

计算机控制系统的 原理与方法

刘松强 编著

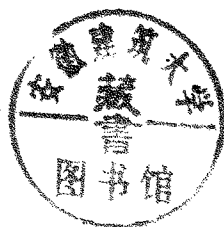


科学出版社

www.sciencep.com

计算机控制系统的 原理与方法

刘松强 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍有关计算机控制系统工程实践中的重要原理和方法,首先以分布式控制系统为例介绍现代控制系统的基本结构,然后分别阐述有关背板总线和 I/O 接口、采样数据转换器、系统的电磁兼容和接地、控制系统中的数据通信和网络,以及时间信息获取与传输等内容。最后讲解实时系统、控制应用软件以及高可靠性系统的知识。全书各章在概念和方法上既具有内在联系,又分别独立成章;实用性,可读性强。

本书可供在控制系统以及相关领域(如通信、仪器、测量、数据采集和数字信号处理等)从事设计、系统集成以及应用软件开发的工程师和技术人员参考,也可作为控制系统以及相关专业的研究生教材和教师参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统的原理与方法/刘松强编著. —北京:科学出版社, 2007
ISBN 978-7-03-018266-1

I. 计… II. ①刘… III. 计算机控制系统 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 148898 号

责任编辑:岳亚东 刘晓融 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 1 月第一次印刷 印张: 19 1/4

印数: 1—4 000 字数: 384 000

定 价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

确切地说,本书的书名应该是“计算机控制系统中的某些原理和方法”。现代控制系统所涉及的领域之广,远不是这本导论性的书所能完全覆盖的。作者只是根据自己多年来在控制系统的工程、研究和教学工作中的实际经验,选出若干对于从事控制系统设计、系统集成和应用软件开发工作较为重要的领域,作为本书的基本内容。

控制系统的各种功能以及衡量控制系统性能的各种基本指标,无不与接口有关。计算机模块之间通过背板总线接口,计算机 I/O 模块通过模拟和数字通道与被控设备接口,计算机与计算机之间通过网络接口,乃至噪声也是通过地线和电源线这种“接口”进入系统的,本书的内容即以接口为主线展开。本书的另一个特点是从硬件和软件两方面来阐述基本原理和方法,控制系统是与形形色色的被控设备紧密相关的,将硬件和软件的内容在同一本书中介绍,有助于理解二者在概念上和方法上的内在联系。本书以分布式控制系统为研究对象,在规模较大的分布式控制系统中,几乎全部包含嵌入式系统和机箱式系统,因而更具有代表性。

本书的读者对象是在控制系统及相关领域(如通信、仪器、测量、数据采集和数字信号处理等)从事设计、系统集成和应用软件开发工作的工程师,他们当中的许多人需要对工作中所获得的知识和经验加以梳理和充实,并在更高的层次上认识和理解系统。本书也可作为控制系统及相关专业研究生的教材。事实上,书中的许多内容是从中国科学院上海应用物理研究所的研究生讲义扩展而来的。

书中使用大量图例来配合文字描述,绝大多数图例出自作者之手,一些直接引用的图例,均注明了出处。本书的每个部分都独立成章,但又相互联系,这使得作者在书的结构和组织上颇费心机,某些可能是重要的内容,因为与全书总的目标不够协调而被略去。作为一本阐述基本原理的书,作者的工作除了对各个领域的成熟内容加以提炼和组织之外,还对一些方法和原理进行评论和比较。凡此种种努力,希望能够达到写作本书的初衷,也欢迎读者不吝赐教。

最后,感谢侯业勤研究员为本书出版所作的努力,这本书是与业勤兄逾半个世纪友谊的见证。在写作过程中,作者常以愉快的心情回忆在中国科技大学长期工作的岁月,那里的自由和脚踏实地的研究风气,无疑对本书的构思有很大帮助。

作 者

2006年7月22日于上海

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 控制系统的基本概念	1
1.1.1 控制系统的发展	1
1.1.2 控制系统的体系结构	3
1.1.3 开环控制和闭环控制	5
1.2 分布式控制系统	8
1.2.1 分布式控制系统的基本结构	9
1.2.2 I/O 通道	10
1.3 分布式控制系统的实例	10
1.3.1 EPICS	10
1.3.2 SCADA	16
1.4 小 结	17
习 题	17
参考文献	18
第2章 总线与 I/O 接口	19
2.1 概 要	19
2.2 总线的基本知识	19
2.2.1 背板总线	19
2.2.2 数据传输模式	20
2.2.3 数据传输的控制机制	21
2.2.4 总线仲裁机制	23
2.2.5 总线的机械结构	24
2.3 VME 总线	25
2.3.1 VMEbus 基本特性	25
2.3.2 VMEbus 数据传输的时间关系	26
2.3.3 VMEbus 中的菊花链	26
2.3.4 地址修正码	28
2.3.5 VME 总线的发展	28
2.3.6 VME 与 CPCI 总线比较	29
2.4 I/O 系统与 I/O 接口	31
2.4.1 I/O 系统	32

2.4.2 I/O 接口模块	35
2.5 并行数字 I/O 接口	38
2.5.1 简单数字 I/O 接口	38
2.5.2 高速突发方式数字 I/O	40
2.6 小 结	41
习 题	42
参考文献	42
第 3 章 采样数据转换器	43
3.1 概 要	43
3.2 基本知识回顾	43
3.2.1 采样原理	43
3.2.2 欠采样	44
3.2.3 量化误差和信噪比	46
3.2.4 dither 技术	47
3.2.5 过采样	49
3.3 模数/数模转换器原理	50
3.3.1 逐次比较型模数转换	50
3.3.2 闪速型模数转换	50
3.3.3 流水线型模数转换器	51
3.3.4 积分型模数转换	53
3.3.5 Σ - Δ 型模数转换器	53
3.3.6 数模转换器	58
3.4 模数及数模转换中的精度问题	60
3.4.1 ADC 的性能指标	60
3.4.2 DAC 的性能指标	65
3.4.3 ADC 和 DAC 的精度	68
3.5 小 结	72
习 题	72
参考文献	72
第 4 章 电磁兼容与接地	74
4.1 概 要	74
4.2 通过空间电磁波耦合的干扰	74
4.2.1 空间电磁干扰的来源	74
4.2.2 空间电磁干扰的特点	75

4.2.3 屏蔽技术.....	75
4.3 通过导线传输耦合的干扰.....	77
4.3.1 差模干扰.....	77
4.3.2 共模干扰.....	78
4.3.3 克服共模干扰的方法.....	80
4.3.4 克服常模干扰的方法.....	81
4.3.5 电源引入的干扰.....	81
4.4 瞬态干扰.....	83
4.4.1 浪 涌.....	83
4.4.2 ESD.....	84
4.5 接地基本知识.....	85
4.5.1 地的基本概念.....	85
4.5.2 电力系统的接地.....	86
4.5.3 设备地和电路地.....	89
4.6 接地方式.....	89
4.6.1 电路中的单点接地方式.....	90
4.6.2 设备中的单点接地方式.....	91
4.6.3 设备之间的接地方式.....	91
4.7 地回路.....	93
4.7.1 地回路和地线噪声.....	93
4.7.2 克服地回路干扰的方法.....	94
4.7.3 设备之间信号电缆的屏蔽层接地问题.....	95
4.8 信号隔离.....	97
4.8.1 数字信号隔离技术.....	98
4.8.2 模拟信号隔离技术.....	99
4.9 小 结.....	102
习 题.....	103
参考文献.....	103
 第5章 网络与数据通信.....	 104
5.1 概 要.....	104
5.2 基本知识回顾.....	104
5.2.1 网络的基本知识.....	104
5.2.2 数据通信基本知识.....	110
5.3 经典的数据通信协议.....	118
5.3.1 RS-232.....	118

5.3.2 RS-485	120
5.4 现场总线	125
5.4.1 现场总线的基本知识	125
5.4.2 CAN	128
5.4.3 DeviceNet	132
5.5 以太网	139
5.5.1 共享方式以太网	140
5.5.2 交换式以太网	144
5.5.3 快速以太网和千兆以太网	146
5.5.4 以太网和 TCP/IP 协议	148
5.5.5 EPICS 中的分布式通信	152
5.5.6 工业以太网	155
5.6 小 结	157
习 题	157
参考文献	157
 第 6 章 时间信息的获取与传输	159
6.1 概 要	159
6.2 定时信号	159
6.2.1 定时技术	159
6.2.2 定时的误差来源	162
6.3 时间信息的测量	163
6.3.1 时间的数字化测量	163
6.3.2 时间/数字转换器	163
6.4 时间信息在系统中的传播	170
6.4.1 时间系统的分类	170
6.4.2 定时系统	171
6.4.3 定时系统的误差	173
6.4.4 时间同步系统	175
6.5 小 结	181
习 题	182
参考文献	182
 第 7 章 实时多任务系统	183
7.1 概 要	183
7.2 实时系统和实时操作系统	183

7.2.1 实时系统.....	183
7.2.2 实时操作系统.....	184
7.3 运行多任务的简单系统.....	186
7.3.1 前台/后台系统.....	186
7.3.2 循环调度系统.....	187
7.4 实时多任务系统.....	189
7.4.1 任务及任务切换.....	189
7.4.2 实时任务调度.....	191
7.4.3 中断处理.....	195
7.4.4 任务调度策略.....	197
7.5 多任务之间的相互关系.....	201
7.5.1 任务间通信机制.....	201
7.5.2 任务的同步和互斥.....	203
7.5.3 优先级反转.....	207
7.6 实时通信.....	209
7.6.1 实时通信对时间的要求.....	210
7.6.2 具有实时性的介质访问控制.....	210
7.6.3 流量控制.....	213
7.7 小 结.....	215
习 题.....	215
参考文献.....	215
第8章 控制软件设计.....	217
8.1 概 要.....	217
8.2 软件设计的基本知识.....	217
8.2.1 软件设计的策略和目标.....	217
8.2.2 软件设计的过程和方法.....	219
8.2.3 结构化设计方法.....	219
8.2.4 面向对象的设计方法和 UML.....	221
8.2.5 顺序逻辑系统的设计方法.....	226
8.2.6 模块设计的若干概念.....	231
8.3 任 务.....	234
8.3.1 任务的一般描述.....	234
8.3.2 多任务的实现模型.....	235
8.3.3 任务的结构设计.....	237
8.3.4 任务的聚合.....	239

8.3.5 任务间的相互关系	239
8.4 设备驱动器	241
8.4.1 设备驱动器基本概念	241
8.4.2 设备驱动器开发策略	243
8.4.3 设备驱动器的结构设计	246
8.4.4 设备驱动器的初始化	251
8.5 小 结	253
习 题	253
参考文献	254
第9章 高可靠性系统	255
9.1 概 要	255
9.2 可靠性的基本知识	255
9.2.1 可靠性系统中的基本概念	256
9.2.2 高可靠性系统的分类	257
9.2.3 故障的分类和定义	259
9.2.4 实现可靠性系统的基本方法	260
9.3 硬件的可靠性	261
9.3.1 硬件可靠性的评估	261
9.3.2 保证硬件可靠性的基本途径	264
9.3.3 机箱系统的热管理	265
9.4 容障系统	267
9.4.1 容障系统中的基本概念	267
9.4.2 表决方式容障系统	269
9.4.3 备份式容障系统	272
9.4.4 高可用性系统	275
9.4.5 看门狗技术	277
9.4.6 软件分区	281
9.5 系统的核查和验证	285
9.5.1 核 查	285
9.5.2 验证与故障注入	286
9.6 小 结	290
习 题	291
参考文献	291
索 引	293

第1章 绪 论

1.1 控制系统的基本概念

1.1.1 控制系统的发展

1. 控制系统的基本功能

控制系统是用来管理、控制和监测其他设备或装置运行的系统。人类的生产活动和科学实验活动，无不表现为过程。例如，炼油和化肥等工业生产表现为一种连续过程，而机械加工、产品包装和金属件的热处理等分立物品的流水线则是离散的、批量的生产过程。宇宙飞船的发射、运行和回收，粒子加速器的运行等，也都表现为一个过程。控制系统的最基本功能之一就是过程控制。狭义地说，过程控制是专指工业生产过程的控制，包括对离散系统的过程控制（逻辑控制）和对连续过程的控制。

现代控制系统还具有状态监控和数据采集、设定值（setpoint）控制以及闭环控制等功能。控制系统为了发出控制命令、设置控制量或实现闭环控制，必须从被控对象取得相应的状态和数据，也就是说，数据采集和测量是控制的基础。专门用来采集数据，以供测量和分析使用的系统，称为数据采集系统。广义地说，数据采集系统是控制系统的一部分。

2. 早期的控制系统

在早期的控制系统中，逻辑控制采用电磁继电器来实现，系统庞大、能耗高而功能简单，后来发展到电子逻辑电路（开关电路），系统变小，但是功能依然比较简单。连续过程控制则主要采用模拟电路组成的组合仪表来实现。图 1.1 所示为一个早期控制系统的控制室，里面充满了开关、指示灯和组合仪表，而输入和输出的信息量很小。

3. 计算机控制系统

随着微处理器的出现和微电子学、计算机及网络技术的发展，现代控制系统发展成为完全数字化的、以计算机为核心的系统，通称为计算机控制系统，是本书所要介绍的内容。

在现代计算机控制系统中，不同的计算机用来实现不同的功能。如图 1.2 所示为一个现代大型计算机控制系统的控制室，控制室内只有用作人机界面的操作员接口计算机（工作站）。其他用作输入/输出控制的计算机和各种设备控制器都位于设备现场，它们通过局域网与操作员接口计算机相连接，构成分布式控制系统。

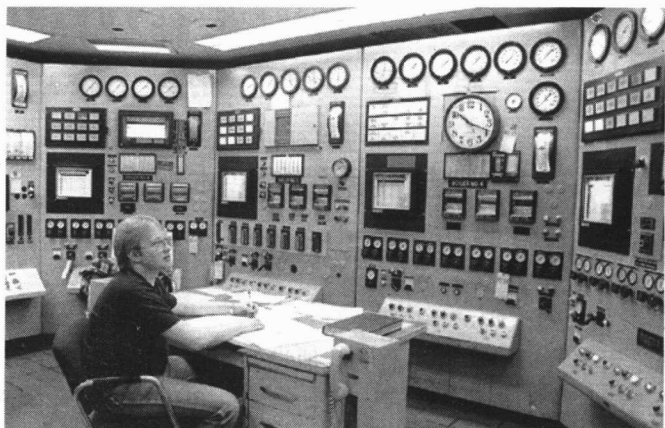


图 1.1 早期工业控制系统的控制室^[1]

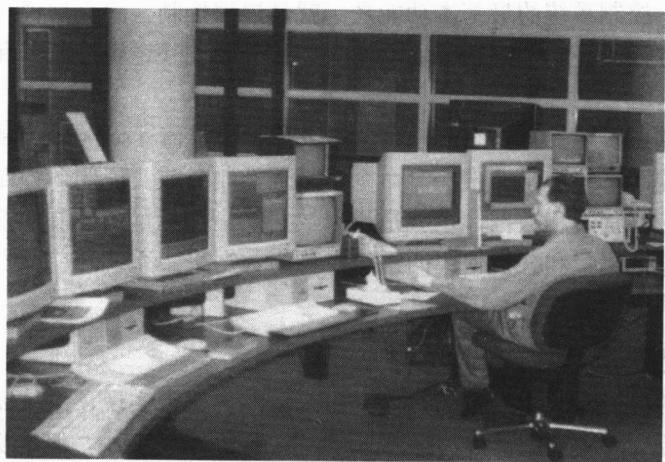


图 1.2 现代控制系统的控制室

4. 现代计算机控制系统的基本组成

计算机控制系统的规模无论大小，都包括如图 1.3 所示的基本组成部分：

- 输入/输出模块，提供输入/输出通道（I/O Channels）。输入通道通过传感器与被控设备接口取得设备的状态信息，如温度、压力、流量、磁场强度以及各种开/关状态。输出通道通过动作器与被控设备接口向设备传送控制指令或设定各种控制量。
- 以微处理器（Microprocessor, μP ）为核心的处理机。
- 人机界面（Human-Machine Interface, HMI）。控制系统的整个运行过程都需要人的参与，操作者通过人机界面对被控对象进行操作与调整，了解被控对象的状态。

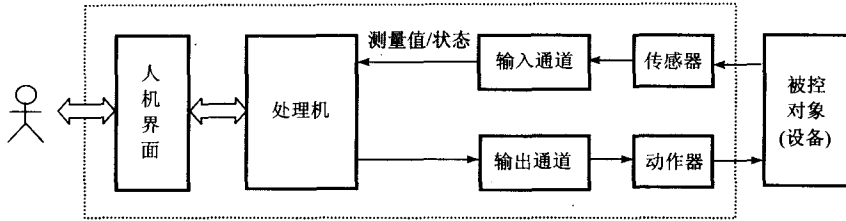


图 1.3 现代控制系统的组成

1.1.2 控制系统的体系结构

现代控制系统可以进行各种规模的应用。根据规模的不同，控制系统大致可以归纳为以下三种结构：

- 嵌入式系统。
- 机箱式系统。
- 分布式系统。

1. 嵌入式系统

所谓嵌入式系统（Embedded System），是一种“嵌”在被控设备中的控制系统，一般而言，嵌入式系统的处理能力与 I/O 数据吞吐量都较小。图 1.4 所示为典型的嵌入式系统所包括的资源，其中最基本的组成部分包括 CPU（微处理器或微控制器），存储器（ROM 和 RAM）以及 I/O 通道等等。

嵌入式系统的系统结构有以下特点：

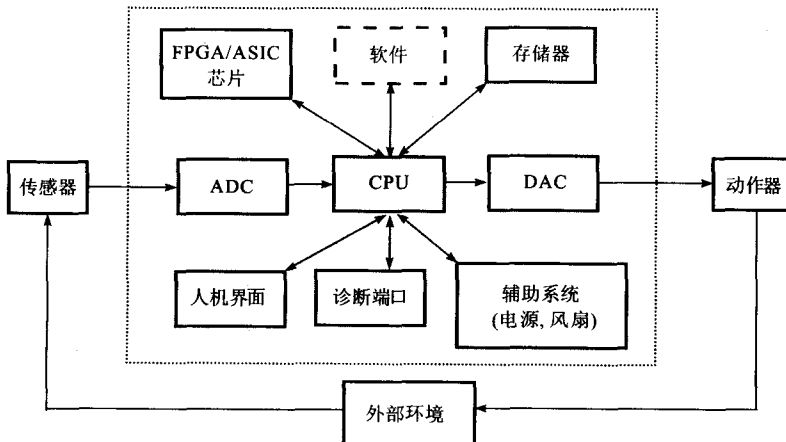


图 1.4 嵌入式控制系统

- 从硬件结构来看, 嵌入式系统主体通常包括在一个电路模块中, 甚至包括在一个芯片中 (System-on-Chip, SoC), 无需背板总线的支持。
- 从软件结构来看, 低端的嵌入式系统通常采用“超循环”方法处理多任务 (参见 7.3 节), 较复杂的系统则在实时操作系统 (内核) 管理下运行。
- 嵌入式系统的人机界面, 多数是比较简单的小型显示屏/指示灯和按键/旋钮。

嵌入式系统的硬件结构是根据具体应用而设计的, 不便于改动, 适用于批量生产的产品。嵌入式系统的应用无所不包, 移动电话、个人数字助理 (PDA)、打印机、复印机、洗衣机、微波炉、电视和 DVD 等各种智能化电器, 都包含有嵌入式系统。广义地说, 某些较复杂的控制系统, 如机器人控制系统以及各种机电设备的智能化控制器 (设备控制器) 等, 也都可以归类为嵌入式系统。

2. 机箱式系统

在许多控制应用场合, 控制系统是一台专门的控制计算机, 系统中包括若干模块 (1 个或多个处理机模块, 图形处理模块以及 I/O 模块等), 它们通过机箱背板总线 (例如 VME 和 CompactPCI) 构成紧耦合的系统。这种系统在实时操作系统管理下运行, 实时性和可靠性都很高。

机箱式系统可以选择各种现有商业化模块 (Commercial-off-the-shelf, COTS) 灵活地配置满足各种专门需要的应用系统, 称为专用系统 (Dedicated System), 被用于工业控制、雷达/声纳、图像处理, 飞行模拟器、航空/航天、电信和医疗设备等领域。而在分布式控制系统中, 机箱式系统通常被用作输入/输出控制机 (I/O Controller)。

低端的机箱式系统, 往往采用台式 PC 机或者 PC 工控机, 运行 Windows 桌面操作系统, 这类系统价格低廉, 有很好的窗口图形界面和丰富的商业软件支持, 因而也得到广泛应用, 但这种系统的实时性和可靠性相对较低。

机箱式系统通常采用背板总线, 实行并行的、所有模块共享数据通道的数据传输方式。当需要传输大量数据时, 传统的处理方法是绕开背板总线, 采用其他通过面板接口的数据传输协议, 在模块之间直接传输数据。

提示 背板总线的数据传输速率虽然不断提高, 但是终将达到极限。为了满足更高速度处理数据的要求, 近年来出现了采用高速串行总线和交换式结构的机箱式系统, 机箱中设有专门供交换控制器使用的插槽, 通过交换控制器来实现各个模块之间的点到点的串行数据传输, 这其实就是把交换式网络的概念浓缩到机箱内部。这种机箱式系统充分利用了网络技术的已有成果 (例如采用 10 千兆以太网协议), 极大地提高了模块之间的数据传输速率。

3. 分布式系统

分布式控制系统（Distributed Control System, DCS）是基于网络的中、大规模控制系统,它所处理的 I/O 通道从 1000~100 000 量级,控制半径在 10~1000 米量级,广泛用于石油、化工、冶金、运输和制造业等工业领域,飞机、舰船和航天领域以及各种大型科学实验装置的控制。

在分布式控制系统中,系统分为管理层、前端控制层以及设备控制层三个层次,不同层次使用不同类型的计算机。各个层次的计算机通过网络通信交换数据和控制信息。前述的嵌入式系统和机箱式系统如果接入网络,就可以成为分布式控制系统的子系统。关于分布式控制系统,在第 1.2 节有更详细的介绍。

表 1.1 列出了上述不同规模的控制系统的特点。

表 1.1 不同规模的控制系统的特点

	嵌入式系统	机箱系统	分布式系统
控制范围	单个设备	实验室范围	10~1000 米控制半径
I/O 通道数	10~100 量级	10~1000 量级	100~100 000 量级
硬件系统	系统在 1 块电路模块上	紧耦合/背板总线系统	松耦合/网络系统
系统软件	低端应用: 无操作系统 高端应用: 实时操作系统	实时操作系统	OPI: 桌面操作系统 IOC: 实时操作系统

1.1.3 开环控制和闭环控制

从工作方式来看,控制系统可以分为开环系统和闭环系统两类。

1. 开环控制

图 1.5 所示为开环控制系统（open-loop system）的框图。开环控制是一种简单直接的控制方法,即将命令或设定值输入到控制器,直接在被控对象产生所希望的输出响应。

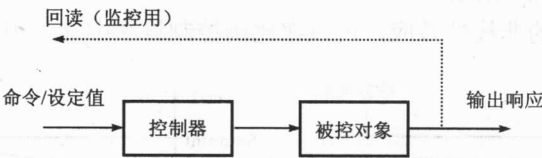


图 1.5 开环系统

开环控制系统的功能之一是逻辑控制,使系统中各个设备或元件按照设计者预先设定的逻辑运行,大体上有以下几种情况:

- 顺序控制,使各个被控对象按照预定的顺序运行。例如,系统中各种设备按顺序的启动或关机过程等等。
- 条件控制,使各个被控对象在设定的条件（联锁关系）下运行。例如,系统

中各种设备的联锁运行。当联锁条件不满足时，系统就停止运行。

- 定时控制，使各个被控对象在设定的定时关系下运行。例如，在某个设备或者元件动作之后，经过一定时间，再使下一个设备动作。

开环控制系统的第二个功能是**设定值控制 (setpoint)**，对指定的被控对象（通过数模转换）输入设定值，得到所需要的输出响应。这个输出响应可以通过模数转换被回读（readback），回读仅仅是用于监控，即用来了解系统是否正确工作。

2. 闭环控制

在闭环控制系统（closed-loop system）中，负反馈环路将被控对象（plant）的输出响应作为偏差信号，送到控制器的输入端与设定值相比较（相减），将比较结果送到控制器作进一步的处理，控制器通过某种算法来调节系统的输出响应，如图 1.6 所示。闭环控制系统又称为**反馈控制系统**或**自动控制系统**。

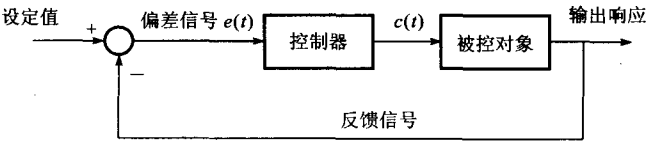


图 1.6 闭环系统

最简单的反馈控制就是将误差信号与一个比例系数相乘后直接用作控制信号，这就是所谓比例（Proportional）控制：

$$c(t) = Pe(t)$$

其中， P 为比例项的系数。

但是这种线性控制方法的静态特性不好，当输出响应接近所希望的值（setpoint）时，误差信号变得越来越小，因而输出驱动控制信号也越来越小，最后不足以克服外部的扰动，使得系统的响应在到达所希望的值位置之前就停了下来，形成一个稳态误差，如图 1.7 (a) 所示。

为了抵消静态的非线性效应，可以在比例控制算法中加入积分非线性项，形成

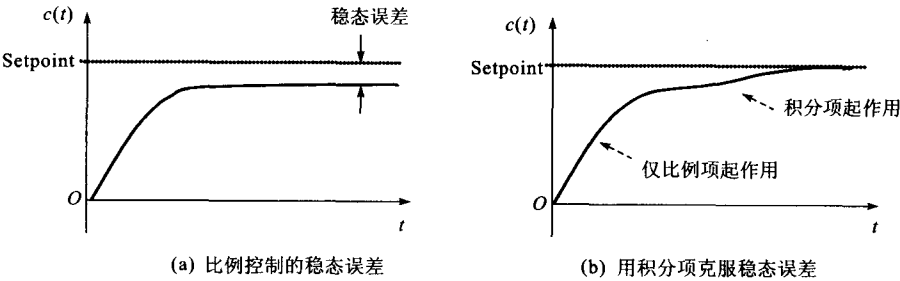


图 1.7 比例-积分控制

PI 控制:

$$c(t) = Pe(t) + I \int e(t) dt$$

其中, P 和 I 分别为比例项和积分项的系数。积分是一种时间累积效应, 只要有偏差存在, 积分项就不断起作用, 直到达到所希望的设定值。图 1.7 (b) 中, 输出响应一开始只有快速的比例控制起作用, 它无法达到设定值; 随着时间推移, 积分项开始起作用, 逐渐消除了稳态误差, 达到设定值。

单纯比例控制的动态特性也不好。如果设定值突然有一个很大的变化, 控制器就要产生很大的驱动信号给被控对象, 而如果被控对象的惯性很大, 则当响应达到所希望的值时, 就会产生过冲 (overshooting), 超出所希望的值, 甚至引起振荡 (hunting), 如图 1.8 (a) 所示。同样, 外界突然扰动也会引起输出的波动, 需要长时间才能恢复, 如图 1.8 (b) 所示。

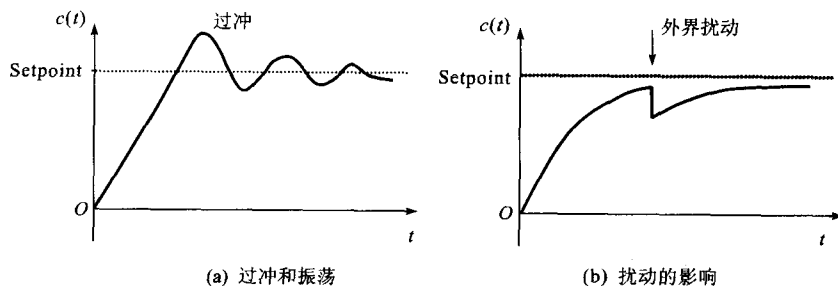


图 1.8 比例控制的动态特性

为了抵消动态的非线性效应, 可以在比例控制算法中加入微分非线性项, 形成 PD 控制:

$$c(t) = Pe(t) + D \frac{de(t)}{dt}$$

其中, P 和 D 分别为比例项和微分项的系数。微分项反映输入偏差变化的速率, 当突然发生偏差变化速率大的扰动时, 当偏差刚刚出现, 还很小时, 就可以根据偏差变化的速率, 乘以系数 D , 提前给出大的调节量, 抵消掉偏差, 如图 1.9 所示。

将比例、积分和微分作用相结合, 就形成著名的比例-积分-微分控制算法 (Proportional-Integral-Derivative control, PID), 即

$$c(t) = Pe(t) + I \int e(t) dt + D \frac{de(t)}{dt} \quad (1.1)$$

其中, P 、 I 和 D 分别为比例项、积分项和微分项的系数。PID 算法研究就是研究对于特定的应用, 如何选择 P 、 I 和 D 的系数。