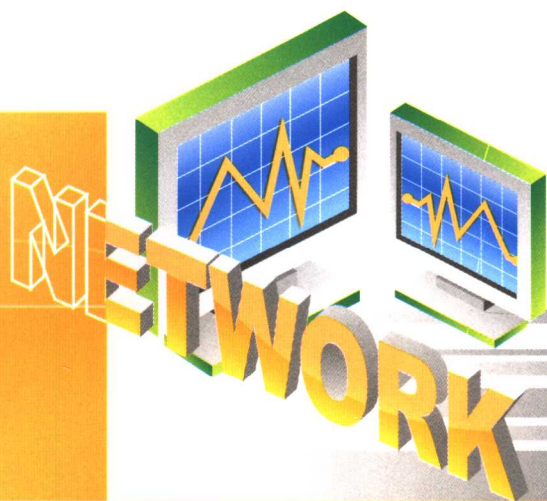




21st CENTURY

实用规划教材

21世纪全国应用型本科 电子通信系列 实用规划教材



自动控制原理

主 编 袁德成 王玉德



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

TP13
200

21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材

自动控制原理

主 编	袁德成	王玉德
副主编	张 健	包 燕
	胡学芝	于 真
参 编	亢 杰	李 凌



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是 21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材之一, 是电子信息类专业基础课程《自动控制原理》的教科书。全书内容按照数学建模、稳定性分析和控制系统设计的模块组织, 重点讲授线性时不变系统的稳定性分析方法, 本书结合 MATLAB/Simulink 仿真工具, 简化了当前大多数自动控制原理教材中关于经典图解方法的叙述, 突出了传统方法的基本思想和用途, 也新增加了在控制科学与技术中非常重要的一些概念, 例如鲁棒性等内容。本书编写的思路和原则是: 传承经典基础知识, 便于入门教学; 连接和面向控制科学发展的未来, 拓展视野。

本书既可作为普通高校电气工程自动化、通信、计算机、自动控制等相关专业本科生的教科书, 也可以作为科技和工程人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/袁德成, 王玉德主编. —北京: 北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材)

ISBN 7-301-10757-9

I. 自… II. ①袁… ②王… 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(2006)第 057963 号

书 名: 自动控制原理

著作责任者: 袁德成 王玉德 主编

策划编辑: 徐 凡

责任编辑: 李娉婷

标准书号: ISBN 7-301-10757-9/TN · 0029

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

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

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京汇林印务有限公司

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 21.5 印张 495 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 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电子通信系列实用规划教材》

专家编审委员会

主 任 殷瑞祥

顾 问 宋铁成

副主任 (按拼音顺序排名)

曹茂永 陈殿仁 李白萍 王霓虹

魏立峰 袁德成 周立求

委 员 (按拼音顺序排名)

曹继华 郭 勇 黄联芬 蒋学华 蒋 中

刘化君 聂 翔 王宝兴 吴舒辞 阎 毅

杨 雷 姚胜兴 张立毅 张雪英 张宗念

赵明富 周开利

丛书总序

随着招生规模迅速扩大,我国高等教育已经从“精英教育”转化为“大众教育”,全面素质教育必须在教育模式、教学手段等各个环节进行深化改革,以适应大众化教育的新形势。面对社会对高等教育人才的需求结构变化,自上个世纪 90 年代以来,全国范围内出现了一大批以培养应用型人才为主要目标的应用型本科院校,很大程度上弥补了我国高等教育人才培养规格单一的缺陷。

但是,作为教学体系中重要信息载体的教材建设并没有能够及时跟上高等学校人才培养规格目标的变化,相当长一段时间以来,应用型本科院校仍只能借用长期存在的精英教育模式下研究型教学所使用的教材体系,出现了人才培养目标与教材体系的不协调,影响着应用型本科院校人才培养的质量,因此,认真研究应用型本科教育教学的特点,建立适合其发展需要的教材新体系越来越成为摆在广大应用型本科院校教师面前的迫切任务。

2005 年 4 月北京大学出版社在南京工程学院组织召开《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》编写研讨会,会议邀请了全国知名学科专家、工业企业工程技术人员和部分应用型本科院校骨干教师共 70 余人,研究制定电子信息类应用型本科专业基础课程和主干专业课程体系,并遴选了各教材的编写组成人员,落实制定教材编写大纲。

2005 年 8 月在北京召开了《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》审编会,广泛征求了用人单位对应用型本科毕业生的知识能力需求和应用型本科院校教学一线教师的意见,对各本教材主编提出的编写大纲进行了认真细致的审核和修改,在会上确定了 32 本教材的编写大纲,为这套系列教材的质量奠定了基础。

经过各位主编、副主编和参编教师的努力,在北京大学出版社和各参编学校领导的关心和支持下,经过北大出版社编辑们的辛苦工作,我们这套系列教材终于在 2006 年与读者见面了。

《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》涵盖了电子信息、通信等专业的基础课程和主干专业课程,同时还包括其他非电类专业的电工电子基础课程。

电工电子与信息技术越来越渗透到社会的各行各业,知识和技术更新迅速,要求应用型本科院校在人才培养过程中,必须紧密结合现行工业企业技术现状。因此,教材内容必须能够将技术的最新发展和当今应用状况及时反映进来。

参加系列教材编写的作者主要是来自全国各地应用型本科院校的第一线教师和部分工业企业工程技术人员,他们都具有多年从事应用型本科教学的经验,非常熟悉应用型本科教育教学的现状、目标,同时还熟悉企业的技术现状和人才知识能力需求。本系列教材明确定位于“应用型人才培养”目标,具有以下特点:

(1) **强调大基础:**针对应用型本科教学对象特点和电子信息学科知识结构,调整理顺了课程之间的关系,避免了内容的重复,将众多电子、电气类专业基础课程整合在一个统

一的大平台上,有利于教学过程的实施。

(2) **突出应用性:**教材内容编排上力求尽可能把科学技术发展的新成果吸收进来、把工业企业的实际应用情况反映到教材中,教材中的例题和习题尽量选用具有实际工程背景的问题,避免空洞。

(3) **坚持科学发展观:**教材内容组织从可持续发展的观念出发,根据课程特点,力求反映学科现代新理论、新技术、新材料、新工艺。

(4) **教学资源齐全:**与纸质教材相配套,同时编制配套的电子教案、数字化素材、网络课程等多种媒体形式的教学资源,方便教师和学生的教学组织实施。

衷心感谢本套系列教材的各位编著者,没有他们在教学第一线的教改和工程第一线的辛勤实践,要出版如此规模的系列实用教材是不可能的。同时感谢北京大学出版社为我们广大编著者提供了广阔的平台,为我们进一步提高本专业领域的教学质量和教学水平提供了很好的条件。

我们真诚希望使用本系列教材的教师和学生,不吝指正,随时给我们提出宝贵的意见,以期进一步对本系列教材进行修订、完善。

《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》

专家编审委员会

2006 年 4 月

前 言

目前,国内出版的《自动控制原理》教材很多,虽然基本能满足本科教学的需要,但大多数内容已经沿用了 30 年~40 年。随着科学技术的不断发展,控制工业已经形成,为社会发展和经济建设提供了大量的技术和产品。作为从事自动化事业的入门知识,《自动控制原理》教材内容及相关教学组织在客观上需要与时俱进。

本科生走出校门参加与各类自动控制相关的工作后,可能有这样的体会,书中学习过的一些控制方法在实践中不知如何运用,也很难应用。原因固然很多,但我们在教材内容组织上是否值得改进和完善,需要深入的思考。20 世纪 70 年代以来,自动控制理论与工程经历了快速发展时期,取得了许多辉煌的成就。关于线性时不变系统的稳定性问题、满足最优性能指标的控制器设计方法、适应现场对象不确定性的鲁棒稳定(Robust Stability)和鲁棒性能(Robust Performance)指标设计等问题几乎都有解决方法,并已建立起成熟的理论体系。与控制科学并行发展的数学建模和仿真技术,也为自动化提供了强有力的支持。在传统教材中,一些花很多学时讲授的图解或手算方法,现在借助 MATLAB/Simulink 等仿真工具,输入几条语句即可完成。还有,自动控制理论的学习主要是掌握给定系统的稳定性分析、控制器设计与性能评价、实施等理论方法和技术。分析与设计一般要基于数学模型(离线),实施(在线)则要综合应用检测仪表、通信、计算机控制等技术。一个重要概念往往被忽视,即控制器设计所依赖的数学模型只是受控过程在某种工况条件下的近似表述,一旦控制器设计完成并投入运行,控制器实际要控制的对象已经不再是一个简单的数学模型(分析设计阶段用),而是一个实实在在的、有扰动且处在不断变化中的物理对象。在学习《自动控制原理》课程时,数学模型(传递函数、微分方程、状态空间等)是已知给定的,具体实践中需要试验获取。要控制的对象特性可能不同,一旦得到过程模型,后续的控制器分析和设计已经存在可以遵循的系统化方法和程序。商业化的各类控制仪表、软件及计算机控制装置,为控制系统的实施提供了可靠的工具和技术支持,但普遍的看法是目前在工业现场投运的控制系统面临相当多的问题,用自动控制原理的方法,改善、提高和优化自动控制系统的运行效率存在巨大的空间。培养学生建立处理问题的系统思想,掌握应用现代集成工具,强化理论联系实际意识,是新一轮《自动控制原理》教材编写应该遵循的思想。

控制科学与技术已经建立起庞大的理论体系,想在本科阶段到硕士及博士研究生阶段学完所有方法几乎不可能。新材料、新工艺、新装置持续涌现,又在不断呼唤新控制。摒弃一些陈旧少用的内容,突出基本思想和方法如何应用,把学生的视野引向当前实践和未来发展,教学效果可能更好,也有助于增加学生的学习兴趣 and 培养学生的创新意识。结合编者从事自动控制原理近 20 年的教学及工业现场自动化项目的实践,深入理解和掌握反馈控制的思想至关重要。反馈基本思想包括负反馈和前馈,具有普适性,广泛存在于人体自身、生物和工程技术界。实现反馈的方式可能多种多样。在实践中不断发现反馈的存在和运用反馈技术,对从事包括自动控制专业在内的许多专业学生都有重要的指导意义。

本书第 1 章、第 5 章由袁德成执笔，第 2 章、第 4 章由王玉德执笔，第 8 章、第 9 章由张健、于真执笔，第 10 章由袁德成、胡学芝执笔，附录 B 由王玉德、胡学芝执笔，第 3 章由包燕执笔，第 6 章及附录 A 由亢杰执笔，第 7 章由李凌执笔。参与教材编写老师所在学校的一些同事提出了许多宝贵意见，编者谨在此致谢。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 8 月

21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材

参编学校名单

- | | |
|-------------|---------------------|
| 1 安徽建筑工业学院 | 24 苏州大学 |
| 2 安徽科技学院 | 25 江南大学 |
| 3 北京石油化工学院 | 26 沈阳科学技术大学(沈阳化工学院) |
| 4 福建工程学院 | 27 辽宁工学院 |
| 5 厦门大学 | 28 聊城大学 |
| 6 宁波工程学院 | 29 临沂大学 |
| 7 东莞理工学院 | 30 潍坊学院 |
| 8 海南大学 | 31 曲阜师范大学 |
| 9 河南科技学院 | 32 山东科技大学 |
| 10 南阳师范学院 | 33 烟台大学 |
| 11 河南农业大学 | 34 太原科技大学 |
| 12 东北林业大学 | 35 太原理工大学 |
| 13 黑龙江科技学院 | 36 中北大学分校 |
| 14 黄石理工学院 | 37 忻州师范学院 |
| 15 湖南工学院 | 38 陕西理工学院 |
| 16 中南林业科技大学 | 39 西安工程大学 |
| 17 北华大学 | 40 陕西科技大学 |
| 18 吉林建筑工程学院 | 41 西安科技大学 |
| 19 长春理工大学 | 42 华东师范大学 |
| 20 东北电力大学 | 43 上海应用技术学院 |
| 21 吉林农业大学 | 44 成都理工大学 |
| 22 淮海工学院 | 45 天津工程师范学院 |
| 23 南京工程学院 | 46 浙江工业大学之江学院 |

目 录

第1章 绪论	1	2.5.4 二阶线性系统阶跃 响应分析	32
1.1 系统、反馈与控制	1	2.6 模型转换	38
1.2 反馈控制系统举例	4	2.6.1 传递函数转换为状态 空间模型	38
1.3 反馈及前馈控制原理	7	2.6.2 状态空间模型转换为 传递函数	43
1.4 自动控制发展简史	8	2.6.3 传递函数的实数极点模型转 换为状态空间模型	45
1.5 本课程学习内容	9	2.7 本章小结	48
1.6 本章小结	10	2.8 思考题与作业	48
1.7 思考题与作业	10	第3章 控制系统的数学模型	53
第2章 动态系统的数学描述	12	3.1 典型环节的模型及响应	53
2.1 数学模型	12	3.2 控制系统的方框图与化简	58
2.1.1 数学模型的基本概念	12	3.2.1 方框图的建立	58
2.1.2 建模的基本方法	12	3.2.2 方框图的化简规则	61
2.1.3 反馈控制系统对模型的 基本要求	13	3.3 信号流图与梅逊(Mason)公式	68
2.2 时域描述	13	3.4 本章小结	72
2.2.1 用常微分方程(ODE)表达的 数学模型——平衡的观点	14	3.5 思考题与作业	72
2.2.2 用常微分—代数方程表达 的数学模型——约束的存在	15	第4章 经典的控制工程数值 与计算工具	76
2.2.3 用一阶常微分方程组表达的 数学模型——状态空间模型	16	4.1 数值仿真	76
2.2.4 其他建模方法	19	4.1.1 数值积分法	76
2.3 S域描述	19	4.1.2 计算实例	79
2.3.1 拉普拉斯变换及性质	19	4.2 回路与闭环传递函数	80
2.3.2 传递函数	21	4.3 系统零点与极点的计算	83
2.4 频域描述	24	4.3.1 零点与极点的定义	83
2.4.1 认识频率响应	24	4.3.2 零点与极点的分布及 系统闭环响应	83
2.4.2 典型环节的频率特性	25	4.4 频域 Nyquist 方法	86
2.5 微分方程的解	29	4.4.1 频率特性的概念	86
2.5.1 初值问题	29	4.4.2 频率特性曲线的绘制	90
2.5.2 数值解法	29		
2.5.3 解的存在与唯一性问题	31		

4.4.3 频谱、带宽和滤波器.....	94	第 6 章 线性定常连续时间	
4.4.4 频率特性的绘制实例.....	95	控制系统的设计.....	159
4.5 频域 Bode 方法.....	96	6.1 控制问题的一般定义.....	159
4.5.1 典型动态特性的		6.1.1 单变量控制系统的	
Bode 图绘制.....	96	校正方式.....	159
4.5.2 复杂动态特性的		6.1.2 性能指标.....	160
Bode 图绘制.....	102	6.2 S 域设计.....	162
4.6 根轨迹方法.....	107	6.2.1 等效二阶系统方法.....	162
4.6.1 根轨迹的基本概念.....	107	6.2.2 零极点消去法.....	164
4.6.2 常规根轨迹绘制的		6.2.3 极点配置.....	166
基本法则.....	110	6.3 频域描述——滞后/超前补偿.....	169
4.6.3 广义根轨迹.....	114	6.4 状态与输出反馈.....	171
4.7 本章小结.....	117	6.4.1 可达性.....	171
4.8 思考题与作业.....	117	6.4.2 状态反馈.....	173
第 5 章 线性定常连续时间		6.4.3 可观测性.....	175
控制系统的分析.....	123	6.4.4 观测器.....	176
5.1 稳定性分析.....	123	6.4.5 输出反馈.....	184
5.1.1 平衡与稳定性.....	123	6.5 内模控制系统设计.....	186
5.1.2 基于微分方程特征根的		6.5.1 系统组成.....	186
解析方法.....	125	6.5.2 内模控制的基本性质.....	187
5.1.3 基于多项式系数构造的解		6.5.3 开环稳定系统的	
析方法——Routh-Hurwitz		内模控制器设计.....	188
稳定判据.....	127	6.5.4 鲁棒稳定性在线调整方法.....	189
5.1.4 基于开环零极点分布的		6.6 本章小结.....	190
图解方法——根轨迹法.....	132	6.7 思考题与作业.....	190
5.1.5 基于频率特性的图解方法		第 7 章 离散时间控制系统	
——Nyquist 稳定性判据.....	133	分析与设计.....	194
5.1.6 基于频率特性的图解方法		7.1 连续信号的离散时间表示.....	194
——Bode 稳定性判据.....	135	7.2 Z 变换及其性质.....	197
5.1.7 稳定性分析的一般方法		7.2.1 定义.....	197
——李雅普诺夫稳定性判据.....	137	7.2.2 基本性质.....	197
5.2 鲁棒稳定性.....	142	7.2.3 Z 变换与 Z 反变换的方法.....	199
5.2.1 稳定裕度的概念.....	143	7.3 动态系统的离散时间域表示.....	203
5.2.2 鲁棒稳定性定理.....	146	7.3.1 差分方程.....	203
5.3 系统静态特性分析.....	148	7.3.2 脉冲传递函数与阶跃响应.....	205
5.4 系统动态特性分析.....	153	7.4 Z 变换与拉普拉斯变换的关系.....	209
5.5 本章小结.....	155	7.5 δ 变换及性质.....	210
5.6 思考题与作业.....	155	7.5.1 δ 变换的定义.....	210

7.5.2 δ 变换的性质	211	第 9 章 非线性控制系统设计	258
7.6 线性定常离散控制系统的		9.1 反馈线性化方法	258
Z 域分析	212	9.1.1 基本概念	258
7.6.1 线性采样系统的稳定性	212	9.1.2 反馈线性化方法	260
7.6.2 线性采样系统的瞬态		9.1.3 反馈线性化方法设计	263
响应	215	9.2 Back-stepping 方法	268
7.6.3 稳态误差	215	9.2.1 基本原理	268
7.7 线性定常离散控制系统的		9.2.2 设计举例	270
Z 域设计	216	9.3 滑动模态控制方法简介	272
7.8 本章小结	217	9.3.1 基本原理	272
7.9 思考题与作业	218	9.3.2 设计举例	275
第 8 章 非线性控制系统分析	222	9.4 自适应控制方法简介	277
8.1 非线性系统的特征	222	9.4.1 基本原理	277
8.2 相平面分析法	224	9.4.2 设计举例	286
8.2.1 相平面图概念	224	9.5 本章小结	287
8.2.2 线性系统的相平面图分析	228	9.6 思考题与作业	287
8.2.3 非线性系统的		第 10 章 应用最广泛的两类	
相平面图分析	230	控制算法——PID 和 MPC	290
8.3 描述函数法	234	10.1 PID 控制算法	290
8.3.1 描述函数分析基础	234	10.1.1 PID 控制组成	290
8.3.2 常见非线性环节及其		10.1.2 积分饱和	294
描述函数表示	235	10.1.3 PID 参数整定	296
8.3.3 非线性系统的描述		10.2 MPC 控制算法	298
函数分析	238	10.2.1 引言	298
8.4 李雅普诺夫函数法	241	10.2.2 动态矩阵控制	299
8.4.1 平衡点与稳定性概念	242	10.2.3 设计举例与仿真演示	302
8.4.2 李雅普诺夫稳定性		10.3 本章小结	308
直接判别法	244	10.4 思考题与作业	308
8.4.3 基于李雅普诺夫方法的		附录 A 控制系统分析与	
线性系统分析	247	设计的数学基础	309
8.4.4 基于李雅普诺夫方法的		附录 B MATLAB 编程与 Simulink	
非线性系统分析	251	仿真简介	319
8.5 本章小结	255	参考文献	328
8.6 思考题与作业	255		

第 1 章 绪 论

教学提示：自动控制技术已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。过去自动控制技术及理论已经广泛地应用于各类工业学科领域。近年来，控制学科的应用范围还扩展到交通管理、生物医学、生态环境、社会科学和其他许多社会生活领域，并为各学科之间的相互渗透起到促进作用。自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论，是研究自动控制共同规律的技术科学。自动控制理论的任务是研究自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性及途径，为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。作为现代的工程技术人员和科学工作者，都必须具备一定的自动控制理论基础知识。

教学要求：理解系统、反馈和控制的意义，掌握组成一个反馈控制系统各个部件的工作原理及在系统运作中所起的作用。注意发现自己身边存在的负反馈现象，能归纳抽象表达成用方块图表示的控制系统。

1.1 系统、反馈与控制

自从地球上有了人类，利用资源加工制造出各种各样的工具、机器或工厂，用于生产、再生产和消费，就一直是人类的主要活动之一。这些活动影响了环境，维系了人类社会的存在和发展。自然资源越用越少，生态环境越来越差，人类开始担忧，但令人类自豪的是我们已经在地球上建立了一个庞大的人造技术世界(物质)和生产技术(智慧)。看一看我们周边的世界，各类工程系统不断涌现，组成它们的相关机器、部件和工艺也越来越复杂。操作它们所需的反应时间、精细精密精准程度、劳动强度等要求已经远远超过了人自身的能力极限。要不断支持这样的技术进步，广泛深入地采用自动控制技术是我们唯一的选择。

自动控制有很强的应用背景，其发展动力源自于生产和消费需求的日益多样化。小到人追求舒适便捷的日常家用电器、空调、汽车等，大到满足探索、创造和交流欲望的航空航天、制造系统及因特网等，还有各种大型的、更为复杂的系统都需要控制。要学好和用好控制技术，需要掌握系统思想、数学基础、计算机技术。

1. 什么是系统

我们先从认识“系统”开始。系统一词中文的解释是“同类事物按一定关系组成的整体，侧重指结构完整”，英文“system”一词的解释是“A system is an arrangement of physical components connected or related in such a way as to form and/or act an entire unit”。不同的行业对系统可能会赋予特定的含义，但至少有两部分(或称子系统)组成，且连接后能实现一个整体目标。两个子系统连接在一起的方式有三种：串联、并联和反馈，如图 1.1 所示。第一个子系统发生的变化影响第二个子系统的行为，反之不然，则为串联。两个子系统间互不直接关联，但影响外联的输入输出关系，则为并联。如果两个子系统间互相影响，它

们的动态特性强烈相关耦合，则为反馈。在反馈连接方式中，由于互动作用，两个子系统间的因果关系分析变得困难，必须把它们作为一个整体加以考虑。两个子系统本身的动力学特性可能多种多样，组合后形成的反馈关系可能更加复杂，这是反馈控制理论至今充满魅力和诱惑的主要原因之一。

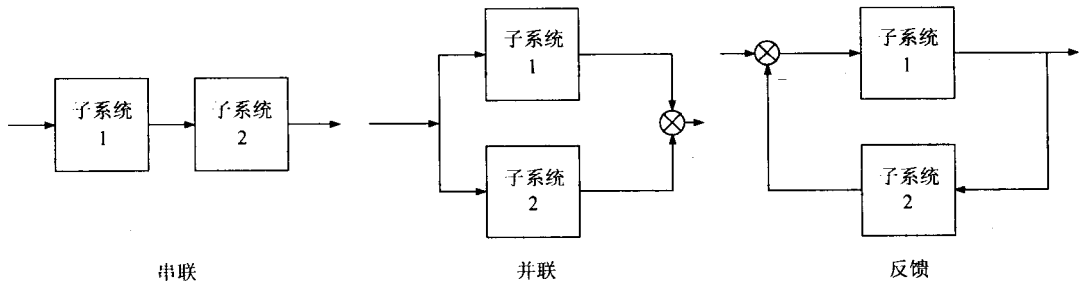


图 1.1 两个子系统连接的方式

2. 什么是反馈

对于反馈行为，人们并不陌生。看一看我们人体本身，借助于反馈维持着各种生态平衡。例如，人体细胞产生能量时需要血糖，而且生物机能总是试图维持定常的血糖浓度。在血液流中，通过胰腺产生胰岛素和胰增血糖素，调整血糖高低就是典型的反馈系统。餐后血糖可能增加，荷尔蒙胰岛素开始释放，引导身体在肝脏中储藏过量的血糖。当血糖降低时，胰腺开始分泌荷尔蒙胰岛素。每天胰岛素和胰增血糖素分泌间的互动，帮助维持每 100ml 血液中血糖含量在 90mg 左右。当然，对于糖尿病患者，由于分泌胰岛素的功能出现障碍，则须借助于外部注射胰岛素或药物来调节血液内的血糖浓度。

在工程中早期使用的反馈控制系统，一般认为是 1769 年出现的瓦特蒸汽机的调速器，它被用来控制蒸汽机的转速。如图 1.2 所示，其中机械装置用来测量驱动杆的转速并利用飞球的转动来控制阀门，进而控制进入蒸汽机的蒸汽流量。当转速增大时，飞球离开轴线，重心上移，阀门被关紧，进入蒸汽机的蒸汽流量减少，蒸汽机的转速将减慢，速度得到了控制，反之亦然。

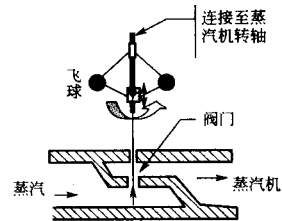


图 1.2 瓦特蒸汽机调速系统示意图

通过以上两个实例，我们总结一下反馈构成的三要素：

感测变化：及时掌握受控系统变化状态，如上例中的血糖浓度、蒸汽机转速；

期望目标：如 100ml 血液中血糖含量在 90mg 左右；

校正执行：根据偏差(期望的受控系统状态与其当前所处状态)产生校正作用，驱动受控系统从当前所处状态向期望状态靠近，如分泌或注入胰岛素等、进入蒸汽机的蒸汽流量。

3. 什么是控制

控制一词在不同的领域具有不同的含义。在《自动控制原理》一书中，控制是指在工程系统使用反馈和算法。在电子放大器中的反馈回路、化学与材料加工中的定值调节器、飞机上的飞行电子控制仪、因特网上控制信息量的路由器协议、并联在减震板上的压电陶

瓷线路、高信度软件系统、自主式车辆和机器人、实时资源管理系统、生物工程系统等，都可视为控制。控制是一门信息科学，涵盖了传统的模拟信息和现代的数字信息。系统无处不在，本书主要学习的是控制系统。一个控制系统可以定义为“把一些物理部件连接或组合在一起实现命令或指挥或调节自身或其他一个系统的目的”。事实上，我们可以把任何一个物理目标视为一个控制系统，任何一件事或物都在主动或被动地影响着周边的事物。例如，图 1.3 所示的一块玻璃镜，它按照“反射角 α 等于入射角 α ”的简单方程控制着照射在玻璃镜面上一束光的走向。进一步假设，光源入射角不变，通过调整螺丝改变玻璃镜面与支撑面的夹角，则反射后的光束将按照我们的动作而变化，实现了简单的控制意图。

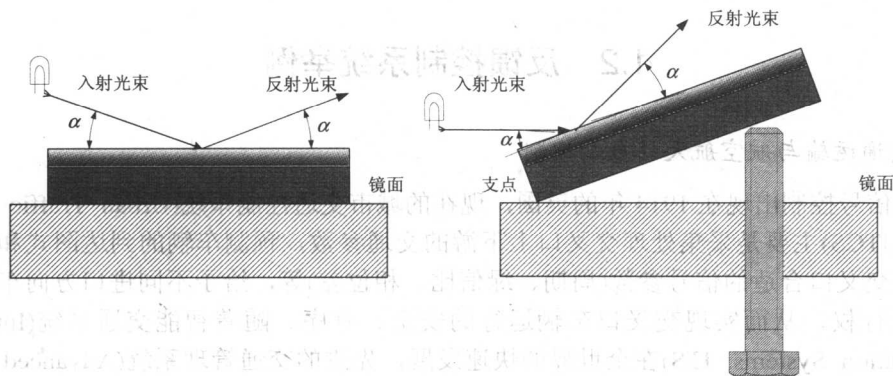


图 1.3 反射镜面

在工程和科学领域，所谓控制系统主要是指能动态、主动地实现调控功能的那些系统。其一般组成如图 1.4 所示。假设一个子系统是我们控制的对象，它可能是一个物理过程、化学反应、生物的新陈代谢等，在它们内部完成物质流或能量流的转换。另一个子系统是我们设计的控制器，它们也可能有能量流转换发生，但显著的是信息流。这三类流能和谐、持续共存，就达到了一个人造技术系统的设计目标。要让这些过程(流)按我们的旨意发展、变化，基于全局的、系统的思想，设计适当的控制规律至关重要。

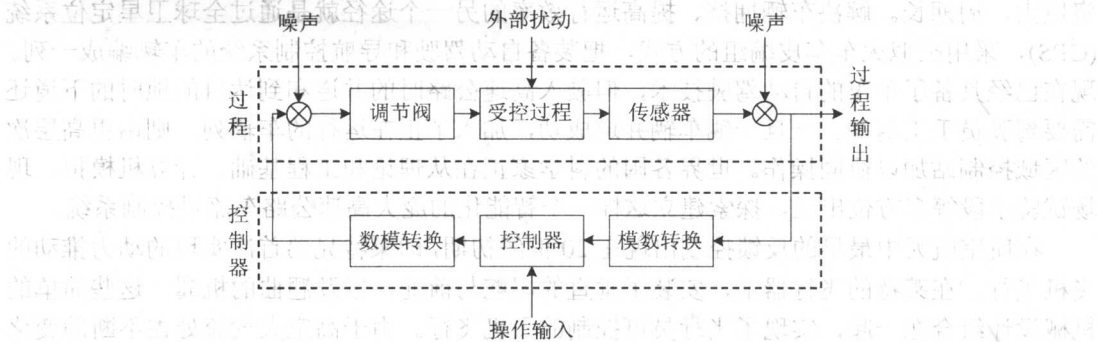


图 1.4 现代控制系统的一般组成

通过以上分析可知，控制科学与技术至少与三门专业知识紧密相关：建模、计算机和运筹学。联系最为密切的是物理系统(受控过程)的建模，控制的建模要求更强调，通过：

①输入输出关系表达系统的行为；②复杂模型简化或降阶；③子系统间不同连接方式的适应性评价，为控制系统分析和综合提供依据。计算机软硬件系统是现代控制系统得以完成从分析、综合、设计到付诸实施的手段和工具，更是反馈控制规律的实现载体。控制和扰动是一对孪生体，博弈的结果是某些指标的折中即优化。运筹学中包括线性规划、非线性规划、整数规划、混合整数的线性规划等理论与软件都为最优控制问题的解在线实施提供了数学工具。

另外也要特别强调，一方面，要想在某个领域成为控制专家，了解和掌握这个领域的专业知识也非常必要。另一方面，控制系统除在人造技术系统内发挥关键作用外，在自然界也普遍存在，借鉴天然控制系统的机理，对发展和完善人造控制系统的性能也非常有益处。

1.2 反馈控制系统举例

1. 交通运输与航空航天的自动控制

交通信号控制出现在 1914 年的英国，现在的城市交通控制系统(Urban Traffic Control System, UTCS)主要是采集处理交叉口上下游的交通参数，预测车辆的到达图式和排队长度，确定交叉口合适的信号参数(周期、绿信比、相位差)等，给予不同进口方向车辆的时间分配通行权，从而实现交叉口车辆运行的安全、有序。随着智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)在全世界的快速发展，先进的交通管理系统(Advanced Traffic Management System, ATMS)和先进的交通信息系统(Advanced Traffic Information System, ATIS)成为 ITS 重点发展的两大子系统。而交通信号控制系统和交通流疏导系统分别属于其中，交通信号控制系统在接近百年的发展过程中已趋于成熟，而交通流疏导系统则成为继交通信号控制系统后的重点发展领域。交通流疏导和交通控制的共同管理对象都是由人、车、路、环境构成的复杂时变的交通流，两系统的共同管理目标都是为了实现路网交通流的畅通，提高安全性、舒适性。

除了城市内交通控制系统外，在高速公路上的车流量控制也是智能交通控制研究的另一个重要分支。高速公路的建设总是赶不上车辆的持续增加，新建或扩建高速公路，投资巨大，周期长。解决车辆拥挤、提高运行效率的另一个途径就是通过全球卫星定位系统(GPS)，采用类似火车车皮编组的方式，把装备自动驾驶和导航控制系统的车辆编成一系列。现在已经具备了单车的自动驾驶技术，但驶入高速公路时的并道和到达目的地时的下道还需要驾驶员手工驾驶。一旦一辆车辆并道成功，加入了正在运行的车辆列，则由更高层次的区域控制站加以协同操作。世界各国的科学家正在从理论和工程基础、计算机模拟、现场试验手段等多方位出发，探索建立这样一个智能化的庞大高速公路车流量控制系统。

在航空航天中最早的反馈控制出现在 20 世纪初期，即莱特兄弟首次实现的动力推动的飞机飞行。在莱特的飞行器上，安装了垂直的尾舵与前舵，以及翘曲的机翼，这些简单的机械设计组合在一起，实现了飞行员可控制的飞机飞行。由于高空大气流处在不断的变化中，飞机平稳航行需要适应能力很强的稳定装置。现在，无人驾驶飞机、飞船登月、永久太空舱和航天飞机(飞船)对接、火星车着陆探索等都是人类征服自然的杰出成就，控制技术在这些伟大的工程中发挥着关键作用。

科学家已经解决了单体诸如汽车和飞机的自动控制问题，但在市区交通流量疏导、高

速公路车辆协同操作、大机场飞机起降调度等方面,形成了多层次分散化的大系统,用目前成熟的技术还不能为它们提供解决方案,这些问题正在向控制工程师,特别是成长中的青年控制专家,提出许多新的挑战性问题。

2. 信息与网络系统的自动控制

有了因特网,我们居住的这个大星球变成了“地球村”。我们来设想一下,你在北京,你的三个同学分别在沈阳、西安和广州,你们在网上同时请求一个设在美国纽约的服务器提供信息服务,内容可能是MP3音乐下载、数字图片传输、网上聊天等。你们的请求命令如何发出?路由器如何定向传输?远端服务器收到请求后的服务响应如何进行?当前安装在网络终端、路由和服务器上的传输控制协议(Transmission control protocol, TCP)为此提供支持。人们无法观察在TCP控制下、在网络上的信息流动,但当下载的速度减慢时,肯定会想到网络上访问的人太多,出现拥塞了,于是反馈控制自动开始工作。在他人的访问量减少时,你的下载又会变得快起来。其实,网络的控制涉及很多题目,包括拥塞控制、邮件路由控制、数据存储和动力管理等。与传统的控制相比,有一些显著的特征,例如,因特网系统的规模极大,大概是人类曾经建造的最大的反馈控制系统。另一个是控制问题的分散性,当某个终端的局部需求信息被快速发布到网络上传播时,在被远端接受的过程中,可能由于网络拥塞导致随机变化的滞后出现。我们知道,一个系统含有时变滞后,其稳定性条件更加复杂,因为关于网络状态信息和局部控制动作只能经过一定时间延迟后才能被感测或发挥影响,网络拓扑、传输通路特性、通信量需求、可利用资源等随时在发生不可预见地变化。还有控制设计必须适应网络通信的多样性统计特征和客户对服务质量的不同要求等。在这种环境里必须管理的资源包括计算、储存和在末端主机、路由器的输送能力。传输量、延迟、掉包率、公平性、可靠性,以及网络适应改变通行模式、资源可用量、网络阻塞等时的速度与品质等,都是评价网络性能指标。

3. 医学治疗过程的自动控制

生物医学过程是一个崭新的、自动控制理论应用相对薄弱的研究领域,专家预测有广阔的市场前景。在过去十多年,发明了许多新的生物执行器和传感器,对生物体运动规律的认识也不断加深,在医学治疗过程研究中,传统内置反馈控制系统已经逐渐被外置反馈控制技术所取代。主要研究动态有:

(1) 胰岛素自动给药控制。糖尿病已经严重危害人类的健康,全世界每年投入巨资研发药品和治疗患者。对于胰岛素依赖症者,通常的治疗策略是每天按时注射3次~4次胰岛素(前馈控制算法),然后根据3次~8次毛细血管血糖浓度检测值调整给药的剂量和间隔(反馈控制算法)。这样一个过程的自动控制问题,目前的主要技术障碍是找到能够在线自动检测血糖浓度的传感器,以及能进行皮下注射或静脉注射(两种手段各有其优缺点)的执行装置。对胰岛素如何降解血糖的机理和动态过程特性,人类已经积累了相当的认识,相关的控制策略研究也已完成计算机模拟和小批量临床试验。

(2) 临床麻醉过程的自动控制。在外科手术期间,麻醉师是“控制算法”,他要根据病人的肌肉松弛、痛觉和催眠状态(系统输出变量),决定施加(静脉注射或外涂挥发麻醉)多少麻醉药物量或通风或肌肉迟缓剂参数(系统输入变量)等手段,同时要保证病人始终处于生命可恢复的药理状态(约束条件)。在手术过程中,操作不当产生的刺激和失血过多(外