



第八章 计算机控制系统设计

- 8.1 计算机控制系统的设计步骤
- 8.2 数字伺服系统
- 8.3 双闭环直流数字调速系统
- 8.4 电阻炉温度控制系统
- 8.5 数字程序控制系统





8.1 计算机控制系统的设计步骤

1. 研究被控对象、确定控制任务
2. 确定系统总体控制方案
3. 确定控制策略和控制算法
4. 硬件详细设计
5. 软件详细设计
6. 系统仿真与调试
7. 现场安装调试





8.2 数字伺服系统

伺服系统是自动控制系统中的一类，原称位置随动系统，简称随动系统。伺服系统是用来控制被控对象的某种状态，使其能自动地、连续地、精确地复现输入信号的变化规律。

- 1.系统硬件设计
- 2.伺服系统控制器设计
- 3.系统软件设计



1. 系统硬件设计

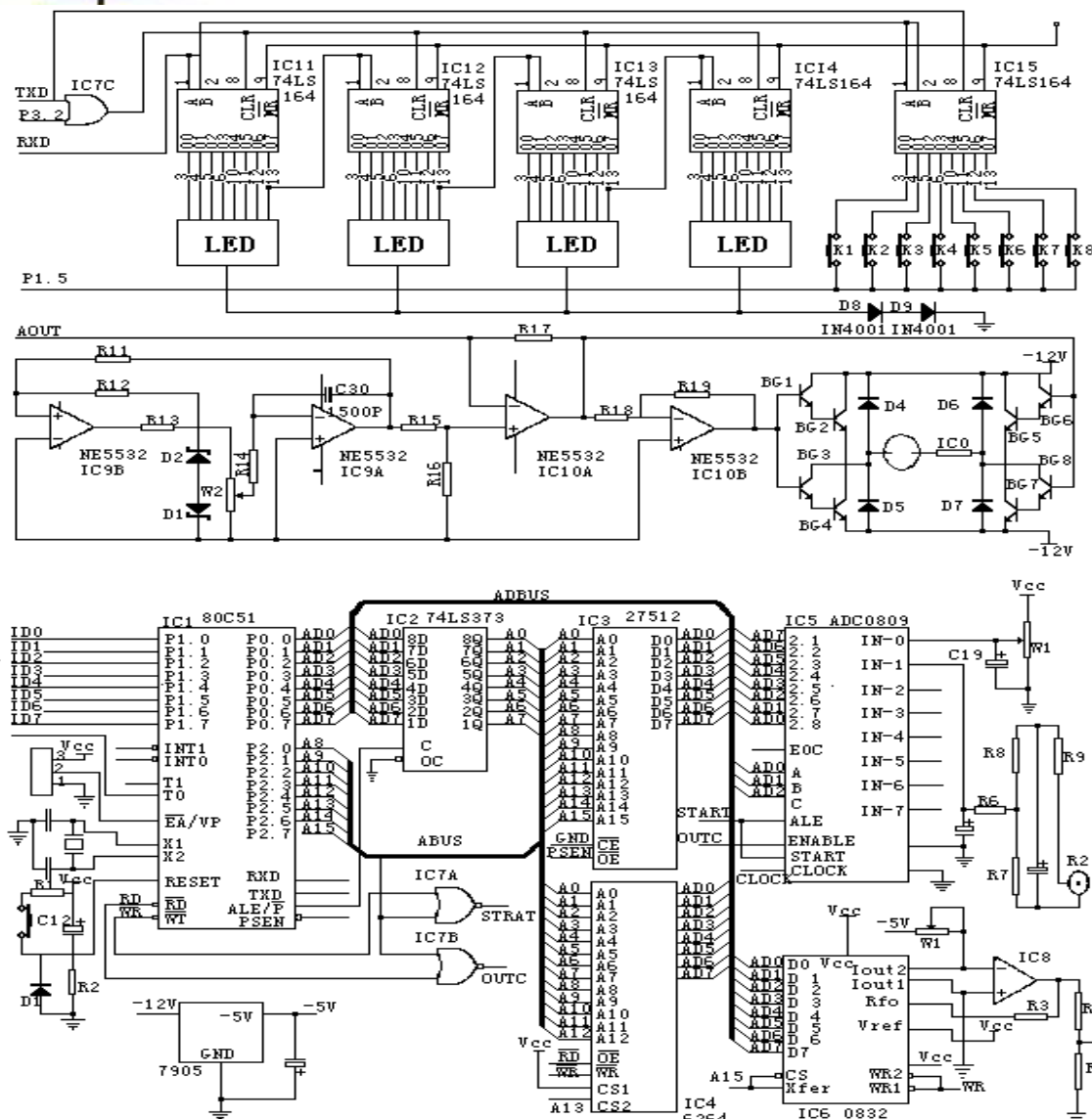


图8.1 系统硬件原理图

单片机与外部ROM、RAM的接口：

PSEN 低电平时，读 ROM (27512)；RD 为低时，读 RAM (6264)，WR 为低时，写 6264。

单片机与A/D芯片的接口：当A14为

低时，RD、WR 对 ADC0809 操作。ALE 与 START 相连，地址锁存同时启动 A/D 转换。ADC0809 的 IN0 做位置及速度的参考输入。

单片机与 DAC0832 的接口：WR 为低时，DAC0832 将数据总线上的数据转换为单极性电流输出。

PWM 功率放大器原理：运放 IC9A、IC9B 及其外围元件构成了三角波发生器，IC10A 做比较器，模拟量与三角波电压比较，输出宽度可变的方波脉冲。

键盘显示器设计：RXD 接最高位 74LS164 串行移位寄存器，TXD 接 74LS164 外部时钟引脚。74LS164 并行输出端接 LED 段驱动输入端。TXD 受 p3.2 控制，p3.2 低时，TXD 驱动显示器；p3.2 高时，对键盘操作。

2. 伺服系统控制器设计

设伺服电机位置随动系统传递函数为

$$G(s) = \frac{K(T_3s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

其中 $K = 3724$, $T_1 = 1.81$, $T_2 = 0.038$, $T_3 = 0.15$ 。

根据第五章第三节介绍的二阶工程设计法, 校正后系统开环传递函数为

$$\Phi_0(s) = \frac{1}{as(1 + \frac{1}{2}as)}$$

则应选择如下形式的控制器

$$G_c(s) = \frac{K_P(T_1s + 1)}{T_3s + 1}$$



伺服系统控制器设计

即

$$G(s)G_c(s) = \frac{K(T_3s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \frac{K_p(T_1s + 1)}{T_3s + 1} = \frac{1}{\frac{1}{KK_p}s(T_2s + 1)} = \frac{1}{as(\frac{1}{2}as + 1)}$$

由

$$\frac{1}{KK_p} = a$$

$$T_2 = \frac{1}{2}a$$

得

$$K_p = \frac{1}{2KT_2}$$





伺服系统控制器设计

即模拟控制器为

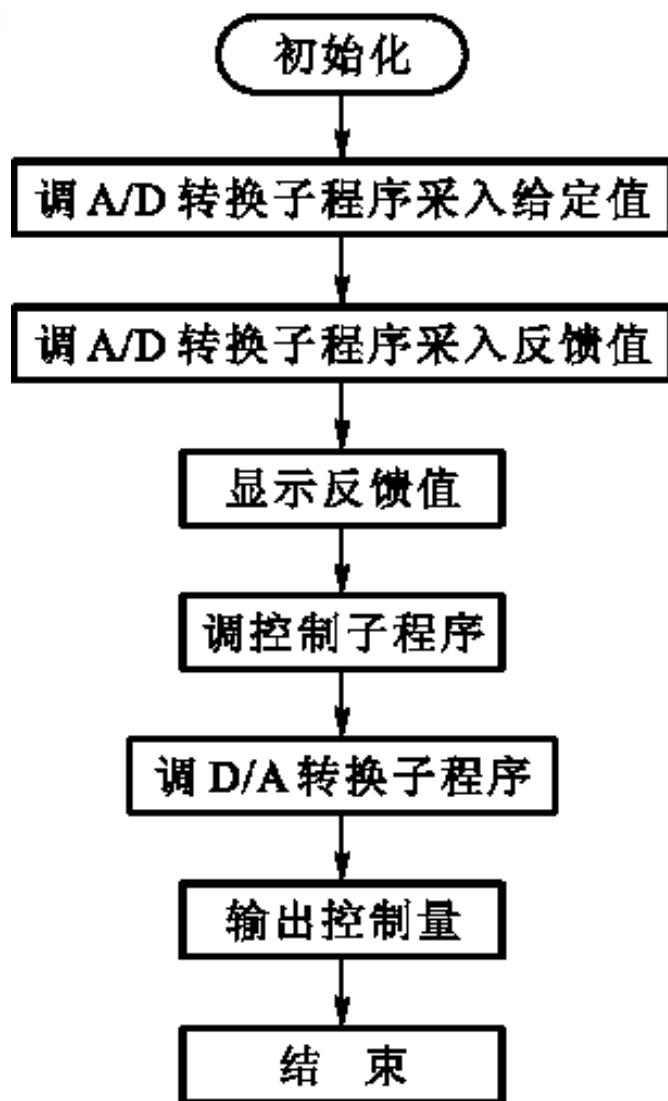
$$G_c(s) = \frac{1}{2KT_2} (T_1s + 1) \frac{1}{T_3s + 1}$$

利用后向差分法对模拟控制器进行离散化，得到数字控制器

$$D(z) = G_c(s) \Big|_{s=\frac{z-1}{Tz}} = K_P \frac{(T_1 + T)z - T_1}{(T_3 + T)z - T_3}$$



3. 系统软件设计



本系统应用软件包括主程序，D/A转换子程序，A/D转换子程序及控制子程序，其程序流程图如图8.2所示。从而实现了直流伺服电机的位置控制。

图8.2 位置控制程序流程图



8.3 双闭环直流数字调速系统

由于直流调速系统具有控制特性优良，能在很宽的范围内平滑调速，起制动性能好，定位精度高等优点，使得其广泛地应用于轧钢机、造纸机、金属切削机床等许多领域的自动控制系统中。

- 确定整体方案
- 电流环、速度环数字控制器设计
- 晶闸管数字触发器设计
- 微型计算机选择
- 系统硬件和软件设计
- 系统调试



1.确定整体方案

本系统拟设计成采用计算机控制的全数字式直接数字控制系统。因此，要求计算机完成内环电流调节器运算、外环速度调节器运算以及完成晶闸管数字触发控制功能。

电流内环要获取电流反馈信号。在本例中采用交流电流互感器作为电流检测元件，检测到的交流电流信号，经整流、分压、滤波后，变成与负载电流成比例的0~5V的直流电压，再经A/D转换器将模拟电压转换成数字量，输入计算机。

速度外环要获取转速反馈信号。可采用测速发电机作为速度检测元件。测速发电机的输出电压经分压、滤波，再通过A/D转换器得到转速的数字量。这种方法的缺点是测速发电机本身存在死区和非线性以及转换、滤波电路带来的误差和时滞。因此，本例中采用主轴脉冲发生器（光电编码器）作为速度检测元件，通过计数器定时计数即可得到转速的数字信号。若选定每转产生 Tn 个脉冲的主轴脉冲发生器，则在转速为 n (转/每分钟)时，每秒产



确定整体方案

本系统拟由计算机来实现晶闸管数字触发功能。用数字触发器取代模拟触发器电路，不仅可以提高晶闸管触发的可靠性、灵活性，而且还为进一步提高触发精度和实现整个系统的多功能、智能化提供了必要的条件。

综上所述，可画出本系统的组成框图如图8.3所示。

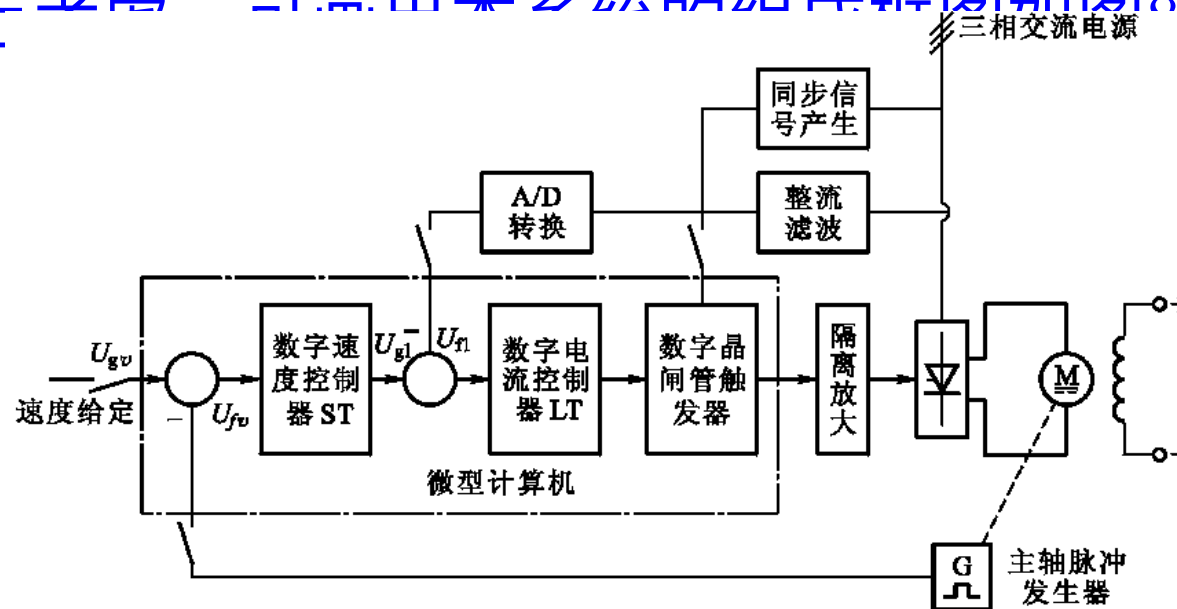


图8.3 双闭环直流数字调速系统

2. 电流环、速度环 数字控制器设计

在典型的双闭环晶闸管直流调速系统中，电流环调节器和速度环调节器均采用PI调节器。其传递函数为

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

由第四章数字控制器的模拟化设计方法，可得PI控制算式为

$$u(k) = u(k-1) + a_0 e(k) - a_1 e(k-1)$$

$$a_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} \right), \quad a_1 = K_p$$

采样周期 T ，按经验公式 $\omega \approx 10\omega_c$ 确定。其中， ω 为采样角频率， ω_c 为系统开环频率特性的截止频率。



电流环、速度环 数字控制器设计

由于电流环调节器和速度环调节器均采用PI调节器，因此可以编制一个PI运算子程序，调用前将有关参数及偏差数据送入相应单元，则两个环可共用一个子程序。PI运算子程序流程图如图8.4所示。

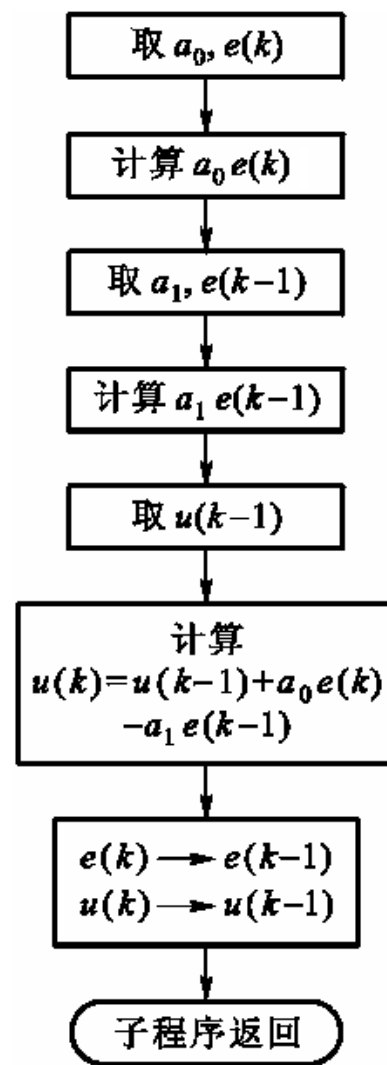


图8.4 PI运算子程序流程图

3.晶闸管数字触发器设计

晶闸管三相全控桥式整流电路及线电压曲线如图8.5所示。 $t_1 \sim t_6$ 为自然换相点。取线电压 u_{WV} 从负半波到正半波的过零点 (t_1) 作为同步基准点。根据波形图可分析出各晶闸管的触发时刻 (对应于控制角 $\alpha = 0^\circ$) 及触发顺序

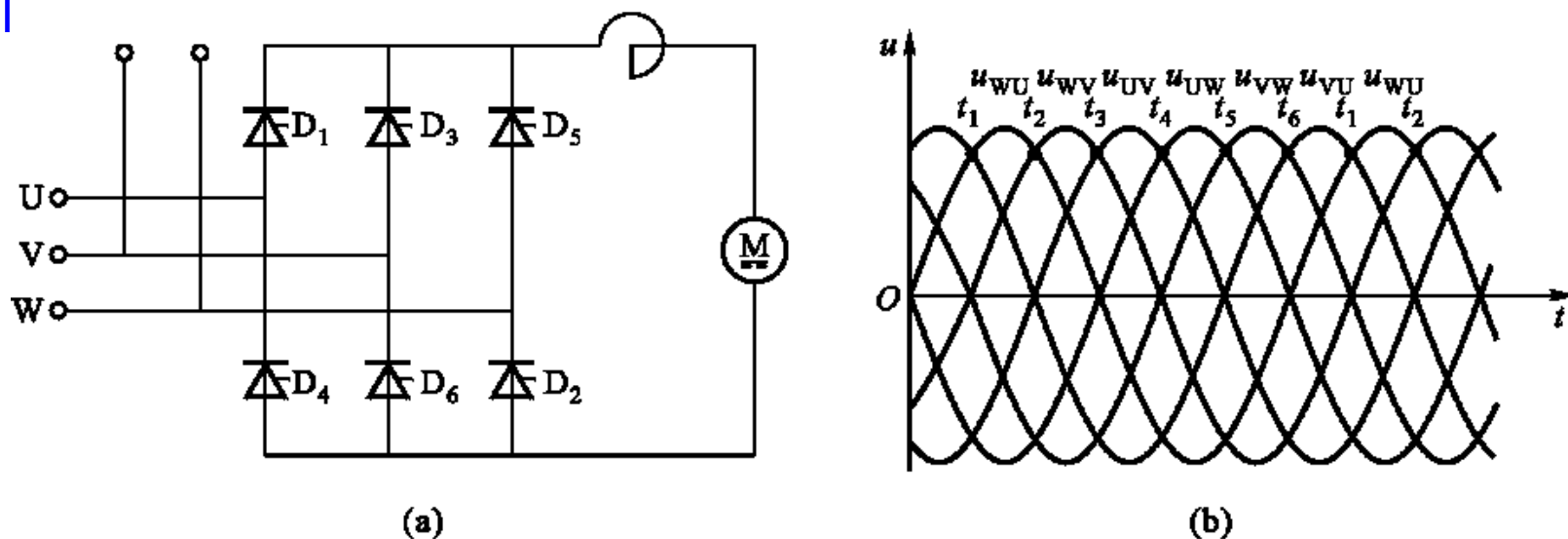


图8.5 三相全控桥式整流电路及线电压曲线

晶闸管数字触发器设计

计算机对电流调节器的输出 u_k 进行计算，以同步基准点为参考点，算出晶闸管控制角 α 的大小，再通过定时器按触发角大小及图8.6的顺序，准确的给各个晶闸管发出触发脉冲，这就是数字触发器的任务。

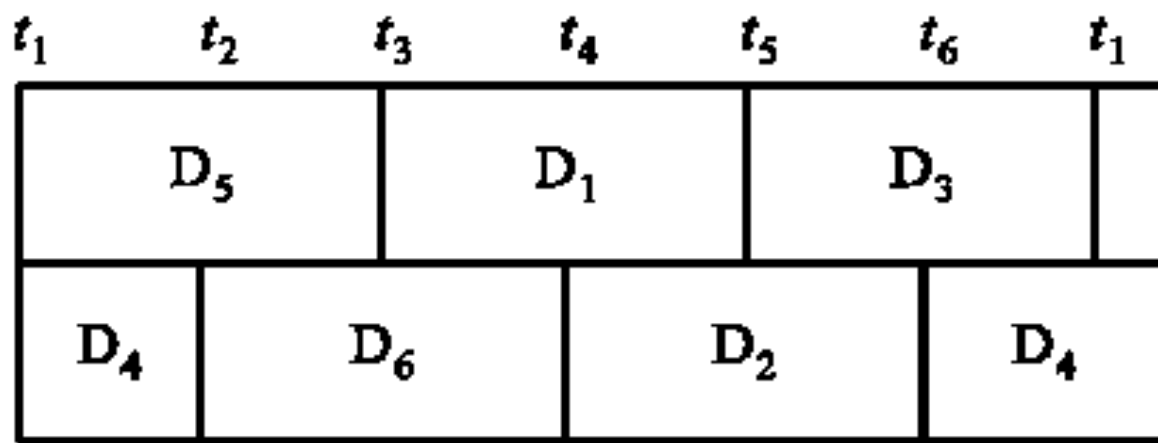


图8.6 晶闸管的触发时刻及触发顺序

绝对触发方式设计 数字触发器的一种方法

- 控制算法 采用绝对触发方式，触发角 α 是滞后自然换相点的角度。为了用一个定时器完成对触发角的定时，定时时间不能超过 $3.33ms$ 。所以，需引进一个新的变量 α' 作为定时角度，其定义如下

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 60^\circ \text{ 时 } \alpha' = \alpha$$

$$60^\circ < \alpha \leq 120^\circ \text{ 时 } \alpha' = \alpha - 60^\circ$$

$$120^\circ < \alpha \leq \alpha_{\max} \text{ 时 } \alpha' = \alpha - 120^\circ$$

其中 α_{\min} 和 α_{\max} 是触发角的最小值和最大值。



绝对触发方式设计 数字触发器的一种方法

- 建立 α 表 三相全控桥式整流电路输出电压 V_d 与控制角 α 之间的关系

$$V_d = 2.34E_2 \cos \alpha$$

其中 E_2 为变压器二次侧相电压有效值。

若令触发整流环节成为一个放大系数为 K_s 的线性环节，即

$$V_d = K_s u_k$$

则有

$$\alpha = \arccos(\lambda u_k)$$

给定一个 u_k 值，按公式可算出一个 α 。为满足快速实时控制要求，可离线算出 u_k 与 α 的所有对应值，列成表格存入内存，这个数据表就称为 α 表。

绝对触发方式设计 数字触发器的一种方法

- 脉冲分配表 数字触发器要根据图8.6给出的触发顺序，顺次发出触发脉冲。为方便起见，建立一个脉冲分配表。当定时器定时的时间到时，定时器发出中断申请，在中断服务程序里从脉冲分配表中取出数据，由I/O口送出，经单稳形成宽度约1ms的脉冲，再经光电隔离、功率放大，最后通过脉冲变压器输出到晶闸管触发极。



4.微型计算机选择

本系统要求微型计算机完成电流环和速度环的反馈信号采样、处理和速度环的数字触发控制等功能。该系统主要由8086CPU、并行I/O接口8255A、可编程中断控制器8259、同步信号电路、A/D转换器，以及时钟电路、光电隔离器件等组成。

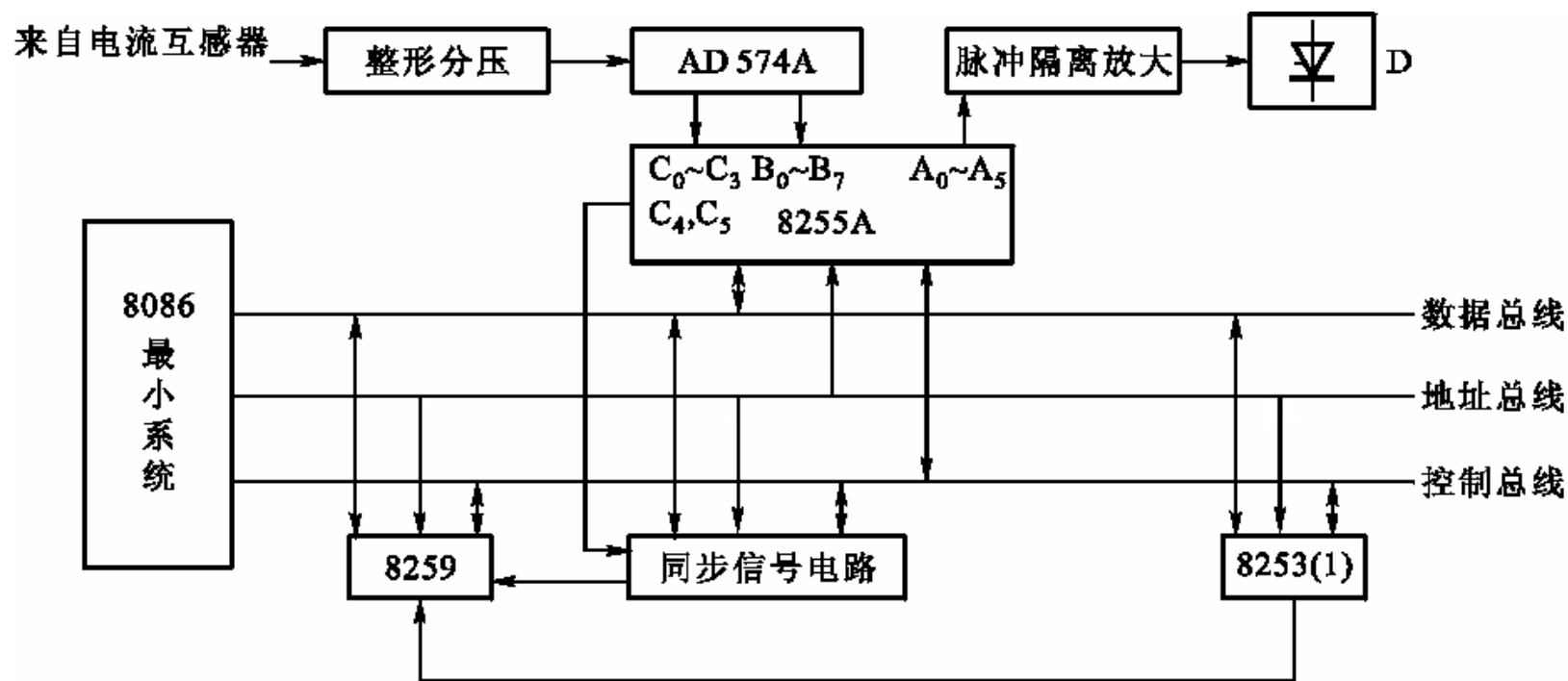


图8.7采用Intel8086微处理器构成的全数字式直流调速系统



5.系统硬件和软件设计

硬件设计是在单板机或单片机的基础上，对照系统总体框图缺少部分加以扩充。本系统是在TP86A 单板机基础上扩充的，所用的器件都是大家比较熟悉的通用器件。因此，根据系统总体原理框图画出电气原理图是不困难的，这里不再画出。本系统的主要控制功能由中断服务程序完成，程序由汇编语言编写。主程序完成外围芯片设定和初始化、建立脉冲分配表及存储单元的设定任务；IR1中断程序完成启动IR2定时及输出控制字任务；IR2中断程序完成输出00H控制字任务；IR3 中断程序完成电流采样、电流环调节计算及触发角 α 的计算；IR4





6.系统调试

完成硬件和软件的分部安装、编制、调试之后，就要进行联调，联调要分步进行。数字触发器部分是比较独立的部分，可先单独调试通过，然后再和电流环、速度环联调。

联调是一项细致的工作。由于采样周期选择欠佳、参数估值误差等等原因，一般系统不能立即达到要求的动、静态品质指标，甚至系统是不稳定的。根据调试出现的现象对系统进行分析，仔细调整参数。在调试过程中，理论分析是需要的，但往往离不开试凑法，反复调试。调试首先



8.4 电阻炉温度控制系统

在日常生活中和工业生产中，有大量的需要进行温度控制的场合，有大量的需要控制的加热设备。其中，电阻炉就是热处理生产中应用最广的加热设备，是电流通过电热元件产生热量，借助辐射和对流的传递方式将热量传递给工件，使工件加热到所要求的温度。

- 确定总体方案
- 系统硬件设计
- 控制算法设计
- 软件设计



1.确定总体方案

在某煤气/焦炭生产企业中，为了把握工艺规律和控制参数，按比例制作了一台模拟炼焦炉，其中的煤炭采用电阻丝进行加热。要求控制电阻炉中A点的温度按预定的规律变化，同时监测B点的温度，一旦B点温度超过允许值，就应该发出报警信息并停止加热。

根据设计任务的要求，采用8031单片机系统组成的数字控制器代替常规模拟调节器。整个系统在规定的采样时刻经过A/D转换采集由温度传感器反馈回来的温度反馈测量值，并和给定值进行比较，将经过控制运算后的控制量输出给执行元件控制电阻丝的加热过程。此外，系统还应

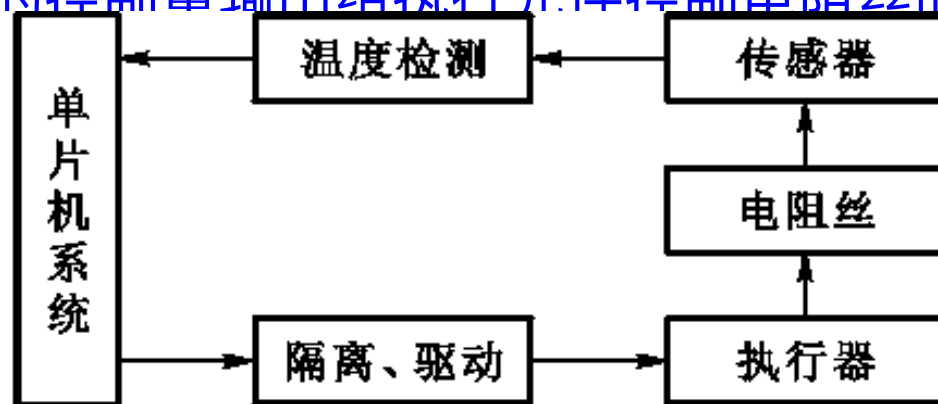


图8.10 模拟炼焦炉温度控制系统总体框图



2.系统硬件设计

- 人机接口电路
- 温度测量电路
- 温度控制电路
- 单片机基本系统





人机接口电路

本系统允许用户根据需要在需要随时改变系统的工作状态和控制参数，为此设置了4位LED显示和相应的操作键盘，并由专用控制芯片8279实现与CPU的接口。采用8279后，可以节省CPU用于查询键盘输入和管理显示输出的时间，降低了对CPU处理速度的要求，同时也减少了软件工作量。





温度测量电路

热电偶用来检测炉温，将温度值转换为毫伏级的电压信号。为便于信号远距离传送，采用温度变送器，把热电偶输出信号转换为4~20mA的电流信号，在接收端再经I/V变换使之变成适于A/D转换的电压信号。

在系统中，采用多路复用方式对两路热电偶信号、冷端补偿信号和标准电压信号进行A/D转换。系统运行过程中，定期对标准电压进行采样，以修正A/D转换器的灵敏度、保证测控精度。为提高系统抗干扰能力，在多路转换开关的控制电路A/D



温度控制电路

电阻丝由过零触发型的双向晶闸管整流电路驱动，通过调节加热电阻丝上的平均电压来控制加热功率，最终达到控制炉温的目的，其原理见图8.11。MOC3021是晶闸管型光电隔离器件，它只能触发小功率晶闸管。因此，本系统中通过MOC3021控制双向晶闸管T1，再由T1控制主电路中的双向晶闸管T2

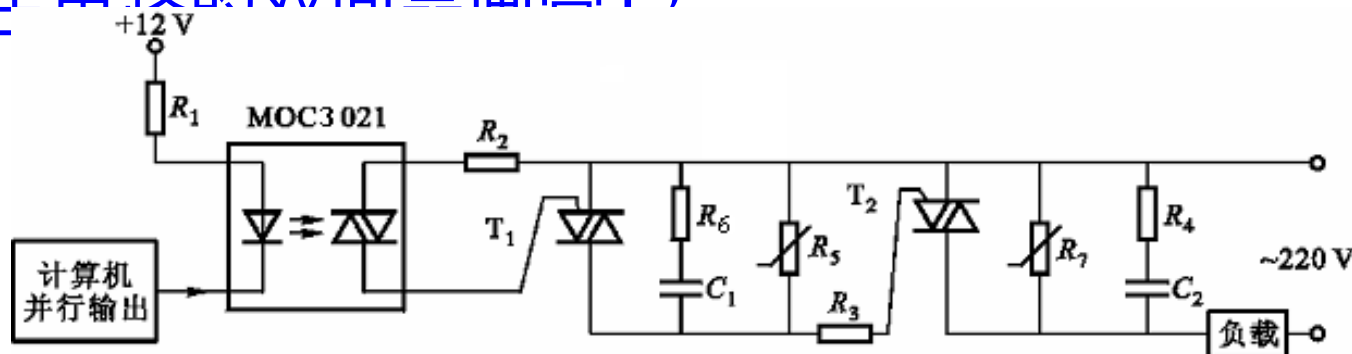


图8.11加热控制电路

温度控制电路

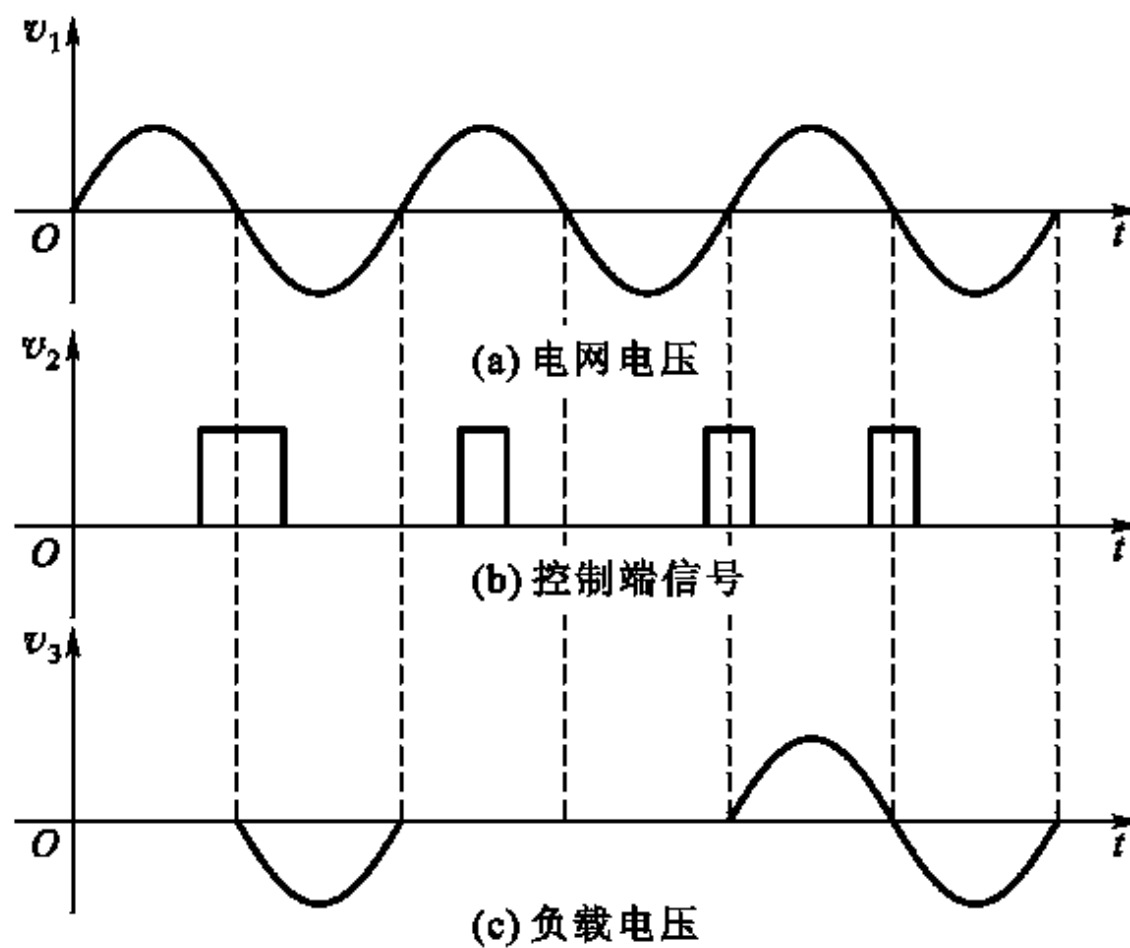


图8.12过零型双向晶闸管的触发特性



单片机基本系统

单片机是整个系统的核心，它负责协调、控制系统的各个部分完成规定的功能。

过零同步信号接到8031CPU的外部中断输入端上，在中断服务程序中进行触发控制和控制周期计数；外部中断用于8279的中断请

为了软件简便和节省资源起见，可以选择采样周期 T 为电网周期的整数倍，这样采样工作和控制运算就可以在同步信号中断服务程序中进行，而不必安排另外的定时器进行采样/控制⁰

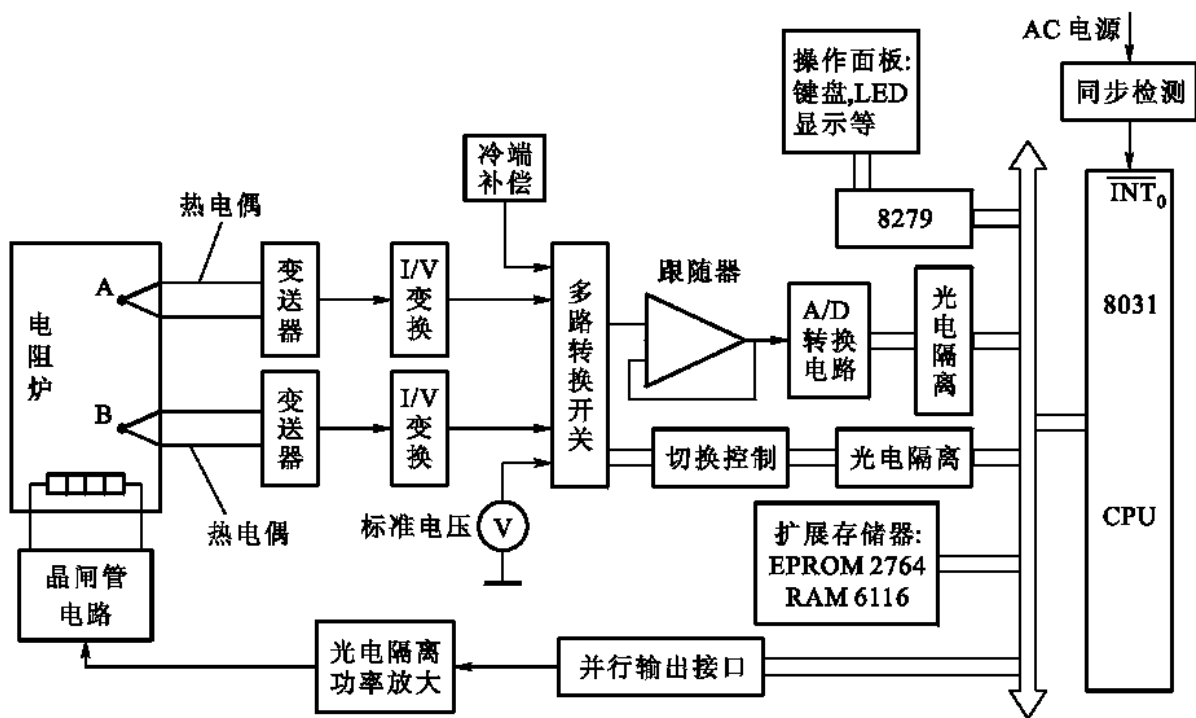


图8.13 模拟炼焦炉温度控制系统

3.控制算法设计

系统数学模型 电阻炉是一个具有自衡能力的对象，可以近似为一个纯滞后环节和一个惯性环节的串联。

控制器设计 针对被控对象具有纯滞后环节的特点，采用大林算法设计如下数字控制器进行控制。

$$D(z) = \frac{a_0 - a_1 z^{-1}}{1 - a_2 z^{-1} - a_3 z^{-N-1}}$$

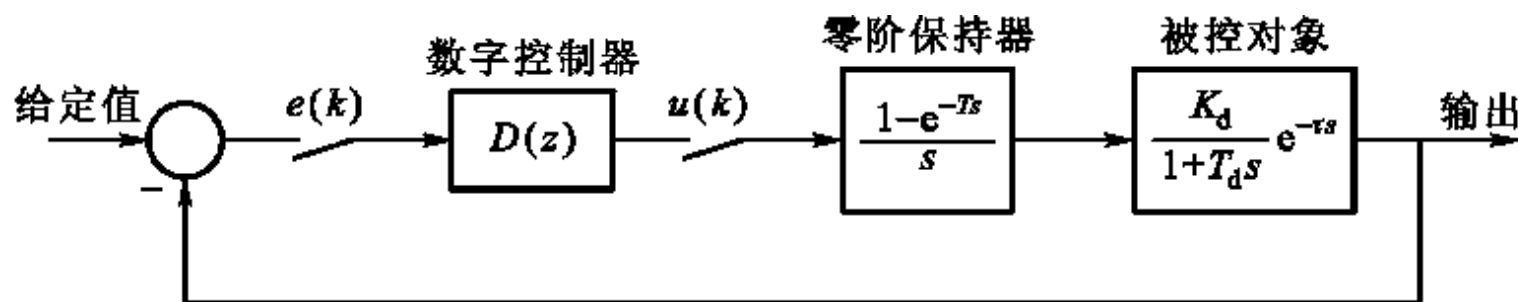


图8.14 模拟炼焦炉温度控制系统数学模型



4. 软件设计

温度控制系统软件包括主程序、采样定时中断程序、数字滤波程序、非线性校正程序、控制运算和控制输出处理程序、键盘管理程序等。



8.5 数字程序控制系统

能够根据输入的指令和数据，使生产机械按预定的工作顺序、运动轨迹、运动距离和运动速度等规律完成工作的自动控制，称为数字程序控制。数字程序控制主要应用于机床的自动控制，采用数字程序控制的机床称为数控机床。数控机床能够加工形状复杂的零件、加工精度高、生产效率高，而且易于改换加工品种，因此是机床自动化的一个重要发展方向。

- 数字插补算法
- 步进电机控制





1. 数字插补算法

- 直线逐点比较法插补
- 四象限直线逐点比较法插补计算
- 圆弧逐点比较法插补
- 四象限逐点比较法圆弧插补计算





直线逐点比较法插补

假定要加工第一象限内从坐标原点开始的一条直线 OE ，终点 E 的坐标为 (x_E, y_E) 。若当前加工点 $M(x_M, y_M)$ 在直线 OE 上，则有

$$y_M/x_M = y_E/x_E$$

或者 \square

$$y_M x_E - x_M y_E = 0 \square$$

定义

$$F_M = y_M x_E - x_M y_E$$

F_M 为直线逐点比较插补的误差函数。



直线逐点比较法插补

从图8.19可知，若加工点在直线 OE 上方，如图中 M_1 点，则相应的误差函数值 $FM_1 > 0$ ，应使加工点沿 $+x$ 轴方向进给一步；若加工点在直线 OE 下方，如图中 M_2 点，则相应误差函数值 $FM_2 < 0$ ，应使加工点沿 $+y$ 轴方向进给一步；若加工点在直线 OE 上，如图中 M 点，则相应的误差函数值 $FM = 0$ ，这时既可以沿 $+x$ 轴方向进给、也可沿 $+y$ 轴方向进给。我们规定沿 $+x$ 轴方向进给一步。

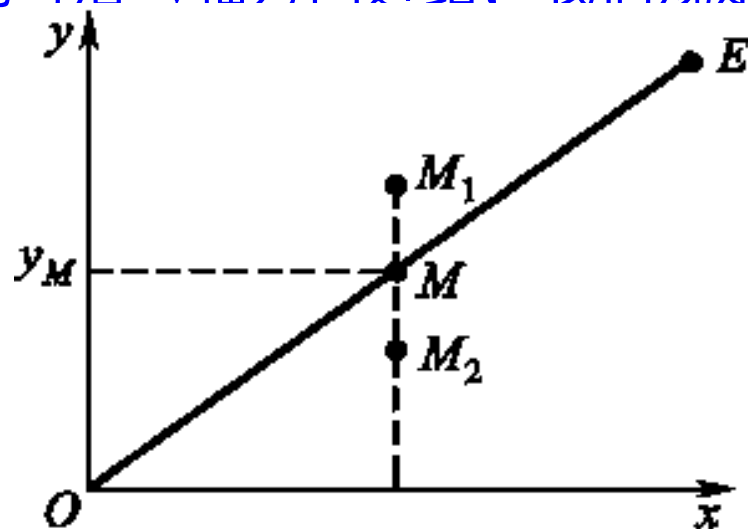


图8.19 第一象限直线插补原理

直线逐点比较法插补

设加工第 i 步时，动点坐标为 (x_i, y_i) 。若计算得 $F_i \geq 0$ ，表明加工点在直线 OE 上或在 OE 的上方，本步应沿 $+x$ 轴方向进给，则第 $i+1$ 步的坐标为 $(x_{i+1}=x_i+1, y_{i+1}=y_i)$ ，第 $i+1$ 步的误差函数为

$$F_{i+1} = y_{i+1}x_E - x_{i+1}y_E = y_i x_E - (x_i + 1)y_E = F_i - y_E$$

若计算得 $F_i < 0$ ，表明加工点在直线 OE 的下方，本步应沿 $+y$ 轴方向进给，则第 $i+1$ 步的坐标为 $(x_{i+1}=x_i, y_{i+1}=y_i+1)$ ，第 $i+1$ 步的误差函数为

$$F_{i+1} = y_{i+1}x_E - x_{i+1}y_E = y_i x_E - x_i y_E + x_E = F_i + x_E$$

上两式给出了误差函数的递推算法，由于加工初始点在原点，它在直线 OE 上，所以递推初值 $F_0=0$ 。





直线逐点比较法插补

插补运算应该解决的另一个问题是终点判别。当刀具到达终点(x_E, y_E)时, 必须自动停止进给。

逐点比较法终点判别方法

- 设置一个计数器 Σ , 开始加工前, 使 Σ 的初值为 x 轴和 y 轴应该进给的总步数之和($x_E + y_E$)
- 进行插补时, x 轴或 y 轴方向每进给一步, 均使计数器 Σ 的值减1
- Σ 减到零就表明到达加工终点, 否则继续加工



四象限直线逐点比较法插补计算

第二~四象限内的由坐标原点出发的直线的插补运算，可由第一象限插补公式得到

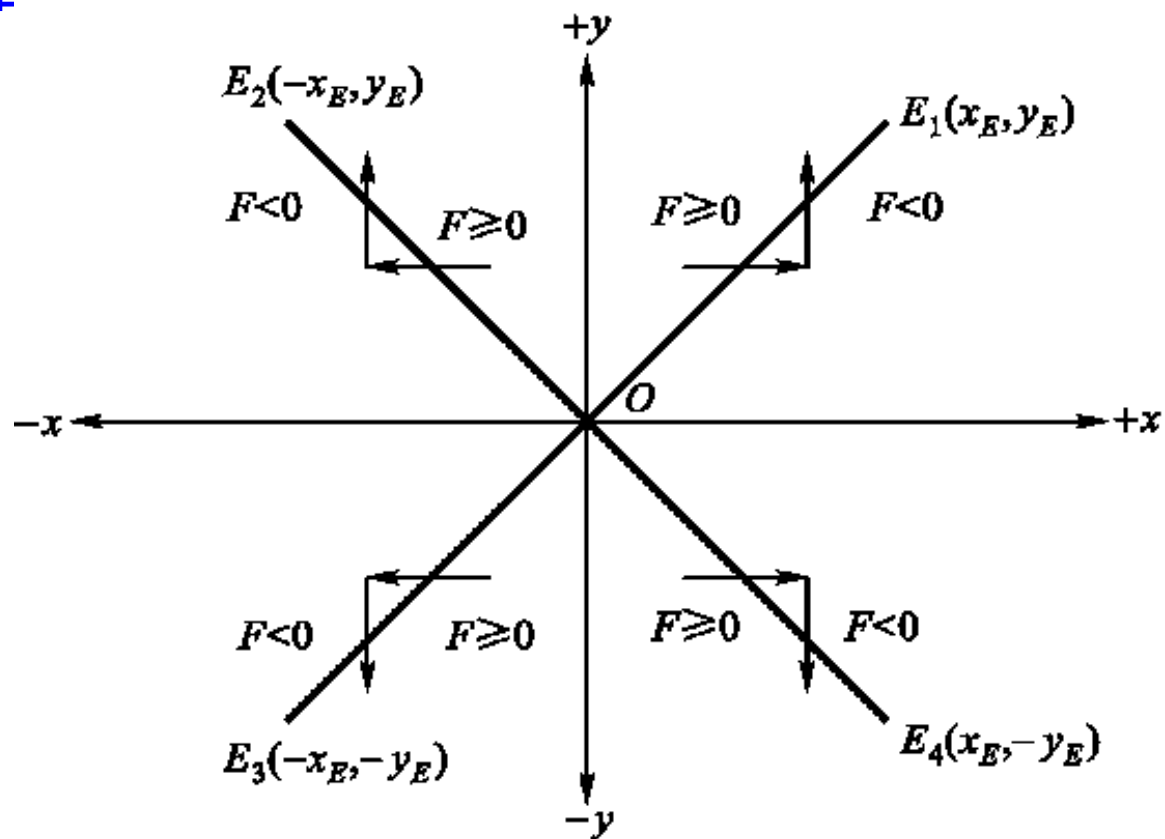


图8.22 四象限直线插补误差函数与进给方向

圆弧逐点比较法插补

假定要加工第一象限内以坐标原点为圆心的圆弧 AB ，圆弧起点坐标 $A(x_A, y_A)$ 、终点坐标为 $B(x_B, y_B)$ ，这是一个逆时针圆弧，简称为逆圆。

由所给条件知，圆弧半径 R 满足

$$R^2 = x_A^2 + y_A^2 = x_B^2 + y_B^2$$

设当前加工点为 $I(x_i, y_i)$ ，定义圆弧插补的误差函数为

$$F_i = x_i^2 + y_i^2 - R^2$$

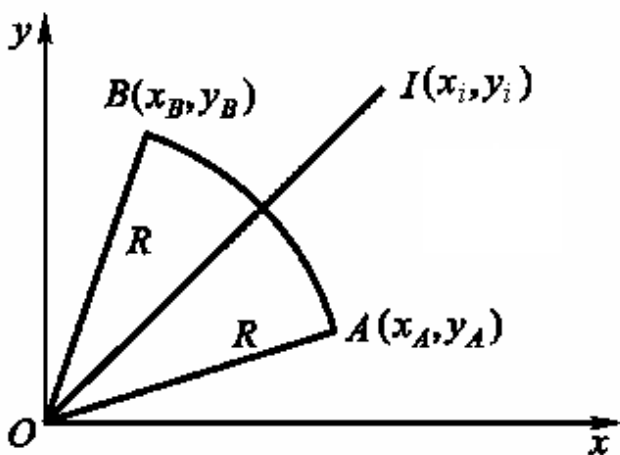


图8.23 第一象限逆圆插补原理

若规定 $F_i=0$ 时，向 $-x$ 轴方向进给，为了逼近圆弧，则有：

向 $-x$ 轴方向进给的条件为 $F_i \geq 0$

向 $+y$ 轴方向进给的条件为 $F_i < 0$



2. 步进电机控制

步进电机是计算机控制系统常用的执行元件，具有快速起停、精确步进的特点，并可直接采用数字脉冲信号控制，而不需要进行A/D转换，因而为控制系统的设计带来极大的方便。

- 步进电机的工作原理
- 步进电机的计算机控制



步进电机的工作原理

在图8.25所示的步进电机中，转子上铣有40个矩形小齿，齿和槽宽度相等，相邻两齿之间的夹角为 9° ；定子由六个磁极构成，它们均匀地分布在定子的内圆周上，相邻磁极间夹角为 60° ，相对的两个磁极组成一相，共有U、V、W三相。每个定子磁极上开有4个槽、5个齿，齿和槽等宽，相邻齿间的夹角也是 9° 。如果以U相绕组通电(V相、W相不通电)而使转子的某五个齿与U相定子磁极的齿对齐为初始状态，则因U相磁极与V相磁极机械角度相差 120° ，而使转子的第 $120^\circ/9^\circ=13\frac{1}{3}$ 个齿(从处在U相磁极中心线上的齿数起)正对准V相磁极，第13个齿顺时针落后V相磁极的中心线 3° ，若此时突然变为第13个齿要

电，则在磁场力的作用下，转子的类似地，如果U相通电此转子顺时针转动 3° 。突然变为W相通电，则转子逆时针转动 3° 。通电状态的改变可以在任意一相进行，因此可以在任一相改变转动方向。

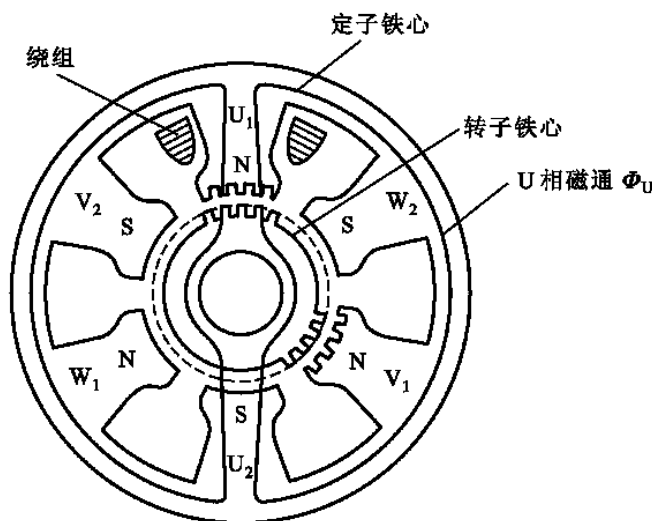


图8.25 三相步进电机的结构示意图

步进电机的励磁分配方式

- 三相三拍方式 这种方式每次只有一相定子绕组通电。
- 三相六拍方式 这种方式中，通电次序为 $U \rightarrow UV \rightarrow V \rightarrow VW \rightarrow W \rightarrow WU \rightarrow U \rightarrow \dots$ 时，电机顺时针转动；欲使电机逆时针转动，则通电次序为 $U \rightarrow UW \rightarrow W \rightarrow WV \rightarrow V \rightarrow VU \rightarrow U \rightarrow \dots$ 。
- 双三相三拍方式 这种方式每次都有两相通电，即顺时针转动的通电次序为 $UV \rightarrow VW \rightarrow WU \rightarrow UV \rightarrow \dots$ ，逆时针转动的通电次序为 $UV \rightarrow WU \rightarrow VW \rightarrow UV \rightarrow \dots$ 。



步进电机的计算机控制

图8.26中，步进电机的输出控制接口电路的地址为Motor-Port，U相、V相、W相定子绕组分别由Motor-Port口的 $D0$ 、 $D1$ 、 $D2$ 位控制。 $D_i=0$ ($i=0, 1, 2$)则相应的相断电，否则相应的相通电。

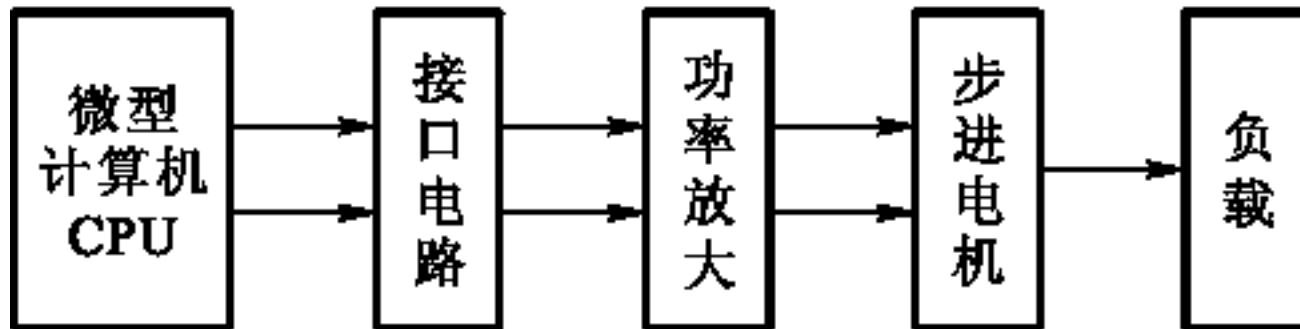


图8.26 步进电机控制原理

步进电机的计算机控制

计算机向Motor-Port口送出的数据与定子通电/断电状态的关系表。设插补器计算出的电机转向存放在内存Direct单元、转速存放在Speed单元，并把表8.9存放在内存Control-Table开始的单元。Direct单元值为0表示正转，反之为反转。按照地址递增或递减的方式循环把通电状态表的内容输出到Motor-Port口，就可以使电机正转或反转。改变输出数据的时间间隔，则可以改变电机转速。

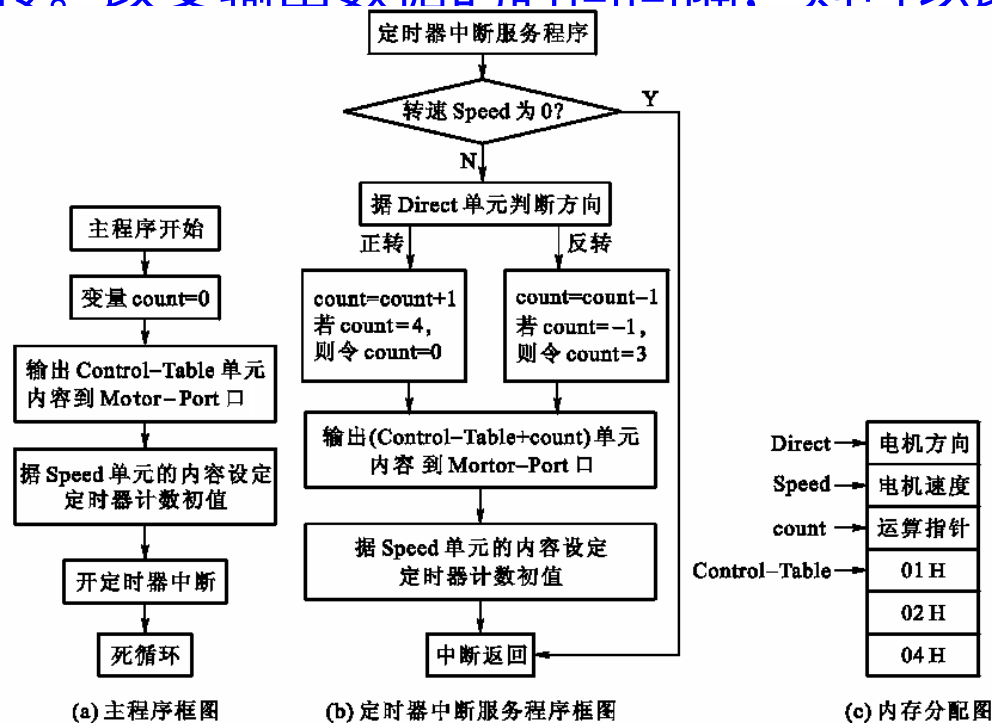


图8.27 步进电机控制软件框图

