

第一讲 百年期待说变频

朝思暮想近百年 开关器件最关键
变频变压须简便 主体电路记心间

张燕宾

1 朝思暮想近百年

三相交流异步电动机发明于1889年。一经问世，便以其结构简单坚固、价格低廉而迅速地在电力拖动领域独占鳌头。

异步电动机的转速公式是： $n_M = (60 \cdot f / p) (1 - s)$ (1)

式中 n_M 是电动机的转速； f 是电流频率； p 是磁极对数； s 是转差率： $s = (n_0 - n_M) / n_0$ (2)

式中 n_0 是旋转磁场的转速，即同步转速，公式是：

$n_0 = 60f / p$ (3)

可见，变频可以调速，是异步电动机“与生俱来”的。

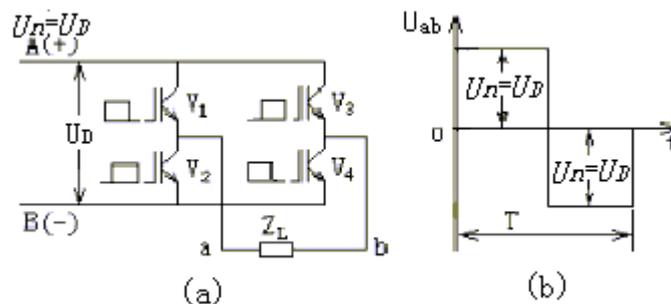
可以说，实现变频调速，是人们长期以来孜孜以求的愿望。然而，直到20世纪80年代，变频调速技术才达到能够普及推广的阶段。中间相隔了近一个世纪！是什么原因使变频调速技术如此姗姗来迟呢？

2 开关器件最关键

目前应用得最为广泛的是交—直—交变频器。它的工作过程是：先将频率固定的三相(或单相)交流电整流成直流电，再把直流电“逆变”成频率任意可调的三相交流电，其中的关键技术是“逆变”。

2.1 逆变的基本原理

单相逆变桥的构成及工作过程如图1所示。



(a) 单相逆变桥 (b) 电压波形

图1 单相逆变桥及其波形图

首先，令 V_1 、 V_4 导通， V_2 、 V_3 截止，则负载 Z_L 上所得电压为a“+”、b“-”，设这时的电压为“+”；又令 V_1 、 V_4 截止， V_2 、 V_3 导通，则负载 Z_L 上所得电压为a“-”、b“+”，设这时的电压为“-”。这两种状态如能不断地反复交替进行，则负载 Z_L 上所得到的便是交变电压了。这就是由直流变为交流的“逆变”过程。

三相逆变桥的工作过程与单相逆变桥相同，只要注意三相之间互隔 $T/3$ 就可

以了。

2.2 逆变器件必须满足的条件

由上述，逆变桥是实现变频的关键部分，它由六个开关器件构成。这些开关器件必须满足：能承受足够大的电压和电流；允许长时间频繁地接通和关断；接通和关断的控制必须十分方便。

显然，手动的刀开关和机械式的接触器都无法满足上述条件。

2.3 电力电子技术的进步为变频调速技术奠定了基础

(1) 起步始于晶闸管

20世纪60年代，大功率晶闸管（SCR）的出现，使变频调速开始得到了实施，出现了希望。但由于晶闸管在直流电路内自身不能关断，故用于逆变的主电路与控制电路都较复杂，工作不够可靠，性能也不够完善，所以，未能达到普及推广的阶段。

(2) 普及归功于GTR

20世纪70年代，大功率晶体管（GTR）与可关断晶闸管（GTO）相继问世，把变频调速推向了实用阶段，于80年代初开始逐渐推广。

GTR是大功率的复合晶体管（达林顿管），控制方便。从而大大简化了控制电路，也提高了工作可靠性，使变频调速技术达到了能够普及的阶段。但由于GTR的开关频率较低（ $\leq 2\text{kHz}$ ），导致变频器有以下弱点：电流波形较差；电动机的转矩略小；电动机内的电磁噪声较大；故障率较高。

(3) 提高全靠IGBT

20世纪80年代，绝缘栅晶体管（IGBT）的开发成功并进入实用阶段，使变频器在许多方面提高了一大步。

IGBT的主体部分与GTR类似，但控制部分却与场效应管类似。故控制功率大为减小，开关频率也提高了一个数量级（ $\leq 20\text{kHz}$ ），从而使变频器具有以下优点：电流波形大为改善，电动机的转矩增大；电磁噪声极小；增强了对常见故障（过电流、过电压、瞬间断电等）的自处理能力，故障率大为减少；变频器自身的损耗也大为减少。

可以说，IGBT为变频调速的迅速普及和进一步提高奠定了基础。

3 变频变压须简便

3.1 能量传递靠磁通

异步电动机的能量传递过程是：定子侧从电源吸取电能，并将它转换成磁场能（建立旋转磁场），传递给转子；转子侧则将定子侧传递过来的电磁能转换成机械能，并从转子轴上输出（即拖动产生机械旋转）。

在建立旋转磁场的过程中，能量转换过程主要体现在电动势平衡方程上：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 \quad (4)$$

式中 r_1 为每相定子绕组的电阻； X_1 为每相定子绕组的漏磁电抗。

式(4)表明，电源电压 U_1 主要用于克服反电动势 E_1 （即建立磁场），同时也要克服定子绕组的电阻和漏磁电抗上的电压降 $I_1 r_1$ 和 $I_1 X_1$ 。

反电动势 E_1 的有效值由(5)式计算：

$$E_1 = 4.44 k_e N_1 \Phi_m \quad (5)$$

式中， k_e 为与绕组结构有关的常数； N_1 为每相定子绕组的匝数； Φ_m 为旋转磁场每个极下的磁通量。式(5)表明，反电动势 E_1 的大小直接反映了建立磁场的情况。

3.2 磁通大小不能动

(1) 磁通减小

任何电动机中, 电磁转矩的大小都与转子电流和磁通的乘积成正比。电动机允许电流的大小要受到发热的限制, 是不能增大的。所以, 如果磁通减小, 必将使电磁转矩减小, 电动机的带负载能力也就减小。所以, 磁通不能减小。

(2) 磁通增大

磁通增大, 将使电动机的磁路饱和。磁通波形变成平顶波, 而励磁电流的波形将是一个具有很高峰值的尖顶波。所以, 磁通也不能增大。

(3) 结论

异步电动机在工作过程中, 要求磁路内的磁通 Φ_m 保持不变, 即 $\Phi_m = \text{const}$ 。

3.3 VVVF出了笼

(1) 频率下降出现的新问题

① 从能量角度看 频率 f_x (f_x 为调节后的频率) 下降的最终结果, 是电动机轴上的转速 n_M 下降了, 从而, 输出功率 P_2 也下降了。

如果输入功率 P_1 不变的话 (电压 U_1 不变、最大允许电流 I_1 不变), 则作为中间环节的电磁功率 P_M 必将过剩, 导致磁路的饱和。

② 从电动势平衡的角度看 由式(5)知, 频率 f_x 下降时, 反电动势 E_1 也下降。又由式(4), E_1 的减小将使电流 I_1 增大。但由于负载转矩未变, 电流 I_1 中的转矩分量 I_2' 也未变, 于是励磁电流 I_0 增大, 导致磁路饱和。

总之, 如果简单地降低频率, 将破坏 $\Phi_m = \text{const}$ 的条件。

(2) 保持 Φ_m 不变的方法

① 准确方法 因为:

$$\Phi_m = \frac{E_{1x}}{4.44k_s f_x N}$$

式中, E_{1x} 是与频率 f_x 对应的反电动势。所以, 保持 Φ_m 不变的准确方法就是使反电动势 E_{1x} 与频率 f_x 同步升、降。即满足

$$\frac{E_{1x}}{f_x} = \text{const}$$

② 变通方法 由于 E_{1x} 的大小无法从外部加以控制, 所以, 根据电源电压主要与反电动势相平衡 ($U_{1x} \approx E_{1x}$) 的特点, 作为一种变通手段, 保持主磁通 Φ_m 不变的实际方法是: 使电压 U_{1x} 与频率 f_x 同步下降来近似地代替反电动势 E_{1x} 与频率 f_x 的同步下降:

$$\frac{U_{1x}}{f_x} = \text{const}$$

所以, 变频的同时也必须变压, 这也就是变频器常被简称为VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 的原因。

3.4 调压最好用脉冲

要实现VVVF, 可以考虑的方法有:

(1) PAM (脉幅调制)

这是最容易想到的办法, 即在频率下降的同时, 使直流电压也随着下降, 如

图2所示。

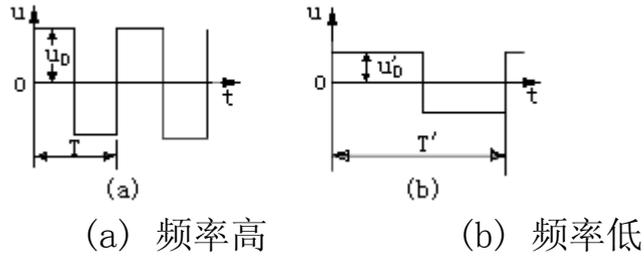


图2 脉幅调制图

实施PAM要同时控制整流和逆变两个部分，两个部分之间的协调也比较困难，故线路比较复杂。

(2) PWM (脉宽调制)

通过调节脉冲宽度和各脉冲间的“占空比”来调节平均电压，如图3所示。PWM的优点是不必控制直流侧，因而大大简化了电路。但是，电流的谐波分量将是很大的。

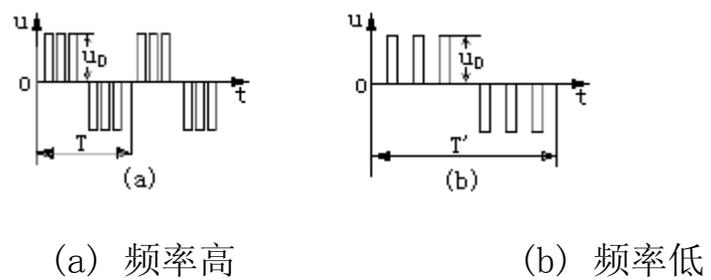


图3 脉宽调制图

(3) SPWM (正弦脉宽调制)

如果脉冲宽度和占空比的大小按正弦规律分布的话，便是正弦脉宽调制 (SPWM)，如图4所示。

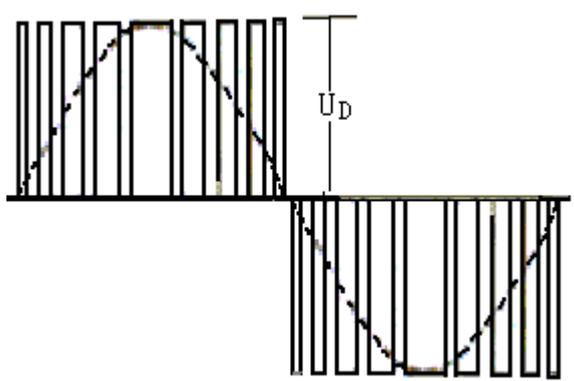


图4 正弦脉宽调制图

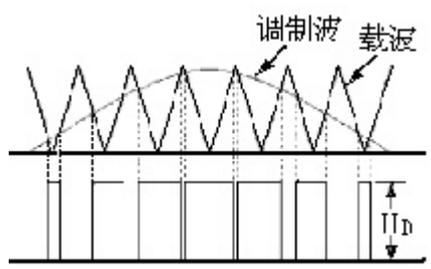


图5 单极性调制

SPWM的显著优点是：由于电动机的绕组具有电感性，因此，尽管电压是由一系列的脉冲构成的，但通入电动机的电流却十分逼近于正弦波。其产生方法如下：

脉冲系列中各脉冲的上升与下降是由正弦波和三角波的交点来决定的，以单极性调制为例，如图5所示。变频时：① 正弦波的频率随给定频率而变；三角波的频率原则上也跟着一起变化，但变化规律在不同品牌的变频器中不尽

相同。② 正弦波的振幅按比值 U_{1X}/ω_X 和给定频率 ω_X 同时变化；三角波的振幅则不变。

实际变频器中，更多地使用双极性调制方式，如图6所示。

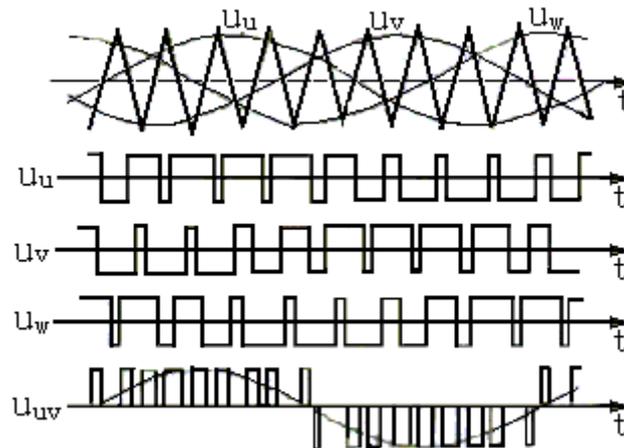


图6 双极性SPWM调制图

要具体地实施SPWM，必须实时地求出各相的正弦波与三角波的交点，并使逆变管按各交点所规定的时刻有序地导通和截止。这样的实时计算，只有在微机技术高度发达的20世纪80年代，才有可能。

4 主体电路记心间

4.1 交-直变换不普通

交-直变换电路就是整流和滤波电路，其构成如图7所示。

(1) 全波整流电路 由图7中的 $VD_1 \sim VD_6$ 构成。

(2) 滤波及限流电路

① 滤波电路 由于受到电解电容的电容量和耐压能力的限制，滤波电路通常由若干个电容器并联成一组，又由两个电容器组串联而成，如图7中的 C_1 和 C_2 。因为电解电容器的电容量有较大的离散性，故电容器组 C_1 和 C_2 的电容量常不能完全相等，这将使它们承受的电压 U_{D1} 和 U_{D2} 不相等。为了使 U_{D1} 和 U_{D2} 相等，在 C_1 和 C_2 旁各并联一个阻值相等的均压电阻 R_{C1} 和 R_{C2} 。

② 限流电路 变频器在接入电源之前，滤波电容上的直流电压 $U_D=0$ 。因此，当变频器刚接入电源的瞬间，将有一个很大的冲击电流经整流桥流向滤波电容，使整流桥可能因此而受到损坏。图7中的限流电阻 R_L 就是为了削弱该冲击电流而串接在整流桥和滤波电容之间的。

但限流电阻 R_L 如长期接在电路内，会影响直流电压 U_D 和变频器输出电压的大小。所以，当 U_D 增大到一定程度时，令短路开关 S_L 接通，把 R_L 切出电路。 S_L 大多由晶闸管构成，在容量较小的变频器中，也常由继电器的触点构成。

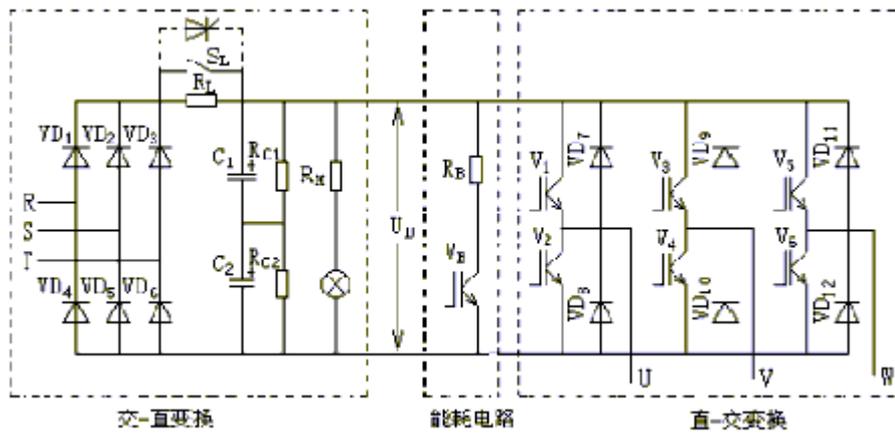


图7 交一直一交变频器的主电路图

4.2 直—交变换要弄懂

(1) 三相逆变桥电路

如图7所示，由开关器件 $V_1 \sim V_6$ 构成的电路，常称逆变桥。

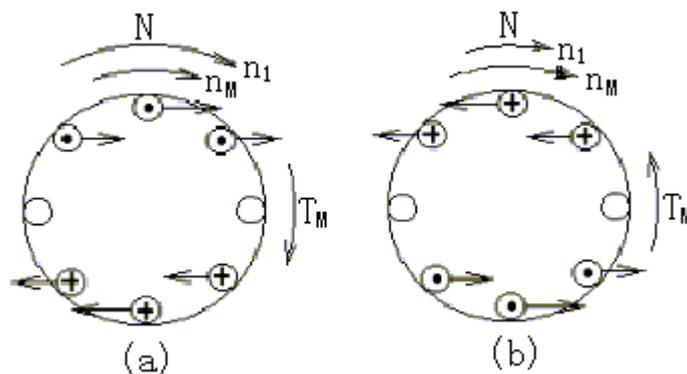
(2) 续流电路

由图7中的 $VD_7 \sim VD_{12}$ 构成。其功能是：① 为电动机绕组的无功电流返回直流电路时提供通路；② 在降速过程中，为电动机的再生电能反馈至直流电路提供通路；③ 为电路的寄生电感在逆变过程中释放能量提供通路。

4.3 制动电路记心中

(1) 能耗制动电路的作用

在变频调速系统中，电动机的降速和停机是通过逐渐减小频率来实现的。这时：



a) 电动机状态 b) 再生状态

图8 电动机的状态图

① 在频率刚减小的瞬间，电动机的同步转速随之下降，而由于机械惯性的原因，电动机的转速未变。当同步转速低于转子转速时，转子电流的相位几乎改变了 180° 。电动机处于再生状态，与此同时，电动机轴上的转矩变成了制动转矩，处于再生制动状态，使电动机的转速迅速下降，如图8所示。

② 电动机再生的电能经图7中的续流二极管（ $VD_7 \sim VD_{12}$ ）全波整流后又反馈到直流电路，由于直流电路的电能无法回输给电网，故直流电压将升高，形成“泵生电压”。过高的直流电压将使变流器件受到损害。因此，当直流

电压超过一定值时, 就要求提供一条放电回路, 将再生的电能消耗掉。

(2) 能耗制动电路的构成

① 制动电阻 图7中的 R_B 即是。其选择方法如下:

一般情况下, R_B 的大小以使制动电流不超过变频器额定电流的一半为宜, 即 $I_B = U_D / R_B \leq I_N / 2$, 从而 $R_B \geq 2U_D / I_N$;

由于 R_B 的工况属于短时工作, 故其标称功率 P_B 可以比长期通电时消耗的功率

小很多, 即 $P_B \geq \alpha_B U_D^2 / R_B$, 式中 α_B 为选用系数, 取值范围约为 $\alpha_B = 0.3 \sim 0.5$, 取决于电动机的容量和工况。通常, 电动机容量较小时取小值, 反之取大值; 制动时间短时取小值, 反之取大值。

② 制动单元 VB 它的功能是在直流回路的电压 U_D 超过规定的限值时, 接通耗能电路, 使直流回路通过 R_B 释放能量。

第二讲 知己知彼探变频

负载“脾气”要摸清 变频本领要心明

张燕宾

1 负载特性要摸清

电力拖动系统是为负载(各类机械)服务的, 不同的负载, 机械特性不同, 电动机在调速以后的机械性能否满足负载机械特性的要求, 是考察拖动系统是否成功的主要标志。负载的机械特性是多种多样的, 归纳起来, 主要有以下三类:

(1) 恒转矩负载(如带式输送机、桥式起重机等)主要特点

$$T_L = \text{Const} \quad (1)$$

$$P_L = \frac{T_L n_L}{9550} \propto n_L \quad (2)$$

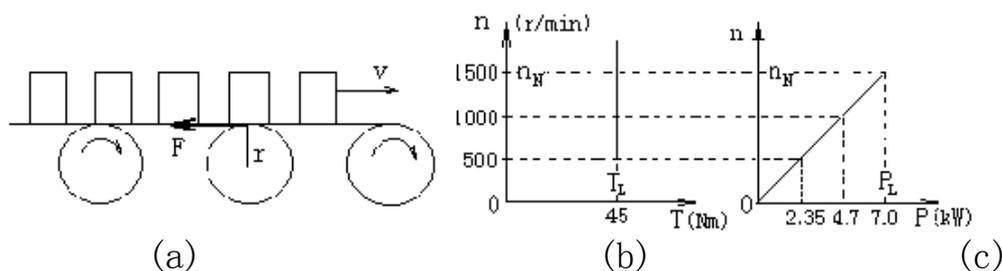


图1 恒转矩负载示例图

如图1所示, 以带式输送机为例, 其负载转矩的大小决定于:

$$T_L = F \cdot r \quad (3)$$

式(3)中, F 是皮带与滚轮之间的磨擦力; r 是滚轮的半径, 两者都和转速的快慢无关, 所以在调节转速的过程中, 转矩 T_L 保持恒定。

(2) 恒功率负载(如各种薄膜的卷取机、金属切削机床的高速区等)主要特点

$$P_L = \text{Const} \tag{4}$$

$$T_L = \frac{9550 P_L}{n_L} \propto \frac{1}{n_L} \tag{5}$$

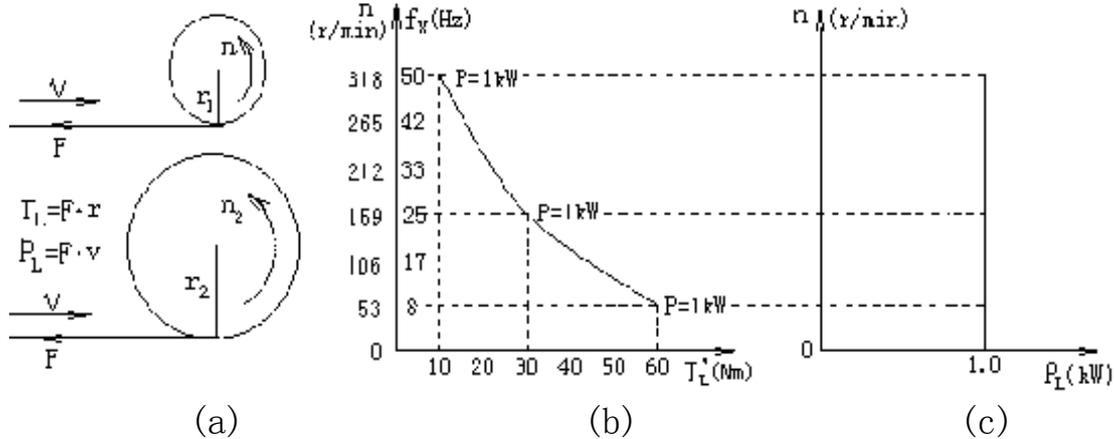


图2 恒功率负载示例图

如图2所示，以薄膜卷取机为例，其负载转矩的大小决定于：

$$T_L = F \cdot r \tag{6}$$

式(6)中，F是被卷物体的张力；r是被卷物的直径。在卷绕过程中，要求线速度v和张力的恒定。因此，拖动系统的功率是恒定的：

$$P_L = F \cdot v = T_L \cdot n / 9550 = \text{Const} \tag{7}$$

但随着卷绕过程的不断进行，被卷物的直径不断加大，负载转矩也不断加大。故：

$$T_L = 9550 \cdot P_L / n \tag{8}$$

即转矩与转速成反比。

(3) 平方律负载主要特点

$$T_L = K_T \cdot n_L^2 \tag{9}$$

$$P_L = K_P \cdot n_L^3 \tag{10}$$

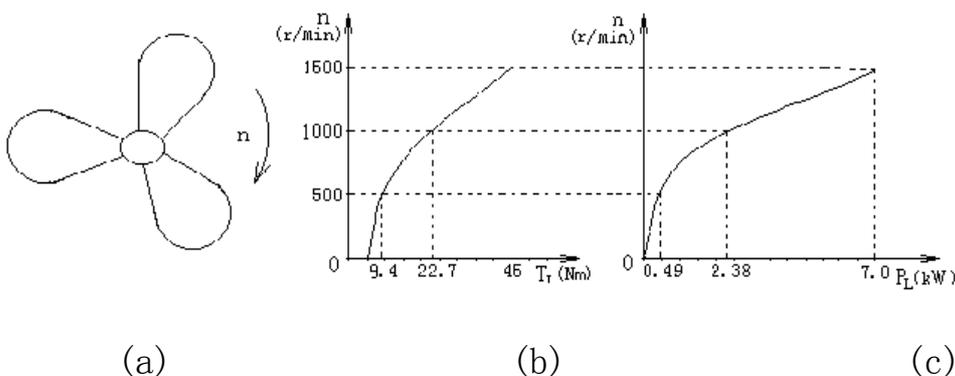


图3 平方率负载示例图

如图3所示，典型例子是风机和水泵。

2 变频本领要心明

2.1 机械特性最重要

异步电动机在变频调速后的机械特性如何, 能否与直流电动机媲美, 是人们特别关注的事情。

(1) 满足 $U/f=Const$ 的机械特性 如图4所示, 异步电动机在满足该条件下的机械特性是: 频率越低, 电动机的临界转矩越小, 带负载能力也越小。显然这样的机械特性是难以和直流调速系统相比的。

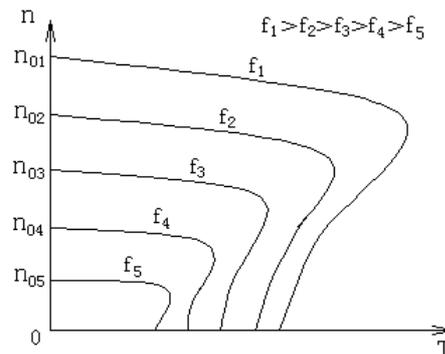


图4 满足 $U/f=Const$ 的机械特性图

(2) 低频时临界转矩减小的原因 从根本上说, 这是用 $U_{1X}/\omega_X=Const$ 近似地代替 $E_{1X}/\omega_X=Const$ 的结果。

① 从能量传递的角度看, 频率 ω_X 下降时, 由于电源电压 U_{1X} 要成正比地下降, 故输入功率 P_{1X} 也成正比地下降。但电动机的允许工作电流仍等于额定电流, 是不变的, 所以铜损 $I_1^2 r_1$ 也是不变的。定子侧铁损的变化也不大, 故总的损失功率几乎不变。于是, 传递到转子的电磁功率 P_M 的下降比例大于输入功率 P_1 的下降比例, 临界转矩 T_{KX} 也随之减少。

② 从电动势平衡的角度看, 当电压 U_{1X} 随频率 ω_X 同步下降时, 阻抗压降 ΔU 却基本不变(额定电流不变), 而反电动势 E_{1X} 所占比例则逐渐减小。从而, 当 $U_{1X}/\omega_X=Const$ 时, 比值 E_{1X}/ω_X 实际上是随 ω_X 的下降而减小的, 主磁通 Φ_m 也随之减小。所以, 电动机的临界转矩 T_{KX} 也随之减小。

2.2 对症下药V/F调

(1) V/F控制法 为了满足 $E_{1X}/\omega_X=Const$, 人们首先想到的办法是: 频率下降时, 在 $U_{1X}/\omega_X=Const$ 的基础上适当提高 U_{1X}/ω_X 的比值, 以补偿 ΔU 所占比例增大的影响。这种方法称为转矩补偿, 也叫转矩提升, 这种调整临界转矩的方法称为V/F控制法。

通常, 变频器提供了许多条比值不同的V/F线, 供用户根据不同机械的具体情况进行选择, 如图5所示。

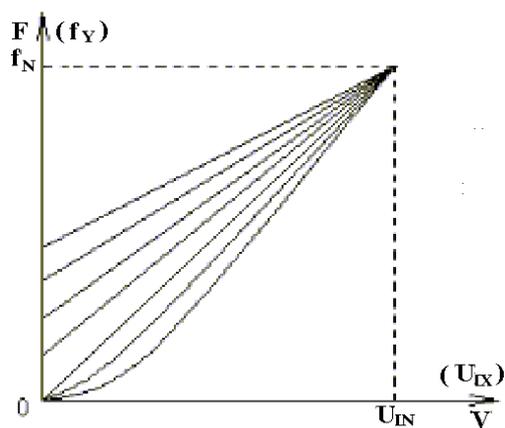


图5 变频器提供的V/F线图

V/F控制方式如再配合变频器的转差补偿等功能, 可以基本上使异步电动机在低频时的机械特性和直流电动机不相上下了。

(2) V/F控制法的缺点 V/F控制法中, 当转矩补偿线选定后, 电动机输入电压 U_{1X} 的大小只和工作频率 f_x 有关, 而和负载轻重无关, 这是它的致命弱点。因为许多负载在同一转速下, 负载转矩是常常变动的。例如塑料挤出机在工作过程中, 负载的阻转矩是随塑料的加料情况、熔融状态以及塑料本身的性能等而经常变动的。

用户在决定V/F线时, 只能根据负载最重时的状况 ($I_1 = I_{1N}$) 进行选择。当负载较轻时, 电压的补偿量将处于过补偿状态。这是因为: 负载较轻时, 电流 I_1 下降, 定子绕组的电阻压降 $I_1 r_1$ 及其功率损失 $I_1^2 r_1$ 也减小。结果, 电磁功率 P_M 偏大, 使磁路饱和。

上述分析表明, 当变动负载采用V/F控制法时, 电动机磁路的饱和程度将随着负载的变化而变化, 这无疑是个缺点, 使它仍难以和直流电动机相媲美。

2.3 矢量控制功夫高

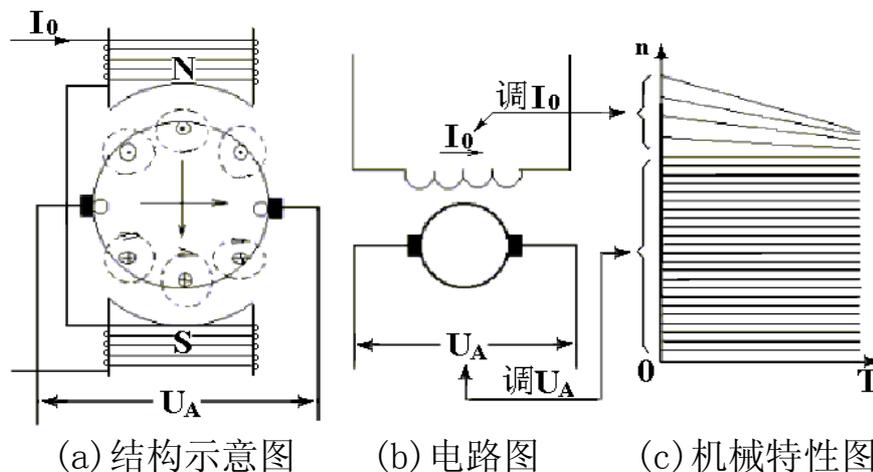


图6 直流电动机的调速示例图

(1) 对直流电动机的思考 直流电动机的调速性能被公认为是最好的。如图6所示, 它的主要特点是: ① 有两个互相垂直的磁场; ② 产生这两个磁场

的电路是互相独立的。在这两个互相垂直而独立的磁场中，只需调节其中之一即可进行调速。

(2) 矢量控制的基本思想 仿照直流电动机的调速特点，使异步电动机的转速也能通过控制两个互相垂直的直流磁场来进行调节。其主要依据是：

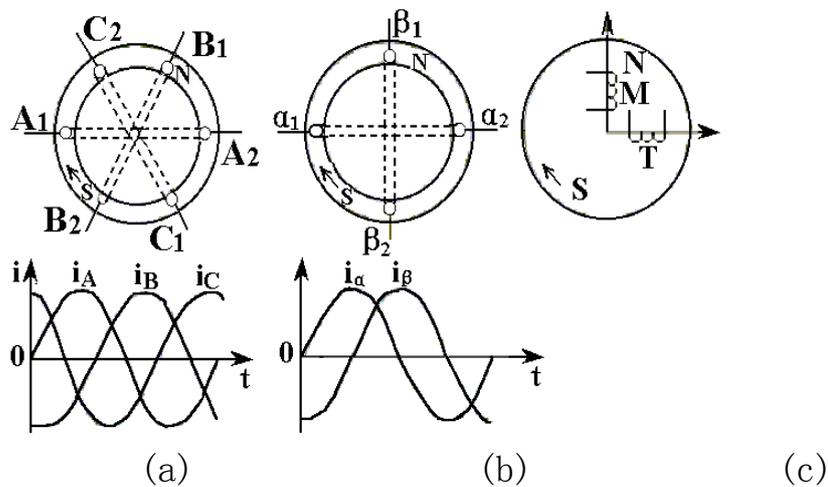


图7 产生旋转磁场的方法示例图

① 产生旋转磁场的方法可以有多种 如图7所示。(a) 将相位上互差 $2\pi/3$ 的三相交变电流通入在空间位置上互差 $2\pi/3$ 电角度的三相绕组；(b) 将相位上互差 $\pi/2$ 的二相交变电流通入在空间位置上互差 $\pi/2$ 电角度的二相绕组；(c) 用机械方法使两个直流磁场在空间旋转。

② 旋转磁场可以进行等效变换 如果上述三种方法产生的旋转磁场完全相同（磁极对数相同、磁感应强度相等、转速一样），则认为这时的三相磁场系统、二相磁场系统和旋转直流磁场系统是等效的。因此，这三种旋转磁场之间，是可以进行等效变换的。

在这里，二相旋转磁场起着特殊的作用。说明如下：

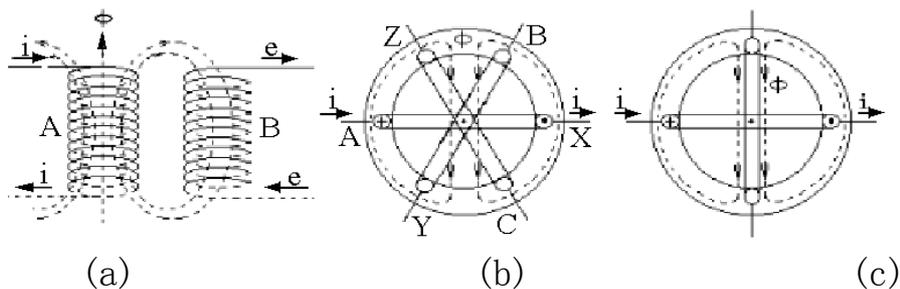


图8 线圈间的磁耦合图

- 互感和耦合 当线圈A中的电流所产生的磁通也穿过线圈B时，线圈A中电流的变化将在线圈B中引起感应电动势，这种现象称为互感，所产生的感应电动势称为互感电动势。A、B线圈间因通过磁通而互相关联，这种联系称为磁耦合，通常简称为耦合，如图8(a)所示。

- 二相绕组和三相绕组的区别 在三相绕组中，任何一相电流所产生的磁通，必将穿过另外两相，即三相绕组相互间存在着磁的耦合，如图8(b)所示。但在二相绕组中，由于两个绕组在空间处于垂直状态，任一相电流所产生的磁通，并不穿过另一相。因此，二相绕组相互间不存在磁耦合，如图8(c)所示。

• 二相磁场在等效变换中的作用 在进行等效变换时, 应尽量寻找变换双方的共同点, 以减少需要变换的因素。容易看出:
三相旋转磁场和二相旋转磁场之间由于都是多相交变磁场的合成结果, 故相互间较易变换, 称为3/2变换或2/3变换。其中, 当进行3/2变换时, 原来存在着磁耦合的三相绕组被变换成没有磁耦合的二相绕组了, 即绕组间的磁耦合被解除了, 故也称为解耦变换。
二相旋转磁场和直流旋转磁场由于都由两个互相正交的磁场构成, 绕组间都没有磁的耦合, 相互间也较易变换, 称为交直变换或直交变换。
而在三相旋转磁场和直流旋转磁场之间, 要进行直接变换就比较困难了。由此可见, 二相旋转磁场在三种磁场之间进行等效变换时可以起到“桥梁”的作用。

(3) 矢量控制的框图 如图9所示, ① 将给定信号分解成模拟直流电动机的控制信号: 即分解成两个互相垂直的直流磁场信号, 分别称为磁场分量 i_T^* 和转矩分量 i_M^* ; ② 通过“直/交变换”将互相垂直的直流磁场信号变换成等效二相磁场的控制信号 i_α^* 和 i_β^* ; ③ 通过“2/3变换”将二相磁场的控制信号变换成三相磁场的控制信号 i_A^* 、 i_B^* 、 i_C^* , 用来控制逆变桥的工作; ④ 当给定信号改变时, 使直流磁场之一(转矩分量)得到调整, 从而获得和直流电动机相仿的调速特性。

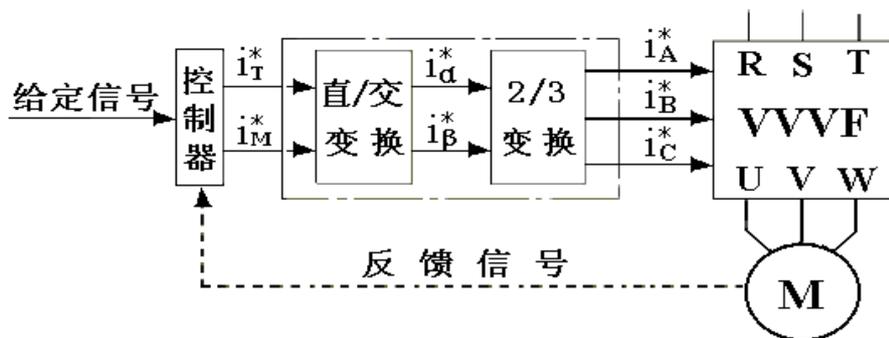


图9 矢量控制框图

2.4 有效转矩要记牢

(1) 概述

① 机械特性曲线簇 电动机是通过连续改变电路中的参数(电压、频率、励磁电流等)来实现其无级调速的。对应于不同的参数, 得到不同的机械特性, 把它们综合起来, 便得到调速电动机的机械特性曲线簇。例如, 异步电动机在不同频率时机械特性曲线的总和便是变频调速的机械特性曲线簇。

② 有效转矩线 电动机在某一转速下允许连续运行的最大转矩, 称为有效转矩。在电动机的一条机械特性曲线上, 有效转矩只是一个点, 将所有转速下的有效转矩点连接起来, 即得到电动机在调速过程中的有效转矩线。必须注意: 有效转矩线是说明电动机允许工作范围的曲线, 而不是说明电动机在某一时刻工作状态的特性曲线, 因此, 不能在有效转矩线上决定工作点。

③ 了解有效转矩线的意义 要使拖动系统在全调速过程中都能正常运行, 必须使电动机的有效转矩线把负载的机械特性曲线包围在内, 否则超越的部分

将不能正常工作。

(2) 额频以下的有效转矩线

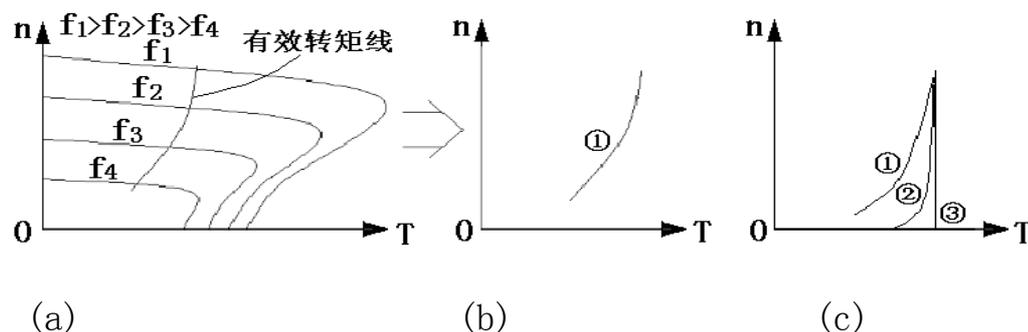


图10 $f_x \leq f_N$ 时的有效转矩线

异步电动机在无补偿（即满足 $U/f = \text{Const}$ 的条件）时的有效转矩线，如图10 (b) 中的曲线①所示，可见频率越低，电动机的临界转矩越小，带负载能力也越低，必须通过转矩补偿（V/F控制方式）或矢量控制使有效转矩线得到改善。改善的结果又怎样呢？

① 能否在全频率范围内得到恒转矩特性？ 不管是V/F控制方式还是矢量控制方式，都能够达到。

② 必须考虑从发热的角度来修正电动机在低频时的带载能力 因为电动机在低频运行时，散热条件将变差，所以：

- 如果能够充分改善散热条件（如外加强迫通风或采用专用电动机），则有效转矩将是恒转矩，如图10(c)中之曲线③（曲线①是未补偿的有效转矩线）；

- 在拖动短时负载或低速运行时间不长的负载（如龙门刨床）时，有效转矩也可以是恒转矩。

一般情况下，电动机在低频运行时的有效转矩线将界于上述两者之间，如曲线②所示。

③ 在V/F控制方式下，如果将最低频时的转矩补偿到与额定转矩相等的程度，则轻载或空载时，将出现磁路严重饱和、励磁电流严重畸变的问题。

(3) 额频以上的有效转矩线

异步电动机在 $f_x > f_N$ 时的机械特性曲线簇，如图11所示，频率越高，临界转矩越小。

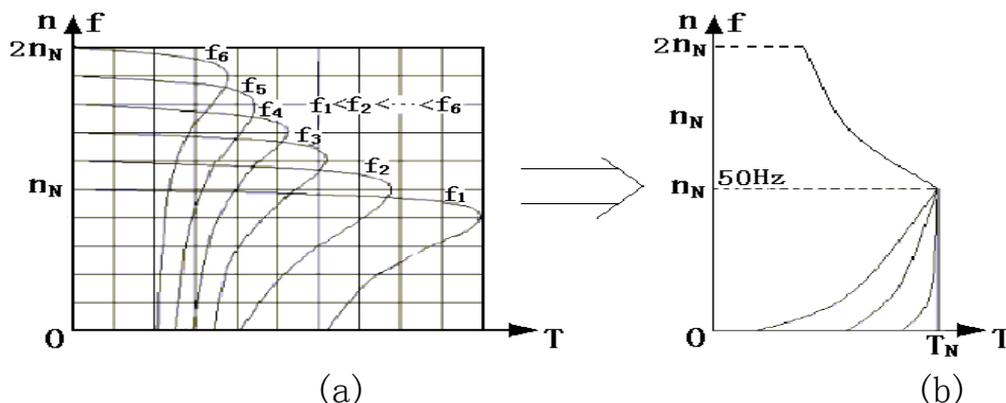


图11 $f_x > f_N$ 时的机械特性曲线簇

$\omega_X > \omega_N$ 时, 临界转矩减小的物理意义是:

① 由于变频器的输出电压 U_{1X} 是不可能超过额定电压 U_{1N} 的, 因此, 当 $\omega_X > \omega_N$ 时, 恒有 $U_{1X} = U_{1N}$ 。相应地, 反电动势 E_{1X} 的大小也基本不变, 所以, 随着 ω_X 的上升, 主磁通 Φ_m 将减小, 这是导致临界转矩减小的根本原因。

② 事实上, 当 ω_X 增大时, E_{1X} 是略有增加的。此外, 定子绕组的漏磁电抗也有所增加, 使电动机定子的临界电流减小, 所以, 电动机的临界转矩将进一步减小。有资料表明, 当 $\omega_X > \omega_N$ 时, 电动机的临界转矩大体上与调频比的1.4次方成反比:

$$T_{KX} \propto \frac{1}{k_f^{1.4}} \quad (11)$$

式(11)中, $k_f = \omega_X / \omega_N$, 为频率调节比, 简称调频比。

但从发热的角度看, 电动机可以由电流不超过额定值作为决定有效转矩的依据。

由于在 $\omega_X > \omega_N$ 时, $U_{1X} = U_{1N}$, 所以, 当电动机在额定电流 I_{1N} 下工作时, 其输入功率与输出功率均基本不变。故电动机的调速具有“恒功率”性质。即有效转矩 T_{MX} 与调频比 k_f 成反比:

$$T_{MX} \propto \frac{1}{k_f} \quad (12)$$

综上所述, 异步电动机在变频调速时的有效转矩线如图11(b)所示。

第三讲 见“机”行事用变频

恒转矩负载——频率范围作指标
恒功率负载——系统容量要减小
平方律负载——节能效果要最好

张燕宾

1 恒转矩负载——频率范围作指标

1.1 恒转矩负载实现变频调速的主要问题

恒转矩负载在设计变频调速系统时, 必须考虑的主要问题是调速范围能否满足要求? 详述如下:

(1) 最低工作频率 变频调速系统中, 允许的最低工作频率除了由变频器本身的性能及运行模式决定外, 还和电动机的负荷率及散热条件有关。

① 各种运行模式下的最低工作频率 在不考虑负荷率的情况下, 能够稳定运行的最低工作频率大致如下:

- 有反馈的矢量控制模式——不同品牌变频器的最低工作频率不尽相同, 多数变频器通常可达0.1Hz。

- 无反馈的矢量控制模式——变频调速系统在无反馈矢量控制模式下运行时, 工作频率不宜低于5Hz, 但某些品牌的新系列变频器, 已经能够在更低的频率下稳定运行了。

• V/F控制模式——最低工作频率通常为1Hz。但是，在最低频率下工作时，电压的补偿量（V/F比）较大，轻载时，容易引起电动机磁路的饱和，并导致因励磁电流过大而发热。

② 散热与负荷率对最低工作频率的影响 最低工作频率与控制模式、负荷率、散热的综合关系，如表1所示。

表1

控制模式	最低工作频率 (Hz)	允许负荷率	
		无外部通风	有外部通风
有反馈矢量控制	0.1	≤75%	100%
无反馈矢量控制	5	≤80%	100%
V/F控制	1	≤50%	≤55%

这里，负荷率的定义是：电动机轴上的负载转矩（负载折算到电动机轴上的转矩）与电动机额定转矩的比值，用 σ 表示：

$$\sigma = \frac{T_L}{T_{MN}} \quad (1)$$

(2) 最高工作频率 当工作频率高于额定频率时，其有效转矩线具有恒功率的特点。这实际上也说明了：在某一频率下，变频调速系统允许的负荷率 σ 为：

$$\sigma = \frac{1}{k_f} \quad (2)$$

即最高工作频率的大小是和负荷率成反比的。

1.2 调速范围与传动比

(1) 调速范围和负荷率的关系 综上所述，变频调速系统的最高和最低工作频率都和负荷率有关，所以，调速范围也就和负荷率有关。

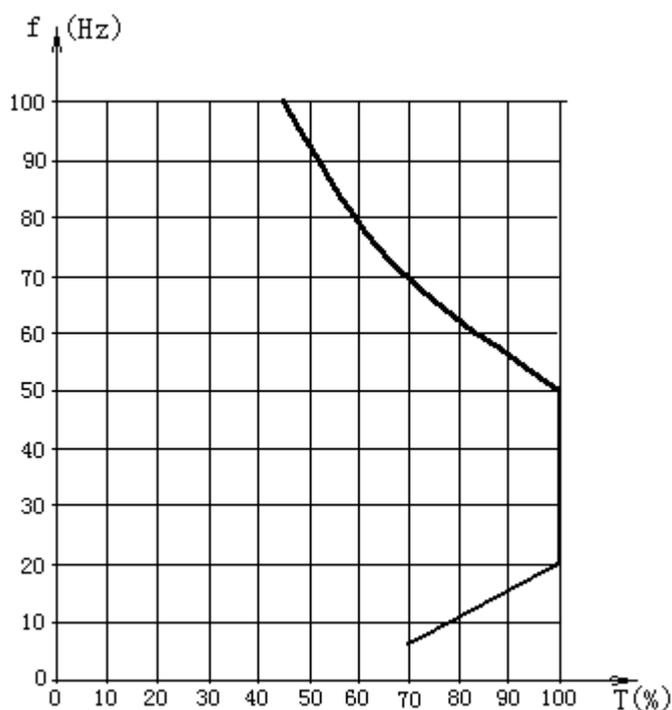


图1 变频器的有效转矩线示例图

某变频器在外部无强迫通风的状态下提供的有效转矩线, 如图1所示。在拖动恒转矩负载时, 允许的频率范围和负荷率之间的关系, 如表2所示, 可见, 负荷率越低, 允许的调速范围越大。

表2

负荷率 (%)	最高频率 (Hz)	最低频率 (Hz)	调速范围
100	50	20	2.5
90	56	15	3.7
80	62	11	5.6
70	70	6	11.6
60	78	6	13.0

(2) 负荷率与传动比的关系 负载转矩的折算值是和传动比有关的, 传动比 λ 越大, 则负载转矩折算到电动机轴上的值越小, 负荷率也就越低。

(3) 调速范围与传动比的关系 由表2可知: ① 当电动机轴上的负荷率为100%时, 允许的调速范围比较小。② 在负载转矩不变的前提下, 传动比 λ 越大, 则电动机轴上的负荷率越低, 调速范围(频率调节范围)越大。

因此, 如果当调速范围不能满足负载要求时, 可以考虑通过适当增大传动比, 来减小电动机轴上的负荷率, 增大调速范围。

1.3 传动比的选择举例

例如, 某恒转矩负载根据工作需要, 要求最高转速为720r/min; 最低转速为80r/min (调速范围 $\alpha_n=9$)。满负荷时负载侧的转矩为140Nm。

原选电动机的数据: $P_N=11\text{kW}$, $n_N=1440\text{r/min}$ 。

原传动装置的传动比为: $\lambda=2$ 。

今采用变频调速, 用户要求不增加额外的装置, 如转速反馈装置及风扇等。但可以适当改变皮带轮的直径, 在一定的范围内调整传动比。

(1) 计算负荷率

① 电动机的额定转矩 根据电动机的额定功率和额定转速求出:

$$T_{MN} = \frac{9550 \times 11}{1440} = 72.95\text{Nm}$$

② 负载转矩的折算值 根据负载转矩与传动比求出:

$$T_L' = \frac{140}{2} = 70\text{Nm}$$

③ 电动机的负荷率 根据电动机轴上的负载转矩与额定转矩求出:

$$\sigma = \frac{70}{72.95} = 0.96$$

(2) 核实允许的变频范围 由图1可知, 当负荷率为96%时, 允许频率范围是19~52Hz, 调频范围为:

$$\alpha_f = \frac{52}{19} = 2.74 < \alpha_n$$

显然, 与负载要求的调速范围相去甚远。

(3) 选择传动比

① 如果负荷率为70%, 则允许调频范围为6~70Hz, 调频范围为

$$\alpha_f = \frac{70}{6} = 11.7 > \alpha_n$$

② 电动机轴上的负载转矩应限制在:

$$T_L' \leq 72.95 \times 70\% = 51\text{Nm}$$

③ 确定传动比

$$\lambda \geq \frac{140}{51} = 2.745$$

选 $\lambda = 2.75$

(4) 校核

① 电动机的转速范围

$$n_{M_{\max}} = 720 \times 2.75 = 1980\text{r/min}$$

$$n_{M_{\min}} = 80 \times 2.75 = 220\text{r/min}$$

② 工作频率范围

$$s = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

$$?_{\max} = \frac{p \cdot n}{60(1-s)} = \frac{2 \times 1980}{60 \times 0.96} = 68.75\text{Hz} < 70\text{Hz}$$

$$?_{\min} = \frac{2 \times 220}{60 \times 0.96} = 7.64\text{Hz} > 6\text{Hz}$$

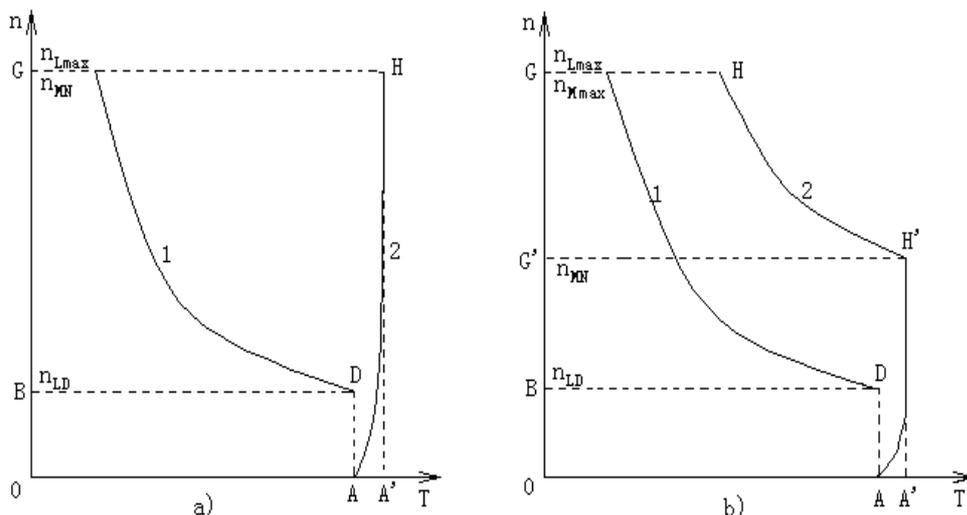
可见, 增大了传动比后, 工作频率在允许范围内。

2 恒功率负载——系统容量要减小

2.1 恒功率负载实现变频调速的主要问题

恒功率负载在设计变频调速系统时, 必须考虑的主要问题是减小拖动系统的容量。

如图2(a)所示, 曲线①是恒功率负载的机械特性; 曲线②是电动机的有效转矩线。两者相比, 可以看出:



(a) $X \leq N$

(b) $X \leq 2N$

图2 电动机拖动恒功率负载示例图

两条曲线只有在最低速时才是比较吻合的, 在转速较高的部分, 电动机的带载能力比负载转矩大得多。因为 ① 电动机的额定转矩必须能够带动最低速时的负载转矩 (这时的负载转矩是最大的); ② 其额定转速又必须满足负载的最高转速。所以, 如果把频率范围限制在 $?_X \leq ?_N$ 内的话, 则所需电动机

容量为:

$$PMN \geq \frac{T_{Lmax} \cdot n_{Lmax}}{9550} \quad (3)$$

式(3)中, PMN的大小与图2(a)中0A' HG的面积成正比。

负载所需功率为:

$$PL = \frac{T_{Lmax} n_{Lmin}}{9550} = \frac{T_{Lmin} n_{Lmax}}{9550} \quad (4)$$

与图2(a)中0ADB的面积成正比。

两者之比为:

$$\frac{P_{AN}}{P_L} = \frac{n_{Lmax}}{n_{Lmin}} = \lambda \quad (5)$$

式(5)中, λ 为负载的调速范围。

可见, 变频调速系统的容量比负载所需功率大了 λ 倍, 是很浪费的。

2.2 减小容量的对策

(1) 基本考虑 电动机在 $n_X > n_N$ 时的有效转矩线也具有恒功率性质, 应考虑充分利用这一特点。

(2) $n_X \leq 2n_N$ 时的系统容量 以 $n_{max} = 2n_N$ 为例, 因为电动机的额定转速只需负载最高转速的一半, 故所需电动机容量可减小一半, 如图2(b)中0A' H' G' 的面积。

(3) $n_X \leq 2n_N$ 、两档传动比时的系统容量 有些机械对转速的调整, 只在停机时进行, 而在工作过程中并不调速, 如车床等金属切削机床的调速。对于这类负载, 可考虑将传动比分为两档, 如图3所示。

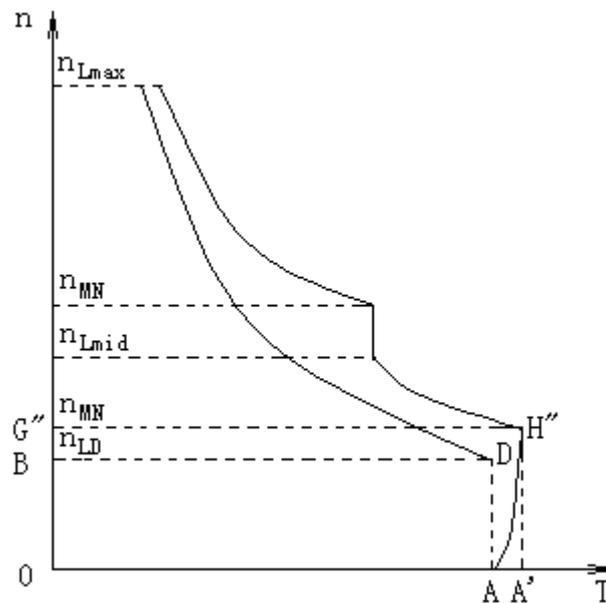


图3 $n_X \leq 2n_N$, 两档传动比带恒功率负载示例图

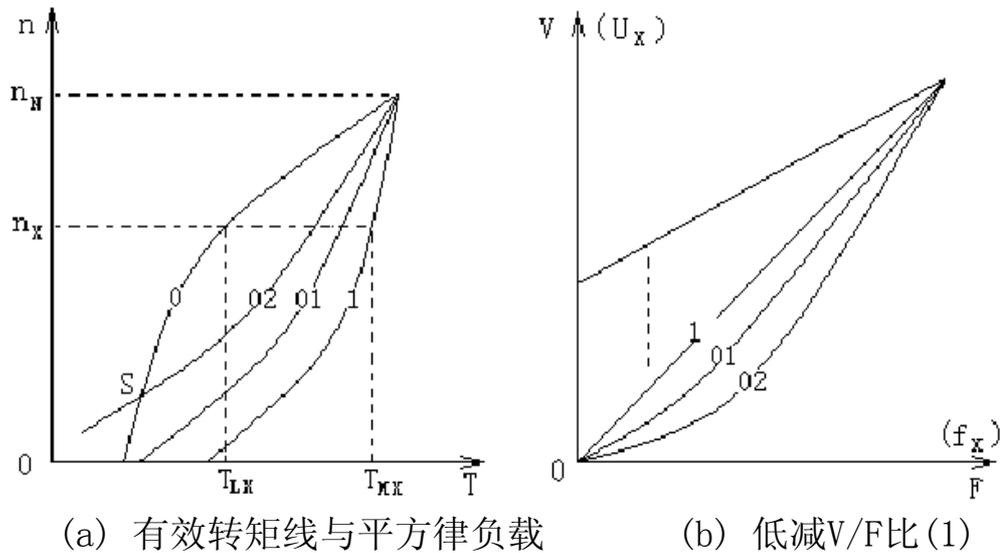
① 低速档 当电动机的工作频率从 $n_{min} \sim n_{max}$ 时, 负载转速从 $n_{Lmin} \sim n_{Lmax}$ 。

如果计算准确, 可使电动机的有效转矩线与负载的机械特性曲线十分贴近, 则所需电动机容量也与负载所需功率接近, 如图3中0A' H'' G'' 的面积。

3 平方律负载——节能效果要最好

3.1 平方律负载实现变频调速的主要问题

平方律负载实现变频调速后的主要问题是如何得到最佳的节能效果。



(a) 有效转矩线与平方律负载 (b) 低减V/F比(1)

图4 电动机的有效转矩线与低减V/F比示例图

(1) 节能效果与V/F线的关系 如图4(a)所示, 曲线0是平方律负载的机械特性; 曲线1是电动机在V/F控制方式下转矩补偿为0 ($k_U = k_\varphi$) 时的有效转矩线, 与图(b)中的曲线1对应。当转速为 n_x ($n_x < n_N$) 时: 由曲线0可知, 负载转矩为 T_{Lx} ; 由曲线1可知, 电动机转矩为 T_{Mx} 。

可见, 即使转矩补偿为0, 在低频运行时, 电动机的转矩与负载转矩相比, 仍有较大余量。这说明, 该拖动系统还有相当大的节能余量。

为此, 变频器设置了若干条低减V/F比 ($K_U < K_\varphi$) 线, 如图(b)中的曲线01和02所示。与此对应的有效转矩线是图(a)中的曲线01和02。但在选择低减V/F比线时, 有时会发生难以起动的问題, 如图4(a)中的曲线0和曲线02相交于S点。显然, 在S点以下, 拖动系统是不能起动的。对此, 可采取的对策有:

① V/F比线选用曲线01; ② 适当加大起动频率。

由于电动机有效转矩线的形状不可能与负载的机械特性完全吻合, 所以, 即使在低减V/F比的情况下运行, 仍具有节能潜力。为此, 有的变频器还设置了“自动节能”功能, 以利于进一步挖掘节能潜力。

(2) 节能效果与变频器台数的关系 由于变频器的价格较贵, 为了减少设备投资, 不少单位常常采用由一台变频器控制多台泵的方案。即只有一台泵进行变频调速, 其余都在工频下运行。从控制效果(如恒压供水)来说, 这是完全可行的。但显然, 这是以牺牲节能效果为代价的。

第四讲 选好器件配变频

主要电器需选好
睦邻友好抗干扰

供电部门不能恼
制动电路要记牢

张燕宾

1 主要电器需选好

变频器在实际应用中, 需要和许多外接的配件一起使用, 图1为一个比较完整的主电路。现就主要电器的功用及选择方法加以说明。

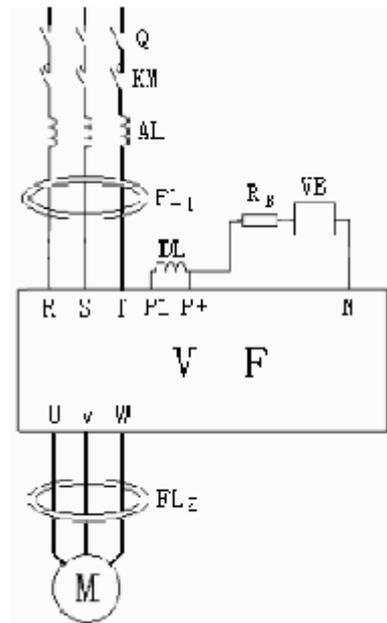


图1 变频调速主电路图

1.1 空气开关 (Q)

(1) 主要作用

- ① 隔离作用 当变频器需要检修时, 或者因某种原因而长时间不用时, 将Q切断, 使变频器与电源隔离;
- ② 保护作用 当变频器的输入侧发生短路等故障时, 进行保护。

(2) 选择原则 由于:

- ① 变频器在刚接通电源的瞬间, 对电容器的充电电流可高达额定电流的2~3倍;
- ② 变频器的进线电流是脉冲电流, 其峰值常可能超过额定电流;
- ③ 变频器允许的过载能力为150%, 1分钟。

所以, 为了避免误动作, 空气开关的额定电流 I_{QN} 应选:

$$I_{QN} \geq (1.3 \sim 1.4) I_N \quad (1)$$

式(1)中, I_N 是变频器的额定电流。

1.2 接触器 (KM)

(1) 主要作用

- ① 可通过按钮开关方便地控制变频器的通电与断电;
- ② 变频器发生故障时, 可自动切断电源。

(2) 选择原则

由于接触器自身无保护功能, 不存在误动作的问题。故选择原则是, 主触点的额定电流 I_{KN} 应满足:

$$I_{KN} \geq I_N \quad (2)$$

(3) 输出接触器

变频器的输出端一般不接接触器。如由于某种需要而接入时, 则因为电流中

含有较强的谐波成分, 故主触点的额定电流 I_{KN} 应满足:

$$I_{KN} \geq 1.1 I_{MN} \quad (3)$$

式(3)中, I_{MN} 是电动机的额定电流。

1.3 主电路线径的选择

(1) 电源与变频器之间的导线

一般说来, 和同容量普通电动机的电线选择方法相同, 但考虑到其输入侧的功率因数往往较低, 应本着宜大不宜小的原则来决定线径。

(2) 变频器与电动机之间的导线

因为频率下降时, 电压也要下降, 在电流相等的情况下, 线路电压降 ΔU 在输出电压中占的比例将上升, 而电动机得到电压的比例则下降, 有可能导致电动机发热。所以, 在决定变频器与电动机之间导线的线径时, 最关键的因素便是线路电压降 ΔU 的影响。一般要求:

$$\Delta U \leq (2 \sim 3)\% U_N \quad (4)$$

ΔU 的计算公式是:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} I_{MN} R_0 l}{1000} \quad (V) \quad (5)$$

式(5)中, I_{MN} 为电动机的额定电流; R_0 为单位长度导线的电阻; l 为导线的长度。

常用电动机引出线的单位长度电阻值, 见表1。

表1

标称截面 (mm^2)	1.0	1.5	2.5	4.0	6.0	10.0	16.0	25.0	35.0
R_0 ($\text{m}\Omega/\text{m}$)	17.8	11.9	6.92	4.40	2.92	1.73	1.10	0.69	0.49

2 供电部门不能恼

2.1 变频器的输入电流波形

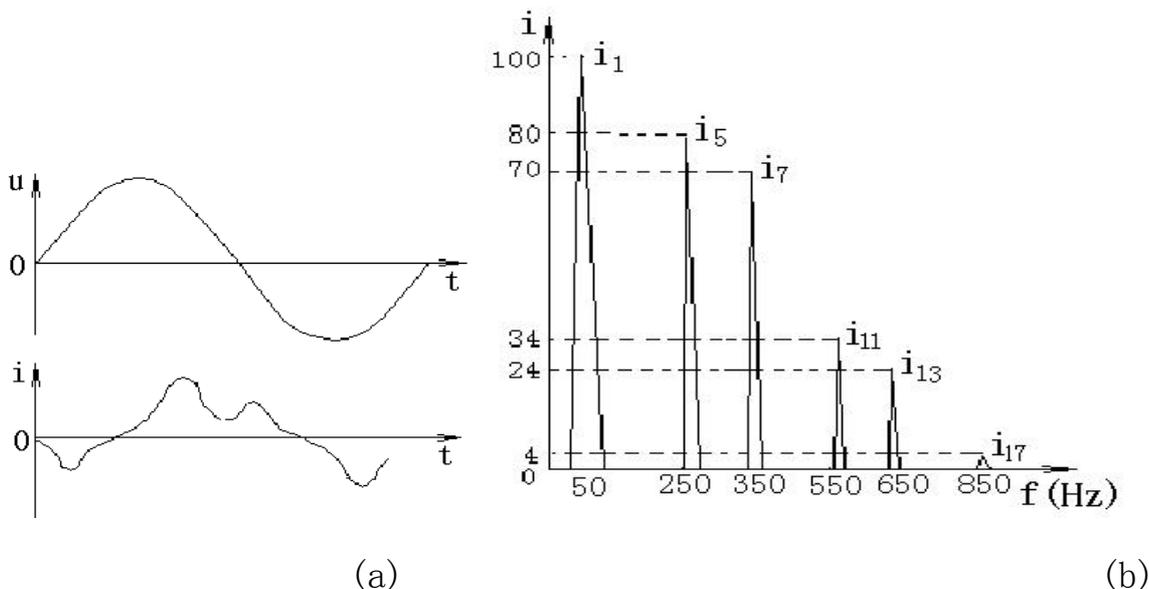


图2 输入电流的波形及其谐波分析图

如上所述, “交-直-交、电压型”变频器的输入侧是整流和滤波电路。显然, 只有电源的线电压 U_L 大于电容器两端的直流电压 U_D 时, 整流桥中才有

充电电流。因此, 充电电流总是出现在电源电压的振幅值附近, 呈不连续的冲击波形式, 如图2(a)所示。它具有很大的高次谐波成份。有关资料表明, 输入电流中的5次谐波和7次谐波分量是很大的, 如图2(b)所示。

2.2 变频器的功率因数

产生无功功率的原因: ① 电流与电压不同相; ② 高次谐波电流。

在变频器中输入电流的基波分量与电压同相, 故

$\cos\varphi=1$, 但由高次谐波电流形成的无功功率较大, 所以, 变频调速系统的功率因数较低, 约为0.7~0.75。

2.3 功率因数的改善

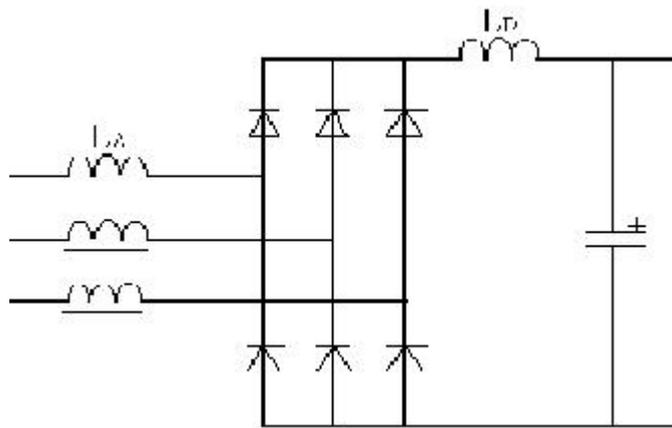


图3 变频器中串入电抗器的电路图

如图3所示, 在输入电路中串入电抗器是抑制较低谐波电流的有效方法。根据接线位置的不同, 主要有以下两种:

(1) 交流电抗器 (L_A)

L_A 串联在电源与变频器的输入侧之间, 它除了可以抑制谐波电流, 将功率因数提高至0.75~0.85外, 还具有削弱输入电路中的浪涌电流对变频器的冲击, 削弱电源电压不平衡的影响等功能。

(2) 直流电抗器 (L_D)

L_D 串联在整流桥和滤波电容器之间。它的功能比较单一, 就是削弱输入电流中的高次谐波成份。但在提高功率因数方面比交流电抗器有效, 可达0.95, 并具有结构简单、体积小等优点。

3 睦邻友好抗干扰

3.1 变频器的电流波形

(1) 变频器的输入电流 如上所述, 变频器的输入电流具有很大的高次谐波成份。这些高次谐波电流除了影响功率因数外, 也可能对其他设备造成干扰。

(2) 变频器的输出电流 绝大多数逆变桥都采用SPWM调制方式, 其输出电压为占空比按正弦规律分布的系列矩形波, 如图4(a)所示。由于电动机定子绕组的电感性质, 其定子电流十分接近于正弦波, 但其中与载波频率相等的谐波分量仍是较大的, 如图4(b)所示。

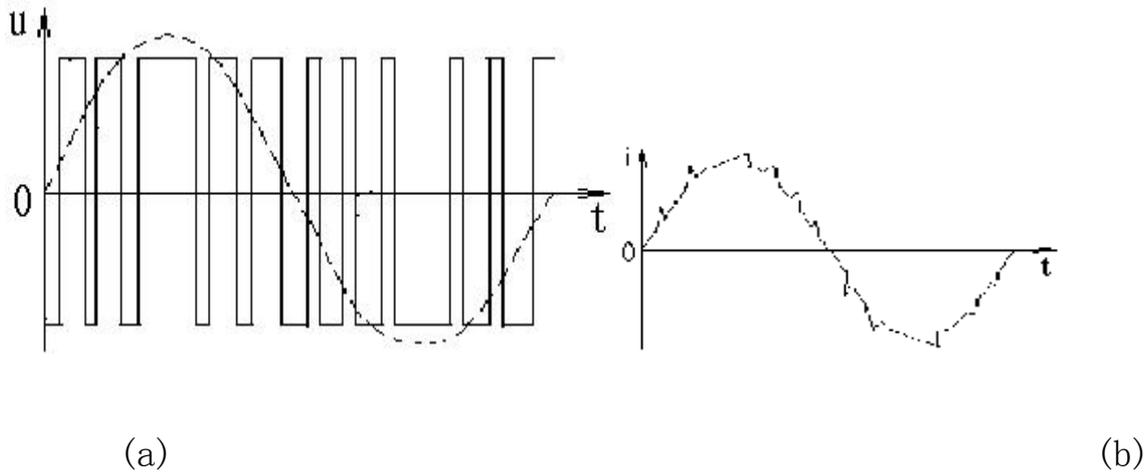


图4 输出电压与电流的波形图

3.2 干扰信号的传播方式

(1) 电路耦合方式 即通过电源网络传播。由于输入电流为非正弦波，当变频器的容量较大时，将使网络电压产生畸变，影响其他设备工作。显然，这是变频器输入电流干扰信号的主要传播方式。

(2) 感应耦合方式 当变频器的输入电路或输出电路与其他设备的电路相距很近时，变频器的高次谐波信号将通过感应的方式耦合到其他设备中去。感应的方式有两种：

① 电磁感应方式 是电流干扰信号的主要传播方式；

② 静电感应方式 是电压干扰信号的主要传播方式。

(3) 空中幅射方式 以电磁波的方式向空中幅射，这是频率很高的谐波分量主要传播方式。

3.3 变频调速系统的抗干扰措施

(1) 合理布线 对于通过感应方式传播的干扰信号，可以通过合理布线的方式来削弱。具体方法有：

① 其他设备的电源线和信号线应尽量远离变频器的输入、输出线；

② 其他设备的电源线和信号线应避免和变频器的输入、输出线平行；

③ 所有的电源线和信号线都应尽量屏蔽。

(2) 接入滤波器 在变频器的输入和输出电路中，除上述较低次的谐波成份外，还有许多频率很高的谐波电流，它们将以各种方式把自己的能量传播出去，形成对其他设备的干扰信号。滤波器就是用于削弱频率较高的谐波分量的主要手段。根据使用位置的不同，可分为：

① 输入滤波器 通常有两种：

- 线路滤波器主要由电感线圈构成，它通过增大线路在高频下的阻抗来削弱频率较高的谐波电流。

- 辐射滤波器主要由高频电容器构成，它可吸收频率很高的、具有辐射能量的谐波成份。

② 输出滤波器 也由电感线圈构成，它可以有效地削弱输出电流中的高次谐波成份，不仅起到抗干扰的作用，而且能削弱电动机中由高次谐波电流引起的附加转矩。对于变频器输出端的抗干扰措施，必须注意以下两方面：

- 变频器的输出端不允许接入电容器，以免在逆变管导通（或关断）瞬间，产生峰值很大的充电（或放电）电流，损害逆变管；

- 当输出滤波器由LC电路构成时，滤波器内接入电容器的一侧必须与电动

机侧相接。

(3) 仪器侧隔离

① 电源隔离法

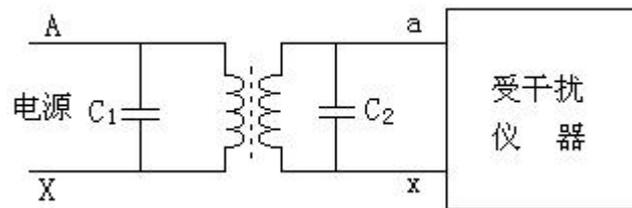


图5 隔离变压器图

实践表明，变频器输入侧的高次谐波电流常常从电源侧进入各种仪器，成为许多仪器的干扰源。针对这种情况，应在受干扰仪器的电源侧采取有效的隔离和滤波措施。方法之一是接入隔离变压器，如图5所示。其特点是原、副方的匝数相等，即无变压功能，在原、副方之间应用金属薄膜进行良好的隔离。原、副方电路中都可接入电容器，如图中之 C_1 和 C_2 。

为了进一步滤去电源电压中的高次谐波成份，在隔离变压器的两侧，还可以接入各种滤波电路。

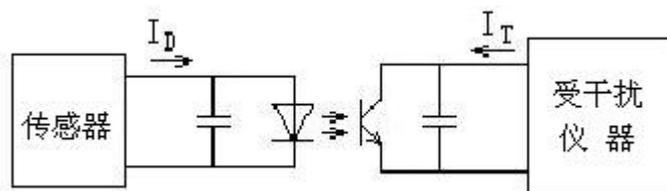


图6 信号隔离法示意图

② 信号隔离法 在某些传感器传输线较长，并采用电流信号的场合，还可以考虑在信号侧用光电耦合管进行隔离，如图6所示。需要注意的是：

- 所用光电耦合管应是传输比为1的线性光电耦合管；
- 光电耦合管两侧的电容器对传输信号应无衰减作用，即：如为直流信号，电容量可大一些，如为脉冲信号，则应根据脉冲频率的大小适当选择。

4 制动电路要记牢

4.1 制动过程对泵生电压的影响

泵生电压是当电动机处于再生制动状态时，电动机将再生的电能反馈给直流回路的结果。而再生制动状态则是电动机转子的实际转速超过了同步转速

（旋转磁场的转速），转子绕组正方向切割磁力线的结果。

归根结底，泵生电压的大小取决于转子绕组（鼠笼条）正方向切割磁力线的速度。主要与下列因素有关：

(1) 拖动系统的飞轮力矩GD²

飞轮力矩大，则当同步转速随频率下降而下降时，转子的实际转速将因惯性大而不能及时地跟随下降，从而，转子导体正方向切割磁力线的速度也大，使泵生电压增大。

(2) 降速时间t_B

降速时间越短，则频率下降越快，也容易使转子的实际转速不能及时地跟随同步转速下降，并使泵生电压增大。

(3) 制动转矩TB

制动转矩是再生电流与旋转磁场相互作用的结果。因此, 所要求的制动转矩大, 则再生电流也大, 导致泵生电压也大。事实上, 在计算制动转矩时, 已经把飞轮力矩和降速时间的因素考虑进去了。

所以, 泵生电压的大小和所要求的制动转矩的大小成正比。

4.2 制动电阻值的粗略算法

由于电动机和负载的飞轮力矩的数据常常难以得到, 要进行准确计算往往十分困难。

考虑到再生电流经三相全波整流后的平均值约等于其峰值, 而所需附加制动转矩中可扣除电动机自身的制动转矩 (0.2TMN), 以及在计算直流电压时已经增加了10%的裕量。把这些因素综合起来, 可以粗略地认为: 如果通过制动电阻的放电电流等于电动机的额定电流, 则所需的附加制动转矩大致得到满足。有关资料表明: 当放电电流等于电动机额定电流的一半时, 就可以得到与电动机的额定转矩相等的制动转矩。因此, 制动电阻的粗略算法是:

$$R_B = \frac{U_D}{2I_{\text{额定}}} \sim \frac{U_D}{I_{\text{额定}}} \quad (6)$$

在实际使用中, 可以根据具体情况适当调整制动电阻的大小。

4.3 制动电阻容量的确定

(1) 制动电阻的耗用功率PB0 当制动电阻RB在直流电压为UD的电路中工作时, 其耗用功率PB0为:

$$P_{B0} = \frac{U_D^2}{R_B} \quad (7)$$

耗用功率PB0的含义是: 如果电阻的容量按此选择, 该电阻就可以长时间接在电路里工作。

(2) 制动电阻容量的确定 由于拖动系统的制动时间通常很短, 电阻的温升在短时间内不足以达到稳定温升。因此, 决定制动电阻容量的根本原则是, 在电阻的温升不超过其允许值 (即额定温升) 的前提下, 应尽量减小容量:

$$P_B = \gamma_B \frac{U_D^2}{R_B} \quad (8)$$

式(8)中, γ_B 为制动电阻容量的修正系数。

(3) 修正系数的决定

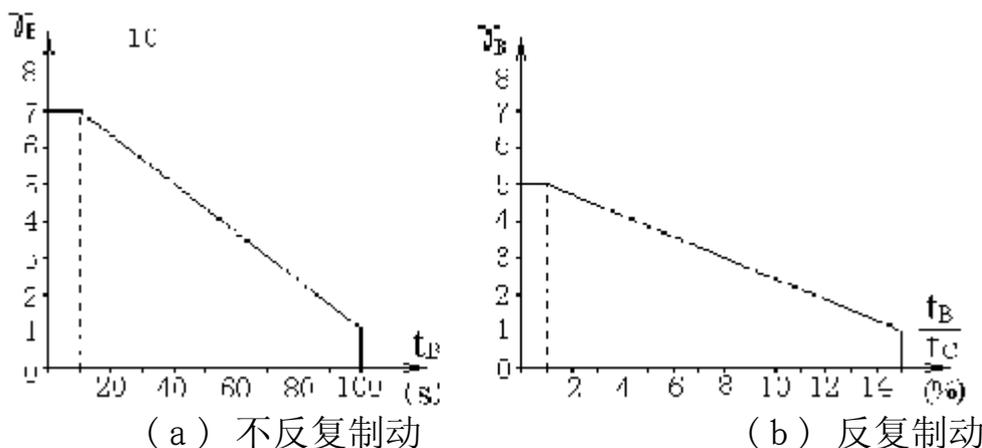


图7 制动电阻的容量修正系数

① 不反复制动的场合 指制动的次数较少, 一次制动以后, 在较长时间内

不再制动的场合, 如鼓风机。

对于这种负载, 修正系数的大小取决于每次制动所需要的时间:

如每次制动时间小于10s, 可取 $\gamma=7$; 如每次制动时间超过100s, 则 $\gamma=1$; 如每次制动时间在两者之间, 即 $10s < t_B < 100s$, 则 γ 大体上可按比例算出, 如图7(a)所示。

② 反复制动的场合 许多机械是需要反复制动的, 如起重机械、龙门刨床等。对于这类负载, 修正系数的大小取决于每次制动时间 t_B 与每两次制动之间的时间间隔 t_C 之比 (t_B/t_C), 称为制动占空比。由于在实际工作中, 制动占空比常常不是恒定的, 所以, 只能取一个平均数。决定 γ 的大致方法如下:

如 $t_B/t_C \leq 0.01$, 取 $\gamma=5$; $t_B/t_C \geq 0.15$, 取 $\gamma=1$;

$0.01 < t_B/t_C < 0.15$, 则 γ 大体上可按比例算出, 如图7(b)所示。

(4) 制动电阻的保护 由于制动电阻的标称功率比实际消耗的功率小得多, 并且, 制动电阻的通电时间也很难准确估算。因此, 如果在运行过程中的实际通电时间超过预想的通电时间, 将导致过热而损坏。所以, 对制动电阻应有过热保护, 可以用现成的热继电器, 也可以自行设计过热保护电路。

4.4 制动单元的构成与设计

(1) 制动单元BV的功能与构成 其功能是, 当直流回路的电压 U_D 超过规定的限值时, 接通耗能电路, 使直流回路通过制动电阻 R_B 释放能量。制动单元BV的构成如图8的虚线框所示。

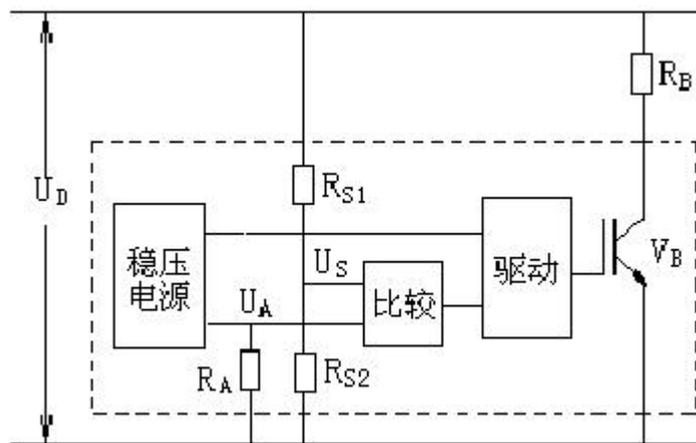


图8 能耗制动和制动单元示意图

① 功率管 V_B 用于接通与关断能耗电路, 是制动单元的主体。

② 电压取样与比较电路 由于功率管 V_B 的驱动电路是低压电路, 故只能通过电阻 R_{S1} 和 R_{S2} 进行分压, 按比例取出 U_D 的一部分 U_S 作为采样电压和稳定不变的基准电压 U_A 进行比较, 得到控制 V_B 导通或截止的指令信号。基准电压 U_A 的大小应与 U_D 的限值成比例。

③ 驱动电路 用于接受比较电路发出的指令信号, 驱动 V_B 导通或截止。

(2) 功率管 V_B 的选择

① 集电极最大电流 通常, 可按制动电流的两倍来计算:

$$I_{CM} \geq \frac{2U_D}{R_F} \quad (9)$$

② 击穿电压 由于VB的负载是电阻负载，在导通和截止过程中，基本上没有附加电动势，因此，击穿电压可以略低一些。当电源电压为380V时，取：
 $U_{CEO} = (1000 \sim 1200) V$

(3) 用交流接触器代替功率管的要点

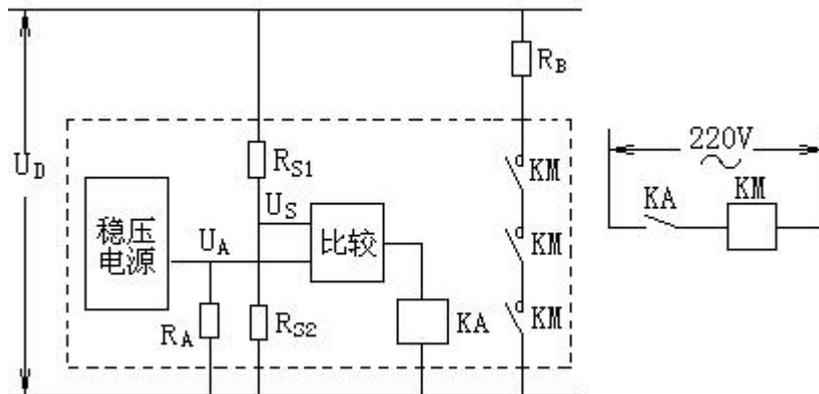


图9 用接触器代替功率管示意图

① 用交流接触器代替功率管的可行性 如图9所示，将交流接触器的3个主触点串联，来代替功率管VB，由于每个主触点的耐压为500V，3个串联后总的耐压可达1500V，裕量足够；另一方面，在电路断开时，有3个地方同时断开，也有利于灭弧。因此，是完全可行的。

② 应用场合 由于交流接触器不允许频繁地接通和关断，因此，主要用于降速次数较少的场合。

第五讲 变频调速恒压供水系统

张燕宾

1 单泵恒压供水系统

1.1 恒压供水的目的与系统构成

(1) 恒压供水的目的

对供水系统进行控制，是为了满足用户对流量的需求，所以流量是供水系统的基本控制对象。但流量的测量比较复杂，考虑到在动态情况下，管道中某一点水压 p 的大小与供水能力和用水流量之间的平衡情况有关，如果以安装压力表的位置作为分界点，把压力表之前的流量称为供水流量（ Q_G ），压力表之后的流量称为用水流量（ Q_U ），则：

如 $Q_G > Q_U$ ，则 $p \uparrow$ ；

如 $Q_G < Q_U$ ，则 $p \downarrow$ ；

如 $Q_G = Q_U$ ，则 $p = \text{const}$ （恒量）。

需要说明的是：在实际的供水管道中，流量具有连续性，并不存在“供水流量”与“用水流量”的差别。这里的 Q_G 和 Q_U 是为了说明当供水能力与用水流量之间不适应时，导致管道内的压力发生变化而假设的量。

总之, 保持供水系统中某处压力的恒定, 也就保证了该处的供水能力和用水流量的平衡, 恰好满足用户所需的用水流量, 这就是恒压供水所要达到的目的。

(2) 系统的构成

恒压供水系统的框图如图1所示。PS是压力变送器, 它在测量管道内压力 p 的同时, 还将测得的压力信号转换成电压信号或电流信号。该信号在控制系统中作为反馈信号, 用 X_F 表示。所以, 反馈信号也就是实测的压力信号, 即 $X_F \propto p$ 。

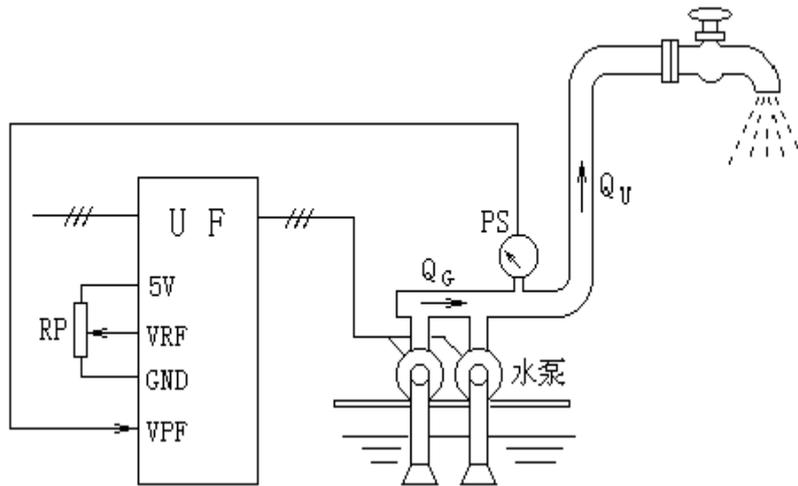


图1 恒压供水框图

变频器预置为PID控制方式, X_F 接至变频器的反馈信号输入端VPF（电压信号）或IPF（电流信号）。

与用户要求的压力大小对应的信号称为目标信号, 用 X_T 表示。由电位器RP或键盘直接给出。

1.2 PID控制概述

(1) 系统的工作方式

变频器内部PID调节功能的框图如图2所示。 X_T 和 X_F 两者是相减的, 其合成信号 $X_D = (X_T - X_F)$; 经过PID调节处理后成为频率给定信号 X_G , 决定变频器的输出频率 ω_x 。

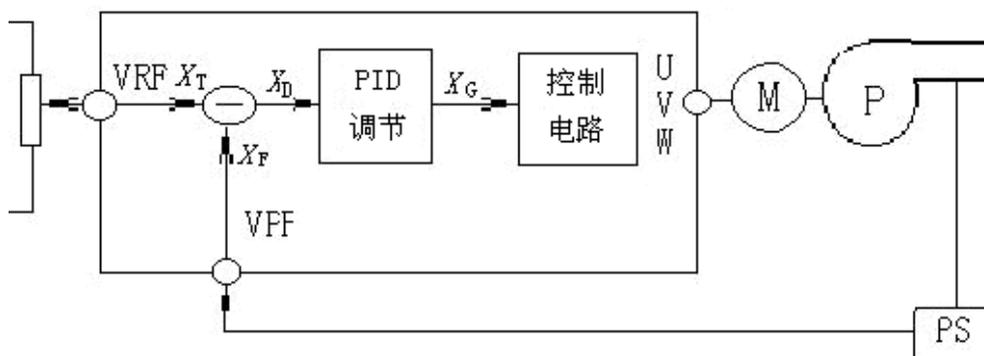


图2 变频器内部的控制框图

当用水流量减小, 使 $Q_G > Q_U$ 时, 则供水压力 $p \uparrow \rightarrow X_F \uparrow \rightarrow X_D \downarrow \rightarrow ?_X \downarrow \rightarrow$ 电动机转速 $n_X \downarrow \rightarrow Q_G \downarrow \rightarrow Q_G = Q_U$ 直至压力大小回复到目标值 ($X_F \approx X_T$), 从而达到平衡;

反之, 当用水流量增加, 使 $Q_G < Q_U$ 时, 则 $p \downarrow \rightarrow X_F \downarrow \rightarrow X_D \uparrow \rightarrow ?_X \uparrow \rightarrow n_X \uparrow \rightarrow Q_G \uparrow \rightarrow Q_G = Q_U \rightarrow X_F \approx X_T$, 又达到新的平衡。

因此, 供水系统总是根据用户的用水情况不断地处于自动调整状态中。

(2) PID调节的原理

① 问题的提出 上述工作过程存在着一个矛盾: 一方面, 我们要求水管的实际压力 (其大小与 X_F 成正比) 应无限接近于目标压力 (其大小与 X_T 成正比), 即要求 $X_D = (X_T - X_F) \rightarrow 0$; 另一方面, 变频器的输出频率 $?_X$ 又是由 X_T 和 X_F 相减的结果来决定的。所以, 如果把 $(X_T - X_F)$ 直接作为给定信号 X_G , 系统将无法工作。

② 比例增益环节(P) 解决上述矛盾的方法是: 将 $(X_T - X_F)$ 进行放大后再作为频率给定信号:

$$X_G = K_P (X_T - X_F) \tag{1}$$

式(1)中, K_P 为放大倍数, 即比例增益。

上述关系如图3所示。由于 X_G 是 $(X_T - X_F)$ 成正比放大的结果, 故称为比例放大环节。另一方面, X_G 又是使变频器输出某一频率 $?_X$ 所必须的信号。显然, K_P 越大, 则 $(X_T - X_F) =$ 越小, X_F 越接近于 X_T 。

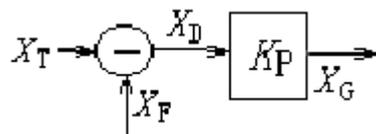
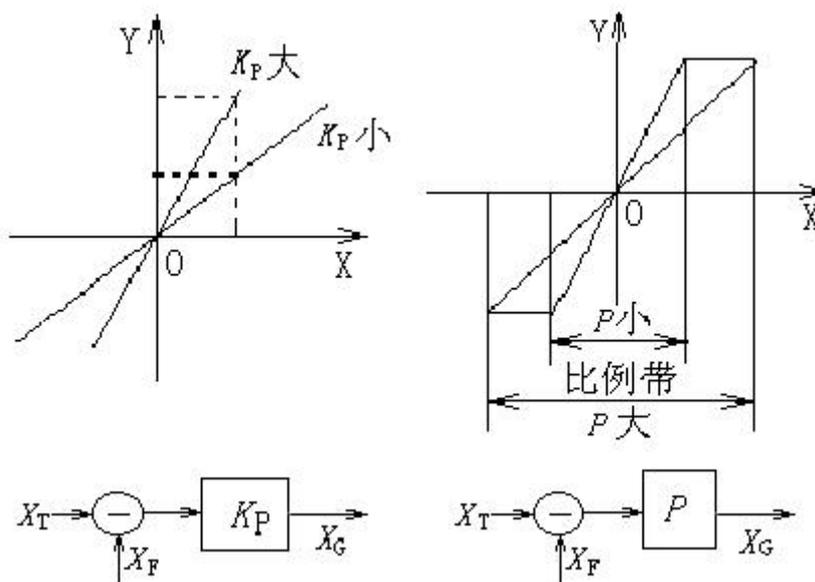


图3 比例放大前后各量间的关系框图



(a) 输出与输入的比例关系 (b) 比例带的概念
图4 比例与比例带

这里, X_F 只能是无限接近于 X_T , 却不能等于 X_T , 即 X_F 和 X_T 之间总会有一个差值, 称为静差, 用 ε 表示。该值应该越小越好。显然, 比例增益 K_P 越大, ε 越小。

在专用PID调节器中, 比例增益的大小常常是通过“比例带”来进行调节的。比例带就是按比例放大的区域, 用 P 表示 (等于 K_P 的倒数), 如图4所示。 P 越小, 相当于 K_P 越大。但在几乎所有变频器内置的PID调节功能中, 都是直接预置 K_P 的。

比例增益环节的引入, 减小了系统稳定后的静差 ε , 如图5(a)所示。于是又出现了新的矛盾: 为了减小静差 ε , 应尽量增大比例增益 K_P , 但由于系统有惯性, K_P 过大容易引起被控量 (压力) 忽大忽小, 形成振荡, 如图5(b)所示。

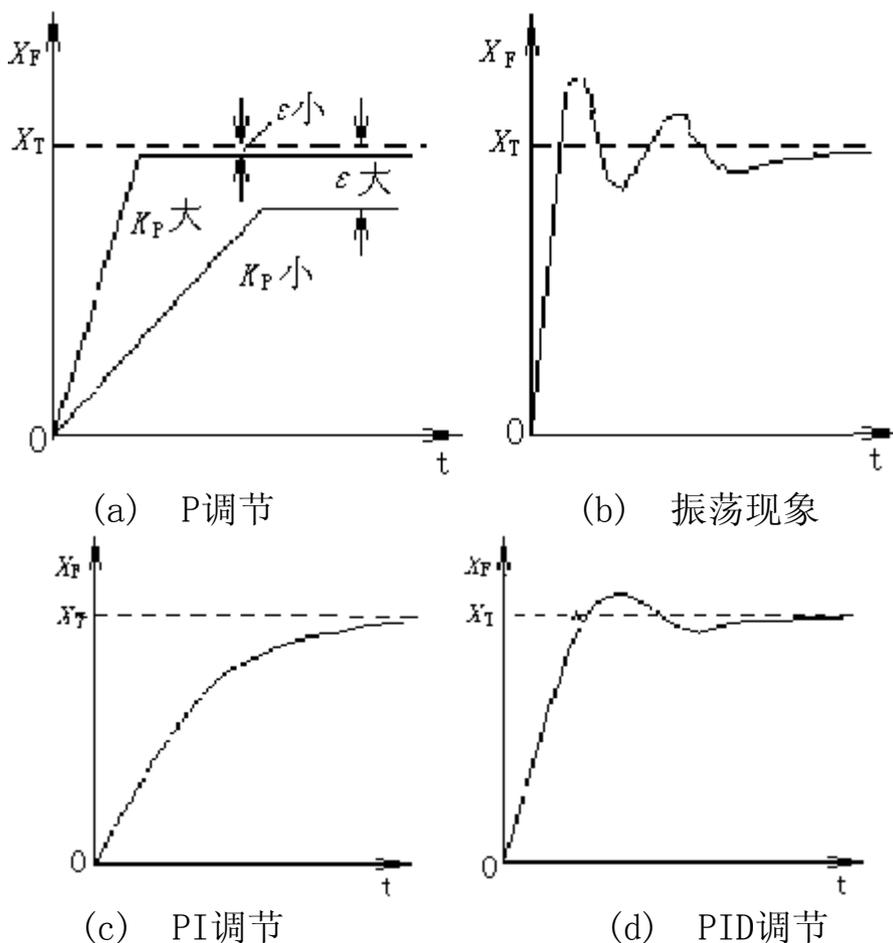


图5 P、I、D的综合作用示意图

③ 积分环节 (I) 引入积分环节的目的在于:

- 使给定信号 X_G 的变化与乘积 $K_P (X_T - X_F)$ 对时间的积分成正比。即尽管 $K_P (X_T - X_F)$ 一下子增大 (或减小) 了许多, 但 X_G 只能在“积分时间”内逐渐地

增大（或减小），从而减缓了 X_G 的变化速度，防止了振荡。积分时间越长， X_G 的变化越慢；

- 只要偏差不消除($X_T - X_F \neq 0$)，积分就不停止，从而有效地消除静差，如图5(c)所示。

但积分时间太长，又会发生当被控量（压力）急剧变化时难以迅速恢复的情况。

④ 微分环节(D) 其作用是：可根据偏差的变化趋势，提前给出较大的调节动作，从而缩短调节时间，克服了因积分时间过长而使恢复滞后的缺点，如图5(d)所示。

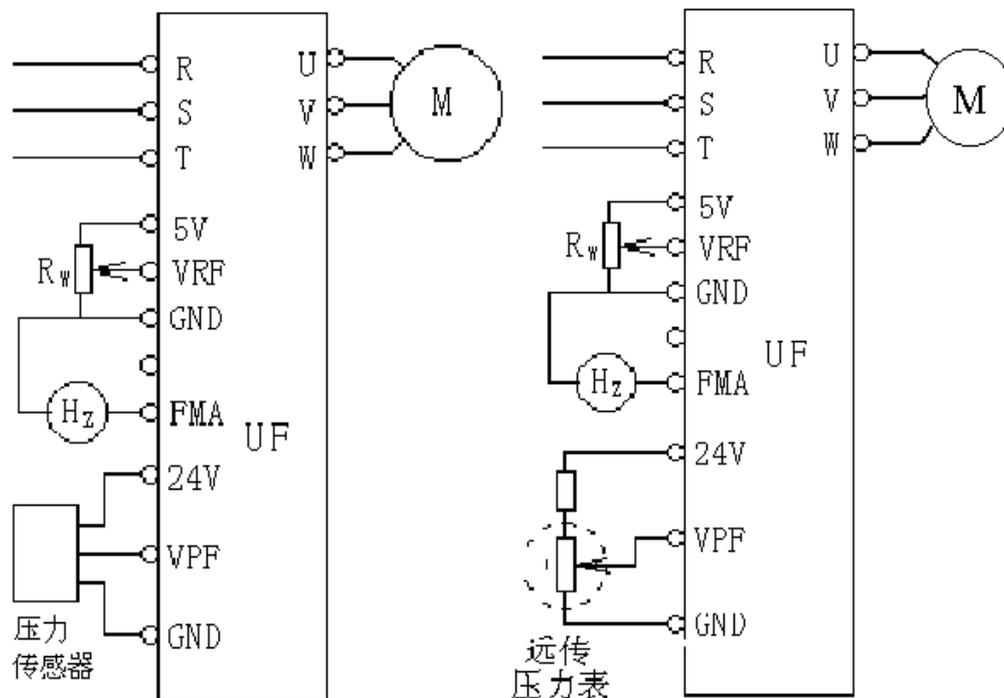
在供水系统中，当对过渡过程时间的要求并不严格时，通常用PI调节。

1.3 常用的压力变送器与PID调节功能的预置

(1) 常用的压力变送器

① 压力传感器 是一种能够将压力信号转换成电压信号或电流信号（通常为4~20mA）的装置。当距离较远时，应选用电流信号，以消除因线路压降引起的误差。其接线图如图6(a)所示。

② 远传压力表 其基本结构是在压力表的指针轴上附加一个能够带动电位器滑动触点的装置。因此，从电路器件的角度看，实际上是一个电阻值随压力而变的电位器。使用时，需另行设计电路将压力的大小转换成电压或电流信号。通常，变频器内可以提供转换电路所需的电压，如成都希望森兰变频器制造有限公司BT12S变频器中，可提供24V直流电压，其接线方法如图6(b)所示。



(a) 压力传感器

(b) 远传压力表

图6 压力变送器及其接法示意图

远传压力表的价格较低廉，但由于电位器的滑动点总在一个地方磨擦，故寿命较短。

(2) PID功能的预置

① 预置PID功能 预置的内容是：变频器的PID功能是否有效。当变频器的PID调节功能有效后，其升、降速过程将完全取决于由P、I、D数据所决定的动态响应过程，而原来预置的“升速时间”和“降速时间”将不再起作用。

② 目标值 X_T 的预置 PID调节的根本依据是反馈量 X_F 与目标值 X_T 之间进行比较的结果。因此，准确地预置目标值 X_T 是十分重要的。主要有以下两种方法：

- 面板输入式 只需通过键盘输入目标值 X_T 。其确定方法通常是：目标压力与传感器量程之比的百分数。例如，某供水系统要求的压力（目标压力）为2MPa，所用压力表的量程是0~5MPa时，则目标值为40%。

- 外接给定式 由外接电位器进行预置，但显示屏上仍显示目标值的百分数。

(3) PID调节的运行特点

当变频器按P、I、D调节规律运行时，需要注意以下两点：

- 变频器的输出频率(f_x)只根据实际压力(X_F)与目标压力(X_T)比较的结果进行调整，所以，频率的大小与被控量之间并无对应关系；

- 变频器的输出频率(f_x)始终处于调整状态，因此，其数值常不稳定。

1.4 变频器的功能预置

(1) 一般运行功能

① 上限频率 水泵的机械特性具有平方律特点，当转速超过额定转速时，负载的阻转矩将增大很多，导致电动机的严重过载。所以，上限频率(f_H)不应超过额定频率(f_N)，即 $f_H \leq f_N$ 。

② 下限频率 在决定下限频率时，有两种情况应予考虑：

- 水泵的扬程必须满足供水所需的基本扬程；
- 供水系统常常是多台水泵共同供水，如果其他水泵在高速下运行，一台水泵转速过低，实际上将无法供水。

故下限频率一般预置为： $f_L \geq (30 \sim 35) \text{Hz}$

③ 升、降速时间 水泵由于水管中有一定压力，在升、降速过程中，惯性的作用极微。但过快地升速或降速，会在管道中引起水锤效应。所以，也将升、降速时间适当预置得长一些。

④ 升、降速方式 通常预置为线性方式。

(2) 暂停（睡眠与苏醒）功能

① 睡眠功能 当变频器的工作频率已经降至下限频率，而压力仍偏高时，水泵应暂停工作（使变频器处于睡眠状态）。以森兰BT12S系列变频器为例，当压力传感器的量程为1MPa，而所要求的供水压力为0.2MPa时，则目标值为20%，“睡眠值”可设定为21%~25%（相当于压力的上限）。

② 苏醒功能 当水管中的压力小于某一下限值时，应使系统中止睡眠而重新开始工作（即中止暂停或称之为“苏醒”），苏醒值可设定为15%~19%。

2 1控3的恒压供水系统

1控3是由1台变频器控制3台水泵的工作方式，其目的是减少设备费用。但显然，3台水泵中只有1台是变频运行的，其总体节能效果不能与用3台变频器控制3台水泵相比。

2.1 1控3的工作方式

设3台水泵分别为1号泵、2号泵和3号泵，工作过程如下：

先由变频器起动1号泵运行，如工作频率已经达到50Hz，而压力仍不足时，将1号泵切换到工频运行，再由变频器去起动2号泵，供水系统处于“1工1变”的运行状态；如变频器的工作频率又已达到50Hz，而压力仍不足时，则将2号泵也切换到工频运行，再由变频器去起动3号泵，供水系统处于“2工1变”的运行状态。

如果变频器的工作频率已经降至下限频率，而压力仍偏高时，则令1号泵停机，供水系统又处于“1工1变”的运行状态；如变频器的工作频率又降至下限频率，而压力仍偏高时，则令2号泵也停机，供水系统又回复到1台泵变频运行的状态。这样安排，具有使3台泵的工作时间比较均匀的优点。

2.2 1控3的控制电路

很多变频器都带有专用于由1台变频器控制多台水泵的附件，称为扩展板。以森兰BT12S系列变频器为例，其控制电路如图7所示。接触器KM1用于接通变频器的电源；1KM2、2KM2、3KM2分别用于将电动机M₁、M₂、M₃接至变频器的输出端；1KM₃、2KM₃、3KM₃分别用于将电动机M₁、M₂、M₃接至工频电源。除KM₁外，其余6个接触器都由继电器扩展板进行控制。

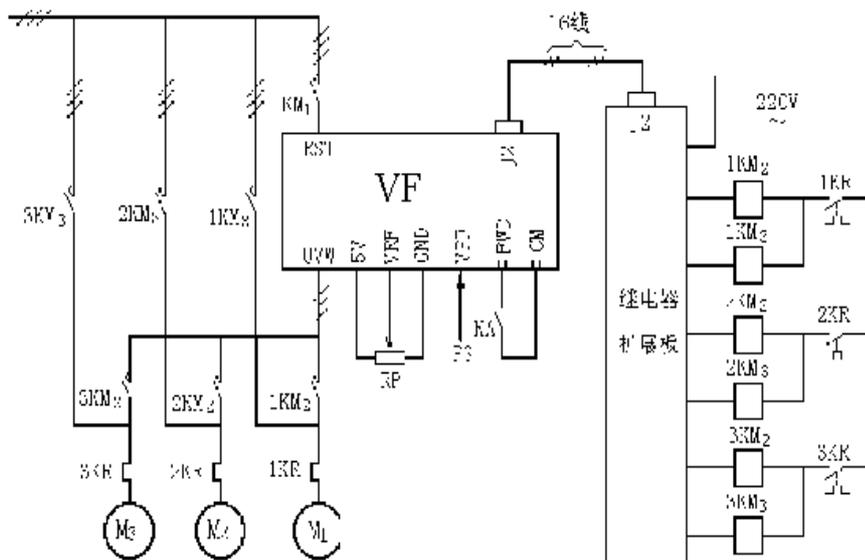


图7 1控3电路图

反馈信号和目标信号的接法和单台控制时完全相同。

2.3 1控3的功能预置

除常规的功能外，BT12S系列变频器专门针对由1台变频器控制多台水泵的控制方式设置了与继电器扩展板相配合的功能，如表1所示。该功能十分方便用户进行预置。

表1

功能码	功能名称	预设范围	出厂预设	1控3预设
F53	电动机台数	0: 1控1 1: 1控2 2: 1控3 3: 1控4 4: 1控5 5: 1控6	0	2
F54	电动机启动顺序	0: 电动机M ₁ 首先启动 1: 电动机M ₂ 首先启动 2: 电动机M ₃ 首先启动 3: 电动机M ₄ 首先启动 4: 电动机M ₅ 首先启动 5: 电动机M ₆ 首先启动	0	0
F55	附属电动机设定	0: 无 1: 变频运行 2: 工频运行	0	0
F56	换机间隙时间	0.1~50.0s	0.5	1
F57	切换频率上限	0.5~120Hz	50.0	50.0
F58	切换频率下限	0.1~120Hz	10.0	35.0

第六讲 循环水系统的变频调速

张燕宾

1 循环水系统与供水系统的比较

人们通常的概念是：水泵工作过程中消耗的功率与转速的立方成正比。这是因为，水泵的主要用途是供水，而对于一般供水系统来说，上述结论无疑是正确的。然而，水泵的用途是多方面的，在非供水系统中，上述结论却未必是正确的。

1.1 供水系统的特点

供水系统的基本模型如图1所示。

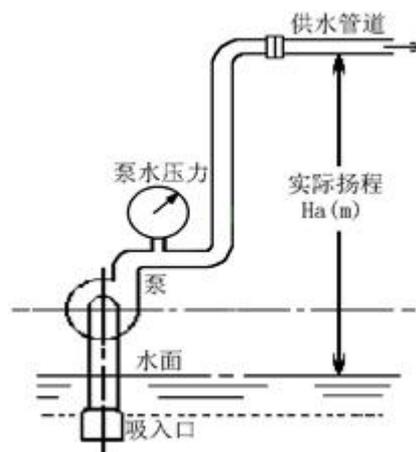


图1 供水系统模型图

(1) 供水特点

在供水系统中，用户所用的水是被消耗掉的。它并不回到水泵的进水口，对拖动系统毫无反馈作用。

(2) 水泵的作用

在供水系统中, 水泵的作用是提高水的扬程。

(3) 水路特点

实际需要的扬程较大, 水泵的全扬程必须大于实际扬程才能供水。

(4) 功率计算

在供水系统中, 所消耗的功率与扬程和流量的乘积成正比:

$$P=H \cdot Q \quad (1)$$

式(1)中P为功率(kW); H为扬程(m); Q为流量(m³/s)。

当改变水泵的转速时, 流量和转速成正比:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

式(2)中Q₁、Q₂为调速前后的流量(m³/s); n₁、n₂为调速前后的转速(r/min)。

而全扬程和转速的平方成正比:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (3)$$

式(3)中H₁、H₂为调速前后的全扬程(m)。

所以, 功率与转速的三次方成正比:

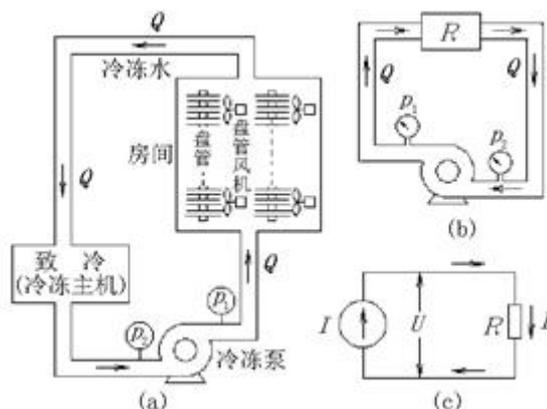
$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \quad (4)$$

式(4)中P₁、P₂为调速前后的功率(kW)。

由于供水系统在一昼夜间所需的平均流量(从而平均转速)大大小于最高流量, 所以, 在采用变频调速系统进行恒压供水控制时, 其节能效果十分显著。

1.2 循环水系统

循环水系统的基本模型如图2所示。



(a) 冷冻水系统 (b) 等效水路 (c) 电流源电路

图2 循环水系统模型图

(1) 用水特点

在循环水系统中, 所用的水是并不消耗的。从水泵流出的水又将流回水泵的进口处, 并且, 回水本身具有一定的动能和位能, 将反馈到水泵的进水口。其典型实例是中央空调中的冷冻水循环系统, 如图2(a)所示。冷冻水路由冷冻泵、各楼层房间的盘管以及冷冻主机等构成一个封闭的循环水系统。这

里, 冷冻主机只起降低水温的作用, 对于水的流量, 并没有特殊的作用。因此, 该水路可简化成如图2(b)。

(2) 水泵的作用

在全封闭的循环水系统中, 水流具有连续性, 全扬程几乎为0。水泵所起的作用就是使循环水按一定的流量 Q 流动。这种情形与图2(c)所示的电流源电路十分类似: 电流源的作用就是产生一定量的电流。

(3) 压差的概念

在图2(c)所示的电路中, 电流 I 流经电阻 R 后将产生电压 U (即电位差)。同理, 循环水系统中, 在水泵的出水口和回水口之间, 也必存在着压力差 pD :

$$pD = p_1 - p_2 \quad (5)$$

式(5)中 pD 为水泵出水口和回水口之间的压差(MPa); p_1 为出水压力; p_2 为回水压力。

与电路的工作情形相类似, 循环水系统中压差 pD 的大小是与流量成正比的:

$$pD = Q \cdot R \quad (6)$$

式(6)中 R 为水路中的管阻。

2 循环水系统的控制方式与节能效果

结合中央空调的实际例子, 如图3(a)所示, 其控制方式大致有两种:

2.1 利用变频调速进行恒压差控制

(1) 控制特点

以水泵的出水压力和回水压力之间的压力差作为控制依据, 通过变频调速, 实现恒压差运行。

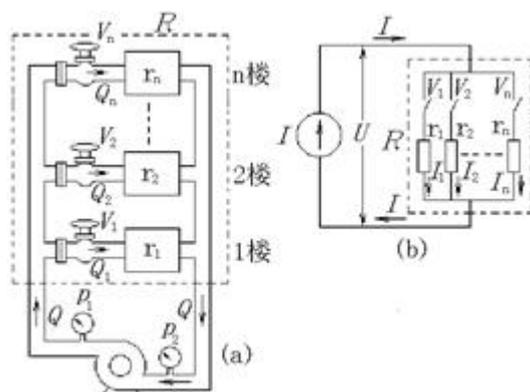
(2) 控制原理

以图3(b)所示的电流源电路为例, 如果切断部分支路, 则负载电阻增大, 在总电流 I 不变的情况下, 端电压 U 必然也增大。与此同时, 各支路中的电流也必增大。

如能通过调节电流源的电流大小, 保持端电压 U 不变, 则各支路中的电流也不变。

同理, 在大楼的冷冻水循环系统中, 当关掉部分楼层的冷冻水管路时, 总的管阻也必增大, 水泵两端的压差也增大, 阀门未关的楼层中的流量增大, 导致室温下降。

如果通过变频调速, 使压差保持恒定, 则未关楼层的冷冻水流量将保持不变, 从而室温也不会变化。



(a) 冷冻水系统 (b) 模拟电路
图3 多楼层的冷冻水系统模型图

(3) 节能效果

在循环水系统中水泵做功的功率可计算如下:

$$P = p_D \cdot Q \quad (7)$$

由于压差 p_D 恒定, 故:

$$P = K P'' \cdot n \quad (8)$$

式(8)中 $K P''$ 为比例常数; n 为转速。

式(7)(8)表明, 功率 P 只与流量或转速的一次方成正比。在平均转速低于额定转速的情况下, 其节能效果与供水系统相比, 将大为逊色。

此外, 恒压差控制方式没有把环境温度变化的因素考虑进去, 就是说, 冷冻水所带走的热量与房间温度无关, 当环境温度变化时, 室温也必将发生变化, 可见, 这种方式也明显不大合理。

(4) 控制框图

压差信号的取出如图4中的虚线所示。市场上已有压差变送器出售, 可以直接使用。由压差变送器得到的压差信号 X_F , 作为反馈量输入到变频器的反馈信号端 IPF 。

压差的目标值 X_T 可以从电位器上取出, 如图4所示, 也可以由控制面板直接输入。

2.2 利用变频调速进行恒温差控制

(1) 控制特点

以冷冻主机的回水温度和出水温度之差作为控制依据, 通过变频调速, 实现恒温差运行。

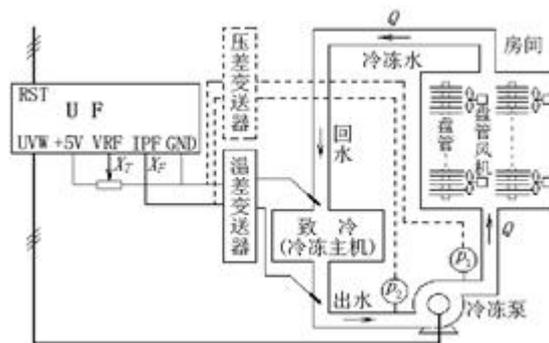


图4 冷冻水的控制方式原理图

(2) 控制原理

冷冻主机的回水温度和出水温度之差表明了冷冻水从房间带走的热量。因此, 如果温差大, 说明房间温度高, 应加快冷冻水的流量; 反之, 如果温差小, 说明房间温度低, 应减缓冷冻水的流量。所以, 恒温差控制可以使房间的温度保持稳定。

其工作特点是:

- 负载不变时的情形 以电路为例, 在负载电阻不变的情况下, 电流大小改变时, 端电压 U 也随之改变。同样, 当开启的楼层不变时, 改变冷冻水的流量, 水泵两侧的压差也必然改变。
- 负载改变时的情形 假设关掉部分楼层的冷冻水管道, 在刚关掉的时候, 将导致压差上升, 使未关房间的冷冻水流量增大。但由于冷冻水流经的房间减少, 带走的热量也少, 温差下降, 反馈给变频调速系统, 使水泵的转速下降, 冷冻水的流量重又减小, 直至温差恢复到目标值为止。

(3) 节能效果

由于压差并非恒值, 故式(8)已不适用。但由式(6)和式(7)可知:

$$P=Q^2 \cdot R \quad (9)$$

所以, 在循环水系统里, 水泵的功率是和转速的平方成正比的:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (10)$$

可见, 采用了恒温差控制方式后, 不仅房间的温度比较稳定, 其节能效果也比恒压差控制方式好, 但仍低于供水系统的节能效果。三者的比较如表1所示。

表1

供水流量	90%Q _N		80%Q _N		70%Q _N	
比较项目	耗用功率	节电率	耗用功率	节电率	耗用功率	节电率
供水系统	72.9%	27.1%	51.2%	48.8%	34.3%	65.7%
循环水系统	恒温差控制	81.0%	19.0%	64.0%	36.0%	49.0%
	恒压差控制	90.0%	10.0%	80.0%	20.0%	70.0%

(注: 表中数据为粗略计算, 水泵本身的功耗与水泵效率等均未考虑)

(4) 控制框图

如图4中实线所示, 反馈信号由温差控制器给出。控制时, 需注意其逻辑关系:

温差大, 说明房间的温度高, 应提高水泵的转速, 加大冷冻水的流量; 反之, 温差小, 说明房间的温度低, 应降低水泵的转速, 减小冷冻水的流量。

2.3 压差与温差的综合控制

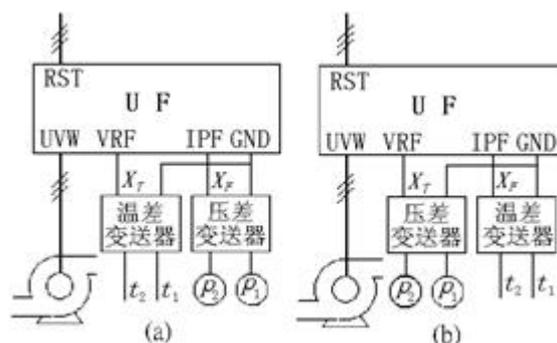
上述分析, 可以改进的控制方案有两种:

(1) 压差为主、温差为辅的控制

以压差信号为反馈信号, 进行恒压差控制。而以温差信号作为目标信号, 使压差的目标值可以在一定范围内根据温差大小进行适当调整。就是说, 当房间温度较低时, 使压差的目标值适当下降一些, 减小冷冻泵的平均转速, 提高节能效果, 如图5(a)所示。这样, 既考虑到了环境温度的因素, 又改善了节能效果。

(2) 温差为主、压差为辅的控制

以温差信号为反馈信号, 进行恒温差控制, 而以压差信号作为目标信号。就是说, 当开启的楼层较多时, 在同样的流量下, 压差较小。这时, 应适当提高目标信号, 增加冷冻泵的平均转速, 确保最高楼层具有足够的压力, 如图5(b)所示。



(a) 压差为主

(b) 温差为主

图5 冷冻水综合控制原理图