

微型计算机控制系统 ——工程设计与实现

杜隽隆 编著

MICROCOMPUTER
CONTROL
SYSTEM

——ENGINEERING
DESIGN
AND IMPLEMENT

西北工业大学出版社



微型计算机控制系统

——工程设计与实现

杜隽隆 编著

西北工业大学出版社

1992年10月 西安

[陕]新登字第 009 号

[内容简介] 本书全面系统地介绍了微型计算机控制系统的基本结构和原理;着重阐述了微型计算机控制系统的数据通信技术,控制策略,程序设计,开发环境,以及系统测试技术,并以交流电机 SPWM 调速系统的微机实现和直流电机位置随动模型参考自适应微机控制系统为应用实例加以讨论。

本书可作为高等院校自动控制、工业自动化、计算机应用等有关各专业的本科生、研究生的教材或参考书,对从事计算机控制工程的技术人员具有实用价值。

微型计算机控制系统

——工程设计与实现

编 著 杜隽隆

责任编辑 王 璐

责任校对 樊 力

*

西北工业大学出版社出版发行

(西安市友谊西路 127 号 邮编 710072)

陕西省新华书店经销

西安电子科技大学印刷厂印装

ISBN7-5612-0309-8 / TP·48

*

开本 787×1092 毫米 1/16 18 印张 432 千字

1992 年 10 月第 1 版 1992 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1-4000 册

定价: 11.80 元

前 言

《微型计算机控制系统——工程设计与实现》是基于作者多年的教学、科研实践活动，着重从工程设计与实现的角度阐述了微型计算机控制系统的基本结构和原理，其宗旨不仅在于向读者介绍微机控制系统的基本知识结构，更重要的是对实际的微机控制工程具有指导意义。

本书从数据通信原理出发，分析了微型计算机控制系统的通信技术，以及可编程芯片的通信方法，为微机控制系统硬件结构设计奠定了基础；在软件设计中，除了系统地、全面地介绍了程序设计的基本原理外，并以实时多任务并行管理程序为设计实例，着重剖析了监控程序；在讨论控制算法时，从动态系统的时滞-后效特性出发，对常用的、有效的控制算法进行了控制策略分析，并注重计算机程序实现，因而易于为工程技术人员所理解和应用；实现技术从单板机、个人计算机和微机开发系统三个不同层次，讨论了开发环境的合理利用，以及硬件、软件调试及系统联调技术；并结合作者的科研项目：交流电机 SPWM 调速系统的微机实现和直流电机位置随动模型参考自适应微机控制系统为应用实例加以分析和讨论。

全书从数据采集系统到执行复杂控制算法的实时控制系统，讨论了系统总体设计、硬件结构设计、软件规范化设计，以及可靠性设计和系统测试技术，力求基本原理和实例分析并重，内容翔实，图文并茂，循序渐进，层次分明。

尽管笔者对本书已经尽心尽力，但限于本人的知识结构及认识水平，书中不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

杜隽隆

1990 年 10 月于西安

10/15/90

目 录

第一章 计算机控制系统概论	1
§ 1.1 计算机控制系统的基本问题	1
§ 1.2 计算机控制系统的控制算法设计	4
§ 1.3 计算机控制系统的分类	13
§ 1.4 计算机控制系统的基本配置	14
第二章 微型计算机系统与数据通信	18
§ 2.1 计算机的分类	18
§ 2.2 微型计算机结构特征	19
2.2.1 基本的微型计算机结构	19
2.2.2 计算机系统的层次结构	20
§ 2.3 数据通信基础知识	22
2.3.1 数据通信的概念及电信技术	22
2.3.2 数据传输技术基础	23
§ 2.4 微型计算机系统的数据通信	26
2.4.1 微型计算机总线	26
2.4.2 微型计算机接口	29
2.4.3 微型计算机输入输出控制	32
2.4.4 微型计算机系统串行数据通信	35
§ 2.5 外围功能芯片	37
2.5.1 外围功能芯片的分类	37
2.5.2 硬布线逻辑功能芯片的使用方法	39
2.5.3 可编程功能芯片内寄存器的通信方法	42
§ 2.6 微型计算机系统模型	48
2.6.1 微型计算机系统模型的概念	48
2.6.2 硬件物理模型	48
2.6.3 软件编程模型	51
2.6.4 微型计算机控制系统中的时空关系	53
第三章 过程通道和数据采集系统	55
§ 3.1 概述	55
3.1.1 过程通道的组成和功用	55
3.1.2 信号变换中的采样、量化、保持和编码	56

§ 3.2 模拟量输入通道	57
3.2.1 模拟量输入通道的一般组成	58
3.2.2 多路转换器	58
3.2.3 可编程增益放大器	60
3.2.4 采样/保持器	61
§ 3.3 数/模与模/数转换技术	62
3.3.1 数/模转换原理	62
3.3.2 模/数转换原理	64
3.3.3 模/数与数/模转换器的主要技术指标	66
§ 3.4 单片模/数转换器及其与微处理器的接口技术	67
3.4.1 A/D 转换芯片的外特性及与 CPU 的接口	67
3.4.2 8 位模/数转换器 ADC 0809 及其接口技术	68
3.4.3 10 位模/数转换器及其接口	77
§ 3.5 程序控制的数据采集系统	81
3.5.1 数据采集系统的结构方案	81
3.5.2 数据采集系统实例	82
§ 3.6 高速微型机数据采集系统	86
3.6.1 DMA 的必要性	86
3.6.2 Z-80 DMA 控制器	87
3.6.3 Z-80 DMA 应用实例	91
§ 3.7 模拟量输出通道	94
3.7.1 多路模拟量输出通道的结构型式	94
3.7.2 单片数/模转换器及其与微处理器的接口	95
3.7.3 双极性模拟量输出的实现	96
§ 3.8 微机控制系统的抗干扰	98
3.8.1 过程通道的抗干扰	98
3.8.2 供电系统的抗干扰	103
3.8.3 系统结构的抗干扰设计	103
第四章 微型计算机控制系统的控制算法	105
§ 4.1 PID 控制算法	105
4.1.1 PID 控制的控制策略分析	105
4.1.2 PID 控制的控制算式	108
4.1.3 PID 控制算式的参数整定	116
4.1.4 串级控制结构	119
§ 4.2 纯滞后补偿控制算法	120
4.2.1 史密斯(Smith) 预估控制	121
4.2.2 大林(Dahlin) 算法	125

§ 4.3 前馈—反馈控制算法	129
4.3.1 前馈控制的基本策略及控制结构	129
4.3.2 前馈—反馈控制结构及实例	130
4.3.3 数字前馈—反馈控制算式	133
4.3.4 实例分析	135
§ 4.4 解耦控制	139
4.4.1 解耦控制	140
4.4.2 数字解耦控制	142
§ 4.5 模型参考适应控制算法	144
4.5.1 MRAC 的控制结构和控制策略	144
4.5.2 模型参考适应控制算法	146
第五章 微型计算机控制系统的工程设计	155
§ 5.1 系统设计的基本要求、特点和步骤	155
§ 5.2 系统总体方案设计	159
§ 5.3 硬件系统设计	159
5.3.1 选择微处理器的原则和方法	160
5.3.2 存储器子系统的设计	162
5.3.3 总线标准的选择	165
5.3.4 输入输出通道设计	168
§ 5.4 软件系统设计	179
5.4.1 结构化程序设计	180
5.4.2 监控程序的剖析	190
5.4.3 实时控制系统的管理程序设计	204
§ 5.5 可靠性设计和故障对策	207
5.5.1 可靠性的基本概念及其数量特征	207
5.5.2 系统的可靠性设计	209
5.5.3 提高计算机系统可靠性的方法和途径	210
第六章 微型计算机控制系统的工程实现	212
§ 6.1 引言	212
§ 6.2 单板机的同级开发	212
6.2.1 单板机开发应用的步骤	213
6.2.2 开发任务的确定	214
6.2.3 单板机的硬件开发和调试	214
6.2.4 用户软件的生成	216
6.2.5 调试程序的技能	217
6.2.6 单板机同级开发的一般技巧	220
6.2.7 单板机开发专用系统的过程	223

6.2.8 单板机同级开发的局限性	224
§ 6.3 个人计算机软件开发环境	225
6.3.1 汇编语言程序的开发过程	225
6.3.2 编辑 / 汇编程序 EDTASM	226
6.3.3 查错调试程序 DEBUG	229
6.3.4 TRS-80 上机操作	232
§ 6.4 微型计算机开发系统简介	233
6.4.1 MDS 的分类	233
6.4.2 在线仿真技术	234
6.4.3 MDS 230 及 ICE-80	235
§ 6.5 微型计算机系统测试	237
6.5.1 有关测试的基本概念	237
6.5.2 微机硬件系统的测试	237
6.5.3 微机软件系统的测试	238
6.5.4 微型计算机控制系统的测试	245
第七章 微型计算机控制系统实例	247
§ 7.1 高性能交流电机 SPWM 调速系统微机实现	247
7.1.1 异步电动机变频调速的一般问题	247
7.1.2 逆变器谐波消除和电压控制技术	248
7.1.3 SPWM 信号发生器的微机实现	257
7.1.4 微机控制的电瓶车交流拖动	261
§ 7.2 直流电机位置随动模型参考适应微机控制系统	264
7.2.1 自适应控制算法的推导	264
7.2.2 系统总体方案的设计	266
7.2.3 系统方案的实施	267
7.2.4 系统调试步骤和技术手段	273
7.2.5 实验设计及结果分析	275
参考资料	277

第一章 计算机控制系统概论

计算机控制是指数字计算机对一个动态系统进行的控制。在计算机控制系统中, 由数字计算机替代自动控制中的常规控制设备。对动态系统进行调节和控制, 这是对自动控制系统技术装备的根本性变革。由于数字计算机具有采集、传送、存贮、处理大量数据的能力, 使自动控制进入了以计算机为主要控制设备的新阶段。

计算机控制系统把计算机技术与自动控制理论相结合。这种系统与模拟硬件构成的系统相比较, 具有下列几个显著的特点:

(1) 程序控制。任何一种控制规律的实现都可以程序化, 而控制规律的改变只不过是程序的改变而已。

(2) 数字控制。数字计算机的输入输出信息都是数字信息, 这种信息在时间上和数值上都是离散的。但是, 由于过程的控制变量、状态变量以及输出变量往往是连续的, 因而在计算机控制系统中将出现信号的采样、量化、保持等变换过程。

(3) 实时控制。计算机的信息处理过程要与控制过程相适应, 因此计算机一般都配有实时时钟。计算机必须在一个采样周期内完成一次控制量的信息处理, 而下一个控制量的处理必须在下一个采样周期内完成。

(4) 综合控制。计算机是控制中心, 可以充分发挥它的软件功能和分时特点, 以实现多变量、多回路、多对象、多工况、变参数和自适应的综合控制。

§ 1.1 计算机控制系统的基本问题

在一个控制系统中, 作用和产生于被控对象的变量如图 1-1 所示。

(1) 干扰变量: 表征环境对被控对象的影响, 它不受控制系统的调节。

(2) 状态变量: 出现于过程内部, 表征过程的动态特性。

(3) 输出变量: 它的值常被用来测量被控对象的性能。

(4) 控制变量: 由控制装置(模拟的或数字的)调节。

通常的控制问题就是调节控制变量, 使被控对象的输出变量在干扰作用的情况下保持它的目标值或按照某种规律变化。为了达到控制的目的, 需要把握被控对象的特性, 以及干扰变量和状态变量对输出变量的作用, 以确立控制变量的调节规律。

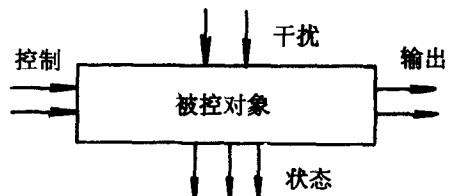


图 1-1 作用和产生于被控对象的变量

一、经典控制理论的控制策略

经典控制理论首先选择单输入—单输出的线性时不变系统为研究对象, 以相似原理建立控制系统的数学模型, 如时域线性时不变微分方程模型, 复频域的传递函数模型, 以及频域

的频率特性模型。

线性时不变系统的时域微分方程模型为:

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = u(t) \quad (1-1)$$

若给定 t_0 时刻的状态变量初值 $y(t_0)$, $\dot{y}(t_0)$, $\cdots$, $y^{(n-1)}(t_0)$ 和 $t \geq t_0$ 时的输入 $u(t)$, 则可确定系统 $t > t_0$ 的状态变量的轨迹, 亦就确定了 $y(t)$ 的运动轨迹。从数学的角度, 求解微分方程就是为了揭示这种运动规律。

若给定系统的初始状态及期望的 $y(t)$ 的运动轨迹, 能否设计出控制变量 $u(t)$ 的控制规律, 则是从控制的角度提出的问题。

基于历史的局限性, 经典控制理论假定被控对象的数学模型, 可以由理论分析或由实验测量求取。假定系统的初始状态为零状态, 将干扰变量和控制变量视为输入变量, 研究被控对象的输入—输出关系, 重点研究表征被控对象的动态特性的模型结构、参数所规定的输入—输出变量之间的关系。为解决求解微分方程时所遇到的困难, 以积分变换为工具, 将时域的动态微分方程变换为频域的静态代数方程, 转而研究表征系统结构、参数的传递函数的零极点分布与控制性能之间的对应关系, 如稳定性分析、稳态误差分析、动态响应性能指标等, 进而提出改造系统结构、参数的设计方法。通常以闭环控制结构为基础, 采用根轨迹法利用闭环控制系统的开环传递函数中的可调参数, 沿根轨迹设置闭环特征根, 必要时在开环传递函数中增加零、极点配置校正网络; 频率法也采用相应的调节手段, 其目标是首先满足稳定性要求, 当稳态指标和瞬态指标出现矛盾要求时, 需要视具体应用情况权衡, 达到符合原则。所谓符合原则, 是指系统的控制性能指标能为用户所接受。

当系统是稳定时, 非零初始状态的状态变量对系统输出变量的影响将是衰减的瞬态分量。通常由前馈控制补偿干扰变量对输出变量的影响。

虽然依据经典控制理论设计控制系统采用试凑法, 在很大程度上依赖于设计人员的经验, 但经典控制理论物理概念清晰, 易为工程技术人员所接受, 并在广泛的工程领域内取得了巨大的成功。

二、现代控制理论的控制策略

现代控制理论以多变量控制、最优控制、估计理论以及自适应控制为主要内容。卡尔曼的动态规划, 庞特里雅金的极小值原理, 卡尔曼提出的线性系统的可控性与可观测性, 以及卡尔曼滤波, 都为现代控制理论的形成奠定了基础。

在经典控制理论中, 用传递函数分析与设计单输入—单输出线性时不变系统, 这是一种行之有效的方法。但是, 传递函数只能反映系统输出变量与输入变量之间的外部关系, 未能包含系统的全部状态变量。在设计多变量控制系统或时变控制系统时, 采用经典控制理论会遇到很大困难。现代控制理论中, 用状态空间法来描述线性系统时采用一阶矩阵—向量微分方程。矩阵表示法使系统的数学模型易于用计算机处理。状态空间法本质上是时域方法, 它适用于存在环境干扰的时变及多变量系统的分析研究。

当被控对象的数学模型难以由理论分析的方法建立时, 只有求助于实验方法。系统辨识就是通过试验采集运行数据来估计被控对象的数学模型的结构及其参数。更确切地说, 系统

辨识是在分析输入—输出数据的基础上, 从一类系统中, 确定一个与所测系统等价的系统。当状态变量不可直接测量时, 为了获取状态变量的信息, 通常以状态观测器重构状态变量。当控制系统受到随机干扰的作用时, 为了测量状态变量, 必须运用滤波理论构造滤波器对状态变量进行估计。

三、自适应控制的设计思想

用经典控制理论设计控制系统, 最常用的性能指标是频域的幅值裕度、相角裕度、谐振峰值或时域的上升时间、调节时间、超调量等。设计方法是建立在经验和试凑的基础上, 通常设计开始时就确定了系统的结构形式和校正网络的结构, 往往仅利用输出变量作为反馈信号, 因此不能保证相对于给定性能指标的最优控制。

现代控制理论在以状态空间法描述系统时, 以状态变量为决策基础信息, 以某种经济技术指标最优的性能指标作为约束条件来设计控制系统, 并使设计步骤程序化。

控制理论是设计控制算法的理论基础, 大部分控制理论研究人员对现代控制理论范围内的课题感兴趣。但是, 控制工程师对基于状态空间法的现代控制理论的认识和评价并不高。

限制现代控制理论广泛地应用于工业的主要原因, 也可以说是新的控制算法实用化时应考虑的主要因素有:

(1) 控制系统的设计基于系统的完整的数学模型时, 通常要获得准确地描述实际控制对象的动态特性的状态方程或系统传递函数的结构和参数是很困难的。为了处理被控对象动态特性的时变性, 需要控制系统具有鲁棒性(robustness), 然而, 过分追求高性能指标, 则会丧失这种鲁棒性。

(2) 为了设计控制系统和决定控制算法中所使用的参数值, 需要进行大量的模拟实验及长期的现场数据采集和数据分析。

(3) 复杂的控制算法增加了系统的复杂程度和信息处理负荷, 使系统的实时性较差, 并降低了系统的可靠性。

(4) 使用复杂的控制算法并未大幅度地提高控制性能指标, 反而使系统的性能价格比下降。

实际的工业过程, 如化工、水泥、造纸、电力、冶金、印染及发酵等工业过程, 难以建立精确的数学模型。即使建立了数学模型, 往往因为过于复杂而难以用于实时控制, 或者由于被控过程的动态特性的时变特性, 数学模型的结构、参数也将是时变的。为了控制动态特性未知或者时变的系统, 迫切需要控制系统的鲁棒性, 即某种适应性。自适应控制理论是现代控制理论一个重要的组成部分。解决自适应控制问题的方法主要有模型参考方法和自校正方法。模型参考自适应控制的绝大多数工作都是针对确定性系统的, 系统设计采用李亚普诺夫的第二稳定性方法, 以及波波夫超稳定性方法; 而自校正调节器方法主要集中在随机系统方面, 在这种系统中, 参数估计方法起着主要的作用。在模型参考自适应控制方法中, 控制的目标是把未知对象的输出渐近地驱动到给定参考模型的输出上; 在自校正调节中, 先选择一种用于参数已知的对象的设计步骤, 然后把这些参数的递推估计值用到未知对象上。在这两种自适应方法中, 自适应算法的收敛性或稳定性是决定性的问题。已经证明, 全局稳定的两种自适应控制方案是等价的, 它们产生相同的误差方程和基本上相同的自适应律。

§ 1.2 计算机控制系统的控制算法设计

按控制系统中所包含的信号的形式不同，通常将其划分为以下四种类型：

- (1) 连续控制系统：系统中的信号均为连续信号。典型闭环结构如图 1-2(a)所示。
- (2) 离散控制系统：系统中的信号均为离散信号。典型闭环结构如图 1-2(b)所示。
- (3) 采样控制系统：系统中的信号既有连续信号，又有离散信号。典型闭环结构如图 1-2(c)所示。
- (4) 数字控制系统：系统中的信号有连续信号、离散信号、数字信号。所谓数字信号是指在时间上离散，幅值上量化的信号。典型闭环结构如图 1-2(d)所示。

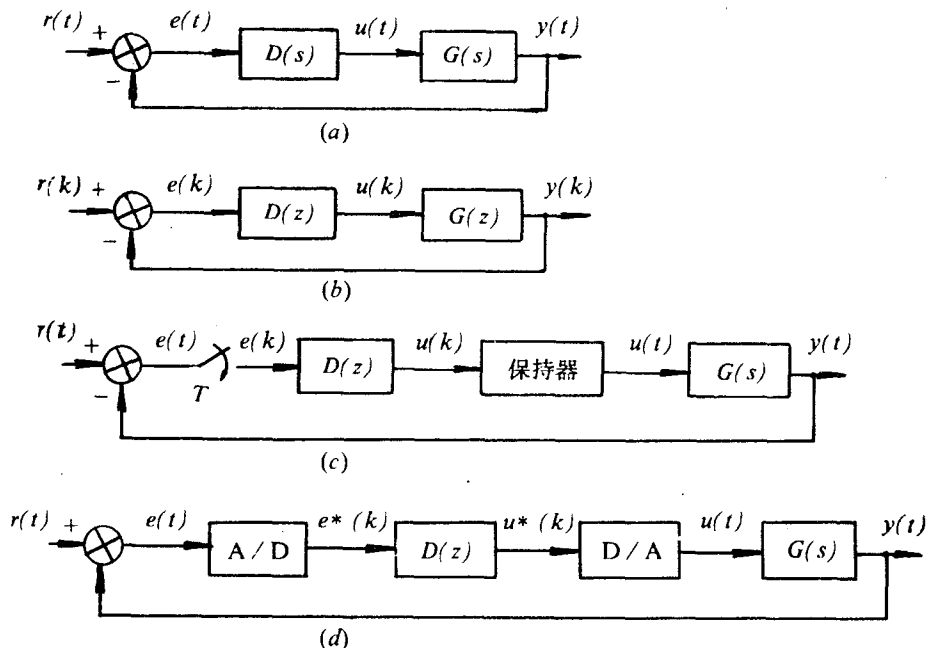


图 1-2 四种类型控制系统的典型结构

(a) 连续控制系统；(b) 离散控制系统；(c) 采样控制系统；(d) 数字控制系统。

数字计算机控制系统的典型闭环结构如图 1-3 所示。

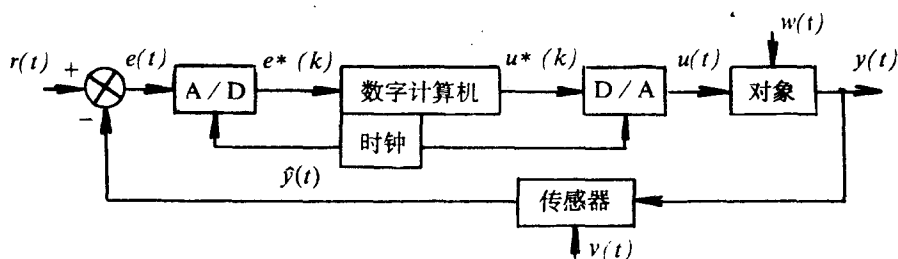


图 1-3 数字计算机控制系统的典型结构

显然，数字计算机控制系统是数字控制系统的一种实现。计算机控制系统的控制算式

$D^*(z)$ 的设计是至关重要的。考虑到计算机控制系统中的采样、保持、量化过程,若假定A/D, D/A转换的精度足够高,量化误差可以忽略不计,则可将计算机控制系统视为采样控制系统。若假定采样控制系统中的采样频率 ω_s 大于系统中信号的最高频率 $\omega_{\max}$ 二倍以上,保持器具有理想滤波特性,则可以忽略采样开关和保持器的存在,将采样控制系统作为连续控制系统对待。按照连续控制系统的设计方法设计控制器 $D(s)$,然后再以某种等效原则将 $D(s)$ 离散表达为 $D(z)$ 。这是计算机控制系统的分析和设计的一种途径。若将采样控制系统中的连续信号以某种虚拟化手段离散化,并求取相应的离散传递函数,采样控制系统将演变为离散控制系统。因此,计算机控制系统的分析和设计的另一条途径是从离散系统起始。不管采用以上哪一种设计途径,都必须认真对待采样周期的选择和量化效应。

一、信号的采样和复现

为了对采样系统进行定量分析,必须对信号的采样和复现过程用数学的方法加以描述。

设连续信号 $e(t)$,其频率特性为 $E(j\omega)$,频谱 $|E(j\omega)|$ 是一个单值的连续频谱,其最高频率为 $\omega_{\max}$,经采样周期为 T 的理想采样器采样后,其采样信号为:

$$e^*(t) = e(t)\delta_T(t) \quad (1-2)$$

式中

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

$\delta_T(t)$ 的富氏级数形式为:

$$\delta_T(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{jn\omega_s t} \quad (1-3)$$

式中 ω_s 为采样频率 ($\omega_s = 2\pi/T$)。

$$e^*(t) = e(t) \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{jn\omega_s t} = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e(t) e^{jn\omega_s t} \quad (1-4)$$

$$\mathcal{L}\{e^*(t)\} = E^*(s) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} E(s + jn\omega_s) \quad (1-5)$$

显然, $E^*(s)$ 是 s 的周期函数,周期为 $j\omega_s$ 。

$$E^*(s + jm\omega_s) = E^*(s) \quad (1-6)$$

式中 m 为任意整数。

$$E^*(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} E[j(\omega + n\omega_s)] \quad (1-7)$$

理想采样器的输入和输出信号的频谱如图1-4所示。

从图1-4中不难看出,要从采样信号 $e^*(t)$ 中完全复现出采样前的连续信号 $e(t)$,必须满足:采样频率 ω_s 大于或等于二倍的采样器输入连续信号 $e(t)$ 频谱中的最高频率 $\omega_{\max}$,即 $\omega_s \geq 2\omega_{\max}$ 。这就是香农采样定理。

在满足香农定理的前提下,要想不失真地复现采样器的输入信号,采样器必须具备理想滤波器的频率特性 $|F(j\omega)|$,如图1-5所示。

实际上,这种理想滤波器是不存在的。工程上通常只能采用接近理想滤波器性能的低通

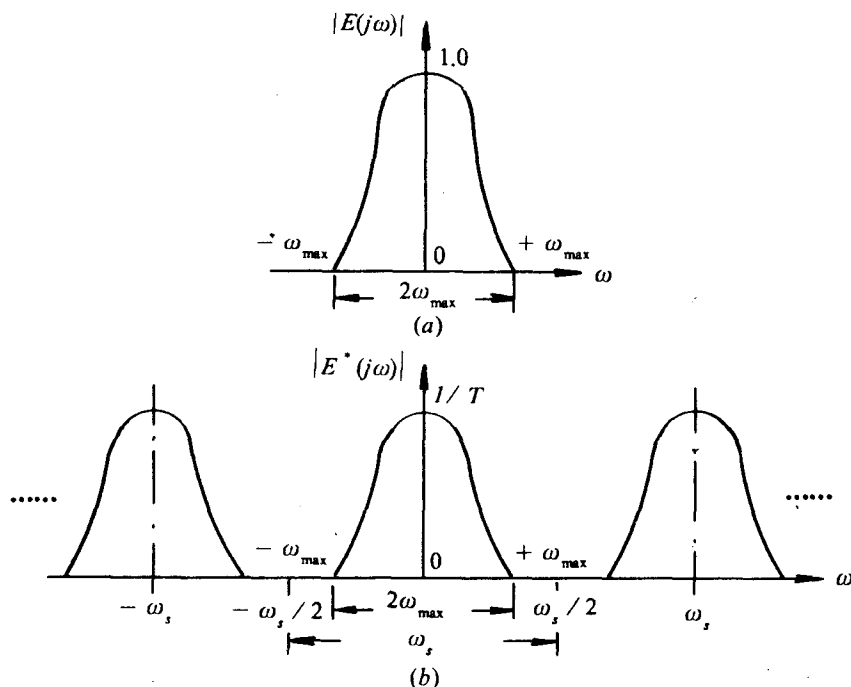
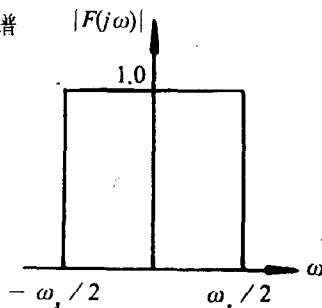


图 1-4 理想采样器输入和输出信号的频谱

滤波器来近似代替。最简单、最常用的低通滤波器就是零阶保持器(ZOH: Zero-Order Hold)。零阶保持器的作用是: 使采样信号 $e^*(t)$ 的每一个采样瞬时的采样值 $e(nT)$, ($n=0, 1, \dots$)一直保持到下一个采样瞬时, 从而使采样信号 $e^*(t)$ 变成阶梯信号 $e_h(t)$ 。因为 $e_h(t)$ 在每个采样区间内的值均为常数, 其导数为零, 故称为零阶保持器。零阶保持器的传递函数为:

$$G_h(s) = \frac{1}{s} - \frac{e^{-Ts}}{s} = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}$$

(1-8) 图 1-5 理想滤波器的频率特性



零阶保持器的频率特性为:

$$G_h(j\omega) = G_h(s)|_{s=j\omega} = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega} = T \frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} e^{-j\omega T/2} \quad (1-9)$$

采样信号 $e^*(t)$ 经零阶保持器后的输出信号记为 $e_0(t)$, 其频率特性为 $E_0(j\omega)$, 则有:

$$\begin{aligned} E_0(j\omega) &= G_h(j\omega)E^*(j\omega) \\ &= T \frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} e^{-j\omega T/2} \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} E[j(\omega + n\omega_s)] \end{aligned} \quad (1-10)$$

当采样频率 $\omega_s \gg 2\omega_{\max}$, 而 ω 取值大于 ω_s 时, 由于零阶保持器的低通特性,

$\frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} \ll 1$, 因此可以忽略 $E_0(j\omega)$ 中 $\omega > \omega_s$ 的高频部分; 当 ω 取值小于 $\omega_{\max}$ 时, $\frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} \approx 1$, 相角滞后 $e^{-j\omega T/2}$ 也不大, 于是有:

$$E_0(j\omega) \approx E(j\omega) \quad (1-11)$$

工程上采用零阶保持器时, 当 $\omega_s > 10\omega_{\max}$, 就可以忽略采样开关和零阶保持器的影响, 将采样系统近似为连续系统。

二、基于连续系统的离散等效设计方法

若连续控制系统按 s 域的设计方法得到控制器 $D(s)$ 的表达式, 可将 $D(s)$ 作为滤波器的传递函数, 以频率特性等效的原则, 求取 $D(s)$ 的某种离散等效表达 $D(z)$ 。

$D(z)$ 等效 $D(s)$ 的理想频域条件为:

$$D(z) \Big|_{z=e^{j\omega T}} = D(s) \Big|_{s=j\omega} \quad (1-12)$$

这就是说, $D(s)$ 的频率特性应能在 $D(z)$ 的各种表达中找到一个等价表达。要完全满足 (1-12) 式的条件是困难的。实际上, $D(s)$ 作为系统中的一个环节, 将输入信号经 $D(s)$ 的算法处理, 变换为输出信号, 相当于滤波器的作用。它所处理的输入信号的频带通常在具体应用场合中是有限的。因此频率特性的等效原则, 可以在期望的工作频段等效。此外, $D(s)$ 在控制系统中作为控制器, 其算法处理是否适当, 应以控制系统的性能指标作为最终检验的尺度。因此 $D(z)$ 对 $D(s)$ 的等效原则, 也应该从系统优化的角度出发, 而不应局限于环节等效的最优化。这是寻求 $D(z)$ 等效表达 $D(s)$ 的基本出发点。

通常将连续传递函数 $D(s)$ 转换为离散传递函数 $D(z)$ 的等效方法有冲激不变法、零阶保持法、零极点匹配法、双线性变换法、差分变换法。

1. 冲激不变法

冲激不变法的实质是要求 $D(z)$ 与 $D(s)$ 在脉冲信号输入激励下, $D(z)$ 的输出响应 $K^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} K(nT)\delta(t-nT)$ 相当于 $D(s)$ 的输出响应 $K(t)$ 的采样值。因此下列关系式成立:

$$D(s) = \mathcal{L}\{K(t)\} \quad (1-13)$$

$$D^*(s) = \mathcal{L}\{K^*(t)\} \quad (1-14)$$

$$D(z) = D^*(s) \Big|_{s=\frac{1}{T}\ln z} \quad (1-15)$$

若 $D(s)$ 以部分分式表达:

$$D(s) = \sum_{i=1}^n A_i / (s + a_i) \quad (1-16)$$

则有:

$$\begin{aligned} D(z) &= \mathcal{Z}\{D(s)\} \\ &= \sum_{i=1}^n A_i / (1 - z^{-1}e^{-a_i T}) \end{aligned} \quad (1-17)$$

2. 零阶保持法

假定 $D(s)$ 的输入信号为脉冲形式, 采样系统中的信号采样、复现过程采用保持器, 因此,

求取包括保持器的连续传递函数 $G_h(s)$ 在内的 $G_h(s)D(s)$ 的冲激响应等效更趋合理。

当采用零阶保持器时, $G_h(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}$, 则

$$\begin{aligned} D(z) &= \mathcal{Z} \{G_h(s)D(s)\} = \mathcal{Z} \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} D(s) \right\} \\ &= \mathcal{Z} \left\{ \frac{D(s)}{s} - \frac{D(s)}{s} e^{-sT} \right\} = (1 - z^{-1}) \mathcal{Z} \left\{ \frac{D(s)}{s} \right\} \end{aligned} \quad (1-18)$$

3. 零极点匹配法

当 $D(s)$ 以零极点形式给出时, 即:

$$D(s) = \frac{K_s \prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{j=1}^n (s - p_j)} \quad (1-19)$$

式中 $n \geq m$ 。

求取离散等效传递函数的一个简单而有效的方法是利用 $z = e^{sT}$ 的关系, 将 s 平面上所有零极点均一一对应地映射到 z 平面。考虑到 s 平面上的 $(n-m)$ 个无穷零点可记为 $s_i = j\omega_i$ ($i=1, 2, \dots, n-m$); ω 趋于无穷大。因 $z = e^{j\omega T}$ 为周期 $\omega_p = 2\pi/T$ 的周期函数, ω 的主值范围为 $-\pi/T \leq \omega \leq \pi/T$, 则可将 s 平面上的无穷零点映射到 z 平面上 $\omega = \pi/T$ 处, 相当于 $z = e^{j\omega T} = e^{j\pi} = -1$ 。即:

$$D(z) = \frac{K_z (z + 1)^{n-m} \prod_{i=1}^m (z - e^{z_i T})}{\prod_{j=1}^n (z - e^{p_j T})} \quad (1-20)$$

式中 K_z 的选择使得在某一个特征频率处 $D(s)$ 与 $D(z)$ 具有相同的增益。

4. 双线性变换法

若 $D(s)$ 以多项式之比的形式给出:

$$D(s) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^{m-i}}{\sum_{j=0}^n a_j s^{n-j}} \quad (1-21)$$

求取 $D(s)$ 离散等效传递函数 $D(z)$ 时, 先将 $z = e^{sT}$ 作线性化近似。即:

$$z = e^{sT} = \frac{e^{sT/2}}{e^{-sT/2}} = \frac{1 + Ts/2 + \dots}{1 - Ts/2 + \dots} \approx \frac{1 + Ts/2}{1 - Ts/2} \quad (1-22)$$

$$S = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (1-23)$$

$$D(z) = D(s) \Big|_{s = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}} \quad (1-24)$$

5. 差分变换法

连续传递函数 $D(s)$ 本质上反映了输入输出之间满足某种微分方程的关系, 因此若能找到与

该微分方程近似等效的差分方程，即可求得等效的离散传递函数 $D(z)$ 。将微分方程离散化为差分方程称为差分变换。

从求解微分方程的角度，数字仿真 $D(s)$ 往往采用较为复杂的算法，需要的计算工作量也偏大。校正网络 $D(s)$ 的离散等效通常采用简单的算法。将 $D(s)$ 中的 s 作为微分算子 D ， $D = d/dt$ 。为使稳定的 $D(s)$ 的差分变换 $D(z)$ 也稳定，采用后向差分变换：

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T} \quad (1-25)$$

以 z^{-1} 表示向后移位算子，则 $z^{-1}e(kT) = e(kT - T)$ ，即 $D = (1 - z^{-1})/T$ ，于是：

$$D(z) = D(s) \Big|_{s=(1-z^{-1})/T} \quad (1-26)$$

三、基于离散系统的设计方法

离散控制系统的设计可以直接在 z 域进行，或变换到 w 域进行。以下介绍几种常用的离散设计方法。

1. 根轨迹法

根轨迹法是分析和设计连续控制系统的一个重要工具。对于离散控制系统，在 z 平面上绘制根轨迹的方法与连续系统在 s 平面上绘制根轨迹的方法完全相同。因此根轨迹法同样可以用于离散控制系统的设计，其差别仅在于， z 平面上的零极点分布与系统响应性能的关系与连续系统中的情况有不同的物理解释。在 s 平面上， $s = j\omega$ (即虚轴) 是稳定边界，而在 z 平面上， $|z| = 1$ (即单位圆圆周) 是稳定边界。

根轨迹法实质上是一种配置极点的设计方法。通过设计控制器，使闭环控制系统的极点配置到期望的位置。设计过程需要借助于设计者的经验，通过试凑获得满意的设计。计算机辅助设计能大大提高根轨迹法设计的工作效率。

2. 频率响应法

离散控制系统的频率响应法是将离散闭环控制系统的闭环特征方程 $1 + G(z) = 0$ ，经 w 变换后，即令 $z = \frac{1+w}{1-w}$ ，得到 $1 + G(w) = 0$ 。令 $w = j\omega_p$ (式中 ω_p 为虚拟频率)，则可将连续控制系统 s 域的伯德图校正与设计方法移植到 w 域。

根据 z 域中单位圆与 w 域中虚轴之间的映射关系： $z = e^{j\omega T}$ 和 $w = j\omega_p$ ，以及 $w = \frac{z-1}{z+1}$ ，可得 $\omega_p = \operatorname{tg}(\omega T / 2)$ 。这是 z 域实际频率 ω 与 w 域虚拟频率 ω_p 之间的关系。为此需将频域性能指标进行相应的转换。在 w 域完成 $D(w)$ 的设计后，再按 $w = \frac{z-1}{z+1}$ 的变换关系求得 $D(z)$ 。即 $D(z) = D(w) \Big|_{w=\frac{z-1}{z+1}}$ 。

3. 解析设计法

离散控制系统的解析设计法要求根据系统的性能指标确定期望的系统传递函数 $H(z)$ 。在确定系统控制结构的基础上，利用解析的方法求得控制器的传递函数 $D(z)$ 。

当采用如图 1-2(b) 所示的闭环控制结构时，系统闭环传递函数：