



“十二五”国家重点图书出版规划项目  
材料科学研究与工程技术系列

# 材料处理工艺计算机控制

Computer Control for Materials Processing Technology

● 蔡 珣 于 宽 主 编  
● 朱 波 主 审

哈爾濱工業大學出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
材料科学研究与工程技术系列

# 材料处理工艺计算机控制

---

蔡珣 于宽 主编  
朱波 主审



哈尔滨工业大学出版社

## 内容简介

本书概括介绍了现代控制理论和方法在材料处理工艺过程中的应用,阐述了计算机测试与控制系统在材料处理工艺中的实现方法。主要包括:基本控制理论及数值分析方法,材料处理工艺过程参数测量及传感器技术,工艺参数计算机控制系统设计,PLC 控制技术应用,典型化学热处理工艺过程数学模型及计算机控制,碳纤维及其原丝生产工艺过程的计算机控制等。每章配有思考题,有的还配有实验指导书。

本书可作为高等学校材料科学与材料加工专业的教材,也可供广大科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

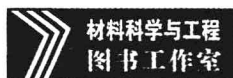
材料处理工艺计算机控制/蔡珣,于宽主编. —哈尔滨:  
哈尔滨工业大学出版社,2012.8

(材料科学研究与工程技术系列)

ISBN 978-75603-3737-1

I. ①材… II. ①蔡…②于… III. ①工程材料-生产-  
工艺-计算机控制 IV. ①TB3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 164884 号



责任编辑 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 18.25 字数 422 千字

版 次 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3737-1

定 价 36.00 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

材料、信息和能源被誉为社会经济发展的三大支柱,而材料处理工艺是决定材料性能的关键因素之一。

随着计算机技术的飞速发展,计算机在材料处理工艺过程中的应用日趋扩大,交叉学科在材料处理中的体现越来越突出。工艺参数的计算机控制,工艺过程的计算机管理,工艺过程数学模型研究及建立,材料性能的计算机预测,计算机仿真,网络管理,数据库技术, CAD/CAM 等现代控制理论和计算机技术将材料处理提到一个新的高度。

材料工艺过程控制是一门综合性的应用学科,涉及基本控制理论和数值分析方法,涉及现代传感技术及计算机控制技术,涉及材料科学基本原理以及材料微观组织结构和材料最终机械性能之间的关系,涉及多门学科的交叉和综合运用。

近年来,国内外科技工作者为促进先进技术在材料处理过程中的应用作了大量工作,国外发展尤为迅速。我国由于地域差别较大,科技发展的不平衡性也比较突出,20 世纪五六十年代的材料处理设备与 21 世纪最新科技共存,传统材料处理工艺与现代处理方法共存,高能耗装备与现代绿色环保设备共存。现代科技发展要求我们必须加快步伐,从实践中不断完善,赶超世界先进水平,全面保持材料处理设备、工艺和管理等与科技发展同步。

为了适应高等院校教育体制改革的需要,提高大学生的实践工作能力,为了更好地使广大科技工作者了解材料处理领域的应用现状和未来发展趋势,特编写《材料处理工艺计算机控制》,本书可作为高等学校材料学与材料加工专业的教材,也可作为本学科科技人员的参考书。

本书共分 7 章,第 1 章主要介绍计算机控制系统和控制理论的基础知识以及数学模型建模求解所需的数值分析方法;第 2 章主要介绍 8086/88 微处理器原理及其在温度控制中的应用;第 3 章主要介绍 PLC 原理及编程技术;第 4 章主要介绍材料处理工艺过程的参数检测及传感器技术;第 5 章主要介绍温度控制系统设计的基本方法;第 6 章主要论述典型化学热处理渗碳工艺过程数学模型及计算机控制;第 7 章主要介绍碳纤维及其原丝生产工艺过程的计算机控制。

本书由蔡珣、于宽主编,朱波主审。编者在多年的教学和科研中,得到了山东大学黄国靖教授、蔡华甦教授、北京科技大学高仲龙教授的教诲和指导,在此表示衷心的感谢。

书中的部分资料及图表选自有关书刊资料,在此谨向原著者表示谢意。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2012 年 2 月

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第1章 计算机自动控制基础               | 1   |
| 1.1 计算机控制系统简介               | 1   |
| 1.2 计算机接口技术                 | 5   |
| 1.3 自动控制基础理论                | 17  |
| 1.4 计算机控制策略                 | 30  |
| 1.5 最小二乘法曲线拟合               | 39  |
| 思考题                         | 42  |
| 第2章 微机原理及其工艺过程控制应用          | 43  |
| 2.1 86 系列微处理器结构             | 43  |
| 2.2 86 系列微型计算机的指令系统         | 47  |
| 2.3 86 系列微型计算机汇编语言程序设计      | 66  |
| 2.4 微机控制系统应用                | 100 |
| 思考题                         | 107 |
| 第3章 可编程控制器技术及应用             | 108 |
| 3.1 西门子 S7-300/400 PLC 结构体系 | 109 |
| 3.2 西门子 STEP7 编程技术          | 118 |
| 3.3 基于 S7-300 PLC 的温度控制系统设计 | 172 |
| 3.4 贝加莱 PLC 简介              | 177 |
| 思考题                         | 184 |
| 第4章 材料处理工艺过程参量检测及传感器技术      | 186 |
| 4.1 温度测量及其传感器               | 186 |
| 4.2 气氛测量及其传感器               | 193 |
| 4.3 压力测量及其传感器               | 201 |
| 4.4 流量测量仪表                  | 205 |
| 4.5 液位检测方法                  | 211 |
| 4.6 调节阀                     | 214 |
| 思考题                         | 218 |
| 第5章 温度计算机控制系统设计             | 219 |
| 5.1 常规温度控制仪表                | 219 |
| 5.2 温度计算机控制系统组成             | 229 |
| 5.3 温度控制实现                  | 232 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 思考题.....                         | 238        |
| 综合设计题目.....                      | 238        |
| <b>第 6 章 气体渗碳工艺过程计算机控制.....</b>  | <b>239</b> |
| 6.1 气体渗碳基本原理 .....               | 239        |
| 6.2 分布式渗碳计算机监控系统 .....           | 246        |
| 6.3 多用炉控制系统实例 .....              | 255        |
| 思考题.....                         | 258        |
| <b>第 7 章 碳纤维生产工艺过程计算机监控.....</b> | <b>259</b> |
| 7.1 碳纤维生产设备及工艺 .....             | 259        |
| 7.2 碳纤维生产工艺过程计算机控制 .....         | 265        |
| 7.3 聚丙烯腈原丝生产线计算机控制 .....         | 268        |
| 思考题.....                         | 271        |
| <b>附录.....</b>                   | <b>272</b> |
| 附录 1 ASCII 码字符表 .....            | 272        |
| 附录 2 86 系列指令系统汇总.....            | 273        |
| <b>参考文献.....</b>                 | <b>285</b> |

# 第 1 章 计算机自动控制基础

## 1.1 计算机控制系统简介

### 1.1.1 概 况

人们为了追求控制系统具有最优性能、最大生产率、最高效益、最小成本或能耗,越来越多地在生产过程中使用数字计算机控制系统。数字计算机用作工业控制系统的一部分以构成计算机控制系统,经历了一个逐步发展的过程,一般将这一过程划分为三个阶段。

#### 1. 开创期

1965 年以前的工作为开创期,这一时期的标志是实现数据自动测量和处理的开环计算机控制系统和工业装置中的直接数字控制 (DDC) 系统。

#### 2. 实用普及期

1965 ~ 1969 年是数字计算机控制系统的实用和逐步普及的阶段,在这期间出现了可靠性不断提高、价格逐年下降的小型数字计算机,在生产中得到广泛应用。其标志是集中型的计算机控制系统,即用以控制整个生产过程或装置的多回路集中控制系统。

#### 3. 微型计算机的应用阶段

由于微型计算机和单片机所具有的高可靠性、价格相宜和使用方便灵活等特点,使计算机的应用自 1972 年以后得到了大量的推广。这一时期的主要标志是利用系统工程方法实现集管理、控制于一体的集散控制系统。

近年来,在现场智能控制设备的发展和实现整个企业信息系统的需求驱动下,应运而生的现场总线控制系统获得了突飞猛进的发展。

### 1.1.2 计算机控制系统的结构

用计算机实现自动控制系统中的控制器就构成了计算机控制系统,计算机控制系统的基本结构如图 1.1 所示。



图 1.1 计算机控制系统的基本结构

图 1.1 所示的计算机控制系统的工作过程为:为了控制被控参数  $y$ , 首先要获取控制信号  $u$ , 而  $u$  的获得又需先将给定量  $w$  和被控量  $y$  进行比较求得误差信号  $e$ , 再由数字计算机对  $e$  进行处理以提供控制信号  $u$ , 最终使系统误差  $e$  减少甚至趋向于零, 使被控量  $w$  按某一性能趋向于给定值  $y$ 。

据此, 计算机控制系统的控制过程可以归结为以下三个步骤。

①实时数据采集:对被控对象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量进行分析, 并按照已经确定的控制规律计算出控制量。

③实时控制:适时地向执行机构发出控制信号。

上述过程不断循环, 使整个系统能够按照一定的动态品质指标进行工作, 从而实现工艺过程的自动控制过程。

工业生产过程是连续进行的, 用于工业控制的微型机系统是一个实时系统, 它由硬件和软件两大部分组成。

### 1. 硬件组成

按硬件模块结构划分, 计算机控制系统的硬件组成如图 1.2 所示。

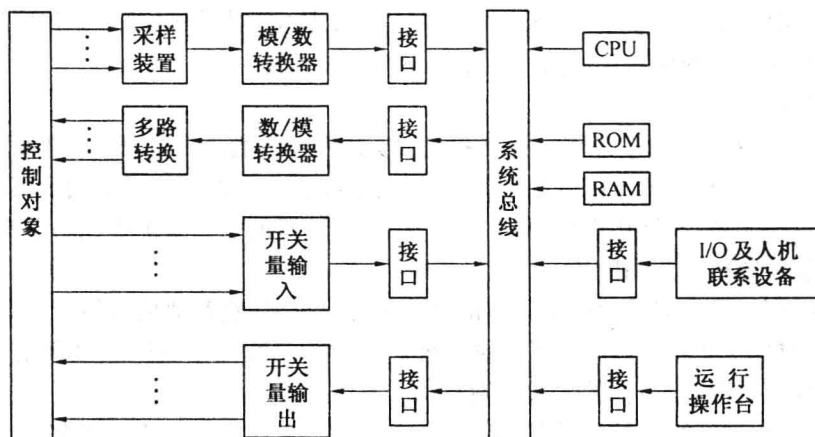


图 1.2 计算机控制系统硬件组成示意图

图 1.2 中采样装置和模/数转换器(A/D 转换器)的作用是将来自控制对象的模拟信号(如温度信号)或系统误差转换为数字信号;数/模转换器(D/A 转换器)和多路转换的作用是将来自接口的数字信号转换为驱动控制对象的模拟信号。图示接口显然用作传递数字信号的缓冲通道,其中包括将来自工业现场的多路开关量输入信号(如接触器、继电器触点的打开/闭合状态)转换为数字信号,以及将来自接口的数字信号转换为开关量驱动信号(如驱动接触器、继电器动作的开关量信号)。

有关计算机接口和采样相关知识将分别在 1.2 和 1.3 节中介绍。

### 2. 软件组成

计算机控制系统的软件通常分为两大类:系统软件和应用软件。

系统软件包括操作系统、监控程序、编译程序和故障诊断程序等,这类程序一般由计

算机生产厂家提供或由专门的软件开发商配套。

应用软件主要是用户根据要解决的问题而编写的各种程序。对于不同的被控对象和不同的控制任务,应用软件有很大差异。在计算机控制系统中,应用软件和有关的硬件及系统软件相互配合,完成工艺过程中信息的获取、加工和传递任务。应用软件的好坏直接影响整个控制系统的性能。

### 1.1.3 计算机控制系统的分类

#### 1. 数据采集和处理系统

数据采集和处理系统不属于自动控制意义下的系统,其结构如图 1.3 所示。计算机主要用于对大量的过程参数进行巡回监测、记录、数据统计和整理、数据超限报警以及对大量数据进行累计和实时分析。计算机不直接参与过程控制,对生产过程不会直接产生影响。

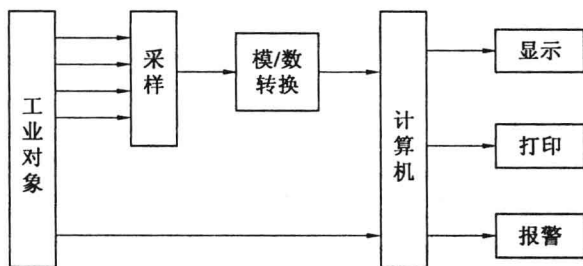


图 1.3 数据采集和处理系统组成框图

此类系统的主要用途为:

- ①代替大量常规显示仪表,对整个生产过程进行集中监视;
- ②集中加工处理数据,指导生产;
- ③存储大量生产信息,按照预先设定的上下限进行超限报警,确保生产安全;
- ④为建立系统数学模型奠定基础,为控制系统的结构设计和控制算法设计提供重要依据。

#### 2. 直接数字控制系统

直接数字控制系统(Direct Digital Control, DDC)是计算机在工业中最普遍的一种应用方式。其特点是计算机直接参与闭环控制。计算机通过输入通道对一个或多个物理量进行巡回监测,并根据规定的控制算法进行运算,然后发出控制信号,通过输出通道直接控制执行机构。其结构如图 1.4 所示。

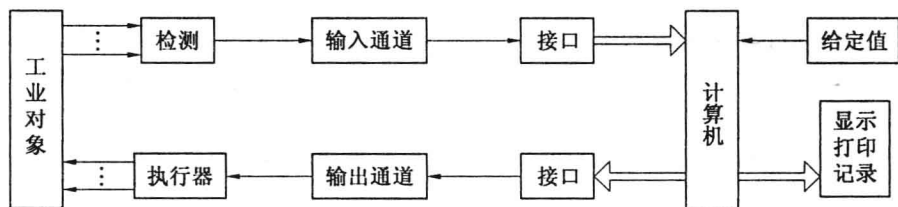


图 1.4 直接数字控制系统结构示意图

一般的 DDC 系统有一个功能较齐全的运行操作台,设定、显示、报警等集中在这个操作台。在 DDC 系统中,计算机除具有数据采集与处理功能外,还可以利用其本身的分时操作功能,同时用作多个回路的数字控制器或取代多台模拟控制器的功能。它所能实现的控制规律,不管是简单的还是复杂的(或特殊的),都是通过计算机语言编程实现的。

### 3. 监督控制系统

监督控制系统(Supervisory Computer Control, SCC)的一般结构如图 1.5 所示,它是在 DDC 控制系统的基础上增加了一台给若干 DDC 控制系统提供给定值和对控制过程进行监督的计算机。

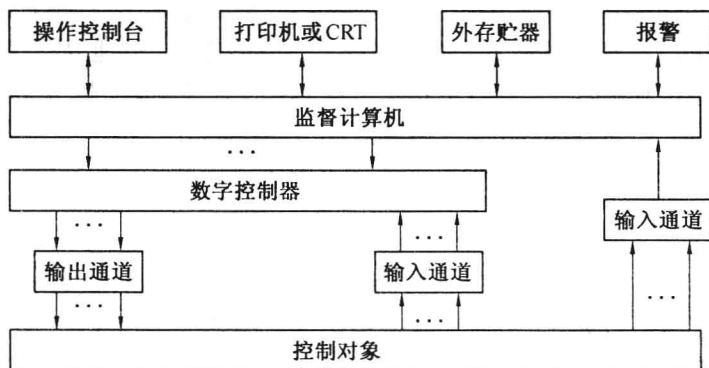


图 1.5 监督控制系统结构示意图

图 1.5 中的监督计算机,通常是根据原始生产工艺信息和从输入通道采集数据加工处理的结果,按照描述该生产过程的数学模型,自动地改变或修正各 DDC 控制系统的给定值,从而使生产过程始终处在最优的生产工况状态中。

需要注意的是,这种应用方式的控制效果主要取决于描述该生产过程的数学模型的优劣。实际上,该数学模型一般是针对某一目标函数设计的,如果该数学模型能使相应的目标函数达到最大值状态,则认为它是能实现生产工况的最优控制;反之,控制效果就不理想。由于监督计算机通过简单回路控制系统与生产过程相连接,因此,它属于“离线”方式。然而,正是这一“离线”方式,才使它有可能实现生产过程的各种复杂规律的控制。

### 4. 分级控制系统

分级控制系统是在监督控制系统的基础上,利用通信技术和 CRT 显示技术组构的系统,如图 1.6 所示。它不仅具有对生产过程的控制和监督功能,而且还包括工厂或企业一级的集中监督和管理决策的功能,如生产调度、生产计划、材料消耗、成本核算等企业管理任务。

### 5. 分布式计算机控制系统

分布式计算机控制系统的结构特征,是利用微型计算机或微处理器为核心的基本控制器,实现地理上和功能上的分散控制,同时通过高速数据通道将各个分散点的信息集中起来进行集中监督、管理和控制操作,以实现生产过程的各种复杂的控制规律。其一般结构如图 1.7 所示。

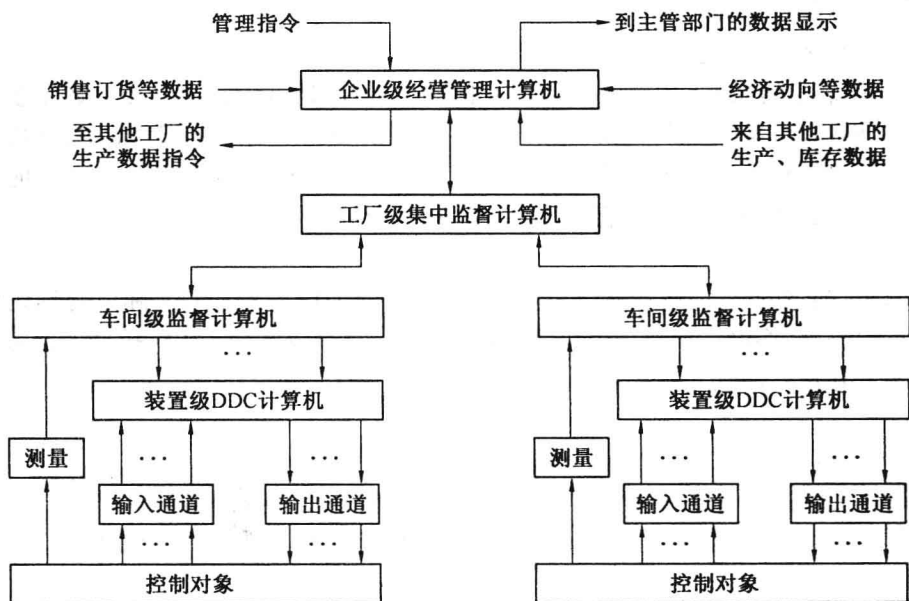


图 1.6 分级控制系统结构示意图

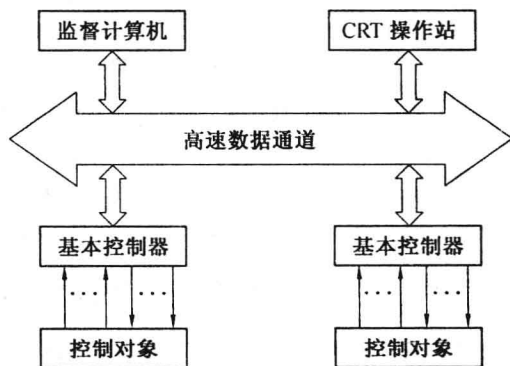


图 1.7 分布式计算机控制系统结构示意图

## 1.2 计算机接口技术

### 1.2.1 模/数(A/D)转换器

将模拟量信号转换成数字量的器件称为模/数转换器,简称 A/D 转换器。

#### 1. A/D 转换器主要性能指标

A/D 转换器是将模拟量转换成数字量的器件,模拟量可以是电压、电流等信号,也可以是声、光、压力、温度、湿度等随时间连续变化的非电的物理量。非电量的模拟量可通过适当的传感器(如光电传感器、压力传感器、温度传感器)转换成电信号。A/D 转换器主

要性能指标有以下几方面。

### (1) 分辨率

分辨率表示转换器对微小输入量变化的敏感程度,通常用转换器输出数字量的位数来表示。例如,对 8 位 A/D 转换器,其数字输出量的变化范围为 0 ~ 255,当输入电压满刻度为 5 V 时,转换电路对输入模拟电压的分辨能力为  $5 \text{ V}/255 = 19.6 \text{ mV}$ 。目前常用的 A/D 转换集成芯片的转换位数有 8 位、10 位、12 位和 14 位等。

### (2) 精度

A/D 转换器的精度是指与数字输出量所对应的模拟输入量的实际值与理论值之间的差值。A/D 转换电路中与每个数字量对应的模拟输入量并非单一的数值,而是一个范围  $\Delta$ ,如图 1.8(a) 所示。

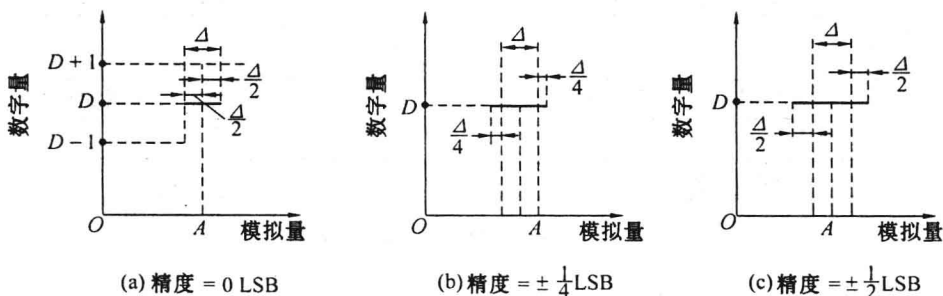


图 1.8 A/D 转换电路的精度

图 1.8 中  $\Delta$  的大小,在理论上取决于电路的分辨率。例如,对满刻度输入电压为 5 V 的 12 位 A/D 转换器,  $\Delta$  为 1.22 mV。定义  $\Delta$  为数字量的最小有效位 LSB。但在外界环境影响下,与每一数字输出量对应的输入量实际范围往往偏离理论值  $\Delta$ 。

精度通常用最小有效位 LSB 的分数值来表示。在图 1.8(a) 中,设  $\Delta$  的中点为 A,如果输入模拟量在  $A \pm \frac{\Delta}{2}$  的范围内,产生唯一的数字量 D,则这时称转换器的精度为  $\pm 0$  LSB。若模拟量变化范围的上限值和下限值各增减  $\Delta/4$ ,转换器输出仍为同一数码 D,则称其精度为  $\pm \frac{1}{4}$  LSB,如图 1.8(b) 所示。如果模拟量的实际变化范围如图 1.8(c) 所示,这时称其精度为  $\pm \frac{1}{2}$  LSB。

日前常用的 A/D 转换集成芯片的精度为  $(\frac{1}{4} \sim 2)$  LSB。

### (3) 转换时间

完成一次 A/D 转换所需要的时间,称为 A/D 转换电路的转换时间。常用的 A/D 转换集成芯片的转换时间约为几个微秒到 200  $\mu\text{s}$ 。在选用 A/D 转换集成芯片时,应综合考虑分辨率、精度、转换时间、使用环境温度以及经济性等诸因素。12 位 A/D 转换器适用于高分辨率系统;陶瓷封装 A/D 转换芯片适用于  $-25 \sim +85^\circ\text{C}$  或  $-55 \sim +125^\circ\text{C}$ ,塑料封装芯片适宜于  $0 \sim 70^\circ\text{C}$ 。

## (4) 湿度系数和增益系数

这两项指标都是表示 A/D 转换器受环境温度影响的程度,一般用每摄氏温度变化所产生的相对误差作为指标,以 ppm/°C 为单位表示。

## (5) 对电源电压变化的抑制比

A/D 转换器对电源电压变化的抑制比(PSRR)用改变电源电压使数据发生 $\pm 1$  LSB 变化时所对应的电源电压变化范围来表示。

## 2. A/D 转换器工作原理

ADC 是把模拟量(通常是模拟电压)信号转换为  $n$  位二进制数字量信号的电路。这种转换通常分 4 步进行,即

## 采样—保持—量化—编码

前两步在采样保持电路中完成,后两步在 A/D 转换过程中同时实现。

所谓采样,是将一个时间上连续变化的模拟量转换为时间上断续变化的(离散的)模拟量。或者说,采样是把一个时间上连续变化的模拟量转换为一个串脉冲,脉冲的幅度取决于输入模拟量,时间上通常采用等时间间隔采样。

所谓保持,就是将采样得到的模拟量值保持下来,即是说, $s(t) = 0$  期间,使输出不是等于 0,而是等于采样控制脉冲存在的最后瞬间的采样值。实际中进行 A/D 转换时所用的输入电压,就是这种保持下来的采样电压,也就是每次采样结束时的输入电压。

所谓量化,就是用基本的量化电平  $q$  的个数来表示采样—保持电路得到的模拟电压值。这一过程实质上是把时间上离散而数字上连续的模拟量以一定的准确度变为时间上、数字上都离散的、量级化的等效数字值。

实现 A/D 转换的方法很多,常用的有逐次逼近法、双积分法及电压频率转换法等。

## (1) 逐次逼近法 A/D 转换器

逐次逼近法 A/D 转换器是一个具有反馈回路的闭路系统。A/D 转换器可划分成 3 大部分:比较环节、控制环行、比较标准(D/A 转换器)。

图 1.9 为逐次逼近法 A/D 转换器的原理电路。其主要原理为:将一个待转换的模拟输入信号  $V_{IN}$  与一个“推测”信号  $V_1$  相比较,根据推测信号是大于还是小于输入信号来决定减小还是增大该推测信号,以便向模拟输入信号逼近。推测信号由 D/A 变换器的输出获得。当推测信号与模拟输入信号“相等”时,向 D/A 转换器输入的数字即为对应的模拟输入信号所对应的数字量。

其“推测”的算法过程为:它使二进制计数器中的二进制数的每一位从最高位起依次置 1。每设置一次后,都要进行测试。若模拟输入信号  $V_{IN}$  小于推测信号  $V_1$ ,则比较器的输出零,并使该位置零;否则比较器的输出为 1,并使该位

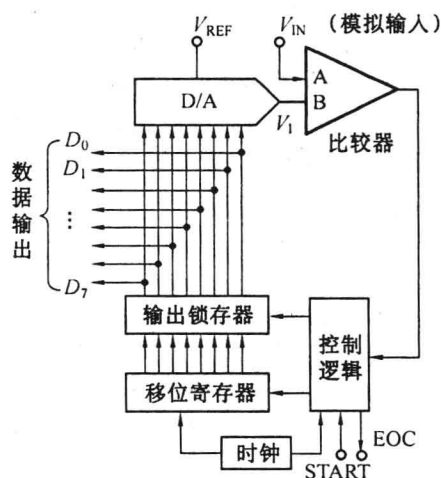


图 1.9 逐次逼近法 A/D 转换器原理

保持1。无论哪种情况,均应继续比较下一位,直到最末位为止。此时在D/A变换器的数字输入即为对应于模拟输入信号的数字量,将此数字输出,即完成其A/D转换过程。

### (2) 双积分法 A/D 转换器

双积分法 A/D 转换器由电子开关、积分器、比较器和控制逻辑等部件组成,如图 1.10(a)所示。双积分法 A/D 转换器是将未知电压  $V_x$  转换成时间值来间接测量的,所以双积分法 A/D 转换器也称为  $T$ - $V$  型 A/D 转换器。

在进行一次 A/D 转换时,开关先把  $V_x$  采样输入到积分器,积分器从零开始进行固定时间  $T$  的正向积分,时间  $T$  到后,开关将与  $V_x$  极性相反的基准电压  $V_{REF}$  输入到积分器进行反相积分,到输出为零伏时停止反相积分。

从图 1.10(b)所示的积分器输出波形可以看出:反相积分时,积分器的斜率是固定的,  $V_x$  越大、积分器的输出电压越大、反相积分时间越长。计数器在反相积分时间内所计的数值就是与输入电压  $V_x$  在时间  $T$  内的平均值对应的数字量。

由于这种 A/D 转换器要经历正、反两次积分,故转换速度较慢。

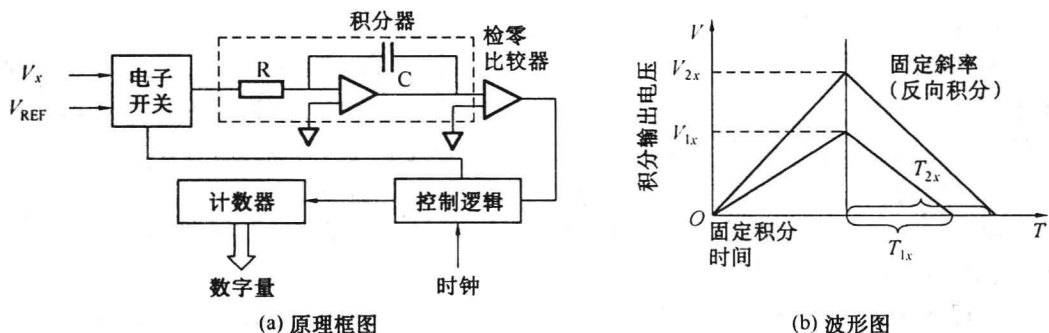


图 1.10 双积分法 A/D 转换器原理

### (3) 电压频率转换法 A/D 转换器

①VFC 模/数转换器工作原理。VFC(电压频率转换器)构成模/数转换器时,由计数器、控制门及一个具有恒定时间的时钟门控制信号组成。图 1.11 所示为 VFC 型 A/D 转换装置的流程图和波形。当电压  $V_i$  加至 VFC 的输入端后,便产生频率  $f$  与  $V_i$  成正比的脉冲。该脉冲通过由时钟控制的门,在单位时间  $T$  内由计数器计数。计数器在每次计数开始时,原来的计数值被清零。这样每个单位时间内,计数器的计数值就正比于输入电压  $V_i$ ,从而完成 A/D 变换。

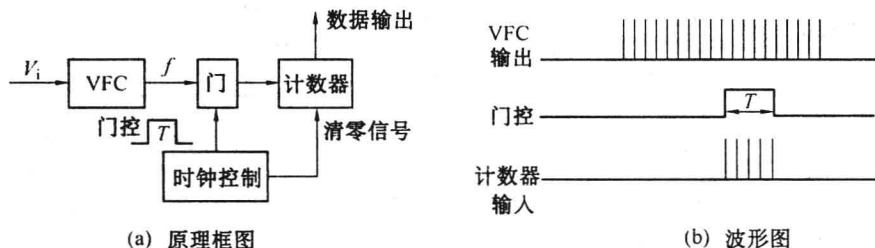


图 1.11 采用 VFC 构成的模/数转换器

当 VFC 的满度频率已知时, A/D 转换周期为

$$T = \frac{N}{F} \quad (1.1)$$

式中,  $N$  为 A/D 转换器最大输出计数值;  $F$  为 VFC 的满度频率。

VFC 与微型机结合起来, 可方便的构成多位高精度的 A/D 转换器, 且具有如下优点:

a. VFC 价格不高。用它构成的 A/D 转换器, 在零点漂移及非线性误差等方面, 性能均优于逐次逼近式 A/D 转换器。

b. VFC 输出频率为  $f$  的脉冲信号, 只需要两根传输线就可进行传送。用这种方式对生产现场的信号进行采样和远距离传输都很方便, 且传输过程中的抗干扰能力强。

c. VFC 的输入量为模拟信号  $V_i$ , 输出的是脉冲信号, 只需采用光耦合器传输脉冲信号, 便可实现模拟输入信号  $V_i$  和计算机系统之间的隔离。

d. VFC 的工作过程具有积分特性, 在构成 A/D 转换器时, 对噪声具有良好的滤波作用。所以采用 VFC 进行 A/D 转换时, 其输入信号的滤波环节可简化。

采用 VFC 构成 A/D 转换器的缺点是转换速度较慢, 为了克服这一缺点, 可采用如下措施:

a. 采用高频 VFC。若采用 5 MHz 的 VFC 构成 10 位 A/D 转换器, 则最大转换时间只需 200  $\mu$ s, 这就进入了中速 A/D 转换的行列。

b. 在多微机系统中, 利用单片机与 VFC 构成 A/D 转换器。由于系统是多机同时工作, 即在同一时间内, 系统可实现多功能的控制运算。这就解决了实时控制中在速度上的矛盾。

②电压频率变换器(VFC)的传输特性。VFC 是输出信号频率正比于输入电压数值的线性变换器, 如图 1.12 所示, 其传输特性可表示为

$$f = KV_i \quad (1.2)$$

式中,  $f$  为变换器输出信号频率;  $V_i$  为变换器输入电压;  $K$  为变换器的增益。

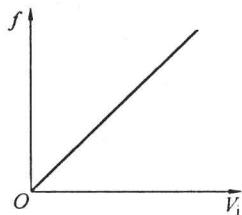


图 1.12 VFC 的输入输出特性

VFC 具有如下主要指标:

a. 频率范围: 是指在额定输入电压范围内的输出脉冲频率范围, 通常分 0 ~ 10 kHz, 0 ~ 100 kHz, 0 ~ 1 MHz 三种。近年来, 国外已生产出输出频率为 0 ~ 5 MHz 的 VFC 模块 (如美国 TP 公司生产的 4707)。

b. 模拟输入电压范围: 变换器额定输入电压为 0 ~ 10 V, 该输入值通常还允许超出量程的 10% ~ 100%。

c. 输入阻抗: 输入端对地的等效电阻, 该值一般为 1 ~ 100 k $\Omega$ 。

d. 非线性误差: 一般用相对满量程的百分数表示, 通常为  $\pm(0.1\% \sim 0.001\%)$ 。

e. 满程稳定性: 包括满程温度系数、时间漂移、电源电压灵敏度 3 部分。其中温度系数是主要的, 一般几十至几百万分之几 (即百万分之几)/ $^{\circ}\text{C}$  的数量级。

f. 工作电压: 一般是  $\pm 15$  V, 其可变化范围为  $\pm(12 \sim 18)$  V。

g. 电源电流: 该指标实际上表示了器件的功耗。正负电源电流一般为几 mA 到 20 ~

30 mA。

h. 工作温度:通常要求 VFC 模块在  $0 \sim +70^{\circ}\text{C}$  内正常工作。

### 1.2.2 数/模(D/A)转换器

将数字量信号转换成模拟量的器件称为数/模转换器,简称 D/A 转换器。

#### 1. D/A 转换器主要性能指标

D/A 转换器主要性能指标包括以下几方面。

##### (1)分辨率

分辨率指最小输出电压(对应的输入数字量只有最小有效位“1”)与最大输出电压(对应的输入数字量所有有效位全为“1”)之比。如  $N$  位 D/A 转换器,其分辨率为  $1/(2^N-1)$ 。在实际使用中,表示分辨率大小的方法也用输入数字量的位数来表示。

##### (2)线性度

用非线性误差的大小表示 D/A 转换的线性度,并且把理想的输入输出特性的偏差与满刻度输出之比的百分数定义为非线性误差。

##### (3)转换精度

D/A 转换器的转换精度与 D/A 转换器的集成芯片的结构和接口电路配置有关。如果不考虑其他 D/A 转换误差时,D/A 转换器的转换精度就是分辨率的大小,因此要获得高精度的 D/A 转换结果,首先要保证选择有足够分辨率的 D/A 转换器。但是,当外部电路器件或电源误差较大时,也会造成较大的 D/A 转换误差。在 D/A 转换过程中,影响转换精度的主要因素有失调误差、增益误差、非线性误差和微分非线性误差。

##### (4)建立时间

建立时间是 D/A 转换速率快慢的一个重要参数,是指 D/A 转换器中的输入代码有满度值的变化时,其输出模拟信号电压(或模拟信号电流)达到满刻度值  $\pm \frac{1}{2}$  LSB(或与满刻度值差百分之多少)时所需要的时间。不同型号的 D/A 转换器的建立时间不同,一般从几个毫微秒到几个微秒。

##### (5)温度系数

在满刻度输出的条件下,温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,输出变化的百分数定义为温度系数。

这两项指标都是表示 D/A 转换器受环境温度影响的程度,一般用每摄氏温度变化所产生的相对误差作为指标,以 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  为单位表示。

##### (6)电源抑制比

通常把满量程电压变化的百分数与电源电压变化的百分数之比称为电源抑制比。

##### (7)工作温度范围

由于工作温度会对运算放大器加权电阻网络等产生影响,所以只有在一定的工作温度范围内才能保证额定精度指标。较好的 D/A 转换器的工作温度范围为  $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$ ,较差 D/A 转换器的工作温度为  $0 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 。多数器件其静态、动态指标均在  $25^{\circ}\text{C}$  的工作温度下测得,工作温度对各项精度指标的影响用温度系数来描述,如失调温度系数、增益温度系数、微分线性误差温度系数等。

## (8) 失调误差(或零点误差)

失调误差定义为数字输入全部为0时,其模拟输出值与理想输出值之偏差值。对于单极性 D/A 转换,模拟输出的理想值为零伏点。对于双极性 D/A 转换,理想值为负域满量程。偏差值的大小一般用 LSB 的份数或用偏差值相对满量程的百分数来表示。

## (9) 增益误差(或称标度误差)

D/A 转换器的输入与输出传递特性曲线的斜率称为 D/A 转换增益或标度系数,实际转换的增益与理想增益之间的偏差称为增益误差。增益误差在消除失调误差后用满码(全1)输入时其输出值与理想输出值(满量程)之间的偏差表示,一般也用 LSB 的份数或用偏差值相对满量程的百分数来表示。

## (10) 非线性误差

D/A 转换器的非线性误差定义为实际转换特性曲线与理想特性曲线之间的最大偏差,并以该偏差相对于满量程的百分数度量。在转换电路设计中,一般要求非线性误差不大于  $\pm \frac{1}{2}$  LSB。

## 2. D/A 转换器工作原理

D/A 转换器从工作原理上可分为并行 D/A 转换器及串行 D/A 转换器两种。并行 D/A 转换器的转换速度快,但电路复杂。

并行 D/A 转换器的位数与输入数码的位数相向,对应输入数码的每一位都设有信号输入端,用以控制相应的模拟切换开关,把基准电压  $V_N$  接到电阻网络上。并行 D/A 转换器的原理如图 1.13 所示。

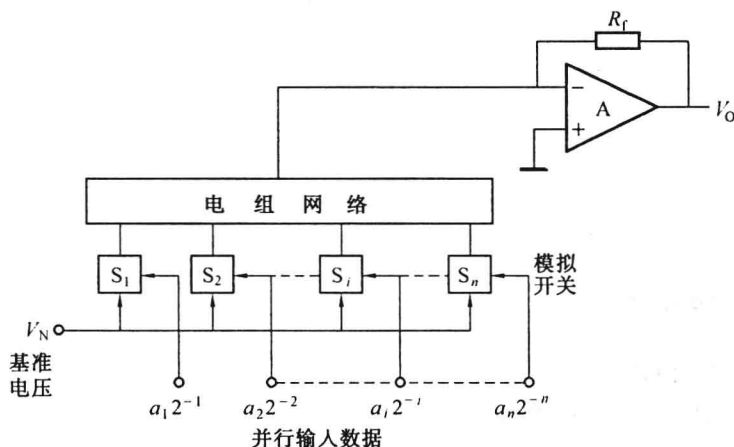


图 1.13 并行 D/A 转换器原理

电阻网络将基准电压转变为相应的电流或电压,在运算放大器的输入端进行总加。放大器的输出则反映了输入数码的大小,如输入数码

$$x_p = a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \cdots + a_i 2^{-i} + \cdots + a_n 2^{-n} \quad (1.3)$$

则

$$V_O = V_N x_p = V_N (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \cdots + a_n 2^{-n}) = V_N \sum_{i=1}^n a_i 2^{-i} \quad (1.4)$$