

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

自动控制原理

主 编 丁肇红 胡志华
副主编 孙国琴 蒋文萍

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

自动控制原理

主 编 丁肇红 胡志华

副主编 孙国琴 蒋文萍

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是根据全国高等院校电气工程及自动化专业规划教材教学指导小组制定的教材规划而编写的,为应用型本科教材。

本书系统地介绍了自动控制理论的基本内容,着重阐述了控制系统的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共分九章,分别为:绪论、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、线性控制系统的频域分析法、线性控制系统的校正、线性离散控制系统、非线性控制系统分析和自动控制理论的应用实例。为了适应培养“高素质的工程技术类应用型人才”的需要,体现工程应用性,本书增加了工程应用实例,旨在提高学生综合分析和解决工程实际问题的能力。

本书可作为高校应用型本科电气自动化、机电一体化、电子信息类及仪器仪表等专业“自动控制原理”课程的教材,也可供从事自动控制工程的专业技术人员自学参考。

本书有配套的 PPT 课件和习题解答。有需要者可联系作者。(作者 E-mail: dzh@sit.edu.cn)

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/丁肇红,胡志华主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.1

应用型本科电气工程及自动化专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4326-7

I. ① 自… II. ① 丁… ② 胡… 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(2016)第 259257 号

策划编辑 高 樱 马晓娟

责任编辑 杨 璠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 21.5

字 数 508 千字

印 数 1~2000 册

定 价 42.00 元

ISBN 978-7-5606-4326-7/TP

XDUP 4618001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

编审专家委员会名单

主 任：汪志锋(上海第二工业大学电子与电气工程学院 院长/教授)

副主任：罗印升(江苏理工学院 电气信息工程学院 院长/教授)

刘 燕(常熟理工学院 电气与自动化工程学院 教授)

成 员：(按姓氏拼音排列)

陈 桂(南京工程学院 自动化学院 副院长/副教授)

邓 琛(上海工程技术大学 电子电气工程学院 副院长/教授)

杜逸鸣(三江学院 电气与自动化工程学院 副院长/副教授)

高 亮(上海电力学院 电气工程学院 副院长/教授)

胡国文(盐城工学院 电气工程学院 院长/教授)

姜 平(南通大学 电气工程学院 副院长/教授)

王志萍(上海电力学院 自动化工程学院 副院长/副教授)

杨亚萍(浙江万里学院 电子信息学院 副院长/副教授)

于海春(淮阴师范学院 物理与电子电气工程学院 副院长/副教授)

郁有文(南通理工学院 机电系 教授)

张宇林(淮阴工学院 电子与电气工程学院 副院长/教授)

周渊深(淮海工学院 电子工程学院 副院长/教授)

邹一琴(常州工学院 电子信息与电气工程学院 副院长/副教授)

前 言

我国教育部工作要点明确提出,要引导一批本科高校向应用技术类高校转型。而应用型本科教材在培养工科应用型技术创新人才的教学上起着关键的作用,为了具体贯彻应用型本科教育由“重视规模发展”转为“注重质量提高”的工作思路,就必须重视应用型本科教材的建设。本书编者根据二十几年从事本科教学的经验,编写了本书。在编写过程中,编者针对教学目的,加强了工程实例与控制理论的结合。

自动控制技术广泛应用于工农业生产、交通运输、国防建设和经济领域。随着科技的进步,控制理论也有了很大的发展,其概念、方法和体系已经渗透到许多学科领域。为了适应应用型本科教学,紧跟科技发展前沿,体现自动控制理论在日益发展的科技创新工程中的应用,本书增加了移动机器人控制系统、磁悬浮控制系统等较前沿的工程案例分析。

全书为了体现教材应用型的特点,将实例“直线一级倒立摆控制系统”贯穿于前六章的相应章节中,目的是使读者充分理解控制系统的工作原理、性能分析及工程设计过程。另外,MATLAB 辅助分析和设计也是本课程教学的重要组成部分,本书在每一章都强化了这一方面的内容。

本书内容共分九章。1~6 章为经典控制理论:第 1 章通过工程实例介绍了控制系统的基本概念、系统组成及控制方式;第 2 章介绍了控制系统数学模型的不同表达形式、工程中常用控制器的传递函数及一级倒立摆系统的建模过程,并用 MATLAB 软件实现了数学模型之间的转换;第 3 章介绍了线性控制系统的时域分析法,包括一、二阶系统性能及高阶系统的主导极点,系统稳定性及稳态误差的分析,一级倒立摆系统的 MATLAB 时域分析;第 4 章介绍了线性控制系统的根轨迹分析法,包括根轨迹及广义根轨迹的绘制、用根轨迹法分析控制系统性能、系统主导极点与时域指标的关系、一级倒立摆系统的 MATLAB 根轨迹分析;第 5 章介绍了线性控制系统的频域分析法,包括频率特性(伯德图与奈氏图)、奈奎斯特稳定判据、开闭环频域指标、一级倒立摆系统的 MATLAB 频域分析;第 6 章介绍了线性控制系统校正装置的设计,包括校正装置及校正方法,串联超前校正、串联滞后校正、串联滞后-超前校正的根轨迹校正及频率法校正,PID 及参数整定方法,一级倒立摆系统的 MATLAB 频域法设计。第 7 章介绍了线性离散控制系统,包括采样定理,Z 变换及脉冲传递函数,系统稳定性、稳态误差及动态响应性能的分析等;第 8 章介绍了非线性控制系统,包括非线性控制系统的概述及其一般分析方法——相平面法和描述函数法;第 9 章介绍了自动控制理论的应用实例,每个工程实例包括实际系统数学模型的建立、系统性能的分析、控制器的设计及系统的综合评价,这些工程实例体现了教材的应用型特色,符合应用型本科的教学要求。

本书在取材和阐述方式上注重工程性、应用性,将实践教学环节和计算机辅助设计融为一体并贯穿全书;在内容上避免了复杂的公式推导;在叙述上力求概念明确、层次分明;在例题的选用上考虑实用性,并给出了详细的解题步骤,以供不同专业的学生选用。由于

前 6 章与第 7 章、第 8 章、第 9 章的内容有相对独立性,因此本书在删除一些章节后还可供其他非电类专业选用。本书的内容能够满足工科院校不同专业 64~84 学时的教学需要。

本书最后有三个附录,附录 A 为拉普拉斯变换,附录 B 为自动控制原理的 MATLAB 常用控制系统命令索引,附录 C 为自动控制原理的常用技术术语的中英文对照。

本书由上海应用技术大学丁肇红副教授和上海第二工业大学胡志华副教授主编,其中第 4 章由胡志华副教授和陶莉莉老师编写,第 3 章、第 6 章和第 9 章第 3 节由上海应用技术大学孙国琴副教授编写,第 7 章及第 9 章第 2 节由上海应用技术大学蒋文萍老师编写,其余各章均由丁肇红副教授编写,他还负责全书的组稿、定稿和统稿工作。

本书由叶银忠教授担任主审,他对本书提出了许多宝贵的意见,在此深表谢意!本书的部分图形由研究生徐亦雯、李伟、王希同和桑建绘制,在此表示感谢!本书在编写过程中参阅了大量公开出版的教材及习题集,也在此对这些教材和习题集的作者及编者表示感谢。

虽然我们在编写本书的过程中花了不少的精力,但仍存在许多不尽如人意之处,殷切希望同行专家及广大读者不吝指教。

上海应用技术大学
电气与工程学院

丁肇红

2016 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4 控制系统的传递函数	42
1.1 引言	1	2.4.1 系统的开环传递函数	42
1.1.1 自动控制理论发展简史	2	2.4.2 闭环系统的传递函数	43
1.1.2 控制工程实践	2	2.4.3 系统的误差传递函数	43
1.2 反馈控制的基本原理	4	2.4.4 常用控制器的传递函数	45
1.2.1 人工控制与自动控制	4	2.5 信号流程图	46
1.2.2 反馈控制系统的基本组成和 常用术语	5	2.5.1 信号流图的术语	47
1.2.3 自动控制系统的的基本控制方式	7	2.5.2 信号流图的基本性质	48
1.3 自动控制系统工程实例	9	2.5.3 梅森增益公式的应用	48
1.3.1 电冰箱制冷控制系统	9	2.6 控制系统建模实例	50
1.3.2 倒立摆控制系统	10	2.6.1 一级倒立摆系统的建模	50
1.3.3 位置随动控制系统	11	2.6.2 用 MATLAB 处理数学模型	52
1.3.4 移动机器人控制系统	12	2.6.3 不同形式模型之间的相互转换	53
1.4 自动控制系统分类	13	2.7 小结	54
1.4.1 按描述系统的数学模型分类	13	习题二	54
1.4.2 按系统传输信号的性质分类	14	第 3 章 线性控制系统的时域分析法	58
1.4.3 按输入信号 $r(t)$ 的变换规律 分类	14	3.1 系统时间响应的性能指标	58
1.5 控制系统设计概述	14	3.1.1 典型输入信号	58
1.5.1 对控制系统的基本要求	14	3.1.2 动态性能与稳态性能	60
1.5.2 自动控制系统的设计原则	16	3.2 控制系统的时域分析	61
习题一	17	3.2.1 一阶系统时域分析	61
第 2 章 控制系统的数学模型	19	3.2.2 二阶系统时域分析	63
2.1 系统的微分方程	19	3.2.3 高阶系统时域分析	73
2.1.1 列写物理系统的微分方程	19	3.3 线性系统稳定性分析	75
2.1.2 控制系统微分方程的建立	23	3.3.1 稳定性的基本概念	76
2.1.3 非线性微分方程的线性化	24	3.3.2 劳斯(Routh)稳定判据	77
2.2 传递函数	25	3.3.3 稳定判据的应用	80
2.2.1 传递函数的概念和求取	25	3.4 线性系统的稳态误差分析	82
2.2.2 单位脉冲响应	29	3.4.1 误差与稳态误差的基本概念	82
2.2.3 典型环节的传递函数和单位 阶跃响应	30	3.4.2 系统的类型	83
2.3 结构图	34	3.4.3 典型输入信号作用下的稳态误差	83
2.3.1 结构图的组成和绘制	35	3.4.4 扰动作用下的稳态误差	86
2.3.2 方框图的基本连接与等效变换	37	3.4.5 减小或消除稳态误差的措施	88
		3.5 MATLAB 在时域分析与设计中的应用	89

3.5.1 用 MATLAB 分析系统的时域响应	89	5.3.3 最小相位系统和非最小相位系统	151
3.5.2 用 MATLAB 分析系统的稳定性及稳态误差	94	5.3.4 系统类型与开环对数幅频特性的关系	152
3.5.3 用 MATLAB 分析一级倒立摆系统的时域响应	95	5.4 奈奎斯特稳定判据	154
3.6 小结	96	5.4.1 开环与闭环系统零、极点间的关系	154
习题三	97	5.4.2 幅角原理	155
第 4 章 线性控制系统的根轨迹分析法	101	5.4.3 奈奎斯特稳定判据	158
4.1 根轨迹的基本概念	101	5.4.4 奈奎斯特稳定判据在 Bode 图上的应用	163
4.1.1 根轨迹的概念	101	5.5 相对稳定性分析	166
4.1.2 根轨迹与系统性能	102	5.5.1 幅值裕度	166
4.1.3 闭环零、极点与开环零、极点的关系	103	5.5.2 相角裕度	168
4.1.4 根轨迹方程	104	5.5.3 基于开环对数频率特性的闭环系统性能分析	169
4.2 根轨迹绘制的基本法则	105	5.6 闭环频率特性与时域性能指标的关系	172
4.3 广义根轨迹	113	5.6.1 闭环频率特性指标	172
4.3.1 参数根轨迹	113	5.6.2 闭环频域指标和时域性能指标的关系	175
4.3.2 零度根轨迹	114	5.7 基于 MATLAB 的频率特性分析	177
4.4 用根轨迹法分析控制系统性能	116	5.7.1 利用 MATLAB 绘制伯德图	177
4.4.1 用闭环零、极点表示的阶跃响应表达式	116	5.7.2 利用 MATLAB 绘制奈氏图	180
4.4.2 闭环零、极点分布与阶跃响应的定性关系	117	5.7.3 一级倒立摆系统的频域法分析	182
4.4.3 利用主导极点估算系统性能指标	118	5.8 小结	183
4.5 基于 MATLAB 的根轨迹分析	120	习题五	184
4.5.1 绘制系统根轨迹图的 MATLAB 命令	120	第 6 章 线性控制系统的校正	189
4.5.2 一级倒立摆系统的根轨迹分析	122	6.1 引言	189
4.6 小结	123	6.1.1 校正及校正装置	189
习题四	124	6.1.2 校正的方法	189
第 5 章 线性控制系统的频域分析法	126	6.1.3 系统的性能指标	190
5.1 频率特性	126	6.2 常用校正装置及其特性	191
5.1.1 频率响应的基本概念	126	6.2.1 超前校正装置	191
5.1.2 频率特性的表示方法	129	6.2.2 滞后校正装置	193
5.2 极坐标图	130	6.2.3 滞后-超前校正装置	193
5.2.1 典型环节的极坐标图	131	6.3 根轨迹法设计串联校正	195
5.2.2 开环系统的极坐标图	136	6.3.1 超前校正的根轨迹法设计	195
5.3 对数坐标图	140	6.3.2 滞后校正的根轨迹法设计	199
5.3.1 典型环节的对数坐标图	140	6.3.3 滞后-超前校正的根轨迹法设计	201
5.3.2 开环对数频率特性曲线	147	6.4 频率法设计串联校正	204

6.4.1 超前校正的频率法设计	204	8.1.2 非线性系统的特点	267
6.4.2 滞后校正的频率法设计	207	8.1.3 非线性控制系统的分析 研究方法	268
6.4.3 滞后-超前校正的频率法设计	209	8.2 相平面法	268
6.5 PID 控制器	212	8.2.1 相平面的基本概念	268
6.5.1 PID 控制器原理	213	8.2.2 相轨迹的性质	269
6.5.2 PID 校正的参数整定法设计	214	8.2.3 相轨迹的绘制	270
6.6 一级倒立摆系统的频域分析与设计	218	8.2.4 奇点与极限环	271
6.6.1 采用超前校正装置设计	219	8.2.5 非线性系统的相平面分析法	274
6.6.2 采用滞后-超前校正装置设计	221	8.3 描述函数法	277
6.7 小结	222	8.3.1 描述函数的基本概念	277
习题六	223	8.3.2 典型非线性元件的描述函数	278
第 7 章 线性离散控制系统	226	8.3.3 用描述函数法分析非线性 控制系统	281
7.1 概述	226	8.4 MATLAB 在非线性控制系统中的应用	283
7.1.1 离散控制系统的基本概念	226	8.5 小结	285
7.1.2 离散控制系统的分析与校正 设计方法	227	习题八	286
7.2 信号采样与保持	227	第 9 章 自动控制理论的应用实例	288
7.2.1 信号采样	227	9.1 磁悬浮控制系统设计	288
7.2.2 零阶保持器	229	9.1.1 磁悬浮系统的应用背景	288
7.3 离散系统的数学模型	231	9.1.2 磁悬浮系统的基本组成与 工作原理	289
7.3.1 Z 变换	231	9.1.3 磁悬浮系统的数学建模	289
7.3.2 Z 反变换	235	9.1.4 磁悬浮系统的控制器设计	292
7.3.3 差分方程	237	9.1.5 基于 MATLAB 的磁悬浮 系统设计	294
7.3.4 脉冲传递函数	238	9.2 移动机器人控制系统设计	297
7.4 离散控制系统的性能分析	244	9.2.1 移动机器人控制系统的 应用背景	297
7.4.1 离散系统稳定性分析	244	9.2.2 移动机器人系统的基本组成与工 作原理	298
7.4.2 离散控制系统的动态性能分析	248	9.2.3 移动机器人系统的数学建模	299
7.4.3 离散控制系统的稳态误差分析	250	9.2.4 移动机器人系统的控制器设计	299
7.5 采样系统设计	252	9.2.5 移动机器人实物实验	305
7.5.1 最小拍采样系统设计	253	9.3 直流电动机调速系统设计	306
7.5.2 有限拍采样系统设计	254	9.3.1 直流电动机调速系统简介	306
7.6 MATLAB 在离散控制系统分析中的 应用	257	9.3.2 直流调速系统的工作原理	307
7.6.1 离散系统的数学模型	257	9.3.3 闭环直流调速系统的数学模型	308
7.6.2 离散系统的时域分析	259	9.3.4 闭环直流调速系统的设计实例	311
7.7 小结	260		
习题七	261		
第 8 章 非线性控制系统分析	264		
8.1 非线性系统概述	264		
8.1.1 典型非线性特性	264		

9.4 小结	316	附录 B MATLAB 常用控制系统命令索引	325
附录 A 拉普拉斯变换	317	附录 C 自动控制原理的常用技术术语	330
A.1 拉普拉斯变换的概念	317	中英文对照	330
A.2 拉普拉斯反变换	320	参考文献	334
A.3 拉普拉斯变换求解微分方程	323		

第1章 绪论

1.1 引言

本章的目的是使读者熟悉和理解以下几个方面的内容：

- (1) 自动控制和控制系统。
- (2) 控制理论发展史。
- (3) 控制系统的工作原理。
- (4) 控制系统的组成和分类。
- (5) 几个控制系统的应用实例。

初学自动控制原理的人会问：“什么是自动控制？什么是控制系统？”要回答这两个问题，自然可以联系日常生活中那些需要实现某种预定“目标”的例子。例如在室内，为了达到舒适的环境，人们常常安装空调器来控制室内的温度，这种利用控制装置来取代人工操纵的方式就是自动控制。

所谓自动控制，就是在没有人的直接干预下，利用控制装置使被控对象（或受控对象）的某些物理量自动按照预定的规律变化或运行。例如房间的温度控制系统，房间是被控对象，室内的温度就是被控制的物理量，最终要求温度达到人们设定的温度，如图 1.1 所示。

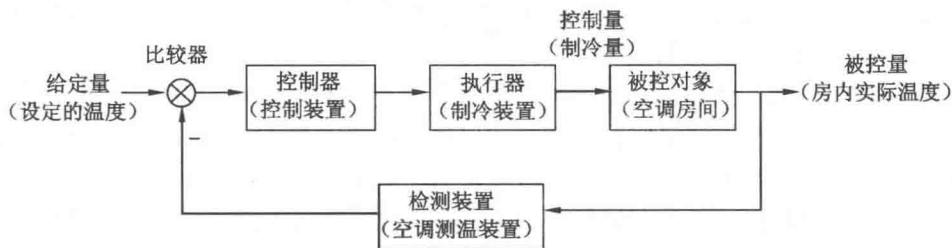


图 1.1 房间温度控制系统

随着现代计算机技术的迅速发展，自动控制大量应用于空间技术、科技、工业、交通管理、农业、经济等领域，这些领域为了达到预期“目标”，通常包含实现特定控制策略的控制系统。如政治、经济、教学领域中的各种体系，人体的各种功能，自然界的生物学系统，都可以视为一种控制系统。把实现自动控制所需要的各个部件按照系统一定的规律组合起来，去控制被控对象，这些部件的组合体称为“控制系统”。分析和综合自动控制系统的理论就称为“控制理论”。

自动控制理论和实践的不断发展，为人们提供了获得动态系统最佳性能的方法，不仅提高了生产率，而且使人们从繁重的体力劳动和大量重复性的手工操作中解放出来。因此技术人员和科研工作者必须具备一定的自动控制知识。

1.1.1 自动控制理论发展简史

1788 年, 瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计了离心调速器, 这是第一次应用反馈思想设计的离心式飞摆调速器, 是自动控制领域的一项重大成果。1868 年, 麦克斯韦(J. C. Maxwell)为解决离心式飞摆调速器控制精度和稳定性之间的矛盾, 发表了《论调速器》, 提出用基本系统的微分方程模型分析反馈系统的稳定性。麦克斯韦尝试推导多项式系数必须满足的条件, 以使系统方程的根都有负实部。但他仅仅在二阶方程和三阶方程中取得了成功。1877 年, 劳斯(E. J. Routh)和赫尔维茨(A. Hurwitz)提出了根据代数方程的系数判断线性系统稳定性方法。1876 年, 俄国学者 N. A. 维什涅格拉诺基发表著作《论调速器的一般理论》, 对调速器系统进行了全面的理论阐述。1895 年, 劳斯与赫尔维茨分别提出了基于特征根和行列式的稳定性代数判别方法。1927 年, 布莱克(H. S. Black)发现了采用负反馈线路的放大器, 放大器系统对扰动和放大器增益变化的敏感性大为降低。1932 年, 奈奎斯特(H. Nyquist)采用频率特性表示系统, 提出了频域稳定性判据, 很好地解决了 Black 放大器的稳定性问题, 而且可以分析系统的稳定裕度, 奠定了频域法分析与综合的基础。1934 年, 海森(H. L. Hazen)发表了《关于伺服机构理论》。1945 年, 伯德(H. W. Bode)发表了《网络分析和反馈放大器设计》, 完善了系统分析和设计的频域方法。1948 年, 维纳(N. Wiener)发表了《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书, 标志着控制论的诞生。1948 年, 伊文思(W. R. Evans)提出了系统的根轨迹分析法, 这是一种易于工程应用的, 求解闭环特征方程根的简单图解法。1954 年, 钱学森出版了《工程控制论》, 全面总结了经典控制理论, 标志着经典控制理论的成熟。

1.1.2 控制工程实践

控制工程所要面对的问题是分析与设计面向预期目标的控制系统。面向目标的不同控制策略产生了不同层次的控制系统。

反馈控制是现代工业和社会生活的一个基本要素。安全驾驶好汽车无疑是一件重要的事情, 这首先需要汽车能够对司机的操纵作出快速准确的响应。汽车驾驶控制系统框图如图 1.2 所示, 该图说明了将期望的行驶路线与实际测量的行驶路线相比较, 从而得到一个行驶方向偏差, 司机根据行驶方向偏差调整转向装置, 使汽车的实际行驶轨迹跟踪预期行驶轨迹。这时实际行驶路线的测量是通过视觉和触觉的反馈检测来实现的。图 1.2 描述了系统负反馈的控制过程, 负反馈的控制就是通过检测偏差, 然后纠正偏差或消除偏差的过程。图 1.3 给出的是一条典型的行驶方向响应曲线图。

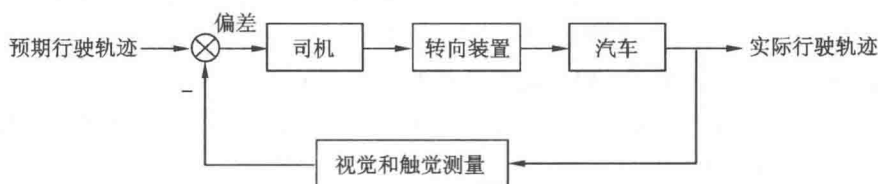


图 1.2 汽车驾驶控制系统框图

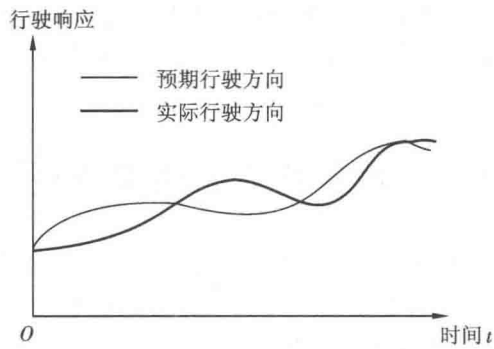


图 1.3 行驶方向响应曲线图

现代控制工程设计在机电一体化系统中获得了广阔的发展空间。机电一体化系统 (Mechatronics) 指的是机械 (Mechanical)、电气 (Electrical) 和计算机 (Computer) 等组合而成的系统。机电一体化系统的基本要素包括物理系统建模、传感器与执行机构、信号与系统、计算机与逻辑系统、软件与数据采集。以上五个要素都与反馈控制有着紧密联系。如图 1.4 所示的漫游小车是机电一体化系统的典型实例。在漫游小车中集成了带有反馈回路的数字计算机——嵌入式控制系统。

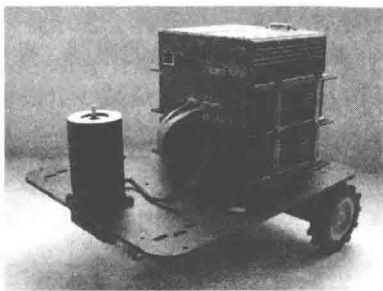


图 1.4 嵌入数字计算机的漫游小车

漫游小车的运动闭环控制有两个部分，一是速度闭环控制，二是位置闭环控制，速度闭环控制系统如图 1.5 所示。

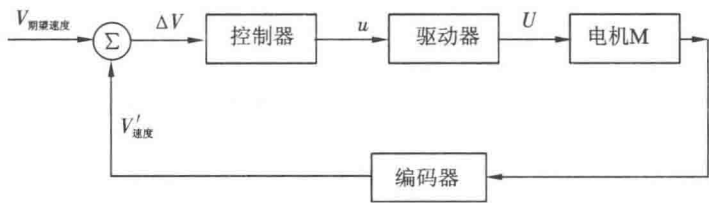


图 1.5 速度闭环控制系统

设 $V_{期望速度}$ 为输入量，与反馈速度 $V'_{速度}$ 相减后得到 ΔV 作为控制器的输入；控制器输出 u 决定了驱动器输出电压 U 的大小，不同的输出电压 U 对应不同的电机转速。反馈速度 $V'_{速度}$ 由编码器采集的信号计算得到，反馈到输入端。当实际速度大于设定值时，控制器的输入量 ΔV 为负值，控制器输出到驱动器的 u 值减小，从而减小了输出电压、电机减速；当实际速度小于设定值时，控制器的输入量 ΔV 为正值，控制器输出到驱动器的 u 值增大，从而增大了输出电压，电机加速。

以上两个工程实践表明控制技术的进步将人类从体力劳动中解放了出来。控制系统可以用来提高生产率,改善装置或系统的性能。自动控制即是通过自动操作或对生产过程、装置或系统的控制等途径,提高生产率 and 产品质量的。

1.2 反馈控制的基本原理

前面一节反复提到动态系统的反馈控制的概念,其核心思想是对一个系统的输出量进行检测,然后反馈到输入端并与参考输入相比较,得到的偏差信号经控制器的变换运算后,驱动执行机构,以使被控对象的输出量能按照参考输入的要求变化。为了实现精确的控制,应满足三个基本的要求。第一,系统必须已处于稳定状态。第二,系统输出必须跟踪控制输入信号。第三,系统输出必须尽量克服来自扰动输入的响应。虽然在设计中使用的模型不是完全精确的,或者物理系统的动态特性随时间变化或者因环境变化而变化,但是这些目标是必须满足的。

1.2.1 人工控制与自动控制

一个基本的人工闭环控制的例子是人工液位控制系统,如图 1.6 所示。其中,该系统的参考输入(期望输出)是按规定应该保持的液面参考位置(参考位置存放在操作手的脑海中),控制放大器是操作手本人,而传感器则是他的眼睛。操作手比较实际液面与预期液面的差异,决定进水阀(即执行机构)开度是增大还是减少,以调节输入流量,达到维持液面高度的目的。当出水量增大,实际的液面高度下降时,操作人员通过眼睛观察到期望的水位高度高于实际水位高度,操作员利用手增大调节阀开度,使得进水量增加,实际水位上升,回到期望水位高度。人工液位控制系统框图如图 1.7 所示。

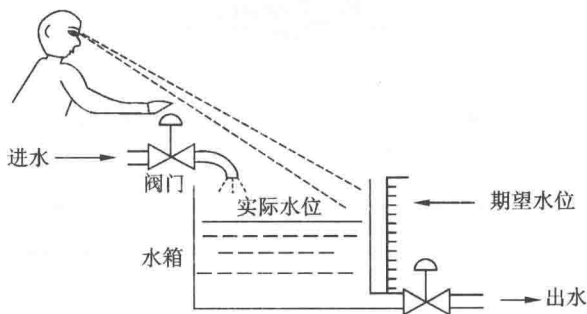


图 1.6 人工液位控制系统

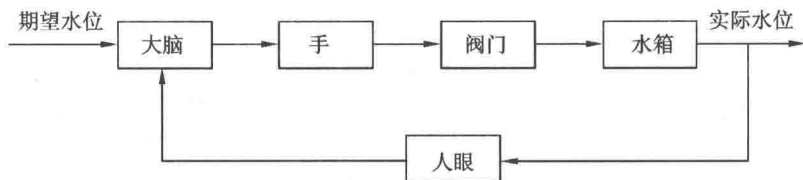


图 1.7 人工液位控制系统框图

为了提高劳动生产率和控制精度,用自动控制去代替上述的人工控制。自动控制系统必须具有上述三种元件,即测量元件(相当于人眼)、比较元件(相当于人脑)、执行元件(相

当于人手和阀门)。可以用图 1.8 所示的液位自动控制系统取代图 1.6 所示的人工液位控制系统。

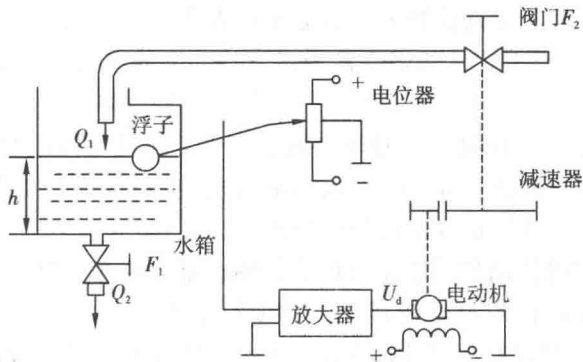


图 1.8 液位自动控制系统

液位自动控制工作原理为：当输入流量与输出流量相等时，水位的测量值和给定值相等，系统处于相对平衡状态，电动机无输出，阀门位置不变；当输出流量增加时，系统水位下降，通过浮子检测后带动电位器抽头移动，电动机获得一个正电压，通过齿轮减速器传递，使阀门打开，从而增加入水流量使水位上升，当水位回到给定值时，电动机的输入电压又会回到零，系统重新达到平衡状态。将液位自动控制系统原理图用反馈控制系统框图表示，如图 1.9 所示。本书在以后讨论中常用系统框图的形式表示控制系统原理。

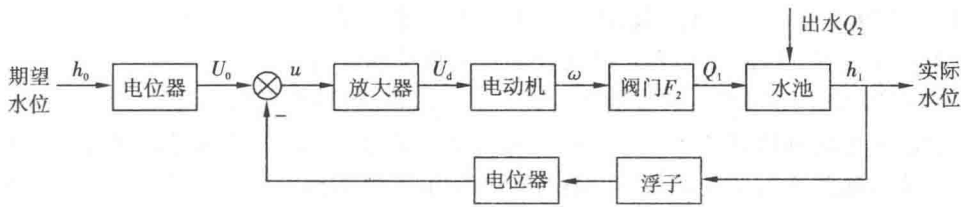


图 1.9 液位自动控制系统框图

1.2.2 反馈控制系统的基本组成和常用术语

为了更好地理解反馈控制系统的基本概念，下面介绍自动控制系统的基本组成以及控制系统的一些常用术语。

1. 反馈控制系统的基本组成

一个典型的反馈控制系统的基本组成如图 1.10 所示，主要由被控对象和控制装置两大部分组成，而控制装置是具有一定职能的各种基本元件组成的。在不同系统中，结构完全不同的元部件可以具有相同的功能。



图 1.10 反馈控制系统的基本组成

(1) 被控对象。被控对象亦即控制系统所要控制的设备或生产过程，它的输出量就是

被控变量。它可能是一种设备,也可以是一些机器零件的有机组合,作用是完成某种特定的操作。上文中的液位控制系统的被控对象就是水箱。

(2) 给定元件。在常规仪表控制中用给定元件来产生参考输入量或者设定值。设定值既可以由手动操作设定也可以由自动装置给定。上文中的液位控制系统的给定元件是电位器。

(3) 控制器。控制器接收偏差信号或者输入信号,通过一定的控制规律给出控制量,送到执行元件。如某种专用运算电路、常规控制仪表(电动仪表、气动仪表)、可编程逻辑控制器(PLC)、工业控制计算机等都属于控制器。

(4) 执行元件。有时控制器的输出可以直接驱动被控对象。但是大多数情况下被控对象都是大功率级的,控制信号与被控对象功率级别不等。另外,控制信号一般是电信号,而被控对象的输入信号多是其他形式的非电物理量,因此控制器的输出往往不能直接驱动被控对象。两者之间实现功率级别转换或者物理量纲转换的装置称为执行元件,又常称为执行机构或者执行器。常见的执行元件有步进电动机、电磁阀、气动阀、各种驱动装置等。上文中的液位自动控制系统的执行元件是电动机、减速器和阀门。

(5) 测量变送元件。测量变送元件又称传感器,用于检测被控对象的输出量,如温度、压力、流量、位置、转速等非电量,并变换成标准信号(一般是电信号)后作为反馈量送到控制器。例如各种压力传感器、流量传感器、差压变送器、测速发电机等。上文中的液位控制系统的测量变送元件是浮子和电位器。

(6) 比较元件。比较元件用以产生控制所需的偏差信号。有的系统以标准装置的方式配以专用的比较器,以隐藏的方式将其合并在其他控制装置中。

在图 1.10 中,用“ $\otimes$ ”表示比较元件,“-”表示负反馈,“+”表示正反馈。信号从系统输入端沿箭头方向到达系统输出端的通路称为前向通路;系统的输出量经测量变送元件到系统输入端的通路称为主反馈通路。前向通路和主反馈通路构成主回路。此外,系统内局部前向通路和局部反馈通路构成的回路称为内回路。一个只包含主反馈通路,称为单回路系统;有些系统包含两个或两个以上的反馈通路,称为多回路系统,如图 1.11 所示。

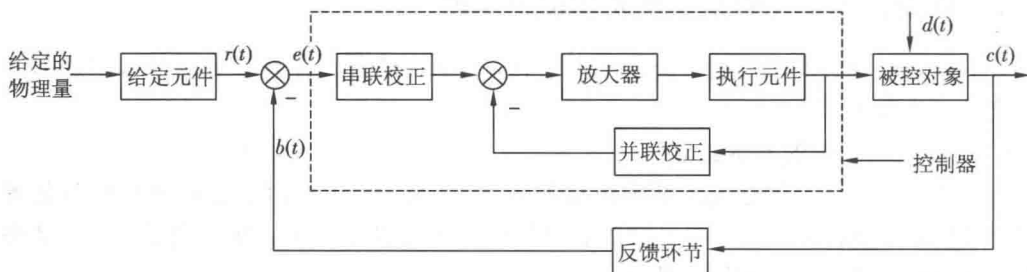


图 1.11 多回路控制系统的基本组成

2. 控制系统的常用术语

(1) 输出量:控制系统的被控变量,是一种被测量和被控制的量值或状态。本书一般用符号 $c(t)$ 表示输出量。上文中的液位控制系统的输出量是实际水位。

(2) 输入量:影响被控量的外来信号,分为给定量和扰动量。

① 给定量:指人们期望系统输出按照这种输入的要求而变化的控制量,又称为参考输入或期望输入。本书一般用符号 $r(t)$ 表示给定量。上文中的液位控制系统的给定量是期望

水位 h_0 或 u_0 。

② 扰动量：指外界或者系统内部影响系统输出而使输出量偏离给定输入量的干扰信号。外部的扰动称为外扰，它是系统不希望发生的一个输入信号。

(3) 反馈量：指与被控量成正比或为某种函数的信号，其物理量纲与参考输入相同。反馈量是从输出量中经过检测变送后返回到输入端参与系统控制的一种信号。图 1.11 中的 $b(t)$ 是反馈量。

(4) 偏差量：指系统的参考输入量与反馈量之差，是控制系统中的一个重要参数。一般用 $e(t)$ 表示偏差量。

(5) 前向通路：指从输入端到输出端的单向通路。

(6) 反馈通路：指从输出端到输入端的反方向通路。

1.2.3 自动控制系统的基本控制方式

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，除此之外，还有其他的控制方式。最典型的控制系统有三种，即开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

1. 开环控制系统

如果系统的输出量没有与其参考输入量相比较，即不存在由输出端到输入端的反馈通路，这种控制系统叫做开环控制系统。换句话说，开环系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。如图 1.12 所示的音乐喷泉自动控制系统是开环控制系统。

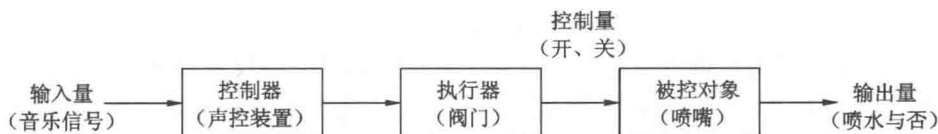
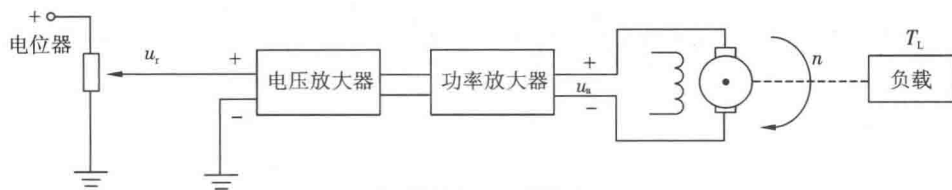
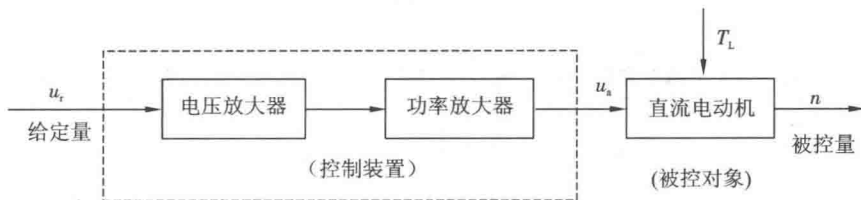


图 1.12 音乐喷泉自动控制系统

图 1.13 所示为直流电动机转速开环控制系统，开环直流调速原理如图 1.13(a) 所示。直流电动机是被控对象，电动机的转速为系统的被控量或输出量； u_r 是系统的给定量或参考输入量；电动机负载转矩是系统的扰动量。



(a) 开环直流调速原理



(b) 直流电动机转速开环控制系统框图

图 1.13 直流电动机转速开环控制系统