

# 第43篇 电动执行器

**主编单位:**

上海工业自动化仪表所

**编写单位:**

上海自动化仪表十厂 上海仪器仪表学  
校 上海工业自动化仪表研究所

**合稿人:**

王 兴 蒋庆华

**编写人:**

蒋庆华 施竹仁 蔡祖光 王 兴

**特约编辑:**

吴钦炜

CA14 / ZK16

## 常用符号表

$C$ ——电容量	$P$ ——压力
$D_g$ ——公称通径	$R$ ——电阻
$d_g$ ——阀座直径	$R_L$ ——负载电阻
$E$ ——电源电压	$S$ ——螺距
$F$ ——推力	$t$ ——时间、温度
$f$ ——频率	$U$ ——电压
$f_r$ ——起动频率	$u$ ——电压
$I$ ——电流	$V$ ——速度
$i$ ——减速比	$Z$ ——齿数
$M$ ——力矩	$\alpha$ ——角度、控制角
$M_s$ ——起动力矩	$\theta$ ——角度、导通角
$M_i$ ——不平衡力矩	$\eta$ ——效率
$n$ ——转速	$\tau$ ——时间常数
$P$ ——功率	$\omega$ ——角频率

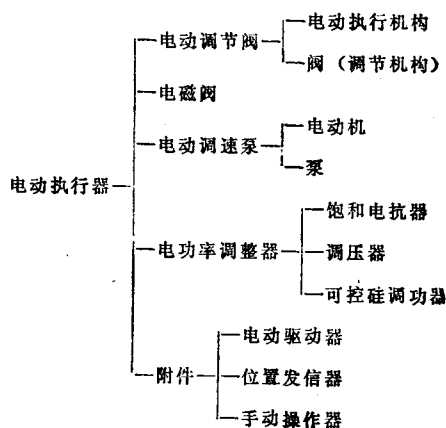
# 第1章 概 论

## 电动执行器的用途和分类

电动执行器是指在控制系统中以电为动力源的直接改变操纵量的一种仪表，如电动调节阀、电磁阀等。

电动执行器一般按其结构原理的不同进行分类，如表43.1-1所示。

表43.1-1 电动执行器分类表



电动执行器还可按动力元件的不同，分为电磁型（如电磁阀）、电动机型（如电动调节阀、电动调速泵）、电功率输出型（如调压器、调功器）。

本篇重点介绍电动调节阀、电磁阀和电驱动器、位置发信器等。在电动调节阀中又主要介绍电动执行机构，阀门部分可参阅本手册第42篇气动执行器中有关部分。

## 2 电动执行器的组成和特点

电动执行器通常是由电动执行机构和调节机构两部分组成。将调节仪表的信号转换成位移或转角的部分叫执行机构，如电磁阀中电磁线圈部分、电动调节阀中电动机和减速器部分。直接改变操纵量的各种阀门和元件叫调节机构。电功率输出执行器不再分成两个部分。

常见的电磁阀外形如图43.1-1所示。电动调节阀外形如图43.1-2所示。电动执行机构与阀门在现

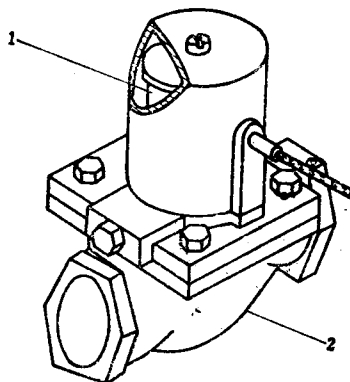


图43.1-1 电磁阀外形图  
1—电磁线圈 2—阀

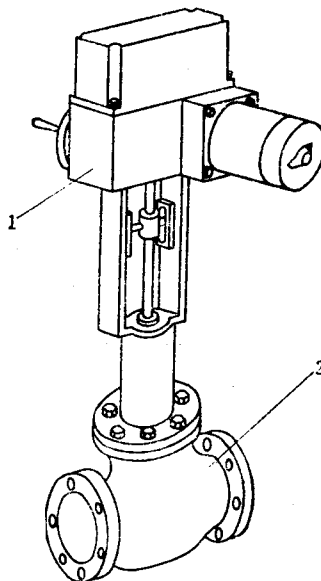


图43.1-2 电动调节阀外形图  
1—直行程电动执行机构 2—阀

场的连接情形如图43.1-3所示。

执行器按能源形式可分为气动执行器、电动执行器、液动执行器和复合式执行器等。电动执行器具有信号传输迅速、与调节仪表连接距离长、与计算机连用方便、安装接线简单、能源取用方便等特点，特别适用于安装地点分散的场合。电磁型和电

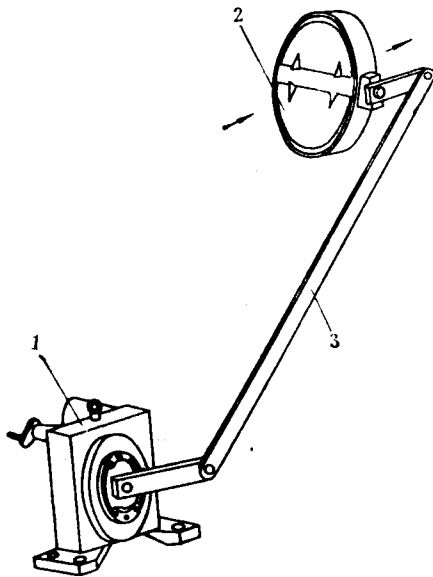


图43.1-3 角行程执行机构与蝶阀连接图

1—角行程电动执行机构 2—蝶阀 3—连杆

动机型执行器除了具有上述共同特点外, 还有一些不同特点, 如表43.1-2所示。

表43.1-2 电磁型和电动机型电动执行器特点

电 磁 阀	电动调节阀	电动调速泵
开闭阀门控制流体通断, 实现两位调节	能连续调节管道中流体流量, 也可开闭阀门实现两位调节	通过连续调节泵的转速调节流体流量
通常采用无填料函结构, 密封性好, 但口径小、压力低	多数采用填料函结构, 口径大、压力高	无阀门, 节省设备和能源, 无压力损失
自保持式电磁阀停电时阀门位置保持不变, 常开式电磁阀断电时保持阀开, 常闭式电磁阀断电时保持阀闭	停电时阀门位置保持不变	停电时流量为零, 因此要有一定措施, 保证不断电
体积小, 重量轻, 结构简单, 便于维修	结构较复杂, 重量较重, 成本较高	结构较简单, 维修方便, 价格低廉

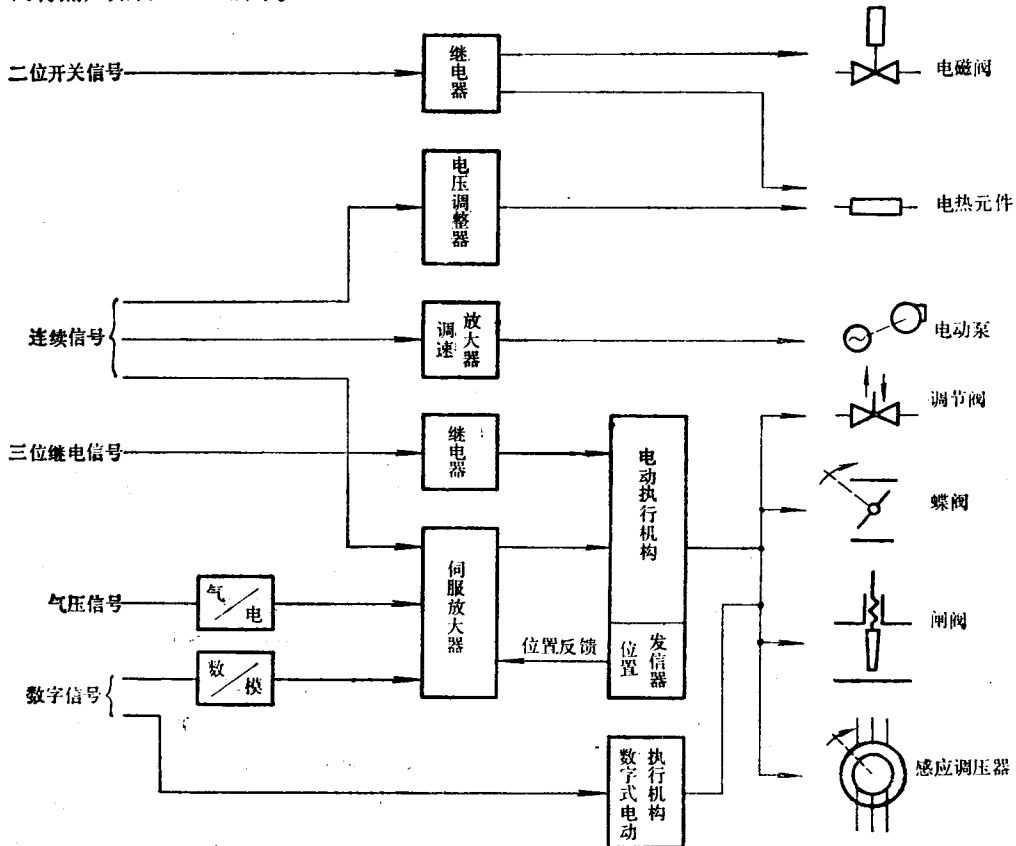


图43.1-4 电动执行器与调节仪表的不同输出信号之间的连接

### 3 电动执行器与调节仪表信号的连接

电动执行器能直接与具有不同输出信号的各种电动调节仪表配合使用，通过转换器还可与气动调

节仪表配合使用。电动执行器与各种调节控制仪表和装置的不同输出信号之间的连接，如图43.1-4所示。

## 第2章 电动执行机构

### 1 分类与应用

电动执行机构按功能分类和应用情况如表43.2-1所示。

表43.2-1 电动执行机构的分类和应用

分类	角行程电动执行机构	直行程电动执行机构	多转式电动执行机构
典型应用	执行机构输出轴转动范围小于360°，通常用来推动蝶阀、球阀、偏心旋转阀等转角式调节机构	执行机构输出轴为各种大小不同的直线位移，通常用来推动单座、双座、三通、套筒型等各种调节阀	执行机构输出轴为各种大小不等的有效转圈数，用来推动闸阀或由执行电动机带动旋转式调节机构，如各种泵类

电动执行机构按动作特性可分为积分式执行机构和比例式执行机构。按结构型式可分为普通型和特殊结构型。(如：防爆、防潮、热带用、船用等)

### 2 工作原理

#### 2.1 角行程电动执行机构的工作原理

##### 2.1.1 少齿差行星减速角行程执行机构

少齿差行星减速角行程执行机构是由伺服电动机、减速器、位置发信器等部分组成，其结构原理如图43.2-1所示。当伺服电动机1通电旋转时，经过平齿轮2和3减速后，使偏心轴6旋转，从而带动摆轮5在内齿轮4内滚动，偏心轮每转一周，摆轮自转的角度可用齿数 $Z_4$ 与 $Z_5$ 之差表示( $Z_4$ 为内齿轮的齿数， $Z_5$ 为摆轮的齿数)，摆轮的自转运动由销轴9和联轴器8引至输出轴7输出，达到减

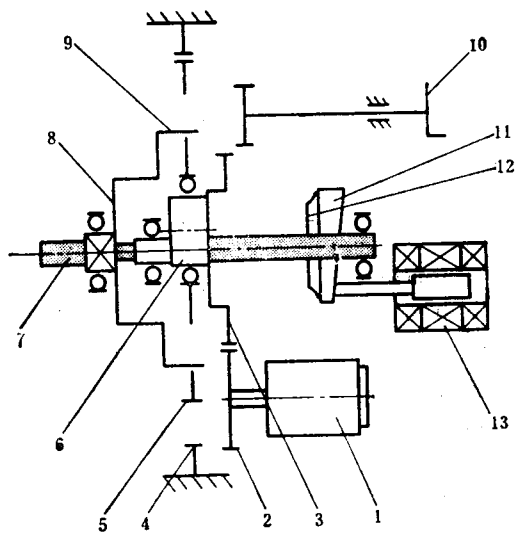


图43.2-1 少齿差行星减速角行程执行机构结构示意图

1—伺服电动机 2—平齿轮 3—平齿轮 4—内齿轮 5—摆轮 6—偏心轴 7—输出轴 8—联轴器 9—销轴 10—手轮 11—凸轮 12—弹簧片 13—差动变压器

速目的。少齿差行星减速的减速比为：

$$i = \frac{Z_4 - Z_5}{Z_5} \quad (43.2-1)$$

少齿差行星减速机构的优点是体积小、减速比大、效率高。

差动变压器13产生与输出轴位置相对应的位置信号，该信号经整流和放大成为标准直流信号，作为阀位指示和位置反馈信号。

##### 2.1.2 低速电机角行程执行机构

低速电机角行程执行机构结构原理如图43.2-2所示。当低速电动机1通电旋转时，通过万向接头2使丝杆3转动，从而带动螺母4作上下移动，并

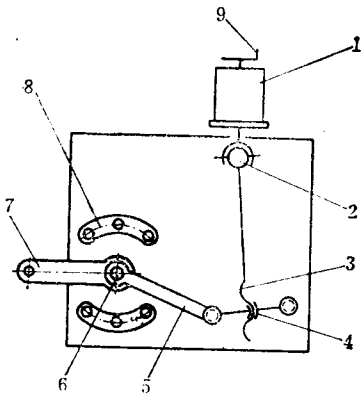


图43.2-2 低速电机角行程执行机构结构示意图

- 1—低速电动机 2—万向接头 3—丝杆  
4—螺母 5—转臂 6—输出轴 7—曲柄  
8—止挡块 9—手轮

经转臂5带动输出轴6旋转。输出轴的一端装有曲柄7，作为执行机构的输出臂，另外一端与位置发信器和极限开关的凸轮相连。在减速器箱体外部还装有两个止挡块8，也可用机械方法把曲柄位置限制在要求的动作范围之内。

## 2.2 直行程电动执行机构的工作原理

### 2.2.1 丝杆和平齿轮构成的直行程执行机构

丝杆和平齿轮构成的直行程执行机构是最简单的一种结构形式，其结构原理如图43.2-3所示。当伺服电动机通电旋转时，经齿轮、螺母、丝杆、限位槽的作用，由输出杆得到直线位移输出。在主轴旋转的同时带动弹性联轴器，使多圈电位器发出相应的阀位信号。

### 2.2.2 滚珠丝杆和蜗轮蜗杆构成的直行程执行机构

滚珠丝杆和蜗轮蜗杆构成的直行程执行机构结构原理如图43.2-4所示。这种结构在丝杆与螺母之间设置了滚珠，因而称之为滚珠丝杆机构，它可以减小丝杆与螺母之间磨损，提高传动效率。

### 2.2.3 低速电机直行程执行机构

低速电机直行程执行机构，采用低速电动机作为驱动元件，其减速器比一般直行程执行机构简

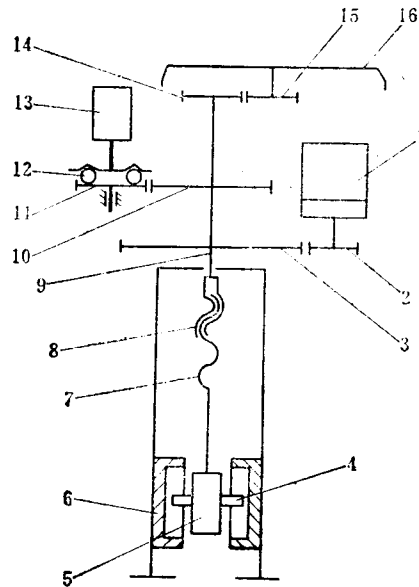


图43.2-3 丝杆和平齿轮构成的直行程执行机构结构示意图

- 1—伺服电动机 2—平齿轮 3—平齿轮  
4—限位柱 5—输出杆 6—限位槽  
7—丝杆 8—螺母 9—主轴 10—平齿轮  
11—平齿轮 12—钢球 13—多圈电位器  
14—平齿轮 15—平齿轮 16—手轮

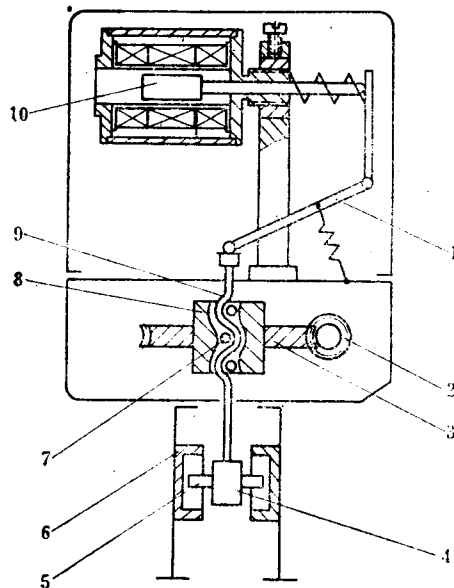


图43.2-4 滚珠丝杆和蜗轮蜗杆构成的直行程执行机构结构示意图

- 1—杠杆 2—蜗杆 3—蜗轮 4—输出杆 5—限位柱  
6—限位槽 7—滚珠 8—螺母 9—丝杆  
10—差动变压器动铁芯

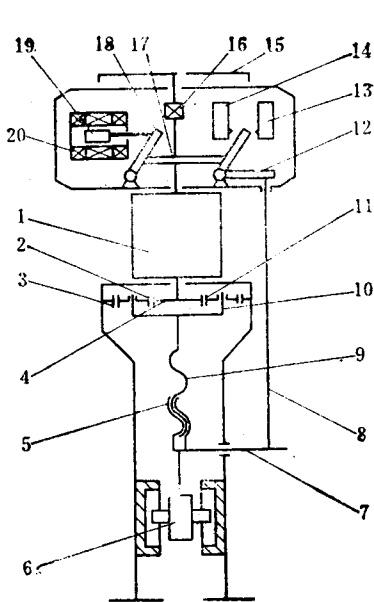


图43.2-5 低速电机直行程执行机构结构示意图

- 1—低速电动机 2—行星齿轮 3—内齿轮 4—中心齿轮 5—螺母 6—输出杆
- 7—悬臂 8—连杆 9—丝杆 10—转臂 11—行星齿轮 12—人字形杠杆
- 13—微动开关 14—微动开关 15—手轮 16—离合器 17—可调杠杆 18—杠杆
- 19—差动变压器动铁芯 20—差动变压器线圈

单, 结构原理如图43.2-5所示。

### 2.3 多转式电动执行机构的工作原理

多转式执行机构主要是用来开启和关闭闸阀、截止阀等多转式调节机构除了用于手动控制、程序控制外, 若配以电动驱动器、位置发信器等附件后, 可作为自动调节系统中的执行机构使用。下面介绍几种不同形式的多转式执行机构。

#### 2.3.1 手动-自动之间人工切换多转式执行机构

手动-自动之间人工切换多转式执行机构是一种最简单的结构形式, 它由三相电动机、减速器、位置发信器和行程控制器等部分组成, 其结构原理如图43.2-6所示。当电动机1通电旋转时, 通过斜齿轮2、3和蜗杆4、蜗轮5, 使输出轴6转动, 同时经过齿轮11、12和螺杆14、螺母15带动差动变

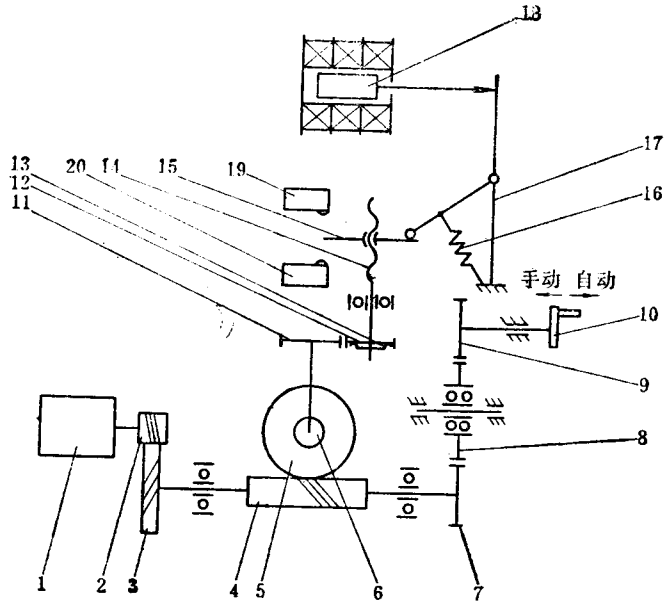


图43.2-6 手动-自动之间人工切换多转式执行机构结构示意图

- 1—电动机 2—斜齿轮 3—斜齿轮 4—蜗杆 5—蜗轮 6—输出轴 7—齿轮 8—齿轮 9—齿轮
- 10—手轮 11—齿轮 12—齿轮 13—盘形弹簧 14—螺杆 15—螺母 16—弹簧 17—杠杆
- 18—差动变压器动铁芯 19—行程开关 20—行程开关

压器铁芯18动作, 发出相应的阀位信号, 当阀门到达极限位置时, 通过行程开关19或20切断电机电源, 使电机停转, 当需要手动操作时, 把手轮10往里推, 然后摇动手轮。

由于这种执行机构只有行程控制, 而没有力矩控制装置, 所以只适用于负载力矩不变或变化不大的场合。

#### 2.3.2 手动-自动单向自动切换多转式执行机构

手动-自动单向自动切换多转式执行机构结构原理如图43.2-7所示。与图43.2-6相比, 在减速原理方面基本相同, 差异只是增加了力矩控制部分, 当负载力矩超过了反向力矩弹簧所设定的力矩值或者超过了正向力矩弹簧所设定的力矩值时, 蜗杆向左或向右窜动, 从而使力矩控制器7中触点断开, 切断电机电源。由拨叉16和切换手柄17等组成的手动-自动单向自动切换机构结构原理, 如图43.2-8所示。图中所示离合器处于自动位置, 如果需要手

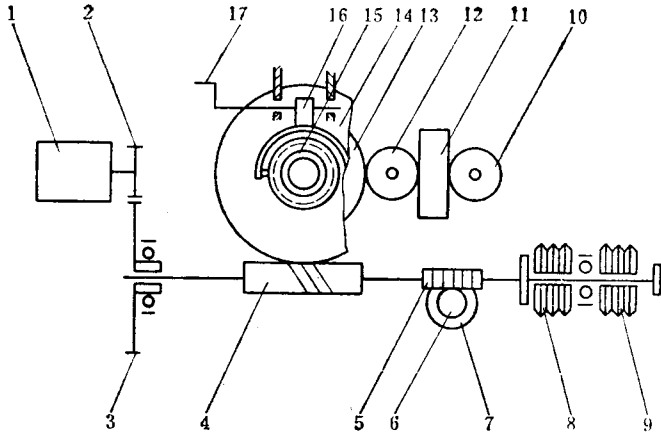


图43.2-7 手动-自动单向自动切换多转式执行机构结构示意图  
 1—电动机 2—齿轮 3—齿轮 4—蜗杆 5—齿条 6—齿轮 7—力矩控制器 8—反向力矩弹簧 9—正向力矩弹簧 10—两位指示器 11—行程控制器 12—齿轮 13—蜗轮 14—蜗轮 15—输出轴 16—拨叉 17—切换手柄

动时，先将切换手柄 17 转到手动位置，通过拨叉 16 使离合器 21 上移，使之与手轮 20 啮合，此时转动手轮则可使输出轴旋转，当需要自动时，只要接通电动机电源，则蜗轮 14 旋转，直立杆 18 自动偏移，此时靠弹簧 19 的弹力把离合器下推，自动恢复到自动位置。这种多转式执行机构由于有了力矩控制装置，并且正反两个方向的力矩可根据需要分别进行设定，因此使用较广泛。

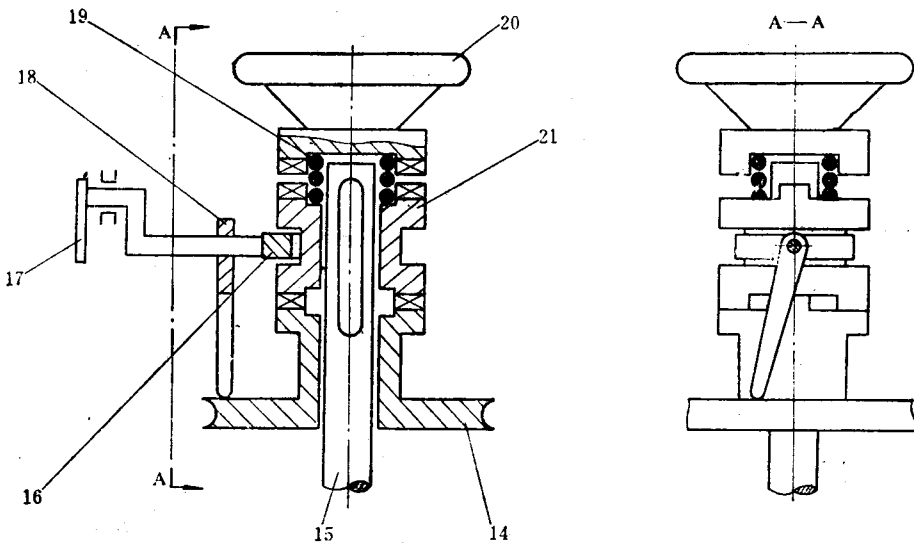


图43.2-8 手动-自动单向自动切换机构结构示意图  
 14—蜗轮 15—输出轴 16—拨叉 17—切换手柄 18—直立杆 19—弹簧 20—手轮 21—离合器

## 2.4 积分式执行机构的工作原理

如前所述按执行机构的动作特性可分为积分式和比例式两种。积分式执行机构通常也称为断续控制式，其电动机动作按输入三位信号表现为正转、反转和停转三种状态，执行机构的最后输出位移与输入信号对时间积分成正比，它的工作原理框图如图 43.2-9 所示。

积分式执行机构除了直接与三位输出的调节仪表连接外，还可附带不同的控制环节，构成不同的工作特性：

1) 积分式执行机构带有持续通断器时，它将输入信号转换成周期性脉冲，然后驱动电动机呈间歇动作，避免执行机构迅速到达极限位置，造成调节系统的不稳定，它的工作原理。如图 43.2-10 所示。

2) 积分式执行机构带有超前反馈环节脉冲宽度调节时，它的工作原理如图 43.2-11 所示。当输入信号已超过三位控制器的死区时，三位控制器输出脉冲宽度可变的信号  $U$ ，驱动执行电动机使执行机构输出位移  $\theta$ ，位移  $\theta$  相当于一个连续 PI 调节作



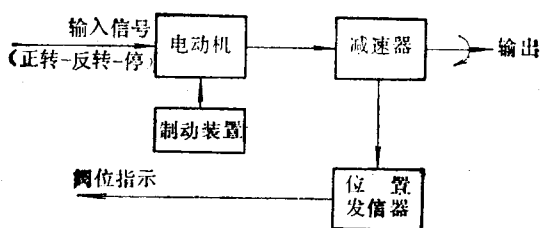


图43.2-9 积分式执行机构的工作原理框图

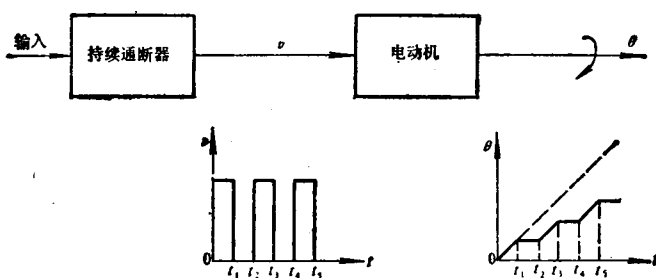


图43.2-10 积分式执行机构带持续通断器时作用原理图

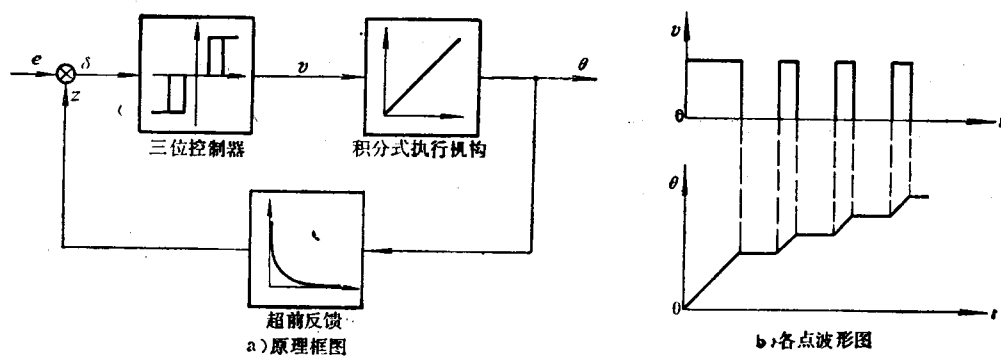


图43.2-11 积分式执行机构脉冲调宽作用原理图

a) 原理框图 b) 各点波形图

用。脉冲最小宽度应大于电动机起动时间。

### 2.5 比例式执行机构的工作原理

比例式执行机构通常也称为连续控制式，它是由执行机构本身和电动伺服放大器组合而成，其工作原理框图如图43.2-12所示。来自调节仪表的输入信号，在伺服放大器内与位置反馈信号比较，其偏差经放大后去驱动伺服电动机旋转，最后经减速器输出位移。位置发信器将输出位移转换成与输入信号相对应的直流输出，作为位置反

馈信号。执行机构的旋转方向决定于偏差信号的极性，并向减小偏差值的方向转动，直到偏差值小于伺服放大器的死区时，执行机构才停转，因此执行机构的位移与输入信号的大小成正比关系。

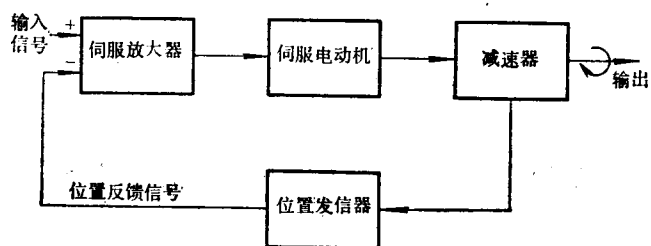


图43.2-12 比例式执行机构工作原理框图

## 2.6 数字控制执行机构

### 2.6.1 步进电机执行机构

采用步进电机直接驱动阀门可以省略数模转换，提高控制精度，随着大功率步进电机的发展，应用范围也日益扩大，步进电机驱动执行机构的工作原理如图43.2-13所示。

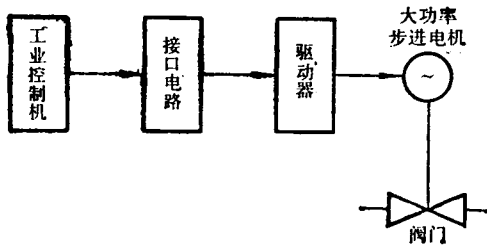


图43.2-13 步进电机驱动执行机构工作原理框图

### 2.6.2 数字阀

数字阀是由一系列口径大小不同的阀门组合而成，受计算机输出信号控制，按不同组合方式开启某几个阀口、改变总的流量，其工作原理如图43.2-14所示。

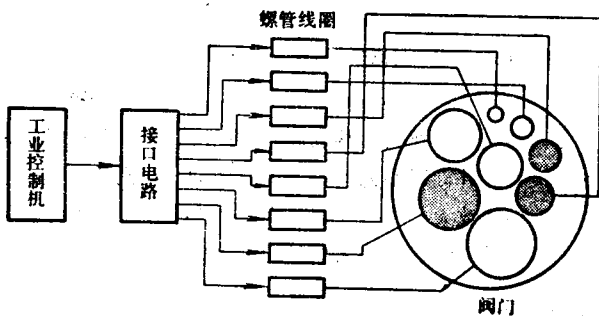


图43.2-14 数字阀工作原理框图

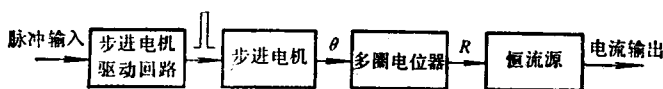


图43.2-15 数-模转换器工作原理框图

### 2.6.3 数—模转换器

通常采用小型步进电机组数—模转换器，它将计算机输出的数字量转换成直流模拟量信号，然后去控制常规的电动执行器，其工作原理如图43.2-15所示。

这种数—模转换器的特点是当输入脉冲消失后步进电机保持原位不动、输出电流保持不变，从而使阀门位置保持在脉冲消失前的位置。

以上介绍了几种常见的数字控制电动执行器，随着微处理机的发展，也出现了采用微处理器的电动执行器，它具有就地控制功能和对阀门流量特性进行补偿等功能，即所谓执行器的智能化。

## 2.7 电动调速泵

电动调速是通过改变电机速度，即泵的速度来调节泵的流量，并能根据转速大小获得相应的流量信号，例如齿轮泵流量与转速有较好的线性关系。这样往往可以利用生产装置中已有的各种泵类，再增加一个电机调速装置即可代替调节阀来调节流量。采用调速方法改变流量与采用恒速泵改变流量相比，还能节省能源的消耗。

图43.2-16为采用直流电机的调速泵工作原理框图。

## 3 静态与动态特性

### 3.1 静态特性

执行机构的静态特性主要是指输入信号与输出位移之间的关系，

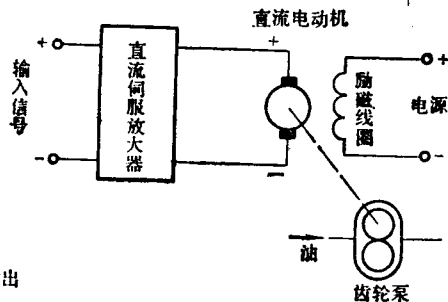


图43.2-16 直流电动机调速泵工作原理框图

图43.2-17为比例式执行机构的输入-输出特性。图中实际位移与理想位移之差(a和b)称为误差,正、反向实际位移之差c称为变差。影响误差和变差的主要因素是齿轮间隙、位置反馈装置的精度、系统死区等。

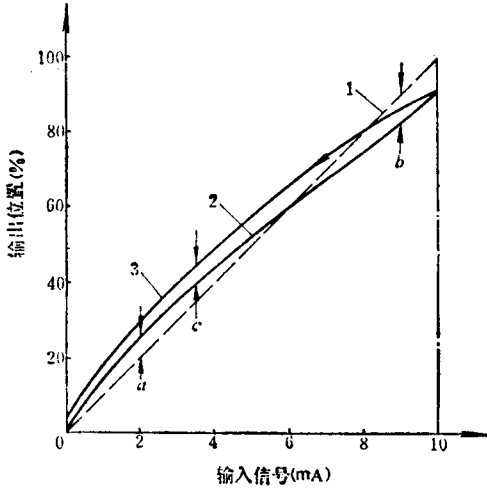


图43.2-17 比例式执行机构输入-输出特性  
1-理想特性 2-正向实际特性 3-反向实际特性

如前所述,积分式执行机构的输出位移与输入信号的积分成正比,其对应关系如图43.2-18所示。

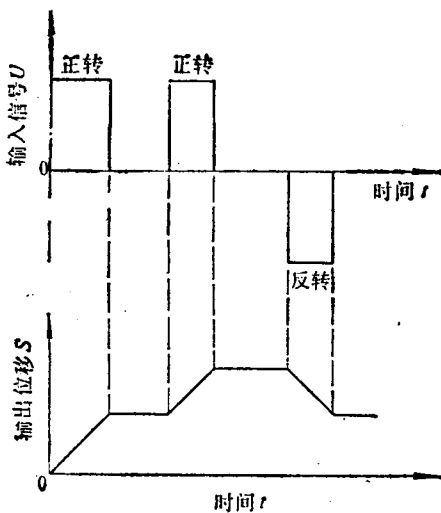


图43.2-18 积分式执行机构的输入-输出对应关系

### 3.2 动态特性

#### 3.2.1 比例式执行机构动态特性

根据比例式执行机构的工作原理,可画出它的系统方框图如图43.2-19所示。

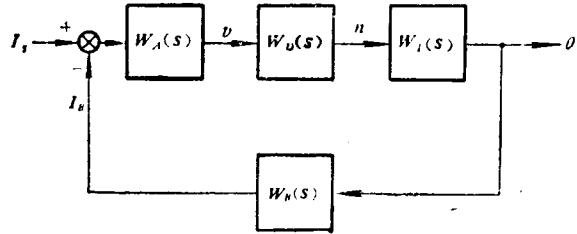


图43.2-19 比例式执行机构系统方框图

图中符号说明:

$W_A(s)$ ——放大器传递函数,  $W_A(s) = \frac{K_A}{1 + T_A s}$ ,

$K_A$ 为传递系数,  $T_A$ 为时间常数。

$W_D(s)$ ——电动机传递函数,  $W_D(s) = \frac{K_D}{s(1 + T_D s)}$ ,  $K_D$ 为传递系数,  $T_D$ 为机电时间常数。

$W_I(s)$ ——减速器传递函数,以传递系数  $K_I$  表示。

$W_B(s)$ ——位置发信器传递函数,以传递系数  $K_B$  表示。

$I_s$ 、 $I_b$ ——分别表示输入信号和位置反馈信号。

$\theta$ ——执行机构输出角位移

根据自动调节原理,比例式执行机构传递函数为:

$$\begin{aligned}
 W(s) &= \frac{W_A(s)W_D(s)W_I(s)}{1 + W_A(s)W_D(s)W_I(s)W_B(s)} \\
 &= \frac{\frac{K_A}{1 + T_A s} \times \frac{K_D}{s(1 + T_D s)} \times K_I}{1 + \frac{K_A}{1 + T_A s} \times \frac{K_D}{s(1 + T_D s)} \times K_I \times K_B} \\
 &= \frac{K_A K_D K_I}{K_A K_D K_I K_B + s(1 + T_A s)(1 + T_D s)} \quad (43.2-2)
 \end{aligned}$$

当忽略放大器和电动机时间常数时，上述传递函数可简化为：

$$W(s) = \frac{\frac{1}{K_B}}{1 + \frac{1}{K_A K_D K_I K_B} s}$$

令  $K = \frac{1}{K_B}$  比例式执行机构传递系数

$T = \frac{1}{K_A K_D K_I K_B}$  比例式执行机构时间常数

数

所以比例式执行机构输入单位阶跃信号时反应曲线如图 43.2-20 所示。

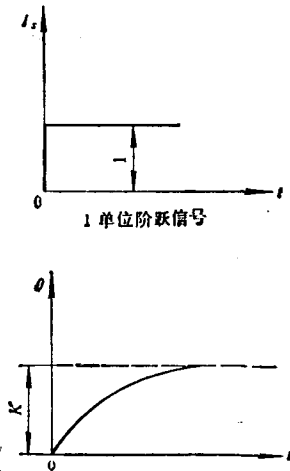


图43.2-20 比例式执行机构阶跃反应特性

当考虑放大器和位置发信器存在时间常数时，公式(43.2-2)就不是一阶非周期环节，而是二阶或多阶非周期环节。

### 3.2.2 积分式执行机构动态特性

根据积分式执行机构的工作原理，可画出它的系统方框图如图 43.2-21 所示。

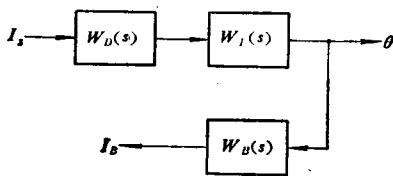


图43.2-21 积分式执行机构系统方框图

根据自动调节原理可知，积分式执行机构传递函数可写成：

$$W(s) = W_D(s) \times W_I(s) = \frac{K_D}{T_D s} \times K_I = \frac{K}{T s} \quad (43.2-3)$$

式中  $K = K_D K_I$ ——积分式执行机构传递系数

$T = T_D$ ——积分式执行机构时间常数

故积分式执行机构输入单位阶跃时反应曲线如图 43.2-22 所示。

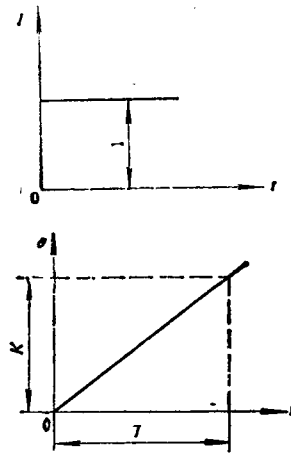


图43.2-22 积分式执行机构阶跃反应特性

## 4 电功率调整器

电功率调整器是用电器元件控制电能输出的一种执行器。通常有饱和电抗器、感应调压器、可控硅调压器等，它是通过改变流经负载的电流或加在负载两端电压的大小来调节电功率输出，另外也可以通过改变通电和断电时间比来达到调节输出功率的目的，如接触器、可控硅调功器等。下面介绍几种常见的电功率调整器。

### 4.1 饱和电抗器

饱和电抗器是根据磁性材料的交流有效磁导率随直流控制电流的磁化作用而变化的原理，通过改变交流有效电抗值，从而改变交流回路中电流，达到改变负载功率的目的。它的原理电路如图 43.2-23 所示。它由两个相同的铁芯组成，每个铁芯上都

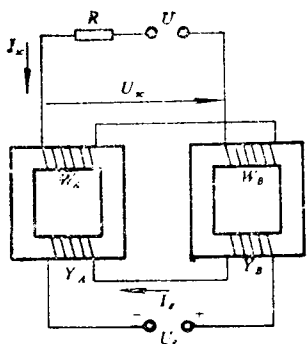


图43.2-23 交流线圈串联饱和电抗器原理电路图

有交流绕组  $W_A$ 、 $W_B$  和直流控制绕组  $Y_A$ 、 $Y_B$ ，两个交流绕组反向串联，直流绕组同向串联，当直流控制电流越大，交流有效磁导率越低，有效电抗值越小，交流电流  $I_x$  越大，输出功率就越大，其输出特性如图 43.2-24 所示。

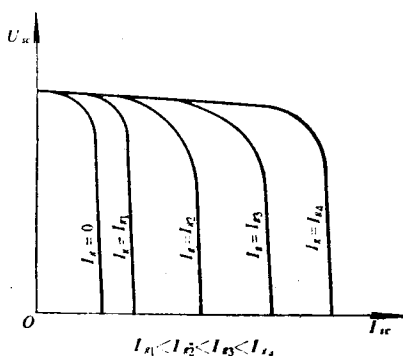


图43.2-24 饱和电抗器的输出特性

用饱和电抗器调节负载功率时，会使电压和电流波形产生畸变，因此它不适用于对波形有严格要求的场合。

### 4.2 感应调压器

感应调压器的结构和电磁原理类似于堵转的绕线式异步电动机，其能量转换关系类似于变压器。通过电动机和传动机构使感应调压器的定子与转子之间产生相对角位移，从而改变定子或转子绕组感应电势的幅值（对单相感应调压器而言）、相位（对三相感应调压器而言），以达到调节输出电压之目的。

单相感应调压器的工作原理如图 43.2-25 所示。公共绕组  $g$  通常置于定子上，二次串联绕组  $C_2$

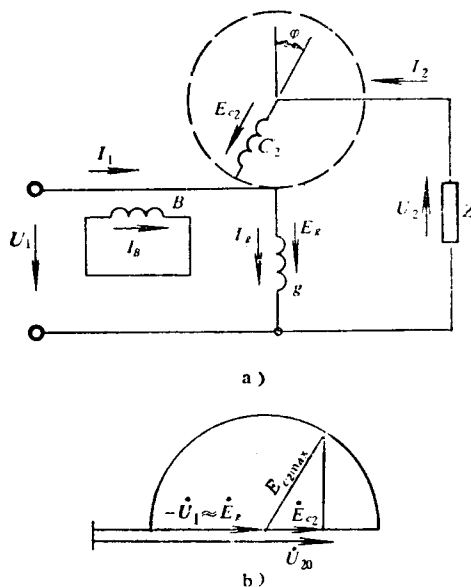


图43.2-25 单相感应调压器工作原理图  
a) 接线原理图 b) 简化空载矢量图

置于转子上，绕组  $g$  的激磁磁势在气隙中产生一个单相脉动磁场，当绕组  $C_2$  和绕组  $g$  的轴线重合时，绕组  $C_2$  的感应电势最大为  $E_{c2max}$ ，当转子的角位移为  $\varphi$  时， $E_{c2}$  的大小随之变化，输出电压：

$$U_{20} = U_1 + E_{c2max} \cos \varphi \quad \text{V} \quad (43.2-4)$$

式中  $U_1$ ——电源电压 V

$U_{20}$ ——空载输出电压 V

当负载情况下，由于  $I_2$  在绕组  $C_2$  中产生的磁势不能与绕组  $g$  产生的磁势相平衡，使输出电压急剧下降，特性变坏，为了克服上述影响设有补偿绕组  $B$ ，使其产生的磁势与绕组  $g$  产生的磁势相平衡。

### 4.3 可控硅调压器

移相触发式可控硅调压器是最常见的一种调压器，它具有线路简单、体积小、效率高等优点，其工作原理如图 43.2-26 所示。当输入信号在  $0 \sim 10 \text{ mA}$  变化时，经放大触发单元输出相应的脉冲，可控硅  $\text{SCR}_1$  和  $\text{SCR}_2$  导通，导通角与输入信号成正比，从而改变负载两端的电压。图中所示稳压电源作为预给电压，即使输入信号为零时，仍可保证可控硅有一定的输出电压，维持一定的加热电流。

从上述可知，由于采用移相触发控制可控硅导通角的原理，因此在负载上的交流电压波形是一个

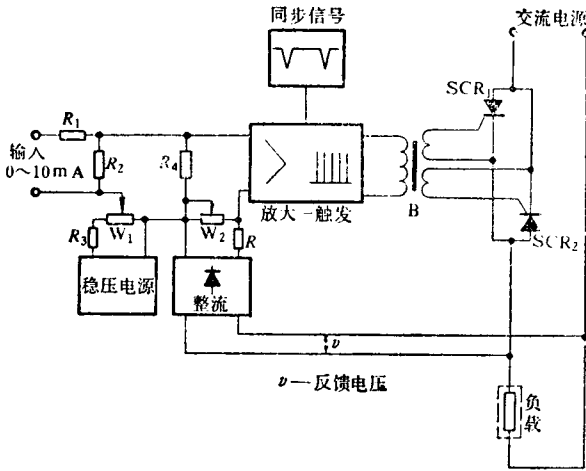


图43.2-26 移相触发式可控硅调压器原理框图

有缺角的正弦波，同时，在可控硅导通的瞬间电流变化率很大，由此引起的电源波形畸变和高频电磁波辐射，对电网和其他电子设备产生干扰，因而使移相式可控硅调压器的应用受到一定限制。

#### 4.4 可控硅调功器

过零触发可控硅调功器克服了移相触发的缺点，因为触发信号发生在电压过零的瞬时，所以输出到负载两端的波形接近于完整的正弦波，输出功率的大小是靠改变固定周期内可控硅通电与断电的时间比来调节，根据通断区在给定周期中的分布情况和基本调节单位可分为以下四种触发工作方式：

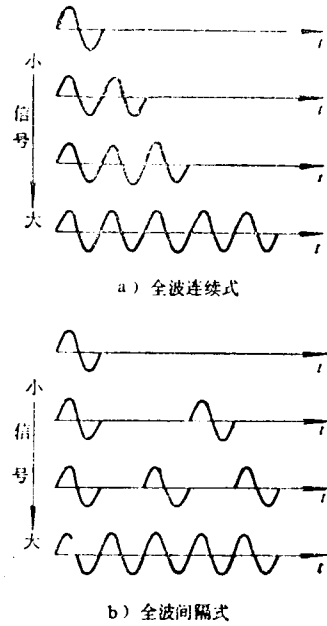


图43.2-27 全波触发方式工作原理图  
a) 全波连续式 b) 全波间隔式

单位，通断区为连续分布。

4) 半波间隔式，在给定周期中以半波为基本调节单位，通断区为间隔分布。

在以上几种触发工作方式中，间隔式的通断区比连续式分布均匀，但其控制线路要比连续式复杂。半波触发方式不能用于变压器负载。

过零触发可控硅调功器的典型电路原理框图如

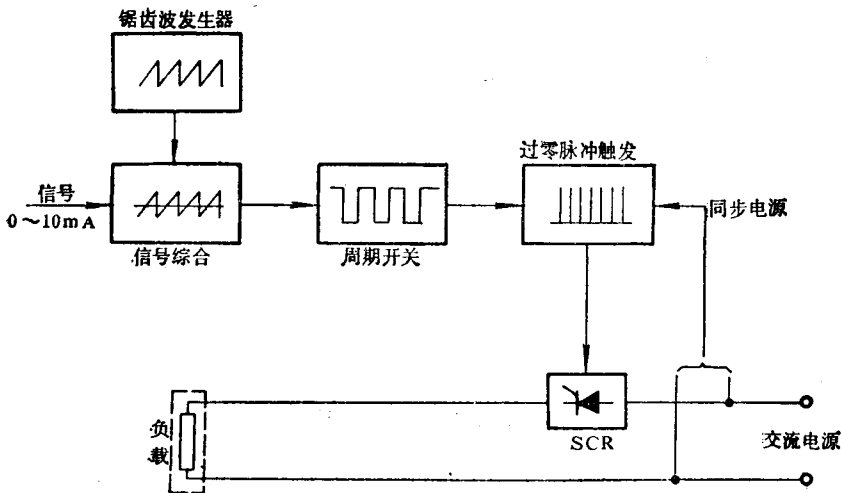


图43.2-28 过零触发可控硅调功器原理框图

1) 全波连续式,如图 43.2-27 a)所示,在给定期中以全波为基本调节单位,通断区为连续分布。

2) 全波间隔式,如图 43.2-27 b)所示,在给定期中以全波为基本调节单位,通断区为间隔分布。

2) 半波连续式,在给定期中以半波为基本调节图 43.2-28 所示。当锯齿波发生器与输入信号综合后,经周期开关分为通断两个区域,然后与电源同步信号一起进入触发器,产生过零触发脉冲去控制可控硅导通,输入信号愈大可控硅接通时间愈长,输出功率也就愈大。

对于电感性负载必须采用电流过零触发,使电源同步信号经过移相滞后某一相角后进入触发器,使触发信号移当负载电流过零时产生触发信号,并使移相角等于负载的功率因数角,负载电流和电压

波形接近于完整的正弦波,从而减小波形畸变和电磁波辐射。

## 5 主要技术参数

### 5.1 角行程电动执行机构主要技术参数

角行程电动执行机构主要技术参数见附录 43-1。

### 5.2 直行程电动执行机构主要技术参数

直行程电动执行机构主要技术参数见附录 43-2。

### 5.3 多转式电动执行机构主要技术参数

多转式电动执行机构主要技术参数见附录 43-3。

# 第3章 电动执行机构设计与计算

## 1 电动执行机构主要参数计算

### 1.1 角行程执行机构主要参数计算

#### 1) 电动机功率计算

$$P \geq \frac{61.5M}{t\eta} \text{ W} \quad (43.3-1)$$

式中  $M$ ——执行机构输出力矩  $\text{kgf}\cdot\text{m}$

$t$ ——减速器输出轴每转时间  $\text{s}$

$\eta$ ——减速器效率

#### 2) 减速器传动比

$$i = \frac{tn_1}{60} \quad (43.3-2)$$

式中  $n_1$ ——电动机额定转速  $\text{r}/\text{min}$

#### 3) 电动机额定工作力矩

$$M_1 = \frac{M}{i\eta} \text{ kgf}\cdot\text{m} \quad (43.3-3)$$

#### 4) 电动机起动力矩

$$M_{s1} \geq (1.2 \sim 2.0)M_1 \text{ kgf}\cdot\text{m} \quad (43.3-4)$$

#### 5) 手动操作力

$$F = \frac{M_1}{i_m R_1 \eta} \text{ kgf}\cdot\text{m} \quad (43.3-5)$$

式中  $M_1$ ——减速器起动力矩,取  $1.25M \text{ kgf}\cdot\text{m}$

$i_m$ ——手操机构传动比,与减速机构结构尺寸有关

$R_1$ ——手轮半径  $\text{m}$

通常手轮操作力在  $6 \sim 7 \text{ kgf}$  为宜,在大力矩执行机构中可达  $20 \sim 25 \text{ kgf}$ 。

输出力矩由  $10$  到  $600 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ ,常用角行程执行机构主要参数汇总如表 43.3-1 所示。

### 1.2 直行程执行机构主要参数计算

#### 1) 输出轴速度

$$V = S n_2 \text{ mm/s} \quad (43.3-6)$$

式中  $S$ ——丝杆螺距  $\text{mm}$

$n_2$ ——丝杆转速  $\text{r/s}$

#### 2) 电动机功率计算

$$P = 9.81 \frac{F_2 V}{\eta} \text{ W} \quad (43.3-7)$$

式中  $F_2$ ——输出推力  $\text{kgf}$

$\eta$ ——减速器效率

#### 3) 电动机额定工作力矩

$$M_1 = 0.974 \frac{P}{n_1} \text{ kgf}\cdot\text{m} \quad (43.3-8)$$

表43.3-1 常用角行程执行机构主要参数汇总表

输出力矩 kgf·m		10	25	60	160	600		
输出轴每转时间 s		100	100	100	100	100		
减速器传动效率 %		60	60	60	60	60		
减 速 器 部 分	减速器传动比 $i$	理论值	1000	1000	1500	1500	1500	
		实际值	945	1000	1504	1477	1604	
	手操机构传动比 $i_M$	理论值	104	192	420	538	735	
		实际值	290	415	485	429	422	
	手操作力 kgf	理论值	5	6	4.5	9.1	10	
		实际值	2.2	2.8	4	11.4	19	
	手轮半径 cm		3.2	4.5	6.25	10	18	
圆柱齿轮传动比		9	8	9.4	10.33	11.22		
少齿差减速传动比		105	125	160	143	143		
电 动 机 部 分	额定转速 r/min		600	600	900	900	900	
	额定工作电流 A		0.38	0.5	0.6	2	4.4×2	
	电动机功率 $W$	理论值		10.3	25.6	61.5	164	615
		实际值		18	28	69	200	350×2
	额定工作力矩 $gf·cm$	理论值		1700	4167	6700	18000	67000
		实际值		3000	4400	8800	20000	40000×2
	启动力矩 $gf·cm$	理论值		2125	5209	8375	22500	84000
实际值			4400	6900	14000	26400	54000×2	

式中  $n_1$ ——电动机额定转速 r/min

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (43.3-11)$$

### 1.3 多转式执行机构主要参数计算

#### 1) 电动机功率计算

$$P = \frac{M_2 n_2}{974 \eta K} \text{ kW} \quad (43.3-9)$$

式中  $M_2$ ——执行机构输出力矩 kgf·m

$n_2$ ——执行机构输出转速 r/min

$K$ ——电动机利用系数, 取1.5~2

$\eta$ ——减速器效率

#### 2) 电动机额定工作力矩

$$M_1 = 974 \frac{P}{n_1} \text{ kgf·m} \quad (43.3-10)$$

式中  $P$ ——电动机功率 kW

$n_1$ ——电动机额定转速 r/min

#### 3) 减速器传动比

## 2 减速器设计与计算

### 2.1 减速器的设计要求

在设计执行机构的减速器时应考虑以下几点要求:

1) 为了降低电动机功率和减小执行机构体积, 所以设计时尽可能采用传动效率高的传动形式。如果需要减速器有自锁性能时, 可选用效率较低但具有自锁性能的传动形式。

2) 减速器采用封闭结构, 能工作于水溅和有灰尘的地方, 要求结构紧凑, 体积小、重量轻, 所以尽量采用每级减速比大的减速形式。

3) 传动平稳、噪音小、寿命长、可靠性高。



表43.3-2 各种传动形式的基本特性

传动形式	主要优点	主要缺点	效率	功率范围 (kW)	速度范围	传动比范围
圆柱齿轮	外形尺寸小, 寿命长效率高, 传动比准确	要求制造精度高, 高速传动精度不够时有噪音, 不能缓和冲击	8级精度的齿轮传动 $\eta = 0.97$	从极小到52000	一般圆周速度在25 m/s 以下	常用4~5以下, 有时可达10
普通蜗杆	外形尺寸比圆柱齿轮要小, 传动比准确, 传动平稳无噪音, 可制成自锁传动	效率低, 中速和高速传动需要高级青铜, 制造要求高	自锁蜗杆 $\eta = 0.40 \sim 0.45$ 单头 $\eta = 0.7 \sim 0.75$ 双头 $\eta = 0.75 \sim 0.82$	一般在51以下, 亦可达200	一般滑动速度小于15 m/s, 个别可达30 m/s	一般10~30, 可达8~100
圆弧齿蜗杆	结构紧凑, 体积小, 传动比大, 效率较高, 运动平稳, 无噪音, 与普通蜗杆相, 承载能力提高0.5~1倍, 效率提高10~15%	对中心距偏差要求较高, 对安装误差较敏感, 侧隙较大	单头 $\eta = 0.75 \sim 0.78$ 双头 $\eta = 0.85 \sim 0.88$	从几十~10000	一般滑动速度小于15 m/s, 个别可达30 m/s	一般在8~50或更大
摆线针轮行星传动	传动比大, 效率高, 运动平稳无噪音, 过载能力大, 可承受较强的冲击性能, 使用寿命长	摆线轮、针齿、销、针齿套、柱销和柱套等主要零件均采用材质好的GCr15制造, 制造精度高, 工艺复杂, 转臂轴承受力大	单级传动 $\eta = 0.90 \sim 0.97$	目前达到100	一般高速轴的转速 $\leq 1500 \sim 1800 r/min$	单级传动比9~87
谐波齿轮传动	零件少、体积小、重量轻, 同时啮合齿数多, 传动精度高, 可实现零侧隙传动, 承载能力高, 可以保证向密封空间传动, 这是独特优点	柔轮要选用材质好的GCr15轴承钢制造, 热处理要求高, 制造精度高, 柔轮加工比较费时	传动装置总效率 $\eta = 0.60 \sim 0.90$	从极小~100	一般高速轴转速可达3000 r/min 或更高	单级传动比1.002~500
少齿差行星齿轮传动	结构紧凑、体积小、重量轻、传动比大、效率较高、加工方便、安装容易、成本低、寿命长	齿轮承载能力比摆线针齿轮小, 效率还不够高, 联轴器加工要求高, 高速传动时有噪音和抖动现象, 转臂轴承受力大	用销轴式联轴器, 效率为 $\eta = 0.80 \sim 0.90$	从极小~16, 个别可达45	高速轴转速 $\leq 50 \sim 700 r/min$	单级传动比10~100
丝杆螺母传动	结构简单、加工方便, 能自锁	效率低, 磨损大, 承载力小	$\eta = 0.2 \sim 0.4$			
滚珠丝杆传动	效率高, 运动平稳, 磨损小, 寿命长, 精确度高	制造要求高, 不能自锁	$\eta = 0.90 \sim 0.98$			

4) 传动间隙从技术、经济综合考虑, 应尽量小。

5) 零件加工要简单、装配维修方便、便于成批生产。

### 2.2 各种传动形式的基本特性

常用的减速形式有圆柱齿轮、蜗轮蜗杆、行星齿轮、谐波齿轮等。把旋转运动转换成直线运动的形式有丝杆螺母和滚珠丝杆等。各种传动形式的基