一辑

科学与人译丛

技术与风险

[美] H·W·刘易斯 著

中国对外翻译出版公司

序

过去的 15 年里，我在研究风险方面得到很多人的支持，这些风险都是我们能叫得出名字的。 1974 年，美国物理协会主席皮也夫·帕诺夫斯基要求我主持该协会的反应堆安全研究，从而使我选择了这一偏离专业的生涯。我多年前的专业教授和朋友罗伯特·奥本海默先生的渊博学识树立了杰出的典范，因为真正的物理应用正需要这种学识。如果没有他，二战后的理论物理要贫乏得多。

在审读和评论过我的部分手稿的人当中，我特别感谢比尔·普雷斯，他审读了书稿全文；感谢比尔·安德斯和查列·米勒，他们审读了飞行安全一章；感谢通用汽车公司研究实验室的几位同仁——鲍勃·弗罗施，迪克·施温和莱恩·埃文斯——他们审读了公路安全一章；感谢乔·凯勒和艾丽斯·惠特莫尔，他们审读了有关有毒和致癌化学物质的章节；感谢迪克·威尔逊，他审读了矿物燃料一章。如果还有什么错误，那当然是我自己的。

我的编辑埃德·巴伯实际上详细地审读了手稿，并指出我在写作方面要学的东西还很多。他不知从哪里学会了批评人但又不使人反感的技巧，我非常感谢他。

最后，我要感谢我的家人（特别是有其他工作的人）忍受了我在写作时的疯狂和古怪行为。我过去一直认为这些感谢之词只是出于礼貌，但实际上不是。

引　　言

我们的周围充满风险，特别是科学和技术带来的许多新型风险。风险已成为一个重大的政治和社会问题，激起人们对种学进步的普遍不安，煽动家在这样的气氛中春风得意。

然而，技术的风险是真实的，而技术的好处也是真实的。我们在现代化学奇迹的包围中度过我们的一生，但我们念念不忘化学污染。我们使用来自核电站的清洁的电力，却又害怕核事故的发生。我们因接种疫苗战胜了许多过去的病害，而使生命得以大大延长，但少数几种疫苗弊大于利的例子被广泛宣传，忧心忡忡的父母常常拒绝给他们的子女注射疫苗以预防已知的疾病。商用飞机的速度使我们当中越来越多的人只用几小时就跨越全国，这比我们驾车走同样的路程要安全 10 倍，但我们却担心飞机晚点。对饮用水进行氟化处理使得龋齿成为过去，但对化学物质的恐惧剥夺了氟化水给全国带来的许多益处。

技术丰富了我们的生活，同时也带来了风险——特别是那些未知的风险。这是一个令人不安的利弊共存的问题。知道我们在得到益处的同时要付出代价，包括要承担风险是好的，然而风险和益处都难以估计，即使对致力于这方面研究的专家来说也是这样。在上述所有例子中，都既有真正的益处，也有真正的风险。由于它们难以比较，我们常常在权衡利弊时做得很糟，即接受了那些没有必要，但对我们来说较为熟悉的风险，而同时又夸大其他形式的风险。大部分人可能会同意，如果没有报偿，我们经受风险就毫无意义；甚至还可能会同意，如果报偿较大，我们就应该接受大的风险。如果我们的祖先中无人愿意承担风险以取得可能的成就，那么人类的历史就非常可悲

了。风险是我们为成长付出的部分代价，几乎所有的父母都知道这一点。

有些琐事把我们吓得不知所措，而一些真正的风险却不使我们烦恼。许多人为 1000 年后可能会泄漏储存的强放射性核废料（目前的环保局标准要求 1 万年无泄漏）而苦恼，却对美国每年大约有 1000 人触电而死的事实熟视无睹。没有反对电力的群众示威，没有一个带有呼吁降低配电电压演讲的摇滚音乐会，尽管较低的配电电压能减轻触电事故的危害。（大部分国家使用高于我们的 110 伏的家庭配电电压，以此得到经济上的利益。）闪电每年要杀死大约 100 名美国人，但只售避雷针远远不是肯定的致富之路。一个最惊人的有关风险的例子——吸烟，已被人们开始严肃地对待，正如它本该被严肃地对待那样。吸烟每年杀死将近 40 万美国人，每天 1000 多人。美国人中每死亡 5 人，其中之一必是死于吸烟。诚然，自从医务总监颁布那份证明吸烟引起肺癌的著名报告以来，20 多年中美国的吸烟率逐渐下降，1971 年是高峰，但我们的进步缓慢。难以理解的是，许多医生仍在吸烟，所占比例和全国成人的 30%一样。如果我们在因吸烟而夭折的每个人身上花费与煤矿安全方面同样的经费，美国就再也没有钱干别的事了——这将花掉整个国民生产总值。我们每年甚至付出 300 亿美元以上的钱来购买香烟。这比我们估计花在非法毒品上的 1000 亿美元要少，对于后者就不必多说了。

事实上，吸烟尽管在美国有所减少，但作为一个全球问题它却在加剧。在第三世界，吸烟的增长率高于人口增长率，在非洲是人口增长率的两倍。在社会劳动大军中，吸烟在教育程度较低的人当中比在教育程度较高的人当中普遍，在蓝领工人中比在白领工人中普遍，在黑人中比在白人中普遍，等等。也许在那儿也像这里一样，这个问题已引起社会关注。

本书意在提高公众对风险估价和风险管理的困难的认识，为公众理解这些问题提供帮助。本书的对象是有理解能力的读者，而不是专家。尽管风险有许多种，但本书只限于与科技进步有关的风险。其他威胁生命的因素也很重要——他们在死者和病人的统计中占主导地位——但它们不是本书的论题。

许多与风险有关的问题，譬如生命的价值和风险的控制，并不取决于考虑中的技术风险的形式，本书的第一部分将讨论这些问题。另一方面，再没有比通过例子学习更好的学习方法了，所以第二部分集中探讨具体案例，并根据案例的特点分类，第二部分意在探求第一部分中提出的实际问题。收集的案例远远不够全面，但所选的每一个例子都具有现实意义，论证了前面提出的论点。最后我们必须承认这一倒霉的事实，即没有起码的统计和概率方面的知识，就不能较深刻地了解风险，特别是可能发生的罕有风险。第三部分为有中学数学基础，善于思考的读者提供必要的知识，任何人都应敢于使用数字。第三部分还作了某种概括。

现在谈谈有关适时问题。追求适时很吸引人，但研究、立法及管理上的变化使得完全时新成为不可能。此外，有人反对在适时方面走得太远，因为还没有经受时间考验的新发现的信息以后可能被证明是错误的——这在科学中常常发生，适时的会迅速过时。本书将做到适当地但不是完全地适时。

对技术风险的关注是地点和时间的作用——这种关注相对来说是后来者，在较发达国家最为明显。这里的出发点自然是美国，无论是所举的例子还是对管理力量的讨论都是如此，尽管可以在全世界找到不同的问题和例子。

我们也应该客观地看到风险与人类面对的其他威胁和挑战相比较的重要性。尽管技术风险很重要，但它远远不是最重要的议题。当我们人类的末日来临时，它不会来自空气和水中的微量化学物质，也不会来自核事故。正如艾略特所预见的，人世就这样结束了，没有一声巨响，而只有啜泣。我们必须时时思索这一事实的含义，即地球上的人口大大超过地球的负荷，而且这种情况越来越严重，特别是在第三世界。第一世界并未幸免于第二和第三世界的经济和人口问题，我们所有的人都同在其中。创造“宇宙飞船地球”一词就是为了描述这种状况，解决人口问题的时间限度是一两代。这种情况不能再继续下去，已到挽回局面的时候了。

“科学与人译丛”出版说明

英国著名科学专栏作家布赖恩·阿普尔亚德在其《理解现在——科学与现代人的灵魂》一书中有这样一段话：“1609年，加利莱奥·伽利略使用一架望远镜观看月亮。这一时刻，对世界的意义如此重大，以至人们将它与耶稣的诞生相提并论。因为，就像在伯利恒，自这一时刻，人类生活中的不可能成为可能。”

阿普尔亚德据此将科学划分为伽利略之前的科学，或称“智慧”，以及从1609年开始的现代科学。前一科学建立在推理基础上，后一科学建立在观察与实验基础上。经过如此划分，我们习以为常的科学，竟然只有40年的历史。

但人类就在这400年内经历了飞速发展。

我们有了蒸汽机，有了轮船，有了电话、电报，有了飞机、火箭，有了电视、电脑、互联网络，我们还有重力场理论、元素周期表、量子力学、相对论乃至被称为“自然中最基本物体”的超弦。工业革命、农业革命、信息革命使人类的社会生活发生了前人难以想象的变化。

人类改造了自然，也改造了人类自己。回顾这一切，人类完全有理由感到自豪。因为，人类就像上帝，也有自己的“创世纪”。人说，要有科学，就有了科学。科学是好的，它行之有效。然而，“创世纪”中写道“到第七日，上帝造物的工已经完毕，就在第七日歇了他一切的工，安息了？。而人类的工却没有完毕，400年后的今天仍然不能安息。

就像有光必有影，人在发现、发明、创造，拥有上述一切的同时，还得到了原子弹、氢弹、核泄漏、酸雨、温室效应、臭氧层空洞乃至伴随科学技术而来的种种风险。

人类曾以为已找到了通往自由王国的必由之路，他将乘着科学的飞船，摆脱一切束缚，重新确立自己在宇宙中的位置。但在科学爆炸的二十世纪，人类终于开始反思：

科学行之有效，但它是否就是真理？

为此，我们编辑了这套《科学与人译丛》，陆续分辑推出。其中，有对信息崇拜的批判，有对生命起源的求索，有对技术所导致风险的分析，有对世界最新科学动态和研究方向的展望。数学家用对策论证明，完全的民主实际上并无可能；物理学家提出全新的超弦理论，试图统一描述所有的力、物质的所有基本粒子和时空，继量子力学和相对论之后，成为“第三次物理学革命的重要标志”……《译丛》汇集了物理学家、数学家、生物学家、天文学家、哲学家、人类学家、伦理学家……自本世纪后半期、尤其是在本世纪末打通自然科学与社会科学之间的隔膜，对科学这一决定人类命运的工具的深刻思索。通过这套丛书，我们期望读者可以对科学的现状、科学的未来、科学的正面与负面效应，有一个较为全面的了解，更好地认识科学、掌握科学、利用科学。

中国对外翻译出版公司

科学与人译丛第一辑
(技术与风险)

第一部分　总　则

第一章　生活的各种风险

恐惧和风险是两种不同的东西。我们有些人最害怕的东西——饮用水中的毒物，空气中的放射物，食品中的农药——几乎没有带来任何真正的风险，而我们最少害怕的一些事情——开车、饮酒和吸烟——却每年杀死成千上万的人。风险并不是一无是处。没有风险就不可能有个人发展——一个人怎样才能学会骑车呢？从更大的范围来讲，没有改善物种的风险和挑战，就不可能有生物的进化。不管怎么说，如果没有我们祖先对之作出反应的种种风险，我们人类永远也不会成为今天这个样子。

本章意在收集美国已知的有关对生命产生威胁的事件，为本书其余部分建立一个框架，在以后的各章中，我们将集中讨论技术风险问题。

现在让我们把风险看作是自然的生命终结前偶然的死亡事件。死亡对于人类来说自然是不可避免的。用某种确定的东西来衡量风险似乎有点奇怪，但有时人们也使用其他一些方法，譬如生命非自然地缩短的年数、日数或分钟数。用第一种衡量方法，早死 10 年与早死 5 年被看成是一样的；而用第二种衡量方法，早死 10 年要比早死 5 年糟一倍。有些人认为早年的岁月比晚年的岁月更有价值，而另一些人（譬如罗伯特·布朗宁）则持相反的论点。第七章将较为深刻地探讨有关生命的价值这一有争议的问题。在一位著名的喜剧演员活到 50 岁时，人们开始把他称作中年人，据说他曾说过如果多认识几个 100 岁的老人，他的感觉会好得多。事实上，我们当中大约有 1%的人能活到 100 岁，而其中 80%以上很可能是女性。目前，夭折的几率是对风险的一个恰当的定义。

美国人的平均寿命几十年来一直在稳步延长。一位 1920 年出生的美国人的寿命可达 54 岁——女性比男性多 1 年——而到 1985 年平均寿命已增加到 75 岁。世界平均寿命是 60 岁左右。美国女性现在比男性能多活 7 年，这一数字在降低。因此在过去 65 年中我们的平均寿命每年延长约 4 个月，如果这种态势再继续 75 年，美国的平均寿命可达 100 岁，最近有关社会福利基金的偿债能力的危机到那时回想起来可能只不过是一种儿童游戏而已。寿命的延长主要是由于医学进步和公共医疗措施攻克了一些易于夺去年轻生命的疾病。美国的婴儿死亡率在过去 20 年中下降了一半，这虽是一个巨大的进步，但我们仍落后于其他 20 个工业化国家。年纪越大，改善的程度越小。50 岁以后大约每年能延长寿命 1 个月，这种延长速度已持续 28 年。要活到 50 岁，最重要的一步是要活到 1 岁，95%能活到 1 岁的人可望活到 50 岁。

年轻人和老年人在存活率改善方面的区别在过去更为明显。在 1789 年《宪章》生效时，即两百多年前，平均寿命的数据保存在马萨诸塞州。在那时的马州，人们在出生时预计可活到 35 岁左右，而今天则是 75 岁。相比之下，当时 60 岁的人预计还能活 15 年，而现在增加到了 20 年，可见对老人来说，长寿的前景现在比过去好不了多少。当然，在 18 世纪末能活到 60 岁的人一定是非常顽强的。

我们最终死去的原因是什么？下一页的表格列出了 1985 年的主要死因，曲线图展示主要死因的年龄分布。表格括号中的项

起因	死亡人数
心血管疾病 （心脏病）	978,000 （771,000）
恶性肿瘤 （肺、呼吸道等）	462,000 （127,000）
事故 （机动车）	93,500 （45,900）
肺病，慢性	75,000
肺炎	68,000
糖尿病	37,000
自杀	29,500
肝病	27,000
被杀（包括警察）	20,000
其他	……
合计	2,086,000

目是前一项目的分项，在致命事故一项几乎有一半与机动车有关。

表格反映了当时的一个快照，并不是对未来的预测，因为我们的人口成分不稳定。美国的出生人数是死亡人数的两倍，所以我们的人口很年轻，这种情况将持续相当一段时间。这会使表格有所变动，因为那些主要袭击年轻人的疾病在这种情况下会显得较为突出。例如，表格下面的曲线图显示癌症死亡率的顶点是 72 岁，心脏病是 80 岁，因此后者会随着人口年龄的增长而更为突出。（人们不认为癌症是较年轻的人的病症，但它事实上是。）图中以最低的曲线表示意外死亡，它主要是交通事故造成的，顶点是 20 岁。（自杀是 15—35 岁美国人的第二大杀手）。在非交通事故造成的意外死亡分项中，对此我们并未列入图表，20 多岁和 30 多岁的人当中溺水和中毒是最主要的原因，而跌倒，即意外死亡的第二重要的原因，是 60 岁以上的人最主要的死因，其曲线顶点在 80 多岁。所有这些与年龄有关的因素都会对未来各种死亡原因的相对重要性有影响。医学研究也会影响这一点，它将攻克现在的疾病；生物力学也会发生影响，它会带来新的疾病。 1900 年，美国最主要的死亡原因是肺结核，这一疾病如今在 1000 个死亡的人中占不到 1 个；而艾滋病当时还属于未知。

还请注意，曲线图展示的是 1985 年各种死亡的总数，而不是死亡率。所有的曲线在达到顶点后都随着年龄的增长而下降，这一事实并不意味着我们随着年龄的增长发展了一种死亡豁免力，而是因为面临死亡的人减少了。我们人口中只有大约 5%的人超过 75 岁，如果我们的人口稳定，按照目前的死亡率，这一比例会增加到 8%。但曲线图中展示的比率告诉我们许多有关相对的风险。因此，到 60 岁，因癌症和心脏病而死的人数大约相同，而到 90 岁，心脏病致死的人数是癌症的 5 倍。

这些死因中的大多数不仅取决于年龄，而且只是美国此时的具体情况。奥地利的自杀率是我们的两倍，而意大利只有我们的一半。法国的心脏病死亡率是我们的三分之一，日本则是我们的五分之一。日本因胃癌死亡的人数几乎是我们的 4 倍。表格的确只是一个时间与空间的切面，而不是人类的永久状态。

显而易见的信息是：我们社会中的真正杀手是血液系统的疾病和癌症（1985 年，前者占死亡的 47%，后者占 22%），而技术对死亡率几乎没有

起到什么作用。诚然，美国发生的谋杀中有一半使用了手枪，并且我们 100 人中有一人（统计表明）命中注定要被谋杀，但最近几十年手枪技术的发展却不如手枪的扩散快。手枪并不能表明可能发生的化学和核事故所带来的技术风险。另一方面，可以公平地问一问最近几十年在癌症发生率的增加方面技术是否起到了作用，或者人口的年龄增长是否应作为原因。我们在很大程度上把长寿归功于技术，即使是这样，几乎所有因不同年龄死于各种癌症的人数一段时间以来一直在下降。但肺癌和呼吸道癌症是突出的例外，其病因毫无疑问是吸烟。只有狂热的烟民和烟草商继续否认这一点。例如，在 55 岁至 64 岁的妇女中，上述这类癌症的死亡率在 25 年中增加了 5 倍以上，从 1960 年的 10 万分之 17 到 1985 年的 10 万分之 94。这些妇女在二战以后开始抽烟，这是当时的时尚，那时对其风险还不清楚。这是对那一时期妇女解放的标志所付的代价——对这些妇女来说，肺癌比乳腺癌的死亡威胁更大。当然，在吸烟死亡率方面，妇女还远不如男子的高。男性烟民的比例在过去 25 年中下降了 35%；而女性的则要小得多，在同期约减少 15%。在中学高年级学生中，吸烟的女生比男生多。对于没有中学文凭的人来说，比例几乎没有下降。吸烟有它的社会性。

死亡人数表明机动车事故是技术方面的主要死亡起因。如果汽车未被发明，也就不会发生汽车事故。但骑马作类似旅程的旅行也许风险更大，因而汽车也可能拯救了生命。当然，这一点是得不到证明的，因为人们永远不会骑马或步行作同样路程的旅行。即使是现在，每旅行一英里，步行被汽车撞死的可能性比开车被撞死的要大。人们注意到，如果我们真要拯救步行者的生命，我们应让他们上车。

其他大家普遍恐惧的技术危险，例如核能，根本没有列入表中，因为它们造成的死亡人数微乎其微。在核能问题上，大家恐惧的是一个灾难性的事件，因此去年无人被核能杀死这一事实对恐惧的人来说并无特别的说服力。发生灾难性事件这一遥远的可能性会带来一大类风险，合理地对待这种风险——既不要过高估计，也不要过低估计——并不是区区小事。我们当然担心发生大的核事故，在我写这本书时本国的三英里岛刚发生了一次，没有一个人死亡，苏联的切尔诺贝利也发生了一次，迄今为止有 31 人死亡。我们确实担心飞机坠毁的大事故，这种事故每年总要发生一两次；我们确实担心毁灭性地震，在美国，每一代人的时间就要发生不到一次；我们确实担心大坝倒塌，等等。有些人甚至害怕外来文明的冲击，这可能比对上面任何一件事的担心要少些，建设性地对待我们的担心，同时不使我们的文明瘫痪，这是我们面对的挑战。

除了这些罕见而熟悉的不测事件以外，还有真正严重的技术风险，其损失在遥远的未来。煤炭和石油的燃烧伴随着地球大量森林的被砍伐，而砍伐森林又为膨胀的人口提供住宿（我们的人口在增长，我们需要生存空间，我们有饮食需求），它造成大气中二氧化碳含量的稳定而明显的增加。没人怀疑这会影响气候，但我们不能肯定会有多大的气候变化，什么时候发生，结果如何。这也许是真实的也许不是。例如，南极和格陵兰冰山的融冰造成全球沿海地区的洪灾是肯定的，尽管一部分融冰将不可避免地伴随着全球气温升高的趋势而来，但我们还不能预测会有多少融冰。

由氟化碳引起的大气中臭氧层的枯竭，或者核战争的难以估量的气候效应（所谓的核冬天），或其他一些大规模风险所造成的健康效应同样也是真

实的。所有这些都是真的，它们长期威胁着人类，但所有这些都很遥远，给我们提供了一点时间来作出共同行动。我们是否有这样做的意愿和智慧则是另一回事了。

第二章　风险的测量

韦氏《新国际词典》未节略本（令人敬畏的第二版）说风险是“冒险；危险；严重危险；面对损失、伤害、不利、或毁灭”。它说风险和冒险的区别在于，风险常常是更自愿的，而冒险是机遇的产物。冒险本身是一个古老的游戏，我们知道掷骰子赌博是它的一个简化形式，在《牛津英语词典》（同样令人敬畏）中，它的定义是“掷骰赌博游戏，其机遇由于一些任意的规则而复杂化”。这些定义包含了风险的本质，把损失的概念与机遇或概率的概念结合起来。后者是关键，因为不可避免的事也许是令人不愉快的，但它缺乏机遇的因素，不是风险。死亡和纳税被假定是不可避免的。逃避后者要作的努力是冒风险，尽管许多人接受这一风险以获得潜在的收益。

数学把概率定义为 0 和 1 之间的一个数（一个分数如果你愿意），它测量某事发生的机会。概率为 1 意味着某件事一定发生，概率为 0 则意味着不可能发生。二分之一或 0.5 的概率意味着会有一半的可能性，是输赢各半的打赌，或叫同额赌注。在日常生活中，人们很少从这方面谈到概率，但他们谈到机会，他们甚至为此打赌。讲某一个队赢得足球的机会是二比一，意思是赢球的机会是三分之二，输球的机会是三分之一。赢球的概率因此是三分之二或是 0.667，这是一个 0 和 1 之间的数。机会和概率总是以这种方式相联系，因此 0．01 的概率可以被认为是 99 比 1 的机会。大多数人更习惯于机会的概念，而不习惯于概率，这大概是因为我们大多数人都有打赌的经历。事实上我们社会中具有最精通的概率实践知识的人很可能是职业赌徒，他们比业余赌徒知道得多得多，业余赌徒把他们的财产浪费在骰子的“胜利系列”和赛马中的幸运数字这一类幻想中。根据最近的一个民意测验，美国人中有一半相信幸运数字。

风险有四大类，涉及大多数情况：

1.人们熟悉的造成大量伤亡的重大风险，对这类风险我们有很多信息。恰当的例子是开车和滑翔。

2.低概率的风险，其后果非常严重，必须认真对待。大地震可以作为一个例子。

3.这一类可以看作是第二类的延伸——其概率非常低，从未发生过，但其预期后果非常可怕，值得注意。大气污染引起气候的灾难性重大变化可以作为一个例子。

4.最后是一类实质性风险，尽管很真实，但却难以估价，因为它们在自然发生的危险增多时出现。任何一种部分由环境污染引起的癌症可作为例子，其附加的影响很难与“自然”部分区分。

第一类——熟知风险——的一个例子可以是一次驾车在洛杉矶和旧金山之间往返旅程中死于交通事故的机会。很多人作过这样的旅行，很多人令人遗憾地死在路上，人们知道生存的机会有多大。平均统计数字显示美国年客运汽车的旅程总计 3 万亿英里，而各种机动车造成的死亡人数达 45，000，其中只有约 25，000 人是在汽车里——我们在第十三章中将看到所有种类——因此对一个普通的车里的人来讲，被撞死的机会大约为每旅行 1 亿英里一次。

洛杉矶与旧金山之间相距 400 英里，因此夭折的风险大概是十万分之一，美国人每天死亡的人数是四万分之一，因此这一旅程增加的风险与正常

的不到半天时间死亡一人可能性相等。这一风险似乎是可以接受的，几乎无人在出发前作风险预测。此外，每一位开车的人都认为自己技术很好，不能想象会发生任何事故。另外，在我们长期成功地做某件事时，我们就变得自满了，没有一个活着的司机有在交通事故中被撞死的直接经验，而乏第一手知识会影响我们的态度，这是一个自明之理。

我们较详细地对此作了研究，只是要表明在有长期经验和丰富的信息时，这种人们熟知的风险是如何计算的。既然人们此频繁地在这一特定的线路上旅行并得到具体数据，就没有必要使用全国性统计数字，我们甚至还可以按照年轻司机和年老司机、男性司机和女性司机、高速公路和风景路线来进行划分计算——所有的有关信息都有。这些常见风险易于分析，因为我们有数据。

对后果的估计要难得多，这涉及个人价值观念问题，大多数人都宁可回避。例如，典型的机场事故保险单并不只是为旅客的生命保险。如果失去表格上所列的手、脚、眼等项目中的两项，可以得到与丧失生命相同的保险金，但如果只失去一项，就只得一半的保险金。可怕的是，这意味着有人对普通的飞机乘客的身体各部分的价值作了估价，把眼与脚等同起来，等等。（人们并不总是认为这种交易是合适的。《圣经》的出埃及记中说，“以命还命，以眼还眼，以牙还牙，以脚还脚……。”）

对这些损失分配价值很不容易。在对待有形物质时，譬如财产，谈论重置费用，修理费用，或某些这种措施是有效的，但对于一些无法替代和无法修理的东西，那种估价就会失去说服力。（替代人相对来讲较容易，但替代具体的人是不可能的。）因此，产生了一场激烈的有关生命的价值，以至那些有助于提高生命质量的不可替代的东西的价值的辩论。美丽的落日的价值是什么？古老的红木林、或者约塞米提国立公园，或者玛莎大婶的价值又是什么？

对于第一类风险——普遍和熟知的威胁——在任何情况下，通过对充足数据的统计分析可以获得概率的数值。对后果的估价很难，这是因为常常涉及到需要主观判断的东西。脚的价值与手或眼的价值真的相等吗？能够安全地步行穿过马路值多少——每年有 8000 名步行者被车撞死。每个角落应该设有红绿灯和过街引导人的城镇人口应超过 1 万？还是 1000？还是 100？

这个问题和落日的问题把我们引向一个重要的但又被普遍误解的观点。有些人激烈地争辩说，为保护生命我们应不惜一切资源，他们对那些试图对方程式的两边都作出估价的风险分析家持怀疑态度。这样做确实需要对生命、四肢以及落日确定一个金钱价值，这样我们才能判断要花多少钱来保护它们。金钱毕竟是我们进行交换的媒介，金钱的目的正是使物品能够在不作物物交换的情况下按价值进行交易。但试图为生命确定价值的分析家们只要作此努力，就会受到铺天盖地地诅咒。（当福特汽车公司分析燃料罐碰撞引起火灾的威胁时，曾确定所拯救的潜在生命价值相当于每辆汽车花费 11 美元，他们受到了严厉的指责。不是因为他们为生命的价值选择的数字 200，000 美元太小，而是因为他们竟敢确定生命的价值。）反对作风险—益处分析的人所用的标准表达方式是“拿苹果和桔子作比较”，他们认为这不可能。

事实上，这揭示了该论据的缺陷。端出一个既有苹果又有桔子的水果盘，我们很少有人会难以作出选择。在超级市场采购，只有罕见的优柔寡断的顾客才会有困难。人们甚至可以测试消费者对苹果和桔子的不同价格的反应，

来获知他们更喜欢哪一个，水果商和超级市场确实这样做了，因此他们可以出售这两种商品。价格体现了出售者的相对成本和购买者的相对需要，这是应该的。当然这些价值判断是主观的，我们毕竟不是机器。我们作出选择，并常在被迫对此作合乎逻辑的辩护。那又怎样？

对于是否需要红绿灯也可以阐述同样的观点。我们的社会事实上并未表现出步行者的生命是无价的。我们把一定的资金拨给我们的民主政府，政府又把这些资金的一部分拨给红绿灯，然后我们都接受剩下的风险。尽管世界上充满了对生命的价值发表武断意见的人（当然我们对那些对我们来说很亲近的人有这样的感觉），但我们并不采取相应的行动。

第二类风险的测量更困难。这类风险是真实的，但概率极低，几乎没有经验的指导，而结果却可能非常严重，我们对此关注是应当的。考虑一下南加利福尼亚发生一次大地震的可能性，我就住在这一地区。我们偶尔从令人吃惊的经历中得知我们居住在一个充满着断层、多地震地区，当来自东部的人被这儿经常发生的小地震所惊吓时，我们却自鸣得意、自视优越。像 1906 年旧金山的那种毁灭性地震并不经常发生，但却是不可避免的。地震是构成地壳的构造大板块的稳定运动造成的，不可预防。我们可以通过建造更富有弹性的建筑物，进行研究获得更多的了解和更可靠的预警，改善应急能力，进行公共教育等等限制地震的损害，所有这些措施都涉及到费用，我们承受这些费用的意愿应取决于事件在合理的时间范围内发生的概率。我们从有限的经验和从理论知识中获得对估测概率的方法，而这两者都不是准确的指南。事实上，我们只是在等待。

但我们确实在试图增加我们的知识。国家愿意给予多少支持，我们就对潜在原因作多少研究，这样可以最有效地利用稀有的数据来作预测。我们有地震、洪水和其他自然现象的模型，以及对其发生频率的合理估测，尽管它们还不完善。由子上次加利福尼亚圣安德烈亚斯断层发生的大地震距今已近一个世纪，由于断层的内部压力可以测量并在增加，因此发生大地震只是一个时间问题。（本书最早写成时，1989 年的加利福尼亚地震还未发生。这次地震与 1906 年相比要小，我们还在等一个“大地震”。）我们不知道它将在断层的哪一部分发生，什么时候发生，会造成多大的灾难。发生的概率和后果都不能肯定，在这样的情况下，我们所能做的事微乎其微。在洛杉矶的加利福尼亚大学，一个学院委员会几年前估计一些旧的建筑物也许经不起一次大地震，如果发生地震，这些楼又住着学生，就会造成重大的生命损失。但对这人们没有紧迫感，同时对稀缺的资金人们还有其他的用途。对于该地区大坝倒塌的可能性，情况也是一样。

第三大类风险——从未发生但可能发生的事——更为遥远。如果它们也不造成很大损失，我们可以不管；但如果后果是灾难性的，我们必须尽可能保护我们自己。例子很丰富，有些是技术性的，有些技术性不太强。一场大国之间的核大战的后果一定非常可怕，因此我们和苏联人都把我们国民生产总值的很大一部分用于那些减少战争的可能性的设备和活动上。试图在这个国家做一些预防核战争后果的事情（譬如建掩体）不受欢迎，因为这被某些人曲解为接受核战争的不可避免性。

误解低概率的含义对这一类风险造成的后果最严重。低概率仅仅意味着低概率，它并不意味着一件事永远不会发生或可以设法避免。低概率并不意味着 0 概率，接受这一事实是正确理解的开始。在核战争问题上，人们必须

在认为概率确实无疑是 0 的时候才可以坚持说减轻潜在后果的努力是误入歧途。尽管我们都希望并努力避免这样一种灾难，但认为我们能保证成功而且不必考虑失败只是痴心妄想和傲慢自大。根据罗杰斯委员会的报告，这种对概率的误解对 1986 年挑战者号航天飞机的失事也起了部分作用。

后果严重但概率低（但不是 0）或时间遥远的事件还有更多的例子。大陨石对一个城市的影响是可以使成百万人死亡，但由于我们对此无能为力，我们根本就不去尝试做任何事。我们已提到大气中二氧化碳的稳定增长，它有可能造成全球性的气候灾难。还有核战争。

这一类低概率但后果严重的风险在某种程度上是四类风险中最有趣的，因为对后果和概率二者的估测必须完全以理论为基础。概率由于不可避免的不定因素来自概率风险估价（后面会更多地讲述这个问题），而估计有可能造成争论和混乱。争论并没有内在的错误——民主制度据说因为争论而繁萦——而不定因素本身是任何科学事业的合法和可敬的特点。但合法的不定因素为煽动家和技术骗子的行动提供了一个缺口，使他们有可能对国家政策产生不适当乃至最终是毁灭性的影响。使我极为痛苦的是那么多的有关技术风险的国家政策是由律师和娱乐界人士决定的。前者表现得似乎是技术专家，后者则用扮演虚构人物获得商业成功。二者都是外行。

这一类风险有很多各不相同的例子。我们这个国家还未经历重大的商业性核事故，但这是不可避免的。这就是概率法则——如果概率不是 0，事情是注定要发生的，只要有充足的时间。我们需要知道事情发生的概率及可能的后果，以及降低概率和减轻后果的最佳方式。我们在核工业的管理方面花费了大量金钱（核管理委员会的预算每年超过 3 亿美元），但我们仍不能对“怎样安全才够安全”达成一致的观点。因此我们无法知道什么时候我们做的工作已经够了，应该把我们的努力转到别处。过去的 15 年里核能界在风险分析领域中取得了许多最难忘的成就，也为地震学（地震会破坏核电厂）的研究获得支持作出了贡献。但大事故发生的概率仍异常难以确定。这为恶作剧的人打开了大门，他们利用了不定因素。

第四类即最后一类风险——因技术而略微增加的已知的风险——常常最有破坏性。它包括一大批的威胁，其概率和结果都难以捉摸。不是因为其后果比较陌生，而是因为我们对它们非常熟悉，它造成的附加损害在我们这个本已不完善的世界带来非 常小的损害。典型的例子是少量自然或商业化学物对健康的损害和少量辐射的后果。对污染（出于健康原因，不是出于美学原因）的恐惧有时像典型的恐惧症，然而威胁却是真实的，一个很好的办法是尽一切努力了解它。在估价这些污染物的损害概率时，我们的问题是，尽管它们被大大地夸张，但其影响却很小。在此我们可以作一些一般性的评论，但每个例子都个案处理，在第二部分中我们将讨论一些例子。

毫无疑问，人与环境中，或者食品或饮用水中的某些化学物质在某种浓度下接触一定的时间会引起癌症。但我们不知道那神奇的接触极限，在这一极限内，某种化学物质是“安全的”，而超过这一极限，它就是危险的。了解化学品致癌作用的重要问题在于确定不同接触方式和接触期限的癌症诱发率，这样才能制定把风险减到可接受程度的国家政策。不可能把风险减到 0，特别是因为许多最有害的化学物质存在于自然环境中。（花生中发现的黄曲霉毒素是已知最厉害的致癌物之一，但谁会在棒球比赛中禁止食用花主呢？）

困难在于，由于癌症是一种常见病（我们当中有 22%的人死于某种癌症），从统计数字中几乎不可能确定哪些癌症病例是由于哪种原因引起的。有时某些具体形式的癌症可以与同类接触物联系起来——所以我们毫无疑问地知道吸烟目前是美国人肺癌的最主要诱因——但我们无法直接测量在接触程度较低的情况下癌症的诱发率。化学品如果有效用的话，它也被每年 40 万以上“正常”的因癌症而死亡的人数所淹没。（某些专家认为氧气是癌症发生的罪魁。如果有人努力从空气中消除氧气，使呼吸变为非法行为，那一定非常有趣。）

少量辐射的后果也是这样。我们知道大剂量的辐射会造成癌症（或与此相反，可治愈癌症），但同样我们无法知道与普通的宇宙射线和正当使用的医疗或牙科 X 射线相联系的低剂量辐射是否也会造成同样后果。少剂量辐射的后果小得无法测量，也许最小剂量是无害的。但我们并不知道。如果我们要以这样一种方式来管理社会，即不使我们承受过度的风险，但同时又不对轻微的或可忽视的威胁作出过分反应，那么我们就处于一种进退两难的境地。第十五章将专门讨论这一问题。

最后，我们不得不面对专家们所说的风险防避，这与所有四类风险都有关。到现在为止，我们还未区分一件事的概率与其后果哪一个更为重要，尽管概率低且后果不严重的风险被忽略了——这是常识。人们仍然会问能否把一个事件的概率及其后果结合起来以更好地测量风险呢？概率和后果哪一个更重要？

开保险公司的人觉得这很容易。他们把事件的概率与潜在损失的数相乘，把结果称作损失估计，用它作为最终的风险测量。如果一件事发生的机会是千分之一，但会造成 100 万美元的损失，那么预测的损失是 1000 美元。如果可以找到一家非赢利的保险公司的话，这家保险公司会把这作为最低保险费。这种方法可行，因为该虚构的保险公司也许要负担 1000 份这样的保险单，这会导致它平均承担一次损失，就用尽它从最低保险费中收集来的 100 万美元。把概率与损失价值数相乘是优秀的经济学，声誉最好的保险公司以这种方式运作，在最低保险费用上加上管理费、利润、广告费，推销员工资、佣金及其他看得见的必需开支。不管保险合同有多大，他们都可以用这种方式运作，只要潜在的损失没有使保险公司破产的可能。（破产就会导致规则的改变，这一点许多曾经孤注一掷的赌徒都知道。）

但人不是保险公司，有一种学说认为较大的损失应看作比损失的价值所意味的损失更大，因此必须把它们的概率保持在比乘法程序所建议的更低的水平上。根据这种思维方式，一次大的损失要比两次较小的损失更糟，即使损失的数额相等。能摧毁 1 万幢房屋的事件所代表的风险比只摧毁 1000 幢房屋的事件的风险大，即使大大大大大大倍。这一推理使得有些公司要求其两位高级主管人员不乘同一架飞机旅行。（他们常常乘同一辆轿车去机场，这样也可能风险更大。）尽管两人分开旅行至少一人死亡的概率要高一倍（哪一架飞机都有可能坠毁），两人都死亡的概率要小得多，而且避免这一灾难更为重要。许多人似乎都这么想。

许多反对核能的论据都以风险防避为基础——尽管大事故的概率极低，但其后果之严重会使人认为技术是不可接受的。在本书的其余部分，我们将使用理想的保险公司的方法，以概率和损失数值的乘积来测量风险。甚至一些大保险公司有时也会偏离人们熟悉的规则的轨道。1971 年，伦敦的劳埃德

公司被要求签署一份保险单保护卡蒂·萨克烈性酒公司，以备有人可能在那一年捕捉到尼斯湖湖怪。卡蒂·萨克公司为捉到湖怪提供了一份奖金，后来它又突然地（莫名其妙地）担心起它可能不得不付出这份奖金。劳埃德公司无法判断捕获的概率，特别是因为湖怪也许不存在，但它还是签署了保险单，要求卡蒂·萨克公司支付令人难以忍受的大额保险费用，这笔保险费与任何合理的损失概率没有任何联系。卡蒂·萨克公司支付了保险费，显然它没有讨价还价，没有人假装去计算概率和后果的乘积。（对劳埃德公司来说这是纯利润——湖怪没有被抓住，真是意外。）

第三章　对风险的认识

在这个物质生活富裕的社会里，我们特别关注安全，而在那些较贫穷的地方人们却把风险看作是生存环境中的正常现象不知为什么，认为地球应该为我们提供一个无风险的生活环境这一奇怪的想法较有地域性，并且是一种新现象，主要出现在西方工业化国家。即使在美国，这种想法也有地域性差异，西部比中西部突出，北方比南方突出，等等。但这种认识只是个人的观点，不能作为普遍现象。

有一种对风险的认识在原始人中有很长的历史，在当今社会的某些部门仍然盛行，它使得风险比较易于接受。这种认识在许多保险单上出现——即否认风险的存在。保险单常常把问题归因于上帝的行为，暗示所发生的事是由一个较高的权威决定的，而不只是运气。这是宿命论的一种形式。那些坚信我们的不幸是上帝让我们忍受的人不能走得太远了，因为合理的风险管理在这种情况下不起作用。处理风险承受所采取的实际措施，当然取决于我们是否认为它具有威胁性，以及我们是否认为我门可以为之干点什么。前者就是本章的主题。

那么如何认识风险？用什么标准确定某种风险是否可以接受？什么东西使得我们害怕某些威胁而又忽视另一些威胁？特别地，在对待极大的恐惧——失去生命时，“风险”一词意味着什么？到现在为止，它是不适时死亡（什么时候死亡是适时的？）的可能性，但风险还有比这更多的含义。承保人公开地、大多数人下意识地对生命的相对价值（缩短和死亡）和各种伤残作某种估价。在上一章我们提到了机场保险单，我们都有不同的价值观，基于早期的经历、教育、环境、个性等等诸如此类的因素。第一章开始时提到恐惧和风险是两种不同的东西，但个人对风险的反应主要取决于他个人的恐惧特征，不管是合理的还是不合理的恐惧。现在来看一些例子。

相貌对我们当中一些较为幸运的人来说，可以占据比生命本身更为重要的中心地位。在加利福尼亚，强迫纹身造成的容貌损害被法院看作与残害肢体同罪，然而，自愿的纹身仍很繁荣，因此至少有些人对此有不同的感觉。当然这取决于纹身的性质，即使在加利福尼亚给未成年人纹身，无论其是自愿的还是被强迫的，都是非法的。

一些人会冒生命危险来保护财产，大多数人会冒生命危险保护他们所爱的人，使他们不受伤害，许多抱着传统的价值观念的人，会冒死保卫他们的国家，而冒死推崇其宗教条规的人则更是多如牛毛。在紧急情况下应牺牲男人去保护妇女儿童的格言（这一格言仍被恪守，但现在被认为是性别歧视）来源于那个遥远的、久已被人遗忘的时代，那时人口短缺，现在的世界不存在这个问题。

我们将用两种主要的测量方法来计算失去的那部分生命：偶然发生的不适时死亡和所谓潜在寿命的缩短（YPLL）。后者常常被风险分析家们使用，大部分人常常只把 65 岁之前失去的岁月算作真正失去的岁月,这体现了老人承受的风险同威胁年轻人的风险相比对社会造成的损害要小的观点（老年公民极少同意这一观点）。有时人们认为一个人所剩的有生产力的生命，其价值与其寿命或与退休前所剩的年月成比例,一个还剩下 20 年生命的人因此被认为比仅剩 10 年生命的人的价值高 1 倍。这样的程序实际上过高估计了暮年岁月的经济价值。但从冷酷无趣味的非人格性经济角度看，老年人和幼儿的

消费高于产出，而中年人则养活他们自己和其他人。在我们的一生中，我们大概是不赔不赚，无论是生产力还是个人感情，与剩下的寿命长短都没有直接联系。但医疗统计数字常常采用潜在寿命的缩短，医疗行为的目的在于延长寿命，不是拯救生命，后者是其他专家的责任。根据潜在寿命缩短方法计算，只有 65 岁以前失去的生命才算是失去的岁月，那么超过 65 岁的就被认为是无价值的岁月——这一观点难以站得住脚。我们将模糊地使用风险一词，大多指失去的那部分生命。

即便是“不适时”一词，在用来描述死亡时也构成了问题。疾病控制中心用过早死亡描述 65 岁以前的死亡，并以三种形式公布死亡率：失去的潜在生命的年数，潜在寿命的缩短（65 岁以前），过早死亡（还是 65 岁之前），和总死亡人数。第一章的表格使用了总死亡人数，心脏病和癌症居死亡原因之首。但老年人患心脏病的比患癌症的多，第一章的曲线图中对此有所表现，因此在过早死亡人数比较表中，这两个原因大致相等。（曲线图表明这两种病引起的死亡人数大致相同一直到 60 岁，从这一点开始表示癌症的曲线开始走平，并在 72 岁后下降，而心脏病却一直在上升。到 90 岁，所有死亡中绝大多数起因于心脏病或中风。）如果我们采取下一步骤，根据潜在寿命的缩短计算方式列出 65 岁以前的死亡原因，这两种病引起的死亡人数低于无意伤害或事故，无意伤害和事故是年轻人死亡的主要原因。根据潜在寿命的缩短的计算方法，四种死亡原因的次序是：事故，癌症，心脏病和自杀/被杀。在 21 岁组，事故是最大的死亡原因，其中四分之三是摩托车事故。甚至还有地区差异——根据潜在寿命缩短的计算法，哥伦比亚特区的事故率是美国其他最糟糕的地区的两倍。人们可以在不具体谈到是谁的生命时，询问生命的价值吗？

最常提到的影响个人对风险的认识的因素有：

1.风险是自愿承担还是由外在因素强加的？吸烟者常常以此作为继续抽烟的部分理论依据。“这是我的选择！”对一个在团体中处境相同的成员来说，风险更易于接受，因为相互支持可以打消对采取的行为是否明智的踌躇不决和疑虑。在军界，这被称作集体精神。

2.风险是熟悉还是陌生的？编鬼故事者、狂欢节和煽动家利用人们对未知世界的恐惧。这是低概率风险常常显得比高概率风险更具危害的原因之一——它们肯定较为陌生。最陌生的当然是那些从未出现的风险。

3.风险是会导致即时伤害的，或是算总帐的日子离我们还远？向德玛尔·卡亚姆表示道歉，不要留意远处的鼓声。

4.风险是如何表述的？人们极经不起言语的暗示——风险分析家把这看作是框架问题。

第一个问题几乎不需要讨论。人们非常愿意承担风险，有时为了好玩，有时是工作的一部分。他们在承担风险时，常常对风险的大小没有什么清晰的概念，只要他们认为他们在控制着自己的命运。这一点在 70 年代中期特别突出：当时人们普遍拒绝使用强制性的安全带。在短期的安全带自动连锁装置（你不系上就发动不了汽车）的统治期，在一辆新车刚交货时就拆除这种装置是一种时尚，卖车者会免费提供这项服务。由于连锁装置经常被拆开，最后只好取消这种装置。

气袋法有着与强制安全带法律一样的问题。尽管对于这些毫无疑问的救命措施的公开辩论都是关于费用和有效性的（它们在白热化的辩论中被热情

高涨的人所夸大），但强迫还是自愿这个潜在的问题起码同样重要。谁会喜欢那些冒充有权来保护我们，使我们不伤害自己的社会改良家？我们没有请他们那么做。

我们已经提到第二个问题——对风险的熟悉程度。人们夸大不熟悉的风险，很多人仍然害怕飞行甚于害怕开车，尽管商业航空的死亡率是每英里十亿分之一，而汽车放行的死亡率比这高 10 倍。有时经验证明排外心理，对其他国家和文化的恐惧是有道理的，但陌生感起着很大的作用。美国人对不讲英语的人的疑惧众所周知。目前最被夸大的恐惧也许与强放射性核废料储存有关，其根源在于对辐射的陌主感。尽管了解此事的科学家和工程师一致认为从本质上这种风险被大大地过高估计了，恐惧依然存在。然而在我打字撰写这本书时，这间屋子里的辐射量要高于核废料储存库顶上的辐射量（由于氡及其生成物封闭在屋里）。任何一个真正害怕核辐射的人都不应该在屋里写书。

第三个因素是产生后果的时间，既更有趣也更微妙。有些风险对生命和肢体造成即时威胁——开车、爬山、在梯子下行走、进入虎穴等等。对于这些风险，我们原则上可以预测出灾难的可能性，判断这些活动与风险相抵可否带来补偿性报酬。坏运气带来的后果既及时又明显，你冒险尝试，如若失败就承担后果。

另一方面，一个接触可怕的疾病（譬如艾滋病或麻风病，或吸烟引起的气肿或肺癌）的人会不会由于接触病人而染上这种病，其后果长时间后才会出现。艾滋病需要 10 年以上的时间才发作，吸烟或辐射或接触化学致癌物质的后果要在二三十年甚至更长的时间以后才会出现。

有些风险的危害潜伏到遥远的未来，影响到后代。煤和其他矿物燃料的持续燃烧造成的气候大变化（温室效应）估计要在 20 到 100 年以后发生（尽管也许会来得更早），而反对储存核废料的人则在热烈地谈论 1000 年或 1 万年以后可能发生的事。（想象一下 1 万年以前的人为我们今天的福利作计划，就可以发现操心要么远的事徒劳无益。1 万年前是克罗马尼翁人的时代，无论出于多么美好的愿望，他们也不可能知道怎样为我们提供帮助。）

据我所知，此远见记录保持者是加利福尼亚州的前州长，他曾为未来将活 10 万年（我们希望如此）的人的福利担忧。相反地，如果我们回顾 10 万年以前的事，当时人类刚刚在地球上出现，我们可以问一问除了企图生存以外，我们那些早年的祖先还能为我们干些什么。在一切宏伟的计划中，假设我们对人类怀有良好的祝愿，生存即是我们对自己后代的唯一最重要的职责，其他的一切，包括生命的质量，都比不过它。如果我们不能生存，就不可能有后代。无论是对后代与我们具有相同的价值观，还是我们能预见他们的需求的设想都不过是自欺欺人。

那么我们应该如何对待可能在未来造成损失的风险呢？我们对风险的关注应该有一个客观的时间限度，在这一客观的时间限度以外，焦虑没有任何意义，不管我们的责任感有多强。太阳的自毁目前预计距今还有几十亿年，为此作准备毫无意义。对那些算总帐的日子距今非常非常遥远的风险，我们当然不要太注意。对大多数人来说，他们对风险的关注时限在他们的一生中持续着并延续到他们的孩子的一生——而对某些人来说，还没有那么远。当然我们应该为未来作好准备并做一些对未来有益的事，这是出于正当的社会责任感，但我们应该做得谦虚而实际。

经济学家和银行家对付未来的偶发事件没有任何问题——他们每天都在做——其机制就是贴现，年金或复利也一样。后者对大多数人来说更为熟悉。有了年金，我们期望以少量的付出在将来得到较大的补偿（安逸的退休岁月），而利用复利，我们自愿放弃使用一部分钱，使它的数目在将来增长。在这两种情况下，某种东西的现值高于未来的价值。（一鸟在手胜于两鸟在林，等等。）没有任何一个自然法则宣称未来不如现在重要，但许多世纪以来人们表现得像是将来不如现在重要。经验甚至为利率提供了指导。

选择在今年或十年以后遭灾——譬如断一条腿——几乎不会有人决定要先度过这一灾难。从现在到十年以后，什么事都可能发生，如果我们相信史蒂文·文森特·贝尼特，魔鬼都会受骗。与此相反，选择在今年获得 100 万美元的礼物或在 10 年后继承相同数目的钱，只有傻瓜才会选择后者。我们在内心深处知道我们应该贴现未来，尽管贴现率在很大程度上取决于心理因素，譬如安全感。银行和投资者把这种贴现当作一种惯常作法，从他们的经验中可以了解我们的集体智慧。从存款帐户、投资收入和类似的用目前的财富与将来利益作交换时所使用的利率大小来判断，我们的未来贴现率长期以来似乎每年在 5%和 10%之间（当然扣除通货膨胀的因素）。

这些惯常作法有两种方式：我们愿意放弃目前的好处，以便以后获得较大的补偿，这叫作投资。我们又坚持对将来才交货的东西少付些款，这叫作贴现。原则上这两者是一回事。它和保险的概念只有一步之遥，就是说保险单持有者并不是在等待损失，而是现在付保险费以防将来花费。信托基金与投资相同，资金被储存起来（连同利息）以备将来支取。如果未来支取是为了应付未来的意外事故，并在发生意外事故时付出，这就叫保险，而该投资则叫作保险费。

所有这些金融方面的鬼把戏都基于同一概念——任何注定在未来才有的东西其现在的价值较小，不管它是好是坏。正如上文所说的，这并不具有自然法则的地位，而是观察几千年人类行为而得出的结论。顺便说一句，这里任何一项都不能与通货膨胀混淆，通货膨胀只是使计算物品价值的单位——钱贬值。扣除通货膨胀因素是用金钱作未来计划的媒介的一种额外考虑。

更明确地说，假设贴现率或利率是 10%，而投资者想在年底获得 1 万美元，那么现在必须投资 9090． 91 美元，这样自然增长的利息 909.09 美元将使总数达到 1 年以后的 1 万美元。如果投资者能等两年，所需的投资数额则为 8264． 46 美元，以此类推，这样累计的复利和本金在适当时间以后将达到 1 万美元。如果有 10 年的时间，所需的投资则为 3855． 43 美元，20 年则为 1486． 43 美元，这开始显得有点像讨价还价了，投资不到 73 美分，过 100 年可获得 1 万美元。（这不是投资建议。）

因此对付未来风险的系统方法是把它当作商业损失，并按每年 5%到 10%的贴现率决定它目前的价值。1972 年，美国预算管理办公室命令所有联邦机构在计算任何打算采取的行动的费用或效益时使用 10%的贴现率。这是那时该办公室较为恰当的估价水平。这一命令现在仍然有效，但普遍为人们所忽视。

大多数人会同意贴现是应付未来的合乎逻辑的程序（尽管有人会竭力否认这与人的生命和健康等问题有关），但对于“恰当的”贴现率却争议很大。理智的人的认识会有所不同，反映了他对于现在和未来的价值的区别有不同观点。然而，一旦原则被接受，对风险的决策就会产生戏剧性后果，人们总

是对眼前的问题投入更多的努力和资源。应该合理地对待未来，既不高估也不低估——这两种错误都很常见。

第二部分将再次讨论未来损失问题，但一个简单的例子可以说明要旨。1986 年的全球生产总值（地球上所有地方生产的物资和服务的总和）据最近估计为 15 兆美元。假设我们知道一个将要降临（譬如由于二氧化碳的积聚）的灾难可能会使其损失三分之一——5 兆美元，并使人类遭受一次大挫折，但这件事 200 年后才会发生。按照美国预算管理办公室的建议，把 10%定为适当的贴现率，我们现在可以计算今天要花费多少钱来避免这一悲剧。答案大约是 2.5 万美元，作为一次性投资。这一数目既可以现在就用来避免这次灾难；也可以投资于储蓄帐户，以至到了需要的时候已有 5 万亿美元的钱在银行里等着。（你会问什么银行，但银行只是一个比喻。）如果贴现率为 5%，今天要花的钱将是 3 亿美元，而在这两个数字之间很可能有一个合理的数字。这两个数字对于那样巨大的不幸来说都不显得昂贵——如今一架飞机都值 3 亿美元——而且我们大多数人都很可能愿意作这种投资，出于对后代的一种不可估量的责任感。我们可以按照 200 年的想法进行考虑。如果我们谈论的是 1000 年以后的事，那也许就是另外一回事了，其费用可以忽略不计，远远不到 1 美分，然而那时距今非常遥远，我们也许干脆不去理会。

这些都与风险认识有关，因为，尽管上面所述的一切从经济上来说是无可非议的，但不是所有的人都懂得经济学或复利，因此我们往往把今天的资金浪费在遥远的威胁上。为寻求一个绝对安全的核废料仓库所浪费的数 10 亿资金就是一个典型的例子，这一点后面我们会谈到。更糟糕的是，在这急功近利的时代我们常常在另一方面犯错误，政府和公司领导人都不愿对未来投资。我们的主要行业现在很少支持基础研究，即使是在他们自己的领域也是如此。销售今天的产品被认为比开发明天的产品更为重要。躲避未来的伤害似乎比保证未来的利益更为重要，这一怪事令人难以理解。但事情并非总是这样，那些不愿为未来投资的人没有赢得未来。

影响对风险的认识第四个因素是描述风险的方式——这是个框架问题。说明这个问题较容易的方法是：交替地从利益或损失的角度来提出同样的问题要求人们对风险问题作出决策。这样做结果会发现人们通常以冒着遭受更大损失的风险来获取避免损失或把损失降到最低程度的机会；但却更可能努力获取肯定的东西，以保障其获得某一利益。显然，正如所有赌场的观察者所知道的。人与人虽然不一样，但这些是最常见的方式。

证明这一点的一个方法是，设一个 1000 美元的奖金，让人掷硬币来决定能否获得，如果投掷失败也不用倒赔。但也可以在未掷市之前就付一笔钱把这事了结了，这种了结方法是在法庭之外的。后一种办法显然是要赢，只有获利的可能，而没有任何损失的危险。但这值多少钱呢？既然获得 1000 美元的同额赌注机会创造了平均获得 500 美元的期望值，你可能估计人们愿意以 500 美元出售这个机会。然而测验表明，平均说来人们愿意哪怕只获 350 美元而不掷钱币。人们要得到肯定的东西，即使他们得不到那么多，并且愿意为此付出代价。这是有所获得时发生的情况。

另一方面，如果规则有稍许变化，先给参加测试的人 1000 美元，然后要他掷硬币决定是否要归还这笔钱，他的决定就变了。这与上面其实是一回事，只是现在钱在他手里，而掷硬币是为了决定承担或避免损失，而不是获得。概率还是他有一半的机会保留这笔钱，因此期望值仍然是 500 美元（手中有

1000 美元，减去必须归还的这笔钱的二分之一的机会）。最大的区别在于他已经有了这 1000 美元，而且可以享受它。由此可见，赌博似乎是为了避免损失，而不是为了赢钱。一个数学家仍然建议付出 500 美元放弃掷市，或者，如果与上面所述的那种选择一致，他应该甚至愿意付出 650 美元以保证净收 350 美元。但事实却不是这样，赌博者仍然建议要以可能连 350 美元也保不住的掷币方式来了结，这就是说他更愿意押上一切去赌什么也不损失的运气。对于一个数学家或统计员来说，甚至对一个职业赌徒来说，这种选择没有一点道理，一个职业赌徒一定垂涎欲滴地等待机会碰上这样一个人。

因此人们赌博一般是为了避免损失，但对潜在的得益却比较保守。他们宁可一鸟在手。这当然是假设他们知道机会的大小——概率非常低的事件，譬如彩票和灾难性事故是由于缺乏信息和了解以及迷信而导致的。在某些测试中，有些人不愿将刚用一美元买来的彩票以两美元售出。在这种情况下，一鸟在手等于无鸟在手。

值得注意的是使用“风险”一词去定义本书的主题，这本身已使问题发生了偏差。如果我们用“安全”一词，那么心理方面的色调就不一样了。在给联邦机构命名时人们就认识到这一点，所有的机构都致力于（至少在名义上）保证安全，没有一个是减少风险。国防部，不管其名字如何，意思是在必要的时候发动战争；健康与公众服务部对付疾病多于对待健康；司法部主管联邦调查局；能源部在核武器上的花费高于在能源方面的花费；而疾病控制中心，上帝保估，确实在干名副其实的工作。仍然，委婉措词是常规而不是例外。

对问题的设计方式的敏感性远远超出了对风险的估价本身（这种敏感性有助于解释在风险估计中对低度风险的例行夸张），延伸到业余赌博和业余（部分专业）投资战略这样一些领域。有关风险的设计偏见是不可避免的，既然风险很少以有多少人逃脱的方式来表达。想象一下在描述航空工业的一天时说，“昨天有 100 万旅客进行商业旅行，其中绝大多数最终活着到达了目的地”，很少有可能看到这种广告。

但我们的公民对此有何看法？大约 10 年以前，俄勒冈州一个研究机构要 4 个不同团体的人——妇女投票人联盟、大学生、商业和职业俱乐部的成员以及专家人士——按照风险大小的次序来排列 30 种知名风险。对照大学生和专家的答案，他们发现大学生把核能对公众的威胁列在第一位，而专家则将其列在第 20 位。专家把机动车列在第一位，而学生把它列在第 5 位（在核能、手枪、吸烟和杀虫剂之后），等等。这种事实与幻想之间的差异也波及其他小组，人们所看到的风险常常取决于大众媒介的报道而不是实际的风险。

在引言中我们提到过有关优先性混乱的一个特别惊人的例子，即有几十年历史之久的氟化问题。到现在，在整整一代人饮用加了一丝氟化钠（大概百万分之一）的水长大、而且大部分使用了氟化牙膏和漱口剂以后，其效果已经出现，而且很明显。5 岁至 17 岁的儿童中 50%的人恒牙中一个牙洞也没有；仅在过去十年，儿童牙洞数字下降了 40%。另外，有关有毒的氟化物（我们定期食用的许多东西含有氟化物，而剂量大到一定程度确实是有毒的）危害公众健康的可怕预言还未被证实。氟化已最大限度地发挥了绝对的优势，几乎是有百益而无一害。

然而政治压力的结果是，不管专家们的意见如何，大约 40%的美国人生活在水源的氟含量低于最佳自然氟化物浓度的地区，且没有加入任何氟化

物。10 个最大的城市中有 3 个没有调节其水质。在整个洛杉矶盆地，只有两个社区的用水已氟化，而洛杉机市不在其中。实际上，反技术力量使得市政厅的日子非常难过，以致于符合公众利益的行动成了不利的政治行为。没有畅言无忌的选民支持健康牙齿，因此一个把保证能再次当选作为主要关心的焦点的政客是不能把良好的意愿白白耗费在牙齿上的。幸运的是，许多被剥夺氟化水的儿童使用了氟化牙膏。

作为辩论质量的一个例子，最近反氟化出版物宣称，大部分艾滋病病例发生在饮用水氟化的城市。事实上，它还可以同样轻易地说艾滋病发生在设有公共图书馆的城市，同样正确——但同样不相干。

氟化物一例体现了人们熟悉的公共利益被民主过程粗暴对待的情形。由于出现了许多以攻击技术和利用恐惧为职业、以此糊口、具有说服力的团体，而且他们被当作专家受到大量大众媒介的热烈欢迎，这一问题已更加恶化。下一章将简要并善意地讨论这一全国性问题及其伴随而来的优先性扭曲的问题。

第四章　风险政治

由于风险是一个容易使人激动的主题，因此我们有必要谈谈有关参与者的情况，一般性的礼节要求这要做得尽可能的公平。否认这种事实是不诚实的，即有些参与者对合理决策产生了毁灭性影响，其结果是损害我们所有的人。本章篇幅很短，旨在承认这种事实，即美国和西欧存在大量而有力的直率地反对技术的政治势力，他们在行使其政治力量时几乎完全出于阻碍性目的。德国绿色和平组织的政策宣言最为公开，而美国的绿色组织的关心焦点则不那么集中。他们在我们许多人心中唤起真正的对简朴生活的留恋之情，这是对这样一种事实的反应，即我们的技术世界的确是更难以理解。我们不知怎么丧失了对我们的命运的控制，这种感觉当然令人沮丧，而反技术姿态却能够撞击出有响应的和弦。反对变革特别是技术变革是许多人的专门职业，“积极分子”一词如今被骄傲地使用，似乎积极本身就是光荣，不管他是积极拥护什么还是积极反对什么，而后者更为经常。

由于我们社会中一个令人惊恐的趋势，这一问题变得更加严重。正当我们的生活变得更为复杂、相互作用更大、电脑比程度更高以及——让我们面对这一点——技术更进步时，我们人口的教育水平却在下降。标准的学术能力和成就测验的平均分数多年来一直在下降，这已不是秘密，尽管分数在 80 年代初已停止下降，而且从那时起上升了一点，但跟 20 年前的分数比仍有很大的距离（低 50 点），而测验的难度并没有相应的提高。除此之外，我们学校的课程在过去几十年中大大减少，作为正当的教育目标，学术成就不被重视，科学和数学已让位给更“相关”的东西，分数的膨胀掩盖了学生及其父母的标准下降的事实。所有这些在任何有声誉的、可靠的研究中都已被证明，并遭到所有有声誉的学者的反对。在我们的学生一次又一次地与其国外同伴的竞赛中，结果都成绩最差。在理论上，所有的父母都支持——甚至要求——他们的孩子获得更好的教育，但如果这会影响孩子享受生活，或孩子完不成学业将面对难以置信的事——失败的话，支持更好的教育的父母就会大大减少。

这种贬低学业的部分结果是我们人口中相信飞碟和再生的人的比例令人吃惊。我们美国人当中只有不到一半的人知道地球一年绕着太阳转一圈，而使得学校中有关进化论的教学保持合法性的斗争却永无止境。美国人中相信进化论和神造论的人大约一半对一半。一半美国人迷信幸运数字。最后，这种贬低学业的直接结果是，据估计美国工业每年用于数学补习教育的钱与用在小学、中学和大学直接数学教育上的钱一样多。

我们当中许多人从电视画面和音响刺激中获得信息，并且根据我们在晚间新闻中闪过几秒钟的单方面的英雄和坏蛋来确立我们对于和平、战争、环境、风险和经济的态度。那些已学会在娱乐节目和电视新闻节目中用 5 秒钟或更少的时间处理复杂观点的人知道，他们拥有的观众数量几乎完全取决于他们的娱乐价值。

在年轻人当中情况则更为糟糕，他们是在电视氛围中被抚养成人的。根据全国舆论研究中心的一个民意测验，报纸阅读者人数从 20 年前占人口 75%下降到现在的 50%，而在 18—19 岁的年龄组中，则从 60%下降到 29%，在 30—34 岁的年龄组中，从 75%下降到 45%；主要是老人，60 岁以上的人仍在阅读报纸。每一个人的观点都与任何其他人的一样好，不管他是否有学

识，这已成为一个信条，并在学校受到鼓励。

而你，亲爱的读者，你则属于卓越的少数人——你确实在阅读一本书。这不仅是一本书（不管它多么没有价值），而是一本意在使你比在读它之前更有学识的书。如果没有达到这个目的，这将是作者的错，而不是你的错。

我们整个民族的识字程度已处于危险之中。教育部目前的估计是，我们美国人当中整整有三分之一，即 7000 万 17 岁以上的人不是职业文盲就是勉强地认识字。尽管我们的子女绝大多数中学毕业，这个数字估计以每年 200 万的速度增长（成人人口中 75%以上都是中学毕业，而 1940 年只有 25%），而更多的人是职业性数盲（数字文盲）。这不仅是一支必须在更为复杂和要求更高的劳力市场中得到供应的劳动大军，而且是一批具有权利和特权的人口，包括追求幸福的古老权利。首先他们是重要的选民，对我们国家对技术挑战的反应方式具有决定性发言权。我们的国家是分享民主制的国家，它是每个人的国家，而不仅仅是受过教育的人的国家。当 1983 年 3 月第一次写下这些话时,两大党中剩下的 11 位被提名的总统候选人中没有一个受过科技培训，这不属于偶然事件，（惟一一个受过培训的是最先从竞争中被去除的。）这就是反技术力量的工作背景。上面几段中描述的问题远远超出了本书的主题，我们马上就把它们搁在一边，尽管它们非常重要。

然而，在这里很难做到不提到一个有趣并且也许是有关的故事。据说 1968 年对德国妇女的“代表性样板”作了一个民意测验，询问她们希望她们理想中的丈夫干什么工作。列在第一位的是核物理学家。（由于本作者是有核抱负的男性物理学家，认为这种现象是令人兴奋的，因为物理学家，特别是理论物理学家，没有许多幻想的机会。）可是在 1979 年，类似的测验却得出非常不同的答案，在表的前 20 位怎么也找不到核物理学家，列在首位的是护林员。尽管德国人爱他们的森林，但这种偏爱的变化很 大，而追求这种变化的重要性又太令人痛苦了。

技术风险以保证公益的方法为民主社会管理事务提供了一个试验场。加勒特·哈丁在他 1968 年发表的《民众的悲剧》一文中指出，如果一个社会的每一个成员都以自身的利益为目标来作决策，该社会就得不到好的服务。由许多出于自身利益采取行动的个人组成的群体，很容易造成给社会和个人都带来坏结果的局势。他举了一个公共牧场的例子，每个人似乎都可以从增加牲畜中得益，最后导致过度放牧和牧场的毁灭。我们通过接受政府的限制来控制这种问题，平衡每个人选择的自由和共同福利的需求。如果政府本身只能体现个人选择的总和，就像在分享民主制国家那样，这一潜在的逻辑就会瓦解，如果分享者信息不准，则瓦解得更厉害。即使是少数人也会造成真正的损害。

这方面当然是有历史的，作为工业革命的一部分，自动机械 19 世纪初在英国被引入纺织业。其不可避免的结果是熟练手工工人（其技艺现已不用）被解雇，而他们自己并没有错误。他们的怨恨首先是针对机器本身，特另是织袜机（生产针织袜的机器使得技术不太熟练的工人的产量达到历史最高记录的 10 倍多）。从 1811 年开始的 5 年中，暴乱和毁坏机器的行为范围不断扩大，一开始是破坏纺织机械，后来发展为破坏其他的各种机器。暴乱者被称作卢德派，因为其领导人采用了卢德将军的名字，这是以一个也许是虚构的叫作内德·卢德的人命名的，据称他在 1779 年捣毁了织袜机，而他却是那个时代以后的人。“卢德派”一词已成为骂人的话，指任何一个强烈反对机

器或延伸到反对技术的人。这个词在此非常恰当。

卢德派最终在议会里产生强烈的反应，议会通过了一项法律，把捣毁织袜机定为死罪。自那以后，一些卢德派分子被处以绞刑，该运动被镇压。拿破仑大败滑铁卢以后的经济复苏和 1815 年的和平很可能也有助于缓和引起暴乱的失业状况。

这一悲剧性事件有一个很有趣的插曲。拜伦勋爵 23 岁在上议院作首次演讲时反对该死罪法案，并为卢德派辩护。诗人对技术的厌恶由来已久——读一下沃尔特·惠特曼的《博学的天文学家》可以得到这种感觉——但现代的律师接过了接力棒，而如今我们周围却没有足够的诗人，他们无法腾出时间来做这种工作。然而在这件事上，技术在下一轮中赢了：拜伦的女儿艾达·洛夫莱斯伯爵夫人是计算机历史上早期杰出的人物之一，一种现代计算机语言是以她的名字命名的。好的基因难以保留，当然她的母亲是个数学家。

奇怪的是，今天的失业工人并没有构成反技术运动的中心——反技术运动似乎是上层中产阶级现象。这些人真正担心的是技术也许在破坏环境，他们可能从未见过在其他技术较不发达的国家的环境状况。（马克·吐温曾说，“做好人是高尚的，告诉别人如何做好人更为高尚，会减少许多麻烦。”与此具有比较意义的是，H.L.门肯曾说，“对人类的每一个问题总有一个简易的解决方案——好的，好像有道理的，和错误的。”）遗憾的是，前人留给我们的环境质量确实需要有力而明达的保护。

到此为止，本章看起来有点偏向（这不令人奇怪），似乎所有的风险政治化的罪行都是由反技术精英犯下的。不幸的是，事实并非如此。无知的政治伴随着自负的政治，并且被不少风险技术的保护者接受。有些对我们的健康和福利不大可能有的威胁——核事故、核战争、温室效应等等——它的非常低的概率（在未来概率高，现在刚刚开始）可能会把人引入歧途。那些还没有到来的灾难使得太多的人相信它们永远不会发生，并因此而松懈。在重大事故从未发生的情况下要保持警惕不太容易，特别是在叫嚣得最凶的世界末日预言家明显是无情报根据的，或甚至还要糟糕的时候。一方面的无知和另一方面的自满（特别是伴随着互相的蔑视）是对合理地管理风险的双重威胁。

第五章　对风险的估价

风险估价同时涉及概率和后果，在第二章中我们第一次评述了测量概率和后果的方法。本章将更加仔细地研究概率。就像本书开始时提到的，风险的最基本因素是偶然性——即我们不知道是否会造成伤害以及何时何地会造成伤害。当然也有不涉及概率的造成伤害的方式，但它们不是风险。一个人从高高的悬崖上跳下来，无疑会立即发生糟糕的事情。（尽管有一个古老的笑话说，一个人从摩天大楼顶上摔下来，经过第四层楼的窗户时，人们听见他说，“到现在为止，一切都还好。”）这注定是要死的，而不只是风险。概率因偶然性而引起人们对它的辩论，它对风险估价至关重要。

本书的第三部分将对概率和统计进行更加透彻地讨论，所有的这些讨论都会更为准确和完整。但有一个特点——也许是最重要的特点——应占主角地位，这就是著名的 N 的平方根规则，尽管没有一个博学的统计学家会这样称呼它。我们将解释这一规则，并举例说明它的合理性。任何一个了解平方根在统计学中的作用的人都差不多已经明白这一规则了。

这一规则——通常是正确的，但也有些例外——简单地说就是一个偶然事件发生次数的难以控制的波动大约等于预计数字的平方根加上或减去一些小的因素。（统计学家把这一魔术般的数字称作标准误差。）因此，从计算事件发生的次数得来的信息大约是同样地不清楚或不可靠的。（这些评论不一样：第一种情况是从信息到观察，而第二种情况则是从观察到信息。）

N的平方根（用$\sqrt{N}$表示）表示其值相乘等于N。因此9的平方根等于3；25 的平方根等于 5。更常见的情况是平方根不是整数，但这并不重要。例如，50 的平方根略大于 7，因为 7 乘 7 等于 49，略小于 50。事实上，50 的平方根约等于7．071，写作$\sqrt{50}$＝7．071……，你愿意加上多少个小数位就 加上多少，使得答案越来越精确。在风险分析中，这是浪费时间。请看这样一个例子。

假设我们喜爱的一个棒球队有一名强有力的击球员，他的安打率是 300（30%的安打率，这是一个可畏的平均数，1988 年主要棒球队中有 20 名击球员达到这一数字）。这个人每赛季都能达到这个水平，因此成为俱乐部不可缺少的人物。可是在最后十几次的比赛中，他有 50 次打数，但却只打出 10 次，因此这段时间他的安打率只是可怜的 200，即使是糟糕的击球员，这一水平也让人嗤之以鼻。这一平均安打率远远低于他的正常水平，当地报纸的体育专栏评论员就会宣称他处于“萎靡”状态，他很可能会在下面几场比赛前的早晨来到公园作额外的击球练习。老板和教练就会找他谈话，讨论出了什么问题，甚至很可能让他坐几天板凳体息一下。这一切有没有道理呢？如果假设每次击球都是一个独立事件（这一假设也许正确，也许不正确），上面的一切就毫无道理，请看统计数字。

在那 50 次击球中，“正常”情况下他应打出 15 次，这就不会使人担忧了。15 的平方根接近于 4，如果在轮到击球的 50 次中他在任何一个方向出现 4 次偏差，没有人会感到奇怪。打出 10 个球是有点超出了范围，但这还不足以使人焦虑。事实上，在这个特别的例子中，我们的击球员在正常发挥的情况下，在 50 次轮到击球时打出 10 次或更少的概率是 0． 079，因此偶然发生的对其不利的机会不到 11 比 1，这并无真正的意义。当然发生这种情况可能性不大，但也并非荒谬绝伦，可能每个赛季会发生一次。

击球员在 50 次击球时打出 20 次或更多的概率是 0． 085，与上面提到的差不多。因此在这一阶段他的安打率达到 400 的机会与达到 200 的机会差不多。但达到 400 人们当然会说他手气好，这种情况也可能是平均每赛季发生一次。这种随机事件中的波动并不罕见，如果它们处于预期数值的合理范围内，则不应该从中得出太多的结论。合理范围指的是当 N 是预期值时，加上或减去小的$\sqrt{N}$的倍数。

在这个具体的例子中，5 次击球中的 4 次多一点处于“正常”范围，如果赛季不长，他远远超出范围的情况就不寻常了，但棒球赛季如今有 162 次比赛，就是说有许多持续十几次的比赛周期，在其中任何一个周期他都有可能偏离他正常的平均水平。在这些周期内，他会不时被宣称处于“手热”或“萎靡”状态，而事实上，这完全是由于运气。

当然，人应当是理智的。如果击球手在 50 次击球中一次也没有打出，我们就有理由表示怀疑了。发生这种情况的可能性不到 5000 万比 1。如果真的发生这种情况，一定出了严重的事情。

这种思维适用于所有的此类比赛。棒球（美国的全国性运动）是人们在统计分析中最喜欢用的对象，事实上人们发现，所谓的“击球员萎靡”只不过是一种幻想，但几乎所有棒球运动员，经理和体育记者都相信这一点。在篮球运动中，某一个运动员的投篮命中数次数越小，随机波动的相对效果越大。但大部分运动员、教练以及球迷都相信运动员是有“手热”的，从而设计比赛时把球传给他，因为他“命中率高”。我们还没有谈到赛马，轮盘赌、掷骰赌博以及其他这种靠运气的游戏中的一连串胜利的情况，财产的获得和失去是在追寻好运期中发生的。更不用说股票市场了，几乎所有的统计研究都表明短期行为的主要因素是随机波动。

现在看看常在新闻媒介中出现的具体例子：有两个镇，我们姑且把它们叫作阿尔德瓦克和日佐米斯，这两个镇子在社会问题方面非常相似，人口相同，但日佐米斯处于一个为公众市场生产齐特拉琴的大工厂的下风。在 10 年的时间里，人们发现在阿尔德瓦克出生的婴儿有 100 名是音盲的，而在日佐米斯却有 110 名。那么是否应该责备这家工厂并禁止它生产齐特拉琴，或者只能在政府的严格规定下才能生产呢？或者坚持这家工厂装上隔音装置，使得无辜的日佐米斯免受试琴的灾难之苦呢？答案是不（即使不考虑公认的制造齐特拉琴的社会效益），因为这两个数字的平方根大约都是 10，人们一般能预计这种偶然波动。如果日佐米斯有 150 位音盲的儿童，差别就远远大于 10，也就更难以用统计波动来说明，会被认为具有“统计意义”。音盲是否应归咎于齐特拉琴的制造是另外一回事，因为两个镇子之间可能会有以前未注意到的区别。这也是烟草业的辩护士惯用的一个借口，在吸烟引起肺癌的大量证据面前，他们说“统计方面的联系并不一定意味着因果关系”。尽管在技术上他们是正确的，但在烟草问题上显示因果关系的还有其他证据。而齐特拉琴却不是这样。

因此，我们讲数据“意义”时使用事件发生次数的平方根来确定我们看到的差异是否有意义。当然标准可以定得更精确一些，但现在这样已经足够了。对于概率不到 0． 05 的事情来说，如果偶然事件发生的机会与观察结果相比大于 19 比 1，生物学家就习惯于把数据看作具有统计意义。这一选择没有理论基础，完全是任意决定的，但它在生物培植中的地位根深蒂固，很少受到怀疑。

这种分析在别的场合也很重要。本章在第一次撰写时恰逢是总统大选季节，我们有时看见民意测验的模拟投票的结果大体是这样宣布的：“在调查的 100 名登记选民中，候选人 A 稍稍领先候选人 B，他获得选票的 52%。”由于几个有竞争力的候选人的差距很可能是随机波动的，我们知道所谓的稍稍领先没有任何意义。事实上，下一个星期的调查也许会发现该候选人落后 2%。而如果发生了这种情况，也许会有人宣称，毫无疑问这是因为他不是同自己的妻子，而是和另一女人一同在公共场合出现的结果。这一数字同样不重要，至少在统计上是如此。我们越是深入研究某些特定灾难的概率，这种小数字的问题就越麻烦，特别是在这一事件带有较大的自然发生率时。有些结果会在 N 的平方根水平上，但是否应把它们当作事情的真相对待还不清楚。

前面提到过 4 种风险，现在应该问一下到底怎样估计这些风险发生的概率。如果我们逐一进行讨论，问题会越来越大。

人们熟悉的严重风险

这是最容易的一关，因为糟糕的主角们——汽车事故，飞机事故，甚至谋杀——经常出现，所以统计数字也很完整，其社会风险也易于估计和测量。在第二章中我们举了个例子，这里需要作点补充。统计数字是直接用来确定事件发生的概率的，在估计中的统计上的不确定性常常由 N 的平方根法则来决定。最频繁的事件因此（相对来讲）也是人们最熟悉的。

低概率但后果严重的风险

尽管前面用大地震作为这种风险的范例，但它们与技术的联系微乎其微。的确，人们进行了大量的科学工作来预测地震和设计抗震楼房及其他建筑物，但这种风险的起因不是本书的主题，大坝倒塌也不是，尽管它的威胁极大。（从历史上看，每 300 座大坝中有一座刚建成就倒塌，其他的后来倒塌。）

然而大建筑在结构上的失败却是不能完全忽略的，尽管这种失败几乎总可归因于人在设计、建设和维修中的失误。这种不时发生的错误可被看作是因为不懂得基础技术。下面就有这样一个例子。

1940 年，跨越皮吉特海峡南端的世界第三长吊桥塔科马海峡大桥在一片喧嚣声中交工使用了。它有半英里多长，只有跨越旧金山湾入口的金门桥和飞架哈得孙河，连接纽约和新泽西的乔治·华盛顿大桥比它长。那两座桥建于前 10 年，那是个建吊桥的年代。不用说，这座新桥是由一位杰出的桥梁设计家设计的，结构很优美。

仅仅在 4 个月以后，它在一阵不大的风中倒塌了，倒塌的过程持续了几个小时，是人们可以想象的最富有戏剧性的场面之一——大桥发生剧烈的摇摆和扭曲，巨型吊缆像孩童的跳绳一样抽打，惊慌失措的司机们弃车而逃，竭尽全力保持平衡地爬向安全的地方。由于整个倒塌过程的时间持续很长，桥上的每个人都得以逃生，生命财产没有受到损失，除了一只丢弃在一辆车里的小狗。这种大规模的旋转运动从未在吊桥上发生过，这一场面给人留下的主要印象是吊桥结构的巨大弹性。该桥在最后坍塌之前遭到了极端的辱

骂，但有一点很关键，它的设计和建造都是完美的。

例行的调查披露了好几件事，其中之一是那个倒霉的经手该桥 600 万美元保险单的代理人——那笔钱大约为该桥的建筑费用——侵吞了保险费。大概他深以为桥梁是不会坍塌的，保险只是浪费纳税人的钱，他最后进了监狱。但主要由一些杰出的桥梁专家组成的委员会进行的技术调查却没有发现原设计有任何错误，在短时期里，华盛顿州州长甚至还想根据旧的图纸重新建桥，以省点钱。庆幸的是这种想法为期不长，该桥在 1950 年重新设计和建造，现在桥还在，至少在我写这本书的时候还在。什么事情都无法保证。

发生了什么事？飞机和轮船的设计者熟知的涡流现象桥梁设计者显然不知道，这种现象在第一次刮大风时就会造成了灾难。这种涡流被称作冯·卡曼涡流，是以一位著名的航空工程师的名字命名的，他如何参与桥梁建筑的故事记载在他的自传中。任何人划船时都能在水面上看见涡流——它们是在橹或桨的尾部形成的小旋涡。风使桥的尾部形成类似的涡流。在那致命的一天，涡流以所谓的共振频率推动着桥，摇摆越来越大，最后桥坍塌了。我们在推孩子荡秋千时使用共振——如果推的时机抓得准，振幅可以很大。那一天，风正是抓住了时机。

因此，即使是专家有时也犯严重的原则错误（不是操作错误，那是另外一回事），但其概率很难估计，我们从经验中得知这种情况会发生，因此我们从来都不认为人是完美的。要知道人到底有多大程度的不完美是一更加难以估计的风险问题。

但这使我们难以估计那些罕见但又偶然会发生的事件的概率。有两种方法：根据经验和根据分析。经验方法也就是这个词的字面意思——搜集发生的可比事件中所有能得到的数据，作人们所谓的有情报根据的估计。分析方法当然更具分析性，其最高形式被称为概率风险估价，概率风险估计是对风险的估计，把概率考虑在内。

基本思想是，极少有灾难会突然出现，许多灾难都是一些结局并不总是很糟的小事发展到极点。最后的不幸也许是罕见的，但造成不幸的那些事情却不罕见，我们在这方面也许有一些有用的数据，即便没有，也至少可以有专家作较好的估计。因此，如果（问题就在这里）我们知道最后事件发生的大部分方式，我们可以把每一个中间事件发生的机会加在一起，对最后的概率作一个像样的估计。误差是不可避免的，但知道一些总比什么也不知道好。

作为一个基本逻辑的例子，考虑一下一场精彩的棒球赛，在这场球赛中，投球手使他面对的所有 27 名击球手退场。这种情况非常罕见，尽管投球手使任何一位击球手退场的机会有 70%。我们来估计一场完美球赛的机会——罕有事件——从使一位击球手退场的概率开始，假设击球手都是独立的，这意味着使一位击球手退场的概率是 0.7，两位是 0． 49，乘上 27 次。其结果是 15，000 次中有一次，或者说对一名投球手来说，其概率是 15，000 比 1。

这一估计准确程度如何？在过去的几十年中，主要联队每年平均有 3000 场比赛（对两位击球手每场比赛算了 2 次，每位击球手都有一次机会），因此我们可以期待每 5 年左右会见到一场完美的比赛。事实上，在过去 40 年中，即“现代”，恰恰出现了 8 场完美的比赛，因此我们的估测是对的。这种计算确实是行得通的。

知道了单个起作用者（每一个杀出局）的基本概率，假设他们互相没有关系，并且知道它们如何依次导致了罕有事件（完美的比赛），就有可能估

计后者发生的概率。这是一个简单的例子，因为次序很简单而且完全被人知晓——投手必须先使第一位击球手退场，然后是第二个、第三个、直到第九盘。要达到最后的结果只有这一条路。其结果最后令人惊讶地接近于实际经验，而本来并不一定要接近事实——记住平方根法则。我们很幸运。

这种计算在大多数长期的好运或坏运降临时是行得通的，就像一连串的胜利或一连串的失败一样。体育运动中确实有一次例外，即 1941 年乔·迪马吉奥的 56 场比赛连续安打期。没有人能接近这一记录。斯蒂芬·杰伊·古尔德认为，尽管迪马吉奥的击球技术很高（一生平均安打率为 0.325）。这一时期对他来说也是很幸运的。好的击球手在某一年达到这个记录的概率是 100 比 1。但这里也有一个熟悉的教训——低概率不等于零概率。事情是可能发生的。

举一个较难的例子——譬如说商用飞机在飞行时掉了一个机翼。这较为复杂，仍是罕有事件，但发生的方式较多。我们以列举不同的事故原因开始，虽然心里知道不可能列出所有可能发生的事故原因。我们会想到由于遇到坏的天气，飞行对机翼的压力过大，并估计这种事发生的概率。我们会想到维修失误使翼梁压力过大（1979 年在芝加哥坠毁的 DC—10 飞机就是由于维修不善导致引擎座架断裂），并估计这种失误的概率。我们也许会查询飞机的飞行历史，因为金属疲劳最终导致脆化以及裂缝的增加，后者又导致结构失灵。（所有金属成分都有裂缝，它随着时间和使用而不断发展、增大，但大多数裂缝不会导致结构失灵，除非裂缝太大，或受到重压。重复压力是最槽的， 1988 年阿洛哈航空公司一架飞机因发生了机身故障。在我撰写这本书时，我们老化的商用喷气式飞机大队似乎在流行裂缝以致结构失灵。）如果我们比那时的人聪明，我们也许会想到飞机刚开始投入使用时会引起一些厄勒克特拉机翼失灵的颤动——那种现象与发生在塔科马海峡大桥身上的现象并无二致，等等。

在我们列举了所有结构性故障原因并确定了每一种原因导致事故的概率以后，我们可以把那些概率相加、相乘，以估计机翼脱落的总概率。这被称作“错误之树”，因为一张标明了所有不同原因及其相关的概率的图表看起来像一棵树。设立一棵错误之树的一个附带好处是我们可以被迫明确地考虑该系统不同部分的相互作用。概率风险估计包括建立错误之树和事件之树（在后面），从而对事件的可能发生的原因以及与此相关的概率作一个总的估测。一个罕见事件的发生是因为许多东西失灵所造成的，但这种事仍然可以进行探讨，因为每个导致最后结果的单个事件也许并不太罕见。

事件之树是倒立的错误之树。在错误之树中，我们集中注意最后事件的发生，并列举导致其发生的各种原因，而在事件之树中，我们从事件开始，列举其可能造成的后果。一个典型的概率风险估计从建造事件之树开始，对飞机来说，事件之树也许从引擎失灵开始。是在低海拔发生的吗？飞行员技术如何？引擎能否重新启动？在每一阶段，都有事情变糟或变好的可能，然后再进入下一个戏剧性场面，这就像想出一步棋的各种结果。大部分结果都会是无人受伤，但总有发生灾难的概率。这个数字这时也能估计出来。

许多这些概率都取决于系统中其他部分的运转。引擎设备是否还在工作？电子系统是否还有效？水压系统是否完好无损？这里的每一项都有一个概率，估计概率的方法就是对每个项目设立一棵错误之树。这样这些错误之树就可以用来确定事件之树各枝条的概率，其组合就称为概率风险估计。

整个过程从概念上来讲很简单，但在实际中也可以极为复杂。目前最高水平的概率风险估计是对核电厂事故风险的估计——第二部分中会讲得更多——它估计了几千种潜在的事故发展原因。核电厂老板如果希望为他的工厂作概率风险估计，最好先为这项工作准备几百万美元。但这是估计这种复杂系统失败概率的最佳方法，而它又不经历实际的灾难。这才是问题的要点。

存在一些固有的问题，即你不能考虑到所有的因素，你只能尽力而为，这样的问题属于完整性问题。如果整个系统中有人，例如飞行员或工程师，而对他们在紧张状态下其行为的预测不能达到完全的程度，这种问题叫作人的因素问题；有时各部件的故障并不是按顺序依次发生的——地震把某样东西从架子上震下来，打碎了控制板，引起大火，扯断了消防水管，同时震塌了消防站的屋顶，这种问题叫作同一原因（或同一方式）的故障问题。诸如此类的困难很多，但没有一种困难使我们的工作不可能完成。它们只是增加了最终的“末行数字”答案中的不确定性，但一个不确定的答案总比完全没有答案好。这种估计目前常应用于核反应堆领域，并正扩展到其他领域。

概率风险估计可用于——是唯一的方法——估计不大可能发生的事件的概率，如那些也许 100 万年才发生一次的事情。在这种情况下使用概率风险估计并获得结果后，人们很快就发现大部分人，包括在其他方面富有经验的科学家和工程师，都不知道“一百万分之一”是什么意思。核管理委员会提议核安全的合理目标是商业核电厂大事故发生的机会每年是一百万分之一，这有两方面的麻烦。有些人很得意，因为他们认为这样低的可能性意味着不会发生，并认为整个事情很愚蠢。另一些人则认为无论多大的可能性都是太大了。（甚至核管理委员会似乎也属于第一小组，在宣称百万分之一数字的同一份文件中指出其政策是完全防止这种事件的发生。）如果第二组的人想要找到他们为这么低的概率而着急的合理原因，他们会指出这种可能性接近于个人赢得彩票的可能性，但总有人赢得彩票。当然，区别在于：上百万人购买彩票，而某个人赢和你赢这之间的差别太大了。这就像别人告诉你你是百万分之一——你在认识到这意味着全国像你这样的人数以万计以前一直很兴奋。

对这种低概率的解释和理解远远比不上我们计算这些概率的能力。一个概率，不管多么小，其含义就是数字本身的含义，百万分之一的概率意味着某件事平均试一百万次就会发生一次，如果计算正确的话。它并不意味着永远不会发生，也不意味着它肯定明天就会发生。

从未发生过的事件，但是

在这种情况下概率非常低，我们几乎只能作纯粹的猜测了。下一次大选之前仁慈的外星人来到地球上整顿好美国的政治，发生这种事的概率有多大？也许很低，但要确定一个数字却是愚蠢的。下一次圣安德烈斯断层发生大地震，使得旧金山滑进太平洋的概率有多大？也许还是很低——很抱歉，各位。地球上人口越来越快的增长——过去 40 年中翻了一番，今后 30 年很可能要再翻一番——在未来 50 年中给人类带来大灾难的概率有多大？很大，但即使是考虑一下解决方案也会引起社会动荡，因此我们就不去考虑了。

在那些情况下，我们可以作一些有情报根据的猜测。它们也许只是猜测，但总比什么也没有好。然而，其他一些猜测将让位于概率风险估计，尽管概

率确实微乎其微。这就像一场完美的比赛。

一个勉强可举的例子也许是一块大陨石在未来 10 年内落到美国一个人口稠密的城市的概率。美国人口超过 100 万的大城市有 40 多个，其面积从 25 平方英里到几百平方英里不等，总面积大约是 3000 平方英里，美国地面总面积大概有 300 万平方英里，因此落在美国的陨石（如果陨石不是外星投手掷的）落到某个城市的概率有千分之一。近代最大的陨石在亚利桑那州的温斯洛附近砸出一个大坑，直径大约为 4000 英尺，深 600 英尺。我们认为这发生在 5 万年以前，因此可以合理地估计这种事大约 10 万年发生一次。现在我们准备以一连串概率为基础作一个估测：未来 10 年中掉下一块大陨石的机会有万分之一，落在大城市的机会是千分之一，那么事件发生的总概率是一千万分之一，或 0.0000001，它的发生不是不可能，它可能会发生，但不要为此睡不着觉。

这一类风险更切合要点的一些问题将在第二部分作更彻底地讨论，例如核冬天，格陵兰冰山由于温室效应而融化，核废料储藏地的泄漏，以及其他一些时间遥远、低概率的技术风险。严格他讲，在这一类中还应该包括美国发生一次大的核事故——到目前我撰写本书为止，它还未发生，但其发生的概率是完全可以计算出来的，如果有充足的时间，它的发生是不可避免的。对于所有这些情况，上面描述的方法都是可以使用的，已经发生的罕有事件和从未发生的事件两者的计算方法实际上没有什么区别。

在“自然”发生的背景中隐藏着的风险

我们前面已列举了一些例子——化学品致癌作用，氧，杀虫剂，饮用水中的污染物等等。问题在于区别出微小的附加后果，检查一下这些后果是否真实，如果是真的，有多重要。（在写作本书时，我们正处于对氡的全国性小型恐慌之中，甚至超级市场也在出售所谓的测氡工具。）这里的主要分析工具是 N 的平方根法则。本章已描述过这个法则，在第三部分中将详细描述。它为我们测量自然环境中微小变化的能力确立了一个界限。

然而还有其他一些工具。例如，在显微镜下，由长期吸入石棉引起的癌症显示出与其他对肺部的侵害例如吸烟（尽管有证据表明它们有相互作用）引起的癌症的不同。如果损害的原因有具体的标记，那么即使增加量很小，也可以鉴别出来。（想想对谋杀武器的弹道测试。）

同样，有些风险适用于被控制的实验，这些实验一般是对实验室动物进行的。几年前，动物热爱者反对把小猎犬用于估计吸烟对人的影响的实验，但通过这些试验人们确实学到了很多东西。用其他有潜在危险的物质对动物进行试验也是如此，因为这些试验可以在那些有问题的物质的影响被隔离的情况下进行。事实上，目前艾滋病研究的一个真正障碍是缺乏易于感染这种病毒的动物。艾滋病似乎注定是人类历史上最大的杀手之一，但这一风险不是技术风险，至少在此时（1989 年末）人们还未能掌握这种风险即将到来的严重性。

那么，对于这一类风险，进行估价的主要工具是仔细的统计和流行病分析，加上对这种现象的实验室研究和理论研究。如果没有后者，我们就只能做到前者，这样，风险估价就会成为一个困难较多的工作。第十二章中会有这方面的例子。

第六章　对风险的管理

对风险的管理有两大基本战略：防止和减轻。前者是指降低人们不愿看到的事件的发生概率；后者是指在事件发生时减少其不良后果。（龙卷风的避风穴完全可以减轻后果，但没有人能够操纵龙卷风。如果对云进行催化来改变导致龙卷风的气象条件有效的后，就能预防龙卷风的形成。）在对疾病的斗争中，防止被称作预防；而减轻则被称作治疗。我们将在第十五章的一个紧急处理核事故的例子中讨论减轻，本章主要讨论防止。（严格他讲，没有防止这种事情，我们只是降低概率。）

技术风险的许多预防工作是通过管理——我们美国人似乎不可思议地信任管理机构的能力，相信它们能找到一种方法使我们的生命更为安全同时又不严重地降低生命的质量。多少次我们抱怨有害药物（例如擦里多米德）溜过管理机构的迷宫？多少次我们抱怨似乎无休止的测试使有疗效的药物不能进入市场？甚至连几乎被专家们一致看作是肆无忌惮地欺诈绝望的病人的杏音也有人替它辩护。一些据称能治疗艾滋病的药物也再现了这佯的情景，有些药物也许有希望，但到底是哪一种药呢？而急切的顾客们到处都是——遭受病痛折磨的人抓住一切救命的稻草。管理的主要困难是在既不剥夺对我们有好处的东西和又不让坏的或无用的东西侵害我们这二者之间作出选择。

有些预防努力既不是管理性的，也不是专门针对技术风险的。免疫已基本上消灭了过去的一些流行病，公共卫生措施更是如此。天花曾是一种可怕的疾病（1920 年到 1921 年流行时期美国有 20 万个病例），它已从地球上根除，是因为人们接种了疫苗。据估计，14 世纪导致四分之一欧洲人死亡的鼠疫受到控制是公共卫生获得成功的一个典型的例子，这种鼠疫是通过传染上病毒的老鼠身上的跳蚤传播给人类的（尽管人与人之间也能传播），因此控制鼠疫只需要在某个地方切断传染链，降低这种威胁的程度。疟疾和蚊子也是这样，但它们只发生在某些地区——疟疾在世界的许多地方仍然是一个大问题。

管理是我们愿意采用的对付技术风险的武器。有些管理机构很早就已存在，但在过去几十年中我们设立了许多管理机构。这里有一份清单：劳工部职业安全和卫生管理局，消费品安全委员会，环境保护局及其下设的水、安全、废物、杀虫剂、辐射等各个分局，健康与公众服务部的粮食和药物管理局，核管理委员会，联邦紧急措施署，财政部的酒、烟和火器局，劳工部的矿业安全和健康局，运输部的国家公路交通安全局，交通部的联邦航空局及其监督机构全国运输安全委员会，后者是一个独立机构，司法部的药品管制局，现在属于运输部的海岸警备队，新成立的国防核设施安全委员会，众多的地方和州立机构。等等，等等，数不胜数。每一个机构都有确立其责任和权威范围的法律基础，同时也被赋予强制实施的有效手段。（有些手段作用一般，而有些手段却作用很大。）大部分机构都有一个由咨询委员会组成的网络，其中许多是法定委员会，其职能是监督（当然还有帮助）管理者。一个管理机构通常有许多联系松散的法律要实施（一旦成立，它就成为新业务的自然存放处），同时，它还有更多的内部规则要实施。有时那些法律相互矛盾，各个管理机构的领地相互重叠。在法院中或在议会中，不同机构的权力边界像掷泥大战。不同的机构归不同的议会委员会和小组委员会管辖，因此它们陷入领土大战。上面所列的机构中有四分之三是在 70 年代设立的，尽

管有几个机构的历史要长得多，但它们都是 20 世纪的产物。

每个机构都有出生史，通常是有一件事引起了公众的注意，公众要求得到保护，保护全体公民毕竟是政府的主要职能。（威廉大帝知道他的头等大事是什么，他禁止在啤酒中掺水。）从我们的清单中举一个例子，粮食和药物管理局尽管其家谱不管怎样可追溯到 1906 年的《粮食和药物法案》，但它是从 1938 年通过的《食品、药物和化妆品法案》中获得其有效的手段的。（事后想一想，这其实是一个机构中不同议题的奇怪结合，正如戴维·博达尼斯在他那饶有风趣的《秘密屋》一书中所指出的，尽管纽约卫生委员会在 1924 年审议禁用口红，但这并不是为了妇女的利益，而是因为担心男人亲吻抹口红的女人后会中毒。有些事儿有风险，其原因是莫明其妙的。）新法案明文规定制造商有责任保证新药的安全,事情的起因是 1937 年的大约 100 人被毒死，大部分是儿童，他们服用了一种磺胺糖浆，这是第一种广谱特效药，但它是用二甘醇主剂制作的（出于无知，不是出于恶意）。所有的毒药都有一个损害临界点，虽然一位成人化学家（这位化学家后来自杀了）以服用治疗剂量的药物进行试验，但这种尝试不能保证对儿童也无害。因此一项幕后的法律立刻进入舞台，并迅速获得了通过。其他机构也有类似的故事。

回到那一系列机构中来，这一大堆麻烦为那些向管理机构输送数据和分析的组织和机构提供了业务。这些机构有全国科学院——全国工程科学院，疾病控制中心，全国职业安全及保健研究所，国家药物滥用研究所，总统办事机构的科技政策办公室，议会中的技术估价办公室，大量的咨询委员会，大学，非赢利研究机构，赢利研究机构，顾问，承包商，作者，听证会的见证人，有关的公民，无关的但喜欢以反对某事而出名的公民，议会说客，等等。对管理机构提供支持虽然不是这些机构的唯一工作，但确实为它们提供了部分的有利可图的工作。然而，就是这一点也不应从消极的角度去解释，因为这一亚文化群对风险管理的内部一致性有很大的作用。

最后一点需要详述，因为其原因不仅仅是风险。如果每个管理机构都独立运行，独立设立标准和范围，独立建立法规，那么我们就会有一个由许多互不协调的部门组成的政府，永远不会有人知道什么事是容许的，什么事是不容许的。那些保护我们的机构相互间必须有交流，以便在互相矛盾和不确定的标准面前保持一致性和合理性。对于风险的估计甚至已发展了一种完善的方法——这就是本书讨论的问题——这种方法应该得到公平的应用。

风险亚文化群在此发挥了作用。有会议、演讲、论文、报告，甚至还有聚会，通过这些手段交流信息，像现代约翰尼苹果种子公司这样的开业者则在整个团体中宣传一种一贯性。所有的科学都是这样工作的，即正式或非正式地为这种技术的实践设立协调一致的标准。任何一个人想知道某些深奥学科的知识——例如泥浆的液流学或线性文字的句法——会感到很难找到一个了解这方面的知识的人。然而，一旦找到了一个这样的人，也就找到了这个领域所有的人。（这就是“深奥”的意义。）知识的流传来自于信息丰富和好奇心强的人组成的各个相互作用的团体的活动，这些人偶尔以书面形式记录下他们的产品。

很容易忽视的一个事实是这种相互补充在政府的一致性中发挥了巨大的作用，1984 年，白宫的总统人事办公室公布一项声明，声称不再允许任何人在一个以上的总统机构或委员会任职。如果这项声明得到遵守，它将立刻使各种职务相互隔离。原因是：“有一大批合格的候选人……这将为那些渴望

为总统服务的人提供许多机会”，换句话说，为忠诚的人提供工作机会。这一法令基本上被置之不理。（那些对政府工作没什么经验的人中普遍有一个误解，他们认为颁布一条命令就意味着这条法令会在实际中实施。事实上，有许多法律、法规和指令对大多数人没有任何影响。制定法规的是积极的实施或活跃的律师，而不是法规本身。）

另一个纠缠不休从而促使我们制订管理计划的是新闻媒介，包括电视。而新闻媒介对风险的解释是决定性的。美国不管怎样是一个民主社会，我们是从叫嚷声音的大小来判断事情的重要性的。作者并不同意一般的观点，即记者们日夜制定残忍的计谋来歪曲人们说的话，颠倒是非，但我们从新闻报道中读到的东西，特别是有关风险的东西，确实不够准确。几乎所有的记者，在其他条件相同的情况下，都愿意他们的工作干得好而准确，而不愿干坏，但其他条件却很少相同。在技术问题上，某些事实也许还处于争论之中，也许还不太清楚，问题也许很深奥，也许有人在掩盖事实，也许在新闻报道发稿时调查还未完成，等等，但记者不得不干他的工作。在最好的情况下，他是一位新闻专业毕业生，只有最大、最好的报纸（最大的报纸不一定是最好的报纸）才负担得起科学作者。

由于我们的新闻媒介几乎都是商业性的，好的故事比坏的故事更可能先获得昂贵的设备。（不管是新闻还是日间连续广播剧，广告负担费用，因而广告进入了人们愿意看的电视节目和愿意读的报纸和杂志。）因此我们强调瞬间事件和罕见的疾病，以使人们认为报道的完全就代表了事情的实际发生。这里并不含有恶意或不良行为，只意味着那种人们对有趣的事情更感兴趣的正常倾向，认识到这一事实的新闻机构比未认识到这一点的更有可能获得成功。

在有关管理的章节里提到这些是因为管理机构中的人（更不用说议会了）也看新闻报道、看电视，也由他们读到和看到的东西来引导他们选择优先考虑的事情。我们对我们发党的风险作出反应——除此之外我们又能怎么样呢——并且对不确定性表示特别的关注。由于我们的制度是民主制度，我们的政府与任何迎合我们的猎奇心理的商业机构不会有什么区别。国会议会或市议员或县长若因他们的选民不知道自己在说些什么而让其滚蛋，那他们在自己的位置上就呆不长了。

最后，经常发生的情况是，凌驾于所有这些管理机构和其他势力之上的是法庭。法庭是解释有关程序、权威、法律和宪法方面的争端的合适仲裁者，它们还常常在解决技术争端时有最后发言的权利。这一概念使人感到莫名其妙，因为法官（或者甚至是陪审团——我个人的经验是受过技术教育的人在挑选陪审员时就被自动剔除）所受的教育及其经历并没有为其担任法官作过什么准备。经常地，对于被讨论的技术问题，甚至没有一个明确的或为人们普遍接受的答案，科学家不会因一个问题没有答案而烦恼，而法官和律师却很烦恼。他们倾向于认为证人或许没有作足够的努力，或许有人在掩盖什么东西。

在一个案子中，一位法官对与一件事的概率有关的任何证词持怀疑态度，他说否则意味着他在赌博，而且“法庭不是赌注登记处”。他的裁决后来被最高法院推翻了。

我们也许会由于独立性和献身精神而发现一个更为糟糕的解决技术分歧的方法。我们这样做是因为当然的立法者议会很少清楚要寻求多少安全，因

此就把法律写得很含糊。没有人特别恶劣或愚蠢，对于我们的目标和宗旨没有政治舆论。当议会偶尔很具体时，如在有关食品的致癌添加剂问题上，我们会看到它的努力获得适得其反的后果。

试图详细描述每一个机构的责任和做法是不可能的（也是不合情理地枯燥），而彻底的概括也没什么好处。这些事情最好以举例来说明，在第二部分我们做这些事，我们将通过管理体制来追踪一些真实的案子。

这里有一个焦点问题，即一个几乎是普遍的合理的管理的障碍是法律不能确定可接受的风险程度和我们愿为此付出多大代价。这使得那些管理机构的工作不仅仅是从事管理——它们必须在确立管理的标准时作出裁决。它们既是执法者，又是立法者，这意味着我们从中学的公民权课上学到的理论——制定法规的人最好不是实施法规的人——就管理机构来说是站不住脚的。

因此，一个典型的管理机构把其工作分为两部分。首先它必须审定它按其运转的法律的内容，然后把审定的内容定形为一套法规。接着可以实施法规，而不是法律。这种安排对那些被管理者来说也更好。法律的一个普遍原则是，需要坚持一种要求的人知道这一要求是什么。生活不应该像卡夫卡的小说那样，有人被指控犯了罪，却不告诉他犯了什么罪。不幸的是，仲裁标准可以有自己的一套系统，仲裁标准成了目的本身，而不是对目的的不完善的表述。

因此，在高速公路上开车速度过侠是危险的，但什么是过快？大多数的州立法律会说“从周围情形来看太快”，但这还是回避了问题。法律的实施使得有必要把某一速度定为明显的极限，意思是超过这一极限的速度就被定为危险的或明显是危险的。“这样，速度限制就成为可实施的安全替代物。

此外，在美国的大多数州里，血液中含 0.1%的酒精浓度被定为酒后开车的推定证据，（典型的情况是，警察在 0.05%至 0.1 %之间有某种斟酌决定权。）而在 0.05%以下，司机被推定为处于清醒状态。幸运的是，对飞行员我们有较为严格的联邦标准——血液中酒精含量不得高于 0.04/，而且至少在喝酒 8 个小时以后才能飞行。因此一位被认为是喝醉了的飞行员如果去开车，不一定会被认为是喝醉了的司机。在处理飞行员、司机或其他干关键的工作的人除酒精以外的其他麻醉品中毒时就没有这么准确，我们还未就一个类似的标准达成协议。这使得法律的实施更为困难。（联邦航空规章对飞行员的酒精摄入量规定很准确，但对其他麻醉品却只是说，任何人都不应该在其体内麻醉品含量足以影响其安全的情况下飞行。谁能确切地知道这到底是什么意思呢？）

‘ 0.1%的酒精限度是任意决定的，只是为了使法律实施容易一些，使得官方不必证明喝了酒的司机是否真正受到了酒精的影响。在美国首都华盛顿，过去的限度是 0.21%，现在是 0.1%。在我写作本书时，有 4 个州（加利福尼亚、缅因、俄勒冈、犹他）血液中酒精标准定得较为严格，是 0. 08 %，而佐治亚州较为宽松，为 0. 12%。美国医疗协会鼓励在所有的州采取 0.05%这一标准。后者体现了任意管理标准的一个普遍特性——政治上的考虑预防了这些标准的放松，而且总有不断的压力使得这些标准更为严格。玩世不恭的人把这一过程称作齿轮运动，这一标准一开始是任意决定的，在提高这些标准时也一样是任意的。

面对这种任意性，充分安全的实际定义成了一个水准，在这一水准上，政治压力消失或者预算用尽，这两者几乎是一回事。由于社会资源有限，对

于不存在的或轻微的风险花费过多的注意力不可避免地要减少为处理真正风险所作的努力，或者说，会减少为饥饿的人提供食品所作的努力。

新的政府有时一开始要“整理屋子”，因为几乎每个人都承认一些官僚机构的存在，完全与我们的切身利益无关。里根政府 1981 年就职时也不例外，总统签署了一条行政命令，要求任何 机构，在颁布一项重大条例时，必须证明其利得大于成本。有谁能反对呢？这些话是无懈可击的：“机构应以社会利得的极大化为目标制定其优先管理的事项……”，换句话说，要证明你所作的事利大于弊。他甚至走得更远：“行政决定应以大量的有关需求的信息为基础……”，以及“管理活动只有在其社会的潜在利得超过潜在成本的情况下才可以进行”，还有“管理活动的目标应是社会利得的极大化”，等等。法令还规定要作的“管理影响分析”应考虑到“不能以金钱计算的益处”，这大概是为了处理像美丽的日落和红杉树这样的问题。

可预见的结果是，政府被指责为对人的健康和安全过于冷酷无情，而各个机构（正在做管理工作的）找到许多方法来绕过这一命令。实施成本利得战略的一个基本问题当然是那些获得利益的人很少付出代价。因此，尽管从理想上讲，可通过利得与成本的比较来使社会的总利得极大化，但政治也许无法在赢者和输者之间找到平衡。有些反对增加发电量的人的立场是，唯一的受益者是电力公司，它们从出售电力中获得利润，而电对消费者没有任何好处。所有的管理机构忙于管理工作，常常无视社会的代价。

这是管理的羊角理论——如果花的是公款，那么要确定其来源就非常困难，而且节约的动力极少。受益者是可见的，而付钱者却不可见。如果有人声称，判断一件对公众有好处的事，不仅应该看到它有好处，还应该看到它是否有足够的好处，那么这人就遇到了麻烦。

在游戏数学理论中有一个概念叫作“零数目游戏”，即一个游戏者只能在牺牲另一个游戏者的利益的情况下才能赢——不可能所有的游戏者都赢。纸牌就是这样一种游戏，每个玩牌的人都认识到他与其他玩牌的人相对立这一事实。我们很少有人认识到，为公益使用公款，包括管理，具有这种游戏的许多特点。资金来源于某地和某人，它使我们失去了选择于其他事情的机会，尽管我们也许不能确定干其他什么事。

羊角在希腊神话中象征丰饶。（译注）

考虑到成本和益处，决定管理的适当水准的问题就成为最复杂的问题。一家核工厂在证明它的运转“不会给公众的健康和安全带来不适当的风险”以后，它的运营许可证就颁发了，这就是标准，从来没有人规定过多大的风险是适当的，而当提出这个问题时，通常都是一阵令人发窘的沉默。这一论题可普及至所有的管理活动。

第七章　生命的价值

怎么会有生命的价值这个论题呢？大家都知道生命是无价的，生命的价值这个问题无需讨论。但这里存在一个问题，如果我们不能决定“合理”一词意味着什么，那么我们应该作出多大的努力才能把风险限制在合理的水平呢？作为一个社会，我们确实不能表现得像是生命真的是无价的那样。

为表述这一观点，我们可以下顾所有的社会、道德和精神方面的问题，从粗略的经济角度来估价一下生命。以美国为例，1988 年，我们的国民生产总值大约是 42，000 亿美元，而美国人口大约为 2.4 亿，因此人均国民生产总值大约为 17，500 美元。假设平均寿命为 75 岁，那么每人一生的总产值大约是 100 多万美元，这最粗略地估量了我们在地球上的有生之年所创造的价值。我们应该非常严肃地对待这一估量方法，原因有很多。如果一个人在钻井时发现了石油，他能否被称作具有生产力？如果一个人种玉米，伐木，踢足球，当摇滚歌星，他能否被称作具有生产力？所有这些对国民生产总值都是有贡献的。那么，窃贼或毒品贩呢？因此，给生产力下定义并不容易。

假设所有这些工作都被称作具有生产力，我们还是不应该有把人当作生产机器的想法。如果是这样的话，他就需要一定程度的支持性服务：燃料（食品），使之不受风雨侵袭（住房），保养和维修（医疗和牙齿保健）等等，这些东西将蚕食掉他或她表面的生产力，正如这些支持性服务会蚕食拖拉机或割草机的生产力一样。人需要保养，甚至需要娱乐，而机器却不需要娱乐。

稍加思考就会发现，普通人一般盈亏持平，他在一生中创造的东西大约相等于他的消费。一个发展的社会可能会有纯生产优势，但也可能会有相反的情况，不管是哪一种情况，差额都不会大。在美国，在我撰写本书时，我们的消费超过产出，所以我们的国家对他国的负债越来越多。这种状况不会无限期地持续下去。我们在第三章中提到过，个人在其一生的不同时期的生产力也各不相同，人在中年时期产出多于消费，而在童年和老年时期消费多于产出。这是个社会契约，由文明的外表所维持，以团体生存的需求作为其实际基础（就儿童而言）。许多社会，而且事实上是许多物种，都未能生存下来，这个事实太容易被忽视了。前面曾提到过，物种生存是我们对后代的唯一最重要的职责，但它却未得到保证。

我们不能通过这种冷酷的分析来获得对生命价值的合理估价，以此来处理风险问题。上文描述的这些计算方法通常用于法庭审理非正常死亡的诉讼案，但它们通常只处理方程的一边——个人的潜在赚钱能力，而从不计算保养费用，这就相当于在结算一个公司的帐时不算所有的开支记录。我们确定生命的价值几乎与生产力无关。

了解一件东西的价值的另一种方法是使用供求规律，让市场自行决定。这种方法在这里没多大用处，因为人类面临的主要问题无疑是人口过剩，而供过于求在自由市场上会促使价值下降。我们无法用这一逻辑来指导我们理解生命的价值。这里存在着一个悖论，但随它去。我们最好也不要用生产的费用来衡量价值，因为众所周知，人是可以大批生产的，成本很低，只用非熟练劳力就可以。以上提到的市场手段都没多大用处。

然而，我们可以问一问，我们的社会对生命的估价是否表现为我们每天决定花多少代价来限制风险。对这些事情所作的决定体现了我们的集体以及个人对生命价值的态度；在自由经济中，态度决定所有商品的价值。1987 年，

美国所得报酬最高的人都是娱乐界人士，其收入最高达 5000 万美元（职业拳击家），其次则是一位摇滚歌星，那是对其服务价值的定义。有些人也许觉得这是对价值概念的荒唐歪曲，但很少有人不觉得自己的工资不够高。

我们的日常行为中也有确定有关生命价值的迹象，其中有三点是人们最常提到的。我们给人奖金让他们干有风险的工作，我们的民主政府以有限的预算来减少威胁生命的风险，我们的管理机构建立了似乎可接受的事实标准。显然，这些都不是独立的，它们都是在现金成为问题时生命的自由市场价值的衡量标准。我们说的还是美国——不同的国家有不同的观点。（博帕尔灾难以后，印度的要求索赔者希望在美国的法院审理损害诉讼案，因为在美国法院容易给生命确定较高的价格。）

对于干非常危险的工作的人来说薪水刺激很常见，它一方面是一种补偿危险的形式，另一方面也诱使人们签约被雇，（所有的薪水，以及贿赂和小费，都有补偿和刺激两个目的。）从原则上说，问一下用多少薪水奖励才能使人们被雇干危险的工作可以查明人们如何确定自己生命的价值。当然，有时这种解释会造成一个问题，对于军队的战斗薪金和飞行薪金来说，增加的薪金与增加的风险几乎没什么关系，而且其环境也不是自由市场的环境。

然而，这种研究倾向于把对生命价值的估价定在几十万和几百万美元之间，这可以从接受工作和提供工作的人身上看出来。

这种估计生命价值的方法的最大问题是，几乎没有什么工作有丧失生命的重大危险。有些人确实觉得他们是在冒着生命危险谋生（例如汽车大赛和摩托车特技），他们的工作确实因某些人的喜好来说风险太大，但大多数这种胆大妄为的人最终死于与我们所有的人同样的痛苦。他们因其工作的娱乐价值而得到很高的报酬，而这种价值又由于风险观念而得以增强。

风险不太大的工作刺激则较小，因此它们不能对隐含的生命价值给出较好的估价。如上述的这些估价把生命价值定在几十万到几百万美元之间，但人们对小风险的感觉不太可靠，因此这些估价的用处也不太大。

本人每年总要飞越 10 万英里，搭乘航空公司的飞机，其乘客死亡率大约为十亿乘客英里分之一，因此死于与工作有关的飞行事故的概率大约是每年万分之一。这大约是被谋杀和自杀的风险相加之和的一半，不需要任何薪水奖励。即使对被更广泛宣传的职业风险来说，例如一辈子在煤矿或铀矿中工作，或教书（教授有时被遭受挫折的学生开枪打死），实际的风险也很小。为生命确定价值的第二个方法——政府为保护我们所愿提供的开支怎么样？这里有充足的证据，范围是从花在道路和医院的开支到把强放射性废料置于生物圈之外。匹兹堡大学的伯纳德·科恩教授研究了政府的各种开支，结果发现我们毫无计划，在有些风险领域我们的支出很少，而在另一些领域我们的支出毫无限制。

高速公路的改进，例如建立护栏、警告信号，较好的保养等等，能够以较低的代价拯救生命——即每条生命为 2 万至 5 万美元。如果生命值 100 万美元的话，这就很便宜了。在另一方面，我们在一些问题上乱扔金钱，又不能拯救多少生命。科恩估计，煤矿安全的开支相当于拯救一条生命，需要 2200 万美元（1975 年的美元价值）。当然我们应该努力拯救矿工的生命，但我们可以用同样的费用拯救更多司机的生命，矿工好像比汽车里的人价值高。也许是我们把矿工看成了不能自助的受害者，而认为司机应对其自身的安全负责，或者也许是没有司机工会照管他们的福利。不管是什么原因，这种对比

很有趣。甚至还有更加极端的例子。

科恩还发现在印度尼西亚投资扩大免疫计划可以以每条生命 100 美元（还是 1975 年的美元价值）的代价拯救生命。我在大约 10 年以前第一次听说这事时，对我的一班学生提到这事，建议全班捐献 100 美元，每人捐 1 美元，给将寄往印度尼西亚的一项基金，用来拯救一条生命。然而，没有一个人捐款。

这里的问题都不简单；对于生命的维持本身就存在深刻的伦理问题。如果在不久的将来有更多的人死于更严重的问题，如果不可避免的结果是晚些时候更多的人死于饥饿，那么从道义上讲绝对必要的饥荒救济会怎么样？人若要问心无愧，就必须毫不犹豫地帮助饥饿的人们，但在许多情况下，从长远来看，同情的害处大于益处。

另一个例子人们更为熟悉。运输部估计强制使用安全带将以每条生命 500 美元的代价拯救生命。代价很低，主要是实施法律的代价——汽车上已有安全带：而对拯救的生命，尽管某些公共鼓吹者——很可能是运输部——可能有些夸张，仍然很可能是大量的。从理论上讲，我们任何一个人都毫无疑问会投票赞成以这样低的代价拯救生命，但强制使用安全带的法律却不得人心。第十三章中会继续讨论这个问题。

我们并未从通过（民主）政府为保护生命所花费的资金来了解生命的价值中得到多少结果。被拯救的每条生命价值各不相同，从较低的几万美元，或甚至更低，到几十亿美元（强放射性废料处理）。有些代价很低，但都是一些不大引人注目的形式——公路修缮，医疗检查，安全带，等等——而煤矿安全这样的选择是另一个极端。照常，我们的决定与风险的概念和风险的实质同样联系密切。想一想我们愿意花多少钱拯救一位困在大空中的宇航员，以及我们为赎回被恐怖主义扣压的人质花了多少钱。在后一种情况下，我们的同情心使我们（并不仅仅是我们）对恐怖主义以后的行动提供了支持。

测试生命的价值的第三个方法是着眼于那些负责保护我们的管理机构的行为。这些机构的资金间接地体现了纳税人所关心的问题。这些机构对选民和国家给它们施加的压力作出反应，它们的行为应该体现我们自己对生命价值的观点。

这里，我们发现的一致性比我们预料的要多，特别是因为这些机构必须在几乎没有什么指导的情况下制定它们自己的标准。各个机构都相互抄袭，并了解法院、议会及公众会接受什么。接受什么有时取决于这样的事实，即没有现成的技术把风险降低到“可接受的”水平，无论付多大代价。因此，只有关闭整个工业才能减少风险，而出现这种情况时我们就不那么理想主义了。（如果代价不太大，我们总是愿意在很高的道德水准上行动，但一旦我们的财力成为问题，我们就失去了热情。）

一个来自橡树岭和剑桥的小组在是否进行管理的决定涉及对生命的估价时，分析了负责保护我们不受化学致癌物侵袭的管制机构的实际行为的抽样。涉及到的化学物质有几十种，而抽样的模式很明确：如果每个生命估计可以以不到 200 万美元的代价拯救，对有关致癌物的接触就受到管理；如果代价比这高，则不受到管理。此外，有些危险很小的物质未受到管理，因为该风险被看作是本质上可以忽略的。分界线并不明确，但各个管理机构在工作时却采取相似的行动。人们不应对此感到太奇怪，因　为在上一章中我们提到，风险亚文化群在各个机构之间提供了一座桥梁。

从所有这些估价生命的努力中我们可以得到什么呢？　首先，我们越来越认识到人不能只是简单地采取生命是无价的、应无限地使用财力来保护生命这一“合乎道德”的立场。在一个资源有限的世界中（也就是这个世界），在没有多大益处的地方浪费资源不可避免地将剥夺其他值得的活动，最后的结果是丧失生命。想在一切地方做好事的人会妨碍那些试图在某些地方做好事的人。

其次，开始摆脱了生命的价值应以个人一生的赚钱能力为基础的想法。尽管有许多法律争端以这种方式解决——一位成功的总经理的家庭在非正常死亡诉讼案中得到的赔偿比一位工人家庭所得到的要多。这使得确定生命价值的逻辑基础特别难以找到，因为生命价值必须在不知道个人的任何背景情况下确定。

这一点由 1978 年西弗吉尼亚州一工地发生的事故引起，当时未固化好的混凝土塌陷了，　51 名建筑工人死于非命。在以后的几年中劳工部职业安全和健康署努力制定使用这种温凝土和砖石建筑的安全标准，这也就不可避免地要面对工人的生命价值这个问题。提高标准的代价非常实际，并将通过提高建筑造价由消费者支付，但其益处则体现于被救工人的生命价值之中。这些生命的价值不如那些公司总裁，或飞行员吗？最后，劳工部职业安全和健康署作了一个生命价值范围的分析，这个范围是从 200 万美元 500 万美元，远远高于有关工人的一生挣钱能力，即“人力资本”价值。

第三，州一级或地方一级政府没有什么一致性，即使有也是很少，在那些地方，拯救生命活动的估价范围非常之广，没有什么明显的基本原则。一个人能够或者应该对这些事情进行分析的想法还不根深入。地方和州立政府对选民作出敏锐的反应，设立红绿灯是因为公民要求设立，而不是因为它们将拯救生命。

第四，各联邦管理机构事实上似乎已一致地把生命的价值估计为 100 万美元左右，上下浮动 20%左右。也有一些不切实际的过高估计的极端例子，但很少。当然，当政府行动的可行性取决于生命的价值应定为 999.999 美元还是 1，000，001 美元时，这一决定则是根据其他因素作出的，就像应该是这样的。决定有时候很难只根据逻辑分析来证明其合理性——谁会用计算机来决定是否去赴一个约会呢？值得欣慰的是，如果一个决定介乎两者之间，双方的论点具有基本相同的说服力，那么走哪条路大概关系不大。

最后，任何人若想为人的生命确定一个金钱价格，他必将招来自命为他人道德管理者洪流般的诽谤。

第八章　怎样安全才足够安全

这就是困难所在。这是所有风险管理所围绕的中心问题，它把在我们的头脑中彼此分离的两个问题对风险的估价和对风险的管理放到一起。两个问题都可以顾名思义，第五章讨论了前者，第六章讨论了后者。管理是指如何限制风险，估价则是确定结果是否令人满意。这两个问题很容易混淆。

风险管理可在没有风险估价的情况下进行，正如不记录棒球队员的安打率、投手责任失分率、各个队员的特点甚至比分本身，棒球赛也一样举行。但从长远来讲不作风险估价就不可能有效地管理风险。同样，有一些棒球迷（通常是青少年，但也不是绝对如此）一直记录那些统计数字，但对他们这些记录却没什么真正的用处。用最得体的话说，他们是业余爱好者。在风险估价这一行业中，许多人在作估价时从未想过这些估价如何或是否能用来改进风险管理。

这并不是无关紧要的事。收集和解释知识本身就具有意义和价值——这是纯科学和数学的内容，我们有很多事情都应归功于它们——但如果它们被用来改善我们在生活中的行为，其价值就会增加。在对基本的知识了解最少的情况下也有可能在生活中做一些有创造性的和有益的事情，但了解知识会有用。在大部分领域甚至风险领域都有热情的业余爱好者。

从理论上讲，解决“怎样安全才足够安全”这个问题的最简单的方法就是拒绝整个想法，并主张在任何一项活动中我们都应该花费所有可获得的资源来减少风险，像中世纪的骑士寻找圣盘一样寻求一个无风险的世界。成功的机会也许会小一些，圣盘也许曾经有过。第四章中提到的许多机构公开表示追求风险的消除，尽管这些机构在与专家对话时通常否认这一点。它们认识到这种立场虽然是站不住脚的，但它起码不存在内在矛盾，在面对风险时，人们努力去消除风险，并只有当资源用尽时才停止这些努力。

不幸的是，我们的许多法律被法院解释为禁止管理机构在决定怎样安全才足够安全时权衡减少风险的社会和经济代价。因此那些机构只剩下成群结队的律师，他们在挣扎着为合理的妥协辩护，与其他成群结队的为严格遵守起草得很马虎的法规而辩论的律师开战。有些机构——例如粮食和药物管理局——在不涉及食品的致癌添加剂的其他案子中运转得很好，用简单的任意性来决定“怎样安全才足够安全”。这样做很有效，条件是立法允许这样做，粮食和药物管理局在这一点上很幸运。对于一个科学家，要说出这一点是很痛苦的，我们有时把精力太多地投入于对技术上的细微差别的争论，以至只能让一个不太博学的人来作决定。任意决定并不都是坏事，特别是在它如果能体现一种基本的哲学的时候。

没有任何战略也能进行下去，不过只是不稳定，每个决定都是为了应付眼前的压力而作的。这被称作市场手段，除了对市场的压力作反应之外没有一贯的基本原理。基本的设想是自由市场的人们将为他们真正想要的任何安全付出代价，而找到这一水准的最佳方式是把整个事情拿出来招标。这样做比较容易。粮食和药物管理局首先收集有关的数据，以制定可能有毒的食品添加剂的任意的法定容许量。除非受到就致癌来说的德莱尼条款的限制，它考虑到动物试验，人类的体验，可能接触该种物质的人数，以及对食品供应的影响（而非对这种食品的生产者的经济影响）。接着根据最佳判断确定法定容许量的水准。没有适合一切案例的精确标准，也没有人声称有这样一种

标准。

粮食和药物管理局于是受到来自几方面的评论和压力的轰击，一方面来自那些认为法定容许量太高的人——常常是消费者团体；另一方面来自那些认为法定容许量太低的人——常常是生产者团体；还有来自国会的，该机构总是卷入诉讼之中。这种公开的任意决定的方法具有自由市场体制通常的优点和缺点，包括浪费人力资源和持续冲突的缺点。这不是一个不合理的妥协。确立法定容许量的标准一直很模糊（有人怀疑是故意的），但辩论一直没有结果。人们并不期望民主制度是一种有效的政府形式，它只是比其他可得到的选择优越一些。在写作本书时，甚至还不清楚民主制度是否一种可行的长期的政府形式——几百年的历史几乎不能构成充足的证据——但这是一个比技术风险更为重要的论题。

一个与怎样安全才足够安全有关的方法是事先就完全任意地确定风险标准——不作分析，但根据公众能够忍受的程度——然后忘记这些标准是任意决定的。例如，环保局最近放松了一些环境污染物的标准，包括二恶英和铅，力求把人口风险的标准统一定为人在一生（70 岁）中过早死亡的机会为百万分之一。（这一任意选择的风险标准在整个政府中得到越来越多的应用，大概是因为它是一个整数，而旦对大多数人来说，它是无风险的同义词。）环保局又一次遭到环境组织的辱骂，环境组织较为一贯地要求尽可能严格地管理污染物，它们通常不加思索地（作者明确认为）反对任何确定数量标准的努力。任意决定的确会遭来法律的攻击。

不幸的是任意确定标准的风险管理方法未能充分考虑到风险估计中的不确定性。当我们在第五章中讨论 N 的平方根法则时，是为了说明这里所讨论的这种风险——某种特定的污染物造成一种低概率癌症的风险，各种癌症造成的死亡占死亡总数的 22%——极其难以用数量表示。在估计中有相当大的不确定性，而政客们可以为自己的利益利用这些不确定性。那些认为癌症是一种不必要的病痛，应通过管理予以消灭的人只需在不确定性范围的边缘上通过对概率的最坏情况协估价就能得到指导。

在核能问题上，核管制委员会通过颁布一套正式的“安全目标”来面对这个问题，安全目标详细、准确地说明了核企业将给公众带来多大的风险——与生活中的其他风险以及其他发电技术的风险相比较。尽管这些目标完全是任意决定的，但它们直接以核风险与其他风险的比较为基础。核管理委员会缺乏对风险和益处进行比较的法律权威。因此核能风险中的误差与比较风险的误差合在一起，这种情况使其对最坏情况的处理异常容易。

误差并非无关紧要。每位司机都知道如果公布的速度限制是每小时 55 英里，车速达到 60 或 65 英里而不被发觉是可能的，只要车速的测量中有一点点误差。法律实施机构考虑到这种误差，只传讯那些明显的，而且可以证明是在超速的司机。但如果误差不是每小时 10 英里（比如），而是每小时 50 英里呢？那么误差的范围是每小时 5 英里到每小时 105 英里，速度限制会成为一个非常无效的执法工具。核误差比这还要大。

此外，在比较风险时有某种缺乏逻辑的成分，生活中除了避免风险还有其他更多的内容。风险减少并不自动意味着生命质量提高。对发电带来的风险和抽烟造成肺癌的风险进行比较的这种论证更是站不住脚，这两者彼此之间确实毫不相干。

另一处理怎样安全才足够安全这个问题的方法是成本利得分析，这是各

种方法中最具分析性的，也是风险分析家们最喜爱的一种方法。你只要尽己所能根据数量来计算我们所讨论的枝术风险——所有风险，包括美丽的日落和生命——然后再同样来计算利得，所有的利得。根据这种对代价和利得的分析就可以确定最佳的决策。这就是 1981 年行政命令的意图。不幸的是要实施这一命令极为困难，人们往往对事物怀有个人感情，一旦有人对事物进行不受个人情感色彩影响的分析，他们就感到不满。汽油罐事件就是一个恰当的例子。

代价 利得分析的一个最大的优势是不能忽视安全的代价。作好分析很难，这一点与根本的合理性无关——值得做的事也值得做得很糟。

由于加强安全的大部分代价由较大的非个人组织承担——政府、公司、整个工业——因此人们很容易忘记资金必须来自我们社会的资产。（记住一方得益相应地引起另一方损失的零数目游戏。）在我们要公开为某件事情付出代价时，我们往往对要用金钱换取的东西较为苛求，但相反地，我们在童年时代就学会对礼物不要太挑剔。那些表现得好像减少风险不需花钱的人犯了实践风险管理羊角理论的错误，我们在第六章中提到过这一点——如果付出代价者的知名度不够高，他们可被假设为不存在。而我们大家最终都是付代价者，我们应该确信，即使是从无形的税款中我们也需要找出自己的金钱的价值来。代介利得分析，不管在实践中多么不完善，是作这项工作的一种方法。

这不仅仅是个省钱的问题。尽管社会并不完全是一个零数目游戏，但确实存在对资源的竞争，在无效或不当的减少风险的努力上浪费的资产必定来自某个地方。我们现在所作的某些把风险减少到最低限度的事情有着相反的效果，同时又在浪费我们的资源。在拯救下个世纪的每一生命的渴望中，我们在牺牲我们现在的朋友和邻居的生命，这当然不是故意的，但却有同样的效果。

一旦怎样安全才足够安全这个问题被确定，还存在的一个问题就是：风险估价这一工具是用来以管理减少风险，还是用来评价管理的有效性。这两者不一样，在前者，每个管理机构的决定，或每个社会的决定，在实施之前都必须经过估价并通过怎样安全才足够安全的测试。在后者，将根据其他标准来作出决定，分析的作用将只是判断其他标准是否恰当，即通过怎样安全才足够安全的测试。如果在分析中没有不确定性，前者是合理的，它为决策提供了一个公正的方法。

但是不确定性不可避免，而且我们不是自动器，因此，我们实际上是根据我们所拥有的所有信息来作管理决定的，那些信息并不全是客观信息和数量信息。风险估价可发挥不同的作用，以回答这一不太有规则的风险管理形式是否能够满足怎样安全才足够安全的决定这样的问题。那么这是估价病人健康的事情，而不是对诊断和治疗疾病的证实，它更加适合于风险估价技巧的目前状况。

不幸的是，正如本章开头所述，管理和估价往往会混淆。这是写书和评书之间的区别——二者都是光荣的事业，但其中一项比另一项难，且需要不同的技巧。许多机构不愿使用数量风险估价，其原因有二：一是担心估价会干扰正常的决策过程——这就是上面所述的混淆——二是一种自然的但不是值得称赞的对别人估价其行为的厌恶，免得别人发现他们的愚笨。

怎样安全才足够安全这一问题没有一个大家一致同意的答案。但一个珍

视其资源，认识到在一项事业中消耗了的资源无法用于另一项事业的社会必须提出这个问题并努力回答这个问题。即使没有一个被普遍接受的答案，特别是在一个分享民主社会，面对这个问题显然是走向合理地管理风险的第一步。正如前面所说过的，任何值得做的事情值得做得很糟——这样我们才能学会做好它。一个人是怎样学会拉小提琴的呢？

第九章　不确定性、因果关系、可探测性

如果一件事直接导致另一件事，它们则被称作具有因果关系——从高楼上跳下肯定差不多会摔得血肉横飞，古老的俄罗斯轮盘赌游戏也是这样。但俄罗斯轮盘赌并不只有一个结果，也有可能幸存。同样，去蚊子横行的中非丛林旅行也不一定会导致疟疾，尽管有此可能。结果中有我们所称的不确定性，在这种不确定性中概率的使用是最经常的，正如我们一直用到现在的一样。

如果我们把因果顺序倒置过来，讨论还是一样的。在上一段中，我们在知道原因的情况下讨论了结果中的不确定性，而当我们知道结果时，也许很难确定原因。国家运输安全局负责调查交通事故（还有其他职责），它因为第一个出现在重大飞机事故现场而著名。最后，它起草一份确定事故的“可能起因”的报告。一般说，原因会有好几个，不可能确定哪一个是真正的原因。这就是不确定性。

在风险分析中使用因果关系涉及两个方面的不确定性。一个原因不一定只有一个后果，一个后果也不一定只有一个原因。重要的是要强调这种不确定性是内在的，而非没有付出足够的时间和努力得出结果。

这是法律体制的一个问题，人们认为法律体制应适合于这一想法，即作出足够的努力雇用足够的专家就可以找到一个不幸事件的原因。但事情并非总是如此。

在过去几十年中法院已倾向于严格赔偿责任，确定应负责任（因此也是担负损害赔偿金）的人，其主要的罪恶在于参与了导致损失的最后的一连串事件，而且——最重要的是——有钱支付。这已被人们称之为“深口袋””问题——不要向过失最大的一方索赔损失，向最支付得起的人索求。这是一种重新分配收入的方式。最近法庭上一个民事诉讼案中的索赔事件要求人们表明被起诉的一方犯有疏忽的过失，这越来越不正确，原因在于太需要一名罪犯。有人争辩说被损害的人应该获得一些补偿，因此应该有人付钱。承认原因的不确定性的一个间接方法是让最富的人支付。

肺癌是一个更微妙的问题。毫无疑问在过去几十年中吸烟造成肺癌的增加。（男子 90%以上的肺癌是由于吸烟，妇女的比例较低。）尽管如此，法院仍在拼命地处理这样的问题，即任一具体的肺癌病例是否吸烟引起的，合理的怀疑已为烟草公司赢得许多案子。没有一个具体的案例可以肯定地归因于吸烟，尽管有几种癌症（鳞状细胞癌和燕麦细胞癌）与吸烟有特别紧密的关系。但相互关联并不等于有因果关系。因此大家知道这种疾病的原因，但却不知道一个具体病例的原因。

“不确定性”一词的另一种用法——在第二部分中会经常出现——在我们的了解某一主题的需求超过实际上了解它的程度时就会出现。二恶英是名声极坏的橙剂中使用的有毒微量污染物，在越战中被用作除莠剂，但人们并不知道接触到这种毒剂的部队是否遭受了值得重视的损害。这听起来和原因的不确定性一样，但实际却不然。这和适成上述事件可能有几个原因的状况有关，人们不能肯定哪一个原因最重要。在这种状况下，了解和深口袋的意思是有钱、富裕。（译注）自信地分析该案例所必需的基本科学知识就是没有。

这并不意味着我们完全无知，只是我们不能肯定。有些人激烈地争辩说

橙剂确实损害了接触到这种物质的士兵的健康，他们也许是对的，但我们目前拥有的知识还不足以使我们有可能充满自信地这样说。

不确定性并不是一个肮脏的词。每一种科学测量和每一个科学预测都涉及到某种程度的不确定性，程度不同，但总是存在的。不幸的是每天使用这个词使它带有混乱、无能和不恰当的意思。文本编辑程序中的同义词词库为“不确定性”一词提供了下列词作为可能的替代词：忧虑、怀疑、犹豫不决、疑惑、猜疑，等等。因此毫不奇怪该词具有消极涵义。在风险分析中和所有豹科学活动一样，我们从未知晓一切，也从未毫无所知，不确定性是一个合法和必要的测量我们对我们自认知道的事情有多大把握的方法。

亚伯拉罕·林肯说，“几乎没有什么事情是百分之百的好或百分之百的坏。特别是政府的每一项政策都是好坏两方面不可分割的结合。因此不断要求我们对好坏两方面孰占优势作出最佳判断。”

下面所有的例子都有估价估计中的不确定性的方法，有时候必须做到这一点。在科学中，一项测量或一个估计若没有说明其不确定性就没有任何用处。概率及其伴生因素——不确定性对了解风险是心脏和灵魂。

不确定性的幅度如此之大使得最合理的估计也只针对无关紧要的风险，在这种情况下我们也许应从律师那里得到一个教训。有一句法律格言：法律不过问琐事。它意在不让法律机制把时间浪费在微不足道的事情上。没有必要对每个案子作出裁决，不管这个案子多么平常。

另一方面，我们寻找最低水平的风险。寻求小风险当然是一件没有止境的事，因为现代技术使得我们有可能检测水准非常低的风险，这在几十年前是不可想象的。对某些食品或药物的添加剂或污染物来说，检测技术如今非常灵敏和会选择，可以检测到一种可疑物质的几个分子。把这种能力和下面这一信念结合起来，例如，如果大剂量地服用一种东西会毁了你，那么较小剂量也是危险的，你也有可能受到伤害。新闻媒介肯定会这样说，于是将开始对小剂量的危害的搜索。有了这种心理之后，对风险的寻找不可能不成功。正如几个世纪以前寻找巫婆一样。1988 年，鉴于爆发了——几乎是一种流行病——在各种消费品上添上警告标签的运动，《洛杉矶时报》发表一箱社论，建议贴上一个通用标签：“警告：据了解，活着本身就对健康有害。”这不完全是可笑的——我们可以从伊索的一个男孩呼叫狼来了的寓言中学到很多东西。贴标签中的真理是一件幸事。它一方面由于坦率而很有道理，也对那些对产品特别地抱有怀疑态度的人有帮助，它还会使我们的意识迟钝。我的微波炉上的标签警告我不要在炉门铰链损坏时使用，但并未警告我不要做其他我可能会对机器做的蠢事。它是否应该提出警告呢？那内容可就多了。

有些人会认为这不是一个有力的论据，因为一个正确的标签是有价值的，如果有人确实阅读了标签并从中获益。但克劳德·香农所建立的通讯理论告诉我们，通讯中重要的不是所传播的信号而是信号与噪音之比。（噪音是不传递信息的干扰，例如电视屏幕上的“雪花”。）不必要的标签就像不必要的规章，使我们忽视重要的事情，只能造成危害。这现在是一个熟悉的测试问题，不仅要看某样东西是否好，还要看它是否够好。

我们已说过某些管理机构似乎倾向于这一立场，即给普通人受死亡威胁的机会不到百万分之一，这种风险是可接受的。为更好地看待这一问题，回想一下，普通美国人每年被谋杀的机会比这大 100 倍，这使得百万分之一的机会看上去极小。

如果对普通人来说一种琐事的风险概率是百万分之一，那么“普通人”的意义是什么？我们应该关心最大的个人风险——与其接触最多的人的风险——或社会风险，对我们的社会的全部损害吗？那就大不一样了。有一些站得住脚的道德理论认为我们应该努力为尽量多的人争取最大限度的好处，正如还有另外一些站得住脚的论点认为我们有责任保护那些最不能保护自己的人一样。

目前我们的死亡总数是每年两百万人，加上死亡机会为百万分之一这个因素就是每年总人口中死亡两人。这两个人的死将是引起注意的非常与众不同的死亡。

有些死亡确实与众不同。1986 年挑战者号航天飞机事故中 7 名字航员的死震动了全国，它实际上使得航空计划搁浅了两年半以上。如果这种事情再次发生，并且没有令人信服的理由让人相信它不会再发生，那么这种后果趋于持续更久。在切尔诺贝利事故中，死亡 31 人（主要是死于火灾），这引起了世界的注意。我们已提到过天花已被消灭，因此世界上任何地方的一个天花病例都将是一件大事。

但如果我们正在阻止的后果不从人丛中出现又会怎么样呢？考虑一下反核团体的困境，他们试图表明 1979 年的三里岛事故在处于工厂“下风”的各个地区引起过高的癌症死亡率。那几个地区的总人口是 2.5 万人左右，因此人们可预计每年有 250 名居民死亡，其中 50 人死于某种癌症。宾夕法尼亚州跟踪研究了这件事，在 1982 年到 1984 年的三年时间里研究了那个地区的死亡统计数字。那时正常的癌症死亡人数大约是 142。

反核团体声称事故后癌症死亡率过高，为证明这一点它们还提供了一份后来证明是具有偏见的统计分析（根据宾州卫生部的论点）。在被纠正过来对，和预期的 142 人相比，被观察的癌症病例证明是 144 人，根据 N 的平方根法则，我们可预计这一数字的波动数是 12，因此 142 和 144 之间的差距没有任何统计性意义。任何低于 20%的增加永远也不会被注意到。它们的断言还有其他一些漏洞，但仅仅统计方面的原因就可以证明它是错误的。

说一种风险不需注意意味着对可接受的风险水准有着某种标准。它不一定是量的标准，也不必明确地表示出来，对这一点甚至连通情达理的人也不会同意，但它必定存在。即使在具体案例中，一些人的行为（和诉讼）似乎表明没有可接受的风险水准，但他们在抽象概念中通常也承认这一点。

然而，在涉及到具体问题时很容易犯错误。我们将在第十二章中讨论的某些食品色素添加剂被禁止使用是因为它们给人的一生带来不到百万分之一的风险，而这一数字还是夸大了的。对这种细微的威胁采取行动完全是荒谬的。一个风险被过分渲染的异乎寻常的例子是有关强放射性辐射废料的储存，它使得我们的政府瘫痪了好几年。本作者几乎没有见到任何一篇文章、一次演讲、一篇议会的证词或一个电视节目，不把这种风险描绘得确实可怕，不把长期安全储存的问题描述成超出我们的技术能力的。然而最佳估计表明，普通公民在其一生中遭受风险的机会是万亿分之一。如果这都不能忽略不计，那就没什么东西可以忽略不计了。

在其他情况下，接受适当的风险被认为是精神健康的表现；过度的恐惧（即使存在着某一水准的真正风险）被列为精神病，恐惧症。恐惧症，根据韦氏大词典，是一种荒谬的、持续的恐惧——请注意“荒谬”一词。患高空恐怖症的人超乎寻常地害怕高度，尽管高度也许真正存在着风险。恐惧症的

突出特点是把风险夸大到远远超出现实——治好这种病要花很多钱。而对社会却不能这样夸大风险，尽管一名著名的华盛顿精神病学家确实写过有关核恐惧症的文章，建议把它作为一种病症治厅。

对夸大风险的问题没有什么好的解决方法，险非使公众和国家提高认识，以最终导致更好的风险管理，在一切可能的情况下为琐事风险建立明确或事实上的标准有许多机会——我们已提到过核废料的处理和某些食品色素，其他将在第二部分中出现。在我们把时间和资源浪费在小风险上的同时我们使自己处于瘫痪状态，我们的举止恰恰像一个患恐惧症的社会。

我们可以通过一个真实的例子来表明一个极端的琐事问题，即辐射的有害后果，这将在第十五章中详细阐述。在讨论这个问题中最重要的是我们不知道少量接触是否不好，想要问一问是否可能通过直接测量来找到答案。

我们可以查看一下接触医疗 X 射线的人的统计数字，检查一下他们当中是否有过多的人遭受不良后果。对典型的医疗照射来说，这种盲目的检查从统计学上来说是毫无希望的，其原因有二。一是辐射量的大小，辐射量很小，所以最近的估测表明每一次照射引起将来癌症的机会是十万分之一。即使数字比这大 10 倍，也必须在“自然”癌症的背景下测量。死于“自然”癌症的人占死亡总数的 22%，而患癌症的人更多。

如果检查的结果是万分之一，比预期的数字大 10 倍，其背景就是五个死亡的人中有一个死于癌症。那么如何检查呢？首先我们至少要抽样一万人，否则，我们就不能指望发现一个病例。但在这一万人中，不管怎样有两千人预计会死于癌症（阻挠了癌症疗法的发现），加上两千的平方根的统计波动，即 45 个病例，即使我们准确地知道可以预料多少人死于其他原因，被抽样的人也不流动，这些人的习惯和食谱保持不变，使得有充足的时间收集数据，即使如此，一个可能的由辐射引起的癌症病例也会消失在正常情况下的统计波动中。

做这项工作需要有 2000 万个自愿的研究对象的抽样。那么，如果辐射风险的机会是万分之一，我们就会有 2000 个辐射病例，正常的病例是 400 万，其平方根为 2000，那么从可探测性的角度来看我们勉强能够扯平。如果某件事勉强可以探测，就不会有人相信。即使是这种对风险过高的估计，也只有对美国的总人口进行研究才能得到可信的结果。这种后果无法通过统计研究来探测。

这种统计问题也影响了切尔诺贝利事故的报告，所预测的未来的伤亡永远得不到注意。这并不是说这些伤亡不会发生，只是它们藏在“自然”癌症的正常波动中。当然这些受到辐射的人的健康将得到几十年的监测，因此任何要出现的后果会被认识到。

那么来自其他辐射形式的非直接证据怎么样呢？例如，宇宙射线是一种非医疗的辐射接触来源，宇宙射线来自天空，而且是无法避免的，在海平面接受的宇宙射线年辐射量比标准的 X 射线胸腔检查的辐射量要大，而后者的剂量不到上胃肠道 X 射线检查辐射量的五十分之一。

在丹佛，海拔有一英里高，其空气的屏蔽作用不如海平面好，居民接受的宇宙射线量大约是海平面地区的两倍，甚至丹佛的地面放射性剂量也比全国平均量高。我们是否应该预计丹佛的 150 万人口中的癌症病例比其他地方多？最新估计表明，预计每年由辐射引起的癌症增加两三例，原因是海拔高和土地放射性强。与成千上万的正常癌症病例相比，这些是看不出来的，即

使与一个类似的海平面城市进行比较。

同样的统计问题困扰着其他测量小风险的努力。如果我们求助于动物实验，虽然环境可以得到更有效的控制，但仍然需要大量的动物。人们谈到“百万老鼠”试验，事实上确实对几万只老鼠进行了试验，但这还不足以测量非常小的风险。在第二部分中我们还要讨论这一点。

我们对原则上小得无法观察得到的风险花费了大量的时间和努力。有些风险与生命中的正常危险相比太小了，它们应是被善意忽视的候选者（从莫伊尼汉参议员那里偷一句话），有时风险非常之小，我们甚至不能肯定它们的存在。明智地忽略它们，从事真正的生活。

第十章　保守主义的迷惑

在其基础训练中，工程师们被灌输了不可抗拒的保守地设计系统和结构的倾向。在这一行业中到处都是这类证据。表示钢的强度的表格所给的数字比钢条断裂以前能够承受的力小得多。建筑规则提供的标准和水准非常保守，人们可以从一幢标准房屋的四壁上间隔取掉一根墙筋，甚至更多，而不会对其结构的完整造成任何明显的影响。一座吊桥失去一半的垂直支撑的巨缆也不会倒塌，（塔科马海峡大桥在最后倒塌前，承受了特别的惩罚，大大超过其设计基础。）有谁没有在只允许载运 12 人的电梯中挤进 13 人而又活下来谈论这件事呢？

设什和规格的保守主义不是要强制浪费人力和物资，许多世纪积累的经验表明现实世界的情况不是总能预料的，为错误或未预见的事件留些余地是非常合理的。在任何大的项目中都会出现错误。计算机上会按错键，工人在工作时都表现出过度放任，木条、钢条或其他材料的质量会比预期的低，人们会偷窃、欺骗、开小差，同时也会犯诚实的错误，木头会腐烂，钢会生锈，等等。设计师着认为产品恰恰符合图纸或计划，或者产品永远会被在设计中想象的情形下使用，他必定缺乏智谋。如果他认为自己完美无缺，那么他也同样地愚蠢。这些是构成保守的基础。

即使这样，大楼仍在倒塌，桥梁陷入河流，大坝塌崩，飞机由于其结构失灵而坠毁。我们从经验中学会做事时以足够的保守为基础，从而保证事故不要太经常地发生，而“怎样安全才足够安全”是由大家的公认，而非由异想天开的分析来决定的。足够的安全就是东西不太经常地断裂。这话也许不太优雅，但它确实行得通。

但保守不能总用来为偶然的误差留余地，它是一件奢侈品。造一座比必要的强度强 5 倍或 10 倍的桥所需要的额外材料不仅很贵，也很重。对某些工程计划来说，保守手段还带来了不应持续或不可忽视的困难。一架符合保守的桥梁标准的飞机也许极为安全，但它将重得无法起飞，因此它也不会有多大用处。瑟伯寓言中的一个教训是，为了避免摔个嘴啃泥也不能太往后仰。因此设计和建造飞机时所保留的安全余地比桥梁小得多——商用飞机机翼的标准安全余地是 50%，这意味着它们的强度应该比需要的高 50%，但飞机的机翼在飞行中很少遭受严重的结构性损伤。因此，这一标准很有效。航天飞机结构的安全值更小，因为把不必要的重量减少到最低限度的要求更加迫切。那些余地被削减到微不足道的地步。

第一次听说商用飞机的微小安全值的人吓坏了，他们问为什么安全值不能增加，譬如增加一倍。答案当然是可以增加，但不幸的是这会减少、而不是增加飞机的安全性。认为提高机翼的强度会带来安全，这种错误的概念（这是错误概念，因为机翼极少失灵）造成的后果是，飞机的重量增加，灵活性降低，携带的燃料减少，飞行性能更具挑战性（许多事故是由飞行员的错误造成，而不是机械损坏造成的），这架飞机将是一架更糟糕的飞机。因此强度高的机翼在给予乘客平静的心情时需付出很高的安全代价。

这个例子表明一个重要的原则，也是本章真正的主题：对复杂的系统来说，保守行动并不能保证产生保守的后果。其推论是，对一个复杂系统来说，把注意力集中于其中一个独立的部分、提高这一部分的强度和可靠性，并不能使整个系统更为安全。这样做的害处也许会超过益处，希莱尔·贝洛克说，

“永远抓住一位护士，以防发现更糟糕的事。”今天的工程师们则说，“如果还没坏，就别去修。”一架经过修理的飞机的强度和重量都超过新飞机，强度影响被修理的那一部分，而重量则影响整个飞机。安全保障要求进行全盘考虑。

在设计中引进保守主义是一个蓄意的错误，尽管人们预期这更为有利。如果一位设计者假设钢的强度是每平方英寸 18，000 磅（这是常见的设计强度），而他知道在强度远远不到每英寸 10 万磅时就断裂的钢条很少见，这就是一个不怀恶意的谎言和欺骗的游戏。固然，其用意是可尊敬的，很难想象低估材料的强度怎么可能会削弱设计。这一推理在很多情况下是正确的，但不是永远都正确。

形式逻辑中有一条绝妙的公理，它极其微妙，大多数人第一次听见它时都不相信。根据理论逻辑学家的观点，下面是逻辑学的一堂短课。

逻辑系统包括一套陈述，称作命题；一套起始命题，称作公理；以及一套推理法则，即从其他陈述“证明”某一陈述的法则。最著名的推理法则是三段论法则。三段论采取下列形式：所有阶猫在有人抚摩它的肚子时都会得意地咕噜叫；菲利克斯是猫；因此菲利克斯在有人抚摩它的肚子时会得意地咕噜叫。各命题有着严格的顺序——我们许多人在肚子被抚摩时都会哼哼，但我们并不是猫。（不遵循适当的顺序就会导致排中律的错误推理，这很常见。）法则存在一些变化，还有其他一些法则。因此，有了一套公理或起始命题，就有可能探索根据推理法则可形成哪些新的公理。当这一点成为可能时，就被称作公理证明。

现在，省略“真理”定义中的微妙之处，我们可以问这样一个问题：是否所有的错误命题都能被证明是错误的，是否有任何错误的命题会被证明是正确的，是否有些命题不能确定它正确与否，整个系统实际上是否前后一致。

50 多年前，数学界获知（著名的戈德尔定理）数学中有些命题或公理是不可判定的——无法证明是正确的还是错误的，尽管从更广泛的角度来说，它们或许对或许错。有一个与此有紧密联系的答案在此很重要，它表明如果一个系统的各个公理彼此矛盾，或更进一步，其中有一个公理是错误的，那么还有可能证明任何命题的正确与否。这句话的意义并不明显。举一个简单内数学例证，我们假设一等于零是一个公理。（我们知道它是错误的，是因为有其他原因，但为进行逻辑测试，暂且假设它是正确的。）那么很容易看到，经过适当的加减乘除，我们可以进行任可算术陈述，不管正确与否。这意味着我们可以发明一种新的形式算术，和通常的一样，除了加上一等于零这条公理，这样所有的打赌都不存在了。

这与工程保守主义有关，因为对任何东西的保守性假设者是有意制造的谎言，可能会产生任何后果，不管后果是好是坏因此，保守的假设——对事实的故意篡改——总会导致保守性后果的错误，无论是一般他说还是从逻辑上说都是错误的。这是一个具有真正后果的抽象真理，我们以正式的方式表明这一点只是为了强调其普遍性。

飞机机翼的强度是一个现实生活的例子，还有其他许多例子。在著名的布朗斯弗雷核电厂火灾中，管理人员拒绝用水灭火，害怕引起电的问题（他们很保守，保守的灭火教条是对电力火灾不要使用水）。由于暂停灭火工作，他们使得大火失去了控制，在最后用水把火扑灭之前造成的损失严重得多。被严格加固使之具有足够的强度抵御地震的大楼会倒塌，而较有弹性的大楼

则不会。在中世纪，盔甲厚重的骑士往往在战斗中表现不佳　对疫苗的担心正在消耗我们对二些疾病的免疫水平，导致了一　些可预防疾病的偶发流行。在我们的一些内陆城市麻疹病例在增加。为保证需要时可以使用，在核电厂对重要的紧急状态柴油发动机进行的测试过多，这些测试使其不断磨损。如果飞机在坏天气不飞，更多的人就会开车，而开车风险更大。由于害怕辐射，不愿接受医疗 X 光检查，会诊断不出严重的疾病。如此类推。

这些是简单明了的例子，有些例子没有这么明显。低估某种材料的强度有可能觉察不到这一事实，即在强压之下它可能长时间不破裂，而给另外更重要的部件带来更严重的压力。如果南加利福尼亚的房顶坚固得只足以承受厚重的雪（这当然是愚蠢的保守主义），那么地震中它倒塌时造成的损失要严重得多。如果宇航员（这是另一个真实的例子）被迫对所有想象得到的紧急状态进行实践，那么与那些只对很少一些可能发生的紧急状态进行实践的宇航员相比，他们准备得不如后者。

最后，在计算中也有保守主义，举例说明这一点要困难一些。为保守的目的而在计算中蓄意制造错误，并不能保证其结果也是保守的。但人们却广泛认为是这样的。在申请开办核电厂的许可证时，申请者必须证明工厂能经受一个重大的丧失冷却剂事故，而规定则详细说明在计算中应制造哪些蓄意的错误（也称作保守主义）。

这些丝毫也不意味着工程设计中的保守主义不合适。本章开始时就承认保守意在预防无法预见的事。能够有把握地预见得到的少数几件事情之一就是不可预见的事会发生。但任何保守的设计最终应该被尽可能现实地看待，考虑到材料的实际性能这样的事，看一看以保守主义的形式出现的额外风险是否被无意地引进。做到这一点困难得多，很少有工程师具有必需的技术。任何一位工程师都会同意确定某样东西不会断裂要比确定它会断裂容易得多。

最后，对一个系统的性能分析，即估价，应该保守地进行，简单他说应诚实地进行，如果目的是要真正知道该系统在压力下会如何工作。可以说工程师在转入分析的角色时应戴上一顶不同的帽子。许多工程师发现这很难做到——终生的保守主义训练与之相斥。如果一项设计作得很保守而分析却以现实的设想进行，那么就会获得两全其美的结果，而且甚至会发现表面上保守的设计实际上并不保守。在设什和对设计的合适性进行判断时使用同样的手段，这其中存在着欺骗的因素，这就像自己给自己在学校的考试打分一样不对。保守的分析不应用来检查保守的设计。

第十五章将有一个有关过分热忱的保守主义的错误的特好的例子——对商业核事故的反应——表面保守的反应是得到辐射有可能释放的第一个暗示时就撤离现场所有的人。大部分事故永远不会发展成完全的灾难，因此，认为临时应急机构应按照事故会发展成灾难的设想来采取行动只能带来麻烦。人们不会在每次废纸篓起火时都从摩天大楼的窗户跳到防火网中去。根据同样的论点，我们对所有可能的战争所作的准备不应该像是这些战争一定会成为核灾难。几乎可以肯定，我们的军事领域专心于考虑核战争的可能性，这部分地造成了这样的局面：在近几年，在要求我们的军队做较低级的工作时，它们的成绩低于正常水准。固定为最糟的状况做准备导致了在一个不是最糟的世界中的失败。

此外，在任何现实场景中寻找最坏的情况比成为世界上最好的双簧管演

奏家还难。我们可以做一个游戏，假设发生一个事故，你告诉我一个最糟的情况——我总能编造出更糟的。毕竟我的创造不必合情合理，只要更糟就行。在三英里岛事故之后，我的朋友们都一致认为并没有造成太大的损害（除了反应堆本身的损害），但他们仍然很焦虑，问道，“最坏的情况会是怎样呢？”标准答案立刻就有，“事故确实会发展得不可控制，反应堆的外壳可能会爆炸，恰好这时该地区出现了龙卷风。龙卷风会吸走外壳中所有的放射物，向东而行，在每个大城市丢下一些放射物，使其不可居住。如果这对你来说还不够糟糕，我会想出更糟糕的。”

这显然（故意的）是一个不能令人满意的答案，但它却能说明问题——没有什么最糟情况。如果你接近最坏情况，你所谈的事极不可能，不值得考虑。朋友们经常会说，“噢，别这样，理性点吧。告诉我真正有可能发生的事。”当他们问道“真正有可能”的事时，他们所谈的是概率，我们兜了一圈又回到原位。没有概率的风险，正如法国人所说的，就像一顿饭没有葡萄酒或者一天没有阳光。然而为最坏情况作打算在我们的社会中很盛行。在写作本书时，美国航空航天局正在不太成功地努力放弃对航天飞机安全保障的最坏情况分析，而航空航天局并不是唯一的冒犯者。一种为人们喜爱的近乎催眠术的想法是，如果你涉及到了最坏的情况，你就涉及了一切。但事实并不是这样。

第二部分　详细说明

第十一章　有毒化学物

族特征

化学物质，和大部分技术产品一样，会带来巨大的益处，也会造成损害。有些化学物会引起癌症（这在下一章讨论），有些会以其他方式毒害我们。如果它们真的导致癌症，其后果通常是逐渐积聚而成的——小剂量化学品的长期沉淀直到最终发生疾病。通常没有证据表明临界点（在此剂量以下化学物没有害处）有关的作用很小的统计数字表明我们不大可能找到一个临界点，即使这个临界点是存在的。

与此形成对比，大多数不会造成癌症的有毒化学物的确有损害临界点——有那么多的接触会造成巨大的损害，而没有那么多的接触则是良性的，甚至是有益的。大部分化学物在一定剂量下是有毒的，过多的接触会导致对人体的伤害。重要的安全问题和我们如何与之接触及接触的程度有关，（在给毒药下定义时，一位化学家说毒药就是过量。）例如，阿司匹林是已知的有毒化学品，许多年来一直是美国儿童中毒的一个常见原因。目前制定了一整套法律来应付这一威胁——只允许出售一瓶最多装有 36 片小儿用(成人用量的四分之一）阿司匹林药片——阿司匹林中毒尽管比以前少得多，它仍然是一个可发党的问题，但不再是一个多大的问题了，主要是因为阿司匹林的销售已让位于被更广泛宣传（利润也大得多）的止痛化合物。事实上，1985 年 14 岁以下的儿童中没有一个死于阿司匹林中毒。许多人一生都服用阿司匹林，消费了几千倍的致命剂量，几乎没有什么明显的副作用，尽管胃痛很常见。身体能够修复任何直接的损伤，并保持优势。我们已学会服用小剂量的阿司匹林，很少有人受到损害，死的人更少。

阿司匹林在剂量适当时不仅无害，它还是人类已知的用途最广和最安全的药物之一。它在医疗领域的使用已将近 100 年，美国每天消费的阿司匹林药片大约为 8000 万片。医疗行业越来越多的人一致认为健康的成年男人应定期服用阿司匹林，以防止心脏病。事实上所有的药物——可能是所有的——都具有这种特征，即剂量适当时是有益的，而剂量过大则是危险的。体现一种药物的优点的一个数字是致命剂量与治疗剂量的比率，比率越大，药越好。

我们在这里所谈论的不是药物，而是那些也许不具有已知的疗效但具有损害临界点的有毒化学品。人们在这些事情中不应该太教条——老的化学品有时会有新用途。使用有毒化学品的关键在于避免过度接触，而不是避免接触本身，这就使得限制较为容易。

这种正常的模式有两个例外。有些有毒化学物不太容易被身体排泄或在身体中发生化学变化，因此会在组织、器官或骨头中积聚沉淀。它们与致癌物质的区别在于物质的本身在沉淀，而不是效果在积聚。最好的例子是像铅和水银这样的重金属的沉淀，多次接触会导致身体里这些物质的堆积，对身体造成长期的损害。铅纹葡萄酒壶、水管和一种在铅纹罐中熬制的被叫作止咳葡萄浆的特制浓缩葡萄汁所导致的铅中毒，研究罗乌帝国的历史学家暗示这与罗马帝国的衰落和瓦解有关。水银中毒是“ 像帽商一样疯狂 ”（意指狂怒）这一表达法的来源，据说《阿丽斯漫游奇境记》一书中的马德 · 哈特 · 就染上了这种病，尽管阿丽斯从来没有明确告诉我们。（在制造皮毡帽时使用

水银。）写作本书时，保护美国商业核安全的机构核管理委员会被禁止在其新式大楼里使用喷泉，因为自来水工程中使用了铅焊。正如玛丽·安托瓦内特所说的，让他们去喝葡萄酒，但不要喝从铅纹酒罐里倒出来的酒。

临界点法则的另一个例外在这一情况下出现，以“安全的剂量”重复接触有毒化学品，以致在身体中造成生物化学变化，随着时间的推移发展成真正的对身体的损害。两个大家熟悉的例子是酒精中毒和吸毒成瘾，其毁灭性潜力无须在此阐述。

同样，慢性支气管炎和气肿是主要由吸烟引起的病害，它们在人的一生中对肺造成损害。大工业区的居民在空气污染物的毒害中度过一生，污染物在几十年中损害其健康。化学物的沉淀可以对身体产生作用，即使不以癌症的方式出现，但这种情况并不多。尽管如此，某些种类的癌症是由细胞不断受到刺激引起的，不管是有毒化学物的刺激还是有形手段的刺激，这些区分方法没有一个是完善的。

对任何一种已知的化学品来说，一般都有可能确定损害的临界水准，从而找到限制接触的方法。这也许不太容易，而且结果也不一定准确，但它却是能够做到的。然而，化学品太多了。

我们已知的化学品大约有 500 万种，在美国，我们在工业中大约使用 65，000 种。每一种化学品都造成一个潜在的毒性问题，事实上其中五分之一的化学品每年的产量都超过 100 万磅。绝大部分化学品从未经过充分的对其损害可能性的试验。它们存在于我们的食物、空气和水中，有时是有意和公开加入的，有马德·哈待的英文 Mad Hatter 的意思是疯帽商。（译注）时是无意中加入的，有时是以别的形式加入的。它们有时在大规模的事故中被释放到环境中——米西索加的氯气和博帕尔的异氰酸甲酯就是这样。它们存在于我们的垃圾场中，其中有些自然分解成威胁性较小的物质，有些慢慢渗进生物圈，还有些可以存在许多年甚至几千年。（过去的垃圾场是考古学家和人类学家经常喜欢去的地方，这些地方使我们更为了解我们的祖先，我们的垃圾当然也反映了我们的特点。）垃圾最后总应该落到某个地方。

当然有法律管制有毒化学品的使用和处理，也有机构实施这些法律——这些机构常常是根据其职能组织起来的。运输部防止有毒化学品在公共高速公路和航空线运输时的泄漏，尽管许多标准是由环保局制定的。工作地点的空气通常是职业安全和健康署的范围，而粮食和药物管理局和农业部负有《食品、药物和化妆品法案》、《清洁空气法案》、《联邦杀虫剂、杀真菌剂和杀鼠剂法案》所规定的不同责任。《联邦水污染控制法案》授权环保局确定标准，但也规定了州政府和地方政府的作用。

联邦政府在某些事务中的权威甚至还涉及到宪法问题，例如，《联邦水污染控制法案》所指的是“美国水域”，环保局把它解释为可通航水域，可通航水域的支流、跨州水域，所有这些似乎都很清楚。然而，解释中还包括州际的湖、河、溪。它们或者被跨州旅游者用于娱乐或其他目的，是州际贸易中出售的鱼或水生贝壳类动物的来源；或者被州际贸易行业用于商业目的。“美国水域”定义的设计几乎没有什么例外。如果有一个像我这样的加利福尼亚人旅行到威斯康星州，在一条小溪里钓鱼，那么这就属于联邦管辖之下。州的权利也就仅此而已。

至于大气污染，宪法的规定较简单，因为没有人能够争辩说空气的流动不是州际的。事实上，空气也无法尊重国际边界，因此把天空清洁干净的水

变成酸雨的污染物的流动在加拿大和美国之间造成了很大程度的紧张局势。我们以后再讨论这个问题。

针对有毒化学品的不同法律对毒性的定义也不一样，它们通常很不具体，以致于对标准的详细规定是在法庭上完成的。例如，《清洁空气法案》指定，应引起管制机构注意的水准是一种“可能合理地被预料为危害”公众健康或福利的污染物。“合理”一词深受律师们的喜爱，原因很明显——它提供了有偿服务和战斗的乐趣。韦氏大词典说“合理”意味着“具有理性的官能；出于理性的，”这并没有多大帮助，这个词最后由案例法来下定义。

这些问题中有一些可由两种差别很大的化学品举例说明：一种是异氰酸甲酯，具有广泛商业用途的有毒化学品，它造成了 1984 年印度博帕尔的灾难；另一种是铅，它是一种广泛分布在我们的环境中的作用长久的累积毒品。铅很少会杀死人，但它会导致严重的对身体和精神的损害。

博帕尔——鼻氰酸甲酯

博帕尔按印度的标准是一个中等城市，其人口大约为 75 万人（估测各有不同），距印度的地理中心不远，位于首都新德里以南 350 英里的地方，是默提那布勒德黑什省的首府。1956 年以前，博帕尔本身也是个州，它曾是印度较大的穆斯林社区之一，1926 年以前的 80 年中，它是由妇女统治的。

异氰酸甲酯是一种较常见的工业化学品，几乎被毫无例外地用作杀虫剂生产中的一种媒介物，产量大约是每年 3000 万磅。即使是这样，在异氰酸盐族，它还是用得比较少的一种化学品，异氰酸盐家族的全球生产总量每年达几十亿磅。异氰酸甲酯极容易挥发，毒性极强——国立职业安全与健康研究所手册规定它在工作地点的浓度只有氰化物毒气的 1%。因此异氰酸甲酯被看作比氰化物毒气还要危险 100 倍。光气，第一次世界大战中所用的毒气之一，毒性较低，在博帕尔它被用于生产异氰酸甲酯的前期工序。它在水中的不稳定性导致了人们的怀疑，但没有证据表明异氰酸甲酯是致癌的。事实上人们非常讨厌与这种物质打交道，以致于在发生事故之前几乎对其毒性没有做过什么认真的研究。由于该族的其他化学物毒性更强且产量更高，它们转移了人们对异氰酸盐毒性问题的大部分注意力。

较低浓度的异氰酸甲酯会刺激眼睛和呼吸道，造成暂时的呼吸问题。呼吸道刺激对跟它打交道的人来说是一种很平常的经历，对博帕尔的居民来说也很常见。浓度较高的异氰酸甲酯会引起严重的肺部损伤，事实上它会致使受害者窒息，并使得幸存者遭受永久性呼吸损伤，有时会造成失明。这是一种讨厌的物质。

博帕尔和异氰酸甲酯的毒性于 1984 年 12 月 3 日星期天夜里一点同时为世人所知，事件几个小时以前就开始了；罪魁祸首是水。

与其他异氰酸盐不一样，异氰酸甲酯极易挥发——很容易变成气体。事实上，它的沸点略高于华氏 100 度，因此它必须保持低温。热量会使它滞腾，或者使它在一个封闭的容器中积聚压力，就像在一个高压锅中一样，最终会导致容器的破裂和异氰酸甲酯的释放。因此，这种化学品的安全规定中的一个基本部分是保持低温，同时监测其压力。然而博帕尔平常用于这一目的空调系统在事故发生时却是关着的，它已经关了好几个月了，这时印度是冬季，室温似乎已够低了。

不幸的是（对于化学加工业来说或许很幸运），异氰酸甲酯在化学上也十分活跃，就是说它不稳定。（稳定或好或坏，根据使用者的要求而论，如果硝化甘油不是不稳定的话，甘油炸药就不会被发明了。）异氰酸甲酯与水会起剧烈的反应，遇到某些其他物质时甚至会发生自我反应，那些物质会像催化剂一样起作用。铁就是其中之一。（催化剂即一种能加速化学反应的物质，而自身却不会被用尽，它是一种加速剂。）此外，所有这种化学现象在温度较高时发生较快。

这些反应也被化学家们称作放热反应——反应本身释放热量——因此化学活动能给反应物质加温，加速反应，又生出更多的热量，等等。这就是不稳定的形式，因为反应能自我提供能源，至少能自我提供热量。（这也是火工作的方式，所以你须在它自我维持之前先点上火，生小火难，生大火容易。）对一个封闭的罐来说，更高的温度又造成更高的压力。博帕尔的罐当然有压力标准，人们读过这些压力标准，但没有认真对待，直到一切都晚了。

这些是事故的先兆：安全和警报系统不起作用，它们无法使用或被忽视；容易发生放热反应的物质，特别是遇水；正在工作的人已注意到一个裂缝，但决定在下一次茶点休息之后再去管它；一个基本失修的工厂；其阀门泄漏而维修计划落后；在两个罐中存有毒性很高的气体。只需一个导火索，星期六晚上对已注定要遭厄运的异氰酸甲酯储罐提供的 1000 加仑左右的水就是导火索。不管这是有意还是无意，这都是个错误。反应渐渐地开始了——储罐一开始的温度相当于室温——随着水与异氰酸甲酯的反应，压力从每平方英寸 2 磅上升到 10 磅。这是第一个小时发生的事。随着混合物温度的升高，反应加速，压力最后升到每平方英寸 50 磅，到这一点，排放系统打开了，有毒气体泄漏出来向城市移动。如果压力升高一开始就被认真对待，我们就很少有人会听说博帕尔。

最后，大约 2500 人死亡，成千上万的人受伤。由于异氰酸甲酯气体比空气重，在通过农村地区时，它离地面很近，许多被杀死的人正在睡觉，根本无法逃脱。没有任何警报，据说是因为许多工人正忙于拯救自己及其家人。

博帕尔是一个令人震惊的灾难，是历史上最糟糕的工业事故。只有战争、地震、洪水等等才会杀死和杀伤这么多的人。泰坦号沉船事故的死亡人数也没有这么多。当然我们知道有毒化学品会杀死人，但却非常罕见，人们只有在它发生时才会注意到，因此很难对它保持警惕。这一案例中有许多替罪羊，但我们总得记住：圣经中的替罪羊被允许逃脱了，所在才有替罪羊这个词。去喝茶的监工，忽视压力标准的工人，抓着水管给水的工人——都犯有玩忽职守罪。然而，这么多事情都有错误，其根源在于管理。这种管理问题很常见，原因是自满情绪。事实上，化学工业是我们最安全的大产业之一，其事故发生率远远低于美国的其他工业，部分是因为它从艰苦的经验中获知化学品可以造成危险。那些忘记这一点的人立刻就会被提醒：自然的友善掩盖着无情的特点。必要的谨慎意识似乎还未传送到印度；风险是技术性的，但失误却是人类造成的。解决的办法不是消除有毒化学品，这与我们用锤子敲到手指以后就扔掉锤子一样没有道理。

当碳化物联合公司（母公司）的董事长在事故发生后赶到印度时，他被印度政府逮捕，被指控犯有过失罪和其他各种罪。这并没有特别的作用，特别是，既然他作此旅行的动机是严肃的且富于同情心，他立刻作出反应也是值得称赞的，但印度确定最终责任的本能也基本上是正确的。令人悲哀的是

事故后的报复并不能代替事先的警惕。

风险行业的一个必要工作是从经验中学习。桑塔亚那说，“那些不能记住过去的人一定会重复过去。”不是每一件可能的事在很久以前都发生过，但大事故通常有一些根本的相似之处，而且这些相似之处可以跨越各种技术之间的界限。

我们在一些领域中利用了这一点，例如全国运输安全委负会努力从运输事故中吸取充足的教训使同样的事故尽可能少地再次发生。因此我们试问：有责任队博帕尔事故中吸取教训的是谁？它毕竟是历史上最致命的工业事故，在责难结束之后，必须得到一些重要的教训。这一事故发生后不久，本作者打电话给一位身居白宫高位的朋友，询问哪一个政府机构有责任从博帕尔事故中得到教训，特别是那些跨越国界的教训，他的回答是：“这是个非常有趣的问题。我猜没有人在干这个。”今天仍是这种状况，所以我们在每一次发生新的事故以后就任命一个新的总统委员会。我们必须从经验中吸取教训这本身就是一个真正的教训，它正在耐心地等待人们从经验中吸取。

铅，正在减少的污染物

大地含有丰富的铅，但直到工业革命以后，才有许多铅进入了大气，或进入了我们的食品和饮用水。铅非常重，其密度是水的 10 倍多，大约是空气的 1 万倍，被风吹到大气中的任何一点铅都会很快落到地上。铅微溶于水，这使得只有不流动的水才包含许多铅。作为一种污染物，我们环境中的铅几乎完全是人类干预的产品，最终是技术的产品。铅并不多，但它会在人体中沉淀。

铅是有害的。默克手册中列举的铅中毒的症状有性格改变，头疼，伴有昏迷和痴呆的成人腹内失调，以及儿童脑溢血。铅中毒事实上是最早被发觉的职业病，公元前 4 世纪希波克拉底医生就对其作出了鉴定。严重的铅中毒可用螯合物治疗，这种化学品会与铅形成化学结合，帮助人体摆脱这种侵入物。到目前为止，人们认为铅不会引起癌症。

人类对铅的开采，冶炼和使用已有几千年的历史，始于有历史记载的年代以前，由于熔点低，它也许是第一种被冶炼的金属。现在有来自罗马时代的铅币和铅焊水管，更不用说众所周知的铅纹葡萄酒罐了。但那时沉淀于人体中的铅也许比现在少得多，可以肯定几乎不到今天的 1 %，我们只是不知道如今普通美国人所承受的巨大的铅的负担是否具有普遍性后果。城市中心的居民体内的铅多于郊区和农村的居民，但城市中心的生活中其他一些人口统计方面的欠缺可能会掩盖铅的可能后果。儿童是最容易受影响的，他们面临着整个生命时期体内铅沉淀的挑战。我们确实知道典型的体内铅沉淀并不比造成上述疾病的体内铅含量要低得多，因此，即使我们目前基本上没有病状，但并非以后也一定没有病。根据默克手册，血液中的某些不应有的物质超过 30 个单位——每分升微克——就可以诊断为中度铅中毒。 70 年代对城市中心儿童的平均测量结果大约为 20，尽管现在对测量的可靠性有些怀疑。除了明显的症状外，还有一些决定性的证据表明少量的铅会影响儿童的智商。铅给环境带来的风险是真实的。

在每年使用的 100 万吨左右的铅中，大约有一半是反复使用的铅，其中大部分进入了汽车的蓄电池，尽管最近几年用于生产含铅汽油的铅大量减

少，但进入汽油的铅直接排入了大气，而人类吸入了存在于大气的铅。这种情况，过去更多，而它是有害的。我们不仅呼吸到它，而且这种回降物还进入了供水系统和食品供应（这事实上是最重要的途径），因此汽油中燃烧的铅与我们体内的铅之间有着简单和直接的联系。大气层中的铅随着向无铅汽油的艰难过渡而开始减少，体内铅负担的减轻也紧随其后。由于人们买新车代替旧车，客运汽车队大约每 10 年周转一次，人们也许会想我们现在只需等待旧汽车从公路上消失就行了。不幸的是有些反社会的司机继续非法使用含铅汽油（它便宜一些），这限制了这一减铅战略的有效性。最后，可能会有彻底禁止含铅汽油或者对其征收重税的必要，使其失去价格上的优势。

读者无疑在本书中注意到一种腔调，即我们通常对技术风险过度恐慌——序言一开始就这样说——但铅问题是一个真正的例外。铅是一个真正的威胁，其来源可以辨认，它对儿童和成人造成明显的伤害，而我们却迟迟不采取措施。在这方面受影响的工业所作的抵抗发挥了重要作用，而某些所谓的环境组织的努力却错过了方向，这些组织醉心于与更令人兴奋的事情作斗争，以致几乎没什么精力来应付没有趣味但却很重要的事。

尽管如此，人们对于空气中的铅正在采取某些行动。尽管还没有彻底禁止含铅汽油，我们已大大减少了它的使用。其结果在空气中已很明显。每年由路上的汽车排放到大气中的铅从 1975 年的 10 多万吨下降到 1985 年的不到 1000 吨（尽管运输部门的其他因素仍然产生 15，000 吨），而空气中铅的浓度在这段时间里也从每立方米 1.3 微克下降到 0.26 微克。环保局确立的空气质量标准是每立方米 1.5 微克。因此在较短时间内有了真正和可测量的进步，但这来之不易。

最后，强调汽车燃料中的铅这一事实不应该被解释为这就意味着它是唯一给人体提供铅的渠道。标准的铅管制造业（注意该词的用法）许多年来一直在新建的房屋中用铜管，但安装铅焊接头。铅管焊料中大约有 50%的铅，其中一部分与管中的水有着永久的接触。因此经过一夜在管中的滞留，早上家里一开始使用的水可能含有相当数量的铅。在家庭供水系统中使用含铅焊料不再是合法的，但这只能对最新建造的房屋而言。

儿童、特别是城市中心儿童铅中毒的主要来源是使用了好几十年的铅制油漆中的铅，特别是在较旧的房屋或公寓中，这些油漆（和所有的涂料一样）最终会破裂和剥落，并且通过这样或那样的方式被幼童吃掉。甚至在人们广泛意识到这一危险之前，玩具上也涂上了这种含铅油漆。由于消费品安全委员会所作的大量努力，含铅油漆可能不再用于玩具，而在任何油漆中的铅含量也有着严格的（微小的）上限。

对铅中毒的控制是成功的合理环境管理的故事之一。威胁是现实的，人们采取了必要的措施。尽管代价在过去和将来都会很高，但与益处相比这种代价是很值得的。无论是我们的国家还是我们的身体都没有回归到原有的纯洁状态，但我们距离危险的边缘已远得多，并且正朝着正确的方向前进。

第十二章　化学品致癌作用

族特征

致癌化学物特别可怕，原因很充分。它对人体的损害在人的一生中默默地积累，直到接近生命的终止之时才出现明显的恶果，但已为时太晚。死于癌症，不管是不是化学品引起的，都可能特别痛苦。既然目前美国死于各种癌症的人占死亡人数的 22%，它就太为人们所熟悉了。最后，对环境中致癌化学物的接触甚至不为人注意，潜在的威胁特别令人忧虑。对癌症的恐惧在公众对化学品风险的担心中占主导地位。

然而，在大约 6.5 万种商用化学品中，1 万种以上每年的产量超过 100 万磅，但人们确知只有几十种会造成人类的癌症。通常这一信息来自对一组病例的研究，并把其原因追溯到罪恶的化学物。对化学物导致癌症的首次发现是在 18 世纪，得自英格兰的波西瓦尔的观察，他观察到清扫烟囱时接触到煤烟有可能导致阴■癌。尽管如此，直到 20 世纪初，对实验室中的耗子所作的试验才表明煤焦油会直接引起癌症。

除了几十种毫无疑问的化学品之外（石棉，芥子气等等），还有几百种化学品被怀疑在足量的接触下会引起癌症。幸运的是，这一接触量通常远远高于我们平时的接触量，我们知道这一点是因为我们让实验室动物接受了大量的可疑致癌物。人们在培养特别种类的小动物上（通常是耗子）花了很大的努力，它们在某些地方特别易于得癌症，这使得试验较为容易，但其结果更难解释。下面我们会接着讨论这个问题。在寻找和鉴别致癌物的所有努力中，接触化学物导致癌症是一个例外，而不是常规。

法律要求卫生与公众服务部发表年度报告，列出所有目前美国有相当数量的人与之接触的已知和可疑的致癌物。目前这张表上大约有 150 种化学物，而商用化学物有 6.5 万种，已知化学物有 500 万种，因此这从某种程度上说是对化学物致癌性的测量。整个国家正淹没在致癌化学品中这一广为传播的意象远不是事实。当然，香烟是例外。

那么我们怎么才知道一仲可疑的化学品是否能引起人类的癌症呢？它会在多大的剂量下及多长的时间内发生？最后，我们当中是否有人或我们大家是否都可能与之有足量的接触从而受到伤害呢？

首先，要避开第五章中所解释的 N 的平方根法则的控制是不可能的。在我们对付小数字和小风险时，癌症发生率的不可避免的统计波动很容易导致错误的结论，不管是哪个方向的错误。典型地，对接触的管理其目标是避开具有稍大于百万分之一的在人的一生中可能造成致命癌症的化学品。这立即意味着我们要应付的是统计数字极不充分的小数字，而“自然”癌症的死亡率要高得多。癌症是一种特别可恶的风险，因此我们愿意付出额外的努力把它置于控制之下。

如果我们依赖于对小老鼠和耗子的试验来检测这种微小的风险，我们很快就会用尽全世界所有的这种小型啮齿动物。要检测百万分之一的机会，就必须做 100 万次试验，否则就观察不到任何结果（平均来说）。这是不可能办到的，因此我们培养容易患癌症的鼠种，给予它们大剂量的可疑化学品，以促使事情的发生。有时，如果化学品在食品中，而它们不喜欢，它们吃的量就不足。这时就有必要求助于强迫喂食，这种喂食法叫作管饲法。最后，

通过一种或另一种方法，不管它们喜欢与否，被试验的动物接受了要求达到的剂量，我们也就知道了我们想要知道的有关这种可疑化学品的情况。

有一个明显的要解释的问题。没有一只小鼠能够吃进和我们一样多的可疑化学品（没有一只老鼠会吃下两磅重的牛肉），但按比例它们的消费量要大得多。此外，它们一般生活一两年，比我们的寿命短得多。从啮齿动物的数据来解释可能对人类造成的威胁需要进行大量的推断，有很多的未知数。

当一种化学品被指定进行致癌性测试时，一开始是进行甄别测试，人们较喜欢进行艾姆斯测试，这是由著名的加利福尼亚生物化学家布鲁斯·艾姆斯发明的。由于人们认为癌症是以基因的改变开始的，所以艾姆斯测试根本就不是癌症测试，而是测试化学品引起细菌变异的能力，它常常用某种沙门氏菌作试验。致癌化学物通常（但并不总是）会引起沙门氏菌的变异，因此变异测试代替了真正的致癌性试验。到现在为止，人们已对可疑的化学致癌物进行了成千上万的艾姆斯测试，而且，除非有其他证据，否则只有未通过测试的化学品才用于小动物试验。还有其他一些短期测试，其原则与此类似。

动物试验更加复杂，相应地也就更为昂贵，这自然就意味着所作的动物试验要少得多。迄今为止，只对几百种化学物作了这种测试，但主要的问题不是缺乏试验而是难以解释。某一个试验所涉及的动物数目可达到 1000，尽管也有少数几次特例使用的动物比这多得多，而试验的期限限于小鼠和耗子的正常生存时间，大约为两年。这种测试大约要花费 100 万美元。在一些罕见的情况下，试验也许会使用大一点的动物，当然数目也就小些。

对于解释问题，首先我们真不知道如何进行上面所说的体重和寿命的推断。由于癌症的确切原因仍是个谜，我们不得不借助于专家的判断——被美化了的猜测。通常的程序是根据动物体重按比例确定剂量，因此喂食老鼠的 1 克物质（大约是老鼠日进食总量的 20%）也许相当于一个人 5 磅的进食（大大高于人的日进食总量的 20%，即使是食量很大的人也是这样）。还有其他的比例确立法，不同的机构有不同的习惯，但无法证明一种方法比另一种方法好。（喂食试验在此作为一个例子，但化学品可以其他方法进入体内。一只普通的小鼠大约重一盎司，食量相当于人的三百分之一，而耗子的重量也许是小鼠的 10 倍，食量是小鼠的 3 倍——胃口与体重并不成正比例。）同样，在小鼠的一生中不断提供的剂量通常相当于人一生的剂量，尽管时间长短不同。这里的每一个假设都有某种理论基础，而其他方法几乎也有同样可靠的根据。此外，小鼠和耗子从生理上讲与人类也不一样。

因此，用啮齿动物的试验结果来判断人的感受性具有不可避免的误差，误差在 10 倍上下很常见，但在这一行业中并不具有科学上的重要性，尽管到了法庭上它们可能很关键。在对试验作出解释时，我们试图往安全的这一方向偏移，但这会导致过分的保守主义，其潜在的危险前面曾描述过。

剂量与后果之间的关系问题比体积的差异更难以解决。我们已说过要观察到某种结果要求被试验的动物接受大剂量的可疑致癌物。事实上，我们想从小动物短时间大剂量的结果中了解大动物（人）在长时间内小剂量的情况，小动物中的高概率必须转变为人的低慨率。这需要一个所谓的数学模式。

用于这些目的的数学模式，是接受有害物质的量与因此患上癌症的可能性之间的关系。这一关系在我们对整个过程的了解中也许有根据，也许没有——如果有根据的话，它就被称作理论模式。如果这一模式完全是虚构的，

但似乎适合于已知的事实，它就被称作经验模式。经验模式与理论模式都存在。例如，最常用的剂量与反应之间的关系模式（也许只因为它是最简单的）就是所谓的线性模式，它假设一种化学物引起癌症的可能性与积累的总剂量直接成比例。剂量大一倍，风险也就大一倍，剂量减少一半，风险也就减少一半。另一种模式被称作方形模式，它是假设后果与剂量的平方成比例。根据这种模式，剂量大一倍，风险就是原来的 4 倍。（美国国家科学院最近爱用的辐射引起癌症的模式是把两者结合起来，称作一次——二次模式。）还有更加复杂的模式。

10 年以前，国家毒物学研究中心进行了著名的逐项试验来一次性地决定某种特定的化学致癌物 2-乙酰氨基芴（简称 2-AAF）的剂量与反应之间的关系。在这一重要的实验中，使用了 24，000 只小雌鼠来测试 2-AAF 引起肝癌和膀胱癌的能力，这是小鼠最容易染上的两种癌症。数据表明，在同样的小鼠身上，对肝肿瘤来说，从使用的最小剂量开始，这种关系似乎完全是线性的，而膀胱癌则完全不是线性的。因此并不存在适用于一切情况的普遍有效的剂量与后果之间的关系。化学品致癌作用有时与剂量成比例，有时不成比例。当不成比例时，几乎都是量小时致癌作用较小，这一试验中也是这样。最可能的情况是其他形式的致癌作用也是这样，这一点很重要，因为对小动物所作的所有试验都是大剂量试验，线性模式的常见假设意味着较低程度的风险很可能被夸大了。

为搞清如何作这些试验，开始可以计划使用大约 500 只小鼠，这是一个合理的数字。也许因为有性别的区别（例如小雄鼠不会得卵巢癌），小鼠往往被分为 2 组。鉴于目的是要获知剂量与反应之间的关系，小鼠必须进一步分为不同的剂量小组。也许会有 4 个剂量小组：一个对照小组，不接受任何可疑物质；一个高剂量小组，因此有可能会发生什么事情；以及在两者之间的其他两个小组。这样共有 8 个小组，每个小组大约有 60 只小鼠。这个数字是较典型的。

推断问题可以通过一个真正的例子加以说明。这个例子（一个广泛的和开拓性的甲醛吸入试验）涉及 4 个小组，每组大约有 100 只小鼠，耗子的数目稍多一些。大部分老鼠与甲醛接触两年，实际上就是鼠类的一生。其稍稍过于简化的结果是，在三组接触较少的小鼠中（包括没有任何接触的一组）没有发现一例癌症，在接触最多的小组中发现两例癌症。耗子的结果比较糟糕，在接触量处于第二位的小组中有两例癌症，接触最多的小组中有许多例。在两个接触较少的小组中，耗子和小鼠都没有染上癌症。

这说明什么呢？记住最多的接触量远远高于我们真正关心的接触量。事实上，真正值得注意的接触——导致百万分之一的可能性或类似的情况——存在于这个试验中的没有接触和接触最少的两个小组之中。这两个小组中都没有发现小鼠和耗子患上癌症。

显然，存在着一个问题。大约 500 只动物的接触量大于我们所能见过的接触量，而它们却不受癌症的威胁，鉴于此我们也许可以推断甲醛是无害的。但这将是不负责任的结论,因为浓度增加 10 倍确实看上去要造成一种动物患癌症的巨大可能性（在这个例子中是鼻癌），但在另一种动物身上却不会。虽然只有在大剂量的情况下，在一种动物身上，甲醛确实会引起癌症。我们处于一种两难的境地。鉴于管理的目的，甲醛目前被列为一种“可能引起人类癌症的物质”，尽管没有令人信服的证据表明它能在人身上引起癌症。注

意正式的分类并没有提到剂量一即使需要成吨的物质才会引起癌症，分类也不会变。

举这个例子是为了表明证据可以具有怎样的不确定性，而这是个特别好的例子，涉及到的动物超过通常的数字。本人在这种情况下会误导读者，给人留下一个印象：我们所知道的太少了，最好还是放弃的好。前面曾指出过，认为你对某件事很有把握或毫无所知都不对，所有的科学研究都处于这两个极端之间。

致癌试验中的不确定性也许比其他一些科学领域更加糟糕，但性质相同。在有人声称对某件事完全有把握时，这种声称就应该作为反对他的证据，但在有关风险的公众辩论中，却是相反，不确定性被用来攻击诚实的科学家，这些诚实的科学家承认他们也许犯了可以想象的错误。对不确定性的承认被解释为无能的标志。一位倍受尊敬的前参议员有一次曾说希望有更多的单臂科学家，因为科学家总是说“一方面是这样，另一方面是那样”*。同情这种观点很容易，因为需要作出决定，而不确定性却是真正存在的。掩盖这一点不仅没有意义，而且是不诚实的。

让我们仔细审视所有的这些问题，问一问我们真正的癌症病例中有多少是由我们环境中的人造化学物造成的，这不会造成什么损害。艾姆斯是应对上文提到的艾姆斯测试负责的生物化学家，他走上了相当于教育改革运动的道路，目的就是提供这一透视法。结果发现世界上的自然有毒物和致癌物比人造的要多得多，只有极小部分的癌症病例是由有毒废物和污染造成的。干罗勒中含有草蒿脑，蘑菇中含有联氨，这些都是致癌物。一种常被提到的黄曲霉毒素出现在食用了发霉的粮食的母牛牛奶中。艾姆斯估计我们吃进去的自然杀虫剂至少相当于人造杀虫剂残余物的一万倍。原因很简单，在进化过程中，植物不得不建立自我化学保护系统，以防犯害虫的侵害——我们不是第一个认识到这一必要性的。而植物保护自己不必获得政府的准许。

*英文中“一方面……另一方面”(on the one hand…on the other hand…）的字面意思是“在一只手上……在另一只手上……”。（译注）

德莱尼条款

1958年，议会以一种绝妙明确的方式面对癌症诱因的不确定性，在《食品、药物和化妆品法案》中，加入了众所周知的德莱尼条款。它设立了一个零的限制，绝对的零，这是为任何一种有证据表明会引起人或动物的癌症的添加剂设立的，不管剂量有多大。这种添加剂不能使用，哪怕是极小的量也不行。这个标准因其简单而吸引人，但它没有考虑到有些物质有极强的致癌化而另一些几乎没有这一事实。比较没有害处的物质被禁止使用，甚至一些有益的东西也被禁止了。而自然中存在的危险得多的东西则未受到限制。遵守德莱尼条款的唯一方法就是表明所作的较为艰苦地寻找有害后果的努力失败了，这并不意味着添加剂没有致癌性，只是未被表明有致癌性。当然对待这种失败的办法可以是进行更加勤奋，更加艰苦的尝试，正如几个世纪以前寻找巫婆那样。（人们有时候能够保持一贯性——詹姆斯·德莱尼众议员是一位热忱的反氟化者。）

德莱尼条款的确切措词（对于食品添加剂——其措词略微不同于药物和化妆品）是：“任何一种添加剂，如果发现它被人类或动物摄取后诱发癌症，

或者在进行了与估价食品添加剂的安全性相适应的测试以后发现它会在人或动物身上诱发癌症，都不应被看作是安全的。”人们可以对“发现”和“诱发”的意思吹毛求疵，但这种用语的意思被解释为如果有任何证据表明这种添加剂的致癌性，它就被绝对禁止。立法的历史支持了具有这一议会含义的解释，其表面逻辑是添加剂是不必要的，因此任何一点风险都没有存在的理由。这当然是可能的最极端的立场，而同时又是最简单的。

不时地,有人努力对德莱尼条款给风险管理者带来的压力提出质疑。1987年，粮食和药物管理局建议允许使用某些食品染色剂——橙色 17 号和红色 19 号——前者尽管没有确确实实满足完全没有风险的法律要求，据估计它对普通美国人在其一生中造成不到一百九十亿分之一的风险。粮食和药物管理局争辩说，这样低的风险实际上相当于没有任何风险（“风险极其微小，就像没有风险一样”）的法律要求，但被美国上诉法院驳回，且被最高法院拒绝复审。为明确方向，请回忆一百九十亿分之一的死亡风险相当于一生中在商用飞机上多飞 100 码的风险和在汽车上多驾驶 10 码的风险。这种风险比吃一颗含粮食和药物管理局允许的黄曲霉毒素含量的花生的风险，即 1%还低。它相当于在丹佛（在宇宙射线之下）呆几分钟，而不是在海平面地区。上诉法院同意风险极微，但“不情愿”决定它有义务作出这样的裁决，因为法律措词很明确。在阅读这个案子时，人们感觉到，法院在试图向议会传达一个信息。

第二年环保局宣布它将在杀虫剂残余物一事上使用德莱尼条款，环保局根据《联邦杀虫剂、杀真菌剂和杀鼠剂法案》进行管制，宣布它将把一生中的风险不到百万分之一的上限看作是可以忽略不计的。联邦官僚在德莱尼条款的约束下常常有愤怒的骚动。变革将要发生，但议会中谁就此投票就会被贴上支持癌症的标签，因此这一条款仍然存在。

糖　精

糖精和德莱尼条款之间的战斗许多年来打了个平手。这个战斗的特点是每个人都知道德精作为人造甜化剂的用处，因此不能真正地毫无声息地禁止它。这样，就把它放在了一边。

100 多年以前（1879 年），糟精在约翰·霍普金斯大学被偶然发现。在对某些甲苯化合物的氧化作较为常规的试验的过程中，一位化学家发现他的食物不寻常的甜；事实上，甜味布满了他的手和手臂。一名好科学家的一个标志是当大自然想告诉他什么事情时，他注意倾听而不是让其闭上嘴，说因为他太忙了。因此糖精被发现了，这种物质比通常的糖甜 400 倍左右，但不增加食物的任何价值或热量。（阿斯巴特，是目前人们喜爱的人造甜化剂，它是以类似方式发现的——舔舔你的手指你就发现有收获了。）

糖精不久就成为许多国家的固定产品。有人抱怨它没有营养，但安全问题在那么早的时期还未被摆到桌面上。尽管如此，第一次世界大战前的很短时间内它在美国被禁止用于食品（部分是安全原因，部分是因为缺乏营养价值），但战时和战争结束后，糖的缺乏使得禁令很快就取消了。

二战后糖精的使用迅速扩大，到 1984 年达到顶峰，相当于每人每年使用 13 磅糖，这一数字给人留下深刻印象，阿斯巴特（甜度为糖精的一半）在这一年被广泛使用。糖精中最大的一部分进入了软饮料和甜化剂中。糖精给生

活提供了一个增加甜度的机会，既可以替代我们通常消费的糖，又使我们的食物增甜。从糖精和阿斯巴特总销售额的稳定增长和我们每人每年消费的 150 磅的糖和玉米增甜剂中可以判断美国人对甜食的喜爱还处在青春期。美国过去 100 年中对糖的消费增长了 4 倍。

到 70 年代，一直存在的安全问题不能再被忽视了。实验室试验强有力地证明糖精会在实验室动物身上造成膀胱癌，尽管没有充足的证据表明它对人类也会造成同样的后果。事实上，糖精过去和现在都是已知的最弱的致癌物之一，如果不是最弱的话。它的致癌性比我们前面提到的黄曲霉毒素小 1000 万倍。在致癌的化学物社会中，糖精是二等公民。事实上，已知的也许比糖精的致癌性还弱的物质是乙醇，当然我们在享受成人饮料时消费的乙醇量要大得多，而致癌性却不是它对人类健康的主要危害。

糖精的确引起实验室动物的癌症，因此 1977 年，忠于德莱尼条款的粮食和药物管理局宣布它有禁止糖精的意向。回忆一下那时候没有一种合理的替代物能够作为人造的不使人发胖的甜化剂，因此对糖精的禁令可能会引起饮食混乱，更不用说人口将变得更不结实了。（当时的人均糖精消费量相当于每年 8 磅，因此直接用糖代替糖精将使普通美国人每年增加 5 磅的重量。）对饮食的潜在影响无疑对粮食和药物管理局使用拖延战术起了主要促进作用，它在 60 和 70 年代的大部分时间要求进行反复的研究。最后，到 1977 年，它不得不硬着头皮采取行动，尽管风险相对来说微不足道。

那么议会有没有看到其方法的错误，废除或修改德莱尼条款呢？——根本没有，它立即颁布了一个专门针对糖精的 18 个月的弃权声明书，在努力寻找无营养的替代甜化剂期间禁止粮食和药物管理局对糖精的禁令。这种情况持续至今。弃权声明书被定期延长，寻找也在继续，这些年来替代物证明比糖精更糟。环己氨基磺酸盐有一段时间显得很有希望，但到 1970 年被完全禁止。 1989 年，在我撰写本书时，粮食和药物管理局在审查对环己氨基磺酸盐的禁令，有很多理由表明原来的禁令是基于不充分的证据。环己氨基磺酸盐也许会卷土重来。

最后在 1984 年出现了阿斯巴特，没有已知的证据表明它致癌，但它对健康有其他威胁。阿斯巴特对患苯酮尿的人有害，这是一种遗传性代谢紊乱，15，000 名儿童中有一名患这种病。只要含有阿斯巴特的食品贴上合适的标签，有这种遗传性缺陷的人就可以避开阿斯巴特，而且他们愿意过不喝软饮料的生活。

这也许是议会能够集体舒一口气的时候了。因为看得出的延长针对糖精的弃权声明书的需要最终消失了，德莱尼条款可以再次毫无例外地实施了。可是弃权声明书最近又被延长了，期限还要长一些，直到 1992 年都有效。戏还没有散场。

糖精被用在动物身上进行了长期的广泛的试验，以解决其致癌能力的问题。试验还在继续，即以不同的剂量在不同的啮齿动物身上进行上面描述过的那种试验。当然没有对人进行有控制的试验，尽管我们已这么长时间消费了这么多的糖精，却没有出现大量的膀胱癌，这一事实意味着它的致癌性并不太强。在人身上可能会诱发癌症的证据很模糊，也许在此不值得讨论，因为动物试验通常都被认为是决定性的。然而，请回忆一下从动物向人进行推断的问题。

最近的试验表明：试验的小鼠或耗子如果其一生饮食中所含的糖精不到

1 %或 2%，就没有膀胱癌，而到了这一点后，有百分之几的动物得了肿瘤。从这一点开始，癌症风险随着浓度的增加而增加。小鼠饮食中 1 %的糖精相当于人类每天消费四分之一磅的糖精，那么其甜度就相当于每天大约消费 100 磅的糖。人们也许会可怜小鼠，也许会羡慕小鼠，这要看他喜欢甜食的程度如何。1984 年的顶峰期，我们实际上每人每年消费大约半盎司的糖精，相当于上面数字的千分之三。运用线性假设，这将意味着消费糖精引起膀胱癌在一生中的风险最高是十万分之一。这是对这类风险所作的典型计算。它并不完全，因为没有考虑方程的另一端，即用糖代替糖精后肯定会出现的肥胖所带来的健康后果。健康对糖精有利。

要不要糖精人们可以自己选择——接踵而来就不再是科学或统计数字了。一方面的论点是一生中十万分之一的风险不重要，因为我们当中有五分之一的人不管怎样会死于癌症，在任何给定的 100 万人中，有 20 万以上的人死于癌症，那人们怎么能知道是否会多死十个人呢？此外，这相当于在一生中每年多开车 20 英里，何必要为这烦恼呢？风险是可以忽略不计的，这是茶壶中的风暴，与糖造成的肥胖的风险相比当然要小。这是一方的论另一方面的论点是把个人的小风险与人口总数相乘，看有多少人确实处于风险之中。这一计算告诉我们如果糖精消费的高峰值永远持续下去，而线性假设又适用于这一例子，那么每十万人中有一人的死可归因于糖精引起的癌症。由于我们每年大约有两百万人死亡，这意味着我们也许每年没有必要地杀死了 20 个人，而到本世纪末也许杀死几百人。因此他们辩论说，如果你是其中之一呢？这是另一方的观点。

对每一种微小的个人风险，都可以拿它乘以美国的人口，甚至世界的人口，表明所谈论的是大量的个人。如果我们想要保护世界上的每个人的一生，我们谈论的风险水准将比我们现在所管制的低 100 万倍。这不仅不可能，还会浪费本来可以更好地改善人类健康的资源。正如腓特烈大帝所说，“想保护一切的人什么也保护不了。”

我们的加拿大邻居对于人造甜化剂有着完全同样的信息，但他们的管制方法却不同。尽管美国完全禁止了环己氨基磺酸盐，议会维持一项弃权声明书使糖精合法，加拿大人却喜欢环己氨基磺酸盐甚于喜欢糖精。他们只通过药房分配糖精，不允许食品杂货店出售，但却允许杂货店出售环己氨基磺酸盐。他们不允许把糖精和环己氨基磺酸盐用作食品添加剂，所以他们以怀疑的态度对待二者，但次序正相反。

因此，至少在很短的时间内，我们可以继续往咖啡里放糖精，心里知道咖啡若不放糖精似乎有造成胰腺癌的风险。但有两件事对咖啡有利，对其不利的证据比糖精的充分不了多少，而且它是一种自然产品。为了公平起见，我们应该说，美国有一个禁止含有可能“以普通的方式侵害健康”的自然成分的食物这样的管制机构从法律来讲是可能的——这是个严格得多的要求，但可以想象它是可以满足的。但要求一位州立政府的官员努力在美国禁止咖啡所需要的非凡勇气远远超过人们有权利期望一名公务员所做的任何事情。糖精已经够糟的，更不用说酒精了，很久以前它被禁止了 15 年而且不太成功。

甲　醛

甲醛是一种极其简单的化学化合物，我们许多人也许会记得它是中学的生物实验室里浸着动物的尸体或肢体的那种难闻的东西。其化学构成与普通水的区别是在分子中加了一个碳原子，这就足以完全改变其特性。它迄今为止是被称作醛的这类化学化合物中最重要的成员，美国每年要生产几十亿磅的醛——甲醛就占大约 30 亿磅。世界其他地区生产得还要多。甲醛用于胶合板、碎料板、绝缘泡沫、其他树脂制品和塑料、消毒剂，当然还有防腐液。（甲醛的同类乙醛的一种用途是生产腊酸酐，而后者又被用来从吗啡中提取海洛因，化学的世界是相互联系的。）醛在商业中无处不在，因此人们对它们影响健康的兴趣有着很长的历史。

甲醛非常难闻，在足够的浓度下（大约百万分之一）会刺激眼睛和呼吸系统。没有可靠的证据表明它会引起癌症。但它却被正式列为“可能引起人类癌症的物质”，在我撰写本书时，人们正在努力将其在工作地点允许的接触水准从现在的百万分之三降低两三倍。为什么？

据估计 95%的人对浓度在每百万分之零点一至百万分之三之间的甲醛有过敏。因此目前的标准是在一定程度上人们的眼睛和呼吸道受到刺激，可被看作是无害的。但 1982 年，消费品安全委员会仍然试图禁止在学校和家里使用脲醛沫，后被联邦法院推翻。（如果有读者注意到插手的联邦机构太多那就对了。这是另一个普遍问题——联邦机构之间的掷泥大战。）

1984 年，环保局援引了 1976 年通过的《有毒物质控制法案》，该法案授权它不仅仅禁止致癌物，还禁止那些给人类健康带来危害的有“极大风险”的物质。（在一份科学刊物的一篇著名的文章中，有些评论家把“极大风险”解释为“可能发生的可能性”，这种措词毫无意义。）法律的措词区别出自然物质和添加剂，但这一点在这里并不重要。

但现在这已成为一种潮流，在环保局宣布其意图后不久，住房和城市发展部颁发了一条法规，要求活动房屋中散发的甲醛浓度保持在百万分之零点四以下，为了不受到攻击，职业安全与健康署宣布它有意把工作地点允许的浓度降低到百万分之一至一点五。最后，在 1987 年，根据“充足的”来自动物的证据和“有限的”来自人类的证据，环保局最终把甲醛列为“可能引起人类癌症的物质”，“充足的”证据是什么？

你已经看到了，本章前面所述的啮齿动物呼吸试验，这是迄今所作的最广泛的试验，在接触最高浓度的甲醛的耗子身上引起了一种特别的癌症（鼻腔鳞状细胞癌），这是在两年中每星期五天，每天六个小时接触浓度为百万分之十四的甲醛所导致的。但能证明这些结果会扩展到人身上的证据忽隐忽现。此刻还没有确定结果，当然人不会在这样长的时间内接触任何浓度这样高的东西。如果是这样的话，他们无疑就会作出耗子所没有的选择，离开这个地方——接触这样高浓度的甲醛不是一件好玩的事。事实上，耗子患癌症完全可能是因为其鼻腔组织处于不断的刺激之下，而这不会在人的身上发生，癌症的起因不是甲醛的任何特定的化学后果。

因此管理机构在不能确定事实的情况下采取了保守行动。面对耗子试验的确凿证据，他们选择了向安全的一面偏移，限制人类的允许接触量。甲醛被列为“可能”的致癌物这一事实没有多大意义，除非人们说出可能性有多大，而对于这一点我们现有的知识还不够。最近的流行病学研究表明，在受影响的行业工作的工人中癌症病例没有值得注意的增长（国家癌症研究所对 100 多万的工人进行了研究），但没有人知道如果把工人束缚住强迫他们终

身呼吸浓度达百万分之十四的甲醛会发生什么情况。永远不会有任何人知道。

此外，在这个案例中甚至不可能进行代价-利得分析。更严格的管理的代价可以估计，但我们不知道是否会有任何益处。如果有益处也不会太多，因为甲醛在人身上引起癌症肯定远远低于探测的临界点。任何人说已知甲醛会引起人的癌症都是在歪曲事实，然而接触大剂量甲醛的啮齿动物却引起人们的联想。也许会有轻微的影响，当然不会有严重的后果——这将是人们熟悉的故事。

乙烯氯化物

这是个很短的故事，它之所以有趣主要是因为它提出了这个问题，即法律是否允许管理机构去考虑一下它颁布的法规给社会带来的代价。

乙烯氯化物是另一种被怀疑可能引起癌症的常见化学品，它和甲醛一样被列为“可能引起人类癌症的物质”，其证据更充分。像聚氯乙烯这样的聚合形式是人们最熟悉的形式（分子粘接在一起），它无处不在。有证据表明有些长期住在散发烟雾的制造工厂附近的居民患上一种罕见的肝癌称作血管肉瘤，这地方的居民比其他地方的居民的患病率高得多。在全国，每年只有几十个这种病例，因此它们很突出。不幸的是，其他污染物也会引起这种病，目前还不可能对原因进行整理，乙烯氯化物是罪魁祸首的证据是示意性的，不是结论性的。小动物试验较具结论性，但数据的特殊性使得乙烯氯化物的作用中的不确定性比通常还多。但那不是这里的问题——这是法律问题，不是技术问题。

环保局根据《有毒物质控制法案》和《清洁空气法案》管理致癌物（除了别的工作以外）。其权限在这两个法案中并不一样，尽管其工作——保护我们不受伤害——是同样的。这两项法律差异很大。

根据《有毒物质控制法案》，环保局必须确定一种物质是否会对人类健康造成或可能造成不合理的风险，注意“不合理”这一关键词。它必须考虑一种物质的后果，公众与该物质的接触和该物质的益处，因此它必须进行权衡分析。当考虑颁布限制这种物质的法规时，它必须考虑“法规的可适当查明的经济后果”，这又意味着要权衡整个事情的正面和反面的因素。风险分析家没有什么可以埋怨。

根据《清洁空气法案》，环保局局长必须使我们的空气保持清洁。他必须管理“有害”污染物，污染物的定义是“合理地预计”会导致死亡或严重疾病的东西。他该怎么办呢？他必须对每一种危险污染物确定一个标准，“根据他的判断这一标准能提供充分的安全余地以保护公众健康”。人们也许会想“根据他的判断”这几个字将给予他广泛的权限使他在法庭上获胜，而结果并非如此。他被要求提供充分的安全余地，但法律中没有任何条款授权他把所有的因素都考虑在内进行权衡分析。没有明确的授权，他的手被捆住了，他必须只考虑安全，任何其他东西都不会进入他的头脑。法律问题围着“充分”这个词的意思转。

一旦环保局接受了乙烯氯化物是一种致癌物这一前提，而且不可能确定任何肯定的接触临界点，在这一点以下环保局可以诚实地宣称没有任何风险（当然永远不会有这样的临界点），那么它的鹅子就被煮熟了。

[1]事实上，环保局公开声称在没有强

有力的相反证据的情况下，“应该假设没有一种浓度下的乙烯氯化物绝对不会对公众健康造成任何风险”，这样做它自己就忽略了鹅子。注意绝对和强有力的证据这些词——鹅子已被烧脆了。没有一种物质能证明这样坚定的声明是正确的——甚至氧气也不能。

然而，环保局继续说完全禁止乙烯氯化物的气体排放将关闭一个主要工作。这是没有任何道理的，因此它重新对法律作了解释，说它的意思是人们应该做到合情合理，确立现代技术能满足的最严格的保护标准，然后就随它去。当然，他们说，只能期望人们尽己所能。但环保局选错了法律，因为《清洁空气法案》丝毫没有提到使用合理的判断。

毫不奇怪环保局立刻被自然资源保护委员会送上了法庭，后者似乎对关闭工业没有丝毫疑虑，它对 1989 年的苹果大恐慌负有主要责任。自然资源保护委员会争辩说，由于环保局承认自己不能证明一个低于它就没有风险的排放标准，因此就应该把排放限制定为零。这将结束乙烯氯化物在美国的生产和使用。

法庭一开始注意到其他许多污染物也没有已知的损害临界点。他们认为议会通过《清洁空气法案》的意思极不可能是关闭美国的一大部分的工业，议会甚至没有注意它在干些什么。最后这句话来自这一事实，即这项法律通过之前议会的辩论中似乎没有人提到过发生巨大的经济混乱的可能性。法庭假设议会对其通过的法律造成的影响是很敏感的——这是个值得称赞的假设。

然而，最后法庭在该项法律中没有找到使用任何东西的正当理由，除了设立标准的健康水准。法官们不同意自然资源保护委员会的观点，即排放标准必须定为零，但他们确实裁决，引用“现有的最佳技术”的水准不是以健康水准为基础的，因此根据《清洁空气法案》是不可接纳的。因此他们把环保局局长送回制图板，让他为他原先想做的事找到一个以健康为基础的理论说明。他们没有禁止他设立一个合理的排放限制，但要求他在自己的权限内只引用理由，以确定“充分的安全余地”。被禁止的考虑包括费用和技术可行性。在解决技术事务时不考虑费用和技术可行性有点古怪。但自然资源保护委员会成功了——平衡的风险评价又一次失败了。

法庭对这个案子的裁决的一个有趣和可引用的脚注是：

若局长发现某些统计方法足以消除本案中的科学不确定性，那么可以想象，局长就可以发现某一由统计决定的排放水准将提供充分的安全余地。如果局长使用这种方法，他不能考虑费用和技术可行性，这些因素不再重要，因为局长已找到另一种提供安全的“充分余地”的方法。

去除这一脚注中的晦涩难懂的部分，就是说，根据《清洁空气法案》，局长在设立排放标准时不可以考虑费用或可行性。然而，他被要求制造一些模糊的统计数字来为其行动提供理论基础（只要这基于健康考虑），并且不使用被禁止的费用或可行性等词。记忆力较好的人会记得这一鉴定是由美国哥伦比亚特区巡回上诉法院的罗伯特·博克法官写下的。

石　棉

---

[1] 喻遭人暗算。（译注）

严格地讲，石棉也许不属于致癌化学物这一章，它引起癌症的作用还未被了解，也许是物理性的，也许是化学性的。它肯定会刺激肺组织，非常严重，接触石棉最终会导致恶性肿瘤。不管其原因是物理性的还是化学性的，癌症并不因此而不具真实性。石棉对吸烟者比非吸烟者更有害，大概因为对肺的损害是积聚性的，但其协助作用也许有更深刻的原因。本节虽然是要强调石棉的致癌特性，但石棉还会导致其他一些疾病，这些疾病尽管不是癌症，但也是致命的。石棉有许多不同的种类，其效力也各不相同。

许多对石棉的接触是职业性的，几乎所有的接触都是在过去。由于石棉能防水且耐用，它被广泛地用于剧院幕布、汽车离合器和刹车衬垫、建筑绝缘材料和房屋顶板。它在造船这样的行业中也很常见，特别是在二次大战期间。如果需要一种延缓火灾、防止腐蚀、模型不受限制和坚硬的材料，不管是哪种需求，石棉都是最好的选择，这是一种由又长又细的岩石晶体组成的纤维。

石棉的故事可上溯到人类历史的很久以前，原因在于它耐用。它是一种矿石，可制成石棉的岩石沉积在地表，原始人类很容易获得它。国家科学院说它被用作埃及人的尸体防腐衣，罗马人的火葬包装，并被罗马人用作维斯太处女的圣灯中的常明灯芯。据说 1000 多年以前的查理曼大帝有一块由石棉制成的桌布，在宴会以后，他可以把它扔进火里清洗。

现在我们比以前更加了解石棉可对人的健康造成的损害，它已被从商业中大量清除，其剩余部分存在于仍然含有石棉的建筑物中以及仍在遭受其损害带来的后遗症的人身上。剧院的幕布已不再用石棉制作。

新的住宅和学校中的绝缘物不再含有石棉，在有防火必要的地方使用了其他材料。因此这一风险在美国逐渐消失。另一方面，在过去几十年中，世界的石棉产量无论是保持稳定还是有所增长，美国的份额减少到大约 1%，剩下的少数几种用途也逐渐在美国消失。

尽管它在衰落，有两个原因使得石棉很有意思。第一个原因是我们的国家处于一种从公共建筑，大多数是学校中清除石棉的疯狂之中，几乎难以控制。人们害怕将来某个时候会被打扰。当然清除石棉的行动本身就会释放这些本来可以永远安息的纤维。

另一个有趣的原因是 60 年代和 70 年代初，由于人们广泛认识到石棉可能是有害的，因此掀起了历史性的个人伤害索赔的浪潮。全国的法庭案卷中有 3 万多件诉讼案，索赔数目总计达好几十亿美元，人们再次把注意力集中到产品的责任上。一家公司或个人在一种材料被普遍认为是安全的时候生产了这种材料，但后来又发现它并不安全，那么该公司或个人是否应对其生产的产品负财政或法律责任？如果历史在回顾时判定我们犯了一个诚实的错误，我们是否有罪，是否应受处罚？如果这样说，大多数人也许会说不。但法庭中的答案常常是肯定的。陪审团似乎很愿意从公司和政府那里拿钱给予个人。由于一半的石棉接触诉讼都与在政府的船厂工作有关，这就打开了深口袋中最深的一个口袋。从石棉诉讼中获得的金钱双方的律师获得了 61%，受害者获得了 39%。

我们不必对这一点作过多的说明，但它很重要。随着对风险的知识和了解的增加，我们的世界不仅变得更为安全，而且也更容易操纵。彼得·休伯，一位律师兼工程师写道，“如果有一位科学家愿意给死亡风险确定一个数字

——任何数字，就有一位原告的律师愿意把这个数字送上法庭。”关于风险的信息越多，它就越容易在诉讼中被歪曲，特别是当诚实的科学家承认不确定性时，那么诚实不是最好的对策几乎是不言自明的了。

在这些事情中石棉并不是唯一可从中得到索赔的东西。在过去大约 10 年的时间里，存在着改革国家的民事侵权行为法的极大压力，但它受到各种出庭律师协会的强烈抵抗。（民事侵权行为可导致损害赔偿责任。）不断增强的起诉倾向，“深口袋”综合症对增加损失赔偿费造成的影响，更强烈的把产品的责任当作重新分配收入的一种形式的愿望，这三者结合起来对经济造成了重大后果。例子有很多，医疗事故保险是一个常见的例子，它迫使一些产科医生放弃他们的专长，并增加了每个人的医疗费用。（现在许多医疗试验被用来保护医生，使其日后不遇到法律问题，而不是对病人有益。）著名的达尔肯·希尔德一案中有 30 万项以上的损害索赔要求，创最高纪录。现在生产的普通飞机有十分之一似乎是十年以前制造出来的，每架飞机的平均责任赔偿负担达 10 万美元，等等，等等。

石棉带有风险这一认识在过去 20 年中并没有多大改变,但可以有多种方式进行赔偿的意识却有了很大改变。这不是由于突然发现了它的致癌能力——这从 1955 年至 1975 年之间已逐渐被每个人所知晓，事实上有些人身保险公司早在 1918 年就停止向石棉工人出售保险单了。接触石棉存在着真正的风险早就为人们所知，据估测大约有 500 万人在二次大战期间的船厂工作时有过一些接触。我们无法肯定有多少人受到了伤害。

普遍地农村空气中的石棉浓度低于城市，城市低于与石棉打交道的工厂。当然使用含石棉材料建造的建筑中其成分当然比那些不含石棉的建筑中高。接触石棉造成的癌症一般需要 10 年的发展时间。

两类与众不同的人值得关注。一类是有长期接触高浓度石棉的工人，那是在这个国家还未十分注意工作地点所带来的风险之前，即在职业安全与健康署之前。第二类是学校的儿童，原因有三：我们关心儿童，这不需要强调或道歉；他们在学校中度过一生中美妙的时光；他们很年轻，因此造成的损害有更长的时间发展为真正的问题。

令人高兴的是，学校中的平均接触量远远低于人们开始时的想象。（环保局自身在 1983 至 1985 年前把其估计减少了 10 倍。）事实上，学校建筑物中的平均接触量不到职业安全和卫生管理局对工作地点接触量设立的限制的千分之一。专家们一致认为，对大多数学校来说，可为孩子们做的最好的事情是不要去管石棉，除非它已暴露且破碎，不要在摆脱它的笨拙努力中把它释放到空气中。这种意见不受人欢迎。

对于曾接触石棉的工人来说，事情就不一样了。许多工人受到严重伤害，几乎无法改善其健康，尽管可以作出补偿。但应牺牲谁呢？如何区分贫困的人和贪婪的人呢？在我们这个越来越好打官司的国家中，人们很熟悉这个两难境地。

诉讼与技术风险有什么关系？它们之间有关系是因为诉讼的潜在得益为夸大风险提供了社会和经济动机，特别是夸大技术风险，因为在这找碴儿比较容易。这是迫使管理机构在估计风险时向极其保守的一面偏移的一个因素，而这又对我们所有人的生命增加了风险。许多学校和企业清除以前的石棉是害怕日后的诉讼，而不是害怕石棉。处于良好状态下的石棉最好不要去管它，无论是出于健康原因还是出于费用原因。据估计，我们从建筑物中清

除石棉每拯救一条生命需花费 10 亿多美元，而以其他方式 10 亿美元可以更有效地拯救生命。有时还是莫惹是非的好。

第十三章　高速公路安全

族特征

美国每年有 10 万人死于意外事故，其中大约有一半死于道路事故。在某些年龄组中——十几岁和二十出头的男子——汽车事故是主要的死亡原因。每年还有 500 万人受伤，受伤者的医疗和非医疗费用需要 500 亿美元。公路上风险很大，这不需要证明。

但作一些分析没有坏处。谋杀和自杀的死亡率总和大致相当于公路上的死亡率，前者在上升，而后者在下降。和公路运输不同，谋杀和自杀几乎没什么社会效益。吸烟造成的死亡人数大约是公路事故的 10 倍，而吸烟也没有多少社会效益。死于交通事故的人数占死亡总人数的 2%。事实上，在主要的工业化国家中，美国的每乘客英里的死亡率最低，但我们开车的里程也比别国的多。因此公路交通带有风险，但它不是对人类生存的最大威胁。

而且现在公路上越来越安全了。尽管在过去 20 年中的死亡总数没有下降多少（现在的死亡总数与 60 年代差不多，那时议会注意到这个问题），但每乘客英里的死亡率下降了大约一半。专家们广泛认为各州把最低饮酒年龄定为 21 岁的趋势（现在所有的州都这样做了）与此有很大的关系。也许更广泛地使用安全带的趋势也有所帮助，时速限制也一样，尽管死亡率降低的趋势早于此二者。从全国平均来看，一个坐在汽车里的人死于汽车事故的机会大约是每一亿乘客英里有一次。对一个每年在公路上行驶 1 万英里的人来说，这相当于每年死于汽车事故的机会是万分之一，这比我们努力消除的其他风险要大得多，但它仍然不到死于抽烟的平均风险的十分之一。

和所有的风险一样，有些人口群体比其他人口群体风险大。15 至 24 岁年龄组的白人男子的死亡率是全国平均数的 3 倍，而同一年龄组的黑人妇女的死亡率只达全国平均数的一半。当然这两个极端体现了文化和社会的差异、在公路上的时间长短的不同和其他无法估量的事情上的不同。它们还体现了青年人饮酒的后果。

饮酒年龄长期以来一直是一个被许多不重要的因素搞乱的问题。许多年来，对选举和购买酒精饮料的要求（包括年龄）这样的事情被认为属于各州的职权范围，联邦的干预处于最低限度。然而，在二次大战期间，而且直到军事征兵在 1973 年痛苦的越战后结束以前，18 岁的青年都可以被征兵。这就使人感觉有些矛盾，一个人被认为已到了足以为保卫国家而战斗的年龄，但他同时又被认为还太年轻，还不能加入政府。当然，做这两件极不相同的事情所需要的技艺具有截然不同的性质，但仍存在着一种不公正感——这个痒处需要搔一搔。因此 1971 年宪法第 XXVl 修正案获得批准，在所有各州把最低选举年龄降到 18 岁。有趣的是，修正案并没有这么说，一个州仍然可以把选举年龄定得更低，譬如 5 岁，但不得高于 18 岁。

一些州接着降低了饮酒年龄（它是这么称呼的，虽然它指的是购买酒精饮料的最低年龄），他们争辩说一个人到达选举年龄也就应该到了饮酒年龄。（由于到达选举年龄的论据是他已到了战斗年龄，因此根据三段论，这意味着他到战斗年龄就应到了饮酒年龄。不会有许多人这样去推理，但逻辑上就是这样。）当然，这种讨论与公路安全完全无关。直到 1984 年联邦政府最后采取行动时，最低饮酒年龄各州各不相同，从亚利桑那州的 17 岁到一半州所

定的 21 岁。其他各州处于这两者之间，而 18 岁是普及的饮酒年龄。1984 年通过了一项联邦法律，该项法律并没有要求各州提高饮酒年龄——这也许不符合宪法——但通过取消联邦公路拨款来惩罚那些拒不服从的州。

各州一个接一个地屈服了，怀俄明州于 1988 年让步，因此现在全国的标准饮酒年龄是 21 岁，这是通过税款实施的。这无疑会给公路死亡率带来有利的影响，特别是对较年轻的司机来说，因为较早提高饮酒年龄的那些州的情况一般都是这样。尽管处于失去联邦公路拨款的威胁之下的怀俄明州坚持最长时间有几个不同的原因，但它不愿意成为美国唯一的饮酒年龄比别州低的州。这个州的饮酒年龄原来是 19 岁。

司机酒后开车造成的公路上的死亡，其原因不只是酒精。步行者饮酒也会使其在公路上被撞死（大约 20%的死者是步行的），三分之一的步行受害者血液中的酒精浓度高于醉酒的法律定义。

当然，酒精不是造成公路风险的唯一原因，甚至不是主要原因，尽管它确实起了一定作用，满足了为难题寻找简单答案的自然渴望，特别是对于那些认为酒精不管怎样都是有害的人来说。现在来看一下事实。

首先，尽管 1987 年有 46，000 人在公路上丧生，但其中不到四分之三的人是在汽车里的，其余的是步行者，骑摩托的人，另外还有一小部分其他种类的人（过去 20 年中摩托驾驶者的死亡人数大幅度增长，与总趋势相反，也许是因为买得起的进口摩托扩散的缘故）。在汽车里的人当中，大约有三分之二是在轿车里，剩下的是在公共汽车、卡车和运货汽车中，主要是后者。因此，在轿车中死亡的人大约占公路死亡人数的一半。1987 年，大约有 27，000 名司机（其中 17，000 人开轿车）死亡，其中有 7350 人在 18 岁至 20 岁之间，占 27%。这个年龄组的人数在总人口中不到 5%，因此他们的死亡率是其人口比例的 5 倍以上。

这一统计的要点在于，公路安全问题并不像某些人想让我们相信的那么简单。它们受年龄、酒精、交通工具、道路及其他许多不太明确的因素的影响，包括对开车的社会态度。至于酒精，大约一半卷入致命事故的有驾驶执照的司机都是酒后开车，死亡的人当中有三分之一以上（38% ）超过了法定酒精限度。这一不规矩的行为的高峰年龄是 20 至 24 岁，将近一半的致命事故都涉及一个酒后开车的司机，但一直到 55 岁，这个数字在 40%上下徘徊，从 55 岁开始，这个数字开始下降。即使酒精的作用被提倡戒酒的人夸大，毫无疑问公路上确实存在着这个问题，特别是在青年人中。从 65 岁起，司机酒后开车出事故只占致命事故的 10%。或者是老人开车的时候不喝酒，或者那些开车时不喝酒的人长寿。这是读者的选择。酒后骑摩托车死亡的百分比仍在增加。

大多数提高饮酒年龄的州最近几年的交通事故死亡人数确实有所下降，尽管下降幅度不大。它的效果不像热心人让我们相信的那样，但它确实存在。

这就导致了加强管理是否有作用这个中心问题，不管是通过对超速或酒后开车的司机采取惩罚措施，或是通过对在酒力影响下开车更严格的标准，或降低时速限制（在二次大战期间时速只有 35 英里）。每项措施无疑都会加强安全，但相应地也需要社会付出代价，这些代价必须与益处进行比较。

在这方面导言中还没有提到造成风险的其他因素。例如交通工具的耐撞性，护栏，公路的照明和标志，通道的控制，等等。两个有争议的问题阐明了一些主要论点：强制安全带和时速 55 英里的限制，前者与耐撞性有关，后

者与司机的习惯有关。

安全带

不言自明，在交通安全中，每一起汽车相撞事故实际上都是两次碰撞。第一次碰撞是汽车和其他什么东西碰撞——另一辆汽车、护栏、路灯柱，或悬崖底部的地面。第二次碰撞是汽车里的人与车的内部或地面或其他什么差不多的不柔软东西的碰撞。限制措施的目的是减轻第二次碰撞，把乘客限制在车里，同时把相撞的东西换成一个较软的物体，例如安全带或肩甲，或是气袋。这个思想很早以前就有了，第一项安全带专利是 1885 年颁布的。

没人会怀疑安全带的使用将是有效的，而我们说“有效”的意思是减少碰撞时的死亡人数，但在实践中它们似乎并不像在理论上声称的那样有效。对模拟撞车中的假人进行的试验，以及对进了医院的真正的事故受害者的观察表明：那些死于车祸的不系安全带的人如果系上安全带，其死亡率可减低 40—50%。然而，如果有这么多的话，即使在通过了强制系安全带法律的州中，这方面的改进也只有 5%至 10%，这是为什么？

总而言之，改进的幅度很少像产品推销者许诺的那么大，如今出售什么东西都难，甚至一个好主意，除非产品的价值被夸大。然后，一旦产品被出售后人们发现它并不是原来声称的那种万灵药时，就必须对此进行辩解。这适用于安全措施和总统选举，这是格雷沙姆法则范围广泛的后果。

格雷沙姆法则需要用一个段落来解释，尽管它与安全带几乎没什么关系。格雷沙姆法是一个产生在 18 世纪的经济法则，它以一位 16 世纪著名的英国商人（根据他第一次阐明这条法则的错误印象）的名字命名。它声称如果有两种钱，那么坏钱就把好钱挤出流通领域。如果有金子，政府就颁发“无价值的”纸币，人们就会用纸币买面包，而把金子埋起来。价值最低的媒介总是赢得面对面的竞赛。这种令人沮丧的对更广泛的观念世界的适用性到处可见，适用于那些观看商业电视的人，那些在报摊阅读杂志的人，那些倾听政治辩论的人，等等。对于风险事务，辩论往往被那些拥有易懂的解决方案、容易痛恨的恶棍和无痛苦的对策的人所主宰。回忆一下第四章中引用的门肯的话。

关于安全带令人失望的效果，有两种简单的理论，每一种在交通安全团体中至少都有几个追随者。第一种理论其高雅的名称叫作风险自动平衡，它在专家中不太受欢迎，它也被称作风险补偿。动物和植物世界中的自动平衡是机体对环境中的变化作出反应的一种趋势，通过调整尽可能地保持其原状。在风险世界中，这意味着在我们心灵的最深处，我们不知怎么地知道我们想与多大的风险共存。因此，如果外部世界，比如政府对我们强加安全装置，我们的反应是行动更加粗心，以便维持我们所习惯的风险水准。这是一种迷人的想法，显然至少含有一点真实性。根据这一理论，系上安全带的司机（其乘客，如果在的话，也系上安全带——大部分汽车里只有司机）会开得快一些，多冒一些风险，总之比他原来更容易自满。一些有限而又模糊的证据表明情况确实这样。观察一位司机在系安全带前后的行为是件好事，只是看一下他是不是真的多冒几次险，但这很难做到，也没有这样做过。

大多数风险专家不同意风险自动平衡的观点；事实上他们不喜欢这整个想法。然而，人们在解释这个事实时不得不谨慎小心。如果人们内心真有一

种抵销用意良好的安全措施的重要倾向，那么这就使得安全团体的许多工作毫无意义。当然对于安全团体来说，这是不可思议的。风险自动平衡是一种真正存在的后果——走钢丝的艺术家在下面有一张网时会冒更多的险——但这也许与这个问题无关。人们只能说需要进行更多的研究，这句话对科学家的耳朵来说是音乐。

第二种有关强制安全带法律其有效性有局限之理论在人类行为中也有了坚实的基础。尽管也许不可想象，但众所周知，人们都不遵守法律。在 80 年代中期实施强制安全带法律的浪潮之前，据估测使用安全带的司机大约占 15%——安全带从未受人欢迎。大多数通过要求人们系上安全带的法律的州注意到一开始掀起了服从的浪潮，大约有 50%的人遵守这个法律——各州数字不同——几个月以后人数又下降。其它有关为气袋或其他真正被动的，比如强制的限制措施的辩护都基于这些数字。如果人们不自愿照我的话去做，我就强迫他们去做。当然是为了他们好。

各州实施法律的魄力也不一样。所谓的初级执法州允许警察逮捕没有系安全带的汽车里的人，可以理解对法律的遵守率在这样的州就高一些。在二级执法州，司机只有在被指控违反了另一条法规而被拦截时，才被检查是否使用安全带。在这些州中，这是附加执法，法律遵守率就低一些。大部分的州属于第二类。在公众的压力下，有些州甚至废除了安全带法。安全带也许能拯救生命，被许多人被动地接受，但真正喜欢它们的人为数极少。

第二种低效理论表示不系安全带的司机最有可能发生事故。在这种情况中，致命的事故集中于那些比较反社会的群体：受教育的可能越少，越可能饮酒，越可能粗心地开车，越可能蔑视安全带法。其论点是小心和负责的司机在强制安全带法颁布之前就系安全带，法律只使较不谨慎的司机系上安全带。根据这一理论，该法规对真正易于发生事故的人的习惯没有影响。这个观点被称作有选择的招募。

安全统计数字对这一观点提供了一些支持。1987 年，在丧生于事故的轿车司机中，8%的酒后开车司机系着安全带，而清醒的司机有 24%系着安全带。（必须小心地对待统计数字，这些数据可以被解释为不系安全带的醉汉能较好地避免事故，但这个结论是错误的，不是吗？）一些研究表明易发生事故的司机系安全带的倾向确实较弱，因此几乎没有疑问存在着某种有选择的招募，但要决定它有多重要需要更多的研究。音乐又来了。

安全带是各种东西的混合。理论很可靠，如果被普遍使用，安全带将会拯救许多生命，但实践中的真实结果却没有证实理论，而且人们不喜欢安全带。说不喜欢安全带的人没有理性这话很容易，但实际上他们是在其保护者的价值观念之上维护自己的价值观念。这也许会冒犯用意良好的保护者，但这并不是没有理性。目前的计划是要求在所有的汽车中安装防损害约束装置，很可能是以被动安全带的方式。在驾驶汽车的人关上门发动引擎时，安全带就自动裹在他身上，不管他愿意不愿意。气袋是主要的替代方法，其优点在于在它砰地一声打开之前不引人注目，缺点是费用较高。与 1974 年对待连锁装置相比，司机们是否更愿意接受被动安全带，大家都拿不准。

时速 55 英里

如果当时 10 岁以下的人几乎不记得那一插曲，那么我们人口中有 40%

的人都不记得 1973—1974 年的阿拉伯石油禁运以及与之俱来的创伤了。美国当时一半的石油靠进口，主要从中东的阿拉伯国家进口，石油为我们的汽车提供汽油，为我们的飞机提供燃料，为我们的家庭提供取暖用油，等等。而 5 个月的禁运对我们的生活是一个极大的打击。我们那时实际上没有意识到我们对进口石油的依赖，采取了一切努力来保存供应（尽管禁运已出现了裂缝——有些国家不能彼此信守诺言），有一个措施便是在全国设立时速 55 英里的限制，它是被当作国家紧急状态法规实施的，在 1974 年禁运被解除时它已完全生效。即使如此，它一直持续到现在，主要是因为法规也有自己的寿命，也发展其存在的理由。这个例子中的理论基础是安全，尽管开始设立时速限速时几乎没有提到安全。

和安全带一样，没有人怀疑放慢速度能拯救生命，但同样很难确定实践中它的作用有多大。把安全作为时速限制的原因这是事后的考虑——如果它一开始是为了这个目的提出的，它一定会被拒绝。从 1989 年开车人的平均速度判断，即使在标有时速 55 英里的路上，如今没有多少司机认真对待时速限制。美国人似乎有一种集体看法，即风险比延误更可取，如果我们用他们的行为而不是言辞来衡量他们的看法。有法律而不予以实施，这是一种不良行为，它会派生对法律的蔑视，并给予执法者太多的判决权力。它因此提供了歧视性执法的机会，不管是歧视小红车还是大绿车。这对民主不利。

期望降低速度能减低碰撞死亡率，其原因稳固地植根于物理学中。碰撞造成的损害——不管是与另一辆车相撞，与路标相撞，还是与子弹相撞——基本上与碰撞速度的平方成比例。碰撞速度增加一倍，损害就是原来的 4 倍。把时速从 70 英里（州际公路以前的最高时速）减少到 55 英里可以把碰撞的损害潜力减少 40%。这似乎是值得的。当然高速州际公路的死亡率是速度较低的公路的一半，因此速度并不能决定一切。

正如前面所提到过的，每乘客英里的公路死亡率在过去 15 年中大幅度下降。曾有一些忽高忽低的起伏，但降低是标准。

这些年来发生了许多事：阿拉伯禁运，这大量但暂时地减少了自由决定的汽车旅行里程；安全带；汽油价格上涨；汽车耐撞性的改进；全国安全意识的增强，这一意识也融入车辆驾驶中；饮酒年龄的提高；更安全的州际公路系统的不断发展。这里的每一项措施都为死亡率的降低起了作用，但却很难准确地算出它们在其中的比例。所有的措施都有其作用。

特别是我们不知道得到的益处中有多少应归功于速度极限。不管其贡献有多大，它的实施是因为人们不愿为其付出代价，这又一次是从人们在公路上的行为来判断。从这种意义上说，主要快车道和州际高速公路上的速度限制与 1919—1933 年的禁酒时代有着一些相同的特点。人们可以被强制为一致，但如果惩罚是可以承担的，那么社会的准则就是抓住一切机会违反法律，当然，如果使得惩罚无法承受，人们就会服从——这是有着其他类型的政府的国家的经历。

奇怪的是，接受民意测验的人中绝大多数都说他们支持时速 55 英里的限制。同时，他们在实践中又超过这一限制，他们行使了说别人期望的而不是自己相信的话的权利（这是一生中早年就学到的适应技巧）。据估测，由于时速限制，司机每年要在路上大约多呆十亿小时，这些时间一点儿也不愉快。还存在着地区差异；许多西部的司机都知道在笔直的路上度过漫长的时间是什么滋味，其视程可达到目力所及的最远的地方，他们想知道人们为什么希

望他们缓慢地前进。由于在这样的路上如果有巡逻车，在目力所及的地方是可以看到的，因此很少有人遵守时速 55 英里的限制。在标志时速为 55 英里的州际高速公路上的几个地方对平均时速进行了测量，大约是 60 英里。这表示有一些车比这速度还快，与偶然的观察相符，然而，高科技也许会通过从空中监视超速者来获胜。

鉴于认识到了不可避免的事，议会 1987 年通过一项议案，允许各州在某些乡间州际公路上设立时速 65 英里的限制。在 6 个月内，四分之三的州都这样做了。议案勉强获得通过，但它是对公众厌恶限制的反应，而议会对公众的口味和偏好是异常敏感的。然而，被涉及到的仍然只有一小部分公路，在写作本书时提高时速的最后结果还未确定。第一批报告显示了混杂的结果，州与州各不相同。加利福尼亚就是一个好例子，因为它把 77%的州际公路的时速定为 65 英里，把其他公路的时速定为 55 英里。看一下乡村州际公路，1986 至 1987 年间，时速提高的路段的死亡人数从 110 增加到 116；而在时速保持在 55 英里的路段，死亡人数在同期从 66 降到 65。这一差别没有统计显著性（没有通过 N 的平方根测试），当然也不太大。

更新的数据来源于新墨西哥州,其乡间州际公路在时速改为 65 英里之前的 5 年中年平均死亡人数是 61 人，改为 65 英里之后的一年中是 99 人，这就具有统计意义了。在时速改变之前，大约 15%的车在这些路段上的时速都超过 65 英里（而时速限制是 55 英里）；后来增加到 30%，尽管中值速度只增加了每小时 3 英里。新墨西哥是个特例，有着稀少的人口和高速公路。在以后几年中，其他许多州会有更多的数据。

利得和代价的情况怎样？下列数字是从阅读几项研究材料中得出的，只是作者的一些猜测，但这些猜测对任何变量是最可靠的估测。和安全带一样，问题在于 1974 年以来发生的许多变化,包括时速限制的变化使得区分任何一种变化的后果成为不可能。此外，在这个问题上人们的观点非常强硬，能影响从可靠数据得出的结论。有些读者会注意到许多欧洲国家认为我们把速度问题过度强调到狂热的地步；他们的许多重要公路根本没有什么时速限制。在这样的路上开车肯定十分受刺激的。

首先，了解高速公路在整个运输图景中的作用很有用处。尽管（1987 年以前）时速为 55 英里的州际公路和快车道不到我们 400 万英里铺好的街道和公路的 1 %，但它们承受着车辆总数的四分之一。这样的道路总是比其他道路安全，收税高速公路和州际公路的死亡人数比全国平均数低得多。根据国家公路交通安全管理局的统计，1986 年美国所有公路上的死亡率是每 1 亿车辆英里死亡 2.5 人，而乡间州际公路是 1.1，不到一半。

在 1974 年制定时速限制时州际公路的平均速度有所下降,从那时起又逐渐缓慢上升。然而，以远远高于最高时速的极高速度开车的司机人数急剧下降，但还没有回到 1974 年以前的水平。过高速度似乎成了全国全神专注的事，因此涉及这种真正高速的汽车事故现在可能不如以前那样致命。然而，汽车却比以前更加耐撞，最低饮酒年龄有所提高；人口年龄有所增长（从 1975 年到 1986 年，18 岁至 21 岁年龄组的人口从 7. 7 %下降到 6.3%，几乎下降了 20%），而且年轻人的事故发生率高于他们所占的合理的份额。任何一种原因都会因为其他原因被忽视而显得更有影响力。

此外，提高时速并不一定转为提高车速。许多司机似乎设定自己的速度，只是在必要时为了尽可能避免因交通原因而被捕时才遵守时速限制。对这些

司机来说，提高时速只是使他们一直使用的开车速度合法化。因此，在乡间州际公路上时速增加 10 英里，从 55 英里增加到 65 英里，实际导致了平均时速增加不到 2 英里，从 59.7 英里增加到 61.4 英里，奇迹般地把大部分司机从违反法律者变成遵守法律的公民。改变法律要比改变人们的行为容易。就对 85%的司机来说（只有 15%的司机超过这一速度），增加的幅度也不到 2 英里，从 65.6 英里增加到 67.3 英里。

考虑到这些说明，最好的估测似乎是，降低时速每年可拯救大约 1 到 4000 人的生命。其他益处（除了减少的受伤人数以外）在一大堆事故中的确是可以忽略不计的，其中有燃料和其他东西的节约，每年最多可达到几亿美元。这数字听起来很大，但每辆车也就一两美元罢了。

同样，时速 55 英里限制的现金成本也不高，每年相当于几亿美元，其中许多是以州际货运行业效率降低的形式出现的。当然，以先进的无线电通讯设备来阻挠执法的州际货车司机是众所周知的超速驾驶者。他们同时也是技艺高超的司机。

因此时速限制的最大益处是拯救生命，最大的代价是损失的时间的价值。两边的专家都会把这称为过分简化，的确如此，但复杂有时会使论点不明确。没有很多代价和益处的关系问题如此简单。

使用稍稍好于猜测的拯救 2000 人生命的估测，以及较好的每年失去 10 亿小时的估测易于比较。1987 年美国的年收入大约是人均 18，000 美元，包括一切，如果一个人的时间的价值被估测为用工作年份的小时数去除收入数，结果是每小时 9 美元。当然对于幼儿以及那些个人时间的价值从来不同于工作时间的人，这一事实（谁没有估测过他的时间非常宝贵，不能够自己去修草坪或漆厨房，但最后不管怎样还是干了呢？）应该作一些调整，但所有这些调整，有些稍高，有些稍低，都很细微。合理的让步是以每小时 10 美元对公路上的司机和乘客的时间价值作合理的估测，而对其他那些用更复杂的方法，使用从最低工资开始往上升的一系列的数字估计其时间价值的人给予应有的尊重。

然后我们用所失去的时间价值 100 亿美元（每小时 10 美元，10 亿小时）除以被拯救的 2000 人的生命，我们发现每拯救一人的生命大约要花 500 万美元。这大大高于大部分其他管理活动的费用。认为这种生命的拯救没有代价的论点完全忽视了他人的时间价值。也许，美国人以某种模糊的方式了解这一点，所以他们倾向于忽视时速限制的法律。

第十四章　航空运输

族特征

我们在舒适和安全的条件下以比 100 年前快 100 倍的速度在天空飞行，并往往能在细心的乘务员的照顾下，在指定的日子里到达目的地，这是一个真正的奇迹，但我们当中很少有人会对此多加思索。据报道，人类开始飞行是一两千年前的事，那时没有物质享受，死亡率是 50%。根据传说，代达罗斯活了下来，可他那鲁莽的儿子伊卡洛斯却丢了性命。我们经历了很长的历史。为了明确态度，看一下 1909 年 11 月《美国评论之评论》中的一篇绝妙的文章，它赞扬了航空业的最新成就，接着说道：

这些就是过去两年的成就。这确实是个不可思议的记录，甚至远远超过了飞行迷们的期望。然而，任何一位严肃和公正的观察家都看到，尽管这些飞行表演非常杰出，但它们并不能证明对这种新型迷人玩具的过分要求是正当的——它确实是玩具，至少在目前的发展阶段是如此。在它能为普通的运动员使用并与汽车一样成为公认的娱乐手段之前还有根长的路要走。这篇文章接着揭露了对飞行提出的所有的愚蠢的要求，特别是也许可以用于战争的要求。当时的预见就是如此。

目前商用喷气式飞机的乘客死亡率大约是每 10 亿乘客英里有 1 人，比汽车乘客的平均死亡率低 10 倍，比专用航空飞机的死亡率低 100 倍。根据大型商业航空公司对乘客登上飞机以后死亡的可能性进行衡量的安全记录，在过去 50 年中这种安全性提高了 200 倍，在非航班飞行中也有相应的改善。在同一时期内，机动车旅行每英里的死亡率降低了不到五分之四。（作者首先应承认他当了 40 多年的专用航空飞行员，对飞行很有感情，这也许会使他带着有色眼镜看问题，他将努力不使这一点影响他的客观性。但他在这方面做得如何应由读者来判断。）不管怎样，商业飞行确实是远距离旅行的所有途径中最安全的一种。

尽管这些统计数字是正确的，但专用航空的死亡率每年相差很大，这取决于是否发生了事故。　1980 年的定期航班中没有发生造成死亡的事故；而 1979 年则发生了迄今最严重的国内飞行事故（芝加哥 DC-10 坠毁，275 人死亡）。　1982 年死亡 233 人；而 1984 年死亡 4 人，1985 年死亡 197 人，1986 年则是 3 人。每年总共有 700 多万次飞行，运输了 4 亿人次的乘客，每人次平均飞行 1000 英里，尽管很容易求出死亡率的平均数，而且这也是我们所做的。但任何一年都可能发生一次大事故，也可能什么事故也不会发生，也可能发生几次事故——这是统计的性质。发生事故以后，就有人要求提高安全水准，而不发生事故时，我们认为这理所当然，并抱怨航空食品。

如果发生商用飞机事故，就会造成许多人死亡，国此会引起公众注意，人们会误以为航空事故的发生率较高。涉及罕见事件的平均数很难具体化，但我们仍然必须对风险作出量的估计。1988 年提交给总统的一份报告开头就说，“委员会一致认为国家的航空运输系统是安全的”，这立即给人们带来一个错觉，认为安全就像厨房的龙头，或是开着，或是关上了。它并不是龙头，而它却和许多真正的厨房龙头一样泄漏。问题的关键在于它泄漏多少。凯尔文勋爵说过，“若你可以衡量你所说的事，并用数字表达，那么你确实对它有所了解”，那些说某样东西安全或不安全的人是在偷懒，这也包括总

统委员会。

尽管专用航空系统的事故发生率要高得多（包括飞行和往返线要好一些），但所有的飞行从过去到现在都越来越安全。对促进安全起作用的是方程的各个组成部分：飞机的设计、建造和维修；引擎可靠性的提高；电子设备的大幅度改进使飞行操作在恶劣的气候条件下都很容易，连平庸的飞行员也能应付（因此阻碍了优胜劣汰的法则的实施，至少是在飞行员中）；飞行高度的增加；天气预报的改善；对风险来源的持续学习过程；以及其他许多因素。只有空中交通控制系统在过去几十年中一直未变，它只是在用新的技术去做它一直在做的事，虽然效率更高，管理的飞机数量增大。所以该系统总是像濒临绝境似地运行着。

空中交通控制系统有一个基本目标：使处于控制的飞机不相互撞击。它不负责防止飞机撞击山头或地面，或用尽燃料，或无意地翻跟头——这些是飞行员的责任。该系统属联邦航空局并由其经营管理，联邦航空局（在管制机构中是独一无二的）既负责管理和发展航空业，同时又经营它所管制的系统，它用其雇员干这些事。联邦航空局现在是运输部的一部分，但正在采取步骤——前面提到的航空安全委员会建议的——恢复其早期的独立地位。目前的这种安排既具有历史意义，又很古怪。

我们应该看一看数字。联邦航空局大约有 5 万名全日制雇员，年预算消费约 50 亿美元。它控制着大约 70 万有执照的飞行员的生活，其中 15 万名飞行员持有商用飞行执照，8 万名飞行员拥有航班运输级别。全美国大约有 20 万架正在使用的各种型号飞机，其中 3000 架是由航空公司经营的喷气式飞机。定期航班所运载的乘客是专用航空的 3 倍，而飞行次数是后者的十分之一，运载旅客的距离较远，速度较快，也更加安全，但目的地较少。全国共有 1 万多个机场，其中约有 400 个是用于定期航班，其余大部分都用于专用航空。这是一个设备和人员的丰富和复杂的混合。

联邦航空局的工作总是劳动密集型的，地面控制员对正在飞行的一架飞机负责（条件是飞行正处于控制之下——大多数专用航空航班，即大多数航班并不处于管制之下），随着飞行的继续，又把责任移交给下一位控制员。飞行员都认为管理员对正在飞行的飞行员的指示是咨询性质的，而真正负责和指挥的是飞行员。这就意味着帮助联邦航空局在控制员犯错误时逃避法律责任。任何一名飞行员都会迅速了解他与控制员的关系的实质，即控制员在操纵演出。公平地讲，控制员都能周到、出色地完成自己的工作，是一群具有献身精神的人。

飞行的基本规则一直是看见和被看见，这一规则适用于天气较好，有可能根据目视飞航规则飞行的时候，而在天气不好时，则使用仪器飞航规则。只有在像高海拔或靠近大机场这样一些特殊的情况下，联邦航空局才成为飞行戏剧中一个活跃的角色，其历史性任务是在能见度较低以及看见和被看见规则无法实施时防止飞机在空中相撞。事实上，航空公司的飞机总是依据仪器飞航计划飞行的，不管天气和能见度如何。因此，飞行总是处于积极控制之下。航空公司很久以前就开始采取这种作法，其目的是给控制系统增加负担，从而迫使联邦航空局雇用更多的控制员，提供更多的服务。这种作法果真奏效。当然，即使在执行仪器飞航计划时，也要求飞行员在能见度允许的情况下保持目视监视。飞行员们工作的勤奋程度不一样。

到 1980 年，共有 27，000 名控制员为联邦航空局工作，在全美国为飞行

在天空的平均 700 架航班飞机和 4 倍于此的专用航空飞机服务。这些数字在不同的地点和时间各有不同。大多数专用航空飞机通常不按仪器飞航规则飞行，大多数专用航空飞行员甚至受过这种训练，不具备这种能力，因此，即使是 5 班倒，仍有好几名值勤的控制员在为一架飞机服务。虽然除了飞行跟踪外还有其他一些职责，但这仍为衡量劳动密集型组织的一种方法。

1981 年，控制员工会组织了一次非法的罢工，总统谴责了这次罢工并解雇了罢工的控制员，控制员的人数下降到 17，000 人。这为迅速实施计划使控制系统现代化和改善技术与人员的比率提供了黄金机会，但这个机会丧失了；控制员的人数目前正在恢复。

在那些长期为航空安全工作的工程师当中，联邦航空局早就有着技术落后的名声。人们都知道好挖苦的人认为其动机在于保住控制员的饭碗，而其他人则认为这只是出于惯性。不管原因如何，最近的每一次主要研究——研究进行了许多次——得出的结论都是，联邦航空局的设施远远落后于现有的技术水平，而其改进速度非常慢，与技术水平的差距越来越大。这些问题不能通过雇用更多的控制员来解决，而资金也不是问题，航空信托基金有着丰富的未派上用途的资金。议员们也乘飞机，他们急切地支持控制系统的任何改进，只要发生的变化不会威胁他们在华盛顿机场附近停车的特权。（停车似乎是人类的一个较强的需求之一。一所大学的一位前任校长在别人让他描述一下自己的工作时说，他的工作是为校友提供橄榄球，为大学生提供性生活，为教职员工提供停车点。）

联邦航空局对于控制员的作用有着先入之见，一个简单的衡量手段——联邦航空局的高级管事都是前控制员，因为该系统中没有其他的提升途径——体现在工资级别中，技术员最高的工资级别，在政府级别中是 12 级（1988 年大约是 42，000 美元）；而控制员则是 14 级（1988 年大约是 6 万美元），退休安排也有类似的倾斜。

到现在为止我们还没提到雷达系统，进场系统，通讯系统，计算机系统等等，因此对于技术惯性的判断也许过于急躁。所有这些技术在空中交通控制系统中都有自己的位置，但没有一个系统接近于现代技术的能力。举一个例子，在大部分商业电视节目和私人电话早已由卫星传送的时期——卫星中继站避开了由地球球体形状造成的问题——联邦航空局没有认真的卫星计划。相反，每一架飞机在国内飞越一二百英里之后，其控制员就更换了一位，无线电频率也随之改变，就像 40 年前一样。为在不同的控制中心之间进行协调，使用了详尽的程序，联邦航空局及其控制员在这方面的工作值得称赞。

为这一切服务的导航和通讯系统惊人地错综复杂，而该系统居然能够使用，更是令人吃惊。主要的设施包括 1000 多件分离的甚高频导航设备（是 40 年前采用的那种），另外大约 1000 种较低频率的信标（其历史远远长于 40 年，实际上现在已不太使用），25 个中央空中航道交通控制中心（航线交通的所有改组、计算和协调在此进行），大约有 700 座控制塔指挥飞机进出机场，1000 多件设备的着陆系统（同样落后于现代技术 40 年，但它却是有效和可靠的，它也是替换的候补对象），几千个无线电台，在 1000 种频率上运行，许许多多的雷达（当然是过时的）向系统提供信息，许许多多计算机（同样可悲地古老，快要散架子了，并正在由稍稍不过时些的机器代替），以及一批其他设备。它们全由成千上万的控制员主持。所有的无线电和雷达设施都在地面上，因此受到视线的限制，在国土上根据仪器飞行规则进行的

飞行就是在这个由提供帮助的电子设备和人员组成的迷宫中找出一条路。

结果，整个系统运行得很不错，但怎么会是这样的呢？毕竟人不应该与成功吵架，而应该努力去了解成功。我们首先可以问一下天空中到底有多挤。

平均来说，在任何时间，天空中共有 1100 架航班飞机（1986 年的数据，它还在增加），3300 架专用航空飞机（也是 1986 年的数据，它在减少）。如果加上几百架往返和空中出租飞机，总数就约达 5000 架。飞机的分配很不均衡，东部的飞机比西部的多，低空飞行的飞机比高空飞行的多，白天的飞机比晚上多，在好天气飞行的比坏天气的多；而我们需要的是平均数。由于美国大陆的面积超过 300 万平方英里，如果飞机平均分布的话，每架飞机可占有 600 平方英里的空间，它们当然广泛地分布在从地面到几万英尺海拔的不同高度，因此飞机不会擦翼而过，即使没有一个飞行员向外看。当然，在天气好的时候，飞行员是应该向外看的，90%以上的时间天气是好的。这就是空中环境，除非靠近繁忙的大机场和在东部的其他一些地区，这些地方的天空确确实实布满了飞机。在那里，特别是在天气坏的时候，航空训练团系统就可以挣饭吃了。然而，平均来说，控制员对于防止飞行中的相撞并没有起太大的作用，因为通常地天空中并不太拥挤。

事实上，避免相撞的问题由于控制系统的存在而加剧。尽管天空很大，我们生活的世界是三维空间，通常要求处于控制之下的飞机在相当于 1000 英尺的倍数的高度飞行，例如 1 万英尺，28，000 英尺，等等。因此，它们挤在某些具体的高度，相撞的可能性增加了。此外，它们通常还须要在专门的航道飞行（空中公路），这也造成飞机的拥挤。这背后的推论是知道每一架飞机的具体位置的控制员可以使飞机适当地分散。这在大多数情况下都行之有效，但航道的开辟使它更加困难。控制系统把所有的飞机集中到一起，使其易于跟踪，然后更加努力地防止飞机相撞。

除非在大机场附近，随意的飞行也能达到相同的效果。

技术的进步很缓慢，而程序变化并不太慢，因为它们只需要一个信号，而且它们几乎总是由联邦航空局控制下的空域的扩展区构成，空域被分成惊人的碎片。

1987 年，一架墨西哥航空公司的班机在洛杉矶国际机场附近的一小块处于控制之下的空域中与一架小飞机相撞，这块空域刚好有 1000 英尺厚，海拔在 6000 英尺和 7000 英尺之间，它的上、下、北面、西南面和东面都是不受控制的空域。它的形状相当于一个馅饼，两架飞机的空中导航辅助设备都无法确定对方是否处于这一空域之中。（地图上标得很明确，但如果导航无线电设备不能确定边界，它毫无用处。与安大略的信标接通联系可确定一条边界，与锡尔滩信标接通无线电联系又可以确定一条边界，与洛杉矶接通无线电联系可以确定第三条边界。没有人能有这么多富余的无线电频道。此外，通常的作法是把无线电设备和注意力集中到降落在正确的机场上的无聊的事务上。）这并不能为处于控制之下的空域中的飞行员辩解，但确实提供了部分解释。这是一块被不受控制的天空所包围的受控制的空域，它的形状奇特。对于航班飞机来说，这并不是问题；控制员告诉飞行员往哪儿飞。由于他被引进这一禁区，他并不需要知道他是否处于禁区之中一控制员知道他在哪里。这种复杂的天空分区在所有的大机场附近都存在，被称作终点控制区。洛杉矶终点控制区有 12 块这种形状奇特的空域，每一块都有自己的海拔限制。

联邦航空局对这一事故的反应是进一步限制空域，使其更加复杂，扩大被控制的空间（其中包括把终点控制区的最高点从 7000 英尺提高到 12，500 英尺，尽管事故是在 7000 英尺下发生的）。它接着关闭了现有的航道（终点控制区的所谓目视飞航规则走廊），而开始设置这些航道就是为了避免这种事故。这一惊慌失措的反应明显具有反作用，联邦航空局不得不撤销了最后这一措施。当时的局长作这一后退值得赞扬，尽管他一开始的轻率行动并不值得称赞，保持其他那些鲁莽的变革也不值得称赞。联邦航空局的反应与事故的根源几乎无关，但却满足了一种长期的扩大控制空域的渴望。就洛杉矶而言，许多安全专家长期以来一直建议用另一种手段代替通过东面的进场走廊的空域管制。（由于太平洋在西边，因此来自那个方向的飞机较少。）不幸的是，尽管这一安排也许比复杂的终点控制区更安全，但它却减少而不是增加了控制之下的空域，因此在联邦航空局的管理阶层没有引起兴趣。许多管制机构确实认为增加控制是增加安全的同义语。公平地讲，他们并不总是错的。

航空安全的状况很好，但并不只是因为管制。对航空公司来说，真正对此起了作用的因素是他们自己认识到乘飞机的公众对偶然的事故非常敏感，如果事故太多，经营状况就很糟糕。飞行员们也知道每次飞行他们自己的生命和生涯都处于危险之中，因此他们总的来讲是一个具有安全意识的专业团体。飞行是分布着几个惊慌时刻的长时间的无聊旅程这句老话仍然正确。全国运输安全委员会估计在商用班机的致命事故中有 43%是由飞行员的错误造成的。

对安全起到作用的第二个因素是全国运输安全委员会本身。一架飞机是一个复杂的装置，会受到意料之内和意料之外的压力，飞行员也是如此。没有一位工程师能坐在图板前凭空设计出一架安全、稳固、全天候、耐错误的飞机。也没有人醒来就想象出飞机能在其中运行的整套通讯、雷达、照明、跑道、信号等等复杂的系统。同样也不可能发明出恰好适用于培训飞行员、工程师、技术员、维修人员的方案，更不用说控制员了。所有这些都必须从经验中学习。

今天的飞机从理论上讲与 80 年前的飞机并无不同,那是写本章开始引用的那篇文章的时候。引擎，结构，飞行理论知识，控制系统等等发生了巨大的变化，但对于地球以外的观察家来说，其相同点比不同点更能给人留下深刻的印象。这并没有什么错——它提供了一个学习的机会。前面引用过桑培亚那的话，即不能记住过去的人一定会重复过去；事故的发生尤其如此。围绕着运输事故的许多活动是确定指责的对象，而全国运输安全委员会的调查是针对从错误中吸取教训，其调查结果不能用于诉讼。

全国运输安全委员会并不一直是独立的，它创立于 1966 年，由运输部控制它的预算。它从 1975 年开始真正的独立，那时人们才认识到预算控制是事实上的控制。你从电视中得知发生一次大的飞机事故时，报道通常会包括联邦调查人员正在赶赴现场这样的陈述，接着你会听到事故的“可能起因”被确定为飞行员的错误，或在恶劣的气象条件中飞行，或燃料用尽引起发动机失灵，等等。这些信息来自全国运输安全委员会。

全国运输安全委员会不是一个管制组织，没有业务责任。它提出建议，而管制机构——在航空业是联邦航空局——对其提出的建议可以接受也可以拒绝。尽管有时该委员会被政治化了（其成员由总统任命），但它仍被广泛

认为是有实力和公正的。其报告当然是进行诚实的实地调查的样板。

全国运输安全委员会的中心职能——它还具有其他职能——是迫使航空系统从经验中学习。确定每一个事故的根本原因，从而提出建议，减少它再次发生的可能性。建议也许会涉及规则的改变，飞机的修改或检查，飞机员或非飞行人员培训的改善和调整，航空手册的修改，或者只是警告当心某些事情。该委员会的独立性至关重要，以防止对任何事故当事人的忠诚。即使从世上最诚实和最良好的心意出发，对联邦航空局——设计师、检查员、监督员、空中交通管制系统操作员报有期望也是太过分的。联邦航空局也许对事故的发生有一定的作用。

因此，在一段时间里调查出技术和系统出了什么毛病是可能的，认识到它有时会失灵，但不让它一次又一次地以同样方式失灵。从长远来看，这使弱点得到了弥补，而这一过程又带来了极其稳固的航空安全体制，它以系统的方式从经验中吸取力量。这是个值得学习的榜样。每个组织都会告诉你它从经验中学习，但人们从经验中得知这些声明是可疑的。我们已经引用过桑塔亚那的话，现在该引用帕特里克·亨利的话了，他说，“从过去判断未来是我所知道的唯一判断未来的方式。”

但独立性有好处也有坏处，由于调查者全国运输安全委员会独立于操作者联邦航空局，这距离有效性还有一步之差。如果联邦航空局不同意全国运输安全委员会的结论或建议，委员会只能通过劝说或对外公开来施加影响。然而，在独立之前，不太令人愉快的结论更容易被塞到地毯底下。考虑一下著名的 Dc-10 的行李舱门的事故。

Dc-10 型飞机和其他大型客机一样，其机身被纵向分为两大部分。旅客在上面，行李在下面。客舱的地板就是行李舱的顶。地板还支撑着连接飞机座舱和尾部的许多飞行和引擎控制线。（DC-10 机翼上有两个引擎，垂直尾翼有一个引擎。）行李舱是密封的，其压力应与客舱大致相等。随着飞机的升高，外部的压力减少，但为了乘客的舒适和安全，要求内部的压力下降不要那么快，通常的作法是把机舱的压力保持在海平面的水平，即使是在海拔很高的地方。因此行李舱与客舱压力相同，都比外面的压力大，中间有一层地板隔开。不管哪一个舱失去压力，都会给地板造成重压。地面人员在飞行之前必须关闭并锁上行李舱门，而机组人员则关照乘客舱门。如果有什么错误，飞行座舱的指示灯会有报告。

1972 年初，美洲航空公司的一架 DC-10 飞机离开底特律前往布法罗。在升高到 12，000 英尺的高度时，行李舱门突然被吹掉了，导致行李舱迅速减压，由于客舱的气压大于行李舱的气压，两舱中间的地板弯曲了。这损害了一些重要的控制系统，导致较大的失控。幸运的是飞机载量很小，失控是部分的，飞行员还能够把飞机飞回底特律。飞机遭到严重损坏，但没有人死亡。

当然全国运输安全委员会进行了全面调查，结论是行李舱门的门锁装置设计欠佳，门锁可以用力撞上，而门却并没有锁好。门锁装置的细节不重要，但需要指出的是关上的门可以使飞机座舱的警告灯熄灭。尽管地面人员注意到门很难关，他们显然不会介意使用力气，事故也就不可避免了。机组人员根本不知道门没有锁好。

对于应该采取什么措施，全国运输安全委员会和联邦航空局之间爆发了一场大战。安全委员会建议联邦航空局要求修改门锁装置，使得舱门在未锁的情况下不可能关上。他们还建议在客舱和行李舱之间设置通风孔，避免引

起飞机结构损害的压力差异。详细介绍涉及的人没什么意义，尽管后来发生的事件把黑帽子与白帽子*区分开来。联邦航空局拒绝要求飞机作重大的修改，而命令在 DC-10 上装一个小窗户，这样地面人员从外面可以看见门锁，从而保证把锁锁好。

1974 年，即两年以后，土耳其航空公司的一架 DC-10 从巴黎起飞，当它升高到海拔 12，000 英尺的高度时，行李舱门被吹掉了，这次飞机载满了旅客，地板的坍塌更完全，因而导致了飞机失控。这是历史上最严重的空难，死亡 346 人。除了结果不同，它与上一次事故几乎一样，而且是完全可以预防的。检查窗是安装了，但显然没有人告诉地面人员去使用这个窗户。而且窗户离地面很远，本来用起来就很不方便。

现在所有的 DC-10 飞机都得到了适当的修改。 1975 年议会使得全国运输安全委员会成为一个完全独立的机构，但那时它已失去了一些最优秀的人才。独立有其优点，特别是强制吸取教训，公牛也许需要被抵伤。

*美国旱用西部片中，坏人戴黑帽子，好人戴白帽子。（译注）

小飞机

“小飞机”一词有时被认为是专用航空的同义词，但它并不是。出版令人兴奋的杂志的出版商用他们的私人 DC-9 型飞机到处旅行时,就是专用航空部分，因为它处于航空工业以外。大部分专用航空飞机实际上很小，运载旅客不到 12 人,最常见的是运载乘客 2 人或 4 人。双人座的飞机常常用于培训，4 人座的飞机则是社区的载重马。在当地的机场遛达一圈，任何人都会相信这一点。

全国这样的飞机超过 20 万架，我们已经说过它们构成了 90%以上的起飞和降落，而运载的旅客比航班飞机少得多，距离也较短。尽管人们广泛认为这种飞行许多是为了好玩（人们称之为“云雀”），但联邦航空局只把其中的 6%定为“娱乐性”的。它包括各种各样的飞机，由各不相同的人出于不同的原因驾驶，适于归为“其他”一类。

最好的专用航空飞机装备着与大多数商用飞机一样的先进仪器和设备，而装备最次的也许限于一个罗盘，一个高度计，一个飞行速度指示器。撒农药并不需要太多的设备，而喷撒农药的飞机通常并不飞进大机场。

飞行员的技术参差不齐。在 70 万名持有驾驶执照的飞行员中（只有 4 万名是妇女），25 万人持有允许他们在坏天气飞行的级别证书。几乎所有商业飞行员都有这种级别证书,而 30 万名私人飞行员中却只有十分之一有级别证书。如果数字相加不符合总数的话，是因为总飞行员人数还包括 15 万名学员飞行员，他们也许在导师的监督下飞行，但不运载乘客。

专用航空是一个比商业航空复杂得多的混合体。事故发生率高得甚至像机动车。死亡人数最近几年急剧下降，1987 年降到 800 人以下，但部分原因是飞行时数也下降了。

对于专用航空的致命事故起因的详细统计分析由全国运输安全委员会公布，但很难找到有用的概括性结论。 1987 年发生 426 起致命事故，死亡 788 人，而事故的起因则有 426 种。对这些事故进行分类的可能性要大于进行分析的可能性，尽管任何分析也许会导致命令对同样型号的其他飞机进行某种修改。在这方面的程序与商用航空一样。其区别在于商用航空事故的发生率

较低，而死亡人数较多，调查进行得更为彻底，其本身就构成了一个独特的教训。

从全国运输安全委员会所使用的大范围分类可得出某种启示。它列出一个叫做“第一发生”的事件，即在事故顺序中的第一个事件。主要的原因是飞行中失控以及在飞行中遇到坏天气。没有一个原因会涉及另一架飞机或空中交通控制系统，而这两个原因都是完全可以避免的。这在安全委员会所确定的可能原因中得到体现，他们把飞行员列为造成 90%专用航空致命事故的因素，而恶劣气候则促成了 35%的事故。第二大类是“杂项”，这一类没多大帮助。飞行员在恶劣条件中作出了错误的处理，遇到了他们没有能力应付的天气，错误（回想起来是这样）的决策，以及总的来说糟糕的判断——这些因素造成了致命的事故。

但在这些事故中酒精或年轻人不像在汽车事故中那样成为主要原因，尽管有时也涉及到酒精问题。但它不像在公路上那样是主要影响因素。同样，发生致命事故的飞行员的年龄分布从 30 岁到 55 岁平均分配,小于 30 岁和大于 55 岁的人数则减少。这并不是因为不允许年轻人开飞机——学员飞行员获得执照的年龄要求是 16 岁，而获得正式飞行员执照的年龄要求是 17 岁——而是因为年轻人得到汽车要比得到飞机容易。毫无疑问也存在着社会因素。

也不是发生致命事故的飞行员一定缺乏经验。掌握操纵器达几千小时的飞行员也会遇到他们无法处理的情况。当然，在有了 100 小时的飞行经验后有一段时间，飞行员认为自己已知道一切应知道的事，但如果他在第一次遇到使他感到自己能力有限的紧急情况中生存下来的话，他就会成为一个更加优秀和更加谦虚的飞行员。同样的道理，在第二次世界大战中战死的战斗机飞行员有一半是首次执行战斗任务的。

不必再作补充了。大部分专用航空死亡原因不在于技术、飞机或空中交通控制系统，而在于人。大飞机的情况往往也是如此。

大飞机

空中交通控制系统的服务对象是大多数美国人所熟悉的大飞机。大飞机约有 3000 架，航空公司的经济学要求这些飞机有四分之一的时间在空中飞行。在空中的时间越长越好，因为飞机在地面上停着影响了资金的周转，且没有收入。正如我们开始时所说的，控制系统提供的主要服务是使飞机分散，特别是在天气坏的情况下。在天气好时，大多数飞行员在大多数时间里都处于警觉状态。然而，在高海拔的地方有一些松懈和自满，所有的飞机都处于完全的控制之下，分布在不同的海拔，而且飞机毕竟不是太多，在空中相撞极为罕见。航班事故，和专用航空事故一样，常常是由于飞行员的错误。当然，很难进行概括，因为航班事故极少，每一个事故都是特例，且本身都是一个复杂的故事。

很少有一个事故是一次单独的事件。一架飞机在空中航行，机上人员无忧无虑，十分高兴，然后灾难没有警告地突然降临，这种情况很少发生。对根本原因作的详细研究总是表明事故已在酝酿发生，它已通过先发生的一些小的故障或其他方式发出了信号，回头想想这些事故都是可以预防的。回头想是一种很好的手段，但你事先确实需要它时，它总是不在。在查出事故的主要原因是飞行员的失误时，这往往意味着飞行员对一些异常情况处理不

当，不管是机械的小故障或大故障，或是天气，或是任何一种他通常能够轻易应付的十几种挑战。人为失误也包括维修人员和其他辅助人员，其集体努力构成一次安全飞行。飞行员被期望应付一切剩下的问题，他是许多环节中的最后一环。他的培训就是处理异常情况——任何笨蛋都能学会在正常情况下驾驶现代化飞机。

飞机和其他安全因素非常重要的系统往往依赖于跨越一切技术的某些普遍安全原则。第一个原则是多余——大部分重要部件有两套或三套，因此有一套失灵不会损坏整个系统。这就是航班飞机有两个或两个以上引擎的一个原因，这样设计是为了在失去一个引擎时飞机还可以飞。飞行员定期练习引擎失灵程序。设备有两套，无线电也有两套，甚至飞行员也有两位，从而使得飞机能抵抗所谓的单套失灵。一位飞行员声称在飞行中所有的引擎都失灵了（在多引擎飞机上）时，其他大部分飞行员都会认为他犯了错误，或是没有燃料了。在双引擎飞机上容易犯的错误是，一个引擎失灵了，而关闭了的却是那个好的引擎。要知道哪个引擎失灵并不总是很容易。但这种令人难堪的错误并不常见，多余设备为保证飞机安全经过了很长的历程。

如果某个部件不能有两套，联邦航空局的飞机设计标准要求其夫灵的可能性“极其渺小”，尽管用概率解释这一要求很不明确。例如，现代飞机上的右翼只有一套，因此它们必须极其可靠，而事实上飞行中的结构失灵很罕见。

第二个在设计中普遍存在的安全原则叫作纵深防御。在某一设备失灵时，应该有某种备用系统以另一种方式提供同样的功能，或至少提供一个脱离失灵引起的困境的途径。如果正常的方法失灵了，总有另一种降低起落架的方法，有一些机动和电力泵。如果所有的无线电通讯都中断，雷达脉冲转发器可提供有限的通讯。在自动驾驶仪失灵时，飞行员实际上是记得如何驾驶飞机的。

、这些原则结合起来，再加上较为保守的设计，使得大的商用飞机成为非常安全的机器。这在记载中有体现。（当然，保守会导致假的安全改善的幻觉，第十章中曾强调了这一点。）

尽管不是惯例，人们还是可以对飞机作概率风险分析（第五章中描述过），从而迅速了解富余设备的提供和单套失灵的预防，再加上纵深防御，使得计算出来的失灵概率非常低。人们也可得知剩下的风险处在最难以进行概率风险分析的领域，这就是所谓的同一原因失灵，这在第五章中也曾提到。对某些事件或人为行为将破坏一架设计完善的飞机上的所有复杂的富余设备和纵深防御的概率进行预测非常困难，接近于不可能，但经验表明这种情况确实会发生。这里有一个著名的例子。只是纯粹出于运气才没有人丧生。

通常人们都认为两个引擎比一个引擎好，尽管有一些持异议者指出这使得一个引擎在飞行中失灵的机会增加一倍，要是有三个或四个引擎将会好得多。任何一个引擎失灵的概率是已知的，而两个引擎各自独立地失灵的概率也可以计算出来，该数字确实很小，但独立是关键词，而且这种情况确实会发生。

1983 年 5 月 5 日，一架洛克黑德 L-1011 型飞机（三个引擎）正在作从迈阿密到巴哈马群岛的短程飞行，机组人员注意到一个引擎的油压下降，因此关闭了这个引擎。这是防止引擎损坏的一个正确步骤，因为依靠任何两个引擎飞机都完全可以飞行。（汽车中的油压灯变亮时，我们也应该关闭引擎。）

机长决定飞回迈阿密，因为那里的地面设施较好，这也是一个合理的决定。15 分钟以后，当他们改变航程预计平静返回时，另一个引擎失灵了，5 分钟后，最后一个引擎也失灵了。这使得飞机像滑翔机那样运作，而它并不是为此设计的。他们在水上，没有动力，正在下降，真是遇到了麻烦。

在 5000 英尺左右，在使 162 名乘客准备好在海上紧急迫降后，机组人员重新发动了第一个失灵的引擎，这个引擎勉强维持到返回迈阿密。这是个幸福的结局，但一架现代化飞机上三个各自独立的引擎怎么会一个接一个地失灵呢？这种事件的通常原因被委婉地称作管理不当——燃料用尽，这是飞行员的严重失误——然而这次事件并非这样，飞机机组人员完全没有失误。

这三个引擎用尽了油，不是燃料。怎么会发生这种事？——它们各自拥有独立的油库，起飞前都检查过。当然这就是问题所在了，因为它们是被检查过的。每当某样东西被检查过，就有可能使它比检查前更加糟糕。这种飞机的定期维修的一部分无论在过去还是现在都是定期清除磁片探测器，即油管内安装的小磁片。它们被放在那里是为了吸引和抓住任何游动的钢片，这将会显示出引擎的过度磨损和损坏。装置这些磁片是为了安全的原因，每个磁片上都有两个 0 型的环，防止漏油，不幸的是，0 型环只有装上才能起作用，而这三个探测磁片都没有安装 0 型环，因此三个引擎都漏油，最后失灵。这是一个典型的同一原因故障，其共同原因在于使用同一批维修人员。这种失误很容易防止，不要让同一批维修人员检查一个有富余设备的系统中的两套设备。然而，这造成了日程安排问题，在实际中很少能做到这样。

在这个例子中，整个故事更让人灰心，这个问题一直需要得到人们的重视。在发生这一事件的一年半以前，这种引擎的漏油已发生过 12 例，其中 9 例导致引擎的关闭，而 5 例是因为安装磁片探测器时没有装上 0 型环。联邦航空局检查人员是知道这一点的，但没有想到有一天这种情况会在同一架飞机上的三个引擎上同时发生。他们只满足于告诉航空公司更加谨慎一点，而没有改变维修工作方法。

在下一部分中我们将讨论一些更加著名的 0 型环，但故事仍然属于没有认真对待早些时候发生的故障。我们似乎认为自己的生活受着魔法的保护，当然相反的事实堵住了我们的嘴。

所有的致命飞机事故，以及许多不致命的事故都受到全国运输安全委员会的认真对待，从而得到一份有关导致事故发生的情形、事件发生的顺序以及事故的主要起因的详细报告。没有一个例外，上文所写的情况的依据就是安全委员会的报告。这些报告意在尽可能以不太痛苦的方式从经验中学习，向社会提出建议。了解航空安全的复杂性的最好办法是读几份这样的报告。

宇宙飞船

严格地讲，宇宙飞船并不属于航空安全这一章节——太空中几乎没有空气——但其安全问题很自然地随着前面的叙述而来。支持太空计划的工业同样支持航空业，而工程师们则称自己为宇航工程师。技术大部分相同。设计太空飞行器所遇到的挑战要比飞机更加严峻，而安全问题的处理则更加笨拙，费用较大，飞行器也较少。总的来说，二者的相似之处证明把飞机和宇宙飞船相提并论是有道理的。

在 1986 年 1 月挑战者号的灾难之前，美国已执行了 24 次航天飞机的轨

道飞行任务，以及相应数目的航天飞机前飞行，其中有些远远脱离了地球的轨道。整整 19 年前发射台上发生了一次致命的事故，杀死了 3 名字航员，但飞行中没有任何人员死亡。飞行中当然存在着一些问题，故障，甚至还有戏剧性事件，但仅此而已。这是一个奇迹般的记录，苏联人干得和我们差不多好。是这一个成功的记录，不可避免地导致了安全系统的自满，而这种自满就是挑战者号事件的根源，它也是下一次事故的根源，尽管著名的 0 型环是悲剧的角色，自满则是幕后的恶魔。

轨道中的第一个物体人造卫星是由苏联人于 1957 年发射的，接着是一条叫做拉卡的狗进入轨道，最后是 1961 年尤里·加加林的第一次载人轨道飞行。（也许当时不到 10 岁的人不记得这些了，那部分人占现在人口的一半以上。）美国并没有落后很远，一年以后，约翰·格伦（现在的格伦参议员）进入了地球的轨道。从 1957 年到 60 年代初，美国陷于一种学术恐慌之中，害怕我们在技术方面的主动性输给了苏联人。每个人、每件事都受到了指责，特别是我们的教育体制。“遇到麻烦或处于怀疑之中时，就转着圈跑，尖声大叫”，这条口号流行于全国。很自然全国调动一切资源来“追赶”，1961 年，肯尼迪总统宣布了在 60 年代末把人送上月球并使其安全返回的计划。由此产生了阿波罗计划。重复这段历史是因为它体现了当时促成太空计划的全国性紧迫意识和献身意识。

登月计划很成功，首次登月行动按计划在 1969 年 7 月实施。在以后的三年半时间里，又进行了 5 次登月和安全返回的行动，其中包括一次戏剧性的失败，飞行员绕着月球转了几圈，然后返回了地球，从那以后再没有人返回月球。苏联人从未试过。不管出于什么原因，我们从那时起一直集中于使用无人飞行器探索太阳系，只在地球轨道上使用宇航员。许多人甚至对这一点也感到奇怪，因为他们在这类飞行中的职责并不都是只有人才能够履行的。

这并不是令人振奋的 60 年代所设想的后果，1967 年 2 月，登月之前两年多，总统科学咨询委员会颁布了一份题为“阿波罗后太空计划”的富有影响力的报告，勾画了阿波罗计划（预期的）成功以后的太空探测计划。这个计划包括扩大人对月球的探测，发展有人居住的太空站，以及雄心勃勃的载人探索行星计划。所有这些都是空想，但体现了使我们竭尽全力的热情。没有一次计划被付诸实施，使用宇航员完成航天飞行任务没有什么可探测的。宇航员是一群杰出的人，适宜于太空探测，而不应履行司机的职责。

总统科学咨询委员会的报告也建议“航空航天局研究采用一个重视计划的目标而不是实现目标的手段的规划和决策体制的优势。”现在这仍然是一个很好的建议，但它不是本书的主题。在太空中增加人的存在是一件好事——有这样做的明确原因就更好。1989 年初，国家航空和航天局宣布它将不去分散注意力，以便“专心致志地证实航天飞机系统进行安全可靠运行的能力。”不幸的是，这同样是一个手段，不是目的——手段又一次变成了目的。爱因斯坦曾这样描述他所处的时代，“手段的完善和目的的混淆似乎是我们时代的特点。”如今越变越不离其宗了。

阿波罗飞行器是飞机工业的产品，飞机工业被变形成太空工业，其现有的最佳技能被用来创立太空工业。设计、证明和测试过程与飞机设计中使用的一样，并作了适当的修正以适应新的用途。一切都进行得很好。

对使用创新的风险估计技巧例如概率风险估计作过一些早期的努力，但计算出来的发射成功的概率对于计划管理人来说没什么用处。人具有同情心

——对宇航员说，成功的机会是三比一，因此发射获得批准，这有什么好处呢？而算出的数字比这还糟。因此对安全的量的估测的唯一可能的方法失去了，如今仍不存在。在飞机工业中你可以把它抛在一边，因为飞机很多，飞行次数也很多，所以经验本身就可以有足够的成功和失败来指明方向。阿波罗计划共有 12 次飞行，全部成功的飞行经验几乎不能体现真正的安全状况。就像一个玩俄罗斯轮盘赌的人，如果每一次成功使你更加确信你肯定不会死，你就是自欺欺人，并将为此付出代价。

因此，当国家航空和航天局从阿波罗时期走向航天飞机时代时，两个普遍性的安全问题潜入了航天系统。第一（这样说有些痛苦）是民族热情消退，伺样，一流天才参与航天计划的动力也减少了。这并不仅仅就航空和航天局而言——创新计划也有自然的寿命。一开始开辟新的领域时，能见度很高，个人也可获得很高的成就和满足感——那时，为计划所吸引的人的素质是全国最好的。一个国家拥有的最珍贵的商品是素质良好的人。指出有一半美国人的智力低于平均水平很容易引起听众的强烈反应，但从定义上来讲这是正确的（照语言纯正癖者的话来讲，低于中值）。这不是社会性评价，而是无可争辩的数学事实。能力较强的人更少，当计划失去其方向时，本来就很少的这些人参与或继续坚持航天计划的刺激力也减少了。

人们广泛认为当国家航空和航天局从阿波罗计划转向航天飞机时发生了这种状况。除了这个问题以外，美国作为一个国家其数学和科学落后于世界其他地区。1988 年，教育测试局进行了一次研究，对来自美国、其他一些国家以及加拿大四个省的 8 年级学生进行了科学和数学测试。当然，美国绝对是最后一名。教育危机是真实的，而且具有破坏性。

不是每个人都超过平均水平，适应这一事实似乎很困难。我在许多委员会工作过，这些委员会中有人建议（总是为了解决一些问题）不管怎样应该让负责某样工作的人显得比实际更聪明。这样的建议没什么好处。有一次我在一个空军军官培训和教育水准委员会当主席，得知 90%的空军军官被定为“远远超过平均水准”，尽管这在数学上是不可能的。（其他部门就不能比这儿好。）有一次我听见一位著名的律师说，在发生三英里岛事故后，核工业的问题在于拥有核反应堆的公用事业公司低于平均水平的太多。当有人提醒这位律师，不管我们作怎样的努力，总会有一个最次的公用事业公司，律师回答说，在这个行业中，我们付不起这一代价。对每一个班级来说，总有一个分数最低的学生，半数的学生会低于中等水平。这样说也许很蠢，但只有 10%的学生处于最高的 10%的水平。缺少素质极好的人员来做重要和创新计划的工作，这一简单的事实似乎是我们没有勇气面对的。它打击了优越感，理应如此。

当一个计划，像 60 年代的太空计划，一直很成功时，这种转化造成的损害特别大。这培育了自满情绪，以及一种受到魔法保护的感觉。这种感觉从来不是公开的，总是被激烈地否认，但它几乎是无法避免的。没有通过事故真正展示风险，因此很容易认为事故不可能发生，而以此居功则更加容易。很少有人会说计划是在借来的时间进行的，因为过去曾有巨人的贡献。有时这不是真实，但在大多数情况下是真实的。甚至在阿波罗时代结束之前，1961 年大火在发射台上夺去三名字航员的生命时，就有证据表明国家航空和航天局对其安全计划管理不当。议会当时为航空和航天局创立了一个新的安全咨询委员会，以抵销该机构中已产生的自满情绪，而航空和航天局不想要这个

委员会，罗杰斯（总统任命）委员会有关挑战者号灾难的报告中有一章题为“沉默的安全计划”。这个题目已不言自明，但出于我不能理解的原因，这似乎并没有让那些当事人难堪，他们认为自己无可责难。

艾伦·威尔达沃夫斯基强调，所有的生物机体在其环境中需要一定水准的风险，以免它们越来越放任自流，脱离实际，最后无法应付挑战。计划也是如此。

最后，在处理罕有事故时，有两种手段可以推迟不可避免的事（除了不言而喻的那些，例如细致的工程、测试、设计、维修、培训、操作、质量控制）。一个手段是采取系统和有力的努力从经验中学习，而不是把不愉快的经历扫到地毯下面。全国运输安全委员会负责把这一积极因素带入飞机安全的改善中——而航空和航天局则没有相应的机构。这种方法也被拒绝，据说每人都有责任从经验中学习，这只不过是没有人有此责任的另一种说法。挑战者号的灾难中失灵的致命的 O 型环以前失灵过许多次，由于没有造成灾难，人们便得出了简单的结论，这样的失灵在“经验基础之内”，因此是可以接受的。自满问题还没有在航空和航天局得到解决，也许要等到下一次悲剧发生。

了解罕见事故的第二大手段是分析，具体地说是概率风险估计。第五章中描述过，它是一个系统的程序，把已知的所有部件失灵率、系统相互作用和人为失误集中到一起，对事故发生的概率作出预测，它并不完善，但比意守丹田要好得多。特别是计算出来的概率结果总是有限的，这对那些愿意在心中认为事故不可能发生的人会产生有益的效果。由于概率是真正有限的，不是零，事故是会发生的，唯一重要的问题是什么时候发生。这对那些负有安全责任的人来说是种良好的思想状态。概率是自满情绪的自然克星。

在阿波罗计划早期，航空和航天局被认为是全国使用概率风险估计的先驱，但其计算出的失败概率令人不快地高，这种方法就被取消了。（砍掉带来坏消息的信使的头。）因此，正如里查德·费曼（我们时代最可靠的天才之一）在他的《你在乎什么别人想什么》一书中所说，航空和航天局的工程师们可能认为坚固的火箭助推器失灵的可能性几乎没有，尽管有大量的统计证据表明这种火箭失灵的机会有几个百分点。航空和航天局还有一种莫名其妙的反对以数量表示风险估计的思维方式（本人由于提出这一建议而被逐出教门），但凶事已有预兆。人们只能希望不要一定等到发生新的可怕事故时才迫使风险管理体制得到改进。回忆一下，风险估计与风险管理并不同，但却是监督管理的有效性的基本手段。

这一节集中讨论航空和航天局的风险管理体制，因为这是问题所在，技术是具有挑战性的，但它也是可以管理的，而为了保证安全对这一技术的管理没有跟上。

挑战者号事故在记忆中还很清晰，回忆事件发生的顺序没有意义。O 型环可能失灵，特别是在天冷时，这些早期的警告被合理的解释，对此表示关切的人被告知忘掉自己是工程师，像管理人员那样行事；论证的重担落在谨慎的人身上，而不是落在鲁莽的人身上；航空和航天局高层管理部门甚至根本不知道发生了什么事。因此七位原本不一定会死的人死了。航空和航天局管理层对太空飞行的明显风险视而不见，这已在早些时候得以体现，它愿意运载平民乘客，参议员，众议员，沙特王储，而在这次致命的飞行中甚至运载了一名学校老师。整个故事在罗杰斯委员会的报告中得到了很好的阐述。

报告详细地说明了在这里所作的许多一般性概括的证实信息。费曼的对传统观念进行攻击的书很值得一读，其中一半的内容都是描述他作为罗杰斯委员会成员（显然是一位让人不愉快的成员）的经历。如果能在本节结束时说美国第一次丧失宇航员的震动导致了航空和航天局风险处理方法的极大改善，那将是很好的一件事，但这不符合事实。航空和航天局的大部分人都认为罗杰斯委员会的报告极端不公平。但它是公平的。

第十五章　电离辐射

族特征

大剂量地接受电离辐射对我们有害，除非接受辐射是为了治疗某种疾病，在这种情况下，益处超过了风险。小剂量的电离辐射会不会有害——没有人知道。但不管怎样，电离辐射无处不在，不可避免。它是什么呢？

我们的身体本身以及我们的环境由原子构成，而每一个原子都由一个带正电的原子核及其周围的带负电的电子构成。当电子所带的负电正好与原子核所带的正电抵消时，这个原子被称为是中性的。当它们不能抵消时——电子太多或太少——该原子就被称作离子。中性是标准状态，但外在的影响会打乱中性的平静和安宁，正如政治局势一样。有时，穿过我们的辐射能从其主体原子核上拆掉一个电子，造成一个离子；这种辐射就称作电离辐射，它有许多形式。大家对 X 射线很熟悉，而对伽马射线则不太熟悉，宇宙射线以多种方式来自天空，如果我们能够看见它们就会熟悉它们。所有这些射线都能对物质产生电离作用，包括人体内的物质。

我们习惯于医疗上以及牙科的 X 射线，这两者的辐射量大约为普通人接受的电离辐射的三分之一，它们有助于诊断病情，但也会破坏人体细胞，因此我们把它控制在最低限度。这也是有关是否应建议所有的妇女定期做早期胸部肿瘤 X 射线测定，还是只建议那些风险最大的妇女做的辩论中的一个问题。胸部 X 光和其他医疗程序也有类似的问题。剂量最小的 X 射线是坐在一部彩色电视机前所接触的。（在屏幕上形成画面的高速电子会产生 X 射线，它们被减少到“安全”水平，但并不能完全被厚厚的屏幕玻璃挡住。）公平地说，那些“软”X 射线并不会深深进入人体。损害很小，而社会效益则是可以争论的。

医疗上的 X 射线是自愿接触辐射的例子——三分之二的辐射是非自愿的，那是自然辐射。宇宙射线占每位普通美国人接受的辐射量的 20%，而且不可躲避，即使是在最深的洞穴之中。其密度随海拔的升高而增加——在丹佛的密度是海平面的两倍——在高海拔飞机中，商用飞行机组人员和乘客们吸收的更多在现代高飞的喷气式飞机中飞行的航空机组人员所接受的辐射超过一般公众被允许接受的剂量，与地面上大多数辐射工作人员接受的剂量一样多。但他们不受任何管制，通常也无人监督他们接受的辐射量。经常乘飞机旅行的人会接受两倍于“正常”的辐射量，宇航员接受的辐射量更大，特别是苏联的那些在太空中呆了一年以上的宇航员。地面也含有散发电离辐射的材料，我们的房子也是如此。我们的身体也散发辐射，主要来自钾（一种基本的营养物），对于这，我们显然无法逃避，这使我们感知这样一种经验：一个人睡觉安全，而两个人睡则不安全，原因在于辐射。

除此之外，我们和苏联在 1962 年停止了大气层核试验，却留下了逐渐衰竭但仍然可以探测得到的辐射残余。核电厂通常释放少量的放射性物质；发生事故则释放较多。核废料心须小心地处置。空气中含有放射性的氡及其生成物。香烟的烟中含有放射性的钋。眼镜使用的玻璃中含有微量的放射性的铀和钍。陶器也是如此。

这听起来像是一个恐怖故事，让你惧怕辐射。但所有这些辐射源中的大部分只散发极小的剂量，对健康的影响处于最低限度（如果有的话），尽管

人们普遍存在对微量辐射的恐惧。

计算辐射量的单位是伦姆（发现 X 射线以后的辐射生物剂量单位），1 伦姆为 1000 毫伦姆。先不谈氡，氡本身就是一个故事，所以以后再谈。普通美国人每年接触 150 毫伦姆的辐射，它们来自不同的辐射源（包括睡伴）。在核设施工作的工人每年所允许接触的最大辐射量是 5000 毫雷姆，一般公众是 500 毫雷姆。我们不知道这个数量的辐射是否会造成伤害，甚至有人认为辐射和葡萄酒一样，剂量小时对健康有益。（这里所使用的“不知道”一词只有一方面的意义。我们知道这种辐射不会造成太大伤害，但不能证明它丝毫没有伤害。谨慎要求我们假设它是有害的，但这也许是错误的。）

公众每年接触 500 毫雷姆的极限低于人们接受到的从彩色电视机中散发出来的 X 射线剂量。当然在电视机前坐的时间太长的人，大脑被那些节目变成浆糊的可能性更大，因此辐射从总体来讲也就无关宏旨了。

有关辐射对人类影响的所有直接信息来自人们遭到严重辐射的几次事件，无论是偶然的或是有意的。当然也有动物数据，其提供的警告与化学物质的情况一样。回到雷姆这个单位（记住 1 雷姆相当于 1000 毫雷姆），我们知道接触 400 雷姆辐射量的人会有一半死亡，尽管适当的治疗能减轻伤亡。这是从偶然遭到辐射的少数人身上和二次大战中出于愤怒使用的两枚原子弹中得知的。这一知识在苏联的切尔诺贝利核事故中得到证实，该事故中有 31 人死亡。

在比这小的剂量的辐射下，也许是从 50 雷姆到 400 雷姆，人们会患辐射病，其内脏会受损害，但通常能幸存并康复。在 200 雷姆以下，几乎肯定不会死亡。广岛和长崎的许多人接受这个剂量的辐射后活了下来，切尔诺贝利大约有 100 人也是如此。在 50 雷姆以下，我们的身体能对付得了。这并不是说没有后果，只是我们进入了一个不同的机制，在这个机制中没有发生明显的严重损害。然而，辐射也许已括下了种子，促成癌症在 10 到 15 年后发生。这是大多数人最害怕的后果。

我们知道中等剂量的辐射会引起癌症，大部分证据来自原子弹幸存者。但还有其他例子，像人们在不清楚其风险之前出于医疗目的使用的辐射。例如，僵硬脊椎炎是一种脊椎疾病，一直用中等剂量的 X 射线治疗，正如头皮上的一种金钱癣，癌症在接受这种治疗的人当中较为常见。但这种剂量在 100 雷姆以内，在我们通常接触的低得多的剂量水平，从未显示过任何损害。重复一下前面多次说过的话，这并不意味着没有损害，只不过是可能会有的任何损害都无法探测。

所有的管制问题都属于低剂量体制，在这个机制内，尽管缺乏知识，但仍然必须作出保护公众的决策。全国科学研究理事会的电离辐射生物效应委员会作出了最具权威性的估测，虽然并非没有内部的争论。根据集体专业知识，他们断定辐射引起的癌症的概率很可能是剂量的线性和二次函数的结合。这意味着概率的大小并不直接与辐射量成正比，而是小一些。这个半官方的估测被用于所有对具体事件的后果的估测之中，比如切尔诺贝利。这是我们所有的最好的估测，委员会明确承认不知道 100 雷姆以下的剂量是否对人体有害。知识的缺乏实际上也扩展到较高水平的辐射。（在写作本书时，电离辐射生物效应委员会的最后一份报告刚刚颁布，该报告把以前对低水平辐射的后果的估测往上调整了大约三倍。这是根据二次大战中日本受害者接触辐射量的向下修正。这是一个动态问题。）

这一点很重要是因为，人们从新闻界阅读的所有有关成千上万的俄国人在未来 50 年中将患上来自切尔诺贝利的癌症的报道都是以这些估测为依据的。也许不会有一例癌症，但这也不会有人知道。电离辐射既不是有益于健康的，也不是人们常常所描述的可怕的魔鬼。

电离辐射的益处几乎还没提到，因为这是一本有关风险的书，但辐射的名声如此差，以致不提它的益处也不显得不公平。X 射线的许多用途人们都熟悉：它们能诊断疾病，帮助按照原来的样子而不是人为和危险地安置折断的骨头。通过放射性示踪器进行医疗诊断现在很普遍，正如对癌症进行辐射治疗，而它有时候能产生疗效。在甲状腺中积聚的放射性的碘被用来治疗良性或恶性的甲状腺疾病。医疗研究定期使用辐射示踪器。手表表面使用的镭比以前少了，但照明使用的氚（这是放射形式的氢）比以前多了。辐射源被用来研究关键结构的金属部件，并为太空探测提供能量。用辐射法确定年代对于考古学、地质学、人类学及其他许多“学”非常重要。我们很快就要讨论核能。但辐射最古怪的用途是测试酒精饮料的真伪。乙醇是酒精饮料得以存在的必要条件，生产乙醇的方法有多种，传统方法是用粮食、葡萄、蜜糖或其他含碳食品发酵制成，但乙醇也可用石油这样的矿物质合成。美学家可能对前者比后者（石油葡萄酒？）更喜欢，但这谁能知道呢？酒精就是酒精，人体并不知道两种酒精的原料的区别，但它仍然是事情的要素。

碳有几种形式，称作同位素（不同重量的原子核），除了两种，其他都具有放射性。放射性同位素寿命很短（下文会讨论放射性物质的半排出期），因此碳的古老样品只含有稳定的同位素，其他的同位素早就衰变了，煤和石油都很老——它们几乎不含有任何放射性同位素。然而在大气中，宇宙射线的持续辐射产生了补充主要的放射性同位素 C14 的供应的核反应。因为植物呼吸了空气并吸收了其中的二氧化碳作养料，所以任何用植物制造的东西都含有 c14，其以后的衰变可以观察得到。（C14 的半排出期超过 5000 年，比任何人想要确定的好酒的年代都要长。）因此有可能通过辐射手段得知某种酒精饮料是从矿物质中合成而来的，还是纯威士忌酒。好酒具有放射性，而合成品则没有。政府的测试表明一些进口的酒精饮料辐射量不够大。

核　能

当科学界大部分人都被二次大战中原子弹的研制吸引住时（理查德·罗德兹所著的《原子弹的生成》一书是对那一英雄时代的杰出描述），有些人则在思索在战后的世界中用这种非凡的新能源发电。它似乎是一种基本上取之不尽的资源。科学界被打了一下屁股，因为 1954 年被电声称也许最终将十分便宜，不必再计量，但从未有一位科学家说过这样的话。和科学家不一样，政客和将军对他们所说的话不负责任，甚至当事人也是错误引用的。1988 年，核动力为我们提供了 20%以上的电力，煤提供了一半以上。煤有它自己一系列的风险，这留在下一章讨论。

开始人们认识到核电厂将在某个地方聚集大量的电力和辐射，造成严重的安全问题。任何泄漏到环境中的辐射都可能造成损害，因此核安全工作一直是把辐射限制在适当的地方，甚至只在事故中。使用核动力含有风险，正如其他风险一样，问题在于把它控制在可接受的水平上。

（我在政府的几个核安全咨询委员会工作，主持该论题的几项研究。下

面的观点和书中其他观点一样是我个人的，同意这一观点的人令人沮丧地少。我在提倡更加重视核安全的同时也是核动力的支持者，因此我被我的支持核动力的朋友看作太反对核动力了，又被我的反对核动力的朋友看作太支持核动力了。这就是生活。）

核能源来自某种特别敏感的原子核的裂变，其中最著名的有铀的同位素，铀-235 和一种人造元素钚的同位素。所谓的原子时代（用词不当，因为裂变的不是原子）始于发现这些可裂变的原子核可以通过被称作中子的亚原子粒子的轰击而大致分裂成两半，这会释放极大的能量，从而可用来发电。一个目前最普通的核电站大约能容纳 100 吨的氧化铀。裂变能被用来烧沸开水，从而产生蒸气，蒸气又带动汽轮机发电。在蒸气被萃取之后，核电厂与一个煤厂、炼油厂或天然气厂没有太大的区别。反核者们乐于取笑核能，说这只是一种烧沸开水的新花样，好像他们知道怎样挥一挥手就能让水沸腾。所有的工程师都知道沸腾的水是把热能转化成其他形式的能的极其有效的方法。以同等重量计算，铀-235 所含的能量是煤的 1000 万倍。

裂变以后的原子核留下一种辐射性极强的裂变碎片的残余物，这是绝对不能进入环境的辐射物质。反应三英里岛和切尔诺贝利——写作本书时发生的两起最著名的核事故——的许多卡通片展示了一个遭损坏的反应堆，上空有一团暗示的蘑菇云。然而一个核反应堆像一颗原子弹那样爆炸从科学上来讲是绝对、明显地不可能的。（这句话写得尽可能地明确和不含糊，使用了过多的副词，因为这个问题总是出现。）卡通片的编辑们并没有对他们的创作负责。

我们并不企图轻视风险——正在运作的核反应堆中心的辐射量的确很大，不论从前面的哪种标准来看，因此具有巨大的潜在危险。用特别的措施使其处于适当的位置是完全正当的。

它是怎么出来的呢？日常的放射性辐射被控制在少量的水平上，基本上没什么风险，因此问题存在于事故中。反应堆中有能使裂变在反应堆内停止的系统（如果在运作），但即使在裂变程序完全停止之后核碎片仍能产生热量。如果反应堆正在满负荷运转，且已经运转了一段时间，当它被突然关闭后，它还能够

产生相当于它关闭前所产生的电能的 7%的能量。这种能量被称作衰变热，将在几小时、几天、几星期和几个月的时间里慢慢减少。这是一种惯性滑波，不可避免。尽管 7%像是个小数字，它仍然相当于 2 亿瓦的电，足以供应一座小城市。因此反应堆必须持续地冷却，即使是在关闭之后，否则它会融化。如果它真的融化，这就叫做堆芯融化事故，有可能造成灾难。在三英里岛，部分核心融化了，但没有造成灾难；面切尔诺贝利的结果要糟糕得多。

在正常的运转条件下，裂变反应由控制系统有规律地打开和关闭。如有异常情况，它们也能被立即关闭，自动关闭或手动关闭。做这项工作的特殊系统被称作停堆系统，这项工作极其重要，因此它必须异常可靠。（核工业界前辈当中对于紧急停堆（SCRAM）这个表达法是否是个缩略词有一场激烈的争论。由于他们各人的记忆不同，我们也许永远不会知道了。）尽管紧急停堆系统有时曾部分失灵，但从未发生过像切尔诺贝利那样的全部失灵。

美国的反应堆每年都平均分配几个紧急停堆系统，日本稍少一些。一个紧急停堆就像一个炸面圈——你可以注意它好的部分也可以注意中间那个

洞。每一次紧急停堆反映安全系统的适当运转，这很好，但如果安全系统受到太多的挑战就不好了。需要时紧急停堆失灵了，问题将十分严重，紧急停堆用得越少，它失灵的可能性也就越少。核工业界有一种奇怪的行话，异常情况造成偶然但有规律的紧急停堆被称作“预期紧急停堆”，因为一定程度的异常状况是不可避免的。也有非预期紧急停堆，其定义是“所有其他”的紧急停堆。

研究最多的核安全问题涉及冷却的丧失，无论是由于管道破裂还是反应堆冷却系统的其他故障。如果反应堆中心充满水并保持这种状况，通常可以避免融化，否则问题就大了。如果反应堆失去了冷却剂，就会发生冷却剂丧失事故。这种事故很容易想象——即漏水——因此它是 70 年代反核团体的注意中心。但它不是引起真正麻烦的可能性最大的因素。70 年代对丧失冷却剂事故的注重导致了对其他安全问题的疏忽，促成了三英里岛的事故。

商用核企业有多安全？它朝着哪个方向发展？

概率风险估测的技术在核能界是最先进的，因此我们能够较好地计算一次大型核事故的概率。那种“末行数字”估测具有很大的不确定性，但仍然比猜测强。对美国反应堆最好的现行估测是核心融化事故发生的概率是每个反应堆每万年一次，而释放到环境中的一次大的放射性机会是这个数字的十分之一或百分之一。如果认真对待这些数字，可以预计核心融化事故在目前运转的 100 多个反应堆中大约每 100 年发生一次。无法有任何把握地预测本世纪内是否会发生一次核心融化事故，因为预测的技术没那么好。也许不会发生，但无法作出承诺。

这些数字与核管理委员会公布的安全目标是一致的（这毫不奇怪），但当然应该有所保留地对待。不定因素很大。随着时间的推移，以及智慧和经验的积累，我们将知道更多。

事　故

三英里岛

1979 年在三英里岛二号反应堆上发生的事故引起了全世界的注意，三英里岛是萨斯奎汉纳河中的一个小岛，离哈里斯堡不远（但远远超过了三英里）。这是有史以来第一次严重的核事故，每晚电视节目都有报道，是整个文明世界的头条新闻，纠缠了人们一个星期。它还增加了电影《中国综合症》的上座率，制片人很幸运地描述了一个类似的事件。

反应堆核心部分地融化，公用事业遭受惨重的财政损失，核管理委员会的声誉被完全和理所当然地玷污了，无法规避的总统委员会演完了自己的角色。散发的辐射很少，没有人受到伤害。然而该地区人口遭受的心理损害与肉体伤害同样真实。

核安全团体经过了一次小恐慌，有些反核团体对事故感到不可辩解地欣喜若狂。核管理委员会颁布了 200 条变革要求，其中有些到现在还未履行，而对一个小事故作出 200 个变革的反应是一种恐慌性的反应，在安全问题上稳定是一个长处。太多的变革，特别是没经过分析的变革，是个坏主意。这些指令性的变革中没有一项，真的没有一项，是通过分析以确定其长处的。这是一种疯狂的制定规则的行为。

这起事故本身很简单。在凌晨 4 点左右（事故总是在凌晨发生），反应堆几乎在满负荷运转，反应堆给水系统被截断了。这自动地引发了为保持核心冷却而设计的一系列事件（包括紧急停堆）。有些泵被关闭了，而另一些泵被启动，包括两个辅助给水系统的泵。不幸的是，连接这些泵和反应堆的阀门关上了，几乎用了 10 分钟才整理好。这些阀门根本不应该关闭，到现在还没有任何人承认关阀门一事。尽管没有证实，但正如上一章所述的洛克黑德 L-1011 型飞机上的 0 型环事件一样，维修很可能是罪魁祸首。

当阀门最终打开，水泵开始运作时，事件本来应该过去了。（给水中断在火力发电厂也是经常发生的事。）不幸的是，在一开始的压力下自动打开的一个阀门总是不能适当地关闭，当有人发现时，已太迟了。这是一场悲喜剧，未关严的救急阀门不停地泄漏，反应堆渗漏以至停转，水泵根据错误的紧急程序而被关闭，操作人员忽视了监测仪表中有关事故发生的信号（令人恼怒的阀门一直有点泄漏，因此泄漏未被认真对待），整个形势的严重性逐渐降临了。4 个小时以后才重新恢复了控制，但核心的损坏早已发生。损坏过程在头两个小时内的任何时刻都可以被扭转，那样的话，我们就很少有人能够在地图上找到三英里岛了。

总统委员会（肯米尼委员会）很好地处理了这件事，事故一开始是机械性的，得到多次人为失误的帮助，是自满情绪不可避免的结果。从未发生过事故的工业开始认为事故不可能发生。这听起来是否有点耳熟？

几年以前的 1975 年，一个开拓性的核反应堆概率风险估测已经完成（拉斯马森研究）。尽管有其他问题，这份研究报告正确地断定核心融化事故最有可能的原因是瞬变现象（一开始中断给水是一种瞬变现象），小的冷却剂丧失事故（泄漏的阀门就是小的冷却剂丧失事故）和人为失误（有很多）。这一事故，或多或少是可以预见和不可避免的。但核工业和管制力量都没有作出适当的反应——他们对研究的主要结论即核事故不太可能发生感到十分高兴。他们也处于反核势力的围攻之下，而后者又愿意强调大的冷却剂丧失事故。负有责任的人很多。

对于自满情绪似乎没有一种疗法或预防法，一项成熟的技术其弊病也是如此，除非它经常经历促人清醒的非灾难性事故。如果概率研究预测事故概率不是 0，也没有一项可靠的研究得出其他结论，这就意味着事故会发生——唯一有帮助的问题是什么时候发生。不意识到这一点将损害民族的健康和福利。

这个事故带来一大批新的规则，尽管其中有许多考虑不周，但总的来说产生了积极效果。当然对该工业的管制比以前更严格了，这也许并不完全有益，但确实更为现实了。也许该事故最有益的效果是更加强调操作人员的质量和行为，以及核工业认识到事故会造成经济灾难。该工业发起建立了一些团体以交流安全信息，并且努力在全国制定一个共同的安全标准，这至少是同样重要的。尽管不可能使每个人超过平均水平，但有可能提高平均水平并帮助落后者。

此外有一个观点，作者对此非常重视。这是商用核工业发生的第一个大事故（写作本书时本国政府核设施的第一次事故还未发生），因此它可能促成一种完全是全国运输安全委员会风格的由公正的专家进行的治疗方法，尽可能不带偏见地吸取所有的教训。事故发生前两年就有人建议建立一个机构做这项工作，当然它被核管理委员会成功地抵制了。（当时的一个论点是这

个组织将无所事事，因为没有核事故。）但发生了许多大小事件以后，还是没有这样一个独立的考察机构，这意味着没有人负责评价核管理委员会这个管制机构的工作作得如何。反核团体的人不可信赖，因为他们公开宣称的目标不是增加安全而是关闭核电厂；同时也不能依赖核管理委员会来管辖它自己。议会也不能提供帮助。

因此每当发生一次引起公众注意的灾难时，总统就任命一个特别委员会对其进行审查。这总是会引起负责该领域的机构的强烈批评，在委员会解散后，批评会随着时间的推移而消逝。自满情绪又会卷土重来，一切又恢复原样，人们不易于作自我批评。三英里岛事故以后，卡特总统任命了一个总统核安全监督委员会，试图保持一定水平的监督，但里根总统却让这个机构悄悄地消失了。在他们的内心深处对核管理体系中不协调的复杂性的最合理的解释是，许多参与者仍不相信有可能发生大的毁坏性事故。他们错了。

切尔诺贝利

1986 年 4 月的核事故使我们大多数人第一次知道有一个叫作切尔诺贝利的地方。这是迄今为止最大的核事故，是第一个产生大量放射性释放的事故。反应堆核心的大部分炸到空中，在整个苏联西部、斯堪的纳维亚和东欧都可以探测到辐射。事故首先是被瑞典人发现的，他们担心这是他们自己的一个反应堆的问题。由于切尔诺贝利反应堆完全地遭到了破坏，该事件可成为核事故方面最严重的了，很难想象还有比这更糟的事故了。

事故（当然）是在黎明之前开始于乌克兰的一个大城市基辅附近的一个由 4 个反应堆合成的 4 号反应堆。这个反应堆和三英里岛的那个不一样，它没有满负荷运转；它几乎根本没有运转。操作人员在进行一个测试以显示反应堆能经受某种假设性事故，测试的目的几乎没什么问题。

作为测试的一部分，反应堆被假定进入了一种在正常运转下被禁止的运转机制，这种情况如果在现实中发生就会导致紧急停堆。为在测试中防止紧急停堆，操作人员因此关闭了许多安全装置，因此当反应堆真的遇到麻烦时，它没有自动的逃避手段。事故本来不一定会发生，但操作人员显然很自信，这种反应堆非常安全，事故实际上是不可能发生的。他们很自满——到现在这话听起来应该耳熟了。

为了弄明白这个事故，我们需要简单地了解一些有关反应堆的情况。反应堆能够工作的原因在于裂变的原子核释放中子，而中子本身又诱发其他裂变原子核的裂变，从而有可能建立一种链式反应。在这种链式反应中原子核发生裂变，释放中子，中子引发其他原子核裂变，又释放中子，如此类推。由于裂变原子核释放了几个中子，而维持这种反应只需要一个中子，这样就有许多中子在活动。所有的反应堆因此都有一些措施吸收多余的中子，通过控制棒或吸收中子的物质，或者干脆让中子离开核心。控制棒吸收中子。想使反应堆紧急停堆，所要干的就是迅速插入吸收中子的物质。到目前一切都顺利，但你已被无耻地欺骗了。

上面所述的根本行不通，因为反应非常迅速（l 秒钟的极小一部分），如果只要有一刹那没有足够的吸收物，中子过剩，那么远在采取任何可能的措施之前，链式反应就会失控。这是原子弹的工作程序，在原子弹爆炸过程当中阻止它是很难的。但自然比这要友善。裂变产生的中子中的一小部分，

大约 1%被称作缓发中子，需要整整 1 秒钟才会产生，而这仁慈的 1 秒钟就使得控制反应堆成为可能。有的中子需要更多的时间，有的时间少一些，但 1 秒钟是一个合理的平均数。

在反应堆的运转机制中，每一次裂变立刻释放的有效中子数（称作迅发中子）略小于 1，这与需要的正好是 1 的数字之间的差异由缓发中子填补；它们可以被控制。这是一个微妙的平衡，是所有反应堆可以控制的基础。

但这里有条很重要的警告性说明，如果控制棒拉得太远的话，仅靠迅发中子就可实现连锁反应，灾难就会接踵而至；反应堆就会进入“瞬时临界的”状态，这就是切尔诺贝利发生的事，细节无关紧要。这是另一个悲喜剧，涉及一个基本的设计缺陷和许多人为失误——但反应堆的工作人员能让这种事情发生确实是不可想象的。

反应堆的顶被炸掉了，到处释放辐射。事故发生以后，苏联人作出了英勇和良好的反应。那些遭受过度辐射的人（最后有 31 人死亡）主要是消防队员，他们在致命的辐射环境中和大火作战，他们是真正的英雄。人们只能赞叹苏联人的反应，以及他们后来愿意与国际社会分享事故信息的表现，在那个夏天，他们很细致地这样做了。值得注意的是当苏联人向国际原子能机构报告时，他们一开始就说这个事故不会让他们放弃核能，因为核能发电对环境的害处最少，切尔诺贝利发生事故的那个反应堆现在被埋葬在混凝土中，但该地的其他 3 个反应堆仍在运作。

到 1990 年初，该地另外两个正在建造的反应堆（同样类型）已停建，三个正在运行的反应堆的未来还不清楚。苏联内部对其核计划的质量作了一次重大的重新估价，进行了不可避免的改组。许多刚计划好或正在建造的旧型反应堆（包括切尔诺贝利型的所有反应堆）都已停建。此外，公开性掀起了极大的反核情绪，给核计划带来的后果难以预测。

作为一个傍注，切尔诺贝利反应堆的设计不同寻常，它使用石墨使中子减速——慢中子比快中子更能产生裂变——美国也有一个大型反应堆使用石墨减速剂，这个者式的反应堆归能源部所有，位于华盛顿州的汉福德。最后的决定是永远关闭这个反应堆，不是因为有可能发生切尔诺贝利那样的事故，而是因为它不符合现代安全标准。该反应堆过去通常被用来为核武器规划制造钚。归属能源部的反应堆合乎现代标准的很少，如果有这样的反应堆的话。我们的国家存在着问题。

事故反应

如果发生像切尔诺贝利那样的核事故，它对公众的真正威胁是什么呢？风险来自那些通常被约束在反应堆核心中的放射性物质的排放，而反应堆主体的周围围有大家熟悉的圆顶形的防护墙。（切尔诺贝利没有防护墙——苏联反应堆有的有防护墙，有的没有。）辐射是致命的东西，但并不是一点点辐射就立刻把你击倒，而是由于本章开始所提到的原因——辐射会导致癌症。

重大核事故中最重要的事故管理问题是很明确的：把公众接触的辐射量控制在最低限度。在最坏的情况下，人们还必须保护食品和水的供应，并处理土地恢复和清扫。接触的辐射量越小所受损害就越小。有一个临界点，在此以下，即便辐射造成了损害也是注意不到的。

核事故（及大多数其他事故）管理的第一个原则是我们不应该从最坏的情况着手解决问题；我们不应该把我们所有的计划建立在我们能够想象的最坏情况的基础上。发生最坏情况的可能性最小，作最坏的打算使我们对现实无所准备。想象一个消防队所作的一切培训和购买的一切设备都是为了和100层高的摩天大楼内的“冲天大火灾”[1]作战。消防队员将等待一生并在处理废纸篓和停车场火灾时遇到麻烦，而后者才是消防队日常遇到的典型事件。

不幸的是，人们对核事故非常恐惧，因此事故规划者们一直不可能避开最坏情景：几乎所有的规划都是为大事故准备的。这一恶性循环导致了控制系统工程师所说的不稳定性——即一个主要为大事故作计划的人似乎更值得赞扬，这又意味着他的计划较好。结果是公众永远听不到除了巨大的破坏以外核事故还会带来什么其他的后果。规划者们很快地自己也就这样认为了。

减少核事故中的放射性辐射接触有三种方式：等待，逃跑，和躲藏。所有的放射性物质都会在一定的时间内衰变（即变得无害），有些需要几秒钟或更短，有些需要几分钟，有些几天，有些要几百或几十亿年。与公众所相信的相反，短命的放射性物质最具有放射性，而长命的放射性物质几乎没有什么放射性。躲藏起来等待短命的放射性物质衰变以后再出来是明智的。此外，有些放射性物质——事故开始时的所有的放射性物质——是由空气传播的，强劲的风会使其蔓延。等待的两个原因是放射衰变和风。

普通的建筑材料可以起到一定的抵抗放射性的作用。到屋子里去，希望能在家里，有地下室的最好在地下室里，这样做比较合理。当然应该打开收音机或电视，以便从当地的事故专家那里获取信息和建议，但不要求助于晚间新闻节目，后者在三英里岛事件中干得很糟，他们激起了恐慌，而这一事件最后是给公司的股票持有人带来了最大的损失。

然而，你不能无限期地等。大多数有害的放射性物质的半排出期（它衰变到二分之一能量的时间）有 30 年左右，在此之前早就必须采取措施。在等待和躲藏以后，在适当的时间离开这个地区，快速跑步离开。等待的时间或许是几个小时或几天，取决于事故的细节，应由那些这时已被动员起来的专家决定。这种减轻痛苦的行动的顺序，即躲避以后重新安置，几乎对所有的严重核事故来说都是最理想的，这接近于切尔诺贝利事故中苏联人的反应。美国的反核团体错误地批评苏联人没有命令人们立刻撤离。苏联人良好地处理了他们前所未有的紧急情况，许多个人表现得很英勇，并且没有惊慌失措地过早撤离。在必须撤离时，他们撤离了，也许他们慢了点，但慢得不多。

与我们对这种意外事故的规划进行比较结果如何？我们重视尽早撤离，我们只是嘴上讲讲等待和躲藏战略，而重点是在迅速逃离。要获得开设核电厂的执照，有关的公司必须表明有可能撤离事故发生地方圆 10 到 15 英里（取决于具体情况）之内的所有人，不管风向如何。这显然需要地方当局和州府的合作和参与，他们负责所有的事故反应，而法规要求经常进行联合操练。有些地方和州级官员反对核能——这是如今的好政治——并得知只要拒绝参加紧急撤离操练，就可以阻止核电厂获得执照。马萨诸塞州州长杜卡基斯就采取了这一举动阻碍邻州新罕布什尔州一家核电厂获得执照。纽约的长岛目前出现了同样的状况，纽约州的库尔莫州长的立场已转变为站在受人欢迎的

[1] 美国一部电影的片名。（译注）

反核的一方。

上面大部分内容远不仅与核事故有关。对大多数事故的计划都必须考虑周到，其战略应具有足够的灵活性以应付各种大范围的意外事故。计划得太详细是错误的，因为这种计划不可避免地要强调最严重的灾难，而小的意外事故在这种作最坏打算的计划中又没有涉及到。此外，人们并不能真正预见事件发生的顺序。区别战略和战术很重要，战略是一项有效的行动方针的广泛和灵活的概要，而战术往往是详细的蓝图。只有拙劣的建筑师会让后者支配前者。美国前总统艾森豪威尔曾说过："订好的计划毫无价值，而制订计划则可应付一切"。

没有得力的领导，就没有一项战术会起作用，首先必须了解谁在负责。据说在军界这可以通过数军官肩上的星星的数目来决定，能数到 5 就够了。谁站在星下这个问题不如所有的人由一个人指挥重要。作者有一位朋友过去是军人，他说如果你在打胜仗，指挥才能从不重要，而如果你在打败仗，指挥才能就很关键。对核事故来说，经验表明政府的最高官员将负责——切尔诺贝利事故时戈尔巴乔夫先生这样做了，尽管他具有良好的意识，他把一位有能力的科学家派到现场——而这位官员根据他的直觉行动。由于他在这方面的培训几乎没有或者很少，他的行为将主要取决于他对顾问的选择。

事先对领导的安排对公布较少的事故也是很重要的。在加州，也许在其他地方，当小火灾有时跨越不同的管辖范围时，消防部门懂得最初起火的地区的消防队队长应负总的责任，而其他地区的消防队给他提供帮助，不管大火蔓延到什么地方。显然通情达理的人必要时可通过谈判转移权力，但保持一个明确的指挥结构的原则是正确的，《加利福尼亚互助计划》（原来是 1950 年由厄尔·沃伦州长签署的）中有关的一句话写道，"需要互助的事故，在其管辖范围内发生的地方负责官员应在事件中负责，包括指挥这种互助计划对他提供的人员和设备。"这里没有含糊之处。如果明确了谁在指挥，那么这个人将与他的下属进行双向通讯，交流良好的建议和信息，这样就可以对事故管理采取重大步骤。在这些事务中，核事故是孤儿。

强放射性废料

裂变产品具有放射性，反应堆用过的燃料棒载满了裂变产品，在一个典型的反应堆中，有三分之一的燃料棒每年更换，大约每三年全部更换一次。而对用过的燃料棒必须予以处理，它们因放射性太强而无法处理，一般刚开始储存在反应堆场地的水下。放射能会逐渐衰减，水可以提供长时间的冷却。问题在于在它们的放射性"冷却"到一定程度后怎么办——冷却需要一二十年。

用过的燃料棒并不完全是废料。它们开始时是铀的同位素的混合物，其中最重要的同位素的重量是 238 和 235。U-238 是迄今最常见的，但并不特别具有可裂变性，而 U-235 是可裂变的，但它的含量只是自然铀 0.7%。对美国反应堆来说，通常的做法是把 U-235 的含量增加到大约 3%或 4%，因为这使得使用普通的水作为减速剂成为可能。普通的水较为便宜，水源也比重水丰富，加拿大的商用反应堆和我们一些政府所有的反应堆使用重水。剩下的铀的同位素是 U-238，在被一个中子撞击后它就生成钚。（过程稍稍复杂一些，但这是通常的结果。）有些钚是可裂变的，重新使用钚似乎很合理，但

钚也可用于核武器，卡特总统因此在很早以前就决定美国为世界做一个好榜样，不对用过的燃料进行再加工以获得钚，因此我们不这样做。这就把钚留在用过的燃料中，使得核废料处理更为困难。而作为一个好榜样，我们的举动则是一个错误。

（尽管从上文中可得出某些推断，但本作者既提倡实施有力的核不扩散，也不反对采取强硬措施支持值得实现的目标。然而，作者不相信善意的姿态能成为威慑核欺骗的手段。有些国家通过谎言和欺骗来掩盖其鬼鬼祟祟的核武器计划。要阻止这些国家不仅仅需要善意的举动。）

核废料会衰变，在它仍有可能造成损害时必须把它置于人类的环境之外。很难确定什么时候它不再有害，但经过几百年的时间，核废料的放射能就会衰减到它们的原料矿的水平。在那以后，如果废料一直被埋着，放射性辐射总的来说已从地球上消除，而储罐如果愿意的话可以破碎，它们当然不会。

这里有一点很重要，是理解强放射性废料问题的关键。所有的放射性物质都有自然的半排出期，在这段时间里，物质的一半衰变成其他东西。这种其他的东西也许有放射性，也许没有——如果具有放射性，它又有自己的半排出期。或者会有两种或两种以上的衰变产品，其中任何一种或所有的产品可能具有放射性。例如，如果半排出期是一天，那么一天以后这种物质剩下一半，两天以后还剩四分之一，三天以后还有八分之一，等等。反应堆强放射性废料是 100 多种不同物质的混合体，每一种都有自己的半排出期，因此其衰变率是所有这些物质的复变函数。在短命的物质衰变以后，剩下的将是原来的混合物中寿命较长的物质。一个原子核在衰减时会发射辐射，如果它的半排出期长，这将持续一段时间。因此，有关对强放射性废料将在几十万年中一直具有极强放射性的恐惧只是杜撰。寿命长和放射性强二者是对立的。这就是为什么几百年后核废料就不再具有极大的威胁的道理——短命的强放射性的物质早就衰减了，剩下的都是较为良性的。不是完全良性的，而是相对来讲较为良性。废料混合体基本分为两大类，半排出期不到几百年的原子核，和半排出期很长，比如，有几百万年的原子核。因此，似乎只把核废料隔绝几百年，只剩下那些较为温和的物质，一切都会好的。如果原来的分离出钚以进行再加工的计划没有放弃，这就是所要发生的情况，但废料中还有钚的两个同位素。其中一种的半排出期是 6000 年，另一种是 24，000 年，它们的半排出期比短命的物质长，放射性能又比长寿的物质强。这就使事情更难办了。

反应堆关闭之后，典型的核废料的辐射在第一年中衰减 99%，在随后的 10 年中又衰变 80%，在随后的 100 年中又衰变 90%。在此之后，衰减则取决于物质的特殊构成，但衰减很稳定，没有任何已知方法来增加或降低衰减的速度。

处理计划（像 1989 年的）是把废料连同其中的钚包装起来，把它埋在内华达州一座山的深深的洞穴中。没有人要它，因此它必须被塞进内华达州的喉咙，这也许不大可能。环保局为储存器设立了标准，要求它保持 1 万年完好无损，到那时放射物相对来讲将成为无毒物质。环保局要求储存废料的方式应使未来的人，假定他们为无知的野人，如果无意把这些东西挖出来以后也不会受到伤害。除了这一假设有明显的骄傲自大以外，未来的人很可能将欢迎这些储罐的发现，这些储罐里的东西那时一定很紧缺。

这种骄傲自大值得强调。我们设想自己比过去的人知道得多得多，当然，就科学和技术而言，这也许是事实。而设想我们比未来的人也更有能力则意味着我们把自己看作是人类最高级的表现形式，处于所有时候人类发展的巅峰。这是一种迷人的想法，只是有点自负。

当然不会把核废料倒入一个地洞中，然后盖上一块油布。目前的意图是把它转化成一种特别硬的状态，把它浇铸成固体玻璃，防止任何可能通过储存器的地面水的渗透，然后把它装进更难以渗透和耐久的储罐中。最后，把它埋进一个深深的、稳定的地质储罐中，让它在那里等待地质变化或未来人类的处理。

一个大反应堆运转一年所产生的强放射性废料有几立方码，相当于一辆小吨位卡车的容量。当然它的密度要大于通常的卡车货物，会使卡车的骨架弯曲，但毕竟没有堆积如山的物质。

如果这些物质按照计划被埋起来，对风险进行估价就有可能。而结果却发现风险小得可笑，起码比本书讨论的任何其他一种风险小 100 万倍。这种风险就像能想象到那样小得可以不被重视。但在这个问题上的舆论的鼎沸声却使决策机构寸步难行，到现在还没有一致的解决方案。解决技术问题很容易，但解决政治问题却不可能。其他国家好像发现了路途较为容易，也许是因为我们要为一个由缺乏受过任何技术教育的人的政府付出代价。事情并不总是如此——本杰明·富兰克林是一位有成就的科学家。强放射性废料处理是无风险的。

对于那些最担心 1 万年后从储藏罐渗漏出来的废料会进入生物圈的人，这里有一个真实的故事。尽管我们是普通人类中第一个发现如何建造核反应堆的人，但大自然很早以前就这样做了。大约 20 亿年前，在现在非洲的加蓬，正好产生了使得某些自然的铀的沉淀物发生核裂变的适当条件，并在实际上产生并维持了一个链式反应。没有人知道它持续了多长时间，也许有几十万年。这本身就很吸引人，但与强放射性废料处理有关的是大自然并没有这些花哨的储罐和山洞来储存其核废料。废料就呆在原来的地方，经过 20 亿年还是未动。经过精心选择的地质条件，现代技术，制作精密的储存器，人类的才能，和深深的掩埋，做到百万分之一似乎应该是可能的。我们所计划的储藏地必须能持续和罗马废墟或埃及金字塔一样长久的时间，如果我们的工程师没有这种技术，我们就会遇到很大的麻烦。甚至目前储存地安全标准的颁布者环保局也预测‘在整个 1 万年的时间内，它引起的死亡人数不会超过 1000 人”。注意“不超过”意味着上限，是保守的估计，很可能实际的数字要小得多。即使上限也相当于每 10 年有 1 个人死亡，而在美国，每年有 200 万人死亡。这是一个没有价值的问题，把精力放在更重要的事务上才符合国家利益。

氡

当我们列出美国人对电离辐射的“正常”接触量时，氡及其衰变产物被明显忽视了。我们现在必须补上这个遗漏，而它确实是一个很大的遗漏。严格地讲，氡这个论题不属于一本有关技术风险的书——氡是自然产物，正如宇宙射线是自然产物一样。宇宙射线来自天空，氡来自地面——瞧它们多么具有互补性。

一个多世纪以前，人们认识到，在东德和捷克斯洛伐克目前的边境附近的埃尔兹山地区工作的地下矿工特别容易得肺癌。甚至在更早的一两个世纪前人们就知道矿工容易患上严重的呼吸道疾病，当时被称作“矿工病”。这种病曾经很神秘，只是到了近代才被最后发现。这些问题是呼吸了放射性岩石散发的氡气及其生成牧而产生的。所有的岩石都具有某种放射性——这就是我们所居住的地球。现在还有其他几个涉及不同群体的地下矿工的病例，包括美国在科罗拉多高原上工作的采铀矿工。氡气及其生成物容易使人患上肺癌。

氡是以铀的同位素 U-238 为父本开始的一长串放射性活动的最后产品，铀在地壳中无处不在，其平均浓度在百万分之一到几之间（以重量计算）。U-238 的半排出期是 45 亿年，大约相当于地球的年龄（所以现在仍有一些 U-238），它经过五个步骤的衰变变成镭，镭又衰变生成氡。氡本身的半排出期是 3.82 天，而且更重要的是，它通过释放一种高能量的氦原子粒（称作阿尔法粒子）衰变成各种寿命较短的次极粒子，而这些粒子又通过散发阿尔法粒子发生衰变，对人的肺造成巨大损害。这不是一个简单的过程。

氡是一种稀有气体，不是因为它有皇族祖先，而是因为它不能像氦、氩、氖等一样形成化学键。稀有气体又称隋性气体，同样这也不具有任何社会含义。因此我们吸进的氡以同样快的速度又呼了出来，在它呆在我们肺部的很短时间内不大可能发生衰变。如果它不衰变，它就不会造成伤害。但含有氧的空气总是同时含有一定浓度的氡的生成物（称作衰变产物）。衰变产物不是隋性气体（铅、钋、铋是主要罪魁），因此它们能够也的确粘在灰尘粒上，粘在肺中。在那里它们可以自由地等待，从容不迫地衰变，释放出最后能对人体造成损害的阿尔法粒子。因此危害最大的是衰变物而不是氡。

正常的空气中氡的含量有多少？它的害处有多大？原始时代存在的铀在土壤中到处都有，因此镭（铀的衰变产物，氡的直接父本）也存在，其浓度较低。由于镭的半排出期（大约 1600 年）远远短于铀，实际上每个由铀衰减最后生成的每个镭都衰变成氡。（这就像一个挥霍的人靠不足的津贴生活。他把镭用来变成氡，快得就像他能从铀中获得镭一样，就像他可能一等到津贴支票就很快花光。支出的速度由收到支票的速度决定。现实生活中的挥霍者也许能通过贷款弥补亏空，但大自然不允许这样。）因此生成的氡的数量就是铀衰变的数量。由于氡是一种惰性气体，在它注定要在地球上呆的几天中，有一部分渗出土壤的顶层，飘到大气中，等待它的命运。其命运当然是衰变。

辐射量的单位称作居里，以皮埃尔·居里的名字命名，居里和像他一样杰出的妻子玛丽由于发现了镭而一同获得了诺贝尔奖。 （1906 年他在巴黎被马车撞倒而死。）居里，缩写为 Ci，开始被确定为相当于 1 克镭的辐射量。用处最大的是微微居里，相当于 1 居里的万亿分之一。大约是每 30 秒钟的衰变。典型的户外土壤上方的空气的平均辐射量相当于每升十分之一微微居里，0.1pci/l，1 升相当于 1 品脱。（总有一天会通行公制。）

和宇宙射线一样，氡无处不在，确实无法逃避，我们在户外与它的接触量相当于宇宙射线的辐照量。氡及其衰变物的特别问题在于它们在建筑物(和矿）中积聚，这些地方的空气不流通。在户外土壤中释放出来，它们被强劲的风刮到高层大气，因此它们被大大地稀释了。然而房屋却以一种或另一种方式建在地面上，多少有点密封，显然，户内空气中氡的浓度取决于房屋底

下和周围是哪种土壤，从土壤到房屋的途径和通风程度。我们的母亲告诉我们新鲜空气对我们有益是正确的，即使她们掩藏的动机是让我们离开屋子，通风和建筑结构可以影响一所房屋中的氡的浓度和积聚的衰变产物的数量。尽管两者都会产生影响，但室内氡的浓度要比户外大得多。

更明确地说，户外空气中的氡及其衰变物的平均浓度由土壤种类和平时的风决定。由于氡的半排出期有几天，从土壤中渗出以后，它有足够的时间与空气进行完全混合，它在空气中的浓度取决于土壤提供氡的速度和它被刮入高层大气的速度。如果它很快就会刮走，周围的氡气就不多，否则就相反。而衰变产物的生涯与此不太相同，它们是活性化学物质，能够在氡渗出土壤的时候粘于土壤。因此氡从土壤中渗出来时它的一些衰变物被刮掉了。一旦脱离了土壤，氡就开始（通过衰变）补充衰变物的供给，它在脱离土壤后的半个小时中做这件事。之所以是半个小时是因为衰变产物的半排出期在几分钟到半个小时之间。屋内可积聚高浓度的氡衰变物，通过把氡储存较长时间使其得以衰变，特别是在通风不好的时候。而衰变物则长时间地粘在肺部，从而又发生衰变。

很难直接地把氡诱发的辐射和其他自然来源的辐射作比较。氡衰变物对肺部和呼吸系统的其他部分造成损害，而宇宙射线影响全身，医疗和牙科 X 射线则影响身体的某些部位。通常的方法是找到共同点，不管多么不完善，用“全身剂量”来表示所有的这些接触量，从而可以进行比较。根据这一惯例，氡的每升一微微居里的辐射量大约相当于宇宙射线每年的 200 微雷姆，因此普通美国人接受的实际氡的剂量相当于其他辐射来源的总和。这给人印象很深，所以氡已成为人们主要关心的公共健康问题。

我们不知道这是否对健康有害——采铀矿工为氡气的损害性提供了最好的信息来源，但他们的接触量要大得多。这是人们熟悉的低度辐射的后果问题——损害极少以至无法探测，并且没有直接的证据表明会造成任何损害，为谨慎起见，我们设想存在着损害。

然而，在这件事上，有两个因素使得风险较为真实。第一是不同的房屋氡气浓度相差很大，有限的调查表明在同一地区不同的房屋差别很大。有些房屋的氡气含量比别的房屋高 1 千倍，情况最糟的房屋的浓度接近于采铀矿工的接触的剂量。没有大范围灾难或人们在街上倒下的可能，但对于我们有些人来说，存在着一些风险。

环保局建议，如果对封闭房屋的初步甄别测试表明氡的浓度高于 4pci/l，对这个问题应谨慎从事并给予重视；如果该数字超过 200，则应立即采取行动；而如果数字不到 4，不必采取行动。这些建议并不是没有道理，尽管风险，如果有风险的话，在浓度较低的水平上非常之小。

第二个特殊的因素涉及到吸烟。肺癌仍在美国流行——1986 年诊断出有 15 万新病例，而诊断出有此病至死亡其平均时间不到一年。这是一种可怕的疾病。肺癌最常见的原因当然是吸烟。根据医务总监的报告，吸烟造成的死亡人数占死亡总数的 90%，肺部和呼吸道的其他部分也正是氡及其衰变物袭击的地方。尽管氡本身只稍稍增加了得肺癌的风险，但吸烟和氡侵袭身体的同一部分使得它们的后果有可能综合或互相产生作用。如果一个人是烟民，他是否更容易染上氡气诱发的癌症？其可能性是否会超过这两个因素相加的和？

回答这个问题的最好方法是对接触和不接触氡气衰变物的吸烟者和非吸

烟者的可比较的死亡统计数字进行研究。因此要观察 4 个小组。由于吸烟造成的后果较大，因此最好集中研究最常接触氡气的人——矿工——并调查他们的吸烟史。这项工作很难，特别是在那些已死的人当中，但对于现有的少量样本作了研究。写作本书时，这一数据的最权威的分析是由全国科学研究理事幸于 1988 年公布的，报告一开始就承认数据与工作要很不相称（因此需要进行更多的研究），报告断定目前的证据表明两个因素的综合效果大于二者相加，这意味着烟民特别应该远离充满氡气的房屋。当然，他们也可以接受这样的房屋，放弃吸烟。

第十六章　矿物燃料

族特征

第十三章描述了 1973—1974 年阿拉伯石油禁运给美国带来的一部分创伤。禁运暂时（幸亏是暂时）震动了我们，使我们脱离了舒适但又是虚假的对于能量供应的安全感。能量这个词属于部类其一般意义与技术意义没多大关系的词，科学家把能量定义为做功的能力或潜力，而做功则是另一个这种类型的词。在告诉初学物理的学生如果他们在头上顶一个大铁砧呆一个小时，那么他们什么功也没有做时，他们会大为震惊（而且有点不相信）。做功意味着物体在一种力（另一这样的词）的作用下运动一段距离，不管你信不信，这个词意义名副其实。这应该阐明一切了。

人们最多想到的能量是其来源，对美国来说，它们是：矿物燃料（煤、石油和天然气），在古代的树木和植物这种物体的燃烧残余物；水电；在海拔较高地区让水在阳光下蒸发获得的太阳能；核能，地球某些原生成分中储存的能量；以及其他一些较小的来源。在人类历史的大部分时期，能量通过动物的力获得（力是能量使用率），而最常使用的动物是人类自己。我们使用所谓的生物量转化；我们吃的食物（化学能）被转化成其他形式的能，后者又被用来做功。我们是以食物为燃料的发动机，而我们可花费的大部分能量过去是被用来使我们持续获得燃料。

驯服较强壮的动物来替我们做功是人类福利中的一个主要步骤。一头公牛一天中能做的功是人的 10 倍，而马则更多。“马力”这个词的发明是为了描述一匹好马一天平均的做功率，所以机械引擎可以直接与标准的马相比。（实际上，真正的马做一整天的功不到一马力，发明这一词的詹姆斯·瓦特也许认为他的马没有尽力。）如今甚至小型的汽车和拖拉机做的功都相当于一匹马的 100 倍，因此我们局限于人的肌肉的日子已过去很久了。这一解放的重要性很容易被低估。在美国，我们每个人的日均能量消耗率相当于 15 匹马的工作，而且是很卖力的工作。这就要求我们每个人拥有一个可容 50 匹马的马厩——马也需要休息。

能量最重要的一个事实是它不能从无到有。我们所能做的只是从形式上把不太有用的能转换成较为有用的能，从自然中收集原始的能。太阳就是在这样做，它在燃烧它形成时继承的那些成分。幸运的是，太阳所拥有的能量足以持续几十亿年，因此没有理由立刻发出警报。这一难以了解的事实，即能量的守衡，古人并不知道，而其全部含义只在过去一个半世纪人们才明白，这最早是在 19 世纪中叶，人们认识到热是能的一种形式，接着是本世纪初爱因斯坦认识到质量可以转换成能量，反之亦然。我们现在知道能有多种形式，而且科学也比以前发达得多，但能量守衡定律没有任何迹象显出它的弱点。我们使用我们所继承的，仅此而已。

能量的各种形式和使用可以概括为所谓的能量预算，收入对支出，而美国多年来一直处于赤字状态。这一赤字一直由进口其他国家的石油所填补，以金钱作为给他们的报酬，这是造成目前的贸易赤字的巨大因素。（目前大约三分之一的贸易赤字，每年将近 500 亿美才，用于进口石油，这一数字只会增大。）1973-1974 年石油禁运后很短的一段时间里，我们通过储存来削减进口，但现在又恢复到了以前的水平，而代价则更高。我们最终将对这种

挥霍承担费用。 1988 年，我们的进口石油占我们石油总供给的一半，而这一比例在上升。最大的供应国是沙特阿拉伯、加拿大、委内瑞拉和墨西哥，读者可自己对供应国的政治稳定性作出判断。

当能量从一种原先的形式转化成一种更有用的形式时，大自然的一个不可改变的定律要求付出一个代价。能量没有丧失——这是热力学的第一定律——但第二定律注定了它不能被完全转化。从一种能源中获取的有用功的比例被称作转化过程的效率，它总是不到 100%，不仅仅是你得到的比你投入的少，而且通常要少得多。历史上有力我们设计“永动”机的发明家，他们违反了热力学的第一或第二定律，有时同时违背了两条定律。这些全是欺诈，许多人自己都被欺骗了。像癌症庸医或其他假医生一样，他们的事业仍然兴旺，只有对相信他们的人造成伤害。

热是一种形式的能，可用来做功，（以一辆蒸汽机车甚至汽车作证）效率不高的能量转化所丧失的能量通常表现为被丢弃的热量。人体在把食物的能量转化为有用的功时效率为 25%，原来能量的 75%变成了废弃的热。所以如果我们作强度较大的运动就会“过热”——我们的身体在努力处理那些废弃的热。身体通过提高皮肤的温度并最终通过出汗来做到这一点。

因此能量转化时的损失不可避免，我们把它作为能量转化时的代价来接受。我们的能量总供给的三分之一以上用于发电，通常的效率在 30%和 40%之间，尽管水电的转化效率很高。（大多数较好的水力资源已在使用，对剩下的进行开发会造成不可接受的环境破坏。）汽油和柴油发动机的效率大约在 20—25%之间，太阳能光电池（吹嘘过分但仍在改进）的效率大约在 5—20%之间，电力发动机（在其他东西已经生产电力以后）的效率

大约是 90% ，等等。

我们的大部分能量由燃烧矿物燃料而来（1987 年将近 90%），而且矿物燃料快要用尽。最有潜力的燃料是煤，根据目前的使用率，它也许能持续几百年——估计各有不同。对能量长期供应的问题没有已知的解决方案，特别是世界人口还在增长，第三世界渴望达到工业化国家的生活水平。有大多的人提供简单的却又是虚幻的解决方法，没有任何用处。

有一个有趣的关于能量供应的事实，它是里查德·威尔逊指出的，它也许有助于正确地看待问题。所有的煤都含有微量的铀和社，一般是百万分之几。如果有可能从一吨煤中收集这些微量的铀和钍，在核反应堆中燃烧，提供的能量是直接燃烧煤的 10 倍，当然这样做从技术上和经济上都不合理，但这表明核燃料含有多少能量。铀 -235 的一个原子的能量相当于煤中一个碳原子能量的 1 亿倍。以同样的重量计算，我们曾说过，比率接近于 1000 万。

矿物燃料主要通过燃烧碳和氢产生能量，就像我们吃食物一样。煤主要由碳构成，石油含有碳和氢，而天然气中的氢多于碳。要燃烧这些物质，我们让它们与空气中的氧气化合，释放热量。热量接着转化成更有用的能的形式或者直接用来供暖，同时把它的化学废物倾倒到大气之中。燃烧碳剩下的废料是二氧化碳，而燃烧氢则得到普通的水。这与我们燃烧我们自己的燃料所呼出的废气一样，不管是巧克力块还是肉排。我们没有其他选择，只能倾倒。

煤和石油中还有其他一些不可燃烧的成分，这些或者形成灰烬或者被直接倾倒到大气中。在现代的燃煤工厂中，使用洗涤器减少这些有问题的残余物的释放，而洗涤器的工作可以做得很好。然而，这些工厂做得并不完善，

释放的废料可以引起对环境和健康的一些危害，这是燃烧矿物燃料的代价。最大的问题，而且是真正具有毁灭性的问题，是由二氧化碳造成的，本章后面将讨论这个问题。

许多年以前，奥托·冯·弗里希写了一篇古怪的文章，描述一个想象中的社会，其成员长期把核能作为唯一的能源。他们知道某种埋藏在地里的黑色物质已经有一段时间了，这种物质在部落仪式上被用来给物件上色。最后他们发现了如何燃烧这种物质并释放能量。当然他们立即认识到其排放物、燃烧生成物和污染物都很危险，因此把它们释放到大气中是不可想象的。这一显然无法解决的废物处理问题使他们一直没有开发这种本来很有前途的能源。有些人提出一些疯狂的建议，例如把废气收集在巨型气球中，把气球放在地球轨道上，但这些只是不切实际的解决方案。似乎没有什么好办法。因此他们很妥善地舍弃了这一发现，从此在空气清洁、能源充足的环境中幸福地生活。

这个故事并不太牵强。如果我们没有养成燃烧矿物燃料并把垃圾倒入大气的习惯，现在开始也许不太可能。但我们的习惯已养成。嗜好毕竟是嗜好。

大气的平衡和构成问题不仅仅与燃烧矿物燃料有关，但它们是主宰因素。倾倒废物的习惯，和我们所有的倾倒习惯一样，可上溯到人类对地球的影响很小的时期，那时“自然”过程可以轻易地吸收我们的垃圾。这一吸收非常有效，以致于考古学家找到古老文明的剩余遗物或人工制品时欣喜若狂——大部分古代文明早就消失了，没留下任何痕迹。这一古老习惯变成目前的一大问题是因为人类已成为地球的一个主要组成部分，并且人口的增长没有止境。引言中曾说过，在污染问题从仅仅是有害和令人不快变得难以控制之前，人口增长问题早已殃及自身了。

酸　雨

煤和石油不仅仅由碳和碳化氢构成，甚至连天然气也是不纯的。其燃烧产品因此混合着各种污染物，大部分是有害的。即使燃料本身是纯的，它们释放能量所燃烧的空气也不是纯粹的氧气——它含有 78%的氮气，在很高的燃烧温度下会受到化学影响。内燃发动机里的高温还会形成更多的有毒排放物。大约 40%的石油用来供应汽车和卡车，一半的煤用来发电。

在燃烧生成物中，由煤和石油中的硫污染物形成的二氧化硫，是酸雨的主要来源；我们在进行控制中所作的努力大多都是针对二氧化硫的。

问题何在？酸一词通常让人想起给沙拉调味的醋（醋酸与水的混合），或者汽车电池中浓度较大的硫酸溶液。然而有一个用 pH 值衡量的准确定义。酸的反面是碱，例如碱液，而 pH 值则测量一种物质是在一条线上的这一头还是那一头。纯净的水被认为是中性的，其 pH 值为 7.0，而酸溶液的 pH 值则只有 2 或 3 或更低，而碱的 pH 值则是 10 或 12 或更多。当我们遭受酸中毒时，我们肚子里的 pH 值太低，当我们摄取碱以“中和我们的胃酸”时，每年有数十亿美元换了手。所有生物机体包括人类的活动对环境的 pH 值都很敏感，并依赖于保持一个较稳定的内在 pH 值。人体的正常 pH 值是 7.4，稍稍偏向碱性这一边。每个园丁都知道山杜鹃在酸壤中长得最好，pH 值在 4 至 5.5 之间，而大白菜则更喜欢稍具碱性的土壤，pH 值将近 8。 pH 值度量法是对数式的，pH 值的增加变化会导致酸度的乘积变化。 pH 值从 5 到 4 意味着酸度是原来

的 10 倍。

尽管纯蒸馏水的 pH 值为 7.0，但天上下的雨从来都不纯净。雨从地面水的蒸发而来，但它在变成雨落下之前的很长一段路程使它有时间溶解大气中的一些成分，这改变了它的 pH 值。远在人们开始把垃圾倾倒入大气中以前，雨就有些酸，而地球对这种东西已习以为常。这当中的机制很简单，大气含有一些来自有机物质腐烂的二氧化碳，而其中有些发生了溶解。这使得正常的雨变成了很稀薄的苏打水，或碳酸。典型雨水的 pH 值大约是 5.6，在中性的酸性这一边，但我们的植物和动物是可以接受的。

最近几年在世界的某些地区，包括美国的东北部和加拿大的东部，雨水的 pH 值稳步下降，给庄稼、鱼类和树木带来严重损害，甚至著名的德意志森林也未能幸免。这是我们的错——我们人类把大量可溶解的气体排入大气，它们溶入了雨水。主要的罪魁是二氧化硫和氮气的氧化物。两者都来自矿物燃料的燃烧。

有的煤含硫量较低，石油也一样。低硫燃料显然更受人欢迎，但它们也更加昂贵，距离使用地点也更远。我们已经提到过燃煤工厂的洗涤器。最佳的解决方案是少烧些煤——法国的问题就不太大，其电力的 70%来自核能。

如果我们坚持燃烧煤，“清洁燃烧”的代价非常之高，我们不愿意支付。然而，酸雨丝毫也不尊重国界，出于国内原因不愿付此代价的国家也许由于国际关系而被迫这样做。其惩罚不可避免的是能量费用的提高，无论是通过改进燃烧技术，使用较纯净的燃料，还是减少能量的使用。所有这些都会强制造成生活水平的下降，很少有国家会自愿地接受。

迄今为止我们的国会有“勇气”通过了一项法律，即 1980 年的《酸雨法案》，该法案下令对这个问题进行研究和估价，我们甚至对我们的加拿大朋友承诺要对酸雨“干些事情”。环保局具有控制空气污染的广泛权威，但这个问题实在是太庞大了。美国上空的大气如今每年吸收 2500 万吨的二氧化硫和几乎同样数量的氮氧化物，主要来自东部各州。东部有些地区雨水的平均 pH 值下降到 4.0，森林受损，水系——湖泊、溪水和鱼类受损。不幸的是最纯净的煤离这很远，在西部。没有一项清洁燃烧多杂质煤的技术特别有效，尽管有许多方法现在在使用，而且所有的方法费用都很高。人们可以梦想从煤的排出气体中去除 80%的硫，而实际做到的要低得多。而硫并不是唯一的祸害。除了放弃燃烧矿物燃料外，没有永久的解决方案。即使在那些部分解决的方案中，没有一种不会影响我们的生活水平，或不造成很高的费用。当对环境的关注与我们的生活方式相矛盾时，我们对环境的热心受到了考验。

致命的污染

燃烧矿物燃料生成的排放物也有害于人类健康，而二氧化硫对此也有作用。氮的氧化物，臭氧（氧气的一种），粒子和其他数量较少的成分，对我们的肺部造成损害。肺的损害很可能是接触少量物质积累起来的后果——在一个充满烟雾的城市呆一天会刺激肺但通常不会致命——但有关致命的信息很多都来自一些极端的插曲。

我们不想一一列举这些事件。对于覆盖着许多大城市的黑色浓雾已有许多文字记载，伦敦是最糟的之一，因为工业革命传播了煤的燃烧。然而，有关人类健康受影响的数据不久以前还是逸事，人们没有去收集统计数字。即

使没有详细的数据，也有足够的信息证明严重的空气污染事件会夺去一些人的生命。最经常的情况是大气逆温，它造成洛杉矶定期的烟雾。即使对这些戏剧性的事件，也几乎不可能整理出不同的燃烧生成物的后果——所有的事情同时发生。

美学方面的论点就足以说服许多国家和城市努力控制大气污染物，因此不太可能重复本世纪中叶发生的污染插曲。此外，主要的健康问题和通常一样，是大量人口长期接触较小浓度的肺部刺激物，因此存在着人们熟悉的对微弱后果进行数据解释的问题。健康问题与癌症不同，癌症有着假定剂量与后果的线性关系的长期历史。与此相反，大气污染物引起或加剧支气管和其他肺部疾病，并有可能使那些本来就身体虚弱或特别敏感的人加速死亡。这些插曲没有一个严重到使健康的人突然倒下，尽管有些事件（例如 1984 年宾州的多诺拉发生的）影响到人口中很大一部分，而其他一些事件（例如 1952 年的伦敦）与那么多的死亡相关，而其死亡人数毫无疑问具有统计上的意义。

有些人对空气污染比其他人更敏感，还有一些人有着使他们更易受到侵害的个人习惯（例如吸烟），这似乎是合理的，当然，患气肿同时又呆在刺激性空气中当然不好。但如果想要以数量表示这些陈述，我们缺少硬数据。许多调查者曾尝试进行统计学家所说的回归分析——清理出两种或两种以上原因的后果——但令人困惑的变量非常多，数据非常分散，而又互相矛盾。例如，收入较低的人往往居住在靠近大城市中心的地区，这里的空气较为肮脏，而且他们吸烟的人也多。如果他们的健康受到影响，那么其原因是空气、贫困，还是吸烟？回归分析必须说明这些题外的因素。

尽管问题很复杂，奇迹在于对燃烧矿物燃料造成的死亡的不同估计取得了较为一致的结论。不算煤或石油的采矿和运输造成的死亡，分析报告的数字表明燃烧矿物燃料每年在美国杀死的人在 5000 到 5 万，尽管不太精确，但数字在这一范围内这个事实本身就意味着这些排放物使得矿物燃料成为迄今最致命的能源。而烟雾中的辐射污染物还没有提到。

温室效应

1988 年的夏天炎热异常，不仅仅是由于总统竞选的激烈论战，而且并不是只有这一年炎热。自从上个世纪中叶全球性气温记载开始以来，最热的 5 年都在 80 年代，它们是 1980、1981、1983、1987 和 1988 年。这使人印象深刻，这也许是纯粹的巧合，也许不是。

造成这种情况可能有多种因素，许多人认为这只是统计波动。这不一定是温室效应的早期显示，许多专家预测温室效应将在 30 或 40 年后出现，但也可能是。不管怎样，现在对此并无太多的事可做。那么什么是温室效应呢？

园丁们非常熟悉温室的使用，这是用玻璃笼罩的空间，保护脆弱的植物不受酷寒或酷暑的影响，同时又给予这些植物足够的光线，使其成长，没有供热的温室通常比外面温暖，因此春天的发芽季节来得比外面早些，而秋天的生长季节则比外面长一些。寒冷的天气并不能阻止温室里结冰，但温室总比外面暖和一些，特别是在晴天。

这都是源于光线的一种特别和奇妙的特征，它的多种颜色。光是电磁辐射，电磁辐射的波长（单个波的长度）各不相同，从很短的由 X 射线集中体现的波长到很长的给我们带来音阶音乐的中波无线电的波长。每一种可见的

波长都有电磁辐射。光，我们所能看见的电磁辐射，其波长在我们的眼睛感觉到的很少范围之内，这些波长很小——20 万个将布满这一页——但没有这些波长这一页上的字你就看不见。光的较长波长称作红色，是较短波长长度的两倍，较短的波长称作紫色。彩虹展示了所有颜色的光供我们享受，紫光在里面，红光在外面，它是一个圆圈，对站在地面的观察者来说这个圆圈的中心总是略低于地平线。最后当然总是一团金黄。

太阳光的主要波长在我们的视觉范围内。这似乎是一种奇怪和惊人的巧合，但这当然不是巧合——我们在这种光中进化，我们的眼睛逐渐进化到能够看见这种光。如果你能看见周围的事物，生存的机会就大大增加了。太阳也散发一些波长长得我们看不见的光——叫作红外线——和波长短得我们看不见的光——叫作紫外线。大气挡住太阳这些光的一部分，幸运的是正好是紫外线，当我们进行彻底的日光浴时，紫外线会造成晒黑的斑或皮肤癌。不管好坏如何，太阳是我们在地球上生活的热量来源。

不幸的是，太阳并未很好地胜任其工作。如果地球在离太阳这样远的距离（9300 万英里）吸收跟现在一样的太阳光，而且没有温室效应，平均的温度将是华氏零下 20 度左右。在这种温度下难以生存，更不用说很不舒服了。地球之所以能够居住的唯一原因是大气层像一个温室那样发挥作用，利用太阳辐射和地球辐射的波长的区别。

的确，地球也散发辐射，正如宇宙中一切物体一样，但其辐射的波长长得多，肉眼看不见。物体温度越低，其辐射的波长越长。有些特别的红外线胶卷使你可以拍摄一块热铁上看不见的辐射。金属工人和铁匠能从一块红色的钢的颜色深浅中看出它的温度有多高。

地球的红外辐射的波长相当于正常太阳光的 20 倍,而大气层像温室的玻璃一样知道两者的区别。它让大部分可见光渗入，同时挡住红外光的入口。这样就留住了我们需要的热量，使得温度高于所注定的零下 20 度，足以使我们生存。因此地球上的平均温度在华氏 60 度左右，这都是因为大气层的单向透明。这也是温室的工作方法，用玻璃代替了大气层。

这是个脆弱的平衡，80 度的温度处于危险之中。当然地球上有较热和较冷的地方，通常也有冷季和热季，甚至通常还有冷年或热年，但这个行星上的平均温度在很长一段时间里一直保持稳定。几度的差别会对农作物的生长季节造成巨大变化，会使某种作物的成功耕种的地区向赤道或向极地移动。在上次冰川期的中期，大约 2 万年前，平均温度很可能下降了不到华氏 10 度，但冰川当时在我们中间，地球的平均温度很重要。

阻挡红外辐射的并不是空气本身，而是一些细小的成分，主要是水蒸汽和二氧化碳。另外还有其他一些东西，例如臭氧、甲烷和碳氟化合物，但它们的作用不太大。臭氧在可见光谱的另一头非常著名，它帮助阻挡来自太阳的紫外线辐射，这种辐射会引起皮肤癌，臭氧被其他大气污染物破坏，包括碳氟化合物，但那是另一个论题。我们对大气中的水蒸汽没有多少控制——地球表面的五分之四是水，它想怎样就怎样——但我们的确影响二氧化碳，这是整个故事的起因。

正常的大气——我们呼吸的空气——含有 78%的氮气，21%的氧气（生命之源），不到 1%的氩气（主要由原生钾衰变而来的一种辐射气体），和其他一些微量气体。水蒸汽很丰富，它甚至形成可见的云、雷和雨的形式。在那些数量较少的气体中量最大的是二氧化碳，另一个生命之源。我们的动

物与地球上的植物舒适地相处，这稍微有点一头热，因为没有人植物也可以很容易地生存。我们吸进氧气，呼出二氧化碳，而植物吸进二氧化碳，在太阳的帮助下制造出氧气和我们饭桌上的食物。二氧化碳被持续不断地制造，氧气也是这样。这种安排确实行得通。这并不像我们假装的那样简单，因为我们只是二氧化碳的许多来源之一，而植物则是氧气的唯一来源。

二氧化碳要给那些为我们提供养料的植物提供养料。它还有助于挡住红外辐射，保持那宝贵的华氏 80 度。大气中有多少二氧化碳很重要，即使它所占的成分很少——它对地球的温度有着直接影响。不多不少最好。那么二氧化碳有多少呢？它又发生了多大的变化？

对遥远的过去所知不多，但一百年前大气中的二氧化碳欠约占 0．027%，通常表示为百万分之 270，或 270ppm，从那时起它一直在增加，现在刚刚超过 350 ppm，而且不见它有停止增长的迹象。为什么会发生这种事？这很糟吗？能够做些什么？最后一个问题的答案很容易——非常少。倒数第二个问题的答案也很简单——是的，这很糟。那么我们从第一个问题开始：为什么会发生这种事？这个问题起码要困难一些。

一个二氧化碳分子由一个碳原子和两个氧原子构成，氧气供应非常充足——大气中的 21%都是氧气——因此二氧化碳浓度的关键在于碳的供应，而这很容易得到。我们美国人每年把 50 多亿吨的碳倒入大气。发电所燃烧的每一吨煤要把将近一吨的碳倒人大气，每燃烧一加仑汽油要把 5 磅左右的碳倒入大气，燃烧 1000 立方英尺的天然气排出大约 30 磅的碳，等等，等等。这些几乎都是以二氧化碳的形式排放的。这发生在全世界，制造出的二氧化碳的数量极其庞大。更重要的是，随着世界越来越工业化，对能源的需求也相应地增加，二氧化碳的倾倒量也在增加。

1950 年，美国徘放的碳的数量占全球总量的 40%，但世界正在赶上来，尽管现在我们的人均排放量高于 1950 年，但我们只占全球总量的 20%。1950 年，苏联人的二氧化碳排放量是我们的四分之一，现在几乎赶上了我们。1950 年中国是第十位，现在成为第三位。日本当时是第九位，现在变成了第四位。新兴的工业化国家需要能源，只要矿物燃料存在，燃烧矿物燃料是获得能源的最容易和最便宜的方法。几乎所有国家人均燃烧的燃料都高于 1950 年，而世界人口翻了一番。全球消费的矿物燃料在过去 35 年中以每年 3.5%的平均速度增长。日积月累。世界人口的增长又以另外一种直接的形式起着作用，因为人不得不吃饭和生存，地球上的森林被清除，给人类提供生存空间，给农业腾出地方。在要求饥饿的人们用眼前的一顿饭换取将来对气候的担心时，他们当中很少有人会犹豫不决。这一趋势不仅减少了通过光合作用把碳从流通领域中清除所需要的植被的数量，而且被清除而又未被补充的植被自己也会变成二氧化碳。一棵树是被烧掉还是自己腐烂并不重要，它体内的碳总是以二氧化碳的形式进入大气。

由于我们知道每年大约有多少碳被倒入大气，也知道二氧化碳增加了多少，因此问一下这些二氧化碳是否全部都有下落是很合理的。是不是所有的碳最后都在大气中积聚，或者是否有什么自然程序参与某种大气净化行动？

1958 年，斯克里普斯海洋地理学研究所的戴维·基林身边的一个小组开始对远离地方燃烧中心的地点的大气二氧化碳进行定期测量。（在福科纳斯的燃煤工厂的下风地带进行测量不会有什么好处。）他们选择了夏成夷岛上的冒纳罗亚火山的斜坡，在海拔刚刚超过 11，000 英尺的地方设立了一个冒

纳罗亚观测所。从那时起进行了定期测量，对清洁空气中二氧化碳的稳定增长进行了最为完整和持续的记录。

结果很明显。1958 年的浓度大约是 315ppm，现在则是 350ppm ，世界其他地区的测量，最值得注意的是在南极的测量，结果与此相符。不仅浓度在不断增加，随着矿物燃料的加速使用，增长率也不断提高，似乎二氧化碳简直就在积聚。计算方法很简单。大气的重量大约是 5200 万亿吨（地球上大约每人 100 万吨），而目前我们每年向大气倾倒 55 亿吨的碳。由于一吨碳能制造出稍稍多于 3.5 吨的二氧化碳（氧气也有重量），我们可以及计大气中的二氧化碳浓度目前每年增长 3.7ppm，如果二氧化碳纯粹是在积聚的话。

实际上二氧化碳的增长速度是这个数字的一半，因此我们排放到空气中的二氧化碳只有一半固定不动，而其余的不知为什么消失了。其目的地仍然是个谜，但大部分人认为海洋是个合理的储藏地。当然二氧化碳可在水中溶解（所以我们才可以享受香槟和软饮料），但海洋如何净化空气的理论仍不完善。即使一半的二氧化碳被清除，一半留在大气中，但人类极不可能很快就放弃燃烧矿物燃料。

事情甚至更加糟糕。我们说过世界对这些燃料的使用每年以 3.5%的速度增长，这意味着每 20 年翻一番。如果发生这种事，而且一半的碳继续在大气中积聚，目前的二氧化碳增长率（大约每年 1． 5 ppm）也将翻一番。我们并不很了解碳的最终命运，无法成为厄运的真正预言者，但我们也不知道这一定不会发生。我们正在对地球作一个巨大的试验，而且赌注很高。

如果二氧化碳像过去一样继续积聚，世界人口继续增长，并增加对燃料和可耕地的需求，不可避免的结果是大气中的二氧化碳浓度将在下个世纪中叶左右翻一番。或早或迟，但一定会发生。那么可能会产生什么结果呢？

这似乎是一个简单的问题，如果二氧化碳挡住了红外辐射，二氧化碳数量又在增加，它应该能更好地留住热量。这意味着地球将变得更暖，中纬度地区的生长季将延长，我们国家北部地区有时很悲惨的居民不必在冬天去佛罗里达或加利福尼亚，每个人都会高兴。当然事情不会这么简单。

热空气会上升，它比冷空气轻。热气球只要保持热度就会悬在天空，但冷却下来就会落到地上。地球赤道附近的较热的空气也会上升，而极地附近较冷的空气则会下沉。因此会产生某种环流或对流，暖空气在赤道附近上升，向北行进，接着下沉，最后又被带到南部以完成对流。其结果是太阳的热量被从最为丰富的赤道运输到最需要热量的极地地区。这是某种热量慈善机构。

但事情还不止这么简单，因为在发生这些事时地球没有坐在那儿不动。它也在绕着自己的轴心转动，大约每天转一圈，这种自转打乱了风向。其结果非常复杂一它被称之为科里奥利效应——观察溜冰或跳水就会熟悉这一点。溜冰者或跳水者如果绕的圈子越小转得就越快。由于地球多少是圆的，北半球的风在移动时容易向右偏。如果听起来觉得太复杂，请相信我。

这种加热，对流和自转的相互作用的结果并不是简单的高处的风向北走，低处的风向南走的格局，而是由信风，赤道无风带和盛行风等等构成的复杂格局。这叫作全球环流，给无数的气象学家、数学家和计算者带来收益丰厚的就业机会。对这一格局的了解还不完全，因为实际的因素比这要多得多。处理这一格局的计算机模式被称为全球环流模式。有一些较好的模式，它们经常得出一致的结果。

另外还有其他一些后果。如果地球更暖，海洋中蒸发的水更多，将形成更多的云，将有更多直射的阳光在到达地球表面之前被反射回来。这是一个冷却效果，这也许多少会抵消加热效果。进行理论上的计算异常地艰难。一开始必须从太阳对我们的辐射开始，跟踪太阳被反射、吸收、再辐射以及最后被处置的所有重要路径，不管其最终命运如何。要对大气中某种成分的变化所带来的后果进行较好的计算，所有这些结果都必须进行估价，现代的计算能够干这项工作简直是奇迹。

今天所使用的全球环流模式能够很好地计算出大气中二氧化碳如果翻一番所带来的结果，但的确还需要更多的研究。（音乐，如前所述。）即将到来的气候变化的细节仍然在我们的掌握之外，尽管主要的轮廓已很明显。

美国有四大团体作这种计算，询问一下这些计算能在多大程度上解释目前的气候就可以对模式的准确性有所了解。答案是它们计算的全球平均温度非常准确，误差在一个摄氏度之内（将近二华氏度），但描述地方气候时却没那么准确，常常相差五个摄氏度或更多。规模越大，结果越准。

所有的模式都表明最后的结果是全球普遍升温，只是各个模式对升值的多少有不同意见。没有一个模式表明后果很小，我 们尽可以继续干我们的事，不用去理会它。各地的估计相差摄氏 3 至 5 度（5 至 9 华氏度），而这是巨大的变化。记住上次冰川期是降低了大约 5 摄氏度，对于提高 5 度会发生什么事我们知道得要少得多。

肯定会给农业和生态系统带来巨大影响，有些地区毫无疑问将从气候的缓和中得益。有些勉强可以居住的地区吸引力将更小——华盛顿温度在华氏 100 度的无数将迅速增加，迫使我们把首都向北移。否则只有被虐待狂和傻瓜才会为政府服务。惭量格局也许会发生巨大变化，破坏一些良好的耕作区域，同时又改善一些糟糕的耕地。也许气候效应将是可以容忍的，我们现在无法作出预测——这是一个全球试验。

另外一个后果已被广泛地公布。每个人都知道冰在温暖的天气会融化，而地球的最北端和最南端都覆盖着冰。如果许多冰融化会发生什么事？幸运的是，北边的冰有许多只是在水上浮动，它的长时间的融化几乎不会影响海平面。在水上浮动的冰发生融化不会使海平面提高。要证明这一点，倒上满满一杯水，放进一块冰块，因此冰块肯定超过杯高。当冰块融化时，水仍会与杯口相平，不会溢出来。这是冰山和冰块所以高于水面的原因——冰的密度比水小。

然而有些冰不是浮动的，它凝聚在地面上，因此冰水会流向海洋。北边最主要的冰冠是格陵兰岛，它并不像墨卡托投影法所显示的那样大，但仍然很大。在南部，南极洲是一块覆盖着积累了好几个世纪的厚冰的大陆。如果所有这些冰都融化并流入火海，人们估计海平面将升高几十英尺，这是个最糟糕的极端的场景。更现实的是，本世纪以来海平面事实上一直在升高，每年大约升高一毫米，本世纪来升高了几个英寸。这个增长率会增加两倍或更多，因此到下个世纪末海平面可以很容易地比现在高几英尺。海平面如果真的升高，其社会后果将降临到我们的后代身上，而且不是太远的后代。沿海城市将被淹没，海岸线将后退，等等。这虽不是世界的末日，但也不是美丽的图景。

其他温室现象已被省略：大气中其他吸收红外光的气体的作用，温度升高的海洋会扩展，与大部分热涨冷缩的东西一样，这也会提高海平面，等等。

但是，尽管这个问题非常复杂，最低限度是地球会由于人造气体主要是二氧化碳的积聚而在很大程度上变暖，这一变暖可以想象将与恐龙时代的气候相似。海平面不一定但可能相应地提高，大概会升高几英尺或更多。我们在自作自受。

有没有办法减缓这一进程？唯一的长期选择是减少排放到大气中的废气。这就需要目前的全球合作和牺牲，以避免较远的未来的某件事，某件推测出来的事。人类历史上没有证据表明这可能会发生，但人不能总是希望。实际上有一个大气成分有所改善，而并未涉及太多的牺牲：致冷剂和喷雾壳中使用的氯氟化碳会严重破坏大气中的臭氧，它们逐渐被更容易分解的化学品代替，但没有任何证据表明有任何全球性的降低森林砍伐速度或减少矿物燃料的消费的意愿。没有任何东西可以代替这些方法。

当然，对电力来讲有核能，它一点也不会造成温室效应，但它有政治问题。我们已提到过法国现在正在用核能生产其 70%的电力，该比率比世界上其他任何国家都高，因此法国是优秀的世界公民。美国在向大气倾倒碳方面是世界最糟的公民，其核计划停步不前。随着温室效应的幽灵更加明显，观察专业反核人士对此的反应非常有趣。这显然提供了一个有利于核能的证据，而对大多数这些人士来说这是不可容忍的，他们的反应就像那些被告知患有不治之症的人——开始是否认，接着是愤怒和怨恨。根据正常的次序，随后应该是接受，但这还没发生。

更多地转向核能将推迟全球变暖的后果，转向不太奢侈的生活方式也是这样（有些人把这叫作守恒），在这方面还有改善的余地。较多地使用天然气也会有一些帮助，因为它排放的碳少一些。但没有任何证据表明存在着真正起作用的任何解决方案。即使世界明天就停止增加大气中的二氧化碳——白日梦——大气中的二氧化碳已足以影响气候。很可能最近连续几年的天气炎热只是气候波动，而不是温室效应的出现，但人们并不能肯定。

如果这是一本科幻小说，我们的主人公现在就会找到一种无废物的制造能量的方法，与此同时学会既向世界提供食物和住房又重新植树的方法。我们还可以加上一个人口问题的解决方案。但这并不是科幻小说。

第十七章　核冬天

事实和不确定性

这一章紧接温室效应一章似乎很自然。上一章与我们倒入大气层的额外温室气体所造成的气候后果有关。那些气体降低了地球把我们从太阳获得的热量送回太空的能力，最后使地球变得比以前温暖。本章则是关于阻挡原来的太阳辐射从而使地球变冷。两者都归因于技术，尽管我们目前所担心的问题是核战争也许会导致遮蔽太阳，但大自然在没有我们的帮助的情况下过去就做过这件事了。

在太平洋的边缘，构成地壳的一些构造板块在互相挤压，火山很常见。火山爆发创造岛屿又毁灭岛屿——夏威夷群岛就是由火山造成的——而火山的爆发可以非常剧烈。在板块边缘的附近几乎到处都有火山，但在印度尼西亚最为集中，在历史上，那里已知有 100 座火山曾喷发过。太平洋边缘曾被称作火圈，世界上 800 座左右的火山中有四分之三都位于这个地区。一座火山可以非常安静地喷发，只影响到所在地区，或许会降落火山灰，或许会有熔岩流。在另一个极端，火山喷发也许会使天空布满岩屑，这些岩屑会落到很远的地方。已知一次喷发所产生的熔岩最多有几立方英里（俄勒冈州南部的火山口湖的容量，该湖是 7000 年前的一次火山喷发形成的）。飞到空中的岩屑可以与此相比较，可以部分地挡住全球的阳光。

现代最著名的火山爆发是在 1833 年印度尼西亚的巽他海峡中的喀拉喀托岛上（所以排除了维苏威火山，它把庞贝城埋在 50 英尺的火山灰下面）。它几乎完全摧毁了这个岛，掀去了岛的顶部，并把岛的基座留在水平面以下 1000 英尺的地方。随之而来的海啸使临近岛屿上成千上万的人丧命，大气中的岩屑遍布全球，在两年的时间里人们看到的只能是美丽的日落，但对气候没有造成显著后果。

在 68 年以前的 1815 年，松巴哇岛上的坦博拉火山发生了一次更为剧烈的喷发，很可能是几个世纪中最大的喷发，同样它的岩屑环绕全球。次年欧洲的夏天异常寒冷（拜伦有一首诗记载了这件事），最近发现的一些中国古老的记载表明当时中国也异常寒冷。那一年，即 1816 年，被称作无夏之年。除了日落以外，其他的全球天气现象是否来自火山喷发是另一码事。目前有影响的专家认为它们不是，但火山喷发给大气带来的岩屑是可怕的。我们将会看到，这可以与一次核大战所带来的岩屑的数量相比。但那是另一种物质了。

已知的造成这种后果的另一个自然事件是大约 7000 万年前一块巨大的星外物体的影响，它在大气中散布了非常多的岩屑，造成动物种类的广泛灭绝，其中包括恐龙。仍然有人怀疑这件事是否曾发生，但证据非常确实。因此，自然现象会影响大气的阻光度，有充分的理由相信一个较严重的事件会影响气候。这里不存在什么魔术，只是地球复杂的热量平衡，正像上一章中所讨论的，它与温室效应有关。

在一次核大战中——我们和苏联人各有成千上万的核武器——一定会有巨大的全球性火灾向大气中喷发烟雾和岩屑，极大地影响保持地球温度的脆弱的辐射平衡。这一观点首先是由保罗·克鲁森和约翰·伯克斯于 1982 年宣布的，即刻被命名为“核冬天”。据目前的估恻，在一次核交流（核战争的

一个礼貌用词）以后的头几天中，大约会有 1 亿吨的烟雾产生。其中大部分将以小粒子的碳（烟灰）的形式出现（它们会有效挡住太阳的辐射，它们比火山灰要能干得多。黑烟的颜色将非常之深。

在进入技术细节和不确定性之前，必须先对这一论题的重要性作一些技术性评论，下面两段是本作者的一些个人观点（当然和本书其余部分一样），但这些观点在专家当中并不罕见。

自从核时代开始以来我们就知道核武器会造成巨大的火灾——1945 年它发生了迄今为止唯一的一次，当时核武器被在愤怒中使用。 1982 年的新观点是大国之间的核战争所造成的火灾将非常巨大，可能产生的全球性影响，远远超过本来就已经很可怕的核战争后果。有些极端观点认为这样一次战争会清除地球上所有的生物，或至少是人类的生命，但这些观点的基础是寻找政治后果，而不是科学。

这一论题接着吸引了科学团体中一些最著名的人物，这些人又普及了这一论题，使之成为避免核战争并努力实现核裁军的又一原因。本作者（主持了这个领域的一个政府委员会）总是对表达这些观点的强烈性感到困惑，似乎演讲者刚刚发现核战争是坏事，他并不知道在任何地方有任何一个人支持核战争，但那些言辞似乎表明是针对这样的人的。许多人一生认真负责地从事预防核战争的工作，他们很容易对一些好心的知名人士刚刚发现一个原因就有相反的建议感到非常讨厌。核战争的预防，是仅次于人口过剩的对人类的真实和直接的威胁，它需要的是工作，不是夸夸其谈。过去 40 年的记载表明我们迄今为止一直成功地阻止了大的战争。和本书所讨论的其他风险一样，没有任何理由可以自满。

幸运的是，理解核冬天现象的问题与理解天气、气候和温室效应的问题相似，因此一流科学家中的有经验的群体可以研究这一论题。下面的讨论将以他们的工作为基础。

整个场景非常简单，尽管它显然是“ 最坏情况 ”。由于某些原因，多年来阻止了大国间核战争的抑制因素瓦解了，美国和苏联之间发生了一次大规模的核交流，这两个国家是唯一武装得可以造成全球后果的校国家。其他国家是否参加对整个场景来说不重要；这已经够糟的了。计算（以及仅有的一点经验）表明受到袭击的大城市将燃烧，也许森林和大部分灌木丛也会燃烧。这将是无边的大火，其规模在人类历史上前所未有。森林大火较为常见，但地球上陆地的很大一片地区同时起火并不常见，而且，文明使城市和其他地区积存了大量可燃烧的物质。此时，美国在全国储存了大约 4 亿桶石油及其产品（一桶石油相当于 42 加仑），相当于每人 70 加仑。这些石油的大部分会燃烧，而另一方的相当数量的石油供应也会燃烧。美国每人拥有 4 只汽车和卡车的轮胎，它们大部分也会燃烧，等等。这已经是 5000 多万吨的可燃物，而可燃的森林和农田我们估计将很容易使烟雾达到 1 亿吨。

如果这样大量的烟雾在很短的时间中释放，而大海的那一边也发生类似的事，它必将使天空变暗，把白天变成黑夜。这是数量极其庞大的物质，尽管想起燃烧矿物燃料每年会把 50 倍以上的碳排放到大气之中，我们应该对这种烟雾还能抱一些希望。然而，那是透明的二氧化碳气体的形式，不是黑烟。

对这一威胁的有效反应很显然——避免核战争——当然即使没有核冬天提供额外的动机也应避免核战争。

对注入这么多烟雾的后果的早期运算被称之为单维运算，这就是说它没

有妥善处理烟雾的扩散。这些计算也没有处理其他减轻作用，例如被雨水冲刷。部分是由于过分简单化，计算出来的结果具有戏剧性，预测黑暗会持续几个星期或几个月，环绕全球，造成中纬度地区夏季的温度大大低于冰点。而这一地区正是世界上大部分人口居住的地方。这样的温度将严重破坏给我们提供食品的生态系统，尽管地方的超级市场也许还有其他原因在核大战后无视正常的作息时间。核战争的终极灾难将会更为深远。

核冬天现象是真实的，剩下的未知数要求进行更好的计算，不管从上面的讨论中推断出什么结论，我们都应该努力以最大的限度学习有关这个论题的知识，哪怕只是为了更好地作出决策，因此自从 1982 年开始这一论题的研究以来，很显然地需要进行更多的研究，不仅通过更好的计算，而且通过对大范围火灾：现象的研究。我们可以使用在美国部分地区横行的大范围森林火灾，还可以使用为了烧掉日后也许会加剧不可控制的火灾而故意有控制地燃放的大火。（对于后者有人表示强烈抗议，有些人遭蒙蔽认为燃放大火是为了研究核冬天。）

大规模火灾的一个不太被了解的特征是它会造成所谓的风暴性大火，这种大火非常之大，其上方的热空气把周围地面的空气吸了进去，既给大火提供燃料又煽动了火焰。这种状态能自我维持到再没有可供燃烧的东西为止，而在大火燃烧的过程中要进行控制基本上是不可能的。一场普通的大火也许很可能烧掉现场的一切东西，风暴性大火一定也会这样。

在壁炉中升起的规模较小的火有着与风暴性大火相同的许多特性。通过烟囱上升的热空气造成一个气流，把新鲜空气吸人火的底部，这又提供了炉火需要的新的氧气。每个人都知道好的气流对生好人很重要，当然空气的流动也把烟抽出房屋。风暴性大火在大气中建造一个自己的无形的烟囱，而吹到底部的风的力量会超过飓风。来自风暴性大火的烟可以排入大气的高层，在那里它会延伸到最远的地方，也会保持最长的时间。

很难预测一场大火什么时候会越过无形的临界点变成风暴性大火。许多大城市过去都燃烧过——堆满了可燃物质的城市——伦敦 1666 年，芝加哥 1871 年，旧金山 1906 年，东京烧过几次，另外还有几十个其他的例子。很难从这些大火的目击者的记忆中得知是否有过完全的风暴性大火，也许有些是。

在第二次世界大战对城市的轰炸中，人们注意到更多的破坏——轰炸的目标就是破坏——是由火灾引起的，而不是普通炸弹造成的。于是空袭不久以后就以放火为目的，以风暴性大火作为可能的奖赏。在德国对英国考文垂的空袭中有 25%的燃烧弹，对德国科隆和德累斯顿的空袭燃烧弹分别占 40%和 75%，而美国对东京的大空袭则使用了 100%的燃烧弹。有时造成了风暴性大火，造成巨大的破坏，有时没有造成。对汉堡的空袭（25%的燃烧弹）引起了能形成飓风式大风的风暴性大火。没有风暴性大火的空袭已经很糟糕了，而风暴性大火使得破坏更为彻底，向内的大火禁闭了大火，并给大火提供燃料。风暴性大火还可以把烟排到同温层那么高。

与常规炸弹不同，核爆炸总是会引起大火。爆炸本身就很热，比太阳要热得多，而可燃材料接触到来自炸弹的辐射在很远的地方就会燃起大火。对一个百万吨级的炸弹来说，它能燃起立英里开外的大火。唯一的直接核经历又是来自二次大战。长崎燃起大火，但没有风暴性大火，而广岛则在爆炸几小时以后发生了风暴性大火，持续了大约 12 小时，烧掉了方圆 4 至 5 英里之

内市中心剩下的一切。一场核大战一定会造成巨大的火灾，至少有一些会变成大规模的风暴性大火。除此之外还有核冬天。

在这给定的标准场景中，对于注入大气中的黑烟重量的预测基本上是正确的。这并不意味误差在 10%以内，而是意味着期望预测超过实际的 10 倍那么高是不合理的。这是双方核武器完全交流后产生的任意场景，这种交流会持续到底。

“一旦烟雾进入上层大气，它一定会遮暗所有地区。同样也肯定会延伸到全球，正如喀拉喀托的火山灰那样。要花多少时间取决于烟雾在大气层的哪一部分，但这种时间是用星期计算的。还没有答案的大问题是云层是否能坚持那么长的时间与足够的纯净空气混合从而有效地阻挡阳光，是否会被雨水清除，形成块状落到地上或落入大海，或者遇到其他的命运。

答案不很清楚——这是个真正复杂的问题，给最优秀的计算机和智慧带来压力——但计算在不断修正，把越来越多的对大气环境和较小规模的大气现象的了解考虑进去。随着知识的积累，专家的预测导致预计的气候后果越来越小。这些预测依然令人惊恐，因为对这些后果的基础理论是完全正确的。但与早期引起所有公众注意的单维模式所显示的结果相比，现象没有那么简单，后果也没有那么严重。有些专家建议把核冬天的名词改为核秋天，因为现在对中纬度地区夏天的温度预测更像秋天。

这是此时此刻的核冬天的故事。它是真实的，但它是努力防止核战争的一个较为不重要的原因。

第十八章　非电离辐射

事实和不确定性

第十六章中提到电磁辐射有各种颜色，波长长短不一，从 X 射线以及更短的波到普通无线电彼以及更长的波。原则上，长短两个方向都没有极限，原子核和宇宙射线都存在着辐射，其波长比普通的调射线短得多，有的无线电波比商用广播波段的电波长得多。这些波长与其频率成反比关系。一个商用无线电台的频率若为每秒 100 万周（称为赫 Hz）.在你的 AM 调偕度盘上以 1000 或有时以 100 表示，其波长则大约为 1000 英尺。每秒 1 亿周（你的 FM 调谐度盘上的 100　MHz）其波长大约是 10 英尺，等等。使我们大多数人家的灯发亮的 60 赫的电（有些国家是 50Hz）所散发的辐射的波长超过 3000 英尺，而我们的脑波或心跳所散发的辐射从地面到月球只需几个波长。

短波和长波之间没有神奇的区别——它们属于同一族，但区分能导致破坏人类身体组织的电离的波和不能导致电离的波还是有益的。作为一般性法则，不要太拘泥于表面，可见波长较短的光是会引起电离的。甚至紫外线也会导致皮肤病，而大多数人；特别是那些肤色白皙的人，皮肤病学家并未警告他们在夏天避开阳光。（这是担心大气层中的臭氧的一个原因——臭氧不能吸收的一部分紫外线能晒黑皮肤和引起皮肤癌。）而波长更短的 X 射线造成癌症的潜力已被完全证实，如第十五章中所讨论过的，比可见光谱的红外光的波长更长的辐射不是电离辐射，但它会造成其他方式的损害。

在本世纪以前，我们对非电离辐射给人体带来的影响所知不多，无线电在 19 世纪末最后几年中才被发明。当时还不可能制造出功率大得可以影响人类的无线电波。甚至电灯泡或白炽灯，把电能转换成可见辐射（光）的一种方式，也是 100 多年以前才发明的。第一次对人体使用电是在 1908 年，当时人们认识到我们的神经太慢，无法适应高频率的电流；这使得让大电流通过人体而不引起电击成为可能。因此发明了透热疗法机器，使身体变暖但又不产生电击，从而促进病体痊愈。我们现在仍在使用加热垫或红外加热灯达到这个目的，不让电流通过人体。透热疗法机器也还在使用。

在第二次世界大战中，雷达的使用得到了普及，正是在那时人们注意到任何一个站在离大功率的雷达射线较近的地方的人会感到异常的燥热（或者很暖和，看气候如何）.据称微波炉的发明是因为一位工程师口袋里装着一块巧克力穿过正在运转的雷达设备的射线。根据这个传奇故事，巧克力融化了，微波炉烹调诞生了。如果这个故事是真实的，它也许是真实的，那么灵感追溯到巧克力上就不是第一次了。

在任何情况下，适当的微波可以给身体加温，正如微波会加热肉排一样，而在操作微波炉时把手放进去的人一定是疯了。为安全起见，所有这种炉子都要求装一个联锁装置——按开门时自动开关切断电源。并不需要太长的时间手就要受到伤害。

为了限制非故意的加热效果，联邦条例把微波炉装置的辐射散发限制在不到下 5mw/cm（每平方厘米毫瓦，测量辐射密度的单位），在这一点可能会使某些人体组织升温。在大多数情况下体温适当的升高没有害处——例如发烧是我们的身体与疾病斗争的一种方式——但有一些没有较好的自我冷却机制的组织（眼睛是其中之一）特别敏感。苏联人制定了更为严格的接触非电

离辐射的标准，因为他们认为除了体温升高以外还有一些心理效应，而后者更为重要。我们从未能够证实苏联人声称存在的那些效应，因此没有强制性的原因促使我们防止这些效应；然而美国有一群可敬的科学家坚持认为存在着我们不知道的一些微妙的效应。和许多事情一样，可敬的科学家的行列中又加入了一些傻瓜，降低了科学家的努力的质量。如果存在着这种效应，它也是很小并且难以捉摸的。在所有的科学中，测试一位科学家的断言是否正确的方法是看另一位科学家在没有任何利害关系的情况下是否会得出同样的结论。在作过这种尝试之后，结果一般对低度辐射对人体有害的断言是不利的。

重要的是应明确记住产生的后果并不一定是一个有害的后果。展示强无线电射线可以产生温暖的感觉但不一定有害是容易的。展示（我们在基础物理教学中可做到这一点，而大自然打雷时这样做）一个较大的电场可以使你的头发直立起来但不一定有害是容易的。在这方面有一些真实的故事，有些住在大功率删无线电台附近的人说脑中听到音乐，最后调查发现这是他们的牙齿中填补物的整流效应。根据电台节目的不同，这可能会损害精神健康，等等。要点在于，即使正确的研究导致有人断言会产生“后果”，但这一后果并不一定是有害的。

频率或波长有两个重要的从属性，我们已提到过频率和波长之间的关系——它们互成反比。

在低频领域（不是 X 光，那是另外一码事），辐射穿透人体（或肉排）的程度取决于它的频率或波长，波长越长，穿透力越强。因此红外辐射几乎无法穿透人体，尽管一盏红外灯通过给皮肤加温能使人产生温暖的感觉，而 60 赫的家用线路的辐射可完全穿透人体。对微波炉来说（“微波”一词的意思是波长较短），联邦法规规定的标准频率是 2450 MHz（波长大约为 5 英寸），在这种频率下，穿透深度大约是 1 英寸。所以一大块冰冻食品内部解冻的速度比外面慢得多。事实上，普通烘烤和微波炉烹调的主要区别在于烘烤完全是从食物的外表开始，而微波炉则穿透食品 1 英寸左右，并在里面存放热量。所谓的穿透深度是非电离辐射的一个重要特征。

第二个从属性来自这一事实，所有的辐射，不管其频率多少，最终是由振荡电流造成的。有时电流在电线中，有时在原子中，有时在原子核中，但它们总是存在的。有时一电线被故意用来制造辐射，给它通上电流——于是它就被称作无线。在其他时候，辐射不是故意造成的，但振荡电流总会散发辐射。辐射的频率与电流的频率一样，如果电流一秒钟来回振动 100 万次，其辐射的频率就是 1 兆赫。

在高频率下制造辐射比低频率有效得多,因此家用的 60HZ 的电线所产生的辐射非常微弱，另一方面，为我们的微波炉生产辐射的小装置（通常是磁控管）效率非常高。

人们最早的对低频非电离辐射的一些担心是在 1960 年代的初期出现的，这和跟深海的核潜艇进行通讯联络的问题有关。我们和苏联人长期作为避免核战争战略之基础的威慑战略，要求双方都不易于受对方的突然袭击。这并不意味着袭击不会发生——我们每一方都有充足的核武器摧毁对方——只是因为不可能不遭受后果地逃脱其惩罚。这就要求每一方都有报复性武器的供应，这些武器不易受破坏，且数量多得足以表明可以并将会进行回敬。有些人被这种所谓的恐怖平衡吓坏了，但它的确似乎在 40 多年中行之有效。

基本论据在这里并不重要——已写出许多有学问的书——唯一必要的是指出人们看到有必要建立一支不受破坏的威慑力量。美国的威慑力量原来是所谓的三元体，飞机、陆基导弹和潜艇三者的结合，因此没有一个精神健全的侵略者会想象它能够一下子把三者都消灭。批评家们怀疑这三者我们是否都需要，但这也不是本书的论题，在任何情况下，为使威慑力量可信——可信性是对威慑的唯一要求——也应有可能在必要时下达开火的命令。如果对方知道报复力量永远不会接到报复的命令，威慑力量就无法威慑了。命令、控制和通讯的整个复杂结构被称作 C3 ，C 的立方。原则上很容易与空军联系，他们大部分时间不管怎样是等在地面上，并且已建立起稳固的系统保证与导弹发射井的通讯联系；潜艇却是个较为困难的问题。

潜艇不像导弹一样呆在坚固的发射井里，也不像飞机一样在发生灾祸时飞到空中，而是躲在茫茫大海中以得到安全。海洋如此广阔，因此捉迷藏的游戏通常被隐藏者赢得——1 海军英亩是一个表示海洋中的 100 万平方英里的古怪的词。美苏双方都花费了巨额金钱来研究如何在公海上找到隐藏的潜艇，如果获得任何成功的话，双方也闭口不言。指挥和控制问题立刻接踵而来，如果潜艇隐藏得非常好，那么如何与它进行通讯联络呢？没有通讯也不会有很好的威慑力量。

无线电，你也许会说，那又回到了本章的论题上。不幸的是，海洋是由盐水构成的，与我们体内的液体非常相似（记住不管神造论者怎么说，人类是从海洋生物进化而来的，我们的身体以自己的方式记着）。因此，如果指挥员试图以 2450 兆赫的频率与沉在水底的潜艇联系,信息将穿透到海水以下 1 英寸左右，正如这一频率在微波炉里对肉排所作的那样。这对在海面几百英尺以下的潜艇来说没什么用处。

但无线电波对海洋的穿透深度与频率的平方根成反比，这意味着如果辐射的频率降低四倍，辐射穿透深度就将增加一倍。简单的计算表明（考虑到我们的身体并不完全和海水一样），和电线的频率一样，60Hz 的频率的穿透深度大约在 100 英尺。如果用这一频率进行通讯联络，有些辐射会达到处于合理的运行深度的潜艇，至少单向通讯是可能的。因此 25 年多以前，诞生了一个计划，以极低的频率与潜艇联系，因此产生极长的波长，只是为了穿透海水。多年来该计划有过许多名字，一开始称作血红色，后来使用别名海员，在进展艰难时，又用过威斯康星、密歇根，最后以平淡而又古旧的 ELF（极低频率的缩略）作为化装名，现在则以一个象征性的部署而躲避着，远远没有运作效用。

你会记得低频率辐射很难有效地制造，频率越低，难度越大，而这是无线电通讯的一个异常低的频率。原先的计划是在威斯康星北部（为什么越过前寒武纪时期的岩石好，有其技术原因）拉上几千英里的无线电缆，让几千安培的电流通过这些电缆。此时环境和健康方面的忧虑产生了。因为这些电缆将通过优质的牛奶农场，非常容易被认为会带来害处。当然议会中的威斯康星代表要反对——威斯康星的经济健康与牛奶业密切相关。“尽管很容易把这一宏伟计划的失败归因于健康问题，但至少这也同样应归因于海军首先不喜欢这个主意，而这个计划是为海军而立的。正如空军反对强迫它把钱花在不能力飞行员提供更多的飞机的计划上面的想法，航空和航天局会说不给宇航员提供飞行器的计划不重要，海军也不喜欢把资金花在不能提供可供航行和指挥的船只的项目上。陆军，也不例外，过去常常专心于

军刀和马匹，所以坦克团仍被称作骑兵，但已不能继续以作战用途为由为军刀和马匹辩护了。（国家的安全和福利与这些基本本能相比并不重要。）没有其军种的积极支持，没有一项计划会生存。

极低频率问题是目前有关电缆争斗的先兆。最后，海军支持实施大规模的研究计划以探知几十赫的大功率辐射是否对健康的确有影响，到现在未证实有什么影响。在辐射场作用下的母牛的产奶能力没有受到任何影响，人类、昆虫、其他动物和植物同样没有显示任何有害后果。

当时有许许多多怪诞的故事。有一个特别受人欢迎的怪诞的想法的事实基础是，我们的脑波（所谓的贝塔波）的频率接近于我们建议的通讯系统的频率，阿尔法波的频率是其一半。尽管磁场（最重要的是短距的）非常微弱，但人们认为它们会使脑波与其同步，从而改变我们的大脑。60 年代初期苏联人有关在高压场附近工作的人的心理效应的报告似乎与此有关。流传的故事说这一频率的闪烁不定的光能使人发疯，另外还有传奇故事说宇航员受到这一频率的火箭震动的影响。没有一个说法得到进一步证实，但这些故事非常有趣，引人入胜并让人觉得可信，最后促成了该计划最终的死亡。而没有死亡的则是对低频辐射场的关切。

很长时间以来有一个生物医学团体，它认为极小的电磁场对一些基本的生命过程包括大脑的运转有着潜在的有害影响。持这种观点的人的确有一些麟麟爪爪的证据表明，一些人们认为不会发生任何事的微弱磁场有一些效应。证据一点也不明确，但它表明我们对这一论题并不是完全了解——这几乎不是一个新的立场。这个由一些献身于事业的人们组成的小组从未能够展示这些低度辐射对人的任何实际的而非潜在的有害影响，但他们还在努力。该领域的国家政策因此在某种程度上是以推测力基础的。回想一下苏联人对微波与人的接触的限制比我们要严格得多，但他们并没有，我们也没有的令人信服的证据。他们还规定军事计划可以例外，军界不必遵守这些法规。美国的微波标准几乎完全是以辐射给人体的增加温度为基础，也因为低度辐射从未表现出有任何有害效果的缘故。但电线辐射场不是微波。

最近几年人们突然又对此表示兴趣，因为电力使用的稳定增长（每年增长几个百分点，多年来累计增加）导致有必要在越来越拥挤的国家架设新电线，技术的改善使得远距离电力传送的电压越来越高。部分是由于没有人愿意其后院里有一根电线，部分是因为全国环境意识的增强和活动的增加，几乎没有一根电线不受到当地的反对。由于人们寻求用来反对电线的武器，人们很自然地转向电线可能带来的潜在健康问题这种观点。这样做并没有什么内在的错误,因为这一领域仍有一些不确定性。有哪些技术问题？证据何在？

在很大程度上，最近对电线辐射场效应进行的最可靠的研究（费用 200 万美元）得到纽约州电力当局和纽约公共事业公司联合体的资助。这次研究是在接到持续不断的报告以后进行的，报告说住在电线（城内或城市附近的低压配电电线）附近的人中，儿童白血病发作率高于正常值，或者流产率较高，或者怀孕期较长（电热毯被指责为罪魁），或者遭受其他一些问题的折磨。每一份报告都是基于有着某种统计缺陷或结构缺陷的流行病学研究，但也不能立刻怀疑这些报告。

研究进行得很认真，它有一个有能力的科学咨询小组，而结论，简而言之，是所有的证据都有别的解释，或者是不受控制的，或者是不能被重复，或存在偏见，或者在其他方面不能令人信服。有一个数据是通过打电话给发

布了出生公告的人收集来的，从而自动地选择了上层经济社会团体。在另一项报告生殖期变化的研究中，那些儿童们在研究对象在电磁环境中工作以前很久就出生了。还有一份报告的分类是由一个知道需要怎样的结果的人主观地作出的。（这并不是说他不诚实，但在良好试验中应警惕无意的偏向。）当努力研究靠近电线的人和远离电线的人的区别时，显然存在着一个社会偏向——富人不靠电线住。等等。

纽约研究的末行数字是有较为明确的证据表明低频电磁场能以不同的方式影响细胞，但几乎没有证据表明会造成相应的损害，或者目前的标准不恰当。流行病学有关电线对人口带来有害影响的证据没有一个不存在缺陷，尽管还有许多有缺陷的研究使得这一论题仍然引起人们的兴趣。总之，我们已了解很多，但还没有了解一切，还需要更多的研究。

在这里提一下几十年以前欧文·兰米尔所作的杰出的报告是很合适的。他谈到了科学失误——发现一些事实上不存在的效应或东西——通过研究一些著名的历史性案例并搜索出一个共同的模式，在那些历史事件中，有人宣布作出了重大的发现，并在一段时间内为人们所相信，最后却又证明是错误的。

他研究的案例的确有一些共性。第一，所涉及的科学家从未故意说谎——每个人都虔诚地相信他作出了划时代的发现。没有一个是我们所说的银行欺诈那样的欺诈。（兰米尔把他的报告定名为“病理科学”，大概是承认他在对待一种疾病而不是重罪。）被声称的发现总是在现象混乱的背景下，勉强可以探测到的。因此当别人进行尝试且未能重复该项试验时，总可以说他们的方法不对。发现者总是怨恨“正统的科学机构”不能给予他们的工作以应得的称赞，此外还有其他特点，但其论点很明确。诚实的科学家也能自欺，并导致欺人。所以科学在开放交流的气氛中最为兴旺，除此之外没有其他更好的环境。所以优秀的科学家总是努力不去怨恨批评——他们知道他们有时是错误的，而自我批评不知怎么在区分真理和幻想时总是不如同类人当中的互相批评有效。他们是同类人很重要——相对论的准确性不能由议会或学校董事会的投票来决定，更不用说进化论了。第三部分结　　语

第三部分 结语

第十九章　足够的统计数字和概率

如果说这一章是一瓶酒或一包泡菜，消费者保护法律将要求贴上一块标签：警告，内含数学！数学和前面所述的致癌化学物一样，对之存有畏惧之心的人非常之多，以致于每一样含有数学的东西上都应贴上警告标签，不管剂量多小。事实上，这里只含非常少的数学，它只能造成一些表面的擦伤，不会留下任何永久的伤疤。但我们不应该诱使任何人去做任何违背其原则的事，所以，我鼓励任何一位哪怕很少的数学也会使其感到困扰的人跳过这一章，直接去读结尾部分。如果你以后还想回过来试一试，我们还在这里等你。

事实上前面所说的一切有关风险的事情都存在着一个可能的要素——死亡的可能性，跌倒的可能性，核电厂崩溃的可能性，冰淇淋不够引起头皮屑的可能性，等等。每一件不确定的事情都涉及概率，由于没有一件事真正是确定的，所以处处都存在概率。职业赌徒属于我们社会中那些少数能够真正掌握概率并用它谋生的人。业余赌徒是他们的补充，但概率和统计并不那么难以对付，除了那些急切想要达到哲学深度并想究根知底的人以外。任何一个课题都比它表面上难。理解生活并不需要能够使用概率这一工具。

本章的内容已在本章标题上表明——提供足够的有关统计的知识以便从此幸福地生活。本章不需记忆，只需要理解，也不必像小说那样阅读。也许最好的方法是按次序阅读，但即使这样也没什么必要。学习没有什么正确的方法，尽管专业老师总是装腔作势，对你有效的方法就是正确的方法。本书作者一生中大部分时间都是当大学教授，并已逐渐地认识到在教授和学习这一关系中，目的可为手段辩护。如果你能哄骗学生，使其去学他本来不会去学的东西，也许是通过让他认为该科目比实际更加有趣的方法做到的。那么你做了一件好事，而不是犯了罪过。

因此，亲爱的读者，概率和统计数字是迷人的东西。它们不仅有助于理解风险，对于理解测验民意的模拟投票、彩票、报酬更大的打赌形式、以及日常生活中的许多问题也很重要。有一句老生常谈的话，知道得越多越幸福，它在这个问题上双倍地正确。许多本来很好的格言恰好是假的，而“无知即极乐”则是无懈可击的。

统计数字和概率

概率和统计数字是两个不同的概念。概率是对某事发生的可能性或机会的一种测量，例如骰子将掷成什么样。它是 0 到 1 之间的一个数。0 表示不能，1 表示肯定。当进一步对概率进行定义时，专家们当中发生了一场激烈的论战。所谓的频繁论学派认为最好的定义应以频率为基础。想象一下某事你做了无数次，有关事件发生的次数就是其概率，这种理论有时行得通——如果你把一对没有作假的骰子掷 100 万次，你得到 7 的次数将进六分之一。因此概率就是 0.1667，或 1/6。（如果不是这样，你可以断言骰子一定作了假。）但如果你想知道社会党赢得下次总统选举的概率怎么样——选举当然不会举行 100 万次。对于这种事情频繁论定义就行不通了。就由所谓的主观论者接办。主观论者的定义是概率是信息最丰富的人的恰到好处的最佳判

断。这对于骰于是行得通的，信息最丰富的人知道骰子是怎么工作的，因此也知道其可能性。甚至频繁论者的内心深处也不会依赖掷 1000 次骰子来得知掷骰子游戏中得 7 的概率，他们是计算出来的，和我们其他人一样。通常来说概率是如何定义的并不重要——重要的是它有何用处。但在发明概率的好几个世纪以后，专家仍在为什么是概率而争吵。

每个人对什么是统计数字都有一致意见——被测量或被数过的东西，而到底是什么东西并不重要。中国皇帝的身高可以是一个统计数字，如果还有这样一个人的话；所有中国人的平均身高也是一个统计数字；美国所有叫作戴夫的左撇子的平均收入也是；劳动节周末公路交通事故的死亡人数也可以是。任何定义这样广的东西听起来很空洞，但如果我们试图寻找统计数字之间的关系时，有趣的部分就开始了。叫戴夫的人如果是左撇子，其收入是否较高，或者左撇子如果叫作戴夫，收入是否较高？这是两个不同的问题。或二者都不是？在西南地区是否与众不同？这些就是要求统计学家们干的事。还可能要求统计学家计算叫作戴夫的富裕的友撇子眼睛又小又亮的概率。或者，我们也许会问他们全国联队在过去 11 场职业冠军赛比赛中赢得了 6 场，美洲联队则赢得了 5 场（到 1989 年），这是否具有统计意义？美洲联队在最近 50 场比赛中赢得了 27 场是否具有统计意义？当问到这样的问题时，概率和统计数字一起出现。

“显著性”一词在统计分析中经常出现，刚才也是。它的意思是观察到的结果也许不只是运气。任何事情的发生如果概率较低，以纯粹的机遇为基础，那么必须涉及更深的东西。概率截止点使得某事变得具有意义，旁观者看在眼里。在生物科学中有一种非正式的一致意见，截止点是二十分之一的比率，即 0.005，因此任何一件随机概率小于二十分之一但总是发生的事情被认为是具有统计显著性。在统计学的非专业人员中，显著性的标准波动很大——好的工程师到处为具有统计显著性的测量范围从千分之一到十分之一的概率辩护。最后，对统计意义的解释取决于与概率毫无关系的条件，如果错误的代价很高，我们就要十分有把握。许多人的标准都可随时调整，取决于估计的重要性。

上面用到“随机”一词，这也要求定义。对这个词甚至令人敬畏的韦氏大词典未节略本第二版也没有什么帮助——它在“随机”一词的定义中两次用到随机一词。较新的兰登书屋未节略本做得稍好一些——努力不在定义中使用该词，但最后的定义都是错误的。说这些并不是要批评这两本优秀词典的作者们，而是要强调这个概念不寻常。每本权威词典都想表达发生的事毫无道理却又随机发生这一思想。也许最好的办法就是把随机用其反义词定义，随机概念是个深奥的数学概念，确实缺乏准确定义。这没有关系，因为我们有时遇到一些显然是随机发生的事，后来却发现它有二个明确的模式。缺乏模式是随机性的特征，但缺乏模式常常既是观察者的功能又是被观察物的特征。聪明人能看到我们其他人看不见的模式，而骗子、超自然物信仰者和观察天象者则看见并不存在的模式。伟大的数学家约翰·冯·纽曼说，“任何一个考虑用算术方法制造随机数字的入当然是处于犯罪状态。”我们的谈论到此为止。

有两大概率法则最为重要。第一是如果我们想知道两个互相独立的事件同时发生的概率，而且我们知道每一独立事件发生的概率，那么同时概率则是把二者概率相乘。如果我把一个 25 美分的硬币扔到空中，那么它正面朝上

的概率是二分之一，扔一个 10 美分的硬币也是如此。如果现在我把 10 美分和 25 美分的硬币同时抛起来。那它们两个落下来都是正面朝上的概率则是四分之一。乘法法则适用于两件事需要发生的情况。这是一个“和”法则。

第二个法则是加法法则。它在两事件互相排斥时适用，这意味着这两件事不会同时发生。一枚硬币可以正面朝上也可以反面朝上，但它不会二者兼得。一个人的姓可以以字母 W 开头也可以以字母 G 开头，但不会既是前看又是后者，在这些情况下，或甲或乙的概率是每个事件的概率之和，这是一个“或”法则。例如，如果我们掷一对骰子，我们得到 4 的机会是十二分之一，得 10 的机会也是十二分之一，而得 4 或得 10 的概率则是六分之一。如果二者不是互相排斥。事情就更复杂一些。这两个法则非常重要。

人口和抽样

在统计中经常有必要区分某地全体人口和这一人口中的一个抽样。最常见的一个统计问题是通过取样检验来推断出某地居民的一些特征，然后估计结果的准确性。在每次总统选举中，我们都遇到接二连三的民意测验，这些测验报告说对 1000 名投票人的随机（注意这个词）抽样表明有 5000 万人在大选日会选举候选人 Z。如今老练的民意测验者会补充说该民意测验的误差幅度是±X%，而 X 可以是任何数字。他们也许会说这是抽样误差。

我们通常把全体人口看作一个很大的团体（尽管它下一定大），从中我们取一个较小的样本，小得可以进行研究。我们这样做可以了解某一人口，譬如在总统选举中。我们可以有一条小机械生产线，并在每 100 件产品中查看 1 件（当然是随机的），看它是否符合规格，并假定它具有典型意义。这种通过抽样检查猜测某一人口的特性的过程称作推理。仅仅是猜测当然还不够好——还应该有某种表述我们认为我们干得怎样的方法，而这种表述被称作置信区间）当民意测验者说民意测验有着±±X%的误差，他所讲的就是置信区问，没有必要知道置信区间的公式，只需知道它是度量该人口答案的正确范围的方法，概率很高。

所有这些都涉及通过抽样检查了解一国的人口，有时候的工作是利用人口统计数字来了解样本。那么概率就比统计数字更为直接相干。假设我们知道美国人口的 51.3%是女性（的确是，因为我们在每 10 年的人口普查中数人数），并想随机挑选 20 个人组织一个舞会，不管其性别如何。那么我们获得 10 对夫妇的概率是多少？答案是 0.175，稍稍高于六分之一，如果人口中的男性与女性一半对一半，那么概率就会稍高一些。如果对 100 岁以上的人作同样的试验，在这个年龄层，女性的人数是男性的 5 倍多，那么机会就要小得多，三千分之一。人口比率告诉我们如何计算样本的概率。

人口就像具有某些特征的水库，而抽样则是这一水库中的随机取样。随机性和如何保证随机性是抽样的永久问题。总统选举民意测验的一次最著名的失败（该失败导致发起该民意测验的杂志的倒闭，并在许多年中使民意测验普遍带上了坏名声）是归咎于民意测验是用电话进行的，而在那时电话不像现在这样普及。这一测验选择了人口中的非随机样本，较为富足的人口，这使民意测验的结果有偏向。使得抽样具有随机性需要异常的谨慎和技巧，以使得它恰当反映被取样的人向。

假设实验

假设实验是统计学家面对的一个较为困难的工作，也是风险事务中最重要的工作之一。它出现在确定某一种影响是否会引起或治愈疾病，一种新的科学理论是否“正确”，以及我们以何种信心相信结论的时候。在科学理论问题上，存在着更为实际的起作用的标准——当大多数可敬的科学家认为它正确时它就是正确的。

假设 10 个人患有某种疾病，这种疾病被叫作 D， 而一种叫作 C 的试验药物，被建议作为治疗物。应该对这种药物进行测试（在对实验动物进行强制性试验以观察其副作用以后），因此把病人分为 2 个小组，每组 5 人，给其中一个小组用药。为使试验公平起见，给另一个小组，即未用药的参照小组安慰剂（无药效、仅产生心理作用）。没有人知道哪个病人服了哪一种药；如果医生和病人都未被告知，这就被称作双盲实验，被认为是避免偏向的唯一可靠的方法。有一些被密封的记录，这样我们以后能查到真相。在这种事情中总有一个道德问题，对也许会长期有益于每一个人的知识的寻求与某些病人被剥夺了一种有效的药物的可能性互相对抗。对这个问题没有容易的普遍答案。所作试验的假设是有助于治愈疾病的药物与表示它不能治愈疾病的所谓零假设相比较。该试验被解释为对零假设的测试。假设眼用 C 的小组中有三人恢复了健康，而参照小组有两人恢复了健康，那么我们得到什么结果呢？当然我们得知 D 并不总是一种致命的疾病，因为未受治疗的小组中也有两人痊愈了，但只有几种疾病始终是致命的。问题在于试验的药物是否有助于痊愈。所有的药都对统计数字有影响，使可能性发生偏向，因为尽管很少有疾病总是致命的，也很少有药物是永远有效的。如何解释测试结果呢？

对这种问题的标准程序是划出某种表格来描述具体情形。这种表格叫作偶然性表格。

治疗	治愈人数	死亡人数
接受治疗的人数	3	2
未接受治疗的人数	2	3

治疗结果

挑战是这种表格是否可能来自某种随机机会（测验零假设）。当然它也许是，但概率是多大？显然治愈的病人比未治愈的结果好一些，而治疗事实上是无效的机会有多大呢？甚至更加糟糕，治疗稍稍带来害处的机会有多大呢？

在这种情况下所作的试验叫作费希尔精确实验。（我不喜欢它，会在后面说明原因。）它包含着，如果接受治疗和未接受治疗的病例之间的确没有差别的话，就要求表中分布的或甚至更好的结果的概率是多少。这个测试得出的答案是同额赌注——偶然发生至少如此有利的结果的机会是二分之一——因此人们丝毫不应该信任治疗有一些好处的表面证据。前面提到的生物界所使用的粗略估计是，根据这些具体规则计算，表格（或甚至更有利的结果）可能是偶然出现的概率，应该是不到 0.05，二十分之一的机会，以这种标准，即使上面的数字是 4 和 1，治疗也不一定是可信的，但若所有接受治疗的人都幸存下来而所有未接受治疗的病人都死了，治疗就可信了。这与许多人的本能相矛盾，本能告诉人们，与不接受治疗有 20%的人幸存相比，能治好 80%的病人的治疗是非常好的，它也许看起来很好，但使用标准水准，仍无法

通过费希尔精确实验以证明其显著性。

我们较为详细地讨论了这一具体的测试，但假设测试或显著性测试还有其他许多方式，这取决于数据的形式和种类。一位棒球爱好者也许会回顾过去 50 年的棒球历史,看看主要联队的得分数是否与中西部夏天的平均温度有关。他会收集数据，也许会去作所谓的线性回归分析，看一下得分数是否随着温度的升高而增加（或减少）。对这种问题也有一个显著性测试。

与我们的主题更接近，他也许会问空气污染是否对死亡人数有影响。然后他会搜集十几个城市的死亡统计数字，以及空气质量的各种度量，以测试趋势和显著性水平。具体的程序超出我们自我确定的“ 恰好足够的统计数字 ”的法则，但这也是一种线性回归分析，有更多的变量。几个分析家已作过这种分析，它导致了我们在第十六章中使用的结论。如今的统计学家们可以用计算机程序来作这种估计，因此，就连统计学家自己再也不必去弄明白他们在干些什么了。

有时候对一个问题没有可行的既定步骤统计测试，统计学家也许会对假设是否正确或数据是否具有显著性有不同意见。第十二章中的甲醛数据就属于这一类，也许在低水准时不显著，但其程度还不足以阻止管制机构。数据充分时，对显著性的标准测试很好，但如果数据不充分，对数据的解释就变成一种艺术形式。

参数估测

在大多数我们使用概率推理的情况中，有一个所谓的概率分布。这意味着一项测试、一项调查、或不管什么都会带来一系列可能的事件或结果，且每一事件都带有某种概率。通常是划一张图表来展示这种信息。例如，如果我一次掷上四枚硬币，它们全都正面朝上的概率是十六分之一，三个正面朝上、一个反面朝上的机会是四分之一，两个正面朝上、两个反面朝上的概率是八分之三，等等。这就是概率分布，显示了可能发生的情况及其概率。有各种不同的多少比较标准的分布，视具体情况而定。

一旦了解了某一情况的具体统计法则，也就知道了概率分布的特征，那么我们只要知道实际的数字就行了。假设我有一枚重量失衡的硬币，它反面朝上的概率要高于正面朝上（一会儿我们要看一个现实生活中的例子），这样我们也许想知道它反面朝上的实际概率。一旦我们知道其统计法则，我们就能预测反面朝上的概率是十次中有八次、七次、六次等等。指导这种东西的统计法则叫作二项式分布（下一节），但它不能使用，除非我们知道只试一次反面朝上的隐含概率有多大。为得出结果，我们不得不试上很多次来得出反面朝上的平均比例。这就是所谓分布的参数，接着我们就可以用二式项分布计算出在一定的投掷次数当中反面朝上的一定次数。换句话说，我们将通过测量平均数而了解围绕平均数的波动。只有当我们知道统计法则时这才会发生。因此我们进行了多次尝试来测量平均数，从大样本中估测小样本概率。

平均数是个简单的参数，但概率分布还有其他一些有趣的参数。整个人口的平均智商是 100，因为这是智商的基本定义。（我们不能全都超过平均水平，这一点令人沮丧，但我们也不会全都低于平均水平，这一点让人放心。）当然，有些人超过平均水平，有些人则不到，有些人远远超过，有些人则远

远不到——这是日常经验，不需进行智商测试。从几十年各种各样的测试中得知，这种分布被称作正态分布（下一节），对一个具体的数学形式来说这是个不幸的名字。对社会来说重要的是分布的概率散差，它告诉我们可能会有多少天才的儿童和成人，以及有多少人需要特别的帮助。因此这种散差，或宽度，是另一个可能通过测量进行估测的参数。只有对许多人进行测试，看看他们的智商与平均数相比有什么不同，才能得到这一参数。我们美国人当中有三分之二的人的智商在全美智商平均数的上下 15 点之内。

生活中有许多事情完全可以用正态分布来描述——婴儿的出生体重）成人的身高，随机挑选的人的跑步速度等等。这在统计中无处不在。有一个强有力的定理叫作中心极限定理，它声称几乎所有的概率分布都与正态分布相似；只要有关案例的数目足够大。这一点在下面的一些具体分布中很明显。

标准分布

有些概率问题很容易用数学方法解决。如果你事先不必知道大多的细节以计算概率，问题就很容易。标准的例子是掷硬币。推理是这样进行的：正面和反面互相排斥——硬币不可能既是正面朝上又是反面朝上——因此不管正面或反面的概率分别是多少，二者或彼或此的总概率是二者的概率的和。这是“或”法则。但硬币不可能倾向正面，所以二者的概率一定是相等的。正面或反面两个概率的和相加必须是 1，因为硬币肯定要落到地下——没有人能把硬币扔到地球轨道上去。如果两个相等的数字相加等于 1，它们自己必须分别是二分之一，因此一个硬币也不必掷我们就知道正面朝上的概率是二分之一，0.5。这个事实太本能了。我们从未进行这样的逻辑推理。同样的论据告诉我们一个骰子落在任何一面的机会是六分之一，而当我们把两个互相独立的骰子的概率相乘（“相乘”法则），我们发现蛇眼的概率（两个幺点）是三十六分之一。通过同样的方法我们知道扑克牌游戏中以 A 打头的五张同花顺的概率是 649，740 分之 1。我们不用玩上几百万次来看这样的同花顺出现几次，我们通过计算可以知道。只要在这种情况下，所有不同的概率是可互换的，而且是互相排斥的，且所有的概率相加等于 1，我们就可以很容易地而且有把握地计算出每个概率。

但重要的是我们必须肯定不同的选择确实有同样的机会。普通美国人的一个信条是一枚被诚实地抛起的硬币落到地上正面朝上或反面朝上的概率相等，这是“输赢各半的打赌”（ToSsUP）一词的由来。只要把硬币掷得够高以使这一掷“随机化”，结果肯定就是这样。（在赌场中骰子必须向一块板上投掷来获得同样的随机化，以免具有献身精神的赌徒们练习多年从而在某种程度上控制结果。）几乎所有的人都认为在桌子上旋转一枚硬币可得到同样的随机性——正面和反面转得非常快，很难看出它会哪面朝上。

但对某些硬币来说则不是如此，例如 1 美分的硬币。如果在一张光滑的桌子上旋转一个 1 美分的硬币，它反面朝上的机会有 70%，因为正面和反面稍稍有些差异。这一差异之所以有关系是由于旋转的一个较为复杂的物理特性，但这的确有关系，我通过表演迷惑了许多朋友，有一次连我自己也被迷惑了。（观看旋转的 1 美分硬币的顶，你会看到旋转的轴心并不完全是垂直的，顶上似乎有一个小小的假想的圈。正是这个圈影响了硬币落下的方式。）要在骰子上得到同样的结果必须增加骰子的重量（这是非法的），而 1 美分

的硬币是以增加重量的方式铸造的。当心那些表面上很诚实的人，他们旋转硬币而不掷硬币。

许多概率分布可以用这些方法计算，结果发现很少一部分的标准分布就足以应付几乎所有的情况了。

回忆一下；概率分布只不过是一个测试的不同结果的概率描述，有时候某件事情会发生的绝对概率不如发生各种不同事情的相对概率有趣。美国全国篮球协会的教练也许觉得，知道与那些身高在 6 英尺半到 7 英尺之间的人相比较，高于 7 英尺的人占多大的比例很有用处。从这里他也许会得知如果在匹斯堡的一条马路拐角处站上一天他能看见一个 7 英尺高的可能的招募对象的概率有多大。婴儿出生时的体重非常接近于正态分布。如果我们知道参数，就像我们确实知道的，我们就可以计算出婴儿出生时有 8 磅重的概率。这也许会引起每一个怀孕的母亲的兴趣。（根据一些旧的数据，稍稍高于十分之一。）这里的任何一个都是概率分布，这可以在一张竖坐标是概率、横坐标是其他有关变量的图表中展示出来。不管这些变量是出生体重或智商，还是酒喝醉了的程度（对于相撞的概率来说）。

标准分布经常出现，因此它们有名称，每一个都适用于某种特定的情况。最重要的，即日常生活中的出现率，叫作泊松分布，正态分布（常常叫作高斯分布），还有二项分布。本书中的大多数论题都忠实于这些统计行为方式的一种或另一种。

泊松是一位法国数学家，高斯是一位德国数学家，正态（NoRMAL）则只是一个英文单词，二项是一个数学用语，二项分布有时叫作伯努利分布，是以瑞士一个数学世家中的一位成员命名的。科学和数学是国际化的。

泊松分布适用于随机点数过程，其中每个事件都独立于所有其他事情。我们也许会清点在每五分钟的间歇内打到交换台来的电话的数目，每分钟经过不太拥挤的高速公路上的某一点的汽车数目，在本人打字撰写这本书时每秒钟落到我头上的宇宙射线粒子数目，或者在某个人口群体中出现癌症病例的数目。对每个例子都会有一些长期的平均数）分布的参数。在汽车的例子中，我们也许会清点一个小时内通过的汽车数，并把这个数目的六十分之一作为每一分钟通过的汽车数。那么，在被测量的每一分钟内，经过的汽车数与平均数相比或多或少——只是随机波动——而泊松分布则给予每个例子以相对的概率。（落在我头上的宇宙射线长期的平均数大约是每秒钟 5 个，在海平面地区。）

下一页的上图显示在平均数是 3 时的泊松分布，我们看到在任何一分钟内都有可能一辆汽车也未通过（汽车的例子）.而有时则会通过六辆、七辆或更多。可能性最大的数字是二和三（在这里它们的概率相同），但事实上任何数字都有可能。当然如果平均每分钟只通过三辆车的话，数字就不大可能太大——我们看到，数字越大，指示条越小。（若汽车一辆接一辆，打赌就不存在了，因为它们再也不是互相独立了。）但分布仍然广泛，与平均数不同的机会很多，一旦我们知道平均数是三辆，就准确知道了波动的幅度。

中图也显示了泊松分布，但这次平均数是 16。（对每个可能的平均值都有一个分布，即使这个数不是整数。）注意中图的变化。在平均值附近的顶峰更加明显，而一辆车也不通过的机会现在可以忽略不计了。泊松分布的最重要的一个事实是它的半宽度——分布的表面宽度的一半——大约与平均值的平方根相等。本书中曾把这称作 N 的平方根法则。因此在平均值为 16 的图

中，我们可以预计范围在 16 加 4 或减 4 的之内是合理的。如果我们看一看该图，并且发现代表 12 和 20 的竖条分别比平均数 16 低 4 个和高 4 个，我们就可以看到，它们二者之间的距离可以合理地粗略测量分布的宽度。（每个竖条测量该结果的概率。）

这对一个泊松分布永远行得通，它是出现在大多数公众舆论民意测验底下的小注脚的基础，小注脚说民意测验的误差幅度是多少多少。这个数字总是大约相当于被测人数的平方根，再除以总数。（有一个小小的修正与以下事实有关，给予一个候选人的选票是来自另一个候选人的，因此它们不是完全相互独立的。）因此你不能采访几百个人就查明误差只在百分之几之内的未来选举的结果。如果你在一次势均力敌的选举中采访 200 人，你预计每位候选人有大约 100 票，从一个抽样到另一个抽样的随机波动对每个人来说大约是 10 票。因此没有一个小抽样能够提供足够的信息来显示势均力敌的选举情况。这些是统计问题，与其他的民意测验问题无关。

下一个重要的概率分布，所有概率分布中最重要的是正态分布，如前页下图所示。它在统计中很普遍，我们已经说过中心极限定理告诉我们当数字很大时所有其他的分布看起来都像正态分布。当平均数只有 16 时，这种情况已经发生在泊松分布上，而当平均数到达 100 或 1000 时，这种相似之处将越来越惊人。

当我们在度量而不是清点某种东西时，我们通常期待正态分布。我们已说过它描述婴儿的出生体重、儿童及成人智商、成人的身高（但不是重量）等诸如此类的事情中的差异。由于泊松分布在数量很大时与正态分布特别相似，许多统计学家在这种情况下为方便起见就使用正态分布。

此二者的基本区别是泊松分布的“宽度”完全由清点数的平均数字决定，通过 N 的平方根法则，而正态分布的宽度必须分别测量，是分布中最重要的参数。这种对一半宽度的测量有一个名称，称作标准偏差。（几乎所有的分布都有一个标准偏差，它测量其宽度。）下图显示了一个标准偏差为一个方块的正态分布。我们还有意绘制了第二个泊松曲线，这样标准偏差 4 与正态曲线上的一个方块的宽度相同，表面上看起来用正态分布替代泊松分布相差不大，根据中心极限定理可以猜到这一点。

正态分布的曲线表明了本书前面所述的一个论点，可以预料平均数上下的随机波动，但这一波动极不可能超过两个或三个标准偏差。在我们离中心的三个标准偏差处，曲线实际上下降到了 0。如果我们知道了标准偏差，或是由于对其进行过测量或估计，或是由于我们把正态分布用作泊松分布的近似值（这样我们可以算一下平方根来得出标准偏差），我们就知道了任何偏差中值的可能性。把这一评论用统计的显著性来表述，则意味着可以预期随机机会有一个或两个标准偏差的波动，而与预期值相差甚远的测量就不大可能只是一个统计偏差，从而就具有显著性。（许多民意测验者引用的取样误差相当于两个统计偏差。）最后，我们来看看二项分布。这适用于掷硬币，我们在第五章中使用的最高安打率的例子，以及其他我们知道每试一次某件事发生的概率，但想知道尝试一定次数它会发生一定次数的概率的情形。换句话说，当我们知道长期或人口平均值的时候，它告诉我们计算有限的样本时的波动。

最典型的例子是掷硬币。假定对没有作假的硬币（赌博的时候最好持怀

疑态度）来说，我们知道正面朝上的机会是 0.5。如果我们一次掷上十个硬币，我们知道正面朝上的平均数是 5。但是，假设我们间一个不同的问题：掷十个硬币我们实际上看到有 5 个正面朝上的概率是多少？这是一个完全不同的问题，因为这个问题的答案包括这样的事实，即我们得 6 个正面朝上的机会和得 4 个一样多，得 7 个和得 3 个的机会一样多，等等。对这种问题的答案来自二项分布，在这个具体例子中，尽管 5 是答案平均值，也是最常见的结果，但确实得到 5 个正面朝上的机会只有 0． 246，不到四分之一。（试一下——这是个很简单的试验。当然应注意，这种试验也会出现统计波动，你也许要做 20 或 30 次试验平均数才明显出现。这将涉及几百次投掷，但花上几分钟学习某样东西是很合理的开支。这是讨价还价。）这是个简单的例子，因为每个硬币的潜在概率是 0.5，但当概率不足 0.5 时，只会稍稍复杂一些（公式，不是概念）。我们在第五章中举例的强有力的击球手的安打率是 300，这是他每次击球时打出的潜在概率。（在计算安打率时我们忽略了棒球特有的复杂性，例如失误，牺牲打和飞球，等等。）下一页上的最后一张表就是这种情况，显示了他在随机挑选的 50 次击球中某个安打次数的概率。由于 50 是一个较大的数字，该分布与平均数为 16 的泊松分布没有太大的差异（这里我们的平均数是 15），与几乎所有的分布看起来都很相像的普遍原则相一致，只要数字足够大，它看起来像正态分布。（尽管我们把这称作中心极限定理，许多统计学家干脆把这称作大数目法则。）

读者到现在会注意到这些分布具有相似之处。每一个分布都有一个平均数，在图中它们是 3、16、0 和 15，每一个都有一个半宽度（标准偏差），在我们的例子中分别是 1.73、4、1 和 3.24。这些基本特征在一切（为完全做到诚实，几乎一切）概率分布中都很常见，认识到这一点就足以理解几乎所有的统计。在泊松分布的例子中，有一个优点是标准偏差与平均数的平方根相等，而在正态分布中，则必须通过其他方式求出标准偏差，而二项分布则只需对泊松法则作细微的修改。如果你知道这些，并认识到用标准偏差测量分布的宽度的重要性，你知道得够多了。

贝叶斯统计

这一节已经超出了你合理地应付风险所需了解的知识，它纯粹是为了更深刻的理解。

托马斯·贝叶斯 1763 年出版了他的著作（实际上是他的朋友们在他死后帮他出版的），这本书现在仍然使统计学家们恼怒。问题如下：尽管我们讨论了几种使用人口数据来推断样本概率的方法，没有反其道而行之的办法。我们在谈到参数估测时提到这一点，假设测试也涉及到这一点，但在传统的统计学中这个问题还未解决。它颠倒了正常概率推理的次序。

举一个大多数人熟悉的例子，假设你和朋友玩骰子游戏（骰子是已知的最古老的游戏器具），使用通常的掷骰子赌博的法则——如果你不懂，我们不准备在这里教赌博——并且想知道连续出现 4 次得 7 点或 11 点的机会有多大。简单的计算表明得到 11 点有 2 种方式，得到 7 有 6 种方式，而骰子落下共有 36 种明显的方式。因此得到一个 7 点或 11 点的概率是三十六分之八，或 0． 222……。这是对概率的通常使用，它还告诉我们连续获得 2 次的机会大约是 0． 0494（“和”法则），连续 3 次是 0． 011，等等，而连续 4

次的机会不到四百分之一。到此为止一切都很好。

你的朋友掷了一次骰子得到一个 7 点或 11 点，因此你祝贺他运气好。他又得到一次，你又祝贺了一次。到第三次你开始疑惑了（机会大约是 100 比 1），而到第五次你确信你的朋友（过去的朋友？）在欺骗。你刚刚使用过贝叶斯统计法，作过这种计算后，碰巧连续四次获得这种点数对你的轻信提出质疑，而连续五次的机会是 1844 比 1，因此你作出结论你应该对你的朋友和骰子都没有作假这一前提提出疑问。

贝叶斯统计涉及通过看结果来了解假设。尽管许多传统的统计学家从心底里不喜欢它，但它被每个人本能地使用，正如例子中一样。在其正式结构中，正如贝叶斯 200 多年前第一次指出的，有了数据，它为估价不同假设的概率提供了一个量的方法。

例如，在科学中，对某种自然现象的解释常常有几个假设互相竞争，你甚至能够发现科学家们互相打赌看谁最可能是正确的。（广义相对论的赌注是三比一，等等。）接着，在作了一个试验以“测试”不同的假设后，赌注就发生了变化，正如在第一场比赛后对某个棒球队赢得职业冠军赛的赌注有所改变一样。虽于广义相对论，它也许是物理学现代历史中唯一没有任何需要解释的实验证据而形成和提出的理论，做了三个著名的试验以后，广义相对论才被普遍接受。

回到未知的世界，使用观察，这是贝叶斯统计法的特点——这无法在传统统计中做到。在前面提到费希尔精确实验中，我们确实想要知道哪种疗法是否能治好疾病。相反，我们为它不能治病这一论点作了假设，并计算出可能会偶然出现的观察的概率。我们作了一个假设并计算了结果，尽管我们已经知道了结果，并对假设的正确性感兴趣。这只能在贝叶斯统计中做到。

正是由于这种欠缺，对费希尔精确实验（我们在这里把这个实验当作替罪羊）的解释才非常武断。如果这种观察偶然实现的概率不到 0． 05，数据就被认为具有显著性，否则就没有显著性。对于 0． 05 这个任意数字没有任何理论基础，但它被用来衡量许多具有强制后果的测试的显著性，例如某种化学品是否会引起耗子的癌症。

如果我们把这一标准用于上面的骰子例子，在我们的朋友掷出一个 7 点或 11 点时，我们应祝贺他的好运，但如果连续两次掷出这个点数，我们就断定骰子灌了铅（其概率是 0． 0494，不到 0． 05），并追求其后果。在真正发生这种情况是，我们也许会使用被称作常识的异常品质，考虑到与朋友的长久友谊，朋友内在的可信赖性，以及找到一对灌铅的骰子的困难。总之，我们会作出明智的举动，尽管是主观的举动。主观不是一个肮脏的字眼，即使在统计中也不是。

贝叶斯统计一直引起争议，因为它不可避免地涉及一定的主观主义。这使它失去了传统形式的纯粹正式的结构，使实践者失去了秩序感和安全感。人们对这种丧失没有良好的反应。读者大概并不渴望做一个专业统计学家，因此从这一节中得出的唯一教训是，密切注视人们是在用数据测试假设还是在用假设预测数据是很明智的。这是两种不同的行为，你会发现此二者经常混淆不清。生活中大多数事情是由前者构成的，而统计学中有许多是由后者构成的。

第二十章　后记：这一切意味着什么？

最后，我说的这些是否有任何有益的成分？许多不同来源的技术风险已涉及到，它们有一些共同的特征，这应该很清楚。最重要的是这些风险都是小风险，对我们大多数人造成的威胁难以觉察——我们中的绝大多数人死亡的注定原因要比奇怪的化学品、杀虫剂、或辐射普通得多。即使是在机动车里旅行，技术风险中最大的风险来源以及真正的杀手所造成的死亡，也“只”占美国死亡人数的四十分之一。此外，技术风险根本不会在标准死亡人数表中出现。

然而技术风险却是真实的。风险的确存在，有时在潜伏等待着，眼前的威胁很小，但有可能在将来造成真正的问题。核能就存在真正的风险，正如煤能源也存在着真正的风险。后者现在就造成死亡，而前者也许以后会。酸雨已经产生，但温室效应还未降临到我们头上。这些都是非常重要的事情，但目前还未显示出致命性。其中有些风险，例如温室效应，其潜在的破坏是灾难性的。而另一些风险，例如核事故，其风险则是有限的，但想象却是无限的。还有一些风险，例如强放射性核废料储存的风险，除了轻信者的想象以外没有任何东西。

带有风险的技术同时也带来益处。任何人若想因为汽车具有风险而不要汽车马上就会不得人心。甚至，那些想使驾驶汽车更为安全的人也不得人心，如果这会引起不便。对于想关闭由核能供应的 20%电力的反核团体，最好希望他们不会成功，因为随着电灯熄灭、空调关闭，人们会对他们发怒。那些反对我们食品中化学残余物的可以真正忽略不计的风险的斗士们也是如此，如果真威胁到食品的供应，他们就会失去得到的支持。仿佛技术没有带来益处似地进行说教和采取行动非常容易，只要我们的舒适和正常的生活方式没有受到威胁。总之，只要它是一头无形或遥远的要被抵伤的公牛。

技术给我们全体居民的安全、健康和长寿带来了积极的影响，这是无可争辩的事。我们的寿命从 1920 年以来增加了 20 多年，在过去 100 年左右增加了一倍。这并不只是因为星座的位置好，这是由于技术为我们提供了更安全和更容易的做事方法，提供了替代人力的能量，并通过科学提供了把自然变成人类行为的盟友的方法，赋予我们极其高产的农业系统，并提供防止和治疗许多威胁人类生命的疾病方法。认为我们可以拒绝技术，回到简单、美妙和安全的生活中去完全是疯狂的想法。

但风险的确存在。在一个更完善的世界，我们将对风险和具体技术的其他代价作出合理的判断，并将其与益处相比较。当我们购买香蕉半剖条时我们会这样做，但对风险我们几乎从不愿意公开地这样做，而更愿意通过复杂的机制作出决策，好像我们不知道我们在与什么作交易，或谁应对决策负责。我们似乎很喜欢这样。

即使我们试图尽可能做最好的权衡，我们在大多数情况下都会失败，因为风险估价中几乎总是存在着不确定性，而益处起码也同样难以用数量计算。最近我们对苹果上的某种化学残留物产生全国性的恐慌——全国的学校委员会都从学校的午餐中取消了苹果，食品商也从货架上清除了苹果。这一威胁被以制造这种恐慌维持生计的组织夸张和宣传，但这一点并不重要。虽然这种恐慌是够真实的，就连风险也是真实的，尽管它很小，但这对学生的健康并没有重大影响，因为他们还可以食用其他水果，不然的话真会造成巨

大的损害。在这个时候，那些说我们应该在化学残留物的极小威胁和水果对人体有益这二者之间进行平衡的人不受欢迎，而且肯定不会起作用。吉卜林写了一首著名的诗，一开始是这样的，“如果你能保住自己的脑袋，当你周围所有的人掉了脑袋并为此指责你时……”这并不容易，而且吉卜林忘了提到在这种情形下保住自己脑袋的最好方法是闭上嘴。我们有一个长久的传统就是砍掉带来坏消息的信使的头。

为负责地作出这种估价，作一些数量方面的工作是绝对必要的。仅仅说某某化学添加剂是致癌的还不够，仅仅说飞行是危险的也不够，这种方法会导致瘫痪。重要的是该化学品的危险性有多大，或发生飞机事故的可俞性有多大。从我们的生活中完全消除风险是不可能的（如果可能的话也不让人称心），因此知道我们面对的是什么这一需要是至高无上的。我们所有人（几乎所有人）在童年的晚期都学会作个人的预算——克服了拥有一切见到的玩具的冲动，学会询问获得某样具体的东西的费用是否值得。避免风险与这没有什么区别，只是后者对我们较为陌生。

我们似乎正失去这种能力，即认识到在某些问题上有理智的人会有不同的意见，而任何一方都不是坏人。1989 年，《纽约时报》登载了一篇文章，题目是“科学中的失误不是欺诈”。对任何不愉快事件的最常见的公众反应是，这是别人强加给我们的，出于可以想象的恶意，或者是以牺牲我们而获益。我们法庭上的戏，既现实又是虚构的，它基于这样的观念，即任何一件坏事都应有人受到指责，而事情本来不一定是这样。

我们这样想毫不奇怪，从我们和我们的孩子对电视节目、报摊上的书以及许多流行电影的接触中，很难看出从什么地方我们可以得知背后没有罪恶势力的坏事有时也会发生。总有一个戴着黑帽子的人——小说就是这样构成的。而对知识界来说，相信巫婆和恶棍要比面对需要作出判断的问题容易得多。我们的政治竞选中更加有害的向消极面的转化是另一个承认这种需求的例子。

因此我们生活在一个存在着技术风险和技术益处的体系中，二者都很难用数量计算。在这些事情中我们的许多领导人都经过传播媒介的过滤，有着天然的夸大风险和寻找邪恶的趋势（在苹果恐慌中，我没有看到任何报纸或杂志文章或电视节目提到过苹果有益于健康）。毫无疑问本书对那些在这些事情中利用我们的弱点的人已发泄了很多怨愤，但他们（常常是出于最好的意愿）正在使这个世界成为对人类不那么安全的世界。我们整个人口对科学和技术感到极不自在，同时又对科技完全无知，这一事实似乎使我们成了恼人的笑柄。留心注意怀有使命感和妒忌心的假专家，特别是那些假装是科学家的律师。

最后，没有什么可以替代教育。如果有人否认技术中存在着风险，他们就和那些认为更加简单的世界也就更加安全的人犯了同样的错误。前者促成了引起事故的自满情绪，这需要时不常的使其震惊的治疗。对于后者来说，妒忌他们的梦想不是有同情心的做法，但他们也不必硬把自已的梦想塞给我们其他人。在所有现实的情形中，存在着相互冲突的价值观念，需要妥协，某些人的公牛的确需要抵伤，重要的是公牛属于谁。处理这些真正深奥的问题的唯一有效方法是理解它们——我们不能总是依赖运气，本书是提供帮助的一个适度努力。如果你爱读这本书那就更好了。