



21st CENTURY
实用规划教材

21世纪全国应用型本科

大机械系列 实用规划教材



控制工程基础

主 编 杨振中 张和平
副主编 韩致信 王丽君 朱兴元
主 审 傅水根



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

TP13/217

2007

21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材

控制工程基础

主 编	杨振中	张和平	
副主编	韩致信	王丽君	朱兴元
参 编	朱国荣	胡万华	陈大立
	张兰娣	张东辉	
主 审	傅水根		



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书结合机械大类各专业及相近专业的发展和教学需要,较为系统地介绍了机械控制工程的基本内容。全书由3个模块组成,即经典控制理论(第1~7章)、离散控制系统(第8章)、现代控制理论(第9章)。各模块基本独立,其中经典控制理论为基本部分。全书共分9章,主要内容有绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、根轨迹法、控制系统的频域分析、控制系统的稳定性分析、控制系统的综合与校正、离散控制系统、线性定常系统的状态空间分析与综合。本书内容丰富,叙述深入浅出,既注重理论的系统性,也注重方法的实用性,力图做到将机械大类各专业的通用性要求与各个学校的具体要求有机地结合。

本书既可作为高等院校机械大类、近机类、能源类各本科专业的控制工程课程教材,也可作为从事控制工程的专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/杨振中,张和平主编. —北京:北京大学出版社,2007.8

(21世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-12169-6

I. 控… II. ①杨… ②张… 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(2007)第075047号

书 名:控制工程基础

著作责任者:杨振中 张和平 主编

责任编辑:郭穗娟

标准书号:ISBN 978-7-301-12169-6/TH·0010

出 版 者:北京大学出版社(地址:北京市海淀区成府路205号 邮编:100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者:河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 20印张 459千字

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

定 价:29.00元

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

举报电话:010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

《21世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材》

专家编审委员会

名誉主任 胡正寰*

主任委员 殷国富

副主任委员 (按拼音排序)

戴冠军 江征风 李郝林 梅 宁 任乃飞

王述洋 杨化仁 张成忠 张新义

顾问 (按拼音排序)

傅水根 姜继海 孔祥东 陆国栋

陆启建 孙建东 张 金 赵松年

委员 (按拼音排序)

方 新 郭秀云 韩健海 洪 波

侯书林 胡如风 胡亚民 胡志勇

华 林 姜军生 李自光 刘仲国

柳舟通 毛 磊 孟宪颐 任建平

陶健民 田 勇 王亮申 王守城

魏 建 魏修亭 杨振中 袁根福

曾 忠 张伟强 郑竹林 周晓福

* 胡正寰：北京科技大学教授，中国工程院机械与运载工程学部院士

丛书总序

殷国富*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一，是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门，包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务，在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20世纪80年代以来，以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度，改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织模式，产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面：

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用，使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件，而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品，其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动，而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化，CAD/CAM/CAE/PDM集成技术和软件系统得到广泛使用，促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低，而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术，并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产，提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化，制造过程的网络化、全球化得到很大的发展，涌现出CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式，制造装备和制造系统的柔性及可重组已成为21世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学，制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程特征和发展趋势表明，现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此，加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质的机械工程学科人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育，培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才，不断推动

* 殷国富教授：现为教育部机械学科教学指导委员会委员，现任四川大学制造科学与工程学院院长

我国机械科学与工程技术的进步。

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998年对本科专业目录进行了第3次大的修订。调整后的机械类专业变成4类8个专业,它们是:机械类4个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类1个专业(测控技术与仪器);能源动力类2个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类1个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的一系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重大决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于21世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次的学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1)关注全球机械科学与工程学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2)重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3)学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4)注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

前 言

机械控制工程课程是实现传统机械工程学科向以机、电、液相结合的现代机械工程学科跨越的主干支撑课程之一。本书作为机械大类学科基础课——控制工程课程的教学用书，主要阐述自动控制理论与技术的基本概念、基本理论与基本分析方法及其在现代机械工程中的应用，为机械控制系统的分析与设计奠定基础。本书的目的是使读者学会运用经典控制理论和现代控制理论的基本理论及思想方法，掌握机电控制系统中信号的传递、反馈及控制、动态特性与综合的分析与研究方法，初步培养读者从事机电控制系统分析与设计的能力。

1998年，教育部将机械类9个专业（机械制造工艺及设备、汽车与拖拉机等）归并为“机械设计制造及其自动化”，就加入“自动化”三字而言，体现了用自动化改造传统机械类专业的思想和用心。全书既考虑到我国机械大类应用型本科教育的这种现状，又考虑到自动控制技术对传统机械工程学科越来越强烈的渗透，并兼顾新世纪机械电子工程学科发展的需要，采取分模块组合的编写方式。全书由3个模块组成，即经典控制理论（第1~7章）、离散控制系统（第8章）、现代控制理论（第9章）三部分，各模块基本独立。这样安排可以适合不同学校的不同层次的教学需要，每一所学校都可方便找到适用自己教学需要的相应模块组合，能分别适用于2.5学分、3学分、3.5学分、4学分、4.5学分的教学安排。本书的编写由几所学校共同承担，为此，保证教材的通用性是必然的选择，在此基础上本书对各个学校的具体要求也给予了充分的关注。

本书由华北水利水电学院杨振中、武汉理工大学张和平担任主编；兰州理工大学韩致信、华北水利水电学院王丽君、武汉理工大学朱兴元担任副主编；华中科技大学朱国荣、华东交通大学胡万华、河南工业大学陈大立、河北建筑工程学院张兰娣、张东辉参加编写。其中，张和平编写第1章，王丽君编写第2章及第9章的9.2节，张兰娣、张东辉合编第3章，朱兴元、朱国荣合编第4章、第7章，陈大立编写第5章，胡万华编写第6章，韩致信编写第8章，杨振中编写第9章（除9.2外），全书由杨振中负责统稿。华北水利水电学院刘海朝、孙永生、宋小娜、王欣欣等老师，研究生毕国进及郭楠等为本书从文稿录入、校对修改、文字编辑直至插图绘制等做了大量工作。在此，谨向上述老师和同学一并致以衷心的感谢！

本书承蒙2006—2010年教育部高等学校机械学教学指导委员会委员兼机械基础课程教学指导分委员会副主任委员、清华大学傅水根教授主审。傅教授对全书提出了许多宝贵的修改意见，谨致谢意！

由于编者水平有限，书中定然存在疏漏不当之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2007.4.2

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4.2 框图的连接方式	33
1.1 控制工程概述	1	2.4.3 框图的简化	34
1.1.1 控制系统的基本概念	1	2.5 控制系统的传递函数	36
1.1.2 控制系统的发展与应用	6	2.5.1 开环传递函数	37
1.2 控制系统的分类	7	2.5.2 给定输入作用下的 闭环传递函数	37
1.2.1 按反馈情况分类	7	2.5.3 扰动作用下的闭环 传递函数	37
1.2.2 按输入信号变化规律 分类	8	2.6 信号流图和梅逊公式	38
1.2.3 按系统的数学描述分类	9	2.6.1 信号流图	38
1.2.4 按系统内部的信号 特征分类	9	2.6.2 梅逊公式	40
1.3 对控制系统的基本要求	10	习题	42
1.3.1 稳定性	10	第 3 章 控制系统的时域分析	46
1.3.2 快速性	10	3.1 时间响应以及典型输入信号	46
1.3.3 精确性	11	3.1.1 时间响应的概念	46
习题	11	3.1.2 典型输入信号	47
第 2 章 控制系统的数学模型	13	3.2 一阶系统的时域分析	49
2.1 系统的微分方程	13	3.2.1 一阶系统的数学模型	49
2.1.1 列写微分方程的一般 方法	13	3.2.2 一阶系统的单位阶跃 响应	50
2.1.2 控制系统微分方程的 列写	14	3.2.3 一阶系统的脉冲响应	50
2.2 拉氏变换	15	3.3 二阶系统的时域分析	51
2.2.1 拉氏变换的定义	15	3.3.1 二阶系统的数学模型	51
2.2.2 拉氏变换定理	18	3.3.2 二阶系统的单位阶跃 响应	52
2.2.3 拉氏反变换	22	3.3.3 二阶系统阶跃响应的 性能指标	55
2.3 系统的传递函数	24	3.3.4 二阶系统的脉冲响应	58
2.3.1 传递函数的定义	25	3.4 高阶系统的时域分析	61
2.3.2 传递函数的基本性质	25	3.4.1 高阶系统的单位阶跃 响应	61
2.3.3 典型环节的传递函数	26	3.4.2 闭环主导极点	62
2.4 系统的框图及其简化	31	3.4.3 高阶系统阶跃性能 指标估算	63
2.4.1 绘制系统框图的一般 步骤	32	3.5 系统稳态误差分析	64

3.5.1 偏差及稳态误差的概念	64	5.3.4 最小相位系统和非 最小相位系统	115
3.5.2 系统的类型和偏差系数	66	5.4 频域性能指标与时域性能 指标间的关系	118
3.5.3 典型输入作用下的 稳态误差	66	5.4.1 闭环频率特性及其 性能指标	118
3.5.4 扰动作用下的稳态误差	67	5.4.2 二阶系统时域响应与 频域响应的关系	120
3.5.5 提高系统稳态精度的 措施	69	习题	121
习题	70	第6章 控制系统的稳定性分析	123
第4章 根轨迹法	73	6.1 代数稳定性判据	123
4.1 根轨迹的基本概念	73	6.1.1 稳定性的基本概念	123
4.1.1 根轨迹	73	6.1.2 系统稳定的条件	123
4.1.2 根轨迹方程、相角条件及 幅值条件	74	6.1.3 劳斯(Routh)稳定性 判据	125
4.2 绘制根轨迹的基本规则	77	6.2 频域稳定性判据	129
4.3 广义根轨迹	83	6.2.1 奈奎斯特稳定性判据	129
4.3.1 参数根轨迹	83	6.2.2 对数频率特性稳定性 判据	138
4.3.2 零度根轨迹	85	6.3 系统的相对稳定性	141
4.4 利用根轨迹法进行系统 性能分析	87	6.3.1 相位裕量	142
习题	89	6.3.2 幅值裕量	143
第5章 控制系统的频域分析	92	习题	144
5.1 频率特性概述	92	第7章 控制系统的综合和校正	147
5.1.1 频率特性的基本概念	92	7.1 系统校正的基本概念	147
5.1.2 频率特性的求取方法	94	7.1.1 系统的性能指标	147
5.1.3 频率特性分析法的特点	97	7.1.2 校正的概念	149
5.2 频率特性的极坐标图 (奈奎斯特图)	98	7.1.3 校正的分类	149
5.2.1 极坐标图的基本概念	98	7.2 校正方法和校正装置的设计	151
5.2.2 典型环节的极坐标图	99	7.2.1 超前校正	151
5.2.3 极坐标图的一般 画法	103	7.2.2 滞后校正	156
5.3 频率特性的对数坐标图 (波特图)	106	7.2.3 滞后-超前校正	159
5.3.1 对数坐标图的基本 概念	106	7.2.4 PID调节器	161
5.3.2 典型环节的对数 坐标图	107	7.2.5 反馈校正	165
5.3.3 对数坐标图的一般 画法	113	习题	167
		第8章 离散控制系统	169
		8.1 有关离散控制系统的基本概念	169

8.2 信号的采样、保持及转换 ·····	171	9.1.1 状态空间表达式及 模拟结构图 ·····	218
8.2.1 采样过程 ·····	171	9.1.2 建立状态空间表达式 ·····	223
8.2.2 采样定理 ·····	174	9.1.3 传递函数与状态空间 表达式的等价转换 ·····	226
8.2.3 零阶保持器 ·····	176	9.1.4 状态空间表达式变换为 对角线和约旦标准型 ·····	231
8.2.4 A/D转换与D/A转换 ···	178	9.2 控制系统状态空间表达式 的解 ·····	238
8.3 Z变换及其反变换 ·····	179	9.2.1 齐次状态方程的解 ·····	238
8.3.1 Z变换 ·····	179	9.2.2 状态转移矩阵 (矩阵指数函数) ·····	239
8.3.2 Z反变换 ·····	189	9.2.3 非齐次状态方程的解 ·····	247
8.4 离散系统的数学模型 ·····	192	9.3 控制系统的能控性与能观性 ·····	249
8.4.1 差分方程及其解法 ·····	192	9.3.1 能控性的定义及判别 准则 ·····	249
8.4.2 脉冲传递函数 ·····	193	9.3.2 能观性的定义及判别 准则 ·····	256
8.5 离散系统的稳定性分析 ·····	198	9.3.3 能控性与能观性的 对偶关系 ·····	262
8.5.1 $[s]$ 平面到 $[Z]$ 平面的 映射 ·····	199	9.3.4 能控标准型与能观 标准型 ·····	263
8.5.2 离散系统稳定的 充分必要条件 ·····	201	9.3.5 系统的规范分解 ·····	273
8.5.3 w 变换及基于 w 变换的离散 系统稳定性分析 ·····	201	9.4 状态反馈与状态观测器 ·····	281
8.6 离散系统的稳态误差分析 ·····	207	9.4.1 状态反馈 ·····	281
8.6.1 离散系统稳态误差的 计算方法 ·····	207	9.4.2 状态观测器 ·····	290
8.6.2 离散系统的类型与稳态 误差系数 ·····	207	9.4.3 带状态观测器的闭环 控制系统 ·····	296
8.7 离散系统的瞬态响应分析 ·····	209	习题 ·····	299
8.7.1 瞬态响应分析方法 ·····	209	参考文献 ·····	305
8.7.2 采样器和零阶保持器对系统 动态性能的影响 ·····	210		
8.7.3 闭环脉冲传递函数极点分布 与系统瞬态响应的关系 ···	212		
习题 ·····	215		
第9章 线性定常系统的状态空间 分析与综合 ·····	217		
9.1 控制系统的状态空间表达式 ·····	218		

第 1 章 绪 论

教学提示：本章主要阐述控制系统的工作原理、组成及其分类和对控制系统的基本要求。

教学要求：通过本章的学习，要求学生了解控制系统的工作原理、分类及特点，掌握反馈及反馈控制的基本概念、反馈原理在控制系统中的应用；掌握控制系统的组成和各部分的作用，理解对控制系统的基本要求；了解控制理论及控制系统的发展概况。

1.1 控制工程概述

控制工程基础课程主要阐述的是有关自动控制技术的基础课程，它涉及古典控制理论的主要内容和应用，其理论基础是工程控制论。

当前，自动控制作为一种技术手段广泛地应用于工业、农业、国防乃至日常生活和社会科学的许多领域。例如，数控机床按照预先编制好的程序加工零件；雷达自动跟踪空中的飞行体；微波炉、洗衣机、空调等家用电器按人们的要求服务等等，所有这些都离不开自动控制技术。自动控制技术的广泛应用，不仅可以改善人们的工作条件，降低人们的劳动强度和提高生产效率，而且在人类征服自然、探知未来、建设高度文明的社会等方面有着重要的意义。在今天，随着科学技术、国防事业的发展及人们生活水平的提高，自动控制技术所起的作用越来越重要，自动控制技术本身也将得到进一步发展。

当然，自动控制的概念也在扩大，人们赋予它的意义更广泛、更深远。控制理论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论，它应用于政治、经济、社会各领域。控制理论不仅是一门极为重要的学科，而且也是科学方法论之一。

1.1.1 控制系统的基本概念

什么是系统？广义地说，系统是由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的具有特定功能的整体。在工程领域，系统可以是电的、机械的、液压的、气动的、热的、生物医学的，或者是这些系统的某种组合。对于实际应用来说，系统一般可以定义为任何一组存在某种因果关系的物理元件。原因将称为激励或输入，效果将称为响应或输出。通常，输入和输出都是物理变量，例如：温度、压力、液位、电压、位移、速度等。

在各种生产过程和生产设备中，常常需要将该过程和生产设备中的某些物理量（如温度、压力、液位、电压、位移、速度等）保持恒定，或者让它们按照一定的规律变化。要满足这些要求，就应该对生产设备或装置进行及时的调整和控制，以抵消外界的干扰和影响。

控制就是按照预先给定的目标，改变系统行为或性能。所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（称为控制装置或控制器），使机器、设备或生产过程（统称被控对象）的某个工作状态或参数（即被控量）自动地按照预定的规律运行。例

如，数控车床按照预定程序自动地切削工件；化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定；雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统，自动地将导弹引导到敌方目标；无人驾驶飞机按照预定航向自动升降和飞行；人造卫星准确地进入预定轨道运行并成功地回收等，为了实现上述的控制目的，把相互联系和制约的各部分按一定规律组合成具有特定功能的整体，这就是自动控制系统。自动控制系统如何实现？其控制原理又是什么？下面以实例来说明。

1. 控制系统的工作原理

以恒温控制系统为例。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。控制目的：克服外来干扰（如电源电压的波动、环境温度变化等），保持恒温箱内的温度恒定在某个给定的希望值上。操作者可通过调压器改变加热电阻丝的电流来达到这个目的，而箱内温度是由温度计测量的。

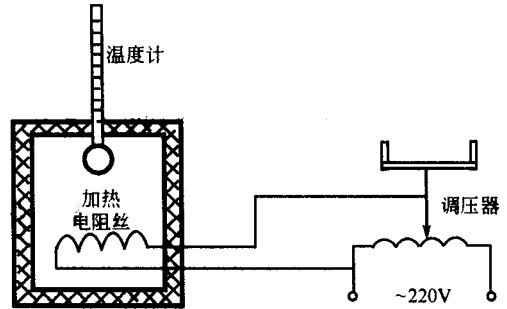


图 1.1 人工控制的恒温箱

人工控制恒温箱的调节过程如下：

- ① 观测由测量元件(温度计)测出的恒温箱内的温度(被控量)。
- ② 将测出的恒温箱内的温度与要求的温度值(给定值)进行比较，得出偏差的大小和方向。
- ③ 根据偏差的大小和方向进行调节。当恒温箱内的温度值高于所要求的温度值时，调整调压器，使通过加热电阻丝的电流减小，温度就会降低；若温度低于所要求的温度值，则调整调压器，使电流增大，温度升高到正常范围。

从上述调节过程可以看出，人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程，简单地说就是“检测偏差，再纠正偏差”的过程。

这种人工控制过程要求操作者随时观察恒温箱内温度的变化情况，随时进行调节。对于这样简单的控制形式，可用一个控制器来代替人的职能，即把人工控制系统变成一个自动控制系统。

图 1.2 即为恒温箱的自动控制系统示意图。其中，恒温箱所需温度由电压信号 u_1 给定。当外界因素引起箱内温度变化时，作为测量元件的热电偶就会把测得的箱内温度转换成对应的电压信号 u_2 ，并反馈回去与给定信号 u_1 进行比较，所得结果即为偏差信号 Δu ， $\Delta u = u_1 - u_2$ 。偏差信号经电压放大、功率放大后，用以改变执行电动机转速和旋转方向，并通过传动装置拖动调压器的触头。若箱内温度高于给定温度时，调压器的触头向着减小电流的方向运动，反之，则加大电流，直到温度达到给定温度值为止。这就是说，只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时，即箱内温度值与给定温度值一致时，电动机才停止转动，这样就完成了所要求的控制任务。

分析图 1.1 的人工控制的恒温箱和图 1.2 自动控制的恒温箱的工作过程，可以看出：自动控制系统与人工控制系统非常相似。在自动控制系统中，测量装置就相当于人的眼睛、控制器则类似于人的大脑，执行机构好比人的双手。在控制过程中，它们的共同点都是要检测偏差，并利用检测的偏差再去纠正偏差。

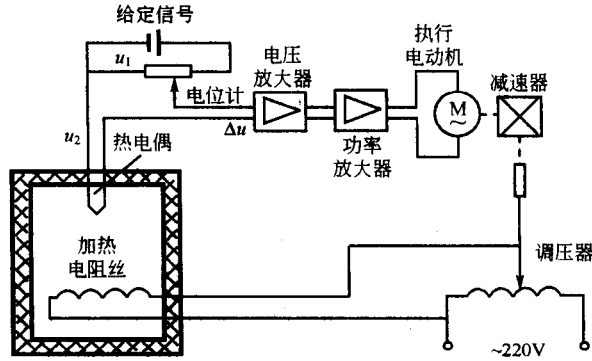


图 1.2 自动控制的恒温箱

没有偏差就不会有控制调节过程。值得注意的是控制系统没有调节，并不等于系统不工作。

综上所述，控制系统的工作原理可归纳如下：

- (1) 通过测量元件检测输出量的实际值。
- (2) 将输出量的实际值与给定值(输入量)进行比较，得到偏差信号。
- (3) 用偏差值产生控制调节作用去消除偏差。

在控制系统中，给定量又称为输入量，被控制量又称为输出量。通常，把输出量取出，送回到输入端，并与输入量相比较产生偏差信号的过程，称为反馈。这种基于反馈原理，通过“检测偏差，利用偏差纠正偏差”的系统，称为反馈控制系统。显然，作为反馈控制系统，至少应具备检测、比较(或计算)和执行 3 个基本功能。

研究控制系统(以恒温控制系统为例)，首先必须解决如下 4 个问题：

(1) 控制目的。恒温控制系统的控制目的是：克服外来干扰，保持恒温箱内的温度恒定在某个给定的希望值上。这个希望值就是系统的输入信号(输入量)。(2) 受控对象。恒温控制系统的受控对象是恒温箱。(3) 输出信号(被控量)。描述受控对象行为、状态特征的某个物理量。输出信号是受输入信号控制的信号，总是要求它随输入信号变化而变化的。恒温控制系统的被控量为箱内温度。

(4) 输出信号的检测。采用各种检测装置(如传感器)将输出物理量转换为电量。图 1.1 中人工控制的恒温箱是通过观测温度计来检测实际温度的。

2. 控制系统的职能框图

控制系统的控制过程可以用如图 1.3 所示的职能框图清晰而形象地表示。图 1.3 中，“⊗”代表比较元件；“→”代表信号的传递及方向；“□”为职能框，代表一个环节，每

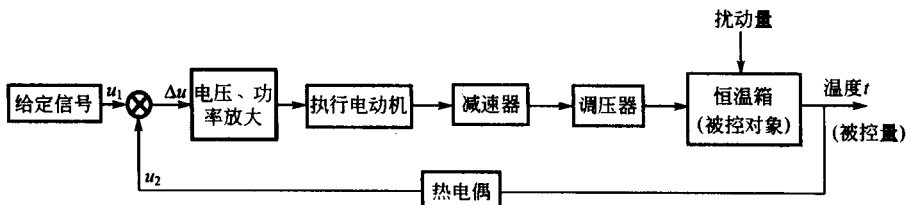


图 1.3 恒温箱自动控制系统职能框图

个环节的作用是单向的，其输出受输入控制。从职能框图可清楚地看到反馈控制的基本原理。

各种不同的控制系统实现自动控制的装置可以各不相同，但反馈控制的原理却是相同的，因此，反馈控制是实现自动控制的最基本的方法。

3. 日常生活中的控制系统举例

其实，人的一切活动都体现出反馈控制的原理，人本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统。例如，用手拿取桌上的书，汽车司机操纵转向盘驾驶汽车沿公路平稳行驶等，这些日常生活中习以为常的平凡动作都渗透着反馈控制的深奥原理。下面，通过解剖手从桌上取书的动作过程，透视一下它所包含的反馈控制机理。

1) 人手取书

在这里，书的位置就是人手运动的目标和指令信息，即输入信号(或给定量)。在取书的过程中，首先人要用眼睛连续目测手相对于书的位置，并将该位置信息反映给大脑(称为位置反馈信息)，然后由大脑判断手与书之间的距离，由此而产生偏差信号。大脑根据偏差的大小，发出控制手臂移动的命令(称为控制作用)，逐渐使手与书之间的距离(即偏差)减小。显然，只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行，直到手接触到书(即偏差减小为零)，手便取到了书。

从该例中可以看出：大脑指挥手取书的过程，实际上是一个利用偏差(手与书之间距离)产生控制作用，并不断使偏差减小直至消除的运动过程。同时，为了取得偏差信号，必须要有手位置的反馈信息，两者结合起来，就构成了反馈控制。显然，反馈控制实质上是一个按偏差进行控制的过程。因此，反馈控制也可称为按偏差的控制，反馈控制原理就是按偏差控制的原理。

当把人手取物视为一个反馈控制系统时，手是被控对象，手的位置是被控量(即系统的输出量)，眼睛是检测器、大脑是控制器，肌肉是执行器，这样就可以用如图 1.4 所示的系统框图来展示这个反馈控制系统的基本组成及工作原理。

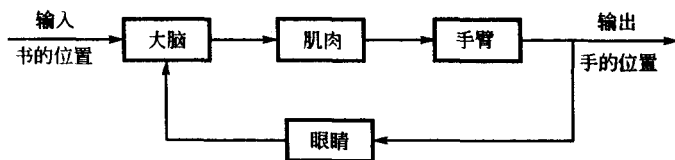


图 1.4 人手取书系统框图

2) 汽车行驶的位置控制

人与汽车构成的控制系统如图 1.5 所示，司机通过观察交通和道路情况以及通过适当地操纵加速器、离合器、变速杆、制动器和转向盘等等来确定和控制汽车的路线、速度和加速度。

又如，假设司机想要保持 50km/h 的速度(期望的输出)。他借助于加速器将汽车加速到此速度，而后通过保持加速器不变来维持这个速度。只要沿途道路没有坡度和没有其他干扰，就不会出现汽车的速度误差。汽车的实际速度通过车速表测量，并在它的刻度盘上指示出来。司机直观地读速度表盘，并将实际的速度与他期望达到的速度比较，若与所期望的速度有偏差，那么他相应地决定增加或减小速度，这个决定通过改变他的脚(通过肌

肉的力量)在加速器踏板上的压力来完成。

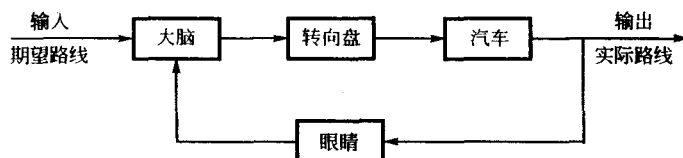


图 1.5 汽车行驶的位置控制框图

3) 液位控制系统

水箱水位控制系统如图 1.6 所示。该系统的控制任务是将水箱的液面维持在一定高度。从图中可以看出：水箱是被控对象，水箱液位是被控制量，浮球顶杆(杠杆)的长度(表征液位的期望值)是给定量。杠杆平衡时，控制进水阀门位于某一位置而具有一定开度，使水箱中输入水量与流出水量相等，从而使液位保持在期望高度 h 上。当液位降低时，浮球位置也随之降低，这时，通过杠杆机构使水阀阀门开度增大，进入水箱的水流量增大，水箱中液面随之上升，浮球位置也随之上升，使水阀阀门开度减小，进水增加量减小，直至系统处于新的平衡状态。反之，若水箱液位上升，系统会自动减小阀门开度，从而减少流入的水量，使液位降低，直至达到新的平衡位置。

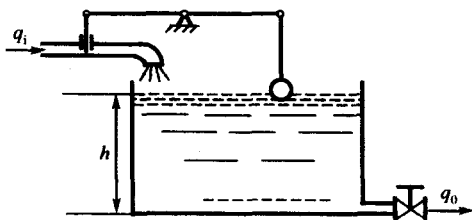


图 1.6 液位控制系统结构示意图

读者可根据图 1.6 绘制该系统的框图。

4. 控制系统的组成

图 1.7 所示为一典型的反馈控制系统框图。该框图表示了控制系统各元件在系统中的位置和其相互间的关系。作为一个典型的反馈控制系统，它应包括反馈元件、给定元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等。

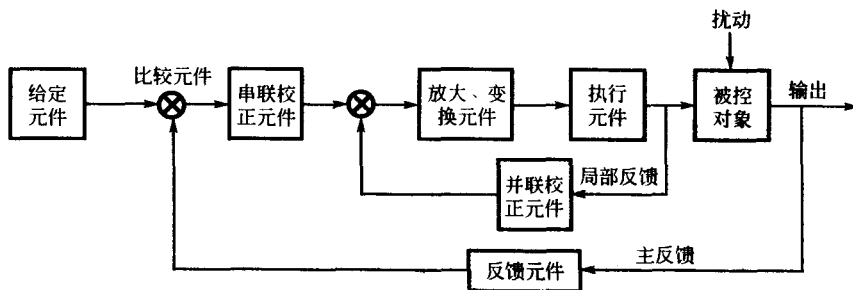


图 1.7 典型反馈控制系统框图

(1) 给定元件：产生系统的给定(输入)信号的元件。如调速系统的给定电位计。

反馈元件：该元件的功能是对系统输出量的实际值进行量测，将它转换成反馈信号，并使反馈信号变为与给定输入信号同类型、同数量级的物理量。一般来说，主反馈信号多为电信号，因此，反馈元件通常是一些用电量来测量非电量的元件，例如各种传

感器。

(2) 比较元件：用来接受输入信号和反馈信号并进行比较，产生偏差信号的环节。如电压比较电路，平衡电桥等。

放大元件：对偏差信号进行信号放大或功率放大的元件。例如电压放大器、功率放大器、电液伺服阀等。放大元件的输出要有足够的能量，才能驱动执行元件，实现控制功能。

(3) 执行元件：在控制信号作用下，进行功率放大(功率流、物质流、信息流从该环节进入系统)，直接推动被控对象，使被控制量发生变化的环节。如晶闸管整流装置、液压缸、电动机等。

(4) 被控对象：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制量。如机床、工作台等。

(5) 校正元件(或校正装置)：用以稳定控制系统，提高控制性能的环节。校正分为并联校正和反馈校正两种形式。

应注意的是上述元件在具体实现时不一定是各自独立的，可能是一个实际器件同时担负几个元件的作用，例如，系统中常用的运算放大器，往往同时起着比较元件、放大变换元件及校正元件的作用；反之，也可能是几个实际器件共同担负一个元件的作用，如电冰箱中，电动机、压缩机、冷却管、毛细管节流阀及蒸发器共同起着执行器的作用。

采用反馈控制提高了系统的精度，这是闭环控制系统的优点。由扰动所引起的偏差，只要扰动作用点被反馈路径包围，都能被反馈作用所抑制或消除。因此，系统对这部分元器件内部参数的变化不敏感，所以这部分可以用精度不高且成本低的元器件组成。但是，对于作用点不被反馈路径包围的扰动所引起的偏差，反馈作用则无能为力。

5. 控制过程的物理本质

在机器系统、生命系统甚至社会与经济系统中，都存在一个共同的本质的特点，它们都通过信息的传递、变换、处理与交换(反馈)来进行控制的。控制什么？从物理本质上看，控制过程是一种信息处理及能量转移的过程。因此，提高信息处理能力，以最短的时间和(或)最小的代价(能量消耗最小)实现系统按预定的规律进行能量转移，就是控制系统设计所要解决的中心问题。

1.1.2 控制系统的发展与应用

控制论是自动控制、电子技术、计算机科学等多种学科相互渗透的产物，它是关于控制系统建模、分析和综合的一般理论。早在一千多年前，中国发明了铜壶滴漏计时器、指南针以及天文仪器等多种自动控制装置，这些发明促进了当时的社会经济发展。即使从1788年瓦特(J. Watt)发明蒸汽机飞球调速器算起，控制工程也有了200多年的历史了。然而，控制工程作为一门学科，它的形成并迅速发展却是近六七十年事。

新兴学科控制论的奠基人维纳(N. Wiener)从1919年就已经萌发控制论的思想。在二次世界大战前，控制系统设计因缺乏系统的理论指导而多采用试凑法。在二次世界大战期间，为了建造飞机自动驾驶仪、雷达跟踪系统、火炮瞄准系统等军事装备的需要，从而推动了控制理论的飞速发展。维纳在二次世界大战期间参加了自动控制的研究工作，他把火

炮自动打飞机的动作与猎人狩猎的行为作对比发现了反馈这一重要的概念。1948年,维纳发表了著名的《控制论:或在动物和机器中的通讯和控制》,标志着经典控制理论体系的形成。经典控制理论以传递函数为基础,主要研究单输入/单输出系统的分析和控制问题。

在20世纪50年代以后,是控制论的发展时期,一方面,火炮及导弹控制技术极大地得到发展,数控、电力、冶金自动化技术突飞猛进;另一方面,控制理论也日渐成熟。1954年,我国科学家钱学森在美国运用控制论的思想和方法,首创了工程控制论,把控制理论推广到工程技术领域。接着又相继出现了生物控制论、经济控制论和社会控制论。

20世纪50年代末到60年代初,控制工程又出现了一个迅猛发展时期,这是由于导弹制导、数控技术、空间技术发展的需要及电子计算机技术的成熟,控制理论发展到了一个新的阶段,产生了现代控制理论,这是人类在自动控制技术认识上的一次飞跃。现代控制理论是以状态空间分析法为基础,主要分析和研究多输入/多输出、时变、非线性、高精度、高效能等控制系统的设计和分析问题。

从20世纪70年代开始,一方面现代控制理论继续向深度和广度发展,出现了一些新的控制方法和理论。如现代频域方法、自适应控制理论和方法、稳健控制方法及预测控制方法,另一方面随着控制理论应用的范围扩大,发展到若干相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制,从传统的工程领域拓展到包括经济管理、生物工程、能源、运输、环境等大型系统以及社会科学领域,人们开始了对大系统理论的研究。

人工智能在控制上的应用是近年来发展起来的一种控制技术。智能控制是从“仿人”的概念出发,针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性提出来的,它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧,解决那些目前需要人的智能才能解决的问题。

特别是近20年来计算机技术和应用数学的高速发展,现代控制理论在最优控制、最优滤波、系统辨识、自适应控制、智能控制等方面又有了重大发展。

控制理论主要研究两方面的问题。

(1) 分析:在系统的结构和参数已经确定的条件下,对系统的性能进行分析,并提出改善性能的途径。

(2) 综合:根据系统要实现的任务,给出稳态和动态性能指标,要求组成一个系统,并确定适当的参数,使系统满足给定的性能指标。

1.2 控制系统的分类

控制系统的种类很多,在实际工程中,可以从不同的角度对控制系统进行分类。

1.2.1 按反馈情况分类

工业上用的控制系统,根据有无反馈控制作用可分为两类:开环控制与闭环控制。

1. 开环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路,输出量对系统的控制作用没有影