



普通高等教育“十三五”规划教材
普通高等教育 电气工程 系列规划教材
自动化
四川省精品课程教材
四川省精品资源共享课教材

The Principle of
Automatic Control

自动控制原理

◎ 邹见效 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

普通高等教育 电气工程 自动化 系列规划教材

四川省精品课程教材

四川省精品资源共享课教材

自动控制原理

主编 邹见效

参编 李焱骏 李 瑞 吴小娟 凡时财



机械工业出版社

自动控制原理是高等学校工科专业的核心课程之一,本书比较系统地阐述了自动控制理论的基本原理、方法和应用,可作为控制系统领域入门课程教材。全书共9章,第1~8章较为系统地介绍了经典控制理论,包含控制系统的数学模型的建立与分析,围绕系统的稳定性、动态性能和稳态性能,从时域、频域、根轨迹等不同角度,介绍了系统分析与设计的方法;第9章介绍了现代控制理论的状态空间分析法。本书每章最后一节,引入对应知识点的 MATLAB 仿真指令,加强读者对基于使用 MATLAB 工具进行系统分析、设计与仿真的理解与掌握。

本书注重知识点阐述的系统性,同时突出工程应用性,语言叙述的简洁性。

本书适合工科相关专业本科生作为教材使用,也可供研究生及工程技术人员自学参考。

(编辑邮箱:jinacmp@163.com)

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/邹见效主编. —北京:机械工业出版社,2017.1
普通高等教育电气工程自动化系列规划教材
ISBN 978-7-111-55657-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第302650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:吉玲 责任编辑:吉玲 王荣 刘丽敏

责任校对:樊钟英 封面设计:张静

责任印制:李洋

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2017年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19.25印张·463千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55657-2

定价:42.00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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

Preface

自动控制技术在工业、农业、交通、环境、军事、生物、医学、经济、金融和社会各个领域中都起着极其重要的作用。自动控制理论是研究自动控制的基本理论和自动控制共同规律的技术科学。自动控制原理主要讲述自动控制的基本理论和分析、设计控制系统的基本方法。自动控制原理已成为许多学科的专业基础课程或是核心课程，对掌握和理解自动控制技术及其应用有着重要的作用。

本书是课程组在总结多年教学和科研经验的基础上，结合国内外控制理论发展及应用现状，参考国内外众多经典教材，经反复研讨编写而成。本书是课程组建设省级资源精品共享课、省级精品课程及大规模在线课程（MOOC 课）的配套教材。

编者在编写本书的过程中，坚持以下原则：

1) 理论系统性。在有限的学时数内，保持所阐述的控制基本理论的系统性和完整性。同时，在不影响理论阐述的基础上，精简了传统自动控制原理教材中过于繁复的数学推导和证明。

2) 工程实用性。通过工程应用实例引出要阐述的概念、理论和方法，强调控制对象的物理背景和物理概念，突出分析和设计方法的工程实用性。通过增加工程应用背景较强的典型例题和习题，激发读者的兴趣，让读者理解和掌握经典控制理论的精髓。

3) 阐述简洁性。在写作风格上，力求做到言简意赅、内容精炼、重点突出，避免大篇幅的叙述性内容，尽量压缩各章节的篇幅，同时注重基本概念准确性和完整性。

4) MATLAB 工具的应用。每章最后一节简单介绍对应知识点的 MATLAB 仿真指令，加强读者对理论和方法的理解与掌握。同时，通过引入系统性的实例介绍了基于 MATLAB 的系统分析、设计与仿真。

本书适用于 48 ~ 90 学时的课内教学。本书由邹见效任主编，李焱骏、李瑞、吴小娟、凡时财参编。秦刚、林晓雯、黄康、宋应、郑海潮、孟令榜、叶倩文参与了本书的资料整理工作。

在编写过程中参考了国内外很多优秀教材、著作，在此，编者向参考文献及被引用内容的各位作者表示衷心的感谢！同时感谢责任编辑吉玲女士，同时对在本书编写过程中给予帮助的所有人员表示诚挚的谢意。

本书提供配套的电子课件及相关仿真程序。

由于作者水平有限，书中错误或欠妥之处在所难免，恳请各位读者批评指正。

编 者

目 录

Contents

前言

第1章 绪论 1

1.1 自动控制技术及其应用	2
1.2 自动控制系统的一般概念	4
1.2.1 自动控制的基本原理	4
1.2.2 自动控制系统的组成	5
1.3 自动控制系统的基本控制方式	7
1.3.1 开环控制系统	7
1.3.2 闭环控制系统	7
1.3.3 复合控制系统	8
1.4 自动控制系统的分类	8
1.4.1 按系统输入信号形式划分	8
1.4.2 按系统微分方程形式划分	9
1.4.3 按系统参数与时间的关系划分	9
1.4.4 按系统信号形式划分	9
1.4.5 按系统控制作用点个数划分	9
1.5 自动控制理论发展简史	10
1.6 自动控制系统的基本要求	11
1.6.1 稳定性	12
1.6.2 暂态性能	12
1.6.3 稳态性能	12
1.7 自动控制系统分析与设计工具	13
1.8 全书章节结构	13
习题	14

第2章 系统的数学模型 17

2.1 系统的微分方程	17
2.1.1 电路系统	17
2.1.2 机电系统	18
2.1.3 机械系统	19

2.1.4 非线性方程的线性化	19
2.2 传递函数	20
2.2.1 拉普拉斯变换	20
2.2.2 传递函数的定义	21
2.3 框图模型	25
2.3.1 框图的构成及绘制	25
2.3.2 框图的变换规则	26
2.4 信号流图模型	32
2.4.1 信号流图的绘制	33
2.4.2 梅森增益公式	34
2.4.3 闭环系统的传递函数	37
2.5 控制系统建模的 MATLAB 方法	39
习题	42

第3章 线性系统的时域分析法 48

3.1 时域分析的基础	48
3.1.1 典型输入信号	48
3.1.2 系统的动态性能指标	49
3.2 一阶系统的时域分析	51
3.2.1 一阶系统的数学模型	51
3.2.2 单位阶跃响应	52
3.2.3 单位脉冲响应	52
3.2.4 单位斜坡响应	53
3.3 二阶系统的时域分析	54
3.3.1 二阶系统的数学模型	54
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	54
3.3.3 欠阻尼二阶系统的动态过程分析	56
3.4 高阶系统的时域响应	59
3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应	59
3.4.2 高阶系统的二阶近似	61
3.5 线性系统的稳定性分析	61
3.5.1 稳定的概念	61
3.5.2 系统的稳定性判据	62
3.6 线性系统的稳态误差计算	66
3.6.1 计算稳态误差的一般方法	67
3.6.2 系统类型及静态误差系数法	68
3.6.3 动态误差系数法	72
3.6.4 扰动作用下的稳态误差	72
3.6.5 减小和消除稳态误差的措施	74

3.7 基于 MATLAB 的时域分析	75
习题	79

第4章 线性系统的根轨迹法 82

4.1 根轨迹的基本概念	82
4.2 根轨迹方程	83
4.3 根轨迹的绘制与动态特性	85
4.3.1 绘制根轨迹的基本法则	85
4.3.2 根轨迹与系统的动态特性	95
4.4 广义根轨迹法	97
4.4.1 参数根轨迹	97
4.4.2 零度根轨迹	99
4.5 基于 MATLAB 的根轨迹分析	101
习题	103

第5章 频域分析法 106

5.1 频率特性概述	106
5.1.1 线性系统在正弦信号作用下的稳态输出	106
5.1.2 线性系统的频率特性	107
5.1.3 频率特性的几何表示方法	107
5.1.4 系统频率特性与典型环节频率特性的关系	108
5.2 Nyquist 图的绘制	109
5.2.1 比例环节	109
5.2.2 积分环节	110
5.2.3 惯性环节	110
5.2.4 振荡环节	112
5.2.5 微分环节	113
5.2.6 一阶微分环节	114
5.2.7 二阶微分环节	115
5.2.8 延迟环节	115
5.2.9 系统 Nyquist 图绘制举例	116
5.3 Bode 图的绘制	118
5.3.1 比例环节	118
5.3.2 积分环节	118
5.3.3 微分环节	119
5.3.4 惯性环节	119
5.3.5 一阶微分环节	120
5.3.6 振荡环节	122
5.3.7 二阶微分环节	123

5.3.8 延时环节	124
5.3.9 系统 Bode 图的绘制方法	125
5.3.10 最小相位系统的 Bode 图	129
5.4 Nyquist 稳定判据及其扩展	131
5.4.1 稳定判据分析对象函数	131
5.4.2 辐角定理	131
5.4.3 Nyquist 稳定判据	132
5.4.4 Nyquist 稳定判据扩展	135
5.5 系统的相对稳定性和稳定裕度	139
5.5.1 相位裕度	139
5.5.2 幅值裕度	140
5.6 频域指标与系统性能的关系	142
5.6.1 闭环频率特性	142
5.6.2 频域指标与系统性能的关系	142
5.7 MATLAB 的频域分析应用	145
习题	147
第 6 章 控制系统的校正	150
6.1 校正问题的提出和一般方法	150
6.1.1 校正问题的提出	150
6.1.2 校正的一般方法	151
6.1.3 基于频域分析法的校正思想	152
6.2 PID 控制器简述	153
6.2.1 比例控制器	153
6.2.2 比例微分控制器	155
6.2.3 积分控制器	156
6.2.4 比例积分控制器	156
6.2.5 比例积分微分控制器	157
6.3 串联超前校正	157
6.3.1 超前校正元件特性	157
6.3.2 超前校正元件设计	158
6.3.3 串联超前校正对系统的影响	161
6.4 串联滞后校正	162
6.4.1 滞后校正元件特性	162
6.4.2 滞后校正元件设计	163
6.4.3 串联滞后校正对系统的影响	164
6.5 串联滞后-超前校正	164
6.6 MATLAB 在系统校正中的应用	166
习题	168

第7章 线性离散系统分析 170

7.1 线性离散系统的基本概念	170
7.2 信号的采样与保持	171
7.2.1 采样过程	171
7.2.2 信号保持	175
7.3 z 变换	177
7.3.1 z 变换定义	177
7.3.2 z 变换方法	178
7.3.3 z 逆变换方法	180
7.3.4 脉冲传递函数	183
7.3.5 线性离散系统的开环脉冲传递函数	184
7.3.6 z 变换法的局限性	190
7.4 离散系统的稳定性分析	191
7.4.1 离散系统稳定的充分必要条件	192
7.4.2 劳斯稳定判据	192
7.4.3 线性离散系统的时域分析	195
7.4.4 线性离散系统的稳态误差	196
7.5 基于 MATLAB 的线性离散系统分析	198
习题	202

第8章 非线性控制系统分析 206

8.1 非线性控制系统概述	206
8.1.1 典型非线性环节	206
8.1.2 非线性系统特征	208
8.1.3 非线性系统分析方法	209
8.2 描述函数法	209
8.2.1 描述函数定义	209
8.2.2 典型非线性特性的描述函数	210
8.2.3 非线性特性描述函数简化	214
8.2.4 描述函数法应用条件	215
8.2.5 应用描述函数分析非线性系统	216
8.3 相平面法	218
8.3.1 相平面法概念	218
8.3.2 相轨迹绘制方法	219
8.3.3 奇点	222
8.3.4 非线性系统相平面分析	224
8.4 非线性控制系统 MATLAB 设计	227
习题	231

第9章 线性系统的状态空间分析 235

9.1 线性系统状态空间描述	235
9.1.1 系统状态空间描述的基本概念	235
9.1.2 状态空间表达式的建立	236
9.1.3 状态空间表达式的线性变换	241
9.1.4 从状态空间表达式求传递函数阵	245
9.1.5 状态空间表达式解	248
9.1.6 线性离散时间系统状态空间表达式建立及其解	251
9.2 线性系统的能控性和能观性	254
9.2.1 线性定常连续系统的能控性与能观性	254
9.2.2 线性定常离散系统的能控性与能观性	258
9.2.3 线性定常系统能控性与能观性的对偶关系	259
9.2.4 线性定常系统的能控标准型和能观标准型	260
9.2.5 线性定常系统的结构分解	264
9.3 线性定常系统反馈及状态观测器	268
9.3.1 线性反馈控制系统的基本结构及其特性	268
9.3.2 极点配置	269
9.3.3 全维状态观测器	271
9.4 李雅普诺夫稳定性方法	273
9.4.1 李雅普诺夫稳定性定义	273
9.4.2 李雅普诺夫第一法	274
9.4.3 李雅普诺夫第二法	276
9.4.4 线性定常系统的李雅普诺夫稳定性分析	278
9.5 基于 MATLAB 的状态空间分析	280
习题	282

附录 287

附录 A 常用函数的拉普拉斯变换表和 z 变换表	287
附录 B 本书常用 MATLAB 命令及工具	287

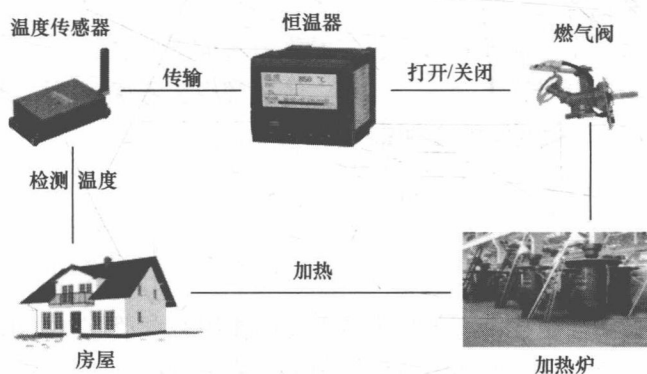
参考文献 295

第 1 章 绪 论

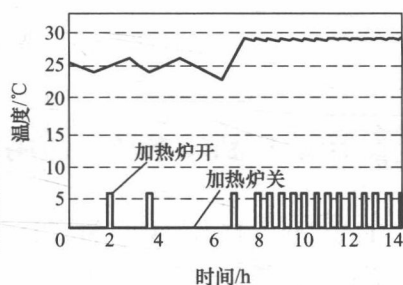
自动控制原理是研究自动控制的基本理论和自动控制共同规律的技术科学。自动控制原理主要讲述自动控制的基本理论和分析、设计控制系统的基本方法。本章从自动控制的基本概念、任务、控制方式、控制系统的基本组成出发,介绍自动控制的原理及应用、自动控制理论的发展史、自动控制系统的组成、自动控制系统的分类、自动控制系统的基本要求以及自动控制系统分析与设计工具。

控制系统包含众多特性,如人工控制、自动控制、开环控制、闭环控制等。如果一个系统由人来操作,如驾驶飞机、操纵仪器等,则称为人工控制;如果一个系统无人工操作,例如空调温度调节系统、电梯升降系统、公交红绿灯控制系统等,则称为自动控制;用于跟踪某个参考信号的系统则称为跟踪控制系统或伺服控制系统,如数控机床。

我们在日常生活中有很多包含控制的系统,如图 1-1a 所示的恒温调节系统,人们希望在室内维持一个恒定的温度,而室内温度的升降是由燃烧煤气的加热炉决定的。当室内温度低于希望温度时,煤气阀的阀门会增大,以提高室内温度;当室内温度高于希望温度时,煤气阀的阀门会减小,以降低室内温度。这个调节阀门的过程可以是人工调节,也可以是使用恒温器自动调节。



a) 恒温调节系统结构



b) 室内温度变化与加热炉工作状态

图 1-1 恒温调节系统

以使用恒温器自动调节为例,当恒温器的房间的室内温度和室外温度都低于参考温度

时,恒温器将导通,控制器打开加热炉煤气阀并点燃燃烧室,从而使热量以一定的速率提供给房间,这个速率必须比热量损失的速率大。因此,室内温度将会一直升高,直到稍微超过恒温器的设定点。这时候加热炉被关闭,接着室内温度由于比室外温度高而不断下降。当温度下降到低于设定点时,恒温器再次导通,就这样一直循环通断过程。室内温度变化与加热炉的开关示意图如图 1-1b 所示。室外温度为 20°C ,恒温器初始设定值为 24°C ,之后将恒温器的设定温度重新设定为 27°C 。随后加热炉工作使温度升高到这个设定值,之后室温一直围绕设定值上下波动。

日常生活中常见的还有汽车速度控制系统(见图 1-2)。人们通过踩踏油门踏板对车辆系统设置了一个期望速度,速度控制器通过控制调速气门,以此影响车辆发动机喷油嘴的开度,增加或降低发动机的转速,以此达到人们所期望车辆达到的速度。当车辆的实际速度低于期望速度时,控制器增大调速气门,增加发动机的转速提高车辆速度;当车辆的实际速度高于期望速度时,控制器减小调节气门,减小发动机的转速降低车辆速度。

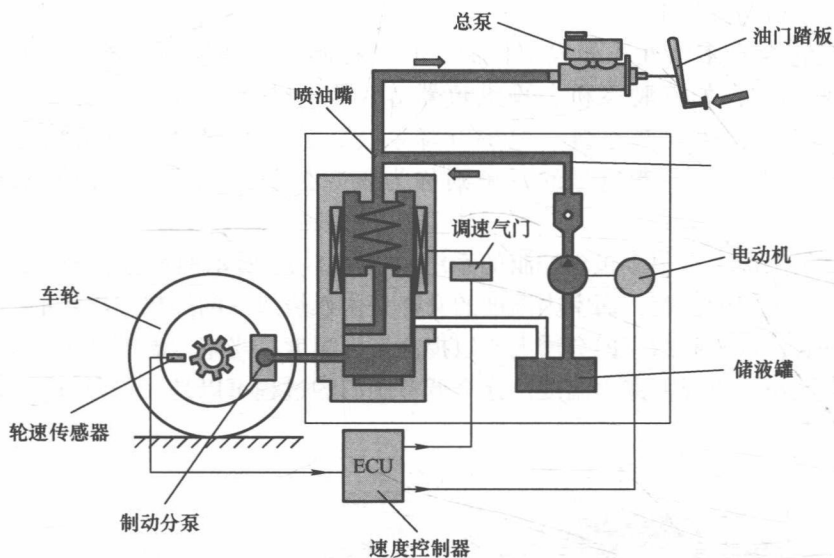


图 1-2 汽车速度控制原理图

1.1 自动控制技术及其应用

在现代科学技术的众多领域中,自动控制技术起着越来越重要的作用。自动控制技术给人们提供了获得动态系统最佳性能的方法,从普通的工业生产到尖端的国防科技,到处都有自动控制技术大显身手的空间。一方面,自动控制技术使得无数高难度、复杂、高精度的控制成为可能;另一方面,它的应用提高了产品质量、降低了生产成本、提高了劳动效率,使得人们可以从繁重的体力劳动和重复的手工操作中解放出来。

控制理论分成经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论是从20世纪20年代到20世纪40年代形成的以时域法、频域法和根轨迹为主要内容的一门独立学科,以传递函数为基础,研究单输入-单输出一类定常系统的分析与设计问题。世界上最早的自动控制系统是在18世纪中叶由瓦特研制的,他设计了离心调节器去控制蒸汽发动机的速度。1932年,奈奎斯特针对反馈放大器提出了几何稳定判据,并证实此判据适用于线性定常控制系统。1945年,伯德提出了反馈放大器的一般设计方法,并编著了《网络分析与反馈放大器的设计》一书。1947年,美国出版了当时世界上第一本控制方面的教材《伺服机原理》。1948年,美国麻省理工学院的辐射研究所完成了“雷达自动跟踪”“火炮指挥仪”“数控机床”等一系列自动控制的实践工程。同年,伊文思(W. R. Evans)根据反馈控制系统的开环传递函数与其闭环特征方程间的内在联系,提出了一种非常实用的设计方法——根轨迹法。数学家维纳把那时发表的有关控制方面的理论与方法称为控制论。

20世纪50年代,中国学者对控制理论也做出了诸多贡献。1954年,钱学森在美国出版了专著《工程控制论》,成为当时控制科学技术的经典著作之一,并于1958年由戴汝为、何善培译成中文,曾获中国科学院1956年度科学一等奖。天津大学刘豹教授于1954年编著了我国第一本用中文撰写的控制理论专著《自动控制原理》。1956年由浙江大学胡中楫教授和中国科学院薛景瑄研究员在前苏联专家讲稿的基础上,出版了由中国教师自己编写的第一本《自动控制原理》教科书。

20世纪60年代,在蓬勃兴起的航空航天技术的推动和飞速发展的计算机技术的支持下,现代控制理论在经典控制理论的基础上迅速发展起来。它是以状态空间法为基础,研究多输入-多输出、时变参数、高精度复杂系统的控制问题,并形成了如最优控制、最佳滤波、系统辨识和自适应控制等学科分支。

经典控制理论和现代控制理论主要是针对线性系统的线性理论。20世纪70年代末,由于被控对象、环境、控制任务的复杂性,控制理论在非线性系统理论、离散时间系统理论、大系统理论、复杂系统理论和智能控制理论等方面均有不同程度的发展。尤其是从“仿人”概念出发的智能控制,在实际应用方面得到了很快的发展,它主要包括模糊控制、神经网络控制和专家系统控制等。

自动控制理论是研究自动控制的基本理论和自动控制共同规律的技术科学,专门研究有关自动控制系统分析和设计中的基本概念、基本原理和基本方法。自动控制技术在工业、农业、国防(尤其是在航天、制导、核能等方面)乃至日常生活和社会科学领域中都起着极其重要的作用。

自动控制技术开始多用于工业,如压力、温度、流量、位移、湿度、黏度自动的控制,应用于数控机床、合成塔、核反应堆等;后来进入军事领域,如飞机自动驾驶、火炮自动跟踪、导弹、卫星、宇宙飞船自动控制;目前已深入到人民生产、生活的各个领域,如收音机、电视机、冰箱、空调器、汽车、飞机;更渗透到生物、医药、环境、经济管理等更多领域,如生物控制论、人造器官、模拟经济管理过程、经济控制论,如图1-3所示。

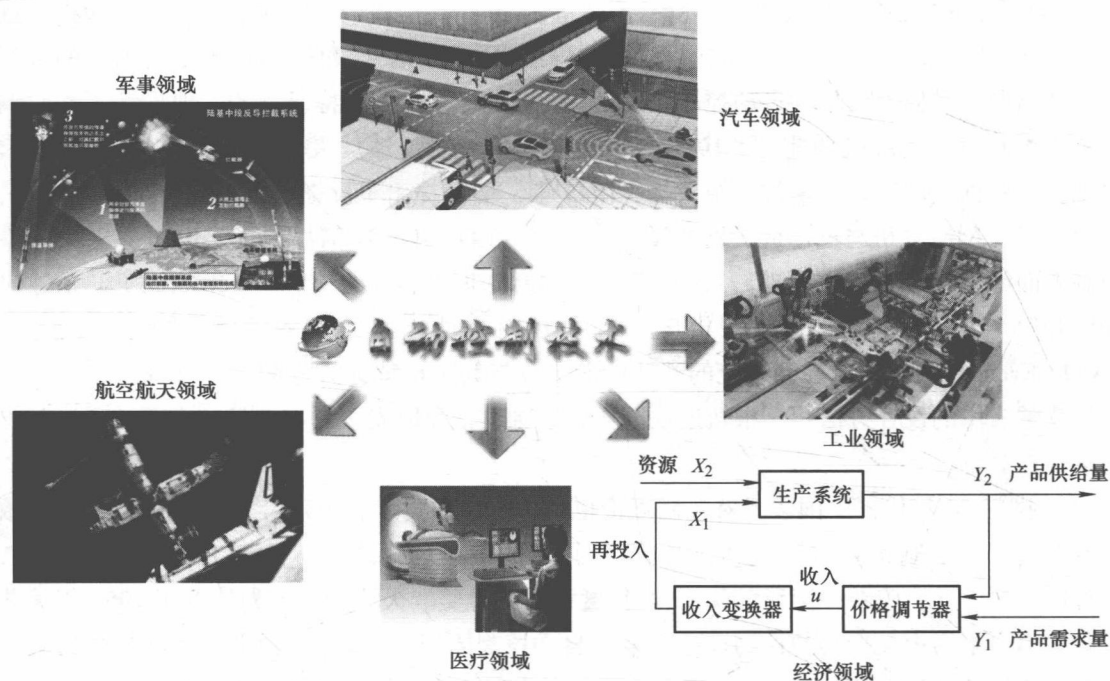


图 1-3 自动控制技术应用领域

1.2 自动控制系统的一般概念

1.2.1 自动控制的基本原理

自动控制是指在没有人直接参与的情况下，利用控制装置操纵受控对象，使受控对象的被控制量自动地按预定的规律运行。系统是指按照某些规律结合在一起的物体或元部件的组合，它们互相作用、互相依存，并完成一定的任务。能够实现自动控制的系统就可称为自动控制系统。

例如：人造卫星按照指定的轨道运行，并始终保持正确的姿态，使它的太阳电池一直朝向太阳，无线电天线一直指向地球；电网的电压和频率自动地维持不变；金属切削机床的速度在电网电压或负载发生变化时，能自动保持近似不变。以上这些都是自动控制的结果。下面以温度控制系统为例来具体说明自动控制的基本原理。

图 1-4 所示为一个温度人工控制系统。根据工件加工的工艺要求，系统的控制任务是保持加热炉的温度恒定或按一定的要求变化。炉内的温度会受到环境温度和工件数量的影响，调节燃气阀的开度，可以控制炉内温度的高低。采用人工操纵时，靠人眼观察温度仪，根据实际温度和要求温度的误差情况，通过大脑的思考，用手调节燃气阀门的开度来控制炉内温度，使炉温能按要求变化。

图 1-5 所示是一个温度自动控制系统。系统中，设定温度是通过调节给定电压 $u_g(t)$ 的值来调整，热电偶检测到温度信号放大后作为反馈电压 $u_f(t)$ ，比较器的输出 $\Delta u = u_g(t) -$

$u_1(t)$ 反映了设定温度和实际温度的偏差, Δu 放大后控制电动机调节气阀的开度就可以控制炉内温度的高低。若实际温度小于给定温度, $\Delta u > 0$, 它放大后控制电动机开大阀门, 调高炉温; 若实际温度大于给定温度, $\Delta u < 0$, 使电动机反转关小阀门, 调低炉温。只要 $\Delta u \neq 0$, 系统就会进行自动调节, 直到实际温度与给定温度相等, 即 $\Delta u = 0$, 电动机停止转动, 实现了温度的自动控制。

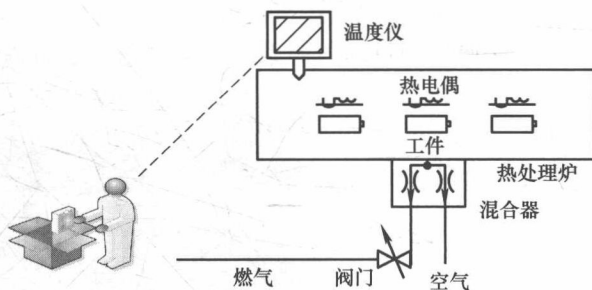


图 1-4 温度人工控制系统

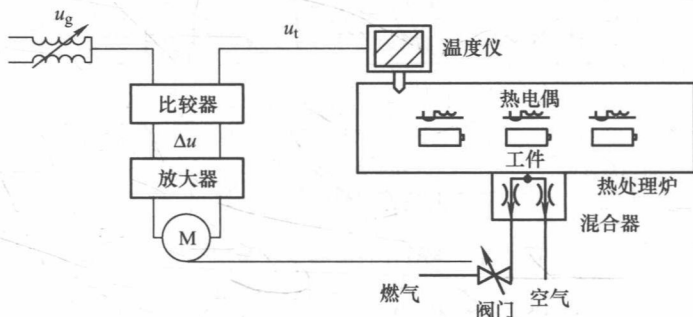


图 1-5 温度自动控制系统

在温度自动控制系统中, 反馈电压相当于人眼观察到的实际温度, 比较、放大及驱动电动机代替了人们大脑思考和手的作用, 整个控制过程是在无人参与的情况下实现的。

可见, 温度自动控制系统由比较器产生的偏差对系统产生控制作用, 在炉温达到设定值时, 偏差信号为零, 控制作用消失, 否则偏差信号不为零, 电动机转动, 控制调节阀门朝向减小误差的方向转动, 实现了温度的自动控制。图 1-6 给出了该系统各组成部分的职能和各信号间关系的结构框图。

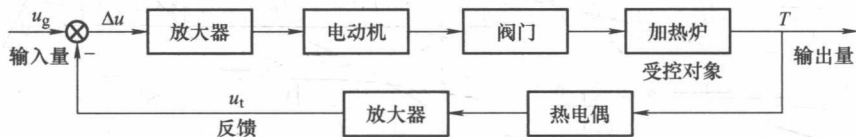


图 1-6 温度自动控制系统结构框图

1.2.2 自动控制系统的组成

图 1-7 是一个简单的自动车速控制系统, 当车辆监控系统监测到公路限速值时, 车辆速度控制系统改变期望达到的车速, 通过速度传感器检测车辆的实时速度, 当实时车速未达到期望车速时, 转速控制系统调节发动机的转速以保障车辆的速度为期望车速。

自动控制系统根据具体功能和控制要求的不同, 可以有不同的控制装置或不同的结构形

式。但是从工作原理来看,自动控制系统通常由一些具有不同职能的基本部分构成。图 1-8 所示是一个典型的自动控制系统结构框图。下面解释各部分的含义:

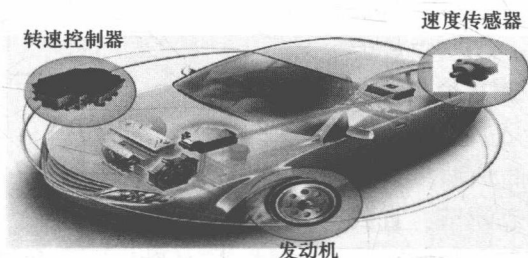


图 1-7 车速控制系统

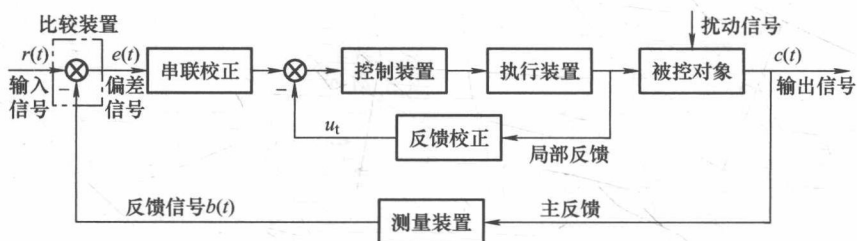


图 1-8 典型自动控制系统结构框图

测量装置：用以测量被控制量并转换成与输入信号相同的物理量作为反馈信号，如图 1-9 所示的热电偶和热电动势放大器。反馈有主反馈和局部反馈之分。



图 1-9 自动温度调节系统框图

比较装置：将输入信号与反馈信号进行比较，产生反映被控制量与要求值之间差值的偏差信号。

控制装置：是指按照某种函数关系产生控制信号，用以改善系统的控制性能的装置。它可能是一个简单的放大器，也可能是一个具有复杂控制规律的微型计算机。

执行装置：根据控制信号执行相应的控制作用，以便使被控制量按要求值变化，如阀门、电动机和液压装置等。

被控对象：又称控制对象和受控对象，常指需要进行控制的工作机械装置、设备或生产过程，如加热炉、汽车和飞机等。

校正装置：用以改善系统的控制性能的装置。

输入信号：也称给定量或给定输入，它是人们期望系统按照这个信号的要求而变化的指令信号。

输出信号：也称系统的被控量，是指被控对象中要求按一定规律变化的物理量，如温

度、速度、流量和距离等。

反馈信号：指反馈装置的输出信号。

偏差信号：指给定输入信号与主反馈信号之差。

扰动信号：也称扰动输入，它是一种与控制作用相反、影响系统的输出使之偏离给定作用的信号，如温度自动控制系统总的工件数量、环境温度及燃气压力等变化量都属于扰动信号。

前向通道：指从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通道。

反馈通道：指从输出端经反馈装置回到系统输入端的通道。

主回路：指前向通道与主反馈通道一起构成的回路。

由自动温度控制系统，我们可以进一步认识到基本反馈控制系统的一般组成结构。自动温度调节系统框图如图 1-9 所示。

图中，系统输入量是设定温度，系统输出量是室内温度，过程的干扰是由房间向低温的室外流出的热量，执行机构是电动机和阀门，被控对象是加热炉，反馈信号是室内温度。

1.3 自动控制系统的 basic 控制方式

自动控制系统有多种，例如开环控制系统、闭环控制系统、复合控制系统、温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统、线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统（时不变系统）和时变系统、确定性系统和不确定性系统、恒值控制系统、随动系统和程序控制系统等。

闭环控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的一种控制方式。除此之外，还有开环控制方式和复合控制方式，它们都有各自的特点和不同的适用场合。

1.3.1 开环控制系统

开环控制系统是指无被控量反馈的系统，即需要控制的是被控对象的某一量，而被控量对于控制作用没有任何影响的系统。信号由给定值至被控量单向传递。这种控制较简单，但较大的缺陷，即对象或控制装置受到干扰或工作中特性参数发生变化时，会直接影响被控量，而无法自动补偿。因此，系统的控制精度难以保证。从另一种意义上理解，也意味着对被控对象和其他控制元件的技术要求较高，如数控线切割机进给系统、包装机等多为开环控制系统。开环控制系统的原理框图如图 1-10 所示，信号流动由输入端到输出端单向流动。

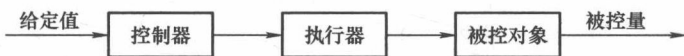


图 1-10 开环控制系统的原理框图

1.3.2 闭环控制系统

若控制系统中信号除从输入端到输出端外，还有输出端到输入端的反馈信号，则构成闭环控制系统，也称反馈控制系统，如图 1-11 所示。闭环控制的定义是有被控制量反馈的控制。从系统信号流向看，系统的输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端，构成闭合通道，