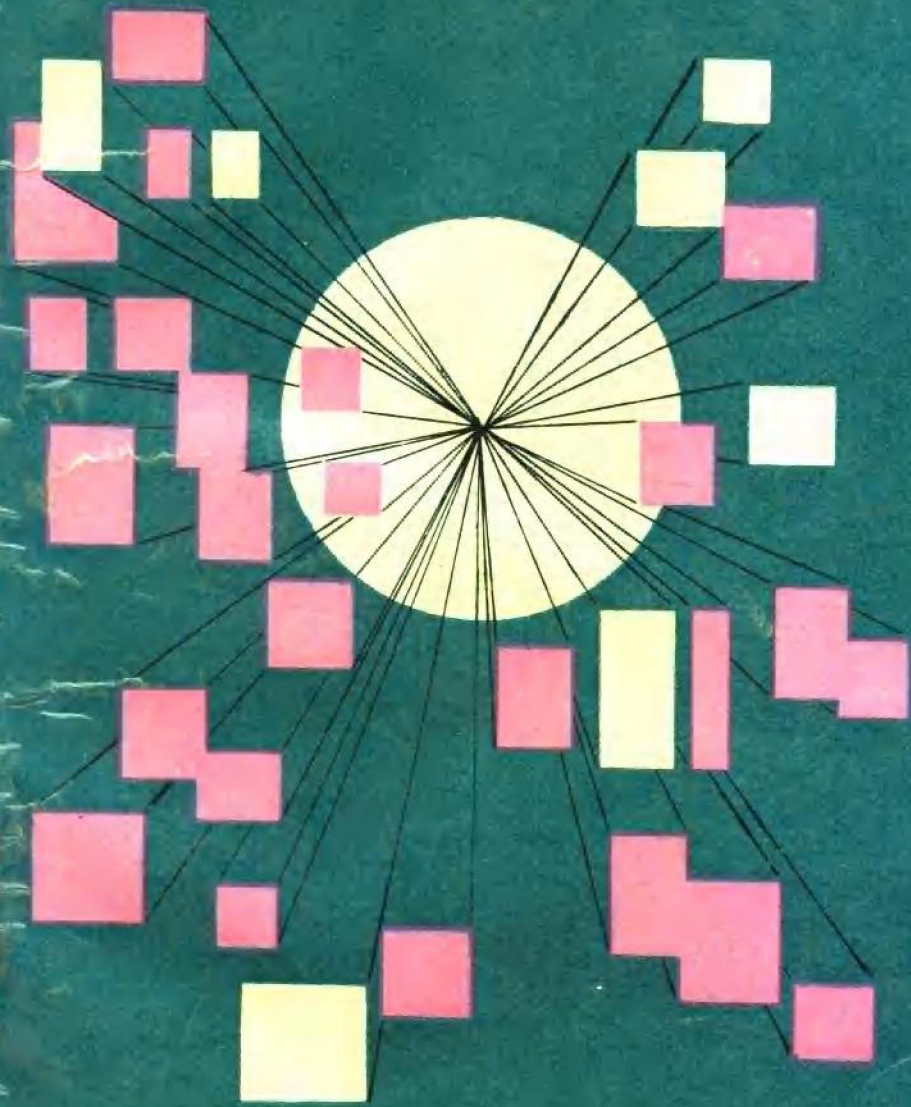


控制论基础

王行愚 编著



华东化工学院出版社

控制论基础

王行愚 编著

华东化工学院出版社

内 容 提 要

本书是一本颇具特色的控制论基础书。作者采用现代科学观点,论述了控制论的大多数领域及控制论的新面貌。全书共分15章,第1、第2章为引子及概论。第3~11章论述了控制论的基本理论及方法:系统的描述、辨识和分析;最优控制系统;状态估计;随机控制和自适应控制;大系统理论及模糊控制。第12~15章介绍控制论应用的一些独立分支:工程控制论;经济控制论;生物控制论和智能控制论。

本书视野较宽,涉及面广泛,使读者能对控制论的基本内容、发展沿革和动向有很好的了解,并能掌握控制论的思想方法。可供各专业的大学生、研究生、教师、工程技术人员和社会科学研究人员阅读。

控 制 论 基 础

Kongzhilun Jichu

王行愚 编著

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路130号)

新华书店上海发行所发行

江苏常熟周行联营印刷厂

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 10.375 字数 279 千字

1989年2月第1版 1989年9月第2次印刷

印数 3801-6800 册

ISBN 7-5628-0014-6/TP·3 定价: 3.00元

前 言

控制论是本世纪 40 年代末发展起来的一门新兴学科。控制论的奠基人诺伯特·维纳把控制论定义为：在动物和机器中控制和通讯的科学。30 多年来，控制论在各个领域中的应用已经取得了辉煌的成果，它对工程技术、生物科学、经济科学及社会科学的研究都有着深刻的意义，比起相对论和量子论对社会的作用有过之而无不及。控制论已经成为 50 年代以来不可忽视的科学思潮为人类认识和改造世界提供了新的科学思想和方法。

与非常专门的学科相反，控制论是属于一类跨学科的、边缘的和普遍化的科学，它的发生和发展涉及历史和当代的许多重要学科知识，它的基本思想和方法应该也能够为不同专业的大学生、研究生、教师、工程师、医生、管理和科技工作者所掌握。然而，由于专业分工等缘故，多数非自控专业的读者对于控制论缺乏比较全面和具体的了解，以致于很难在自身的工作中，运用控制论去指导和解决各种问题。本书就是专门为那些希望“具体”了解控制论的读者而编写的，试图在较短的学时内讲授控制论的基本原理和方法，作为他们深入钻研和运用控制论的“入门指导”。

为了达到上述目的，在写法上，本书力图将“通俗的讲解”和“严密的论述”相结合，使本书能为没有高深数学专业知识的读者所接受。在选材上，本书挑选了控制论中一些重要、实用、新颖和有趣的内容。希望通过对这些内容的讲述来“刻划”控制论的基本原理和方法，使读者不仅对控制论有一个“定性的”印象，而且也有“定量的”认识。因此，在一定程度上，本书将成为控制论科普读物和专著之间的桥梁。

本书前 11 章论述了控制论的起源、科学基础以及控制论的基本概念、原理和方法。从第 12 章到第 15 章分别介绍了控制论的主要分支：工程控制论、生物控制论、经济控制论和智能控制论。通过上述各章的介绍，可使读者对控制论有一个比较全面的了解。当

然,学习的成效不在于记住了多少结论,而是要通过各章的学习逐步掌握控制论的思想和方法。

维纳曾经说过:在科学的发展上可以得到最大收获的区域是各种已经建立起来的部门之间的被忽视的无人区。正是这些科学的边缘区域,给有修养的研究者提供了最丰富的机会。作者衷心希望,通过本书的学习,能促进不同专业读者互相对话,去共同开垦科学的处女地,去探索和研究新的领域。

本书是作者自1985年以来为研究生开设《控制论基础》课程所撰写的讲义的基础上进一步充实、发展而成的。在本书的编写和讲授中,蒋慰孙教授给予了热情鼓励和帮助,并审阅了全书,对此表示衷心的感谢。

由于作者学识浅薄,不妥之处,恳望批评指正。

编者

目 录

1	导论	(1)
1.1	控制论的起源	(1)
1.2	控制论的研究对象	(5)
1.3	控制论的基本概念	(7)
1.3.1	信息	(8)
1.3.2	系统	(11)
1.3.3	控制	(14)
2	控制论的科学基础	(18)
2.1	统计学	(18)
2.2	数理逻辑	(23)
2.3	语言学	(27)
2.4	生物科学	(31)
3	系统的描述	(35)
3.1	动态系统描述的时域法	(35)
3.1.1	动态系统的状态空间描述	(35)
3.1.2	动态系统输入-输出关系的差分方程描述	(38)
3.1.3	动态系统的脉冲响应描述	(40)
3.2	动态系统描述的频域法	(42)
3.3	系统的逻辑描述法	(47)
3.3.1	时序逻辑系统的描述	(48)
3.3.2	图灵机的描述	(50)
3.3.3	自动机的概率描述	(53)
4	系统辨识	(57)
4.1	系统辨识问题	(57)
4.2	系统的参数估计	(60)
4.3	系统的非参数模型辨识	(67)
4.3.1	线性系统的脉冲响应辨识	(68)
4.3.2	非线性系统的非参数辨识	(72)
4.4	系统的结构辨识	(74)

5	系统分析	(77)
5.1	状态空间分析法	(77)
5.2	房室分析法	(80)
5.2.1	房室的定义	(81)
5.2.2	房室的数学描述	(82)
5.3	系统的稳定性	(85)
5.4	系统的能控性与能观性	(92)
6	最优控制	(98)
6.1	最优控制问题的数学描述	(98)
6.2	最小值原理	(101)
6.2.1	最小值原理的表述	(101)
6.2.2	线性二次型最优调节器	(105)
6.3	动态规划与离散系统的最优控制	(111)
6.3.1	最优途径问题	(111)
6.3.2	离散系统最优控制问题	(113)
7	状态估计	(118)
7.1	引言	(118)
7.2	线性系统的状态观测器	(119)
7.2.1	一般观测器	(119)
7.2.2	最小维观测器	(121)
7.3	卡尔曼滤波器	(128)
7.3.1	最优估计问题	(128)
7.3.2	卡尔曼滤波公式	(129)
8	随机控制	(139)
8.1	引言	(139)
8.2	随机控制问题的描述	(141)
8.3	最小方差控制	(144)
8.4	确定性等价原理和LQG问题的解	(152)
9	自适应、学习和自组织	(158)
9.1	基本概念	(158)
9.1.1	自适应	(158)
9.1.2	学习	(159)

9.1.3	自组织	(161)
9.2	自适应控制系统	(164)
9.2.1	自适应机的一般原理	(164)
9.2.2	参考模型自适应控制系统	(165)
9.2.3	自校正调节器	(167)
9.3	学习系统	(170)
9.3.1	学习的方式	(171)
9.3.2	图形识别	(172)
9.3.3	塞尔弗里奇的“群妖堂”	(174)
9.3.4	再励学习系统	(176)
9.4	自组织系统	(177)
10	大系统	(181)
10.1	引言	(181)
10.2	大系统的基本概念	(182)
10.3	分解-协调方法	(186)
10.3.1	分解-协调的基本思想	(186)
10.3.2	线性大系统的递阶控制	(188)
10.4	分散控制	(192)
11	模糊控制	(197)
11.1	引言	(197)
11.2	模糊集合论	(199)
11.2.1	模糊集与隶属函数	(199)
11.2.2	分解定理与扩张原则	(207)
11.3	模糊关系和模糊系统	(209)
11.3.1	模糊关系	(210)
11.3.2	模糊系统	(215)
11.4	模糊语言和近似推理	(216)
11.4.1	模糊语言	(216)
11.4.2	近似推理	(219)
11.5	模糊控制器	(223)
11.5.1	模糊控制器原理	(224)
11.5.2	模糊控制应用举例	(228)

12	工程控制论	(238)
12.1	引言	(238)
12.2	工程控制论的主要内容和特征	(239)
12.2.1	经典控制理论	(239)
12.2.2	现代控制理论	(241)
12.2.3	大系统理论	(241)
12.3	应用举例	(241)
12.3.1	造纸机的计算机控制	(241)
12.3.2	生化过程的辨识与控制	(248)
12.3.3	宇宙飞船的姿态控制和软着陆	(253)
13	生物控制论	(261)
13.1	生物控制论的产生与发展	(261)
13.2	生物系统分析	(264)
13.2.1	生物反馈系统的研究	(264)
13.2.2	生物信号分析	(265)
13.3	生物系统的辨识	(267)
13.4	脑和神经系统	(271)
13.4.1	神经与神经网络	(272)
13.4.2	感觉信息处理	(277)
13.4.3	脑信息处理系统	(277)
14	经济控制论	(280)
14.1	经济控制论的形成	(280)
14.2	经济控制论的基本概念	(284)
14.2.1	经济控制论系统	(284)
14.2.2	经济时间和经济空间	(286)
14.2.3	计量经济模型概念	(289)
14.3	建模与控制	(289)
14.3.1	建模的一般程序	(289)
14.3.2	几种典型的计量经济模型	(291)
14.3.3	经济系统的控制方法	(294)
14.4	应用举例	(295)
14.4.1	国民经济总控制论系统	(296)

14.4.2	密执安经济模型.....	(297)
14.4.3	最优库存问题	(299)
15	智能控制论.....	(304)
15.1	智能模拟	(304)
15.2	人工智能程序的设计原理	(308)
15.3	应用与前景	(313)
15.3.1	博弈	(313)
15.3.2	机器人	(314)
15.3.3	专家系统	(315)
15.3.4	美学	(317)
参考文献.....		(319)

1 导 论

在科学的发展上可以得到最大收获的领域是各种已经建立起来的部门之间的被忽视的无人区。……正是这些科学的边缘区域，给有修养的研究者提供了最丰富的机会。

诺伯特·维纳(Norbert·Wiener)

1.1 控制论的起源

控制论这门科学是 40 年代后期才开始发展的，它的诞生一般是以 1948 年诺伯特·维纳的出色著作《控制论》的出版为标志 [1]。这是人类科学发展史上又一新的里程碑。

维纳是美国的著名数学家。他生于 1894 年，逝世于 1964 年。除了在数学上有很高造诣之外，他是一位兴趣十分广泛，知识渊博和思想活跃的学者。他曾被誉为“神童”。14 岁毕业于塔夫茨学院，18 岁获得塔夫茨学院博士学位，1913 年至 1915 年到英国剑桥大学和德国哥廷根大学研究数学。从师于著名学者 B·罗素，G. H. 哈迪和 D·希尔伯特。1919 年起到马萨诸塞理工学院数学系工作。1948 年发表了上述奠基性著作。

在《控制论》中，这位杰出的学者清楚地论述了发展一门一般的控制理论的方法，并为从一个统一观点来考察各种系统的控制和通讯问题的方法奠定了基础。此书震动了科学界，维纳也因此一举成名。科学家们被该书中新颖的科学思想和观点所深深地吸引，纷纷研究和引进控制论，控制论像澎湃的春潮，席卷了几乎所有的科学领域。

和所有的新兴科学一样，控制论的诞生和发展绝非偶然，而是有着悠悠流长的思想渊源和深刻的历史背景。

构成控制论基本概念的若干科学趋势，可以追溯到几千年前。

在我国古代,二千多年前业已成书的中医名著《黄帝内经》,就已体现了控制论的朴素思想。在西方,控制论一词 cybernetics 来源于古希腊文 κυβερνητης 即“掌舵术”。从近代历史来看,在17世纪,巴斯卡(Pascal)和莱布尼茨(Leibniz)就曾有过设计数字计算机的想法。在19世纪巴贝奇(Babbage)又以更成熟和精巧的方式研究过这种自动计算装置。一百多年前,从麦克斯韦(Maxwell)和维什涅格拉特斯基(Вышнеградский)的工作开始,控制和反馈系统的理论就已经发展起来了。1868年麦克斯韦发表的一篇关于调速器的文章是关于反馈机构的第一篇重要论文。用逻辑语言来研究系统的专著也已在五十多年前问世。然而,所有这些工作都没有形成系统的思想和理论,以致于维纳《控制论》发表会产生如此强烈的震动和“连锁反应”。

在科学的进程中,数学和物理科学、生物科学和计算机科学对控制论的诞生起了关键的作用,成为控制论思想的发源地。

数学和物理的发展,导致了人们对随机现象的定量研究。一个多世纪以来,吉布斯提出的统计力学观念已经浸入了当时科学的每一个分支。按照拉普拉斯决定论和牛顿力学的格式来描绘世界的观点,已经被统计的、进化的观点所取代。在这种观点的影响下,维纳突破了传统的自动调节理论,把自动控制理论建立在统计理论的基础之上。这种新的观点和数学框架,为控制理论的发展,开创了新的阶段。

生物学的发展,曾经历了重大的革命。19世纪下半叶生物学的变革,建立了动植物组织的细胞构造理论,出现了达尔文的进化论。而现代生物学的革命则主要是以分子生物学的发展和在分子水平上研究生物体的生物学认识方法为前提。在发展的过程中,工程系统中的稳定性概念也进入了生物系统的研究。早在一百多年前,法国生理学家伯尔纳(Claude Bernard)就对生理参数的稳定性有深刻的认识。他认为:“内环境的恒定性是机体自由和独立生存的基本条件。”1929年美国生理学家坎农(Walter B. Cannon)把这种内环境的稳定称之为体内稳态(homeostasis),它是指

机体内环境不断地通过复杂的神经体液调节，所建立起的动态平衡。没有控制和调节就不可能有体内稳态。正是这种体内稳态，保证了复杂的生理过程在生命的原生质中得以正常进行。体内稳态概念的建立，意味着人类对生命活动的认识已进入一个新的阶段，推动了生物科学发展的同一智力冲动，同时也推动了控制论的发展。1943年，维纳、别格罗和罗森勃吕特联名发表了著名论文《行动，目的和目的论》，首次用反馈来代替目的性的行为，揭示了生物学、生理学、机器控制和信息的共同特性，这是控制论萌芽的重要标志。

计算机科学的早期研究，主要是计算机的制造和数理逻辑的研究。这种研究也推动了思维过程理想的或实际的模型化。维纳在《控制论》的导论中写道：“在控制论的历史上反复出现过的一个因素，即数理逻辑的影响，这时也参与进来了。假如我必须为控制论从科学史上挑选一位守护神，那就挑选莱布尼茨。莱布尼茨的哲学集中表现于两个密切联系着的概念——普遍符号论的概念和推理演算的概念。”早在电子计算机问世之前，维纳等人已经预言，以替续的开关装置为基础的快速计算机必定会是神经系统中发生的各种问题的模型。神经元兴奋的“全或无”性质与二进制数中决定数字时的单一选择和开关网络的“断或通”性质之间是十分相似的；解释动物记忆的性质和变化的问题与机器中的人工记忆问题也是互相类似的。来自计算机科学的思想、类比和计算机制造的实践，使得维纳及其同事们关于控制论的思想日趋完善和成熟。

除了历史和现实的客观原因及控制论奠基者们的渊博知识和天才条件之外，控制论的诞生还得益于方法论上的创新和突破。

维纳曾是B.罗素的弟子，他对于哲学和方法论有着特殊的兴趣。1911~1913年，他在哈佛参加过约·劳埃斯领导的方法论讨论班。30年代后，又参加了由哈佛医科学学校的阿托罗·罗森勃吕特博士领导的科学方法讨论会。参加者大多是哈佛医科学学校的青年科学家，也有数、理、电子、工程和心理学等各行业的专家。经过充分的讨论，维纳和罗森勃吕特共同认识到：现代科学的发展，

一方面使科学日益成为专门家在愈来愈窄的领域内进行着的事业；另一方面又出现了互相交叉的边缘地带。这些边缘区域需要科学的综合研究。他们认为，在这块科学的处女地上去作适当勘查和耕耘的工作，只能由一批既是他自己领域的专家又对与他邻近的领域有着十分正确和熟练知识的专家来担任。“数学家不需要有领导一个生理学实验的本领，但却需要有了解一个生理学实验、批判一个实验和建议别人去进行一个实验的本领。生理学家不需要有证明某一个数学定理的本领，但是必须能够了解数学定理中的生理学意义，能够告诉数学家他应当去寻找什么东西。”〔1〕

正是在这种共同观念和方法的指导下，在维纳和罗森勃吕特周围聚集了一批杰出的科学家，其中有博弈论和二进制计算机的创始人冯·诺意曼，数学家和工程师别格罗、戈德斯汀，神经生理学家瓦·麦克卡洛，数理逻辑学家匹茨，数学家李郁荣博士和物理学教授瓦拉尔塔博士等等。在这一批科学家的努力下，1943年至1944年之间的冬末，由维纳和诺意曼发起，在普林斯顿召开了一次对控制论的全面讨论会，工程界、数学界和生物学界都有代表参加。这次会议沟通了思想，使大家明白，在不同领域的工作者之间确实存在着一个实在的共同的思维基础，每一个人都可以运用已经由别人发展得更为成熟的概念，然而必须采取一些步骤来获得共同的辞汇。1946年春，由麦克卡洛与梅氏基金会主持，在纽约召开了反馈问题的专题会议，心理学家、社会学家和经济学家也参加了会议。这两次会议成为控制论产生的序曲，1948年，维纳《控制论》的出版，宣告了作为一门科学的控制论的正式诞生。

控制论的诞生，具有十分重要的理论意义和实践意义。它是20世纪上半叶继相对论和量子论之后的又一科学理论的伟绩。它不仅揭示了生命机体、社会与技术系统之间共同的控制规律，而且在许多方面冲破了传统的思维方式和研究方法的束缚，为现代科学的研究提供了一套崭新的科学方法，它还促进了当代哲学观念的一系列变革。

1.2 控制论的研究对象

自从维纳提出控制论至今,虽已经历了近 40 年的历史,但是,对于什么是控制论?控制论的研究对象是什么?还没有一个统一的定义。人们从不同的侧面去认识和研究控制论,对于它的解释也各有侧重。这也许是所有新兴边缘学科所共有的特征。然而,作为一门学科总有一个大致的研究范围,在本节中,我们将对控制论的研究对象及其特点作一简略的分析。

首先,我们分析控制论创始人维纳对这一问题的看法。维纳在《控制论》书名的副标题中,明确指出控制论的研究对象是动物和机器中的控制和通讯问题。当时,他对于控制论能用于社会系统持怀疑态度。几年后,在《人当作人来使用》一书中,他不仅改变了看法,甚至认为控制论在社会系统中应用的可能性已经出现,以后维纳的认识又有发展,在 1960 年,他参加了在莫斯科举行的国际自动控制联合会、国际自动控制与自动调节联合会第一次会议。在此期间,他明确表示,控制论的最主要和最迫切的任务是“研究自行组织系统、非线性系统以及同生命是怎样一回事有关的那些问题。但是所有这些——三种提法说的是同一回事。”他还说:“我用‘控制论’这个词标志这这个问题的领域,是出自一个简单的原因,我在今天的生物科学和工程科学进行研究的那些过程中,找到了许多相似的东西,因而力图使用这样的词汇,把不同的相似性表示和指明出来,否则在这领域进行的工作就会混杂不齐,并缺少对问题的最基本的共同的理解。我的目的就在于把各个科学领域中进行的努力联合起来,使它们都致力于对相似问题的划一的解决。”

由此可见,维纳把控制论的研究对象扩充到生物、社会和机器中控制和通讯的共同规律的研究,但他强调的是对于有生命系统的控制机制的模拟研究。著名控制论专家英国生理学家艾什比(W. Ross. Ashby)在《控制论导论》一书中,对于控制论研究对象和特点的观点与维纳的观点基本类似,他认为:“控制论也确实可以定义为:它是研究这样一类系统的科学,在这类系统中能量是无

关紧要的,而信息及控制却非常重要,换言之,它研究的系统是‘不透信息’的。”同时,艾什比强调控制论是研究复杂系统的。而复杂系统在生物界中则是司空见惯的。

有些哲学家和科学家,与维纳和艾什比的观点则不尽相同。下面仅举几例:

在60年代,捷克斯洛伐克的柯尔曼(A. Kolman)认为控制论是“信号和机械控制的数学理论”。

苏联数学家索波列夫等人认为,控制论是“关于自动机器与生物体中控制与通信方面一些共同问题的各种理论、假设和观点的总和。”但他认为把控制论应用到社会方面去是不适当的。

在70年代,苏联哲学家茹科夫(H. N. Жукoв)[30]认为控制论不是一门普通的专门科学,它既不是数学,也不是哲学,它所研究的对象是一种抽象的功能系统,这与一切具体的技术、生物和社会系统是有区别的。他强调控制论的方法论意义。

列尔涅尔(A. Я. Лернев)认为:“目前,控制论表示一种能应用于任何系统中的一般控制理论。在这里,所谓‘系统’是指当作一个互相关联的整体的一组任意种类的元素。”他同时指出:“控制论,作为控制的科学,它并不一般地研究一切系统,而只研究控制系统”,他还提出了“抽象控制论系统”的概念[5]。列尔涅尔提出的控制论的研究对象是非常一般的。

美国学者乔治(F. H. George)在《控制论基础》一书中认为人工智能是控制论的核心部分。他认为:“控制论从技术和理论两个方面研究控制和通讯系统,研究控制和通讯在动物和人中间的发生过程。在某种意义上,控制论的基本问题是‘能使得机器思维吗?’但在另一种意义上又不是这样,而是如何使得机器能为我们做许多复杂的事。这个观点也就是说一方面我们可能想知道我们是否能制造比人更有理智的机器,或我们仅仅想利用自动化控制系统为我们提供任何有效的帮助。”他还讲到,“控制和通讯的科学,也是人工智能的科学。”“控制论的基本问题之一就是模拟和综合人类智能问题,这是控制论的焦点。”

在讨论控制论的研究对象时,必须说明的是,控制论(cybernetics)与控制理论(control theory)是两个不同的概念,应该加以区分。控制理论指的是自动控制理论,它的经典理论是在1945年前后,以伺服机构理论为核心的自动调节理论。在控制论诞生之后,控制论的原理和方法被运用于工程技术领域而形成的工程控制论,它通常也被理解为自动控制理论。因此,自动控制理论既可以指控制论以前的伺服机构理论,也可以指工程控制论。

综上所述,关于控制论的研究对象,虽然众说纷纭,但无论从哪一个角度去定义控制论,它的研究目标是明确的、具体的。正是这种多方面、多角度的研究,使得这门新兴的边缘学科得以迅速地发展。正如维纳在《控制论》第二版序言中所说:“如果一门新的科学学科是真正有生命力的,它的引人入胜的中心就必须而且应该随岁月而转移。”

1.3 控制论的基本概念

控制论是研究一般系统中控制和信息过程共同规律的科学,是一门涉及各个领域的综合性很强的科学。为此,它必须建立起自己的概念体系。这些概念部分是从“旧有的”传统知识领域借用而来,并且以同控制论自身概念体系相适应的方式概括它们。正是通过这些基本的概念,在不同的科学领域之间架起了桥梁,形成了控制论独特的语言和方法。控制论所包含的基本概念有:信息、动态系统、控制、反馈、规划、适应、目的、稳定性、可靠性、最优化、模型和算法等等。所有这些概念,从整体上形成了特殊的概念群,但是这个概念群中的任何一个单独的概念都不是控制论所专有的,它的每一个概念都是同一系列哲学的、一般科学的和专门科学的范畴相联系。在这些概念中,存在一些更为基本的和重要的概念。

在《控制论》发表13年后,维纳在第二版序言中写道:“当我开始写《控制论》时,我发现说明我的观点的主要困难在于:统计信息和控制理论的概念,对当时的传统思想来说,不但是新奇的,也许