

高等学校教学参考书

现代控制理论及其在 企业管理中的应用

马义飞 张宝生 著 南岳 审

煤炭工业出版社

高等学校教学参考书

现代控制理论 及其在企业管理中的应用

马义飞 张宝生 著
南 岳 审

煤炭工业出版社

前 言

最佳控制理论在自动控制各专业得到了广泛的应用，如自动化仪表与管理、工业自动化、电气自动化和热动力及其自动化等。最佳控制理论在企业管理方面的应用，虽然在国外研究较早，在国内也有不少研究成果，但并不像自动化诸专业那样普及。笔者认为在企业管理专业开设控制理论课程，对于培养高级管理人员，提高企业管理水平是大有裨益的。本书是在整理讲稿的基础上编写而成的，其中的几个应用实例是作者在近几年的科研成果。编写时，作者避开高深的理论证明，从实际应用出发，直接引用其中的有用结论，着重阐述控制理论在企业管理中应用的基本思路和方法，介绍若干应用实例，力求使本书有较高的实用性和指导性。

由于动态规划既是解决控制问题的有力工具，又是运筹学的一个分支，管理专业人员对这一内容都有所了解，从这里入手容易理解。因此，在本书的内容编排上，首先介绍控制论的一般概念和动态规划的基本理论。其次，阐述了最佳控制的基本理论和计算机解法。最后，介绍了动态规划和最佳控制的极大原理的应用实例。

本书可作为企业管理专业的研究生和本科生的教学参考用书，也可作为企业高级管理人员和技术人员的自学用书。

由于作者水平所限，错误或不妥之处在所难免，敬请专家学者多提宝贵意见。

作 者

1998年4月

目 录

第一章 概述	1
第一节 控制论的基本概念	1
第二节 现代控制理论与管理科学	10
第三节 动态管理决策的特征	11
第四节 管理系统与计算机	14
第二章 动态规划的基本理论	15
第一节 最佳行程问题	15
第二节 动态规划问题的特征	19
第三节 多阶段决策问题的一般提法	21
第三章 动态规划的数值计算	24
第一节 算法	24
第二节 实例	25
第三节 框图及小结	30
第四章 连续系统最佳控制的基本理论	32
第一节 最佳控制问题的变分方法	32
第二节 连续系统的哈密顿——雅可比——贝尔曼方程	40
第三节 连续系统最大原理	41
第五章 离散系统最佳控制的基本理论	47
第一节 离散最大原理的推导	47
第二节 计算方法及举例	52
第六章 最佳控制的计算方法	55
第一节 连续时间状态方程的离散化	55
第二节 最大原理的边界条件迭代	59
第三节 求最佳控制的梯度法	66
第四节 求最佳控制的共轭方向法	73
第五节 解有约束最佳控制问题的梯度投影法	78
第七章 用动态规划方法解决综采采区接续问题	86

第一节	问题的提出	86
第二节	初次动态规划模型的构成和求解	87
第三节	二次动态规划模型的构成和求解	90
第八章	动态规划方法在采准计划上的应用	93
第一节	问题的提出	93
第二节	将采准计划问题转化为动态规划模型	93
第三节	举例计算和结论	94
第九章	动态规划在煤炭生产——库存——销售系统中的应用	100
第一节	问题的提出	100
第二节	动态规划模型的建立	100
第三节	求解	101
第十章	动态规划在煤炭库存——销售系统中的应用	106
第一节	问题的提出	106
第二节	动态规划模型的构成	106
第三节	求解	107
第十一章	用动态规划解线性二次型的最优管理问题	112
第一节	线性二次型最优管理问题的解	112
第二节	定常管理策略	120
第三节	线性二次型问题的推广	120
第十二章	煤仓胶带系统最佳控制的数学模型及其应用	129
第一节	煤仓胶带系统最佳控制的通用数学模型	129
第二节	简单情况的解析解	132
第三节	胶带系统最佳控制模型的计算机解法	138
第四节	多仓装带的最佳控制问题	141
第十三章	最大原理在其它管理问题中的应用	148
第一节	机器的保养与更换问题	148
第二节	基金的最优管理	150
第十四章	离散最大原理的应用	153
第一节	井下轨道运输系统最佳控制的数学模型	153
第二节	按需分风最佳控制的数学模型	158
第三节	有限时期内科技人才最佳培养策略	160

第十五章 生产计划与控制问题	164
第一节 概述	164
第二节 建立最佳控制的数学模型	165
第三节 用线性规划方法求解生产计划与控制问题	167
第四节 将生产计划与控制问题转化为运输问题求解	169
参考文献	175

第一章 概 述

第一节 控制论的基本概念

控制论的主要创立者是美国著名数学家维纳。他于1948年发表的《控制论》一书，标志着控制论的正式诞生。该书的副标题“或关于在动物和机器中控制和通讯的科学”，则是对控制论这一概念的科学规定。它表明：首先，他把动物和机器这两类表面上毫不相干的东西联系起来，考察它们的共性即共同本质和规律。其次，是考察动物和机器在其行为和功能方面的共同本质和规律。再次，为什么会有这种相似性？维纳的研究表明，动物和机器都存在着共同的控制和通讯。最后，控制和通讯都与主体的目的直接有关，都是主体有目的活动，即通过保持或改变对象系统的某种状态，以达到主体的直接目的。因此，研究对象系统的状态变化与主体目的的关系，就成为控制论要解决的核心问题。

从学科性质看，控制论是综合性的边缘学科，它是数学、数理逻辑、神经生理学、无线电通讯、自动控制、计算机科学、经济学、统计学等学科相互渗透的产物，是系统科学中重要的理论和方法论。

控制论从产生起经历了三个重要发展阶段：古典控制论阶段、现代控制论阶段和大系统控制阶段。由于控制论向各个领域的渗透，已经形成生物控制论、工程控制论、智能控制论、社会控制论、经济控制论、环境控制论等分支学科，其发展趋势则是向着“人工智能”等综合性领域发展。

一、控制与控制论系统

1. 控制及其目的和手段

所谓控制，就是控制主体向施控对象所施加的一种能动影响

和作用，其实质是改变或保持受控对象的某种状态，使其达到施控主体的预期目的。这个概念表达了三个含义：首先它把考察对象看成两个子系统，即施控主体和受控对象。施控主体可以是人，也可以是机器装置。其次，它是一种主体对客体的影响或作用，并表现为一种能动的活动或过程。最后，控制的目的在于通过控制主体对受控对象进行某种有序作用或影响，并在不断地反馈调解中，将受控对象导向预定目标，即通过保持或改变受控对象的特定状态而实现控制目的。

可见，控制行为与控制主体的目的直接相关，整个控制都是围绕目的展开并进行的。因此，目的性范畴在控制论乃至整个系统科学中意义重大。有无目的是控制行为与其它一切行为的最本质的区别。

控制的目的是在对受控对象的有效调节中实现的。因此，保持或改变受控对象的状态，不但要求目的明确，而且必须借助于相应的手段。无目的或目的不明确，固然不能对受控系统进行有效控制，但无相应的手段，或手段不得力也不行。

2. 控制论系统及其分类

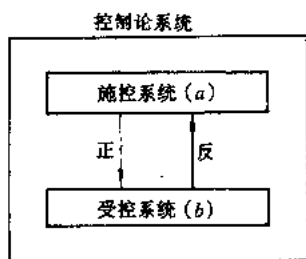


图 1-1 控制论系统结构示意图

控制论作为研究控制的科学，它并不研究一切系统，而只研究可控系统。一个具体的控制论系统，可由机器、自然资源，以及经济、政治、社会等具体对象组成。每一个控制论系统的特征，都以该系统所具有的性质及其反映系统与环境间的各种联系来表示。它抛弃了对象的具体特征，而只定量地、抽象地描述在各种控制作用下状态变化间的一般关系，即控制和通讯的关系。控制论包括两个基本部分或子系统，即施控系统 (a) 和受控系统 (b)，如图 1-1 所示。

需要指出的是，施控系统与受控系统的区别又具有相对的意义。它们会随着双方在控制论中的地位、作用以及范围的变化而改变和转化。

由于控制对象的复杂性和多样性的特征，决定了控制论系统的多种结构和形式。其中最常见的有以下4种：

(1) 受控型和受调型控制系统。如果施控系统 (a)，控制系统 (b)，其控制结果为 x ，且 x 对 (a) 不发生作用，则 (b) 属于受控控制系统；若 x 对 (a) 发生作用，则 (b) 就属于受调控制系统，如图 1-2 所示。

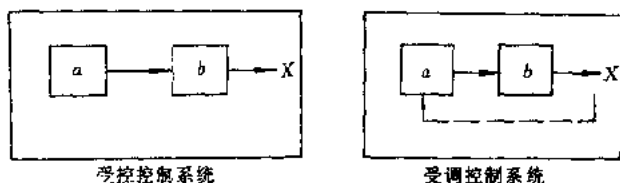


图 1-2 受控和受调控制系统示意图

(2) 对抗控制系统。其典型的例子是比赛和战争等行为双方组成的系统。如由 (a) (b) 两方组成的系统中，双方都想控制对方，使自己成为施控系统。其结果就形成对抗型控制论系统。可如图 1-3 所示。

(3) 链式控制系统。其典型的例子是生物系统的食物链。由于植物的繁茂程度控制着食草动物的多少，而食草动物的多少又控制着食肉动物的数量。这里，对草来说，食草动物是受控制系统；而相对食肉动物，则食草动物就成为施控系统了。

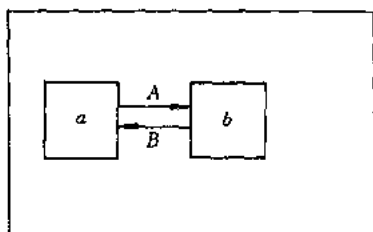


图 1-3 对抗型控制论系统示意图

在工程技术和管理中，对于不能直接控制的对象实施控制，研究链式控制系统（如图 1-4）具有特别意义。

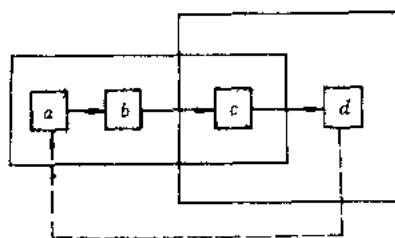


图 1-4 链式控制论系统示意图

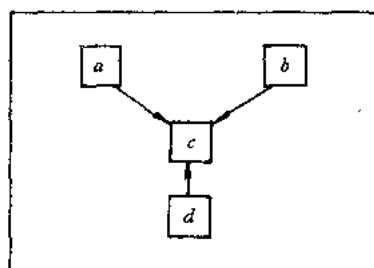


图 1-5 多主体控制论系统示意图

(4) 多主体控制论系统。其典型的例子是跨行业联合公司，控股公司，如图 1-5 所示。研究这类控制论系统，对复杂的管理对象和指挥现代化跨行业的大集团、大工程具有重要意义。

二、输入和输出

1. 输入输出的含义

任何系统都要存在于一定的环境之中，都同环境发生着不同程度的相互作用和影响。这种相互作用和影响是通过输入和输出的方式来实现的。在控制论中，环境对系统的作用和影响称系统的输入，系统对环境作用和影响称为系统的输出。

在解决控制问题时，系统的控制被分为两类，即可控输入和不可控输入。由施控系统发出的，携带着施控者目的输入叫可控输入，用 U 表示。由施控系统以外的环境引起的输入叫不可控输入，简称干扰，用 M 表示。无论是可控输入还是干扰，都会对系统的输出产生影响，只是影响的程度和结果不同而已。干扰会使系统产生偏离目标的运动，使控制结果与目标产生偏差，即目标差。可控输入有两方面的作用：一方面是使系统产生稳定的输出；另一方面是有利于干扰所带来的偏差。但应注意，影响系统

正常输出的干扰可能来自环境，也可来自系统内部。

一般来讲，输入是外界投向系统的物质、能量和信息，输出的则是系统受到外界输入影响后的结果，输出的也同样是物质、能量和信息。

2. 输入和输出关系的基本模式

研究表明，受控系统的输出（ Y ），同其输入（ U ）、干扰（ M ）以及系统内部结构（ F ）具有密切的相关性，如图 1-6 所示：

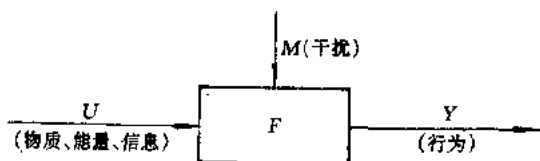


图 1-6 系统输入与输出的基本模式图

其关系式为 $Y = F(U, M)$

如果抛开环境对系统的干扰，或干扰甚微可以忽略不计时，上式变成：

$$Y = F(U)$$

式中 F 为转换算子，它起着将输入（ U ）变成输出（ Y ）的作用；当 Y 与 U 一一对应时，则 F 表示函数关系。它可以是常量，变量或集合。

上式可见，受控系统的输入（ U ）对其输出行为（ Y ）的影响才是有决定意义的， Y 是 U 的函数。因此，为了保证系统的输出在有干扰的情况下，仍能达到满意的效果，可以通过改变输入来实现。

三、控制的基本方法

1. 控制论方法的本质和特征

控制论方法是人们通过信息的变化及其反馈来确保系统的通讯和控制，以实现对系统所规定的最优功能目标的思维方法和操

作技术。

控制方法有以下四个特征：

(1) 它把考察的对象看成一个受控系统，该系统能够通过输入的变化而相应地调整自己的行为(输出)。当然这种变化与调整一般不是机械决定论，而是遵循统计规律。

(2) 它所考察的重点是受控系统的行为和功能，而不是系统的质和量、内容和形式等。

(3) 它认为系统的行为和功能主要取决于该系统的通讯和控制，因此它不重点考察该系统的内部要素及其结构等。

(4) 它把信息作为分析问题、实施控制的一个关键因素，即完全抛开具体的运动形态，将受控系统有目的运动抽象为一个信息变换过程，通过信息的变化及其反馈来实现通讯和控制。

2. 控制方法

(1) 黑箱方法。控制论中的黑箱，是指人们不能或暂时无法分解剖开以直接观测其内部结构，或分解剖开后其结构和功能即遭破坏的控制论系统。显然，对黑箱的判定，一方面取决于对象本身“黑暗”的程度，这与系统的复杂、封闭、要素关联程度等密切相关；另一方面也取决于主体认识的“清晰”程度，这与主体认识的能力、工具、环境条件等密切相关。因此，黑箱的概念只具有相对的概念：同一客体对不同的主体来讲，既可以是黑箱也可以不是黑箱，而且随着主体认识能力的提高，黑箱可以转化为灰箱或白箱。

所谓黑箱方法，就是人们把对象系统看成一个黑箱，即通过抛开其内部结构和状态，只考察其输入所引起的相应的输出变化，从而来认识其结构和状态，并进而建立相应模型的一种控制方法。现在脑科学对人脑功能特性的研究，行为科学中对人的行为特性的研究，等等，都是使用黑箱方法研究问题的例子。

黑箱方法的基本模式如图 1-7 所示。

黑箱方法的基本步骤是：①用相对孤立的原则确认黑箱，这就要求，一是规定黑箱与环境的边界，二是确定一组黑箱的主要

输入和输出通道。②通过观测和主动试验等手段考察黑箱。③建立模型，阐明黑箱。

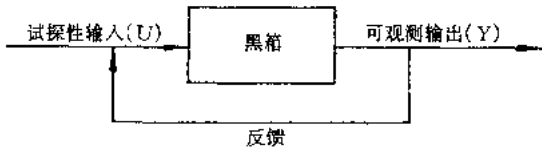


图 1-7 黑箱方法模式图

如果我们假定环境干扰 (M) 和黑箱的内部结构状态 (F) 在一定时空范围内为常量，则黑箱的输出是其输入的函数，即：

$$Y = F(U)$$

这样，我们就可根据主体认识的需要，给出一系列试探性输入，从而通过其相应的输出变化，来认清其内部结构和状态。可见，这是种充分发挥主体作用普遍有效的方法。

诚然，数学模型是一种阐明黑箱的较理想的方法。但是，在大多情况下，这种数学方程式实际上很难建立起来。因为黑箱的输入和输出通常是不规则的，且有时只能从性质和行为方面来考察。所以，为了阐明不同类型的黑箱系统，除数学模型外，还采用输入输出表格、动态曲线、框图以及各种物理或实物模型等。

(2) 功能模拟法。在传统认识中，人们通常根据两个对象在某些方面的相似或相同面推出在其它方面也相似或相同，从而提出并证明假设，揭示对象的本质和规律。这种方法叫类比方法。还有一种方法是根据模型与原型之间的相似关系，用模型来模拟原型，并通过模型来间接地研究原型的性能和规律，这叫模拟方法。它有物理模拟和数学模拟等。这些方法仍盛行于科学研究中。

控制论的功能模拟是类比和模拟方法发展的崭新阶段。它是事物间的某些功能和行为的相似为基础，并用模型来模仿原型的某些行为和功能，从而达到认识事物的本质和规律的一种控制论方法。

功能模拟法的特点是：它只以功能和行为的相似为基础，所模拟的是一切有控制和通讯功能的系统的有目的的行为；它运用了黑箱理论与方法，追求功能和行为的相似或相同，而不追求模型与原型在其内部要素与结构等方面相似或相同。

在功能模拟中，模型是具有目的性行为的机器，它就是认识和研究的目的。

(3) 反馈方法。反馈是控制论的一个重要概念，它是指将控制系统的一部分输出回授给输入端的活动过程。所谓反馈方法，就是施控系统根据反馈情况用以调解其对受控系统的输入，以实现控制目的的方法。其实质就是维纳所指出的：根据过去的操作情况去调整作用未来的行为。它是控制论的一种重要的方法。其活动机制如图 1—8 所示。

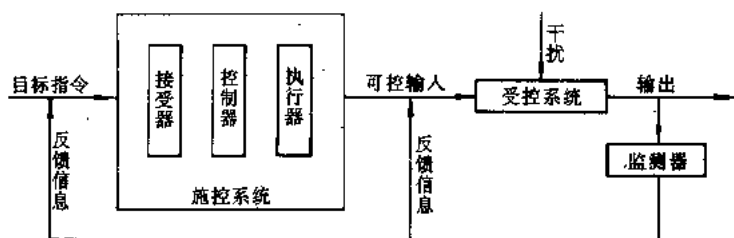


图 1—8 反馈方法活动机制示意图

反馈按其结构分，有简单反馈和复杂反馈；按其作用分，又有正反馈和负反馈。如果反馈结果不断削弱原运动过程的偏差，使其稳定地取向目标状态，就是负反馈。负反馈是系统稳定发展存在的保证。如果反馈结果不断强化原运动过程，就是正反馈。正反馈有两种情况：一是强化目标中那些趋于目标的主流因素，从而就可推动系统加速取向目标状态；二是强化原运动过程中那些偏离目标的因素，从而加速系统的不稳定甚至崩溃。

(4) 状态变量方法。上述控制方法基本上是把对象系统看作

一个黑箱，即不管系统内部结构和状态，侧重从系统输入输出变化的角度来描述系统的性能。因此，它们原则上适用于对单变量、初始条件为零的线性定常系统的描述。但若遇到多变量且初始条件不为零的系统时，就需要运用状态变量分析法才能解决问题。

现实中大量情形是这样的：同一个输入信号作用于某一对象系统，如果该系统的初始状态不一样，则系统的输出也不一样，即输入和初始状态一起，决定着系统的输出。假定任何系统都可用三组变量：输入变量 U ，状态变量 X 和输出变量 Y 来描述其功能与行为，且三组变量都是多维的，则其作用过程可如图 1—9 所示：

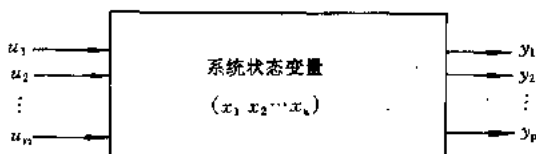


图 1—9 系统的三组变量示意图

假定系统有：

输出变量 $U = [u_1, u_2 \cdots u_m]^T$

这是一组外加的 m 维变量，它将对系统的状态，以及输出施加影响，并且，它是可以调控的，故称控制变量。

状态变量 $X = [x_1, x_2 \cdots x_n]^T$

这是系统内部随时间变化的一组 n 维变量，它是表示系统内部状态变化的量。

输出变量 $Y = [y_1, y_2 \cdots y_p]^T$

这是我们期望得到的一组 p 维变量，它与控制目的直接相关，即是输入变量的效应——系统的输出。

状态变量不是随意选取的，它必须满足以下条件：若 $t=t_0$ 时系统的状态变量值 $x(t_0)$ 已知，且 $t \geq t_0$ 时的输入 $U(t, t_0)$ 也已知，则系统在 $t \geq t_0$ 时的任何时刻的状态就是确定的，且是唯一的

状态。这时它仅与 $x(t_0)$ 有关而与 t_0 以前的状态和输入无关。

综上所述，黑箱方法、功能模拟法和反馈方法是在系统内部状态基本不变或相对稳定时，即输入输出的关系不受系统状态变化的影响时，才是可能的。因此，它们可视为是状态变量法的一种特例。

第二节 现代控制理论与管理科学

现代控制理论的发展已有 30 多年的历史，在古典的控制论中，主要研究系统的反馈控制，把系统的目标和系统的输出相比较，根据比较结果而作出控制动作，以消除偏差，使系统控制在给定值附近。50 年代以来在控制中出现的大量问题，不仅要求被控制系统完成指定的动作，而且要求在使某种指标达到“最佳”的前提下完成。控制过程不是单纯地接近给定值，而是要求最佳目标值，即控制的目的是要求系统实现最佳化。例如，向月球发射火箭，不但要求准确到达，而且要求控制在一条飞行时间最短的轨道上，或者要求在一条消耗燃料最省的轨道上。所谓“时间最短”、“燃料最省”，就是对系统进行控制时提出的实现准则，这个准则以函数或泛函的形式给出，亦称目标泛函。

解最佳控制问题的数学方法有两种，一种是动态规划的方法，这是美国数学家贝尔曼 (R. Bellman) 最初为了解多步决策问题于 50 年代中期提出来的，又称贝尔曼原理。尔后发现在求系统的最佳控制时有广泛的应用。通过动态规划中的最佳准则，可以找到目标泛函的最佳值所满足的一组递推的函数方程或一个偏微分方程，解这些方程便能得到最佳控制目标泛函的最佳值，这是一个有普遍意义的方法。另一种方法是在 50 年代末由前苏联数学家庞特里雅金 (Л. С. Понтрягин) 建立的最大原理。这个方法处理问题虽不及动态规划普遍，但它有严格的数学理论为基础和有较具体的可行的解法，因而在有些问题中更便于应用。

上述两种方法都是寻求最佳控制的有力工具，从它们发表那天起就受到学术界的极大重视。计算机的飞速发展，使得由动态

规划或最大原理推导出的方程式有满意的数值解,从而使得生产过程或系统运行过程的在线控制成为切实可行。所以,从60年代起,最佳控制的理论方法得到较快的发展,充分显示了它在控制理论中的重要地位。

经过多年的科学研究和生产实践,最佳控制的应用范畴已远远超出了一般理解的工程技术范围,而深入到了工业设计、生产管理、经济计划等部门。在这些部门中,凡是作为一个多步决策过程的最佳化问题,往往都能转化为用离散动态规划或最大原理来解。例如,一批原料进入车间,要经若干道工序加工,如何安排各工序的生产,使某一指标最优(如生产周期最短,能源消耗最省,其中某些产品产量最多或利润最高等)。企业的资金分配,矿井的采准计划制定都可以转化为一个多步决策的问题。

管理科学涉及到社会、经济、文化教育等多方面,管理科学可以使有限的资源得到合理地开发利用,从而使其发挥最大的经济效益。在企业生产过程中,管理问题都可以归结为多阶段决策问题,从而可以用动态规划或最大原理求出其最佳策略,达到某个指标最佳。

近20年来,现代控制理论在管理科学中的广泛应用,已成为现代控制理论应用的一个重要方面。作者在借鉴前人应用实例的基础上,把控制理论应用到某些煤矿生产系统控制和生产管理决策。

第三节 动态管理决策的特征

适用控制理论来解决的管理问题,最容易理解的是与时间阶段有关的问题,即问题或系统的发展要经历一个从 t_0 到 t_N 的 $N+1$ 个时间阶段,并且,对每一个给定的 t_i 来讲,系统都可以用一组变量 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 来描述,把 x 称为状态变量,它是 t_i 的函数。在每一阶段 t_i 还有一组变量 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 是可以人为调整或选择的,通过适当地选择 $u(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$),可使某指标 J 达到最优,而使 J 达最优的 $u(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)称为最佳控制,