

第一章 控制理论概述

交通控制，是交通系统发展客观需要及控制理论与技术在交通系统中应用的结果。交通控制理论和方法的发展是同控制理论及技术的发展紧密联系的。控制理论和技术在交通控制中的广泛应用，大大促进了交通控制理论及其系统的发展，智能的、先进的和有效的交通控制方法也不断地涌现，有效地改善了道路交通的畅通与安全。因而，在研究交通控制的基本理论和方法之前，概要地了解有关的控制理论和方法的基本知识是非常必要和重要的，同时也有助于理解掌握交通控制的理论和知识。

第一节 经典控制理论

一、经典控制理论

经典控制理论，是自动控制理论中建立在频率响应法和根轨迹法基础上的一个分支。它的研究对象是单输入、单输出的自动控制系统，特别是线性定常系统。经典控制理论的特点是以输入输出特性（主要是传递函数）为系统数学模型，采用频率响应法和根轨迹法等图解分析方法，分析系统性能和设计控制装置。

经典控制理论的数学基础是拉普拉斯变换，占主导地位的分析和综合方法是频率域方法。经典控制理论主要研究系统运动的稳定性、时间域和频率域中系统的运动特性（如过渡过程、频率响应）、控制系统的设计原理和校正方法。经典控制理论包括线性控制理论、采样控制理论、非线性控制理论 3 个部分。早期，

这种控制理论常被称为自动调节原理，随着以状态空间法为基础和以最优控制理论为特征的现代控制理论的形成（在 1960 年前后），开始广为使用现在的名称。

控制理论的形成远比控制技术的应用为晚。人类使用自动装置的历史可以追溯到古代。中国古代的指南车和铜壶滴漏以及古罗马人家庭水管系统的简单水位调节装置等，都是自动控制系统的萌芽。此后，一直到 18 世纪工业革命开始之前仅偶尔出现一些自动装置，如中国的水运仪象台、欧洲古老的钟表机构和水力及风力磨房的速度调节装置等。在 1788 年英国机械师 J·瓦特制造蒸汽离心调速器之后的一个半世纪中，人们开始大量采用各种自动调节装置来解决生产和军事中的简单控制问题，同时还开始研究调节器的稳定性等理论问题，但尚未形成统一的理论。

1868 年，英国科学家 J·C·麦克斯韦首先解释了瓦特速度控制系统中出现的不稳定现象，指出振荡现象的出现同由系统导出的一个代数方程根的分布形态有密切的关系，开辟了用数学方法研究控制系统中运动现象的途径。英国数学家 E·J·劳思和德国数学家 A·胡尔维茨推进了麦克斯韦的工作，分别在 1875 年和 1895 年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。

1932 年，美国物理学家 H·奈奎斯特运用复变函数理论的方法建立了根据频率响应判断反馈系统稳定性的准则。这种方法比当时流行的基于微分方程的分析方法有更大的实用性，也更便于设计反馈控制系统。奈奎斯特的工作奠定了频率响应法的基础。随后，H·W·波德和 N·B·尼科尔斯等在 20 世纪 30 年代末和 40 年代进一步将频率响应法加以发展，使之更为成熟，经典控制理论遂开始形成。

1948 年，美国科学家 W·R·埃文斯提出了名为根轨迹的分析方法，用于研究系统参数（如增益）对反馈控制系统的稳定性和

运动特性的影响，并于 1950 年进一步应用于反馈控制系统的设计，构成了经典控制理论的另一核心方法——根轨迹法。

20 世纪 40 年代末和 50 年代初，频率响应法和根轨迹法被推广用于研究采样控制系统和简单的非线性控制系统，标志着经典控制理论已经成熟。经典控制理论在理论上和应用上所获得的广泛成就，促使人们试图把这些原理推广到像生物控制机理、神经系统、经济及社会过程等非常复杂的系统，其中美国数学家 N·维纳在 1948 年出版的《控制论》最为重要和影响最大。

经典控制理论在解决比较简单的控制系统的分析和设计问题方面是有很有效的，至今仍不失其实用价值。存在的局限性主要表现在只适用于单变量系统，且仅限于研究定常系统。

二、自动控制系统

所谓自动控制系统，是指在无人直接参与下可使生产过程或其他过程按期望规律或预定程序进行的控制系统。自动控制系统是实现自动化的主要手段。

一个自动控制系统按控制原理的不同，可分为开环控制系统和闭环控制系统。

（一）开环控制系统

所谓开环控制系统，是系统的控制输入不受输出影响的控制系统。在开环控制系统中，不存在由输出端到输入端的反馈通路。因此，开环控制系统又称为无反馈控制系统。开环控制系统由控制器与被控对象组成，见图 1-1-1 所示。



图 1-1-1 开环控制系统的结构

开环控制系统的优点是结构简单，成本低；其缺点是控制精

度和抑制干扰的性能都比较差，而且对系统参数的变动很敏感。因此，一般仅用于可以不考虑外界影响，或惯性小、或精度要求不高的一些场合，如步进电机的控制，简易电炉炉温调节，水位调节等。基于按时序进行逻辑控制的开环控制系统称为顺序控制系统。

（二）闭环控制系统

闭环控制系统是建立在反馈原理基础之上的、利用输出量期望值的偏差对系统进行控制，可获得比较好的控制性能。通常大多数重要的自动控制系统都采用闭环控制的方式。闭环控制系统又称反馈控制系统。所谓反馈原理，就是根据系统输出变化的信息来进行控制，即通过比较系统行为（输出）与期望行为之间的偏差，并消除偏差以获得预期的系统性能。在反馈控制系统中，既存在由输入到输出的信号前向通路，也包含从输出端到输入端的信号反馈通路，两者组成一个闭合的回路。反馈控制是自动控制的主要形式。自动控制系统多数是反馈控制系统。在工程上常把在运行中使输出量和期望值保持一致的反馈控制系统称为自动调节系统，而把用来精确地跟随或复现某种过程的反馈控制系统称为伺服系统或随动系统。

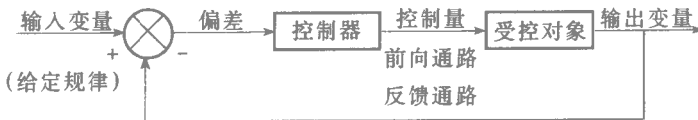


图 1-1-2 反馈控制系统框图

反馈控制系统由控制器、受控对象和反馈通路组成。图 1-1-2 中带叉号的圆圈为比较环节，用来将输入与输出相减，给出偏差信号。这一环节在具体系统中可能与控制器一起统称为调节器。以炉温控制为例，受控对象为炉子；输出变量为实际的

炉子温度；输入变量为给定常值温度，一般用电压表示。炉温用热电偶测量，代表炉温的热电势与给定电压相比较，两者的差值电压经过功率放大后用来驱动相应的执行机构进行控制。

同开环控制系统相比，闭环控制具有一系列优点。在反馈控制系统中，不管出于什么原因（外部扰动或系统内部变化），只要被控制量偏离规定值，就会产生相应的控制作用去消除偏差。因此，它具有抑制干扰的能力，对元件特性变化不敏感，并能改善系统的响应特性。但反馈回路的引入增加了系统的复杂性，而且增益选择不当时会引起系统的不稳定。为提高控制精度，在扰动变量可以测量时，也常同时采用按扰动的控制（即前馈控制）作为反馈控制的补充而构成复合控制系统。

自动控制系统已被广泛应用于人类社会的各个领域。在工业方面，对于冶金、化工、机械制造等生产过程中遇到的各种物理量，包括温度、流量、压力、厚度、张力、速度、位置、频率、相位等，都有相应的控制系统。在此基础上通过采用数字计算机还建立起了控制性能更好和自动化程度更高的数字控制系统，以及具有控制与管理双重功能的过程控制系统。在农业方面的应用包括水位自动控制系统、农业机械的自动操作系统等。在军事技术方面，自动控制的应用实例有各种类型的伺服系统、火力控制系统、制导与控制系统等。在航天、航空和航海方面，除了各种形式的控制系统外，应用的领域还包括导航系统、遥控系统和各种仿真器。此外，在办公室自动化、图书管理、交通管理乃至日常家务方面，自动控制技术也都有着实际的应用。随着控制理论和控制技术的发展，自动控制系统的应用领域还在不断扩大，几乎涉及生物、医学、生态、经济、社会等所有领域。

交通控制中的定时控制和感应控制都是经典控制理论和技术在交通控制中应用的具体体现。

第二节 现代控制理论

在 20 世纪 60 年代以前，研究自动控制系统的传统方法主要是传递函数，研究对象主要是单输入单输出的定常系统，这样建立的理论就是所谓的经典控制理论。随着宇航技术和工业生产的发 展，以及电子计算机的出现，控制系统日益复杂，而传统的研究方法也就愈难适应形势发展的需要。在此情况下，现代控制理论便在 20 世纪 60 年代初期诞生了。它以 R·贝尔曼 (Bellman) 的动态规划、П·С·庞特里亚金的极大值原理和 R·E·卡尔曼 (Karlman) 的滤波方法为基础，立足于状态变量法，研究复杂的系统，要求系统达到最优的指标。由于大规模工业生产、宇航以及军事方面的促进和推动，现代控制理论自诞生后发展非常迅速，已经在所有与自动化技术有关的领域里（如宇航、军事、电子、机械制造、化工、仪表、交通运输等领域）获得广泛应用。

现代控制理论在发展过程中逐渐演变出了多个分支，如最优控制、随机控制、自适应控制、多级递阶控制等。本节将主要对最优控制等现代控制理论中的基本方法进行概要介绍，以期使读者对现代控制理论有一个初步了解。

一、最优控制

最优控制是现代控制理论的一个主要分支，着重于研究使控制系统的性能指标实现最优化的基本条件和综合方法。最优控制理论所研究的问题可以概括为：对一个受控的动力学系统或运动过程，从一类允许的控制方案中找出一个最优的控制方案，使系统的运动在由某个初始状态转移到指定的目标状态的同时，其性能指标值为最优（最大或最小）。这类问题广泛存在于技术领域或社会问题中。例如，确定一个最优控制方案使空间飞行器由一

个轨道转换到另一轨道过程中燃料消耗最少；选择一个温度的调节规律和相应的原料配比使化工反应过程的产量最多；制定一套最合理信号控制方案使车辆延误、停车次数、燃油消耗及废气排放指标等为最优，等等，都是一些典型的最优控制问题。

最优控制理论是 20 世纪 50 年代中期在空间技术的推动下开始形成和发展起来的。前苏联学者 Л·С·庞特里亚金 1958 年提出的极大值原理和美国学者 R·贝尔曼 1956 年提出的动态规划，对最优控制理论的形成和发展起了重要的作用。线性系统在二次型性能指标下的最优控制问题则是 R·E·卡尔曼在 20 世纪 60 年代初提出和解决的。

为了解决最优控制问题，必须建立描述受控运动过程的运动方程，给出控制变量的允许取值范围，指定运动过程的初始状态和目标状态，并且规定一个评价运动过程品质优劣的性能指标。通常，性能指标的好坏取决于所选择的控制函数和相应的运动状态。系统的运动状态受到运动方程的约束，而控制函数只能在允许的范围内选取。因此，从数学上看，确定最优控制问题可以表述为：在运动方程和允许控制范围的约束下，对以控制函数和运动状态为变量的性能指标函数（称为泛函）求取极值（极大值或极小值）。解决最优控制问题的主要方法有古典变分法、极大值原理和动态规划。

古典变分法：研究对泛函求极值的一种数学方法。古典变分法只能用在控制变量的取值范围不受限制的情况。在许多实际控制问题中，控制函数的取值常常受到封闭性的边界限制，如方向舵只能在两个极限值范围内转动，电动机的力矩只能在正负的最大值范围内产生等。因此，古典变分法对于解决许多重要的实际最优控制问题是无能为力的。

极大值原理：又称极小值原理，是分析力学中哈密顿方法的推广。极大值原理的突出优点是可用于控制变量受限制的情况，

能给出问题中最优控制所必须满足的条件。

动态规划：数学规划的一种，同样可用于控制变量受限制的情况，是一种很适合于在计算机上进行计算的比较有效的方法。

最优控制理论已被应用于综合和设计最速控制系统、最省燃料控制系统、最小能耗控制系统、线性调节器等。

二、随机控制

随机控制，是控制理论中把随机过程理论与最优控制理论结合起来研究随机系统的分支。随机系统是指含有内部随机参数、外部随机干扰和观测噪声等随机变量的系统。随机变量不能用已知的时间函数描述，而只能了解它的某些统计特性。自动控制系统分为确定性系统和不确定性系统两类，前者可以通过观测来确定系统的状态，后者则不能。随机系统是不确定性系统的一种，其不确定性是由随机性引起的。严格地说，任何实际的系统都含有随机因素，但在很多情况下可以忽略这些因素。当这些因素不能忽略时，按确定性控制理论设计的控制系统的行为就会偏离预定的设计要求，而产生随机偏差量。飞机或导弹在飞行中遇到的阵风；在空间环境中卫星姿态和轨道测量系统中的测量噪声；各种电子装置中的噪声；生产过程中的种种随机波动等，都是随机干扰和随机变量的典型例子。随机控制系统的应用很广，涉及航天、航空、航海、军事上的火力控制系统，工业过程控制，经济模型的控制，交通系统的控制，乃至生物医学等。

随机控制理论研究的领域包括：随机系统的结构特性和运动特性（如动态特性、能控性、能观测性、稳定性）的分析，随机系统状态的估计，以及随机控制系统的综合（即根据期望性能指标设计控制器）。随机系统中含有随机变量，所以在研究中需要使用随机过程的基本概念和概率统计方法。严格实现随机最优控制是很困难的。对于线性二次型高斯（LQG）随机过程控制问

题，包括它的特例最小方差控制问题，可以应用分离原理把随机最优控制问题分解成状态估计问题和确定性最优控制问题，最终能得到全局最优的结果，但对于一般的随机控制问题应用分离原理只能得到次优的结果。

在随机最优控制中，由于存在不确定性，控制作用常宁可取得弱一些、保守一些，这称为谨慎控制。另一方面为更好和更快地进行估计，必须不断激发系统中各种运动模式，为此需要加入一些试探作用。试探作用的大小，则根据增加的误差、直接费用和所带来的好处等因素加以折衷权衡进行选择。谨慎和试探已成为设计随机控制策略的两个重要原则。

三、自适应控制

自适应控制是能在系统和环境信息不完备的情况下改变自身特性来保持良好工作品质的控制系统。信息不完备表现为系统和环境的特性或其变化规律的不确定性。自适应控制系统中采用有目的搜索和试探等方法，通过对环境不断进行观测和对已有控制品质进行评价和分析，在采集和加工信息的基础上学习和改进关于环境特性的知识，减小不确定性，进而模仿工程师的设计过程，自动地调整系统的结构或参数，达到改善系统品质的目标。在大多数情况下，自适应过程必须依靠计算机来完成。适应性是生物机体的基本特性之一。无论是生物个体还是整个物种，都是依靠适应性在长期进化过程中逐渐形成各种灵活、完善的控制功能的。生物的适应性可成为建立适应控制系统的原理和各种方法的借鉴。

20世纪50年代初产生的自寻最优系统和用巧妙反馈方式使系统能在较广范围内正常工作的条件反馈系统，是建造适应控制系统的最初尝试。1958年前后在美国设计成功了飞机自动驾驶仪的模型参考适应控制系统，这种系统能在空气动力特性变化很

大的情形下正常工作。R·E·卡尔曼提出的不断进行最小二乘递推估计并按此估计值修改控制器参数的自动最优化控制系统和R·贝尔曼从动态规划观点提出的多步决策适应过程的一般数学模型，建立了自适应控制系统的基本原理和可能途径。到20世纪70年代，由于计算机的普遍使用和自动控制理论的进步，自适应控制技术遂得到很大的发展。微处理机的问世又推动了自适应控制系统开始得到较为广泛的应用。自适应控制系统的主要类型有：自校正调节器、模型参考适应控制系统、自镇定系统、自寻最优系统、自组织系统和学习控制系统。

图1-2-1是自适应控制系统的结构。它比普通的反馈控制系统增加了一个适应控制回路。自适应控制器根据受控对象的输入输出关系来辨识受控对象和外部干扰的特性，随后根据辨识的结果校正反馈控制规律，以适应环境特性的变化。无论辨识还是控制规律的设计，都可采用不同的方法。它们的不同组合能形成自适应控制的不同方案。当系统的环境特性及其变化可以用一些参数来描述时，就可对这些参数进行辨识并使反馈控制规律跟踪这些参数的变化。这种系统称为参数自适应控制系统。对于复杂的情况，常常只能用一些笼统的数量指标来反映控制过程的品质，并以品质的优劣作为校正控制规律的依据，这就是品质自适

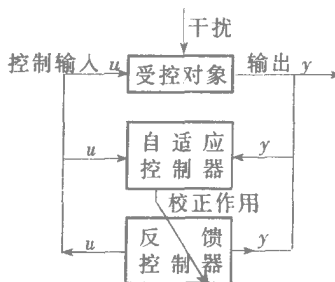


图 1-2-1 自适应控制系统的结构

应控制系统。对控制规律进行的校正也有多种方式，可从根本上改变控制器的结构（由一种结构改换到另一种结构）的控制系统，称为变结构系统；只改变控制器的一些参数（如放大倍数）的方式，称为参数校正式系统；如果利用校正作用直接去影响控制信号的大小，则称为信号综合式系统。

按照自适应控制原理设计的控制系统常常会出现失稳或参数发散的现象，这使人们认识到稳定性是自适应控制系统的重要研究课题。对于自适应控制系统，即使受控对象是线性定常系统，它的闭环控制系统也是变系数或带有随机干扰的非线性系统，很难由一般分析方法给出稳定性判据。但是，有相当多的自适应控制系统的稳定性问题，可以用李雅普诺夫稳定性理论和波波夫超稳定性理论来研究。模型参考自适应控制系统和自校正适应控制系统实质上是一致的，它们的稳定性分析方法也相互适用。在稳定性分析的过程中还能附带给出一些关于参数选择的信息。李雅普诺夫稳定性理论和超稳定性理论的主要缺点，在于它们要求对系统的模型有十分精确的知识。系统参数的变化可能使整个控制系统失去稳定性。这就推动了对自适应控制系统的鲁棒性的研究。由于还没有一般的判据，在实际使用自适应控制系统时，往往主要借助于人工智能技术来积累经验或进行逻辑判断。

自适应控制系统已在船舶驾驶、过程控制等方面取得了一些成功的应用，由于理论还不够完善，一般在完成设计后还需要用仿真技术进行最后的校验。

现代控制理论自 20 世纪 60 年代以来得到了迅速的发展，与此同时，由于微电子技术、计算机技术、通信技术及检测技术的飞速发展和应用，又进一步促进了控制理论的发展。目前控制理论已经在工业、军事、社会经济、交通运输、生物工程等各个领域得到了广泛的应用。交通控制的理论和实践在这一时期也得到了迅猛发展，并先后出现了多个具有代表性的区域交通控制系

统，如 TRANSYT、SCOOT、SCAT 等系统。

第三节 大系统理论

大系统理论是关于大系统分析和设计的理论，包括大系统的建模、模型降阶、递阶控制、分散控制和稳定性等内容。大系统一般是指规模庞大、结构复杂（环节较多、层次较多或关系复杂）、目标多样、影响因素众多，且常带有随机性的系统。这类系统不能采用常规的建模方法、控制方法和优化方法来进行分析和设计，因为常规方法无法通过合理的计算工作量得到满意的解答。

随着生产的发展和科学技术的进步，出现了许多大系统，例如电力系统、城市交通网、数字通信网、柔性制造系统、生态系统、水资源系统、社会经济系统等。这类系统的特点是规模庞大，结构复杂，而且地理位置分散，因此造成系统内部各部分之间的通信困难，提高了通信的成本，降低了系统的可靠性。

原有的控制理论，不论是经典控制理论还是现代控制理论，都是建立在集中控制的基础上，即认为整个系统的信息能集中到某一点，经过处理再向系统各部分发出控制信号。这种理论应用到大系统时遇到了困难，这不仅由于系统庞大，信息难以集中，也由于系统过于复杂，集中处理的信息量太大，难以实现。因此，需要有一种新的理论，用以弥补原有控制理论的不足。

一、递阶控制理论

这是研究具有递阶结构的大系统的控制问题的理论。它包括大系统的分解和协调、最优控制和稳定性等。

一个递阶系统必须具备 3 个基本特征：

1 一个由多台决策器组成的多级控制结构，其中每一级包

含有一定数量的决策器。上级决策器在数量上通常少于下级决策器，整个结构呈金字塔形。每级决策器都赋予一定的决策权，同级决策器可以并行工作。

2. 信息只能在相邻级间垂直传送，由上向下的信息传递有优先权。各决策器通过它们的模型、目标函数和约束条件等实现关联。

3. 整个系统有一个总体目标，而每个子系统有各自的局部目标。总体目标是各局部目标的一个保序函数，最常见的形式是总体目标等于诸局部目标的算术和。经过上级决策器对下级决策器的反复协调，各子系统的局部目标与整个系统的总体目标最终将同时达到极值。

大系统的分解和协调是递阶系统赖以建立的基础。分解就是把一个大系统分成若干子系统。分解的结果（不管这种分解是自然的还是概念的）产生一组有关联（耦合关系）的下级子系统。这组子系统可以在放宽关联约束之下各自求解，这样得到的解当然不可能是大系统的整体最优解，为了从整体上把握各子系统之间的关联，就需要在上级设置一个协调机构（协调器），通过协调某些变量，不断调整下级各子系统间的关系。一旦关联约束条件成立，则在一组凸性的条件下，各子系统局部最优解的组合便成为大系统的整体最优解，据此选定的变量称为协调参数或协调变量。M·D·梅萨罗维茨等通过选择不同的协调变量，提出两种典型的分解协调方法——目标协调法和模型协调法。

20世纪70年代，递阶控制理论在以下两个方面得到了迅速发展：

1. 建立了各种递阶控制最优化方法

具有代表性的有：田村坦之的三级法和时延算法、非线性系统的哈桑 - 辛预估法、非线性系统的三级共态预估法，以及M·G·辛格和 A·铁脱里等提出的线性二次型系统的闭环控制法

等。

2. 初步形成统一方法

M·S·穆罕默特等把广义梯度法和拉格朗日对偶理论结合起来，提出一种统一方法。这种方法具有下列特点：

(1) 在两级结构的上下关系方面，控制级（下级）和协调级（上级）的排序是无关紧要的；

(2) 每一级包含的变量数不受限制；

(3) 在多台计算机并行工作的情况下，可依据每级计算机的功能适当调配其解题任务。

G·科恩在无限维凸规划的基础上，依据辅助问题原理和松弛原理建立了另一种统一方法。

两种统一方法都可推出大多数分解协调算法，为探索新的算法开辟了途径。

20 世纪 70 年代，M·G·辛格等应用递阶控制理论成功地在西伦敦通向白金汉宫的一条由 3 个路口的干道上实现了递阶最优控制，开创了应用大系统理论解决城市交通控制问题的先例。

二、分散控制理论

分散控制理论，是对一个复杂的大系统按其分布特征划分为若干较简单的子系统，并分别设置分散控制器对各子系统施加控制的一种系统理论。分布可以指系统各部分在空间位置上的不同，也可以指系统各部分动态特性响应时间的明显差异。

分散控制的主要特征是：在每个时刻，各分散控制器（又称控制站）只能获得整体大系统的某一局部信息，并利用这局部信息作出自己的控制决策，因而只能产生整体控制作用中某一局部控制作用。这种在一个给定时刻各控制器的动作基于自身所得的不同的信息结构，称为非经典信息结构。在分散控制系统中各分散控制器之间完全没有或只有部分在线信息（指每一时刻或到该

时刻为止对系统的输入和输出的测量数据) 可以进行交换。完全没有在线信息交换时称完全分散控制, 有部分在线信息交换时称部分分散控制。在这两种情况下, 系统的某些传感器的输出和某些执行器的输入之间的信息传输都受到一定的结构上的限制, 即不能达到完整的状态反馈。在这个意义上说, 分散控制是一般最优控制在反馈结构约束下的特定情况。因此, 在系统性能上分散控制不可能达到集中控制系统的最优指标, 只能是次优的。各控制器如能获得更多的关于大系统的测量信息, 次优指标便有可能提高。

非经典信息结构给分散控制带来两个主要困难:

1. 发信策略现象

在信息交换时, 在分散控制器发出的信号中, 除用于本身的局部控制信号外, 还混着发送给其他分散控制器的有关本身局部控制决策的信号。这种混合信号十分复杂, 是一种非线性编码信号, 别的分散控制器很难从混合信号中识别出自己要求的信息。此外, 由于有结构约束, 分散控制器还会利用动态特性极不确定的受控对象本身作为传递通道以传送上述信息, 这就使得分散控制系统的最优决策复杂化, 成为非线性的。

2. 二次推测现象

用卡尔曼滤波器进行状态估计时, 滤波器得到的状态估计值不仅受该分散控制器本身控制决策的影响, 还受到其他分散控制器控制决策的影响。因此, 滤波器必须对来自其他分散控制器的信号进行估计, 而那些信号又依赖于其他滤波器所得到的状态最优估计值, 如此一次又一次地循环下去, 这就使得控制器在维数上成为无限维的。基于这两种现象, 要想求得分散控制的最优解析或数值解就十分困难, 即使对于最简单的线性二次型高斯(LQG) 问题, 分离原理也不再成立, 反馈律一般是非线性的。

分散控制理论的研究问题, 按性质可分为描述分散控制系统

的性能和加在受控系统上的行为两类。前者包括对分散系统的状态估计、能控性、能观测性、稳定性等的分析；后者又分为最优分散控制（如各种最优、次优解法）和定性分散控制（如分散镇定和极点配置等）两部分，研究工作主要集中在采用简化模型的线性定常系统或线性二次型高斯（LQG）问题上。分散状态估计主要解决分散滤波器的计算和性能评价问题。20世纪70年代中期以前的研究工作主要是在完全分散化信息结构方面，滤波器的性能都比较差，后来注意力转向各控制站间通过低噪声通道有部分信息交换的特殊结构上，以改善滤波器的性能。性能更好的整体滤波器的分散算法也受到注意，对能控性和能观测性的研究较少，但也取得了显著的成果。能控性是指有分散控制站的线性定常连续系统存在一个分散控制律，能在有限时间间隔内把系统任意初态转移到原点的问题。假定各分散控制站使用发信策略彼此交换了全部必要信息并占据了初态信息之后再对系统施加控制，这样的发信策略现象会使问题易于解决。现已得到分散信息结构下系统能控的充分必要条件。人们还研究了在时延大于或等于2步的共享信息结构下分散控制系统从某一分散控制站能观测的充分必要条件。

分散控制系统设计中还有许多问题尚未解决，如发展有效、经济和可靠的通信方式，减少通信中的时延、噪声和信息丢失等因素的影响，确定分散控制器的数目、接口和选择控制器的结构等。解决这些问题尚需有新的理论。

第四节 人工智能控制理论

一、人工智能

人工智能是研究人类智能活动的规律，构造具有一定智能行

为的人工系统，以实现脑力劳动部分自动化的综合性学科。人工智能的基本目标是在传统计算机上用人工智能技术编制的程序，完成以往需要人的智能才能胜任的工作，如推理、学习、联想、理解自然语言、制订行动计划等。这种模拟人的智能的技术尚处于初级阶段，只能作到一定程度的形似，而不能保证神似。计算机只是在给定的问题范围内，在有限程度上表现出同人相似的智能行为，还不能严格模拟人在处理信息时的思维形式和思维过程。人工智能的长远目标是在思维科学指导下，对传统计算机的硬件、软件和体系结构进行改造，研制人工智能系统，并不断提高这类系统的思维模拟水平。人工智能的技术是从人类各种智能行为（如问题求解、感知、学习、创造、语言等）中总结提炼出来的，它与心理学、逻辑学、语言学等多种学科相关。人工智能研究能提高计算机的灵活性，使其发挥更大的作用，因此有时也称为机器智能，被认为是计算机科学的一个分支。人工智能的基本问题，可分为技术基础和应用研究两个方面。

人工智能研究可以追溯到 A·M·图灵提出的通用的非数值符号计算模型（图灵机）。在出现了大规模的高速计算机以后，研究人工智能的一些先驱学者，如 A·纽厄尔、H·A·西蒙等才从信息处理的角度认识到，人的思维过程和计算机工作过程都可归结为符号过程。以人（脑）的信息处理为模型，研制解脱部分脑力劳动的人工系统，这是人工智能的任务；而根据计算机的符号过程来研究人在信息处理时的思维活动规律，则是认知心理学的任务。因此，人工智能和认知心理学是在 20 世纪 50 年代中期，随着高速计算机的发展而同时产生的孪生学科。人工智能的发展大致分为三个阶段：

第一阶段（1956~1970 年）是人工智能的起步时期。早期的人工智能研究是从智力难题、弈棋、难度不大的定理证明等简单问题开始的。研究的目的在于实际应用，而在于探索人的解题