

中国古代的计时器——漏壶图

控制论：

一门深入人类物质生活和精神生活的学科

郑大钟 清华大学

控制论，作为关于系统控制的科学与技术的前沿学科，形成和发展于上世纪的中后叶。控制论的出现，已经和正在广泛地推动人类生产活动和生活方式的现代化与自动化，使之成为一门深入人类物质生活乃至精神生活的基础性学科。本文从四个方面，即科学地位、发展历程、对象内容和方法、以及应用领域等，浅近地和粗线条地对控制论进行简明的介绍，以期对这门前沿学科有一个基本的了解。

I 控制论的科学地位

控制论的创始人 N. 维纳从引发一场新工业革命的高度来评价控制论的出现。N. 维纳（1947）认为：

“如果我说，第一次工业革命是革阴暗的魔鬼的磨房的命，是人手由于和机器竞争而贬值，……；那么现在的工业革命便在于人脑的贬值，至少人脑起的较简单的较具有常规性质的判断作用将要贬值。”

著名控制论学者 J. D. 贝尔纳同样从一场新工业革命兴起的高度来评价控制论。J. D. 贝尔纳（1954）认为：

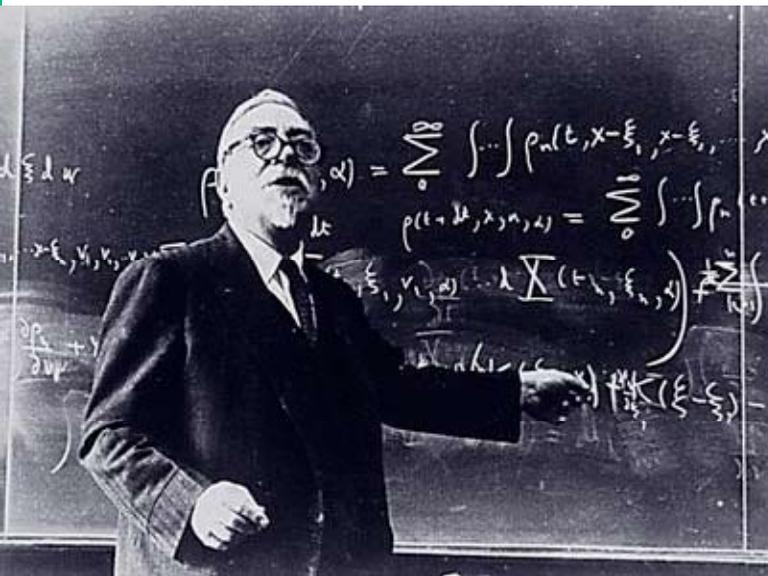


图1. 控制论之父维纳

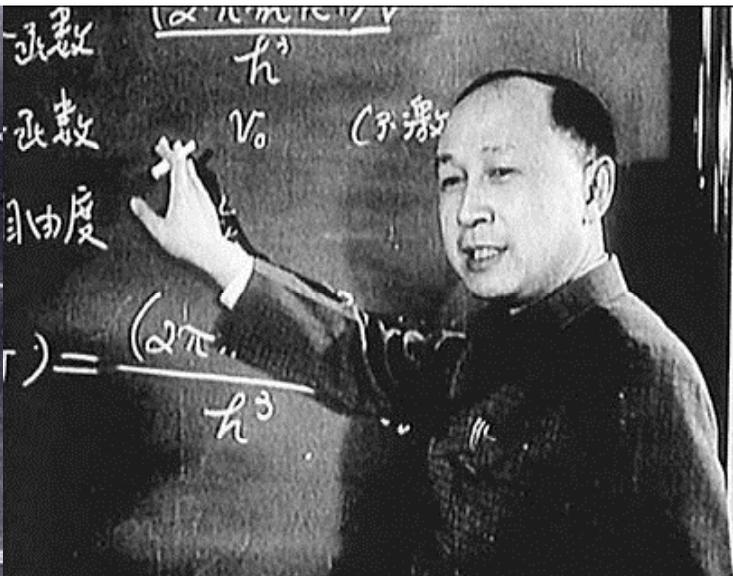


图2. 工程控制论创始人钱学森

“我们有理由提到一次新的工业革命，因为我们引用了电子装置所能提供的控制因素、判断因素和精密因素，还有进行工业操作的速度大大增加了。巨型的自动化生产线，甚至完全自动化的工厂都有了。”

东德科学院哲学研究所所长 G.克劳斯评价控制论的出现是一个当代最重要的科学事件。G.克劳斯（1961）认为：

“除了掌握原子能的科学技术和正在开始的宇宙航行以外，控制论这门新学科以及它所带来的一切社会的、科学的和哲学的后果，也是当代最重要的科学事件。”

工程控制论创始人钱学森高度评价了控制论对当代三项技术革命的关键性推动作用。钱学森（1980）指出：

对现代生产和现代科学技术的面貌发生深远影响的三项技术革命是“核能技术”、“电子数字计算机”和“航天技术”，“但所有这些科学技术的发展，所有这些技术革命都直接与控制论联系在一起。”

钱学森进一步称控制论是二十世纪上半叶人类三大伟绩之一。钱学森（1980）认为：

“作为技术科学的控制论，对工程技术、生物和生命现象的研究和经济科学，以及对社会研究都有深刻的意义，比之相对论和量子论对社会的作用有过之而无不及。我们可以毫不含糊地说从科学理论的角度看，二十世纪上半叶三大伟绩是相对论、量子论和控制论，也许可以称它们为三项科学革

命，是人类认识客观世界的三大飞跃。”

美国控制界高峰会议反映了当今美国权威控制论学者的声音，会议得到的共识《对于控制的挑战》（1986）认为：

“自古代亚历山大时期利用反馈调节流量的克泰希比斯水钟（滴漏），直到今天的宇宙探测火箭和自动化生产工厂，控制系统在技术和科学的发展中都起着关键的作用。”“仅在美国，现已安装的计算机控制系统就已超过30000个，可见控制对经济的影响是巨大的。”

控制论学者和人口控制论学家宋健则从更广泛的角度评价了控制论的重大影响和作用。宋健（1991）认为：

“系统控制的理论和实践是二十世纪对人类生产活动和社会生活发生重大影响的科学领域。”“已经开始的这场新技术革命将在系统控制技术的推动下，把人类生产活动的智能自动化和劳动生产率提高到一个新的、前所未有的程度。”“包括系统控制论在内的关于系统的概念、理论、方法以及系统工程的实践，是人类认识社会、改造社会和引导社会发展的强大武器。”

II 控制论的发展历程

1. 史前时期：个别自动装置的原始应用

▲ 古代，人类出于减轻劳动的愿望，在利用自然界动力代替人力的同时，尝试制造原始的自动装置，以替代部分繁难的脑力劳动。

▲ 公元前14 – 前11世纪，中国、埃及和巴比伦出现自动计时装置 – 漏壶，为人类制作和使用自动装置之始。

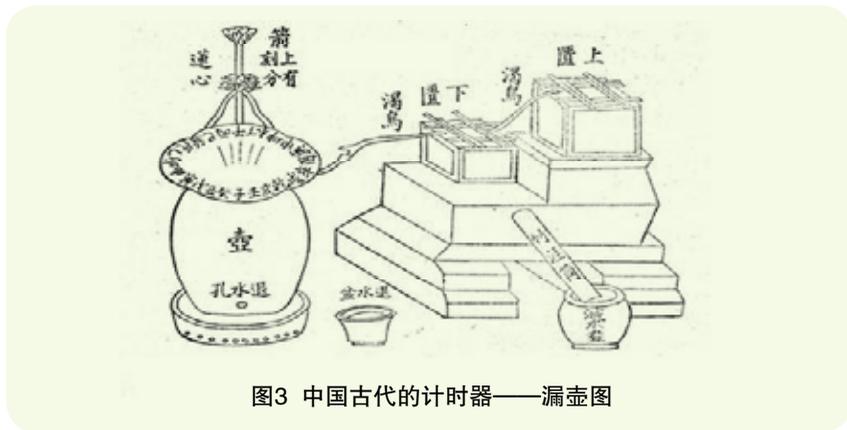


图3 中国古代的计时器——漏壶图

▲ 1世纪，古埃及和希腊出现用于宗教活动的自动装置，如庙门自动开启、铜祭司自动洒圣水、教堂门口自动鸣叫的青铜小鸟等自动装置。

▲ 1086 – 1092年，中国北宋年间出现的水运仪象台，是一种把浑仪（天

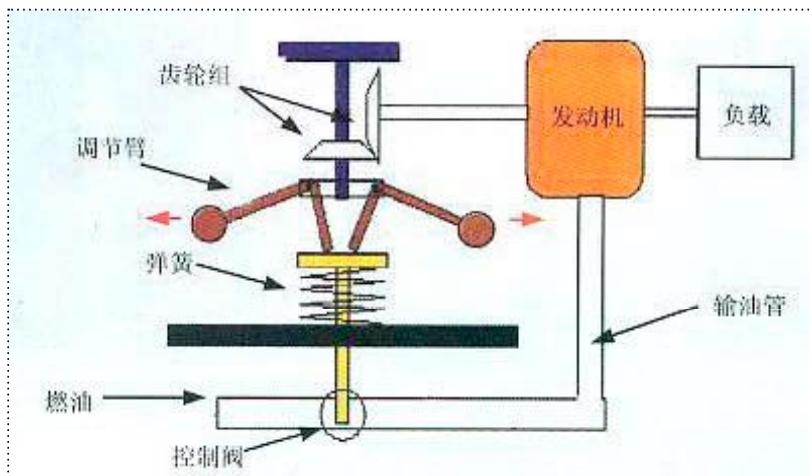


图4 瓦特式离心调速器

文观测仪器)、浑象(天文表演仪器)和自动计时装置结合在一起的自动装置。

▲1642年, 法国人发明能自动进位的加法运算装置。1657

年, 荷兰人制成利用锤形摆作调速器的钟表。1765年, 俄国人发明浮子阀门式水位调节器用于蒸汽锅炉水位的自动控制。

2. “萌芽”时期: 自动调节装置的大规模应用促使控制学科的萌芽

▲ 1788年, 英国人瓦特发明离心式调速器, 并把它与蒸气机阀门连接起来, 构成蒸气机转速的反馈式自动控制系统, 成为第一个大规模应用的自动控制装置。

▲ 瓦特调速器满意的应用效果(能耗降低3/4, 热效率提高4至6倍), 以及蒸汽机作为原动机在当时工业生产中的极端重要的地位, 使瓦特调速器迅速大规模推广, 成为推动第一次工业革命的重要技术。控制技术开始成为对推动社会生产发展具有重大影响的一种需要。

▲ 继瓦特调速器之后, 开始出现采用自动调节装置广泛解决工业生产中提出的控制问题的趋势。1854年俄国人发明电磁调速器, 1868年法国人发明用于操纵蒸汽机动力船的舵的反馈式调节器等。

▲ 自动调节装置在大规模应用中“暴露”出需要研究的理论问题。1868年, 仅英国本土运行的75000台瓦特调速器中, 大部分出现“剧烈振荡”而不能正常运行。解决瓦特调速器中出现的“不稳

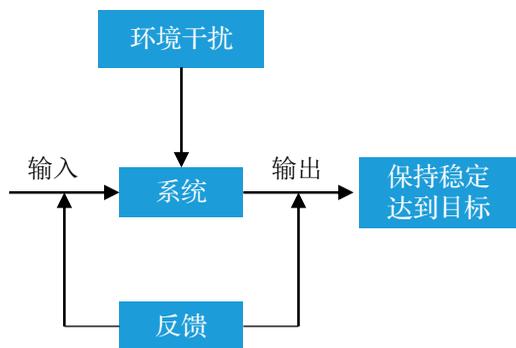


图5 反馈是控制的重要概念

定”问题，成为控制技术领域提出的第一个理论问题。

▲ 1868年，英国物理学家麦克斯韦发表论文《论调速器》，为瓦特调速器的不稳定振荡现象提供理论解释和解决途径。1876年，俄国机械学家维什涅格拉斯基发表《论调节器的一般理论》的论文，形成分析调节器行为和稳定性的一般理论。对于反馈的这种基础性的研究促使控制作为一门学科发展的开端。

▲ 恩格斯曾对此发表过一句深刻的名言。他说：“社会一旦有技术上的需要，则这种需要比之10所大学更能把科学推向前进。”众所周知，那个时代不同于现今时代，当时作为高等学府的大学数量还是十分稀少的。

3. 经典控制理论时期：长途电话革命促成经典控制理论

▲ 20世纪初叶，美国兴起长途电话通讯革命，以适应资本主义新兴市场经济发展的需要。1906年，发明真空三极管，为克服长途电话通讯信号衰减的障碍提供可能性；1915年，贝尔系统完成连接纽约到旧金山横跨美洲大陆的4000多千米的试验通话线；1928年，贝尔实验室布莱克发明反馈放大器投入应用，使高性能的长途电话通讯成为现实。

▲ 长途电话运行中反馈放大器大多出现“嗡嗡作鸣”表现的不稳定振荡，使得解决这类新形式的振荡成为推动控制理论发展的新问题。1932年，贝尔实验室的奈奎斯特提出反馈放大器稳定性的频率特性判据，同时使得基于传递函数和频率特性的分析综合方法得到极大发展，成为经典控制理论形成的一个里程碑标志。

▲ 第二次世界大战期间，为解决战时紧迫问题，控制科学与技术得到极大进展，在高射炮、炸弹瞄准器、舰船、航空、机械等领域，相继设计制造了一大批高精度的自动控制系统，显示了控制的强大威力。

▲ 1950年代前后，基于战时发展起来的控制技术和其后的大量应用实践，导致以“针对单输入-单输出系统”和“基于频率域方法”为特征的经典控制理论的形成。1948年美国学者伊文思进一步引入根轨迹法以分析和综合单输入-单输出控制系统。几乎同一时期，前苏联学者将对数频率特性图解法系统地引入于控制系统的性能分析和校正装置综合。这一切标志着经典控制理论开始走向成熟。

▲ 在应用领域，“单个过程或机器的自动化”即“局部自动化”，开始普及到众多的工业部门。

▲ 1948年，由于经典控制理论在理论上的辉煌成就和在应用上的巨大成功启示下，人们期待这种理论和方法能推广至更复杂的系统，维纳在其著作《控制论》中试图把它的概念和方法扩展到研究生物控制机理和神经系统等



图6 1969年美国阿波罗飞船登月

高度复杂系统，奠定了控制论的基础。

▲ 维纳在其以后出版的题为《我是数学家》的著作中指出，“我宁愿选择1935年作为创立控制论的起点，那时我受聘在清华大学担任客座教授，在电机工程系与后来成为MIT教授的Y. T. Li 教授合作从事滤波器工作的研究。”

▲ 1954年，旅美中国科学家钱学森出版著作《工程控制论》，成为控制论发展历程中又一奠基性著作。

4. “现代控制理论”时期：航天技术革命推向现代控制理论

▲ 1950年前后，蓬勃兴起的航天技术革命成为控制论发展的新的动力。1957年，苏联发射第一颗人造卫星。1966年，苏联发射探测器在月球软着陆。1969年，美国阿波罗载人宇宙飞船登陆月球。这些成就都与控制理论和技术的发展紧密相关。

▲ 1950年代中期，适应航天技术的需要，控制论相继出现三项影响重大的突破。1956年，苏联数学家庞特里亚金创立“极大值原理”，美国数学家贝尔曼创立“动态规划”，为最优控制提供有效的理论工具。1960年，美国应用数学家卡尔曼创立“卡尔曼滤波”，成功地解决了带有随机噪声的信号中信号的恢复问题。

▲ 1960年左右，基于这个“三项标志性结果”，开始形成以“针对多输入-多输出系统”和“最优控制”为特征的“现代控制理论”，控制论进入现代控制理论阶段。

▲ 1970年代,适应生产过程应用的需要,促使现代控制理论的实用化、实时化和智能化。形成了一系列新分支,如“自适应控制”、“预测控制”、“学习控制”、“智能控制”等。

▲ 1980年代,适应研究“计算机集成制造系统”、“机场交通调度系统”、“军事上的C3I系统”等同时包含“管理、规划、控制”的复杂人工系统的需要,发展了“离散事件动态系统”、“混合动态系统”等。

5. 领域“扩展”:在工程控制论成功影响下的领域延伸

▲ 生物控制论的起源和确立。早在维纳1948年创立控制论的过程中,就已将通信和控制系统与生物机体中的某些控制机制通过类比以概括出两类系统的共同规律,开创了“生物控制论”研究之先河。1960年代中期,维纳等合编《生物控制论进展》,汇集了控制论在生物医学的多个不同领域的应用,确立了生物控制论作为控制论的一个分支学科的地位。生物控制论是应用控制论思想和方法研究生物系统的调节、控制和信息处理规律的学科,包括“生物反馈系统的定量和动态行为”,“神经元和神经网络”等,除了用来解释和揭示生物系统的机理外,还试图应用于解决医学中的实际问题。

▲ 经济控制论的起源和确立。“经济控制论”一词提出于1952年。“经济控制论”作为控制论的分支确立于1975年。其主要任务是应用现代控制理论的原理和方法研究经济系统的演变规律和最优控制。观点强调整体、动态、相互关联和协调发展。研究内容包括:“经济控制系统的结构理论”、“宏观经济系统的控制和调节”、“微观经济系统的控制和协调”、“经济大系统的递阶控制和分散控制”等。

▲ 社会控制论的起源和确立。“社会控制论”于1978年确立为控制论的一个分支。其基本思想是把社会作为高度复杂的“政治-经济-文化-生态”综合的多级递阶控制系统。认为社会行为和社会结构不可分,改变系统行为方式必须改变系统结构。强调整体结构的协变、子系统结构的协同和子系统行为的互补。此外用社会控制论作为一种辅助的工具来研究社会系统的某些侧面,有助于发现社会系统的某些具体规律,以便于进行社会预测,为决策者提供决策依据。

▲ 人口控制论的起源和确立。“人口控制论”起源于1970年代初,当时美、日、荷等国学者开始应用控制论方法研究人口问题。1970年代末,中国控制论科学家宋健等从理论和应用两个方面对人口控制进行了系统的定量研究,在数学模型、人口指数、人口系统动态分析、稳定性理论、人口预报、人口结构和人口发展过程的最优控制等方面都取得重要结果,奠定人口控制论的理论基础。人口控制论的理论结果已用于中国人口控制的实践。

III 控制论的对象、内容和方法

1. 控制论的对象

▲ 研究对象：系统。在控制论研究中，系统既可是具有特定属性的具体系统，也可是作为“自然系统”和“人造系统”、“实体系统”和“观念系统”的抽象的一般意义下的系统。

▲ 系统定义：系统是由相互关联和相互作用的一些“部分”组成的具有某种功能的“整体”。古希腊哲学家德谟克利特在著作《世界大系统》中最早采用系统一词。简单系统如工程装置等，复杂系统如人体系统、社会系统等。

▲ 系统模型：模型是对系统的简化和理想化的描述。最常用的是数学模型，表现为数学方程或数学关系。按系统机理和数学模型分类，有“连续变量动态系统”，如线性系统，非线性系统，分布参数系统，随机系统等；“离散事件动态系统”；“混合动态系统”。

▲ 控制机理：引入控制，即通过外部对系统的作用，或校正系统的组成部分及相互作用，使系统实现稳定、期望的性能、或性能优化。

2. 控制论的内容

▲ 基本目标：研究“系统中变量的运动规律”和“改变或优化这种运动规律的可能性与途径”，为设计和实现高性能的控制系统提供必要的理论手段。

▲ 基本概念：“反馈”和“信息”。反馈是利用系统过去行为调节未来行为的一种手段。反馈原理是构成控制系统的最基本原理。反馈控制广泛存在于生物体、经济过程、自动化装置、自动武器等中。信息是实施控制的基础，一个全面的控制过程包括信息提取、信息传输和信息变换。

▲ 系统建模：对系统建立描述其因果关系的模型，是研究控制系统的前提。相应的分支为“系统辨识”，即利用系统的输入输出关系来确定系统的模型，包括辨识结构和估计参数。

▲ 系统分析：定量分析，涉及运动轨线、动态行为、运动跟踪等的规律性。定性分析，涉及运动稳定性，即系统受到扰动后其运动能保持在有限边界区域内或回复平衡状态的性能。稳定性问题是控制论研究的基本问题之一。

▲ 系统结构特性：“能控制性”和“能观测性”。能控制性是指外部控制对系统内部行为的可影响性，能观测性是指系统内部行为由输出的可反映性。它们属于控制系统分析和综合的基础，构成控制论中有决定意义的基本特性。

▲ 控制类型：基本的类型有

常规控制：使控制系统性能达到期望指标的控制类型，还可区分为“自动调节”和“跟踪控制”。

最优控制：使控制系统性能指标达到最优即极大或极小的控制类型，其中线性二次型（LQ）最优控制最为基本。

鲁棒控制：使控制系统在其特性或参数发生摄动时，仍可使其品质指标保持不变的的控制类型。鲁棒一词直接来自其英语的音译。

适应控制：能在系统和环境的信息不完备的情况下，改变自身特性以保持良好品质的控制类型。

容错控制：使一个或几个部件失效下仍能保持控制系统的基本性能而正常运行的控制类型。

学习控制：靠自身的学习功能来认识控制对象和外界环境的特性，并相应地改变自身特性以改善系统性能的控制类型。

模糊控制：采用由模糊数学语言描述的控制规则来操纵系统工作的控制类型。

随机控制：以随机系统为被控对象的控制类型。随机系统指含有内部随机参数、外部随机干扰和观测噪声等随机变量的系统。

▲ 控制结构：基本的结构类型有

集中控制：采用集中型控制结构，即用一个控制器来控制集中的或分散的多个对象。

分散控制：采用分散型控制结构，即用一个局部控制器分别控制一个子对象。

递阶控制：采用层次型控制结构，由下而上形成“控制层”（实时）-“协调层”（时间尺度较慢）-“调度管理层”（时间尺度更慢）。

▲ 状态观测和估计：目的是获取系统的内部信息或对系统实现状态反馈控制。基本类型有，对确定性系统采用“状态观测器”，由输入输出实测值来导出重构状态；对包含内部和外部随机因素的系统采用“状态估计器”，按估计理论由输入输出实测值来导出状态估计。

▲ 优化算法：控制论涉及控制、调度、管理等问题，这类优化问题已被证明几乎大都属于NP完全问题，只能采用“启发式”算法来求解。现今，采用的主要优化算法有“模拟退火算法”、“遗传算法”、“神经网络算法”、“蚁群算法”等。

▲ 智能控制：以控制理论和人工智能结合为基础，可用于对难于建立有效数学模型的复杂系统的控制，具有一些初等的人类智能功能。研究领域有：“智能机器人”即能感觉、操作、行动、处理意外事件，从事一定作业的智能机器；“专家控制”即能仿效人类专家的经验 and 技能进行控制；“智能仪表”等。

3. 控制论的方法

▲ 模型化方法：研究流程采取“系统-模型-分析-综合”，构成控制论的基本方法论。

▲ 数学化手段：研究方法强调“规律化，定量化，普适性”，构成控制论研究

手段特点。

▲ 计算机辅助：研究方式适于辅以“计算机仿真，计算机辅助设计，虚拟现实”，构成控制论研究方式的多样性。

IV. 控制理论的应用领域

1. 军事

▲ 火力控制：例如

——机载火力控制；

——舰载火力控制；

——反坦克导弹控制；

——反导弹防御火力控制。

▲ 自动跟踪控制：高精度地连续跟踪并测量运动目标如车辆、舰船、飞机、导弹、卫星的轨迹参数。

▲ 武器装备的精确制导：

图7 2013年12月我国玉兔号月球车踏上月球



—— 1940年代，德国V-2导弹，射程300公里，向伦敦发射2000枚，1230枚落入市区，其中半数落在距目标中心13公里范围。

—— 1980年代，洲际弹道式导弹，射程10000公里，弹头落点精度，第一代为2770米，第四代在30米以内。

—— 1980年代，战术巡航导弹，命中精度达到几米至十几米。

—— 当代，精确制导技术朝着全导式多弹头、毫米波制导、激光制导、导航卫星定位、全程制导、复合制导、自适应控制、自学习控制等方向发展。

▲ 通信指挥控制情报系统（简称C3I系统），用于军队自动化指挥，也可用于空中交通管制、城市交通管理等。

2. 工业生产

▲ 冶金自动化：高炉、转炉、连铸、连轧等的控制。

▲ 化工自动化：加热炉、换热器、蒸馏塔、化学反应器等的控制，连续过程CIMS。

▲ 电力自动化：锅炉、汽轮机、发电机、电网等的控制，灾变下的紧急控制和解列控制。

▲ 制造自动化：数控机床、工业机器人（焊接，喷漆，装配）、自动化仓库、自动化生产线、计算机集成制造系统（CIMS）等。

▲ 核反应堆控制：新的改进的控制算法可使得系统的安全性和经济性明显提高。

▲ 其他：造纸生产自动化、水泥生产自动化、印染生产自动化、纺织自动化，各种自动控制的家用电器，家庭自动化等。

3. 航天航空

▲ 航天领域，控制的惊人成就的例子如，阿波罗飞船到月球的最优轨线导航和软着陆；海盗号飞行器在距离地球47000万公里之遥的火星实现准确的软着陆；2004年，勇气号和机遇号相继在火星上登陆和运行。

▲ 各种人造卫星，行星探测器，运载火箭，航天飞机，航天遥测和遥控，都是控制在航天技术发展过程中所建立的里程碑。

▲ 航空领域，控制已成为提高飞机性能和安全性中的一个主要手段，自动驾驶仪、高性能喷气引擎的控制、旨在节约燃料的轨迹优化控制等都是典型例子。

▲ 航空领域内，控制取得的一个新成就是，从提高飞行的机动性能出发，F-16和前掠翼型飞机X-29被设计成是静不稳定的，控制系统必须不停地运行才可稳定飞行器和向飞行员提供所需要的决策支持。

4. 小结

▲ 控制论的成功应用极大地推动和提高了生产过程和军事技术的自动化和现代化。

▲ 控制论的广泛影响已经遍及和深入社会生活的众多领域和人类日常生活的一切方面。

▲ 贯穿控制论的众多概念、原理和方法，已有效地采用于宏观经济、人口过程、生物与生命现象、哲学和社会科学等领域。

参考文献

- [1] 《中国大百科全书：自动控制与系统工程》，北京，上海：中国大百科全书出版社，1991.
- [2] Wiener N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. MA: MIT Press, 1948.
- [3] 贝尔纳 J. D. 历史上的科学，伍况甫译. 北京：科学出版社，1959.
- [4] 钱学森、宋健. 工程控制论（修订版），上册. 北京：科学出版社，1980.
- [5] MacFarlane A G J. Development of Frequency-Response Methods in Automatic Control, IEEE Trans. Automatic Control, 1979, AC-24: 250-265.
- [6] 佛特曼 T E, 海兹 K L. 线性控制系统引论，吕林等译. 北京：机械工业出版社，1980.
- [7] 对于控制的挑战. 美国国家科学基金会和IEEE控制系统学会组织的专题研讨会（1986年9月18-19日）报告，《控制与决策》编辑部译.
- [8] 《马克思恩格斯选集》第四卷，第505页. 北京：人民出版社，1972.
- [9] 郑大钟. 控制科学的发展及其启示. 自然辩证法研究，1986, 1(6): 57-62.