

上 篇

基 础 篇

# 第一章 引 论

理论是一门学科赖以成立并发展的基础。管理控制同样离不开相关的基础学科,如控制论、系统论、管理学、经济学等。作为管理控制最重要和主要的理论基础,学习控制论的基本知识是非常有必要的。对于到底什么是控制论?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予回答。

## 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信问题奠定了基础,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其的对象。但迄今为止,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。那么控制论究竟是一门什么样的学科?

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(通信)

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中考虑控制论的方法，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，从而抓住一切通信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信的科学，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价值是，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。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——控制论理论（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，认为通信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？后来，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。

1940年正值第二次世界大战期间,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。

除此之外,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,把系统的活动看成具有目的性的行为。进而又引入信息概念,认为信息是通信和控制的关键,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汲取营养,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应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。

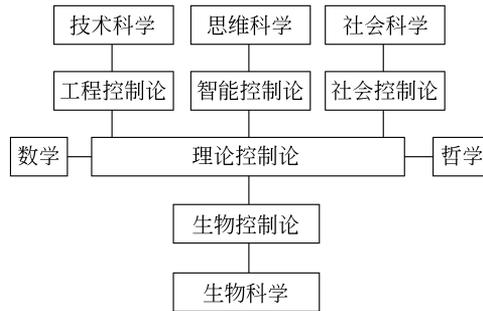


图 1-1 控制论学科的分类

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作理论控制论。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。该书出版以后,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去甚远。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,甚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了哲学和哲学方法;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,显示出传统方法不可比拟的优越性。

“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是信息的交流过程。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。

最初,信息论仅局限于通信领域,后来,信息论作为控制论的基础。它是一门应用概率论与数理统计方法研究通信和控制系统中普遍存在的信息传递和信息处理的科学。随着现代科学技术的发展,信息概念及其方法远远超出通信领域,发展成一种广义信息论。

在美国称为信息科学,西欧称为信息系统。

人类对信息的认识和利用,源远流长。从古到今,人类经历了语言的产生、文字的产生、造纸和印刷术的发明、电讯通信的应用这样四个信息革命阶段。目前,以计算机为标志的第五次信息革命,使人类历史进入信息时代。

人类对信息的认识和利用虽然历史悠久,但是上升到科学理论的高度并形成一门独立的科学,却是 20 世纪 40 年代的事情。一般认为,申农的《通信的数学理论》的发表,标志着信息论的诞生。它为人们广泛而有效地利用信息提供了基本的技术方法和必要的理论基础。

信息概念是信息论中最基本和最重要的概念。申农把信息定义为“两次不确定性之差”。比如,某人知道朋友要来做客,但不知其何时到达,则对这个人来说,关于朋友的到达日期存在不确定性。当他接到朋友打来的电话后,知道了朋友到达的具体日期,这时就消除了朋友到达日期的不确定性,就可以说此人从电话中获得了信息。

根据申农的信息定义,对信息概念可作如下两方面的理解:一是从通信角度看,信息是消息的内核,消息是信息的外壳。或者说,信息是消息的内容,消息是信息的形式。二是从实用角度看,信息是指能为人们所认识和利用的,但事先又不知道的消息、情况。信息能提供我们关于事物运动状态的知识。

信息量是指用来度量信息大小的量,它是信息论的中心概念。只有在申农提出度量信息的科学方法,使通信理论由定性进入定量阶段之后,对信息的研究才被公认为一门完善的科学。

信息量的大小,取决于消息的不肯定程度。消息的不肯定程度要依赖于它在整个消息集合中发生的概率。信息的定量描述是用概率的方法来实现的。

如果我们事先知道某一事件出现的概率是  $P$ ,有一个消息使我们知道这一事件的确发生了,则可以说我们获得了一定量的信息。某事件发生概率越大,当有消息证实其确实发生了,则从中获得的信息量越小;若事件发生的概率越小,当有消息证实其确实发生了,则从中获得的信息越大。这与我们的常识也是相符合的。这种关系,正如申农在《通信的数学理论》中指出的:采用对数作为信息的度量,在数学上比较合适。

一般来说,若某事件出现概率为  $P$ ,则这一事件所具有的信息量为: $h = -\log P$ ,其中以 2 为底,单位称比特(bit),这是信息量最常用的单位。

例如,向上抛出一个质地均匀的硬币,它只有两种可能性状态:正面朝上或反面朝上。每次试验只可能出现两种结果中的一种,即二者必居其一。它们的出现概率各为 0.5,则每个状态所具有的信息量为: $h = -\log 1/2 = 1$ (比特)。

由上可知,1 比特就是含有两个独立等概率可能状态的事,择其中之一时所具有的信息量。因此,任何一个事件系列,如果能分解成  $n$  个等概率的二中择一事件,它的信息量就是  $n$  比特。

附带地说明一下,申农的数学信息论以及它的关于信息数量的主要概念,是为了满足在控制论普及以前通信技术中传递信息的实际需要而创立的。后来,当控制论的原理和方法开始广泛深入生物科学和各种社会科学时,控制论的基本概念(反馈、信息、控制)便被概括起来,把申农的主要公式运用于上述知识领域这种想法也产生了。借助于这种为确定机器中信息数量而推论出来的公式,从量上表征生物信息和社会信息的尝试实际上已没有意义,其结果是把“信息量”概念同“信息”概念混淆起来。某些科学工作者克服了对控制论的怀疑主义态度,但却大肆宣扬在非技术领域运用数学方法,特别是运用确定信息量的公式的可能性,这归根结底是导致了概念的混乱和变形。

信息之所以称为信息,在于它的可传递性。我们把发出信息的一方称为发信者(信源),接受信息的一方称为受信者(信宿)。通信就是通过信道(传递信息的通道)将信息由发信者传给受信者。信源、信道、信宿构成了一个最简单的系统,叫作通信信息系统。

任何信道都具有一定的传输信息的能力,标志信道传输信息能力的量称为信道容量。决定信道容量大小的因素有:信源发出信息的能力,信道的传递能力,信宿接收信息的能力,信道内外干扰的强弱。

通信的主要目的就是使收信端收到和发信端尽可能相同的信息。但在许多情况下,由于系统内、外原因(通信中叫“噪声”),使得收发信息之间往往有差别,这种情况通常叫“失真”。把信息在受信者那里所引起的效果与发信者的意图相符合的程度称为接受率。接受率越高,就认为信息的沟通程度越好。反之则认为沟通程度越差。若接受率为零,表明未能沟通信息。

信息方法这一术语,是控制论的创始人维纳在其 1948 年出版的《控制论》一书中提出的。如图 1-2 所示。尽管技术装置与生物有机体中的反馈回路可以很不相同,但作为信息通道来说,却是相同的。这样就便于控制论从统一的角度来一般地研究各类不同的控制论系统。

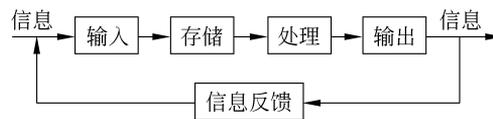


图 1-2 信息方法示意图

信息方法不同于传统的研究方法,传统的方法注重的是物质和能量在事物运动变化过程中的作用,而信息方法是以信息的运动作为分析和处理问题的基础,它完全撇开系统的具体运动形态,把系统的有目的的运动抽象为信息变换过程。它根据系统与外界环境之间的信息输入和输出关系,以及系统对信息的整理和使用的过程,来研究系统的特性,探讨系统的内在规律。

信息方法是实现科学管理的有效手段。我们知道,管理的成败首先取决于管理决策是否正确。决策正确与否又与能否及时准确地获取足够的信息有直接的关系。决策过程的实质就是信息反馈控制过程。从信息方法的角度看,我们可以把管理过程抽象为信息过程。整个管理活动就是信息从输入到输出,经过反馈再一次重新输入的过程。

任何一个管理系统,一般都是由三个因素构成的,它们和管理对象、管理机构和联系两者之间及其内部关系的信息系统。这三个要素之间的有机联系,可形象地比喻为管理系统的实体、大脑和神经中枢,其中的每一条信息流可看作神经网络。可见,在任何管理条件下,信息系统都是管理系统的一个重要组成部分。现代化管理必须建立完备的管理信息系统。

## 2. 系统论和系统方法

系统论是 20 世纪迅速发展起来的具有普遍适用范围的现代科学。系统论的主要创立者是贝特朗菲,他于 1945 年发表了《关于一般系统论》的论文,宣告了这门学科的诞生。1968 年,贝特朗菲发表了《一般系统论——基础·发展·应用》一书,全面地总结了他自己 40 年来研究一般系统论的成果,为广泛而深入地发展系统科学,提供了指导意义的理论纲领,被公认为一般系统论的经典著作。

70 年代以后,不同领域的科学家各自独立地从自己的角度研究系统理论,形成了许多关于系统论的分支理论,并取得了突破性的进展。如耗散结构理论、协同学理论和突变理论等。这些研究不仅是定性的,而且是定量的。

一般系统论经过几十年的发展,其内容已远远超过了原有的范围。我们现在说的一般系统论,是广义系统论。贝特朗菲曾把广义系统论研究的领域划分为以下三个方面。一是关于“系统”的科学和数学系统论;二是系统技术,包括“纯粹”的系统技术,也包括系统技术的应用;三是系统哲学,研究系统论的哲学方面的性质。直到晚年发表《一般系统论的历史和现状》一文,贝特朗菲一直坚持关于广义一般系统论研究领域的这种划分。这一关于系统科学体系的富有探索性和启发性的构想,在系统研究领域产生了广泛的影响。

关于系统科学的体系问题,我国著名科学家钱学森认为,系统科学是与自然科学和社会科学等并行的一个学科门类。它不是自然科学,也不是社会科学,不是数学,而是一个为这些学科体系所不能包括的新兴学科体系。它有三个层次:系统的工程技术层次;系统的技术科学层次;系统的基础科学层次——系统学。他认为在系统的基础科学与哲学之间还存在着一个桥梁,即系统论。钱学森关于系统科学体系结构的框架,是他长期从事系统科学研究所获诸多成果中的重要部分,对我国系统科学的发展产生了深远的影响。

至今,系统科学形成由五大方面组成的庞大体系,即系统概念、一般系统论、系统理论、系统方法和系统工程应用。

系统这一概念来源于人类长期的社会实践。贝特朗菲把系统定义为“相互作用的诸

要素的综合体”。钱学森认为：“系统由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成具有特定功能的有机整体。”可见，一个形成系统的诸要素的集合永远具有一定的特性，而这些特性是它的任何一个部分都不具备的。系统的特定结构决定系统的特定功能，这正是区别一个系统和另一个系统的主要标志。换句话说，一个系统是一个由许多要素所构成的整体，但从系统功能来看，它又是一个不可分割的整体，如果硬把一个系统分割开来，那么它将失去其原来的性质。

系统论认为，世界上各种对象、事件、过程都是由一定部分组成的整体，而这一整体中的各个部分又是由更小的部分组成的，如此下去，以至无穷。构成整体的各个层次和部分不是偶然地堆积在一起，而是依一定规律相互联系、相互作用的。系统整体大于系统各部分之和。这包括两方面含义：其一是指系统整体的性质大于其各个部分性质的机械相加和；其二是指系统整体的功能大于其各个部分功能的机械相加和。贝特朗菲指出：整体大于它的各部分的总和，是基本的系统问题的一种描述。

系统论不仅在技术科学、生物科学和社会科学等领域结出了丰硕果实，而且给人类带来了新的思想观念，引起了思维方法的巨大变化。如果说系统论的基本概念和原理主要是从理论上研究系统，那么，系统方法则主要是从应用上研究系统。国外有人把系统方法称为“全科学的方法”。整体性是系统方法的基本出发点，最优化是运用系统方法所要达到的目的。任何系统都是一个动态系统，要在动态中把握系统整体，使系统最优化地前进。这里重点谈谈系统工程方法。

系统工程就是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。它应用定量分析和定性分析相结合的方法和电子计算机等技术工具，强调最优化，充分地发挥人力、物力的潜力，通过各种组织管理技术，使局部和整体的关系协调。由于系统工程是一门新兴的交叉学科，尚处于发展阶段，还不够成熟，至今还没有统一的定义。钱学森等指出，系统工程是一门组织管理的技术。也就是说，系统工程是系统方法在组织管理中的具体应用。

学术界往往把系统分析作为系统工程的同义词来解释。有的人认为，系统分析是系统方法在科学决策中的具体应用。有的人甚至认为，系统分析就是运用数学方法研究系统的一种方法。完整地说，系统分析的方法既具有科学性，又具有某种艺术性。

系统分析是系统工程的重要组成部分，处在系统工程全过程的前期阶段，这个阶段对于系统工程起着非常关键的作用，是其他所有后续阶段的基础。系统分析是对系统工程的特定对象，即复杂的系统进行多方位的分析，通过对系统的目标、环境、结构和功能等内容的分析，为系统的下一步工作提供基础。但在有些场合或在学术界往往把它与系统工程混淆。

系统工程是一门技艺。探讨系统工程方法论是有意义和必要的。具有代表性的是霍尔的三维结构和李怀祖的系统工程方法论框架。

美国的 A. D. 霍尔提出的系统工程的三维结构，是把系统工程的活动分为相互联系

的三个方面,即按时间进程把活动分为七个阶段,按处理问题的逻辑关系把活动分为七个步骤,为完成各阶段和步骤所需的各种专业知识设置科学技术体系,并将活动的三个方面用空间直角坐标系形象地表示出来(见图 1-3),这就为解决大规模复杂系统提供了较科学的思想方法。

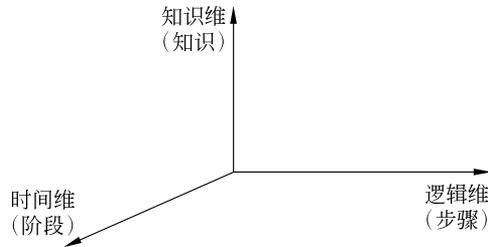


图 1-3 系统工程方法三维结构

具体地讲,运用系统工程方法进行思考、分析和处理系统问题时应遵循的一般程序为:A. 明确问题;B. 选择目标;C. 相成方案;D. 建立模型;E. 方案优化;F. 作出决策;G. 付诸实施。

西安交通大学教授李怀祖根据多年的研究和实践,提出了概括性程度高、可操作性强的系统工程方法论框架。他把系统工程分成三个阶段,五个环节。它们是:①阐明问题阶段。既是一个阶段,也是一个环节。②分析研究阶段。包括提出备选方案,预测未来环境,建立模型和预测后果三个环节。③评比备选方案阶段,也是一个环节。在大多数情况下,这五个环节不可能一次就完成,需要多次反复迭代。

可以看到,系统工程在自然科学与社会科学之间架起了一座沟通的桥梁。它为从事自然科学的技术人员和从事社会科学的研究人员的相互合作开辟了广阔的道路。20 世纪 60 年代以来,系统工程在理论研究和实际应用方面都得到了巨大的发展,引起社会的广泛重视。

应该指出,系统科学虽然有了很大的发展,但它毕竟还是一门正在成长着的学科。它的思想原则和方法技术还有待于进一步探索、发掘。它的理论体系还有待于进一步整理完善。在这块新开垦的科学园地上,还需要更多的辛勤园丁去耕耘、灌溉、扶植、培育。可以相信,随着现代科学技术的不断发展,随着系统科学队伍的不断壮大,这门新的学科必将在理论上和实践上取得更大的成就。

把系统科学理论应用到管理中,可以发现,现代管理方式在方法论上与传统管理方式有许多不同之处:①现代管理方式把组织作为一个系统和整体进行研究,强调局部服从整体,组织适应环境;②现代管理方式要求在分工的基础上强调部门之间的沟通、协调、综

合、平衡,以系统目标来调节部门目标,达到全面最优;③现代管理方式强调运用多学科的知识对系统进行科学的、合乎逻辑的分析、计算、预测,使定性分析与定量分析紧密结合,提高管理的科学性、预见性和准确性。

总之,现代管理方式这个新的理论概念,对组织观察、研究的角度和方法都是新的,它采用了系统的和动态的观点、环境和目标的观点、结构和功能的观点、信息和控制的观点等,并把这些观点综合成一个整体,构成特定情况下的管理活动方式。

## 二、控制论与哲学、数学

### 1. 控制论与哲学

由于控制论研究范围广泛的系统,所以可以认为它是跨学科的理论,它在生物界与非生物界的科学之间,在各门生物科学之间,在各门技术科学之间,在各门社会科学之间,架设了特殊的桥梁。当然,这不是说,控制论产生之前在上述各知识部门之间都是完全脱节的。大家知道,哲学是关于现实界的一切领域的最一般规律的科学。

和哲学不同,控制论远不是研究世界上的一切客体,而只是研究有一定组织性的复杂系统。而且,控制论研究仅仅着眼于在所获得它们的情况信息的基础上所进行的控制过程。这就是说,控制论的对象,也像任何其他的专门科学的对象一样,其范围比起哲学要大为狭窄。无论就对象而言,还是就研究的客体数量而言,都极大地不同于哲学。所以,没有理由认为,控制论可以成为能解决科学一切问题的“科学的科学”。

### 2. 控制论与数学

关于控制论与数学的相互关系问题具有特殊的意义。众所周知,控制论从其产生时起就和数学分不开,并且产生了新的数学学科——数学控制论,以至于一些科学家甚至倾向于把控制论看作一门数学学科。控制论被数学渗透,但它不是数学的一个分支,所以不应把控制论看作数学学科的一部分。为了更有说服力地论证这个问题,必须略谈一下用数学方法掌握现实界的特殊性。

数学就其本性而言,像哲学一样,是一个抽象的和内容很广泛的知识领域。有人认为,哲学只研究现实界种种现象的质的方面,而数学只研究现实界种种现象的量的方面。这样理解哲学和数学的对象未免是简单化了。哲学所研究的对象大体上同现实的客体相似,而数学则在某种意义上“创造”自己的研究客体。数学过去一向是并且今后也将是掌握现实界的辅助手段,是自然语言。任何一个有内容的理论都不能归结为其中所用的数学手段。实际上,数学控制论不过是控制论的一个组成部分,当然也是十分重要的一个组成部分。虽然广泛使用“数学控制论”这个术语,但我们再说一遍,控制论不能被数学吞没,它是既有形式又有内容的科学。

以上我们简要地介绍了控制论的概貌,作为阶段小结,如何再给这个知识部门下一个创新的定义呢?有一些控制论定义只强调控制论系统活动的某些方面。这些定义不仅互

相一致，而且也是互相补充的。这些定义具有毫无疑问的价值，因为它们表现了控制论过程的某些特殊的侧面和方面。当然，在简短的定义中，不可能表达其所有特点，只要指出主要的和本质的东西就够了。但是，控制论的定义也不能太狭窄，对控制的理解也不能太工程化和数字化。根据科技的发展，笔者认为，符合要求的是这样一个定义，控制论是一门利用信息来进行调节和控制的科学。

## 第二章 控制论的基本概念和原理

科学的概念体系是每一门科学的理论骨架。本章是本篇最重要也是最困难的一部分。困难在于,要求在现代科学的基础上作出控制论的概念体系。重要在于,正是通过这个概念群,在不同的科学领域之间架起桥梁,形成了控制论独特的语言。也正是通过这个概念群,可以使有关概念有机地结合起来,揭示其中包含的控制论的基本原理。也就是说,本章将以或多或少系统化的形式阐述控制论的基本概念和基本原理。

### 第一节 系 统

控制论作为一门科学,同一般系统论有机地相联系,使用一般系统论的概念和方法。为了分析控制论的各种概念,就应从一般系统论中的“系统”这个基本概念开始。

系统是在人类的长期实践中形成的概念。必须肯定这一事实,即不能把“系统”这个概念简单地理解为一般系统论的最重要的基本范畴,而应正确地确定它的性质和在整个知识体系中的地位。

有的人认为系统是指现实界的任何一个客体,这样一来,作为一般系统论的最基本的“系统”这个概念就成为普遍的概念。另外一些人则坚持认为,不是任何客体都是系统,而只有具有完整性的客体才是系统。这个问题远不是一个次要的问题,因为进一步的研究在很大程度上取决于这个问题的解决。第二个观点看起来是比较正确的,因为一般系统论在这种情况下有自己完全确定的运用范围,而第一个观点实际上导致取消“系统”概念的特点,把它同现实界的任何客体等同起来。

#### 一、系统与要素

系统是由两个以上的要素组成的。系统是整体,要素是部分,系统与要素的关系就是整体与部分的关系。一个系统只有相对于构成它的要素而言才是系统,同样,一个要素只有相对于由它和其他要素构成的系统而言才是要素。没有系统就无所谓要素,没有要素也就无所谓系统。而且,要素与要素之间存在着一定的有机联系。联系是指要素构成系统的媒介。联系是系统呈现整体性的根源。更重要的是,因为一个要素的变化会这样或

那样地引起全系统的变化。所以也说,系统的性质是由要素决定的。有什么样的要素,就有什么样的系统。

例如,从企业的外部来看,企业就是一个经济系统,系统中的每一部分都发挥自己的作用,管理者、一般员工、财、物等等相互影响、相互联系,彼此紧密地结合在一起。

系统与要素的区分是相对的。要素是系统最基本的单位,它总是系统的一部分,而且任何一个系统都是更一般的系统的一个部分。换句话说,任何一个系统都是较高一级系统的一个要素,任何一个系统要素的本身,通常又是较低一级的系统。这就是系统的层次性。注意,在一个大系统中,组成系统的要素,也称为子(分)系统。

例如,整个教学系统由以下诸要素(子系统)构成:一是教学管理子系统,二是施教子系统——教师,三是受教子系统——学生,四是教学设施子系统。又例如,一个企业系统是本行业系统的一个子系统,而行业系统又是整个国民经济系统的一个子系统。

## 二、系统与环境

在明确了所研究的系统本身后,还应当了解系统的环境。环境是相对于所研究的对象系统而言的。系统以外的部分称为环境系统,简称环境。

我们必须考虑环境对系统的影响,以及系统对环境的影响。因为系统与包围系统的环境之间,通常都有物质、能量和信息的交换。

系统与它的环境的划分也是相对的。在一个大系统中,对于某一个特定的子系统来说,其他的子系统可以看作它的环境。

所以,从广义的角度看,所谓环境,就是指被研究对象系统之外,对被研究对象系统有影响作用的一切系统的总和。

需要说明的是,系统作为统一的整体,对外界环境而言,必然有相对封闭的边界,否则,系统与系统的环境不能区分。但是,任何现实的系统都不是绝对封闭的,而是开放的。系统的开放性集中体现于它与环境之间的相互影响和相互作用,它与环境有物质、能量和信息的交换。

以企业为例,任何企业组织都是在一定的环境中谋求生存与发展的。通常企业组织所面临的环境可分为外部环境和内部环境两个方面。前者又分为一般环境和具体环境两种。一般外部环境由社会、经济、技术、文化、教育、自然资源、人口、政治与法律等方面所决定,这些因素对正式组织系统的影响力很大,但其影响方式往往是间接的;具体外部环境包括供应者、顾客、竞争对手等方面,他们虽然也在正式组织系统之外,但其影响方式却是直接的。内部环境基本上是指正式组织系统,主要的内部环境因素包括组织结构与体制、战略与决策、沟通与控制过程以及工艺与流程等。

系统必须依赖于环境而存在和发展,环境是系统存在和发展不可缺少的基本条件。环境的变化对系统有很大的影响。因此,系统必须适应外部环境的变化,不能适应环境变

化的系统是难以存在的。另外,系统所处的环境又是系统的限制条件或者称为约束条件,我们在研究系统过程中不得不考虑这一点。

系统论的创立者贝特朗菲把系统确定为:处于一定的相互关系中并与环境发生联系的各组成部分的总体。这是对系统比较经典比较完整的定义。

从此定义可以看出,要素与要素、要素与整体、整体与环境之间,存在着相互联系和相互作用。而且,每一个系统的特征(在控制论中叫作状态),都是用这个系统所具有的那些性质和反映系统与环境间的那些联系来表示的。

一个学校、一个工厂、一个城市、一个国家都可分别把它们看成一个系统。读者可以试着分析一下学校这一系统的要素和环境。我们要善于把我们的研究对象作为一个系统问题来考察,学会分析系统内的要素、系统外的环境,这样才能逐步提高分析一个具体问题的能力。

在控制论中,我们还强调组织界系统的概念。所谓组织界系统就是指有目的地组织起来的系统。我们研究系统,正是为了更好地实现系统的某种目的。没有目的、没有组织的要素堆积不是系统,因为仅仅指出系统中有哪些要素,并不足以确定一个系统,还必须指出这些要素有着什么样的联系(也叫耦合,即一个要素的存在与变化和另一个要素的存在和变化之间的关系),它们为了一个什么样的目的组织在一起。

例如,企业就是一个为了达到一定目的,由许多相互关联的要素(各种子系统或分系统)组成,并依靠各个要素之间的相互联系、相互作用有机结合在一起的复杂的耦合运行的人造经济系统。企业的经营管理系统在限定的资源和现有职能机构的配合下,它的目的就是完成或超额完成生产经营计划,实现规定的质量、品种、成本、利润等指标。

另外,系统的边界是指系统与环境的分界处。确定系统的边界能使对象系统更加明确。系统与环境是密切交织的,在确定系统的具体环境时,往往会遇到一定的困难,这就是如何明确系统与环境的边界问题。边界就是把系统和环境分割开的设想的界线,它并不是严格不变的。

总之,控制论,作为控制的科学,它并不研究所有系统,而只研究这种组织界系统。

## 第二节 结构和功能

在理解了系统的概念,分析了系统的要素和环境以后,下面进一步介绍系统的有关概念。

### 一、结构与功能的概念

任何系统都是有结构的。没有无结构的系统,也没有离开系统的结构。结构的概念

是一个很广泛的范畴,对这个范畴的研究已特别深入。所谓结构是指诸要素在该系统范围内联系的内在形式和方式。简要地说,系统内部各个要素的组织形式,即为结构。

需要说明的是,不能把结构仅归结为构成,因为结构不明显地含有一定的动态。换句话说,结构不仅要求空间的观点,而且要求某些时间的观点。任何物质系统的结构,都是空间结构和时间结构的统一,都是稳定性结构和可变性结构的统一。

结构概念常常同要素概念一起出现,但是,“结构”这个范畴不仅同“要素”概念有关,而且同“功能”概念有关。反过来说,系统的功能不仅依赖于它的各组成部分即要素本身的特性,更取决于后者之间的相互联系与相互作用的形式和方式即系统的结构。

所谓功能,通俗地说,是指系统所能发挥的作用。准确地说,系统在一定环境中所发挥的作用,即功能。有时将其与行为、活动看作是等价的概念。也就是说,它表达的是有目的地组织起来的系统的活动,简单地说,表达它们的行为。

现以教学系统的功能加以说明,教学系统的功能就是培养德、智、体全面发展的适合社会需要的人才。就具体业务而言,就是要使学生增长知识,发展能力,提高素质。

我们必须认识到,系统的整体功能并非各个组成要素功能的简单叠加,也不是组成要素的简单拼凑,而是呈现出各组成要素所没有的新功能。即使每个要素并不都很完善,但它们可以综合,统一成为具有良好功能的系统。

任何系统都有特定的功能,这是整体具有不同于各个组成要素的新功能,这种新功能是由系统内部的有机联系和结构所决定的。要素与结构是功能的内在根据,功能是要素与结构的外在表现。没有内部的联系就不会形成系统的结构;而没有外部的联系,就谈不上系统的功能。

系统是结构和功能的统一体。功能是只具有一定结构的系统的功能,而结构也是只具有一定功能的系统的结构。如果说,结构说明系统诸要素相互联系和作用的内在组织形式或内部秩序,那么,功能则说明系统与环境相互联系和作用的外在活动方式或外部秩序。换句话说,系统结构说明的是系统的内部状态和内部作用,系统功能说明的是系统的外部状态和外部作用。按照贝特朗菲的解释,结构是“部分的秩序”,功能是“过程的秩序”。系统的结构与功能的关系是不可分割的一对范畴,理解系统的结构是理解系统的功能的基础。

有什么样的结构,就相应地有什么样的功能。但是,结构相同也可能功能不同。例如人体结构大体相同,但表现出的体能和智能却存在不同。另一方面,不同的结构也可以实现相同的功能。例如人脑与电脑具有不同的结构,但在某些方面却具有相同的功能。

系统的功能反映系统与外部环境的关系,系统的功能与环境相联系,意味着功能与环境的状态及其变化有关。环境一旦发生了变化,系统的功能就可能随之发生变化。一般地,与系统的结构具有相对稳定性比较而言,系统的功能则是灵活易变的。

值得一提的是,功能这个概念是与系统的动态过程联系在一起的,只有在系统与环境

相互作用的过程中才能体现。因此,控制论所研究和追求的重要目标之一就是赋予系统以适应性,也就是说提高系统对外界环境变化和内部结构变化的适应性。

功能不仅为人和动物的器官所固有,而且也为技术装置的各种零件所固有。在社会领域,“功能”也是一个很流行的概念,这个概念说明集体(社会团体)和个人的活动的性质。但应当指出的是,“功能”范畴只是为组织界系统所特有。

总之,任何系统都是处在特定的环境下,任何系统又都是由若干要素按一定结构组成的具有特定功能的有机整体。决定系统功能的两个因素是系统结构和环境作用,前者是决定系统功能的内在因素,后者是诱发并制约系统作用的外在因素。

## 二、相关的一些概念

系统的功能是接受物质、能量和信息进行加工处理产生物质、能量和信息的过程。在这里,环境对系统的作用表现为系统的输入,系统在特定的环境下对输入进行工作(加工处理),产生出反作用于环境的输出。由系统的输入引起的系统的输出就是系统的行为。系统把输入转换为输出的能力,就是系统的功能。

可以看出,系统行为和系统功能是两个相近但又不完全相同的概念。现在,行为这个术语获得了进一步的概括,而且已在控制论的许多其他范畴中占有一定的地位。所谓行为就是一个系统相对于它的环境做出的任何变化。它是由系统环境和系统内部状态两个因素引起的。换句话说,行为不是一个原因而是两个原因——外部原因和内部原因的结果。

系统的功能可以通过系统的外部行为来体现,它可以用系统的输入、输出和内部结构来描述。系统的作用实质上是从输入到输出的“变换”,只不过这种变换通常极其复杂。需要说明的是,输入和输出也是控制论的一对范畴。因为控制的目的说到底,就是要找出如何通过输入得到符合我们愿望的输出。为此必须弄清输入和输出之间的关系。

我们不仅是要理解输入与输出的概念,更重要的是这对概念提供了我们研究问题的重要途径。一般来说,我们可以把输入和输出关系归结为因果关系,输出作为结果,与之相应的输入作为原因。为了直观地说明,可把此关系简化为一般的函数关系。

通常把对系统有重要影响的外界作用称之为输入(可控输入),而把其余的外界影响当作干扰(不可控输入)。很显然,无论是输入还是干扰,都会对系统的输出产生影响,只是影响的结果不同。如果不考虑干扰因素对系统状态的影响,那么给系统  $F$  施加输入  $X$ ,相应地得出输出  $Y$ , $F$  起到把  $X$  转换成  $Y$  的作用。关系式为: $Y=F(X)$ 。如果考虑干扰因素  $M$  对系统状态的影响,系统  $F$  的输出  $Y$ ,则是输入  $X$  和干扰  $M$  共同作用的结果。关系式为: $Y=F(X,M)$ 。通过阐述输入和输出的上述关系,可以加深对控制过程的理解。

例如,一个工厂专门用已加工好的元件装配汽车,对这个系统来说,输入和输出是什

么? 这时的干扰输入是什么? 很显然,输入是交付给这家工厂的加工好的元件和由计划部门下发的汽车生产计划,输出是所生产的汽车数量。当加工好的元件供应中断或工厂的工作节奏中止时,就出现干扰。

### 第三节 功能系统、控制系统和控制论系统

在介绍了对系统进行分析的一些概念后,下面再介绍对系统进行控制的一些概念。

#### 一、功能系统和控制系统

前面指出,结构说明系统中各要素相互联系的性质,功能表达系统与外部环境相互作用的效果。而且,控制论是在从“结构”方面研究系统的基础上,重在强调从“功能”方面研究系统。因此,“功能系统”的概念逐渐成为控制论的主要概念之一。

这里首先指出,功能系统和控制系统这两个概念是有不同意义的:前者强调系统的活动方面,而后者则强调被控制的对象。可见,功能系统这个概念比控制系统这个概念广泛得多。

控制系统一般由控制部分、被控制部分以及它们之间的各种信息传输通道构成,见图 2-1。控制部分也被叫作控制者,被控制部分也即被控制的客体。

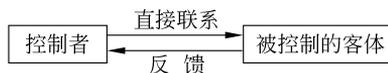


图 2-1 一般控制系统示意图

对我们来说,应当把控制系统理解为“主体-客体”这一整个系统。直观地说,控制活动就是施控主体对受控客体的一种能动作用。控制作为一种作用,至少要有作用者(施控主体)

与被作用者(受控客体)以及作用的传递者(控制媒介)三个组成部分。这三个组成部分组成一个整体,相对于某种环境而言,具有控制的功能,这就被称为控制系统。

在一个控制系统内,不仅施控者作用于受控者,而且受控者也可以反作用于施控者。前一种作用是控制作用,后一种作用则是反馈作用。控制与被控制、施控与受控是控制过程中的基本矛盾。

作为一个特定的控制系统,总是处于一定的环境之中,控制系统与环境之间是相互作用的。控制论着眼于从控制系统与特定环境的关系来考虑系统的控制功能。换句话说,控制系统的控制功能是在系统与环境之间的相互作用中实现的。因而,控制系统必然是一个动态系统,控制过程必然是一个动态过程。所谓动态,指系统的状态是随时间而改变的。动态系统可看作系统的一般模式,静态系统可看作它的特殊形式。

例如,就整个国民经济系统而言,它是超级大系统。而这个超级大系统实际上又分别

与两个超级大系统——自然系统和社会系统相交,未相交者是它的环境(自然环境和社会环境)。国民经济系统从自然系统与社会系统输入自然资源与劳动力资源,经过生产过程生产出中间产品与最终产品,最终产品中的一部分形成生产资料积累,重新回到生产过程,而另一部分形成各种消费品,反过来对社会系统发生影响。所以,一个国民经济系统,大体上可分为两部分:国民经济管理系统和国民经济再生产系统。这两个系统各处于不同的地位,施控系统相当于国民经济中的各级管理系统,而受控系统就是实际的再生产过程,它具体又由各生产和流通单位组成。

再如,企业是整个社会大系统中的一个子系统,它具有社会系统的一般性质,又具有自身的特殊性质。企业作为一种特殊的社会系统,与其他社会系统不同的特殊功能是从市场获得人力、物资、资金、信息等资源,转换成市场所需要的产品,提供给市场。以往的传统管理把企业看作一个孤立的封闭系统,忽视了企业与外部环境的相互关系。现代的系统管理则把企业看成是一个开放系统,它受环境影响,同时,也影响着环境。企业从周围环境中输入物质、能量和信息,经过企业的转换,以产品或服务的形式输出,又回到环境中去。因此,可把企业作为一个系统来分析,从目标、环境、生产过程或流通过程、管理过程,信息传递等方面,全面地考察其运动过程。

需要说明的是,关于控制系统,如以自动化仪器(如电子计算机等)担当施控系统的职能,称为自动控制系统;如以人或人群系统担当施控系统的职能,则称为人工控制系统。我们分析和探讨的均是基本上从人工控制的角度出发的。

## 二、开环控制系统和闭环控制系统

在控制系统中,控制者向被控制的客体施加控制作用,以实现所需的控制过程,达到预定的控制目的或控制目标。控制系统根据有无反馈回路,可区分为开环控制系统(图 2-2)和闭环控制系统(图 2-3)两大类。(注:这里的输入即目标值,输出即实际值。)

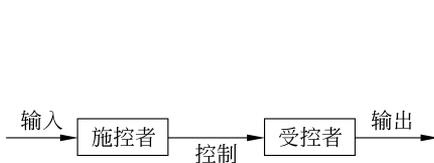


图 2-2 开环控制系统图

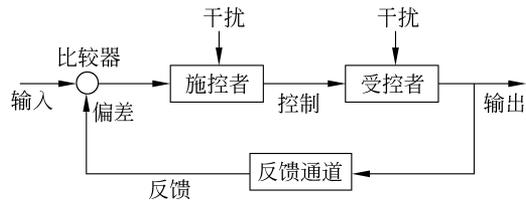


图 2-3 闭环控制系统图

(1) 开环控制系统的输入直接控制着它的输出,或者说,系统的输入在开环系统中根本不受系统输出的影响。开环系统的特征是,输出对输入有响应,但输出是相对隔绝的并对输入没有影响。在这种系统中,过去的行动不会控制未来的行动。它虽然结构简单,但对环境的适应能力差,控制精度低。

城市交通的控制就是开环控制。通常只要红绿灯信号的更替时间适当,这种控制就是有效的,交通是流畅的。但是,一旦出现非常事故,造成路口堵塞,这种控制就失败。

(2) 闭环控制系统由于带有反馈回路,所以它的输出是由输入和输出的回路共同控制的,或者说,系统的输入受到系统输出的影响。在这种系统中,它能把系统过去的行动结果带回给系统,以控制未来的行动。带反馈回路的闭环控制系统通常更能抵抗环境干扰与系统本身不确定性对系统的影响,所以它对环境有较大的适应能力,控制精度高。

技术装置中的自动控制系统,生命机体中的自动调节系统,经济活动中的调节控制机制等都是建立在反馈控制的基础上。

需要注意的是,在环境变化所产生的干扰作用于受控者引起输出改变的同时,干扰也可以直接作用于施控者。这就有可能在输出未出现偏差之前,施控者即发出控制纠正即将发生的偏差,而不是产生了偏差之后再通过反馈来纠正。干扰对施控者的这种直接作用,且施控者又能理解这一作用的影响,这种情况叫前馈。前馈控制是根据干扰因素和受控者的变化规律,预测干扰因素和受控者的变化趋势,提前采取控制措施,避免可能出现的系统偏差。实际上,在现实的控制中,往往将前馈控制与反馈控制各自的特点结合在一起进行。

下面我们来看一个综合的例子。假设希望使农民收入稳定。我们知道,各年的收入依赖收成出现大幅度波动。稳定收入的目的可用三种方法来达到:

第一种方法是努力使每年的收成保持在一定的水平,不比平均水平低多少。这可以采用排除干扰的方法,该方法具有前馈控制的某些特征。但这种方法实际上是行不通的,因为这要求我们有控制天气的能力。

第二种是使用补偿天气干扰的方法,该方法具有开环控制的特征。这种方法是可行的。随着农业科学技术的进步,可以减少收成对天气的依赖,比如可根据天气控制农用水的人工供应(灌溉),因而上述目的可以部分地达到。

第三,可以建立由农民在收成高于平均收成年份提供的适量的平衡基金,用来在收成低于平均水平的年份付给农民。这种方法就是平衡农民收入与平均水平的偏差,该方法具有明显的闭环控制的特征。

实践中,我们可以同时使用这三种调节方法,取得较好的调节效果。

### 三、控制系统与控制论系统

从严格意义上说,开环控制系统虽具有控制功能,但它不属于控制论的研究范围,而属于自动控制理论的研究范围。控制论一般只研究带有反馈回路的闭环控制系统。也就是说,控制论的研究对象并不是任意的控制系统,而只是其中的一类。

苏联的控制论学者列尔涅尔把控制系统和控制论系统作了严格的区分。他认为控制论系统不仅要求这个系统是控制系统,而且还取决于研究这个系统的工作者所持的观点

与方法。意思是说,控制论系统不仅是控制系统,而且是以控制论的基本观点与方法来研究的控制系统。

控制论的首要观点是反馈。把控制论系统限于带反馈回路的闭环控制系统,这也是控制论的基本特点之一。

控制论的另一个重要观点是信息。它认为控制系统也是一种信息系统,因此必须用信息的观点来研究控制系统。

可以看出,信息和反馈是控制论思想的核心。控制论的基础正是根据这两个基本概念:一切有生命与无生命的系统都是信息系统;一切有生命与无生命的系统都是反馈系统。作为控制论系统,必须同时具备以上两个特点。也就是说,控制的机制在于信息反馈的作用,而且控制论系统中的反馈是指信息反馈。在控制论系统中通信(信息的传输)和控制(信息的反馈)是不可分的。

## 第四节 反馈、信息、控制及其统一原理

对控制论的基本概念(系统、要素、环境、结构、功能、功能系统、控制系统、控制论系统、控制者、被控制的客体)进行初步的确定以后,就可以转入研究关于反馈、信息和控制的问题,从而揭示控制论的基本原理。

反馈、信息和控制是控制论的三要素。反馈、信息和控制使“控制论系统”这一概念系统化,“控制论系统”对反馈、信息和控制则是最基本的、最主要的。反馈、信息和控制是互为前提的,因此不能把这三者分开。形象地说,它们同“控制论系统”这个基本概念一起,是建立理论控制论这一整座大厦的柱子。

而要分析能说明控制论系统活动性质的三个主要概念,应从控制论的最重要原理——被称为控制论“灵魂”的反馈原理——开始分析。

### 一、反馈

维纳把火炮自动打飞机的动作与人狩猎的行为作了类比,发现了重要的反馈概念。如果用原因和结果来解释反馈过程,那么可以把反馈过程看成是系统的输出端的结果反过来作用输入端的原因。很显然,反馈的必然性是由于一个系统的运动总是受到内部要素和外部环境的影响和干扰造成的随机性决定的。

维纳指出,如果调节器(系统中用来实现调节的部分称为调节器)、控制者使用关于被控制的客体情况的信息来达到目的的,而且它以后一切作用都旨在消除被控制的客体的“现实的”东西——实际状态与“给定的”东西——目标状态之间的不协调性,那么系统就具有反馈。

调节器、控制者按照反馈渠道获得关于被控制的客体情况的信息,而起校正作用的控制信息是沿着直接联系渠道发送的。控制者系统施加控制作用,接收反馈信息;被控制的客体接受控制作用,提供反馈信息。从控制者系统到被控制的客体,传递控制信息的正向通道,从被控制的客体到控制者系统,传递反馈信息的反向通道,它们组成了闭环的信息通道,构成闭环控制系统。

事实上,一切机械控制系统,一切生命系统以及那些以生命系统为基础的社会系统都是与反馈机制密不可分的。反馈的本质是系统的输出被送回输入端,并由此对系统状态产生制约作用的影响。任何系统只有通过反馈,才能实现控制。

有必要把反馈概念同反馈原理本身区别开来。前者指的只是从被控制的客体到调节器、控制者方向的联系渠道,而反馈原理本身则意味着在控制过程中的定向性的校正机制。

反馈原理是控制和调节的一个通用原则。它不仅要求控制系统中的信息联系,而且也要求控制过程的有目的的方向性。不使用反馈原理,控制就不能实现。反馈原理是“控制论”的最重要、最基本的原理。

我们总是谈控制者方面的反馈,产生了一个问题,被控制的客体方面是否有反馈。这一个问题留给读者们思考。

下面进一步谈一谈反馈的两种类型——负反馈和正反馈。

如果现实状态的反馈信息与给定状态的控制信息之差倾向于反抗系统正在进行的偏离目标的运动,那么它就使系统趋向于稳定状态,称为负反馈。

如果两者之差倾向于加剧系统正在进行的偏离目标的运动,那么它就使系统趋向于不稳定状态,乃至破坏稳定状态,称为正反馈。

换句话说,负反馈的机制是使系统的输出始终趋向于它的目标,而正反馈的机制则是使系统的输出偏离它的目标。

负反馈是一种最简单的类型。正反馈是反馈的一种最复杂形式。

负反馈有利于制约系统偏离目标的行为,使系统沿着减少偏差的方向运行,最终使系统趋于稳定状态,恢复平衡。有经验的教师常常利用负反馈。在向学生传递各种信息的同时,也开辟另一条信息通道,取得学生接受知识情况的信息。在课程上他们都十分注意观察学生的眼色,判断他们听懂了没有,或者采取提问的方式,直截了当地进行试探。课外批改同学的作业以及课后安排的考试也是一些重要的了解学生听课情况的通道。通过这些教学环节,教师就能比较正确地把握自己讲课的深浅和进度了,使教学达到比较理想的目标。

正反馈使人联想到超级大国之间的军备竞赛。每一方得知对方发明了一种新式武器就立即研制一种更先进更厉害的武器来对付。于是,原子弹、氢弹、远程导弹等就这样不断地被制造出来,远远偏离了“和平”这种目标值。可见正反馈是越来越偏离目标值,甚至

失去控制。这样看来似乎正反馈只起破坏、消极的作用。以至于在很多场合,正反馈现象的名声不太好,人们常常把它叫作“恶性循环”。但这绝不是指正反馈在所有场合都是“坏”的。事实上,在有的系统中,恰恰需要正反馈作用。

在我们研究控制论的基本原理时,既要重视负反馈,也不能因此而忽视正反馈。不能笼统地说负反馈“好”,正反馈“坏”,而要根据具体情况恰当地使用。比如,在企业内部控制中,我们常常认识到负反馈的重要性,即强调考核与惩罚,而忽视正反馈的激励作用,否认激励是一种控制技术。又比如,现代管理中许多地方需要正反馈,两个企业、两个生产单位开展竞赛就是一例,你追我赶,相互竞争。当然,大量需要的还是为了减少和消灭同既定目标的差距的负反馈。

正反馈、负反馈是普遍存在于自然界与社会领域中的两种反馈机制,是事物发展中的一对矛盾,两者既是相互独立的,又是相互联系的、相互转化的。农贸市场上的蔬菜价格,供过于求时,价格就下跌,求大于供时,价格就上涨,这其中既有负反馈作用又有正反馈作用。生产与市场之间,政府与人民之间,教师与学生之间,都同时既有负反馈,又有正反馈。

## 二、信息

如果说,以前把信息只理解为关于某人或某物的消息,那么现在“信息”概念使用得如此广泛,已经成为当代社会上最时髦的词汇之一。但是到目前为止,信息并没有一个统一的定义。

在形形色色的观点中,有一种观点认为信息是物质的特性。这样一来,信息概念以明显或不明显的形式被解释为具有普遍性的哲学范畴。另有一种观点要求把信息看作为同控制有机地联系着的,因而只为生物界、机器和社会的控制系统所固有的功能现象。在这个意义上,信息概念被看作控制论的概念。

维纳说过,信息是人们在适应外部世界并且使这种适应反作用于外部世界的过程中,同外部世界进行交换的内容的名称。它是被控制论系统用来适当控制和调节的内容、方面,是控制者与被控制的客体之间的特殊关系和联系。在这种情况下,信息是为控制服务的,它们是成对的范畴。

一个系统之所以能按预定目的实现控制,就是因为该系统内部的各组织部分之间以及系统与其外界环境之间存在着信息流通和信息反馈。控制机构发出指令,作为控制信息传送到控制对象,由它们按照指令执行之后再把执行的情况作为反馈信息输送回来,并作为决定下一次调控的依据。换句话说,任何系统都离不开信息,系统是依靠信息来进行通信和控制的。控制和信息是不可分的,任何控制都要凭借信息。

应该看到的是,系统的运动变化过程是一个信息运动的过程。仍以教学系统为例,教学的功能主要是通过不断的信息运动来实现的。我们来看看学生学习中的信息运动过

程。学生听了教师讲课和阅读教材以后,把内容记下来,这是初步的信息获取。更重要的是,他应把整体的知识分解成若干个概念、知识单元、定理、定律、法则、案例、算法等,对它们逐个地进行分析,理解并吸收到自身的认识体系中去,成为他知识的有机组成部分。在这个过程中,学生要不断地进行信息的加工和变换。当然,为了真正掌握所学知识并培养能力,学生还要进行必要的教学实验,做作业、设计和参加一定的生产实践和社会实践。在参加上述实际活动中,学生不断进行信息的输入、输出、存储、加工、重组,有时还有信息的再生。

在这里,要记得有两种基本类型的信息——约束性信息和非约束性信息。这两种类型的信息要求在分析时用截然不同的方法。

第一种类型的信息也叫结构信息。它的特点是控制论系统本身的组织性。对其量的研究,不需要统计的方法。

第二种类型的信息也叫功能信息。对信息的这种理解在科学界最流行。要从量的方面表征这类信息,必须使用统计的方法、数学的概率论。

初看起来,这两种类型的信息区别到这种程度,但是它们之间也有许多相似之处。一方面,不从外边获得并使用非约束性信息,不同环境保持信息上的联系,是不可能的。另一方面,非约束性信息不断地转变为约束性信息,提高系统的原来组织。因此,它们是相辅相成的。

信息的分类还很多。比如,产生于系统本身的称内部信息,来自周围环境的则称外部信息。

最后指出,“信息”这个概念是容量极其大的和多方面的,这一术语在每一具体情况下的意义,只有从它被使用的上下文中才能加以说明。

### 三、控制

下面我们来分析控制论中最重要的概念——“控制”。

在控制论产生以前,控制概念只说明人类的活动。现在已作为必要的组成部分包括到控制论科学的定义中,即必须把它作为一个普遍概念来解释。

高级汉语大词典将控制定义为:“掌握住对象不使其任意活动或超出范围;或使其按控制者的意愿活动”。在传统意义上,我们对“控制”的理解更多地强调了“制”,即掌握住对象不使任意活动或超出范围。然而,“控”的含义更重要,即使其按照控制者的意愿活动。控制的这一定义明确了控制是由控制主体、控制客体、控制目标、控制过程等要素组成。控制主体,即控制者;控制客体,即控制对象;控制目标,即控制者的意愿;控制过程,即控制活动。

控制就是对被控对象施加某些作用,使对象行为或变化过程符合或逼近目标,实现行为或过程的目的性。维纳就曾从驾驶汽车的过程中获取关于控制极为重要的认识,行进

方向偏离靠方向盘来校正和控制,使汽车行驶回到预定的方向。这虽然是极平常的例子,但却包含着关于控制论相当丰富的内容。首先,被控对象——汽车是一个可控系统;第二,控制作用可通过执行器——方向盘来实现;第三,控制依据是司机观察到的偏离,其标志是车体离开了预定的目的方向,这是关于车行进的信息;第四,信息作用于司机,他作出合理的控制——偏右时,向左打方向盘,反之偏左时,向右打方向盘。当然,像这样的事实生活中比比皆是。

控制是控制者同被控制的客体相互作用的一个方面。如前所述,控制系统在结构方面是控制者与被控制的客体、直接联系的信息渠道与反馈的信息渠道的统一。控制系统的活动正是由于使用反馈原理,被控制的客体被引入某一指定的状态。被控制的客体的合乎目的的变化,把它引向需要的状态的过程,就是控制。控制的实质就是保持或改变受控对象的某种状态,使其达到施控主体的预期目的。整个控制都是围绕控制主体的目的而进行的。在这里,控制成为一种有目的的能动性行为。

控制具有目的性的性质。目的性原则是控制论的首要原则。没有目的,无所谓控制。关于目的,按照过去的观点,是脑子里预先想到的活动的结果。许多学者谈到目的这一范畴,认为它标明了一切控制论系统活动的性质。所以我们有理由作出结论:目的和目的性的概念也是控制论的范畴。

广义地说,控制的目的有两种:一是保持系统原有的状态;二是引导系统的状态达到某种预期的新状态。换句话说,控制活动就是保持系统的稳定状态或把系统由一种状态向另一种状态转换。控制论的主要任务也就是保持系统的稳定和实现系统的既定目标。

应该指出,目的与目标不同,目标是目的的具体化。设定目标就是确定控制的目的。没有目标或目标不明确,就好像射击看不到或看不清靶子一样。而要实现控制目标,就要有相应的条件。即使系统有向目标状态转化的可能,但由于缺乏必要的条件,也就不能把可能性变为现实性。控制必须是目标和条件的统一,这就涉及控制能力这个概念。所谓控制能力,通俗地说就是创造条件使系统向目标状态转化的能力。如果不具备与目标要求相应的控制能力,就不能有效地控制系统的状态变化。

控制需要凭借一定的手段。保持或改变受控系统的状态,不但要求目的明确,而且还必须借助相应的手段。无目的或目的不明确,固然不能对受控系统进行有效的控制,但无相应的手段或手段不得力也不行。

需要说明的是,控制的逻辑起点是可能性空间。什么是可能性空间呢?可能性空间是指系统在运动变化过程中所面临的各种可能性的集合。具体地说,系统的可能性空间是其可能性状态的集合。可能性空间在控制中的重要意义就在于:可能性空间是系统控制的前提条件,如果系统运动变化只有一种可能性,那么也就无所谓控制了。

另外,控制的概念不仅和可能性空间有关,而且还与选择有关。选择不是一种盲目的

随意性的活动,而是一种有意识的、有目的的主动行为。控制是施加于被控对象上的一种作用,以维持或改善该对象的某种功能,而这种作用是在给定的条件和预定的目标情况下,从种种可能的作用中作出的一种选择。没有选择也就没有控制。

概括起来,对于控制来说,必须具备以上两个基本条件:一是受控客体必须存在多种发展的可能性;二是目标状态在各种可能性中是可以选择的。

控制的种类很多,有稳定控制(系统的标准输出值为常数)、程序控制(系统的标准输出值为已知的时间函数,如航行过程)、目标控制(系统的标准输出值是跟踪另一个系统的输出值变化而变化,如追捕过程)、最优控制(系统的标准输出值由某一函数的最大值或最小值构成)、自适应控制(系统只是根据过去的记录确定它的标准输出值),等等。

另外,控制又有自控和他控之分。比如,学生在校的学习过程,可以看作一个有控制(包括自控和他控)的过程。其中有一个重要的特点是,教师的控制要通过学生的自控来实现。教师的控制性信息能否有效地转化为学生的自控性信息,是教学能否取得成功的关键。

需要补充说明的是,控制论的中心问题是调节与控制。在调节概念和控制概念之间存在着这样的关系:调节被看作是控制的局部情况,是控制的最简单的情况。当然,这些概念的区别是相对的,在一定意义上,可以把控制看作是调节,而把调节看作是控制。可见控制与调节这两个概念几乎是等价的。唯一的区别是,当我们说一个系统具有调节功能时,这种调节功能一定是系统自身所具有的,而不是外部施加的。而当我们说控制时,往往是指在系统之外有一个控制机构对系统实施控制作用。因此,调节是控制的一种特殊形式,即“系统的自我控制”。

控制过程是设立目标与保证目标实现的统一。调节是纠正系统输出与变化的标准值之间的偏差。许多文献中用到“狭义”与“广义”的控制概念,所谓狭义的控制实际上就是调节,而广义的控制应该是一般意义上的控制。有些学者曾指出,用来使系统特征保持在一定轨道上的过程称为调节。如果不仅使系统的特征保持在一定轨道上,而且要确定这个轨道,那么就已经不是调节,而是控制了。

总之,控制是控制论系统为了保持它的结构而进行的功能活动的一个重要方面,是控制者同被控制的客体相互作用的一个因素。控制的实质是通过使用反馈原则而达到目的,而控制的内容则是把被控制客体引入符合这一目的的状态的过程。

现在我们来做一般的结论和表述控制论的基本原理。使控制论系统功能过程详细化的反馈、信息和控制的有机统一原理,是控制论的重要原理。系统概念是基础,信息概念是内容,控制是主动的施控系统对被动的受控系统的作用,反馈是被动系统对主动系统的反作用。

## 附：熟知的例子

高校是大家最熟悉的系统，把控制论的思想、原理应用于高校教学管理，是一个很好的例子。

按照控制论的基本观点，对烦琐庞杂的教学工作实施有效的管理，一是要把学校整个教学活动作为一个系统，教学单元活动和各个教学环节以及教学人员作为教学系统的要素；二是系统中各要素的联系和协调运动是通过信息的输入和输出，即信息的传递来实现的，信息在系统中起着重要的作用；三是维持系统的正常运动，需要调控各要素的运动，使其达到最优的状态和高效地运转。

高校教学管理的科学化是高校教学工作、教学管理工作发展的必然要求，也是高校提高教育质量的基本保证。高校教学管理科学化的内容主要是：遵循高等教育的基本规律，以教学管理基本原则为指导，运用现代科学方法，建立起教学管理决策系统、教学状况信息反馈系统、教学过程监控系统，进而实现对教学管理全过程动态的有效管理。

(1) 高校教学管理的核心结构是教学管理决策系统，教学管理决策系统指挥着教学管理系统的运行。通常来说，教学管理决策是指参与教学工作的领导者，在实践基础上形成的一定认识的指导下进行的选择目标和行动方案的活动。由于教学管理所依靠的主要是教学过程中知识信息的传递、交流、加工和制造，因而教学信息的管理又成为教学管理决策系统的基础。此外，在有了科学的教学管理决策系统作指导，畅通的教学管理信息为基础之后，还需要有效的教学管理控制系统为保障，才能使整个教学管理大系统合理地运行。

(2) 教学状况信息反馈系统主要包括教学巡视员制度、学生教学联络员制度等。正确的决策依赖于可靠的信息，而可靠的信息必须经过畅通的信息网络才能获取。教学状况信息反馈系统要求及时得到利于决策执行的准确和有力的信息，以便使决策部门在充足准确的信息下，有效调整和控制教学的顺利进行。信息反馈系统的科学化管理主要体现在教学信息的收集、教学信息的浓缩、教学信息的筛选、教学信息的提取反馈四个方面。实践证明，建立两种信息反馈制度，形成了科学的信息网络系统，通过执行这些制度，教学管理决策部门就能汇集大量的有关人才培养目标、层次、知识结构以及教学过程中反映出的教风、学风等各类信息。

(3) 教学过程控制系统是以教学质量为核心，以各类教学检查为手段，以教学过程中各类教学环节为中心而形成的。主要内容包括教学质量评估制度、学分评估制度、教学检查制度、作业和试卷抽查制度等，通过在教学过程中运作这些制度，就能有效地控制住影响教学质量的各个关键点，使人才培养全过程得到优化，确保人才培养质量。

## 第三章 控制论的一般性方法

控制论是一门具有方法论特点的学科。虽然如此,对于什么是控制论方法,它应该包括哪些主要内容,至今还不是很明确。本章将首先简单介绍控制论的一般性方法,下一章重点论述控制论的数学模型化方法。本章介绍的控制论方法主要包括以下三种:反馈控制方法、功能模拟方法和黑箱辨识方法。

### 第一节 反馈控制方法

控制论是研究具有通信和控制功能的系统,通信的目的是为了控制,而要实现控制就必须有反馈。因此,反馈既是控制论的一个基本原理,也是控制论的一种重要方法。

反馈作为现代科学技术中的一个重要概念,经历了一个漫长的发展演化过程。反馈概念萌芽于自动装置的技术经验。20世纪二三十年代,反馈思想被引入无线电技术中,形成了电子学的一个重要概念。战后控制论的创立,使反馈概念又扩展为控制论的一个基本原理。在控制论中,系统的控制过程就是通过信息的传输和反馈以实现系统有目的的活动的过程。控制部分有控制信息输入到受控部分,受控部分也有反馈信息返送到控制部分,从而形成闭合回路。控制部分正是根据反馈信息才能比较,纠正和调整它发出的控制信息,从而实现控制的。事实上,反馈控制是一切客观事物相互作用的一种普遍形式。没有反馈,客观事物就难以存在和发展,人类也就失去了对自然、社会和思维的控制能力,整个世界就会处于混沌和混乱之中。可见,反馈比其他的科学概念有着更大的适用性。概括起来,反馈经历了技术经验——电子学——控制论——哲学四个阶段。

维纳曾明确指出,反馈是控制论的一种方法,即将系统以往的操作结果再送入系统中去。它的特点是根据过去的操作情况去调整未来的行为。这种以系统活动的结果来调整系统活动的方法即反馈方法。

从一般的角度讲,任何控制系统,特别是人工控制系统,都是由施控和受控系统两个子系统构成的。其反馈控制过程是:施控系统将输入信息变换成控制信息,控制信息作用于受控系统后产生的结果通过反馈通道再被返送到原输入端,并对受控系统的再输出发生影响,起到控制作用,达到预定目的(见图 3-1)。

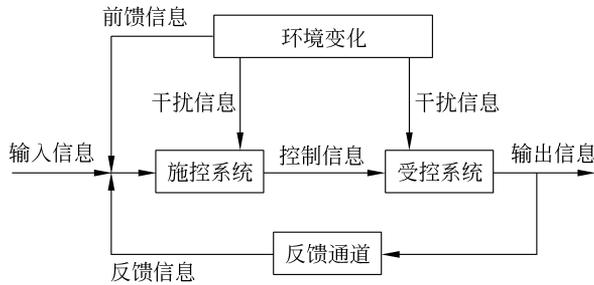


图 3-1 反馈控制方法示意图

输入信息、控制信息、输出信息、反馈信息以及环境变化引起的随机干扰信息，它们之间存在着一定的函数关系，可以进行定量描述。

任何控制系统和控制过程，由于环境变化的干扰信息的作用，总会使受控系统的输出状态偏离给定状态。反馈控制的依据，就是受控系统运行的现实状态与给定状态之间的偏差信息。反馈控制就是根据这种系统偏差信息，调整和改变受控系统的输入信息（控制信息）。

要实现控制的目的，必须不断解决“系统的偏差与反馈控制措施”之间的矛盾。反馈控制措施的实施，可能产生两种不同的效果。正反馈是系统偏差不断扩大的过程，而负反馈则是不断消除系统偏差的过程。

例如，某企业作出生产某种产品的决策，产品投放市场后，由于规格型号不符合用户要求而滞销，这个信息反馈回来后，企业的决策机构马上改变产品的规格型号，使自己的产品适销对路，这就是典型的负反馈。但如果企业的决策者是个官僚主义者，听信了虚假汇报，不仅不改变生产方案，而且片面追求更高产量，结果造成严重的产品积压，使整个企业陷入困境，这就是典型的正反馈。

由上可见，反馈控制方法是最重要、最基本的控制论方法。今天，反馈控制方法已被广泛运用到各个领域。

## 第二节 功能模拟方法

控制论把模拟方法发展到功能模拟的新阶段。功能模拟方法是模拟方法的高级形式，它集中体现了控制论的思想特点。功能模拟方法既是控制论的基本方法，又是具有相对独立性的科学研究方法。

模拟方法简单地说就是用模型模仿原型的方法。它依据的是模型和原型之间的相似关系。模拟方法的萌芽，可以追溯到遥远的古代。直观模拟是人类最初对自然物的形态

的简单模仿。正是这样大量地对自然物的模拟,人类逐渐过渡到对人造工具的模拟阶段,这个转变具有划时代的意义。随着近代实验科学的产生和发展,模拟方法进入一个新的发展阶段——模拟实验阶段。即先设计与某一自然现象或过程相似的模型,然后通过模型间接地研究原型。上述的模拟方法,不论是对自然物的模仿或人造工具的仿制,还是对近代科学研究的模拟实验,都是以认识了原型事物的结构及其运动过程为前提的,失去了这个条件,传统的模拟方法就会失去意义。在对象的物质结构以及内部关系尚不清楚的条件下,传统的模拟方法就暴露出它所固有的局限性。

维纳等人抛开机器和生命机体的不同物质基质和具体的运动形式,只在行为和功能方面寻找二者的统一性和相似性,把传统的模拟方法发展到功能模拟的新阶段。所谓功能模拟方法,就是以功能和行为的相似为基础,用模型模仿原型的功能和行为的一种方法。所模拟的是一切具有通信和控制功能系统的合乎目的性的行为。这里的通信和控制功能系统,就是指控制论系统。

从控制论的角度说,机器、动物以及人类社会等系统,虽然在物质基质、结构和具体运动形式上各不相同,但它们之间存在着行为和功能的相似性,即通过信息的变换和反馈机制,自动调整自身的运动,以适应环境的变化。因此,这类系统都可以从通信和控制方面用模型模仿原型。功能模拟方法的作为在于,通过对模型的功能和行为的研究得出关于原型的知识。

一般地说,采用功能模拟方法是因为不认识或不完全认识研究对象的结构,才从功能研究入手的。它所提出的问题不是“这是什么东西”,而是“它能做什么”,即着眼于功能的相似性。它改变了传统的模拟方法以结构与功能严格对应的相似性的理论基础,为人类利用结构不同的物质去实现相同的功能提供了有力的方法。

概括起来,功能模拟方法与传统的模拟法相比,具有以下特点:

- (1) 它只以功能和行为的相似为基础;
- (2) 不追求模型的结构与原型相同;
- (3) 在传统模拟中,模型只是一种认识原型的手段,而在功能模拟中,模型本身就是研究的一个目的。

功能模拟方法使模拟由单纯认识原型的手段,发展成改造世界的直接手段,这一点具有重大的理论意义和实践意义。

控制论的创立者们正是运用功能模拟法,研究制造出电子计算机。他们运用五个与大脑功能相似的部件,创造了用电脑代替人脑的部分功能的奇迹。具体地讲,用输入装置模拟人的感受器官来接受外来信息;用存储器模拟人的记忆功能,将外来信息存储起来,并可供随时提取;用运算器模拟人脑的判断、选择、计算功能;用控制器模拟人脑思维运动有条不紊地指挥各部件协调一致地工作。用输出装置来模拟人对外界环境的反映,输出有关计算结果。随着控制论向智能科学发展,将促进计算机向智能机发展,也必将带来认识和实践手段的新飞跃。

### 第三节 黑箱辨识方法

控制论的创始人维纳曾认为,所有的科学问题都可作为“闭盒”,研究它们的唯一途径是利用闭盒的输入和输出。1956年,艾什比在《控制论导论》中写道,所有事物实质上都是“黑箱”,并对黑箱方法作了比较系统的描述。艾什比所称的黑箱,也就是维纳所称的闭盒。那么什么是黑箱?

黑箱是指人们一时无需或无法直接观测其内部结构,只能从外部的输入和输出去认识的现实系统。在这里,黑箱、系统、客体都是等价的概念。现实的系统作为认识的客体之所以被称为黑箱,是因为对于人类认识的相对性来说,在人类认识的一定阶段上,任何客体总有许多情况是人们不曾了解的。这些尚未被认识的东西,如同装在一个不透明且封闭的箱子里,一时无需或无法进行直接观测,人们只能在系统之外进行研究。正是在这种意义上,控制论把人们认识和改造的对象称为黑箱。

既然黑箱是相对于人这个认识主体而言的,那么,被考查的对象能否作为黑箱来对待,这不仅取决于客体本身的性质,而且更重要的是取决于认识的主体。如果对一个确定的被考查对象一无所知,或者说系统内部结构不能直接观测,那么它就是黑箱;如果既不是一无所知,也不是无所不知,或者说部分可直接观测,那么它就是灰箱;如果认识达到了无所不知,或者说可直接观测,那么它就是白箱。

例如,一台电视机,对于外行人来说,只会看电视节目,对其内部构造、机理一无所知,是黑箱;但对电视机专家而言,是白箱;还有些人对其略知一二,但又不太清楚,是灰箱。

黑箱概念是相对的,在不同的时间,随着科学技术的进步,人们认识和改造客观世界的能力提高,许多原先是黑箱的事物可以转化为灰箱,乃至白箱。

控制论的贡献不在于把一无所知的系统视为黑箱,而在于它提供了认识黑箱的方法,即黑箱方法。所谓黑箱方法,就是通过建立相应的输入和输出关系,了解系统的功能和行为,并进而去认识其内部结构。

设某一控制系统  $S$  的行为取决于它的输入值  $X_1, X_2, \dots, X_n$  和输出值  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  (见图 3-2)。

在对这一系统观察一段足够的时间后,便可获得反映系统行为的大量数据。据此便可建立反映系统行为规律的数学模型。即  $Y=f(X)$

黑箱方法的最大特点在于几乎完全不涉及系统内部结构,只考查系统的输入和输出。这样,即使我们不打开黑箱,不知道它的内部结构,

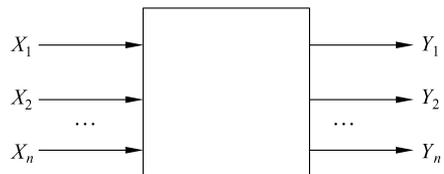


图 3-2 黑箱系统

仍然可以了解系统在功能和行为上的某些特性。

黑箱方法的基本步骤如下。

### (1) 建立主体和客体的耦合系统

首先根据研究目的,把作为黑箱看待的研究对象从周围环境中“分离”出来(划定两者的边界),使它成为一个相对独立的系统。

其次,使主体和客体耦合。耦合就是相互作用。主体和客体的相互作用归结为两部分:一部分是主体对客体施加的各种影响和作用。它们反映在客体的输入中,被称为可控制变量。另一部分是客体对主体的反向影响和反作用。它们反映在客体的输出中,被称为可观测变量。这样主体和客体就构成了有反馈的耦合系统。

### (2) 通过输入和输出考查黑箱

在主体和客体的耦合系统中,通过可控制变量,主体对客体实施控制;通过可观测变量,主体对客体进行观察。可见,这个耦合系统,为人们通过输入和输出主动考查黑箱创造了条件。

现实的系统可能有多种输入,同样输出也可能有多种。主动考查实际上就是考查主体对客体施加某种典型输入,观测其输出反应,取得输入和输出两组数据,作为认识客体黑箱的依据。

### (3) 建立模型辨识黑箱

在获得了关于黑箱客体的大量输入和输出的数据后,往往还不能直接说明黑箱,因而必须对获得的数据进行综合整理,以排除试验过程中出现的特殊状态。

根据整理后的数据,建立关于阐明黑箱的模型。凭借模型,可以探讨黑箱系统的功能和特性,进而对其结构和机理作出某些推测,达到对系统辨识的目的。

假如我们把黑箱的输出看成是输入的函数,那么我们就可以依靠该数学模型,给黑箱一个适当的输入,从而得到所需要的输出。

经济学中著名的“投入—产出”生产函数模型就是黑箱辨识方法的例子。

假定依据西方经济学家 Cobb-Douglass 的生产函数,即生产过程的产出水平取决于劳动力和资本的投入水平。

$$Y_t = A(t) L_t^a K_t^b$$

式中:  $Y_t$  为总产出量;

$L_t$  为劳力投入量;

$K_t$  为资本投入量;

$A(t)$  为技术进步因子(它包括生产技术、管理技术等对总产量的作用。在短时期内可近似为常数);

$a$ 、 $b$  分别表示劳力产出和资本产出弹性系统(衡量由劳力变化和资金变化引起产出变化的程度)。

通过给定  $t$  时刻的  $L_t$  和  $K_t$ , 观察相应时刻的  $Y_t$ , 就可获得一系列输入输出数据组。

通过取对数, 可把上面的非线性回归方程化为线性回归方程, 便可辨识其中的参数  $a$  和  $b$ 。

控制论的黑箱方法是一种崭新的认识论方法, 是科学方法论的突破。它是研究结构复杂巨系统的有效工具, 是研究尚不能打开系统的唯一手段。黑箱问题的普遍性, 决定了控制论的黑箱方法是人类认识和改造世界普遍有效的方法。黑箱永远有, 白箱永不白, 这是艾什比反复阐述过的思想。这就是说, 控制论的黑箱方法, 在人类认识的任何阶段, 都不失为一种重要的实践手段。

## 第四节 一般的启示

在本章的最后, 主要谈谈控制论一般性方法对企业整体优化的一些启示, 以便为讨论控制论在管理中的应用做个铺垫。

### 一、强化反馈控制, 优化企业行为

根据控制论的反馈方法, 我们可以把生产企业看成一个系统, 把商品市场看成另一个系统, 企业向市场输出商品, 引起市场商品供求状况的变化, 商品市场的这种变化状况, 或供大于求, 或供小于求, 作为一种信息再将其输入给生产企业, 生产企业根据这种信息调整产品结构。如供大于求, 则减少该产品的生产; 如供小于求, 则扩大生产量。这个过程就是反馈, 而对于扩大产量或减少产量的决策选择则可以根据反馈方法作出。

反馈方法应用于企业整体优化, 其作用在于调节系统的运行, 实现对企业的行为的有效管理。根据控制论的原理, 对企业系统可采用以下几种类型的基本调节方法。

(1) 稳定调节。上面列举的对企业生产过程进行的调节就是这种情况。在生产中一般存在着实际产量和预期产量的不对等性, 两者之间存在着差额, 要么实际产量超出预期产量, 要么实际产量低于预期产量。不论这两种情况中的哪一种情况出现, 都将影响企业再生产, 干扰企业生产过程中的稳定性。在企业生产管理过程中, 生产管理部门就需要根据所获得的反馈信息, 采取消除实际产量和预期产量之间的偏差的决策, 以调节生产过程, 使实际产量和预期产量之间大体维持平衡状态, 以便保持整个企业生产系统相对的稳定性。

(2) 计划调节。它的作用是保证企业管理系统的输出变量按照既定计划进行变化。输出变量可以依时间和空间的形式变化而变化, 也可以根据企业系统结构的状态变化而变化。计划调节是依靠编制的企业计划程序, 控制企业系统的运行, 保证在这种条件下仍能够实现既定的企业计划。

(3) 跟踪调节。这种调节是企业管理系统事先并未制定确切的计划,而是通过跟踪被观察系统的行为。这种调节方法往往是在无法确认输出可能产生什么结果的情况下使用,或者在由输出到反馈的周期很长的情况下使用。这种调节,既考虑到企业的目标计划,又涉及市场因素。

(4) 市场调节。这种调节是以市场变化因素来调节系统行为的方式。如企业根据市场对于某产品的需求量,来不断地调整自己生产该产品的产量,引导其生产经营活动。

另外,我们可以运用控制论中关于开环系统和闭环系统的理论来进一步分析反馈在企业管理领域中的作用。在过去纯计划指令控制下的企业是开环系统,这种体制下的企业只受计划控制,完成生产指标,然后输出产品,它不考虑也不需要考虑产品输出后的情况,这是生产型企业。由于它无视市场情况,无需根据市场反馈的信息调整生产,所以其经济效益和社会效益都比较差。在有计划的市场经济体制下的企业是闭环系统,它必须建立反馈回路,因为它不仅要生产,而且还要负责销售,是生产经营型企业。所以它要重视市场因素,根据市场反馈的信息调整生产,因而其经济效益和社会效益都会比生产型企业要好。总之,从企业的生产经营效果来看,反馈调节对于现代企业管理具有十分重要的作用。

## 二、重视功能模拟,优化企业决策

将功能模拟方法应用于企业整体优化,主要用以帮助企业进行经济决策。20世纪70年代,国外学者运用功能模拟方法来解决企业经济决策问题,取得了显著效果,并研制出专门用于决策的系统——决策支持系统,用于战略规划决策和管理控制决策。随着电子计算机的广泛应用,仿真技术得到迅速发展,功能模拟方法在企业经济决策中的作用也越来越明显,特别是对那些难度大、风险大、责任大的企业经济决策,更需要运用功能模拟方法。借助电子计算机作大量的比较计算和试验模拟工作,可以获得最佳的企业决策方案,避免并非不可避免的经济损失。

功能模拟方法是保证企业决策科学化的重要而有效的工具。某个企业经济决策是否正确,最终当然是由企业实践来作出检验。但是,对关系企业兴衰存亡的重大经济决策,如果等到由实践来作出其正确与否的判断,那么,企业所付出的代价就可能太多了、太大了。而今世界经济发展极为迅速,国际市场竞争日益激烈,企业如果没有能够抓住机会进行正确决策,就可能导致失败,甚至倒闭。功能模拟方法是一种“实验”手段,我们可以而且应该用它来判断企业重大经济决策的科学性、可靠性和适用性,运用它来减少或剔除企业决策中的经验性、不可靠性和不适用性。

## 三、运用黑箱方法,优化企业经营

根据控制论的观点,对企业整体优化的认识也可以运用黑箱方法来处理。我们要了

解一个企业的生产经营情况的好坏,就可以从它的输出和输入的关系入手,而不必首先分析它的结构。只要这个企业生产的产品多,并获得了较好的经济效益,这就表明该企业产销对路,生产经营情况良好。对企业的经济考核主要看它的投入产出关系(输入和输出),这也可以避免主管部门对企业的过多干预,使企业处于生产经营的主体地位。

对于企业整体优化的外部环境——市场的认识,也可以运用黑箱方法。市场是商品交易的场所,主要特性就是商品的流通,即商品的输入和输出。商品流通畅顺,表明市场兴旺,供需平衡;商品流通滞胀,表明市场萧条,供需失调。所以,我们通过分析市场的输入和输出关系,就能了解在某些时期某种商品市场的功能和行为,从而实现对市场的认识,把握市场的状态。这种分析无须涉及市场结构,而又认识了市场结构,对于及时调整企业自己的生产行为具有十分重要的意义。

## 第四章 控制论的模型化方法

这一章是本篇也是本书比较重要的部分。我们将讨论应用数学模型方法来对所研究的系统进行分析与综合。系统分析也就是要搞清楚系统的输入输出因果关系；系统综合要求我们作出最优控制决策。我们并不想把读者带到纯数学的“胡同”里去，只是希望用数学语言来描述动态系统的运动过程，以加深对动态系统控制原理的理解。

### 第一节 引言

建模是系统分析和控制的基础。

模型是对现实系统的抽象。由于描述现实系统，因此必须反映实际；又由于它具有抽象的特征，因此又要高于实际。任何模型都具有近似性，不可能达到尽善尽美，也不可能完全与实际系统一致。当然，对于实际工作来说，也没有必要达到百分之百的一致。

模型必须由原型有关的基本部分所构成，表明这些有关因素之间的关系。也就是说，模型是以简化的形式，撇开了研究对象的次要成分或过程，但必须抓住研究对象的主要成分或环节，才能起到对原型的模仿作用和简化作用。

模型的意义在于：现实很难做试验；即使对现实可以进行试验，使用模型还是有作用的，因为它比现实容易理解；模型也比现实容易操作，尤其在模型中改变一些参数值，要比在现实中去改变参数值方便。

数学模型是最一般最抽象的模型，它用来表述事物和过程的本质特征。控制论花费相当大的力气在数学模型上做文章，通常主要致力于建立被控制对象的数学模型，而较少研究控制者系统的模型化问题，也就是说，模型化工作是针对被控制对象而言的。

将各种实际的研究对象和过程抽象成具有一定输入和输出的系统，建立该系统的数学模型，进而分析系统的性能。如果其性能不符合人们的要求，就需要对其进行控制，实现要求的控制过程，完成预定的控制任务。

对待数学模型，我们不应采取偏颇的态度，或“数学模型至上”，或“数学模型无用”，而应该在研究和应用上鼓励定量方法的开拓和推广，以适应复杂系统的需求。应该抓住两点：一是模型的前提是否正确；二是模型的结论是否可行。

在本章讨论中,我们力求避免烦琐的数学推导及定理证明,取而代之的是提供给读者大量的典型实例。这些例子不仅说明了理论,而且它们本身都有实际意义。望读者阅读时着重注意如何将实际问题抽象为理论问题来研究的方法。

为阐述方便,本章将控制论的数学模型分为确定性模型、最优化模型、随机模型和模糊模型来介绍。这里首先谈一谈系统的分类。

依据描述系统所用的数学方程,可把系统分为分布参数系统(参数随时间和空间变化)和集中参数系统(参数仅随时间变化,不随空间变化)。

在集中参数系统里,又可分为确定性系统和随机性系统。如果一个控制系统不受外界的随机干扰而只受输入的控制,则称此系统为确定性控制系统;若受到外界的随机干扰,则称为随机性控制系统。

在确定性系统中,如果我们对系统在连续的时间区间上的行为感兴趣,则需要用连续时间系统模型来描述系统;如果我们只对系统在一系列离散时刻上的行为感兴趣,则需要用离散时间系统模型来描述系统。

在各时间系统中,又可分为线性系统 and 非线性系统。线性系统理论比较成熟,非线性系统分析比较复杂。

在线性系统里,又可分为定常系统(参数不随时间改变)和时变系统(参数随时间改变)。一般来说,系统都是时变的,时变系统的研究是比较困难的,人们往往先研究定常系统。

模型化方法本身是人类认识上的最古老、最基本、最普遍的方法,它实质上是一种实验方法。控制论中的模型化概念是广义的。控制论中的模型化是系统的组织化状态(与系统的结构有关)、可控性(与系统的输入有关)和可观测性(与系统的输出有关)的反映。也就是说,输入——系统——输出可由可控性——状态——可观测性来描述。

其中,系统的组织化程度与结构的有序性成正比,即结构的有序性越强,系统的组织化程度就越高。

而且,控制论系统必须是可控的,但这只说到问题的一半,因为系统受控的前提是必须有足够的信息反馈回来,即控制论系统还必须是可观测的。

另外,控制论认为一切系统均处于不断的运动变化之中,但是在运动的各个阶段上都有相对静止的状态——稳定性。稳定性分析也是控制论研究与实践的一项重要内容。

稳定性、可控性和可观测性问题是控制论的三个非常重要的问题,本书将从定性和定量两个角度给予介绍,希望读者加深对它们的理解。

在本章中,将主要(平行地)介绍线性连续时间系统和线性离散时间系统的理论,而且把重点放在介绍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的基本知识上。

控制理论的发展大致可以分为三个阶段。第一阶段是20世纪30年代以波德和奈奎斯特发展的频率特性方法为代表的阶段,即经典控制理论阶段;第二阶段是20世纪60年代以贝尔曼和卡尔曼发展的状态空间方法为代表的阶段,即现代控制理论阶段;第三阶段

是目前正引人入胜的大系统理论方法为代表的阶段,即大系统控制理论阶段。

经典的控制理论只能处理简单的对象,数学模型比较单纯,基本上是单变量常系数线性微分方程或差分方程,控制的目的是要求稳定性和一定的动态品质。

经典控制理论通常只研究系统的输出和输入的相互关系,并不涉及系统的内部状态,而只从系统的外部联系上把握系统的行为。它研究单输入—单输出的线性定常问题,而对于非线性的、时变的以及多输入—多输出问题,显得无能为力,因而 20 世纪 60 年代出现了现代控制理论。此时,生产规模的不断扩大,生产过程越来越复杂,对自动化控制的要求已不只是个别变量的问题,而是要求多个变量进行综合调节和最优控制。

现代控制理论从状态空间及能控性与能观测性等新概念出发,结合庞特里雅金等人提出的最小值原理及贝尔曼的动态规划方法,在方法执行中采用电子计算机,使控制理论的应用达到了更令人瞩目的新阶段。计算机特别适合处理更为接近实际系统的状态空间模型方法,从而使得处理更复杂更大规模的系统成为可能。

现代控制理论相对于古典控制理论的一个主要优点是,在设计控制系统时可以借助于数学解析方法,使一个目标函数在一定条件下取极值(极大或极小)。这种理论称最优控制理论,是现代控制理论的重要组成部分。在社会、经济和管理中,有许多最优控制问题。最优控制的解不随时间而变的称静态最优控制;如最优控制的解随时间而变则称为动态最优控制。

大系统控制理论是在现代控制理论的基础上逐渐发展起来的,而且还处在发展过程中。由于大系统规模庞大,结构复杂,功能综合,所以大系统涉及的因素众多,系统的输入输出多,环境对系统的影响因素也多。社会经济系统几乎都是复杂的大系统。对于宏大规模的复杂系统,控制论的基本理论和方法是否仍然适用?这一问题越来越引人注目,并迫切需要解决,控制论面临新的挑战。

从控制理论的角度来分析,一个大系统的控制问题,往往被分解为若干相互关联的子系统的控制问题。大系统理论所要研究的问题,主要是大系统的最优化。现有的大系统理论基本上是现代控制理论与运筹学相结合的产物。当然,大系统的研究不仅与控制论、运筹学有关,还涉及许多学科,大系统理论和应用已经成为一个多学科交叉综合的研究领域。对大系统而言,控制和管理很难明确地加以区别,既可以从控制的角度去研究,也可以从管理的角度去研究。前者主要与控制论有关,后者则侧重于系统工程。

## 第二节 确定性模型

确定性模型是对确定性系统的描述。关于确定性系统,换个说法,就是对同一确定性系统而言,相同的输入将会得到相同的输出,输入与输出之间呈现出“法则般”的联系。

数学方程是描写确定性系统行为的主要工具。描述确定性问题的数学方程中通常包括两种数：参数（已知值）和变数（未知值）。方程的解法就是决定未知值的方法。方程的解可以用来分析和解决实际问题。

## 一、差分方程和微分方程

差分方程与微分方程在许多情况下给出动态系统的合适描述。这里简要地叙述差分方程和微分方程方法的基本情况，而把重点放在后面将要介绍的状态空间方法的理论上。

定义域为整数的离散函数用来描述离散系统的动态过程，表征离散函数数量关系的是差分方程式。

常微分方程和偏微分方程描写的数学模型是研究连续函数问题的，即函数的定义域是实数的连续系统的动态过程。常微分方程数学模型中的未知函数是一元的，通常表示未知函数对某一自变量的行为描写。当事物或过程的数学模型中所包含的函数，与两个或更多个自变量有关时，其完整的行为描写必须用偏微分方程。

使用微分方程还是差分方程来描述动态系统，取决于是以连续时间还是离散时间来观察系统的行为。对于某一具体现象是建立连续时间模型还是建立离散时间模型的选择多少是有点任意的。

微分方程一般是存在着与它近似的差分方程，只是差分方程特别适于利用电子计算机来进行求解。

### 1. 差分方程

先从简单的一阶差分方程说起。

$$y(k+1) = ay(k) + b$$

$$y(0) = y_0$$

当  $k$  分别取  $1, 2, \dots$  时，有

$$y(1) = a y_0 + b$$

$$y(2) = a^2 y_0 + ab + b$$

...

$$y(k) = a^k y_0 + a^{k-1} b + \dots + ab + b$$

可见，当  $a$  不等于 1 时，

$$y(k) = a^k y_0 + (1 - a^k)b / (1 - a)$$

而当  $a$  等于 1 时，

$$y(k) = y_0 + kb$$

这就是一阶差分方程的通解。 $y_0$  称为初始条件。

假定  $k$  代表一系列离散等间隔时间点，在这一系列时间点上定义了量  $y(k)$ 。差分方程即联系各  $y(k)$  值的一个方程。

差分方程实际上是一系列方程式的集合,只要逐个代入时间  $k$ ,即可获得这些方程。关于  $k$  的定义域,常见的情况是  $k$  取  $N$  个连续整数或取一系列连续整数。只要时间  $k$  的取值范围已知,确定诸  $y(k)$  值的方程组便是已知的。

差分方程也可以看作是各  $y(k)$  值间的一个递推关系式。一旦给定了递推关系式中的初始值,便可序贯地得出序列  $\{y(k)\}$  的其他值。

为得出一个新的  $y(k)$  值需要确定的初始值的个数,称为差分方程的阶次,也称为系统的阶次。

如下形式是  $n$  阶线性差分方程:

$$a_n(k)y(k+n)+a_{n-1}(k)y(k+n-1)+\cdots+a_1(k)y(k+1)+a_0(k)y(k)=u(k)$$

式中:  $a_0(k), \dots, a_n(k)$  和  $u(k)$  是  $k$  的已知函数;

之所以称该方程为  $n$  阶的,是因为需要  $n$  个初始条件  $y(0), y(1), \dots, y(n-1)$ 。

之所以称该方程为线性的,是因为变量  $y(k)$  之间的关系是线性的。

$a_i(k)$  称为线性差分方程的系数;

$u(k)$  是方程的驱动函数,即系统的输入;

$y(k)$  是方程的解,即系统的输出。

如果一个给定数列  $\{y^*(k)\}$  适合差分方程,则称  $\{y^*(k)\}$  为差分方程的一个解。

差分方程的解一般不是唯一的。当然,任意给定一个方程,其解也可能不存在。

在什么条件下一个差分方程有解,而且解是唯一的? 这样的问题显然是一个基本问题。

满足解的存在性与唯一性的一类特殊的差分方程便是线性常系数差分方程:

$$y(k+n)+a_{n-1}y(k+n-1)+\cdots+a_0y(k)=g(k) \\ (k=0,1,2,\dots)$$

式中:  $a_0, \dots, a_{n-1}$  为任意的实常数。

这类方程也是我们在控制理论中最常见的方程,而且这类方程的求解有成熟的  $z$ -变换方法。 $z$ -变换是一种数学运算,它是求解线性定常差分方程的有效方法。这里不作进一步介绍。

#### [例子] 分期付款问题

在市场经济的今天,购买住房利用住房抵押贷款形式分期付款已相当普遍。

在分期付款问题中,设  $b(k)$  表示第  $k$  年年末偿还银行的钱款,  $y(k)$  表示第  $k$  年年初还欠银行的贷款数,  $y(0)$  为初始贷款数,贷款的年利率为  $i$ ,并以年按复利计算,则可得如下分期付款方程:

$$y(k+1)=(1+i)y(k)-b(k)$$

当每年偿还款相同时,则可简化为

$$y(k+1)=(1+i)y(k)-b$$

如果我们希望通过分期付款以便在第  $n$  年年初 (第  $n-1$  年末) 还清贷款, 则每年必须还款数目可由下式求出

令  $y(n)=0$ , 求得  $b$ 。

[例子] 人口增长模型

人口问题是当今世界上人们最关心的问题之一。一些发展中国家为出生率过高而担忧, 而另一些发达国家却为人口负增长而不安。

把人口按年龄区段分成年龄组, 如以 10 年作为区段长度。并假定人口中男性人口数与女性人口数相等, 则建模时只需考虑所有的男性或女性人口数即可。

以  $x_i(k)$  记第  $i$  个年龄组在  $k$  时刻的人口数,  $i=0, 1, 2, \dots, n$ 。其中  $i=0$  表示第一个年龄组,  $\dots, i=n$  表示最后一个年龄组。

为描述系统的行为, 只需给出各组人口在一个时间周期内的变化即可。

以  $b_i$  记第  $i$  个年龄组人口的存活率, 则第  $i$  年龄组人口  $x_i(k)$  在一个时间周期内只有  $b_i x_i(k)$  能存活到下一个时间周期, 即转移到第  $i+1$  年龄组:

$$x_{i+1}(k+1) = b_i x_i(k) \quad (i=0, 1, 2, \dots, n-1)$$

$b_i$  可以统计得出,  $b_i \leq 1$ 。

用  $x_0(k+1)$  表示在最近一个时间周期中新生儿 (它包括各组人口所生的后代) 的数量。

如以  $a_i$  表示第  $i$  个年龄组人口的生育率, 则

$$x_0(k+1) = a_0 x_0(k) + \dots + a_n x_n(k)$$

把上面的关系式写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} x_0(k+1) \\ x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & \cdots & a_n \\ b_0 & & & \\ & b_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & b_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0(k) \\ x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{pmatrix}$$

对于一个比较安定平稳的社会环境, 基本上可以认为  $a_i, b_i$  不随时间变化, 上述方程可以近似于线性常系数方程。

这就是分组人口系统的数学模型。利用该数学模型, 可以预测人口的发展变化。但应指出, 这只是一个粗略的模型。人口系统是一个社会系统。影响该系统的因素很多, 也很复杂。它和社会制度、经济发展水平、民族传统、生态系统平衡等因素直接有关。但所有这些因素的影响都将集中表现在时间、出生、死亡和迁移四个方面。这四者的数量变化以及它们之间的定量关系决定了人口系统状态的演化和系统总体的发展趋势。

## 2. 微分方程

假定  $t$  是连续时间区间  $[t_0, t_1]$  中的任何一点,  $y(t)$  为定义在该区间的函数。

微分方程是指关于  $y(t)$  及其对时间的导数的一个方程。

微分方程的阶次是方程中出现的导数的最高次数。

与差分方程类似,一个微分方程称为线性的,是指如果它关于  $y(t)$  及至导数是线性的:

$$a_n(t) \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0(t) y(t) = u(t)$$

式中:  $a_0(t), \dots, a_n(t)$  和  $u(t)$  均为定义区间上的已知函数;

$a_0(t), \dots, a_n(t)$  称为系数;

$u(t)$  称为驱动函数。

区间  $[t_0, t_1]$  上的函数  $y^*(t)$  称为微分方程的一个解,如果它使给定的方程成为该区间上的恒等式。

求解微分方程就是在已知的输入  $u(t)$  作用下找到输出  $y(t)$  使之满足该方程。

对应的线性定常微分方程为

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = u(t)$$

和  $z$ -变换类似,  $L$ -变换是求解线性定常微分方程的重要方法。

拉氏变换本身只是一个翻译的手续,它把一个用时间变数  $t$  所描述的动态过程翻译成用变数  $s$  描述的过程,这样的手续并不影响动态过程本身的性质,只不过是把这个过程的描述从“ $t$  的语言”翻译成“ $s$  的语言”而已。在  $t$  的语言里用分析运算描述的过程,用  $s$  的语言来描述只要用简单的代数运算就可以了。 $t$  的语言中的微分方程,用  $s$  的语言来表示就简化为代数方程,从而可以简化计算手续和表达的方式。在大规模高速数字计算机还不存在的 20 世纪 30 年代,这种简化的意义是不容否定的。经典控制理论的核心内容传递函数方法便起源于此。限于篇幅,这里不作介绍。

#### [例子] 战争模型

设  $x(t)$  和  $y(t)$  分别表示交战双方在  $t$  时刻的战斗能力(为简单起见,可以认为是双方的士兵人数)。

① 正规战争:在传统的正规战争中,双方士兵公开的活动。

如果每单位成员的打击能力分别为  $a$  和  $b$  (打击能力定义为每单位时间单位成员能使敌人遭受死亡的单位人数),则有

$$\frac{dx(t)}{dt} = -by(t) \quad (1)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = -ax(t) \quad (2)$$

用  $ax(t)$  乘第①式减去  $by(t)$  乘第②式,得

$$ax(t) \frac{dx(t)}{dt} - by(t) \frac{dy(t)}{dt} = 0$$

两边积分得

$$ax^2(t) - by^2(t) = C$$

当  $C > 0$  时,则交战结束时  $y(t) = 0, x(t) > 0$ ;

当  $C < 0$  时, 则交战结束时  $x(t) = 0, y(t) > 0$ ;

当  $C = 0$  时, 则表示双方同归于尽。

② 游击战争: 由于游击战争的双方人员均非公开的活动, 其死亡主要取决于相遇的概率和双方打击能力, 则有

$$dx(t)/dt = -bx(t)y(t)$$

$$dy(t)/dt = -ax(t)y(t)$$

同样有

$$adx(t)/dt - bdy(t)/dt = 0$$

两边积分得

$$ax(t) - by(t) = C$$

当  $C > 0$  时, 前者获胜;

当  $C < 0$  时, 后者获胜;

当  $C = 0$  时, 双方同归于尽。

虽然这些模型都很简单, 没有考虑交战双方的政治、经济、社会等因素, 但对于分析一些局部的战争还是有参考价值。而且该模型对于企业之间的竞争描述也具有一定的参考价值。

#### [例子] 捕杀模型

设想在一个孤岛上只有狼和羊两种动物。羊靠吃岛上的植被存活, 而狼则靠吃羊存活。

设  $N_1(t) = t$  时刻羊的数目;  $N_2(t) = t$  时刻狼的数目。

则

$$dN_1(t)/dt = aN_1(t) - bN_1(t)N_2(t)$$

$$dN_2(t)/dt = -cN_2(t) + eN_1(t)N_2(t)$$

式中  $a, b, c, e$  均为正常数。

把上面的关系式写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} dN_1(t)/dt \\ dN_2(t)/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -bN_1(t) \\ eN_2(t) & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1(t) \\ N_2(t) \end{bmatrix}$$

关于上述两个方程的直观解释是很清楚的。如果岛上没有狼, 即  $N_2(t) = 0$ , 则羊的数目是由  $a$  决定的指数增长。如果岛上没有羊, 即  $N_1(t) = 0$ , 则岛上狼的数目是指数递减的, 递减的速度由  $c$  决定。以上是对方程中第一项所作的解释。

当狼和羊共存于岛上时, 两种群体之间便有遭遇。如果羊和狼的运动是随机的, 则遭遇的频率与两种群体的数目成正比。每次遭遇都增加狼的数目, 同时减少羊的数目。这便是方程中第二项的解释。

总之, 狼与羊的头数应当服从上述微分方程, 这是一组非线性微分方程。

## 二、状态空间描述

从外部描述系统输入到输出之间关系是经典控制理论所采用的主要方法,考虑到它的局限性,现在讨论状态空间描述和状态方程。用状态方程表示系统动态过程是 20 世纪五六十年代发展起来的现代控制理论中最基本的方法,它扩大了动态系统研究的广度和深度。状态空间描述,使数学处理大为简化,且便于用计算机求解。

这一节将首先引入状态变量、状态向量和状态空间等一系列基本的概念(以读者习惯的连续时间系统来介绍),这些基本概念的重要性是应该重视的,现代控制理论就是在引入状态和状态空间概念的基础上发展起来的。然后,介绍系统的状态空间模型及状态方程的建立方法。

状态的概念在现代控制理论中占有中心的位置。状态的概念是一个极其基本的概念,以至于很难再用更基本的概念去解释它。

状态是系统在特定时刻状态的概括。整体在某一时刻的状态,常可由其每个部分在该时刻所处的一批状态来给定。例如整个赛跑的状态就由各个运动员在同一时刻所处的各种状态(位置)给了出来。

状态是把系统过去行为与未来行为分离开来的一组必要而充分的信息。 $t_0$ 时刻的状态是系统在  $t_0$ 之前历史行为的总括。

在任意固定时刻,系统的状态可以由一组最少的变量  $x_i(t)$ , ( $i=1,2,\dots,n$ ) 的值来刻画,这种变量称为系统的状态变量。(分布参数系统需用无穷个状态变量刻画系统的状态,我们只考察用有限个,即用有限个变量描述。)

以状态变量为分量的向量称为系统的状态向量,简称为系统的状态。如  $n$  个状态变量描述的系统,这时系统的状态便可由  $n$  维的状态向量  $\mathbf{X}=[x_1(t),\dots,x_n(t)]^T$  来表示了。

状态向量取值的范围称为状态空间,一般为实域  $R$  上的向量空间。任何状态都可看作状态空间中的一个点。

一个动态系统的运动过程,归根结底就是运动在状态空间中从一个状态转移到另一个状态。一个系统的运动可以视为它的状态的一系列变换。作变换时所关心的是,发生了什么变化,或者说变成了什么东西,而并不关心为什么会发生变化。

考虑一般的多变量系统。

假定影响系统的可控制变量即输入变量有  $r$  个  $u_i(t)$ , ( $i=1,2,\dots,r$ ), 这里特别强调可控制变量的值依赖于时间  $t$ , 系统的可控制变量则可用  $r$  维向量  $\mathbf{U}(t)=[u_1(t),\dots,u_r(t)]^T$  表示。对固定的时刻  $t$ ,  $\mathbf{U}(t)$  是  $r$  维向量空间  $\mathbf{U}$  中的向量。

假定系统有  $m$  个变量  $y_i(t)$ , ( $i=1,2,\dots,m$ ) 是可以观测的,用  $m$  维向量  $\mathbf{Y}(t)=[y_1(t),\dots,y_m(t)]^T$  表示系统的可观测变量,也称为系统的输出变量。 $\mathbf{Y}(t)$  是  $m$  维向量空

间  $Y$  中的向量。使系统有定义的时间子集为  $[t_0, t_1]$ 。

输入量对系统运动起控制作用,同时影响系统的输出量,使系统成为一个受控系统。控制理论中主要研究系统的输入变量和输出变量之间的关系。输入变量与输出变量之间的关系可以认为是由  $U$  到  $Y$  的影射。

要确切地描述一个系统,除了要知道系统的输入以外,还需要一个能描述系统内部信息的变量。状态变量就是系统的内部描述。

系统状态变量的重要性则是由于系统的一切行为,包括输出均由它唯一确定。系统的状态变量一般不可直接量测,所以有时也把状态变量称为内部状态变量。

考虑一个依赖于时间的一组变量  $x_i(t) (i=1, 2, \dots, n)$  所描述的系统,当这组变量的初始值  $x_i(t_0) (i=1, 2, \dots, n)$  及系统的输入  $U(t) (t \geq t_0)$  确定以后,这组变量在时刻  $t \geq t_0$  的值也能唯一地确定,而且该系统在  $t \geq t_0$  的任一时刻的值,均能用  $x_i(t) (i=1, 2, \dots, n; t \geq t_0)$  来表示,则这组变量就是系统的状态变量。

换句话说,系统的状态变量是如下意义下表征系统的状态的一组最少信息:如果在任意时刻  $t_0$ , 状态变量  $x_i(t_0)$  的值是已知的,则对任何  $t_1$ , 只要给定  $t_0$  到  $t_1$  区间上的输入  $U[t_0, t_1]$ , 系统在  $t_1$  时刻的状态  $x_i(t_1)$  和  $t_1$  时刻的输出  $Y(t_1)$  就能唯一地被确定。

初始时刻的状态称为初态, 终止时刻的状态称为终态。

上述定义的含义可以用函数映射来表达。给定一对时间  $t_0$  和  $t_1$ , 给定状态空间  $X$  中一点  $X(t_0)$ , 此时一旦确定了  $[t_0, t_1]$  上的输入函数  $U[t_0, t_1]$ , 则  $t_1$  时刻的状态与输出都是唯一确定的, 即存在影射  $G$  使

$$X(t_1) = G(t_0, t_1, X(t_0), U[t_0, t_1])$$

$X(t_1)$  不依赖于  $t_0$  时刻以前的输入变量值, 只要系统的过去行为概括在  $X(t_0)$  中;  $X(t_1)$  也不依赖于  $t_1$  时刻以后的输入变量值。

由于输出是状态唯一确定的, 故应有影射  $H$  使

$$Y(t_1) = H(t_1, X(t_1), U(t_1))$$

$Y(t_1)$  的值只取决于  $t_1$  时刻的状态值和输入值。

上两式中,  $G$  和  $H$  的具体形式取决于具体系统。

可见, 只要给定初始状态和控制作用, 就唯一地决定了系统的行为。

根据微积分关系, 如果系统可以由如下的一阶微分方程组表示:

$$dX(t)/dt = F(t, X(t), U(t))$$

$$X(t_0) = X_0$$

其中  $X(t)$  是  $n$  维状态向量,  $U(t)$  是  $r$  维控制向量。  $F(t, X(t), U(t))$  是  $n$  维函数向量。

当  $F(t, X(t), U(t))$  是  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  与  $u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)$  的线性函数时, 该方程的向量形式为:

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t)$$

$$\mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0$$

其中  $\mathbf{A}(t) = (a_{ij}(t))_{n \times n}$  称为状态矩阵 (或系数矩阵);

$\mathbf{B}(t) = (b_{ij}(t))_{n \times r}$  称为输入矩阵 (或控制矩阵);

且  $a_{ij}(t), b_{ij}(t)$  均为  $t$  的连续函数。

上述方程称为控制系统的状态方程。

在该方程中,若状态矩阵  $\mathbf{A}(t)$  与输入矩阵  $\mathbf{B}(t)$  都是常数矩阵,则称此系统为线性定常系统;否则,称为线性时变系统。

一个系统的输出向量  $\mathbf{Y}(t)$  通常是状态向量  $\mathbf{X}(t)$  与控制向量  $\mathbf{U}(t)$  的函数:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{H}(\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t))$$

其中  $\mathbf{H}(\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t))$  为  $m$  维函数向量。

当系统为线性系统时,该式为:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{U}(t)$$

其中  $\mathbf{C}(t) = (c_{ij}(t))_{m \times n}$  称为输出矩阵 (或观测矩阵);

$\mathbf{D}(t) = (d_{ij}(t))_{m \times r}$  称为系统的输入-输出矩阵;

且  $c_{ij}(t), d_{ij}(t)$  均为  $t$  的连续函数。

上述方程称为系统的输出方程。

系统的状态方程与输出方程合在一起,称为系统的方程,也称为系统的状态空间表达式。

状态空间描述考虑了“输入—状态—输出”这一过程,揭示了问题的本质,即输入引起状态的变化,而状态决定了输出。前者是一个运动过程,后者是一个变换过程。由于这种描述深入到系统的内部,完全表达了系统的动力学性质,故称为内部描述。

从系统的状态空间表达式可以看出,当状态变量的数目、输入变量和输出变量的数目增加时,并不增加方程在表达式上的复杂性,这是状态空间法的一个优点。

对于离散时间系统的情形,设在  $k$  时刻,系统相应的状态向量为  $\mathbf{X}(k)$ ,控制向量为  $\mathbf{U}(k)$ ,则系统的状态可由向量形式的差分方程来描述:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k, \mathbf{X}(k), \mathbf{U}(k)) \quad (k=0, 1, 2, \dots, N-1)$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0$$

其中  $\mathbf{X}(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$  是  $n$  维状态向量;

$\mathbf{U}(k) = (u_1(k), u_2(k), \dots, u_r(k))^T$  是  $r$  维控制向量;

$\mathbf{F}(k, \mathbf{X}(k), \mathbf{U}(k))$  是  $n$  维函数向量。

当  $\mathbf{F}(k, \mathbf{X}(k), \mathbf{U}(k))$  是  $x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)$  与  $u_1(k), u_2(k), \dots, u_r(k)$  的线性函数时,该方程的向量形式为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{U}(k)$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0$$

其中  $\mathbf{A}(k)$  和  $\mathbf{B}(k)$  分别为  $n \times n$  与  $n \times r$  矩阵。

上述方程称为控制系统的状态方程。

在该方程中,若状态矩阵  $\mathbf{A}(k)$  与输入矩阵  $\mathbf{B}(k)$  均与  $k$  无关,则称此系统为线性定常系统,否则,称为线性时变系统。

一个离散时间系统的输出向量  $\mathbf{Y}(k)$  通常是状态向量  $\mathbf{X}(k)$  与控制向量  $\mathbf{U}(k)$  的函数:

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{H}(\mathbf{X}(k), \mathbf{U}(k)) \quad (k=0, 1, 2, \dots)$$

其中  $\mathbf{H}(\mathbf{X}(k), \mathbf{U}(k))$  为  $m$  维函数向量。

当系统为线性系统时,该式为:

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{D}(k)\mathbf{U}(k)$$

其中  $\mathbf{C}(k)$  与  $\mathbf{D}(k)$  分别为  $m \times n$  与  $m \times r$  矩阵。

上述方程称为系统的输出方程。

这两个模型的动态结构图分别如图 4-1 和图 4-2 所示。

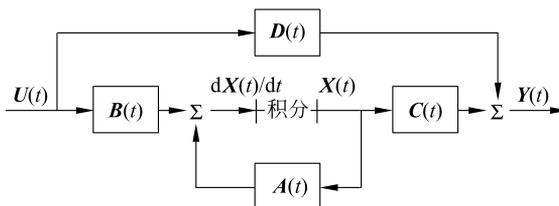


图 4-1 连续时间线性系统的状态空间表示方块图

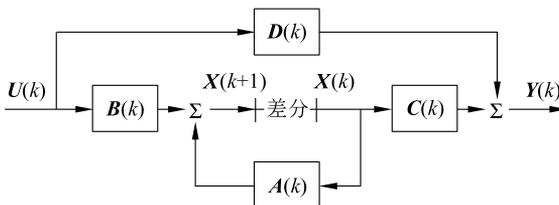


图 4-2 离散时间线性系统的状态空间表示方块图

从状态空间表达式和系统方块图清楚地说明,它们既表征了输入对系统内部状态的因果关系,又反映了内部状态对外部输出的影响,所以是对系统的一种完全的动态描述。

建立状态方程是现代控制理论中最基本的方法。

对于结构和参数未知的系统,只能通过系统辨识法的途径建立状态方程。粗略地说,系统辨识就是要辨别和认识系统。系统辨识法适用于那些系统内部结构和特性不清楚或不完全清楚的研究对象,即所谓黑箱或灰箱问题。

关于系统辨识,目前比较通用的是查德(Zadeh)给出的定义:系统辨识是在输入输出

的基础上,从一类系统中确定一个与所观察的系统等价的系统。具体地讲,根据受控系统或受控过程的输入输出数据,从某类模型中确定出一个在某种意义上最能代表该系统或过程特性的数学模型,称为系统辨识。

辨识过程是一个对系统输入输出数据进行处理的过程。系统辨识的一般可以分为四个步骤:(1)试验设计;(2)模型结构的确定;(3)参数估计;(4)模型验证。(有关方面的内容,这里不作讨论。)可见,对于动态系统的辨识,包括两个主要方面:一是根据动态系统的输入输出数据确定系统的结构;二是估计动态系统数学模型的未知参数。

系统辨识方法适用于任意形式(工程的、生物的或经济的)复杂系统。即使事先未能了解系统内部的机理,也可根据实验结果,建立符合实际情况的数学模型。简单地说,实际中,人们经常要对一系列的数据进行处理和分析,通过对这些数据的定量分析,构造出一个数学模型,用它来简洁而又全面地表示所研究的系统。这个模型可以用来分析系统并且预测它在变化着的条件下的行为。同时,还可以根据所得到的信息。进一步对系统中可能的因素和变量加以改变,以达到某种意义下的最优性能。

机理法适用于那些系统内部结构和特性清楚的研究对象,即所谓白箱问题。对于结构和参数已知的系统,依照机理建模,这是建立系统数学模型最常见、最基本的方法。换句话说,当研究的系统比较简单和问题足够明确时,可按问题的性质和范畴直接分析来构造模型。在经营管理系统分析中所运用的模型,多数属于这种模型。例如,库存模型、资源分配模型等。

对于白箱问题,由于常常不难根据机理写出方程,所以问题转化为如何将其转换为状态方程的形式。下面先分析如何从输入—输出微分方程建立状态方程。

首先选择状态变量,其次根据机理列写微分方程(或差分方程),并将其化为状态变量的一阶微分(或差分)方程组,用向量矩阵形式表示,即得状态空间描述。

如果已获得单输入—单输出系统的微分方程模型:

$$d^n y(t)/dt^n + a_{n-1} d^{n-1} y(t)/dt^{n-1} + \cdots + a_1 dy(t)/dt + a_0 y(t) = u(t)$$

由于一个  $n$  阶系统具有  $n$  个状态变量,所以可定义如下的状态变量:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= y(t) \\ x_2(t) &= dy(t)/dt \\ &\cdots \\ x_n(t) &= d^{n-1} y(t)/dt^{n-1} \end{aligned}$$

注意上面引入的状态变量之间有如下关系:

$$\begin{aligned} dx_1(t)/dt &= x_2(t) \\ dx_2(t)/dt &= x_3(t) \\ &\cdots \\ dx_{n-1}(t)/dt &= x_n(t) \end{aligned}$$

再从原微分方程可解出

$$dx_n(t)/dt = d^n y(t)/dt^n = -a_0 x_1(t) - a_1 x_2(t) - \cdots - a_{n-1} x_n(t) + u(t)$$

联立成一阶微分方程组,并用向量形式表示,便得系统的状态空间模型:

$$\begin{aligned} d\mathbf{X}(t)/dt &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n-1} \end{pmatrix} \mathbf{X}(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u(t) \\ &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}u(t) \end{aligned}$$

其中状态向量  $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \cdots, x_n(t)]^T$

而系统输出  $y(t)$  则为

$$y(t) = x_1(t) = [1 \ 0 \ \cdots \ 0] \mathbf{X}(t)$$

一般来说,给定一个系统之后,其状态空间描述不是唯一的,也即系统的状态变量可以有多种多样的取法。对应于状态变量的不同取法,也就会得到不同的状态方程和输出方程,但是,系统的状态空间描述虽然不唯一,但其状态变量的个数却是唯一的。

**[例子]** 设系统的运动方程为

$$d^3 y(t)/dt^3 + 6d^2 y(t)/dt^2 + 11dy(t)/dt + 6y(t) = 6u(t)$$

选择状态变量,写出系统的状态方程。

取状态变量为

$$\begin{aligned} x_1(t) &= y(t) \\ x_2(t) &= dy(t)/dt \\ x_3(t) &= d^2 y(t)/dt^2 \end{aligned}$$

从运动方程中解出最高次导数项  $d^3 y(t)/dt^3$ ,并将上式代入方程,则有

$$dx_1(t)/dt = dy(t)/dt = x_2(t)$$

$$dx_2(t)/dt = d^2 y(t)/dt^2 = x_3(t)$$

$$dx_3(t)/dt = d^3 y(t)/dt^3 = -6x_1(t) - 11x_2(t) - 6x_3(t) + 6u(t)$$

用矩阵形式表示,则系统的状态方程为

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}u(t)$$

式中

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$$

$$d\mathbf{X}(t)/dt = [dx_1(t)/dt \ dx_2(t)/dt \ dx_3(t)/dt]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -6 & -11 & -6 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = [0 \quad 0 \quad 6]^T$$

输出方程为

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{X}(t)$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0]^T$$

如果系统是多个微分方程描述的多输入—多输出系统,构造状态模型的方法是类似的。

[例子] 考察三输入—三输出的系统(本题简写各变量):

$$d^3 y_1/dt^3 + a_1 d^2 y_1/dt^2 + a_2 (dy_1/dt + dy_2/dt) + a_3 (y_1 - y_3) = u_1$$

$$d^2 y_2/dt^2 + a_4 (dy_2/dt - dy_1/dt + 2dy_3/dt) + a_5 (y_2 - y_1) = u_2$$

$$dy_3/dt + a_6 (y_3 - y_1) = u_3$$

选择如下的状态变量

$$x_1 = y_1$$

$$x_2 = dy_1/dt$$

$$x_3 = d^2 y_1/dt^2$$

$$x_4 = y_2$$

$$x_5 = dy_2/dt$$

$$x_6 = y_3$$

则有

$$dx_1/dt = x_2$$

$$dx_2/dt = x_3$$

$$dx_4/dt = x_5$$

$$dx_3/dt = -a_1 x_3 - a_2 (x_2 + x_5) - a_3 (x_1 - x_6) + u_1$$

$$dx_5/dt = -a_4 (x_5 - x_2 + 2dx_6/dt) - a_5 (x_4 - x_1) + u_2$$

$$dx_6/dt = -a_6 (x_6 - x_1) + u_3$$

写成矩阵形式便得:

$$\begin{bmatrix} dx_1/dt \\ dx_2/dt \\ dx_3/dt \\ dx_4/dt \\ dx_5/dt \\ dx_6/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 & 0 & -a_2 & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_5 - 2a_4 a_6 & a_4 & 0 & -a_5 & -a_4 & 2a_4 a_6 \\ a_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2a_4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

输出方程是

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6]^T$$

时变与定常的转化方法类似。

[例子] 求带有时变系数的微分方程

$$d^2 y(t)/dt^2 + e^{t^2} dy(t)/dt + e^t y(t) = u(t)$$

的状态变量表示。

令

$$x_1(t) = y(t)$$

$$x_2(t) = dy(t)/dt$$

则得

$$dx_2(t)/dt = d^2 y(t)/dt^2$$

记  $\mathbf{X}(t) = [x_1 \quad x_2]^T$ , 有

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -e^t & -e^{t^2} \end{bmatrix} \mathbf{X}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1, 0] \mathbf{X}(t)$$

把差分方程化为相应的状态空间表达式与把微分方程化为相应的状态空间表达式是类同的。

[例子] 由如下输入输出方程描述的系统

$$y(k+3) + 2y(k+2) + 4y(k+1) + y(k) = u(k)$$

这里的情形与连续时间系统中不带输入微分的情形相似。

状态变量的选择可以是

$$x_1(k) = y(k)$$

$$x_2(k) = y(k+1)$$

$$x_3(k) = y(k+2)$$

于是

$$x_1(k+1) = x_2(k)$$

$$x_2(k+1) = x_3(k)$$

$$x_3(k+1) = -2x_3(k) - 4x_2(k) - x_1(k) + u(k)$$

最后的状态方程便是

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -4 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k)$$

作为当场练习, 已知某离散系统的状态空间描述为

$$x_1(k+1) = x_2(k)$$

$$\begin{aligned}x_2(k+1) &= 2x_1(k) + x_2(k) + u(k) \\y(k) &= x_1(k)\end{aligned}$$

请读者将该系统改写成向量矩阵形式。

在实际系统状态方程的建立中,常常不难依据问题的背景和细节确定状态变量。当然,这里没有一定的方法可以遵循,许多技巧要读者自己从众多的案例中归纳总结。

先来看一个简单的例子。某个一年制干部进修学校,只有一个年级的学生。第  $K$  个学年末的学生数设为  $\mathbf{X}(K)$ ,并设在第  $K$  个学年末平均有 3% 的学生因成绩不合格而留级,其余 97% 准予毕业。同时,在第  $K$  个学年末或第  $K+1$  个学年初招收新生数为  $\mathbf{U}(K)$ ,这样在第  $K+1$  个学年初的学生数为

$$0.03\mathbf{X}(K) + \mathbf{U}(K)$$

它也就是第  $K+1$  个学年末的学生数。即

$$\mathbf{X}(K+1) = 0.03\mathbf{X}(K) + \mathbf{U}(K)$$

而在第  $K$  个学年末毕业的学生数  $\mathbf{Y}(K)$  为

$$\mathbf{Y}(K) = 0.97\mathbf{X}(K)$$

以上两个式子构成了一个离散时间系统的数学模型。我们把第  $K$  个学年末的学生数称为系统的内部状态,它反映系统的运动状态,第  $K$  个学年末招收的新生数  $\mathbf{U}(K)$  称为系统的输入,第  $K$  个学年末毕业的学生数  $\mathbf{Y}(K)$  称为系统的输出。

上述状态方程的求解可应用电子计算机来完成,所以我们应该重视计算机在管理控制中的应用。

离散时间线性动态管理系统由差分方程来描述

$$\begin{aligned}\mathbf{X}(K+1) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}\mathbf{U}(k) \\ \mathbf{Y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(k)\end{aligned}$$

用迭代法解差分方程,需要编一个矩阵与向量相乘以及向量与向量相加的程序,就可求出上述模型的解。

第一步,赋予初值  $\mathbf{X}(0)$ , 给定迭代次数  $N$  和输入  $\mathbf{U}(0), \mathbf{U}(1), \dots, \mathbf{U}(N-1)$  的值;

第二步,令  $K=0$ ;

第三步,计算  $\mathbf{X}(K+1)$  和  $\mathbf{Y}(k)$ ;

第四步,令  $K=K+1, N=N-1$ ;

第五步,若  $N>0$ , 则回到第三步;

第六步,输出结果;

第七步,结束。

大多数社会经济系统都可以用离散时间系统来描述,这是因为这些系统一般都有明显的离散时间结构。因此我们特别强调离散时间系统。

这里再介绍一个简单的描述国民经济动态发展的模型。该模型中有四个基本的

变量：

$Y(k)$  = 国民收入(或产值)；

$C(k)$  = 消费；

$I(k)$  = 投资；

$G(k)$  = 政府支出。

变量  $Y$  表示国民收入,即在一个生产周期中参与经济活动的所有主体的收入总和; $Y$  也可定义为国民总收入,即在一个生产周期中参与经济活动的所有主体所创造的产品和服务的总和。

消费  $C$  是指消费的产品与消费的服务的总和,它是所有主体支出的和。

$I$  是这一周期中的总投资。

最后,  $G$  是同一周期中政府支出的总量。

基本的均衡方程是

$$Y(k) = C(k) + I(k) + G(k)$$

除此之外,假定消费是收入的一个固定部分:

$$C(k) = mY(k), \quad 0 < m < 1$$

还假定经济增长与投资成正比,则有:

$$Y(k+1) - Y(k) = rI(k), \quad r > 0$$

上述三方程表达了上述假设条件下国民经济的运行机制。在这些方程中,只有变量  $G(k)$  是输入变量,其他变量是导出变量。

用向量-矩阵形式表示,有

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(k+1) \\ C(k+1) \\ Y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & m \\ r & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(k) \\ C(k) \\ Y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} G(k)$$

可得出

$$Y(k+1) = [1 + r(1 - m)] Y(k) - rG(k)$$

$$C(k) = mY(k)$$

$$I(k) = (1 - m)Y(k) - G(k)$$

再留给读者自己完成一个题目:

设某城市第  $k$  年的人口数为  $N(k)$ , 初始年人口数为  $N(0) = N_0$ , 人口年平均出生率为  $r_1$ , 年平均死亡率为  $r_2$ , 第  $k$  年迁入的人口数为  $f_1(k)$ , 迁出的人口数为  $f_2(k)$ 。试求该城市第  $k$  年人口数(以年终统计为准)的状态方程,并画出方框图。

### 三、状态方程的解

一旦系统的模型已经建立,就可进行系统分析。

由状态方程可知,典型的控制问题可以表述为:如何选择  $U(t)$  使系统的输出  $Y(t)$  或状态  $X(t)$  满足特定的目标。

作为准备,这里首先讨论在给定  $U(t)$  的情形下如何决定  $X(t)$  和  $Y(t)$  的问题。注意到  $Y(t)$  只通过代数关系依赖于  $X(t)$  和  $U(t)$ , 所以中心问题实际上是求解向量微分方程的问题。

以下不加证明地给出连续状态方程的解:

### 1. 线性定常微分方程

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}U(t)$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0 \quad \text{或} \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0$$

对应的齐次方程(没有控制作用下)为:

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{A}\mathbf{X}(t)$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0 \quad \text{或} \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0$$

这一由初始条件引起的自由运动的解为

对应于  $\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0$ , 有

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{Q}(t)\mathbf{X}(0)$$

其中

$$\mathbf{Q}(t) = e^{\mathbf{A}t} = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}^k (t)^k / k!$$

对应于  $\mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0$ , 有

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{Q}(t-t_0)\mathbf{X}(t_0)$$

其中

$$\mathbf{Q}(t-t_0) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}^k (t-t_0)^k / k!$$

$\mathbf{Q}(t)$  和  $\mathbf{Q}(t-t_0)$  称为状态转移矩阵。因任一时刻的状态仅仅是由初始状态转移来的而得名。这是一个十分重要的概念。

原方程(有控制作用下的强迫运动)的解为:

当  $t_0$  等于 0,

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{Q}(t)\mathbf{X}(0) + \int_0^t \mathbf{Q}(t-s)\mathbf{B}U(s)ds$$

当  $t_0$  不等于 0,

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{Q}(t-t_0)\mathbf{X}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{Q}(t-s)\mathbf{B}U(s)ds$$

其中  $\mathbf{Q}(t-s) = e^{\mathbf{A}(t-s)}$ , 各式第一项为  $\mathbf{X}_0$  对  $\mathbf{X}(t)$  产生的影响, 第二项为  $U(t)$  对  $\mathbf{X}(t)$  产生的影响。

### 2. 线性时变微分方程

一般的系统, 严格来说都是非定常系统。所以线性时变系统比线性定常系统更具普遍意义。