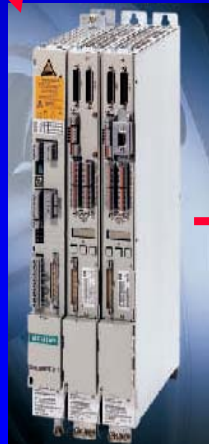
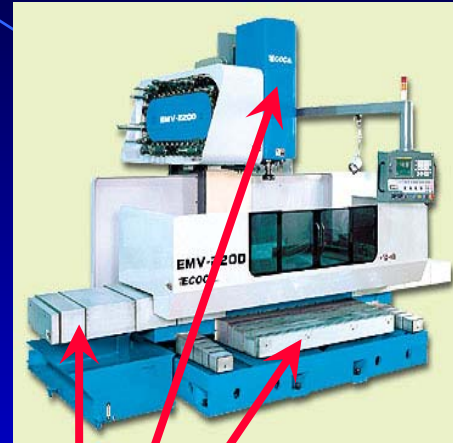


第五章 数控机床的伺服驱动系统

- 概述
- 开环步进式伺服驱动系统
- 闭环伺服控制原理与系统
- CNC伺服系统

§ 5-1 概述



§ 5-1 概述

伺服驱动系统直接影响移动速度、跟踪精度、定位精度等一系列重要指标，是数控机床的关键技术。

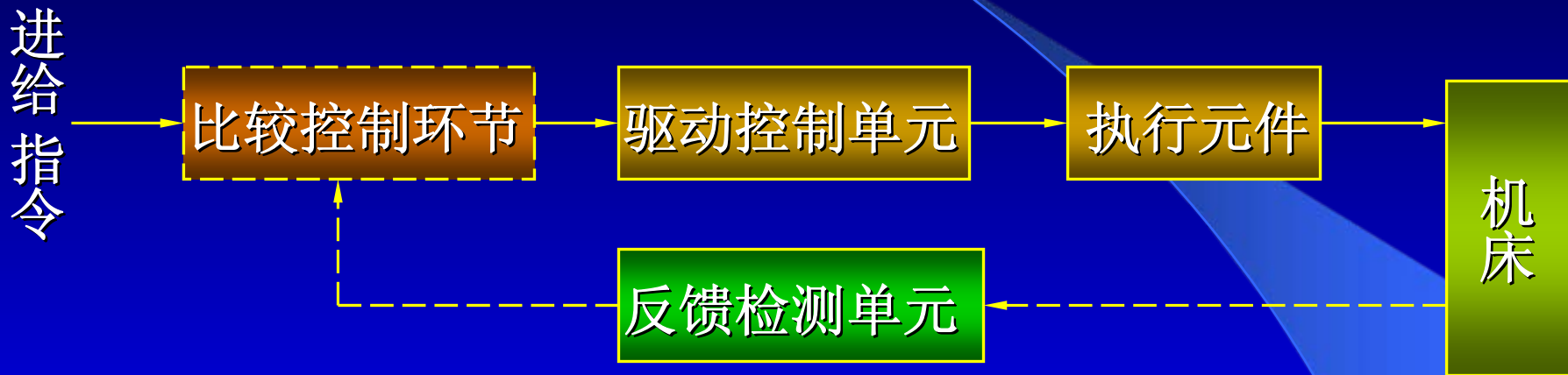
一、伺服驱动系统的性能

数控机床对伺服驱动系统的要求：

1. 进给速度调速范围大：5mm/min，10m/min
2. 位移精度要高：全程积累误差 $\leq \pm 5 \mu\text{m}$ ，与脉冲当量有关， $\delta \downarrow$ ， $\Delta \downarrow$ ；
3. 跟随误差要小：闭环自控系统动态性能要好；
4. 伺服系统的工作稳定性要好：抗干扰能力强，速度均匀、平稳，粗糙度低，过载4~6倍，低速爬行工作可靠，抗干扰性强；

§ 5-1 概述

二、数控机床伺服驱动系统的基本组成



开环、闭环、CNC（比较由软件实现）

§ 5-1 概述

三、数控机床伺服驱动系统的分类

1. 按用途和功能分

- **进给驱动**：转矩大小,调速范围,调节精度,动态响应速度等;
- **主轴驱动**：足够的功率,宽的恒功率调节范围,速度调节范围;

2. 按控制原理和有无检测分

- **开环**：无检测,经济型数控和老设备改造
- **闭环**：半闭环（检测丝杠转角）和全闭环（检测工作台直线位移）

§ 5-1 概述

二、数控机床伺服驱动系统的分类

3. 按执行元件和动作原理分

- **电液伺服驱动**: 由电液伺服阀、低速大转矩液压马达或液压缸, 位置检测等元件组成
- **电气伺服驱动**: 步进电机、直流伺服电机(频繁起动, 制动, 快速定位等优点, 但有电刷, 需要维护), 交流伺服电机(易于维护, 制造简单)

4. 按控制方式分

- **模拟伺服方式**
- **数字伺服方式**

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

执行元件是步进电机，开环，无检测装置，结构简单、容易调整，但控制精度低，速度受到限制。

一、步进电机的种类、结构及工作原理

1. 步进电机的种类

- 按产生力矩原理分：反应式、激磁式
- 按输出力矩大小分：伺服式、功率式
- 按定子数：单定子、双定子、三定子、多定子
- 按各相绕阻分布：径向分相式、轴向分相式

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

一、步进电机的种类、结构及工作原理

2. 步进电机的结构

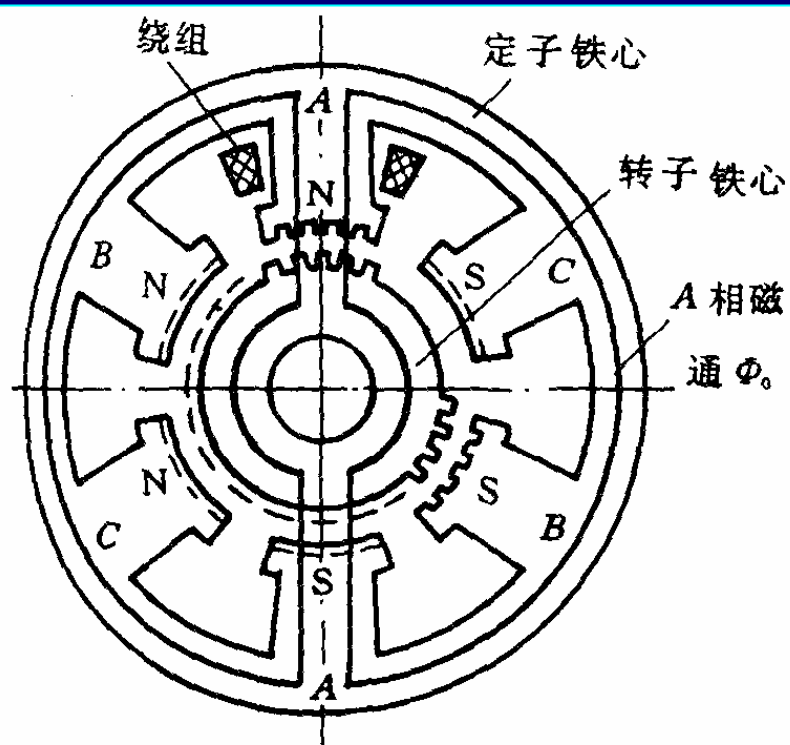


图 5-2 单定子径向分相反应式伺服
步进电机结构原理图

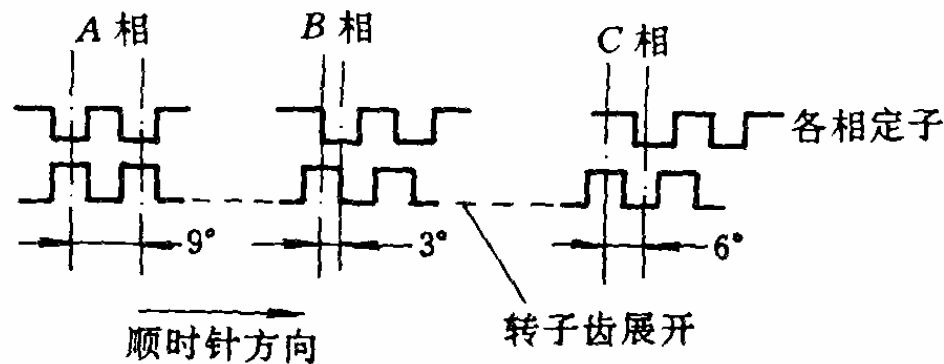
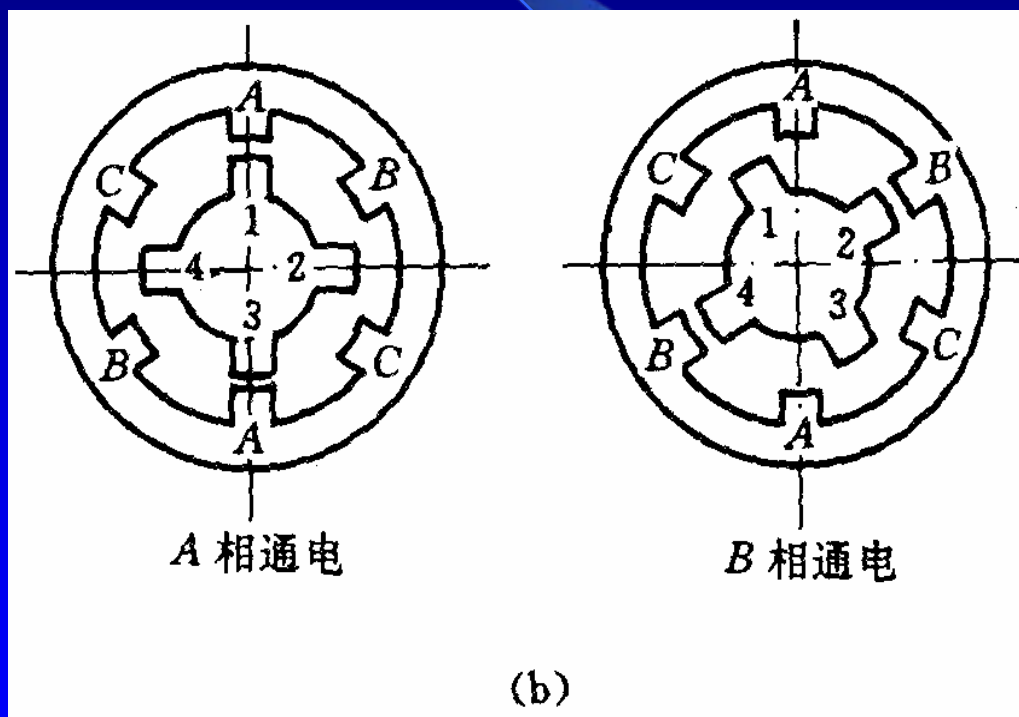
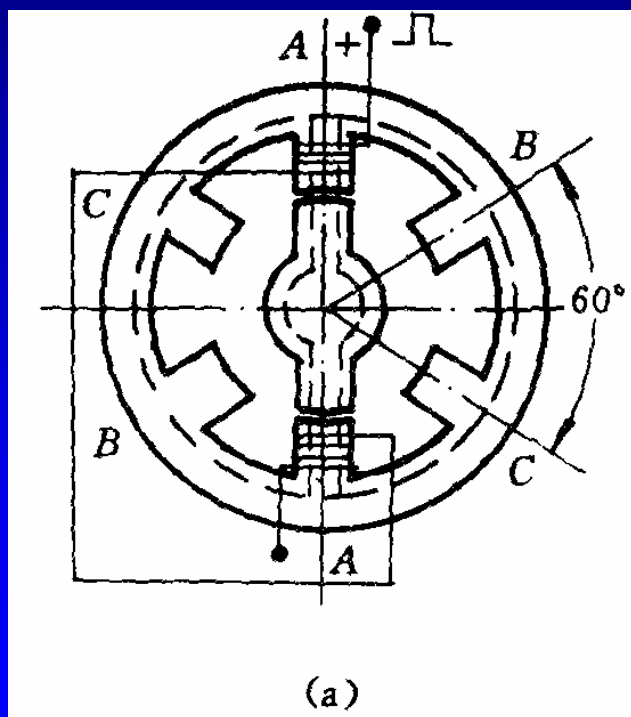


图 5-3 步进电机的齿距

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

一、步进电机的种类、结构及工作原理

3. 步进电机的工作原理



§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

一、步进电机的种类、结构及工作原理

3. 步进电机的工作原理

电磁铁的工作原理，结论：

- 步进电机定子绕阻通电状态每改变一次，它的转子转过一个固定的角度，即电机的步距角；
- 改变步进电机定子绕阻的通电顺序，其转子的旋转方向随之改变；
- 步进电机定子绕阻通电状态变化的频率越高，转子的转速越高；
- 步距角与定子绕阻相数 m 、转子齿数 z 、通电方式 k 有关： $\alpha = 360^\circ / (mzk)$

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

一、步进电机的种类、结构及工作原理

3. 步进电机的主要特征

- **步距角 α :** $0.5^\circ \sim 3^\circ$, 决定控制精度, 是决定步进式伺服系统脉冲当量的重要参数
- **距角特性、最大静态转矩 M_{jmax} 和启动转矩 M_q**
- **启动频率 f_q :** 空载时, 步进电机由静止突然启动, 并进入不丢步的正常运行所允许的最高频率
- **连续运行的最高工作频率:** 保证不丢步运行的极限频率
- **加减速特性:** 描述步进电机由静止到工作频率和由工作频率到静止的加减速过程中, 定子绕组通电状态的变化频率与时间的关系。

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

二、步进式伺服驱动系统工作原理

系统由步进电机驱动线路+步进电机组成，对工作台位移、速度和运动方向进行控制

1. 工作台位移的控制

进给脉冲个数 N →定子绕组通电状态改变次数
 N →角位移 $\phi = \alpha N$ →工作台位移 $L = \phi t / 360^\circ$

2. 工作台进给速度的控制

进给脉冲频率 f →定子绕组通断电状态变化频率
 f →步进电机转速 ω →工作台进给速度 v

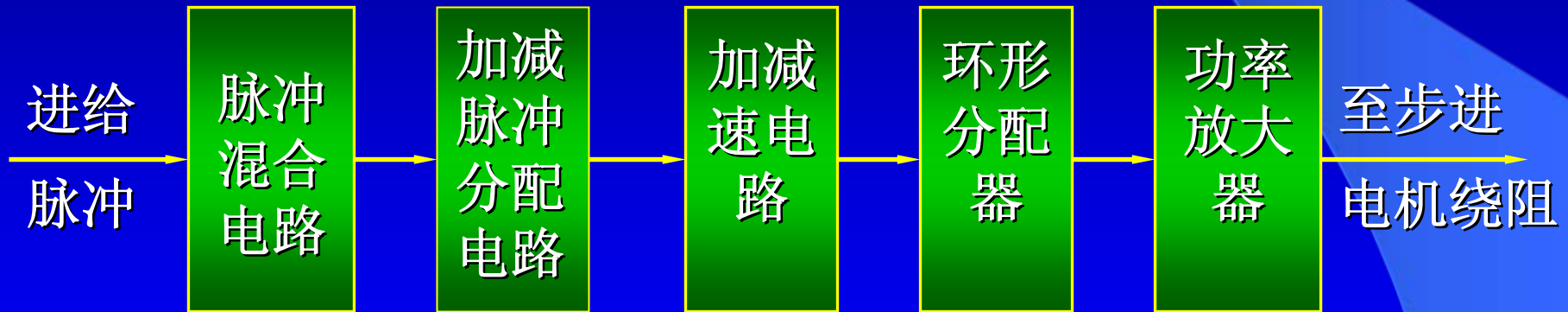
3. 工作台运动方向的控制

定子绕组通电顺序改变→工作台运动方向改变

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

三、步进电机的驱动控制线路

功能：将一定频率 f 、数量 N 和方向的进给脉冲转换为控制步进电机定子各相绕组通断电状态变化的频率、次数和顺序的功率信号



§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

三、步进电机的驱动控制线路

1. 脉冲混合电路

将脉冲进给、手动进给、手动回原点、误差补偿等混合为正向或负向脉冲进给信号

2. 加减脉冲分配电路

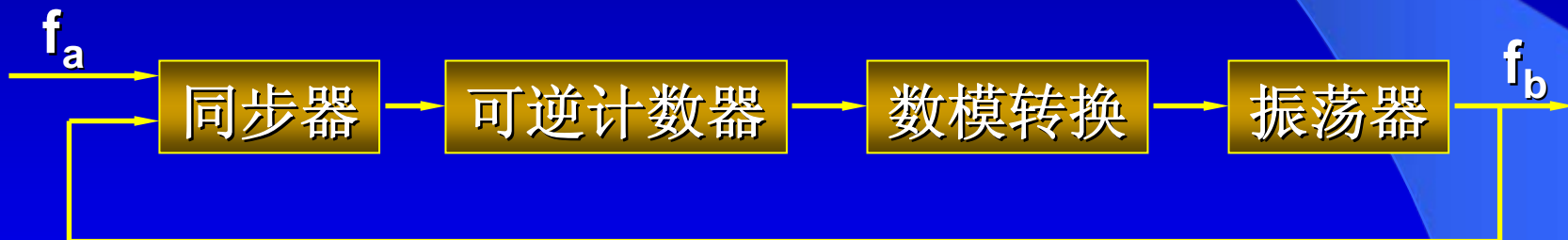
将同时存在正向或负向脉冲合成为单一方向的进给脉冲

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

三、步进电机的驱动控制线路

3. 加减速电路

将单一方向的进给脉冲调整为符合步进电机加减速特性的脉冲，频率的变化要平稳，加减速具有一定的时间常数。



§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

三、步进电机的驱动控制线路

4. 环形分配器

将来自加减速电路的一系列进给脉冲转换成控制步进电机定子绕组通、断电的电平信号，电平信号状态的改变次数及顺序与进给脉冲的个数及方向对应。

5. 功率放大器

将环形分配器输出的mA级电流进行功率放大，一般由前置放大器和功率放大器组成。

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

四、提高步进式伺服驱动系统精度的措施

影响步进式伺服驱动系统精度的因素：

步进电机；丝杠螺母传动幅；由于受工艺和结构的限制，常常从控制线路采取措施

1. 细分电路

把步进电机的一步分得再细一些，减小脉冲当量

2. 齿隙补偿（反向间隙补偿）

- 原因：机械传动链在改变方向时，由于间隙的存在，会引起步进电机的空走；
- 补偿原理：对实际间隙进行实测并保存，当工作台换向时增加输出脉冲进行补偿。

§ 5-2 开环步进式伺服驱动系统

四、提高步进式伺服驱动系统精度的措施

3. 螺距误差补偿

- 原因：丝杠螺距存在制造误差，会直接影响工作台的位置精度，需要进行补偿。
- 补偿原理：实测丝杠全行程误差分布曲线，在相应位置时根据误差分布进行补偿。
- 实现方法
 - 安置两个补偿杆
 - 按照螺距误差在补偿杆上设置档块
 - 工作台移动时行程开关与档块接触时进行补偿

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

闭环控制的特点：工作可靠、抗干扰性强、精度高，但增加了位置检测、反馈、比较等环节，结构复杂，调试困难。

一、闭环伺服驱动系统的执行元件

数控系统对执行元件的要求

- 减少电机的转动惯量
- 提高电机的过载能力
- 提高电机的低速运行的稳定性和均匀性

1. 直流伺服电机

2. 交流伺服电机

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

一、闭环伺服驱动系统的执行元件

1. 直流伺服电机

数控机床用的一般是大功率的直流伺服电机，其工作原理与直流电机类似

- **低惯量直流伺服电机**

结构特点：电枢铁芯无槽，电枢细长，气隙尺寸大等

- **宽调速直流力矩电机**

结构特点：极对数和电枢导体数多，一般采用永磁体（他励式）

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

一、闭环伺服驱动系统的执行元件

1. 直流伺服电机

- 直流伺服电机调速原理

$$n = \frac{U - IR_a}{k_e}$$

调速方法：
改变电枢电压U
改变电势系数
改变电阻

目前使用最广泛的是脉宽调速PWM（改变电枢电压U）

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

一、闭环伺服驱动系统的执行元件

2. 交流伺服电机

用三相正弦电流驱动的伺服电机。按工作原理分为：

- 永磁同步型（SM型）
- 异步感应型（IM型）

AC伺服电机本身结构简单，坚固耐用，体积较小，重量较轻，没有整流子机械换向，所以远比DC伺服电机便于维护。但速度的控制方法比DC伺服电机要复杂的多，对控制元件的容量及速度的要求也很高。

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

一、闭环伺服驱动系统的执行元件

2. 交流伺服电机

• 永磁同步型（SM型）AC伺服电机

结构与无刷DC伺服电机几乎完全相同，两者的根本差别不在于它们的结构，而是在于驱动它们的方式。当采用直流电源驱动时，叫做无刷DC伺服电机，当采用三相交流电源（通过逆变器产生）驱动时，就叫AC伺服电机。

与DC伺服电机不同之处：永磁同步型AC伺服电机内部不是采用多个霍尔元件来检测转子的位置，而是采用单一的角度位置传感器来连续检测，并以检测的结果为依据使三相电机电流实现正交控制。常用旋转编码器或旋转变压器，完成转子位置、速位移检测。

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

一、闭环伺服驱动系统的执行元件

2. 交流伺服电机

- 永磁同步型 (SM型) AC伺服电机

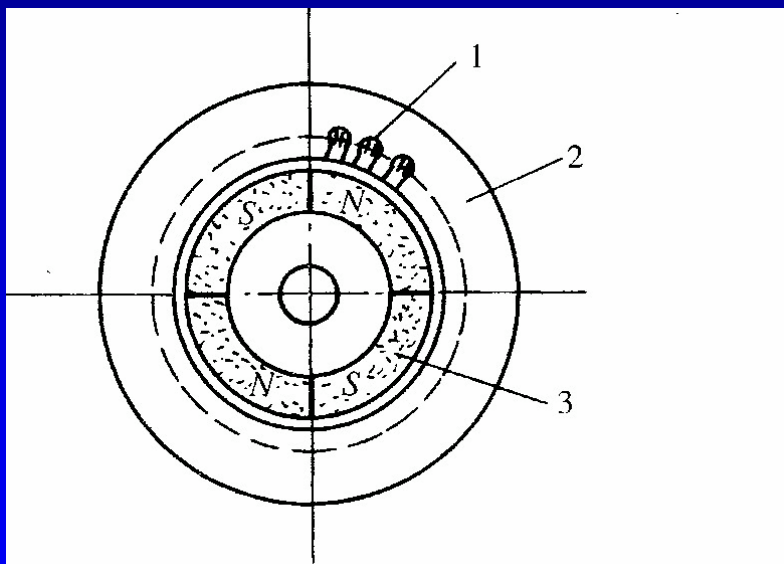


图 4-23 永磁同步型 AC 伺服电机的结构

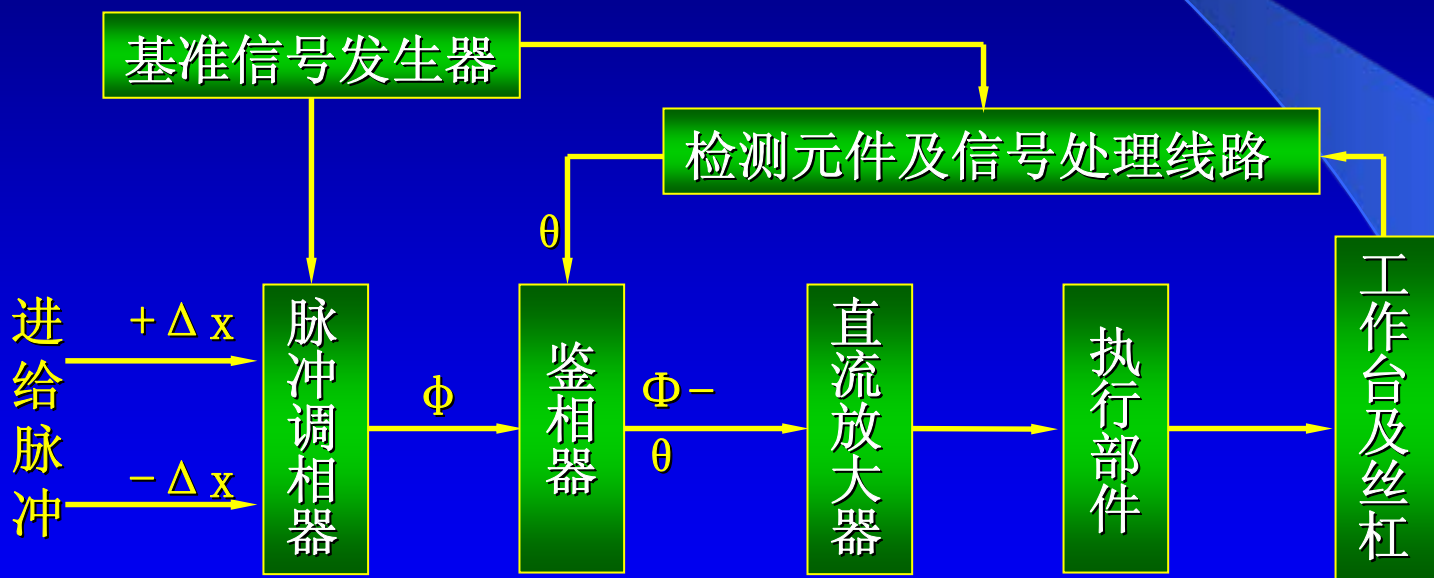
1—绕组;2—定子;3—转子。



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

二、鉴相式伺服驱动系统

1. 鉴相式伺服系统的基本组成和工作原理



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

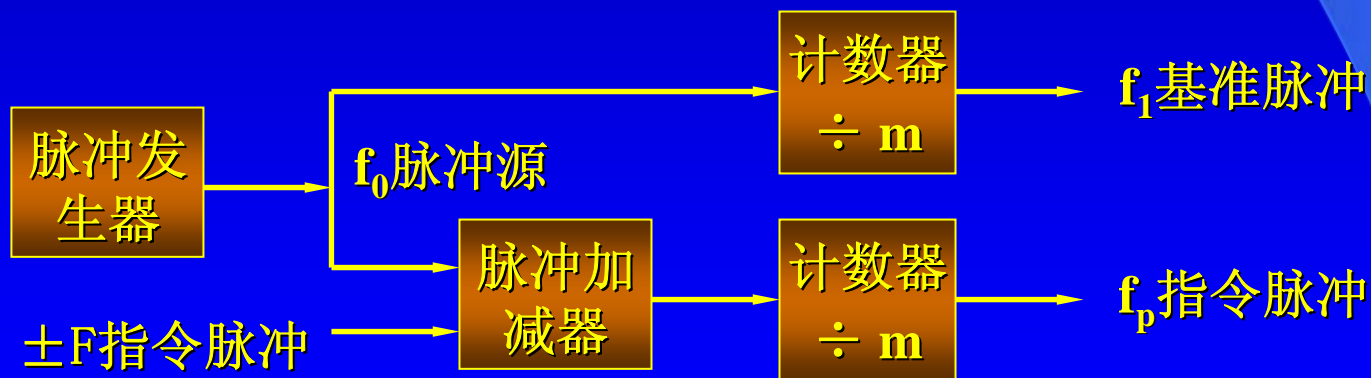
二、鉴相式伺服驱动系统

3. 鉴相式伺服系统的主要控制线路

- 脉冲调相器（数字相位转换器）

作用是将脉冲信号转换为与基准信号的相位变化信号，输出信号是正弦或方波信号

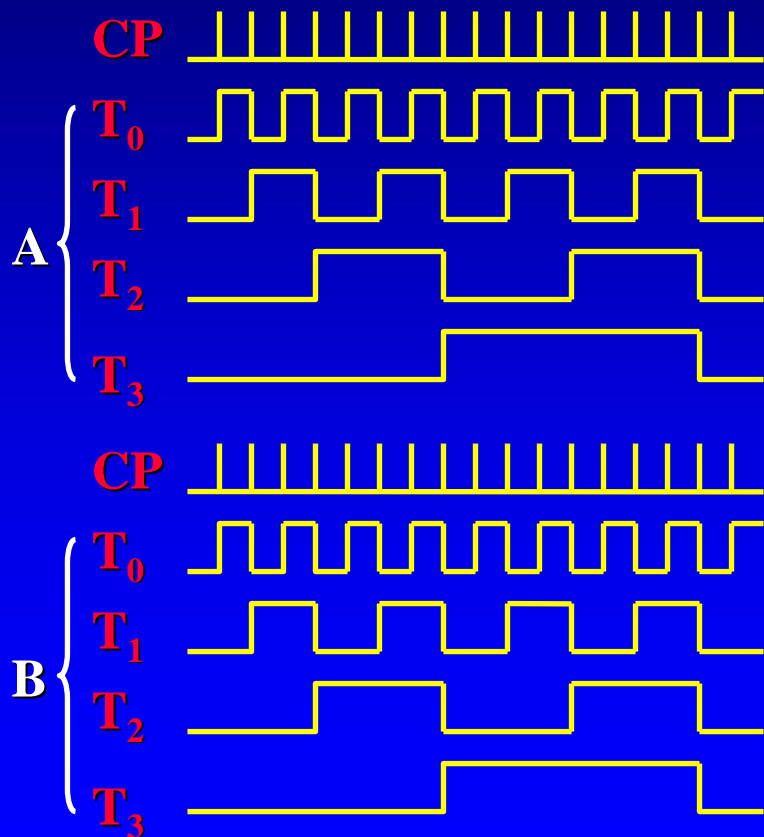
电路由两个容量相同的计数器组成



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

3. 鉴相式伺服系统的主要控制线路

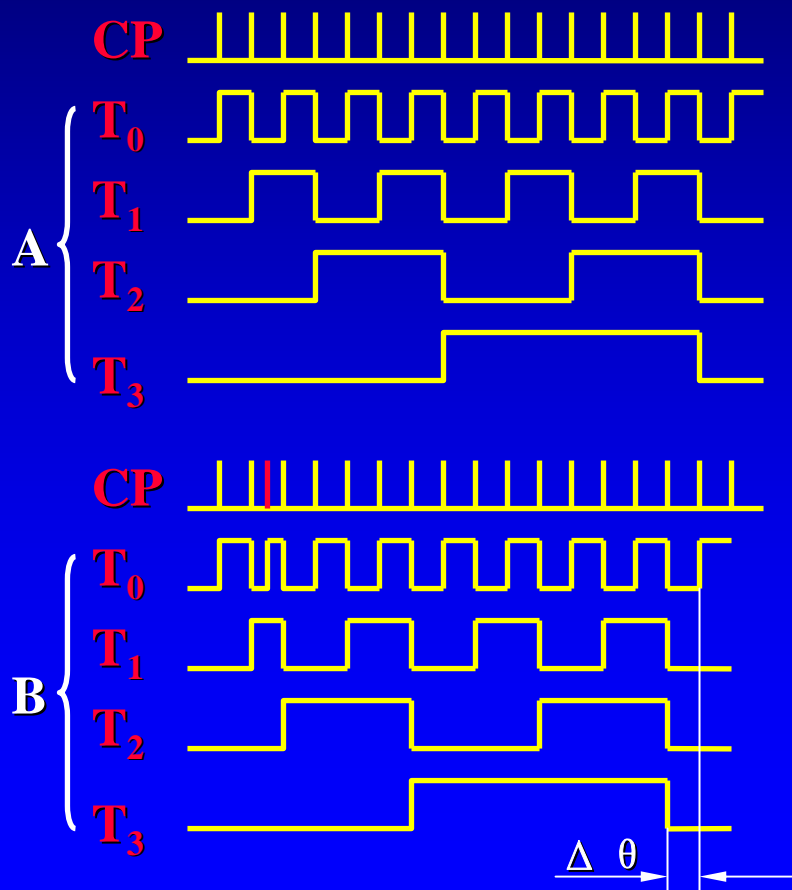
• 脉冲调相器（数字相位转换器）



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

3. 鉴相式伺服系统的主要控制线路

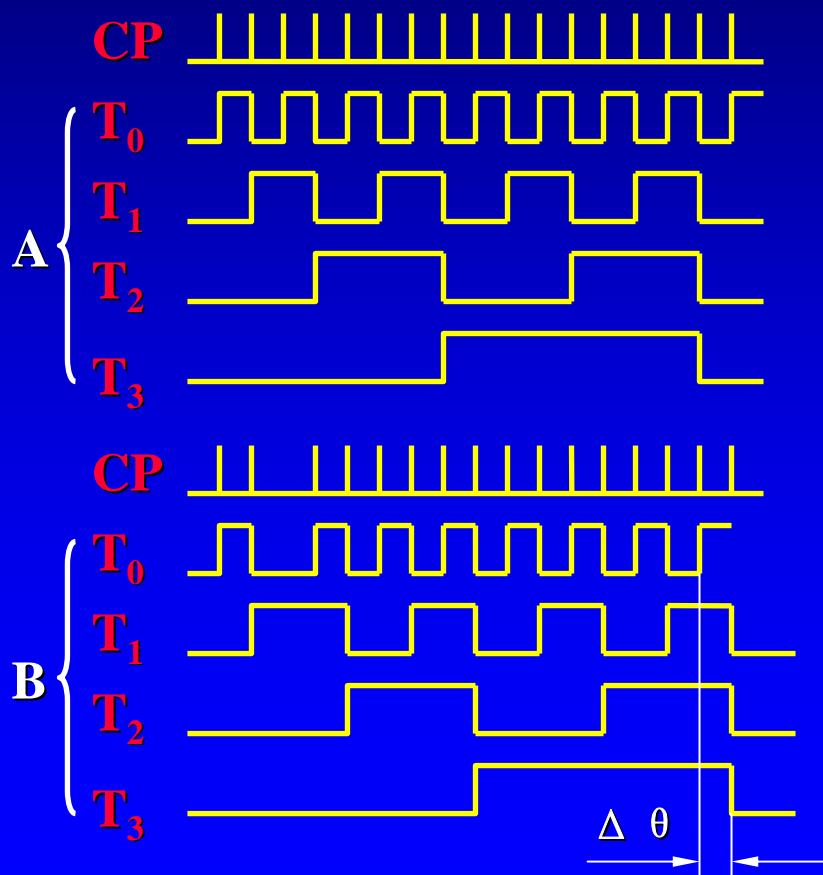
• 脉冲调相器（数字相位转换器）



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

3. 鉴相式伺服系统的主要控制线路

• 脉冲调相器（数字相位转换器）



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

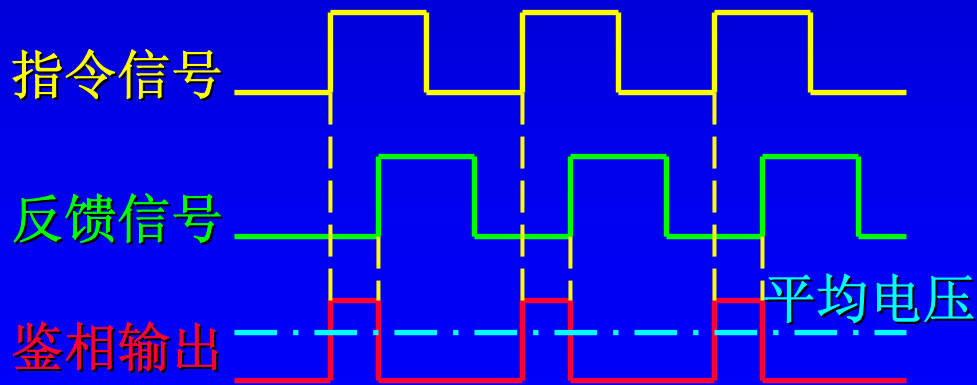
二、鉴相式伺服驱动系统

3. 鉴相式伺服系统的主要控制线路

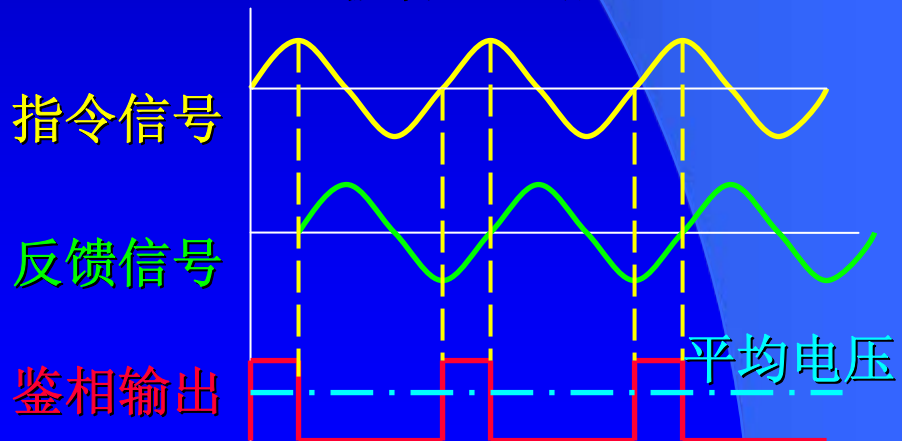
● 鉴相器

作用是鉴别两个输入信号的相位差及其超前滞后关系，有门电路和二极管两种类型

门电路型鉴相器



二极管型鉴相器



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

二、鉴相式伺服驱动系统

3. 鉴相式伺服系统的基本组成和工作原理

- 基准信号发生器

输出一系列具有一定频率的脉冲信号，为伺服系统提供相位比较的基准

- 脉冲调相器

- 检测元件及信号处理线路

检测工作台的位移，并表达为与基准信号之间的相位差

- 鉴相器

- 直流放大器

鉴相式伺服系统的工作原理是一个自动调节系统

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

二、鉴相式伺服驱动系统

2. 鉴相式伺服系统的类别

采用不同的测量元件（旋转变压器、感应同步器、光栅）时，信号处理线路、脉冲调相器、鉴相器的结构不同，所组成的鉴相式伺服系统的结构也不同。

- 以旋转变压器为测量元件的半闭环伺服系统

构成的是半闭环伺服系统，存在反向间隙、螺距误差，可采取相应措施进行补偿。采用感应同步器作为测量元件时伺服系统与此相同

- 以光栅为测量元件的数字相位比较伺服系统

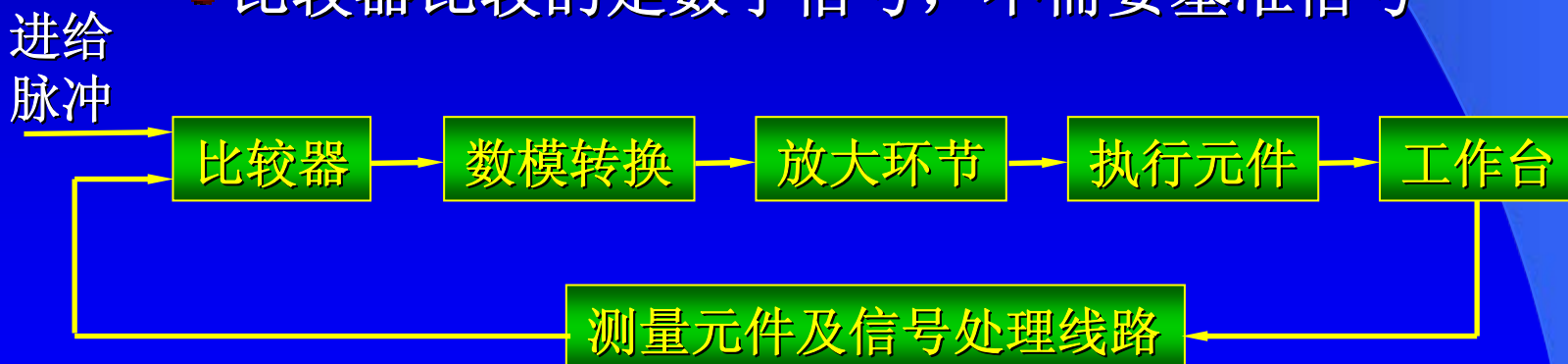
§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

三、鉴幅式伺服驱动系统

1. 鉴幅式伺服系统的工作原理

与鉴相式伺服系统的区别：

- 测量元件以鉴幅式方式工作，鉴幅式系统的测量元件有**旋转变压器**和**感应同步器**
- 比较器比较的是数字信号，不需要基准信号

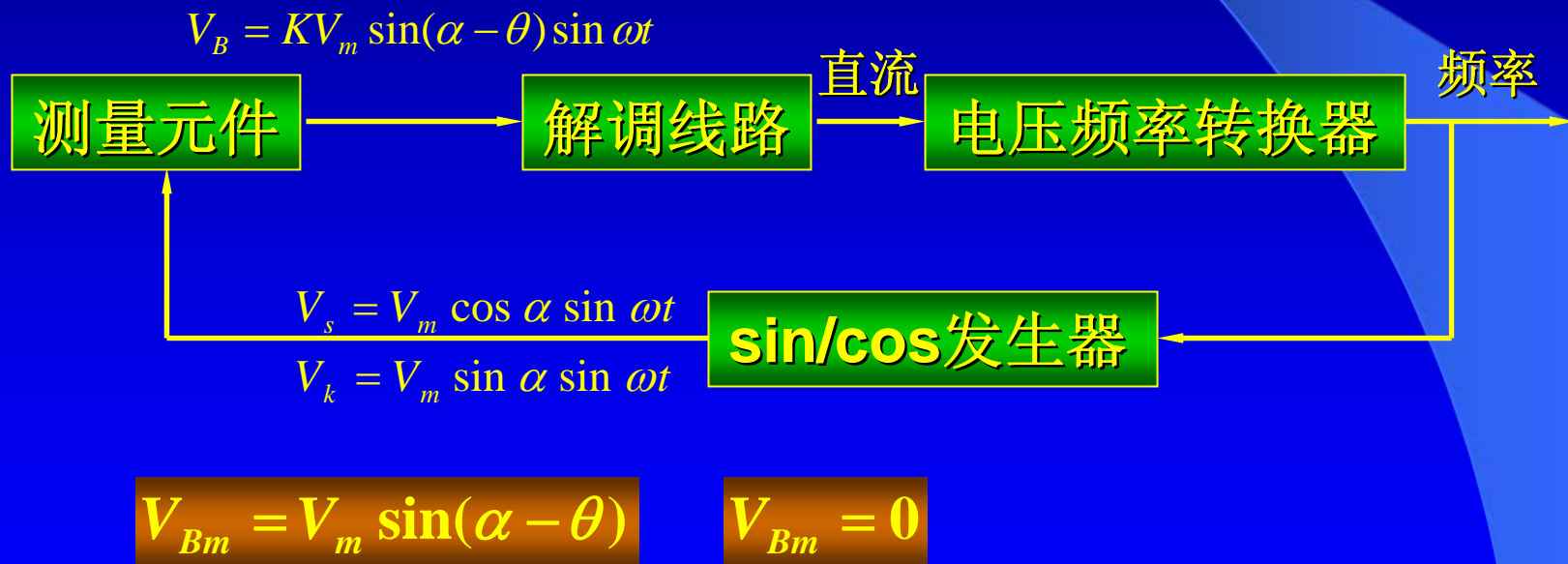


§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

三、鉴幅式伺服驱动系统

2. 鉴幅式伺服系统的主要控制线路

测量元件及信号处理线路



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

三、鉴幅式伺服驱动系统

2. 鉴幅式伺服系统的主要控制线路

- 解调线路：将测量信号的幅值变换为直流电压信号，电压的正负表示运动方向。需要进过滤波→放大→检波处理
- 电压频率转换器：将直流电压信号变换为频率与电压成比例的脉冲信号，需要给出运动方向信号
- sin/cos发生器：根据电压频率转换器输出的脉冲的多少和方向，生成侧量元件的激磁信号

$$V_s = V_m \cos \alpha \sin \omega t$$

$$V_k = V_m \sin \alpha \sin \omega t$$

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

三、鉴幅式伺服驱动系统

2. 鉴幅式伺服系统的主要控制线路

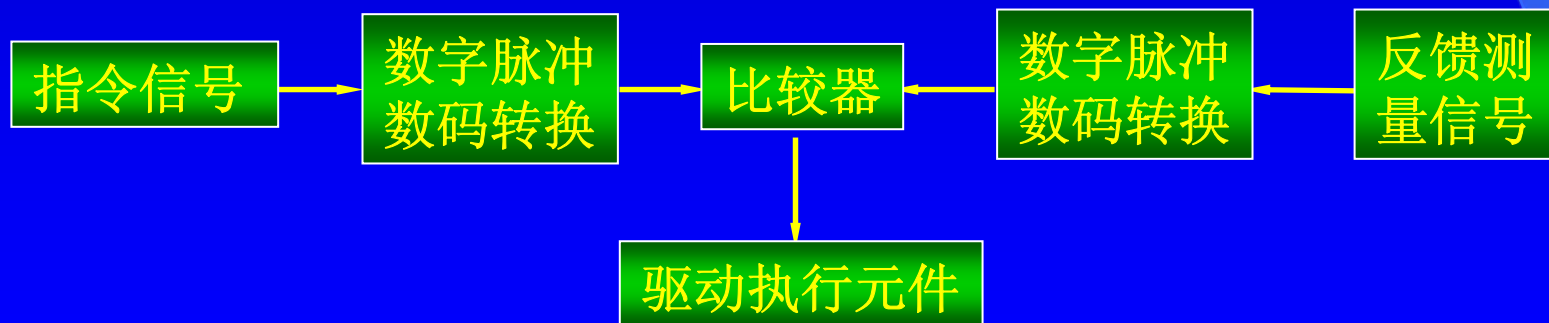
- 比较器：对指令脉冲和反馈脉冲进行比较
比较器根据来自数控装置的脉冲信号形式分两种：
 - 一条线路传递进给方向，一条线路传送进给脉冲
 - 一条线路传送正向进给脉冲，一条传送反向进给脉冲

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

四、数字比较式伺服系统

1. 数字比较系统的构成（光栅、编码器）

- 指令信号
- 位置反馈
- 比较器
- 数字脉冲与数码转换部件
- 驱动执行元件



§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

四、数字比较式伺服系统

2. 数字比较系统的主要功能部件

- 数字脉冲——数码转换器
 - 数字脉冲转换为数码
 - 数码转换为数字脉冲
- 比较器
 - 数码比较器
 - 数字脉冲比较器

§ 5-3 闭环伺服控制原理与系统

五、闭环伺服系统的性能

1. 系统工作稳定性
2. 无负载机床丝杠最大转速
3. 系统静不灵敏区
4. 稳态误差
5. 动态特性

稳态误差、超调量、调节时间、过渡过程振荡次数

6. 提高系统稳定性的措施

降低系统的放大倍数

采用积分—微分串联校正装置

采用速度、加速度负反馈并联校正装置

§ 5-4 CNC伺服系统

一、以光栅为测量元件的7360CNC伺服系统

优点：软件代替大量硬件功能，硬件控制电路简单，可用计算机对伺服系统进行一些先进的策略控制，从而提高整个伺服系统的性能

CNC伺服是数字比较式伺服系统鉴幅式伺服系统的灵活应用

§ 5-4 CNC伺服系统

一、以光栅为测量元件的7360CNC伺服系统

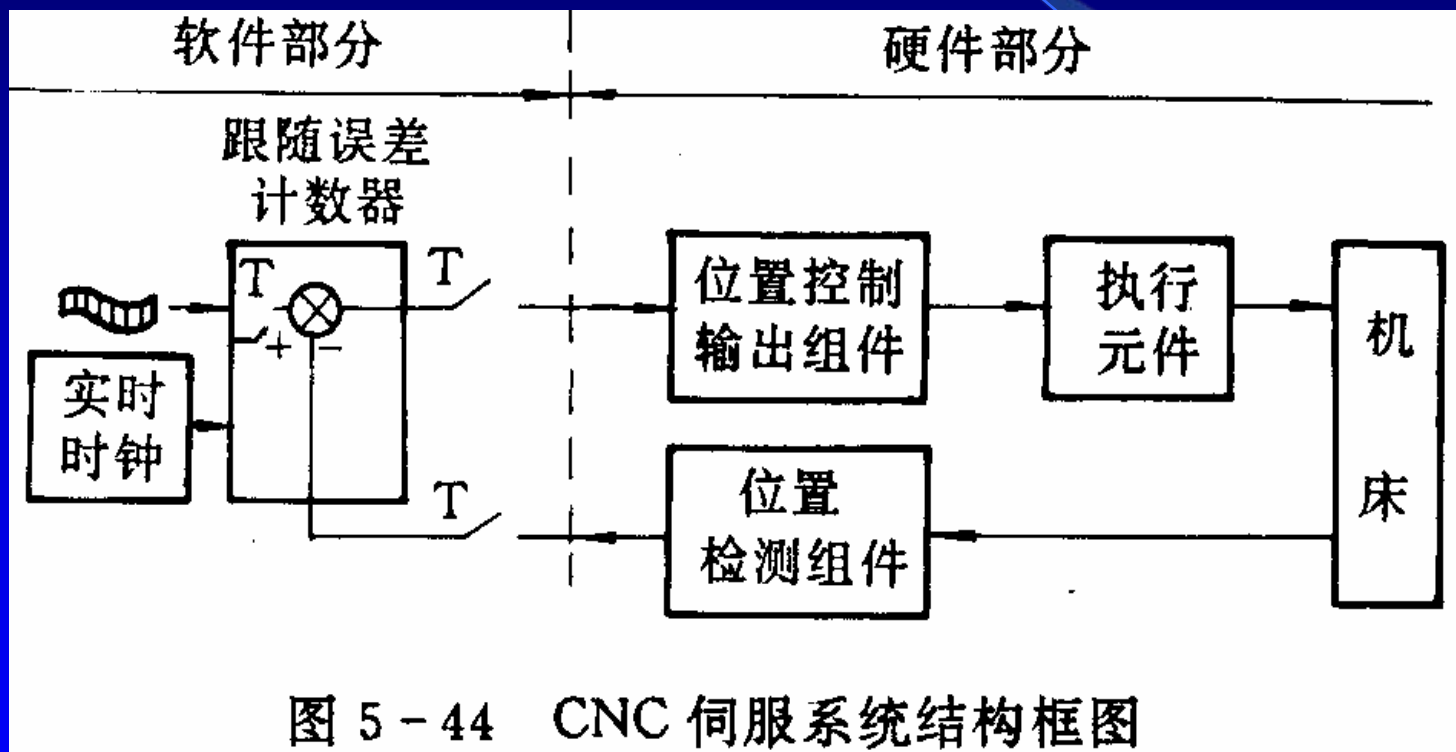


图 5-44 CNC 伺服系统结构框图

§ 5-4 CNC伺服系统

一、以光栅为测量元件的7360CNC伺服系统

1. 软件部分

- 跟随误差计算 $E_i = E_{i-1} - \Delta D_{Fi} + \Delta D_{Ci}$

- 位置环增益 K_v 的控制

$$E = v / K_v \quad K_v = K_C K_D K_M K_A \quad K_D = K_N K_{DA}$$

- 进给速度指令的计算

$$v = K_v E = K_C K_N K_{DA} K_M K_A E \quad v_{DA} = K_C K_N E$$

- 进给速度监控

$$v_D = K_C E \quad v_D = K_C E_{BP} + \alpha K_C (E - E_{BP})$$

进给速度抑制点S

过量进给速度控制点M

§ 5-4 CNC伺服系统

一、以光栅为测量元件的7360CNC伺服系统

2. 硬件部分

- 位置控制输出组件
- 位置检测组件

§ 5-4 CNC伺服系统

二、以旋转变压器为测量元件的7M伺服系统

1. 软件部分

- 跟随误差计算
- 进给速度指令的计算

2. 硬件部分

- 位置控制输出组件
- 位置检测组件

§ 5-4 CNC伺服系统

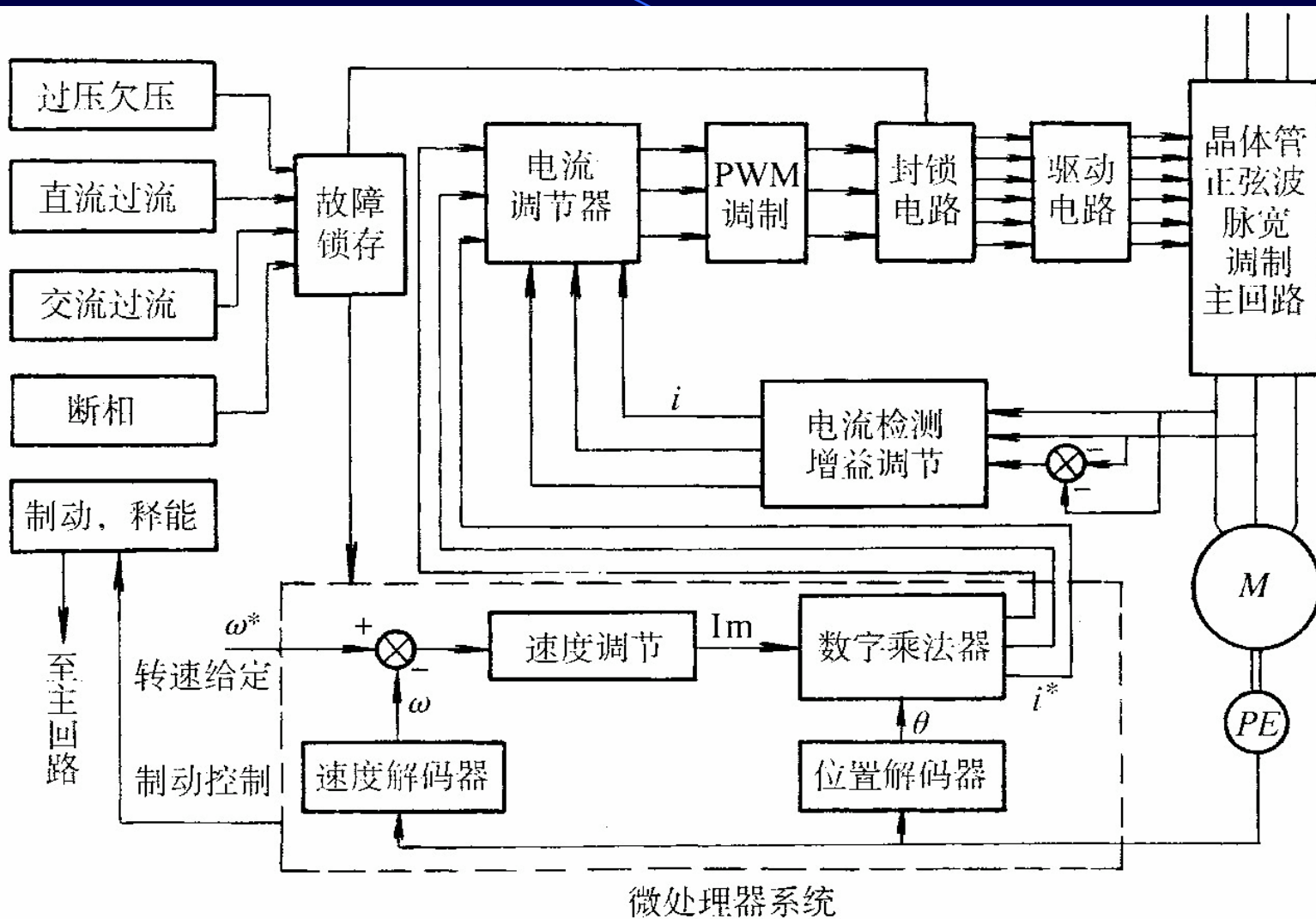


图 4-58 交流进给伺服系统的结构框图