

General Education

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



ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

刘保录 主 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

自动控制原理



自动控制原理

自动控制原理

自动控制原理

General Education

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



参考文献

参考文献

[1] 刘保录. 自动控制原理. 北京: 中国电力出版社, 2005.
[2] 赵亚明, 赵浪涛, 柴清. 自动控制原理. 北京: 中国电力出版社, 2005.
[3] 韩璞, 杨平. 自动控制原理. 北京: 中国电力出版社, 2005.
[4] 李友善. 自动控制原理. 北京: 中国电力出版社, 2005.
[5] 刘保录. 自动控制原理. 北京: 中国电力出版社, 2005.

ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

主 编 刘保录

编 写 赵亚明 赵浪涛 柴 清

主 审 韩 璞 杨 平

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-308-2844-4

I. 自... II. 刘... III. 自动控制原理—高等学校
IV. TP13 刘保录 韩璞 杨平 柴清 编

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第04332号

中国电力出版社出版

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

北京丰源印刷厂印刷

各新华书店均有代售

2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷
187毫米×1092毫米 16开本 15.25印张 328千字
印数0001—3000册 定价19.00元

告 告 告

本书可作为高等院校自动化专业及相关专业的教材,也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。



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”规划教材（高职高专教育）。

全书共分七章，主要介绍经典控制理论的基本内容，包括自动控制系统的基本概念，系统的数学模型，时域分析与频域分析，根轨迹基本方法，控制系统的校正与设计，线性离散系统的分析。每章介绍了 MATLAB 语言在自动原理中的应用，并举了大量有针对性的例题，章后附有小结与习题，以利巩固基础知识和训练解决实际问题的能力易于读者学习和巩固。

本书可作为高职高专院校电力技术类、自动化类、机械类等工科专业自动控制原理课程的教材，也可作为职业院校其他相关专业的教材，还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/刘保录主编. —北京: 中国电力出版社, 2007.

普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978 - 7 - 5083 - 5844 - 4

I. 自... II. 刘... 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 094335 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>)
北京丰源印刷厂印刷
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 12.25 印张 296 千字
印数 0001—3000 册 定价 19.60 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着现代科学技术的迅速发展,自动控制技术的应用领域日益广阔,自动化技术取得了巨大的进步,自动控制系统的应用也越来越广泛,自动控制理论得到了不断的发展和完善,所以自动控制原理课程越来越受到重视。该课程不仅对自动控制系统的设计有指导作用,而且对培养学生的辩证思维能力、建立理论联系实际的科学观点和提高综合分析问题的能力,都具有重要的作用。

自动控制原理是分析和设计自动控制系统的理论基础,可分为经典控制理论和现代控制理论。根据教学特点及后续课程对自动控制理论的需求,本书主要介绍经典控制理论。

本教材全面阐述了自动控制的基本理论,既考虑到本课程理论体系的系统性和完整性,又力求做到少而精,尽量减少证明推导。本教材共分七章,以最基本的内容为主线,注重基本概念和原理的阐述,突出工程应用方法,理论严谨,系统性强,便于读者自学。

第一章为自动控制系统的基本概念,简述自动控制系统的发展历史,介绍自动控制系统的基本概念,引出了自动控制系统的常用术语。

第二章为自动控制系统的数学模型,系统地介绍了用于定量分析控制系统的两种数学模型微分方程和传递函数,介绍了利用结构图等简化简和梅逊增益公式确定系统闭环传递函数的方法。

第三章为控制系统时间域分析,介绍了线性系统的时域分析,重点对系统的稳定性、快速性、准确性的分析方法进行讨论。

第四章为控制系统的根轨迹分析,介绍了线性系统根轨迹分析方法,重点讨论了根轨迹的绘制规则以及利用根轨迹分析系统性能的方法。

第五章为控制系统频域分析,频率法是工程上重点应用的方法,本章对频率域作图、分析的原理进行了详细讨论,介绍了频域稳定判据,给出了频域指标的计算及分析方法。

第六章为控制系统的校正与设计,介绍了控制系统校正的基本方法、校正的特点, PID 调节器和控制系统设计举例。

第七章为线性离散系统的分析,介绍了线性离散系统的分析,详细讨论了 z 变换理论,指出了应用线性理论分析离散系统性能的方法与连续系统分析方法的相似性,并介绍了数字控制器的直接设计方法。

本书由兰州工业高等专科学校刘保录、赵亚明、赵浪涛、柴清编写。刘保录任主编并统稿,其中,第一、七章及第四、五章 MATLAB 部分由刘保录编写,第三、六章由赵浪涛编写,第四、五章由赵亚明编写,第二章由柴清编写。

本书由华北电力大学韩璞教授主审，上海电力学院杨平教授审阅了大纲，他们在审阅过程中都提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。在本书的编写过程中，参考了同行们的论著，在此编者对他们一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请各位读者批评指正。

编者

2007年6月

目 录

前言

第一章 自动控制系统的基本概念	1
第一节 自动控制系统的基本概念及发展历史	1
第二节 自动控制的基本方式	4
第三节 自动控制系统的组成	6
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
小结	10
习题	11
第二章 自动控制系统的数学模型	13
第一节 控制系统的微分方程描述	13
第二节 线性系统的传递函数描述	15
第三节 典型环节及传递函数	17
第四节 系统的结构图及其等效变换	21
第五节 信号流图及梅逊公式	26
第六节 控制系统的传递函数	28
第七节 控制系统数学模型的 MATLAB 分析	30
小结	32
习题	32
第三章 控制系统时间域分析	34
第一节 典型信号和时域性能指标	34
第二节 一阶系统的分析	37
第三节 二阶系统的时域分析	40
第四节 控制系统的稳定性分析和代数判据	48
第五节 控制系统的稳态误差分析	51
第六节 利用 MATLAB 进行时域分析	56
小结	60
习题	60
第四章 控制系统的根轨迹分析	63
第一节 根轨迹的概念	63
第二节 绘制根轨迹的基本规则	65
第三节 控制系统性能的根轨迹分析方法	70
第四节 应用 MATLAB 绘制根轨迹图	73
小结	76

习题	76
第五章 控制系统频域分析	78
第一节 频率特性的基本概念	78
第二节 频率特性的表示方法	80
第三节 典型环节的频率特性	81
第四节 控制系统的开环频率特性	88
第五节 频率特性的稳定性判据和稳态性能	95
第六节 系统动态性能的开环频率特性分析	106
第七节 系统性能的闭环频率特性分析	113
第八节 应用 MATLAB 进行频域分析	115
小结	119
习题	120
第六章 控制系统的校正与设计	123
第一节 系统校正的基本方法	123
第二节 串联校正	124
第三节 反馈校正	130
第四节 PID调节器	131
第五节 控制系统设计举例	133
第六节 应用 MATLAB 进行校正设计	136
小结	140
习题	141
第七章 线性离散系统的分析	142
第一节 离散控制系统概述	142
第二节 信号的采样与复现	144
第三节 z 变换	150
第四节 离散系统的数学模型	155
第五节 离散系统的稳定性分析	163
第六节 离散系统的动态性能分析	171
第七节 数字控制器的设计	175
第八节 应用 MATLAB 进行离散系统分析	178
小结	182
习题	182
附录	185
参考文献	189

第一章 自动控制系统的基本概念

自 20 世纪中叶以来,在生产和科学的发展过程中,自动控制技术的应用起着极为重要的作用,自动控制已广泛地应用于现代的工业、农业、国防和科学技术领域中。可以这样说,一个国家在自动控制方面的水平,是衡量它的生产技术和科学技术水平先进与否的一项重要标志。导弹能够准确地命中目标,人造卫星能按预定的轨道运行,宇宙飞船能准确地返回地面,都是由于自动控制技术迅速发展的结果。工业生产过程中诸如对压力、温度、湿度、流量、频率、物位、成分等方面的控制,都是自动控制技术的重要组成部分。现在,自动控制技术已经在工业、农业、军事、交通、商业、医疗、服务以及家庭等领域得到了广泛应用。

自动控制原理是自动控制技术的理论基础,是一门理论性较强的工程科学。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论一般可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

经典控制理论的内容主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题。由于其发展较早,现已成熟。在工程上,已相当成功地解决了大量实际问题,因此它是研究自动控制系统的重要理论基础。

现代控制理论的内容主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、定常数或变参数、线性或非线性一类自动控制系统的分析和设计问题。随着现代科学技术的发展,已出现最优控制、智能控制、预测控制、鲁棒控制、自适应控制等一些新的控制方式。因此,现代控制理论是研究大系统工程和人工智能控制等方面必不可少的理论基础。

经典控制理论发展较早,那时缺少计算工具,因此经典控制理论的主要思想是引入各种各样的图表和曲线,在频率域内对系统进行分析和设计。随着计算机的普遍应用,经典控制理论的内容可以由计算机来完成。因此,本书在介绍经典控制理论内容的同时,也介绍 MATLAB 软件作为经典控制理论辅助设计的这一有效工具。

第一节 自动控制系统的基本概念及发展历史

一、自动控制的基本概念

所谓自动控制就是在无人直接参加的情况下,利用控制装置使被控制对象和过程自动地按预定规律变化的控制过程。所谓自动控制系统是由控制装置和被控制对象所组成的,它们以某种相互依赖的方式结合成为一个有机整体,并对被控制对象进行自动控制。

1. 自动控制涉及的范围

(1) 军事领域:导弹命中目标、飞机驾驶系统。

(2) 航天技术方面:登月计划,航天飞机,宇宙飞船准确在月球上着陆并能重返地球,人造卫星按预定轨迹运行并返回地面等。

(3) 工业生产过程:对压力、温度、湿度、流量、频率及原料、燃料成分比例等方面的

控制,全自动生产线等。

(4) 现代农业生产:温室自动温控系统、自动灌溉系统等。

(5) 社会生活的其他领域:如导航控制系统使汽车自动保持在设定车速,刹车防抱死系统自动防止汽车在湿滑的路面上打滑;在大型办公楼或旅馆,电梯调度系统自动发送车辆搭载乘客;一个现代化的居室内,温度由温度调节装置自动控制。

2. 自动控制常用的基本术语

(1) 对象。对象是由一些机器零件有机地组合在一起的设备,其作用是完成一个特定的动作。在下面的讨论中,称任何被控物体(如加热炉、化学反应器或宇宙飞船等)为对象。

(2) 过程。任何被控制的运行状态称为过程,其具体例子如化学过程、经济学过程、生物学过程。

(3) 系统。系统是完成一定任务的一些部件的组合。系统是一个广义的概念。系统不限于物理系统,系统的概念可以应用于抽象的动态现象,如在经济学中遇到的一些现象。因此,“系统”这个词,应当理解为包含了物理学、生物学和经济学等现象的系统。

(4) 扰动。扰动是一种对系统的输出产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统内部称为内扰;扰动产生在系统外部则称为外扰。外扰是系统的输入量。

(5) 控制。控制是指为了改善系统的性能或达到特定的目的,通过信息的采集和加工而施加到系统的作用。

(6) 反馈控制。一个对象接受一个输入量对其作用时,输出会发生变化,当对这个对象进行控制时,往往需要把对象的输出量引入到对象的输入端与输入量进行比较,产生偏差信号控制信号,再作用给对象,并利用偏差进行控制的过程,称为反馈控制。应当指出,反馈控制系统不限于工程范畴,在各种非工程范畴内,诸如经济学和生物学中,也存在着反馈控制系统。例如,人的机体在某种意义上说,就类似于一个具有许多控制变量的化工设备。在这种运输和化学反应网络的过程控制中,包含着许多控制回路,事实上,人的机体是一个极其复杂的反馈控制系统。

(7) 随动系统。随动系统是一种反馈控制系统,在这种系统中,输出量是机械位移、速度或者加速度。因此,随动系统这个术语与位置(或速度或加速度)控制系统是同义语。在现代工业中,广泛采用着随动系统,例如,采用程序指令的机床的全自动化操作,就可以应用随动系统来完成。

(8) 自动控制系统。自动控制系统是一种反馈控制系统,这种系统的基本任务是在存在扰动的情况下,将系统的输出量保持在希望的数值上。例如,室内空调系统就是一种自动控制系统,空调系统中控制器的温度给定值(即希望的温度值),用来与室内的实际温度进行比较,室外温度变化是该系统的扰动。控制系统的任务是,保持所要求的室内温度不受室外温度变化的影响。

(9) 过程控制系统。当自动控制系统的输出量是温度、压力、流量、液面或 PH 值(氢离子浓度)等这样一些变量时,就叫过程控制系统。过程控制在工业中应用广泛。

(10) 程序控制系统。这类控制系统的参变量是按预定规律随时间变化的函数,要求被控制量迅速、准确地复现。机械加工使用的数字程序控制机床便是一例。

二、自动控制理论的发展

根据自动控制理论的发展历史,大致可分为以下四个阶段。

1. 经典控制理论阶段

1868年, 麦克斯韦尔 (J. C. Maxwell) 基于微分方程描述从理论上给出了稳定性条件。劳斯 (E. J. Routh) 在 1877 年以及霍尔维茨 (A. Hurwitz) 在 1895 年分别独立给出了高阶线性系统的稳定性判据; 另外, 1892 年, 李雅普诺夫 (A. M. Lyapunov) 给出了非线性系统的稳定性判据。1922 年, 米罗斯基 (N. Minorsky) 给出了位置控制系统的分析, 1932 年, 奈奎斯特 (Nyquist) 提出了负反馈系统的频率域稳定性判据, 这种方法只需利用频率响应的实验数据, 不用导出和求解微分方程。1940 年, 波德 (H. Bode) 进一步研究通信系统频域方法, 提出了频域响应的对数坐标图描述方法。频域分析法主要用于描述反馈放大器的带宽和其他频域指标。

1948 年, 麻省理工学院维纳 (N. Wiener) 教授发表了《控制论》著作, 才标志着控制理论的形成。但这时的控制理论只适应单变量线性定常系统, 又对系统内部状态缺少了解, 且复数域方法研究时域特性, 得不到精确的结果, 这是其缺点。

2. 现代控制理论阶段

由于航天事业和电子计算机的迅速发展, 在 20 世纪 60 年代初, 在原有“经典控制理论”的基础上, 又形成了所谓的“现代控制理论”, 这是人类在自动控制技术认识上的一次飞跃。随着人造卫星的发展和太空时代的到来, 为导弹和太空卫星设计高精度、复杂的控制系统, 使得最优控制变得重要起来。由于这些原因, 时域手段也发展起来。状态空间方法属于时域方法, 其核心是最优化技术。它以状态空间描述 (实质上是一阶微分或差分方程组) 作为数学模型, 利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段, 适应于多变量、非线性、时变系统。它不但在航空、航天、制导与军事武器控制中有成功的应用, 在工业生产过程控制中也得到了逐步应用。

3. 大系统控制理论阶段

20 世纪 70 年代开始, 一方面现代控制理论继续向深度和广度发展, 出现了一些新的控制方法和理论, 如现代频域方法、自适应控制理论和方法、鲁棒控制方法、预测控制方法; 另一方面随着控制理论应用范围的扩大, 从个别小系统的控制, 发展到若干个相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制, 从传统的工程控制领域推广到包括经济管理、生物工程、能源、运输、环境等大型系统以及社会科学领域, 人们开始了对大系统理论的研究。大系统理论是过程控制与信息处理相结合的综合自动化理论的基础, 是动态的系统工程理论, 具有规模庞大、结构复杂、功能综合、目标多样、因素众多等特点。它是一个多输入、多输出、多干扰、多变量的系统。大系统理论目前仍处于发展和开创性阶段。

4. 智能控制阶段

这是近年来新发展起来的一种控制技术, 是人工智能在控制中的应用。智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性提出来的, 它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧, 解决那些目前需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。被控对象复杂性体现为模型的不确定性、高度非线性、分布式的传感器和执行器、动态突变、多时间标度、复杂的信息模式、庞大的数据量以及严格的特性指标等。而环境的复杂性则表现为变化的不确定性和难以辨识。智能控制是从“仿人”的概念出发的, 其方法包括模糊控制、神经元网络控制、专家控制等方法。

第二节 自动控制的基本方式

自动控制系统的种类繁多,形式多样、任务不一,但从控制的基本方式看,可分为开环控制和闭环控制。

一、开环控制

开环控制是指在控制装置中,输入端与输出端之间,只有信号的前向通道而不存在由输出端到输入端的反馈通路。只有在输出量无法测量或者不需要测量时才使用开环控制,如交通指挥的红绿灯转换、自动生产线等。开环控制的结构图如图 1-1 所示。

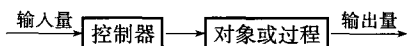


图 1-1 开环控制系统结构图

【例 1-1】 如图 1-2 所示的直流电动机转速开环控制系统,电动机带动负载以一定的转速转动。当调节电位器的滑臂位置时,可以改变功率放大器的输入电压,从而改变电动机的电枢电压,最终改变电动机的转速。电动机的转速可以由调节电位器来给定,但是当电动机受到负载变化影响时,电动机的转速是要发生变化的。

在这个系统中,电位器滑臂的分压值是系统的输入量,放大器作为控制器,电动机是受控对象,电动机的转速是系统的输出量。当外界有扰动时,即使输入量没有变化,输出量也会改变。这种开环控制系统的输出转速,在负载扰动的影响下不可能稳定在希望的数值上,所以开环控制系统不能做到自动调节,控制的精度是比较低的。

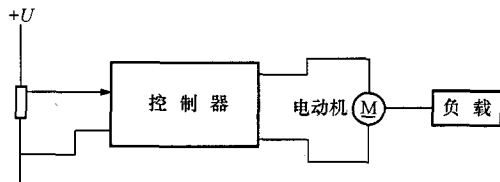


图 1-2 直流电动机转速开环控制系统

再如洗衣机就是开环控制系统的例子。浸湿、洗涤和漂清过程在洗衣过程中是依次进行的,在洗涤过程中,无法对其输出信号即衣服的清洁程度进行测量。

1. 开环控制的特点

- (1) 输出不影响输入,对输出不需测量,通常较易实现。
- (2) 组成系统的元部件精度高,系统精度才能高。
- (3) 系统的稳定性不是主要问题。

2. 开环系统存在的问题

- (1) 要求元部件的精度高。
- (2) 当存在变化规律无法预测的干扰时,无法消除干扰。
- (3) 开环控制系统的精度不高和适应性不强。

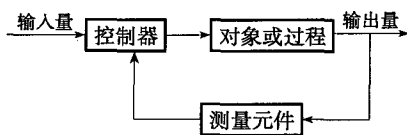


图 1-3 闭环控制系统结构图

二、闭环系统

闭环系统指控制对象之间既有正方向的作用,又有反方向联系的控制过程。在闭环系统中,需要对输出量进行测量,把输出量的信息反馈到输入端,通过比较输入值与输出值,产生偏差信号,该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用,逐步减小以至消除这一偏差,从而实现所要求的控制性能。如小功率随动系统、雷达控制系统等。图 1-3 所示为其结构图。

【例 1-2】 如图 1-4 所示的直流电动机转速闭环控制系统, 是在图 1-2 所示的原来开环控制系统的基础上增加了一个由测速发机构成的反馈回路, 检测输出转速的变化并作反馈。由于测速发电机的反馈电压大小与电动机的转速成正比, 反馈电压与输入值 (电位器滑臂的分压值) 作差值运算后, 再经过控制器 (功率放大器) 来控制电动机的转速, 可以实现电动机转速的自动调节。系统自动调节电动机转速的过程如下。

当系统受到负载扰动作用时, 如果负载增大, 则电动机的转速降低, 测速发电机的端电压减小, 功率放大器的输入电压增加, 电动机的电枢电压上升, 使得电动机的转速增加。如果负载减小, 则电动机转速调节的过程与上述过程相反。这样, 消除或者抑制了负载扰动对于电动机转速的影响, 提高了系统的控制精度。

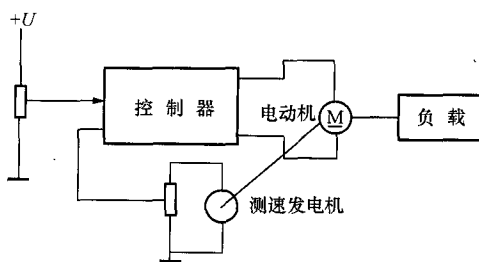


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

把取出的输出量送回输入端, 并与输入信号相比较产生偏差信号的过程, 称为反馈。若反馈的信号与输入信号相减, 使产生的偏差越来越小, 则称为负反馈; 反之, 则称为正反馈。

显然, 闭环系统为反馈系统, 根据反馈极性的不同, 反馈可分为通过反馈使偏差增大的正反馈和通过反馈使偏差减小的负反馈。一般无特殊说明, 下面所讲的反馈系统均为负反馈系统。

反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程, 而且由于引入了被反馈量的反馈信息, 整个控制过程成为闭合的, 因此反馈控制也称为闭环控制。输入信号和反馈信号之差称为误差信号, 误差信号加到控制器上, 以减小系统的误差, 并使系统的输出量趋于所希望的值。换句话说, “闭环” 这个术语的含义, 就是应用反馈作用来减小系统的误差。

闭环系统的特点如下。

- (1) 输出影响输入, 所以能削弱或抑制干扰。
- (2) 低精度元件可组成高精度系统。
- (3) 因为可能发生超调、震荡, 故闭环控制的稳定性很重要。

一般来说, 当系统控制的规律能预先确知, 并对系统可能出现的干扰可以做到有效抑制时, 应采用开环系统。因为开环控制系统结构简单、易于维修、成本低, 特别是当被控制量很难测量时更是如此。只有在系统的控制量和扰动量均无法预知的情况下, 闭环系统才有其明确的优越性。值得注意的是, 控制系统的干扰往往是未知的, 加之其他原因, 所以, 常见的系统大多是闭环系统。

三、闭环与开环控制系统的比较

一般来说, 开环控制系统结构比较简单, 成本较低。开环控制系统的缺点是控制精度不高, 抑制干扰能力差, 而且对系统参数变化比较敏感。一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合, 如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

在闭环控制系统中, 不论是输入信号的变化或者干扰的影响, 或者系统内部的变化, 只要是被控量偏离了规定值, 都会产生相应的作用去消除偏差, 因此, 闭环控制抑制干扰能力强。与开环控制相比, 系统对参数变化不敏感, 可以选用不太精密的元件构成较为精密的控制系统, 获得满意的动态特性和控制精度。但是采用反馈装置需要添加元部件, 造价较高,

同时也增加了系统的复杂性,如果系统的结构参数选取不适当,控制过程可能变得很差,甚至出现振荡或发散等不稳定的情况。因此,如何分析系统并合理选择系统的结构参数,从而获得满意的系统性能,是自动控制理论必须研究解决的问题。

第三节 自动控制系统的组成

任何一个自动控制系统都是由被控对象和控制器有机构成的。自动控制系统根据被控对象和具体用途不同,可以有各种不同的结构形式。图 1-5 是一个典型自动控制系统的功能方框图,图中的每一个方框都代表一个具有特定功能的元件。除被控对象外,控制装置通常由测量元件、比较元件、放大元件、执行机构、校正元件以及给定元件组成。这些功能元件分别承担相应的职能,共同完成控制任务。

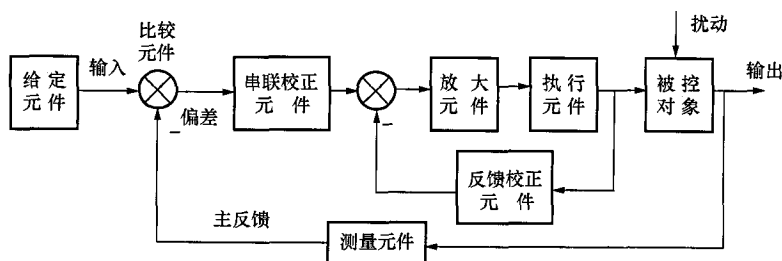


图 1-5 典型的反馈控制系统功能方框图

(1) 被控对象。被控对象一般是指生产过程中需要进行控制的工作机械、装置或生产过程。描述被控对象工作状态的、需要进行控制的物理量就是被控量。

(2) 给定元件(环节)。其主要用于产生给定信号或控制输入信号,例如直流电动机转速控制系统中的电位器。给定环节的精度对系统的控制精度会有较大影响,因此应采用高精度的元件构成给定环节。

(3) 测量元件。其用于检测被控量或输出量,产生反馈信号。如果测出的物理量属于非电量,一般要转换成电量以便处理,例如直流电动机转速控制系统中的测速发电机。测量元件的精度直接影响系统精度,所以应尽可能采用高精度的测量元件。

(4) 比较元件。比较元件用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差,产生偏差信号、起信号的综合作用。它可以是一个差动电路,也可以是一个物理元件(如电桥电路、差动放大器、自整角机等)。

(5) 放大元件。它用来放大偏差信号的幅值和功率,使之能够推动执行机构调节被控对象,例如功率放大器、电液伺服阀等。

(6) 执行机构。它用于直接对被控对象进行操作,调节被控量,如阀门、伺服电动机等。

(7) 校正元件。其用来改善或提高系统的性能。常用串联或反馈的方式连接在系统中,例如 RC 网络、测速发电机等。

【例 1-3】 如图 1-6 所示是电冰箱制冷的原理图。简述系统的工作原理,指出被控对象、被控量和给定量,并画出系统的方框图。

解 被控对象是看得见的实体,不能与物理量相混淆。被控制量则是被控对象中表征被

控制对象工作状态的物理量。确定控制对象要看控制的目的与任务。

控制的任务是保持冰箱内的温度 T_c 等于设定的温度 T_r 。冰箱的箱体是被控对象，箱内温度是被控量。由控制器旋钮设定出电位器输出电压（与希望温度 T_r 值对应）是给定量。

温度控制器中的双金属温度传感器（测量元件）感受冰箱内的温度，并把它转换为电压信号，与控制器旋钮设定出电位器（给定元件）输出电压（对应于与希望温度 T_r ）相比较，利用偏差电压 Δu （表征实际温度和希望温度的偏差）控制继电器。当 Δu 大到一定的值时，继电器接通压缩机启动将蒸发器中的高温低压气态制冷液送到冷却器散热。降温后流出的低温低压冷却液被压缩成低温高压液态进入蒸发器急速降压扩散成气体，吸收箱体

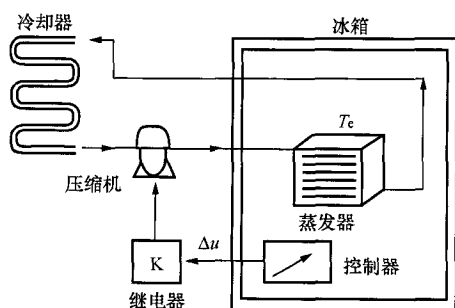


图 1-6 电冰箱制冷系统原理图

内的热量，使箱体内温度降低，而高温低压制冷剂又被吸入冷却器。如此循环，使冰箱达到制冷效果。继电器、压缩机、蒸发器和冷却器组成系统的执行机构，完成降温功能。冰箱制冷系统框图如图 1-7 所示。

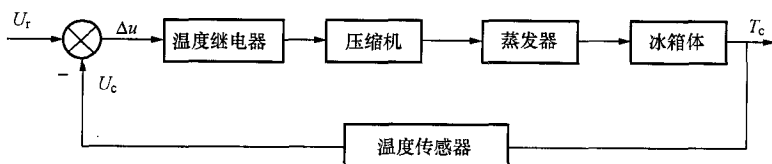


图 1-7 冰箱制冷系统框图

第四节 自动控制系统的分类

自动控制系统的应用范围很广，种类繁多，名称上也很不一致，常用的分类方法有以下几种。

一、按系统输入信号的变化规律不同来分

1. 恒值控制系统（或称自动调节系统）

这类系统的特点是输入信号是一个恒定的数值。工业生产中的恒温、恒速等自动控制系统都属于这一类型。

恒值控制系统主要研究各种干扰对系统输出的影响以及如何克服这些干扰，把输入、输出量尽量保持在希望数值上。

2. 过程控制系统（或称程序控制系统）

这类系统的特点是输入信号是一个已知的时间函数，系统的控制过程按预定的程序进行，要求被控量能迅速准确地复现，如化学工业中反应的压力、温度、流量控制。数字程序控制机床也属此类系统，恒值控制系统也认为是过程控制系统的特例。

3. 随动控制系统（或称伺服系统）

这类系统的特点是输入信号是一个未知的函数，要求输出量跟随给定量变化，如火炮自动跟踪系统，人们事先不知道飞机的运动规律，当然也就无法驱动火炮瞄向一个确定的位

置。这类系统要求火炮随飞机的运行轨迹,不断地自行修正位置,考虑到飞机的机动性,要求该系统有较好的跟踪能力。

工业自动化仪表中的显示记录仪,跟踪卫星的雷达天线控制系统等均属于随动控制系统。

二、按系统传输信号的性质来分

1. 连续系统

当控制系统的传递信号都是时间的连续函数时,这种系统称为连续控制系统。连续控制系统又常称为模拟量控制系统(相对于数字量信号控制系统而言)。目前大部分的控制系统都是连续控制系统。工业中普遍采用的常规控制仪表 PID 调节器控制的系统就属于这一类型。本书将主要研究连续控制系统。

2. 离散系统

离散系统是系统的某一处或几处,信号以脉冲序列或数码的形式传递的控制系统。其主要特点是:系统中用脉冲开关或采样开关,将连续信号转变为离散信号。若离散信号取脉冲的系统又叫脉冲控制系统;若离散信号以数码形式传递的系统,又叫采样数字控制系统或数字控制系统。随着计算机的发展,在大型工业过程控制中,普遍采用了计算机控制,这些系统均属离散系统。

三、按描述系统的数学模型不同来分

1. 线性系统

由线性元件构成的系统叫线性系统,其运动方程为线性微分方程。若各项系数为常数,则称为线性定常系统,其运动方程一般形式为

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} y^{(1)} + a_n y = b_0 u^{(n)} + b_1 u^{(n-1)} + \cdots + b_{n-1} u^{(1)} + b_n u$$

式中 $u(t)$ ——系统的输入量;

$y(t)$ ——系统的输出量。

线性系统的主要特点是具有叠加性和齐次性,即当系统的输入分别为 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 时,对应的输出分别为 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$,则当输入为 $r(t) = a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$ 时,输出量为 $c(t) = a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t)$,其中 a_1 、 a_2 为常数。

2. 非线性系统

在构成系统的环节中有一个或一个以上的非线性环节时,则称此系统为非线性系统。非线性元件有硬非线性和软非线性两种。典型的硬非线性特性有饱和特性、死区特性、间隙特性、继电器特性、磁滞特性等,如图 1-8 所示。软非线性可以用一个非线性方程式来描述,

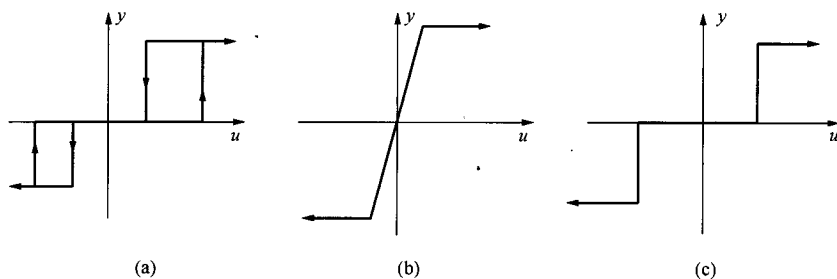


图 1-8 典型非线性环节特性

(a) 继电器特性; (b) 饱和特性; (c) 不灵敏区特性

硬的非线性特性则不能。典型的软非线性的方程式有： $y = \frac{u^2 + u^5}{\sqrt{a}}$ ， $y = ku^2$ ， $y = k_1u^2 + k_2u^3$ 等。

非线性理论研究远不如线性系统那么完整，一般只能进行近似的定性描述和数值计算。在自然界中，严格来说，任何物理系统的特性都是非线性的。但是，为了研究问题的方便，许多系统在一定的条件下、一定的范围内，可以近似地看成线性系统来加以分析研究，其误差往往在工业生产允许的范围之内。

第五节 自动控制系统的基本要求

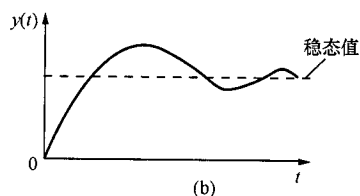
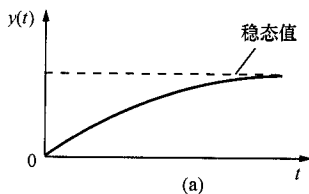
一、控制系统的基本要求

当自动控制系统受到各种干扰（扰动）或者人为要求给定值（参考输入）发生改变时，被控量就会发生变化，偏离给定值。通过系统的自动控制作用，经过一定的过渡过程，被控量又恢复到原来的稳定值或者稳定到一个新的给定值。这时系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态，把被控量在变化过程中的过渡过程称为动态过程（即随时间而变的过程），而把被控量处于平衡状态称为静态或稳态。

自动控制系统最基本的要求是系统必须控制系统被控量的稳态误差（偏差）为零或在允许的范围内（具体误差可以多大，要根据具体的生产过程的要求来确定）。对于一个好的自动控制系统来说，仪表要求稳态误差越小越好，最好稳态误差为零。一般要求稳态误差在被控量额定值的 2%~5% 之内。

自动控制系统除了要求满足稳态性能之外，还应满足动态过程的性能要求。在具体介绍自动控制系统的动态要求之前，先看看控制系统的动态过程（动态特性）有哪几种类型，一般的自动控制系统被控量变化的动态特性有以下几种。

(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 1-9 (a) 所示。



(2) 衰减振荡过程。被控量 $y(t)$ 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 1-9 (b) 所示。

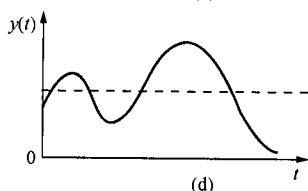
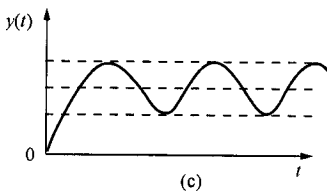


图 1-9 自动控制系统被控量变化的动态特性

(3) 等幅振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个持续等幅振荡过程，始终不能到达新的稳态值，如图 1-9 (c) 所示。

(4) 渐扩振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程不但是一个振荡过程，而且振荡的幅值越来越大，以致会大大超过被控量允许的误差范围，如图 1-9 (d) 所示。

一般来说，自动控制系统如果设计合理，其动态过程多属于图 1-9 (b) 的情况。为了