

摘 要

桥式起重机作为物料搬运系统中一种典型设备,在企业生产活动中应用广泛作用显著,因此对于提高桥式起重机的运行效率,确保运行的安全可靠,降低物料搬运成本是十分重要。传统的桥式起重控制系统主要采用继电器接触器进行控制,采用交流绕线串电阻的方法进行启动和调速,这种控制系统存在可靠性差,操作复杂,故障率高。电能浪费大,效率低等缺点。因此对桥式起重机控制系统进行研究具有现实意义,也是国内外相关行业专家学者的一个研究课题。

本文针对桥式起重机控制系统中存在的上述问题,把可编程序控制器和变频器应用于桥式起重机控制系统上,并进行了较深入的研究。

1.根据桥式起重机的运行特点,桥式起重机控制系统采用工业触摸屏监控起重机变频调速系统,该系统主要由上位机(工业触摸屏系统)、下位机(PLC控制系统)、变频调速系统等组成。

2.组态软件作为用户可定制功能的软件平台工具,利用其良好的人机界面和通信能力,在PC机上可开发出友好人机界面,下载至工业触摸屏中,使工作人员可以实现变频器的参数设置、电机的启动和停止同时可实现系统故障报警。

3.PLC系统采用SIEMENS公司产品,能控制起重机大车、小车的运行方向和速度换档;吊钩的升、降方向及速度换档,同时能检测各个电机故障现象并送往工业触摸屏进行显示,减小了传统继电—接触式控制系统的中间环节。减少了硬件和控制线,极大提高了系统的稳定性,可靠性。

4.为了更加有效的防止重物下滑,在桥式起重机起升机构各加上一套由旋转编码器、PG数模转换和PLC相结合的闭环系统,使主副吊钩拖动更加稳定、可靠。实验结果表明,采用该控制系统,使桥式起重机工作可靠,使用方便,同时具有动态显示的功能,节能效果好明显。

关键词:可编程序控制器、桥式起重机、变频调速、组态软件

ABSTRACT

The bridge crane carries a kind of typical equipment in the supplies system , so it have extensive function in the activity of producing enterprise ,so it is important to improve the bridge crane operational efficiency, guarantee the safe reliability to be operated, reduce the cost of the supplies carrying . But the traditional bridge crane control system mainly adopts relay and contactor to control bridge crane , adopt the methods of wire winding bunch of resistance to start and adjust speed of motor , the control system have many disadvantages ,for example : dependability is bad, it is complicated to operate, fault rate is high. the electric energy is wasted greatly, efficiency is low. Carrying on the research to the bridge crane control system has realistic meanings, it is a subject for research of relevant experts and scholars' both at home and abroad too.

To the question that exist in the bridge crane control system , the paper apply programmable controller and frequency converter on control system of bridge crane , have carried on deeper research. in relevant respects.

1.According to the operation characteristic of bridge crane, bridge crane control system adopt industry touch-sensitive screen control the system of bridge crane frequency conversion, this system mainly include location going to machine (industry touch-sensitive screen system) , the next machine (PLC control system) and frequency conversion system.

2.The configuration software can customize the special function software platform for users, utilize its good man-machine interface and communication capacity, can develop the friendly man-machine interface on the PC , download the interface into the touch-sensitive screen , make staff member can set parameter , start or stop electrical motor and at the same time implementation fault alarm.

3.PLC system adopts the SIEMENS Company products, can control the crane cart , car operation direction and change speed ; To rise , lower cliver direction and change speed , can measure each motor trouble phenomenon and send this to touch-sensitive screen of industry to show at the same time, have reduced traditional electricity - Contact-type control system of intermediate link . it reduce the hardware and control line, has improved systematic stability, dependability greatly.

4.Prevent the heavy object from gliding for being more effective, rise organization of crane add one rotate encoder , PG count mould change combine PLC with close ring system , make clivers more steady , more reliable . The experimental result indicates , adopt this control system, it is reliable to make the bridge crane work, easy to use, have dynamical shown function ,energy-conservation is effectual.

KEYWORDS: Programmable Controller、 Frequency Conversion 、 Bridge Crane、 Configuration Software

第一章 绪 论

1.1 传统桥式起重机控制系统存在的问题

桥式起重机作为物料搬运机械在整个国民经济中有着十分重要的地位。经过几十年的发展,我国桥式起重机制造厂和使用部门在设计、制造工艺、设备使用维修、管理方面,不断积累经验,不断改造,推动了桥式起重机的技术进步。但在实际使用中,结构开裂时有发生。究其原因是频繁的超负荷作业及过大的机械振动冲击所引起的机械疲劳。因此,除了机械上改进设计外,改善交流电气传动,减少起制动冲击,也是一个很重要的方面。由于传统桥式起重机的电控系统采用转子回路串接电阻进行有级调速,致使机械冲击频繁,振动剧烈,因此电气控制上应采用平滑的无级调速是解决问题的有效手段。

传统的起重机驱动方案一般采用:(1)直接起动电动机;(2)改变电动机极对数调速;(3)转子串电阻调速;(4)涡流制动器调速;(5)可控硅串级调速;(6)直流调速。前四种方案均属有级调速,调速范围小,无法高速运行,只能在额定速度以下调速;起动电流大,对电网冲击大;常在额定速度下进行机械制动,对起重机的机构冲击大,制动闸瓦磨损严重;功率因数低,在空载或轻载时低于 0.2—0.4,即使满载也低于 0.75,线路损耗大。可控硅串级调速虽各服了上述缺点,实现了额定速度以下的无级调速,提高了功率因数,减少了起制动冲击,价格较低,但目前串级调速产品的控制技术仍停留在模拟阶段,尚未实现控制系统具有很好的调速性能和起制动性能,很好的保护功能及系统监控功能,所以有时采用直流电动机,而直流电动机制造工艺复杂,使用维护要求高,故障率高。

1.2 桥式起重机电气传动技术的国内外发展概况

电气调速控制的方法很多,对直流驱动来讲 60 年代采用发电机—电机系统。从控制电阻分级控制,到交磁放大控制,到可控硅 SCR 激磁控制,到主回路可控硅即晶闸管整流供电系统。随着电子技术的飞速发展,集成模块出现,计算机、微处理器应用,因此控制从分立组成模拟量控制发展至今天的数字量控制。

从交流驱动来讲:常规的常采用绕线式电动机转子串电阻调速,为满足重物下放时的低速,一般依靠能耗制动、反接制动,后来还采用涡流制动,还有靠转子反馈控制制动、反接制动、单相制动器抱闸松劲的所谓软制动,随着电子技术的发展,国内外开发研制变频调速,PLC 可编程序控制器的应用控制系统的性能更加完美。目前国内外几种常用调速系统配置及其性能:

1. DC—300 直流驱动调速系统:GE 公司 DC—300、DC—2000 是微处理器数字量控制的直流驱动调速系统,其控制功率从 300HP 到 4000HP,并采用 PLC 对整机驱动系统实施故障诊断、检测、报警及控制。

该驱动系统实施主回路 SCR 整流,其控制是给定模拟量通过数模转换成数字量,通过速度环、电流环到 SCR 移相触发的逻辑无环流的调速系统。可用测速反馈或电压反馈,对磁场弱磁,以实施恒功率控制。

2. 交流调速控制系统：对于起重机械来讲，交流驱动仍是国内普遍采用的方案而且多数停留在绕线式电机转子串电阻来调速。随着功率电子技术的发展，早在六十年代后期，国外就开始致力于晶闸管定子调压调速技术的开发研究。目前，该技术已进入了成熟稳定的发展应用阶段。日本安川电机制作所于 1972 年就正式定为 VS 系列，应用于起重机及轧机辅助设备的交流调速。法国、英国、德国等大电气公司亦在这方面展开了重点研制开发。借助电力电子技术、微电子技术的发展，由分离元件发展到大规模集成电路，从而实现控制部件的微型组件化、智能化、标准化、系列化，进而从模拟量控制发展到数字量控制。可编程序控制器 PLC 引入到交流电气传动系统后，使传动系统性能发生了质的变化。在桥式起重机实现了抓斗的自动控制和故障诊断、检测显示等，达到了新的技术高度。

3. 变频调速：变频调速技术是国际上各大电气公司在 70 年代末 80 年代投入全力研制、开发，也是国际国内这几年全力研制应用的目标与方向。这几年一些公司如德国 SIEMENS，美国 GE，日本三菱等推出全数字化的矢量控制技术，大功率的 IGBT 模块的出现使变频技术在起升机械、电梯等位能负载控制成为现实。目前，变频调速的控制方法有恒压频比控制，转差频率控制，矢量控制，直接转矩控制等。这些控制方法都得到了不同程度的应用，但其控制性能有一定的差异。

直流电动机之所以有良好的控制性能，其根本原因是当励磁电流恒定时，控制电枢电流的大小就能无时间滞后的控制瞬时转矩的大小。异步电动机产生瞬时转矩的原理虽然与直流电动机相同，但由于建立气隙磁场的励磁分量和电磁转矩所对应装置电流有功分量都应包含在定子电流中，无法直接将它们分开，在运行过程中，这两个分量有会互相影响。因此要控制异步电动机的瞬时转矩十分困难。像采用恒压频比控制、转差频率控制的变频调速系统由于是从控制电动机的平均转矩的角度出发来控制电动机的转速，因而难以获得较理想的动态性能，异步电动机在高精度调速系统和伺服系统中的应用受到限制。而矢量控制是从根本上解决了这个问题，使交流调速系统的应用范围迅速扩大。

适用于通用的鼠笼式电动机，无速度传感器的矢量控制变频调速技术的应用—该技术使变频控制装置不再配套专用电机，而且可通过软件对一般的鼠笼式电机—矢量控制装置实施参数调整，进一步降低电气电机的投资而且维护保养方便。

变频器使用 PWM 技术可严格地使输入电流正弦 $\cos \phi = -1$ 即在下降过程各机械减速制动中，将动能和位能转化为电能反馈电网，达到理想的节能指标，同时确保工况正常运行，上述发展已完成了产品系列化上市，对“变频”装置在技术上以及经济上与其他驱动装置竞争将有明显的优势。同时随着 PLC 系统的不断成熟与完善，以及大容量变频器在位能负载上的成功应用，变频调速系统必将成为未来调速市场的主流。

1.3 本课题的研究意义及主要内容

本课题中以桥式起重机作为研究实体，由上可知，传统桥式起重机的控制系统主要采用交流绕线转子串电阻的方法进行启动和调速，继电-接触器控制，这种控制系统的主要缺点有：

1. 桥式起重机工作环境差，工作任务重，电动机以及所串电阻烧损和断裂故障时有发

生。

2. 继电器-接触器控制系统可靠性差, 操作复杂, 故障率高。

3. 转子串电阻调速, 机械特性软, 负载变化时转速也变化, 调速不理想。所串电阻长期发热, 电能浪费大, 效率低。

要从根本上解决这些问题, 只有彻底改变传统的控制方式。近年来, 随着计算机技术和电力电子器件的迅猛发展, 同时也带动电气传动和自动控制领域的发展。其中, 具有代表性的交流变频调速装置和可编程控制器获得了广泛的应用, 为 PLC 控制的变频调速技术在桥式起重机系统提供了有利条件。变频技术的运用使得起重机的整体特性得到较大提高, 可以解决传统桥式起重机控制系统存在诸多的问题, 变频调速以其可靠性好, 高品质的调速性能、节能效益显著的特性在起重运输机械行业中具有广泛的发展前景。

由于起重机行业的特殊性, 变频调速系统的应用相对滞后。采用变频调速取代传统的起重机控制系统是近几年才开始应用的新技术。无论是在起重机老产品还是新产品设计, 变频调速都是优选方案。变频调速装置的先进性能特别适用于起重机的恶劣工况, 对改善起重机的调速性能, 提高工作效率和功率因数, 减小起制动冲击以及增加起重机使用的安全可靠是非常有益的。相比较发达国家而言, 我国的相关技术水平差距较大。主要技术难度体现在: 对起重机对电控系统运行的稳定性和可靠性要求愈来愈高, 起重机的起重量及运行速度等技术参数越来越大, 起重机的自动化程度越来越高, 起重机对管理和通讯的性能要求越来越严格。为此, 有必要对桥式起重机电控系统的应用研究。由变频器构成的交流调速系统可取代直流调速系统, 是随着计算机技术特别是大规模集成电路制造技术的不断发展的必然结果, 符合起重机的发展趋势, 适合发展大起重重量的起重机; 提高工作速度、扩大调速范围; 提高金属结构、机构和电气设备的可靠性和使用寿命; 改善司机操作的条件, 保证作业安全, 提高自动化控制程度和扩大远距离控制系统的使用范围尤其是把它们应用到作业频繁的仓库堆垛起重机和环境恶劣的冶金起重机上。也符合起重机向大型化、高效率化、无保养化和节能化发展。向自动化、智能化、集成化和信息化发展的方向。^{[2][3][5]}

本论文以 20/5t*19.5m 通用桥式起重机为研究对象, 研究了变频调速技术在起重机中的应用, 并且根据原有的控制结构, 结合组态软件和 PLC 技术, 提出了一个改进的系统控制结构, 并且采用此体系结构实现了桥式起重机变频调速系统。本论文的主要内容分为如下五个部分:

(1) 矢量控制变频调速原理 即本论文的第二章, 它首先介绍变频调速的基本原理, 然后介绍了变频器的基本结构, 即变频器的主电路和控制电路构成, 最后介绍了变频器的基本控制方式—矢量控制方式。为下一步部分的起重机变频控制系统提供了理论基础。。

(2) 变频调速桥式起重机系统总体方案设计和部件选型 即本论文的第三章, 起重机变频调速控制系统主要由上位机(工业触摸屏系统)、下位机(PLC 控制系统), 变频器等组成, 并选择系统各主要组成部分。

(3) 可编程序控制器在桥式起重机变频控制系统中的应用 即本论文的第四章, 它首

先介绍了 PLC 原理、系统组成及其各部分的作用，然后论述本系统中 PLC 的选取，采用 Siemens 公司 S7-200 型 PLC，最后介绍控制系统的构成及各机构的安全保护和检测。

(4) 桥式起重机变频调速系统软件设计 即本论文的第五章，主要分为触摸屏的软件设计和系统的 PLC 程序设计。它首先介绍了组态软件，然后讲述组态软件对触摸屏的编程，同时根据控制系统的要求对 PLC 进行编程。

(5) 全文的总结与展望 即本论文的第六章，它对全文的研究内容作了总结，并对本论文中的需要进一步完善和提高之处作了研究展望。

第二章 矢量控制变频调速

2.1 变频调速的基本原理

根据异步电机的知识，异步电机的转速公式为：

$$n = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (2.1)$$

其中：n——异步电动机的转速，单位为 r/min；

f——定子的电源频率，单位为 Hz；

S——电机的转速滑差率；

P——电机的极对数。

由上式 (2.1) 可知，如果改变输入电机的电源频率 f，则可相应改变电机的输出转速。在电动机调速时，一个重要的因素时希望保持每极磁通量 Φ_m 为额定值不变。磁通太弱，没有充分利用电机的磁心，是一种浪费；若要增大磁通，又会使磁通饱和，从而导致过大的励磁电流，严重时会因为绕组过热而损坏电机。对于直流电机来说，励磁系统是独立的，所以只要对电枢反应的补偿合适，保持 Φ_m 不变是很容易做到的。在交流异步电机中，磁通是定子和转子合成产生的。

三相异步电动机每相电动势的有效值是：

$$E_g = 4.44f_1 N_1 k_{N1} \Phi_m \quad (2.2)$$

式中：E_g——气隙磁通在定子每相中感应电动势有效值，单位为 V；

f₁——定子频率，单位为 Hz；

N₁——定子每线绕组串联匝数；

k_{N1}——基波绕组系数；

Φ_m ——美极气隙磁通量，单位为 Wb；

由公式可知，只要控制好 E_g 和 f₁，便可以控制磁通 Φ_m 不变，需要考虑基频（额定频率）以下和基频以上两种情况；

1：基频以下调速：

即采用恒定的电动势。由上式可知，要保持 Φ_m 不变，单频率 f₁ 从额定值 f_{1n} 向下调节时，必须同时降低 E_g。然而绕组中的感应电动势是难以控制的，但电动势较高时，可以忽略电子绕组的漏磁阻抗压降，而认为定子相电压 U₁ ≈ E，则得 U₁/f=常值。低频时，U₁ 和 E_g 读较小，定子阻抗压降所占的份量都比较显著，不能在忽略。这时，可以人为的把电压 U 抬高一些，以便近似的不补偿定子压降。带定子压降补偿的恒功率比控制特性为 b 线，无补偿的为 a 线。如图 2.1 所示：

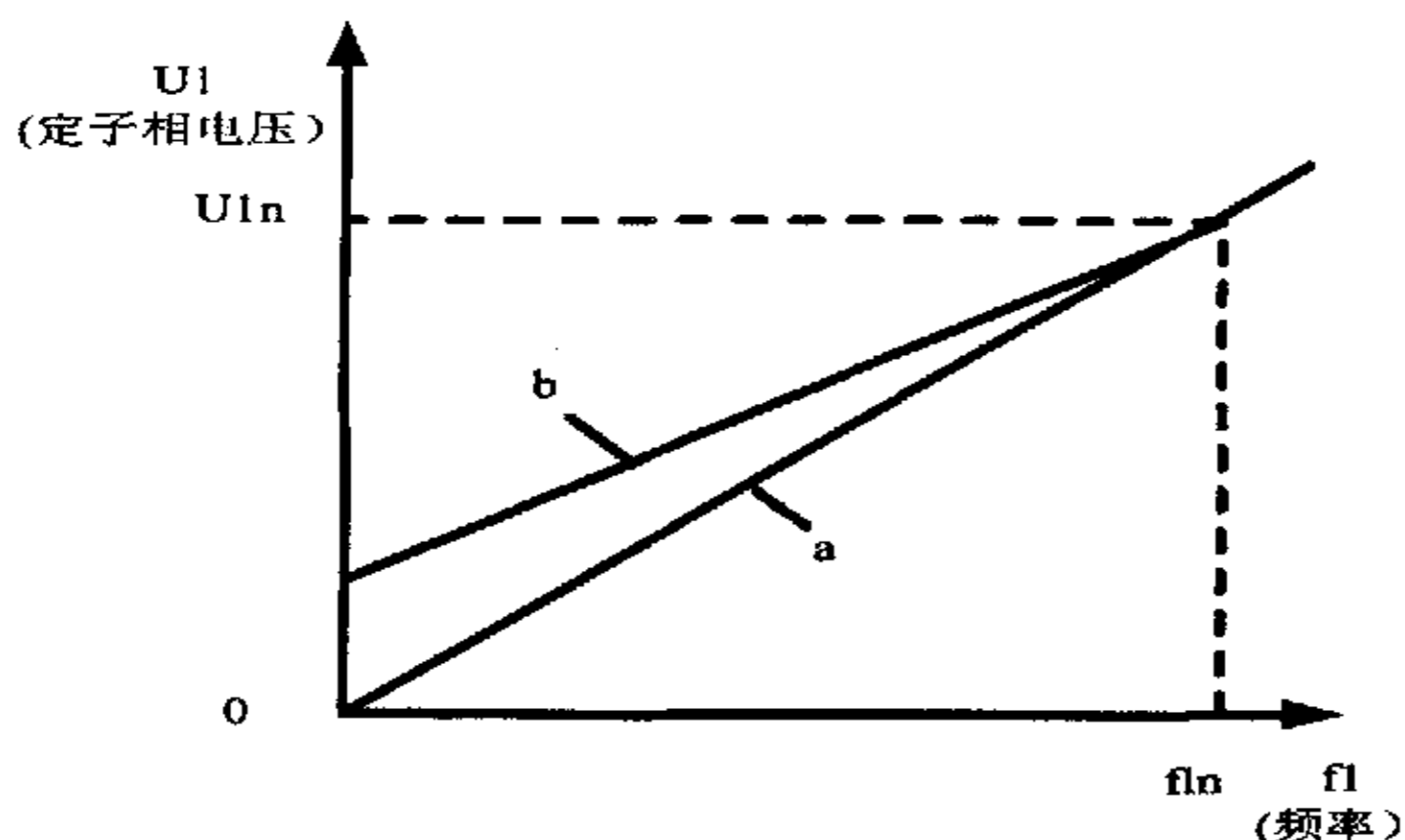


图 2.1 恒压频比控制特性

2: 基频以上调速

在基频以上调速时，频率 f 可以从往上增高，但电压 u 磁通与频率成反比的降低，相当与直流电机弱磁升速的情况。

把基频以下和基频以上两种情况合起来，可得到异步电动机的变频调速控制特性，如图 2.2。如果电动机在不同的转速下都具有额定电流，则电动机都能在温升容许的条件下长期运行，这时转矩基本上随磁通变化。在基频以下，属于“恒转矩调速”的调速，而在基频以上，基本上属于“恒功率调速”。^{[4][6]}

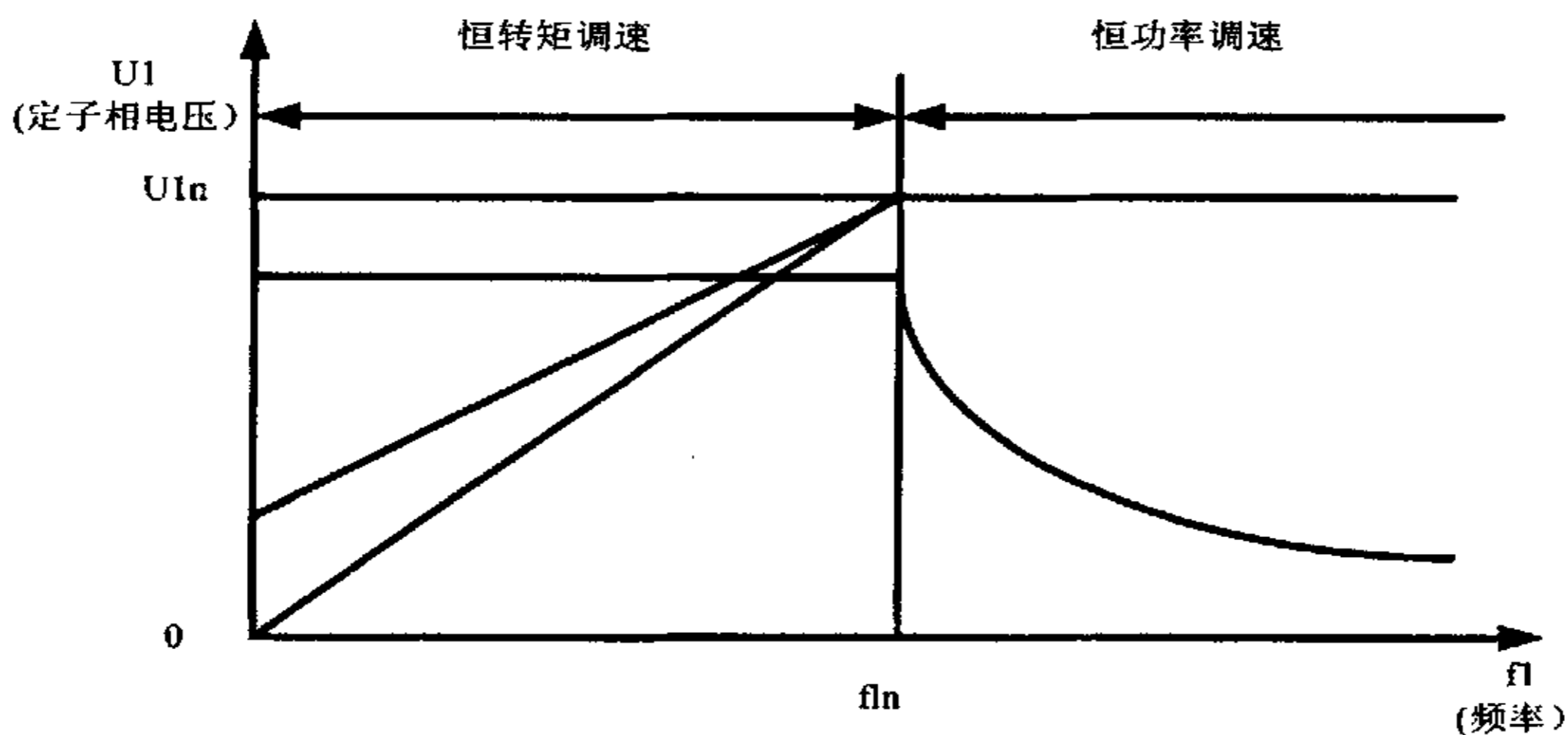


图 2.2 异步电动机变频调速控制特性

2.2 变频器的基本结构

变频器的基本结构见图 2.3

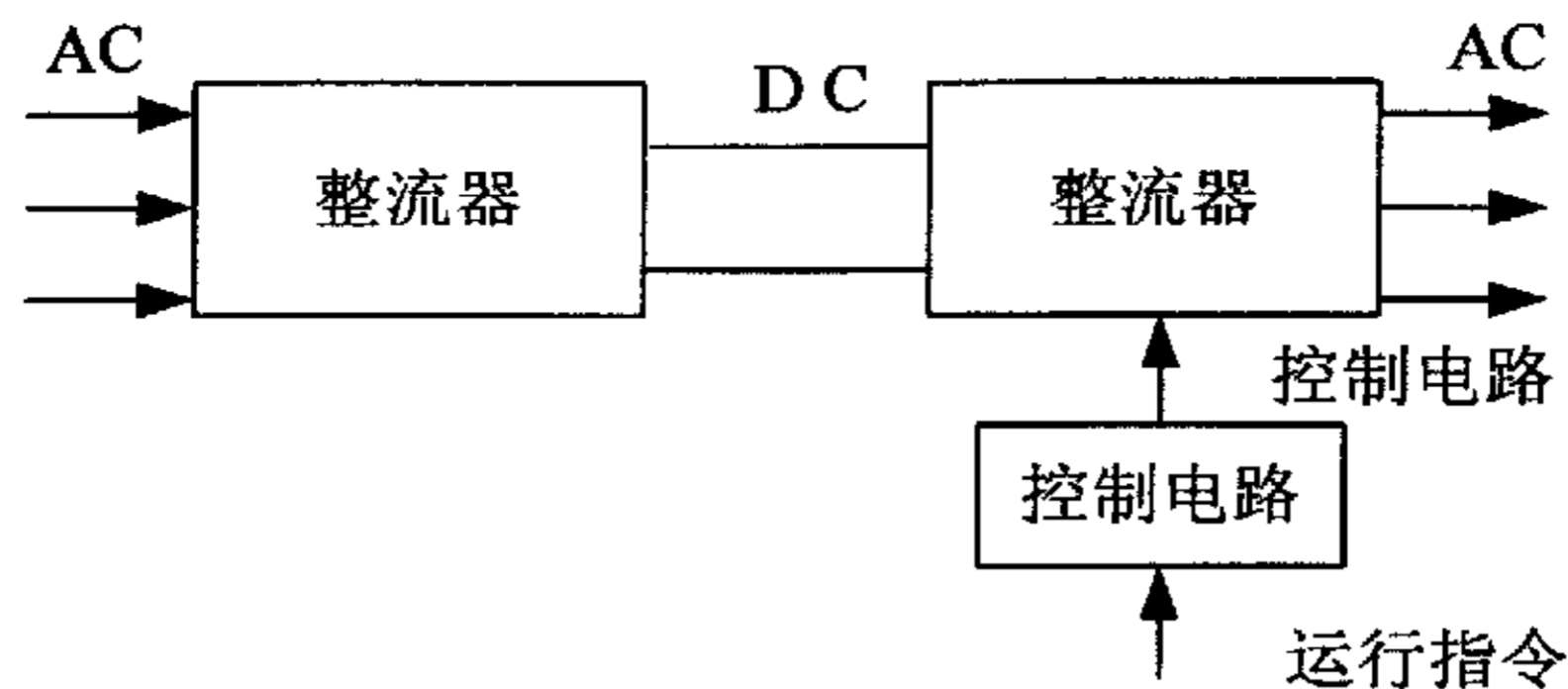


图 2.3 变频器的结构图

2.2.1 变频器的主电路

电力电子开关器件

电力半导体器件已经历了以晶闸管为代表的分立器件，以可关断晶闸管 (GTO)，巨型晶体管 (GTR)，功率 MOSFET、绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 为代表的功率集成器件 (PID)，以智能化功率集成电路 (SPIC)，高压功率集成电路 (HVIC) 为代表的功率集成电路 (PIC) 等三个发展时期。从晶闸管发展到 PID、PIC 通过门极或栅极控制脉冲可实现器件导通与关断的全控器件。在器件的控制模式上，从电流型控制模式及发展到电压型控制模式，不仅大大降低了门极 (栅极) 的控制功率，而且大大提高了器件导通与关断的转换速度，从而使器件的工作频率不断提高。在器件结构上，从分立器件发展到由分立器件组合成功率变换电路的初级模块，继而将功率变换电路与触发控制电路、缓冲电路、检测电路等组合在一起的复杂模块。

整流电路

一般的三相变频器的整流电路由三相全波整流桥组成。它的主要作用是对工频的外部电源进行整流，并给逆变电路和控制电路提供所需要的直流电源。整流电路按其控制方式，可以是直流电压源，也可以是直流电流源。直流中间电路的作用是对整流电路的输出进行平滑，以保证逆变电路和控制电源能够得到质量较高的直流电源。此外，由于电动机制动的需要，在直流中间电路中有时还包括制动电阻以及其它辅助电路。

逆变电路

逆变电路是变频器主要的部分之一。它是利用六个半导体开关器件组成的三相桥式逆变电路，有规律的控制逆变器中的主开关元器件的通与断，得到任意频率的三相交流电输出。由于逆变器的负载为异步电动机，属于感性负载，无论电动机处于电动机是发电制动状态，变频器功率因素总不会为 1。因此，在直流环节和电动机之间总会有无功功率的交换，这种无功能量就靠这之间直流环节的储能元件来缓冲。它的主要作用是在控制电路的控制下，将平滑电路输出的直流电源转换为频率和电压都任意可调的交流电源。逆变电路的输出就是变频器的输出，它被用来实现对异步电动机的调速控制。

2.2.2 变频器的控制电路构成

包括主控制电路、信号检测电路、门极驱动电路、外部接口电路以及保护电路等几个

部分,是变频器的核心部分。控制电路的优劣决定了变频器性能的优劣。控制电路的主要作用是完成对逆变器开关控制、对整流器的电压控制以及完成各种保护功能。

控制算法

随着电力半导体器件和微型计算机控制技术的迅速发展,促进了电力变频技术新的突破性发展,70年代后期发展起来的脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术成了现在最常用的变频器功率开关器件的控制策略。PWM控制利用了采样控制理论中的一个重要结论:冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性环节上时,其效果基本相同。冲量即指窄脉冲的面积。这里所说的效果相同,指环节的输出响应波形基本相同。根据这个原理,可以用一系列等幅而不等宽的脉冲来近似正弦波,且脉冲的宽度按正弦规律变化,这种方法称为SPWM(Sinusoidal PWM)。

SPWM各脉冲的宽度和间隔可以准确计算出来,按照计算结果控制电路中各开关器件的通断,就可以得到所需要的SPWM波形。但这种计算很繁琐。较为常用的方法是采用调制的方法,即把正弦波作为调制信号,把接受调制的信号作为载波,通过对载波的调制即可得到SPWM波形。通常采用等腰三角波作为载波,因为等腰三角波上下宽度与高度线性关系,且左右对称,当它与正弦波调制信号相交时,如在交点时刻控制电路中开关器件的通断,就可以得到宽度正比于正弦波幅值的脉冲,这正好符合SPWM控制的要求。三角载波的频率 f_c 和正弦调制波的频率 f_r 之比即 $f_c/f_r=N_c$ 称为载波比。用生成的SPWM波控制逆变器开关器件的通断,可得到等幅且脉冲宽度按正弦规律变化的矩形脉冲列输出电压。正弦调制波的频率 f_r 即是逆变器的输出频率 f_1 改变 f_r 便可改变 f_1 。三角载波的幅值为恒定,因而改变正弦调制波的幅值就改变了矩形脉冲的面积,由此实现输出电压幅值的改变。

根据以上介绍的SPWM逆变电路的基本原理和控制方法,可以用模拟电路构成三角波载波和正弦调制波发生电路,用比较器来确定它们的交点,在交点时刻对功率开关器件的通断进行控制,就可以生成SPWM波形。但这种模拟电路结构复杂,难以实现精确的控制。微机控制技术的发展使得用软件生成SPWM波形变得比较容易。^{[6][7][8]}

变频器技术是一门综合性的技术,它建立在控制技术、电子电力技术、微电子技术和计算机技术的基础上。它与交流拖动系统相比,利用变频器对交流电动机进行调速控制,有许多优点,如节电、容易实现对现有电动机的调速控制、可以实现大范围内的高效连续调速控制、实现速度的精确控制。容易实现电动机的正反转切换,可以进行高额度的起停运转,可以进行电气制动,可以对电动机进行高速驱动。电机在带动较大负载在启动时,会有较大的冲击电流,采用变频器时,可以实现软启动,减小冲击电流,解决大负载的启动问题。电源功率因素大,所需容量小,完善的保护功能:变频器保护功能很强,在运行过程中能随时检测到各种故障,并显示故障类别(如电网瞬时电压降低,电网缺相,直流过电压,功率模块过热,电机短路等),并立即封锁输出电压。这种“自我保护”的功能,不仅保护了变频器,还保护了电机不易损坏。

2.3 变频调速的控制方式——矢量控制方式

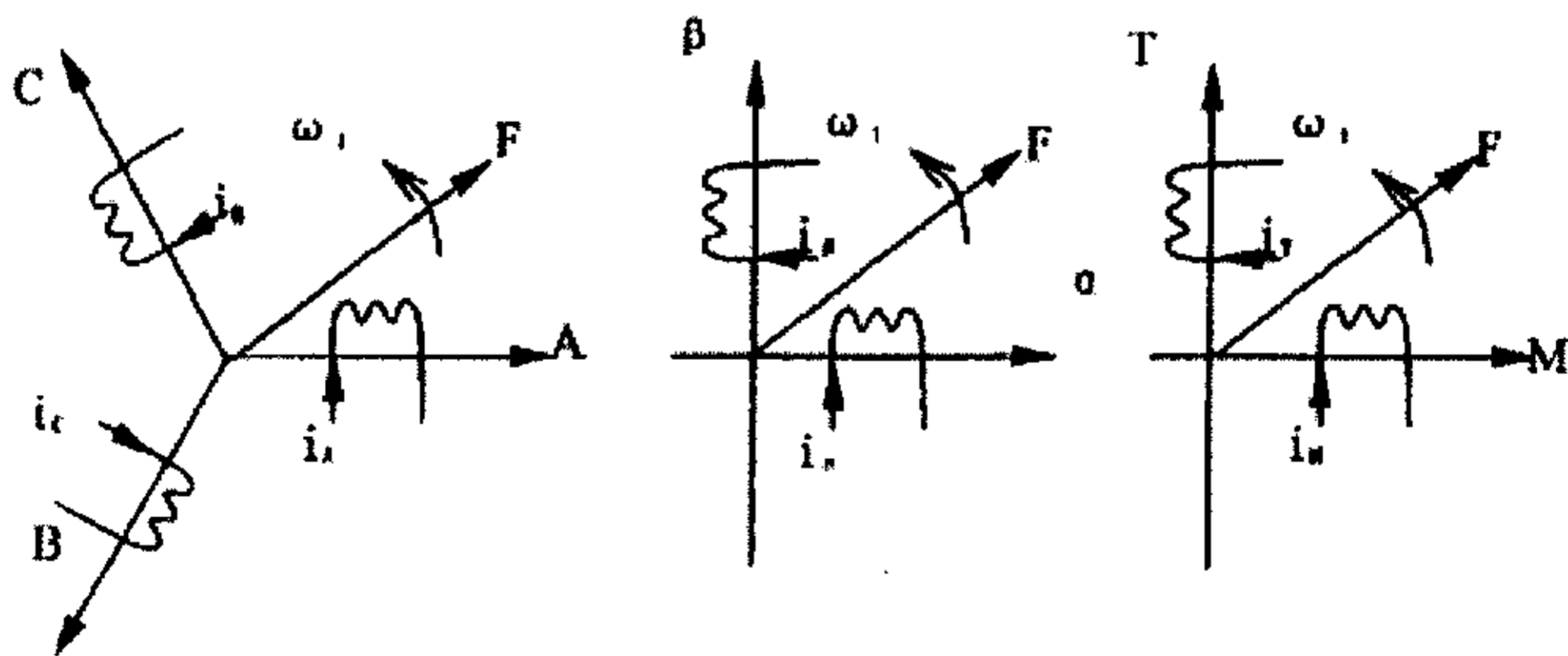
2.3.1 矢量控制的基本思想

矢量控制交流调速是通过坐标变换使交流电动机获得与直流电动机相似的数学模型，从而可采用类似于直流电动机的控制方法来控制瞬时转矩，使交流调速系统获得与直流调速系统同样优越甚至更加优越的动静态特性能。

矢量控制的基本思想是；将异步电动机的物理模型等效变换成类似直流电动机的模型，再仿照直流电动机去控制它，等效的原则是在不同坐标中产生的磁动势相同。

由电动机原理可知，异步电动机三相定子绕组电流在空间产生一个角速度为 ω_1 的旋转磁场。若有两个互相垂直的 M 绕组和 T 绕组与旋转磁场同步旋转，绕组中分别通以直流电流 i_M 和 i_T ，产生的磁动势可以与三相合成磁动势等效即两个磁动势有相同的幅值、转速和方向。又令 M 绕组的轴线与三相合成旋转磁场方向平行，则 i_M 相当于电动机的励磁电流分量 i_T ，相当于电动机的转矩电流分量，调节 i_M 的大小可以在磁场一定时改变转矩。由这样绕组组成的电动机其控制原理与直流电动机控制原理相同。

在实际的等效变换中，先将异步电动机在三相静止坐标系下的定子电流 i_A 、 i_B 、 i_C 通过三相/两相变换，等效变换，等效为两相静止坐标系下的交流电流 i_α 、 i_β ，再通过磁场定向的旋转变换，等效为同步旋转坐标系下的直流电流 i_M 、 i_T 。等效的电动机绕组模型如图 2.4 所示。



(a) 三相交流绕组 (b) 两相交流绕组 (c) 旋转的直流绕组

图 2.4 等效的交流电机绕组和直流电机绕组物理模型

通过控制 i_M 、 i_T 大小也就是电流矢量 i 的幅值和去向去等效的控制三相电流 i_A 、 i_B 、 i_C 瞬时值，从而调节电动机的磁场与转矩达到调速的目的。

2.3.2 矢量变换规律

如上所示, 通过坐标系的变换, 可以得到交流三相绕组的等效绕组, 现在的问题是如何求出 i_A 、 i_B 、 i_C 与 i_M 、 i_T 之间的准确等效关系, 也就是按等效原则进行坐标变换, 而且要求这些变换都必须是可逆的。坐标变换电路通常有三类: 即三相/两相变换, 直角坐标/极坐标变换和同步旋转坐标/静止两相左标变换。

2.3.2.1 三相/两相变换(3/2 变换)

A、B、C 三相坐标是以电动机定子三相绕组轴线为轴的静止平面坐标系, 现设置一个 $\alpha - \beta$ 两相坐标系中的交流分量, 实际上就相当于把一个三相的异步电动机变换成等效的两相异步电动机变换成等效的两相异步电动机。为了保证三相电动机变换成两相电动机后所产生的磁势不变, 需要考虑这两种坐标变换的折算因子 $2/3$, 根据图 2.2,

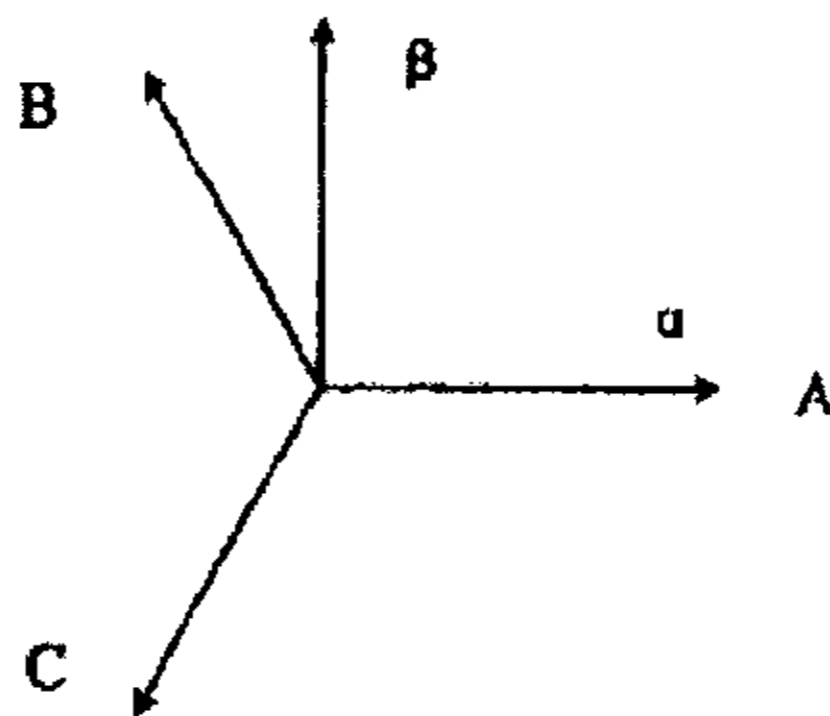


图 2.5 三相/两相坐标变换

以电流的变换为何可以得出如式 (2.3) 的变换矩阵表达式。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos(-120^\circ) & \cos(120^\circ) \\ -\sin 0^\circ & -\sin(-120^\circ) & -\sin(120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \\ &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

应用坐标变换方法可求得式 (2.3) 的逆变换, 即两相/三相坐标变换表达式。

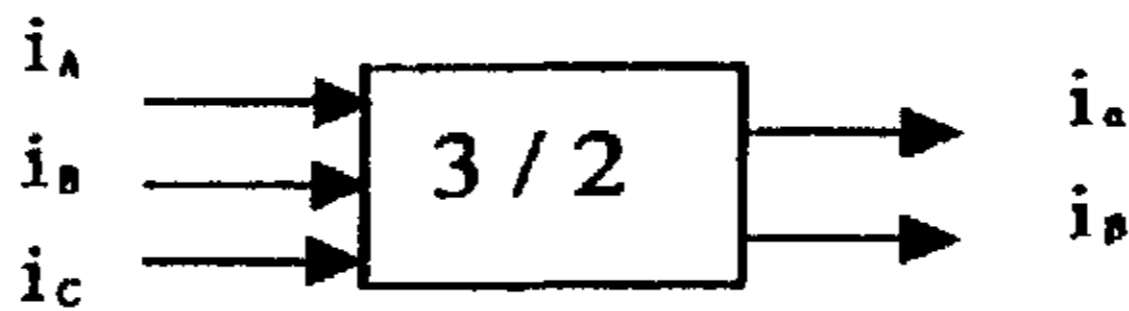
$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

对于三相星型不带零线的接法，有 $i_C = i_A \sim i_B$ ，则上面两式简化为：

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

三相/两相变换符号为，



对于异步电动机电压和磁通的坐标变换表达式均与电流的变换式相同。

2.3.2.2 静止坐标与旋转坐标变换 (VR 变换)

两相的 $\alpha \sim \beta$ 静止直角坐标系和同步旋转直角坐标系轴系之间的变换属于同步旋转变

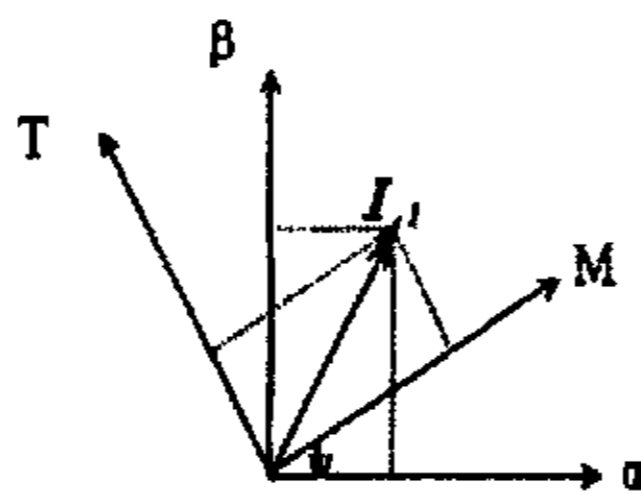


图 2.6

换，如图 2.5 所示。 $\alpha \sim \beta$ 是一个静止的直角坐标系，而 M—T 则是一个同步角速度 ω 旋转的直角坐标系。设 M 轴与 α 轴之间的夹角为 φ ，则 $\alpha \sim \beta$ 坐标系上的分量和坐标系上的分量之间的变换关系如下：

$$\begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

式中, ψ 为 α 轴的夹角, $\varphi = \int \omega_1 dt$ (2.9)

同步旋转变换符号为:



注意: 对于异步电动机在两相静止坐标系中的分量 i_α 、 i_β 是随时间变化的交流量, 而经过同步旋转变换到 M~T 坐标系后得到的分量 i_M 和 i_T 则是直流量。

2.3.2.3 直角坐标与极坐标变换(K/P 变换)

在矢量变换控制系统中, 有时需要将直角坐标变换成极坐标, 用参量的幅值及相位来表示矢量。例如由 i_α 和 i_β 求出 I_1 和 θ 就属于 K/P 变换。众所周知, 直角坐标与极坐标的变换关系为

$$I_1 = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (2.10)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{i_\beta}{i_\alpha} \quad (2.11)$$

由于 θ 取不同值时, $\text{tg} \theta$ 的变换的变化范围是 $0 \sim \infty$, 这个变化幅度太大, 在实际电路中难以实现, 因此在实际电路中, 电流的相位角 θ 通常采用其正弦值和余弦值来表示

$$\cos \theta = \frac{i_\alpha}{i_1} \quad (2.12)$$

$$\sin \theta = \frac{i_\beta}{i_1} \quad (2.13)$$

直角/极坐标变换符号为



2.3.3 矢量变换下异步电动机的数学模型

2.3.3.1 原型电机的电压方程

异步电动机的数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。因此常作以下假设:

忽略空间谐波

忽略磁路饱和, 各绕组的自感和互感是恒定的。

忽略铁芯损耗

不考虑频率和温度变化对电阻的影响。

在上述假设下, 通过坐标变换的方法, 就可以建立交流电动机的电路数学模型。

依据电机的双轴理论, 定子有两个集中绕组, DD 为直轴绕组; QQ 为交轴绕组。转子上有分布绕组, dd 为直轴绕组; qq 为交轴绕组。这四个绕组上分别加上电源电压 U_D, U_Q, U_d, U_q , 则原型电机的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_D \\ u_Q \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D + pL_{DD} & 0 & pL_{Dd} & 0 \\ 0 & R_Q + pL_{QQ} & 0 & pL_{Qq} \\ pL_{Dd} & \omega L_{Qq} & R_d + pL_{dd} & \omega L_{qq} \\ -\omega L_{Dd} & pL_{Qq} & -\omega L_{dd} & R_q + pL_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.3.3.2 坐标变换后的异步电动机数学模型

由上可知, 等效到 α 、 β 坐标系上的异步电动机和原型电机结构完全一致, 因此原型电机的电压方程也适用于两相异步电动机。两种电机的参数有如下对应关系:

$$\begin{aligned} R_D &= R_Q = r_1 \\ R_d &= R_q = r_2' \\ L_{DD} &= L_{QQ} = L_1 \\ L_{Dd} &= L_{Qq} = L_M \\ L_{dd} &= L_{qq} = L_2' \end{aligned} \quad (2.15)$$

其中 r_1, L_1 为定子绕组电阻和电感; r_2', L_2' 为转子绕组电阻和电感的折和值; L_M 为互感。由于转子绕组是短路的, 所以 $u_{\alpha 2}, u_{\beta 2}$ 均为零。这样, 对照原型电机的电压矩阵方程式 (2.12) 即可得到异步电动机变换到 α 、 β 轴的电压方程式 (2.16)

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha 1} \\ u_{\beta 1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + pL_1 & 0 & pL_M & 0 \\ 0 & r_1 + pL_1 & 0 & pL_M \\ pL_M & \omega L_M & r_2' + pL_2' & \omega L_2' \\ -\omega L_M & pL_M & -\omega L_2' & r_2' + pL_2' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \\ i_{\alpha 2} \\ i_{\beta 2} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

接着可得到异步电动机变换到 M—T 轴上的电压方程式 (2.17)。

$$\begin{bmatrix} u_{M1} \\ u_{T1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + pL_1 & -\omega_0 L_1 & pL_M & -\omega_0 L_M \\ \omega_0 L_1 & r_1 + pL_1 & \omega_0 L_M & pL_M \\ pL_M & -\omega_s L_M & r_2' + pL_2' & -\omega_s L_2' \\ \omega_s L_M & pL_M & \omega_s L_2' & r_2' + pL_2' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{M1} \\ i_{T1} \\ i_{M2} \\ i_T \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

为了进一步简化方程式 (2.15), 可选择 M 轴与电机转子磁链 ψ_2 的方向重合, T 轴逆时针转 90° , 与 ψ_2 垂直。通过这种设定, 就得到转子磁通定向的异步电动机电压方程式 (2.18), 也就是矢量控制所依据的异步电动机数学模型。

$$\begin{bmatrix} u_{M1} \\ u_{T1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + pL_1 & -\omega_0 L_1 & pL_M & -\omega_0 L_M \\ \omega_0 L_1 & r_1 + pL_1 & \omega_0 L_M & pL_M \\ pL_M & 0 & r_2' + pL_2' & 0 \\ \omega_s L_M & 0 & \omega_s L_2' & r_2' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{M1} \\ i_{T1} \\ i_{M2} \\ i_T \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.4 矢量变换控制方程

在矢量控制中, 被控制的物理量是定子电流, 因此必须从数学模型中找到定子电流各分量与其它物理量的关系。

由式 (2.18) 矩阵的第三行得

$$0 = pL_M i_{M1} + (r_2' + pL_2') i_{M2} = r_2' i_{M2} + (pL_M i_{M1} + pL_2' i_{M2}) \quad (2.19)$$

$$\text{上式括号部分 } pL_M i_{M1} + pL_2' i_{M2} = p\varphi_{M2} \quad (2.20)$$

所以有

$$0 = r_2' i_{M2} + p\varphi_{M2} \quad (2.21)$$

$$i_{M2} = -p\varphi_{M2} / r_2' \quad (2.20)$$

将式 (2.22) 代入式 (2.20) 的方程中, 可解得 i_{M1} , 即

$$\varphi_{M2} = L_M i_{M1} + L_2' i_{M2} = L_M i_{M1} - L_2' \frac{p\varphi_{M2}}{r_2'} \quad (2.22)$$

$$i_{M1} = \frac{(1 + pL_2' / r_2') \varphi_{M2}}{L_M} = \frac{1 + T_2 p}{L_M} \varphi_{M2} \quad (2.23)$$

式中, $T_2 = L_2' / r_2' = L_2 / r_2$ 为转子回路时间常数。

$$\text{而 } \varphi_{M2} = \varphi_2 \quad (2.24)$$

$$\therefore i_{M1} = \frac{1+T_2p}{L_M} \varphi_2 \tag{2.25}$$

再从式 (2.18) 第四行得

$$\begin{aligned} 0 &= \omega_s L_M i_{M1} + \omega_s L_2 i_{M2} + r_2 \dot{i}_T \\ &= \omega_s (L_M i_{M1} + L_2 i_{M2}) + r_2 \dot{i}_T \\ &= \omega_s \varphi_2 + r_2 \dot{i}_T \end{aligned} \tag{2.26}$$

$$\therefore \dot{i}_{T2} = -\frac{\omega_s \varphi_2}{r_2} \tag{2.27}$$

又因为 $L_M \dot{i}_{T1} + L_2 \dot{i}_{T2} = 0$ ，则将式 (2.27) 代入得

$$\therefore \dot{i}_{T2} = -\frac{L_2 \varphi}{L_M} \dot{i}_{T1} = \frac{\omega_s T_2}{L_M} \varphi_2 \tag{2.28}$$

由此可得式 (2.25) 和式 (2.28) 为矢量变换控制所用得方程式，

并画出矢量变换的控制结构如图 2.6 所示：^{[12][13]}

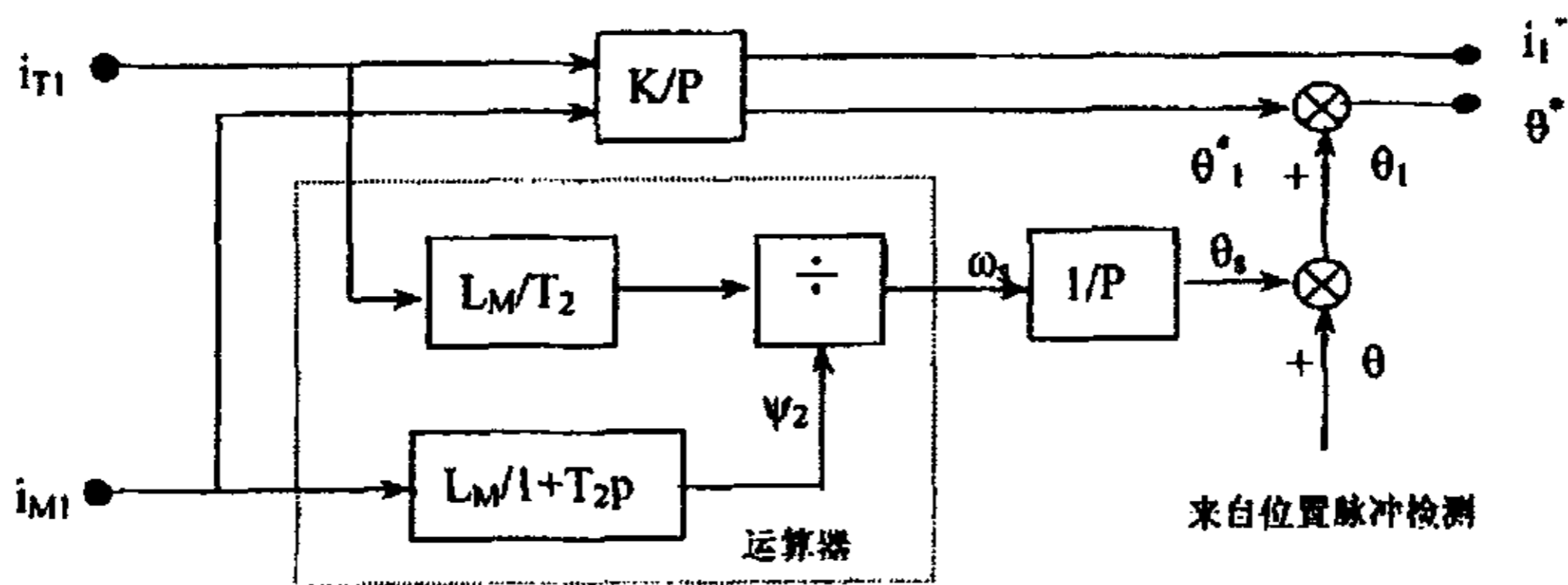


图 2.7 矢量变换控制的结构图

第三章 变频调速桥式起重机系统总体方案设计和部件选型

3.1 桥式起重机系统简介及起重机基本数据

3.1.1 桥式起重机的构造

桥式起重机广泛地应用在室内外仓库、厂房、码头和露天贮料场等处用作物料搬运设备，为此要求它高效，灵活，安全可靠。

本课题研究的桥式起重机是电动双梁桥式起重机，该起重机由起重小车、桥架金属结构、桥架运行机构以及电气控制设备等四个部分组成。机构主要指主起升机构、副起升机构、小车运行机构、大车运行机构。在电气控制系统中，其供电一般是通过电缆卷筒将电源输送到中心电器上，起重机为低压供电系统，电气控制部分集中在操作室和电气房内，安全保护装置装在适当的位置上。^[21]

3.1.2 各机构组成和特点

起升机构是用来实现货物的升降，它通常由驱动装置、钢丝绳卷绕系统和取物装置三部分组成。此外，根据工作需要还可以装设各种辅助装置，如高度限位器，超载限位器等。运行机构的作用是使起重机运行部分作来回运动，以达到在水平面内运移货物的目的。

以下是本课题桥式起重机基本参数：

该机的起重量为 20/5 吨，其跨度(L)为 19.5m 小车起升速度为 15m/min，大车起升速度为 7.5m/min，小车运行速度为 45m/min，大车运行速度为 75m/min。^[22]

3.1.3 传统桥式起重机的电气控制系统

桥式起重机的控制系统为继电器接触控制系统，噪音大，接线量多，更改控制逻辑困难。各机构的驱动系统简介如下：

主、副起升机构为两台电机分别单独驱动，为满足货物下降的需要，采用了动力制动，制动器是电动液压推杆操作。

小车运行机构为一台电机单独驱动，制动器是电动液压推杆操作。大车运行机构为两台电机分别驱动，同时控制。

3.2 本系统总体方案设计

控制系统由继电器控制改为 PLC 控制，四大机构调速均采用变频调速。由于各机构的特点不同，对调速要求也不相同。桥式起重机变频调速系统主要由上位机（工业触摸屏系统）、下位机（PLC 控制系统）、变频调速系统组成。系统结构图如图 1。

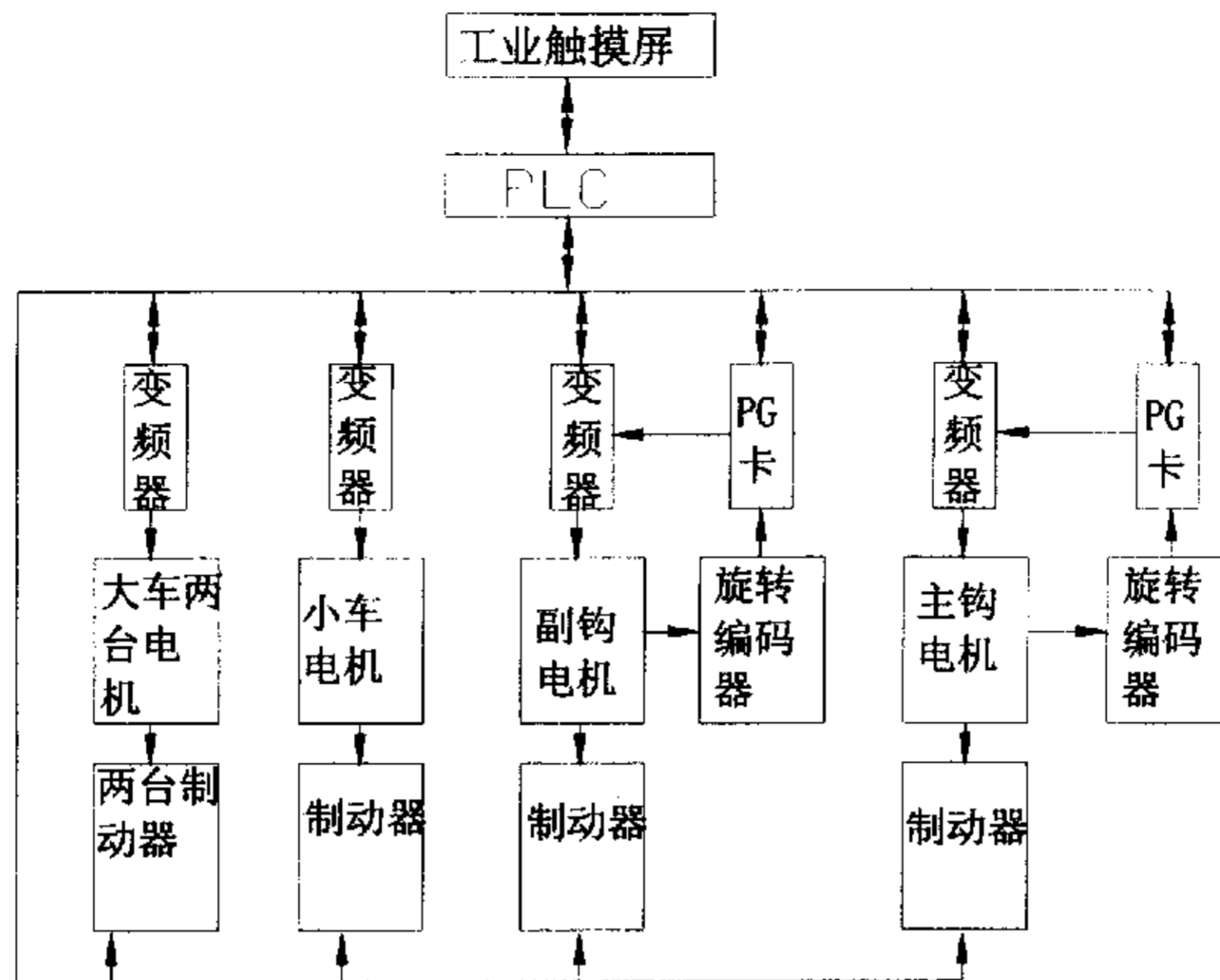


图 3-1

下面分别对各机构调速控制进行说明。

1、起升机构

起升机构属位能负载机构。不但要求高的转速及起制动的控制精度。而且对转矩控制要求严格。

主起升和副起升两台电机各使用一个变频器。变频器的选择，应以选择变频器的额定电流为基准，一般以电动机的额定电流，负载率。变频器运行的效率为依据。通过计算，变频器的额定电流一般为电动机额定电流的 1.2 倍以上。

控制方式选用带 PG 的矢量控制方式。PLC 接受电机的旋转编码器经数模转换卡送达的反馈信号，避免吊钩的下滑。

2、运行机构

大车运行机构两台电机用一个变频器；考虑到运行机构的工作频率较少，为节省成本，在调速中运行机构共用一台变频器。变频器的选择，一般以电动机的额定功率作为选择的依据。通常选额定功率大一级的变频器。

控制方式选用无 PG v/f 的变频控制方式。

运行机构的起动时间应尽量符合实际需要，起动迅速而平稳；机构的电气制动方式必须着重考虑。对不同的工况，可选择自由制动方式与强制制动方式。在运行机构正常停止时，可选用自由停止方式，其停止时间可按实际生产中的运行情况设定，以尽量满足司机操作桥式起重机的需要为主。为保证起升机构起动时具有足够大的起动转矩，可以通过设定机械制动器的打开时间、变频器的最低运行频率、运行电流之间的关系，以满足机构负载特性的要求。

采用该种设计，变频器内部参数的设定能保证机构具有良好的调速精度及起制动性能，由于起升机构电机需使用脉冲编码器作为速度反馈装置。通过测量脉冲编码器的脉冲

数, 利用二者之差控制电机的速度, 但选择脉冲编码器及其安装时, 应当考虑周全。^{[40][58]}

3.3 系统的部件设计

3.3.1 电机的选用

一、变频调速对电机的要求

采用变频调速时, 由于变频器输出波形中高次谐波的影响以及电机转速范围的扩大产生了一些与在工频电源下传动时不同的特征。主要反映在功率因数、效率、输出力矩、电机温升、噪音及振动等方面。随着高开关频率的 IGBT 等电力电子器件的使用、PWM 调制、矢量控制、增强型 V/f 控制方法的应用、使变频器输出波形、谐波成份、功率因数及使用效率得到了很大的改善, 有效地提高了变频控制电机的低速区转矩。同时由于变频控制软件的优化使用, 使电机可以避开共振点, 解决了系统在大调速区间内可能发生的共振问题。目前, 变频器已经发展到除非有超同步调速的要求或呈 1:20 以上的大速比、低调速要求或特低噪声要求外, 一般无须选用变频专用电机作变频系统的电机。现在国内推出的变频专用电机由普通电机加独立风扇组成, 以解决电机在低速运转过程中自冷风扇风量不足而引起的电机过热问题。

二、变频起重机系统中电机的选型

起重机起升和运行机构的调速比一般不大于 1:20, 且为断续工作制, 通常接电持续率在 60% 以下, 负载多为大惯量系统。严格意义上的变频电机转动惯量较小, 响应较快, 可工作在比额定转速高出很多的工况条件下, 这些特性均非起重机的特定要求。普通电机与变频电机在不连续工作状态下特性基本一致; 在连续工作时考虑到冷却效果限制了普通电机转矩应用值, 普通电机仅在连续工作时的变频驱动特性比变频电机稍差。

三、电机冷却

西门子变频器在调速比为 1:20 的范围内能确保起重机上普通电机有 150% 的过载力矩值。此外, 起重机电机多用于大惯量短时工作制, 通常不工作时间大于或略小于工作时间。电机在起动过程中可承受 2.5 倍额定电流值, 远大于变频起动要求的 1.5 倍值, 运行机构的电机在以额定速度运行时电机通常工作在额定功率以下, 因此高频引起的 1.1 倍电流值可不予考虑。但若电机要求在整个工作周期内在大于 1:4 的速比下持续运行则必须采用他冷式电机。

四、电机效率

国外以 4 极电机作变频电机首选极数, 因此时电机有最好的功率因数和最高的工作效率, 使能耗降为最低。高速电机比低速电机在电流小、功率因数高、电缆截面小及电器配置容量小等方面占有优势。尽管减速器传动比增大造成了减速器体积的增大, 但由于硬齿减速器的应用, 新塑耐磨齿轮副及焊接箱体的使用为高速电机驱动创造了条件。高速电机的使用因电机材料价格远高于减速器, 故电机体积重量的减小使一次性投资及能耗大大降低, 具有很高的经济价值。目前, 国内用于起重机械的 4 极电机有强迫通风冷却的 YZFXXX—4 型电机等。

五、电机起动转矩及电机运行的功率因数

起重机运行机构的转动惯量较大，为了加速电机需有较大的启动转矩，故电机容量需由负载功率 P_f 及加速功率 P_a 两部分组成。一般情况下 $P_a > P_f$ ，电机容量 P 为

$$P \geq (P_f + P_a) / \lambda_{ms}$$

式中 λ_{ms} —电机平均启动启动转矩倍数

若使电机在额定转速下接近满载运行，且能承受电网电压的波动，并通过 1.1 倍试验载荷，则要求电机的过载力矩倍数 λ_N 大于 1.5 倍，或适当增加加速时间，减少加速功率。对每小时作 20 多个循环的起重机来讲，运行机构的加速时间可在 5~10s 调整，有利于机构的平稳运行。

起重机起升机构的负荷特点是启动时间短(1~3s)，只占等速运动时间的较少比例；转动惯量较少，占额定起升转矩的 10%~20%。其电机容量 P 为

$$P = C_p g v / (1000 \eta) \quad (\text{kw})$$

式中 C_p —起重机额定提升负载，kg

v —额定起升速度，m/s

g —重力加速度， $g=9.81\text{m/s}$

η —机构总效率

为使电机提升 1.25 倍试验载荷，能承受电压波动的影响，其最大转矩值必须大于 2，否则必须让电机放空，从而降低电机在额定运行时的工作效率。

通过利用上述公式的计算，选用改造后的桥式起重机各执行机构的电机参数如表 3.1 所示：^[21]

	电机型号	电机功率
主起升机构	YZR250M1-8	30KW
副起升机构	YZR200L-8	15KW
大车运行机构	YZR160M1-6	2*5.5KW
小车运行机构	YZR1601-6	5.5KW

表 3.1

各机构电机启动调速方式说明如下：

起升机构：

起升、开闭机构的两台电机分别采用各自独立的变频调速器。其控制方式为带 PG 矢量控制方式。它具有稳定性好，对急加、减速负载变化有较好的响应特性。

运行机构:

行走机构变频器采用 V/F 控制方式驱动, 这样做一方面简化了电路, 另一方面又可降低成本。只是上述机构在运行中不能同时作业。

3. 其它说明:

上述各机构原有制动器和控制方式不变。但由于采用了交流变频调速系统, 对整机结构的冲击、对制动器的磨损都降低到了最小限度。

传统起重机控制系统起升机构能耗部分将取消, 各机构调速电阻器将取消。

3.3.2 变频器的选用

一. 变频器选型

起重机各机构负载为恒转矩负载, 普遍选用带低速转矩提升功能的电压型变频器, 如日本的安川, 三菱, 富士, 德国的西门子及丹麦的丹佛斯等。其中本系统选用西门子变频器, 西门子变频器具有较合理的价格, 完整的理论计算书及辅件推荐值, 有利于用户合理选用。

二、变频器容量选择

2.1 起升机构

起升机构平均起动转矩一般来说可为额定力矩值的 1.3~1.6 倍。考虑到电源电压波动因素及需通过 125% 超载试验要求等因素, 其最大转矩必须有 1.8~2 倍的负载力矩值, 以确保其安全使用的要求。等额变频器仅能提供小于 150% 超载力矩值, 为此可通过提高变频器容量 (YZ 型电机) 或同时提高变频器和电机容量 (Y 型电机) 来获得 200% 力矩值。此时变频器容量为

$$1.5P_{CN} \geq \frac{K}{\eta_M \cos \varphi} \times \frac{C_p g v}{1000 \eta} = \frac{K}{\eta_M \cos \varphi} P \quad (\text{KVA})$$

式中 $\cos \varphi$ ——电机的功率因数, $\cos \varphi = 0.25$

P ——起升额定负载所需功率, kw

η_M ——电机效率, $\eta_M = 0.85$

P_{CN} ——变频器容量, KVA

K ——系数, $K=2$

起升机构变频器容量依据负载功率计算, 并考虑 2 倍的安全力矩。若用在电机额定功率选定的基础上提高一档的方法选择变频器的容量, 则可能会造成不必要的放容损失。在变频器功率选定的基础上再作电流验证, 公式如下:

$$I_{CN} > I_M \quad \text{式中 } I_{CN} \text{ ——变频器额定电流, A}$$

I_M ——电机额定电流, A

2.2 运行机构

当运行电机在 300s 内有小于 60s 的加速时间的并且起动电流不超过变频器额定值的 1.5 倍时变频器容量可按下式计算

$$1.5P_{CN} \geq \frac{K}{\eta_M \cos \varphi} \left\{ \frac{T_j N}{973} + \frac{1}{973} \frac{\sum GD^2 N^2}{375t_A} \right\} = \frac{K}{\eta_M \cos \varphi} (P_j + P_M)$$

式中 k ——电流波形补偿系数, PWM 方式 $K=1.05 \sim 1.1$

T_j ——负载转矩, $N \cdot m$

$\sum GD^2$ ——总转动惯量对电机轴的折算值, $kg \cdot m$

t_A ——加速时间, s

N ——电机额定转速, r/min

当运行电机在 300s 内电机有大于 60s 加速时间时, 变频器容量按下式取值

$$P_{CN} \geq \frac{K}{\eta_M \cos \varphi} (P_j + P_M) \quad (\text{kVA})$$

电流验证:

以上公式均以负载功率作为变频器容量计算的基本参数, 相同功率不同极数的电机有不同的额定电流。故最终尚需验证电机和变频器额定电流, 即 $I_{CN} > I_M$

2.3 多电机驱动时变频器容量的选择

电压型变频器可以一台变频器驱动多台电机, 其并联运行且变频器短时过载能力为 150%、60%时, 如电机加速时间在 300s 内有小于 60s 的加速时间, 则

$$1.5P_{CN} \geq \frac{KP_M}{\eta \cos \varphi} [n_T + n_s (K_s - 1)] = P_{CN} [1 + \frac{n_s}{n_T} (K_s - 1)]$$

并要求
$$I_{CN} \geq \frac{2}{3} n_T I_M [1 + \frac{n_s}{n_T} (K_s - 1)] \times 1.1$$

式中 P_M ——负载所要求的电机轴输出功率

n_T ——并联电机的台数

n_s ——同时启动的台数

η ——电机效率, $\eta=0.85$

K_s ——电动启动电流与电机额定电流之比值

K ——电流波形的修正系数, PWM 方式取 1.05-1.1

P_{CN} ——变频器容量, KVA

I_{CN} ——变频器额定电流, A

2.4. 根据起重机电机驱动的特性和技术要求, 采用带测速反馈接口的 MASTERDRIVE 6SE70 系列变频器作为主、副起升机构的电机驱动, MASTERDRI Vector 6SE440 系列变频器作为大、小行车行走机构的电机驱动, 6SE440 系列是一种通用性高性能矢量控制型变频器, 功能强, 价格低, 完全满足行走机构的需求, 因此我们推荐用户选用该系列变频器. 下面仅就行走机构的电机变频驱动应用作介绍。

起重机大车运行方向有前后, 小车运行方向有左右要求, 根据运行速度至少要求分为 1-4 挡, 加减速时间为 3-6s, 通常小车行走机构采用一台电机, 而大车行走机构须采用 2 台电机, 大、小车本身的惯性也较大, 为防止电机被倒拖处于发电状态时产生过电压, 因此大小车变频器都配置了制动单元及制动电阻来释放能量。起重机整个电气系统由 S7~200 系列 PLC 进行控制, 变频器通过开关量端子接受 PLC 控制信号。

为了减小对电网的谐波污染, 每个变频器均加有输入电抗器, 它不仅减小了高次谐波分量, 同时也抑制了输入电流峰值, 有利于提高整流二极管使用寿命。电流输入端采用断路器作为变频器的短路保护。

通过利用上述公式的计算, 改造后的桥式起重机各执行机构的变频器如表 3.2 所示:

[43][51][52]

	变频器型号	额定功率/电流
主起升机构	6SE70272-ED61	37KW/48A
副起升机构	6SE70274-7ED61	22KW/47A
大车运行机构	6SE6440-2AD31	15KW/30A
小车运行机构	6SE6440-2AD25	5.5KW/11.6A

表 3.2

2.5、变频器主要参数设置

首先将所用电机铭牌数据输入 P80_P85, 大车变频器应输入几个电机的总电流及总功率, 并且大车变频器带有几个电机时应运行于线性频率/电压特性, 速度变化采用固定频率的迭加, 同时利用变频器的制动器接通、断开功能由 RL2 输出继电器触点控制机械制动器, 使行走机构在电机停止时不会由于外力而随意移动。如表 3.3 [21][28] [53]

参数号	参数值	说明
P002	6	加减时间 秒
P003	6	减速时间 秒
P005	5	1 档速度
P006	3	附加数字给定
P007	0	开关量输入控制
P051	6	固定频率 5 开关
P052	6	固定频率 4 开关
P053	6	固定频率 3 开关
P054	10	故障复位
P055	1	运行右转
P0356	2	运行左转
P046	5	固定频率 5
P044	15	固定频率 4
P043	25	固定频率 3
P061	6	故障
P062	4	外部制动控制
P077	0	V/f 特性 (大车多电机)
P077	1	FCC 特性 (小车单电机)

表 3.3

3.3.3 常用辅件的选择

变频器系统器件由断路器、接触器、电抗器、变频器、制动电阻及制动单元组成。

1、断路器

为避开变频器投入时直流回路电容器的充电电流峰值，为此变频器配置的断路器容量应为电机额定电流的 1.3~1.4 倍，整定值为断路器额定值的 3~4 倍。

2、接触器

接触器在变频器主回路中仅在变频器辅助器件或控制回路故障时起断开主回路的作用，一般不作回路开断器件用，故可按电机额定电流选用接触器容量，无须按开断次数考核其寿命。

3、交流电抗器

当变频器直接连接于一个大容量的电源变压器（600kVA 以上或离电源变压器很近安装）时，或电网回路中接有移相电容器，可能会在电网中产生过峰值电容，致使变频器损坏。为此，在变频器的输入端加接交流电抗器，以抑制变频器造成的高频峰值电流，或电容器开断造成的峰值电流对变频器的危害。同时，交流电抗器的接入还可起到降低电机噪声、改善起动转矩、在电机轻载时改善电机功率因数的作用。

交流电抗器容量按电机容量配置，可参见变频器生产厂推荐的配置表或按下列公式计

算:

$$L = \frac{(2\% - 5\%)U}{2TfI}$$

式中 L —电抗器容量, H

U —额定电压, V

I —电机额定电流, A; 电抗电流值为电机额定电流的 1.1~1.2 倍

f —最大周波数, Hz

(2%-5%) U 的选择根据速比要求定, 速比愈大百分比愈大。在变频器与变压器单台独配的系统无须配置电抗器。

4、制动单元

为减小大惯性系统的减速时间, 解决变频器直流电路上的过电压问题。常在其直流电路上加接一检测直流电压的晶体管。一旦直流回路电压超过一定的界限, 该晶体管导通, 并将过剩的电能通过与之相接的制动电阻器转化为热能耗。在能量消耗的同时加速了转速的减小, 该能量消耗得愈多, 制动时间愈小, 此装置即为变频器的制动单元。

5. 制动电阻器

借助制动单元, 消耗电机发电制动状态下从动能转换来的能量。

5.1: 电阻值的计算

$$R_{BO} = \frac{U_c^2}{1.047(T_B - 0.2T_M)n}$$

式中 U_c —直流回路电压, V

T_B —制动转矩, N·m

T_M —电机额定转矩 (在附加电阻制动的情况下, 电机自损耗约为电机额定功率的 20%左右), N·m

n —电机额定转速 (在附加电阻制动的情况下, 电机额定转速,) r/min

在制动晶体管和制动电阻构成的能耗回路中最大电流受晶体管许用电流 I_c 的限制, 因此在选择制动电阻值时不可小于其最小制动电阻值 R_{min} , 即

$$R_{min} = U_c / I_c \quad (\Omega)$$

式中 U_c —直流回路电压, V

I_c —制动晶体管允许的最大电流, A

因此，制动电阻应 R_B 按 $R_{BO} > R_B > R_{min}$ 的关系选用。

5.2 制动转矩 T_e 的计算

$$T_B = \frac{(GD_M^2 + GD_L^2)(n1 - n2)}{375t_b} - T_L$$

式中 GD_M^2 ~ 电机转子飞轮转矩之和, $N \cdot m$

T_L — 负载转矩, $N \cdot m$

$n1$ — 减速开始时转速, r/min

$n2$ — 减速结束时转速, r/min

t_b — 减速时间, s

5.3 制动电阻额定功率的确定

制动时平均消耗功率的计算如下:

$$P_{ro} = 1.047(T_B - 0.2T_M) \frac{n1 + n2}{2} \times 10$$

5.4 电阻器额定功率计算

考虑到制动时间的不连续性，电阻器的额定功率 P_{ro} （许用功率），可按许用功率增加系数 m ($m = P_{ro} / P_r$) 和制动电阻使用率 D 之间的关系曲线，由关系曲线可查得 m 值，再由用户 $P_r = P_{ro} / m$ 求得电阻器实配功率。

6. 电缆选择

由于高次谐波的驱动效应，电缆的实际使用面积减少，单位实际工作电阻增大，电缆压降有增大的趋势，故所配电缆一般大于常规使用值。如转换器与电机间的主回路配线不当，将会是电压下降较多，从而降低电机转矩，增大电机电流，引起电机过热。近年来变频器厂家将变频器额定电压设计成稍低于电源电压，如 380v 电源用变频器标称电压为 360V 等，有利于输电线容量的降低。 [21][41][42]

综上所述，变频自身特性及合理选择是驱动系统设计成功的首要因素，但辅件配置的恰当与否同样不容忽视。

第四章 可编程序控制器在桥式起重机变频控制系统中的应用

4.1 PLC 概述及其系统组成

4.1.1 PLC 概述

可编程序控制器 (Programmable Controller), 其早期主要应用于开关量的控制, 现代的可编程序控制器是以微处理器为基础, 高度集成的新型工业控制装置, 是计算机技术与工业控制技术相结合的产品。可编程序控制器是一种数字运算操作的电子系统, 专为工业环境而设计。它采用了可编程序的存储器, 用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作的指令, 并通过数字式和模拟式的输入和输出, 控制各种类型机械的生产过程。而有关的外围设备, 都应按易于与工业系统联成一个整体, 易于扩充其功能的原则设计。^[37]

PLC 自问世以来, 经过多年的发展, 随着大规模和超大规模集成电路等微电子技术的发展, 以 16 位和 32 位微处理器构成的微机 PLC 得到了惊人的发展, 使 PLC 在概念、设计、性能价格以及应用等方面都有了新的突破。不仅控制功能增强, 功耗、体积减少, 成本下降, 可靠性提高, 编程和故障检测更为灵活方便, 而且远程 I/O 和通信网络、数据处理以及图像显示也有了长足的发展, 所有这些已经使 PLC 应用于连续生产的过程控制系统, 使之成为最受欢迎的工业控制类产品。它较好的解决了工业控制领域中普遍关心的可靠、安全、灵活、方便、经济等问题。

4.1.2 PLC 的系统组成与各部分的作用

PLC 是一种通用的工业控制装置, 其组成与一般的微机系统基本相同。按结构形式的不同, PLC 可分为整体式和组合式。

整体式 PLC 是将中央处理器 (CPU)、存储器、输入单元、输出单元、电源、通信接口等组装成一体, 构成主机。另外还有独立的 I/O 扩展单元与主机配合使用。主机中, CPU 是 PLC 的核心, I/O 单元是连接 CPU 与现场设备之间的接口电路, 通信接口用于 PLC 与编程器和上位机等外部设备的连接。

组合式 PLC 将 CPU 单元、输入单元、输出单元、智能 I/O 单元、通信单元等分别做成相应的电路板或模块, 各模块插在底板上, 模块之间通过底板上的总线相连。装有 CPU 单元的底板称为 CPU 底板, 其它称为扩展底板。CPU 底板与扩展底板之间通过电缆连接, 距离一般不超过 10m。无论哪种结构类型的 PLC, 都可以根据需要进行配合与组合。它主要是由 CPU、电源、存储器和专门设计的输入/输出接口电路等组成。

1. 中央处理单元 (CPU)

中央处理单元一般由控制器、运算器和寄存器组成, 这些电路都集成在一个芯片内, CPU 通过数据总线、地址总线和控制总线与存储单元、输入/输出接口电路相连接。它是

PLC 的运算、控制中心。它按照系统程序所赋予的功能，完成以下任务：

- (1) 接收并存储从编程器输入的用户程序和数据；
- (2) 诊断电源、PLC 内部电路的工作状态和编程的语法错误；
- (3) 用扫描的方式接收输入信号，送入 PLC 的数据寄存器保存起来；
- (4) PLC 进入运行状态后，根据存放的先后顺序逐条读取用户程序，进行解释和执行，完成用户程序中规定的各种操作；
- (5) 将用户程序的执行结果送至输出端。

2. 存储器

根据存储器在系统中的作用，可以把它们分为以下 3 种：

(1) 系统程序存储器：和各种计算机一样，PLC 也有其固定的监控程序、解释程序，它们决定了 PLC 的功能，称为系统程序，系统程序存储器就是用来存放这部分程序的。系统程序是不能有用户更改的，故所使用的存储器为只读存储器 ROM 或 EPROM。

(2) 用户程序存储器：用户根据控制功能要求而编制的应用程序称为用户程序，用户程序存放在用户程序存储器中，由于用户程序需要经常改动、调试，故用户程序存储器多为可随时读写的 RAM。由于 RAM 掉电会失去数据，因此使用 RAM 作用户存储器的 PLC，都用后备电池保护 RAM，以免电源掉电时，失去用户程序。当用户程序调试修改完毕，不希望被随意改动时，可将用户程序写于 EPROM。目前较先进的 PLC 采用快闪存储器作用户程序存储器，快闪存储器可随时读写，掉电时数据不会失去，不需要后备电池保护。

(3) 工作数据存储器：工作数据是经常变化、经常存取的一些数据。这部分数据存储在 RAM 中，以适应随机存取的要求。在 PLC 的工作数据存储区中，开辟有元件映像寄存器和数据表。

元件映像寄存器用来存储 PLC 的开关量输入/输出和定时器。计数器、辅助继电器等内部继电器的 ON/OFF 状态。数据表用来存放各种数据，它的标准格式是每一个数据占一个字。它存储用户程序执行时的某些可变参数值，如定时器和计数器的当前值和设定值。它还用来存放 A/D 转换得到的数字和数字运算的结果等。根据需要，部分数据在停电时用后备电池维持其当前值，在停电时可以保持数据的存储器区域称为数据保持区。

3. I/O 单元

I/O 单元也称为 I/O 模块。PLC 通过 I/O 单元与工业生产过程现场相联系。输入单元接收用户设备的各种控制信号，如限位开关、操作按钮、选择开关、行程开关以及其他一些传感器的信号。通过接口电路将这些信号转换成中央处理器能够识别和处理的信号，并存到输入映像寄存器。运行时 CPU 从输入映像寄存器读取输入信息并进行处理，将处理结果放到输出映像寄存器。输出映像寄存器由输出点对应的触发器组成，输出接口电路将其由弱电控制信号转换成现场需要的强电信号输出，以驱动电磁阀、接触器、指示灯被控设备的执行元件。

4. 电源部分

PLC 一般使用 220V 的交流电源，内部的开关电源为 PLC 的中央处理器、存储器等电路

提供 5V、+12V、+24V 的直流电源，使 PLC 能正常工作。

电源部件的位置形式可有多种，对于整体式结构的 CPU，通常电源封装到机壳内部；对于模块式 PLC，有的采用单独电源模块，有的将电源与 CPU 封装到一个模块中。

5. 扩展接口

扩展接口用于将扩展单元以及功能模块与基本单元相连，使 PLC 的配置更加灵活以满足不同控制系统的需要。

6. 通信接口

为了实现“人-机”或“机-机”之间的对话，PLC 配有多种通信接口。PLC 通过这些通信接口可以与监视器、打印机和其他的 PLC 或计算机相连。

当 PLC 与打印机相连时，可将过程信息、系统参数等输出打印；当与监视器（CRT）相连时，可将过程图像显示出来；当与其他 PLC 相连时，可以组成多机系统或连成网路，实现更大规模的控制；当与计算机相连时，可以组成多级控制系统，实现控制与管理相结合的综合控制。

7. 编程器

编程器的作用是提供用户进行程序的编制、编辑、调试和监视。

编程器有简易型和智能型两类。简易型的编程器只能联机编程，且往往需要将图形转化为机器语言助记符后，才能输入。它一般由简易键盘和发光二极管或其他显示管件组成。智能型的编程器又称为图形编程器，它可以联机编程，也可以脱机编程，具有 LCD 或 CRT 图形显示功能，可以直接输入梯形图和通过屏幕对话。

还可以利用 PC 作为编程器，PLC 生产厂家配有相应的编程软件，使用编程软件可以在屏幕上直接生成和编辑梯形图、语句表、功能块图和顺序功能图程序，并可以实现不同编程语言的互相转换。程序被下载到 PLC，也可以将 PLC 中的程序上传到计算机。程序可以存盘或打印，通过网络，还可以实现远程编程和传送。现在已有些 PLC 不再提供编程器，而且提供微机编程软件了，并且配有相应的通信连接电缆。^[46]

4.2 本系统中可编程序控制器的选取及其特点

4.2.1 PLC 系统选型—SIEMENS S7-200

目前 PLC 使用性能较好的 SIEMENS 公司、日本的三菱、欧姆龙、美国的 AB 公司，根据性价比的选择，根据被控对象的 I/O 点数以及工艺要求、扫描速度、自诊断功能等方面的考虑，采用 SIEMENS 公司的 S7-200 系列 PLC。

SIMATIC S7-200 系列是西门子公司小型可编程序控制器，可以单机运行，由于它具有多种功能模块和人机界面（HMI）可供选择，所以系统的集成非常方便，并且可以很容易地组成 PLC 网络。同时它具有功能齐全的编程和工业控制组态软件，使得在完成控制系统的设计时更加简单，几乎可以完成任何功能的控制任务，同时具有可靠性高，运行速度快的特点，继承了和发挥了它在大、中型 PLC 领域的技术优势，有丰富的指令集，具有

强大的多种集成功能和实时特性，其性能价格比高，所以在规模不太大的领域是较为理想的控制设备。^[54]

4.2.2 Siemens S7-200 系列 PLC 特性

(1) S7-200 系列 PLC 介绍

S7-200 系列 PLC 功能强、速度快、扩展灵活，具有模块化、紧凑的结构。使用范围可覆盖从替代继电器的简单控制到复杂的自动控制，应用领域极为广泛，覆盖所有与自动检测、自动化控制有关的工业及民用领域，包括电力设施、民用设施、机械、机床等领域。

S7-200 系列具有极高的可靠性、极丰富的指令集、易于掌握、操作便捷、内置丰富的集成功能、实时特性，良好的通信能力，丰富的扩展模块。

S7-200 系列的强大功能使其无论是在独立运行中，或相连成网络都能实现复杂控制功能。所以它具有极高的性价比。

S7-200 系列可以根据对象的不同，可以选用不同的型号和不同数量的模块。并可以将这些模块安装在同一机架上。

(2) Siemens S7-200 主要功能模块介绍

1. CPU 模块

S7-200 的 CPU 模块包括一个中央处理单元、电源以及数字 I/O 点，这些都被集成在一个紧凑、独立的设备中。CPU 负责执行程序，输入部分从现场设备中采集信号，输出部分则输出控制信号，驱动外部负载。从 CPU 模块的功能来看，CPU 模块为 CPU22*，它具有如下五种不同的结构配置的 CPU 单元。

- (1) CPU221 它有 6 输入/4 输出，I/O 共计 10 点。无扩展能力，程序和数据存储容量较小，有一定的高速计数处理能力，非常适合于少点数的控制系统。
- (2) CPU222 它有 8 输入/6 输出，I/O 共计 14 点。和 CPU 221 相比，它可以进行一定的模拟量控制和 2 个模块的扩展，因此是应用更广泛的全功能控制器。
- (3) CPU224 它有 14 输入/10 输出，I/O 共计 24 点。和前两者相比，存储容量扩大了一倍，它可以有 7 个扩展模块，有内置时钟，它有更强的模拟量和高速计数的处理能力，是使用得最多 S7-200 产品。
- (4) CPU226 它有 24 输入/16 输出，I/O 共计 40 点，和 CPU224 相比，增加了通信口的数量，通信能力大大增强。它可用于点数较多、要求较高的小型或中型控制系统。
- (5) CPU226XM 它在用户程序存储容量和数据存储容量上进行了扩展，其他指标和 CPU226 相同。

2. I/O 扩展模块

当 CPU 的 I/O 点数不够用或需要进行特殊功能的控制时，就要进行 I/O 扩展，I/O 扩展包括 I/O 点数的扩展和功能模块的扩展。典型的数字量 I/O 扩展模块有：输入扩展模块 EM221 有两种：8 种 DC、8 点 AC 输入；输出扩展模块 EM222 有三种：8 点 DC 晶体管输出，

8 点 AC 输出、8 点继电器输出。输入/输出混合扩展模块 EM232 有六种:分别为 4 点(8 点、16 点) DC 输入/4 点(8 点、16 点) DC 输出、4 点(8 点、16 点) DC 输入/4 点(8 点、16 点) 继电器输出。

3. 功能扩展模块

当需要完成某些特殊功能的控制任务时, CPU 主机可以扩展特殊功能模块. 如要求进行 PROFIBUS-DP 现场总线连接时, 就需要 EM277 PROFIBUS-DP 模块, 在这里主要介绍模拟量输出模块 EM232 和模拟量输入模块 EM231

(1) EM232 模块提供了有 2 输出模拟量通道, 具有 12 位的分辨率, 且具有多输入, 输出信号范围。其内部集成了 D/A 转换器、放大器等多种功能的电路, 可用于复杂的控制场合。它能够不用外部放大器而与传感器直接相连, 可根据输出模拟量的大小, 通过其外置的 DIP 开关选择不同的档位及分辨率, 且模拟量的输出可作为测量传感器的恒流源使用。

(2) EM231 模拟量输入扩展模块提供了 4*12 位模拟量输入的功能。其内部集成了 A/D 转换器、放大器等多种功能的电路, 有很强的抗干扰性, 可用于复杂的控制场合, 它能够不用放大器而与传感器直接相连, 有 4 输入模拟量通道, 具有 12 位的分辨率, 且具有多种输入、输出信号范围。

4.2.3 Siemens S7-200 PLC 的工作原理

各种 PLC 具体工作原理大同小异都采用扫描工作方式,。Siemens S7-200PLC 的工作过程: PLC 上电后, 首先进行初始化, 然后进入循环工作过程。一次循环过程可归纳为公共处理、程序执行、扫描周期计算处理、I/O 刷新和外设端口服务五个工作阶段, 一次循环所用的时间称为一个工作周期(或扫描周期), 其长短与用户程序的长短以及 PLC 机本身性能有关, 其数据级 ms 级, 典型值为几十 ms. 各阶段完成的任务如下:

(1) 公共处理: 复位监视定时器, 进行硬件检查、用户内存检查等。检查正常后, 方可进行下面的操作。如果有异常情况, 则根据错误的严重程度发出报警或停止 PLC 运行。

(2) 程序执行: 在程序执行阶段, CPU 按先左后右, 先上后下的顺序对每条指令进行解释、执行, CPU 从输入映像寄存器(每个输入继电器对应一个输入映像寄存器, 其通/断状态)和元件映像寄存器(即与各种内部继电器、输出继电器对应的寄存器读出各继电器的状态, 根据用户程序给出的逻辑关系进行逻辑运算, 运算结果再写入元件映像寄存器中。

(3) 扫描周期计算处理: 若设定扫描周期为固定值, 则进入等待循环, 直到该固定值到, 再往下进行。若设定扫描周期为不定的(即决定于用户程序的长短等, 为不定值), 则进行扫描周期的计算。

(4) I/O 刷新: 在此阶段, 进行 I/O 刷新。输入刷新时, CPU 从输入电路中读出各输入点状态, 并将此状态写入输入映像寄存器中; 输出刷新时, 将输出继电器的元件影响寄存器的状态传送到输出锁存电路, 再经输出电路隔离和功率放大, 驱动外部负载。

(5) 外设端口服务: 完成与外设端口连接的外围设备部编程器或通信适配器的通信处理。

CPU 从输入电路的输出端读出各路状态, 并将其写入输入映像寄存器; 在程序执行阶段,

CPU 从输入映像寄存器和元件映像寄存器中读出各继电器的状态，并根据此状态执行用户程序，执行结果再写入元件映像寄存器中；在紧接着的下一个 I/O 刷新阶段，将输出映像寄存器的状态写入输出锁存电路，再经输出电路传递到输出端子，从而控制外接器件动作。

PLC 的循环扫描工作方式也为 PLC 提供了一条死循环自诊断功能。PLC 内部设置了一个监视定时器 WDT，其定时时间可由用户设置为大于用户程序的扫描周期，PLC 在每个扫描周期的公共处理阶段将监视定时器复位。正常情况下，监视定时器不会动作，如钩由于 CPU 内部故障使程序进入死循环，那么，扫描周期将超过监视器的定时时间，这时，监视定时器动作，运行停止，以示用户。

4.3 变频调速起重机控制系统设计

4.3.1 系统控制的要求

对桥式起重机变频调速控制系统的基本要求

- (1) 主、副机构升降速度调节；
- (2) 运行机构运行速度调节；
- (3) 保护功能：主副机构上升限位、下降限位、大车限位、小车限位、主副机构及大小车电机的保护等。

控制系统应由 PLC、继电器、操纵台各主令控制器、开关、按钮、指示灯及各部位限位开关等组成。

4.3.2 控制系统的 I/O 点及地址分配

根据控制系统的要求，控制系统应具备的输入/输出点数，名称、代码及地址编号如表 4.1 所示。

名称	代码/	地址编码
输入信号		
起动输入点	QA1	I0.0
停止输入点	TA1	I0.1
主钩超重输入点	CK1	I0.2
副钩超重输入点	CK2	I0.3
主钩变频故障输入点	BRL11	I0.4
副钩变频故障输入点	BRL21	I0.5
小车变频故障输入点	BRL41	I0.6
大车变频故障输入点	BRL31	I0.7
大车故障输入点	KR3	I1.0
主钩故障输入点	KR1	I1.1
副钩故障输入点	KR2	I1.2
小车故障输入点	KR4	I1.3

安全开关输入点	AK	I1.4
主接触器应答输入点	KM0	I1.5
主钩起升一档输入点		I2.0
主钩下降一档输入点		I2.1
主钩二档输入点		I2.2
主钩三档输入点		I2.3
主钩四档输入点		I2.4
主钩五档输入点		I2.5
主钩上升限位输入点	XK11	I2.6
主钩下降限位输入点	XK12	I2.7
副钩起升一档输入点		I3.0
副钩下降一档输入点		I3.1
副钩二档输入点		I3.1
副钩三档输入点		I3.2
副钩四档输入点		I3.3
副钩五档输入点		I3.4
副钩上升限位输入点	XK21	I3.5
副钩下降限位输入点	XK22	I3.6
大车左行一档输入点		I3.7
大车右行一档输入点		I4.0
大车二档输入点		I4.1
大车三档输入点		I4.2
大车四档输入点		I4.3
大车五档输入点		I4.4
大车左行限位输入点	XK31	I4.5
大车右行限位输入点	XK32	I4.6
小车前行一档输入点		I4.7
小车后行一档输入点		I5.0
小车二档输入点		I5.1
小车三档输入点		I5.2
小车四档输入点		I5.3
小车五档输入点		I5.4
小车前行限位输入点	XK41	I5.5
小车后行限位输入点	XK42	I5.6
总空开合闸输入点	QF0	I5.7

输出信号		
主继电器	K0	Q0.0
主钩风机继电器	K12	Q0.1
副钩风机继电器	K22	Q0.2
大车风机继电器	K32	Q0.3
小车风机继电器	K42	Q0.4
允许起动指示灯	SE01	Q0.6
机构限位指示灯	SE02	Q1.0
综合故障指示灯	SE03	Q2.0
主钩上升输出点		Q2.1
主钩下降输出点		Q2.2
主钩自由停车命令		Q2.4
大车 OFF		Q2.5
大车左行输出点		Q2.6
大车右行输出点		Q3.0
大车自由停车命令		Q3.1
小车前行输出点		Q3.2
小车后行输出点		Q3.4
小车自由停车命令		Q3.5
小车 OFF		Q3.6

4.3.3 PLC 配置

根据以上系统开关量输入点，开关量输出点，模拟量输入点，模拟量输出点的个数，系统同时要求有八路模拟量输入作为反馈信号，有四路模拟量输出作为变频器的控制端输入同时要求 DI/DO 点数具有 >10% 的冗余，所以 CPU 模块选用 CPU226 模块，数字量输入模块采用两块 EM223 模块，模拟量输入模块采用两块 EM231 模块、模拟量输出模块采用两块 EM232 模块。PLC 系统与配置如图 4.1。

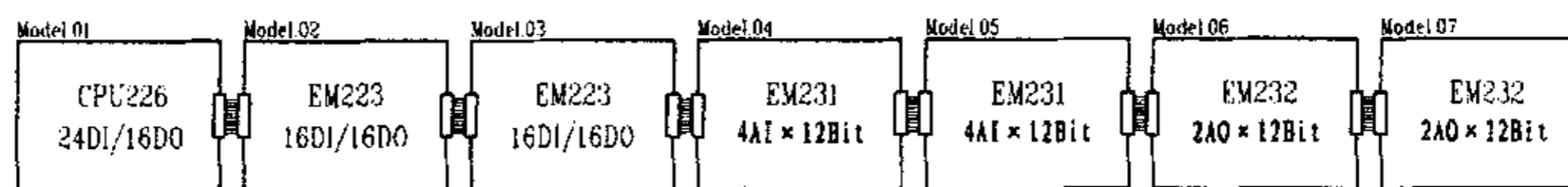


图 4.1

4.3.4. 电气控制系统原理图

电气控制系统原理图主要包括主电路和 PLC 外围接线图。

1. 主电路图

如图 4.2 所示为电控系统的主电路图，共有五台电机，其中大车运行机构有两台电机，同时带有风机冷却装置。

2. PLC 外围接线电路

如图 4.3 所示为 Siemens S7-200 CPU226 模块接线图。图中所示的 I/O 接线信号分别与图 4.1 中的 I/O 名称相对应。数字量输入模块 EM223 模块, 模拟量输入模块 EM231 模块、模拟量输出模块 EM232 模块的接线图与此相同。

4.3.5 各机构的安全保护及检测

桥式起重机的安全性能尤为重要, 因此在软硬件设计中, 我们对各机构的安全检测和保护做了周密的设计。

1、起升机构安全保护及检测

主副起升机构设有上下极限限位开关, 限位开关采用凸轮式或螺母螺杆式, 当吊钩上升下降到极限位置时, 停止在该方向上的运行。

主副起升机构超速限位保护由变频器完成

主副起升机构共用一台超负荷力矩限制器

主副起升机构的过电流、过载、短路、断相等保护由变频器自动完成

主副起升机构均配备 BCQ 型起重量超载限制器, 其综合称量精度 $\leq 5\%FS$ 。起重量超载限制器能分别在满载和所设定载荷发出相应信号, 当载荷达到 90%时, 发出提示性报警信号, 当载荷达到 110%时, 立即停止起升动作, 并发出禁止性报警信号。

2、小车行走机构安全保护及检测

小车在其运行的两个方向上均设有终点限位开关和预限位开关, 开关采用一般机械式, 其动作逻辑与保护过程同起升机构。

行走机构的过电流、过载、短路、断相等保护由变频器自动完成。

3. 压电安全保护及检测

所有空气开关均有通、断检测。

所有接触器均有故障检测。

所有电机均有过电流、过载、短路、断相保护。

联动台设空气开关分断按钮和总接触器急停按钮开关, 在紧急情况下断开门机总电源各机构均设有主令控制器设零位保护。

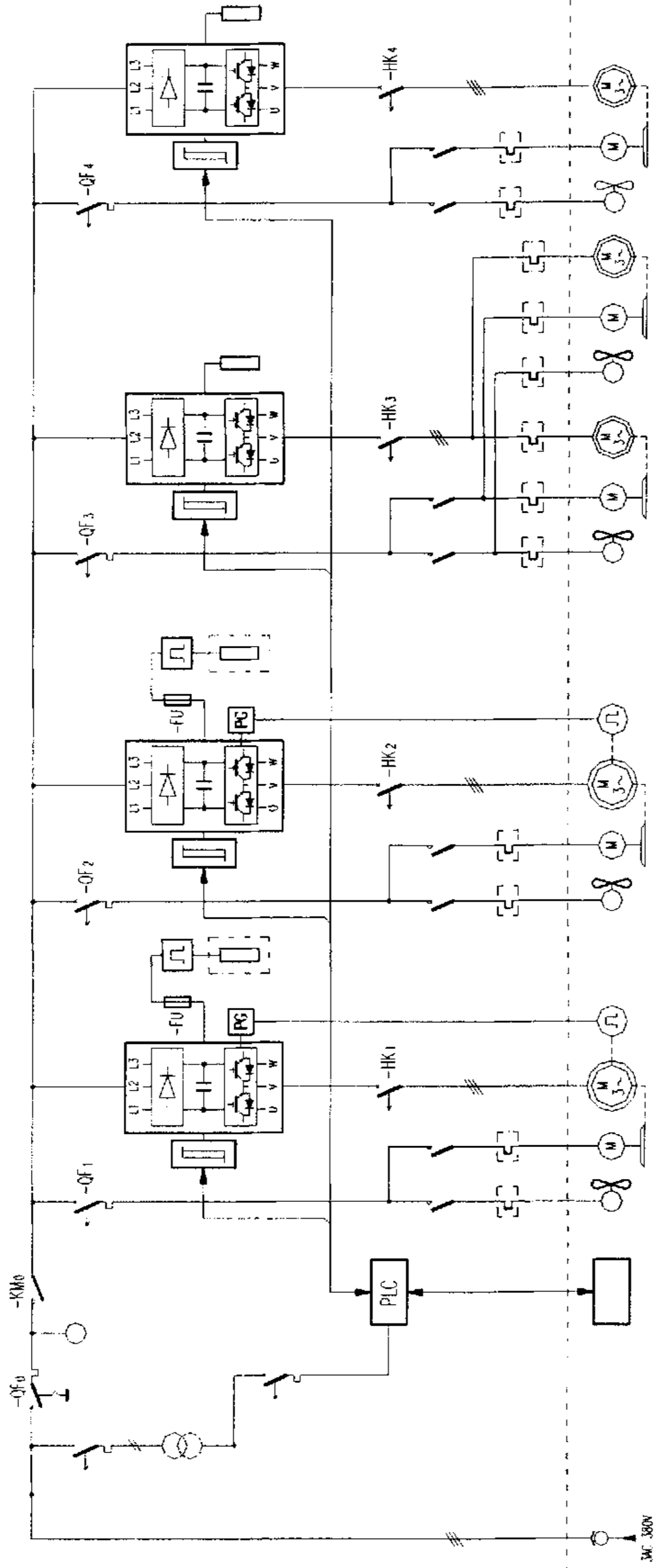


图 4.2

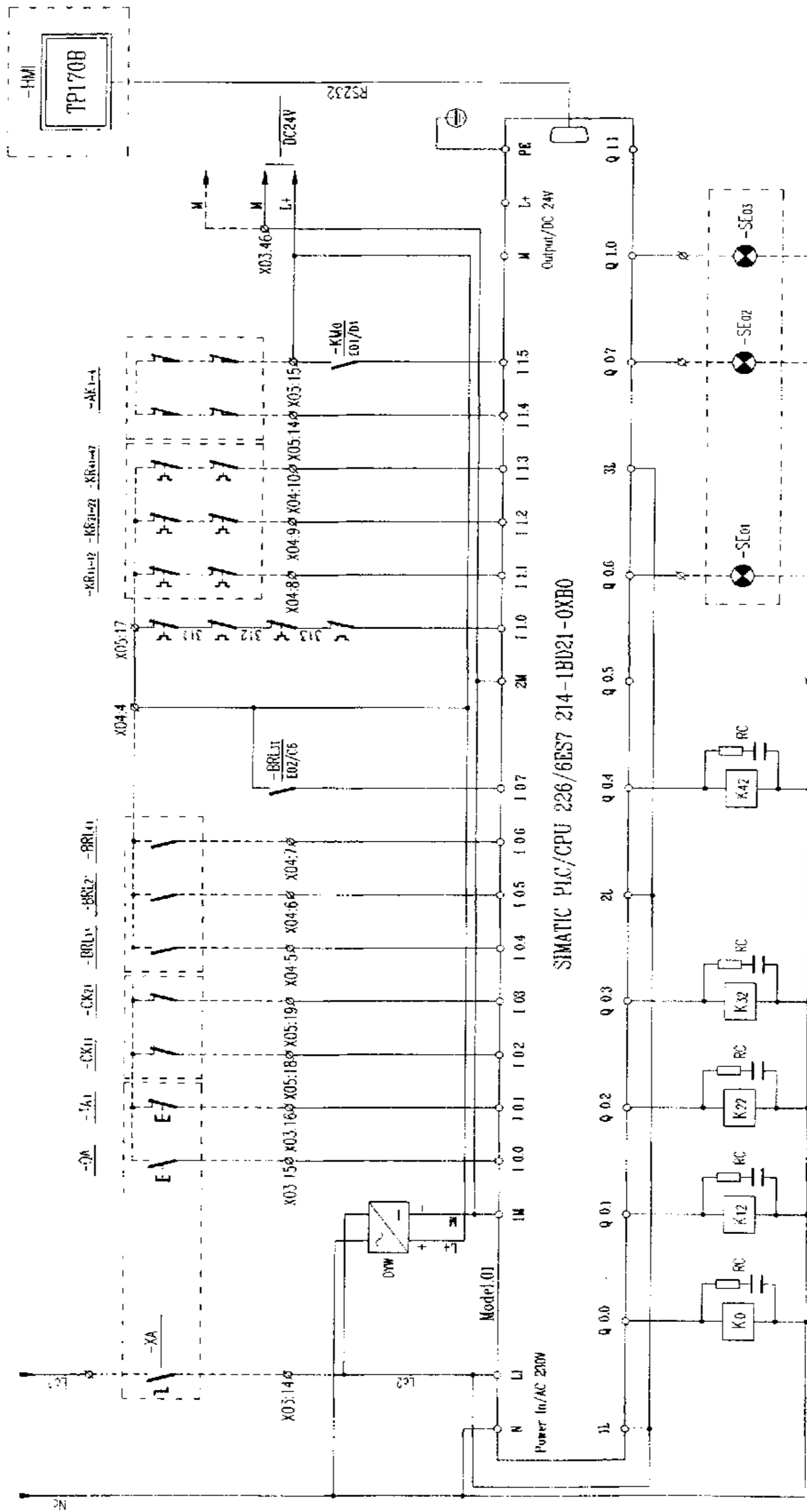


图 4.3

第五章 桥式起重机变频调速系统软件设计

5.1 触摸屏的软件设计

5.1.1 监控画面的开发方法

1) 采用 VB、VC 等开发工具进行开发

软件的控制界面和控制算法功能是靠软件工作人员通过编程从底层来实现的。工作量且设计的软件通用型差，软件功能可靠性也低。因为自动化系统的差异性，每次系统应用，其软件都新的，但随着科技的发展，对自动化程度，可靠性要求很高的工业监控领域，对软件的要求越来越高。

2) 采用组态软件进行开发

实时监控系统中上位机应用软件的开发建立在组态软件的基础之上，是工业控制系统软件开发的一个方向。当计算机硬件有了飞速发展之后，各种应用领域对软件提出了更高的要求。

所谓组态软件，即一组功能强大的软件包，它有一个友好的人机界面，且不用编什么代码便可以是组态软件具备了良好的人机交互界面。开发时操作简易灵活，开发的产品直观生动、

显示画面丰富、工业控制中的各种显示仪表控制表盘、回路调节图、历史趋势图、实时曲线都可以通过它来实现。

在组态软件的基础上开发的控制软件可以适用于一大类被控对象，对于不同的对象只需改变底层驱动即可。组态软件的运用，不仅可以大大提高系统软件的开发速度，而且保证了系统软件的成熟性、可靠性、易于维护性。

考虑到上面的因素，所以我们采用组态软件来在上位机上进行应用开发。

5.1.2 组态软件

组态的概念最早来自英文 Configuration，含义是使用软件工具对计算机及其软件的各种资源进行配置，达到使计算机和软件按照预先设置，自动执行特定任务，满足使用者要求的目的。组态软件是面向监控和数据采集 (supervisory control and data acquisition, SCADA) 的软件平台工具。具有丰富的设置项目，使用方式灵活，功能强大。组态软件最早出现时，HMI (human machine interface) 或 MMI (man machine interface) 是其主要内涵，即主要解决人机界面的问题。随着它的快速发展，实时数据库、实时控制、SCADA、通信及联网、开放数据接口、对 I/O 设备的广泛支持已经成为它的主要内容，组态软件的构成和功能可分为：

(1) 以使用软件的工作阶段划分

从总体上讲，组态软件是由系统开发环境和系统运行环境两大部分构成。系统开发环境是自动化工程设计工程师为实施其控制方案，在组态软件的支持下进行应用程序的开

发工作所必须依赖的工作环境。通过建立一系列用户数据文件，生成最终的图形目标应用系统，供系统运行环境运行时使用。系统开发环境由若干个组态程序组成，如图形界面组态程序，数据库组态等。

系统运行环境在系统运行环境中，由系统开发环境下生成的各种应用程序无论是图形或者数据库，可以结合现场的数据实时地运行，同时可以各种关联关系也可以得到体现。系统运行环境由若干个运行程序组成，如图形界面运行程序和实时数据库运行程序等。

自动化工程师最先接触的是系统开发环境，通过一定工作量的系统组态和调试，最终将目标应用程序在系统运行环境投入实时运行，完成一个工程项目。

(2) 按照成员构成划分：

组态软件因为功能强大，而每个功能相对来说又具有一定的独立性，因此其组成形式是一个集成软件平台，由若干程序组件构成。组态软件必备的典型组件包括以下几个部分：

应用程序管理器。

图形界面开发程序；

图形界面运行程序；

实时数据库系统组态程序；

实时数据库系统运行程序；

I / O 驱动程序；

组态软件扩展可选组件包括：

通用数据库接口（ODBC 接口）组态程序；通用数据库接口组件用来完成组态软件的实时数据库与通用数据库（如 Oracle、Sybase、Foxpro、DB2、SQL Server 等）。

通用数据库接口（ODBC 接口）运行程序。

策略（控制方案）编辑组态程序；它是以 PC 为中心的实现低成本监控的核心软件，具有很强的逻辑、算术运算能力和丰富的控制算法。它以 IEC-1131-3 标准为使用者提供标准的编程环境，共有四种编程方式：梯形图、结构化编程语言、指令助记符、功能化模块。策略运行程序。实用通信程序组件。极大的增强了组态软件的功能，可以实现与第三方的数据交换。实用通信组件可以使用以太网、RS485、PSTN 等多种通信介质和网络来实现数据的远程访问和传输。

(3) 组态软件的功能特点

组态软件具有以下功能：

与采集、控制设备之间进行数据交换；

使来自设备的数据与计算机图形界面上的各元素关联起来；

处理数据报警和系统报警；

存储历史数据并支持历史数据的查询；

各类报表的生产和打印输出；

为使用者提供灵活的组态工具，可以适应不同应用领域的需求；

最终输出的应用系统运行稳定可靠；

具有与第三方程序的接口，以便数据共享。

组态软件的特点：实时多任务是最大特点。例如数据采集与输出、数据处理与算法实现、图形显示及人机对话、实时数据的存储、检索管理、实时通信等多个任务要在同一台计算机上同时运行。程序设计人员在组态软件中只需要填写一些事先设计的表格，再利用图形功能把被控对象（如温度计、电动机、趋势曲线、报表）形象的画出来，通过内部数据连接被控对象的属性与 I/O 设备的实时数据进行逻辑连接。当由组态软件生成的应用系统投入运行后，与被控对象相连的 I/O 设备数据发生变化会直接带动被控对象的属性变化。

（4）组态软件的数据处理流程

组态软件通过 I/O 驱动程序从现场 I/O 设备获得实时数据，对数据进行必要的加工后，一方面以图形方式直观的显示在计算机的屏幕上；另一方面按照组态要求和操作人员的指令将控制数据送给 I/O 设备，对执行机构实施控制或调整控制参数。对已经组态的历史趋势的变量存储历史数据，对历史数据检索请求给予响应。当发出报警时及时将报警以声音、图像的方式通知操作人员，并记录报警的历史信息，以被检索。^[38]

5.2 监控画面的设计

操作系统：

对于上位机，由于设计系统管理和人机界面，应该采用成熟的通用系统平台，32 位优先级抢占式的多任务多进程操作系统 Windows 2000 Professional 作为系统软件，就是一种很好的选择。

Window 2000 Professional 作为操作系统，具有较好的调度管理和内存保护机制，在上位机中采用成熟的操作系统可以对多任务提供良好的支持。

组态软件：

Protool/pro 软件系统是西门子公司基于 PC 硬件、运行在 Windows 平台上的一种组态软件。该组态软件是由 Protool/pro CS 和 Protool/pro RT 构成，其中前者是应用程序的集成开发环境。软件开发者在这个环境中完成界面的设计、变量的定义等工作，它具有先进完善的图形生成功能；同时具有数据报警、趋势曲线、过程记录、安全防范等重要功能。Protool / pro RT 是软件的实时运行环境，用于显示画面开发系统中建立的图形画面，并负责软件与 PLC 之间的数据交换，实时更新变量的数值，同时完成报警显示、历史记录查询、趋势曲线监视等功能，并可生成历史数据文件，它是工业现场监控和数据采集系统的最终形式。

上位机应用软件的开发建立在组态软件的基础之上，是工业控制系统软件开发的一个方向。Protool/pro 组态软件功能强，实时性好，人机界面美观，软件稳定性好，应用程序开发周期短，是一种较为理想的实时控制平台软件。基于 Protool/pro 我们可以构造 C/S 模式的两层结构，方便用户对现场设备的观测和控制，可以查看现场的图形显示、历史曲线、报警信息，并能根据权限进行报警应答、变量修改。

SIMATIC ProTool/Pro 具有以下的特点：

适用于单机设备或较为简单的控制系统，具有响应时间快的特点，非常适合于设备旁

边就近使用。

ProTool/pro 是全套产品系列的操作和监控部分,项目一经创建,即应用于各种 HMI 平台。

SIMATIC 系列的全线集成,即意味着营造了一种通讯、数据管理及组态或编程的无缝环境。

直观的界面环境及面向对象的设计,一经启动,即可运行。

ProTool/Pro Runtime 为各种不同的自动化系统提供有驱动程序,全面集成开放。

快速数据采集和存储,响应时间短,即使在点动模式,也可确保过程控制的可靠性。

ProTool/pro 支持 OLE, ODBC, OPC 等标准接口,同时用户程序可以采用内嵌 VB 语言编写。

ProTool 能够集成到 SIMATIC STEP 7-micro/win 组态软件中。从而允许在 ProTool 中作为变量选择 STEP 7-micro/win 符号和数据块。这样不仅节省时间和金钱,也消除了当数次输入同样数据时发生错误的可能性。^[59]

在启动 ProTool / Pro 建立一个新的 ProTool/Pro 项目时,要在组态的设备中选择面板,本课题采用 TP170B COLOR 型触摸屏,如图 5.1,

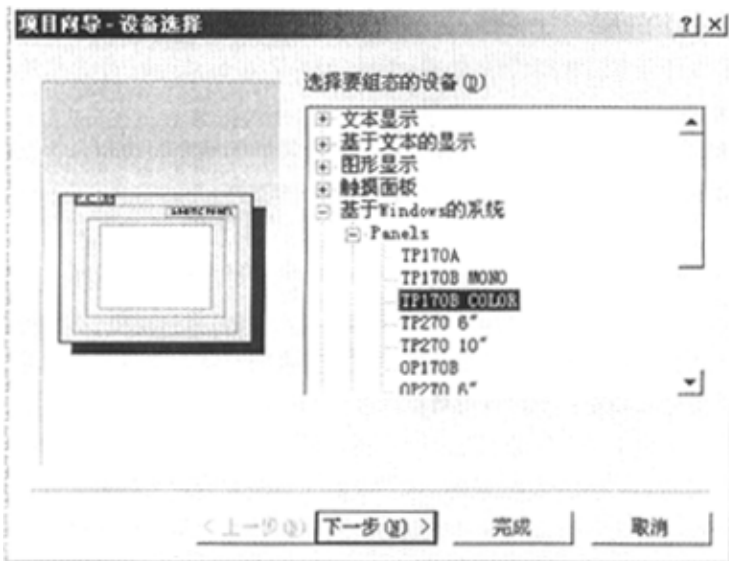


图 5.1

以及使用的协议,因为这里使用的是 S7-200,所以选择 SIMATIC S7 200 VS 协议。如图 5.2.

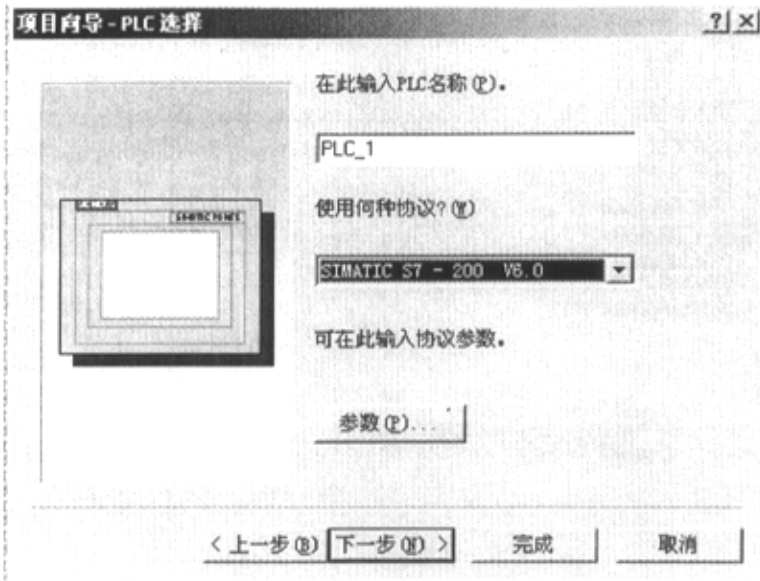


图 5.2

接下来设置操作面板参数(地址和接口)和网络参数(传输协议和波特率)如图 5.3

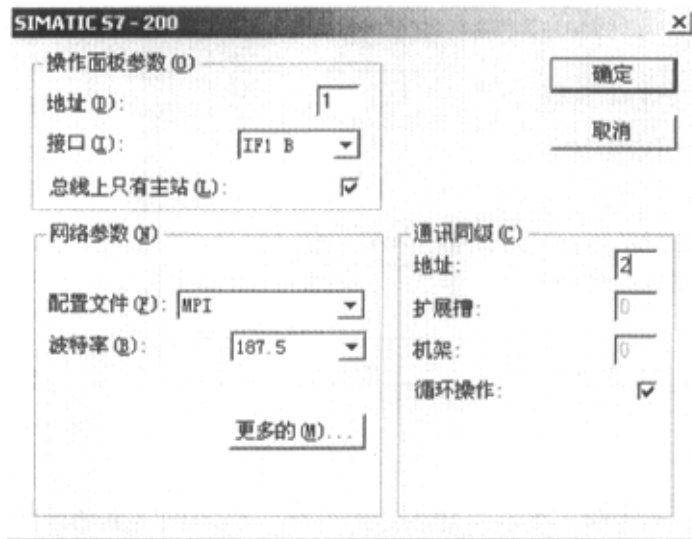


图 5.3

接下来在控制面板中设置 PG/PC interface , 让其中 PPI 中的参数地址和上面操作面板参数地址必须相同, 以便让 STEP 7-micro/win 集成到 ProTool/Pro 中。如图 5.4^[53]所示:

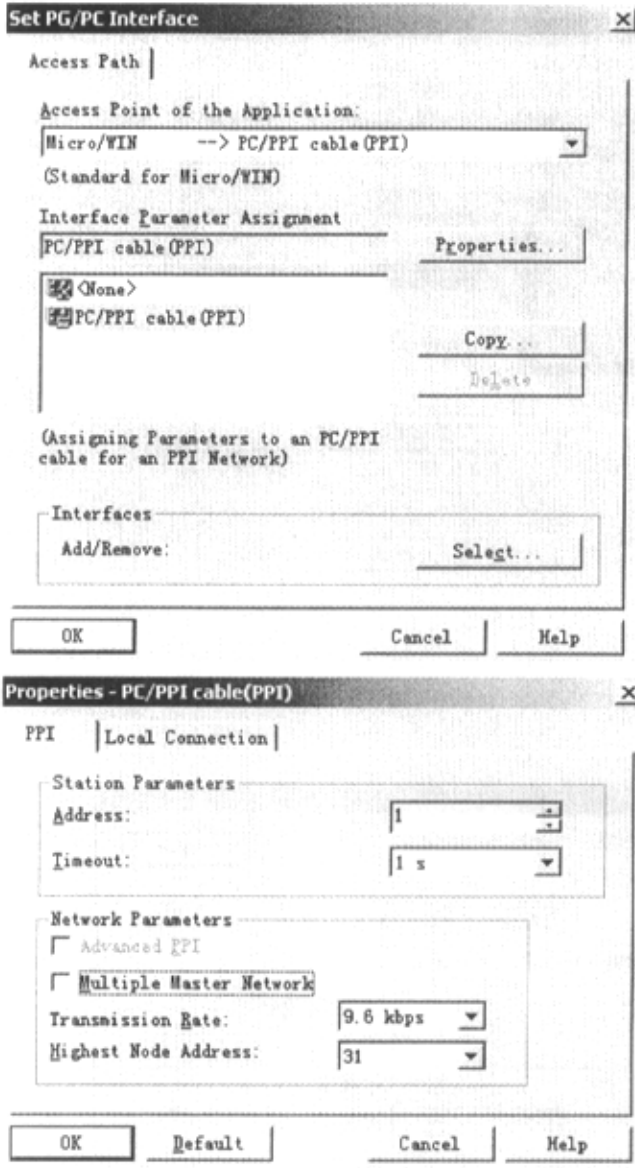


图 5.4

系统中，要求上位机能够直接启动和停止各台电机，可以设定电机的运行频率，对下位机进行监控，显示电机的运行速度和电机的运行状态，以及显示变频器的故障信息。

启动界面

开机之后显示的界面是启动界面，启动界面主要包括运行控制、转速控制和报警查询三个切换按钮。

运行控制模块

可以通过点击按钮分别实现启动和停止主钩电机、副钩电机、大车电机和小车电机；

同时也可以通过点击按钮实现主钩的上升和下降，副钩的上升和下降，大车右行和左行，小车的后行和前行，如图 5.5 所示。

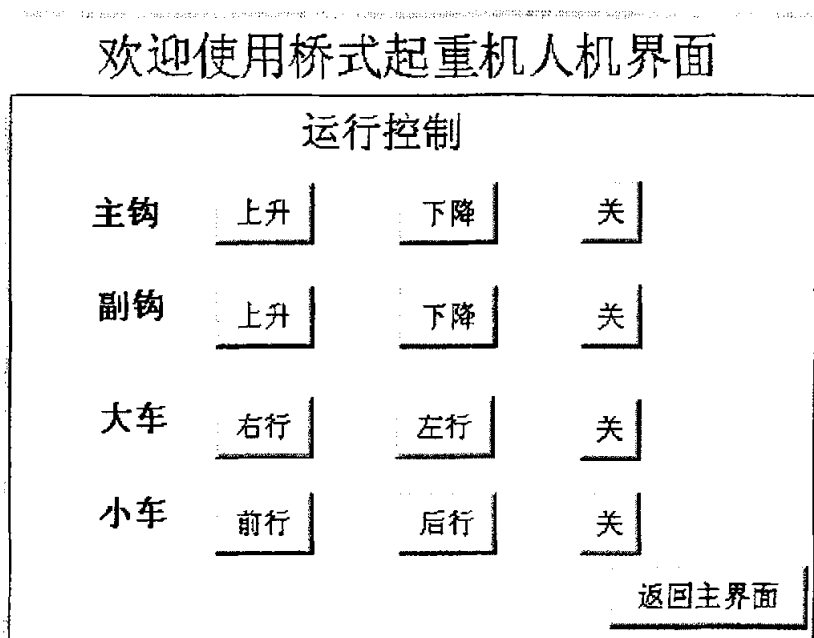


图 5.5

转速控制

通过设置主钩电机、副钩电机、大车电机和小车电机的运行频率。由 PLC 将该设定值转换成相应的模拟量给变频器，然后再由变频器将该模拟量进行处理并调制成相应频率的脉冲，来驱动电机。现场电机的转速经过传感器处理输入 PLC，由 PLC 进行相应的处理，将再界面中显示，如图 5.6 所示。

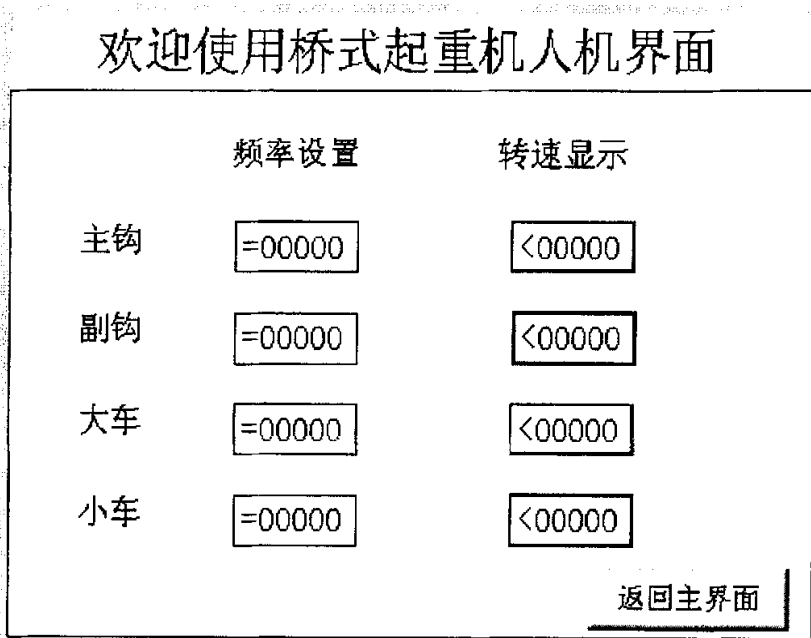


图 5.6

故障报警

在故障报警中，当主钩超重时，图中对应的蓝色会变成红色的；同样，当某变频器出现故障时，该变频器在图中对应的蓝色会变成红色的，并进行切断变频器的输入，实现故障报警，如图 5.7 所示。

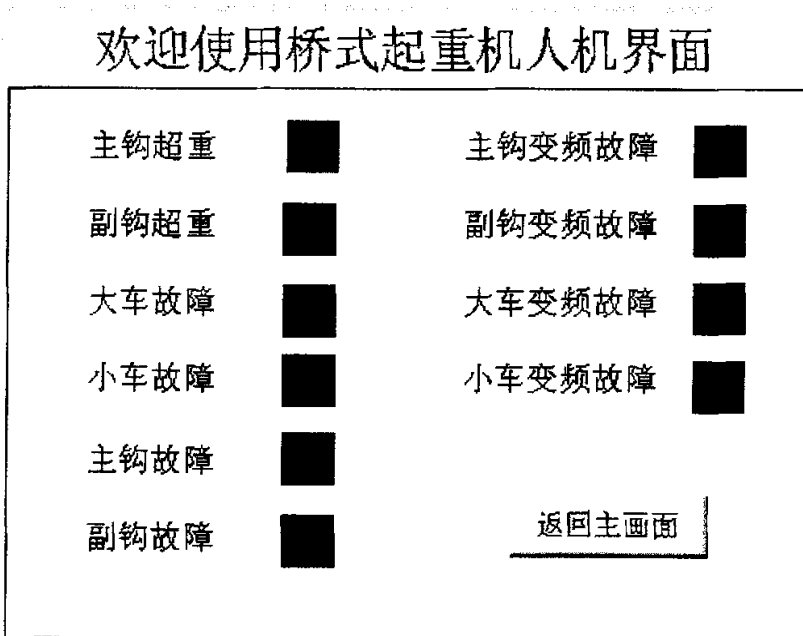


图 5.7

5.3 S7-200PLC 网络的通信协议及本系统采用的通信协议

5.3.1 S7-200PLC 网络的通信协议

西门子 S7-200 系列 PLC 是一种小型整体结构形式的 PLC, 内部集成了 PPI 接口为用户提供了强大的通信功能, 其 PPI 接口 (即编程口) 的物理结构特性为 RS-485, 根据不同的协议, 通过此接口与不同的设备进行通信或组成网络。

S7-200CPU 支持多种通信协议。根据所使用的 S7-200CPU, 网络可以支持一个或多个协议, 包括通用协议和公司专用协议。专用协议包括点到点 (point-to-point) 接口协议 (PPI)、多点 (Multi-Point) 接口协议 (MPI)、Profibus 协议、自由通信协议和 USS 协议。

PPI、MPI、Profibus 协议在 OSI 七层模式通信机构的基础上, 通过令牌环网实现, 令牌环网遵守欧洲标准 EN 501170 中的过程现场总线 (Profibus) 标准。

1. PPI 协议

PPI 通信协议是西门子专门为 S7~200 系列 PLC 开发的一个通信协议。主要应用于对 S7~200 的编程、S7~200 之间的通信以及 S7~200 与 HMI 产品的通信。可以通过 PC/PPI 电缆或两芯屏蔽双绞线进行联网。支持的波特率分别为 9.6KB/s、19.2KB/s 和 187.5KB/s。PPI 是一个主/从协议, 在这个协议中, S7~200 一般作为从站, 自己不能发送信息, 只有当主站, 如西门子编程器、TD200 等 HMI, 给从站才进行响应。

如果在用户程序中将 S7~200 设置为 PPI 主站模式, 则这个 S7~200CPU 在 RUN 模式下可以作为主站。一旦被设置为 PPI 主站模式, 就可以利用网络读和网络写指令来读写另外一个 S7~200 中的数据。PPI 通信协议是一个令牌传递协议, 对于一个从站可以响应多个主站的通信请求, PPI 协议没有限制, 但是在不加中继器的情况下, 网络中最多只能有 32 个主站, 包括编程器、HMI 产品。

2. MPI 协议

S7-200 可以通过接口连接到 MPI 网上, 主要应用于 S7-300/400CPU 与 S7-200 通信的网络中。应用 MPI 协议组成的网络, 通信支持的波特率为 19.2KB/s 或 187.5KB/s。通过此协议, 实现作为主站的 S7-300/400CPU 与 S7-200 的通信。在 MPI 网中, S7-200 作为从站, 从站之间不能通信, S7-300/400 作为主站, 当然主站也可以是编程器或 HMI 产品。在这里是 HMI 产品。

MPI 协议可以是主/主协议, 或主/从协议。设备是一个主站与 S7-200CPU 通信, 那么就建立主/从连接, 因为 S7-200CPU 是从站。

3. Profibus 协议

Profibus 协议通常用于实现分布式 I/O 设备 (远程式 I/O) 的高速通信。许多厂家生产类型众多的 Profibus 设备。这些设备包括从简单的输入或输出模块到电机控制器和可编程控制器。S7~200CPU 可以通过 EM277 Profibus~DP 扩展的方法连接到 Profibus~DP 协议支持的网络中。协议支持的波特率为 9600KB/s 到 12MB/s。

Profibus 网络通常有一个主站和几个 I/O 从站, 主站通过配置可以知道所连接的 I/O

从站, 的型号和地址。主站初始化网路时核对网路上的从站设备与配置的从站是否匹配。运行时主站可以像操作自己的 I/O 一样对从站进行操作, 即不断地把数据写到从站或从从站读取数据。当 DP 主站成功地配置一个从站时, 它就拥有了该从站, 如果在网络中和另外一个主站, 它只能很有限地访问属于第一个主站的从站数据。[46][53]

5.3.2 本系统采用的通信协议

本系统采用工业触摸屏监控起重机变频调速系统主要由上位机 (人机界面产品)、下位机 (PLC 控制系统), 经 MPI 多点接口卡与 PLC 连接, 组成一个小型的 MPI 网。S7-200 向人机界面产品提供全局数据服务, 其数据传输速率位 187.5kB/s。

人机界面产品 (HMI) 选用 Siemens 公司 TP170B 型触摸屏, 使用组态软件 Protool/pro 进行图形编程, 提供菜单方式操作和全中文显示, 用以对变频器的状态、各机构运行情况 & 故障报警等信息进行实时监控。

5.3.3 上位机和 PLC 之间的通信

硬件: 上位计算机 (PC) 通过 CP5611 卡与可编程控制器 (PLC) 的串行通信接口连接, 对 PLC 进行集中监视和管理。

软件实现上: PLC 和 PC 是通过变量来实现的, 变量是上位机与 PC 之间用于数据交换的最重要的通讯方式。变量有两种类型: 全局变量和局部变量。

全局变量是带有 PLC 链接的变量, 它在 PLC 上占据一个定义的存储器地址, 从上位机与 PLC 都可以对之进行读与写访问。它是通信的关键。

局部变量不连到 PLC 上, 他们仅在上位机上可用, 系统变量表如表 5.1。

在组态完的 S7-200 下设置变量, 每个变量有三个设置项: 变量名、数据类型、地址, 其中最重要的是变量地址, 它定义了此变量与 S7-200 中输出地址 Q0.0。以此方法, 将 S7-200 与 ProTool/Pro 之间的数据通信。然后在画面编辑器 (Graph editor) 中, 用基本元件或图形库中对象制作生产工艺流程监控画面, 并将变量与每个对象连接, 即相当于画面中各对象与现场设备相连, 从而可在屏幕上显示, 控制现场设备。

Symbol	Control	Address	Datatype	Initial value	comment
DC-PI	PLC_1	VW14	WORD	0	驱动大车电机频率设置
DC-YOU	PLC_1	Q3.1	BOOL	0	驱动大车右行输出点
DC-ZHUO	PLC_1	Q3.0	BOOL	0	驱动大车左行输出点
DCBP-BJ	PLC_1	I0.7	BOOL	0	大车变频器故障信号

DCGZ-BJ	PLC_1	I1.1	BOOL	0	大车故障信号
DC-TI	PLC_1	Q3.6	BOOL	0	闭合大车电机的继电器
DC-SX	PLC_1	VW12	WORD	0	大车电机速度输出值
FG-PI	PLC_1	VW0	WORD	0	驱动副钩电机频率设置
FG-SS	PLC_1	Q2.4	BOOL	0	驱动副钩上升输出点
FG-SX	PLC_1	VW2	WORD	0	副钩电机速度输出值
FG-TI	PLC_1	Q2.6	BOOL	0	闭合副钩电机的继电器
FG-XJ	PLC_1	Q2.5	BOOL	0	驱动副钩电机下降输出点
FGBP-BJ	PLC_1	I0.5	BOOL	0	副钩变频器故障信号
FGCZ-BJ	PLC_1	I0.3	BOOL	0	副钩超重报警信号
FGGZ-BJ	PLC_1	I0.3	BOOL	0	副钩故障信号
XC-HOU	PLC_1	Q3.5	BOOL	0	驱动小车后行输出点
XC-PI	PLC_1	VW4	WORD	0	驱动小车频率设置
XC-QI	PLC_1	Q3.4	BOOL	0	驱动小车电机前行输出点
XC-SX	PLC_1	VW6	WORD	0	驱动小车电机速度输出值
XC-TI	PLC_1	Q3.6	BOOL	0	闭合小车电机的继电器
XCBP-BJ	PLC_1	Q0.6	BOOL	0	小车变频器故障信号
XCGZ-BJ	PLC_1	I1.3	BOOL	0	小车故障信号
ZG-PI	PLC_1	VW8	WORD	0	驱动主钩电机频率设置
ZG-SS	PLC_1	Q2.1	BOOL	0	驱动主钩电机上

					升输出点
ZG-SX	PLC_1	VW10	WORD	0	驱动主钩电机速度输出值
ZG-TI	PLC_1	Q2.2	BOOL	0	驱动主钩电机继电器闭合
ZG-XJ	PLC_1	Q2.0	BOOL	0	驱动主钩电机下降输出点
ZGBP-BJ	PLC_1	I0.4	BOOL	0	主钩变频器故障信号
ZGCZ-BJ	PLC_1	Q0.2	BOOL	0	主钩超重报警信号
ZGGZ-BJ	PLC_1	Q1.0	BOOL	0	主钩故障报警信号

表 5.1

5.4 PLC 程序设计

5.4.1 PLC 编程软件概述

S7-200 的编程语言是 STEP 7-micro/win32，它是用于 S7-200 系列 PLC 进行编程、调试的全新软件，它是在国际标准 IEC1131—3 的基础上建立的，可以用 LAD、FBD 和 STL 来编程。这是一种可以运行于通用微机中，在 WINDOWS 环境下进行编程的语言。将它通过计算机的串口和一根 PC/MPI 转接电缆与 PLC 的 MPI 口相连，即可进行相互间的通信。

通过 STEP-7micro/win32 编程软件，不仅可以非常方便的使用梯形图和语句表等形式进行离线编程，经过编译后通过转接电缆直接下载入 PLC 的内存中执行，而且在调试运行时，还可以在线监视程序中各个输入输出或状态点的通断状况，甚至进行在线修改程序中的变量，给调试工作也带来极大的方便。^[57]

STEP 7-micro/win32 软件的一个特点是调试功能很强大，不仅能在线读取数据，而且能在线修改过程数据，对于调试大型复杂控制程序非常有效。STEP 7-micro/win32 软件还附带一些控制程序模块，如 PID 调节模块，这些模块可以从主控制程序中直接调用，以便实现不同的功能。STEP 7-micro/win32 软件工具包采用模块化的程序设计方法，它采用文件块的形式管理用户编写的程序及程序运行所需的数据。该工具软件包为 S7-200CPU 与其它系统部件（如触摸屏、变频器）的使用提供了便利。

5.4.2 程序设计

在本系统中，PLC 程序设计的主要任务是接受外部开关信号（按钮、继电器）的输入，判断当前的系统状态以及输出信号去控制接触器、继电器等器件，以完成相应的控制任务。除此之外，另一个任务就是接受上位机的控制命令，以进行自动采样。PLC 的软件设计部

分我们采用模块化的方法, PLC 程序设计共有四个模块:

按钮处理模块

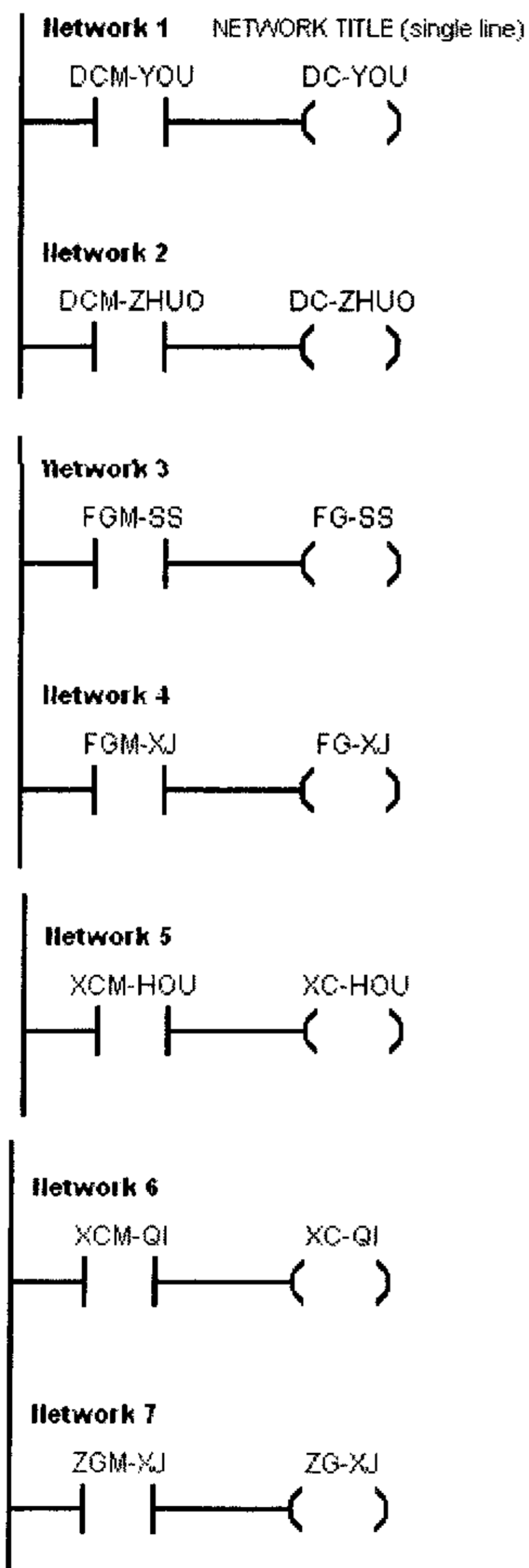
通信模块

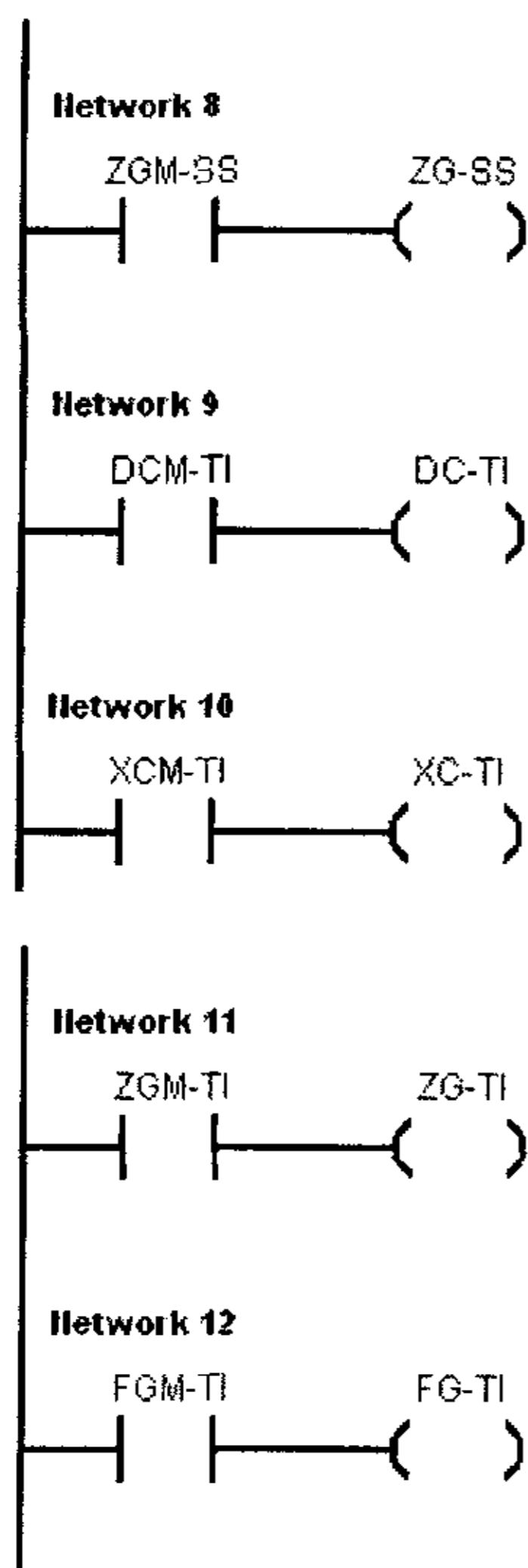
PID 控制模块

故障报警模块

其中按钮模块主要处理各电机和电磁阀的启停控制。

按钮处理模块的梯形图





通信模块

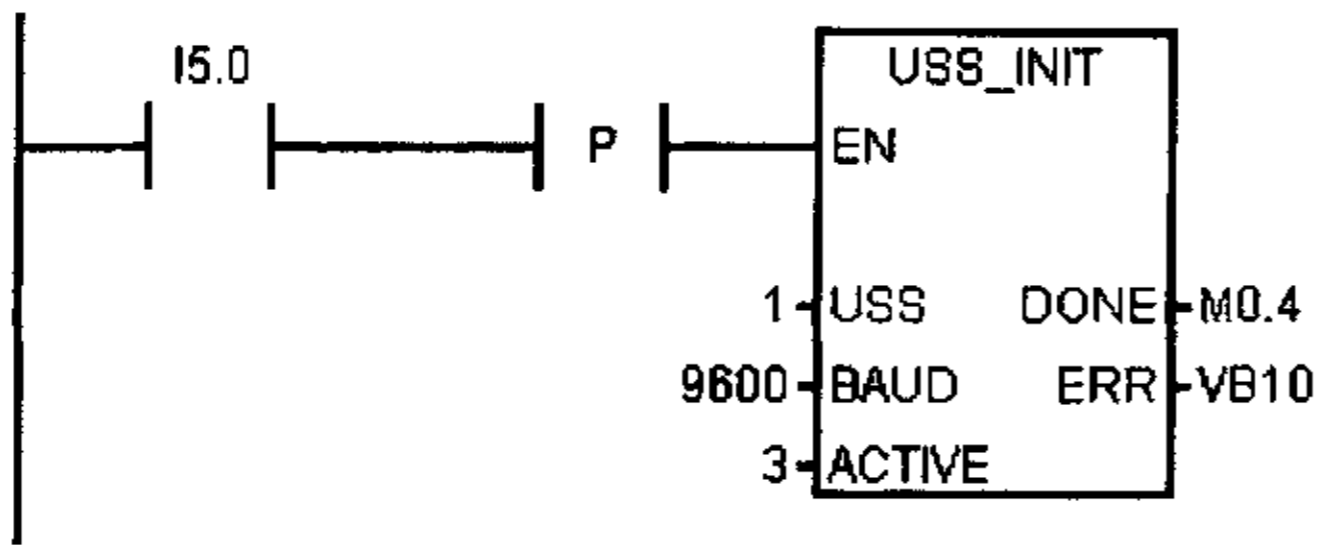
由于我们用 MicroMaster 变频器对起重机电机进行调速，所以本系统中对起重机的调速，实际上就是对其 MicroMaster 变频器的控制。STEP 7-Micro/Win32 软件工具包提供了 USS 通信协议，从减少软件的工作量和提高可靠性出发，我们采用 USS 协议来完成 PLC 与变频器的通信。与变频器的通信，对 PLC 的 CPU 扫描是异步的，完成一个变频其通信事务通常需要几次 CPU 扫描。这取决于连续的变频器数目，波特率，以及 CPU 的扫描时间。

USS 通信指令用于 PLC 与变频器等驱动设备的通信及控制。将通信 USS 通信指令置于用户程序中，经编译后自动地将一个或多个子程序和 3 个中断程序添加到用户程序中。另外需要将一个 V 存储地址分配给 USS 全局变量表的第一个存储单元，从这个地址开始，以后连续的 400 个字节的 V 存储器将被 USS 指令使用，不能用作他用。当使用 USS 指令进行通信是，只能使用通信口 0，而且 0 口不能用作它用，包括与编程设备的通信或自由通信。

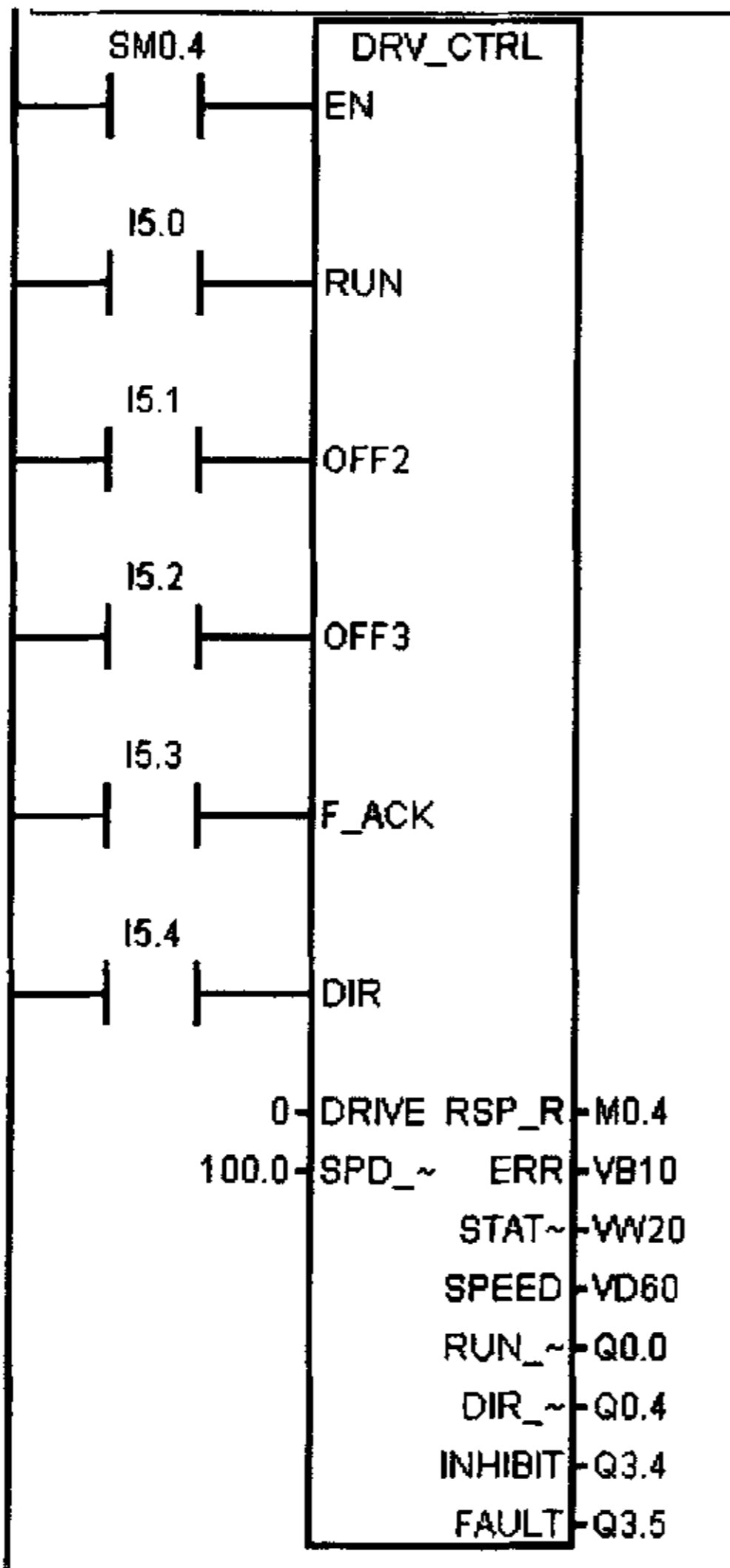
使用 USS 协议的编程顺序如下：

通过调用 USS_INIT 指令以改变 USS 通信参数，如启用或禁止 USS 协议、设定波特率，指示哪些地址的变频器是激活的（即可与之通信）。标志为激活的任何变频器都自动地在

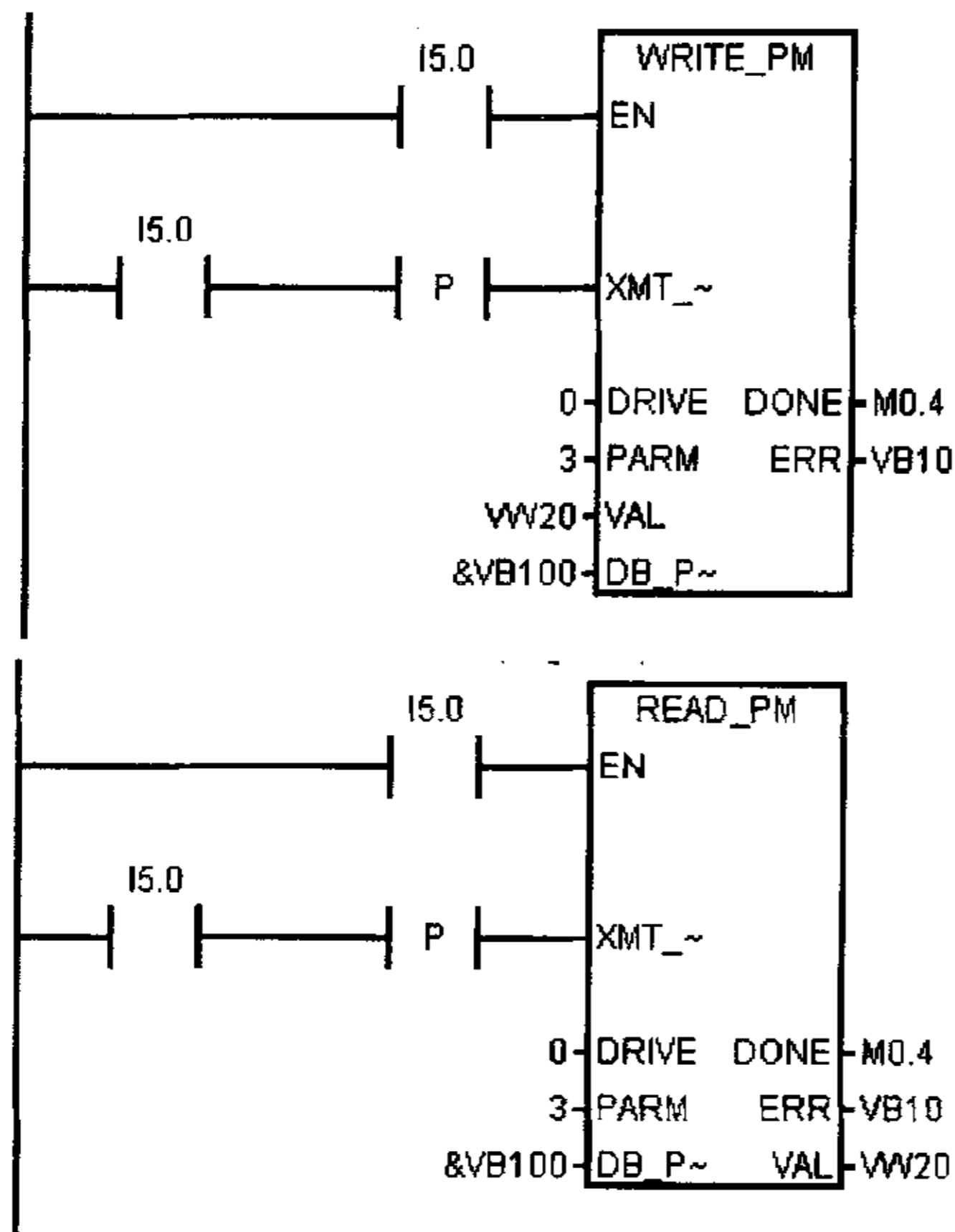
后台进行轮询控制，汇集状态，并防止变频器的串行链路超时。



(2) 把 V 存储器地址分配给 USS 协议。



(3) 通过调用 DRV_CTRL 指令来控制指定的变频器，如启停，控制方向，设定速度，查询变频器返回的状态字等。

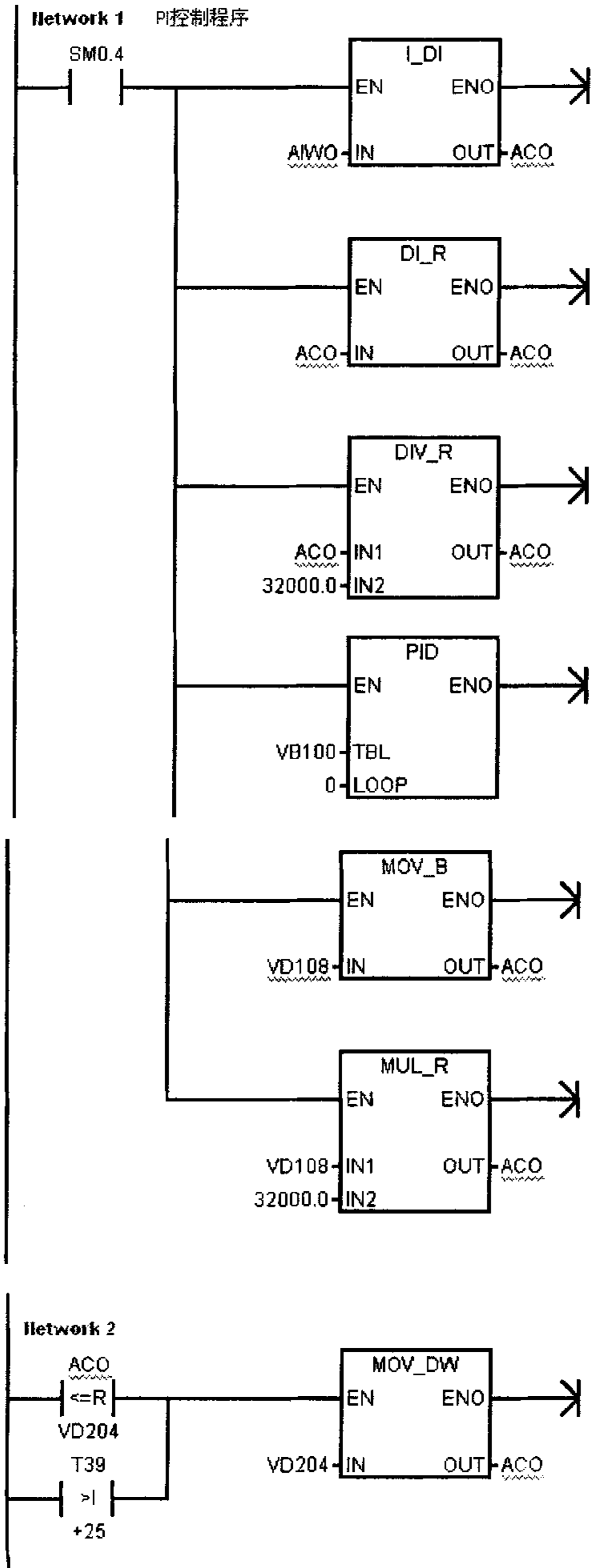


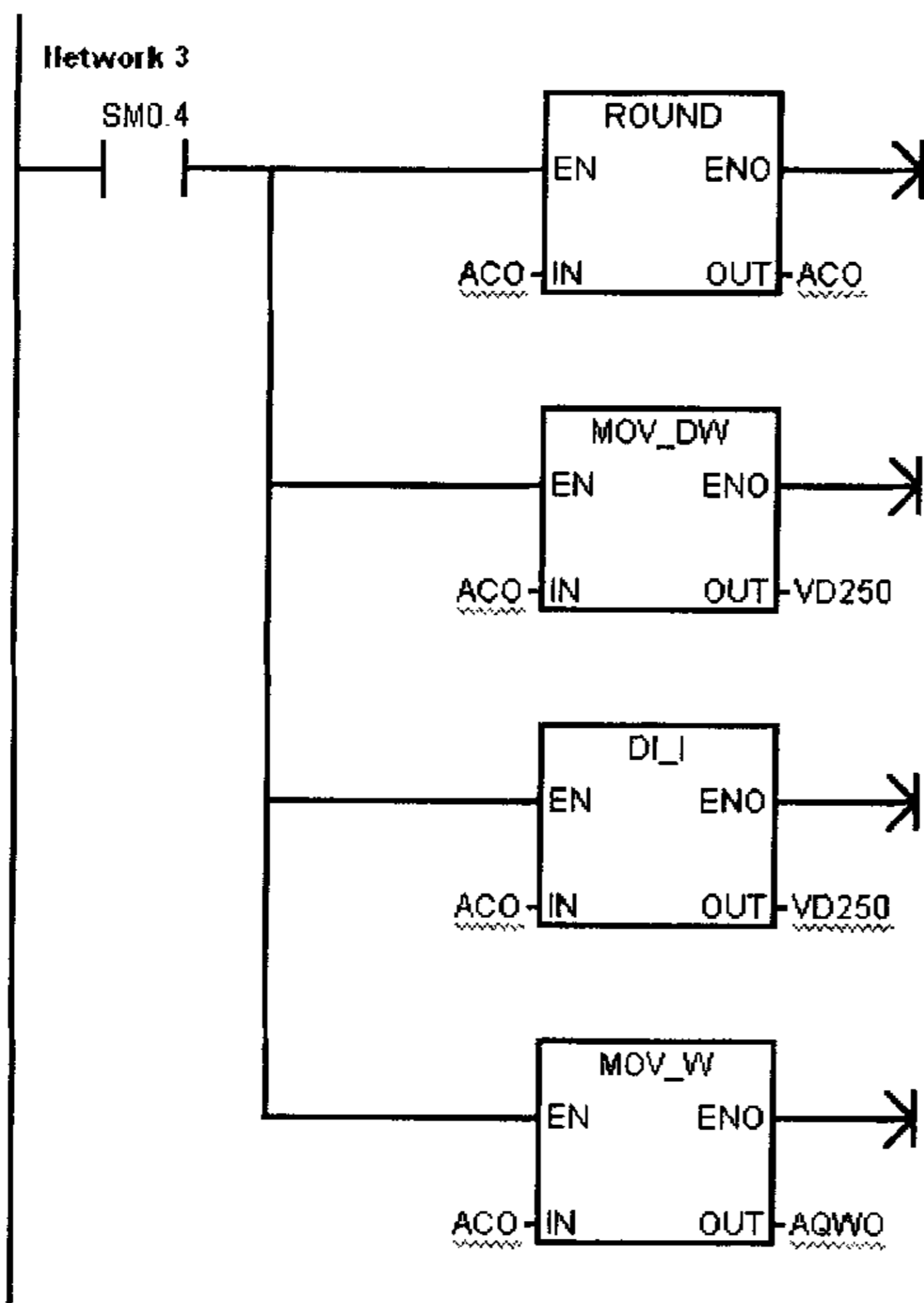
(4) 同时调用 READ_PM 或 WRITE_PM 指令来读取或写变频器参数，以便于设置变频器参数，程序中所用的波特率和地址相匹配。

采用上述方法，我们可以很好地控制网带的速度并查询变频器的状态，把诊断信息反馈给 PLC。

PID 控制模块

桥式起重机主副起升机构速度的控制，是一现很重要的技术指标，本系统由通过旋转编码器测得电机速度，由数模转换卡转换成数字量，传递给变频器，与设定速度进行比较，采用常规的 PID 算法在控制效果上就能够达到较为理想的结果，所以，本系统起升机构控制方案为常规的数字 PID 算法并结合 PLC 中的 PID 控制模块来控制。





为了实时通知操作员故障消息，以便尽快地排除故障，确保整个系统正常运行，本控制系统具有良好的故障报警措施。所以在 PLC 程序中始终对相应的传感器输入信号进行扫描，一旦有诸如变频器故障，超重等故障，应马上切断该设备，并启动蜂鸣器，进行报警。考虑到工业现场可能的干扰，1) 我们在程序中采用延迟报警，即只有当报警信号持续一定的时间（一般为几十毫秒到几百毫秒），才认为有故障。2) 在启动设备时，逐步开启报警；而在停止设备时，逐步阻塞报警。上述两个措施可有效的防止误报警。报警处理由画面元素和 PLC 变量直接对应，无需编程。

5.5 系统抗干扰措施

可编程控制器的主要应用场合是工业现场，工作环境中各种干扰对系统设备的正常运行存在着严重的影响。所以在本系统中也不例外，有必要考虑 PLC 的抗干扰措施。

抗干扰的主要措施有：

- (1) 输入信号电缆、输出信号电缆和电力电缆都要分开敷设，不能扎在一起。
- (2) 必要时需选用带有屏蔽层的输入和输出信号电缆，并注意一端接地。
- (3) 多芯电缆中的备用芯线也要一端接地，一则扩大屏蔽作用，二则抑制芯线间的信号串扰及外部干扰。
- (4) 为避免干扰，同一电平等级的信号才能用一条多芯电缆传输。所以，对数字信

号和模拟信号，在任何情况下，都必须分开电缆进行传输。低电平信号线应与其它信号线分开。尽量缩短模拟量 I / O 信号线的长度，并采用双芯屏蔽线作为信号线。

(5) PLC 电柜应有独立的接地线，接地电阻小于 10 欧姆。

(6) 引至 PLC 柜的电缆要尽量远离那些会产生电磁干扰的装置。

(7) 一般要将 PLC 装于专门的电柜中，要注意 PLC 四周留有 50 mm 以上的净空间，保证良好的通风环境，在设备现场，要充分考虑周围环境的影响，尽量不要将 PLC 安装在多尘、有油烟、有导电灰尘、有腐蚀性气体、振动、热源或潮湿的地方。

第六章 全文总结及其展望

6.1 全文总结

本文主要为桥式起重机设计一套变频调速控制系统，同时实现起重机电机速度的可调节，以节约能源和适应生产的需要。

根据要求，此系统要能达到现场的运行状况、运行数据都可以在司机控制室掌握，用户在控制室可以通过人机界面来设置变频器的运行频率、启动和停止电机，并且变频器的故障信息可以在人机界面上反映出来，以用来提示用户。采用变频器实现起重机电机的调速运行，结合 PLC 的强大功能、可靠性以及基于组态软件所开发出来的良好人机界面和通信能力，实现在司机控制室对电机的远程控制运行参数调节。上位机选择触摸屏主要完成系统的组态、监控、参数设置和开关量置位。下位机采用 PLC 来实现各电机的启、停、电磁阀的开关，数值的转换、速度的检测。

总结本文的主要工作有以下几点：

1.根据桥式起重机的运行特点，桥式起重机控制系统采用工业触摸屏监控起重机变频调速系统，该系统主要由上位机（工业触摸屏系统）、下位机（PLC 控制系统）、变频调速系统等组成。

2.组态软件作为用户可定制功能的软件平台工具，利用其良好的人机界面和通信能力，在 PC 机上可开发出友好人机界面，下载至工业触摸屏中，使工作人员可以实现变频器的参数设置、电机的启动和停止同时可实现系统故障报警。

3.PLC 系统采用 SIEMENS 公司产品，能控制起重机大车、小车的运行方向和速度换档；吊钩的升、降方向及速度换档，同时能检测各个电机故障现象并送往工业触摸屏进行显示，减小了传统的继电—接触式控制系统的中间环节。减少了硬件和控制线，极大提高了系统的稳定性，可靠性。

4.为了有效的防止重物下滑，在桥式起重机起升机构各加上一套由旋转编码器、PG 数模转换和 PLC 相结合的闭环系统，使主副吊钩拖动更加稳定、可靠。实验结果表明，采用该控制系统，使桥式起重机工作可靠，使用方便，同时具有动态显示的功能，节能效果好。

本文重点解决了系统中的监控画面、PLC 程序设计的问题以及上下位机之间的通信问题。同时根据 STEP-7 MICRO/WIN32 软件工具包的结构化程序设计特点，大量采用代码重用的方法，大大减少了系统的开发和维护，同时利用西门子公司公司的 Protool/pro 组态软件设计良好的人机界面以下载至触摸屏，以及实现其与 PLC 的通信。

6.2 研究展望

本文在桥式起重机控制系统研究中，采用变频器和可编程序控制器相结合的方法，对桥式起重机变频调速进行了一些研究，虽然取得了一定的成果，但同时还存在以下几点不足：

1.本文主要是单个桥式起重机进行研究，针对桥式起重机控制系统多采用传统的分散、

独立工作方式，导致操作和调度、管理之间信息不灵，货物装卸时间长，设备利用率低等问题，还没有考虑到基于现场总线技术实现桥式起重机控制系统的网络化智能化的设计思想，以形成从驾驶室到电气房、监控室的智能化、网络化。

2. 控制系统使用的电子电气元件较多、电路也较复杂，成本较高，易造成线路之间的相互干扰，在一定程度上影响系统的控制精度。由于时间关系对本课题的研究还不够完善，对起重机的故障诊断，遥控领域没有过多涉及，起重机同时应具有一定的自诊断功能。

3. 控制算法上的随意性较大，具体控制算法的优点在本课题的应用上还不够成熟，因此控制算法上存在这较大的随意性，有待于进一步的研究。同时也应做到对于不同类型的起重机，系统控制参数的设置也应相应变化。

未来桥式起重机将向着自动化运转、数字化控制、采用自动定位和识别技术、以及先进的遥控和通信技术、先进的网络系统，机械故障诊断系统、虚拟现实技术等方向发展，最终实现桥式起重机的高效化、实用化。因此，采用全变频调速系统，以改善桥式起重机的整体性能，对推动起重机械电气控制与调速系统的更新换代，具有非常现实的意义。通过本课题的研究开发工作，以作者的观点提出以下几点希望：

1. 持续关注相关的电力电子、变频器、PLC 等领域的新技术、新发展，选择更先进的、使用方便、工作可靠，并且性价比更高的元器件，以提高系统的硬件设计水平，促进整机性能的提高，降低成本。

2. 网络通讯已是当今世界的潮流，研究开发具有数字通信功能的桥式起重机控制系统已是大势所趋，所以在今后的研究和开发过程中应加强研究桥式起重机的通信功能，从而可以建立企业内部局域网，通过这个网络可以对桥式起重机进行远程监控、维护。通过远程数据交换，还可以实现远程故障诊断。

参考文献

- [1] 李永乐. 交流电机数字控制系统. 机械工业出版社, 2002. 5 72-168
- Boldt, Allen E. Conversion of a d-c constant potential crane to adjustable frequency a-c control. *Iron and Steel Engineer*, v75, n5, May, 1998, p51-53
- [2] Terashima, kazuhiko. Sinusoidal polynomial feed forward control input for high-speed starting control with damping to reduce residual vibration and its application to crane system. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, transaction of the Japan Society of mechanical Engineers, Part C*, v69, n4, April, 2003, p898-905
- [3] 胡崇岳. 现代交流调速技术. 机械工业出版社 1999: 29-96
- [4] 陈贤明, 桥式起重机新型变频调速系统, *起重运输机械*, 1998, (2): 9-11
- [5] 张燕宾. SPWM 变频器调速应用技术. 北京: 机械工业出版社, 1997: 12-33
- [6] jean Pierre Thomesse. *The Field Bus IFAC Intelligent Components and Instruments For Control Application [M]. Amnecy, France, 1997;32-35*
- [7] D. Lorenz, S. M. Yang. AC induction servo sizing for motion control Applications via loss minimizing real-time flux control. in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1989:612-616.*
- [8] 上山直彦. 现代交流调速, 吴铁坚等译. 北京: 水利电力出版社, 1989: 22-34
- [9] 鲍燕传. 变频器的故障诊断与维护技术. *机床电器*, 1990 年, 第 6 期: 46-49
- [10] Kouki Matsuse, Fellow, IEEE, Shotaro Taniguchi, Tatsuya Yoshizumi and kazushige Namiki A Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motor Operating at High Efficiency Taking Core loss into Account:14-16
- [11] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(第二版). 北京: 机械工业出版社, 1997: 189-201
- [12] 周绍英, 储方杰. 交流调速系统. 机械工业出版社, 1996, 11: 24-162
- [13] 苏彦明, 李宏. 交流调速控制系统的控制策略. 机械工业出版社, 1998, 6: 34-87
- [14] Paul, A. K. AC operated EDT crane control with variable voltage variable frequency drive *Proceeding of the IEEE international Conference on Power Electronics, Drives & Energy Systems for industrial Growth*, v2, 1996, p857-861
- [15] Anon. Frequency control of crane hoist speed. *steel Times international*, v27, n5, july, 2003, P23
- [16] Feldman, Yu. I. The state of and outlook for the development of automated electric drives with frequency converters for crane and ship lifting machines. *Elektronika*, n9, Sept, 1995, p2-5
- [17] Chin, c-m. Dynamics and control of ship-mounted cranes. *JVC/Journal of Vibration and control*, v7, n6, September, 2001, p891-904
- [18] Podobedov, E. G; Barkov, v. s. Automatic electric drives with frequency

converters for ship abroad and hoisting mechanisms. Elektroteknika, n8, 1993

- [19] 巩建平, 张学. 现代可编程序控制器原理与应用. 北京: 科学出版社, 1999 22-25
- [20] 张小坤. 可编程控制器原理及应用. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 13-18
- [21] 朱少祥等. 可编程控制器 (PC) 原理及应用. 上海交通大学出版社, 1998
- [22] 崔亚军. 可编程控制器原理及程序设计. 北京: 电子工业出版社, 2-50
- [23] 陈雨春, 李景学. 可编程控制器应用软件开发方法与技巧. 北京: 电子工业出版社, 1992: 5-16, 34-65
- [24] 赵昌颖等. 电力拖动基础. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1991: 58-69
- [25] 韩安荣. 通用变频器及应用. 北京: 机械工业出版社, 2000: 45-48
- [26] 佟纯厚. 近代交流调速. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 1-4
- [27] 天津电气传动设计院研究所编. 电气传动自动化技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1992: 5-10, 39-41
- [28] Siemens SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control DA 65.10, 1998:23-26
- [29] Implementation of A Speed Controlled Brushless DC Drive. Texas Instrument.
- [30] 赵洪恕, 王忠石, 简维新. PLC 控制交流调速控制系统在电梯中的应用. 基础自动化. 2002 年 2 月 第七期 : 24-27
- [31] A. Harrison .predicting the Tracking Characteristics of Steel Cord Belts Bulk Solid Handling February 1990 Num 1:63-66
- [32] 许正军, 曾献辉, 陈瑞琦. 变频器的 PC 控制. 电气自动化, 2000 年 3 月: 20-24
- [33] 赵庆林. 用变频调速器实现过程的自动控制. 石油化工自动化, 2003. 2 34-35
- [34] 过玉卿. 起重运输机械. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992. 11
- [35] 张质文等. 起重机设计手册. 北京: 中国铁道出版社, 2001
- [36] 陈宇. 可编程控制器基础及编程技巧. 广州: 华南理工大学出版社, 1999 年 2 月
- [37] 马国华. 监控组态软件及其应用. 清华大学出版社. 2000 年 8 月: 1-16, 20-34
- [38] 陶维真. 变频调速起重机的特色. 起重运输机械. 1999, (4) :1-3
- [39] 马寅. 起重机的变频调速. 起重运输机械, 2001, (12): 21-23
- [40] 张三豹. 变频调速起重机中的 PLC. 起重运输机械, 2001, (12): 27-29
- [41] 王梅生. 变频调速在起重机中的应用. 起重运输机械, 1999, (2): 6-10
- [42] 满永奎. 通用变频器及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [43] 许大中. 交流电动机调速理论. 杭州: 浙江大学出版社, 1991
- [44] 陈 坚. 交流电机数字模型及调速系统. 北京: 国防工业出版社, 1989
- [45] 王永华. 现代电气控制及 PLC 应用技术. 北京: 北京航空航天大学出版社 2003. 9
- [46] 王静 . PLC 在食品杀菌控制系统中的应用 . 工业控制计算机 2001 (14): 58-62
- [47] 韦巍. 智能控制技术. 北京: 机械工业出版社, 1999. 5
- [48] 王继东. 变频调速在起重机中的应用. 建筑机械 , 2000 (6): 21-24

- [49] SIEMENS MICROMASTER 操作手册 (电子版): 54-58
- [50] SIEMENS. 标准驱动产品通讯手册 (电子版): 2-17
- [51] Germany Profibus Interface Center/lab. Manfred Pop The Rapid Way to PROFIBUS-DP[M], 1997:167-169
- [52] S7-200 Module Specifications:1-18, 22-24
- [53] SIEMENS 公司. SIMATIC PROFIBUS:32-66
- [54] SIEMENS 公司. 自动控制系统的工业通讯网络 (电子版): 40-80
- [55] SIEMENS 公司. STEP-7micro/win32 使用手册 (电子版)
- [56] 李伟. 起重机工业触摸屏监控变频无级调速系统. 电工技术, 2003 年 10 期
- [57] SIEMENS 公司. SIMATIC protocol/pro 6.0 使用手册. 2002. 08
- [58] SIEMENS 公司. SIMATIC S7-200 可编程序控制器系统手册. 2002. 10
- [59] Kimiaghalam. b, Homaifar, A. An application of model predictive control for a shipboard crane Proceeding of the American Control Conference , v 2, 2001, p929-934
- [60] Fang. Y, Zergeroglu. E, Nonlinear coupling control laws for an overhead crane system . IEEE Conference on Control Application - Proceeding , 2001, p639-644
- [61] Nowacki, Zbigniew, Owczarz, On the robustness of fuzzy control of an overhead crane . IEEE international Symposium on industrial Electronics , v1, 1996, p433-437
- [62] Wans, Jiaming. Real world Implementation of Fuzzy Anti-swing control A Behavior-based intelligent crane system . IEEE international conference on intelligent robots and systems, v2, 2003, p1992-1197

致谢

在论文完稿之际，谨向教导和帮助我的师长、朋友、同学，以及默默支持和鼓励我的亲人们致以最诚挚的谢意和最衷心的祝福！

感谢导师范勤教授！在我三年的求学生涯中，导师以其严谨、求实的治学态度、高度的责任心和敬业精神，给予我极大的帮助与鼓励；导师踏实认真、开拓创新的治学作风将使我终生受益；导师给我提供了良好的学习环境、以及社会实践的机会。本论文从选题到完成无不浸透着恩师的心血。在此期间，老师多次询问我的课题进度，提醒我该注意的问题，并在我课题遇到困难时，给予了我耐心的指导和帮助。借此论文的完成之际，谨向我的恩师表达我衷心的感谢和崇高的敬意！感谢恩师不厌其烦的教诲和一丝不苟的严谨作风，在学习、生活和以后的工作中给我树立了为学为人的榜样。并希望在今后的学习和工作中继续得到导师的教导。

感谢武汉科技大学机电研究所的各位老师在这三年学习生涯中给予我的关心和帮助。同时也感谢王华林、程灵芝、肖蕴章、冯铮宇、桂慧等物流工程研究生工作室诸位同学给予我各方面的支持与帮助。也感谢我在武汉求学期间的结识好友，给予我的帮助、鼓励和支持，在此一并感谢。

最后，我要深深感谢我的父母和兄弟，多年来，正是由于他们对我学业上的支持、理解和鼓励，对我一如既往的殷切期望和无私奉献，给予了我无尽的关爱和动力，才使得我得以顺利完成学业！

刘小庆 谨致

公元 2005 年 3 月 17 日

于武汉科技大学

攻读硕士学位期间发表的论文

《基于 PLC 控制的变频调速在桥式起重机中的应用》 刘小庆, 范勤
机械 2004.8