

普通高等院校计算机类专业系列教材

*Computer Control Techniques*  
**计算机控制技术**

主编 薛弘晔 副主编 刘原 马永

西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>



普通高等院校计算机类专业系列教材

# 计算机控制技术

Computer Control Techniques

主编 薛弘晔

副主编 刘 原 马 永

参 编 龚尚福 蒋 璞

西安电子科技大学出版社

2003

## 内 容 简 介

本书以计算机控制系统为主,深入浅出地论述了计算机控制系统的理论和应用。全书共分9章。作为学习离散系统的前提条件,本书首先概括地介绍了连续控制系统的基本理论知识以及计算机控制实现的基本程序;其次以经典控制算法PID为基础,介绍了由连续控制器到离散控制器的设计方法,较深入地分析了PID算法性能和参数整定;随后重点讲述了控制器的直接设计方法,给出了最少拍无波纹控制器的设计方法;最后还对计算机控制系统的设计与实现和计算机控制网络给予了较详细的论述。

书中列举了大量例题,给学生学习提供了方便。本书知识点突出,详略得当,语言简洁,便于非控制类专业本科(如计算机类)学生作为教材使用,也可供大专学生使用。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费索取。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机控制技术=Computer Control Techniques/薛弘晔主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2003.8

(普通高等院校计算机类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1283-0

I. 计… II. 薛… III. 计算机控制—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 058672 号

策 划 马武装

责任编辑 龙 晖

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8242885 8201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 高陵县印刷厂

版 次 2003年8月第1版 2003年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 16.25

字 数 380千字

印 数 1~4 000册

定 价 18.00元

ISBN 7-5606-1283-0/TP·0677(课)

**XDUP 1554001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 普通高等院校计算机类专业系列教材

## 编审专家委员会名单

**主任委员:** 冯博琴 (陕西省计算机教育学会理事长,  
西安交通大学计算机教学实验中心主任, 教授)

**副主任委员:** 陈建铎 (陕西省计算机教育学会副理事长,  
西安石油学院计算机系教授)

**李伟华** (陕西省计算机教育学会副理事长,  
西北工业大学计算机系副主任, 教授)

**武 波** (陕西省计算机教育学会副理事长,  
西安电子科技大学计算机学院副院长, 教授)

**李荣才** (西安电子科技大学出版社总编辑, 教授)

**委 员:** (按姓氏笔划排列)

巨永锋 (长安大学信息工程学院副院长, 教授)

冯德民 (陕西师范大学计算机科学学院院长, 教授)

石美红 (西安工程科技学院信息控制系教授)

朱明放 (陕西理工学院计算机系副主任, 副教授)

何东健 (西北农林科技大学信息工程学院院长, 教授)

陈 桦 (陕西科技大学计算机与信息科学系主任, 教授)

李长河 (西安理工大学计算机科学与工程系主任, 副教授)

李晋惠 (西安工业学院计算机系副主任, 副教授)

李银兴 (宝鸡文理学院计算机系副主任, 副教授)

张俊兰 (延安大学计算机系教授)

孟东升 (西安石油学院计算机系副主任, 副教授)

赵文静 (西安建筑科技大学信息与控制工程学院副院长, 教授)

耿国华 (西北大学软件开发中心主任, 教授)

龚尚福 (西安科技学院计算机系主任, 教授)

**项目策划** 陈宇光 马乐惠

**策 划** 云立实 马武装 臧延新 马晓娟

**电子教案** 马武装

# 前 言

本教材是为计算机专业的学生编写的,同时也适合电子工程、通信工程、检测与仪器仪表、机电控制、机械自动化及机电一体化等专业的本科学生使用。

计算机控制技术是自动控制理论和计算机技术相结合而发展起来的一门学科。随着计算机在工业生产中的广泛应用,计算机控制系统的分析和设计方法也正在日臻完善。对上述所列专业的大学生来说,系统地掌握本学科的知识技能显得尤为重要。为此,我们编写了这本教材。

本教材的主要目标是使学生掌握计算机在控制系统、仪器仪表等各领域的应用理论及技术,培养学生分析问题和解决问题的能力。由于涉及内容较广泛,技术性、实践性很强,因此本书力求简洁、明了,达到使学生较系统地掌握计算机控制理论及其相关技术,并能理论联系实际地学习设计和维护计算机控制系统的目的。

本书首先由浅入深地讲述了经典控制系统的理论,重点介绍了自动控制系统的构成、连续控制系统的稳定性及其控制系统的分析与设计方法;其次,对离散控制系统的基本理论、基本方法、稳定性理论及离散控制器的模拟化和数字化设计方法做了较详细的阐述;第三,对具有应用优势的可编程序控制器,以实例形式给予了较大篇幅的介绍;第四,给出了计算机控制系统设计和实现的一般内容和方法;最后,对当前的计算机控制技术热点——工业控制网络做了介绍,目的在于让读者了解新型的控制技术和实现方法。

全书共分9章。第1章概括地介绍了控制系统的基本原理,以及计算机控制系统的基本构成;第2章主要介绍了控制系统数学模型建立和传递函数描述;第3章介绍了控制系统的时域分析、频率响应分析方法和系统校正;第4章介绍了采样定理及数据采集控制系统的构成与设计;第5章介绍了顺序与数字程序控制的内容;第6章是数字控制器的模拟化设计,主要以经典控制器的PID数字化设计为核心,介绍了数字控制器的模拟化设计方法;第7章是离散控制系统设计,主要介绍了数字控制器的数字化设计方法;第8章是计算机控制系统设计与实现;第9章是工业控制网络,主要介绍了集散系统和近年来新兴起的现场总线技术。第3、4、6、7章是本书的重点内容。

本书第7、9章由薛弘晔编写,第1、2、3章由刘原编写,第4、6章由马永编写,第5章由蒋璞编写,第8章由龚尚福编写,全书由薛弘晔统稿。在编写过程中,龚尚福教授提出了不少改进意见,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2003年5月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 自动控制系统的基本概念 .....     | 1  |
| 1.1 自动控制系统的基本概念 .....       | 2  |
| 1.1.1 自控系统的工作原理 .....       | 2  |
| 1.1.2 自动控制的基本方式 .....       | 5  |
| 1.1.3 对控制系统的基本要求 .....      | 6  |
| 1.2 计算机控制系统的一般构成 .....      | 7  |
| 1.2.1 一般概念 .....            | 7  |
| 1.2.2 计算机控制系统的组成 .....      | 8  |
| 1.2.3 微机控制系统的分类 .....       | 10 |
| 1.3 计算机控制系统的发展 .....        | 15 |
| 小结 .....                    | 16 |
| 习题 .....                    | 16 |
| 第 2 章 自动控制系统分析基础 .....      | 18 |
| 2.1 控制系统的数学模型 .....         | 18 |
| 2.1.1 系统微分方程的建立 .....       | 18 |
| 2.1.2 非线性微分方程的线性化 .....     | 20 |
| 2.1.3 微分方程的解 .....          | 21 |
| 2.2 传递函数 .....              | 24 |
| 2.2.1 传递函数的概念及定义 .....      | 25 |
| 2.2.2 传递函数的基本性质 .....       | 26 |
| 2.2.3 结构图等效变换及系统的传递函数 ..... | 28 |
| 小结 .....                    | 37 |
| 习题 .....                    | 37 |
| 第 3 章 连续控制系统的分析与设计 .....    | 39 |
| 3.1 系统响应指标与输入信号 .....       | 39 |
| 3.1.1 系统的性能指标 .....         | 39 |
| 3.1.2 典型输入信号 .....          | 40 |
| 3.2 时域分析法 .....             | 41 |
| 3.2.1 系统的阶跃响应分析 .....       | 42 |
| 3.2.2 控制系统的稳定性 .....        | 49 |
| 3.2.3 反馈控制系统的稳态误差 .....     | 53 |
| 3.3 频率响应分析法 .....           | 59 |
| 3.3.1 频率响应的基本概念 .....       | 59 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 3.3.2 典型环节的频率特性 .....        | 61         |
| 3.3.3 开环系统的频率特性 .....        | 66         |
| 3.3.4 频率法分析系统的稳定性和性能指标 ..... | 69         |
| 3.4 用频率法校正系统 .....           | 72         |
| 3.4.1 校正与综合的基本概念 .....       | 72         |
| 3.4.2 综合设计的主要方法 .....        | 75         |
| 小结 .....                     | 77         |
| 习题 .....                     | 77         |
| <b>第4章 数据采集系统设计 .....</b>    | <b>81</b>  |
| 4.1 概述 .....                 | 81         |
| 4.1.1 数据采集系统的构成 .....        | 81         |
| 4.1.2 过程通道的作用与分类 .....       | 81         |
| 4.2 模拟量输入通道 .....            | 82         |
| 4.2.1 信号的采样和量化 .....         | 82         |
| 4.2.2 模拟量输入通道的组成 .....       | 84         |
| 4.2.3 A/D 转换器及其接口技术 .....    | 86         |
| 4.3 模拟量输出通道 .....            | 93         |
| 4.3.1 模拟量输出通道的结构形式 .....     | 93         |
| 4.3.2 D/A 转换器及其接口技术 .....    | 94         |
| 4.4 数字量输入输出通道 .....          | 99         |
| 4.4.1 数字量输入通道 .....          | 99         |
| 4.4.2 数字量输出通道 .....          | 100        |
| 4.5 数据处理与滤波 .....            | 101        |
| 4.5.1 线性化处理 .....            | 101        |
| 4.5.2 标度变换 .....             | 102        |
| 4.5.3 数字滤波 .....             | 103        |
| 小结 .....                     | 106        |
| 习题 .....                     | 107        |
| <b>第5章 顺序与数字程序控制 .....</b>   | <b>108</b> |
| 5.1 顺序控制与可编程控制器 .....        | 108        |
| 5.1.1 顺序控制器概述 .....          | 108        |
| 5.1.2 继电器控制逻辑与梯形图 .....      | 108        |
| 5.1.3 PLC 及其简单应用 .....       | 111        |
| 5.2 开环数字程序控制 .....           | 114        |
| 5.2.1 开环数字控制原理 .....         | 114        |
| 5.2.2 平面直线插补算法 .....         | 116        |
| 5.2.3 四象限直线插补算法 .....        | 120        |
| 5.3 平面圆弧插补算法 .....           | 120        |
| 5.3.1 第一象限圆弧插补算法与实现 .....    | 120        |
| 5.3.2 四象限圆弧插补计算公式 .....      | 124        |
| 小结 .....                     | 126        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 习题 .....                       | 126        |
| <b>第 6 章 数字控制器的模拟化设计 .....</b> | <b>128</b> |
| 6.1 概述 .....                   | 128        |
| 6.1.1 数字控制器的设计方法 .....         | 128        |
| 6.1.2 差分变换法 .....              | 128        |
| 6.2 数字 PID 控制器的设计 .....        | 130        |
| 6.2.1 模拟 PID 控制器 .....         | 130        |
| 6.2.2 数字 PID 控制器 .....         | 131        |
| 6.3 数字 PID 控制算法的改进 .....       | 133        |
| 6.3.1 抑制积分饱和的 PID 算法 .....     | 133        |
| 6.3.2 不完全微分的 PID 算法 .....      | 134        |
| 6.3.3 微分先行 PID 算法 .....        | 136        |
| 6.3.4 纯滞后的补偿算法 .....           | 137        |
| 6.3.5 带死区的 PID 控制 .....        | 138        |
| 6.3.6 时间最优 PID 控制 .....        | 138        |
| 6.4 PID 控制器的参数整定 .....         | 139        |
| 6.4.1 采样周期 $T$ 的选择原则 .....     | 139        |
| 6.4.2 用扩充临界比例度法选择 PID 参数 ..... | 140        |
| 6.4.3 用扩充响应曲线法选择 PID 参数 .....  | 140        |
| 6.4.4 PID 归一参数整定法 .....        | 141        |
| 6.4.5 凑试法确定 PID 参数 .....       | 142        |
| 小结 .....                       | 142        |
| 习题 .....                       | 142        |
| <b>第 7 章 离散控制系统设计 .....</b>    | <b>144</b> |
| 7.1 离散系统分析基础 .....             | 144        |
| 7.1.1 $Z$ 变换及性质 .....          | 144        |
| 7.1.2 $Z$ 反变换 .....            | 149        |
| 7.1.3 用 $Z$ 变换解差分方程 .....      | 153        |
| 7.1.4 脉冲传递函数及方框图分析 .....       | 155        |
| 7.2 离散系统性能分析 .....             | 160        |
| 7.2.1 $s$ 域到 $z$ 域的变换 .....    | 160        |
| 7.2.2 离散系统稳定性及稳定条件 .....       | 161        |
| 7.2.3 参数对稳定性影响 .....           | 162        |
| 7.2.4 采样系统的动态特性分析 .....        | 163        |
| 7.3 数字控制器直接设计 .....            | 165        |
| 7.3.1 直接数字控制器的脉冲传递函数 .....     | 165        |
| 7.3.2 最少拍有波纹控制器设计 .....        | 166        |
| 7.3.3 最少拍无波纹控制器设计 .....        | 173        |
| 7.4 大林(Dahlin)算法 .....         | 174        |
| 7.4.1 一阶被控对象的大林算法 .....        | 175        |
| 7.4.2 二阶被控对象的大林算法 .....        | 175        |

|                                                         |            |
|---------------------------------------------------------|------------|
| 7.4.3 振铃现象及其抑制 .....                                    | 176        |
| 7.5 数字控制器 $D(z)$ 算法实现 .....                             | 178        |
| 7.5.1 直接程序设计 .....                                      | 178        |
| 7.5.2 串行程序设计 .....                                      | 180        |
| 7.5.3 并行程序设计 .....                                      | 182        |
| 小结 .....                                                | 184        |
| 习题 .....                                                | 184        |
| <b>第8章 计算机控制系统设计与实现 .....</b>                           | <b>187</b> |
| 8.1 概述 .....                                            | 187        |
| 8.2 系统设计的原则与步骤 .....                                    | 188        |
| 8.2.1 计算机应用系统的一般构成 .....                                | 188        |
| 8.2.2 应用系统的设计原则和要求 .....                                | 190        |
| 8.2.3 系统设计的基本内容和步骤 .....                                | 192        |
| 8.3 系统的工程设计与实现 .....                                    | 198        |
| 8.3.1 系统总体方案设计 .....                                    | 198        |
| 8.3.2 硬件的工程设计与实现 .....                                  | 200        |
| 8.3.3 软件的工程设计与实现 .....                                  | 202        |
| 8.3.4 系统的调试与运行 .....                                    | 204        |
| 8.4 计算机控制系统设计实例 .....                                   | 206        |
| 8.4.1 城市交通管理控制系统分析与设计 .....                             | 206        |
| 8.4.2 啤酒发酵过程计算机控制系统 .....                               | 210        |
| 小结 .....                                                | 215        |
| 习题 .....                                                | 215        |
| <b>第9章 工业控制网络 .....</b>                                 | <b>216</b> |
| 9.1 集散控制系统 .....                                        | 216        |
| 9.1.1 概述 .....                                          | 216        |
| 9.1.2 集散系统的基本结构 .....                                   | 218        |
| 9.1.3 集散系统的特点 .....                                     | 221        |
| 9.1.4 集散系统的发展方向与趋势 .....                                | 221        |
| 9.2 现场总线概述 .....                                        | 222        |
| 9.2.1 现场总线的含义 .....                                     | 222        |
| 9.2.2 现场总线对自动化领域的变革 .....                               | 224        |
| 9.2.3 现场总线产生的原因 .....                                   | 224        |
| 9.2.4 现场总线发展过程 .....                                    | 225        |
| 9.2.5 现场总线的设备 .....                                     | 226        |
| 9.3 五种有影响的现场总线 .....                                    | 227        |
| 9.3.1 FF(Foundation Fieldbus) .....                     | 227        |
| 9.3.2 LONWORKS(Local Operating Networks) .....          | 227        |
| 9.3.3 PROFIBUS(Process Fieldbus) .....                  | 228        |
| 9.3.4 CAN(Control Area Network) .....                   | 228        |
| 9.3.5 HART(Highway Addressable Remote Transducer) ..... | 229        |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 9.4   | OSI 参考模型与现场总线通信模型 .....      | 230 |
| 9.4.1 | 基金会现场总线通信模型 .....            | 230 |
| 9.4.2 | LONWORKS 通信模型 .....          | 231 |
| 9.4.3 | PROFIBUS 通信模型 .....          | 231 |
| 9.4.4 | CAN 通信模型 .....               | 232 |
| 9.4.5 | HART 通信模型 .....              | 232 |
| 9.5   | FF 现场总线技术 .....              | 232 |
| 9.5.1 | 物理层(Physical Layer) .....    | 232 |
| 9.5.2 | 数据链路层(Data Link Layer) ..... | 236 |
| 9.5.3 | 应用层(Application Layer) ..... | 238 |
| 9.5.4 | 用户层(User Layer) .....        | 240 |
| 9.6   | 现场总线控制系统设计 .....             | 244 |
|       | 小结 .....                     | 247 |
|       | 习题 .....                     | 247 |
| 附录    | 部分函数的 Z 变换、拉氏变换表 .....       | 248 |
| 参考文献  | .....                        | 249 |

# 第 1 章 自动控制系统的基本概念

自动控制对于工农业生产和科学技术的发展具有越来越重要的作用。它不仅在宇宙航行、导弹制导、核技术以及火箭控制等新兴学科领域中是必不可少的,而且在金属冶炼、仪器制造及一般工业生产过程中也具有重要的意义,为实现工业生产过程的自动控制、高产、稳产、安全生产,改善劳动条件,提高经济效益创造了条件。

古典控制理论是 20 世纪 40 年代发展起来的,直到现在仍然是分析、设计自动控制系统的主要理论基础,它在工程上应用较普遍的是频率法和根轨迹法。这些方法用来处理单输入单输出的线性自动控制系统是卓有成效的。随着科学的发展和技术的进步,控制对象越来越复杂、多样,因此自动控制系统日益复杂,出现了多输入多输出的多变量系统、非线性系统、系统参数随时间变化的时变系统、分布参数控制系统以及最优控制系统等。因此,古典控制理论已经难以分析和设计上述复杂的系统了。到 60 年代逐渐形成了以状态空间法为基础的现代控制理论,它的形成和发展为数字计算机应用于自动控制领域创造了条件。

生产技术的进步和科学技术的发展,要求有更加复杂、更加完善的控制装置,以期达到更高的精度、更快的速度和更大的效益。然而,若用常规的控制方法,潜力却是有限的,难以满足如此高的性能要求。由于电子计算机出现并应用于自动控制,才使得自动控制发生了巨大的飞跃。计算机具有精度高、速度快、存储量大等特点,并且能够进行逻辑判断,因此可以实现高级复杂的控制算法,获得快速精密的控制效果。计算机所具有的信息处理能力,能够把过程控制和生产管理有机地结合起来,从而对工厂、企业或企业体系的管理实现自动化。

微电子技术和计算机技术的发展,为计算机控制的发展和应用奠定了坚实的基础。电子计算机在经历了电子管、晶体管、集成电路等阶段之后,现已到了第五代计算机研制阶段。计算机的发展是异常神速的。无论在速度、性能、可靠性、能耗、性能价格比等方面,现在的计算机都有了突飞猛进的变化,其运算速度已经达到了 1000 万次每秒到 1 亿次每秒。一台普通的个人微型计算机的运算速度已经相当于原来的大型机甚至巨型机的速度。

计算机信息处理技术的发展,也从数字发展到文字,从黑白发展到彩色,从无声发展到有声,从本地发展到远程。正如有关专家预测的,计算机将向微型化、巨型化、网络化、多媒体以及智能化方向发展。

计算机控制是以自动控制理论与计算机技术为基础的。当今已具备推广和应用计算机控制的条件、基础和迫切性。计算机控制既是一门新兴的学科,又与自动控制有着密切的关系。事实上,远在 50 年代就已经有了采样控制系统的理论,随着计算机控制的推广和应用,人们不断总结提高,逐步形成了计算机控制理论。计算机控制系统的分析和设计方法也正在不断提高,日臻完善。

本书阐述自动控制和计算机控制的基础理论，概述计算机控制系统的分析方法，总结计算机控制系统的设计方法和控制规律，同时，联系实际讨论计算机控制系统的实现方法（包括硬件和软件实现），并介绍了一些计算机控制系统的应用实例。

# 1.1 自动控制系统的基本原理

## 1.1.1 自控系统的工作原理

我们首先讨论以下两种典型的连续自动控制系统，对自动控制有一个基本的认识，进而了解自动控制系统的结构、工作原理和特点。

### 1. 速度控制系统

图 1-1 表示用来实现车床主轴变速的直流电动机转速控制系统。系统中③是电枢控制式的直流电动机，它具有恒定的激磁电流。电动机的转速  $n$  和电枢电压  $u_a$  成正比。可以改变给定电位计①的滑臂位置而得到给定电压  $u_g$ ，并通过放大器②放大而获得电枢电压  $u_a$ 。因此，电动机转速  $n$  和给定电压  $u_g$  有一一对应的关系，将电位计滑臂调到适当位置，就可得到所需要的转速。这一系统的控制关系可用图 1-2 所示的原理图表示。

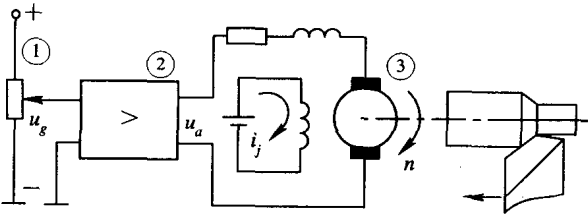


图 1-1 直流电动机转速控制系统

图 1-2 直流电动机转速控制系统原理图

当电动机的负载转矩变化很小，系统元件特性比较稳定时，图 1-1 所示的控制系统可以满足预期的要求。否则，电动机的实际转速与期望值相比将有较大的误差。

为了克服或减小负载转矩变化对转速的影响，可以采用干扰补偿的办法，但是，采用干扰补偿的系统一般不能解决由于元件特性不稳定所产生的输出误差。而图 1-3 所示的带偏差控制作用的速度控制系统则可以减小或消除由各种因素所引起的转速变化。

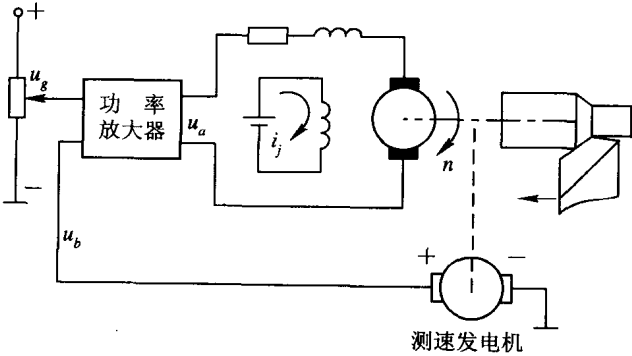


图 1-3 带偏差控制作用的速度控制系统

在这个系统中,电动机的转速是由电压  $u_g$  和  $u_b$  共同控制的。测速发电机用来测量实际转速,并将与实际转速对应的电压  $u_b$  回送到加法器件(比较器),然后与给定电压  $u_g$  进行比较。当负载转矩变化或由于其他原因使电动机转速高于(或低于)要求的转速时,电压  $u_b$  便升高(或降低)。比较器输出的偏差电压  $\Delta u = u_g - u_b$  相应减小(或加大),因而经放大器放大后的电压  $u_a$  也相应降低(或升高),从而使电动机的转速下降(或升高)而回复到要求值。图 1-4 是这一控制系统的原理图。

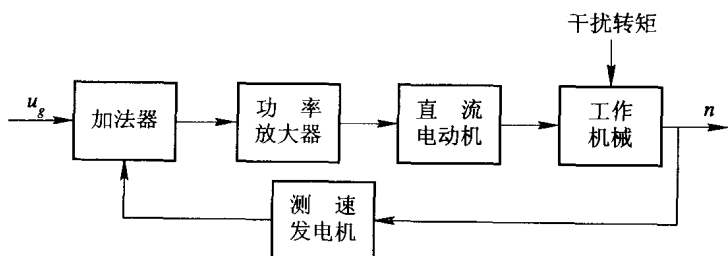


图 1-4 带偏差控制作用的速度控制系统原理图

## 2. 随动系统

图 1-5 所示随动控制系统的任务是保证输出轴始终紧紧跟踪输入轴变化,由于输入轴的位置无法预先确定(如雷达导引系统),因此该系统是一个位置随动系统。

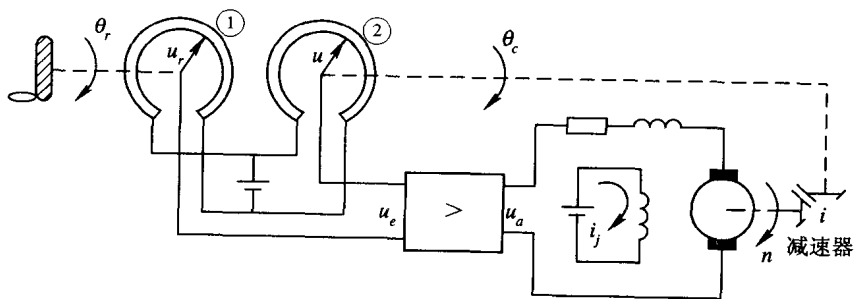


图 1-5 随动控制系统

系统工作原理如下:利用两个电位计①和②,分别把输入轴和输出轴的转角  $\theta_r$  和  $\theta_c$  变成相应的电压,然后把这两个电压反向串联(相减),即可以得到与角度偏差  $\theta_e = \theta_r - \theta_c$  成比例的电压  $u_e$ ,该电压经过放大器放大后加到电动机上,电动机的轴经减速器和输出轴相连,并且同时带动电位器②的电刷移动,如果  $\theta_c \neq \theta_r$ ,则  $u_e \neq 0$ ,放大后的电压  $u_a$  驱动电机转动,转动方向最终应使  $\theta_c$  向  $\theta_r$  接近,使  $\theta_e$  减小。最后,两者取得一致,  $\theta_c = \theta_r$ ,则  $u_e = 0$ ,电机停止转动,系统进入平衡状态(假定元件没有死区)。这样就保证了输出轴紧紧地跟着输入轴变化。

在随动系统中,当指令信号变化时,输出轴便精确地复现着输入轴的变化规律。这个系统的原理如图 1-6 所示。

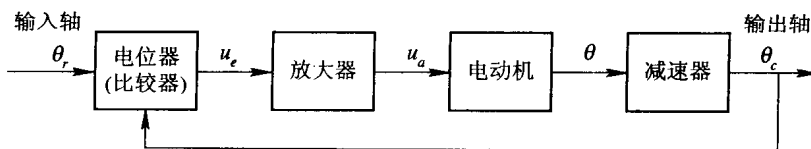


图 1-6 随动系统的原理图

由上面两种系统的讨论可知：

(1) 自动控制系统的典型结构如图 1-7 表示。自动控制系统是由控制装置和被控对象(或被控过程)两大部分组成的。对被控对象(或被控过程)产生控制调节作用的设备或装置称为控制装置。

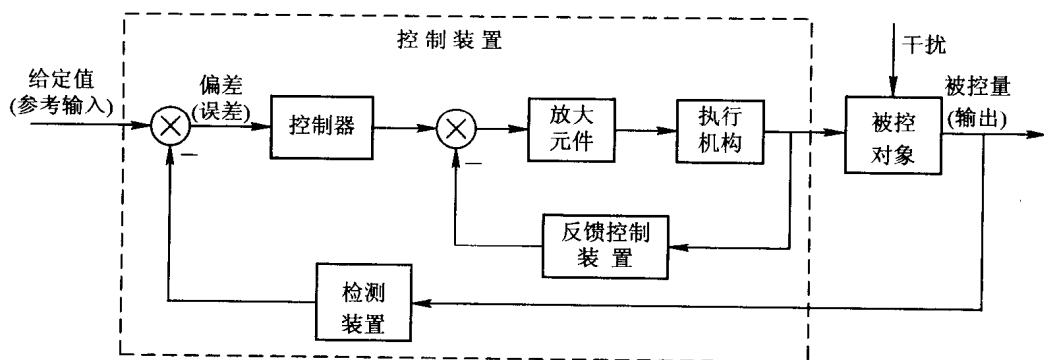


图 1-7 自动控制系统的组成

一般的控制装置包括如下环节：

① 检测装置。检测装置的任务是对系统被控量进行检测，并把它转换成与参考输入相同的物理量后，送入比较环节。前述系统中的测速发电机和测量电位计等就是检测反馈元件。

② 比较器。比较器的作用是将检测反馈装置送来的信号与参考输入进行比较，得出两者偏差(误差)信号。比较器往往是由综合电路或检测装置兼而完成的，一般用符号 $\otimes$ 表示；“-”表示输入信号与反馈信号相减，即负反馈；“+”表示正反馈。

③ 放大元件。放大元件的作用是将比较环节输出的微弱信号进行放大。前述系统中的电压放大器和功率放大器等都是放大元件。

④ 执行机构。执行机构将放大元件的输出信号转变成机械运动，从而对受控对象施加控制调节作用。前述系统中的电机就是执行机构。

⑤ 校正装置。校正装置(或称控制器、调节器)是对偏差信号进行比例、积分、微分等运算的元件，参数或结构便于调整，用于改善系统性能。

⑥ 被控对象。被控对象是指接受控制的设备(或过程)，如前述系统中的工作机械等。

(2) 自动控制系统是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置对受控对象进行控制操纵，使被控量按照参考输入保持常值或者跟随参考输入的变化规律而变化的。

被控量：指系统的输出，它是受控对象中被控制的一个物理量，如速度控制系统中工作机械的速度、随动系统中的转角等。

参考输入：又称给定值，它是对系统进行控制的给定输入，如速度控制系统中的给定电压  $u_g$ 、随动系统中的角度  $\theta_r$  等。

(3) 由图 1-7 可见, 对系统参与控制或施加影响的信号可能来自三个方面, 除了参考输入量还有干扰和偏差。

干扰: 指除参考输入和反馈信号以外的对系统被控量产生影响的其他因素。干扰可能来自系统的内部或外部。来自系统外部的干扰, 是环境对系统的一种作用, 所以它也是系统的一种输入。

偏差: 又称为误差信号, 就是比较环节的输出, 即被控量经过检测反馈环节之后与给定参考输入量进行比较所得的差值。

(4) 前面讨论的几种系统, 可分别归属于如下类型:

① 恒值系统。图 1-1 和图 1-3 所示的速度控制系统, 它们的给定值都是恒定值, 故这类系统称为恒值系统。

② 随动系统。给定值(控制指令)是事先未知的时间函数的系统称为随动系统。在随动系统中, 当指令信号变化时, 工作机械便精确地复现着指令信号的变化规律。图 1-5 所示的系统为随动系统。

③ 程序控制系统。控制指令已预先知道的系统, 称为程序控制系统。

④ 自动调节系统或镇定系统。图 1-3 所示的带偏差控制作用的速度控制系统是根据偏差产生控制作用, 对系统进行自动调节, 使被控量保持恒定的。故这类系统又常称为自动调节系统或镇定系统。

### 1.1.2 自动控制的基本方式

#### 1. 开环控制

被控量(输出)不影响系统控制的控制方式称为开环控制。所以在开环控制中, 不对被控量进行任何检测, 在输出端和输入端之间不存在反馈联系。

开环控制的原理图如图 1-8 所示。这种控制方式的特点是, 在给定输入端到输出端之间的信号传递是单向进行的。图 1-1 所示的直流电机转速控制系统就采用的是这种控制方式。

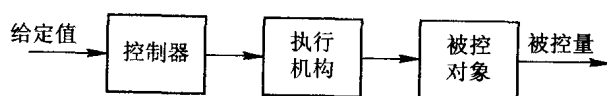


图 1-8 用给定值操作的开环控制系统

这种控制方式的缺点是, 当被控对象或控制装置受到干扰, 或者在工作过程中元件特性发生变化而影响被控量时, 系统不能进行自动补偿, 被控制精度难以保证。但是由于它的结构比较简单, 所以在控制精度要求不高或者元件工作特性比较稳定而干扰又很小的场合应用比较广泛。

#### 2. 闭环控制

被控量参与系统控制的控制方式称为闭环控制。闭环控制的原理如图 1-9 所示。由图可见, 在闭环控制中, 在给定值和被控量之间, 除了有一条从给定值到被控量方向传递信号的前向通道外, 还有一条从被控量到比较元件传递信号的反馈通道。控制信号沿着前向通道和反馈通道循环传递, 故闭环控制又称反馈控制。

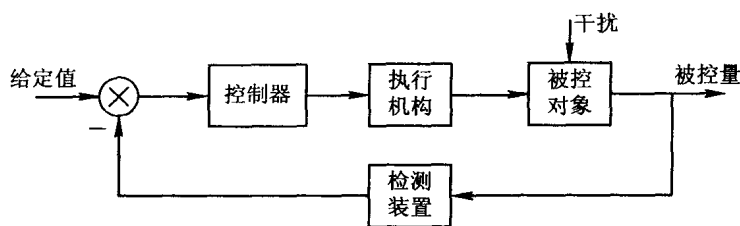


图 1-9 闭环控制系统

在闭环控制中，被控量时时刻刻被检测，再经过信号变换，并通过反馈通道回送到比较元件和给定值进行比较。比较后得到的偏差信号经放大元件放大后送入执行元件。执行元件根据所接受的信号的大小和极性，直接对受控对象进行调节，以进一步减小偏差。可见，只要闭环控制系统出现偏差，而不论该偏差是干扰造成的，还是由于系统元件或受控对象工作特性变化所引起的，系统都能自行调节以减小偏差。故闭环控制系统又称按照偏差调节的控制系统。

闭环控制从原理上提供了实现高精度控制的可能性，它对控制元件的要求比开环控制的低。但与开环控制系统相比，闭环控制系统设计比较麻烦，结构也比较复杂，因而成本较高。

闭环控制是自动控制中广泛采用的一种控制方式。当控制精度要求较高，干扰影响较大时，一般都采用闭环控制。图 1-3 所示的速度控制系统及图 1-5 所示的随动系统都是闭环控制系统。

### 1.1.3 对控制系统的基本要求

控制系统工作的场合不同，对它的性能要求也就不同。

控制系统的任务是使被控量按参考输入保持常值或跟随参考输入变化。但要在任何时间做到这一点并不容易。例如，当图 1-5 所示的随动系统的指令电位计①，在瞬间转动一个单位角度时，由于系统惯性的存在，以及能源功率的限制，工作机械不可能立即跟随转动相等的角度。当偏差产生的控制作用使工作机械转过与给定值相等的角度时，由于惯性关系，工作机械将仍以一定速度继续旋转，因而出现反向偏差，控制系统又产生反向控制作用，使工作机械反向转动。如此周而复始，出现了振荡的跟踪过程。控制系统的这一运动过程称为动态过程（或瞬态过程、暂态过程、过渡过程等）。当系统结构及其参数匹配合理时，经过一定时间后，被控量将趋于希望值，称为进入稳态。

图 1-10 表示了在阶跃输入信号作用下，几种系统的被控量的变化过程。图中  $x(t)$  表示输入， $y(t)$  表示输出。

显然，不是所有系统都能正常工作。系统要能正常工作，必须满足如下基本要求：

(1) 稳定性。稳定性是指系统被控量偏离给定值而振荡时，系统抑制振荡的能力。对于稳定的系统，随着时间的增长，被控量将趋近于希望值。可见，稳定性是保证系统正常工作的先决条件。图 1-10(b)和(c)所示的系统是不稳定的，这种系统不能工作。

(2) 快速性。快速性是指被控量趋近希望值的快慢程度。快速性好的系统，它的过渡过程时间短，能复现快速变化的控制信号，因而具有较高的动态精度。图 1-10(d)所示的

系统 1, 其快速性要比系统 2 好。稳定性和快速性是反映动态过程好坏的尺度。

(3) 精确性。精确性是指过渡过程结束后, 被控量与希望值接近的程度。也就是当系统过渡到新的平衡工作状态后, 被控量对希望值的偏差的大小。系统的这一性能指标称为稳态精度。

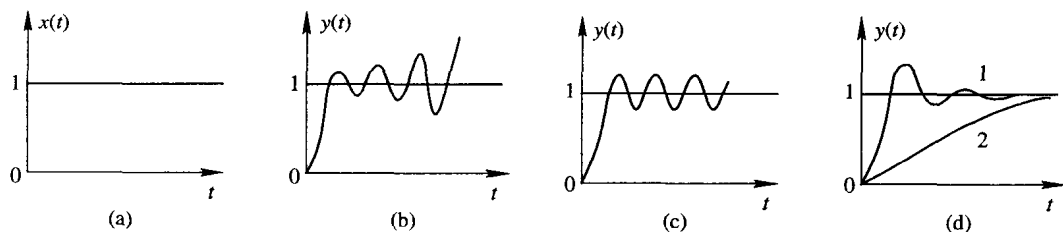


图 1-10 控制系统的阶跃输入和输出

在后面的有关章节中, 将通过对系统数学模型的研究, 进一步介绍系统的结构和参数匹配与稳定性、快速性和稳态精度之间的关系。

## 1.2 计算机控制系统的一般构成

电子计算机的出现, 在科学技术上引起了一场深刻的革命, 特别是随着半导体技术的发展, 各种高性能、低价格的微型计算机相继问世, 这使得微机不仅在科学计算、信息处理、事务管理和自动控制等方面占据重要地位, 并且在日常生活中也发挥着不可或缺的作用。目前, 微机技术的发展及其应用的深广度, 已成为衡量一个国家现代化水平的重要标志之一。

### 1.2.1 一般概念

计算机控制系统的结构与前面介绍的反馈控制系统十分相似, 只是将控制器由数字控制器来实现, 就组成了一个典型的计算机控制系统, 如图 1-11 所示。

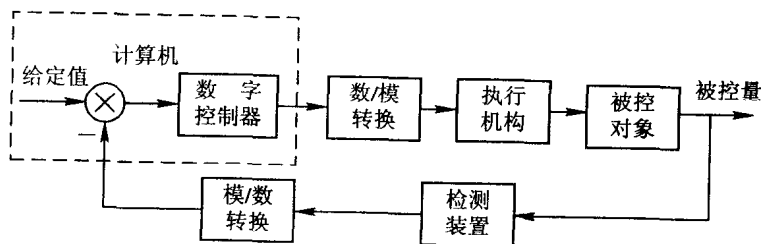


图 1-11 计算机控制系统

在控制系统中引进计算机, 可以充分利用计算机的运算、逻辑判断和记忆等功能。在这里给定量和反馈量都是二进制数, 为了信号的匹配, 计算机的输入/输出两侧分别带有模/数(A/D)转换器和数/模(D/A)转换器: 反馈量经过模/数转换器送入计算机, 计算机接收了给定量和反馈量后, 运用计算机中微处理器的各种指令, 就能对该偏差值进行运算