

中国系统工程学会 编
上海交通大学

钱学森系统科学思想文库

工程控制论

(新世纪版)

钱学森 著

戴汝为 译
何善墀

上海交通大学出版社

1B114.2

工程控制論

錢學森著

科學出版社

《工程控制论》

H. S. TSIEN
ENGINEERING CYBERNETICS
McGraw-Hill Publishing Company Ltd.
New York, London, Toronto

内 容 简 介

本书的目的是把一般性概括性的理论和实际工程经验很好地结合起来,对工程技术各个系统的自动控制和自动调节理论作一个全面的探讨。它一方面奠定了工程控制论这门技术科学的理论基础,另一方面指出这门新学科今后的几个研究方向。

本书最初是用英文写的。现在的中文版是在钱学森先生的指导下,翻译英文版并且参照俄文译本略加修改和补充而成。

本书曾荣获中国科学院 1956 年度一等科学奖金。

图书在版编目(C I P)数据

工程控制论: 新世纪版 / 钱学森著. —上海: 上海交通大学出版社, 2007
ISBN 978-7-313-04325-2

I. 工... II. 钱... III. 工程控制论
IV. TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 140003 号

工程控制论

(新世纪版)

钱学森 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 20.25 插页: 8 字数: 386 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—4050

ISBN 978—7—313—04325—2/TB·079 定价: 40.00 元

版权所有 侵权必究

ЦЯНЬ СЮЭ-СЭНЬ

ТЕХНИЧЕСКАЯ
КИБЕРНЕТИКА

《工程控制论》俄文版

“钱学森系统科学思想文库”序

钱学森是中国现代史上一位杰出的科学家，同时也是一位杰出的思想家。

在长达 70 多年丰富多彩的科学生涯中，钱学森曾建树了许多科学丰碑，对现代科学技术发展和我国社会主义现代化建设做出了杰出贡献。钱学森对我国火箭、导弹和航天事业的开创性贡献，是众所周知的，人们称他为“中国航天之父”。但从钱学森全部科学成就与贡献来看，这只是其中的一部分。实际上钱学森的研究领域十分广泛，从科学、技术、工程直到哲学的不同层次上，在跨学科、跨领域和跨层次的研究中，特别是不同学科、不同领域的相互交叉、结合与融合的综合集成研究方面，都做出了许多开创性的独特贡献。而钱学森在这些方面的科学成就与贡献，从现代科学技术发展来看，其意义和影响可能更大也更深远。

钱学森的科学历程大体上可分为三个阶段。第一阶段是从 20 世纪 30 年代中到 50 年代中。这二十年是在美国度过的，主要从事自然科学技术研究，特别是在应用力学、喷气推进以及火箭与导弹研究方面，取得了举世瞩目的成就。与此同时，还创建了物理力学和工程控制论，成为当时国际上著名的科学家，这些成就与贡献形成了钱学森的第一个创造高峰。

值得指出的是，从现代科学技术发展来看，工程控制

论已不完全属于自然科学领域,而属于系统科学范畴。自然科学是从物质在时空中运动的角度来研究客观世界的。而工程控制论要研究的并不是物质运动本身,而是研究代表物质运动的事物之间的关系,研究这些关系的系统性质。因此,系统和系统控制是工程控制论所要研究的基本问题。钱学森创建工程控制论这个事实表明,在这个时期,钱学森已开始进行跨学科、跨领域的研究,并取得了重要成就。《工程控制论》一书的出版,在国际学术界引起了强烈反响,立即被译成多种文字出版发行。工程控制论所体现的科学思想、理论方法与应用,直到今天仍然深刻地影响着系统科学与系统工程、控制科学与工程以及管理科学与工程等的发展。

第二阶段是20世纪50年代中至80年代初。这一时期钱学森的主要精力集中在开创我国火箭、导弹和航天事业上。这个时期工作更多的是工程实践,要研制和生产出型号产品来。航天科学技术与工程具有高度的综合性,需要广泛地应用自然科学领域中多种学科和技术并综合集成到工程实践中。由于钱学森在自然科学领域中的渊博知识以及高瞻远瞩的科学智慧,使他始终处在这一事业的“科技主帅”位置上。在周恩来、聂荣臻等老一辈无产阶级革命家的直接领导下,钱学森的科学才能和智慧得以充分发挥,并和广大科技人员一起,在当时十分困难的条件下,研制出我国自己的导弹和卫星来,创造出国内外公认的奇迹,这是钱学森的第二个创造高峰。

这里需要强调的是,以“两弹一星”为代表的大规模科学技术工程,如何把成千上万人组织起来,并以较少的投入在较短的时间内,研制出高质量可靠的型号产品来,这就需要有一套科学的组织管理方法与技术,在当时这是一个十分突出的问题。钱学森在开创我国航天事业的过程中,同时也开创了一套既有中国特色又有普遍科学意义的系统工程管理方法与技术。当时,在研制体制上是研究、规划、设计、试制、生产和试验一体化;在组织管理上是总体设计部和两条指挥线的系统工程管理方式。实践已证明了这套组织管理方法是十分有效的。从今天的角度来看,这就是在当时的条件下,把科学技术创新、组织管理创新与体制机制创新有机结合起来,实现了综合集成创新,从而走出了一条发展我国航天事业的自主创新道路。我国航天事业一直在持续发展,现已发展到了载人航天阶段,其根本原因就在于自主创新。

航天系统工程的成功实践,证明了系统工程的理论与方法的科学性和有效

性,它不仅适用于自然工程,同样也适用于社会工程。系统工程的应用与实践也是钱学森对管理科学与工程的重要贡献。

第三阶段是20世纪80年代初到现在。80年代初,钱学森从科研一线领导岗位上退下来以后,就把自己的全部精力投入到学术研究之中。这一时期,钱学森学术思想之活跃、涉猎学科之广泛,原创性之强,在学术界是十分罕见的。他通过讨论班、学术会议以及众多专家、学者书信往来的学术讨论中,提出了许多新的科学思想和方法、新的学科与领域,并发表了大量文章,出版了多部著作,产生了广泛的学术影响,这些成就与贡献也就形成了钱学森的第三次创造高峰。

在这个阶段中,钱学森花费心血最多也最具有代表性的是他建立系统科学体系和创建系统学的工作。从现代科学技术发展趋势来看,一方面是已有学科不断分化,越分越细,新学科、新领域不断产生,呈现出高度分化的特点;另一方面是不同学科、不同领域之间相互交叉、结合与融合,向综合性、整体化的方向发展,呈现出高度综合的趋势。这两者是相辅相成、相互促进的。系统科学就是这后一发展趋势中,最有基础性的学问。钱学森不仅善于从各学科、各领域吸收营养来构建系统科学,如创建系统学、发展系统工程技术等,而且又能从系统科学角度和系统集成思想去思考一些学科和领域的发展,从而提出新的学科和新的领域。如把人脑作为复杂巨系统来研究,提出了“思维科学”;把地球表层作为复杂巨系统来研究,提出了“地理科学”;把人体作为复杂巨系统来研究,提出了“人体科学”等等。这些新的学科和领域不仅与原来相关的学科和领域是相洽的,同时还融入了新的科学思想和科学方法。

在钱学森的科学理论与科学实践中,有一个非常鲜明的特点,就是他的系统思维和系统科学思想。在这个阶段,钱学森的系统科学思想和系统方法有了新的发展,达到了新的高度,进入了新的阶段。特别是钱学森的综合集成思想和系统集成方法,已贯穿于工程、技术、科学直到哲学的不同层次上,形成了一套综合集成体系。综合集成思想与综合集成方法的形成与提出,是一场科学思想和科学方法上的革命,其意义和影响将是广泛而深远的。

钱学森的科学成就与贡献不仅充分反映出他的科学创新精神,同时也深刻地体现了他的科学思想和科学方法。这是我们宝贵的知识财富和精神财富,值得我们认真学习和研究,以便把他所开创的科学事业继续发展下去并发扬光大。正是由于这个原因,中国系统工程学会和上海交通大学编辑出版《钱学森系统科学思

想文库》(以下简称“文库”)。出版这套“文库”的目的,一方面是为广大读者学习和研究钱学森科学思想、科学方法和科学精神提供系统的文献资料;另一方面,我们也将以此献给今年九十五岁高龄的人民科学家钱学森,并祝他健康长寿。

“文库”收集了钱学森在不同时期有关系统科学的主要著作和文章。包括《工程控制论》(科学出版社,1958年)、《论系统工程》(增订本,湖南科学技术出版社,1988年)、《创建系统学》(山西科学技术出版社,2001年)。这三本书构成了“文库”的一、二、三卷。按照系统科学体系结构,工程控制论是处在技术科学层次上,系统工程属于应用技术,而系统学则属于基础理论层次。从这个角度来看,这三卷著作集中反映了钱学森在系统科学及其不同层次上的科学成就与贡献。我们可以从中学习和研究钱学森的系统科学思想、系统方法、系统理论、系统技术与系统应用。这三部著作,曾经培育和影响了几代在这个领域中从事研究工作的专家、学者。他们之中的一些同志,应邀为“文库”出版撰写了自己的研究心得与成果。将这些文章编辑成册就构成了“文库”的第四卷,即《钱学森系统科学思想研究》。

编辑出版这套“文库”,是由中国系统工程学会和上海交通大学联合组织进行的。中国系统工程学会理事长陈光亚研究员、副理事长于景元研究员、涂元季高级工程师和上海交通大学党委副书记潘敏同志、王浣尘教授并邀请中国科学院自动化研究所戴汝为院士、中国科学院系统科学研究所顾基发研究员、北京大学哲学系冯国瑞教授、上海理工大学和上海系统科学研究院车宏安教授共同组成了“文库”编委会。“文库”第一卷由戴汝为负责,第二卷由顾基发负责,第三卷由冯国瑞负责,第四卷由车宏安负责。“文库”的整个组织协调工作由于景元、涂元季负责。在“文库”编辑出版过程中,北京大学朱照宣教授、中国人民大学苗东升教授、二炮装备研究院赵少奎研究员,积极提供了有关资料并参与讨论,为这套“文库”的出版作出了贡献,在此向他们表示衷心的感谢。

编辑出版这套“文库”是一项艰难的工作,我们为此也作了很大努力,力求把这一工作做好。但由于我们水平有限,难免会有这样或那样的缺点和不足,甚至是错误之处。希望读者在阅读和学习“文库”之后,如有发现,请给予批评和指正,我们将十分感谢。

“钱学森系统科学思想文库”编委会

2006年11月

汉 文 版 序

本书原来是用英文写的,当时作者尚在美国,生活不安定,所以写得很粗糙,也没有能够引入非常重要的苏联文献。理当重写一遍,补正这些缺点,但是现在工作忙,尚无暇及此。可是祖国的自动化事业在党的领导下正飞速发展,工程控制论这门学科还是需要介绍。解决这样一个矛盾的办法是:请戴汝为同何善培两位同志根据作者 1956 年春季在中国科学院力学研究所讲工程控制论的笔记,在译英文版的基础上加以补充。今年工程控制论的俄译本也出版了,俄译本编校人费尔德包姆(А. А. Фельдбаум)很耐心地收集了有关的苏联文献,加注到译文里。汉译者就利用了这些文献,在适当的地方用[...]来加注,其中数字相当于书后俄文文献的号数。作者和汉译者希望就这样初步地补正英文版的一些缺点。

钱学森

1957 年 8 月于北京

原 序

著名的法国物理学家和数学家安培(A. M. Ampère)曾经给关于国务管理的科学取了一个名字——控制论(Cybernétique)[安培著:“论科学的哲学”(Essai sur la philosophie des sciences)第二部,1845年,巴黎出版]。安培企图建立这样一门政治科学的庞大计划并没有得到结果,而且,恐怕永远也不会有结果。可是,在这些年代中,各国之间的战争却大大地促进了另一个科学部门的发展,这就是关于机械系统与电气系统的控制与操纵的科学。维纳(N. Wiener)就借用安培所创造的名称“控制论”来称呼这门新的科学,然而,这门科学却是对于现代化战争非常重要的。这真是有些讽刺意味的。维纳的控制论(Cybernetics)[“控制论——关于动物体和机器的控制与联系的科学”(Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948)]是关于怎样把机械元件与电气元件组合成稳定的并且具有特定的性能的系统的科学。这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素,可是在其他各门自然科学中这些因素却是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质,以及整个系统的总的运动状态。

工程控制论的目的是研究控制论这门科学中能够直接用在工程上设计被控系统或被操纵系统的那些部分。因此,通常在关于伺服系统的书里所讨论的那些问题当然都包括在工程控制论的范围之内。但是,工程控制论比伺服系统工程内容更为广泛这一事实,只是二者之间的一个表面的区别,一个更深刻的,因而也是更重要的区别在于:工程控制论是一门技术科学,而伺服系统工程却是一种工程实践。技术科学的目的是把工程实际中所用的许多设计原则加以整理与总结,使之成为理论,因而也就把工程实际的各个不同领域的共同性显示出来,而且也有力地说明一些基本概念的重大作用。简单地讲,理论分析是技术科学的主要内容,而且,它常常用到比较高深的数学工具。只要把本书稍微浏览一下就对这个事实更加清楚了。关于系统的部件的详细构造和设计问题(也就是把理论付诸实践的具体问题)在这本书里几乎是不予讨论的。关于元件的具体问题更是根本不谈的。

能不能够把理论从工程实践分出来研究呢?其实,只要看到目前已经存在的各门技术科学以及它们的飞速发展,就会发现这个怀疑简直是完全不必要的。举

一个特别的例子来说:流体力学就是一门技术科学,它与空气动力学工程师,水力学工程师,气象学家以及其他在工作中经常利用流体力学的研究结果的人的实践是“分割”开来的。可是,如果没有流体力学家的话,对于超音速流动的了解和利用至少也要大大地推迟。因此,把工程控制论建成一门技术科学的好处就是:工程控制论使我们可能有更广阔的眼界用更系统的方法来观察有关的问题,因而往往可以得到解决旧问题的更有成效的新方法,而且工程控制论还可能揭示新的以前没有看到过的前景。最近若干年以来,控制与导航技术已经有了多方面的发展,所以,确实也很有必要设法用这样一种统观全局的方法来充分地了解与发挥这种新技术的潜在力量。

因此,关于工程控制论的讨论,应该合理地包括科学中对于工程实践可能有用的所有方面。尤其是不应该仅仅由于数学的困难而逃避任何一个问题,其实,深入地考虑一下就会发觉,任何一个问题在数学上的困难常常带有很大的性质。只要把问题的提法稍微加以改变,往往就可以使问题的数学困难减轻到进行研究工作的工程师所能处理的程度。因此,本书的数学水平也就是读过数学分析课程的大学生的水平。关于复变数积分,变分法和常微分方程的基本知识是研读这本书所预先需要的。此外,只要比较直观的讲法能够达到目的,我们就用严密的精巧的数学方法来讨论;所以,以一个专门作具体工作的电子工程师的眼光来看,我们这种做法一定是太“学究气”了;可是,从一个对这门科学有兴趣的数学家的眼光来看,这种做法可能是太“不郑重”了。如果真的只有这两种批评的话,作者一方面愿意承担这种责任,另一方面也会感到一些满意,因为他将认为他在原来要作的事业里没有完全失败。

在编写本书期间,作者从和他的两位同事的多次交谈中得益很多,因为,这些谈话常常使一些含混之处突然明确起来。这两位先生就是美国加利福尼亚省理工学院(California Institute of Technology)的马勃尔(Frank E. Marble)博士和德普利马(Charles R. Deprima)博士。由于塞尔登杰克梯(Sedat Serdengecti)和温克耳(Ruth L. Winkel)给予的有效帮助,大大地减轻了书稿的准备工作。对于以上提到的各位先生,作者谨表示衷心的感谢。

钱学森

目 录

A	汉文版序	1
	原序	2
B	第一章 引言	1
	1.1 常系数线性系统	1
	1.2 变系数线性系统	3
	1.3 非线性系统	5
	1.4 工程近似的问题	6
	第二章 拉氏变换法	8
	2.1 拉氏变换和反转公式	8
	2.2 用拉氏变换法解常系数线性微分方程	9
	2.3 拉氏变换的“字典”(拉氏变换表)	10
	2.4 关于正弦式的驱动函数的讨论	11
	2.5 关于单位冲量驱动函数的讨论	13
	第三章 输入、输出和传递函数	15
	3.1 一阶系统	16
	3.2 传递函数的表示法	19
	3.3 一阶系统的一些例子	21
	3.4 二阶系统	28
	3.5 确定频率特性的方法	33
	3.6 由多个部件组成的系统	34
	3.7 超越的传递函数	36

第四章 反馈伺服系统	40
4.1 反馈的概念	40
4.2 反馈伺服系统的设计准则	42
4.3 乃氏(Nyquist)法	44
4.4 艾文思(Evans)法	48
4.5 根轨迹的流体力学比拟	53
4.6 伯德(Bode)法	55
4.7 传递函数的设计	56
4.8 多回路伺服系统	57
第五章 不互相影响的控制	60
5.1 单变数系统的控制	60
5.2 多变数系统的控制	61
5.3 不互相影响的条件	65
5.4 反应方程	69
5.5 涡轮螺旋桨发动机的控制	70
5.6 有补充燃烧的涡轮喷气发动机的控制	73
第六章 交流伺服系统与振荡控制伺服系统	76
6.1 交流系统	76
6.2 把直流系统变为交流系统时传递函数的变化方法	78
6.3 振荡控制伺服系统	79
6.4 继电器的频率特性	80
6.5 利用固有振荡的振荡控制伺服系统	83
6.6 一般的振荡控制伺服系统	85
第七章 采样伺服系统	88
7.1 一个采样线路的输出	88
7.2 施梯必茨-申南(Stibitz-Shannon)理论	89
7.3 采样伺服系统的乃氏准则	92
7.4 稳态误差	93
7.5 $F_2^*(s)$ 的计算	94
7.6 连续作用伺服系统与采样伺服系统的比较	96

7.7 $F_2(s)$ 在原点有极点的情形	96
第八章 有时滞的线性系统	98
8.1 燃烧中的时滞	99
8.2 萨奇(Satche)图	101
8.3 有反馈伺服机构的火箭发动机的系统动力学性质	104
8.4 没有反馈伺服机构时的不稳定性	107
8.5 有反馈伺服机构时的系统的稳定性	108
8.6 时滞系统的稳定性的一般判断准则	112
第九章 平稳随机输入下的线性系统	116
9.1 随机函数的统计描述方法	116
9.2 平均值	118
9.3 功率谱	120
9.4 功率谱的例子	122
9.5 功率谱的直接计算	124
9.6 离开平均值的大偏差的概率	128
9.7 随机函数超过一个固定值的频率	131
9.8 线性系统对于平稳随机输入的反应	132
9.9 二阶系统	134
9.10 不可压缩的湍流中作用在一个二维机翼上的举力	135
9.11 间歇的输入	137
9.12 为随机输入而作的伺服控制设计	138
第十章 继电器伺服系统	141
10.1 一个继电器的近似的频率特性	141
10.2 柯氏(Kochenburger)方法	143
10.3 其他的频率迟钝非线性机构	146
10.4 继电器伺服系统的最优运转状态	147
10.5 相平面	148
10.6 线性开关	151
10.7 最优开关函数	156
10.8 二阶线性系统的最优开关曲线	160
10.9 多方式的控制作用	163

第十一章 非线性系统	165
11.1 有非线性反馈的继电器伺服系统	165
11.2 弱非线性系统	167
11.3 跳跃现象	168
11.4 频率缩减	169
11.5 频率侵占现象	170
11.6 异步激发和异步抑制	171
11.7 参数激发和参数阻尼	171
第十二章 变系数线性系统	174
12.1 火箭弹在燃烧过程中的运动状态	175
12.2 线性化的弹道方程	177
12.3 火箭弹的稳定性	178
12.4 变系数系统的稳定性问题和控制问题	182
第十三章 利用摄动理论的控制设计	183
13.1 火箭的运动方程	183
13.2 摄动方程	187
13.3 伴随函数	189
13.4 射程的改正	191
13.5 关车条件	192
13.6 导航条件	193
13.7 导航系统	195
13.8 控制计算机	196
附录 摄动系数的计算	199
第十四章 满足指定积分条件的控制设计	203
14.1 控制的准则	203
14.2 稳定性问题	205
14.3 一阶系统的一般理论	206
14.4 一般理论对喷气发动机的控制的应用	208
14.5 温度有一定限制条件的速率控制	210
14.6 两个自由度的二阶系统	213

14.7	以微分方程作为附加条件的控制设计	216
14.8	控制设计概念的比较	217
第十五章	自动寻求最优运转点的控制系统	218
15.1	基本概念	218
15.2	自动寻求最优点控制的原理	220
15.3	干扰的影响	223
15.4	自动保持最高点的控制系统	224
15.5	动力学现象的影响	226
15.6	稳定运转的设计	230
第十六章	噪声过滤的设计原理	233
16.1	平均平方误差	233
16.2	菲利普斯(Phillips)的最优过滤器设计原理	237
16.3	维纳-阔尔莫果洛夫(Wiener-Колмогоров)理论	237
16.4	一些简单的例子	241
16.5	维纳-阔尔莫果洛夫理论的应用	243
16.6	最优检测过滤器	248
16.7	其他的最优过滤器	251
16.8	一般的过滤问题	252
第十七章	自行镇定和适应环境的系统	254
17.1	自行镇定的系统	254
17.2	自行镇定的系统的一个例子	257
17.3	稳定的概率	260
17.4	终点场	261
17.5	适应环境的系统	265
第十八章	误差的控制	267
18.1	用加倍的办法改进可靠性	267
18.2	基本元件	268
18.3	复合方法	270
18.4	执行机构中的误差	273
18.5	复合系统的误差	278

18.6 一些例子	281
俄文文献	283
索引	286
附录	293
C 工程控制论简介	293
现代化、技术革命和控制论	296
编后记	310