

省级精品教材
高等院校自动化专业教材

- 渗透式双语教学
- 理论与实践相结合
- 典型例题和习题

自动控制原理

Principles of Automatic Control

(第2版)

徐国凯 主 编
孙进生 张 涛 副主编

清华大学出版社

自动控制原理

(第2版)

徐国凯 主 编

孙进生 张涛 副主编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统全面地介绍了经典控制理论的基本内容,着重于基本概念、基本理论和基本方法的论述。全书共分8章:绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、控制系统的根轨迹法、控制系统的频率响应法、控制系统的校正、非线性控制系统、离散控制系统。

为了便于读者深入理解本书所述的重要概念,每章都列举了一定数量的例题和习题。另外,在每章都加入了 Matlab 的具体应用实例。

本书的一个重要特点是适合渗透式双语教学。在每节中都为重要的技术术语加注了英文解释,每章末都加入了重点概念和术语的中英文对照表,便于教师在课堂上对学生专业词汇的渗透,使学生在学本课程的同时逐步增加专业词汇量,方便学生更好地阅读外文专业书籍和文献,进而切实提高双语教学水平。

本书可作为自动化专业本科生的教科书,也可作为其他与控制有关的专业的本科生、研究生以及科技与工程人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/徐国凯 主编. —北京:清华大学出版社, 2011.3

ISBN 978-7-302-24988-7

I. 自… II. 徐… III. 自动控制理论 IV.TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 028271 号

责任编辑:刘金喜 鲍 芳

封面设计:久久度文化

版式设计:孔祥丰

责任校对:胡花蕾

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:22.25 字 数:514 千字

版 次:2011 年 3 月第 2 版 印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:35.00 元

产品编号:041007-01

第2版前言

本书初版经过多年电子信息类本科生自动控制原理课程的教学实践，任课教师和学生反映其双语教学特点鲜明，课堂教学效果良好，并先后获得大连民族学院校级精品教材和辽宁省省级精品教材等荣誉。此次再版对编者队伍做了重要调整，充实了一些在一线从事自动控制原理课程教学和控制理论研究的教师。

与本书初版相比，此次再版保留了初版书渗透式双语教学这一重要特点。编者参考了教学过程中教师和学生的反馈意见和建议，对初版书的内容和编排做了较大改动。修编内容较多的是控制系统的校正和非线性控制系统两章。其中在控制系统串联校正环节的设计中，针对时域和频域两种不同的性能指标，分别给出了利用根轨迹法和频率法设计校正装置的方法，并且在每种设计方法后都列举了设计实例，以便读者对两种设计方法的异同点获得更深刻的认识。在非线性控制系统一章的编排上增加了相平面和相轨迹的基础知识，使得整章内容更加全面。此外，再版书还修订了初版书的一些错误和不当之处。

本书由徐国凯教授担任主编，孙进生教授、张涛副教授担任副主编，参加编写的还有王娟博士、杜海英博士和宋鹏讲师。全书共分8章：第1、2章由徐国凯执笔，第3章由宋鹏执笔，第4、7章由王娟执笔，第5章由杜海英执笔，第6章由张涛执笔，第8章由孙进生执笔。

此次再版得到了大连民族学院教材出版基金资助，在此表示感谢。

再版书是在初版书的基础上加以改写的，并利用了初版书的部分内容。在此谨向初版书的编者表示衷心感谢。

编 者

2011年2月

第1版前言

随着工业生产和科学技术的发展,自动控制技术已广泛应用于制造业、农业、交通、航空航天和国防等领域。“自动控制理论”是专门研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,也是高等院校自动化及其相关专业学生必修的基础课之一。

本书系统地介绍了经典控制理论的基本内容。主要内容包括:自动控制基础知识、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、根轨迹法、频率响应法、控制系统的校正、非线性控制系统、离散控制系统。这些内容都是被国内外公认的关于自动控制理论的基本内容。为了便于读者深入理解本书所述的重要概念,每章都列举了一定数量的例题和习题。

本书的一个重要特点是适合渗透式双语教学。在每节中都为重要的技术术语加注了英文词汇,每章末都加入了重点概念和术语的中英文对照表,便于教师在课堂上对学生进行专业词汇的渗透,使学生在学本课程的同时逐步增加专业词汇量,方便学生更好地阅读外文专业书籍及文献,进而切实提高双语教学水平。

本书由大连民族学院徐国凯教授主编。参加编写的有陈晓云副教授(第1章)、张艳讲师(第2章)、宋鹏讲师(第3章)、谢春利讲师(第4章)、徐国凯教授(第5章)、杜海英助教(第6章)、张涛讲师(第7章)和韩志敏副教授(第8章)。本书由王培昌教授主审。

本书可作为自动化专业本科生的教科书,也可作为电子信息类或其他与控制有关的专业本科生、研究生以及工程技术人员的参考书。

由于编者水平有限,错误或不当之处在所难免,期望广大读者批评指正。服务邮箱:
wkservice@vip.163.com。

编者

2007年5月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5.2 梅逊增益公式	45
1.1 自动控制系统的一般概念	1	2.6 Matlab 在本章中的应用	47
1.2 自动控制系统的分类	4	本章小结	49
1.2.1 开环与闭环系统	4	习题	49
1.2.2 定值、伺服与程序控制系统	6	第 3 章 控制系统的时域分析法	52
1.2.3 线性与非线性控制系统	6	3.1 控制系统的时域性能指标	52
1.2.4 连续与离散控制系统	7	3.1.1 典型输入信号	52
1.3 自动控制理论的发展概况	8	3.1.2 控制系统时域性能指标	55
1.4 自动控制系统的性能要求	9	3.2 一阶系统的时域响应	57
本章小结	10	3.2.1 一阶系统的数学模型	57
习题	10	3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	58
第 2 章 控制系统的数学模型	12	3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	59
2.1 列写系统微分方程式的 一般方法	12	3.2.4 一阶系统的单位脉冲响应	60
2.1.1 简单系统微分方程的建立	13	3.2.5 一阶系统的单位加速度响应	60
2.1.2 复杂系统微分方程的建立	15	3.3 二阶系统的时域响应	61
2.2 非线性数学模型的线性化	19	3.3.1 二阶系统的数学模型	62
2.3 传递函数	22	3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	63
2.3.1 传递函数的定义	22	3.3.3 欠阻尼二阶系统的动态 过程分析	68
2.3.2 传递函数的基本性质	25	3.3.4 二阶系统的单位脉冲响应	71
2.3.3 控制系统的典型环节及其 传递函数	26	3.4 高阶系统的时域响应	72
2.4 框图和系统的传递函数	32	3.5 线性系统的稳定性分析	74
2.4.1 框图的组成	32	3.5.1 系统稳定的充要条件	74
2.4.2 系统框图的建立	33	3.5.2 劳斯—赫尔维茨判据	75
2.4.3 框图的等效变换	34	3.5.3 劳斯稳定判据	76
2.4.4 自动控制系统的传递函数	39	3.5.4 赫尔维兹判据	80
2.5 信号流图和梅逊公式的应用	42	3.6 控制系统的稳态误差	81
2.5.1 信号流图的术语和性质	44	3.6.1 稳态误差的定义	82
		3.6.2 系统类型	82

3.6.3 扰动作用下的稳态误差	87	5.2 对数坐标图	147
3.6.4 提高系统稳态精度的方法	88	5.2.1 典型因子的伯德图	148
3.7 Matlab 在本章中的应用	88	5.2.2 绘制开环系统伯德图的一般步骤	157
3.7.1 控制系统的传递函数	88	5.2.3 最小相位系统与非最小相位系统	159
3.7.2 控制系统的时域响应	91	5.2.4 系统的类型与对数幅频特性曲线低频渐近线的对应关系	161
本章小结	97	5.3 极坐标图	163
习题	97	5.3.1 典型因子的乃氏图	164
第4章 控制系统的根轨迹法	101	5.3.2 极坐标图的一般形状	168
4.1 根轨迹法的基本概念	101	5.4 乃奎斯特稳定判据	171
4.1.1 根轨迹的概念	101	5.4.1 幅角原理	171
4.1.2 根轨迹与系统性能	103	5.4.2 乃奎斯特稳定判据介绍	173
4.1.3 根轨迹的幅值条件和相角条件	103	5.4.3 乃氏判据应用于滞后系统	180
4.1.4 根轨迹增益与系统开环增益的关系	105	5.5 相对稳定性分析	182
4.2 绘制根轨迹的基本法则	106	5.5.1 增益裕量	183
4.3 参量根轨迹的绘制	120	5.5.2 相位裕量	183
4.4 非最小相位系统的根轨迹	123	5.5.3 相对稳定性与对数幅频特性中频段斜率的关系	185
4.4.1 正反馈回路的根轨迹	124	5.6 频域性能指标与时域性能指标间的关系	188
4.4.2 含有非最小相位元件的系统的根轨迹	125	5.6.1 闭环频率特性及其特征量	188
4.4.3 滞后系统的根轨迹	126	5.6.2 二阶系统时域响应与频域响应的关系	190
4.5 用根轨迹分析控制系统	127	5.7 传递函数的实验确定	194
4.5.1 用根轨迹确定系统的有关参数	127	5.8 Matlab 在本章中的应用	196
4.5.2 指定 K_0 时的闭环传递函数	130	5.8.1 用 Matlab 绘制伯德图	196
4.5.3 确定具有指定阻尼比 ζ 的闭环极点和单位阶跃响应	132	5.8.2 用 Matlab 绘制乃奎斯特图	200
4.6 Matlab 在本章中的应用	133	本章小结	203
本章小结	138	习题	204
习题	139	第6章 控制系统的校正	208
第5章 控制系统的频率响应法	143	6.1 引言	208
5.1 频率特性	143	6.1.1 被控对象	208
5.1.1 频率特性的基本概念	143	6.1.2 性能指标	209
5.1.2 由传递函数确定系统的频率响应	145	6.1.3 系统校正	210

6.2 线性系统的基本控制规律·····212	7.3.1 描述函数的基本概念·····262
6.2.1 比例控制规律·····213	7.3.2 非线性元件描述函数的举例···264
6.2.2 比例—微分控制规律·····213	7.3.3 用描述函数法分析非线性 控制系统·····270
6.2.3 积分控制规律·····214	7.4 相平面分析法·····274
6.2.4 比例—积分控制规律·····214	7.4.1 相平面的基本概念·····274
6.2.5 比例—积分—微分控制 规律·····215	7.4.2 线性二阶系统的相轨迹·····276
6.3 串联校正·····216	7.4.3 绘制相平面图的等倾斜线法···277
6.3.1 超前校正·····216	7.4.4 非线性系统的相平面分析···280
6.3.2 滞后校正·····222	7.5 Matlab 在本章中的应用·····286
6.3.3 滞后—超前校正·····228	本章小结·····290
6.4 反馈校正·····233	习题·····291
6.4.1 利用反馈校正改变局部 结构和参数·····234	第 8 章 离散控制系统 ·····294
6.4.2 利用反馈校正取代局部 结构·····235	8.1 引言·····294
6.5 复合校正·····237	8.2 信号的采样与复现·····297
6.5.1 前馈校正与反馈控制组成 的复合控制·····237	8.2.1 采样过程·····297
6.5.2 扰动补偿校正与反馈控制 组成的复合控制·····239	8.2.2 采样定理·····299
6.6 Matlab 在本章中的应用·····239	8.2.3 零阶保持器·····301
本章小结·····248	8.3 z 变换与 z 反变换·····302
习题·····249	8.3.1 z 变换·····303
第 7 章 非线性控制系统 ·····251	8.3.2 z 变换的基本性质·····307
7.1 非线性控制系统概述·····251	8.3.3 z 反变换·····310
7.1.1 研究非线性控制理论的意义···251	8.4 脉冲传递函数·····312
7.1.2 非线性系统的特征·····253	8.4.1 串联环节的脉冲传递函数···314
7.1.3 非线性系统的分析与 设计方法·····256	8.4.2 闭环系统的脉冲传递函数···315
7.2 常见非线性及其对系统运动 的影响·····257	8.5 差分方程·····320
7.2.1 非线性特性的等效增益·····257	8.5.1 差分的定义·····320
7.2.2 常见非线性因素对系统 运动的影响·····259	8.5.2 差分方程概述·····320
7.3 非线性元件的描述函数·····262	8.5.3 用 z 变换法求解差分方程···321
	8.5.4 用迭代法求解差分方程·····323
	8.6 离散控制系统的性能分析·····325
	8.6.1 离散控制系统的稳定性 分析·····325
	8.6.2 闭环极点与瞬态响应的关系···328
	8.6.3 离散系统的稳态误差·····332
	8.7 Matlab 在本章中的应用·····335

8.7.1 利用 Simulink 分析和设计 离散控制系统	335
8.7.2 利用控制系统工具箱分析 和设计离散控制系统	340

8.7.3 利用 SISO 分析工具分析和设计 离散控制系统	341
本章小结	342
习题	342

第1章 绪 论

随着生产和科学技术的发展,自动控制技术在国民经济和国防建设中所起的作用越来越大。从最初的机械转速或位置的控制到生产过程中温度、压力或流量的控制,从远洋巨轮到深水潜艇的控制,从飞机自动驾驶、航天飞船的返回控制到“勇气”号、“机遇”号的火星登陆控制,自动控制技术的应用几乎无所不在。从航空航天、电气、机械、化工、生物工程到经济管理,自动控制理论和技术已经渗入到许多学科,渗透到各个应用领域。所以许多工程技术人员和科学工作者都希望具备一定的自动控制知识,根据任务需要分析和设计自动控制系统。

本章重点内容:

- 自动控制系统的组成
- 自动控制系统的分类
- 自动控制理论的发展历史
- 自动控制系统的性能要求

1.1 自动控制系统的一般概念

自动控制(automatic control)就是在没有人直接参与的情况下,利用控制器使被控对象(如机器、设备和生产过程)的某些物理量(或工作状态)能自动地按照预定的规律运行(或变化)。自动控制是一门理论性很强的科学技术,一般泛称为“自动控制技术”。把实现自动控制所需的各个部件按一定的规律组合起来,去控制被控对象,这个组合体叫做“控制系统”。分析与设计自动控制系统的理论称为“控制理论”。

自动控制系统的种类较多,被控制的物理量也各种各样,如温度(temperature)、压力(pressure)、流量(flow)、转速(rotate speed)、位移(distance)和力(force)等。组成这些控制系统的元部件虽然有较大的差异,但是系统的基本结构却有着共同特点,且一般都是通过机械、电气、液压等方法来控制。为了解自动控制系统的结构,下面分析一下图 1-1 所示的液面控制系统。

图中 F_1 为放水阀(drain valve), F_2 为进水阀(inlet valve),控制任务要求液面的希望高度等于 h_0 。当人参与控制时就要不断地将实际液面高度 h_1 与希望液面高度 h_0 作比较,根据比较的结果,决定进水阀 F_2 的开度(aperture)是增大还是减小,以达到维持液面高度不变的目的。图 1-2 所示为人参与该系统的框图。由该图可见,人在参与控制中起了以下三方面的作用。

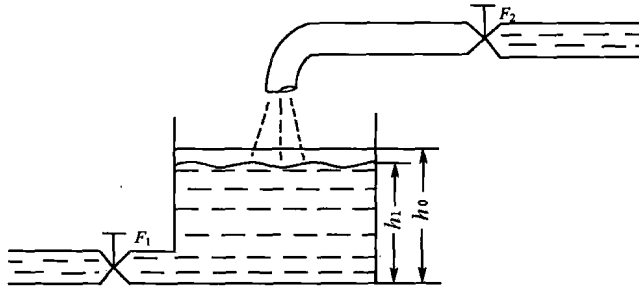


图 1-1 水池液面控制系统

- (1) 测量实际液面高度 h_1 ——用眼睛。
- (2) 将测得的实际液面高度 h_1 与希望液面高度 h_0 做比较——用大脑。
- (3) 根据比较的结果，即按照偏差的正负和大小去决定阀的开度——用手。

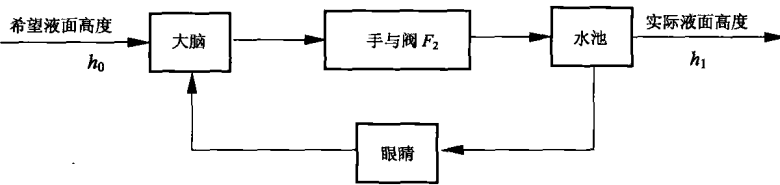


图 1-2 液面人工控制系统的框图

显然，如果用自动控制去代替上述的人工控制，那么在自动控制系统中必须具有上述三种职能机构，即测量机构、比较机构和执行机构。不言而喻，用人工控制不能保证系统要求的控制精度(control accuracy)，也不能减轻人的劳动强度。如果将图 1-1 改为图 1-3 所示的自动控制系统，当满足放水量小于进水量这个条件时，不论放水阀 F_1 输出的流量如何变化，系统总能自动维持其液面高度在允许的偏差范围(error range)之内。假设水池液面的高度因放水阀 F_1 的开度的增大而稍有降低，系统立即产生一个与降落液面成比例的误差电压 u ，该电压经放大器放大后供电给进水阀的拖动电动机，使阀 F_2 的开度相应地增大，从而使水池的液面恢复到所希望的高度。

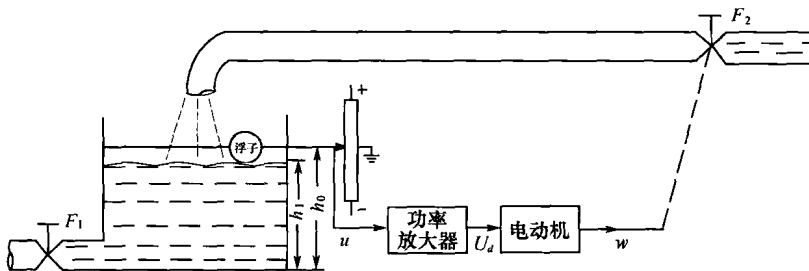


图 1-3 液面自动控制系统

图 1-3 所示的液面自动控制系统由以下五个部分组成。

- (1) 被控对象(controlled plant)——水池。
- (2) 测量元件(measure element)——浮子。

(3) 比较机构(comparer)——比较浮子的希望位置与实际位置之差。

(4) 放大机构(amplifier)——当测量元件测得的信号与给定信号比较后得到的误差信号(error signal)不足以使执行元件动作时, 一般都需要放大元件。

(5) 执行机构(actuator)——它的作用是直接驱动被控对象, 以改变被控制量。

以上五个部分也是一般自动控制系统的组成单元。此外, 为了改善控制系统的动、静态性能通常还在系统中加上某种形式的校正装置(correcting device)。

为了使控制系统的表示简单明了, 一般采用方框来表示系统中的各个组成部件, 在每个方框中填入它所表示的部件的名称或函数表达式(function expression), 不必画出它们的具体机构。根据信号在系统中的方向, 用有向线段依次把它们连接起来, 就可得到控制系统框图(system diagram)。控制系统框图由以下三个基本单元组成。

(1) 引出点, 如图 1-4(a)所示。它表示信号的引出, 箭头表示信号的方向。

(2) 比较点, 如图 1-4(b)所示。它表示两个或两个以上的信号在该处进行的“ \pm ”运算, “+”表示信号相加, “-”表示信号相减。

(3) 部件的方框, 如图 1-4(c)所示。输入信号(input signal)置于方框的左端, 方框的右端为其输出量, 方框内填入部件名称。

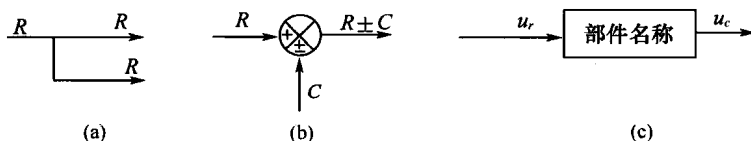


图 1-4 系统框图的基本组成单元

据此可把图 1-3 所示液面控制系统的原理改用图 1-5 所示的方框图来表示。显然, 后者的表示不仅比前者简单, 而且信号在系统中的传递过程也更为清晰。因此, 在以后的讨论中控制系统一般均以框图的形式表示。

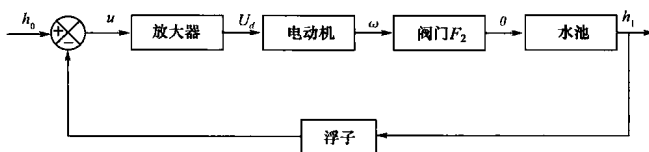


图 1-5 图 1-3 所示系统的框图

WORDS AND PHRASES

自动控制	automatic control
被控对象	controlled plant
测量元件	measure element
比较机构	Comparer
放大机构	Amplifier
执行机构	Actuator

1.2 自动控制系统的分类

在工程实际中, 控制系统因其工作环境、被控对象、变化规律不同, 种类也不同。因此, 介绍控制系统的各种类型, 从而分门别类地掌握不同类型控制系统的具体规律, 对于控制系统的分析和设计是很有必要的。

1.2.1 开环与闭环系统

按照信息传递路径的不同来分类, 控制系统可以分为开环系统、闭环系统和复合系统三种类型。这里只介绍开环系统和闭环系统。

1. 开环系统(又称开环控制系统、无反馈系统)

如果系统的输出量没有与其参考输入相比较, 即系统的输出与输入量间不存在反馈的通道, 这种控制方式叫做开环控制(open-loop control)。图 1-6 所示为开环控制系统的框图。由图可见, 这种控制系统的特点是结构简单、所用的元器件少、成本低。然而, 由于这种控制系统既不对被控制量进行检测, 又没有将被控制量反馈到系统的输入端和参考输入相比较, 所以当系统受到某种干扰(disturbance)作用后, 被控制量一旦偏离了原有的平衡状态(balanced state), 系统没有自行消除或减小误差的功能。这是开环系统的最大缺点。正是这个缺点, 大大限制了这种系统的应用范围。

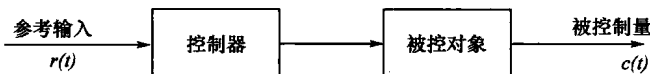


图 1-6 开环控制系统

图 1-7(a)所示为一个开环直流调速系统, 图 1-7(b)所示为它的框图。图中 U_g 为给定的参考输入。

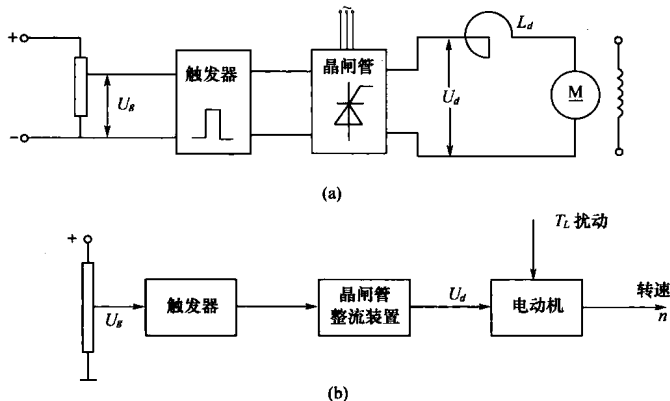


图 1-7 开环直流调速系统

U_g 经触发器和晶闸管整流装置转变为相应的直流电压 U_d , 并供电给直流电动机, 使之产生一个 U_g 所期望的转速 n 。但是当电动机的负载、交流电网的电压以及电动机的励磁

有变化时，电动机的转速就会随之变化，不能再维持 U_g 所期望的转速。

2. 闭环系统(又称闭环控制系统、反馈控制系统)

若把系统的被控制量反馈到它的输入端，并与参考输入相比较，这种控制方式叫做闭环控制(closed-loop control)。由于这种控制系统中存在着被控制量经反馈环节至比较点的反馈通道，故闭环控制又称反馈控制(feedback control)。闭环系统的特点是：连续不断地对被控制量进行检测，把所测得的值与参考输入作减法运算，求得的误差信号经控制器的变换运算和放大器的放大后，驱动(drive)执行元件，以使被控制量能完全按照参考输入的要求去变化。这种系统如果受到来自系统内部或外部的干扰，通过闭环控制系统的作用，能自动地消除或削弱干扰对被控制量的影响。由于闭环控制系统具有良好的抗扰动性能(anti-interference performance)，因而它在控制工程中得到了广泛的应用。

如果把图 1-7 所示的开环调速系统改接为图 1-8 所示的闭环系统，则它就具有自动抗扰动的功能。例如，当电动机的负载转矩 T_L 增大时，流经电动机电枢中的电流便相应地增大，电枢电阻上的压降也变大，从而导致电动机转速的降低；而转速的降低使测速发电机的输出电压 U_m 减小，误差电压 ΔU 相应地增大，经放大器放大后，使触发脉冲(triggering pulse)前移，晶闸管(thyristor)整流装置的输出电压 U_d 增大，从而补偿了由于负载转矩(load torque) T_L 的增大或电网电压 u 的减小而造成的电动机转速的下降，使电动机的转速近似地保持不变。上述的调节过程，也可用如下的因果图来表示。

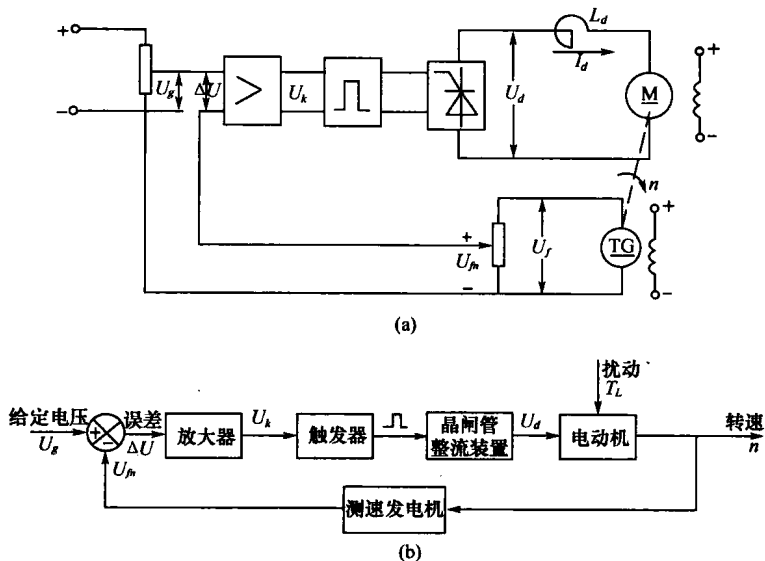
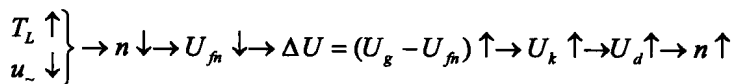


图 1-8 闭环直流调速系统

1.2.2 定值、伺服与程序控制系统

按照输入给定值的不同,控制系统可以分为定值控制系统、伺服系统和程序控制系统三类。

1. 定值控制系统(又称恒值、镇定调节系统)

给定值为常值的控制系统称为定值控制系统。这种系统的任务是保证在任何扰动下,被控参数(输出)均保持恒定的、希望的数值。在过程控制系统中,一般都要求将过程参数(如温度、压力、流量、液位和成分等)维持在工艺给定的数值。

2. 伺服系统(又称跟踪系统、随动系统)

给定值随时间任意变化的控制系统称为伺服系统(servo system)。这种系统的任务是在各种情况下保证系统的输出以一定精度跟随参考输入的变化而变化,所以这种系统又称为跟踪系统。导弹发射架控制系统、雷达天线控制系统以及轮舵位置控制系统等都是典型的伺服系统。当被控量为位置或角度时,伺服系统又称为随动系统。

3. 程序控制系统

若给定值随时间变化有一定的规律,且为事先确定的时间函数,则称这种系统为程序控制系统。如耐火材料生产中的炉温程序升温、间隙生产的化学反应器温度控制以及机械加工中的数控机床等均属于此类系统。实际上,程序控制系统是随动系统的一种特殊情况,其分析研究方法也和随动系统相同。

1.2.3 线性与非线性控制系统

按照描述系统的数学表达式的特性不同来分类,控制系统可以分为线性控制系统和非线性控制系统(或线性系统和非线性系统)两类。

1. 线性控制系统

若组成控制系统的元件都具有线性特征,则称这种系统为线性控制系统(linear control system)。这种系统的输入与输出间的关系一般用微分方程、传递函数来描述,也可以用状态空间(state space)表达式来表示。线性系统的主要特点是具有齐次(odd)性和适用叠加原理(principle of superposition)。如果线性系统中的参数不随时间而变化,则称为线性定常系统(linear time-invariant system),反之,则称为线性时变系统(linear time-varying system)。

2. 非线性控制系统

在控制系统中,至少有一个元件具有非线性特征,则称该系统为非线性控制系统(nonlinear control system)。非线性系统一般不具有齐次性,也不适用叠加原理,而且它的输出响应(output response)与其初始状态(initial state)有很大的关系。

严格地说,绝对的线性特征(或元件)是不存在的,因为所有的物理系统和元件在不同的程度上都具有非线性特性。为了简化系统的分析和设计,在一定条件下,可以对某些非线性特性作线性化处理。这样,非线性系统就近似为线性系统,从而可以用分析线性系统的理论和方法对它进行研究。

工程上有时为了改善控制系统的性能,常常人为地引入某种非线性元件。例如,为了实现最短时间控制(time optimum control),采用开关型(Bang-Bang)的控制方式;又如,在晶闸管组成的整流装置的直流调速系统中,为了改善系统的动态特性和限制电动机的最大们有意识地把电流调节器(current regulator)和速度调节器(speed regulator)设计成具(saturated nonlinear)的特性。

1.2.4 连续与离散控制系统

按照系统传输信号与时间的函数关系来分类,控制系统可以分为连续控制系统和离散控制系统。

1. 连续控制系统

当系统中各组成环节的输入、输出信号都是时间的连续函数时,称此类系统为连续控制系统(continuous control system)。连续控制系统的运动状态或特性一般用微分方程来描述。模拟式的工业自动化仪表以及用模拟式仪表实现的过程控制系统都属于连续控制系统。

2. 离散控制系统

在控制系统各部分的信号中只要有一个是时间 t 的离散信号(discrete signal),则称这种系统为离散控制系统。显然,脉冲(pulse)和数码(digital code)都属于离散信号。如图 1-9 所示的计算机控制系统就是一种常见的离散控制系统(discrete control system)。离散控制系统的运动状态或特性一般用差分方程来描述,其分析研究方法也不同于连续系统。

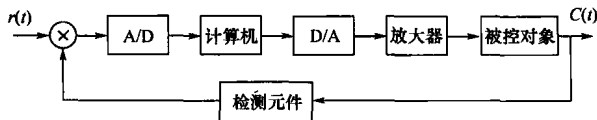


图 1-9 计算机控制系统的框图

WORDS AND PHRASES

开环控制	open-loop control
闭环控制	closed-loop control
反馈控制	feedback control
线性控制系统	linear control system
非线性控制系统	nonlinear control system
连续控制系统	continuous control system
离散控制系统	discrete control system

1.3 自动控制理论的发展概况

现代科学技术的迅速发展对自动控制的程度、速度、范围及其适应能力的要求越来越高,从而推动了自动控制理论和技术的迅速发展。特别是20世纪60年代以来,电子计算机技术的迅速发展奠定了自动控制理论和技术的物质基础,于是逐步形成了一门现代科学分支,即现代控制理论。纵观历史,控制理论的发展大体经历了3个阶段。

1. 经典控制理论(18世纪起)

1788年, J. Watt 研究蒸汽机的调速器时引出了离心调速的问题,这是一个自动调节系统的问题。1868年, J. C. Maxwell 首先在 *Proceeding of the Society of London* 第16卷上发表了“论调速器”一文。E. J. Routh 于1877年提出了有关线性系统稳定性的判据,使自动控制技术前进了一大步。1923年, Heavyside 提出了设计系统的算子法。1932年, H. Nyquist 研制出电子管放大器。1945年, 美国人 Bode 写了“网络分析和反馈放大器设计”一文,奠定了经典控制理论基础,在西方国家开始形成了自动控制学科。1948年, N. Wiener 发表了著名的《控制论》,形成了完整的经典控制理论。1950年, W. R. Evans 提出了根轨迹法,能简便地寻找特征方程的根,进一步充实了经典控制理论。此后,经典控制理论得到了更加深入和广泛的研究与应用。

经典控制(classic control)理论多半用来解决单输入/单输出的问题,所涉及的系统一般来说是线性定常系统,非线性系统中的相平面法也只含两个变量。如机床和轧钢机中常用的调速系统,发电机的电压自动调节系统以及冶炼炉的温度自动控制系统等,均被当作单输入/单输出的线性定常系统来处理。如果把某个干扰考虑在内,也只是对它们进行线性叠加而已。解决上述问题时,采用频率法、根轨迹法、奈氏稳定判据、期望对数频率特性综合等是比较方便的,这些方法均属于通常所说的经典控制理论范畴,所得结果在对精确度、准确度要求不是很高的情况下是完全可用的。经典控制理论是与生产过程的局部自动化相适应的,它具有明显的依靠手工进行分析和综合的特点,这个特点是和20世纪四五十年代生产发展的状况,以及电子计算机技术的发展水平尚处于初期阶段密切相关的。

2. 现代控制理论(20世纪60年代起)

空间技术的需要和电子计算机的应用,推动了现代控制理论和技术的产生与发展。20世纪50年代末至60年代初,空间技术的发展迫切要求对多输入/多输出、高精度、参数时变系统进行分析和设计,这是经典控制理论无法有效解决的问题,于是出现了新的自动控制理论,称为“现代控制理论”。1960年 Kalman 发表了“控制系统的一般理论”,1961年又与 Bush 发表了“线性滤波和预测问题的新结果”。西方国家公认 Kalman 奠定了现代控制理论的基础。他的工作是控制论创始人 Wiener 工作的发展,主要引进了数学计算方法中的“校正”概念。现代控制(modern control)理论的主要内容为状态空间法、系统辨识、最佳估计、最优控制和自适应控制。