

跨世纪知识城

主编：刘以林

谈控制论



新世界出版社

跨世纪知识城
谈控制论

控制论思想

控制论击毁驱逐舰

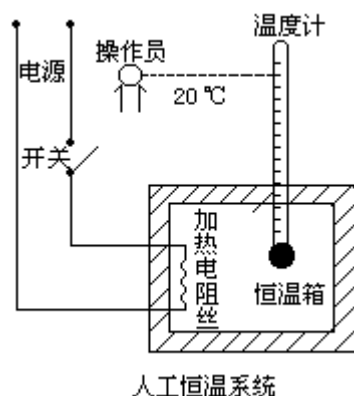
1982 年 4 月，英国和阿根廷在南大西洋的马尔维纳斯（福克兰）群岛附近，展开了第二次世界大战以来规模最大的海空战，也是世界上第一场动用核潜艇和空对舰导弹以及复杂电子系统的大战。这次海战，双方共出动了数十艘战舰和几百架飞机，尤其是使用了几十种现代化导弹，在水面、水下、空中和岛岸进行了封锁与反封锁、空袭与反空袭、登陆与反登陆的殊死较量。5 月 2 日，英“征服者”号核潜艇在水下发射两枚配有先进制导系统的“虎鱼”式鱼雷，击沉了阿根廷唯一的一艘 3 千多吨的巡洋舰。5 月 4 日，阿根廷使用法国制造的“超级军旗式”战斗机，在距英舰 48 公里左右处，发射一枚“飞鱼 AM39”型空对舰导弹，一举击沉了英国现代化程度很高、价值约 2 亿美元的“谢菲尔德”号导弹驱逐舰。5 月 25 日，阿方再次使用“超级军旗式”飞机发射两枚“飞鱼式”导弹，又击沉了一艘排水量为 1.8 万吨的英国“大西洋运送者”号运兵船。

阿方空军用一枚价值 20 万美元的“飞鱼”导弹，击沉了英国一艘价值 2 亿美元的导弹驱逐舰，使世界各国军事人员目瞪口呆，惊呼导弹在未来的海战中将起到“关键作用”。战斗结果表明，配有精密制导系统的武器彻底改变了传统海战方式，双方用不着面对面地舰炮对射，在几十公里乃至几百公里外就可用导弹发动攻击了。

我们介绍这一战例的目的在于说明这样一个事实：现代导弹装配的精密制导系统正是自动控制技术在军事上的一个重要应用。

控制论是什么？

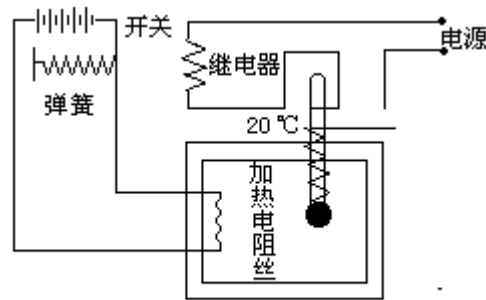
控制论研究的对象是包括人在内的生物系统和各种非生物系统（如工程系统、化工系统、通讯系统、经济系统等）。所谓系统，是由相互制约的各个部件组成的具有一定功能的整体。



恒温箱就是一个简单的系统。如图所示，构成系统的基本部件是：电源、开关、加热电阻丝、箱体和执行动作的人。因为我们的目标是要保持恒温箱内的温度不变，所以这就是一个控制系统，受控对象是箱内温度，控制方式是接通或断开电源开关。

如果我们希望箱内的温度保持在 20（假定环境温度低于 20），那么当操作员观察到温度计的数值低于 20 时，就合上开关，接通电源加热，使

箱内的温度升高。等升到 20℃，操作员又将开关断开了一段时间后，箱内温度就会因为散热而下降，这时操作员又得合上开关为箱子加热。重复上述过程，操作员眼睛观察温度计，手控制电源开关，就能基本上保证箱内的温度维持在 20℃。



自动恒温系统

如果我们采用自动控制技术来代替人的劳动，就成为自动恒温系统。它与人工恒温系统不同的是减少了操作员，但增加了一根弹簧、一个继电器和有关线路。温度计底部及 20℃ 处，各有一根导线连到电源上，这些增加部件的功能就是代替人工操作。当继电器回路的电源接通时，就会产生吸力，将开关拉开（断开），因此加热电阻不工作（停止加热）。如果继电器回路中电源断开，继电器不产生吸力，那么开关受弹簧拉力的作用而闭合，接通加热器回路的电源，加热器开始加热。

这个系统是怎样实现自动控制的呢？原理很简单。因为温度计内的水银是可以导电的，所以当箱内温度低于规定值 20℃ 时，继电器回路是断开的，不产生吸力，弹簧把开关拉紧（闭合），加热器回路有电，电阻丝发热，箱内温度持续升高。一旦温度升到 20℃ 时，水银使继电器回路接通，因为继电器产生的吸力大于弹簧的拉力，所以将开关断开，加热器停止工作。由此可见，在自动恒温系统中，弹簧与继电器接替了操作员双手的工作——合上或断开开关；而温度计上的接线相当于人双眼的观察，它能依据箱内是否达到规定值而使继电器工作，从而实现了自动恒温的目的。

从上面这个简单例子可以归纳出自动控制系统的一个突出特点，即系统自动控制过程就是信息传递和变换的过程。但是一旦系统中信息传递受阻，又会发生什么情况呢？我们再以一个美国独立战争时期发生的一件事来说明。

当时，英国殖民主义者为了巩固它在美国的殖民统治地位和有效镇压美国人民的起义，曾组织了一次重要的战役。英军指挥者设想一支军队从加拿大出发，同另一支从纽约出发的军队，在一个名叫萨拉托加的地方汇合，对那里的起义队伍形成两面夹击的进攻阵势，企图一举消灭起义军队。但是战役的结果却并不像英军指挥者设想的那样。当其中一支部队到达指定地点时，却始终不见另一支英军前来汇合，结果形成了孤军奋战的被动局面，惨遭失败。事后才查明，原因是由于疏忽，行动命令只发给了一支部队，另一支部队根本就没有接到命令。

显而易见，英军失败的主要原因是信息受阻。其下属根本没有收到上级的任何指示，因为英军的信息传递只有自上而下（命令），而没有自下往上的信息反馈。所谓反馈（Feed-back），是指当指挥者控制系统发出的指令

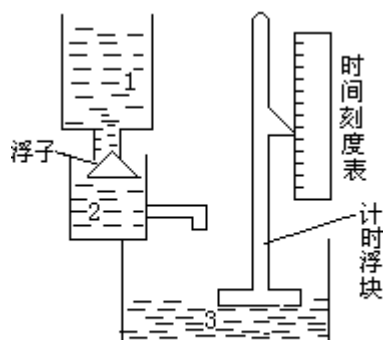
信息(也叫系统输入)输入后,通过系统内部变换后又将信息作用的结果(也叫系统输出)返回到系统输出端,并根据系统输出与系统输入(规定值)是否吻合,再对系统施加作用的过程。这也正是控制论创始人维纳所提出的“双向通讯”的概念,既有从系统输入到系统输出的正向信息传递和变换,也有从系统输出端返回输入端的反馈信息。从控制论的观点来看,系统的自动控制过程正是通过“双向通讯”的信息反馈联系而实现的。信息在系统中的这种循环往返过程中,不断变换形式,最终实现控制目标。这就是控制论所揭示的自动控制系统的反馈机制,它是自动控制系统的第二个特点。

反馈机制

在山村野地，一群小鸡在嘁嘁喳喳地寻找食物，时而翻动草屑，时而啄食幼虫，怡然自得。一只饿鹰从远处飞来，发现了猎物，急速俯冲下来，吓得小鸡四处逃窜，于是演出了一幕“追踪—逃逸”的活戏剧。在这个“追踪—逃逸”系统中，对老鹰来说，目标是小鸡，控制机构是鹰脑（发出指令），执行动作的机构是鹰翅、鹰爪和嘴。在整个追踪过程中，鹰借助眼睛不断地获得反馈信息（即小鸡的位置、速度和方向变化），据此及时调整自己的动作，直到抓住目标。

从这场“鹰鸡殊死之战”的过程中，我们可以看出信息反馈和反馈控制的重要性。

其实反馈作为一种技术手段自动控制目标，早在古代就开始了，只不过那时人们尚未从理论上加以升华。相传早在 2 千多年前，我国和古希腊都曾发明过水钟（“铜壶滴漏”）。这种简单的装置中就包含了深奥的反馈控制原理。水钟的基本要求是控制水流的速度恒定以达到准确记时的目的。控制方式如图所示。



水钟

反馈控制早期应用的另一个实例是离心式调速器。大家都知道，1768 年，英国工人瓦特（J.Watt，1736～1819 年）发明了蒸汽机，从而导致了西方国家的第一次产业革命。据说瓦特小时候家里很穷，没有上过学，可是他十分爱学习，特别爱动脑子。一天，小瓦特在厨房里看奶奶做饭，正巧炉子上的一壶水开了，壶盖“啪啪”地直响，还不断地跳动。小瓦特看了半天，感到很奇怪，就问奶奶：“什么东西使壶盖跳动不停呀？”奶奶说：“水开了，壶盖就动呗！”瓦特进一步问道：“为什么水烧开了，壶盖就会动呢？是不是有什么东西在里面推动它呢？”奶奶看瓦特老是问个不停，就说：“我不知道，你自己去看吧！”为了弄清壶盖为什么会跳动，瓦特常常坐在炉旁边仔细观察和思索，后来，他终于搞清楚了，原来，水烧开后，会产生一股“气”（即水蒸气），是“气”的力量在推动壶盖上下跳动。瓦特长大后，正是利用这个道理发明了蒸汽机。为了进一步解决蒸汽机所推动的机械装置的速度控制问题，1788 年瓦特在系统中采用了离心式自动调速器。据估计，在 19 世纪中，仅英国就有 7.5 万台装有瓦特调速器的蒸汽机装置。我们又一次看到了反馈控制的神奇魅力。

有趣的是，我们人体本身几乎处处都具有高速复杂控制能力的反馈控制系统。不知大家注意过没有，人体在正常状态下，无论春夏秋冬环境如何变

化，都能保持体温、血压、血糖浓度、呼吸和心跳率基本恒定。大多数动物也具备这种功能。但是大家是否知道人类和动物如何实现这种自我调节功能的机理呢？说白了，关键还是反馈控制的功劳。人体内显然没有像继电器、温度计和调速器这一类东西，而是依靠更为复杂的生物化学或生物物理过程来“检测”各种生理变化的。例如，血液中葡萄糖浓度若偏离标准值，人体检测到这条信息后就会由大脑中枢神经发出控制胰岛素分泌的命令（信息），由胰岛素分泌量的变化来调整血糖浓度使之恢复到正常值。同样的，人体内各种分泌和神经系统，每时每刻（即使当你睡着的时候）都在参与各种自我调节活动，以保持人体内部状态和心理状态基本稳定。这些自我调节过程和我们前面介绍的自动恒温、离心调速器的原理基本上是一致的。

反馈控制的概念还可以应用到更为广泛的领域，如教师讲课时，在认真讲授书中内容的同时，还密切观察同学们的反应，并随时提问，课后批改作业。这后面的三种方式就是为了获取反馈信息，以检查同学们掌握教学内容的程度，并根据这些信息调整讲授方法和进度，确保教学质量。

反馈机制对于人们的各种社会实践活动也具有十分重要的意义。就拿企业管理来说吧，管理也是一种深奥的控制活动，必须紧紧抓住信息反馈这个关键环节。管理没有信息反馈，只有上情下达，而无下情上达，就必然会脱离实际而出乱子，企业也会弄得一塌糊涂。同样，对经营决策者来说，市场信息的反馈也是至关重要的，不注意市场需求变化而关起门来盲目生产的决策者，必然会导致企业亏损，甚至倒闭。

从上面的讨论可以看出，信息概念和反馈思想是控制论的两个基本出发点。

陀螺与航行自动控制

大家小时候可能都玩过陀螺，当你掌握了正确方法用鞭子抽打它几下以后，它就会尖顶朝下竖起来，并绕其轴线旋转而不倾倒。

可别小看陀螺这小玩意儿，人们正是根据其自旋不倒的原理而设计制造出了五花八门的精密陀螺仪，为各种飞行器（如飞机、导弹、人造卫星等）的飞行自动控制奠定了基础。尽管陀螺仪的外表看起来与常见的陀螺不大一样，其大小也不尽相同（如用在飞行仪器上的陀螺仪最轻者只有几十克重，而一个稳定核潜艇的陀螺仪却重达 55 吨），但是基本原理却并无二致。

陀螺仪对于现代飞行控制系统来说可谓举足轻重。它不仅对整个系统的工作起着决定性作用，而且它的精度高低、可靠性程度和使用寿命长短等指标，对飞行器的稳定性和精确性都有着至关重要的影响。

陀螺仪的最早应用领域是航海事业。19 世纪人们广泛利用陀螺仪标定航向，在漫长的航海史上写下了新的一页。从 20 世纪 40 年代开始，陀螺仪便在导弹武器及航空航天事业上得到广泛应用，其稳定性和工作精度也随着科学技术的进步和工艺水平的提高而迅速提高。目前陀螺仪已有滚珠轴承、气浮、液浮、挠性、激光等类型。

陀螺仪在高速旋转时，能够抗拒任何外力和干扰的影响，保持其自转轴相对于惯性空间方向上稳定不变。当飞行器的飞行姿态偏离了预定正确方向，陀螺仪在转轴与飞行方向之间的夹角便发生了变化，飞行器上的检测元件立刻就可测量出来，并同时发出控制信号，通过执行机构的作用使飞行器的状态恢复正常。因此，这种自动控制系统也叫做“姿态稳定系统”。

陀螺自转轴方向不变的原理除应用于导弹的制导和飞机姿态控制以外，在宇航技术中也同样得到广泛运用。例如陀螺仪用在人造卫星上，可以保证人造卫星不受外界干扰而稳定运行在预定轨道上。不论人造卫星绕地球转到哪个位置或受其他什么外界干扰，卫星上的陀螺仪始终是指向空间某一预定方向。

小小的玩具陀螺和精度日益提高的陀螺仪竟具有完全相同的原理，初看起来似乎觉得有点不可思议，其实这正是大千世界中存在的客观规律。许多表面上看来非常简单的东西，却蕴藏着深奥的科学道理，关键在于我们要认清其本质规律，从而推动社会向前发展。

英国科学巨人牛顿从苹果落地而不是飞向空中这样一个司空见惯的现象中，发现了苹果从树上落到地上与其他行星绕太阳运行都遵循着同样的法则——万有引力定律，并且计算出了太阳系中各行星绕太阳旋转的轨道和周期，一下子把几百年来争论不休的是“日心学说”正确还是“地心学说”正确的问题解释得一清二楚。科技发展史表明，科学上许多原理和理论，常常是经过一段模糊时期后突然为人们所认识。细心的读者是否会从中得到什么启迪呢？

自动控制与电子战争

现代科学技术的发展，使电子技术在军事上的应用日益普及。现代化的武器装备，如大炮、坦克、飞机、军舰、导弹等，都配有相应的雷达、通讯设备及红外线或激光装置。然而历史的发展规律总是“有矛就有盾”。有了电子技术的应用，就会有电子技术上的斗争，这样现代战争中就出现了一个崭新的竞争领域——电子对抗和电子干扰，或叫做电子战。

所谓电子对抗，是指敌对双方利用电子设备和能够反射、吸收电磁波的器材的电子斗争。电子对抗的历史可以追溯到本世纪初。当无线电刚开始在军事通信中应用时，以截获和破译敌方情报为特征的简单的无线电通信对抗就萌芽了，并揭开了电子对抗的序幕。二次大战以来，炮瞄雷达、导弹制导雷达和飞机截击雷达相继问世，大大提高了武器命中率。与此同时，围绕着兵器控制与反控制展开了更激烈的电子对抗。

我们知道，雷达和无线电通信是现代社会的“千里眼”和“顺风耳”。而电子干扰却能把敌人的“眼睛”和“耳朵”封住，使它们成为“瞎子”和“聋子”，或者巧施妙计，使敌人上当受骗。比如，利用雷达干扰发射机作为干扰源，可以发射或转发某种电磁波来压制敌方的电子设备，使它们无法正常工作。我们平时收看电视都有体会，如果附近有电子干扰（如汽车发动机或电焊机等工作时所产生的干扰），电视屏幕的画面就会发生畸变，干扰越强，画面畸变越厉害。同样，当飞机或舰艇上的雷达接收机受到干扰压制后，在雷达距离显示器屏幕上会出现参差不齐的“茅草”。干扰电波的能量越大，“茅草”长得越高，把本应能够发现的目标信号给掩盖住了，因为此时目标信号完全淹没在干扰信号中了。而且，无线电通信设备受到强烈的电磁干扰后，耳机中充满了杂乱刺耳的噪声，也无法进行正常的通信联络。

另外一种电子对抗手段是欺骗性干扰。其原理是用干扰发射机或无线电台巧妙地模仿敌方信号使敌人上当受骗。对雷达的欺骗性干扰，可使雷达在测定目标、方位、速度时产生错误，破坏雷达跟踪或制导，使敌方火炮、导弹击不中目标。无线电通信欺骗干扰还可以冒充敌台通报、通话，搅乱敌方通信，达到以假乱真的目的。

电子干扰技术在第二次世界大战中为盟军 1944 年 6 月在法国诺曼底登陆，并最终消灭德国法西斯军队立下了汗马功劳。当时盟军的具体作法是：

（1）将计就计，实施欺骗。纳粹德军统帅部曾武断地认为联军将在加莱地区登陆。英美联军将计就计，在多佛尔设置了一个假司令部电台群，不断发出内容适当的电报，故意泄密，造成联军将在加莱登陆的假象，使希特勒陷入圈套。

（2）严密侦察，挖睛扫障。英美联军对德军部署在法国沿海一带的雷达站、干扰站、警报台和电台进行严密侦察，并做到了如指掌。在登陆前夕，又派出轰炸机和战斗机进行大规模袭击，摧毁了德军所有的干扰台和 80% 以上的雷达站，挖掉了德军的“眼睛”，并保证了联军雷达和电台的正常工作。

（3）巧布疑阵，声东击西。登陆前夜，英美联军用一群群小船装着角反射器，拖着涂铝气球等用于干扰的物体驶向加莱地区，使残存无几的德军雷达误将小船队视为大批飞机掩护下的大型进攻舰队，牵制住了加莱地区的大量德军，减少了联军在诺曼底登陆战中的阻力。

（4）施放干扰，出奇制胜。登陆开始时，英美联军出动 320 架干扰飞机

迷惑德军残存的雷达，掩护了飞向战区的大批战机。庞大的突击舰队始终隐蔽前进，只是在距登陆地点 10 海里时，因发动机响声才被德军发现，然而联军 5 个师 20 万人的突击部队的登陆已是势不可挡了。

60 年代以来，还出现了一种反雷达导弹，是专门用来对付敌方雷达的导弹。其原理是利用敌方雷达发射的电磁波作引导，跟踪其信号直捣老巢，最后摧毁敌方雷达站。反雷达导弹第一次出现在战争舞台上是在 1965 年，当时美国利用“百舌鸟”反雷达导弹，攻击越南的高炮阵地。装备“百舌鸟”导弹的飞机，一般先在地面防空高炮火力有效射程外盘旋，引诱敌方雷达开机搜索，然后捕捉其信号，再发射导弹予以摧毁。这种武器曾严重破坏了越南北方地面雷达系统。其后，在中东战争、英阿马岛战争、两伊战争中，反雷达导弹都显示了巨大的威力。

“最优化”思想

在日常生活中，我们都有这样的经验，无论干什么事都希望以最小的代价获得最大的成功。例如上街买东西时，我们总是挑那些质量好、外形最美观、价格也便宜的商品；在学习上，我们喜欢掌握最好的学习方法，以便在最短的时间内取得最好的学习成绩；在工作时，我们更愿意用最轻松愉快的方式来取得最满意的工作效果。这些看似平常的日常现象，其中包含了现代控制理论中的“最优化”思想。将上述这种“最优化”的观点应用于工程实践，便产生了在社会生活各个方面得到广泛应用的最优控制技术。

最优控制理论的发展是伴随着“最优化”概念的提出而开始的。在第二次大战期间及以后的一段时间内，应战争和军事防御上的需要，以提高大炮发射命中率为主要目标的自动控制系统（通常叫做伺服系统）的技术日臻完善。但是，随着社会的发展，简单的反馈控制已经难以满足工程实践的要求，传统的系统设计方法也无法实现日渐增高的性能指标。在这种情况下，科学家们通过大量的研究，于 50 年代初提出了最优化的概念，并试图对控制对象施加最优控制。但由于理论上尚不完善故未能真正实现。直到 1960 年前后，由于在控制理论中引入一系列新的研究方法和数学成果，推出了最优控制所必须满足的必要的充分条件后，才使最优控制的应用逐渐普及，并成为 60 年代自动控制领域的热门课题。特别是空间技术的迅猛发展，更进一步推动了最优控制理论向前迈进。举个例子来说，为了使宇宙飞船登月舱能以最小的燃料在月球表面准确、平稳地实现“软着陆”，即落到月球表面时的速度恰好为零，以避免与月球表面发生碰撞而损坏舱内设备，必然选择合适的控制方式来改变火箭发动机的推力。这就是所谓的“月球软着陆”问题，也叫做“燃料最省控制问题”。

再举一个例子：坐电梯。开关一按，哧溜一下就到了几十层的大楼顶上。电梯省时省力，是现代科学和文明的产物。不过，应当怎样来控制电梯的运动，使它能以最短的时间到达顶楼（或从楼上下到地面）呢？也许有人会说，这还不简单，让电梯始终以最快的速度直上（或直下）不就行了么！其实仔细想一下就会发现这种控制方式是不行的。因为当电梯以最大的速度冲向楼顶（或地面）时，必然会发生剧烈的碰撞而造成设置损坏甚至人员伤亡。因此必须运用科学分析的方法，制定合理可行的控制方案，既要保证电梯上升（或下降）的时间最短，又要让它到达楼顶或地面时速度恰好为零。这也是一个最优控制问题，我们称之为“时间最优控制问题”。

为了解决各种各样的最优控制问题，人们找到了许多方法，其中有两种最有成效。一种是美国学者贝尔曼于 1953~1957 年间研究提出的“动态规划”；另一种是前苏联学者庞特里亚金于 1956~1958 年间创立的“极大值原理”。

变色蜥蜴的启示

“变色龙”，也叫“变色蜥蜴”，它能够自动适应周围环境的变化，随时把皮肤颜色变成与它所附着的物体相同的颜色（俗称保护色）。变色龙这种难能可贵的变色本领具有极好的伪装效果，通常不会为凶猛野兽识别，从而达到保护自己免受其天敌袭击或吞食的目的。

我们人体本身也同样具有适应外界环境变化的巨大能力。如人的体温，无论酷暑严寒，总能保持在一个相对恒定的水平上。

人们从生物体具有自动适应外界环境变化的能力这种自然现象中受到了很大的启发。如果人们设计的自动控制系统也能够在外界条件发生变化时，仍然保持最优运行，岂不是美事一桩吗？正是在这种思想支配下，人们提出了自适应控制（Adaptive Control）的概念。

前面我们已经介绍了，反馈控制的基本思想是利用系统输入（受控量）与希望值之间的偏差来控制系统的行为，使误差趋近于零。但实际上，由于多数受控制对象的特性很难准确掌握，内部参数也随环境而变化（如电阻会随温度变化），外界条件会随时波动（如电压波动），而且这些变化通常是无法预测的，所以，人们在対原系统进行控制的过程中，该系统的特性实际上已经发生了不同程度的变化。事先确定的最优控制在内部参数和外部环境变化后，可能已不再是最优方案了，因此只有设计一种随内部参数和外部环境变化而自动调整系统特性的控制方式，才能保证控制系统始终处于或接近最优运行状态，这种系统就是自适应控制系统，具有自适应能力的控制器叫做自适应控制器。

自适应控制的设想，最先是由考德威尔（W.I. Caldwell）于1950年提出来的。1958年美国麻省理工学院的怀特克（H.P. Whitaker）教授首先应用自适应控制方法设计了飞机自适应自动驾驶仪。

自适应控制系统的两个基本功能是：能够自动检测和分析受控对象的特性以及系统所处环境的变化；能够根据从环境和系统内部检测到的信息得出决策，适当改变系统的结构或参数以及控制策略，以保护系统在任何情况下都能稳定和最优运行。要实现这两种功能，显然必须进行大量的复杂计算和推断，所以自适应控制系统离不开现代社会的“天之骄子”——电子计算机的帮助。可以说，没有电子计算机的参与，要实现系统的自适应控制是不可能的，正如“巧妇难为无米之炊”。

如前所述，飞行器的控制是较早应用自适应控制技术的。大家知道，飞行器飞行的高度和速度会随着高空中云层、气流等环境的改变而发生剧烈变化，飞行器的动力学参数也会产生较大波动，依靠常规的反馈控制往往难以获得令人满意的控制精度。现在，采用带电脑的自适应控制系统可以实现良好的飞行。此外，大型船舶的自动驾驶仪是自适应控制技术成功应用的典型范例。

海上航行，环境复杂，气候多变，随时会出现一些意想不到的情况，如海浪、海潮、台风等。采用船舶自适应驾驶仪后，则可以克服风、流、浪、水域深度、船舶装载重量及其他不可预见的因素对船舶操纵性能的影响，确保船舶在各种环境条件下能量消耗最小，并安全准确地航行。目前，瑞典、日本和英美等国已生产出许多性能良好的产品投放市场。由于采用这种自适应驾驶仪后，航速可提高1%，估计每条远洋轮船可节省燃油3%，因此具有

明显的经济效益和社会效益。

在医院，当有重病患者需急诊抢救时，往往要对患者进行长时间的输液治疗，这对医护人员是一个很重的负担。日夜值班守护，一时疏忽就可能酿成重大事故。但如果采用自适应监护系统，就可以日夜不间断地监测病人的脉搏和心电图，及时获得病情信息，并根据病人病情变化自动调整输液量。这样不但减轻医护人员的工作负担，还可明显提高治疗效果。

此外，自适应控制技术还广泛应用于工业、农业、石油勘探与开发、资源分配、宏观经济调控等各个部门。

自适应控制系统的进一步发展，将走向所谓“自学习”、“自组织”和“智能控制”系统。这些系统除具备一般自适应功能外，还能够自动记忆本系统过去的经验和教训，回忆过去曾经发生的情况，并基于这些信息改进系统的自适应功能。或许在不远的将来，通过读者朋友们的辛勤劳动和创造，在自动控制领域内将产生更加惊人的突破。

“黑箱”问题

今天，人们在许多科学研究领域，都可以碰到“黑箱”这一概念，但它并不是指一只真正的黑色箱子，而是控制论中的一个重要概念。作为一种近代科学方法，黑箱方法已越来越受到人们重视，并且与现代科学技术手段联系在一起，广泛应用于社会生活实践中。

1945年，控制论的创始人维纳在一篇文章中写道：“所有的科学问题都是作为‘闭盒’问题开始的”，“若干可供选择的结构被密封在‘闭盒’中，研究它们的唯一途径是利用闭盒的输入和输出。”维纳所说的闭盒，也就是我们今天所说的黑箱。

到底什么是“黑箱”呢？粗略地说，所谓黑箱是指它的内部构造和机理还不清楚，但可以通过外部观测和试验来认识它的功能和特征。在现实生活中，许多客观事物，当人们还不可能，或客观条件不允许深入解剖其内部细节（因而无法详细了解其内部结构和特征），都可以把它看做是黑箱。为了让读者对黑箱概念有个形象化的认识，我们先从“大脑之谜”说起。

“大脑之谜”，也叫做“身心问题”，在科学研究史上是一个长期以来没有得到圆满解答的难题，无数科学家和哲学家倾注了毕生的心血进行过深入探讨和研究，提出了种种假设和理论。思维究竟是怎样从物质中产生出来的？大脑功能的具体活动机制又是什么？要解答这一系列问题可不是一件容易的事。人们可以用物理上的分割法，研究物质的结构和属性；也可以用化学分解和合成的方法来了解不同物质的成分。但这些方法，对研究大脑的思维功能却是鞭长莫及的，因为即使按这些方法的要求，将大脑打开，解剖分析，也只能是对失去思维功能的大脑物质的认识。这样，在科学研究面前，大脑的思维过程就是一个只见其外观和表现，而无法深入其内在了解其机制的难题。它就像一个不能打开的箱子一样，里面的一切对于我们来说都是黑乎乎的，一无所知。

在高能物理中，就有如下一个事实：当物质被高度分割后，就会出现不能再分割的微粒，这时人们只能借助科学仪器来观察其行为，而无法再通过分割来了解其内部结构。对于这类问题，必须开辟新的研究途径。幸好控制论中提出的黑箱研究方法，为我们研究这类问题提供了可能。

所谓黑箱方法，指的是当一个系统内部结构不清楚时，利用外部观察和试验方法，获得系统（即黑箱）的输入——输出特性；再根据这种信息，在不打开“黑箱”的情况下，研究其功能和属性，探索其构造和机理的一种科学方法。人们常说“知人知面不知心”。如果说人相当于一个黑箱的话，那么我们可以通过“听其言，观其行”而“知其心”，这是一种行为分析的方法。

黑箱方法的道理并不神秘，在我们的日常生活中，人们都在自觉或不自觉地运用这种方法。比如说看电视，如果说看电视必须要懂得电视内部结构和工作原理才行，那恐怕能看电视的人就不会很多了。然而，人们虽然不懂得电视机内部构造和机理，却知道按哪个开关打开它，调整哪些开关可以得到清晰稳定的画面效果，什么情况是出了故障，等等。这些都是我们运用黑箱方法的具体体现。不过黑箱方法最典型的应用是中医看病。中医看病，主要是通过“望、闻、问、切”等外部观察作出诊断，开方抓药。有时遇到疑难杂症没有把握时，可以先投以试探性的药物，观察病人的反应，并随时增

减药物，观其疗效，一旦抓住病症就大胆对症下药。这种从人体的输入特征入手，实施“辩证论治”的方法正是黑箱方法的精髓所在。上面所举的例子，主要是让读者对黑箱方法有个基本的认识，但是控制论的黑箱方法，作为一种科学研究方法，具有自己的特点和独特表达方式。随着科学技术不断发展，对系统进行动态观测的黑箱方法，已发展成为现代控制理论的一个重要分支——系统辨识。辨识，指的是通过外部观测系统得到系统的输入—输出数据，然后用数学方法确定系统的结构和参数，求得定量描述系统动态特性的数学模型，并在此基础广，实现对系统的最优控制。

“人狮搏斗”中的控制论思想

意大利古罗马斗兽场内，座无虚席、人声鼎沸，一场残酷的人狮角逐正在这里进行。只见“兽中之王”大吼一声，猛地一扑，向角斗士直扑过来，而那位健壮刚强的小伙子却敏捷地闪开了……奴隶主们注视着这一惊险纷呈的场面，不由得大声叫喊起来，或者得意忘形，或者懊丧至极。原来，他们正在进行一场奇异的赌博，而且下了一笔可观的赌注呢！

在这场雄狮与奴隶的生死搏斗中，狮子总想尽早扑住对手美餐一顿，而人则要设法躲避求得安宁。这是一场惊心动魄、扣人心弦的角斗。但是，谁又能料到，在这场事件背后竟然蕴含着深奥的对策论的朴素思想呢？

拿活生生的人去与残忍的雄狮角斗取乐，这在世界文明的今天是不可思议的，然而在古罗马的奴隶制社会却是司空见惯。假如您读过小说《斯巴达克斯》的话，您就会不以为怪了。

对抗的双方都要运用自己的聪明才智，充分发挥自身的优势，尽量利用对方的弱点，选择最优策略，最终战胜对方。对策论就是一门利用数学的观点和方法研究竞争或斗争现象中，是否存在一方战胜另一方的最优策略以及如何制定最优策略的科学。由于我国古代把下棋玩牌这类活动叫做博弈，所以对对策论又叫博弈论。

对策论的相互思想还可以追溯到公元前若干世纪。其中我国古代田忌赛马的故事已成为脍炙人口的对策问题的范例。这个故事给我们这样一个启发：只要策略得当，实力并不是取胜的唯一因素。这也深刻地反映了对策的极端重要性。

对策论虽然渊源久远，但它真正成为一门独立的学科，还是 1944 年数学家冯·诺依曼和经济学家摩根斯坦合著的《对策论与经济行为》一书出版以后的事。而该书则被认为是对策论发展的一块里程碑。冯·诺依曼不仅创立了对策论，他还是电子计算机的奠基人。1946 年以后，由于电子计算机的发明和应用，大大简比了对策论中的复杂计算，才使对策论不再仅仅是纸上谈兵了。进入 60 年代，对策论与最优控制相互渗透，使对策论得到了长足的发展。

在对策论发展的基础上，美国的依萨克斯博士通过对军事上追逃问题的深入研究，开创了微分对策的研究工作，提出在追逃问题中，追逃双方都能自由决策的新的对策，即微分对策理论。

形形色色的对策现象，一般都具有三个最基本的要素：（1）局中人。具有决策权的参与对策的各方叫做局中人。局中人既可以理解成个人（如狮子与奴隶、齐王与田忌等），也可以理解成集体（如参加比赛的球队）。从人类与大自然进行斗争的角度理解，也可以把大自然作为局中人，同时把那些得失一致的参加者看作是一个局中人。（2）策略集。对策过程中每个局中人可以采取的方案称为该局中人的策略。一个局中人可能采取的所有策略则称为他的策略集。（3）得失函数。一局对策结束之后，每个局中人都有自己的得与失，它与各局中人所采取的策略有关，故称为得失函数。

只有两个局中人的对策叫二人对策，三人以上叫多人对策。在二人对策中，如果胜者之所得就是负者之所失，双方得失之和为零，则称此种对策为二人零和对策。实际生活中许多问题都可以归结为二人零和对策问题，如人狮之斗、田忌赛马及各种追踪问题。如果对策各方得失之和大于零，即是互

相协助、合作的，则称这种对策为合作对策。

对策论的应用很广，尤其是作为新一代更复杂的微分对策理论，由于与控制理论特别是最优控制理论紧密相联，已经能够解决许多实际问题，在军事部署、自动控制、海洋捕捞、农业抗灾、贸易竞争、外交谈判、疾病医治以及各种体育比赛中被广泛应用。进入 70 年代后，对策论更加向纵深发展。如模糊数学是新近发展起来的一个数学分支，在对策论中也得到了应用。借助模糊数学，可开辟对策论研究的新领域，用以探讨如周围环境、对策策略、合作关系等在模糊情况下的对策问题。

毋庸讳言，对策论，尤其是微分对策理论，毕竟还只是一门年轻的科学，其理论和应用不论在广度或是深度方面都有许多问题，等待着广大有识之士去开垦、去发掘、去探讨。相信在不远的将来，在对策论这片土地上，会绽开更多、更美的花朵。

控制论的发展

控制论在科学史上的位置

在人们认识世界、改造世界的漫漫长夜中，不时闪烁着智慧的火花；在广阔的科学处女地上，遍布着开拓者们的足迹。环顾仰视，我们不难发现一座座人类科技史上的丰碑。

这里是牛顿等著名科学家建造的一座宏伟殿堂——经典物理学，它庄严、博大、精湛。那浑然一体的坚强柱石，那硕大的穹隆，无不令人肃然起敬。它不愧是一代科学之宫，领导了 200 多年的世界科学潮流，造就了以机器、轮船、铁路、电力、汽车和飞机等为代表的工业革命。

然而，较之本世纪初比肩崛起的另两座巍巍丰碑——量子力学和相对论来说，经典物理学之宫却显得低矮陈旧了一点。站在这两座丰碑之巅，人类的视野更加开阔，科学技术开始冲破传统范围，导致了本世纪整个自然科学在纵深方向的一场革命，形成了探测微观世界和洞察宏观宇宙的两个前沿阵地。

不过人们也注意到，量子力学、相对论领导的这场自然科学革命，尽管它的理论高度大大超过了经典物理学体系，却没有像经典物理学那样引起生产与社会文明的爆发性飞跃。

正当物理学家们步履艰难地迈着沉重步伐攀登之时，人们惊奇而又欣喜地发现：一个前所未有的科学技术与生产突飞猛进的新时代，就诞生在第二次世界大战的废墟之上。它并不直接来源于自然科学纵深方向的发展，而是来源于科学技术的横向突破。新时代的科学技术革命几乎深入到人类活动的所有领域，汇成了波澜壮阔的强大浪潮，并迅速构筑了那片高耸入云的摩天大厦，而支撑这片大厦的擎天柱就是系统论、信息论和控制论，简称为三论。

无论是系统论、信息论，还是控制论，都与以往的任何学科不一样，它们不是以客观世界的某种物质结构、属性和运动形式作为研究对象，而是一类别开生面的“横断科学”，就控制论而言，是以各种物质结构及其内部运动规律的共同特点——信息传递和变换为研究对象，即研究各种现实系统共同的控制规律。它既不限于自然科学，也不属于社会科学，而是横跨各个学科，超出了其他学科的局限性，为各门学科找到了共同的内涵。控制论揭示了机器与生物系统信息控制的共同规律，把反馈控制的原理扩展到生物、经济和社会系统，为后来控制理论在非工程系统中的应用提供了理论基础。究其本质而言，控制论是一门方法论学科，它是集当代哲学、社会科学、自然科学和数学之大成而产生出来的多学科综合体，即具有形成结构上的多学科性，研究方法上的综合性等显著特点。因此，控制论享有“交叉科学”、“边缘科学”和“横断科学”的美称。

我们可以看到，当今众多的学者和科技人员，都在他们自己的领域，如政治学、经济学、社会学、工程学、生物学、医学、教育学等方面，探讨和运用以控制论方法为主的现代科学方法。控制论与每门学科的具体方法有机地结合以后，又产生了一个又一个的边缘学科。

控制论的诞生

美国科学家维纳是世界公认的控制论的奠基人。他于 1948 年出版发行的《挖掘论》一书被认为是控制论学科诞生的重要标志。

说起维纳创立控制论学科的过程，还有一段传奇般的故事呢！

那是在本世纪 30 年代末期，美国马萨诸塞州府波士顿市附近的剑桥，一家装修并不豪华的小酒店里，每月都可看到一群年轻人在这里围着一张大圆桌饮酒、交谈。有的衣冠楚楚、西装革履，有的衣衫不整、不修边幅，让人猜不透这群人的真实身份。他们偶尔轻言细语偶尔又争论不休。交谈和争论的话题也是海阔天空、相当广泛，涉及数学、物理、生物、医学、工程、机械、社会、经济等。他们的思想和观点，在当时是非常新颖而略显出格的，但听了使人耳目一新。

别以为这是一群年轻人在发酒疯、过酒瘾，其实是哈佛医学院的神经生理学家阿托罗·罗森勃吕特博士领导的关于科学方法论的午餐讨论会。讨论会的成员包括许多学科的年轻科学家，大都在本专业和其他科学领域有着广博的知识，思想异常活跃，具有独特的科学见解。该讨论会的一些积极成员，后来都成为名闻遐迩的大科学家，如诺伯特·维纳（创立控制论）、冯·诺依曼（V. Neuman）（计算机科学之父）、C. E. 申农（Shannon）（信息论的奠基人）等。

正是因为积极参与这个讨论会，维纳的思想受到极大的影响。首先，维纳认识到，在科学发展上可以得到最大收获的领域，是已经建立起来的各门学科之间容易被人忽视的科学边缘（维纳称之为“科学处女地”）。控制论的创立正是他在这块“科学处女地”上辛勤耕耘的结果。其次，讨论会集中了大批的各种学科的杰出人材，讨论中往往是从不同科学领域的不同角度去谈论问题，同时也从本学科的角度去理解别人提出的问题。这使维纳极大地开阔了眼界，增长了见识，活跃了思想，融汇贯通了他自己过去在许多领域中的独特见解。再加上他本人渊博的知识，以及与几位合作者（如罗森勃吕特、别格罗以及当时在麻省理工学院任教的中国学者李郁荣博士等）的共同研究，最后才形成了控制论的基本思想。

诺伯特·维纳不仅勤奋好学，还十分聪慧。正如他自己在自传《昔日神童》中写的：“我曾经是个名副其实的神童。因为我不到十二岁就进入大学，不到十五岁就获得学士学位，不到十九岁就成了哈佛大学的哲学博士。”他又是一位数学家，曾经在赫赫有名的英国数学家罗素教授的影响下专攻数学，在纯数学理论上取得了很大进展。但是他成长为一个著名的数学家却相当缓慢。他从小无书不读，家庭教育过分苛刻，使他成为一个性格奇特的人。他对数学、物理学、博物学等许多学科都有着浓厚的兴趣，加上他严谨的科学态度、孜孜不倦的探索精神和敢于创新的意思，使他成为一个对社会、对人类大有贡献的杰出人物。

钱学森与控制论

与控制论其他分支比较起来，工程控制论是最早形成的一门学科，其研究方法也最为成熟。而其他控制论分支大多是借鉴工程控制论的分析方法，在各自领域内开展研究。工程控制论，也就是人们通常说的控制理论，是我国著名科学家钱学森创立的。他于 1954 年出版的专著《工程控制论》，标志着这门学科的诞生。该书从技术观点出发对各种工程控制系统的自动控制原理作了全面总结和探讨，奠定了工程控制论的基础，指出了工程控制论的发展方向，推动了自动化技术在工程中的广泛应用，是世所公认的工程控制论经典著作。

纵观控制理论几十年的发展过程，人们习惯上把它分为经典控制理论、现代控制理论和大系统理论 3 个阶段，下面我们就分别加以叙述。

1. 经典控制理论（40 ~ 50 年代末）

本世纪 40 年代，为了改善工业自动调节系统，特别是第二次世界大战中为解决军事装备自动控制系统的性能，逐渐形成了以分析和设计单变量（即一个物理量）控制系统的经典控制理论和方法。这期间，着重研究的是单机自动化或局部自动化。例如，用自动调节器来控制锅炉的水位、发电机的电压及电动机的转速。更为复杂的控制系统有大炮的自动瞄准，飞机、舰艇的自动导航和舵位控制系统等。经典控制理论应用于工程实践，最成功的例子是美国的陆军于 1944 年发明的自动防空火炮系统。该系统中包括雷达自动搜索和跟踪目标（敌机），同时控制高炮自动对准飞行中的敌机，自动计算出炮弹发射方向，自动装入定时起爆引信，炮弹自动上膛和发射，直到击落敌机或敌机逃跑为止。这样一个复杂的作战过程，居然能够全部自动化，而且比人操作更灵巧，命中率也高得多，在当时看来，的确是个奇迹。

2. 现代控制理论（60 年代初 ~ 现在）

50 年代以来，控制理论在航空航天部门的应用进展很快，许多更复杂、更精密的自动控制系统相继出现，如自寻目标导弹、人造卫星、登月飞行、火星着陆、载人飞船等。与此同时，随着电子计算机技术的发展和普及，许多重要的工业生产部门也逐渐由局部自动走向综合自动化，因为这样可以最大限度地提高劳动生产率和产品质量，节约原材料和能源，从而实现现代化生产的最优化。

随着自动化水平的不断提高，控制系统本身也日渐复杂，系统中的控制变量数也随之增多，对控制性能的要求也逐步提高，很多情况都要求系统的性能是最优的，如时间最短、误差最小、燃料最省、产量最高、成本最低、效益最大等，而且要求对环境的变化有较强的适应能力，但现在所依据的稳定性、快速性和准确性等设计指标难以满足新的控制要求。为了适应航空航天事业和生产综合自动化的需要，1960 年出现了以状态空间描述为基础，以最优控制理论为核心的现代控制理论。现代控制理论这一概念，最早是在 1960 年由美国著名科学家、控制理论界权威人士卡尔曼（R.E. Kalman）（时年仅 27 岁）提出的。其主要标志是卡尔曼提出的能控性和能观测性的新概念，还有贝尔曼的动态规划和庞特里亚金的极大值原理和卡尔曼滤波器。

3. 大系统理论（70 年代初 ~ 现在）

70 年代以来，控制理论向深度和广度进一步发展，进入了所谓的“大系统理论”阶段。因为大系统理论可以用来解决大系统最优设计、最优管理和

最优控制等问题，所以在国际上受到了日益广泛的重视。一方面，许多国家的研究机构、大学、军事部门，都在积极进行各种大系统的研究、分析、设计等工作；另一方面，国际上相继成立了跨国的大研究机构，如 1972 年在维也纳成立的国际应用系统分析研究所（ASA），旨在专门研究涉及全世界范围的大系统问题，如地球资源问题、能源问题、人口问题、世界模型等。

但是，什么是大系统呢？因为它尚处于不断发展和完善之中，很难给它下一个确切的定义。通常所说的大系统，指的是包括工程技术、社会经济、生物、生态等各个领域的复杂系统。如各类文献中提到的大型钢铁厂、化工厂的多级计算机控制与管理系统；区域性火力电网的动态稳定、自动保护与最佳运营系统；水源供应系统，农田水力灌溉网，输油、输气管道系统；铁路、航空、城市交通管理与控制系统等等。

现代经济控制论

对于一个家庭而言，每个月的经济总收入是有限的，而要消费和支出的项目又很多，如衣、食、住、行，购买书籍、文具和其他娱乐消费等。如何合理安排和控制各项开支，做到既满足生活要求，又能略有节余以应不时之急需，乃是家政管理的一大学问。

对一个家庭是如此，对一个企业、一个地区乃至一个国家，更是如此。国民经济发展水平，是衡量一个国家综合国力的重要依据。而对国民经济的宏观调控和微观搞活，就正如一个善于理财、精打细算的好管家对于一个家庭一样，是国民经济适度增长的必要保证。

经济学，作为一门完整的学科，已有数百年的历史。发展到今天，就像是一棵大树，深植在社会经济活动的土壤中，其粗壮的主干上分枝丛生，花繁叶茂，色彩缤纷。近几十年来人们尝试用控制论的思想和方法给这棵古老的参天大树嫁接上一枚并不显眼的新芽。在斗艳争芳的盛况中，在绿叶浓荫的掩映下，这枚嫩芽默默地成长着。通过母体发达的根系吸收土壤中的养分，以自己强大的生命力，迅速成长壮大起来。短短时间里，崭露头角，成了经济学这棵大树上独树一帜的新分支——经济控制论。特别是近十几年来，这一新的分支更是奇葩竞放，硕果累累，令人刮目相看。

我们说，控制论与经济学的结合产生了新的边缘学科经济控制论。但这并不意味着是先有控制论，而后才有经济控制论。事实上，早在控制论诞生之前，从古典经济学起，就有大量的经济学者在研究经济系统的调节、反馈、控制及稳定性问题，只是他们还没有上升到控制论的高度来分析罢了。很明显，无论是古典政治经济学家还是现代经济学家，都在一定程度上认识到价值规律对经济发展起着重要的“调节器”作用，任何一种社会经济过程中都存在着某种自动调节与控制现象，用控制论的术语来说，就是“负反馈调节”。

经济控制论的最终形成是建立在现代自然科学和社会科学基础上的。1952年在法国巴黎召开的世界控制论大会上，与会学者首先提出了“经济控制论”一词。1951~1953年间，美国加利福尼亚大学史密斯教授运用电子模拟装置模拟资本主义经济体系，分析体系的稳定性和各种干扰影响的反应，指出了资本主义经济危机的必然性与周期性。1953年，英国电子工程学教授A.图斯丁(A. Tustin)发表了《经济系统的机制》，把二次世界大战中发展起来的经典控制理论应用于进行控制的问题上，1954年和1957年，美国数学家A.菲利浦斯(A. Phillips)在《封闭经济中的稳定政策》和《稳定政策与滞后反应的时间形式》等文中，开始用二次常微分方程来描述宏观经济系统，讨论了它的开环控制与闭环控制问题，并提出了一种新的控制方案来改进经济政策的稳定性。

随后，运筹学、系统工程、现代控制理论、大系统理论、微分对策理论等新的现代科学理论被陆续引用到经济学的研究领域，极大地推动了经济控制论进一步向前发展。

现代经济控制论的一个主要内容，是将控制论与数量经济学、管理学、经济系统学、运筹学等学科相结合，对具体的经济过程实现控制与管理。这类经济控制论问题把人和物及各种参数均视为被动的受控对象。典型的应用包括：宏观经济的最优控制、建立最优经济增长模型、最佳消费投资比例、最佳广告费用、有价证券选择、金融市场最优控制、基本建设投资优化问题

等等。

现代经济控制论的另一方面是由对策论发展起来的。在这里，经济控制论把人视为其内在的动力因素，人与人之间的关系是既协作又竞争的，这种关系形成社会经济的唯一主动结构，从而形成了经济系统的控制功能，简单地说，这类经济控制论问题研究的是人的积极性、主动性，涉及到物质刺激、责任问题、竞争的控制功能等等。所谓“小智善于治事，大智善于治人，睿智善于立法”，就可喻指为控制的几个不同层次。

现代经济控制论作为一种管理过程的科学的基本工具，在社会主义经济中有着巨大的潜力。经济控制论的重要性表现在两个方面：一是它提供了一种关于使经济管理有效、准

确和可靠的精确分析工具；二是它发展了一种处理和解决问题的合适的思想方法，我们称之为“控制论思想”。其实，经济控制论的原理和方法并非高深莫测，全部思想方法也都是辩证唯物论的。大家都来学点经济控制论知识，对我们的国家、对我们的企业、对我们的人民，都将是有百利而无一害的。

生物控制论

我们知道，工程自动控制系统可以无需人的直接干预而完成各种生产任务，这是由于其内部有完善的通讯和反馈控制机制。同样，大千世界中存在数百万种生物，在长期的进化过程中，沿着从无序到有序、从低级到高级的发展途径，在其体内形成了复杂精巧的自动调节系统，使得生物能在千变万化的竞争环境中生存和发展。自然界中每一种生物都能按照自己的方法，适应各自所处的环境，就像一部部最灵巧的自动机器。正是由于自动机器和生物都具有反馈控制的共性，人们创立了生物控制论这一崭新的边缘学科，其基本思想就是根据控制论的思想和方法，研究生物体各部分以及生物体内与周围环境之间的信息传递、加工和自动调节规律，以及有关生物医学的信息加工和控制问题。

生物体的结构是多层次的，由亚细胞、细胞到器官和整体，每一层次都有其特殊的调节和控制方式。而且，地球上现存的数百万种生物，它们的控制和处理形式又千差万别。因此，生物控制论研究的范围是极其广泛的，它既为生物医学服务，也为工程技术的发展作出贡献。一方面，利用控制论的理论与方法可解决生物学中的问题，为深入了解生物医学

的原理以及解决生物医学中的实际问题提供新的方法与工具；另一方面，通过对光怪陆离的生物世界中各种生物控制和信息处理原理的研究，反过来又为新的工程技术设计提供新的思路。人们在这两方面都已做了大量的工作。

在生物医学领域，很需要控制论这样的跨学科的理论和研究方法。由于生物系统十分复杂，大部分还处于之谜阶段。比如动物和人的脑系统，它是当前生物科学的重大研究课题。研究感觉信息加工的机理，探索学习和记忆的奥秘，都要研究这个系统。脑与感觉器官都具有巨大的信息处理能力和灵活性，它们不断接受、传递、加工和储存信息，并对身体各部分发出相应的动作指令。据估计，人的大脑皮层约有 $100 \sim 1000$ 亿个神经细胞，这些细胞通常被称为神经元，神经元是脑内信息处理的基本单元。每一个神经元通过称为“突触”的树枝状通道，从数以千计的其他神经元接受输入信号，又对其他许多神经元提供输出，因而神经元之间的联系网呈犬牙交错的立体分布。神经元通常有两种基本状态：兴奋与抑制，决定于神经元从突触接受到的神经脉冲。神经元所传递的信号是在千分之一秒的时间内完成的局部电位变化。当大脑皮层中的神经元兴奋而载有外界有关信息时，通过神经元内部与外部的化学物质的作用，信号从一个神经元传递到另一个神经元，最后由大脑中有关神经细胞进行综合处理，将它们变成所需要的决策，并对外界的各种刺激作出反应。大脑真不愧为自然界中最高级的、最复杂的信息加工与调节控制系统之一。

除了对人脑研究以外，应用控制论解决生理学问题也取得了重要进展。

记得前些年有一家外国报纸报道说用遗传工程的方法育成了“牛肉西红柿”，这种新型西红柿体较硬，而且有牛肉的味道。该报道立刻引起强烈反响，各国报纸纷纷转载，事后才知道这是在“愚人节”登出的玩笑新闻。如果在 20 年前有人杜撰这样一条消息，恐怕谁也不相信，而今天居然连科学家都跟着“上当”了。这的确说明遗传工程的发展为实现人们对生物生长的控制和调节，获得各种优良动物和植物的愿望，带来了新的曙光。尤其是遗传

工程近年来的一系列惊人成果更是引起了世人的极大关注和广泛兴趣。

1982 年，美国科学家把大白鼠的生长激素的基因植入小白鼠的受精卵中，结果培育出来的小白鼠长得非常大，它的照片被各杂志竞相刊登，使这只“超级小鼠”成了轰动一时的动物名星。很自然地人们立刻联想到，如果将此项技术成功地用于渔业和畜牧业，我们不就可以获得个体大、生长快、价格便宜的“超级鱼”，“超级鸡”，“超级鸭”，“超级猪、牛、羊”了吗！

同样，如果用类似的技术把豆类的固氮基因转移到水稻、小麦等农作物的细胞中，那么每一棵植物都成了小的“天然化肥厂”，不用再施化肥而获高产；如果把抗病虫害的基因移植到农作物体内，则不需要喷洒农药而获丰收。到那时，我们的环境必将更优美，身体会更加健康。

人口控制论

由于人口爆炸性的激增，已给全世界带来了直接或间接的社会经济问题。目前，贫穷、疾病、灾害、愚昧、暴力、犯罪依然严重威胁着世界上大多数国家。全世界有 70% 的粮食生产要受到天灾的捉弄，人类的生存问题在很大程度上都受到自然界的摆布。

定量分析人口系统的状态并预测其变化规律，研究在各国不同人口情况下如何调节和控制妇女生育率，改变人口结构和发展趋势，以使人口系统的繁衍过程朝着最优化方向发展，达到人类自己掌握自己的命运这一宏伟目标，就是人口控制论所要研究的基础内容。控制论、系统工程和电子计算机等现代高新技术，为研究人口控制问题提供了有效的理论基础和技术手段。

人口控制论的创立和发展，进一步突破了过去那种认为不能用自然科学方法研究社会问题的思想束缚，证明了定量研究方法对社会科学同样具有重要的作用。

人口控制论的研究范围一般包括：

- 人口系统建模：用数学模型描述人口发展变化过程；
- 人口系统预测：根据系统模型预报未来人口变化规律；
- 人口系统稳定性分析：用控制理论方法分析系统的稳定性；
- 人口系统能控性和能观测性：分析系统是否具有能控性和能观测性；
- 人口目标：希望达到的人口控制目标，如在本世纪末把我国人口稳定在 12 亿左右；

人口系统最优控制：研究为实现人口目标而应采取的控制手段，如晚婚晚育（推迟结婚和生育年龄），一对夫妇只生一个等。

英国人口学家马尔萨斯（R. Malthus, 1776 ~ 1835）是

世界上公认的人类历史上第一个提出定量研究人口发展过程的人。他于 1789 年提出了最早的描述人口增长的数学模型。但是马尔萨斯的理论和办法，本质上是错误的，也没有什么实用价值，在历史上曾受到多次批判。

在我国，50 年代马寅初先生就曾提出过控制人口增长的建议，但由于“左”的思想干扰，这项建议不但没被采纳，反而将马老先生打成右派，结果是“错批一人，误增四亿”。这不能不说是一个深刻的教训。不过近年来，我国的控制论学者与社会科学家通力合作，在人口理论方面做出了巨大的成绩，为我国计划生育和国民经济发展提供了有效的决策依据。

用控制论方法进行人口预测，预报未来人口变化规律，是人口理论发展的必然结果。深入开展这方面的研究工作，对于我们这样一个世界第一人口大国来说，无疑是十分必要的。

教育控制论

教育控制论是既属于教育学又属于控制论的一门新兴边缘学科，至今约有 20 年的历史。

我们说，人是生物成员之一，又是社会大家庭中的一分子。人的先天特征服从生物属性。例如遗传，通过载有遗传信息的染色体把父体和母体的生物特征传给后代。人的后天特征又具有社会属性，只有通过社会活动才能体现人的存在。其中最典型、最重要的社会活动就是教育。人从获得生命的那一天起就在接受来自社会四面八方的教育，这个过程一直要延续到寿终正寝之时。不过，除人类外，其他高级动物也都有接受教育的特征，如刚出蛋壳的小鸡寻食捉虫，就受教于母鸡，母狮训练幼狮捕食猎物等。可见社会性、受教性并非人所独有的本质，但“教育的优化”，即教育的目标性，也即使受教育者“正于社会”而不“负于社会”的一面，却是人类教育异于动物“教育”的本质特征。

如前所述，控制论是一种模型化、数学化的理论，是研究信息传递、加工和处理的科学，而教育学正是广泛与信息打交道的学科。但是传统的教育学虽已形成了比较完整的学科体系，总的来说仍属于经验科学，对于教育过程中的信息处理以及各种社会因素产生的影响只能做定性的分析和描述，而且一般说来，它不能对教育过程做可靠的预测。在现代科学技术的飞速发展过程中应运而生的教育控制论，广泛吸取了控制论、信息论和系统论思想的丰富营养，试图通过建立系统模型的方法来模拟教育过程，把教育过程中涉及到的各种因素的影响看成信息传递和存储，应用反馈控制的思想，探讨最佳控制方案，并对教育过程进行有目的的预测。教育控制论的实质在于应用控制论的方法、手段和成果来解决教育科学（如教育心理学、教学方法论和定向教育）所提出的问题，使传统教育学从定性研究的描述性科学过渡到定量研究的精确科学。

然而，我们应该看到，教育过程是相当复杂的。从深度来说，如何培养和造就高、精、尖、开拓性人才，是现代社会中最突出的问题之一；从广度来说，除小学、中学、大学、研究生院的德、智、体、美、劳教育以外，胎儿教育、婴儿教育、幼儿教育、成年教育、老年教育以及终身教育也已深入普及到社会各个层次。按控制论的观点，教育系统的控制和优化必须是对广义教育的控制和优化，而把狭义教育（即

学校正规教育）作为其中最重要的一个环节。从这个意义上讲，教育系统的最优控制问题很自然地构成了一个多阶段性决策过程。按照我们在第一章中介绍过的贝尔曼最优性原则（即动态规划法），整个广义教育须认真研究严肃对待。任何一个环节上的失误，不论是对个人，还是对社会都将造成难以挽回的损失。

环境控制论

1952年12月5日，英国伦敦上空突然浓烟滚滚，黑雾弥漫，天昏地暗。许多居民感到胸闷气急、喉痛咳嗽、呕吐不止，在几天之内就有4000余人死亡。紧接着，整个英国大雾笼罩，气温逆转，又造成了数千人死亡。人们恐怖地称之为“杀人的烟雾”。这是怎么回事呢？

1961年1月，美国得克萨斯州科罗里达河下游，突然出现了大量的死鱼，10千米，50千米，一直扩散到300多千米的河面上。据统计，当地所有的27种鱼类全部死亡，连重达30多千克的蓝猫鱼也未能幸免。是谁杀死了这么多的河鱼呢？

1953年开始，日本九州的水俣县出现了一种奇怪的病人，耳聋眼瞎，四肢麻木，精神亢奋，一会儿酣睡如泥，一会儿又兴奋异常，身体渐渐弯曲，最后惨痛呼叫而死。到1972年，全镇有180多人患了这种“水俣病”。这究竟是什么原因呢？

现代社会中发生的诸如此类的致命灾害，引起了世界各国人民和科学家的密切关注。美国海洋生物学家卡逊女士经过详细调查研究，于1962年写成了近代环境污染对生态的严重影响，唤起了人们对古老生态学的兴趣，被人们誉为开创了一个新的“生态学时代”。卡逊在书中通过大量骇人听闻的材料表明，人类如果破坏了赖以生存的生态环境系统，必然会遭到自然界的严重报复。她的呼吁，立刻得到了各国科学家的热烈响应。通过对生态和环境污染的系统研究，许多谜团被解开了。比如上面提到的英国伦敦烟雾事件，原来是英国大多数居民家的取暖烧煤排气中，含有三氧化二铁成分，能促进空气中的二氧化硫氧化，生成液态酸沫，附着在烟尘上或凝聚在雾核中，进入人的呼吸系统，使人突然发病，并加速慢性病患者的死亡。美国科罗里达河的死鱼事件，则是一家生产农药的工厂长期排放污水的恶果。日本的水俣病，也是因为该河流上游有个工厂排放含汞废水而酿成的灾难。

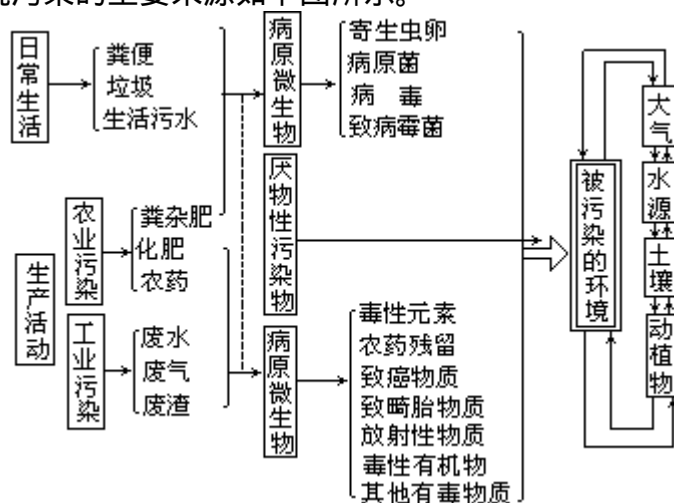
大量事实说明，人作用于环境，环境也反作用于人。随着现代工农业生产的发展，生态环境的污染程度日益加剧，严重影响着人类社会的发展速度、动植物的正常生存，这不仅关系到当代人们的身体健康，而且关系到子孙后代的繁衍昌盛。污染控制和环境保护无疑已成为世界各国政府刻不容缓的重要任务，“保护环境，造福人类，功在当代，利在千秋”的思想，已为世人普遍接受，环境控制论正是在这一浪高过一浪的呼声中诞生了。

顾名思义，环境控制论是专门研究生态环境的质量变化、污染控制与处理、环境保护与优化的科学原理及技术措施的一门科学，其范围涉及到地球生物圈（包括大气、海洋、湖泊、河流、土壤等）和人类生产活动的各个领域。它以生态学和地球化学为基础，以控制论、现代控制理论和大系统理论

的思想方法为工具，并利用化学、生物学、物理学、医学和工程技术知识研究环境综合治理和优化，是一门多学科交叉和综合的边缘性学科。环境控制论的出现，人类自觉运用科学手段来研究和保护环境，是社会文明的一大进步，是现代科学向深度和广度进军的一个重要标志。

环境控制论首先面临的是环境污染问题。所谓环境污染，是指由于人为的或自然的因素，使环境中原来的组成元素或状态发生了变化，扰乱并破坏了生态系统与人们的正常生活条件，致使人类生存的环境恶化；或者污染物进入生态系统，沿着食物链（比如说“大鱼吃小鱼，小鱼吃虾米，虾米吃

稀泥”（藻类））转移、循环和聚集，最后进入人体，危害人体的身体健康。现代社会中环境污染的主要来源如下图所示。



面对如此众多和复杂的污染源，要做到环境综合治理和优化，首先应利用控制论的黑箱方法（即系统辨识方法），建立环境系统的动态数学模型，并在此基础上提出环境保护的有效措施。由于电子计算机技术的发展，要做到这一点并非难事，特别是计算机的仿真技术，更为我们分析和模拟环境系统提供了有效手段。

利用系统分析方法研究环境自净能力，是环境控制论的另一项重要内容。我们知道，自然环境对污染物质都有一定的净化能力。比如，污染物质进入河流，会慢慢稀释，然后在光合和微生物的作用下氧化、分解、还原、沉淀，水质会逐渐恢复常态。进入土壤的污染物质，同样会在土壤中微生物的作用下分解、还原。这些都是自然界生态系统内部反馈控制作用的结果，当然这种反馈控制实现系统动态平衡的作用是有限的。因此我们应认真摸索自然界对不同污染物质的不同净化能力，掌握它们的规律，据此制定污染控制和环境保护的有效措施。

随着现代经济向纵深发展，环境科学的重要性也日益显著。可以预见，在未来的历史长河中，环境问题仍将伴随着我们，困扰着我们，使我们不得不在发展生产与保护环境二者之间不断地进行平衡和调整，以使脆弱的生态系统不至于受到严重破坏。为了保证人类社会和经济的健康发展，我们就必须从根本上摸清地球上各种生态、环境系统的内部变化规律，掌握其发展趋势，提出合理开发和保护生态环境系统的最优方案。诚然，环境控制论还只是一门尚未完善的学科，仍有许多领域是一片未知的海洋，需要我们用全部的智慧去探索和研究。

军事控制论

众所周知，军事系统是一个规模庞大、结构复杂、因素众多、功能综合、信息分散的大系统。军事控制论正是要运用大系统理论、系统理论、数学和计算机技术，研究军事系统的建模、信息传递和处理以及控制自动化的问题。控制论应用于军事，就是为了在各种因素的制约下（如敌我力量对比、气象、环境等条件），对军事大系统进行科学的规划、设计、制造和使用，使其达到信息、能量和物质的综合平衡，取得整体控制的最佳效果。这对于指挥员，尤其是高级指挥员来说，是不可缺少的指挥控制艺术。

现代战争是总体战，战场已从传统的海、陆、空范围向外层空间和海底两极扩展，规模空间增大。在此情况下，只有全面统一地实施进攻和防御，才能获取战争的全面胜利。把大系统理论用于军事决策，能帮助指挥员把握全局，制定出最佳战略、战役行动方案，真正做到“运筹于帷幄之中，决胜于千里之外”。运用计算机仿真技术，将敌对双方力量以及各种外界环境因素输入电子计算机，可以在“兵不血刃”的情况下，分析研究战争的发展趋势，从而寻找出最佳作战方案。

在战争舞台的长宽高都在无限延伸、军事斗争日趋大型化的当今时代，要在浩瀚广阔的战场上得心应手地指挥千军万马，指挥员必须具备高瞻远瞩、统帅全盘的系统思想，军事控制论则为实现这一目标开辟了新的有效途径。

社会控制论

人类社会进入本世纪 50 年代，特别是 60 年代以后，已越来越受到世界性的 5 大社会问题的困扰，即人口激增、能源短缺、资源破坏、粮食不足和环境污染的严重威胁。如何利用现代科学知识，合理解决这些问题，使社会正常发展，明显改善人类生存环境，是全世界人民所面临的一个挑战性任务。幸运的是，社会控制论的出现，拓广了人们的视野，使我们在迷惘困惑之中看到了希望的曙光。

社会控制论的基本内容是把控制论中取得的丰硕成果推广应用于社会的生产管理、交通运输、能源管理、资源开发、环境保护、城乡建设，以至人类社会的各个方面。控制论研究者认为，人类社会是一个充满活力和生机勃勃的自适应、自组织系统，存在着内涵丰富的信息交流和反馈机制。社会控制论不仅从整体上研究社会发展的内在规律，而且运用控制论的基本原理分析各类复杂的社会现象，比如说国家领导体制的改革、社会精神文明的建设、社会犯罪问题的综合治理等。人类社会的存在和发展，既需要社会变革，也需要社会的稳定和正常的社会秩序。安居才能乐业，这是人所共知的真理。无论是哪个朝代，哪个社会，都试图建立一个稳定的社会秩序，使人民生活安定，生产迅速发展。从控制论的观点来看，社会秩序、社会稳定都是与社会控制紧密相连的。离开有效的社会控制，就不会有安定团结的社会局面。因此，社会控制论的研究还与社会政治、法纪法制、伦理道德等诸多因素有关。所以我们说，在应用控制论研究复杂社会现象时，

绝不能摆脱辩证唯物主义和历史唯物主义的科学分析法，否则也很难得出正确的结论。

应当承认，社会控制论的研究还处于刚刚起步的初始阶段，但控制论及其在社会各个领域的应用已经或正在成为人们认识世界和改造世界的强有力工具。随着社会控制论这一边缘学科的进一步深入研究，它在社会发展过程中必将发挥愈来愈显著的作用。

