

ZI DONG KONG ZHI LI LUN JI CHU

自动控制理论基础

季新宝 编著

上海科学技术出版社

自动控制理论基础

季新宝 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书较全面地介绍了控制理论的基本内容,重点是古典理论,对现代理论也作了简要叙述。其中除第一章用以说明本书的研究主题外,其余各章都用来阐述各类控制系统特性的描述、分析和设计方法。此外,各章中还穿插介绍借助袖珍机的辅助设计。每章前有内容提要,章末附有习题。

全书不仅举有伺服控制还有过程控制等有关内容和实例,因此,本书可作为大学、大专、职大等院校电气自动化、过程控制及其它机、电专业控制理论课的教材或教学参考书,也可供有关科技人员自学或参考。

自 动 控 制 理 论 基 础

季新宝 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 无锡县人民印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 20 字数 446,000

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数: 1—5,600

统一书号: 15119·2531 定价: 3.65 元

前 言

目前,自动控制几乎应用于一切工业部门,成为现代工业装置高效率、高性能、高可靠运行的必不可少的技术手段,对新技术革命也将起着重要的作用。

自动控制技术和理论已日益成为广大工程技术人员的一种基本知识,大、中专院校理工科的很多专业也都将它列为课程之一。

自动控制可分为顺序控制和反馈控制两类,后者在自动控制中常起着中心作用,自动控制原理一般就指反馈控制的原理,其内容又可分为古典控制理论和现代控制理论两部分。前者指从瓦特的调速器稳定性解析开始,到五十年代所建立的单变量线性反馈控制的理论,它主要用于最小相位系统或具有S字形的过程对象特性等比较简单对象的控制上。而现代控制理论则是在五十年代末,由于被控对象向复杂化多样化演变,加上计算机的迅速发展的推动而建立起来的多变量最优控制的理论。现在,尽管现代控制理论已显露头角,然而古典理论的重要性尚未见减,它在很多场合仍是一简单实用的方法,特别是其中的负反馈方法仍是自动控制中最基本的方法。

本书的主要内容是古典控制理论,对现代控制理论也作了简单扼要的叙述,并且整个内容力图突出以下几点:

(一)本书以较广泛地适应于机、电多种专业的大学、大专、职工大学等作为教学参考书或教材为目的。取材以“突出中心,带动其余,保证基础”为原则。在应用上兼顾电气自动

化及过程控制等专业的有关内容及实例。

(二)在编排上无论是前四章的线性控制还是以后几章的非线性、采样值及现代控制理论都以控制系统的描述法、分析法、设计法这种较为清晰的思路逐步深入。

(三)由于袖珍机(特别可编程计算器)日趋普及,功能也日渐增强,一般已能解算相当复杂的控制问题,利用它或者和超小型绘图(打印)机配合,作为控制理论教学或设计工具将大有可为。不但可辅助于理论中常用的分析和设计方法,还可用于那些原不适合人工计算的非常用方法和新方法上,从而可加深对控制理论的理解和研究。为此本书各章穿插有借助袖珍机的辅助分析和设计方法的叙述。其中所采用的语言,是微机和袖珍机共同可用的 BASIC 语言。

本书编写中,主要参考了上海科技出版社的《自动控制原理及设计》一书,个别章节中还采用了其中一些内容。

最后向对本书提出宝贵意见和热忱帮助的上海工业大学、上海交通大学、复旦大学等有关同志深致谢意。

限于作者水平有限,本书必有不少谬误之处,恳请读者批评指正。

作者 1986年5月

目 录

第一章 导论	1
§ 1.1 自动控制的实现方法	1
§ 1.2 自动控制系统的分类	11
§ 1.3 对自动控制系统的要求及自控理论的研究主题	14
第二章 自动控制系统特性的描述	23
§ 2.1 微分方程描述法	24
§ 2.2 传递函数及方块图描述法	52
§ 2.3 频率特性法	85
第三章 自动控制系统特性的分析	123
§ 3.1 系统的负反馈效果	123
§ 3.2 系统的稳定性判别	131
§ 3.3 系统的稳态误差分析	159
§ 3.4 系统动特性的时域分析法	167
§ 3.5 系统动特性的频域分析法	177
§ 3.6 系统动特性的根轨迹分析法	198
§ 3.7 利用袖珍机直接求取阶跃响应的特性分析法	230
第四章 自动控制系统特性的设计	243
§ 4.1 系统特性设计的一般方法	243
§ 4.2 系统特性的频率特性补偿法(补偿设计法之一)	248
§ 4.3 系统特性的根轨迹校正法(补偿设计法之二)	291
§ 4.4 系统频率特性的综合设计法	306
§ 4.5 过程仪表控制系统设计法	326
§ 4.6 复杂系统的特性及其设计	364
§ 4.7 对象特性的实验辨识法	378
§ 4.8 借助电子模拟计算机的系统特性研究	397

第五章 非线性控制系统	421
§ 5.1 非线性控制系统基本概念	421
§ 5.2 描述函数法	425
§ 5.3 相平面法	440
第六章 采样值控制系统	471
§ 6.1 引言	471
§ 6.2 信号的采样及采样信号的保持	474
§ 6.3 Z 变换	481
§ 6.4 Z 传递函数	489
§ 6.5 由采样系统的 Z 传递函数求取系统特性	496
§ 6.6 采样系统稳定性判别	500
§ 6.7 采样系统特性的设计	504
第七章 现代控制理论	524
§ 7.1 数学基础——矩阵知识的复习	525
§ 7.2 系统的状态空间描述法	532
§ 7.3 系统的传递函数矩阵及特征方程式	545
§ 7.4 状态方程式的解	552
§ 7.5 系统的固有特性(结构特性)分析	557
§ 7.6 离散值系统的状态空间研究法	569
§ 7.7 状态反馈及根据状态反馈的极点配置	575
§ 7.8 最优调节器	588
附录一 拉氏变换、Z变换对照表	597
附录二 利用最小二乘法辨识对象的 n 阶差分方程	602
习题解答	607
参考文献	633

第一章 导 论

§ 1.1 自动控制的实现方法

(一) 控制、自动控制

日常生活中需要控制的事例大致有两类：一类是定性的，另一类是定量的。前者如控制电扇定时关闭；洗衣机定时洗涤再漂清；电梯在预定的楼层停车并开门；三相异步电机启动时控制 Y 形接法换成 Δ 形等等。这类控制的方法是依照预先给出的顺序命令进行，其目的是使被控制的那些量（如电扇的供电电流等）处于开、关或其它几个断续的状态下，而并不要求连续地精确地控制这些量，故这是一类定性控制。与此相反，另一类控制的目的是使被控制量，不受干扰影响而连续地、精确地达到要求的规定的上。如不论室外温度是高是低，室内人多人少，室内温度都达到要求的值。不论衣服原先弄脏得重还是轻，衣料洗净难或易等外界因素如何，洗涤衣服的清洁程度都达到要求的量值上。显然这类控制是不能以顺序命令进行的。由于此两类控制的要求、方法、原理都不一样，因此一般都分门别类地进行介绍，而本书将专门介绍定量控制。这类控制不仅应用于日常生活中，而且更广泛地应用到各个生产部门和非生产部门中。例如控制水箱水位一定而不因用水量多少而变；电网电压一定而不受负荷大小升降；控制电机转速一定或按要求的调速规律变化而不受负载大小影响；热处理的炉温一定或按某指定的升温、保温规律变化而不因环

境温度变化、电网电压波动等使炉温偏离要求值或破坏指定的规律变化等。此外,如人体体温、商品价格等被控制在一定范围内而不受环境条件变化而变等都是属于这里要研究的所谓控制。至此,对控制的含义就可作一较为明确的叙述:所谓控制,就是指对被控制对象中某一(某些)被控制量,克服干扰影响达到预先要求状态的手段(或操作)。也就是说控制是一种手段(或操作),目的是克服干扰使被控制量达到要求状态,而干扰就是指一切破坏被控制量达到要求状态的因素。其中被控制对象狭义地是指机器、设备或生产过程,如水箱、炉子、电机等,被控制量则指水位、炉温、转速等物理量(也可以是化学量)。被控制对象广义地也可指生物体、经济或社会的某些部门,量就是指其中的生物量、经济量等等。另外,所谓预先要求的状态狭义地仅指一定值或一定的变化规律。广义地就包括某种最优工作状态,如产品质量最佳或成本最低等复杂的状态。不管狭义的内容还是广义的内容,其基本原理还是相似的。下面仅以狭义的内容为研究对象进行叙述。

既然控制是一种手段,当然实现这种手段就有各种办法,显然会有这样两种:一是由人自己来做;一是由人所设计的机器装置完全自动地实现。相应地就叫人工控制和自动控制。但往往自动控制是受人工控制启发而制造出的,因此,首先看一下人工控制。图 1-1 到图 1-4 的点划线框外面部分就是人工控制的四个例子。

图 1-1 是一要求水箱水位为一定的控制示意图。水位就是被控制量。出水量 q_0 是干扰,代表用水量大小。进水量 q_i 可以人为地用来改变水位的高低,是控制这一手段的直接表现,通常就称它为控制量或操作量。此时要实现控制,人工可以如下进行:首先用一测量元件测出水位高低,如这里用带连

杆的浮球。再选用一元件来操纵操作量 q_i ，如这里选用一阀门 3。倘若此时水位由于干扰 q_0 减小而升高，高于要求值，则人工就用手开大进水阀，否则相反。又倘若此时水位恰好等于要求值，并进水量等于出水量，则就不改变阀门，使水位保持在要求值上。在此人工控制中，人主要完成了检测偏差和消除偏差的任务，即检测出实际水位与要求值之差，然后根据此偏差判断出并给出如何移动阀门的动作，执行此动作，直到消除偏差为止。

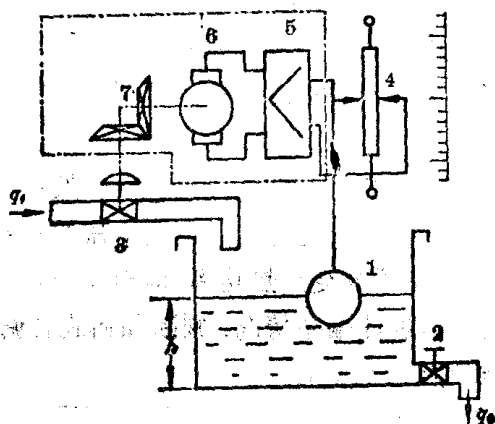


图 1-1 水箱水位控制(系统)示意图

1—带连杆的浮球； 2—出水管手动阀门； 3—进水调节阀门； 4—带双滑动触点的电位器； 5—放大器； 6—直流可逆电机； 7—减速齿轮

出实际水位与要求值之差，然后根据此偏差判断出并给出如何移动阀门的动作，执行此动作，直到消除偏差为止。

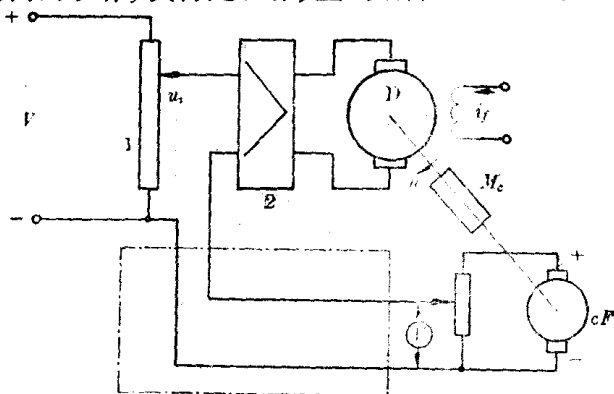


图 1-2 直流电机调速控制(系统)示意图

1—电感器； 2—电压放大及功率放大； D—直流电机；
cF—直流测速发电机

图 1-2 是直流电机调速的控制示意图。负载 M 为干扰，测速发电机输出电压用来测转速。当转速与给定规律不等或由于负载增减偏离要求时，人就根据这偏差，判断并执行移动电位器触点的动作，直至达到所要求状态即消除偏差为止。

图 1-3 是使炉温保持恒定或按指定规律变化的控制示意图。干扰是环境温度及电网电压波动等。热电偶输出电压测温，调压器改变加热功率（即操作量）大小。当炉温出现偏差，人就根据此偏差情况，判断如何旋转调压器，并执行此判断，使炉温偏差消除。

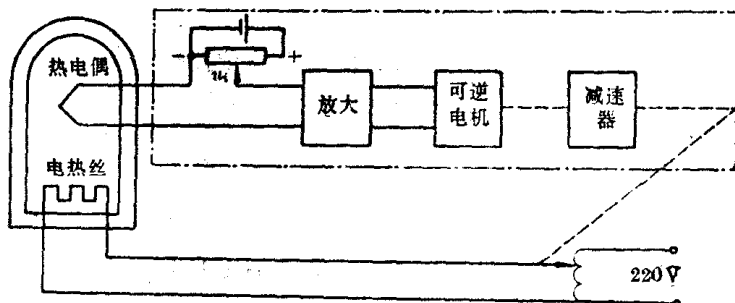


图 1-3 电炉炉温控制(系统)示意图

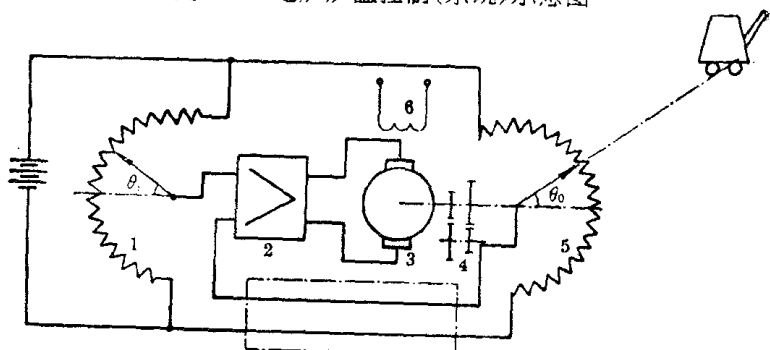


图 1-4 位置随动控制(系统)示意图

- 1—主动轴电位器； 2—电压及功率放大； 3—直流电机；
4—减速器； 5—从动轴电位器； 6—电动机激磁绕组

图 1-4 是控制从动轴的位置角 θ_0 跟随主动轴的位置角 θ_1 变化而变化的示意图。这类控制通常也称位置随动控制，应用很广泛。若从动轴为火炮位置角，主动轴为雷达天线位置角，则就是一火炮位置控制。人在此控制中首先检测偏差，作出判断，给出适当的放大器输入电压，当偏差消除后，去除此输入电压，电机停转，达到跟随控制的目的。

(二) 自动控制系统

总结上述人在人工控制中的作用(当然也可借助一些装置来进行)，不外乎是完成了“检测偏差、纠正偏差”这项工作，具体地说完成了“测量、比较、判断、执行”这几项工作。自动控制只要用机器装置完全自动地完成上述几项工作就便实现了。并把自动地完成上述工作的装置总体称为自动控制装置，而把被控制对象和自动控制装置结合而构成的整体叫做自动控制系统。通常都依被控制对象或被控制量的名称来命名各自动控制系统，如图 1-1 到图 1-4 中那样，在这些图中，由于人工控制中已采用了如自动测量等装置，故只须加入自动完成比较、判断、执行等装置即可。各图中若加入点划线框内装置便构成了自动控制系统。如图 1-1 带有滑动点的电位器起自动比较作用，滑动点 4 是给出要求水位的触点。放大器、电机、减速器就起自动执行功能。而连接线的极性正确连接就起自动判断功能。倘若水位低于给定水位，不管是由于干扰增加还是给定水位提高所引起，此时电位器两触点不在同一位置上，就有电位差输入放大器；又假设极性已接对，电机就带动阀门向上移动，进水量增加，水位亦上升。要电机停转，必须使电机电枢电压为零，即放大器输入为零，电位器两触点在同一位置，即水位和给定水位一致时才行。因此，此系统一旦出现水位偏差，便能自动地消除此偏差，即电机停转，

系统稳定下来。图 1-2、图 1-3 的要求状态都是通过电位器触点电压给出，再和用来测量被控制量的电压在放大器输入回路中进行比较。图 1-4 要求角度和被控制角度都用电位器的电压测出，并且由它们和放大器输入回路组成比较装置。顺便指出，上述的四个自动控制系统示意图中，从工作原理上说，图 1-2 系统只要把偏差减小或减小到一定精度范围内，系统运动就稳定下来，而其它各图系统是基于只有把偏差减小到零，系统运动才能稳定下来的原理而工作的。系统工作原理的这种差别，在以后系统静差的章节中将会着重介绍。

为了叙述方便，这里先介绍几个常用术语：

对象 即被控制对象的简称，如水箱、电机、电炉、从动轴等。

被控制量 如水位、转速、温度等，也可称作系统输出量。当自动控制系统有时被称做自动调节系统时，亦称做被调量。

给定量 即系统要求达到的状态，也可称为系统输入量。

扰动量 干扰的量值，如出水量等，它也是系统的输入量。系统的输入量可以是给定量也可以是扰动量。

操作量(控制量) 直接表现出控制效果而改变被控量的量，如进水量、加热功率等。

方块图 所谓方块图，即用方块表示系统内各组成部分而画出的系统结构图。利用上述术语，可将图 1-1~1-4 各系统简化成如图 1-5 方块图形式。图中方块两边的直线代表该部分在系统中参与工作的变量，并用字母写在线上。箭头代表变量传递的方向，箭头向方块的变量称此方块的输入量，箭头离开方块的称为输出量。这些变量是随时间变化的，不管书写时是否写成时间函数的形式，实际上都应认为是时间的

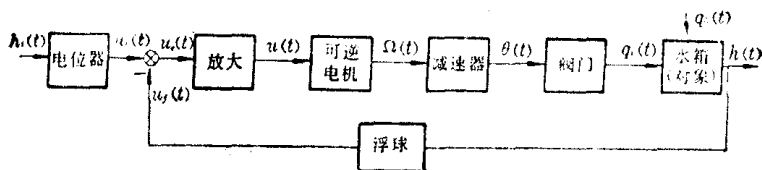


图 1-5 水位控制系统方块图

$h_d(t)$ —要求的水位； $u_i(t)$ — $h_d(t)$ 转换成基准信号后的系统输入量； $h(t)$ —实际水位； $u_f(t)$ — $h(t)$ 转换成基准后的测量信号； $u_e(t)$ —偏差信号

函数。图中 $\otimes$ 代表比较元件，亦即相加点，注意相加点后面的变量要受相加量影响。 $\rightarrow$ 代表引出点，在方块图中规定引出量不影响被引出的量。

利用方块表示各部分在系统中的功能，方块图表示系统中信号流动和变换情况，可以清楚地表示出系统结构和工作原理。但自控原理中不仅如此，更重要的是（第二章开始）用方块来表示各部分参与系统工作的变量间的变化关系，如用方块表示这些变量间的一个数学关系式，整个方块图就表示整个系统各变量间的变化关系，即所谓动态关系。此时的方块图也可称做动态结构图。这是自控原理中方块图的最大特点，是表示系统特性或信息传递的有力工具。但是，作为第一步往往还是先从结构示意图中画出如图 1-5 那样表示工作原理的方块图，然后找出各变量间的量值关系来分析系统。画方块图时必须注意的是：一是从对象开始向前推，直到比较元件处找出测量及给出基准信号的方块；二是找出各部分参与工作的各变量，以容易划分各变量间关系来划分方块，不一定一个部分就一个方块。最后对照结构示意图及图 1-6 那样原则方块图，检查是否有遗漏并找出扰动量。利用此法读者可自行画出图 1-2 到图 1-4 各自的方块图。

自动控制系统构成方块图按上述的几个实例，显然系统

的具体结构不同，但从控制的原理上看，它们的构成不外乎是被控对象和自控装置两部分。特别是自控装置都由完成测量、比较、判断、执行等工作的相应的部分（称为功能元件）组成。这些功能元件是测量、给定、比较、放大、校正、执行功能元件。其中给定元件是将要求的状态值转换为合适的系统输入值（称基准信号）。放大元件是起执行功能的，因为多数执行元件必须由放大后的判断信号才能推动它。另外校正元件则是起一种较为复杂的判断功能的，因为实际的人工判断并不是仅仅给出与偏差大小成正比、方向和偏差极性相应的信号去推动执行元件，因为这样的控制效果一般并不好。而是往往当一出现偏差，就把执行元件推到最大位置，如水位一下降，不是正比地去开大进水阀，而是更大地开大进水阀，使水位迅速上升，当将要回到要求值时，就迅速关小进水阀，使进、出水相等。这样水位就控制得好。自控装置如何来实现人工这样的判断经验呢，结果发现人工控制的这种判断经验还是有一定的算法规律的，而校正元件就是实现这一算法规律的功能元件。以后会知道，这种算法规律随对象和要求不同会不同，常称该规律为控制规律。综上所述可以看到，虽然有具体不同的自动控制系统，但其构成的原则性结构是一样的，图 1-6 就是自动控制系统构成的原则性方块图。

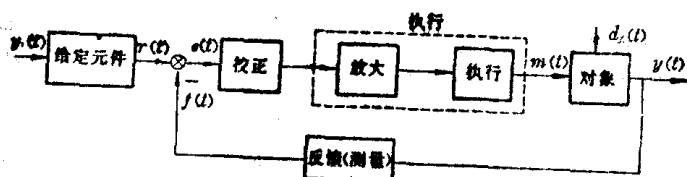


图 1-6 自动控制系统构成方块图

$r(t)$ —给定量（系统输入量）； $y(t)$ —被控量（系统输出量）；
 $d_f(t)$ —扰动量； $m(t)$ —操作量（控制量）；
 $e(t)$ —偏差量； $f(t)$ —反馈量（测量量）

图 1-6 表明,系统要实现测量、比较和得到偏差等,必须把系统输出量反馈到输入量端相减后才能得到,即用反馈方法来实现。图中测量元件也即是反馈元件。

对照图 1-6,读者是不难找出图 1-1 到图 1-4 相应于各功能元件的各自实际元件,但应注意二点,一是一个功能元件不一定是一个实际元件,或许是几个实际元件或者一个实际元件是几个功能元件。如图 1-4 的两电位器,既是给定,又代表了反馈、比较等功能元件。再一是上面的几个实例中均未画出校正元件,并非校正元件可以不要,仅仅是为了使问题简单化。以后会知道,没有校正元件的系统一般是不能工作或不能良好工作的(如控制得不快等等)。

另外,还须指出,尽管不同的自动控制系统,从功能上看,都按图 1-6 原则构造,但具体构造时,不一定是把图 1-6 中每个功能元件都做成一个独立的装置,有时把所有功能元件放在一起做成一个装置,有时把校正元件做成一个装置(称调节器),其它执行元件做成一个装置等。

上述实现自动控制是基于“检测偏差,纠正偏差”原理基础上,有时也称按偏差的自动控制。其实现的方式是一负反馈自动控制系统,具体如图 1-6 所示。这是一类应用得最广泛的实现自动控制的方式,也是本书讨论的主要对象。

自动控制由自动控制系统实现,自动控制理论,或称自动控制原理就成为研究自动控制系统的原理。具体地就是主要研究图 1-6 那类系统的原理,即它的分析和设计的一般原理。

自动控制理论与系统是相辅相成、相互促进的,从其发展简史就可看到这一点。

(三)自控理论发展简史

理论研究是从对瓦特的蒸汽机调速系统改进开始的。当

时人们为了提高该系统的调速精度,就改进了系统中某些机械部件的加工精度,这样使这些部件灵敏度大大提高,但如此一来,往往导致系统工作时产生振荡甚至不稳定。当时,不得其解。到1868年以后,有 T. O. Maxwell、E. J. Routh、A. Hurwitz 等人开始用微分方程描述整个系统的运动,并从中找出了代数形式的系统特征方程,从而明白了系统出现不稳定的实质原因,即著名的系统稳定的充要条件是其特征方程根的实部为负实部这一稳定性判据。至此,微分方程研究系统的方法就成为自控原理发展的开端。

1932年以后,工业生产得到高速发展,反馈控制已应用在许多部门,此时 H. Nyquist、H. W. Bode 关于反馈放大器的频率特性研究法被引进了自控原理中来,建立了一套用频率特性分析和设计自控系统的实用方法。

频率特性法尽管实用,但是是一种间接法。1948年 W. R. Evans 提出了直接求解系统特征方程根的图解法,来设计和分析系统,即根轨迹法研究系统。至此系统的分析和设计原理日臻完善,并能依靠人工(不一定依靠计算机)就可使工程付诸实用。这种自控原理即50年代前的自控原理,也被人们称为古典理论。

到了五十年代中期,由于计算机的应用,对自动控制提出了更多更高的要求,如被控量从一个到多个;系统从单被控量到多被控量系统;对象从一般到复杂,如一个生物体、整个车间、多个经济部门等作为对象;对控制的要求状态也从狭义的要求到达到某种含义下最佳工作状态的最优控制系统等等。另一方面也出现了为适应这种高要求、高复杂、多被控制量的最优控制系统的理论研究,如60年代初 R. E. Kalman 提出的适合计算机求解并适合描述多被控量系统和复杂系统内部