

表 3.1.4.3 船用电动机过载能力

电动机类型	系 列	转矩过载倍数 $\lambda_T$	电流过载倍数 $\lambda_I$
一般用途	Y-H	2.1~1.8(功率小、转速高的偏大)	
	Z <sub>2</sub> C	1.6(2min)	2(1min)
起重	IZ <sub>2</sub> -H	单速 2.8; 双速 2(高)/2(低); 三速 2(高)/2.5(中)/2~2.8(低)	
	YHLQ-H	双速 2.6(高)/2.4(低); 三速 1.9(高)/2(中)/2.4(低)	
	1PB1	单速 2; 三速—/2.2(中)/2.1(低); 四速—/2(中)/1.4~2(低)	
	1PB2	三速—/2.3(中)/2.3(低); 四速—/2.4(中)/2.3(低)	
	ZZH、 ZZKH 复激	3.5	3(1min)
	ZZH、 ZZKH 并激	2.5	2.8(1min)
	ZZY-H 复激	3.5	2.8(1min)(2级火花)
	ZZY-H 并激	3	2.6(1min)(2级火花)
	ZZY-H 串激	4	3(1min)(2级火花)

体按时间均匀加热时的热态方程式为:

$$\tau = \tau_s(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.1.4.3)$$

式中  $\tau$ ——加热开始后  $t$  分钟时物体超过周围介质的温升(K);

$\tau_0$ ——开始时的温升(K);

$\tau_s$ ——发热稳定时的温升(K);

$T$ ——发热时间常数(min);

$t$ ——电动机工作时间(min)。

稳定温升  $\tau_s$  决定于:

$$\tau_s = \frac{Q}{A} \quad (3.1.4.4)$$

式中  $Q$ ——物体中每秒钟内产生的热量(J/s);

$A$ ——散热率,当物体与周围介质有 1K 的温度差时,在 1s 内从物体全部面积散出的热量(J/sK)。

电动机运行时与静止时的散热率对采用自扇冷的电动机有所不同。

图 3.1.4.4 为按式(3.1.4.3)升温的理论发热曲线。其中曲线 I 表示  $\tau_0 = 0$  的发热曲线,即式(3.1.4.3)中的第一部分;曲线 II 表示  $Q = 0$ ,即停止发热后从  $\tau_0$  开始的冷却曲线,即式(3.1.4.3)中的第二部分。

从图中可知,发热时间常数  $T$  为物体加热而不向外散热时达到稳定温升的时间。实际上由于存在散热,只能达到  $0.632\tau_s$  的温升,要经过  $4T \sim 5T$  的时间,才可近似认为达到了稳定温升。如果发热与散热的时间常数相等,则曲线 I 和曲线 II 是互为镜像。

电动机的发热时间常数实际上不是恒定的,特别是在发热的起始阶段。发热时间常数与

电动机的结构尺寸有极大关系,电动机的通风方式、结构类型直接影响散热效果,所以也影响时间常数。一般,体积大和散热率小的电动机的发热时间常数较大。常用的电动机发热时间常数:

直流防滴式、交流防护式为 25min ~ 90min;

起重用防水封闭式为 65min ~ 270min;

交流封闭式为 11min ~ 22min。

各种电动机具有不同的绝缘结构与绝缘等级,每种绝缘均有一个最高允许工作温升,各级绝缘的温升标准如表 3.1.4.4 所示。

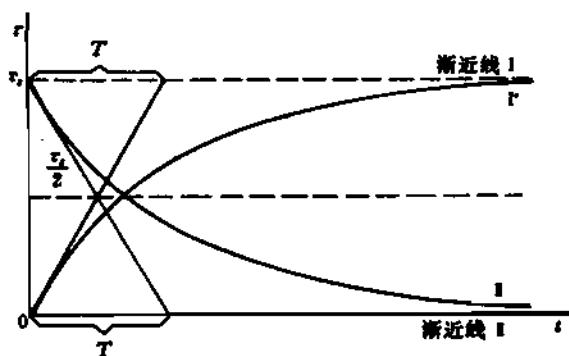


图 3.1.4.4 物体发热曲线

表 3.1.4.4 船用电动机最大允许温升(环境温度 45℃)

单位:K

电动机 部 件	Z <sub>2</sub> C			Y-H	JZ <sub>2</sub> -H JZ <sub>2a</sub> -H	YHLQ-H	ZZH ZZKH	ZZY-H
	E	B	F	B	B	H	B	H
电枢、并激绕组	75	80	100	80	85	85	95	125
整流子	70	80		—	—	—	85	100
轴 承	50	50		50	50	50	50	50

注:电枢、并激绕组温升均用电阻法测量,整流子、轴承均用温度计法测量

### 3. 容量校验

船舶机械电力拖动中电动机功率常由机械专业设计人员提供计算值,电气专业设计人员应配合进行电动机选型并作校验。

#### 1) 选择连续工作制电动机(S1 工作制)

适用于不调速不反向连续负载基本不变的机械。校验的首要条件:

$$P_N \geq P_L = \frac{T_L n_N}{9565} \quad (3.1.4.5)$$

式中  $P_N$ ——连续工作制的电动机额定功率(kW);

$P_L$ ——机械负载功率(kW);

$T_L$ ——电动机轴上的负载转矩(N·m);

$n_N$ ——电动机额定转速(r·min<sup>-1</sup>)。

#### 2) 选择周期工作制电动机(S6, S7, S8 工作制)

适用于不调速不反向连续变动负载、不调速不反向(或反向)带起动和制动连续负载或调速的连续变动负载。

若负载变化情况如图 3.1.4.5 所示,则:

$$I_N \geq I_{me} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{T_c}} \quad (3.1.4.6)$$

或 
$$T_N \geq T_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_1^n T_i^2 t_i}{T_c}} \quad (3.1.4.7)$$

式中  $I_N$ ——周期工作制电动机的额定电流(A);  
 $T_N$ ——周期工作制电动机的额定转矩(N·m);  
 $I_{rms}$ ——一个周期  $T_c$  内的等效电流(A);  
 $T_{rms}$ ——一个周期  $T_c$  内的等效转矩(N·m);  
 $I_i$ ——一个周期  $T_c$  内各分段时间的电流(A);  
 $T_i$ ——一个周期  $T_c$  内各分段时间的转矩(N·m);  
 $t_i$ ——一个周期  $T_c$  内各分段时间(s);  
 $T_c$ ——一个周期总时间,  $T_c = \sum_1^n t_i$  (s)。

当每个分段时间内的负载特性不是矩形,而是如图 3.1.4.6 所示为三角形或梯形时,则应将每一分段时间内的电流或转矩换算成等效平均值后,同样用式(3.1.4.6)或式(3.1.4.7)计算。

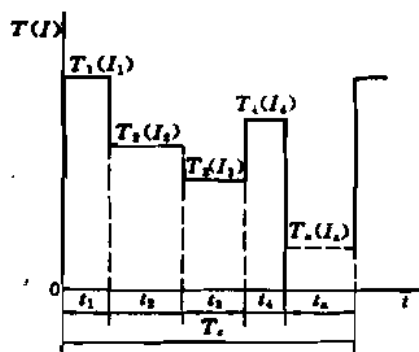


图 3.1.4.5 连续变动负载图

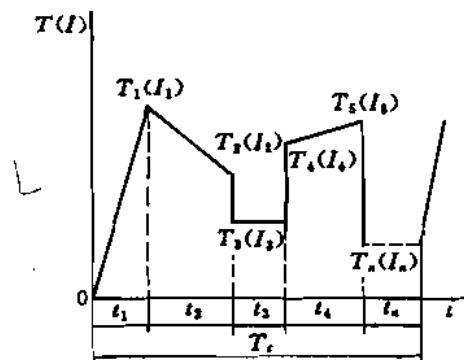


图 3.1.4.6 三角形及梯形负载图

三角形负载特性时( $t_1$  时间分段)为:

$$I_{av1} = \sqrt{\frac{I_1^2}{3}} \quad (3.1.4.8)$$

$$T_{av1} = \sqrt{\frac{T_1^2}{3}} \quad (3.1.4.9)$$

梯形负载特性时( $t_2$  时间分段)为:

$$I_{av2} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}} \quad (3.1.4.10)$$

$$T_{av2} = \sqrt{\frac{T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2}{3}} \quad (3.1.4.11)$$

式中  $I_{av}$ ——等效平均电流(A);  
 $T_{av}$ ——等效平均转矩(N·m)。

按  $I_{rms}$  或  $T_{rms}$  选择电动机额定值后,还要用最大负载转矩校验电动机的过载能力,即:

$$T_N \geq \frac{T_{Lmax}}{0.9K\lambda_T} \quad (3.1.4.12)$$

式中  $T_{Lmax}$ ——最大负载转矩(N·m);  
 $K$ ——电压降低系数,直流  $K=1$ ,交流  $K=0.72$ 。

### 3) 选择短时工作制电动机(S2工作制)

按式(3.1.4.5)或式(3.1.4.6)、(3.1.4.7)计算值可选取与机械工作情况相适应的工作时间的短时定额电动机,并按式(3.1.4.12)校验过载能力。

如果没有合适的短时定额电动机,也可选用连续定额电动机,一般用热过载系数折算为:

$$p_{th} = \frac{1 - e^{-\frac{1}{T} \cdot FC \cdot t_i}}{1 - e^{-\frac{1}{T} t_i}} \quad (3.1.4.13)$$

式中  $p_{th}$ ——热过载系数;

$T$ ——电动机发热时间常数(min);

$FC$ ——负载持续率,对短时工作制而言  $FC = 0$ ;

$t_i$ ——机械短时工作总时间(min)。

由式(3.1.4.13)可画出  $p_{th}$  与  $FC$  在各种不同的  $\frac{t_i}{T}$  时的关系曲线,如图 3.1.4.7 所示。

考虑热过载系数时的转矩折算为:

$$T_N = \frac{T_{ms}}{\sqrt{p_{th}(\gamma + 1) - \gamma}} \quad (3.1.4.14)$$

式中  $T_N$ ——按热过载系数折算的等效转矩(N·m);

$T_{ms}$ ——短时机机械负载等效转矩(N·m);

$\gamma$ ——电动机固定损耗与可变损耗之比。

$\gamma$  值的一般规律是低速电机较小;同样转速下电动机容量越大  $\gamma$  值越大;起重电动机比一般用途电动机大。一般情况下,对直流防滴式电动机,  $\gamma = 0.7 \sim 2$ ;对防水式起重电动机,  $\gamma = 2 \sim 3$ ;对异步电动机,  $\gamma = 0.5 \sim 1$ 。必要时,可从电动机型式试验报告中查出定耗与变耗值计算出  $\gamma$  值来。

按  $T_N$  值选取电动机的额定值后,再按最大负载转矩校验电动机过载能力,方法同上。

### 4) 选择断续周期工作制电动机(S3, S4, S5 工作制)

同样按式(3.1.4.13)计算出热过载系数  $p_{th}$  后,再按式(3.1.4.14)计算出折算的等效转矩,选取电动机的额定值。

机械的负载持续率为:

$$FC = \frac{t_i}{t_i + t_0} \times 100\% \quad (3.1.4.15)$$

式中  $t_i$ ——一个周期中运行时间总和(min);

$t_0$ ——一个周期中停止时间(min)。

精确的计算应将每个分段中的起动、制动分段都分出来,并且考虑起动和制动时散热恶化系数。

### 4. 容量折算

#### 1) $FC$ 值不同时

断续周期定额电动机在不同的  $FC$  值时,其功率也不同。因此,应将相应于计算  $FC$  的功率折算成标准  $FC$  的功率,才能按电机样本选择电动机。其折算公式为:

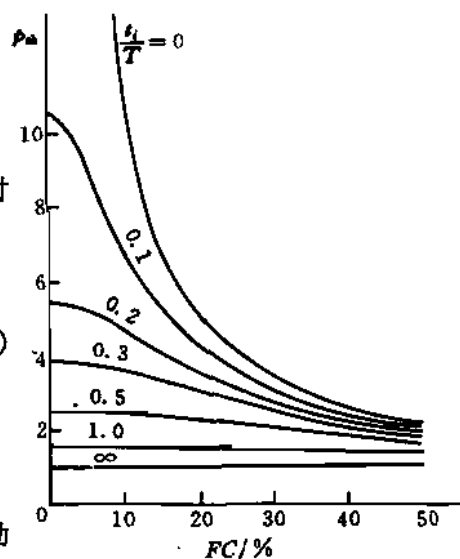


图 3.1.4.7 热过载系数  $p_{th}$  与  $FC$  的关系

$$P_{st} = P \sqrt{(\gamma + 1) \frac{FC}{FC_{st}} - \gamma} \quad (3.1.4.16)$$

式中  $P_{st}$ ——折算到标准  $FC_{st}$  时的功率(kW);  
 $P$ ——按实际负载特性计算所得的功率(kW);  
 $FC_{st}$ ——标准的负载持续率;  
 $FC$ ——按实际负载特性计算所得的负载持续率;  
 $\gamma$ ——固定损耗与可变损耗之比。

## 2) 短时工作时间不同时

短时定额电动机在不同的工作时间时,其功率也不同。因此,应将相应于计算的功率折算成标准短时定额的功率,才能按电机样本选择电动机。折算公式为:

$$P_{st} = P \frac{\sqrt{p_{thst}(\gamma + 1) - \gamma}}{\sqrt{p_{th}(\gamma + 1) - \gamma}} \quad (3.1.4.17)$$

式中  $P_{st}$ ——折算到标准短时定额时的功率(kW);  
 $P$ ——按实际负载特性计算所得的功率(kW);  
 $p_{thst}$ ——标准短时定额的热过载系数;  
 $p_{th}$ ——按实际负载特性计算所得的热过载系数;  
 $\gamma$ ——固定损耗与可变损耗之比。

## 3) 短时定额与断续周期定额之间的折算

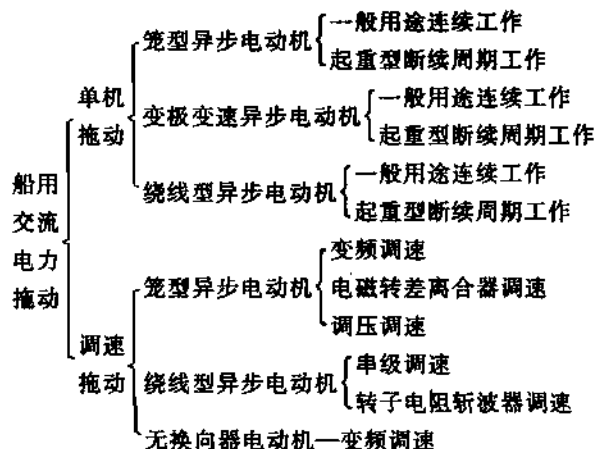
这种情况式(3.1.4.17)同样适用,只是对断续周期定额电动机应计入一定的  $FC$  来计算其  $p_{th}$  值,可由式(3.1.4.13)计算得到。

# 3.1.5 交流电力拖动基本原理

## 1. 分类

船用交流电力拖动方式分类见表 3.1.5.1。

表 3.1.5.1 船用交流电力拖动方式分类



单机拖动是一种由母线供电无电源变换装置按逻辑信号方式进行控制的不调速或有级调速的电力拖动方式。交流单机拖动是船舶机械电力拖动的主要方式,特别在常规机械拖动中

占据了绝大多数。

调速拖动是一种有电源变换装置按模拟或数字信号方式进行控制的无级或有级调速电力拖动方式,其供电可由母线或专用电源供给。调速拖动主要用于特种机械拖动。调速拖动中的应用无换向器电动机(即带位置检测器的同步电动机)的变频调速是一种新型的调速方式,能获得近似直流拖动的调速性能,一般适用于大容量范围,船舶机械较少使用,但在船舶电力推进中可能会有应用。

## 2. 笼型电动机单机拖动

笼型电动机是一种简单、耐用、可靠、易维护、价格低的电动机。适用于不调速机械,缺点是起动电流大、轻载功率因数低。

笼型电动机在各种接线和运行状态下的机械特性曲线及计算公式见表 3.1.5.2。

表中  $T$ ——电动机转矩( $N \cdot m$ );

$U$ ——电动机定子相电压(V);

$R_2'$ ——电动机转子每相电阻折算值( $\Omega$ );

$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$ ——旋转磁场同步角速度( $rad \cdot s^{-1}$ );

$n_0 = \frac{60f_1}{p}$ ——旋转磁场同步速度( $r \cdot min^{-1}$ );

$f_1$ ——定子电源频率(Hz);

$p$ ——电动机极对数;

$R_1$ ——定子每相电阻( $\Omega$ );

$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ ——电动机转差率;

$X_1$ ——定子每相电抗( $\Omega$ );

$X_2'$ ——转子每相电抗折算值( $\Omega$ );

$T_{Hj}$ ——电动机临界转矩( $N \cdot m$ );

$S_{Hj}$ ——电动机临界转差率;

$\lambda_T$ ——电动机最大转矩倍数;

$U_a$ ——定子降压后的电压(V);

$T_a$ ——电动机降压后的转矩( $N \cdot m$ );

$T_{Hj}$ ——电动机固有特性的转矩( $N \cdot m$ );

$v = \frac{n}{n_0}$ ——相对速度;

$I_L$ ——直流励磁电流(A);

$I_0$ ——电动机空载电流(A)。

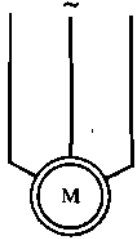
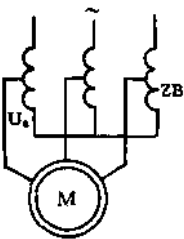
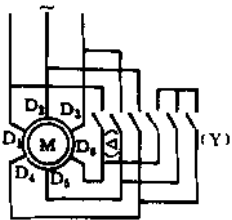
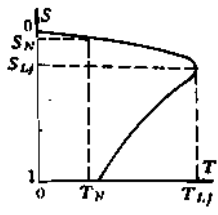
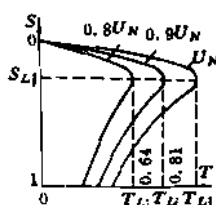
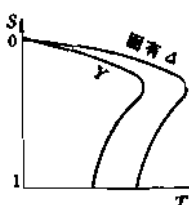
对于大容量笼型电动机,由于  $R_1$  值较小,则  $R_1/R_2' \approx 0$ ,实用公式可简化为:

$$T = \frac{2T_{Hj}}{\frac{S}{S_{Hj}} + \frac{S_{Hj}}{S}} \quad (3.1.5.1)$$

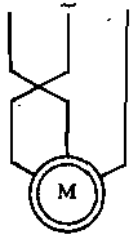
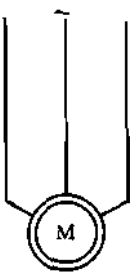
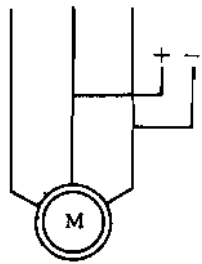
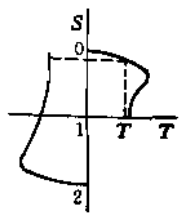
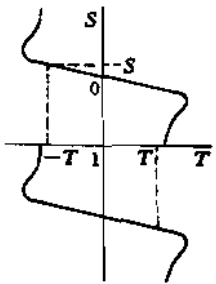
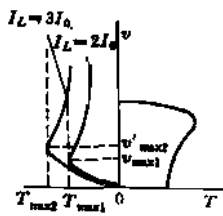
$$T_{Hj} = \frac{3U^2}{2 \times 9.81\omega_0(X_1 + X_2')} \quad (3.1.5.2)$$

$$S_{Hj} = \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \quad (3.1.5.3)$$

表 3.1.5.2 笼型电动机

分 类	固 有 特 性	人 为 特 性	
		自耦变压器降压	星(Y)-三角(Δ)变换
电动机接线图			
机械特性曲线			
机械特性方程式	理论公式	$T = \frac{3U^2 R_2'}{9.81\omega_0 \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_1 + X_2) \right] S}$	同自耦变压器降压 $\left( U_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} U_\Delta \right)$
	实用公式	$T = \frac{2T_N \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} S_N \right)}{\frac{S}{S_N} + \frac{S_N}{S} + 2 \frac{R_1}{R_2'} S_N}$	同固有特性
机械特性曲线绘制	将 $T_N = \lambda_T T_N$ $S_N = [\lambda_T + \sqrt{\lambda_T^2 - 1}] S_N$ 代入实用公式逐点计算 理论值 $T_N = \frac{3U^2}{2 \times 9.81\omega_0 [\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2) \pm R_1}]}$ $S_N = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}}$ (“+”电动状态“-”制动状态)	按固有特性曲线资料逐点 用上述公式计算(在同一“S” 值)	同自耦变压器降压
用途说明	额定工作长期运行,主要用于负载不变场合	减少起动电流,作降压起动 用	减少起动电流,作降压起动 用
备注		可调整,性能较好,但自耦 变压器太大	最简单,性能可满足一般要 求

的机械特性曲线

人 为 特 性		
反接制动	发电反馈制动	能耗制动
		
		
同固有特性	同固有特性	计算复杂不予介绍
同固有特性	同固有特性	
同固有特性, 将“s”值扩大到“1~2”范围	同固有特性, 将“s”值扩大到“0~-1”范围(公式中用“-”值)	类似固有特性曲线, 因磁通变化, 计算复杂不予介绍
①由于冲击电流较大, 制动力矩较小, 一般不用 ②可逆磁力起动器在正转时突然反转即为此种状态, 一般应先停止后再反转	①超速时为能量反馈 ②反馈制动, 常用于位能负载的下降特性	用于频繁起动、停止, 要求快速制动时采用, 但需专门供给直流电源, 设备较多
		为使制动效果大, 直流励磁电流必须相当大, 且低速时制动效果好



当  $S \ll S_H$  时, 则  $S/S_H \approx 0$ , 式(3.1.5.1)可近似为:

$$T = \frac{2T_H S}{S_H} \quad (3.1.5.4)$$

由式(3.1.5.4)所得的机械特性曲线是一条通过( $S=0, T=0$ )点以  $2T_H/S_H$  为斜率的直线。这就是说异步电动机在工作段  $0 < S < S_N$  时可近似认为和直流并激电动机一样, 具有线性的机械特性曲线。

笼型电动机一般采用直接起动方式, 即将电源全电压直接加于定子绕组上的方式。直接起动具有控制设备简单、起动加速快、价格便宜等一系列优点, 因而被广泛采用。这时, 起动转矩为额定起动转矩, 一般用途电动机约为 1.1 倍额定转矩左右; 起重型电动机的起动转矩极大, 一般与最大转矩接近, 约为 2 倍~3 倍额定转矩。一般用途电动机起动电流约为 5.5 倍~7 倍额定电流, 起重型电动机约为 2 倍~2.5 倍(低速绕组)或 4 倍~6 倍(高速绕组)额定电流。在起动瞬间 1 个~2 个周波内, 起动电流可能会达到 8 倍~13 倍额定电流。配电开关应选用适用于电动机起动用保护特性的规格, 若选用一般用途的则应放大其动作电流规格以免误动作。一般船舶电网允许小于 25% 电网容量的电动机直接起动。

对于大容量笼型电动机, 当船舶电网容量较小时直接起动会引起过大的瞬间电压降, 通常就采用降压起动方式, 主要有自耦变压器降压和星-三角降压两种。其起动转矩和线路起动电流的变化关系为:

$$T_{st} = \frac{U_a^2}{U_N^2} T_{stN} = a^2 T_{stN} \quad (3.1.5.5)$$

$$I_{st} = \frac{U_a^2}{U_N^2} I_{stN} = a^2 I_{stN} \quad (3.1.5.6)$$

式中  $T_{st}$ ——降压后的电动机起动转矩(N·m);

$T_{stN}$ ——全电压时的电动机起动转矩(N·m);

$I_{st}$ ——降压后的线路起动电流(A);

$I_{stN}$ ——全电压时线路起动电流(A);

$a = \frac{U_a}{U_N}$ ——降压系数。

即起动转矩和线路起动电流均与降压系数的平方成正比。自耦变压器的抽头较多, 所以其降压系数可变, 一般有 65%, 80%, 85% 等几挡; 星-三角转换只有一种降压系数  $1/\sqrt{3} = 0.57$ 。

星-三角转换必须在正常运转工作状态的接线为三角形时才能采用。Y-H 系列电动机在 4kW 及以上者全部为三角形接法, 可适用于星-三角降压起动方式。

笼型电动机的制动状态运行比直流电动机要困难得多, 因此应用也较少。能耗制动中一般取  $I_L = (2 \sim 3) I_0$  ( $I_0 = (0.2 \sim 0.4) I_N$ )。能耗制动直流励磁电路的接线有多种方式, 星形接线时一般用二相串联绕组; 三角形接线时一般用二相串联绕组和一相绕组的并联接法。因为这样可不改动原来的接线, 也不必增加附加的控制设备, 且其制动效果也较大。

### 3. 变极变速电动机单机拖动

变极变速电动机是在笼型电动机基础上增加一套或数套绕组的方法来获得有级的调速的一种简单可靠的电动机, 适用于有级调速机械。缺点是低速绕组的功率因数较低。

绕组的设置有两种方法, 一种是用一套绕组改变其接线方式可得到极对数成两倍关系的

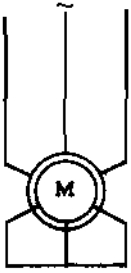
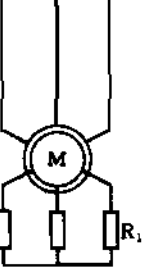
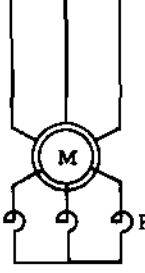
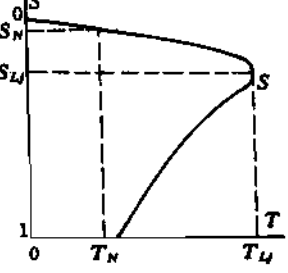
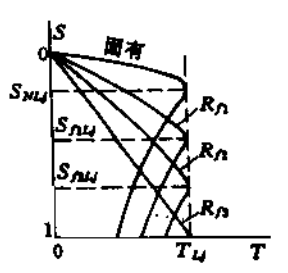
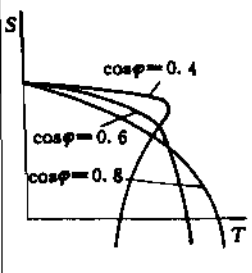
变化,包括恒功率(YY-△)及恒转矩(YY-Y)两种类型;另一种是设置互不相关的几套独立绕组,各有不同的极对数,一般不成两倍关系。

变极变速电动机在各种接线时的机械特性曲线及计算公式见表 3.1.5.3。

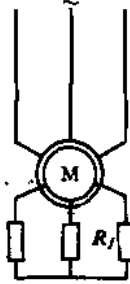
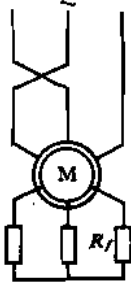
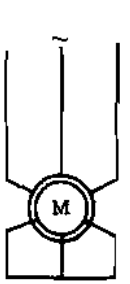
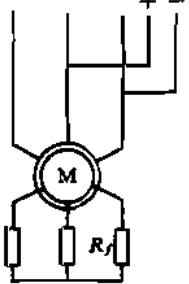
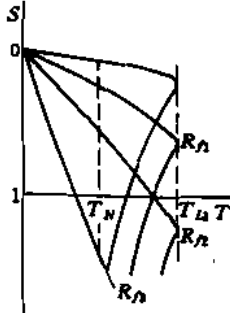
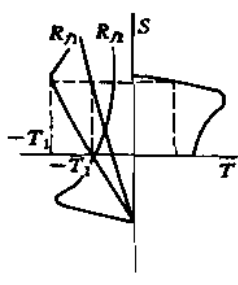
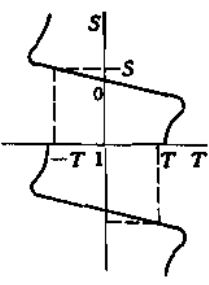
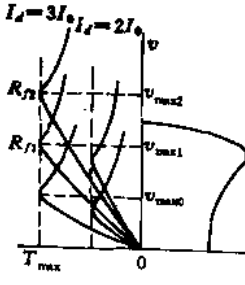
表 3.1.5.3 变极变速电动机机械特性曲线

分类	恒功率(YY-△)	恒转矩(YY-Y)	两套独立绕组(Y, Y)
电动机接线图			
机械特性曲线			
各极间关系	$n_{\Delta} = \frac{1}{2} n_{YY}$ $T_{\Delta} = 2 T_{YY}$ $P_{\Delta} = P_{YY}$	$n_Y = \frac{1}{2} n_{YY}$ $T_Y = T_{YY}$ $P_Y = \frac{1}{2} P_{YY}$	基本接近恒转矩类型,但转速按极数而定
机械特性方程及曲线绘制	笼型异步电动机理论公式均适用 船用电机的起动转矩和最大转矩相同(对每极本身),近似“挖土机”特性		
用途说明	船用起重电机广泛使用,低速极为开口△接线,以便可接成Y接线使用(减小转矩) 适用于负载变化较大的场合	除了船用起重电机广泛使用外,陆用电机也有用,较适用于恒定负载的场合	船用起重电机广泛使用,并有三套独立绕组或一套独立绕组、一套变极绕组组合等多种形式,以扩大应用场合
备注	陆用电机均为闭口△接线 实际电机低速极功率配置均比规定的小	实际电机低速极功率配置均比规定的大	陆用电机也有应用

表 3.1.5.4 绕线电动机

分 类	固 有 特 性	人 为 特 性	
		转 子 串 电 阻	转 子 串 频 敏 变 阻 器
电 动 机 接 线 图			
机 械 特 性 曲 线			
机 械 特 性 方 程 式	理论公式: 尚有 $T = \frac{28.6 f_s R_2}{n_0 S}$ 实用公式	$T = \frac{3 U^2 R_2'}{9.81 \omega_0 [(R_1 + \frac{R_2' + R_1'}{S})^2 + (X_1 + X_2')^2] S}$ $T = \frac{2 T_d}{\frac{S}{S_{N1}} + \frac{S_{N1}}{S}}$	计算复杂, 不予介绍
机 械 特 性 曲 线 绘 制	同笼型电动机	① 将 $T_d = \lambda_T T_N$ $S_{N1} = \frac{R_2' + R_1'}{X_1 + X_2} = \frac{R_2' + R_1'}{R_2} S_{N1}$ 代入实用公式逐点计算。 ② 取任一 $T$ 值 查固有特性 $S$ 值及计算 $S_f = \frac{R_2' + R_1'}{R_2} S$ 即可逐点得出	计算复杂, 不予介绍
用 途 说 明	额定工作长期运行, 主要用于经常需要人为特性的负载场合	① 起动过速特性 ② 恒转矩向下调速运行	减小起动电流, 增大起动转矩, 可单独使用或用于调速系统
备 注		电阻损耗很大	性能近似“挖土机”特性

机械特性曲线

人 为 特 性			
反 转 制 动		发电反馈制动	能耗制动
反接制动下降	定子换相序		
			
			
同转子串电阻	同转子串电阻	同笼型电动机	计算复杂,不予介绍
同转子串电阻	同转子串电阻	同笼型电动机	类似转子串电阻人为特性,磁通变化,计算繁复不予介绍
反接制动,用于位能负载的下降特性,较适宜于重载下降	反接制动,用于快速停车	①超速时为能量反馈 ②反馈制动常用于位能负载的下降特性 一般情况下,此时转子不串电阻	用于频繁启动、停止,要求快速制动时采用,但需专门供给直流电源,设备较多

#### 4. 绕线电动机单机拖动

绕线电动机是一种转子具有绕组和滑环结构的电动机。在转子接入了电阻或其他器件后可减小起动电流,增大起动转矩,提高功率因数,且可进行小范围的调速,而控制设备较为简单。特别适用于母线电网容量较小、起动次数较多的机械,缺点是电动机对环境适应性稍差及维护工作较多。

绕线电动机在各种接线和运行状态下的机械特性曲线及计算公式见表 3.1.5.4。

表中  $I_2$ ——电动机转子相电流(A);

$R_2$ ——电动机转子每相电阻( $\Omega$ );

$R_f'$ ——转子附加电阻折算值( $\Omega$ )。

转子实际电阻、电流及电压之间的关系为:

$$R_2 = \frac{S_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} \quad (3.1.5.7)$$

式中  $E_{2N}$ ——电动机转子额定电压(V);

$I_{2N}$ ——电动机转子额定电流(A)。

用电压变比  $k_U = U_N/E_{2N}$  可得到电流变比  $k_i = 1/k_U$  及阻抗变比  $k_R = \frac{m_1}{m_2} k_U^2$ , 式中  $m_1$  为定子相数,  $m_2$  为转子相数。则阻抗与电流的折算关系为:

$$R_2' = R_2 k_R \quad (3.1.5.8)$$

$$X_2' = X_2 k_R \quad (3.1.5.9)$$

$$I_2' = I_2 k_i \quad (3.1.5.10)$$

绕线电动机的固有特性与笼型电动机完全一致,所以式(3.1.5.1)~式(3.1.5.4)完全适用。

转子串电阻与转子串频敏变阻器实际上也是绕线电动机的降压起动方式。转子串电阻类似于直流并激电动机电枢串电阻一样用于起动或调速,一般均在 2 级~4 级范围内。转子串频敏变阻器一般用 1 级,大容量电动机也可用到 4 级~5 级。

转子串电阻可用图解法、解析法、割线图解法来计算各级电阻值,其中以割线图解法较为精确。起动级数与起动转矩及换接转矩的大小有关为:

$$m = \frac{\ln \frac{T_N}{S_N T_1}}{\ln \frac{T_1}{T_2}} \quad (3.1.5.11)$$

式中  $m$ ——起动级数;

$T_1$ ——起动转矩;

$T_2$ ——换接转矩。

起动电流一般控制在 2 倍~2.5 倍额定电流内。

频敏变阻器是一种由较厚的铸铁片或钢板叠成铁芯,外面套上绕组的三相电抗器。绕组串在电动机转子回路中,通电后由其绕组电抗和铁芯损耗(主要是涡流损耗)确定的等效阻抗随转子电流频率而变化。在电动机起动过程中,随着转速上升,自动平滑地减少阻抗值,起到限制起动电流和得到大致恒定的起动转矩的作用,并且减少了控制的触点。其结构简单、运行可靠、无需维护。主要性能见表 3.1.5.5。

表 3.1.5.5 频敏变阻器性能参数

系 列	用 途	负 载 分 类	负 载 特 点	性 能				功率 范围 /kW
				起动时 负载转 矩倍数	起动转 矩倍数	起动电 流倍数	总起动 时间/s	
BP1  BP6	偶 尔 起 动	轻载	$GD^2$ 小, 负载小	0.1~0.5	0.7	1.25~1.6	80	22~2240
		重轻载	$GD^2$ 大, 负载不大	0.5~0.7	1	1.6~2	120	
		重载	$GD^2$ 不大, 负载大	0.6~1	1.2	2~2.5	120	
BP1  BP4	断 续 周 期	第一类	$Z < 250/h$ $t_s Z < 400S$	0.2~0.8	1~1.3	1.6~2.5		2~125
		第二类	$Z < 400/h$ $t_s Z < 630S$					
		第三类	$Z < 630/h$ $t_s Z < 1000S$					
		第四类	$Z > 630/h$ $t_s Z < 1600S$					

绕线电动机的制动特性与笼型电动机也完全相同。由于绕线电动机转子中可串有不同电阻,使制动特性像起动特性一样具有族性。

## 5. 交流调速拖动

### 1) 分类

由于异步电动机的优点,交流调速拖动的研究一直是近代电力拖动的重要课题。随着电力电子技术及器件和电子控制装置的发展,交流调速拖动已取得相当大的成就。

交流电动机转速为:

$$n = \frac{60f}{p}(1 - S) \quad (3.1.5.12)$$

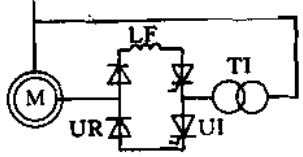
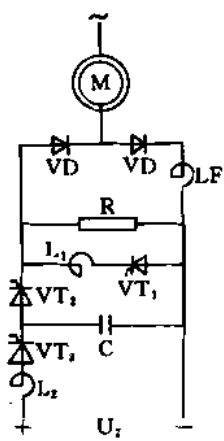
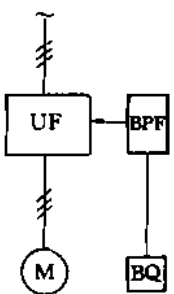
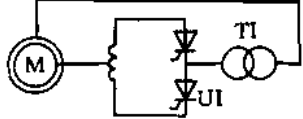
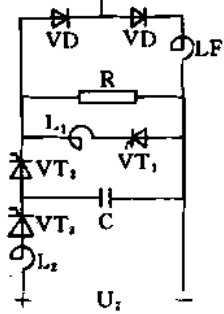
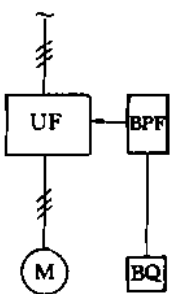
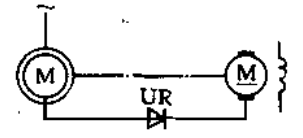
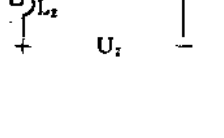

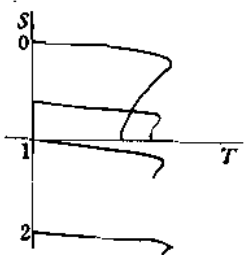
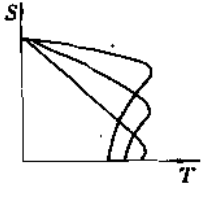
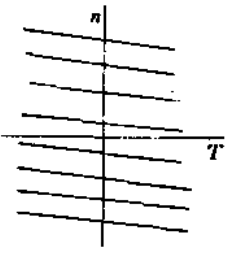
因此,交流电动机有3种基本调速方式:改变电源频率 $f$ 、改变极对数 $P$ 和调节转差率 $S$ 。改变极对数的方式已在本节的“3. 变极变速电动机单机拖动”中论述过。改变电源频率的方式是交流调速的重点发展方向,因为这种方式可应用于广泛使用的笼型电动机的调速,是最经济的方式,有深远的意义。调节转差率的方式在交流调速的早期起到过积极的作用,也有较多的方法,如串级调速、调压调速、电磁调速等。其中有些是属于能耗型调速,有些性能指标不高,所以在应用中有一定局限性。随着变频调速的发展,这些调速方式的应用将会逐步减少。

交流调速拖动的各种方式及其性能见表 3.1.5.6。

表 3.1.5.6 交流调速系统

分类	宽 型 电 动 机		
	电磁转差离合器调速	变频调速	调压调速
系 统 原 理 简 图			
机 械 特 性 曲 线			
调 节 方 式	调节测速反馈的比较电压	用双连电位器同时调节晶闸管整流器输出的直流电压(调压)与尖脉冲发生器的脉冲频率(调频),使电压与频率大致成正比关系	调节测速反馈的比较电压
用 途 说 明	①因调速时损耗很大,所以较适用于通风机性负载。电源不变相序时,可用于位能性负载,能作制动下降,但有轻载不可控区; ②用变极电动机可增加调速范围并减小损耗; ③电源变相序(有触点),可用于正反反转场合或空钩下降	①用于恒转矩调速装置。正反转为有触点变相序,以简化逆变线路,控制脉冲顺序不变; ②线路用于再生制动,整流部分必须采用可逆线路	①用于恒转矩调速装置,短时深调速,长期高速运行; ②电源变相序(有触点),可用于正反反转场合; ③系统功率因数及效率较低(特别低速时)
备 注	①由于额定转差率较大,配合机械时转速需注意; ②不可控区约 $0.1T_N$ ; ③调速范围:3~10	①采用输出变压器可以提高效率; ②逆变器带电动机起动有一定困难; ③调速范围:5	①电动机需强迫通风并选用高转差率型; ②额定滑差较大,配合机械时转速需注意; ③时间常数小; ④结构和控制简单

原理及机械特性曲线

绕 线 电 动 机		无换向器电动机
串级调速	转子电阻斩波器调速	变频调速
<div>低同步速</div> 		
<div>超同步速</div> 		
<div>电机串级</div> 		
		
调节晶闸管逆变器触发装置的控制相位	调节晶闸管斩波器周期的通断,使整流电路的等效电阻变化	调节晶闸管变频器触发装置的控制相位
①适用于位能性负载,能作制动下降; ②电源变相序(有触点),可用于正反转场合或空钩下降; ③系统功率因数较低	①适用于通风性负载; ②转差功率损耗于电阻,效率较低	①适用于四象限工作,与直流调速系统有类似机械特性; ②可适用低速或高速大容量电动机
①电动机转子宜选择低电压,以免逆变回路电压太高; ②开环系统机械特性较软,但系统简单可靠。加测速反馈可提高硬度; ③逆变回路尚有一较小的压降,影响最高转速的达到,必要时可再加短路接触器来满足	①需直流电源; ②开环系统机械特性较软,但系统简单可靠。加测速反馈可提高硬度	①需精确的位置检测器; ②大容量电动机的高电压等级需与晶闸管电压水平协调



除了电磁调速是采用电磁转差离合器之外,交流调速拖动中的电源变换装置均是基于晶闸管及新型大功率半导体器件的各种应用。

## 2)变频调速

变频调速是利用电动机的同步转速随频率变化的特性,通过改变电动机的供电频率进行调速的方法。用晶闸管等静止变频装置构成变频电源进行调速已被广泛采用。船舶大功率特种机械曾采用过专用柴油发电机组作为变频电源,用改变柴油机转速的方法来改变发电机频率。

静止变频电源可分为间接变换(交-直-交变频)和直接变换(交-交变频)两种方式。间接变换方式有中间直流环节,它又可分为电压型、电流型和脉宽调制型(PWM)3种类型。电压型与电流型变频的主要性能比较见表3.1.5.7。脉宽调制型也可认为是电压型,逆变器大多采用大功率晶体管(GTR)或可关断晶闸管(GTO)。脉宽调制是将一个周期的逆变电压分割成几个脉冲,分配脉冲时使电源谐波成分尽量减少。改变脉冲数和脉冲宽度,使供给电动机的基波电压与频率成比例变化,频率越高脉冲数越少。此种方式具有电源侧功率因数高、电机侧谐波成分少、调速范围宽(20:1)和响应快的特点。直接变换方式是利用晶闸管的开关作用,对交流电源控制输出不同频率的交流电供给电动机进行调速的一种方法。电动机最高频率仅为电源频率的1/2至1/3,不能高速运转是个缺点。但直接变换效率高,输出波形得到改善,在中低速及大中容量电动机调速中被广泛采用。间接变频与直接变频的主要性能比较见表3.1.5.8<sup>[5]</sup>。

表 3.1.5.7 电流型与电压型变频主要性能比较

变频器类别 比较项目	电 流 型	电 压 型
直流回路滤波环节	电抗器	电容器
输出电压波形 <sup>①</sup>	决定于负载,当负载为异步电动机时,为近似正弦波	矩形
输出电流波形 <sup>①</sup>	矩形	决定于逆变器电压与电动机的电动势,有较大谐波分量
输出动态阻抗	大	小
再生制动(发电制动)	方便,不需附加设备	需要附加电源侧反并联逆变器
过电流及短路保护	容易	困难
动态特性	快	较慢,用 PWM 则快
对晶闸管要求	耐压高,对关断时间无严格要求	一般耐压可较低,关断时间要求短
线路结构	较简单	较复杂
适用范围	单机、多机	多机,变频或稳频电源
<sup>①</sup> 指三相桥式逆变器,既不采用脉冲宽度调制,也不进行多重叠加		

表 3.1.5.8 交-交变频与交-直-交变频主要性能比较

变频器类别 比较项目	交-交变频	交-直-交变频
换能形式	一次换能,效率较高	两次换能,效率略低
换流方式	电源电压换流	强迫换流或负载换流
装置元件数量	元件较多,元件利用率较低	元件较少,元件利用率较高
调速范围	最高频率为电源频率的 $1/3 \sim 1/2$	频率调节范围宽,不受电源频率限制
电网功率因数	较低	移相调压、低频低压时功率因数低,用斩波或 PWM 调压,则功率因数高

### 3) 电磁转差离合器调速

电磁转差离合器调速是由笼型电动机恒速拖动一个具有直流励磁绕组的可变速的离合器来实现的。离合器由电枢和磁极两个旋转体组成,磁极沿离合器气隙圆周产生若干对  $N, S$  极性交替的磁场,电枢与磁极的相对运动切割磁力线而产生涡流,这涡流与磁通的相互作用,使另一个旋转部分产生转矩而转动起来。改变励磁电流就能改变转矩,经转速负反馈可获得稳定转速,因此,输出转速不可能超过笼型电动机转速。这种调速系统是一种损耗型调速,低速时由于电枢涡流发热损耗能量,所以效率较低,因此适用于短时深调速而长期高速运行的机械。但由于它具有制造方便、结构简单、成本低廉、维护方便、起动平滑、起动力矩大、调速范围广等优点而获得广泛应用。转差离合器在拖动反应性负载时不能反向,只能靠笼型电动机反向运转而反向,所以在要求频繁可逆的场合不宜采用。在拖动位势性负载时,只要改变转速反馈比较电压的输出极性即可用于制动下降,此时笼型电动机并不反向,所以转差率最大可达  $S=2$ 。由于位势负载下降反馈到电动机轴上的制动转矩约为电动转矩的 0.6 倍左右,所以实际上能量损耗并不大,甚至比低速上升时小,笼型电动机及转差离合器均能适应工作。笼型电动机可不反向运行而使位势性负载反向下落,对运行控制简化带来较大好处,这是该系统的优点<sup>[6]</sup>。

### 4) 调压调速

调压调速是利用接在笼型电动机定子端的反并联连接的晶闸管或双向晶闸管的不同的触发角来改变定子端的电压值进行调速的方法。因此,从机械特性来看相当于降压起动时的特性,增加了转速反馈环节后可获得硬特性。如果选用高转差率或有高电阻特殊笼型条的电动机,也能在低速区获得稳定转速。不论何种电动机,其调速能量损耗均消耗在转子电阻中,所以也是损耗型调速。为了散热,可能需要采用强制通风结构的电动机。因此,这种调速方法受电动机的选型限制而应用较少。表 3.1.5.9 列出了几种晶闸管的不同的连接方式及其输出波形<sup>[5]</sup>,比较而言,其中  $b, e$  两种电路较好,实际有所采用。调压调速的主要优点是线路简单、价格便宜、使用维修比较方便,所以在小容量、调速范围和精度要求不高的场合可以采用。

表 3.1.5.9 调压调速接线方式及性能

类 型	电 路	波 形 (一相)	性 能
三相 零线			输出电流中有奇次谐波, 电网中有直流分量
三相 全控			需宽脉冲或双脉冲触发
三相 半控			输出电流中有奇次、偶次谐波, 使转矩减小效率降低
三相 内三角形			晶闸管耐压要高, 有三次谐波电流
三相 三角形			使用元件少, 电路简单, 有偶次谐波, 电动机只能Y接线

## 5) 串级调速

串级调速是在绕线电动机的转子侧连接一个由二极管或晶闸管组成的整流桥, 将转差频率交流电变为直流电, 再用逆变器或直流电动机将直流电变为交流电返回电源或变为机械能返回绕线电动机轴上进行调速的一种方法。能量返回电源的称为电气串级; 能量返回电动机轴的称为电机串级。电机串级能使电动机轴实现恒功率机械特性, 即转速下降转矩增加, 其增加的转矩由直流电动机给出。电气串级又可分成低同步速串级和超同步速串级两种, 图 3.1.5.1 给出了串级调速四象限工作时的状态(第三、四象限工作为电源反相序与第一、二象限相同, 从

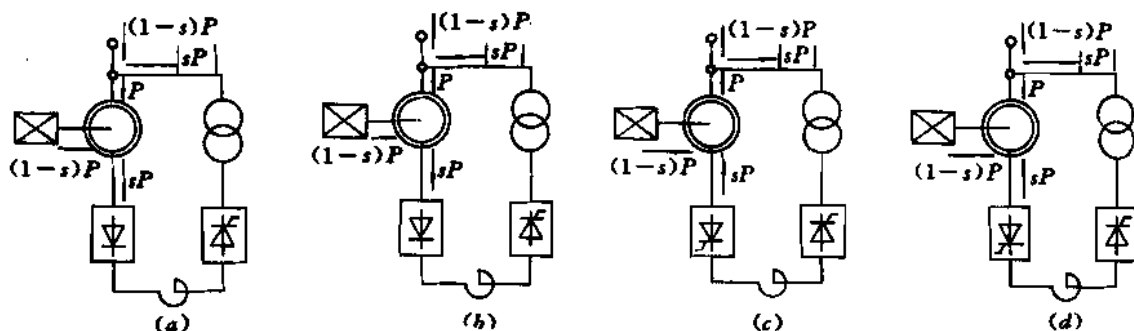


图 3.1.5.1 串级调速系统的四种工作状态

(a) 低同步电动机运行 ( $0 < S < 1$ ); (b) 超同步发电运行 ( $S < 0$ );  
(c) 低同步发电运行 ( $0 < S < 1$ ); (d) 超同步电动机运行 ( $S < 0$ )。

略)<sup>[7]</sup>。串级调速效率较高但功率因数较低(超同步速的能获得提高)。串级调速系统中电动机选择应比正常情况提高 15% 的转矩系数和 10% 的转速系数。由于逆变器常按最低速时参数设计较经济, 所以像变频调速一样, 带电动机起动因电压太高而不适应, 常用串电阻或频敏变阻器方法先起动后再接入串级调速装置为宜。

## 6) 转子电阻斩波器调速

转子电阻斩波器调速是在绕线电动机的转子侧连接一个由二极管组成的整流桥,在整流桥的直流侧接入外接电阻  $R$ ,在电阻  $R$  两端并联一个斩波器,改变斩波器的导通和开断的时间比率,就可以改变整流电路的有效电阻值,即可以达到改变转子等效电阻进行调速的方法。当斩波器处于导通状态,等值电阻为零;斩波器处于断开状态,等值电阻为  $R$ 。如导通时间为  $t_{on}$ ,周期为  $T$ ,则导通率  $\alpha = t_{on}/T$ ,等效电阻  $R_d = (1 - \alpha)R$ 。晶闸管  $VT_1$  与  $VT_3$  以恒定周期同时触发,经  $t_{on}$  时间后触发  $VT_2$ ,使电容  $C$  通过  $VT_2$  放电使  $VT_1$  关断, $VT_2$  与  $VT_3$  不允许同时导通。转子电阻斩波器调速适用于小容量要求不高的通风机性负载。

#### 7) 无换向器电动机变频调速

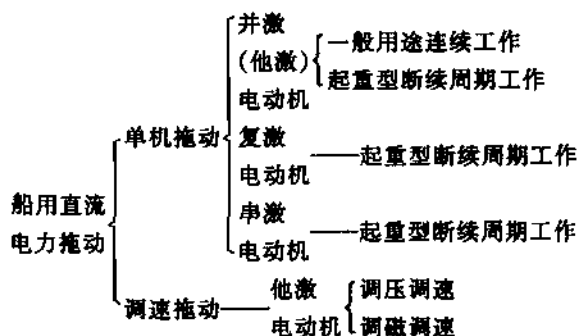
无换向器电动机是典型的机电一体化的新型调速电机,它由变频器、同步电动机、位置检测器及控制极触发装置等组成,又称无整流子电动机或无刷直流电动机。它具有直流电动机的调速特性,但是没有换向器和电刷,具有结构简单、不需经常维护和检修的特点。从几瓦级的小型晶体管电动机直到兆瓦级的大容量晶闸管电动机已有广泛应用,与笼型电动机变频调速系统相比,在经济上有较大优势。无换向器电动机的特点是它的逆变器和一般同步电动机变频调速系统中的逆变器不同,它的频率不是独立调节的,而是受控于电动机转子轴上的转子位置检测器,是一个所谓自控式逆变器。它保证逆变器的输出频率和电动机的转速能始终保持同步,并有可能利用同步电动机中的反电势帮助晶闸管进行换流。转子位置检测器分直接式和间接式两种,直接式有接近开关式、光电式及电磁式;间接式采用反电势进行转换,所以还需加初始(静态)位置检测,比较复杂而较少应用。根据变频器类型可有直流和无直流两种,相应无换向器电动机也分直流和交流两种。

### 3.1.6 直流电力拖动基本原理

#### 1. 分类

船用直流电力拖动方式分类见表 3.1.6.1。

表 3.1.6.1 船用直流电力拖动方式分类



单机拖动是一种由母线供电无电源变换装置按逻辑信号方式进行控制的不调速或有级调速的电力拖动方式。

调速拖动是一种有电源变换装置按逻辑、模拟或数字信号方式进行控制的有级或无级调速的电力拖动方式。其供电可由直流母线、交流母线或专用电源供给。

#### 2. 直流单机拖动

直流单机拖动在历史上曾起到十分重要的作用,60 年代至 70 年代以后,随着船电交流化

和交流电力拖动的发展,直流单机拖动已基本不用。然而,由于直流调速拖动性能优良,仍有较多应用,即使在陆用场合亦是如此。而直流调速拖动中主要采用他激电动机,所以此处主要对他激电动机的基本性能,即单机拖动的并激电动机的基本性能作介绍。

并激电动机在各种接线和运行状态下的机械特性曲线及计算公式见表 3.1.6.2。

表中  $n$ ——电动机转速( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ );

$U$ ——电动机端电压(V);

$I$ ——电动机电枢电流(A);

$R$ ——电动机电枢绕组、换向极绕组和补偿绕组电阻的总和( $\Omega$ );

$T$ ——电动机电磁转矩( $\text{N}\cdot\text{m}$ );

$C_e, C_T$ ——电动机结构常数;

$\Phi$ ——电动机每极磁通(Wb);

$n_0$ ——电动机空载转速( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ );

$R_f$ ——电动机电枢附加电阻( $\Omega$ );

$E$ ——电动机电枢电动势(V);

$P$ ——电动机功率(kW);

$\eta$ ——电动机效率;

下角  $N$ ——额定值;

下角  $st$ ——堵转值;

下角  $W$ ——弱磁值;

$$v = \frac{n}{n_0}; \quad m = \frac{T}{T_N}; \quad i = \frac{I}{I_N}; \quad r = \frac{R}{R_N}; \quad R_N = \frac{U_N}{I_N};$$

下角  $art$ ——人为特性值;

$$\alpha = \left| \frac{dT}{dn} \right| \text{——机械特性曲线硬度};$$

下角  $ih$ ——固有特性值。

$$\text{其中} \quad C_e = \frac{pN}{60a} \times 10^{-8} \quad (3.1.6.1)$$

$$C_T = \frac{pN}{9.81 \times 2\pi a} \times 10^{-8} \quad (3.1.6.2)$$

式中  $p$ ——电动机极对数;

$N$ ——电枢绕组有效导体数;

$a$ ——电枢绕组并联支路数。

式(3.1.6.1)与式(3.1.6.2)之间有如下关系:

$$\frac{C_e}{C_T} = 1.03 \quad (3.1.6.3)$$

机械特性曲线的斜率说明电动机转速随着负载变动的变化大小,用硬度  $\alpha$  表示,转速变化越小,则硬度越大。

纯并激或他激电动机的固有机特性曲线,在负载超过额定值的时候,有时会上翘,即其转速不但下降,反而会超过空载转速,这是由于电枢反应祛磁影响之故。为了得到较稳定的转速,可在并激或他激的基础上,带有少量(约占 10%)的串激绕组(或称稳定绕组)。

复激电动机的特点是串激绕组产生的磁通与电动机电枢电流有关,负载大小影响磁通变

表 3.1.6.2 并激电动机机械特性曲线

分 类		固 有 特 性	人 为 特 性		
			电枢串电阻	削弱磁场	发电反馈制动
电动机接线图					
机械特性曲线					
机械特性方程式	理论公式	$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_f \Phi^2} I$ $= n_0 - \frac{R}{C_e C_f \Phi^2} T$	$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R + R_f}{C_e C_f \Phi^2} I$ $= n_0 - \frac{R + R_f}{C_e C_f \Phi^2} T$	同固有特性	$n = \frac{U}{C_e \Phi} + \frac{R}{C_e C_f \Phi^2} I$ $= n_0 + \frac{R}{C_e C_f \Phi^2} T$
	标么值公式	$v = 1 - m r$ $= 1 - i r$	$v = 1 - m(r + r_f)$ $= 1 - i(r + r_f)$	同固有特性	$v = 1 + m r$ $= 1 + i r$
	实用公式	$T = C_f \Phi I$ $E = C_e \Phi n$	同固有特性	同固有特性	同固有特性
机械特性曲线绘制(二点一直线法)		$(0, n_0)(T_N, n_N)$ $n_0 = \frac{U_N}{U - I_N R}$ $T_N = 9555 \frac{P_N}{n_N \eta_N}$	$(0, n_0)(T_N, n_{Nst})$ 或 $(T_*, 0)$ $n_0$ 不变 $n_{Nst} = \frac{U - I_N(R + R_f)}{U - I_N R} n_N$ $T_* = T_N \frac{I_N}{I_N}$ $= T_N \frac{U}{I_N(R + R_f)}$	$(0, n_{0w})(T_{*w}, 0)$ $n_{0w} = \frac{\Phi_N}{\Phi_w} n_0$ $T_{*w} = \frac{\Phi_N}{\Phi_w} T_{*N}$	固有特性在第二或第四象限的延长线
用途说明		额定工作长期运行,主要用于负载不变的情况	①启动过渡特性; ②恒转矩向下调速运行	恒功率向上调速运行 $I_N n_w = T_N n_N$ 注意:最大允许转矩的减小和最高转速的允许值 调速范围:3~5	①反馈制动,常用于位能负载的下降特性(同时还可变化电枢串联电阻值); ②超速时为能量反馈
备 注		$\alpha = 40 \sim 10$	电阻损耗很大	公式忽略因转速不同的电枢反应变化电阻损耗很小	电动机电动势 $E$ 大于端电压 $U$

分 类		人 为 特 性		
		能耗制动	反 接 制 动	
			电枢端线反接	反接制动下降
电动机接线图				
机械特性曲线				
机械特性方程式	理论公式	$n = -\frac{R + R_f}{C_e \Phi} I$ $= -\frac{R + R_f}{C_e C_r \Phi^2} T$	$n = -\frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R + R_f}{C_e \Phi} I$ $= -n_0 - \frac{R}{C_e C_r \Phi^2} T$	同电枢串电阻
	标么值公式	$v = -m(r + r_f)$ $= -i(r + r_f)$	$v = -1 - m(r + r_f)$ $= -1 - i(r + r_f)$	同电枢串电阻
	实用公式	同固有特性	同固有特性	同固有特性
机械特性曲线绘制 (二点一直线法)		$(0, 0), (T_N, n_N)$ $T = T_N \frac{U - I_N R}{I_N (R + R_f)}$	$(0, -n_0), (T_N, n_N)$ $T = T_N \frac{U - I_N R}{I_N (R + R_f)}$	$(0, n_0), (T_N, n_N)$ $n = \frac{U - I_N (R + R_f)}{U - I_N R} n_N$
用途说明		能耗制动, 常用于快速准确停车或位能负载的下降特性(同时还可变化电枢制动电阻值)	反接制动, 用于快速停车	反接制动, 用于位能负载的下降特性(同时还可变化电枢串联电阻值)
备 注		磁场保持恒值	又称重物倒拖特性	电阻损耗较大 第四象限虚线平行于固有特性曲线

化。由于实际电动机磁路是饱和的,因此磁通与电流的关系是非线性的,不能用公式表达其机械特性。具体应用时,必须利用工厂提供的工作特性曲线资料,即将  $I = f(T, n)$  换算成  $T = f(n)$ ,或利用磁化曲线  $\Phi = f(AW)$  进行计算得到,计算中电阻应折算成 75℃ 时的数据。注意,工作特性曲线中的  $T$  为轴转矩,计算的  $T$  为电磁转矩。

电枢分路各种接线是复激电动机应用最广泛的运行方式,它用适当的电阻配合,能实现各种各样的人为机械特性,以得到简单的有级调速性能,60 年代至 70 年代前的直流制船舶甲板机械电力拖动中曾获得广泛应用。

复激电动机中的串激和并激绕组的安匝比简称为串并比,对机械特性曲线的硬度影响较大。ZZH, ZZKH 系列串并比约为 7:3, ZZYH 系列复激的为 1:2, 串激的为 9:1。串激比例越大,特性越软。

和复激电动机一样,串激电动机的磁通也与其电枢电流有关,并且它们的关系是非线性的,所以也不能用公式表达其机械特性。串激电动机各种接线时的特性完全可运用复激电动机的资料,只需把并激绕组部分去掉就可以了。由于没有并激绕组,所以工作特性上没有理想空载转速这一点(理论上是无穷大),机械特性最软。

### 3. 直流调速拖动

直流调速拖动由于调速范围广、调速平滑精确、效率高、容易控制、快速响应等优点,既是最古老的调速方法又具有很强的生命力,即使在当今交流调速拖动得到很大发展的时期,甚至在未来的一段时间内,仍会被广泛应用。

直流电动机转速为:

$$n = \frac{U - I(R + R_f)}{C_e \Phi} \quad (3.1.6.4)$$

因此,直流电动机有三种基本调速方式,即改变电源电压  $U$ 、改变电枢电路附加电阻  $R_f$  和调节电动机磁通  $\Phi$ 。改变电枢电路附加电阻的方式由于电阻损耗大、调速范围小、特性硬度软而最少在调速系统中得到应用。调节电动机磁通的方式单独使用的也较少,一般结合调压调速方式在某些恒功率负载特性的机械上有所应用。因此,改变电源电压的方式是直流调速拖动的主要方式,并且一般均采用他激电动机。

直流调压调速拖动的各种方式及其性能见表 3.1.6.3。

直流调压调速拖动中的电源变换装置可以是各种型式的直流发电机及功率型放大控制器件。过去较多采用电机放大机及磁放大器,随着电力电子器件的发展,晶闸管及新型大功率半导体器件已成为电源变换装置的主流。但从船舶应用而言,由于电力电子器件产生的波形畸变对船舶有限电网的影响及无线电通信的干扰应特别重视。一般认为,电力电子器件容量以不大于电网容量的 30% 为宜。因此,船舶直流调压调速拖动较多采用晶闸管控制励磁的发电机-电动机系统。

在各种带有放大控制器件的直流调速拖动方式中经常用到各种反馈(如电压、电流、转速等),反馈的连接方式也各不相同,以获得不同的性能要求和保护要求。各种放大控制器件各有其特点,见表 3.1.6.4。

直流调速拖动常需可逆运行。在发电机-电动机系统中通常采用磁场反向的办法使发电机电压改变极性从而达到电动机反向的目的;在晶闸管-电动机系统中则可采用开关切换一



表 3.1.6.3 直流调速系统原理及机械特性曲线

分类	简单发电机-电动机系统	三绕组发电机-电动机系统	电机放大器-发电机-电动机系统		
			电压截止系统	电流截止系统	转速截止系统
系统原理简图					
机械特性曲线					
调节方式	调节发电机励磁电流	(1)调节并激磁场; (2)调节他激磁场	(1)调节比较电压; (2)调节给定励磁; (3)调节电流反馈	(1)调节比较电压; (2)调节给定励磁; (3)调节电压反馈	(1)调节转速比较电压; (2)调节给定励磁; (3)调节电流比较电压
用途说明	用于调速范围较广或平滑调速,经常长期低速运行等场合 调速范围 8~10	用于调速范围较广有堵转可能,硬度要求不高的场合	用于调速范围较广有堵转可能的场合。硬度稍差,增加比较电压电阻功率可改善。易得到下垂性很强的特性(挖土机特性)	用于调速范围较广有堵转可能,经常正反转的场合。硬度比简单发电机-电动机系统好。在与电压截止系统相同的下垂性要求下,主电路往往要增加信号降压,加中间放大则系统复杂,加电阻则损耗巨大	用于硬度要求特别大,调速范围极广的场合 调速范围 50~200
备注		将 BQ_G 去掉,即为差复激发电机-电动机系统,机械特性曲线相似	比较电压电阻功率较小	比较电压电阻功率较大	可采用交流调速发电机加整流环节,则低速稳定性更好

(续)

分类	电机放大器-发电机-电动机系统 恒流制系统	放大器-发电机-电动机系统	晶闸管-电动机系统	晶闸管-发电机-电动机系统
系统原理简图				
机械特性曲线	<p>发电机外特性</p> <p>电动机机械特性</p> <p>(1)</p> <p>(2)</p>	<p>可采用各种反馈装置,以得到和电机放大器系统相类似的各种机械特性曲线和相应的调节方法</p>		
调节方式	<p>(1) 调节电动机励磁电流; (2) 在有电动机转速反馈时的各种特性(转速反馈接线不同)</p>			
用途说明	<p>用于调速范围广有堵转可能,经常正反转的场合,且电动机可不限数量,只要使不同工况下的总功率不超过发电机功率即可,发电机也可超过一台不限数量,串联连接。实质上是利用发电机的下亚段特性</p>	<p>见表 3.1.6.4</p>		
备注	<p>电动机转速反馈有多种接线方式,所以机械特性也各不相同</p>	<p>为降低时间常数,常采用二级或三级串联放大线路</p>	<p>上图为反并联连接全控线路,可满足快速启动、制动、反转和频繁可逆场合。对于大功率不频繁可逆的场合可用一套装置进行主电路有触点可逆转换</p>	<p>晶闸管装置需考虑强迫励磁倍数。对于不频繁可逆的场合可用一套装置进行励磁有触点可逆转换</p>

表 3.1.6.4 各种放大器件的比较

分 类	电机放大器	磁 放 大 器	晶 闸 管
放大系数	$10^4 \sim 10^5$	$5 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^2$	控制极触发电压 2.5V ~ 4V, 20mA ~ 450mA
输出功率	0.15kW ~ 16kW	0.04W ~ 15kW (小功率的能放大微弱信号)	元件 1A ~ 1000A, 20V ~ 3000V
时间常数	较小 0.04S ~ 0.2S	较大 0.005S ~ 1.5S	最小
过渡过程	快	慢	最快
线性化	好	稍差	非线性
综合性	高	高	高
强迫励磁	强	强	受过载能力限制
过载能力	大	大	小
工作可靠	转动有触点	静止无触点	静止无触点
维 护	困难	方便	方便
调 整	困难	方便	困难
可 逆	方便	困难 (双拍效率低, 有触点线路复杂)	两套装置
调速范围	广	受最小输出限制稍差	广
无信号时	有剩磁	有最小输出	无输出
尺 寸	大	小	小

套变流装置反向、两套变流装置反并联供电及磁场反向 3 种办法来达到。3 种办法的性能比较见表 3.1.6.5, 3 种办法的四象限运行工作状态见图 3.1.6.1<sup>[5]</sup>。

表 3.1.6.5 晶闸管-电动机系统可逆方式比较

比较项目	电枢用一套变流装置供电, 开关切换	电枢用一套变流装置供电, 磁场反向	电枢用两套变流装置供电, 电枢反向
设备	1. 电枢变流装置一套; 2. 电枢回路切换开关; 3. 切换逻辑	1. 电枢变流装置一套; 2. 励磁变流装置两套; 3. 切换逻辑	1. 电枢变流装置两套; 2. 无环流切换逻辑或环流电抗器
性能	有触点开关快速性差, 正反转开关切换死时 0.2s ~ 0.5s, 减速时开关要切换两次 采用晶闸管开关可将切换死时减少到 0.1s	快速性差, 正反转磁通反向时间几百毫秒到 1s, 减速时磁通要切换两次	快速性好, 切换死时 0 ~ 几十 ms
可靠性	主回路不会产生环流, 有触点开关维护工作量大, 寿命低	主回路不会产生环流, 无触点切换, 要求有可靠的可逆励磁回路	要求触发器、逻辑切换可靠及抗干扰能力强
系统与 投资	系统简单, 投资少	系统复杂, 但投资较少	系统较简单, 但投资大
适用场合	正反转调速不频繁, 受开关容量限制, 一般在几十千瓦以下, 如吊车等	正反转调速不频繁, 对调速精度要求不高, 容量几十千瓦到几千千瓦, 如卷扬机等	正反转调速频繁, 容量从几千瓦到几千千瓦, 船上使用较少, 多用于轧机主、辅传动, 可逆转机床等

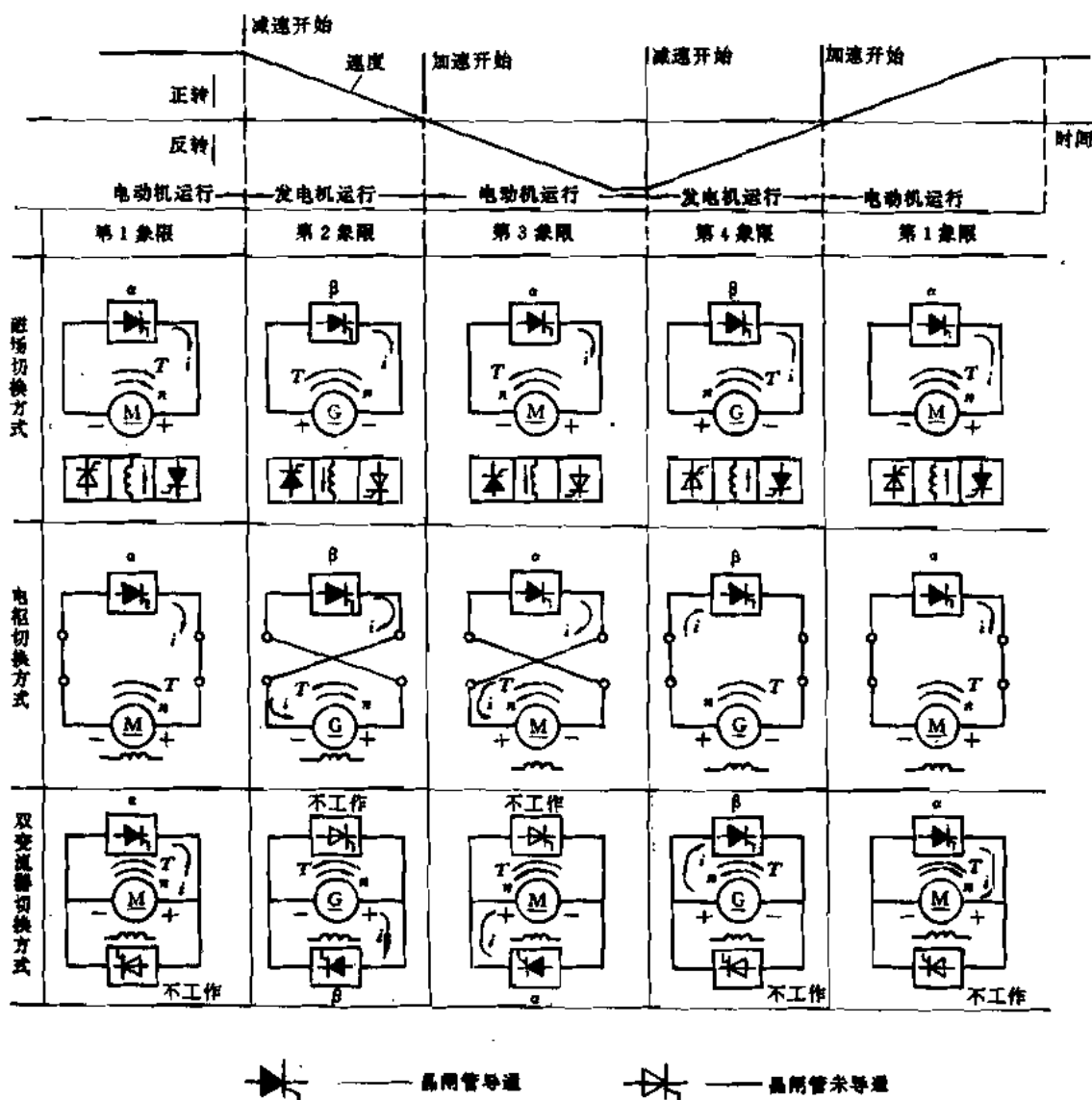


图 3.1.6.1 晶闸管-电动机系统的四象限运行

### 3.1.7 常规控制电器

#### 3.1.7.1 起动器

##### 1. 全电压直接起动器

交流磁力起动器是用于笼型电动机全电压从电网直接起动的控制电器。直接起动具有控制设备简单、价格便宜、起动快速、可靠等优点，因而得到广泛应用。

笼型电动机直接起动由于起动电流较大，会引起船舶电网电压的瞬时跌落，从而导致电网其他用电设备的不正常运行。因此，船舶电站调压性能的不同，对允许直接起动的笼型电动机的容量限制也不同。一般船舶电站的瞬时电压降允许为 15%，各种发电机按此值都规定了允许直接起动的电动机容量。在未给出此值的情况下，一般允许直接起动的电动机容量最大约

为  $1/4 \sim 1/3$  的发电机容量。

磁力起动器主要由电源开关、接触器、热继电器组成,并配以控制变压器、按钮、指示灯、电流表、计时器等辅助元件。起动器具有失压和过载保护功能。为了配合某些机械简单的自动控制的需要,有的起动器还带有手动-自动转换控制开关。

常用的船用磁力起动器系列及参数见表 3.1.7.1。

表 3.1.7.1 常用船用磁力起动器系列参数

序	系列	额定工作电流/A	额定电压/V	接触器,热继电器
1	QC91	10, 20, 40, 60, 100, 150	380, 440	CJ91 或 CJ914, JR16B
2	QC96	13.5, 22.5, 45, 90, 135	380	
3	QC98	20, 40, 60, 100, 150	380	CJ98, JR915
4	QC99	9, 16, 25, 40, 63, 86, 120, 150	380, 440	法国 LC, LR
5	QC916	10, 20, 40, 80, 150	380, 440	CJ914, JR918
6	QC920	16, 25, 40, 63, 100, 160	380, 440	CJ920 或 3TB, JR16B 或 3UA
7	QCC1	20, 40, 63, 100, 160	380, 440	CJC1
8	WQ92	16, 30, 45, 85, 105, 170	380, 440	德国 B, T
9	CST81	16, 30, 45, 65, 85, 105, 120	380, 440	德国 B, T
10	MC	10 ~ 400	380, 440	德国 3TB, 3UA

典型的磁力起动器原理图如图 3.1.7.1 所示。

## 2. $\Delta$ -Y 降压起动器

当电动机容量相对于船舶电站容量的比例较大,直接起动将会产生超过允许的瞬时电压降时,可以采用  $\Delta$ -Y 降压起动器。 $\Delta$ -Y 降压起动器适用于电动机定子绕组具有 6 个出线头的结构,在正常运行三角形接线时才能采用,Y-H 系列电动机在 4kW 以上者均为这种接线法。

起动时定子绕组为星形接线,以降低电动机的起动电流,待转速上升后,再转换到正常三角形接线。星形起动时,起动电流为原来的  $1/3$ ,同时起动转矩也减小为原来的  $1/3$ 。 $\Delta$ -Y 起动器设备比较简单,是降压起动的首选方式。

常用的船用  $\Delta$ -Y 起动器系列及参数见表 3.1.7.2。

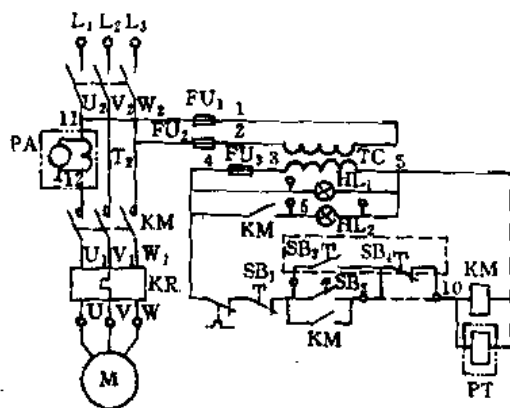


图 3.1.7.1 典型的磁力起动器原理图

表 3.1.7.2 船用 $\Delta$ -Y 起动器系列参数

序	系列	额定电流/A	额定电压/V	转换方式
1	QX91	20,40,80,150	380,440	时间
2	QX92	40,80,150,300	380	时间
3	QX920	25,40,63,100,160	380,440	时间
4	QXC1	20,63,160	380,440	时间
5	CST82	52,78,112,147,181,225	380,440	时间
6	MC	10~250	380,440	时间
7	WQ92	52,78,147,181,225	380,440	时间
8	QXJ1	100,110,120,150,180	380	时间

典型的 $\Delta$ -Y 起动器原理图见图 3.1.7.2 所示。

### 3. 自耦变压器降压起动器

$\Delta$ -Y 起动器只有一种降压关系,如这种降压关系满足不了降压要求时(一般为起动转矩欠大),可采用自耦变压器降压起动器。由于自耦变压器的抽头可任意选择,所以降压关系可按需要决定,这样可获得大于或小于 $\Delta$ -Y 起动器的起动电流及起动转矩。其起动电流及起动转矩均与自耦变压器抽头电压比的平方成正比。

自耦变压器降压起动器由于增加了自耦变压器,所以其重量尺寸较大,一般用于超比例容量电动机的起动。

船用自耦变压器起动器系列及参数见表 3.1.7.3。

典型的自耦变压器起动器原理图见图 3.1.7.3。

表 3.1.7.3 船用自耦变压器起动器系列参数

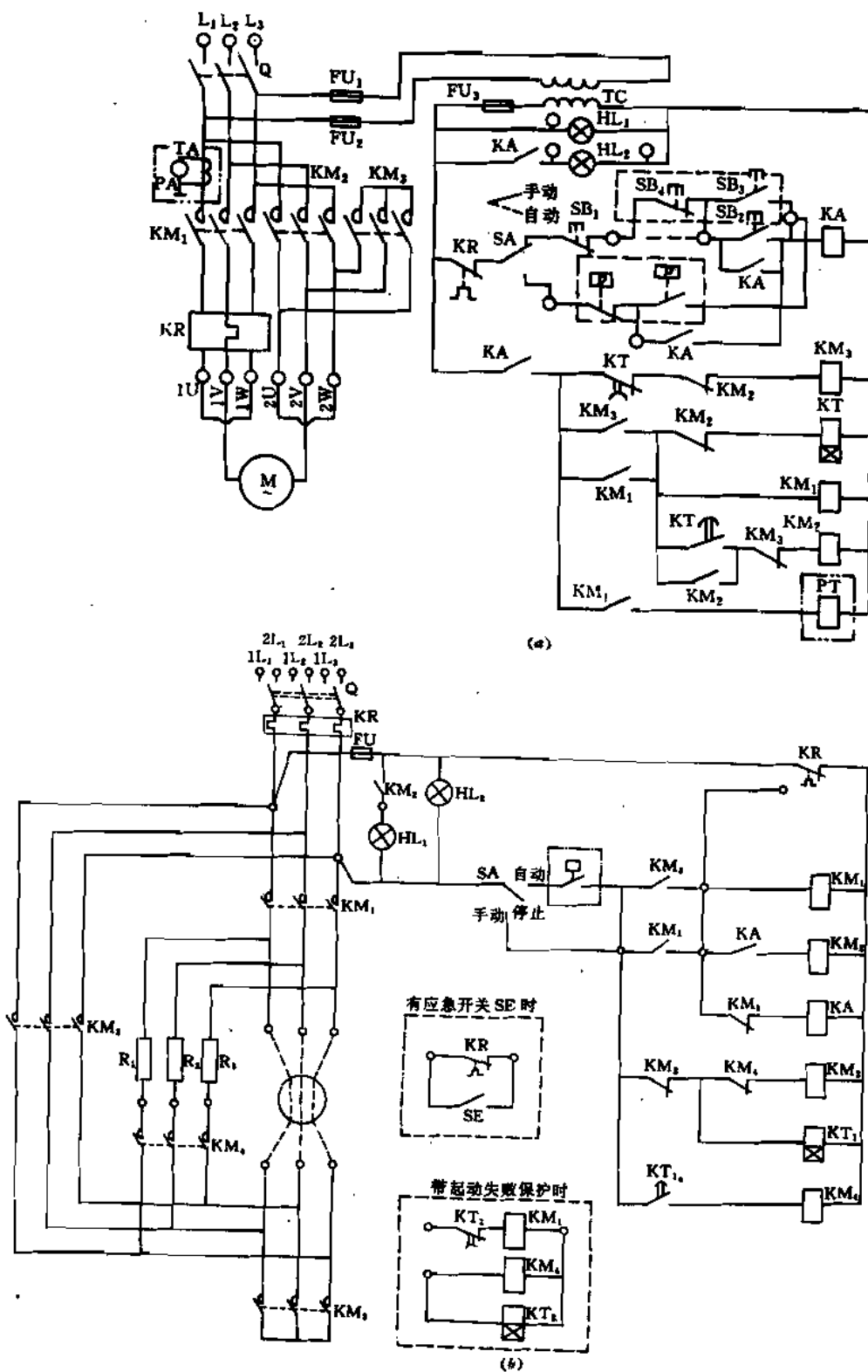
序	系列	额定电流/A	额定电压/V
	QD920	160,250,400,630,800	380,440

### 4. 组合起动器

由多个不同型式和规格的起动器组合而成的控制设备称为组合起动器或称电动机控制中心(Motor Control Centre,缩写为 MCC)。

在现代某些大型船舶或海上石油平台上经常装置组合起动器,以对某一区域内的有关电动机进行集中控制。组合起动器中一般由直接起动器、降压起动器及馈电开关组成。组合起动器一般由母线区、电器设备区和电缆区三个具有阻燃功能的小室组成。电器设备区可为固定式也可做成抽屉式,但都具有标准模数化的尺寸规格,以满足不同容量的组合。根据一次接线的不同方案,可以任意选择进行组合。

船用组合起动器系列及参数见表 3.1.7.4。

图 3.1.7.2 典型的 $\Delta$ -Y 起动器原理图

(a) 开式; (b) 闭式。

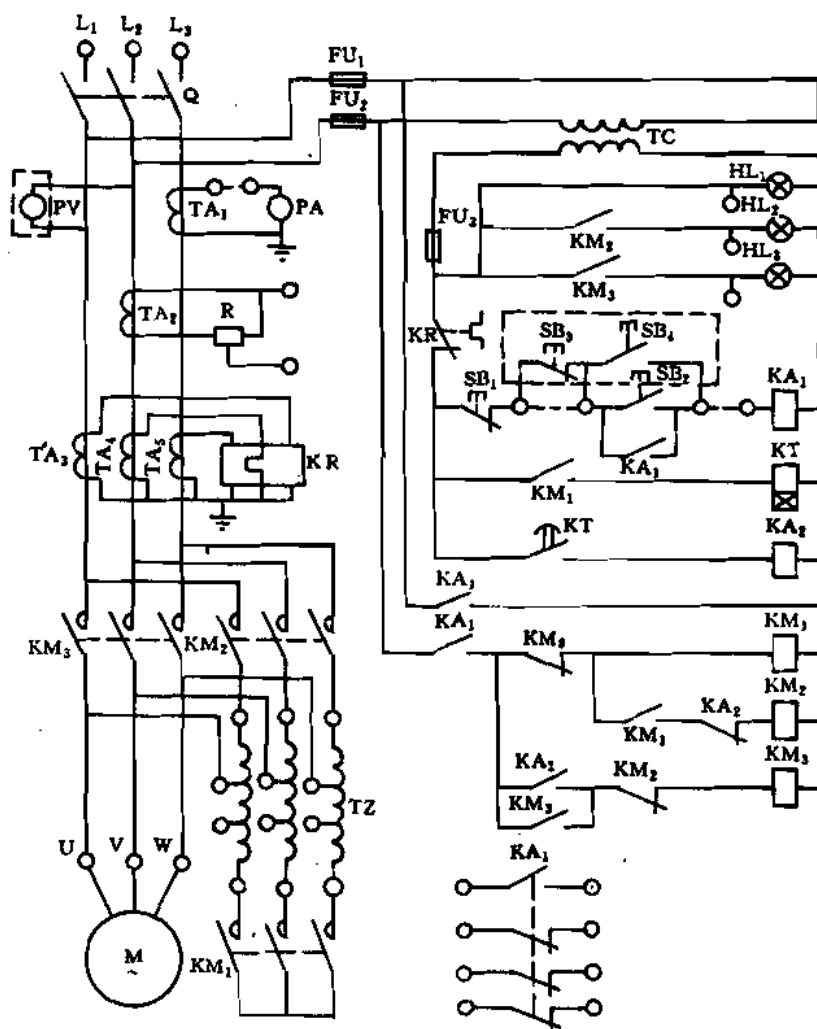


图 3.1.7.3 船用自耦变压器起动器原理图

表 3.1.7.4 船用组合起动器系列参数

序	系列	额定电压/V	额定电流/A		可控电动机/kW	额定短时耐受电流/kA
			水平母线	可插母线		
1	QCZ91	380		150	10~75	30
2	QCZC1	380,440	1500	500	10~75	
3	CSB8	380	2500	630	300	
4	ZQP	380,440		250	110	
5	MNS	380,660	630~5500	1000	200	100
6	GCK	380	1600,3000	200,400	155	15,30,50,80
7	DF-1-G	380,440	1800	600	300	

### 5. 无触点起动器

无触点起动器是采用晶闸管替代接触器所组成的起动器，当晶闸管是采用全导通控制方式时为直接起动起动器；当晶闸管的控制组件采用了微处理器后，能连续检测电动机电流和发热状态而实现某种控制作用时，又可称之为软起动器，甚至做到软停止功能。

无触点起动器能实现无触点电力拖动运行以及可控起动和停止，能极大地改善电动机的



运行条件和控制电器的维护工作,在某些特殊要求的场合具有重要的价值和意义。

无触点起动器由功率组件和控制组件两部分组成。图 3.1.7.4 为无触点直接起动器的原理图<sup>[8]</sup>,图 3.1.7.5 为无触点软起动器的框图,图 3.1.7.6 为无触点软起动器电流和转矩的变化关系图<sup>[9]</sup>。

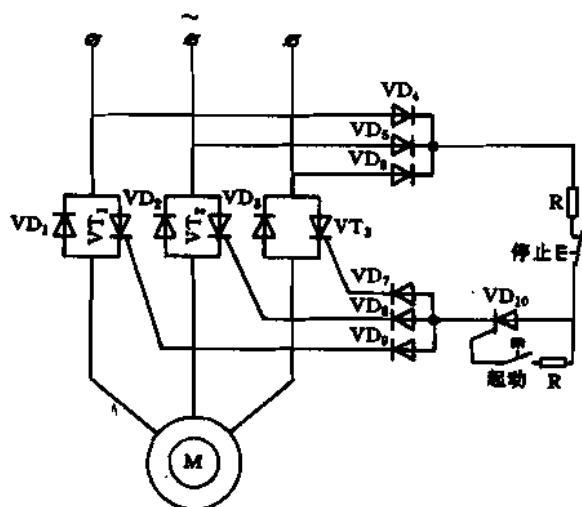


图 3.1.7.4 无触点直接起动器原理图

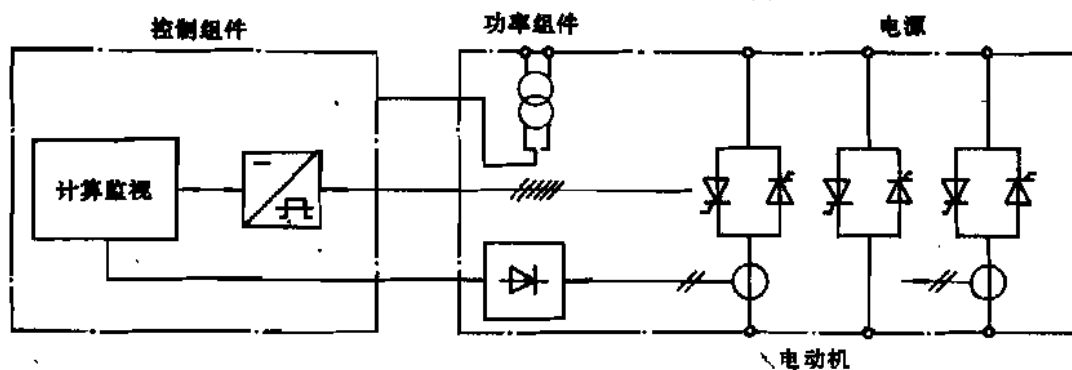


图 3.1.7.5 无触点软起动器框图

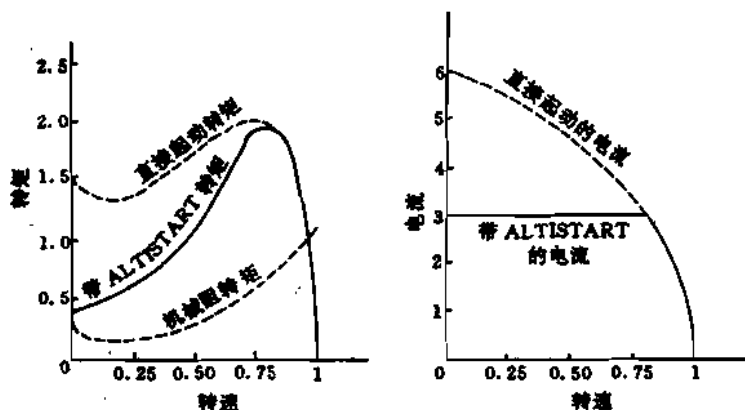


图 3.1.7.6 无触点软起动器电流和转矩变化关系