

计算机控制系统

——理论、设计与实现

高金源 等编著

北京航空航天大学出版社
<http://www.buaapress.com.cn>

内容提要

本书较为系统地讲述了计算机控制系统,即计算机参与控制的动态系统的分析、设计与实现问题。全书共12章,可分成5大部分:(1)系统理论基础:计算机控制系统概述;系统信号分析;计算机控制系统数学描述。(2)系统分析与设计:计算机控制分析;经典设计法及状态空间设计法。(3)多采样速率系统。(4)系统实现:计算机控制系统的硬件与软件;计算机控制系统工程实现中的某些问题(如控制算法编排、量化误差分析、采样速率的选取以及抗干扰及可靠性技术等)。(5)某些现代计算机控制技术,如可编程控制、分布式计算机控制及集散型计算机控制系统。全书内容丰富,理论与设计和实现相结合,且包含有较丰富的工程实现技术的讨论。

本书可作为高等院校自动控制及电气工程类本科生及研究生的教材,也可作为有关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统——理论、设计与实现/高金源等编著.

北京:北京航空航天大学出版社,2001.2

ISBN 7-81077-002-5

I. 计… II. 高… III. 计算机控制系统 高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 80550 号

计算机控制系统——理论、设计与实现

高金源 等编著

责任编辑 张光斌

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路37号(100083) 发行部电话:82317024 发行部传真:82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: pressell@publica.bj.cninfo.net

北京宏文印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:22.375 字数:573千字

2001年2月第1版 2001年2月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 7-81077-022-5/TP·014 定价:25.00元

前 言

计算机在实时控制领域获得了广泛的应用。在国民经济及国防等各个领域采用计算机控制是现代化的重要标志。计算机控制学科将涉及计算机控制的基本理论、分析、设计与工程实现等众多方面的内容。

本书是依高等学校自动化专业本科及研究生的教学要求而编写的。力图使读者通过本书的学习,除了掌握一定的计算机控制的基本理论和分析、设计方法外,对计算机控制系统的工程实现技术以及近年来工业上获得广泛应用的一些新的计算机控制技术亦有所了解。全书除第1章外主要包括四大部分内容:① 计算机控制的理论基础(包括计算机控制系统内的信号、系统的描述与分析方法等),(第2章~第4章);② 计算机控制系统的经典与现代设计方法(包括连续域设计-离散化方法、直接离散域设计以及 W' 、 δ 域设计和状态空间的极点配置、LQR 设计等),(第5章、第6章);③ 计算机控制系统工程实现技术(包括计算机控制系统的硬件、软件、控制算法的编排、总线技术、采用周期的选用以及抗干扰与可靠性技术、设计步骤与设计实例等),(第7章、第8章);④ 第10章~第12章重点介绍了现代计算机控制的一些新技术(包括可编程控制器技术、分布式计算机控制技术、集散型计算机控制等)。考虑到许多复杂的计算机控制系统是多采样速率系统,故专门用1章(第9章)概要地介绍了多采样速率系统的分析、设计与实现方面的问题。鉴于自动化专业的学生,在选修课中已对微机原理及接口技术有了专门的学习,故本书对有关计算机硬件系统将不予专门的介绍。

学习本书的知识背景是:一般连续控制理论(或信号与系统)的基本知识以及微机原理和微机接口的基本知识。

根据多年的教学经验,在学习本课程时应安排必要的简单计算机控制系统设计与实现的实验内容,或者后续课程安排专门的计算机控制系统的系列实验课,这对于巩固学习效果、对于学生将来参加计算机控制系统开发的实际工作是很有益处的。

考虑到本书要兼顾作为工学或工程硕士研究生的计算机控制课的教材,选用的内容多于通常本科生教学大纲所规定的内容。教学时可以根据本科生及研究生不同的教学大纲及学时要求,适当选用不同的章节。多余章节亦可作为学习的参考。

本书是本教学小组在总结近20年计算机控制教学经验以及参阅了近年来国内外有关院校的教材,并结合我们的科研实践经验编写的。全书由高金源教授统编并负责编写第1章和第9章;王醒华教授负责编写第2章~第5章;张平副教授负责编写第6章及5.5节;夏洁副教授负责编写第7章、第8章、第10章~第12章。

全书承陈忠信研究员进行了详细的审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书的出版受到了北航教材科领导的大力支持与帮助。责任编辑张光斌先生为本书的出版做了大量细致工作。在此对他们的关心与支持表示衷心的感谢。

由于编者的知识与经验不足,时间有限,不妥之处在所难免,期望得到读者及同学们的批评指正。

编 者

2000年5月

第1章 绪论

数字计算机的出现和发展,在科学技术上引起了一场深刻的革命。数字计算机不仅在科学计算、数据处理等方面获得了广泛的应用,而且在自动控制领域也得到了越来越广泛的应用。数字计算机在自动控制中的基本应用就是直接参与控制,承担了控制系统中控制器的任务,从而形成了计算机控制系统。它的参与对控制系统的性能、系统的结构以及控制理论等多方面都产生了极为深刻的影响。本章简要介绍计算机控制系统的组成、工作原理以及它的特点,并着重说明计算机参与控制后给控制理论及控制系统设计所带来的新问题。

1.1 计算机控制系统的组成

1.1.1 计算机控制系统的组成

图 1-1 为一个典型的雷达天线位置伺服控制系统。为了改善系统的特性,该系统采用了滞后-超前串联校正网络,该校正网络是利用常规的有源模拟运算放大器实现的。如果系统的校正网络非常复杂,采用这种模拟运算放大器的有源网络实现将是非常困难的。如果将系统中对信号的这种变换和处理利用数字计算机来实现,那么就构成了常规的计算机控制系统。

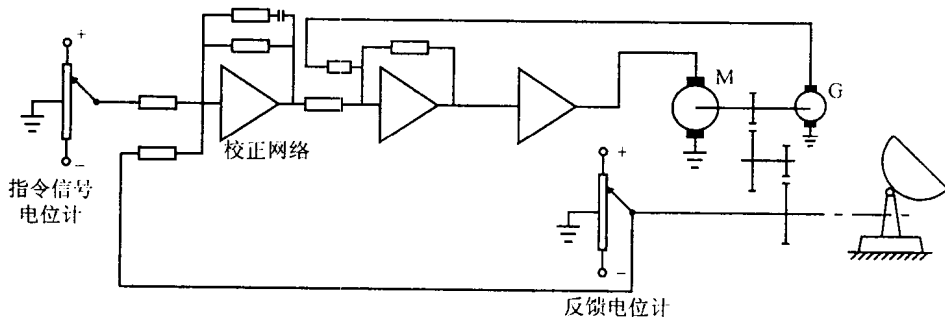


图 1-1 雷达天线位置伺服控制系统

这里,计算机实现了原控制系统中控制器的作用。由于数字计算机工作的特点,为了使计算机能接收系统的模拟信号,并输出连续的模拟信号给天线的拖动机构,所以,除了要引入数字计算机外,还需要加入其他的外部设备,如 A/D、D/A 转换器,从而形成了如图 1-2 所示的计算机控制系统的组成框图。

从图 1-2 可见,计算机控制系统的组成与连续模拟控制系统组成类似,是由下述几部分构成的。

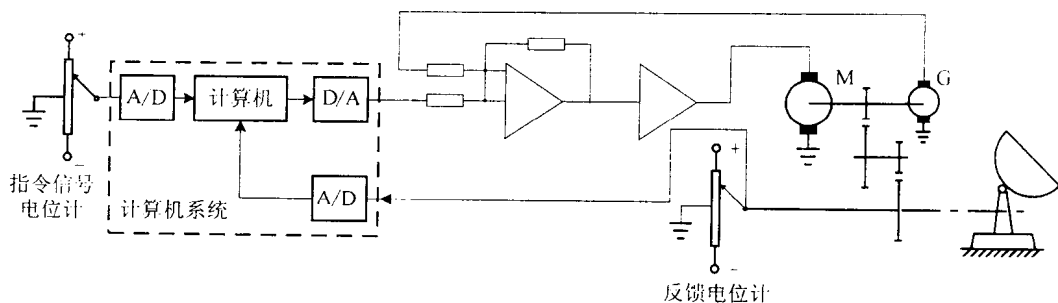


图 1-2 天线位置计算机控制系统

1. 被控对象:本例为雷达天线;
2. 执行机构:本例为直流电机回路;
3. 测量装置:本例为测量电位计;
4. 指令给定装置:本例为天线指令发生器(指令信号电位计);
5. 计算机系统:包括下述主要部件。

- A/D 变换器,将直流模拟信号转换为断续的数字二进制信号,送入计算机;
- D/A 变换器,将计算机产生的数字指令信号转换为连续模拟信号(直流电压)并送给直流电机的放大部件;
- 数字计算机(包括硬件及相应软件),实现信号的变换处理,按给定的算法产生相应的控制指令。

如同连续控制系统一样,计算机控制系统亦可分为闭环控制、开环控制以及复合控制等不同的控制类型。

1.1.2 计算机控制系统主要特点和优点

相对连续控制系统而言,计算机控制系统的主要特点可以归纳为以下几点:

- 系统结构特点 计算机控制系统必须包括有计算机,它是一个数字式离散处理器:此外,由于多数系统的被控对象及执行部件、测量部件是连续模拟式的,因此,还必须加入信号变换装置(如 A/D 及 D/A 变换器)。所以,计算机控制系统通常是模拟与数字部件的混合系统。若系统中各部件全为数字部件,则称为全数字式控制系统。本书主要研究混合系统。

- 信号形式上的特点 连续系统中各点信号均为连续模拟信号,而计算机控制系统有多种信号形式,由于计算机是串行工作的,必须按一定的采样间隔(称为采样周期)对连续信号进行采样,将其变成时间上是断续的信号才能进入计算机。所以,它除有连续模拟信号外,还有离散模拟、离散数字、连续数字等信号形式,是一种混合信号形式系统(详细分析见第 2 章)。

- 系统工作方式上的特点 在连续控制系统中,控制器通常都是由不同的电路构成,并且一台控制器仅为一个控制回路服务。在计算机控制系统中,一台计算机可同时控制多个被控量或被控对象,即可为多个控制回路服务。每个控制回路的控制方式由软件来形成。同一台计算机可以采用串行或分时并行方式实现控制。

尽管由常规仪表组成的连续控制系统已获得了广泛的应用,并具有可靠、易维护操作等优点,但随着生产的发展、技术的进步,对自动化的要求越来越高,这种常规连续控制系统的应用受到了极大的限制。例如,难于实现多变量复杂的控制,难于实现自适应控制等等。与连续控

制系统相比,计算机控制系统除了能完成常规连续控制系统的功能外,还表现了如下一些独特的优点。

- 由于计算机的运算速度快、精度高、具有极丰富的逻辑判断功能和大容量的存储能力,因此,能实现复杂的控制规律,如最优控制、自适应控制及自学习等,从而可达到较高的控制质量。

- 计算机控制系统的功能价格比值高。尽管一台计算机最初投资较大,但增加一个控制回路的费用却很少。对于连续系统,模拟硬件的成本几乎和控制规律复杂程度、控制回路多少成正比;而计算机控制系统中的一台计算机却可以实现复杂控制规律并可同时控制多个控制回路,因此,它的功能价格比值较高。

- 由于计算机控制系统的控制律是由软件程序实现的,并且计算机具有强大的记忆和判断功能,所以,极易实现工作状态的转换,实现不同的控制功能,因此,它的适应性强、灵活性强。此外,计算机是一种可编程的智能元件,易于修改系统功能和特性,构成了一种柔性(弹性)系统。

- 随着微电子技术的发展,大规模集成电路的出现,计算机体积减小,重量轻、成本下降。

与连续控制系统相比,计算机控制系统也有一些缺点与不足。例如,抗干扰能力较低,特别是由于系统中插入数字部件,信号复杂,给设计实现带来一定困难。但全面比较起来,随着对自动控制系统功能要求的不断提高,计算机控制系统的优越性表现得越来越突出。现代的控制系统不管是简单的,还是复杂的,几乎都是采用计算机进行控制的。

1.2 计算机控制系统典型应用分类

根据应用特点及控制目的和系统构成的不同,计算机控制系统在工业中的典型应用大致可分为下述几类。

1.2.1 数据采集处理系统

数据采集处理系统结构如图1-3所示。严格说,这种系统不属于计算机控制,计算机并不直接参与控制。这种系统的主要作用是:

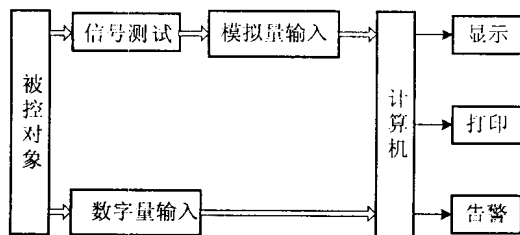


图 1-3 数据采集处理系统结构

- 生产过程的集中监视 计算机对生产过程(被监视对象)的不同变量参数进行巡回检测,并将采集到的数据以一定格式在监视器上显示或通过打印机打印出来,实现对生产过程的

集中监视：

● 操作指导 计算机对采集到的数据进行分析处理,并给出对生产过程控制的建议,由过程的操纵者依给定的建议实现对过程的控制。

1.2.2 直接数字控制系统(DDC 系统)

直接数字控制系统结构如图 1-4 所示。计算机通过输入通道进行实时数据采集,并按已给定的控制规律进行实时决策,产生控制指令,并通过输出通道,对生产过程(被控对象)实现直接控制。这种控制方式是应用最普遍的一种方式。由于这种系统中的计算机直接参与生产过程的控制,所以,要求实时性好、可靠性高和环境适应性强。本书主要研究这种系统的设计与实现问题。

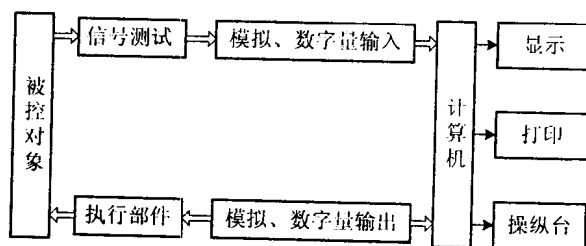


图 1-4 直接数字控制系统结构

1.2.3 监督计算机控制系统(SCC 系统)

监督计算机控制系统结构如图 1-5 所示。该系统是 2 级计算机控制。其中直接数字控制完成生产过程的直接控制;而监督计算机则根据生产过程工况和已知的数学模型,进行优化分析,产生最优设定值,作为直接数字控制的指令信号,由直接数字控制系统执行。监督计算机由于承担上一级控制与管理任务,要求其数据处理功能强,存储容量大等。

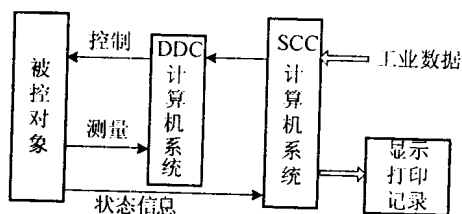


图 1-5 监督计算机控制系统结构

1.2.4 分散型计算机控制系统(DCS)

随着工业生产过程规模的扩大和综合管理与控制要求的提高,人们开始应用以多台计算机为基础的分散型控制系统,如图 1-6 所示。该系统采用分散控制原理、集中操作、分级管理与控制和综合协调的设计原则,把系统从上而下分成生产管理级、控制管理级和过程控制级等,形成分布式控制。各级之间通过数据传输总线及网络相互连接起来。系统中的过程控制级完成过程的检测任务。控制管理级通过协调过程控制器工作,实现生产过程的动态优化。

生产管理级完成制定生产计划和工艺流程以及对产品、人员、财务管理实现静态优化。

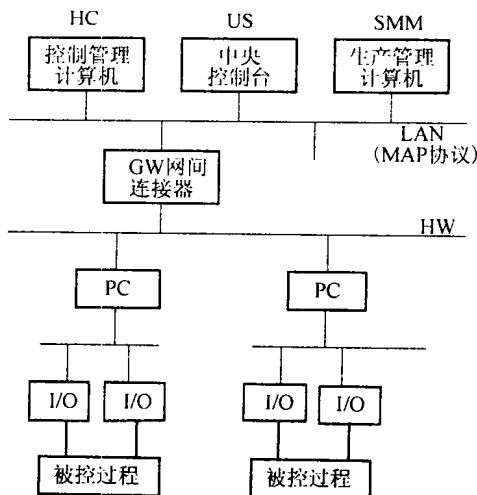


图 1-6 分散型计算机控制系统

1.3 关于计算机控制系统的理论与设计问题

1.3.1 关于计算机控制系统的理论问题

如前所述,计算机控制系统是混合系统,若采样间隔时间越小,甚至趋于零,该系统即趋于连续系统。因此,常常会产生这样的问题即连续控制系统理论已有深入的发展,是否还需要计算机控制的有关理论和设计方法?从如下几个例子的讨论中,可以看到,研究计算机控制的有关理论是需要的。

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,由于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 1-7 所示,所以严格说,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,所以,它的特性与时间有关。

2. 众所周知,连续系统在正弦输入信号激励作用下,稳态输出为同频率的正弦信号;但对计算机控制系统来讲,其稳态正弦响应则与输入信号频率和采样周期有关。如图 1-8 所示,若输入信号频率为 4.9 Hz,采样间隔时间为 0.1 s 时,则会发生振荡周期为 10 s 的差拍现象。这种现象在连续系统里是不会发生的。这种现象产生的原因,可以依信号采样理论进行分析。

3. 尽管计算机控制系统特性可以用连续控制系统理论解释,但还有很多现象是不能用连续系统理论加以解释的。通常,一个连续系统是可控可观的,将其变成计算机控制系统时,若采样周期选取的不合适,则可能会变得不可控。例如,围绕地球运动的同步卫星,其运动周期为(1 d)。为了保持它的高度和同步特性,地面站需要不时地对其姿态进行控制,如连续进行控制和修正,卫星是可控的;若对其实现断续、按一定周期实现控制,且控制周期为 1 d,则会发现,对这样的控制作用,卫星是不可控的。这种结果也是和采样系统的特性有关。

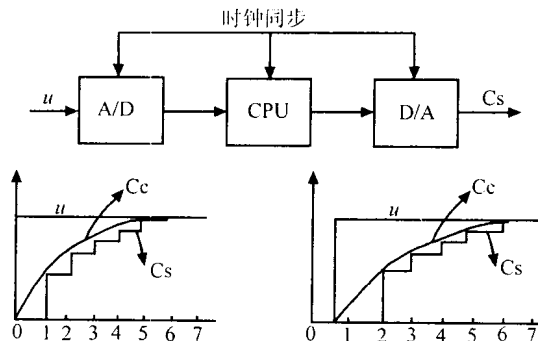


图 1-7 采样系统的时变特性

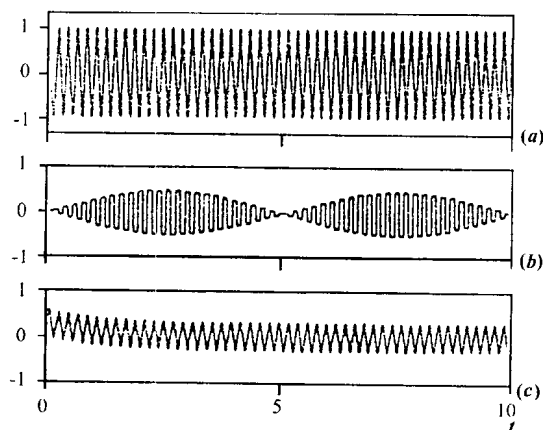


图 1-8 计算机控制系统的正弦激励响应

4. 严格说,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。但对计算机控制系统,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 1-9 所示。

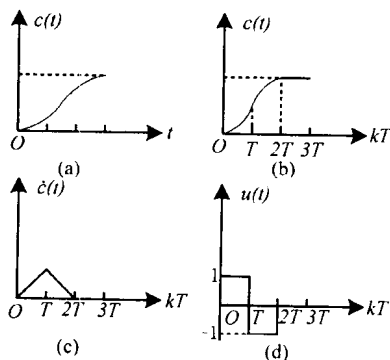


图 1-9 有限调节时间系统

上述几个例子表明,在计算机控制系统中由于信号的采样,所产生的一些现象是无法用连续控制理论解释和说明的,因此,必须采用与采样有关的理论进行说明和解释。

除上述问题外,在计算机控制系统中还有另一个问题,即字长有限的问题。众所周知,A/D或D/A变换器、计算机内存及运算器的字长是有限的,由于数字字长有限,在某些情况下,将会使计算机控制系统响应产生极限环振荡,如图1-10所示。这也是连续系统所没有的现象(当然,也会由系统中的非线性特性引起极限环振荡)。

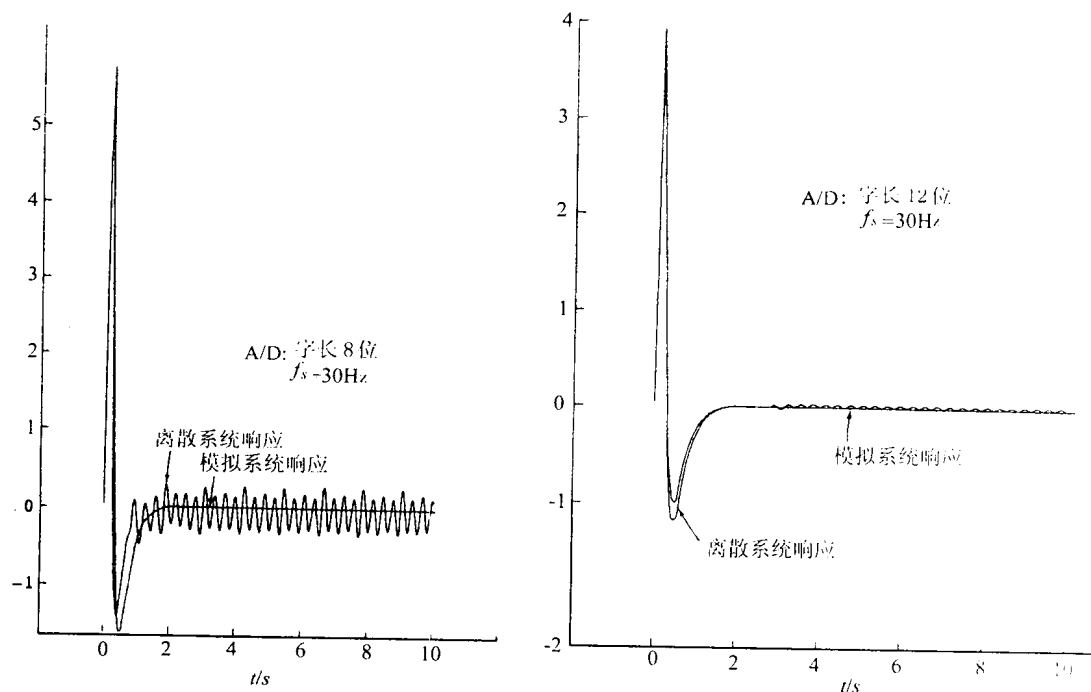
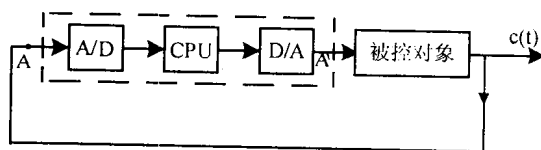


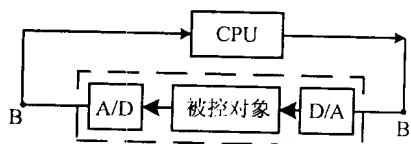
图 1-10 字长有限引起的极限环

1.3.2 关于计算机控制系统设计方法

如前所述,计算机控制系统是一种混合信号系统。如果从图1-11(a)中AA'来看,将计算机系统看作黑箱,系统可以看成是连续系统;如从图1-11(b)中BB'来看又可将其看成



(a)



(b)

图 1-11 计算机控制系统等效结构

是纯离散信号系统,因此,在实际工程设计时亦有 2 种方法。

1. 连续域设计离散化方法:把计算机控制系统看成是连续系统,在连续域上设计得到连续控制器,由于它要在数字计算机上实现,因此,再采用不同方法将其数字化(离散化)。这种方法是目前常用的一种设计方法。由于离散化将会产生误差,并与采样周期大小有关,所以是一种近似实现方法,这是目前工程技术人员较为熟悉的方法。

2. 直接数字域(离散域)设计:把系统看成是纯离散信号系统,直接在离散域进行设计,得到数字控制器,并在计算机里实现。这种方法是一种准确的设计方法,无需将控制器近似离散化并日益受到人们的重视。

不管采用那种方法,采样频率对系统性能均有很大影响,所以正确选择采样频率是计算机控制系统设计需要特别重视的问题。

鉴于计算机控制系统在基本理论、分析设计方法和工程实现等方面与连续控制系统有许多不同之处,因此,在学好连续控制理论后,还必须系统地学习有关计算机控制系统的基本理论和分析、设计以及工程实现方法。

第2章 计算机控制系统的信号

计算机控制系统是模拟部件与数字部件共存的混合系统,信号的传输及变换过程较为复杂。本章将分析系统各环节的信号特性,重点研究采样及恢复过程中信号的数学描述。

2.1 计算机控制系统中信号的种类

对连续控制系统,不论是被控对象部分还是控制器部分,其各点信号在时间上和幅值上都是连续的。计算机控制系统的结构图如图2-1所示,其被控对象通常为模拟式部件,而控制器采用了数字计算机。对于这种模拟部件和数字部件共存的混合系统,信号变换装置A/D和D/A则是必不可少的,因此,在计算机控制系统中,信号的种类较多。在时间上,既有连续信号,也有断续信号;在幅值上,既有模拟量,也有离散量或数字量,数字量即是用二进制编码表示的离散量。

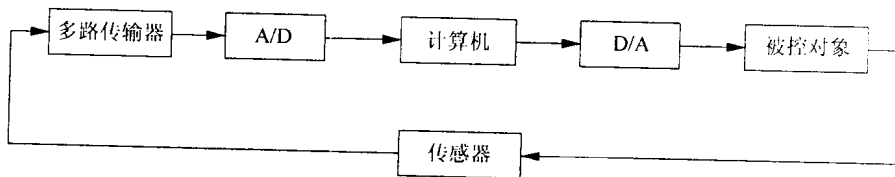


图2-1 计算机控制系统结构图

当区分各种信号的形式时,只要从时间(轴)和从幅值两方面分析,就可以清楚地区别信号的类型。

从时间上区分:

- 连续时间信号 时间轴上任何时刻都存在的信号;
- 离散时间信号 时间轴上断续出现的信号。

从幅值上区分:

- 模拟量 幅值连续变化,可取任意值的信号;
- 离散量 具有最小分层单位的模拟量,更一般地说,幅值上只能取离散值;
- 数字量 幅值用一定位数的二进制编码形式表示。

以下首先分析信号变换装置A/D和D/A中各种信号形式,然后归纳出计算机控制系统中的6类信号。

2.1.1 A/D 变换器

A/D变换器是一种将连续模拟信号变换成离散数字编码信号的装置。通常,A/D变换器

要按下述顺序完成 3 种变换:采样/保持、量化及编码。其方块图如图 2-2 所示。

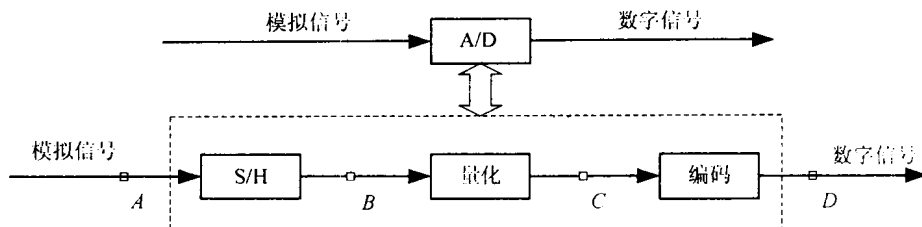


图 2-2 A/D 变换器框图

(一) 采 样

采样/保持器(S/H)对连续的模拟输入信号,按一定的时间间隔 T (采样周期)进行采样,并保持时间 p (采样时间,在其他教科书中常用 τ 表示),从而变成时间离散(断续)、幅值等于采样时刻输入信号值的方波序列信号,如图 2-3B 点所示。从理论上来说,不需要保持操作。

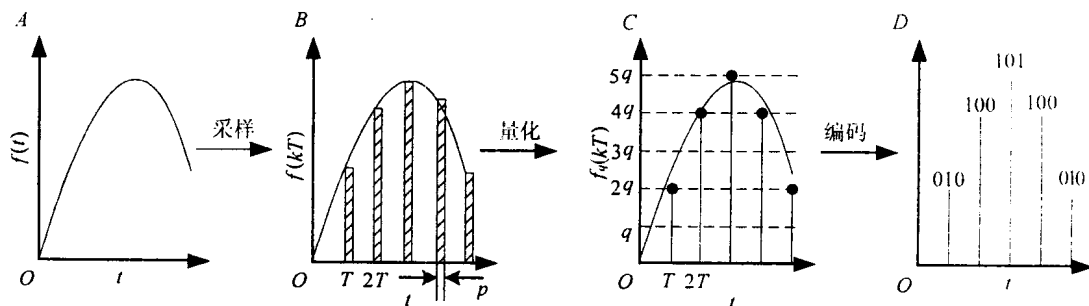


图 2-3 A/D 变换中信号形式的变化

但由于 A/D 变换需要时间,为了减少在变换过程中信号变化带来的影响,采样后的信号在 p 中将保持幅值不变,直到完成变换。显然,采样过程是将连续时间信号变为离散时间信号的过程,也即将时间轴上连续存在的信号变成了时有、时无的断续信号,这个过程涉及信号的有、无问题,因而是 A/D 变换中最本质的变换。当采样时间 p 忽略不计时,采样过程可用一个理想的采样开关表示。所谓理想的采样开关是指,该开关每隔 1 个采样周期闭合 1 次,并且闭合后又瞬时打开,既没有延时也没有惯性。这样,经过理想采样开关后的信号为一串理想的脉冲序列信号。

(二) 量 化

将采样时刻的信号幅值按最小量化单位取整,这个过程称为整量化。若连续信号为 $f(t)$,经理想采样后得到的采样信号用 $f^*(t)$ 表示,它在采样时刻的幅值为 $f(kT)$, $f(kT)$ 是模拟量,它是可以任意取值的,为了将它变换成有限位数的二进制数码,必须要对 $f(kT)$ 进行整量化处理,即用 $f_q(kT) = L \cdot q$ 表示,其中 L 为整数, q 为最小量化单位。这样,可以任意取值的模拟量 $f(kT)$ 只能用 $f_q(kT)$ 近似表示,显然,量化单位 q 越小,它们之间的差异也越小。量化过程如图 2-3 点 C 所示。

(三) 编 码

编码是将整量化的分层信号变换为二进制数码形式,也即用数字量表示,如图 2-3 点 D 所示。编码只是信号表示形式的改变,可将它看作是无误差的等效变换过程。

2.1.2 D/A 变换器

D/A 变换器将数字编码信号转换为相应的时间连续的模拟信号(一般用电流或电压表示)。从功能角度来看,通常可将 D/A 变换器看作是解码器与保持器的组合,如图 2-4 所示(点 F、G、H 的信号见图 2-5)。其中,解码器的功能是把数字量转换为幅值等于该数字量的模拟脉冲信号。注意:点 G 的信号在时间上仍是离散的,但幅值上已是解码后的模拟脉冲信号(电压或电流);保持器的作用则是将解码后的模拟脉冲信号保持规定的时间,从而使时间上离散的信号变成时间上连续的信号,如图 2-5 点 H 所示。在 1 个采样周期内将信号保持为常值形成阶梯状信号的保持器称为 ZOH(Zero-Order Holder,零阶保持器)。

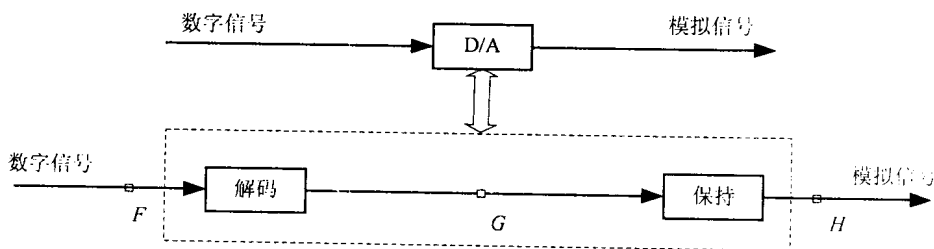


图 2-4 D/A 变换器框图

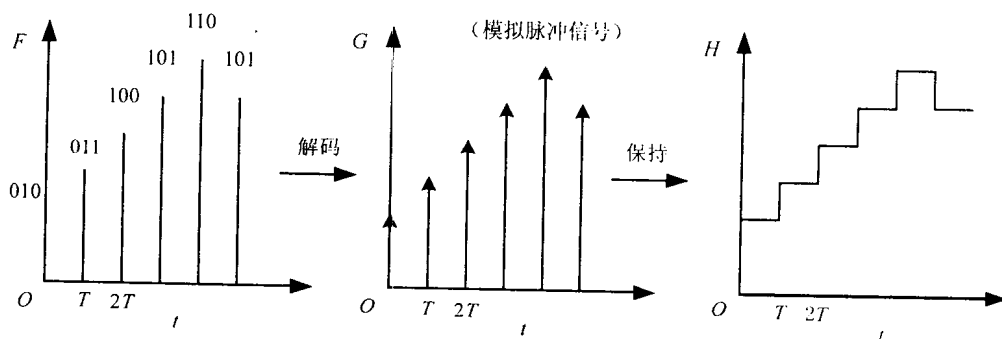


图 2-5 D/A 的信号变换过程

分析 D/A 变换的过程,解码亦只是信号形式的变化,可看作无误差的等效变换,而保持器则将时间离散的信号变成了时间连续的信号。在实际系统里,由于 D/A 变换器的结构不同,可能是如图 2-4 所示的先解码后保持,也可能是先数字保持后解码。利用数字计算机的存储功能使数字量在时间上保持连续,则称为数字保持器。

2.1.3 计算机控制系统中信号形式的分类

通过以上 A/D 和 D/A 信号变换的分析,可将图 2-1 计算机控制系统画成图 2-6 所示信号变换结构图,并将其中的信号形式分成 6 类,如表 2-1 所示。读者不难确定图 2-6 中各点信号的类型。

习惯上,将时间及幅值均连续的信号称为连续信号或模拟信号,如表 2-1 中点 A、I;将时间上离散,幅值上是二进制编码的信号称为数字信号,如表 2-1 中点 D、F(在计算机内存中,也存在时间上连续的数字量,见点 E);常常又将时间断续而幅值为连续的信号称为采样信号。

见表 2-1 点 B。

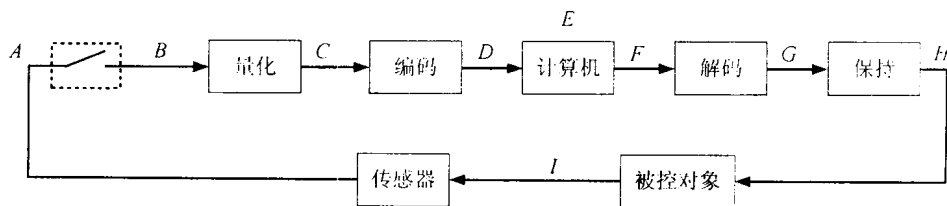


图 2-6 计算机控制系统信号变换结构图

表 2-1 计算机控制系统中信号形式的分类

信号形式		图形表示	图 2-6 中各点信号
时间	幅值		
连续	模拟量		A, I
连续	阶梯形模拟量		H
离散	模拟量		B
离散	离散量		C, G
离散	数字量		D, F
连续	数字量		E (计算机内存信号)

计算机控制系统与连续控制系统相比,除了信号形式多样外,还有一个重要的差别是信号的传递速度不同。连续系统中(除纯延迟环节外),模拟信号的传递可以认为是瞬时完成的,即系统

的输出反映同一时刻输入的响应,也即各点信号都是同时刻的值。而计算机控制系统中,由于A/D转换、计算机运算、D/A转换都需花费一定的时间,因此系统某时刻的输出,实际上不是当前时刻输入的响应,这就是常说的“计算机信号时延”。计算机信号时延对系统的性能有一定的影响,这将在后面的章节中讨论。

2.1.4 计算机控制系统的简化结构图

通过以上分析,可得出以下结论:

- A/D和D/A变换中,最重要的是采样、量化和保持3个变换过程。编码和解码仅是信号表现形式的改变,其变换过程可看作无误差的等效变换关系,因此在系统的分析中可略去;

- 采样将连续时间信号变换为离散时间信号,保持将离散时间信号又恢复成连续时间信号,这是涉及采样间隔中信号的有、无问题,是影响系统传递特性的问题,因而是本质问题,在系统的分析和设计中是必须要考虑的。

- 量化是将模拟信号按最小量化单位整量化,量化将使信号产生误差并影响系统的特性。当量化单位 q 很小时,信号的量化特性影响也很小,因而在系统的初步分析和设计中可不予考虑。在后面的章节中再对量化影响进行分析。

这样,在计算机控制系统初步分析和设计时,图2-6可进一步简化为图2-7。

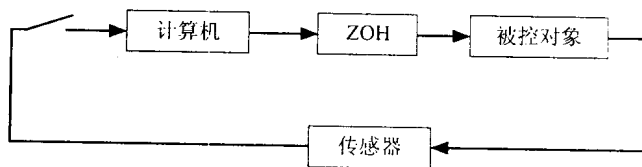


图 2-7 计算机控制系统简化结构图

2.2 理想采样过程的数学描述及特性分析

2.2.1 采样过程的描述

一般说,采样器就是各种不同形式的“开关”,如图2-8(a)所示。由于实际开关合上后是不能瞬时打开的,这样采样所得的脉冲有一定的宽度 p , p 被称为采样时间,如图2-8(b)所示。当采样时间很短时,信号 $f(t)$ 变化不大,或者采样器具有保持功能,则实际采样信号可近似看作矩形脉冲信号(平顶),如图2-8(c)所示。

相邻2次闭合之间的间隔时间称为采样周期,以 T 表示,单位为s。 $f_s = 1/T$ Hz称为采样频率; $\omega_s = 2\pi f_s = 2\pi/T$ rad/s称为采样角频率。

通常,采样周期 T 远大于脉冲宽度 p ,即有 $p \ll T$ 成立。为分析方便起见,可以近似认为采样是瞬时完成的,即认为 $p \approx 0$,如图2-8(d)所示,这种采样过程称为理想采样过程,理想采样信号用 $f^*(t)$ 表示。

若整个采样过程中采样周期不变,这种采样称为均匀采样,如图2-9(a),(b)所示;若采

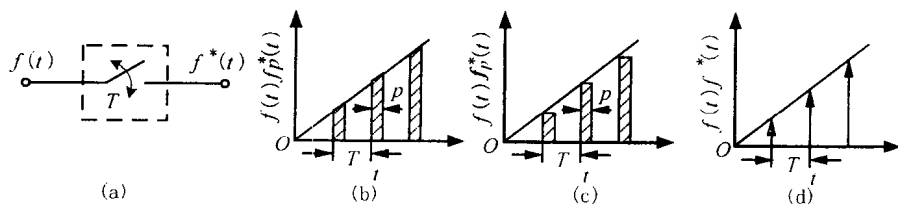


图 2-8 采样过程描述

样周期是变化的,称为非均匀采样。某些非均匀采样可以视为是几种均匀采样的叠加,如图 2-9(c)所示非均匀采样为(a),(b) 2 种均匀采样的叠加。若采样间隔大小毫无规律,则称为随机采样,如图 2-9(d)所示。本书只讨论均匀采样。

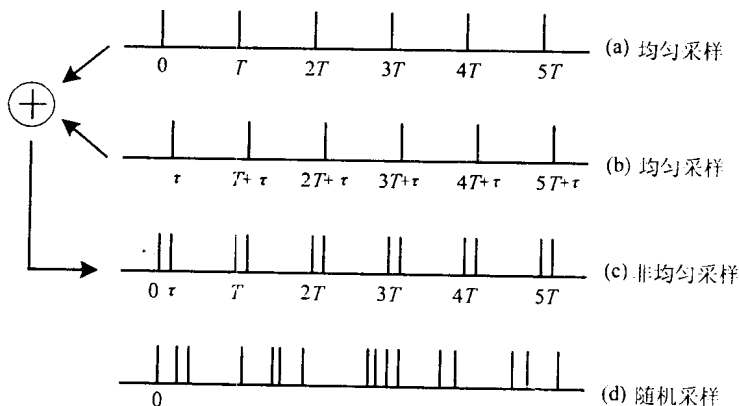


图 2-9 采样形式

2.2.2 理想采样信号的时域数学描述

(一) δ 函数的定义和性质

自然界常遇到一些物理现象,它们的持续时间极短,而取值极大,如力学中的爆炸、冲击、碰撞;电学中的放电、雷击等, δ 函数就是对这种物理现象的科学抽象与描述。

δ 函数又称脉冲函数,它可以由不同方式来定义。

一种较为直观的方式是把 δ 函数定义为矩形脉冲的极限,或采样函数的极限。

矩形脉冲:图 2-10(a)示出宽为 p 、高为 $1/p$ 的矩形脉冲,其面积为 1。当 $p \rightarrow 0$ 时,此矩形脉冲的极限称为单位脉冲函数 $\delta(t)$,其数学描述为

$$\delta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p} \left[u_s(t + \frac{p}{2}) - u_s(t - \frac{p}{2}) \right] \quad (2-1)$$

式(2-1)中, $u_s(t)$ 为单位阶跃函数,即

$$u_s(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2-2)$$

采样函数:采样函数的数学描述为

$$S_a(t) = \frac{\sin t}{t} \quad (2-3)$$