

计算机控制基础

Computer Control Fundamental

选题编辑 张莹莹

责任编辑 孔庆勇

封面设计 广大迅风艺术 

定价：51.00 元

ISBN 978-7-312-03550-0



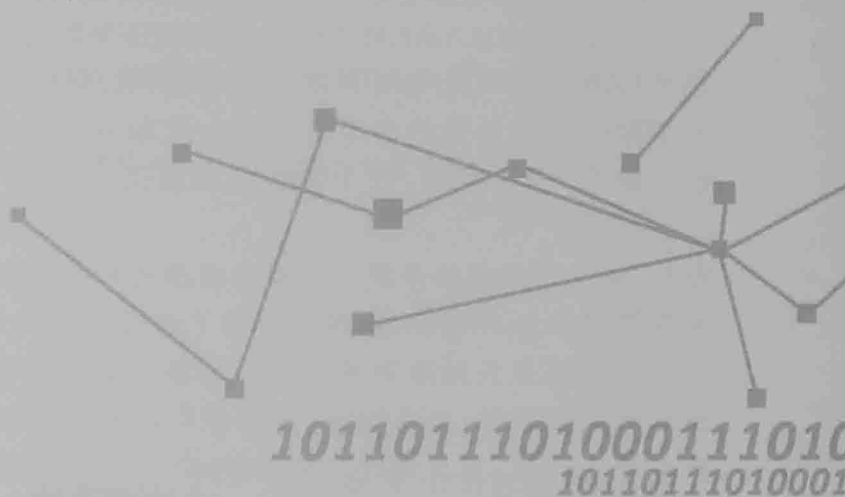
9 787312 035500 >

上架建议：信息技术类



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材



李嗣福 等 编著

Computer Control Fundamental

计算机控制基础

第3版

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了计算机控制系统分析、设计与工程实现的基本理论和方法,以及模型预测控制的基本原理和算法。全书共8章,主要内容有:信号转换与Z变换、计算机控制系统数学描述、动态分析、基于输入输出模型设计、基于状态空间模型设计、模型预测控制算法及设计和计算机控制系统的工程实现技术。其中,“模型预测控制算法及设计”一章系统讲述基于系统时间响应序列(即系统单位脉冲或单位阶跃响应序列)的各种模型预测控制算法及其设计方法,也包括一些作者多年来在这方面的研究成果。模型预测控制是20世纪70年代末发展起来的一类新型的最具适用意义和广泛应用前景的计算机控制策略。这章内容也是本书有别于同类教材的一个重要特点。

本书可作为高等学校自动化和电子技术及相关专业的本科生、研究生教材,也可供有关科技人员和教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制基础/李嗣福等编著. —3版. —合肥:中国科学技术大学出版社,2014.7
(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03550-0

I. 计… II. 李… III. 计算机控制 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第145023号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址:安徽省合肥市金寨路96号,230026

网址:<http://press.ustc.edu.cn>

安徽省瑞隆印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:26.75 插页:2 字数:654千

2001年9月第1版 2014年7月第3版 2014年7月第3次印刷

定价:51.00元



编审委员会

主 任 侯建国

副主任 窦贤康 陈初升

张淑林 朱长飞

委 员 (按姓氏笔画排序)

方兆本 史济怀 古继宝 伍小平

刘 斌 刘万东 朱长飞 孙立广

汤书昆 向守平 李曙光 苏 淳

陆夕云 杨金龙 张淑林 陈发来

陈华平 陈初升 陈国良 陈晓非

周学海 胡化凯 胡友秋 俞书勤

侯建国 施蕴渝 郭光灿 郭庆祥

奚宏生 钱逸泰 徐善驾 盛六四

龚兴龙 程福臻 蒋 一 窦贤康

褚家如 滕脉坤 霍剑青

总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、

“教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

入选的这些精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。希望该精品教材系列的出版,能对我们继续探索科教紧密结合培养拔尖创新人才,进一步提高教育教学质量有所帮助,为高等教育事业作出我们的贡献。

A large, expressive handwritten signature in black ink, reading '谢建国' (Xie Jiantuo). The signature is written in a cursive style with clear, bold characters.

中国科学技术大学校长
中国科学院院士
第三世界科学院院士

第3版前言

《计算机控制基础》一书于2001年出版,2006年修订出了第2版。十多年来,这本书在有关计算机控制基本理论及技术的教学以及相关知识传播和学术研究等方面发挥了积极的作用,产生了较好的社会效益。第2版图书业已售完,出版社拟将其修订出第3版。适逢2012年中国科学技术大学为了加强教材建设,由校教务处、研究生院和出版社联合组织学校年度精品教材出版项目。经评审,本书列入了该出版项目,并获得一定的经费支持。作者对此深感荣幸,并按该出版项目的要求,十分认真地对本书的第2版进行了重新修订,以使第3版无愧为中国科学技术大学的精品教材。

这次修订,考虑到本书的第8章内容所涉及的计算机硬件和软件技术发展变化很大,原有很多内容相对陈旧过时,所以着重对第8章的内容作了大幅的修改。将其中8.1节改为计算机控制系统工程实现的步骤及其任务;将其8.2节改为重点讲述单机集中式和多机分布式(即集散系统)计算机控制系统的结构及其特点;在其8.3节软件实现中,增加了控制算法的实现和减少在线计算产生时延的方法;将其8.4节硬件实现改为着重系统讲述单机集中式计算机控制系统的主要部件的结构及其技术要求以及设计选择的准则和依据。除此之外,对第1章也作了少量修改,在1.1节末,增加了一段关于计算机控制系统中的各种信号的说明;同时在其中增加了1.3节有关计算机控制系统分析设计理论的简要介绍,以使读者在学习本课程前对计算机控制的基本理论有一个整体概括的了解,以便在学习后面各章具体理论知识时,易于从理论整体高度加深理解。其余各章均未作较大的改动,仅个别地方因叙述不清或不够严谨,重新作了一些修改或补充说明。

在这次修订工作中,中国科学技术大学自动化系薛美盛老师给予很多支持和帮助,提供了不少非常好的参考文献资料,在此深表感谢。

这次修订改动最多的第8章原是以作者学生陈忠保博士为主编写的,因他移居海外多年,不能参与修订,只能由作者自己执笔修订。但这章相关知识非作者所长,作者在此方面的水平十分有限,所以难免会有不妥和错误之处,因此真诚欢迎读者不吝赐教指正。

李嗣福

2014年1月16日

于中国科学技术大学

第 2 版前言

《计算机控制基础》这本教材是 2001 年出版的,中国科学技术大学信息学院一直将其作为本科生和部分研究生的计算机控制课程的教材,使用效果较好,师生反映其内容系统,思路清晰,讲述清楚,易于阅读理解。由此本书曾获得中国科学技术大学 2002 年度优秀教材一等奖。因第 1 版图书现已售完,为满足教学需要,出版社决定再版重印。

考虑到计算机控制系统分析设计的基本理论方法相对比较稳定,近几年来没有什么实质性大的发展变化,这次再版便没有作大的改动,基本上保持了原版内容、结构的全貌,仅仅作了一些局部少量的修订。具体包括:① 对原版作了一次全面仔细的勘校,对由于书写、输入、打印以及校对疏忽造成的错误进行了订正;② 对原版中个别阐述不清、不妥或错误的地方作了修改;③ 在第 5 章的数字 PID 控制、极点配置设计和最少拍控制系统设计等几节中分别增加了 Smith 预估补偿 PID 控制、大林控制器设计和卡尔曼控制器设计等内容。这几节同其所增加的内容存在一定的内在联系。

这次再版修订工作,中国科学技术大学自动化系薛美盛副教授参与了部分勘校工作,并对修订提出了一些宝贵意见,特在此致谢。

因本人学识和文字编写能力有限,本版虽经再次勘校修订,但其中仍难免有不妥或错误之处,真诚欢迎读者不吝赐教批评。

李嗣福

2006 年 1 月 22 日

于中国科学技术大学

前 言

本书是为高等学校自动化、控制理论与工程及其相关专业的计算机控制课程编写的教材,取名《计算机控制基础》。

自 20 世纪 80 年代以来,为适应计算机控制教学发展的需求,国内先后出版了一批各具特色的计算机控制理论与技术的教材。这些教材在计算机控制教学和工程推广应用中发挥了很大作用。本书综合借鉴了国内外现有的一些优秀计算机控制教材,取材主要是有关计算机控制系统分析、设计和工程实现方面的基本理论和基本方法。内容力求系统、简练、有新意,注重基础性、实用性和先进性;结构力求自然清晰、层次分明,注意各章节的联系与呼应;理论阐述力求概念清楚、论证严谨,注重理解思路和启发;语言力求简明、通俗易懂,便于阅读自学。

全书共分 8 章。第 1 章概述计算机控制系统的组成、类型、特点以及其发展概况和趋势;第 2 章讲述信号采样与重构、采样信号数学描述与分析,以及有关 Z 变换的数学知识;第 3 章讲述计算机控制系统的数学描述,侧重介绍差分方程、 Z 传递函数、脉冲响应序列以及状态空间表示式等离散系统的 4 种数学模型及其相互关系;第 4 章讲述计算机控制系统稳定性和稳态及动态分析;第 5、6 两章分别讲述计算机控制系统基于输入输出模型和状态空间模型的一些典型设计方法和算法;第 7 章介绍最近二十多年来新发展的模型预测控制的原理、典型算法以及算法改进与分析,其中包括了作者自己多年来在这方面的一些研究成果;第 8 章简要介绍计算机控制系统工程实现中的一些基本知识,其中包括系统总体设计任务及步骤、计算机分布控制系统(DCS)及现场总线控制系统(FCS)的结构和特点、计算机控制系统软件与硬件设计思路与要求,以及抗干扰技术等。

本书可用于本科生或研究生教学,也可供从事自动化及其相关技术工作的科技人员参考。用于本科生教学可安排 54~72 学时,重点讲授前 5 章和第 8 章;用于研究生教学可安排 54 学时,重点讲授后 4 章内容。

本书第 8 章由魏衡华副教授和陈忠保博士完成,其余各章和全书统稿审校均由作者本人完成。本书的写作出版得到了中国科学技术大学教务处和自动化系吴刚教授、奚宏生教授的关心和支持,全茂达教授审阅了前 7 章,并提出了很多宝贵的建设性意见,学

生李亚秦、许自富为整理、打印书稿付出了辛勤劳动,在此一并致谢。

由于作者知识水平有限,书中难免有不妥或错误之处,诚请读者批评指正。

李嗣福

2001年3月20日

于中国科学技术大学

目 次

总序	(i)
第 3 版前言	(iii)
第 2 版前言	(v)
前言	(vii)
第 1 章 计算机控制系统概述	(1)
1.1 计算机控制系统的组成	(1)
1.1.1 计算机反馈控制系统及其中信号类型	(1)
1.1.2 计算机控制系统的组成	(3)
1.2 计算机控制系统的类型和特点	(5)
1.2.1 计算机控制系统的类型	(5)
1.2.2 计算机控制的主要特点	(8)
1.3 计算机控制系统的分析设计理论简介	(9)
1.4 计算机控制的发展概况及趋势	(12)
习题	(14)
第 2 章 信号转换与 Z 变换	(15)
2.1 数字信号和 A/D 转换	(15)
2.2 采样信号	(19)
2.2.1 理想采样信号	(19)
2.2.2 实际采样信号	(22)
2.2.3 采样信号分析	(23)
2.3 采样定理与采样周期选取	(26)
2.3.1 采样定理	(26)
2.3.2 重构公式说明	(27)
2.3.3 采样周期 T 选取	(29)
2.4 信号恢复与保持器	(32)
2.4.1 零阶保持器特性分析	(33)
2.4.2 一阶保持器特性分析	(35)
2.5 Z 变换	(37)

4.1.3	离散系统频率特性与奈氏(Nyquist)稳定性判据	(119)
4.1.4	离散系统李亚普诺夫稳定性判据	(121)
4.2	计算机控制系统的稳态误差分析	(124)
4.2.1	计算机控制系统的稳态误差与稳态误差系数	(125)
4.2.2	计算机控制系统的误差级数与动态误差系数	(129)
4.2.3	计算机控制系统对干扰输入的稳态误差	(131)
4.3	计算机控制系统的暂态响应分析	(132)
4.3.1	Z平面上极点分布与暂态响应的关系	(132)
4.3.2	采样周期 T 对暂态响应特性的影响	(137)
4.3.3	计算机控制系统的连续输出响应的计算	(141)
4.3.4	含有延迟的计算机控制系统的输出响应	(144)
4.3.5	非同步采样和信号转换延迟的处理	(144)
4.4	双速率采样控制系统分析	(146)
4.4.1	开关分解 Z 域分析法	(146)
4.4.2	串级双速率采样控制系统时域分析法	(148)
	习题	(151)
第5章	计算机控制系统基于输入输出模型设计法	(153)
5.1	连续化设计和模拟控制器离散化	(154)
5.1.1	连续化设计	(154)
5.1.2	模拟控制器的离散化	(156)
5.2	数字 PID 控制	(165)
5.2.1	理想 PID 控制	(166)
5.2.2	实际 PID 控制	(167)
5.2.3	数字 PID 控制改进算法	(169)
5.2.4	Smith 预估补偿 PID 控制	(172)
5.2.5	数字 PID 控制算法参数的整定	(174)
5.3	根轨迹和伯德(Bode)图设计法	(177)
5.3.1	根轨迹设计法	(177)
5.3.2	伯德图设计法	(178)
5.4	极点配置设计法	(180)
5.4.1	单位反馈控制系统的极点配置设计	(180)
5.4.2	复合控制系统的极点配置设计	(184)
5.4.3	大林(Dahlin)控制器设计	(192)
5.5	最少拍控制系统的设计	(193)
5.5.1	最少拍控制系统的设计	(194)
5.5.2	最少拍无纹波控制系统的设计	(204)
5.5.3	最少拍无纹波复合控制系统的设计	(209)
5.5.4	卡尔曼(Kalman)控制器设计	(212)

7.4 MPC 算法的预测状态空间形式	(328)
7.4.1 MAC 算法的预测状态空间形式	(328)
7.4.2 DMC 算法的预测状态空间形式	(337)
7.4.3 GPC 算法的预测状态空间形式	(341)
7.4.4 无自平衡系统的 MAC 和 DMC 算法	(345)
7.4.5 可减小模型截断误差的 MAC 和 DMC 改进算法	(347)
7.5 多变量系统的 MPC 算法	(352)
7.5.1 多变量 DMC 集中预测集中优化算法	(352)
7.5.2 多变量 DMC 分散预测分散优化算法	(355)
7.6 基于 Laguerre 函数模型的预测控制	(361)
7.6.1 动态系统的 Laguerre 函数模型	(361)
7.6.2 预测控制算法	(368)
习题	(370)
第 8 章 计算机控制系统的工程实现	(372)
8.1 计算机控制系统工程实现的步骤及其任务	(372)
8.2 计算机控制系统的结构	(377)
8.2.1 集中式计算机控制系统的结构	(377)
8.2.2 分布式计算机控制系统及其结构	(378)
8.2.3 现场总线式计算机控制系统及其结构	(380)
8.3 计算机控制系统的软件实现	(386)
8.3.1 概述	(386)
8.3.2 人机界面的要求和实现	(387)
8.3.3 数据管理和数据通信	(391)
8.3.4 数据输入和输出	(393)
8.3.5 控制器的算法实现及其计算时延减少	(394)
8.4 计算机控制系统的硬件实现	(398)
8.4.1 控制计算机硬件系统的技术要求	(398)
8.4.2 控制机主机的选择	(400)
8.4.3 模拟输出通道及 D/A 选择	(401)
8.4.4 模拟输入通道及 A/D 选择	(403)
8.4.5 数字输入输出通道的实现	(404)
8.5 计算机控制系统的抗干扰技术	(405)
8.5.1 干扰源	(405)
8.5.2 干扰的耦合方式	(406)
8.5.3 干扰的抑制	(407)
8.5.4 系统供电技术	(409)
习题	(411)
参考文献	(412)

第 1 章 计算机控制系统概述

众所周知,计算机具有信息存储记忆、逻辑判断推理和快速数值计算功能,是一种强大的信息处理工具,其应用已经渗透到人类活动的各个领域,强有力地推动着科学与技术的全面进步。随着计算机技术的迅猛发展,计算机在工程控制中的应用也越来越广泛。如今计算机控制已广泛应用于各行各业技术工程和各类工业生产制造过程的控制中。人们在计算机控制推广应用的技术实践中不断总结、创新,促进了计算机控制系统的分析设计理论和方法以及工程实现技术的不断发展和完善,已使计算机控制成为以控制理论和计算机技术为基础的一门新的工程科学技术,成了从事自动化技术工作的科技人员必须掌握的一门专业知识。本书将侧重系统讲述有关计算机控制系统分析及设计的基本理论和方法,以及一些较为实用的计算机先进控制算法,并简要概述计算机控制系统工程实现技术。

本章概述计算机控制系统的组成、类型、特点和计算机控制系统分析设计理论简介,以及计算机控制的发展概况及趋势。

1.1 计算机控制系统的组成

1.1.1 计算机反馈控制系统及其中信号类型

计算机控制系统简单地说,就是由计算机和自动化仪表装置与被控对象连接而成的具有各种自动化功能的技术工程系统。其中计算机反馈控制系统典型结构如图 1.1 所示。系统中由被控对象、测量仪表和执行装置构成的广义被控对象绝大多数都是连续系统,其输入和输出信号均为连续的模拟信号,而计算机则是一个数字信号处理系统,进、出计算机的信号和计算机运算处理的信号均为数字信号,因此,广义被控对象和计算机之间,必须采用模/数(A/D)转换器和数/模(D/A)转换器来实现模拟信号与数字信号之间的相互转换,从而使被控对象与计算机之间的信号传递形成闭合回路,构成反馈系统。系统中计算机的作用相当于传统模拟控制系统中的控制器,计算机按照时间很短的重复周期(即采样周期)不断地由 A/D 转换器获得被控量的数字测量信号 $y_m(k)$ 和数字参考输入信号 $r(k)$,并按照预定的反馈控制律(亦即控制算法)计算出数字控制信号 $u(k)$,再通过 D/A 转换器转换成模

拟控制信号 $u(t)$ 驱动执行装置, 从而实现对被控对象的反馈控制。

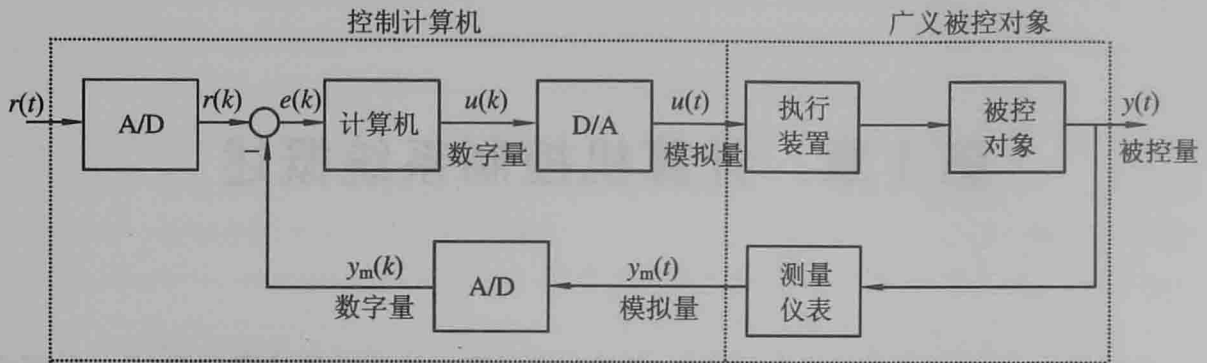


图 1.1 典型计算机反馈控制系统结构框图

由图 1.1 可知, 计算机控制系统总是由连续环节的广义被控对象(其输入和输出均为连续时间信号)和离散环节的计算机(其输入和输出均为离散时间信号)通过 A/D 和 D/A 转换器连接而成的。系统中总是同时存在着连续时间和离散时间信号, 所以计算机控制系统就其结构和信号而言是一种混合系统。因系统中的离散时间信号是由连续时间信号通过 A/D 过程中的周期采样获得的, 故又称为采样系统。

计算机控制系统中的信号形式多样, 若按信号时间特征可分为:

- 连续时间信号: 指随着时间持续不间断的, 在任何时刻都可取值的信号;
- 离散时间信号: 指随着时间断续出现的, 只可在离散间断的时刻取值的信号。

若按信号幅值特征可分为:

- 连续幅值信号: 指幅值可连续变化, 即可以是任何值的信号;
- 离散幅值信号: 指幅值不是连续变化, 只是离散值的信号。

如果将信号的时间特征和幅值特征两者组合, 则计算机控制系统中的信号可分为如下四种类型:

- (1) 连续时间连续幅值信号简称连续信号或模拟信号: 具体有, 系统被控量 $y(t)$ 及其测量 $y_m(t)$ 和系统参考输入 $r(t)$ 以及被控对象内部各状态量 $x_i(t)$ 等信号;
- (2) 连续时间离散幅值信号也简称连续信号: 具体有, D/A 转换器中的零阶保持器输出的幅值为阶梯式的控制信号 $u(t)$ 和计算机内存储的数字信号;
- (3) 离散时间离散幅值信号简称离散信号: 具体指计算机输入和输出以及运算处理的数字信号;
- (4) 离散时间连续幅值信号: 具体指 A/D 转换器中的采样开关后面的采样信号 $y^*(t)$ 。

说明一点, 以上几种信号, 按幅值特征分的连续幅值和离散幅值两类信号的差别仅是整量化误差, 差别很小, 对系统作用无实质性区别, 其差异一般较少考虑。而按时间特征分的连续时间和离散时间两类信号则有很大差别, 对系统的作用有着实质性区别。所以后面论及有关信号对系统影响时, 主要关注和讨论的是这两类信号, 凡提及连续信号和离散信号, 若无说明, 则均指连续时间和离散时间信号。此外, 本书讲的计算机控制系统, 若无特别说明, 则均指计算机控制的线性时不变系统。