

东北大学
硕士学位论文
AC-2000数字式交流变频调速装置在首钢2160工程上的应用研究
姓名：刘荣杰
申请学位级别：硕士
专业：控制理论与控制工程
指导教师：王建辉
2001. 1. 1

摘要:

近年来, 由于交流变频调速技术日臻完善, 已能与直流调速传动技术相媲美, 并逐渐在许多工业领域中取代直流调速传动。本文就美国GE公司出品的AC-2000 数字式变频调速装置在首钢 2160 热带钢连轧机工程的热输出辊道传动中的应用和该交流变频调速装置的特点以及控制系统结构、原理, 特别是所运用的矢量变换控制、PWM控制进行了较为深入和系统的分析。从而对2160热带轧钢项目下一步顺利进行奠定了坚实的理论基础, 同时对工程实施非常有指导意义。

关键词: 变频器 矢量控制 PWM控制

The Application And Research Of
AC-2000 Of The Digital Alternating
Current Being-converter Timing
Device On The 2160 Engineering IN
Shou Gang

ABSTRACT:

In the years, owing to the AC variable frequent technology being perfected inceasingly, it can compare fvorably with the DC timing dyiving technology and replace the DC timing drive in lot of fields of industry gradually. this passage is to make a deeper and systematic analysis about the application of the AC-2000 of the AC verable frequent device from U. S. A GE company when it is used on the hot-output rolling-road transmission of the 2160 engineering of the hot steel strip milling roll and its characteristic and configuration of the controlling system, theory, and vectorial transpositional control, the PWM control of which it exercise especially. Thus laying a solid theoretical foundation for the 2160 project of the the hot milling roll that can go on smoothly, the same as the analysis is directing singnificance to the implement of the engineering.

KEYWORDS: Frequency converter Vectorial control
PWMcontrol

正在筹备建设中的首钢总公司2160热带连轧机工程是首钢为改变目前产品结构单一，进行产品结构调整和加快形成新的经济增长点的主要工程措施。

该工程建成后年产热带钢板400万吨，产品厚度为1.6-19mm，宽度为750-2030mm，2160热带轧机工程的电控设备按照“一流设备”的要求，引进了美国GE公司的数字式交流变频调速装置和数字式直流调速装置，作为轧线主、辅传动交、直流电机的传动控制装置。其中热轧线精轧机组出口机架至卷取机前夹送辊之间，长达109米的热输出辊道的240台交流电动机均采用了GE公司出品的14台AC-2000数字式交流变频调速装置作为其传动电源。这是首钢第一次在轧钢生产线上采用大量的数字式交流变频调速装置。目前数字式交流变频调速装置在国外已得到广泛的应用，特别是在欧美发达国家，几乎所有的热带轧钢厂在电气控制方面都采用全交流、全数字调速技术，在国内仅有上海宝钢1580热带轧钢厂采用了全交流、全数字调速技术，而其它的热带轧钢厂则是采用直流调速与交流调速相结合的方式，98年攀钢热带轧钢厂把原已使用多年的直流主传动调速装置，以技术改造的方式改为交-交变频调速。因此深入研究和学习美国GE公司为首钢2160热带轧钢项目而选用的AC-2000数字式变频器的控制原理，对我们今后的工作具有现实的指导意义。

第二章 AC-2000数字式交流变频调速装置在 热输出辊道上的应用

AC-2000数字式交流变频调速装置是从美国GE公司引进的具有90年代先进水平的调速设备，它根据所适用的工作环境轧钢工艺提出的调速要求进行设计，采用交-直-交电压型控制方式。主回路如图(1)所示

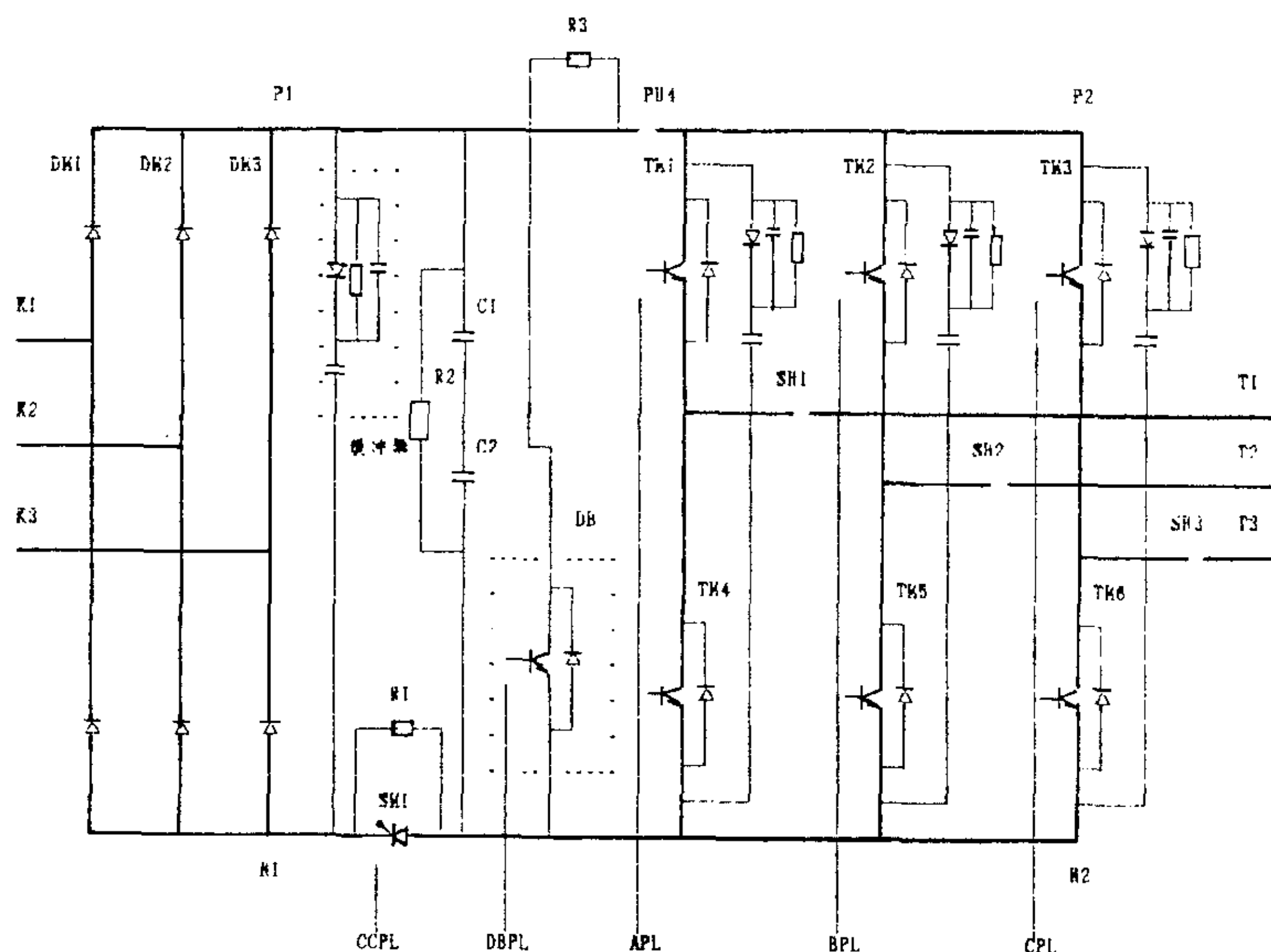


图 (1) AC2000主回路电路图

第一节 首钢2160热连轧工程工艺流程简介

首钢2160工程在设计上采用连铸连轧工艺形式。如图

道进入板卷箱，板卷箱把初轧带钢卷取后，由带钢的尾部变成带钢的头部，由输送辊道经飞剪切去头部后进入F1~F7精轧机组(带钢的尾部经过飞剪时切去带钢的尾部)带钢由末架精轧机轧出后经过热输送辊道送到卷取机卷取成卷。

(2) 所示从首钢第二炼钢厂板坯连铸机到2160热连轧厂的粗轧机之间不设中间板坯库，而是经隧道炉除鳞后直接进入R1粗轧机进行轧制，这样可以大大降低热能的浪费，使生产组织更加严密。R1两辊粗轧机经单道次轧制后，经R1的输出和R2的输入辊道送入R2四辊粗轧机，经R2的输出辊道进入板卷箱，板卷箱把初轧带钢卷取后，由带钢的尾部变成带钢的头部，由输送辊道经飞剪切去头部后进入F1~F7精轧机组(带钢的尾部经过飞剪时切去带钢的尾部)带钢由末架精轧机轧出后经过热输送辊道送到卷取机卷取成卷，完成整个轧制过程。在正常情况下，全部轧制过程不需要人为操作，全部由事前设定好的计算机程序完成，在遇到事故状态时才需要人为干预。

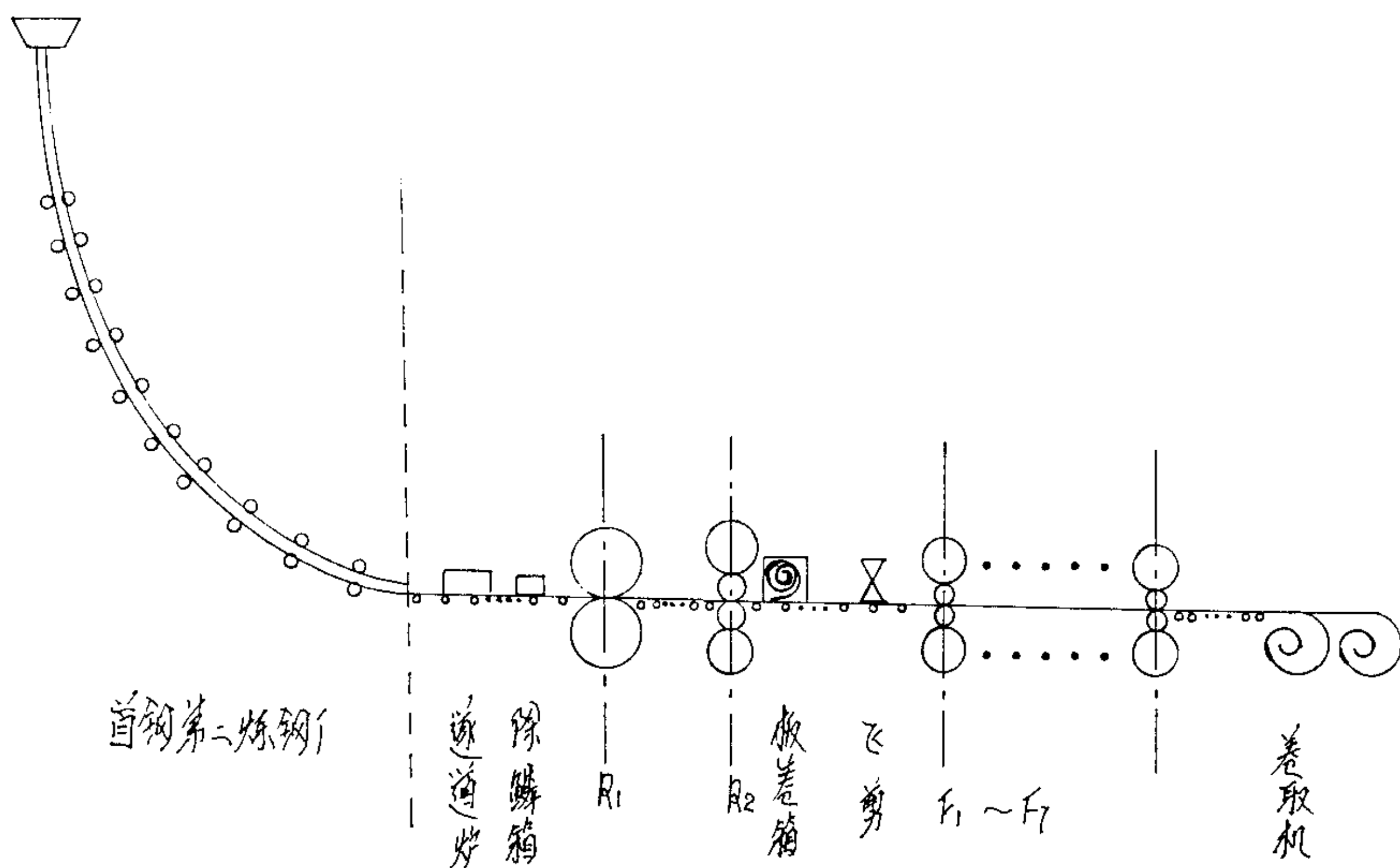


图 (2) 工艺流程图

第二节 热输出辊道的生产工艺 对 控 制 系 统 的 要 求

这里首先对热输出辊道生产工艺进行介绍，以便了解为什么要选用AC-2000来作为其设备的传动装置。

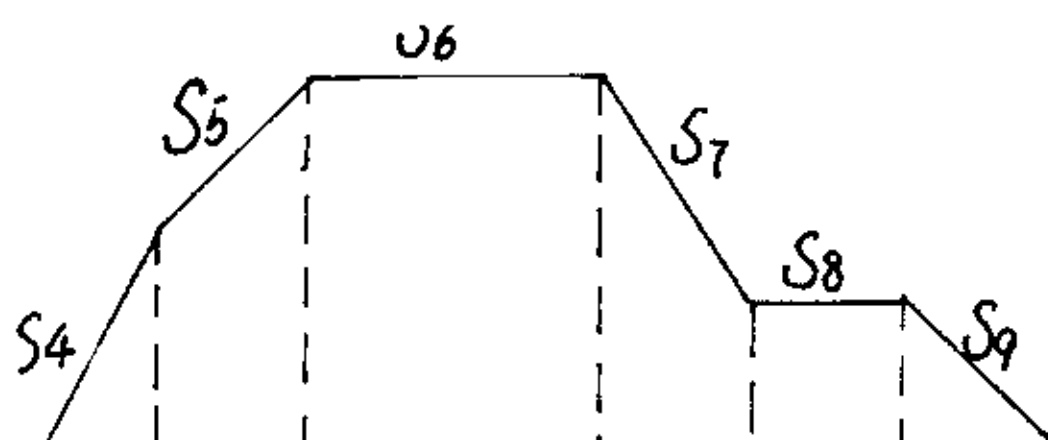
从精轧机轧出的成品带钢是由热输出辊道输送到100多米远的卷取机进行卷取成卷，完成整个热带钢卷的全部生产过程。

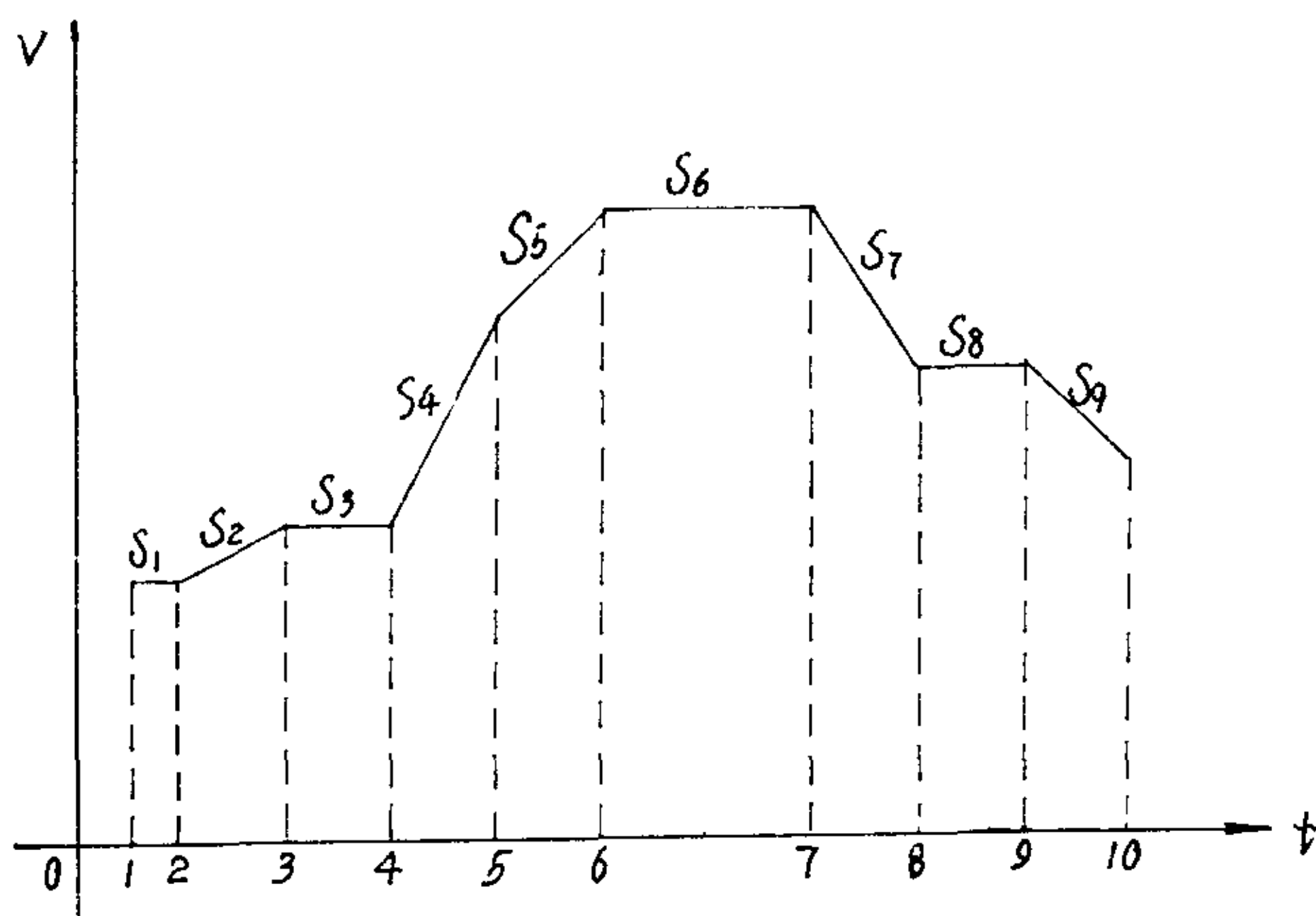
热输出辊道的全部240个辊子按照工艺要求一共分为14组，每组由13-18个辊子组成。即前后两组每组13个辊子，第2、3组每组16个辊子，第4-13组每组为18个辊子。每个辊子均由单独一台交流鼠笼式电动机拖动。从末架精轧机组轧出来的带钢温度为 $800-850^{\circ}\text{C}$ ，并且又宽又薄，工艺要求14组辊道的速度要逐组升高，即后一组辊道比前一组辊道的速度要略高一点，最后一组的辊道速度一般要高出第一组辊道速度约为20%左右。利用速度差使辊道传送的薄带钢产生纵向张力，保持带钢在传送过程中的平直，避免形成波浪或打折，影响成品带钢的质量。

而且，在正常轧制时，热输出辊道是与精轧机组同步运行，一般不反转，只是在出现事故或进行废钢处理、调试时才使辊道反转，同时辊道在正常轧钢条件下极少进行启、停操作。

轧制节奏是每分钟即轧出一块卷重为36吨的成品带钢，热输出辊道的速度是随精轧机轧制速度变化而变化，如图(3)所示

这样在一块带钢的轧制周期内，辊道速度是经历了等待--加速--稳定高速--减速--等待几个阶段，而每个阶段的时间长短各不相同。并且，对于不同规格的产品，轧制速度、加减速等也是不相同的，速度是频繁变动的。所以，对于辊道的传动控制方式就必须按照上述的负荷性质、运行条件和工艺特点来综合考虑。





图(3)轧制速度变化曲线图

第三节 热输出辊道所处的生产环境

八十年代以前，热输出辊道的传动控制方式广泛采用直流传动。虽然直流传动在调速方面可以满足其工艺要求，但由于直流电机在运行维护方面存在着种种不利因素，特别是直流电机防水性能方面满足不了生产要求。因为辊道在运输热带钢的同时，设置在辊道上方和下方的层流冷却装置对辊道上通过的热带钢进行层流冷却，把带钢温度冷却到 $550-650^{\circ}\text{C}$ 进行卷取才能保证成卷的带钢质量。在带钢被层流冷却过程中溅出的水会波及到电机，并且辊道四周存在大量水蒸汽。在这种恶劣的环境条件下要求电机具有很好的防水性能，而直流电机的防水性能较差，这样在生产过程中因潮湿而损坏的电机较多，造成维护量大和维护费用高，给正常生产带来影响。所以如何改变这种被动状况，便成为人们多年来一直考虑的问题。

第四节 热输出辊道传动的交流化

如前所述，在热带钢轧制线上，由于热输出辊道对传动的调速要求及其环境条件的恶劣，以及直流电机存在的问题，人们一直希望用交流鼠笼电动机来取代直流电动机。我们知道交流鼠笼型电动机具有结构简单、运行可靠、维护方便、价格便宜能在恶劣环境条件下工作，具有较好的防水性能，这是直流电动机所不能比拟的。所以人们一直考虑使用它来取代直流电动机，应用于热输出辊道上。

近年来，随着电力电子技术、微电子技术的急速发展，新的电力电子器件的出现，如快速SCR、可关断可控硅GTO、功率晶体管GTR和大规模集成电路等，以及矢量控制理论和微处理机的应用，各种交流变频调速装置相继开发出来并逐步应用到各个领域，使交流调速性能完全可以与直流调速性能相媲美。在热带钢轧制线上，最先应用交流变频调速装置的设备就是热输出辊道。在我国九十年代中期以后建成的热带钢连轧生产线上全部采用，并应用得比较成功的交流变频调速装置也是在热输出辊道设备的传动应用上，轧线其它主、辅传动设备仍是以直流传动为主。只有九六年底建成的宝钢1580热带轧机工程才在整条轧线采用了全交流调速传动。

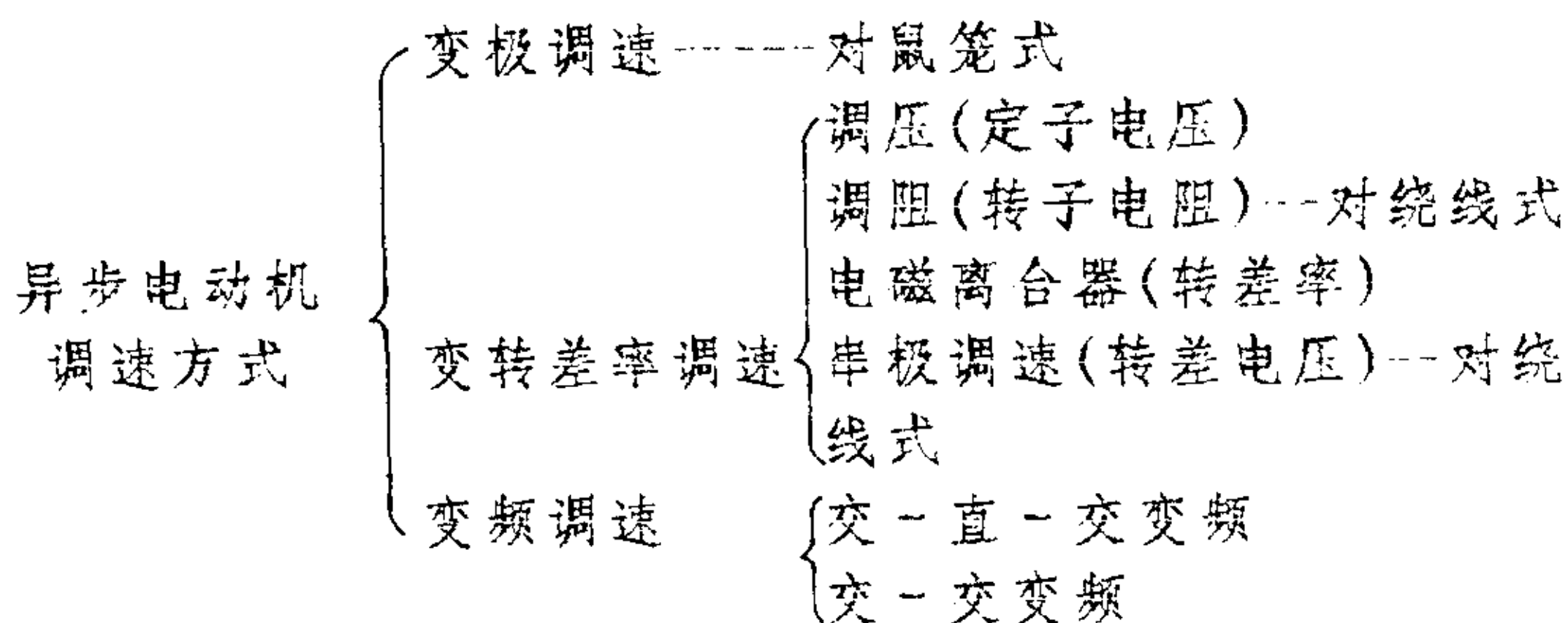
交流变频调速装置可分为间接变换和直接变换两大类型，而目前国内外热带钢轧线所有热输出辊道采用的交流传动都是间接变换类型，其拖动电机无一例外都是使用的防水型交流鼠笼电动机。

第五节 交流变频的调速分类及控制方式

从交流电机的速度表达式

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

可知，交流异步电动机的调速方法可以有三种变转差率S、变极对数P及变频f。



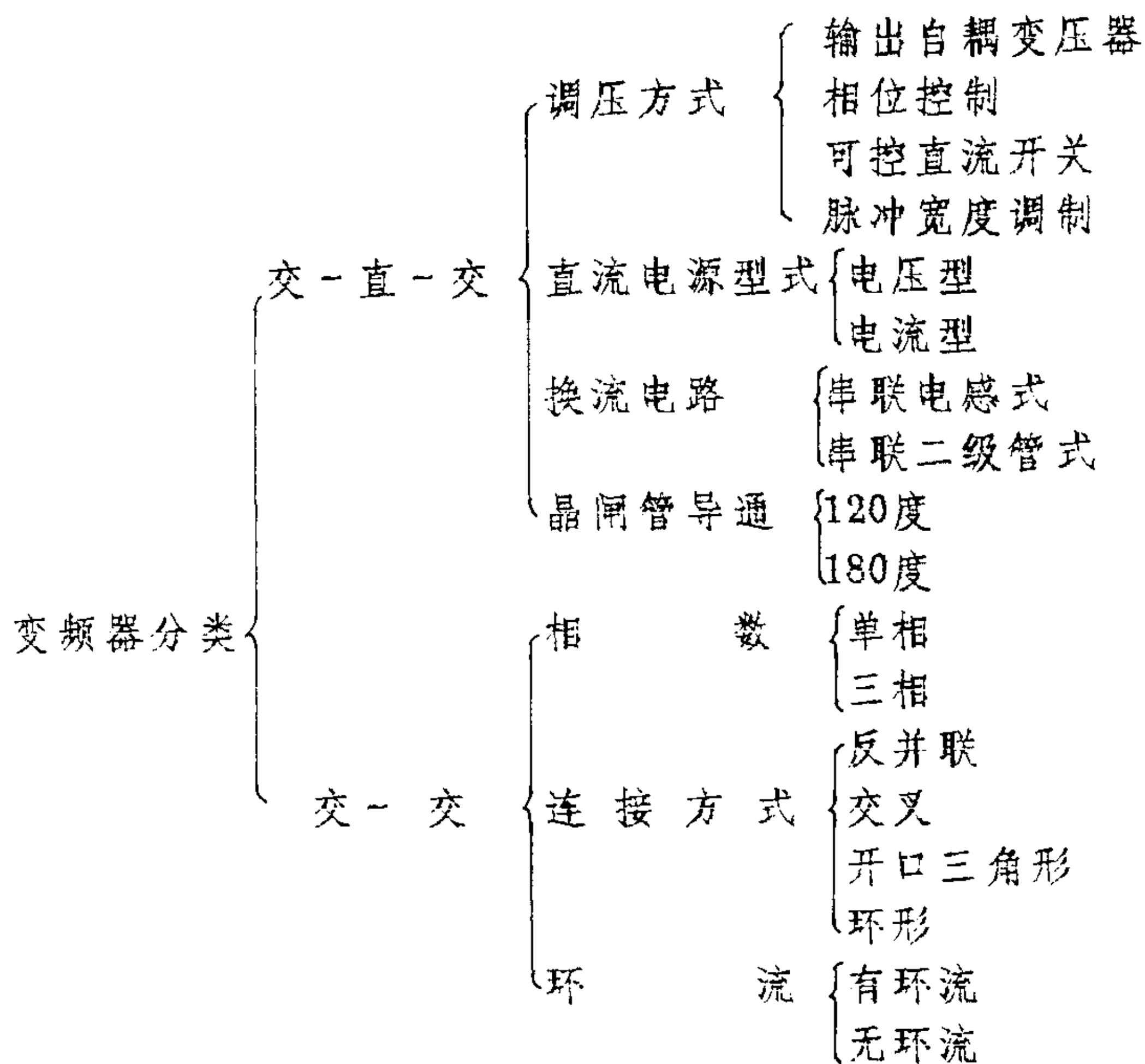
交流电动机调速分类表

在这里我们主要讨论异步电动机利用改变频率调速。变频调速方法与变转差调速方法有本质的不同。变频调速时，从高速到低速都可以保持有限的转差率，因而变频调速具有高效率、宽范围、和高精度的调速性能。可以认为变频调速是交流电动机的一种比较合理和理想的调速方法。

目前由于新型电子器件的不断出现，特别是计算机的广泛应用，使变频调速方法受到人们的普遍重视，并已经在生产的很多领域中获得了应用，目前变频调速是交流电动机调速的重要发展方向。

变频器可以分为交-直-交变频器与交-交变频器两大类。前者又常称带直流环节的间接式变频，后者又常称直接式变频器。每一类又可以根据不同分类方法加以区分，如下表所示：

根据控制方式的不同，可以有三种不同的变频调速原则：磁通变频调速、恒流变频调速及恒功率变频调速。



第六节 交流电机对调速的要求

根据电工理论，异步电动机每相绕组可用图(4)的等效电路来表示：

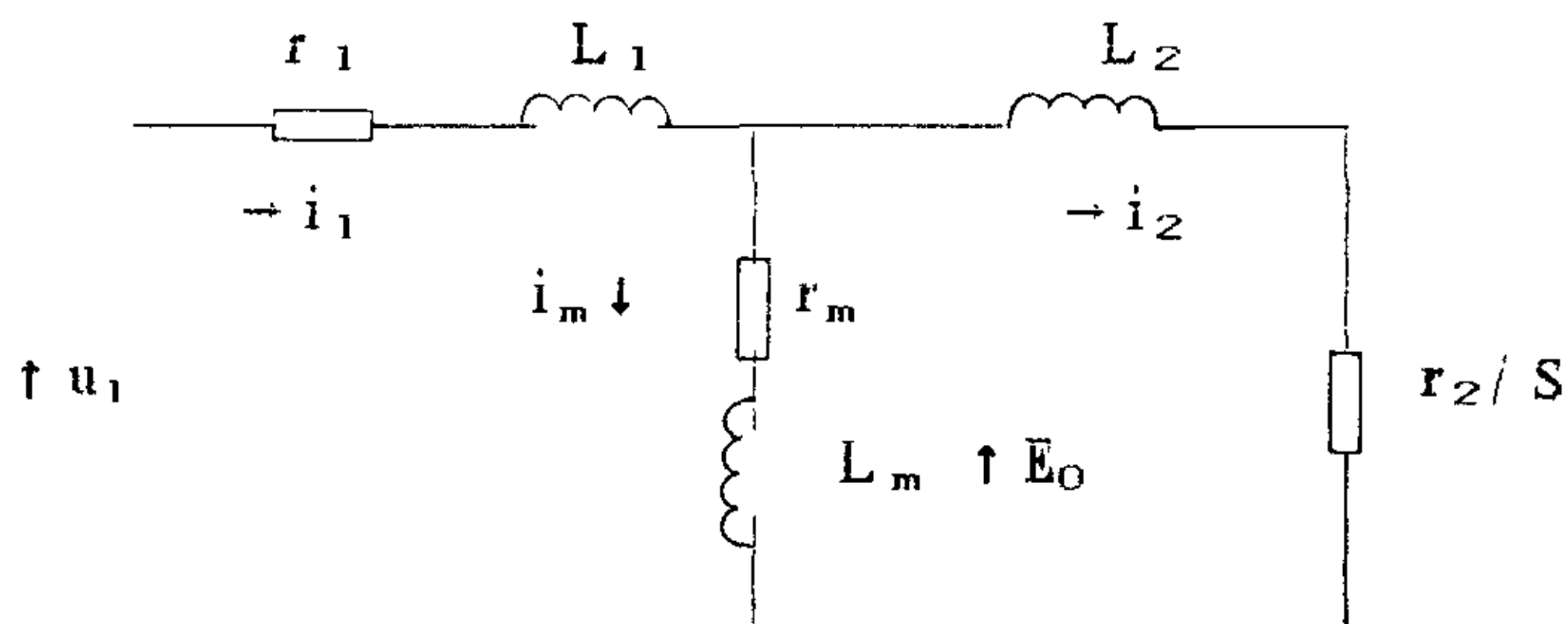


图 (4) 异步电机等值电路

其中：

i_1 、 L_1 : 一次绕组电阻与电感。

i_2 、 L_2 : 转子回路折算到一次的电阻与电感。

L_m : 为励磁电感。

i_m : 为激磁损耗的等效电阻, 其值很小, 计算时忽略不计。

设 u_1 为一次电压, i_1 为一次电流, i_2 为二次电流, i_m 为励磁电流, E_0 为内部感应电势, S 为转差率, P 为电机极对数, 则电机转速 n 公式:

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

f : 为一次电压频率。

由于正常运行时转差率 S 很小, 约为 $0.04 - 0.06$, P 为常数(电机的极对数)所以(1)式可写成:

$$n \propto f \quad (2)$$

所以只要改变一次电压的频率 f 就能调节电动机的转速, 并且根据电机等效电路推出以下转矩公式:

$$\begin{aligned} M &= K_m \phi_m i_2 \cos \phi_2 \\ &= (K_m E_0 i_2 / 2\pi f L_m) \cdot \cos \phi_2 \end{aligned} \quad (3)$$

如果取 $E = V$, $\cos \phi_2$ 在正常运行时变化很小, 则(3)式可简化为:

$$M = \frac{u \cdot i_2}{f} \quad (4)$$

又由于:

$$i'_2 = \frac{S \cdot E_0}{(i'_2)^2 + (S x'_2)^2}$$

当 s 很小时, 则上式简化为:

$$\begin{aligned} i'_2 &= s \cdot E_0 / r'_2 \\ &= (\Delta \omega / \omega_1) \cdot (E_0 / r'_2) \\ &= (\Delta \omega / 2\pi f) \cdot (E_0 / r'_2) \end{aligned}$$

$$\text{又} \because i_2 = K \cdot i'_2 \quad E_D = u$$

$$\therefore i_2 \propto (u/f)(\Delta \omega) \quad (5)$$

$$\therefore M \propto (u/f)^2(\Delta \omega) \quad (6)$$

从(2)式和(6)式可知：调节电源频率就能改变异步电动机的速度。但如果在调节频率的同时，电源电压不变，就会出现以下两种情况：

- 1) 当电源电压不变降低频率低速运行时，电动机的感抗 $X = 2\pi fL$ 就相应减少，那么定子电流将增大、 ϕ_m 增大，使电机磁饱和，铁损、铜耗增加， $\cos\phi$ 降低，效率也降低。
- 2) 当电源电压不变，频率升高，气隙磁通 ϕ_m 和定子电流将随着频率的升高而减少，相应输出转矩也减少。如果在负载这种情况下负载不变，就会造成 i_2 升高，也造成电动机过流。

所以，绝大部分工业用的交流调速装置都采用变压、变频 (VVVF) 电源来拖动交流异步电动机。

这种方式就是在基频以下，随着频率的降低，则相应地降低电源电压以便保持恒定的气隙磁通，即 V/f 恒定，使异步电动机如同直流电动机基速那样保持恒转矩控制。图(5)示出转矩，速度曲线。

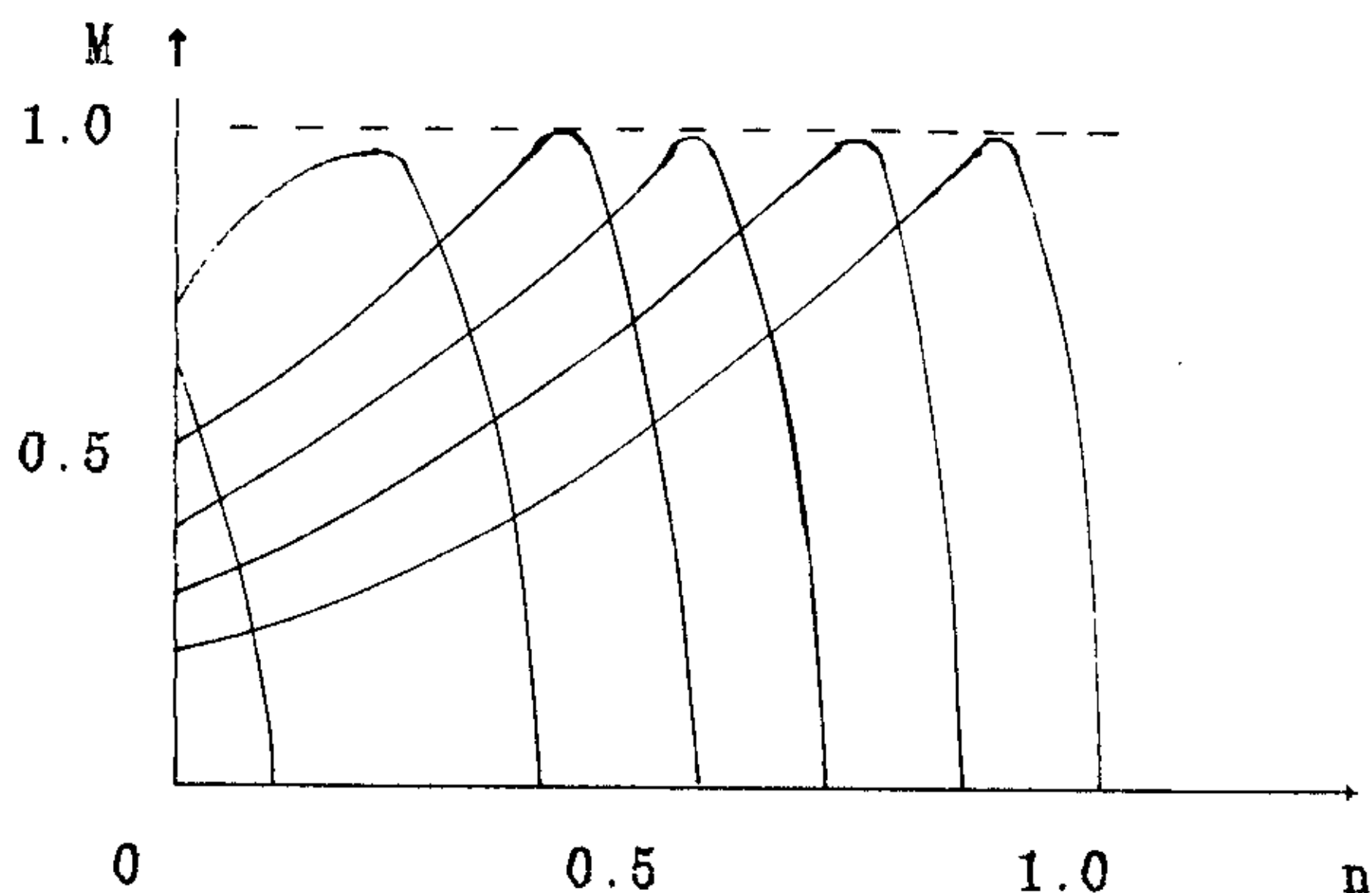


图 (5) 电压/频率恒定时的转矩/速度曲线

电阻值不能忽略，因定子绕组上的压降显得突出， V/f 不能再保持恒定，一般情况下，应用一个附加电压来补偿定子压降，以保持恒定转矩不变。如图(6)虚线所示。

在比较低的频率范围，由于电压也降低，这时绕组的电阻值不能忽略，因定子绕组上的压降显得突出， V/f 不能再保持恒定，一般情况下，应用一个附加电压来补偿定子压降，以保持恒定转矩不变。如图(6)虚线所示。

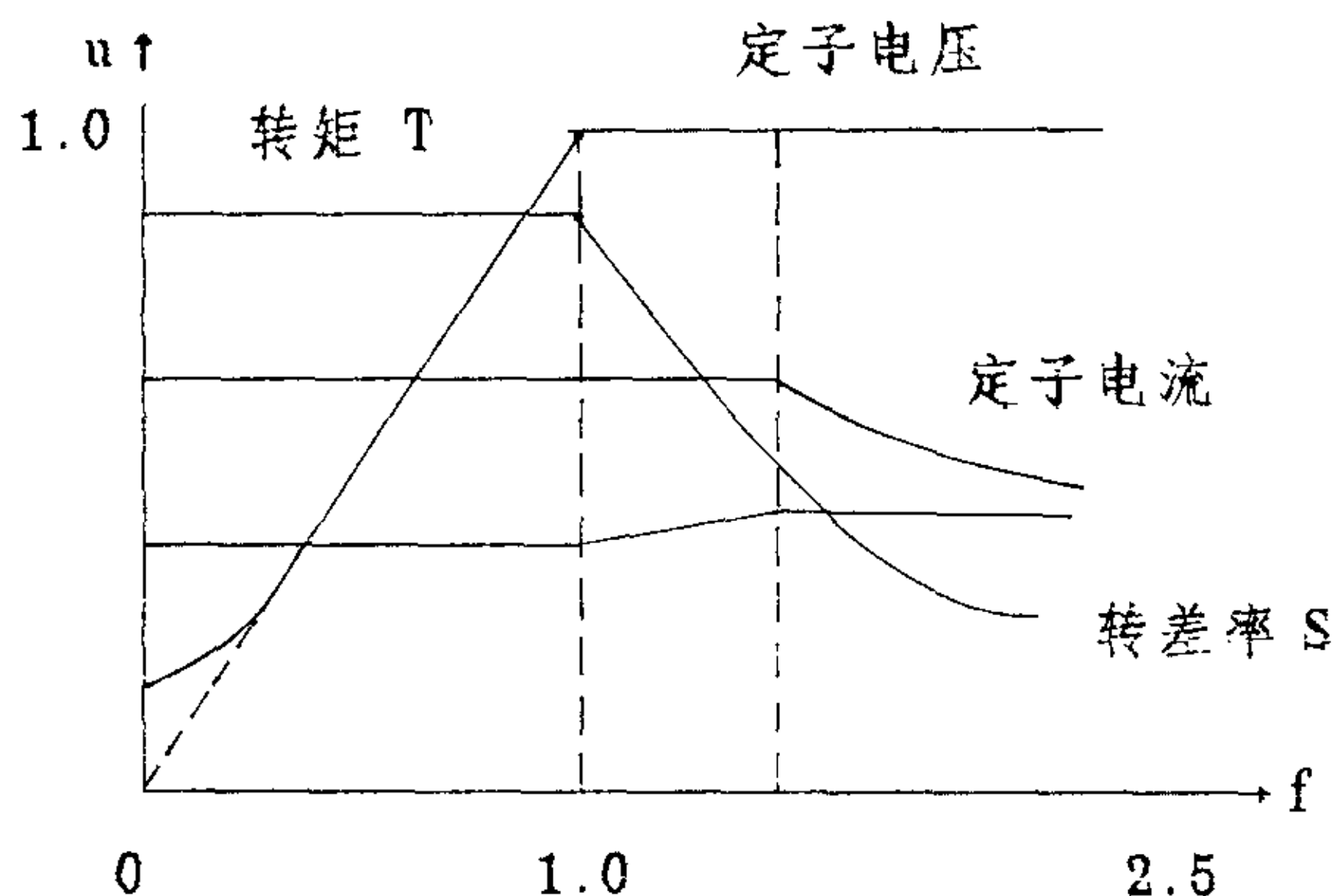


图 (6) 异步电动机的电压/频率关系曲线

由于恒转矩范围内电动机是在恒气隙磁通条件下运行，所以每安培定子电流可产生较高的转矩，从而允许传动系统快速瞬时响应。并且在变压变频传动系统中，电机具有低转差特性，效率较高。尽管基频运行的固有起动转矩较小，如图(7)所示，电机总是能在最大的转矩下起动。这一点是可满足热输出辊道传动所要求的。

在轧制厚度较大的带钢情况下，轧机速度相应降低，辊道速度也随之降低，其转矩保持不变。而在轧制厚度较小的情况下，轧机速度较高，虽然辊道在基速以上运行，输出转矩减小，但此时负载也相应减小，可以满足传动要求。2160所选用的AC-2000传动装置，则是在10-50Hz为恒转矩调速，50-58Hz为恒功率调速。

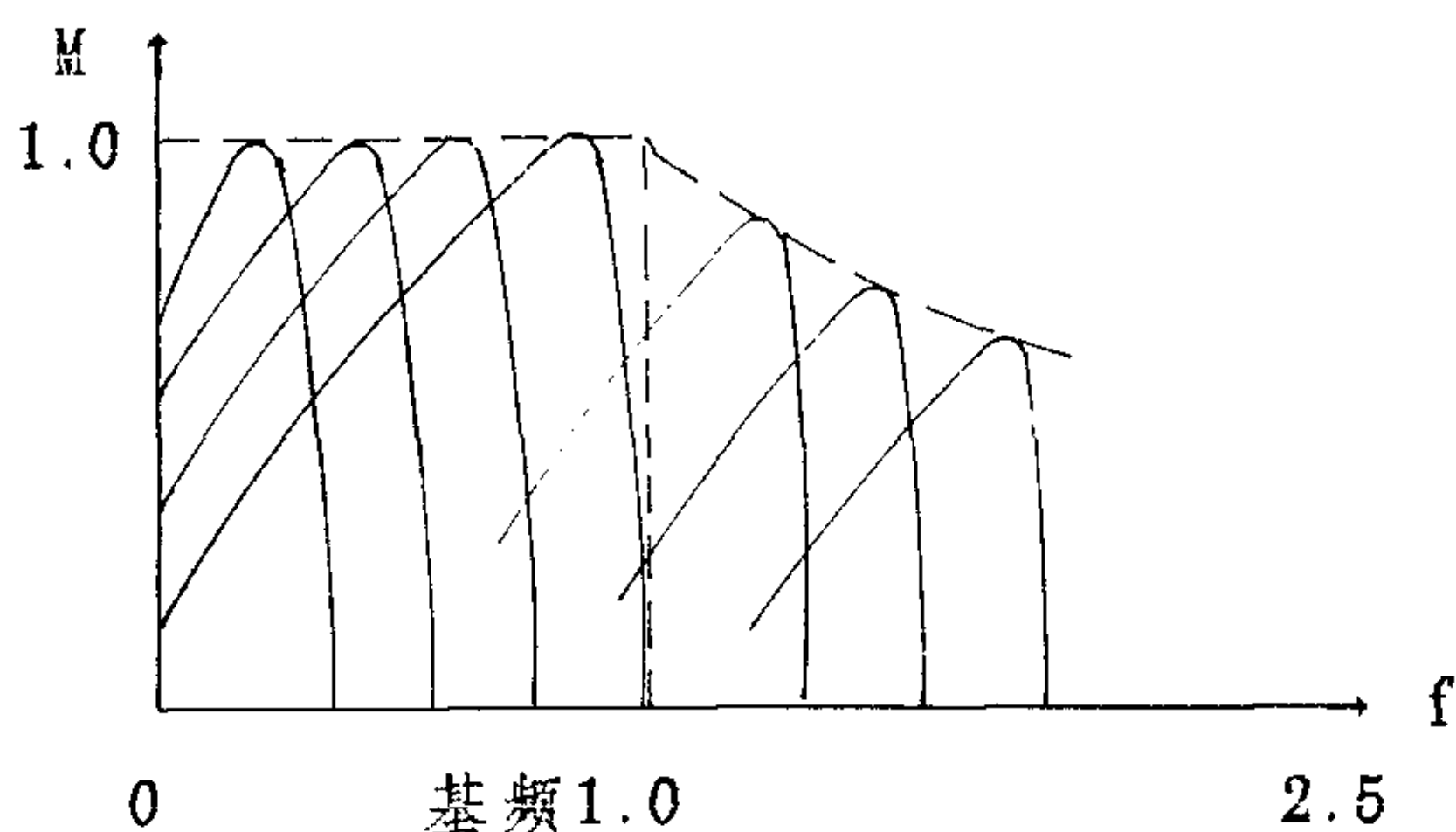


图 (7) 变压/变频电源下转速/速度曲线图

前述交流传动的控制型式就可以基本上使异步电动机如同直流电动机那样的控制特性来进行恒转矩和恒功率调速。而且 AC-2000 是速度开环运行，但在此控制型式下的开环运行其控制精度也是比较高的。可以满足生产工艺的要求。

实现控制有两种方式

一种是 PAM 方式，即是把 VV 与 VF 变换控制分开来完成；先采用可控整流器，将交流电变成可变电电压的直流电，完成 VV 变换；再在逆变器部分将直流电变成可调频率的交流电，完成 VF 变换。

另一种是 PWM 方式，是将 VV 和 VF 变换集中在逆变器完成，这就是 PWM 方式。

第七节 PWM 控制方式

由于 PAM 控制方式需要在整流器部分进行调压，增加了主回路和控制回路的复杂性，而且输出为 180 度或 120 度方波电压，存在较大的谐波损耗，引起电机发热并在低速时产生转矩脉动。随着全控型开关器件 GTR 等的应用，采用 PWM 技术的变频器就解决了 PAM 技术逆变器所存在的问题，使变频器输出电压和频率直接在逆变器进行调节。AC

-2000 装置的直流恒压源就是一个不可控的三相二极管桥路，不但 $\cos\phi$ 高达 97-98%，而且主回路及控制回路也较简单，系统也具有较好的动态响应性能。同时使变频器在成本、重量、效率及电压控制范围方面都得到了改善。

实现 PWM 有模拟调制方式和数字调制方式，在模拟控制电路中一般是用三角波作为载波信号，可变频率的正弦波作为调制信号，来生成 PWM 信号。改变正弦调制波的频率和幅值，就可以控制逆变器输出基波的频率和幅值。PWM 信号的生成一般有几种方式：

一是将模拟生成 PWM 电路改为数字电路来实现，这种方式一般是采用规则采样法来实现。

二是选择脉冲法，它按照所含谐波分量等性能指标的要求来确定逆变器输出脉冲序列，直接从输出脉冲序列形成确定三相 PWM 控制策略，不再用基于低频信号来控制高频振荡过程的 PWM 调制方法去确定逆变器中 GTR 的通或断。

三是目前最新颖的 PWM 调制方法，它不局限于如何使用逆变器生成按正弦规律变化的电源，而是将逆变器和电动机视为一个整体，基于电压、磁链空间矢量概念，建立逆变器开关器件的开关状态和电压矢量，以及电动机定子磁链矢量的关系，通过控制逆变器的开关状态产生 PWM 电压波形，这种方式即磁链轨迹法 PWM 控制。宝钢 96 年底投产的 1580 热轧工程的 MELVEC-2000 传动装置即是采用这种方式；而首钢 2160 工程采用的 AC-2000 传动装置是第一种方式，即数字控制方式。

逆变器的 PWM 控制过程如下：

以模拟电路生成 PWM 调制信号为例，对于 A 相：

其中 V_c 载波为等腰三角波信号，载波频率 f_c 固定不变。 V_r 为正弦调制波信号，其频率和幅值均是可变的，正弦调制波与载波相比较，在图(8)所示的自然相交点决定桥路上相应 GTR 的开通和关断。

在正弦调制波电压正半周时， T_1 根据正弦调制波与三角波相比较的相交点不断地进行导通和关断，从而产生脉宽按正弦半周期变化的等幅的高频脉冲列，电压在 T_1 导通时，上图 A 点接到直流电源正极，电流上升；当 T_1 关断时，

异步电动机的感性负载电流不能突变，则经过二极管 D_4 由直流电源负极继续流入电流，电压为负，电流逐渐下降。

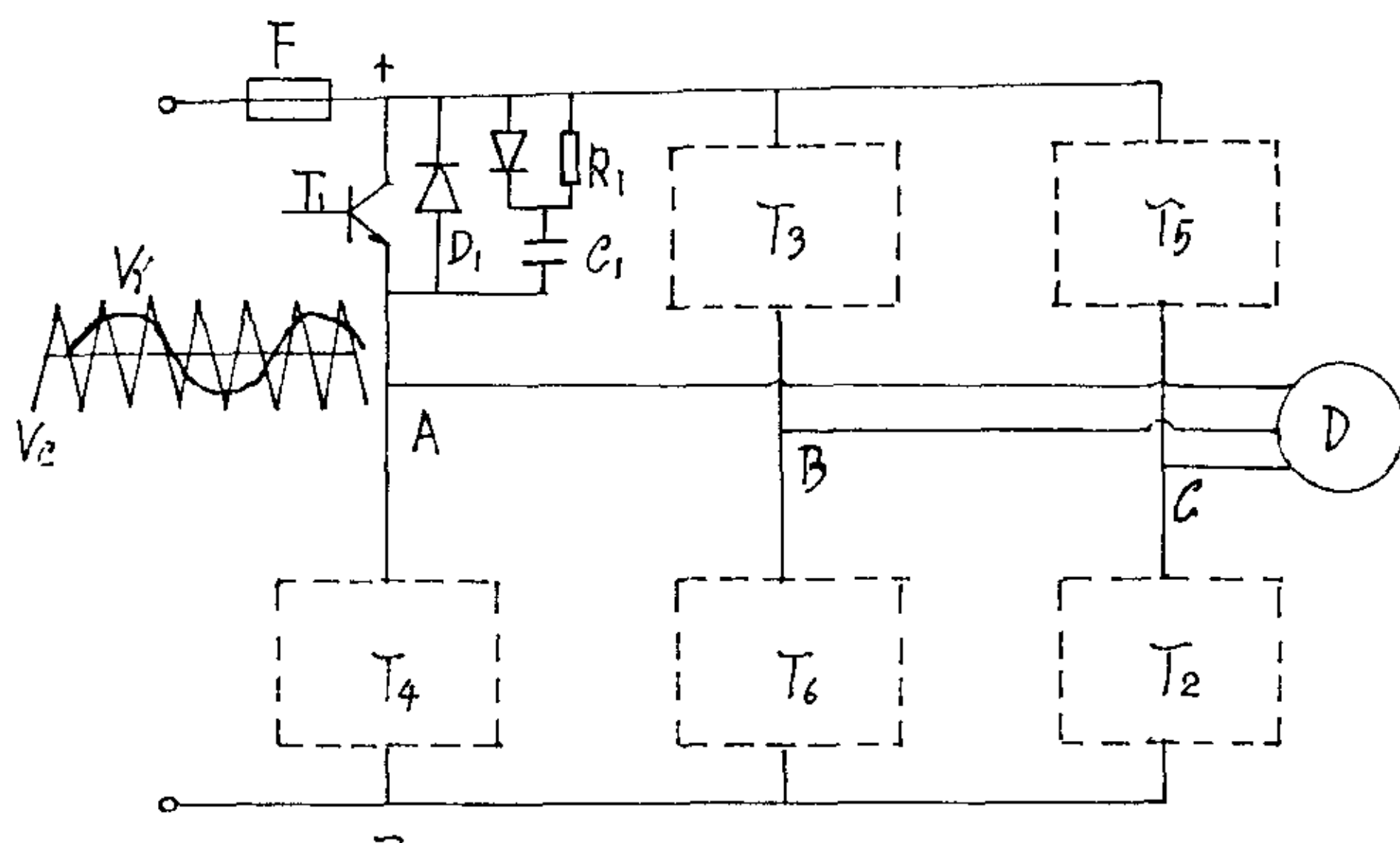


图 (8) 三相逆变器桥路

同理当正弦调制波为负半周时，在PWM控制下 T_4 管导通，A点接到直流电流负极，反向电流增大，当 T_4 管关断时，则 D_1 二极管续流。这样，产生一个正弦周期的脉宽变化等幅的“变频”脉冲列电压，电动机A相的电流呈带锯齿的正弦电流。如图(9)所示：

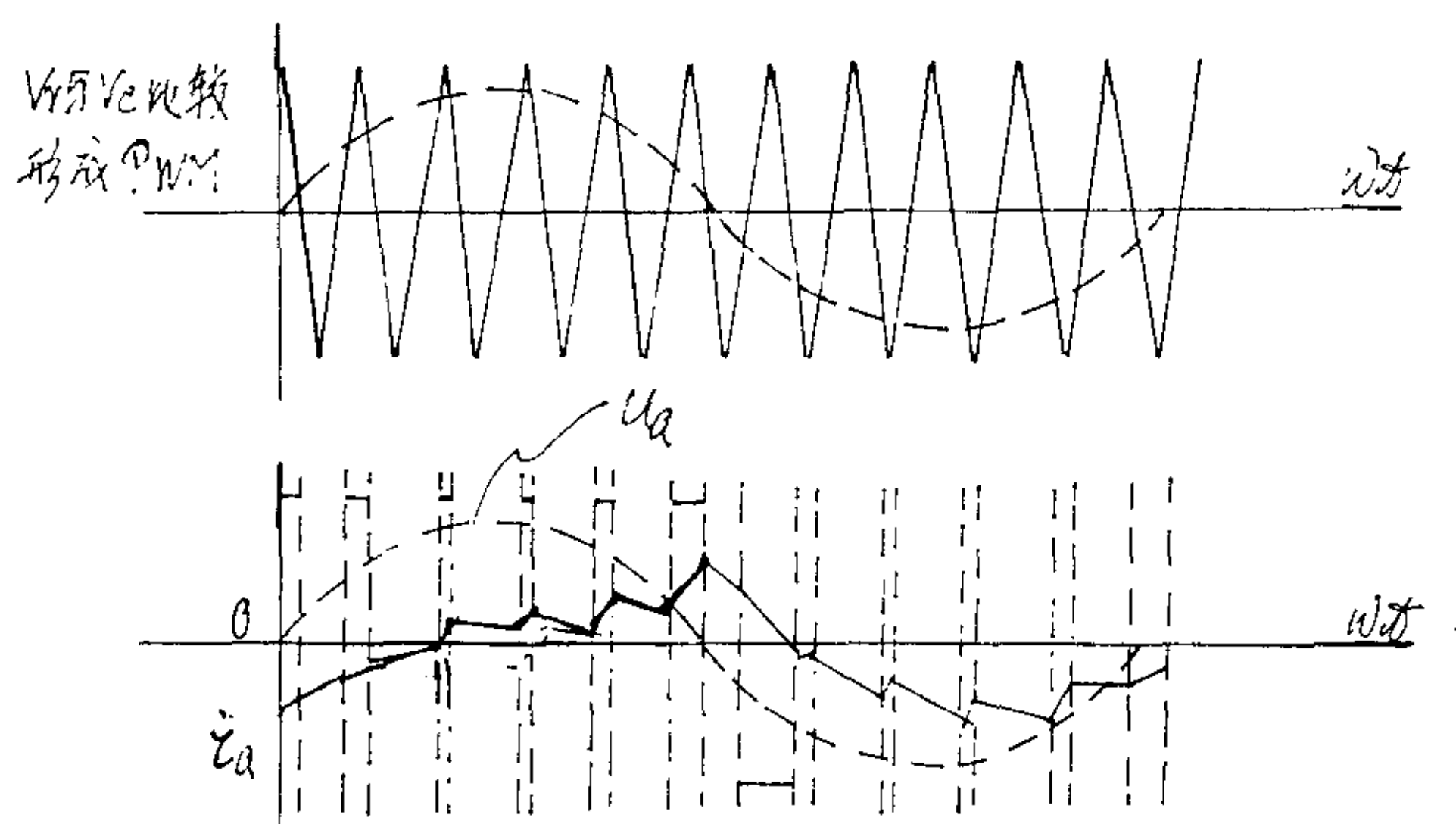


图 (9) 模拟变频电路输出电流波形

其余B、C两相工作与A相相似，三相输出电压和电流在相位上差120度。在逆变器调制工作过程中，同一桥臂上的两个GTR交替工作时，要有一个间隙时间（几微秒）以确保一个GTR可靠关断后，另一个GTR才导通，避免短路。如果同一桥臂的上下两个GTR同时导通，或是有一个GTR已发生击穿，则直流电源就会通过GTR被短路。短路电流受GTR特性制约，一般超出元件额定电流1-3倍，如不在几十微秒以内切断GTR，就会损坏GTR。

从以上利用模拟电路生成PWM的基本原理分析来看，SPWM是根据三角波载波信号与正弦波调制信号的交点，来确定逆变器中GTR的通、断时刻的。在线路中使用了正弦波发生器、三角波发生器和比较器，这样所用元件多、控制线路复杂、控制精度也不高，如图(10)所示：

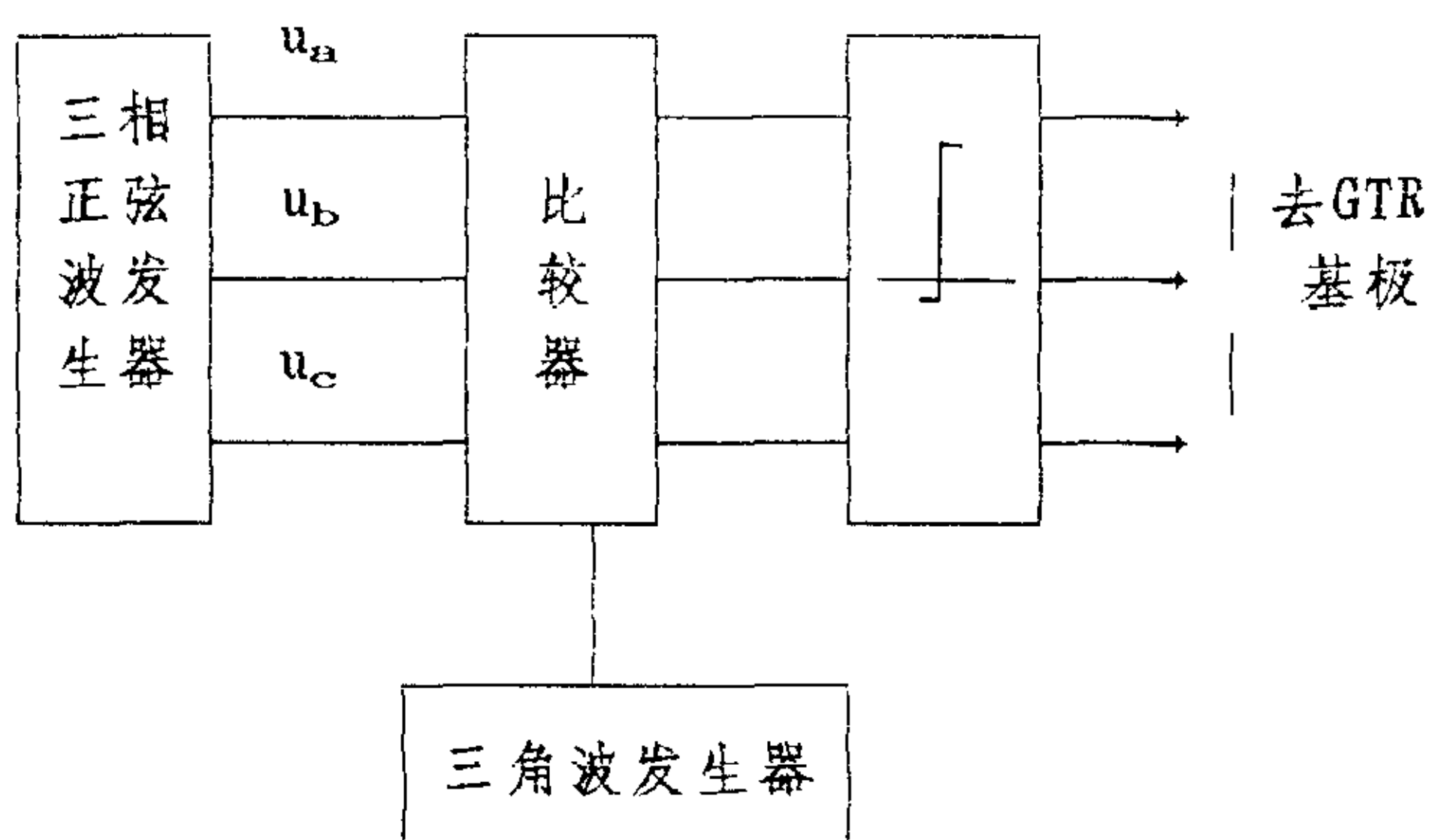


图 (10) SPWM 模拟控制电路框图

但是对于数字控制方式来说，实现数字控制可以用专门PWM集成电路芯片来产生PWM控制信号，也可以用微机来产生PWM控制信号，AC-2000 则采用微机来产生PWM控制信号。

从上面分析可以看到，三角波变化一个周期，它与正

弦波有两个交点，分别控制 GTR 导通和关断各一次。要准确生成 SPWM 波，就要精准计算出这两个点的时间。GTR 导通时间是脉冲的宽度，关断时间是脉冲的间隙时间，正弦频率和幅值不同时，这些时间也不同。对于由微机来控制的情况，时间的计算是由软件实现的，时间的控制是由定时器来完成的。而对于脉冲宽度时间和间隙时间的采样方法有两种：

一是自然采样法；另一种是规则采样法。

AC-2000 采用的是规则采样法，这种采样法近似于自然采样法，又没有过多的复杂计算，使其计算程序较自然采样法那样复杂的计算程序大大简化，也便于提高控制的实时性。

规则采样法基本思想是将三角波负峰的中点时刻所对应的正弦调制波的采样值作为该三角波周期内的调制值，即用一段水平线代替正弦曲线，将正弦波简化成阶梯波。如图(11)所示：

在三角波负峰值时，找到正弦波上所对应的 D 点，求出采样电压值 u_{ri} ，采样电压 u_{ri} 在三角波上的交点 A、B，这两点即是脉冲生成时刻，其间距 t_2 为脉冲宽度，此脉宽 t_2 决定了逆变器输出相电压大小。 t_1 和 t_3 是间隙时间，由于三角载波的对称性，故时间段 $t_1 = t_3$ ，所以在三角载波周期内只需求出两个时间值 t_1 、 t_2 即可。

在规则采样法中，每个周期的采样时刻都是确定的，它所产生的脉冲宽度和位置都是可以预先计算出来，可根据以下公式来进行。

$$t_2 = Ts/2 + (Ts/2) \cdot m \cdot \sin \omega_0 t_1 \quad (1)$$

$$t_1 = t_3 = 1/2 \cdot (Ts - t_2) \quad (2)$$

式中：

$\sin \omega_0 t_1$ -- 采样值

m -- 调制系数， $m = u_m / u_{sm}$ (u_m 为正弦调制波幅值，

u_{sm} 为三角载波幅值， m 的最大值一般取在

0.9 ~ 0.95， m 的大小决定了逆变器输出电压的大小。

在 AC-2000 的控制系统中， m 值是根据电流

调节器输出的电流信号来实时计算而获得的，因为 AC-2000 的控制回路是采用了定子电流瞬时值 PWM 方式，不采用定子电压信号来控制 PWM，这里的分析是以定子电压信号为对象。对于定子电流信号，原理相同）。

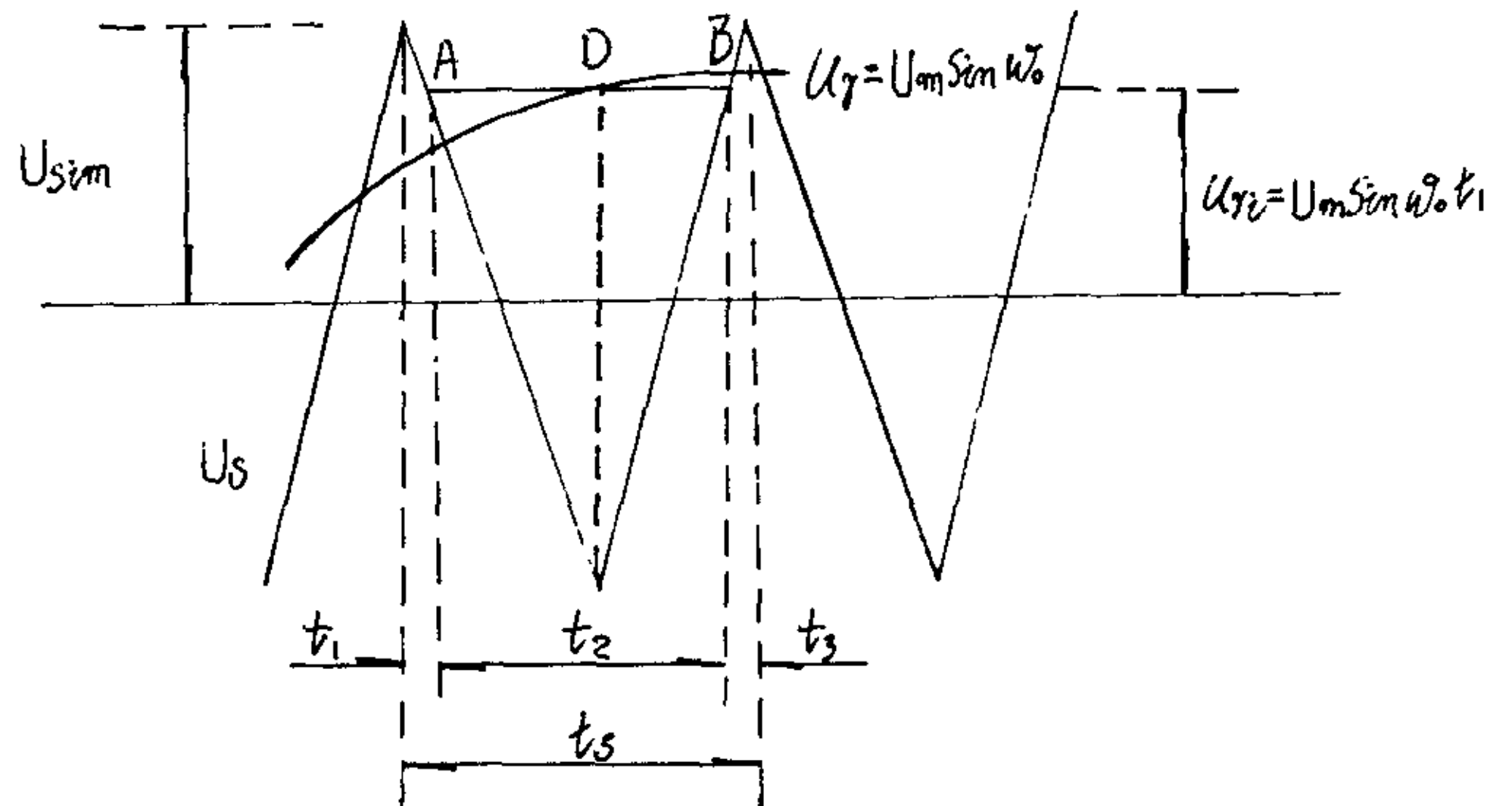


图 (11) 规则采样法 SPWM 调制波生成

1

T_s ——三角载波周期， $T_s = \frac{1}{N_c \cdot f}$ （ f 为逆变器输出

频率给定值，可由采样信号得到。 N_c 为载波比，此值影响阶梯波的正弦度， N_c 越大，阶梯波接近正弦波。但 N_c 受逆变器中开关器件如 GTR 允许开关频率的限制。因此在开关频率所限制范围内，随着 f 增加， N_c 值应相应减小。三角载波频率也相应降低，并且在 f 变化时， N_c 值应保持3的整数倍关系，即以同步进行调制。一般根据调频范围分成几段，在每个频段内值保持3的整数倍不变，对不同频段取不同的 N_c 值。 f 高段 N_c 取值小， f 低段 N_c 取值大。这样 T_s 与 f 就有确定的关系。在 AC-2000 控制系统中，是根据上述确定关系及

$T_s = 1/N_c \cdot f$ 公式计算出不同 f 所对应的 t_s 值，制成表格存入 EPROM 中，在控制时根据采样得到的 f 进行查表得到 T_s 值，以提高控制的实时性。

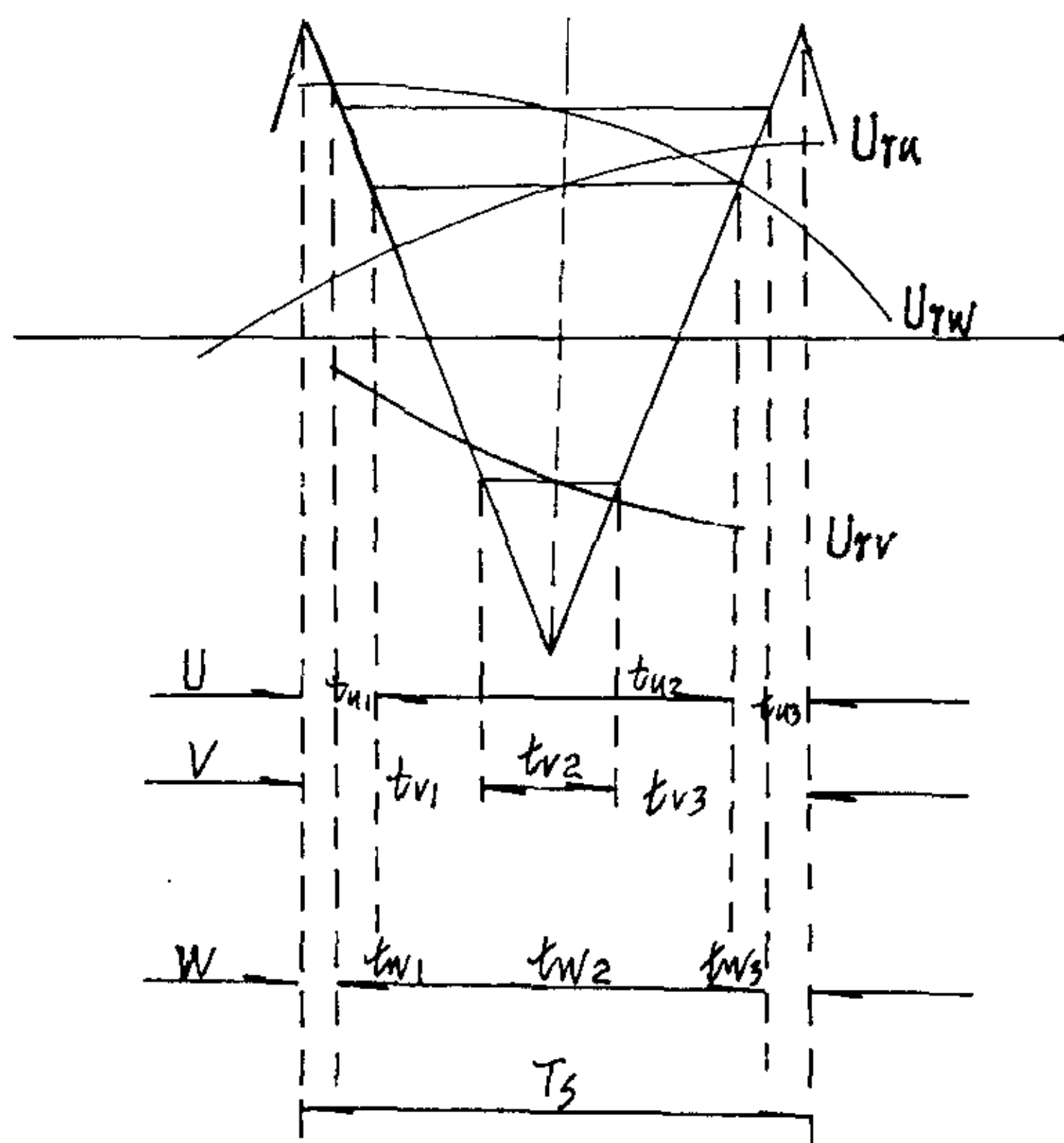


图 (12) 三相SPWM波的生成

在AC-2000中也是采用查表法得到的。一般是根据 u_{ru} (或 i_{ru}) 制作一张单位幅值的正弦函数表存入 EPROM 中以备查取。如查表地址的总长为 A_m ，对应于 $\omega_o t$ 的360度，查取采样值，每次按互差 $A_m/3$ 查表，便可得到三个采样值。

对于三相逆变器来说，需要三相正弦调制波 u_{ru} 、 u_{rv} 、 u_{rw} 与同一个三角载波来获得三相SPWM波，如图(12)所示。而每一相的脉宽时间 $t_{u1}=t_{u3}$ ， t_{u2} ； $t_{v1}=t_{v3}$ ， t_{v2} 和 $t_{w1}=t_{w3}$ ， t_{w2} 都是利用上述的(1)和(2)式，使用查表和计算求出来，得到三相的SPWM波的脉冲列信号输出出来控制各相

GTR的通断。

以上是以电压为三相正弦调制信号来进行分析的，而AC-2000传动是以电流来作为三相正弦调制波信号的，但原理相同。

第八节 电压型逆变器的特点

电压型逆变器具有如下主要特点，

1) 因为电压型逆变器具有不择负载的通用性，所以一台电压型逆变器变频调速装置可以同时拖动多台电机运行，而热输出辊道每一组的10多台棍子传动电机，是需同一传动电源装置供电以保证各个辊道以相同速度转动，这种情况对于电流型逆变器来说则是非常困难。

2) 对于电压型逆变器来说稳定性问题很小，尤其是在轻载及输出较高频率情况下，电机运行的稳定性远较电流型逆变器高。在轧制厚度较薄的产品时，由于轧制速度较高，因而辊道转速也较高并处于轻载状态下。

3) 在带钢坯未轧出精轧机组前，该辊道是处于空转状态，对电机来说几乎是一种无负载状态。只有电压型逆变器才能在这种空载条件下继续工作，而电流型逆变器是不能工作在空载条件下，始终要求连接某一最小负载才能正常运行。

4) 电压逆变器在PWM方式控制时其动态响应特性也是较快的，是可以满足辊道在图(3)所示的快速加、减速要求。

5) 电压型逆变器对于异步电动机负载来说，是一个电压源，在采用GTR的PWM控制下，电流波形是趋近于正弦波，不会产生转矩脉动，功率因数较高可达到95%以上。

虽然AC-2000整流器未接有反并联桥，不能实现再生制动。但对于2160所采用的变频调速装置属中等容量150—200KVA，并且该辊道在正常轧制条件是不停转的，除非事故或交接班、换辊等才停转。所以AC-2000采用能耗制动，这样就使整流器部分简化。

6)电压型逆变器一般宜用于单方向运转。这是由于直流电源电压恒定,电动机不宜作四象限运行。在正常轧钢时,该辊道只在一个方向上转动,只是在设备调试及事故处理时才进行反转。

鉴于上述这种电压型逆变器的特点,因此,能满足热输出辊道在所述中的工艺特点及环境条件。它可以作为热输出辊道的传动装置。

第九节 矢量控制

在标量控制的电压逆变器中,电压及频率是异步电动机的基本控制变量,例如转矩和气隙磁通都是电压和频率的函数,这样的耦合作用是造成异步电动机响应滞缓的主要原因。如果升高频率增大转矩,则磁通就趋于减弱,但它是靠滞缓的磁通控制环馈入附加电压来补偿的。磁通的瞬时下垂,降低了转矩对转差的灵敏度,便延长了响应时间,难以达到稳定地调速,一般要求转矩的响应是所要求的速度响应的三倍左右,才能进行稳定地调速。对于标量的VVVF控制是难以实现转矩及速度的快速响应控制,而矢量控制技术就可以克服上述问题。

1) 矢量变换控制的基本思想

AC-2000传动装置是采用了矢量变换控制方式来实现对所拖动的交流异步电动机象他激直流电动机那样进行控制的,其矢量变换控制的基本思想如下:

我们知道,一切旋转电机中电磁力矩都是产生于电枢电流和励磁磁通的相互作用。

$$\text{在直流电机中 } M = C_m \cdot \phi_m \cdot I_a \quad (1)$$

$$\text{在交流电机中 } M = C_m \cdot \phi_m \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2 \quad (2)$$

式中:

ϕ_m —气隙磁通 (它是定子电流和转子电流共同磁化的结果,以电流频率的同步速度在空间旋转。)

I_2 —转子电流 (在异步电机中此电流不直接可控)

ϕ_2 -- 转子功率因数 $\phi_2 = \tan^{-1}(S \cdot X_2 / r_2)$
 C_m -- 电机结构系数
 S -- 转差率
 r_2 -- 转子回路电阻
 X_2 -- 转子回路电抗

在直流电机中，其补偿绕组抵消电枢反应后，就可在电枢回路和激磁回路分别对公式(1)中的 I_a 和 ϕ_m 分别进行独立调节，以获得理想的调速特性。而异步电机转矩公式(2)中的气隙磁通 ϕ_m ，转子电流 I_2 和 $\cos \phi_2$ 均与电机转速有关，都是转差率 s 的函数。同时 I_2 在鼠笼式异步机中是不能直接控制的， ϕ_m 是由定子电流和转子电流共同磁化的结果，并以电流频率的同步速度在空间旋转。 I_2 和 ϕ_m 又均源于同一定子电流 I_1 ，它们不是两个独立的变量，这样异步机是一个多变量系统，所以转矩控制复杂，难以获得很好的调速特性。矢量变换控制则通过数学变换，将式(2)中的量解耦，实现对这些量的分别独立控制，达到和直流电机相同的特性。

据电机学原理，异步电机的矢量图如(13)所示：

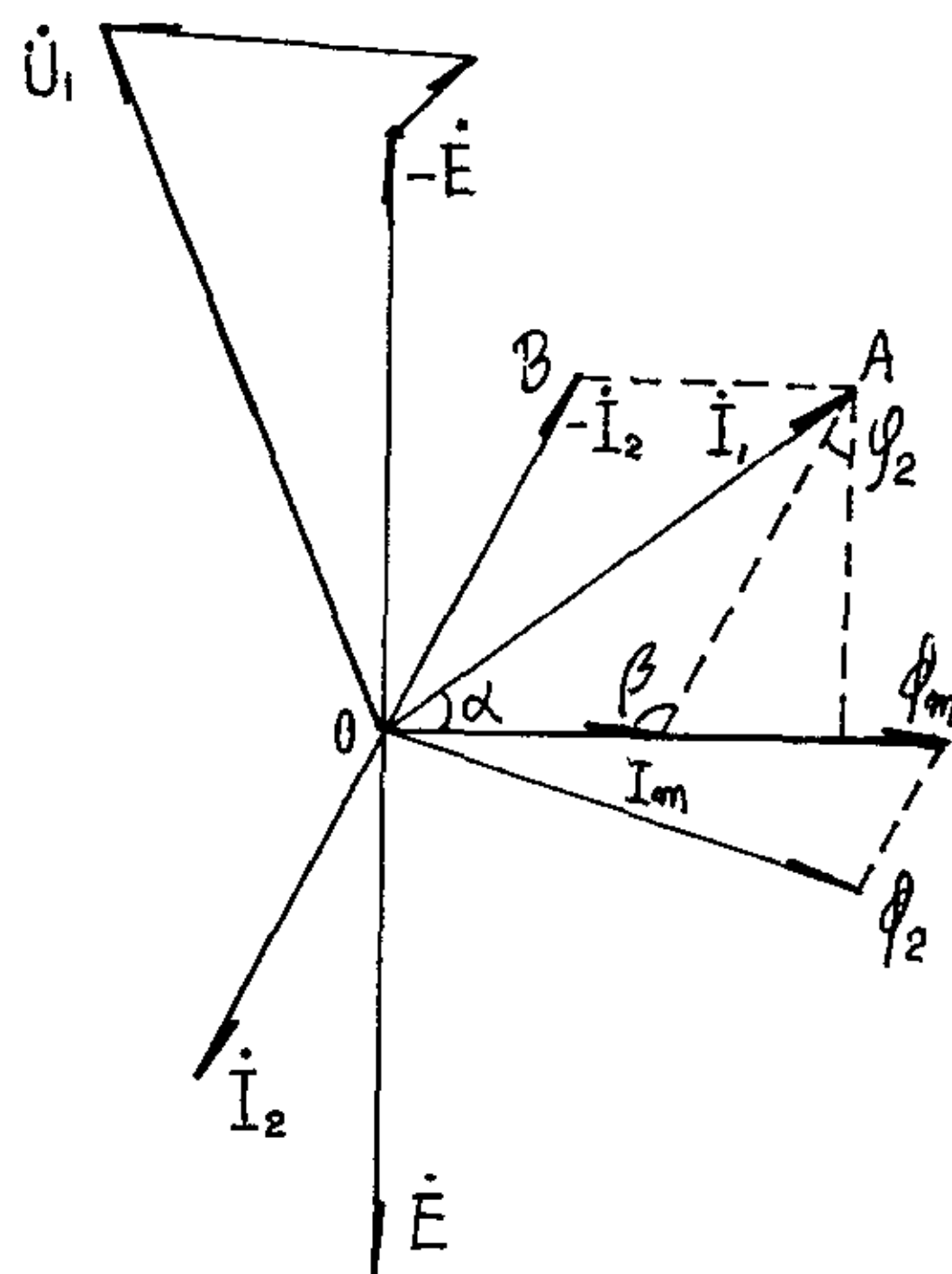


图 (13) 异步电机矢量图

在 $\triangle AOB$ 中：

$$\begin{aligned} I_1 / \sin \beta &= (-I_2) / \sin \alpha \\ I_1 \cdot \sin \alpha &= (-I_2) \cdot \sin \beta \\ &= (-I_2) \cdot \cos \phi_2 \end{aligned}$$

所以，公式(2)可改写为：

$$M = C_m \cdot \phi_m \cdot (-I_1) \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

式中：

α —— 定子电流矢量 I_1 和气隙磁通 ϕ_m 的相位差角。

再将 I_1 分解成互为 90° 的两个变量，如图(14)所示：

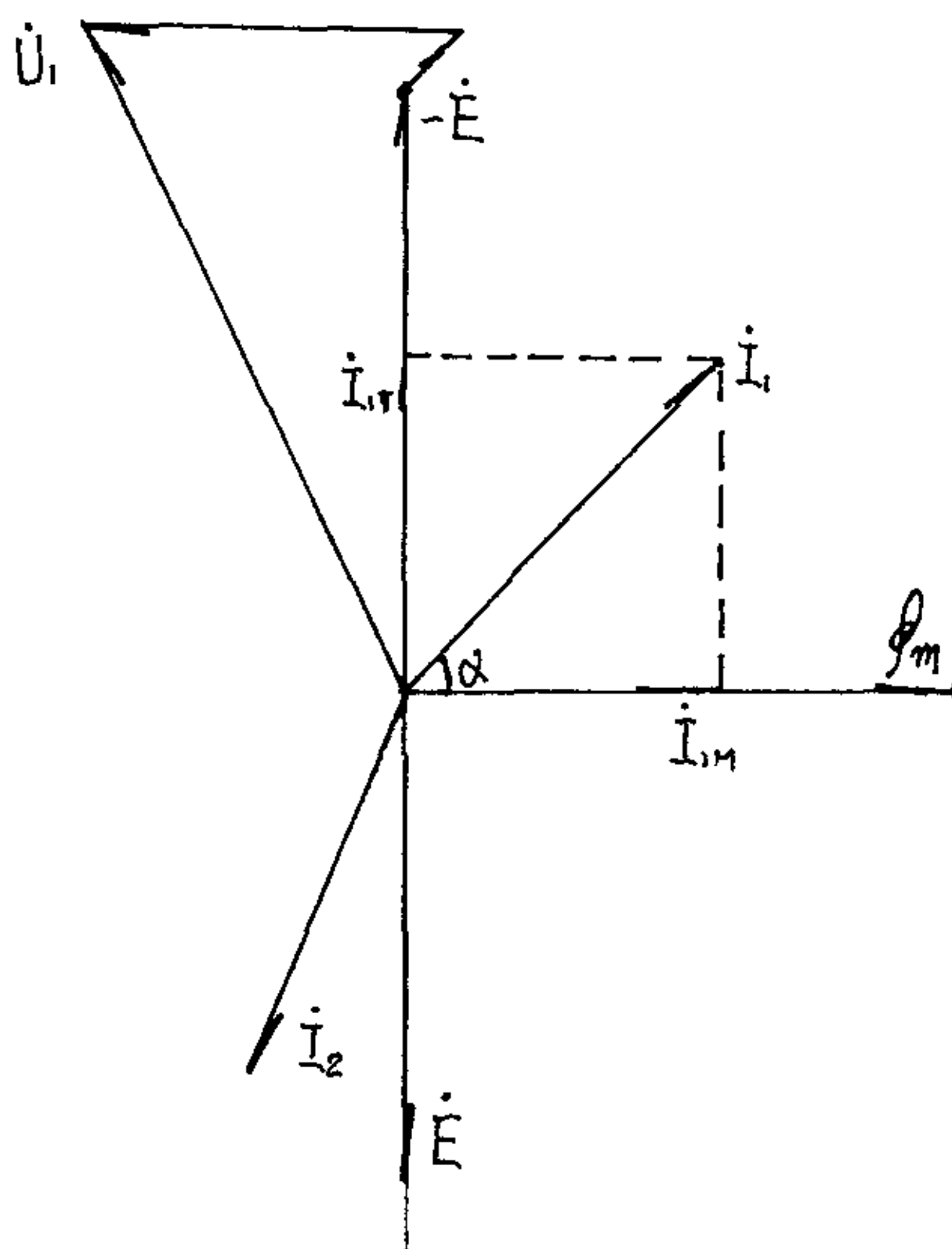


图 (14) 异步电机时间矢量图

I_1 在 ϕ_m 方向上的分量为 I_{1m} ，其幅值为 $I_1 \cos \alpha$ ，即定子电流的励磁分量，与 I_{1m} 垂直的分量为 I_{1T} ，其幅值为 $I_1 \sin \alpha$ ，即为定子电流的转矩分量。这样公式(3)又可写为：

$$M = C_m \cdot \phi_m \cdot (-I_{1T}) \quad (4)$$

公式(4)的异步电机转矩方程式就与公式(1)的直流电

机方程式相同，由于变量 I_{1T} 和 I_{1m} 是相互解耦的，可以分别独立控制，即是对转矩公式中的 ϕ_m 和 I_{T1} 进行分别独立控制，交流异步电动机就可以如同直流电机那样机进行调速。为了把异步电机的定子电流分解为 I_{1T} 和 I_{1m} 两个彼此解耦的两个分量，就需用矢量变换控制来实现。

在进行矢量变换控制时，需要使用坐标变换器。而矢量变换控制具有两种基本形式：一种是磁场定向式，即上面所分析分那样，AC-2000即采用这种方式来进行矢量变换控制。另一种是转差频率控制式，磁场定向式矢量变换控制方式需要转子磁链观测器来获得实际转子磁链的幅值和相位，在AC-2000中是采用的间接观测法，利用检测出的电机定子电压、电流，用电压模型实时计算磁链的幅值和相位。进行矢量变换控制的关键就是要将定子电流 I_1 进行解耦 I_{1T} 和 I_{1m} 以便对他们进行分别控制。为此，在AC-2000中使用了以下坐标变换器。

(1) $3\phi/2\phi$ 变换器

$3\phi/2\phi$ 变换器的实质是根据旋转磁通等效原则，用一个对称的两相绕组来代替对称的三相绕组，并且保持变换前、后的功率不变。

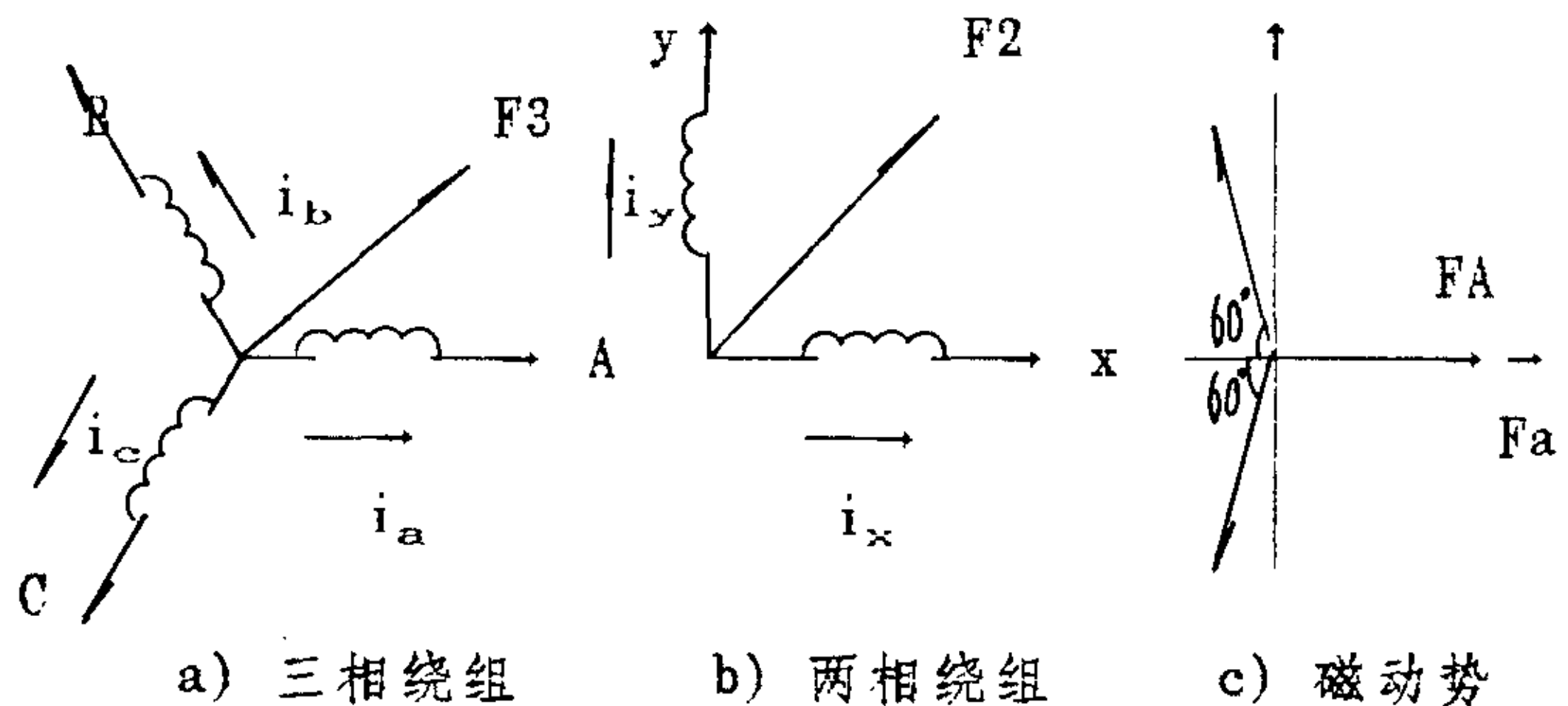


图 (15) $3\phi/2\phi$ 坐标变换

我们知道，在异步机三相对称绕组中通入三相对称电

流 i_a, i_b, i_c 则形成定子旋转磁动势 F_3 , 如图15a)所示。两相对称绕组(互差 90°)通以两相电流, 其磁动势 F_x, F_y 也产生定子旋转磁动势 F_2 , 如图15b)所示。只要适当改变两绕组的电流, 就可以使 F_2 与 F_3 的幅值相等, 两磁动势完全等效。

如果 F_2 和 F_3 取向相同, F_a 和 F_A 重合, 如图15c)所示。

如果每绕组等效集中绕组匝数相同, 则 $F \propto i$, 从电机学可知三相绕组合成磁动势基波幅值为:

$$F_3 = 1.35 i_3 \cdot W$$

两绕组合成磁势的基波幅值为

$$F_2 = 0.9 i_2 \cdot W$$

其中: W -- 为每相绕组有效匝数

i_2, i_3 -- 分别为两相和三相绕组的每相相电流有效值。

根据变换前、后功率不变的原则:

$$F_3 = F_2$$

$$\therefore 1.35 i_3 \cdot W = 0.9 i_2 \cdot W$$

$$i_2 = 1.5 i_3$$

$$= (3/2) i_3$$

所以, 将三相绕组 A、B、C 等效为两相绕组 x, y 时, 每相电流应为三相时的 $3/2$ 倍。它们之间的电流关系为:

$$i_x = i_a - 1/2 \cdot i_b - 1/2 \cdot i_c$$

$$i_y = \sqrt{3}/2 \cdot i_b - \sqrt{3}/2 \cdot i_c$$

其矩阵形式为:

$$\begin{vmatrix} i_x \\ i_y \end{vmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{vmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{vmatrix}$$

所以, 在实际控制系统中是用三个电流互感器直接检测逆变器输出三相电路(即电机定子回路)的电流瞬时值输入 $3\phi/2\phi$ 变换器进行变换的。

对于 AC-2000 来说, $3\phi/2\phi$ 的矢量变换是用微机来实现的, 其变换程序模块是存在 EPROM 中, 其变换程序流程图如图(16)所示。

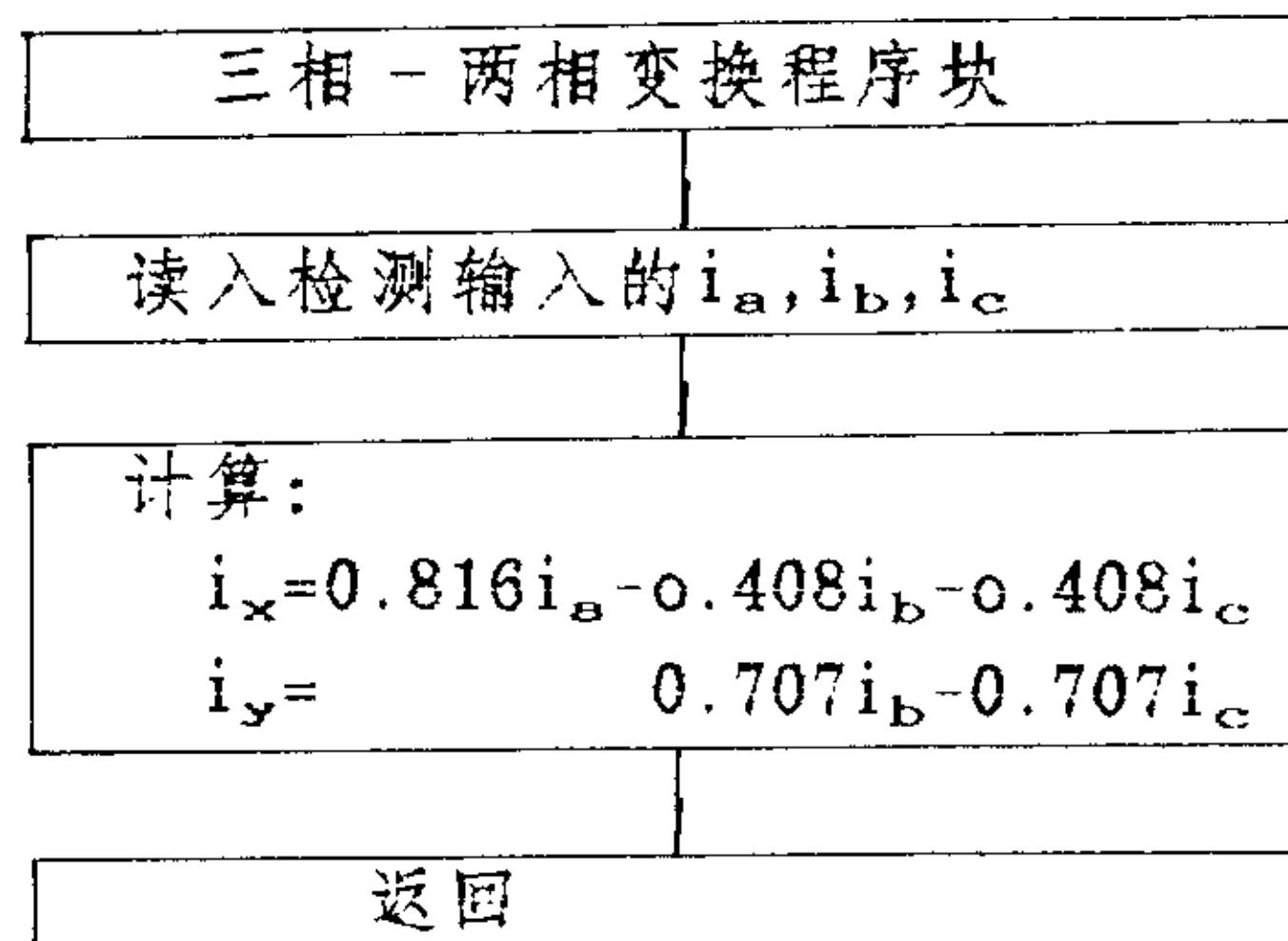


图 (16) 3 ϕ / 2 ϕ 变换程序流程图

其逆变换2 ϕ / 3 ϕ 变换矩阵如下:

$$\begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{vmatrix} = \sqrt{3/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_x \\ i_y \end{vmatrix}$$

其逆变换流程图序如(17)所示:

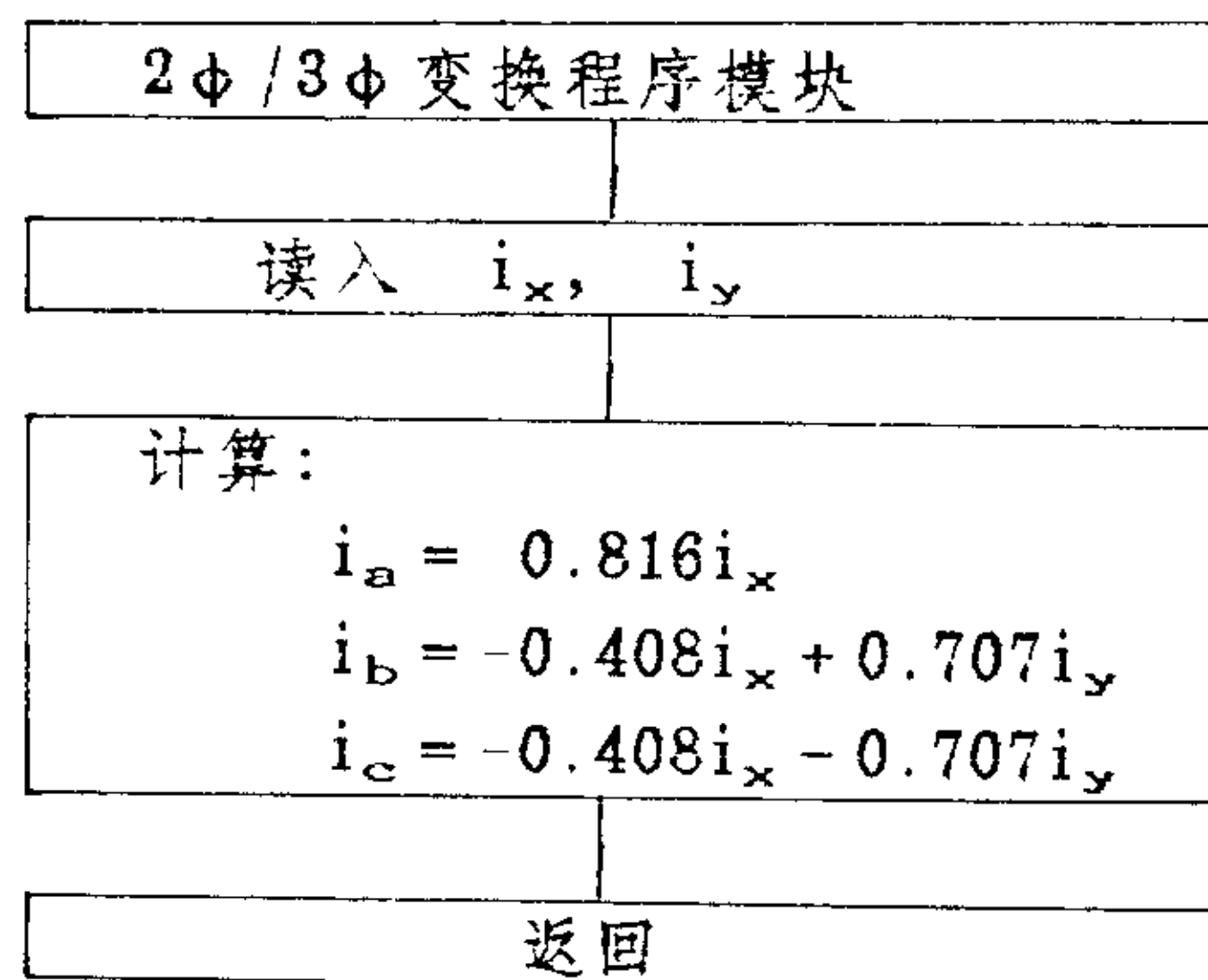


图 (17) 2 ϕ / 3 ϕ 逆变换流程图

在 AC-2000 中, 三相定子电流是从各逆变器输出相线

上的分流器SH1-SH3取出来，输入IBD卡，在IBD卡设置的VCO（电压控制振荡器，其输出脉冲频率正比于输入电压）电路将模拟电压信号转换成数字脉冲信号进入控制系统。

(2) 矢量旋转变换器VR

要最终实现将异步交流机的控制如同直流机那样的控制，在完成 $3\phi/2\phi$ 的变换后，需要把静止坐标系X-Y的两相交流电 i_x 、 i_y 变成旋转坐标系M-T的两个直流电流 i_M 、 i_T ，完成这种矢量旋转变换是使用VR变换器。

如图(18)所示，静止坐标系X-Y的两个交流电流 i_x 、 i_y 和旋转坐标系的两个直流电流 i_M 、 i_T 均合成为 I_1 ，产生以 ω 转速的旋转磁动势 F_1 。由于各相绕组匝数相同，在数值上 F_1 与 I_1 成正比，所以以 I_1 代替 F_1 。

ϕ 为旋转坐标系的旋转磁通矢量，它与X轴的夹角 ϕ 随时间变化。而 ϕ 与 F_1 之间的空间相位角 θ_1 在稳定运行时，由于 ϕ 与 F_1 都以同步速度 ω 旋转，所以 θ_1 不变。 i_x 、 i_y 与 i_M 、 i_T 之间的关系为：

$$i_M = i_x \cos \phi + i_y \sin \phi$$

$$i_T = -i_x \sin \phi + i_y \cos \phi$$

其矩阵变换形式为：

$$\begin{vmatrix} i_M \\ i_T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_x \\ i_y \end{vmatrix}$$

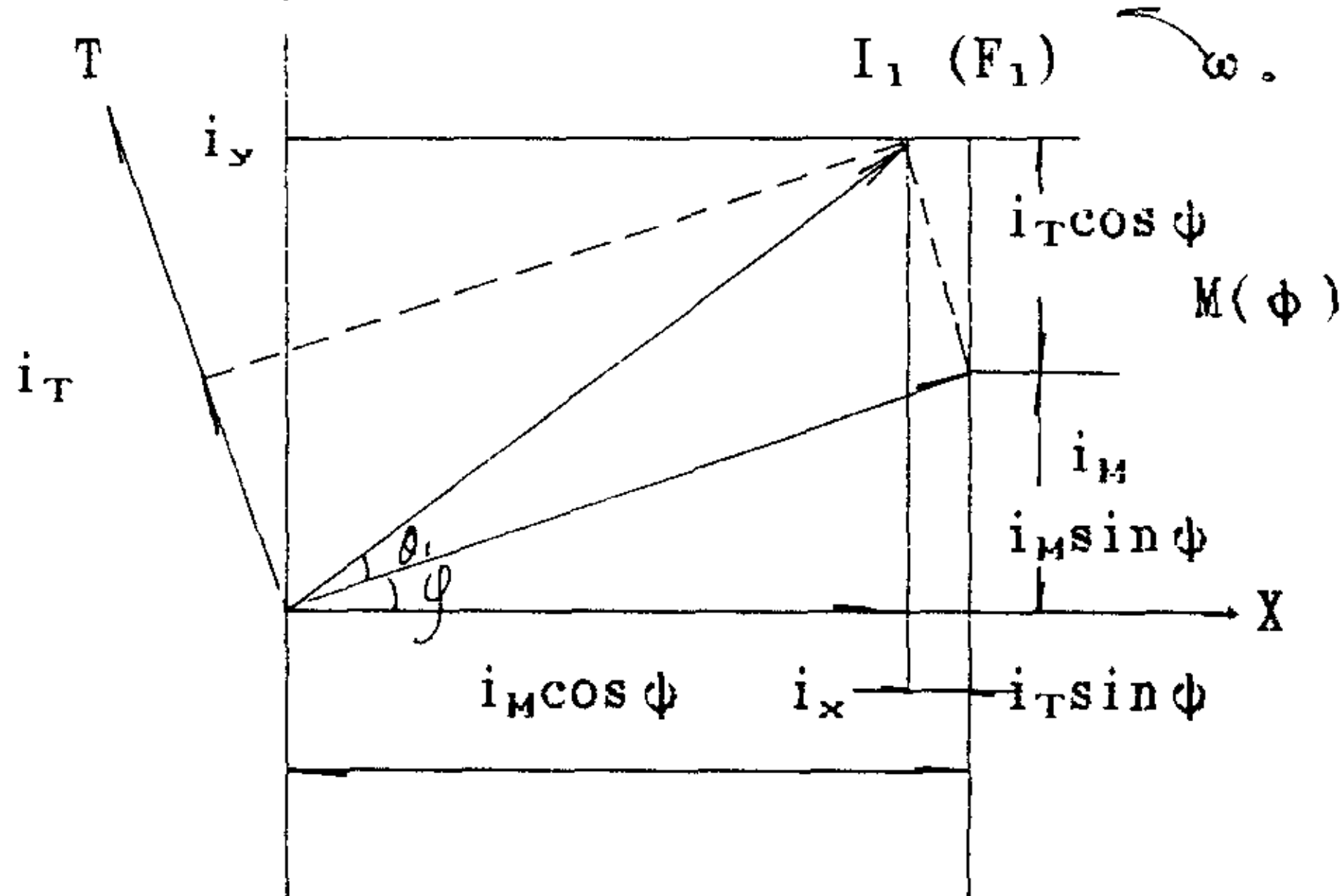


图 (18) 旋转变换矢量图

在 AC-2000 传动控制系统中是用微机来完成上面公式计算的。在求得 ϕ 后, 采用查表法先求取 $\sin\phi$ 和 $\cos\phi$ 。又因为 $\sin\phi = \cos(90^\circ - \phi)$, 所以在微机中只须将正弦数值存入 EPROM 中。在控制过程中, 控制程序根据求得的 ϕ 值, 先判断 ϕ 区间:

若 ϕ 在第一象限, 则直接查表, 结果为正。

若 ϕ 在第二象限, 则令 $\alpha = 180^\circ - \phi$, 用 α 查表, 正弦值为正, 余弦值为负。

若 ϕ 在第三象限, 则用 $\alpha = \phi - 180^\circ$ 来查表, 正弦值和余弦值均为负。

若 ϕ 在第四象限, 则用 $\alpha = 360^\circ - \phi$ 查表, 正弦值为负, 余弦值为正。

这样就可得到 ϕ 从 $0^\circ - 360^\circ$ 的正、余弦值。

从 EPROM 中查出的 ϕ 角所对应的 $\cos\phi$ 和 $\sin\phi$ 角值输入到 VR 变换器, 并输入 i_x 、 i_y , 经过 VR 变换器运算后输出 i_M 、 i_T , 它们分别与转矩电流给定值 i_T^* 和励磁电流给定 i_M^* 值相比较后, 分别进入转矩分电流和励磁分电流调节环节参与调节。

VR 变换的逆变换矩阵形式为:

$$\begin{vmatrix} i_x \\ i_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_M \\ i_T \end{vmatrix}$$

VR 的变换程序流程图如图 (19):

(3) 求取气隙磁通的大小和其空间方位角

磁通定向矢量变换控制中关键的一环是须正确地检测运算出电机内产生的磁通矢量。检测气隙磁通有多种方法, 由于 2160 的 AC-2000 是速度开环控制, 所以用间接方式中的电压模型法。这种方式简单、精确, 是从电动机的端电压中减去原绕组中的电阻压降, 而将反电势作积分, 从而求得磁通。

从图 (4) 可知:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \cdot di_1/dt + d\phi_m/dt$$

取算子形式 (以P代替d/dt) 得:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \cdot P i_1 + P \phi_m$$

变换后即可得到:

$$\phi_m = u_1 / P - \lambda(r_1 + PL_1) / P \cdot I_1 \quad (1)$$

所以通过测量和计算就可以求得磁通 ϕ_m , 但在低速时, 其精确运算是困难的, 误差较大, 因此 AC-2000 传动规定的调频范围为 10-58Hz, 由此克服了在低速时运行精度不高的困难。

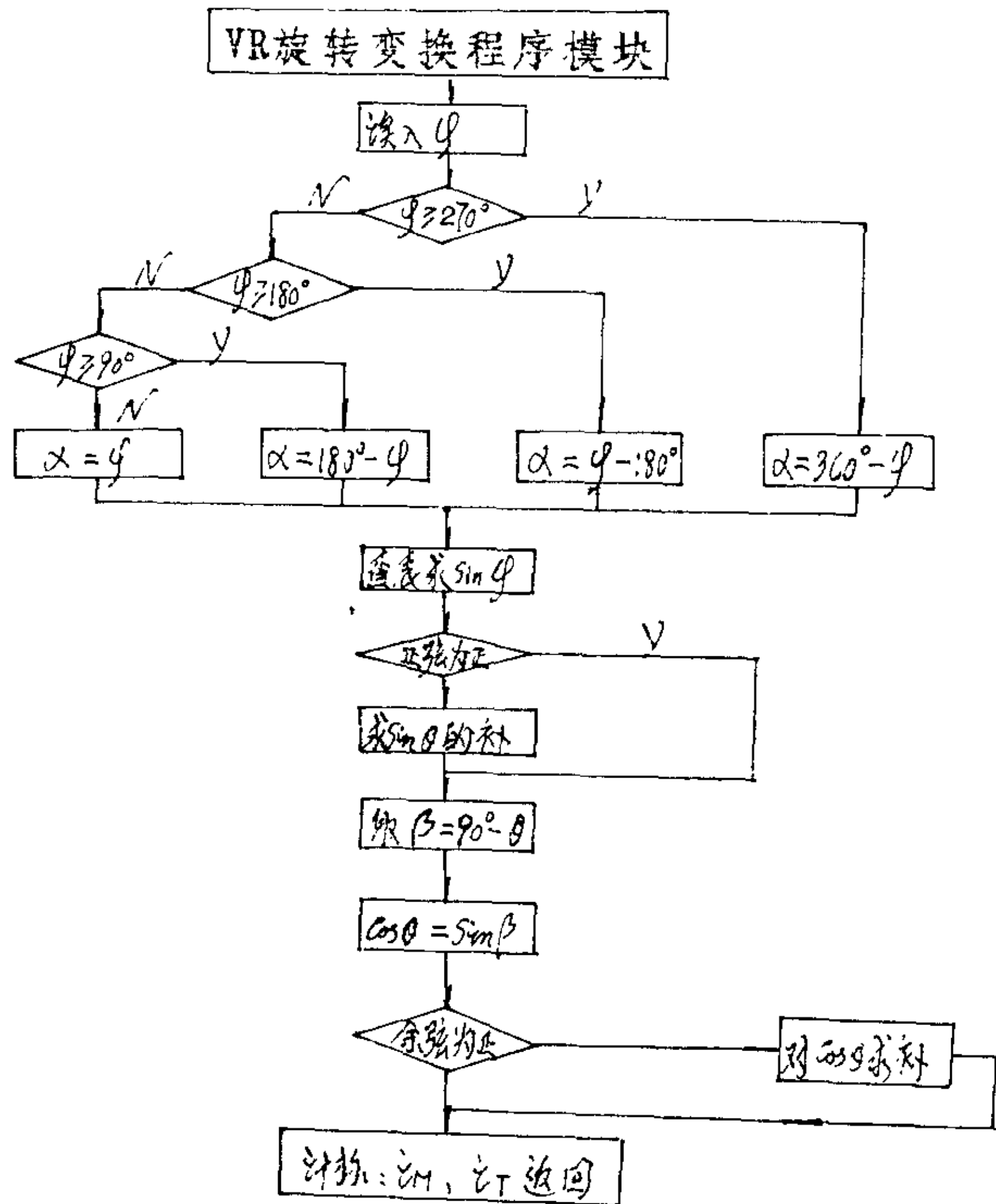


图 (19) VR 变换程序流程图

又因为 ϕ_m 在静止的直角坐标系 $X - Y$ 中的分量分别为:

$$\phi_x = u_x / P - (r_1 + PL_1) / P i_x \quad (2)$$

$$\phi_y = u_y / P - (r_1 + PL_1) / P i_y \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可得到:

$$\phi_m = \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} \quad (4)$$

$$\phi = \cos^{-1}(\phi_x / \phi_m) \quad (5)$$

(2)式和(3)式中的 u_x 、 u_y 同样可以用检测到的定子三相绕组相电压瞬时值 u_a 、 u_b 、 u_c 经过 $3\Phi/2\Phi$ 变换器变换得到。

所以, 对于 AC-2000 传动, 未使用速度检测传感器来检测转子实际位置 ϕ 角。而是利用上述原理, 实际检测电机的三相电流和电压, 各自用 $3\Phi/2\Phi$ 变换器求出 i_x 、 i_y 和 u_x 、 u_y , 再用电压模型就可以把气隙磁通 Φ_m 的大小及其在轴线在空间的方位角 ϕ 得出。求出 ϕ 角后, 利用查表得到相应的 $\sin\phi$ 和 $\cos\phi$ 值。 $|\Phi_m|$ 值和 $\sin\phi$ 和 $\cos\phi$ 值是分别输入到相关的矢量变换环节中去变换及运算。

第三章 AC-2000 的主回路结构 控制系统结构及工作原理

从图(1)中可以看出,这是一种交—直—交电压型逆变器。电压型逆变器用作交流电动机的调速电源,是从水银整流器和闸流管问世以来开始的。但是由于这些功率变换器,存在着通弧逆弧等不稳定现象,以及控制电路可靠性不高等原因,没有得到普遍的推广使用。

后来,随着 SCR 的发明,换流电路的研究及晶体管,集成电路在控制电路中的应用,使电压型逆变器的可靠性有了显著的提高,这样电压型逆变器在工业领域中便逐渐得到推广使用。我国九十年代以前热带轧钢厂轧线上所采用的电压型逆变器多是这种逆变器,国产的电压型逆变器也是处于这种水平。虽然在工业中得到一定的应用,但由于 SCR 是一种半控型换流元件,不能自关断,这样在换流过程中当同一桥臂上的前一个 SCR 转换为后一个 SCR 导通时,前一个 SCR 必须可靠关断。为了使前一个 SCR 能够可靠地关断,必须采用强制方法使其可靠关断,以进行强迫换流。尽管强迫换流方法有多种类型的换流电路,这些换流电路各自具有其特点,但这些采用强迫换流电路的电压逆变器共同的问题是:

- (1) 这种采用 SCR 的电压逆变器输出电压波形为方波或阶梯波,只能采用 PAM 方式进行控制,其逆变器部分只能控制输出频率,电压的大小则由变流器部分决定。结果使其控制回路复杂,使用中调试,维护量大,且较易出现问题。
- (2) 由于 SCR 不能自关断,增加了进行换流的电路,结果使主回路结构复杂,元器件量增多,装置体积较大;在较大容量的装置中还存在着不可忽视的换流损耗。
- (3) 采用 SCR 的逆变器,为使 SCR 可靠地关断,其换流

时间需要100--数百微秒，所以高频开、关困难，不易进行PWM控制，这样使逆变器输出频率不可能太高。

由于这种 SCR的电压型逆变器存在上述的问题，我国几个在热输出辊道采用这种变频器的热带钢连轧厂不同程度地存在事故率高，维护困难，影响生产等问题，限制了在其他设备上的进一步推广使用。

近年来由于功率晶体管GTR，可关断晶闸管GTO，绝缘极双极型晶体管IGBT等新型电力电子器件在逆变器中的采用，以上所述换流电路中的相关问题都不存在了。因为这些新型电力电子器件是属于全控型器件，具有自关断能力，在控制回路中实现 PWM控制和矢量变换控制，并在控制电路中采用了微机和中大规模集成电路。在主回路中也采用了模块化和积木化装配方式。这样不仅使复杂的控制电路变得简单，而且使装置更为可靠，其成本，重量，效率和调频范围都得到了改善。这样才真正使交--直--交逆变器近年来广泛地运用在工业领域，特别是在冶金企业中得到了逐渐推广使用。国内几家热带轧钢厂在热输出辊道上淘汰了原先使用的 SCR电压型逆变器，或在新建工程时，分别引进了国外生产的采用了 GTR或IGBT全控型器件的交--直--交电压型逆变器。例如宝钢1580热连轧厂在热输出辊道上引进了从日本三菱公司制造的采用 IGBT的MELVEC-1200系列全数字交流变频调速装置。首钢2160热连轧工程在热输出辊道的传动上引进的是美国 GE公司AC-2000型全数字交流变频调速装置，这是一种适于冶金钢铁企业的高性能交流变频调速的传动装置。

第一节 AC-2000数字式交流变频调速装置主回路

AC-2000 不采用直流电源，而是每台装置用一个二极管整流器作为固定的直流电压源，逆变器则是使用功率晶体管GTR作为变流器件。

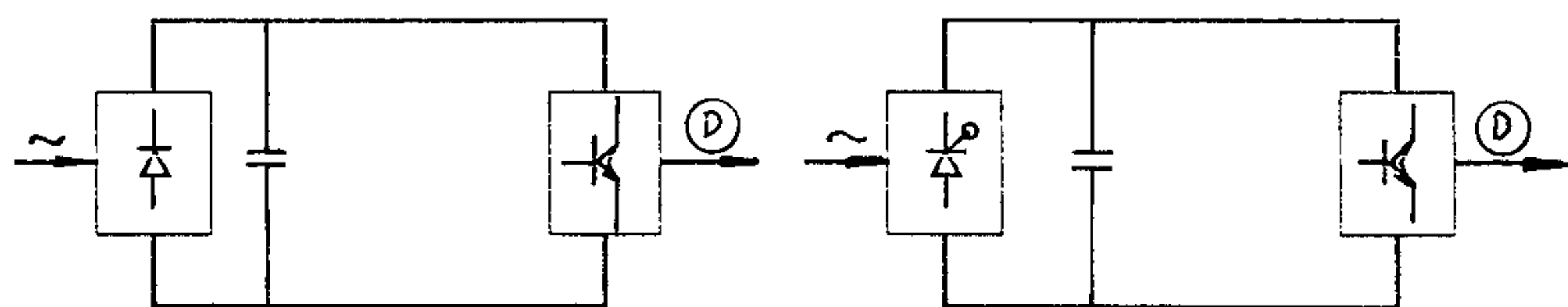
这些新型的交流变频调速传动装置实现了控制的高精

度、高性能、装置的小型化、其线路较 SCR 的逆变器大为简化，保护性能提高，并降低了元件的开关损耗，从而操作维护简单，容易。

1. AC-2000 整流回路

我们知道，交-直-交电压型逆变器的特点是：其逆变器的输入端上具有硬特性的直流电源，该直流电源可以是固定的，也可以是可变的，如图(20)所示。但这是取决逆变器采用的变流器件。对于 AC-2000 来说，逆变器的变流器件是 GTR，因此采用了 SPWM 控制，在逆变器部分同时完成频率和电压的控制。不象 SCR 逆变器采用的 PAM 控制，必须在整流器部分进行电压控制。所以，该直流电源直接采用二极管来进行整流以及在直流输出端并联电容器以作为固定的具有硬特性的直流电压源。

从图(1)可以看出，它是由三个整流器模块 DM1，DM2，DM3 装配成三相全波整流桥路。每个整流器模块包括两个二极管，每个模块都具有电气隔离基板，并安装在散热器上。这种模块化的结构的整流器因其结构简单，安装和拆卸都比较方便。



a) 固定式直流电压源

b) 可变式直流电压源

图 (20) 两种形式的直流电压源

输入的三相交流电源是来自整流变压器二次的 L1，L2，L3 输入，经过 FU1，FU2，FU3 熔断器进入整流器。FU1-FU3 用来防止内部线路和输出线路的短路电流。除此之外，在控制软件中的瞬时过流和定时过流控制功能也可防止在直

流侧及逆变器出现的过电流。

对于这种二极管桥式整流器的功率因数 $\cos \phi$ 可接近 1.0。

2. 缓冲器电路

P1缓冲器，如图(21)中虚线框部分所示：

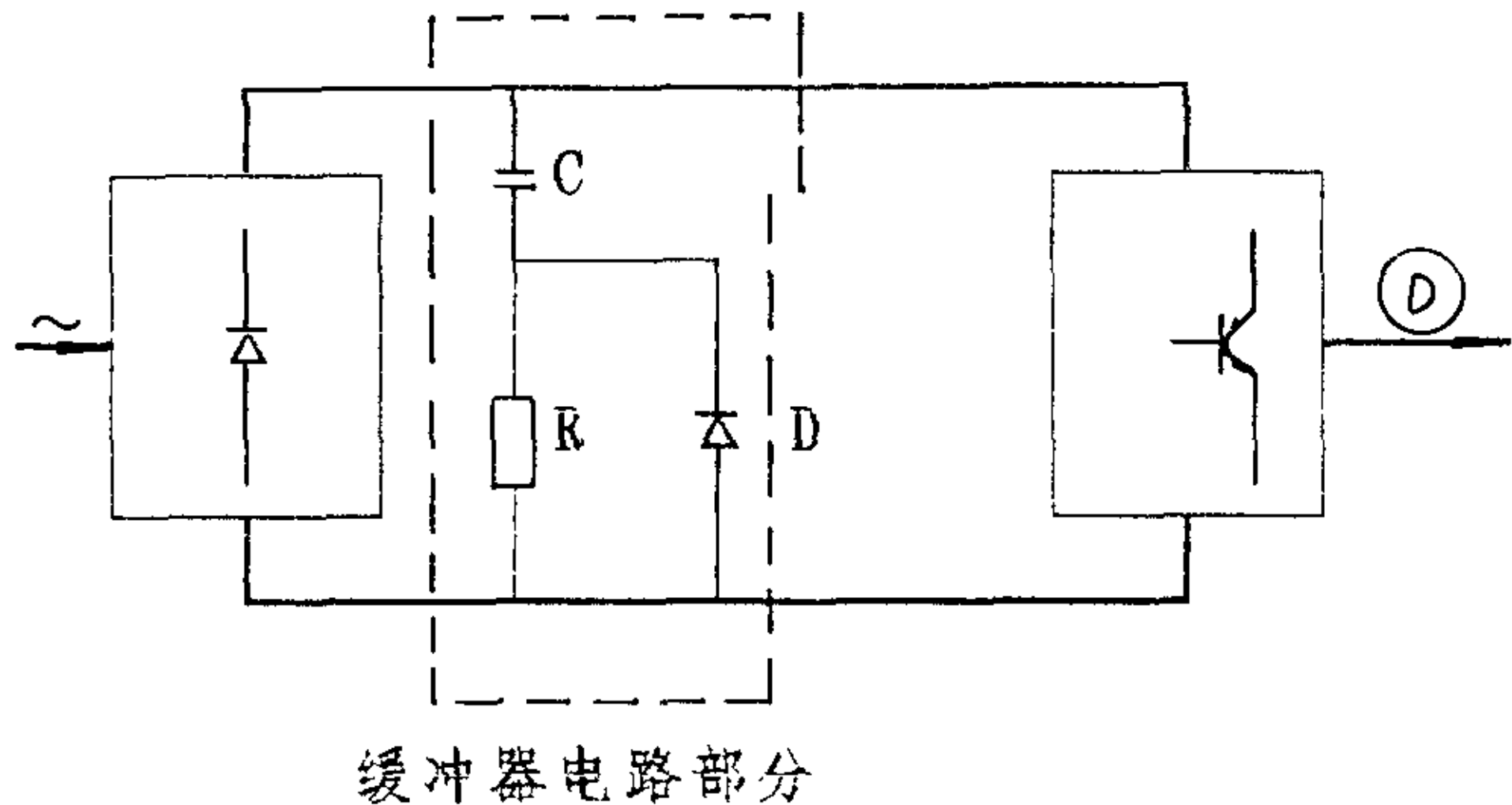


图 (21) 缓冲器电路示意图

在整流桥输出端设置了RC缓冲电路。该电路是由电阻R，电容C和二极管D组成，而且全部安装在一块卡上。一般的电压型逆变器在二极管桥路输出侧并未设置一专门的缓冲电路，而GE公司则在AC-2000中设置了缓冲电路，这是AC-2000的特点之一。其目的一是用于吸收交流输入电路瞬时波动时造成的高的输出电压浪涌，防止过大的电压 dV/dt 尖脉冲对GTR造成损坏；二是在变频器高速停车时，逆变器件GTR关断瞬间会发生过电压尖脉冲，由于在这种状态下 dV/dt 较大，容易造成GTR的二次击穿。为此，不但在逆变器桥路的每一个GTR处并联一个缓冲电路，而且在直流回路也加入了缓冲电路。

3. 滤波电路

如图(1)所示，该电路是由滤波电容1C，2C和放放电

阻R2组成。这里该电路具有两个作用：

1) 对三相桥式整流电压进行滤波

由于在整流输出的直流电压中，含有电源6倍频率的脉动电压。为了抑制电压波动，在AC-2000采用了1C，2C电容器来吸收脉动电压以获得平滑的直流电压送到逆变器上。在主回路的中间环节采用电容器滤波，这是电压型变频器的特点，它的电源阻抗很小，类似于电压源。

2) 具有中间储能作用

它能减弱逆变器换流过程中对交流电网的影响，当逆变器的负载为异步电动机时，它供给必要的无功功率，而有功功率由电网供给。该滤波回路也可以抑制AC电源侧网络的电压瞬变。

电阻R2是用于均匀分配施加于串联着的1C，2C上的电压和对电容器进行放电。

4. 充电控制的SCR

与典型的电压逆变器主回路不同，GE公司在AC-2000中设置了这一环节，它们是由SM1模块和电阻R1组成，SCR模块有一电隔离基座，安装在散热器上。该充电控制回路是串联在整流电路和逆变电路之间。当电气操作人员闭合AC-2000装置的电源开关，装置通电时，SCR并不被触发导通，二极管整流桥满压输出的直流电压是经R1电阻降压后加在滤波电容器上。这样就限制了在装置刚送电瞬间对滤波电容器的充电电流过大，保护滤波电容器，这是由于电容器最大容许过电流为其额定电流的130%左右。在电容器初始化充电结束后，控制回路给出一触发脉冲将SCR导通。这样，整流后的直流满电压再加在电容器上。由于此时电容器已充电到90%左右，这时就不会有过大的电流冲击电容器。该SM1模块中的SCR触发信号是来自控制回路的MCP卡上CCPL端子的输出。

该回路与通常所见到的电压型变频器主回路结构不大相同，GE公司在AC-2000装置中虽然增加此回路，但是元件的增加不多，而产生的保护作用明显的，尤其是对容量较大的变频传动装置。

5. 动力制动回路

它是由TM7晶体管模块和电阻器R3组成。此回路具有两个作用：

1) 在辊道停车制动时，防止直流回路电压升高。由于AC-2000是电压型逆变器，并且整流器是三相二极管桥式电路，异步电动机惯性积蓄的能量是不能经过该二极管桥路回馈给电网。但该能量则通过续流二极管D1--D6对直流侧的1C，2C平波电容器充电。由于平波电容器1C，2C容量有限，就会造成直流回路电压升高，即泵升电压。

泵升电压可能损坏GTR，因此，为了避免发生直流回路的电压升高，以保护其回路的电器件以及进行快速地减速制动，AC-2000中专门设置了由TM7和R3构成的回路，其目的是将电动机惯性积蓄的电能耗耗在电阻R3上。

2) 此电路在AC-2000中还具有另外一个重要作用，就是如果交流电网电压瞬时波动引起二极管桥路输出直流电压升高，超过额定的直流电路电压时，则TM7被触发导通，通过R3耗能降压，防止DC电路电压的“泵送”。

上述的两个作用都是控制电路的MCP卡通过直流过压检测电路所检测的直流电压来进行控制的。当MCP检测到直流电压超过其电路的正常电压时，即给TM7晶体管发出触发信号使其导通。当电压恢复到正常值时就停止触发，TM7关闭。

从图(1)中还可以看出，在TM7模块的两端并联了一缓冲电路GQ2，该GQ2电路元件全部装在一块卡上，并紧靠TM7模块安装。其目的是使缓冲器与TM7之间的接线最短，将其线路的杂散电感降到 $0.2-0.5\mu\text{H}$ 以下，以保护功率晶体管。

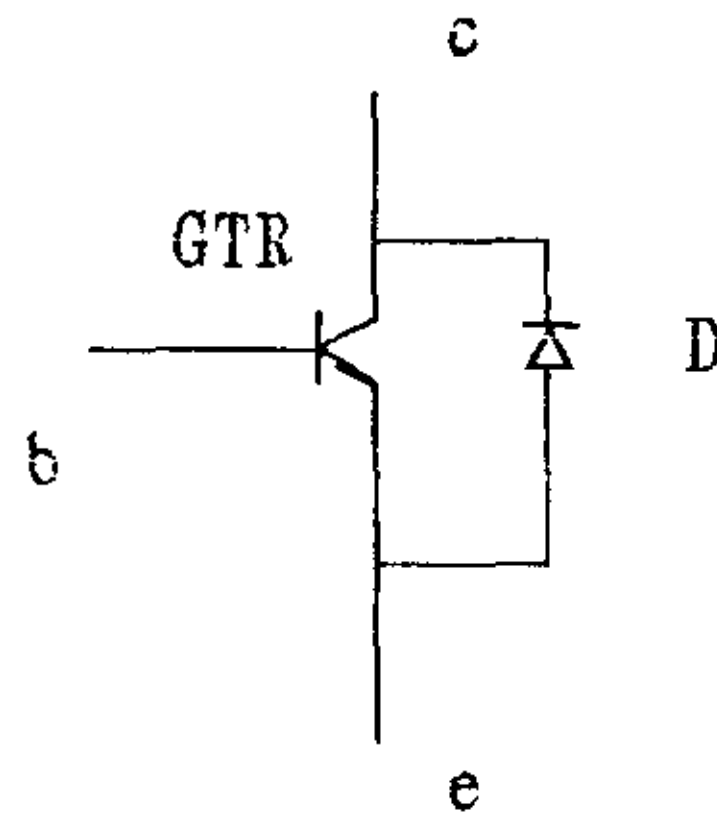
这种制动电路的优点是电路简单，比其他各种能量再生制动回路都简单，元器件数量较少，控制电路也相应简单，因此，经济性能较高。当然这种电路由于不能把电能回馈到电网中去，而是把它消耗在电阻上，存在着节能方面的缺点。但此缺点对于应用于热输出辊道的AC-2000装置来说影响不大，前面已说明在正常生产时，AC-2000是

很少出现停车制动的情况，而是长期运行着的，除非是出现事故或在交接班时才停止运行。所以，GE公司选择 AC-2000装置来作为热输出辊道的传动装置是适宜的。

6. 逆变器回路

1) 逆变器的功率晶体管

AC-2000 逆变器主回路的换流元件是采用模块化的功率晶体管 GTR，这也是本装置的特点之一。每个模块中包括一个功率晶体管 GTR 和一个反并联的续流二极管 D。每个模块具有电隔离的基座，并安装在公共的散热器上，如图(22)所示：



图(22) GTR 模块

大电流，高耐压的功率晶体管GTR是一种全控型器件，近年来在中小功率的逆变器中已得到了广泛的应用。它具有良好的自关断的开关特性，开关频率可达到数KHZ，适宜于高频PWM控制。但是单个GTR容量较小，电流增益较低，通常只有10左右，要使晶体管饱和导通就需要很大的基极驱动电流，所以实际运用的逆变器器件一般都是按达林顿方式组成的复合管，如图(23)所示。

达林顿功率晶体管是由两个晶体管级联构成，具有较大的直流共射极电流增益(hFE)。

因为： $i_c = i_{c1} + i_{c2}$

$$= \beta_1 i_{b2} + \beta_2 i_{b2}$$

$$= \beta_1 (1 + \beta_2) i_{b2} + \beta_2 i_{b2}$$

$$= (\beta_1 + \beta_1 \beta_2 + \beta_2) i_{b2}$$

$$= \beta i_b$$

因此AC-2000的GTR就是采用了这种达林顿复合晶体管，其TM1--TM6的GTR模块组成如图(24)所示：

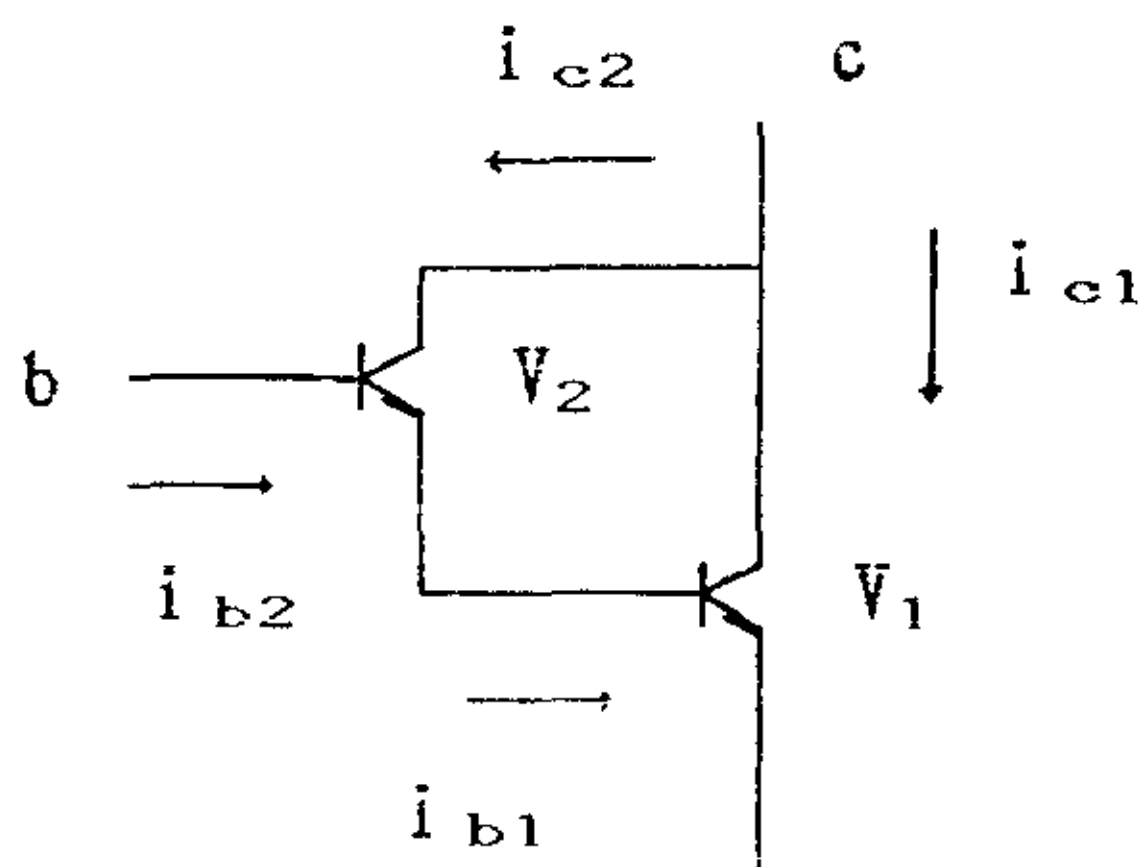


图 (23) 达林顿复合管

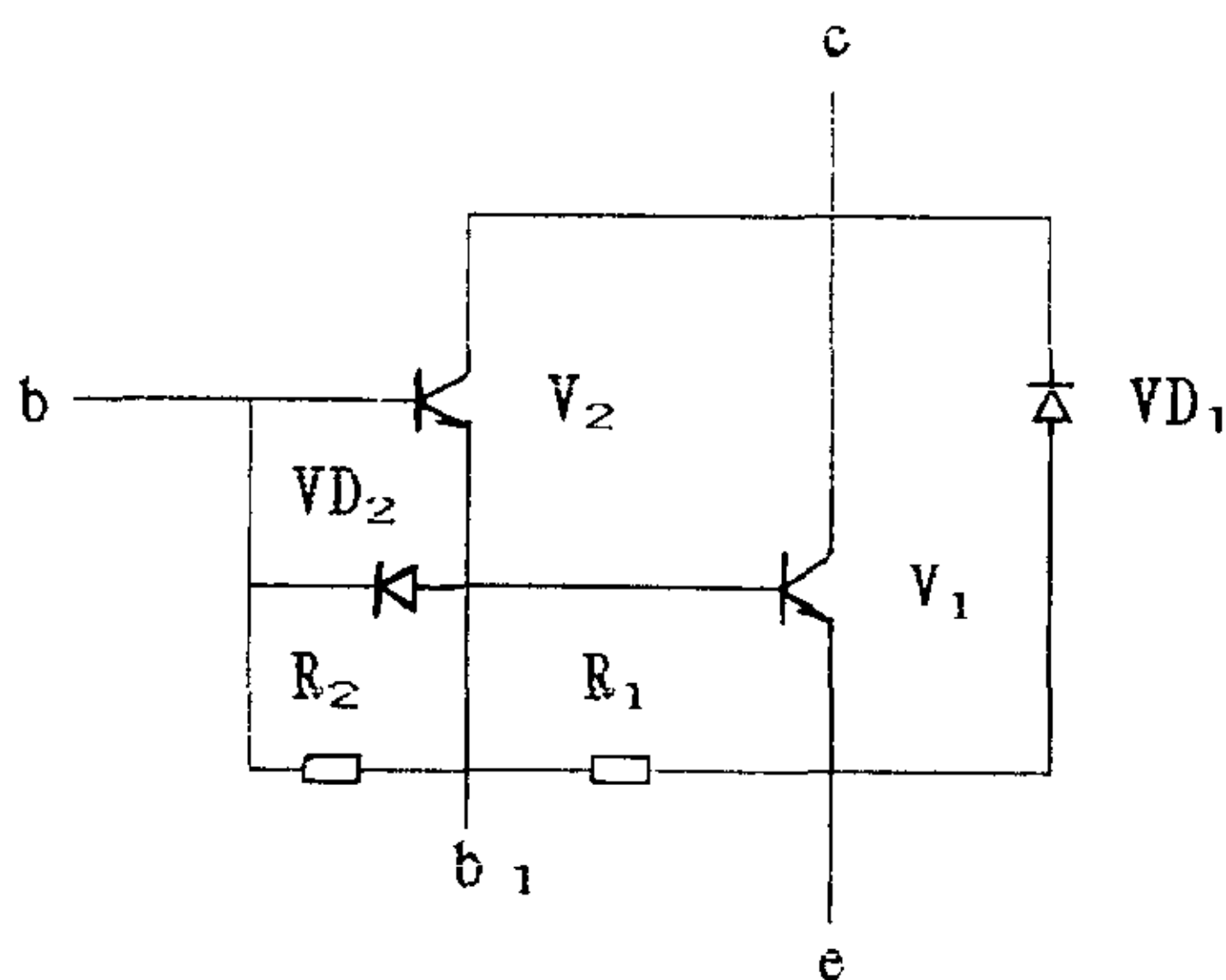


图 (24) 实际的功率晶体管模块结构

VD₁ - 是一个反并联的续流二极管，组合在GTR模块中。
V₁，V₂ - 是功率晶体管GTR。

b₁ - 是用来加快V1的关断，在AC-2000中未用。这是因为2160工程中所引进的AC-2000传动装置的输出频率最高只58HZ，如果要用于更高的频率，要求GTR开关速度更快时，则可使用b₁。

使用GTR器件的逆变器具有以下的特点:

- GTR 的正向损耗及开关损耗小, 效率高达97-98%左右。
- 由于目前高压、大容量的GTR元件制造困难, 最大只达1200V/600A, 一般用于中小容量的传动装置。
- 不能使用熔断器来保护元件, 但可以由控制系统通过检测其过电流, 迅速切断主回路来进行保护。
- 关断时间短, 适应于PWM控制方式。

2) AC-2000逆变器的选择

热输出辊道传动所采用的电动机, GE公司要求适应逆变器专用电机, 不能使用一般的交流电动机, 以满足电机能够在10-50 HZ保持额定转速运行, 在50-58 HZ保持额定功率运行, 如图(25)所示:

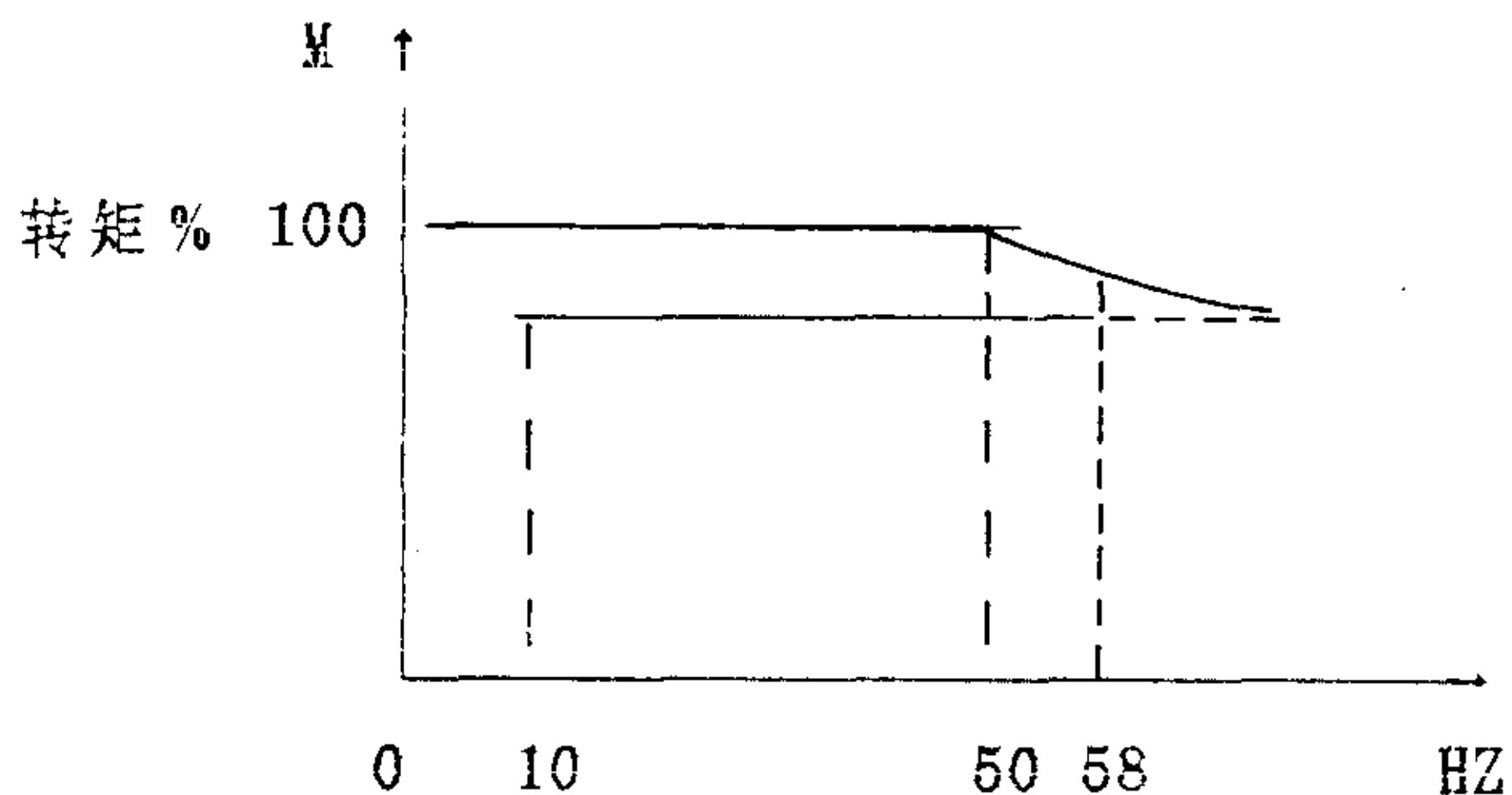


图 (25) 电机运行特性示意图

这是因为一般的交流电机是按在工频电网下运行, 可以获得最佳特性来设计的, 所以:

- 当一般普通电机应用逆变器时, 由于受到逆变器输出电压及电流中所含的高次谐波的影响, 电机效率, 功率因数均要降低。这样对于同样的负载, 电机电流比在工频电网下运行要增 10% 左右。温升增 20% 左右。

- 当电机在其额定转速以下的低速区域运转时，因其频率减小速度降低，则冷却效果及转矩均要降低，那么带负载能力减小。但是对于热轧线的热输出辊道来说，要求传动电机在低速下能够保持额定转矩不变。这是由于轧制厚度较大(10-19mm)的带钢时，其轧制速度相应降低，则辊道的速度也随之要降低，其频率在 22-40 HZ左右。又因为带钢厚度增大，这样电机的负载也增大。所以对于热输出辊道这种负载特点，电机的转矩应保持额定值不变，不能降低。然而一般电机是满足不了这种要求的，如图(26)所示：

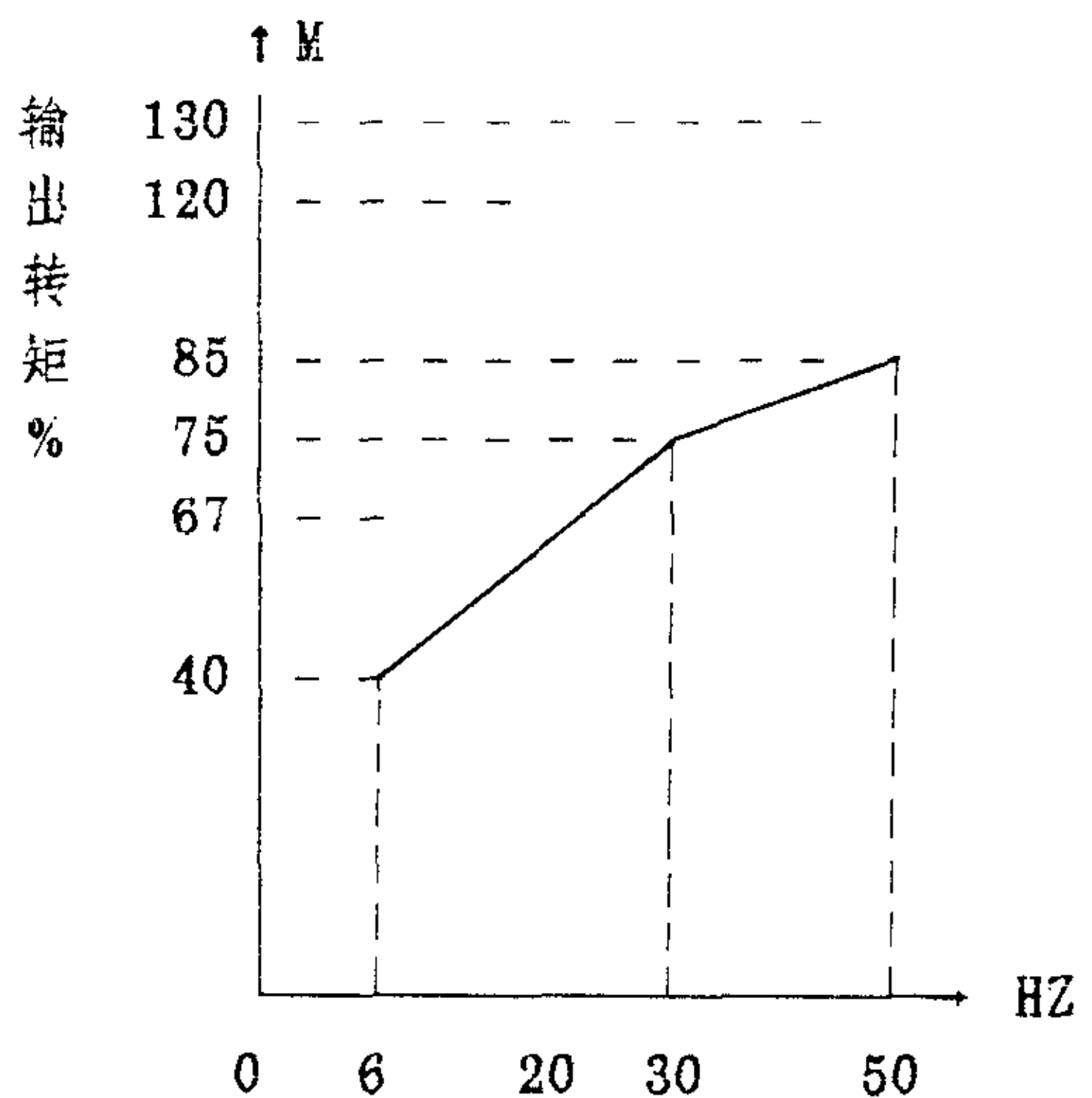


图 (26) 标准电机用于逆变器传动时的转矩特性

根据以上所述，AC-2000 选用了应用于逆变器的专用电动机，鉴于该电机性能的特殊性，根据热输出辊道的布置情况，选用了两种容量的 AC-2000传动装置。因为：

- 热输出辊道的前，后两组辊道，每组辊道均为13个辊子，为此每组使13台电机。

- b) 辊道前二，三组辊道，每组16个辊子，这样每组使16台电机
- c) 从第4组开始，以后的10组辊道，每组18个辊子，这样每组使18台电机。

电机参数如下：

额定功率： 7.5 Kw
 额定电压： 400 V
 额定转速： 1000 rpm
 最高转速： 1100 rpm
 额定频率： 10-50-58 Hz

又因为逆变器的换流元件是GTR，为了保护GTR，逆变器所设置的限流保护，一般确定为逆变器额定电流的150%，60秒。选择 AC-2000逆变器的容量是按负载额定容量的1.37倍来确定的。所以：

- a) 对于每组拖动13台电机的AC-2000，其容量：

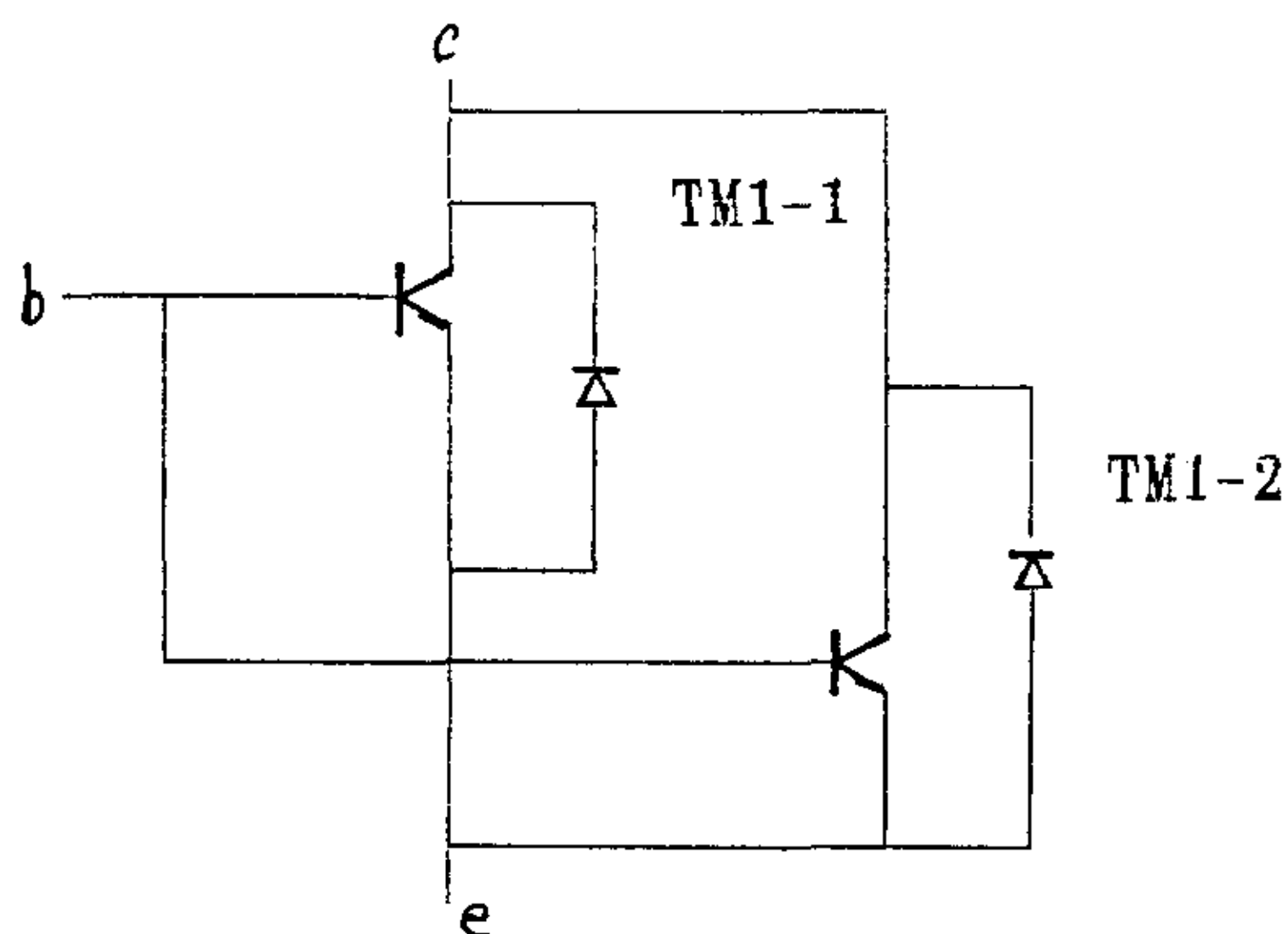
$$P = 1.37 * (13 * 7.5) \\ = 134 \text{ KVA}$$

实际选用了Q+系列标准产品150 KVA

- b) 对于每组拖动16台和18台电机的AC-2000，其容量：

$$P = 1.37 * (18 * 7.5) \\ = 185 \text{ KVA}$$

实际选用了T系列标准产品200 KVA



图(27) 200 KVA逆变器GTR模块的并联接法

对200 KVA容量的逆变器，是由十二个模块化的TM1-TM12 功率晶体管构成三相桥式逆变器电路。每两个600 A/1200 V的功率晶体管并联，如图(27)所示。这样每一桥臂上共安装4个GTR模块。

我们可以看到，GE公司在这方面还进行了多方面的努力，一是所生产的功率元件已完全模块化；二是元件在柜内的安装位置和接线长度也进行了标准化；三是控制系统的基极驱动板 IBD为了能够驱动这种并联的 GTR模块，在其板上增加了一个基极驱动放大器晶体管以构成复合达林顿接法，这样就可以同时驱动4个 GTR模块。通过这些措施就可保证所并联GTR的电流平衡率能够达80%以上。

150KVA和200KVA的 AC-2000逆变器功率元件是全部采用同一规格的600 A/1200 V的TM模块，这样不仅使产品设计和生产易于实现标准化、系列化、提高生产效率、降低生产成本；而且也使用户的备品备件规格一致、减少其备品数量及其费用。

逆变器三相的输出是分别经过 SH1-SH3分流器到交流电动机。

GE公司为首钢2160工程热输出辊道设计的AC-2000 的控制采用了矢量变换控制和SPWM控制，并且利用微机来实现这些控制方式。

第二节 AC-2000数字式交流变频 传动装置控制系统分析

AC-2000 交流变频传动装置的显著的特点是采用全数字化的微机控制系统。该系统完成装置的全部控制（包括矢量变换控制及SPWM控制等）、运算、逻辑连锁、显示和键盘操作等，并且通过接口卡及其相应板子与热轧线的基础自动化网络及设备相连，实现了运行指令的下装和运行参数的上传，还可通过人机接口——编程器或ST-2000工具箱，实现电机和传动控制系统参数的设定及显示，以及事故诊断、事故码显示及程序配置等。

AC-2000 的数字化和集成化的程度较高，不但在硬件的装配方面采用积木化结构，将控制系统的全部控制卡、通讯卡、电源板、基极驱动卡、编程器等装在一个控制箱中，构成一个完整的交流变频调速控制系统。而且在应用软件方面设计成模块化结构，一个软件模块完成一种特定功能。所以针对不同用户的要求及装置容量（例如2160的AC-2000采用速度开环方式），配置相应功能的软件模块和硬件插件即可。

2160所用AC-2000的控制系统是由以下几块卡构成：

- LCC--通讯卡 一块
- DCC--传动控制卡 一块
- MCP--电源卡 一块
- IBD--基极驱动卡 一块
- 人机接口--编程器 一个
- NTB/3TB--传动端子板 一块
- LAN I/O端子板LTB/RTB端子板 一块

其结构框图如下：

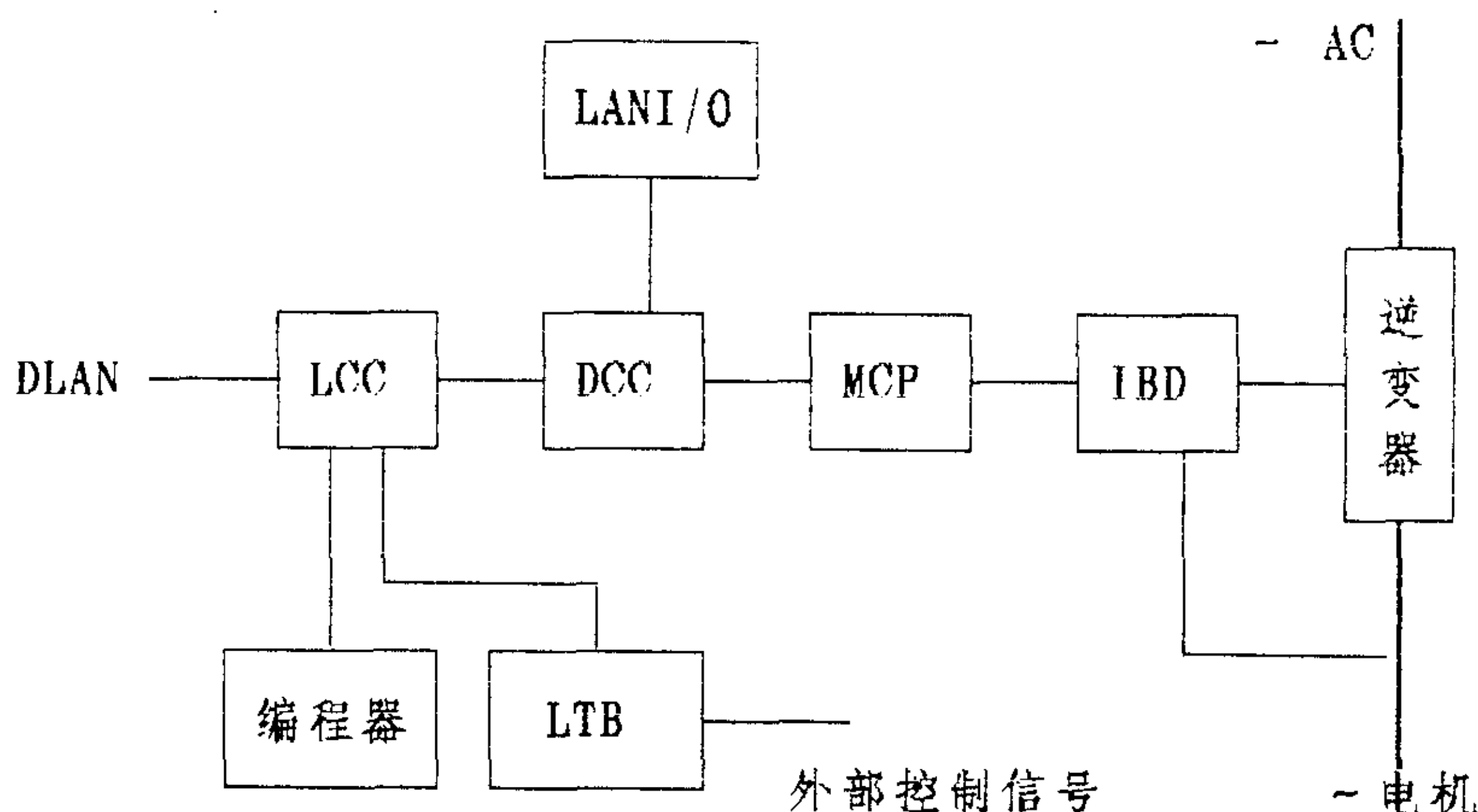


图 (28) AC-2000控制系统框图

本文主要就LCC卡和DCC卡部分进行深入分析，其余的如电源卡、基极驱动卡等在分析LCC和DCC卡时仅做一般的分析。

1) AC-2000的通讯回路

AC-2000数字式变频调速装置的DCC传动控制系统与外部网络之间以及和外部控制设备之间，人机接口（编程器）之间的通讯是通过LCC通讯卡及其LTB I/O接口端子板等来实现的。在LCC通讯卡上的以80C196微处理器为核心的微机系统即LCP系统，担负了完成和控制LCC卡与DCC卡之间以及LCC卡与外部网络、控制设备、人机接口的通讯任务。

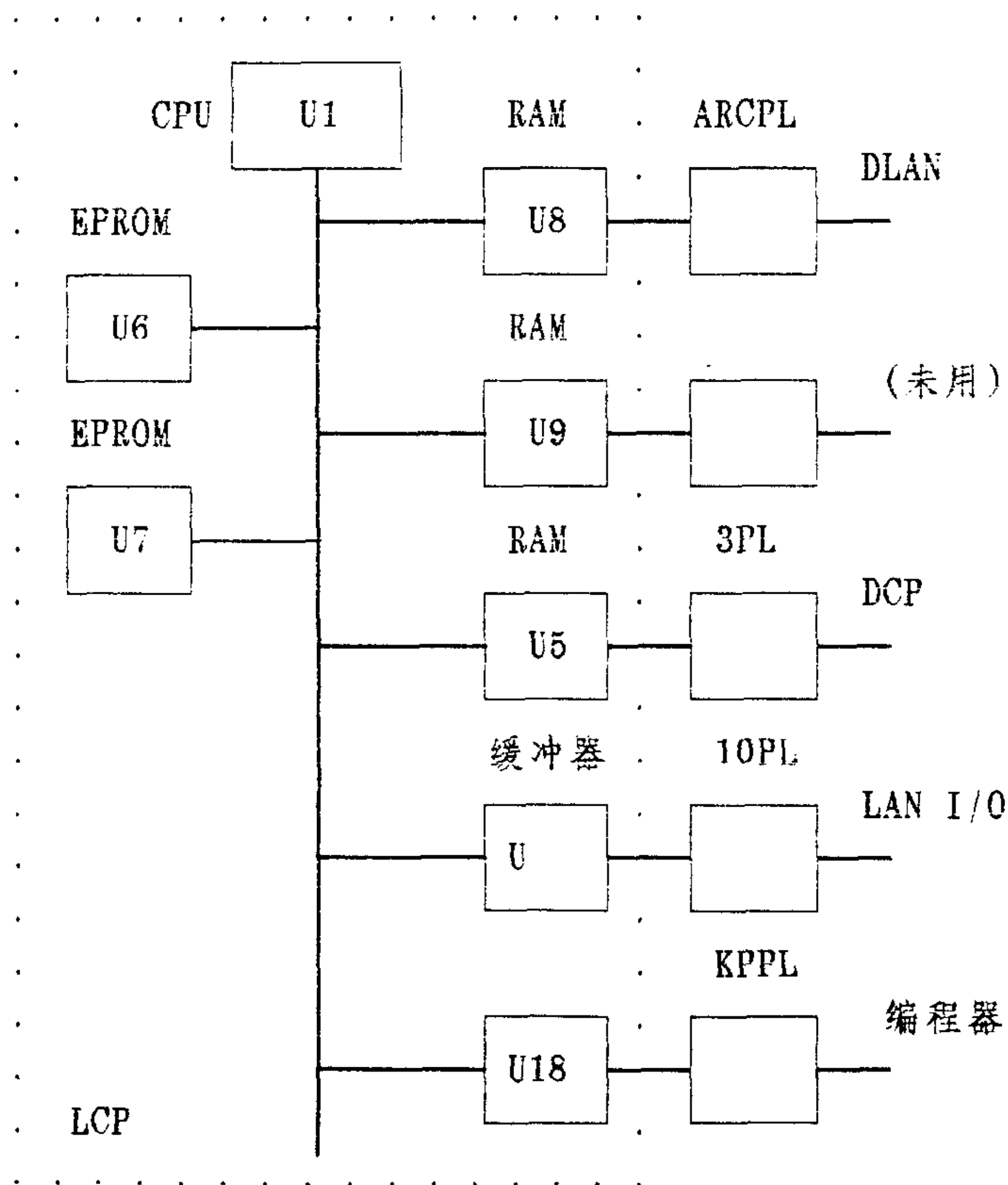


图 (29) LCC结构框图

(1) LCC通讯卡结构

如图(29)所示, LCC卡主要包括一个局域网LAN的控制处理器部分(LCP), LCP控制处理器部分包括一个80C196微处理器(U1), 即LCC卡的CPU; 2个EPROM(27513)存储器, 其页面地址为 $4 \times 16K \times 8$; 两个LCP专用的接口RAM($8K \times 8$); 两个三—状态输出地址锁存器; 以及一个用于LCP与DCC传动控制卡上DCP传动控制处理器之间通讯的双端口RAM接口($1K \times 8$)和字母数字显示控制器(U18)一个。

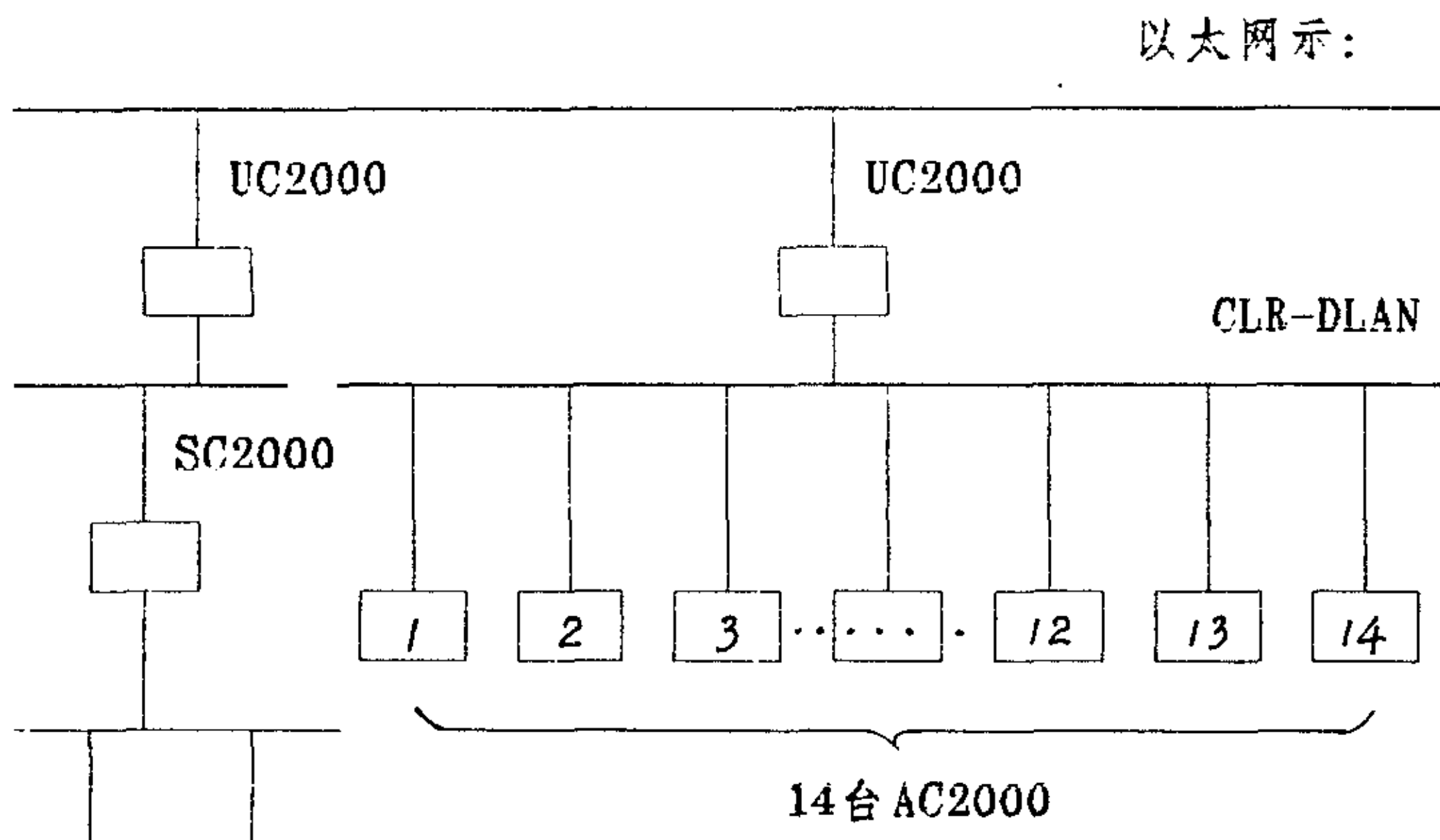
(2) LCC的通讯功能

A) LCC卡与DCC卡之间的通讯

在LCC卡上, LCC卡与DCC卡之间的通讯是通过一个动态双端口RAM($1k \times 8$)即U5接口来进行的, 并且使用3PL连接器来构成两卡之间的数据通道。U5中的指令及数据流的存取则共同地由LCC卡的LCP和DCC卡上的DCP微处理器来控制。

B) LCC卡与工厂基础自动化网(DLAN)之间的通讯

因为14台AC-2000全部是接在工厂的基础自动化网上, 即CLR-DLAN卷取机传动局域网上, 此网是2160热带钢轧制线基础自动化网络五个子网中最后一个子网。如图(30)所示:



图(30) CLR-DLAN子网

首钢2160热带轧机生产线的自动化程度是我国已建成的几家同规模热带轧机中最先进的系统之一，具有九十年代中期世界先进水平，其自动化系统是分为三级，即：

第一级：基础自动化级，即DLAN网；

第二级：过程自动化级，即以太网；

第三级：生产管理级。

基础自动化网是直接对全轧线各类传动设备进行控制，是分散性结构，分成五个独立的、彼此又有联系的子系统。AC-2000 装置的运行速度指令就是来自相邻的精轧区子系统FM-DLAN，经本子网输入到AC-2000。

通过CLR-DLAN网， 在本网上的OC-2000智能操作员站和在以太网上的 MM-2000人机界面装置的控制指令也可直接对AC-2000进行控制，包括自动/手动，各辊道单独选择，点动等控制指令的输入。

为了与网络进行连接， LCC卡分别设置了一个RS-422接口线路，一个隔离的DLAN接口线路。针对不同的网络，可用卡上设置的JP13、JP14 跨接片来选择。AC-2000则是用RS-422接口来与DLAN网连接的。LCC卡的二个RAM用于接口(8k x 8)回路，即每接口回路中各用一个 RAM作为接口芯片。从DLAN网输入的数据及控制指令均为数字信号，其传输速率为2.5Mbt/s。

C) 与外部设备之间的通讯

AC-2000控制系统与外部设备(即外部的控制按钮、接触器、显示灯等分立元件)的通讯是通过LCC卡上的隔离接口线路部分完成。该部分线路使用八进制缓冲器和八位寄存器，经过卡上的10PL连接器处理7个数字输入和7个数字输出。

在2160轧线上通过此卡实际只使用了一个输出指令，即控制 AC-2000装置线路接触器MA的闭合或切断。其控制过程如下：

LCC卡与外部设备的输入/输出信号经过10PL连接器接到LTB端子板，由LTB输入/输出电路完成与外部设备之间

的电压、功率的变换，使其能直接驱动 RTB上的七个高电压大电流继电器，通过 RTB的继电器接点来闭合或切断线路接触器。

D) 与编程器之间的通讯

AC-2000 的控制器正前方装有一台小编程器，该编程器上有一个矩形的字母数字液晶显示器和一个具20个健的键盘，它是用来作为现场维护人员与 AC-2000之间的人机接口。以便进行参数调整、设置、事故诊断及测试等。

数字-字母液晶显示器，在正常运行时可以显示速度、电流等参数；故障时则显示出故障码、状态。

其键盘上的各个功能健可以直接用来设置和调整控制参数，给出指令或输入数据；查询故障原因以及启动装置运行等。

LCC通讯卡是通过卡上的KPP接口与编程器进行连接，卡上的字母数字显示控制器U18（即8279接口芯片）是用来完成液晶显示器上数字及字母显示变换控制功能。

第三节 AC-2000调节控制回路分析

AC-2000的调节控制回路是集中在DCC传动控制卡一块主板上，其结构框图如图31所示。

DCC部分是AC-2000传动装置的“大脑”。全部控制功能均由软件来实现，与一般变频器中的应用软件编制不同，GE公司是应用软件进行了模块化，这些模块是预先确定的代码（程序）块，完成特定的功能。这样的结果一是厂家可依据各种用户的不同要求，非常方便地装入相应的功能软件模块来实现所需要的传动功能，大大地节省了软件的编制工作量。二是也方便了现场维护人员，当装置的程序出现问题时，便于查找和重新安装出现问题的这一部分的功能程序模块。三是大大地简化了控制系统的硬件结构。例如2160工程所采用的 AC-2000虽然整机是GE公司的一种通用产品，但针对2160的具体工艺要求，则配置了相应的程

序模块，组合成为一个完整的控制系统程序，所以这是GE产品的一个显著特点。

DCC传动控制卡主板上的调节控制回路是分为三部分：

- a) 主微机DCP部分
- b) 从微机MCP部分
- c) 共 - MCP部分

这与一般常见的变频器控制系统结构不同，但是从控制原理来分析，实际上是两个部分：即主微机系统DCP部分和从微机系统MCP部分，实际上MCP部分应包含CMP和共-MCP两系统。

下面分别就各部分主要功能及结构进行分析。

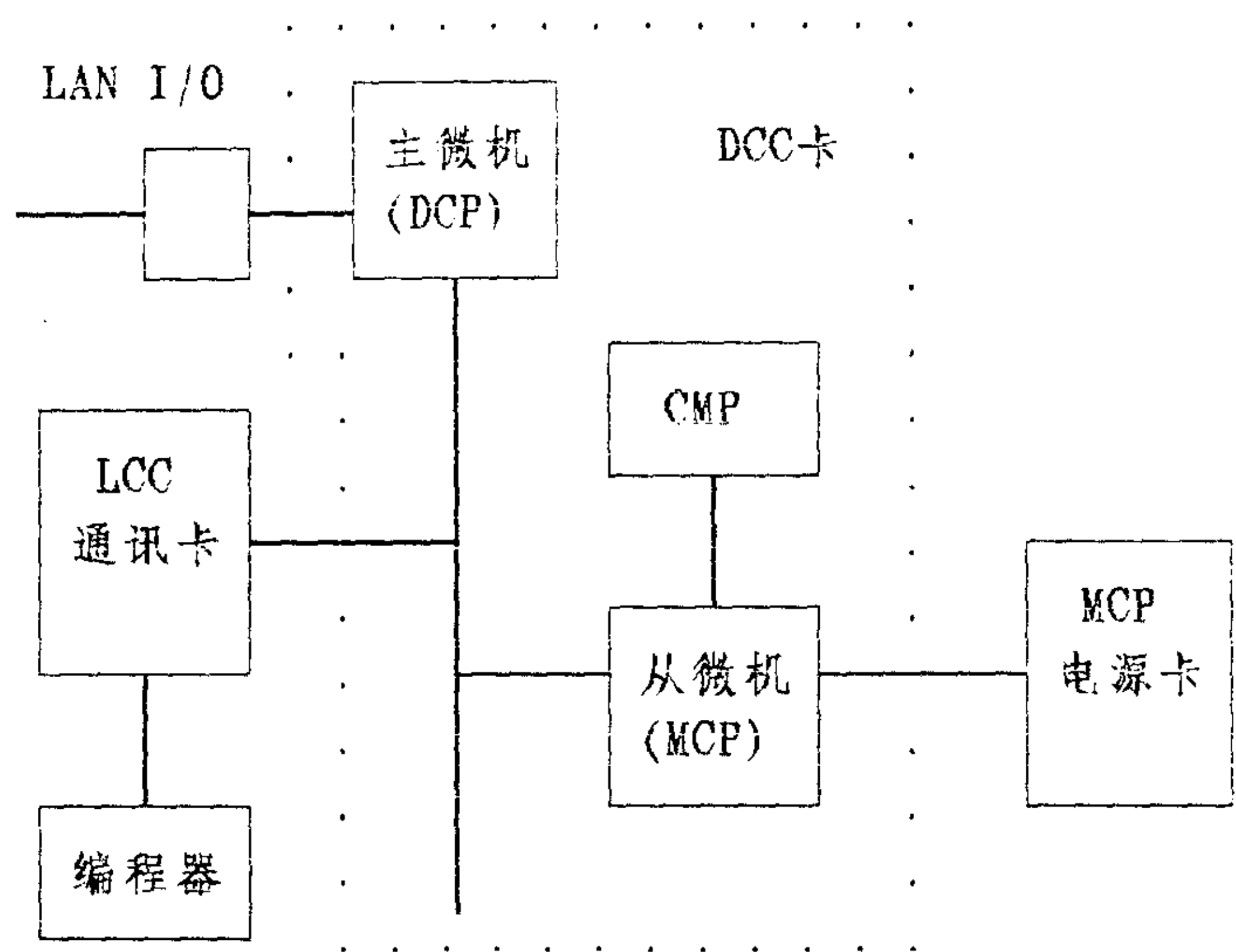


图 (31) DCC 卡结构框图

A) DCP主微机部分

这部分是调节控制回路的主微机部分，它的CPU 主要由一个80C186微处理器，2个外接的程序存储器EPROM，一个数据EEPROM，一个双端口RAM(62256) 以及数字I/O外围

设备和模拟I/O外围设备，以及VCO 电压/频率变换电路组成，如图(32)所示：

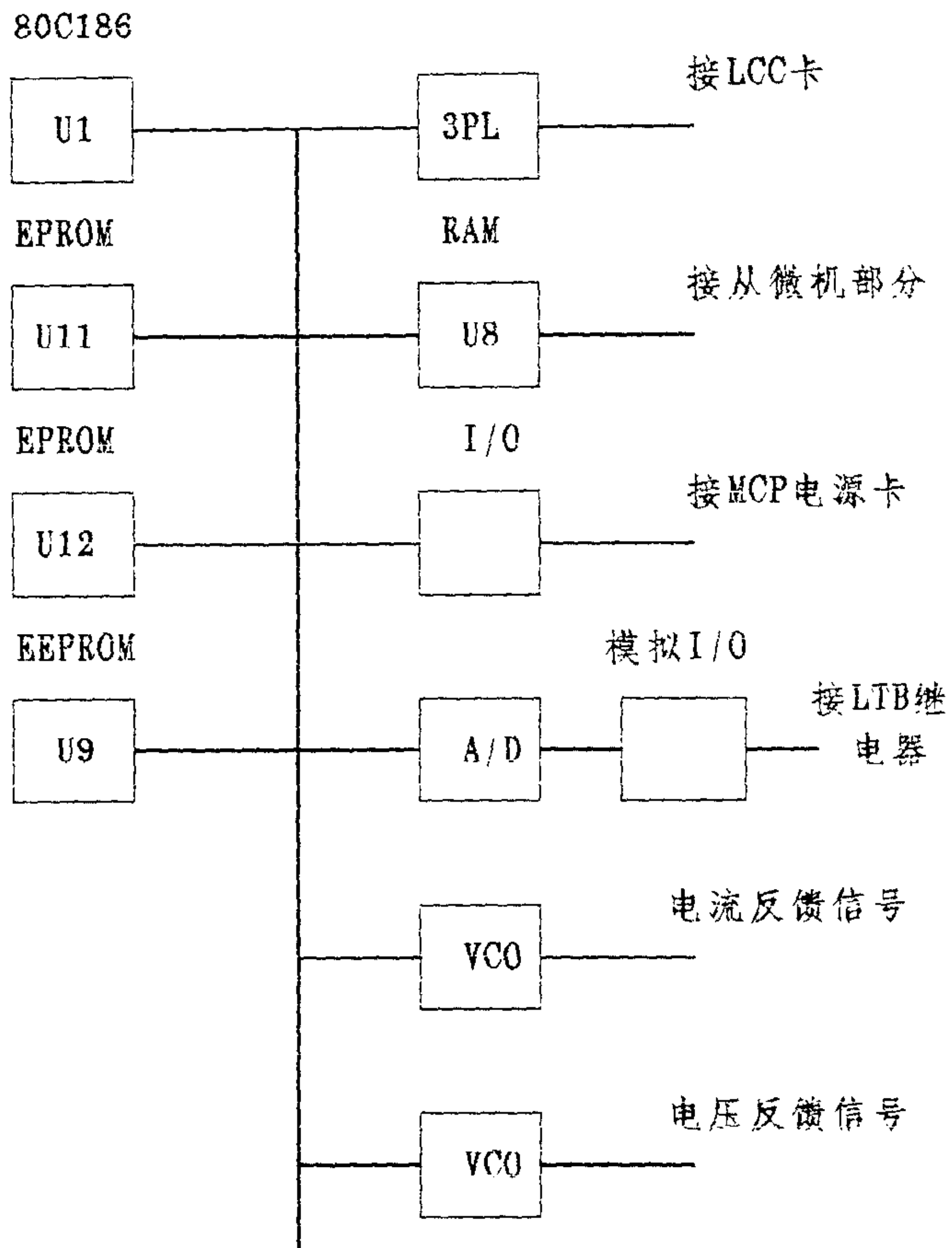


图 (32) DCP的功能框图

主CPU 80C186为16位微处理器，该处理器是把时钟发生器、二个DMA 通道、三个16位定时器、中断控制器、等待状态发生器、存储器和外设片选逻辑、局部总线控制器、CPU集成在一块芯片上，工作频率为16MHZ。

(1) DCP主要功能

1) 执行AC-2000控制系统的系统操作程序

系统软件控制、硬件资源（CPU扫描时间，存储器管理，I/O设备等）以及应用程序执行的管理。

2) 完成速度环的调节运算和控制

在AC-2000传动控制系统中，GE公司的标准设计是闭环方式，这样在硬件配置上需要设置相应的速度编码器和SPC信号处理器卡，检测电机转速并对速度反馈信号进行处理，然后输入到速度调节器。而2160热输出辊道传动的AC-2000是一速度开环系统。所以，装置中未配置SPC和速度编码器。

速度调节器采用通常的PI调节器，其输入速度信号为 ω ，输出信号则是定子电流的转矩分量给定值。PI调节器能够满足稳定、准确、快速的调速要求，而且PI调节器是一种不太复杂的程序块，通过此程序块就可以完成PI控制算法的计算和控制，并且参数调试也不复杂，便于调试，所以速度调节器的程序比较简单，其程序是存储在EPROM中。

3) 励磁给定的控制

励磁给定环节在基速以下按照V/F比值进行调节，在基速以下为恒磁通输出，在基速以上为弱磁输出。该环节根据外部输入的速度指令 ω ，输出励磁磁通的给定值。该程序块比较简单，也是存储在U12 EPROM中。

4) 通过LCC和CLR-DLAN传动局域网进行通讯

在CPU的控制下，从LCC卡的双端口RAM（U8）中读取由网络传送来的速度信号及其它各种顺序控制指令，并且将一些运行参数、状态上传输出。

5) 通过LCC卡和人机接口—编程器进行通讯

DCC接收经LCC卡传送来的编程器输入的操作指令和运行参数，并且输出运行参数、状态及事故码等信号到编程器的显示器进行显示。

- 6) 对系统的运行状态进行跟踪, 并将跟踪数据暂存, 供事故出现时调试人员进行分析使用。

(2) DCP的控制和保护功能:

- 1) 在DCP中还设置了两个高-隔离的 VCO (电压/频率) 电路, 其中一个是把从MCP电源卡检测到的信号, 输送到DCC卡的主回路中间环节直流电压经过DCC卡上的模拟 I/O 电路把电压模拟信号转换成与电压对应的数字脉冲信号进入DCP微机。

--当AC-2000在制动或其它原因, 直流电压高于设定值, DCP控制程序就输出过压标志到编程器, 并使控制系统转入保护程序。

--当AC-2000加电运行时, 或运行中直流电压欠压, 保护程序根据检测到的输入电压信号使装置进入保护状态, 变频器这时就不能进入或立即退出运行状态。

--当操作人员给AC-2000装置合上电源侧开关后, 主回路中间环节滤波电容初始化充电结束, 直流电压达到预设值, 则DCP给出指令去MCP 电源卡的软启动电路, 该电路输出一触发信号导通主回路SM1模块的SCR。

- 2) 在DCP中还设置了两个高-隔离的VCO (电压/频率) 的另一个VCO线路是用于变频器输出三相电压的监控, 其控制过程如下:

变频器输入的交流电压信号是在MCP 电源卡上的AC电源监视电路获得, 经DCC卡的模拟I/O外围接口输入到 VCO电路的, 当任何一相交流电压低于额定值的70%时, DCP就产生一控制信号, 经过可编程延时环节输出到LCC通讯卡, 经 LCC卡输出到LTB, 再到 RTB, 通过RTB继电器动作来切断线路接触器。并且根据MCP卡的电源监视电路输入的信号, DCP判别交流电源的线路相序。如不满足 A、B、C三相的正序关系, DCP一方面通过编程器-人机接口显示屏

显示故障码信号；另一方面把AC-2000系统转入保护状态。这时AC-2000装置输出端线路接触器MA不能被合闸。而且三相电源只有处于正序状态，装置内的三相冷却风扇转向正确。

在VCO线路上还设置有标定电位器，用来校正电压/频率转换比值，这里是定为每伏电压为578.3HZ。

(3) 软件配置方法

GE公司为DCC卡中的软件配置提供了两种方法

存储在DCP微机外接2个 EPROM及EEPROM中的模块化软件GE公司在出厂时根据用户使用 AC-2000的实际要求进行配置，一般情况下，现场调试及维护人员根据不同要求分别采用不同方法来进行重新配置和修改。

- 1) 在 AC-2000安装后调试时或运行过程中如果装在 EPROM 中的主程序出现较大紊乱时，须使用GE公司专用的ST-2000 工具箱来进行程序的重新装入和修改或故障查寻。ST-2000工具箱通过与NTB/3TB板上的COMPL RS-232接口连接，再经过NTB/3TB板与DCC卡6PL、8PL连接器接通，实现ST-2000和DCC卡的通讯。
- 2) 第二种方法是直接通过操作柜内的人机接口—编程器，进行局部功能软件调整以及配置和读出装在EEPROM 中的传动参数及读出RAM中的值，为现维护人员提供了较大的方便。

B) MCP从微机部分

这部分是AC-2000调节控制回路的从微机部分，CPU主要包括一个 80C196 KC微处理器、2个外接的程序存储器EPROM(27513)、一个双端口RAM(62256)和模拟量输入接口及其A/D变换电路，如图(33)所示：

从微机部分的80C196 KC是一个具有高速I/O、一般数字I/O、模拟I/O、定时器/计数器、监视定时器的 16位16MHz的微处理器。

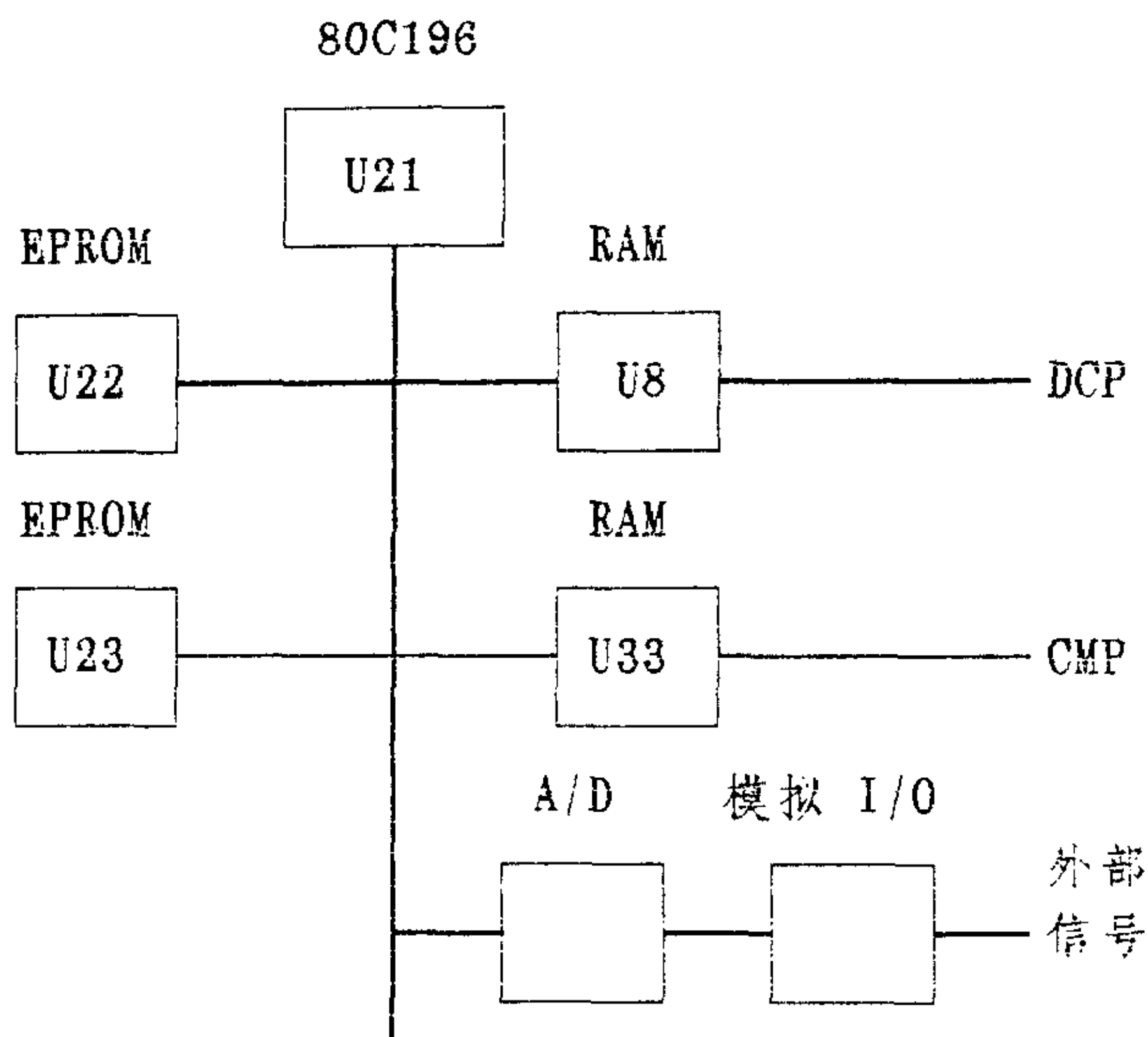


图 (33) MCP 结构框图

MCP微机系统具有以下功能

1) 与DCP及CMP微机系统之间的通讯:

MCP微机和DCP微机之间以及与CMP微机之间的数据交换分别是通过MCP与DCP之间的通讯接口——U8双端口RAM(62256)和MCP与CMP之间的通讯接口U33双端口RAM来进行的。这是一种双向通讯, 通讯速度很快, 并且在通讯时间内不会影响MCP微机的其他功能的执行。

MCP是从U8 RAM读取DCP输出的数据, 主要是定子电流的转矩分量给定值及磁通指令值等。

MCP与CMP之间通讯则是MCP输出采样信号值, 读取CMP计算结果值。

2) 进行矢量变换控制

AC-2000 的矢量变换控制是由软件来完成, 其软件模

块是装在外接的 EPROM 存储器中。输入到矢量变换控制环节的信号包括:

1)) 由 DCP 微机部分速度调节器输出的转矩电流分量给定值 i^*_{Tr} 和由励磁磁通给定环节输出出来的励磁磁通给定值 ϕ^*_r 。

2)) 从 MCP 电源卡输入的电机三相定子电压和电流反馈信号 u_{af} 、 u_{bf} 、 u_{cf} 和 i_{af} 、 i_{bf} 、 i_{cf} 。

在此矢量变换控制环节中, 其控制程序根据上述输入信号, 进行矢量变换和运算。求取定子定向轴 (M 轴) 与转子轴之间的位置夹角 ϕ 和 ϕ_m 值, 再根据 ϕ 值查表求取 $\cos \phi$ 和 $\sin \phi$, 输入到 VR 旋转变换单元。 ϕ_m 的值输入到转矩和磁通 ϕ^*_r 环节, 求取到转矩分量给定值 i^*_T 和励磁电流分量给定值 i^*_M 。

经过 VR 变换后求得的 i_M 和 i_T 分别与 i^*_M 和 i^*_T 比较, 进入各自的转矩分量电流调节器和励磁分量电流调节器。经过电流调节器调节后的转矩电流分量和励磁电流分量经过 VR 逆变换和 $2\phi/3\phi$ 变换后输出三相定子电流控制信号。

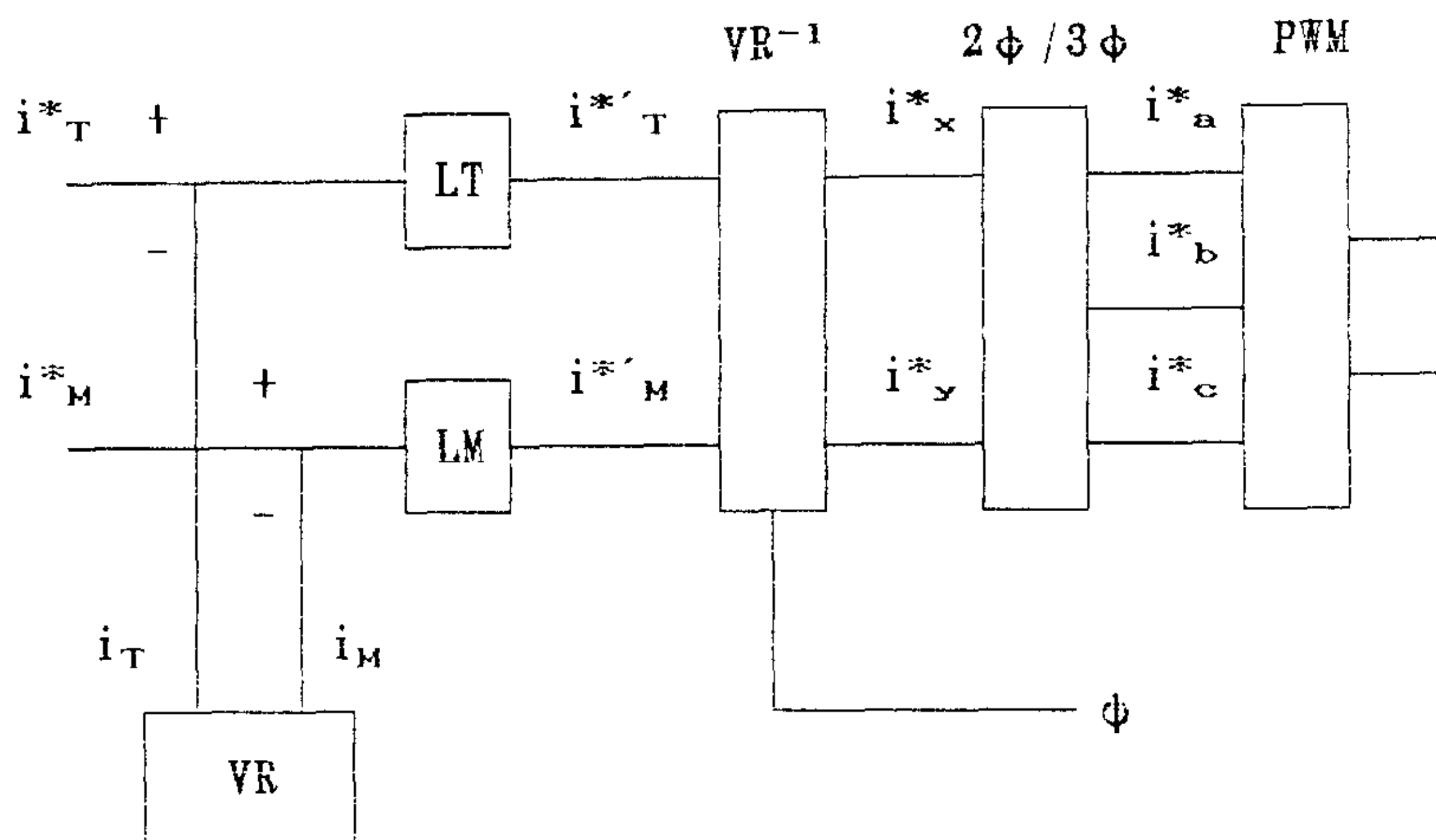
3) 进行电流调节控制

电流调节是交流调速系统中的一个重要环节, 是调节控制系统中的内环。可以提高整个控制系统精度和响应速度, 而且 AC-2000 是采用定子电流瞬时值控制的 PWM 方式, 不是采用定子电压信号来控制 PWM, 这样就可以避免用电压控制信号引起的逆变器输出的三相电压不平衡。

在 MCP 微机的控制程序中, 分别设置了两个电流调节单元: 一个是对转矩分量电流 i^*_T 进行调节; 另一个是对励磁分量电流 i^*_M 进行调节, 这样就如同直流电那样分别调节。经过调节的转矩分量电流信号和励磁电流分量信号输出到 VR^{-1} 逆变换器, 再由此逆变换器进行处理输出 i^*_x 、 i^*_y 信号到 $2\phi/3\phi$ 变换器功能程序中。经此 $2\phi/3\phi$ 变换功能程序块的变换, 输出三相定子电流控制信号 i^*_a 、 i^*_b 和 i^*_c 到 PWM 控制单元中去, 如 (34) 所示:

在 AC-2000 中的电流调节器采用是 PI 调节器, 其 PI 调节运行是由微机实现, 其功能软件是存储在 80C196KC 的

外接的 U22 EPROM中。



图(34) 电流调节环节示意图

4) PWM控制

AC-2000传动装置是用 80C196KC 微机本身生成 SPWM 信号的，在 MCP微机内部有一个 PWM生成电路用来生成三相 SPWM信号，并且其内部的定时器/计数器电路是用采样定时及脉宽定时。PWM线路根据输入的三相电流控制信号及逆变器频率的给定值进行上述 PWM分析中所述的查表及运算，得到生成的三相SPWM波信号后，直接由80C196KC的HS0.0-5输出口输出三相SPWM脉冲列信号，并经过DCC卡的1PL连接器输出到 MCP电源卡，再经 MCP电源卡到IBD基极驱动卡，再由IBD卡上的微机控制，SPWM信号经光/电隔离和功放电路放大后去逆变器桥路相应的 GTR基极，驱动GTR的通断。

MCP 微机系统的全部软件是在装置出厂之前由GE写入 U22、U23 EPROM中，现场维护人员一般不须修改。

C) CMP共 - 电机处理器部分

共 - 电机处理器CMP微机部分是一个以TMS320C10数字信号处理器核心，包括 2 个外接的程序存储器(27C256)和一个U33双端口RAM (62256)，如图(35)所示：

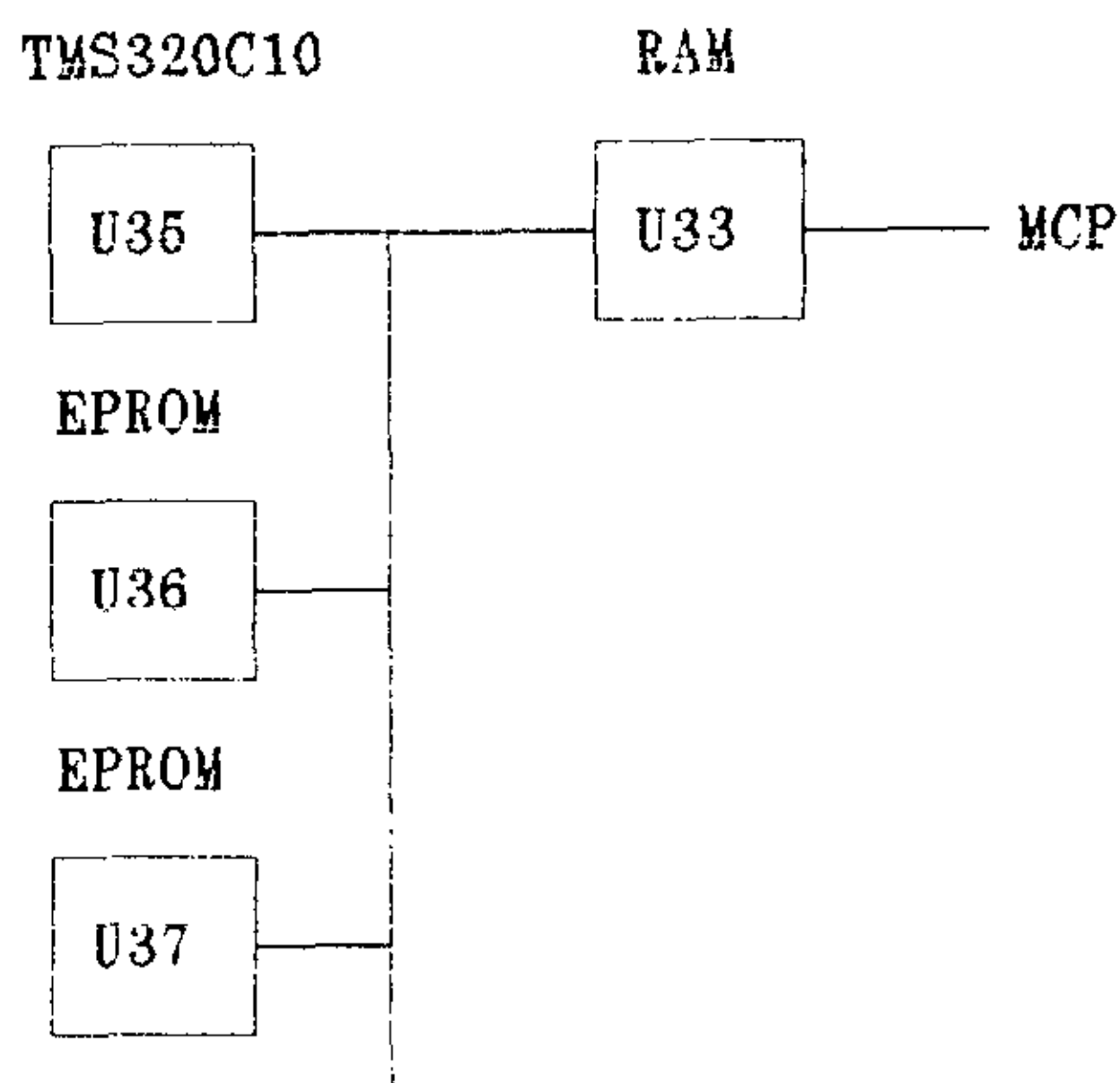


图 (35) CMP 结构框图

由于DCC卡上的 MCP微机部分是AC-2000变频器装置的核心部分。它所担负的矢量变换控制，电流调节及 PWM控制等主要几项任务的控制及运算功能是全部由软件来实现的。这样系统硬件数量少，电路简单，装置成本可以降低，也容易进行功能扩展以满足不同用途的要求。但是，如果这些功能的软件全部集中在 MCP微机部分，那么这 MCP的控制和运算的程序就会相当大。虽然 MCP的 CPU采用的是80C196KC这样一个微处理器，其时钟频率达 16MHZ，但在程序的执行时，占用CPU时间就比较长，响应时间就较慢，难以高速地和实时地满足调速控制的要求。为解决此问题，我们发现GE公司在AC-2000传动装置控制系统不是采用更高一级别的微处理器，（如这样作虽然运算速度可提高一个数量级，解决程序运算速度问题，但是却大大提高了装置的成本，）而是另外增加了这个CMP 微机部分。

由于CMP的 TMS320C10是一种数字信号处理器(DSP)，DSP 是近几年才出现的一种新器件，已开始运用在高性能的数字传动控制中。这里需注意是 DSP的运行速度很快，

其运算速度一般要高于同一级别的微处理器或微控制器。就GE公司在AC-2000中所采用的TMS320C10来说，它的运算速度比80C196KC微处理器至少高出一个数量级。例如在用于矢量控制运算时，完成一个旋转变换只需 $1.2\ \mu\text{s}$ 左右。

TMS320C10的指令周期为160ns，而EPROM (27C256)的读出周期一般为250ns，这样TMS320C10和 EPROM间的数据交换可以直接进行。因此采用 CMP部分后，不但更易于实现高性能的交流传动控制，而且兼顾了系统功能扩展的要求和降低控制系统的成本。

GE公司设计的另一个优点是在 DCC这样一块通用控制卡上，可根据不同传动装置所需的功能和调速性能来配置相应的硬件和软件以实现其要求。如果装置需要的功能较少或调速性能要求不高，例如用于拖动风机电机一类的传动装置，其控制和运算程序不大，通过 MCP微机系统就可达到要求，那么CMP微机系统这部分就可以取消，在DCC卡上 TMS320C10及相应的存储器等硬件就不配置。

CMP中的U33 双端口RAM其作用是用来进行MCP与CMP之间的数据通讯。CMP系统部分是用来集中处理MCP控制系统中的运算功能，包括电流调节器的控制算法，SPWM的规则采样法的近似计算和矢量变换控制的计算等。这些电机的控制算法等程序模块是存储在二个EPROM (27C256) 中。

D) 复位电路

AC-2000变频调速装置的DCC卡上除了具有以上三部分微机系统外，还设置了一些复位电路。这些电路实际上是AC-2000 装置的保护电路，它们是由四个逻辑“非”门及相关电路组成，包括复位按钮。这些复位电路是使AC-2000传动装置的控制系统返回到初始状态，用于发生外部事故(例如过流，过压，失压)、内部事故(例如程序出错，死循环等)时的保护，及复位系统控制等。这里可以用4种方法来执行复位功能：

- 1) 按下DCC卡上的 RESET按钮，这是手动方式之一。
- 2) 通过传动端子板 (NTB/3TB)用户接口进入的 +5V - +24V 直流电压来产生复位信号，这是手动方式之

二。它是用于轧钢时，当轧线出现意外时(不是AC-2000本身出现事故)需要立即停止轧线设备时。当操作台上的操作人员按下台上的急停按钮时，+5V-+2V直流电压经由NTB/3TB端子输入，使AC-2000控制系统复位，这种方式即是“事故急停”。

3) 在MCP电源卡上还设置了一个电源监控电路，其用是在电源欠压时，输出/PSEN信号来对系统进行复位。确保DCC卡正常工作以及在电源电压出现波动时保护EEPROM，这是一种自动复位方式。

4) 另外，在DCC卡的MCP微机系统也设置了两种复位功能，其作用主要是针对控制系统可能出现的CPU故障进行保护：

一是通过编制的程序来复位，即在系统程序中设置了相应的陷阱，一旦程序在运行时出现执行紊乱，所编制的程序就立即转入保护程序块进行复位。

二是通过内部的监视器自动下拉，进行复位。

第四节 AC-2000控制系统的电源

电源部分主要是一块MCP (power supply board)电源板，其作用是：

1)用来为AC-2000传动装置控制电路的各卡以及风机提供+5V、+/-15V、+/-24V、110V等电源。

2)板上所设置的接口电路，是用于为外部高压电源电路与DCC卡的控制回路提供电压、电路的反馈回路，其反馈信号包括：

1))逆变器输出的线-线(C-A, B-A)电压反馈这些信号是从基极驱动卡IBD上的衰减电阻上取出，在MCP板上被施加一偏压之后再放大，然后输入到DCC卡的VCO电压/频率变换器。VCO在零电压时是设置250KHz频率输出。

2))主回路直流中间环节直流电压反馈直流电源实际是在MCP上的DCPL1和DCPL2端子上取出, 经电阻衰减后输入到DCC卡的另一个VCO电源/频率变换器, 其设置是每伏直流电压对应于578.3 HZ。

3))输出电流反馈装置输出电流反馈信号是从IBD卡取出并经该卡上的缓冲电路缓冲之后输入到DCC卡。

3) 软启动控制电路

在这块MCP电源板上设置的控制电路的作用是接受DCC卡主CPU输出出来的指令信号, 经过本电路转换成瞬时突发的能够触发主回路中SM1模块的SCR的脉冲信号。

4) 动力制动控制电路

在板上还设置了一动力制动电路, 其作用是将输入的中间环节直流电压反馈信号在本线路中的比较器中进行比较。当高于设定值时, 则此线路就输出一触发脉冲。该脉冲导通TM7晶体管模块, 电路通过TM7回路放电。当直流电压降到设定值以下, 则线路立即停止输出脉冲, GTR晶体管自关断。

5) 逆变器晶体管GTR触发保护电路

板上的此电路当其控制电压出现低压、硬复位、GTR基极驱动线路故障、MA线路接触器跳闸等故障条件下, 根据DCC卡输出的信号, 此电路立即封锁DCC输出的SPWM控制脉冲, 防止GTR导通。

第五节 IBD基极驱动卡

在IBD卡上设置了一以80C196微处理器为核心的微机线路和六个相同的GTR基极驱动电路, 并设置了电机的三相电流和电压反馈电路。

微机电路控制由MCP板输出出来的、控制GTR开通或关闭的数字脉冲基极驱动指令, 并且该电路还通过六个故障锁存器来分别记忆各基极驱动电路的故障。

基极驱动电路包括光/电隔离、放大、故障封锁、LED显示、脉冲整形线路。在板上各基极驱动电路中均设置了JP跨接片，它的作用是根据逆变器回路中GTR的容量大小来选择不同的连接位置，对于AC-2000是置于1,3位。

板上的电流和电压反馈电路是输入的电流和电压反馈信号进行隔离、放大后输入到DCC卡。

第六节 结 束 语

2160工程采用的GE AC-2000交流变频调速装置其调速性能是完全可以满足热输出辊道传动的要求其控制系统的设计是先进的。但我们应认识到逆变器的输出电压中所存在的高次谐波对电机的影响，虽然AC-2000这种电压型变频器的谐波较其它型式的变频器小，但在调试时也应充分注意这个问题，按照实际情况修正运行参数，使变频器工作在最佳状态。

参考资料:

1) 佟纯厚主编: 近代交流调速 冶金工业出版社1884年5月 第二版 P7 - P8

2) 「日」上山直彦编著 现代交流调速 水力电力出版社 1989年7月 第一版 P25 - P93

3) 宝钢: 热轧厂1580热轧岗位培训教材 (基础自动化下篇) 宝钢继续工程教育中心宝钢 (集团) 公司热轧厂 1996年2月 3.1

4) GE公司 AC/DC2000 Digital Adjustable Speed Drive Use'r Manual 1985年 第六版本 第六版 基础自动化部分

缩写字母的意义:

- 1) VVVF-----变压变频
- 2) RAM -----变压变频公开完成
- 3) PWM -----变压变频集中在一起完成
- 4) SPWM-----正弦脉宽调制
- 5) GTR -----双极结型晶体管
- 6) EPROM-----存储器
- 7) SH1-SH3-----分流器
- 8) IBD -----AC-2000的基极驱动卡
- 9) VCO-----电压控制振荡器
- 10) VR-----矢量旋转变换器
- 11) LCC-----AC-2000通讯卡
- 12) DCC-----AC-2000传动控制卡
- 13) MCP-----AC-2000电源卡
- 14) NTB/3TB-----AC-2000传动端子板
- 15) LAN I/O LTB/RTB-----端子板
- 16) DLAN-----DLAN网
- 17) LCP-----80C196微处理器为核心的微机系统
- 18) DLAN-----工厂基础自动化网
- 19) CLR-DLAN-----卷取机传动局域网
- 20) FM-DLAN-----精轧区子系统局域网
- 21) OC-2000-----AC-2000系统上的智能操作站
- 22) MM-2000-----AC-2000系统上的人机界面
- 23) SPC-----信号处理卡(速度处理卡)
- 24) TMS320C-----数字信号处理器