



普通高等教育 电气工程 自动化 系列规划教材  
甘肃省精品课程教材

Computer Control System

# 计算机控制系统

第2版

© 李华 侯涛 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育 电气工程 自动化 系列规划教材

甘肃省精品课程教材

# 计算机控制系统

第2版

主编 李 华 侯 涛

参编 魏文军 缪仲翠

机械工业出版社

本书较全面、系统地阐述了计算机控制系统的结构、原理、设计和应用技术。

全书共 10 章, 包括: 计算机控制系统概述, 线性离散系统的数学描述和分析方法, 计算机控制系统的多种经典的、现代的先进控制算法, 计算机控制系统硬、软件设计, 计算机网络控制及网络控制系统设计, 计算机控制系统的设计原则与工程实现方法, 最后给出了 3 个计算机控制系统应用设计实例。本书书末附有 3 个附录, 分别是常用函数的  $Z$  变换、MATLAB 控制系统工具箱函数和本书中部分例题 MATLAB 仿真参考程序清单。本书每章后均配有习题供读者学习使用。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器、计算机科学与技术等专业的高年级本科生教材和控制学科以及相关学科的研究生教材, 也可供有关技术人员参考和自学。

欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 下载本书课件, 或发邮件至 [jinaemp@163.com](mailto:jinaemp@163.com) 索要。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

计算机控制系统/李华, 侯涛主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2016. 6

普通高等教育电气工程自动化系列规划教材

ISBN 978-7-111-54181-3

I. ①计… II. ①李…②侯… III. ①计算机控制系统—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 152012 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吉 玲 责任编辑: 吉 玲 王 康 刘丽敏

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 征

封面设计: 张 静 责任印制: 李 洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2016 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.25 印张 · 468 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-54181-3

定价: 39.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金 书 网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前言

《计算机控制系统》于2007年出版以来,多次重印,得到了广大读者的认可和欢迎。为满足广大读者的使用需求,以及对新知识的更新需要,目前本书已完成了第2版的修订工作。

本书在保持原书的基本体系结构和基本特色的基础上,增加了近年来计算机控制领域的新理论、新技术,引入了近年来作者完成的科研项目研究成果,借鉴了课程组近年来的课程改革和课程教学上的成果和经验,吸纳了原书使用中的反馈意见和建议,参考了该课程近年来的国内外优秀教材,对原书的内容进行了部分修改和增删,并继续保持了内容的先进性,使本书结构更加清晰,内容更加全面、系统,逻辑性更强,也更便于读者学习。

本书对原书的修改和调整如下:

(1) 在计算机控制系统中,由于数字信号所固有的时间上离散、幅值上量化的效应,使得控制系统的实现存在一些特殊性。因此在第1章中除了介绍计算机控制和计算机控制系统的基本概念之外,增加了对计算机控制系统与连续系统之间存在的特殊性和一些本质区别的分析,这样更有利于加深读者对计算机控制和计算机控制系统的认识。

(2) 随着通信技术、计算机网络技术、控制技术和软件技术的发展,计算机控制系统已经跨入网络化控制的新阶段。为了适应这种趋势,在第8章中加大了控制网络和网络控制系统内容的介绍,增加了工业以太控制网络系统和控制网络与管理网络的集成技术等内容,在第10章计算机控制系统设计实例中,结合作者的科研成果,增加了基于二乘二取二的分布式安全计算机联锁系统等网络控制应用案例,为读者学习设计计算机网络控制系统提供了帮助。

(3) 第7章修改为计算机控制系统的硬件设计,增加了控制用计算机的选型和构成计算机控制系统的总线连接技术;第9章修改为计算机控制系统的软件设计,增加了控制软件设计语言的选用、控制算法的编排实现和涉及的采样控制系统中采样频率的选择等内容。

(4) 鉴于科学技术迅速发展,将MATLAB计算工具软件作为控制领域的仿真工具应用已经非常普及,相应的参考书也很多,因此本书将原书第10章控制系统计算机辅助设计与仿真内容删除。

(5) 为使全书内容更加丰富和完整,对原书第3章、第4章等部分章节内容做了少量增删,并增加了每章的习题,便于读者学习使用。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器、计算机科学与技术等专业的高年级本科生教材和控制学科以及相关学科的研究生教材,也可供有关技术人员参考和自学。建议教学学时48~64学时,其中包括8~10学时的实验教学。教师在讲授过程中也可以根据学时安排及学生对象的不同,对本书中控制算法部分的章节进行有针对性的讲授。

本书由李华、侯涛、缪仲翠和魏文军共同编写。其中第1、2章由李华完成,第3~5章由侯涛完成,第6、7、9章由缪仲翠完成,第8、10章由魏文军完成,全书由李华和侯涛

统稿。

本书由华中科技大学方华京教授担任主审。第1版主编范多旺教授在本书的编写过程给予了许多宝贵的修改意见和建议;研究生李丹丹、张帅等同学绘制了书中的部分插图,并参与了部分校稿工作。本书编写中认真学习和参考了国内外同行专家学者的有关教材、专著和论文,并在本书中有所引用。此外,本书的编写得到了机械工业出版社的大力支持与帮助。在此,一并对他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

编者

# 目 录

## 前言

## 第1章 计算机控制系统概述..... 1

- 1.1 计算机控制系统的基本概念 ..... 1
- 1.2 计算机控制系统的发展与应用 ..... 2
- 1.3 计算机控制系统的组成 ..... 3
  - 1.3.1 计算机控制系统的硬件组成 ..... 3
  - 1.3.2 计算机控制系统的软件组成 ..... 6
- 1.4 计算机控制系统的特性 ..... 6
  - 1.4.1 计算机控制系统的特点 ..... 6
  - 1.4.2 计算机控制系统的特殊问题 ..... 7
- 1.5 计算机控制系统的典型形式 ..... 10
  - 1.5.1 数据采集和监视系统 ..... 10
  - 1.5.2 直接数字控制系统 ..... 10
  - 1.5.3 监督控制系统 ..... 11
  - 1.5.4 分散型控制系统 ..... 11
  - 1.5.5 现场总线控制系统 ..... 12
- 1.6 计算机控制系统的设计方法 ..... 12
- 本章小结 ..... 13
- 习题和思考题 ..... 14

## 第2章 线性离散系统的数学描述和分析

### 方法 ..... 15

- 2.1 信号变换理论 ..... 15
  - 2.1.1 连续信号的采样和量化 ..... 15
  - 2.1.2 采样定理 ..... 17
  - 2.1.3 采样信号的复现和采样保持器 ..... 18
- 2.2 线性离散系统的数学描述方法 ..... 20
  - 2.2.1 差分方程的定义 ..... 20
  - 2.2.2 差分方程的求解 ..... 21
- 2.3 线性离散系统的 $Z$ 变换分析法 ..... 21
  - 2.3.1  $Z$ 变换的定义 ..... 21
  - 2.3.2  $Z$ 变换法 ..... 22
  - 2.3.3  $Z$ 变换的基本定理 ..... 24
  - 2.3.4  $Z$ 反变换 ..... 25
  - 2.3.5 用 $Z$ 变换解差分方程 ..... 27
- 2.4 脉冲传递函数 ..... 28

- 2.4.1 脉冲传递函数的概念 ..... 28
- 2.4.2 离散系统框图的变换 ..... 29
- 2.5 线性离散系统的稳定性分析 ..... 32
  - 2.5.1  $s$ 平面到 $z$ 平面的变换 ..... 32
  - 2.5.2  $z$ 平面的稳定性条件 ..... 33
  - 2.5.3 朱利稳定性判据 ..... 34
  - 2.5.4  $W$ 变换的稳定性判据 ..... 37
- 2.6 线性离散系统的稳态误差分析 ..... 39
- 2.7 线性离散系统的动态响应分析 ..... 41
- 本章小结 ..... 44
- 习题和思考题 ..... 45

## 第3章 开环数字程序控制 ..... 46

- 3.1 数字程序控制基础 ..... 46
  - 3.1.1 运动轨迹插补的基本原理 ..... 46
  - 3.1.2 数字程序控制系统分类 ..... 47
- 3.2 逐点比较法插补原理 ..... 48
  - 3.2.1 逐点比较法直线插补 ..... 48
  - 3.2.2 逐点比较法圆弧插补 ..... 52
- 3.3 步进电动机控制技术 ..... 56
  - 3.3.1 步进电动机工作原理 ..... 57
  - 3.3.2 步进电动机的脉冲分配程序 ..... 58
  - 3.3.3 步进电动机的速度控制程序 ..... 59
- 本章小结 ..... 61
- 习题和思考题 ..... 61

## 第4章 计算机控制系统的常规控制

### 技术 ..... 62

- 4.1 数字PID控制 ..... 62
  - 4.1.1 模拟PID调节器 ..... 62
  - 4.1.2 理想微分数字PID控制器 ..... 64
  - 4.1.3 实际微分数字PID控制器 ..... 66
  - 4.1.4 数字PID控制算法的改进 ..... 69
  - 4.1.5 数字PID控制器参数的整定 ..... 72
- 4.2 最少拍控制 ..... 76
  - 4.2.1 最少拍控制的基本原理 ..... 76
  - 4.2.2 闭环脉冲传递函数 $\Phi(z)$ 的结构

|                          |     |                          |     |
|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 设计 .....                 | 77  | 第7章 计算机控制系统的硬件设计 ..      | 152 |
| 4.2.3 最少拍有纹波控制器的设计 ..... | 80  | 7.1 控制用计算机系统的硬件要求 .....  | 152 |
| 4.2.4 最少拍无纹波控制器的设计 ..... | 82  | 7.1.1 对计算机主机的要求 .....    | 152 |
| 4.2.5 最少拍系统的改进措施 .....   | 85  | 7.1.2 对过程输入输出通道的要求 ..... | 153 |
| 4.3 纯滞后控制 .....          | 90  | 7.1.3 对软件系统的要求 .....     | 153 |
| 4.3.1 施密斯预估控制 .....      | 90  | 7.1.4 方便的人机联系 .....      | 154 |
| 4.3.2 达林算法 .....         | 93  | 7.1.5 系统的可靠性及可维护性 .....  | 154 |
| 本章小结 .....               | 98  | 7.2 控制用计算机的选择 .....      | 154 |
| 习题和思考题 .....             | 99  | 7.2.1 计算机速度的选择 .....     | 154 |
|                          |     | 7.2.2 计算机字长的确定 .....     | 155 |
| 第5章 计算机控制系统的离散状态         |     | 7.3 计算机控制系统的过程通道 .....   | 156 |
| 空间设计 .....               | 100 | 7.3.1 数字量输入输出通道 .....    | 157 |
| 5.1 状态空间描述的基本概念 .....    | 100 | 7.3.2 模拟量输入通道 .....      | 160 |
| 5.1.1 离散时间系统的状态空间描述 ..   | 100 | 7.3.3 模拟量输出通道 .....      | 172 |
| 5.1.2 离散时间系统的能控性 .....   | 101 | 7.4 总线技术 .....           | 182 |
| 5.1.3 离散时间系统的能观性 .....   | 102 | 7.4.1 总线的定义及分类 .....     | 183 |
| 5.2 采用状态空间模型的极点配置设计 ..   | 103 | 7.4.2 常用总线介绍 .....       | 183 |
| 5.2.1 按极点配置设计控制规律 .....  | 103 | 本章小结 .....               | 187 |
| 5.2.2 按极点配置设计状态观测器 ..... | 104 | 习题和思考题 .....             | 187 |
| 5.2.3 按极点配置设计控制器 .....   | 107 |                          |     |
| 5.3 采用状态空间模型的最优化设计 ..... | 111 | 第8章 计算机网络控制 .....        | 189 |
| 5.3.1 最优控制规律设计 .....     | 112 | 8.1 计算机工业网络基础 .....      | 190 |
| 5.3.2 状态最优估计器设计 .....    | 116 | 8.1.1 网络功能及分类 .....      | 190 |
| 5.3.3 LQG 最优控制器设计 .....  | 121 | 8.1.2 网络拓扑结构 .....       | 191 |
| 本章小结 .....               | 121 | 8.1.3 网络传输介质 .....       | 192 |
| 习题和思考题 .....             | 122 | 8.1.4 网络访问控制 .....       | 193 |
|                          |     | 8.1.5 信息交换技术 .....       | 194 |
| 第6章 计算机控制系统的先进控制         |     | 8.1.6 网络协议及其层次结构 .....   | 196 |
| 技术 .....                 | 123 | 8.1.7 网络互连 .....         | 197 |
| 6.1 内模控制 .....           | 123 | 8.1.8 IEEE 802 标准 .....  | 199 |
| 6.1.1 内模控制基本原理 .....     | 123 | 8.1.9 控制网络的特点 .....      | 200 |
| 6.1.2 内模控制器的设计 .....     | 125 | 8.1.10 工业控制网络的选型考虑 ..... | 201 |
| 6.1.3 内模 PID 控制 .....    | 128 | 8.2 集散控制系统 .....         | 203 |
| 6.1.4 内模控制的离散算式 .....    | 130 | 8.2.1 集散控制系统的产生与发展 ..... | 203 |
| 6.1.5 内模控制的仿真实验 .....    | 131 | 8.2.2 集散控制系统的特点 .....    | 205 |
| 6.2 模型预测控制 .....         | 133 | 8.2.3 集散控制系统的体系结构 .....  | 206 |
| 6.2.1 模型预测控制基本原理 .....   | 134 | 8.3 现场总线控制系统 .....       | 213 |
| 6.2.2 模型算法控制 .....       | 135 | 8.3.1 现场总线控制系统的产生与       |     |
| 6.2.3 动态矩阵控制 .....       | 140 | 发展 .....                 | 214 |
| 6.2.4 模型预测控制的工程设计 .....  | 146 | 8.3.2 现场总线控制系统的特点 .....  | 215 |
| 本章小结 .....               | 150 | 8.3.3 现场总线控制系统的体系结构 ..   | 216 |
| 习题和思考题 .....             | 151 | 8.3.4 几种典型的现场总线 .....    | 217 |
|                          |     | 8.4 以太控制网络系统 .....       | 221 |

|                                 |     |                                          |     |
|---------------------------------|-----|------------------------------------------|-----|
| 8.4.1 工业以太网概述 .....             | 221 | 9.4.3 多采样频率配置 .....                      | 251 |
| 8.4.2 以太控制网络系统的特点 .....         | 222 | 本章小结 .....                               | 251 |
| 8.4.3 以太控制网络系统的组成结构 .....       | 222 | 习题和思考题 .....                             | 252 |
| 8.4.4 以太网用于工业现场的关键<br>技术 .....  | 223 |                                          |     |
| 8.5 控制网络与信息网络的集成技术 .....        | 225 | <b>第 10 章 计算机控制系统的设计与<br/>工程实现</b> ..... | 253 |
| 8.5.1 网络互联技术 .....              | 226 | 10.1 计算机控制系统设计的原则与<br>步骤 .....           | 253 |
| 8.5.2 动态数据交换技术 .....            | 228 | 10.1.1 系统设计的原则 .....                     | 253 |
| 8.5.3 远程通信技术 .....              | 228 | 10.1.2 系统设计的步骤 .....                     | 254 |
| 8.5.4 数据库访问技术 .....             | 230 | 10.2 计算机控制系统抗干扰技术 .....                  | 256 |
| 本章小结 .....                      | 230 | 10.2.1 干扰的来源与种类 .....                    | 257 |
| 习题和思考题 .....                    | 231 | 10.2.2 硬件抗干扰技术 .....                     | 258 |
|                                 |     | 10.2.3 软件抗干扰技术 .....                     | 266 |
| <b>第 9 章 计算机控制系统的软件设计</b> ..... | 232 | 10.3 计算机控制系统设计实例 .....                   | 269 |
| 9.1 计算机控制系统的软件概念 .....          | 232 | 10.3.1 铁路车站全电子信号控制系统<br>设计 .....         | 269 |
| 9.1.1 控制软件的特点 .....             | 232 | 10.3.2 真空钎焊炉温度控制系统 .....                 | 274 |
| 9.1.2 控制应用软件的体系结构 .....         | 233 | 10.3.3 基于二乘二取二的分布式安全计算机<br>联锁系统 .....    | 278 |
| 9.1.3 控制软件设计语言的选用 .....         | 234 | 本章小结 .....                               | 290 |
| 9.1.4 实时控制软件的设计 .....           | 235 | 习题和思考题 .....                             | 290 |
| 9.2 控制算法的编排实现 .....             | 236 |                                          |     |
| 9.2.1 控制算法的编排结构 .....           | 236 | <b>附录</b> .....                          | 292 |
| 9.2.2 比例因子的配置 .....             | 238 | 附录 A 常用函数的 Z 变换 .....                    | 292 |
| 9.3 数据处理技术 .....                | 241 | 附录 B MATLAB 控制系统工具箱库<br>函数 .....         | 293 |
| 9.3.1 系统误差的校正 .....             | 241 | 附录 C 部分例题 MATLAB 仿真参考程序<br>清单 .....      | 296 |
| 9.3.2 数字滤波 .....                | 242 | <b>参考文献</b> .....                        | 300 |
| 9.3.3 非线性处理 .....               | 244 |                                          |     |
| 9.3.4 标度变换方法 .....              | 246 |                                          |     |
| 9.3.5 越限报警处理 .....              | 247 |                                          |     |
| 9.4 采样频率的选择 .....               | 247 |                                          |     |
| 9.4.1 采样频率对系统性能的影响 .....        | 248 |                                          |     |
| 9.4.2 选择采样频率的经验规则 .....         | 250 |                                          |     |

## 第1章

# 计算机控制系统概述

随着计算机技术的迅速发展,计算机在控制工程领域发挥着越来越大的作用。计算机控制系统是计算机技术与自动控制理论、自动化技术以及检测与传感技术、通信与网络技术紧密结合的产物。利用计算机快速强大的数值计算、逻辑判断等信息加工能力,计算机控制系统可以实现比常规控制更复杂、更全面的控制方案。计算机为现代控制理论的应用提供了有力的工具。同时,计算机控制系统应用于工业控制实践所提出来的一系列理论与工程上的问题,又进一步促进和推动了控制理论和计算机技术的发展。计算机在工业领域已成为不可缺少和不可替代的强有力的控制工具,计算机的参与,对控制系统的性能、结构和控制效果都产生了深刻的影响。可以这样说,目前所有的控制系统都是基于计算机控制来实现的,而所有开发的控制系统都是以计算机控制为基础的。因此,计算机技术的发展为计算机控制系统的应用开辟了无限广阔的空间。

由于计算机的微型化、网络化、性能价格比的上升和软件功能的日益强大,计算机控制系统几乎可以出现在任何场合:实时控制、监控、数据采集、信息处理、数据库等。计算机不仅可用于单个控制回路取代常规的模拟调节器或控制器,而且还经常用在高度现代化的工业生产控制系统中。其应用领域非常广泛,不但是国防、航空航天等高精尖学科必不可少的组成部分,而且在现代化的工、农、医等领域也已发挥着越来越重要的作用。随着计算机技术、高级控制策略、现场总线智能仪表和网络技术的发展,计算机控制技术水平也必将大大提高。因此,掌握计算机控制技术,对于实现生产过程自动化是十分重要的。

本章主要介绍计算机控制系统的基本结构组成、简单概述了计算机控制系统的发展和应用,分析了计算机控制系统不同于连续控制系统的一些特殊问题以及对控制系统设计的影响,最后给出了构成计算机控制系统的一些典型形式和计算机控制系统的两种基本设计方法。

### 1.1 计算机控制系统的基本概念

计算机控制系统就是利用计算机来实现生产过程自动控制的系统。简单地说,如果控制系统中的控制器功能由数字计算机来实时完成,则称该系统为计算机控制系统。

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,通过控制器使生产过程自动按照预定的规律运行。随着计算机技术的迅速发展,计算机已成为自动控制技术不可分割的重要组成部分。

图 1-1 所示为计算机控制系统基本结构框图。

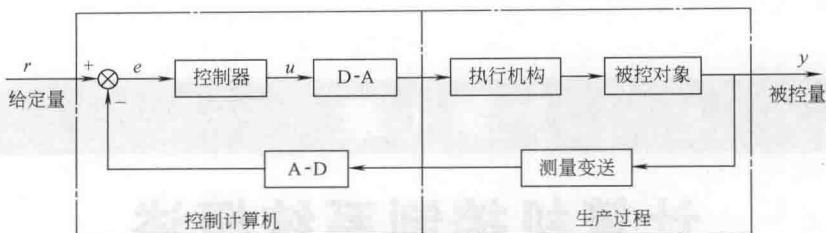


图 1-1 计算机控制系统基本结构

工业生产中的自动控制系统随控制对象、控制算法和采用的控制器结构的不同而有所差别。控制系统为了获得控制信号，要将被控量  $y$  和给定值  $r$  相比较，得到偏差信号  $e = r - y$ 。然后直接利用  $e$  来进行控制，使系统的偏差减小，直到消除偏差，被控量等于给定值。这种控制，由于控制量是控制系统的输出，被控制量的变化值又反馈到控制系统的输入端，与作为系统输入量的给定值相减，所以称为闭环负反馈系统。

从图 1-1 可以看出，自动控制系统的基本功能是信号的传递、加工和比较。这些功能是由传感器的检测、变送装置、控制器和执行装置来完成的。控制器是控制系统中最重要的部分，它从质和量两方面决定了控制系统的性能和应用范围。

计算机控制系统由控制计算机和生产过程两大部分组成。控制计算机是指按生产过程控制的特点和要求而设计的计算机系统，它可以根据系统的规模和要求选择或设计不同种类的计算机。生产过程包括被控对象、测量变送、执行机构、电气开关等装置。通常生产过程中的物理量大都是模拟信号形式，而计算机采用的是数字信号，为此，两者之间必须通过模数 (A-D) 转换器和数模 (D-A) 转换器，来实现这两种信号之间的相互转换。当然，对于有些系统直接利用数字信号作为输入和输出信号，就不必通过 A-D 或 D-A 转换设备。

从本质上看，计算机控制系统的控制过程可归纳为以下三个步骤：

- 1) 实时数据采集：对来自测量变送装置的被控量的瞬时值进行检测和输入。
- 2) 实时控制决策：对采集到的被控量进行分析和处理，并按已定的控制规律，决定将要采取的控制行为。
- 3) 实时控制输出：根据控制决策，适时地对执行机构发出控制信号，完成控制任务。

所谓实时，是指信号的输入、计算和输出都要在一定的时间内完成，即计算机对输入信息以足够快的速度进行控制，超出了这个时间，就失去了控制的时机，控制也就失去了意义。实时的概念不能脱离具体过程，一个在线的系统不一定是一个实时系统，但是一个实时控制系统必定是在线系统。

上述过程不断重复，使整个系统按照一定的品质指标进行工作，并对被控对象和设备本身的异常现象及时做出处理，通过执行机构控制被控对象，以达到预期的控制目标。

## 1.2 计算机控制系统的发展与应用

计算机的出现使科学技术产生了一场深刻的革命，同时也把自动控制推向一个新高度。随着大规模及超大规模集成电路的发展，计算机的可靠性和性能价格比越来越高，这使得计算机控制系统得到越来越广泛的应用。

世界上第一台计算机于1946年问世。1952年计算机开始应用于化工生产过程的自动检测 and 数据处理,并打印出生产管理用的过程参数。1954年开始利用计算机构成开环控制系统,操作人员根据计算机的计算结果及时、准确地调节生产过程的控制参数。1957年开始利用计算机构成闭环控制系统,对石油蒸馏过程进行自动控制。1958年开始试验性地采用直接数字控制系统,从而实现了计算机的“在线”控制。1960年开始在生产过程中实现监督计算机控制。1966年以后计算机控制开始侧重于生产过程的最优控制,并向分散控制和网络控制方向发展。20世纪70年代,随着大规模集成电路技术的发展,于1972生产出微型计算机,使计算机控制技术进入了一个崭新的发展阶段。20世纪80年代以后,微型处理器件迅速发展,价格大幅下降,微型处理器件参与控制,使得计算机控制系统的应用更为普遍,开创了计算机控制的新时代,即从传统的集中控制系统革新为分散控制系统。分散控制系统为工业控制系统的发展提供了基础,它是一种由许多相关联的微计算机组合并共同担负工作负荷的系统,通常包括:控制过程的控制站以及具有操作监视作用的操作站和各种辅助的站点,所有的相互作用通过某种通信网络实现,形成目前广泛应用的集散型控制系统。这种集散型控制系统能够控制生产的各个方面,使操作员通过一台计算机就能够完成对整个生产活动的监视。从20世纪90年代开始,随着微处理技术和其他高新技术的发展,使分散型控制、全监督式控制、智能控制得到了进一步的研究和应用。计算机控制系统的性能价格比的不断提高更加速了计算机控制系统的普及和应用。促进了许多新型计算机控制方式的发展,目前嵌入式计算机控制系统、网络计算机控制系统以及许多专用控制器都得到了迅速的发展。

计算机控制技术的发展除了依赖于计算机硬件的发展外,还依赖于计算机控制软件的发展。计算机控制软件由20世纪80年代以前主要采用汇编语言编写到现在广泛采用高级语言编写实时程序,大大缩短了控制系统的研发周期,成为了控制软件设计的发展方向。

由于计算机具有存储大量信息的能力、强大的逻辑判断能力以及快速运算的能力,使计算机控制能够解决常规控制所不能解决的难题,能够达到常规控制达不到的优异的性能指标,同时进一步促进了许多新型先进技术的研究并迅速扩大了计算机控制系统的应用。先进的制造技术如计算机集成制造、柔性制造系统以及在过程控制方面的软件技术(如DDE、ActiveX、UPC、CUM等)的引入,给工业生产带来了巨大的效益。目前,计算机控制系统的发展,不仅应用在机械、化工、电力、冶金、采矿、核电站、人造卫星等不同的工业领域和航天航空等国防现代化的武器装备中,同时也快速渗透到现代生活的各个方面,并由对单一的设备或产品的控制,发展到通过网络对多个设备的同时远程控制。各类先进的计算机控制设备不仅完成单一的控制功能,甚至参与信息管理和决策支持,实现管控一体化。今天计算机控制系统正迈向网络化、智能化飞速发展的新时代。

## 1.3 计算机控制系统的组成

计算机控制系统由硬件和软件两部分组成。

### 1.3.1 计算机控制系统的硬件组成

图1-2给出了计算机控制系统的硬件组成框图。计算机控制系统的硬件主要由计算机系

统（包括主机和外部设备）、过程输入/输出通道、被控对象、执行器和检测变送环节等组成。

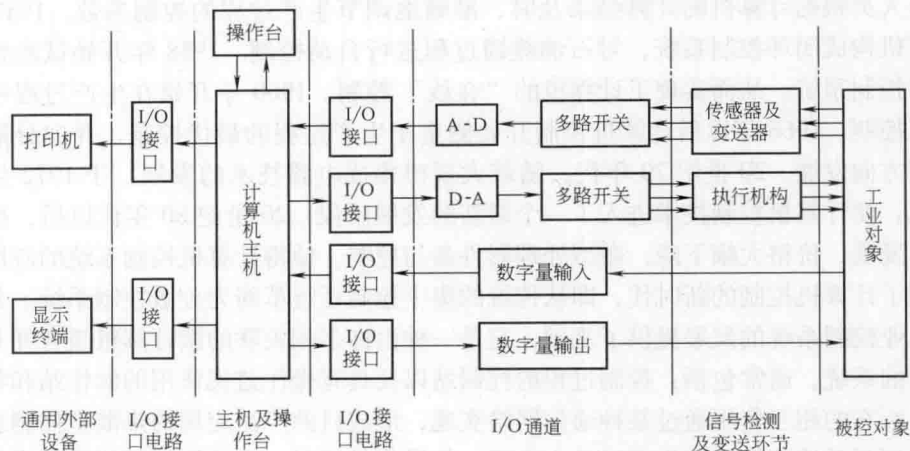


图 1-2 计算机控制系统的硬件组成框图

### 1. 计算机系统

计算机系统包括主机和外部设备。

主机是计算机控制系统的核心，可以根据不同的生产过程控制要求，配置不同的主机设备。通常用于工业控制的主机有：专用工业控制计算机、可编程控制器（PLC）及各种单板、单片计算机。主机根据过程输入设备送来的实时生产过程工作状况的各种信息，以及预定的控制算法，自动地进行信息处理，及时地选定相应的控制策略，并实时地通过过程输出设备向生产过程发送控制命令。

外部设备可按功能分为输入设备、输出设备、通信设备和外存储器。

常用的输入设备有键盘、鼠标、数字化仪表及专用操作台等，用来输入程序、数据和操作命令。

常用的输出设备有显示器（CRT）、打印机、绘图机和各种专用的显示台，它们以字符、曲线、表格、图形、指示灯等形式来反映生产过程工况和控制信息。

常用的外存储器有磁盘、磁带、光盘等，它们兼具输入和输出两种功能，存放程序和数据。

通信设备的任务是实现计算机与计算机或计算机与设备之间的数据交换。在大规模工业生产中，为了实现对生产过程的全面控制和管理，往往需要几台或几十台计算机才能完成控制和管理任务。不同的地理位置、不同功能的计算机及设备之间需要交换信息时，把多台计算机或设备连接起来，就构成了计算机通信网络。

### 2. 过程输入/输出通道

系统计算机与工业对象之间的信息传递是通过过程输入/输出通道进行的，它在两者之间起到纽带和桥梁作用。过程输入/输出系统由输入/输出通道（也称检测/控制通道）及接口、信号检测及变送装置和执行机构等组成。从信号传递的方向来看，又可分为过程输入通道和过程输出通道两部分。

常用的输入/输出接口有并行接口、串行接口等，输入/输出通道有模拟量输入/输出通

道和数字量输入/输出通道。模拟量输入通道的作用是将检测变送装置得到的工业对象的生产过程参数变成二进制代码送给计算机；输出通道的作用则是将计算机输出的数字控制量变换为控制操作执行机构的模拟信号，以实现对生产过程的控制。数字量输入/输出通道的作用是完成编码数字的输入和输出，将各种继电器、限位开关的状态通过输入接口传送给计算机，或将计算机发出的开关动作逻辑信号通过输出接口传送给生产过程中的各个开关、继电器等。

### 3. 控制对象

控制对象是指所要控制的生产装置或设备。当控制对象用传递函数来表示时，其特性可用放大系数  $K$ 、惯性时间常数  $T_m$ 、积分时间常数  $T_i$  和纯滞后时间  $\tau$  来描述。控制对象的传递函数可归纳为比例环节、惯性环节、积分环节、纯滞后环节等基本环节，而实际控制对象可能是这些基本环节的串联组合。

另外，可以按输入、输出量的个数来分类控制对象。当对象仅有一个输入  $U(s)$  和一个输出  $Y(s)$  时，称为单输入单输出对象，如此，还有多输入单输出对象、多输入多输出对象等，如图 1-3 所示。其中， $U(s)$  为给定控制量， $Y(s)$  为被控制量。

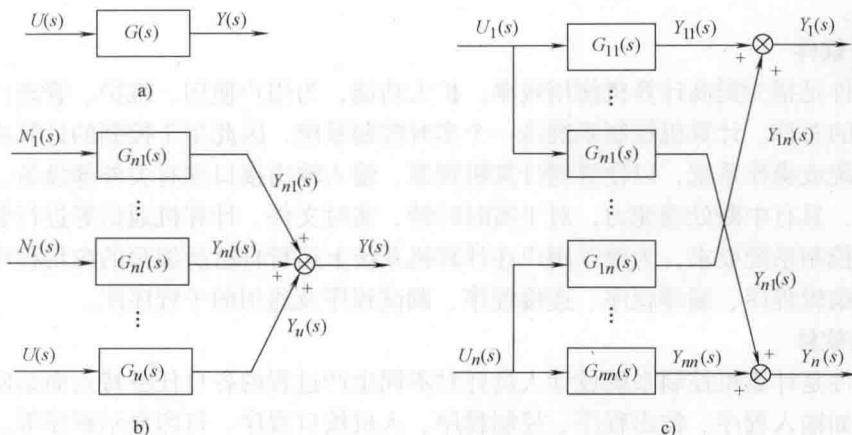


图 1-3 控制对象的输入输出

a) 单输入单输出对象 b) 多输入单输出对象 c) 多输入多输出对象

### 4. 执行机构

在控制系统中，有时控制器的输出可以直接驱动受控对象。但是大多数情况下，受控对象都是大功率级的，而且常与受控对象功率级别不相等，因此控制器的输出不能直接驱动受控对象，从而存在功率放大级问题。解决该问题的装置就称为执行元件，又常称为执行机构或执行器。执行器有适合大功率输出、快速运动、精确运动等不同用途的各种装置，按动力源一般可分为电动式、液压式和气动式 3 种。在电动执行机构中有步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机和直接驱动电动机等实现旋转运动的电动机，以及实现直线运动的直线电动机。电动执行机构由于动力源容易获得，使用方便，所以得到了广泛的应用。液压执行机构有液压油缸、液压马达等，这些装置具有体积小、输出功率大等特点。气动执行机构有气缸、气动马达等，这些装置具有质量轻、价格便宜等特点。

### 5. 测量变送环节

测量变送环节通常由传感器和测量电路组成，其主要功能是将被检测的各种物理量转变

成电信号,并转换成适用于计算机输入的标准信号。传感器作为获取被控信息的手段,是实现测试和自动控制的首要环节,其作用相当于人的“五官”,直接感受外界信息,具有重要的地位和作用。传感器获取和转换信息的正确与否,关系到整个控制系统的准确度。如果传感器的误差很大,后面的处理设备再好,也难以实现准确的测试和控制。自动化程度越高,系统对传感器的依赖性就越大。传感器通常有温度传感器、压力传感器、流量传感器、液位传感器、力传感器等。

计算机控制系统种类繁多,系统复杂程度也不尽相同,组成计算机控制系统的硬件组成也不同,设计者可根据实际情况进行选择。

### 1.3.2 计算机控制系统的软件组成

计算机的硬件为计算机控制系统提供了物质基础,软件则是计算机系统的神经中枢。计算机控制系统软件是计算机控制系统中具有各种功能的计算机程序的总和,整个系统的动作都是在软件指挥下协调工作的。计算机控制系统的软件从功能上可以分为两大类:系统软件和应用软件。

#### 1. 系统软件

系统软件是指为提高计算机使用效率,扩大功能,为用户使用、维护、管理计算机提供方便的程序的总称。计算机控制系统是一个实时控制系统,因此用于控制的计算机应配备有实时监控系统和操作系统,以便管理计算机资源、输入输出接口和有关外部设备,还要实现模块的调度,具有中断处理能力,对于实时时钟、实时文件、计算机通信等进行管理。根据实际计算机控制系统要求,为便于用户在计算机上运行自己所编写的应用程序,系统软件还应具有编辑程序、编译程序、连接程序、调试程序及通用的子程序库。

#### 2. 应用软件

应用软件是计算机控制系统设计人员针对不同生产过程的各自任务特点而编制的控制和管理程序,如输入程序、输出程序、控制程序、人机接口程序、打印显示程序等。应用软件的优劣,将给控制系统的功能、精度和效率带来很大的影响。在进行应用程序的设计时,应注意具有一定的灵活性,便于软件算法的改进或控制功能的增减。

在计算机控制系统中,硬件和软件不是独立存在的,在设计时必须注意两者的有机配合和协调,只有这样才能研制出满足生产要求的高质量的控制系统。

## 1.4 计算机控制系统的特性

由于数字计算机工作的特殊性,当它直接参与控制构成计算机控制系统时,与连续控制系统相比,在系统的结构、信号形式、工作方式和设计实现方法上都具有一些不同的特征,在本质上也存在许多不相同的性质。

### 1.4.1 计算机控制系统的特点

在实际工业控制系统中,大多数的被控制量、执行机构和测量部件都是连续模拟信号,而计算机是一个数字式离散处理器,其输入输出量都是数字信号。由于计算机是串行工作的,必须按照一定的时间间隔对连续信号进行采样,将其变成时间上断续的离散信号,进而

变成数字信号才能进入计算机,而计算机输出的数字量控制信号则要转换为模拟信号才能控制实际被控对象。所以,在计算机控制系统中,除具有连续模拟信号外,还有离散模拟信号和离散信号等多种信号形式。为了实现各种信号之间的通信,计算机控制系统中必须加入信号转换装置,如A-D和D-A转换器。

计算机控制系统中信号的具体变换与传输过程如图1-4所示。

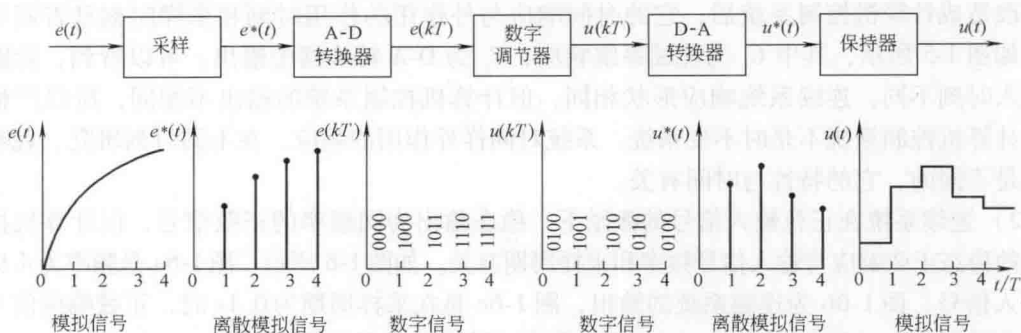


图1-4 计算机控制系统中信号变换与传输过程

为了便于讨论,本书将图1-4中的信号和信号变换过程名称做一统一定义:

模拟信号——时间上、幅值上都连续的信号,如图1-4中的 $e(t)$ 、 $u(t)$ 。

离散模拟信号——时间上离散,幅值上连续的信号,如图1-4中的 $e^*(t)$ 、 $u^*(t)$ 。

数字信号——时间上离散,幅值也离散的信号,计算机中常用二进制表示,如图1-4中的 $e(kT)$ 、 $u(kT)$ 。

采样——将模拟信号抽样成离散模拟信号的过程。

量化——采用一组数码(如二进制数码)来逼近离散模拟信号的幅值,将其转换成数字信号。

从图1-4可以清楚地看出计算机获取信号的过程是由A-D转换器来完成的。从模拟信号 $e(t)$ 到离散模拟信号 $e^*(t)$ 的过程就是采样,其中 $T$ 是采样周期。显然合理地选择采样周期是必要的, $T$ 过大会损失信息, $T$ 过小会使计算机的负担加重,即存储与运算的数据过多。A-D转换的过程就是一个量化的过程。

D-A转换的过程则是将数字信号解码为模拟离散信号并转换为相应时间的模拟信号的过程。

计算机引入控制系统之后,由于其运算速度快,精度高,存储容量大,以及它强大的运算功能和可编程性,一台计算机可以采用不同的复杂控制算法同时控制多个被控对象或控制量,可以实现许多连续控制系统难以实现的复杂控制规律。由于控制规律是用软件实现的,修改一个控制规律,无论复杂还是简单,只需修改软件即可,一般不需变动硬件进行在线修改,使系统具有很大的灵活性和适应性。

### 1.4.2 计算机控制系统的特殊问题

在计算机控制系统中,由于数字信号所固有的时间上离散、幅值上量化的效应,使得控制系统的实现存在一些特殊问题。当采样周期比较小(时间上的离散效应可以忽略)以及

计算机转换和运算字长比较长（幅值上的量化效应可以忽略）时，可以采用连续系统的分析和设计方法来研究计算机控制系统的问题。然而当采样周期比较大以及量化效应不可忽略时，必须运用专门的理论来分析和设计计算机控制系统。由下面的几个典型例子可以看到计算机控制系统与连续控制系统的不同。

1) 若被控对象是时不变线性系统，通常所形成的连续控制系统也是时不变系统。但当将其改造成计算机控制系统后，它的时间响应与外作用的作用时刻和采样时刻是否同步有关。如图 1-5 所示，其中  $C_c$  为连续系统响应， $C_s$  为 D-A 转换器的输出。可以看到，阶跃信号加入时刻不同，连续系统响应形状相同，但计算机控制系统的输出不相同，所以严格地说，计算机控制系统不是时不变系统。系统对同样外作用的响应，在不同时刻研究、观察时可能是不同的，它的特性与时间有关。

2) 连续系统在正弦输入信号的激励下，稳态输出为同频率的正弦信号，但计算机控制系统的稳态正弦响应与输入信号频率和采样周期有关。如图 1-6 所示，图 1-6a 是频率为 4.9 Hz 的输入信号，图 1-6b 为连续系统的输出，图 1-6c 是在采样周期为 0.1 s 时，正弦响应信号发生振荡周期为 10s 的差拍现象，而这种现象在连续系统中是不会发生的。

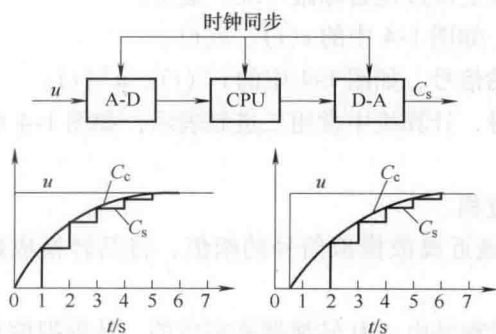


图 1-5 采样系统的时变特性

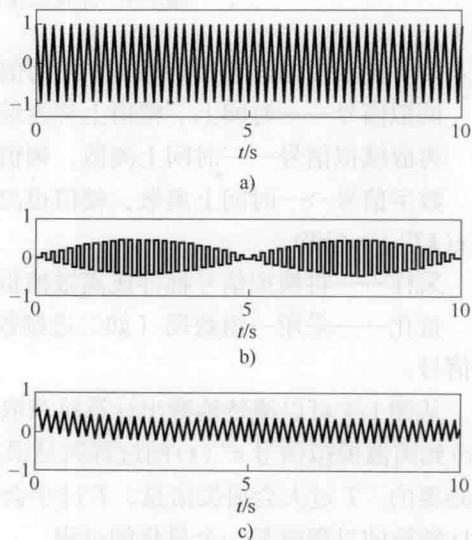


图 1-6 计算机控制系统的正弦激励响应

a) 输入信号 b) 系统输出 c) 差拍现象

3) 严格地说，一个稳定的连续时不变系统，达到稳态的时间应是无限的，因为它的响应是多个指数函数之和。而对于计算机控制系统，通过设计却可以实现在有限的采样间隔内（即有限时间内）达到稳态值，从而可以获得比连续系统更好的性能。如图 1-7 所示，实线表示连续系统位置、速度的阶跃响应和被控对象的连续输入曲线。虚线是同一被控对象的计算机控制系统的仿真曲线，其中控制器是依据有限调节时间方法设计的，最大控制输入两个系统相同。由图 1-7 可见，连续系统的调节时间大约为 6s，且有一定的超调。计算机控制系统的调节时间大约为 2.8s，具有较好的调节性能。

4) 在计算机控制系统中还有一些通过连续系统理论无法解释的现象。如：一个连续系统是可控可观的，将其变成计算机控制系统时，若采样间隔时间的选取不合适，则可能会变

为不可控系统；对于闭环负反馈的一阶、二阶线性连续系统，开环放大系数为任意值，系统均是稳定的，但是在计算机控制系统中，当采样周期一定时，系统开环放大系数仅处于一定的范围时，系统才能稳定。即使是一个简单的一阶惯性被控对象，只采用比例控制，也有可能在某个比例增益下，系统产生幅度不大的自持振荡。对于一个稳定的控制系统，当采样周期选择较大时，系统会变得不稳定。

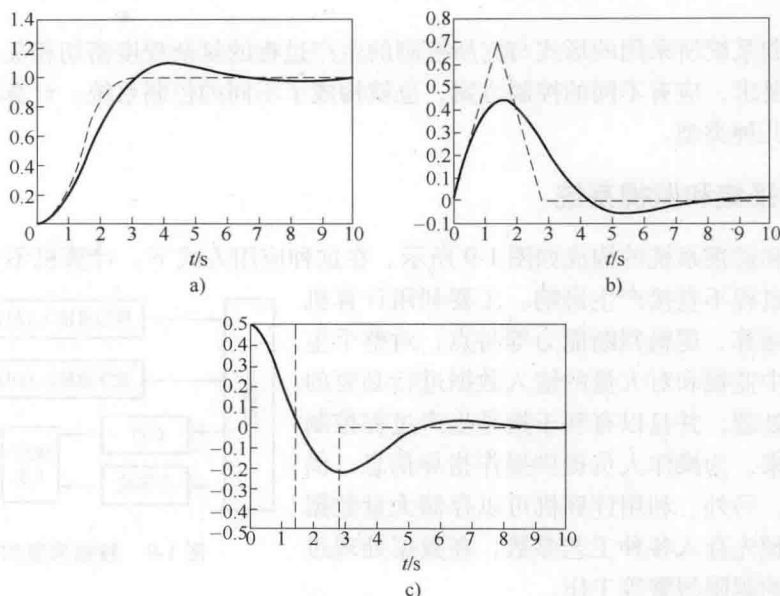


图 1-7 有限调节时间系统

a) 位置响应曲线 b) 速度响应曲线 c) 控制作用曲线

5) 在计算机控制系统的分析与设计时，还应考虑计算机内存、计算机运算器以及 A-D 与 D-A 转换器的字长问题，由于数字字长有限，不仅会带来量化误差问题，甚至会引起系统响应产生极限环振荡。如图 1-8 所示。这也是连续系统所没有的现象（当然，连续系统也会由系统中的非线性特性引起极限环振荡）。

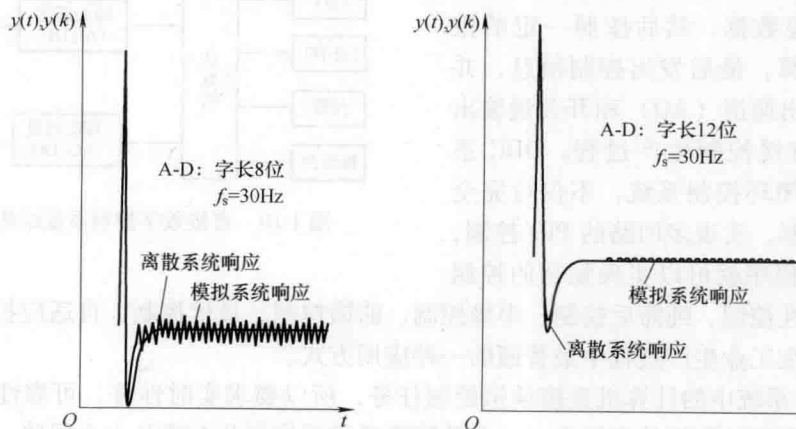


图 1-8 字长有限引起的极限环