



高等学校  
电子信息类

DIANZIKEJIDAXUECHUBANSHE

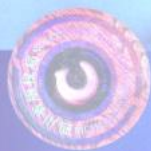
XILIEJIAOCAI

规划教材

本科机械电子工程

# 机电系统 计算机控制工程

熊世和 主编



电子科技大学出版社

UESTC PUBLISHING HOUSE

TP273

X66-2

高等学校  
电子信息类 规划教材

# 机电系统计算机控制工程

---

熊世和 主编

电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了机电系统计算机控制的基本原理、设计方法及其应用技术,它是将线性连续控制系统和计算机控制系统的内容紧密结合在一起,以计算机控制为重点,具有基础性、系统性、应用性和学科发展的前沿性。同时达到减少学时,拓宽知识面的要求,使自动控制原理和机电系统计算机控制技术的内容合一,解决前后课程的脱节问题。全书共十章,前五章是分析和设计计算机控制系统应具有的基础知识,内容包括系统的组成、原理及数学模型,分析和设计控制系统所涉及的数学工具、系统性能指标与系统内部和外部参数的关系等。后五章从不同的角度介绍计算机控制系统的设计方法和工程实现应考虑的主要问题。练习题力求少而精。

本书可作为机械工程类专业本科生及研究生的教材或教学参考书,并可作为非自动控制专业及大专教材或教学参考书。本书还适合广大从事机械电子工程和电气工程方面的技术人员自学和参考。

0030/24

## 声 明

本书无四川省版权防盗标识,不得销售;版权所有,违者必究,举报有奖,举报电话:(028)6636481 6241146 3201496

高等学校 规划教材  
电子信息类

机电系统计算机控制工程

熊世和 主编

---

出 版:电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号,邮编:610054)

责任编辑:王仕德

发 行:新华书店经销

印 刷:西南冶金地质印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张 22.625 字数 546 千字

版 次:1999年8月第一版

印 次:1999年8月第一次

书 号:ISBN 7-81065-196-X/TP·112

印 数:1-4000册

定 价:25.00元

---

# 出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办协商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

# 前 言

本教材按电子工业部的《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由机械电子工程专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由电子科技大学熊世和担任主编，主审吕炳朝，责任编辑谢仕聘。

本教材的参考学时数为85学时，其主要内容是讲机电系统计算机控制工程的基础知识、设计方法和工程实现应考虑的主要问题。使用本教材宜在学过专业基础课机械原理、力学、电子(或电气)技术和计算机原理之后，而在需学自动控制原理内容的那些课程之前。由于本教材对自动控制原理和机电系统计算机控制技术内容深浅是并行安排的。因此，在讲课时可根据不同的听课对象选取相应的内容以形成系统性。

本教材中由李小兵和熊静琪参加编写各约12万字。参加审阅工作的还有陈永、古天祥同志，他们都为本书提出许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

<b>第一章 基本知识</b> .....	(1)
1.1 机电系统计算机控制工程的含义 .....	(1)
1.2 控制系统的基本物理概念 .....	(2)
1.3 智能控制系统 .....	(9)
1.4 计算机分层控制系统结构.....	(12)
1.5 计算机控制系统的设计特点.....	(13)
1.6 本课程讲述的内容.....	(14)
小结.....	(14)
练习题.....	(15)
<b>第二章 拉氏变换·Z 变换·传递函数</b> .....	(17)
2.1 基本信号.....	(17)
2.2 拉氏变换及 $S$ 传递函数 .....	(25)
2.3 $Z$ 变换及 $Z$ 传递函数 .....	(32)
2.4 $[S]$ 域到 $[Z]$ 域之间的转换 .....	(36)
2.5 控制系统结构的等效变换.....	(42)
小结.....	(46)
练习题.....	(47)
<b>第三章 连续时间信号和数字信号之间的转换</b> .....	(51)
3.1 采样理论.....	(51)
3.2 模拟数字转换器(ADC)、数字模拟转换器(DAC) .....	(53)
3.3 DAC 位数 $n$ 的选择及与系统的连接 .....	(61)
3.4 ADC 位数 $n$ 的选择及与系统的连接 .....	(62)
小结.....	(63)
练习题.....	(63)
<b>第四章 机电系统的动态模型及传递函数</b> .....	(65)
4.1 机电系统原理简化图.....	(65)
4.2 机电系统动力学方程及传递函数.....	(70)
4.3 状态变量法描述机电系统.....	(86)
4.4 状态方程及其传递函数.....	(88)
4.5 被控对象的可控性和可观测性.....	(92)
4.6 机电系统未建动力学模型.....	(96)
小结.....	(99)



小结 .....	(279)
练习题 .....	(280)
<b>第十章 计算机控制系统的工程实现</b> .....	<b>(281)</b>
10.1 计算机控制系统实现中的工程实际问题.....	(281)
10.2 机械手的一个终端执行器的微机控制.....	(295)
10.3 示教再现式机械手伸缩臂的计算机控制系统设计.....	(304)
10.4 机械手机电一体化开环控制系统设计.....	(312)
10.5 机械手各轴闭环控制系统设计.....	(326)
10.6 计算机分层控制系统举例.....	(330)
10.7 仿人智能控制.....	(342)
小结.....	(350)
<b>参考文献</b> .....	<b>(352)</b>



# 第一章 基本知识

## 1.1 机电系统计算机控制工程的含义

### 1. 机电系统的含义

一般来说机电系统的动力部分是电气的,经过电气系统与工艺过程或被控对象相联系的是机械。机械与电气动力相结合的系统是机电系统,它在生产过程自动化和机电产品中占有相当大的数量。现代控制系统也常常是机电的,是运动控制技术的最基本的环节。机械包括被控对象和机械传动两部分内容。电气包括能量放大和执行器两部分内容。能量放大一般是指电压放大、电流放大和功率放大等,这些统称为驱动器。执行器一般是指伺服电机、步进电机、电磁阀和电磁铁等,它常分为线性执行器和数字式执行器,因而与之相配的是线性驱动器和脉冲驱动器。机电系统的物理结构框图如图 1.1 所示。图中  $u(t)$  为连续控制信号,  $u(nT)$  为离散时间控制信号,  $T$  是采样周期(或控制周期),  $n$  为整数。

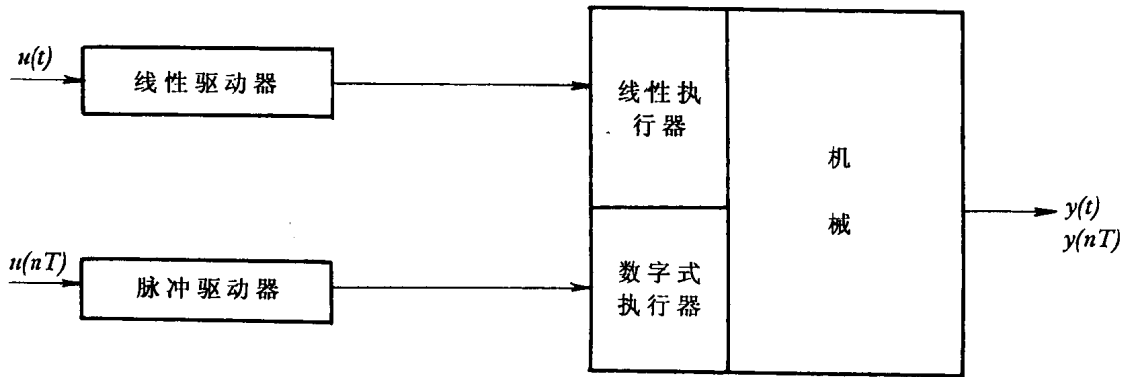


图 1.1 机电系统的物理结构

机电系统在国防军事装备、民用设备和生产过程中大量地存在,比如化工生产过程控制中的蒸馏过程本身不是机电系统,而保证这个过程正常运行的却是机电系统,如阀门的控制。又因为力学系统中的位置、速度、转角;电力系统中的电流、电压、电感和电容;化学热力学系统中的克分子数、温度、压力、流量等;这些系统的数学模型是相似的。所以机电系统的分析是具有一般性、代表性和实用性的。

### 2. 机电系统计算机控制工程的含义

随着电子数字计算机和微电子学的迅速发展,数字计算机不仅可以作为复杂控制系统中的一个组成部分,而且可以用于单个控制回路的调节器或控制器中,代替常规的模拟调节器或控制器,同时,它还不局限于少数的有限的几种功能。

现代工业生产的主要经济指标是产量高、速度快、质量好、消耗少、产品易于更新换代。因而要求从事生产的设备向“智能”和“柔性”方向发展。所谓“智能”和“柔性”就是不改变系统的硬件,而能根据客观的情况做多种事情。用户对产品的要求是性能好、可靠性高、功能强、价格便宜、易于维护和修理等,这正是计算机的特长。数字计算机模拟人的“大脑”,是机电产品和生产装备的重要组成部分。因而机电系统计算机控制工程的含义是机电系统、信息获取和处理、计算机接口等部分在数字计算机的支持下,以系统的观点进行有效的组合而形成计算机控制系统,解决实际工程的理论和技术问题,实现最佳的性能指标要求。计算机是产品或生产设备的核心。

对于有计算机参加控制的系统称为计算机控制系统,有时也称为数字控制系统,这是计算机在控制系统中的在线应用。在讲述计算机控制系统时以机电系统为实际内容,同时注意满足机械、电子工程专业和机电一体化技术的需要。

计算机还可以帮助工程设计人员对控制系统进行分析、设计、仿真及建模等工作,这方面的内容称为计算机辅助设计或控制系统 CAD,这是计算机控制系统方面的离线应用。

## 1.2 控制系统的基本物理概念

控制系统从信号传送的通路可分为两大类:一是开环控制系统;二是闭环控制系统。控制系统从信号形式来看,又可分为连续控制系统(模拟控制系统)和计算机控制系统(离散控制系统)。

### 1. 开环控制系统

对于连续的开环控制系统仅举一例子以简要说明,如图 1.2 所示的直流电动机的转速

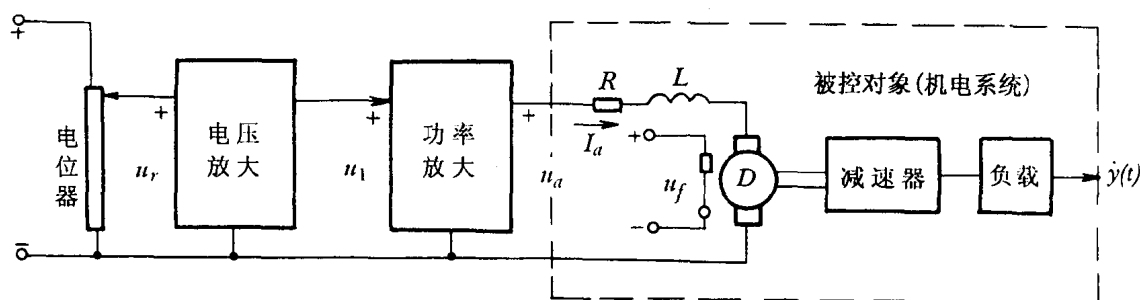


图 1.2 直流电动机的开环控制系统

控制,图中  $R$  和  $L$  为直流电动机电枢线圈的直流电阻和电感,  $u_f$  为恒定激磁电压。给定电压  $u_r$  经放大后得到电动机的电枢电压  $u_a$ ,改变  $u_r$  负载可得到不同的转速。这种系统信号通路不闭合,则称为开环控制系统。它可被简化为如图 1.3 所示的一般情况。 $r(t)$  称为系统的给定值或输入量,  $u(t)$  称为系统的控制信号或控制量,  $y(t)$  称为系统的被控制量或输出量。如果给定值为恒定值则是一个开环恒速控制系统。如果给定值为一个恒速信号,则是一个开环速度跟踪系统。控制器是为了满足系统的静态误差和动态特性而设计出的网络。如果这个控制器由计算机来实现,则称为开环计算机控制系统,如图 1.4 所示。因为被控对象是线

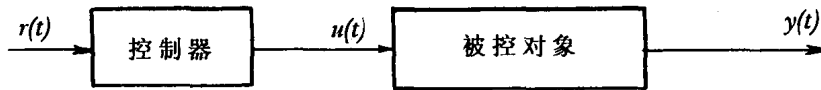


图 1.3 开环控制系统简化框图

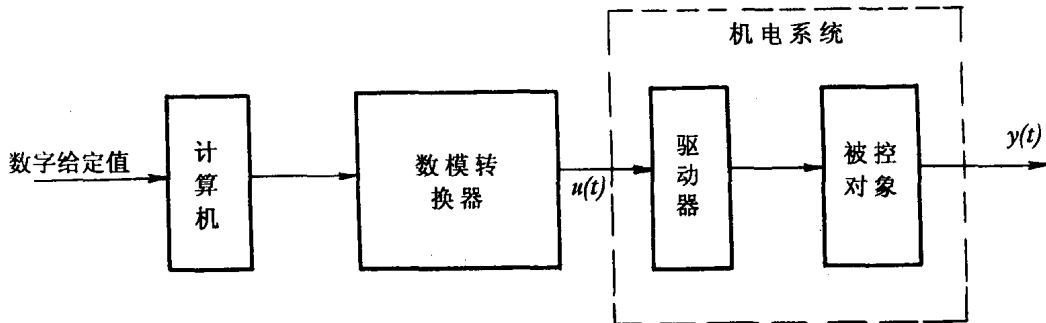


图 1.4 开环计算机控制系统

性连续系统,所以计算机的输出必须有数模转换器,数模转换器包含有输出保持器,常称之为 DAC。如果执行器为数字式的执行器,则如图 1.5 所示,称为开环直接数字控制系统或 DDC。

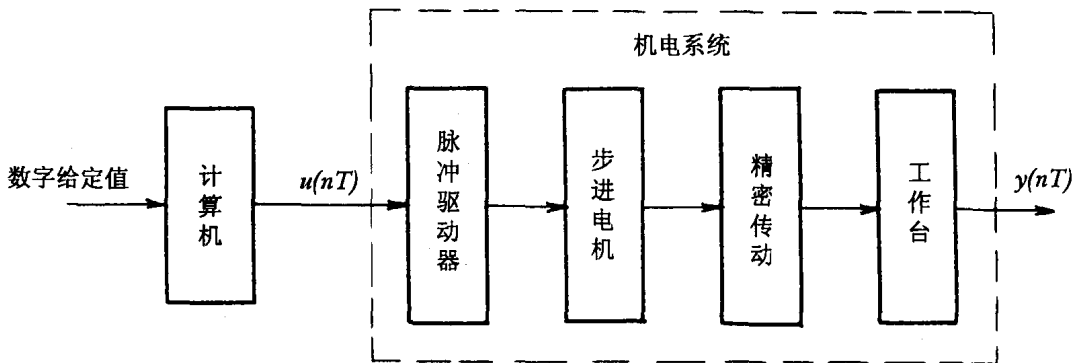


图 1.5 开环直接数字控制系统

开环控制系统是根据给定值通过控制量进行控制,如果系统有扰动量存在,诸如负载的变化、电源电压的波动、环境条件引起各环节元件参数的变化等等,则控制量  $u(t)$  或  $u(nT)$  和输出量  $y(t)$  或  $y(nT)$  的对应关系是不精确的 [ $u(t)$  和  $y(t)$  是连续时间函数,  $u(nT)$  和  $y(nT)$  是离散时间函数]。所以开环控制系统的控制精度取决于该系统各环节包括被控对象的参数稳定性。

## 2. 闭环控制系统

对于连续的闭环控制系统仅举一例予以简要说明,如图 1.6 所示的直流电机转速闭环控制系统,图中 CF 为测速发电机,其输出电压  $u_{CF} = K_{CF}n$  是正比于转速  $n$ ,它被称为测量转换元件,  $u_{CF}$  称为与被控制量  $n$  成比例的反馈量或反馈信号。反馈量  $u_{CF}$  与给定量  $u_r$  比较后得

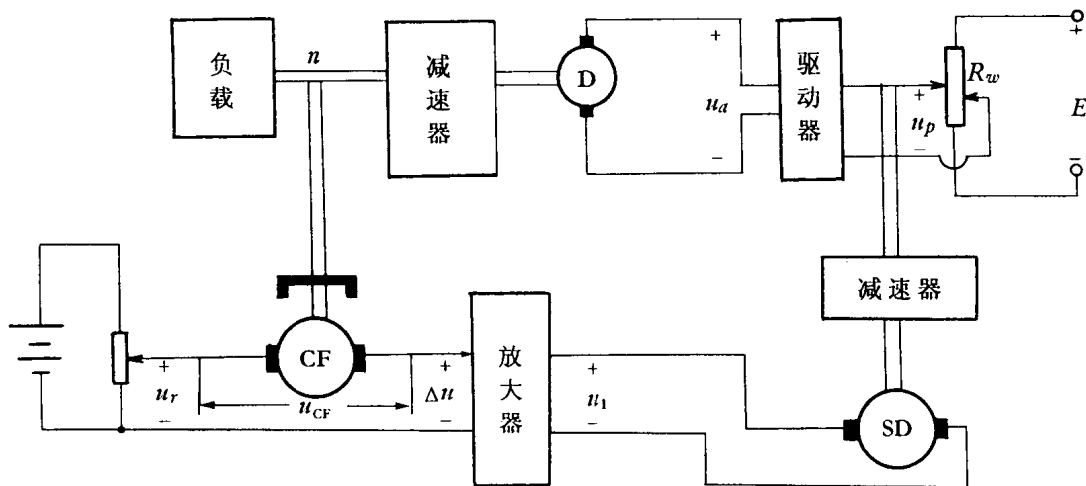


图 1.6 直流电机转速闭环控制系统

到的电压差  $\Delta u = u_r - u_{CF}$  叫做偏差量或偏差信号。偏差信号经放大后才能驱动伺服电机 SD，SD 转动通过减速器移动电位器  $R_w$  的滑臂，从而改变电压  $u_p$  的量值，使电枢电压  $u_a$  的大小发生变化，从而使直流电动机 D 的转速得到控制。当给定值为一定值时上述控制过程直到消除电压  $\Delta u$  使转速  $n$  达到预期值。这种利用负反馈得到的偏差产生的控制作用，又去消除偏差的控制原理叫做反馈控制。当给定值为已知时，整个控制系统便形成了一个闭环系统，我们把这种输入与输出之间存在负反馈的系统称为闭环控制系统（反馈控制系统），其控制系统物理结构方块图如图 1.7 所示。

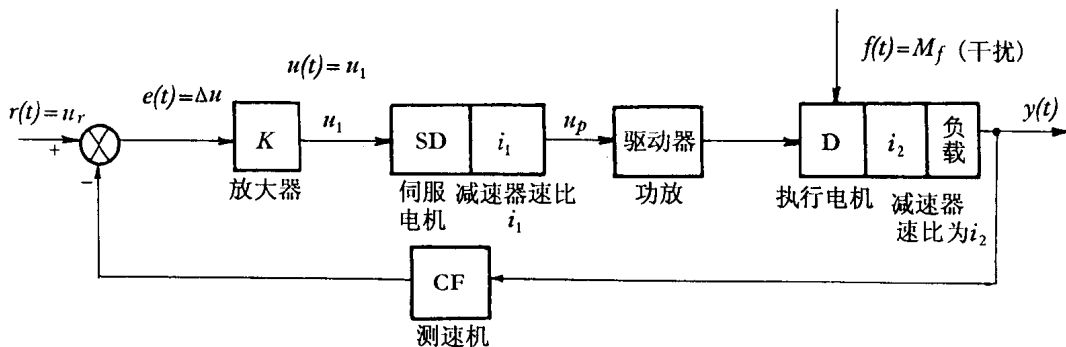


图 1.7 直流电动机转速闭环控制系统物理结构图

由本例可知该系统各环节的输入和输出在时间上都是连续的，所以常称为连续控制系统或模拟式控制系统。当不考虑扰动信号  $f(t)$  时，其连续控制系统的简化物理结构如图 1.8 所示。控制的目的是使被控量  $y(t)$  达到预定的输入量  $r(t)$ 。控制过程是将被控量的测量值与输入量比较，经过模拟控制器对误差信号进行加工，生成控制信号  $u(t)$  去控制被控对象以减小差值  $e(t)$ ，直到被控量  $y(t)$  达到要求的输入量  $r(t)$ 。模拟控制器是为了使系统达到满意的控制性能而设计的。如果图 1.8 所示的反馈控制系统其输入量为一恒定的常量，特殊情况为  $r(t) = 0$ ，而机电系统有干扰信号  $f(t)$ ，要求被控量  $y(t)$  保持在相应的常量上，这类反馈控制系统叫做稳定系统，其基本物理结构如图 1.9 所示。例如航空上用的陀螺稳定平台，图中模拟调节器是为了使该系统在扰动  $f(t)$  的作用下输出量  $y(t)$  趋近于零。而实际工程应

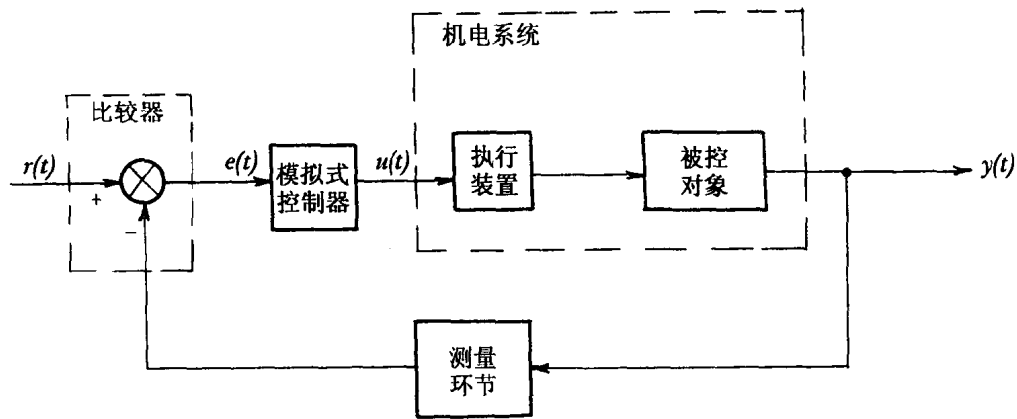


图 1.8 连续控制系统的简化物理结构图

用系统往往是既有输入量也有干扰量,因而应该协调解决,使整个系统得到满意的性能指标。

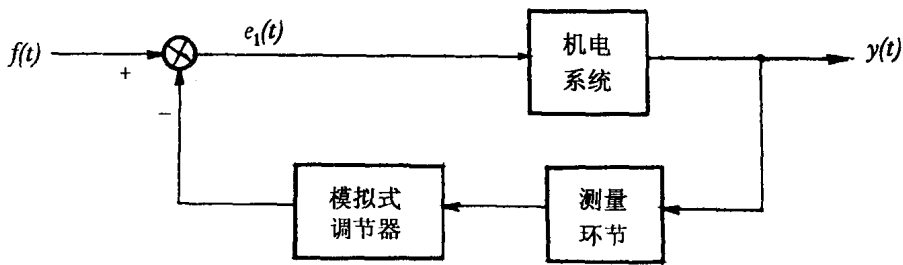


图 1.9 干扰作用的稳定系统

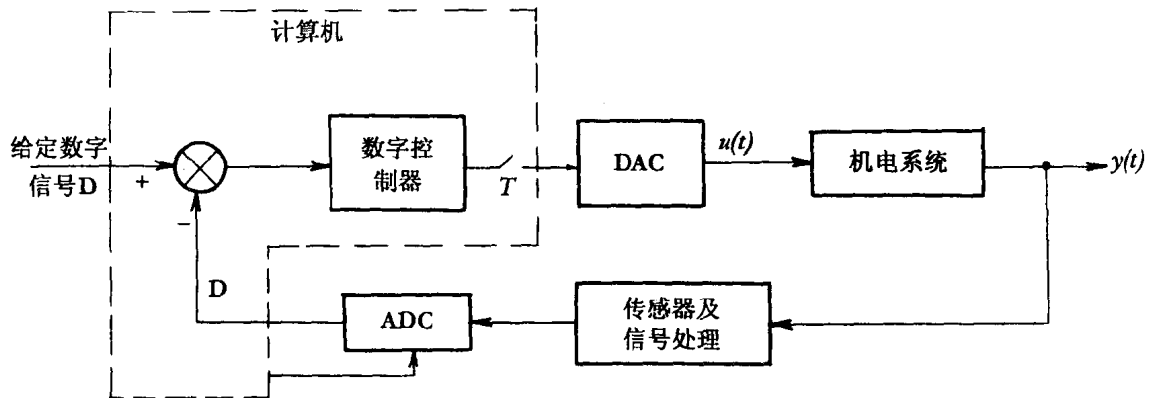
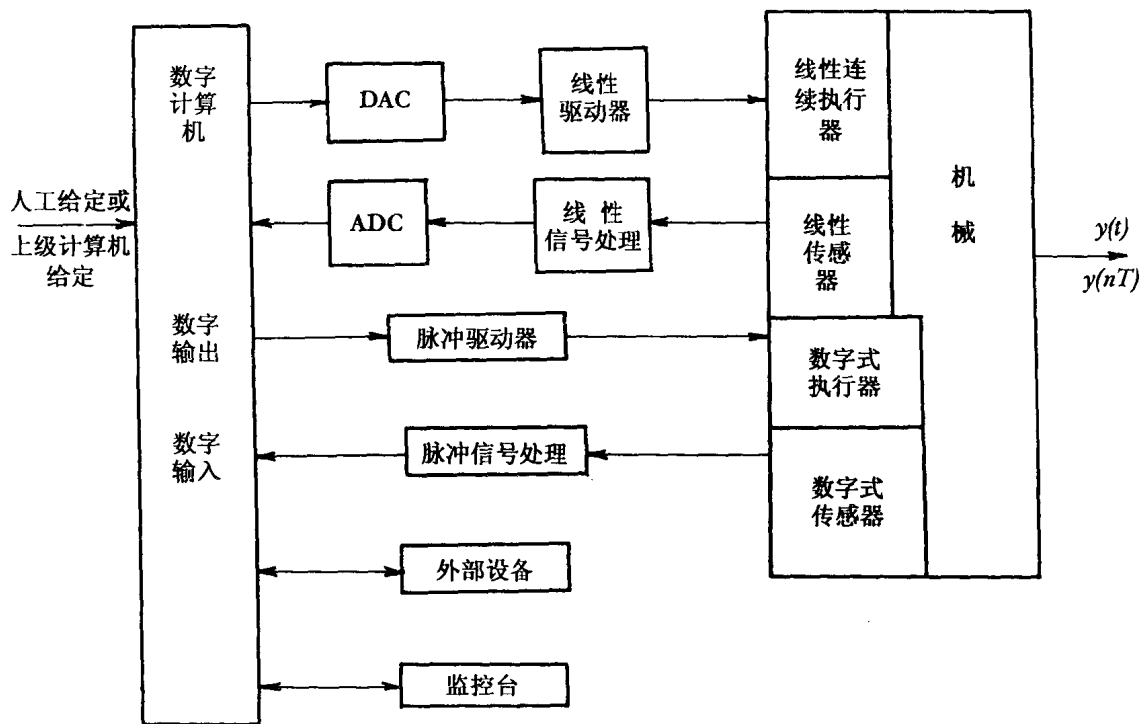
作为机电系统计算机控制的线性闭环系统,其综合的基本物理结构如图 1.10 所示。图中传感器是用来检测同机械状态有关的量,它的输出最终必须转换为电信号。机械的状态量,指机械各部分的位置、速度、加速度、力、力矩等各种各样的物理量。

执行器是对机械起作用的工作部分,主要产生力学运动,由此改变机械状态。执行器按动力源可分为电气式、液压式、气动式以及其他方式。电器执行器中,一般有伺服电机、步进电机、电磁线圈等。

由图 1.10 可以把计算机控制系统大致分为三类:一类如图 1.11 所示,称为采样控制系统;二类如图 1.12 所示,称为离散控制系统;三类如图 1.13 所示,称为混合式计算机控制系统。

在图 1.11 的采样控制系统中,信号处理包括线性连续信号放大及滤波等。ADC 称为模拟数字转换器系统,它包括采样保持和量化,由计算机控制它采集数据放到计算机内寄存器里,求它与给定信号之差,再按数字控制器要求进行运算,运算后按采样周期  $T$  发出数字信号,经过 DAC 变成控制量  $u(t)$  使机电系统中的被控对象发生运动,再测量形成闭环控制系统。该系统的特点是既有连续时间信号又有数字信号(离散时间信号)。数字控制器是为了在给定信号的作用下,使被控量  $y(t)$  达到满意的性能指标要求。

在图 1.12 的离散控制系统中,脉冲信号处理包括有脉冲信号放大及整形等。该系统的



特点是信号传送全是数字信号，所以称为离散控制系统。

图 1.13(a)和(b)所示的混合式计算机控制系统，往往是根据工程实际情况需要作出恰当的选择。

无论是连续闭环控制系统或计算机闭环控制系统，由于采用了负反馈，因而被控量对于外部和内部的干扰都不甚敏感。因此，某些环节有可能采用不太精密和成本低的元件来构成控制质量较高的系统。

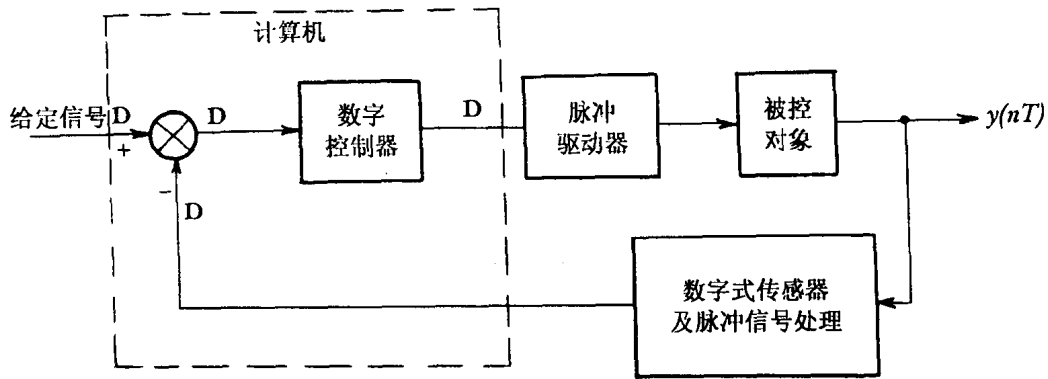
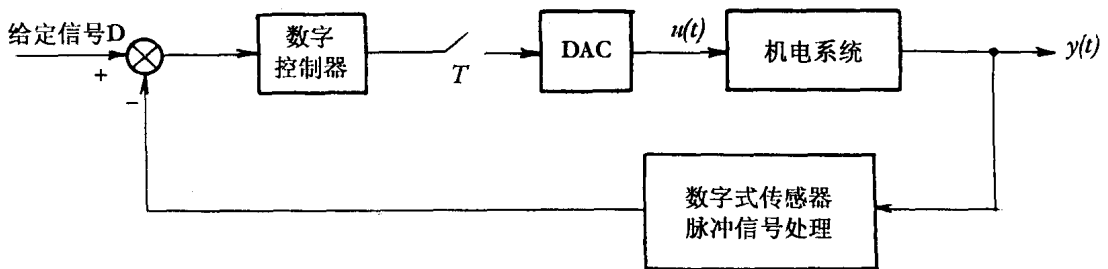
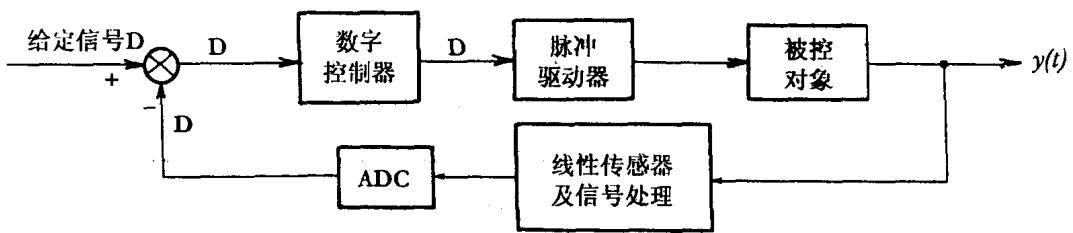


图 1.12 离散控制系统



(a)



(b)

图 1.13 混合式计算机控制系统

### 3. 控制系统的基本理论

从上面的讲述可得出整个控制系统的统一方块图,如图 1.14(a)和(b)所示。它表明在给定的作用下,要使被控量满足动态误差、静态误差、稳定性和快速性的要求。对于图 1.14(a)的控制系统,其分析和设计所使用的数学工具如图 1.15 所示。

从图 1.15 中可看出,拉氏变换是分析、设计线性连续系统的主要数学工具。 $Z$  变换是分析、设计计算机控制系统的主要数学工具。由此可得出,连续控制系统、离散控制系统(数字控制系统)和采样控制系统的方块图,如图 1.16、图 1.17 和图 1.18 所示。它们是控制系统中最基本的类型,因而有连续时间控制系统理论和离散时间控制系统理论,作为设计和分析控制系统的依据。

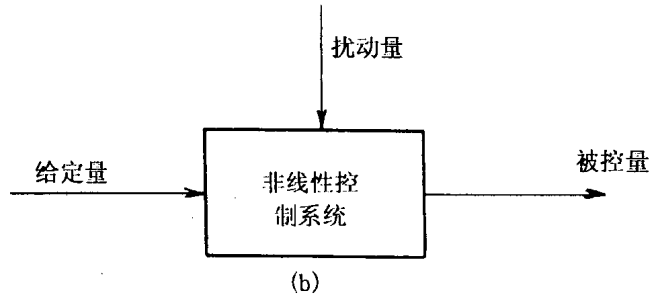
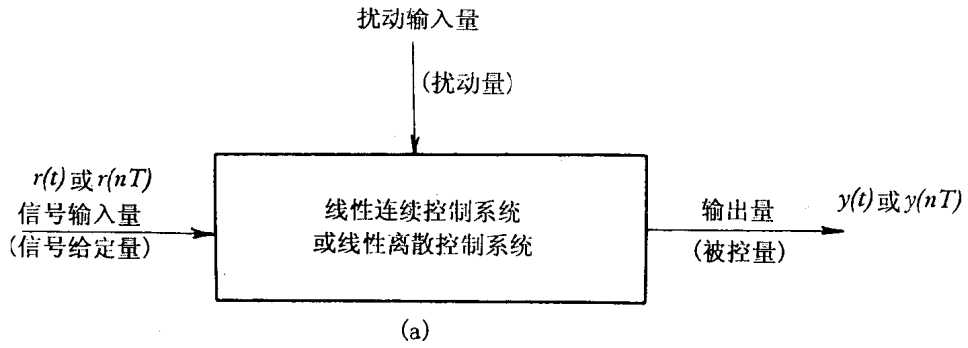


图 1.14 控制系统统一方块图

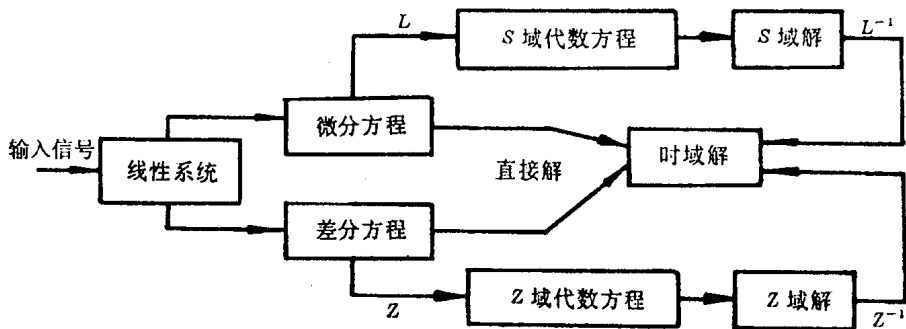


图 1.15 拉氏变换与 Z 变换的比较

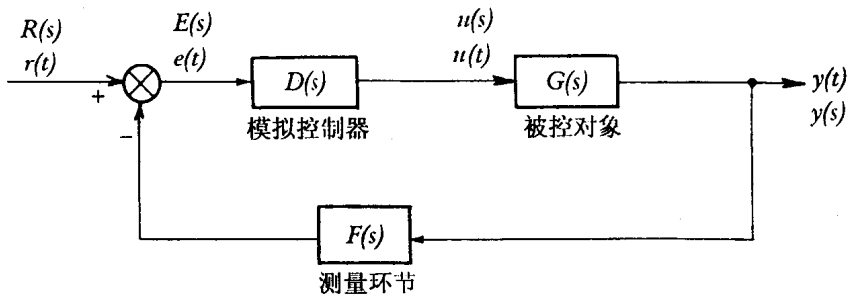


图 1.16 连续控制系统



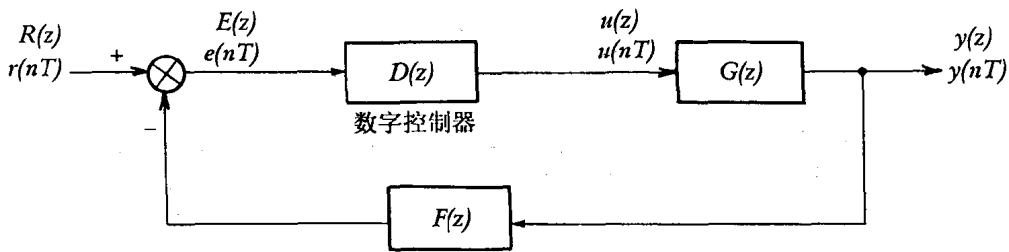


图 1.17 数字控制系统

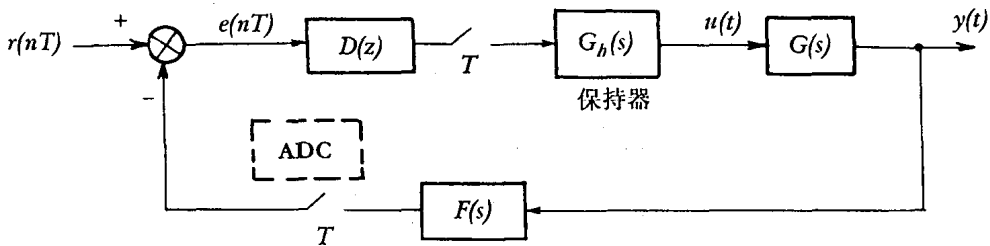


图 1.18 采样控制系统

### 1.3 智能控制系统

作为计算机控制系统,前面谈到的是根据被控对象的特性,设计数字控制器以满足系统要求的性能指标。随着计算机的发展,控制系统要求提高综合性能指标,再加上被控对象不可能全面的用精确的数学描述,因而出现了智能控制系统。如图 1.19 所示,称为直接智能控制系统。智能控制器代替了数字控制器,智能控制器可以是专家系统控制器、模糊控制器等。广义被控对象是指被控对象中包括了保持器。

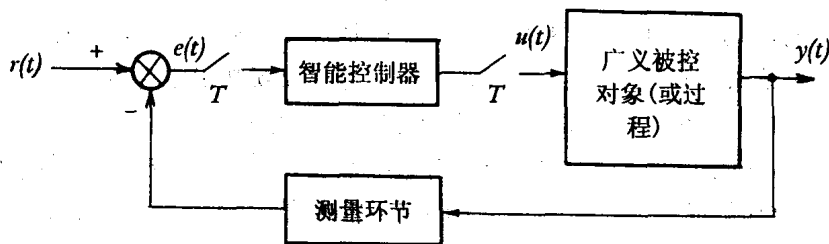


图 1.19 直接智能控制系统

另一种智能控制系统如图 1.20 所示。这种智能控制器是根据输入信号、偏差信号、控制信号、输出响应等的综合规律来调整数字控制器的参数,以满足系统要求的性能指标,称为间接智能控制系统。

第三种情况,是根据被控对象的输入数据、输出数据和给定信号,不断地在线辨识被控对象的参数,在此基础上通过推理决策,使控制器的结构或参数发生相应变化;使数字控制器的输出作用调整到一个满意的工作状态;使系统性能指标趋于最优,达到有效控制。如图 1.21 所示,它称为智能自适应控制系统。