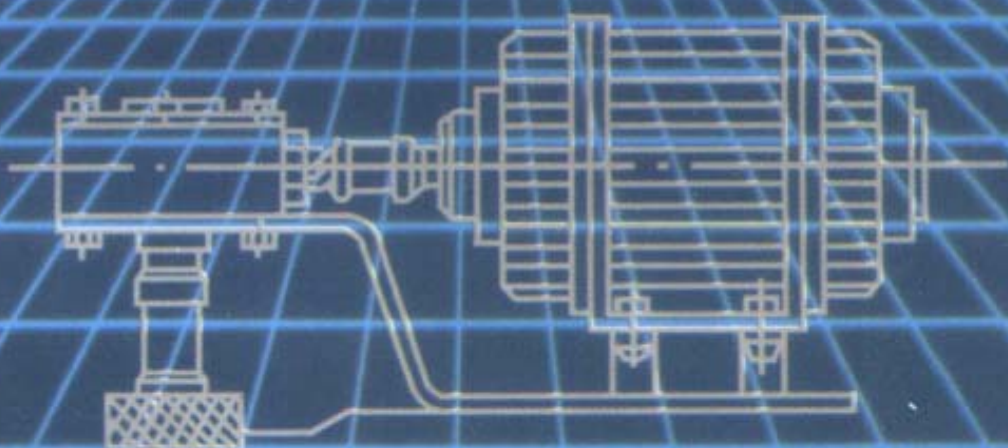


电动机变频器

与电力拖动

戴广平 编著



(北京)

43

中国石化出版社

目 录

第一章 概述	1
第一节 电力拖动系统	1
第二节 异步电动机的机械特性	3
一、三相异步电动机转速极限	4
二、三相异步电动机的机械特性	4
第三节 异步电动机的调速方式	12
一、变极对数调速	13
二、变速差率调速	14
三、变频调速	25
第二章 变频调速装置的组成和特点	27
第一节 变频调速装置分类和特点	27
一、变频调速装置分类	27
二、异步电动机在变频调速时的机械特性	31
第二节 变频器的的工作原理	35
一、方波幅度调制 (PAM)	35
二、矩形等幅脉冲宽度调制 (PWM)	39
三、正弦脉冲宽度调制 (SPWM)	41
四、交流电动机的矢量控制	43
第三节 变频器的主要技术规格	48
一、铭牌数据	48
二、技术指标	49
三、运行和指示	52

第一章 概 述

第一节 电力拖动系统

在诸如石油化工、轻工、纺织等工业部门，广泛使用着电力拖动系统。所谓电力拖动系统是一种电气传动系统，即以电动机为动力驱动控制对象（工作机构）作机械运动的整套装置。如果对象是生产机械，有一定的功率转换（电能变为机械能）要求，习惯上称之为电力拖动系统。该系统通常包括三个主要环节：电动机、控制设备和机械传动机构，后者是指连接电动机与工作机之间的装置，如联轴节、减速机构或换向机构等。

利用控制设备通过电动机使生产机械按照预定的规律运行的系统叫电力拖动自动控制系统。按照被控制的物理量及其变化规律的不同，电力拖动自动控制系统的形式也不同，其中自动调速系统应用最为广泛。此外，张力控制系统、位置控制系统和随动系统等应用也较广。

交流电动机与直流电动机相比，具有结构简单、成本低、维护方便等优点，但过去采用的传统变频装置价格昂贵且交流调速性能差，因此在调速领域里一直是直流传动占统治地位。直流调速的缺点有：

(1) 直流电动机结构复杂，成本高，故障多，维护困难，且不适于恶劣的工作环境（如易燃、易爆及粉尘多的场合），经常因火花大而影响生产。

(2) 换向器的换向能力限制了电机的容量和速度。直流电动机的极限容量和速度之积约为 $10^6 \text{kW} \cdot \text{r}/\text{min}$ ，因此大型

机械的电动机设计制造困难，一般单机容量只能做到 12~15MW。

(3) 为改善换向能力，要求电枢漏感小，转子短粗，导致电机和负载机械的飞轮力矩 GD^2 增大，影响系统动态性能。在动态性能要求高的场合，不得不采用双电枢或三电枢，带来造价高、占地面积大、易共振等一系列问题。

(4) 直流电动机除励磁外，全部输入功率都通过换向器流入电枢，电机效率低，由于转子散热条件差，冷却费用高。

交流电动机虽没有上述缺点，但调速困难。近年来，随着电子技术的发展，交流调速的性能已经达到直流传动的水平，装置成本降低到相当或略低于直流传动的程度，而且维修费用及能耗大大降低，可靠性高，因而出现了以交流传动取代直流传动的强烈趋势。采用交流调速的优点是：

(1) 减少维修工作量，减少停机时间，提高产量。一般维修量约是直流传动的 1/4。

(2) 可突破直流电动机的功率、速度极限，可为设备提供更大的动力，从而提高产量。

(3) 减小电动机的转动惯量。

(4) 节能、节水。

(5) 由于交流电动机结构简单，体积小，可形成机电一体化产品。

交流电动机分为同步电动机和异步电动机，均可使用变频调速器。国外各公司对哪种电动机更好的看法有所不同，德、法等国的公司主张用同步电动机，而日、英等国的公司坚持用异步电动机，这两种电动机各有特点：

同步电动机气隙大，制造容易，适合工作于冲击振动场合；异步电动机气隙小（若气隙大，则电动机功率因数及效

率会降低), 按机加工能达到的最小气隙设计, 大容量异步电动机 (4000~5000kW) 制造困难。

异步电动机控制系统简单。因为同步电动机存在牵入同步和失步问题, 不宜开环调速, 需采用闭环控制; 而异步电动机可以开环工作, 在调速性能要求不高的场合 (例如: 风机、水泵等) 可以采用简单的 U/f 比开环控制方案, 不用较复杂的闭环控制。另外同步电动机的矢量控制系统比异步电动机的矢量控制系统复杂得多。

总的来说, 同步电动机功率指标好, 但控制复杂, 一般在 3000kW 或 4000kW 以上使用较合算。在石化装置中, 大量使用异步电动机, 因此本书以异步电动机调速为主来讨论交流变频调速问题。

第二节 异步电动机的机械特性

由电机学可知, 在定子线圈中通入三相电流产生了旋转磁场。如果开始时转子是静止的, 那么, 旋转磁场与转子导条就有相对动力, 于是在各导条里产生感应电动势和感应电流。根据电磁力

$$F = BLI$$

的关系 (式中 F 为电磁力, B 为磁感应强度, L 为导条有效长度, I 为导条中的电流), 转子各导条中的电流与旋转磁场相作用产生电磁转矩。把各导条的电磁转矩加起来, 就是驱动转子转动的总电磁转矩 M_{dc} 。如果 M_{dc} 大于轴上的总反抗转矩 M_f , 则整个转动部分将加速转动, 由于转子转速逐渐增高时, M_{dc} 逐渐减小, 所以, 总可以达到 $M_{dc} = M_f$, 转动就成为匀速了。

一、三相异步电动机转速极限

三相异步电动机的转速不能超过该电动机旋转磁场的转速。因为当转子转速接近同步转速时，转子导条中的感应电动势和感应电流很小，因而产生的电磁转矩也很小，这样将使电动机因带不动机械负载而减慢转速。如果转子的转速达到同步转速，则转子导条中就无电磁感应，因而 $M_{dc} = 0$ ，因此电动机不可能在这种转速下运转。所以同步转速是作为电动机运行的一个极限。例如 $p = 2$ 时，同步转速为 1500 r/min, $p = 3$ 时为 1000 r/min 等等。

带负载运行时，转速 n 低于同步转速 n_1 。 $(n_1 - n)$ 称为转差，也称滑差。 $(n_1 - n) / n_1$ 称为转差率，亦称滑差率。以 S 表示：

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

一般三相异步电动机的转差率为 1% ~ 5%，转差率较大的电动机可达 7% 以上。

二、三相异步电动机的机械特性

电动机带动生产机械运行的时候，由于负载经常有变化，所以电动机的转矩也经常变化。转矩变化时，电动机的转速如何变化，是使用电动机的人很关心的问题，因为这不仅关系到生产率，而且也影响产品质量。转速随电磁转矩的变化，称为电动机的机械特性，即 $n = f(M_{dc})$ 。为了简便，以后将 M_{dc} 简写为 M 。

1. 在正常运行范围内 $n = f(M)$ 的关系

空载时，电动机转速很接近于旋转磁场的转速。当负载增加后，电动机转速下降了，虽然转速下降的百分数不大，但转子与旋转磁场相对运动的转差率却增加了许多倍，转子

导条中的感应电动势和感应电流在正常运行范围内是差不多正比于转差率的。因此，转差率增加多少倍时，感应电流就增加多少倍，于是电磁转矩也就增加多少倍，结果与负载转矩达到新的平衡。

需要说明，电磁转矩变化时，转速变化是很小的（电动机从空载到满载，转速变化不超过 10%）。电动机这种机械特性称为硬特性，如图 1-1 所示。

2. 电动机从静止到同步转速范围内 $n = f(M)$ 的关系

上面我们只研究了工作范围内的机械特性。这当然是很重要的问题，因为电动机的正常运行就是工作在这个范围内的。但是，至少有两个问题引起我们注意。第一，如果负载转矩继续增加，电动机在电磁转矩方面是否可以无限制地适应呢？它的过载能力究竟有无限制？第二，电动机开始启动时，它的电磁转矩究竟有多大？这个问题对使用的人是很重要的，因为我们知道如果电磁转矩比负载转矩大得多就启动得快，可以提高生产率；如果电磁转矩小于负载转矩，就根本不能启动。为了解决上述两个问题，需要研究从 $n = 0$ 到 $n = n_c$ 转速范围内的 $n-M$ 关系。

下面详细说明三相异步电动机的机械特性。为了讨论方便，我们用转差率 S 来表示转速。于是研究 $n = f(M_{dc})$ 的关系就变为研究 $M_{dc}-S$ （简称为 $M-S$ ）的关系了。

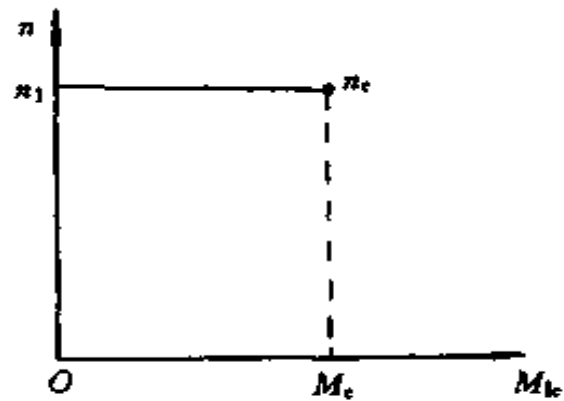


图 1-1 从无载到满载范围内的 $n = f(M)$ 曲线

1) 转子电路的影响

① 转子电路的频率及 e_2 与 i_2 的关系

转子与旋转磁场有相对运动，转子导条中的感应电动势、感应电流的频率与相对运动的速度是直接联系着的。

设旋转磁场的转速为 n_1 (r/min)，转子转速为 n (r/min)，定子线圈中的频率为 f_1 (Hz)，角频率为 ω_1 (rad/s)，转子导条中的频率为 f_2 (Hz)，角频率为 ω_2 (rad/s)，电动机的极对数为 p ，则旋转磁场与转子的相对转速为 $n_1 - n$ ，即对于转子的导条而言，旋转磁场以 $n_1 - n$ 的速度旋转。这样，转子导条中 e_2 及 i_2 每秒钟变化 $(n_1 - n/60) \cdot p$ 个周期。即

$$\begin{aligned} f_2 &= [(n_1 - n)/60] \cdot p \\ &= \{[(n_1 - n)/n_1](n_1/60)\} p \\ &= S(n_1/60)p = S f_1 \\ \omega_2 &= 2\pi f_2 = 2\pi f_1 = S\omega_1 \end{aligned}$$

例如 $S = 0.02$ 时， $f_2 = 0.02 \times f_1 = 0.02 \times 50 = 1$ (Hz)，即 e_2 与 i_2 每秒钟变化一个周期。

转子导条中产生了感应电动势 e_2 后，由于导条是由端环短路起来的，所以 e_2 就与导条电阻及漏磁电抗的电压降相平衡。即：

$$e_2 = r_2 i_2 + L_2 (d i_2 / d t) \quad (1-2a)$$

式中 r_2 及 L_2 分别为转子导条的电阻及漏磁电感。

如果把 e_2 ， i_2 近似地认为是正弦变化的，则 (1-2 a) 式可写成复数形式：

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= r_2 \dot{I}_2 + j\omega_2 L_2 \dot{I}_2 \\ &= r_2 \dot{I}_2 + jS\omega_1 L_2 \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (1-2b)$$

如果在电动机中 $\omega e_1 L_2/r_2$ 约为 3, 那么在 $S = 0.02$ 时, $S\omega_1 L_2$ 便 $\ll r_2$ 。其中 S 为转差率; ω_1 为定子线圈中磁场的角频率; L_2 为转子漏磁电感; r_2 为转子电阻。因此在讨论工作段的机械特性时, 认为 e_2 与 i_2 同相, 是合乎实际情况的。

② 转子总电磁转矩

$$M_{dc} = C\Phi I_2 \cos\phi_2 \quad (1-3)$$

式中 M_{dc} ——转子上的总电磁转矩;

C ——系数, 是个与电动机结构有关的常数;

Φ ——旋转磁场每个极的磁通量;

I_2 ——导条中电流的有效值;

$\cos\phi_2$ —— e_2 与 i_2 相位差的余弦, 即是转子电路的功率因数。

此电磁转矩公式可以推导证明, 我们只从物理概念上来加以解释。

电磁力是由旋转磁场与 I_2 相互作用产生的, 所以 M 与 Φ 及 I_2 成正比是显而易见的。问题是为什么还与 $\cos\phi_2$ 有关? 这是因为当转差率 S 较大时, i_2 与 e_2 是不同相的。图 1-2 示出当 i_2 滞后于 e_2 时各导条中电流的空间分布及其与磁场的相对位置, 这时在同一磁极下的电流并不都是同一方向的, 所以产生的电磁转矩有些是相互抵消的。并且磁极最强的地方电流并不最大, 这说明 M 是受 $\cos\phi_2$ 影响的。假如 $\phi_2 = 90^\circ$ (实际上当然不可能), 那么各导条的电磁转矩便都彼此抵消了。虽然 Φ 及 I_2 是有数值的, 但总电磁转矩却为 0。

③ I_2-S 及 $\cos\phi_2-S$ 曲线

从 (1-2 b) 式得知:

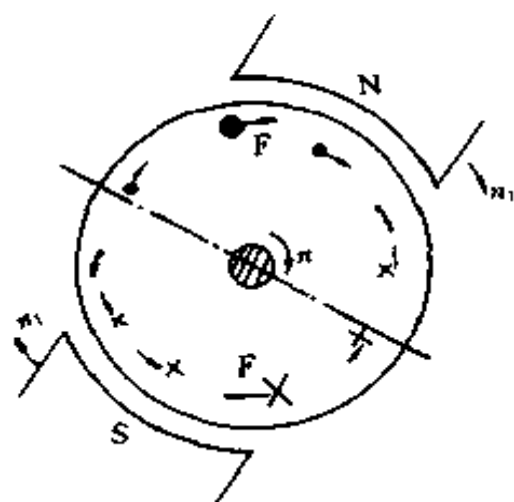
$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{r_2 + jS\omega_1 L_2}$$

但 E_2 正比于旋转磁场与转子的相对转速 $n_1 - n = S n_1$ 。如果转子静止 ($S = 1$) 时, e_2 的有效值为 E_{20} , 则 S 为任意值时,

$$E_2 = S E_{20}$$

于是 i_2 的有效值可写为

$$\begin{aligned} I_2 &= S E_{20} / [r_2^2 + (S\omega_1 L_2)^2]^{1/2} \\ &= E_{20} / [(r_2^2/S)^2 + (\omega_1 L_2)^2]^{1/2} \quad (1-4) \end{aligned}$$



如果设 $\omega_1 L_2 / r_2 = 3$, 那么当 $S > 0.5$ 时, $(r_2^2/S)^2$ 一项便可略去, 于是

$$I_2 = E_{20} / \omega L_2 = \text{常数}$$

而当 $S < 0.1$ 时, $(\omega_1 L_2)^2$ 一项便可略去。于是

$$I_2 = (E_{20}/r_2) \cdot S_0$$

这样就得出 $I_2 - S$ 的曲线,

图 1-2 当 n 与 n_1 相差甚大时 如图 1-3 所示。

转子导条中电流的空间分布及其旋转磁场的相互位置

从 (1-2 b) 式可得

$\cos \phi_2$ 与 S 的关系:

$$\cos \phi_2 = r_2 / [r_2^2 + (S\omega_1 L_2)^2]^{1/2}$$

仍以 $\omega_1 L_2 / r_2 = 3$, 则 $S < 0.1$ 时, $\cos \phi_2 \approx 1$ 。而当 S 增大, 则 $\cos \phi_2$ 便逐渐减小。 $\cos \phi_2 - S$ 的曲线如图 1-4 所示。

④ $M - S$ 曲线

在 $M = C\Phi I_2 \cos \phi_2$ 中, C 为常数, Φ 亦近似为常数, 因此 M 与 S 的关系可由 $I_2 - S$ 与 $\cos \phi_2 - S$ 的曲线相乘来得到, 如图 1-5 所示。图 1-5 也可用 $n = f(M)$ 曲线表示。

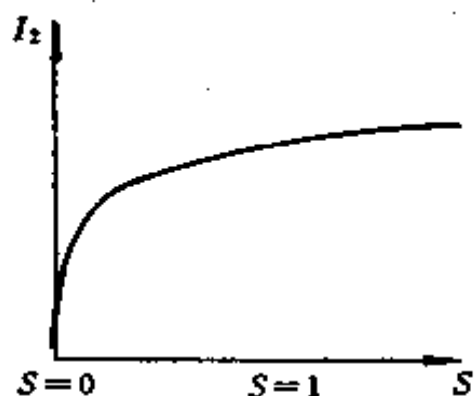


图 1-3 I_2-S 曲线

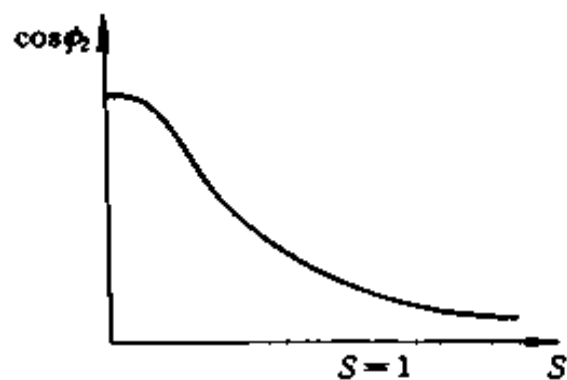


图 1-4 $\cos\phi_2-S$ 曲线

对 $M-S$ 的形状可作如下的解释：

当 $S=0$ 时，即转子与旋转磁场同步，这时转子导条中的 $e_2=0$ ，因而 $i_2=0$ ，所以 $M=0$ 。

当 S 逐渐增加，但其值很小时， I_2 几乎是随 S 成正比增加，而 $\cos\phi_2$ 则几乎保持恒定。因此 M 是随 S 直线增加的。在图 1-7 中 OK 一段就是这样。

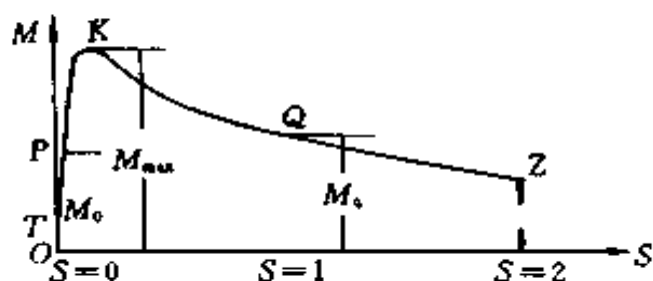


图 1-5 $M-S$ 曲线

当 S 值变得更大时， I_2 的增加变得缓慢了，而 $\cos\phi$ 却减小较快，于是出现了电磁转矩最大值——最大转矩 M_{max} ，然后减小下来。当 S 再增大时， I_2 增加甚慢，而 $\cos\phi$ 却几乎与 S 成反比，因此出现了 KQ 段 $M-S$ 的关系， M 下降甚多。

当 $S=1.0$ 时，这是转子转速等于 0 的情况，这时的 M 叫做电动机启动转矩 M_{q0} 。启动转矩比最大转矩要小很多。

如果电动机正在某方向旋转时，突然使旋转磁场反转，

则出现 $S > 1$ 而接近于 2 的情况，那时的 $M-S$ 关系如图 1-5 中 QZ 段所示。在 QZ 段里，电磁转矩与转速的方向是相反的，这种情况称为制动。在制动情况下电动机将很快地停转，此时的电磁转矩称为制动转矩。

⑤ 转子电阻 r_2 对 $M-S$ 曲线形状的影响

在绕线式电动机启动和调速时，及在一些控制用的异步电动机中，有时故意加大转子电阻以造成某种形态的机械特性来达到增加启动转矩调节转速和消除无讯号时自转现象。那么，究竟 r_2 的改变对 $M-S$ 曲线有何影响呢？

从 I_2-S 及 $\cos\phi_2-S$ 曲线中可以看出如加大 r_2 则二曲线将变为如图 1-6 (a) 所示。于是 $M-S$ 曲线就变成图 1-6 (b) 的形状。

从图 1-6 (b) 中可以看出，加大 r_2 后可能加大电动机

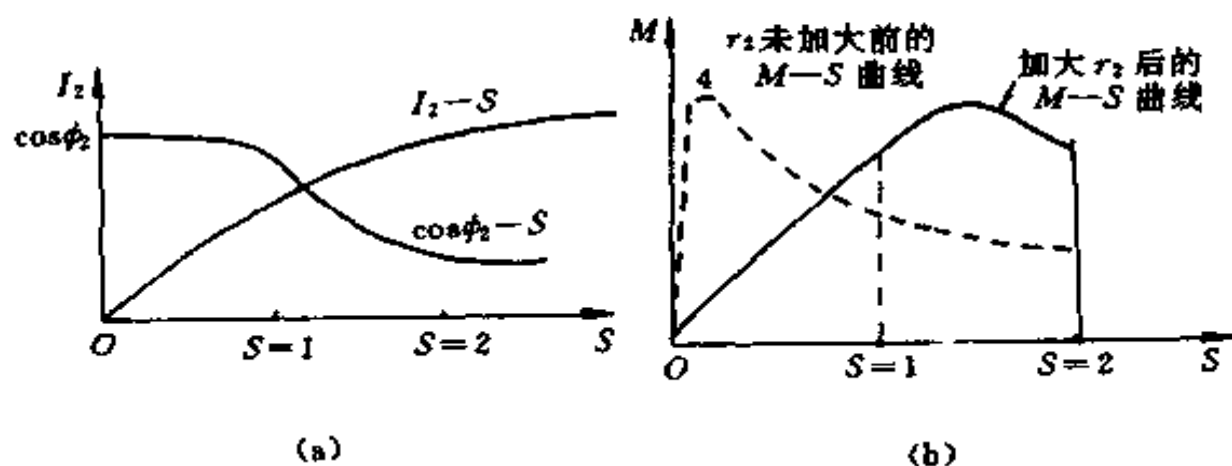


图 1-6 转子电阻 r_2 的影响

(a) 加大 r_2 后 i_2-S 及 $\cos\phi_2-S$ 曲线；

(b) 加大 r_2 前后 $M-S$ 曲线比较

的启动转矩，同时使 $M-S$ 曲线向右移了，或者说电动机的机械特性变软了，在同一负载转矩下，转速将变低，这样就达到了调节转速的目的。

2) $n = f(M)$ 的曲线及对额定转矩、最大转矩及启动转矩的影响

$n = f(M)$ 的曲线如图 1-7 所示。在 $n = f(M)$ 曲线上有三个特殊点对选择和使用电动机很有用处，即额定转矩 M_e 、最大转矩 M_{max} 及启动转矩 M_q 。

额定转矩是电动机满载时传给负载的转矩，使用电动机时不能长期地超过这个转矩，否则，电动机会过热。额定转矩以 M_e 表之，其单位为 $\text{kgf}\cdot\text{m}$ 或 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

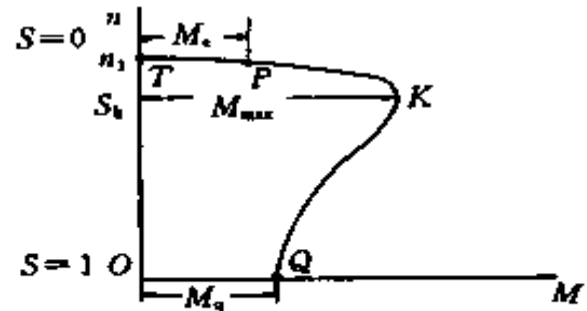


图 1-7 $n = f(M)$ 曲线

最大转矩 M_{max} 是电动机可能发出的最大的电磁转矩，它标志着电动机的瞬时过载能力，即电动机运行中如有一个时间不长即可消失的过载，只要不超过最大转矩，电动机是可以承受的，不致停转。但若超过此值，电动机便将不能维持转动而停转。这是在电动机拖动变化负载时必须要考虑的。

启动转矩 M_q 是 $n = 0$ 时电动机的电磁转矩。它必须大于启动电动机时轴上的反抗转矩，否则电动机就不能开始转动。

3) 电动机的外加电压对 $n = f(M)$ 曲线的影响

电动机是接在电网上工作的，电网电压的波动会影响电动机运行。究竟是怎样影响的呢？后果又怎样呢？

加在电动机定子线圈上的电压 U_1 减小时，则电动机中旋转磁场强度随之成比例的减弱。因而每磁极下的磁通量 ϕ 也成比例的减小。同时在同一转速下，转子导条中 e_2 与 i_2

的有效值也成正比例的降低。由于这个原因，电磁转速便与 U_1 成正比。

因此，异步电动机对于电压波动是很敏感的， U_1 对 $n = f(M)$ 曲线的影响如图 1-8 所示。可以看出，在运行段内同样转矩下，电压降低后，转速也略有降低。

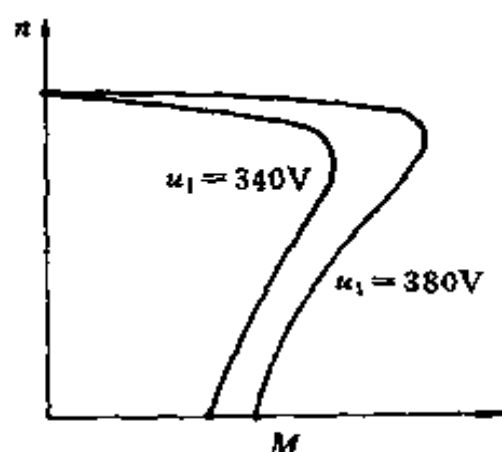


图 1-8 电压波动对 $n = f(M)$ 曲线的影响

若由于某种原因，电动机必须在低于额定电压下运行，那就必须注意降低电压后的 M_{q0} 及 M_{max} 是否能拖负载启动和承受瞬时过载。同时也要注意当电压降低后，重负载下电动机的电流比额定电压时的电流要大。例如电动机额定电压为 380V，如电压降低为 220V，则在输出功率大于 40% P_e 时，电动机电流已超过额定值了，这是电动机所不能承受的。

所以如电网过低时，必须考虑减轻电动机的负载，甚至停止工作。

与式 (1-1) 对应的机械特性曲线如图 1-7 所示。其 S_k 称为临界转差率，对应的 M_{max} 为转矩的最大值，一般是额定转矩的 1.8~2.5 倍。

第三节 异步电动机的调速方式

所谓三相异步电动机调速是在某一转矩下，调节转速使它为某一指定值。根据转差率的定义：

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}$$

$$n = n_1 \cdot (1 - S)$$

$$= 60 f_1 / p \cdot (1 - S) \quad (1-5)$$

由此可见，异步电动机的调速方式可分为变极对数、变转差率及变定子供电频率三种，其中变转差率的方法又可以通过调定子电压、转子电阻、转差电压等方法来实现。这样，异步电动机常见的调速方法如下表所示：

{	变极对数调速——对鼠笼型转子		
	{	变速差率调速	调定子电压
		调转子电阻——对绕线型转子	
		电磁离合器（转差率）	
串级调速（转差电压）——对绕线型转子			
{	变频调速	交—直—交变频	
		交—交变频	

一、变极对数调速

由 $n_1 = 60 f_1 / p$ 可知，在频率一定时，改变旋转磁场的转速与电动机定子的极对数即可改变同步转速 n_1 ，从而达到调速的目的，此时的机械特性如图 1-9 所示。

关于用改变定子极对数的办法来调速则需在电动机运行时改变定子线圈的接法，或在定子上绕上独立的 2 套或 3 套不同极对数的线圈，这样势必增加电动机的成本，体积和重量，因为电动机的极对数必须是整数，即 $p = 1, 2, 3, \dots$ ，因此这种调速方法只能是跳跃式的有级调速，例如：

$$p = 1 (n_1 = 3000), p = 2 (n_2 = 1500), p = 3 (n_3 = 1000)$$

此种方法是用改变电机定子绕组接线方式实现调速的，通常得到的是二级，即调速比为 2:1，叫做双速电动机，还有三

速、四速电机，由于设计和制造原因，目前只能做到四速。

尽管这种调速有上述的许多缺点，但毕竟能满足某些调速要求。因此在工业上不少需要调速的地方就用这种方法，如某些机床。具有这种结构的电动机称为多速电动机（JC系列）。

二、变速差率调速

1. 转子串电阻调速

由公式

$$S_k = \frac{r_2}{\{r_1^2 + (x_1 + x_{20})^2\}^{1/2}} \quad (1-6)$$

可知，改变转子电阻 r_2 ，即可改变临界转差率 S_k ，而最大转矩不变，因此改变了其机械特性图 1-10，从而可以实现调速。这种调速方法只能用在绕线型转子异步电动机上，显然，这是依靠增加转差功率的办法来降低速度的，因为转子中电流很大，因而转子的附加电阻中产生很大损耗，所以电动机的效率很低。同时，这种方法也只能是有级的和有触点的。由于机械特性很软，低速运行时负载稍有变化转速就波动很大，调速精度很差，一般多用在起重机等场合。

速度越低，损耗越大，从节能观点出发，这种方法也是不好的，对于大中容量的绕线转子异步电动机，若要求长期在低速下运行，是不宜采用此种调速方法的。

2. 定子电压调压调速

由异步电动机的机械特性可知，异步电动机的转矩与定子电压的平方成正比，因此改变其定子电压即可改变电动机的转矩与机械特性图 1-11，从而改变它与负载机械特性的交点，以实现调速，这是一种简单方便的调速方法。过去主要是利用笨重的饱和电抗器或交流调压器来改变电压的，目

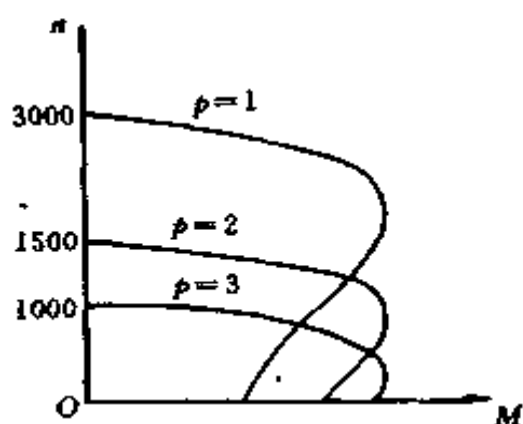


图 1-9 变极对数时异步电动机的机械特性

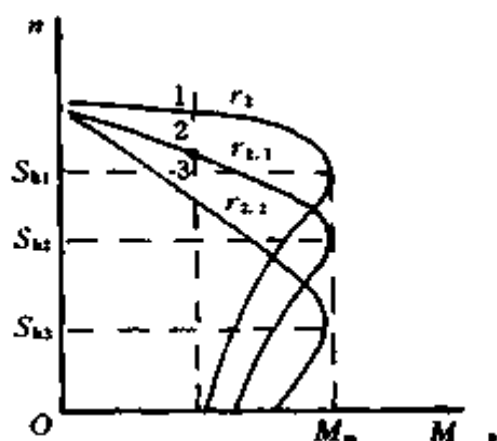


图 1-10 变转子电阻时异步电动机的机械特性

前已广泛采用可控硅做交流开关元件来调节电压。此种方法的电机损耗与转差率成正比，低速时损耗严重，效率很低，往往要降低电动机的容量运行（即选用容量较大的电动机）。此种方法通常用于电梯及卷扬机械中，调速范围开环时为 2 : 1，闭环时则可达 10 : 1，为了改善调速特性，可采用具有较大转子电阻的异步电动机。

3. 电磁转差离合器调速

用电磁离合器做为电动机和被驱动机械负载的联轴节，以电动机为原动机，恒速运转，当改变电磁离合器的励磁电流时，其机械特性将发生变化图 1-12，而使被驱动机械的速度发生变化。对应恒定的负载，励磁电流越大，负载转速越高。由于其机械特性很软，为保持转速稳定，一般都要采用速度反馈闭环控制，可以获得 10 : 1 的调速范围。通常将电磁离合器与异步电动机做为一个整体，称为滑差电动机。其优点是装置及控制线路简单、价格便宜，常用在纺织、印染、印刷等机械上。其缺点是低速运行时损耗大，效率低 ($n = 1 - S$)，对要求调速范围较大，且长期运行在低速的设

备中，是不适宜的。此外，由于机电时间常数大，系统的转动惯量约为一般异步电动机的二倍，不宜用于要求响应快的场合。

滑差电动机调速系统由笼型电动机、滑差离合器及控制系统三部分组成，三者缺一不可，核心部分是滑差离合器。滑差电动机在工业中有较广泛的应用，现在较详细地予以说明。

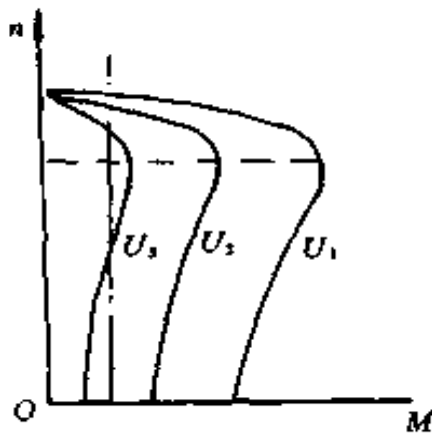


图 1-11 变定子电压时异步电动机的机械特性

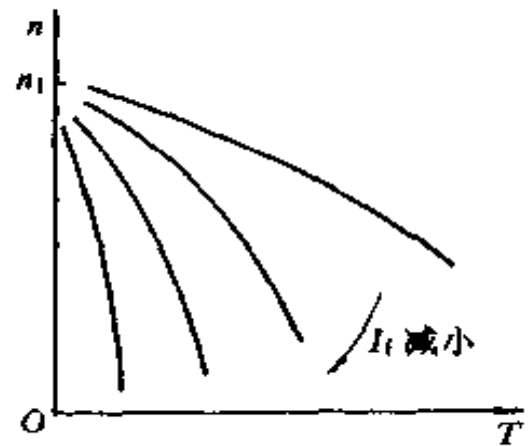


图 1-12 电磁滑差离合器在不同励磁电流下的机械特性

图 1-13 为滑差电动机结构示意图。图中滑差离合器部分的结构是：外壳；产生的直流励磁场绕组；安装在主动轴上的磁极，主动轴通过联轴节与笼型异步电动机的转轴相联；安装在从动轴上的电枢，通常是用铸钢材料并做成某种均匀对称结构，能导磁导电；测速电机安装在从动轴上，用于转速指示和反馈信号。

离合器的具体结构比较复杂，有好几种类型：有的把励磁绕组安装在转轴上，因而需用电刷滑环装置才能送入励磁电流；也有的把磁极装在从动轴上而把电枢装在主动轴上

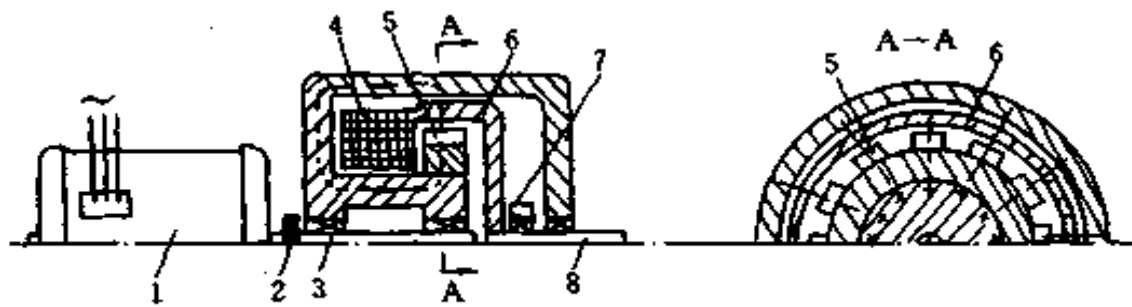


图 1-13 滑差电动机结构示意图

1—笼型异步电动机；2—联轴节；3—主动轴；

4—励磁绕组；5—磁极；6—电枢；7—测速电机；8—从动轴

的。磁极和电枢的几何形状也有不同的类型。不论具体结构如何，有一点是共同的，就是从动轴和主动轴之间没有机械联系，只有电磁联系，并要求磁路结构合理，以加强电磁联系的紧密程度。

1) 滑差电动机的工作原理和机械特性

当在离合器的励磁绕组内通入直流电流 I_1 时，在离合器内所产生磁场的磁力线在空间被磁极分为几束（磁极个数）进入电枢导磁体内（如图中虚线所示）。而当磁极被笼型异步电动机带动以 n_1 的转速旋转时，这几束磁力线也在 n_1 的转速旋转，必然对电枢产生切割作用，而电枢又是导电材料成的，因而在其上将感应出涡流 I_2 ，后者又与磁力线产生电磁力效应。因而产生电磁转矩 M ，驱使电枢和从动轴跟着磁场旋转的方向以低于磁场转速 n_1 的转速 n_2 旋转。励磁电流的有无决定从动轴和主动轴“合上”和“离开”，又因为它是基于 n_1 和 n_2 的转差存在才会有感应涡流和电磁转矩的出现，所以才把它叫做转差（滑差）离合器。

滑差离合器的工作原理与普通异步电动机的原理是极为相似的，所不同的只是普通异步电动机的旋转磁场转速取决

于电源频率和磁极对数、磁场的磁通正比于定子电压 ($\phi \propto U_1$)；而滑差离合器这一“特殊异步电动机”，它的旋转磁场的磁通取决于直流励磁电流 I_f ，转速取决于主动转速 n_1 (由拖动它的笼型电动机决定)。考虑到离合器电枢材料的电阻率比较大，所以电磁滑差离合器的机械特性与转子绕组电阻比较大的异步电动机—力矩电动机的软机械特性极为相似，改变离合器的励磁电流 I_f ，相当于力矩电动机改变定子电压 U_1 。

2) 滑差电动机的调速

由机械特性可知，改变励磁电流 I_f 可以调节滑差电动机的从动轴 (接负载) 的转速。但是开环的机械特性太软，只适用于卷绕机械或通风型负载的调速。对于恒转矩负载，

必须采用闭环控制，才能得到较大的调速范围和保证一定的转速的稳定性。

通常，励磁电流是通过晶闸管可控整流电路提供的，利用滑差电动机从动轴上的测速发电机送出的转速信号构成转速负反馈闭环控制系统如图 1-14 所示。图中 TG 为交流测速发电

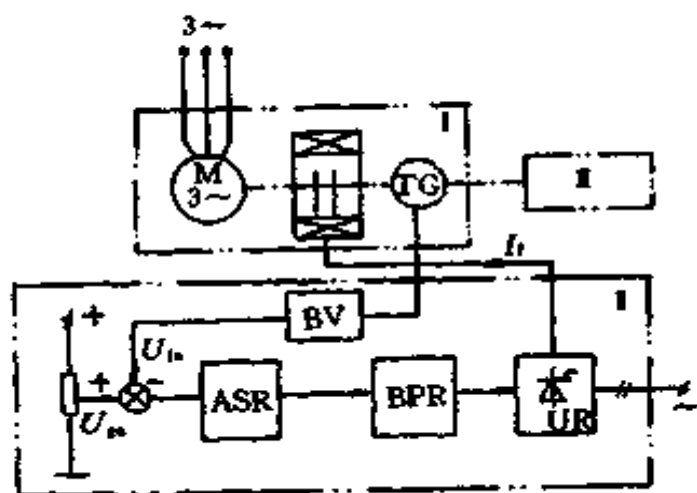


图 1-14 滑差电机转速
负反馈系统图

I—滑差电动机； II—控制器；
III—机械负载

机；BV 为转速·电压变换电路；ASR 为转速调节器；通常用比例 (P) 调节器；BPR 为移相脉冲触发器；UR 为晶闸

管可控整流器。

由电位器的给定电压 U_{gn} 来调节滑差电机的转速。由于转速负反馈作用的存在，使得电动机遇到负载转矩增加引起转速的降低时会自动增加励磁电流来补偿，从而使转速不至于降低很多。这样就提高了电动机机械特性的硬度，如图 1-15 所示。具有转速负反馈的滑差电动机的调速范围可达 10:1 或 20:1。

3) 滑差电动机的能耗和效率

滑差电动机在采取转速负反馈闭环控制后虽然调速性能有很大的改善，但从它的调速本质上说仍然是属于耗能型调速，效率是较低的。在负载转矩 M 不变的条件下，滑差离合器的主动轴转速 n_1 是恒定的，它取决于笼型异步电动机的硬特性。因此从笼型异步电动机传给离合器的主动轴的输入功率为 $P_1 = M n_1 / 9550$ 也是恒定的。如果离合器从动轴的转速为 n_2 ，则由从动轴传给机械负载的输出功率为 $P_2 = M n_2 / 9550$ 。输入功率 P_1 称为转差功率

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{M(n_1 - n_2)}{9550} \quad (1-7)$$

这部分功率将由电枢上涡流的热效应消耗转化为热量使电动机的温度升高。转速 n_2 愈低， ΔP 愈大，离合器发热就愈严重。从温升角度， ΔP 应该有一个最大允许的限度。由式

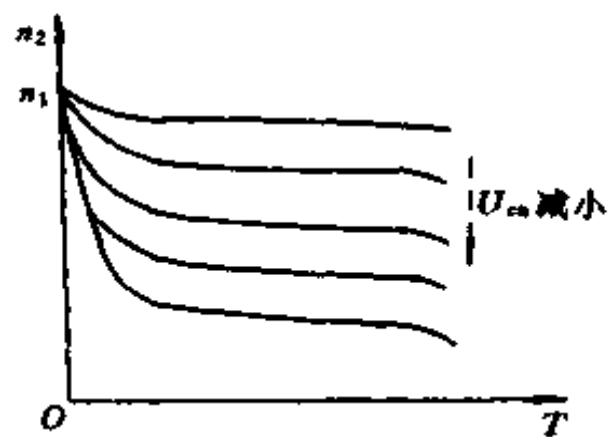


图 1-15 具有转速负反馈控制的滑差电动机机械特性

(1-7) 可见, 当 ΔP 一定时, 允许输出的转矩 M 将随 n_2 的调低而降低。因此, 滑差电动机调速系统不适于恒转矩负载的调速, 用于通风机或泵类负载的调速为宜。

但不论什么性质的负载, 滑差离合器的效率总是为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M_{n2}}{M_{n1}} = \frac{n_2}{n_1}$$

可见转速调得越低, 效率也越低。

总之, 滑差电机调速系统虽然简单并具有一定的调速性能, 但是效率低, 耗能大, 所以不适宜长期低速运行。

4. 异步电动机的串级调速

对于绕线式异步电动机, 在其转子回路中不是串入电阻, 而是串入与转子电势同频率的附加电势, 并通过改变 E_f 的幅值和相位来实现调速, 同时通过产生 E_f 的电路将转差功率返回到电源去, 因此, 即使电动机在低速运行时, 也只有小部分功率消耗在转子电阻本身, 仍具有较高的效率。

实用的串级调速系统, 是采用转子回路中串入直流附加电势 E 的方案, 即直流附加反电势 E 由可控硅元件组成的全控整流电路来获得, 要求全控整流电路长期在有源逆变状态下工作, 即要求可控硅的触发脉冲控制角 $\alpha \geq 90^\circ$, 也就是逆变角 $\beta \leq 90^\circ$ 。这样, 不可控的转子整流器输出的转差功率就利用可控硅组成的有源逆变器回馈入电网, 改变 β 的大小, 即调节了可控硅逆变器的输出电压值, 也就是改变了直流附加电势 E_f 的值, 实现了低于同步速度范围内的调速, 其机械特性如图 1-16 所示。

串级调速完全克服了转子串电阻调速方法的缺点, 它具有高效率 (85% ~ 93%)、无级平滑调速、较硬的低速机械特性、可实现闭环控制装置较简单 (与变频调速相比) 等优

点，其主要缺点是功率因数较低，满载运行时也只有 0.6 左右。

串级调速原理要求有一个与转子电动势频率相同的附加电势 E_{ad} 真正实现起来是很困难的，因为转子电动势的频率 $f_2 = Sf_1$ 是随着转速调节、转差率的改变而变化的。

但是，串级调速的本质，是利用附加电势和转子电流的相互作用来吸收或提供转差功率，因此完全可以通过频率变换，把转子电量通过变流装置变成直流量。此时，为实现调速而串入的附加电势就可以采用直流电源。这样就避免了需要随时改变附加电动势频率的复杂问题。而目前，这个附加的可调直流电源多采用晶闸管逆变装置。

图 1-17 为应用晶闸管逆变器控制的串级调速系统的主电路。接于异步电动机转子侧的不可控整流桥，把转子电动势的电流整流成直流量 E_{dc} 和 I_{dc} ，再送到三相有源逆变器上，逆变器再把直流量逆变成交流量，经过变压器把转差功率 SP 回馈到交流电网，从而可大大提高系统的效率。改变逆变器中的晶闸管的逆变角 β ，即改变逆变器的直流电动势 E_{ad} ，使电动机的转速得到调节。由于接在转子侧的是不可控整流桥，电流不可能逆向，所以该系统中转子回路总是单方向地把一部分功率（转差功率）通过接于电源侧的晶闸管逆变器送回电网，因而该线路只能是低于同步转速下调速。

如果把接在转子侧的整流桥也改用晶闸管变流装置，并

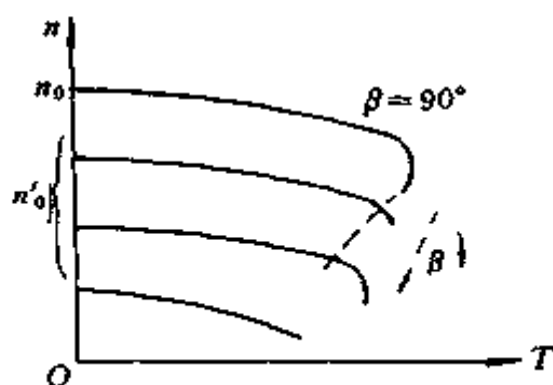


图 1-16 异步电动机串级调速时的机械特性图

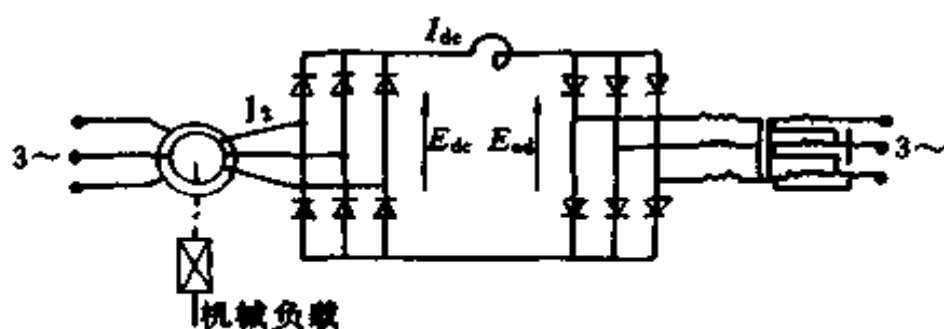
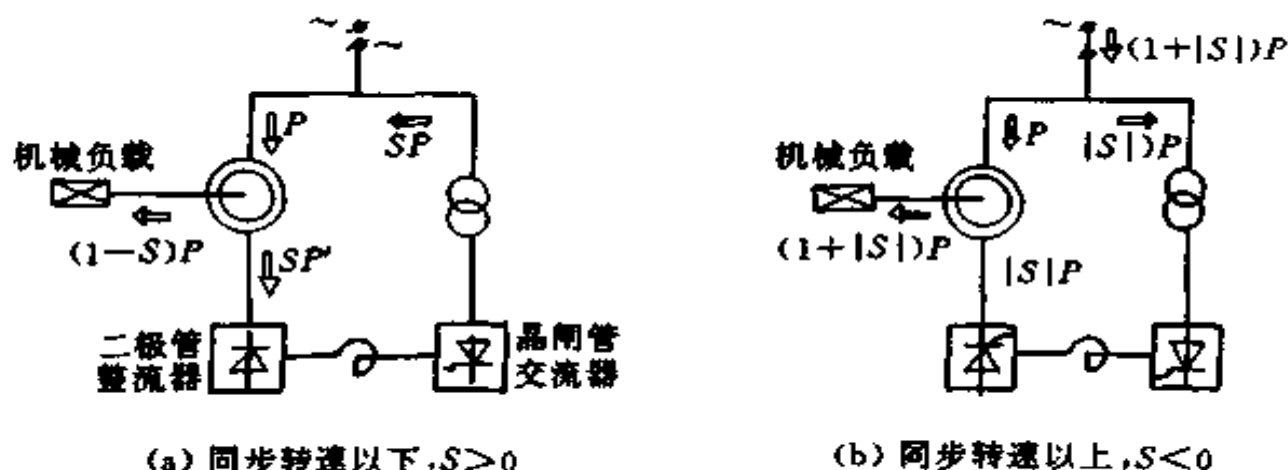


图 1-17 异步电动机晶闸管逆变串级调速系统主电路图

且让它处在逆变状态而让接于电源侧的变流装置处在整流状态，则会有一部分功率（转差功率）由交流电网通过整流和逆变送入转子，形成定子和转子所谓“双馈状态”，从而使电动机的转速可以超过同步转速。图 1-18 给出了两种串级调速方案电动工作状态的能量流向关系示意图。



(a) 同步转速以下, $S > 0$

(b) 同步转速以上, $S < 0$

图 1-18 电动状态下串级调速的能量流向

如图 1-18 所示以逆变角 β 为参变量的异步电动机串级调速时的机械特性曲线，与直流电机电枢调压调速的机械特性很相似。不同的是由于整流、逆变回路中的电压降低比较大，而且还有功率因数变化的影响，所以机械特性比同容量的他激直流电动机特性要稍微软些。

由于串级调速装置控制的电动机本身具有类似他激直流电动机的较硬的机械特性，因此在对调速精度要求不高的场合可以采用开环控制。如果要想得到高精度的调速，则采用速度负反馈的自动调节系统，最典型的是速度和电流双闭环控制系统，其方框图如图 1-19 所示。与直流电动机的双闭环调速系统很相似。

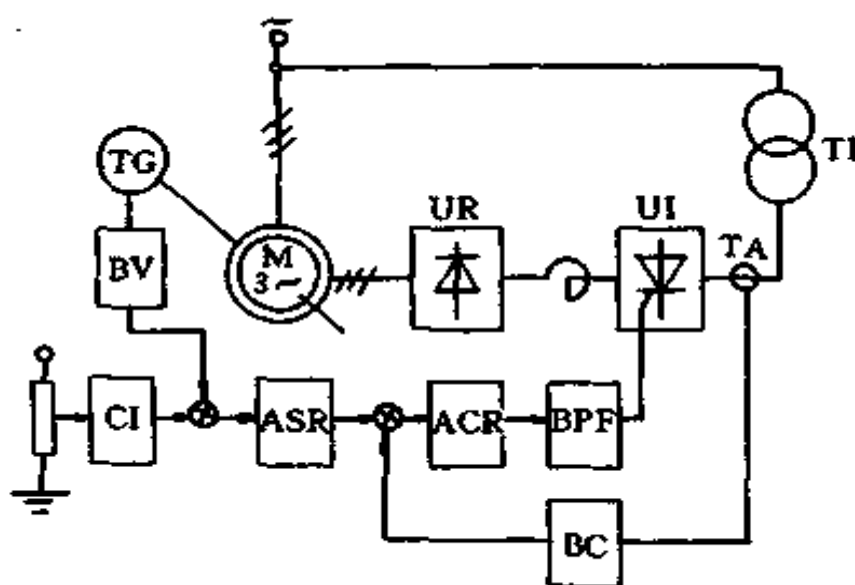


图 1-19 低同步串级调速系统框图

CI—给定积分器；ASR—速度调节器；ACR—电流调节器；
BPF—触发器；BC—电流变换器；BV—速度变换器；TG—测速电机

串级调速系统中应注意的问题：

(1) 串级调速虽然效率较高，但功率因数较低，这是因为串级调速装置中电动机定子必须从电网吸收感性无功电流而且逆变器也必须从电网吸取感性无功电流、以实现自然换流。所以总的功率因数较低，特别是低于同步转速运行时更是如此。对于容量较大的串级调速系统，应采取必要措施以求改善功率因数。具体有以下几种方法：

①在系统的交流电源上并联电力电容器或旋转式同步补偿器；

②在整流逆变主回路上采取一些措施，如异步电动机转子回路接入变压器，并通过开关控制整流电压 E_{dc} 使之在整个调速范围内不出现过高的数值，以保证逆变器的逆变角在较小的范围内变化，从而提高功率因数。也可以采用强迫换流的具有超前功率因数的逆变器；还可以利用变流器的串、并联切换，逆变器的串联等一些措施。

(2) 晶闸管串联系统中，异步电动机的最大转矩有所降低，功率因数也有所降低，对于低于同步转速的调速系列也就达不到异步电动机本身的额定功率和额定转速的数值。只能发挥出各自的 85% 和 90% 左右。因此在设计串级调速系统时异步电动机的容量应留出 15% 的裕量，并且按电动机 90% 额定转速与生产机械所需最高转速之比值作为电动机与生产机械之间传动机构的传动比。

串级调速系统的启动方式，如果系统设计的是一个宽调速范围的系统，则可以直接启动。启动时只要使逆变器的逆变角 β 处在最小的 $\beta_{\min} = \cos^{-1}(1/k)$ 状态，对应的转速为零，逐渐增大 β 值，逆变电压减少，系统平稳增速至所需转速；对于一些调速范围不大的系统，由于整定的系统在低转速时速度不是零，这与实际启动时转速从零开始之间存在差异，直接启动会使系统受到很大的冲击。为了解决这个问题，通常采用图 1-20 所示的利用频敏变阻器启动方式。频敏变阻器与串级调速装置并联，用接触器进行切换。启动时接触器 KM_1 闭合、 KM_2 断开，当异步电动机启动至串级调速装置设计的最低速时，接触器 KM_2 接通，串级调速装置投入运行。

三、变频调速

异步电动机的变频调速是通过改变定子供电频率来改变同步转速而实现调速的，在调速中从高速到低速都可以保持较小的转差率，因而消耗转差功率小，效率高。可以认为，变频调速是异步电动机的唯一最为合理的调速方法。随着电力电子技术和微机应用的不断发展，能够提供一种合乎异步电动机调速要求的变频电源装置，

与结构简单的异步电动机组成调速系统，在调速性能上已能和直流电动机调速系统相媲美。因此，目前异步电动机的变频调速越来越受到人们的注意，已经在很多领域得到了应用。在我国也被列为重点的技术推广项目。

异步电动机变频调速的特性和基本要求就是在基本速度（简称基速即电动机自然机械特性速度）以下调速时要求保持电压和频率的比值为定值（ $V/F \approx \text{常数}$ ），电动机具有恒转矩调速特性；在基速以上，电压为额定值一般不再升高，所以，电动机磁通 Φ 将随 f 的调高而减小，电动机具有恒转矩调速特性。由于在低于基速时要求 V/F 为定值，故常用的变频装置称为 VVVF（Variable Voltage Variable Frequency——变压变频）控制方式的变频器。又因为异步电动机的电子式变频电源毫无例外都采用了逆变技术，所以也被称为 VVVF 逆变器。

由式 (1-5)

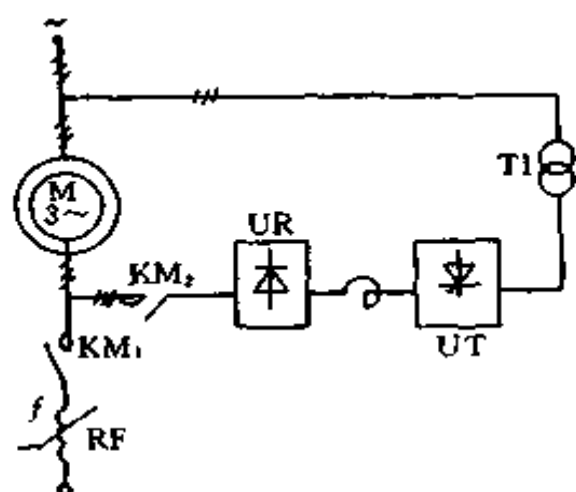


图 1-20 串级调速系统利用
频敏变阻器启动方式

$$n = 60 f_1 / p \cdot (1 - S)$$

可以看出，若均匀地改变供电频率 f_1 ，即可平滑地改变电动机的同步转速，因此，它可以通用于各种异步电动机和同步电动机。异步电动机采用变频调速，除了充分发挥异步电动机的一系列为直流电动机所没有的优点外，还有下列优点：

(1) 较高的效率和功率因数。由于异步电动机在调速过程中总是运行在很小的转差率情况下，所以转差率小（损耗小），效率较高。同时，由电机学可知，转差率很小时，转子的等效电阻 r_2 很大，此时转子回路基本上是电阻性的，因而功率因数 $\cos\phi$ 亦高。

(2) 调速范围宽。频率 f_1 可以在低于和高于工频电源频率的范围内调节，低频率从几赫兹开始，高频则可达几百赫兹，因而具有宽的调速范围。

(3) 由于采用微计算机控制，变频调速系统开环运行时已有相当的精度，若采用速度闭环控制，则可得到很高的调速精度。

因此从调速性能来说，变频调速是交流调速系统中比较理想的调速方法。下面较为详细地介绍这种调速方法。

第二章 变频调速装置的组成和特点

第一节 变频调速装置分类和特点

一、变频调速装置分类

变频器一般可分为交—交变频器与交—直—交变频器两种，如图 2-1 所示。

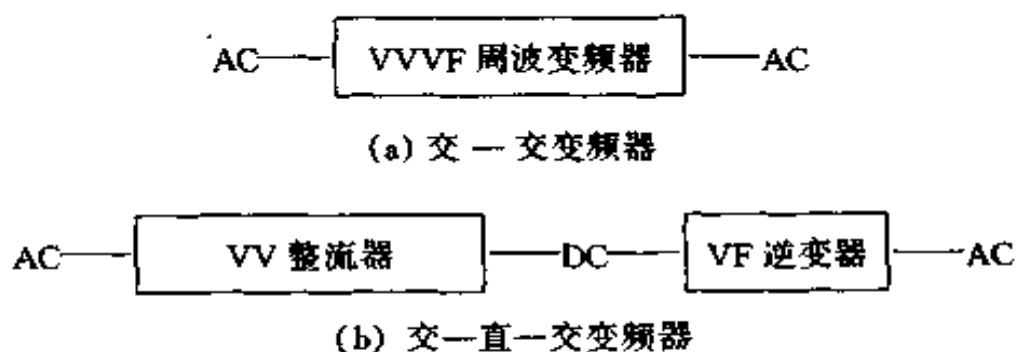


图 2-1 电动机变频调速装置

VVVF—Variable Voltage

Variable Frequency

交—交变频器由三组可逆整流器（桥式或零式线路、大功率装置都用桥式）组成，其特点是：

- (1) 原理基于可逆整流，工作可靠。
- (2) 流过电动机的电流近似于三相正弦，附加损耗小，脉动转矩小，电动机属普通交流电机类，价格便宜。
- (3) 当电源为 50Hz 时，最大输出频率不超过 20Hz，4 极电动机最高转速小于 600r/min。

交—交变频调速适用于大功率（500kW 或 1000kW 以上）、低速（600r/min 以下）的场合。

对交—交变频装置：

变频装置容量 = 电动机输出功率 ÷ (电动机功率因数 ×

电动机效率)

同步电动机功率因数 = 1, 效率 ≈ 0.95

异步电动机功率因数 ≈ 0.85 , 效率 ≈ 0.95

在同样输出功率下, 按上述公式算出异步电动机的变频装置容量比同步电动机大 15% 左右, 但往往由于变频器末级功率器件容量富裕量较大, 且在堵转工作状态时, 同步电动机的变频装置输出直流电流。异步电动机的变频装置输出转差频率的交流电流, 同样的晶闸管变流装置输出交流电流 (0.1Hz 以上) 比直流电流提高出 30% 左右, 实际上装置容量可能并不需加大。

变频装置电网侧的功率因数与负载电动机的功率因数成正比, 异步电动机功率因数低, 电网侧功率因数也低, 为提高功率因数, 要求装较大容量无功补偿装置。

交一直一交变频器亦称间接变频器, 它是将交流电先经可控整流 (或其他方式) 变成幅值可变的 (简称 VV) 直流电, 然后再将直流电经逆变器变成频率可调的 (简称 VF) 交流电输出。

根据其对负载无功能量的处理方式不同, 变频器又可分为电压源和电流源两种。电压型变频器中间环节采用电容滤波, 其特点是电源阻抗小, 类似于电压源, 输出电压比较平直, 为矩形波, 输出电流近似于正弦波, 电流的幅值随负载变化而自动调整, 控制简单; 并且一台变频器可适用于几种不同容量、不同类型的电动机; 通用性强, 只控制电压, 电流任其随负载变化, 因逆变器直流侧电压极性固定, 不能再生发电制动, 可以采用速度负反馈, 构成自动调节系统。

电流型变频器采用的是电感滤波, 其特点是电源阻抗大, 类似于电流源, 输出电流较平直, 为矩型波, 输出电压

近于正弦波，当突然降低变频器输出频率时，电动机可以自动地进入再生发电工作状态，可以由速度外环反馈电流及内环反馈构成自动调速系统，具有良好的动态性能，适合于快速及高精度系统中采用。它的特点是：

(1) 逆变器换相条件要求电动机工作在超前功率因数区，变频装置容量大，过载能力低。

(2) 欲提高过载能力，需减小电动机的定子漏抗，电动机短粗，转动惯量大，动态性能差。

(3) 电机定子电流为 120° 方波，电动机损耗增加，转矩脉动。

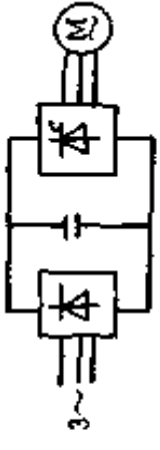
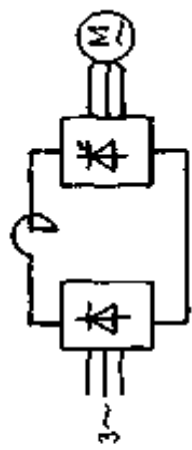
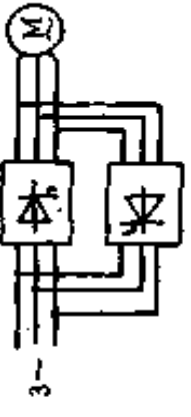
(4) 无输出频率限制。

交—直—交变频调速适用于大功率， 600r/min 以上，负载较平稳的场合。其调速范围宽，低频可以从几赫（甚至零点几赫）开始，高频可达几百赫兹。

变频器的电路结构和性能见表 2-1。

异步电动机用变频器调速时，需要根据电动机特性对供电电压、电流、频率进行适当的控制。控制方式大体可分为开环控制和闭环控制两类。作为开环控制的有 V/f 控制方式；闭环控制有转差频率控制和矢量控制等方式。从历史发展来看各种控制方式，是按 V/f 控制、转差频率控制、矢量控制的顺序发展起来的。在对电动机的控制性能方面，越是后来的控制方式、性能越优良，特别是矢量控制，可以实现与直流电动机电枢电流控制方式相匹配的传动性能。但与此同时，由于控制内容复杂化，装置的价格也提高了。各种控制方式的变频器已经商品化，使用者应根据调速的目的、用途和所要求的性能选择最适宜控制方式的变频器，以达到较高的性能价格比。

表 2-1 变频器主电路结构、性能和适用场合

	典型结构示意图	结构特点	性能及适用场合
交—直—交变频器	 <p>电压型</p>	<p>直流环节用电容滤波，具有直流恒压源性质</p>	<p>频率调节范围宽，可高于也可低于电网频率。通用性、经济性较好</p>
交—直—交变频器	 <p>电流型</p>	<p>直流环节用电感滤波，具有恒流源性质</p>	<p>频率调节范围宽，可高于也可低于电网频率。便于实现电流的闭环反馈，动态性能好，适合于快速及高精度系统</p>
交—交变频器	 <p>交—交变频器</p>	<p>两组逆变器并联</p>	<p>直接变频省去中间直流环节，故效率较高，但所用开关器件较多，且频率输出只能低于电网频率，调节范围较窄，适用于低速、大容量且对调速范围要求不高的场合</p>

交流调速用的变频器按电力电子器件及其关断方式分为三类：

(1) 自关断类：使用全控型电力电子器件（既能控制开通，也能控制关断），例如大功率晶体管（GTR）、可关断晶体管（GTO）、功率场效应管（POWER MOSFET）、绝缘门极晶体管（IGBT）等。

(2) 强制关断类，使用半控型电力电子器件——普通晶闸管（仅能控制开通，不能控制关断），靠换相电容的充放电来关断已导通器件。

(3) 自然换相类，使用半控型电力电子器件——普通晶闸管，利用电源或负载的交流电压来关断已导通器件。自关断类受器件限制，目前功率还不能做得很大，强制关断类功率受换相电容的换相能力限制，对于大功率变频器来说，大都采取自然换相类，因为普通晶闸管功率大，价格便宜，自然换相可靠。

在中小功率范围内，由于 IGBT 易开关，具有高速度，低损耗等特点，已在 PWM 方式中取代 GTR 和 MOSFET。

二、异步电动机在变频调速时的机械特性

如前所述，变频调速是一种改变供电频率 f_1 的调速方法。在许多场合，为了保持在调速时电机的最大转矩不变，需要维持磁通恒定，这就要求在改变 f_1 的同时，对定子端电压 U 也要做相应的调节。因此，对给电机供电的变频器一般都要求兼有调频和调压两种功能。

在异步电动机中，已知定子感应电势

$$E_1 = 4.44 f_1 \omega_1 k_1 \Phi \quad (2-1)$$

如果略去定子阻抗压降，则定子端电压

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 \omega_1 k_1 \Phi \quad (2-2)$$

上式说明，若维持端电压 U_1 不变，则随 f_1 的升高，磁通 Φ 将减小，又从转矩公式

$$M = C_M \Phi I_2 \cos \phi_2 \quad (2-3)$$

可以看出， Φ 的减小势必导致电机允许输出转矩 M 下降，使电机的效率变低，同时电机的最大转矩 M_{\max} 也将降低，严重时会使电机堵转。若维持电压 U_1 不变，而减小 f_1 ，据式 (2-2)， Φ 急剧增大，造成电机过热。这就是要求在变频的同时，必然相应地改变电压 U_1 的原因。根据 U_1 和 f_1 的不同比例关系，将有不同的变频调速方式。

1. 保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 的比例控制方式

由式 (2-2) 可以看出，在变频时要维持磁通不变，只要 U_1 和 f_1 成比例地变化即可。

设电机工作于任意的 f_1 和 U_1 ，且 f_1 和 U_1 均以其额定值表示，即

$$f_1 = \alpha_f f_{1n} \cdot U_1 = \alpha_f U_{1n}$$

于是，三相电动机机械特性表达式可写为：

$$M = \frac{3PU_{1n}^2 r_2' (\lambda_f S)}{2\pi f_{1n} [(r_2')^2 + (\lambda_f S)^2 x'_{20}]^2} \quad (2-4)$$

对于不同的 α_f ，式 (2-4) 所表达的机械特性为一族平行曲线，如图 2-2 中虚线所示。同时，根据最大转矩公式

$$M_{\max} = 3PU_{1n}^2 \alpha_f / 2 \cdot 2\pi f_{1n} [r_1 + (r_1^2 + \alpha_f^2 x_e^2)^{1/2}] \quad (2-5)$$

式中 $x_e = x_1 + x'_{20}$

可以看出，只有当 r_1 忽略不计时， M_{\max} 才和 α_f (或 f_1) 无关。但实际上在低频时 r_1 已不可忽略， M_{\max} 将随 f

而减小，如图 2-2 中实线所示。在低频时，启动转矩也将减小，甚至不能带动负载。

2. 保持 $M_{\max} = \text{常数}$ 的恒磁通控制方式

对于 U_1/f_1 成比例的控制方式，在低频时由于 r_1 上压降所占比重增加，将无法维持 M_{\max} ，因而只适用于调速范围不太大或转矩随转速下降而减小的负载（如风机，泵类）。对于调速范围大的恒转矩负载，则要求在整个调速范围内维持 M_{\max} 不变，亦即按 $E_1/f_1 = \text{常数}$ 来进行控制。为此，

必须随着 f_1 的降低，适当地提高 U_1 ，以补偿 r_1 上的压降。

令式 (2-5) 中的 $\alpha_f = 1$ ，得额定频率时最大转矩

$$M_{me} = 3PU_{1n}^2/2 \cdot 2\pi f_{1n} [r_1 + (r_1^2 + x_e^2)^{1/2}] \quad (2-6)$$

对任意 f_1 则有

$$M_{\max} = 3PU_{1n}^2/2 \cdot 2\pi f_1 [r_1(r_1^2 + \alpha_f^2 x_e^2)^{1/2}] \quad (2-7)$$

当 $M_{\max} = M_{me}$ 时，可得：

$$U_1 = \alpha_f U_{1n} \{ 1/\alpha_f + [(1/\alpha_f)^2 + Q^2]^{1/2} / [1 + (1 + Q^2)^{1/2}] \}^{1/2} \quad (2-8)$$

式中 $Q = x_e/r_1$ 。上式即代表了在电动机参数 (Q) 一定

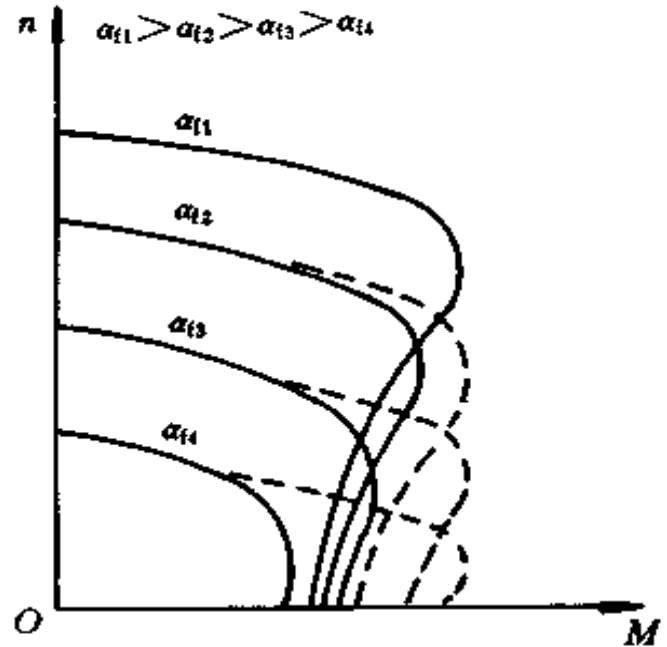


图 2-2 $U/f = \text{常数}$ 时变频调速的机械特性

时, U_1 应随 f_1 (α_f) 怎样变化, 才能维持 $M_{\max} = \text{常数}$ 的表达式。图 2-3 示出了式 (2-8) 的函数关系。按 $M_{\max} = \text{常数}$ 控制方式的机械特性如图 2-4 所示。

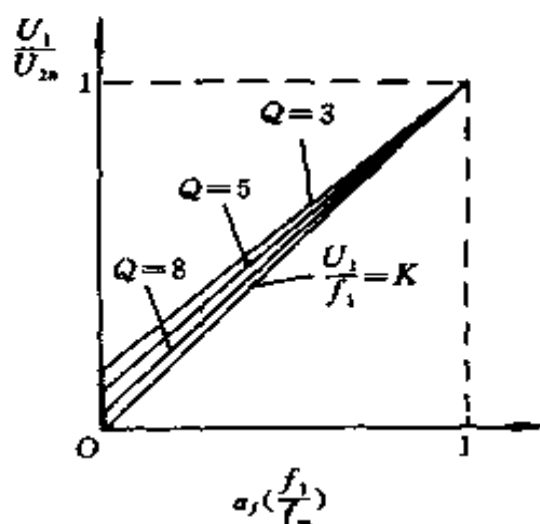


图 2-3 $M_{\max} = \text{常数}$ 调速时 U_1 与 f_1 的关系

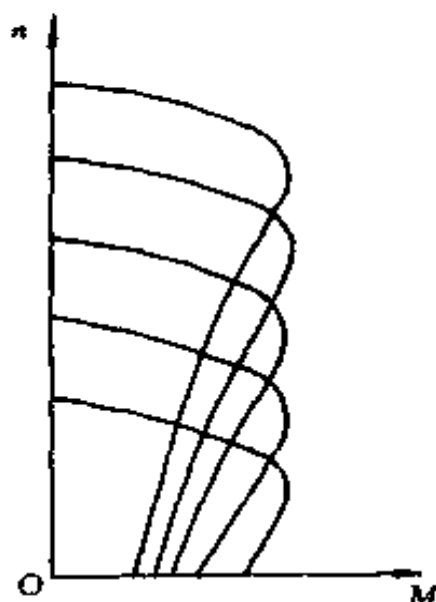


图 2-4 $M_{\max} = \text{常数}$ 调速时的机械特性

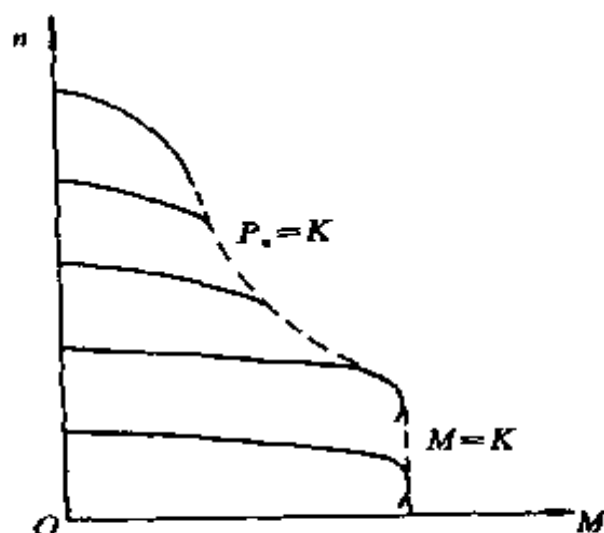


图 2-5 恒转矩恒功率调速时的机械特性

3. 保持 $p\omega = \text{常数}$ 的恒功率控制方式

在 $f_1 > f_{1n}$ 时, 亦即电机的转速超过其额定转速时, 若仍维持 $U_1/f_1 = \text{常数}$, 势必使 U_1 超过 U_{1n} , 这是不可能的。所以, 在 $f_1 > f_{1n}$ 时定子电压 U_1 将不再升高, 而保持 $U_1 = U_{1n}$ 。这样一来随 f_1 的增加气隙磁通将成比例地减小, 从而导致

电机转矩的减小，其机械特性如图 2-5 所示，可以看成恒功率调速。

在异步电动机变频调速系统中为了得到宽的调速范围，可以将恒转矩调速和恒功率调速两种方式结合起来。当转速升到基速（通常为额定转速）以上时将不再保持恒转矩调速，而改为恒功率调速。

第二节 变频器的工作原理

这里我们介绍交—直—交电压型变频器的工作原理，内部框图如图 2-6 所示，其主回路如图 2-7 所示。其中的逆变器由 6 个大功率晶体管（GTR）组成，每个大功率晶体管还配有一个与之反向并联的大功率快速二极管（续流二极管），以提供释放电机线圈电感中能量的通路，防止在 GTR 上产生过高的电压。滤波电容器 C 起中间能量存储作用，使逆变器与交流电网去耦。下面介绍三种调制方式。

一、方波幅度调制（PAM）

这里以 180° 导电型为例说明变频器的工作原理。在三相逆变器中，电动机正转时大功率晶体管（GTR）的导通顺序是 GTR1, 2, 3, 4, 5, 6。各触发信号间隔 60° 电角度，而 180° 通电型的特点是每只大功率晶体管导通为 180° ，在任意瞬间有 3 个 GTR 同时导通（每个桥臂上有 1 只 GTR 导通），它们的导通互换关断是在同一条桥臂内进行，即 GTR1—4, GTR3—6, GTR5—2 之间相互导通关断互换。

设负载为星形连接，若以中性点 O 点电位为参考点时，则 GTR1, 2, 3, 4, 5, 6 顺次导通时的电压波形如图 2-8 所示。其不同导通区间时的相电压可通过图 2-9 中的等值

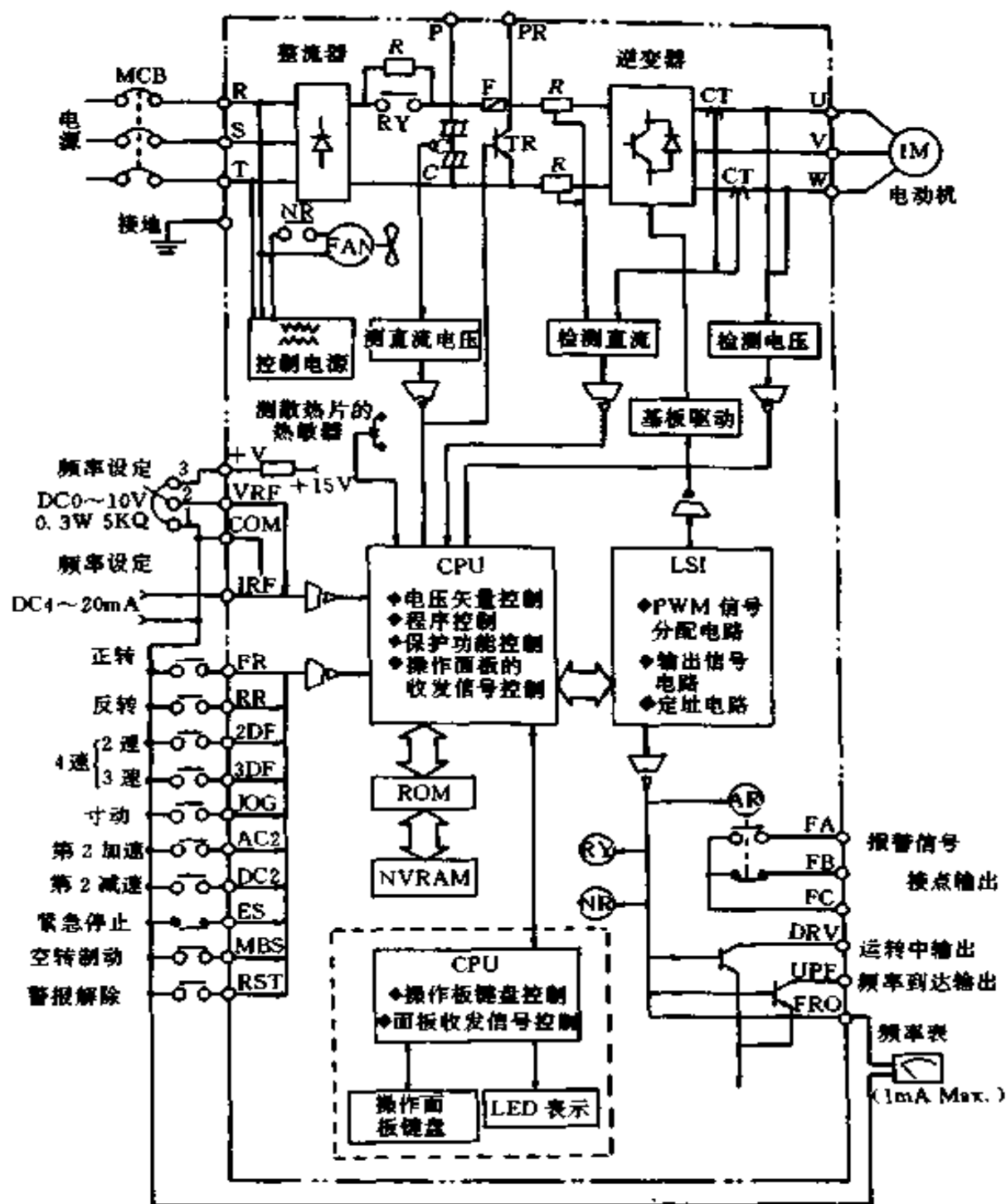


图 2-6 变频器内部框图

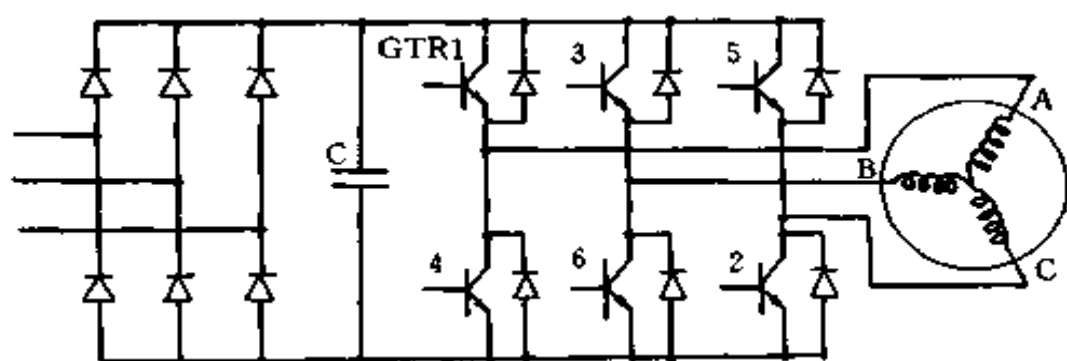


图 2-7 变频器（交一直—交电压型）主回路图

电路求得。例如在区间①中，GTR1, 6, 5 导通， $U_{AO} = U_{CO} = 1/3U$ ； $U_{BO} = -2/3U$ ；区间②GTR1, 6, 2 导通， $U_{AO} = 2/3U$ ， $U_{BO} = U_{CO} = -1/3U$ ；区间③GTR1, 3, 2 导通， $U_{AO} = U_{BO} = 1/3U$ ， $U_{CO} = -2/3U$ 。区间④~⑥与上面区间重复，只不过是电源极性相反。从而可画出相电压波形为一阶梯形波，线电压（ $U_{AB} = U_{AO} - U_{BO}$ ， $U_{BC} = U_{BO} - U_{CO}$ ， $U_{CA} = U_{CO} - U_{AO}$ ）波形为一矩形波。

根据波形图及有效值定义，可以求出输出电压和输入直流电压 U 的关系。相电压有效值为：

$$\begin{aligned}
 U_A = U_B = U_C &= (1/T \cdot \int_0^T U_A dt)^{1/2} \\
 &= [1/2\pi \cdot \int_0^{2\pi} \pi U_A^2 d(WT)]^{1/2} = 0.47/U_D
 \end{aligned}$$

式中线电压有效值为

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = (2/3)^{1/2} U_D = 0.817 U_D$$

线电压和相电压之比为

$$U_{AB}/U_A = \frac{(2/3)^{1/2} U_D}{2^{1/2}/3 \cdot U_D} = \sqrt{3}$$

对线电压，相电压进行谐波分析，将其分解成傅立叶级

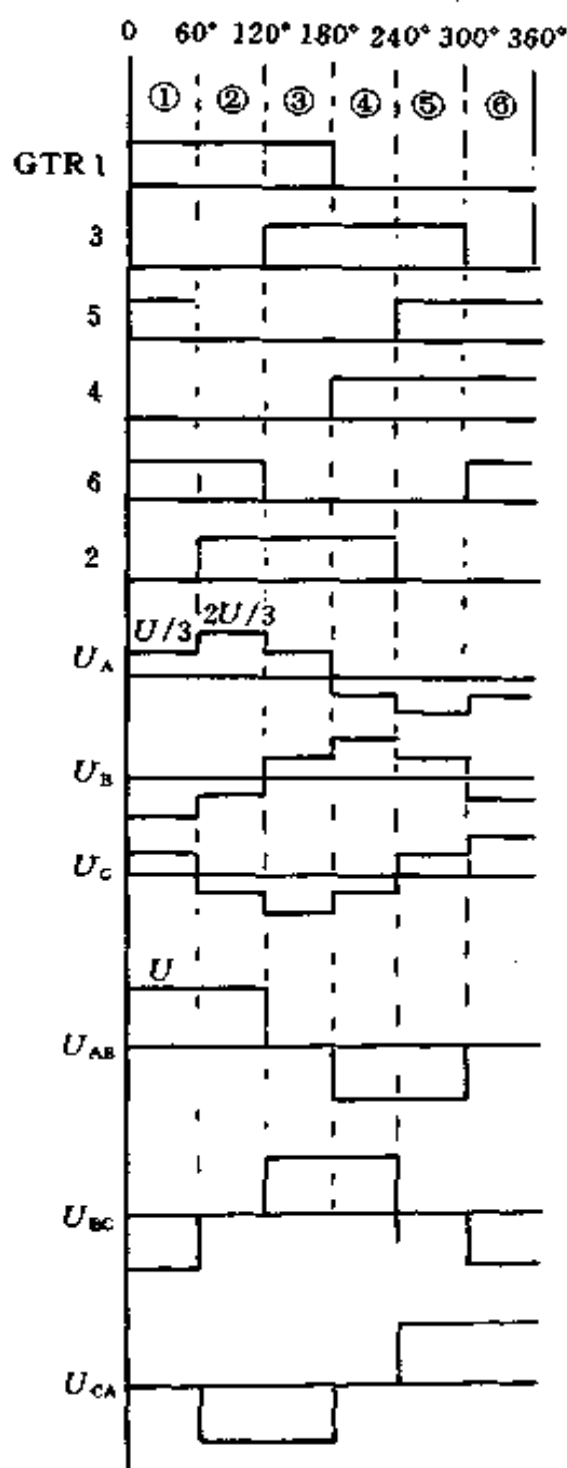


图 2-8 逆变器输出电压波形

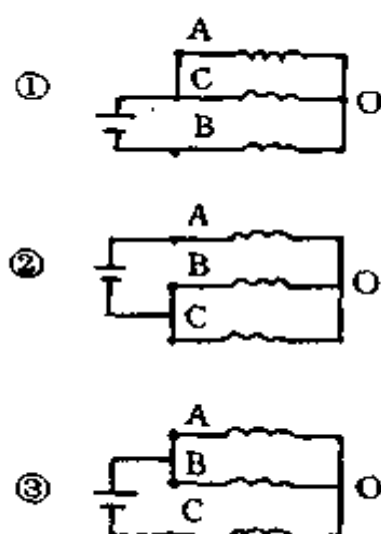


图 2-9 逆变器中各区的等值电路图

数，得

$$U_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}U (\sin\omega t \pm \sin 5\omega t \pm \sin 7\omega t \pm \sin 11\omega t \pm \dots)$$

$$U_{AB} = \frac{2}{\pi}U (\sin\omega t \pm \sin 5\omega t \pm \sin 7\omega t \pm \sin 11\omega t \pm \dots)$$

从上式可以看出，它们都不含有三次及 $3N$ ($N = 1, 2, 3, \dots$) 次谐波，因此对电机的运行影响不大，在一般情况下是允许的。但因含有 5, 7, 11... 高次谐波，它们给波形会带来一些畸变和增加一些损耗。

二、矩形等幅脉冲宽度调制 (PWM)

上述方波幅度制谐波分量很大，一般较少采用。为此又提出一种矩形多脉冲宽度调制方法。这是通过快速开关的通断作用、将直流电压（交流半周期）变换为一系列等幅（幅值等于输入直流电压）脉冲，如图 2-10 所示。改变开关通断时间比（导通率）就可以改变输出电压的大小。

交一直—交变频器之所以能把直流电压（电压型）或（电流型），高效率地逆变成频率可调的交流电，是逆变器工作在所需频率的正弦信号脉冲调制状态的结果。现以电压型逆变器的单级性正弦波



图 2-10 矩形脉宽调制波形

同步式脉冲调制状态来说明它的工作原理。如图 2-11 (a) 所示，三相逆变器中的某一个控制元件，例如图中的电力晶体管 GTR 1，其控制极接在一个电压比较器的输出端上，而比较器的两个输入端分别送入控制信号（被调制信号） $u_C = U_C \sin 2\pi f t$ 和三角波载波信号 u_R 。作为同步式调制，要求 u_R 频率 f_R 高于 u_C 频率 f 的倍数 N 是固定的。因为三角波是上下宽度线性变化的波形， u_C 信号的半个周期内， u_C 与 u_R 比较的结果，使比较器输出 N 个宽度不等的脉冲，每一脉冲的宽度与所对应 u_c 的数值有关。因此，脉冲宽度成为断续的时间正弦函数。用这一系列脉冲来控制逆变器中的 GTR₁，则在其输出端可得到一组类似的矩形脉冲电压，如图 2-11 (b) 的阴影部分所示，脉冲的幅度相同，都是逆变器直流侧电压 U_D 。这组等幅而宽度按断续正弦变化的

脉冲对负载的作用，可用等效正弦波来代替。显然，等效正弦波的幅值与逆变器直流供电电压 U_D 有关（成比例），同时也与控制电压 u_c 的幅度 U_C 有关。这是因为当保持 u_R 不变而改变 u_C 的幅值时（例如把 u_C 降低为原来的 $1/2$ ，如图 2-11 (b) 中虚线所示），与 U_R 比较的结果仍然得到 N 个矩形脉冲，只是每一个脉冲的宽度都相应缩小一半，如图中粗黑线所示，显然此时的等效正弦波的幅度也将减小一半。

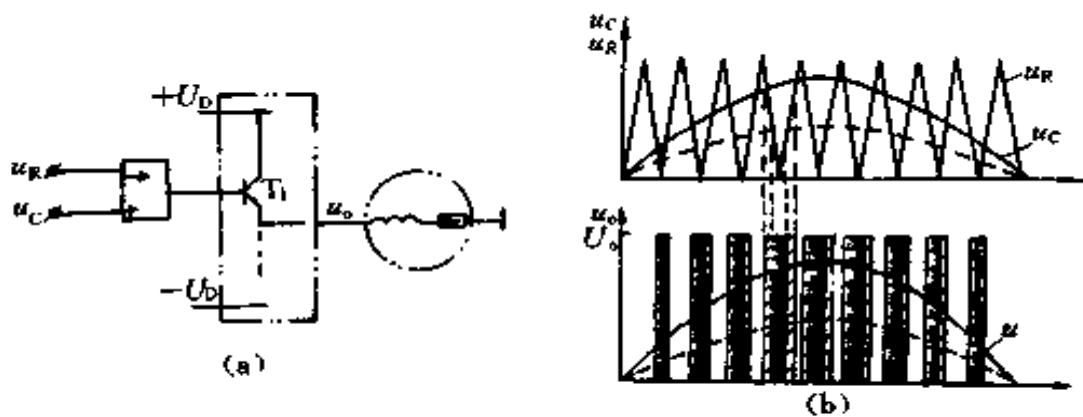


图 2-11 PWM 变频原理图

综上所述，逆变器的输出虽是一系列脉冲，脉冲的幅度取决于逆变器直流电压 U_D ，脉冲的宽度取决于控制电压 U_C ，而脉冲宽度的变化周期就是控制信号的周期 $1/f$ 。因此，逆变器输出的等效正弦波可表示为

$$u = KU_D U_C \sin 2\pi f t \quad (2-9)$$

式中 K ——与调制器参数有关的常数。

以上分析的是单相半波的情况，对于三相逆变器，还需要有一个脉冲的循环分配环节，使之造成 6 路在相位上互差 60° 的调宽系列脉冲去相应控制逆变器中的 6 个开关器件，从而得到三相调频交流电源。由式 (2-9) 可知，等效的正弦波的频率就是控制信号的频率 f ，而幅度的控制又有两种

方案，一种是保持控制电压的幅度值 U_C 不变，而改变逆变器的直流侧供电电压 U_D ；另一种是保持 U_D 不变，而令控制电压的幅度 U_C 也随频率而变。后一方案因为变频器的主电路简单，其中变流部分只需不可控制整流器，虽然控制电路相对复杂些（当用微机软件来完成控制功能时也相当容易实现），因而这一控制方案得到了广泛地采用。

最后应当指出，变频器的 PWM 工作方式，一方面，既解决了逆变器中功率器件是以开关状态工作的问题，因而可以减小所用器件的容量并大大提高变频器中效率，又能提供给电动机变频变压的等效正弦交流电源，解决了异步电动机的调速问题；但另一方面，毕竟不是输出连续的正弦交流，而是断续的脉冲，因此除了等效正弦波（调频基波）以外还存在高次谐波，后者会使异步电动机的损耗，噪音和振动有所增加，这就是 PWM 变频调速带来的不良效应。目前采取的对策是：

(1) 必需时可在变频器与普通异步电动机之间串入高频滤波电感。

(2) 选用为变频器专配的低噪声异步电动机（价格较昂贵）。

(3) 开发出新型功率开关器件，提高开关速度，因而可以提高 PWM 的载波频率，从而增加脉冲密度，减少高次谐波。

三、正弦脉冲宽度调制 (SPWM)

为了进一步减少谐波分量改善变频器的输出波形，采用脉冲宽度按正弦规律变化的一组脉冲做为大功率开关元件的控制信号，如图 2-12 所示。

为了得到这样的控制信号，通常是把固定频率和幅值的



图 2-12 正弦波脉宽调制波形

三角波（称为载波）与频率和幅值均比三角波小的正弦波（称为参考波）相交的方法来确定各脉冲的宽度。如图 2-13 所示为正弦波双极性脉宽调制波形。

为了保证调制脉冲波正、负半周对称，且三相波形严格互差 120° ，必须取 $N = f_C / f_R = 3(1 + 2N) = 9, 15, 21, \dots$ ($N = 1, 2, 3, \dots$)，即等于从 9 开始，等差为 6 的正整数数列中的某一个数值。

在 SPWM 变频器的控制中可以用模拟电路法，模拟电路与数字电路的结合法和单片计算机控制法。后者不仅电路简单可靠，而且具有良好的控制功能和灵活性。如果用这样一组

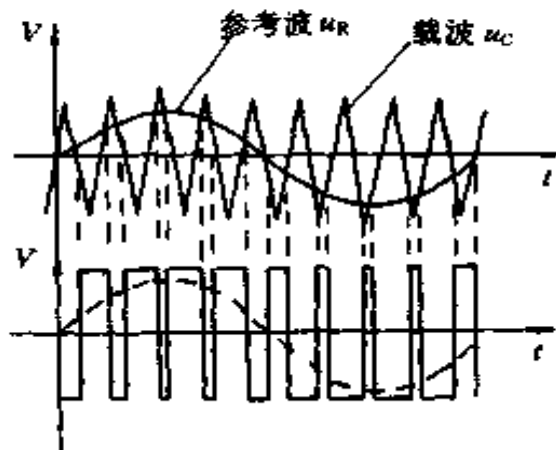


图 2-13 正弦波双极性脉冲宽度调制波形

脉冲作为逆变器各开关元件的控制信号，则在逆变器输出端可以获得一组类似的脉冲，其幅值为逆变器直流侧电压 U_D ，而宽度按正弦规律变化，可以用正弦波来等效，如图 2-13 中虚线所示。对应于一个正弦周期内的脉冲数越多，其输出波形越接

近正弦波。输出电压的大小和频率均由参考波电压 u_R 来控制,改变 u_R 的幅值,脉冲宽度随之改变,从而改变了输出电压的大小。当改变 u_R 的频率时,输出电压的频率也随之改变。对于三相变频器,三角载波可以共用,而参考波是三相的。

当交一直一交变频器需要实现异步电动机最基本的 V/f 方式调频时,则要求逆变控制器是一个变压变频的正弦波脉冲宽度调制 (SPWM) 器,并要求有脉冲序列的循环移项分配功能。原理如图 2-14 所示,首先是通过压控调频调幅正弦波发生器,获得一个正弦波控制信号 $u_C = U_C \sin 2\pi f t$,

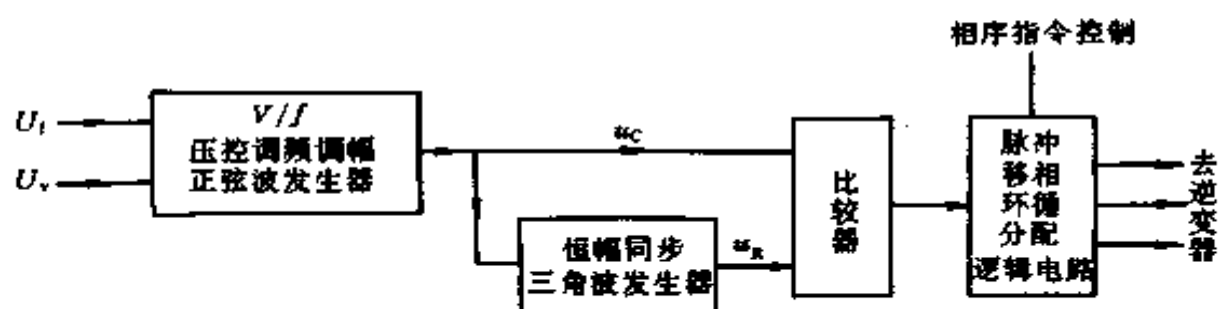


图 2-14 SPWM 变频原理框图

使它的频率 f 和幅值 U_C 分别受到外加电压 U_1 和 U_v 的控制 (一般为比例控制)。其次,要有恒幅同步三角波发生器产生载波调制三角波 u_R , 然后再通过比较器及脉冲移相、循环分配逻辑电路以获得 6 组脉冲。实际上还需要有脉冲的相序指令控制和脉冲功率放大等措施,最后送到逆变器。

四、交流电动机的矢量控制

直流电动机的电枢电流和磁场在空间保持垂直关系,是互不相干 (忽略电枢反应),而电磁转矩正比于磁通与电枢电流乘积,因此只要调节电枢电流,瞬时也就调节电磁转矩,使直流电动机传动系统很容易实现恒加减速控制,获得良好的动态性能。

异步电动机矢量控制，从原理上把交流电动机解析成直流电动机一样的转矩发生机构，按照磁场和其正交的电流乘积就是转矩这一最基本原理，将定子电流分解成建立磁场的励磁分量和与磁场正交的产生转矩的转矩分量，然后分别进行控制，就像直流电动机可以分别对励磁和电枢电流进行控制一样，使得普通的三相笼式异步电动机能得到如同直流电动机的控制规律和动态性能。

电动机调速的任务是控制转速，调速的关键是转矩控制。转速可以通过转矩来改变，从转矩到转速是一个积分环节——机械惯量，即

$$\frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = M_d - M_L \quad (2-10)$$

式中 GD^2 ——电动机和负载机械飞轮力矩；

M_d, M_L ——电动机电磁转矩和负载转矩。

由此可知，除转矩外，再没有其他控制量可影响转矩，凡电动机均由定子和转子两部分组成，他们分别产生定子磁通势矢量 F_s 和转子磁通势矢量 F_r 。 F_s 和 F_r 合成，得合成磁通势矢量 F_c ，由它产生磁链矢量 Ψ 图 2-15。当 F_r, F_s 矢量方向一致时，不产生转矩，转子不动，若方向不一致，它们将互相吸引，产生转矩，使转子转动。由电磁理论可得

$$M_d = \partial E_m / \partial \theta_{rs} \quad \partial E_m = k_e \partial (F_c^2)$$

由余弦定理可得：

$$F_c^2 = F_s^2 + F_r^2 - 2F_s F_r \cos \theta_{rs} \quad (2-11)$$

$$M_d = k_m F_s F_r \sin \theta_{rs} \quad (2-12)$$

式中 E_m ——磁场能量；

θ_{rs} —— F_r 到 F_s 的夹角。

电动机的转矩等于三个磁通势能矢量， F_s, F_r 和 F_c 中任

两个矢量的模和它们间夹角的正弦之积, 只与这些矢量的大小与相对位置有关, 而与它们的绝对位置、是否转动无关。

异步电动机转矩正比例于转差角速度 $\Delta\omega$ 与转子磁链平方 ψ_r^2 的乘积, 各种标量控制系统均企图通过控制转差角速度 $\Delta\omega$ 来控制转矩, 这只有在 ψ_r 不受 $\Delta\omega$ 影响的条件下才能实现, 然而这一要求在标量系统中无法保证, 欲改善转矩控制性能, 必须对定子电压或电流实施矢量控制, 即既控制大小, 又控制方向。

由日本住友公司 (SUMITOMO) 提供的图表 (图 2-16~图 2-19) 表明, 自动向量控制方式, 最大限度地发挥了 AC 电机所具有的性能。

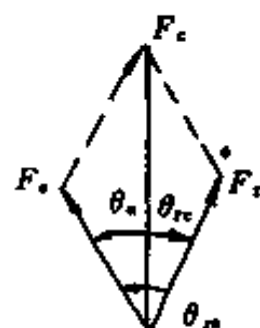


图 2-15 电动机磁通矢量图

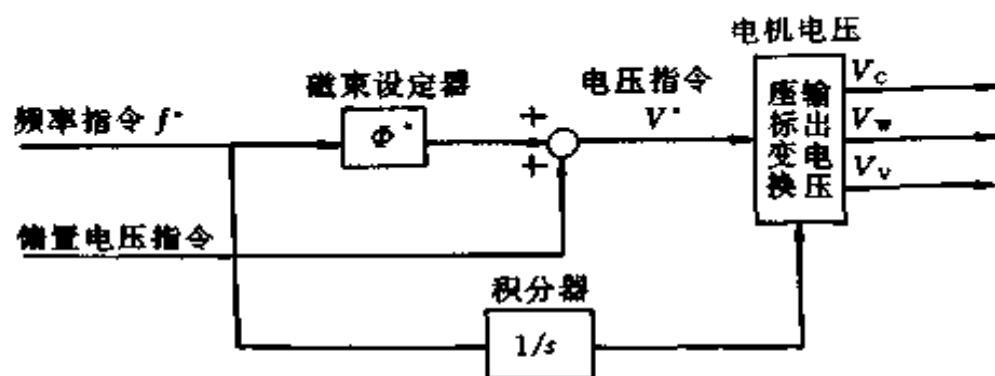


图 2-16 标量系统 V/f 控制方块图

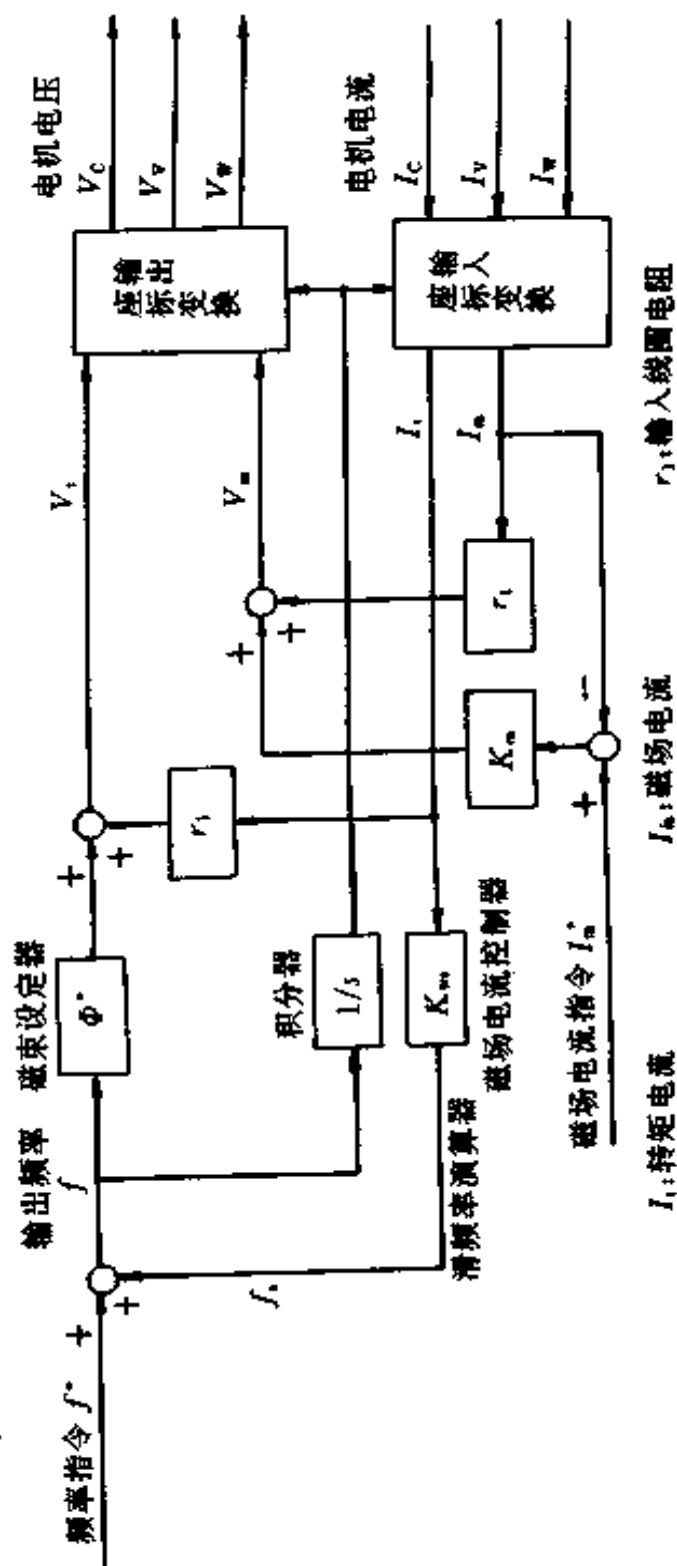
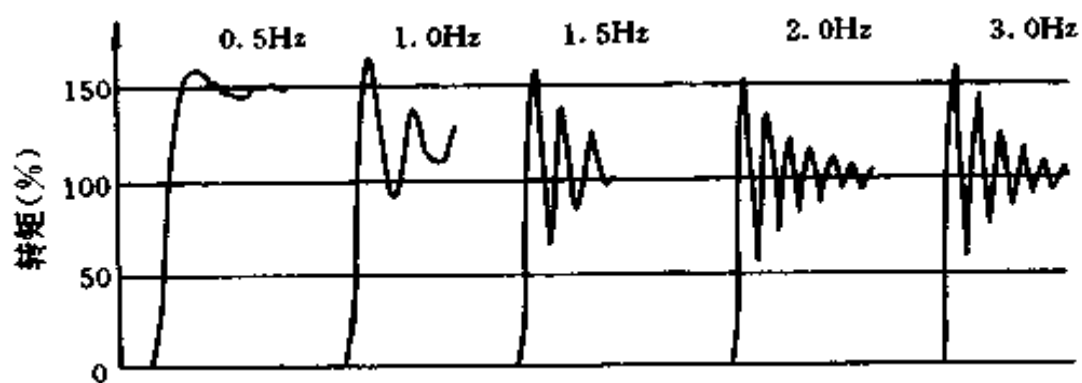
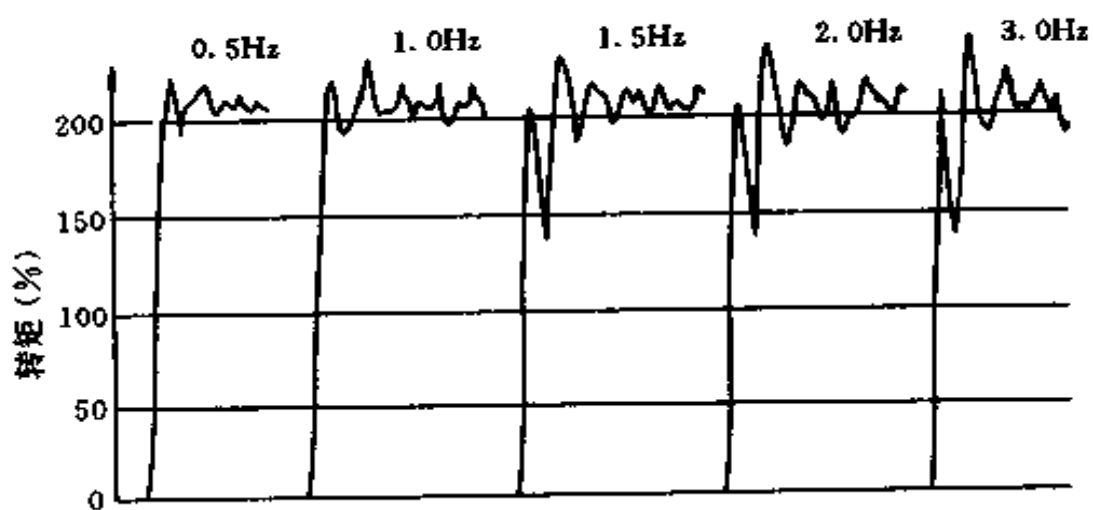


图 2-17 自动向量控制方块图



(a) V/f 控制



(b) 自动向量控制

图 2-18 始动转矩特性

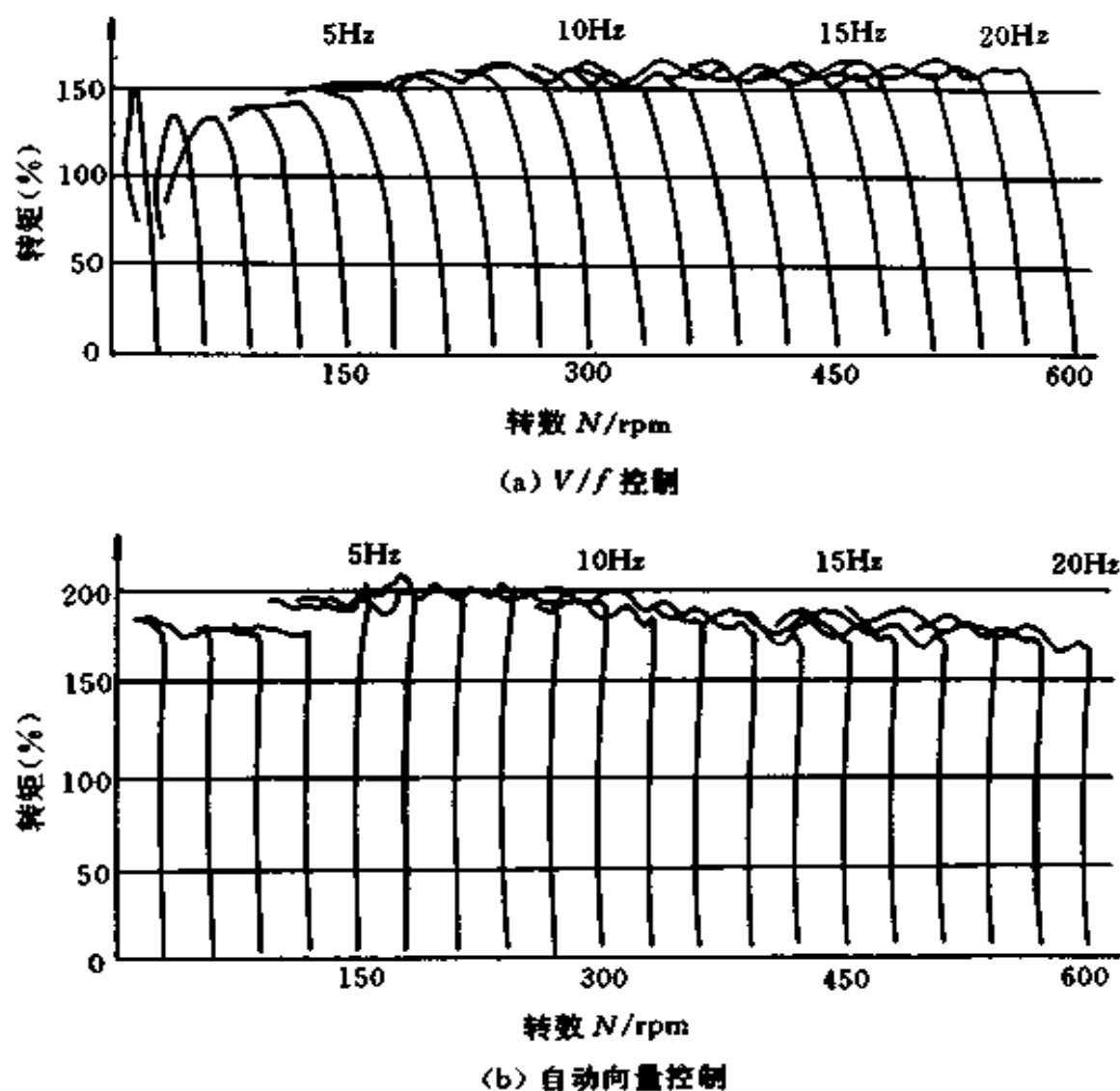


图 2-19 输出转矩特性

第三节 变频器的主要技术规格

一、铭牌数据

以日本住友产 AF-3000 系列产品为例子以说明。

三相交流 200V, 0.75kW 变频调速器铭牌如图 2-20 所示, 类型标记如图 2-21 所示。

型号	Model: AF3002 - A75
输入指标	Input: AC 3PH 200—230V 50/60Hz 5.5A
输出指标	Output: AC 3PH 0—230V 1.9kVA 5A
类号	Lot No:
编号	Ser No:
重量	Mass: 2.0kg
公司名	Sumitomo Heavy Industries, Ltd. JAPAN

图 2-20 变频调速器铭牌

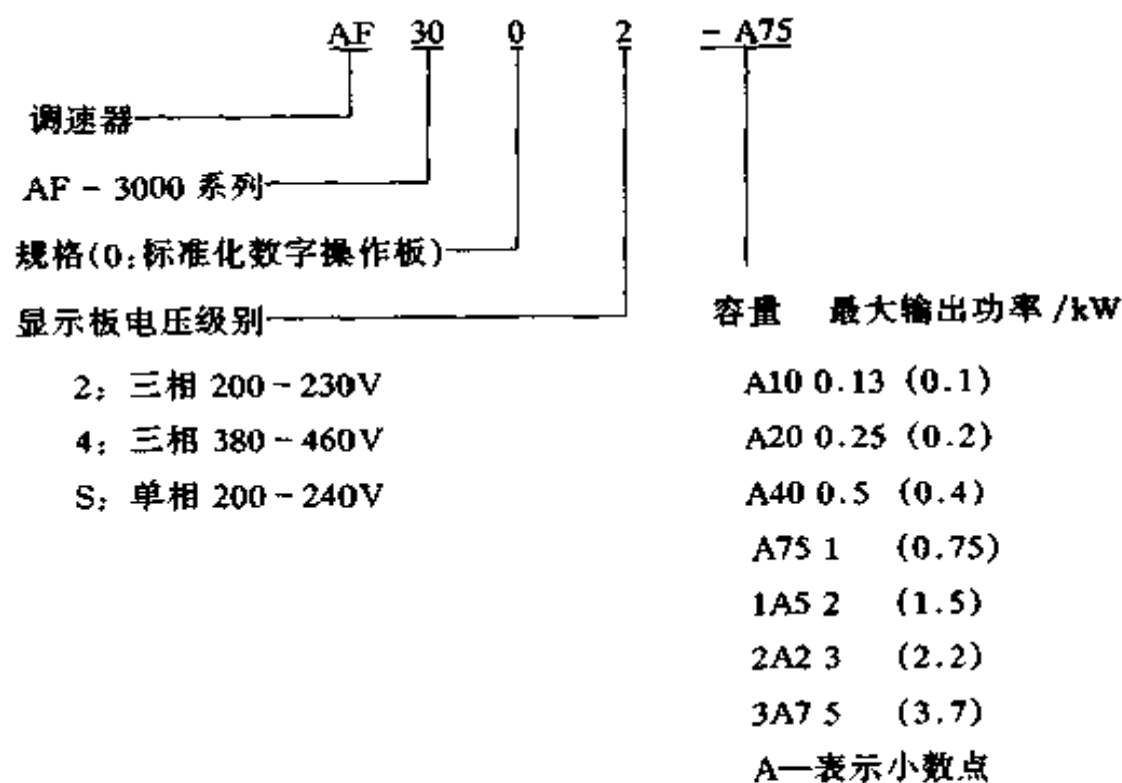


图 2-21 类型标记

二、技术指标

AF-3000 系列变频调速器的主要技术指标见表 2-2。

表 2-2 变频调速器主要技术指标

电压级别	200V 三相(200~230)							460V 三相 (380~460V)		
调速器型号 AF-3002	A10	A20	A40	A75	1A5	2A2	3A7	1A5	2A2	3A7
最大电机输出 功率/kW	0.13 (0.1)	0.25 (0.2)	0.5 (0.4)	1 (0.75)	2 (1.5)	3 (2.2)	5 (3.7)	2 (1.5)	3 (2.2)	5 (3.7)
输出 逆变容量/kVA	0.3	0.6	1.1	1.9	2.5	4.2	6.7	3	3.7	6.1
输出 额定输出电流/A	0.8	1.5	3	5	6.5	11	17.5	4	4.8	8
特性 最大输出频率/Hz	400Hz(可设定)									
特性 最高输出电压/V	三相 200~230V(与输入电压一致)							三相 380~460V (与电源一致)		
电源 额定输入电压及 频率	三相 200~230V 50/60Hz							三相 380~460V 50/60Hz		
电源 允许电压波动	±10%									
电源 允许频率波动	±5%									
控制 方式	正弦波脉宽调制(PWM)									
控制 频率控制范围	0.1~400Hz									
控制 频率精度 (温度变化)	数字指令:0.01%(-10~40℃) 模拟指令:0.01%(-10~40℃)									
控制 频率设定分辨率	数据板基准:0.1Hz 模拟基准:0.6/60Hz									
控制 输出频率分辨率	0.1Hz									
特性 过载能力	150% 额定输出电流 1min									
特性 频率设定信号	0~10VDC(20kΩ) 4~20mA(250kΩ)									
特性 加/减速时间	0.1~600s(可以分别设定)									
特性 制动力矩	约 20%(采用外接制动电阻时可达 150%), 制动电阻 在设备内									
特性 电压/频率特性	可设定各种 V/f 特性曲线									
特性 失速防止水平	可设定操作电流									

续表

电压级别	200V 三相(200~230)							460V 三相 (380~460V)		
调速器型号 AF-3002	A10	A20	A40	A75	1A5	2A2	3A7	1A5	2A2	3A7
最大电机输出功率/kW	0.13 (0.1)	0.25 (0.2)	0.5 (0.4)	1 (0.75)	2 (1.5)	3 (2.2)	5 (3.7)	2 (1.5)	3 (2.2)	5 (3.7)
瞬时过电流	超过 200% 调速器额定电流时,电机自行停转									
过 载	150% 调速器额定电流持续 1min,电机自行停转									
漏 电	由电子电路保护									
电机过载保护	电子热控过载继电器									
过电压	主电路直流电压超过 410V 时,电机自停							直流电压高于 820V 时动作		
欠电压	主电路直流电压降至 210V 时,电机自停							直流电压低于 820V 时动作		
瞬时断电源	电源断路时间 > 15ms 时停机(出厂设定)(恢复供电后能自动启动时间约 2s)									
散热片过热	由热敏开关保护(只适用于有风扇的型号)									
电源充电指示	充电指示灯在主电路直流电压 $\geq 50V$ 时亮									

1. 输入额定值

因为变频器一般都没有欠压、超压、过载保护,因此输入额定值仅仅给出一个范围。例如,日产 400V 系列,输入电压为三相 380~460V/50Hz,允许波动电压 10%~15%,不平衡 < 30%,频率 $\pm 5\%$ 。

2. 输出额定值

额定容量,指逆变容量 kVA,一般这个数值要比所拖动的最大电动机输出功率要大些。

输出频率,指逆变器输出的最低和最高频率,日本住友公司变频器输出为 0.1~400Hz。

输出电流，指输出的能长时间工作的可能最大电流，过载额定电流为额定电流的 120%，具有 1 分钟反时限特性。

3. 控制方式

指逆变器从直流到交流逆变过程中采取的调制方式，在本书第二章第二节中已有叙述，一般常用的有矩形等幅脉宽调制（PWM）和正弦波脉冲宽度调制及自动向量控制三种。

4. 保护

是指变频器本身具有的保护功能。（1）瞬时过电流保护：超过约 200% 调速器额定电流时，电动机自动停转。（2）过载：约 150% 调速器额定电流持续 1min，电机自停。（3）漏电：由电子漏电保护装置完成自动停机。（4）电机过载保护：由电子热控过载继电器控制。（5）过电压：对于交流 380V 三相系列，主电路直流电压超过 820VDC 时，电机停转。（6）欠电压：对于交流 380V 三相系列，主电路直流电压降低 420VDC 时，动作瞬时断电源；如果电源系统断电时间大于一定间隔，例如 2s，变频器停机。（7）本机散热片过热保护：由热敏开关来实现。

三、运行和指示

1. 数字操作板显示

住友 AF—3000 系列变频器操作面板见图 2-22。

- (1) 驱动方式显示：亮
- (2) 转向显示(FWD 正转)：亮
(REV 反转)：熄
- (3) 批量方式显示：熄
(批量序列参数)
- (4) 运行中：熄
- (5) 停止状态：亮

(6) 7 段 LED 显示 (5 位数)

输出频率设定值

2. 操作

1) 操作前检查

完成安装和接线以后检查以下各项:

(1) 连线无误, 再次检查以免电源线接到输出端。

(2) 没有引起短路的电线残物 (灰尘、油等)。

(3) 螺钉和接线柱已拧紧。

(4) 为了安全操作, 先将电机与负载脱开, 当电机与负载匹配上时, 密切注意电流。

(5) 电线不接地。

(6) 运行指令未输入。在正转/反转指令已从控制电路接线端输入到操作方式的情况下 (带显示面板的出厂时已设置), 只要主电源闭合, 电机就自动运转, 所以在闭合调速器前要确保没有运行指令输入。

2) 操作前设置

因为标准化的调速器类型已设置了各类参数值, 所以必须根据负载特性, 使用数字操作板改变这些参数的初始值。

(1) 出厂时的预设置值: 下面介绍了操作中常用的功能和初始参数值。

① 输出频率与增/减时间

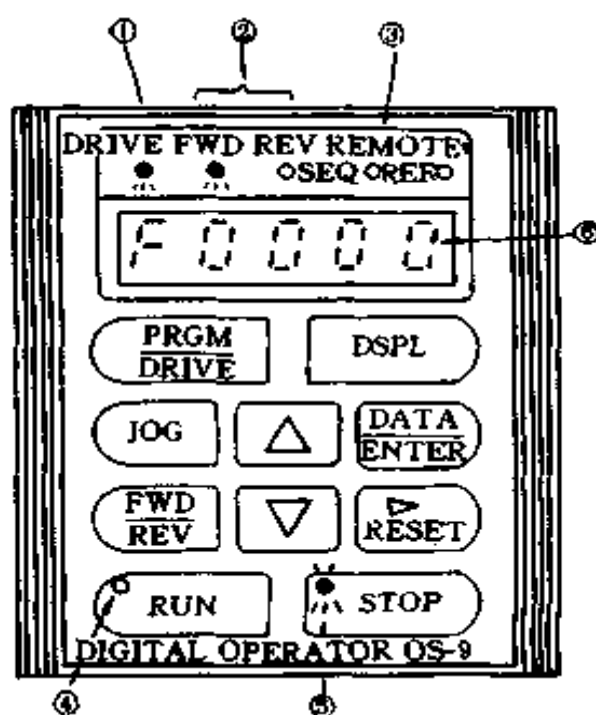


图 2-22 AF-3000
操作面板

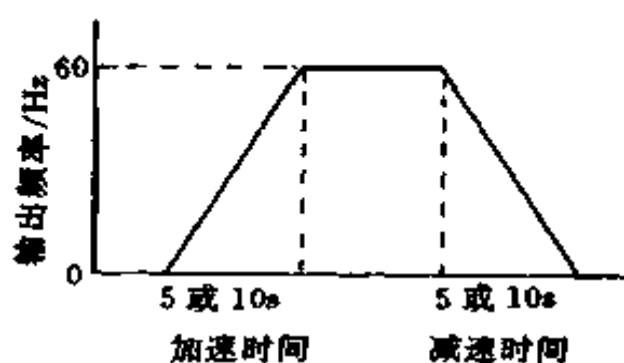


图 2-23 输出频率和增
减时间的关系

③电压/频率特性

图 2-25 表示输出电压与输出频率的关系。当该特性（最高电压/预置频率）与所用电动机不同时，参见有关说明书中“电压/频率设定”的内容修改。

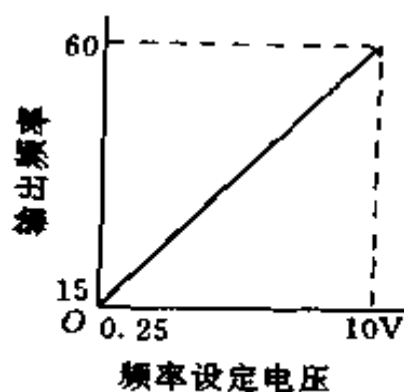


图 2-24 频率设定电压与
输出频率的关系

出厂时设置的最大输出频率为 50Hz，增/减时间为 5s 或 10s，可根据情况改变参数值。图 2-23 给出了输出频率和增减时间的关系。

②频率设定与输出频率

图 2-24 显示了调速器输出频率与 VF 端电压事 IF 端电流的关系。

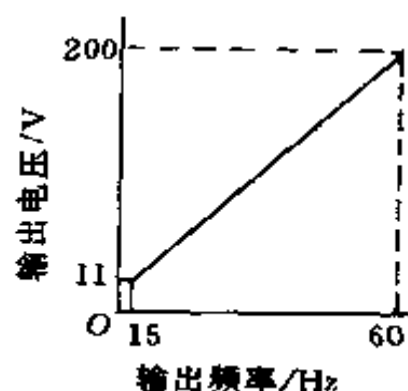


图 2-25 变频器输出电压
与输出频率的关系

(2) 电机额定电流设定

因为调速器有保护电动机因过载而过热的功能，所以电机额定电流一定要输入到代码 No.19 中，其中预置的是住

友四极电机的电流值。注：多于一个电机同时运行提供一个过热过载继电器或过热保护器。

3) 标准运行方式

调速器可采用以下两种方式操作，出厂时带数字操作板的设置为“数字面板操作方式”，无数字操作板（带提示面板）的设置为“控制电路接线操作方式”。见表 2-3。

表 2-3 调速器操作方式

操作方式	数字板操作 (标准化数字操作型号)	控制电路接线端操作 (标准化提示面板型)
特 点	采用数操板上的“运转”键等来操作调速器	采用连在控制电路接线端的频率设定电位器与操作开关来操作
操作方式选择	出厂已设置为此方式，不需变动	输入程序代码：按 PRGM 键，用 V、Λ 键将 No.01 数据设定为的 0000，按 DATA 键； 输入驱动代码（按 DRIVE 键）； 以上操作后，转为接线操作方式
操 作	按 DSPL 键选择频率值显示 F0000； 键入 Λ 或 V 设定频率； 再按 DATA 键； 按 RUN 键	将频率设定电位器扭转到左边，使设定频率 = 0； 闭合正转或反转信号； 慢慢向右旋动电位器增加频率
停 止	按 STOP 键	慢慢向左旋动电位器降低频率至 0，断开正转或反转信号

4) 调速器状态显示 LED (发光二极管)

对于无数字操作面板的一类，LED 显示帮助用户了解调速器运转状态，LED 显示可以调速器前面的提示面板上看到。有两种 LED：绿色 (DS1) 和红色 (DS2)。从这两

种 LED 发光状态可以知道调速器状态, 如表 2-4 所示。试运行阶段可以从电源闭合时 LED 状态检查调速器。

表 2-4 LED 显示与含义

调速器 状态	LED 显示		含 义	备 注
	DS1 绿	DS2 红		
正 常	⊙	●	操作就绪 (停止时)	
	○	●	正常运行	
报 警	●	⊙	电压低, 同时停机	保护操作解除后自动 复位
保 护 操 作	⊙	⊙	外围设备故障	消除故障后可以人为 复位
	○	⊙	过载、过热保护	
	●	○	过电压、欠电压保护	
	⊙	○	过电流保护	
调速器 故 障	○	○	数字存储器故障	不能复位 ^① (换调速器)
	●	●	硬件故障, 如: 控制电 源故障, CPU 失控等	不能复位(换调速器)

注: ●—灯熄; ⊙—闪烁; ○—亮。

①通过数字操作板重新初始化控制参数, 错误可能消除。

应该指出特别注意以下步骤:

(1) 运行准备。运行前应检查:

①输入交流电源是否符合额定值。

②确认接线正确。

(2) 试运行:

①所有操作开关都为关的状态 OFF。

②将频率设定为生产需要的最小值。

(3) 将电源线开关合上, 观察片刻并查看控制电路, 顺序电路等处有无发现异常情况, 如发热、冒烟、异常气味等。

(4) 如无异常情况下，给正或反转命令，并加大频率，观察电机运转情况。

(5) 启动电机所带负载，观察电机运转情况，此时可调整频率上升速率。

(6) 确认一切正常后，停机试运即告完毕。

第四节 电动机和变频器容量的选择

一、变频器的适用场合

变频器与鼠笼型异步电动机相配合，使交流传动系统具备了调速范围宽、稳速精度高、动态响应快以及运行可靠性高的特点及良好的技术性能。特别要指出的是，交流调速系统在节约能源方面起到很大作用。在世界能源紧张、能源费用高涨的今天，节约能源是一个迫切需要解决的问题。因此，交流调速系统的推广应用已引起人们高度重视。

交流变频调速系统特别适用下列场合：

(1) 无级在线调速。

(2) 节约电能（特别是风机、泵类负载）。

(3) 对于开机加速和减速停机要求很高的场合，可根据负载情况合理选择加、减速时间。

(4) 恶劣的外界环境如腐蚀性大的气体，有爆炸危险、卫生要求高的场合。

(5) 难于维修的场合（如深水泵等）。

但交流变频器调速系统不是万能的，应该按其具体使用条件和负载情况合理地选用，才能充分发挥它的优势。通用异步电动机与变频器配套使用时，电动机的损耗略有增加。因此必须在适当降低输出转矩的情况下使用。对小功率电动

机，由于设计本身就有一定的裕度，因此在额定频率点可以获得 100% 的输出转矩。对较大功率电动机，由于裕度比较小，因此输出转矩的降低最大达到 85% 左右。

在低速运行时，电动机致冷风扇冷却效果下降，允许连续使用的输出转矩还应有所下降。

二、变频器的选择

在选择变频器时，根据电动机额定电流 I_n ，或电动机实际运行中最大电流 I_{max} 而定，一般令变频器额定电流

$$I_{INV} \geq (1.05 \sim 1.1) I_n \quad (2-13)$$

或

$$I_{INV} \geq (1.05 \sim 1.1) I_m \quad (2-14)$$

式中 I_m ——电流最大有效值。

按容量选择，则变频器容量

$$P_{INV} = K \sqrt{3} U_n I_n 10^{-3} (\text{kVA})$$

式中 U_n ——电动机额定电压，V；

I_n ——电动机额定电流，A；

K ——安全系数，通常为 1.05~1.1。

在短时间内加减速过程，变频器允许其输出电流达到额定电流的 130%~150%。对于频繁加减速运转的情况，像如图 2-26 所示的运行曲线，应按下式选定变频器的额定电流。

$$I_v = (I_1 t_1 + I_2 t_2 + \dots + I_6 t_6) K / (t_1 + t_2 + \dots + t_6)$$

式中 I ——各运行状态下的平均电流，A；

t ——各运行状态下的时间，s；

K ——安全系数，通常取为 1.1~1.2。

有时会遇到如下情况：用额定频率 60Hz (V/f 恒定) 的变频器驱动额定频率 50Hz 的电动机。一般来说，电动机

的转矩在频率恒定时与电压的平方成正比。因此，若用图2-27所示的 V/f 特性变频器以 50Hz 驱动使用三相 200V 60Hz 商用电源的电动机，则电压降低到 84%，产生的转矩减至大约 70%。这一结果使电动机的转差率增大，连续使用转矩降为额定的 75%。如 75% 的转矩不足，则必须使用在 50Hz 时能够得到 100% 输出电压的那种 V/f 特性图 2-28 的变频器，但即使在这种情况下，50Hz 时能够连续使用的转矩也只有使用商用电源时的 85%。

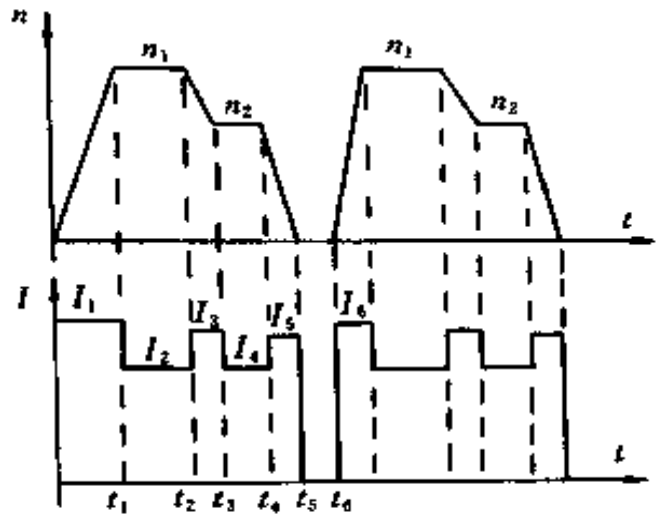


图 2-26 电动机运行图

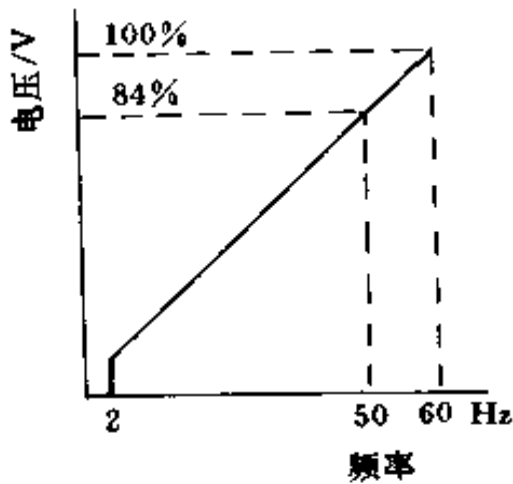


图 2-27 60Hz 时
100% 输出电压

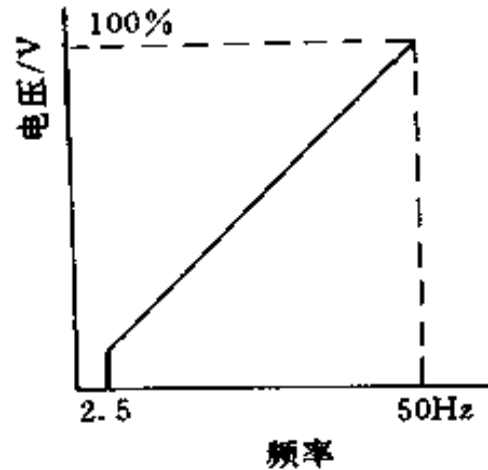


图 2-28 50Hz 时
100% 输出电压

另外，值得指出的是：利用 380V 三相交流变频器可以

在 220V 交流单相电源中拖动 380V 交流三相电动机，具体做法为：

用一容量比电动机稍大些的单相变压器，将电源电压由 220V 升至 380V 左右，接入变频器主电路输入端 (R, S)，逆变器输出端 (U, V, W) 接上电动机电源线，即可对该电动机进行交流调速。

第五节 变频器的安装及配置

一、使用环境

目前国内外的变频器尚未见有防爆型式，因此安装时一定要注意不要安装在易燃易爆的操作现场。可安装在安全场合下，用动力电缆连接驱动电动机。

(1) 环境温度：-10 ~ +50℃。

(2) 相对湿度：20% ~ 90% RH (无由温度锐变引起的凝结和结冰)。

(3) 高度：小于 1000m。

(4) 大气：应无腐蚀性气体，无易燃气体，无水蒸气，无水滴、灰尘和油性灰尘量小，不直接日晒，不含高盐分。

(5) 震动 $\neq 0.50g$ 。

变频器不希望在图 2-29 所示的环境中使用。

二、逆变器安装盘的安装

逆变器安装盘必须设计成使盘内温度在逆变器容许温度以下。也就是说，盘的周围温度 $T_A = 40^\circ\text{C}$ (max)，逆变器的容许最高温度是 $T_i = 50^\circ\text{C}$ ，要使盘内的温度上升在 $T_i - T_A = 10^\circ\text{C}$ 以下。

1. 不施行强制换气

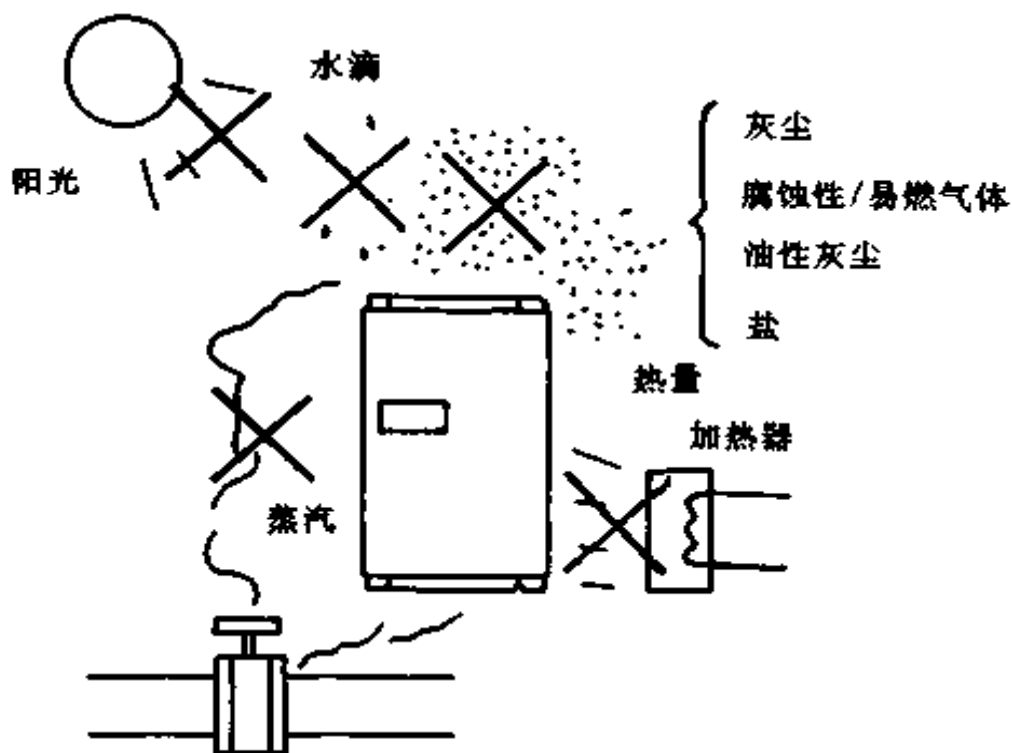


图 2-29 变频器不希望的使用环境

在逆变器上发生的热量，经过盘内的空气，自盘面散热。冷却所需的逆变器盘有效面积 A 为如下列公式所示：

$$A = q/h(T_S - T_A)q/50$$

式中 q ——逆变器盘总发热量， W （总发热量等于逆变器发生热量 + 盘内收存的机器发生热量 + 自外部的加热量。所谓来自外部的热量，是指受盘外的机器或直射日光等热影响时，其受热量换算成 W ，作为盘内的发生热量）；

h ——热传输率（散热系数）， $5 \sim 6W/m^2 \cdot ^\circ C$ ；

A ——逆变器安装盘有效散热面积， m^2 （要去掉靠近地面，墙壁面与并列盘时的并排盘面（中间盖）等的不能散热面积，以及有其他影响散热的面积）；

T_s ——逆变器盘表面温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_A ——周围温度, $^{\circ}\text{C}$, 一般最高是 40°C 。

依照上述公式, 如果要求输出功率 10kW 、电源电压 380V 的逆变器盘, 则为 4000mm (W) \times 2300mm (H) \times 1000mm (D) 尺寸的幅度相当宽的盘。因此, 如果只靠自然散热施行设计, 其结构将大得惊人。

2. 设置换气扇, 施行强制换气

在逆变器盘内发生的热量, 虽然也可由自然对流从盘面散热, 但是, 由换气扇散热效果更佳, 自然对流的散热效果和它是不可比拟的。必要的换气流量 Q , 如下列公式所示

$$Q = q / \rho c (T_o - T_A) = q / 10 \quad (2-15)$$

式中 q ——逆变器安装盘总发热量, kW ;

ρ ——空气密度, $1.057\text{kg}/\text{m}^3$ (50°C 时);

c ——空气比热容, $1.0\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$;

Q ——流量, m^3/s ;

T_o ——排气口的空气温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_A ——周围温度 (在进气口的空气温度), $^{\circ}\text{C}$ 。

也就是说, 当 1kW 的热要散失时, 需要 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ ($6\text{m}^3/\text{min}$) 的换气扇。

如果排气口的空气温度为 50°C , 周围温度为 40°C , 试行计算, 即适用于 10kW 、 380V 的逆变器盘, 使用有 $8.5\text{m}^3/\text{min}$ 的换气能力的风扇, 则其安装盘的尺寸为高 $H = 1600\text{mm}$, 宽 $W = 600\text{mm}$, 厚 $D = 600\text{mm}$ 。这种尺寸即成可以制作的实用型尺寸。

使盘强制换气时, 有下列要求:

(1) 使盘强制换气时, 随着从外部吸入的空气, 也会同

时吸入尘埃，所以在吸入口设有空气过滤器。在门扉部有屏蔽垫，在电缆引入口设有精梳板，当电缆引入之后，就会密封起来参看图 2-30。

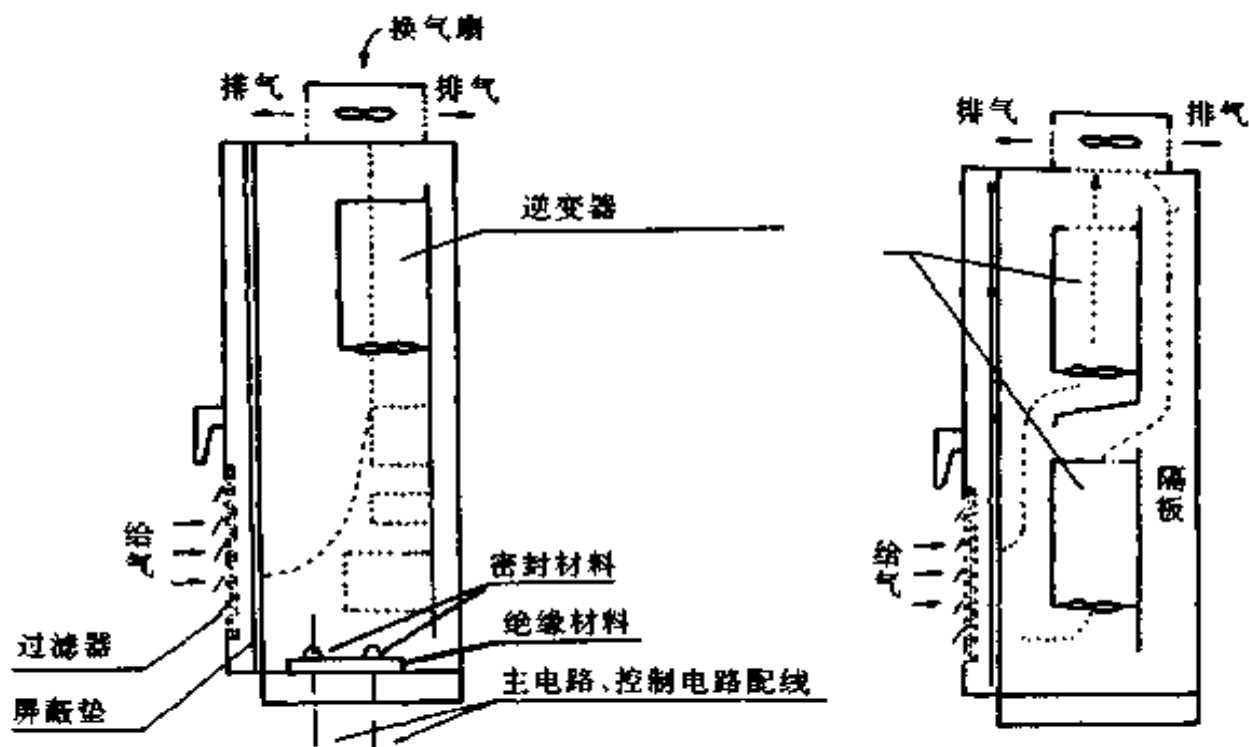


图 2-30 安装盘强制换气方式

(2) 有空气过滤器时，如吸入口的面积太小，则吸入的风速增高，以致使过滤器在短时间里堵塞。而且，压力损失增高，以致降低了风扇的换气能力。通常滤网的通过风速之设计是 1m/s 、将一般所使用的聚酯滤网 PS/400（日本 BILEEN 公司制品）两张重叠时，对 1m/s 的风速通过滤网时压力损失，初期值为 2mmAq 。

(3) 因担心由于电源电压的波动而使风扇的能力降低，选定了约有 20% 裕量的风扇。

(4) 因热空气从下往上流动，请使用冷却空气从盘的下部进入，而向上部排气的结构。

再者，冷却用的空气在风路上风阻小的地方流量大。风阻大的地方流量小，冷风通过发热部分，设有调节风门、隔板等，来调节风路，以便产生最佳的冷却效果参看图 2-30。如果没通过发热部分就向外排气时，即使设置了具有所需风量的换气扇，也不能使逆变器的温度下降到理想的温度，而成为发生故障的原因。

要把逆变器及其他装置安置在逆变器盘内有限的空间时，问题是在于电子电路与动力电路以及这些机器如果没秩序地乱配置，可能会造成温度上升或感应受阻等障碍。一般机器的配置，其要求如下：

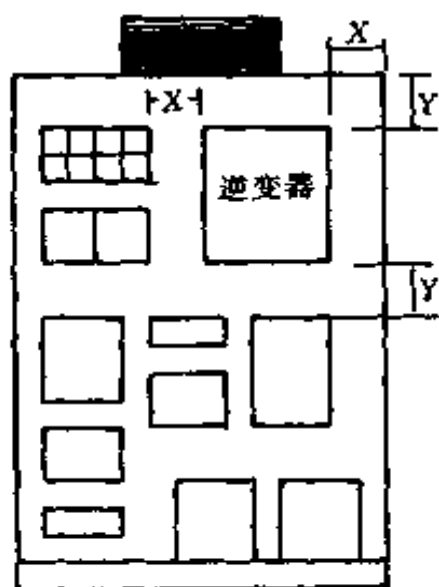


图 2-31 逆变器
周围的间隔

(1) 使逆变器作垂直的安装，不可采用水平或其他的安装形式。

(2) 逆变器周围要有足够的间隔。因考虑到盘内的温度上升，请不要将变频器安置在密闭的小箱之内，也不要安装在逆变器的四周密布部件、发热体等物。而且，如图 2-31 所示，要设置逆变器的位置，需使其周围有足够的散热空间。见表 2-5。如果无法达到表 2-5 所示的尺寸，应尽量使其间隔的

通风良好，让逆变器在尽可能良好的散热冷却状态下工作。

(3) 如果在同一个盘内放置了两台以上逆变器，请依照图 2-32 所示方法横向配置。若是要作上下的配置，则依照图 2-30 所示的方法施行。

表 2-5 逆变器周围的间隔

逆 变 器	间隔距离/mm	
	X	Y
住友 AF-300 系列	30	100
富士 PRENIC5000 系列	50	100
三肯 MF-2.2K-MF15K 系列	50	100
西门子 MM25-MM500 系列	—	100

注：对于不同产品要求也不尽相同。

(4) FREIC5000G7/P7 系列的逆变器装置，其发热量大的主电路的散热片部分，可以向盘外伸出去安装。这种安装方法，如图 2-33 所示。如为外部冷却的安装方式，发生消耗的 60% 左右可直接向外部散热，虽与盘有效热面积相关，但它也可以成为完全密闭的结构。另外，因逆变器的散热片伸出于盘外，所以，如为线屑多的空间时，要注意不可使其堵塞。再者，也可以把逆变器装备全部安装在盘内，参看图 2-34。

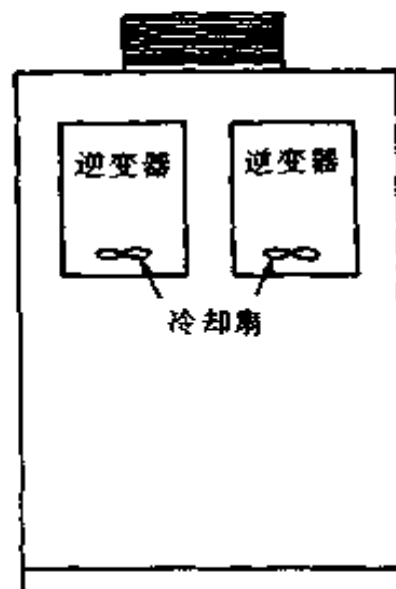


图 2-32 变频器
横向配置

(5) 与逆变器的控制印刷电路板等控制电路直接接线的各种选购件或控制用继电器，为避免噪音等的影响，请尽量配置在逆变器装置的附近。并且接线要尽量短。

(6) 主电路机器及顺序电路用控制继电器类会发生开关冲击电流的机器，最好能与逆变器控制电路分开走线。

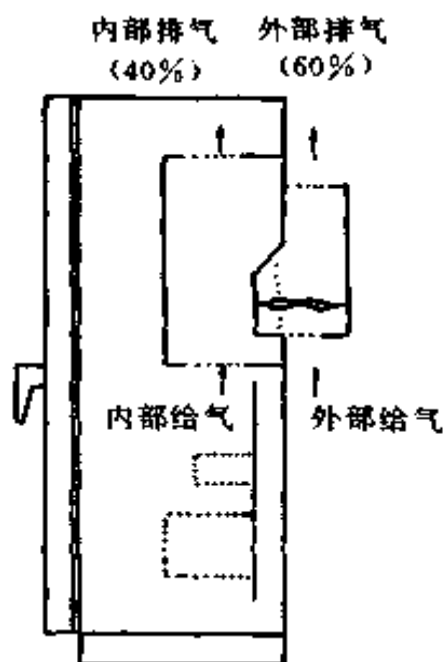


图 2-33 外部冷却安装方式
(全密封形盘构造亦可)

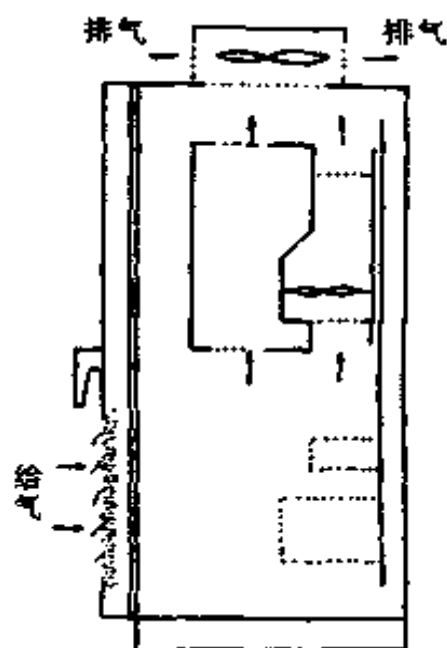


图 2-34 逆变器装备全部安装在盘内的方式

(7) 电抗器或变压器等重的机器，应放在逆变器下部的梁（四角等）上，用螺栓拧紧固定妥善。如果安装不稳或是仅摆放其上，会因震动等形式成噪声。并且勿与侧板、底板等薄板直接安装。

(8) 在逆变器盘的上部，温度会因机器的发热而上升。如果要在上部配置机器时，应使用不受热影响而产生故障的机器。

(9) 具有大型电阻等发热量大的机器部件，安装在逆变器盘的上部，要留意其冷却情形，其发热量不可致使逆变器等机器受到影响。例如，制动电阻器等大型电阻器之类的部件要安装在逆变器盘外的上部参看图 2-35。

三、配置与接线

逆变器装置使用了 CPU 等高性能集成电路 IC。所以在为

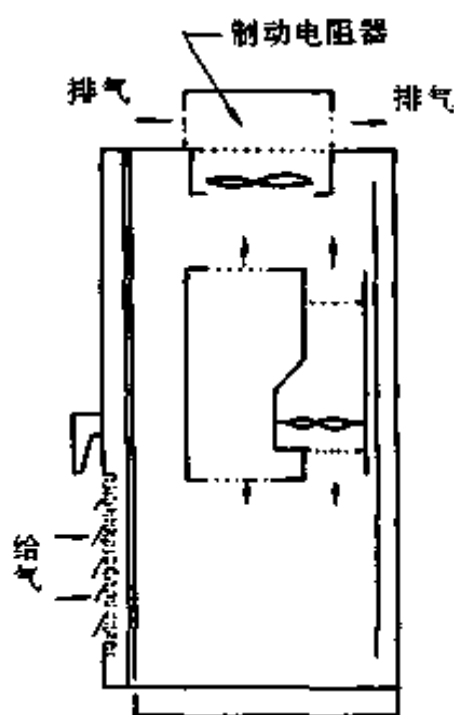


图 2-35 发热机器
的安装方式

上推，盖子即可打
开，装时相反。

2) 标准接 线图

图 2-37 所示
为标准接线图。使用数字操作板的型
号只连主电路线，
这种型号作为控制
电路接线方式操作
时，必须修改控制
参数。

逆变器配线上如果不正确时，
会因噪音等的影响而可能使逆
变器的动作不安全。为了维持
高度可靠性的运行，周围机器
要采用适当的设置方法以及配
线。下面仍以日本住友产
AF-3000系列产品予以说明。

1. 接线

确保按下述方法连接主电
路和控制电路。

1) 接线仓盖的拆装

取仓盖时，在如图 2-36
中①所示部位用力压（两边同
时），同时在②所示的方向往

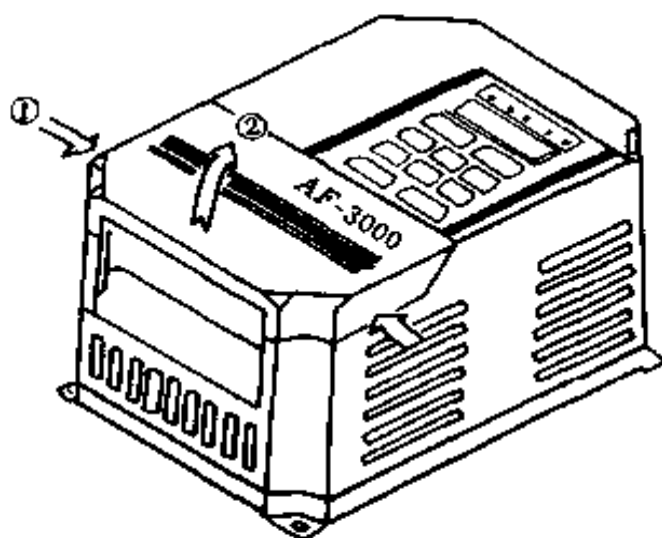


图 2-36 AF-3000 变
频器仓盖的拆装

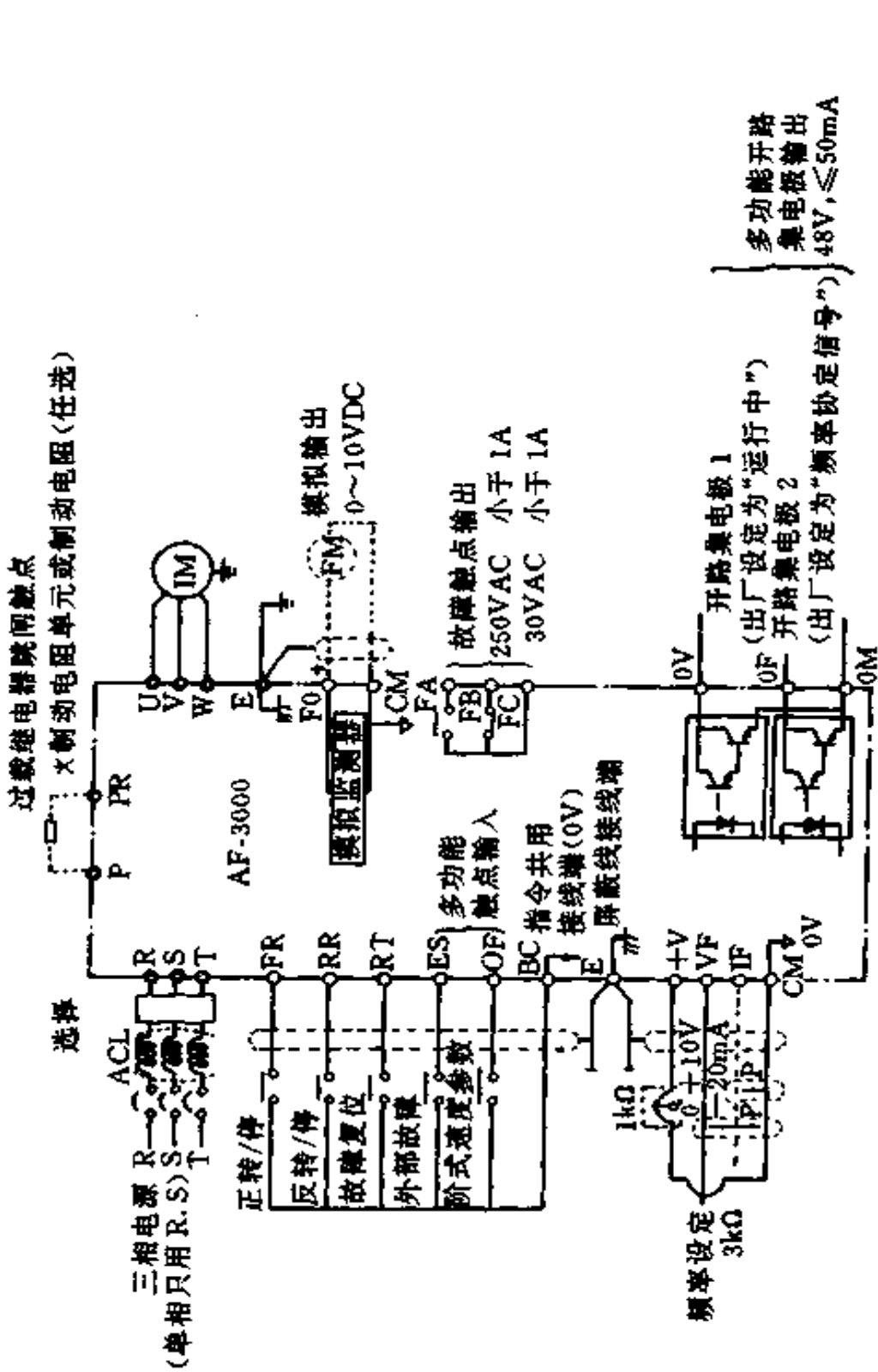


图 2-37 标准接线图

+V—调速参考电源, +12V, 20mA;
VF—主参考电压输入, 0~10V;
IF—主参考电流输入, 4~20mA

注释: 1. 表示屏蔽线, 表示双绞屏蔽线。
2. +V 接线端的 +12V 电压最大输出电流 20mA。
3. 接线端子标记: ⊙ 表示主电路, ○ 表示控制电路。

3) 主电路

适合于输送电流有效值不超过 1000A, 最高电压 240V 的电路, 型号有 2-A10, 2-A40, S-A20, S-A40。

4-A20, 4-A40 适合于电流有效值不超过 1000A, 最高电压 460V 的电路。

2-A75, 2-1A5, 2-2A2, 2-3A7, S-A75, S-1A5, S-2A2 和 S-3A7 等型号适合于电流小于 5000A, 电压小于 240V 的电路。

4-A75, 4-1A5, 4-2A2 和 4-3A7 适合于电流小于 5000A, 电压小于 460V 的电路。

主电路接线如图 2-38 所示, 主电路接线端子见表 2-6。

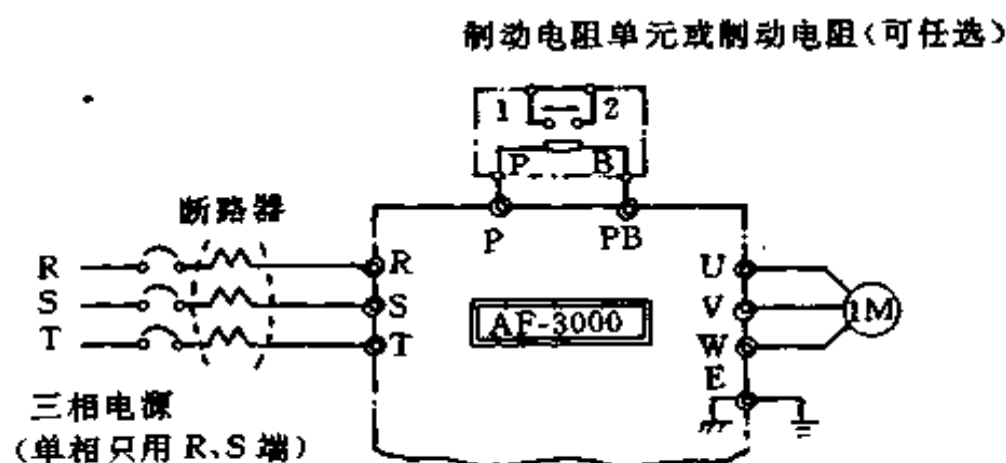


图 2-38 主电路接线图

表 2-6 主电路接线端子

接线端子	说 明	接线端子	说 明
R S T	主电路电源(单相只用 “R”, “S”)	P PB	外接制动电阻或制动电 阻设备(任选)
U V W	逆变输出	E	接地端(接地电阻 ≤ 100)

注: 使用螺钉将外壳接地。

主电路接线端子排列:

三相系列(所有型号):

R	S	T	P	PR	U	V	W
---	---	---	---	----	---	---	---

200V 等级(200~240V)单相系列, 0.13 到 2HP(0.1 到 1.5kW):

R	S		P	PR	U	V	W
---	---	--	---	----	---	---	---

└─空

200V 等级(200~240V)单相系列, 3/5HP(2.2/3.7kW):

R	S	P	PR	U	V	W
---	---	---	----	---	---	---

2. 主电路保护

1) 断路器和熔断器

保护电路使用模制壳断路器(MCCB)和熔断器。确保在交流电源与 AF-3000 输入端子 R, S, T 之间接入断路器或熔断器, 以保护线路。建议使用表 2-7~表 2-9 所列规格的断路器(MCCB)或熔断器(FUSE), 熔断器必须使用 PK5 级的。

当使用漏电保护器时, 选择一种不频繁动作的保护器, 把漏电动作电流设定为不小于 200mA 和持续时间 0.1s 以上, 以防止误动作。

表 2-7 200V 级别三相系列(200~230V)电路保护

型号 AF-3002	A10	A20	A40	A75	1A5	2A2	3A7
功率/kVA	0.3	0.6	1.1	1.9	2.5	4.2	6.7
额定输出电流/A	0.8	1.5	3	5	6.5	11	17.5
断路器或熔断器, RK5 级	3A	5A	5A	10A	20A	20A	30A

表 2-8 200V 级别单相系列(200~230V)电路保护

型号 AF-3002	A10	A20	A40	A75	1A5	2A2	3A7
功率/kVA	0.3	0.6	1.1	1.9	2.5	4.2	6.7
额定输出电流/A	0.8	1.5	3	5	6.5	11	17.5
断路器或熔断器, RK5 级	1.8A	3.2A	6.25A	10A	15A	40A	50A

注:支路电流保护不得超过电机满载电流的 225%。

表 2-9 400V 级别三相系列(380~460V)电路保护

型号 AF-3004	A20	A40	A75	1A5	2A2	3A7
功率/kVA	0.3	1.2	2	3	3.7	6.1
额定电流/A	1	1.6	2.6	4	4.8	8
断路器或熔断器, RK5 级	4A	5A	5A	10A	10A	20A

2) 浪涌吸收器

浪涌应与控制继电器、电磁接触器、电磁阀或者电磁制动器的线圈连接起来作为 AF-3000 的外部设备。否则,开关所产生的巨大浪涌电压会击毁元件或引起误动作。建议使用表 2-10 所列浪涌吸收器或等同电路。

3) 交流电抗器的插入

当输出功率超过 600kVA 时,应在逆变器输入端接入一交流电抗器以提高供电质量和功率因数。

表 2-10 浪涌吸收器

电磁接触器和控制继电器线圈		浪涌吸收器 ^①	
		型号 DCR2-	规格
200V ~ 230V	大体积电磁接触器	50A 22E	250VAC 0.5 200
	控制继电器 MY-2, -3 (OMRON), HH-22, -23 (富士), MM-2, -4(OMRON)	10A 25C	250VAC 0.1 100
380~460V 设备		50D 100B	1000VDC 0.5 220

①MARCON 电器公司制造。

3. 电线与螺钉规格

使用 600V 乙烯护皮电缆或等效品, 只能用 75℃ 铜线。低压接线端的接线要符合等级 I。现场接线端螺钉规格与扭矩值见表 2-11~表 2-13。

选择线规时应考虑电线上的压降。压降可用下列方程式求得: 选择电线应使压降小于正常额定电压的 2%。

表 2-11 200~230V 三相系列螺钉规格与扭矩值

电路	型号 AF3002-	逆变 能力/ kVA	接 线 端			电线规格	
			标 记	螺钉	扭矩	美国 线规	mm ²
主 电 路	A10	0.3	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	A20	0.6	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	A40	1.1	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	A75	1.9	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	1A5	2.5	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	12~10	3.5~5.5
	2A2	4.2	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	12~10	3.5~5.5
			E		1.43	12~10	3.5~5.5
	3A7	6.7	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	10	5.5
			E		1.43	10	5.5
控制 电路	各型号 相同	—	控制电路有 FA, FB, FC	M3.5	0.95	20~14	0.5~2

表 2-12 220~240V 级别单相系列螺钉规格与扭矩值

电路	型号 AF300S-	逆变 能力/ kVA	接 线 端			电 线 规 格	
			标 记	螺钉	扭矩	美国 线规	mm ²
主 电 路	A10	0.3	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	A20	0.6	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	A40	1.1	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	A75	1.9	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	1A5	2.5	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	12~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	2A2	4.2	R, S, T, P, PR, U, V, W	M5	2.24	10~8	5.5~8
			E	M4	1.43	10~8	5.5~8
	3A7	6.7	R, S, T, P, PR, U, V, W	M5	2.24	8	8
			E	M4	1.43	10~8	5.5~8
控制 电路	各型号 相同	—	控制电路有 FA, FB, FC	M3.5	0.95	20~14	0.5~2

表 2-13 380~460V 级别三相系列螺钉规格与扭矩值

电路	型号 AF3004 -	逆变能力/ kVA	接线端			电线规格	
			标 记	螺钉	扭矩	美国线规	mm ²
主 电 路	A20	0.8	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	A40	1.2	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	A75	2	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	1A5	3	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	2A2	3.7	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	14~10	2~5.5
	3A7	6.1	R, S, T, P, PR, U, V, W	M4	1.43	14~10	2~5.5
			E		1.43	12~10	3.5~5.5
控制 电路	各型号 相同	—	控制电路有 FA, FB, FC	M3.5	0.95	20~14	0.5~2

4. 连线

1) 逆变器与电动机间连线

如果逆变器与电动机间的电线过长且载波频率很高(晶闸管开关频率), 电缆的谐波漏电流将会影响逆变器单元和外围设备。距离较大时, 应按表 2-14 降低载波频率, 用代码 No.40 可以改变载频, 出厂时载频设定为 10kHz。

2) 主电路输入/输出连线

(1) 输入端 R.S.T 的相序即可顺时针也可逆时针。

表 2-14 允许载波频率

调速器与电动机距离/m	30	50	100	>100
允许载波频率/kHz	<15	<10	<5	<2.5
(代码 No.40 设定值)	(6)	(4)	(2)	(1)

(2) 将调速器输入端 U.V.W 分别与电动机输入端子 U.V.M 联接好, 如果这时发出正转指令, 而电动机反方向运转, 只需将电动机任意两线互换即可。

(3) 不可将交流电线接触到调速器输出端 U.V.W, 否则调速器将可能被损坏。

(4) 注意不要使电线接触到调速器外壳, 以防漏电或短路。

(5) 在 AF-3000 输出端可以接电感噪声滤波器, 但千万不可接入电容补偿电路、LC 和 RC 电路。

(6) 确保拧紧主电路接线端螺钉。

(7) 确保将主电路电缆与调速器和外围设备控制电缆分离开, 否则可能产生误动作。

3) 接地

AF-3000 壳体的接地使用接地端子 E

(1) 接地电阻要小于等于 100Ω 。

(2) 不可将 AF-3000 的地线与电焊机、电动机或其他大电流设备及接地杆接在一起, 将地线与大电流设备的电缆分离单独套管走线。

(3) 接地线应符合美国线规 (AWG) 和本机标准, 尽可能短。

(4) 当几台 AF-3000 设备紧挨着使用时, 应采用图 2-39(a)或(b)图的接地方法, (c)图作法是错误的。

4) 控制电路



(a) 正确 (b) 正确 (c) 错误

图 2-39 多台变频器接地图

控制电路接线应符合 I 级接线标准，控制信号是通过接线端的。图 2-37 画出了输入/输出信号与接线端序号的关系（出厂设定值），图中接线端功能是装船前的标准化设置。因为

数字操作顺序的操作代码是为有数字操作板的调速器设置的，所以当操作从控制电路接线端执行时，有必要改变控制常数。对于设有数字式操作板而有显示面板的类型，控制电路接线端的操作代码是出厂时标准化设定的。

控制电路接线端在出厂时预置，见表 2-15。

表 2-15 控制电路接线柱

分类	接线端	信号功能	说 明	信号强度	
指令 输入 信号	FR	正转/停信号	闭合正转，开则停	光电耦合绝缘 输入：24VDC 8mA	
	RR	反转/停	闭合反转，开则停		
	RT	故障复位输入	闭合复位		
	ES	外部故障	闭合时故障		多功能触点 输入可选 两个信号
	DF	阶式速度参数	闭合有效		
	BC	输入信号地线	—		
模拟 输入 信号	+V	速度基准电源线	速度基准电源	+12V(最大电流 20mA)	
	VF	频率基准	0~10V/最大输出频率	0~+10V(20k)	
	IF		4~20mA/最大输出频率	4~20mA(250)	
	CM	控制电路地线	0V	—	

续表

分类	接线端	信号功能	说 明	信号强度
指令 输出 信号	DV	运行中	运行时低电平	多功能触点输出可选两个信号
	UF	约定频率信号	输出频 = 设定频时, 低电平	
	OM	开路集电极输出地线		
	FA	故障信号	故障时 A 与 C 接通, B 与 C 断开	触点容量 250VAC: $\leq 1A$ 30VDC: $\leq 1A$
	FB	触点输出		
	FC	故障信号输出地线		
模拟 输出 信号	FQ	频率计, 电流表输出	0~10V/最大输出频率	0~11V, $\leq 2mA$
	CM	地线		

控制电路连线注意事项:

- (1) 将控制信号线与电力线分开, 否则会引起误动作。
- (2) 模拟频率设定线, 需用屏蔽线并对线头充分处理图 2-40。

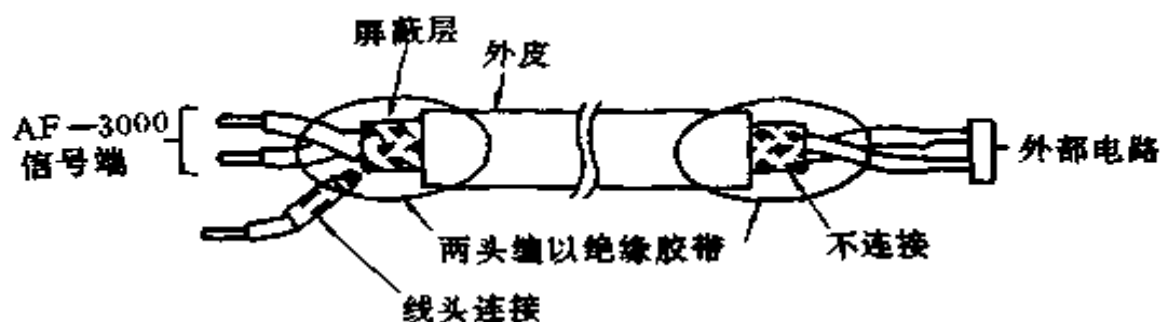


图 2-40 信号线接线头的处理

- (3) 控制信号线长度不大于 50m (164ft)。
- (4) 为使晶体管驱动触点输入信号, 导线的额定值应大于 50V, 50mA。在信号“关”时漏电流小于 $100\mu A$ 。
- (5) 用多功能光电输出端驱动感性负载 (继电器线圈)

等), 应该安装一单向二极管图 2-41。

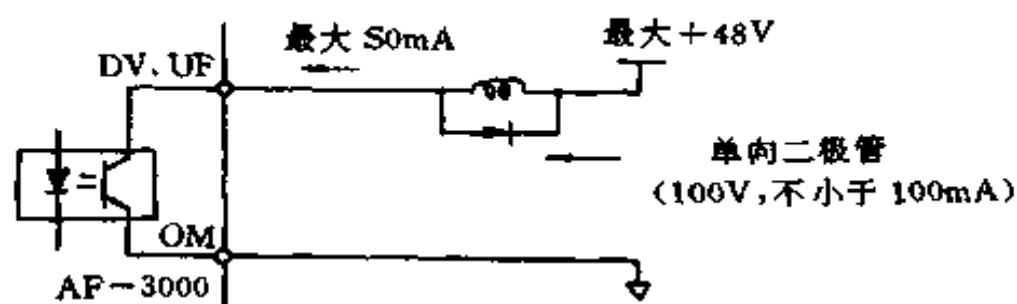


图 2-41 输出端驱动感性负载保护

综上所述, 变频器接线一般遵循的原则为:

主电路

- 选用在额定电流下电压降尽量小的电线。一般选用在逆变器输出侧最大电流时的电压降为额定电压的 2% 以下规格的电线。

- 为了尽量减低自输入/输出侧配线所发生的噪音, 在输入/输出配线时, 分别作三相一捆的配线。

一般控制电路配线

- 逆变器及同一盘内或其近处所设置有线圈的装置, 请安装浪涌吸收器。

- 所有关系到逆变器的机器设置 (螺线管、电磁阀、电磁制动器等), 其配线要尽量靠近逆变器装置, 并安装好浪涌吸收器。

逆变器控制电路配线

- 把要直接向逆变器接线的控制电路配线与主电路配线及一般控制电路配线间隔开 10cm 以上, 绝对不可放在同一电线槽内。

- 对于各种控制电路的配线, 请依照图 2-42-2-44 施行配线。

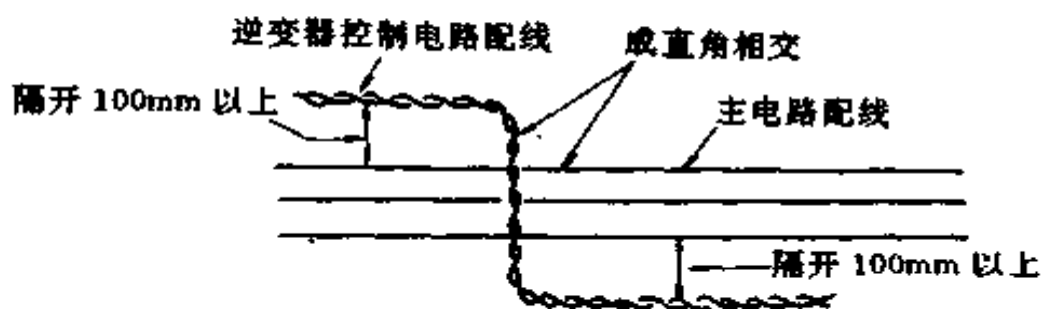


图 2-42 主电路与控制线路交叉时的配线

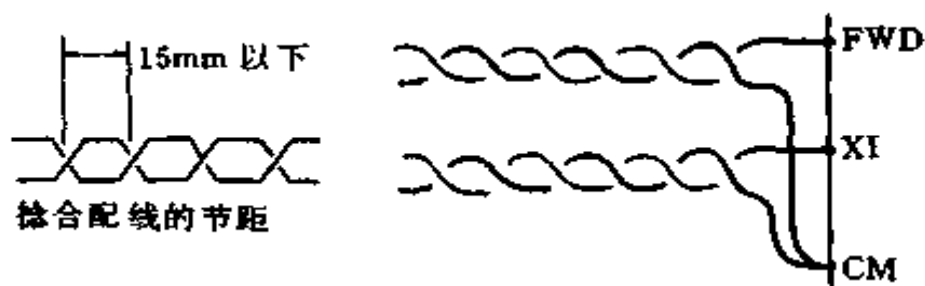


图 2-43 防止噪声信号的捻合配线

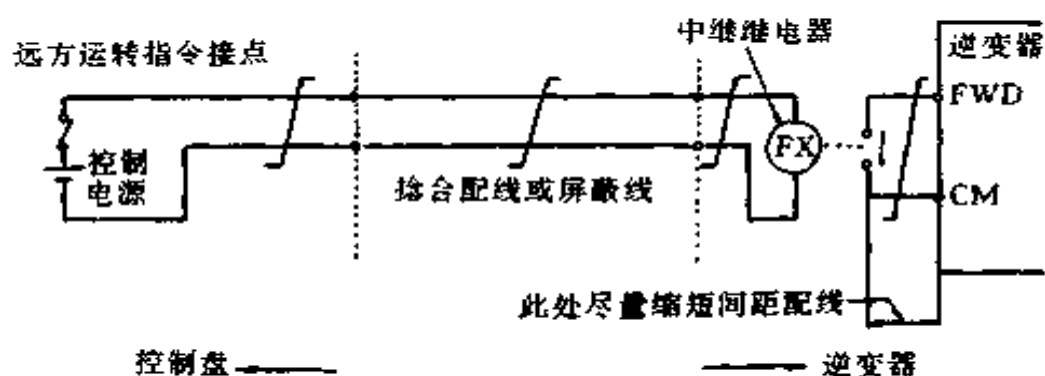


图 2-44 长线路控制的配线

接地线

安装可靠接地线除了可防触电之外，对防止设备噪音也很有益处，所以务必要接好地线。

5. 输入电压对逆变器的影响

如果输入电源的电压有较大的波动，超过了产品说明书中的容许范围时，会成为逆变器发生故障的原因或缩短使用

寿命，所以务请引起注意。

输入电压过大，会威胁到内装部件的耐压，是造成故障发生的原因。400V系的极限是418V ($380V \times 1.1$)。另外，在具有制动电路的情况下，即使并没有制动动作，也可能由于该电路的单独动作而使变频器发生警报而停止工作。上述这些情况，如果主电路外加输入电压，即使逆变器没运行也可能会发生问题。

输入电压过小时，会使最大输出电压降低，所以在高速范围内会造成马达转矩不足的现象，因电流增大而加快过载保护动作。

如前所述，如电源容量大（即电源侧阻抗小）时，会使输入电流的波峰值变高，使整流二极管或电解电容器的损失增大而发生故障。在电源容量500kVA以上，或是逆变器额定容量的10倍以上时，应连接选购件——电源匹配用电抗器。如果配线电缆长，其阻抗大于电源匹配用电抗器的电抗值以上时，就没有连接电抗器的必要。如果电源电压的不均衡度超过3%时，就需连接电源匹配用电抗器。不均衡度过大时，可能也会致使输入电缆异常过热。特别由V型变压器供电时，采用电源匹配电抗器也不能完全解决问题，所以需另采用改善功率因数用的直流电抗器。

在连接逆变器的电源系统上，按图2-45所示连接自动功率因数调节器，或按图2-46所示连接闸流管逆变器时，会使输入电压波形发生畸变，输入电流的峰值变大，加重整流二极管的电压负担。遇此情况时，应在输入侧连接电源匹配用电抗器。

逆变器用电源变压器容量因负载电流包含高次谐波，所以对于逆变器所需电源容量要加上一些裕度（10%~20%左

右) 选择, 为了减轻对电源或来自电源的影响, 使用一次及二次的绝缘物。

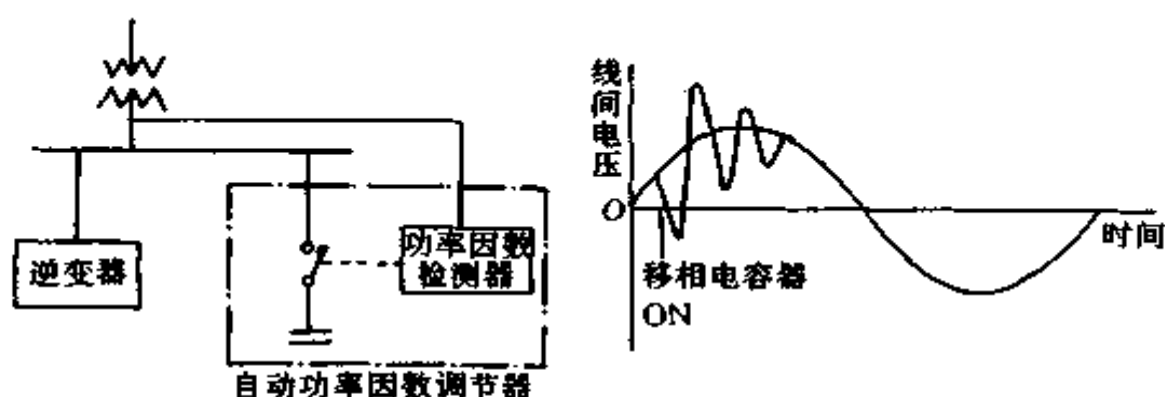


图 2-45 自动功率因数调节器与移相电容器投入时的异常电压

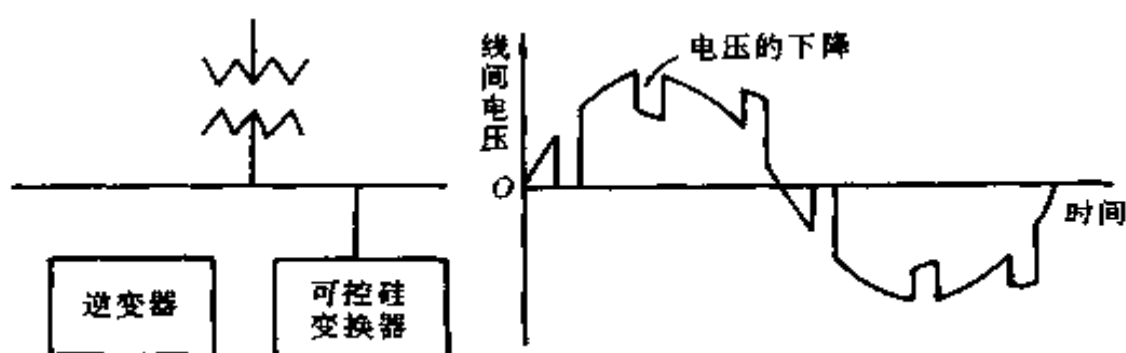


图 2-46 可控硅变换器与可控硅的转流造成电压下陷

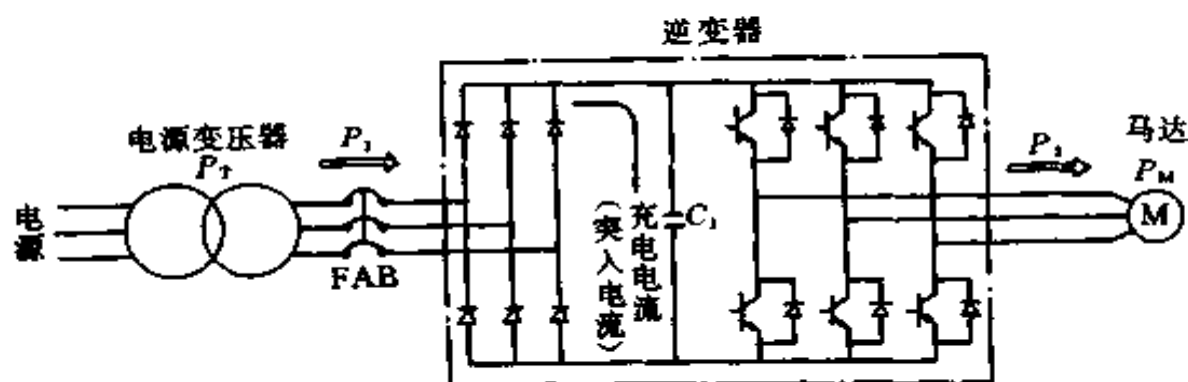


图 2-47 逆变器装置电路

图 2-47 所示逆变器装置的电路, 其各个容量的关系如下:

$$P_1 = P_2 \cdot P_{IM} / \eta \cdot P_f \quad (2-16)$$

$$P_2 = P_M / \eta_M \cdot P_{IM} \quad (2-17)$$

逆变器所需电源容量（输入容量），由上面的公式整理，得到式（2-18）

$$P_1 = P_M / \eta_M \cdot \eta \cdot P_f \quad (2-18)$$

电源变压器容量，依照 $P_T > P_1$ 的关系，选用时比式（2-18）中所示逆变器所需电源容量还应大些（约有 10% ~ 20% 左右的裕度的变压器）。

式中 P_T ——电源变压器容量，kVA；

P_1 ——逆变器所需电源容量（输入容量），kVA；

P_2 ——逆变器输出容量，kVA；

P_M ——马达输出容量，kVA；

η_M ——马达效率，逆变器运行的场合，受高次谐波的影响，会使百分率稍降低些（约降低 2% ~ 3% 左右）；

η ——逆变器效率，0.95；

P_f ——逆变器输入功率因数，安装功率因数改善直流电抗器时为 0.94 ~ 0.95，安装功率因数改善交流电抗器时为 0.75 ~ 0.85；

P_{IM} ——马达用功率因数。

6. 高次谐波的影响

向逆变器的输入电流的频率成分参看图 2-48。马达输出为 100% 时，随电源的电抗发生变化，基波电流 I_1 大致不发生变化，而高次谐波电流 $I_2 \sim I_{19}$ 却有很大的变化。高次谐波电流随电源的状况的不同，有时会对电源产生不同的不良影响。

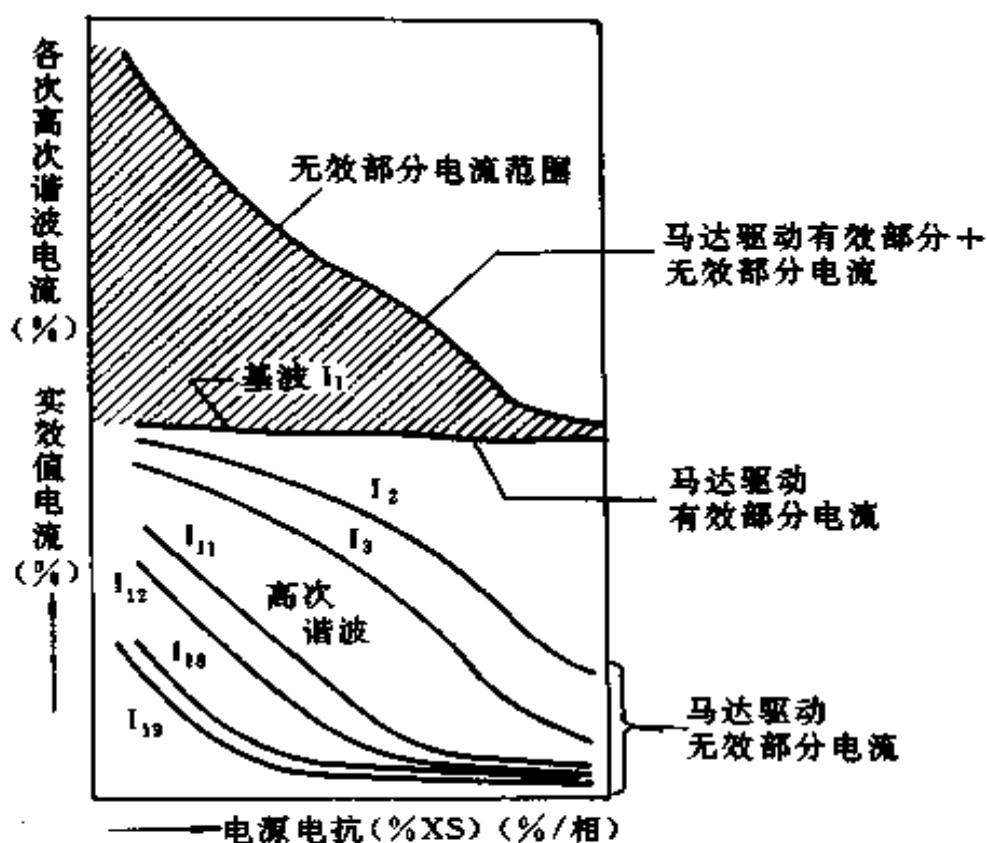


图 2-48 高次谐波的特性

1) 移相电容器

改善功率因数用的移相电容器，对高次谐波阻抗很小，将它接入系统，则可使其他负载的高次谐波电流减小。不过，如图 2-49 所示，与电源的感性阻抗成并联状态，由于高次谐波电流，两者可能发生并联共振，使得移相电容器或变压器成为过电流状态，以致造成损坏。

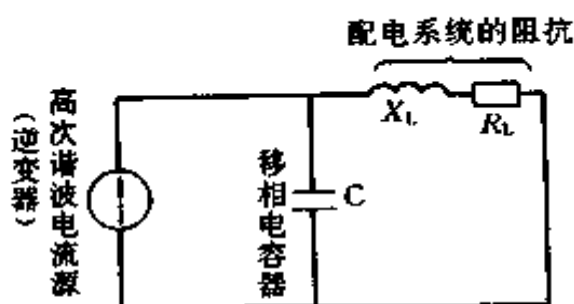


图 2-49 移相电容器连接时的等价电路

为了避免这种共振现象,在移相电容器上,以串联连接6%的电抗器。于是移相电容器可以阻止5次谐波以上的高次谐波通过。当逆变器存在输入高次谐波时,如电源是均衡的,移相电容对5次以上谐波可防止其发生共振现象。再者,在逆变器的输出侧,禁止使用为改善马达的功率因数而采用的移相电容器。因逆变器的晶体管呈高速转换开关状态,所以输出电压瞬时值有剧烈的变化。由于电容两端电压不能突变,会造成移相电容器与逆变器有很大的电流通过,致使逆变器受到损坏,所以在变频器输出端绝对不要使用电容器。

2) 自备发电设备 (同步发电机)

将逆变器连接到发电机上使用的场合,因逆变器发生的高次谐波电流,会使发电机的阻尼线圈产生感应电流,甚至可能造成发电机线圈发热烧损。这种影响,如下面公式所示(等价反相电流)。

$$I_{2eg} = \left[\sum_v (v/2 \cdot I_v)^{1/4} \right]^{1/2} \\ = \left[3^{1/4} \cdot (I_5 + I_7)^2 + 6^{1/4} \cdot (I_{11} + I_{13})^2 \right]^{1/2} \quad (2-19)$$

式中 I_{2eg} ——等价反相电流, A;

v ——高次谐波次数;

I_v ——高次谐波电流, A。

一般的柴油机驱动陆用同步发电机可以承受额定值的15%左右的反相电流。如果用自备发电机发电作电源,发电机的额定电流大约是使用DC电抗器时的4倍,当使用AC电抗器时大约为5倍,以此作为选择的标准。另外,如果使用的发电机有特别设计的阻尼线圈,则可减低其倍率而使用。

3) 送电输入端电压波形的谐波

从对被连接到系统上并受到高次谐波的影响而遭受损害侧的机器的观察，可发现这高次谐波成分的电压值是有问题的。图 2-50 是研究逆变器的高次谐波对系统的影响的等效电路。

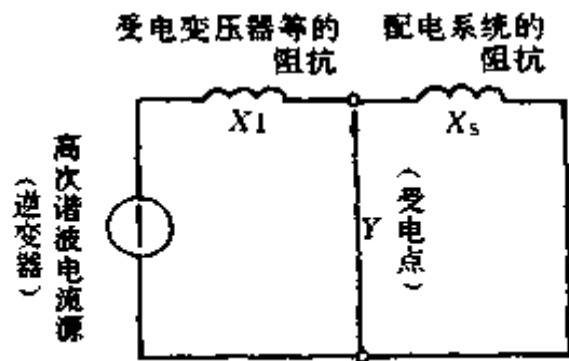


图 2-50 高次谐波对系统影响的等效电路

逆变器对高次谐波为电流源。由该等效电路输入端的高次谐波畸变电压为

$$V_n = n \cdot X_s \cdot I_n \quad (2-20)$$

- 式中 V_n ——高次谐波畸变电压，V；
 X_s ——配电系统阻抗， Ω ；
 I_n ——逆变器输入高次谐波电流，A；
 n ——次数 ($n > 1$)。

另外，对系统的影响作综合的判断时，其标准如下列公式所示的综合电压畸变率

$$D = \frac{(V_{22} + V_{23} + \dots)^{1/2}}{V_1} \times 100\% \quad (2-21)$$

式中 V_1 ——基波电压，V (相电压)。

低压配电线的高次谐波的允许值，电压的综合畸变率为 5% 以下。所以在 5% 以上的状况时，需接入交流电抗器或是直流电抗器，以抵制高次谐波电流，使输入端畸变为 5% 以下。再者，当要采用总容量大的逆变器设备时，设置专用的变压器来连接到高压系统的方法较为有利。

第六节 异步电动机在变频调速运行时的特点

一、启动

异步电动机在工频下直接启动，其启动电流往往为额定电流的5~7倍，但启动转矩不很大。在变频器调速中，采用软启动（低频启动）可以减小启动电流，通过力矩升高调整可以增加启动转矩，从而加快启动过程。但根据异步电动机的机械特性，在频率较高时（低于工频），电动机的启动转矩是随频率的降低而增大的，但当频率较低时这个规律并不存在，即启动转矩随频率的降低而减小，为了缩短启动时间，便要选择最佳的启动频率，以使启动转矩为最大而电流尽可能为最小。

对于(2-4)式，令 $S=1$ ，可得启动转矩公式为：

$$M_2 = 3PU_{1n}^2 r_2 \alpha_1 / 2\pi f_{1n} [(r_1 + r_2)^2 + \alpha_1 x_e^2] \quad (2-22)$$

将式(2-22)对 α_1 求导，并令其等于零，可得到对应于最大启动转矩时的频率

$$\alpha = \frac{r_1 + r_2}{x_e}$$

即

$$f_{\max} = \frac{r_1 + r_2}{x_e} f_{1n} \quad (2-23)$$

这个频率称为最佳启动频率，对一般电动机而言，此值大致在12.5~25Hz的范围内，超出此值，启动转矩都将小于其最大值。

二、升速

电动机启动之后，要使电动机加速，就必须连续地提高

频率，其过程如图 2-51 所示。例如从 n_1 升速到 n_3 ，即从 f_1 上升到 f_3 ，实际上是从工作点 1 沿箭头到点 2 再到 3，达到新的稳定运行。但是应当注意，频率增加的速度要与电动机的实际转速相适应，如果频率变化太快，例如从 f_1 突然上升到 f_3 ，电动机转速因惯性而未跟上，工作点将从点 1 移到点 4，对应的转矩为 M' ，则因 $M' < M$ （负载转矩），电动机就会停止运转。

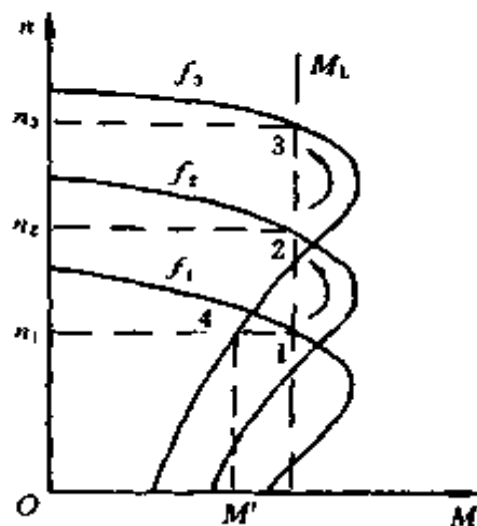


图 2-51 升速过程

由方程式：

$$M - M_L = GD^2 \Delta n / 375 \Delta t$$

式中 GD^2 ——电动机及负载（折算到电机轴上）的总转动惯量， $\text{kgf}\cdot\text{m}$ ；

Δn ——转速增量；

Δt ——时间增量，即升速所需时间， s 。

可得：

$$\Delta t = \frac{GD^2}{375(M - M_L)} \Delta n \quad (2-24)$$

(2-15) 式表示， Δt 为在特定负载下所需的最小启动时间，小于这个时间就有不能启动的可能。

在闭环控制系统中频率与转速的协调控制是自动实现的，上述情况在手动操作的开环系统中应予以特别注意。

三、制动

在变频调速系统中电动机的制动和在工频下运行一样，可以采用反接制动、再生制动和能耗制动。由于反接制动要

消耗一定能量，且有冲击电流，故不采用。再生制动可以将电动机存储的电能反馈给电网，从节能观点出发是经济的。电流型的变频器可以再生制动，电压型的变频器不能进行再生制动。电压型变频器只能采用能耗制动方式。即在逆变器直流侧跨接一个能耗电阻与大功率晶体管的串联电路，如欲使电动机迅速停转时，给该晶体管基极一个信号，使之立即导通，将返回的能量消耗掉，电动机即迅速停转。

第三章 变频器的应用

第一节 变频器的作用

一、节能

众所周知，工业化处理过程，特别是石油化工生产过程，对物料的压力、液位、流量要进行严格地配量操作，而对复杂的操作过程，过去传统采用固定驱动电动机的转速的方式，用控制阀（对气体而言用风门）来控制管道中流量的变化来完成整个过程的控制。

以泵系统为例，通常，泵都在额定工作条件下，按最佳工作条件设计操作。如图 3-1 所示为泵的典型的工作曲线， AB 是泵的性能曲线，与额定系统压力曲线 CB 相匹配，在 B 点可以得到额定压力下的额定流量，在该点泵有最高的效率，关闭阀门可控制流量，当流量减小时，泵分别工作在 P 、 Q 、 R 、 S 点，此时泵需要在很高的压差下工作，因此泵的能量输出比实际系统需要多得多，多余的能量在阀上表现为热量损耗，并被液体流动时带走。用泵的输出能量除以泵的效率，可以求得对泵的总输入，如图 3-1 (b) 所示，用调节阀控制减小流量，能量损失相当大。

利用变频器调速，使电动机驱动泵在可变速情况下工作，要使得泵的特性曲线与系统在任何流量条件下的需要相匹配，流量与马达转速成正比，产生的压差与速度的平方成正比，因此可得一组特性曲线，如果减小速度，只损失很少的能量，其节能效果相当可观。

二、构成自动调节系统

对于一些小容量的变频器其节电量较少。但由于变频器可接受外部弱电信号的控制来完成较复杂的控制过程，其结构简单可靠，所以在工业生产中应用越来越广泛。使用变频器可构成多种自动调节系统。

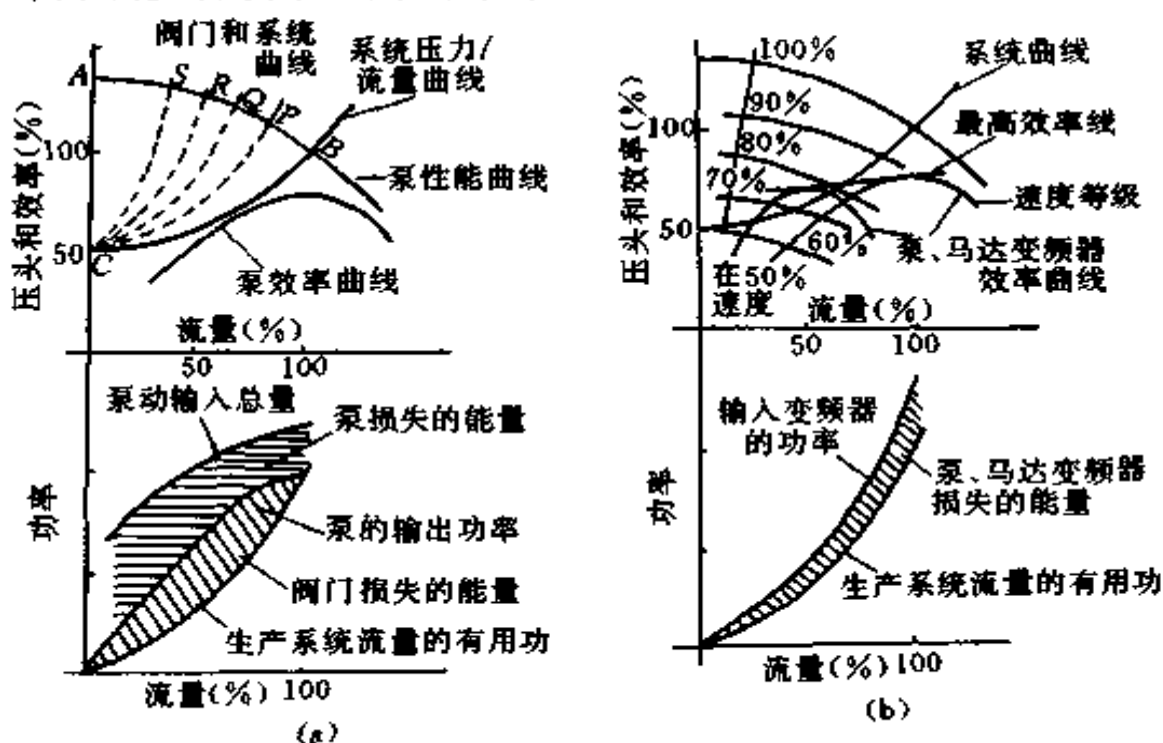


图 3-1 泵的固定速度/变速状态曲线

(a) 固定速度泵曲线；(b) 可变速泵曲线

第二节 变频器应用实例

一、变频调速恒压供水系统

我们国家在供水技术方面一直比较落后，自动化程度很低，难于管理，造成的浪费很大。而给水矛盾也逐年加深，主要由于供水设备生产长期来未受人们重视，设备陈旧，气压供水一直长盛不衰，加上这种供水设备生产厂家多为自发企业，设备无统一标准，局面混乱难于管理。在节能、节

水、节原材料呼声高涨的今天，各方开始努力开发新的供水系统，变量恒压供水在我国尚处于初期阶段，目前已受到各有关方面的重视。

1. 传统供水系统

我国的传统供水方式一般有三种：恒速泵供水、水塔及高位水箱供水、气压罐供水。

如图 3-2 为恒速泵供水额定转速下水泵的特殊曲线。当用户的用水量变化时，如由 Q_2 变为 Q_1 时，供水管路上水压则由 p_2 变为 p_1 ，这个变化较大，效率也变化很大，无论从管路设计还是从能耗角度讲都不合理。这种供水方式只适用于供水量不大及供水量稳定的场合，而更多的水量大、变化频繁的场所是不适合的。

针对上述供水系统的不完善，人们首先采用了水塔和高位水箱的办法解决供水矛盾，如图 3-3 所示。这种方式优点是水泵充分工作在额定点，耗能十分合理，管路上压力恒定，供水稳定，不足之处是投资大，占地大，建造周期长，在城建土建的初期设计尚能采用。随着工业、农业、城乡建设发展，要求对供水设备的小型化、经济化、灵活化、要求日益强烈，于是人们想出了一种气压供水的办法。

如图 3-4 所示，气压供水设备是利用气压罐作调节容器调节供水量，这种方式供水能使水泵工作在最大效率附近，耗能比恒速泵合理，管路上压力变化不太大，比较水塔、高位水箱具有投资小制造简单，占地小，周期短的特点。因此，气压供水设备很快在国内流行，目前已达高潮，但气压罐供水不足之处也很明显，当供水量比较大时（ 50m^3 以上），占地面积也颇为可观，消耗钢材也很多，而且由气压供水本身构造决定，必然是差压供水，这就必然多

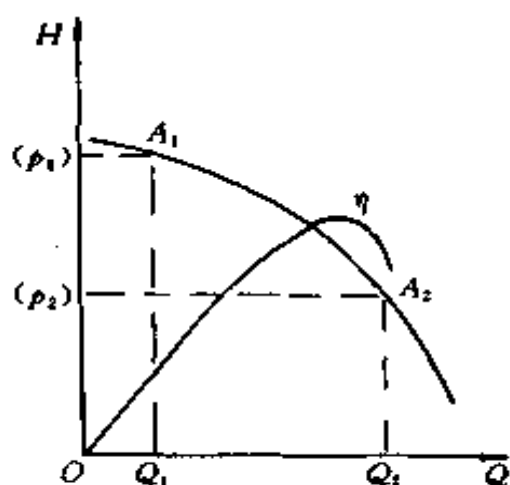


图 3-2 泵的额定转速的特性曲线

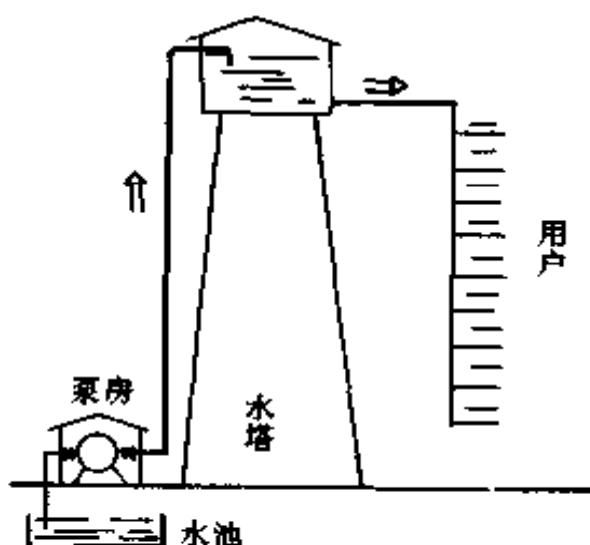


图 3-3 水塔和高位水箱供水

耗了相当的电能，比例一般占总电能的 10% ~ 30%。这个数目不很大，但积累起来数目惊人。为了解决占地大、耗能大的问题，不少人想办法使气压罐小型化，节能化，但进展不大。气压罐体积 V 由下式决定

$$V \propto \frac{Q}{K \cdot \Delta p}$$

式中 Q ——调节水量；
 K ——水泵启动次数；
 Δp ——压差。

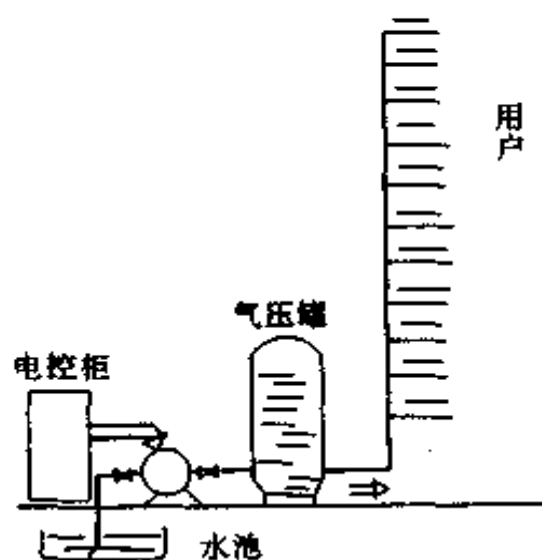


图 3-4 气压供水图

水泵启动次数由电器元件决定，目前国内一般最高每小时启动 6 次， K 值变化不大。压差 Δp 与多耗能和管路设计合理与否关系很大， Δp 大，与恒速泵接近，不合理。因此

Δp 不能变得太大，于是 V 正比于 Q ，随供水量的增加，气压罐体积随之增大。为此人们开始考虑其他方法，在变频器商品化的今天，便出现了变频调速恒压供水系统。

2. 变频调速恒压供水系统

1) 部件

传感器：压力传感器为检测压力信号，并转换成电信号的仪表，压力 p 与输出的电信号 U 有一定的线性关系， $U = Kp$ 。

变频器：控制输出给电动机的电功频率，电动机转速。

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

式中 n ——电动机转速；

S ——电动机滑差，一般为 0.02 左右；

f ——供给电动机电源的频率；

P ——电动机极对数，一般电动机选定 P 为定值。

于是 n 正比于 f ，水泵转速 n' 正比于 f 。

控制器：将传感器输送来的电信号进行处理，并输出电信号，控制变频器，从而控制水泵转速。

2) 工作原理

图 3-5 给出了变频调速恒压供水系统示意图。图 3-6 为水泵在某一管阻下，不同转速时的水泵曲线。分析恒压过程，如图 3-7 所示。假定用户用水

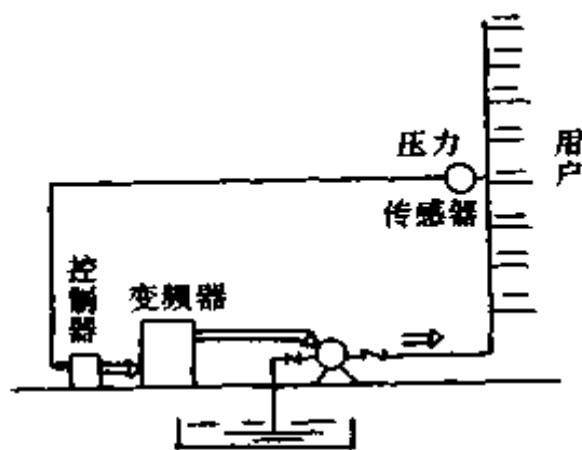


图 3-5 变频调速供水系统

的需要压力为 p_0 ，现在用水量为 Q_1 ，用户的用水量突然需要 Q_4 的量。假定用户将阀门突然打开，打开时间设为 t 趋于 0，那么在打开闸门时，工作点 A_1 因管阻突然变化，将沿 n_1 线下至 A' 点达到暂稳态，此时，管路上压力为 p' 低于要求值 p_0 。压力传感器检测出 p' 后输出 $U' = Kp'$ ，控制器接收 U 信号后进行比较处理，发出信号控制变频器升频

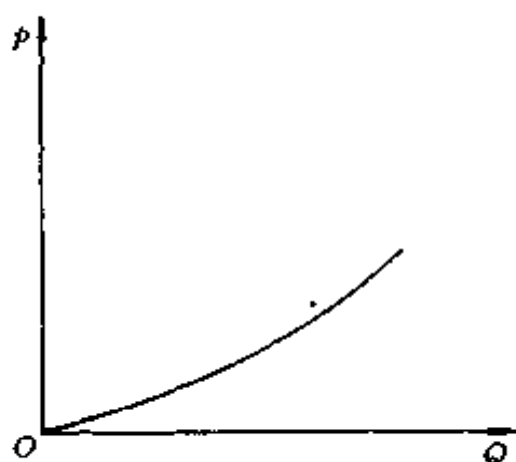


图 3-6 不同转速时的水泵曲线

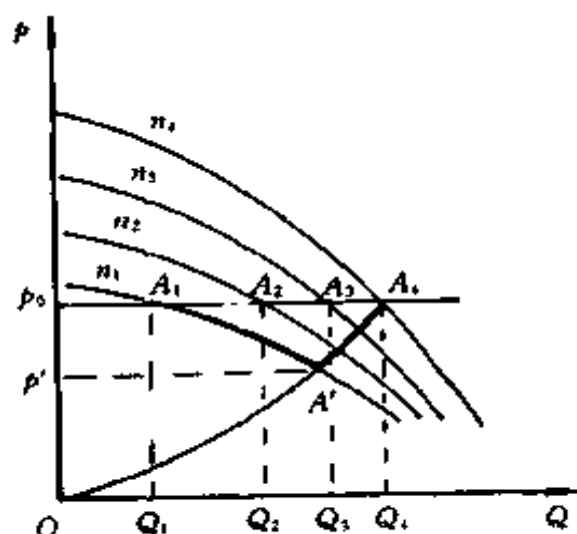


图 3-7 恒压供水特性曲线

率，于是变频器控制水泵升速，水泵工作点便由 A' 沿 β 线上升至 A_4 点达新的稳定。 A_4 点压力为 p_0 ，供水量为 Q_4 ，满足用户需要。实际中，用户的用水量不可能突然增大，而且控制部分反应速度也快，局部工作情况如图 3-8 所示 (β 线为恒管阻的水泵曲线)，工作点由 A_1 沿 n_1 线降至 B_1 ，沿 β_1 升至 A_2 ，又沿 n_2 线降至 B_2 之后，沿 B_2 升至 A_3, \dots 。那么，实际工作时由于控制系统和水泵升速响应较快，从总体上看工作点的变化如图 3-9 所示， A 沿 A' 变到 A_4 ， p_0, p' 之间差距很小，整个过程时间很短。

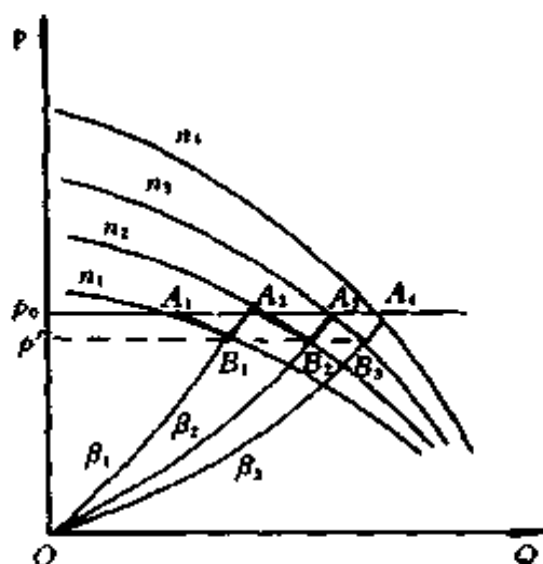


图 3-8 恒压供水
局部工作状况

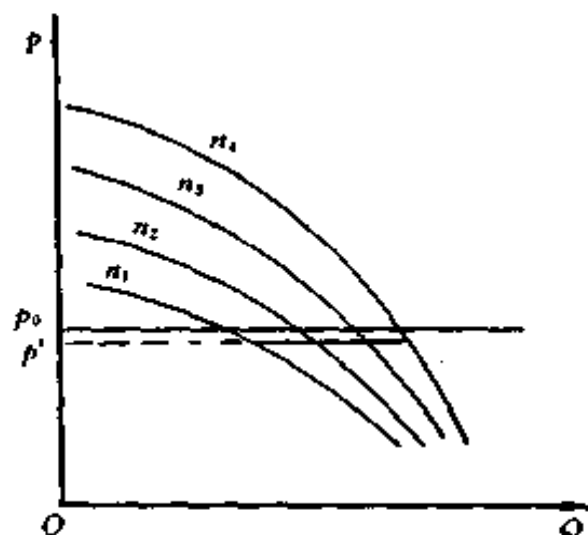


图 3-9 恒压供水
总体工作点

压力表上的变化人们一般辨别不出，表现为人们现在说的恒压。现在有的变频调速恒压供水设备压力表指针摆动，这不是因为调节恒压引起的，而是由于水流在管路中的振动引起，有的厂家生产设备压力指示摆动较大，是由于整个系统的参数未统调好造成的。良好的设备应为恒压。

3. 变量恒压供水设备与气压供水设备比较

1) 能耗

气压供水方式中，气压罐本身的性能决定了工作时给水管路的压力在设计值 p_1 和最高值 p_2 之间图 3-10，这高出 p_1 的压力对用户来说是不需要的，因而浪费了电能。与理想水塔比较多耗电计算，多耗电能

$$D_n = p(Q)dQ$$

考虑时间因素则有

$$D_n = p(t) \cdot Q(t)dt$$

由计算可知，每日多耗电 20%。

变频调速恒压供水，所采用合理的设计方案为：最大流

量点取额定转速下水泵的最大效率点，最小流量取值一般控制在 70% 转速的 80% 点的数值附近 (η_{max} 为水泵的最高效率)，如图 3-11 所示。

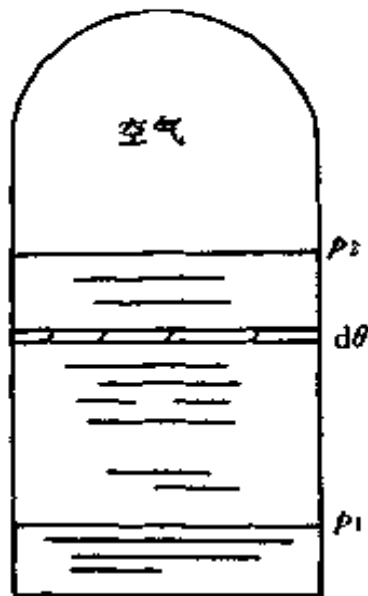


图 3-10 气压罐压力图

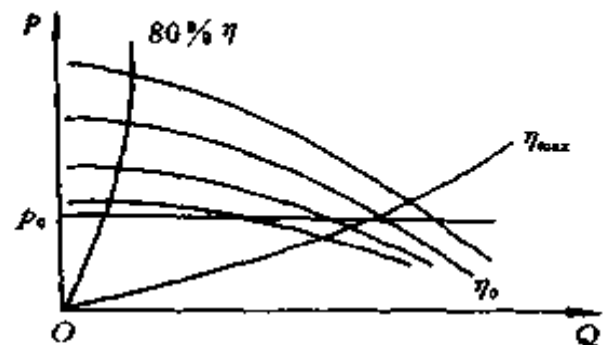


图 3-11 变频恒压供水工作点

变频调速恒压供水与理想水塔比较多耗电 6% ，与气压供水相比节约电能 14% 。

2) 其他

(1) 变量供水设备消耗原材料少，特别是钢耗比气压供水设备减少 90% 以上，这点在今天具有很大意义。

(2) 噪音比较。变量供水设备由于通过调整转速而调流量，那么在人们休息时，用水量小。变量供水的水泵低转速运转，噪音小。

(3) 变量供水设备对水流无二次污染。

从以上比较表明，变量供水方式具有十分明显的优越性，在未来的供水系统发展中必将占主导地位。

4. 供水工程实例

1) 单泵调速控制系统

利用电机变频调速技术可更新改造传统的供水系统，根据用户用水量的变化，通过 PID 控制，无级调节水泵电机的转速，保持水压恒定。由于变频调速器控制灵活方便，整个系统实现了模块化，结构简单，系统构成方式灵活，可以单泵控制，亦可多泵调速控制。例如，某厂供水工程改造原系统为单泵，即搞单泵调速控制，由远传压力表、PID 调节器，变频器，在 1km 外遥控整厂供水，效果用户非常满意。供水控制系统如图 3-12 所示。

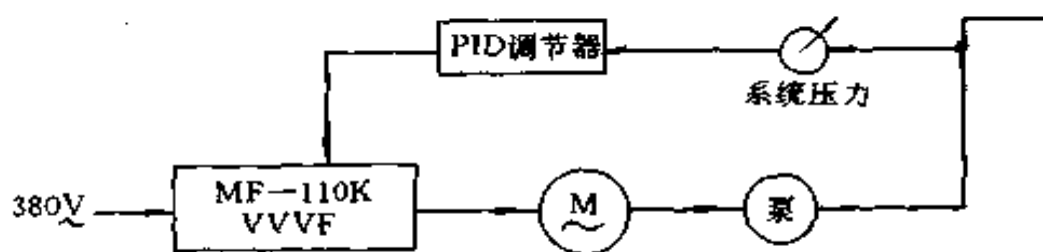


图 3-12 PID 恒压供水控制系统

2) 多泵调速控制系统

如果新设计系统，可以采用多泵控制，以期最大限度降低投资成本。例如某小区变频恒压、无水塔供水系统设计，即由三泵组成系统，其控制过程如下：

当电控系统处于自动控制状态时，接通恒压控制器中的交流接触器给变频器 VVVF 供电，出水管处的远传压力表，将水压信号传给控制器，水压信号由 PID 运算后，输出相应的模拟信号，控制变频器调节电机转速，对系统供水。当系统压力仍低于设定值时，控制器对 2[#] 电机供电工作，此时 2[#] 泵调速工作，维持母管水压力超过设定值时，2[#] 泵停止工作，1[#] 泵调速工作，维持母管水压恒定。

当系统需消防水时，恒压控制器接到消防信号，由于

PID 设定为消防水压力，生活用水压力两个值，变频器使电机运转在高转速状态，此时 3[#] 泵亦恒速投入工作，以增大供水管压力，提供消防用水。系统如图 3-13 所示。由于采用了软启动和循环软切换技术，大大提高了系统的稳定性，避免了水锤现象，延长了水泵使用寿命，减少了系统运行时对电网的冲击。

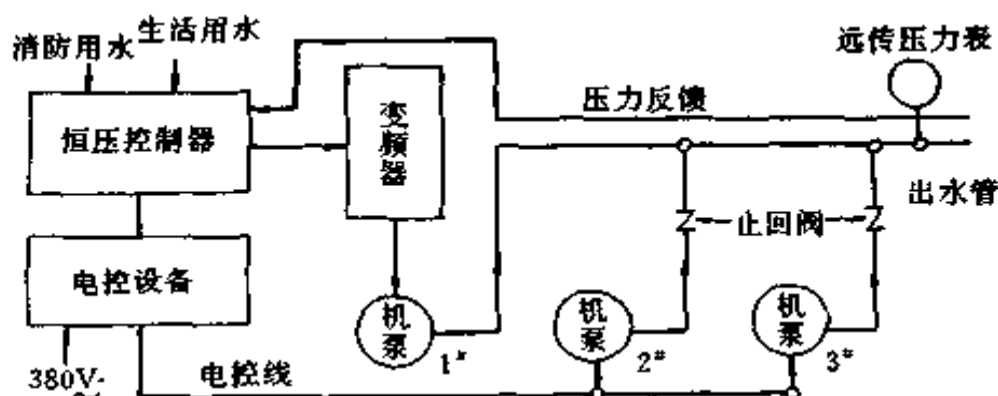


图 3-13 变频调速供水控制系统

恒压供水系统不失为一种节能、稳定、经济可靠的新型供水系统。

二、水池水塔供水控制系统的技术改造

1. 概述

对于采用蓄水池的供水系统其控制目的是在保证可靠供水的前题下，尽量节约电能和水资源，降低生产成本。某单位供水系统由水池和水塔组成，水流程为：水源地机泵将水抽出并计量，经过 600m 输送管道注入 800m³ 的蓄水池，再由机泵加压送至 28m 高的水塔中，然后再送至工厂各部门。改造前，水源地及水塔机泵均手动操作，司泵人员劳动强度很大，而蓄水池经常溢水，造成电能及水资源的很大浪费。

由调节原理可知，对于蓄水池水位 h 而言

$$dh/dt = (Q_1 - Q_2)/F$$

式中 Q_1 ——流入量，是基本扰动；

Q_2 ——流出量，是外部扰动；

F ——水池截面积。

由于水池面积很大，在阶跃扰动下水位的变化曲线即水位的飞升特性曲线表现为很大的惯性特征，再加之有长管道引起的基本扰动传输的纯迟延，对于这样一个没有自平衡特性的大惯性环节，为设计控制系统带来了很大麻烦。

该水池液位的飞升特性曲线如图 3-14 所示。纯迟延时间 $t_1 = 0.24\text{h}$ ，再经过 $t_2 = 0.31\text{h}$ 水位上升 0.3m ，再经过 t_3

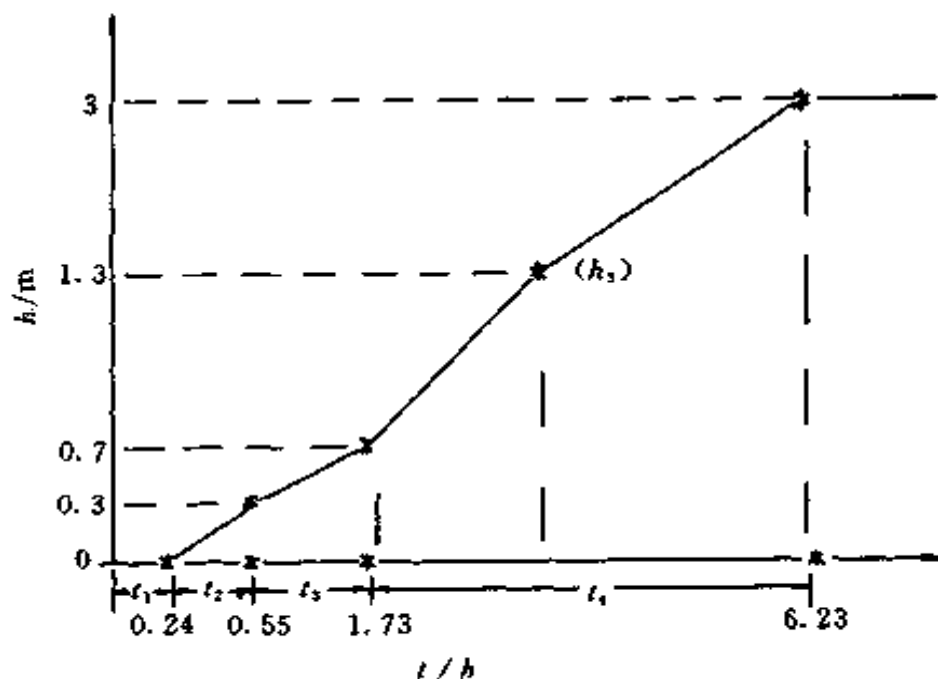


图 3-14 水池液位飞升特性曲线

$t_3 = 1.18\text{h}$ 水位达到 0.7m ，再经过 $t_4 = 4.5\text{h}$ 水位达到 3m ，此时水池开始溢水，在 $t_3 - t_4$ 区间内水塔水箱开始向水池回流水。

过去曾有人推出继电器—接触器—机泵恒速开停控制系统，其水位控制误差很大，机泵开停频繁，电动机启动电流为工作电流的 $4 \sim 7$ 倍，对电网造成很大的电流冲击，同时

也浪费电能。

由于变频器的节电效果显著，人们又提出采用变频器线性比例调节系统，尽管这种方式理论上是可行的，但由于水池底部有泥沙等物，且压力传感器安装位置必须高于水面，给信号的拾取带来很大困难。为解决此问题采用水池—水塔水位复合控制系统，这种控制方式为：在水池水位大偏差范围内分挡控制水池给水电机的频率，当水池水位达到 h_3 时水池给水电机的频率改由水塔液位的 PID 调节信号控制。其原理如图 3-15 所示。工程实践表明，这种复合控制动态响应特性快，超调小，稳态精度较高。

2. 系统构成

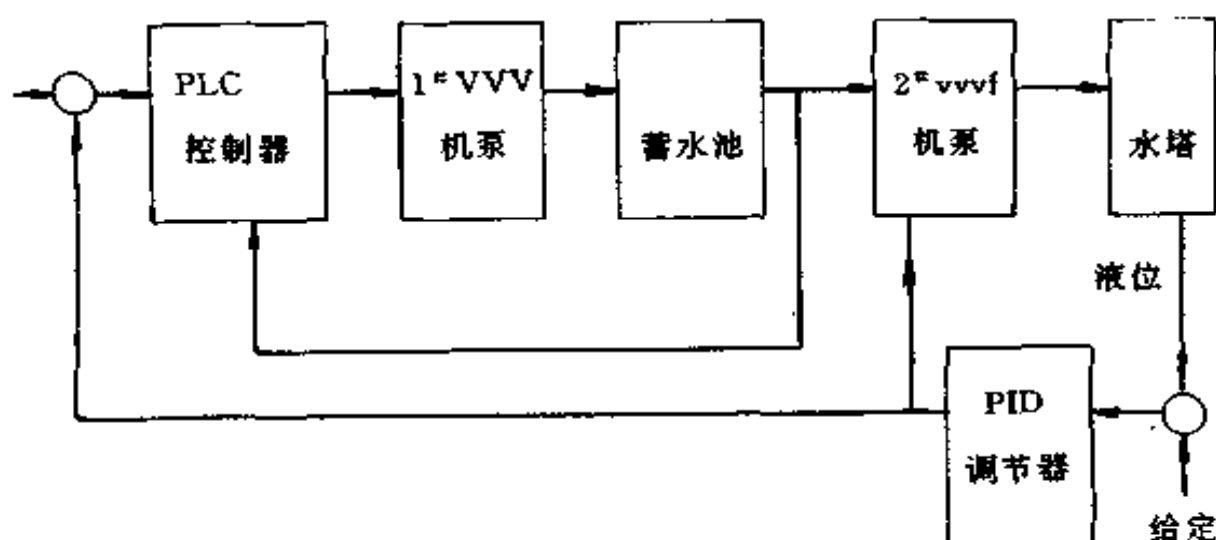


图 3-15 水池—水塔水位复合控制原理框图

本系统由 PLC、PID 调节器 (DTL)、接点式液位传感器、DBY 压力传感器、VVVF 电动机变频调速器和电气控制电路组成，如图 3-16 所示。水池液位控制软件流程框图如图 3-17 所示。

1) 液位传感器

水池液位的液位传感器为全封闭全隔离磁控触点开关，

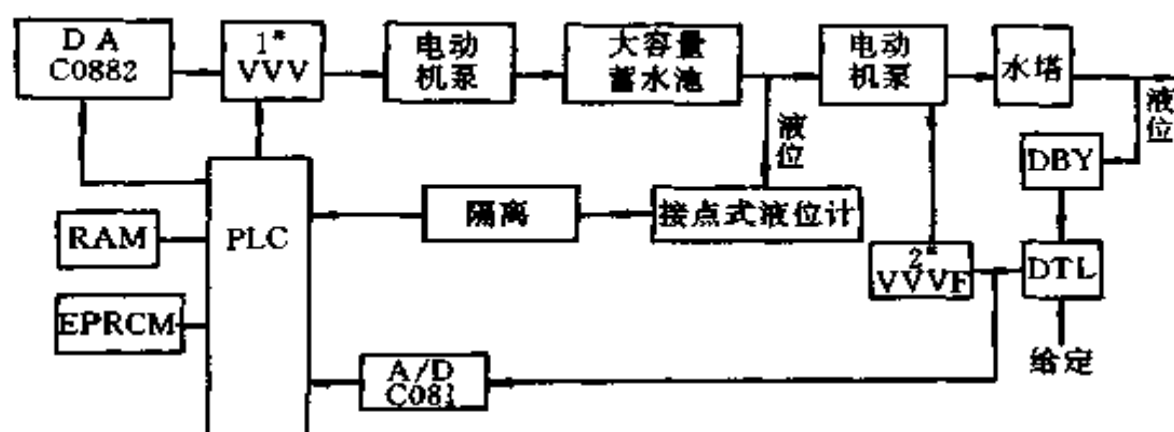


图 3-16 水位控制电气系统

对水位进行采样，共 4 个接点。水池底部定义为 COM，“0”，向上量 300mm 为接点 1 是最低水位，再增加 400mm 为接点 2，再增加 600mm 为接点 3，再增加 300mm 为接点 4 是最高水位。

水塔液位采用 DBY 型压力传感器，安装在塔上，量程范围 0 ~ 5kgf/cm，输出信号 4 ~ 20mA，经 DTL 调节器处理后，控制 2# 变频器。

2) 变频器

水池注水电动机用 MF-110K-380 SANKEN 通用型全数字式变频器，驱动 110kW 电动机，内有 16 位 CPU，

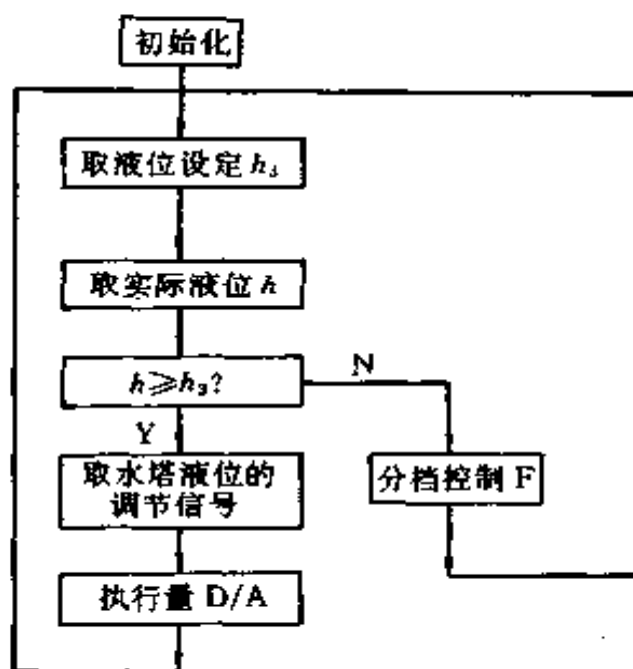


图 3-17 水池液位控制
软件流程框图

GTR, SPWM 输出。变频器输出频率设定由外部控制信号 (4~20mA) 决定。程序设定 CD01 = 1, CD04 = 1。该变频器为交—直—交型。

变频器工作原理为：二极管整流桥将输入电压整成直流，电容滤波，通过控制大功率晶体管 (GTR) 的基极，使各组 GTR 依次导通，各相逆变输出一类似正弦波。CPU 存储器内存有已固化程序，控制脉冲分配电路向 GTR 的驱动电路发触发脉冲，控制 GTR 导通，CPU 同时还检测滤波电容上的电压，及变频输出的电流 (VVVF 输出端有两个电流互感器)，如果信号超过设定值，CPU 就控制相应的保护回路动作，并使变频器面板上的警报灯亮，同时显示屏上显示警报的类别。

水塔上水电动机变频器采用 MF-45K-380 SANKEN 通用型全数字式变频器，驱动 37kW 电动机，内有 16 位 CPU, GTR, SPWM 输出，变频器输出频率设定由液位信号经 DTL 调节器发出的控制信号 (4~20mA,) 决定，程序设定 CD01 = 1。

3) 液位控制器

水塔液位控制器采用 DTL 调节器，经动态参数法整定 PID 参数如下：

$$\delta = 80\%, T_i = 280s, T_d = 70s,$$

液位控制给定 4.5m(18.4mA)

水池液位采用可编程控制器 (PLC)，本系统选用日本产 OMRON C20P 型。其控制程序要点为：

最高水位 J1 = 4XK J2 = 3XK J3 = 2XK

最低水位 J4 = 1XK 启动 J5 = Q 停车 J6 = T

报警 J7 = 0503 + FCCOM 0002 = J5

0003 = J6 0004 = J1

0005 = J2 0006 = J3 0007 = J4

输入设置: 0002 = Q 0003 = T 0004 = 4XK

0005 = 3XK 0006 = 2XK 0007 = 1XK

输出设置: 变频器正转控制 FR = 0500

第二速度控制 2DF = 0501 第三速度控制 3DF = 0502

第四速度控制 4DF = 0501 × 0502

变频器报警控制 C7 = 0503 + FCCOM

根据自适应原理, 对不同的水位, 输出不同的适当频率, 并根据最高水位变化率确定最优频率, 使系统实现最优控制, 节点信号由 PLC 编程分档控制 1# 变频器输出频率。

开机时第一频率 $f_1 = 50\text{Hz}$, 当达到最低水位 0.3m 时, 1XK 接通, 选择第二频率 2DF = 0501 与 COM 短路, 此时 $f_2 = 45\text{Hz}$ 。当水位达到 0.7m 时, 2XK 接通, 此时 3DF = 0502 与 COM 短接, 此时选择第三频率 $f_3 = 35\text{Hz}$ 。当水位达到 $h_3 = 1.3\text{m}$ 时, 水池注水变频器的频率由水塔液位控制, 水塔液位的 PID 调节信号, 经 A/D 转换后送 PLC 编程, 再经 D/A 转换后送变频器 IRF 端子。

当水池水位达到 4XK 时, 选择第四频率, 此时 2DF 与 COM、3DF 与 COM 同时短接, $f_4 = 0\text{Hz}$, 1# 电机停转。

4) 水池液位显示器

水池液位显示器是一种能够显示液位高低、在液位不正常时能够自动报警的自动化仪表。把它与传感器相联接, 根据传感器的信号, 用四个发光二极管 (左边) 的亮与灭来模拟显示水池液位的高低, 并且在极高和极低水位, 可用右边的发光二极管的闪烁来报警, 从而可以较直观观察水池水位, 如图 3-18 所示。

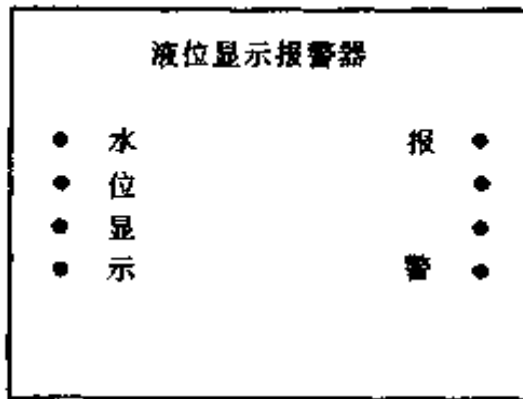


图 3-18 水位显示器示意图

3. 操作方法

系统投用步骤：先启动 1[#] 机泵为水池上水，当水池液位大于 0.7m 时，再启动 2[#] 机泵。液位控制先投水塔液位自动控制，再投水池液位自动控制。

1) 水池液位自动控制

在没有异常情况时，系统应工作在自动控制状态，这时操作人员应根据如下步骤操作。

(1) 系统启动。确认水塔液位已处于自动控制状态，然后按下列顺序操作：

- ① 闭合变压器开关。
- ② 确认水位显示器、1[#] 变频器和 PLC 都已接通电源。
- ③ 确认 1[#] 变频器处于自动控制状态。
- ④ 确认 PLC 的 I/O 单元连接方向设定开关打在“RUN”位置上。

⑤ 按下 1[#] 变频器启动按钮 Q，这时系统自动控制水位。

(2) 系统停车。若遇到故障或特殊情况时，可按下列顺序操作：

- ① 按下 T 按钮。
- ② 断开变压器开关。

2) 手动控制

在非常情况下，可能不需要自动控制，这时系统应切换到手动控制，即将变频器改为面板操作。具体步骤如下：

(1) 系统启动。按下列顺序操作：

①如在自动控制状态下，直接改为手动控制，则先按停止按钮 T。

②按变频器操作面板上的设定键，将 CD40 单元内容变为 0，并置入。

③再按设定键将 CD04 单元内容变为 0，并置入。

④按正转键，系统便会在手动状态下启动。

(2) 停车：按变频器面板上的停止键，便可实现停车。
特别指出：

①手动控制方式运行时的工作顺序可以通过改变 CD00 单元的频率值实现。

②在手动改自动控制时，必须先按停车键，使变频器停车后，再将 CD04 单元内容改为 1，并置入。

③如果需要锁定参数，请将 CD40 单元内容变为 1。

4. 技术经济分析

水池水塔供水控制系统改造前，年耗电 104 万度，年耗水 160 万吨。电费（按计划价 0.425 元/度）44.2 万元，水费（按实收价 0.46 元/吨）73.6 万元。改造后，1995 年耗电 83.2 万度，耗水 87.6 万吨。电费 35.36 万元，水费 40.296 万元。共计节约 $8.84 + 38.24 = 39.08$ （万元）。该系统改造投资 24 万元，8 个月即可收回投资。

此类控制系统具有以下明显的特点：

(1) 在系统设计时对水池液位大范围内进行分档控制，不需复杂的数学计算，只要求掌握现场操作人员的经验或操作数据。

(2) 系统的控制精度高，动态响应快，特别适应于大惯性、长滞后系统的控制。

(3) 可靠性高, 抗干扰能力强。

(4) 变速范围宽, 在 $20 \sim 1450$ r/min 范围内可作无级调速。

(5) 效率高, 损耗小, 节能效果显著, 与恒速电动机系统相比节电率一般大于 20%。

(6) 具有多种保护功能和故障自诊断, 可保证安全运行, 工人容易掌握, 便于真正实现自动化控制。

第四章 变频器的日常维护

第一节 定期检查和测试

末极大功率器件采用 IGBT 的变频器很少需要例行检查，如果安装合理，保持环境干净，温度不高和环境空气干燥，变频调速器的功能能会很持久，定期检查主要检查电动机是否照常运转，冷却系统是否正常，电气连接端子的松紧和端子触点是否过热变色等迹象，检查之前，先关断交流主电源并确认充电指示灯（CHARGE）熄灭后方可进行。

测试时的测定部位如图 4-1 所示。由于逆变器的输入、输出电路的电压和电流中含有高次谐波，因此，需要选择检测仪器的种类。使用工频用测定仪器时，请用表 4-1 所示测定仪器进行测示。

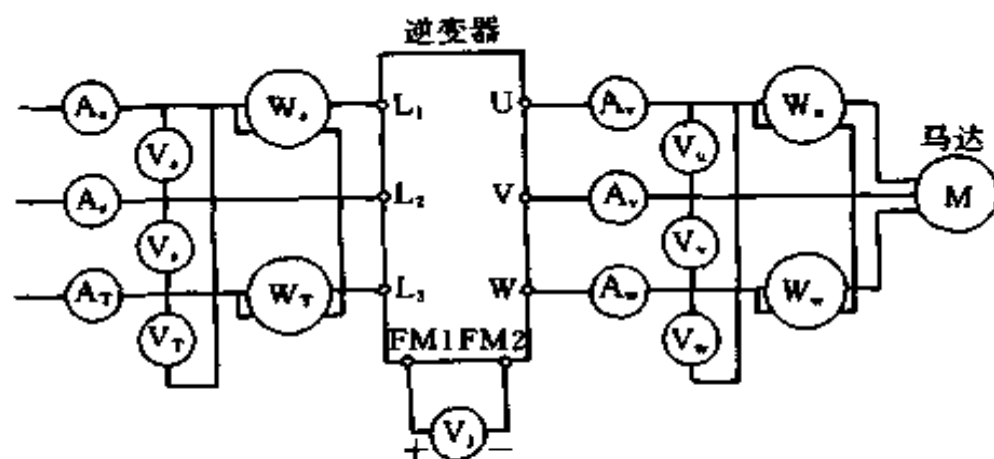





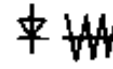





图 4-1 主电路测试部位图

表 4-1 测 定 仪 器

项 目	输入(电源)侧		输出(马达)侧		输出频率 (FMI、FM2) (端子部)
	电压波形 	电流波形 	电压波形 	电流波形 	
仪器名称	电流表 A _{R.S.T}	电压表 V _{R.S.T}	电流表 A _{U.V.W}	电压表 V _{U.V.W}	直流电压表 V _I
仪器种类	可动铁片形	整流形或 可动铁片形	可动铁片形	整流形	可动线圈形
仪器记号					
注 意 事 项	由于负载、电源电压而失去平衡,因此,应测定三相	带 AC 电抗器时为电抗器一次侧	包含高次谐波电流,最好使用电力计法	含有众多高次谐波成分	必须确认测定规格(标准)

一、电流测试

1. 输入电流

虽然为 50/60Hz 电路，但是由于含有高次谐波，所以应使用可动铁片式（电磁式）电流计。逆变器的输入电流容易平衡，因此，有必要通过三相测定后的平均值进行判断。另外，因含有高次谐波成分，在使用 CT 时，请使用相对负荷 VA，具有 20% 左右裕量的 CT。图 4-2 为输入电流测定法和电流波形图。

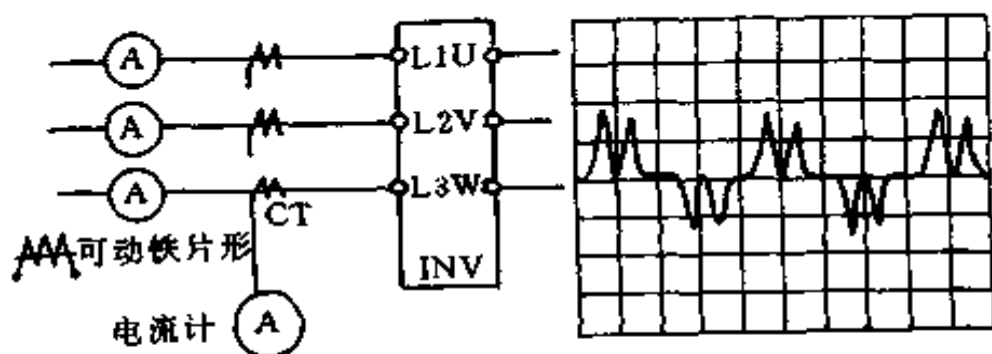


图 4-2 输入电流测定法和电流波形

2. 输出电流

逆变器的输出电流多为含高次谐波成分的近似正弦波，因此，请使用可动铁片式（电磁式）电流表。使用电平测定仪时，平均值显示型的误差较大，请使用有效值显示型。使用 CT 时，低周波范围内误差较大，所以应使用测范围较大的表。图 4-3 为输出电流测定法和波形图。

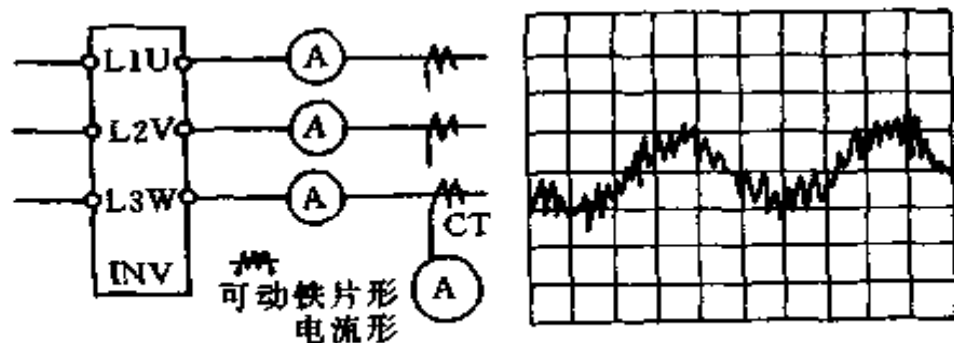


图 4-3 输出电流测定法和电流波形

二、电压测试

1. 输入电压

由于是 50/60Hz 电路，即使普通测定器也可以准确地进行测定。在变换器输入部分使用电抗器时，请测定电抗器的一次侧及二次侧。图 4-4 为输入电压测定法及波形图。

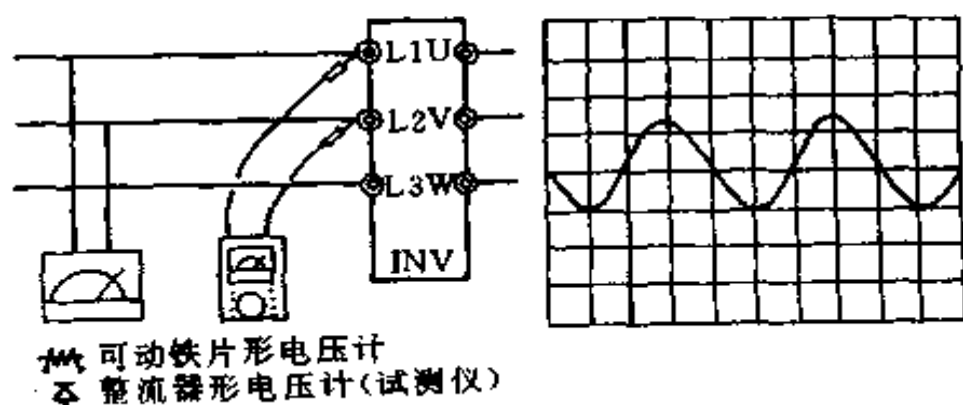


图 4-4 输入电压测定法和电压波形

2. 输出电压

输出电压近似正弦波由脉冲构成，因此，请使用能够比较正确地表示基波有效值的整流型仪表。使用可动铁片式（电磁式）电压表时，显示值比实际基波值稍高。另外，使用 PT 时，应采用 2 倍以上的额定电压，使其不发生磁饱和。使用测试仪器时，请务必采用有效值显示型的仪表。图 4-5 为输出电压测定法及波形图。

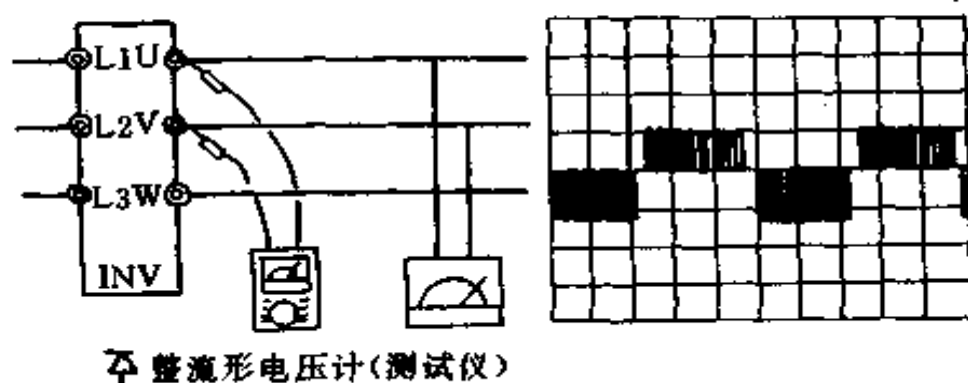


图 4-5 输出电压测定法和电压波形

三、功率测试

1. 输入电功率

使用电动瓦特表计量，采用二瓦特表法测定。当由于各相电流不平衡时，最好用三瓦特表法计量。

2. 输出电功率

使用电动瓦特表计量，采用二电力计法测定。

3. 频率测定

将频率输出端子 FM1—FM2 之间设定为采用模拟仪器方式，然后使用可动线圈型电压表进行测定。用 DC10V 显示最高频率。出厂时设定为 FM1—FM2 间采用模拟仪器方式，最高频率 60Hz，其对应指示值为 DC10V。

四、高阻表测试

在日常检测时，请使用高阻范围测试仪测定电阻值，保存好趋向数据。当电阻变化大时，在定期检测中应施行绝缘试验。进行绝缘试验的时候，请遵照下列要领。如发生错误则有可能造成逆变器损坏。因此，必须充分注意。

1. 主电路

400V 系列逆变器使用 DC500V 系列的兆欧表，250V 系列逆变器使用 DC250V 兆欧表进行绝缘电阻试验。使用兆欧表进行逆变器测试时，必须拆卸下接在逆变器输入侧的浪涌电压吸收器。

(1) 拆卸下逆变器的所有端子（包括控制电路端子）的外部连接线，进行各部位清扫，如图 4-6 所示，用共通线连接所有的主电路接线端子。

(2) 仅在主电路共通线与接地（接地端子 E (G)）之间进行绝缘电阻试验。

(3) 绝缘电阻表的指针指示 $5M\Omega$ 以上时为正常。

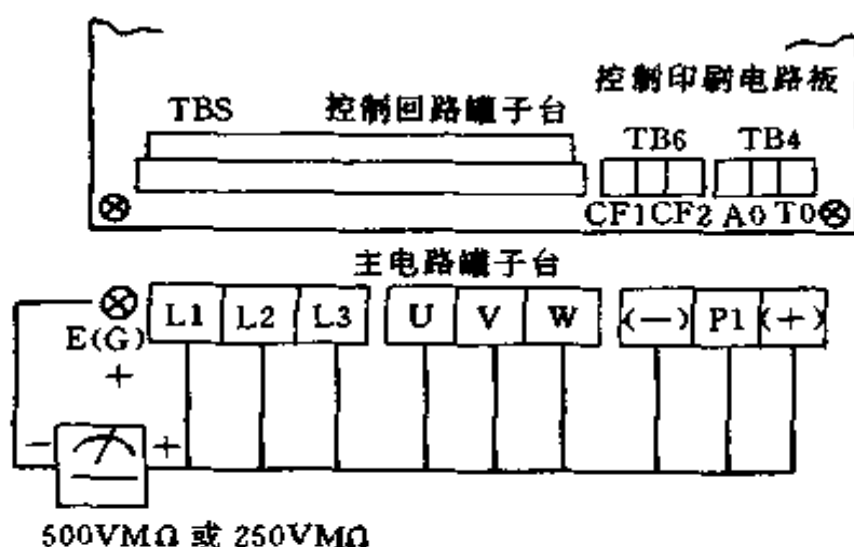


图 4-6 绝缘电阻试验要领

2. 控制回路

拆卸下控制回路端子的外部连接线，进行对地导通试验。试验时应使用高电阻范围测试仪，不要使用兆欧表或蜂鸣器。

3. 外部主电路和顺序控制电路

在进行外部电路的耐压试验或绝缘电阻试验时，应拆卸下逆变器的所有端子，然后在逆变器外加试验电压。

第二节 故障显示与检查

各种品牌的变频器普遍有相似的完善的故障保护功能，如果运行中发生故障，保护电路将断开调速器的输出，电动机失速停止，同时输出故障信号。表 4-2~表 4-5 以日本住友重机公司 (Sumitomo) 所产的 AF-3000 系列变频器为例，给出了故障显示与检查情况的说明。

表 4-2 故障显示及查找

故障显示		含 义	可能原因/处理措施
数字式 操作板	LED 显示		
		DS1 绿	DS2 红
过电流 OC	⊙	○	<p>调速器输出电流 > 200% 额定电流 (瞬时动作)</p> <ul style="list-style-type: none"> · 输出端短路; 负载惯性台大; · 加/减设定时间台短 (代码 No.09~12); · 特殊电动机用途; · 电动机失速时启动; · 电动机电容大于调速器; · 输出端电磁接触器动作, 找到原因后复位
过电压 OV	●	⊙	<p>主电路直流电压超过 410V (对 200V 级别) 或 820V (对 400V 级别), 是由电动机逆变能量产生的 (超过过压保护值)</p> <ul style="list-style-type: none"> · 减速时间不够 (No.10, 12); · 负向加载, 检查避免负向载荷, 增加减速时间或接一制动电阻; · 检查电源电压, 以符合马达标示数值
欠电压 UV1	●	○	<p>主控制直流电压小于 210V (对 200V 三相系列) 或 170V (对 200V 单相系列) 或 420V (对 400V 三相系列)</p> <ul style="list-style-type: none"> · 输入电压降低; · 相线开路或瞬时停电等; · 检查输入电压, 主电源连线是否正确, 接线螺钉是否拧紧
散热片 过热 OH	○	⊙	<p>调速器过载或换流空气温度升高, 散热扇转速下降</p> <ul style="list-style-type: none"> · 负载过重; · 电压/频率特性不恰当; · 启动时间太短; · 换流空气 > 45℃, 修正负载, 修改 U/f 曲线 (No.02~08), 降低换流空气温度, 检查风扇

续表

故障显示		含 义	可能原因/处理措施	
数字式 操作板	LED 显示			
	DS1 绿			DS2 红
电机 过载 OL1	○	⊙	由于电子元件过热, 电机过载保护电路动作 ·检查负载大小, 操作方式或电压/频率设定值(No.02~08), 将电机铭牌上的额定电流输入到代码 No.19	
调速器 过载 OL2	○	⊙	电器过热引起调速器过载保护电路动作 检查负载大小, 操作方式或电压/频率设定值(No.02~08), 检查调速器电容	
转矩过大 OL3	○	⊙	由于机器故障和过载电机电流超过设定值 查机器使用状况, 消除故障或增加电流允许值到机器允许上限(No.41)	
外部故障 EF3-5	⊙	⊙	调速器从外部电路输入了错误信号 检查外围设备	
控制功能故障 CPFOO	○	○	调速器丧失控制功能 关断电源再打开, 或使用数字板初始化控制常数, 如仍无法消除, 则更换调速器	
	●	●		
数字指示 全熄	●	●	·主电路熔断(只对400V级别) ·控制电源故障 ·硬件故障 更换调速器	

注: (1) LED 显示: ○—亮; ⊙—闪烁; ●—熄。

(2) 对于过转矩显示, 可以通过 No.37 设定故障显示及报警显示。

(3) EF3 表示由多能触点输入端 RT 输入的故障, EF4 从输入端 ES 来, EF5 则从 DF 来。

(4) 对于控制功能故障, 详细参阅说明书中 CPF 显示细节。

表 4-3 控制功能故障显示的详情

故障显示			含 义	处 理 措 施
数字板	LED 显示			
	DS1 绿	DS2 红		
CPF-00	●	●	初始化记忆故障	关断电源再闭合, 若故障仍旧, 换调速器
CPF-01	●	●	ROM 故障	关断电源再闭合, 若故障仍旧, 换调速器
CPF-04	○	○	参数值故障	记录所有数据, 重新关断电源再闭合, 若故障仍旧, 换调速器
CPF-05	○	○	模/数转换器故障	

注: LED 显示: ●—熄; ○—亮。

表 4-4 报警类型与含义

报警显示			含 义	可能原因/处理方法
数 字 面 板	LED 显示			
	DS1 绿	DS2 红		
(同时按下正转、反转键) 闪烁	●	⊙	正、反转指令同时闭合超过 500ms, 调速器按 No.01, 设定值停止	检查控制接线
(外部 Base-block) 闪烁	●	⊙	外部暂停信号输入, 调速输出关断 (外部暂停信号消失后, 操作启动)	检查控制接线
(主电路欠电压) 闪烁	●	⊙	主电路直流电压将至监测水平, 调速器停止工作	检查电源电压、主电路接线是否正确、螺钉是否拧紧
过转矩检测 闪烁	●	⊙	由于机器故障或过载, 电机超过设定值, 调速器继续工作	检查机器使用状态, 消除故障, 或通过 No.41 将电流设定值增至机器允许值

续表

报警显示		含 义	可能原因/处理方法
数 字 面 板	LED 显示		
		DS1 绿 DS2 红	
过电压闪烁	●	⊙	主电路直流电压高于监测值, 调速器停止输出 检查电源电压
过热闪烁	●	⊙	换热空气温度高, 调速器停止输出 检查换热空气温度

注: (1) LED 显示: ⊙—闪; ●—熄。

(2) 当检测到过转矩时, 通过 No.40 可以设定为故障显示或报警显示。

表 4-5 电机故障时的检查要点与处理措施

故 障	检查要点	处理措施
电机不转	电源是否连至 R.S.T. 端 (充电指示灯是否亮)	<ul style="list-style-type: none"> · 闭合电源 · 断开电源再闭合 · 查供电电压 · 接线端螺钉是否拧紧
电机不转	输出端 U.V.W. 有电压	断开电源再闭合
	负载过重 (电机锁定)	减轻负载 (解除锁定)
	故障显示	据显示的故障情况检查
	正转或反转指令已输入	修正接线
	频率设定电压已输入	<ul style="list-style-type: none"> · 修正接线 · 检查频率设定电压
	操作方式设定正确	用数操板检查操作方式设定 (代码: No.01)
电机反向	输出接线端 U.V.W. 正确	与电机相序 U.V.W. 对照
	正转信号连线是否正确	修正连线

续表

故障	检查要点	处理措施
电机运转,但不能调速	频率设定电路是否正确	修正连线
	操作方式设定是否正确	用数操板查 No.01 操作方式选择
	负载过重	减轻负载
电机转速太高(低)	电机规格(极对数、电压)是否正确	检查技术规范和铭牌
	最高频率设定正确否	检查 No.02 最高频率设定值
	电机接线端电压不降低(用整流式电压标)	检查 No.02 - 08 V/8 特性设定值
电机转速不稳	负载过重	减轻负载
	负载变化率太大	· 减小负载变化率 · 增加调速器和电机容量
	是否三相电源	若为单相电源, 增加一个交流电抗器

参 考 文 献

- 1 吕砚山主编. 常用电工电子技术手册. 北京: 化学工业出版社, 1994
- 2 R Shimamura, H Uchino. A Microcomputer - based High Power Cycloconverter - fed Induction Motor Drive. IEEE - IAS Conference Record - Annual meeting. 1982
- 3 马小亮. 大功率交-交变频交流调速及矢量控制. 北京: 机械工业出版社, 1992