

高等学校教材·计算机应用

可赠送课件

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

计算机控制技术

姜学军 编著



清华大学出版社

高等学校教材·计算机应用

计算机控制技术

姜学军 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地阐述了计算机控制系统的分析方法、设计方法以及工程实际的应用。其主要内容有：计算机控制系统组成及分类、信号的采样与恢复、计算机控制系统性能及指标、计算机控制系统的发展概况及趋势；Z变换、Z传递函数、Z变换的性质和定理、广义Z变换；计算机控制系统分析；计算机控制系统离散化设计方法；计算机控制系统模拟化设计方法；线性离散系统状态空间分析法；线性离散系统状态空间设计；复杂控制规律系统设计；计算机控制系统设计与实现的设计原则、步骤、输入/输出通道设计、抗干扰技术以及应用实例。本书既注重理论体系的完整性，又注重工程实际的应用性；既注重理论联系实际，又重视解决工程实际中常出现的问题。

本书可作为高等院校计算机、电子、自动控制及自动化专业的本科教材，同时也可作为有关科研技术人员的参考书。

版权所有，翻印必究。举报电话：010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术，用户可通过在图案表面涂抹清水，图案消失，水干后图案复现；或将表面膜揭下，放在白纸上用彩笔涂抹，图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制技术/姜学军编著. —北京：清华大学出版社，2005.8

(高等学校教材·计算机应用)

ISBN 7-302-10791-2

I. 计… II. 姜… III. 计算机控制 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第031458号

出 版 者：清华大学出版社 地 址：北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编：100084

社 总 机：010-62770175 客 户 服 务：010-62776969

责任编辑：闫红梅

版式设计：刘祎森

印 装 者：北京市昌平环球印刷厂

发 行 者：新华书店总店北京发行所

开 本：185×260 印张：18.75 字数：438千字

版 次：2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

书 号：ISBN 7-302-10791-2/TP·7174

印 数：1~3000

定 价：25.00元

编审委员会成员

(按地区排序)

清华大学	周立柱	教授
	覃征	教授
	王建民	教授
	刘强	副教授
	冯建华	副教授
北京大学	杨冬青	教授
	陈钟	教授
	陈立军	副教授
北京航空航天大学	马殿富	教授
	吴超英	副教授
	姚淑珍	教授
中国人民大学	王珊	教授
	孟小峰	教授
	陈红	教授
北京交通大学	阮秋琦	教授
北京信息工程学院	孟庆昌	教授
北京科技大学	杨炳儒	教授
石油大学	陈明	教授
天津大学	艾德才	教授
复旦大学	吴立德	教授
	吴百锋	教授
	杨卫东	副教授
华东理工大学	邵志清	教授
华东师范大学	杨宗源	教授
	应吉康	教授
东华大学	乐嘉锦	教授
上海第二工业大学	蒋川群	教授
浙江大学	吴朝晖	教授
	李善平	教授
南京大学	骆斌	教授
南京航空航天大学	秦小麟	教授
南京理工大学	张功萱	教授

南京邮电学院	朱秀昌	教授
苏州大学	龚声蓉	教授
江苏大学	宋余庆	教授
武汉大学	何炎祥	教授
华中科技大学	刘乐善	教授
中南财经政法大学	刘腾红	教授
华中师范大学	王林平	副教授
	魏开平	教授
武汉理工大学	李中年	教授
国防科技大学	赵克佳	教授
	肖 依	副教授
中南大学	陈松乔	教授
湖南大学	林亚平	教授
	邹北骥	教授
西安交通大学	沈钧毅	教授
	齐 勇	教授
西北大学	周明全	教授
长安大学	巨永峰	教授
西安石油学院	方 明	教授
西安邮电学院	陈莉君	副教授
哈尔滨工业大学	郭茂祖	教授
吉林大学	徐一平	教授
	毕 强	教授
长春工程学院	沙胜贤	教授
山东大学	孟祥旭	教授
	郝兴伟	教授
山东科技大学	郑永果	教授
中山大学	潘小轰	教授
厦门大学	冯少荣	教授
福州大学	林世平	副教授
云南大学	刘惟一	教授
重庆邮电学院	王国胤	教授
西南交通大学	杨 燕	副教授

改革开放以来,特别是党的十五大以来,我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就,高等教育实现了历史性的跨越,已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上,高等教育规模取得如此快速的发展,创造了世界教育发展史上的奇迹。当前,教育工作既面临着千载难逢的良好机遇,同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾,是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月,教育部下发了《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》,提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月,教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件,指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制订的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分,精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间(2003—2007年)建设1500门国家级精品课程,利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放,以实现优质教学资源共享,提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学

科体系有实质性的改革和发展、顺应并符合新世纪教学发展的规律、代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色精品教材包括:

- (1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。
- (2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。
- (3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。
- (4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。
- (5) 高等学校教材·信息管理与信息系统。

清华大学出版社经过近 20 年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材经过 20 多年的精雕细刻,形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会
E-mail: dingl@tup.tsinghua.edu.cn

计算机控制系统是指计算机参与控制的闭环控制系统。近年来,微型计算机和控制技术发展很快,两者的结合推动了计算机控制理论和控制技术的飞速发展,计算机控制系统在军事、航天技术、工农业、交通运输、生产管理和经济管理、能源开发与利用等重要部门都获得了广泛的应用,计算机控制理论与技术越来越显示出它无限的生命力。

目前,计算机控制技术的参考书有多种,而且内容也不一,有的偏重实际,但理论性不强;有的偏重理论,但实际应用不多。作者根据多年从事计算机控制系统设计工作所得到的体会和经验,在本书中,既注重理论体系的完整性,又注重这些理论在实际中的应用,力争做到重点突出、层次分明、条理清晰,既注重理论联系实际,又重视解决工程实际中常出现的问题。

本书系统地阐述了计算机控制系统的分析方法、设计方法以及工程实际的应用。其主要内容有:第1章介绍了计算机控制系统的组成及分类、信号的采样与恢复、计算机控制系统性能及指标、计算机控制系统发展概况及趋势;第2章介绍了Z变换、Z传递函数、Z变换的性质和定理、线性定常离散系统的差分方程及其解、广义Z变换、广义Z传递函数;第3章讨论了计算机控制系统过渡响应分析、稳态准确度分析、稳定性分析、根轨迹分析法、频率分析法;第4章讨论了计算机控制系统离散化设计方法;第5章讨论了计算机控制系统模拟化设计方法;第6章介绍了线性离散系统状态空间分析法;第7章讨论了线性离散系统状态空间设计方法;第8章讨论了复杂控制规律系统设计方法;第9章介绍了计算机控制系统设计与实现的设计原则、步骤、输入输出通道设计、抗干扰技术以及应用实例。

本书从工程技术角度出发,突出基本理论、基本概念和基本方法。本书叙述简练,深入浅出,选材实用;注重理论与应用结合,设计与实现结合;注重系统性和实用性。

编写本书时,力求做到理论分析计算与应用技术并重。在介绍计算机控制系统时注重软件与硬件的有机结合,以使读者牢固建立计算机控制系统的整体概念。力求做到突出重点,层次分明,语言易懂。在编写过程中还注意理论与实际的结合,重视解决工程实际问题,其中包括了作者多年来从事计算机控制系统设计工作所得到

的体会和经验。根据计算机控制系统目前发展的最新情况,有重点地引入了一些新的概念和方法,更新了原来一些陈旧内容。

通过对本书的学习,能够使读者掌握计算机控制的基本原理和基本控制技术,具有研究和开发新的计算机控制系统、解决实际工程问题的初步能力。

本书可作为高等院校计算机、电子、自动控制及自动化专业的本科教材,同时也可作为有关科研技术人员的参考书。

限于水平,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

作 者

2005 年 2 月

第 1 章 绪论	1
1.1 计算机控制系统概述	1
1.1.1 计算机控制系统的一般概念	1
1.1.2 计算机控制系统的组成	3
1.1.3 计算机控制系统的分类	5
1.1.4 计算机控制系统的特点	8
1.2 信号的采样与恢复	8
1.2.1 信号的采样过程	9
1.2.2 采样定理	10
1.2.3 信息的恢复过程和零阶保持器	13
1.3 计算机控制系统发展趋势	15
习题	16
第 2 章 Z 变换及 Z 传递函数	18
2.1 Z 变换定义与常用函数 Z 变换	18
2.1.1 Z 变换的定义	18
2.1.2 常用信号的 Z 变换	20
2.2 Z 变换的性质和定理	21
2.3 Z 反变换	25
2.4 广义 Z 变换	27
2.5 线性定常离散系统的差分方程及其解	29
2.6 Z 传递函数	30
2.6.1 Z 传递函数的定义	31
2.6.2 Z 传递函数与脉冲响应函数的关系	31
2.6.3 Z 传递函数的求法	32
2.6.4 开环 Z 传递函数	33

2.6.5	闭环 Z 传递函数	35
2.6.6	Z 传递函数的物理可实现性	37
2.6.7	在扰动作用下的线性离散系统	38
2.7	广义 Z 传递函数	39
	习题	40
第 3 章	计算机控制系统的分析	42
3.1	离散系统的稳定性分析	42
3.1.1	S 平面与 Z 平面的关系	42
3.1.2	离散系统输出响应的一般关系式	43
3.1.3	Routh 稳定性准则在离散系统的应用	44
3.2	离散系统的过渡响应分析	46
3.3	离散系统的稳态准确度分析	49
3.4	离散系统的输出响应	51
3.4.1	离散系统在采样点间的响应	52
3.4.2	被控对象含延时的输出响应	53
3.4.3	离散最少拍系统	55
3.5	离散系统的根轨迹分析法	55
3.6	离散系统的频率分析法	58
	习题	59
第 4 章	计算机控制系统的离散化设计	61
4.1	最少拍计算机控制系统的设计	61
4.1.1	最少拍系统设计的基本原则	62
4.1.2	阻尼因子法	67
4.1.3	任意广义对象的最少拍控制器设计	69
4.2	无波纹最少拍计算机控制系统设计	72
4.3	误差平方和最小系统的设计	77
4.4	在扰动作用下计算机控制系统的设计	80
4.4.1	针对扰动作用的设计	80
4.4.2	抑制扰动作用的设计	81
4.5	复合控制系统设计	83
4.6	数字控制器的根轨迹设计法	84
4.7	数字控制器的频域设计法	87
4.7.1	W 变换	87
4.7.2	数字控制器的频率特性	88
4.7.3	W 变换法的设计步骤	90
4.8	数字控制器的计算机程序实现	91

4.8.1	直接程序法	91
4.8.2	串行程序法	93
4.8.3	并行程序法	94
习题	96
第 5 章	计算机控制系统的模拟化设计	99
5.1	概述	99
5.2	模拟控制器的离散化方法	102
5.2.1	冲激不变法	103
5.2.2	加零阶保持器的 Z 变换法	104
5.2.3	差分变换法	104
5.2.4	双线性变换法	107
5.2.5	频率预畸变双线性变换法	109
5.2.6	零极点匹配法	110
5.3	数字 PID 控制	111
5.3.1	PID 控制的基本形式及数字化	111
5.3.2	数字 PID 控制器的控制效果	113
5.3.3	数字 PID 控制算法	116
5.4	数字 PID 控制算法的改进	117
5.4.1	积分分离 PID 算法	117
5.4.2	不完全微分 PID 算法	118
5.4.3	微分先行 PID 算法	120
5.4.4	带死区 PID 算法	120
5.4.5	抗积分饱和 PID 算法	121
5.5	数字 PID 控制器的参数整定	122
5.5.1	试凑法	122
5.5.2	扩充临界比例度法	123
5.5.3	扩充响应曲线法	125
习题	125
第 6 章	离散系统状态空间分析	127
6.1	线性离散系统状态方程	127
6.1.1	由高阶差分方程求状态方程	127
6.1.2	由 Z 传递函数求状态方程	130
6.2	连续状态方程的离散化	136
6.3	计算机控制系统的闭环离散状态方程	141
6.4	离散系统的传递函数矩阵与特征值	144
6.5	离散状态方程的求解	146

6.5.1	递推法	146
6.5.2	Z变换法	149
6.6	线性离散系统的稳定性、可控性和可测性	150
6.6.1	线性离散系统的稳定性	151
6.6.2	线性离散系统的可控性	154
6.6.3	线性离散系统的可测性	155
6.6.4	可控性、可测性与传递函数矩阵的关系	156
	习题	157
第7章	离散系统状态空间设计	160
7.1	线性离散系统输出反馈设计	160
7.1.1	在单位阶跃信号作用下单变量最少拍系统设计	161
7.1.2	在单位速度信号作用下单变量最少拍系统设计	167
7.1.3	在单位阶跃信号作用下多变量最少拍系统设计	169
7.2	线性离散系统状态反馈设计	174
7.2.1	设计单输入二阶系统的坐标变换法	174
7.2.2	n 阶单输入系统的坐标变换法	178
7.2.3	设计单输入系统的递推法	183
7.2.4	多输入 n 阶系统的递推法	186
7.3	离散的极点配置与观测器	190
7.3.1	用状态反馈实现指定的极点配置	190
7.3.2	状态观测器	195
7.4	Liapunov 最优状态反馈设计	202
7.5	最小能量控制系统设计	205
7.6	离散最优控制	208
7.6.1	离散极小值原理	208
7.6.2	离散动态规划法	211
	习题	216
第8章	复杂控制规律系统设计	219
8.1	纯滞后补偿控制系统	219
8.1.1	大林算法	219
8.1.2	史密斯预估算法	227
8.1.3	纯滞后信号的产生	231
8.2	串级控制	233
8.3	前馈控制	237
8.3.1	基本原理及控制算法	237
8.3.2	前馈控制的应用场合	240

8.4 解耦控制	241
8.4.1 解耦控制原理	241
8.4.2 解耦控制器设计	243
8.5 模糊控制技术	244
8.5.1 模糊控制的数学基础	245
8.5.2 模糊控制原理	247
8.5.3 模糊控制器设计	250
习题	253
第9章 计算机控制系统设计与实现	254
9.1 计算机控制系统设计原则	254
9.2 计算机控制系统设计步骤	256
9.3 计算机控制系统输入输出通道设计	263
9.3.1 过程输入输出通道的组成与功能	263
9.3.2 过程输入输出通道的控制方式	264
9.3.3 输入通道	265
9.3.4 输出通道	268
9.4 计算机控制系统抗干扰技术	269
9.4.1 干扰的来源	270
9.4.2 干扰的抑制方法	271
9.5 计算机控制系统应用实例	276
习题	282
参考文献	283

绪 论

计算机控制系统是在自动控制技术和计算机技术飞速发展的基础上产生的。20 世纪 50 年代中期,经典的控制理论已经发展成熟和完备,并在不少工程技术领域中得到了成功的应用。在这个基础上发展起来的模拟式自动控制系统也达到了相当完善的程度,直到现在,它仍然在许多工业部门占有相当重要的地位,许多元件和系统都已经形成标准化和系列化产品。尽管这种模拟式控制系统对单输入单输出系统是很有有效的,对一些较复杂的多输入和多输出的参数相互耦合的系统也曾起过积极的作用。但是,它的进一步发展受到了限制,在控制规律的实现、系统的优化、可靠性等方面越来越不能满足更高的要求。现代控制理论的发展为自动控制系统的分析、设计与综合增添了理论基础,而计算机技术的发展为新型控制规律的实现提供了非常有效的手段,两者的结合极大地推动了自动控制技术的发展。

1.1 计算机控制系统概述

计算机在控制工程中的主要用途有两个方面:在复杂的控制系统的分析、综合任务中进行数字仿真并完成复杂的工程计算;计算机作为控制系统中的一个重要组成部分,完成预先规定的各种控制任务。

1.1.1 计算机控制系统的一般概念

自动控制系统可以按照多种方式组成,但总的归纳起来有两种,即开环控制系统和闭环控制系统,典型结构如图 1.1 所示。

从图 1.1(a)可知,该系统通过测量元件对被控对象的被控参数(如温度、压力、流量、转速、位移等)进行测量,由变换发送单元将被测参数变换成电信号,反馈给控制器。控制器将反馈回来的信号与给定信号进行比较,如有误差,控制器就产生控制信号驱动执行机构工作,使被控参数的值与给定值保持一致。这种负反馈控制,是自动控制的基本形式。

图 1.1(b)是开环控制系统,它与闭环控制系统不同的是不需要被控对象的反馈信

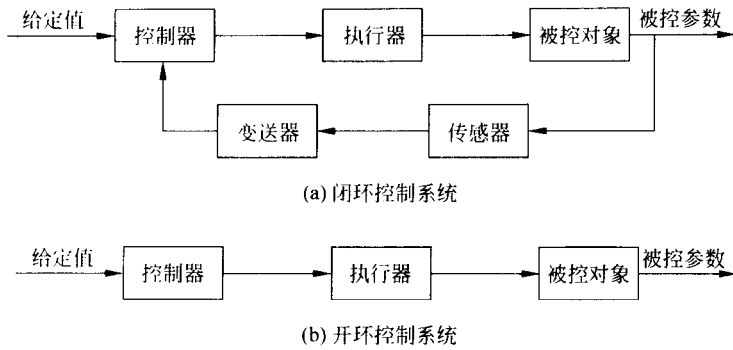


图 1.1 控制系统的一般形式

号。它的控制器直接根据给定信号去控制被控对象工作。这种系统不能自动消除被控参数偏离给定值带来的误差。控制系统中产生的误差全部反映在被控参数上。它与闭环控制系统相比,控制性能要差。

由图 1.1 可见,自动控制系统的的功能是进行信号的传递、加工、比较和控制。这些功能是由检测、变换发送装置、控制器和执行机构来完成的。其中控制器是控制系统的关键部分,它决定了控制系统的控制性能和应用范围。

若将自动控制系统中的控制器的功能用计算机或数字控制装置来实现,就构成了计算机控制系统,其基本框图如图 1.2 所示。简单说来,计算机控制系统就是由各种各样的计算机参与控制的一类控制系统。

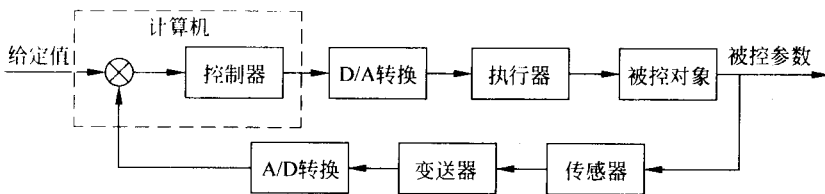


图 1.2 计算机控制系统

在计算机控制系统中,计算机的作用主要有三个方面:

(1) 信息处理,对于复杂的控制系统,输入信号和根据控制规律的要求实现的输出偏差信号的计算工作量很大,采用模拟解算装置不能满足精度要求,因而需要采用计算机进行处理。

(2) 用计算机的软件程序实现对控制系统的校正以保证控制系统具有所要求的动态特性。

(3) 由于计算机具有快速完成复杂工程计算的能力,因而可以实现对系统的最优控制、自适应控制等高级控制功能及多功能计算调节。

在一般的模拟控制系统中,控制规律是由硬件电路产生的,要改变控制规律就要更改硬件电路。而在计算机控制系统中,控制规律是用软件实现的,计算机执行预定的控制程序,就能实现对被控参数的控制。因此,要改变控制规律,只要改变控制程序就可以了。这就使控制系统的设计更加灵活方便。特别是可以利用计算机强大的计算、逻辑判断、记

忆和信息传递能力,实现更为复杂的控制规律,如非线性控制、逻辑控制、自适应控制、自学习控制及智能控制等。

计算机控制系统中,计算机的输入和输出信号都是数字量,因此在这样的系统中,需要将模拟量变成数字量的 A/D 转换器,以及将数字量转换成模拟量的 D/A 转换器。

计算机控制系统,从本质上来看,它的控制过程可以归结为以下三个步骤:

(1) 实时数据采集 对被控参数的瞬时值进行检测并输入。

(2) 实时决策 对采集到的表征被控参数的状态量进行分析,并按已定的控制规律,决定进一步的控制过程。

(3) 实时控制 根据决策,适时地对控制机构发出控制信号。

上述过程不断重复,使整个系统能够按照一定的动态品质指标进行工作,并且对被控参数和设备本身出现的异常状态及时监督并作出迅速处理。

上面所讲的计算机控制系统的一般概念中,计算机直接连在系统中工作,而不必通过其他中间记录介质来间接对过程进行输入输出及决策。生产过程设备直接与计算机连接的方式,称为“联机”方式或“在线”方式;生产过程设备不直接受计算机控制,而是通过中间记录介质,靠人进行联系并作相应操作的方式,称为“脱机”方式或“离线”方式。离线方式不能实时地对系统进行控制。

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,亦即计算机对输入信息以足够快的速度进行处理,并在一定的时间内作出反应或进行控制,超出这个时间,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。如炼钢炉的炉温控制,延迟 1s,仍然认为是实时的。而一个火炮控制系统,当目标状态量变化时,一般必须在几毫秒或几十毫秒之内及时控制,否则就不能击中目标了。实时性的指标,涉及到如下一系列的时间延迟:一次仪表的延迟、过程量输入的延迟、计算和逻辑判断的延迟、控制量输出的延迟和数据传输的延迟等。一个联机系统不一定是一个实时系统,但一个实时控制系统必定是联机系统。例如,一个只用于数据采集的微型机系统是联机系统,但它不一定是实时系统,而计算机直接数字控制系统,则必定是一个联机系统。

1.1.2 计算机控制系统的组成

计算机控制系统由计算机、外部设备、操作台、输入通道、输出通道、检测装置、执行机构、被控对象以及相应的软件组成,如图 1.3 所示。

1. 计算机

计算机是计算机控制系统的核心,通过接口可以向系统的各个部分发出各种命令,同时对被控对象的被控参数进行实时检测及处理。具体功能是完成程序存储、程序执行、数值计算、逻辑判断和数据处理等工作。