

高等学校教材

自动控制原理

卢京潮 主编
自动控制原理教学组 编

西北工业大学出版社

【内容提要】 本教材全面阐述了自动控制的基本理论,系统地介绍了自动控制系统分析和综合设计的基本方法。全书共分八章。其主要内容包括:自动控制的基本概念;控制系统数学描述方法;线性系统的时域分析和校正方法;根轨迹分析方法;频域分析和校正方法;线性离散系统的分析与校正方法;分析非线性系统的相平面方法和描述函数法;以及控制系统的状态空间分析与综合设计方法。在论述中注重基本概念和原理的阐述,突出工程应用方法。

本书可作为普通高等学校电气工程自动化、通信、计算机、自动控制等专业的大专生、本科生教材,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/卢京潮主编. —西安:西北工业大学出版社,2004.9
高等学校教材
ISBN 7-5612-1818-4

I. 自… II. 卢… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 075378 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:029-88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印刷者:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:24

字 数:580 千字

版 次:2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

定 价:29.00 元

前 言

随着 20 世纪自动化技术的巨大进步,自动控制理论得到不断的发展和完善。大学自动控制理论课程,越来越受到重视。实践证明,该课程不仅对工程技术有指导作用,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,现已成为诸多专业普遍开设的课程。

本教材全面阐述了自动控制的基本理论,系统地介绍了自动控制系统分析和综合设计的基本方法。全书共分八章,以基本的内容为主线,注重基本概念和原理的阐述,突出工程应用方法,论述严谨,理论性、系统性强,便于读者自学。

第 1 章对自动控制理论的发展历史进行了简单叙述,介绍了自动控制的基本概念,引出了自动控制系统的常用术语;对控制理论研究的对象和任务作了整体介绍。

第 2 章介绍控制系统数学描述方法,系统地讲述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等效化简和梅逊增益公式确定系统闭环传递函数的方法。

第 3 章介绍了线性系统的时域分析和校正方法,重点对系统的稳定性、快速性、准确性的分析方法进行了讨论;对反馈校正和复合校正方法作了介绍。

第 4 章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法则,以及利用根轨迹分析系统性能的方法。

第 5 章介绍工程上重点应用的系统频域分析和校正方法。对频域作图、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;详细介绍了频域串联校正方法。

第 6 章介绍了线性离散系统的分析与校正,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,介绍了数字控制器的直接设计方法。

第 7 章介绍了工程实际中常见的非线性特性,讨论了非线性系统的相平面法和描述函数法。

第 8 章介绍了控制系统的状态空间分析与综合设计方法,对系统的状态空间描述、运动分析、李雅普诺夫稳定性、可控性、可观测性、线性变换,以

及综合设计方法作了较系统的讨论。

教材中保留了课程的重点内容,去掉了工程上不常用的扩展内容,以突出基础和重点;在有些理论性较强的部分和主要的设计方法上作了较详细的论述,以便读者理解和自学;同时配有适量的习题,以配合课堂教学,帮助读者准确理解有关概念,掌握解题方法和技巧。

本书可作为普通高校电气工程自动化、通信、计算机、自动控制等专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可供有关科技人员参考。

本教材由西北工业大学自动化学院“自动控制原理教学组”集体分工编写,卢京潮任主编。参编者的具体分工是:第1,3,5章(部分)由卢京潮编写;第2章由刘慧英编写;第4章由袁冬莉编写;第6章由程咏梅编写;第7章由王新民、贾秋玲编写;第8章由赵忠编写;陈楸参与了第5章的编写工作;李丽锦与徐小东参与了第8章编写的辅助工作。

本书的编写是在栾云凤副院长的亲自组织和关心下完成的。宛良信、胡易两位教授规划、指导了教材的编写工作,并仔细审阅了全书,提出了宝贵的修改意见。陈新海教授对本书的内容安排提出了有益的建议并给予了热情的帮助。高建尧参与了书中有关 MATLAB 程序的设计验证,同时还和肖刚一起为本书的图文处理及编辑排版付出了辛勤的劳动。在此,谨向关心并为本教材的编写、出版做出贡献的所有同志表示深深的谢意!

对书中存在的错误及不妥之处,恳请各位读者、同行批评指正。

编 者

2004年6月

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 自动控制的一般概念 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 自动控制理论发展概述 | 1 |
| 1.3 自动控制和自动控制系统的基本概念 | 3 |
| 1.3.1 自动控制问题的提出 | 3 |
| 1.3.2 开环控制系统 | 4 |
| 1.3.3 闭环控制系统 | 5 |
| 1.3.4 开环控制系统与闭环控制系统的比较 | 6 |
| 1.3.5 复合控制系统 | 7 |
| 1.4 自动控制系统的组成 | 7 |
| 1.5 控制系统示例 | 8 |
| 1.6 自动控制系统的分类..... | 11 |
| 1.6.1 恒值控制系统和随动控制系统..... | 11 |
| 1.6.2 定常系统和时变系统..... | 11 |
| 1.6.3 线性系统和非线性系统..... | 12 |
| 1.6.4 连续系统与离散系统..... | 12 |
| 1.6.5 单变量系统和多变量系统..... | 12 |
| 1.7 对控制系统性能的基本要求..... | 12 |
| 1.8 本课程的研究内容..... | 14 |
| 第 1 章小结 | 14 |
| 习题 1 | 15 |
| 第 2 章 控制系统的数学模型 | 20 |
| 2.1 引言..... | 20 |
| 2.2 控制系统的时域数学模型..... | 20 |
| 2.2.1 线性元部件、线性系统微分方程的建立 | 20 |
| 2.2.2 非线性系统微分方程的线性化..... | 23 |
| 2.3 控制系统的复域数学模型..... | 25 |
| 2.3.1 传递函数..... | 25 |
| 2.3.2 常用控制元件的传递函数..... | 26 |
| 2.3.3 典型环节..... | 31 |
| 2.3.4 传递函数的标准形式..... | 32 |
| 2.4 控制系统的结构图及其等效变换..... | 33 |

| | | |
|-------|-------------|----|
| 2.4.1 | 结构图 | 33 |
| 2.4.2 | 结构图等效变换 | 35 |
| 2.5 | 控制系统的信号流图 | 39 |
| 2.5.1 | 信号流图 | 39 |
| 2.5.2 | 梅逊增益公式 | 40 |
| 2.6 | 控制系统的传递函数 | 41 |
| 2.6.1 | 系统的开环传递函数 | 41 |
| 2.6.2 | 闭环系统的传递函数 | 42 |
| 2.6.3 | 闭环系统的误差传递函数 | 42 |
| 第2章小结 | | 43 |
| 习题2 | | 44 |

第3章 线性系统的时域分析与校正 49

| | | |
|-------|---------------------|----|
| 3.1 | 概述 | 49 |
| 3.1.1 | 时域法的作用和特点 | 49 |
| 3.1.2 | 时域法常用的典型输入信号 | 49 |
| 3.1.3 | 系统的时域性能指标 | 49 |
| 3.2 | 一阶系统的时间响应及动态性能 | 51 |
| 3.2.1 | 一阶系统传递函数标准形式及单位阶跃响应 | 51 |
| 3.2.2 | 一阶系统动态性能指标计算 | 51 |
| 3.2.3 | 典型输入下一阶系统的响应 | 52 |
| 3.3 | 二阶系统的时间响应及动态性能 | 54 |
| 3.3.1 | 二阶系统传递函数标准形式及分类 | 54 |
| 3.3.2 | 过阻尼二阶系统动态性能指标计算 | 55 |
| 3.3.3 | 欠阻尼二阶系统动态性能指标计算 | 57 |
| 3.3.4 | 改善二阶系统动态性能的措施 | 67 |
| 3.4 | 高阶系统的阶跃响应及动态性能 | 71 |
| 3.4.1 | 高阶系统单位阶跃响应 | 71 |
| 3.4.2 | 闭环主导极点 | 72 |
| 3.4.3 | 估算高阶系统动态性能指标的零点极点法 | 72 |
| 3.5 | 线性系统的稳定性分析 | 74 |
| 3.5.1 | 稳定性的概念 | 74 |
| 3.5.2 | 稳定的充要条件 | 74 |
| 3.5.3 | 稳定判据 | 75 |
| 3.6 | 线性系统的稳态误差 | 77 |
| 3.6.1 | 误差与稳态误差 | 78 |
| 3.6.2 | 计算稳态误差的一般方法 | 79 |
| 3.6.3 | 静态误差系数法 | 80 |
| 3.6.4 | 干扰作用引起的稳态误差分析 | 82 |

| | |
|--------------------------|------------|
| 3.6.5 动态误差系数法 | 83 |
| 3.7 线性系统时域校正 | 86 |
| 3.7.1 反馈校正 | 86 |
| 3.7.2 复合校正 | 88 |
| 第3章小结 | 91 |
| 习题3 | 91 |
| 第4章 根轨迹法 | 99 |
| 4.1 根轨迹法的基本概念 | 99 |
| 4.1.1 根轨迹的基本概念 | 99 |
| 4.1.2 根轨迹与系统性能 | 100 |
| 4.1.3 闭环零、极点与开环零、极点之间的关系 | 101 |
| 4.1.4 根轨迹方程 | 102 |
| 4.2 绘制根轨迹的基本法则 | 103 |
| 4.3 广义根轨迹 | 112 |
| 4.3.1 参数根轨迹 | 112 |
| 4.3.2 零度根轨迹 | 114 |
| 4.4 利用根轨迹分析系统性能 | 117 |
| 4.4.1 利用闭环主导极点估算系统的性能指标 | 117 |
| 4.4.2 开环零、极点分布对系统性能的影响 | 121 |
| 第4章小结 | 123 |
| 习题4 | 123 |
| 第5章 线性系统的频域分析与校正 | 127 |
| 5.1 频率特性的基本概念 | 127 |
| 5.1.1 频率特性的定义 | 127 |
| 5.1.2 频率特性和传递函数的关系 | 129 |
| 5.1.3 频率特性的图形表示方法 | 130 |
| 5.2 幅相频率特性(Nyquist图) | 132 |
| 5.2.1 典型环节的幅相特性曲线 | 132 |
| 5.2.2 开环系统的幅相特性曲线 | 139 |
| 5.3 对数频率特性(Bode图) | 142 |
| 5.3.1 典型环节的Bode图 | 142 |
| 5.3.2 开环系统的Bode图 | 147 |
| 5.3.3 最小相角系统和非最小相角系统 | 148 |
| 5.4 频域稳定判据 | 150 |
| 5.4.1 奈奎斯特稳定判据 | 150 |
| 5.4.2 奈奎斯特稳定判据的应用 | 154 |
| 5.4.3 对数稳定判据 | 155 |

| | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----|
| 5.5 | 稳定裕度 | 157 |
| 5.5.1 | 稳定裕度的定义 | 157 |
| 5.5.2 | 稳定裕度的计算 | 158 |
| 5.6 | 利用开环频率特性分析系统的性能 | 160 |
| 5.6.1 | $L(\omega)$ 低频渐近线与系统稳态误差的关系 | 160 |
| 5.6.2 | $L(\omega)$ 中频段特性与系统动态性能的关系 | 160 |
| 5.6.3 | $L(\omega)$ 高频段对系统性能的影响 | 165 |
| 5.7 | 闭环频率特性曲线的绘制 | 166 |
| 5.7.1 | 用向量法求闭环频率特性 | 166 |
| 5.7.2 | 尼柯尔斯图线 | 166 |
| 5.8 | 利用闭环频率特性分析系统的性能 | 168 |
| 5.8.1 | 闭环频率特性的几个特征量 | 168 |
| 5.8.2 | 闭环频域指标与时域指标的关系 | 169 |
| 5.9 | 频率法串联校正 | 171 |
| 5.9.1 | 串联超前校正 | 171 |
| 5.9.2 | 串联迟后校正 | 175 |
| 5.9.3 | 串联迟后-超前校正 | 180 |
| 5.9.4 | 串联 PID 校正 | 183 |
| 第 5 章小结 | | 186 |
| 习题 5 | | 187 |
| 第 6 章 线性离散系统的分析与校正 | | 195 |
| 6.1 | 离散系统 | 195 |
| 6.1.1 | 采样控制系统 | 195 |
| 6.1.2 | 数字控制系统 | 196 |
| 6.1.3 | 数字控制系统与采样控制系统的关系 | 197 |
| 6.1.4 | 离散控制系统的特点 | 198 |
| 6.1.5 | 离散系统的研究方法 | 198 |
| 6.2 | 信号采样与保持 | 198 |
| 6.2.1 | 信号采样 | 198 |
| 6.2.2 | 零阶保持器 | 201 |
| 6.3 | z 变换理论 | 203 |
| 6.3.1 | z 变换定义 | 203 |
| 6.3.2 | z 变换方法 | 203 |
| 6.3.3 | z 变换的基本定理 | 204 |
| 6.3.4 | z 反变换 | 208 |
| 6.3.5 | z 变换法存在的局限性 | 210 |
| 6.4 | 离散系统的数学模型 | 210 |
| 6.4.1 | 线性常系数差分方程及其解法 | 211 |

| | | |
|------------------------------|-----------------------------|------------|
| 6.4.2 | 脉冲传递函数 | 212 |
| 6.4.3 | 开环系统脉冲传递函数 | 213 |
| 6.4.4 | 闭环系统脉冲传递函数 | 216 |
| 6.5 | 离散系统的稳定性与稳态误差 | 218 |
| 6.5.1 | s 域到 z 域的映射 | 218 |
| 6.5.2 | 线性定常离散系统稳定的充分必要条件 | 220 |
| 6.5.3 | 离散系统的稳定性判据 | 222 |
| 6.5.4 | 离散系统的稳态误差 | 225 |
| 6.6 | 离散系统的动态性能分析 | 228 |
| 6.6.1 | 离散系统的时间响应 | 228 |
| 6.6.2 | 闭环极点与动态响应的关系 | 230 |
| 6.7 | 离散系统的数字校正 | 232 |
| 6.7.1 | 数字控制器的脉冲传递函数 | 233 |
| 6.7.2 | 最少拍系统设计 | 233 |
| 第 6 章小结 | | 237 |
| 习题 6 | | 238 |
| 第 7 章 非线性控制系统分析 | | 242 |
| 7.1 | 非线性控制系统概述 | 242 |
| 7.1.1 | 非线性现象的普遍性 | 242 |
| 7.1.2 | 控制系统中的典型非线性特性 | 242 |
| 7.1.3 | 非线性控制系统的特殊性 | 244 |
| 7.1.4 | 非线性控制系统的分析方法 | 245 |
| 7.2 | 相平面法 | 245 |
| 7.2.1 | 相平面的基本概念 | 245 |
| 7.2.2 | 绘制相平面图的等倾斜线法 | 249 |
| 7.2.3 | 非线性系统的相平面分析 | 250 |
| 7.3 | 描述函数法 | 256 |
| 7.3.1 | 描述函数的基本概念 | 256 |
| 7.3.2 | 典型非线性特性的描述函数 | 257 |
| 7.3.3 | 用描述函数法分析非线性系统 | 260 |
| 7.4 | 改善非线性系统性能的措施及非线性特性的利用 | 265 |
| 7.4.1 | 改变线性部分的参数或针对线性部分进行校正 | 265 |
| 7.4.2 | 改变非线性特性 | 266 |
| 7.4.3 | 非线性特性的利用 | 266 |
| 第 7 章小结 | | 267 |
| 习题 7 | | 267 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 第 8 章 控制系统的状态空间分析与综合 | 271 |
| 8.1 控制系统的状态空间描述 | 271 |
| 8.1.1 系统数学描述的两种基本方法 | 271 |
| 8.1.2 状态空间描述常用的基本概念 | 272 |
| 8.1.3 系统的传递函数矩阵 | 275 |
| 8.1.4 线性定常系统动态方程的建立 | 275 |
| 8.2 线性系统的运动分析 | 289 |
| 8.2.1 线性定常连续系统的自由运动 | 289 |
| 8.2.2 状态转移矩阵的性质 | 292 |
| 8.2.3 线性定常连续系统的受控运动 | 293 |
| 8.2.4 线性定常离散系统的运动分析 | 294 |
| 8.2.5 连续系统的离散化 | 295 |
| 8.3 控制系统的李雅普诺夫稳定性分析 | 296 |
| 8.3.1 李雅普诺夫稳定性概念 | 296 |
| 8.3.2 李雅普诺夫稳定性间接判别法 | 298 |
| 8.3.3 李雅普诺夫稳定性直接判别法 | 298 |
| 8.3.4 线性定常系统的李雅普诺夫稳定性分析 | 302 |
| 8.4 线性系统的可控性和可观测性 | 304 |
| 8.4.1 可控性和可观测性的概念 | 304 |
| 8.4.2 线性定常系统的可控性 | 305 |
| 8.4.3 线性定常系统的可观测性 | 312 |
| 8.4.4 可控性、可观测性与传递函数矩阵的关系 | 317 |
| 8.4.5 连续系统离散化后的可控性与可观测性 | 321 |
| 8.5 线性系统非奇异线性变换及系统的规范分解 | 322 |
| 8.5.1 线性系统的非奇异线性变换及其性质 | 322 |
| 8.5.2 几种常用的线性变换 | 324 |
| 8.5.3 对偶原理 | 327 |
| 8.5.4 线性系统的规范分解 | 329 |
| 8.6 线性定常控制系统的综合设计 | 331 |
| 8.6.1 状态反馈与极点配置 | 332 |
| 8.6.2 输出反馈与极点配置 | 336 |
| 8.6.3 状态重构与状态观测器设计 | 337 |
| 8.6.4 降维状态观测器的概念 | 340 |
| 第 8 章小结 | 341 |
| 习题 8 | 341 |
| 附录 | 346 |
| A 拉普拉斯变换及反变换 | 346 |

| | |
|----------------------|------------|
| B 常见的无源及有源校正网络 | 349 |
| C 综合练习题 | 351 |
| D 习题答案 | 357 |
| 参考文献 | 372 |

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 引言

在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术和理论已经成为现代化社会的不可缺少的组成部分。自动控制技术及理论已经广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、电子、电力、航空、航海、航天、核反应堆等各个学科领域。近年来,控制学科的应用范围还扩展到交通管理、生物医学、生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域,并对各学科之间的相互渗透起到了促进作用。自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化,从而提高了劳动生产率 and 产品质量,降低生产成本,提高经济效益,改善劳动条件,使人们从繁重的体力劳动和单调重复的脑力劳动中解放出来,而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明等方面都具有十分重要的意义。

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。学习和研究自动控制理论是为了探索自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径,为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。作为现代的工程技术人员和科学工作者,都必须具备一定的自动控制理论基础知识。

1.2 自动控制理论发展概述

自动控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生,并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展、完善起来的。

早在古代,劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识,发明了许多闪烁控制理论智慧火花的杰作。例如,我国北宋时代(公元 1086—1089 年)苏颂和韩公廉利用天衡装置制造的水运仪象台,就是一个按负反馈原理构成的闭环非线性自动控制系统;1681 年 Dennis Papin 发明了用做安全调节装置的锅炉压力调节器;1765 年俄国人普尔佐诺夫(I. Polzunov)发明了蒸汽锅炉水位调节器等等。

1788 年,英国人瓦特(James Watt)在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决了蒸汽机的速度控制问题,引起了人们对控制技术的重视。以后人们曾经试图改善调速器的准确性,却常常导致系统产生振荡。

实践中出现的问题,促使科学家们从理论上进行探索研究。1868 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析,解释了瓦特速度控制系统

中出现的不稳定问题,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后,英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家古尔维茨(A. Hurwitz)分别在1877年和1895年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

1932年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,奠定了频率响应法的基础。随后,伯德(H. W. Bode)和尼柯尔斯(N. B. Nichols)在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法,为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

第二次世界大战期间,反馈控制方法被广泛用于设计研制飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统及其他军用系统。这些系统的复杂性和对快速跟踪、精确控制的高性能追求,迫切要求拓展已有的控制技术,促使了许多新的见解和方法的产生,同时,还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。

1948年,美国科学家伊万思(W. R. Evans)创立了根轨迹分析方法,为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具,被广泛应用于反馈控制系统的分析、设计中。

以传递函数作为描述系统的数学模型,以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析设计工具,构成了经典控制理论的基本框架。到20世纪50年代,经典控制理论发展到相当成熟的地步,形成了相对完整的理论体系,为指导当时的控制工程实践发挥了极大的作用。

经典控制理论研究的对象基本上是以线性定常系统为主的单输入单输出系统,还不能解决如时变参数问题,多变量、强耦合等复杂的控制问题。

20世纪50年代中期,空间技术的发展迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题(例如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制)。实践的需求推动了控制理论的进步,同时,计算机技术的发展也从计算手段上为控制理论的发展提供了条件,适合于描述航天器的运动规律,又便于将计算机求解的状态空间描述成为主要的模型形式。俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)1892年创立的稳定性理论被引用到控制中。1956年,前苏联科学家庞特里亚金(Pontryagin)提出极大值原理;同年,美国数学家贝尔曼(R. Bellman)创立了动态规划。极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。1959年美国数学家卡尔曼(R. Kalman)提出了著名的卡尔曼滤波器,1960年卡尔曼又提出系统的可控性和可观测性问题。到20世纪60年代初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波为核心的控制系统分析、设计的新原理和方法基本确定,现代控制理论应运而生。

现代控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适用于多变量、非线性、时变系统。现代控制理论在航空、航天、制导与控制中创造了辉煌的成就,人类迈向宇宙的梦想变为现实。

为了解决现代控制理论在工业生产过程中的应用中所遇到的被控对象精确状态空间模型不易建立、合适的最优性能指标难以构造、所得最优控制器往往过于复杂等问题,科学家们不懈努力,近几十年中不断提出一些新的控制方法和理论,例如,自适应控制,模糊控制,预测控制,容错控制,鲁棒控制,非线性控制和大系统、复杂系统控制等,大大地扩展了控制理论的研究范围。

控制理论目前还在向更深、更广阔的领域发展,无论在数学工具、理论基础方面,还是在研

究方法上都产生了实质性的飞跃,而且在信息与控制学科研究中注入了蓬勃的生命力,启发并扩展了人的思维方式,引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。控制理论的深入发展,必将有力地推动社会生产力的发展,提高人民的生活水平,促进人类社会的向前发展。

1.3 自动控制和自动控制系统的概念

1.3.1 自动控制问题的提出

在许多工业生产过程或生产设备运行中,为了保证正常的工作条件,往往需要对某些物理量(例如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等)进行控制,使其尽量维持在某个数值附近,或使其按一定规律变化。若要满足这种需要,就应该对生产机械或设备进行及时的操作,以抵消外界干扰的影响。这种操作通常称为控制,用人工操作称为人工控制,用自动装置来完成称为自动控制。

图 1-1(a) 所示是人工控制水位保持恒定的供水系统。水池中的水位是被控制的物理量,简称被控量。水池这个设备是控制的对象,简称被控对象。当水位在给定位置且流入、流出量相等时,它处于平衡状态。当流出量发生变化或水位给定值发生变化时,就需要对流入量进行必要的控制。在人工控制方式下,工人用眼观看水位情况,用脑比较实际水位与期望水位的差异并根据经验做出决策,确定进水阀门的调节方向与幅度,然后用手操作进水阀门进行调节,最终使水位等于给定值。只要水位偏离了期望值,工人便要重复上述调节过程。

图 1-1(b) 所示是水池水位自动控制系统的一种简单形式。图中用浮子代替人的眼睛,用来测量水位高低;另用一套杠杆机构代替人的大脑和手的功能,用来进行比较、计算误差并实施控制。杠杆的一端由浮子带动,另一端则连向进水阀门。当用水量增大时,水位开始下降,浮子也随之降低,通过杠杆的作用将进水阀门开大,使水位回到期望值附近。反之,若用水量变小,则水位及浮子上升,进水阀关小,水位自动回到期望值附近。整个过程中无须人工直接参与,控制过程是自动进行的。

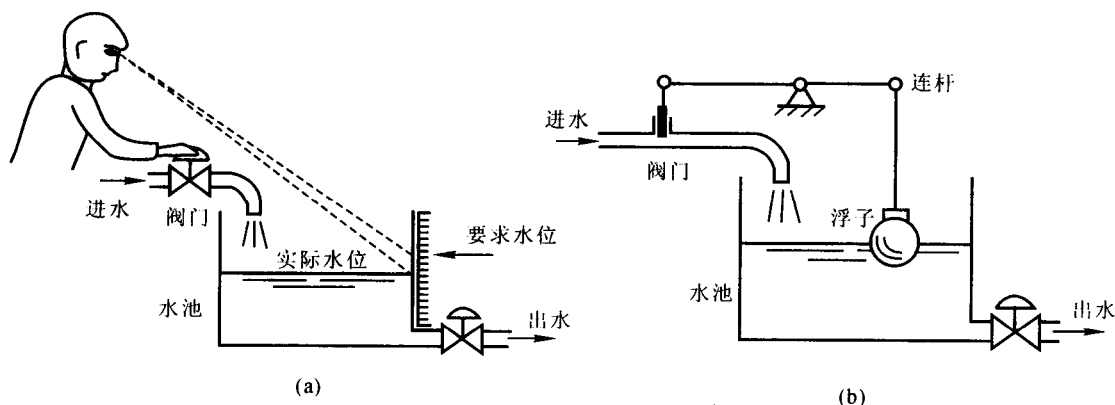


图 1-1 水位控制系统

(a) 人工控制的水位系统; (b) 简单的水位自动控制系统

图 1-1(b) 所示的系统虽然可以实现自动控制,但由于结构简陋而存在缺陷,主要表现在

被控制的水位高度将随着出水量的变化而变化。出水量越多,水位就越低,偏离期望值就越远,误差越大。控制的结果,总存在着一定范围的误差值。这是因为当出水量增加时,为了使水位基本保持恒定不变,就得开大阀门,增加进水量。要开大进水阀,惟一的途径是浮子要下降得更多,这意味着实际水位要偏离期望值更多。这样,整个系统就会在较低的水位上建立起新的平衡状态。

为克服上述缺点,可在原系统中增加一些设备而组成较完善的自动控制系统,如图1-2所示。这里,浮子仍是测量元件,连杆起着比较作用,它将期望水位与实际水位两者进行比较,得出误差,同时推动电位器的滑臂上下移动。电位器输出电压反映了误差的性质(大小和方向)。电位器输出的微弱电压经放大器放大后驱动直流伺服电动机,其转轴经减速器后拖动进水阀门,对系统施加控制作用。

在正常情况下,实际水位等于期望值,此时,电位器的滑臂居中,输出电压 $u_c = 0$ 。当出水量增大时,浮子下降,带动电位器滑臂向上移动, $u_c > 0$,经放大后成为 u_a ,控制电动机正向旋转,以增大进水阀门开度,促使水位回升。当实际水位回复到期望值时, $u_c = 0$,系统达到新的平衡状态。

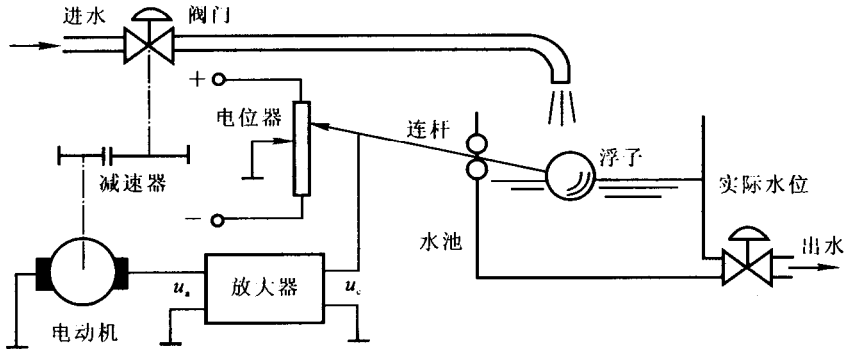


图 1-2 水位控制系统

可见,该系统在运行时,无论何种干扰引起水位出现偏差,系统都要进行调节,最终总是使实际水位等于期望值,大大提高了控制精度。

由此例可知,自动控制和人工控制极为相似,自动控制系统只不过是把某些装置有机地组合在一起,以代替人的职能而已。图1-2中所示的浮子相当于人的眼睛,对实际水位进行测量;连杆和电位器类似于大脑,完成比较运算,给出偏差的大小和极性;电动机相当于人手,调节阀门开度,对水位实施控制。这些装置相互配合,承担着控制的职能,通常称之为控制器(或控制装置)。任何一个控制系统,都是由被控对象和控制器两部分所组成的。

1.3.2 开环控制系统

最常见的控制方式有三种:开环控制、闭环控制和复合控制。对于某一个具体的系统,采取什么样的控制手段,应该根据具体的用途和目的而定。

系统的控制输入不受输出影响的控制系统称开环控制系统。在开环控制系统中,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。

图1-3(a)所示的他激直流电动机转速控制系统就是一个开环控制系统。它的任务是控制

直流电动机以恒定的转速带动负载工作。系统的工作原理是：调节电位器 R 的滑臂，使其输出给定参考电压 u_r ， u_r 经电压放大和功率放大后成为 u_a ，送到电动机的电枢端，用来控制电动机转速。在负载恒定的条件下，他激直流电动机的转速 ω 与电枢电压 u_a 成正比，只要改变给定电压 u_r ，便可得到相应的电动机转速 ω 。

在本系统中，直流电动机是被控对象，电动机的转速 ω 是被控量，也称为系统的输出量或输出信号。把参考电压 u_r 通常称为系统的给定量或输入量。

就图 1-3(a) 而言，只有输入量 u_r 对输出量 ω 的单向控制作用，而输出量 ω 对输入量 u_r 却没有任何影响和联系，这种系统称为开环控制系统。

直流电动机转速开环控制系统可用图 1-3(b) 所示的方框图表示。图中用方框代表系统中具有相应职能的元部件；用箭头表示元部件之间的信号及其传递方向。电动机负载转矩 M_c 的任何变动，都会使输出量 ω 偏离希望值，这种作用称之为干扰或扰动，在图 1-3(b) 中用一个作用在电动机上的箭头来表示。

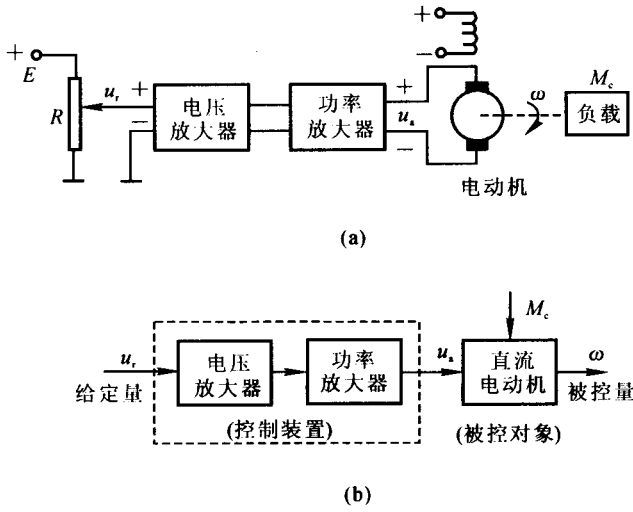


图 1-3 直流电动机转速控制系统

(a) 直流电动机转速开环控制系统；(b) 直流电动机转速开环控制系统方框图

1.3.3 闭环控制系统

开环控制系统精度不高和适应性不强的主要原因是缺少从系统输出到输入的反馈回路。若要提高控制精度，就必须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。

在图 1-3(a) 所示的直流电动机转速开环控制系统中，加入一台测速发电机，并对电路稍作改变，便构成了如图 1-4(a) 所示的直流电动机转速闭环控制系统。

在图 1-4(a) 中，测速发电机由电动机同轴带动，它将电动机的实际转速 ω (系统输出量) 测量出来，并转换成电压 u_f ，再反馈到系统的输入端，与给定值电压 u_r (系统输入量) 进行比较，从而得出电压 $u_c = u_r - u_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质 (即大小和正负方向)，

通常称之为偏差信号,简称偏差。偏差 u_e 经放大器放大后成为 u_a ,用以控制电动机转速 ω 。

直流电动机转速闭环控制系统可用图 1-4(b) 所示的方框图来表示。通常,把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道;从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。方框图中用符号“ \otimes ”表示比较环节,其输出量等于各个输入量的代数和。因此,各个输入量均须用正、负号表明其极性。图中清楚地表明,由于采用了反馈回路,致使信号的传输路径形成闭合回路,使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈回路使系统构成闭环,并按偏差产生控制作用,用以减小或消除偏差的控制系统,称为闭环控制系统,或称反馈控制系统。

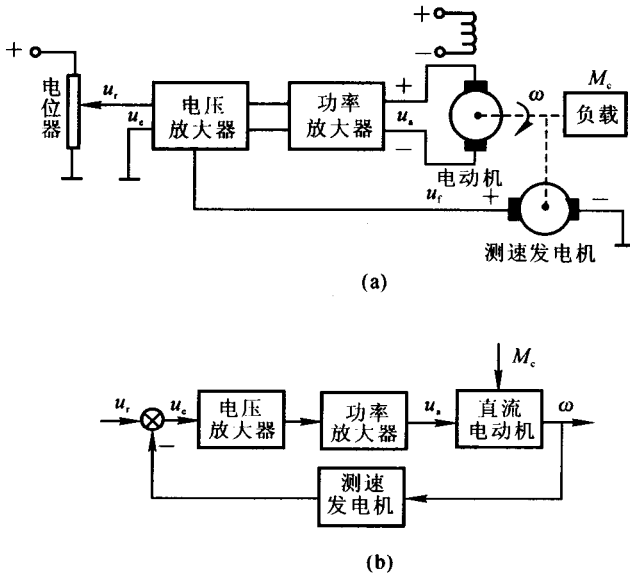


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

(a) 直流电动机转速闭环控制系统; (b) 直流电动机转速闭环控制系统方框图

必须指出,在系统主反馈通道中,只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈,将使偏差越来越大,导致系统发散而无法工作。

闭环系统工作的本质机理是:将系统的输出信号引回到输入端,与输入信号相比较,利用所得的偏差信号对系统进行调节,达到减小偏差或消除偏差的目的。这就是负反馈控制原理,它是构成闭环控制系统的核心。

闭环控制是最常用的控制方式,我们所说的控制系统,一般都是指闭环控制系统。闭环控制系统是本课程讨论的重点。

1.3.4 开环控制系统与闭环控制系统的比较

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,