

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

身边的力学



《身边的力学》编委会

主编：徐秉业

副主编：杨海兴 贾书惠 汤寿根 薛克宗

编委：（按汉语拼音）

范钦珊 贾书惠 刘延柱 刘肃 鹿振友

单辉祖 汤寿根 王家瑶 王克 武际可

徐秉业 薛克宗 杨海兴 张志新 赵学仁

朱峰

执行编委：刘肃

前 言

普及科学技术知识是全社会的义务，更是科技工作者的责任。为了提高全民族的科学文化素质，培养出懂科学、重教育的下一代，出版一批水平高、趣味性强的科普文章和书籍是十分必要的。力学知识也不例外，这是力学教师和力学工作者应该肩负起的责任和义务。

力学广泛地存在于工农业生产和人类生活中的各个领域，如何利用力学原理去解释和分析力学现象，不仅对理解这些现象大有好处，而且对掌握这些力学规律并运用这些规律去处理问题也是非常重要的。

当前，急需组织起一支稳定的、有一定水平的力学科普作者队伍，选定一些适合科普的题目，进行力学科普创作，鼓励发表科普文章和书籍。由中国力学学会和中科院力学所主办的《力学与实践》杂志已开辟了力学科普专栏“身边力学趣话”，方便了力学科普文章的发表，北京大学的武际可教授和天津大学的王振东教授为力学科普撰写了不少优秀的文章，做出了十分有益的开创性工作。武际可教授撰写的“捞面条的学问”于1996年曾荣获中宣部、广电部、中国科协、国家出版总署联合颁发的奖励。

中国力学学会教育工作委员会和科普工作委员会于1996年8月27日至1996年9月1日在山东长岛共同组织了力学科普会议。会上交流了45篇力学科普论文，这些论文都是以具有中学水平以上读者为对象的。与会作者相互交流，相互切磋，相互学习，这对建立一支力学科普队伍和这支队伍水平的提高起到了良好的作用。为了进一步作好力学科普工作，决定出版这本《身边的力学》。这里发表了编委会从这次科普会议上遴选出来的优秀文章；为了充实这本书的内容，我们还转载了《力学与实践》曾发表过的一些优秀作品（目录中文章名左上角加“*”的）。

社会上总认为力学太深奥，因而普及力学知识是力学教师、力学工作者义不容辞的责任。应该看到力学科普与兄弟学科相比还有一定差距，把力学知识普及到人民大众中去，普及到青少年中去是力学工作者长期努力的目标。力学科普工作任重而道远，我们要放眼世界，放眼未来，为开拓高水平的力学科普园地而不断努力。

我们仅以本书献给中国力学学会成立40周年！在此，我们谨向北京大学出版社的大力支持和邱淑清编审对此书十分精心地审改，表示衷心的感谢！

我们衷心地期望这本《身边的力学》能起到抛砖引玉的作用，使更多的力学教师和力学工作者重视这块园地，为力学科普工作做出贡献。

徐秉业
1997年6月

内容简介

作为研究物质机械运动规律的力学科学，它在人们身边无时不在，无处不在。本书收入的 35 篇力学科普佳作，给读者描绘了一个活生生的力学世界。这些文章有的从一件普通事情出发，揭示出深刻的力学原理；有的由表及里，由近及远，通俗地阐述了现代力学发展的重要问题。本书的主要作者和编者，或是国内知名的力学专家，或是大学的力学教师。该书涉及力学领域广，内容新颖丰富，好读易懂，是一本适合于广大中学师生、大学生、工程技术人员、大中专院校力学教师以及自然科学爱好者阅读的极好的力学科普读物。

目 录

从噗噗瞪儿谈到非线性	武际可 (1)
漫谈人体的运动	刘延柱 (8)
脸盆、茶缸的生产制造与金属	
材料的塑性加工	朱峰 徐秉业 薛克宗 (13)
猫在下落时的翻身及其他	贾书惠 (17)
材料科学王国中的新成员——智能材料	张陵 (26)
*春蚕到死丝方尽——谈液体的拉丝现象	王振东 (36)
*捞面条的学问——兼谈分离技术	武际可 (42)
*神秘的数字 84.4	贾书惠 (49)
编钟，为何如此奇特？	王大钧 (55)
从磁带盒上的斑斓色彩说起	方竞傅缤 (65)
树木生长中的力学行为	方广盛 莫淑华 (68)
走钢丝横跨天堑的力学漫谈	马希龄 薛克宗 (74)
*倒啤酒的学问——兼谈空泡问题	武际可 (79)
平衡吊——力学平衡原理应用一例	王克 (88)
*冰海沉船的启示	周道祥 (94)
混沌浅说	陈立群 赵婷 刘延柱 (98)
飞轮储能	丁占鳌 (104)
*郡亭枕上看潮头——漫谈潮汐及其开发利用	王振东 (109)
“势如破竹”纵横谈	胡宗一 (115)
*伐木的学问	周道祥 (118)
混凝土的发展与力学	苏洪 (122)
*兵无常势，水无常形——漫谈流体	
与流动性	王振东 (125)
流体介质阻力	冯立富 许宏林 (133)
*夜半钟声到客船——谈声音和波的传播	武际可 (138)
*奇妙的爆炸聚能	言志信 (146)
炮弹果真沿 45° 方向发射最远吗？	刘又文 (150)
万有引力和人造卫星	牛光志 刘华 (154)
*从土豆的内伤谈起——漫谈接触问题	武际可 (162)
澄清重量概念，准确选用单位	王家石 (166)
*地震与断裂力学	周道祥 (170)
亦忧亦喜话“振动”	刘会川 扬玉贵 (174)
*生理流动与医学听诊	黄上恒 (179)
摆的运动纵横谈	陈立群 (185)
风与桥	彭大文 (191)

裂纹与材料的强度	侯晓宁 文健 (198)
后记	汤寿根 (203)

从噗噗瞪儿谈到非线性

武际可

噗噗瞪儿，是一种用玻璃吹制而成的玩具。吹制的办法是，先将玻璃拉成一根管子，然后将它的端部吹成一个球，最后趁玻璃还软，在一个微凸的平面上一摠，使底平面略向内凹，待冷却后即成。通常多为暗红色或红褐色。图 1 (b) 是清朝同治光绪年间民间艺人画的彩色画“北京民间风俗百图”中的“卖琉璃喇叭图”，图中左筐上边即有几只噗噗瞪，它的形状如图 1 (a)。图 1 (c) 则是 40 年代的一张民俗剪纸，右筐上也插着几只噗噗瞪。据日本学者林谦三的考证，噗噗瞪大约在江户时代 (1603 ~ 1867 年) 传入日本，称之为鼓 (poppen) 并附有一张插图 (图 1 (d))。

由于它的底薄如蝉翅，且略凹，玩的时候对着管端轻轻吹气，当内部气压略大时，底儿便变形而突然外凸，随之噗地一响；然后再吸气，随着内部压力减小，底儿又噗地一响变为向内凹，这样一吹一吸，便响个不停，很好玩。

但是，由于这种玩具很易破碎，不小心能够划破皮肤，再加上新的电子玩具的出现，所以近几十年来生产很少了。早年它却很流行。它的名称很多，北京一带也称不不登、倒掖气、倒掖器、响葫芦；山西一带则称咯嘣儿、琉璃咯嘣儿；广东一带称料泡等。

噗噗瞪儿在中国发明得相当早，在明末刘侗、于奕正合写的《帝京景物略》中有记载：“别有衔而嘘吸者，大声 (h ng)，小声啾啾 (b ng)，曰倒掖气。”可见它的发明当不晚于明末。书中还记有一首儿歌，现录在下面：

倒掖器，如瓶落阶瓶倒水。
匀匀呼吸吹薄纸，吸少呼多瓶脱底。
藏爹钱瞒爹眼里，迷糊琉璃厂甸子。
儿迷糊，倒掖器，爹着汗，嬷着泪。

这首儿歌的大意是：倒掖器玩起来，它发出的声音有如瓦盆掉在台阶上或小口瓶往出倒水，由于它很不结实，所以必须均匀地吹吸，就像吹一张薄纸一样，一不小心就会将底吹脱落，很容易吹坏。歌的后半阙是说一个淘气的小孩背着爹妈拿了钱去逛琉璃厂、厂甸，买倒掖器玩，结果害得爹为了寻他而汗流夹背，老妈妈急得哭泣。这里“迷糊”有迷恋与糊涂双关的意思。

时间上大约是噗噗瞪儿发明稍后，英国人虎克 (R. Hooke, 1635 ~ 1703 年) 在 1660 年发现了一条定律，并且于 1676 年发表了。这就是现在中学教科书上说的虎克定律，即：在材料的弹性极限内，弹性物体所受的

力与变形成正比。如果用 p 代表外力, d 代表变形量, 则虎克定律可以表示成 $p=kd$, 这里 k 是与 p 和 d 都没有关系的常数。比虎克略早的法国数学家笛卡儿 (Descartes, 1596 ~ 1650 年), 在他 41 岁时, 即 1637 年, 发表了他的名著《几何学》, 也就是后来解析几何的最早起源。书中认为在平面上建立了坐标系, 任何一个两个变数的方程可以对应于平面上的一个图形。有了这个方法, 虎克就可以将他的外力与变形的关系画在图上, 结果是一条直线, 所以后来也将虎克所描述的这种外力与变形的关系称作线性关系。

虎克搜罗了他当时所能收集的许多例子加以研讨, 结果都符合“线性关系”。其中有: 螺旋弹簧, 外力是拉力, 变形是伸长; 钟表发条, 外力是中心轴的力矩, 变形是中心轴旋转过的角度; 一根悬吊的长长的线, 外力是拉力(下端的重物), 变形是伸长; 木制的一端固定, 另一端自由的梁(悬臂梁), 外力是自由端所悬重量, 变形是自由端铅直位移(挠度)。在所有这些例子中, “线性规律”都是成立的。据国防科技大学老亮教授考证, 在我国东汉经学家郑玄(公元 127 ~ 200 年)在《考工记》注中, 通过对弓的试验的注中, 就已经有外力与变形成正比的记载。比虎克早了 1400 多年。

噗噗瞪儿虽然发明得比虎克出生还要早, 可惜由于当时中西交通的阻隔, 虎克小时候肯定没玩过这玩艺儿, 否则他在总结他的定律时, 恐怕要困惑不解了。如果将噗噗瞪儿也看作一个在外部力作用下的变形物体, 这里外力是内部空气的压强减去大气压, 变形可以用圆形底部中心的位移来量, 不妨设底部为平的时, 变形为零。这时, 外力与变形的关系不再是一根直线, 而要复杂得多。

对于噗噗瞪儿的外力变形曲线来说, 也可以将它画在平面上, 令水平坐标表示变形 d , 铅直坐标表示压力 p , 图 2 曲线 ABODC 即是。设未吹气时, 噗噗瞪的状态处于 A 点, 这时 d 是负的, 表示底向内凹。随着吹气使内部压力增高, 底也逐渐向外移动, 当内部力 P 增加时, 于是便使噗噗瞪的状态到达 B 点。我们看到从 B 点, 变形曲线是伸向 BO 段, 但这一段上, 压力必须下降, 实际上我们还在继续吹它, 不可能下降, 于是噗噗瞪的底部中心便直接跳向 C 点, 然后若增加压力再沿 DC 段往上去。从 B 跳到 C, 噗噗瞪的底儿瞬时便从凹形跳到凸形, 发出一个清脆的响声。在 B 点, 噗噗瞪的状态发生突然变化, 所以我们称 B 点为临界点。

现在当噗噗瞪状态处于 C 点, 即底向外凸压力为正, 如果减少压力, 或轻轻吸气, 则噗噗瞪的状态又会沿 CD 段到达 D 点。这时再减小压力, 噗噗瞪的底儿便突然在压力不变的条件下, 由凸变为凹, 即从 D 返回到 A 点。

我们看到在曲线 ABODC 上, BOD 这一段也是外力变形曲线上的一小段, 但却永远达不到。因为在这一段上, 噗噗瞪的平衡是不稳定的。

噗噗瞪儿发明得很早，可是关于它的变形的理论研究得却很晚。最早研究它的是 1939 年美国力学家冯卡门 (von Karman) 和他的中国学生钱学森。他们将这类问题简化为一个球壳在外压作用下的失稳问题。他们的兴趣当然不是为了噗噗瞪玩儿，而是对某些飞机结构元件变形规律认识的要求。

然而，噗噗瞪儿的底儿在它向内凹或向外凸时，都可以看为一个球壳的一部分。所以卡门-钱的研究工作也可以用来解释噗噗瞪儿的变形，它是一类弹性物体变形的代表。后来人们把这类有上下临界 (如图 2 上 B, C 点) 的变形曲线、变形的来回突然跳动称为弹性突跳。

弹性突跳现象在工程与生活中有不少应用，现在电子计算机或计算器的按键就是利用弹性突跳元件，使得指头按上去压力达到一定，键接触时不拖泥带水。高压配电的电闸也是如此。有些工作部门还用它作为控制器，使压力高时达到临界值，通过弹性突跳打开阀门泄气，低时达到某临界值通过弹性突跳关闭阀门。

噗噗瞪儿也是弹性材料，但是它的外力变形曲线却为什么不是线性的，不服从虎克定律？原因很简单，虎克研究的对象都是相对小的变形。其实即使是噗噗瞪儿，如在图上 A 点附近，它的变形曲线也可以近似看为线性的，用曲线过 A 点的切线代替即可；变形大了，曲线便拐弯了。所以虎克之后，为了保持虎克定律有较大的适用范围，人们修改了他的提法，加进两条限制：其一是严格限定在变形很小的情形；其二是将外力与变形改为应力与应变。应力与应变是指在变形体上割出一个无限小的单元上来讨论外力与变形关系的。在这两个条件下，大部分弹性体是满足“线性关系”的，即使我们的噗噗瞪儿上的一个无限小元素也是服从线性关系的。

人们将像噗噗瞪儿的变形外力曲线称为非线性关系。非线性关系类型很多，也很复杂。整个自然科学的历史表明，任何学科发展的早期，最先总是将所得到的关系看作线性的，例如在电学中，电场强度与电感强度的线性关系；渗流中渗透压力与渗透流速度的线性关系；在热学中热流量与温度差的关系；在电工中电压与电流强度的关系，等等。早期都是线性的，随着研究的深入，都发现了非线性的修正。

不仅如此，早期的社会生产，也近似用线性关系的经济学来讨论。手工生产，如打草鞋，生产量与人数是线性关系。后来进入大生产，一座现代化钢厂，钢产量与工人数便不是线性关系，人数少到一定数量便产不出钢来。

大约在本世纪 60 年代，整个自然科学与社会科学各领域，大量提出并讨论非线性现象与问题，而且这些问题都有一些共同点，在数学描述上其非线性关系相同，且发生的现象也有某些可类比性。它比线性情形更复杂、更媚人，描述的现象更丰富，也更具有挑战性。这就是所谓当

前我们称之为非线性科学。而且人们预期，20 世纪人类仅仅是大量提出非线性问题。真正要解决，恐怕是下世纪的事。

然而，非线性现象不管怎样复杂，也总得从最简单的情形开始研究。噗噗瞪儿当是一种最简单的非线性现象。如果你想进入非线性的研究领域一显身手，不妨请你先对噗噗瞪儿思考一下，它会告诉你许许多多。

漫谈人体的运动

刘延柱

人体是个复杂的大系统

生命离不开运动，人类的一切活动都离不开运动，竞技场上奥运健儿们的运动更是牵动着亿万人的心。与无生命的物体不同，人体的运动是受意识控制的运动，虽然也遵循力学普遍规律，但却具有特殊的复杂性。从动力学研究的观点出发，这种特殊性可以归纳为：

(1) 人体的“硬件”是由有限个部件用关节联结成的骨骼系统。

(2) 各相邻部件之间存在肌肉联系，可施加作用力以改变相对运动状态。

(3) 肌肉作用力受神经中枢“软件”的控制。因此，人体是由骨骼、肌肉和神经三个子系统构成的复杂大系统。除了各部件的机械运动以外，各相邻部件之间的肌肉控制力矩，感觉器官接收的输入信息和传递给肌肉的输出信息等都比机械运动数量大得多的未知变量。它们的变化规律已超出了经典力学的研究范围。

经典力学有用武之地吗？

由伽里略、牛顿奠基的经典力学发展至今已经达到尽善尽美的程度。宇宙万物的宏观运动无不可用经典力学解释，当然也应包括人体的运动在内。问题在于按经典力学普遍原理列出的动力学方程的数目远小于未知变量的数目。在这些未知变量中，引起困惑的肌肉收缩力和神经信息不是经典力学的研究对象，也难以被运动者本身感知，只有肌肉活动所引起的后果，即相邻部件的相对位置变动可以被感知和控制。体操运动员做一个高难动作时，他只关心手臂或腿的位置是否正确，不会去想关节上应加多大的肌肉收缩力或传递多大的神经脉冲。只要不追究肌肉施力的生物物理过程，并且假定运动者对肌肉的控制机能足够健全，人的主观意志就能通过肢体的相对运动体现出来。将相对运动规律作为附加的约束条件列出，就能从经典力学微分方程解出躯干运动的变化规律。这种研究方法十分有效，可以正确地解释人体运动和指导体育实践。

猫的翻身与运动员的腾空

猫的空中翻身与动量矩守恒原理的矛盾使人困惑不解，流行一时的挥尾巴解释也由于无尾猫转体实验成功而宣告无效。细致观察可以发

现，猫在翻转过程中前半身相对后半身作方向相反的圆锥运动，使总动量矩保持为零。引入这种相对运动的计算结果与摄影记录完全吻合。

与猫的翻身类似，跳远运动员在空中向下挥臂能使双足抬高而改善成绩；宇航员利用双臂或双腿的协调动作能改变在空间中的方位。现在已能编制出人体腾空运动的仿真软件，作为体操、跳水和技巧运动员完成高难动作的计算机辅助工具。

单杠上的自激摆动

悬挂在单杠上的运动员是一个复摆，但依靠收腹、屈臂和鞭打的联合动作能使稳定的平衡状态变为不稳定，产生振幅愈来愈大的摆动。这种称作振浪的体操动作是一种典型的自激振动。运动员根据自身摆动的位置控制肢体的动作。将这种协调关系写成约束条件，从动力学方程解出摆动规律，从而可以说明，正确的振浪动作使摆幅增大，错误动作反使摆动衰减。

直立的人体为何不倒

直立的人体是一个倒置的复摆，若不加控制是典型的不稳定平衡。人一旦感觉到重心有向一侧偏移的趋势，就立刻控制足底支承力的作用点向同一侧移动，同时向另一侧做弯腰动作以维持平衡。将这种协调动作写作约束条件，可以分析出，由不稳定平衡如何转变为平衡。由于重心水平运动的动力来自足底的静摩擦，因此受到地面能够提供的最大静摩擦力的限制。为保证控制作用有效，站立过程中重心的地面投影不得越出以支承足为中心的一个椭圆域，域的大小与地面摩擦系数成正比。在光滑的冰面上人容易摔倒是因为这个椭圆域缩小到接近于零的原因。

怎样保持步行稳定

人的步行是更复杂的运动。由于是单足支承，重心在地面上的投影经常越出足底与地面的接触面，不能像爬虫缓慢爬行那样随时满足静平衡条件（图1）。因此人的步行稳定性是一个动态过程，主要依靠足底摩擦力来保证，向前踏地时，摩擦力朝后，向后蹬地时摩擦力朝前的客观规律恰好满足稳定性的要求。在地面上围绕支承足也可作出幅度与摩擦系数成正比的椭圆域。重心的地面投影必须保持在域内才能保证实现稳定步行。要使步行能连续进行，左、右足的椭圆域必须连通。因此跨步的距离必须受到限制，地面愈粗糙容许的步距愈大。田径运动员穿上钉子鞋就能大步奔跑，因为鞋底与地面的摩擦明显增强了。

人怎样才能离地

人体从受地面约束到腾空状态的转变依靠起跳运动实现。当足底的法向支承力消失，且重心具有垂直向上的速度时，人体就能解除地面约束。因此正确的起跳动作是从下蹲状态向上伸展肢体，使重心的垂直运动先加速后减速。加速的目的是积累离地速度，减速的目的是减小法向支承力。当负加速度与重力加速度相等时，支承力减小为零，人体离地跳起。肢体的伸展主要受膝关节的控制，因此，膝关节转角可作为起跳运动的控制变量。对运动员来说，最大跳跃高度是衡量跳跃质量的优化目标，由离地速度确定。要提高离地速度，起先必须用大力蹬地以获得最大的起始伸展速度。但随后的制动过程必须缓慢，因为过快的制动将使解除约束过早发生，致使人体尚未积累足够的垂直速度即离地跳起而影响成绩。

与跳跃运动相反，竞走运动必须避免支承足离地面的犯规动作。由于解除约束是由重心的垂直加速度引起，因此运动员在步行过程中必须力图避免重心上下波动，从而形成了竞走运动员独特的扭臀动作。

骑自行车的力学

虽然自行车是最普及的交通工具，但是自行车运动的原理至今尚未完全弄清楚。自行车是受人控制的机械，若不考虑人的主观因素，会得出自行车稳定性只与车速有关，即车速太慢太快都会引起不稳定的错误结论。实际上，众所周知，自行车是否稳定完全取决于驾车人的技术。当驾车人感觉到车架向一侧倾斜时，会立刻控制车把使前叉朝同一侧转动。将这种控制规律作为自行车运动方程的补充条件进行计算，结果表明，所谓驾车技术完全是由控制规律体现的。选择适当的控制参数就能使自行车稳定。除了把手以外，人的腰部动作是另一个控制因素，所以，高明的驾车人双手脱把也能骑好车。

脸盆、茶缸的生产制造与金属材料的塑性加工

朱峰 徐秉业 薛克宗

当你看到一个新的脸盆或茶缸时，你可能只是注意它们的外形尺寸，欣赏其漂亮的图案设计，却很难去想象这些物品是怎样被制造生产出来的。如果你仔细观察一下电冰箱、洗衣机、电风扇等家用电器，以及汽车、火车、飞机等交通工具的金属外壳，便会发现，它们厚度均匀、表面光洁、具有不同的外形和尺寸。那么这些形状各异的金属制品究竟是采用什么样的生产方式制造出来的？要回答这个问题，就必须从金属材料的加工工艺谈起。

什么是金属材料的加工工艺？凡是采用一定的设备或工具使金属材料由一种形态成为另外一种形态的加工方式都称之为金属材料的加工工艺。金属材料的加工工艺包括有：由液态金属变为固态金属的铸造工艺，由粉末状金属变为固态金属的粉末成形工艺，将多余金属去掉形成新的产品的切削加工工艺，多个金属拼接在一起的焊接工艺，使金属变形成为产品的塑性成形工艺等。其中，切削加工和塑性成形是极其重要的金属材料加工工艺。

切削加工是指按照图纸要求，采用特殊的加工工具，就像用刀子削水果一样，对金属材料进行车、铣、刨、磨、钻等机械切削的方式，强行去除不需要的金属材料，以使剩余部分组成具有所要求外形和尺寸的工件。这种加工方式具有很大的加工范围，但是由于加工过程中切屑的存在，使得材料利用率很低。塑性加工则是利用外力使金属材料发生塑性变形从而获得所需产品的加工方式，如铁匠用锤子不停地击打烧红的铁块使其变为农具就是一种简单的塑性加工形式。这种加工方式不产生废料，材料利用率高，具有非常高的加工精度和光洁度，产品的互换性强，且在加工时能使产品内部性能得到很大的改善，因而在国民经济生产中占有非常重要的地位。早在二三千年前，塑性加工方法就被我国劳动人民用于生产制造各种生产工具和兵器，且具有相当的技术水平。在陕西秦始皇陵兵马俑坑的出土文物中，就有三把用合金钢锻制的宝剑，其中一把至今仍光艳夺目，锋利如昔，令目睹者叹为观止。

实际上，塑性变形并不是金属材料唯一的变形方式，在外力作用下，金属通常先发生弹性变形。比如你用力拉压弹簧，会使其伸长或缩短，但当你松手时，弹簧则恢复原位，变形消失；又如锯片锯木时，当受到不正常侧向力作用时，会发生弯曲，力消失，弯曲也会随之消失，锯片又恢复原位，锯片的这种弹性性能一方面保护锯片不致断裂破坏，另一方面也使锯片能在非直线的锯道里正常工作。但是，金属材料这种可恢复的弹性变形性能却难以用来形成制品。可以想象，如果利用金属材料

的弹性性能将其做成脸盆或茶缸的形状，那么当外力去除以后，这些所谓的脸盆或茶缸也就不复存在了。当然这种变形程度一般较小，实际上是不可能弹性变形范围内得到如此大变形的物品的。

当金属材料所受外力继续增加时，材料的变形特征发生变化，有塑性变形产生。此时如果去除外力，它就不可能完全恢复原来的形状和尺寸，呈现出来的却是另外一种外形特征，这种残余下来的塑性变形也称之为永久变形，正是这种变形特征构成了极其重要的金属材料加工方式之一——塑性加工。

塑性加工工艺一般分体积变形和板料变形两大类，前者以锻造、轧制、挤压等工艺为主，主要通过金属材料体积的大量转移获得机器零件或毛坯。为了采用较小的作用力获得较大的塑性变形，一般要在 1000 以上的高温下操作，加工设备一般为锻锤、水压机、轧机等。60 年代，我国自行设计制造的一万二千吨水压机标志着我国的锻造工业已经达到了相当高的水平。板料成形则是利用专门的模具在压力机上对金属板料进行塑性加工，亦称为板料冲压，因它一般需在室温下进行，故也称为冷冲压。板料成形对生产容器类产品具有突出的优势。脸盆、茶缸等生活用品，洗衣机、电冰箱等家电产品，汽车、火车等交通工具的外壳均是采用这种加工方法生产出来的。图 1 为体积成形与板料成形的示意图。

因为被加工材料的塑性变形是在其弹性变形之后发生的，所以当外力去除后，弹性变形卸掉，塑性变形保留，与压力作用下所产生的外形有一定的差异，称之为回弹。这种现象可从铁丝的弯曲过程观察到，当我们用手握住铁丝的两端用力弯曲时，铁丝变成弓形，而当松开手后，明显感觉到铁丝的两端往回翘，且翘到一定程度后停止，此时弓形尺寸与刚才加力状态下的不一样了。所以工程技术人员经过计算要将模具的尺寸设计得“过”一些，以保证卸压后，工件恰好恢复到所需的外形尺寸。

金属材料的塑性变形能力并不是无限的，当这种变形超过一定限度时，就会发生破裂，造成废品。为了充分发挥金属的塑性变形能力，人们经过长期的摸索与实践，终于发现：在一定的加工条件下，将金属材料的内部组织结构进行人为的某种改变，便能获得超乎寻常的塑性变形能力，可以达到 300% 以上的塑性变形效果，这就是金属材料的超塑成形。这是本世纪以来，在金属材料及其力学性能方面取得的重要成就之一，开辟了一个新的塑性加工领域。目前在这一课题中，尽管还有许多未知的东西，但它已广泛地应用于宇航、仪器仪表、电子工业、金属工艺制品及型腔模具等领域。

近代先进的塑性加工设备、先进的塑性加工工艺的出现，更由于计算机技术的飞速发展，使得这种加工方式更具机械化、自动化和智能化，极大地促进了工业进步和社会发展。现在人们采用塑性加工生产方式，

不再仅仅是为了获得所需要的工件外形和尺寸，还要通过不断地塑性变形，就像揉面一样，使金属坯料承受反复变形，使其内部组织更加密实、更加均匀，获得最佳的机械性能。现代的锻造生产方式应是同时根据产品外形尺寸要求和内部组织性能要求来设计加工工艺，称之为控制锻造。实践证明，这是今后锻造业发展的重要趋势。随着国民经济的不断发展，必然会有更新、更多的塑性加工工艺问世，以适应社会不断发展的要求。

猫在下落时的翻身及其他

贾书惠

一个顽皮的孩子用双手托起一只猫，使它四脚朝天，然后突然撒手。孩子本想把猫摔一下取乐，可是出乎他的意料，猫竟能在空中翻身，四脚朝地安全落下。你是否也有过这样的实践？可是这个大家都熟悉的日常现象，在力学原理上却有些说不清。因为根据力学中的动量矩守恒原理，猫在下落过程中，猫体对通过重心的纵轴（头尾连线）的动量矩应该始终为零。这样，猫的一部分（例如前半身）的转动必然伴随着另一部分（后半身）的反向转动；因此，猫不可能整个身子向一个方向转动而翻身。然而事实上，猫确实向一个方向翻过身来；而且有人测量过，它翻转 180° 所需要的时间仅为 $1/8$ 秒。猫的翻身竟好像违反了动量矩守恒原理，这就是力学发展中困惑了许多科学家几十年的“猫案”。

违反了力学原理吗？

在中学物理中有这样一个例题：两个人面对面地站在冰上，且假设冰面非常光滑；两个相互一推，则两人必向相反方向滑行，且质量大的人速度小，质量小的人速度大。这就是当系统所受外力为零时的动量守恒原理的一例。同样，如果有两个圆盘装在同一个转轴上，可以分别绕转轴自由转动；两圆盘之间装有电机，电机转子装在一个圆盘上，定子装在另一个圆盘上。开始时圆盘都静止。一通电，电机的转子与定子之间产生相互作用力矩，结果是两个圆盘向相反的方向转动，且质量大半径大的圆盘转动角速度小，质量小半径小的圆盘转动角速度大。这就是当系统所受外力矩为零时的动量矩守恒原理的一个实例。需要指出的是，当物体作直线运动时，可以用质量作为物体运动惯性的度量；而当物体绕某轴转动时，转动惯性的大小不仅与质量有关，而且与半径有关。物体的质量分布距转轴的距离越远，转动惯性就越大，亦即，越不容易改变转动运动的状态。因此，我们用转动惯量 J 表示物体绕某轴的转动惯性，它等于物体中各质点质量 m_i 与距轴的距离 r_i 平方乘积之和，即

$$J = \sum_i m_i r_i^2$$

所以，当系统动量矩守恒并为零时，在内力作用下，两物体反向转动，且转动惯量大的物体角速度小，转动惯量小的物体角速度大。

猫在下落过程中，重力对通过重心的纵轴的力矩为零，因而猫对纵轴的动量矩守恒。又因下落开始时猫处于静止状态，动量矩的初值为零，因而整个下落过程中猫对纵轴的动量矩始终为零。当猫的一部分（例如前半身）向某一方向转动时，根据前述的系统动量矩守恒原理实例，另

一部分（后半身）必然要反转，因而无法解释猫作为整体向一个方向转动的事实，这就是科学家们的长期困惑所在。

形形色色的解释

最早试图解释猫翻身现象的大概是上世纪末法国的古龙。他认为猫先收缩前肢、伸开后肢、并转动前半身（图 1），由于前半身对纵轴的转动惯量小于后半身，根据动量矩守恒原理，在同样时间内，前半身转过的角度比后半身向相反方向转过的角度要大。然后，猫伸开前肢，收缩后肢并转动后半身，根据同样的道理，后半身也转过较大的角度。结果是：虽然动量矩始终为零，猫作为一个整体仍然可以向一个方向转动。古龙的解释可以称为四肢开合论。它虽然符合力学原理，但却不符合实际，因为在猫的自由下落过程中，我们根本观察不到这种明显的四肢开合运动。本世纪 40~50 年代，苏联的洛强斯基与鲁里叶在他们撰写的《理论力学》教科书中曾提出另外一种解释，即不用四肢的伸缩动作，只要将尾巴向一个方向急速旋转，猫的身体也能沿相反的方向翻转过来（图 2）。可是，有人做过计算，由于猫的躯干与尾巴的质量相差甚大，要想使躯干在 $1/8$ 秒内转过 180° ，尾巴必须在同一时间内向相反方向转动几十圈，才能维持系统的动量矩为零。这个角速度简直可以和飞机的螺旋桨比美！因此，转尾巴论也是站不注脚的。遗憾的是，直到 1983 年上述《理论力学》的第 8 版，作还在坚持这种看法。60 年代以后，流传着另一种解释：由于兔子也能像猫一样在空中翻身，而兔子的尾巴很短，所以兔子的翻身过程也许能使问题更加清楚（图 3）。下落一开始，兔子首先弯腰，并伸直后腿，这样兔子的后半身就几乎和前半身的轴线垂直。转体可设想分两步。首先前半身绕（1）轴转 180° ，根据动量矩守恒原理，后半身要向相反方向转动，但由于两部分对（1）轴的转动惯量相差很大，所以后半身几乎不动。第二步，后半身绕自己的轴线，转动 180° ，方向与第一步中前半身的转向相同，根据同样的讨论，这时前半身几乎不动，最后兔子再从向后弯腰恢复到向前弯腰，四肢朝下落到地上。这种理论可以称为绕双轴转动论。它抓住了弯腰这个关键，但要求兔子腰部有扭转，而且由于生理限制，兔子后弯的程度远比前弯为小；在这些方面，理论与实际都不相符。

高速摄影来帮忙

美国的凯恩仔细研究了猫下落时翻身的高速连续摄影，发现猫在下落过程中，依次向各个方向弯腰：先向前弯，然后向一侧弯，再向后弯，再向另一侧弯，最后前弯恢复到初始状态。这个过程很像人们在做体操

中腰部活动一节时上半身的圆锥运动。猫的前半身做这样一轮弯腰运动，整个身子就向相反方向转过 180° 。原来猫之所以能在下落时翻身，是依靠了前半身相对后半身的这种弯着腰的圆锥运动。为了验证这种弯腰论的正确性，凯恩建立了一个模拟猫翻身运动的物理模型。它由两个圆柱组成，分别代表猫的前半身和后半身。然后，利用力学原理建立了描述系统规律的方程式，再上计算机计算，并把计算结果用三维图形输出，就得到了图 4。在图中，+ 号代表猫的四肢，两圆柱间相接触的黑点代表弯腰方向。可以看出，当前半身相对后半身做右旋的弯腰圆锥运动 360° 时，整个身子左旋了 180° ，四脚朝下，完全符合实际。“弯腰论”能比较完满的解释猫下落时翻身的力学现象，现在正逐步被人们接受。

打破思维定势

在“弯腰论”中没有直接涉及动量矩守恒原理，但完全可以用动量矩守恒原理解释清楚。以前没有应用成功，是因为我们的思想中存在着错误的思维定势，即总是把猫这个系统截然分成两部分：前半身和后半身。现在换一种思考方法，即将系统的运动分成全系统的整体运动（理论力学中称之为牵连运动）及局部相对整体运动，或者说，系统的运动等于全系统的整体运动与局部的相对运动的叠加。例如，猫下落时的姿态运动是整体随后半身一起的翻身运动与前半身相对后半身“整体”的反向弯腰圆锥运动的叠加。为保持系统的动量矩为零，这两种运动的转动方向应该相反。所以，当猫的前半身相对后半身“整体”向某一方向作弯腰圆锥运动时，猫的整体必向相反方向转动，即翻身；而且由于前半身的质量及转动惯量近似等于整体质量及转动惯量的一半，当相对的圆锥运动转过 360° 时，整体正好反转 180° ！同样是应用动量矩守恒原理，换了一个角度思考，问题就迎刃而解了。顺便提一下，这种不依靠外力，而是通过系统内各部分之间的相对运动来改变系统整体运动的方法，在工程中有许多应用。读者不妨自己搜集或创造几个例子。

给宇航员出主意

宇航员在航天器中处于失重状态，和猫在下落时的情况是一样的。宇航员必须在漂浮状态下（舱内或者是舱外）完成各项任务，这时宇航员的动作将和地面上的动作有很大的不同。在地面上，如果你想取得身后的工具，不管你是坐着或站着，转身伸手去拿就是了。然而在失重的漂浮状态下，这件事却不那么好办，当你的上半身向右转动时，你的下半身竟向相反的方向转动，你根本无法实现向后转体的动作！因为在失重状态下外力对质心的力矩为零，人体对质心的动量矩守恒。如果初始

动量矩为零，那么一部分身体的转动必然伴随着另一部分身体的反向转动。但是如果研究了猫的翻身，就能设计出好几个动作方案来实现失重漂浮状态下的静止转体。首先，可以采用“弯腰论”方案。宇航员弯腰向前，再像体操中腰部运动那样让上半身作圆锥运动，全身就会向相反方向转体，蹦床运动员表演的节目中就有这种动作。这种方案要求宇航员腰部有很好的柔性与灵活性，而且也不是日常生活中的自然动作，对非运动员来说总显得笨拙，不一定是一个好方案。

其次，亦可用手臂动作来实现转体。在图 5 中人站在转台上，转轴铅直且轴承处摩擦可忽略不计，这样人体绕铅直轴的运动就可以模拟宇航员在漂浮状态下的转体运动。双臂侧向平伸，再向右转动(图 5(a))。由于动量矩守恒，下半身将向左转动，人体处于扭转状态(图 5(b))。不过由于对铅直轴的转动惯量不同，下半身的转角比上半身的要大得多。最后收臂并恢复到非扭转状态，这时下半身要向右转，但因收臂后身体上半部与下半部转动惯量相差不多，所以下半身向右转的角度不大，最后的结果是人体向左转了一个角度(图 5(c))。显然，这种动作实质上是猫翻身的“四肢开合论”的再现，实现起来，比“弯腰”要容易得多。问题是，做这样一轮双臂动作，人体究竟能转过多大角度？有人作过计算，为实现转体 180° ，双臂可能要动作十次，这主要是因为双臂的质量较小。

第三种方法是一种更简单的方法。仍以站在无摩擦转台上的人为例，当受试者举起手臂在头上作圆周运动时，由于整个人体对铅垂轴的动量矩为零，躯干必向相反方向慢慢转动(图 6)。当手臂的圆周运动停止时，躯干的转动也就停止。用这种方法也可使躯干绕纵轴转过任意角度。显然，这种方法是猫的“转尾巴”的再现，只不过人没有尾巴，用手臂代替而已。考虑到手臂如何动作方便，也为了提高转体的效率，可以将上述动作稍作修改，成为图 7 的动作。两手臂在身体的两侧作圆锥运动，转动的方向相同，这时躯干必绕纵轴向相反方向转动，转动的快慢取决于手臂动作的快慢及幅度。为了进一步提高转体的效率，还可用质量较大的双腿来代替手臂，于是获得图 8 所示的动作方案。双腿前后踢开，然后右腿向右，左腿向左，同时作半个圆锥运动，再将双腿收回成直立状态；在这期间，躯干必向相反的方向转动，躯干的转角与双腿圆锥运动的幅度有关。根据计算，双腿这样运动一个周期，躯干的转体可达 70° ！显然，这是一种最为有效的转体动作方案。

宇航员在失重状态下姿态运动的要求是多种多样的，此外，运动员在腾空中(如跳水、单杠、双杠、跳马的下法等)令人眼花缭乱的动作更成为竞技的重要内容。对猫下落时翻身的研究可以给我们许多启示，让我们运用力学原理去揭示运动生物力学中的各种规律，并用来为人民造福！

材料科学王国中的新成员——智能材料

张陵

在人类文明的发展过程中，材料科学所取得的每一次重大突破都极大地促进了社会进步、经济发展和其他相关科学技术的提高，以至于各个历史时代纷纷以该时期人类主要使用的材料名称命名，如石器时代、青铜器时代、铁器时代等等（图1）。

材料的智能化是人类对材料的期望和要求，同时也是材料，特别是功能材料的必然发展趋势。多年来，受大自然中动、植物的启迪，人们一直怀着这样的梦想：为飞机、桥梁和一些关键结构设计出一种在发生灾难性事故之前就能够预感失事并发出警报的材料；能够自动加固、自动修补裂纹的材料；建造一种不用螺旋桨的隐形潜艇，它可以像鲸鱼一样游动而不会产生振动，以避免敌舰上声纳的搜索；在人体内植入一个能够按照医生预先设计的治疗方案对身体特定部位输送药物的生物导弹；发明一种特殊的墙纸，它能够“感觉”到室内的噪声并自动地使之消失；等等。对具有类似于生物智慧的上述种种新材料的构思和设想就是材料科学王国中的新成员——智能材料的雏型。

智能材料的仿生特点

什么叫智能材料呢？举个例子，比如人的皮肤在划伤后过一段时间就会自然长好；骨头折断后，只要对好骨缝，断骨就会自动长在一起。这种皮肤和骨骼的功能引起了一大批科学家的极大兴趣。他们设想：如果飞机的机翼和机身的蒙皮、桥梁的钢梁和混凝土以及车辆上的零件在出现裂纹后也能像皮肤和骨骼一样愈合，那该多好！这样，就可减少飞机失事、车毁人亡等许多灾难。从生物学角度看，人类能够对外界做出主动性反应是因为人体具有收集、分析外界信息并做出适当反应的能力（图2）。收集信息需要“神经元”（如触觉神经、视觉神经等），分析信息需要“大脑”，对信息做出适当反应需要“肌肉”；“神经元”、“大脑”及“肌肉”相互之间的信息传递则需要“神经网络”。因此，与人类相类似，具有仿生功能的智能材料和由它所构成的系统应具备以下四个要素：（1）含有附着的、埋入的或内在的传感器，它是智能材料的“神经元”，用以感知外界变化并收集外界信息。（2）含有中央处理器，它是智能材料和结构的“大脑”，用它对传感器所收集到的外界信息进行分析、处理并发出适当的、适时的动作指令。（3）有附着的、埋入的或内在的执行器，它是智能材料的“肌肉”，其作用是根据中央处理器发出的反应指令进行相应的动作，因而也称之为动作器。（4）拥有

通信网络，它是智能材料和结构的“神经网络”，担负着传感器、执行器与中央处理器相互间的信息传输任务。此外，智能材料和结构还应具有与人的骨架功能相类似的先进复合材料，用以支承、连接这些硬件系统和受控结构。由此可以看出，智能材料是一种用来描述自身含有传感器、执行器、中央处理器及通信网络的仿生材料。它具有与生物体相类似的自适应功能，能够对周围外界环境的变化作出适时、灵敏和恰当的反应。关于智能材料的研究是一门交叉科学，它吸引了一大批化学、物理学、材料学、系统控制、计算机等广泛领域的专家。他们正在联合起来共同攻关，做第一个“敢吃螃蟹”的人，致力于开发出新型、实用的智能材料。90年代以来，他们取得了一系列令人振奋的研究成果。

智能材料的家族

形状记忆合金在智能材料的家族中，有一种具有独特形状记忆功能的合金，称之为形状记忆合金（SMA）。这种合金材料在特定温度条件下其物理性质将会发生显著的变化，即当对预变形的形状记忆合金加热，使其温度超过合金相变温度时，形状记忆合金材料就会恢复到变形前的形状。最早报导的形状记忆合金的应用实例就是美国宇航局的月面天线计划（图3）。在室温下用形状记忆合金制成抛物面天线，然后把它揉成直径5厘米以下的小团，放入阿波罗11号的舱内，在月面上经太阳的照射加热使它恢复到原来的抛物面形状。这样就能用空间有限的火箭舱运送体积庞大的天线了。

形状记忆合金应用的另一个例子是在医疗方面。日本的一位专家利用对电磁场敏感的铁氧体包覆TiNi形状记忆合金丝（ $\phi=1.0\text{mm}$ ）制成了癌症温热疗法用针（图4）。首先，通过病人体外的导管将这种形状记忆合金针植入到病人的癌变部位，由于形状记忆功能的作用，SMP将会发生自变形弯曲现象；其次，在通过涡流效应所产生的高频电磁场作用下，SMP在癌变部位将能够产生出一定的热量以使癌变区域得到萎缩。在以往的癌症温热疗法中，铁氧体治疗用针存在着两个主要问题：一是针体植入后（因不能弯曲），针的运动对病人来说是潜在的危险；二是由于磁通量的大小与直型针体的位置方向有密切关系，因而导致了癌变部位周围电磁场各向异性，位于癌变部位的针体所释放出的热量是非均匀的，影响了治疗效果。但使用上述形状记忆合金针SMP之后，不仅解决了这两个问题，而且同时还使疗效得到了提高。

此外，形状记忆合金机械手及机器人，特别是微型机器人的研制和开发，一直是形状记忆合金应用的一个热点。小型外科手术、显微镜下的精细作业以及很多场合下，都提出了毫米级微型机械手的要求。人们不仅希望机械手的动作要小，而且其本身的结构尺寸也必须小。图5是

一用形状记忆合金作为驱动元件，具有可动的肩、肘、腕及手指的微型机械手。手指和手腕靠 TiNi 合金螺旋弹簧的伸缩实现开闭和弯曲动作，肘和肩是靠直线状的 TiNi 合金丝的伸缩做弯曲动作，各个形状记忆合金驱动元件都由直接通上的脉宽可调电流加以控制。

智能皮肤 研制出触觉灵敏、能够自我修复、自我愈合的“智能皮肤”是人类梦寐以求的愿望，如今这一理想正在变为现实。用光纤材料或高分子材料制成能像人的手那样可以“感觉”和“动作”的传感器与执行器；运用电子技术和计算机技术制造出能够像人的大脑那样可以分析判断、逻辑推理及综合理解的微型数据信息处理系统；将这些传感器、执行器及控制系统埋入到结构材料之中就形成了一种具有类似人皮肤那样功能的复合智能材料结构（图 6）。这种“智能皮肤”不仅可以用来制成飞机的机翼和机身的蒙皮，以防止鸟撞飞机等意外事故的发生；而且，它还可以用在潜艇上，吸收来自声纳的反射波，使其摆脱敌方声纳系统的监控，成为一个真正的“秘密”武器（图 7）。此外，美国的一位科学家研制出了一种可以自行愈合的混凝土（图 8）。他把大量的空心纤维埋入到混凝土中，当混凝土开裂时，事先装有裂纹修补剂的空心纤维也将随之断裂并释放出裂纹修补液，从而把裂纹牢牢地粘在一起，达到了材料自行愈合之目的。

智能生活用品 在日常生活方面，智能材料结构也具有广阔的应用前景。在不久的将来，家庭中由智能材料结构制成的物品到处可见：坐椅可根据人的体型调整其形状和温度，使人能更好地解除疲劳；餐桌可使用磁感应来保持食品的温度；墙壁上的智能装饰材料能够改变颜色和纹路，使人们免受洗衣机、吸尘器、抽油烟机等家电带来的噪声之苦；由电致变色智能材料制成的“智能灵巧窗”可以随气候的变化和人们的活动而自适应地调节热流和采光。此外，用在高级轿车挡风玻璃上的智能雨刷可自动感觉雨量的大小并将其调节到最佳的运动速度。“随身听”是当代青年人喜欢的娱乐用品之一。它上面的磁头定位器是由智能材料——压电陶瓷晶片制成的。这种压电陶瓷定位器可以控制磁带始终垂直地贴紧磁头，精确地沿着磁道轨迹运动，使我们能够听到悦耳动听的音乐。

智能材料的研究前景

在日本，1990 年成立了一个仿生设计调查委员会。该委员会的成员正在对人、动物和植物进行“活体”研究，以掌握生物所具有的特异性能，然后再设法将研究成果用于智能材料的设计之中。现在，患胆结石症的人较多，通过对胆结石这一“生物晶体”的生长机制研究，不仅可以为胆结石的预防和治疗提供线索，而且还为人工牙齿及人工骨骼等医

用“智能晶体材料”的开发提供了条件。日本三重大学一位教授的研究重点是贝壳一旦受到损伤，破损部分就会发生钙化，从而巧妙地进行自我修复；而且，当把构成贝壳的外膜上皮组织移植到其体内时，就形成了珍珠；如果上皮细胞同珍珠袋同时发生变化，蛋白质和晶体就会整齐地互相排列在一起，即使没有来自大脑的指令，这一排列也能完成。研究人员认为，搞清这些原因将有可能找到“无生命”材料自我修复的线索。日本东京大学的一位教授在研究海参时发现，当人在捕捉海参时，它的身体就变硬。海参越遭袭击，其皮肤就变得越硬。他设想：如果能够利用海参与外皮组织的相反特性，即在受到强烈碰撞时能变软的外皮，那么受碰的物体岂不就可免遭破损！还有一位科学家在研究大象游泳时发现，大象可以通过改变体形来减少阻力。于是他设想，如果能够制造出随着速度的提高而改变形状的船舶或飞机，那么在航行时，就能够以最少的能量消耗达到最高的速度。但是要达到这一目标，必须有随环境变化而自我改变的材料。因此，研究大象改变体形的机理就有可能为研制这类材料找到有效的途径。在植物研究方面，大家知道，任何竹子都有竹节，竹节的一个非常重要的作用就是能够防止裂纹进一步扩大。竹子还有一个特点就是韧性极好，多大的狂风暴雨也奈何不了它。日本的科学家正在精心地研究竹子和竹节的这种功能，他们发现：竹子内外侧的纤维排列是不相同的，正是这种结构使它能够抵抗风暴而不会弯曲折断。他们这一研究的目的是将竹子的抗弯和抗裂的机理广泛用于飞机、火箭及其他结构。

随着材料科学、机器人学、电子学和计算机科学相互之间界线的模糊，在世界的建设过程中，智能材料将变得越来越重要。由于它们的原型是生物结构，因而智能材料的研制比我们目前已制造出的任何东西都复杂得多。在这方面的研究和开发过程中，将孕育着新理论、新材料。其研究成果不仅可以促进多种学科间的交叉与共同发展，而且还有利于提高人类的物质生活水平。

春蚕到死丝方尽——谈液体的拉丝现象

王振东

相见时难别亦难，东风无力百花残。
春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干。
晓镜但愁云鬓改，夜吟应觉月光寒。
蓬山此去无多路，青鸟殷勤为探看。

这篇名“无题”的著名七言律诗，是唐代诗人李商隐（约公元813~858年）所作。因早已脍炙人口，所以被选在包括《唐诗三百首》在内的各种唐诗选本之中。

“春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干”是这首无题中最有名的两句。后人常用来歌颂心目中的英雄人物和人类灵魂工程师那种“鞠躬尽瘁，死而后已”的高尚精神。当您使用“春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干”时，可曾想到，蕴含在这名联之中，也有十分有趣的力学现象。

我国著名文学家周汝昌先生对这一名联曾作过精彩的注释：“春蚕自缚，满腹情丝，生为尽吐；吐之既尽，命亦随亡。绛蜡自煎，一腔热泪，而长流；流之既干，身亦成烬。有此痴情苦意。几于九死未悔，方能出此惊人奇语。”并称此联有“惊风雨的境界、泣鬼神的力量。”对于如此精美的解释，笔者不敢妄加评论，但从力学的观点可以提出这样的问题：蚕丝究竟是怎样形成的，是“吐”出来的吗？蜡烛在燃烧的时候为什么总要“流泪”？

我们先来讨论蚕丝是怎样形成的。蚕卵孵化成蚁蚕后，在25~30天内经5个龄期，脱4次皮，发育成5龄蚕。5龄蚕食桑6~8天后停止食桑，皮肤透明，成为熟蚕。这时蚕腹的丝腺内充满了由于化学反应形成的粘液体——蚕丝的原料，亦称为丝液。可以仔细观察一下蚕的动作。蚕把嘴里的丝液粘到某物体上（丝液中的丝胶起着“粘”的作用），然后蚕的头按照8字形左右摇摆，摇晃着把丝液拉成丝线，靠丝线表面上剩留的丝胶将丝线粘到茧的内侧，这样慢慢地作成了茧。有人做了这样的试验，让一个粘着丝液的物体也随着蚕的脑袋一起摆动，那么从蚕嘴里就“吐”不出丝线来了。也就是说，如果蚕的脑袋不摆动，丝线就不会“吐出来”。而如果拿住线头抽拉，就可以连续不断地拉出丝线来；如果你用剪刀将丝剪断，蚕就难于再继续拉丝了，于是它的头就在空中摇晃着，想再找一个拴线的地方拉丝。这个试验说明，蚕丝不是“吐”出来的，而是“拉”出来的。

养蚕的农家儿童常捉蚕来玩。捉一条又肥又大的即将作茧的蚕，捏住它的头尾，猛地一下左右拉开，这时头尾分离了，而从蚕腹中却拉出一条直径约1毫米，长约30厘米的透明结实的丝线。如果慢慢地拉就不

行了，蚕体被拉断后，体液滴滴嗒嗒地流出来，什么也得不到。为什么快拉就能成丝，慢拉就是液体流出来呢？现代科学的研究表明，蚕丝是通过力的作用由丝液拉成的，这个现象叫作“牵引凝固”。丝液的主要成分是丝蛋白，丝蛋白的链状分子是线团状态。丝液是粘性液体，它的线团状分子呈圆球状，当你慢慢拉伸时，圆球分子之间只有滑动，没有其他变化，所以整个液体只是流动。当你快速拉伸时，各个分子还来不及流动就被伸开了。被拉开的丝蛋白链状分子有了新的排列，产生了变异，相互靠近的分子之间产生了很强的结合力。这种丝蛋白分子之间的“结合力”虽然比原子之间的作用力弱，但是长链的各链节之间却有很强的结合，所以形成了整体上很结实的蚕丝。

蚕腹的丝液直接用手去拉，只能拉成像钓鱼线那样粗的丝线，但如果借助于蚕的嘴就能拉成纤细而漂亮的丝线，直径可以细到 0.002 毫米，长度可达 1200 米左右。蚕的嘴是由“角质蛋白”形成的，嘴巴上有一个“调节口”，当丝液经过它时，可对流量进行着适当的调节。

由上所述，我们可以得出如下结论：蚕腹中有胶状丝液，形成结实而又漂亮的蚕丝的主要条件是拉力。蚕丝不是从蚕嘴里吐出来的，而是通过嘴巴的流量调节用力拉出来的。这就纠正了根据头脑中的“常识”而提出的、没有可靠的实验根据的桑蚕吐丝的传统看法。

在现代化学纤维工业中，人们正在模仿蚕所作的工作，用“拉伸”的办法制造尼龙和涤纶等合成纤维。只是在开始作成丝状时，先要对液体施加很大的压力，使从一个小孔中挤压出来，再去拉伸。如何又快又好地拉出丝来，正是流变学中“拉丝流动”所研究的内容。实际上，我们现在还比不上蚕，还不能像蚕那样只靠拉牵就能制出漂亮而结实的丝线来。蚕这个小生物身上还有许多问题有待我们去研究和探索。

除了桑蚕（平常所讲的蚕就是指它）之外，柞蚕、蓖麻蚕、木薯蚕、樟蚕、柳蚕和天蚕等也都不是吐丝，而是拉丝的。蜘蛛结网也是这样，它肚子里有“蛛丝液”，从腹部末端（而不是从头部嘴里）拉出丝来，但蜘蛛拉出的丝不如蚕丝那么结实。蜘蛛网有两种丝，一种是指向外面的，它较结实而光滑；另一种是一圈一圈的，它很有弹性，并且布满粘液珠。据说，在一个好的蜘蛛网上有 25 万个以上的粘液珠，以用来粘住飞虫供蜘蛛饱餐。宋代诗人范成大（1126~1193 年）在“四时田园杂兴”诗中所写：“静看檐蛛结网低，无端妨碍小虫飞。”正是这一情况的生动描述。还有一种结草虫，也可以拉出几乎与蚕丝结实程度不相上下的丝，它的“巢壳”外表有树叶和小枝缠挂着，“巢壳”的内侧像蚕茧一样结实，用手指都不易戳破它。

由科学家研究得知，蜘蛛丝和钢丝一样坚硬，却又比钢丝富有弹性；还特别耐寒，在 -50 到 -60 的低温下才会变脆发生断裂，而一般聚合物在零下十几摄氏度就会变脆。利用蛛丝的这些特性，若以它为原料制

作防弹服装、降落伞等军需物资，则在冬季使用有极佳的性能。据《世界知识》1994年第13期报道，美军正责成有关部门饲养能产坚韧的金黄色蛛丝的巴拿马蜘蛛。这种蜘蛛个大体胖，是一般蜘蛛的十几倍。采集者从蜘蛛腹中引出蛛丝，用镊子夹住末端，将其绕到装有小型电动机的纺锤上，纺锤轻巧地转动，蛛丝也就唾手可得。一般每次可提取蛛丝3~5毫克，每段丝长可达320米。最令人吃惊的是，抽丝对蜘蛛并无伤害，每天都可提取。

只要稍加注意就可以看到，日常生活中有不少液体也是能拉丝的，比如敲开鸡蛋后将蛋黄取走所留下的蛋清。蛋清是搅动一下后能弹缩回来的液体，也是一种向上挑能拉丝的液体。可以用筷子插入向上挑一下试试看。当向上挑的速度很慢时，蛋清像液体一样流了下来，不拉丝。当向上挑的动作很快，蛋清不粘筷子，也不拉丝。可是当向上挑的速度适当时，蛋清就拉丝了。当蛋清拉的丝断了的时候，还可看到在断开的一瞬间，会像橡皮条那样稍有收缩。用筷子挑山药汁，以及婴儿流的口水情况也都相似。这种液体能拉丝，也跟蚕的丝液能拉出丝一样，是因为它们有粘性和弹性的双重性质。

动物和植物的“粘液”大多具有粘性与弹性的双重性质。比如蜗牛和蛞蝓的粘液，人的唾液、痰、鼻涕，鳝鱼的粘液，海藻表面的粘液，芋头的粘液等。这些液体用力搅动后都能表现回缩的弹性，向上挑的速度合适也能拉出丝来。研究表明，在拉丝现象中，粘滞性起主要作用，弹性起辅助作用。也就是说，可流动性是拉丝的基本条件，再加上可伸缩的弹性，才能出现拉成长丝的现象。

有些食品以能拉出丝来而著名。如主产于河北沧县及山东乐陵的金丝小枣，以核小、肉厚、色鲜、味浓、糖多、质细著称，而购买时鉴别质量是否上乘的标准，主要就是用手抓住小枣两头，猛一撕开后能否拉出很多金丝来判别。成语“藕断丝连”也正描述了鲜藕切断后，藕中所含粘液被拉出丝的情况。菜肴中有一道拔丝菠萝（或苹果、山药等），就是用炒糖稀作成粘液裹在上面，以能拉出许多糖丝来著称。当然也有的食品在新鲜的时候不会有拉丝，腐坏了才容易拉丝，人们也常以此来判断这些食品是否腐坏变质了，比如农历八月十五中秋节时的月饼。

接着我们还要再讨论一下“蜡炬成灰泪始干”是怎样的力学现象。如果仔细观察一支燃烧时的普通蜡烛，就会发现，靠近火焰的油脂比靠近外边的热，因此它有较弱的表皮，从而形成了一种持续的环流；油脂由面上向外流，然后又从下面流回来，形成一组涡旋。油脂运动时因携带着细小的灰尘颗粒，就容易使这种运动看清楚。因为油脂在做涡旋运动，热油脂极易从面上流到蜡烛边上，再在重力作用下沿蜡烛的圆柱表面由上流淌而下，这就是“泪”。而“泪”流不远即因温度降低，而凝固在蜡烛的圆柱表面上，又形成了“泪痕”。这种“泪”当然只有等油

脂全部烧尽成气跑掉后才会“干涸”。

捞面条的学问——兼谈分离技术

武际可

捞面条用笊篱，这是常识。

笊篱发明得相当早，大概有几千年历史。神话小说《封神演义》中说姜子牙发迹之前曾以编笊篱为生。这本小说是明朝人写的，毕竟不是可靠的史料，所以不足为凭。较早记载是唐朝人段成式在《酉阳杂俎》中记述了安禄山受赏赐的物品，有银笊篱一项。旧时饭铺门口多挂一把笊篱作为幌子。清朝人李光庭在《乡言解颐》中提到笊篱，说它的功能是“浙米、捞面、抄菜”，并附有一首诗表述以笊篱作幌子的情景：“家无长物漏卮多，流水难盈结柳科，晓起抄云堆白粲，夕来捞月澹金波，莫当渔舍悬（注：装鱼的竹笼），不比欢场设叵箩（注：古时酒器），茅店招牌供一笑，破篱低挂绿杨柯。”笊篱从捞面的功能晋升为饭店的标志，说明它的普及和重要。然而还有一种只用筷子不用笊篱的捞面方法，而且还要捞得干净！不知你可曾想到，这可不是出偏题，它对于手头缺少一把笊篱的新婚夫妇，或是虽有但不常吃面条（笊篱一定积满灰尘，洗起来太麻烦）的主儿，兴许还是有一点现实意义的。用筷子挑面条，开始比较容易，问题是剩下最后几根面条如何捞起。方法是，先使锅离火，免去沸腾带来的麻烦。然后用筷子在锅里作圆形搅动，使面汤旋转起来，这时面条便自然会集中到锅底中心，用筷子到锅底中心去夹。如此重复几次，面条便会一根不剩。不信请君一试便知。熟悉流体力学的人，不难对面条向锅底中心集中给出解释，这就是所谓二次流问题。如果将旋转起来的面汤看为一次流动，这时汤的微团作圆周运动，圆周运动时微团加速度指向圆心。按照流体运动，微团加速度和压力梯度的符号相反，所以压力强度从锅中心向锅边是增加的，即愈远离中心压力愈大。在锅的上层这个压力梯度同惯性力是平衡的。另一方面再看锅底的一层流体，由于锅底与流体的摩擦以及流体的粘性，这层流体的速度很小，从而惯性力也很小，这时惯性力不能与压差平衡就产生向中心运动的趋势。粗略地说，一定存在沿图 1 回路 OABC 的流体运动，这就是二次流。正是这个流动将面条带到锅底中心，又由于煮熟的面条比重较大，二次流的强度不足以携带面条上升到汤表面跟着二次流上下翻滚兜圈子，所以面条便准确地停在锅底中心，等待筷子去夹。

二次流的现象在日常生活和自然界里是常见的。一杯泡好的茶叶，用勺子作圆形搅动，茶叶会向杯底中心聚集。在河流的弯道上，外圈河床要深，因为泥沙会被二次流带到内圈。

现在，让我们将前面介绍的捞面条的两种方法稍加总结。煮熟的面条和面汤混在一起，捞面条问题是如何根据面条和面汤的物理几何性质

将它们分离。这样问难免有点学究气，但请别忙，这种将两种或多种混合物的每一种成分分离开来的技术问题，从古以来，一直是科学家和工程师所执著研究的重要课题之一，一般就称为分离技术。这个问题的解决和推进将会在物理学、化学和技术部门引起革命性的变化，但它的主要理论根据还得从力学上加以阐明。

上述捞面条的两种办法正是解决这个问题的两种典型途径，姑且称之为箴篱法和扰动法。箴篱的发明是很巧妙的，面条留在箴篱内，面汤在重力作用下漏走了。而扰动法，无非使混合介质造成一种运动，它的不同成分运动轨迹不同，在特定的地方去捕捉特定的物料达到分离的目的，这就是我们能用筷子夹起最后几根面条的根据。总结起来，人类迄今使用的基于力学原理的分离技术不外上述两种捞面条办法的延伸而已。当然也还有其他的分离技术，如利用沸点、溶解度不同，但这些都不是基于力学的原理，它超出我们讨论的范围。

磨面时，要将面粉和麦皮分离，筛子就是箴篱的发展。各种各样的筛子也是箴篱的变形。各种粒径的粒状物混合在一起，为了选取不同粒径的物料。就要使用不同筛眼尺寸的筛子，分级过筛。聪明的渔业人员为了捞大鱼，使小鱼跑掉，以便它们长大再捞，采用适中网眼的鱼网。推而广之，滤纸、自来水公司的过滤池、洗衣的甩干机，无不是特殊的“箴篱”。在自然界，地表的土和岩石构成很好的滤层，雨水经过它的过滤变成清冽干净的矿泉水。在生物体内，无论动物、植物，广泛存在着不同性能的薄膜，它使一些物质通过，另一些物质留住，例如肾小体薄膜可以使盐、尿素等通过，而糖、蛋白质不能通过，否则就会得糖尿病或肾炎。正是由于这些神奇的薄膜，才能使生物的新陈代谢正常进行。现代物理化学研究中，为了吸附一定大小分子而用的分子筛，其原理也是一把精细的“箴篱”。这些“箴篱”形式多样，功能不同，但其共同点是具有一定的网眼尺寸和使介质穿过网眼的驱动力。对箴篱，驱动力是重力，而对于其他形形色色的“箴篱”，驱动力可以是重力，也可以是施加的振动、电磁力、惯性力和渗透压力、扩散的分子力等。而一般驱动力愈强，穿透物质的效率也愈高。

对于扰动法分离技术，也可以举出同样多的例子。至今农村在打麦时还在使用的扬场技术，就是一个最原始的例子。扬场手看准了风向，将一锨麦粒和麦壳的混合物扬上去，麦粒基本上沿抛物线下落，而麦壳却被风吹向另一边，从而使它们分离。有经验的扬场手甚至可以在无风的条件下进行操作来达到目的。熟练的簸箕手，使用一把簸箕，施行摇、簸、溜、抖等动作，能使簸箕中的谷粒、秕糠、石块完全分离。元朝王祯在《农器谱》中所画的扬扇（图2）和现在人使用的惯性分离除尘器的原理大致是一样的（图3,4）。它们都是利用粒料运动轨迹不同而分离。在工业中，有一种旋转分离机，它可以造成混合物高速旋转，以达到分

离不同粒径的粒料，以及分离比重不同的液体和除尘等目的。在自然界你可曾注意到一些河滩、海滩上的砂粒粒度总是均匀的。这是因为那里的流动特点适宜于沉积这种粒径的砂子。近代物理中，为了捕捉不同的带电粒子，将它们加速到一定速度，然后考察它们在强磁场中的偏转，这就是精密分析混合物的质谱仪原理（图5）。总之，不同物理性质的物体，让它们运动起来，它们的不同性质就能得到充分的表演，即运动轨道不同，因而也易于分别捕捉它们。

第二次世界大战期间，美国有一个研制原子弹的曼哈顿计划，其中关键技术问题是铀 235 的提炼问题。制造原子弹的材料铀 235，总是和铀 238 混在一起，而后者不能产生链式反应，两种同位素除原子量稍差以外，物理化学性质完全一样，何况天然铀中铀 235 含量只有 0.7%。曼哈顿计划首选的几种方案中有：扩散法 利用六氟化铀的气体在高压下向一种特制的隔膜另一侧扩散时，轻的分子扩散得稍快，经过多次多级反复扩散可得到适当纯度的铀 235。

离心法 使六氟化铀气体在密闭容器中高速旋转，由于比重不同，内侧的铀 235 浓度稍高，经过反复进行也可以得到适当纯度的铀 235，注意这里只需一次流就够了。

电磁法 原理是基于前面介绍过的质谱仪。铀 235 比铀 238 轻，轨道半径也较小，所以在适当位置上安放收集器，可以得到相当纯的铀 235。

你看，这些方案和捞面条多么相似。不同的是铀 235 毕竟不是面条，不那么好“捞”，因而在每一环节上都需要精密地研究。例如，扩散法那张薄膜，需要布满数十亿个孔径在 0.01 微米以下的孔，而且保证没有一个孔径超过 0.01 微米。这些孔不能被腐蚀扩大，也不能被尘埃阻塞，在强度上还得承受一个大气压的压头，扩散膜的总面积以若干英亩计。不仅如此，生产上用的泵、阀门都不许有任何泄漏。这些都是新的高难度技术，需要从头研究解决。经过数年努力，一个个难关都解决了，几种方案一齐上马建厂，曼哈顿计划终于生产出了足够数量的铀 235。说到这里，我们会领悟到，曼哈顿计划不过是以大量人力物力财力精细地“捞取”铀 235 这锅“面条”，从而使核技术跨进一个新时代。当今，我们正在和将要更精细地“捞”更难“捞”的“面条”，以使人类科学技术进入更为发达的时代。仅仅从这个角度看，力学是多么重要！

神秘的数字 84.4

贾书惠

在不同的科技实践中，我们会经常遇到一个相同的数字，你说奇怪不奇怪？这个数字就是 84.4。

人造地球卫星的最小周期

在地球表面沿水平方向以初速度 v_0 射出一抛射体，则当 v_0 不断增加时，抛射体的轨迹如图 1 所示（当然，进入地球内部的那一段不会实现）。当轨迹成为圆周轨道时，抛射体就成为环绕地球飞行的人造地球卫星。这种思想最初是牛顿提出来的，那时，人们就曾把人造卫星称为“牛顿炮弹”。人造卫星在地球表面环绕地球的运行速度称为第一宇宙速度，在中学物理课程中我们计算过，它等于 $v_1 = \sqrt{Rg}$ ；这里 R 是

地球的平均半径，g 是地球表面的重力加速度。如果取 $R=6370\text{km}$ ， $g=9.80\text{m/s}^2$ ，则得 $v_1 = 7.9\text{km/s}$ ，它是发射卫星的最小速度。这时卫星的运行周期是

$$T = \frac{2\pi R}{v_1} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} = 84.4 \text{ min} \quad (1)$$

式中， $R=6370\text{km}$ ， $g=9.80\text{m/s}^2$ ，这就是人造地球卫星运行的最小周期。当然这只是理论结果。实际上，由于地面附近大气稠密，卫星是运行在 200 千米高度以外的空间，卫星运行周期都比 84.4 分大。例如我国早期发射的“东方红 1 号”及“实践 1 号”卫星，均采用近圆轨道，其周期分别是 114 分及 106 分。后来发射的返回式卫星，轨道高度较低，其周期大约是 90 分。而近年来发射的气象卫星，采用极地圆轨道，高度约 900 千米，周期是 102.88 分。

穿越地球的隧道

如果能乘坐人造地球卫星去旅行，那将是十分快捷的，从某地到地球那一面的某地只需 42.2 分，环球一周只需 84.4 分（这里没有考虑由地球自转带来的修正量）。现在的载人飞船、航天飞机都已使这种旅行成为现实，但代价却十分高昂。一些科幻文章中叙述了另外一种旅行方法。从某地 A 开凿一条通过地心到地球另一面 B 地的直线隧道（图 2），当人从 A 地跳入隧道后，受地心引力作用，将不断加速，并高速通过地心。此后，在地心引力作用下逐渐减速，到达隧道另一端时，速度恰好

是零，可以容易地“登陆”B地，从而实现了一次“免费”旅行。现在计算一下旅行所用的时间，如果认为地球是由许多层均质圆球壳组成（各层圆球壳的密度可以不同），则可以证明，地球内部的引力场为以地心C为中心的引力场，且引力与距地心C之距离成正比，即 $F = k$ 。亦即，地球内部的引力场相当于一个弹簧力场，弹簧的原长位于地心C。弹簧的刚度k可用地球表面处人体所受的引力及距地心的距离算出： $k = mg / R$ ，其中，m为人体的质量。根据物理中关于简谐振动的知识可知，在弹簧的回复力作用下，人体将以地心C为振动中心作简谐振动，

其振动周期为 $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ ；将上述k值代入，即得入在隧道中的运

动微分方程

$$T = 2\pi\sqrt{m/k} = 2\pi\sqrt{R/g} = 84.4 \text{ min} \quad (2)$$

与式(1)完全相同，我们又遇到了84.4。设想两个人同时从A地出发，一个乘坐沿圆轨道运行的宇宙飞船，另一个则跳入隧道，经过42.2分后，他们同时到达地球另一面的B地，而经过84.4分后，在原出发地会师。

穿越地心的隧道是不可能的，但沿地球的弦开凿一个由A到B的直线隧道则完全有可能（图3）。在这种隧道中，车辆沿轨道运行时，也可借助地心引力先加速后减速到达另一端，实现“免费”旅行。现在来计算旅行的时间，忽略摩擦，车辆受地心引力F沿轨道方向的分量指向轨道中夹点O，大小为

$$F \cos \theta = k r \cos \theta = kx$$

亦即，这个驱动和制动车辆的力仍相当于一根刚度为k的弹簧，与穿越地心隧道的情况完全相同。由此可知，单程旅行时间是42.2分，往返时间是84.4分。如果由北京开凿3条这样的直线隧道，分别通往上海、广州和天津；则当3列车辆由北京同时（以零初速）出发时，经过42.2分，将同时到达目的地，而不论远近如何。

舒勒条件

飞机、轮船、火箭、导弹等运动物体（通常称为载体，因为它们都是运载有效载荷的工具）都需要导航设备，以便完成预定的航行任务。导航设备中，一个重要的参考基准是地垂线方向。例如，歼击机作战时，要在各种天气情况下作各种复杂的机动飞行。只能依靠仪表指示来判断飞机的姿态、飞行方向以及哪是上哪是下。到现在为止，人们寻找地垂线的唯一办法是借助于摆。例如，在一个静止的小车中，由车顶悬挂一个单摆（最简单的摆），则单摆静止的方向就是地垂线的方向。但如果小车以加速度a前进，则单摆将向后偏离地垂线（图4），如果小车作不

规则的加速及减速运动，单摆将作杂乱无章的猛烈振动，再也无法指示地垂线了。只要手拿单摆坐上汽车，你就会对此确信无疑。怎样减小车厢运动对单摆的干扰呢？我们知道，单摆是一个振动系统，如果摆长是 l ，则它的振动周期是

$$T = 2\pi\sqrt{l/g} \quad (3)$$

如果外界干扰是高频的（相对振动系统固有频率而言），则系统的响应幅度就较小。小车的运动规律我们无法左右，但可以减小单摆的频率（加大周期），使它相对外界干扰成为低频系统。为此要加大摆长 l 。1916年德国人舒勒提出了一个大胆的设想：如果将单摆的摆长 l 加大到地球半径 R ，则摆锤永位于地心，不管小车怎样运动，单摆将永指地垂线（图5）。具有这种性质的摆称为舒勒摆，舒勒摆的振动周期是将式（3）中的 l 换成 R ，于是我们再一次得到式（1）的 84.4 分。因此 84.4 分也称为舒勒周期。舒勒还将这个设想提高成一般原则：一个系统，如果在重力作用下它的固有振动周期是 84.4 分，则它指示地垂线的性能不受基座运动加速度的干扰。上述原则就称为舒勒条件。用单摆是无法实现舒勒条件的，用复摆也实现不了。一种实用方案是使用陀螺摆，因为高速自转的陀螺在进动运动中有巨大的惯性，可以实现长周期的进动运动。

摆式陀螺罗盘

导航设备中另一个重要的参考基准是南北向。人们曾用磁针指示南北（地球的磁极），但现代飞机、火箭等载体中有许多电器，它们不断产生各种干扰磁场，磁针是无法工作的。陀螺仪表仍是常用的指北仪器。例如，舰船中的摆式陀螺罗盘就能利用地球的自转而指北（地球的转轴）。为了使陀螺罗盘的指北性能不受舰船运动加速度的干扰，同样要满足一种“调整条件”，即陀螺主轴的振动周期应是 84.4 分。陀螺罗盘启动前，陀螺主轴一般不位于北向位置，启动后，陀螺主轴要经过几个周期的衰减振荡才能稳定在北向位置。如果是 3 个周期，则找北过程大约需要 240 分。所以当舰船启航演习时，操作罗盘的士兵要比其他士兵早投入工作 4 个小时。如果突然发生战斗，这就成了大问题。现在已研制了电控陀螺罗盘，可以调整摆性及周期，使得启动时振动周期短，陀螺主轴能迅速找北，而正常工作时，仍保持 84.4 分的周期，以便指北性能不受舰船运动的干扰。

非结束语

在上面的来自不同问题的 4 个例子中，我们都遇到了 84.4 这个数

字。如果仔细观察，就会发现这也并不神秘，因为 84.4 主要取决于 R 及 g 的值。亦即，这是因为我们使用了地球表面的引力。由此可以推测，在其他一些使用地球表面引力的情况下，我们还会和 84.4 再次相遇。读者不妨再搜集几个例子。

编钟，为何如此奇特？

王大钧

1978年，湖北随县（现名随州市），土破天惊，在发掘昔日楚国的属国——曾国国君曾侯乙墓穴时，出土了一套中国古代乐钟，这种按乐理组成的乐钟，也称编钟。这套青铜浇铸的编钟（图1），由65枚钟组成，按三层悬挂于呈L型的钟架上，除一枚钟外有64枚乐钟，全套钟重2567千克，包括45枚具有长把的甬钟（图2）和19枚具有挂环的钮钟（图3）。最小的是一枚钮钟，高约16厘米，重2.4千克。最大的是一枚甬钟，高过1.5米，重204千克。全套钟造型优美，工艺精良，气势雄伟。

由于这套编钟蕴含的宝贵丰富的历史、文化和科技信息；由于这套编钟表现的优异音乐性能和铭文中的丰富深刻的乐理；由于这套编钟显示的精湛的青铜铸造技术和深奥的力学原理应用，它轰动了中外考古界、音乐史界和科技史界。一时间，围绕编钟的多方面的学术研究成为举世瞩目的热点，研究成果大量涌现，持续多年。它的出土也迅速泽及文化界，优美典雅的编钟乐舞盛行于舞台和银屏，编钟文化出现在许多博物馆和旅游点。

编钟曾是中国古代文化中的宠儿

钟文化常常是一些历史悠久的民族文化的重要组成部分，而中华民族的钟文化以其特有的古代乐钟文化更是别具魅力。中国乐钟从商代到战国时期，其制造技术、音乐性能和在文化中的地位都经历了近两千年的发展和演变。

先秦时期，极重乐礼。乐不仅是一种娱乐，更是治国的一种重要手段。《史记·乐书》载，乐有内辅正心和外异贵贱两种功能。

什么是内辅正心呢？《荀子·乐论篇》载，音乐入人深，化人也速。又载，乐中平则民和而不流，乐庄肃则民齐而不乱，民和齐，则兵劲城固，敌不敢犯。所谓和齐，不就是安定团结吗？

什么是外异贵贱呢？中国古代乐器，按《周礼》言，有八音，即金（钟等）、石（磬等）、土（埙等）、革（鼓等）、丝（琴瑟等）、木（柷等）、匏（笙等）和竹（管箫等）；而钟为八音之首，既是宫廷音乐的首要乐器，又是高贵权势的象征。首先，用乐分贵贱，例如《墨子》言，诸侯倦于听治，息于钟鼓之乐，士大夫息于竽瑟之乐，农夫春耕夏耘、秋敛冬藏，息于聆缶之乐，即只可借陶制乐器取乐。其次，对钟的拥有多寡分阶层，《周礼》载，王拥有的钟可悬四面，诸侯三面，

卿大夫两面，士一面。平民百姓是不可拥有钟的。

可见编钟和编钟音乐在中国历史上曾具有多么重要的地位，扮演过多么独特的角色。

曾侯乙编钟的优异音乐性能

曾侯乙编钟是至今为止出土的最高水平的乐钟，造于公元前 400 多年，其音乐性能之优异令今人咋舌。下面例举四点，其中（1），（2）两点是所有扁钟的共有性能：

（1）每只钟能发双音，故也称双音钟。当分别敲击钟的中鼓点和侧鼓点时，发出两个不同音高的乐音，两者的音程差是和谐的大三度或小三度。每个钟的中、侧鼓处都标其音名。例如其中一钟，它的中、侧鼓音分别为宫角和徵，即 e^1 和 g^1 ，频率分别为 329 赫兹和 392 赫兹，两者音程差为小三度（图 4）。一钟双音的优越性显而易见，既可扩大演奏功能，又可大大节省材料。

（2）延音短。适于演奏旋律较快的乐曲。它区别于宗教钟那种绵长的延音，这种性能实为中国古代乐钟的本质优点，但它却难以发现和理解。宋代的沈括不愧是大科学家，他在《梦溪笔谈·补笔谈》中专有一段天才的论述。他说，古代（指秦以前）乐钟皆扁，如合瓦形，其原因是圆钟延音长，演奏快速旋律时，互相干扰不能成乐；扁钟延音短，则可成乐。宋代人不明其理，将钟铸成圆形，敲起来晃晃然不能成乐。

（3）全套钟的音阶结构与现代国际通用的 C 大调七声音阶属同一音列。这套钟的音域宽达 5 个半八度，最低音为 C，频率为 65.4 赫兹，钟声浑厚；最高音为 d^4 ，频率为 2384 赫兹，钟音清亮。现代钢琴的音域是 7 个半八度，即只比曾侯乙编钟音域多一个低八度和多一个高八度。

（4）音域的中心区 12 个半音齐备，且能旋宫转调。过去认为 12 音律由外国传入中国，这套钟的 12 个半音的发现是音乐史上的大事，可能引起音乐史的改写。具有如此优异性能的乐钟，出土后不仅可演奏楚韵浓郁、优美典雅的中国古典乐曲，而且演奏西方乐曲也不逊色。

扁钟为什么能发双音？

中国古代乐钟的本质的优异性能是一钟能发双音以及短延音。这在世界上自古至今的乐钟中，是独一无二的。

为什么中国古代乐钟有如此优异的音乐性能？其原因全在于它的独特造型，即它的横截面与通常所见钟型极不相同，不是圆形的，而是由两段圆弧组成的扁形（图 5），故称扁钟；它也像两片中国旧时的瓦合成，故也称合瓦形钟。

东方的各种佛事钟、报时钟，西方的教堂钟以及一些西方的乐钟，横截面都是圆形的，也称圆钟；这种钟的形状构思自然、制造简单，但它们只能发一个基音。作为宗教用钟，发出延音绵长的声音实能感撼人心，若当乐钟使用，就是用其所短了。

我们首先分析扁钟的双音性能。运用振动理论，很容易对圆钟只能发单音而扁钟可发双音作出定性分析。为简单起见，先看平面圆环和扁环的情形。

当敲击圆环（图 6（a））的一点时，环的振动由它的一系列固有振动叠加而成。所谓固有振动，是整个物体在不受外力情况下按一定形状作同频率同相位的简谐运动，其频率称固有频率，按其大小升序排列为 f_1, f_2, f_3, \dots ，最小的频率称为基频；其相应的形状称为固有振型，记为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ 称为基本振型。当环被敲振动后，发出一个合成音，它的主要成分是频率为 f_1 的基音，频率为 f_2, f_3, \dots 的泛音是其次要成分；振动的形状近似基本振型。如果圆环的物理特性（密度、弹性模量）和几何特性（沿环轴的横截面形状和面积）皆是均匀的，此时与过圆心的径向无关，即圆环具有轴对称性。当敲击圆环的 A 点后，合成音的频谱图如图 6（b）中所示，基音是主要成分；振动形状由固有振型 $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ 叠加而成，近似为 φ_3 。当敲击 B 点对，由于圆环的轴对称性，合成音的频谱图仍同敲击 A 点时一样，而固有振型和振动形状只是转了一个角度（图 6（c））。因此，对于均匀圆环，不论敲击哪一点，只能发出同一音。

对于扁环（图 7（a）），情形就不同了，即使它的物理、几何特性是均匀的，但它并不具有轴对称性。对于由两段均匀圆弧对接而成的扁环，它具有镜面对称性，中间有一个过 AA' 的对称面，扁环左右对称。这种对称性结构的固有振型可分为两组：第一组相对于对称面是对称的，如图 7（b）所示，记为 $\varphi_{s1}, \varphi_{s2}, \dots$ ，相应的固有频率记为 f_{s1}, f_{s2}, \dots ；第二组是反对称的，如图 7（c）所示，记为 $\varphi_{a1}, \varphi_{a2}, \dots$ ，相应的固有频率记为 f_{a1}, f_{a2}, \dots 。当敲击点在对称面上 A 点时（图 7（b）），所有的对称振型皆被激发；但由于所有反对称振型的节点通过对称面，故而敲击力对这些振型不作功，激发不了这些振型，振动时它们不出现。所以，敲击音的频谱图如图 7（b），基音为 f_{s1} ，扁环的振动形状近似 φ_{s1} 。当敲击在侧边某点时，钟的振动除了节点通过该点的振型不被激发外，其他对称的和反对称的振型都被激发；而基音，则如同敲击在对称面上一样，仍是 f_{s1} ，但泛音 f_{a1} 的成分也比较大。有趣的是，当敲击点设在第一对称振型的节点 B 处时， φ_{s1} 不被激发，此时敲击音的频谱图如图 7（c）中所示，基音就是 f_{a1} 了，而扁环的振动形状近似 φ_{a1} 。调整扁环的长高比，可以使频率 f_{a1} 和 f_{s1} 满足一定要求，例如大三度或小三度。

圆形钟和扁形钟与环的情形类似，不过复杂多了（图 8）。不论敲击哪一点，圆钟的基音一样，扁钟则不同。若将扁钟的正鼓点正好设在对称面上，如图 8 所示 A 点，敲击后钟的振动形状近似钟的第一个对称振型，敲击音是由与第一对称振型对应的基音和与其他对称振型对应的泛音组成的合成音，敲击音的基音的频率就是钟的基频，即 f_{s1} 。扁钟的侧鼓点巧妙地设在第一对称振型的节线上，如图 8 所示 B 点，敲击后钟的振动形状近似于第一个反对称振型，而敲击音的基音的频率则是与第一个反对称振型相对应的频率，即 f_{a1} 。

钟为什么使延音短促

首先，借助一个实验来说明它，取四个材料和尺寸相同的圆柱形钢管，一个保持圆形截面，三个被压成具有不同扁度的截面，将它们放在真空和大气中敲击，测量其延音。如图 9 (a) 所示四条曲线是在真空中敲击钢管振动的时程曲线，表明它们的振动衰减基本与钢管是圆或扁没有关系。图 9 (b) 所示四条曲线是它们在大气中的振动衰减曲线，显然，其延音相差较大，第三个钢管接近编钟的扁度，圆形管和此管的敲击音从同一音强衰减到另一相同音强，此扁管所需时间是圆形管的 1/3，即扁管的延音是圆管的 1/3。

由理论分析可知，钟的振动衰减主要由于钟的材料的内摩擦和大气的声辐射引起。材料的内摩擦消耗了钟振动的能量，使振动衰减，这种衰减基本与钟的扁度无关。大气的声辐射是由于钟的振动带动周围大气振动，并向四面八方以波的形式传播，从而带走能量，使钟的振动衰减，它明显依赖于钟的扁度，钟越扁振动衰减越快。

中国古代乐钟，不仅以其奇特造型形成了优异的音乐性能，而且其中还含有极深刻的科学道理。这种巧妙的设计，是高度智慧的构思和数千年不懈精雕细琢而成的一块异彩独放的中华文化之瑰宝，蕴含的科学原理也有待进一步探讨和揭示！

从磁带盒上的斑斓色彩说起

方竞 傅缤

“快瞧，老爸，我这个磁带盒上的彩色花纹多漂亮！”桌前灯下的小芳摘下耳机，高兴地向刚刚走进屋里的爸爸炫耀她那新买的录音磁带盒。

“的确好看。”在研究所做力学研究工作的父亲拿着磁带盒，利用灯光观看着从那透明盒子上反射出来的光所产生的花纹。女儿说：“班里的许多同学都从磁带盒上发现过这种漂亮的条纹。我们还互相比较看谁的盒上花纹最好看，而且还议论过好多次，这花纹到底是怎么来的呢？”

爸爸说：“这个问题提得好！你觉得它们是怎样产生的呢？”女儿认真地说：“我们刚刚在物理课学过光的干涉原理，它们是不是像下雨后地上的油膜那样，由膜的上、下表面反射的光线相互干涉叠加而产生的花纹呢？”

爸爸微笑地答道：“这盒子上的彩色条纹也可以说是一种干涉条纹。但它们并不是盒盖的两个表面所反射的光线干涉的结果，因为盒盖的厚度（约2毫米）已远远超过了光干涉的相干长度。实际上，这是由光的一种偏振效应产生的，也就是说，光波被一些材料反射后，可以只在某些特定的方位内振动，继而产生干涉。”

“那究竟是什么东西产生这些漂亮的条纹的呢？”女儿来了兴趣，刨根问底起来。

“应力——也就是材料内部单位面积上作用的拉力或压力等，是产生这种漂亮条纹的根本原因。”爸爸拉过椅子，给小芳耐心地讲解起来：“这种应力实际上是在加工生产中产生的。磁带盒一般是用聚碳酸酯一类的塑料制成的。在一种注塑机类的加工机械中，先将这些材料高温熔化，注入特定的模腔内，然后快速冷却后即可成型，取出来就是磁带盒了。由于流动的塑料被施加了压力，又因为温度的迅速下降，造成了材料收缩的不均匀性，必然在快速成型的材料中产生残余的应力，并以不同的大小和方向将其作用在磁带盒的不同位置上。这种应力的不均匀分布，使得塑料的光折射率在不同点各不相同。这样，当这些塑料盒被偏振光（即在特定平面内振动的光）照射后，或者由反射光线产生部分偏振光的时候，就可以由不同折射率而产生不同的干涉花纹，形成五颜六色的应力条纹图。”

“噢，我明白了！”小芳恍然大悟，“这些花纹不是正与那些我曾经在您的实验室里见到的各种模型中的条纹类似吗？”

“对极了”，父亲高兴地回答。“人们正是利用这些塑料会由于应

力作用而产生花纹，制造了各种各样的结构或零件模型，像齿轮、吊钩，甚至水坝、桥梁等等。给它们施加不同的外部力，就会在塑料模型内部产生应力条纹；反过来，根据这些条纹就可以算出不同位置上的应力，从而来检验结构或零件在受力下是否安全，设计出合理的零部件。”

“真有意思。”小芳说，“爸爸，您一定有不少漂亮的受力模型的条纹图样吧？能给我一张照片吗？这样我也可以向同学们解释它们的原理呀！”

“这好办，明天我给你带回一张吊钩在受力时的应力条纹图，怎么样？”爸爸说。

“太棒了，您真是我的好老爸！”

树木生长中的力学行为

方广盛 莫淑华

树木——人类的朋友

远在恐龙漫游大地之前，地球上的树木已经是千姿百态，郁郁葱葱，花果芬芳，一派生机了。树木是木质多年生植物，通常把它分为乔木和灌木两种。乔木是1.3米以上，只有一个直立主干的树木；灌木是直立的、具有丛生茎的树木。我国现有木本植物约7000多种，属乔木者约占1/3以上，但是作为工业用材而供应市场的只不过1000种，常见的约300种。

倘若没有树木，地球会像火星、月球一样，一幅荒漠化的景象，人类不可能繁衍延续到今天。

地球上拥有充足的空气、水和阳光，这些是树木存活、生长和繁衍的必要条件。树木为生活在地球上的人类营造出了天然的乐园：树木的枝叶翻动摇曳，借助太阳光能蒸腾水分，增加地球表层空气湿度，缓解盛夏的炎热，是天然的“加湿器”和“空调器”；树木叶面能吸附和过滤灰尘、粉尘和烟尘，净化空气，是天然的“过滤器”。此外，树木还能吸收人们排放出的二氧化碳，放出氧气，调节空气的正常成分比含量，是“绿色工厂”；树木的集合，能够减弱风力和风速，保护土壤、建筑物等免受风蚀，是天然“风障”；树木能降低城市和街道噪声，是天然“隔音板”和“消声器”；树木能减弱降雨对地面的冲刷，减少水土流失，是天然“雨、水障”；树木能氧化和分解有毒气体，是天然“防疫员”；树木能监（可）测环境污染程度、种类和毒性强度，是天然“监测兵”。还有，树木为人类提供了丰盛的果实、药材和衣、食、住、行的永续原材料。因此，可以说，树木是人类不可多得的朋友，没有树木和森林，就没有人类的生活，更没有人类的生存与发展。树木——人类真正的朋友。

伴随流体输送现象的树木生长

树木在生长发育过程中，形成了高度发达的营养体。水分及营养液等流体的输运现象始终伴随着树木营养生长的生理过程。这里仅简要地加以说明。

树木由树梢沿主轴向上生长（高生长），也在土壤深处向下生长（根生长），中间的树干（图1）部分沿着径向生长（加粗）。前一年形成的树干部分到了次年不会再进行高生长。有人曾做过这样一个小实验：在

距离地面 1~2 米处的树干上钉入一根铁钉，几年后树木长高长粗了，但那颗铁钉距离地面的高度却没有发生变化。

树木从天上接受阳光的沐浴，到地下去寻觅水分，把原料从树根输送到叶片。由叶子制造养分，将养分向下输送，供给树木生长需要。这样，树木生长过程中，形成了非常协调完备的水分及养分的输送系统。

一株红杉（美）树高达 112 米，一株杏仁桉（奥）树竟高达 156 米，一株银杏（中）树龄达 3000 年，一株世界爷（美）树龄竟达 7800 年。那么对于如此高大、如此年久的树木，体内各种物质（水、矿物质、可溶性碳水化合物和激素等等）是怎样输送的呢？即树液（98%的水和可溶矿物质）是靠什么力量由树根上升到树梢的呢？而营养液又是靠什么力量从叶部运回到根部的呢？同时，那些输送通路又是如何呢？

为了弄清上述流体力学现象，我们先来观察一下树干的横切面（图 2），它的最外层是树皮（外皮），树皮里边一层是韧皮部（也叫内皮），经它将营养液由叶部输送到树木的其他部分（包括根在内）。再向内一层是形成层，它的细胞不断分裂，使树木沿径向生长而不断加粗。再往里是边材和心材，即木质部，木质部中被叫做导管的细胞组织，它将树液输送到茎和叶部。

树木体内营养液的流动

树木由绿色的叶子依靠由根系吸收的水分和矿物质，再通过吸收太阳能进行光合作用共同来制造有机物（糖类、酸类等）树木营养液，以供给树各部的生长、增强、修复组织和繁殖等等。那么，营养液是通过什么途径、以什么为动力来输送的呢？为此，科学家们做了许多实验，获取了不少数据，得出了如下一些结论：

（1）环割实验证明，树木营养液是通过韧皮部的细胞以直线方式，即由上向下运输，这是长途运输，而细胞间的运输则主要由胞间连丝为通道。

（2）压力流动模型实验证明，树木营养液的流动动力是流体静压力。即净生产细胞（如一片成熟叶）由于光合作用制造大量糖而保持较高的溶质浓度，水便通过渗透作用不断进入净生产细胞，使胞内的流体静压力增加，迫使营养液经过胞间连丝进入韧皮部。而净消费细胞（可以是一个根细胞、一个有代谢作用的细胞，或一个果实细胞）由于呼吸、生长和储藏保持着较低的溶质浓度，胞内流体静压力较低。这样，营养液便沿压力梯度向下运输到根部。

上述营养液在韧皮部的流动动力已经清楚，那么，它的流动速度又如何呢？近年来的研究表明：韧皮部转移营养液的最高速度在阔叶树中是 0.4~0.7 米/小时，在针叶树中是 0.18~0.2 米/小时。

根据上述树木营养液的输送速度，对于一株 30 米高的松树和杨树，营养液由树冠输送到树根的最短时间分别为 7 天和 1.8 天，而对于 112 米的红杉来说约需 20 多天的时间。

树木体内的水分流动

水在土壤-树木-大气这个系统中的重要性，无论怎样强调都不过分。这是因为水的可利用程度是控制树木存活和分布的诸因子中最最重要的一个。从生理方面来看，水能保持树木的细胞充分膨胀，使得细胞才能增长和变粗，树木才能生长和维持一定的形状，气孔才会张开，树木才会运动（如放叶和开花）。

树木所需的水分几乎全部由根系（吸水器官）吸取，并沿木质部（从根部到叶部）向上长距离移动。那么，水分是靠什么动力来提升的呢？研究表明，动力有两种：一种是根压，另一种是蒸腾拉力。

所谓根压是指树木根系的生理活动使树液从根部上升的压力。根压把根部的水分压到地面上部，土壤中的水分才能不断补充进来，从而形成根系吸水过程。这是由根部形成力量引起的主动吸水。不过，根压一般只有 0.1~0.2MPa，只能使木质部导管中的水柱升高 10~20 米，而许多乔木的高度是远远超过这个数值的。

树木叶片的蒸腾拉力也是体内水分上升的主要动力。蒸腾拉力是怎样产生的呢？当树木叶片蒸腾失水时，叶肉细胞便产生很低的水势，形成 -3~-1MPa 的负压，即产生对下部连续水柱的拉力，这就是蒸腾拉力。木质部导管中的水柱的上端受到强大的蒸腾拉力，克服水柱本身的重力和运输过程中产生的阻力，从而使水柱连续不断地进入叶部。可是，水柱在拉力作用下会不会断开呢？这取决于水分子间的吸收力（即内聚力）和水分子与管壁间的附着力的大小。据实验测定，0.5 毫米直径毛细管中的水线，在 20 时可耐受 27MPa 的离心力而不断裂且不与管壁脱离。这个事实间接地说明了蒸腾拉力既能够把木质部中的水分拉到叶部，又不会把水柱拉断，从而使树木根部的水分源源不断地运输到叶部，保证了树木的枝繁叶茂。

水分通过木质部由下向上流动，其速度因树种不同而异。据在树木胸高处测定，一般阔叶树种中环孔材水分流动速度为 25~60 米/小时。目前所知，欧洲栎环孔材水分流动速度高达 43.6 米/小时；散孔材为 1~6 米/小时；而针叶树材一般为 1~2 米/小时。

结束语

在树木的生长过程中伴随着各种各样的力学行为，这里介绍的内容

仅仅是其中的一小部分。尽管人们从 30 年代已开始从宏观上，后来又从微观上进行了不懈地研究和探索，但仍有大量的力学问题有待解决。随着社会的发展，人类的进步，树木这个难得的朋友，对人类将越来越重要。爱护树木，多植树木，就是进步。

走钢丝横跨天堑的力学漫谈

马希龄 薛克宗

1995年10月28日，在我国四川奉节，长江三峡最为险峻雄伟的瞿塘峡夔门，一丝飞架南北，天堑变通途，完成这项惊世之举的是加拿大高空王子杰伊·科克伦。他在毫无安全保护措施的情况下，手握银色长杆，身着蓝色演出服，在峰峦沟壑的壮美中，居高临下375米，踩着直径3厘米的钢丝，随着悠扬的音乐声，信步纤云，创造了一个精美的神话。他仅用了53分钟，从北岸到南岸，走完了640米，成为人类走钢丝横跨天堑的第一人。

人们对于空中走钢丝表演并不陌生，无不赞叹。但那大多是在室内低空进行的。科克伦走钢丝横跨天堑，不仅要跨越室内无法比拟的超长钢丝，还要征服高空气流的侵袭，脚下江水的喧闹，飞鸟随时可能的造访等等，因此，这就凭添几分神奇和惊险。然而，室内低空与室外高空走钢丝所包含的力学原理都是一样的。不同的只是，室外的不稳定因素远多于室内，因而表演难度就大得多。

空中走钢丝，若把人的各肢体与横杠一起看成是一个刚体的话，其运动形式基本是两种：沿钢丝方向的平动与垂直于钢丝方向的绕固定轴转动（轴过人脚与钢丝的接触点O垂直于人体横杠所在的平面）。这样，他的力学模型基本上是一个沿钢丝方向平动的倒立摆（图1）。图中C为摆的质心，当 $\theta = 0$ 时，摆处于不稳定的平衡状态。由于摆的质心C位于悬挂点O的上方，当摆受扰动而微小偏离此平衡位置时（ $\theta \neq 0$ ，极小），重力对O之矩将加大摆对此位置的偏离，从而破坏原有的平衡状态。模型摆铰接在悬挂点O，无论怎样偏离都不会脱离悬挂点，而人站在钢丝之上，只受钢丝的单向约束，它不能限制人体脱离钢丝，于是，生死天地一线间便成了所有观赏者的悬念。

上述两种运动形式的运动状态变化，决定于系统受力、运动的初始条件（两种运动形式的初速都认为是零，可不予考虑）及系统的惯性。

惯性是物体保持其运动状态不变的特性，是物体的基本属性。倒立摆的平动和定轴转动惯性分别以物体的质量和对O轴的转动惯量度量。物体的质量越大，平动惯性就越大，平动状态也就越不易改变；转动惯量反映了物体在对转轴的一定力矩作用下改变其转动状态的难易程度，它的大小与物体的质量相对于转轴的分布距离有关，即与距离的平方成正比，距离越大，转动惯量就越大，物体转动状态也越难改变。科克伦的体重约70千克，身高约1.8米，设他的重心至钢丝O的距离 $h = 1.2\text{m}$ ，则身体对O轴的转动惯量 $J_1 = 70\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；平衡杆重27千克，长12米，杆至脚距离也为1.2米，相对于O轴的转动惯量 $J_2 = 363\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。可见 J_2

5J₁。根据动能定理，可以算出科克伦从 0.5 度偏摆到 5 度，持杆时所需时间约为不持杆的两倍多。可见，持杆既有利于他行走速度的缓慢平稳，又减缓了上述由于重心侧向偏移引起的失稳，为他及时调整重心恢复到平衡位置赢得了宝贵时间。

上述把人-杆看成为一个刚体的倒立摆模型，只能解释人踩钢丝易于失稳，及人手持杆减缓失稳的原因。事实上，人和杆并不是固结在一起的，人可以通过恰到好处地控制杆的左右移动、上托下压来消除不平衡力矩。也就是说，人用杆来控制侧向平衡的过程，需用人和杆组成的两刚体模型（两体间为弹性连接）予以说明，如图 2 所示。若不考虑人-杆向前的运动，则此时人绕 O 做定轴转动，杆为平面运动。设 m_1 ， m_2 分别为人与杆的质量， α_1 ， α_2 分别是人与杆重心偏离平衡位置时相应的角度，并可以算出它们相对 O 轴的不平衡力矩，令其之和为零时，即

$$m_1 g h \sin \alpha_1 - m_2 g h \sin \alpha_2 = 0$$

两个角度的正弦比值为

$$\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = m_2 / m_1$$

这说明当人体重心和平衡杆重心等高时，平衡杆重心侧移距离应该是身体重心向另一侧移动距离的 m_2 / m_1 倍。因此，熟练地运用平衡杆，便可以维持侧向稳定，化险为夷。

当然，平衡杆的重量必须适度，其粗细应使手握舒适，而长短则以利于调整侧向稳定为宜。科克伦使用的平衡杆是用铝钛合金制成的，比重较小。因此在质量相同的情况下，使用铝钛合金比使用不锈钢、铸铁等材料制成的平衡杆，其杆长可做得长些，从而较大地增加它的转动惯量。

科克伦沿钢丝方向的运动，可以用质心运动定理来分析，所谓物体的质心，就是物体的质量中心，它与物体受重力作用时的重心是重合的。物体质心的运动和一个位于质心的质点的运动相同，该质点的质量等于整个物体的总质量，而它所受的力则等于作用于物体上所有外力平行移动到质心上的合力，这就是质心运动定理。科克伦沿钢丝行走时如图 3 所示，质心运动方程为

$$(m_1 + m_2) a_C = F$$

式中的 a_C 为科克伦的质心加速度， F 是钢丝作用在脚底的总摩擦力。据当时报道，科克伦开始时走得很慢，膝盖微微弯曲，总是左脚顶着右脚，右脚再紧靠左脚。大约行程过半，意外地来了个“金鸡独立”。此后，似乎展开了羽翼，走的频率加快，因此时质心获得加速度，质心速度也随着变大。

以上只是对科克伦走钢丝横跨三峡的力学问题进行了一些简单的粗浅分析。实际上，人体是个多体系统，近年来将人体简化为一个多刚体系统，用计算机数值仿真法进行研究，在运动生物力学领域占据了主导

地位，随着研究的深入，人体运动的奥秘必将进一步地被揭示。

编者按：

1997年6月22日，我国新疆维吾尔族青年阿地里·吾守尔仅用13分48秒的时间走过了架设在长江夔门天险高空640米长的钢缆，从而打破了加拿大人科克伦于1995年10月28日以53分10秒跨越夔门天险的记录，而且整整提高三倍，创造了人间奇迹。

阿地里与科克伦走过的是同一条钢缆，但经过近两年的风雨侵蚀，主钢缆已严重生锈、下垂，中央部分形成了大的凹陷，阿地里在两端的钢缆下各加垫了三根枕木才使主钢缆略略绷直。又用以稳定主钢缆的斜拉钢丝绳也已大部分被盗，阿地里筹措的资金仅只拉起了36根斜拉钢丝绳，这只有科克伦行走时的一半，因此，主钢缆的稳定性也大大打折扣。此外，由于阿地里以前曾受伤骨折，目前右手臂不能正常弯曲，因此，他只得选择了8.9米长、不足12千克重的铝合金棒作平衡杆。但当他登上主钢缆时，身轻如燕，还在钢缆上作了三个特技动作，最后是一路小跑登上对岸，显示了他令人叹为观止的高超技艺。

倒啤酒的学问——兼谈空泡问题

武际可

从瓶子里往杯中倒啤酒，急性子的人，把瓶子拿得很高，有点像倒大碗茶似地，让啤酒水柱冲向杯底，结果总是倒满一杯泡沫，且泡沫流淌得一桌子，待泡沫消失后，杯子里的啤酒却所剩无几。

熟练的服务员则将杯子尽可能倾斜，将瓶口紧靠杯沿，让啤酒缓慢地沿杯壁流向杯底，随着杯子里啤酒增多，再徐徐将杯子倾角调正到竖直的位置，这样可以倒满一杯啤酒而不产生多少泡沫。人们不无诙谐地把这种倒啤酒的窍门总结为三个含谐音的成语：“歪门斜倒（邪道），杯壁（卑鄙）下流，改斜（邪）归正。”

啤酒、香槟酒、可乐等清凉饮料，都是二氧化碳的过饱和溶液。在不密封的条件下，二氧化碳也会慢慢分离而散逸到空气中去。这类新鲜的清凉饮料，含二氧化碳愈多品质就愈高。这也正是往杯中倒啤酒带来麻烦的原因。

我们把前面说的两种倒啤酒的方法称为直冲式与斜溜式。为什么斜溜式产生的泡沫少，而直冲式的倒法产生的泡沫多呢？要回答这个问题得从气体的溶解度开始研究。

二氧化碳溶解到水中的量，通常用单位体积水能溶解多少体积的二氧化碳来度量，称为溶解度，是同温度和压强有关的量。温度低时溶解度大，高时溶解度小。在高压下溶解度大，低压时溶解度小。如果在高压条件下新鲜啤酒突然减小压强，就会分离出二氧化碳而冒泡。在密闭的容器里，冒出的气泡使容器内的压力升高后，随之溶解度也增高了，气泡就不再冒了。我们在开香槟酒瓶时，听到“啪”地一声；报上也曾刊载开啤酒瓶时，瓶盖飞出伤人的消息，这都是因为容器里压力较高的缘故。

历史上有过一则有趣的事。上世纪中，在伦敦的泰晤士河床下打了一条隧道，当隧道竣工时，当地政界人物在隧道里举行庆典。令人扫兴的是发现带到隧道来的香槟酒都跑了气而无味。然而当庆典过后人们走出隧道回到地面时，不幸的事发生了，酒在肚子里发胀了，气从鼻子嘴里不断冒出来，有的人穿的马甲被胀开，有的人则不得不重新返回隧道以减轻这突然袭来的痛苦。

所以产生这种现象，是因为隧道比地平面低数百米，那里气压较高，二氧化碳溶解度也高，所以香槟酒就像跑了气似地无味。等回到地面，气压低了，二氧化碳分离出来，把绅士们的肚子撑了开来。通常在海平面，每升高 100 米，气压即降低 2190Pa，气压的这种微小的变化，对于过饱和的二氧化碳溶液而言，其气体分离与否则表现得很明显。

现在再来讨论往杯子里倒啤酒的问题。静止在杯中的啤酒，压强各处基本上是均匀的，上层压强略小于杯底，所以也是表面冒泡稍多。但是如果杯里的啤酒产生了不均匀流动，则各点上的压强是不同的，这从流体力学伯努利定律可知，沿一根流线，速度大的局部压强小，因此这些速度大的地方便会产生大量的二氧化碳气泡。为了说明这一事实，取一杯静止的新鲜啤酒，我们看到它基本上不冒气泡。如果用一根筷子一搅，就会发现在筷子运动的尾部会冒出大量气泡，正是那里压强较低的缘故。如果把筷子在杯里作圆形搅动，使杯中啤酒旋转起来，拿出筷子，啤酒在杯中形成旋涡，由理论分析知道，旋涡中心压强小，所以那里产生一串气泡，就像在陆地上看到的龙卷风一样，非常有趣。关于旋涡中心压强小的事实，在江河里游泳的人会有亲切的体会，游泳到旋涡边上，会被旋涡中心吸进去，是非常危险的。

这就是说，如果你想让啤酒不冒泡地倒满杯子，你就应当在倒的过程中，尽量减小啤酒杯中液体的相对速度，尽可能使注满杯子的过程变为准静态。前面说的直冲式之所以不适用，就是因为这种方式使啤酒柱有较大的动量，从而杯中的啤酒速度差加大，即易形成大量的小旋涡。而斜溜式，一方面降低了啤酒从瓶口到接触杯子这段落差，使啤酒入杯时的动能减小；另一方面杯子倾斜可以将啤酒柱对杯子的正冲击变为斜冲击，从而减小啤酒接触瞬时的动量改变；再者斜溜过程，增加啤酒溜到杯底的路程，在这溜的过程中杯壁近处的边界粘性层造成对啤酒的阻力也可以减小啤酒到达杯底的速度。所以它基本上满足尽可能准静态的要求，使整个过程中泡沫较少。

啤酒中含二氧化碳较多，为什么喝起来就会觉得舒服，其中一个重要原因是二氧化碳溶解度与温度的依赖关系。当你倒满一杯冰过的啤酒后，试用一根筷子插入杯中，你就会发现筷子周围爬满了小气泡。这是因为筷子初始温度比啤酒高，筷子周围啤酒中的二氧化碳在温度高时溶解度小，便分离出来爬在筷子上。同样啤酒喝进体内，体内温度比啤酒高，在从口、食道与胃壁的粘膜上也会很快地附着大量的气泡。我们还知道气泡的热传导效率是比较低的，这就是当你喝了比体温低很多的清凉饮料时你并不感到有过分冰凉的原因。我们又知道，粘膜骤然温度下降，会使它附近的血管收缩，神经活力降低，同时消化能力和胃口也相应地变得迟钝。而啤酒中气泡的作用也正是使人既觉得凉爽又不致倒胃口而保持旺盛的消化能力。由于这个原因，你也许注意到，在炎热夏季，当你吃完一杯冰激凌再开始吃饭，会觉得胃口不佳，而喝完凉啤酒再吃饭，还会吃得津津有味，这就是因为后者产生气泡的缘故。

所以，为了啤酒好喝，必须注意从酿造、贮运、从瓶中往杯中倒等一系列环节中，不使二氧化碳跑掉，以使它进入口中以后能产生较多的小气泡。在贮运过程中，要避日光曝晒，要适当降温；不要过分激烈地

摇晃，以免二氧化碳过多跑掉，否则即使在密闭容器中，也会使分离出的二氧化碳气体由于压力过高，导致爆炸事故。还要注意在倒啤酒时，利用斜溜式，而不要在“入口”前这最后一道程序上跑掉过多的二氧化碳。还应当提及的是啤酒中气泡形成不仅与压强和温度有关，还和一定的气化核心有关。气泡总是先在微小的固体近处、或瓶子内表有毛刺处形成。试往啤酒杯里放一小撮砂子，随着砂子下沉，啤酒就会像开了锅一样冒出大量气泡。而且，微小气泡一旦形成，气泡自己又可以作为气化核心而加速气泡的形成。所以啤酒冒泡在实际上是如同雪崩一样的非线性过程。即，气泡愈多便愈容易增加气泡。所以一旦大量气泡冒出来，便会以迅雷不及掩耳的方式溢出杯子，即使停止倒啤酒也还会再冒一阵，直至二氧化碳跑得差不多了才会停下来。

在生活中把这种多了就更多，少了就更少的非线性现象称为马太效应。它来自圣经上马太福音中的一句话：“凡有的，还要加给他，叫他有馀；没有的连他所有的也要夺过来。”这种效应在力学与物理学中，随处都可以遇到。河道弯了，由于流动冲刷就更弯；地不平了，在径流冲刷下就更不平；大气电离了，局部就更易于电离直至放电。一定程度上穷富差别加大，股市行情暴涨暴落，经济危机等都是马太效应。我们这里说的啤酒冒泡也是。要想精确地描述啤酒冒泡的非线性过程，还不是一件十分容易的事，因为泡沫是一种分形结构，不同尺度的泡沫行为也不同。

讨论完啤酒，我们来看一看水，它和啤酒同是液体。啤酒里溶解的是二氧化碳，水呢？水中通常溶有少量空气，进一步说，水的分子群可以转化为气体——水蒸气。在这一点上说，它同啤酒没有什么不同。不同的是，水分子在较低的压强下才会变为气体，产生气泡，这种气泡称为空泡，也称为空穴。空泡有时小到直径只有 10^{-5} 厘米，可别小看这种不起眼的空泡，它曾经是而且现在还是航海事业的可怕障碍。

1894年，英制240吨的小型驱逐舰“勇敢号”初试航时，螺旋桨转速只能达到384转，比额定设计转速低1.54%，几经调试，直到1897年，总工程师Barnaby才在造船工程师会上发表论文说明最初成绩不良是由于螺旋桨发生了空泡现象。过了20年，1915年，英制的新鱼雷艇“德林号”驶入大西洋试验，它的设计速度比前一型号大一倍，但是当舰艇机器以最大转速工作时，艇尾抖动，尾部海水泡沫翻腾，犹如倒啤酒时一样，速度和前一型号一样。当鱼雷艇回到基地时，螺旋桨已破烂不堪了。这又是空泡在捣乱。直到1971年，有人对上千艘船做了调查发现，其中有30%的螺旋桨在使用一年后，由于空泡造成不同程度的损伤。

为了研究空泡产生的机理及其作用，人们从上世纪就开始了理论与实验研究。1895年，英国建造了专门研究空泡问题的小型水洞，随后在本世纪20~30年代，英、德、法、苏、美等国相继建造了较大型的空泡

水洞。同时理论研究也取得了相应的进展。

高速水流为什么会冒气泡？原来水在标准大气压下(1个大气压相当于101325Pa)，温度达到100℃，水就会沸腾，“沸腾”就是水内部能冒气泡的现象。不同温度下，水沸腾的压强是不同的，这个压强称为饱和蒸气压，也称蒸气压。水在不同温度之下的饱和蒸气压如下表所示。

温度/℃	0	20	40	60	80	100	120
蒸气压/Pa	600.66	2338.1	7381.2	14934	47377	101325	198490

由上表可知，在压强为2338.1Pa时，水在20℃就开了，这种在常温下沸腾的现象，可以称作“冷沸腾”。在海拔4000米以上的高原地面，由于那里的气压低，沸点只有86℃，所以在那里煮东西不容易熟。在压强达到198490Pa时，即约不到两个大气压时，水到120℃才开，这个压强差不多是通常高压锅的压强。

前面说过，流体高速运动，会造成局部压力减小，特别是高速舰船、螺旋桨、鱼雷等在水中运动时，会造成局部水的压强很大，达到常温下的蒸气压。这就是高速航行水中产生气泡的原因。

一旦产生了空泡现象，阻力就会加大，产生气泡会消耗大量的能量，所以船速再也上不去。如果不采取对空泡问题的特殊对策，那么大部分大船速度将超不过26节(约14米/秒)。

然而空泡对航海带来的危害还不止如此，问题是空泡在低压区形成后，随着流动流到高压区，在那里压力增高，空气泡无法存在而闭合。空气泡闭合会造成类似于爆炸的高压，甚至会达到100000大气压。在这种大气压下，任何金属材料都会被破坏，于是螺旋桨很快便被空泡咬得百孔千疮。类似的问题在大型水电站与大型水坝上也产生过，如泄流洞水速高了，水泡可以侵蚀洞壁，水电站涡轮机叶片可以在几天之内被水泡吃掉数十毫米厚。

水滴石穿，不间断的水滴可以将坚硬的石头打穿。起先，人们认为是由于水流长时间冲刷造成的，原来也是由于空泡在起作用。随着高速摄影机的发展，有人以每秒1500张的摄影机对准液滴“着陆”的地方。液滴由圆而扁然后四散溅开，就在这一瞬间在液滴中心附近的一些局部流速相当大，足以达到产生空泡的低压。于是空泡逐渐将坚硬的石头咬去。在涛涛流动的江河中，流水拍击岩岸，“乱石穿空、惊涛裂岸”，水的这种作用，恐怕也是空泡在作怪。

细心的读者可能已注意到：将一杯刚煮开的水泼到地面，听到的是噗地一响，而冷水泼到地面，则听到清脆的啪地一响。这响声的不同也是由于气泡。如果你将一杯新鲜的啤酒泼向地面，响声同泼开水一样。刚煮开的水近于100℃，往地下一泼，水与地面冲击，流体的局部速度较大，因而压强减小，这个小的压强会使流体重新沸腾起来，在地面与水之间隔着一层气泡当然与没有气泡听起来响声不同了，而冷水向地面冲

击时局部压强降低不足以使流体沸腾。

拿一把铝壶，烧一壶开水，当水滚开时，你一只手将壶提离炉子并轻轻将壶底放在另一只手上。这时你竟然会发现，这只手可以托起整个铝壶而不感到烫手。这又是水泡在起作用。原来刚烧开的壶底壁上爬着一层细微的水泡，它隔热性能很好，当你用手托壶底时，壶底铝的热容量较小，很快与手温平衡，而壶中水的热量却由于一层气泡的隔热，使手不感到发烫。不信请试试。

本世纪初，人们逐渐认识了超声现象。1917年法国科学家郎之万发明了压电晶体超声波发生器，之后超声波进入了应用研究阶段。值得注意的是，超声波在水中传播引起水的局部高频振荡，这种振荡产生的负压足以产生空泡，从而使超声波在清洗零件、乳化、加速化学反应与粉碎等方面都得到广泛应用。

也正好是在1917年，英国学者瑞利，首先计算了不可压流体中球形空泡闭合时，可以在中心造成无穷大的压强。当液体是可压时，这个压力虽不是无穷大，但仍非常大。对空泡的认识至此却远没有终止。早在60年前，人们就发现当把超声波通到水中，顷刻之间水中可以发出光来。这个现象一直没有得到合理的解释。直到1959年人们才首次论证，光是由空泡破灭时产生巨大能量集中所发出来的。

据最近英国《新科学家》杂志报道，近几年来，人们逐渐用更精确的模型来计算空泡这一现象。先后有3个美国人得到了不同的结果。1986年一个美国人算出气泡破灭可以造成5000K的高温，1993年又有人改进计算，说是可以达到7000K的高温，这已经是太阳表面的温度了。到1994年11月美国全国声学会议上，有人宣布用精细模型并用计算机算得，气泡破灭时的温度可以达到2 000 000 K，这个温度是聚变热核反应所需温度的一半。

如果上述计算理论是对的，我们又能够依靠近代技术去实现的话，说不定空泡还是一条通向可控热核反应的可行途径呢！这是一个多么诱人的前景啊！退一步讲，即使达不到所计算的高温，人们不是也可以利用这一超常的高温去开辟许多新的应用领域吗！

啤酒冒气泡可以带来美味，也可以带来麻烦。同样，空泡可以是危险分子，也可以为人类造福。天下大事，有一利必有一弊。而怎样除弊兴利，全靠对它的机理有充分的了解。倒啤酒尚且如此，对待空泡更是如此。

北京大学力学与工程科学系吴望一教授曾就本文提出宝贵意见，特此致谢。

平衡吊——力学平衡原理应用一例

王克

在工厂车间里搬运重物，往往都是采用起重机、电葫芦、工业机械手等。但对于需要频繁吊装、作业时间短的场合，如机床上下工件，装配工作吊装零部件，流水线上的定点工作等等；对于要求比较精确定位的场合，如铸造中的下芯、合箱等等，一般起重设备常不适用，工业机械手多用于生产自动线上或单一的重复操作，而且成本较高，目前，一般车间使用较少。

近 20 年来，出现的一种新型的定点起重设备“平衡吊”（Balance Arm），适用于几十到几百千克工件的定点频繁吊运。它的结构简单，操作灵活，特别适合于一人操作，直观感觉好，制造、维修方便，在生产中已逐步得到推广，受到工人的欢迎。

“平衡吊”的原理新颖，设计者巧妙地运用了力学中的平衡原理，图 1 是一台平衡吊的简图。挂在平衡吊吊钩上的重物，用手扶着，可以随意在吊装高度的平面内运动，控制升降的电钮开关，装在吊钩处，通过电动机和传动使重物升降。操作者一手扶着吊件，一手随心所欲地操纵吊件升降、回转、移动，好像一只放大的手那样，运用自如。当然手上还是有一点力感，这是由于理论和实际不完全一致所带来的。比如，工艺、安装上的误差，实际存在的变形和摩擦力等等。实践中，这点力感很小，反而给操作者一点习惯的感受。

图 1 的平衡吊主要由传动、杆系、回转座和立柱等组成。立柱和回转座的作用是显而易见的。传动是控制被吊物件升降的，常用的有机械传动和液压传动。

平衡吊为什么能在空载或负载时，吊钩在平面内任一点处于平衡状态，即力学中的随遇平衡呢？这正是设计者在杆系设计中，巧妙地运用了力学中平衡的原理。

杆系由 ABD，DEF，BC，CE 四杆铰接组成一个平行四连杆机构，其中

$$\frac{BC}{DE} = \frac{BD}{CE}$$

在杆系的 A，C 处置两个滚轮，安放在传动箱的垂直和水平导槽内，电机通过传动使 A 轮升降，达到重物升降的动作。电机不工作时，A 轮可以视为不动，犹如一个固定铰链，此时杆系如图 2 所示。先将杆系的杆件理想化为刚体，自重不计，尺寸无误差，各节点处摩擦不考虑。

可以看出，BC 和 CE 两杆皆为二力杆，静平衡时，二力杆上的两个力大小相等，方向相反且沿杆轴线作用。ABD 和 DEF 两杆则为三力杆，在静平衡条件下，三力杆的三个力必交于一点。

拿整个杆系来分析，滚轮 C 的水平运动是引起吊钩（重物）作水平

变幅运动的原因。在不计摩擦的情形下，平衡吊的吊钩（重物）在该水平的任意位置时，只要 C 点的水平反力（分力）为零，即 C 点只有垂直反力，平衡就可以达到。此时，由于系统中重力 G 和 C 点的反力 R_C 都是垂直方向的力，系统中 A 点处的反力 R_A 也必须是垂直的。

杆系满足什么条件，才能保证 R_A 是垂直的呢？

先看 DEF 杆，该杆在重力 G 和 D, E 铰链对 DEF 杆的作用力 T_D 和 T_E 的作用下平衡。 T_E 力的方向沿 CE 杆轴线， T_D 力则必沿 D 点和 G 与 T_E 力交点 K 的连线方向。G, T_E 和 T_D 的指向，可通过力三角形得到，示于图 2

上。再看 ABD 杆，该杆也在三力作用下平衡。铰链 D 给 ABD 杆的作用力 T'_D ，大小与 T_D 相等，指向相反。铰链 B 给 ABD 杆的作用力 T_B ，沿 CB 轴线方向。 R_A 沿 T'_D 与 T_B 两力交点 J 的连线方向。三力的指向亦可以通过力三角形得出，示于图 2 上。

要使系统处于随遇平衡状态。 R_A 要保持垂直，即图 2 上的 AJ 为一垂线才行。

设杆长如下：

$$\overline{ABD} = l_1, \quad \overline{AB} = l_2, \quad \overline{DEF} = l_3, \quad \overline{DE} = l_4,$$

若要保证 A 点的反力沿垂直方向，必须

$$AJ \perp FK$$

此时显然有

$$\frac{KEF}{ABJ} = \frac{KDE}{DJB}$$

得到

$$\frac{\overline{EF}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{BJ}}{\overline{EK}} = \frac{\overline{DE}}{\overline{BD}}$$

或

$$\frac{\overline{EF}}{\overline{DE}} = \frac{\overline{BD}}{\overline{AB}}$$

即

$$(l_3 - l_4) / l_4 = (l_1 - l_2) / l_2 \text{ 或 } l_3 / l_4 = l_1 / l_2$$

只要杆系中各杆满足上述关系，平衡吊即可在理想条件下，吊钩（重物）处在水平的任意位置上达到随遇平衡。因为这是理想条件下的关系式，叫做原型平衡条件。实际设计中，常取 $l_1 = l_3, l_2 = l_4$ 。原型平衡条件下还有一个有趣的几何关系，即 A, C, F 位于一直线上。

实际的平衡吊要复杂得多，因为杆件都有重量，存在变形，加工后尺寸会有误差，摩擦处处存在，设计制造出的 ABD 和 DEF 杆的自重重心不能保证在轴线上等。要使实际的平衡吊真正在工程中得到应用，做到随遇平衡，这些问题应该予以逐个解决。

理论和实践都证明了这诸多问题中，杆件自重的作用是使平衡吊失去平衡的最关键因素。通过力学分析，杆件自重引起吊钩 F（重物）失去平衡的作用，可以把它等效地归化到任意一个杆件上，比如归化到 ABD

杆上，参见图 3，以 G 表示。 G 不是整个杆系的重量，也不作用在杆系的重心处，它满足

$$G l = \sum_{i=1}^4 G_i l_i$$

这样，只要在 ABD 杆的 A 点外，顺延一段杆件 AP，其长为 l_p ，使 $G l = G_p l_p$ ，就把这个问题解决了，见图 1 的配重。这一看起来非常简单的补偿措施，是使平衡吊能付诸工程应用的重大创举，为设计者解决了大难题。

当然，在平衡吊的研究设计中，应用力学知识还解决了许多问题，从而可以看到它在工程中应用的巧妙了。

冰海沉船的启示

周道祥

说到冰海沉船人们很自然地会想起英国白星航运公司的豪华邮轮“泰坦尼克号”触冰山而沉没的悲惨一幕，更由于《冰海沉船》这部电影的生动描述，使当年的悲壮场面令人终生难忘。

“泰坦尼克号”是当时最大、最豪华的邮轮，排水量为4600吨，有海上都城之称。在它从英国南安普敦到美国纽约的处女航中已顺利地走完了差不多5/6的航程。1912年4月14日夜“泰坦尼克号”在加拿大纽芬兰岛大滩以南约150千米的海面上与冰山相撞，船的右舷撕开了长91.5米的口子，船上约2200名船员在猛烈的震动中惊醒。人们不会忘记随船的一位设计该轮的工程师从容然而不无沮丧地向人们解释的镜头。他在船侧视图的水线以下部分从头至中间偏后的部位重重地画了一条黑线，沉重地说：“有5个水密舱进水，船将在两个小时内沉没。”这个令人绝望的结论刺激了并未完全绝望的人们。在一场生死考验面前有的壮烈，有的卑怯，而那位工程师却伴随着他的作品沉入海底。1513人在这一场灾难中丧生，生还者尚不到全部乘员的1/4。

人们从这次悲惨的事件中得出不少有益的教训，关于勤于了望和电报员值班之类的措施早已写入有关的条例中，现在人们已经可以通过雷达或其他技术手段不间断地观察航道周围的环境和轮船航行的状态，这无疑会对防止海难事故或及时救助遇险人员起重要作用。然而我们也应该深入地研究一下，为什么与冰山的一次冲撞竟会产生90多米长的大裂纹？有没有办法保证即使撞上冰山也不会导致轮船沉没呢？这一答案是30多年后才被找到的。

冰海沉船绝不仅仅是“泰坦尼克号”，真正引出教训的却是第二次世界大战沉入冰海的近300艘轮船。

在第二次世界大战正激烈进行的时候，同盟国的运输船队在北大西洋航线上也异常活跃。有不少货轮走的正是“泰坦尼克号”走过的航线。在这条艰难的航线上，除德国潜艇的袭击之外，最大的威胁莫过于冰山和风暴了。在短短的几年内，仅美国制造的“自由号”货轮就损失100多艘。这并非德国潜艇所为，而是毁于船体结构及材料不佳，有的轮船甚至刚下水就裂为两截。美国在第二次世界大战期间建成2500艘“自由号”轮，其中145艘折为两段，近700艘受到严重破坏。

一些货船沿着“泰坦尼克号”的航线，重蹈“泰坦尼克号”的覆辙毫不为怪，然而，许多货轮在北大西洋凛冽的狂风中突然断为两截却使人费解。人们开始怀疑寒冷把金属“冻坏”了。一批才华出众的专家、学者开始在实验室中研究钢材的低温性能。他们对大量的破坏了的船体

钢板在曾经发生事故的温度下进行材料性能测试，继而发展到对同一种材料在不同温度下的性能进行比较，对在发生事故的温度下未发生破坏的钢材作分析。结论很快就清楚了，钢材在低温下会变脆，在极低的温度下甚至像陶瓷那样经不起冲击和震动。材料抗冲击、抗断裂的能力称为韧性。衡量材料韧性的实验很多，其中带裂纹的试样测定材料韧性是最重要的实验方法之一，所测得材料韧性值 σ_c 称为断裂韧度。一种材料的断裂韧性是随温度变化的。

实验表明，钢材的断裂韧性是随温度升高而增加的（如图 1 所示）。在某一个温度范围内，钢由脆性破坏很快地转为塑性破坏。人们把脆性破坏转变为塑性破坏时材料断裂韧性 σ_c 值所对应的温度称为韧性-脆性转变温度 T_i ，美英两国取 $\sigma_c = 0.076\text{mm}$ 所对应的温度作为转变温度，当低于这一温度时钢材的断裂韧度很低，因此对裂纹的存在很敏感，在受力不大的情况下，便导致裂纹迅速扩展造成断裂事故，裂纹扩展的速度，相当于在该材料中声速的传播速度。通常裂纹导致脆性破坏大多在没有先兆的情况下突然发生的，其破坏力十分惊人。就船舶所采用的钢材来说，韧性-脆性转变温度大约在 $-40 \sim 0$ 的范围内。限于当时的冶金水平，那时钢材的转变温度会更高一些，而“泰坦尼克号”和“自由号”轮正是在略低于转变温度的气温下内航行的，所以轮船一再发生断裂事故就不足为怪了。

人们对钢材在不同温度下性能的了解为造船的选材提供了科学依据，选用转变温度远高于使用温度的材料可以有效地防止船舶发生低温脆断事故。

事隔 77 年，前苏联大型游览客轮“马克西姆·高尔基号”载着 953 名乘员又走上了北大西洋布满冰山的凶险之路。这是德国汉堡船厂在 1969 年制造的长 196 米，吃水 25000 吨的巨轮，价值 2350 万美元。1989 年 6 月 19 日是一个黑风高之夜，“马克西姆·高尔基号”以 35 千米/小时的速度破浪前进，在挪威斯匹次卑尔根岛以西 320 千米的海面上突然与冰山相撞，船头顿时裂开一条 6 米长 15 厘米宽的裂缝。轮船步履蹒跚地向斯匹次卑尔根岛缓缓驶去。此次事故无一伤亡，真是有惊无险。人们平静下来之后是否会想到“马克西姆·高尔基号”幸运并非偶然呢？

混沌浅说

陈立群 赵婷 刘延柱

人们习惯上认为科学的目标是发现事物之间的因果关系从而正确地作出预测，这也正是科学的威力所在。例如牛顿力学被人们接受，不仅是因为它理论体系完整严密，也不仅是它能给出已知现象的理论解释，更是因为它能预测未知事物，诸如慧星的运动及海王星、冥王星的存在等。然而，有些现象一直令科学家们困惑不解，如他们能长期精确预测地球潮汐的运动，却对长期预测天气的变化无能为力。这类被认为是例外怪异的现象，在长期被回避之后，近 20 年来成了科学研究的一个热点。这便是本文要说的混沌。

对于不可预测现象，科学家也不完全陌生，17 世纪中叶便有对骰子滚动的研究。但以往讨论的“不可预测现象”是由于不存在确定性的因果关系，这时有随机因素在起作用，必须用概率统计方法研究。而混沌则与此不同，它出现在确定性系统中，即系统的运动由本身丝毫不带随机因素的规律支配，因而混沌可以称为内在随机性。以下将说明混沌是非线性系统特有的一种运动形式，它是具有对初始条件的敏感依赖性而不可长期预测的有限非周期运动。

非线性与线性

正如马克思指出：“一种科学只有当它达到能够运用数学时，才算真正发展了。”近代科学告诉我们，任何物理现象都可用一组在特定精度内确定的变量描述。如果改变其中的一个，而使其他变量产生不成比例的变化，则称该组变量描述的现象为非线性。以弹簧变形产生弹性恢复力为例，这个物理现象可用两个变量：变形 x 和恢复力 F 描述。设变形为 x_0 时恢复力为 F_0 ，若它们成比例变化，即意味着变形为 x_0 时恢复力为 F_0 。这里， k 为由弹簧变形量决定的数，如设弹簧变形为 x ，则 $F = kx$ 。现若有常数 k 和 α 使 $F = kx + \alpha x^3$ ，则变形为 x_0 时，恢复力

$$F = kx_0 + \alpha(x_0)^3 = (kx_0 + \alpha x_0^2)x_0$$

故当 $\alpha = 0$ 时，弹簧为非线性的，当且仅当 $\alpha = 0$ 时弹簧才是线性的。研究非线性问题的理论模型称作非线性系统，通常用非线性方程描述。

丰富多采的现实世界即是非线性的。线性世界是单调乏味缺少变化的世界，如，一个和尚挑一担水，三个和尚挑三担水；一个皮匠制一双鞋，三个皮匠制三双鞋。现实的情况却往往是“一个和尚挑水吃，两个和尚抬水吃，三个和尚没水吃”；“三个臭皮匠，顶个诸葛亮”。由于

线性问题易于处理，长期以来人们一直把注意力集中于线性问题及与之相近的个别非线性问题，以至于回避甚至遗忘了难以处理的大量非线性问题。这样就容易使人片面地认为，线性问题是普遍的、一般的。

科学史上的先行者们并不愚蠢，他们专注于线性问题的研究是出于无奈。那时，大多数非线性问题远远超出了学者们力所能及的范围。如同教诲晚辈“一分耕耘，一分收获”这种典型线性观的长者也并非不知道“天有不测风云，人有旦夕祸福”这种非线性现象一样。尽管从上世纪末以来便有一些杰出的科学家如庞加莱等提出对非线性问题的真知灼见，但总的说来，线性一统的局面一直维持到本世纪中叶，正是由于电子计算机的问世才打破了这种局面。它是技术进步反过来促进科学发展的一个例证。电子计算机的发展和普及使得对非线性问题的研究成为可能。数值实验的广泛采用是非线性问题尤其是混沌研究的特点。当代的混沌研究者不同于牛顿和爱因斯坦那种沉思默想的科学先贤，他们往往是电脑的爱好者和使用者。混沌研究的现实正是数理逻辑创始人莱布尼兹的梦想：“怀着愿意解决争端的良好意愿的人，心平气和地坐下来拿出纸和笔‘让我们计算吧！’。”只不过现在用的是计算机而非纸和笔。

混沌的特征

一个质量确定的物体的运动决定于什么？有人说，决定于它所受的力，这无疑是对的。但仅仅决定于受的力吗？如以不同的方式抛出同一物体，若略去空气阻力，其所受的外力都是同一个重力，但运动可能是直线，也可能是曲线。这说明运动还取决于初始时刻的位置和速度，通称为初始条件，简称初值。任何时刻的运动都依赖于初值。

混沌运动具有对初始条件的敏感依赖性，简称初值敏感性。即初值的微小差别经过一段时间后会导导致系统状态显著的差别。真可谓失之毫厘差之千里。例如在图 1 所示的系统中，单位质量的质量块连有非线性弹簧和线性阻尼器并受周期外力作用，非线性弹簧的弹性恢复力为 $F_k = -k_1 x^3$ ，线性阻尼器的阻力为 $F_c = -0.05k_2 v$ ，周期外力 $F(t) = 7.5k_3 \cos t$ ，其中 x 和 v 分别为质量块离开平衡位置的位移和速度（向右为正）， k_1 ， k_2 ， k_3 分别为单位不相同的比例系数。对于给定的初始条件，借助计算机可以求出位移随时间变化的曲线（称作时间历程）。对应两组初值 $x_0 = 3.00\text{cm}$ ， $v_0 = 4.00\text{cm/s}$ 和 $x_0 = 3.01\text{cm}$ ， $v_0 = 4.01\text{cm/s}$ 的时间历程如图 2 所示，从中可见 10^{-2} 数量级上的初值差别经过不到 50 秒便导致位移差别为 10^0 数量级。这种具有初值敏感性的例子在日常生活中并不少见。例如，某高考考生晚了 2 分钟离开家门，刚好误了一趟 30 分钟一班的车，因迟到而考砸一门课，结果晚入大学一年。所以有人忠告青年人：“人生的路虽很漫长，但紧要处只有几步。”由于对“紧要处”的敏感

依赖，对个人而言，可导致截然不同的人生结局；对于国家，也可导致兴盛或灭亡，如一首英国民谣所述：

钉子缺，蹄铁卸；蹄铁卸，战马蹶；
战马蹶，骑士绝；骑士绝，战事折；
战事折，国家灭。

混沌运动不能长期预测。物理世界的任何量都只能有有限精度，如前例中给出的初值 $x_0 = 3.00\text{cm}$ ， $v_0 = 4.00\text{cm/s}$ ，只精确到小数点后两位。第三位数字可以是 0~9 中的任意一个，因而初值中存在不确定性，有 10^{-3} 量级的误差。可以认为具有初值敏感性的系统对于初值误差的作用不断进行放大。这样随着系统运动时间的流逝，初值中的不确定性起着越来越大的作用。一段时间之后决定运动的已不是初值中以有限精度给定的部分，而是在精度范围之外无法确定而又必然存在的误差，运动的预测便不可能了。由于初值敏感性而具有的长期不可预测性，故被形象地称作蝴蝶效应。一个蝴蝶的振翅，导致大气状态极微小的变化，但在一个月后，千里之外的一场本来不会发生的大风暴发生了。蝴蝶效应是混沌运动的一个生动描述，也说明了长期气象预报的难点所在。

混沌运动是非周期的有限运动。非周期是指不像周期那样周而复始循环往复，有限运动是指既不无限增大发散于无穷，也不无限衰减而趋于静止。以图 1 所示质量弹簧系统为例，从时间历程图 2 中可见，质量块在平衡位置左侧振动两次后又在右侧振动两次，再在左侧振动 1 次……，每个轮回振动次数各异幅值也不同。显然不具有任何周期性而又在一有限范围内往复运动。这里质量块的运动就是混沌运动。

由于混沌运动的上述特征，在宏观的时间尺度上，看不出它与随机运动有任何区别。但混沌产生于由确定性规律支配的系统并没有任何外部随机噪声影响，所以混沌是确定性系统的内在随机性运动。

自然界中的混沌运动

混沌运动不仅出现在实验室中的实验和基于理论模型的数值实验中，在自然界中也广泛存在。这里仅举几例。

小鸟在逃避猛禽捕食时，做时上时下与忽左忽右的混沌性运动。不然，若直线飞行将被速度更快的猛禽追上；若仅周期性改变飞行方向，由于猛禽可以作出预测，小鸟也难逃厄运。

土星的 15 颗卫星中有颗叫土卫 7 的卫星不同寻常，它的形状不规则像颗马铃薯。土卫 7 的轨道精确又规则，但它在轨道中的空间方位角变化（称作姿态运动）是混沌的。土卫 7 在翻筋斗，不只是从一边翻到另一边，而是以一种复杂的、不规则的方式翻转。即使科学家们能以小数点后 10 位的精度测定土卫 7 的空间方位角，根据牛顿运动定律和万有引

力定律预测其未来姿态运动，几个月后仍将会发现预言完全错了。土卫 7 的姿态运动是一种典型的混沌运动。

在力学学科之外，也存在着广义而言的混沌运动，即系统状态的混沌性变化。可以断言，在任何科学领域中；当非线性足够强时，都会遇到混沌现象。

混沌研究之所以引起广泛重视，正是因为混沌无处不在。

飞轮储能

丁占鳌

众所周知，我国电力十分紧张，但电力设备利用率仅有 75%，即约有 1/4 电力被浪费。我们讲某电厂的发电能力是指该电厂发电设备满负荷运行时的能力。实际上只有白天才能满负荷，而深夜则处于低负荷状态，故设备能力不能充分利用。由此导致全国年发电量损失达 1200 亿度！以每度电 0.5 元计，全年损失 600 亿元。为解决这一难题，人们曾设想不少办法：如深夜在水电站抽水蓄能，利用电池蓄能，有人甚至试验过压缩空气蓄能。但结果表明，这些方法不是价格昂贵，就是储能效率太低。迈向 21 世纪，人们对保护环境的呼声越来越高。随着社会的发展，汽车已成为城市第一大污染源。如何开发一种电动汽车，深夜充电，白天使用，可谓两全其美。使用电池的电动汽车目前已试验过几十年，但至今尚未进入实用阶段。太阳能、风能、潮汐能、海浪能，都存在储存问题，目前主要靠电池，但受到蓄电池寿命及效率的制约，至今尚不能广泛应用。以上诸多问题，促使人们寻求一种效率高、寿命长、储能多、使用方便，而且无污染的绿色储能装置。出乎意料，古老的“飞轮”变成了首选对象。

“飞轮”这一储能元件，已被人们利用了数千年，从古老的纺车，到工业革命时的蒸汽机，以往主要是利用它的惯性来均衡转速和闯过“死点”，由于它们的工作周期都很短，每旋转一周时间不足一秒钟，在这样短的时间内，飞轮的能耗是可以忽略的。现在想利用飞轮来均衡周期长达 12~24 小时的能量，飞轮本身的能耗就变得非常突出了。能耗主要来自轴承摩擦和空气阻力。人们曾通过改变轴承结构，如变滑动轴承为滚动轴承、液体动压轴承、气体动压轴承等来减小轴承摩擦力，通过抽真空的办法来减小空气阻力，轴承摩擦系数已小到 10^{-3} 。即使如此微小，飞轮所储的能量在一天之内仍有 25% 被损失，仍不能满足高效储能的要求。再一个问题是常规的飞轮是由钢（或铸铁）制成的，储能有限。例如，欲使一个发电力为 100 万千瓦的电厂均衡发电，储能轮需用钢材 150 万吨！另外要完成电能机械能的转换，还需要一套复杂的电力电子装置，因而飞轮储能方法一直未能得到广泛的应用。

近年来，飞轮储能技术取得突破性进展是基于下述三项技术的飞速发展：一是高能永磁及高温超导技术的出现；二是高强纤维复合材料的问世；三是电力电子技术的飞速发展。为进一步减少轴承损耗，人们曾梦想去掉轴承，用磁铁将转子悬浮起来，但试验结果是一次次失败。后来被一位英国学者从理论上阐明物体不可能被永磁全悬浮（Earnshaw 定理），颇使试验者心灰意冷。出乎意料的是物体全悬浮之梦却在超导技

术中得以实现，真像是大自然对探索者的慰藉。

超导磁悬浮原理是这样的：当我们将一块永磁体的一个极对准超导体，并接近超导体时，超导体上便产生了感应电流。该电流产生的磁场刚好与永磁的磁场相反，于是二者便产生了斥力。由于超导体的电阻为零，感生电流强度将维持不变。若永磁体沿垂直方向接近超导体，永磁体将悬空停在自身重量等于斥力的位置上，而且对上下左右的干扰都产生抗力，干扰力消除后仍能回到原来位置，从而形成稳定的磁悬浮。若将下面的超导体换成永磁体，则两永磁体之间在水平方向也产生斥力，故永磁悬浮是不稳定的。

利用超导这一特性，我们可以把具有一定质量的飞轮放在永磁体上边，飞轮兼作电机转子。当给电机充电时，飞轮增速储能，变电能为机械能；飞轮降速时放能，变机械能为电能。图 1 是储能飞轮装置的示意图，图中超导体是由钷钇铜合金制成，并用液氮冷却至 77K，飞轮腔抽至 10^{-8} 托的真空度（托为真空度单位，1Torr（托）= 133.332Pa），这种飞轮能耗极小，每天仅耗掉储能的 2%。

大家知道，物体动能（E）的表达式为： $E = \frac{1}{2}mv^2$ 。式中m是物体的

质量，v 是速度。由于飞轮上各点的速度是不一样的，所以它的动能也可表达为：

$$E = \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2$$

式中 \sum 是“求和”的表示， m_i 是轮上各点的质量， v_i 是轮上各点的速度。由上式可知，飞轮储能大小除与飞轮的质量（重量）有关外，还与飞轮上各点的速度有关，而且是平方的关系。因此提高飞轮的速度（转速）比增加质量更有效。但飞轮的转速受飞轮本身材料限制。转速过高，飞轮可能被强大的离心力撕裂。故采用高强度、低密度的高强复合纤维飞轮，能储存更多的能量。目前选用的碳纤维复合材料，其轮缘线速度可达 1000 米/秒，比子弹速度还要高。正是由于高强复合材料的问世，飞轮储能才进入实用阶段。

下面介绍一下国外飞轮储能的进展情况。

1994 年，美国阿贡（ANL）国家实验室用碳纤维试制一个储能飞轮：直径 38 厘米，质量为 11 千克，采用超导磁悬浮，飞轮线速度达 1000 米/秒。它储的能量可将 10 个 100 瓦灯泡点燃 2~5 小时。该实验室目前正在开发储能为 50 千瓦小时的储能轮，最终目标是使其储能达 5000 千瓦小时的储能飞轮。一个发电功率为 100 万千瓦的电厂，约需这样的储能轮 200 个。

1992 年美国飞轮系统公司（AFS）开发了一种用于汽车上的机-电电池（EMB），每个“电池”长 18 厘米，直径 23 厘米，质量为 23 千克。

电池的核心是一个以 20 万转 / 分旋转的碳纤飞轮，每个电池储能为 1 千瓦小时，它们将 12 个“电池”放在 IMPACT 轿车上，能使该车以 100 千米 / 小时的速度行驶 480 千米。机-电电池共重 273 千克，若采用铅酸电池，则共重 396 千克。机-电电池所储的能量为铅酸电池的 2.5 倍，使用寿命是铅酸电池的 8 倍，且它的“比功率”（即爆发力）极高，是铅酸电池的 25 倍，是汽油发动机的 10 倍，它可将该车在 8 秒钟内由静止加速至 100 千米 / 小时。

日本曾利用飞轮“比功率”高的特性设计了一个引发可控热核聚变的装置，如图 2 所示。该装置的飞轮直径达 6.45 米，高 1 米，重 255 吨。它所储存的能量与挂有 150 个车厢的列车以 100 千米 / 小时的速度行驶时所具有的能量相当。故将这些能量在极短时间释放出来足以引发核聚变。

我国对飞轮的研究，始于 1993 年，在理论分析及模型试验方面也已取得不小的进展。以飞轮作储能装置，其可行性目前已无人怀疑。大规模的工业应用虽然还存在不少技术问题需要解决，但这只是时间问题。

21, 22 世纪，太阳能（包括其派生的风能、浪能）可能变为唯一允许使用的能源，再辅以飞轮储能，太阳能电厂即可提供全天候的能源，这时，也只有这时，地球村的天空才会变得蔚蓝，水才会清莹，人类“绿色能源”之梦才会彻底实现。

郡亭枕上看潮头——漫谈潮汐及其开发利用

王振东

江南好，风景旧曾谙。日出江花红胜火，
春来江水绿如蓝。能不忆江南？
江南忆，最忆是杭州。山寺月中寻桂子，
郡亭枕上看潮头。何日更重游？
江南忆，其次忆吴宫。吴酒一杯春竹叶，
吴娃双舞醉芙蓉。早晚复相逢？

这篇脍炙人口的“忆江南”是诗人白居易（772~846年）抒发对江南忆恋之情的名作。早在青年时期，白居易就曾漫游江南，行旅苏杭；中年又曾先后于822年任杭州刺史，825年任苏州刺史，江南及苏杭的秀丽风景给他留下了美好的回忆。回洛阳后曾作多首诗词叙苏杭胜事，此首系开成三年（838年）他67岁时所写。

我们着重来看此词中段，偌大一个杭州，可忆的美景当然很多，而按此词牌结构，只能纳入两句，这就要选择最有代表性、感受最深的景物。月中桂子和浙江涌潮便是诗人所选最有代表性、最美的回忆。钱塘江（又名浙江、之江、罗刹江）流至海门入海。钱塘江大潮汹涌澎湃，犹如直立的水墙，排山倒海而来，怒潮滚滚，势不可挡。所以诗人任杭州刺史时，躺在郡衙建造的亭子上，就能看见那卷云拥雪的壮丽景色。“郡亭枕上看潮头”，其形体当然是静的，但其内心世界是否也是静的呢？白居易另有一首“观潮”诗可以说明其观潮时的内心活动：

早潮才落晚潮来，一月周流六十回。
不独光阴朝复暮，杭州老去被潮催。

这里显然已蕴含着人生有限而宇宙无穷的哲理，很值得人们深思。

实际上众多唐宋诗人墨客都曾用精彩的诗句描述钱塘江大潮的雄伟壮观。为节省篇幅起见，我们不妨用集句形式窥其一斑：

“楼观沧海日，门对浙江潮。”
“八月十八潮，壮观天下无。”
“浙中山色千万状，门外潮声朝暮时。”
“一年壮观尽今朝，晚日沉浮急浪中。”
“一千里色中秋月，十万军声半夜潮。”
“罗刹江头八月潮，吞山挟海势雄豪。”
“八月涛声吼地来，头高数丈触山回。”
“欲识潮头高几许，越山浑在浪花中。”

这些诗句都生动、集中表现了雄奇辽阔、声势浩大、千姿百态的钱塘潮景观。

那么什么是潮汐？为什么钱塘江的潮汐如此雄伟壮观呢？我们先来讨论海洋潮汐。从流体力学看，海洋潮汐是海水受引潮力作用而产生的海洋水体的长周期波动现象，它在铅直方向表现为潮位升降，在水平方向表现为潮流涨落。古人将早晨海水上涨称为潮，黄昏上涨称为汐，故合称为潮汐，或称海潮（古代涛与潮通用）。月球、太阳或其他天体对地球上单位质量物体的引力，与对地心单位质量物体的引力之差称为引潮力。太阳因离地球远，其引潮力只有月球的46%。农历每月的朔（初一）和望（十五或十六），月球、太阳和地球的位置大致处于一条直线上。此时月球和太阳的引潮力的方向相同，所引起的潮汐相互增强，使潮差出现极大值。这种极大值每半个朔望月（14.7653天）出现一次，称为大潮。农历每月上弦（初八或初九）、下弦（廿二或廿三）时，月球和太阳的引潮力方向接近正交，互相削弱情况最显著，故潮差达极小值，称为小潮。

潮汐的升降、涨落与人们的生活和生产活动密切相关。舰船的进、出港与航行，沿海地区的渔业、农业、盐业，港口建设，环境保护等，都必须考虑潮汐的变化规律。此外，利用潮汐发电，也是能源开发的一个重要方面，这点将在后面详细叙述。

古人对潮汐的认识，可追溯到汉代王充（27~97年）在《论衡》中所说“涛之起也，随月盛衰，大小满损不齐同”，科学地说明了潮汐对月球的依赖关系。宋代余靖（1000~1064年）指出潮汐是一种“彼竭此盈，往来不绝”的波动现象。西方到17世纪，牛顿（1643~1727年）才根据其提出的万有引力定律，用引潮力说明潮汐的原因，并为大家接受。之后，D.伯努利（1700~1782年）和P.S.拉普拉斯（1749~1827年）分别建立了潮汐的静力学和动力学的基本理论。到19世纪60年代末，才形成潮汐分析和预报的方法，并得到应用。

发生在杭州湾钱塘江口的潮水暴涨现象，被称为钱塘江涌潮。我国沿海的潮波主要是由太平洋传入的，浙江沿岸、杭州湾一带正当其冲，加上杭州湾联接钱塘江口呈漏斗形状（见图），水域变浅变狭，单位体积海水的势能增大，致使潮差在海宁可高达8.93米。潮波在这里又与河水相遇，波面受到较大的阻力，使潮波波峰的前沿出现破碎现象；又遇水下沙坝，迫使涌潮分为“东湖”和“南湖”两支，继续向河口推进，并在大尖山和海宁之间发生潮波的折射、反射和交汇，有时能激起十余米高的水柱。破碎的潮峰呈滚滚白浪，高度1~2米，并以4~6米/秒的速度传播。大潮带来的海水一秒钟内常可达数万吨，所产生的力量也是惊人的。1953年8月的一次大潮，竟把海宁镇海塔附近高出海面七八米的石塘上的一个1500多千克重的“镇海铁牛”冲出十几米之外。每年农历八月十八日，恰逢临近秋分的大潮，加上正值雨季，平均海面升高，若再遇强劲东风或东南风，则风助潮势，涌潮景象更加壮观，诗人描述

的吞山挟海、涛声吼地、雄奇辽阔、千姿百态的钱塘潮景观就出现了。现在每年农历八月十八日，已被海宁定为观潮节，吸引着海内外游客前去观赏。

在流体力学中把涌潮看作是逆水流传播的水跃，所谓水跃是指海水自由表面从一个高度在很短的距离内跃升到较大的高度。可用弗劳德数 $Fr = v / \sqrt{gh}$ 来描述涌潮是否出现，式中 v 是水流速度， g 是重力加速度， h 是水深， \sqrt{gh} 是潮波的传播速度。当 Fr 略大于 1 时，出现弱涌潮

波； Fr 远大于 1 时，出现强涌潮波。对具体河口说，潮差大并有平缓、宽阔漏斗形状的河口是发生涌潮的基本条件，钱塘江口正具备了这两个条件。世界上至少有 15 处以上的涌潮，如南美洲的亚马逊河口，涌潮可高达 5 米，流速约 6 米 / 秒；法国塞纳河口，涌潮高达 4 ~ 6 米。

我国有 18000 多千米的海岸线，海域面积 470 多万平方千米，南部沿海平均潮差 4 ~ 5 米的地区比比皆是，以钱塘江口的潮差最大。夏季去北戴河旅游时，许多人去过山海关附近的孟姜女庙，在姜女庙堂的门口有一幅不大会念下来的对联：

海水朝朝朝朝朝朝朝落
浮云长长长长长长消

这正是描述关于潮汐和白云的流体运动现象的一幅对联，可以念为：海水朝(cháo)朝(zhō)朝(zhō)朝(cháo)朝(zhō)朝(cháo)朝(zhō)落，浮云长(zhǎ)长(cháng)长(cháng)长(zhǎ)长(cháng)长(zhǎ)长(cháng)消。这里朝(cháo)与潮通用。

海流、潮汐和波浪是海水运动的主要方式，利用潮汐发电是能源开发的一个重要方向。全世界潮汐能可开发的总容量约 10 ~ 11 亿千瓦，如能充分利用，年发电量可达 12400 亿度。据 1985 年普查，我国的潮汐能可开发的总容量约 2158 万千瓦，年发电量可达 619 亿度。世界上最大潮差在北大西洋的芬迪湾，为 19.6 米；我国沿海平均潮差在 1 ~ 4.5 米之间，最大潮差在钱塘江口为 8.93 米。

利用海潮涨落形成的潮汐能发电的水电站称为潮汐电站。潮汐电站一般在地形和地质优良的海湾入口处建堤坝、厂房和水闸，与海隔开形成水库，利用涨落潮时内水位与海水之间的水位差，引入经厂房内的水轮发电机组发电。潮汐电站有许多优点：(1) 能源可靠，是再生性能源，周而复始，可经久不息利用。(2) 虽有周期性间隙，但具有准确规律，可用电子计算机预报，有计划纳入电网运行。(3) 无淹没损失、移民等问题。(4) 一般离用电中心近，不必远距离送电。(5) 水库内可发展水产养殖、围垦和旅游综合效益。正因为以上优点，世界上沿海各国都在重视潮汐能的开发利用。目前潮汐电站还处于试验探索阶段，以法国起步最早，成效最大。已建装机容量超过 900 千瓦的几个潮汐电站如下

表所示。

国家	站名	位置	最大潮差 (米)	装机容量 (千瓦)	台数	年发电量 (万度)	投入运行 (年份)
法国	朗斯	圣玛珞	13.5	240000	24	54400	1966
加拿大	安纳	芬迪湾	19.6	20000	1	5000	1983
		波利斯					
中国	江夏	浙江温岭	8.39	3200	5	1058	1980
中国	白沙口	山东乳山	4.8	900	6	232	1978

我国从 60 年代起在山东、江苏、浙江、福建、广东等省已修建 10 多座小型潮汐电站，为沿海农村、渔场提供电能。有人曾估计，著名的钱塘江大潮，如用来发电，其发电能力几乎等于三门峡水电站的 50%。由于如何充分利用潮汐能发电还有许多问题有待研究，1993 年国家自然科学基金委员会已将潮汐能的开发利用列为鼓励研究项目招标。我们相信，我国的潮汐能经过力学家与有关学科专家的努力一定会逐步得到充分利用，使古时诗人笔下描述的潮汐为社会主义建设提供更多的电能。

“势如破竹”纵横谈

胡宗一

人们写文章时总喜欢用“势如破竹”一词来形容所向披靡、节节胜利，而破竹之势则又烘托出一种长驱直入的无比威力。这里的“破”似有斩劈及里之意。《水浒全传》第九十九回就有此种描写：“……关胜等众，乘势长驱，势如破竹，又克了大谷县。”郭沫若同志在《北伐途次》篇中也曾写道：“我军以破竹之势进逼武昌……”，都使人如临其境，如闻破竹之声，读来声情并茂，确有欣快之感。

这种说法经流传下来是有些年代了。早在西晋初，有位深谙韬略的大将军杜预于公元 280 年奉命带领几路大军攻伐孙吴时，说过这样一番话：“昔乐毅（注：战国时燕将）藉济西一战，以并强齐，兵威已振，譬如破竹，数节之后皆迎刃而解，无复著手处也。”杜预的这一形象比喻经过添补、习用，遂有“势如破竹”这条成语问世，算来迄今也有 1700 多年了。我国历来多竹。竹是一种多年生禾本科常绿植物，杆部木质化，中空多节，盛产于我国长江流域及华南、西南一带。用途极广，生活中真还离不开它。不少南方人都有剖劈竹子的有趣经历：偌大青竹筒，利刃过处，节节响裂，钢刀长驱直入，毫无阻碍，施力式微，直贯到底。形容形势发展极其顺利、迅猛，曰势如破竹，可谓贴切矣。

竹子以其挺拔、高雅的素质，虚心而有骨有节的品格，不屈不挠、奋发向上的精神风貌不仅历来被人们所称道，且还是大自然赐予的一种天然复合材料哩。从材质看，它的主体由一种纵向贯通型长纤维组成，这些长纤维处于基质之中。长纤维之间的亲和力很小，与禾本科其他植物相类似，所不同的是竹子的纤维分外致密、坚韧，具有强大的纵向抗拉、抗压能力。但若钢刀从它的端部猛力切入（这个瞬间叫楔入），纵向纤维间便会裂出一道楔形口，断裂力学上称为张开型裂纹或 I 型裂纹，在裂纹的尖端附近形成了一个强应力场（应力是单位面积上的内力）。应力在此处高度集中，因而此类张开型裂纹的破坏性最大；加以竹子长纤维间的亲和力原本就小，楔裂处不但迅即破坏，且随着钢刀的不断切入，加载速度提高，强应力场随之向前扩展，竹纤维间微弱的亲和力难以抵御迅速前移、高度集中了的强应力，于是刀刃未及，竹子便自动开裂。看来顺着纤维方向着力劈削，对竹子来说无疑是认定了它的弱截面，才出现淋漓痛快的势如破竹现象。

出于“势如破竹”这条成语，人们似乎认为竹子耐力性差，只配做些竹篮竹筷之类的小东西了。殊不知换了一个方向，转它个 90 度，情况便会有天渊之别：如果钢刀从横向朝竹筒猛砍下去，刀子不是弹跳回来便是刃钝口缺，竹筒却是岿然不动的，至多略损些皮毛而已。这是因为

竹子具有优化“复合材料”的表层，通体包裹着一层极为坚硬、耐磨的青皮，俗称“蔑青”。同一根竹筒，破竹之势在此似乎再也不灵验了，就是足智多谋的杜预将军恐也不敢说是“皆迎刃而解”吧。竹子的横向抗劈削能力是可以和一些有色金属相媲美了。不言而喻，横向截面是竹子抗劈削的强截面。于是在民间，对付竹子便因纵横有异，纵向才用刀劈，而横向呢，只得借重钢锯利齿的慢功夫了，两者不能混淆。

从力学观点来推敲，“势如破竹”这条成语仿佛就应是势如破直竹才对呀！只是大家沿用久了，说到破竹，往往只想着纵向的，人们习惯于循着竹子纤维生长的方向来看问题，这大概也算是一种顺乎自然的心态吧。但若想利用竹子来制作构件，最起码也得了解这种材料纵、横向抵抗破坏的能力，即浅近的力学知识，这就是被意大利杰出的科学家伽里略（Galileo，1564~1642年）赞誉为“美丽而有用的科学”——材料力学所研究的课题，非常引人入胜。而伽里略一生对材料力学孜孜不倦的探索、钻研，使他也成了这门学科当之无愧的奠基人之一。

《材料力学》是一门研究构件的强度、刚度和稳定性的科学。为了计算方便起见，一般就先假定好材料的各个方向都具有相同的力学性能，这在力学上称为各向同性。工业上所用的锻钢、铸铁、紫铜、塑料等等许多人工材料与这一假定大致吻合。唯有竹子、木材等天然材料例外，而竹子的纵、横力学性能相差又过于悬殊，万不能也认为是“各向同性”了。果真有人难得糊涂若此，在工程上就要捅娄子了。

但也只要明白并顾及此点，竹子就能驯服地为人类服务，而不至于耐不得力的。我们用竹子做成杠棒、扁担、躺椅、竹床、精巧剔透的小竹楼乃至在小型混凝土预制件中替代钢筋的位置都是范例。只要略作分析，我们就不难发现在这些构件中，竹子所受到的要么是一种横向载荷或是一种纵向的集结力，这些都是竹子的“强项”，而决不去选定竹子的弱截面，着力形成劈削。这就避开了它的弱势，发挥了它的长处，因而是决无“势如破竹”之虞的。

经验和教训告诉了我们：竹子固有它自己的客观特性，使用时要切实扬长避短，方能物尽其用。俗话说得好，凡事宜“举一反三”，细细想来，物尽其用固然如此，而要做到地尽其利、人尽其才，又何尝不是如此呢。

伐木的学问

周道祥

断裂力学问题在日常生活中随处可见，如裁玻璃是先用玻璃刀在玻璃表面先划出一条裂纹而后造成断裂；售货员撕布也是先在布边剪一个小口（实际上是加工出一个短裂纹），然后再撕开，这些都是应用断裂力学方法最常见的例子。

冬天，人们皮肤干燥，弹性较差，常在皮肤表面张力较大处产生表面裂纹。司马迁在《史记》中写樊哙晋见楚霸王时说，哙“瞋目视项王，头发上指，目眦尽裂”。讲的也是裂纹受张力作用而扩展。读起来虽觉有些夸张，但从断裂力学的角度看决非妄言。

人们究竟何时开始利用断裂力学中的一些方法为人类服务的呢？最早恐怕可以从发明锯子的那一天算起了。

传说两千多年前鲁国有个叫公输班的木匠，后人又称他为鲁班。他奉命伐许多大树用来建造宫殿，仅凭斧头砍树进展缓慢。眼看限期将到，鲁班带领徒弟夜以继日地干仍难按期完成。一天鲁班的手指在无意间被路边的草叶划破了，经过一番思索之后，他发明出带有草叶边那样齿状的锯。使用锯子伐木速度大大加快了，保证了宫殿的工期。

鲁班作为木匠的师祖很受人尊重，这个故事还会世代留传。然而现代的考古工作者发现，早在鲁班之前两百多年的墓葬中就有锯子！由此看来人们用锯子开制裂纹伐木至少在 2700 多年以前就开始了。

用锯子伐木比用斧头砍效率要高得多，这可以用断裂力学理论解释。

伐木时先用锯子在靠近地面的地方把树锯出一条缝，也就是加工出一条裂纹来（图 1）。人们在有锯缝的一侧裂纹上方尽可能高而又便于施力的地方用力推树，这时裂纹受拉力作用，在断裂力学中是典型的所谓张开型（又称 I 型）裂纹问题。这时造成树断裂的原因主要是外力在裂纹尖端的应力强度因子 K_I 达到木头抗断裂的临界韧性值（描述材料抗断裂性能的物性值）后引起的。可见人们利用断裂力学方法为人类服务可追溯到 2700 年以前当不为过。实际上，现在实验室中测定材料断裂韧性 K_{IC} 所用的标准三点弯曲试样，其原理和伐木情况极其相似（图 2）。

断裂力学中的三点弯曲实验，实际上就是带裂纹的简支梁受集中力作用。由图 2 可知，三点弯曲的右半部可视为悬臂梁受端部的集中力作用，这也正是伐木中所伐树干的受力方式，两者内部材料受内力的函数图像（剪力图和弯矩图）完全相同。断裂力学给出了这种裂纹的应力强度因子 K_I 计算式（适用于矩形截面）

$$K_I = \frac{4P_s}{BW^{3/2}} Y(a/W)$$

式中 $Y(l/W)$ 是一个与 l/W 有关的函数，我国有关规范给出了它的具体表达式和数表。

根据断裂力学理论，我们还可以探讨一下如何伐木才能又快又省力。

许多人通过电视看到过北美伐木工人举行伐木比赛的镜头，那会使我们大受启发。胸径约 30 厘米的大树，一个工人只需几分钟便可以放倒。竞赛者先用锯子在树一侧锯出一条缝，缝深为树径的一半左右，然后用斧头在与锯缝相对的另一侧用力砍上四五斧，最后在裂纹侧的正上方用力一推，这棵树便轰然倒地。这套放树办法是他们在长期实践中摸索出来的，是非常科学的方法。

分析一下三点弯曲的应力强度因子 K_I 表达式可知，它适用于图 2(b) 的情况。裂纹即锯缝，锯缝不宜太深，否则树会倾斜卡锯。假设锯缝深度为树径 D 的 $1/2$ 。若在裂纹对面再用锯子锯出另一个裂缝能否更省力呢？可以设想一下，当工人推树之后，锯口截面就会发生转动，锯缝的最外边缘就会贴紧，就阻碍截面的进一步转动，新锯口便失去了作用，裂纹处抗弯的有效宽度仍然是 $D-a$ ；若用斧头砍四五下，比如说砍进树径的 $1/6$ 。由于刀口是斜的，所以裂纹处有效抗

弯截面宽度仅 $D/3$ ，相当于三点弯曲试样 $W = \frac{5}{6}D$ 。由于 W 的减小

而 l/W 从 0.5 增加到 0.6，这样一来 K_I 值可增加 50% 以上，或者说可省一半的力。

有了断裂力学的指导，会使我们今后伐木省力不少，效率会更高。另外，只要稍加注意，其他很多问题的解决也是可以从断裂力学中得到启发的。

混凝土的发展与力学

苏洪

人们最早利用混凝土只不过把它当作人造石材，并没有想到会有今天这样翻天覆地般的影响。今日的混凝土已经渗透到我们生活、生产的各个角落，从海港建筑到高山上的岗亭，从一般的平房到摩天大楼，从乡间小道到万人广场都能见到混凝土的足迹。那么，为什么混凝土能得到如此广泛的应用呢？

首先是混凝土找到了一个很好的伴侣——钢材。作为人造石材的混凝土与一般石材一样，虽有较好的耐压性能，但经不起受拉，除了其形状能容易地满足人们的要求外，它与石材相比并没有什么特殊的优点。但是它有一个重要的性质，那就是它的膨胀系数与钢材很接近，因此它可以与钢材紧密结合起来。两种材料要永远粘合在一起，关键是要求它们的膨胀系数一样，否则热胀冷缩，彼此胀缩不同就要脱离开来，而混凝土与钢材的结合是经得起长期考验的。另一方面混凝土善于受压，钢材善于受拉，两者结合起来作为梁来使用时正好能够发挥彼此的长处。因为在梁里总是有一侧受压另一侧受拉的。图 1 所示是所谓简支梁，即两头的支座均能允许梁端自由转动。它在受载过程中，要产生向下的弯曲变形，这必然使上边的材料缩短，下边的材料拉长，即总是上边受压下边受拉。进一步可以说：任何承受弯曲的构件总是一边受拉，一边受压。若把钢筋放在受拉一边，将混凝土放在受压一边，正好符合梁内的受力分布。用钢筋混凝土做 6~7 米长的梁，可以得到很好的经济效果。它不仅价格便宜而且耐久性好。

随着科学技术的发展，新的矛盾产生了，钢材的耐拉能力随着钢材性能的改进愈来愈高，可是它的弹性模量并没有增加，弹性模量是反映材料每单位伸长所需要的力。现在抗拉能力提高了，弹性模量没有增加，说明钢材在拉断时比以前伸的更长了。粘结在钢材旁边的混凝土本来就怕受拉，现在必然会裂得更加厉害而使构件无法正常使用。这就使能经拉的钢材，也就是高强钢材无法在钢筋混凝土构件中采用。为了克服这一弱点，人们设法先将钢筋拉紧，然后再在其四周浇筑混凝土，待混凝土凝固并与钢筋产生粘结力以后再放松拉紧了的钢筋。这时靠它们彼此间的粘结力使一部分预先拉紧钢筋的力量传到混凝土上，使在钢筋周围的混凝土受到预压力，而处在与钢筋相对一侧的混凝土受到预拉力，整个梁好像受到反方向的弯曲而拱起。这种现象称作反拱。反拱起来的梁、板在使用载荷下又重新弯回来。在相同的下垂变形条件下，经反拱的梁、板当然能承受更大的载荷，使其既不开裂也更不易破坏，这种被预先拉紧的钢筋做成的构件称作预应力混凝土构件。

人们并没有停留在一般预应力混凝土构件的水平上，经过进一步探索，发现钢筋预加应力后在构件内呈直线状态。因为只要拉紧了，它就绷直了。可是直线位置的钢筋并不是最合宜的位置，于是开始探索曲线配置预应力钢筋的方法。首先想到的是在混凝土中预留孔道，待混凝土硬化后再穿钢筋，然后再张拉钢筋，向孔道里浇注水泥浆，使钢筋与混凝土间产生粘结力，形成预应力构件，这种构件里的钢筋允许有小量的弯曲。它称作后张法预应力构件，以便区别于前面先张拉钢筋再浇注混凝土的先张法预应力构件。

小量的弯曲还不能满足人们的愿望，于是放弃了钢筋与混凝土粘结的要求，将高强度钢材用隔离剂与混凝土分割开，先将这种钢筋按要求的曲线形状放好后再浇混凝土，由于存在隔离剂，钢筋可以在其中自由抽动，当然也就可以张拉这种曲线配置的钢筋了。张拉好以后再靠锚固技术将钢筋在两端锚固在混凝土上，中间仍保持无粘结状态。可以想象，这种锚固技术要求相当牢靠。只要锚固牢靠，它同样起到了预加应力的效果，这就是无粘结预应力混凝土。因为钢筋可以在混凝土中自由抽动，它的设计计算方法与一般有粘结力的预应力混凝土构件不同。人们没有停止前进的步伐，又进一步将优化理论应用到预应力构件上来。他们发现，并不是钢筋预拉得越紧越好，而是有一个最优的拉紧程度。这样，当解决了精确控制钢筋张拉力的技术以后，人们研制出了所谓部分预应力混凝土构件，这种构件既能满足承载能力、变形与开裂程度的要求，又处于最经济合理的状态中。

混凝土技术随着生产而发展，离不开力学知识的深入应用。人们将从各个方面来开发混凝土的潜力，创造出理想的、合理的结构形式，而力学永远是混凝土技术发展的依据。

兵无常势，水无常形——漫谈流体与流动性

王振东

“夫兵形象水，水之形避高而趋下，兵之形避实而击虚。水因地而制流，兵因敌而制胜。故兵无常势，水无常形。能因敌变化而取胜谓之神。故五行无常胜，四时无常位；日有短长，月有死生。”这是《孙子兵法·虚实篇》的最后一段。

《孙子兵法》系孙武（约公元前 500 ~ 440 年）所著，此书总结了春秋（公元前 770 ~ 476 年）末期及以前的作战经验，揭示了战争的一些重要规律，奠定了古代中国军事科学的基础。《孙子兵法》传到国外，已有许多种语言的译本，被国际上推崇为最早的军事理论著作。

“兵无常势，水无常形”这段话的意思是：用兵作战如同水的流动，水流动的规律是避开高处而流向低处；用兵取胜要避开敌人坚实之处，而攻击其虚弱的地方。水因地势的高低而不断改变流向，用兵作战要根据敌情变化而决定其取胜的方针。所以用兵没有固定不变的原则，亦没有固定不变的形态（模式）。能够根据敌情的变化而取得胜利的，才可以称之用兵如神。用兵作战的原则，如同自然现象一样，五行（古人认为：金、木、水、火、土是五种物质）相生相克；四季（春、夏、秋、冬）依次交替，不可能哪一个季节在一年中常在；白天有短有长，月亮有明暗圆缺，永远处于变化之中。这段话以流体的流动等自然现象的变化生动地比喻并阐述了兵家之法。这是对流体属性认识和应用的很早的科学论述。

在常温常压下，物质可分为固体、液体和气体三种状态（在特殊情况下，还有等离子态和超固态）。近代物理学研究表明，任何物质都是由大量分子构成的，这些分子处于永不停息的随机热运动和相互碰撞之中，同时各分子间还有一种相互作用力。对固体，分子间相互作用力较强，无规则运动较弱，不易变形；对气体，分子间作用力较弱，无规则运动剧烈，易于变形和压缩；对液体，其特征介于固体与气体之中，易变形，不易压缩。气体与液体又合称为流体。从力学分析的角度通常认为，流体与固体的主要差别在于它们对于外力的抵抗能力是不同的。固体有能力抵抗一定大小的拉力、压力、剪切力。当外力作用在固体上时，固体将产生一定程度的相应变形。只要作用外力保持不变，固体的变形也就不会变化。因此当固体静止时，既有法应力，也有切应力。而流体在静止时不能承受切向应力，任何微小的剪切力的作用，都将使流体产生连续不断的变形。只有当此外力停止作用时，流体的变形才会停止。流体这种在外力作用下连续不断变形的宏观特性，通常称为流动性（或易流性）。

唐宋诗词的一些名家颇善于用流体的流动性来表达各种情感，写下了一些脍炙人口的精美绝句。如：

李白（701～762年）《金陵酒肆留别》诗：

“请君试问东流水，别意与之谁短长。”

《将进酒》诗：

“君不见黄河之水天上来，奔流到海不复回。君不见高堂明镜悲白发，朝如青丝暮成雪。”

李煜（937～978年）《虞美人》词：

“问君能有几多愁？恰似一江春水向东流。”

王安石（1021～1086年）《桂枝香·金陵怀古》词：

“六朝旧事随流水，但寒烟衰草凝绿。”

苏轼（1036～1101年）《念奴娇·赤壁怀古》词：

“大江东去，浪淘尽，千古风流人物。”

辛弃疾（1140～1207年）《南乡子·登京口北固亭有怀》词：

“千古兴亡多少事，悠悠，不尽长江滚滚流。”

在诗句中用流体的流动抒发情感的事，可以追溯到我国最早的诗歌总集——《诗经》。它是自西周末年到东周春秋中叶（公元前1100～600年）这500年间的抒情诗集，共有305首，约在公元前600年左右编集成册。现在我们来看其中用流体的流动性抒发情感的两首（左为原诗，右为白话译文）。《邶风·柏舟》：

泛彼柏舟，	泛荡着的柏木舟，
亦泛其流。	随着河水任飘流。
耿耿不寐，	焦虑不安难成眠，
如有隐忧。	痛苦忧伤拥心头。
微我无酒，	不是我家无美酒，
以敖以游。	遨游也不能消愁。

诗中以随河水飘流的柏舟，写出了主人公沉郁的心情。即使是美酒、遨游也不能排除自己的痛苦忧伤。邶（bēi）是周代诸侯国名，在今河南省汤阴县东南。

《邶风·泉水》：

毖彼泉水，	清泉水泛绿波，
亦流于淇。	涓涓流淌入淇河。
有怀于卫，	怀念卫国我故土，
靡日不思。	没有一天不惦记。
爰彼诸姬，	同来的姊妹多美好，
聊与之谋。	且和她们共商议。

诗中以泉水始出，涓涓地流淌入淇河，比喻出嫁他国的夫人不能回归卫国，却又没有一天不在思念卫国。无可奈何时，只有与同嫁来的女子谈昔日，念故旧，想亲人，思回归，含情不尽。

在自然科学的发展史上，有许多将其比拟流体流动进行研究的例子。爱因斯坦（A. Einstein）和英费尔德（L. Infeld）合著的《物理学的进化》一书中，就谈到了一些在物理学研究史上比拟流体流动进行研究的事例。如对热学的研究，一开始就是将其与水比较，比拟水从较高的水位流向较低的水位，认为热从较高的温度流向较低的温度，后来虽已将热看成能的形式之一，但这种热流的比拟仍在起作用。对电学和磁学的研究，早期也都曾比拟为电流体和磁流体来研究电磁现象，后来又用流场来比拟电场和磁场。在光学的研究上，有比拟质点运动的“粒子说”和比拟流体波动的“波动说”，后来“粒子说”演化为“量子说”，但“波动说”仍然存在。声速本身就定义为小扰动传播的速度，所以声学更是以比拟流体波动在研究发展。在天文学的研究上，有不少概念也是用比拟流体得来的，如将夜晚天空中由闪烁的星座组成的一条明亮的光带，比拟成“银河”。又如将银河系之外一种从正面看形状像旋涡，从侧面看形状像梭的星云，称为“旋涡星云”。将星际空间分布着的许多细小物体与尘粒，叫做“流星体”。

在人文社会科学中，也经常可以看到用比拟流体流动所引出的许多概念和术语。如将文学创作上的一种方法称为“意识流”；将人们工作单位或地方的改变，称为“人才流动”；将社会成员的社会地位或社会职业的改变，称为“社会流动”；将某产品的加工过程分成若干不同的工序按顺序进行，称为“流水作业”，这样的生产线亦称为“流水线”；将商品或资金的周转过程称为“流通过程”；将一件事的历史很悠久，称为历史“源远流长”；将时间过得很快，称为“年华似水流”或“似水流年”；将没有根据的话称为“流言蜚语”；将感情不自觉地表现出来称为感情的“流露”；将某一事物或事件在短时间集中出现比喻为潮水，如“学潮”、“民工潮”、“金融潮”等等。

还有一个很有趣的例子是莱特希尔（M. J. Lighthill）和惠瑟姆（G. B. Whitham）于1955年成功地将行驶的车流当作可压缩流体来处理。他们提出了一个流体力学的模型来研究一条很长的单行路上车辆的运动。于是在研究交通管理时，又出现了“交通流动”的概念和术语。

众所周知，现代自然科学正面临着深刻变化，非线性科学贯穿着数理科学、生命科学、空间科学和地球科学，成为当代科学研究最重要的前沿领域之一。而推动非线性科学发展的一些重要概念恰巧又来源于流体的流动。如孤立波是罗素（J. S. Russell）于1834年在爱丁堡格拉斯哥运河中观察到的一种他称作大传输波的现象。当时他骑在马背上追踪观察一个孤立的水波在浅水窄河道中的持续行进，这个水波长久地保

持着自己的形状和波速。这一奇妙现象的发现就是关于孤立波和现今关于孤生子研究的起始。混沌的研究尽管在数学上可以追溯到 Poincaré 栅栏和 Birkhoff 平面环扭转映射的吸引子（图 1），但促使混沌研究热起来的，却正好是流体湍流的研究。洛仑兹（E. N. Lorenz）于 1963 年在研究大气对流（Bénard 对流）现象时，从纳维-斯托克斯方程组出发，经过无量纲化并作傅里叶级数展开，截取头一二项，得到傅里叶系数满足的一组常微分方程，称为 Lorenz 方程。数值计算表明，Lorenz 方程的解在一定的参数范围内，当时间充分大时是一个混沌解。自 Lorenz 模型发表之后，对混沌的研究才热起来。

前面谈到流体与固体的主要区别在于会不会流动，而这种区分实际上并不绝对，当放大了时间尺度后，就可以看到固体亦在流动。沥青是固体，但很容易发现，在马路旁边堆放着的准备修路用的沥青，时间一长就会悄悄地“流动”，向四周伸展开去（图 2）。由于小草生长不快，可以慢慢将铺设简单又较薄的沥青面推开，在地上露出来（图 3）。瑞利（J. W. S. Rayleigh）对玻璃板作过一个实验：取一块长 35 厘米，宽 1.5 厘米，厚 3 毫米的玻璃板，在沿长度的两边支起来，板的正中放一 6 千克重物。从 1938 年 4 月 6 日到 1939 年 12 月 13 日，放置了一年零八个月后，将重物取下，测出玻璃板中部向下“流动”了 6×10^{-4} 毫米。这个实验表明，玻璃在相当长的时间后，也具有流体的性质。金属会有蠕变，也是一种流动。当观察地层断面时，我们可看到岩石有皱纹状的褶曲结构，这是岩石在流动的证据。在几亿年的地质年代里，岩层受着横向的力而流变成褶曲形状。在一些山谷里，冰川慢慢地向下流了几千年，古代冰川流动的痕迹还遗留在岩石的表面上。有人还测量计算过冰川的粘滞性，大约是混凝土的 100 万倍；而混凝土的粘滞性，大约是水的 100 亿倍。可见无论冰川是多么“粘”，多么难于流动，然而经过几千年、几万年，冰川终究是在慢慢地向下流动。当然还有一个使固体流动的因素是温度。温度升高后，也会促使固体更快地表现出流动性质。

流体与固体的关系还巧妙地在现代工业生产中表现出来。现代工业生产工艺的重要趋势之一是将固体形态的原材料采用粉碎、浸提、熔化、加水搅拌等办法使之流体化后，在流体运动的过程中进行反应、提炼、加工等，最后再经过冷却、干燥、浓缩、蒸发、挤入模具等形成固体形态的产品。如冶金、造纸、化纤、塑料、橡胶、化肥、制糖、制造巧克力等食品，制造许多化工产品等等无一不是这种思路，如图 4 所示，为一人造纤维生产的流程图。于是，其生产效率与质量，也就在很大程度上取决于对流体运动规律的认识、掌握和应用。

总之，人们在从流体流动及其规律中吸取各种各样的“营养”，去发展自然科学和人文社会科学，去发展生产，为人类造福。

流体介质阻力

冯立富 许宏林

大家知道，物体在空气、水等流体介质中运动时，将会受到这些介质的阻力作用，而这种作用对物体运动的影响究竟会达到什么程度，可能了解的人就不是很多了。

学过中学物理的都知道，抛射体在真空中的飞行轨迹是一条抛物线。假定弹丸的初速度为 850 米/秒，发射角为 43° ，则弹丸在真空中的飞行轨迹为图 1 中的虚线，此时射程 OA 约等于 73 千米。而当考虑空气阻力时，弹丸的飞行曲线为图 1 中的实线，射程 OB 只有约 8 千米，仅为理想射程的 $1/9$ ！

自由飞行物体在流体介质中遇到阻力的大小，与物体的形状、飞行速度、表面光滑程度及介质状况等因素有关。大量实验表明，当物体在空气中的飞行速度 $v < 0.2\text{m/s}$ 时，阻力 $R = rv$ ；当 $0.2\text{m/s} < v < 240\text{m/s}$ 时， $R = rv^2$ ；当 $240\text{m/s} < v < 450\text{m/s}$ 时， $R = rv^3$ 。其中比例系数 r 称为阻力系数，它反映了上述除物体速度以外的其他诸因素对介质阻力的影响。

将图 1 中考虑空气阻力时弹丸的飞行曲线放大，如图 2 所示。容易看出，当考虑空气阻力时，弹丸的落地角 大于发射角（在真空中落地角 等于发射角），而且落地角接近于 90° 。理论计算和实际观察都已证明，物体在空气中的运动经过一段时间后，将几乎铅垂向下匀速降落，并趋近于它的极限速度。所谓极限速度是，在介质阻力的上述影响因素已经确定的情况下，物体在介质中运动需经无限长的时间才能达到的速度。实际上，在物体开始运动后极短的时间内，它已基本接近了这一速度。

在许多工程实际问题中，如选矿、选种和清洁谷粒等常利用物体极限速度的不同，来把大小不同、比重相异的颗粒分离开来。

鸡蛋与跳伞

你看过跳伞表演吗？跳伞运动员自飞行器中跳出后，如果不张开伞，则阻力系数较小，极限速度一般可达到 $50 \sim 60$ 米/秒。这个速度相当大，以这个速度落地，任何人也承受不了。但如果张开伞，则阻力系数变大，极限速度一般不超过 $4 \sim 5$ 米/秒。这个速度仅相当于我们从 1 米多高的矮墙上跳下时按自由落体的速度公式计算所得到的落地速度。这对于普通健康的人来说，是没有危险的。

战争中对伞兵的要求不仅是能安全落地，而且在空中停留时间越短越好。为此伞兵在刚跳离飞行器后，可先不张伞，等降至一定高度后再

把伞张开。

你相信鸡蛋从四层楼上抛下来还能完好无损吗？广州市第七中学在1996年科技节中表演了一个项目，叫“鸡蛋碰地球”，同学们从教学楼四楼将鸡蛋随手一抛，使鸡蛋与地面来了一个轻盈的“接吻”，结果鸡蛋丝毫无损。他们除了用海绵、泡沫塑料等把鸡蛋包裹起来，以减轻落地时与地面的撞击，主要的还是在鸡蛋上系了一个大塑料袋充当降落伞，从而巧妙地利用了极限速度的概念，减小了鸡蛋落地时的速度。

远程大炮的奥秘

在发射远程炮弹时，为了减小空气阻力的影响，适当增大发射角是提高炮弹射程的有效办法。这个办法据说是在20世纪初由德国炮兵在一次炮击中意外地发现的，德国炮兵以很大的发射角发射大口径炮弹，本以为炮弹只能落在20千米远的地方，但谁知炮弹竟然落到40千米远的地方去了。这是因为炮弹被以较大的发射角高速度发射后，可以飞到数十千米外的高空大气层里。那里空气稀薄，阻力很小，炮弹在这样的介质里飞行了较长的时间，可以飞过较长的路程。德国人从这个观察结果出发，设计制造了从115千米外轰击法国首都巴黎的超远程大炮。这是世界上最早的远程大炮。在第一次世界大战时的1918年夏天，德国军队用这种火炮向巴黎发射了300多发炮弹。当时发射的炮弹长1米，直径21厘米，弹体重120千克，装有150千克火药，炮弹发射的初速度为2000米/秒，发射角为 52° ，弹道距地面的最大高度为40千米，飞行时间为3.5分钟，其中有2分钟是在空气稀薄的平流层（距地面高5至10千米的空称为对流层；对流层以上55公里以下的空称为平流层）中飞行的。

地球自转的影响

在上面介绍的问题中都认为地球是静止不动的。实际上，即使不考虑地心每年绕太阳一周的公转运动，地球也还有每昼夜绕地轴转一周的自转运动（自转角速度为 7.29×10^{-5} 弧度/秒）。当考虑地球自转的影响时，抛射体还将受到一种力（称为科氏惯性力）的作用，其飞行轨迹则不再是一条平面曲线，而是一条空间曲线了。所谓科氏惯性力，它是在考虑地球自转这样的非惯性坐标系中，应用牛顿第二定律时，必须附加在物体上的一项作用力，否则，物体的质量 m ，加速度与作用力 F 之间的关系式 $m \cdot a = F$ 不成立，它是法国工程师科里奥利（G. G. de Coriolis）在1832年研究水轮机时发现的。假如在北半球纬度为 45° 处，向正东方向以发射角 43° ，初速度850米/秒发射炮弹，当不考虑

地球自转的影响时，炮弹在真空中的飞行轨迹如图 3 中的虚线所示，落地点为 A；当考虑地球自转的影响时，炮弹在真空中飞行的轨迹如图 3 中的实线所示，落地点为 C。与不考虑地球自转时相比，炮弹在真空中飞行的落地点向东偏移的距离 y 为 337.5 米，向南偏移的距离 x 为 453.7 米。然而普通炮弹的爆炸威力范围只有几十米，因此地球自转对抛射体的影响是不能不引起足够重视的。

如果同时考虑空气的阻力时，不妨假设炮弹受到空气阻力的大小与炮弹速度的平方成比例，取阻力系数为 0.0046 千克 / 米，可以得出在不考虑地球的自转时，炮弹的飞行轨迹如图 4 中的虚线所示，落地点为 B，射程 OB 等于 8352.1 米；而当考虑地球的自转时，炮弹的飞行轨迹如图 4 中的实线所示，落地点为 D。则由于地球自转的影响，炮弹将向东偏离 (y) 2.0 米，向南偏离 (x) 15.7 米。

夜半钟声到客船——谈声音和波的传播

武际可

月落乌啼霜满天，江枫渔火对愁眠。

姑苏城外寒山寺，夜半钟声到客船。

这是唐朝人张继写的诗《枫桥夜泊》。张继是天宝十二年（公元753年）的进士，他作的诗传世的不多，在诗坛上也不算第一流的大家，但他的这首诗却入选在历朝历代的唐诗选中，成为脍炙人口的绝唱。

对于这首诗，历史上有不少人评论，都认为很美。宋朝欧阳修在他的《诗话》中却提出了一个问题，他说：“唐人有人云：半夜钟声到客船，说者亦云句则佳矣，其如三更不是打钟时。”欧阳修肯定了诗句之佳，然而三更是否打钟时，颇引起后人的一番议论。南宋初的王观国在《学林》中写道：“世疑半夜非钟声时，观国案，《南史》文学传丘仲孚，吴兴乌程人，少好学，读书常以中霄钟鸣为限。然则半夜钟固有之矣。”后来南宋叶梦得在他的《石林诗话》中说：“欧公尝病其半夜非打钟时，盖未尝至吴中。今吴中寺，实夜半打钟。”他们说明早在唐以前的南朝，晚在唐以后的南宋，苏州一带都有半夜打钟的习俗。欧阳修的指责，不过是少见多怪而已。

与此同时，人们还找出在唐诗中谈到半夜钟声的诗，张继而外，还大有人在。如比张继早的张说，就在《山夜闻钟》诗中有：“夜卧闻夜钟，夜静山更响。”于鹄的《送宫人入道归山》诗中有：“定知别后宫中伴，应听维山半夜钟。”白居易有：“新秋松影下，半夜钟声后。”温庭筠有：“悠然旅思频回首，无复松山半夜钟。”陈羽有：“隔水悠扬午夜钟。”

读着这许多诗句，我们可以想象，那悠扬的夜半钟声，可以从山上传到客船，可以隔河传到彼岸。更进一层，在皇甫冉的诗句里有：“秋水临水月，夜半隔山钟。”这使我们可以想象那悠扬的钟声甚至可以隔着一座山传过来。

唐诗中不仅有这么多的诗写到半夜钟、夜半钟、午夜钟，还有写到夜间的笛声、琴声。如于鹄有：“更深何处人吹笛，疑是孤吟寒水中。”白居易有：“江上何人夜吹笛？声声似忆故园春。”白居易还有一首著名的长诗《琵琶行》诗句开头几句用“秋索索”、“江浸月”交代了秋天和月夜的背景，然后说：“忽闻水上琵琶声”，再就是“寻声暗问弹者谁”，说明白居易同那位弹琵琶的人还是隔着一段距离的，所以需要“寻声暗问”，最后才得以“千呼万唤始出来，犹抱琵琶半遮面”，才有“同是天涯沦落人，相逢何必曾相识”的一段故事。在唐诗中很少有人写白昼、正午的钟声、笛声、琴声。这绝不是单纯为了追求优美的词

句而“递相沿袭”。宋代人说“恐必有说耳”，意思是说：这么多人写半夜钟声，怕自有它的道理。从张继的“枫桥夜泊”到现在已有1200多年了，在这段漫长岁月中，科学的发展证实张继等人的写法非常符合科学道理。在这许多诗句中，概括了一个科学事实：夜间的声音传得远。

夜间声音为什么会传得远呢？一种说法是：夜深人静了，背景噪音小了，人更易于分辨远处传来的声音。这当然是一个因素，但它不是最主要的原因，这得从声音是怎样地传播说起。

首先，声音是声源的振动扰动了空气，扰动以波的形式往外传。设想声源是地面上空的一个点，空气中的波是以它的密度不同往外传递，如果空气中各点的声速是相同的，由这个点传出的声波的波前是一个球面，声音传播的方向认为是和波前垂直的方向即半径的方向。现在设声音在大气中不同高度传播速度不同，这时波前就不再保持球面，而发生畸变；相应的，声音传播方向也不再是球半径的方向，而是拐了弯，这种声音传播道路拐弯的现象，也称为声折射现象。白天同夜间，声音传播远近不同，就是由这个折射现象产生的。

其次，在地面附近空气中，声速 c (m/s) 和温度 t () 的关系，可近似表为

$$c = (331.45 + 0.61t /) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

就是说在地面上温度每升高一度，声速增加约0.61米/秒。

我们人类活动在贴近地面的大气里，在高度20千米以下，大气的温度变化十分复杂。白天，由于地面接受太阳辐射温度升高，靠近地面大气层比稍高的气层温度高，也就是说近地声速大于高空。这时声音传播路径折向高空，在适当的地方还可以形成声静区，即对远处发出的什么声音都听不见（图1(a)）。这时，由于声传播路径折射向高空，如果坐在气球上便会听到格外清晰的气球下面地面的发声，坐在气球里的张继也许会来上一句“正午钟声到气球”。在夜间，靠近地面空气逐渐冷下来了，上空的气温相对高，结果高空声速比地面大，因而声音会向地面折射（图1(b)）。这就是夜间声音相对远的道理。在寒冷的天气，尤其在结了冰的湖面或未结冰的水面上，即使在白天，由于地面温度低，声音向地面折射的效果也十分明显。“月落乌啼霜满天”，在诗里张继写的是晚秋天气，不仅是夜半钟声，而且是晚秋天气的夜半钟声，不就格外清晰了吗？真可谓“秋声半夜真”（转引自钱钟书《谈艺录》）。可见唐代诗人观察得多么仔细。由于“秋”和“半夜”这双重的因素加在一起，皇甫冉的诗句：“秋水临水月，夜半隔山钟”就显得非常现实了，只有在这样的条件下，声音才能通过折射从山那边传过来。现在，住在闹市区的人大概都有这样的体验，对马路车辆行驶造成的讨厌的噪声，白天除了临街的楼房外，大多感受不到，而到深夜，即使只有一辆车驶过，也会搅得你睡不好觉，甚至隔几座楼还可以听到，可以说是“夜

半噪声扰眠床”吧，它和“夜半钟声到客船”是同样的道理。

用现代科学的方法研究声音，大约在张继《枫桥夜泊》诗后的 1000 年。那时，在欧洲有一种说法：“英国的听闻情况比意大利好。”1704 年，两位认真的人：一位是英国牧师 W·德勒，一位是意大利人阿韦朗尼，他们合作对两地的声音传播情况进行了实测，结果证实两国的声音传播情况差别不大。较早测量声速的是 1636 年法国人 M·梅森，而后于 1738 年，法国科学院测得了比较准确的声速。

谈到大气中声音的传播，我们应当提到清朝的康熙皇帝爱新觉罗·玄烨（1654~1722 年）。他是一位既聪明又博学的政治家。在他的随笔《几暇格物编》中，记载了一则他所做的关于枪声的实验，题目是“雷声不过百里”。他说：“朕以算法较之，雷声不能出百里。其算法：依黄钟准尺寸，定一秒之重线，或长或短，或重或轻，皆有一定之加减。先试之铕炮之属，烟起即响，其声益远益迟。得准比例，而后算雷炮之远近，即得矣。朕每测量，过百里虽有电而声不至，方知雷声之远近也。朕为河工，至天津驻蹕，芦沟桥八旗放炮，时值西北风，炮声似觉不远，大约将二百里。以此度之，大炮之响比雷尚远，无疑也。”从玄烨的话里，看出他做实验很精细。所说的“黄钟”是古时一个标准音阶，它的律管长九寸径九分，可以当作标准长度。至于定 1 秒之重线，很可能使用的单摆摆长周期为 1 秒。定好了量测时间的标准，后面的测量就不难进行了。他的实验，和大致在同时代法国科学院于 1738 年测声速的办法差不多。只不过玄烨没有提出声速的概念，而得到的是比例的概念，玄烨说的“得准比例”，便是现今单位时间内声波走的距离，也便是声速。可惜他未记下得到的比例是多大。

关于声的折射现象，到了 19 世纪，欧洲学者才定量地研究了温度梯度与声折射效应的关系。后来，人们逐渐认识到，要了解大气中声折射的复杂现象，就得要有一张声速沿高度变化的图。即声速作为距地面高度的函数关系。据现在人们的实测和理论计算，这个函数关系简略地可表为图 2。从图 2 我们可以解释许多大气中声音传播的有趣现象。我们看到从 B 点到地面数千米内，白天到晚上速度梯度相反。它可以解释地面声音晚上比白天传得远的原因，已如前面所说。

我们还看到，这条曲线拐了几个弯。注意声速局部极小处 C 点，在这个高程上发声，任何方向的声音都会折射弯向水平。因为从 C 点往上看，它的梯度正好和夜间地面上声速梯度一样，从 C 往下看，也是远离 C 的高度声速变大，所以无论怎样，声音都会弯向过 C 的水平线。就是说，这个高程，声音传得特别远，称为声道。而具有声速极大值的 D 点，则相反，当声音传播接近它时，有一部分会折射返回声波来的那一侧，犹如波的反射。

夏天打雷，总是在闪电之后。闪电只是一瞬间的事，也许不到千分

之一秒。可是一次闪电之后，往往雷声隆隆不绝，要持续好一段时间。这原因就是由于沿高度声音反射，有时来回若干次，就像在山谷中喊一嗓子听到的不断回声。事实上，夏天雷雨前，声速分布比图 2 要复杂得多。这时由于近地的风、云，声速分布不仅沿高度变化，沿水平也变化，会造成极复杂的声折射现象。

在第一次世界大战时，发现了一个奇怪现象。一门不断发射的大炮，当有人驱车从数百千米外的远方驶向它时，起初听到炮声隆隆，但驶得更近时，在一段路上却听不到炮声。原因是，起初听到的炮声是大气反射的波，更近些是静区，再靠近又听到从大炮直接传来的声波。

风对声音的传播是有影响的，声音的速度在顺风和逆风时不同。顺风时，是静止空气中声速 c 加上风速，而逆风时要减去风速。但是风速沿不同高度的分布是增加的，而且近似地按指数增加。高空风速大，贴近地面小，于是逆风时，高空声速小于地面声速；顺风时空声速大于地面声速，这样，在刮风时，顺风时声音的折射犹如夜间，而逆风声音折射犹如白天。这就是为什么在刮风时听人讲话，站在下风处听得格外清楚，也就是荀子在《劝学》中所说的：“顺风而呼，声非加疾也，而闻者彰”的道理。

前面谈到的玄烨所做的声速实验，的确很仔细，他甚至没有忽略他在天津听到芦沟桥炮声时刮的是西北风，可见他已经意识到风对声音传播会产生影响。他当时处于下风，所以听得较远。然而夏天打雷的时候，恰好天空温度较低，声音一般向天空折射，玄烨所以听不到超过百里以外的雷声，很可能他是处于声静区。听到声音与否，不仅同雷炮二者发声的能量有关，还同听者所处的地方和气象条件有关。设想玄烨听炮声是处于上风头，听到的炮声未必会比雷声距离远。所以还不能就一般地说：“大炮之响比雷尚远，无疑也。”

声在水中的传播也类似于在空气中的传播。二次大战中发现了海水深层存在声道，在那里声波可以传播数千千米。这个现象受到很大重视，因为用它可以监视敌方潜艇的动态，它至今还是水声学技术应用的重要课题。

声在固体中传播要复杂一些，但无非是折射反射现象。近代精密仪器可以测出在地球另一边发生的地震和核爆炸。依靠多点测量可以推算它的大小和准确位置。

利用人工爆炸，声在固体中传播的折射、反射，并收集这些讯号加以分析，还可以用于地质探矿。既然波的传播和速度有关，而速度又和介质的密度有关，所以收集各个方向传来的声波可以从中分析出介质的密度。这种技术的应用称为声全息。

要深入了解这些技术的细节，在力学学科中有一个研究方向，称为分层介质或不均匀介质中的波和波动问题的反问题。声音是一种波，光

也是一种波，在不均匀介质中，光波也会折射，它们都是同一个道理。

“海市蜃楼”现象就是光折射造成的。

“夜半钟声到客船”是 1200 多年前的诗句，诗句概括的科学事实不断为后来的科学发展所证实。人类对自然的认识逐渐进步着，我们沐浴在科学发展的薰风化日之中。当我们反复吟诵这优美的诗句时，又怎能不叹服这诗句的语言美和科学美的完整结合。千年来日益发展的科学技术，不正是对这诗句作更为精细详尽的注解吗？

奇妙的爆炸聚能

言志信

细心的人会注意到雷管的尾部有一凹穴，这并非人们故弄玄虚，而是因为有了它，雷管的引爆能力将大大提高。

那么，小小凹穴为何能提高雷管引爆能呢？为弄清其中的缘故，我们来做一实验。实验用的炸药柱均由黑索金和梯恩梯按各占 50% 的比例铸成，直径 30 毫米，高 50 毫米，但药柱底部形状不同，如图 1 所示，A 为平底，B 底部有一圆锥形凹穴，C 和 D 底部还在凹穴中加了一个圆锥形铜罩；药柱下均为中碳钢板，这些药柱被引爆后，对钢板产生的作用效果有显著差别，实验数据列于表 1。实验显示，凹穴（通常

表 1 不同药柱对钢板的作用效果（单位：mm）

试验号	药柱	药柱底与靶距离	穿孔深度
A	圆柱，平底	0	浅坑
B	圆柱，下有锥孔	0	6 ~ 7
C	圆柱，下锥孔且有聚能罩	0	80
D	圆柱，下锥孔且有聚能罩	70	110

为锥孔）改变了爆炸能量在空间的分布，大大增强了锥孔方向的破坏效果。因此人们将这种底部带凹穴的装药称之为聚能装药，其爆炸为聚能爆炸；凹穴叫聚能穴，聚能穴装上铜罩其聚能效果特别显著，聚能穴方向的作用效果为其他方向的几倍至十几倍，因此人们称这种罩为聚能罩。其实，早在 19 世纪人们就已发现了这一现象，不过直到 1923 至 1926 年人们才对此有所研究，而 1935 至 1950 年因二次世界大战，极大地加速了研究的过程，1941 年拍摄到了这种装药爆炸时的闪光 X 射线照片，揭示了能量汇聚过程。尔后制造出给敌人致命打击的穿甲弹、火箭弹、反坦克手雷等穿透力很强的武器。

聚能爆炸是怎样汇聚能量的呢？如图 1 中 A 所示，圆柱形药柱引爆后，爆轰产物（炸药以最大稳定速度化学反应时，反应终了瞬间的产物），沿近似垂直于原药柱表面的方向向四周飞散，作用于钢板部分的仅仅是药柱端部的爆轰产物，作用面积等于药柱端部面积；图 1 中 B 与之不同，当爆轰波（在炸药中传播，压力突然跃升并伴随化学反应的压缩波）前进到锥体部分，其爆轰产物则沿锥孔内表面垂直方向飞出，由于飞出速度大小相等，方向与药柱形状轴对称，爆轰产物汇聚于轴线，形成一股速度和压力以及能量密度（单位体积的能量）都很高的气流，人们称之为聚能流，聚能流集中作用在靶板较小面积上，因而在钢板上形成较深的孔。但是爆轰产物的压力本来就很高，在轴线汇聚时，压力进一步提高，这种高压迫使爆轰产物向四周低压区膨胀，使能量分散，从另一

方面限制了对钢板的穿孔深度。

为了克服膨胀而使能量分散的弊端，在药柱锥孔表面加一个铜罩，如图 1 中 C 所示，那么爆轰产物在推动罩壁向轴线运动过程中，将能量传递给铜罩，由于铜的可压缩性（压强增大体积减小的性质）很小，因此，内能增加很少，能量的极大部分为动能，这样避免了高压膨胀引起的内能分散。同时罩壁在轴线汇聚碰撞时，使能量密度进一步提高，形成能量密度很高的金属射流，射流头部速度达到 7~8 千米/秒，甚至 10 千米/秒；沿射流头部往后，速度逐渐降低，尾部速度最低，射流头部的能量密度可达爆轰波能量密度的 14.4 倍，可见铜罩的聚能作用是非常显著的。金属射流和爆轰产物聚能流的聚能过程都需要一定距离来延伸。一方面随着距离延伸射流拉长，从而提高穿孔深度；另一方面，随距离延伸，射流径向分散和摆动，甚至断裂，使穿孔深度降低，因此当靶板在药柱底部外某点，这点既不离药柱太近，也不离得太远时，攻击最为有效。这就是图 1 中 D 比 C 对靶板穿透更深的原因了。这有点类似光学凸透镜的焦距和焦点的关系。

以上说明，聚能装药的神奇威力在于能量的调整和汇聚，而总能量并没有改变，就是说总能量是守恒的。

此外还可看到，聚能罩对聚能效果起关键性作用。通过合理设计，人们已能用聚能爆炸穿透 0.6 米厚的钢板。聚能罩大多为锥形，也可为半球形和喇叭形或线形。

聚能爆炸广泛用于鱼雷、导弹、火箭弹等广泛的军事领域，用以摧毁敌坦克、装甲、仓库、混凝土防御工事和机动车辆，以及对付飞机和宇宙飞船。已知最大的聚能装药之一是法国的 MISTEL，装药重为 1724 千克。

现今，聚能爆炸在民用方面已获得广泛应用，其中根据聚能原理的石油射孔弹在石油开采中扮演着重要角色，一口耗资几十万至上百万元的油井，最后能否正常出油就取决于射孔作用。石油射孔弹聚能罩的锥面顶角为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，角度越小，穿透能力越强，但孔径很小，锥角太大，则穿孔深度不够，石油难以流出。此外壁厚、壁锥度等都影响穿孔性能，例如，壁太厚则穿孔能力降低并产生一种堵孔的射流棒；壁太薄，射流质量下降，穿孔能力低。为了提高射孔质量，80 年代我国科学工作者根据我国油井实际，大胆创新，试用内层为冲压铜罩，而外层为金属粉末罩的复合聚能罩装药，取得了良好射孔效果，因为这种聚能罩内层能形成优质射流，外层使形成的堵孔射流分散，从而达到高穿深不堵孔的目的。

线型聚能罩横断面为 V 形，装药引爆后产生的带状金属射流如快刀一般，可用来切割钢板、钢梁、钢管，其速度是其他方法不可相比拟的，并能在水下进行，如在“佛山号”沉船打捞和“渤海二号”钻井平台的

水下切割中都显示了其独特优点。

用于平炉穿孔出钢的喷射式穿孔器也是根据聚能原理制成的，既安全可靠，又省工省时。

此外，这一原理还广泛用于伐木；用于冰上打眼，其效率远高于机械钻眼；用于混凝土破碎以及采矿和焊接中；用于提高起爆能力。本文开头提到的雷管上的小锥孔就是用来提高雷管引爆能力的。

炮弹果真沿 45° 方向发射最远吗？

刘又文

在中学物理中，我们已经知道，在地面上发射的炮弹，沿抛物线轨迹运动，当发射角为 45° 时，其水平射程最远。然而，这个结论是在不计地形变化和炮身运动，忽略空气阻力，并假设炮弹运行中所受引力不变的条件下推导出来的，而实际情形却决非如此。下面我们分别谈谈上述因素对炮弹运动轨迹和射程的影响。

高地放炮改变轨道

在高度为 h 的山头向平地放炮，设炮弹初速度为 V_0 ，落地速度为 V_t ，则有 $V_0 + gt = V_t$ ，式中 g 为重力加速度，其矢量三角形如图 1 所示；由能量守恒，有 $V_t^2 = V_0^2 + 2gh$ 。可见，当 V_0 和 h 一定时， V_t 的大小也一定，要使炮弹落在地上的射程 x 最大，只要

$$\frac{g}{2} = \frac{1}{2}(gt) \cdot (V_0 \cos \beta)$$

取最大，即图 1 所示三角形面积最大；三角形中，因边长 V_0 ， V_t 一定，必有 $V_0 \perp V_t$ ，故当炮弹发射角 β 满足

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V_0}{V_t} = \frac{V_0}{\sqrt{V_0^2 + 2gh}} \quad (1)$$

时，炮弹从 h 高处发射落到地上的射程 x 为最大。显然，

从高山放炮获得最大水平射程的发射角小于 45°。我们不难求出这个水平最大射程。如果炮弹落在高为 h_1 的山坡上，求最大射程的问题就可类似进行分析。不过倾角的大小随 h_1 的大小而变化。

炮身反冲 影响射程

炮车发射炮弹时，由于炮身的反冲速度，使炮弹射出时相对地面的仰角大于炮筒的倾角。设炮车质量为 M ，炮弹质量为 m ，炮筒与水平面的倾角为 α ，若已知炮弹相对地面的膛口速率为 V_0 ，试求 α 为多大时，其水平射程最大。这时炮身的反冲速度 u 不可忽视，即 $V_0 = u + V_r$ ，如图 2 所示， V_r 为炮弹相对于炮身的速度。由上式有

$$\left. \begin{aligned} V_0 \sin \beta &= V_r \sin \alpha \\ V_0 \cos \beta &= V_r \cos \alpha - u \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

若不考虑炮身与地面的摩擦力，则由水平向动量守恒有

$$Mu = mV_0 \cos \beta \quad (3)$$

再由 (2)，(3) 式可得

$$\tan \theta = \left(1 + \frac{m}{M}\right) \tan \alpha \quad (4)$$

将 (4) 代入 (1) 式得

$$\tan \theta = \frac{M}{M+m} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{V_0^2 + 2gh}} \quad (5)$$

时，炮弹从 h 高处发射水平射程最大，可见考虑炮身反冲，平地放炮时炮筒倾角 θ 应小于 45° ，高山放炮时 θ 倾角应更小一些。

空气阻力 缩短射程

以上讨论都是在不计空气阻力的理想前提下进行的，实际上炮弹在稠密的大气中运行时，受到与速度方向相反的阻力作用。由于这个阻力大小随速度而变，其运动轨迹只能由求解微分方程得到。如图 3 所示，虚线为不计空气阻力的理想运动轨迹，实线为同样初速的实际运动轨迹。算例表明，以 610 千米 / 秒速度射出的炮弹，在不计空气阻力的空间会画出一条高 9.6 千米的巨大弧线，射程可达 39 千米，而实际炮弹在空气阻力下只飞行了 4 千米，其射程缩短 10 倍之多。

殊不知环绕地球的大气层，由里向外是逐渐稀薄的，远程大炮的发射角一般在 $50^\circ \sim 70^\circ$ 范围内变化。这是因为如此发射的炮弹，可达到离地 40 ~ 50 千米的高度。在这个高度上，空气十分稀薄，阻力很小，炮弹在大气圈中飞越 130 ~ 160 千米的距离。如果炮弹仍以 45° 倾角发射飞行轨迹全在较稠密的大气中，阻力很大，就只能达到约 10 千米的射程了。

引力向心 抛物失真

我们知道，炮弹运行中抛物线轨迹是在诸多假设下推导出来的，其中之一是炮弹在整个运动过程中所受重力均沿同一垂直向下方向的常力。实际上，炮弹飞行时所受引力恒指向地球中心，运行中在各个位置所受的引力方向不同，因而炮弹飞行的轨迹就是以地球中心为其一个焦点的椭圆曲线。又因常规炮弹的运行速度较小，其椭圆轨迹的离心率接近于 1，椭圆高度平化，通常近似视为抛物线。

万有引力和人造卫星

牛光志 刘华

1642年是物理学史上值得纪念的年份。这一年的元月8日，“近代科学之父”意大利物理学家伽利略与世长辞，但就在这一年的圣诞节，经典力学的创造者牛顿诞生了。

牛顿的成就可以说是集前人之大成，他在开普勒、伽利略、惠更斯等人的工作基础上，将表面看来“互不联系”的力学知识，用数学方法把它们统一起来，揭示了物体运动的基本规律从而建立了经典力学。他的一生有很多伟大发现，万有引力定律就是他最伟大的发现之一。

大约是在1665~1667年间，有一天，牛顿坐在苹果树下思考地球的引力问题，突然一个苹果从树上落下，激起牛顿思潮翻滚。他想：苹果在空间，哪一个方向都可以飞去，为什么偏偏要坠向地面？地球和苹果是互相吸引的？行星绕恒星运转，也是互相吸引的？苹果落向地面的力和使行星保持在它的轨道上的力是否有关呢？

牛顿经过长期观察研究，产生了如下的假想：太阳、行星以及离我们很远的恒星，不管彼此相距多远，都是互相吸引着的，其引力随距离的增大而减小，地球和其他行星绕太阳运转，就是靠太阳的引力维持。同样，地球不仅吸引地面上和表面附近的物体，而且也可以吸引很远的物体（例如月亮），其引力也是随着距离的增大而减弱。他在手稿中曾写到“就在这一年，我开始想到把重力引伸到月球的轨道上，……于是我把推动月球在轨道上运行的力和地面上的重力加以比较，发现它们差不多密合。”牛顿进一步猜想，宇宙同任何物体间都存在吸引力，这些力具有相同的本质，遵循同样的力学规律，其大小都与两者之间距离的平方成反比。

牛顿凭着他对于数学和物理的惊人才华。结合开普勒行星运动定律，从理论上推导出太阳对行星的引力 F 与两者距离 r 的平方成反比，还证明引力跟太阳质量 M 和行星质量 m 的乘积成正比，即

$$F \propto \frac{Mm}{r^2}$$

牛顿又研究卫星绕行星的运动，结论是它们之间的引力也是与行星和卫星质量的乘积成正比，与两者距离的平方成反比。

以上结论是否正确，还需要经过实验检验。牛顿根据当时观测到的地球和月球的有关数据，凭借理想实验巧妙地解决了这一难题。

首先牛顿根据月球绕地球运转的周期和轨道半径，从运动学的角度计算出了月球轨道的向心加速度

$$= \omega^2 r_{\text{月地}} = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot r_{\text{月地}} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

式中， ω 为月球绕地球转动的角速度； T 为月球绕地球转动的周期， $T=2.36 \times 10^6\text{s}$ ； $r_{\text{月地}}$ 为月球与地球的球心距离， $r_{\text{月地}}=3.18 \times 10^8\text{m}$ 。

然后，牛顿设想，如果把一个物体放到月球轨道上，让它绕地球运动，地球对它的吸引力就减小到 F ，它运动的加速度减小到 a 。既然物体在地面受到的重力 G 和在月球轨道上运行时受到的力 F 都是来自地球的吸引力，那么在月球轨道上的加速度 a 和地面上的重力加速度 g 就应有如下的关系式：

$$\frac{a}{g} = \frac{F}{G} = \frac{r_{\text{地球}}^2}{r_{\text{月地}}^2} = \left(\frac{1}{60}\right)^2$$

进而从动力学的角度计算出月球轨道的向心加速度

$$a = \frac{1}{3600} \times 9.8\text{m/s}^2 = 2.7 \times 10^{-3}\text{m/s}^2$$

由上可见，两者的计算结果惊人的一致。于是牛顿证实了他的关于地球和物体间，各天体之间的吸引力都属于同一性质的力，都遵从同样的力学规律的猜想是正确的。他把这种引力规律做了合理的推广，称为万有引力，并在 1687 年正式发表了万有引力定律。

万有引力定律的发现，是人类在认识自然规律方面取得的一个重大成果，它揭示了自然界物体间普遍存在的一种基本相互作用——引力作用的规律。它创立了将天体运动和地面上物体的运动统一起来的理论，对以后的物理学和天文学的发展有很大的影响。

我们知道，在地面上一定高度以初速度 V 向水平方向抛射出的物体，在重力的作用下将沿着抛物线轨道落到地平面上。且初速度越大，射程就越远。人们普遍认为不论初速度多大，物体总会落到地面上来。在上面的分析中我们总是把地球表面看成一个理想的平面，重力的大小和方向都是不变的。在初速度比较小，物体的射程不大时，这样处理是可以的。但地球实际上是一个球体，如果物体的初速度比较大，射程比较远，上述处理就不准确了，这是因为当抛出的物体沿曲线轨道下落时，地面也沿着球面向下弯曲，重力的方向也跟着改变了。牛顿在研究天空中卫星的运动和地面附近的落体运动的关系时，讨论过这个问题。图 1 是在他的著作里画出一幅原理图。图中表示出从高山上用不同的水平速度抛出的物体轨迹，物体的速度越大，落地点离山脚越远。当速度足够大时，物体将环绕地球运动，成为一个人造地球卫星。

要成功地发射一颗人造卫星，关键问题是使卫星获得一个适当的速度，使卫星以这个速度环绕地球运动时所需要的向心力，恰好等于地球对卫星的引力，这个速度叫做环绕速度，也叫第一宇宙速度，理论计算得出这个速度的数值为 7.9 千米/秒。

从 1687 年牛顿在他的重要著作《自然哲学的数学原理》中指出发射人造卫星的可能性，到 1957 年人类成功地发射第一颗人造地球卫星，经

过了 270 年的漫长岁月。主要原因，就是要解决一系列极其复杂的技术问题，要有高度完善和威力强大的火箭，高度精密的控制系统，优良的火箭发动机和其他制动装置。

将卫星发射到几十万米的预定高度，然后让它绕着地球运转，通常是采用三级火箭发射来完成的（图 2）。第一级火箭开始是垂直上升的，当冲出稠密的大气层后，自动控制装置便控制火箭，一面加速，一面逐渐改变方向，第一级火箭燃料耗尽后，火箭空壳自动脱落。与此同时，第二级火箭发动，使火箭继续加速并偏离垂直方向。第二级火箭外壳脱落后，第三级火箭发动，使卫星达到预定高度并获得水平环绕速度，将卫星发射出去。

卫星的轨道通常不是圆周而是椭圆的。在大约 500 千米的高度，绕着地球的圆周轨道运转的卫星，要有大约 7.6 千米 / 秒的水平初速度。如果增加这个水平初速度，轨道就变为椭圆。如果水平初速度进一步增加到 11.2 千米 / 秒，它就不再围绕地球运动，而是脱离地球的引力围绕太阳运动，成为人造行星，或飞到太阳系其他行星上去。这个脱离地球引力的最低速度叫做脱离速度，也叫第二宇宙速度。

进行星际航行的探测器或宇宙飞船，都必须达到第二宇宙速度。1974 年发射的“先锋号”探测器曾访问木星，1977 年发射的“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”探测器，其速度都已达到并超过了这个速度。

如果卫星的速度进一步增加到 16.7 千米 / 秒，它不但脱离地球引力的束缚，而且能够脱离太阳引力的束缚，飞到太阳系以外的宇宙空间去，这个速度叫逃逸速度，也叫做第三宇宙速度。一个卫星可以遵循三种不同飞行轨迹中的一种，这取决于射进轨道的发射速度，当卫星的速度大于 7.9 千米 / 秒而又小于 11.2 千米 / 秒时，它将沿椭圆轨道运行；当卫星的速度大于 11.2 千米 / 秒而小于 16.7 千米 / 秒时，它将沿抛物线轨道离开地球；当卫星的速度大于 16.7 千米 / 秒时，它将沿双曲线轨道离开太阳系（图 3）。

自 1957 年 4 月 10 日前苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星后，人类开始了探索太空世界的新时代。我国于 1970 年 4 月 24 日成功地发射了第一颗人造地球卫星，是世界上掌握卫星技术的少数几个国家之一。我国发射的人造地球卫星主要用于科学实验、资源勘测、通讯、气象观测等方面。

人造地球卫星的运行轨道一般有三种：赤道轨道、极地轨道和其他轨道（图 4）。赤道轨道就是卫星轨道在赤道平面内；赤道上的卫星能观察到地球的范围，即覆盖区域有限，但是能对同一地区进行连续观测。极地轨道就是轨道通过地球两极的上方，与赤道平面垂直；极地轨道上的卫星对地球的覆盖区域大，但是一天只能对同一地区观测两次。

现在简单谈一下通讯卫星和气象观测卫星。通讯卫星相当于在太空

中的微波中继站，通过它转发或反射无线电信号。通讯卫星的轨道一般都采用“地球静止轨道”，也称“地球同步轨道”，即卫星转动的周期与地球自转的周期相同，相对于地球是静止的。地球静止轨道属于赤道轨道中的一种。同步卫星距地面高，覆盖区域大，一颗同步通讯卫星覆盖区域约为地球表面的三分之一，如果在同步轨道上等间距地放 3 颗通讯卫星，就能实现全球通讯（图 5）。我国自 1984 年 4 月 8 日发射了第一颗实验通讯卫星，至今已为国内和国外发射了多颗静止轨道通讯卫星。

气象观测卫星的轨道一般有两种，一种是“太阳同步轨道”（近极地圆形轨道）；另一种是“地球静止轨道”，这两种气

象卫星可以互相补充。我国于 1988 年和 1990 年成功地发射了两颗“风云 1 号”气象卫星，卫星采用太阳同步轨道，它拍摄的云图照片有很高的分辨率，对气象预报、环境和灾害监测有重要作用。

从土豆的内伤谈起——漫谈接触问题

武际可

家庭主妇们经常抱怨：好端端的土豆，一削皮就露出里边褐黑色的一块块坏斑，待到把这些坏区全削去，一颗土豆便所剩甚小。唉！真可惜。奇怪的是，买土豆时任你怎么挑选，也总是避免不了有坏斑。这种倒霉的“内伤”在苹果、梨等水果中也时有遇到。

心细的学过力学的人，不难回答这个问题。原来毛病出在包装运输中。在装车运输土豆时人们总想装得多以提高效率，殊不知装车时的碰撞却给土豆造成许多内伤。装得厚了，压在底层的土豆可就倒了大霉，给压坏了。苹果、梨等水果运输时多用箱子或篓子，每只箱篓的高度较小，所以压坏的要少些，但要是车辆驶过颠簸不平的路面，由于振动加大了压力，处在箱底的水果还是难免遭殃。

主妇们又要问了，压坏的土豆，裂的、破的，一眼就能看出来，可又怎样解释表面上是好的内部却受伤的现象呢？土豆和水果的“内伤”问题正好是一个典型的接触问题。假定相互接触的土豆是两个半径为 R 的弹性球，两个球之间作用压力为 P 。这时，接触处由于球的变形已不再是一点，而是一个半径为 a 的圆。根据接触问题的理论分析可以算出

$$a = a\sqrt[3]{PR}$$

在球体内最大剪应力

$$T_{\max} = \sqrt[3]{P/R^2}$$

而最大剪应力不在接触面上却在距接触面为

$$z=ra \quad (r \approx 0.47)$$

处，上述各式中 r ， a ， k 都是常数。

土豆和水果等许多材料都可以近似看为在最大剪应力超过一定限度就产生破坏的材料。

上述公式表明最大剪应力不发生在表面而在深层。而且土豆的半径和相互间压力愈大，深度也愈大。实际接触物体形状虽然各式各样，但上述基本规律则是共同的，这就是为什么土豆外表完好而内伤累累的原因。土豆装运只要超过一定高度，总有一大层土豆难逃这种厄运，每年由此而扔掉的土豆和水果以千吨计，所以改善包装和运输条件才是拯救这批土豆的根本办法。学一点接触问题是很有必要的。

在日常生活中我们经常遇到与接触问题有关的现象。

《三国演义》上有一回说到张翼德用柳条鞭笞督邮，可以想象那贪脏枉法的督邮被打得皮开肉绽。在《水浒》中，我们又看到梁山好汉落在敌人之手，不免要挨杀威棒。三国时候的张飞毕竟是直性子，打人只用柳条，柳条的直径一般较小，所以引起督邮的伤也不过皮肉之苦而已。

宋朝的衙役们可比张飞狡猾多了，棍棒直径自比柳条大了许多倍，受棒者伤在深层，甚至伤筋断骨，而皮肤表面却完好无损。到了法西斯的监狱里，发明了一种用橡皮包着钢丝的刑具，外观柔软，半径又比较大，抽在人身上似不伤筋动骨，外表又看不出异样，但遭受到的内伤却是痛彻骨髓的，这恐怕是反动统治者挖空心思利用科学成果的巧思吧。

擀面，为了把面擀干，必须将面的深部破坏或者发生永久性变形，面才能擀开。面块大就要用粗的擀面杖，而擀饺子皮就必须用细擀面杖了。这个道理用在压路机上，你大概注意到压路机的滚子有近一米多直径吧，这就是希望它把路面的深层压得结实。当然，除了半径大外，压路机还要重，因为压力 P 大了深部的应力也愈大。

在工程技术中，接触问题的应用十分普遍。主要是如下三大类问题：第一类是接触应力造成表面或深层的破裂会引起机器或工程破坏的事故，如轴承、齿轮、滚珠等表面剥落，这时应用接触问题的理论目的是为了减少这种破裂以避免事故；第二类利用接触应力进行加工，如轧钢机的轧滚、压力加工的冲头与模具的设计，都要利用接触问题理论结果使被加工物件易于变形而加工工具却十分耐用；第三类问题是碰撞问题，车船飞机和空中的飞鸟相撞会引起严重的结构破坏而造成空难。

正由于接触问题广泛存在于工程技术，所以它一直受到工程师与力学家们的注意与深入研究。

历史上最早研究并获得重要进展的是德国人 Hertz 在 1881 年取得的。他假定两个弹性体在接触点邻近为两个二次曲面，在外部正压力作用下接触面为椭圆。椭圆的形状、接触面的压力分布，以及物体内应力分布都可以表为解析表达式。这个问题称为弹性力学的 Hertz 问题。我们前面说的两个球接触问题就是它的特殊情形。

其实，近代提出的接触问题更加复杂得多，各种不同形状的物体和结构相接触，考虑物体的弹塑性、蠕变及各种物理因素的变化，考虑接触面间的摩擦力和滑动，考虑物体惯性的碰撞接触问题等等不一而足。

接触问题经过一百多年的研究，已经能近似解决许多实际问题了，但它仍然存在许多十分困难的问题尚待解决，对于比较复杂的问题人们往往利用大型计算机去求数值解。即使如此，由于计算量很大，仍然没法很好地解决。举例说，一个均匀的弹性球，从某一高度在重力作用下落到均匀弹性半空间上，它的弹跳高度如何？这个问题看来是非常简单而又干净的，但请试解一解，它仍然是力学界的难题。更不要说十分复杂结构的碰撞接触问题了。

接触问题之所以困难，是由于它实质上是一类非线性问题。我们知道经典弹性力学大部分是线性的，线性弹性问题的提法是在给定边界上，应力或位移为已知的条件下求解一组弹性力学线性方程。而在接触问题中，接触边界的应力位移是待求的，而边界上的位移和应力以及边

界本身又依赖于物体内部的应力与位移。这种困难问题，随着工程技术的发展不断提出新的挑战，迫使人们去进行更深入的研究，它构成了弹性力学、结构力学和计算固体力学各个分支学科交叉研究的热点课题，同时还吸引了不少数学家的注意。

澄清重量概念准确选用单位

王家石

重量，无论在物理学，还是在工程技术，甚至在日常用语上，都是经常使用的一个名称。在关于力学的量和单位的国家标准（GB3102.3-93）中给出的定义是：“物体在特定参考系中的重量为使该物体在此参考系中获得其加速度等于当地自由落体加速度的力。”其单位当然也是力的单位牛顿（N）。“重量”一词在概念上容易与另外两个常用的量——重力和质量——混淆。当然相应也带来了单位使用上的混乱。有必要予以澄清。

重力的概念在物理学上是指地球对物体的引力，其方向指向地心，大小为物体的质量与其所在位置的重力加速度之积， $G = mg$ 。它的单位当然也与力的单位相同，是牛顿（N）。重力与重量的不同之处，在于给定的参考系不同。重力的参考系就是地球，所以它只与地球的引力有关。而重量的概念则还与由于地球自转引起的物体所在地的离心力有关。下面举例说明它们的不同。

一质量为 m 的物体在地表上的某一点。此物体所受的重力的大小为 $G = mg$ （ g ：当地的重力加速度），方向指向地心。此外地球还绕地轴 NS 自转。因此，该处的物体对于地轴 NS 有离心力存在，其方向垂直于地轴 NS，大小为 $F = mr^2$ （ r ：体到地轴 NS 的垂直距离； ω ：地球的自转角速度）。质量为 m 的物体，在此处的重量 $W = G + F$ 。因此，重量 W 是重力 G 和离心力 F 的合力。二力的夹角是随物体所在的位置在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间变化的钝角。所以，在数值上重量小于重力，其方向也与重力不同。但是，由于离心力 F 远远小于物体的重力 G ，所以，重量和重力在数值上相差很小很小。二者的方向也相差无几。如果物体在地球的南、北两极上（ $r = 0$ ）；离心力等于零，物体的重量就等于重力。如果物体在地球的赤道线上，因为 r 最大，物体所受的离心力最大。此时重量和重力共线，且方向相反。在数值上两力可以代数合成，即 $W = G - F$ 。取 $m = 1\text{kg}$ 的物体，置于赤道处，则该物体所受的重力的大小 $G = mg = 9.78039\text{N}$ （赤道的 $g = 9.78039\text{m/s}^2$ ）。取地球的半径 $R = 6.4 \times 10^6\text{m}$ ，自转的角速度 $\omega = 7.27 \times 10^{-6}\text{rad/s}$ ，物体所受的离心力 $F = mR^2\omega^2 = 3.383 \times 10^{-2}\text{N}$ ，可以得出赤道上的重量 $W = G - F = 9.74656\text{N}$ 。由上计算可以看出，虽然在地球赤道处的重量和重力在数值上相差最大，但其差值也是很小的。因此，在赤道以外的各点上更是相差无几，其方向上也没有多大偏离。所以，人们一般对于重量和重力这两个不同的概念逐步淡薄，不过分区别，甚至当作同义语也是可以理解的。但是，这两个不同的物理概念必须澄清。在国家标准中不仅给出明确的定义，还在备注栏中作了比较详细的说明：“当此参

考系为地球时，此量常称为物体所在地的重力。值得注意的是，重量不仅与物体所在地的引力的合力有关，而且与由于地球自转引起的当地离心力有关。由于（空气）浮力的作用被排除，因此，定义的重量是真空中重量。”

下面再把重量与质量二者作一些说明。由于历史上确定重量和质量的基准的变迁，使得两者之间也容易混淆。

在日常生活用语中，“重量”（有时简称“重”）一词的含义，并不是物理学上的一种特殊的力，而是表明物品的质量。例如，一些商品按重量出售时，所指其实是质量（当然不是指商品的好坏，是指商品的多少）。比如在商店买了重为 500 克的糖果，这里的重量是糖果的质量（多少）。因为人们买的是糖果，而不是什么力。一袋水泥的重量为 50 千克，这里重量指的也是质量。一辆卡车最大载重量为 5 吨，其重量指的是卡车运载的货物的质量最多为 5 吨。又如，旅客列车上规定：“旅客携带物品的重量，大人为 20 千克，小孩为……”。这里的重量 20 千克指的也是质量。还有载重、自重、体重、净重等等，指的均是质量。总之，用秤称出来的物品的重量都是质量。对此，在国家标准中也有一些必要的说明，在备注中写到：“重量一词按照习惯仍可用于表示质量。但是，不赞成这种习惯”。这种习惯在短期内很难改正，例如，把载重量改为载质量，把自重改为自质，把体重改为体质等，都非常不习惯，也都不甚合适。因为“体质”一词还会与衡量人的身体好坏的“体质”混淆。所以，目前在日常生活用语上，只能把重量当作质量的同义语。

在工程技术上，这种含混，反应得更为明显。例如，一座桥梁限重为 5 吨，这是要求车辆在通过此桥时，车辆和货物的总重量不得超过 5 吨。这 5 吨重量指的是用地秤称出来的质量。但是，在采用工程单位制设计该桥时，就要按 5 吨的重力作用在桥上进行计算。同样，对于载重量为 60 吨的铁路车辆，重量也有质量和重力两种含义。

在采用国际单位制以前，重量双重含义的矛盾并不那么突出。主要因为工程技术上过去使用的工程单位制把这一矛盾掩盖了。工程单位制的质量单位应该是工程质量（ $\text{kgf} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ ）。但是，实际应用时却不使用这个单位，而是越出自己建立起来的工程单位制，使用绝对单位制中的质量单位——千克（kg）。这样在工程技术上就出现了力和质量两个性质完全不同的物理量，基本使用了同一个单位名称的现象。特别是不少的人在书写力的单位符号“千克力”时，不写它的全称 kgf，却省略了 f，只写成 kg。这样一来就在单位上给力和质量的含混开了方便之门。不仅两个不同的物理量使用了完全相同的单位，而且在标准重力加速度下，物体的质量与其所受的重力在数值上也是相等的；就是在非标准重力加速度下，二者在数值上也是非常接近的，人们往往也不去计较，都认为是相等的。这就把力和质量含混的方便之门开得更大了。正如前面

所述，车辆在通过桥梁时，车辆和货物的总重量为 5 吨，指的是质量；而在设计该桥时，就硬把 5 吨的重力加在桥上。这种含混在当前采用国际单位制，贯彻、执行国家标准时是不能允许的。因为，力和质量分别采用了不同的单位，力的单位只能用牛顿（N）或千牛顿（kN）；质量的单位只能用千克（kg）或其分数、倍数单位。不仅如此，物体的质量与其所受的重力在数值上也不相等，例如一袋水泥的重量（质量）为 50 千克，它所受的重力大约为 490N。

上述问题不仅在我国，在世界各国都不同程度地存在着。目前还未能找出一个妥善的解决办法。不管以后怎样解决，在当前贯彻国际单位制和国家标准时，必须明确重量的所指，不能再像过去那样含混。因为只有澄清了重量的所指，才能准确的选用单位。

地震与断裂力学

周道祥

地震是常见的自然现象，一些大地震所造成的巨大破坏以及带给人类的灾难使人闻之色变。

1976年唐山大地震把百万人口的大城市夷为平地，死亡242000余人。日本阪-神发生的地震虽处于设防区却仍造成5000多人死亡，直接经济损失数百亿美元。地震造成的破坏绝不仅仅是建筑物的倒塌，它所引发的次生灾害也极为严重。1923年东京地震死亡10万多人，其中相当部分是由地震引起的火灾造成的。如果震源位于大海中，它还常常引起海啸。如1896年6月15日日本本州东部海域的大地震激起海啸，海浪比最高潮位高出25~35米；海浪冲上本州东部海岸，卷走1万多幢房屋，死难26000余人；海浪横越太平洋到达夏威夷，振幅仍高达3米，掠过夏威夷后直抵美国西海岸，又从那里返回，横扫新西兰和澳大利亚。

早在两千多年前我国就有关于地震的记载。古代传说共工怒触不周山，“天柱折、地维绝。天倾西北，故日月星辰移焉，地不满东南，故水潦尘埃旧焉。”（《淮南子·天文训》）若去掉神话色彩，把山崩地裂江河塞流，海水倒灌地陷成湖作为描述地震的传说倒是很恰当的。

地震究竟是怎样形成的，迄今还不能说已完全弄清楚了。然而有一点学术界的认识是一致的，即：地壳上的断层是产生地震的根源。

60年代美国从阿波罗飞船所拍的照片上发现洛杉矶附近有三条交叉的活动断层，在1969年的一次天文会议上就此发出了中期预报。1971年2月洛杉矶果然发生了大地震。阿拉斯加曾发生7次大地震，但原有地质图上的5条断层仅能解释其中两次地震，卫星照片上显示出的另外7条断层使其余5次地震也得到圆满的解释。

地震在地面上显露出来的形态也说明地震的确是沿着断层发展的。1976年2月4日，中美州危地马拉大地震的震源位于莫塔瓜断层上，在地面以下10千米处。该地震地面破裂长度达250千米，沿埃尔普罗格雷索西部测得最大滑动量3.25米，裂缝宽度1~3米，局部最大宽度达9米。

现代的断裂力学理论已能够为地震建立一个力学模型。地球外层是十几到几十千米厚度不等的地壳，地壳下部是地幔，地幔上部是250~400千米厚的软流层（由岩浆构成），地幔以下则是绝大部分呈液态的地核。地壳中的断层可视为裂纹。若断层出露地面或接近地表则是表面裂纹；若断层深埋在地壳之中则是埋藏裂纹。

地壳的物质构成是非常复杂的，但是从地球的尺度来看断层长度一般都在百千米之上，像我国的郯庐断裂北起东北的伊兰，南至湖北的广

济，横贯我国东部绵延 2400 千米以上。可见把地壳视为均质材料在工程上是可行的。构成地壳的基本材料是岩石，是脆性材料。若能获得裂纹扩展的条件就不难解释地震，若能测知断层区地应力积累的速度就能预报地震。

问题在于引起裂纹启裂或扩展的应力从何而来呢？其方向与断层走向有何关系？

自从德国气象学家阿尔弗莱德·魏格纳 (Alfred Wegner) 在本世纪 20 年代提出大陆漂移说以来，板块结构及漂移理论已成为地球学中最权威的学说之一。该理论认为，地壳是由若干板块构成的，地幔中的熔岩不停地上下对流使得板块产生缓慢的横向漂移（如图 1 所示）。有的板块相撞，地壳隆起形成高山，如喜马拉雅山；有的板块冲没于另一板块之下，结果在边缘级处出现一系列岛弧，如千岛群岛、日本列岛直到菲律宾等岛屿组成的岛弧。地壳板块的漂移就像江面上刚解冻的浮冰那样，有碰撞，有俯冲，也有旋转，使得板块受力极为复杂。在板块接合部附近地应力较高，必然会引起附近断层的断裂造成地震，这也说明为什么地震频繁区大多位于大陆板块边缘及岛弧附近。

板块运动的复杂性造成了地震的多样性，因此不可能以同一种模型用于各种不同的地震。

若板块以旋转运动为主，断层两侧面则主要是沿断裂面在水平方向上的滑动，断裂力学称这种裂纹为错开型（ S 型），地震学称为走滑型。当板块向另一板块下俯冲下沉时，断层两侧面就有沿断层面上或向下运动的趋势，断裂力学称这种裂纹为撕开型（ N 型），地震学称为倾滑型。当两板块相撞，地壳局部隆起或下陷，使断层两侧面相互分离，断裂力学则称为张开型（ T 型）裂纹，若断层同时发生两种或两种以上的运动称为复合型裂纹。

现在只要给出断层尺寸、走向，再给出地壳在断层附近区域的应力场和位移场，预报地震就没有原则上的困难了，因此出现多种预报地震的力学方法。有的是直接大范围测量地壳的应力场，研究应力积累的速度来预报地震；有的是利用卫星测量地壳板块的运动和板块固体潮汐的振幅来预报地震；有的则认为地壳受岩石圈围压作用，岩石不表现出明显的脆性特征，由于地壳板块漂移和其他天体引力的作用导致压力卸载使岩层脆性断裂。

然而要准确预报地震仍存在巨大的困难。岩石圈的围压作用使断层面之间产生巨大的摩擦力，由于断层结构复杂，要准确获得摩擦力的大小是很困难的。大型水库区如果存在断层，水库常诱发小型地震，这就是水渗入断层从而减小了摩擦力而导致地震的例子。虽然目前仍有一些难以克服的困难，但是根据现在的理论人们已经能够根据断层结构、地壳的应力场与位移场找出最易发生地震的断层位置，从而设置观测网以

便适时地作出地震预报。事实上，一些较好地做出地震预报的地方所发生的地震正是处于这些重点观测网内的地震。我们有理由相信，随着科学技术的发展和观测手段及分析工具的完善，随着地震知识和资料的积累，再经过几代人的努力对地震作出较准确的预报是完全可能的。

亦忧亦喜话“振动”

刘会川 扬玉贵

没有振动，就没有声音，万籁俱寂，世界不可想象。欣赏一场音乐会，急管繁弦，悠扬的乐曲给人以美的享受；遭受一场大地震，家毁人亡，给人的是撕心裂肺的哀伤。振动，让人欣喜让人忧。

广义地说，振动是指物体或某种状态随时间往复变化的现象。人类生活在振动的世界里，地面上的汽车、拖拉机，天空中的飞机、宇宙飞船，在运行中都不停地振动；楼房、桥梁、水坝受到外界的干扰也会发生振动。远眺浩瀚的宇宙，有电磁波在不停地发射、传播；近观家中的录音机、洗衣机、电冰箱的压缩机，一旦启动，振动就始终伴随。再拿人体来说吧，心脏的跳动、肺部的呼吸、脑电的波动等等，在某种意义上也是一种振动。所以说，振动现象比比皆是，对振动的研究领域广阔、意义深远。

然而，对这些形象各异、千姿百态的振动现象又如何去进行研究呢？首先就要经过抽象化的方法建立振动模型。抽象化就是要纯化现象、把握本质、揭示事物间的内在联系。从力学观点看振动，其产生的原因有内因和外因，内因是系统本身的结构特性（指的是质量和弹性），外因是外部因素对系统的激励（如初位移、冲击、干扰力等）。因此，任何系统只要具有质量和弹性，一旦受到外部的激励就会产生振动。把握了这个最本质的东西，就可将千差万别的振动系统抽象为一个个理想的力学模型了。举例说吧，振动现象可分为确定性振动和随机振动两大类，其中确定性振动中最基本的是单自由度系统的振动，其力学模型就是弹簧质量系统（图1）。建立起力学模型以后，就是对这个模型进行计算了，例如一个单自由度无阻尼受迫振动的微分方程式为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = Q(t)$$

其中 m 为系统的质量， kx 为弹性力， $Q(t)$ 为激振力， $\sqrt{k/m}$ 为系统

的固有圆频率。每秒钟振动的次数称为系统的固有频率，通常用 f 表示， $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$ 。至于系统的振动规律 x ，只要求解上述的微分

方程就可以得到了。

当然，单自由度系统的振动理论是基础，随着科学技术的发展，振动理论也在不断地发展，当前“振动与控制”已成为国际科技界研究的前沿课题之一。因为当你研究航天器的发射和运行时；当你研究提高列车速度要与国际水平接轨时；当你进行高层建筑的抗震设计时；当你进

行海上采油平台的建造时；……都需要包括振动理论在内的多学科知识的综合应用。对高深的振动理论的研究都是从最基础的振动现象开始的，可以说，小小的弹簧和质量块就是你研究振动的入门向导。

在振动研究中，有一现象颇具吸引力，那就是共振。当激振力的频率和系统的固有频率接近或相等时，系统的振幅就会无限地增大，这就是共振现象。很多机器就是因在共振区工作，变形过大而遭到破坏的。因此，机械、仪表、建筑结构在设计时都要进行振动分析，尽量避开共振区，也就是让系统的固有频率和激振力的频率离开些。不过共振现象也并非都要避开，只要我们掌握了振动的规律，就可以控制它和利用它。例如，振动输送机、振动筛分机就是在共振状态下工作的振动机械。过去修建公路用的压路机是因其笨重的躯体著称，而今天使用的振动式压路机与之相比是既灵活又轻便。人，能化腐朽为神奇，何况于振动！

我国人民对振动早有研究，记得在中学时就听过这样一个故事：古代有一个和尚爱击磬（一种古代乐器），当他搬至洛阳城一古寺中居住时，发现房中悬挂的磬常嗡嗡作响，尤其是每当寺内的晨钟响起，其磬不击自鸣，和尚怀疑磬上有妖魔所附，遂忧郁成疾。其友曹绍夔得知，心中明白，前来探望并声称自有除妖魔法。他找到一把锉刀在磬上锉了几下，果然，寺内钟声再起，其磬悄然无声。聪明的曹绍夔就这样用改变古磬的固有频率而避开与钟声共鸣的方法治愈了朋友的心病，岂不妙哉！

在茶香飘逸的皖南山区，办起了一个个茶叶加工厂，有一次，一幢四层楼的厂房落成并验收合格。谁知当机器设备安装完毕，开机运转时，厂房如临地震，门窗、用具叮咚作响，于是厂方与建筑部门各执一词要打官司。这时有一人在察看全局以后提出了一个解决方案，将四楼的分选机的转速加以调整，仅调整了 15%，厂房振动就基本消失，于是对立的双方都偃旗息鼓了。你知道平息这场官司的奥妙是什么吗？原来这幢多层厂房的水平振动的固有频率约为 3~4 赫兹，而四楼的分选机的转速原是 240 转 / 分，运转中的分选机是厂房的激振力来源，而这个激振力的频率正是 4 赫兹，这就与楼房水平振动的固有频率相近而引了共振。调整分选机的转速，避开了共振区，也就控制了厂房的振动。有句名言“知识就是力量”，其实确切地说，只有当知识被有效地应用起来，才能真正显示出它的巨大力量。

振动和人体健康也密切相关，如跨进织布车间，机器轰鸣，震耳欲聋，多少 45 岁以下的纺织女工就这样失去了听觉；走到某些工厂的加工车间，顿觉心身不适，由于振动产生的噪音，使多少操作工人患有心动过速等心脏疾病；再看看拖拉机吧，它颠簸吼叫并频频吐着黑烟，全国千百万拖拉机手长年累月地驾驶着它在土路上运输、在田地里耕作，因此不少人患有胃下垂、尿出血等病甚至死亡……。这种职业病并非偶然，

而是来自同一原因——共振。

前面已说过，只要有质量、有弹性的系统，受到外部的激励就会发生振动。若以力学观点将人体抽象为一个机械振动模型，各部分器官、骨骼都是一个振动系统，且各部分的固有频率均作过测试（图2）。例如人的心脏固有频率约为60赫兹，如工作环境有频率在60赫兹附近的激励就会引起心脏的共振而导致心脏方面的疾病。又例如人的胃固有频率约在4~8赫兹，而拖拉机在土路上跑运输时，测得其座椅的垂直加速度自功率谱密度在4~8赫兹范围内有较大的能量，这正是人胃的谐振敏感区，因而对胃损伤较大而导致疾病。所以，对拖拉机手的座椅及一切交通工具的乘坐都要研究其振动控制问题。当今国际科技界就十分重视乘坐舒适性的研究，其衡量指标中有能量、加速度，还有加加速度呢。

同样，振动对人体健康也并非有百害而无一利，再来看看这样一件真实的事：某山区一妇女难产，山民们只得急备担架送往山外的医院，山路崎岖，行程匆匆，担架颠簸振荡无法控制。嘿，就在这振荡的担架上产妇竟顺利地生下了孩子，山民们向苍天跪拜，感谢神灵相助。殊不知真正相助的神灵是这付天然的振动床——振荡的担架，原来振动床也是用于治疗难产的一种医疗设备呢。

看！振动，就是这样给人欣喜给人忧。

生理流动与医学听诊

黄上恒

自然界和工程中粘性流体的流动有两种基本状态：层流和湍流，人体中的生理流动也是如此。

在圆管中呈层流状态的流体就好像分成了许多与管轴相平行的液层，与管壁接触的液层是不动的，而越接近中心的液层，流速就越大。这表明流体微团在层流状态下，基本保持沿管轴线的直线运动，而无横向运动。湍流就不一样了，它的流动速率通常要比层流大好几个数量级，流体微团在宏观尺度上作不规则的脉动是它的主要流动特征。在湍流中，动量、热量和质量的输送与交换要比层流剧烈的多，还由于流体微团间的激烈碰撞，加上其中气泡不断产生、聚合和破裂，湍流发声的强度也大大超过层流。

湍流，在以往的一段时间里，常记（译）作紊流。从中国文字遣词特点来看，“紊”仅仅突出了流体微团运动轨迹的不规则性，而“湍”字更能表现“急速”、“纷乱”和“喧嚣”的流动特点，十分贴合人们的直观印象。所以笔者认为，“湍流”的记（译）法要比“紊流”来得高明。

流动状态自层流向湍流过渡的过程，称为转捩。流动转捩是 O. Reynolds 于 1893 年首先研究的，他发现圆管管流转捩主要受控于一个无因次的组合量，即雷诺数（简记为 Re ）。在管道流动中，常取 $Re = \frac{\rho UL}{\mu}$ ，其中 ρ 是流体密度和粘性系数， U, L 指的是管道中的平均流速和管道直径，由实验确定的管道流动转捩雷诺数为 2000 左右。雷诺数的实质是作用于流体微团的惯性力与粘性力之比，低雷诺数下的流体运动通常是层流，而高雷诺数条件更利于湍流形成。

在我们的身体中无时无刻不在持续着各种生理流动，其中关乎生命与健康的最为重要的流动莫过于血液循环和气体交换。经实验证实，人体呼吸系统的气体，排泄系统中的尿液、汗水，甚至眼泪都是典型的牛顿流体——作用于其上的剪切应力同剪切变形速率为线性函数关系的流体，而血液（在一定的条件下）和关节液往往呈现非牛顿流体的特点。牛顿流体由于物理模型较为简单，易于实验操作，它是人们研究得最透彻的粘性流体。

健康人体的血管和气管等流动管道都具有良好的弹性，管壁可以吸收扰动能量，起着稳定作用，因而生理流动的转捩雷诺数要远远超过工程中的刚性管流雷诺数。例如人体主动脉的平均雷诺数达到 3400（这里取 $U=48\text{cm/s}$ ， $L=2.5\text{cm}$ ），在正常情况下，血流仍保持层流状态。一般动脉流动的平均雷诺数为 500，雷诺数峰值仅达到 1000（这里取 $U=45\text{cm}$

/s, $L=0.4\text{cm}$)。于是可以断言,正常人体循环系统中的血液几乎时时保持着层状流动,在气管和支气管中气体的流动也是类似的。正常呼吸时,气体一直保持层流状态,唯当深呼吸或咳嗽时,才会发生湍流,此时,雷诺数峰值竟高达不可思议的 50000!而我们知道,在相同雷诺数条件下,层流的摩擦阻力和能量损耗要远远低于湍流,而湍流中的物质交换和化学反应又比层流充分的多。难怪力学专家会发出这样的惊叹:人体已经发展成为近乎最优化的系统。

以上谈的是健康人体的生理流动,一旦循环系统和呼吸系统管道弹性减弱,那么吸收扰动能量的能力就要大打折扣。如果管道(循环系统的管道还应包括心脏瓣膜在内)发生狭窄阻塞,内壁粗糙或当血液中由于红细胞减少而引起血粘度低下时,就容易激发湍流,而且湍流旋涡还会对病变的管壁造成进一步的损伤。前文已经提到过,湍流发声的强度要远大于层流,而且音调也有显著差别,这就使得医生凭一对训练有素的耳朵和一只结构简单的听诊器“听”出许多病症来。

人耳的构造极其复杂和精细,灵敏度是任何一种人造仪器所不能比拟的。人的耳朵究竟灵敏到了什么程度呢?以厘米为特征尺寸的耳鼓膜在感受 10^{-12} 瓦/平方米的声强度时,可以产生 10^{-12} 米的微小位移,这个位移值比一个分子的直径还小 10 倍!但是要捕捉生理流动的声音信息,人耳的灵敏度尚嫌不足。马大猷教授风趣地说:“人耳的灵敏度幸亏没有再高,否则整天要听到自己血液流动的声音、体内动作的声音以及空气中分子无规则运动(布朗运动)的声音等等,从而终日不得安宁。”于是医生还要借助听诊器来加强生理流动的声音信息。

读者朋友或许对医生的听诊器产生过神秘感,为什么戴上它就可以“听”出种种心肺疾病呢?其实听诊器的构造简单得令人吃惊,它用胶管把体件和耳件串联起来,内部不附带任何声放大元件。所以与其说用它来加强声音,还不如说用它来“聚拢”声音更为确切。当然随着选择的体件膜片的厚度不同和联接胶管的长度不同,听诊器对频率不同的声音有一定的选择性。

在肺部检查中,听诊是一项基本和主要的方法,当呼吸时,气流进出截面变化和分叉的呼吸道时,容易发生湍流,由湍流引起振动所发出的声音,经过肺组织和胸壁,在体表所拾取到的声音就是肺部听诊音。听诊时医生根据呼吸音的强度、音调的高低以及持续时间的长短来鉴别和区分正常呼吸音、异常呼吸音和其他附加音。比如正常的肺泡呼吸音,是类似上齿咬下唇吸气时发出的“夫——”音,声音轻软,犹如微风吹拂,这时可以推测所听到的声音是层流气流发出的弱声强音。如果呼吸道粘膜炎变,管壁水肿,管内分泌物增多,引起狭窄或阻塞,这时吸入或呼出气体时湍流引起的声音是很强的,严重的病例所产生哨笛音甚至不用听诊器也能听到。有的时候,为了使某些较轻或潜在的病理呼吸音

得到暴露和反映，医生就让患者张口做深而快的呼吸或咳嗽几声后立即听诊。医生为什么要这样做？聪明的读者朋友一定会马上得出答案的。

心脏各瓣膜所产生的声音，常沿血流方向传导到前胸壁的一定部位，将听诊器的体件放置在这些部位上，就可以清楚地听取到正常心音或心脏杂音。心脏杂音指的是正常心音以外的持续时间较长的声音，它几乎无例外地是由血流加速或解剖关系异常激发的湍流场引起的。在正常生理条件下，人体内一般不会有持续的湍流。而出现了解剖关系异常，情况就不一样了。学过生理课的读者朋友都知道，在心脏收缩射血阶段，由于外周阻力的存在，血流不能立刻全部流过主动脉，主动脉管被迫扩张，使心收缩时所产生的推动血液前进的动力有一部分转化为使主动脉扩张的力量。心舒张期，血液不再射入主动脉，被扩张的主动脉又回弹原位，成为心舒张期推动血流的动力，血流因而不致中断并能维持一定的压力。健康人的主动脉瓣起着“单向阀门”的作用，在心室收缩时，血流可以畅快地流入主动脉，而当心室舒张时，它又及时地严密关闭，使主动脉回缩，血流不会倒灌入心室，图 1 大致描述了正常主动脉瓣的这种功能。

如果这个过程是发生在主动脉瓣关闭不全的病人身上，就会像图 2 所表示的那样，在主动脉回弹时，血流会通过关闭不全的瓣膜发生回流，在主动脉口产生持续的湍流场，它发出的噪声相当强，用听诊器很容易听到。据估计，这时主动脉口流场的雷诺数应在 12000 以上。

测量血压是常规临床体检不可缺少的内容之一，相信每一位读者朋友都经历过不止一次。让我们来回忆一下测量血压的全过程：医生将血压计的袖袋平整地系在肘窝表浅的肱动脉处，再把听诊器的体件放置在袖袋与动脉之间，这时尽管肱动脉中的血流仍在持续流动，可是在听诊器中听不见任何声音。这是由于中等动脉中血液层流发声很弱的缘故。然后用气球向袖袋内充入空气，直至腕部桡动脉搏动消失，再将压力升高 20 ~ 30 毫米汞柱后缓缓放出袖袋中的空气，标示袖袋内空气压力的汞柱随之渐渐下降，当听诊器传来第一个声音时汞柱指示的压力值，就是收缩压。声音随压力值降低而逐渐减弱，直至消失，这时对应的压力值就是舒张压，尽管当声音消失时的袖袋压力并不一定等于生理舒张压力，但是按照国际公认的惯例，就把这时的压力定作舒张压。在测量血压全过程中产生的声音，称为柯氏音 (Korotkoff 音)。用于解释柯氏音的各种原理虽然有所不同，但都考虑到动脉壁受到外压时管圆度和口径变化的重要影响。例如有一种理论认为，柯氏音的产生与血流冲击塌陷的动脉时所激发的自激振动有关。而更易于被医务工作者接受的理论是这样解释柯氏音的：当袖袋中压力稍低于心脏收缩压时所听到的声音，就是血液通过被压扁而变狭窄的血管形成湍流时所发出的声音。当袖袋中的压力继续降低，血管完全恢复其原来的形状，湍流消失，因此血流

音也随之急剧减弱，这时压力恰与舒张期的最低血压相一致。

从雷诺数的实质来考虑这个问题也很有意思：当袖袋内空气压力值恰好等于或略低于肱动脉中的血流压力值时，被阻止的血流开始以高加速度向手臂远端喷涌，此刻血液的粘性性质还来不及表现出来，惯性力项占有优势，对应的是高雷诺数的湍流（这时的现象与工程中的水锤效应很相似），湍流所产生的强声便经过听诊器传到了医生的耳朵里；随着血液流动的逐渐平稳，粘性力作用得以加强，雷诺数下降，血流便向层流状态过渡（由湍流向层流过渡的过程一般不称为转捩），声音就会减弱下来，直至恢复到开始时的寂静世界。流动噪声是由于流体运动或物体相对于流体运动辐射出来的噪声，它在大多数的场合是令人生厌的。但是生理流动的发声效应——尤其是湍流发声在医学听诊过程中却起到了这么重要的作用，这一点是大大出乎我们意料的。

摆的运动纵横谈

陈立群

摆是能够产生摆动的一种机械装置，最简单的摆是单摆。一根不计质量的细杆或弦线（称作摆线），其一端悬于固定点，另一端固结一定质量的质点（称作摆锤），就组成一个单摆（图1）。它受重力作用在某固定铅垂平面内摆动。稍复杂些的摆是复摆（图2）。它是在重力作用下能绕固定轴摆动的物体。

人们对摆的研究和应用由来已久，公元前四五世纪已有天平。据后来估计，它是每秒钟摆动一次的复摆。公元前6世纪，单摆曾被用作花瓶的饰物。公元前4世纪，亚里斯多芬在喜剧《蛙》中写道：“音乐应该用摆动衡量。”这是用单摆记时的最早记载。公元前214年，摆被用作拾振放大器。敌人用铁器挖地道时的撞击能使一个悬挂的花瓶摆动。然而，比较系统的研究摆，却直至17世纪才由著名力学家伽利略、惠更斯和牛顿等相继完成。摆的研究同钟表计时器的发展有密切关系。

伽利略对单摆的研究

1581年，17岁的医学院学生伽利略在教堂做弥撒时，看着被点蜡人弄动了的蜡架摆动越来越小，最后慢慢停下来。伽利略暗自问道，“每次摆动的时间是不是也越来越短呢？”当时尚无秒表，他用数自己脉搏的办法测量了每次摆动的时间。出乎他的意料，尽管每次摆动的摆幅越来越小，但每次摆动所用的时间却相同。这种摆动周期与摆动幅度无关的特性称作摆的等时性。回家后，他又把石头系在绳子一端重复这个实验，得到了同样结果。他还发现，对于给定的绳长，不管他在实验中是用重石头还是用轻石头，摆动周期都相同。由于他正在学医，就为其发现找到一个实际用途，设计了一种脉搏仪，用标准长度的单摆测量患者的脉搏，这是他对医学的最后一次贡献。研究单摆和其他机械装置完全改变了他的志趣，他变更了大学学习科目，开始研究数学和其他学科了。

1638年伽利略在力学名著《两门新科学的对话》中深化了单摆的研究，对单摆等时性进行了理论分析。他认为摆锤偏离最低点后再无初速地回到该点的时间 t 等于摆锤从最高位置自由下落到最低点的时间（我们现在知道这个断言是不正确的），也就是说，若摆线长为 l ，重力加速度

为 g ，则据自由落体公式 $2l = gt^2$ ， $t = 2\sqrt{l/g}$ 。这样计算出来的单摆摆动周期 $T = 4t = 8\sqrt{l/g}$ 。现在来看，尽管这个结果不正确（后面将导出正确公式为 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ ），但伽利略已得出了

正确结果的类似形式。由此式可以说明单摆周期仅取决于摆长的正确结论。在此前一年，梅森也已知周期与 \sqrt{l} 成正比。伽利略还在同

一著作中，以单摆为例证进行物理学探索（图 3）。他在 A 点悬挂一个单摆，从 C 点释放后，若不计空气阻力，它将运动到同一高度的 D 点。为了使这个实验说明的问题具有普遍性，他在 E 点或 F 点分别钉上钉子，摆锤在其阻挡下将运动到 G 点或另外一点（图 3 中未示出），从而说明上述结果在任意摆长下都适用。这样就把摆的运动提高到能量守恒的高度给予解释。他又试图以一组单摆说明简单的频率比会构成悦耳的谐音。他用一组同轴单摆进行试验，并观察到当频率可简单通约时，摆系整体构成了悦目的图案，否则便是混乱的。此外伽利略也讨论了摆的受迫振动，指出用与单摆周期相同的时间间隔对其吹风，可以使本来静止的单摆做摆幅越来越大的摆动。

伽利略是力学史上继古希腊阿基米德后第二位全才性的大科学家，他对于力学的思想、理论、实验和应用发展都有极大贡献。如在单摆的研究中，伽利略引入了“力学模型”的思想。他所研究的摆的摆锤是只有质量而无大小的质点，此点系在无质量弦上且不受空气阻力作用，这显然是真实摆理想化的结果。这种理想化的思想起源于古希腊，如几何学中的点、线、面、体都是相应实际对象在一定条件下的抽象化。而伽利略将模型化的思想和做法由数学引入到其他科学，进而使力学理论与实际应用相互促进形成循环放大的正反馈机制。这里，既指在日常生活中的实际应用，如脉搏仪，也指在其他学科中的应用，如能量守恒和谐音机制的探索。伽利略赋予实验研究工作以重要作用，他主张基本原理必须来自经验与实验，知识来自观测。他在研究中常作“思想实验”，用想象实验说明问题的关键。当然，这也会导致错误的结论，如伽利略称他看到摆偏移铅垂线 80° 时仍有等时性，这是不正确的。他没有发现这一性质已被非线性效应破坏。

惠更斯对摆的研究

由于当时通用的机械钟不够准确，单摆以可能成为改进时间测量的基本装置而引起人们重视。1641 年伽利略用单摆调整时钟，设计并制造了摆钟。1656 年惠更斯利用摆的等时性制成摆式钟。惠更斯把摆锤的摆动视为圆周运动的一部分而给予细致的分析，并将其总结在 1674 年出版的《摆动时钟》一书中。

惠更斯提出了计算单摆运动周期的正确公式，他用几何方法证明，

摆的周期 T 与沿摆的竖直轴线（二倍摆长）自由下落所用时间 t 之比，等于圆周长同直径之比。即 $T/2\pi l = 2l/t$ ，而 $t = 2\sqrt{l/g}$ ，故 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ 。基于该公式，他尝试用摆测量了重力加速度的值。

针对 1646 年梅森提出的不同形状物体摆动是否遵从同样法则的问题，惠更斯还提出了复摆运动的理论。笛卡尔发现了复摆的摆动中心，即若将物体质量集中于该点，复摆可简化为一单摆，其摆锤的质量即为物体质量，摆长为该点到悬挂点的距离。而惠更斯引入了转动惯量的概念，从而给出了确定摆动中心的方法，即若复摆对质心 C 的转动惯量为 I_c ，质量为 m ， C 到悬挂点 O 的距离 OC 为 d ，则摆动中心到悬挂点的距离（称作等效摆长）为 $L = d + I_c/md$ 。惠更斯的方法可将形状复杂的摆等价单摆。

惠更斯也是非线性振动研究的先驱者。他发现单摆只有在摆动幅度很小时才具有等时性，而摆动幅度较大时，单摆的摆动周期与运动幅度有关。然而这一现象的理论解释已超出当时的科学发展水平。现在已有多种方法可以求得振幅 θ_0 。不大时单摆周期的近似值为 $T = 2\pi\sqrt{l/g} (1 + \theta_0^2/16)$ 。

惠更斯还发明了等时摆，其周期和摆幅无关（图 4）， OA 和 OA' 为旋轮线，摆线一旦偏离铅垂位置便贴向 OA 或 OA' ，使其有效长度（摆锤到摆线与 OA 或 OA' 两线切点的自由长度）减少。

惠更斯还发现另一类非线性振动现象，即将两个挂在墙上并略不同步的钟摆固定在同一薄木板上，经过一段时间后会变得同步，这类现象称作同步化或频率拖带。

摆的动力学

伽利略和惠更斯的工作使得人们对摆的运动学已有较充分的认识，并基本上确定了实验与理论相结合的研究方法。但当时因数学的准备不充分，致使摆的动力学，即摆的运动与受力之间关系，尚不清楚。直到自 1687 年牛顿的《自然哲学的数学原理》问世，才奠定了动力学发展的物理和数学基础，其中也专门论述了摆锤在真空和有阻力介质中的运动问题。

不计空气阻力的摆的受力特点是它在运动过程中始终受到沿圆弧轨道的切向力，其大小为 $F = \frac{g}{l} \sin \theta$ ，式中 θ 为摆线偏离铅垂位置的角度。

当 θ 很小时， $\sin \theta \approx \theta$ ，有 $F = \frac{g}{l} \theta$ ，即受力大小与角位移成正比，

又因为该力永远指向摆的平衡位置，才使摆做所谓的简谐振动。简谐振动具有等时性，但当 θ 不是很小时，即 $\sin \theta \approx \theta$ 不再成立，相应的运动便不再具有等时性。

风与桥

彭大文

风对桥梁的力学作用，很早就有学者进行了研究。1759年 Smeaton 等就提出构造物设计时要考虑风压问题，从此开始有了风载荷的概念，但当时对风压的认识是不够的，也没有引起充分重视。直至 1879 年，英国的 Tay 桥受到暴风雨的袭击，85 跨桁架中的 13 跨连同正行驶于其上的列车一起堕入河中的特大事故发生之后，人们对风载荷所产生的作用才引起了高度的重视。以这一事故为契机，开展了关于风压的研究，并将其反映到桥梁设计中。1887 年重建 Tay 桥时，由 Baker 等经现场实验，确定了风压的大小是 273 千克 / 平方米。这一时期，巴黎为迎接 1889 年万国博览会，计划兴建埃菲尔 (Eiffel) 铁塔。为了确定作用在塔上的风压的大小，由著名工程师埃菲尔着手进行风洞实验，并在 1909 年成立了风力研究所。研究所中设立的埃菲尔型风洞，至今仍被广泛使用。这样，设计桥梁或建筑物时，就可以利用风洞试验定量地评价风荷载的大小。此后相当长时间内，人们把风对结构的作用仍只看成是由风压产生的静力作用。直至 1940 年，又发生了一次风毁桥梁的特大事故，才使人们看到了风对结构物的另一种作用——风致振动。

桥梁，特别是悬索桥，由于风而受到损害，早在 Tay 桥被风毁之前就多次发生。据记载，在 1818 年至 1940 年间，至少有 11 座悬索桥毁于暴风。从目击者所描述的风毁景象中可以明显感到事故的原因是风引起的强烈振动。只是人们对这种风致振动机理还不可能作出科学的解释，对其危害性认识还不够。1940 年，美国西海岸华盛顿州建成了中央跨径为 853 米，居当时世界第三位的塔科马悬索桥 (Tacoma Bridge)，其设计风速为 60 米 / 秒。然而四个月后，却在 19 米 / 秒的风速袭击下，产生强烈扭曲振动而遭破坏 (图 1)。这次事故再次震惊了桥梁工程界，经过广泛深入研究，提出了桥梁的风致振动问题。可以说塔科马桥的风毁开辟了土木工程界考虑空气动力问题的新时期。半个多世纪以来，在气象、结构力学、空气动力学、风洞实验等诸多领域专家学者的不懈努力下，虽然尚有不明确之处，但已基本上弄清了桥梁发生各种风致振动的机理，并在结构工程这一领域内逐渐形成了一门新兴的学科——结构风工程学。

风是一种自然现象，是由于太阳对地球大气的加热不均匀而引起的。由于地球表面的地形起伏和各种障碍物的影响，使靠近地面的风的流动发生紊乱，造成风在速度、方向及其空间分布上都是非定常的 (即随时间变化的) 和随机的。为方便计，人们在处理风对桥梁的作用时，首先将风分成两部分：(1) 假定风速在时间和空间上都是不变的，称此

类风为平均风（稳定风）；（2）另一部分为风速在时间和空间上都改变，称它为脉动风。从而再将风对桥梁的作用也归纳为两类：一类是风的静力作用，另一类是风的动力作用。

如果设计的桥梁刚度很大，在平均风作用下，桥梁保持静止不动或者其本身振动不影响气流的作用力，此时的定常反应（不随时间而变化的）称为风的静力作用。这时垂直于桥梁的气流作用力可分解为三个分量（图2），即气流方向的阻力，与其垂直方向的升力及升力矩。它们通常被称为流气作用力的三分力，与风速、桥梁断面形状及风对桥梁的攻角等因素有关。

如果设计的桥梁是个柔性结构，风的作用力可能引起桥梁振动，而振动的桥梁反过来又将改变气流作用力，产生附加的气动力，形成风与桥梁的相互作用体系，这时的反应，我们称之为风对桥梁的动力作用。风对桥梁的动力作用是一种十分复杂的现象。为了便于分析，我们把振动分为两类：一类是在平均风作用下产生的自激振动；一类是在脉动风作用下产生的强迫振动。

自激振动是指振动的桥梁不断从流动的风中吸取能量，从而加剧桥梁的振动，甚至导致破坏。前面所述的塔科马桥即是自激振动的典型例子。该桥在设计时吸取了Tay桥事故的经验，其抗风压的设计对于50米/秒的风速都是安全的，然而对风振却几乎未加考虑。根据当时的技术条件，采用了钢板梁，并且选用了从空气动力学角度来看属于不稳定的H型断面。因此，1940年刚刚建成通车后，每遇稍强的风就显示出有风振的趋势，但在头4个月内，这些振动仅是竖向的，而且在振幅达到大约1.5米后振动就衰减下来。运营几个月之后，随着跨中防止加劲梁和主索间相互位移的几根稳定索的断裂，振型突然改变，主桥在跨中作反对称扭曲运动，在跨度1/4点出现从 $+45^\circ$ 至 -45° 的倾斜。发生了扭曲振动约一小时之后，随着吊杆在索套处的疲劳断裂，约300米长的加劲梁坠入水中。

从力学角度看，风引起了桥梁的振动，而振动的桥梁与附加的气动力之间又形成了闭合关系（图3）。如果风速超过某一数值时，便产生发散现象，变形将无限增大，桥梁便产生失稳。这种振动状态的发散现象就称作颤振（或动力失稳）。颤振是一种自激振动，是将风的动能转换为桥梁的振动能，而使桥梁的振幅增大。颤振有多种形式，像塔科马桥这样的颤振，是绕中心轴的扭转振动，我们称之为扭转颤振。

驰振也是一种自激振动，和颤振相似，同样是一种发生在横风向的发散振动现象。但和颤振不同的是，驰振只限于弯曲振动体系。冬季，深山里的高压输电线上附着的冰雪使断面变成椭圆状态，铁塔间的输电线在风的作用下就会产生长周期（1~10秒），大振幅（1~10米）的振动，这种振动通常是在垂直于气流方向上的振动，这就是驰振（远看时

如快马奔驰)。在桥梁中，就有朗格尔桥的 H 型断面吊杆发生驰振而损坏的例子。驰振一般发生在具有棱角的方形或接近方形的矩形截面结构中。例如斜拉桥矩形截面的钢塔架，在施工阶段就要考虑可能产生这种驰振现象。

另一种自激振动是涡激振动，大约在 1898 年，斯特劳哈尔 (Strouhal) 通过实验发现，当流体绕过圆柱体后，在尾流中将出现交替脱落的漩涡。事实上不仅是圆柱体，对于其他钝体，如方形、矩形或各种桥梁截面受到均匀流的作用时，截面背后的周期性漩涡脱落将产生周期变化的气流作用力——涡激力，并且涡激频率 f_v 与风速 V 和钝体截面的迎风高度 d 之间有一定的关系：

$$f_v = St \cdot V/d$$

式中无量纲数 St 称为斯特劳哈尔数 (Strouhal 数)，表示各种截面的 Strouhal 数见表 1 所示。如果被绕流的物体是一个振动体系时，周期性的涡激力将引起体系的涡激振动，并且在漩涡脱落频率和结构的自振频率一致时将产生涡激共振。涡激振动容易出现在具有实腹断面的斜拉桥、长大的连续箱梁桥、架设过程中的吊桥主塔，以及细长比大的 H 型断面的或圆形断面的构件。对于扁平的桥面 (开口或闭口) 也有可能产生涡激振动现象。

以上我们所述的颤振、驰振以及由规则的周期性漩涡脱落引起的涡激振动现象都是假定在均匀的稳定风作用下，由于空气对振动结构的自激作用所造成的振动响应。这种振动响应的分类是按实用方便、历史背景，以及对现象机理的理解程度等方面考虑的。除此以外，大气中的紊流成分也可能使桥梁产生激烈的振动，我们称之为抖振 (或阵风响应)。这一术语最初用于飞机的尾翼受到前面机翼尾流中紊流成分的影响而产生的振动。但桥梁中的抖振主要是考虑风本身扰动紊乱的气流所产生的强迫振动。根据桥梁的实际情况，紊流引起的抖振响应一般不会造成桥梁的破坏，但会引起结构的局部疲劳或使人感到不适，同时也会影响高速行驶的安全。

为了研究桥对风的响应特性，从根本上来讲，进行几何缩尺模型的风洞实验是不可缺少的，特别对特大跨径的桥梁，风洞实验更是验证桥梁抗风性能的直接手段。如上海的南浦大桥和杨浦大桥 (属斜拉桥)，广东的虎门大桥和福建的海沧大桥 (属悬索桥) 都曾进行过风洞实验。风洞实验所采用的模型大致分为刚性节段模型、刚性整体模型及气动弹性整体模型等，以研究所需的不同气动特性及反映桥梁在风中的振动行为。

由于风对桥梁将产生静力作用或动力作用，那么桥梁的抗风设计也应该包括静力抗风和动力抗风两部分内容。桥梁的静力抗风设计要注意强度问题和稳定问题。作为强度问题，主要是侧向风压引起的变形和应

力；作为稳定问题，主要是在升力矩作用下引起的扭转发散或者在阻力作用下的侧倾失稳。

对于大跨度柔性桥梁，如悬索桥和斜拉桥的抗风设计则应特别注意动力抗风设计。桥梁动力抗风设计的基本方针是：（1）提高结构的临界风速，使之大于设计风速，即不会发生危险性的发散型风致振动；（2）减少各种限幅风致振动（涡激共振，抖振等）的振幅，使之控制在可以接受的范围内。为了使桥梁在使用期间内，在预计的强风作用下不损害桥梁的安全性和使用性，首先应掌握架桥地点的强风特性，决定桥梁的设计风速，并据此推测风对桥梁的作用，校核抗风安全性。如果判断有可能会发生上述有害的振动，就应考虑适当的防止对策或进行设计变更。

各国对于桥梁的抗风设计都制定了规范。例如，日本道路协会的《道路桥抗风设计手册》（1991年），《英国标准学会 BS5400》（1981年）中有关的抗风设计部分等。近年来，我国的大跨度桥梁得到了飞速的发展，已建成了主跨 602 米的斜拉桥——上海杨浦大桥；正在施工中的主跨 1385 米的悬索桥——江阴长江大桥；主跨 270 米的砼连续钢构桥——虎门辅航道桥等，都达到了世界同类大跨桥梁的水平。还有许多特大跨径桥梁正在规划、设计和施工中，随着这些结构向大、轻、柔方向的发展，风对桥梁的作用已上升为结构设计中的重要问题。目前我国也正在抓紧编写《公路桥梁抗风设计指南》，相信这对我国桥梁的抗风设计将起很大的作用。

裂纹与材料的强度

侯晓宁 文健

众所周知，自然界中的各种物质都是由分子构成的，分子和分子之间通过一种结合力相互连接在一起，当外界施加的力大于这种分子结合力的时候，相邻的分子就会发生分离。然而在很早以前人们就发现，按照这样的想法计算得到的材料在断裂时的理论强度值和试验测量的实际强度值两者之间相差甚远，前者常常是后者的数百倍或上千倍，如此巨大的差别是如何产生的呢？

1920年英国科学家格里菲思(A. A. Griffith)在研究玻璃的实际强度，做了一个试验：用玻璃薄壁圆管和球形玻璃灯泡作为试验样品，在玻璃上人为地刻上长度不同的刻痕，然后向其中泵入液体使其爆裂。试验结果显示：刻痕的长度越大，爆破时所需要的液体压力就越小，即玻璃实际测得的强度越低。

因此，他把材料的理论强度与其实际强度的差别归结为材料内部存在着各种细小的缺陷。正是那些肉眼难以察觉的缺陷或裂纹使试验测量得到的材料的实际强度明显降低。但是，由于在那时工程设计中使用的都是材料的实际强度，即试验测量值，加上当时生产力发展水平的限制，19世纪初的工程材料表现为脆性断裂破坏者为数甚少。因此，这种认为材料中存在有裂纹的思想并没有引起足够的重视，工程师们仍遵循材料是没有任何缺陷的和完整的这一假设来进行工程结构的设计。然而，无情的事实向人们提出了一系列的挑战。在二次世界大战期间，美国建造的五千艘全焊接式自由轮货船投入使用后，其中有一千多艘陆续发生各种断裂破坏，最严重的破坏甚至使船体突然断成两截。1950年美国“北极星”导弹固体燃料发动机的机壳在试验时发生爆炸；1949年东俄亥俄州的圆柱形储气罐断裂爆炸使周围街市变成废墟，并造成128人死亡，总损失高达680万美元。这些断裂破坏事故都是在人们毫无察觉的情形下发生的，因此常常伴随着大量的人员伤亡和财产损失，造成灾难性的后果。从大量飞机、船舶和高压容器等的脆性断裂事故分析中科学家们发现，所有的断裂均起源于材料中的裂纹。尽管这些结构都满足常规设计中对强度的要求，并具有足够的安全系数，但是在外力的作用下，这些裂纹会逐渐地增长，不断削弱结构的实际承载能力，最后裂纹发生急剧扩展，从而导致了结构的破坏，这时，人们才对裂纹有了更加深刻的认识。从50年代开始，有关裂纹的研究工作得到了加强，并逐渐形成了一门新兴的学科——断裂力学。断裂力学主要研究裂纹扩展的规律，探索裂纹对材料和结构强度的影响，建立断裂判据，控制和防止断裂破坏的发生。现代工程结构已经开始采用断裂力学的理论进行设计，断裂力

学在完善工程设计、提高结构的安全性、消除断裂事故隐患等方面都发挥着十分重要的作用。

通过严谨的数学分析，科学家们发现：一个矩形的平板，在均匀分布的外界拉力作用下，其内部各处的应力（即单位面积上的力，用 σ 表示）也是均匀分布的（图 1）；但若有一个裂纹存在时，在靠近裂纹的地方，应力就不再均匀分布，相反却会发生急剧的变化（图 2）。越接近裂纹的尖端，应力也就越大；裂纹尖端的应力在理论上是无穷大的。考虑到在建立分析模型时所作的一些抽象化，实际材料中裂纹尖端的应力通常不会达到无穷大，但该处的应力确实要比远离裂纹尖端的应力大得多。这样大的应力常常会超过材料所能承受的极限应力值，引起其内部裂纹的扩展并由此造成结构的断裂。因此在现代工程设计中，对材料选择不仅要求考虑其强度，更重要的还要求考虑其断裂韧度——材料抵抗裂纹扩展的能力。在检验厂家生产的材料合格与否时，断裂韧度也是一个非常重要的指标。与此同时，人们也开始注意材料在冶炼中，在锻造、切削、焊接、铆接及热处理等加工工艺过程中以及在使用中是否会产生裂纹，从而影响到材料的强度。又各种检测裂纹的手段也得到相应的发展，如 X 射线探伤仪、超声波探伤仪以及工业 CT 等仪器都可以帮助人们探测材料或结构中可能存在的裂纹，以避免事故的发生。

在大多数情形下，裂纹的存在总是伴随着灾难，不过，人们还是没有忘记利用它有利的一面来为人类服务。例如，在工业生产中，中国的力学工作者发明了一种利用裂纹对材料强度的削弱这一原理制作的断料机，极大地提高了材料加工的效率。切割玻璃时，工人们总是先用玻璃刀在玻璃上刻下划痕，以使玻璃切割得既整齐又省力。售货员卖布时，也是先在布的边缘剪开一个小口，沿着这个小口，可以很容易地将布撕开。就是在人们常吃的方便面等食品的塑料包装袋边上，你也常常会发现细心的厂家在出厂前开的小缺口（图 3），有了它，你就不再会为如何打开包装袋犯愁了，而厂家也不必担心运输过程中包装的破损。这些例子都说明：只要掌握了裂纹自身的规律，它也会从断裂事故的罪魁祸首变成一个方便生产和生活的功臣。

近年来的研究还发现，甚至在一些材料中，大量存在的细小裂纹会消耗掉一部分外界的能量，使较大尺寸裂纹所受的应力减小，从而起到延缓其扩展的作用，提高了材料抵抗裂纹的能力。利用这种所谓裂纹的“屏蔽效应”，人们已经生产出了一些性能优良的工程材料。

总之，对裂纹的研究使人们更深入地了解了它的规律，有效地防止了结构断裂事故的发生，增强了结构设计的可靠性。迄今，有关研究工作仍在继续进行。力学工作者借助于各种光学和电子显微设备，在更细微的尺度上开展工作，力图寻找裂纹是如何萌生、增长，又是如何聚合、发展并逐步扩展导致断裂发生的。对这一变化过程的研究必将进一步丰

富人类的科学知识，并最终造福于人类。

后 记

《身边的力学》与读者见面了。它像早春枝头的一点新绿，似乎预示着力学界科学普及的繁荣局面即将来临。

科学技术的普及不仅是潜在的生产力，而且是陶冶国民高尚情操，建设社会精神文明所必需。因为，科学是诚实的、实事求是的，它和一切投机取巧、不劳而获的思想格格不入；它培养人们不怕挫折、不畏艰险的进取精神。它教育人们掌握科学思想和方法，并以此来改变自己的生活方式。

改革开放以来，我国在经济建设方面取得了巨大的成就，然而知识性科普读物，特别是基础学科的科普读物，在市场经济中多年来仍处于低谷。民族的自强、国家的昌盛终究要取决于国民科学文化素质的提高。

中国想要真正成为一个让人尊重的现代化强国，不能不看到我们与现代人或发达国家国民在素质上的差距。鉴此，我国于1996年举行了“全国科学技术大会”之后，又举行了“全国科学技术普及大会”。但愿借两次大会之东风，移风易俗，在社会上兴起学科学、讲科学的热潮，并坚持不懈。写到这里，我不禁要对全国力学学会科普工作委员会和教育工作委员会长期坚持力学科普工作，以及北京大学出版社为出版这本小册子《身边的力学》所作的努力表示由衷的敬意。

在这本册子中，我们收集了35篇短篇科普作品，就体裁而言，大部分属于讲述体的“浅说”，如：刘延柱的“漫谈人体的运动”，贾书惠的“猫下落时翻身及其他”，王克的“平衡吊——力学应用的一个范例”，等；少数几篇为“趣谈”，或接近于文艺体的“科学小品”，如武际可的“捞面条的学问——兼谈分离技术”，王振东的“春蚕到死丝方尽——谈液体的拉丝现象”，胡宗一的“势如破竹纵横谈”等。讲述体是科普创作中最常用的一种体裁。它通过通俗的讲解、叙述来介绍某种科学知识或应用技术，一般行文平铺直叙，大都要求从不同侧面穿插历史、联系生活，力求做到深入浅出、引人入胜地介绍科学的某一领域的内容。在讲述体作品中又可以分为各具特色的不同表述形式，如浅说、趣谈、史话、对话、自述等。为了节省篇幅，我仅对“浅说”与“趣谈”两种文体作些展开说明。

浅说——这种文体一般保持了原有的学科体系，但回避了繁复的数学公式和深奥的专用名词和定理，用简明、流畅、生动的语言通俗地介绍科学知识或技术。

趣谈——在浅说文体的基础上，以引人入胜的故事、生活中常见的现象以及谚语、成语、诗词着手引入正题，从而介绍某些科学知识。这类文体常常使用一些生活的、历史的、文学的或哲理的情趣来吸引读者，旁征博引、涉古论今、谈天说地，既给人以知识，又给人以乐趣。这种

写法对一般读者来说，特别是在我国当前大多数群众科学水平较低的情况下是必要的，可使那些距离他们较远的科学技术知识，读起来不觉枯燥，同时有利于精神文明的培养。例如，武际可的“捞面条的学问”是从筴篱的历史说起的，而王振东的另一篇作品“郡亭枕上看潮头——漫谈潮汐及其开发利用”是从“忆江南”这首词引入正题的。

总的来说，讲述体作品的写作技巧主要在于发掘科学技术本身的趣味性（或可称之为“理趣”）。作者如果不是本门业务的行家里手是难以做到的。

在创作一篇科普作品时，在文章结构上怎样来体现“科学技术本身的趣味性”呢？

读者在阅读科普作品时，总是带着生产或生活上碰到的许多问题——什么？怎么？为什么？这些问题在读者的头脑里不是零乱地出现的，而是有规律地产生的。也就是说，读者有自己的思维活动。要想吸引读者，就一定要抓住读者的思维逻辑，当读者想到什么时，作者正好讲到这个问题，从而使读者产生浓厚的兴趣。科学技术本身是一种严格的逻辑思维，作者不仅不能违背这个逻辑，而且要善于把读者的思想引导到科学的思路上去。一方面要掌握和顺应读者的思维活动规律；另一方面又要往科学的思维上引导，通过顺和引，把两者结合起来。这个过程可以概括为“引人入胜”四个字。“胜”就是追求科学真理的乐趣；“入胜”就是进入到科学真理的胜景中的喜悦。这种“胜景”是科学技术本身内在的趣味造成的。

下面，我试着来分析一下武际可的“捞面条的学问”，看看作者是如何来顺应和引导读者进入科学的胜景的。

“捞面条的学问”这篇文章的目的是谈应用力学原理的两大类分离技术——筛选法与扰动法。首先，作者起了一个好题目“捞面条的学问”。读者第一个反应是，“什么？捞面条还有学问吗？这是什么学问？倒要看个明白。”这个题目就吸引读者非要读读下文不可了。当然，好题目还必须有好内容，千万不要形成“虎头、猪肚、蛇尾”，否则读者就要泄气了。

武际可在文章开头先谈了一些筴篱的历史和掌故，以增加一点文学和历史的情趣。接着，他提出一个问题，“捞面条用筴篱，这是常识”，……

“然而还有一种只用筷子挑面条，开始比较容易，问题是剩下最后几根面条如何捞起。”怎样才能把最后几根面条捞干净，说实话我也感兴趣。我是个爱吃面条的主，为了怕浪费粮食，这最后几根面条确实使我伤脑筋。然后，作者告诉读者如何捞的具体方法，“不信请君一试便知”（用现在时兴的话来说，这叫做“参与意识”。这是当前写科普作品的又一种技巧）。读者自然会想，这是什么道理呢？于是，作者要“请君入瓮”了，将读者往科学的思维上引导，阐述了流体力学的“二次流问题”。

这本来是个枯燥的问题，但到这份上读者得耐着性子弄懂它。

按说“捞面条的学问”到此为止了，然而这还只是正题的引子，作者是要引导读者进入更深的科学层次：“让我们将前面介绍的捞面条的两种方法稍加总结。……捞面条的问题是如何根据面条和面汤的物理几何性质将它们分离。……这种将两种或多种混合物的每一种成分分离开来的技术问题，从古以来，一直是科学家和工程师所执著研究的重要课题之一，一般就称为分离技术。……”接着作者从浅显的、日常碰到的生产上的例子说明了“筛选法”与“扰动法”的科学原理，进而引伸到二战期间分离铀同位素的美国研制原子弹的曼哈顿计划。作者是这样来结束这篇文章的：“曼哈顿计划不过是以大量人力物力财力精细地‘捞取’铀 235 这锅‘面条’，从而使核技术跨进一个新时代。当今，我们正在和将要更精细地‘捞’更难‘捞’的‘面条’，以使人类科学技术进入更为发达的时代。”原来“捞面条”里面竟有这么大的学问，说不定有那位青年读者读了这篇文章后，有志于毕生去从事“分离技术”的科学事业。这样的结尾就不是“蛇尾”而是“豹尾”了。

拉拉杂杂地写到这里，就此打住。

这篇文章就算是个“读后感”吧！但愿它没有浪费读者的时间。

汤寿根

1997年5月23日

