



学习情境五 机电一体化伺服系统设计

目 录

子情境1

认识机电一体化伺服系统

- 任务1 认识伺服系统的组成和结构
- 任务2 了解进给伺服系统的分类
- 任务3 了解伺服系统的要求
- 任务4 了解伺服系统的发展趋势

子情境2

执行元件的控制与驱动

- 任务1 步进电机的控制与驱动
- 任务2 直流伺服电机控制与驱动
- 任务3 交流伺服电机控制与驱动
- 任务4 直线电机应用
- 任务5 液压执行装置
- 任务6 气动执行装置
- 任务7 开环控制的伺服系统设计

目 录

子情境3 变频器的应用

- 任务1 认识变频器
- 任务2 变频器基本功能及参数设定

子情境4 上位机组态监控 技术及其应用

- 任务1 认识上位机组态监控技术
- 任务2 **MCGS**组态软件应用实例

子情境5 了解伺服系统 的位置控制

- 任务1 鉴相式伺服系统位置控制
- 任务2 鉴幅式伺服系统位置控制
- 任务3 脉冲比较式伺服系统位置控制
- 任务4 全自动数字比较式伺服系统位置控制

学习目标



情境导入

当你看到机器人在操作者的控制下，准确完成动作时，你一定想知道这一切是如何实现的。**时代楷模钟阳**



• 情境剖析

知识目标

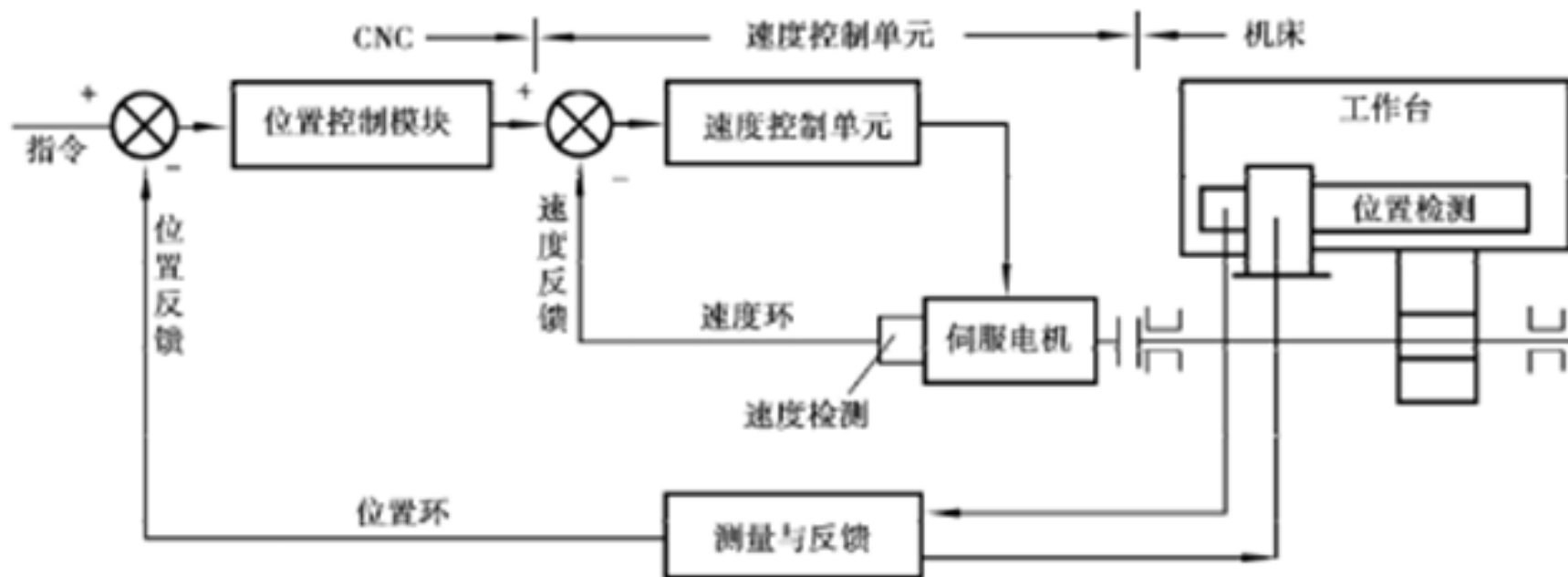
1. 了解伺服系统的组成、分类及技术发展趋势；
2. 了解执行元件的控制与驱动的理论知识；
3. 认识变频器的基础知识以及变频器基本功能；
4. 了解上位机组态监控技术；
5. 了解伺服系统的位置控制；

技能目标

1. 掌握伺服电机的选型与校核以及驱动器的接线；
2. 掌握变频器的接线以及参数设定；
3. 学会应用MCGS组态软件；

子情境1 认识伺服系统

体例5.1.1 伺服系统的基本组成

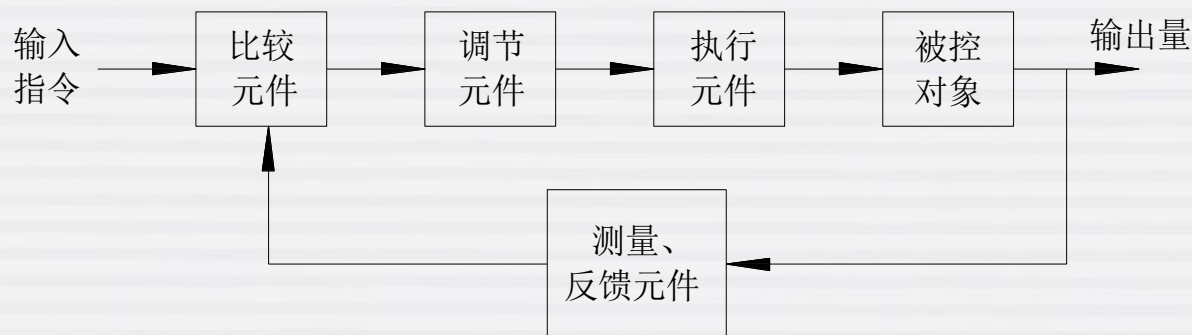


任务1 认识伺服系统的组成和结构

1. 伺服系统的组成

伺服系统（servo mechanism system）随动系统，跟踪输入指令信号进行动作，获得精确的**位移、速度或力**输出的自动控制系统

伺服系统一般由**比较元件、调节元件、执行元件、被控对象和检测反馈元件**等组成。



子情境1 认识伺服系统

2. 伺服系统结构

伺服系统不同的结构形式，主要体现在检测信号的反馈形式上，以带编码器的伺服电机为例：

- 方式一 转速反馈信号与位置反馈信号处理分离，驱动装置与数控系统配接有通用性。
- 方式二 伺服电机上的编码器既作为转速检测，又作为位置检测，位置处理和速度处理均在数控系统中完成。
- 方式三 伺服电机上的编码器同样作为速度和位置检测，检测信号经伺服驱动单元一方面作为速度控制，另一方面输出至数控系统进行位置控制，驱动装置具有通用性。
- 方式四 数字式伺服系统。

子情境1 认识伺服系统

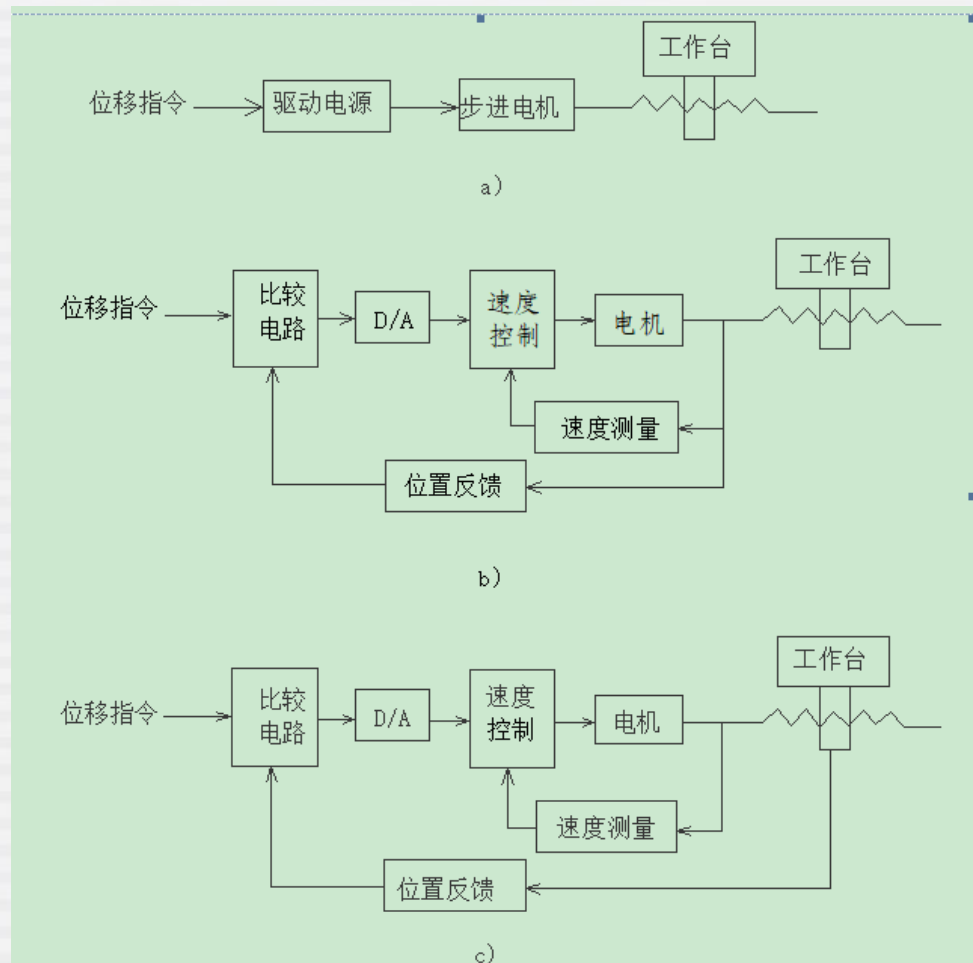
任务2 了解进给伺服系统的分类

1.开环控制与闭环控制

(1) 开环控制

(2) 闭环控制

分为全闭环控制和半闭环控制两种。





子情境1 认识伺服系统

2.直流伺服系统与交流伺服系统

根据**执行元件电机的类型**来分，伺服系统可以分为**直流（DC）伺服系统**和**交流（AC）伺服系统**两大类。**步进电机**

DC伺服电机在原理和结构上类似于**普通直流电机**，其特征是采用单相直流电源供电，内部具有换向器。

AC伺服电机在原理与结构上类似于**三相交流电机**，它采用频率可以连续调节的三相交流电源供电，内部没有换向装置。



子情境1 认识伺服系统

3.模拟控制与数字控制

根据**控制信号的形式**，闭环控制器可分为**模拟控制器**和**数字控制器**两种。

模拟控制是指控制系统中的信号是连续变化的，因此其控制作用也是连续发生的，连续作用于被控对象的。

数字控制指的是系统中的控制信号有些部分是离散化的数字信号，其控制作用是离散地施加于被控对象的。

下列设备中哪些不具有伺服系统

- ☐ A 数控机床
- ☐ B 电子石英表
- ☒ C 半自动洗衣机
- ☐ D 打印机

提交

按照有无检测元件及检测元件所在位置，伺服系统可以分为

- ☒ A 开环系统和闭环系统
- ☐ B 直流伺服系统和交流伺服系统
- ☐ C 数字伺服系统与模拟伺服系统

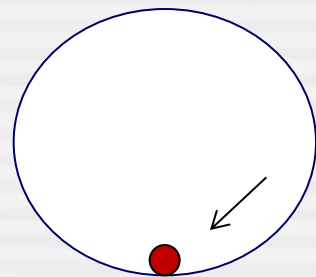
子情境1 认识伺服系统

任务3 了解伺服系统的要求

包括稳定性、精度与快速性三个方面。

1、稳定性

稳定是对伺服系统的最基本的要求。



- 稳定性：指当作用在系统上的扰动信号消失后，系统能够恢复到原来的稳定状态下运行，或者在输入的指令信号作用下，系统能够达到新的稳定运行状态的能力。
- 稳定性是系统**本身**的一种**特性**，取决于系统的结构及组成元件的参数(如惯性、刚度、阻尼、增益等)，**与外界作用信号**(包括指令信号和扰动信号)的性质或形式**无关**。

子情境1 认识伺服系统

任务3 了解伺服系统的要求

2、精度

精度定义：指其输出量复现输入指令信号的精确程度。用**误差**来表征。

动态误差：在动态响应**过程中**输出量与输入量之间的偏差。

稳态误差：在动态响应过程**结束后**，输出量对输入量的偏差。

静态误差：指由系统组成元件**本身的误差**及**干扰信号**所引起的系统输出量对输入量的偏差。

影响伺服系统精度的因素：系统组成元件本身的误差，包括传感器的**灵敏度和精度**、伺服放大器的**零点漂移**和**死区误差**、机械装置中的**反向间隙**和**传动误差**、各元器件的**非线性因素**。此外，伺服系统**本身的结构形式**和**输入指令信号的形式**对伺服系统精度都有重要影响。

子情境1 认识伺服系统

3、快速响应性

快速响应性有两方面含义：一是指动态响应过程中，输出量跟随输入指令信号变化的迅速程度（即**响应速度**），二是指动态响应过程**结束的迅速程度**（即调整时间）。

响应速度：由系统的上升时间来表征。

上升时间：输出响应从零上升到稳态值所需要的时间。

调整时间：系统的输出响应达到并保持在稳态值的一个允许的误差范围内所需要的时间。

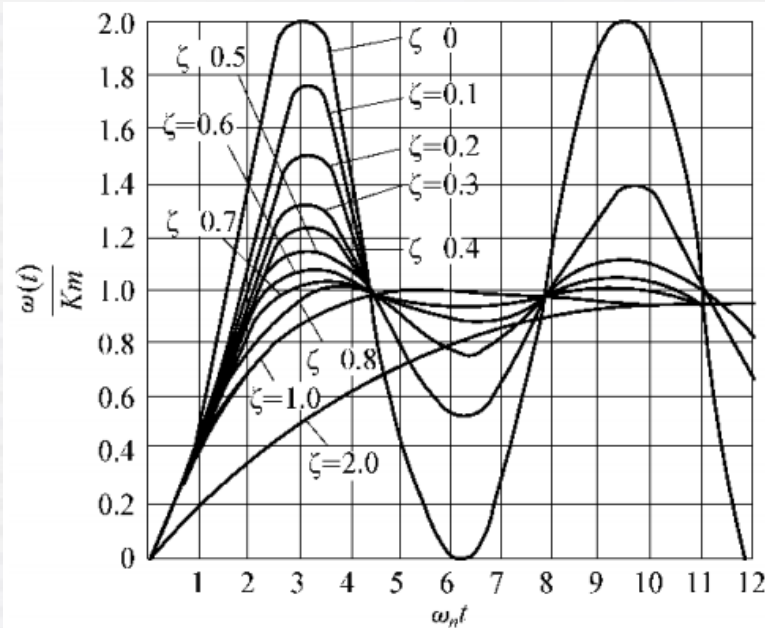


图 2.1.12 二阶系统单位阶跃响应曲线



子情境1 认识伺服系统

最大超调量：系统输出响应的最大值与稳态值之间的偏差

响应速度取决于系统的**阻尼比**和无阻尼**固有频率**。

阻尼比小则响应快，但阻尼比太小会导致最大超调量增大和调整时间加长，使系统相对稳定性降低。当阻尼比一定时，提高固有频率值可以缩短响应过程的持续时间。

下列哪些方面只与系统本身特性有关

- ☒ A 稳定性
- ☐ B 精度
- ☐ C 快速响应性

提交

下列哪些方面既与系统本身特性有关也与输入信号形式或干扰信号有关

A

稳定性

B

静态精度

C

稳态精度

D

动态精度

E

快速响应性

提交



子情境1 认识伺服系统

任务4 了解伺服系统的发展趋势

- (1) 交流化
- (2) 全数字化
- (3) 小型化和微型化
- (4) 高度集成化
- (5) 智能化
- (6) 模块化和网络化

子情境1 认识伺服系统

小结

内容

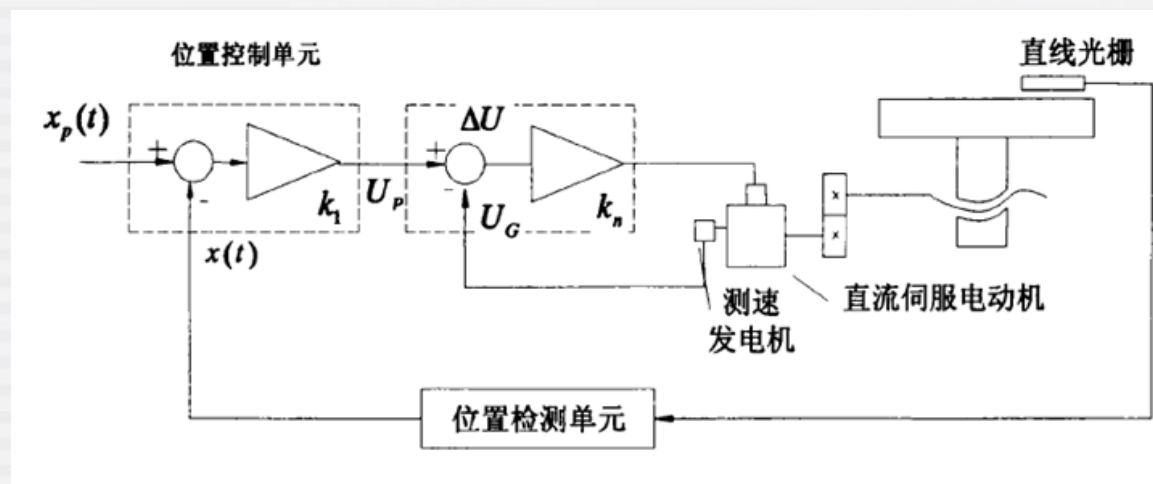
1. 伺服系统的组成
2. 进给伺服系统的分类
3. 伺服系统的要求
4. 伺服系统的发展趋势

重点

1. 伺服系统的组成
2. 进给伺服系统的分类
3. 伺服系统的要求

子情境2 执行元件的控制与驱动

体例5.1.1 直流电机伺服驱动系统



伺服驱动系统组成	功能特点
双环组成，其中内环是速度环，外环是位置环。若单从坐标位置考虑，则位置环输入是脉冲数，相应的输出是位移	以指令脉冲与反馈脉冲的差作为位置环给定脉冲，经过数模转换器和位置调节器变成模拟电压，作为速度给定值，以控制直流伺服电动机向着消除误差的方向旋转，从位置环的给定到速度环的给定可以看作位置放大器

子情境2 执行元件的控制与驱动

执行元件类型

- 1. 电气式** 主要有步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机等。这是机电一体化伺服系统中最常用的执行元件，也是这一节所要介绍的重点。
- 2. 液压式** 主要有液压缸、液压马达等，其优点是输出功率大、动作平稳，但需要相应的液压源，占地面积大，容易漏油而污染环境，控制性能不如伺服电动机。
- 3. 气压式** 主要有气缸、气马达等，其优点是气源方便、成本低、动作快，但输出功率小，体积大、工作噪声大，且难于伺服控制。

子情境2 执行元件的控制与驱动

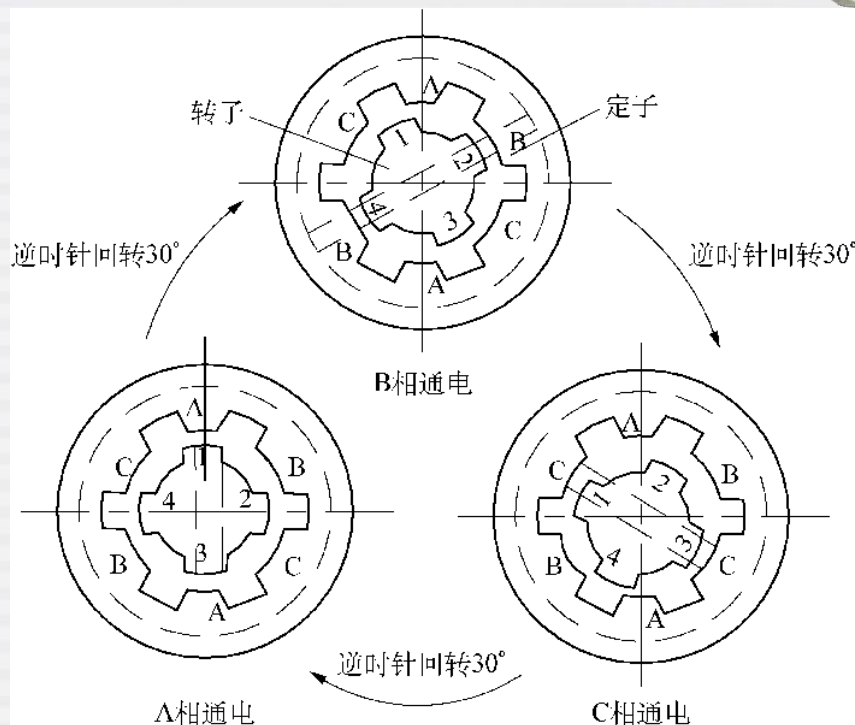
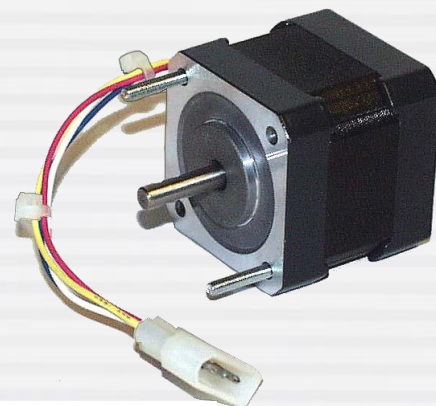
任务1 步进电机的控制与驱动

1. 步进电机的结构与工作原理

1) 反应式步进电动机

(1) 基本结构

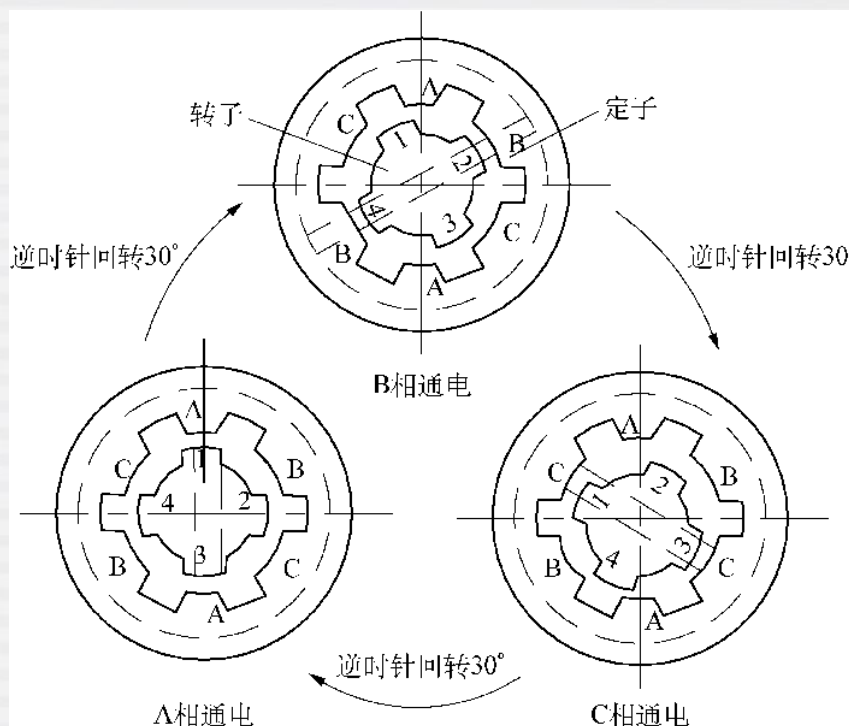
步进电动机由定子和转子组成，定子包括A、B、C三对磁极的铁心，其上分别缠有A、B、C相绕组，转子由硅钢片叠合而成，其上做出4个齿。



子情境2 执行元件的控制与驱动

(2) 工作原理

图中A、B、C三相绕组顺次通电。转子依次转过 30°



子情境2 执行元件的控制与驱动

- 通电方式

三相单三拍：(逆时针转) $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$

(顺时针转) $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$



每次变换通电的相，转子作出减小磁阻的反应，转到磁阻最小的平衡位置上停留，故名反应式步进电动机。

三相双三拍：(逆时针转) $AB \rightarrow BC \rightarrow CA \rightarrow AB$

(顺时针转) $AC \rightarrow CB \rightarrow BA \rightarrow AC$



三相六拍：

(逆时针转) $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$

(顺时针转) $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A$



子情境2 执行元件的控制与驱动

步距角: 步进电动机每一拍转过的角度。

一个 m 相步进电动机，转子上有 z 个齿，则其步距角可通过公式计算，式中 k 是通电方式系数，当采用单相或双相通电方式时， $k=1$ ，当采用单双相轮流通电方式时， $k=2$ 。可见采用单双相轮流通电方式还可使步距角减小一半，提高步进电动机转角输出的分辨率。

$$\alpha = \frac{360^\circ}{k m z}$$

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{P Z K}$$

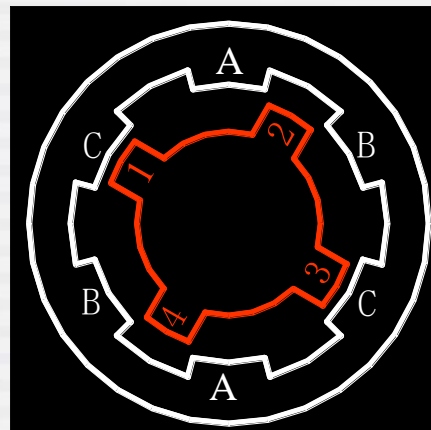
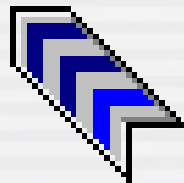
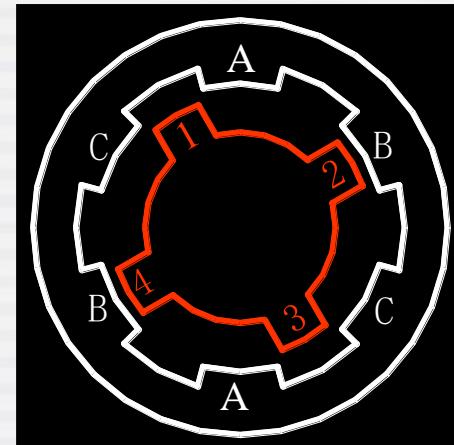
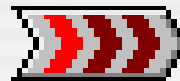
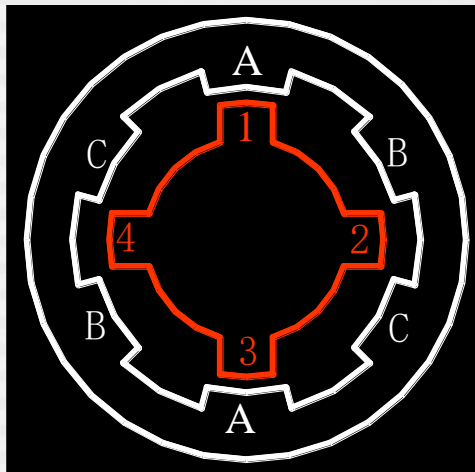
式中： θ_b —步距角；

P —步进电动机的相数；

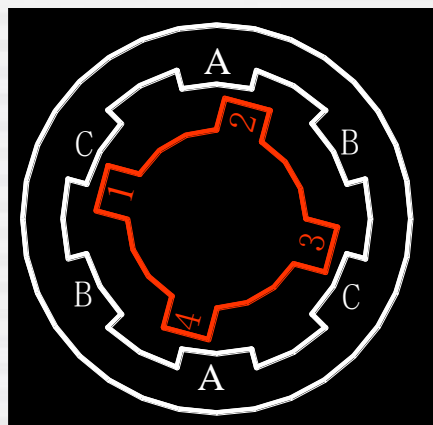
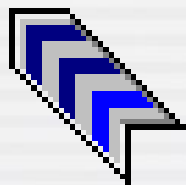
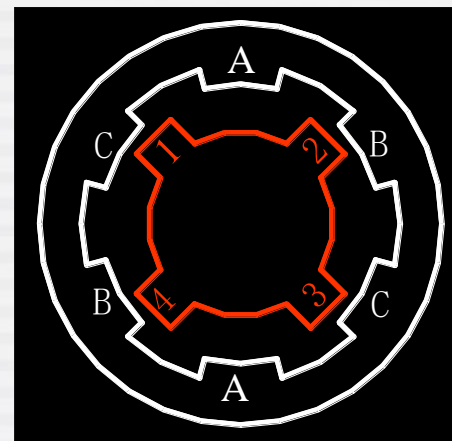
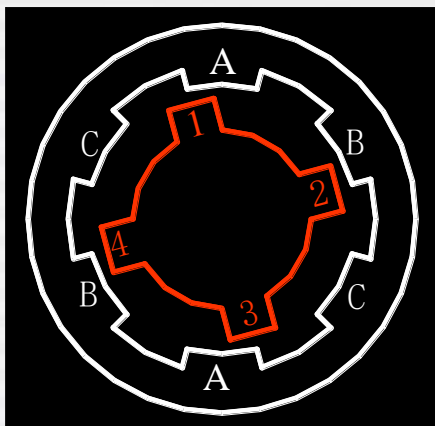
Z —转子齿数；

K —状态系数，单、双三拍时， $K=1$ ；单相六拍时， $K=2$ 。

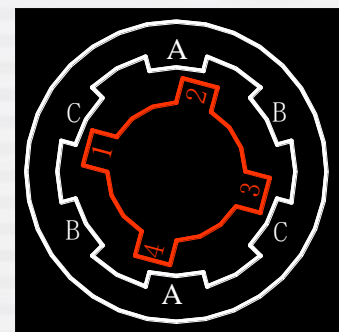
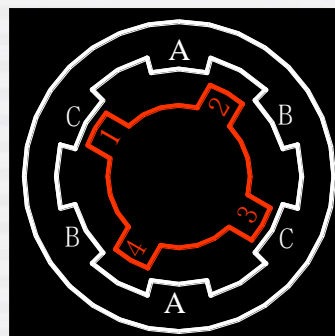
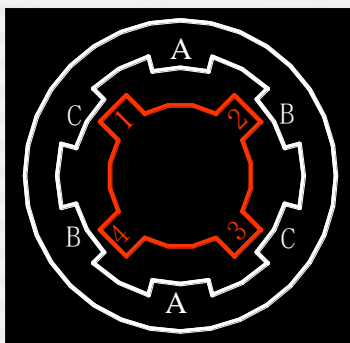
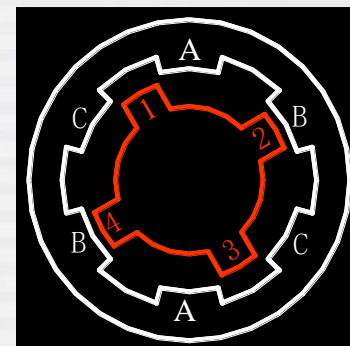
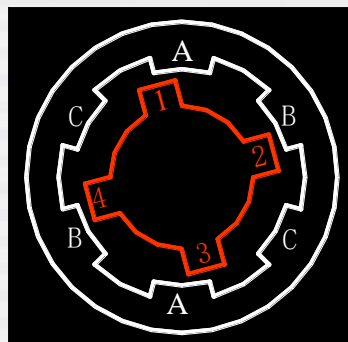
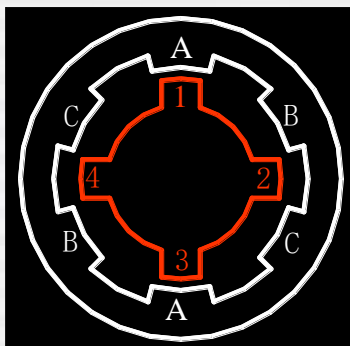
三相单三拍



三相双三拍



三相六拍



子情境2 执行元件的控制与驱动

三种通电方式的特点：

单m拍：每次一相通电,切换瞬间失去自锁力矩易失步,在平衡位置易振荡

双m拍：每次同时有二相通电,切换瞬间仍有一相保持通电,运行稳定

2m拍：步距角小一半，切换瞬间仍有一相保持通电，运行稳定

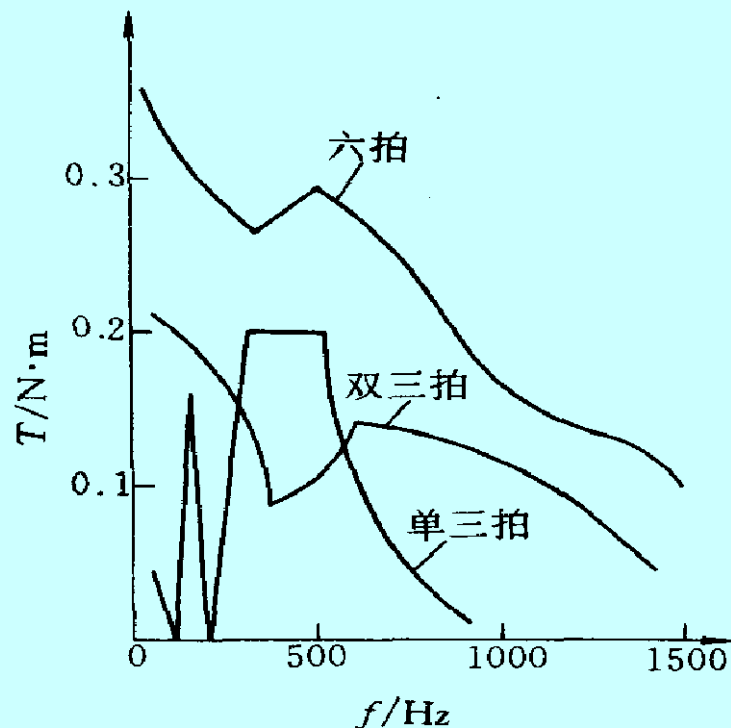


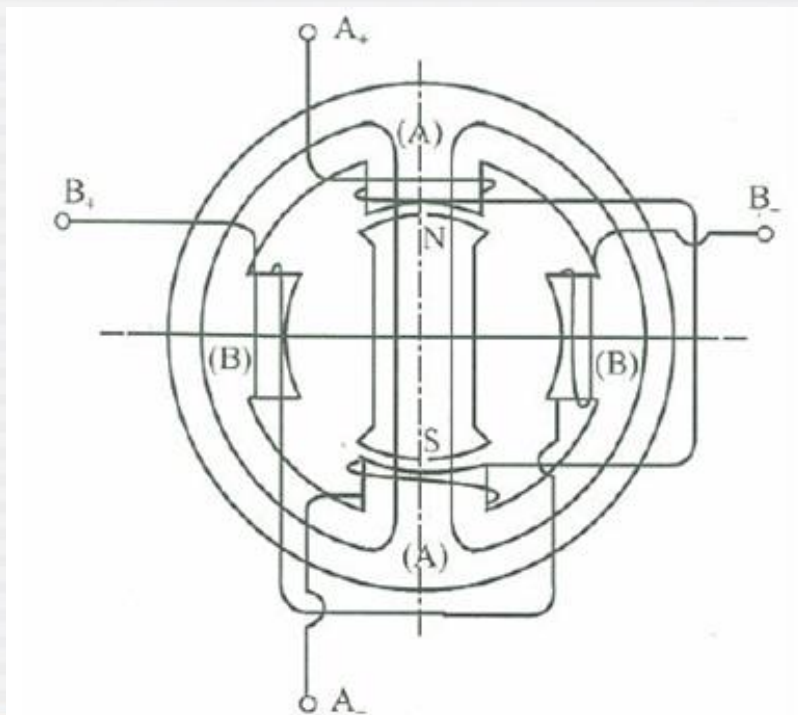
图 5-4 不同通电方式时的矩频特性

子情境2 执行元件的控制与驱动

2) 永磁式步进电动机

(1) 基本结构

永磁式步进电动机**转子为永磁体**，基本做出两个齿，组成一对磁极。
定子包括A、B两对磁极，其铁心上分别缠**A、B绕组**。（实质是四相电机）



子情境2 执行元件的控制与驱动

(2)工作原理

按 $A \rightarrow B \rightarrow (A-) \rightarrow (B-) A \rightarrow \dots$ 相顺次通电时，磁极产生的磁力线吸引转子，使转子顺时针回转，步距角为 90° 。若按 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow B(A-) \rightarrow (A-) \rightarrow (A-)(B-) \rightarrow (B-) \rightarrow (B-) A \rightarrow A \dots$ 相顺次通电，则步距角 45° 。

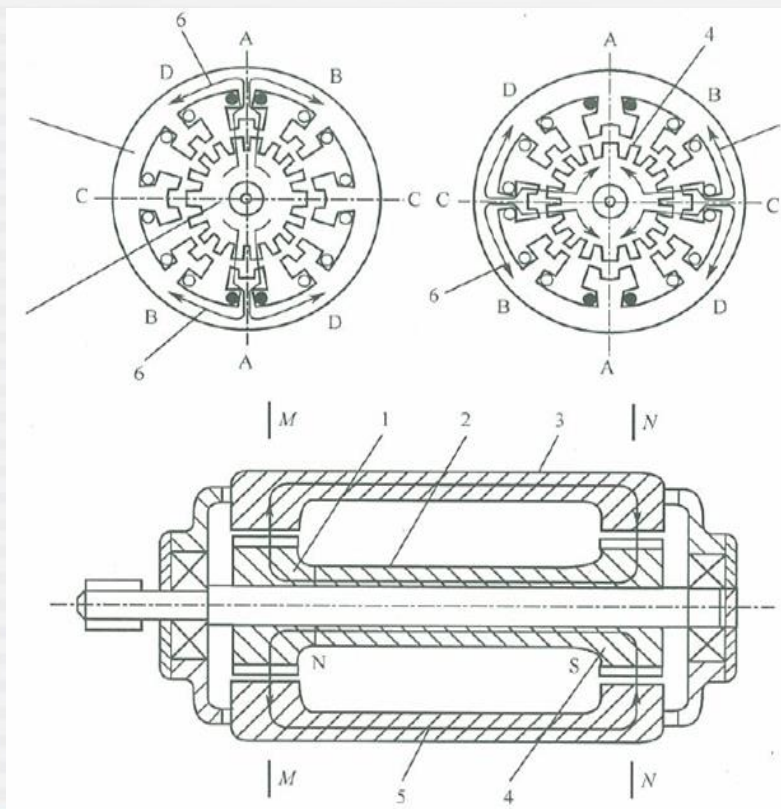
永磁式步进电动机的转子为永磁体，定子磁极对转子的吸引力，较反应式大。获得相同转矩时，永磁式步进电动机的体积小，耗电量小。永磁式步进电动机转子的电磁阻尼较大，可缩短每步的停转时间。当断电后，有定位转矩，被锁住在断电时的位置上，即转子不会漂移。由于转子需充磁，限制了齿数，步距角较大，一般 $\theta_b = 7.5^\circ \sim 18^\circ$ 最大 90° 。

子情境2 执行元件的控制与驱动

2) 混合式步进电动机

(1) 基本结构

转子由永久磁钢2、左齿盘1及右齿盘4组成，左右齿盘上均有18个齿，两齿盘上的齿在圆周方向错开半个齿距角。



子情境2 执行元件的控制与驱动

(2) 工作原理

永久磁钢的磁路5由N极经左齿盘、左气隙、定子铁心、右气隙、右齿盘、S极，回到N极。

当A相绕组的电磁路6由左齿盘上正对八磁极的最上方2个齿和最下方2个齿(M-M截面图示位置)，经A磁极、定子铁心、C磁极、右磁盘上正对C磁极的最左方2个齿和最右方2个齿(N-N截面图式位置)及永久磁钢，回到左齿盘。

正对A、B磁极的8个齿与磁极间的气隙最小、因此磁阻最小，磁势最大，两截面图式转子位置是永久磁势与电磁势合成的磁势达到最大值的位置，也是A相绕组通电时转子的平衡位置。当变换为B相绕组通过时，转子顺时针转过 $1/4$ 齿距角，转到相应的平衡位置。

2.步进电机的主要特性

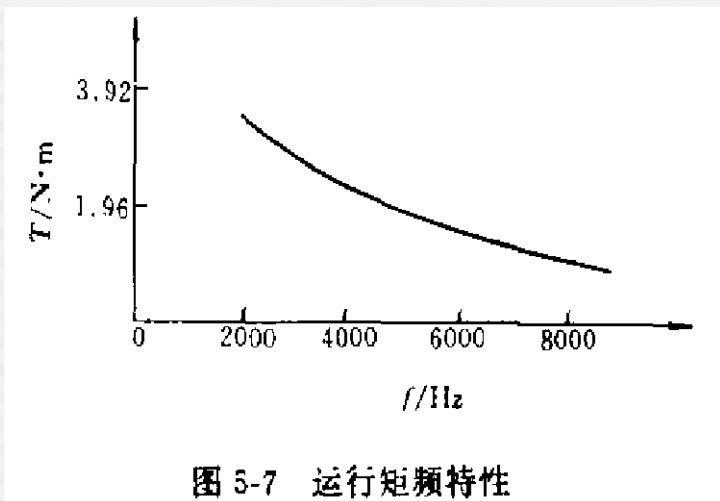
1) 最大静转矩 T_{\max}

步进电动机在某相始终通电而处于静止不动状态时，所能承受的最大外加转矩，亦即所能输出的最大电磁转矩，它反映了步进电动机的制动能力和低速步进运行时的负载能力。

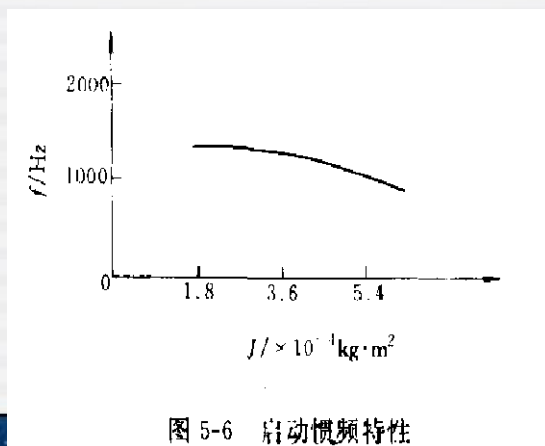
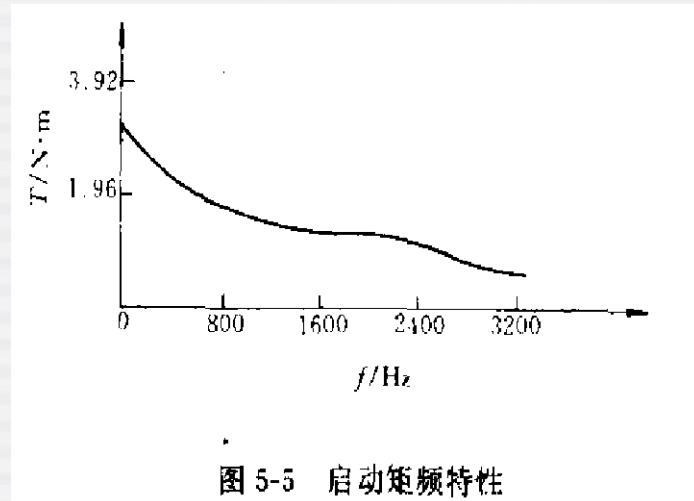
子情境2 执行元件的控制与驱动

2. 步进电机的主要特性

2) 运行矩频特性



3) 最高启动频率



速度越高，惯量越小

子情境2 执行元件的控制与驱动

2.步进电机的主要特性

4) 步进电动机的角位移分辨力：步距角

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{PZK}$$

5) 静态步距角误差

空载时实测的步距角与理论 的步距角之差，它反映了步进电动机角位移的精度。

由于步进电动机主要用于开环控制的伺服系统，这一误差无法测量和补偿，因而在选用步进电动机时，应分析它对整个伺服系统精度的影响。目前国产步进电动机的步距误差一般在 $\pm 10' \sim \pm 30'$ 范围内，精度较高的步进电动机可达 $\pm 2' \sim \pm 5'$

子情境2 执行元件的控制与驱动

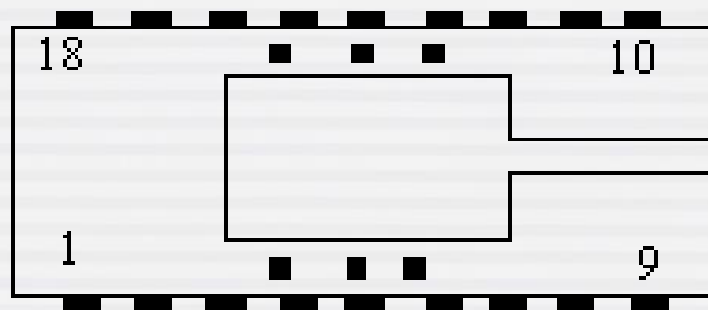
3. 步进电机的控制与驱动

1) 脉冲分配控制

(1) 硬件脉冲分配器

硬件脉冲分配器可采用分立元件(如触发器，逻辑门等)搭成，但体积大、成本高、可靠性差。

YB013、YB014、YB015和YB016分别为三相、四相、五相和六相步进电动机用脉冲分配器，外形见下图。



子情境2 执行元件的控制与驱动

表 5.2.2 集成脉冲分配器各管脚功能

相数 管脚号	三	四	五	六
1	选通输出控制端 E_0	选通输出控制端 E_0	A 相输出端	A 相输出端
2	清零端 RST	清零端 RST	选通输出控制端 E_0	选通输出控制端 E_0
3	励磁方式控制端 A_1	励磁方式控制端 A_1	清零端 RST	清零端 RST
4	励磁方式控制端 A_0	励磁方式控制端 A_0	励磁方式控制端 A_1	励磁方式控制端 A_1
5	选通输入控制端 \bar{E}_1	选通输入控制端 \bar{E}_1	励磁方式控制端 A_0	励磁方式控制端 A_0
6	选通输入控制端 \bar{E}_2	选通输入控制端 \bar{E}_2	选通输入控制端 \bar{E}_1	选通输入控制端 \bar{E}_1
7	(空)	(空)	选通输入控制端 \bar{E}_2	选通输入控制端 \bar{E}_2
8	(空)	(空)	时钟脉冲输入端 CP	反转控制端 $-\Delta$
9	地端 GND	地端 GND	地端 GND	地端 GND
10	时钟脉冲输入端 CP	时钟脉冲输入端 CP	正转控制端 $+\Delta$	正转控制端 $+\Delta$
11	反转控制端 $-\Delta$	反转控制端 $-\Delta$	正转控制端 $+\Delta$	正转控制端 $+\Delta$
12	正转控制端 $+\Delta$	正转控制端 $+\Delta$	出错报警输出端 S	出错报警输出端 S
13	出错报警输出端 S	(空)	E 相输出端	E 相输出端
14	(空)	D 相输出端	D 相输出端	E 相输出端
15	C 相输出端	C 相输出端	C 相输出端	D 相输出端
16	电源 V_{CC}	电源 V_{CC}	H 相输出端	C 相输出端
17	B 相输出端	B 相输出端	(空)	B 相输出端

18

A 相输出端

A 相输出端

电源 V_{CC}

电源 V_{CC}

子情境2 执行元件的控制与驱动

集成脉冲分配器主要性能参数

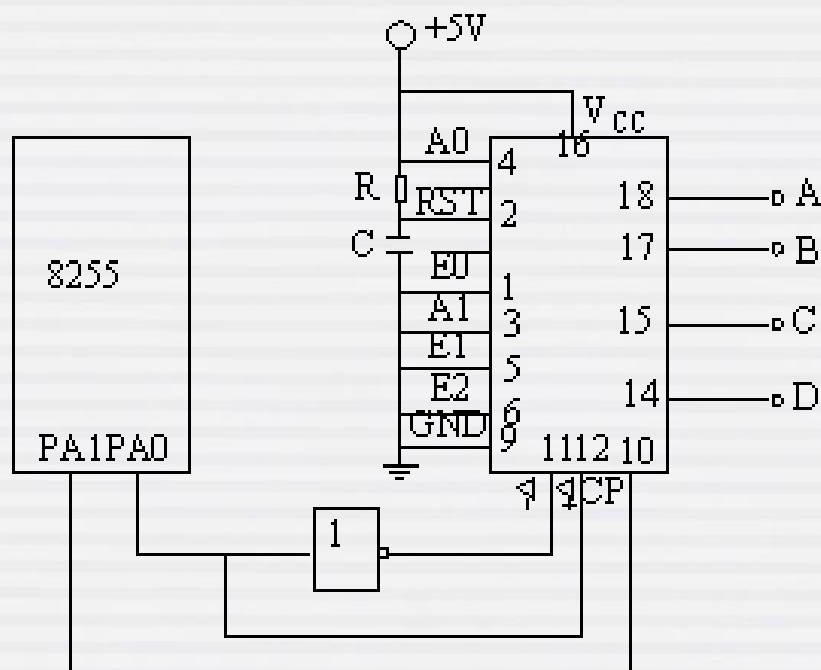
性能	输出 高电平 /V	输出 低电平 /V	输入 高电平 /V	输入 高电平 /V	吸收 电流 /mA	工作 频率 /kHz	电源 电压 /V	环境 温度 /°C
参数	≥2.4	≤0.4	≤0.8	2.4	1.6	0~160	5±0.5	0~+70

励磁方式：控制端**A₀**，**A₁**的控制信号与励磁(通电)方式的对应关系

控制电平		励磁方式			
A₀	A ₁	YB013	YB014	YB015	YB016
0	0	A→B→C→A→...	A→B→C→D→A→...	A→B→C→D→E→A ...	A→B→C→D→E→F →A→...
0	1	AB→BC→CA→A B→...	AB→BC→CD→DA→ AB→...	ABC→BCD→CDE→ ...	ABC→BCD→CDE→ DEF→...
1	0	A→AB→B→BC →C→...	A→AB→B→BC→C→C D→...	AB→ABC→BC→BCD →...	AB→ABC→BC→ BCD→...
1	1	A→AB→B→BC →C→...	AB→ABC→BC→BCD →...	AB→ABC→BC→BCD →...	ABC→ABCD→BCD →BCDE→...

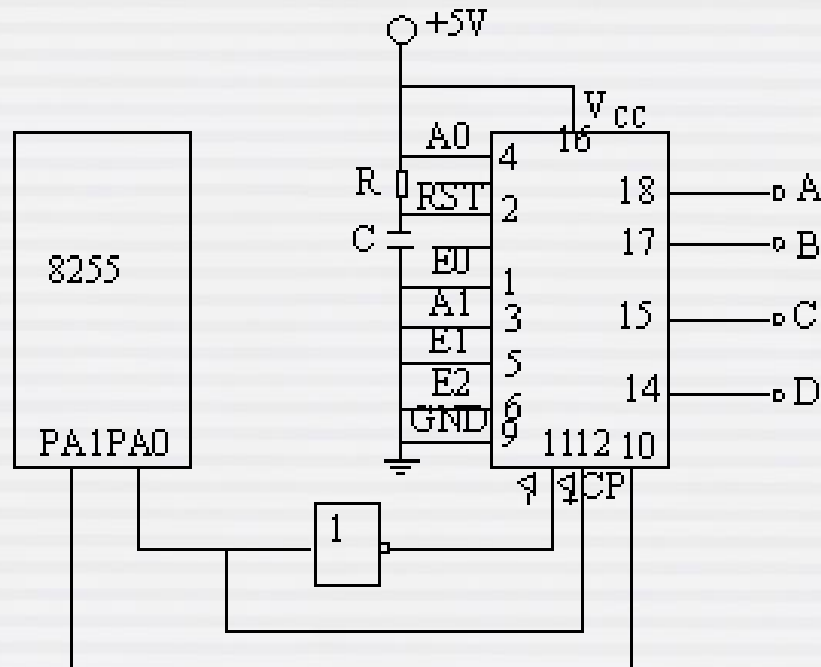
如图，采用通用微机接口芯片**8255**和脉冲分配器**YB014**组成的步进电动机脉冲分配控制电路原理图，欲使电机正转，则8255的PA0口应输出

- ☒ A 高电平
- ☐ B 低电平
- ☐ C 高阻态

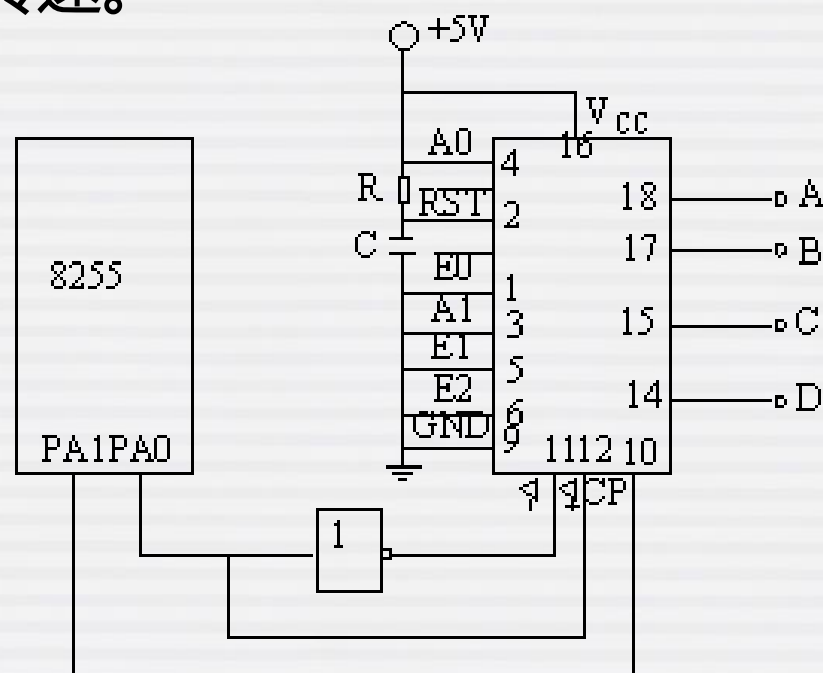


如图，采用通用微机接口芯片8255和脉冲分配器YB014组成的步进电动机脉冲分配控制电路原理图，当 A_0 接电源， A_1 接地时，电机的励磁方式为：

- ☐ A 四相单四拍
- ☐ B 四相双四拍
- ☒ C 四相八拍
- ☐ D 三相六拍



如图，采用通用微机接口芯片8255和脉冲分配器YB014组成的步进电动机脉冲分配控制电路原理图，8255的PA1口输出的[填空1]决定步进电动机的转角，[填空2]决定步进电动机的转速。



正常使用填空题需3.0以上版本雨课堂

作答

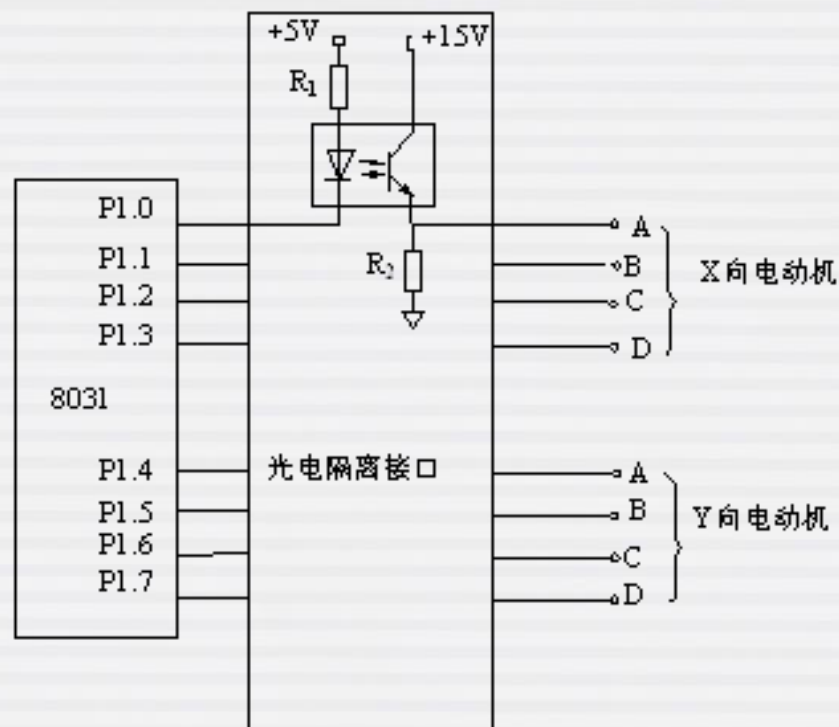
子情境2 执行元件的控制与驱动

(2) 软件脉冲分配器

软件脉冲分配器：指实现脉冲分配控制的计算机程序。**硬件脉冲分配器**不占用计算机资源，但电路复杂，硬件成本较高。软件脉冲分配器不需额外电路，成本低，但占用计算机运行时间。

采用单片机8031对数控X—Y工作台的两台四相步进电动机进行控制的接口电路原理图。

图中采用**负逻辑**控制，即当8031P1口某一口线输出低电平“0”时，对应的步进电动机绕组被接通。



子情境2 执行元件的控制与驱动

2) 速度控制

通过控制脉冲分配频率可实现步进电动机的速度控制。**速度控制也有硬、软件两种方法。**

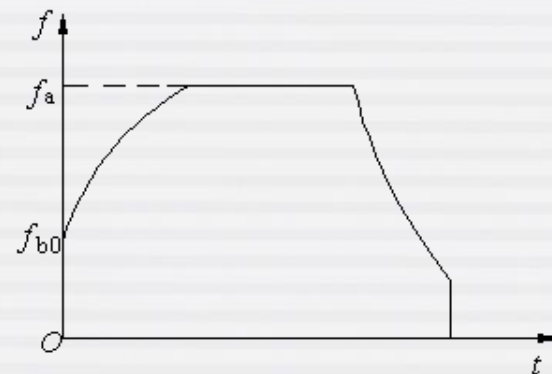
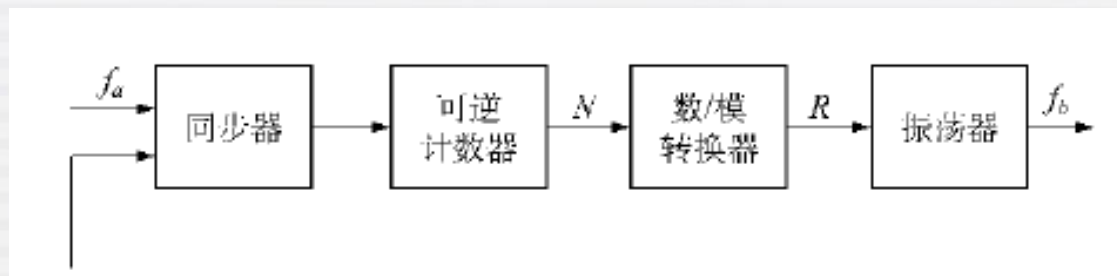
硬件方法：在硬件脉冲分配器的时钟脉冲输入端(**CP端**)接一可变频率脉冲发生器，改变其振荡频率，即可改变步进电动机速度。

软件方法：常采用定时器来确定每相邻两次脉冲分配的时间间隔，即脉冲分配周期，并通过中断服务程序向输出口分配控制数据。

子情境2 执行元件的控制与驱动

3) 自动升降速控制

(1) 硬件自动升降速控制



可逆计数器用于对频率为 f_a 的指令脉冲加法计数，对频率为 f_b 的反馈脉冲减法计数，

同步器用于使指令脉冲与反馈脉冲同步，以保证计数正确，

数 / 模转换电路可将计数器内的脉冲数 N 转换成电阻值，

振荡器的振荡频率随 R 的变化而变化，其输出脉冲作为脉冲分配控制脉冲和反馈脉冲。

子情境2 执行元件的控制与驱动

(2) 软件自动升降速控制

软件自动升降速控制的**基本原理是**：根据允许的启动频率确定定时器的初始定时常数，在升速过程中，增加定时常数(对加法计数的定时器来讲)，减小中断时间间隔；在恒速过程中，保持定时常数不变，在降速过程中，不断减小定时常数，降低脉冲分配频率，直到定时常数等于希望的制动频率所对应的值时，停止脉冲分配，使步进电动机制动。

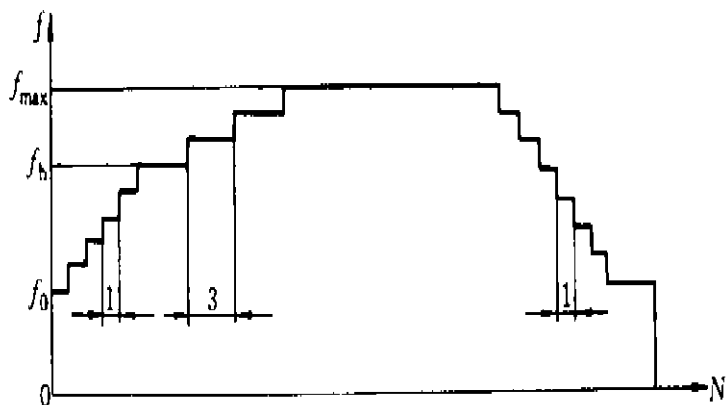


图 5-24 阶梯规律升降速控制

速度控制的关键是定时常数的确定。设数控 X—Y 工作台的脉冲当量为 $\delta(\text{mm})$ ，要求的运动速度为 $v(\text{mm/min})$ ，8031 的晶振频率为 $f_{osc}(\text{Hz})$ ，采用 CTC0 的工作模式 1 (即 16 位定时器模式)，则定时常数 $T_x(\text{s})$ 可按下式确定。

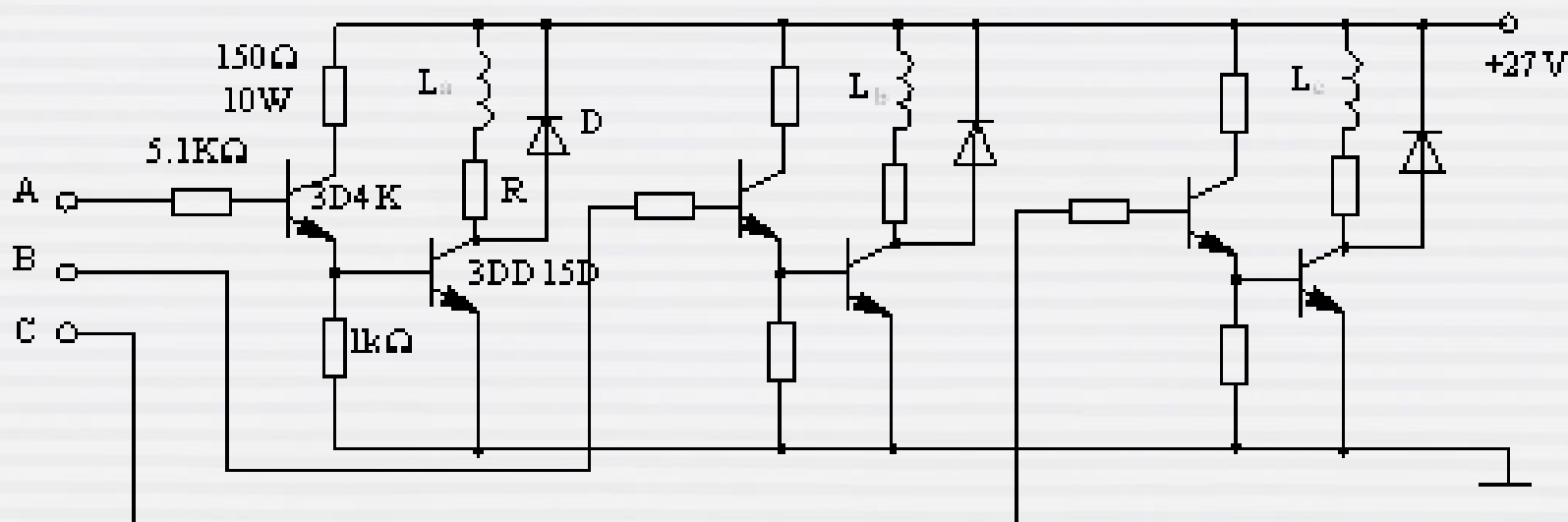
$$T_x = 2^{16} - \frac{5 f_{osc} \delta}{v}$$

4) 步进电动机的驱动

要使步进电动机输出足够的转矩以驱动负载工作，必须对控制信号进行放大，**实现这一功能的电路称为步进电动机驱动电路或功放电路**。驱动电路是步进电动机应用的关键，是影响其性能发挥和可靠运行的一个最重要因素。

子情境2 执行元件的控制与驱动

(1) 单电源驱动电路



单一电源供电，结构简单，成本低，但电流波形差，效率低，出力小，主要用于对速度要求不高的小型步进电动机的驱动。

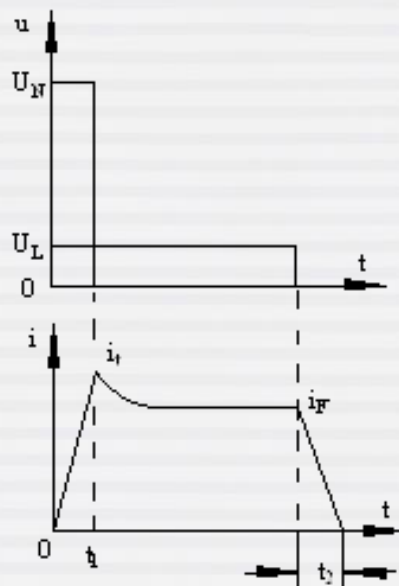
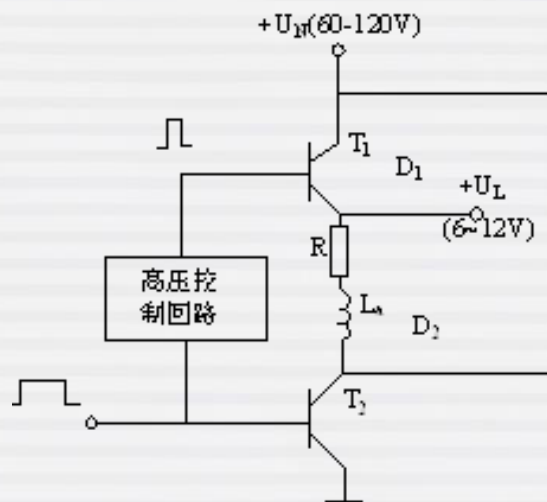
$$\tau = \frac{L}{R_L + R_C}$$

提速（限流）电阻 R_C ：改变时间常数，提高响应速度
续流二极管 D ：用于功率晶体管的过电压保护

子情境2 执行元件的控制与驱动

(2) 双电源驱动电路

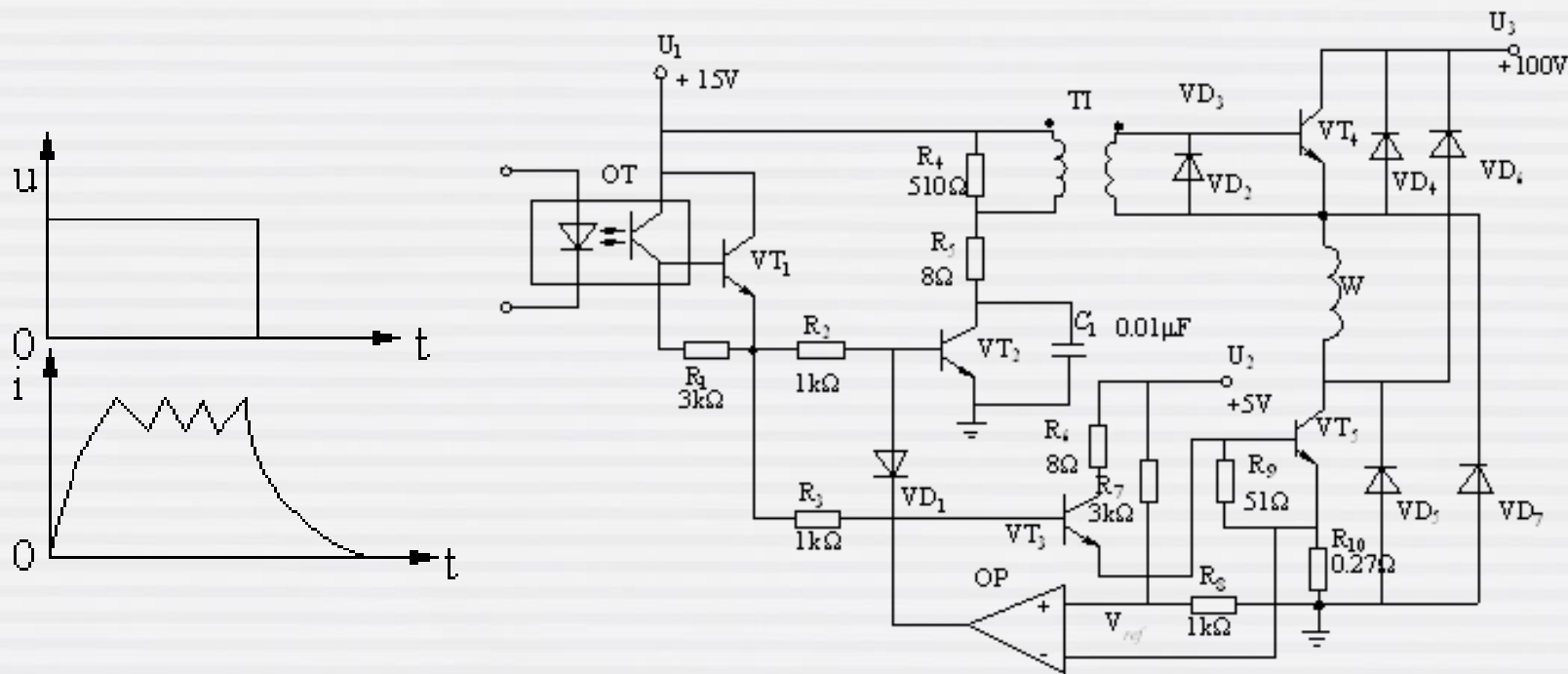
又称高低压驱动电路，采用**高压和低压两个电源供电**。在步进电动机绕组刚接通时，通过高压电源供电，以加快电流上升速度，延迟一段时间后，切换到低压电源供电。这种电路使电流波形、输出转矩及运行频率等都有较大改善，但效率仍较低。



子情境2 执行元件的控制与驱动

(3) 斩波限流驱动电路

采用**单一高压**电源供电，以加快电流上升速度，并通过对绕组电流的检测，控制功放管的开和关，使**电流在控制脉冲持续期间始终保持在规定值上下**。电路出力大，功耗小，效率高，应用最广。



子情境2 执行元件的控制与驱动

4.步进电动机的选用（自学）

1)应用步进电动机的优点

(1)控制简单容易 (2)体积小 (3)价格低

2)步进电动机的选择

在选择步进电动机时首先应考虑的是步进电动机的类型选择，其次才是具体的品种选择。根据系统要求，确定步进电动机的电压值、电流值以及有无定位转矩和使用螺栓机构的定位装置，从而就可以确定步进电动机的相数和拍数。

在进行步进电动机的品种选择时，要综合考虑速比 i 、轴向力 F 、负载转矩 T_1 、额定转矩 T_N 、和运行频率 f_Y ，以确定步进电动机的具体规格和控制装置。



子情境2 执行元件的控制与驱动

任务1 步进电机的控制与驱动小结

内容

1. 执行元件类型
2. 步进电机的结构与工作原理
3. 步进电机的主要特性
4. 步进电动机的控制与驱动

重点

1. 执行元件类型
2. 步进电机的结构与工作原理
3. 步进电动机的控制与驱动

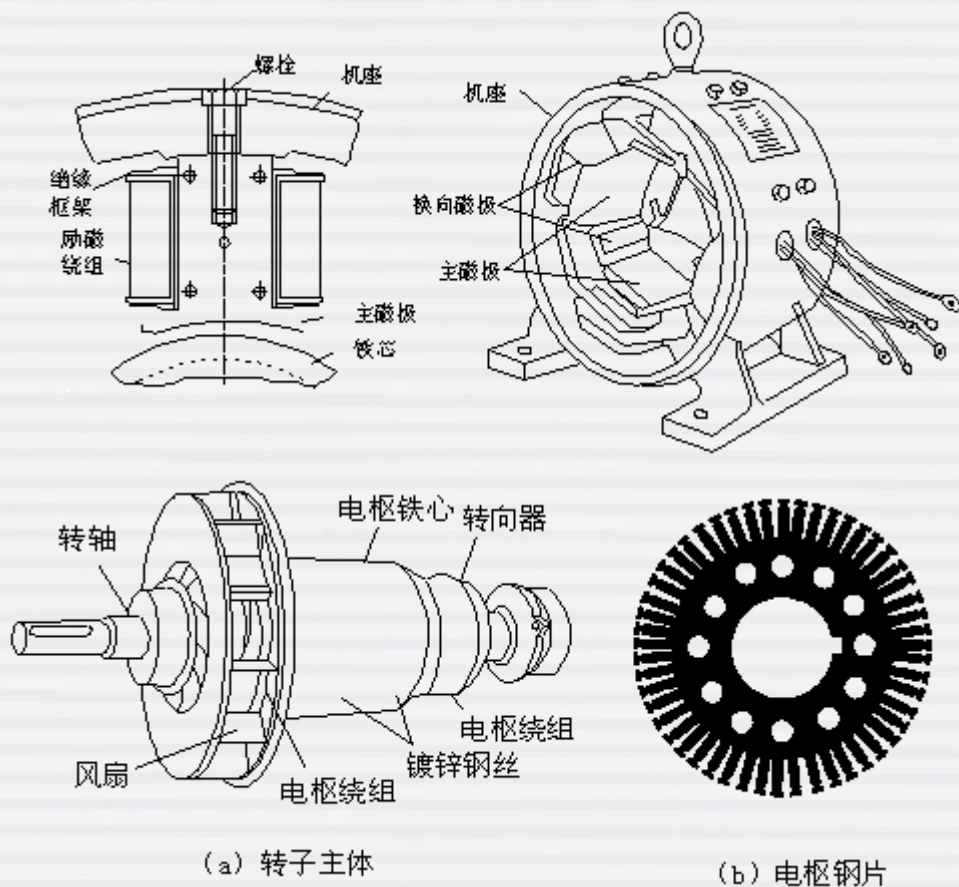
子情境2 执行元件的控制与驱动

任务2 直流伺服电机

1. 直流伺服电机特点与结构

1) 直流伺服电机的特点

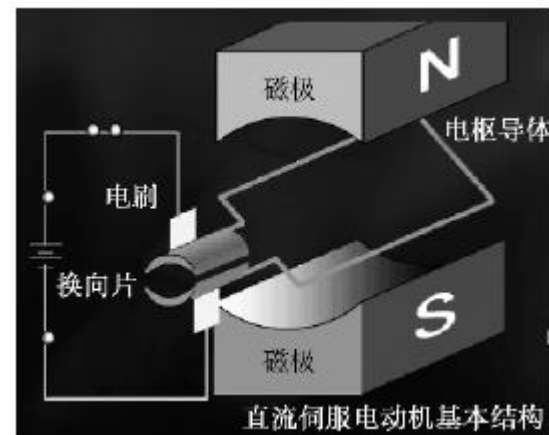
- ①稳定性好
- ②可控性好
- ③响应迅速
- ④控制功率低、损耗小
- ⑤转矩大



任务1 执行元件的控制与驱动

2) 直流伺服电机的结构和性能

(1) 直流伺服电机的分类



按照激励方式的不同，可分为电磁式和永磁式两种。

按照结构，分为一般电枢式、无刷电枢式、绕线盘式和空心杯电枢式等。

根据控制方式，分为磁场控制方式和电枢控制方式。

永磁直流伺服电机只能采用电枢控制方式。一般电磁式直流伺服电机大多也用电枢控制式。

子情境2 执行元件的控制与驱动

(2) 直流 伺服电机 的结构形 式及特点

分类	结构特点
永磁式伺服电机	与普通直流电机相同，但电枢铁心长度与直径之比较大，气隙也较小，磁场由永久磁钢产生，无需励磁电源
电磁式伺服电机	定子通常由硅钢片冲制叠压而成，磁极和磁轭整体相连，在磁极铁心上套有励磁绕组，其他同永磁式直流电机
电刷绕组伺服电机	采用圆形薄板电枢结构，轴向尺寸很小，电枢用双面敷铜的胶木板制成，上面用化学腐蚀或机械刻制的方法印刷绕组。绕组导体裸露，在圆盘两面呈放射形分布。绕组散热好，磁极轴向安装，电刷直接在圆盘滑动，圆盘电枢表面上有裸露导体部分起着换向器的作用
无槽伺服电机	电枢采用无齿槽的光滑圆柱铁心结构，电枢制成细而长的形状，以减小转动惯量，电枢绕组直接分布在电枢铁心表面，用耐热的环氧树脂固化成型。电枢气隙尺寸较大，定子采用高电磁的永久磁钢励磁
直流力矩伺服电机	直流力矩伺服电机设计主磁通为径向的盘式结构，长、径比一般为1:5，扁平结构益于定子安置多块磁极，电枢选用多槽，多换向器和多串联导体数，总体结构有分装式和组装式两种，通常定子磁路有凸极式和稳极式
直流无刷伺服电机	直流无刷伺服电机由电机主体、位置传感器、电子换向开关三部分组成。电机主体由一定极对数的永磁钢转子和一个多向的电枢绕组定制组成，转子磁钢有二级或多级结构。位置传感器是一种无机械接触的检测转子位置的装置，由传感器转子和传感器定子绕组串联，各功率元件的导通与截止取决于位置传感器的信号

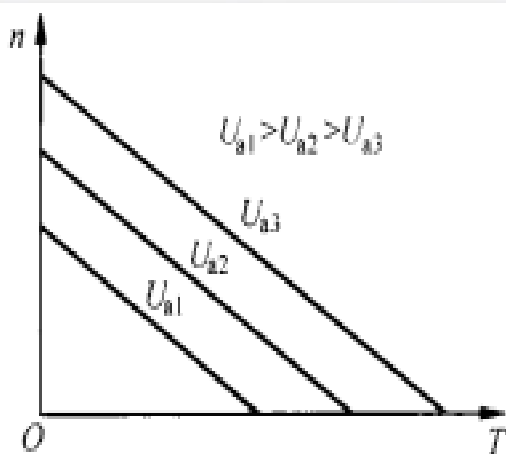
子情境2 执行元件的控制与驱动

2.直流伺服电机的静态特性

$$n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} T$$

1) 机械特性：指电枢电压恒定时，电动机的转速随电磁转矩变化的关系，

$$n = f(T)$$



理想空载转速

启动转矩

机械特性曲线斜率的绝对值：

电动机机械特性的硬度

直流伺服电动机机械特性

子情境2 执行元件的控制与驱动

机械特性曲线斜率的绝对值为：

$$| \tan \alpha | = \frac{R_a}{K_e K_t}$$

它表示电动机机械特性的硬度，即电动机转速随转矩变化而变化的程度。

斜率越大表示转速随负载的变化越大，机械**特性软**；反之，机械特性硬

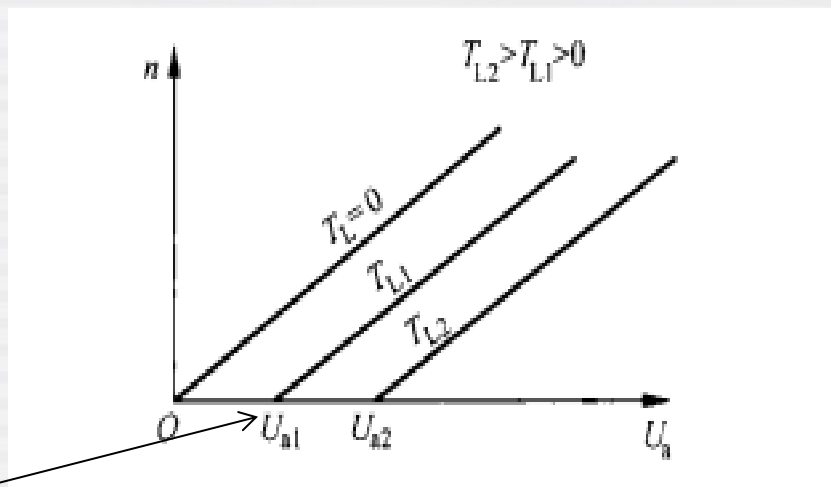
子情境2 执行元件的控制与驱动

2.直流伺服电机的静态特性

$$n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} T$$

2) 调节特性：指电磁转矩恒定时，电动机的转速随控制电压变化的关系，即 $T=\text{常数}$ 时

$$n = f(U_a)$$



始动电压

失灵区

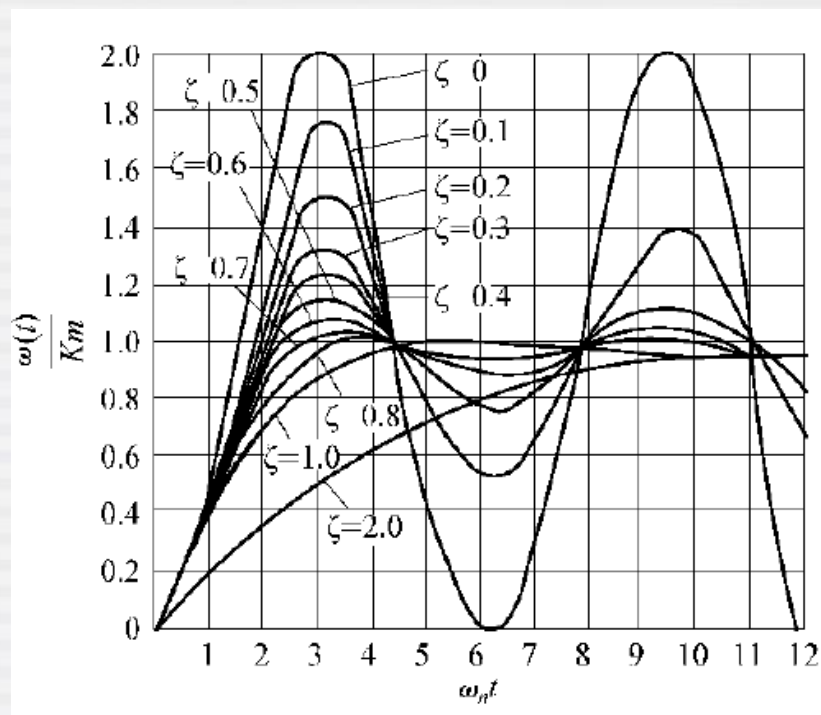
直流伺服电动机调节特性

子情境2 执行元件的控制与驱动

3.直流伺服电动机的动态特性

直流伺服电动机的动态特性：电动机的电枢电压突变时,电动机转速从一种稳态到另一种稳态的过渡过程,即转子转速随时间的变化规律。这一规律可用表达式 $\omega = f(t)$ 来描述。

动态特性的本质是由对输入信号响应的过渡过程来描述的。产生过渡过程的原因在于电动机中存在着两种惯性：即**机械惯性和电磁惯性**



子情境2 执行元件的控制与驱动

4.直流伺服电机的连择

直流伺服电机的选择与步进电机类似，同样要满足**惯量匹配和容量匹配原则**。同时，由于直流伺服电机的机械特性较软，常用于闭环控制。因此对于直流伺服电机的选择。还应考虑**固有频率和阻尼比**等。

子情境2 执行元件的控制与驱动

4.直流伺服电机的连接

1) 惯量匹配和

小惯量直流伺服电动机，推荐：

$$1 \leq J_{eL} / J_m \leq 3$$

小惯量的伺服电动机的转动惯量 $J_m \approx 5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

大惯量直流伺服电动机，推荐：

$$0.25 \leq \frac{J_{eL}}{J_m} \leq 1$$

2) 容量匹配

发热校核

子情境2 执行元件的控制与驱动

5. 直流伺服系统的速度控制方式

1) 直流电动机的调速

直流电动机的调速方法选择，直流电动机的机械特性公式为

$$n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} T$$

根据直流电动机机械特性，可知其调速方法有三种：调阻、调磁和调压。

2) 直流电动机脉宽调制 (**pulse width modulation, PWM**)

改变电枢电压可以对直流电动机进行速度控制，调压的方法很多种，其中应用最广泛的是采用 **PWM** 的方法。

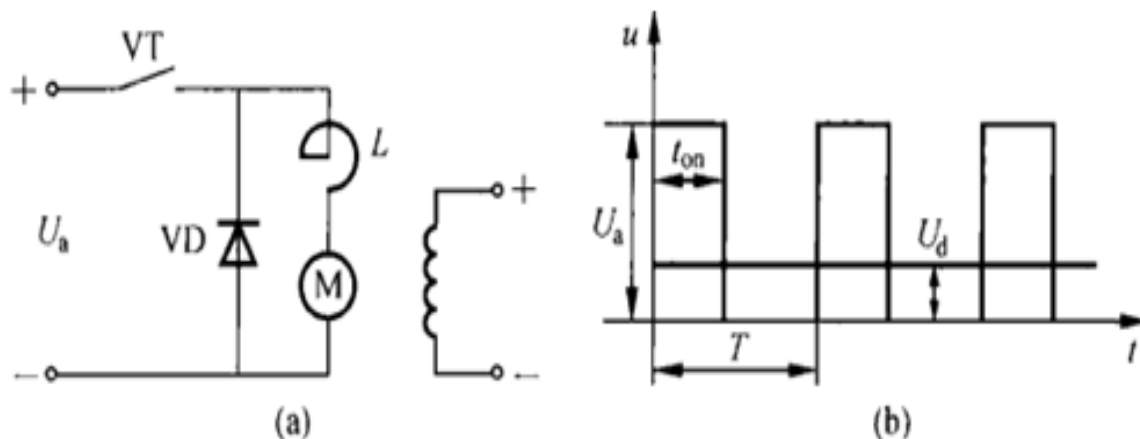
PWM有两种驱动方式，一种是单极性驱动方式，另一种是双极性驱动方式。

子情境2 执行元件的控制与驱动

(1) 单极性驱动方式

单极性驱动原理如图 (a) 所示。其中 VT 是用开关符号表示的电力电子开关器件, VD 表示续流二极管。当 VT 导通时, 直流电压 U_a 加到电动机上; 当 VT 关断时, 直流电源与电动机断开, 电动机电枢中的电流经 VD 续流。电枢两端的电压接近于零。

如此反复, 得到电枢端电压波形 $u=f(t)$ 如图 (b) 所示。



子情境2 执行元件的控制与驱动

(2) 双极性驱动方式

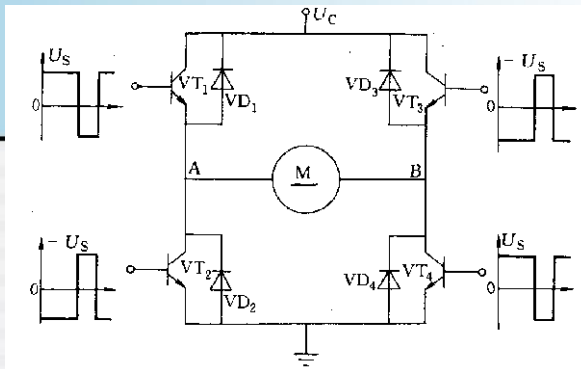
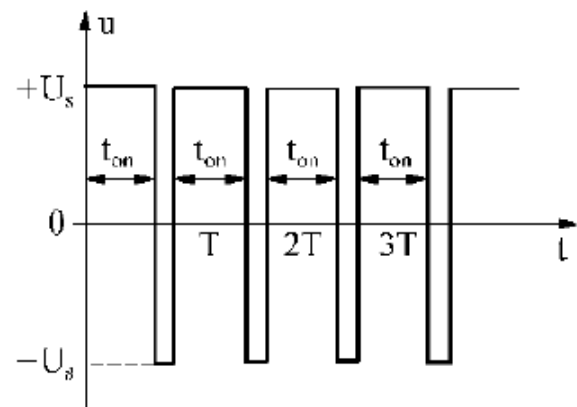
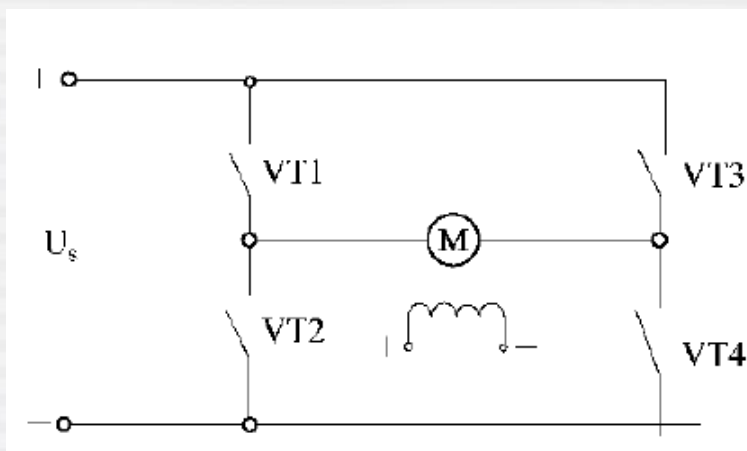


图 5-29 H 型桥式 PWM 晶体管功率放大器的电路原理图

采用四个功率开关构成 H 桥电路，如图 (a)所示。VT1 ~VT 4 四个电力电子开关器件构成了 H 桥可逆脉冲宽度调制电路。VT1 和VT4 同时导通或关断，VT2 和VT3 同时通断，使电动机两端承受 $+U_s$ 或 $-U_s$ 。改变两组开关器件的导通时间，也就可以改变电压脉冲的宽度，得到的电动机两端的电压波形如图 (b)所示。



子情境2 执行元件的控制与驱动

任务2 直流伺服电机的控制与驱动小结

内容

1. 直流伺服电动机的结构和性能
2. 静态特性
3. 动态特性
4. 选择
5. 直流伺服系统的速度控制方式

重点

1. 结构和性能：永磁式
2. 静态特性：机械特性曲线
3. 选择
4. 直流伺服系统的速度控制方式：双极性控制

子情境2 执行元件的控制与驱动

任务3 交流伺服电机

1 交流伺服电机的工作原理

交流伺服电动机分为**同步型**和**异步型**两类。图示为同步型交流伺服电动机的工作原理。电动机本身由**永磁材料的转子**和带有单相或二、三相绕组的**定子组成**。转子跟踪旋转磁场，滞后角为 θ ， θ 随**负载**的增加而变大，在允许值内时，转子同步跟踪，大于允许值时失步。

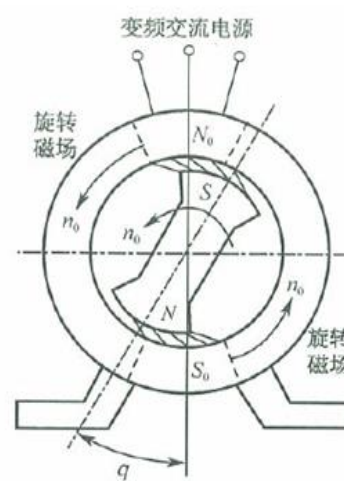
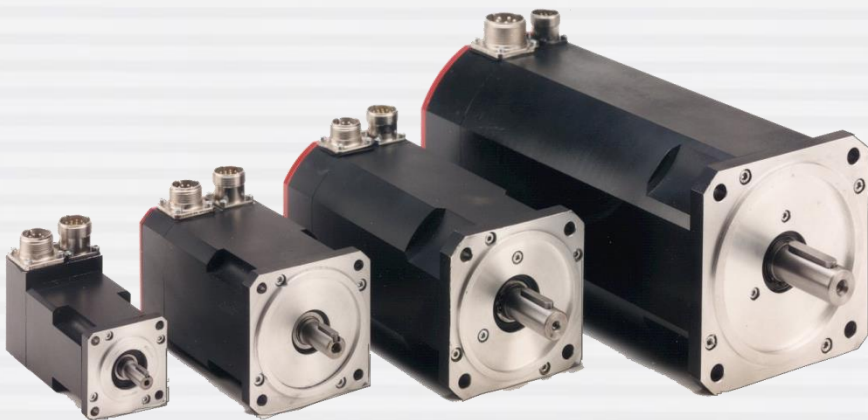


图 5-3-1 电动机的工作原理

子情境2 执行元件的控制与驱动

2.交流伺服电机的种类和结构特点

1) 种类

交流伺服电机分为两种，同步型和感应型。

(1) 同步型 (SM) ,

指采用永磁结构的同步电机，又称为无刷直流伺服电机。

特点: : ①无接触换向部件 ②需要磁极位置检测器(如编码器)

③具有直流伺服电机的全部优点。

(2) 感应型 (IM) , 指笼形感应电机。

特点: : ①对定子电流的激励分量和转矩分最分别控制。

②具有直流伺服电机的全部优点。

子情境2 执行元件的控制与驱动

2) 结构特点

交流伺服电机采用了全封闭无刷结，不需要定期检查和维修。以适应实际生产环境其定子省去了铸件壳体，结构紧凑、外形小、重量轻。

3.交流伺服电动机的选用

矢量控制技术的应用，使交流伺服电机的调速性能可以和直流伺服电机媲美。在中、大型功率应用中，交流伺服电机有取代直流伺服电机的趋势。

交流伺服电机没有换向件，过载能力强、重量轻、体积小，适合于高速、高精度、频繁启动/停止及快速定位等场合。交流伺服电机不需要维护，能在恶劣的环境下工作。

子情境2 执行元件的控制与驱动

3.交流伺服电动机的选用

同直流伺服电机一样，交流伺服电机的工作特性与某些参数和特性曲线有关。5-3-2是**FUNAC 10型交流伺服电机的工作特性曲线**。交流伺服电机的选择方法同直流伺服电机类似。

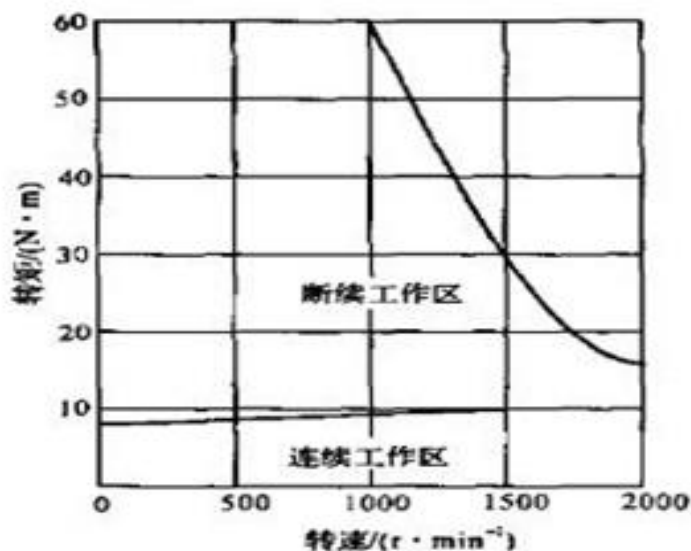


图 5-3-2 FUNAC 10 型交流伺服电机的工作特性曲线

子情境2 执行元件的控制与驱动

4. 交流伺服系统的速度控制方式

1) 交流感应电机的特性

由电机学可知，交流感应电机的转速。与下列因素有关：

$$n = \frac{60f}{p} (1 - S)$$

式中， n 为电机转速(r/min)； f 为外加电源频率(Hz)； p 为电机极对数； S 为滑差率。根据上式，改变交流电机的转速有3种方法，即变频调速、变极调速和变转差率调速。



子情境2 执行元件的控制与驱动

变极调速通过改变极对数来实现电机的调速，这种方法是有极调速且调速范围窄。

变转差率调速可以通过改变在转子绕组中串联电阻和改变定子电压两种方法来实现。无论是哪种改变转差率的方法。都存在损耗大的缺陷，不是理想的调速方法。

变频调速调速范围宽、平稳性好、效率高，具有优良的静态和动态特性。目前高性能的交流调速系统都是采用变频调速技术改变电机的转速。因此本节将主要介绍变频调速。

在异步电机的变频调速中，为了保持在调速时电机的最大转矩不变，希望维持磁通恒定。



子情境2 执行元件的控制与驱动

任务3 交流伺服电机小结

内容

1. 交流伺服电机的工作原理
2. 交流伺服电机的种类和结构特点
3. 交流伺服电机的选用
4. 交流伺服电机的速度控制

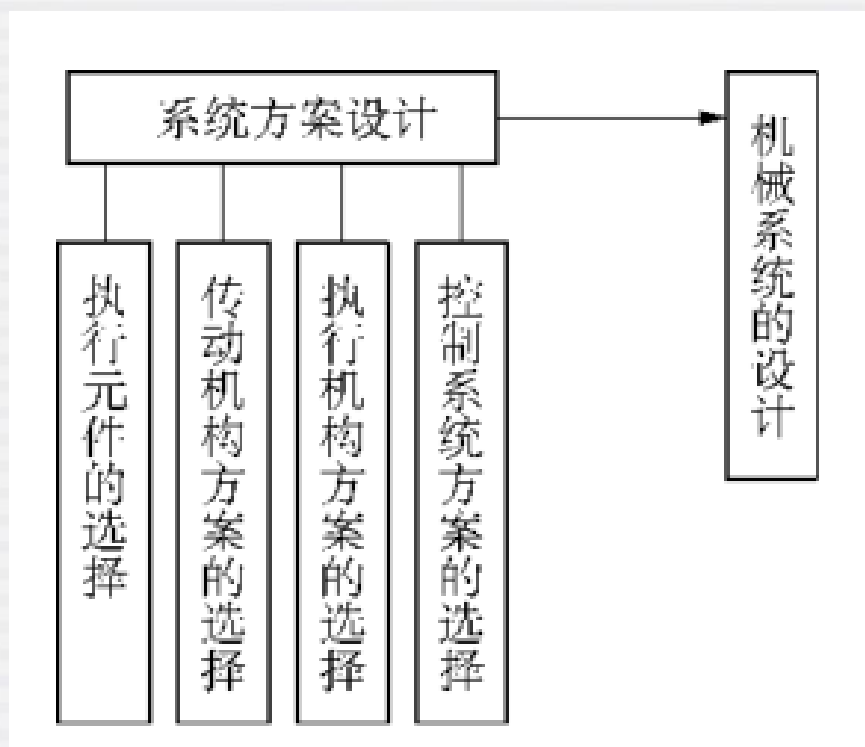
重点

1. 交流伺服电机的工作原理
2. 交流伺服电机的种类
3. 交流伺服电机的速度控制：
变频调速

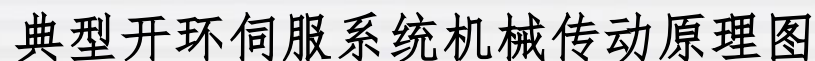
子情境2 执行元件的控制与驱动

任务7 开环控制的伺服系统设计

开环控制的伺服系统设计流程



控制系统方案的选择

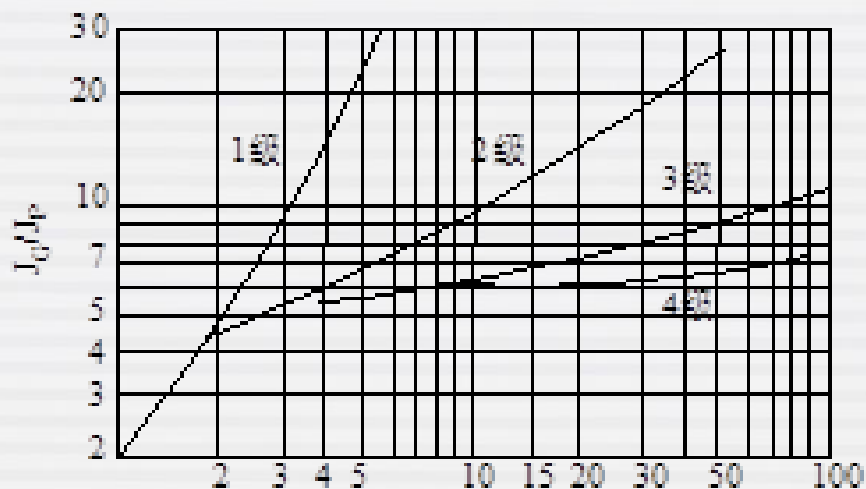


系统方案确定之后，应进行机械系统的设计计算，其内容包括执行元件参数及规格的确定、系统结构的具体设计、系统惯量、刚度等参数的计算等。

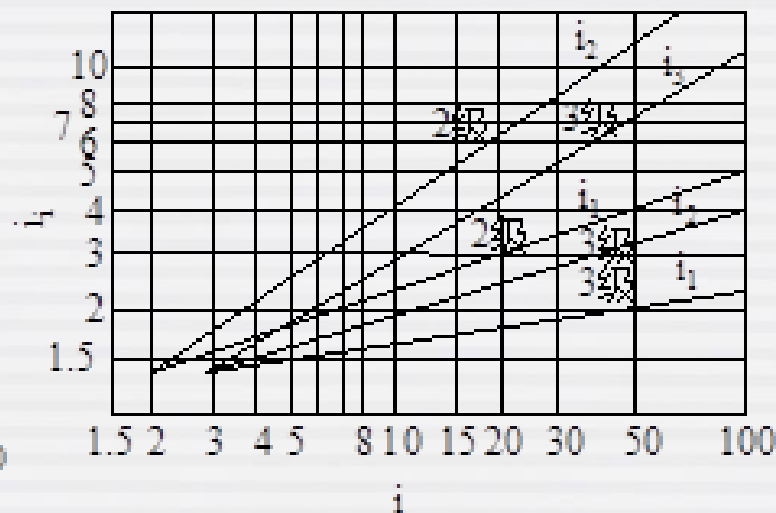
任务7 开环控制的伺服系统设计

- 1) 确定脉冲当量，初选步进电动机
- 2) 计算减速器的传动比

$$i = \frac{\alpha p}{360 \delta_p}$$



传动级数选择曲线



传动比分配曲线

任务7 开环控制的伺服系统设计

3) 计算个各传动件转动惯量

4) 计算系统转动惯量

$$J_d = J_{z1} + (J_{z2} + J_s) \frac{1}{i^2} + \left(\frac{p}{2\pi i} \right)^2 m$$

5) 确定步进电动机动力参数

$$T = (J_m + J_d)\epsilon + \frac{p(F_\mu + F_w)}{2\pi\eta i} + \frac{pF_0(1 - \eta_0^2)}{2\pi\eta i}$$

$$T_J = (J_m + J_d)\epsilon$$

$$T_\mu = \frac{pF_\mu}{2\pi\eta i}$$

$$T_w = \frac{pF_w}{2\pi\eta i}$$

$$T_0 = \frac{pF_0(1 - \eta_0^2)}{2\pi\eta i}$$

任务7 开环控制的伺服系统设计

电动机最大静转矩确定：

$$T_q = T_J + T_\mu + T_0 = (J_m + J_d)\epsilon + \frac{pF_\mu}{2\pi\eta i} + \frac{pF_0(1-\eta_0^2)}{2\pi\eta i}$$

$$T_1 = T_w + T_\mu + T_0 = \frac{pF_w}{2\pi\eta i} + \frac{pF_\mu}{2\pi\eta i} + \frac{pF_0(1-\eta_0^2)}{2\pi\eta i}$$

$$T_{s1} = \frac{T_q}{n_1}$$

$$T_{s2} = \frac{T_1}{n_2}$$

$$T_s \geq \max\{T_{s1}, T_{s2}\}$$

任务7 开环控制的伺服系统设计

6) 验算惯量匹配

小惯量伺服电动机 ($J_m \approx 5 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$): $\frac{J_d}{J_m} \leq 4$ 且 $\frac{T_d}{T_{max}} \leq 0.5$

大惯量伺服电动机 ($J_m \approx 0.1 \sim 0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$): $\frac{1}{4} \leq \frac{J_d}{J_m} \leq 1$

式中: T_{max} —步进电动机的最大静转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

T_d —折算到电动机轴上的负载转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

任务7 开环控制的伺服系统设计

7) 计算传动系统刚度

刚度最薄弱的环节是丝杠螺母机构，所以传动系统的刚度主要取决于丝杠螺母机构的刚度。

丝杠螺母机构的刚度主要由三部分构成（各占1/3）：

丝杠本身的拉压刚度 K_L 、丝杠螺母间的接触刚度 K_N 、轴承和轴承座组成的支承刚度 K_B 。

丝杠扭转刚度计算：

$$K_T = \frac{\pi d^4 G}{32l}$$

3.机械系统动态特性分析

任务7 开环控制的伺服系统设计

4. 系统误差分析

1) 死区误差

又叫失动量，是指启动或反向时，系统的输入运动与输出运动之间的差值。产生死区误差的主要原因有传动机构中的间隙，导轨运动副间的摩擦力以及电气系统和执行元件的启动死区(又称不灵敏区)。

由传动间隙所引起的工作台等效死区误差 $\delta_c(\text{mm})$ 可按下式计算。

$$\delta_c = \frac{p}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{i_i}$$

式中， p 是丝杠导程(mm)； δ_i 是第 i 个传动副的间隙量(rad)； i_i 是第 i 个传动副至丝杠的传动比。

$$\delta_\mu = \frac{F_\mu}{K_0} \times 10^3$$

$$\Delta = 2\delta_\mu = \frac{2F_\mu}{K_0} \times 10^3 = \frac{2mg\mu_0}{K_0} \times 10^3 = \frac{2g\mu_0}{\omega_n^2} \times 10^3$$

任务7 开环控制的伺服系统设计

2) 由系统刚度变化引起的定位误差

$$\delta_{K\max} = F_{\mu} \left(\frac{1}{K_{0\min}} - \frac{1}{K_{0\max}} \right) \times 10^3$$

任务7 开环控制的伺服系统设计

任务介绍 某开环控制的数控车床纵向进给传动链如图 5.2.48 所示。已知工作台质量为 80 kg, 工作时在垂直方向和纵向走刀方向所受的最大切削力分别为 $F_z = 1520 \text{ N}$ 和 F_x

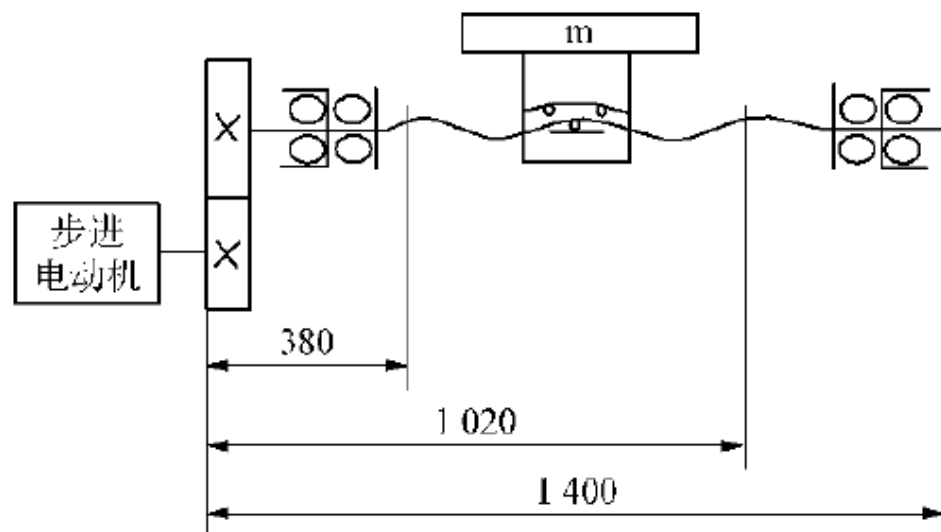


图 5.2.48 纵向进给传动链简图

$= 760 \text{ N}$, 快速空载启动的时间常数为 30 ms, 导轨摩擦系数为 0.15; 滚动丝杠导程 $p = 6 \text{ mm}$, 直径 $d = 32 \text{ mm}$, 总长度 $L = 1400 \text{ mm}$; 步进电动机步距角 $\alpha = 0.75^\circ$, 最大静转矩为 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转子转动惯量 $J_m = 1.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。要求系统脉冲当量为 0.01 mm , 工作台最大快进速度为 2 m/min , 定位精度 $\pm 0.015 \text{ mm}$ 。试对该伺服进给系统进行惯量匹配验算和负载能力校验。

任务7 开环控制的伺服系统设计

任务分析

步进电动机选用与校核及相关资讯

步进电动机选用与校核	资讯
选用反应式步进电动机 传动系统	步进电动机 直齿轮传动系统设计

任务7 开环控制的伺服系统设计

设计计算步骤

计算项目	设计计算与说明	计算结果
1. 传动比计算	$i = \frac{\alpha p}{360 \delta_p} = \frac{0.75 \times 6}{360 \times 0.01} = 1.25$	$i = 1.25$
2. 齿轮参数计算	$Z_1 = 20, Z_2 = 25$, 模数 $m = 2 \text{ mm}$, 齿宽 $b = 20 \text{ mm}$	$Z_1 = 20$ $Z_2 = 25$
3. 转动惯量计算		

任务7 开环控制的伺服系统设计

3. 转动惯量 计算

1) 各元件转动惯量

齿轮转动惯量

$$J_{z1} = \frac{\pi \rho d_1^4 b}{32} = \frac{\pi \times 7.8 \times 10^3 \times (2 \times 20 \times 10^{-3})^4 \times 0.02}{32}$$
$$= 3.92 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{z2} = \frac{\pi \rho d_2^4 b}{32} = \frac{\pi \times 7.8 \times 10^3 \times (2 \times 25 \times 10^{-3})^4 \times 0.02}{32}$$
$$= 9.57 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

丝杆转动惯量

$$J_s = \frac{\pi \rho d^4 l}{32} = \frac{\pi \times 7.8 \times 10^3 \times (32 \times 10^{-3})^4 \times 1.4}{32}$$
$$= 1.12 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

任务7 开环控制的伺服系统设计

2) 总当量转动惯量	$J_d = J_{z1} + \frac{1}{i^2} (J_{z2} + J_s) + \left(\frac{p}{2\pi i} \right)^2 m = 3.92 \times 10^{-5} + \frac{1}{1.25^2} (9.57 \times 10^{-5} + 1.12 \times 10^{-3}) + \left(\frac{0.006}{2\pi \times 1.25} \right)^2 \times 80$ $= 8.6 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	
4. 惯量匹配验算	$\frac{J_d}{J_m} = \frac{8.6 \times 10^{-4}}{1.8 \times 10^{-3}} = 0.48 \in [0.25, 1]$	惯量匹配符合要求

任务7 开环控制的伺服系统设计

5. 步进电动机选型

1) 总惯量计算

$$\begin{aligned} J &= J_m + J_d = 1.8 \times 10^{-3} + 8.6 \times 10^{-4} \\ &= 2.66 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J &= \\ &2.66 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

任务7 开环控制的伺服系统设计

惯性转矩

$$T_J = J\epsilon = J \frac{2\pi i}{p} \cdot \frac{V_{\max}}{\Delta t} = 2.66 \times 10^{-3} \times \frac{2\pi \times 1.25}{0.006} \times \frac{2}{30 \times 10^{-3} \times 60} = 3.86 \text{ N} \cdot \text{m}$$

摩擦转矩

$$T_\mu = \frac{p}{2\pi\eta i} F_\mu = \frac{p}{2\pi\eta i} mg\mu = \frac{0.006}{2\pi \times 0.8 \times 1.25} \times 800 \times 0.15 \approx 0.11 \text{ N} \cdot \text{m}$$

附加转矩(预紧力引起)

$$T_0 = \frac{p}{2\pi\eta i} F_0 (1 - \eta_0^2)$$

$$\text{其中 } F_0 = \frac{F_{W\max}}{3}$$

$$F_{W\max} = 1.15F_x + 0.15(F_z + mg) = 1.15 \times 760 + 0.15(1520 + 80 \times 9.8) = 1222 \text{ N}$$

$$\therefore T_0 = \frac{0.006}{2\pi \times 0.8 \times 1.25} \times \frac{1222}{3} \times (1 - 0.9^2) \approx 0.07 \text{ N} \cdot \text{m}$$

切削转矩

$$T_w = \frac{p}{2\pi\eta i} F_{W\max} = \frac{0.006}{2\pi \times 0.8 \times 1.25} \times 1222 \approx 1.16 \text{ N} \cdot \text{m}$$

2) 转矩计算

$$T_J = 3.86 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_\mu = 0.11 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_0 = 0.07 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_w = 1.16 \text{ N} \cdot \text{m}$$

任务7 开环控制的伺服系统设计

3) 负载能力 校验

空载启动时电动机轴上的总负载转矩为：

$$T_q = T_J + T_\mu + T_0 = 3.86 + 0.11 + 0.074 = 4.04 \text{ N} \cdot \text{m}$$

最大外载荷下工作时，电动机轴上的总负载转矩为：

$$T_1 = T_w + T_\mu + T_0 = 1.16 + 0.11 + 0.074 = 1.34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

设电动机为五相步进电动机，取系数为 0.809

$$T_{s1} = \frac{T_q}{0.809} \approx 5.0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{s2} = \frac{T_1}{0.3 \sim 0.5} = \frac{1.34}{0.3 \sim 0.5} = 4.47 \sim 2.68 \text{ N} \cdot \text{m}$$

由于 $T_s = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，显然 $T_s \geq \max\{T_{s1}, T_{s2}\}$

所以步进电动机可以不失步正常启动

步进电动机可以
不失步正常启动



任务7 开环控制的伺服系统设计

刚度校核、固有频率校核、精度（误差）校核



子情境2 执行元件的控制与驱动

任务7 开环控制的伺服系统设计小结

内容

1. 系统方案设计
2. 机械系统的设计计算
3. 机械系统的动态特性分析
4. 系统误差分析

重点

1. 系统方案设计
2. 机械系统的设计计算
3. 系统误差分析