



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ZIDONG KONGZHI LILUN

自动控制理论

向贤兵 主 编
谢碧蓉 蒲晓湘 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

General Education



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ZIDONG KONGZHI LILUN

自动控制理论

主 编	向贤兵	
副主编	谢碧蓉	蒲晓湘
编 写	曾 蓉	唐顺志
主 审	张丽香	张广辉



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

全书共分六章，包括自动控制概论、控制系统的数学模型、线性系统的分析方法、线性系统的性能分析、线性系统的性能改善方法（控制系统的校正）、采样控制系统分析等内容。每章后分别介绍了 MATLAB 在自动控制理论中的一些应用，以及如何利用计算机辅助设计方法解决自动控制领域的一些系统分析和设计问题。同时，各章均提供了一定数量的习题，以帮助读者理解基本概念并掌握分析和设计方法。

本书可作为高职高专院校与成人高校自动化类、电力技术类、机电类等各专业的教材，也可供相关专业的师生和从事自动化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制理论/向贤兵主编. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材：高职高专教育

ISBN 978-7-5083-5863-5

I. 自... II. 向... III. 自动控制理论-高等学校：技术学校-教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 118335 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 285 千字

印数 0001—3000 册 定价 18.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

随着科学技术的发展,自动控制技术已经广泛应用于工业、农业及国防,近年来在经济、生态、社会科学领域也多有应用;同时,在人类征服大自然,改善居住、生活条件等方面也发挥了非常重要的作用。自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学,是自动化学科的重要理论基础,专门用于研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法。

本书是依据高职高专对自动控制理论课程的要求,结合高职高专教育培养目标编写而成的。在编写过程中,充分考虑到高职高专教学课时少,而自动控制理论内容丰富的特点,以及目前高职高专学生的知识水平和能力结构的现状,力求做到理论知识“少而精,够用为度”,注重培养学生解决实际问题的能力。

本书具有以下几个特点:

(1) 体系结构新颖。突破了传统自动控制理论的结构体系,将系统分析方法和系统的性能分析分开,以系统的性能分析为目的,突出了分析方法的综合运用。

(2) 减少了深奥、难以理解的理论推导过程,充分考虑了高职高专教育重适用、重实践的特点。如在控制系统性能改善(校正)部分,以工业生产中广泛应用的PID控制代替超前-滞后校正装置进行分析,既注重了教学内容的针对性与实用性,又降低了学习难度。

(3) 引进基于MATLAB的控制系统计算机辅助分析与设计技术,可以更好地帮助学生理解和掌握自动控制理论,培养学生现代化的分析与设计能力。

(4) 为了方便学生熟悉专业词汇、阅读相关英文文献,本教材后附有常用控制理论术语中英文对照表。

参加本书编写的人员有唐顺志(第一章)、曾蓉(第二章)、谢碧蓉(第三章)、蒲晓湘(第四章)、向贤兵(第五、六章,附录及各章有关MATLAB的内容)。本书由重庆电力高等专科学校向贤兵担任主编并统稿,谢碧蓉、蒲晓湘担任副主编。本书配有电子课件辅助教学,详情请登录<http://jc.cepp.com.cn>。

太原电力高等专科学校张丽香教授与重庆发电厂张广辉副教授仔细审阅了全稿,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在不足和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2007年6月

目 录

前言

第一章 自动控制概论	1
第一节 控制理论的发展	1
第二节 自动控制的基本概念	2
第三节 基本控制方式	5
第四节 自动控制系统的分类	7
第五节 自动控制系统的基本要求	9
第六节 CACSD 及 MATLAB 语言简介	11
本章小结	20
思考题	21
习题	21
第二章 控制系统的数学模型	23
第一节 控制系统的微分方程	23
第二节 传递函数	27
第三节 控制系统的动态结构图	34
第四节 闭环控制系统的传递函数	40
第五节 MATLAB 中的数学模型及其等效变换	42
本章小结	46
思考题	46
习题	46
第三章 线性系统的分析方法	49
第一节 线性系统的时域分析法	49
第二节 线性系统的根轨迹分析法	59
第三节 线性系统的频域分析法	67
第四节 基于 MATLAB 的线性系统分析法	83
本章小结	90
思考题	91
习题	92
第四章 线性系统的性能分析	95
第一节 线性系统的稳定性分析	95
第二节 线性系统的稳态性能分析	107
第三节 线性系统的动态性能分析	113
第四节 基于 MATLAB 的线性系统性能分析	120
本章小结	129
思考题	130
习题	131

第五章 线性系统的性能改善方法	133
第一节 概述	133
第二节 提高系统准确性的校正方法	135
第三节 改善系统动态性能的校正方法	136
第四节 MATLAB在改善系统性能方面的应用	145
本章小结	149
思考题	150
习题	150
第六章 采样控制系统分析	152
第一节 信号的采样与复现	152
第二节 z 变换	155
第三节 脉冲传递函数	159
第四节 采样控制系统分析	164
第五节 基于 MATLAB 的采样控制系统分析	168
本章小结	170
思考题	171
习题	171
附录 A 拉普拉斯变换基础知识	173
附录 B 常用控制理论术语中英文对照表	179
附录 C 常用 MATLAB 指令与函数	181
参考文献	182

第一章 自动控制概论

内 容 提 要

自动控制理论 (Automatic Control Theory) 是自动化学科的重要理论基础, 专门研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法。本章介绍开环控制和闭环控制、控制系统的基本原理和组成、控制系统的类型, 以及对控制系统的基本要求。同时, 对控制系统计算机辅助设计及 MATLAB 语言进行了简单的介绍。

第一节 控制理论的发展

20 世纪中叶以来, 由于工业的发展和军事技术上的需要, 自动控制技术得到了迅速的发展和广泛的应用。如今, 自动控制技术不仅广泛应用于工业控制中, 在军事、农业、航空、航天、航海、核能利用等领域也发挥着重要的作用。导弹能够正确地命中目标, 人造卫星能按预定的轨道运行并返回地面, 宇宙飞船能准确地月球着陆并重返地球, 都是由于自动控制技术高速发展的结果。在工业生产过程中, 诸如对压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料成分比例等方面的控制, 也都是自动控制技术的重要组成部分。

所谓自动控制 (Automatic Control), 就是在没有人直接参与的情况下, 通过控制装置使被控制对象或生产过程自动地按照预定的规律运行, 使之达到预期的状态或性能要求。自动控制理论则是研究自动控制规律的技术科学。自动控制理论的发展大致可以分为如下三个阶段。

一、经典控制理论的发展

一般认为, 自动控制技术萌芽于 1765 年俄国人波尔佐诺夫发明蒸汽锅炉水位控制器和 1784 年英国人瓦特 (Watt) 发明蒸汽机离心飞锤式调速器。从那时起, 100 多年来, 随着社会生产力的发展和需要, 自动控制技术和理论也得到不断的发展和提高。奈奎斯特 (Nyquist) 于 1932 年提出稳定性的频率判据, 伯德 (Bode) 于 1940 年在频率法中引入对数坐标系并于 1945 年写了《网络分析和反馈放大器设计》一书, 哈里斯 (Harris) 于 1942 年引入传递函数概念, 伊万思 (Evans) 于 1948 年提出根轨迹法, 维纳 (Wiener) 于 1949 年出版了《控制——关于在动物和机器中控制和通信的科学》一书, 他们的研究工作和著作, 以及前人的工作, 至此才奠定了经典控制理论 (Classical Control Theory) 的基础, 到 20 世纪 50 年代趋于成熟。经典控制理论的特点是以传递函数为数学工具, 采用频率域方法, 研究单输入—单输出线性定常控制系统的分析和设计。但经典控制理论存在一定的局限性, 即对复杂多变量系统、时变和非线性系统显得无能为力。

二、现代控制理论的发展

20 世纪 50 年代末 60 年代初, 由于空间技术发展的需要, 对自动控制的精密性和经济指标提出了极其严格的要求; 同时, 数字计算机, 特别是微型机的迅速发展, 为控制理论的发展提供了有力的工具。在它们的推动下, 控制理论有了重大的发展, 如庞特里亚金

(Pontryagin) 的极大值原理, 贝尔曼 (Bellman) 的动态规划理论, 卡尔曼 (Kalman) 的能控性能观测性和最优滤波理论 (卡尔曼滤波) 等, 这些都标志着控制理论已从经典控制理论发展到现代控制理论阶段。现代控制理论 (Modern Control Theory) 的特点是采用状态空间法 (时域方法), 研究多输入—多输出控制系统、时变和非线性控制系统的分析与设计。

三、智能控制理论的发展

20 世纪 70 年代以来, 随着技术革命和大规模复杂系统的发展, 促使控制理论开始向三个发展阶段, 即第三代控制理论——大系统理论和智能控制理论发展。智能控制理论 (Intelligent Control Theory) 的研究是以人工智能的研究为方向, 引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。当前的研究方向有自适应控制、模糊控制、人工神经网络以及混沌理论等, 并且有许多研究成果产生。智能控制理论的研究和发展, 启发与促进了人们的思维方式, 也标志着信息与控制学科的发展远没有止境。

值得指出的是, 现代控制理论、大系统理论和智能控制理论, 虽然解决了经典控制理论不能解决的理论和工程问题, 但这并不意味着经典控制理论已经过时, 相反, 在自动控制技术的发展中, 由于经典控制理论便于工程应用, 今后还将继续发挥其理论指导的作用, 同时它也是进一步学习现代控制理论和其他高等控制理论的基础。

本书主要讲解经典控制理论的基本内容。

第二节 自动控制的基本概念

一、人工控制与自动控制

在现代工业生产过程中, 有很多物理量 (如流量、温度、压力、液位等) 要求保持恒定或按一定的规律变化。但是, 这些工业设备在运行中负荷经常变化, 还存在着各种干扰, 使这些物理量偏离给定值或给定的运动规律。为此, 需要调整相应的另一些物理量以适应负荷的变化以及抵消干扰的影响。例如, 工业锅炉, 要求保持蒸汽压力恒定, 但是, 锅炉在运行过程中的用汽量 (即负荷) 经常变化, 而且还存在着各种随机干扰, 使蒸汽压力偏离恒定值。在这种情况下, 就要不断地改变给煤量 (同时也相应地改变进风量), 才能使蒸汽压力恒定。

起初由人对这些物理量进行控制, 即人工控制。在长期的生产实践中, 人们总结出控制规律及人在控制中的作用, 逐渐用一些装置代替人的职能, 这就实现了自动控制。下面以汽包水位控制系统为例, 弄清汽包水位的人工控制、自动控制及两者之间的关系, 进而阐明自动控制系统的工作原理。

(一) 人工控制

如图 1-1 (a) 所示是锅炉汽包水位人工控制的示意图。图中 W 、 D 分别为给水流量和蒸汽流量 (负荷), 水位 h 是反映汽包流入量与流出量是否平衡的标志, 控制的任务就是以一定的精度来保持汽包中水位为某一期望 (给定) 的数值。

在人工控制中, 人是通过眼、脑、手这 3 个器官来进行水位控制的。

- (1) 操作人员通过眼睛观察汽包水位的变化。
- (2) 利用大脑分析观察的结果, 将观察到的实际水位 h 与其给定值 h_0 进行比较, 判断是否存在偏差, 以及偏差的大小和方向 (水位比给定值高还是低), 并决定是否需要给

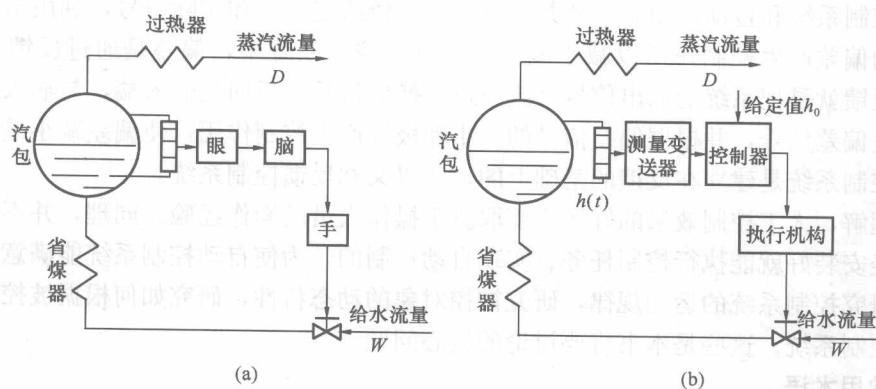


图 1-1 锅炉汽包水位控制示意图

(a) 人工控制；(b) 自动控制

控制阀进行操作，开大还是关小以及按什么规律进行操作（是缓开，还是猛开，还是先过调再回调等）。

(3) 手则根据大脑的指挥命令去操作给水控制阀，使流入量与流出量相适应，维持汽包水位在正常范围内。

可见，人工控制就是不断地观察被控制物理量的实际值，并和给定值相比较，求出实际值和给定值的偏差，根据偏差的极性和大小改变另一物理量，使被控制物理量的实际值等于或接近给定值。

在如图 1-1 (a) 所示的人工控制中，从扰动发生，到被控量重新恢复到给定值，其间要经过一段过渡过程，即要经过一段时间。这个过渡过程时间的长短及被控量偏差的大小，决定于操作人员的运行经验。这些经验包括对被控对象特性的了解，以及根据被控对象特性确定的控制规律。倘若运行人员还不了解被控对象的特性，要想正确进行控制是不可能的。

(二) 自动控制

随着生产的发展，人工控制已远远不能满足生产的要求。如果用一整套自动控制装置来代替人工控制中操作人员的作用，使生产过程不需要操作人员的直接参与而能自动地执行控制任务，就实现了自动控制。图 1-1 (b) 所示为锅炉汽包水位自动控制的示意图。

实现自动控制作用所需要的自动控制装置主要包括 3 个部分。

(1) 测量部件（变送器）：用来测量被控量的大小，并将被控量转变成某种便于传送且与被控量大小成正比（或某种函数关系）的信号。这时，测量部件代替了人眼。

(2) 运算部件（控制器）：控制器接收测量部件输出的与被控量大小成比例的信号，把它与被控量的给定值进行比较，当被控量与给定值之间存在偏差时，根据偏差的大小和方向，按预定的运算规律进行运算，并根据运算结果发出控制指令。在这里，控制器代替了人脑。

(3) 执行机构（执行器）：根据控制器送来的控制指令，驱动控制机构，改变控制量。执行器起到了人手的作用。

可以看出，人工控制系统和自动控制系统非常相似，只要用一些装置模仿和代替人的功能，就可以将一个人工控制系统变成自动控制系统。

人工控制系统和自动控制系统的共同点是：比较给定信号和实际信号，利用给定信号和实际信号的偏差产生控制作用以减小偏差。在自动控制系统中，偏差是通过反馈建立起来的。所谓反馈就是把系统的输出信号（或经过变换的信号）返回到输入端，与输入信号进行比较，产生偏差信号，并根据偏差信号的大小和极性产生控制作用，使偏差减小或消除。可见，自动控制系统是建立在反馈的基础上的，所以又称反馈控制系统。

不难理解，人工控制效果的好坏主要取决于操作人员的操作经验。同理，并不是自动控制设备一经安装好就能执行控制任务、实现自动控制的。为使自动控制系统能满意地进行工作，必须研究控制系统的运动规律，研究被控对象的动态特性，研究如何根据被控对象特性组成自动控制系统。这些是本书将要讨论的核心问题。

二、常用术语

在自动控制领域，经常使用一些专业术语，下面介绍几个常用术语。

(1) 被控对象 (Controlled Object)：被控制的生产设备或生产过程。如水箱、汽包、电加热炉等。

(2) 被控量 (Controlled Variable)：表征生产过程是否正常而需要控制的物理量。如汽轮机的转速、给水压力、汽包水位等。

(3) 给定值 (Set Point 或 Set Value)：根据生产工艺要求，被控量应该达到的数值。例如汽包水位的希望值为 h_0 ， h_0 即汽包水位 h 的给定值。

(4) 扰动 (Disturbance)：引起被控量偏离其给定值的各种原因。如给水流量的变化会引起汽包水位的变化，给水流量的变化称为扰动。

(5) 控制机构 (Control Mechanism)：改变对象流入量或流出量的机构，如图 1-1 所示的给水控制阀。

(6) 控制作用 (Control Action)：控制机构在执行器带动下施加给被控对象的作用。

(7) 控制量 (Control Variable)：由控制作用来改变，以控制被控量的变化，使被控量恢复为给定值的物理量。如图 1-1 所示，汽包水位的控制是通过改变给水流量来实现的，给水流量就是汽包水位控制系统中的控制量。

(8) 系统 (System)：一般来说，系统是指由若干个互相关联的单元（环节）组成的并用来达到某种特定目标的有机整体。就这个意义而言，系统当然可指电力系统、通信系统、机械系统等物理系统，政治组织、经济结构和生产管理等非物理系统，计算机网、交通运输网、交响乐团等人机系统以及自然界中的生物系统。而且随着科学技术的不断发展，系统的规模越来越大，内部结构也日益复杂。

三、自动控制系统的组成

(一) 自动控制系统的组成

由前面可知，汽包水位自动控制系统由被控对象和自动控制装置两个基本部分组成，也就是说，自动控制系统包括起控制作用的自动控制装置（如变送器、控制器、执行器等）和在自动控制装置控制下运行的生产设备（即被控对象）。在控制过程中，这两部分是相互作用的。当被控量受到扰动而变化后，其值与给定值之差作用于控制器，使控制器动作。控制器的动作通过执行器去改变给水控制阀的开度，使给水量变化，给水量的变化又反过来作用于被控对象，从而使被控量逐步趋近其给定值。

自动控制系统中的各装置是通过信号的传递和转换相互联系起来的。

(二) 自动控制系统的方框图

锅炉汽包水位自动控制系统中的信号传递关系可用如图 1-2 所示的示意图直观地表示出来,像这种能直观地表达自动控制系统中各设备之间相互作用与信号传递关系的示意图称为自动控制系统的方框图。方框图(Block Diagram)是研究自动控制系统的重要工具。



图 1-2 自动控制系统组成框图

方框图中的每一个方框都是一个环节。环节表示系统中的一个元件或一个设备,或者几个设备的组合体。也就是说,自动控制系统所包含的各种部件和设备都是系统中的环节,如阀门、变送器等。

方框图中,环节的输入信号是引起环节输出信号变化的原因,而环节的输出信号的变化则是输入信号变化的结果,两者是因果关系。如汽包水位变化的原因可以是给水流量或蒸汽流量的变化,故给水流量和蒸汽流量都是汽包这一环节的输入信号。水位是这个环节的输出信号。

方框图中,每个方框表示一个动态环节,其输入信号与输出信号之间的因果关系是不可逆的。如上例中,汽包的给水流量 W 或蒸汽流量 D 的变化都能引起水位变化,但水位的变化不能反过来影响汽包的给水流量 W 或蒸汽流量 D ,即信号只能沿箭头方向传递,具有单向性。

方框图中,信号线只是环节之间信号的传递关系,不代表实际物料的流动。例如蒸汽流量 D 是“汽包”环节的输入信号,这是从蒸汽流量 D 的变化会直接引起水位发生变化这一因果关系的意义来说的,故方框图与实际的生产流程图是有本质区别的。

自动控制系统的方框图一般是一个闭合回路。图 1-2 所示的实际水位 h 通过测量变送器、控制器和执行器等环节,反过来影响水位本身。所以,这个系统中的信号是在闭合回路中传递的,这种系统称为闭环系统或称为反馈系统。

画方框图时,应按照在系统中工作的顺序,将每个功能部件(环节)用一个方框表示,传递信号的输入量和输出量用带箭头的线段表示,如图 1-2 所示。习惯上把表示被控对象的方框放在最右边,其输出量即是被控量,而把给定值信号和比较环节放在最左边。中间部分的环节方框依工作顺序连接。

第三节 基本控制方式

自动控制的基本方式包括开环控制(Open Loop Control)、闭环控制(Close Loop Control)和复合控制(Compound Control)。

一、开环控制

开环控制是指系统的输出量对控制作用没有影响的系统,如图 1-3 所示。也就是说,在

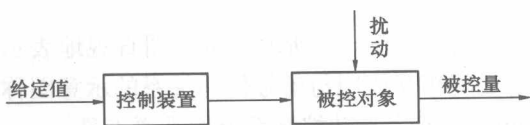


图 1-3 开环控制系统方框图

开环控制系统中，既不需要对输出量进行测量，也不需要输出量反馈到系统的输入端与输入量进行比较。或者说，控制装置与被控对象之间只有顺向作用，而没有逆向联系。例如，洗衣机就是开环控制系统的一个实例，在洗衣机中，浸湿、洗涤

和漂洗过程都是按照一种时间顺序进行的，洗衣机不必对输出信号，即衣服的清洁程度进行测量。

开环控制的特点是：系统结构和控制过程均很简单，但抗干扰能力差，一般仅用于控制精度不高且对控制性能要求较低的场合；由于开环控制系统均无须将输出量与参考输入量进行比较，因此对应于每个参考输入量，一般只有一个固定的工作状态与之对应。这样，系统的精确度便取决于标定的精确度，当出现扰动时，开环系统就不能完成既定任务了。

在实践中，只有当输入量与输出量之间的关系已知，并且既不存在内部扰动，也不存在外部扰动时，才能采用开环控制系统。因此，开环控制的使用有一定的局限性。

二、闭环控制

闭环控制（亦称为反馈控制，Feedback Control）如图 1-4 所示，是指能对输出量与输入量进行比较，并且将它们的偏差作为控制手段，以保持两者之间预定关系的系统。在闭环控制系统中，控制装置与被控对象之间不仅有顺向作用，而且还有逆向联系。作为输入信号与反馈信号之差的误差信号被传送到控制装置，以便减小误差，并且使系统的输出达到期望值。

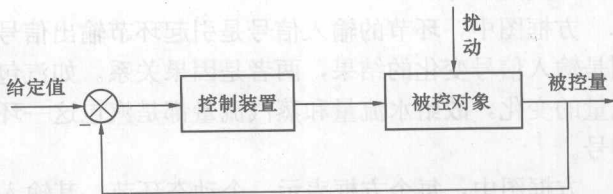


图 1-4 闭环控制系统方框图

通常，把输出量送回到输入端并与输入信号比较的过程称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减而使偏差值越来越小，则称为负反馈；反之，则称为正反馈。

闭环控制系统的特点是：由于采用了反馈，因而可使系统的响应对外部干扰和系统内部的参数变化不敏感，系统可达到较高的控制精度和较强的抗干扰能力。这样，对于给定的被控对象，就有可能采用不太精密且成本较低的元件来构成比较精确的控制系统，这在开环情况下，是不可能做到的。

闭环控制系统的特点是：由于采用了反馈，因而可使系统的响应对外部干扰和系统内部的参数变化不敏感，系统可达到较高的控制精度和较强的抗干扰能力。这样，对于给定的被控对象，就有可能采用不太精密且成本较低的元件来构成比较精确的控制系统，这在开环情况下，是不可能做到的。

但正由于存在反馈，闭环控制也有其不足之处，这就是被控量可能出现振荡，严重时会使系统无法工作。这是由于被控量出现偏离之后，经过反馈便形成一个修正偏离的控制作用。但在这个控制作用和它所产生的修正偏离的效果之间，一般是有一定时间延迟的，因此被控量的偏离不能立即得到修正，从而有可能使被控量处于振荡状态。如果系统参数选择不当，不仅不能修正偏离，反而会使偏离越来越大，系统无法工作。自动控制系统设计的重要课题之一，就是要解决闭环控制中的这个“振荡”或“发散”问题。

如果要求实现复杂且精度较高的控制任务，可将开环控制和闭环控制方式适当地结合起来，组成一个比较经济且性能较好的控制系统——复合控制系统。

三、复合控制

复合控制就是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。实质上，它是在闭环控制回

路的基础上, 附加一个输入信号或扰动作用的前馈通道, 来提高系统的控制精度。前馈通道通常由对输入信号的补偿装置或对扰动作用的补偿装置组成, 分别称为按输入信号补偿和按扰动作用补偿的复合控制系统, 如图 1-5 所示。

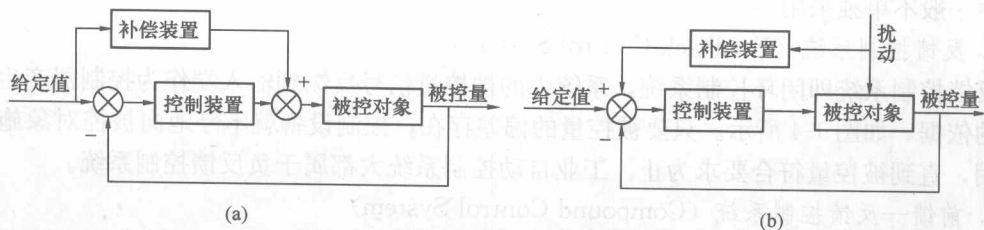


图 1-5 复合控制系统方框图

(a) 按输入作用补偿; (b) 按扰动作用补偿

复合控制中的前馈通道相当于开环控制, 因此, 对补偿装置的参数稳定性要求较高; 否则, 会由于补偿装置参数本身的漂移而减弱其补偿效果。此外, 前馈通道的引入, 对闭环回路性能的影响不大, 但却可以大大提高系统的控制精度, 因此获得了广泛的应用。

第四节 自动控制系统的分类

由于生产过程不同, 生产设备不同, 被控对象具有不同的性质。因此, 自动控制系统的类型也是多种多样的, 可以从不同的角度进行分类, 每种分类都反映了自动控制系统的某些特点。

一、按给定值的变化规律分类

1. 定值控制系统 (Fixed Set Point Control System)

被控量的给定值在系统工作过程中保持不变, 使被控量保持不变的系统称为定值控制系统。如汽包水位控制系统就属于定值控制系统。

2. 程序控制系统 (Programmed Control System)

被控量的给定值是时间的已知函数, 这类控制系统称为程序控制系统。如耐火材料生产中的炉温程序升温、机械加工中的程序控制机床等均属此类控制。

3. 随动控制系统 (Servo Control System)

被控量的给定值是时间的未知函数, 这类系统称为随动控制系统 (或称为伺服系统)。如跟踪卫星的雷达天线控制系统、工业自动化仪表中的显示记录仪等均属此类控制。

4. 比值控制系统 (Ratio Control System)

这种控制系统是维持两个变量之间的比值保持一定数值。例如锅炉燃烧过程中, 要求空气量随燃料量的变化而成比例变化, 这样才能保证经济燃烧。因此, 对于锅炉燃烧经济性的控制, 要求采用比值控制系统。

二、按控制信号的馈送方式分类

1. 前馈控制系统 (Feedforward Control System)

前馈控制系统的控制设备和控制对象之间在信号传递上没有形成闭合回路, 它是直接根据扰动进行控制的, 也称为开环控制系统, 如图 1-3 所示。在扰动作用于被控对象, 使输出

量发生变化的同时,扰动也被直接送入控制器,控制器根据扰动的大小发出一个控制指令去克服扰动对输出量的影响。如果控制作用大小整定合适,就有可能抵消扰动的影响,使输出保持不变。但是,由于没有输出量的反馈,故它无法克服其他扰动的影响。这种控制在生产过程中一般不单独采用。

2. 反馈控制系统 (Feedback Control System)

反馈控制系统即闭环控制系统,系统中的被控量信号反馈到输入端作为控制器产生控制作用的依据,如图 1-4 所示。只要被控量的偏差存在,控制设备就不停地向被控对象施加控制作用,直到被控量符合要求为止。工业自动控制系统大都属于负反馈控制系统。

3. 前馈—反馈控制系统 (Compound Control System)

在反馈控制的基础上,加入对主要扰动的前馈控制,构成前馈—反馈控制系统,或称为复合控制系统,如图 1-5 所示。前馈—反馈控制系统综合了前馈控制和反馈控制各自的优点。当外界扰动作用于控制系统时,在输出量还没有反应之前,先按开环原理进行粗调,尽量使控制作用在一开始就抵消扰动对被控对象的大部分影响,使被控量不发生变化或者变化很小。如果控制作用不是恰到好处,被控量有了一些偏差,则可以通过反馈回路进行细调。因此,这类系统对于特定的扰动作用来说,能获得比一般反馈控制系统更好的控制效果。

三、按系统的特性分类

1. 线性控制系统 (Linear Control System)

系统中各组成部分或元件特性可以用线性微分方程来描述,称这种系统为线性系统。线性

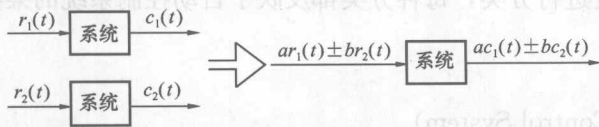


图 1-6 线性控制系统的叠加原理

性控制系统的特点是满足叠加原理。即系统存在几个输入时,系统的输出等于各个输入分别作用于系统的输出之和;当系统输入增加或缩小时,系统的输出也按同样比例增加或缩小,

如图 1-6 所示。

2. 非线性控制系统 (Nonlinear Control System)

当系统中存在非线性元件或具有非线性特性,就要用非线性微分方程来描述,这类系统就称为非线性系统。非线性系统不满足叠加原理。

四、按控制系统信号的形式来分类

1. 连续控制系统 (Continuous Control System)

当系统中各部分的信号均是时间变量 t 的连续函数时,此类系统称为连续控制系统。连续系统的运动状态或特性一般用微分方程来描述。模拟式工业自动化仪表和用模拟式仪表来实现自动化的过程控制系统均属此类系统。

2. 离散控制系统 (Discrete Control System)

当系统中某处或多处的信号为在时间上离散的脉冲序列或数码形式时,这种系统称为离散控制系统或离散时间控制系统。离散系统和连续系统的区别仅在于信号只在特定的离散瞬时是时间的函数。离散时间信号可由连续信号通过采样开关获得,具有采样的控制系统又称为采样控制系统。用数字计算机实现生产过程的直接数字控制 (DDC) 系统就是一个典型的采样控制系统,如图 1-7 所示。

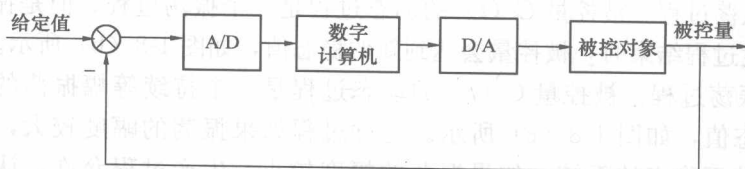


图 1-7 数字计算机采样控制系统

离散系统的运动状态或特性一般用差分方程来描述，其分析和研究方法也不同于连续系统。

自动控制系统的分类还可列举很多，这里不一一赘述。本书主要讨论闭环随动控制系统和闭环定值控制系统的分析、综合校正方法，且重点放在线性定常连续系统上。对于线性离散控制系统，也用一定篇幅进行分析和讨论。

第五节 自动控制系统的的基本要求

一、控制系统的过渡过程

当自动控制系统受到某一扰动后，被控量将偏离原来的稳态值而产生偏差，系统的控制作用又使其趋近于原来的稳态值，这一过程称为控制系统的过渡过程（Transient Process）。对于定值控制系统，受到扰动后，被控量的变化总是先偏离给定值，经历一个变化过程后，又趋近于给定值；以后，只要系统不受到新的扰动，系统中的参数就不再发生变化。因此，控制系统存在两种状态，即被控量处于平衡状态时的静态过程（又称为稳态）和被控量处于变化时的动态过程（又称为暂态、瞬态）。

显然，在不同形式和幅度的扰动作用下，自动控制系统的过渡过程是不一样的。人们可以通过对过渡过程曲线的研究来评价控制系统的控制性能。自动控制系统在阶跃信号作用下，其过渡过程可能具有如图 1-8 所示的几种不同形式。

(1) 单调过程。被控量 $y(t)$ 单调变化（即没有“正”、“负”的变化），缓慢地到达新的平衡状态（新的稳态值），如图 1-8 (a) 所示。一般这种动态过程具有较长的时间。

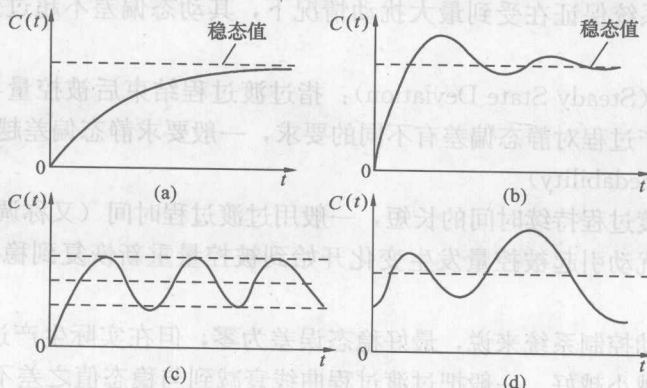


图 1-8 自动控制系统的过渡过程曲线

(a) 单调过程；(b) 衰减振荡过程；(c) 等幅振荡过程；(d) 发散振荡过程

(2) 衰减振荡过程。被控量 $C(t)$ 的动态过程是一个振荡过程。但是振荡的幅度不断地衰减, 到过渡过程结束时, 被控量会达到新的稳态值, 如图 1-8 (b) 所示。

(3) 等幅振荡过程。被控量 $C(t)$ 的动态过程是一个持续等幅振荡的过程, 始终不能达到新的稳态值, 如图 1-8 (c) 所示。这种过程如果振荡的幅度较大, 生产过程不允许, 认为是一种不稳定的系统; 如果振荡的幅度较小, 生产过程允许, 认为是稳定的系统。

(4) 发散振荡过程。被控量 $C(t)$ 的动态过程不但是一个振荡的过程, 而且振荡的幅度越来越大, 以致会大大超过被控量允许的误差范围, 如图 1-8 (d) 所示, 这是一种典型的不稳定过程, 设计自动控制系统要绝对避免产生这种情况。

一般来说, 自动控制系统如果设计合理, 其动态过程多属于如图 1-8 (b) 所示的情况。为了满足生产过程的要求, 我们希望控制系统的动态过程不仅是稳定的, 并且希望过渡过程时间 (又称调节时间) 越短越好, 振荡幅度越小越好, 衰减得越快越好。

二、自动控制系统的基本要求

从生产过程的要求来看, 不仅希望过渡过程是稳定的, 而且希望自动控制系统能随时保持被控量与给定值相等, 不受任何扰动的影响。但实际上扰动经常发生, 被控量总会发生变化而产生偏差。从生产的要求和控制系统的实际出发, 一般从稳定性、准确性和快速性 3 个方面来衡量控制系统的控制品质。

1. 稳定性 (Stability)

过渡过程的稳定性是对控制系统的最基本要求, 稳定性满足要求是控制系统能被采用的必要条件, 只有稳定的控制系统才能完成自动控制的工作。在实际生产过程中, 不仅要求系统是稳定的, 而且要求系统具有一定的稳定性裕度, 以保证系统在被控对象参数或控制设备参数发生变化时还能稳定地工作。

2. 准确性 (Accuracy)

在工业生产中, 不仅要求控制系统的过渡过程稳定, 还要求被控量能稳定在给定值附近, 尽可能使之等于给定值。过渡过程的准确性指被控量偏差的大小, 包括动态偏差和静态偏差 (亦称稳态误差)。

(1) 动态偏差 (Dynamic Deviation): 指整个过渡过程中被控量与给定值之间的最大偏差。通常要求控制系统保证在受到最大扰动情况下, 其动态偏差不超过生产过程所允许的范围。

(2) 静态偏差 (Steady State Deviation): 指过渡过程结束后被控量与给定值之间的残余偏差。不同的生产过程对静态偏差有不同的要求, 一般要求静态偏差越小越好。

3. 快速性 (Speedability)

快速性是指过渡过程持续时间的长短, 一般用过渡过程时间 (又称调节时间) 表示。过渡过程时间就是从扰动引起被控量发生变化开始到被控量重新恢复到稳态值为止所经历的时间。

对一个好的自动控制系统来说, 最好稳态误差为零, 但在实际生产过程中往往做不到, 只能要求稳态误差越小越好。一般把过渡过程曲线衰减到与稳态值之差不超过稳态值的 2% ~ 5% 时所经历的时间作为过渡过程时间。过渡过程时间越短, 过渡过程进行越快, 说明控制系统克服扰动的能力越强。

必须指出,不同的生产过程对稳定性、准确性和快速性这3个性能指标的要求是不同的。对一个控制系统同时要求这3个指标都很高往往是很困难的。理论和实践分析都表明:这3个控制性能指标往往是相互矛盾的,例如提高了系统的稳定性,往往会使被控量的偏差增加,控制时间增长。实际应用中,必须根据具体的生产过程特点及工艺要求综合考虑。一般来说,总是在首先满足稳定性要求的前提下,尽可能地提高系统的准确性和快速性。

第六节 CACSD 及 MATLAB 语言简介

一、控制系统计算机辅助设计简介

在自动控制理论发展的初期,由于计算机技术还未出现,使得大量的计算与绘图工作需要人工来完成,从而影响了人们对控制系统的分析与设计。随着计算机的出现与普及,计算机技术已广泛应用于各个领域,控制系统计算机辅助设计技术就是在这一背景下产生的。

控制系统计算机辅助设计(Computer-Aided Control System Design, CACSD)是一门以计算机为工具进行控制系统设计与分析的技术。大部分从事控制系统分析和设计的技术人员常常会为巨大、繁琐的计算机工作量而苦恼,但如果借助计算机本身强大的计算和绘图功能,则可大大地提高控制系统分析和设计的效率。

近30年来,随着计算机技术的飞速发展,控制系统计算机辅助设计技术也得到了很大的发展,出现了种类繁多的CACSD软件。目前,MATLAB语言已成为应用最广的CACSD语言。在本书中,将应用MATLAB语言及其控制系统工具箱作为辅助工具,帮助进行控制系统的分析和设计。由于MATLAB的很多功能是通过函数实现的,因此也将介绍相关函数的使用。

MATLAB语言是由美国New Mexico大学的Cleve Moler于1980年开始开发的。1984年,由Cleve Moler等人创立的Math Works公司推出了第一个商业版本,随后不断改进,推出新的版本,当前已推出了MATLAB R2007a。本书以MATLAB R2007a为例进行介绍,所有程序均在MATLAB R2007a平台下调试完成。

作为自动化专业的学生很有必要学会应用这一强大的工具,并掌握利用MATLAB对控制理论内容进行分析和研究的技能,以达到加深对课堂上所讲内容理解的目的。另外,我们希望通过使用这一软件工具把学生从繁琐枯燥的计算负担中解脱出来,而把更多的精力用到思考本质问题和研究解决实际生产问题上去。

通过学习,学生应达到以下基本要求:

- (1) 能用MATLAB软件求解复杂的自动控制理论题目。
- (2) 能用MATLAB软件设计控制系统满足具体的性能指标要求。
- (3) 能灵活应用MATLAB的CONTROL SYSTEM工具箱和SIMULINK仿真软件,分析系统的性能。

需要强调的是,本书介绍的经典控制理论是在计算机还未出现或未广泛应用的情况下出现的,很多内容在计算机上采用诸如MATLAB这样的软件来解决已变得十分简单。虽然有像MATLAB这样的强大软件可以直接使用,但这并不意味着可以放弃控制理论的学习,而