



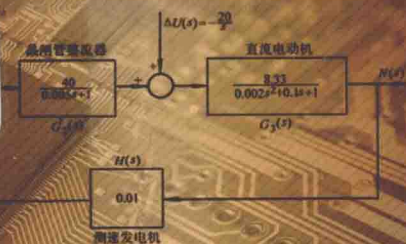
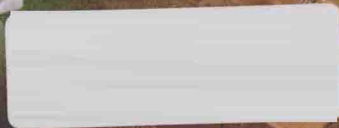
全国高等职业教育“十二五”规划教材
中国电子教育学会推荐教材
全国高职高专院校规划教材·精品与示范系列

省级精品课
配套教材

自动控制技术及应用

◎ 陈慧蓉 主编 ◎ 李中望 张松兰 副主编

- 自动控制系统的组成与控制方式
- 控制系统的性能及分析方法 • MATLAB软件应用
 - ◆ 单闭环直流调速系统定性分析与相图建立
- 自动控制系统数学模型建立
 - ◆ 控制系统典型环节的模拟与测试
 - ◆ 单闭环直流调速系统数学模型建立
- 自动控制系统性能分析与改善
 - ◆ 二阶系统、三阶系统性能分析与测试
 - ◆ 频率分析法分析系统性能
 - ◆ 转速负反馈有静差直流调速系统性能分析
- 直流调速系统分析、调试与故障排除
 - ◆ 双闭环调速系统的MATLAB仿真



- ◆ 根据企业岗位的实际技能需求，结合作者多年的课程改革成果与教学经验进行编写
- ◆ 以“典型自动控制系统的分析、调试与故障排除”为主线，注重实操能力与综合素养培养
- ◆ 精心设计9个典型任务和70个实例，突出本课程学习的实用性、可操作性和趣味性
- ◆ 配有免费的电子教学课件、练习题参考答案和精品课网站，详见前言



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国高等职业教育“十二五”规划教材
中国电子教育学会推荐教材
全国高职高专院校规划教材·精品与示范系列

省级精品课
配套教材

自动控制技术及应用

陈慧蓉 主 编

李中望 张松兰 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据企业岗位技能的实际需求,以“典型自动控制系统的分析、调试与故障排除”这一工作任务为主线,并结合作者多年的教学经验与课程改革成果进行编写。本书针对实际控制系统分析、调试与维修过程中不同阶段所应具有的知识能力,选择和优化了原有课程内容,全书分为4个教学单元,主要内容包括自动控制系统基础,自动控制系统数学模型建立,自动控制系统性能分析与改善,直流调速系统分析、调试与故障排除,同时将MATLAB软件的应用贯穿于各教学单元中。全书内容按照由简单到复杂,由部分到整体的认知规律进行介绍及单元任务设计。

本书为全国高职高专院校“自动控制技术及应用”课程的教材,也可作为应用型本科、成人教育、自学考试、开放大学、中职学校、培训班的教材,以及自动化工程技术人员的参考工具书。

本书提供免费的电子教学课件、习题参考答案及精品课网站,详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制技术及应用/陈慧蓉主编. —北京:电子工业出版社,2014.2

全国高职高专院校规划教材·精品与示范系列

ISBN 978-7-121-22373-0

I. ①自… II. ①陈… III. ①自动控制—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第010981号

策划编辑:陈健德(E-mail: chenjd@phei.com.cn)

责任编辑:夏平飞 特约编辑:郭茂威

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:18.5 字数:452千字

印 次:2014年2月第1次印刷

定 价:39.60元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

职业教育 继往开来（序）

自我国经济在 21 世纪快速发展以来，各行各业都取得了前所未有的进步。随着我国工业生产规模的扩大和经济发展水平的提高，教育行业受到了各方面的重视。尤其对高等职业教育来说，近几年在教育部和财政部实施的国家示范性院校建设政策鼓舞下，高职院校以服务为宗旨、以就业为导向，开展工学结合与校企合作，进行了较大范围的专业建设和课程改革，涌现出一批示范专业和精品课程。高职教育在为区域经济建设服务的前提下，逐步加大校内生产性实训比例，引入企业参与教学过程和质量评价。在这种开放式人才培养模式下，教学以育人为目标，以掌握知识和技能为根本，克服了以学科体系进行教学的缺点和不足，为学生的顶岗实习和顺利就业创造了条件。

中国电子教育学会立足于电子行业企事业单位，为行业教育事业的改革和发展，为实施“科教兴国”战略做了许多工作。电子工业出版社作为职业教育教材出版大社，具有优秀的编辑人才队伍和丰富的职业教育教材出版经验，有义务和能力与广大的高职院校密切合作，参与创新职业教育的新方法，出版反映最新教学改革成果的新教材。中国电子教育学会经常与电子工业出版社开展交流与合作，在职业教育新的教学模式下，将共同为培养符合当今社会需要的、合格的职业技能人才而提供优质服务。

近期由电子工业出版社组织策划和编辑出版的“全国高职高专院校规划教材·精品与示范系列”，具有以下几个突出特点，特向全国的职业教育院校进行推荐。

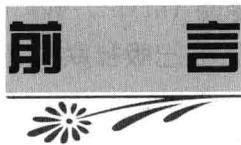
（1）本系列教材的课程研究专家和作者主要来自于教育部和各省市区评审通过的多所示范院校。他们对教育部倡导的职业教育教学改革精神理解得透彻准确，并且具有多年的职业教育教学经验及工学结合、校企合作经验，能够准确地对职业教育相关专业的知识点和技能点进行横向与纵向设计，能够把握创新型教材的出版方向。

（2）本系列教材的编写以多所示范院校的课程改革成果为基础，体现重点突出、实用为主、够用为度的原则，采用项目驱动的教学方式。学习任务主要以本行业工作岗位群中的典型实例提炼后进行设置，项目实例较多，应用范围较广，图片数量较大，还引入了一些经验性的公式、表格等，文字叙述浅显易懂。增强了教学过程的互动性与趣味性，对全国许多职业教育院校具有较大的适用性，同时对企业技术人员具有可参考性。

（3）根据职业教育的特点，本系列教材在全国独创性地提出“职业导航、教学导航、知识分布网络、知识梳理与总结”及“封面重点知识”等内容，有利于老师选择合适的教材并有重点地开展教学过程，也有利于学生了解该教材相关的职业特点和对教材内容进行高效率的学习与总结。

（4）根据每门课程的内容特点，为方便教学过程对教材配备相应的电子教学课件、习题答案与指导、教学素材资源、程序源代码、教学网站支持等立体化教学资源。

职业教育要不断进行改革，创新型教材建设是一项长期而艰巨的任务。为了使职业教育能够更好地为区域经济和企业服务，殷切希望高职高专院校的各位职教专家和老师提出建议和撰写精品教材（联系邮箱:chenjd@phei.com.cn，电话:010-88254585），共同为我国的职业教育发展尽自己的责任与义务！



随着科学技术的发展,自动控制技术大量应用,大大提高了劳动生产率和产品质量,已成为推动经济发展、促进社会进步必不可少的一门技术。“自动控制技术及应用”课程是自动化类专业的核心课程,是专业技能课程与岗位职业技能课程连接的桥梁与纽带。本教材根据企业岗位的实际需求,以“典型自动控制系统的分析、调试与故障排除”这一工作任务为主线,并结合作者多年的职业教育教学经验与课程改革成果进行编写。

本书针对自动控制系统分析、调试与维修过程中不同阶段所应具有的知识 and 能力,选择和优化了原有课程内容,全书分为4个教学单元,主要内容包括自动控制系统基础,自动控制系统数学模型建立,自动控制系统性能分析与改善,直流调速系统分析、调试与故障排除。在内容安排上强调理论以够用为度,注重学生技能培养和可持续发展能力,注意新技术应用,注重MATLAB软件在自动控制的分析与设计方面的广泛应用。在教学的组织与安排上注重理论与实践的紧密结合,建议采用“任务驱动:教、学、做一体”教学模式,将单元内容任务化。

为了培养学生具有相应的职业岗位能力并结合课程知识、能力与素质目标要求,精心设计了具有代表性的9个典型任务,任务的选取原则是尽可能包含各单元知识点,尽可能体现趣味性、实用性和可操作性,任务由简单到复杂,从部分到整体。各院校可结合自身的教学环境条件选择适合的教学形式和学习任务,任务的完成可通过控制原理试验箱和调速系统装置来完成。

在任务完成过程中注重教师引导与学生自主学习的紧密结合。学生在完成各单元任务的同时也就完成相应单元知识点的学习,同时任务的完成需要小组成员的相互配合,共同努力,有利于培养学生的团队合作能力。本课程教学小组开展了多轮教学实践,“自动控制技术及应用”课程被评为省级精品课程,并在省级网络课程中获二等奖。将“任务驱动:教、学、做一体”应用到本课程教学中,丰富了课堂教学和实践教学环节,培养了学生动手能力,提高了学生学习兴趣,符合高等职业教育的特点与要求。

本书各学习单元都设有教学导航,指出本单元的知识重点与难点,必须达到的知识、能力与素质目标,建议教学方法等;每小节均设有知识分布网络,介绍本节知识点的层次和相互联系;各学习单元结束后设有知识梳理与总结,并配有相应的思考与练习题,以便学生复习与巩固。

本书由芜湖职业技术学院陈慧蓉主编并进行全书统稿,李中望和张松兰副主编。陈慧蓉编写单元1、2,张松兰编写单元3,李中望编写单元4。全书由张学亮教授进行主审,并对书稿的编写思路及内容提出许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

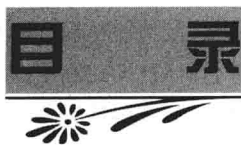
由于编者水平和时间有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

为方便教学,本书配有免费的电子教学课件、习题参考答案,请有需要的教师登录华

信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 免费注册后进行下载, 如有问题请在网站留言或与电子工业出版社联系 (E-mail: hxedu@phei.com.cn)。读者也可通过该精品课网站 (<http://www1.whptu.ah.cn/jwc/08jpkc/zk/wangluokecheng/wlkc.html>) 浏览和参考更多的教学资源。

编 者





单元 1 自动控制系统基础	(1)
教学导航	(1)
1.1 自动控制的概念及发展	(2)
1.1.1 自动控制的基本概念	(2)
1.1.2 自动控制的发展阶段	(3)
1.2 自动控制系统的组成与控制方式	(4)
1.2.1 自动控制系统的组成框图	(4)
1.2.2 控制系统组成框图的绘制	(5)
1.2.3 自动控制系统的控制方式	(8)
1.3 自动控制系统的分类	(9)
1.4 控制系统的性能及分析方法	(10)
1.4.1 控制系统的性能要求	(10)
1.4.2 控制系统的性能分析方法	(12)
1.5 MATLAB 软件应用基础	(12)
1.5.1 MATLAB 语言系统	(13)
1.5.2 MATLAB 基本语句结构	(14)
1.5.3 MATLAB 的运算	(15)
1.5.4 MATLAB 二维图形绘制	(18)
任务 1 单闭环直流调速系统定性分析与框图建立	(21)
知识梳理与总结	(22)
思考与练习题 1	(23)
单元 2 自动控制系统数学模型建立	(25)
教学导航	(25)
2.1 拉普拉斯变换及其应用	(26)
2.1.1 拉氏变换的概念	(26)
2.1.2 拉氏变换的运算定理	(29)
2.1.3 利用分解定理求拉氏反变换	(31)
2.1.4 应用拉氏变换求解微分方程	(33)
2.2 自动控制系统的数学模型	(35)
2.2.1 控制系统的微分方程	(35)
2.2.2 传递函数	(37)
2.2.3 典型环节的数学模型	(39)
2.2.4 控制系统的方框图	(45)

2.2.5 反馈控制系统的传递函数	(51)
2.3 基于 MATLAB/SIMULINK 建立控制系统数学模型	(53)
2.3.1 传递函数的描述	(53)
2.3.2 模型的连接及闭环传递函数求取	(55)
任务 2 控制系统典型环节的模拟与测试	(57)
任务 3 单闭环直流调速系统数学模型建立	(61)
知识梳理与总结	(65)
思考与练习题 2	(66)
单元 3 自动控制系统性能分析与改善	(70)
教学导航	(70)
3.1 自动控制系统性能指标	(71)
3.2 系统时域分析法	(73)
3.2.1 稳定性分析	(73)
3.2.2 控制系统动态性能分析	(81)
3.2.3 系统稳态性能分析	(89)
3.2.4 基于 MATLAB 的控制系统时域分析	(97)
3.3 系统频域分析法	(107)
3.3.1 频率特性的基本概念	(108)
3.3.2 典型环节的频率特性	(112)
3.3.3 开环对数频率特性曲线绘制	(120)
3.3.4 频率特性分析系统稳定性	(125)
3.3.5 频率特性与系统性能的关系	(134)
3.3.6 基于 MATLAB 的控制系统频域分析	(142)
3.4 自动控制系统性能改善	(144)
3.4.1 校正概念与校正装置	(144)
3.4.2 基本 PID 控制	(154)
3.4.3 系统校正	(163)
任务 4 二阶系统性能分析与测试	(177)
任务 5 三阶系统性能分析与测试	(180)
任务 6 频率分析法分析系统性能	(183)
任务 7 转速负反馈有静差直流调速系统性能分析	(185)
知识梳理与总结	(187)
思考与练习题 3	(188)
单元 4 直流调速系统分析、调试与故障排除	(193)
教学导航	(193)
4.1 调速的基本概念和技术指标	(194)
4.2 直流电动机的调速方法	(197)
4.3 单闭环直流调速系统	(201)
4.3.1 开环直流调速系统存在的问题	(201)

4.3.2	系统的组成及静特性	(202)
4.3.3	闭环系统反馈控制规律	(206)
4.3.4	系统的稳态参数计算	(207)
4.3.5	单闭环调速系统的动态分析	(209)
4.3.6	单闭环无静差直流调速系统	(212)
4.3.7	其他反馈在单闭环直流调速系统中的应用	(218)
4.4	双闭环直流调速系统	(221)
4.4.1	转速、电流双闭环调速系统的组成	(222)
4.4.2	转速、电流双闭环调速系统的方框图	(223)
4.4.3	转速、电流双闭环调速系统的工作原理	(224)
4.4.4	转速、电流双闭环调速系统性能分析	(225)
4.4.5	双闭环调速系统动态参数的工程设计	(229)
4.5	可逆直流调速系统	(237)
4.5.1	可逆直流调速电路的形式	(237)
4.5.2	可逆拖动的四种工作状态	(239)
4.5.3	可逆直流调速系统中的环流分析	(240)
4.5.4	有环流可逆调速系统	(242)
4.5.5	无环流可逆调速系统	(245)
4.6	直流调速系统的 MATLAB 仿真设计	(250)
4.6.1	直流电动机模型在 MATLAB 中的实现	(250)
4.6.2	直流调速控制系统的仿真过程	(254)
4.6.3	开环直流调速控制系统与仿真	(256)
4.7	自动控制系统的分析、调试与故障排除	(261)
4.7.1	自动控制系统的分析步骤	(261)
4.7.2	自动控制系统调试	(263)
4.7.3	自动控制系统的维护、使用和故障排除	(266)
任务 8	单闭环直流调速系统分析调试与维护	(268)
任务 9	双闭环调速系统的 MATLAB 仿真	(270)
	知识梳理与总结	(280)
	思考与练习题 4	(281)
	参考文献	(284)

单元 1 自动控制系统 基础

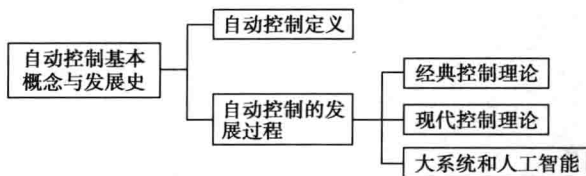
教学导航

知识目标	1. 自动控制系统组成及分类; 2. 自动控制发展及应用; 3. 开环控制与闭环控制; 4. 控制系统的性能要求; 5. 控制系统软件 MATLAB 使用入门知识
能力目标	1. 控制系统的组成分析能力; 2. 控制系统软件 MATLAB 的应用能力; 3. 资料查询与自主学习能力
素质目标	1. 团队协作能力; 2. 组织沟通能力; 3. 严谨认真的学习工作作风
重难点	1. 控制系统的组成; 2. 控制系统的控制方式
任务	单闭环直流调速系统定性分析与框图建立
推荐教学方法	动画教学、任务驱动教学等



1.1 自动控制的概述及发展

知识分布网络



1.1.1 自动控制的基本概念

随着社会经济的发展,越来越离不了自动控制技术,同时,它的应用也推动了经济发展,促进了社会进步。自动控制是相对于人工控制而言的,两者的区别在于是由人还是机器来完成操作控制,如图 1-1 所示的液位控制系统,图中两个控制系统控制的目的是使水箱中的液面保持一定的高度,图 1-1 (a) 是由人来进行操作完成的,属于人工控制,图 1-1 (b) 不需要人的参与,用自动控制代替了人的操作,构成了自动控制系统。

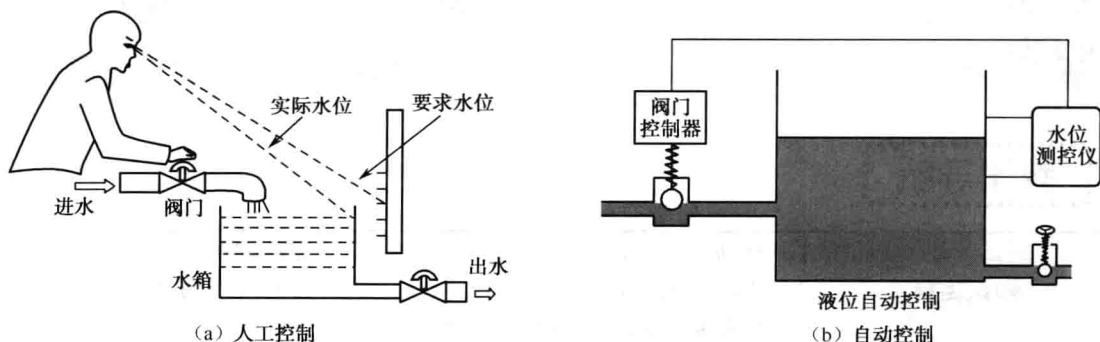


图 1-1 液位控制系统

所谓自动控制,是指在无人参与的情况下,利用控制装置(或控制器)操纵受控对象,使生产设备和工艺过程按预定的规律运行,达到所要求的性能与指标,如图 1-2 所示。

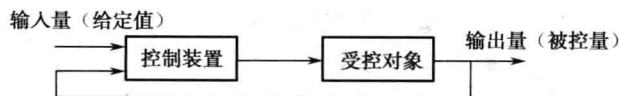


图 1-2 自动控制示意图

控制装置和受控对象是物理装置,而输入量(给定值)和输出量(被控量)是一定形式的物理量。在图 1-1 液位控制系统中,受控对象为水箱,被控量是液位的高度,控制装置包括测量水位高度并与给定值进行比较的水位测控仪、控制阀门的阀门控制器。

为了进一步理解自动控制的基本概念,下面再举一例说明。

【实例 1-1】 水温控制系统如图 1-3 所示,水箱中流入的是冷水,热蒸汽经阀门并流经热传导器件,通过热传导器件将冷水加热,加热后的水流出水箱,热蒸汽冷却后也变成水由排水口排出。

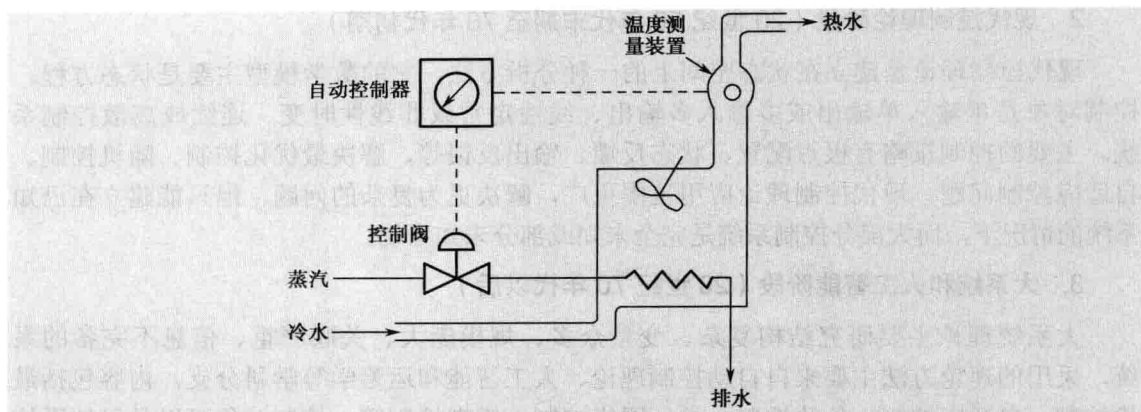


图 1-3 水温控制系统

此系统受控对象为水箱，被控量为水箱中水的温度，控制装置包括温度测量装置、比较给定值与检测值并进行计算的控制器、执行控制命令的控制阀。其自动控制过程为温度测量装置（可采用热电偶）将检测的水温值转换成一定形式的物理量（电信号）之后，反馈给控制器，控制器将给定温度值与检测到的实际温度比较之后，发出控制信号，调节阀门的开度，从而调节蒸汽的流量，直至实际水温值与设定水温值相符为止。可见系统中增加了能模仿人进行判断和操作的控制设备即控制装置，实现了没有人直接参与，利用控制装置对生产过程、工艺参数等进行自动调节，以达到预定的目标与要求。

为了方便分析系统性能，一般应用框图来表示系统结构。水温控制系统的结构图如图 1-4 所示。



图 1-4 水温控制系统的结构图

1.1.2 自动控制的发展阶段

人类很早就进行了“自动控制”装置的探索，如我国发明的自动计时的“铜壶滴漏”装置、指南车等，这只是控制理论发展的胚胎与萌芽。自动控制的应用可以追溯到 18 世纪（1788 年）瓦特发明的蒸汽机上的离心式飞摆速控器，它是运用反馈原理进行设计并取得成功的首例；19 世纪（1868 年）麦克斯韦对离心式飞摆速控器稳定性进行分析，并发表论文《论调速器》。这些当属最早的理论工作，其发展进度很慢，自动控制的真正发展是在 20 世纪，其发展分为以下三个阶段。

1. 经典控制理论阶段（20 世纪 20 年代到 50 年代）

经典控制理论是以传递函数为基础，研究单输入单输出、线性定常系统。经典控制理论主要的分析方法有频率特性分析法、根轨迹分析法、描述函数法、相平面法等。控制策略仅局限于反馈控制、PID 控制等。这种控制不能实现最优控制。



2. 现代控制理论阶段（20 世纪 50 年代末期至 70 年代初期）

现代控制理论是建立在状态空间上的一种分析方法，它的数学模型主要是状态方程。控制对象是单输入单输出或多输入多输出、线性定常或非线性时变、连续或离散控制系统。主要的控制策略有极点配置、状态反馈、输出反馈等，解决最优化控制、随机控制、自适应控制问题。现代控制理论应用范围更广，解决更为复杂的问题，但只能建立在已知系统的情况下，而大部分控制系统是完全未知或部分未知系统。

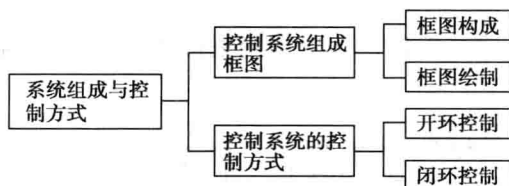
3. 大系统和人工智能阶段（20 世纪 70 年代以后）

大系统理论主要研究结构复杂、变量众多、规模庞大、关联严重、信息不完备的系统，采用的理论方法主要来自自动控制理论、人工智能和运筹学等学科分支。内容包括最优控制、自适应控制、鲁棒控制、神经网络控制、模糊控制等。控制对象可以是已知系统也可以是未知系统，大多数的控制策略不仅能抑制外界干扰、环境变化、参数变化的影响，还能有效地消除模型化误差的影响。

总体来说，自动控制理论随着社会发展而发展，同时它的发展又促进了社会的发展。本书所介绍的是经典控制理论，是控制理论中最基本的也是最重要的内容。它为进一步学习控制理论打下扎实的基础。

1.2 自动控制系统的组成与控制方式

知识分布网络



1.2.1 自动控制系统的组成框图

自动控制系统是在无人参与的情况下，为实现某一控制目标所需要的所有装置的有机组合。任何一个自动控制系统，尽管控制任务、使用元件结构等各不相同，但就其控制的职能来说必然包含控制装置与受控对象，不必画出具体结构，用方框来表示，并将各方框用有向线段依次连接，箭头表示各作用量的传递方向，这样框图就可以简单明了地表示控制系统。所有控制系统可抽象成如图 1-5 表示的系统框图。

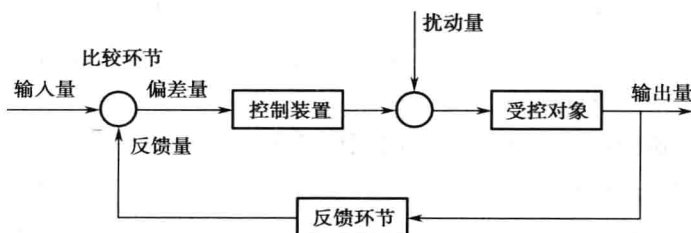


图 1-5 自动控制系统的典型组成框图



其组成框图主要包含一些信号量和基本环节（或元件）。信号量一般包含输入量（Input Variable）（又称给定量或参考输入量）、输出量（Output Variable）（又称被控量）、反馈量（Feedback Variable）、偏差量（Error Variable）（又称控制量）、扰动量（Disturbance Variable）及中间变量（Middle Variable）。有关基本环节或元件介绍如下：

1. 比较环节（Comparing Element）

比较环节用“○”号表示，表示信号量在此做代数运算，偏差量为输入量与反馈量的代数和，极性用“+”“-”分别表示正反馈与负反馈。如图 1-5 所示为负反馈，偏差量为输入量与反馈量的差。

2. 控制装置

控制装置一般包含放大元件（Amplifying Element）与执行元件（Executive Element）。执行元件是驱动受控对象的环节；由于偏差量一般较小，为了驱动执行元件，偏差量须经放大元件放大，如将电压偏差量放大，放大元件可用晶体管放大器或集成运算放大器。

3. 受控对象（Controlled Plant）

一般任何被控物体均可称为受控对象，如水温控制系统中的水箱即为受控对象。

4. 反馈环节（Feedback Element）

它是将输出量引出并转换成相应的量后，反馈到输入端并与输入量进行比较。闭环控制系统中，反馈环节一般包括检测、分压等单元，其中检测装置是关键性元件，其精度和特性直接影响控制系统品质，常用的检测装置有测量温度的热电偶、测量转速的测速发电机等。

1.2.2 控制系统组成框图的绘制

系统组成框图可以直观地将复杂的自动控制系统组成、各环节之间关系以及信号量的传递方向简单明了地表示出来，因此应用控制理论分析自动控制系统的首要工作就是要画出实际控制系统的组成框图（注：区别于传递函数构成的系统框图，文字构成的框图称为“组成框图”，按国家标准可统称为“框图”）。

绘制一个实际自动控制系统的组成框图，首先要弄清系统工作原理，即对系统做定性分析。所谓定性分析，是指弄清系统各个单元或各个元件在系统中的地位与作用，以及它们之间的相互联系，从而弄清系统工作原理。在定性分析基础上明确以下三个问题，可画出其组成框图。

- （1）控制的目的是什么？由此确定被控量（输出量）以及受控对象。
- （2）控制装置是什么？由此确定偏差量、放大元件及驱动受控对象的执行元件。
- （3）是否存在反馈？由此确定反馈量与检测装置以及反馈类型。

下面举例说明如何分析系统组成并画出系统组成框图。

【实例 1-2】 图 1-6 所示为电炉箱恒温自动控制系统。

1) 工作原理与调节过程分析

电炉箱恒温自动控制系统的工艺要求是保持炉温恒定，采用热电偶检测温度，并将其



转化为电压 U_{FT} ，反馈到输入端，与输入端给定电压 U_{ST} 进行比较，采用负反馈控制，两者差值为偏差电压 $\Delta U = U_{\text{ST}} - U_{\text{FT}}$ ，系统稳态时，炉温处于给定值时， $\Delta U = 0$ ，电动机停转；当炉温偏高或偏低时，出现偏差电压 $\Delta U \neq 0$ ，此偏差电压经电压放大和功率放大后，驱动直流伺服电动机，电动机经减速器带动调压变压器的滑动触头，使电炉内加热电阻丝的供电电压 U_{R} 做出相应调整从而调节炉温。其自动调节过程见图 1-7。

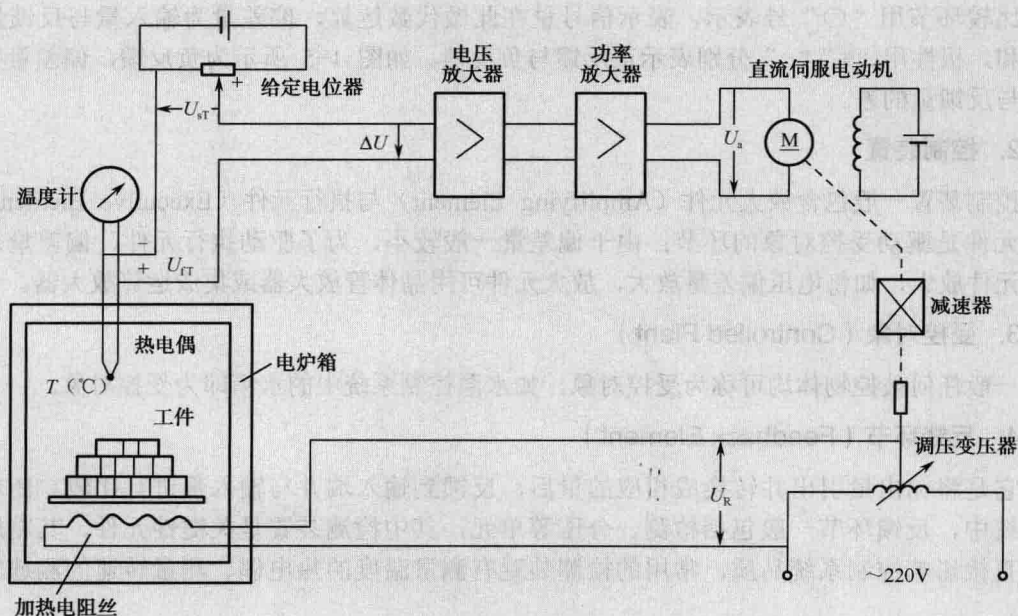


图 1-6 电炉箱恒温自动控制系统

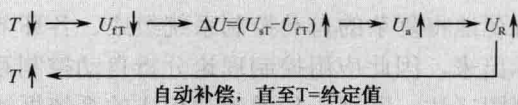


图 1-7 电炉箱恒温自动调节过程

2) 绘制系统组成框图

要明确的三个问题为：

(1) 此控制系统的控制目的是保持电炉箱中温度恒定。由此确定被控量（输出量）为电炉箱温度；受控对象为电炉箱。

(2) 此电炉箱是通过给电阻丝通电来加热的。由此确定执行元件为调压变压器、减速器与直流伺服电动机；放大元件为电压放大器、功率放大器；偏差量（控制量）为电压 ΔU 。

(3) 存在反馈，采用温度负反馈。由图 1-7 可见，检测装置为热电偶。反馈量为电压 U_{FT} ；偏差量为 $\Delta U = U_{\text{ST}} - U_{\text{FT}}$ 。

另外考虑系统存在外界扰动，如炉壁散热以及增减工件等。由以上分析，绘制出系统组成框图如图 1-8 所示。

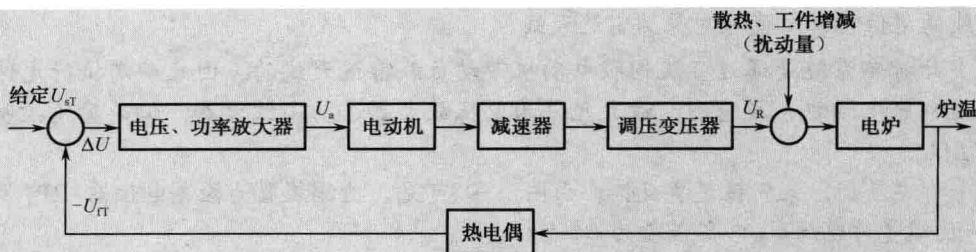


图 1-8 电炉箱恒温自动控制系统框图

【实例 1-3】 图 1-9 为雷达天线位置跟随系统。

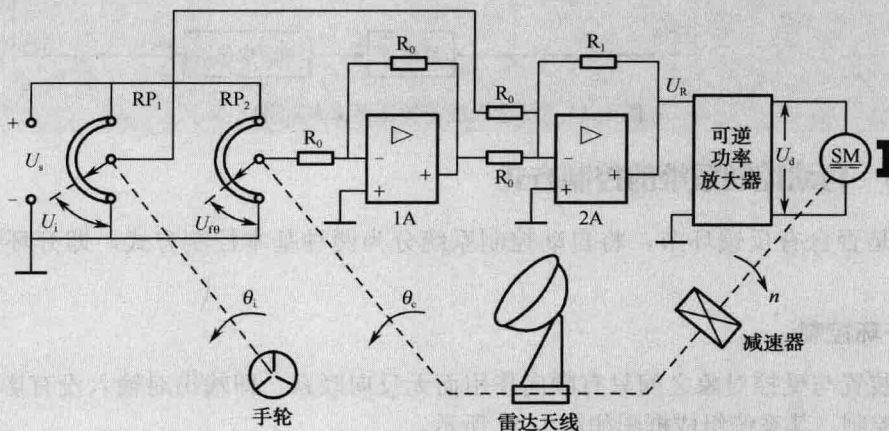


图 1-9 雷达天线位置跟随系统

1) 工作原理与调节过程分析

雷达天线位置跟随系统是雷达天线跟随着手轮转动位置变化而变化。手轮转动给出给定指令 θ_i ，经与手轮联动的给定电位器 RP_1 转化为电压信号 U_i ；采用与雷达联动的电位器 RP_2 检测角位移，并将其转化为电压 U_{i0} ，采用负反馈控制（由图可见，电位器 RP_1 与 RP_2 并接在同一电源上，且具有公共接地端，故 U_{i0} 与 U_i 极性相同，必须增设一个反相器 1A），两者差值为偏差电压 $\Delta U = U_i - U_{i0}$ ，系统稳态时，雷达天线转动的角位移等于手轮转动给出的给定值时， $\Delta U = 0$ ，永磁式直流伺服电动机停转，当手轮转动变化时，出现偏差电压， $\Delta U \neq 0$ ，此偏差电压经电压放大和功率放大后，驱动直流伺服电动机，电动机经减速器带动雷达天线转动，从而跟随手轮转动。其自动调节过程见图 1-10。

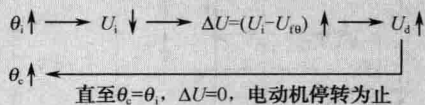


图 1-10 雷达天线位置跟随自动调节过程

2) 绘制系统组成框图

要明确的三个问题为：

(1) 此控制系统的控制目的是雷达天线跟随手轮转动。由此确定被控量（输出量）为



雷达天线的角位移 θ_0 ；受控对象为雷达天线。

(2) 此控制系统是通过直流伺服电动机带动负载雷达天线的。由此确定执行元件为永磁式直流伺服电动机、减速器；放大元件为电压放大器、功率放大器；偏差量（控制量）为电压 ΔU 。

(3) 存在反馈，采用位置负反馈。由图 1-9 可见，检测装置为检测电位器 RP_2 及反相器 1A。反馈量为电压 U_{fb} ；偏差量为 $\Delta U = U_i - U_{\text{fb}}$ 。

由以上分析，绘制出系统组成框图如图 1-11 所示。

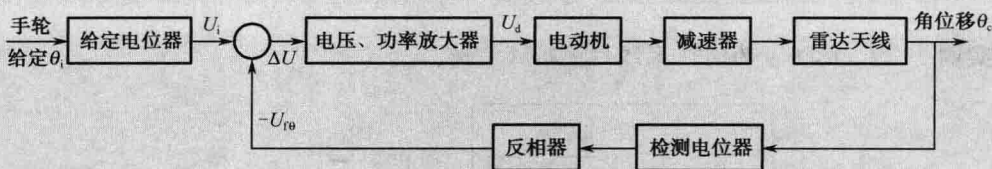


图 1-11 雷达天线位置跟随系统框图

1.2.3 自动控制系统的控制方式

按照是否含有反馈环节，将自动控制系统分为两种基本控制方式，即开环控制与闭环控制。

1. 开环控制

控制装置与受控对象之间只有顺向作用而无反向联系，即输出对输入没有影响的控制称为开环控制。其系统组成框图如图 1-12 所示。



图 1-12 开环控制系统组成框图

【实例 1-4】 图 1-13 所示为电炉箱控制系统。

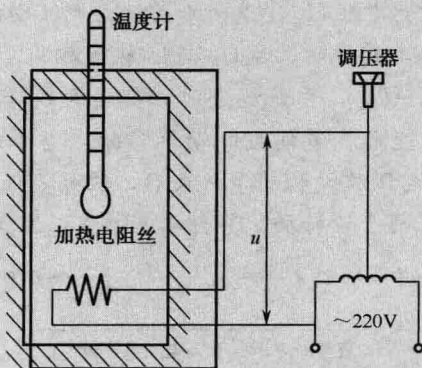


图 1-13 电炉箱控制系统

该系统受控对象为电炉箱，控制装置为调压器与加热电阻丝，受控量为炉温。由预先设定的手柄位置来调节调压器的滑动触头，从而调节加在加热电阻丝上的电压，从而控制电炉箱的温度。其系统组成框图如图 1-14 所示。