



新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材

· 电气自动化技术专业

自动控制原理与系统

熊新民 主 编

刘红运
张 泉 副主编

郭再泉 主 审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·电气自动化技术专业

自动控制原理与系统

熊新民 主 编

刘红运 副主编
张 泉

郭再泉 主 审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为新编高等职业教育电子信息类规划教材, 主要介绍自动控制理论的经典部分和几类常见自动控制系统, 内容包括自动控制系统的基本原理和基本概念、常用数学模型、性能分析方法和校正方法、晶闸管和 PWM 直流调速系统、张力控制系统、位置随动系统和过程控制系统。

本书特点是突出应用, 淡化理论, 注重基本概念和基本原理的阐述, 对时域分析法和频率特性法进行了有机整合, 并拓宽了控制系统的讨论范围, 同时介绍了 MATLAB 工程计算软件在控制理论和控制系统中的应用方法。

本书可作为高职高专电类专业教材, 也可供有关工程技术人员参考。

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

自动控制原理与系统/熊新民主编. —北京: 电子工业出版社, 2003.7
新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·电气自动化技术专业
ISBN 7-5053-8908-4

I. 自… II. 熊… III. ①自动控制理论—高等学校: 技术学校—教材②自动控制系统—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TP13②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 060171 号

责任编辑: 周光明

印 刷: 北京彩艺印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.75 字数: 352 千字

版 次: 2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 18.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077

出版说明

高等职业教育是我国高等教育的重要组成部分。其根本任务是培养和造就适应生产、建设、管理、服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的高等技术应用型人才。近年来,高等职业教育发展迅猛,其宏观规模发生了历史性变化。为适应我国社会进步和经济发展的需要,高等职业教育的教学模式、教学方法需要不断改革,高职教材也必须与之相适应,进行重新调整与定位,突出自身的特色。为此,在国家教育部、信息产业部有关司局的支持、指导和帮助下,电子工业出版社在全国范围内筹建成立“全国高职高专教育教材建设领导小组”,下设“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”等专业的多个编委会。各专业编委会成员由电子信息战线辛勤耕耘、功绩卓著的专家、教授、高工和富有高职教学经验的一线优秀教师组成。

2002年10月,“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”等四个专业的编委会精心组织全国范围内的优秀一线教师编写了《新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材》60余种。这批教材的主要特点是:

1. 在编写方法上打破了以往教材过于注重“系统性”的倾向,摒弃了一些一般内容和烦琐的数学推导,采用阶跃式、有选择的编写模式,强调实践和实践属性,精炼理论,突出实用技能,内容体系更加合理;

2. 注重现实社会发展和就业需求,以培养职业岗位群的综合能力为目标,充实训练模块的内容,强化应用,有针对性地培养学生较强的职业技能;

3. 教材内容的设置有利于扩展学生的思维空间和学生的自主学习;着力于培养和提高学生的综合素质,使学生具有较强的创新能力,促进学生的个性发展;

4. 教材内容充分反映新知识、新技术、新工艺和新方法,具有超前性、先进性。

首批教材共有60余种,将于2003年8月陆续出版。所有参加教材编写的高职院校都有一个共同的愿望:希望通过教材建设领导小组、编委会和全体作者的共同努力,使这批教材在编写指导思想、编写内容和编写方法上具有新意,突出高等职业教育的特点,满足高职学生学习和就业的需要。

高等职业教育改革与教材建设是一项长期的任务,不会一蹴而就,而是要经历一个发展过程。这批高职教材的问世,还有许多不尽人意之处。随着教育的不断深化,我国经济和科学技术的不断发展,高职教材的改革与开发将长期与之相伴而行。在教育部和信息产业部的指导和帮助下,我们将一如既往地依靠本行业的专家,与科研、教学第一线的教研人员紧密联系,加强合作,与时俱进,不断开拓,逐步完善各类专业课教材、专业基础课教材、实训指导书、电子教案、电子课件及配套教材,为高等职业教育提供优质的教学资源和服务。

电子工业出版社高职高专教育教材事业部的全体成员殷切地希望全国高职高专院校的教师们能够踊跃投稿,提出选题建议,并对已出版的教材从多方面提出修改建议。除以上四个专业外,我们还设立了“计算机技术”、“电子商务”、“物流管理”、“会计类”、“金融类”、“环保类”等专业的编委会。我们衷心欢迎更多的志士仁人加入到各个编委会中来。

电子工业出版社的全体员工将竭诚为教育服务,为高等职业教育战线的广大师生服务。

全国高职高专教育教材建设领导小组
电子工业出版社

参加“新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材”

编写的院校名单（排名不分先后）

- | | |
|--------------|----------------|
| 桂林工学院南宁分院 | 广州大学科技贸易技术学院 |
| 江西信息应用职业技术学院 | 湖北孝感职业技术学院 |
| 江西蓝天职业技术学院 | 江西工业工程职业技术学院 |
| 吉林电子信息职业技术学院 | 四川工程职业技术学院 |
| 保定职业技术学院 | 广东轻工职业技术学院 |
| 安徽职业技术学院 | 西安理工大学 |
| 杭州中策职业学校 | 辽宁大学高职学院 |
| 黄石高等专科学校 | 天津职业大学 |
| 天津职业技术师范学院 | 天津大学机械电子学院 |
| 福建工程学院 | 九江职业技术学院 |
| 湖北汽车工业学院 | 包头职业技术学院 |
| 广州铁路职业技术学院 | 北京轻工职业技术学院 |
| 台州职业技术学院 | 黄冈职业技术学院 |
| 重庆工业高等专科学校 | 郑州工业高等专科学校 |
| 济宁职业技术学院 | 泉州黎明职业大学 |
| 四川工商职业技术学院 | 浙江财经学院信息学院 |
| 吉林交通职业技术学院 | 南京理工大学高等职业技术学院 |
| 连云港职业技术学院 | 南京金陵科技学院 |
| 天津滨海职业技术学院 | 无锡职业技术学院 |
| 杭州职业技术学院 | 西安科技学院 |
| 重庆职业技术学院 | 西安电子科技大学 |
| 重庆工业职业技术学院 | 河北化工医药职业技术学院 |

石家庄信息工程职业学院

三峡大学职业技术学院

桂林电子工业学院高职学院

桂林工学院

南京化工职业技术学院

湛江海洋大学海滨学院

江西工业职业技术学院

江西渝州科技职业学院

柳州职业技术学院

邢台职业技术学院

漯河职业技术学院

太原电力高等专科学校

苏州工商职业技术学院

金华职业技术学院

河南职业技术师范学院

新乡师范高等专科学校

绵阳职业技术学院

成都电子机械高等专科学校

河北师范大学职业技术学院

常州轻工职业技术学院

常州机电职业技术学院

无锡商业职业技术学院

河北工业职业技术学院

天津中德职业技术学院

安徽电子信息职业技术学院

浙江工商职业技术学院

河南机电高等专科学校

深圳信息职业技术学院

河北工业职业技术学院

湖南信息职业技术学院

江西交通职业技术学院

沈阳电力高等专科学校

温州职业技术学院

温州大学

广东肇庆学院

湖南铁道职业技术学院

宁波高等专科学校

南京工业职业技术学院

浙江水利水电专科学校

成都航空职业技术学院

吉林工业职业技术学院

上海新侨职业技术学院

天津渤海职业技术学院

驻马店师范专科学校

郑州华信职业技术学院

浙江交通职业技术学院

前 言

根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》精神，为满足高职高专电子信息类专业教学基本建设的需要，在教育部高教司和教育部高职高专教育教学指导委员会的关心和指导下，于2002年11月在杭州召开了由电子工业出版社牵头组织的全国高职高专机电信息类专业教材建设研讨会。全国近百所高职高专院校100多位专家学者经过充分讨论，一致确定新世纪高职高专教材应该遵循“淡化理论、加强应用、联系实际、突出特色”的总体编写原则，同时落实了60本教材的编写规划和编写任务，并组织了编写班子和审订了编写大纲。本教材就是根据这次会议的基本精神和审定的编写大纲组织编写的新一轮全国高职高专规划教材之一。

“自动控制原理与系统”课程是高职高专电子信息类专业的主要课程，其教学内容既包含作为专业基础的自动控制原理部分，也涵盖实践性很强的自动控制系统部分，同时还受到教学时数的限制。为此，本教材在内容选取和编写思路力图体现高职高专培养工业、工程生产第一线高等工程技术应用型人才的要求，力争做到重点突出、概念清楚、层次清晰、深入浅出、简明易学，力求达到紧密联系实际、学用一致的目的。

本教材的特点主要体现在下述两个方面：一是体系组织方面，在原有同类教材基础上进行了较大调整和扩充。全书可分为控制理论和控制系统两大部分，对控制理论进行了删削重组，把时域法和频率特性统一整合成三性分析；同时对控制系统进行了类别增补，特别是增加了过程控制系统，既改变了以往系统类别过于单调的局面，也有效地扩大了教材应用面。二是内容取舍方面，主要介绍经典控制理论和常用控制系统，并且做到删繁就简，去旧推新，加强了对基本理论和应用的阐述，减少了公式和结论的理论推导过程，去掉了应用较少的根轨迹法，增添了应用日益普遍的、基于MATLAB的计算机辅助系统分析和优化设计的内容，既为教师进行CAI教学提供了条件，又使学生有机会掌握一种系统分析与设计的现代工具。

本教材由郑州工业高等专科学校熊新民副教授担任主编，由河北师范大学职业技术学院刘红运、南京化工职业技术学院张泉担任副主编，无锡职业技术学院的郭再泉副教授担任本教材的主审。

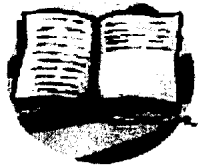
本书第1, 2, 3章由熊新民编写，第5, 6, 7章由刘红运编写，第4, 8, 9章由张泉编写。全书由主编统稿，后又根据主审的意见进行了必要修改和定稿。

本教材的参考学时为60~80学时，适用于高职高专电子信息类各专业的教学需要，也可供相关工程技术人员参考。建议控制原理部分全讲，控制系统部分可以根据学校性质和行业需要选讲。如机电行业可以侧重讲授调速系统及相关内容，化工行业可以侧重选讲过程控制系统及相关内容，以求更具针对性。

书中错误和不妥之处，恳请广大师生和读者批评指正。

编 者

2003年4月



Contents

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 自动控制与自动控制系统	(2)
1.2.1 自动控制系统的原理和基本概念	(2)
1.2.2 自动控制的基本方式	(3)
1.2.3 闭环控制系统的基本组成	(5)
1.2.4 自动控制系统的类型	(6)
1.2.5 对控制系统的基本要求	(7)
1.3 MATLAB 软件及其应用简介	(7)
1.3.1 MATLAB 的命令窗口	(8)
1.3.2 MATLAB 中的命令函数和 M 文件	(8)
1.3.3 MATLAB 中的变量和语句	(9)
1.3.4 MATLAB 中的运算符	(9)
1.3.5 用 MATLAB 绘制响应曲线	(10)
1.3.6 Simulink 简介	(12)
本章小结	(14)
思考与练习题	(15)
第 2 章 控制系统的数学模型	(16)
2.1 控制系统的微分方程	(17)
2.1.1 控制系统微分方程的建立	(17)
2.1.2 控制系统微分方程的求解	(18)
2.2 控制系统的传递函数	(18)
2.2.1 传递函数的定义	(19)
2.2.2 传递函数的求取	(19)
2.2.3 传递函数的性质	(20)
2.3 控制系统的动态结构图	(21)
2.3.1 动态结构图的组成与画法	(21)
2.3.2 动态结构图的等效变换及简化	(22)
2.3.3 用梅逊公式 (S.J.Mason) 求传递函数	(26)
2.4 控制系统的频率特性	(27)
2.4.1 频率特性的概念与定义	(28)



2.4.2	频率特性的求取方法	(29)
2.4.3	频率特性的表示方式	(29)
2.5	典型环节的数学模型和典型系统的传递函数	(34)
2.5.1	典型环节的数学模型	(34)
2.5.2	典型系统的传递函数	(41)
2.6	数学模型的 MATLAB 表示与变换	(43)
2.6.1	数学模型的 MATLAB 表示	(43)
2.6.2	数学模型的 MATLAB 变换	(44)
	本章小结	(46)
	思考与练习题	(47)
第 3 章	控制系统的性能分析	(49)
3.1	概述	(49)
3.1.1	典型输入信号及其时间响应	(50)
3.1.2	高阶系统的开环频率特性	(51)
3.2	稳定性分析	(54)
3.2.1	系统稳定性的概念	(54)
3.2.2	线性系统稳定的充分必要条件	(55)
3.2.3	系统稳定性的代数判据	(56)
3.2.4	系统稳定性的频域判据	(57)
3.2.5	系统稳定性的 MATLAB 分析法	(62)
3.3	动态性能分析	(64)
3.3.1	动态性能的时域分析	(64)
3.3.2	动态性能的频域分析	(70)
3.3.3	动态性能的 MATLAB 分析	(72)
3.4	稳态性能分析	(75)
3.4.1	系统误差与稳态误差	(75)
3.4.2	稳态性能的频域分析	(80)
	本章小结	(81)
	思考与练习题	(82)
第 4 章	控制系统的校正	(85)
4.1	系统校正概述	(85)
4.1.1	系统校正的概念	(85)
4.1.2	系统校正的方式	(85)
4.1.3	系统指标的确定	(86)
4.2	串联校正	(86)
4.2.1	串联校正装置及其特性	(86)
4.2.2	串联校正方法	(88)
4.3	反馈校正	(92)

4.3.1	反馈校正及效果	(92)
4.3.2	反馈校正方法	(93)
4.4	复合校正	(94)
4.4.1	按输入补偿的复合校正	(94)
4.4.2	按扰动补偿的复合校正	(95)
4.5	自动控制系统的一般设计方法	(95)
4.5.1	设计自动控制系统的基本步骤	(95)
4.5.2	系统固有部分开环频率特性的确定	(96)
4.5.3	系统预期开环对数频率特性的确定	(97)
4.5.4	系统校正环节频率特性的确定	(97)
4.5.5	系统校正示例	(97)
4.6	MATLAB 在系统校正中的应用	(99)
	本章小结	(101)
	思考与练习题	(102)
第 5 章	直流调速系统	(103)
5.1	直流调速系统概述	(103)
5.1.1	直流调速系统的基本概念	(103)
5.1.2	直流调速方式	(104)
5.1.3	晶闸管直流调速系统的机械特性	(106)
5.1.4	生产机械对直流调速系统的要求及调速指标	(107)
5.2	单闭环调速系统	(108)
5.2.1	有静差单闭环调速系统	(108)
5.2.2	无静差单闭环调速系统	(110)
5.2.3	单闭环直流调速系统的限流保护	(112)
5.2.4	其他单闭环调速系统	(113)
5.2.5	检测装置	(114)
5.3	双闭环直流调速系统	(115)
5.3.1	最佳过渡过程的基本概念	(115)
5.3.2	转速电流双闭环直流调速系统的原理结构和数学模型	(116)
5.3.3	双闭环直流调速系统的静特性分析	(118)
5.3.4	双闭环直流调速系统的动特性分析	(118)
5.3.5	双闭环直流调速系统的工程设计	(120)
5.4	可逆直流调速系统	(130)
5.4.1	直流调速系统的可逆线路	(130)
5.4.2	可逆直流调速系统中的环流分析	(131)
5.4.3	有环流可逆直流调速系统的回馈制动	(133)
5.4.4	逻辑控制无环流可逆直流调速系统	(135)
5.5	直流调速系统的 MATLAB 仿真分析与优化设计	(136)
5.6	直流调速系统的调试与维护	(137)



5.6.1 系统调试	(137)
5.6.2 系统的维护使用	(140)
本章小结	(141)
思考与练习题	(142)
第6章 直流脉宽调速系统	(143)
6.1 脉宽调制基本原理	(143)
6.1.1 脉宽调速原理及特点	(143)
6.1.2 不可逆 PWM 变换器	(144)
6.1.3 可逆 PWM 变换器	(145)
6.2 直流脉宽调速系统的控制电路	(147)
6.2.1 脉冲宽度调制器	(148)
6.2.2 逻辑延时及限流保护	(153)
6.2.3 驱动电路	(154)
6.3 直流脉宽调速系统实例分析	(155)
本章小结	(157)
思考与练习题	(157)
第7章 张力控制系统	(158)
7.1 张力控制系统概述	(158)
7.1.1 张力系统简述	(158)
7.1.2 张力控制方案	(160)
7.1.3 张力控制的必要性	(161)
7.2 张力检测的方法	(162)
7.2.1 直接检测张力的方法	(162)
7.2.2 间接检测张力的方法	(164)
7.3 直接反馈张力控制系统	(165)
7.4 扰动补偿张力控制系统	(167)
本章小结	(169)
思考与练习题	(169)
第8章 位置随动系统	(170)
8.1 位置检测与位置驱动	(170)
8.1.1 位置检测元件	(170)
8.1.2 相敏整流与滤波电路	(172)
8.1.3 放大电路	(173)
8.1.4 执行机构	(175)
8.2 位置随动系统的控制方案和基本类型	(176)
8.2.1 位置随动系统的控制方案	(176)
8.2.2 位置随动系统的基本类型	(177)
8.3 位置随动系统的控制性能与校正设计	(177)



8.3.1 系统组成及数学模型	(178)
8.3.2 系统的自动调节过程	(179)
8.3.3 系统的稳态性能分析	(180)
8.3.4 系统的动态性能分析	(181)
8.3.5 系统的校正设计	(181)
本章小结	(182)
思考与练习题	(183)
第9章 过程控制系统	(184)
9.1 过程控制系统概述	(184)
9.1.1 过程控制的概念	(184)
9.1.2 过程控制系统的组成与分类	(184)
9.1.3 过程控制系统的特点	(185)
9.1.4 过程控制系统的性能指标	(185)
9.2 过程参数的检测与变送	(186)
9.2.1 测量误差	(186)
9.2.2 检测仪表的结构	(187)
9.2.3 温度检测与变送	(187)
9.2.4 其他参量的检测与变送	(189)
9.3 过程控制仪表	(191)
9.3.1 DDZ-III型调节器	(191)
9.3.2 可编程调节器	(191)
9.3.3 执行器	(193)
9.4 单回路过程控制系统	(195)
9.4.1 单回路过程控制系统的原理结构	(195)
9.4.2 单回路过程控制系统的特性分析	(196)
9.4.3 单回路过程控制系统的选型分析	(197)
9.5 串级过程控制系统	(199)
9.5.1 串级控制系统的结构与模型	(199)
9.5.2 串级过程控制系统的特点与应用	(200)
9.5.3 串级过程控制系统的设计与调整	(202)
9.6 过程控制系统的其他形式	(203)
本章小结	(206)
思考与练习题	(207)
参考文献	(208)

第 1 章 绪 论



内容提要

- 本章简要介绍自动控制理论及其应用的发展历史；重点介绍自动控制的基本原理、基本概念、基本方式、闭环控制系统的基本组成、基本类型以及对控制系统的基本要求，MATLAB 软件及其应用的基本知识。

1.1 概述

自动控制理论是研究各种自动控制系统共同规律的技术科学，是工程控制论的一个重要分支，在工程应用和科技发展中起着极其重要的作用。它以数学为研究工具，以系统为研究和应用对象，以控制方法和控制规律为研究内容，是分析、设计和调试自动控制系统的必备理论基础。

自动控制理论可以分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三大部分，其发展过程也相应经历了三个阶段。

经典控制理论是指 20 世纪 50 年代末期所形成的理论体系，它以描述系统输入—输出关系的传递函数为理论基础，并且采用时域和复频域的双重方法，主要研究单输入—单输出线性定常系统的分析和设计问题。

现代控制理论是在 20 世纪 60~70 年代发展起来的新理论。它满足了当时宇航、国防等尖端技术和复杂系统的发展需要，采用能够描述系统内部特征的状态空间法，着重研究具有高性能、高精度的多输入—多输出、线性或非线性、定常或时变系统的分析和设计问题，如最优控制、最佳滤波和自适应控制等。

智能控制理论是在计算机技术和人工智能理论取得重大进展的 20 世纪后期发展起来的新型控制理论。它是试图模仿具有高度自组织、自适应、自调节能力的人类生命活动的机理，研究具有仿人智能的工程控制和信息处理问题，以使具有高度复杂性、高度不确定性的系统达到更高的要求。

回顾控制论的发展历程，最早可追溯到 18 世纪英国的第一次技术革命。其间，许多科学家为此做出了非常杰出的贡献。其中，控制论创始人维纳 (N.Wiener) 在火炮自动控制的研究中发现了极为重要的反馈概念，于 1948 年发表了著名的“控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学”一文，不仅奠定了控制论这门学科的基础，而且确立了信息、反馈与控制作为控制论的中心思想。1954 年，我国学者钱学森运用控制论的思想和方法，首创了

“工程控制论”，把控制论推广到了诸如生物控制、经济控制和社会控制等其他领域，从而大大拓展了控制论的应用范围，对促进科技发展和社会进步产生了深远的影响。

自动控制理论的不断进展，反映了人类社会由机械化步入电气化，继而走向自动化、信息化和智能化的时代特征。同时可以看出，经典控制理论仍然是基础，相当多的各种工程问题还要用它来解决，因此，学习经典控制理论还是非常重要的。

学习自动控制原理与系统课程，主要解决两个问题：一是如何分析某个给定控制系统的工作原理和控制性能；二是如何根据实际需要来进行各种实际控制系统的设计，并用机、电、液、光等设备来实现这一系统。解决这两类问题都必须具有一定的控制理论知识，同时能以系统的而不是孤立的、动态的而不是静态的观点和方法来处理问题，才能达到预期的目的。

1.2 自动控制与自动控制系统

自动控制作为重要的技术手段，主要用于解决各类性质的工程问题，承担维持系统正常运行的技术任务。实际上，在各种生产过程和生产设备中，常常需要使其中的某些物理量或者保持恒定，或者按照某种规律变化，这就是系统的运行要求。而要满足这些要求，就必须对其进行相应的调整与控制，以抵消外界的干扰和影响，最终实现控制目标。

1.2.1 自动控制系统的基本原理和基本概念

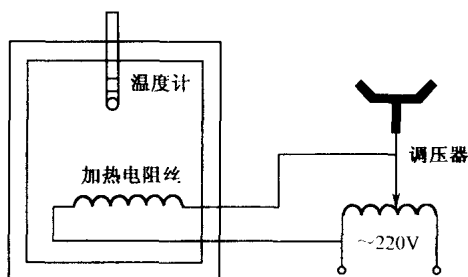


图 1.1 人工控制的恒温箱

首先以恒温系统为例，对其实现温度自动控制的基本原理加以研究，并从中引出自动控制和自动控制系统的基本概念。

实现恒温控制有两种方法：人工控制和自动控制。图 1.1 所示为人工控制的恒温箱。箱内的加热元件为电阻丝，箱内温度则由温度计来测量显示。人们可以通过调压器改变供给电阻丝的电压，进而改变流过电阻丝的电流和电阻丝产生的热量，就可达到控制箱内温度的目的。这种人工调节过程可归结如下：

- (1) 观测由测量元件（温度计）测出的恒温箱的实际温度（也称被控量）；
- (2) 与要求的温度值（也称给定值）进行比较，得出温度偏差的大小和方向；
- (3) 根据偏差的大小和方向再进行控制：当恒温箱的实际温度高于给定温度时，就调节调压器动触头使电流减小，温度降低；若实际温度低于给定温度，则调节调压器动触头使电流增大，温度升高。

由此可见，上述人工控制的过程就是测量、求偏差、再实施控制以纠正偏差的过程，也就是检测偏差用以纠正偏差的过程。

对于上述人工控制的恒温箱，如果能找到一个控制装置（也称控制器）来代替人的职能，它就可以变成一个自动控制系统了。图 1.2 所示就是恒温箱自动控制系统。在这里，测温元件换成了能够输出电压信号的热电偶，调节调压器动触头的任务则交给了执行电动机，恒温箱的温度也改由给定信号电压 u_1 来加以控制。当外界因素引起箱内温度变化时，热电偶



就会将箱内实际温度转换为对应的电压信号 u_2 并反馈回去与给定信号 u_1 相比较, 所得结果即为温度偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。此偏差经过电压、功率放大后, 用以改变电动机的转速和方向, 并通过传动装置拖动调压器动触头。当温度偏高时, 动触头向着减小电流的方向运动, 反之则加大电流, 直到温度达到给定值为止, 即只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时, 电动机才停转。这样就完成了所要求的控制任务。这种无需人工直接干预, 利用外加控制装置操纵被控对象, 使被控量按照预定规律运行变化的过程, 就称之为自动控制。

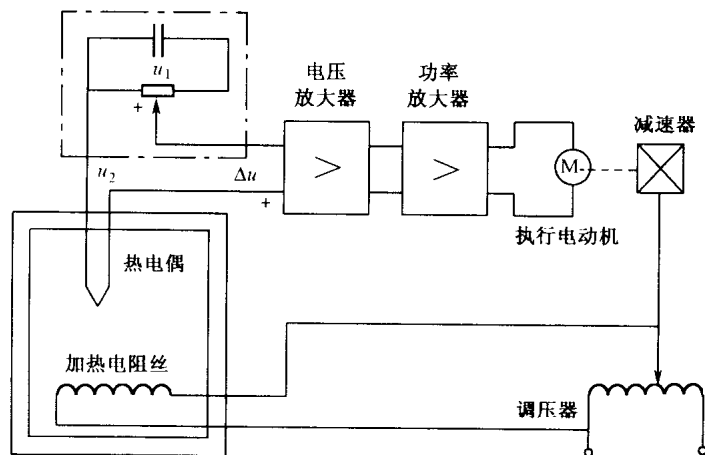


图 1.2 恒温箱的自动控制系统

分析表明, 上述人工控制系统和自动控制系统是极为相似的。执行机构类似于人手, 测量装置相当于人的眼睛, 控制器取代了人脑。另外, 它们还有一个共同的特点, 就是都要检测偏差, 并用检测到的偏差去纠正偏差, 可见没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中, 这种偏差是通过反馈建立起来的。一般给定量也叫控制系统的输入量, 被控量称为系统的输出量。反馈就是通过适当的测量装置将输出量的全部或部分返回输入端, 使之与输入量进行比较, 以求出偏差。这种基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的控制原理就称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的控制系统称为反馈控制系统。实现自动控制的装置可能各不相同, 但反馈控制原理却是相同的。因此可以说, 反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

通过上例, 可以明确下列基本概念。

被控对象 (或受控对象): 指被控制的机器设备或生产过程, 如恒温箱等。

被控量: 指表征被控对象工况的、需要加以控制的物理量, 通常作为系统的输出量, 如恒温箱的实际温度。

给定值: 指要求被控量达到的希望值, 通常作为系统的输入量, 如恒温箱的期望温度。

控制装置: 指能够通过对被控对象实施操纵、从而完成控制任务的外部装置。

控制系统: 指有机结合在一起的被控对象和控制装置构成的总体。

1.2.2 自动控制的基本方式

自动控制有两种基本的控制方式: 开环控制和闭环控制。与这两种控制方式对应的系统分别称之为开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统

开环控制系统是指系统的输出端与输入端不存在反馈关系、系统的输出量对控制作用不发生影响的系统。这种系统既不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到输入端与输入量进行比较，控制装置与被控对象之间只有顺向作用，没有逆向联系。

图 1.3 所示就是一个开环控制的电动机调速系统。图中，电压信号 u_n^* 作为控制电动机转速的给定量，电动机的实际转速 n 就是被控量。当给定电压改变时，电动机转速也跟着改变。但由于没有测量反馈，电动机的实际转速等于多少、是否满足要求都不得而知，因此也就不具备自动稳速功能。当负载力矩改变时，转速也会跟着改变。

开环控制系统的基本结构如图 1.4 所示。

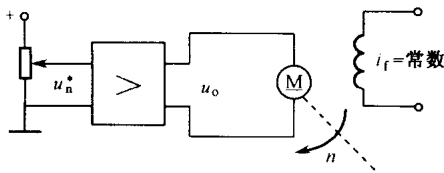


图 1.3 开环调速系统

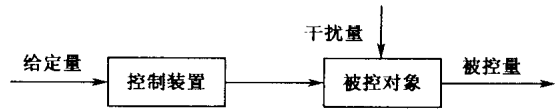


图 1.4 开环控制系统的基本结构

开环控制系统的特点是：系统结构和控制过程简单，成本低廉，稳定性好，但抗干扰能力差，没有自动调节能力。一般仅用于控制性能要求不高、系统输入—输出关系明确、干扰较小且相对确定的场合。

2. 闭环控制系统

闭环控制系统就是反馈控制系统。这种系统的控制装置与被控对象之间不仅有顺向作用，而且输出端与输入端之间存在反馈联系，因此输出量的大小对控制作用有着直接影响。

图 1.5 所示就是一个闭环控制的电动机调速系统。它是在开环控制的基础上，通过增加测速反馈环节而形成的。这样一来，负载转矩变化对转速的不良影响就会大大降低。可以看出，当给定信号 u_n^* 维持恒定时，如果负载转矩增大，电机转速必然降低，开环系统对此无能为力。闭环系统则不然，由于有了反馈，转速降低使得反馈信号减小，偏差信号增大，电机电压就会升高，转速又会上升，最终偏差就会减小。反之亦然。可见闭环的作用就是利用反馈来减小偏差。

闭环控制系统的基本结构如图 1.6 所示。

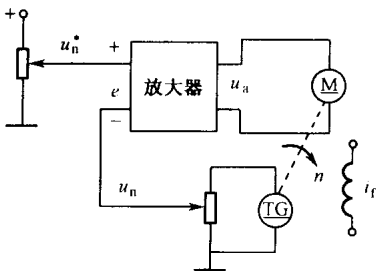


图 1.5 闭环控制的调速系统

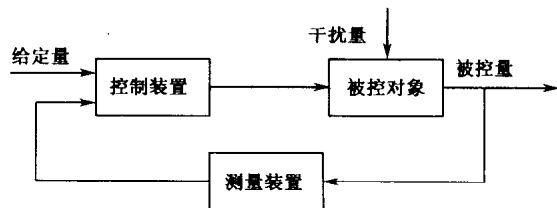


图 1.6 闭环控制系统的基本结构



闭环控制系统的突出优点是控制精度高，抗扰能力强，适用范围广。无论出现什么干扰，只要被控量的实际值偏离给定值时，闭环控制就会通过反馈产生控制作用来使偏差减小。这样就可使系统的输出响应对外部干扰和内部参数变化不敏感，因而有可能采用不太精密且成本较低的元件来构成比较精确的控制系统。

闭环控制系统也有其固有的缺点：一是结构复杂，元件较多，成本较高；二是稳定性要求较高。由于系统中存在反馈环节和元件惯性，而且靠偏差进行控制，因此偏差总会存在，时正时负，很容易引起振荡，导致系统不稳定。可见控制精度与稳定性是闭环系统的基本矛盾。

1.2.3 闭环控制系统的基本组成

闭环控制系统都是反馈控制系统，其典型结构如图 1.7 所示。图中，系统的组成环节和被控对象用方框表示，信号通路及其传输方向用箭头线表示，反馈信号的极性用“+”、“-”号表示，“-”号表示负反馈，“+”号表示正反馈，系统中的主反馈及绝大多数局部反馈必须采用负反馈，正反馈只在补偿控制中偶尔采用，符号 \otimes 表示多路信号在此叠加进行代数求和。由此可见，该图表示了各种环节在系统中的位置及其相互间的关系。

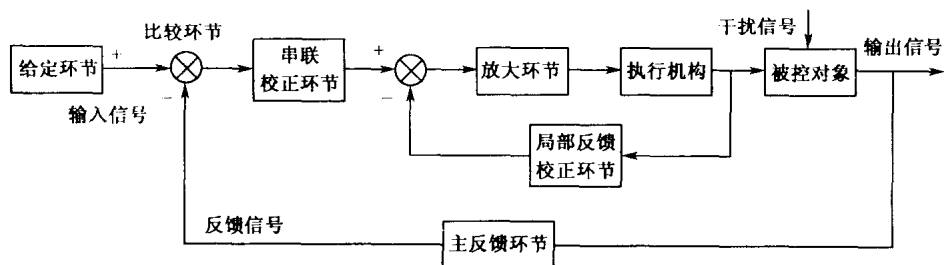


图 1.7 闭环控制系统的典型结构

下面解释各种组成环节的概念及其功能。

- (1) 给定环节：产生给定（输入）信号的环节或元件，如调速系统的给定电位计（器）。
- (2) 反馈环节：对系统被控量或中间输出量进行测量并转换为与相应输入信号一致的反馈信号的环节或元件，它可以构成主反馈或局部反馈，如调速系统的测速电动机。
- (3) 比较环节：对系统输入量和反馈量进行加、减运算求取误差的环节或元件。
- (4) 放大环节：对偏差信号进行电压放大和功率放大的环节或元件，如各种放大器等。
- (5) 执行机构：直接对被控对象进行操作从而对系统产生实际控制作用的环节或元件，如执行电动机、过程调节阀等。
- (6) 校正环节：用于改善系统性能的环节，一般是电子电路形式，可以串联在前向通道，也可以构成局部反馈通道。
- (7) 被控对象：控制系统所要操纵的机器设备或生产过程，它的输出量即为系统的被控量，如恒温箱等。

一般规定，信号从系统输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称为前向通道；系统输出量经由测量装置反馈到输入端的传输通路称为主反馈通道；前向通道与主反馈通道一起构成主回路。此外还有局部反馈通道以及由它组成的内回路。只有一个反馈通道的系统称为单