

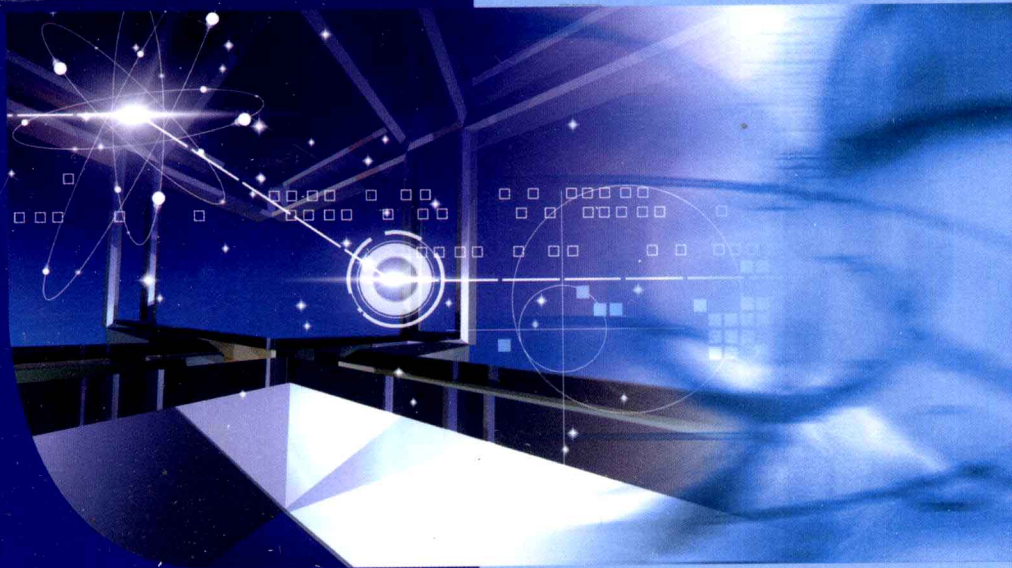


普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

自动控制原理

© 张冬妍 周修理 主编 © 赵月容 副主编

ZIDONG KONGZHI YUANLI



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

自动控制原理

主 编 张冬妍 周修理

副主编 赵月容

参 编 王 鷗 郑 纲 张春妍



机械工业出版社

全书重点介绍古典控制理论部分, 主要涉及线性定常连续系统的理论分析与设计, 线性离散系统的理论分析方法, 非线性系统的理论分析方法, 基于 MATLAB 的控制系统计算机辅助分析与设计。内容包括: 自动控制系统的基本概念、线性控制系统的数学模型、线性控制系统的时域分析法、线性控制系统的根轨迹分析法、线性控制系统的频率特性分析法、线性控制系统的串联校正、线性离散控制系统分析和非线性控制系统分析。书中每章都附有小结、丰富的例题、习题及参考答案, 便于读者在使用时能够准确把握各章的要点, 提高独立分析问题与解决问题的能力。

本书可作为高等院校电气信息类相关专业大、小平台课教学用书, 也可作为从事控制工程的科技人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/张冬妍等主编. —北京: 机械工业出版社, 2011.6

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-34288-5

I. ①自… II. ①张… III. ①自动控制理论-高等学校-教材
IV. ① TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 074791 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王雅新 责任编辑: 王雅新 常建丽

版式设计: 张世琴 责任校对: 刘秀丽

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·17 印张·421 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-34288-5

定价: 30.00 元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着现代技术的发展,自动控制技术越来越深入人们生产、生活的各个领域。自动控制原理已成为众多工科专业重要的专业基础课程。

本书是在作者多年教学和科研经验的基础上,分析研究国内外同类教材的特点,依据高等院校自动控制原理课程的教学要求而精心编写的。本书结合自动化、电气工程及其自动化等控制类相关工科专业的教学特点,力求贴近实际,满足不同专业教学的需要,体现宽口径的教学思想,比较全面地阐述了自动控制原理的基本内容。本书面向高等院校本科生开设的自动控制原理大、小平台(80学时、54学时)课程,强调理论应用性,合理安排内容结构,做到内容阐述循序渐进,注意各章节内容的衔接。从基本理论和概念出发,强调物理概念,淡化繁冗的理论推导,配合典型例题详解,深入浅出,深化读者对控制理论的理解和分析方法的应用。另外,书中引入了MATLAB软件应用,为巩固读者对理论知识的认识和理解、提高利用工程实用软件解决实际问题的能力,提供良好的辅助和基础储备。为便于读者对控制理论知识的更好掌握和自学,每章给出小结、配备精选习题,附录中给出部分习题答案,供读者学习和归纳使用。

本书由东北林业大学、东北农业大学、黑龙江大学、佳木斯大学四校联合编写,共8章内容,张冬妍、周修理任主编,赵月容任副主编。第1、2章和第3章的3.1、3.3节由张冬妍编写;第3章的3.2,3.4~3.7节由郑纲编写;第4、8章由赵月容编写;第5章由王鹏编写;第6、7章由周修理编写;书中第1、2、5、6、7章的MATLAB应用部分由张春妍编写。全书由张冬妍统稿。王矛棣任本书主审,对本书内容提出了许多宝贵的修改意见,在此谨致衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误或疏漏之处,希望读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 自动控制系统的基本概念 1

1.1 自动控制理论发展 1

1.2 自动控制系统的工作原理 2

1.3 自动控制系统的种类及应用实例 6

1.3.1 自动控制系统分类 7

1.3.2 开环控制与闭环控制 8

1.3.3 自动控制系统应用实例 9

1.4 自动控制系统的性能评价 12

1.4.1 稳定性 12

1.4.2 准确性 12

1.4.3 快速性 13

1.5 MATLAB 语言简介 13

1.6 小结 14

习题 14

第2章 线性控制系统的数学模型 16

2.1 数学模型的概念和建立方法 16

2.1.1 控制系统数学模型的定义 16

2.1.2 建立数学模型的方法 16

2.1.3 数学模型的表示形式 17

2.2 控制系统的微分方程 17

2.2.1 控制系统微分方程的描述 17

2.2.2 控制系统微分方程的建立 17

2.2.3 非线性微分方程的线性化 23

2.3 控制系统的传递函数 24

2.3.1 传递函数的基本概念 25

2.3.2 典型环节的传递函数 28

2.3.3 传递函数的求取 30

2.4 控制系统的框图与信号流图 32

2.4.1 系统框图的概念和绘制 32

2.4.2 框图的结构变换 33

2.4.3 信号流图 39

2.4.4 梅森公式 40

2.4.5 典型控制系统的传递函数 42

2.5 基于 MATLAB 的线性系统建模 44

2.5.1 系统模型描述及转换 44

2.5.2 基于 Simulink 的系统框图及其

化简 46

2.6 小结 50

习题 50

第3章 线性控制系统的时域 分析法 55

3.1 控制系统的典型输入信号与系统 性能指标 55

3.1.1 典型输入信号 55

3.1.2 系统动态性能指标 57

3.2 线性控制系统的稳定性分析 58

3.2.1 稳定的基本概念 58

3.2.2 线性控制系统稳定的充分必要 条件 58

3.2.3 劳斯稳定判据 59

3.3 线性控制系统的稳态误差分析与 计算 63

3.3.1 稳态误差的基本概念 63

3.3.2 参考输入作用下系统的稳态 误差 65

3.3.3 干扰输入作用下系统的稳态 误差 68

3.3.4 稳态误差计算的工程应用 71

3.3.5 动态误差系数 72

3.4 一阶系统的时域分析 74

3.4.1 一阶系统的数学模型 74

3.4.2 一阶系统的单位阶跃响应 75

3.4.3 一阶系统的单位斜坡响应 76

3.4.4 一阶系统的单位脉冲响应 77

3.5 二阶系统的时域分析 78

3.5.1 二阶系统的数学模型 78

3.5.2 二阶系统的单位阶跃响应 79

3.5.3 二阶系统的动态性能指标 83

3.5.4 二阶系统性能的改善 88

3.5.5 初始条件不为零时二阶系统的 阶跃响应 90

3.6 高阶系统的时域分析 92

3.6.1 高阶系统的数学模型 92

3.6.2 高阶系统的单位阶跃响应	92	5.4.3 奈奎斯特稳定判据在伯德图中 表示形式	151
3.6.3 闭环主导极点	95	5.4.4 控制系统的相对稳定性	153
3.7 基于 MATLAB 的线性系统时域 分析	96	5.5 系统开、闭环频率特性与时域性能的 关系	155
3.8 小结	100	5.5.1 系统开环频率特性与时域性能的 关系	156
习题	101	5.5.2 系统闭环频率特性与时域性能的 关系	156
第 4 章 线性控制系统的根轨迹 分析法	104	5.5.3 系统的频域指标和时域指标的 关系	157
4.1 根轨迹法的基本概念和根轨迹 方程	104	5.6 基于 MATLAB 的线性系统频率特性法 分析	158
4.1.1 根轨迹的基本概念	104	5.7 小结	160
4.1.2 根轨迹方程	106	习题	161
4.2 绘制根轨迹的基本规则	107	第 6 章 线性控制系统的串联校正	165
4.3 基于根轨迹法的系统性能分析	116	6.1 系统校正的基本方式和方法	165
4.4 广义根轨迹的绘制	119	6.1.1 校正的基本概念	165
4.4.1 参数根轨迹的绘制	119	6.1.2 校正的基本方式	165
4.4.2 零度根轨迹的绘制	120	6.1.3 系统校正的设计方法	166
4.5 MATLAB 下的线性系统根轨迹	123	6.2 常用的校正装置及其特性	166
4.5.1 系统零极点图的绘制	123	6.2.1 超前校正装置	166
4.5.2 系统根轨迹的绘制	124	6.2.2 滞后校正装置	169
4.5.3 计算根轨迹增益函数	125	6.2.3 滞后-超前校正装置	171
4.6 小结	126	6.3 频率特性法的串联校正	173
习题	126	6.3.1 串联超前校正	173
第 5 章 线性控制系统的频率特性 分析法	128	6.3.2 串联滞后校正	176
5.1 频率特性的基本概念和表示方法	128	6.3.3 串联滞后-超前校正	179
5.1.1 频率特性的定义	128	6.3.4 串联校正的期望频率特性法	182
5.1.2 频率特性的几何表示方法	130	6.4 PID 控制器设计	185
5.2 控制系统开环传递函数的对数频率 特性	132	6.4.1 PID 控制器的工作原理	185
5.2.1 典型环节的对数频率特性图	132	6.4.2 PID 控制器的工程设计	190
5.2.2 系统开环对数频率特性图	137	6.5 线性系统校正的 MATLAB 实现	191
5.2.3 最小相位系统	140	6.6 小结	194
5.3 控制系统开环奈奎斯特图的绘制	143	习题	194
5.3.1 无零点系统开环奈奎斯特图的 绘制	143	第 7 章 线性离散控制系统分析	196
5.3.2 有零点系统开环奈奎斯特图的 绘制	145	7.1 离散系统的基本概念	196
5.4 频域稳定判据与系统稳定性	146	7.2 信号采样与保持	197
5.4.1 奈奎斯特稳定判据	147	7.2.1 信号采样与采样定理	197
5.4.2 开环系统含有积分环节时奈氏 判据的应用	149	7.2.2 保持器	200
		7.3 z 变换	202
		7.3.1 z 变换的定义	202
		7.3.2 z 变换的性质	202

7.3.3 z 变换的方法	204
7.3.4 z 反变换	206
7.4 线性离散系统的数学模型	209
7.4.1 线性常系数差分方程	209
7.4.2 脉冲传递函数	211
7.4.3 开环系统脉冲传递函数	212
7.4.4 闭环系统脉冲传递函数	215
7.5 线性离散系统的稳定性与稳态误差	216
7.5.1 线性定常离散系统稳定的充要条件	216
7.5.2 开环放大倍数和采样周期对离散系统稳定性的影响	219
7.5.3 线性离散系统的稳态误差	221
7.6 线性离散系统的动态性能分析	224
7.6.1 线性离散系统的单位阶跃响应	224
7.6.2 闭环极点与动态响应的关系	225
7.7 PID 控制器	227
7.7.1 模拟 PID 控制器	227
7.7.2 数字 PID 控制器	227
7.8 基于 MATLAB 的线性离散系统分析	229
7.9 小结	232
习题	232

第 8 章 非线性控制系统分析	234
8.1 非线性控制系统概述	234
8.1.1 非线性系统数学模型	234
8.1.2 常见的非线性特性	234
8.1.3 非线性控制系统的特点	236
8.2 非线性系统的描述函数法	237
8.2.1 描述函数的基本概念	237
8.2.2 典型非线性特性的描述函数	238
8.2.3 非线性系统的描述函数分析	244
8.3 非线性系统的相平面法	247
8.3.1 相轨迹的概念	247
8.3.2 奇点与极限环	248
8.3.3 相轨迹的绘制	251
8.3.4 非线性系统的相平面分析	252
8.4 利用非线性特性的系统性能改善	254
8.5 基于 MATLAB 的非线性系统分析	256
8.6 小结	257
习题	258
附录	260
附录 A 常用函数的拉普拉斯变换和 z 变换对照表	260
附录 B 部分习题答案	261
参考文献	266

第 1 章 自动控制系统的基本概念

在科学技术飞速发展的今天，自动控制技术所起的作用越来越重要，无论是在宇宙飞船、导弹制导、雷达定位等尖端技术领域，还是在电力电子、机械、石油、化工、医药工业等的过程控制中，都有自动控制技术的应用。自动控制技术已成为现代社会生活中不可缺少的重要组成部分。

自动控制原理是自动控制技术的基本理论，是一门理论性较强的工程科学。自动控制原理可分为古典控制理论和现代控制理论两大部分。古典控制理论以传递函数为基础，主要研究单输入-单输出线性定常系统的分析和设计问题。这些理论早已成熟，在工程上已比较成功地解决了如恒值系统和随动系统自动控制的实践问题；现代控制理论是 20 世纪 60 年代在古典控制理论基础上随着科学技术发展和工程实践需要迅速发展起来的，以状态空间法为基础，主要研究多输入-多输出、非线性、时变系统的分析和设计问题。现代控制理论在实践中也得到了越来越多的应用。

1.1 自动控制理论发展

自动控制理论的诞生和发展源于自动控制技术的应用。最早的自动控制技术的应用可以追溯到两千多年前古埃及的水钟控制和中国汉代的指南车控制，但当时并未建立起自动控制理论体系。1769 年，瓦特（Watt）发明的蒸汽机引发了现代工业革命，但由于蒸汽机需要不断地调节蒸汽阀门才能保持蒸汽机的速度稳定，蒸汽机的应用受到调速精度的限制。为此，1788 年瓦特又发明了飞球调速器，成为最早的反馈控制原理的工程应用。针对调速器的振荡现象，1868 年，英国的麦克斯韦（Maxwell）发表了“论调速器”论文，对以微分方程描述的控制系统稳定性问题进行研究，指出从描述系统的微分方程的解中有无增长指数函数项来判断稳定性，麦克斯韦的这篇著名论文被公认为自动控制理论的开端。1874 年劳斯（Routh）和 1895 年赫尔维茨（Hurwitz）分别提出了间接稳定性判据，使高阶系统稳定性判定成为可能。20 世纪 20 年代，PID 控制器出现，并获得广泛应用。1942 年，齐格勒（Ziegler）与尼柯尔斯（Nichols）提出了调节 PID 控制器参数的经验公式方法，此方法对当今的 PID 控制器整定仍有影响。20 世纪 40 年代是控制思想空前活跃的年代。1948 年，美国数学家维纳（Wiener）提出了著名的《控制论》（Cybernetics），第一次科学地提出了信息、反馈和控制的概念。至此诞生了第一代控制理论——古典控制理论。这一时期的代表性研究成果还有奈奎斯特（Nyquist）于 1932 年创立的稳定判据及稳定裕度的概念；伯德（Bode）于 1945 年提出用图解法来分析和设计线性反馈控制系统的方法，即频率特性法；伊凡思（Evans）于 1948 年创立的根轨迹法对用微分方程模型来研究问题提供了直观而形象的又一种图解方法。

20 世纪 60 年代开始，计算机的飞速发展推动了空间技术的发展。为适应制导技术、宇航技术发展的需要，第二代控制理论——现代控制理论迅速发展起来。这一时期的代表性研

究成果有贝尔曼（Bellman）于1957年提出的动态规划原则；庞特里亚金（Pontryagin）于1958年提出的极大值原理和卡尔曼（Kalman）于1960年发表的“控制系统的一般理论”论文，将状态空间法正式引入控制系统研究。后期，控制理论研究中出现了线性二次型最优调节器、最优状态观测器及线性二次型高斯问题的研究，推动了研究具有高性能、高精度、多耦合回路、多变量系统分析和设计的现代控制理论的发展。

20世纪70年代开始，随着以计算机控制为代表的（如可编程序控制器和工业机器人等）自动控制技术的发展，控制理论也出现了众多新分支，如自适应控制、模型预测控制、最优控制、非线性控制、神经网络控制和模糊控制等。自动控制理论正在迅猛、蓬勃地发展，朝着以控制论、信息论和仿生学为基础的智能控制理论深入。

需要特别提出的是，尽管古典控制理论有一定的局限性，然而它简洁明了，概念清晰，工程技术中的大量问题仍然用它来解决。同时，古典控制理论也是学习和掌握现代控制理论的必要基础。因而，本书主要介绍古典控制理论相关的基本理论和方法。

1.2 自动控制系统的工作原理

自动控制原理研究的对象是系统。日常生活中有很多系统，如电力系统、机械系统，还有交通系统和管理系统等。系统是一个广泛的概念，一部机器、一个生物体、一条生产线、一个电力网等都是一个系统，一个企业、一个社会组织也是一个系统。系统的种类繁多，又千差万别，但它们有一个共同的特点，就是都具有一定的功能，自身的各部分是互相依赖、互相制约的。通常，为实现规定功能以达到某一给定目标，把由若干相互制约、相互依赖的事物组合而成的一个有机整体称为系统。在工业生产过程中，为了实现特定的控制目标，控制系统具有两种不同的工作方式，即手动控制和自动控制。按照手动控制方式工作的系统，即在人的直接参与下使被控对象（生产设备或装置）按照预先确定的期望规律运动，以达到控制目标要求的系统称为手动控制系统。自动控制系统是指按照自动控制方式工作的系统，即不需要人的直接参与，通过控制装置代替人的控制作用，使被控对象按照预先确定的期望规律运动以达到控制目标要求的系统。被控对象是指控制系统中受控制的目标元件或装置。控制装置是指控制系统中除了被控对象以外的其他各部分的组合。

下面通过具体的例子分析手动控制和自动控制的过程，从而可以看出控制系统的基本工作原理。

图1-1所示是恒温箱温度手动控制系统工作原理图。人本身就是一个具有高度复杂控制能力的控制系统，人取书、司机驾驶车辆在公路上平移行驶或人通过观测温度计数据对温箱温度进行调节等，这些动作都渗透着控制原理。恒温箱控制系统的控制目标是克服扰动影响（如电源电压波动和环境温度变化等），保持恒温箱内的温度在期望值恒定不变。

从图中可见，控制系统由恒温箱、温度

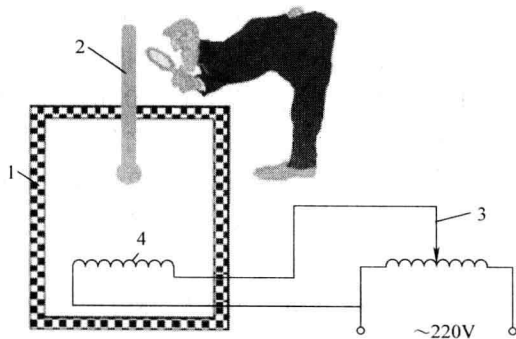


图1-1 恒温箱温度手动控制系统工作原理图

1—恒温箱 2—温度计 3—调压器 4—加热电阻丝

计、加热电阻丝、调压器和人组成。人通过眼睛观测温度计显示温度，并将信息传给大脑，由大脑判断实际温度与期望温度的差别，根据偏差大小做出决策，发出指令给手，调节调压器手柄，从而调节箱内温度，使箱内温度逐渐接近期望值。显然，只要偏差存在，上述过程就要反复进行，直到偏差减小到零，调节过程结束。控制系统要控制的是恒温箱（由箱体和加热电阻丝组成）内的温度，即恒温箱为系统被控对象，被控制量为恒温箱内的温度 T 。温度计、人和调压器即为系统的控制装置。

如果当前箱内温度达到了 $T = T_0$ ，满足控制目标要求，则不需要调整系统的控制作用，保持系统的平衡工作状态。若系统出现扰动，如电源电压降低使恒温箱温度下降， $T < T_0$ ，则可通过手动控制调整系统的控制作用，使箱内温度恢复到 $T = T_0$ 。手动控制过程包括以下几个主要环节：

1) 观察：操作人员通过眼睛观察测量温度计显示温度示数，了解被控制量——箱内温度当前的实际值。眼睛和温度计完成了检测系统参量的功能。

2) 判断：操作人员通过将被控制量——箱内温度当前的实际值与控制目标要求的理想值进行比较，确定其偏离的状态，并根据这个状态为调整系统的控制作用做出正确的决策，当 $T < T_0$ 时，应通过调整控制作用使箱温 T 升高。大脑完成了比较温度实际值与期望值而产生偏差的功能。

3) 调整：操作人员根据控制决策对系统的控制作用做出调整，改变控制量的大小，使被控制量恢复到控制目标要求的期望值。通过调整调压器的手柄，使加热器电阻丝两端的电压增大，箱内温度升高，直到 $T = T_0$ 为止。大脑、手和调压器完成了根据控制作用发出控制指令，施加给被控对象——恒温箱的功能。

用图 1-2 所示恒温箱温度手动控制系统原理框图的形式表示以上控制过程。

手动控制过程是通过循环进行下述过程实现的：

检测被控参量 → 确定偏差量 → 调整控制参量 → 消除偏差量。

即测量偏差，纠正偏差。通常把这样的控制称为偏差控制。也就是说，这一控制过程是利用实际温度和期望温度之间的偏差产生控制作用的，并不断使偏差减小直至消除的过程；同时，为了取得偏差信号，需要有实际温度信息反馈给大脑。信息反馈和偏差形成构成了反馈控制。反馈控制原理就是按偏差控制的原理进行的。

可以看出，手动控制系统要求操作人员随时观察被控参量的变化，随时、频繁地进行调整，且调整的程度往往需要根据操作人员的经验来决定，操作者的劳动强度很大，且常常出现控制作用不及时或不够准确的现象。因此，系统的控制精度较低。而自动控制系统可以将操作人员从繁杂的工作中解脱出来，大大降低劳动强度，从而提高生产效率和产品质量，即自动控制系统通过设置自动控制装置来取代操作人员的全部控制作用，实现对被控制量的自动控制，以达到控制目标的要求。

图 1-3 所示为恒温箱温度自动控制系统工作原理图。从图中可以看出，控制系统由如下几部分组成：

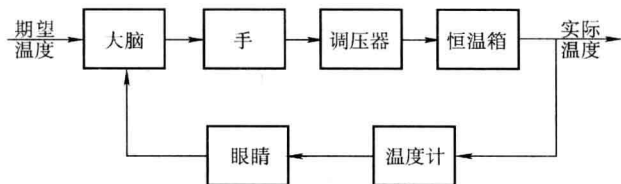


图 1-2 恒温箱温度手动控制系统原理框图

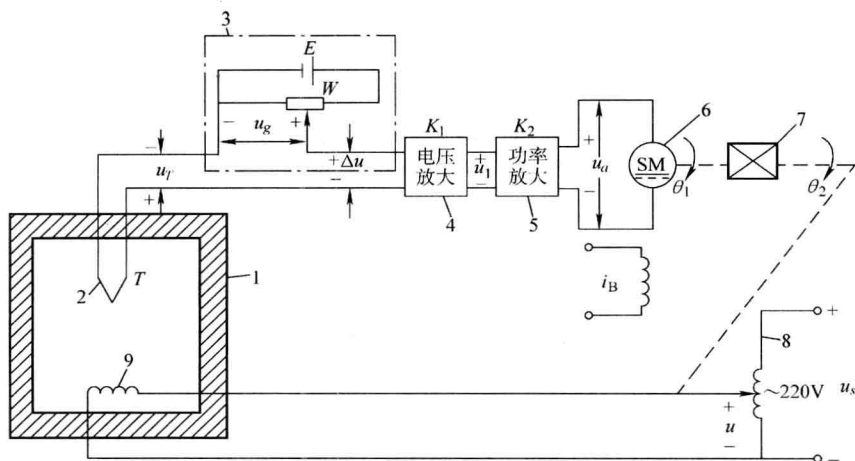


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统工作原理图

1—恒温箱 2—热电偶 3—分压器 4—电压放大器 5—功率放大器
6—直流伺服电动机 7—减速器 8—调压器 9—加热电阻丝

1) 恒温箱：由箱体和加热电阻丝组成，是控制系统的被控对象。**被控对象**是系统中需要加以控制的设备或装置，需要加以控制的变量是从属于被控对象的某个物理量，称为**被控制量**，如恒温箱内的温度 T 。

2) 热电偶：温度**测量元件**，测量温度值并将温度信号转换为与之成比例变化的电压信号输出，其工作特性为 $u_T = KT$ 。

3) 分压器：由直流电源和滑动变阻器组成。当恒温箱内的温度 $T = T_0$ 时，热电偶的输出电压 $u_T = KT = u_{T_0}$ ，对应被控制量的理想值。通过系统整定，改变滑动变阻器的滑动端，使分压器的输出电压 $u_g = u_{T_0}$ ，称为**给定值（给定输入或参考输入）**。提供系统给定值的装置称为**给定元件**。

4) 放大器：由电压放大器和功率放大器组成。电压放大器的作用是将热电偶的输出信号 u_T 与给定值 u_g 进行比较，生成偏差信号 $\Delta u = u_g - u_T$ ，并将偏差信号成比例放大后输出 u_1 ，其工作特性为 $u_1 = K_1 \Delta u$ 。在系统中设置放大器，可提高系统的控制灵敏度和控制精度。功率放大器的作用是为直流伺服电动机的工作提供功率驱动信号，即足够大的电枢电压。其工作特性可用 $u_a = K_2 u_1$ 表示。放大器的等效放大倍数 $K = K_1 K_2$ ，其工作特性为 $u_a = K \Delta u$ 。将输出信号测量出来并回送到输入端形成**反馈信号**，与给定值比较生成**偏差信号**的过程称为**反馈**，如果反馈信号与给定信号极性相反，则称为**负反馈**，反之则称为**正反馈**，即偏差是给定信号与反馈信号的代数和。在自动控制系统中常采用负反馈。

5) 执行机构：由直流伺服电动机、减速器和调压器构成，其作用是根据 u_a 信号的变化带动调压器的调整手柄移动，使调压器的输出电压 u 改变，从而改变加热电阻丝的电压，实现恒温箱温度调整。减速器的作用是使直流伺服电动机与调压器之间获得适当的速比配合。根据被控制量的变化要求，实现对控制信号自动调整的装置称为**执行机构**。在系统中，变量 u 直接作用给恒温箱，实现被控制量 T 的改变。由控制装置输出而作用在被控对象上，直接改变被控制量的物理量称为**控制量**，一般指执行机构的输出量。

恒温箱温度自动控制系统的工作原理如下：

当恒温箱吸收的热量与散失的热量达到动态热平衡状态时，箱内温度 $T = T_0$ ，测量元件热电偶检测到箱内温度，产生输出信号 $u_T = u_{T_0}$ ，通过负反馈产生偏差信号 $\Delta u = u_g - u_T = 0$ ，经放大器输出的 $u_a = 0$ ，直流伺服电动机不转动。调压器的输出不改变，保持系统的工作状态 $T = T_0$ 恒定不变。

当系统中存在干扰量（妨碍被控制量按照预定规律变化的因素）的影响，如电源电压下降时，加热电阻丝产生的输入热量下降，使恒温箱内的热平衡状态破坏，箱内温度 T 下降，热电偶的输出信号 u_T 下降，使 $u_T < u_g$ ，经负反馈与给定值比较，使偏差信号 $\Delta u > 0$ ，经放大器放大后输出到直流伺服电动机的电枢电压 $u_a > 0$ ，电动机正转，经减速器带动调压器的调整手柄移动，使加热电阻丝的电压 u 增大，输入热量增大，箱内温度升高。这个调节过程连续进行，直到 $T = T_0$ 时， $\Delta u = 0$ ，调节过程停止，并保持系统的工作状态不变。

上述调节过程可以用下式简单表示：

$u_s \downarrow \rightarrow u \downarrow \rightarrow T \downarrow \rightarrow u_T \downarrow \rightarrow \Delta u > 0 \rightarrow u_a > 0 \rightarrow \text{SM 正转} \rightarrow u \uparrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow \text{当 } T = T_0 \text{ 时, } u_T = u_{T_0}, \Delta u = 0, u_a = 0, \text{SM 停转, } T = T_0 \text{ 保持不变。}$

通过上述分析可以看到，自动控制系统与手动控制系统的工作原理是相同的，两者都是按照“测偏纠偏”的偏差控制原理工作的。在手动控制系统中，全部控制过程都要依靠操作人员的眼睛观察，大脑判断决策，手动调节来完成。而在自动控制系统中则是依靠自动控制装置，通过负反馈手段产生的偏差信号自动做出调整控制输入的控制决策，并通过执行机构来实现自动调整的。自动控制是指不需要人直接参与而使被控制量自动按预定规律变化的控制过程。

为了更加简明清晰地表示自动控制系统的结构及其内部信号传递关系，可用图 1-4 所示的原理框图描述恒温箱温度自动控制系统。

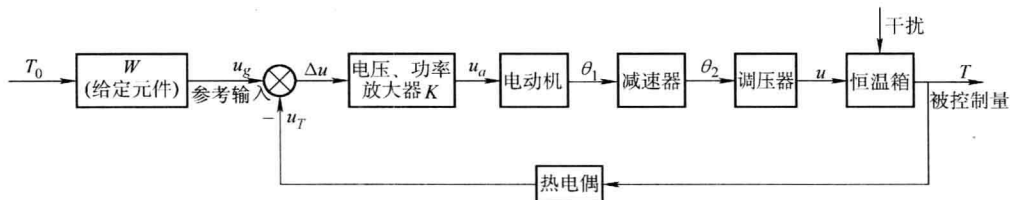


图 1-4 恒温箱温度自动控制系统原理框图

说明：图 1-4 中的每一个方框都表示控制系统中的一个基本独立环节；箭头方向表示控制系统中各独立环节的信号传递方向，箭头上标示的符号表示传递的信号；“⊗”表示比较环节；“-”表示信号相减；比较环节具有加法器的功能，其输出信号等于各输入信号的代数和。

从图中可见，由于采用了负反馈方式，使控制系统可以通过控制装置完全取代操作人员，对被控制量实现自动控制，使其达到控制目标要求。负反馈控制原理是将系统的输出信号引回到输入端，与输入信号相比较，形成偏差信号，然后根据偏差信号产生相应的控制作用，力图减小或消除偏差的过程。通常，把基于负反馈原理工作的自动控制系统称为反馈控制系统。反馈控制是实现自动控制的最基本方法。本书主要介绍负反馈控制系统分析与设计。

不同的控制系统实现自动控制的装置可以不尽相同，但是基于反馈控制原理工作的自动控制系统，分析系统各组成元件在系统中的基本职能，反馈控制系统均可看成由被控对象与以下几种基本类型的元件组成：给定元件、测量元件、比较元件、放大元件、执行元件和校正元件。

给定元件：产生系统给定值的装置或元件。给定值是与被控制量相对应的系统输入量，如恒温箱温度自动控制系统中的分压器是给定元件， u_g 是给定值。

测量元件：将被控制量检测出来并转换成电信号输出的装置或元件，一般为传感器（变送器），如热电偶等。测量不同属性的被控制量可以选择不同类型的传感器作为测量元件。

比较元件：将给定信号与反馈信号比较产生偏差信号的装置或元件。在大多数控制系统中，比较元件与测量元件或放大元件结合在一起，如由电位器构成的比较电路等。

放大元件：将比较微弱的偏差信号进行变换放大，使其具有足够的幅值和功率，如温度控制系统中的电压放大器和功率放大器等。

执行元件（执行机构）：根据偏差信号做出的控制决策产生动作，从而改变被控制量，使被控制量按照期望规律变化的装置或元件，如调压器和直流伺服电动机等。

校正元件：为了改善系统性能而在控制系统内加入的结构和参数均便于调整的装置或元件。根据校正元件在控制系统中的连接方式不同，可分为串联校正和反馈校正。在有些情况下，为了更有效地提高系统性能，可以同时应用串联校正和反馈校正。

由上述各基本元件组成的典型反馈控制系统原理框图如图 1-5 所示。

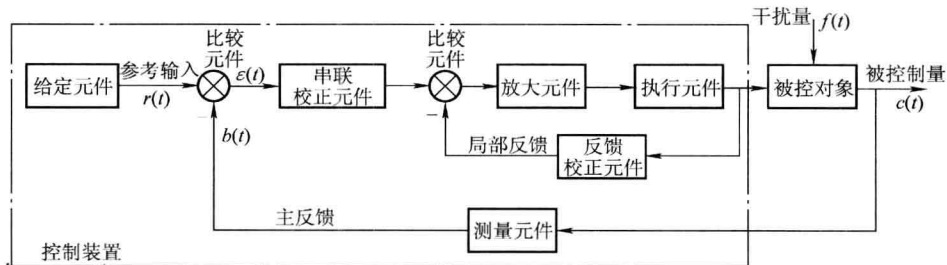


图 1-5 典型反馈控制系统原理框图

图 1-5 中，自动控制原理中的一些物理量符号标识如下：参考输入（给定输入）用“ $r(t)$ ”表示；偏差量（偏差信号）用“ $\varepsilon(t)$ ”表示；被控制量（输出量）用“ $c(t)$ ”表示；反馈量（反馈信号）用“ $b(t)$ ”表示；干扰量（干扰信号）用“ $f(t)$ ”表示。

另外，框图形象地表示出信号的传递过程，从偏差量 $\varepsilon(t)$ 到被控制量 $c(t)$ 的通道称为前向通道。从被控制量 $c(t)$ 到反馈量 $b(t)$ 的通道称为反馈通道。

1.3 自动控制系统的种类及应用实例

控制系统种类繁多，对于不同类型的控制系统需要采用不同的方法研究，以便建立适应不同类型系统的性能指标及其分析计算方法。从不同的角度出发可以对控制系统提出各种不同的分类方法。

1.3.1 自动控制系统分类

1. 按控制方式分类

按控制方式不同可将控制系统分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

开环控制系统是指控制装置和被控对象之间只有顺向作用而无反向联系的控制系統，如自动取款机和自动售货机等。

控制装置与被控对象之间既有顺向作用又有反向作用的控制系统为闭环控制系统，如恒温箱温度自动控制系统等。

将开环和闭环结合的控制系统称为复合控制系统。后面将对开环和闭环控制方式作详细介绍。

2. 按输入信号的性质分类

按输入信号形式不同可将控制系统分为恒值调节系统、随动系统和程序控制系统。

恒值调节系统是指参考输入为不随时间变化的常值，控制目标就是克服状态影响，保持被控制量恒定不变，如恒温箱温度自动控制系统和电动机转速控制系统等。

随动系统是指参考输入随时间变化且变化规律未知，其控制目标是保持被控制量紧密跟随输入信号的变化而变化的控制系统，如火炮随动系统和雷达跟踪系统等。

程序控制系统是指参考输入随时间变化且变化规律事先预知，其控制目标是保持被控制量按照预先已知的变化规律变化的控制系统，如数控机床控制系统等。

3. 按系统组成元件性质分类

按系统组成元件性质不同可将控制系统分为线性系统和非线性系统。

由线性元件组成的系统称为线性系统，其动态过程可以用线性微分方程描述。线性系统的主要特征是具有齐次性，满足叠加原理，即系统在输入信号 $x_1(t)$ 的作用下产生系统输出 $y_1(t)$ ，系统在输入信号 $x_2(t)$ 的作用下产生系统输出 $y_2(t)$ 。如果系统输入信号为 $ax_1(t) + bx_2(t)$ ，则系统输出为 $ay_1(t) + by_2(t)$ 。这里，系数 a 、 b 可以是常数，也可以是时变参数。

如果组成控制系统的元件中包括非线性元件，则称为非线性系统。非线性系统的动态过程可以用非线性微分方程描述，非线性系统不具有齐次性，也不满足叠加原理。严格地说，各种物理系统总有不同程度的非线性，根据非线性程度的不同，可以分为本质非线性和非本质非线性。非本质非线性系统在其工作点附近的小邻域内进行线性化的方法处理后，按线性系统的分析和设计方法进行分析和设计，本书第2章将详细介绍。对于本质非线性系统则需要专门的处理方法，本书第8章将详细介绍。

4. 按系统中元件参数的时变性分类

按系统中元件参数的时变性不同可将控制系统分为定常系统和时变系统。

定常系统中的元件参数均为常值，其动态方程中的各项系数均为不随时间变化的常数。

时变系统中的某个元件或者某些元件的参数是随时间变化的，其动态方程中的各项系数存在时间变量的函数形式。

5. 按系统内部信号性质分类

按系统内部信号性质不同可将控制系统分为连续控制系统和离散控制系统。

连续控制系统是指系统内各处的信号均为连续的模拟量信号的系統，其动态过程可以用微分方程描述。本书主要介绍的是线性定常连续系统。

离散控制系统是指系统内不仅存在连续的模拟量信号，而且存在离散的数字量信号的系

统,其动态过程可以用差分方程描述。计算机控制系统是典型的离散控制系统。本书第7章将详细介绍离散控制系统。

1.3.2 开环控制与闭环控制

开环控制和闭环控制是控制系统的两种最基本的控制方式。

1. 开环控制

开环控制是最简单的一种控制方式,它的特点是系统输入量和输出量之间仅有前向通道,没有反馈通道。

若系统的被控制量对系统的控制作用没有影响,则称其为开环控制系统。其原理框图如图1-6中实线部分所示。

开环控制系统结构简单,容易建造,成本低廉,工作稳定,因此在工程实践中有很多应用,如普通的洗衣机、简易的数控机床、自动饮料机和电源稳压控制系统等。

开环控制系统的控制精度取决于系统组成元件的精度及参数稳定性,因此对系统元件的要求较高;另外,若出现扰动,则会引起被控制量的较大变化,影响系统工作,因而开环控制系统的抗干扰能力差。有些情况下,如果扰动可测,则可以利用对扰动信号的测量产生一种补偿作用,以减小或抵消扰动对输出量的影响,如图1-6中的点画线所示。

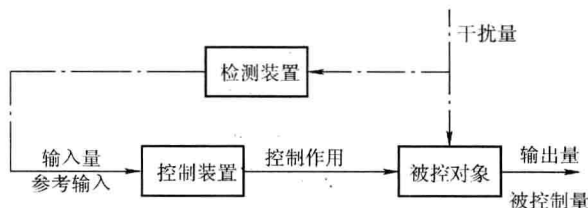


图 1-6 开环控制系统原理框图

对于系统控制量的变化规律可以预知,可能出现的干扰可以抑制,控制精度要求不高,扰动作用不大的情况,多采用开环控制。

2. 闭环控制

闭环控制的特点是系统输入量和输出量之间既有前向通道,也有反馈通道。

若系统的被控制量对控制作用有直接影响,则称其为闭环控制系统。其原理框图如图1-7所示。

负反馈闭环控制系统实现偏差控制,通过反馈通道使系统构成闭环并按偏差的性质产生控制作用,以求减小或消除偏差,所以系统输出量能自动跟踪输入量,使系统具有较强的抗干扰能力,控制精度较高。

但由于采用反馈装置,导致设备增多,线路复杂;闭环控制系统还存在稳定性问题。由于反馈通道的存在,对于那些惯性较大的系统,若参数配合不当,控制性能可能变得很差,甚至出现不稳定的情况。

对于系统外部干扰无法预知的情况,控制精度要求较高,在扰动作用大的情况下,多采用闭环控制。

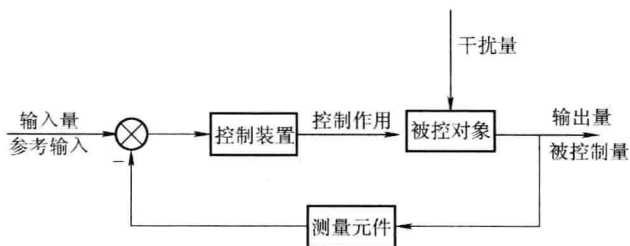


图 1-7 闭环控制系统原理框图

3. 复合控制

当闭环控制系统在某些方面不能满足系统控制要求时，常将开环控制和闭环控制方式相结合，称这样的控制系统为复合控制系统。其原理框图如图 1-8 所示。

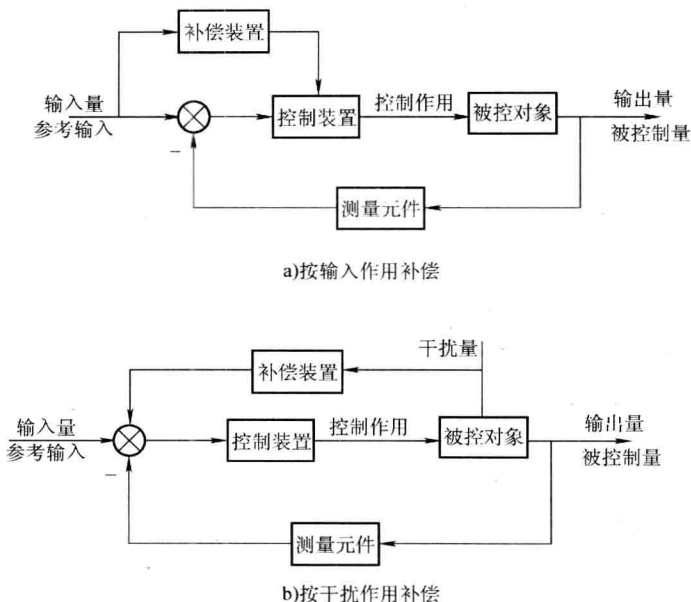


图 1-8 复合控制系统原理框图

图 1-8a 所示为附加参考输入补偿的复合控制，通过补偿装置提高系统的跟踪能力；图 1-8b 所示为附加干扰输入补偿的复合控制，通过补偿装置补偿可测干扰对输出的影响。

复合控制系统按偏差和扰动控制，控制系统具有很高的控制精度，可以抑制几乎所有的可测量干扰，但对补偿装置的参数要有较高的精准确度要求。

若要实现复杂而准确度比较高的控制任务，可将开环和闭环控制适当结合，组成经济性等各种性能都较好的复合控制系统。

1.3.3 自动控制系统应用实例

以下介绍按系统输入信号的性质不同而分的随动系统和恒值调节系统，以了解如何分析系统工作原理及框图的表示。

实例 1. 火炮随动系统

火炮随动系统的控制任务是控制火炮跟踪敌机，以便适时地开炮击中目标。火炮随动系统工作原理图如图 1-9 所示。

说明：自整角机测角线路中包括自整角发送机 I 和自整角接收机 II，功能是测量转角并转换为电压信号输出。自整角发送机的转轴为系统的输入轴，自整角接收机的转轴与火炮轴直接相连作为系统的输出轴。当炮瞄雷达搜索到目标，且目标已进入火炮射程内时，启动天线随动系统，不断把目标的方位角数据传递给指挥仪，由指挥仪根据当时的各种条件计算出为了使炮弹与目标在空中相遇的火炮炮口方位角 $\theta_1(t)$ ，作为系统的参考输入信号。炮口的实际方位角 $\theta_2(t)$ 作为系统的输出信号（被控制量）。自整角机测角线路将输入轴和输出轴的角差 $\Delta\theta = \theta_1(t) - \theta_2(t)$ 转换为电压 u ，即 $u = K_1 \times \Delta\theta$ (K_1 为自整角机传递系数)。

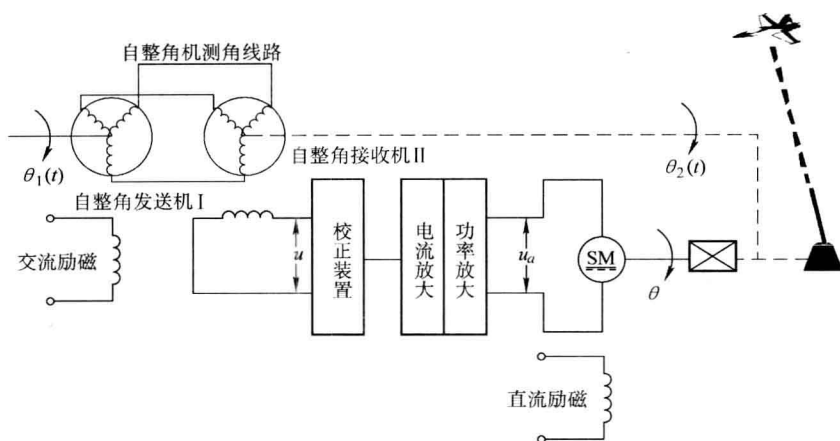


图 1-9 火炮随动系统工作原理图

从图 1-9 中可见，控制系统由如下几部分组成：

被控对象——火炮；

控制装置——自整角机测角线路、校正装置、放大器、直流伺服电动机、减速器；

测量元件、比较元件——自整角机测角线路，完成了测量方位角，并比较得到方位角偏差；

执行机构——SM（直流伺服电动机）、减速器；

放大元件——电流、功率放大器；

校正元件——校正装置。

系统工作原理如下：

假设随动系统初始时处于平衡状态，即 $\theta_1(t) = \theta_2(t) = 0^\circ$ ， $u = 0$ ，电动机电枢电压 $u_a = 0$ ，电动机不动，火炮不动。

当指挥仪给自整角机发送机 I 顺时针 30° 的方位角输入时， $\theta_1(t) = 30^\circ$ ，角差 $\Delta\theta = \theta_1(t) - \theta_2(t) = 30^\circ > 0$ ， $\Delta\theta \neq 0$ ， $u \neq 0$ ， $u > 0$ 。通过校正装置和放大器提供给直流电动机正向的电枢电压， $u_a \neq 0$ ， $u_a > 0$ ，电动机正转，从而通过减速器带动火炮炮口顺时针转动，直至火炮炮口顺时针转 30° ，即 $\theta_2(t) = \theta_1(t) = 30^\circ$ ， $\Delta\theta = 0$ ， $u_a = 0$ ，电动机和火炮停止转动，调节过程结束，系统进入新的平衡状态。

反之，如果指挥仪给自整角机发送机 I 逆时针 30° 的方位角输入，则火炮也会在直流电动机的带动下逆时针转 30° 。

火炮随动系统原理框图如图 1-10 所示。

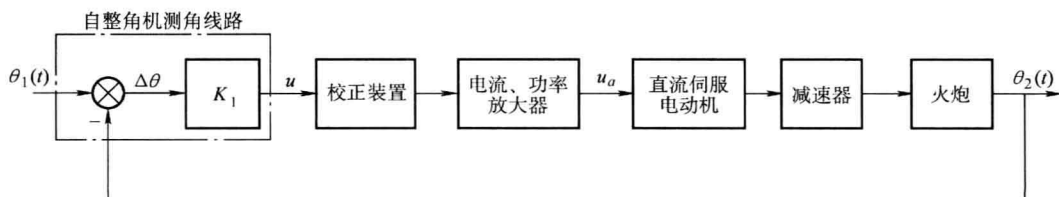


图 1-10 火炮随动系统原理框图