



# 第4章 伺服驱动系统设计

主讲教师：张立勋 教授

## 第4章 伺服驱动系统设计

### 4.1 伺服驱动系统概述

### 4.2 伺服系统中的驱动元件

### 4.3 常用动力驱动元件选择方法

### 4.4 伺服系统方案设计方法

## 4.1 伺服驱动系统概述

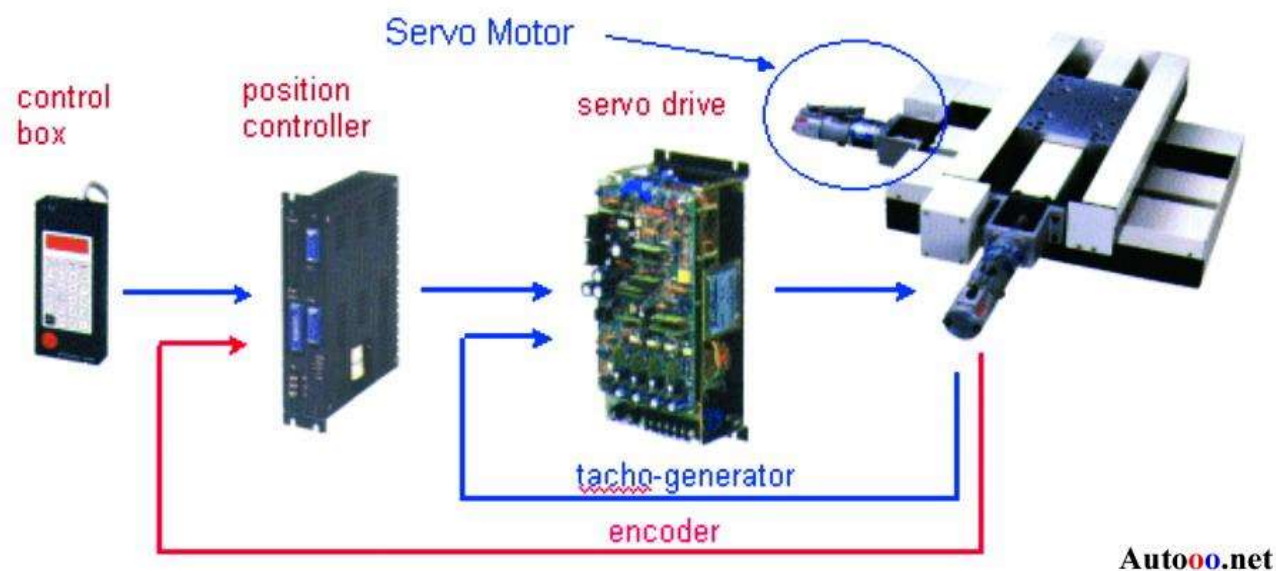
### 4.1.1 伺服驱动系统的基本概念

### 4.1.2 伺服驱动系统设计方法及步骤

## 4.1.1 伺服驱动系统的基本概念

### 基本概念

伺服系统也称之为随动系统，是以位移、速度或力、力矩等作为被控量的自动控制系统。



## 4.1.1 伺服驱动系统的基本概念

- **基本类型**

按被控制量性质不同

位置、速度、加速度、力和力矩等伺服系统形式

按驱动方式不同

电磁、液压和气压等伺服驱动形式

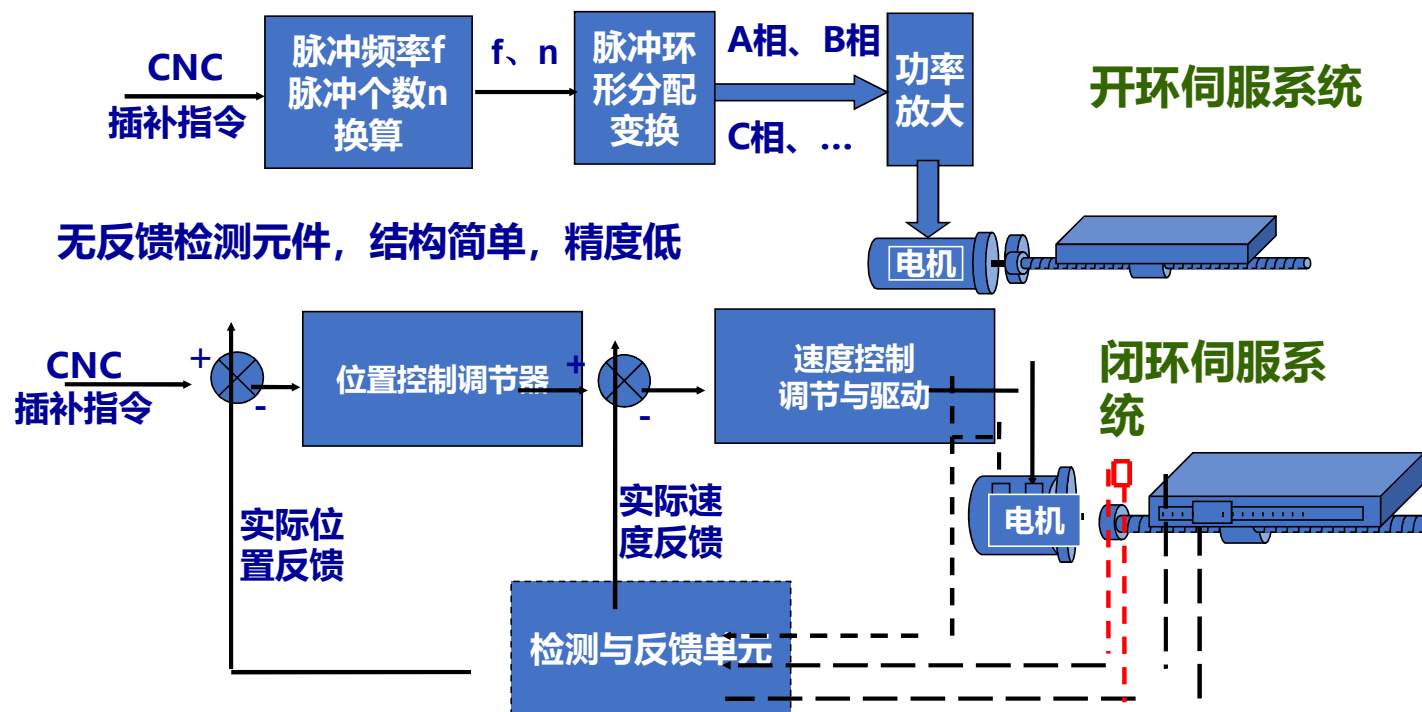
按信号特点不同

模拟式伺服系统和数字式伺服系统

按控制原理（或方式）不同

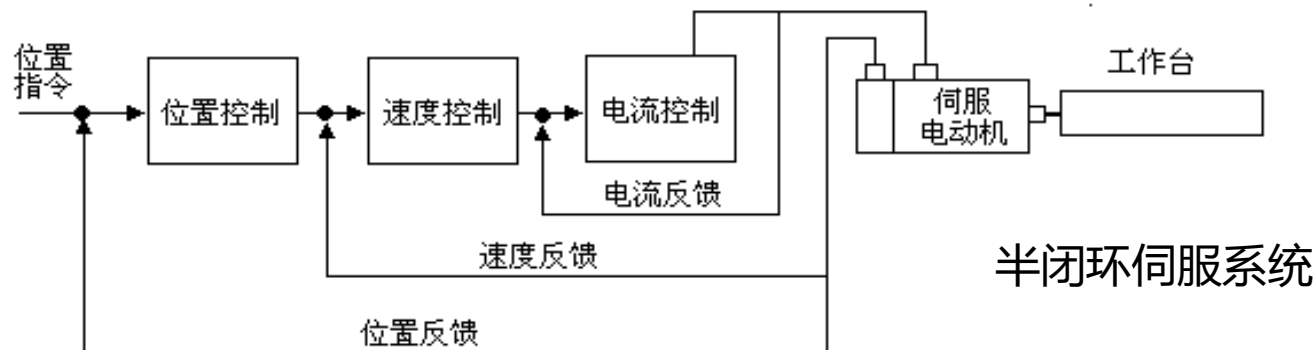
开环、闭环和半闭环三种形式

# 开环和闭环比较

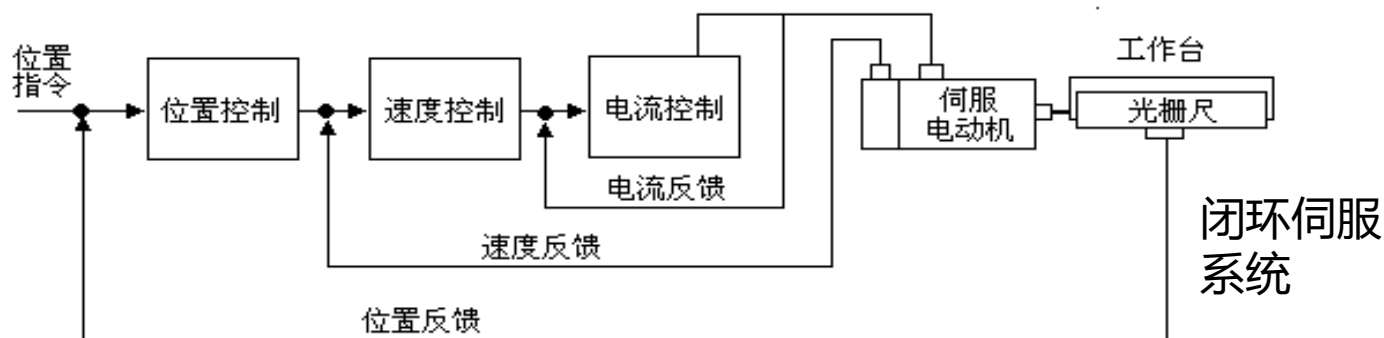


直接对输出量进行检测和反馈，并根据输出量对输入量的实际偏差进行控制，精度高，但结构复杂，成本高

## 半闭环与闭环的比较



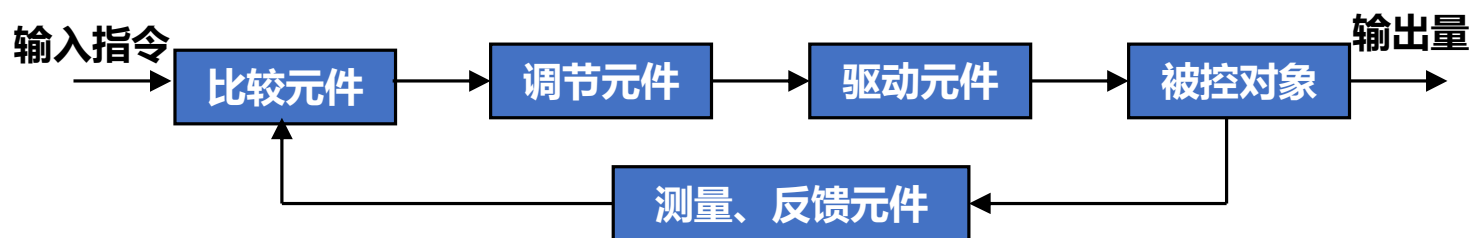
控制系统的稳定性高，不能消除伺服电动机与丝杠的连接误差及传动间隙对加工的影响



相对稳定性不高，易出现系统振荡现象，伺服调整比较困难。需发展伺服软件技术

## 4.1.1 伺服驱动系统的基本概念

- 伺服系统组成



- 比较元件

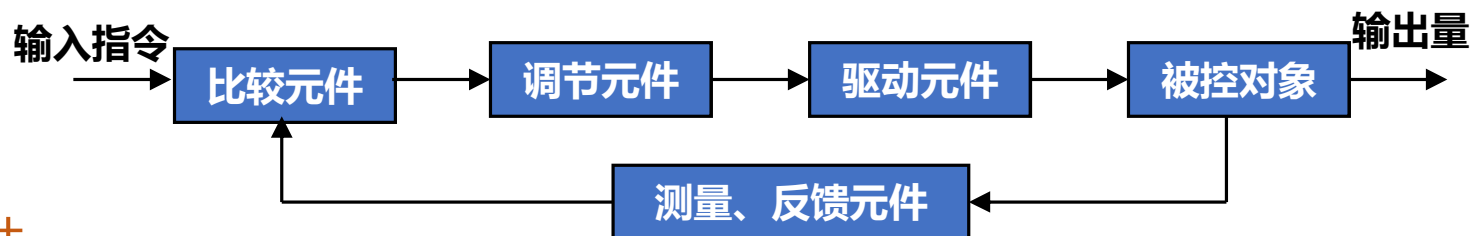
将输入的指令信号与系统的反馈信号进行比较，以获得控制系统动作的偏差信号的环节，通常可通过电子电路或计算机软件实现。

- 调节元件——控制器

对比较元件输出的偏差信号进行变换、放大，以控制执行元件按要求动作。一般由软件算法加硬件电路实现，或单独由硬件电路实现。



# 伺服系统组成



## ➤ 驱动元件

在控制信号的作用下，将输入的各种形式的能量转换成机械能，驱动被控对象工作。机电一体化系统多采用伺服电机作为驱动元件。

## ➤ 被控对象

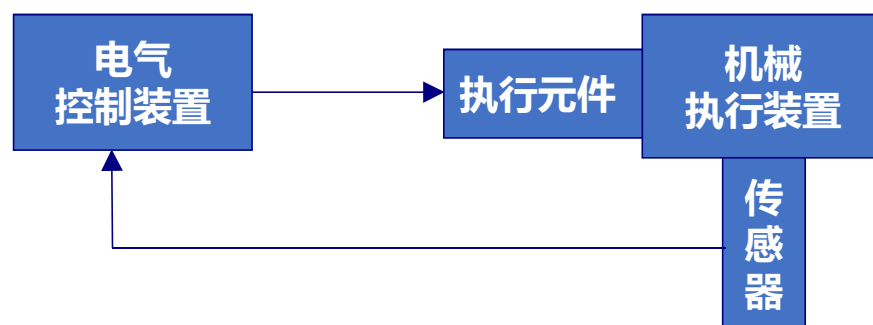
伺服系统中被控制的设备或装置，是直接实现目的的功能或动作的主体，其行为质量反映整个伺服系统的性能。被控对象一般是机械结构和装置，包括传动机构和执行机构。

## ➤ 测量反馈元件

指传感器及其信号检测装置，用于实时检测被控对象的输出量并将其反馈到比较元件。

# 伺服系统组成

## 伺服系统组成的其他表示



由两部分组成:

- 电气控制装置部分
- 机械执行装置部分

- 在控制信号传递路线上, 以执行元件作为接口
- 在反馈信号传递路线上, 以传感器作为接口

## 4.1.2 伺服驱动系统设计方法及步骤

### • 伺服驱动系统的基本要求

#### 稳定性

稳定性是指作用在系统上的扰动消失后，系统能够恢复到原来的稳定状态下运行或者在输入指令信号作用下，系统能够达到新的稳定运行状态的能力。

伺服系统的稳定性取决于系统结构及组成元件的参数，如惯量、刚度、阻尼、增益等，与外界作用信号的性质或形式无关，如指令信号和扰动信号。

可根据系统的传递函数，基于自动控制理论所提供的各种方法来判别。

“爬行”现象是伺服系统不稳定的一种表现。

# 伺服驱动系统的基本要求

## 精度

精度是指其输出量复现输入指令信号的精确程度，是伺服系统的一项重要性能要求。

### ➤ 伺服系统中存在三种误差：

- 动态误差：动态响应过程中的输出与输入的偏差
- 稳态误差：动态响应过程结束后输出与输入的偏差
- 静态误差：系统组成元件本身误差及干扰引起的偏差

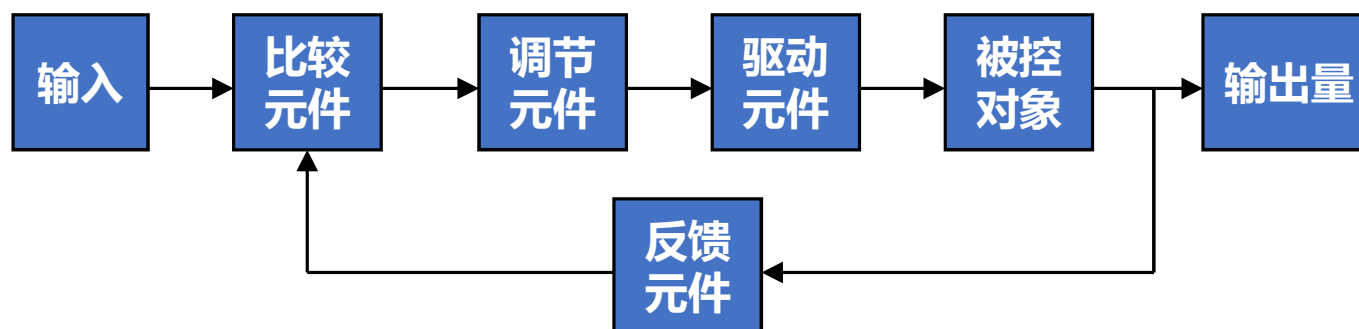
### ➤ 影响伺服系统精度的因素：

- 伺服放大器：零点漂移，死区误差等
- 机械装置：传动误差，回程误差等
- 传感器：灵敏度，精度等
- 输入指令：信号的形式，模拟量、数字量

# 精度

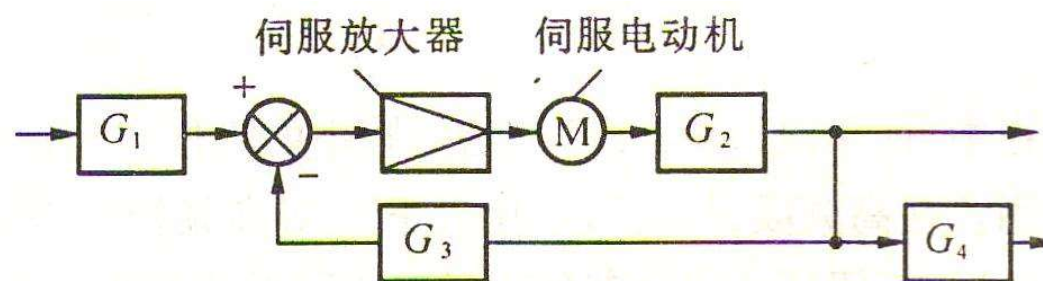
## ➤ 伺服系统中误差产生的位置

- (1) 闭环之前输入环节
- (2) 闭环的前向环节
- (3) 闭环的反馈环节
- (4) 闭环之后输出环节



## 伺服系统中误差产生的位置

- 伺服系统框图



### 一般传动误差可视为两部分

- 伺服带宽以内的低频分量（如回程误差）
- 伺服带宽以外的高频分量（如传动误差）

机电一体化系统通常具有低通特性。

# 伺服系统中误差产生的位置

## (1) 前向通道上环节的误差对输出精度的影响

对无扰动输入  $R(s)$

开环传递函数  $G(s) = G_c(s)G_M(s)G_2'(s)$

闭环传递函数  $\phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)}$

对扰动输入  $R_N(s)$  的闭环传递函数

$$\phi_N(s) = \frac{C_N(s)}{R_N(s)} = \frac{1}{1 + G(s)} = \frac{\phi(s)}{G(s)}$$

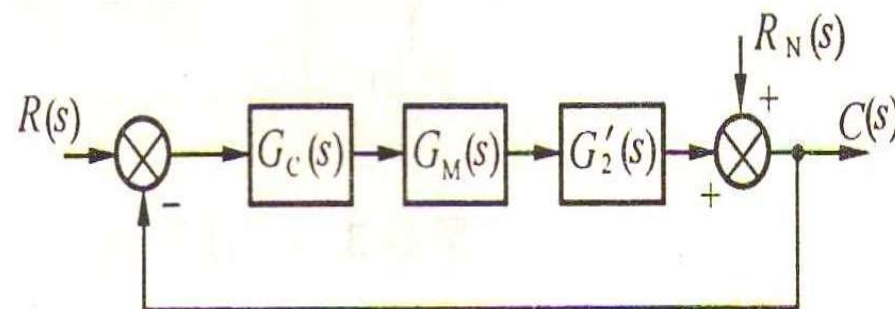


图 4-2  $G_2(s)$  环节有误差时系统的等效方框图

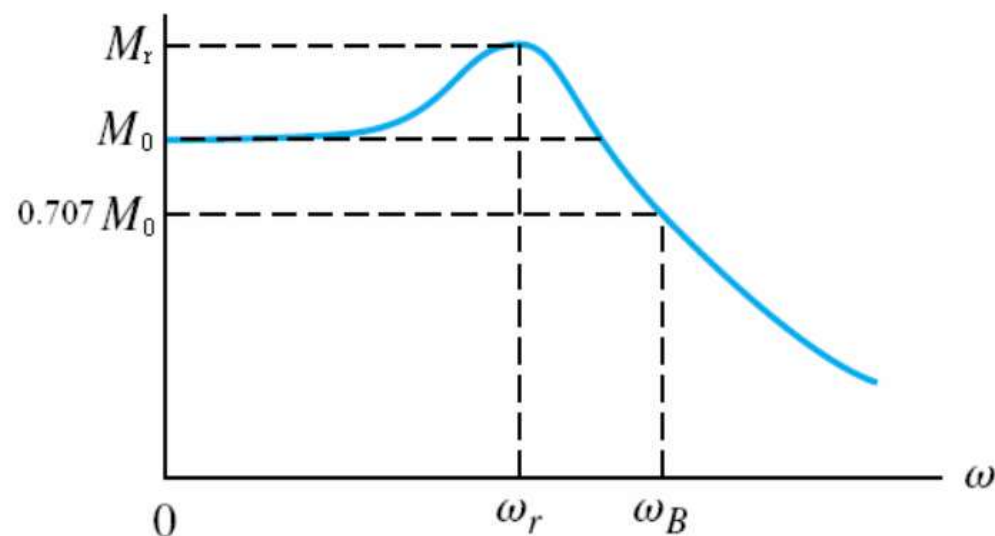
## 一个稳定且具有良好特性的系统应满足

在中低频段  $|\varphi(s)|=1, |G(s)| \gg 1$

则有  $|\varphi_N(s)| = \left| \frac{\varphi(s)}{G(s)} \right| \ll 1, |C_N(s)| \ll R_N(s)$

在高频段  $|\varphi(s)| \ll 1, |G(s)| \ll 1$

则有  $|\varphi_N(s)| = \left| \frac{\varphi(s)}{G(s)} \right| \approx 1, |C_N(s)| \approx R_N(s)$





## 伺服系统中误差产生的位置

**中低频误差信号（即误差低频分量）对系统的输出精度几乎没有影响。**这是因为，闭环控制系统可以校正低频扰动。传动链的低频误差主要来源于传动间隙（回程误差）。

**中高频误差信号（即误差高频分量）几乎被一比一的馈送系统的输出，对输出精度影响很大。**传动链的高频误差主要来源于传动元件的**形位误差**和各种原因引起的**变形**，如齿轮的齿形误差等。高频误差主要体现为系统的**振动和噪声**，加剧系统的磨损和稳定性。只能通过提高加工精度和安装精度来克服。

## 伺服系统中误差产生的位置

### (2) 闭环之前环节的误差对系统输出精度的影响

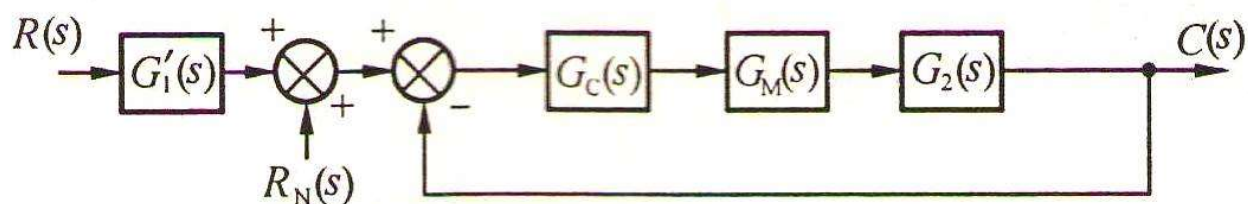


图 4-3  $G_1(s)$  环节有误差时的等效方框图

闭环之前环节的误差相当于系统的另外一个输入信号，  
它和系统的输入信号是并联关系。

中低频  $|\varphi(s)| = 1$  影响输出精度

高频段  $|\varphi(s)| \ll 1$  不影响输出精度

## 伺服系统中误差产生的位置

### (3) 反馈环节误差对系统输出精度的影响

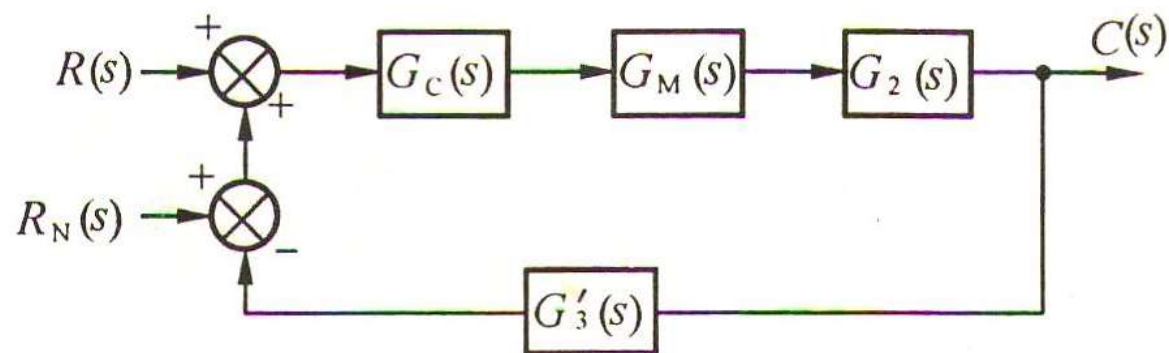


图 4-4  $G_3(s)$  环节有误差时的等效方框图

反馈通道上的误差低频分量相当于系统输入的一部分，直接影响系统的输出精度，误差的高频分量对系统输出精度几乎没有影响。这说明可以允许传感器及其接口电路环节具有一定的高频噪声。

## 伺服系统中误差产生的位置

### (4) 闭环之后输出通道上环节的误差对系统的影响

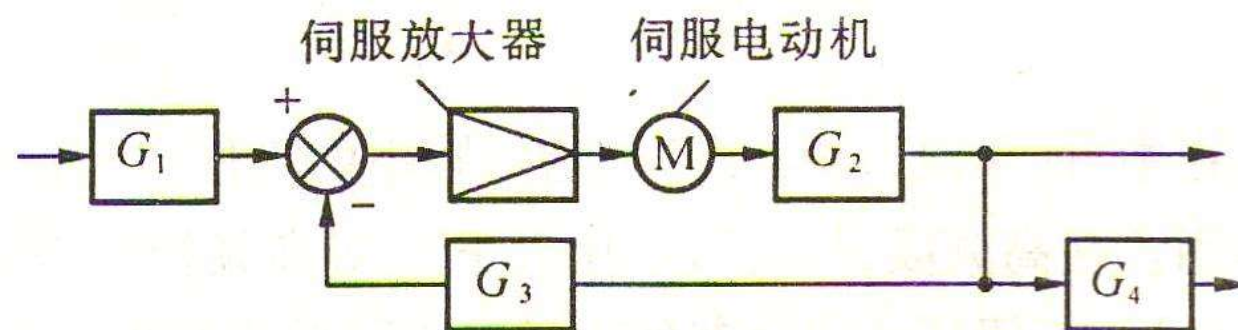


图 4-1 伺服驱动系统

闭环之后传动环节的误差，无论是低频分量还是高频分量，都会影响系统的输出精度。因此只有提高这部分的传动精度才能保证输出精度。

# 精度

## 误差对精度及稳定性的影响

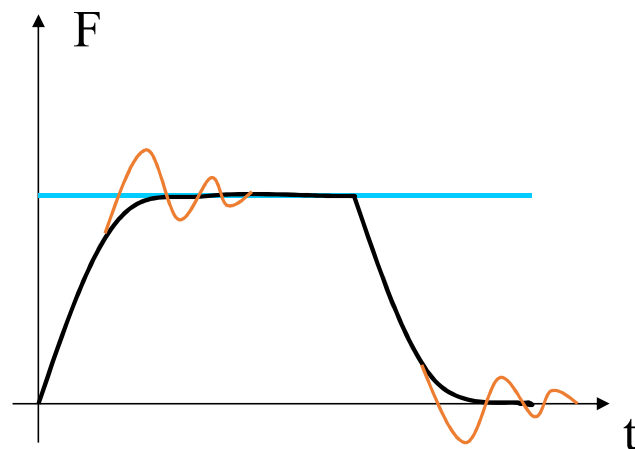
- ✓ 各环节误差因其在系统中的**位置不同**，对系统输出精度的**影响不同**
- ✓ 同一环节误差的**高频分量和低频分量**，对输出精度的**影响不同**
- ✓ **输入环节**误差低频分量相当于输入信号的一部分，影响输出精度，高频分量不影响精度
- ✓ **闭环之前的前向环节**误差的低频分量会得到反馈系统补偿，对输出精度无影响，高频分量影响精度
- ✓ **闭环之前的反馈环节**上的误差相当于系统的一部分输入信号，与输入环节误差影响相同
- 反馈环节误差会影响系统的极点分布，**影响系统稳定性**
- ✓ **前向环节**误差的低频分量会影响系统零点和极点的分布，影响稳定性

# 伺服驱动系统的基本要求

## ➤快速响应性

快速响应性是衡量伺服系统动态性能的另一项重要指标。快速响应性有两方面含义：

- ✓ 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
- ✓ 动态响应过程结束的迅速程度
- ✓ 三个主要衡量指标
  - 上升时间 $t_r$
  - 峰值时间 $t_p$
  - 过渡过程时间 $t_s$



# 伺服驱动系统的基本要求

- 三项基本要求的相关性

- 首先要满足稳定性要求

- 满足精度要求

- 提高系统的快速响应性

- ✓ 提高稳定性：需要大的相角裕度-- $W_c$ 减小，快速性降低

- ✓ 提高稳态精度：提高系统类型，或者提高直流增益-- $W_c$ 增加--相角裕度减小--稳定性下降

- ✓ 提高快速性： $W_c$ 增大--相位裕度减小--稳定性变差

对于位置伺服系统的其它要求：控制精度、调速范围、负载能力、可靠性、体积、质量、成本

## 4.1.2 伺服驱动系统设计与步骤

### • 伺服系统设计的一般步骤

#### (1) 设计要求分析

- 明确应用场合和目的、基本性能指标及其它性能指标
- 根据现有技术条件拟定几种技术方案，经过评价、对比，选定一种比较合理

### 方案设计

**方案设计包括：**控制方式选择、执行元件选择、传感器及其检测装置选择、机械传动及执行机构选择等，方案设计只是系统设计的第一步。



# 伺服系统设计的一般步骤

## (2) 系统性能分析

根据基本结构形式对其基本性能进行初步分析。

- 画出系统方框图，列出系统近似传递函数，并对传递函数及方框图进行简化  
(一般为二阶以下系统)
- 对系统的稳定性、精度及快速响应性进行初步分析，最主要的是稳定性，如果不能满足设计要求，应考虑修改方案或增加校正环节

## (3) 执行元件及传感器的选择

根据具体速度、负载及精度要求来具体确定执行元件及传感器的参数和型号。

# 伺服系统设计的一般步骤

## (4) 机械系统设计

传动机构、执行机构，注意传动间隙，考虑系统刚度、惯量及摩擦。

## (5) 控制系统设计

信号处理电路、校正装置、伺服电机、驱动电路、计算机接口电路、控制算法

## (6) 系统性能复查

## (7) 确定设计方案



## 4.2 伺服系统中驱动元件

## 4.2 伺服系统中的驱动元件

### 4.2.1 驱动元件的分类及特点

### 4.2.2 步进电动机

### 4.2.3 直流电动机

### 4.2.4 交流电动机

### 4.2.5 液压与电气伺服元件

## 4.2.1 驱动元件的分类及特点

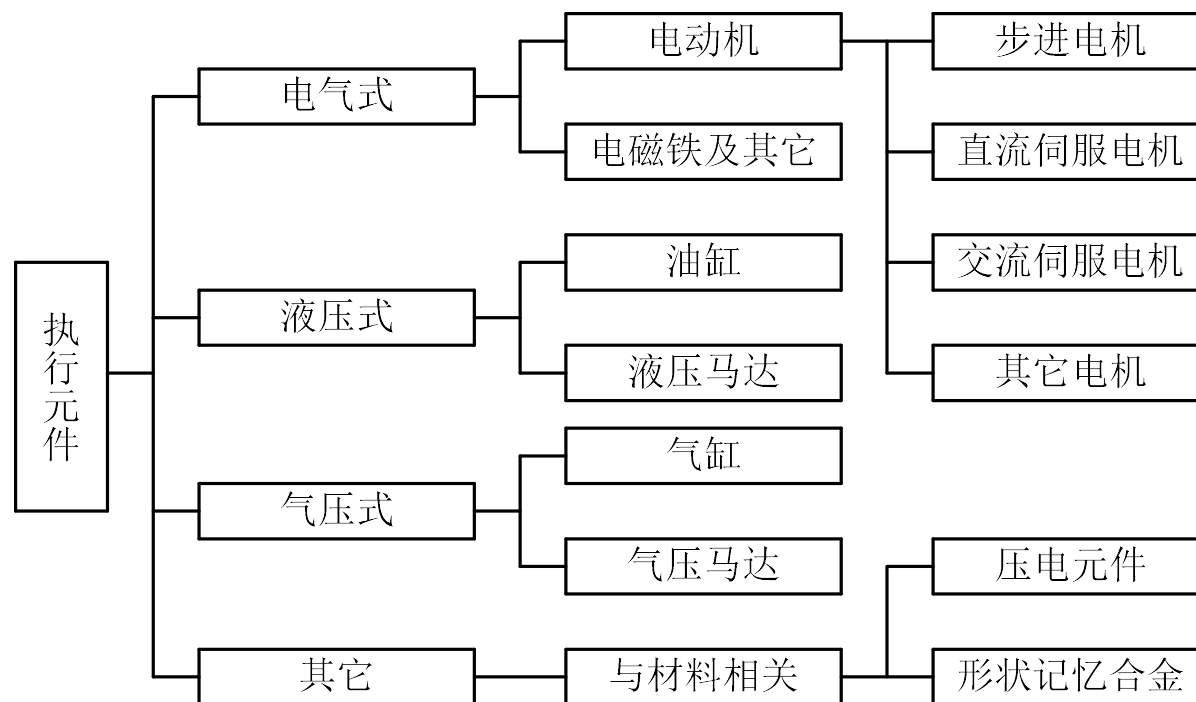
- 伺服驱动系统对驱动元件的基本要求

- (1) 动力大、惯性小
- (2) 体积小、质量轻
- (3) 便于计算机控制
- (4) 成本低、可靠性好、便于安装和维修

驱动元件最好不需要维修，无刷直流伺服电机和交流伺服电机不需维修，有刷直流电机需解决电刷磨损问题。

## 4.2.1 驱动元件的分类及特点

### • 伺服驱动系统中驱动元件的分类及特点



# 驱动元件的分类及特点

- 电气伺服驱动系统

采用伺服电机作为驱动元件，产生电磁力，用电磁力驱动执行机构运动

- 液压式驱动元件

产生液压力，并用液压阀控制压力油的流向，流速或者压力，从而驱动执行机构的运动

- 气压式驱动元件

与液压式驱动元件的原理相同，只是将介质由液压油改为气体

- 一些驱动元件利用材料的物理性能实现对执行机构的控制，如使用双金属片、形状记忆合金和压电元件等

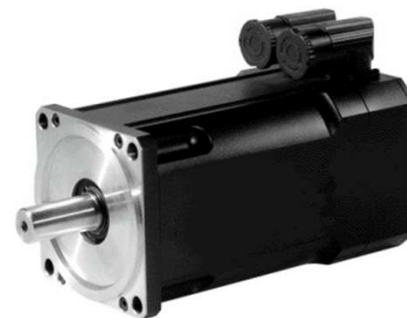
# 驱动元件的分类及特点

## □电气驱动元件

电气执行元件包括直流(DC)伺服电机、交流 (AC) 伺服电机、步进电机以及电磁铁等最常用的驱动元件。

伺服电机又称执行电机，在自动控制系统中，用作执行元件，把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。对伺服电机除了要求运转平稳以外，一般还要求动态性能好，适合于频繁使用，便于维修等。

种类多，应用广泛。





# 驱动元件的分类及特点

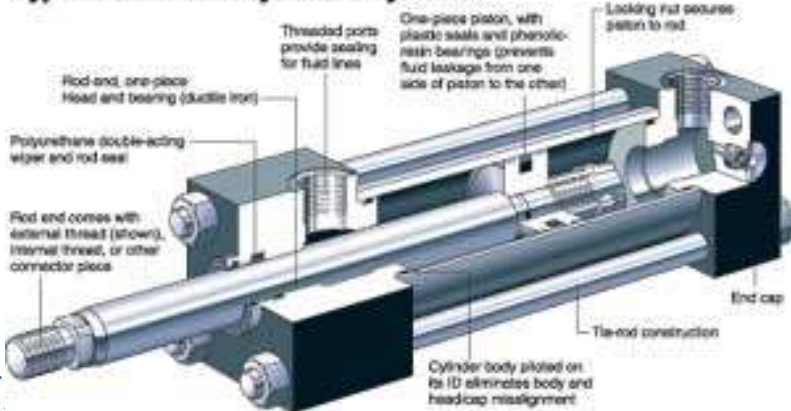
## □ 液压式驱动元件

液压式执行元件主要包括往复运动油缸、回转油缸、液压马达等，其中液压缸最为常见，要与液压控制阀一起实现驱动控制。目前的各种数字式液压驱动元件：电液伺服马达、电液步进马达。

### 液压式驱动元件的特点

- 在同等输出功率的情况下，液压元件具有重量轻、快速性好、动作平稳等特点；
- 需要相应的液压源，占地面积大，容易漏油而污染环境。

Typical industrial hydraulic cylinder



Source: Control Engineering with data from Bosch Rexroth Hydraulics Industrial



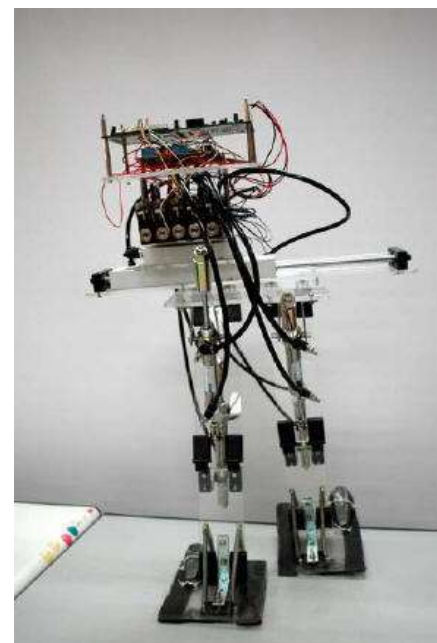
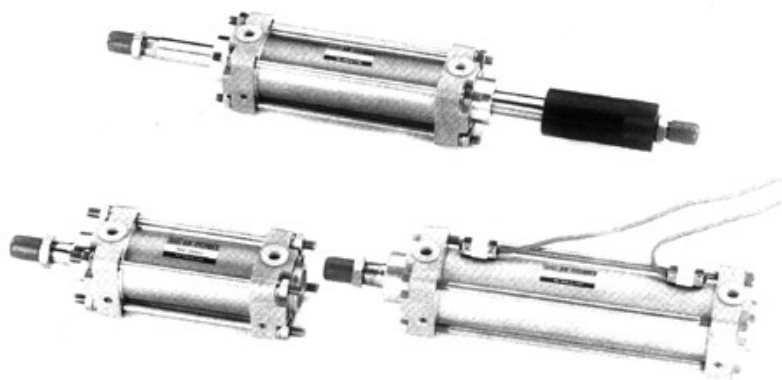
# 驱动元件的分类及特点

## □气压式驱动元件

气压式执行元件除了用压缩空气作工作介质外，与液压式执行元件没有区别。气压驱动虽可得到较大的驱动力、行程和速度，但由于空气粘性差，具有可压缩性，故不能在定位精度要求较高的场合使用。

### 气压式驱动元件的特点

- 气源方便、成本低、动作快；
- 输出功率小、体积大、工作噪声大，难于伺服控制。



# 驱动元件的分类及特点

## 常用伺服驱动元件的特点

	特点	优点	缺点
电气类	可使用商用电源；信号与动力的传送方向相同；有交流和直流之别，应注意电压之大小	操作简便；编程容易；能实现定位伺服；响应快，易于CPU相接；体积小，动力较大；无污染	瞬时输出功率大；过载差，特别是由于某种原因而卡住时，会引起烧毁事故，易受外部噪声影响
气压类	空气压力源的压力为 $(5\sim7) \times 10^5 \text{ pa}$ ，要求操作人员技术熟练	气源方便，成本低；无泄漏污染；速度快，操作比较简单	功率小，体积大，动作不够平稳；不易小型化；远距离传输困难；工作噪声大，难于伺服
液压类	要求操作人员技术熟练；液压源压力为 $(20\sim80) \times 10^5 \text{ pa}$ ，	输出功率大，速度快，动作平稳，可实现定位伺服；易于CPU相接；响应快	设备难于小型化；液压源或液压油要求（杂质，温度）严格；易泄漏且有水污染

## 4.2.2 步进电动机

- 步进电机的种类与特点
- 步进电机的工作原理
- 步进电机的主要参数及特性
- 步进电机的型号表示方法及技术指标
- 步进电机的驱动与控制

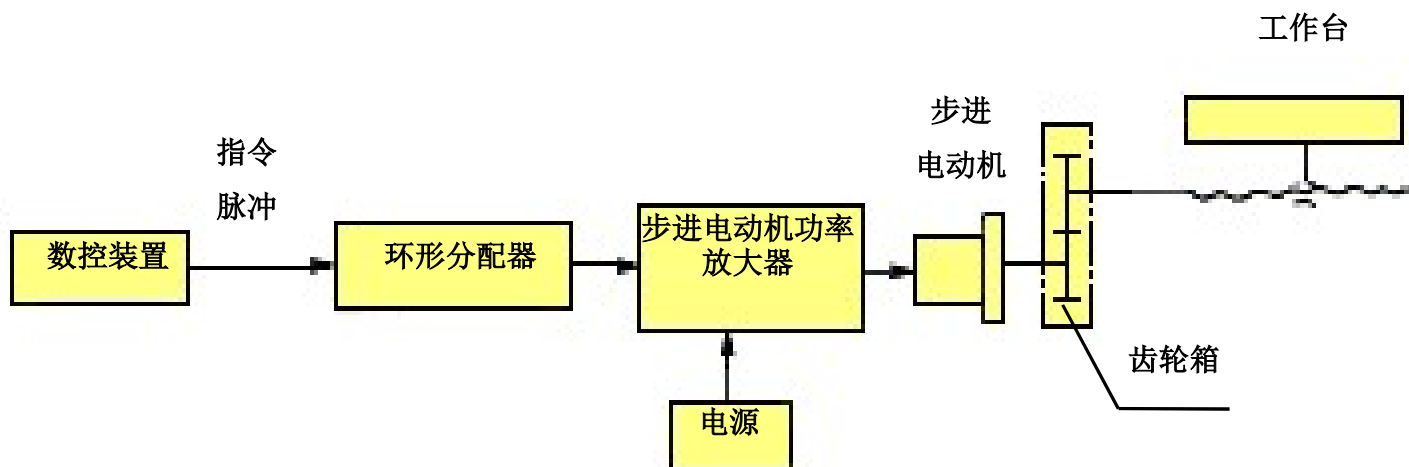
# 步进电机

## 步进电机基本特点

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。

- 在非超载的情况下，电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数，而不受负载变化的影响，即给电机加一个脉冲信号，电机则转过一个步距角。
- 步进电机只有周期性的误差而无累积误差

这些等特点使得在速度、位置等控制领域用步进电机来控制变的非常的简单。



# 步进电机

## □ 步进电机的种类与特点



旋转式步进电机



直线式步进电机

按励磁相数分：两相、三相、四相、五相、六相

# 步进电机主要参数及特性

## 步进电机主要参数及特性

### ➤ 步进电机的静、动态术语

- 定位转矩:

电机在不通电状态下，电机转子自身的锁定力矩（由磁场齿形的谐波以及机械误差造成的）

- 失步:

电机运转时运转的步数，不等于理论上的步数。称之为失步。

# 步进电机主要参数及特性

## 1) 分辨率——步距角

0.75°/1.5°、0.9°/1.8°、1°/2°等

## 2) 矩角特性

最大静转矩的大小与步进电机的通电方式有关，相数越多，静转矩越大

## 3) 启动频率

步进电机能够不失步启动的最高脉冲频率。

空载启动频率、负载启动频率

## 4) 最高工作频率

额定负载下，不失步正常运行的极限频率。

与驱动电源的性能有关。



# 步进电机主要参数及特性

## 5) 转矩 - 工作频率特性

电机在某种测试条件下测得运行中输出力矩与频率关系的曲线称为运行矩频特性，这是电机诸多动态曲线中最重要的，也是电机选择的根本依据。

转动惯量越大，启动转矩越小

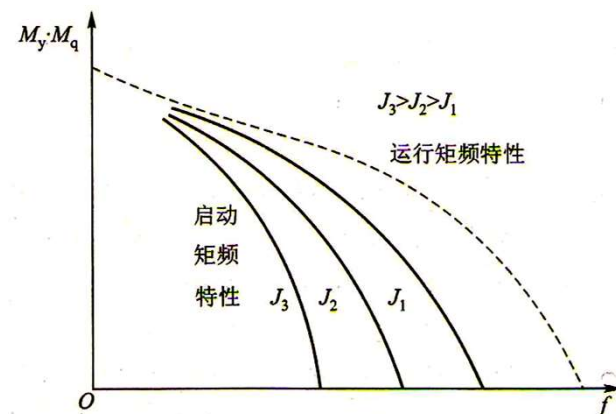


图 4 - 16 步进电机的矩频特性曲线

## 6) 步距角精度

步进电机输入单脉冲时，转过的步距角的实际值与理论值的误差，称为静态步距角误差，反映了电机的制造精度。

## 7) 电机共振点

- 步进电机厂商



韩国AUTONICS



德国Phytron



上海四宏电机



MOTEC步进电机



名称：新加坡MINET



名称：美国PACIFIC

# 步进电机的型号表示方法及技术指标

- 德国Motec步进电机57系列

General Specification通用规格

步距精度	+5%(整步、空载)
温升	80°CMax
环境温度	-10°C -- +50°C
绝缘电阻	100MΩmin.500VDC
耐压	500VAC for one minute
径向跳动	0.06 Max.(450g-load)
轴向跳动	0.08 max.(450g-load)



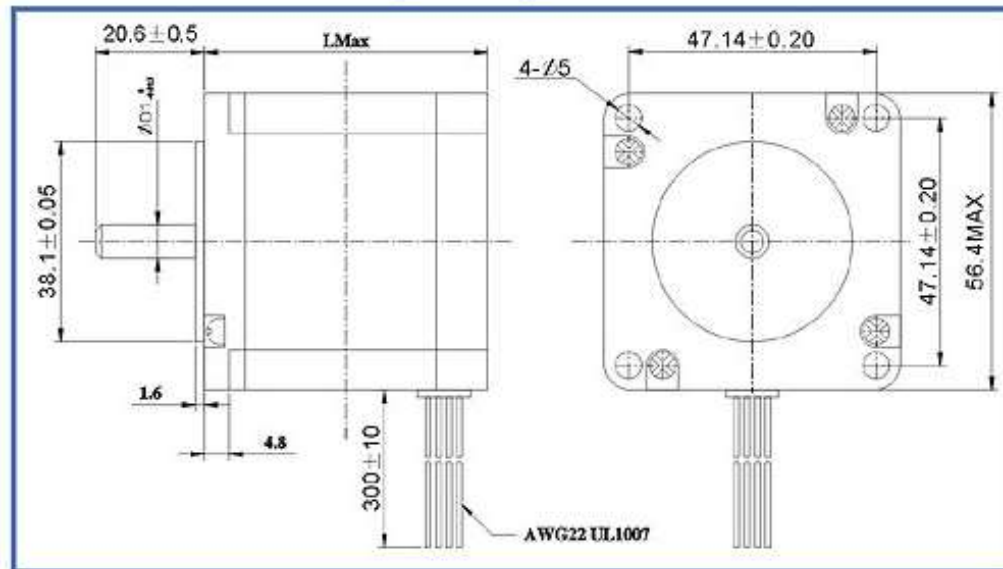
Electrical Specification技术规格

Model No.	相数	步距角	保持转矩	额定电流		相电感	相电阻	引线数量	转子惯量	定位转矩	电机重量	机身长
		(°)	N.M	串联 A	并联 A	mH	Ohm		Kg.cm <sup>2</sup>	g.cm	Kg	mm
HS8123	2	1.8	0.9	3.0		3.75	0.8	4	260	40	0.6	54
57HS21	4	1.8	0.98	2.1	4.2	0.9	0.7	8	260	40	0.6	54
57HS31	4	1.8	1.63	2.1	4.2	1.7	1.1	8	460	70	1.0	76

\* 以上仅为代表性产品

# 德国Motec步进电机57系列

Mechanical Dimensions外形尺寸(unit=mm)



	LMax	D1
57HS21	54	6.35
57HS31	76	8.0

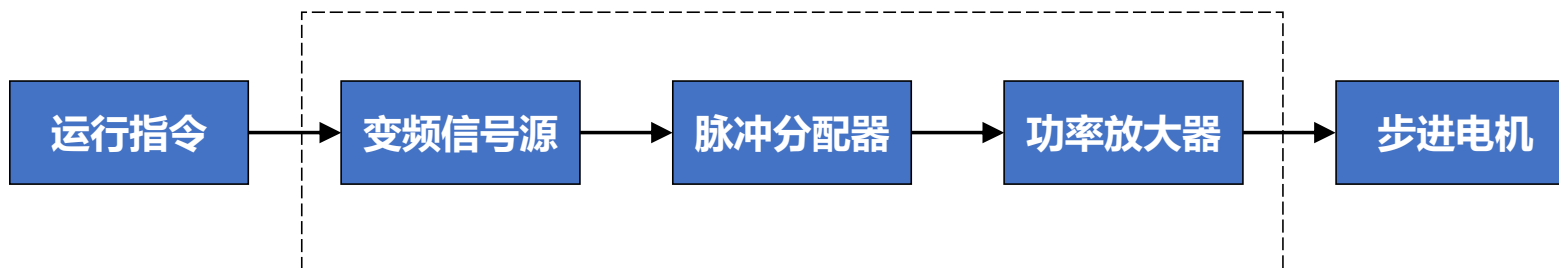
## 4.2.2 步进电动机

### □ 步进电机的驱动与控制

#### 1) 步进电机驱动电源的要求（有机整体）

- 相数、通电状态、电压、电流符合技术参数要求
- 脉冲电流有足够的幅值和较陡的前后沿
- 工作可靠、抗干扰，安装维修方便，便宜

#### 2) 步进电机的驱动电源



# 步进电机的驱动电源

- 变频信号源

脉冲频率从几赫兹到几万赫兹连续变化的脉冲信号发生器，调节R、C改变时间常数。

- 脉冲分配器 - 环形分配器

根据运行指令按一定逻辑关系分配脉冲，实现正、反转控制和定位，输出功率极小，毫安级电流

- 功率放大器 - 驱动电路

给绕组提供足够的驱动电流。

- 步进电机的开、闭环控制

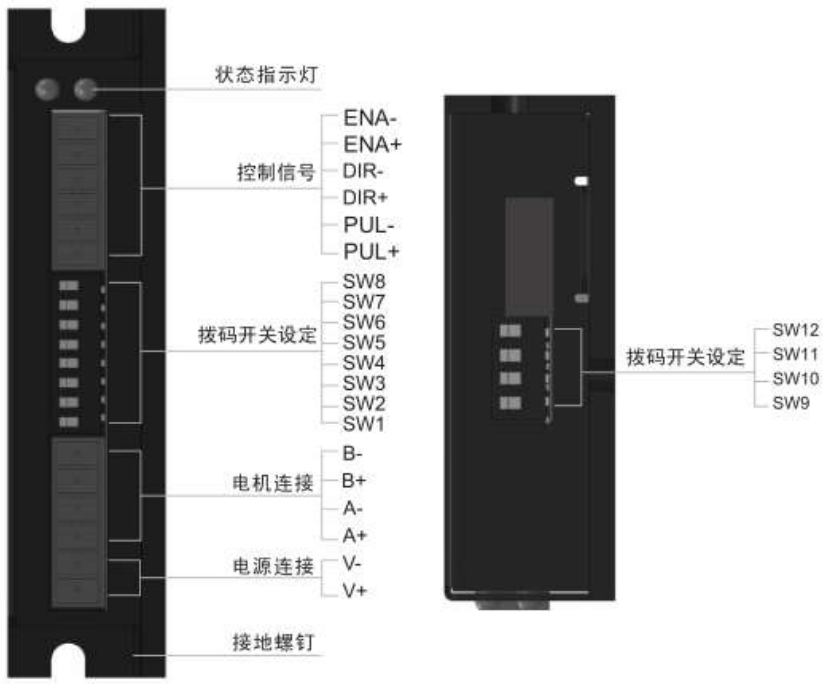
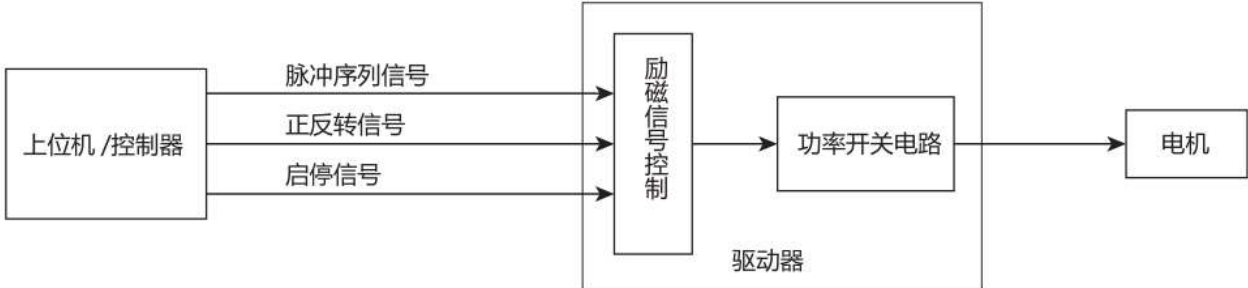
通过直接或间接的检测转子的位置和速度进行闭环控制。

# 4.2.2 步进电动机

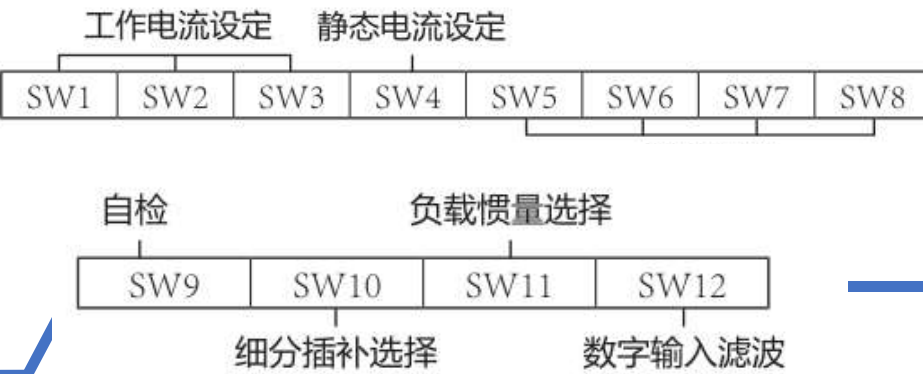
## ■ 步进电机的驱动与控制

### ➤ 驱动器接口信号

#### ➤ 接口和功能介绍



接口	功能	说 明
V-	直流电源地	直流电源地
V+	直流电源正极	介于供电电压最小值~最大值间，宜采用推荐值
A+ , A-	电机 A 相	互换 A+ , A - , 可改变电机运转方向
B+ , B-	电机 B 相	互换 B+ , B - , 可改变电机运转方向

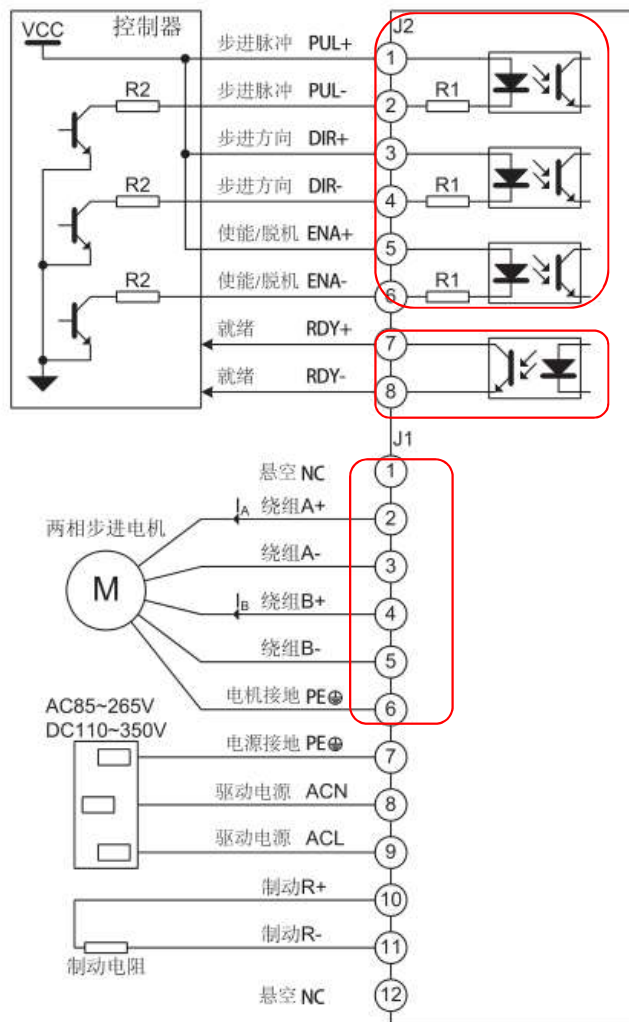




## 4.2.2 步进电动机

### □ 步进电机的驱动与控制

#### ➤ 例：UDB高压电机控制器



控制信号输入：  
光电隔离，电流控制型

控制信号输出：  
光电隔离，集电极开路型

电机接线

电源接线

制动器接线

学 机电工程学院



# 步进电动机的工作原理

## • 步进电机的特点

- 1) 通过改变输入脉冲的数量、频率和顺序可以控制电机的输出转角、转速和方向。
- 2) 实现开环位置控制。
- 3) 具有定位自锁能力，当停止送入脉冲时，只要维持绕组内电流不变，电动机轴可以保持在某固定位置上；
- 4) 步进电动机存在步距角误差，但是不会产生累积误差；
- 5) 转角、转速不受电源电压波动和负载变化的影响。
- 6) 常用于自动化仪表和小功率位置伺服系统

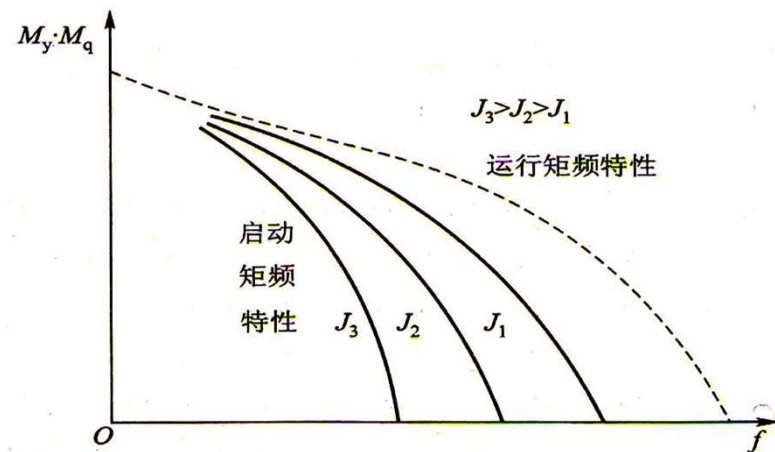
以上这些是步进电机的优点

# 步进电动机的工作原理

## • 步进电机的特点

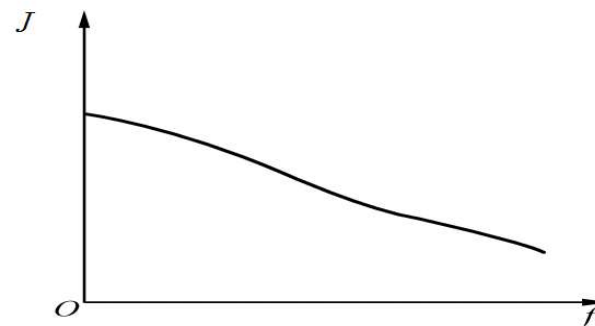
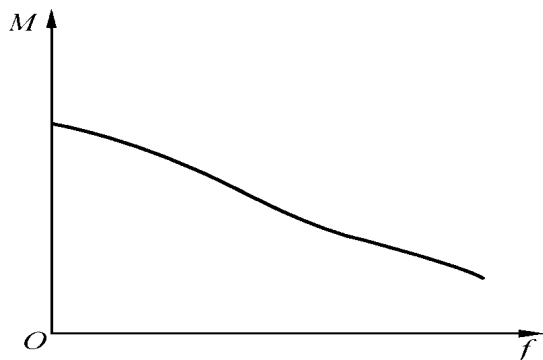
- 7) 步进电动机转动惯量小，起动、停止迅速。
- 8) **负载**转动惯量越大，同频率下的启动转矩就越小。
- 9) 启动频率和最高运行频率相差很大，启动频率大小与负载惯量有关。二者均与驱动电源性能有关。
- 10) 需要专用的驱动电源（驱动器），电源对电机的工作性能影响很大。

**缺点：启动频率远低于连续工作频率；  
对惯性负载驱动能力差；  
过载会丢步，影响控制精度。**



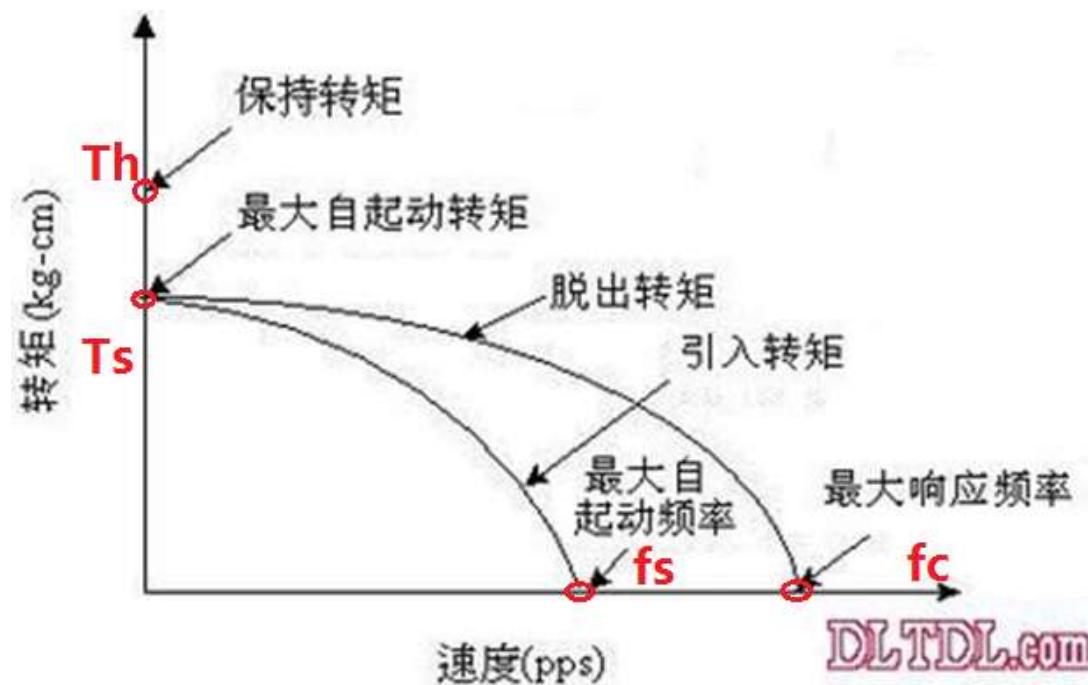
# 步进电动机的选择计算方法

- 按位置精度要求选择步距角。
- 按启动速度、最大工作速度选择驱动频率和最高工作频率。
- 按启动负载和工作负载确定启动力矩和工作力矩。
- 按惯频率特性和矩频特性曲线效验电机的力矩。

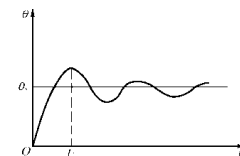


# 步进电动机的选择计算方法

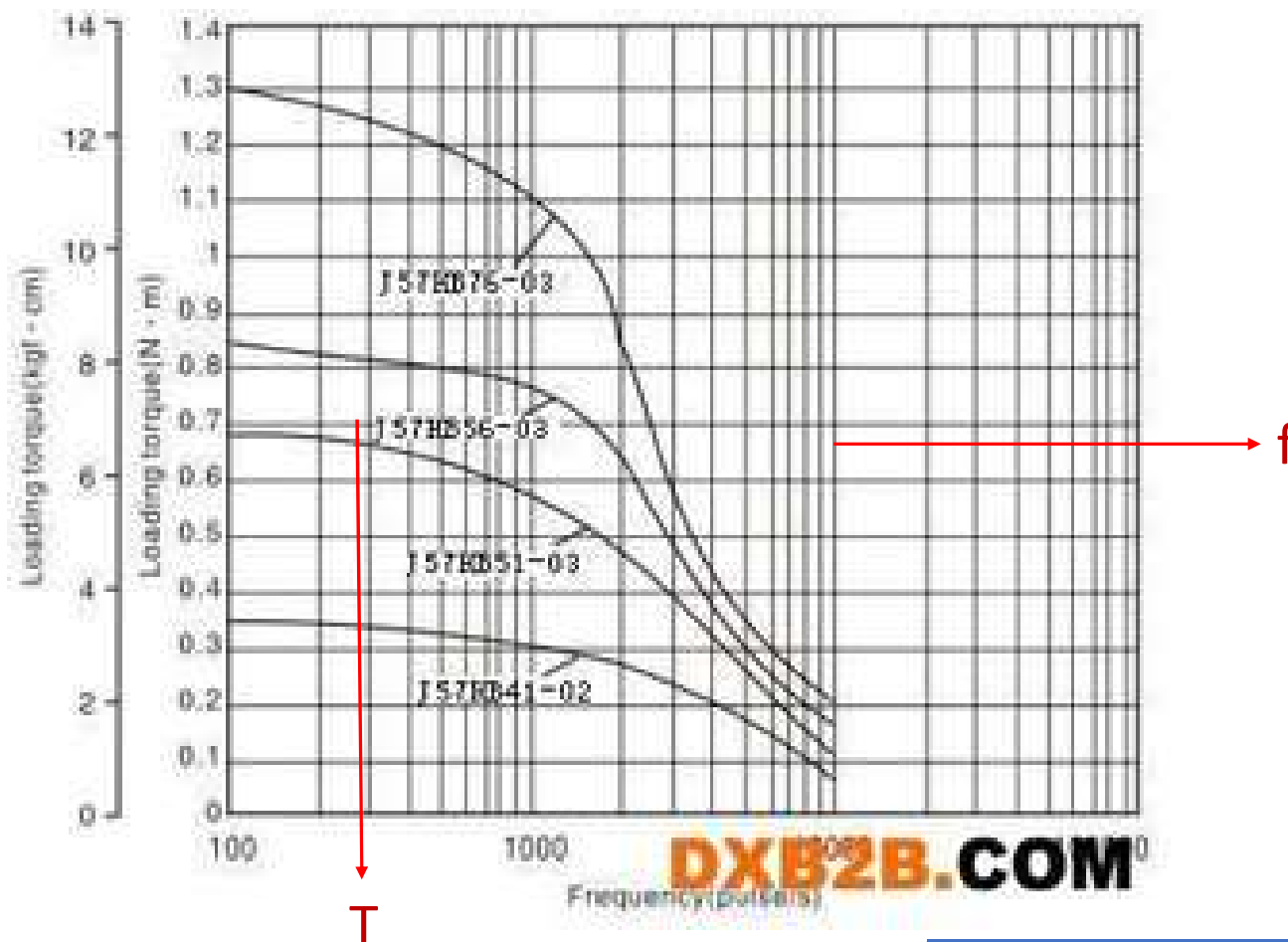
## ➤ 步进电机的工作特性



➤ 实质原因:  $F=ma$ , 每一步都是一个阶跃, 具有最大加速度



## 步进电动机的选择计算方法（实际步进电机矩频特性）





# 感谢聆听

## 机电一体化系统设计

主讲教师：张立勋教授