

上 篇

第一章 引 论

控制论是 20 世纪 40 年代末发展起来的一门新兴科学。它是属于跨学科的、边缘性的和普遍化的科学。到底什么是控制论？控制论是如何产生的？控制论的学科分类有哪些？控制论有哪些主要的相关学科？这些最基本的问题首先需要给以回答。

第一节 什么是控制论

控制论作为一个知识部门，还比较年轻。1948 年美国著名数学家 N. 维纳（Norbert Wiener）发表了他的第一本控制论专著《Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine》，为从一个统一观点考查和解释各种系统的控制和通讯问题奠定了基础，标志着控制论的诞生。后来，英国学者 W. R. 艾什比（W. Ross Ashby）也发表了一本较有影响的著作，名为《An Introduction To Cybernetics》。该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。

控制论是否具有科学的地位，这个问题首先需要认真地讨论。我们知道，任何科学在知识体系中的地位，首先是由它的对象决定的。人们通常把科学所研究的规律理解为它的对象。但到目前为止，谁也没有发现或提出过控制论的任何一条规律，所以不能认为控制论也是研究规律的科学。那么控制论究竟是什么样的一门学科？

控制论是以下列观念为基础的：有可能发展一种一般方法来研究各式各样系统中的控制过程。

它的一个基本特征就是在动态（运动和变化）过程中考查系统。这样就从根本上改变了研究系统的方法。

控制论以“功能方法”研究组织界的各种系统——生物机体、机器装置和人类集体。

换句话说,控制论是组织界系统(有组织的或被组织化的整体)的理论,研究它们的功能(行为、活动)的理论。简单说来,控制论研究的是有组织的功能系统。

需要强调的是,控制论研究上述系统,其着眼点是这些系统中所展开的信息(通讯)管理(控制)的过程。所以,研究控制论应当是在生物科学、技术科学和社会科学的中考考虑控制论的方法,重点是分析利用信息进行控制的过程和系统的功能(行为、活动)的性质。

值得注意的是,生物系统、人类社会系统和一些复杂的机器系统常常表现出种种目的性行为。而这种目的是通过控制达到的。进一步看,如果一个系统要完成一个目的性行为,则它一定有一个可供它追求的目标,而且这个目标是已知的、既定的。系统如果没有达到这个目标,它是不会停止的。

概括而言,控制论能动地运用有关的信息并施加控制作用以影响系统运行行为,使之达到人类预定的目标。

控制论不是一门普通的专门学科,而是一个跨学科的知识部门。它从寻找学科之间的共同联系出发,将动物和机器的某些机制加以类比,从而抓住一切通讯和控制系统中所共有的特征,然后站在一个更概括的理论高度上加以综合,形成了一门具有更普遍意义的新理论。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(注:列尔涅尔的定义)。

更有意思的是,控制论的奠基人维纳起初认为控制论是关于动物和机器中控制和通讯的科学,过了几年,在其第二本书《控制论与社会》中指出了动物、机器和人的集体中各种信息和控制过程的相似性。

特别值得一提的是,控制论在科学上有两点重要的价值:第一是控制论给予我们一套统一的概念和一种共同的语言,使我们足以用来描述形形色色的系统,建立各门学科之间的联系。控制论第二个独特的好处是,对于那些以复杂著称而其复杂性不容忽视的系统,控制论给出了一种新的科学研究方法。

例如,控制论把生物机体的“目的”、“行为”等概念赋予自动机器,把技术系统的“信息”、“反馈”等概念引入生物系统,还有“系统”、“控制”、“功能”等一系列概念,都是控制论提出或给予了新意义。维纳在控制论研究中运用了信息方法、反馈方法、黑箱方法和功能模拟方法等一系列新的科学研究方法,这些方法后来被广泛应用于生物学、工程技术、经济管理和社会管理等许多领域,并取得了显著成效。

总之,控制论作为一门科学,不仅具有自己的概念体系,而且具有自己的专门方法。50多年来,控制论的原理和方法在各个需要或可能进行调节和控制的领域中都得到了广泛的应用,取得了辉煌的成果。控制论是一门理论性与实践性都很强的学科,它以强大的生命力活跃于自然科学和社会科学之中,它对促进现代科学技术的发展和人类思维方式的变革,有着重大的影响,并发挥着巨大的作用。可以看到,在人们理论活动和实践活动的各个领域里使用着控制论的两个方面——理论控制论(原理)和控制论技术(方法)。

在讨论控制论的研究对象时,还有必要说明两点:

(1) 控制论(Cybernetics)与控制理论(Control Theory)是两个不同的概念。

虽然中文的名称只差一个汉字,但却有不少差异,不能把两者混为一谈,应加以区分。

控制论的研究对象是“控制论系统”,是广义的控制系统。控制论是一门边缘性的、综合性的技术学科。在一定意义上它更注重信息的作用,认为通讯过程是认识客体的前提,控制过程是改造客体的途径。

而控制理论的研究对象是“控制系统”,主要指机器的控制系统。控制理论是一门专业性的、工程性的技术学科。控制理论的前期发展主要立足于工程技术领域,虽然后期发展已扩展到生物、生态、社会、经济领域,但控制理论通常指的是自动控制理论,是为自动控制系统的分析与设计服务的。

控制理论可以被看作是控制论的一个组成部分。这样就既对两者做了区分,又使两者有机地统一起来。但由于种种原因,长期以来控制论远没有得到它应有的名义和地位。钱学森先生曾设想,能不能更集中研究“控制”的共性问题,从而把控制论提高到真正的一门基础科学呢?近年来,钱老同意称“学”,不称“论”,即把一般控制理论不叫“控制论”而叫“控制学”,认为当时是把 Cybernetics 翻译错了。(注:控制论一词 Cybernetics 来源于古希腊文,意思是“掌舵术”。)

(2) 控制论与系统论的研究对象和研究目的之间的差异。

在 20 世纪中期产生的学科间的两个一体化科学——控制论和一般系统论(有人译为普通系统论),在作为一般科学的哲学和数学与一切专门科学之间,占有中间的地位。它们都是由于理论需要和实践需要而产生的。

以“结构方法”为核心的一般系统论同以“功能方法”为核心的控制论相似,但是必须把它们区别开来。以一般系统为研究对象的系统论要求回答“为什么”的问题,而以控制系统为研究对象的控制论还必须指出“为了什么”的问题。

也就是说,控制论中并不深究“这是什么东西”,而要研究“它能做什么”。

现代科学的特点之一是,其中功能的(广义说是控制论的)方法与结构的(广义说是系统的)方法相结合,从而统一起来形成结构-功能的(广义说是系统-控制论的)方法。

第二节 控制论的产生

控制论的产生是有它的社会背景、理论根源和技术前提的。

一、社会背景

控制论是由 20 世纪中期的科学进步、技术进步和社会进步引起的。

维纳被人们称为控制论之父。假如把控制论的产生只看作是个别学者的成果,那就未免太简单化了。应该说,实践的需要起着决定性的作用。

用自动控制装备起来的防空系统这一战争的需要,是导致控制论诞生的直接动力。正当第二次世界大战期间,1940年维纳写信给当时的麻省理工学院院长,要求进行与防空火力自动控制有关的理论研究,主要是设法解决防空高射炮瞄准飞机目标的预测控制问题。

除此以外,现代社会的生产和管理对于高度自动化水平的需要决定了控制论在世纪中叶必然要形成。不同生产过程的自动化(由局部自动化到综合自动化)、用机器来模拟人的活动与动物的行为(减轻人的体力劳动和脑力劳动),以及大量管理信息的合理使用和各种系统的有效管理,这些都是产生控制论和促使它迅速发展的重要因素。

二、理论根源

长期以来,人类知识具有不可分的形式,曾以统一的旧哲学表现出来。随着实际的需要和人类知识的积累,就发生了专门科学从旧哲学中分化出来的过程。但是不能认为它是单方面的,这个过程在某一阶段必然伴有对立的过程——科学一体化。控制论就是消除各专门科学的一定独立性的一体化趋势的结果。

我们知道,哲学是自然科学和社会科学的概括和总结。但无机界的因果决定性和有机界的有目的性的关系问题这一哲学难题一直没有得到解决。

控制论冲破了历来科学领域中无机界和有机界截然划分的界限,它的基本任务,正是要在理论上找到技术系统(机器)与生物系统(动物)之间在某些功能上的相似性、统一性。

维纳等人综合多门学科的知识,运用科学类比的方法,寻找二者的关系。1943年维纳和哈佛医学院的罗森勃吕特等合写了《行为、目的和目的论》一文,这是最早的一篇控制论论文。他们首先引入行为这一更一般的概念,接着把行为和目的联系起来,把系统的活动看成是具有目的性的行为。进而又引入信息概念,认为信息是通讯和控制的关键,从而使机器模拟动物的某些行为成为可能。

维纳等人之所以能够创立控制论这门学科,正是由于他们的战略思想抓住了当代科学技术发展的特点,认识到各门学科之间的相互渗透是一种潮流。维纳在谈到控制论产生时说道,在科学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”。

当然,数学在控制论科学中也占一定的比重,它是控制论形成的重要理论前提。马克思曾指出,每门科学只有在能够运用数学的时候才算完善。为了实现对系统的有效控制,就要求人们不能满足于停留在系统的定性的、经验的描述上,而要定量地、精确地分析和研究整个系统。

总之,控制论是在科学知识的各种极其不同的部门——哲学、数学、技术科学、生物科

学、甚至于社会科学——的基础上产生的。特别是在技术科学、生物科学和社会科学领域中的成就是这些科学在控制论范围内一体化的条件。它受惠于这些领域,同时又施惠于这些领域。它在所涉及的领域中吸取营养,但所开的花,结的果却不是这些领域中任何一门学科所特有的。

三、技术前提

控制论不仅仅是一门理论的学科。也就是说,社会条件和理论根源还不是控制论产生和形成独立科学的足够条件,必须有相应的能制造像电子计算机那样的复杂装置的技术前提。快到 20 世纪中期的时候建立了这种前提,这也就是从人工控制阶段过渡到自动控制阶段。

自动控制系统通常由控制器、执行机构和信息反馈装置组成。反馈装置的任务是监视和测量执行机构和工作对象的状态变化和执行结果,把这些信息反馈给控制器。控制器则根据任务的定义、目标的规定和当前执行情况决定以后应采取的措施,向执行机构发出指令,以便执行机构准确地加以实行。

控制论就是在自动控制理论的基础上发展起来的。自动控制理论在维纳的控制论产生之前就已经出现了,其经典理论是伺服机构(一种服务机构)理论。在控制论产生以后,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,通常也称为自动控制理论。因此,自动控制理论既可以指控制论以前的伺服机构理论,也可以指控制论以后的工程控制论。

另外,电子计算机的设计、制造、运行,是控制论思想的一次实践。计算机技术的发展,特别是微型计算机的发展,对控制论的发展起了积极的推动作用。电子计算机和控制论是结伴而生的,维纳就是见证。他不仅创立了控制论,也是信息论的创立者之一,还是计算机科学和智能科学的奠基人之一。现在,计算机不仅是控制系统强有力的手段和工具,而且是控制系统不可缺少的组成部分。

值得骄傲的是,控制论与中国有不解之缘。维纳说过,1946 年的中国之行(当时他来清华做客座教授)是他作为一个数学家和控制论专家的分界线。而且,控制论之所以得到应有的地位和承认,中国人钱学森及其创立的“工程控制论”有不可磨灭的贡献。读者应该知道这段历史。

第三节 控制论学科的分类

我们知道,哲学是普遍的科学,是科学知识的基础,像一般同个别的关系那样,跟一切其他的专门科学发生关系。然而,各种专门科学的一般性程度可以是不同的。控制论的

一般性程度比起任何其他专门科学大得多（数学和一般系统论除外）。那么如何对控制论学科进行分类？恩格斯关于物质运动的基本形式及它们的从属关系的原理是科学分类的基础。

最初，控制论表现为工程控制论，当然也包括数学控制论。后来，由于控制论的进一步发展和它的概念渗透到人类知识的各个部门，人们就开始把它看作是关于技术装置、生物界和人类社会中信息和控制过程的科学。技术的、生物的和社会的控制论学科分类总的来说符合物质运动的主要形式。严格来说，技术是物质运动的特殊形式，是人造的第二个自然界。

控制论横跨基础科学、技术科学、社会科学和思维科学。在各控制论学科的分类中，图 1-1 具有方法论的意义。

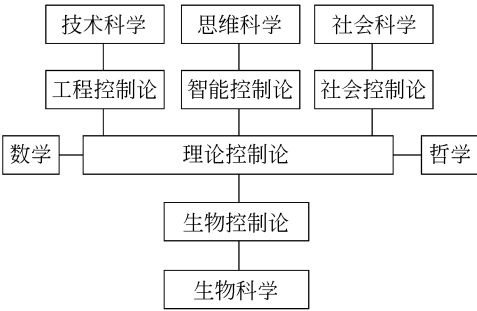


图 1-1 控制论学科的分类

注：控制论是一门综合性的科学，它把技术、生物和社会的知识联系在一起。但把控制论认为是包治百病的灵丹妙药这无论如何都是错误的。在专门文献中，常常把狭义的、原来意义上的控制论叫做理论控制论。有人认为，理论控制论给技术科学帮助特别多，给生物科学帮助很多，给社会科学帮助则较少。

一、工程控制论

在该示意图中，工程控制论占有特殊的地位，它是控制论中最早形成的应用分支之一。它是把控制论的基本理论和方法推广应用于工程控制系统，并吸收了伺服机构理论的成果形成的。

我国著名科学家钱学森于 1954 年在美国发表的《工程控制论》被公认为工程控制论的奠基性专著。这本书出版以后，所有搞理工科的马上产生了强烈的反响。1980 年钱学森和宋健合著了《工程控制论》（修订版），增补了 20 年来这门科学发展的新成果，使工程控制论的内容更为丰富和完善。

由于维纳控制论比较抽象的内容和比较广阔的思想，它与控制工程有一定的距离。而工程控制论是面向工程应用的理论，具有技术科学的特点，即把工程实际中行之有效的

原理和方法整理总结成为理论,又将此理论在解决工程问题中不断充实、提高和发展。

归纳起来,一般把工程控制论的发展过程,大致分为以下三个时期:

第一时期是经典控制理论时期。这一时期的主要研究对象是单因素控制系统,重点是反馈控制,核心装置是自动调节器,在实践方面主要用于单机自动化。

第二时期是现代控制理论时期。这一时期的主要研究对象是多因素控制系统,重点是最优控制,核心装置是电子计算机,在实践方面主要用于机组自动化。

第三时期是大系统控制理论时期。这一时期的主要研究对象是众多因素的大系统,重点是递阶控制,核心装置是智能化机器,在实践上主要用于综合自动化。

从现在来看,钱学森的《工程控制论》处于“古典”和“现代”控制理论的转折,起到承前启后的作用。而现在已从现代控制理论向研究大系统、复杂系统乃至复杂巨系统的控制问题迈进。

二、生物控制论

生物控制论是控制论的一个重要分支。它的产生不仅是控制论在生物学中的应用,也是生物学自身发展的必然结果。

早在控制论产生以前,生物学家已对动物和人体的控制系统进行了研究,并取得了重大的成果。控制论的产生推动了这些研究工作的深入,控制论中的新颖思想和方法改变了生物科学研究的传统格局,开辟了一条新的途径。

人们除了要对生物体内部基本的化学和物理过程进行分析研究之外,还必须对生物体的整体从系统的角度出发进行研究,这是生物控制论诞生的必要性。

生物控制论作为控制论的一个分支正式分化出来被认为是在 20 世纪 50 年代。生物控制论虽然已经有了几十年的发展历史,但是对它至今尚无一个普遍公认的定义。维纳认为,生物控制论的主要目的是创造能正确反映人体和动物体中的功能模型和理论。这就是说,生物控制论是以生物体中的控制和信息过程作为研究对象。目前一般认为,生物控制论可定义为研究生物系统中信息传递、交换、处理过程和调节、控制的科学。

1964 年,维纳与谢德合编了一套《生物控制论进展》丛书。与此同时,格罗丁斯的《控制理论和生物系统》等一批专著相继问世,生物控制论从此进入应用控制论的阶段。

生物控制论的研究一方面有助于弄清生物体的运动发展规律,揭示生命的奥秘,探索思维活动的机理;另一方面可以使人们模仿生物体精巧的控制机理,制造出许多新的更精密的控制装置,从而使仿生学别开生面。

生物控制论是一门理论性和应用性都很强的学科。其中神经控制论主要研究动物及人体神经系统中信息的传递、交换及处理等方面的问题。神经系统由大量的神经元组成,神经元是神经系统的基本结构和功能单元,每个神经元都是复杂的信息处理单元。神经

元不是孤立存在的,每个神经元都与许多神经元相互联系。因此,要研究神经系统的信息处理问题,必须研究神经网络的特征。另外,不论是人体还是动物,神经系统的控制中枢都在脑中,脑的信息处理系统是神经控制论研究的中心问题。目前对脑及其信息处理系统的研究已取得了可喜的成果,但离揭露大脑的奥秘还相差很远。脑的信息处理系统和神经控制系统的研究仍是生物控制论中最重要的研究领域之一。当然,对神经网络和脑功能的研究现在也是计算机工作者极为感兴趣的课题。

人是世界上最复杂的机器,为了揭示这种高级生命的控制和信息过程,控制论的科学家们正从事着人类历史上最伟大的事业,在今天,生物控制论在医学工程中已成为最有生气的科学领域之一。

三、社会控制论

控制论已被成功地应用于工程系统和生物系统,那么它是否也可用于社会系统?这是人们共同关心的问题。事实上,控制论从它产生时起,就已经提出了这个重大问题。在《控制论》一书中,维纳曾以保守的态度分析控制论应用于社会的可能性。后来,在其第二本书《控制论与社会》中,他把社会看作是一种信息、控制系统,认为控制论有必要也有可能运用于社会系统。当然,维纳这里所指的社会是泛指社会的一切领域,不仅仅是社会经济系统。

社会控制论是把控制论运用于社会大系统而产生的控制理论。系统之大可包括整个工厂、一个城市或国家,以至几个国家或全球系统。大系统的基本特征是规模庞大,结构复杂,功能综合,因素众多。

在社会控制论中,经济控制论具有特别突出的地位,它是控制论用于社会系统中比较成功和成熟的一个分支。在这里,一方面,控制论学者将控制论的理论和方法自觉应用于社会经济系统的分析、调节和控制。另一方面,经济学家吸取和运用控制论的思想和方法,开拓经济学的研究领域。经济控制论是从控制论和经济学两个不同的源头出发的两条支流汇集而成的,是这两方面有机结合的硕果。

经济控制论系统是经济控制论概念体系的核心。它是由罗马尼亚前总理、经济控制论专家曼内斯库提出的。经济控制论系统的第一个特征是由于人的因素,使得其具有特殊的复杂性。经济控制论系统的第二个特征是随机性、模糊性等不确定因素起着重要的作用。在经济领域,尤其是在宏观层次上,其系统结构的复杂性、因果联系的模糊性、决策信息的不完全性,都远非一般的物理和工程问题可以比拟。特别是由于人在经济系统起着关键的作用,所以决策者的偏好、个体决策的有限理性等因素,又进一步加强了经济系统的复杂性。

与经济控制论系统密切相关的概念是经济时间和经济空间。由于经济时间和经济空间概念的建立,为经济控制论系统的数学描述建立了时空坐标系。曼内斯库就是在这样

的数学框架下,展开对经济控制论的研究的。可以看出,控制论的一个显著特点,是广泛应用数学方法去研究各种系统。经济系统模型既有定性模型,又有定量模型(这里又有确定性、随机性和模糊性之分)。经济控制论的技术和方法,不仅要包括传统的定理分析技术和方法,还要注重发展定量与定性相结合的分析技术和方法。

经济控制论的核心问题,是对经济过程的最优控制问题。其思想是:以尽可能短的时间、尽可能少的人力、物力、财力消耗为代价,保证控制目的的实现;或者在同样的时间、资源条件下,使系统的输出达到最佳的目标状态。在经济系统的运行过程中,由于受到许多因素的制约,系统变化趋向的目标值往往有多种可能,而且达到同一目标值通常也采取多种途径,所以,是在对受控系统实施控制的过程中,在满足系统的各种限制的条件下,使系统的状态达到最优。

1965年波兰经济学家兰格出版了一本名为《经济控制论导论》的专著,这是一本经济控制论的代表著作,它比较系统地阐述了控制论的基本概念、理论及其在经济学中的应用。40年来,这一边缘学科无论是理论和应用方面都有很大发展,成为一门与社会经济建设和发展密切相关的重要学科。

四、智能控制论

智能控制论是控制论新的分支,它研究智能的模拟问题。如果说大系统理论是控制理论在广度上的开拓,智能控制就是控制理论在深度上的挖掘。创造出“智能机器”或“会思维的机器”这类激动人心的问题已成为人们最关心的科学问题之一。

智能控制是控制理论发展的高级阶段,它的建立和发展是以众多新兴学科为基础的。智能控制的基本出发点是仿人的智能实现对复杂不确定性系统进行有效的控制。因此必须研究人的思维形式和特点。人的智能主要体现在人脑的思维规律,思维科学是研究智能控制的重要认识论基础。

在智能控制论中,最主要的是人工智能。有人认为,智能控制就是人工智能技术与控制理论的交叉。虽然现在一般都把它列入计算机科学内,但从控制论的角度看,可以把它看作智能控制的核心部分。

目前人工智能的两个比较重要的应用领域是机器人和专家系统。近年来,神经网络的研究获得重要进展,神经网络在许多方面试图模拟人脑功能,并不依赖于精确的数学模型,因而显示出具有自适应和自学习的功能。另外,智能控制系统是以知识为基础的系统,因此以研究知识表示、利用和获取中心内容的知识工程是研究智能控制的重要基础。可见,人工智能科学正在兴起,将以更大成就为人类服务。

随着控制论的发展和人工智能机的研制,关于机器能否思维、电脑能否代替人脑的争论也日益广泛深入,这个争论还牵涉到“人机共生”的问题。有人认为,这一问题不仅在实用方面很重要,在哲学上也具有挑战意义。但可以肯定的是,智能机器毕竟不是人,而是

人的工具,它虽然可以模拟人的某些思维功能,但它本身不能思维。

从维纳开创控制论,经历近半个世纪,发展到智能控制论,这是近代科学技术高度分化与高度综合的必然结果。

总之,控制论在工程、生物、社会中广泛应用,已形成了包括工程控制论、生物控制论、社会控制论以及智能控制论的庞大的科学体系,出现了现代科学的控制论化,对科学研究、工程技术和经济管理都产生了巨大影响,显示了强大的生命力。

今天看来,控制论基本上沿着三个方向发展:一是向人类知识的最高层次渗透,形成理论控制论并丰富哲学和哲学方法;二是在科学方法论层次上的发展,大体经历了经典控制论、现代控制论、大系统控制论三个阶段;三是向各门具体学科渗透,与其结合形成具体科学方法。

第四节 控制论与相关学科

每一门学科都不是孤立的,控制论、信息论、系统论被人们称为“三论”。“三论”具有一般方法论的指导意义,被称为横断性科学。另外,控制论与哲学、数学的关系也非常密切。但需要指出的是,控制论不是一门数学学科并且与哲学有着本质的区别。

一、控制论与信息论、系统论

控制论、信息论和系统论是 20 世纪以来最伟大的理论成果之一,它们共同构成了新型的综合性技术基础学科。我国学者已经建立了系统信息控制科学方法论,实践证明,它是行之有效的科学理论。

“三论”不仅渗透到人类的物质生活中,而且还渗透到人类精神生活的各个领域,使人类的思维方式发生了重大变革。它们扩大了人们研究问题的广度和深度,提高了人们认识世界和改造世界的能力,尤其在解决复杂系统的组织管理方面,显示出传统方法无可比拟的优越性。

“三论”为管理现代化提供了有效的方法。它把管理活动作为动态系统,把信息作为分析系统内部和外部联系的基础,把控制作为实现系统优化的手段。这三方面的统一,就是整体优化、信息管理和过程控制的现代化管理。没有系统论的理论指导,不能实现科学有效的管理。一切管理活动的正常进行都必须以获取信息为前提,而管理过程也可以说就信息的交流过程。在管理活动中也离不开控制,控制论可提供对系统实施控制的具体方法。

1. 信息论和信息方法

信息论产生于 20 世纪 40 年代末,它的主要创立者是美国的数学家申农和维纳。