

第2章 常用电动机的控制与保护

牟世鹏

第1节 交流电动机

(一) 笼型异步电动机

1. 笼型异步电动机的起动

电动机从静止开始使速度上升到额定转速为止的全过程叫起动。这个过程根据各种不同情况而异(大约为几分之一秒到十几秒不等),笼型异步电动机的起动分直接(全压)起动和减压起动两种方式。

(1) 直接起动 这种起动方式所用控制设备简单、经济、可靠,起动时间短。但起动电流大,可达额定电流的4.5~7倍,过大的起动电流会引起线路上的电压降超过允许值,这样会影响到其他设备的正常运行。一般情况下,电动机容量在10kW以下时可用直接起动方式。

1) 电动机直接起动后满足的条件

① 电动机起动时,变电所母线电压降不超过允许值,电动机经常起动时母线电压降的最大允许值为10%;不经常起动的电动机起动时母线电压降的最大值为15%;特殊情况下,在保证传动机械所要求的起动转矩而且不影响其他用电设备正常运行时,电动机的起动电压降可增至20%;

② 供电设备短时过载不应超过最大允许值,对供电变压器来说,若负载每天起动六次,每次连续时间不超过15s,变压器的负载持续率小于0.9时,则负载最大起动电流不应超过变压器额定电流的四倍;

③ 所传动机械的转动惯量不宜过大,否则会使起动时的加速时间过长,导致电动机和变压器绕组产生不允许的过热;

④ 所传动机械在起动时可能承受突加机械力

冲击时应慎重选择电压降。

一般情况下,根据供电电源的种类和参数,笼型异步电动机单位容量的全压起动的最大值可按表2-1-1确定(特殊情况下还应作单独的计算)。

表2-1-1 笼型异步电动机单位容量的最大值

电 源	笼型异步电动机单位容量的最大值
小型发电厂	每1kVA发电机容量为0.1~0.12kW
变电所	不常起动时为变压器容量的30%以下,经常起动时则为20%以下
高压线路	不超过线路三相短路容量的3%

2) 直接起动用控制设备 直接起动的笼型异步电动机的控制设备除常用的交流接触器之外,另外采用如下几种手动电器:

① 三极刀开关 常用胶盖瓷底闸刀开关(开启式负荷开关),型号为HK1、HK2,额定电流为15、30、60A。该类开关的触刀下端装有短路保护的熔丝,通常可按不小于电动机额定电流的3倍来选择刀开关的额定电流值。它常用来控制5.5kW以下的电动机。

② 三极负荷(铁壳)开关 此类开关常用的型号为HH2、HH3及HH4,额定电流有10、15、20、30、60A,可用来控制15kW以下的电动机,常按电动机额定电流的2倍来选用。该类开关装有熔断器,手柄与铁壳有机机械联锁,在不拉下刀闸手柄时,是不能打开铁壳的,因而非常有利于操作、检修的安全。

③ 组合开关 控制异步电动机起动的组合开关常用的有HZ5、HZ10系列,组合开关需与熔断器配合使用,开关的额定电流及可控制笼型异步电动机的功率关系如表2-1-2所示。

④ 断路器 常用的断路器型式有DZ5、DZ15、

表2-1-2 HZ系列开关额定电流及可控制电机的功率

型 号	HZ 5-10	HZ 5-20	HZ 5-40	HZ 5-60	HZ10-10/3	HZ10-25/3
额定电流 (A)	10	20	40	60	10	25
可控制电机功率 (kW)	1.7	4	7.5	10	3	5.5

DZ20等系列, 该类断路器装有短路和过载保护用的脱扣器, 可代替刀开关及负荷开关控制笼型异步电动机的直接起动。

⑤ 电磁起动器 电磁起动器是由交流接触器、热继电器及金属外壳等组成, 可供远距离直接控制笼型异步电动机的起动。常用的型式有QC8、QC10、QC12等系列, 电磁起动器品种繁多, 功能较全, 可按需要选用。

(2) 减压起动 当电动机的起动电流受到限制时, 则按允许起动电流、起动转矩决定减压起动。这种起动方式是通过一些专用设备, 使加到电动机上的电压降低, 以减少起动电流, 待电动机的转速达到或接近额定转速时, 再通过控制设备将电动机换接到额定电压下进行工作。常用的专用设备有自耦变压器、电抗器、电阻器等。

这些起动设备虽然可以减少起动电流, 但同时也使电动机的起动转矩降低 (这是因为电动机的起动转矩与电压的平方成正比), 因此这种起动方式只适用于异步电动机⊖的轻载或空载起动。常用的减压起动有如下几种方式。

1) 串电阻(或电抗)减压起动

这种起动方式是当电动机起动时在其定子回路中串入起动电阻, 而起动过程中电阻是逐渐被短路切除, 从而使电动机最后在全电压下正常运行。由数学推导可知, 起动电压降与起动电流成正比, 而与起动转矩的平方成正比, 因此起动时所允许降低的电压是有限度的, 否则电机将难以起动。定子绕组中串对称电阻减压起动的过程可以自动, 也可以手动, 其线路图如图2-1-1所示。

图2-1-1 a) 线路的动作过程为: 合上电源开关Q1, 由于定子绕组中串有电阻R, 降低了电压, 从而限制了起动电流。随着电动机的起动, 其转速逐渐升高, 当转速接近额定转速时, 立即合上Q2, 将

电阻R短接, 定子绕组上的电压便上升到额定值, 使电动机处于正常运转状态。显然, 这种手动控制线路使用时既不方便, 也不可靠, 除了个别情况下使用外, 通常使用接触器、时间继电器来实现其自动控制, 如图2-1-1 b) 所示。其动作过程是: 合上电源开关Q, 按下起动按钮SB1, 接触器KM1及时间继电器KT线圈同时得电, KM1主触头闭合, 但串有时间继电器KT延时闭合的常开触头的KM2线圈不能得电闭合, 这时电动机在定子回路中串有电阻R下进行减压起动。当电动机的转速逐步升高, 时间继电器KT达到预先整定的时间后(一般为4~8s), 其延时闭合常开触头闭合, KM2吸合, 其主触头闭合将起动电阻R短接, 电动机便处于额定电压下正常工作。

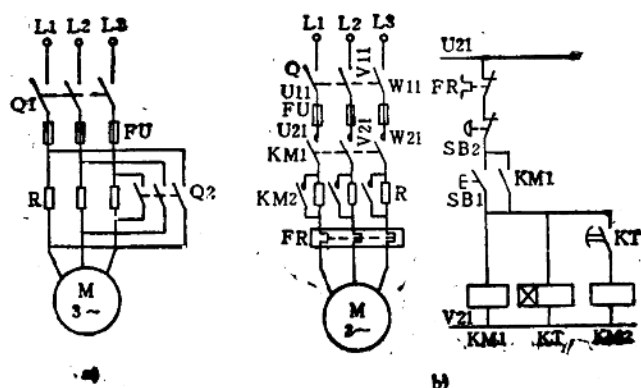


图2-1-1 串电阻的减压起动线路

a) 手动 b) 自动

起动电阻R的计算步骤如下:

① 根据机械的静阻转矩 T_r 与电动机的起动转矩 T_{st} 求出电动机的允许起动电压

$$U_{st} > U_N \sqrt{\frac{1.1 T_r}{T_{st}}} \quad (2-1-1)$$

式中 U_{st} ——允许起动电压 (V);

U_N ——电机的额定电压 (V);

T_r ——机械的静阻转矩 (N·m);

⊖ 本书所述的异步电动机, 在未加特别说明时, 均指感应电动机。

T_{st} ——电动机的起动转矩 (N·m)。

② 计算电动机的起动阻抗

$$Z_{st} = \frac{380}{\sqrt{3} I_{st}} \quad (2-1-2)$$

式中 Z_{st} ——起动阻抗 (Ω)；

I_{st} ——电动机的起动电流 (A)。

③ 计算每相允许的外加电阻

$$R_{add} = \sqrt{\left(\frac{Z_{st}}{\alpha}\right)^2 - X_{st}^2} - R_{st} \quad (2-1-3)$$

式中 R_{add} ——每相允许的外加电阻 (Ω)；

α ——电动机的起动电压与额定电压之比

$$\alpha = \frac{U_{st}}{U_n}$$

X_{st} ——电动机的起动电抗

$$X_{st} = Z_{st} \sin \phi$$

R_{st} ——电动机的起动电阻

$$R_{st} = Z_{st} \cos \phi$$

工程计算中，电动机起动时的功率因数 $\cos \phi$ 取 0.25 时 $\sin \phi$ 为 0.97。

④ 计算降压电阻

$$R = R_{add} - R_l \quad (2-1-4)$$

式中 R ——降压电阻 (Ω)；

R_l ——低压线路电阻 (Ω)，当线路较短时可忽略不计。

定子绕组的每相串联电阻值也可通过下列经验公式确定：

$$R = \frac{I_{st} - I_{st}'}{I_{st} \cdot I_{st}'} \quad (2-1-5)$$

式中 R ——每相串联电阻值 (Ω)；

I_{st} ——未加起动电阻时的起动电流，(可从电机产品样本上查得，或取 $6I_N$)；

I_{st}' ——加起动电阻后的起动电流，一般取电动机额定电流 I_N 的 2~3 倍。

2) 自耦变压器减压起动 该起动方式适用于容量较大电动机的起动，它通常用于对起动转矩要求较高的场合，利用自耦变压器来降低加在电动机定子绕组上的电压，从而达到限制起动电流的目的。常分手动控制和自动控制两种。手动控制自耦变压器减压起动原理如图 2-1-2 所示。

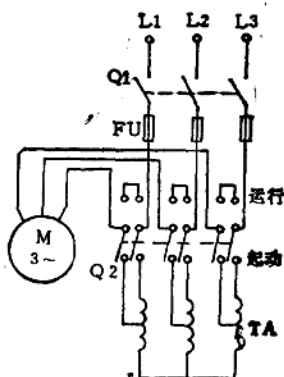


图2-1-2 自耦变压器减压起动原理图

起动时把开关放在“起动”位置，此时电动机定子绕组与变压器的二次侧连接，电动机进行减压起动，待电动机的转速上升到一定值时，再将开关迅速扳到“运行”位置，使自耦变压器脱离电源，

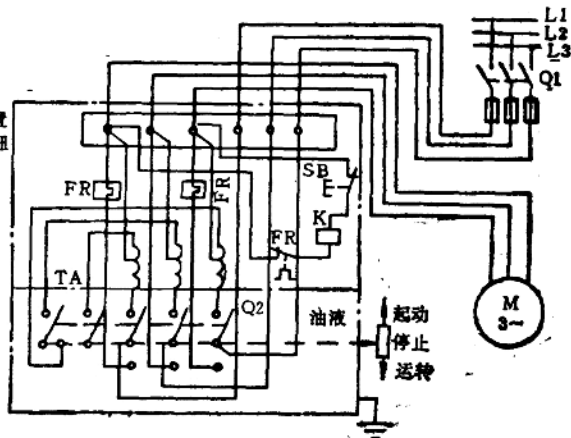
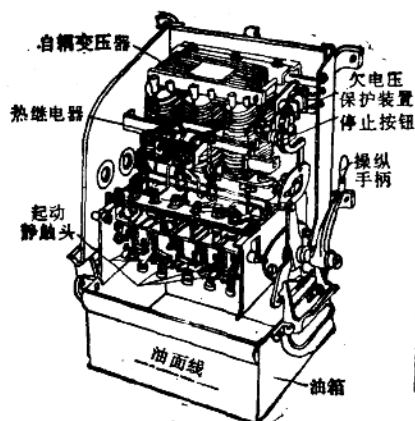


图2-1-3 QJ3型补偿器
a) 结构图 b) 接线图

此时电动机直接与电源相联，在额定电压下正常运行。

常用的QJ3型手动控制自耦变压器减压起动补偿器的结构与接线见图2-1-3。该补偿器由自耦变压器、触头、保护装置和手柄操作机构等部分组成。自耦变压器的电压抽头有两种，分别是电源电压的65%及80%，可以根据不同的需要来选择。线圈是按短时通电而设计的，通常只允许连续起动2或3次，再次起动时需待补偿器冷却后才能进行。保护装置有过载保护和欠电压保护两种。过载保护采用双金属片热继电器，也有用过电流继电器的，欠电压保护线圈跨接在两相之间，正常情况下，线圈产生的吸力可以吸住衔铁，当电源电压降低到额定电压的85%以下时，线圈吸力减小，不能吸住衔铁而使其下落，通过操作机构使补偿器掉闸，从而保护电动机不会因电压过低而烧坏。在电源突然断电时，也会使补偿器掉闸，这样可防止电动机在全电压下自行起动。触头系统包括两排静触头，装在补偿器的下部，浸没在绝缘油中，绝缘油的作用是熄灭触头分开时的电弧，外面一排静触头叫起动触头，它共有五个触头，其中三个触头在起动时与动触头接触，另外两个触头的作用是起动时将自耦变压器的三相绕组接成星形，里面一排静触头叫做运行静触头(只有三个触头)。操作机构包括手柄、主轴和联锁装置等，当手柄在“停止”位置时，装在主轴上的动触头在中间，与两排静触头都不接触，电动机不通电，处于停止状态。当手柄向前推到“起动”位置，动触头与静触头接触，电动机被接入自耦变压器的低压侧，电动机进行减压起动，待电动机的转速升到一定时，把手柄向后迅速扳到“运转”位置，此时动触头与运行触头接触，电动机直接与电源相接，在额定电压下运行。

QJ3型起动补偿器的实际接线见图2-1-3b所示。

QJ3型起动补偿器的实际接线见图2-1-3b所示。

XJ01型是自动控制的自耦变压器减压起动设备。该设备的动作过程是靠时间

继电器控制，而不是由人来直接操作，各运行阶段有指示灯表示，XJ01型起动补偿器的线路如图2-1-4所示。

其组成由自耦变压器TA、交流接触器KM1及KM2、时间继电器KT、热继电器FR、继电器KA及按钮SB等组成。

按下起动按钮SB1，接触器KM1得电吸合并自保持，其常开触头闭合，接通变压器TA一次侧的主电路。由于此时KM2未得电，其常闭的主触头仍然闭合，使TA的三个线圈末端相连，因此电流经二次侧流入电动机M定子绕组，电动机减压起动，在KM1得电的同时，时间继电器KT也得电吸合，KT的常开触头延时闭合接通继电器KA的电路，KA得电吸合，于是KA的常闭触头分开使KM1失电释放；KA的常开触头闭合，使KM2得电吸合，于是KM2的常闭触头切断自耦变压器回路，同时KM2的常开主触头闭合，从而使电动机起动后过渡到在额定电压下运行。

合上电源开关后，如果电源电压正常，指示灯HL3亮；指示灯HL2在接触器KM1得电吸合而中间继电器KA尚未动作时亮，表示起动正在进行；指示灯HL1在接触器KM2得电吸合后亮，表示电动机已转入正常运行。

上述QJ3系列油浸式自耦减压起动器技术数据见表2-1-3，XJ01系列自耦减压起动器技术数据见表2-1-4，其元件材料表见表2-1-5。

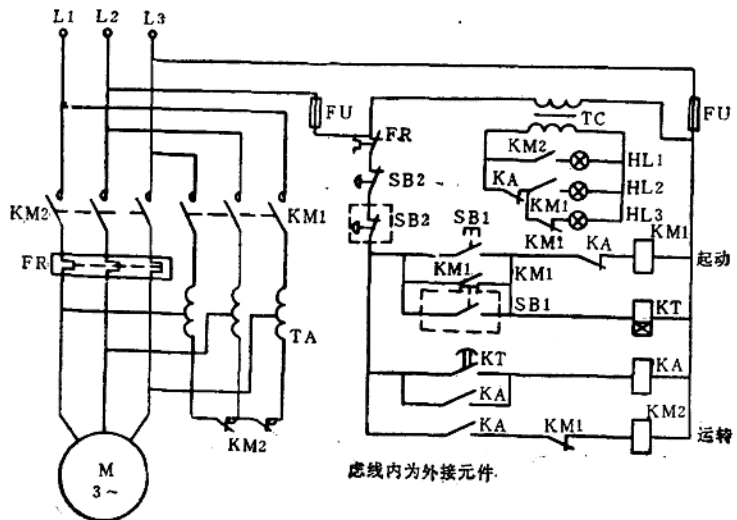


图2-1-4 XJ01型起动补偿器的控制线路图

表2-1-3 QJ3系列油浸式自耦减压起动器技术数据

型 号	电压 220 V、50 (或60) Hz				电压 380 V、50 (或60) Hz				电压 440 V、50 (或60) Hz			
	控制电动机功率 (kW)	额定电流 (A)	热元件 额定电流 (A)	最长起 动时间 (s)	控制电动机功率 (kW)	额定电流 (A)	热元件 额定电流 (A)	最长起 动时间 (s)	控制电动机功率 (kW)	额定电流 (A)	热元件 额定电流 (A)	最长起 动时间 (s)
QJ3-□	—	—	—	30	10	22	25	30	10	19	25	30
	8	29	40		14	30	40		14	26	40	
	10	37	40		17	38	40		17	33	40	
	11	40	45		20	43	45		20	36	45	
QJ3-□	14	51	63	40	22	48	63	40	22	42	63	40
	15	54	63		28	59	63		28	51	63	
	—	—	—		30	63	63		30	56	63	
	20	72	85		40	85	85		40	74	85	
QJ3-□	25	91	120	30	45	100	120	60	45	86	120	60
	30	108	160		55	120	160		55	104	160	
	40	145	160		75	145	160		75	125	160	

注：1.表中规定的最长起动时间，系指一次或数次连续起动的总和，达到规定起动时间后，再次起动前的冷却间隔时间不应小于4 h，如起动时间的总和少于规定时，则冷却间隔时间可以相应缩短。

2.表中□为被控电动机功率 (kW)。

表2-1-4 XJ01系列自耦减压起动器技术数据

型 号	控制三相 380 V 笼型电动机的最 大功率 (kW)	最大工作电流 (A)	自耦变压器容量 (kW)	电流互感器 电 流 比	热继电器整定电 流参考值 (A)	一次或数次连续 起动时间的总和 (s)
XJ01-14	14	28	14		28	30
XJ01-20	20	40	20		40	
XJ01-28	28	56	28		56	40
XJ01-40	40	80	40		80	
XJ01-55	55	110	55		110	60
XJ01-75	75	142	75		142	
XJ01-100	100	200	115	300/5	3.2	
XJ01-115	115	230	115	300/5	3.8	
XJ01-135	135	270	135	600/5	2.2	120
XJ01-190	190	370	190	600/5	3.1	
XJ01-225	225	410	225	800/5	2.5	
XJ01-260	260	475	260	800/5	3	
XJ01-300	300	535	300	800/5	3.5	

注：若连续起动时间总和已达规定值，则应待4 h冷却后再次起动。

以自耦变压器为主体的自耦减压起动器种类很多，除了上述之外尚有QJ10，其技术数据见表2-1-6。使用时可以根据具体情况选用。

3) 星-三角起动 星-三角起动只适用于电动机定子绕组为三角形联结的情况。起动时先将6个出线端子的定子绕组接成星形，此时绕组所承受的电压只是接成三角形时线电压的 $1/\sqrt{3}$ ，电动机

起动升速，待转速接近额定转速时迅速将定子绕组接成三角形。由于起动电压为额定电压的 $1/\sqrt{3}$ ，起动电流为额定电流的 $1/3$ ，故起动转矩为全电压起动转矩的 $1/3$ ，故常用于频繁起动的小容量设备上。

QX1系列是常用的手动星-三角起动器，它无过载、短路和欠电压保护；QX1-13型无灭弧罩，

表2-1-5 XJ01系列自耦减压起动器主要元件规格及数量

元件名称	元 件 型 号 及 数 量											
	型 号	数 量	型 号	数 量	型 号	数 量	型 号	数 量	型 号	数 量	型 号	数 量
交流接触器	CJ10-40	2	CJ10-20	1	CJ10-40	1	CJ12B-150/5	1	CJ12B-250/5	1	CJ12B-400/5	1
			CJ10-40	1	CJ10-80	1	CJ10-150B	1				
			CJ10-80	1	CJ10-80	1	CJ10-150B	1	CJ12B-250/3	1	CJ12B-600/3	1
熔断器	RL1-15/6	2	RL1-15/6	2	RL1-15/6	2	RL1-15/6	2	RL1-15/6	2	RL1-15/6	2
			LA19-11D绿	1	LA19-11D绿	1	LA19-11D绿	1	LA19-11D绿	1	LA19-11D绿	1
			LA19-11D黄	1	LA19-11D黄	1	LA19-11D黄	1	LA19-11D黄	1	LA19-11D黄	1
按钮	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1
			LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1
			LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1	LA19-11D红	1
中间继电器	JZ7-44	1	JZ7-44	1	JZ7-44	1	JZ7-44	2	JZ7-44	2	JZ7-44	2
时间继电器	JS-10(2 min)	1	JS-10(2 min)	1	JS-10(2 min)	1	JS-10(2 min)	1	JS-10(2 min)	1	JS-10(2 min)	1
热继电器	JR0-60B/3(45)	1	JR0-60B/3(63)	1	JR0-150B/3(160)	1	JR0-20/3(3.5)	1	JR0-20/3(2.4)(3.5)	1	JR0-20/3(3.5)	1
控制变压器	380/6V	1	380/6V	1	380/6V	1	380/6V	1	380/6V	1	380/6V	1
接线板	X 5-1005	2	X 5-1005	2	X 5-1005	2	X 5-1005	3	X 5-1005	3	X 5-1005	3
转换开关							LW 5-15 D 0413/2	1	LW 5-15 D 0413/2	1	LW 5-15 D 0413/2	1
电流表							59L1-A 300/5	1	59L1-A 600/5	1	59L1-A 800/5	1
电流互感器							LQG-0.5 300/5	2	LQG-0.5 400/5	2	LQG-0.5 800/5	2
刀开关							HD11-400/39(无底板)	1	HD11-400/39(无底板)	1	HD11-600/39(无底板)	1
自耦变压器	QZB-14 20	1	QZB-28	1	QZB-40	1	QZB-55 75	1	QZB-115	1	QZB-225	1
产品型号	XJ01-14											
	XJ01-20											
			XJ01-28		XJ01-40		XJ01-55 XJ01-75		XJ01-80~115		XJ01-200~225	
									XJ01-125~135 XJ01-150~190		XJ01-260 XJ01-280 XJ01-300	

表2-1-6 QJ10系列技术数据

型 号	过载保护整定电流 (A)	最大起动时间 (s)	起 动 转 矩	
			0.65倍额定电压	0.8倍额定电压
QJ10-10	20.5	30	0.35倍额定转矩	0.64倍额定转矩
QJ10-13	25.7	30		
QJ10-17	34	40		
QJ10-22	43	40		
QJ10-30	58	40		
QJ10-40	77	60		
QJ10-55	105	60		
QJ10-75	142	60		

靠空气自然灭弧；而QX1-30型则带金属灭弧罩，额定电流为40A。后两种起动器都要求迅速操作，其速度不小于1m/s。QX3-13型是自动控制式的星-三角起动器，其线路如图2-1-5所示。

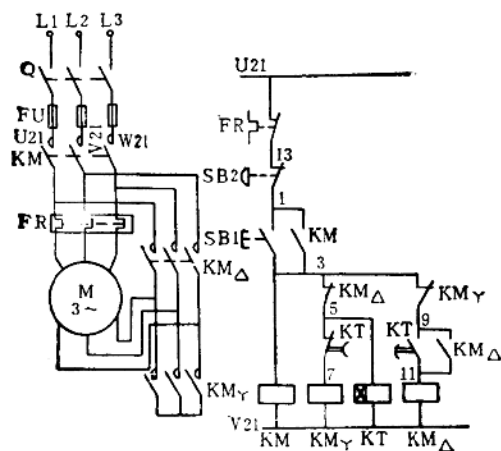


图2-1-5 星-三角起动器控制线路

该起动器由按钮、接触器、时间继电器等组成。当按下按钮SB1后线圈KM得电并由常开触头(1-3)自保持，KM主触头闭合，同时KMΥ得电使电动机M成星形减压起动；通电的KT经过预先整定的时间后断开常闭触头(5-7)而闭合常开触头(9-11)，KMΥ断电，触头(3-9)闭合，主触头断开；KMΔ得电(3-9-11)，主触头闭合，使电动机成三角形运行。

4) 延边三角形起动 这种方式只适用于电动机定子绕组的额定电压为380V，且具有9个出线端。起动时定子绕组先接成兼有星形和三角形的延边三角形，起动后接成三角形。该起动方式的起动转矩较大，兼有自耦变压器和星-三角减压起动两种方

法的优点，其连接方式和控制电路如图2-1-6所示。

按下起动按钮SB1，使接触器KM1得电，并自保持(1-3通)，KM3也得电，于是电动机M通电，M4、M5、M6分别与M8、M9、M7接通此时电动机成延边三角形起动；在KM3通电的同时，时间继电器KT线圈也通电，经过一定的时间其常闭触头(9-11)断开，切断接触器KM3线圈电路，KT的常开触头(3-5)闭合，接通接触器KM12，M4、M5、M6分别与M8、M9、M7，断开而经KM2与电源相连，此时电动机定子绕组呈三角形进入正常运行。

电动机进入正常运转状态后，接触器KM2的常闭触头(3-9)断开，时间继电器KT断电，其触头复位，为再次起动作好准备。按下停止按钮则电动机停止运转。

采用延边三角形起动时，电动机的起动电压 U'_{st} 和起动转矩 T'_{st} 与定子绕组抽头的匝数比有关，可按下述经验公式计算：

$$\frac{U'_{st}}{U_{st}} = \frac{1 + \sqrt{3}K}{1 + 3K} \quad (2-1-6)$$

式中 U'_{st} ——延边三角形起动时电动机的起动电压(V)；

U_{st} ——电动机直接起动时的起动电压(即380V)；

K ——绕组星形及三角形部分抽头比。

电动机的起动转矩：

$$\frac{T'_{st}}{T_{st}} = \frac{1 + K}{1 + 3K} = \frac{T'_{st}}{T_{st}} \quad (2-1-7)$$

式中 I'_{st} ——延边起动时的起动电流(A)；

I_{st} ——直接起动时的起动电流(A)；

T'_{st} ——延边起动时的起动转矩(Nm)；

T_{st} ——直接起动时的起动转矩(Nm)。

对应于各种不同的抽头比，电动机的起动电压

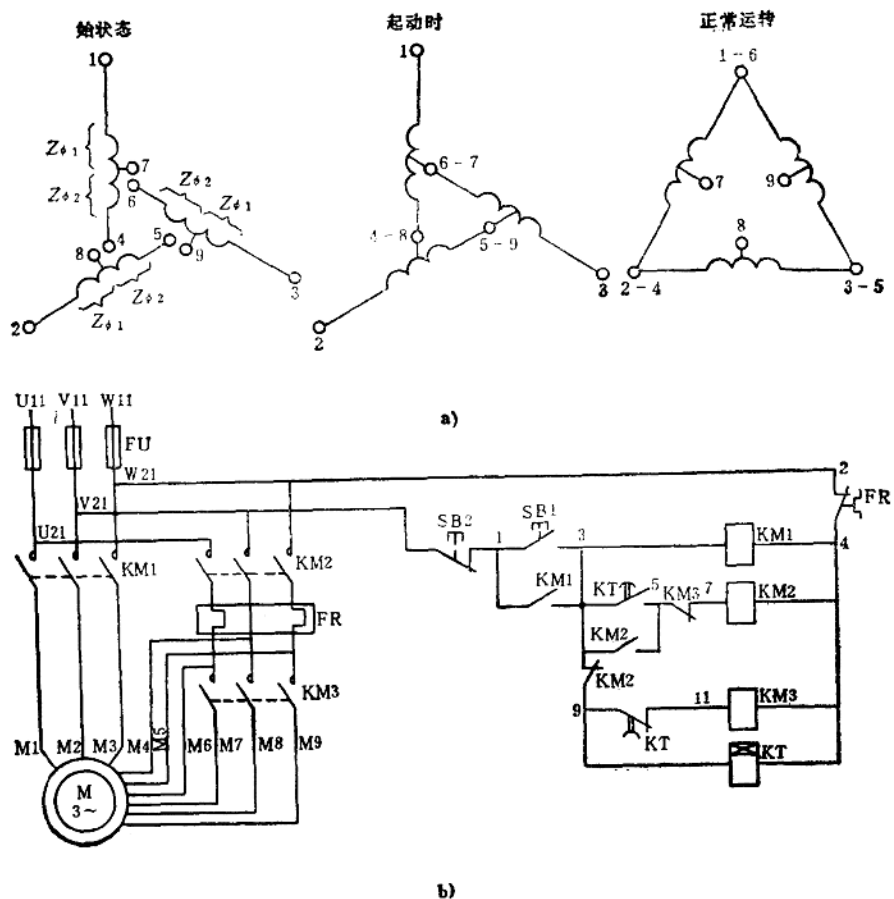


图2-1-6 延边三角形电动机起动控制线路
a) 绕组接线图 b) 起动控制线路

表2-1-7 不同抽头比时，起动电压和起
动转矩的情况

项 目	抽 头 比 K					
	1:1	1:2	2:1	3:5	1:3	3:1
U'_{st}/U_{st}	0.69	0.75	0.64	0.73	0.8	0.62
T'_{st}/T_{st}	0.5	0.6	0.43	0.57	0.67	0.4

和起动转矩之间的关系如表2-1-7所示。

5) 各类起动方式的特点及用途比较 见表2-1-8所示。

6) 各类起动方式特性及优缺点比较 见表2-1-9所示。

7) 直接起动器及减压起动器的应用 见表2-1-10。

2. 笼型异步电动机的调速

交流电动机的调速方式 交流电动机转速计算公式为

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s) \quad (2-1-8)$$

由式 (2-1-8) 可知，改变电源频率 f 极对数 p 及转差率 s 均可实现电动机的调速。

1) 变频调速 该方式必须有专门的变频设备，若电源电压不变，单纯改变电源频率，则气隙磁通 Φ 要发生变化，将影响转矩变化，为保持转矩不变，就要同时改变电压。变频调速需要一套复杂的设备，投资较多，但由于它可节省电能，国务院 (87)25号文件“关于进一步加强节约用电的若干规定”中的第四项中明确规定把交流电机调速作为重点措施要求推广，因此它是今后发展的方向。

表2-1-9 各种起动机起动特性及优缺点对比

项 目	直 接 起 动 器	减 压 起 动 器									
		电抗减压起动机			电阻减压起动机			白钢减压起动机			延边星- 三角起 动 器
		抽	头		抽	头		抽	头		
起 动 特 性	启动时电动 机端电压	50%	65%	80%	50%	65%	80%	50%	65%	80%	
	启动时电动 机电流	$0.5U_e$	$0.65U_e$	$0.8U_e$	$0.5U_e$	$0.65U_e$	$0.8U_e$	$0.5U_e$	$0.65U_e$	$0.8U_e$	$(0.7 \sim 0.8)U_e$
	启动转矩	$0.5I_{st}$	$0.65I_{st}$	$0.8I_{st}$	$0.5I_{st}$	$0.65I_{st}$	$0.8I_{st}$	$0.5I_{st}$	$0.65I_{st}$	$0.8I_{st}$	取 $\sim 0.7I_{st}$
	启动过程中电 机端电压	$0.25T_{st}$	$0.42T_{st}$	$0.64T_{st}$	$0.25T_{st}$	$0.42T_{st}$	$0.64T_{st}$	$0.25T_{st}$	$0.42T_{st}$	$0.64T_{st}$	$\sim 0.49T_{st}$
优 缺 点	启动电流	最大	小	小	最大	小	小	最大	小	小	恒 定
	启动转矩	最大	小	小	最大	小	小	最大	小	小	中 等
	启动时电源 电压的影响	最大	小	小	最大	小	小	最大	小	小	较 小
	启动时电机 结构的冲击	最大	小	小	最大	小	小	最大	小	小	较 小
对 比	启动过程中转 矩变化情况	得到充分 加速转矩	转矩增 加不大	转矩增 加不大	转矩增 加不大	转矩增 加不大	转矩增 加不大	转矩增 加不大	转矩增 加不大	转矩增 加不大	转矩有增加
	最大转矩	大	较小	较小	大	较小	较小	大	较小	较小	一般
	电动机启动 时间	最短	较长	较长	短	短	短	短	短	短	较短
	线路复杂性	最简单	简单	简单	较复杂	较复杂	较复杂	较复杂	较复杂	较复杂	复杂
价 格	最便宜	便宜	便宜	便宜	较贵	较贵	较贵	较贵	较贵	较贵	一般

表2-1-10 直接起动器和减压起动器的应用

负载性质	用 要 求		
	限制起动电流	减小起动时对机械的冲击	不要求限制起动电流及起动时对机械的冲击
要求起动力矩大, 力矩增 加快的负载			直接起动器
无载或轻载 起动	星-三角起 动器 电阻起动器 电抗起动器		
负载转矩与 转速成平方	自耦减压起 动器 延边星-三 角起动器 电抗起动器		
摩擦负载	延边星-三 角起动器 电阻起动器 电抗起动器	电阻起动器	
阻力矩小的 惯性负载	星-三角起 动器 延边星-三 角起动器 自耦减压起 动器 电抗起动器		
恒转矩负载	延边星-三 角起动器 电阻起动器 电抗起动器	电阻起动器 电抗起动器	
重力负载		电抗起动器	
恒重负载		电抗起动器	

① 变频调速的特点及分类 变频调速是一种理想的高效率、高性能的传动系统, 它适用于笼型异步电动机, 使其在整个工作范围内保持在正常的小转差率下运转。由于电力电子及微电子技术的发展, 静止变频调速技术在国内外其适用的领域中得到了广泛的应用。

变频调速方案适用于零点几至万千瓦电动机, 能满足各种生产机械的要求。

静止变频可分为交-交变频及交-直-交变频两大类。交-直-交变频又可分为电压型及电流型两大类, 交-交变频多为电压型, 也有少量采用电流型

的, 其特点比较见表2-1-11及2-1-12。

② 交-交变频调速及参数计算 它将恒压的交流电通过电力电子器件的开关作用, 一次变换为频率和电压均可调的交流电, 从而实现对笼型异步电动机的平滑调速。当前广为采用的是以晶闸管作为开关器件, 借电源电压进行换流, 因此其输出频率只能为电源频率的 $1/3 \sim 1/2$, 用得较多的电压型都用来供低速大容量传动, 其输出调制成正弦波。交-交变频也可采用电流型, 输出波形可以调制成矩形、梯形或其他形式。

两种型式变频器的主要参数计算公式见表2-1-13。

当今, 自关断快速开关器件迅速发展, 利用这种器件组成交-交变频系统, 可以具有更高的技术指标。

以上计算公式, 未考虑电源电压波动及其他电压降, 在作具体工程设计时应加以考虑。

③ 交-直-交电压型变频调速系统 该系统的框图见图2-1-7所示。

逆变器一般采用三相桥式线路, 由于负载呈感性, 所以如采用晶闸管则必须采用强迫关断线路, 并采用快速器件, 必然使造价提高, 且必须在主开关器件旁并联续流二极管; 但若采用大功率晶体管, 可关断晶闸管 (GTO) 等自关断器件取代晶闸管, 则可缩小装置体积, 降低造价, 提高效率。与直流调压相配合, 输出端可以得到任意的 U/f 比值, 可以供电给单台电动机, 也可作为一台变频或稳频的电压源来使用。根据传动的需要, 可采用电压或转速反馈。图2-1-7所示为典型的 U/f 协调控制电压反馈系统。由于中间有直流环节, 所以输出频率不受电源频率的限制。

④ 电压源LC滤波参数的选择 电压型变频器需要一个波形比较平直的中间直流电压源, 以使逆变器能不受电源侧变频器及负载电流的影响而稳定地工作。以电源侧变频器采用三相桥式晶闸管移相线路为例, 滤波器的设置如图2-1-8所示。

在工程设计中, 一般先根据容许的 (由于逆变器输入电流脉动所引起的) 电压脉动幅值计算出电容 C , 然后根据对电源侧变频器滤波的要求以及 C 值求出电感值 L 。其计算公式如下:

$$C = \frac{100 AI}{K \omega U_d} F \quad (2-1-9)$$

式中 A ——与负载功率因数角 φ 有关的系数 (见

表2-1-11 交-交变频器与交-直-交变频器主要特点比较

变频器类型 比较内容	交-交变频器 (电压型)	交-直-交变频器
换能方式	一次换能, 效率较高	二次换能, 效率略低
换流方式	电源电压换流	强迫换流或负载换流
元件数量	较多	较少
元件利用率	较低	较高
调频范围	输出最高频率为电源频率的 $1/3 \sim 1/2$ ①	频率调节范围宽
电源功率因数	较低	如用可控整流桥调压, 则低频低压时功率因数较低, 如用斩波器或是PWM方式调压, 则功率因数高
适用场合	低速大功率传动	各种传动装置, 稳频稳压电源和不间断电源

① 指一般的采用电源电压换流的交-交变频器。

表2-1-12 电流型与电压型交-直-交变频器主要特点比较

变频器类型 比较内容	电 流 型	电 压 型
直流滤波环节	电抗器	电容器
输出电压波形①	取决于负载, 当为异步电机时, 近似正弦形	矩形
输出电流波形①	矩形	取决于逆变器电压与负载电动机电势, 有较大的谐波分量
输出动态阻抗	大	小
再生制动	方便, 主回路不需附加设备	需要在电源侧设置反并联逆变器
过电流及短路保护	容易	困难
动态特性	快	较慢, 如用PWM则快
对晶闸管要求	耐压高, 对关断时间无严格要求	耐压一般可较低, 关断时间要求短
线路结构	较简单	较复杂
适用范围	单机, 不频繁切换的多机传动	多机传动, 稳频稳压电源及不间断电源

① 均指简单的三相桥式逆变器, 既不用PWM (脉宽调制控制), 也不用多重叠加。

图2-1-8 b 曲线);

I ——逆变器输出的电流有效值 (A);

ω ——逆变器输出角频率 (rad/s);

U_d ——直流中间回路电压值 (V);

K ——直流电压容许脉动的百分数。

$$L \approx \frac{100 f(\alpha)}{S \omega'^2 C} H \quad (2-1-10)$$

式中 $f(\alpha)$ ——与延迟角 α 有关的系数 (见图2-1-8 c 曲线);

ω' ——整流电源脉动分量基波角频率 (rad/s);

S ——整流电压滤波后的脉动系数百分数。

⑤ 电压型逆变器典型换流线路的设计及参数计算 电压型逆变器的开关器件可采用大功率晶体管、可关断晶闸管 (GTO) 或快速晶闸管。前两者具有自关断能力, 其通断状态由门极回路进行控制, 后者必须用强迫关断线路来控制其关断。换流线路的选择及设计在很大程度上决定了逆变器的工作性能。

强迫换流线路设计的主要依据可归结为:

a) 有所希望的换流能力;

表2-1-13 交-交变频器主要参数的计算公式

变频器类型	交-交电压型变频器 (18个元件, 按正弦波调制)	交-交电流型变频器 (18个元件, 按矩形波调制)
项目		
主回路接线方式		
变频器供电电源电压 U_s (V)	$U_s = \frac{\pi U_-}{3 \cos \alpha_{\min}}$	$U_s = \frac{U_-}{\cos \alpha} \cos \varphi$
变频器供电电源电流 I_s (A)	$I_s = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_-$	$I_s = I_-$
电源侧平均功率因数 $\cos \alpha$	$\cos \alpha \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha_{\min} \cos \varphi$	$\cos \alpha = \frac{U_-}{U_s} \cos \varphi$
晶闸管承受电压幅值 U_T (V)	$U_T = \sqrt{2} U_-$	$U_T = \sqrt{2} (U_s + U_-)$
晶闸管有效电流 I_T (A)	$I_T = \frac{\sqrt{6}}{2\pi} I_-$	$I_T = \frac{\sqrt{6}}{6} I_-$
有关符号说明	U_- —变频输出电压有效值 (V); α —延迟角; $\alpha_{\min}$ —当变频器输出最大幅值时的延迟角; $\cos \varphi$ —负载电动机功率因数; I_- —变频器输出电流有效值 (A)	

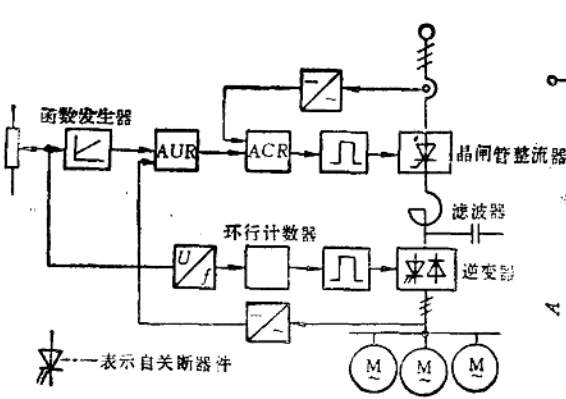


图2-1-7 交-直-交电压型变频调速系统框图
AUR——电压调节器 ACR——电流调节器

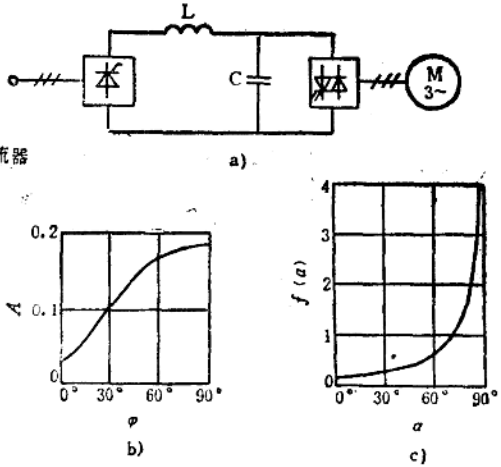


图2-1-8 电压源滤波器的设置及计算用曲线
a) 滤波器的设置 b) 系数A与功率因数角 φ 的关系曲线 c) $f(\alpha)$ 曲线

- b) 换流环节的储能尽可能小;
- c) 换流损耗小;
- d) 较少增加主晶闸管的附加电压、电流及其上升率;
- e) 线路要简单。

换流电容C及电感L的一般计算公式为

$$C = K_C \frac{t_0 I_L}{U_d}$$
$$L = K_L \frac{t_0 U}{I_L} \quad (2-1-11)$$

表2-1-14 典型的电压型逆变器换流线路主要参数的计算公式

逆变器类型 项目	电感储能式 (换流电感 $Q = 8$)	串联电感式	串联二极管式 (反馈二极管曲折联接)
线路结构简图			
换流电容 C (F)	$C = 1.80 \frac{t_0 I_L}{U_d}$	$C = 2.35 \frac{t_0 I_L}{U_d}$	$C = \frac{t_0 I_L}{U_d}$
换流电感 L (H)	$L = 0.336 \frac{t_0 U_d}{I_L}$	$L = 2.35 \frac{t_0 U_d}{I_L}$	$L = 2 \frac{t_0 U_d}{I_L}$
主晶闸管承受电压 (V)	$U = \sim 1.2 U_d$	$U = 1.48 U_d$	$U = 1.5 U_d$

式中 C —— 电容 (μF);
 L —— 电感 (μH);
 t_0 —— 被关断晶闸管承受反偏压的时间 (μs), 它应大于晶闸管的关断时间;
 I_L —— 关断前晶闸管流过的电流 (A);
 U_d —— 逆变器输入直流电压 (V);
 K_C 、 K_L —— 系数, 决定于所选用的换流线路。

表2-1-14为典型的电压型逆变器换流线路主要参数的计算公式。

晶闸管电流的计算尚须考虑换流线路所引起的环流, 因此较为复杂。

⑥ 脉宽调制变频器 脉宽调制变频的主电路结构与交-直-交电压型变频器相似, 唯电源侧变频器可采用不可控整流器或调压深度很小的变频器, 而将变频与调压两个功能同时在逆变器中完成。利用脉宽调节电压的波形见图2-1-9。

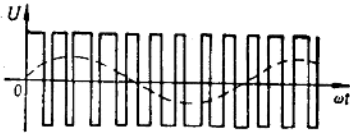


图2-1-9 脉宽调制变频器的电压波形

脉宽调制变频器的主要优点:

- a. 中间直流电压不变, 故其强迫换流线路较为简单;
- b. 变频调压均在逆变器内部实现, 可不受直流滤波回路参数的影响而实现快速调节;

- c. 电源侧功率因数较高;
- d. 可以将输出电压调制成正弦波, 减少谐波分量。

受开关器件工作速度的限制, 其载波频率不能太高。为了得到预期效果, 可以采用不同的调制方法, 例如, 自由调制、分级同步调制、消除特定高次谐波的调制等。

中小容量的脉宽调制变频器可以采用大功率晶体管作为逆变器的开关器件, 容量较大者则采用快速晶闸管或GTO。

电流型变频器也可采用脉宽调制方式。其主要目的是解决低频工作段的转矩脉动问题。

⑦ 交-直-交电流型变频调速系统 系统框图见图2-1-10。逆变器中开关器件的换流情况与负载电动机密切相关, 故逆变器不能脱离电动机而空运转, 且换流参数要与负载电动机的参数相匹配。电流型逆变器中的开关器件目前多采用普通晶闸管, 也可采用自关断开关器件而省掉强迫换流线路。

该类变频器使用于单机传动时采用电压或转速闭环控制; 用于不频繁切换的多机传动则采用电压闭环控制。

采用函数发生器或其他手段实现恒磁通转速闭环调节的电流型工程实用简化系统结构图与双闭环直流调速系统相似, 所以可用直流传动类似的方法来进行系统综合。

⑧ 电流型逆变器主电路参数计算及选择 典型的电流型逆变器主电路见图2-1-11。理想情况

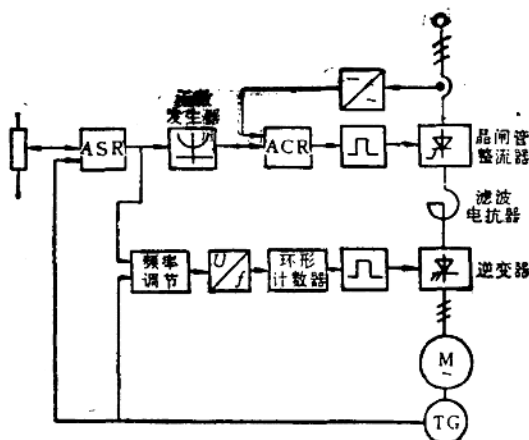


图2-1-10 转差频率控制转速闭环电流型变频调速系统框图

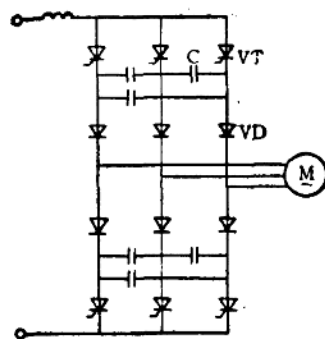


图2-1-11 电流型逆变器主回路线路图

表2-1-15 电流型逆变器主回路参数之计算公式

项 目	计 算 公 式	有 关 符 号 说 明
中间直流回路电压 U_d (V)	$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{cc} \cos \varphi$	U —逆变器输出交流电压有效值 (V) $\cos \varphi$ —负载电动机的功率因数
换流电容 C (μF)	$C = \frac{\left(t_0 - \frac{3\sqrt{2}}{I_d} U_{cc} \sin \varphi\right)^2}{3L}$	t_0 —晶闸管承受反压时间 (μs) L —负载电动机相漏感 (μH) I_d —中间直流回路电流 (A)
晶闸管电压 U_T (V)	$U_T = I_d \sqrt{\frac{4L}{3C}} + \sqrt{2} U_{cc} \sin \varphi$	
隔离整流器电压 U_s (V)	$U_s = \frac{3}{2} \left[I_d \sqrt{\frac{4L}{3C}} + \sqrt{2} U_{cc} \right]$	
晶闸管及整流器电流 I (A)	$I = \frac{\sqrt{2}}{6} \pi I_d$	I —逆变器输出交流电流有效值 (A)

(滤波后的电流波形完全平直, 换流过程较短, 所引起的电压尖波可忽略不计, 逆变器输出电流为理想的矩形波) 下, 主电路各参数的计算公式见表2-1-15。工程设计时可考虑一定的安全系数, 滤波电感值应选得比负载电动机相漏感大5~10倍。

2) 变极调速 由式(2-1-8)可知, 交流电动机的转速与极数有关, 因此把电动机的定子绕组按不同的极数与电网相连, 便可得到不同的转速。用变极方式改变转速的方法, 一般只适用于笼型异步电动机, 这是由于变极必须在定子、转子间同时进行, 该类电机转子是笼型, 其极数可随定子极数的改变而自动改变, 变极只需在定子上进行即可。常把磁极对数可变的电机称作多速电动机。

① 常用的变极调速 通常改变定子绕组接线的方法很多, 但机床加工中多用:

- 绕组从单星形变为双星形;
- 绕组从三角形改接成双星形。

以上两种变极方式都得到同一结论: 使磁极对数减少一半, 使转速增加一倍。但电动机的机械特性和允许的负载却不同了。

② 变极调速的方式 变极调速一般是将定子绕组从串联改为反接或并联, 从而改变磁极对数。其变化示意图2-1-12。

用右手螺旋定则可制定出图2-1-12 a 中定子绕组产生4极磁场, 其同步转速 $n_1 = 1500 \text{ r/min}$, 图2-1-12 b 表示接线已经改变, 一半线圈中电流的方向已经改变, 这时定子绕组产生的是2极磁场, 其同步转速 $n_2 = 3000 \text{ r/min}$, 显然其调速比是1:2。多速电动机一般是以双速电动机为基础的, 通常三速电机定子嵌有两套独立绕组, 其中一套是双速,

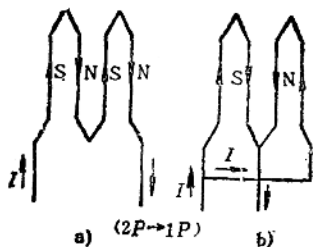


图2-1-12 改变极对数的接线方式

a) 4极 b) 2极

另一套是单速，而四速电动机的定子则嵌有两套各自独立且又可以改接成双速的绕组。其接线图见图2-1-13。

③ 变速电动机的功率 电动机功率与电流、电压有关：

a. 单星与双星的变换 图2-1-13 a 表示定子绕组从单星变为双星的情况，变换后每相绕组分成两个支路并联（两绕组的电流方向相反），这样就使极距 τ 加宽，磁极数减少一半，转速增加一倍。

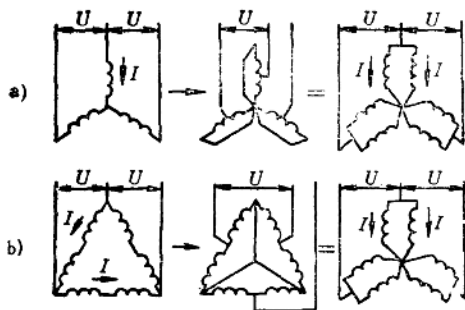


图2-1-13 双速电动机定子接线图

a) 单星-双星 b) 三角-双星

接成单星时，绕组每相的额定电流为 I_N ，此时电动机的输出功率

$$P_Y = 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} I_N \cos \varphi_1 \eta \quad (2-1-12)$$

式中 U_N ——电网电压，单星联结时，绕组的相电压等于 $U_N/\sqrt{3}$ ，

I_N ——电动机每相绕组的相电流，单星联结时，相电流等于线电流。

当单星改接为双星并保持改接前后线圈中的电流 I_N 不变时，则双星联结时的线电流为 $2I_N$ ，这样电动机的输出功率为

$$\begin{aligned} P_{YY} &= 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} 2I_N \cos \varphi_1 \eta \\ &= 2 \times 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} I_N \cos \varphi_1 \eta \\ &= 2 P_Y \end{aligned} \quad (2-1-13)$$

即单星改接为双星后，当认为 $\cos \varphi_1$ 及 η 都近似变化不大时，电动机的输出功率增加了一倍。由于电磁转矩 $T = 9550 \frac{P}{n}$ ，改接后功率增加了一倍，转速也增加了一倍（ $n = \frac{60f}{p}$ ），因而功率与转速的比值不变。显然其电磁转矩不变，这种调速方法适用于要求拖动转矩不变的负载中。

b. 三角与双星间的换接 图2-1-13 b 表示将定子绕组由原来的三角形联结改接成双星形联结，使电动机的极对数减少一半，转速增加一倍。

改接前，电动机为三角形接线，其输出功率为

$$P_{\Delta} = 3 U_N I_N \cos \varphi_1 \eta \quad (2-1-14)$$

式中 U_N ——电网电压，三角形联结时，相电压等于线电压；

I_N ——电动机每相绕组的电流。

电动机绕组从三角形改接为双星形联结后保持改接前后绕组中的电流 I 不变，此时相电压等于 $U_N/\sqrt{3}$ ，线电流等于 $2I_N$ ，输出功率（设 $\cos \varphi_1 \eta$ 近似不变）

$$\begin{aligned} P_{YY} &= 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} 2 I_N \cos \varphi_1 \eta = \frac{2}{\sqrt{3}} 3 U_N I \cos \varphi_1 \eta \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} P_{\Delta} = 1.15 P_{\Delta} \end{aligned} \quad (2-1-15)$$

即改接前后，电动机的输出功率只有15%的变化。由于转速增加了一倍，因此转矩几乎减少了一倍。该调速方法适用于恒功率性质的负载。

由于变频调速时转速的变化是成倍数的，调速变化的平滑性较差，因此多用于不需无级调速的金属切削机床（如镗床类）中。

④ 变极调速电动机的控制 变速电动机的控制方法很多，图2-1-14是一种双速电动机的控制线路。

其工作情况：

a. 低速运行 将开关SA扳向“低速”位置，接触器KM1得电动作，其主触头闭合，使电动机定子引出线U1、V1、W1与电源接通，成三角形联结低速运行；

b. 高速运行 将开关SA扳向“高速”运行位置，继电器KT得电，触头（3-6）闭合，KM1得

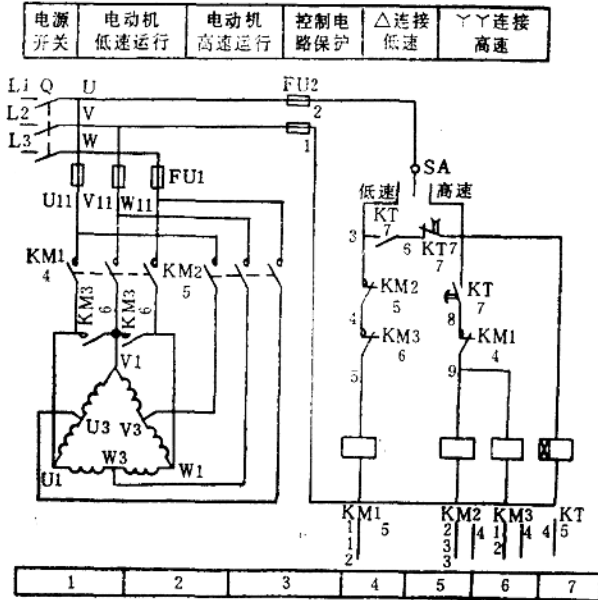


图2-1-14 双速电动机控制线路

电, 打开KM1 (8-9), 接通主电路使电动机绕组

图2-1-15。

表2-1-16 YD系列多速电动机技术数据

型 号	额定功率 (kW)	满 载 时		堵转电流/ 额定电流	堵转转矩/ 额定转矩	重 量 (kg)
		电 流 (A)	转 速 (r/min)			
YD801-4/2	0.45/0.55	1.4/1.5	1420/2860	6.5/7	1.5/1.7	17
YD802-4/2	0.55/0.75	1.7/2.0	1420/2860	6.5/7	1.6/1.8	18
YD90S-4/2	0.85/1.1	2.3/2.8	1430/2850	6.5/7	1.8/1.9	22
YD90L-4/2	1.3/1.8	3.3/4.3	1430/2850	6.5/7	1.8/2	27
YD100L1-4/2	2/2.4	4.8/5.6	1430/2850	6.5/7	1.7/1.9	34
YD100L2-4/2	2.4/3	5.6/6.7	1430/2850	6.5/7	1.6/1.7	38
YD112M-4/2	3.3/4	7.4/8.5	1450/2890	6.5/7	1.9/2	43
YD132S-4/2	4.5/5.5	9.8/11.9	1450/2860	6.5/7	1.7/1.8	68
YD132M-4/2	6.5/8	13.8/17.1	1450/2880	6.5/7	1.7/1.8	81
YD160M-4/2	9/11	18.5/22.9	1460/2920	6.5/7	1.6/1.8	123
YD160L-4/2	11/14	22.3/28.8	1460/2920	6.5/7	1.7/1.9	144
YD180M-4/2	15/18.5	29.4/36.7	1470/2940	6.5/7	1.8/1.9	182
YD180L-4/2	18.5/22	35.9/42.7	1470/2940	6.5/7	1.6/1.8	190
YD90S-6/4	0.65/0.85	2.2/2.3	920/1420	6/6.5	1.6/1.4	23
YD90L-6/4	0.85/1.1	2.8/3.0	930/1420	6/6.5	1.6/1.5	25
YD100L1-6/4	1.3/1.8	3.8/4.4	940/1440	6/6.5	1.7/1.4	34
YD100L2-6/4	1.5/2.2	4.3/5.4	940/1440	6/6.5	1.6/1.4	38
YD112M-6/4	2.2/2.8	5.7/6.7	960/1440	6/6.5	1.8/1.5	49
YD132S-6/4	3/4	7.7/9.5	970/1440	6/6.5	1.8/1.7	65
YD132M-6/4	4/5.5	9.8/12.3	970/1440	6/6.5	1.6/1.4	84
YD160M-6/4	6.5/8	15.1/17.4	970/1460	6/6.5	1.5/1.5	119
YD160L-6/4	9/11	20.6/23.4	970/1460	6/6.5	1.6/1.7	147
YD180M-6/4	11/14	25.9/29.8	980/1470	6/6.5	1.6/1.7	192
YD180L-6/4	13/16	29.4/33.6	980/1470	6/6.5	1.7/1.7	224

接成三角形低速启动; 经过一定时间分断KT常闭触头 (6-7), 使KM1失电, 主电路断开 (此时电动机只能靠惯性旋转), 闭合KM1 (8-9)和KT (7-8), 使KM2得电, 闭合主电路, 使电动机U₃、V₃、W₃与电源接通, 同时KM3得电, 闭合主电路, 使U₁、V₁和W₁并头, 电动机绕组接成双星形而高速旋转。

⑤ 接触器的选择 利用控制开关与接触器组成的组合电器可以满足变频调速电动机绕组切换及速度选择等各种要求。其接触器KM1及KM2可按额定电流值来选用, 而闭合中性点的KM3可按额定电流的一半选择。

⑥ 常用变速电动机数据及接线 YD系列电动机是统一设计的新产品, 用于取代JD02及JD03系列电动机。其技术数据见表2-1-16接线及出线端数见表2-1-17及