



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

毕业设计

开放式机电传动控制实验平台设计与制作

Design and Manufacture of Open Electromechanical
Transmission Control Experiment Platform

姓 名 崔健

学 院 机械工程学院

专 业 机械电子工程

指导教师 庞党锋

职 称 实验师

完成时间 2020.5.22

天津中德应用技术大学
本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

学位论文指导教师签名：

年 月 日

摘 要

随着科学技术的不断进步,机电传动控制技术在我国也有了蓬勃的发展和广泛的应用。社会对这方面的技术人才需求越来越大,高层次的机电一体化人才短缺,机电一体化技术在一定程度上直接影响一个国家的整个制造业的实力。机电技术对身为学生的我们来说是非常重要的,作为一门融合多学科的技术,不仅有很强的理论研究还要有实操的环节,先进而适用的配套教学实验设备则必不可少。

依托我校原有的机电传动实验平台,对其先进行设备结构和电气原理分析,针对其不足之处,进行重新优化设计。新设备可以让学生更加灵活方便的操作设备进行实训,还可以自主添加其它模块件对设备进行扩充。平台的电气控制硬件部分包括变频器、伺服驱动器、伺服电机、倍福 CX9020 控制器、西门子 PLC 等,学习这些设备的原理和使用方法。其次,了解原平台的电气原理并绘制电气原理图。通过倍福公司的 TwinCAT 软件对 CX9020 控制器模块进行调试,并编写程序。再通过 STEP 7 软件对相应的部分进行逻辑控制。最后,完成对新的机电传动控制平台的装配、接线、调试。

通过实际的教学验证开放式试验台能够根据教学目标稳定可靠的运行,具有便捷性、直观性、易于上手等优点,实验平台由很多单一的电子器件组成,可以完成多种实验,极大的丰富了我们的实验范围,创造了从理论到实际的过程。为本课程的实践性做出了一定的贡献。

关键词: 机电传动平台; 优化设计; 电气控制; CX9020 控制器; TwinCAT 软件

ABSTRACT

With the continuous progress of science and technology, electromechanical transmission control technology has also developed vigorously and widely used in China. The society has a growing demand for technical talents in this area. There is a shortage of high-level mechatronics talents. Mechatronics technology directly affects the strength of a country's entire manufacturing industry to a certain extent. Electromechanical technology is very important to us as students. As a multidisciplinary technology, we not only have strong theoretical research but also practical links, and advanced and suitable supporting teaching and experimental equipment is essential. less.

Relying on the original electromechanical transmission experiment platform of our school, we first analyze the equipment structure and electrical principle, and re-optimize the design for its deficiencies. The new equipment allows students to operate the equipment more flexibly and conveniently for practical training, and can also add other modules to expand the equipment. The electrical control hardware of the platform includes inverters, servo drives, servo motors, Beckhoff CX9020 controllers, Siemens PLCs, etc. Learn the principles and usage of these devices. Second, understand the electrical principles of the original platform and draw electrical schematics. Through the TwinCAT software of Beckhoff, debug the CX9020 controller module and write the program. Then use STEP 7 software to control the corresponding parts logically. Finally, the assembly, wiring and commissioning of the new electromechanical drive control platform were completed.

Through actual teaching, it is verified that the open test bench can operate stably and reliably according to the teaching objectives, and it has the advantages of convenience, intuitiveness, and easy to use. The experimental platform is composed of many single electronic devices, which can complete a variety of experiments, which is extremely rich. The scope of experiment was created, from the theoretical to the practical process. It made a certain contribution to the practicality of this course.

Key words: Electromechanical transmission platform; Optimization design; Electrical control; CX9020 controller; TwinCAT software

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题的目的和意义	1
1.2 机电控制的发展和现状	2
1.3 课题主要的内容和任务	3
第二章 逻辑控制技术的选用	4
2.1 可编程控制器 PLC	4
2.2 现场总线	6
2.3 倍福控制器	7
第三章 机电传动控制实验平台电气控制部分	10
3.1LS 伺服驱动器	10
3.2 伺服电机	12
3.3LS 变频器	15
3.4 威纶触摸屏	17
3.5 系统电气控制部分	18
第四章 实验平台程序设计	25
4.1TwinCAT 软件	25
4.2TwinCAT 参数配置	25
4.3 实验平台控制流程图	26
第五章 实验验证与分析	27
5.1 使用 TwinCAT2 令交流电机实现逻辑控制	28
5.2 交流电机变频调速控制	31
5.3TwinCAT 控制伺服驱动 NC PTP	33
结论	39
参考文献	40
附录	42
致谢	46

第一章 绪论

1.1 课题的目的和意义

《机电传动控制》是本科教育中机械电子工程专业的必修课程,是机电结合的纽带。课程目的是要让学生对电动机、变频器、伺服系统等有感性的认识,了解典型产品在工业中的应用^[2]。

一般来讲,实践教学往往有以下几种方法解决:一是通过采购相应的教具产品,但厂商和教学实践相脱节。二是通过虚拟仿真的方式完成,该方式使用简单的原理性实验和虚拟仿真相结合,但学生的动手能力得不到锻炼,达不到提高综合素质的目的^[3]。

本课题的目的是为了提高学院实验室现有机电传动控制实验平台的可扩展性和实验效果,设计制作一套开放式实验平台。本校原有的实验平台,首先对于学生的操作并不是很方便,会比较碍事。其次如果想去了解整个设备的接线及控制关系时,我们只能到设备的后方去观察,但前方的一些电气元件的接线又会看不见,在实际的课程中给我们带来了很大的麻烦。还有就是功能比较固定,操作不灵活,如果我们想加入其它的电气元件,会没有地方放置。不能自主的去接线和摆放电气元件,这样就缺乏了实战性。

所以研制了一个开放式的实验平台,让学生的操作更加直观,方便检修,并增加灵活性,扩展其功能。

本课题研发的实验设备应用于实验教学中,将有以下重要意义:

(1) 让学生可以很好的结合过去所学的其它知识,开放性强,实验的内容更加贴近实际,还可以自主添加其它的电气元件来实现其它功能,可以说覆盖面很广。

(2) 让实验更具有实际意义,让学生更能体现理论结合实际的过程。实验的过程更加能贴近实际的产品装调过程,让实践充满实战性。

(3) 设备的开放性很强,这可以加强学生的动手能力,同时还可以让学生根据实验目标,从元器件的选择、电路的设计、到安装调试,都可以很好的进行,还可以动手接线,有利于加深学生的感性认识。

(4) 增强学生的创新设计和综合应用能力,例如编写 PLC 程序使电机可以实现逻辑控制、变频调速系统,绘制人机交互界面,描绘机电控制系统的电气接线原理和控制原理等。

1.2 机电控制的发展和现状

1.2.1 机电控制的发展

在机电控制领域的许多技术和产品表明，机械、电子和信息处理之间的集成越来越紧密。这种集成位于组件（硬件）和信息驱动功能（软件）之间，从而形成了称为机电系统的集成系统。他们的开发涉及到基本机械结构，传感器和执行器的应用，在信息处理和整体控制之间找到最佳平衡，这种协同作用可带来创新的解决方案。

因此，机电一体化是一个跨学科领域，其中以下学科共同发挥了作用，如图 1-1 所示：（1）机械系统（机械元件，机器，精密机械）；（2）电子系统（微电子，电力电子，传感器和执行器技术）；（3）信息技术（系统理论，控制与自动化，软件工程，人工智能）^[4]。

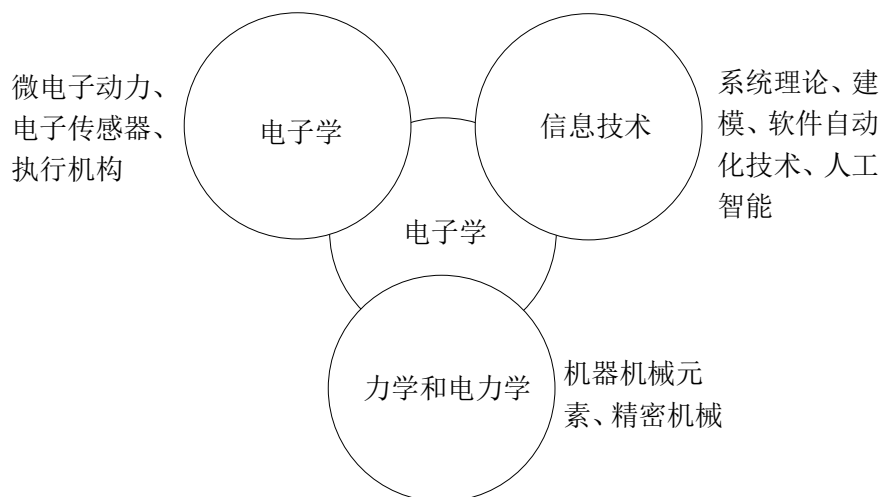


图 1-1 机电一体化

机电控制系统的开发分为四个阶段。20 世纪初，机电一体化仅通过接触器和继电器就实现了控制。在 1930 年代，控制系统从间歇控制演变为连续控制，提高了生产力。在 1950 年代后期，出现了晶体管和晶闸管，由于晶体管和晶闸管的优点，机电控制系统的新时代已经开启。随着数字与信息技术的发展，控制系统已经来到了新的阶段计算机数字控制。自 1970 年代以来，计算机数控系统已用于 CNC 机床和加工中心，以提高机床的多功能性和效率，并广泛用于生产中。随着工业机器人的诞生，我们实现了完全自动化的机加工流程。如今，随着科学技术的不断发展，机电控制系统也正朝着智能化的方向发展。

1.2.2 机电控制平台的现状

鉴于课程实验的重要作用，其创新一直以来都是重要的研究和建设方向^[5]。机电传动控制这门课作为对于学机电专业的学生来说很重要，其中的实验过程和所用的实验器材是支撑这门课的关键，很多高校和机构也相应的对实验平台开展了一些研究。

西安建筑科技大学的王蕊研制了基于 PLC 的机电液一体化实验平台测控系统。平台通过变频器控制电动机的输出转矩，研究柴油发动机和电动机在动力耦合输出时参数变化，在一定程度上对动力输出稳定性后的研究提供了一定的参考。

第 11 届国际会计师联合会控制教育进展研讨会特刊中，斯洛伐克的 Besada Portas 发布了基于 TwinCAT、实验室 Java 服务器应用程序和 Easy Java Simulations (EJS) 的结合使用，为系统工程和自动化控制课程开发了一个远程实验室。通过 PC 中的 TwinCAT 系统控制所选设备的运动。

马里兰大学建立了一个机电一体化实验室，其特点是具有工业性的铰接式机械臂，具有用于指导和零件检查的高架机器视觉^[6]。

1.3 课题主要的内容和任务

1.3.1 主要研究内容

本文主要以开放式机电传动控制实验平台为研究对象，首先通过现有的机电传动控制平台进行先期的理论了解和电气原件的布局，分析其供电原理和控制原理。继而使用 EPLAN 等专业电气绘制软件进行电气原理图的绘制，之后通过三维仿真的方式进行电气柜的设计和模拟摆放各电器元件之间的位置，从而设计出合理的电气柜布局图。然后进行电器柜的基本组装和各电器元件的安装，其中的电气元件包括倍福 IPC、西门子 PLC、LS 伺服驱动器、LS 变频器、电机等，之后根据电气接线图进行正确的接线。最后进行各元件的调试，并通过软件编程，确认教学实验是否可以施行。

1.3.2 课题主要研究任务

- (1) 文献搜集整理、
- (2) 电气原理图绘制、
- (3) 倍福 IPC 编程及应用 (TwinCAT)、
- (4) LS 伺服驱动器和变频器参数设置、实验平台安装与调试、
- (5) 实验验证、
- (6) 论文撰写等。

第二章 逻辑控制技术的选用

2.1 可编程控制器 PLC

可编程逻辑控制器(PLC)的设计, 是用以取代继电器面板的使用, PLC 克服了继电器面板的所有缺点^[7]。在涉及制造业、化学工业和过程工业中存在顺序控制和同步的应用中能非常高效且可靠。PLC 以其方便, 快速, 可靠, 系统简洁和成本低廉等优点在工业中变得越来越实用。当前, 用于执行系统逻辑的大多数数控制器已被 PLC 代替。

迪克·莫利 (Dick Morley) 于 1968 年 1 月 1 日在他的公司 Gould Modicon Company 开发出第一个 PLC, 084 型 PLC 安装在通用汽车公司的 Oldsmobile 部门和宾夕法尼亚州 Landis 的 Landis 公司。第一个 PLC 大而昂贵。他们仅能进行开/关控制, 从而将其应用限制为需要重复移动的操作。PLC 容易安装、节省空间、功耗小、并且具有诊断系统, 使故障排除变得更加容易, 而且还可以在其他项目中使用^[8]。根据此次任务的要求, 通过性能和经济性合理的选择。此次所用 PLC 为西门子 S7-200PLC (DC/DC)。

PLC 与其他控制器的对照比较:

(1) PLC 与继电器控制系统的比较

在漫长的工业进程中, 继电器的使用已经是很广泛了, 但与 PLC 相比, 由于物理性质, 已经很难满足现代工业控制的需求了, 继电器控制是硬触点和硬接线, 容易造成设备短路、易磨损、使用寿命不长, 而 PLC 是采用内部虚拟的触点进行控制, 所以没有物理上的损耗。其它的差别如表 2-1 所示。

表 2-1 PLC 与继电器比较

比较项目	继电器控制	PLC
工控的施行	连接继电器以完成相应的控制功能	逻辑程序的编辑
对生产过程变化的适应性	重新设计和接线, 更改慢	调整逻辑程序即可, 更改快
可靠性	连接组件时容易出错	使用集成电路, 是软继电器。
柔性及灵活性	不好	在整个扩展单元范围内灵活扩展
实时控制	机器的行程时间多, 实时性不好	CPU 控制, 实时性高
体积	控制柜过大	体积小
使用寿命	机械磨损, 寿命短	CPU 逻辑控制, 寿命长
复杂控制能力	差	强
价格	低	高

维护 艰难，工作量极大 方便，容易

(2) PLC 与单片机控制系统的比较

从广义上讲 PLC 已经是做好的单片机器，如今，PLC 已经增加了许多无法在单片机中实现的功能^[9]。表 2-2 给出了 PLC 与单片机控制功能特点的比较。

表 2-2 PLC 与单片机比较

比较项目	单片机	PLC
外形	小	大
运算速度	快	快
稳定性、可靠性、抗干扰性	差	好
编程语言	高级语言	梯形图、语句表、功能块
开发控制系统	仿真器实验板电路开发板，没有成品	不需开发、是成形产品
软件	没有现成的，需要编写软件	已有，不需要自己编写
价格	成本低，维护成本高	贵
对使用者的要求	需要系统地学习	很容易学习，并且只需稍加培训即可使用
适用场合	家用电气等	工业控制

(3) PLC 与计算机控制系统的比较

现代的计算机已经拥有了很高的计算与数据处理能力，计算速度逐年提高，但是在工业控制的许多方面仍然不如 PLC，如表 2-3 所示。

表 2-3 PLC 与 PC 比较

比较项目	PC	PLC
工作方式	中断模式	扫描模式
编程语言	C 语言	梯形图、语句表、功能块
工作环境	要求极高	可以在恶劣的环境中运行
对人的要求	需要特殊的学习和培训	很容易学习，并且只需稍加培训即可使用
可靠性	商业质量的要求	工业级，可反馈、可报警、可监视
软件系统	功能强大	功能专用
价格	高	低

2.2 现场总线

现场总线技术旨在定义一个串行通信网络，用于连接工厂中的低级设备，包括传感器，执行器，单变量控制器和小型（通常是嵌入式）计算机。现场总线的比特率低于 MAP 或 miniMAP 网络的比特率，但其功能可满足一系列要求，这些要求对于最低级别的自动化控制至关重要，包括实时响应，低成本，安全性和动力总线^[10]。

1984 年，ISO 发布了一个特殊的标准，即开放系统互连的国际标准参考模型。该标准的目的是为协调各种计算机的互联，同时允许将现有标准置于该模型内^[11]，如表 2-4 所示。

表 2-4 OSI 模型

序号	各层的应用	层级
7	应用层	
6	表示层	上层
5	会话层	
4	传输层	
3	网络层	下层
2	数据链路层	
1	物理层	
	报文	

物理层：涉及用于数据传输所需要的机械和（光学或）电的装置。它主要负责传输位信息。一些通信系统，尤其是现场总线系统，非常依赖于物理层包含的功能。

数据链路层：是现场总线系统中最重要的一层，因为该层准确地定义了与实时行为，有效速度等相关的系统功能。

网络层：提供了所有你在一个开放的通信系统需要路由数据从一个应用到其他的手段。

传输层：优化了可用网络服务的使用，以最低的成本提供每个会话实体所需的性能。

会话层：同步应用程序之间的数据交换。建立和断开会话连接并定义同步点。

表示层：如果使用特殊语法进行数据传输，例如，以 Pascal 字符串开头的字符数，然后是字符本身，则应用程序使用另一种语法，例如以字符串结尾的 C 字符串。通过特殊的终止字符，则表示层对于语法转换是必需的。

应用层：提供一切所必需的两个应用程序交换信息的手段。

2.3 倍福控制器

2.3.1 倍福控制器的发展

将以太网高速传输技术引入到工业控制领域，是自动化技术的发展趋势 [12]。

倍福提出的 Ethercat 实时以太网技术被广泛的应用在工业自动化和运动控制中。随着工业自动化快速的发展，可靠性、快速性和稳定性成为工业现场总线控制技术的一个重要领域。但是，对于快速响应时间小于 5ms 的情况，工业现场总线的性能就不足以支撑。所以有些企业和组织开始提出基于以太网的解决方案来满足实际应用中的需要。

与其他基于以太网的自动化解决方案相比，Beckhoff 的 Ethercat 的效率最高，周期时间最短，带宽使用率最高。广泛用于工业生产的自动化管理。性能优良，拓扑灵活，配置功能简单。这为传统的现场总线技术设定了新的标准。30 秒内可分配 1000 个分布式 I / O，几乎不受限制的网络规模以及与以太网和 Internet 技术的融合。该系统的具体操作方法是：将实时控制软件安装在 PC 中，这样 PC 的操作系统就可以用来做实时控制器 [13]。

2.3.2 倍福 EtherCAT 系统组成和工作原理

在某些涉及电气驱动的相关应用例如（协调）运动控制，现场总线的性能可能无法令人满意。使用实时以太网技术应用在现场总线上就可以解决这个问题。实时以太网是基于现有的以太网高速通信系统技术（100/1000 Mbits / s），专为工业应用而设计，以确保非常短的传输时间以及对周期性流量和时间的严格确定性 [14]。

其网络结构基本上是由一个主站控制器和多个从站设备或驱动器构成。主站单元使用高兼容性和标准的以太网控制器，配有 EtherCAT 的主站网络接口的计算机和带有以太网控制的嵌入式设备都可以成为主站。Beckhoff 开发的 TwinCAT 软件是主站的主要控制软件。

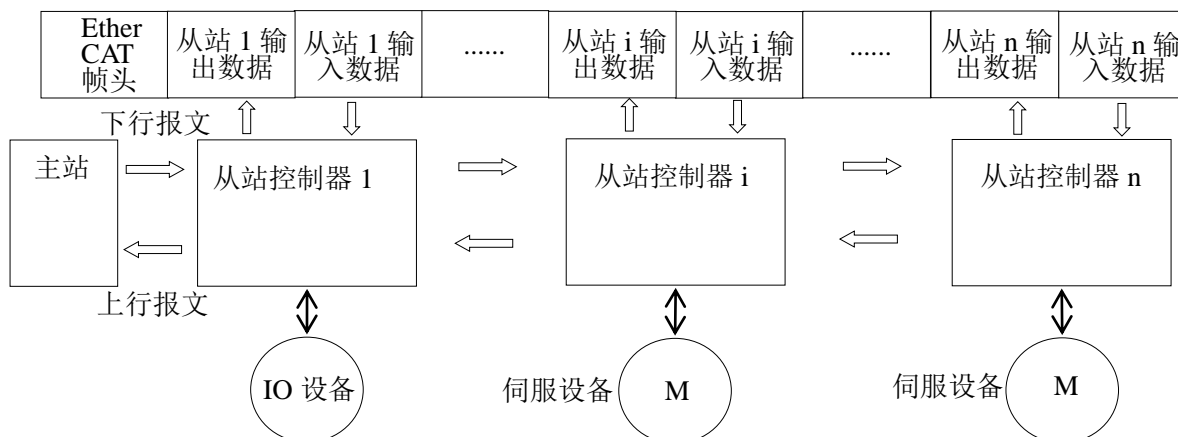


图 2-1 EtherCAT 运行原理

EtherCAT 运行原理为如图 2-1 所示：主站发送数据帧，从站可以直接处理接收的报文，并提取或插入相关数据，然后由这个从站处理过的报文传输到下一个从站。最后一个从站发回经过所有从站处理过的报文，主站接收报文后经过分析比对后发送给控制单元^[15]。

2.3.3 控制器及输入输出模块的选用

(1) 控制器 CX9020：如图 2-2 所示，CX9020 是一个紧凑型、高性能、高效的 PLC 和运动控制器。能在 Windows 操作系统下运行，为其提供了足够的性能需求，在处理繁杂的逻辑程序时也能轻而易举的完成。

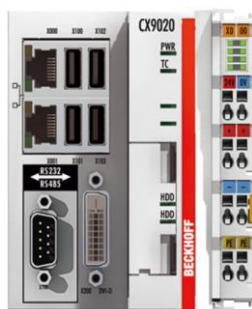


图 2-2 EtherCAT 控制器

(2) EL1008、EL2008、EL4002 分别为数字量输入模块、数字量输出模块、模拟量输出模块，如图 2-3 所示。都有八个通道用于自动化控制，当使用通道时其对应的 LED 灯会点亮，这三个模块都需要使用总线耦合器通过 e-bus 系统供电。

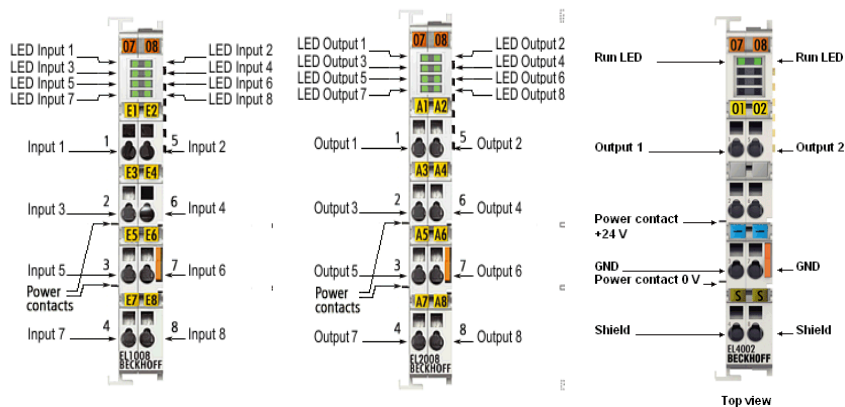


图 2-3 EL1008 模块、EL2008 模块、EL4002 模块

(3) EK1100 耦合器:EK1100 耦合器如图 2-4 所示，用于连接 EtherCAT 与 EtherCAT 端子模块。耦合器通过上面的以太网接口与网络相连。接口 1 为 EtherCAT 信号输入、接口 2 为信号输出。

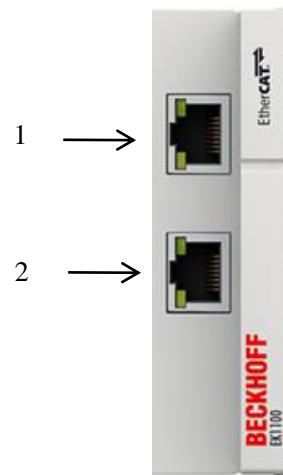


图 2-4 EK1100 耦合器

第三章 机电传动控制实验平台电气控制部分

3.1 LS 伺服驱动器

伺服驱动器(servo drives),是用来控制伺服电机的控制器。它是伺服系统的一部分,主要用与精确的运动控制。通常以三种方式控制执行器:位置,速度和扭矩,以精确定位。

位置控制模式:以位置为控制目标,接受上位机发送的位置控制指令,通过内部算法来驱动电机,最终使给定位置与反馈位置的误差为0,从而实现位置的跟随。主要用于印刷机械、数控机床等场景。

转矩控制模式:是以转矩为控制目标,接受上位机发送的转矩指令,内部通过一定算法驱动电机,使得实际转矩与给定转矩的误差为0,从而实现转矩控制。主要应用于绕线和拉光纤设备上。

速度控制模式:以转速为控制目标,接受上位机发送的速度控制指令,通常是模拟量电压,内部通过一定的算法驱动电机,使反馈转速与给定转速误差为0,从而实现速度控制。

在这次的任务中需要实现使用倍福控制器通过 EtherCAT 网络协议来完成两根伺服轴的运动控制,所以选用的伺服驱动器以及伺服电机的通讯接口必须相通,所以本次采用的伺服驱动器为 L7NA001B 如图 3-1 所示。

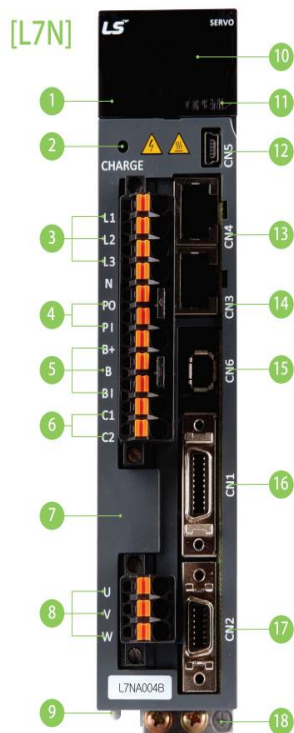


图 3-1 L7NA001B 伺服驱动器接口

各接口说明如表 3-1 所示:

表 3-1 伺服驱动器接口说明

序号	功能
1	操作键 (Mode、Up、Down、Set)
2	充电显示灯
3	主电源接口 (L1、L2、L3)
4	直流电抗接口 (PO、PI) \未使用时短接
5	再生电阻接口 (B+、B、BI) \使用驱动器内部再生电阻,将 B、BI 端子短接\使用外部再生电阻安装时用 B+、B 端子安装
6	控制电源接口 (C1、C2)
7	前盖
8	电机电源电缆接口 (U、V、W)
9	散热片
10	显示面板
11	状态 LED (显示驱动器当前状态)
12	CN5:USB 接口
13	CN4: EtherCAT 通信 (IN)
14	CN3: EtherCAT 通信 (OUT)
15	CN6: STO 安全接口
16	CN1: 控制信号接口 (I/O)
17	CN2: 编码器信号接口
18	接地

L7NA001B 伺服驱动器的外形尺寸紧凑,可在有限的范围内安装,需要使用 3 相 AC200-230 (V) 50~60Hz 电源连接,其控制伺服电机的控制电源为单相 AC200-230 (V) 50~60Hz,内部接口内置了基于实时以太网的接口可以和其它同协议的控制器的从站相通信。与编码器的连接方式包括单圈绝对值 19Bit 和多圈绝对值 16 位 (单圈是指在上电的瞬间就能反馈当前的绝对角位置,多圈还可以反馈自最开始使用时已经旋转了多少圈)。响应速度快,最大为 1kHz (当使用 19-bit 单圈绝对值编码器时)。支持多种控制模式:循环同步 (位置、速度、扭矩) 控制模式、预设 (位置、速度、扭矩) 控制模式、归巢模式、插补模式。在整体上的使用方便快捷易维护,故障率低。

EtherCAT 连接示意图如图 3-2 所示,利用 EtherCAT 通信,连接主服务器 (控制器) 与从服务器。

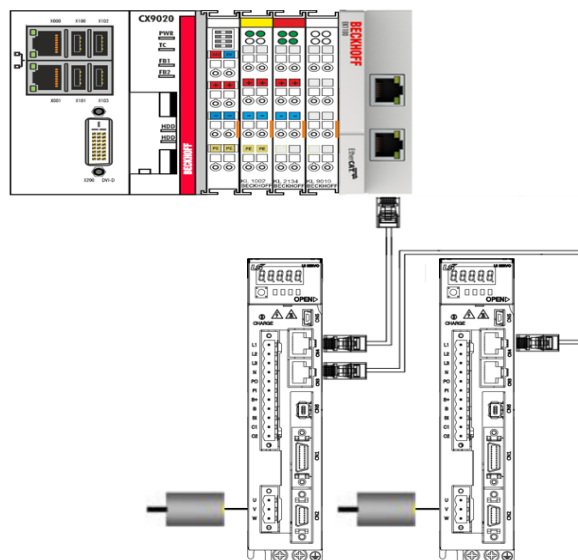


图 3-2 EtherCAT 连接示意图

3.2 伺服电机

这次我所用到了两台伺服电机（型号为 LS APM-SA01AMBN）和两台交流电机，这两种电机的结构相同。伺服电机控制大拖板和中拖板的移动，交流电机分别作用于主轴和钻台。以下将主要介绍伺服电机。

（1）原理：交流伺服电机是一种交流电机，其中包括与控制配合使用的编码器，以提供闭环控制和反馈，该电机可以实现高精度控制。交流伺服电机主要由定子、转子和编码器三部分组成。其工作原理与交流电机相同。

电机在运动中产生的旋转磁场：电流从尾端（X、Y、Z）流入、首端（A、B、C）流出为正；由此画出三相绕组的轴线如图 3-4 所示。从图中可得三相绕组互成 120°

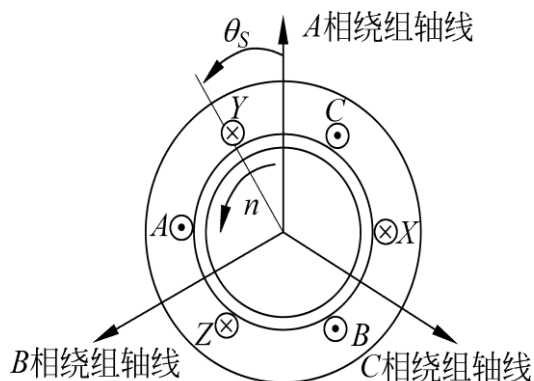


图 3-4 三相绕线

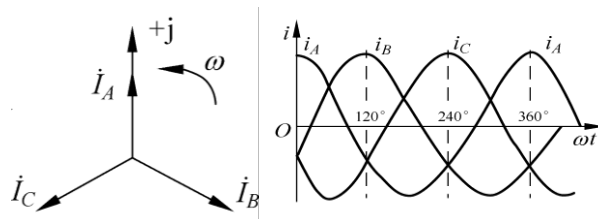


图 3-5 三相对称交流电

在上述三相对称绕组中通以下列三相对称电流：

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos \omega t \\ i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \quad (3-1)$$

三相对称电流随时间的变化曲线如图 3-5 所示。

对于一对两极电机，定子每相电流的最大值随时间变化一次，则相应的合成磁场就旋转一周。考虑到每相电流一秒内变化 f_1 次，于是得两极电机旋转磁场的转速为：

$$n_1 = 60f_1 (r/\min) \quad (3-2)$$

对于 p 对极电机，定子每相电流的最大值随时间变化一次，则相应的合成磁场将仍移动两个极距或 $\frac{1}{p}$ 周。考虑到每相电流一秒内变化 f_1 次，则相应的合成磁

场一秒内将旋转 $\frac{f_1}{p}$ 周，由此求得合成磁场的转速为：

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} (r/\min) \quad (3-3)$$

(2) 结构：定子如图 3-6 所示：由定子铁芯和定子绕组构成，交流伺服电机的定子是三相绕组，其绕组分别相差 120° 放置，通以三相交流电后产生一个旋转磁场。

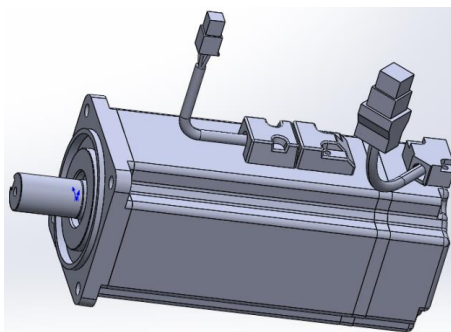


图 3-6 伺服电机

转子如图 3-6 所示：转子根据定子产生的旋转磁场的影响而同步旋转。

编码器（光电传感器）如图 3-6 所示：编码器装在转子的转轴上的，当转子转动的时候编码器的码盘也跟着转动，编码器输出脉冲反馈到伺服驱动器。编码器的结构：编码盘、发光器、光电接收器、放大电路。编码器码盘的原理：外围输出为 A 相脉冲、中间输出为 B 相脉冲、最里面输出为 Z 相脉冲。编码器的精度越高，其盘面上的间隔越多。

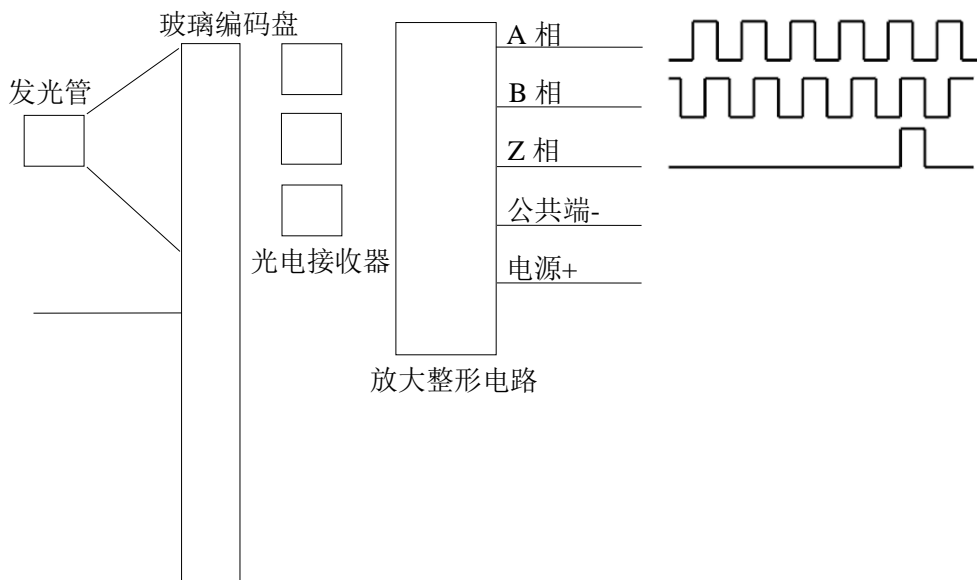


图 3-7 编码器工作原理

编码器工作原理如图 3-7 所示。

蓝色的光电接收管接收的是最外面码盘的信号，红色的光电接收管接受的是中间码盘的信号，黄色的光电接收管接受的是最内部的信号。

当编码器旋转时，发光管发出的光通过码盘照射在光电接收器上。光电接收器将光信号转换为电信号，并将其发送到放大器电路变成脉冲信号，再回馈给伺服驱动器以形成闭环系统。A 相与 B 相有相位差。

(3) 选型：首先计算滚珠丝杠驱动下的负载转矩，公式为：

$$F = F_A + mg(\sin a + \mu \cos a)(N) \quad (3-4)$$

$$T_L = \left(\frac{FP_B}{2\pi\eta} + \frac{\mu_0 F_0 P_B}{2\pi} \right) \frac{1}{i} (Nm) \quad (3-5)$$

式中 F 为轴方向负载， F_A 为外力 0N， m 为质量 13Kg， g 为 9.8， a 为倾斜角 0° ， P_B 为螺距 0.01m， η 为机械效率（选取 0.85）， μ_0 为预紧螺帽的内部摩擦系数（选取 0.1） F_0 为预负载约为 $1/3F$ ， i 为减速比（直线耦合为 0）。

所以计算出 T_L 为 $0.2453 N_m$ 。

根据电机转矩、功率、转速之间的关系及计算公式为：

$$P_m = \frac{T_m \times n_i}{9550} (kW) \quad (3-6)$$

式中 T_m 为电机转矩等于 T_L ， P_m 为电机功率， n_i 为额定电机转速选择 3000r/min, 计算出 P_m 为 0.077kW。所以选择 LS APM-SA01AMBN 伺服电机其额定功率为 0.1kW。

3. 3LS 变频器

变频器是交流电气传动系统的一种，是将交流工频电源转换成电压、频率均可变的适合交流电机调速的电力电子变换装置。变频器的工作原理是通过改变电动机的工作电源频率，实现对电机转矩以及转速的改变^[15]。变频器控制的对象为交流电动机。由于电机的额定功率为 180W、额定电流为 0.8A。所以本次采用的型号为 LSLV0002C100-1N，其输出电流为 1.4A、输出功率为 0.2kW。

变频调速的优势（与其他交流电机调速方式的对比）如表 3-2

图 3-2 变频调速的优势

序号	优点
1	平滑软启动，确保电机安全
2	无极调速，调速精度大
3	电机正反向无需通过接触器切换
4	非常方便的接入通讯网络控制，实现生产自动化
5	不改变机械结构的情况下可以通过改变变频器的输出频率来改变工作效率

目前市场主流的变频器基本上有图 3-8 所示的基本结构：

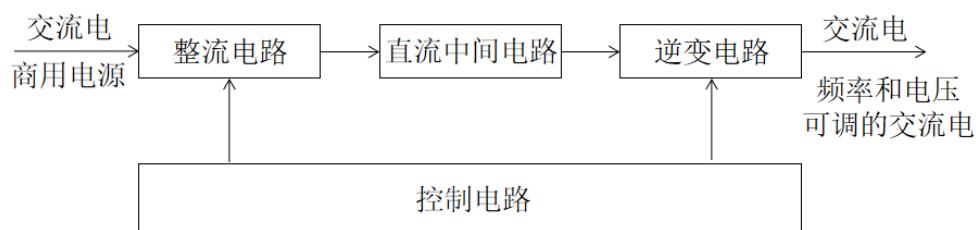


图 3-8 变频器基本结构

整流器：将交流电变成直流电。逆变器：将直流电转换成为交流。

图 3-9 为 LSLV-C100 控制框图。

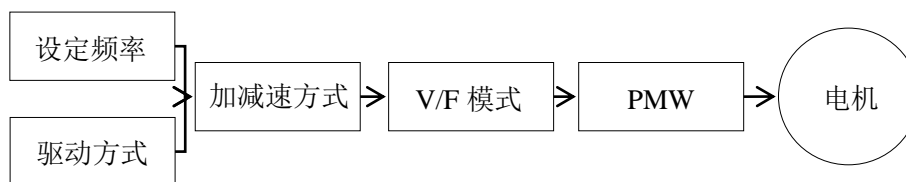


图 3-9 LSLV-C100 控制框图

- 1) 设定频率与驱动方式将在第五章说明。
- 2) 加速减速方式：在负载加减速的过程中，变频器的输出频率随时间的变化关系曲线，如图 3-10 所示。可根据负载的特性进行参数设置。例如：如果设定最大频率设定为 60Hz，加减速时间设定为 5 秒。运转频率设定为 30Hz 时，到达 30Hz 的时间为 2.5 秒。

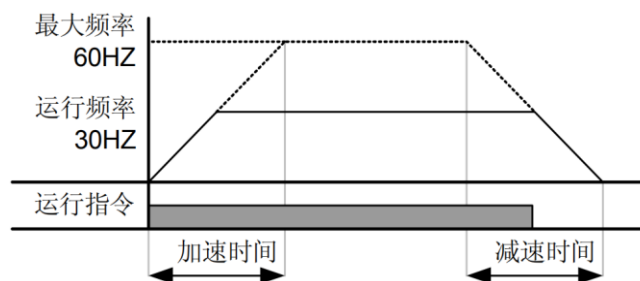


图 3-10 加速减速线形图

3) V/f 控制：

当电机的电源频率改变时,电机的内阻也随之改变,使电机的励磁电流发生变化,从而对电机的输出转矩造成影响,调速系统的性能也随之受到影响。压控制方式的目的是为了得到理想的转矩—速度特性。为了使励磁电流不发生变化,只需要磁通在调速过程中保持不变,为了实现这一目的,就要在改变电源频率的同时改变感应电动势,使频率和电压的比值为一个常数。又由于因电动机定子阻抗而消耗的压降远小于定子上的电压,所以感应电动势可以用电源电压来代替^[16]。

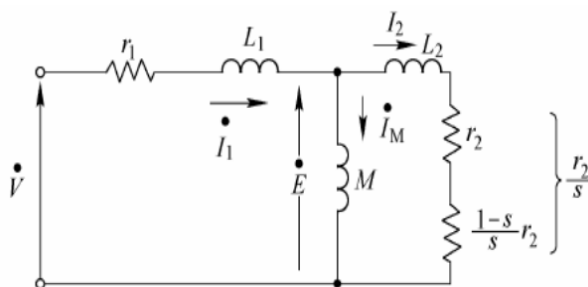


图 3-11 异步电动机的稳态等效电路

在图 3-11 给出的异步电动机等效电路中，设电动机的气隙磁通用 ϕ 表示，则可以看出，励磁电流 I_M ，感应电势 E 和气隙磁通 ϕ 有如下关系：

$$\phi = MI_M \quad (3-7)$$

$$E = j2\pi fMI_M = j2\pi f\phi \quad (3-8)$$

因此，为使气隙磁通 ϕ 在整个调速过程中保持不变，只需在改变电源频率 f 的同时改变感应电动势 E ，使其满足：

$$\frac{E}{f} = \text{常值} \quad (3-9)$$

在电动机的实际调速控制过程中，由于 E 为电动机的感应电动势，无法直接进行检测和控制，必须采用其它方法才能使 (3-9) 得到满足。

另一方面，从图 的等效电路还可得知：

$$V = I_1 Z_1 + E \quad (3-10)$$

其中：

$$Z = j2\pi L_1 + r_1 \quad (3-11)$$

为定子阻抗。因此，当定子阻抗上的压降与定子电压相比很小时，由于 $V \approx E$ ，所以，只要控制电源电压和频率，使得 (3-9) 成立。

4) **PWM**：脉冲宽度调制控制，是指逆变电路部分同时对输出电压（电流）的幅值和频率进行控制的控制方式。

本次使用的变频器为 **LSLV-C100** 如图 3-12 所示。

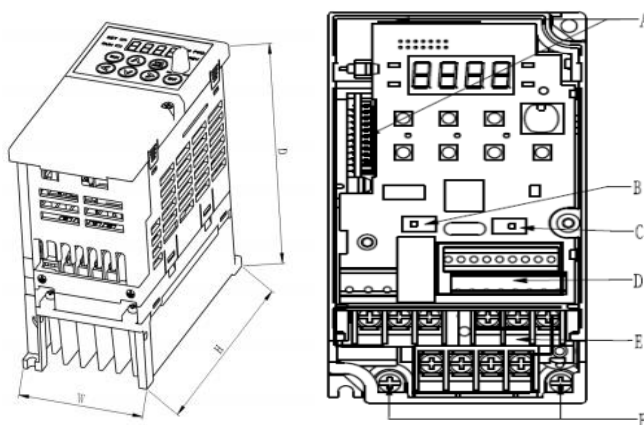


图 3-12 LSLV-C100 变频器

(A-下载接口、B-PNP/NPN 选择开关、C-模拟输入 V/I 选择、D-面板控制端子、E-电源端子、F-接地端子)

3.4 威纶触摸屏

通过触摸屏幕上的图形按钮，触摸反馈系统可以根据预编程的程序来操作各

种链接设备。可以使用显示屏创建动态的声音和视频效果。作为现代计算机输入屏幕，触摸屏是当前人机交互最简单、舒适和自然的方式。还可用来监控操作现场各种设备的动作、状态、数据等。监控的对象包括 PLC、电动机、变频器、一些仪器仪表等，所有的自动化设备都可以作为被控对象，来被触摸屏监控。

3.5 系统电气控制部分

设备的电路包括系统主电路、伺服控制电路、变频调速电路、倍福控制器电路、西门子 S7-200PLC 控制电路。此次所用的电路绘制软件为 EPLAN，它集成了电气设计、信号模拟、3D 控制柜建模、设备选型、支持多种电气标准等。一些特殊的器件可以快速的从网络上下载所需设备的参数和模型，很适用于电气设计。

3.5.1 系统主电路

系统主电源供电为 220V/50Hz,电路图如图 3-13 所示。见附录。

图中各部分作用如下：F1：为主电源断路器，起到系统通断功能、F2：为系统电源断路器，起到控制 PLC 通断电功能、F3：为伺服电源断路器，起到控制变频器、伺服驱动器、伺服电机和交流电机通断电功能、F4：为熔断器，保护电路、V2：开关电源将交流 220V 整流为直流 24V 电压。

将外部电源先与 F1 主电源断路器相连，之后再 F2 系统电源断路器与 F3 伺服电源断路器与 F1 主电源断路器相并联。从而形成 F2 控制低压 24V 电路的通断，F3 控制高压 220V 电路的通断。

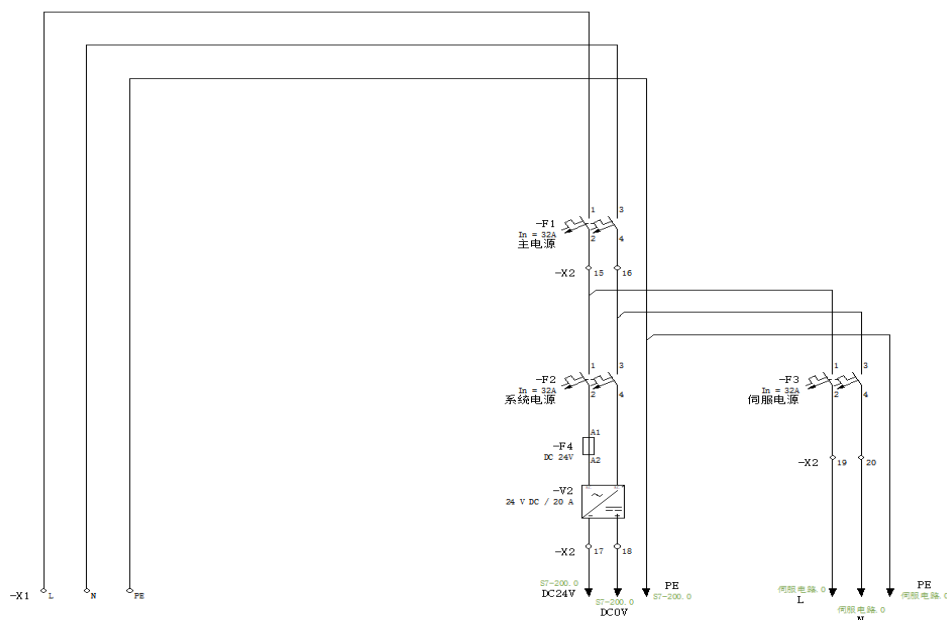


图 3-13 主电路

3.5.2 伺服控制电路

使用伺服控制器控制伺服电机运动，来实现大拖板和中拖板的可控运动，如图 3-14 所示。见附录。

图中各部分作用如下：SF1、SF2：为 LS 伺服驱动器，控制伺服电机运动、M1、M2：为伺服电机、BMQ1、BMQ2：为编码器、KM1：为门上的接近开关，起到安全保护作用。

从 F3 伺服电源断路器引出接线后，将两台伺服驱动器相互并联，使其供电。两台伺服器之间的网络使用 EtherCAT 网络协议与倍福 CX9020 控制器进行通信。KMI、KM2 被接近传感器所控制，当开门操作时达到可以让电机停止工作的效果。

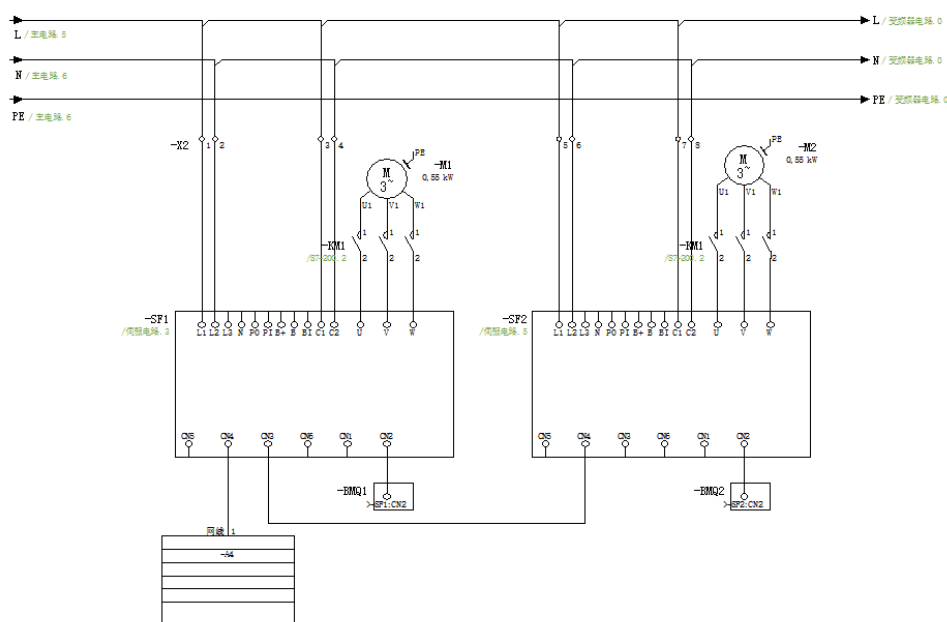


图 3-14 伺服控制电路

3.5.3 变频调速电路

使用变频器调速，通过倍福控制器的模拟量输出信号来控制交流电机的转速，如图 3-15 所示。见附录。

图中各部分作用如下：LS1、LS2：为 LSLV-C100 变频器，控制电机转速、M3、M4：为交流电动机、P1、AI1、RW1、ALM1、SA3.2、FW2、AI2、ALM2：均为倍福控制器触点。

通过 F3 伺服电源断路器引出接线后，将两台变频器相互并联，低压控制信号与倍福控制器模块相连接，达到控制作用，两个 KM1 开关与伺服控制电路中的 KM1 开关作用相同。

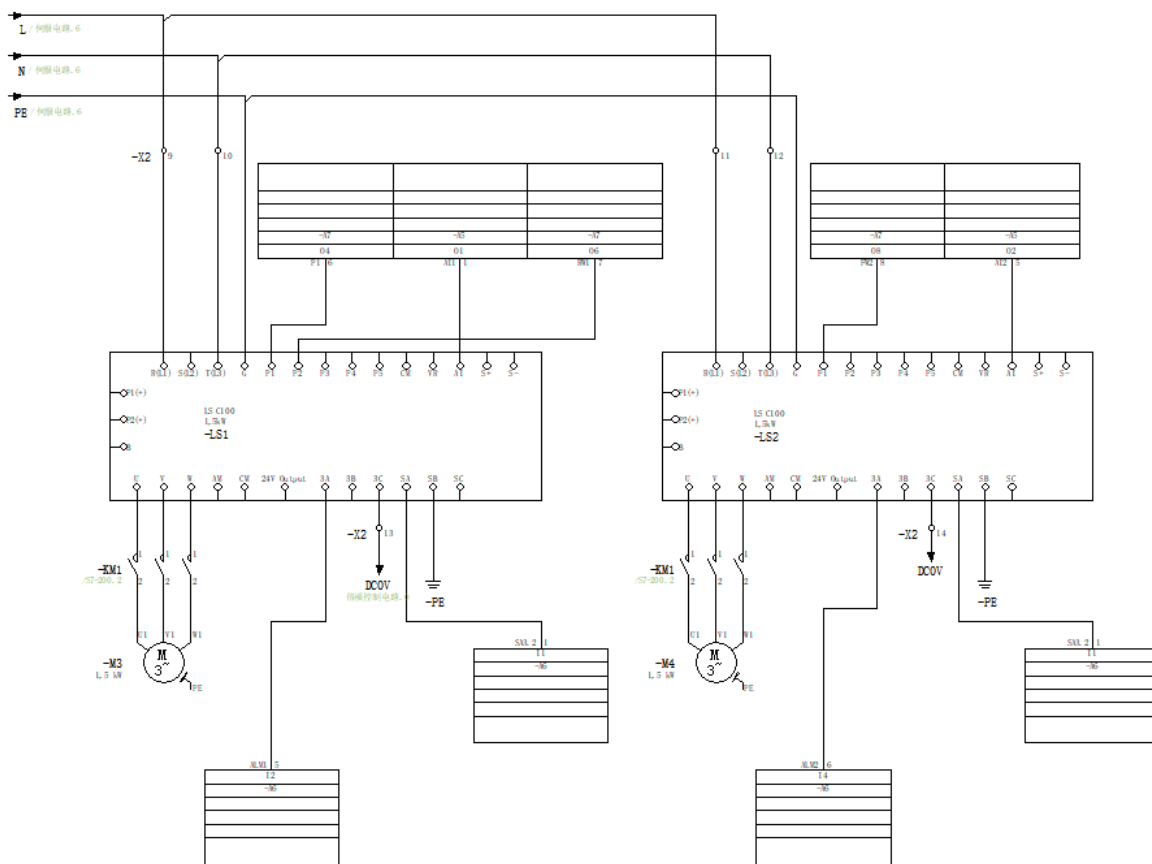


图 3-15 变频调速电路

3.5.4 倍福控制器电路

通过数字信号和模拟信号来控制伺服器和变频器的逻辑控制器，如图 3-16 所示。见附录。

图中各部分分别为：A3:EK1100 耦合器、A4:EL4002 模拟量输出模块、A5:通讯模块、A6:EL1008 数字量输入模块、A7:EL2008 数字量输出模块。

通过 F2 系统电源断路器引出接线后，与倍福控制器的 CX9020 控制器相连接，其他模块通过各模块之间通过 E-BUS 的六个触点进行数据传输和电力供给。

PC 通过以太网线与控制器相连接。

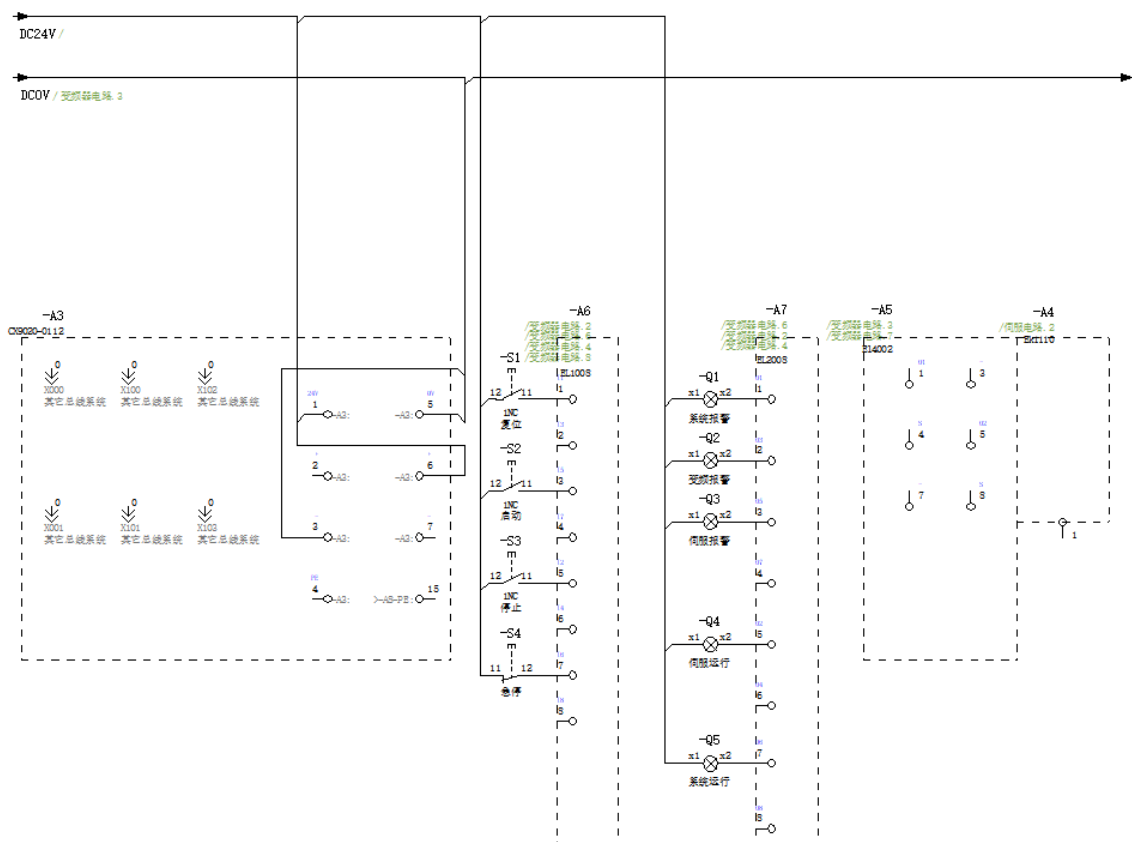


图 3-16 变频调速电路

3.5.5 西门子 S7-200PLC 控制电路

控制门上的接近开关，起到安全保护，如图 3-17 所示。见附录。

通过 F2 系统电源断路器引出接线后，与西门子 PLC 相连接。接近传感器与 PLC 的端子进行连接形成回路。

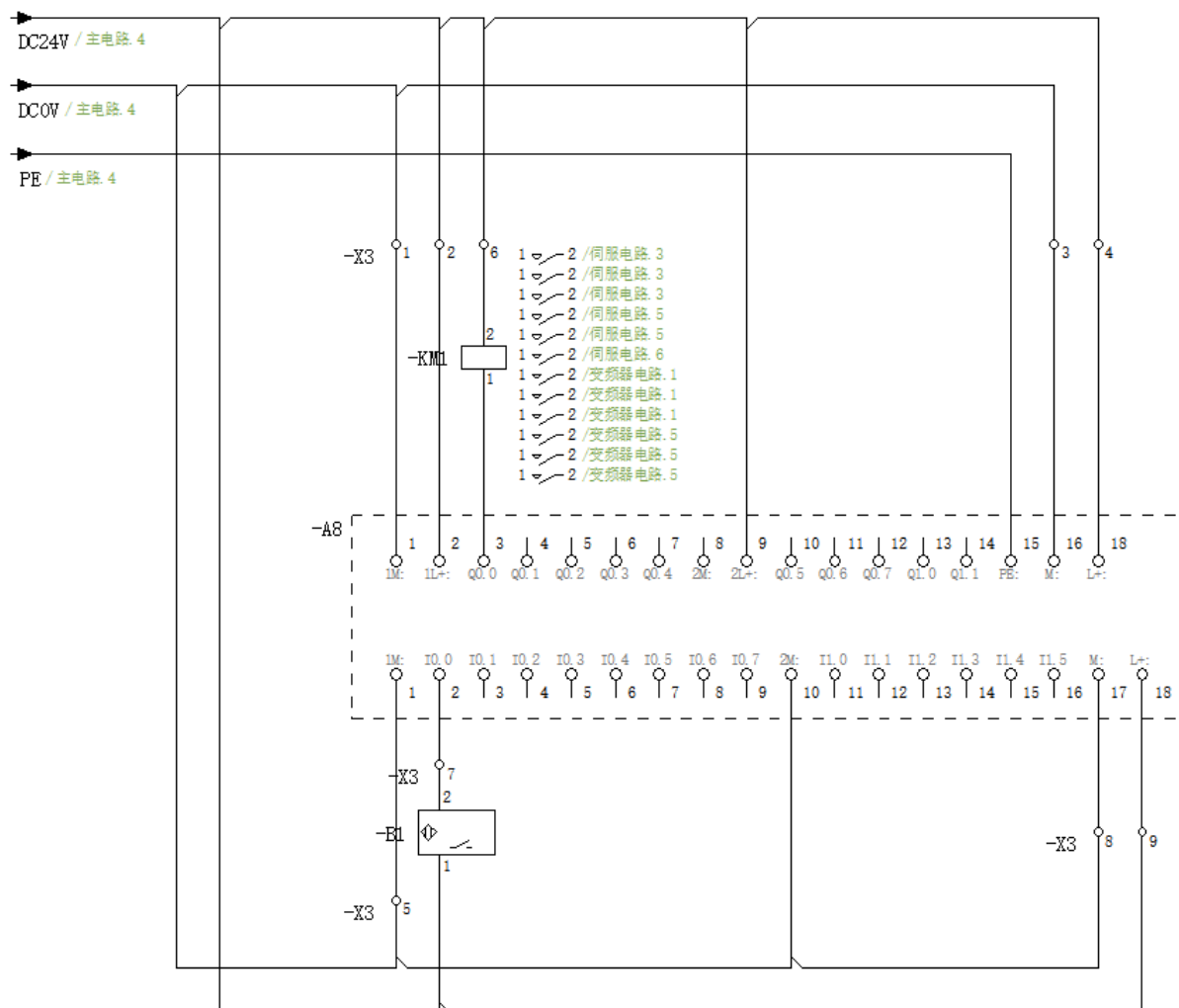


图 3-17 西门子 PLC 控制电路

3.5.6 实验平台 3D 模型与实物图

为了提高实验平台的设计效率，利用 EPLAN 进行了 3D 模型的绘制，如图 3-18 所示。绘制出的模型图，用于前期电气元器件的布局安装设计。之后的实体装配会根据此图上元器件的位置作为重要参考。见附录。

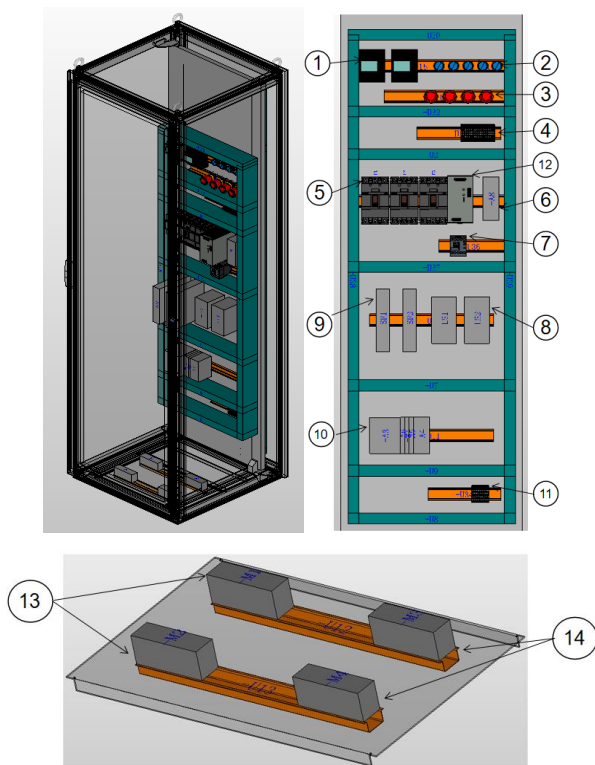


图 3-18 三维模型图

图中左侧的为三维图，右侧的为前面板，下方的为底板，如图 3-18 所示。实物图如 3-19 所示。

表 3-3 设备说明

序号	设备
1	电流表、电压表
2	指示灯
3	按钮
4	高压端子排
5	断路器
6	S7-200PLC
7	熔断器
8	两台 LSLV-C100 变频器
9	两台 LSLV-C100 变频器
10	倍福控制器
11	低压端子排
12	伺服电机
13	交流电机

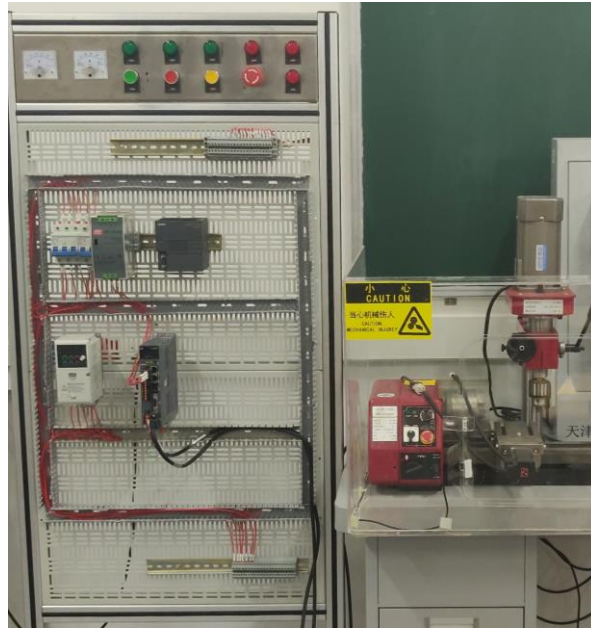


图 3-19 开放式机电传动控制实验平台

第四章 实验平台程序设计

4.1 TwinCAT 软件

TwinCAT 是 “The Windows Control and Automation Technology” 的缩写，是德国倍福公司开发的基于 PC 平台和 Windows 操作系统的控制软件。它的作用是把工业 PC 或者嵌入式 PC 变成一个功能强大的 PLC 来控制生产设备。本次主要运行用 TCatScopeView、TwinCAT System Manager 和 TwinCAT PLC Control。TCatScopeView 为示波器，TwinCAT System Manager 主要负责组态和 I/O 连接，TwinCAT PLC Control 主要用于 PLC 程序的开发与调试^[17]。

4.2 TwinCAT 参数配置

(1) 对 TwinCAT System Manager 进行设置，点击 SYSTEM-Configuration General 选项卡，连接控制器如图 4-1 所示。此时显示出了控制器的名称 CX-2DEAAB 和 IP 地址 5.45.234.171.1.1。选择其进行连接。

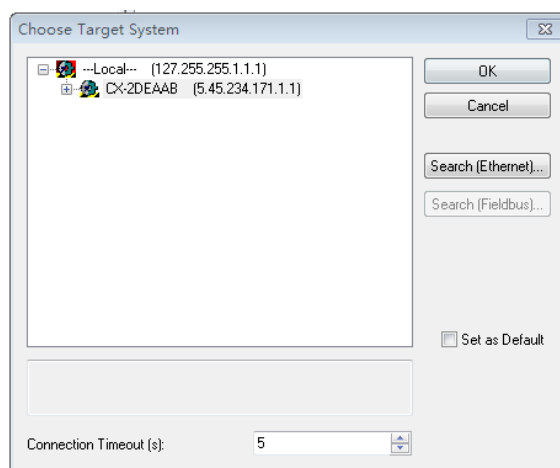


图 4-1 Choose Target System 界面

当建立通讯后 System Manager 软件右下角红色的就会显示控制器的名称 CX9020，绿色的为目标控制器 TwinCAT 状态是否连接成功,如图 4-2 所示。

状态栏显示颜色:	含义:
	当前目标控制为运行状态
	当前目标控制为配置状态
	目标控制器未连接上

图 4-2 控制器状态显示

成功连接后，将目标控制器切换为配置。切换成功后，软件右下角状态栏内显示蓝色：**Config Mode**。

(3) 扫描设备。选择 I/O Device 中的 Scan Devices，进行自动扫描。扫描成功后，展开 I/O Device，在最底层，可以看到所有选用的 I/O 模块及设备，如图 4-3 所示。显示了已经连接上的设备，例如 term2 打开后会出现 1-8 号端口。

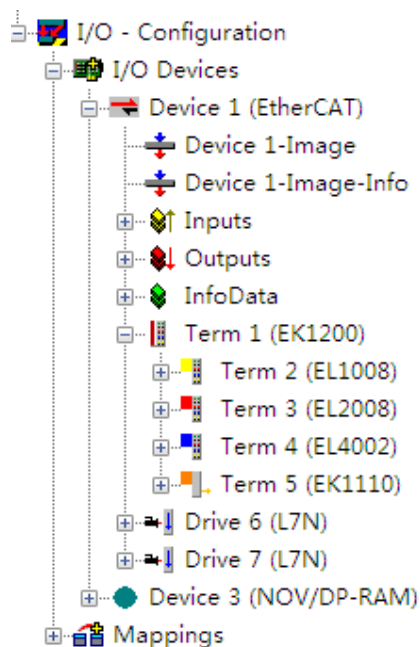


图 4-3 已扫描出的 I/O 模块

点击 Set/Reset TwinCAT to run mode 完成配置，进入运行状态，右下角状态显示将变为绿色。最后在 NC-Configuration 中建立两个轴，在之后的控制中使用。

4.3 实验平台控制流程图

根据图 4-4 所示的流程进行程序的编写，首先要让轴使能上电，此时将显示伺服轴所在的位置，不为 0 时复位归零，之后要设定轴移动的位置和速度，启动电机直到电机停止转动，此时将显示当前轴的实际位置，与设定位置相比较，相同则通过，不同则需要对运动控制进行修改。

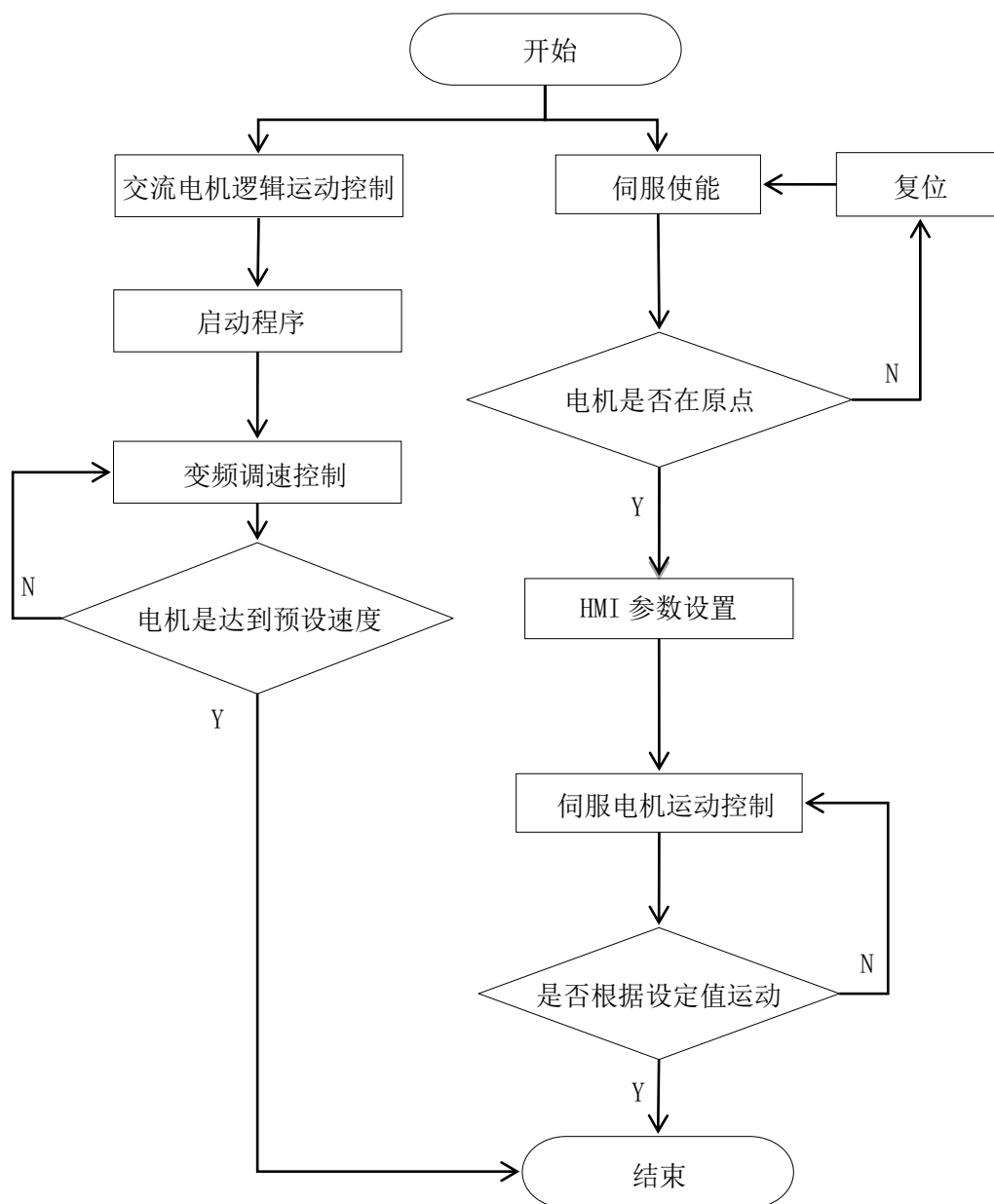


图 4-4 实验平台工作流程图

第五章 实验验证与分析

5.1 使用 TwinCAT2 令交流电机实现逻辑控制

(1) 首先打开 TwinCAT PLC control 软件，点击 File 菜单中的 New，选择程序所运行的控制器机型，这里选择 CX (ARM) 如图 5-1 所示，之后确定。

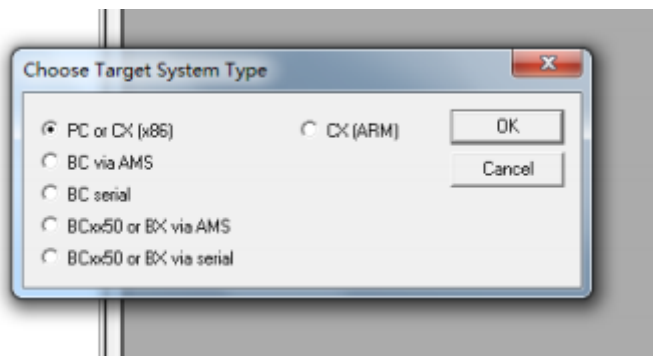


图 5-1 选择控制器内核

选择程序组织单元 (POU) 类型以及语言如图 5-2 所示，这里有三种方式：程序、功能块和函数。以下是使用到的语言解释：

ST (结构化文本)：由一系列指令组成，可以执行如同高级语言中的 (IF..THEN..ELSE) 或循环 (WHILE..DO) 语句。

LD (梯形图)：一种图形化的编程语言，它适合用作逻辑开关，可用于设置不同的网络。梯形图由一系列网格组成，网络左右两侧为电流线。内部是由触点和连接到线圈的电线组成的电路图^[20]。

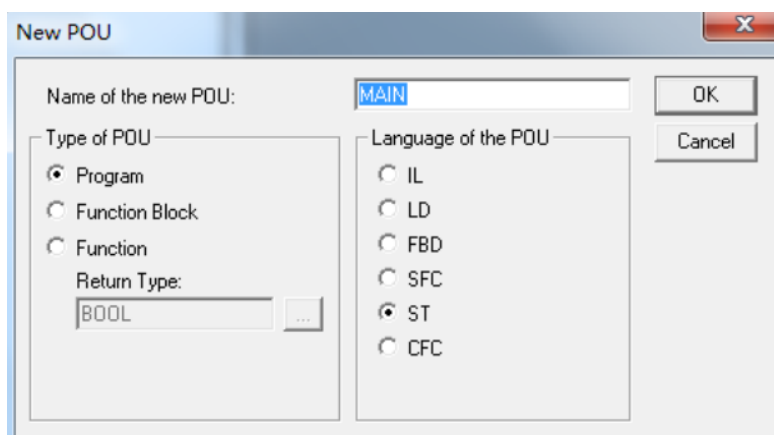


图 5-2 选择 LD 语言

这里选择 LD 梯形图，如图 5.2 所示。择好后弹出编程界面。

(2) 程序说明:根据教学要求完成以下任务：当按下启动按钮时，主轴电机立即转动，延时 10 秒后台钻电机启动。当按下停止按钮时，台钻电机立即停止，延时 10 秒后主轴电机停止。当按下急停时，两台电机立即停止。

程序：

```

0001 PROGRAM MAIN
0002 VAR
0003 TON1:TON;(*延时接通*)
0004 TON2:TON;(*延时接通*)
0005 X1 AT%I*:BOOL;(*启动按钮*)
0006 X2 AT%I*:BOOL; (*停止按钮*)
0007 X3 AT%I*:BOOL; (*急停*)
0008 Y1 AT%Q*:BOOL; (*主轴电机*)
0009 Y2 AT%Q*:BOOL; (*钻台电机*)
0010 A1 AT%I*:BOOL; (*中间变量*)
0011 A2 AT%I*:BOOL; (*中间变量*)
0012 A3 AT%I*:BOOL; (*中间变量*)
END_VAR
    
```

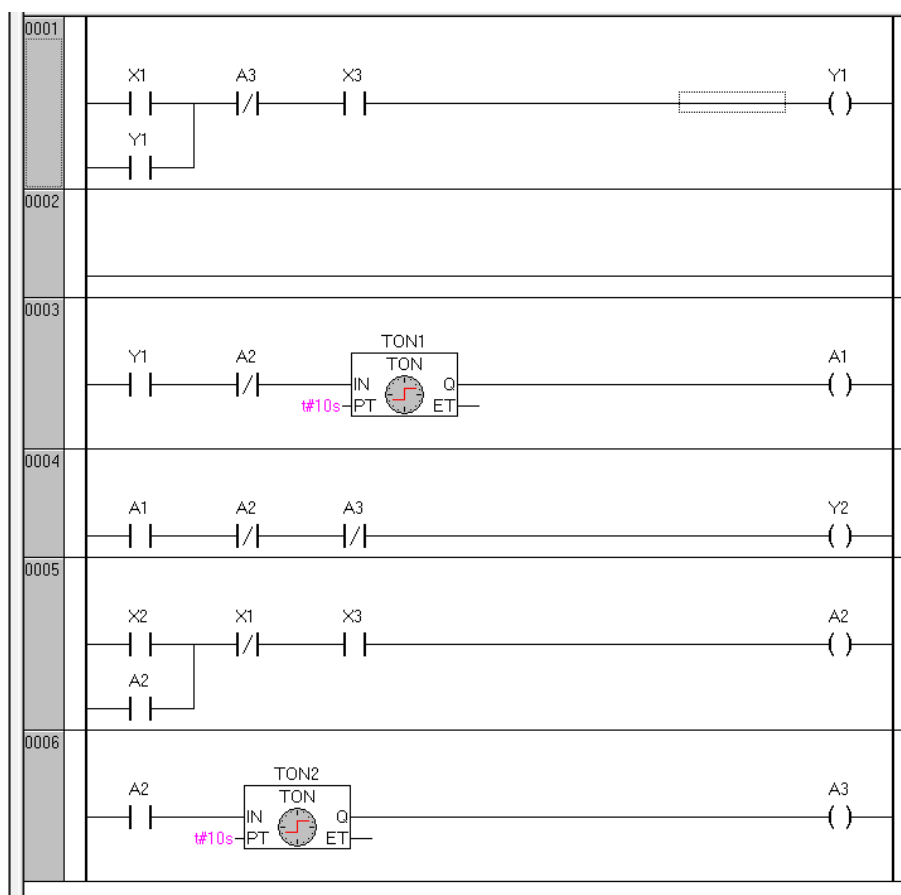


图 5-3 逻辑控制程序

(3) 这时需要保存文件，文件名为 PLC。储存完后要编译。编译的结果会显示在信息窗口中，0 errors 为编译成功。在目标文件夹中会生成 PLC.TPY 文

件，如图 5-4 所示，再将其导入 SYSTEM MANAGER 软件中时需要使用。

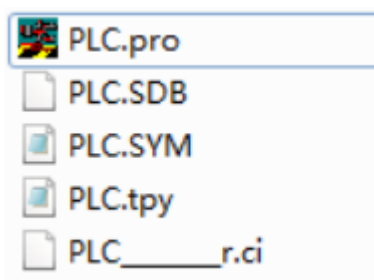


图 5-4 生成 TPY 文件

其中.tpy 为关联文件；.SDB 为二进制系统文件；.SYM 为 ASC 码系统文件，常用于 OPC 通讯。

(4) 链接变量：打开 SYSTEM MANAGER 软件，右键 PLC 配置，点击 Append PLC Project，选中 plc.tpy。此时将控制器切换为配置状态，开始将设定的变量与远程 I/O 点进行关联。

点击 Term2 展开树形图，可以看到 1 到 8 号数字量输入端口，点开相应的端口与变量相配置。如 Channel3 端口在设备上实际连接的是启动按钮，那么就将 Channel3 与 X1 变量相连接，其它的接口也是同样的操作。点击 Term3 展开树形图，可以看到 1 到 8 号数字量输出端口，点开相应的端口与变量相配置。如 Channel4 为主轴电机正转，那么就将 Channel4 与 Y1 变量相连接，其它的接口也是同样的操作。

同时 IO 配置下的 Mappings 可以看到映射的建立情况，会有名为“PLC”的程序与 EL 模块硬件点成功建立连接。ACTIONS 下面的 ACTIVATE CONFIGURATION 进行主动激活，使前面的配置生效，激活之后将 TWINCAT 重启为运行模式。

(5) 最后将程序登录到目标控制器中，点击 ONLINE—login 进行下载程序，如图 5-5 所示。然后点击 ONLINE—run 将程序运行起来

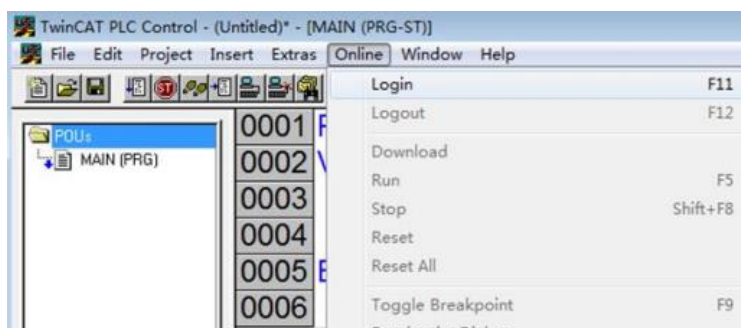


图 5-5 程序登录

(6) 此时按下启动按钮，设备将按照逻辑指令顺序启动。

5.2 交流电机变频调速控制

通过改变模拟量电压的输出来控制电机的转速。具体操作通过一下步骤：

(1) 此次选用的两台电机型号为 51K180RA-SFW。其铭牌信息为额定功率 180W、额定电压为 220V、额定频率 50/Hz、转速为 1400RPM。

(2) 根据教学要求，在执行 5.1 的逻辑程序时，需要将电机转速分别控制在 1000RPM（主轴电机）和 800RPM（钻台电机）。

(3) 通过控制 EL4002 模拟量输出模块的电压信号，再通过变频器的参数设置来控制电机转速。

首先这是变频器的控制面板和按键说明，如图 5-6 所示：

这是字母符号表，表 5-1 所示。

表 5-1 说明

按键	
FWD	正转指示灯
REV	反转指示灯
RUN	运行指示灯
SET	设定参数指示灯
RUN	运行命令
STOP/RESET	STOP: 停止工作, RESET: 复位
↑	上 向上翻动, 可以增加数值
↓	下 向下翻动, 可以减少数值
←	左 向左翻动
→	右 向右翻动
ENT	确定 确认参数
Volume	使用旋钮调频实现调速



图 5-6 变频器操作说明

参数设定:

(1) 将变频器的显示调整到 drv,再将其参数设定为 1, 这改变了驱动方式, 变成由端子驱动运行, “FX” 是正转命令, “RX” 是反转。再由于 FX 点的控制信号来自于 EL2008 模块的 Channe4 通道 (以在 Twincat 变量中定义为电机正转), 所以当执行时电机可以正转。当接到 Channel6 通道时电机反转。两个变频器的设定一样。

(2) 再将变频器的显示调整到 Frq,将其参数设定为 3, 这改变了接收信号的方式, 变成模拟量接入、电压控制, 端子 AI 设定 (J1 拨到 V 端): 0-10[V], 在变频器面板端子 AI 与 CM 间加载 0 ~ +10V 信号, 如图 5-7 所示。AI 的大小控制了频率的大小。

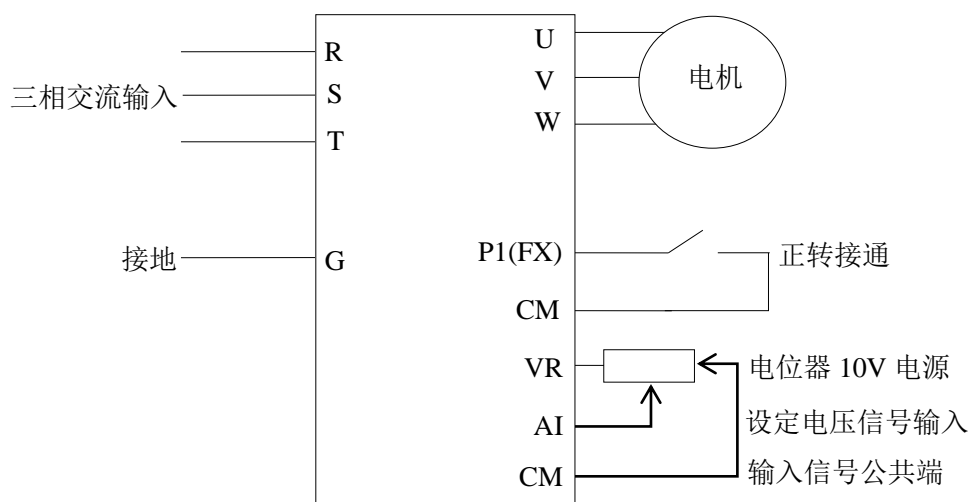


图 5-7 控制原理

端口说明如表 5-2 所示:

表 5-2 端口说明

端口	功能	解释
VR	频率设定单电源	作为模拟频率设定的电源
V1	频率参考	使用频率参考和 0-10V 作为输入
CM	频率设定公共端子	模拟频率给定和 FM (用于监视) 的公共端子

(3) 最后先使 5-1 的逻辑程序运行起来, 再使用 TwinCAT System Manager 软件进行变频调速。将设定的电压输入到 EL4002 的输出通道 1 中, 输出通道 1 就可以观察到输出状态, EL4002 上相应的指示灯会点亮, 使用万用表就可以测量出设定的电压, 从而实现了变频调速。

根据已有主轴电机最大转速为 1300RPM, 模拟量控制电压最大设定为 10V, 最大频率为 50Hz, 极对数为 2, 根据转速公式:

$$n = \frac{60f}{p} \tag{5-1}$$

可知 1000RPM 时需要的频率约为 33.3Hz,对应的模拟量电压为 6-7V 所以要在 Set Value Dialog 中写入 6 或 7V 电压时,可以得到主轴转速约为 1000RPM,同理在钻台电机的端口中写入 5 或 6V 电压,可以得到钻台转速约为 800RPM。将变频器的显示调整到 rpm 再确定后,即可显示当前电机转速,如图 5-8 所示。



图 5-8 当前速度

5.3 TwinCAT 控制伺服驱动 NC PTP

5.3.1 基于 PC 的位置控制

TwinCAT NC PTP 具有特殊逻辑功能,包括:直线耦合(电子齿轮)、距离补偿、在线主轴/从轴和从轴/主轴转换、飞锯(斜线钜)、凸轮控制、外部设定生成器、多主轴耦合。软件通过结合 PC 的处理能力和 PLC 的功能来控制轴的移动。PC 强大的计算能力,使用计算机可使同时定位数十个轴成为可能。

5.3.2 PLC 编程控制伺服电机

首先打开 TwinCAT PLC control 软件,新建程序选择 ARM 内核,选择 ST 语言格式。然后在左下角 resource 选项卡中,在管理库中添加 TCMC2.LIB 库文件,这里有所需的已经由倍福编辑好的功能文本。

在程序编辑界面中声明两个轴类型的变量,主要用来做 NC 和 PLC 之间位置显示的作用, axis_ref 的变量为轴类型的变量。在程序编辑区输入一个“;”。

```
0001 PROGRAM MAIN
0002 VAR
0003 axisA,axisB:axis_ref;
0004 END_VAR
```

编辑完成“另存为”后再“编译”,生成 TPY 文件(链接变量)。接下来将 NC 与 PLC 的变量链接,回到 TwinCAT system manager 软件,添加 TPY 文件,连接变量。将 MAIN.axisz.NCTOPLC、MAIN.axisz.PLCTONC、MAIN.axisx.NCTOPLC、MAIN.axisx.PLCTONC,与声明的轴变量进行连接。PLC

和 NC 通过关联变量进行数据交换，NC 方会将伺服驱动器的状态、速度、位置传送给 PLC，PLC 将逻辑控制程序发给 NC 方。

之后建立 HMI 人机交互界面，在运行程序时使用 HMI 可以更加快捷方便的控制轴的动作和轴的调试，在 HMI 里面画出两个功能块，双击功能块进行配置，如图 5-10 所示。双击功能块填写参数设置：Text Content 里面输入 Z 轴当前位置：%.2f，%.2f 代表数据类型的显示为浮点数数据类型，并只保留小数点后两位。

Variables 里面的 Textdisplay 中设置所关联的变量，填写 MAIN.axis1.NcToPlc.ActPos。第二个功能块用来显示 X 轴的实际位置。选择控制器的 IP，之后再 Login（程序登录上传）。程序登录之后把运行程序即可看到 Z 轴和 X 轴的当前位置显示在 HMI 上面，如图 5-9 所示。程序详见附录 1。

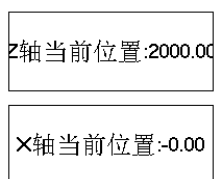


图 5-9 当前位置

HMI 中再加入八个按钮控件，用来对轴进行使能、点动、相对位移和置零，图如 5-10 所示。

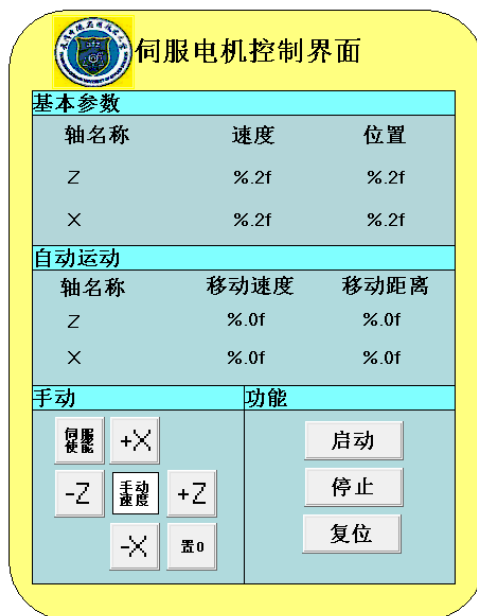


图 5-10 visualization HMI 人机交互界面

最后将程序经过编译，Log in,run 后，将 Z 轴使能按钮按下，对轴进行使能，然后按下 Z+即可看到伺服轴在转动，同时还可以看到大拖板在移动。再次按下 Z+可以看到轴停止。还可以在 Manager 中在线监视轴的状态如图 5-11 所示。

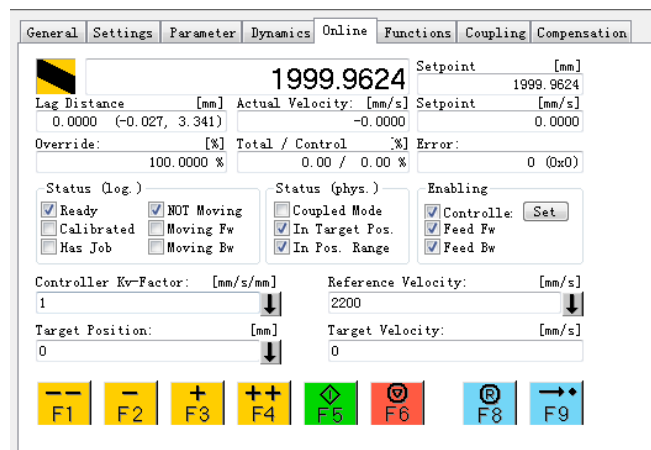


图 5-11 在线监控

最后使用 TCatScopeView 进行示波，首先建立四个频道分，分别连接变量 MAIN.AXIS1.NCTOPLC.ACTVELO 和 MAIN.AXIS1.NCTOPLC.ACTPOS，MAIN.AXIS2.NCTOPLC.ACTVELO 和 MAIN.AXIS2.NCTOPLC.ACTPOS 这四个变量为两个伺服轴的实际速度和实际位置。现在测试所编辑的程序和连接的硬件设备能否执行。

在程序中 Z 轴移动距离输入 2000、Z 轴移动速度输入 150，X 轴移动距离 1500、X 轴移动速度输入 100 并登录程序开始测试。重复测试 30 次，分析 Z、X 轴的定位精度。其中的一次测试结果如下图 5-12 所示。

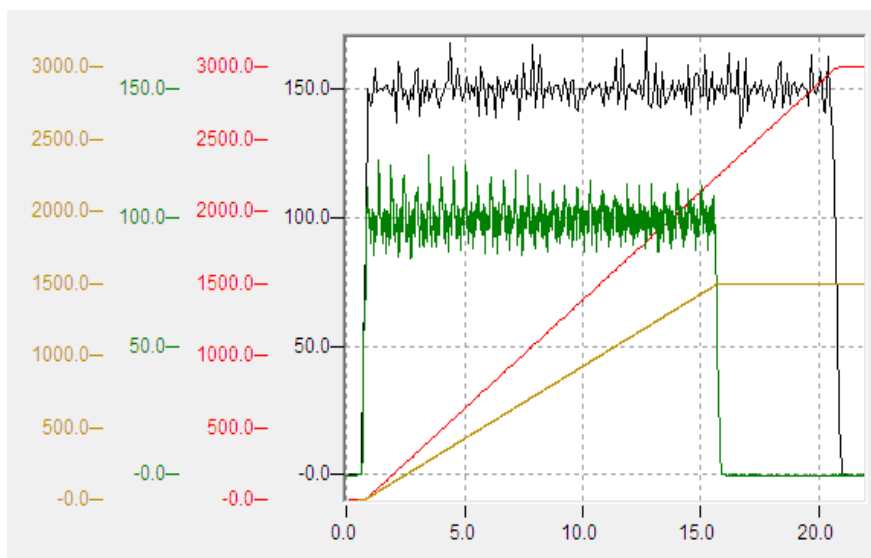


图 5-12 示波器监控

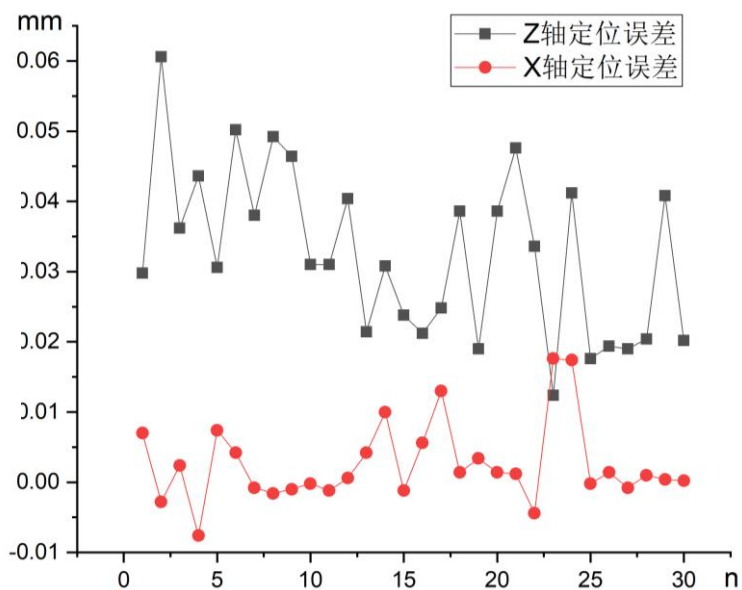


图 5-13 30 组定位误差

图 5-13 为测试 30 次的定位误差，其精度为 0.01mm。选取其中 Z、X 轴误差最低的数据分别为 Z 轴的第 23 次采集和 X 轴的第 30 次采集，分别作出线性分析。表 5-3 和表 5-4 为采集的数据。线性拟合的结果如图 5-14、5-15 所示。

表 5-3 Z 轴运动数据

Start Data: 2020/5/9 11:53:12 183 ms			
编号	Time	Z 轴速度 (mm/s)	Z 轴位置 (mm)
1	1	143.504	38.934
2	2	147.659	188.824
3	3	146.242	339.349
4	4	155.990	488.817
5	5	151.615	638.877
6	6	149.277	788.345
7	7	153.911	938.913
8	8	144.227	1088.738
9	9	148.590	1238.834
10	10	145.139	1389.262
11	11	148.836	1538.952
12	12	147.312	1688.819
13	13	153.849	1838.50
14	14	150.391	1988.911
15	15	147.686	2138.717

16	16	154.515	2288.913
17	17	143.528	2439.096
18	18	147.583	2589.096
19	19	152.598	2738.860
20	20	144.395	2888.569
21	21	0.564	3000.022
22	22	-0.026	3000.012

表 5-4 X 轴运动数据

Start Data: 2020/5/9 11:53:12 183 ms			
编号	Time	X 轴速度(mm/s)	X 轴位置 (mm)
1	1	98.707	38.714
2	2	101.118	101.118
3	3	97.867	238.803
4	4	92.418	338.829
5	5	101.362	438.939
6	6	111.143	538.927
7	7	107.479	638.519
8	8	95.407	738.325
9	9	99.217	838.338
10	10	96.196	938.546
11	11	92.777	1038.758
12	12	94.230	1138.736
13	13	103.966	1238.807
14	14	104.141	1338.774
15	15	101.707	1438.742
16	16	-0.00005	1500.029
17	22	-0.000003	1500.000

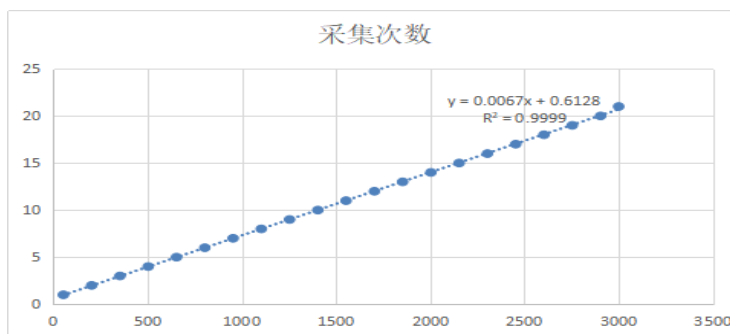


图 5-14 Z 轴的线性拟合

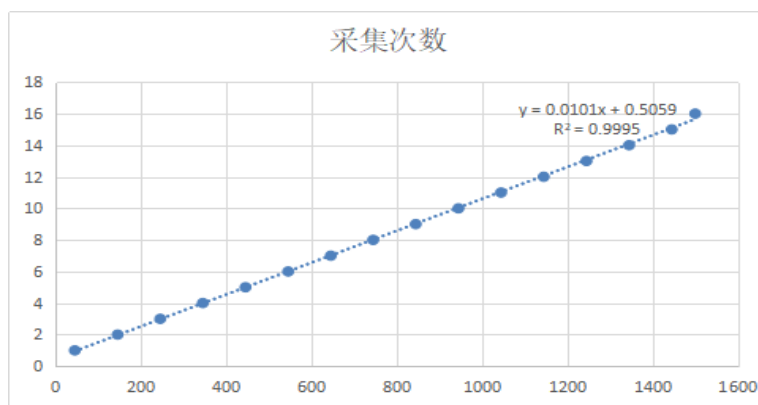


图 5-15 X 轴的线性拟合

从图 5-13、5-14 和 5-15 中可以看出两个伺服轴的线性拟合度很高，其中的 r 值都在 $0 < r < 1$ 区间内，可以预测其在整个行程中的伺服系统的稳定性，所以运行测试的结果达到了预期的要求。但伺服电机的控制精度还有待提高，其中产生误差的原因包括伺服电机的精度不高，机械传动不太可靠，运动控制程序的编写还有待优化。

通过以上对开放式机电传动控制实验平台的测试，其结果可以达到使用要求，其实际使用过程也比较方便。期间也能完全调动学生做实验的积极性，激发了学生做实验的兴趣，开拓学生的思维，培养了能力，也有良好的教学效果^[21]，完成了本次的既定目标。

结论

本文的主要目的是基于学校原有的机电传动控制实验平台的开放式设计及制作，通过自己所学的知识以及查找相关的资料，对原有平台上的设备进行了深入的了解，确定了相关的控制流程及原理。做了一定的理论分析和设计工作。主要完成了以下工作：（1）根据已有的实验平台，在先期进行理论分析及设备原理分析。找出原有设备的不足之处。（2）使用绘图软件进行重新设计，包括使用 Eplan 进行电气原理图的绘制及开放式实验平台的外观设计。（3）根据课程的要求进行测试实验、编写程序，检测新平台可以达到预期要求。包括可以完成对轴的伺服控制，可以使用变频器进行变频调速。

最后展望，该设备还可以根据实际的工作需求进行电子器件的添加，实现其它的功能。例如将现有的两轴车床伺服控制，变为三轴铣床伺服控制，甚至是多轴机床。再例如还可将其改造成收放卷的张力控制系统进行教学研究。

该系统也有不足之处，现将改善的地方做如下说明：（1）在实验中，未能在其上面安装刀架及换刀装置，如果能通过软件和硬件设计一个刀库功能，在实验中可以换刀，则这套设备将能更加贴近现实工作的要求。（2）在程序设计上和运动控制上由于自身的学识有限，无法将其优化到最好，后续研究者可以深入研究完善改进。

参考文献

- [1] 谢绍冬. 机电传动控制实验系统与创新教学研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2015.
- [2] 汪焯. 应用型本科《机电传动控制》课程教学改革研究[J]. 课程教育研究, 2013(22):220.
- [3] 曹辉, 张俊俊. 机电控制技术实验系统开发[J]. 大学物理实验, 2017,30(02):68-71.
- [4] J.V.Martín,F.Tadeo, Learning fieldbus technology using open and flexible educational equipment [J]. IFAC Proceedings Volumes Volume 39, Issue 6 2006, Pages 377-382.
- [5] 范子文. 机电传动控制实验课程创新教学研究和实现[D]. 湖北: 华中科技大学, 2017.
- [6] HanyBassily, RajatSekhon, David E.Butts, JohnWagner,A mechatronics educational laboratory – Programmable logic controllers and material handling experiments[J]. Mechatronics Volume 17, Issue 9, November 2007, Pages 480-488.
- [7] Özgür Cemal Özerdem, Design of two experimental setups for programmable logic controller (PLC) laboratory [J]. International Journal of Electrical Engineering Education 0(0) 1 - 10 The Author(s) 2016.
- [8] 王蕊. 基于 PLC 的机电液一体化实验平台测控系统研发[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [9] 季汉棋. 机电一体类课程实验教学平台的研究及其实现[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [10] Bruce Armitage,George Dunlop,David Hutchison,Shousan Yu, Fieldbus:an emerging communications standard [J]. Microprocessors and Microsystems Volume 12,Issue 10 December 1988Pages 555-562.
- [11] RobertPatzke, Fieldbus basics [M]. Computer Standards & Interfaces Volume 19, Issues 5-6, 15 October 1998, Pages 275-293.
- [12] 钟亮. 基于 PLC 的纸机电气传动控制系统设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [13] 黎妞. 基于 EtherCAT 的伺服运动控制系统研究[D]. 湖北: 武汉科技大学, 2012.
- [14] S.Vitturi,L.Peretti,L.Seno,M.Zigliotto,C.Zunino,Real-time Ethernet networks for motioncontrol [J]. Computer Standards & Interfaces Volume 33, Issue 5September 2011Pages 465-476.
- [15] 戴俊欢. 基于 EtherCAT 多轴伺服控制系统的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [16] 徐青. 跑步机专用变频器设计[D]. 山东: 山东科技大学, 2008.
- [17] 杜亚男, 周惠兴, 刘天宇, 张俊杰. 基于 Beckhoff 的瓷砖铺贴机器人控制系统设计[J]. 科学技术与工程, 2020,20(03):1086-1091.
- [18] 张从鹏, 赵康康. 基于 EtherCAT 技术的多轴运动控制系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(01):115-118+122.
- [19] RolfIsermann,Mechatronic systems-Innovative products with embedded control [J]. Control Engineering Practice Volume 16, Issue 1January 2008Pages 14-29.

- [20] 德国倍福电气有限公司. TwinCAT PLC 编程手册[M]. 北京: 德国倍福电气有限公司北京代表处. 2016.
- [21] 刘霆, 杨建武. 伺服驱动教学实验系统的设计与应用 [J]. 实验技术与管理, 2001(06):57-59+62.

附录

程序:

在程序中声明 MC_Jog、MC_Power、MC_MoveRelative、MC_SetPosition。

声明:

```
PROGRAM MAIN
VAR
axis1,axis2:axis_ref;
power1,power2:MC_Power;
jog1:MC_jog;
Jog2:MC_jog;
Jog3:MC_jog;
Jog4:MC_jog;
Zpower_do:BOOL;
Xpower_do:BOOL;
ZjogForward_for:BOOL;
ZjogBackwards_for:BOOL;
XjogForward_for:BOOL;
XjogBackwards_for:BOOL;
move_r1:MC_MoveRelative;
move_r2:MC_MoveRelative;
move_do:BOOL;
setpos1,setpos2:MC_SetPosition;
set_do:BOOL;
END_VAR
```

在程序编写窗口中按 F2，在 Local Variable 中选择相应的功能文本并插入，程序:

```
power1(*轴使能*)
(Enable:=Zpower_do,(*触发 Z 轴使能变量置 1 时上电*)
Enable_Positive:=TRUE,(*Z 轴正向置 1 上电*)
Enable_Negative:=TURE,(*Z 轴负向置 1 上电*)
Override:=100,(*速度比 100*)
BufferMode:=,
Axis:=axis1, (*与轴 1 链接*)
Status=>,
Busy=>,
Active=>,
Error=>,
ErrorLD=>);

power2(*轴使能*)
(Enable:=Xpower_do,(*触发 X 轴使能变量置 1 时上电*)
Enable_Positive:=TRUE,(*X 轴正向置 1 上电*)
Enable_Negative:=TURE,(*X 轴负向置 1 上电*)
Override:=100,(*速度比 100*)
```

```
BufferMode:=,  
Axis:=axis2, (*与轴 2 链接*)  
Status=>,  
Busy=>,  
Active=>,  
Error=>,  
ErrorLD=>);
```

```
Jog1(*点动*)  
  (JogForward:=ZjogForward_for,(*触发 Z 轴正向点动变量当为 1 时运动*)  
JogBackward:=,  
Mode:=,  
Position:=,  
Velocity:=,  
Acceleration:=,  
Deceleration:=,  
Jerk:=,  
Axis:=axis1,(*与轴 1 链接*)  
Done=>,  
Busy=>,  
Active=>,  
CommandAborted=>,  
Error=>,  
ErrorLD=>);
```

```
Jog2(*点动*)  
  (JogForward:=,  
JogBackward:=ZjogBackwards_for,(*触发 Z 轴负向点动变量当为 1 时运动*)  
Mode:=,  
Position:=,  
Velocity:=,  
Acceleration:=,  
Deceleration:=,  
Jerk:=,  
Axis:=axis1,(*与轴 1 链接*)  
Done=>,  
Busy=>,  
Active=>,  
CommandAborted=>,  
Error=>,  
ErrorLD=>);
```

```
Jog3(*点动*)  
  (JogForward:=XjogForward_for,(*触发 X 轴正向点动变量当为 1 时运动*)
```

```

JogBackward:=,
Mode:=,
Position:=,
Velocity:=,
Acceleration:=,
Deceleration:=,
Jerk:=,
Axis:=axis2>(*与轴 2 链接*)
Done=>,
Busy=>,
Active=>,
CommandAborted=>,
Error=>,
ErrorLD=>);

Jog4(*点动*)
(JogForward:=,
JogBackward:=XjogBackwards_for>(*触发 X 轴负向点动变量当为 1 时运动*)
Mode:=,
Position:=,
Velocity:=,
Acceleration:=,
Deceleration:=,
Jerk:=,
Axis:=axis2>(*与轴 2 链接*)
Done=>,
Busy=>,
Active=>,
CommandAborted=>,
Error=>,
ErrorLD=>);

move_r1(*相对运动*)
(Execute:=move_do, (*触发块变量置 1 上电*)
Distance:=3000, (*移动距离*)
Velocity:=150, (*移动速度*)
Acceleration:=,
Dcecleration:=,
Jerk:=,
BufferMode:=,
Options:=,
Axis:=axis1, (*与轴 1 链接*)
Done=>,

```

```
Busy=>,
Active=>,
CommandAborted=>,
Error=>,
ErrorID=>);

move_r2(*相对运动*)
(Execute:=move_do, (*触发块变量置 1 上电*)
Distance:=1500, (*移动距离*)
Velocity:=100, (*移动速度*)
Acceleration:=,
Dcecleration:=,
Jerk:=,
BufferMode:=,
Options:=,
Axis:=axis2, (*与轴 2 链接*)
Done=>,
Busy=>,
Active=>,
CommandAborted=>,
Error=>,
ErrorID=>);

setpos1(*设定位置*)
(Execute:=set_do, (*触发块功能置 1 上电*)
Position:=0, (*设定当前位置*)
Mode:=,
Options:=,
Axis:=axis1, (*与轴 1 链接*)
Done=>,
Busy=>,
Error=>,
ErrorID=>);

setpos2(*设定位置*)
(Execute:=set_do, (*触发块功能置 1 上电*)
Position:=0, (*设定当前位置*)
Mode:=,
Options:=,
Axis:=axis2, (*与轴 2 链接*)
Done=>,
Busy=>,
Error=>,
ErrorID=>);
```

致谢

两年时光匆匆，听惯了校园教室课本翻动的窸窣声，初春阳光微微泛起丝丝热意，我们的校园生活也即将迎来属于自己的终点。快了，太快了，这一切的熟悉都将在我的脑海里化作过去永恒的回忆，那一花一叶，一砖一瓦，铭刻着我们岁月的痕迹，带不走，却带不走的是我这颗爱母校的心。

对于母校，我们玩乐了小学，懵懂了初中，奋斗的高中，终于成熟了的是大学，两年的学习在这最后的时刻我们做好了最后的冲刺，在本次设计课题中，我又学习到了很多的新知识，对于这台设备我也竭尽全力，要将自己最好的作品留给母校，在设计中凝结着我们对学校最深刻的回忆。

本研究课题能够顺利的进行，得益于庞老师的悉心指导，不管是从开始定方向还是在查资料准备的过程中，一向都耐心地给予我指导和意见，使我在撰写论文方面有了很大提高；在制作设备遇到困难时，庞老师为我指明了方向，提供了大量的资源，为课题的顺利进行提供了保障，在此向庞老师致以深深的敬意和由衷的感谢。同时也显示老师高度的敬业精神和职责感。还要感谢在一起愉快的度过大学生活的每个同学，正是由于你们的帮助和支持，我才能克服一个又一个的困难和疑惑。学校无微不至的关怀是对我最大的帮助，在生活和学习中给我们提供便利的条件，让我感受到了家的温暖。最后要感谢的是我的父母，他们不仅培养了我浓厚的学习兴趣，让我在漫长的人生旅途中是心灵有了虔诚的皈依，而且也为我能够顺利的完成毕业论文提供了巨大的支持与帮助。在未来的日子里，我会跟加努力的学习和工作，不辜负父母对我的殷殷期盼！我一定会好好孝敬他们，报答他们！再见了，结束了，我亲爱的母校，这是我们能献给你最好的礼物，感谢这两年来你最温馨的陪伴。

最后，由衷的感谢百忙之中参与评审论文和答辩的各位专家、教授，感谢你们对论文提出宝贵意见。