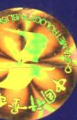


高等学校教材

自动控制原理

Automatic Control Theory

© 宗晓萍 王霞 姜萍 李彩霞 编著



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

“十二五”国家重点图书出版规划项目

自动控制原理

Automatic Control Theory

王长军 王 强 王 强 王 强 王 强 编



中国矿业大学出版社

TP13/222

2007

高等学校教材

自动控制原理

宗晓萍 王霞 编著
姜萍 李彩霞

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/宗晓萍等编著. —北京: 中国计量出版社, 2007. 8

高等学校教材

ISBN 978 - 7 - 5026 - 2649 - 5

I. 自… II. 宗… III. 自动控制原理—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 067620 号

内 容 提 要

本书较为全面地阐述了自动控制的基本理论及应用, 主要内容包括: 线性连续控制系统的数学模型、系统分析 (时域分析、根轨迹分析和频域分析) 和系统校正; 线性离散控制系统的数学模型、系统分析及数字校正; 非线性控制系统的相平面分析和描述函数分析以及非线性控制系统的反馈线性化设计方法; 线性系统的状态空间分析及综合。书中还穿插介绍了 MATLAB 在控制系统分析和设计方面的应用等内容。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、电子信息工程等相关专业的教材, 也可供从事自动控制的其他专业工程技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市媛明印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 20 字数 488 千字

2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 34.00 元

前 言

在现代科学技术的众多领域中，控制技术起着越来越重要的作用，自动控制装置已无所不在。

《自动控制原理》是自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、电子信息工程等专业的专业基础理论课程。通过本课程的学习，除了要系统地了解控制理论的发展，掌握控制理论的基本概念、基本原理以及控制系统的分析、综合和设计的基本思想和基本方法外，还要进一步提高分析问题和解决问题的能力，达到有效地掌握知识，能够举一反三、有所创新的目的，为后续专业课程的学习奠定一定的理论基础。

考虑到目前本科教学的现状及教学需求，我们在参考经典的控制理论教材的基础上，本着结构紧凑、层次分明、条理清晰的原则，根据多年的教学经验编写了本书。书中叙述力求浅显形象，易于接受。原理的说明和例题的选取是在参考多种经典教材的基础上，经过多次比较斟酌确定的。鉴于目前控制系统仿真软件的不断完善，书中穿插介绍了 MATLAB 在控制系统分析和设计方面的应用等内容。

本书由宗晓萍、王霞、姜萍、李彩霞编著。在本书的编写过程中，得到了王培光教授、李芬华教授、田华老师以及河北大学自动控制原理教研室的各位老师帮助和支持。此外，淮小利、徐燕、胡军格、蔡爱玲等同学做了大量的文字录入工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2007年8月

目 录

第一章 绪论	(1)	第四章 根轨迹法	(93)
第一节 自动控制的基本概念	(1)	第一节 根轨迹的基本概念	(93)
第二节 反馈控制系统的构成	(4)	第二节 绘制根轨迹的基本规则	(97)
第三节 自动控制系统的分类	(7)	第三节 根轨迹绘制举例	(108)
第四节 经典控制理论的研究内容	(9)	第四节 参量根轨迹的绘制	(115)
习题	(10)	第五节 用 MATLAB 绘制线性系统的根轨迹	(117)
第二章 控制系统的数学描述	(12)	习题	(121)
第一节 引言	(12)	第五章 频率响应法	(124)
第二节 控制系统的时域数学模型	(13)	第一节 引言	(124)
第三节 控制系统的复数域数学模型	(22)	第二节 频率特性	(125)
第四节 控制系统的结构图	(29)	第三节 频率特性的几何表示 (频率特性图)	(128)
第五节 信号流图和梅逊公式	(36)	第四节 基本环节的频率特性图	(131)
第六节 控制系统复数域数学模型的 MATLAB 描述	(40)	第五节 系统开环频率特性图的绘制	(141)
习题	(44)	第六节 奈奎斯特稳定判据	(147)
第三章 线性系统的时域分析	(47)	第七节 由开环频率特性研究闭环系统的性能	(158)
第一节 引言	(47)	第八节 基于 MATLAB 的频率响应分析	(162)
第二节 线性系统的稳定性	(47)	习题	(166)
第三节 劳斯—赫尔维茨稳定判据	(51)	第六章 控制系统的校正	(169)
第四节 系统时间响应的性能指标	(59)	第一节 控制系统的综合与校正问题	(169)
第五节 典型系统的动态性能分析	(62)	第二节 常用的校正装置及其特性	(172)
第六节 高阶系统的时域分析	(72)	第三节 基于频域响应法的系统串联校正	(178)
第七节 线性系统的稳态误差	(75)	第四节 基于根轨迹分析的系统	
第八节 基于 MATLAB 的线性系统时间响应分析	(83)		
习题	(90)		

串联校正	(185)	习题	(272)
习题	(191)	第九章 状态空间分析法	(274)
第七章 线性离散系统	(193)	第一节 状态变量及状态空间	
第一节 离散控制系统的概念	(193)	表达式	(274)
第二节 信号的采样和保持	(195)	第二节 状态空间表达式的	
第三节 差分方程与 z 变换	(200)	建立	(278)
第四节 脉冲传递函数	(211)	第三节 状态向量的非奇异线性	
第五节 离散系统的性能分析	(219)	变换	(289)
第六节 离散系统的数字校正	(227)	第四节 线性定常系统状态方程	
习题	(231)	的解	(291)
第八章 非线性控制系统	(233)	第五节 线性定常系统的能控性	
第一节 非线性控制系统概述	(233)	和能观性	(296)
第二节 相平面法	(237)	第六节 状态反馈和极点配置	(303)
第三节 描述函数法	(255)	第七节 状态观测器及其应用	(307)
第四节 基于反馈线性化的设计		习题	(312)
方法	(269)	参考文献	(314)

第一章 绪 论

第一节 自动控制的基本概念

一、控制与自动控制

狭义地讲，控制就是使被控制量（如液位、温度、流量、转速等物理量）按照一定的规律变化。图 1-1 是一个简单的液位控制的例子。控制的目的是通过调节阀门 L_1 与 L_2 的开度调节液位，使其以一定的精度稳定于一定的液位高度 h ，或者使其按一定的规律变化。要达到这样的控制目标，操作人员应取液位作为操作指标。首先要用眼睛观察液位的高低，然后通过神经网络将信号传递给大脑，通过大脑的分析、比较、运算、思考，发出控制命令，由手来调节阀门的开度，从而使液位保持在一定的高度。

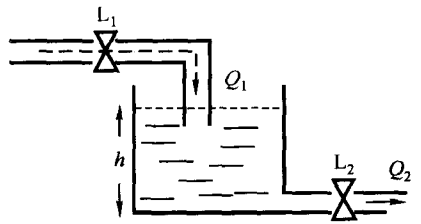


图 1-1 液位控制系统

有些复杂的控制，要求控制精度较高，或者要求动作较为迅速，仅靠人工控制是难以满足控制要求的。另外，还有许多工作场合人们不能直接参与（如原子能的生产等）。此时，就要借助自动化仪表或控制装置来代替人工操作。这种借助自动化仪表或控制装置来代替人工操作，达到一定的控制目的的控制即为自动控制。

二、自动控制系统

控制理论的研究对象是系统。从系统控制理论的角度，系统即为由相互关联和相互制约的若干“部分”所组成的具有特定功能的一个“整体”。系统存在于自然界和人类社会的一切领域。系统作为控制理论的一个最为基本的概念，具有如下的特征：

(1) 整体性

系统的整体性包含了两层基本含义。一是强调系统在结构上的整体性，即系统由“部分”所组成，各组成部分之间的相互作用是通过物质、能量和信息的交换来实现的。二是突出系统行为和功能的整体性，系统本身可以具有其组成部分所没有的功能。因此，对于有着相同组成部分但其关联和相互作用不同的两个系统可以呈现出完全不同的行为和特征。

(2) 抽象性

在现实世界中，一个系统总是具有具体的物理、自然或社会属性，如工程领域中的机电系统、制造系统、电力系统、通信系统等，自然领域中的生物系统、生态系统、环境和气候系统等，以及社会领域中的经济系统、人口系统、社会系统等。但是，对于系统控制理论的

研究对象的系统，常常是抽去了具体系统的物理、自然或社会含义，而抽象化为一个一般意义上的系统而加以研究。系统概念的这种抽象化处理，有助于揭示系统的一般特性和规律，使系统控制理论的理论和方法具有普适性。

(3) 相对性

在系统的定义中，所谓“系统”和“部分”这种称谓具有相对的属性。事实上，对于一个系统而言，其组成部分通常也是由若干个更小部分组成的一个系统，而这个系统往往又是另一个系统的一个组成部分。基于系统的这种相对关系，人们常常把系统进一步分类为小系统、系统、大系统和巨系统。这种区分反映了不同系统在组成规模和信息结构上复杂程度的不同。

为了完成各种复杂的控制任务，首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来，构成一个具有特定功能的有机整体，以实现自动控制的目的，即构成自动控制系统。

更确切地讲，控制理论的研究主体是动态系统（或称为动力学系统）。所谓动态系统是运动状态按确定规律或确定的统计规律随时间演化的一类系统。大量的工程系统、自然系统、社会系统都属于动态系统。在自动控制系统中，被控对象的输出量即被控量是要求严格加以控制的物理量，可以要求它保持为某一恒定值，如温度、压力、液位等，也可以要求它按照某个给定规律运行，如飞行航迹、记录曲线等；而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体，它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制，但其中最基本的一种是基于反馈控制原理组成的反馈控制系统。

三、开环控制与闭环控制

开环控制和闭环控制是两种基本的控制结构形式。下面通过实例说明开环控制和闭环控制的基本概念。

例 1-1 图 1-2 是一由电位器、放大器、直流电动机及负载组成的电动机转速控制系统原理结构图。系统的任务是控制电动机的转速按一定的给定值变化。试分析其工作原理。

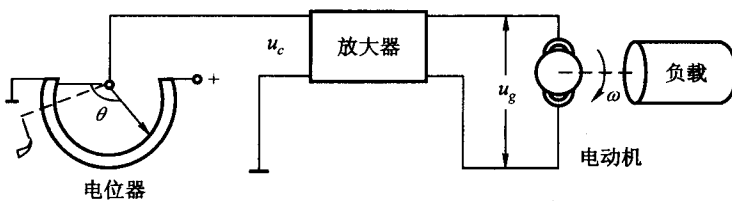


图 1-2 电动机转速控制系统原理结构图

解 由图 1-2，当改变系统电位器滑动端的位置时，就相应的改变了电位器的输出电压 u_c 以及放大器的输出电压 u_g ，电动机的转速 ω 随之变化。因此，电动机的转速 ω 可由电位器滑动端的转角 θ 来控制。

图 1-3 为上述电动机转速控制系统的信号传递方框图。图中方框表示构成系统的元件或装置，带箭头的直线表示系统中的信号和传递方向。由图 1-3 可以看出，系统中信号的传递是单方向的，即只存在输入量 θ 对输出量 ω 的控制作用，而 ω 对输入量 θ 以及输出电压 u_g 无反作用。这种信号按照单方向的方式传递，即输出量对控制作用没有影响的系统称为开

环控制系统，其控制方式称为开环控制。

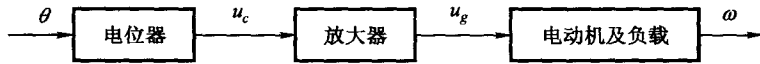


图 1-3 开环控制方框图

开环控制系统的优点是结构简单，而缺点是抗干扰能力差。如系统的负载变化、放大器的零点漂移对电动机的转速 ω 都会产生一定的影响。因此，开环控制只适用于控制精度要求不高的简单控制系统。

为了克服开环控制系统抗干扰能力差的缺点，可以采用闭环控制。直流电动机转速闭环控制系统原理结构图如图 1-4 所示。和图 1-2 比较，在图 1-4 中增加了直流测速发电机。

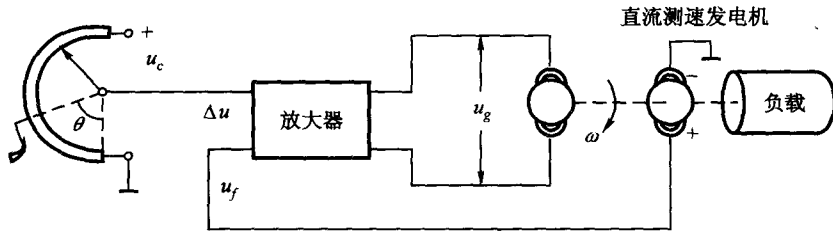


图 1-4 闭环控制原理结构图

如图 1-4 所示，当电动机在电压 u_g 作用下转动时，由于直流测速发电机的轴与电动机的轴机械相连，测速发电机电枢两端产生一个比例于转速 ω 的电压 u_f ，并把 u_f 反馈到放大器的输入端。反馈电压 u_f 与输入电压 u_c 进行比较，其差值 Δu 成为放大器的输入电压。

假设当 $\theta = \theta_0$ 时，相应的电动机轴的转速为 ω_0 。当系统具有外部（如电动机负载）或内部（如放大器的零点漂移）扰动时，电动机转速将偏离其给定值 ω_0 。如果扰动的结果使 $\omega < \omega_0$ ，则反馈电压 u_f 将减小，相应的放大器的输入电压 Δu 将增大，电动机的输入电压 u_g 也将增大，其结果会使电动机轴的转速增大。反之，如果扰动的结果使 $\omega > \omega_0$ ，则反馈电压 u_f 将增大，相应的放大器的输入电压 Δu 将减小，电动机的输入电压 u_g 也将减小，其结果会使电动机轴的转速减小。因此，反馈的结果将使电动机轴的转速 $\omega \rightarrow \omega_0$ 。图 1-5 为图 1-4 所示系统的信号传递方框图。

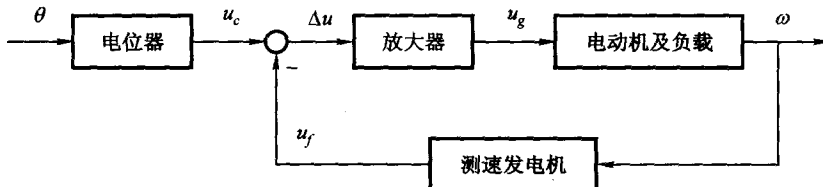


图 1-5 信号传递方框图

从图 1-5 中可以看出信号的传递不再是单一方向的。除了输入量 θ 对电动机轴的转速 ω 的控制作用外，系统的输出量 ω 经测速发电机变换为反馈电压 u_f ，并将其反馈到放大器

的输入端，使信号在系统中形成一闭合回路。我们将这种输出对系统的控制作用产生影响的系统称为闭环控制系统或反馈控制系统。

对图 1-1 所示的液位控制系统，我们可以应用一个浮子来检测液位的实际高度，并通过一个杠杆与阀门 L_1 连接（如图 1-6 所示），即可构成一闭环控制系统。当扰动使实际液位偏离给定的液位高度时，由杠杆机构自动调节阀门 L_1 的开度，使液位保持在一给定值。

在图 1-5 中，“○”为一比较点（或综合点），表示对指向该点的信号进行代数运算。在此，“-”表示为负反馈，即： $\Delta u = u_c - u_f$ 。

图 1-6 同样是一负反馈控制系统，如果改变图 1-6 中的支点位置（如图 1-7 所示），系统成为一正反馈系统。此时，当扰动使实际液位偏离给定的液位高度时，系统将向着偏差增大的趋势发展，不可能达到其控制目的。对于图 1-4 所示的直流电动机转速闭环控制系统，若将其改为正反馈，即： $\Delta u = u_c + u_f$ ，其情况也是如此。

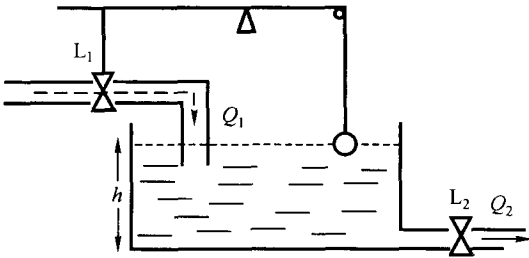


图 1-6 负反馈液位控制系统

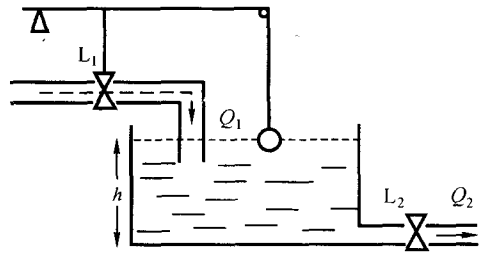


图 1-7 正反馈液位控制系统

第二节 反馈控制系统的构成

反馈控制（或称为闭环控制）是最基本的控制方式。一般，反馈控制系统是由被控对象和控制器两大部分组成，而控制器是由具有一定职能的各种基本的元部件构成的。下面以炉温控制系统为例来说明反馈控制系统的构成。

例 1-2 炉温控制系统原理图如图 1-8 所示，控制的目标是使炉温保持在恒定的温度。试分析其工作原理，并画出其信号传递方框图。

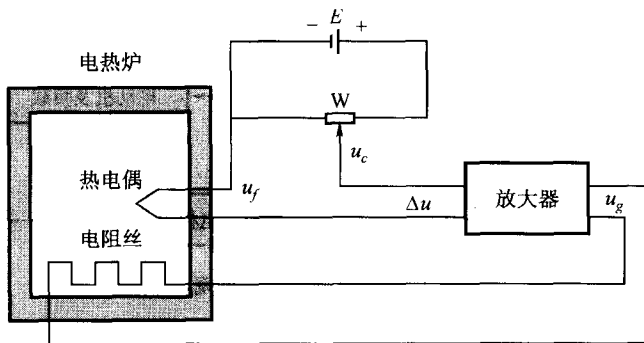


图 1-8 炉温控制系统原理图

解 根据所需的炉温给出电位器的输出电压 u_c 。热电偶测量出电热炉的实际炉温并将其转换成相应的毫伏电压 u_f ，然后将其反馈到放大器的输入端与 u_c 进行比较，产生偏差电压 Δu ($\Delta u = u_c - u_f$)， Δu 经放大器进行电压和功率放大后输出电压 u_g ，将 u_g 加到电热炉的加热电阻丝两端。在正常情况下，电阻丝产生的热量与电热炉向周围环境散发的热量相等，炉内温度保持在一定的恒定温度 T_0 。当电热炉周围环境发生变化时，炉内温度将偏离此恒定温度。假设环境温度下降，电热炉向周围环境散发的热量增加，炉温下降，即热电偶检测到的炉内的实际温度 $T < T_0$ 。此时反馈电压 u_f 减小，相应的偏差电压 Δu 增大，加到电阻丝两端的电压升高，其产生的热量增加，炉温会自动升高。相反，环境温度升高，电热炉向周围环境散发的热量减小，炉温升高，即 $T > T_0$ 。此时反馈电压 u_f 增大，偏差电压 Δu 减小，加到电阻丝两端的电压也相应减小，电阻丝产生的热量减少，炉温将自动降低。因此，电热炉将以一定的精度保持在一定的恒定温度 T_0 。炉温控制系统信号传递方框图如图 1-9 所示。

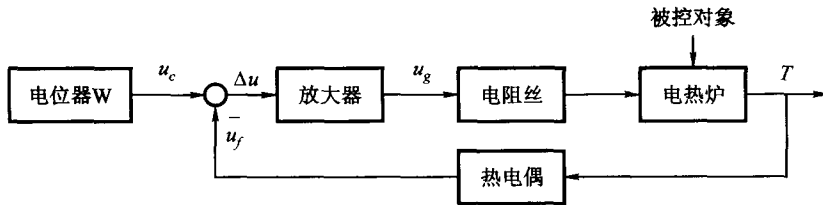


图 1-9 炉温控制系统信号传递方框图

通过以上示例和例 1-1 所示的电动机转速闭环控制系统可以看出，反馈控制的实质是应用检测元件检测到系统的实际输出值，经过物理量的转换，反馈到其输入端与系统的给定值进行比较，然后利用比较后的偏差信号对系统进行控制。其目的是抑制系统的内部或外部扰动，减小输出量的误差，提高系统的控制品质。所以，为了实现对被控对象的反馈控制，系统中必须配置相应的测量、比较和执行等元部件。在典型情况下，组成系统的元部件按职能分类主要有以下几种：

(1) 给定元件

其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量（通常称为给定值），如炉温控制系统中的电位器。一般情况下，给出的数值信号通常为电信号。不言而喻，给定元件给出的信号必须稳定、准确，其精度应当高于要求的控制精度。

(2) 测量元件

其职能是检测被控制的物理量的实际值，如果这个物理量是非电量，一般要将其转换为电量。如炉温控制系统中的热电偶，其用于测量电热炉的实际炉温并将其转换成相应的电压 u_f 。测量元件应当牢固、可靠，其特性应当准确、稳定，且不受环境条件的影响。

(3) 比较元件

其职能是把测量元件检测的被控量的实际值与给定元件给出的给定值进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。在炉温控制系统中由于给定电压 u_c 和反馈电压 u_f 都是直流电压，所以只需将它们反向串联即可形成偏差信号，故不需要专门的比较元件。

(4) 放大元件

其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大。由于比较元件给出的偏差信号通常过于微弱，不能直接用来推动执行元件去控制被控对象。所以总是要用放大元件加以放大。放大元件必须要有足够的功率，才能实现控制的功能。对于电信号来说，常用的放大元件有晶体管、集成电路、晶闸管等。放大元件通常包括电压放大级和功率放大级。

(5) 执行元件

其职能是直接驱动被控对象，使其被控量发生变化。在炉温控制系统中电阻丝即为执行元件。常用的执行元件还有阀、电动机、液压马达等。

(6) 校正元件

校正元件也叫补偿元件。它是结构或参数便于调整的元部件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统的性能。对于较为复杂的控制系统，一般控制器的控制作用不可能满足实际工程的要求，其控制质量很差。所以在实际系统中总要引入一些装置来改变控制器的动态性能，更好地发挥其控制作用。最简单的校正元件是由电阻、电容等元件组成的无源或有源网络，更复杂的情况则用电子计算机。

(7) 能源元件

其是为整个控制器提供能源（电源）的部件。

在不同系统中，结构完全不同的元部件可以具有相同的职能。另外，在实际系统中，同一个元件或部件可以兼备几种职能，如在液位控制系统中浮子和杠杆机构同时担当了检测元件、比较元件和放大元件的职能。

综上所述，一个典型的反馈控制系统基本组成可用图 1-10 所示的方框图表示（方框图中“○”为比较点，代表了比较元件）。

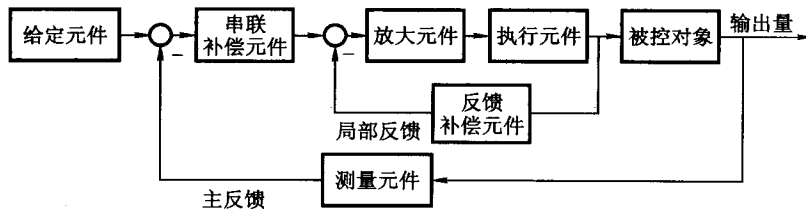


图 1-10 反馈控制系统基本组成

在图 1-10 中，信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。一般，加到反馈控制系统上的外作用有两种类型，一种是有用输入，一种是扰动。有用输入决定系统被控量的变化规律，而扰动是系统不希望有的外作用，它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中，扰动总是不可避免的，而且它可以作用于系统中的任何元部件上。一个系统也可能同时受到几种扰动作用。电源电压的波动、环境温度、压力以及负载的变化、飞行中气流的冲击、航海中的波浪等，都是现实中存在的扰动。

第三节 自动控制系统的分类

随着控制技术的发展,自动控制系统也日趋复杂和完善。为了达到不同的控制目的,出现了各种各样的控制系统,我们很难对其进行统一的确切分类。因此,自动控制系统有多种分类方法。了解控制系统的分类,就能在分析和设计系统之前对系统有一个正确的认识。为了便于本课程的学习,我们在此介绍几种典型的系统分类方法。

一、按系统输入信号的特征分类

按系统输入信号的特征,控制系统可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

1. 恒值控制系统

如果系统的输入量是一个常量,并要求系统在干扰的作用下,其被控量以一定的精度稳定于一确定的期望值,则称这类系统为恒值控制系统。恒值控制系统又称为调节系统。此类系统分析、设计的重点是研究各种扰动对被控对象的影响以及抗扰动的措施。生产过程中的温度控制系统、压力控制系统、液位控制系统等大多数都属于恒值控制系统。如前面讨论过的电动机的转速控制系统和工业炉的炉温控制系统。

2. 随动控制系统

如果控制系统的输入量是预先未知的随时间任意变化的函数,要求被控量以尽可能小的误差跟随输入量的变化,则称这类系统为随动系统。随动系统又称为跟踪系统。在随动系统中,扰动的影晌是次要的,系统分析、设计的重点是研究被控量跟随输入量的快速性和准确性。如雷达天线跟踪系统、函数记录仪等。

3. 程序控制系统

如果系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数,要求被控量迅速、准确地随输入量变化,则称这类系统为程序控制系统。如机械加工使用的数字程序控制机床便是一程序控制系统。程序控制系统和随动系统的输入量都是时间的函数,不同之处在于前者是已知的时间函数,后者则是未知的任意时间函数。

二、按系统中信号的连续性分类

按系统中信号的连续性,控制系统可分为连续控制系统和离散控制系统。

1. 连续控制系统

指组成系统的各个环节的输入信号和输出信号都是时间的连续函数。对连续控制系统,一般采用微分方程作为分析系统的数学工具。

2. 离散控制系统

如果控制系统中某处或多处的信号为脉冲序列或数字信号,因而信号在时间上是离散的,称系统为离散控制系统。离散系统的动态性能一般要用差分方程来描述。工业计算机控制系统即为离散控制系统,其结构如图 1-11 所示。

近年来,计算机技术的快速发展,为系统的信息存贮和处理提供了强有力的技术手段。

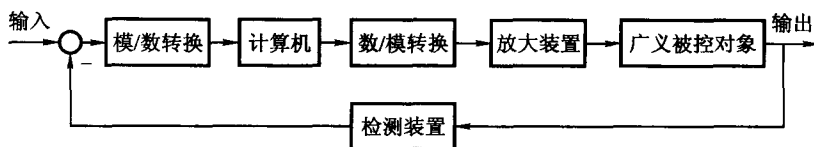


图 1-11 计算机控制系统

将计算机作为控制装置引入控制系统具有一系列的优点，如可以应用软件的方式方便地实现各种控制规律，以适应系统所提出的性能要求；可以对系统参数和变量进行检测、显示、打印和报警等多项功能，大大提高了系统的自动化程度；可以分时控制，实现一机多用，提高控制设备的利用率；利用离散信号的传递，可以有效抑制噪声，提高系统的抗干扰能力等。

三、按组成系统的元部件的线性特征分类

按组成系统元部件的线性特征，控制系统可分为线性控制系统和非线性控制系统。

1. 线性控制系统

如果构成系统的所有元部件都是线性元件，其输入输出特性都是线性的，系统称为线性系统。

对于线性连续控制系统，系统的运动规律可用线性微分方程描述，其一般形式为

$$\begin{aligned}
 & a_n \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_1 \frac{d}{dt} c(t) + a_0 c(t) \\
 & = b_m \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_{m-1} \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_1 \frac{d}{dt} r(t) + b_0 r(t)
 \end{aligned}$$

式中， $c(t)$ 是被控量； $r(t)$ 是系统输入量。当系数 $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 是常数时，称为线性连续定常系统；当系数 $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 随时间变化时，称为线性连续时变系统。

对于线性离散控制系统，系统的运动规律可用线性差分方程描述，其一般形式为

$$\begin{aligned}
 & a_n c(k+n) + a_{n-1} c(k+n-1) + \cdots + a_1 c(k+1) + a_0 c(k) \\
 & = b_m r(k+m) + b_{m-1} r(k+m-1) + \cdots + b_1 r(k+1) + b_0 r(k)
 \end{aligned}$$

式中， $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 为常系数， $r(k), c(k)$ 分别为输入和输出采样序列。

线性系统的重要特征是满足叠加性和齐次性。如果用“ \rightarrow ”表示输入量 x 和输出量 y 之间的关系，上述性质可以表示为

若
$$x_1(t) \rightarrow y_1(t), x_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则
$$k_1 x_1(t) + k_2 x_2(t) \rightarrow k_1 y_1(t) + k_2 y_2(t)$$

2. 非线性控制系统

系统中只要有一个元部件的输入—输出特性是非线性的，系统就称为非线性控制系统。非线性控制系统要用非线性微分（或差分）方程描述其特性。严格地说，实际物理系统中都

含有程度不同的非线性特性，如放大器和电磁元件的饱和特性，运动部件的死区、间隙和摩擦特性等。由于非线性方程在数学处理上较困难，目前对不同类型的非线性控制系统的研究还没有统一的方法。但对于非线性程度不太严重的元部件，可采用在一定范围内线性化的方法，从而将非线性控制系统近似为线性控制系统。

四、其他分类方式

1. 确定性系统与非确定性系统

如果系统的结构和参数是确定的，而且输入信号也是时间的确定函数，则系统的输出响应也是确定的，这种系统称为确定性系统。

当系统本身或输入信号有不确定性时，系统的时间响应必然也是不确定的，这种系统称为非确定性系统（或随机系统）。当输入信号具有不确定性时，随机信号及其响应都不能用一定的时间函数来描述，它们只具有数学统计特性。所以，对于随机系统要用概率统计理论加以研究。对于随机系统的控制，要在系统的运行过程中，提取有关被控对象的输入/输出信息，一边辨识对象的模型参数，一边自动修正控制器的参数，以维持系统的最优运行状态。这就是现代控制工程中的自校正和自适应控制系统。

2. 定常系统与时变系统

如果控制系统的结构和参数在系统运行过程中不随时间变化，则称之为定常系统（或时不变系统），否则，称为时变系统。对于时变系统，它的分析和研究会比较复杂。

3. 集总参数系统和分布参数系统

在系统的分析和设计中，一般可不考虑系统元部件的参数的空间分布，把系统作为一个由有限个分离的元部件所构成的整体，这类系统称为集总参数系统。如系统中的电阻、电容、电感、阻尼器、弹簧等，其参数一般可以不考虑其空间分布。当系统中的波动或参数分布必须考虑时，系统只能看做是由无穷多个无穷小的分离部件所构成的总体，则称系统为分布参数系统。集总参数系统要用常微分方程描述，分布参数系统要用偏微分方程描述。

此外，控制系统还有多种分类方法，如按控制方式可分为开环控制系统、闭环（反馈）控制系统和复合控制系统；按输入/输出信号的数目可分为单入/单出（SISO）系统和多人/多出（MIMO）系统；按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等。

第四节 经典控制理论的研究内容

一般，控制理论所讨论的基本内容可以划分为两个方面：一是控制系统分析，二是系统综合与设计。

控制系统分析是在给定系统的条件下，将物理系统抽象为数学模型，然后在系统数学模型的基础上，定性和定量地对系统进行动、静态性能分析。

系统综合是在已知被控对象和工程所要求的性能指标的前提下，寻求一定的控制规律，建立一个能使被控对象满足性能要求的控制系统。

对自动控制系统的基本要求可以概括为三点，即稳、准、快。这些标准通常可以用系统

的性能指标来评价。对于线性定常系统，经典控制理论所使用的性能指标包括三方面内容：稳定性、动态品质和稳态精度。

稳定性是保证控制系统正常工作的前提条件。如果系统受到扰动的作用，被控量将偏离其期望值，对于一个稳定的控制系统，其被控量偏离的偏差应随时间的增长逐渐减小并趋于零。反之，对于不稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的偏差将随时间的增长而发散。因此，不稳定的控制系统无法实现预定的控制任务。

动态品质和稳态精度是对控制系统动、静态性能优劣的评价。动态品质指的是系统输出响应的快速性和超调量，而稳态精度则常用系统输出响应的稳态误差的大小来衡量。

在设计控制系统时，必须同时满足稳定性、动态品质和稳态精度三方面的要求，但这三者之间通常是相互矛盾的。如稳态精度的提高容易导致系统动态品质的恶化，甚至使系统不稳定。为了解决这类问题，就必须合理地设计控制器，对系统进行校正，这正是控制系统设计的核心问题。

综上所述，经典控制理论的研究内容可用图 1-12 表示。

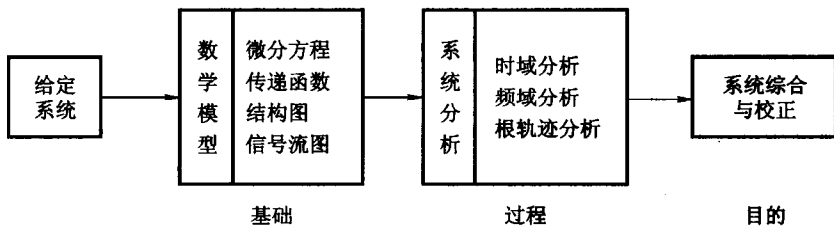


图 1-12 经典控制理论的研究内容

习 题

1-1 热水电加热系统如图 1 所示。为了保持希望的温度，由温控开关接通或断开电加热器电源。在使用热水时，水箱中流出热水并补充冷水。试说明系统工作原理并画出系统原理方框图。

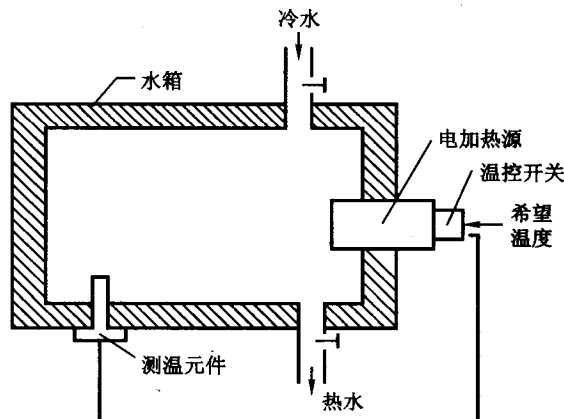


图 1