

四川省产教融合示范项目系列教材

电机与控制实验教程

主 编 © 倪文波

副主编 © 陈 勇

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

“电机与控制”课程是机械类专业的一门重要的专业基础课程。电动机的电气控制系统，特别是 PLC 控制系统设计是课程教学的重要组成部分。

最初的可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）以逻辑控制为主，其是以微处理器为核心的工业通用自动控制装置，具有控制能力强、使用方便灵活、小型化、可靠性高、易于扩展、通用性强等优点。不仅可以取代传统的继电器控制系统，还可以进行复杂的生产过程控制并应用于工厂自动化网络。现在 PLC 已扩展了模拟量调节、数字运算、监控、通信及联网等功能，所以将其改为可编程序控制器（Programmable Controller, 即 PC）。但为与个人计算机 PC 相区别，仍然将其称为 PLC。

PLC 控制技术是现代工业四大支柱技术（PLC、机器人、CAD/CAM、数控）之一，已经广泛运用于工业生产各个领域，掌握 PLC 控制技术是课程教学的重点和难点。为此，在四川省“交大-九洲电子信息装备产教融合示范”项目资助下开展课程实验课程建设。结合最新工业现场中关于伺服电机、步进电机、变频电机等新型电机技术、现场总线、触摸屏显示控制、传感器技术的发展，课程教学组以工业现场电机控制及 PLC 控制为目标，更新了原有 PLC 控制系统实验设备。同时考虑当前学生在计算机语言学习方面水平的提高，摒弃了原有着重于对 PLC 编程语言学习为主的教学思路，设计开发了面向工业现场控制的实验项目。通过实验项目练习，可提高学生的电机 PLC 控制水平、软件开发及动手能力，巩固课堂教学效果。本实验内容有助于提升学生将来在工作中开发新型机电一体化产品的能力，对提高工业生产效率有很重要的意义。

研究生郭炎冰参与完成了实验教程的编写，并完成了实验项目的程序调试，实验台安装工作。特此表示感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者提出宝贵的建议和意见。

编者

2023 年 4 月

第 1 章 实验设备概述	1
1.1 S7-200 SMART CPU	2
1.2 模拟量输入/输出扩展模块 EM AM03	6
1.3 7 寸触摸屏	10
1.4 步进电机及丝杠副模块	12
1.5 三相电机	18
1.6 变频器	19
1.7 伺服电机	21
1.8 伺服驱动器	24
1.9 编码器	28
1.10 继电器	30
第 2 章 STEP 7-Micro/WIN SMART 软件使用	32
2.1 软件安装与卸载	32
2.2 软件界面介绍	34
2.3 桌面的菜单结构	35
2.4 建立一个完整项目	37
2.5 变量符号表	41
2.6 系统块	45
2.7 程序调试	52
2.8 交叉引用	54
2.9 工具	54
2.10 帮助菜单	55
第 3 章 EasyBuilder Pro 软件介绍	56
3.1 HMI 的概念和功能	56
3.2 安装 EasyBuilder Pro	57
3.3 软件界面介绍	60
3.4 HMI 与 PLC 的通信	64
3.5 建立简单的工程文件	65
3.6 组态简单的 HMI 界面	66
3.7 下载文件至 HMI	70

第 4 章 综合实验	76
4.1 数字量输入输出控制	76
4.2 触摸屏数字量输入输出	80
4.3 传感器信息采集及触摸屏显示	84
4.4 使用 PLC 完成对步进电机的控制	91
4.5 使用变频器完成三相异步电机的多段速度控制	102
4.6 使用伺服驱动器进行伺服电机控制	112
参考文献	117

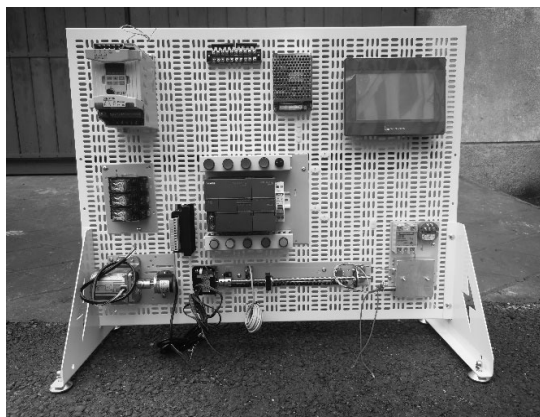
第 1 章 实验设备概述

电机的继电器控制系统已经在“电工技术”课程有所涉及，因此本门实验课程只包含 PLC 控制系统设计所涉及的硬件和软件学习。考虑实验台成本，分别建立了变频器电机模块实验台和伺服电机模块实验台，如图 1.1 所示。实验台上设备主要包含 PLC 及模拟输入输出模块、微型三相变频电机及变频器、伺服电机及驱动控制器、步进电机及驱动控制器、触摸屏、丝杆螺母、编码器、温度传感器，以及常用的低压电器，如表 1.1 所示。

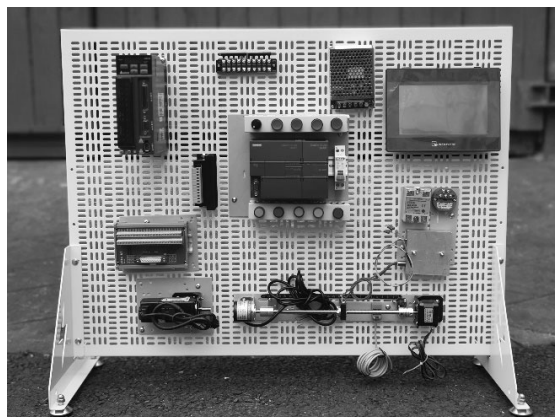
实验台上设备通过组合，完成的控制范围基本覆盖工业控制现场常见运用，包括简单的按钮指示灯逻辑控制、基于网络的触摸屏控制及显示、三相电机变频调速控制、步进电机速度及位置控制，以及伺服电机速度闭环控制系统的控制等。

实验台采用模块化设计，除完成“电机与控制”“机电传动与控制”课程实验教学内容要求外，还可以开展 PLC 控制的工程实训。

本章将简要介绍试验台上主要设备的结构、工作原理和接线。



(a) 变频电机及变频器模块实验台



(b) 伺服电机模块实验台

图 1.1 实验台实物照片

表 1.1 控制设备清单

序号	设备名称	型号规格	数量	备注
1	PLC 主机	ST20 DC/DC/DC	1	
2	PLC 数据采集模块	AM03	1	
3	7 寸触摸屏	TK8071iP	1	
4	步进电机	42BYCH34-401A	1	
5	步进电机驱动器	MicrostepDriverTB6600	1	
6	三相电机	3IK15A-S	1	

续表

序号	设备名称	型号规格	数量	备注
7	变频器	VFD-M	1	
8	伺服电机	台达 ECMA-C20401ES	1	
9	伺服电机驱动器	台达 ASDA-B2	1	
10	丝杆螺母	直径 8 mm, 导程 8 mm	1	
11	温度传感器及变送器	PT100	1	
12	编码器	HN3806-AB-600N	1	
13	固态继电器	SSR-40DA	1	
14	开关电源	MS-50-24	1	
15	继电器	OmronLY2N-J	1	
16	断路器	DZ32-32 C16	1	
17	USB 转 485 模块/网口		各 1	
18	限位开关	V-155-1C25	2	
19	按钮开关	LA9	5	
20	指示灯	AD6-A	5	
21	旋钮开关	AB6-A	1	
22	加热棒		1	
23	交换机	TP-LINKTL-SF1005D	1	
24	工具、网线及导线		若干	

1.1 S7-200 SMART CPU

1.1.1 CPU 特性

S7-200 SMART CPU 是西门子公司继 S7-200 CPU 系列产品之后推出的小型 CPU(中央处理器), CPU 本体集成了一定数量的数字量 I/O 接口。其中标准型 CPU 集成一个 RJ45 以太网接口和一个 RS485 接口, 紧凑型 CPU 仅集成一个 RS485 接口。S7-200 SMART 系列 CPU 不仅提供了多种型号 CPU 和扩展模块, 能够满足各种配置要求, 其内部还集成了高速计数、PID 和运动控制等功能, 以满足各种控制要求。

目前西门子 S7-1200 系列 CPU 是其最新型的小型 PLC, 其基本功能与 S7-200 SMART 相差不多, 主要区别在于强调了网络化, 在本体上集成了 PROFINET 网络接口。从学习 PLC 控制系统编程原理、项目开发的角度来说, S7-200 SMART 系列 PLC 已经能够满足绝大多数工业运用要求, 且学习资料较多, 因此实验台上仍然选用相对便宜的 S7-200 SMART 系列 PLC。

本实验台上 PLC 采用的 CPU 型号为 ST20DC/DC/DC, 技术参数如表 1.2 所示。

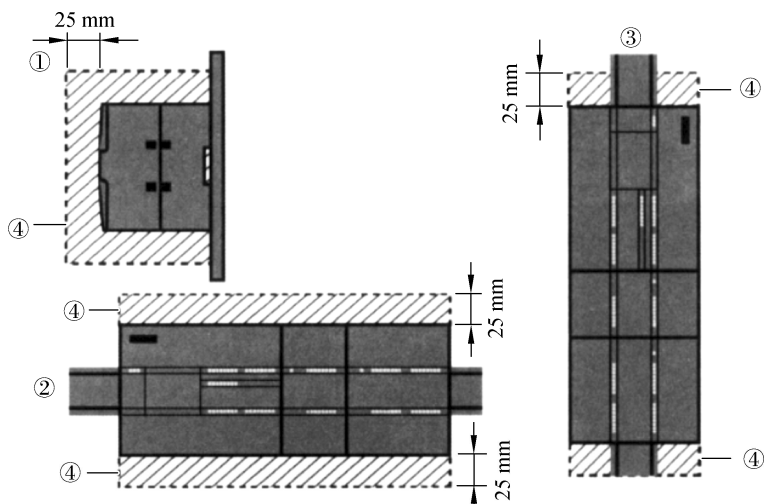
表 1.2 ST20DC/DC/DC 技术参数

参数名称		说明
外形尺寸 $W \times H \times D$		90×100×81
用户存储器	程序	12 kb
	用户数据	8 kb
	保持性	最大 10 kb
板载数字量 I/O	输入	12 DI
	输出	8 DQ (晶体管)
扩展模块		最多 6 个
信号板		1
高速计数器		200 kHz 时 4 个 (单相) 或 100 kHz 时 2 个 (A/B 相)
脉冲输出		2 个, 100 kHz
实时时钟, 备用时间 7 天		有

1.1.2 安装

1. CPU 和机架安装尺寸要求

S7-200 SMART CPU 本体和扩展模块体积小, 易于安装, 可采用水平或垂直方式安装在面板或标准 35 mm DIN 导轨上。S7-200 SMART 采用空气自然对流进行冷却, 因此在安装时必须在其上方和下方至少留出 25 mm 的间隙。此外, 模块前端与机柜内壁间应至少留出 25 mm 的深度。CPU 安装尺寸如图 1.2 所示。



①俯视图; ②水平安装;
③垂直安装; ④空隙区域。

图 1.2 CPU 安装尺寸

2. EM 扩展模块的安装与拆卸

S7-200 SMART CPU 扩展模块通过插针与 CPU 本体连接。EM 扩展模块连接方式如图 1.3 所示。

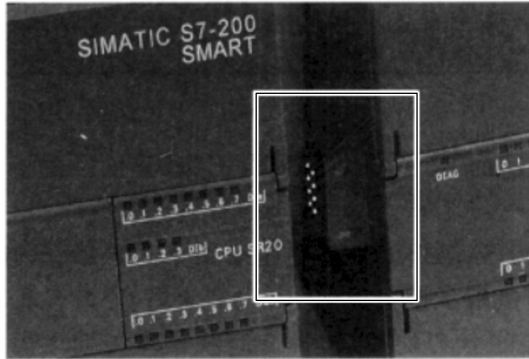


图 1.3 EM 连接方式

在安装 EM 扩展模块时，注意扩展模块上下两个固定插销和扩展插针这三个凸起点（见图 1.4）都要与 CPU 本体连接妥当。用力向外拔即可分离 CPU 本体和 EM 模块。可根据实际应用的需要选择是否扩展 EM 扩展模块以及扩展的个数。多个 EM 扩展模块之间没有先后顺序的要求，应结合实际硬件安装情况进行布线安装。

实验台上有一个数据采集扩展模块 EM03，具有 2 路模拟输入和 1 路模拟输出，可用于采集传感器输出模拟信号和输出模拟信号来控制变频器。

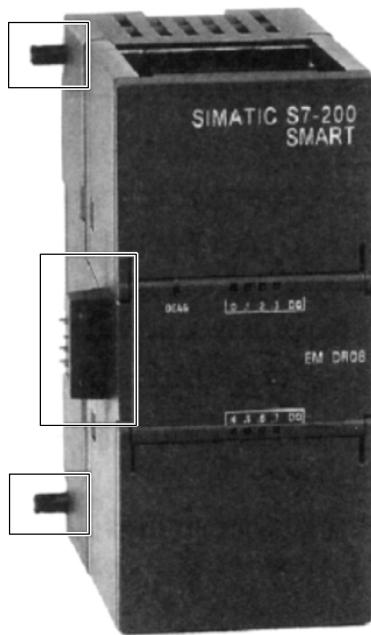


图 1.4 EM 的三个凸起点

1.1.3 供电接线

1. CPU 供电接线

S7-200 SMART CPU 本体有两种供电类型：24 V DC 和 120/240 V AC。DC/DC/DC 类型的 CPU 供电是 24 V DC；AC/DC/RLY 类型的 CPU 供电是 220 V AC。ST20 为 DC/DC/DC 类型的 CPU，采用 24 V DC 供电。图 1.5 给出了 S7-200 SMART CPU 供电的端子名称和接线方法，直流供电和交流供电接线端子的标识是不同的，接线时务必确认 CPU 的类型及其供电方式。

凡是标记为 L1/N 的接线端子，都是交流电源端；凡是标记为 L+/M 的接线端子，都是直流电源端。L+ 接 24 V DC，M 接地（0 V）。

注意：PE 是保护地（屏蔽地），可以连接到三相五线制的地线，或者接机柜金属壳，或者接真正的大地。PE 绝对不可以连接交流电源的零线（N，即中性线）。正常情况下，为抑制干扰也可以把 CPU 直流传感器电源的 M 端与 PE 连接，但若接地情况不理想则不能这样接线。

2. 传感器电源接线

S7-200 SMART 标准型 CPU 本体在模块右下角的位置都有一个 24 V DC 传感器电源，可以用来给 CPU 本体的 I/O 点、EM 扩展模块、SB 信号板上的 I/O 点供电，最大的供电能力为 300 mA。该传感器电源的端子名称和接线方式如图 1.6 所示。

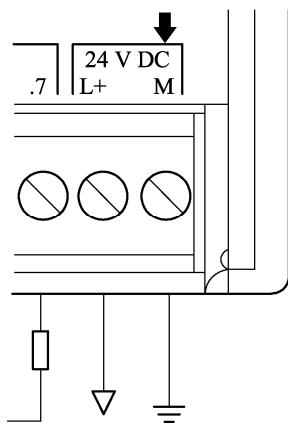


图 1.5 ST20 供电接线

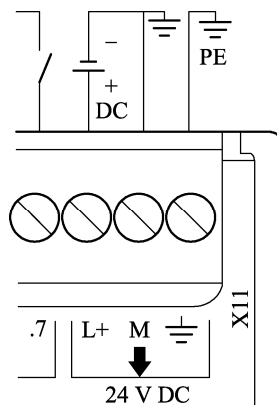


图 1.6 传感器电源接线

3. EM 扩展模块电源接线

不是所有的 EM 扩展模块都需要为其供电，比如 EM DT08 模块就不需要 24 V DC 电源。需要供电的 EM 扩展模块外接 24 V DC 电源，接线方式与 CPU 的 24 V DC 电源的接线方式一致。

1.1.4 I/O 信号接线

1. 数字量输入接线

S7-200 SMART CPU 本体的数字量输入都是 24 V DC 回路，可以支持漏型输入（回路电流从外接设备流向 CPU DI 端）和源型输入（回路电流从 CPU DI 端流向外接设备）两种输入信号。数字量输入接线方式如图 1.7 所示，对于漏型输入 CPU DI 接线端子 1M 接 24 V DC 电

源的负极，对于源型输入 1M 端接 24 V DC 电源的正极。漏型和源型输入分别对应 PNP 和 NPN 输出类型的传感器信号。

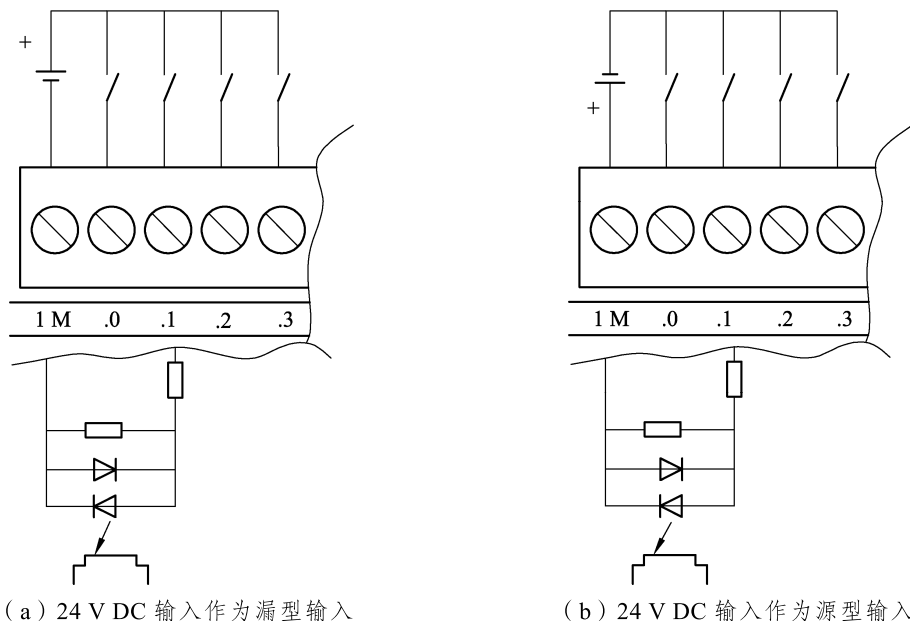


图 1.7 数字量输入接线

2. 数字量输出接线

S7-200 SMART CPU 本体的数字量输出有两种类型：24 V 直流晶体管和继电器，其接线方式如图 1.8 所示。晶体管输出的 CPU 只支持源型输出，如实验台上的 ST20。继电器输出可以接直流信号也可以接 120 V/240 V 的交流信号。

1.2 模拟量输入/输出扩展模块 EM AM03

EM AM03 模块是西门子 PLC 的模拟量输入/输出扩展模块，可以为 CPU 提供 2 路模拟量输入和 1 路模拟量输出。

1. 模拟量输入接线

模拟量类型的模块有三种：普通模拟量模块、RTD 模块和 TC 模块。

普通模拟量模块可以采集标准电流和电压信号。其中，电流包括 0 ~ 20 mA，4 ~ 20 mA 两种信号，电压包括 ± 2.5 V、 ± 5 V、 ± 10 V 三种信号。S7-200 SMART CPU 本体上普通模拟量通道值范围是 0 ~ 27 648 或 -27 648 ~ 27 648。

普通模拟量模块接线端子分布如图 1.9 所示，每个模拟量通道都有两个接线端。

模拟量电流、电压信号根据模拟量传感器仪表或设备的线缆个数分成四线制、三线制、两线制三种类型，不同类型的信号其接线方式不同。

四线制信号指的是模拟量传感器仪表或设备上信号线和电源线加起来有 4 根线，仪表或设备有单独的供电电源，除了两个电源线还有两个信号线。模拟量电压/电流四线制信号的接线方式如图 1.10 所示。

24 V DC 晶体管输出
(源型)

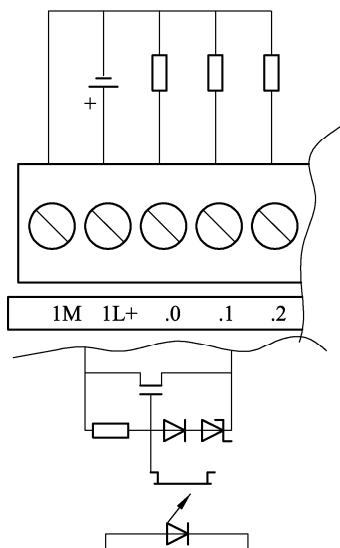


图 1.8 数字量输出接线

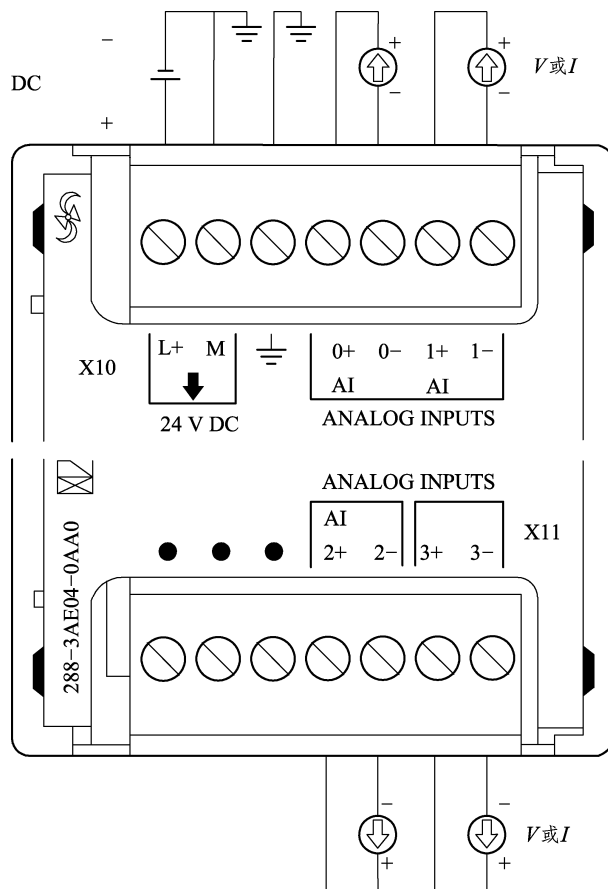


图 1.9 普通模拟量模块接线

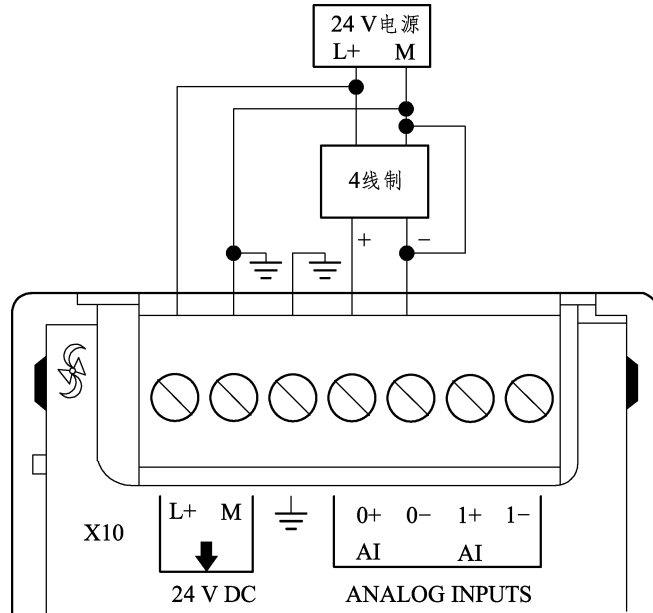


图 1.10 模拟量电压/电流四线制信号接线

三线制信号指的是传感器仪表或设备上信号线和电源线加起来有 3 根线，负信号线与供电电源 M 线为公共线。模拟量电压/电流三线制信号的接线方式如图 1.11 所示。

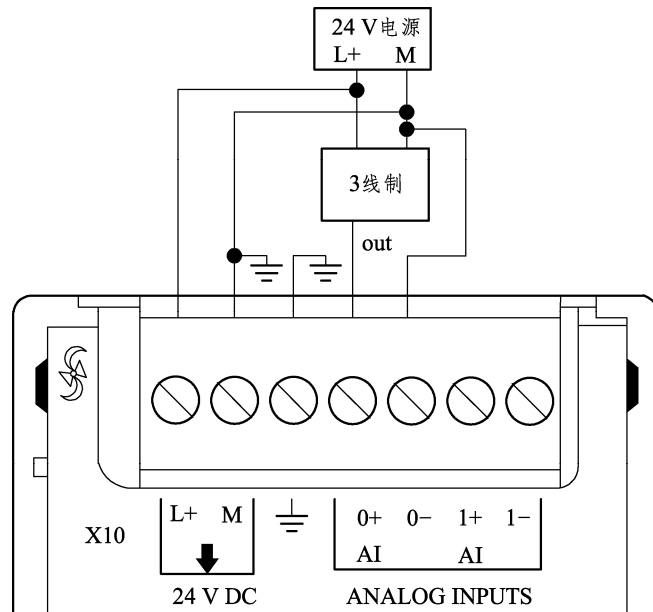


图 1.11 模拟量电压/电流三线制信号接线

两线制信号指的是仪表或设备上信号线和电源线加起来只有两个接线端子。由于 S7-200 SMART CPU 模拟量模块通道没有供电功能，仪表或设备需要外接 24 V DC 电源。模拟量电压/电流两线制信号的接线方式如图 1.12 所示。

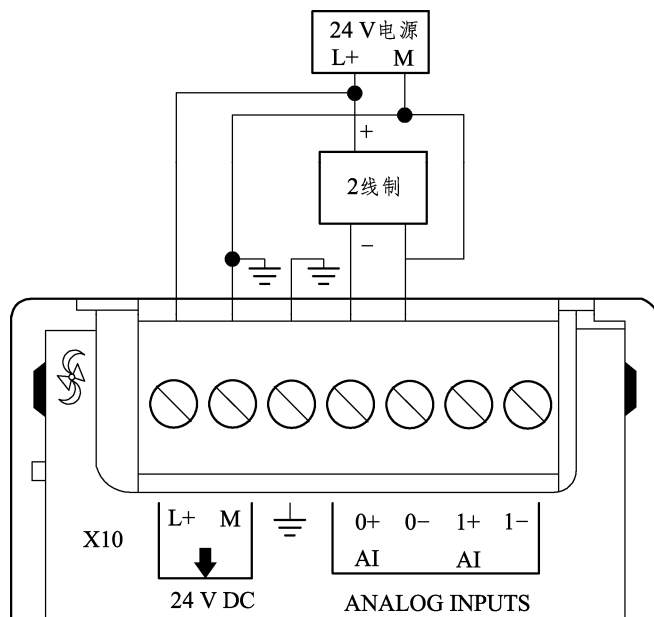


图 1.12 模拟量电流/电压两线制信号接线

实验台上使用的温度传感器经过变送器输出的是两线制信号，按照图 1.12 接线。对于不使用的模拟量通道，要将通道的两个信号端短接，接线方式如图 1.13 所示。

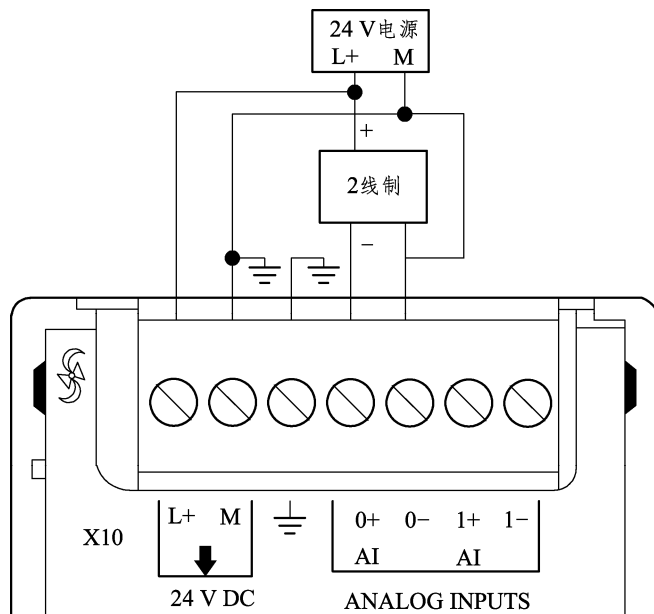


图 1.13 不需要使用的通道需要短接

2. 模拟量输出接线

EM AM03 模块模拟量输出均为四线制信号，每个通道都有两个接线端，最终输出是电流信号还是电压信号以编程软件内系统块设置为准，默认输出是电压信号。模拟量输出接线方式如图 1.14 所示。

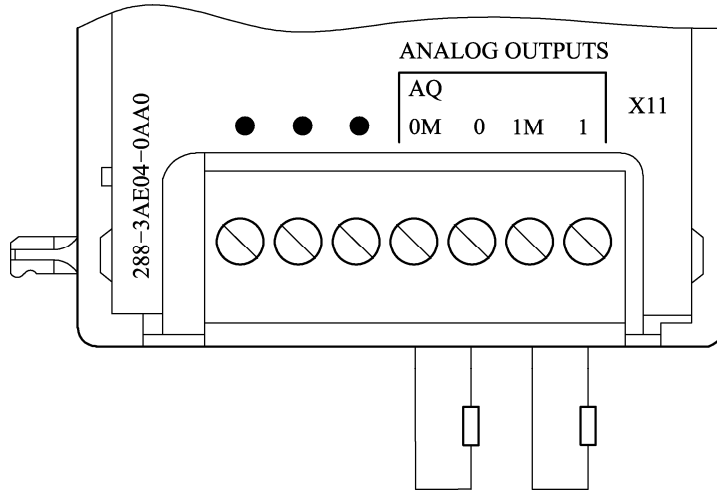


图 1.14 模拟量输出接线

1.3 7寸触摸屏

本实验台配有一块 7 寸（1 寸≈2.33 厘米）触摸屏作为 PLC 的 HMI（人机接口）设备，如图 1.15 所示。用户可通过 HMI 设备对 CPU 发出控制指令或进行 PLC 工作状态和变量状态的显示，通常 HMI 设备具有以下功能：

- 显示 CPU 当前的控制状态、过程变量。
- 显示报警信息。
- 通过按钮或者可视化图片按键输入数字量、数值等。
- 通过 HMI 设备的内置功能对 CPU 内部进行简单的监控、设置等。

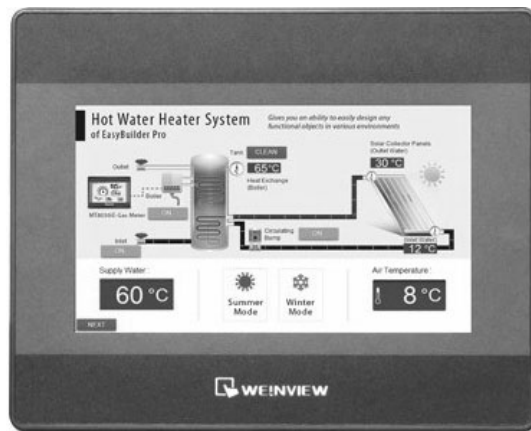


图 1.15 威纶通 TK8071iP 触摸屏

S7-200 SMART CPU 既可以通过控制器本体集成的以太网口来连接支持 S7 协议的西门子 HMI 设备，还可以通过控制器本体集成的 RS485 端口或信号板连接支持 PPI 协议的其他品牌 HMI 设备。本实验台采用威纶通 TK8071iP 触摸屏，与 PLC 的连接采用串行 RS485 总线，PPI 协议；触摸屏提供以太网接口用于下载程序，其配备的接口如图 1.16 所示。

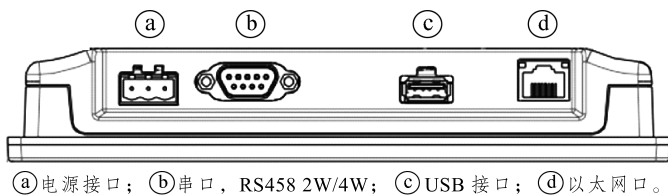


图 1.16 威纶通 TK8071iP 接口

表 1.3 TK8071iP 技术参数

显示	显示器	7" TFT
	分辨率	800×480
	亮度 (cd/m ²)	350
	对比度	500 : 1
	背光类型	LED
	背光寿命	>30 000 小时
	色彩	16.7 M
	LCD 可视角(T/B/L/R)	70/50/70/70
触控面板	类型	四线电阻式
	触控精度	动作区 长度 (X) ±2%，宽度 (Y) ±2%
存储器	闪存 (Flash)	128 MB
	闪存 (RAM)	128 MB
处理器		ARM RISC 528 MHz
I/O 接口	SD 卡插槽	无
	USB Host	USB 2.0×1
	USB Client	无
	以太网接口	10/100 Base-T×1
	串行接口	COM1: RS-232, COM2: RS-485 2 W/4 W
	RS-485 双重隔离保护	无
	CAN Bus	无
	声音输出	无
	影像输出	无
万年历		内置
电源	输入电源	10.5~28 V DC
	电源隔离	内置
	功耗	500 mA@12 V DC; 300 mA@24 V DC
	耐电压	500 V DC (1 分钟)
	绝缘阻抗	超过 50 MΩ at 500 V DC
	耐振动	10 to 25 Hz (X, Y, Z 轴向 2G 30 分钟)

续表

规格	PCB 涂层	无
	外壳材质	工程塑料
	外形尺寸 W×H×D	200.4×146.5×34 mm
	开孔尺寸	192×138 mm
	重量	约 0.52 kg
	安装方式	面板安装
操作环境	防护等级	NEMA4/IP65 Compliant Front Panel
	储存环境温度	-20°~60°C (-4°~140°F)
	操作环境温度	0°~50°C (32°~122°F)
	相对湿度	10%~90% (非冷凝)
认证	CE	符合 CE 认证标准
软件		限于简体中文版 EBPro V6.03.02 或更新版本使用 EasyAccess 2.0 (选购)

触摸屏要控制或显示 PLC 控制器上的动作和信息，需要专用的编程软件（EasyBuilder Pro 软件）进行开发。

1.4 步进电机及丝杠副模块

试验台上步进电机及丝杠副模块如图 1.17 所示。步进电机通过联轴器驱动丝杠转动，带动螺母上的滑块前后移动。限位开关用于当滑块触碰时产生相应信号，控制步进电机停止或反向。可通过标尺观察滑块的位移。可通过接近开关实现位置控制。

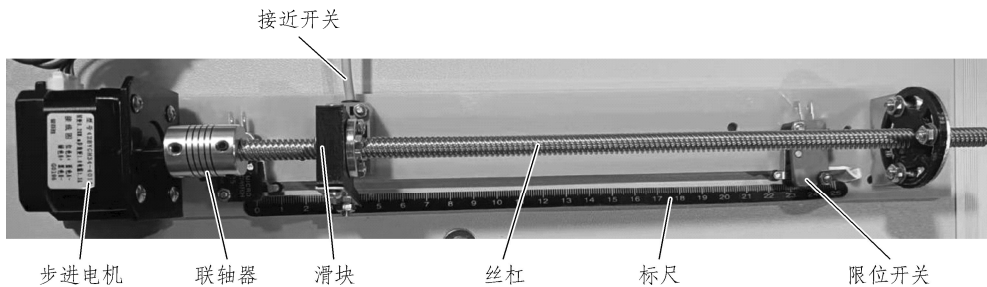


图 1.17 步进电机实验模块

1. 步进电机结构

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件，通过控制施加在电机线圈上的电脉冲顺序、频率和数量，可以实现对步进电机的转向、速度和旋转角度的控制。配合以直线运动执行机构或齿轮箱装置，更可以实现更加复杂、精密的线性运动控制要求。步进电机一般由前后端盖、轴承、中心轴、转子铁芯、定子铁芯、定子组件、波纹垫圈、螺钉等部分构成，如图 1.18 所示。

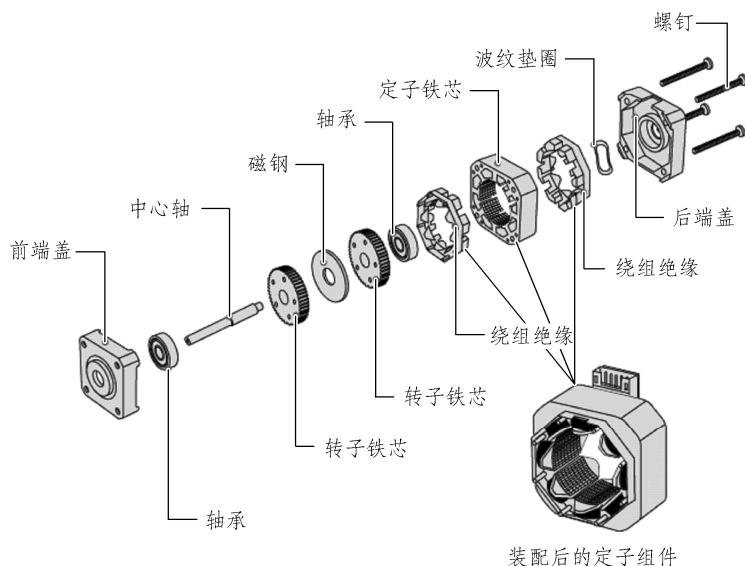


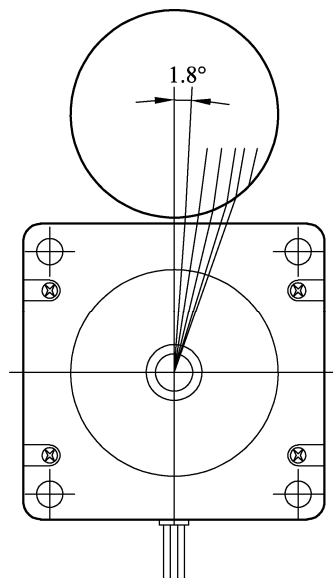
图 1.18 步进电机结构

2. 工作原理

步进电机驱动器根据外来的控制脉冲和方向信号，通过其内部的逻辑电路，控制步进电机的绕组以一定的时序正向或反向通电，使得电机正向/反向旋转，或者锁定。

步进电机以一个固定的步距角转动，这个角度称为基本步距角，如图 1.19 所示。标准电机有基本步距角为 1.8° 两相步进电机和基本步距角为 1.2° 的三相步进电机。除标准电机以外，步距角也可以为 0.72° 、 0.9° 、 1.5° 、 3.6° 、 3.75° 。以 1.8° 两相步进电机为例，当两相绕组都通电励磁时，电机输出轴将静止并锁定位置。在额定电流下使电机保持锁定的最大力矩为保持力矩。如果其中一相绕组的电流发生了变向，则电机将顺着一个既定方向旋转一步 (1.8°)。同理，如果是另外一项绕组的电流发生了变向，则电机将顺着与前者相反的方向旋转一步 (1.8°)。当通过线圈绕组的电流按顺序依次变向励磁时，则电机将顺着既定的方向实现连续旋转步进，运行精度非常高。对于 1.8° 两相步进电机旋转一周需 200 步。

两相步进电机有两种绕组形式：双极性和单极性，如图 1.20 所示。双极性电机每相上只有一个绕组线圈，电机连续旋转时电流要在同一线圈内依次变向励磁，驱动电路设计上需要 8 个电子开关进行顺序切换。单极性电机每相上有两个极性相反的绕组线圈，电机连续旋转时只要交替对同一相上的两个绕组线圈进行通电励磁，驱动电路设计上只需要四个电子开关。在双极性驱动模式下，因为每相的绕组线圈为 100% 励磁，所以双极性驱动模式下电机的输出力矩比单极性驱动模式下提高了约 40%。



两相步进电机
图 1.19 步距角

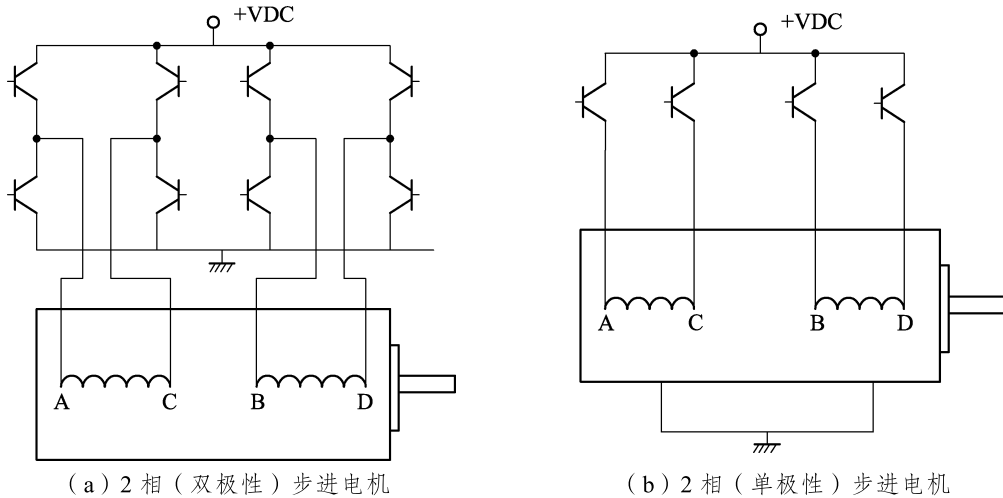


图 1.20 两相步进电机绕组形式

3. 步进电机驱动器

步进驱动器是一种能使步进电机运行的功率放大器，其功能是将控制器发来的脉冲/方向指令（弱电信号）转换为电机线圈电流（强电），电机的转速与脉冲频率成正比，所以控制脉冲频率可以精确调速，控制脉冲数就可以精确定位。

实验台配置的步进电机驱动器如图 1.21 所示，可实现步进电机的正反转控制，通过 3 位拨码开关选择 7 挡细分控制（1，2/A，2/B，4，8，16，32），通过 3 位拨码开关选择 8 挡电流控制（0.5 A，1 A，1.5 A，2 A，2.5 A，2.8 A，3.0 A，3.5 A）。

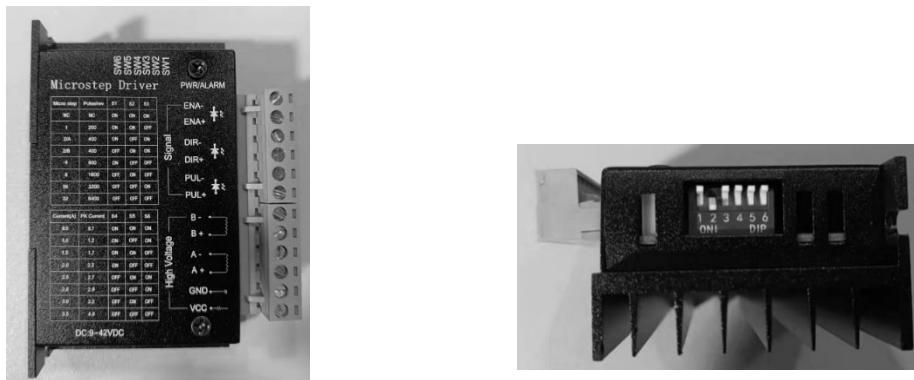


图 1.21 步进电机驱动器

步进电机驱动器参数如表 1.4 所示。

表 1.4 步进电机驱动器参数

输入电压	9 ~ 40 V DC
输入电流（推荐使用开关电源）	5 A
输出电流	0.5 ~ 4.0 A
最大功耗	160 W

续表

细 分	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32
温 度	工作温度-10~45 °C; 存放温度-40~70 °C
湿 度	不能结露, 不能有水珠
气 体	禁止有可燃气体和导电灰尘
重 量	0.2 kg

步进电机驱动器的接线分为两部分：控制信号和高压驱动信号。

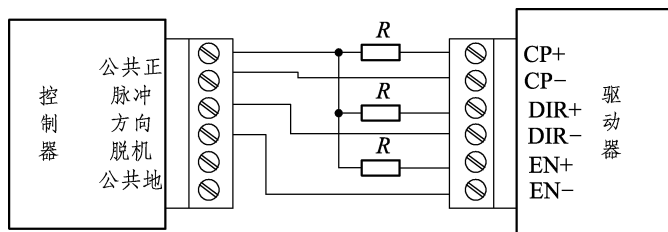
(1) 控制信号 (signal)。

输入信号共有三路，它们是步进脉冲信号 PUL+/PUL-、方向电平信号 DIR+ /DIR-和脱机信号 EN+/EN-。

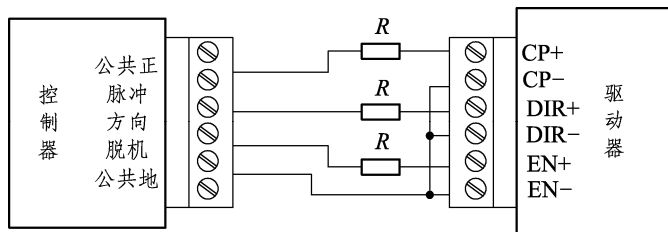
输入信号接口有两种接法，用户可根据需要采用共阳极接法或共阴极接法。

共阳极接法：分别将 PUL+、DIR+、EN+连接到控制系统的电源上，如果此电源是+5 V 则可直接接入，如果此电源大于+5 V，则须外部另加限流电阻 R ，保证给驱动器内部光耦提供 8~15 mA 的驱动电流。脉冲输入信号通过 CP-接入，方向信号通过 DIR-接入，使能信号通过 EN-接入，如图 1.22 (a) 所示。

共阴极接法：分别将 PUL-、DIR-、EN-连接到控制系统的地端；脉冲输入信号通过 PUL+接入，方向信号通过 DIR+接入，使能信号通过 EN+接入。若需限流电阻、限流电阻 R 的接法取值与共阳极接法相同，如图 1.22 (b) 所示。实验台上采用的是共阴极接法。



(a) 共阳极



(b) 共阴极

图 1.22 控制信号接线

(2) 驱动信号 (High Voltage)。

电机与驱动器接线简单，分为 A、B 两相，四根导线分别接在驱动器端子上。

- A+：连接电机绕组 A+相。
- A-：连接电机绕组 A-相。

- B+：连接电机绕组 B+相。
- B-：连接电机绕组 B-相。

步进电机由于自身特有结构决定，出厂时都注明“电机固有步距角”（如 $0.9^\circ/1.8^\circ$ ，表示半步工作每走一步转过的角度为 0.9° ，整步时为 1.8° ）。但在很多精密控制和场合，整步的角度太大，影响控制精度，同时振动太大，所以要求分很多步走完一个电机固有步距角，这就是所谓的细分驱动，能够实现此功能的电子装置称为细分驱动器。

细分数是以驱动板上的拨码开关选择设定的，用户可根据驱动器外盒上的细分选择表的数据设定（见图 1.21，必须在断电情况下设定）。

驱动板上拨码开关 1、2、3、分别对应 S1、S2、S3，如表 1.5 所示。

表 1.5 细分拨码设置表

细分	脉冲/转	S1 状态	S2 状态	S3 状态
NC	NC	ON	ON	ON
1	200	ON	ON	OFF
2/A	400	ON	OFF	ON
2/B	400	OFF	ON	ON
4	800	ON	OFF	OFF
8	1600	OFF	ON	OFF
16	3200	OFF	OFF	ON
32	6400	OFF	OFF	OFF

另外，电机的静态电流可用拨码开关 SW4 设定，OFF 表示静态电流设为动态电流的一半，ON 表示静态电流与动态电流相同。一般用途中应将 SW4 设成 OFF，使得电机和驱动器的发热减少，可靠性提高。脉冲串停止后约 0.4 s 电流自动减至一半左右（实际值的 60%），发热量理论上减至 36%。

驱动板上拨码开关 4、5、6 分别对应 S4、S5、S6，其状态与电流关系如表 1.6 所示。

表 1.6 电流设置拨码表

电流/A	S4 状态	S5 状态	S6 状态
0.5	ON	ON	ON
1.0	ON	OFF	ON
1.5	ON	ON	OFF
2.0	ON	OFF	OFF
2.5	OFF	ON	ON
2.8	OFF	OFF	ON
3.0	OFF	ON	OFF
3.5	OFF	OFF	OFF

4. 步进电机的高精度位置控制

使用步进电机实现高精度定位控制时的控制系统如 1.23 所示。PLC 控制器发出的脉冲信

号可以准确地控制步进电机的转动角度和速度，通过丝杆螺母副实现直线位移的控制。

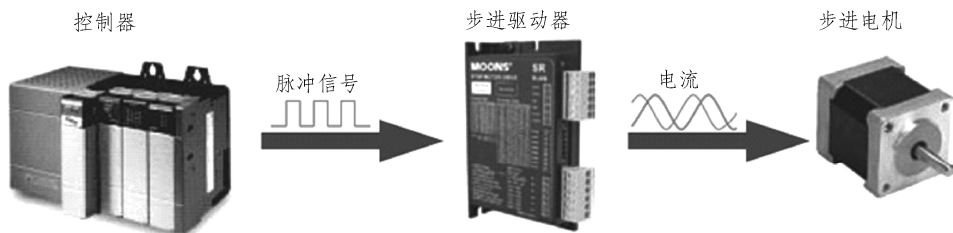


图 1.23 步进电机位置控制

脉冲信号是一个电压反复在 1 和 0 之间改变的电信号。每个 1/0 周期被记为 1 个脉冲。单个脉冲信号指令使电机出力轴转动一步。对应电压 1 和 0 情况下的信号电平被分别称为“H”和“L”，如图 1.24 所示。

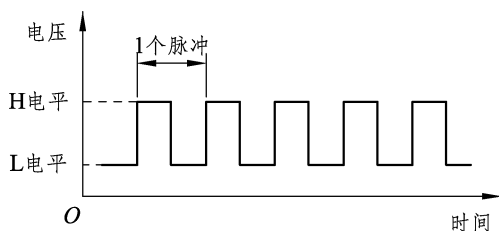


图 1.24 脉冲信号

步进电机的转动距离正比于施加到驱动器上的脉冲信号数（脉冲数）。步进电机转动（电机出力轴转动角度）和脉冲数的关系如图 1.25 所示。

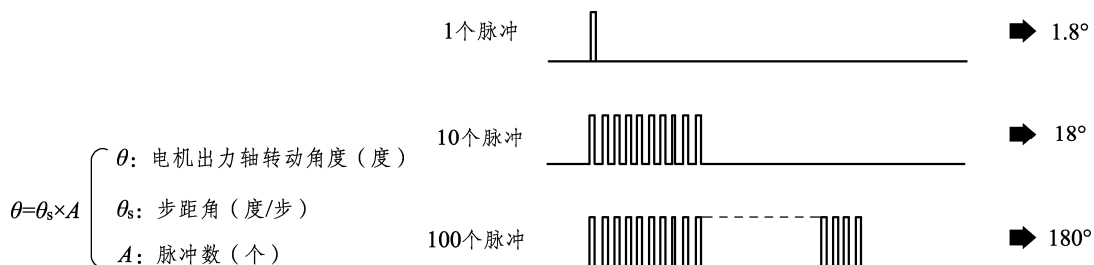


图 1.25 转动角度与脉冲数的关系

步进电机的转速与施加到驱动器上的脉冲信号频率成比例关系。电机的转速（r/min）与脉冲频率（Hz）的关系如图 1.26 所示。

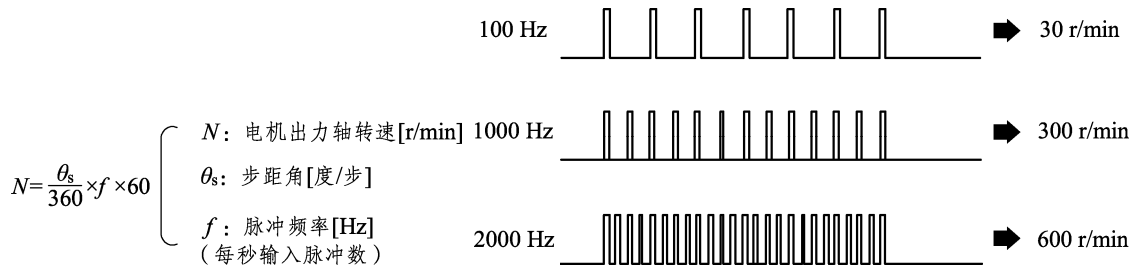


图 1.26 转速与脉冲频率的关系

步进电机通过联轴器与丝杆螺母副相接。丝杆直径 $\phi 8$ ，丝杠导程 8 mm。在步进电机驱动器细分数为 1 的情况下，其脉冲当量为：

$$\delta = \frac{\text{步距角}}{360 \times \text{细分数}} \times \text{导程} = \frac{1.8}{360 \times 1} \times 8 = 0.04 \text{ mm/pulse}$$

通过驱动器的细分设置，可以进一步提高系统的脉冲当量精度。

1.5 三相电机

三相异步电机主要作电动机用，其功率范围从几瓦到上万千瓦，是国民经济各行业和人们日常生活中应用最广泛的电机，主要拖动各种生产机械。异步电动机具有结构简单、运行可靠、效率较高、成本较低及维修方便且适用于多种机械负载的工作特性等优点。三相异步电机主要由静止的定子和旋转的转子两大部分组成，定子与转子之间存在气隙，此外，还有端盖、轴承、机座、风扇等部件（见图 1.27）。

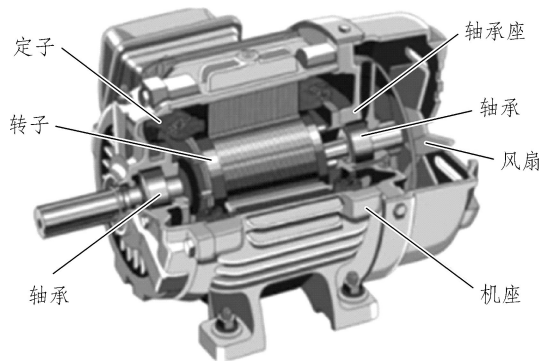


图 1.27 三相异步电机结构

三相异步电机是感应电机，定子通入电流以后，部分磁通穿过短路环，并在其中产生感应电流，形成旋转磁场。通电启动后，转子绕组因与磁场间存在着相对运动而感生电动势和电流，即旋转磁场与转子存在相对转速，并与磁场相互作用产生电磁转矩，使转子转起来。

三相异步电机的转速通过下面的式子确定：

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

其中， f 为电源频率； s 是转差率，通常取值范围 0.01 ~ 0.02； p 为极对数，2 极电机为 1，4 极电机为 2，以此类推。

通常对三相异步电机的调速是通过变频器改变电源频率实现的，变频调速就是采用变频器把我国的 50 Hz 工频电源转换成不同大小的频率，比如 10 Hz 时电机转速就会降低至 1/5；300 Hz 时转速就会提高 6 倍。

实验台上所采用三相异步电机如图 1.28 所示。

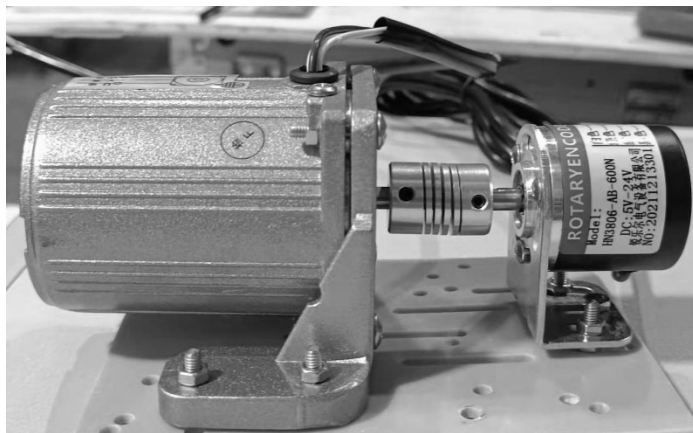


图 1.28 实验台上的三相异步电机与编码器

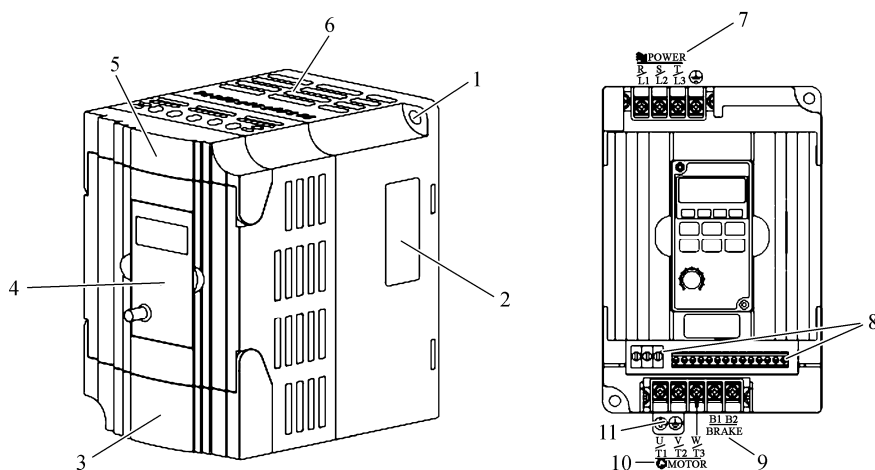
1.6 变频器

变频器是通过变频控制技术、电子电路技术改变输入电压的频率来调节电机运行转速的设备。根据三相异步交流电动机旋转磁场产生的原理，电机的转速与电源频率有关，如果需要通过实现步进电机的转速的可调，就需要脉冲频率的可控，而变频器实现了这一功能。

本试验台上采用了台达 VFD-M 变频器，具体使用可参考《VFD-M 使用手册》。

1. 外观说明

VFD-M 变频器外观如图 1.29 所示。



1—固定螺孔；2—规格品牌；3—电机出力端下盖；4—数字操作器 LC-M02E；5—电源入力端上盖；6—散热通风口；7—电源输入端子；8—外部输入/输出端子；9—煞车电阻接线端；10—电机输出端子；11—接地端子。

图 1.29 变频器外观

2. 运转方式

变频器的控制方式有通过外部信号（接线端子）控制和通过操作面板控制两种方式，其中，操作面板如图 1.30 所示。

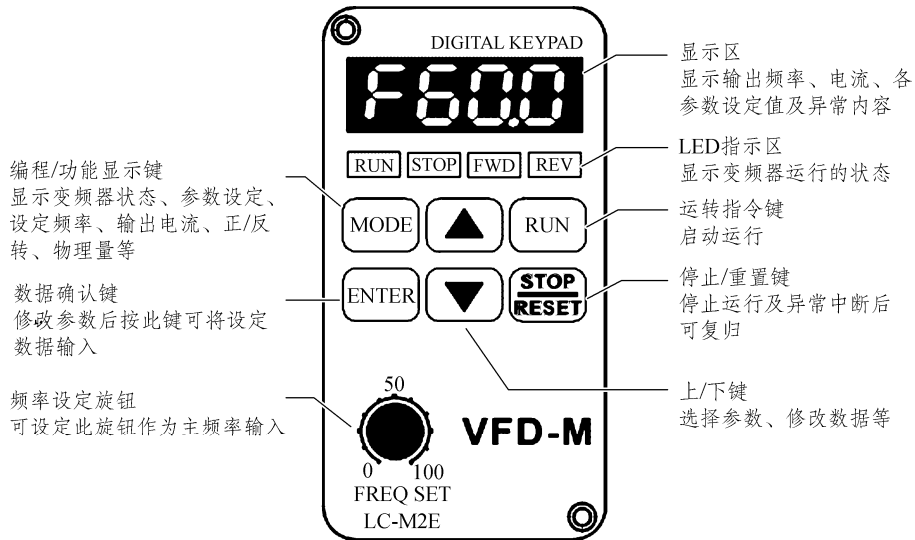


图 1.30 VFD-M 面板外观及操作

3. 主回路端子说明

主回路是指电机的供电回路，如图 1.31 所示，标记说明如表 1.7 所示。

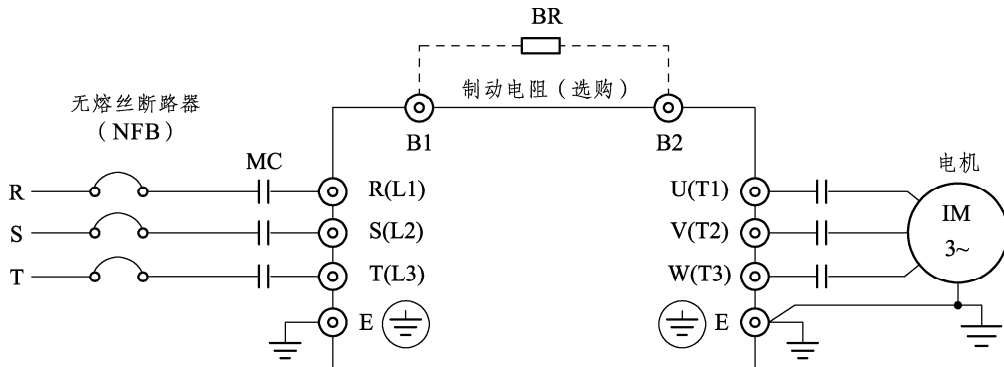


图 1.31 主回路

表 1.7 主回路标记说明

端子记号	说明
R (L1), S (L2), T (L3)	主回路交流电源输入
U (T1), V (T2), W (T3)	连接至电机
B1-B2	制动电阻
⊕	接地

注意：三相电机不能连接单相电源，输入电源 R (L1), S (L2), T (L3) 并无顺序之分，可任意连接。

4. 控制回路端子说明

控制回路用于对变频器输出频率以及电机控制模式等进行控制，控制回路如图 1.32 所示。

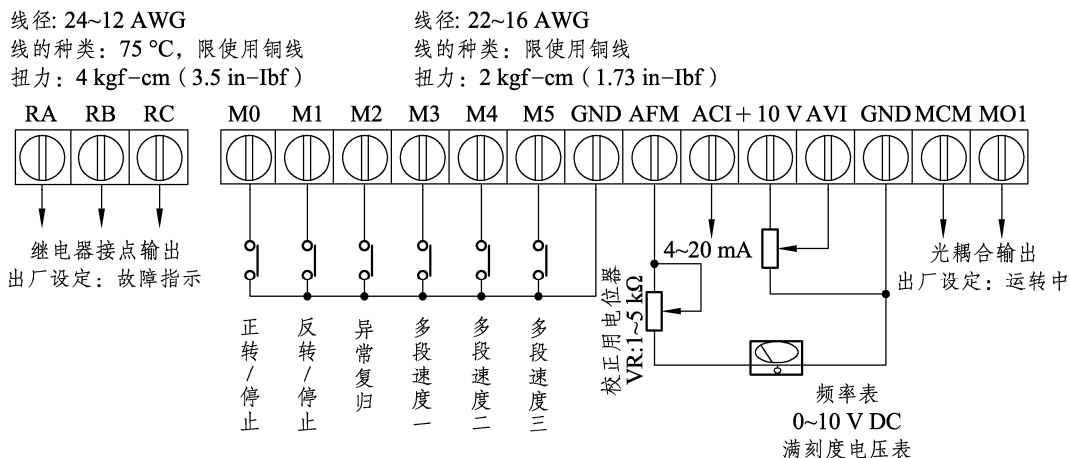


图 1.32 控制回路

M0 ~ M5 为功能选择输入端子, 其对应功能可以由用户指定, 比如通过 PLC 输出端控制, 即可实现电机的多段转速控制。图 1.32 中显示的各端子对应功能为默认设置。ACI 和 AVI 分别为电流和电压模拟量输入, 用于实现模拟量对变频器输出的控制, 实现无级调速。

5. 试运转

变频器可以通过数字操作面板 (见图 1.30) 手动控制, 进行试运转。

(1) 开启电源后, 确认操作器面板显示“F60.0 Hz”。待机状态下, “STOP”及“FWD”指示灯会亮起。

(2) 按下“▼”按钮改变频率到 5 Hz, 按下“RUN”键时, “RUN”及“FWD”指示灯皆会亮起表示运转命令为正转。减速停止只要按下“STOP”键即可。

(3) 检查电机旋转方向是否正确符合使用者需求; 电机旋转是否平稳 (无异常噪音和振动); 加速/减速是否平稳。

如无异常情况, 增加运转频率继续试运转, 通过以上试运转, 确实无任何异常状况, 然后可以正式投入运转。

1.7 伺服电机

伺服电机 (Servo Motor) 是指在伺服系统中控制机械元件运转的电动机, 可实现速度准确控制, 可以将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象 (见图 1.33)。伺服电机转子转速受输入信号控制, 并能快速反应。在自动控制系统中, 用作执行元件, 且具有机电时间常数小、线性度高、始动电压等特性, 可把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。分为直流和交流伺服电动机两大类, 其主要特点是, 当信号电压为零时无自转现象, 转速随着转矩的增加而匀速下降。

1. 伺服电机优点

- (1) 精度: 实现了位置、速度和力矩的闭环控制; 克服了步进电机失步的问题。
- (2) 转速: 高速性能好, 一般额定转速能达到 2 000 ~ 3 000 r/m。



图 1.33 伺服电机

(3) 适应性：抗过载能力强，能承受三倍于额定转矩的负载，对有瞬间负载波动和要求快速起动的场合特别适用。

(4) 稳定：低速运行平稳，低速运行时不会产生类似于步进电机的步进运行现象。适用于有高速响应要求的场合。

(5) 及时性：电机加减速的动态响应时间短，一般在几十毫秒之内。

(6) 舒适性：发热和噪声明显降低。

2. 伺服电机原理

伺服系统 (servo system) 是使物体的位置、方位、状态等输出被控量能够跟随输入目标 (给定值) 任意变化的自动控制系统。伺服电机主要靠脉冲来定位，伺服电机接收到 1 个脉冲，就会旋转 1 个脉冲对应的角度，从而实现位移。因为伺服电机本身具备编码器，旋转时能发出脉冲，所以伺服电机每旋转一个角度，都会发出对应数量的脉冲，这样就和伺服电机接受的脉冲形成闭环。因此，系统就会知道发了多少脉冲给伺服电机，同时又收了多少脉冲回来。这样就能够很精确地控制电机的转动，从而实现精确的定位，可以达到 0.001 mm。其结构如图 1.34 所示。

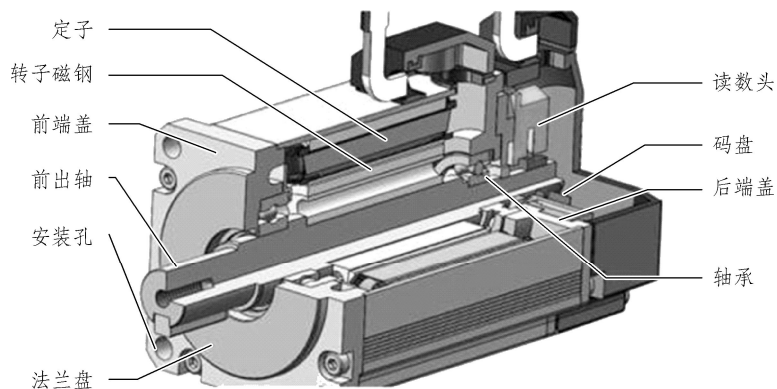


图 1.34 伺服电机结构

直流伺服电机分为有刷和无刷电机。有刷电机具有成本低、结构简单、启动转矩大、调速范围宽、控制容易等优点，但维护不方便 (换碳刷)，产生电磁干扰，对环境有要求。因此

它可以用于对成本敏感的普通工业和民用场合。随着技术发展，成本下降，现在开始大量使用直流无刷伺服电机。

交流伺服电机和无刷直流伺服电机在功能上的区别：交流伺服电机要好一些，因为是正弦波控制，转矩脉动小。直流伺服电机是梯形波。但直流伺服电机比较简单，便宜。

3. 伺服电机重要参数

(1) 额定转速：电机输出最大连续转矩（额定转矩）、以额定功率运行时的转速。

(2) 额定转矩：是指电机能够连续安全输出的转矩大小，在环境温度为 25 °C 时，在该转矩下连续运行，电机绕组温度和驱动器功率器件温度不会超过最高允许温度，电机或驱动器不会损坏。

(3) 最大转矩：电机所能输出的最大转矩。在最大转矩下短时工作不会引起电机损坏或性能不可恢复。

(4) 最大电流：电机短时间工作允许通过的最大电流，一般为额定电流的 3 倍。

(5) 最高转速：电机短时间工作的最高转速，最高转速电机力矩下降，电机发热量更大。

(6) 转子惯量 J ：电机转子旋转惯量单位符号为 $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ ，一般负载惯量最大不超过 20 倍电机转子额定惯量。

(7) 编码器线数：电机转一圈编码器反馈到驱动器的脉冲个数，影响闭环步进精度。常规编码器线数有 2 500 线、5 000 线、17 位和 23 位编码器。17 位编码器精度为 0.0027° ，高于常规的开环步进和闭环步进电机。

4. 实验台伺服电机型号说明

实验台所使用的伺服电机型号为台达 ECMA-C20401ES，编码器采用 17 位编码器，规格如表 1.8 所示。

表 1.8 ECMA-C20401ES 规格

参数名称及单位	参数值
额定功率/kW	0.1
额定扭矩/N·m	0.32
最大扭矩/N·m	0.96
额定转速/(r/min)	3000
最高转速/(r/min)	5000
额定电流/A	0.90
瞬时最大电流/A	2.70
每秒最大功率/(kW/s)	27.7
转子惯量/($\times 10^{-4}\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.037
机械常数/ms	0.75
扭矩常数 $KT/(N \cdot \text{m}/\text{A})$	0.36
电压常数 $KE/(mV/(r/min))$	13.6
电机阻抗/Ohm	9.30
电机感抗/mH	24.0

转矩特性如图 1.35 所示。

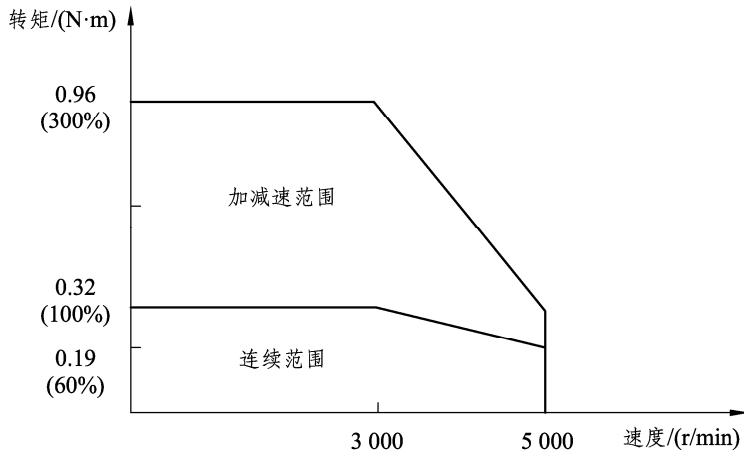


图 1.35 ECMA-C20401ES 转矩特性

1.8 伺服驱动器

伺服驱动器是数控系统及其他相关机械控制领域的关键器件，通过位置、速度和力矩三种方式对伺服电机进行控制，实现高精度的传动系统定位，属于伺服系统的一部分，主要应用于高精度的定位系统。

主流的伺服驱动器均采用数字信号处理器作为控制核心，可以实现比较复杂的控制算法，实现数字化和网络化以及智能化。功率器件普遍采用以智能功率模块 IPM 为核心设计的驱动电路，IPM 内部集成了驱动电路，同时具有过电压、过电流以及过热和欠压等故障检测保护电路。

试验台中伺服驱动器型号为台达 ASDA-B2 系列驱动器，如图 1.36 所示。具体使用方法及功能实现可参考《ASDA-B2 系列标准泛用性伺服驱动器应用技术手册》。

1. 伺服驱动器操作模式简介

实验台上驱动器提供多种操作模式，如表 1.9 所示。

2. 制动电阻的选择

当电机的出力矩和转速的方向相反时，它代表能量从负载端传回至驱动器内。此能量将回流到驱动器中，使其中的电容电压值上升。当上升到某一值时，回流的能量只能靠制动电阻来消耗。通常功率在 400 W 以下的驱动器不需要外接制动电阻，或根据外部实际负载决定外接制动电阻大小。功率大于 400 W 的驱动器内含制动电阻，也可以外接制动电阻。表 1.10 为不同型号 ASDA-B2 系列提供的内建制动电阻的规格。

当再生容量超出内建制动电阻可处理的能耗容量时，应外接制动电阻器。使用外部制动电阻时，电阻连接至 P[⊕]、C 端，P[⊕]、D 端开路。外部制动电阻尽量选择表 1.10 建议的电阻数。具体制动电阻的功率选择请参考《ASDA-B2 系列标准泛用性伺服驱动器应用技术手册》。

3. 外围装置接线

图 1.37 给出了一个伺服驱动器与伺服电机、PLC 或 HMI、接触器等控制器件的接线图。

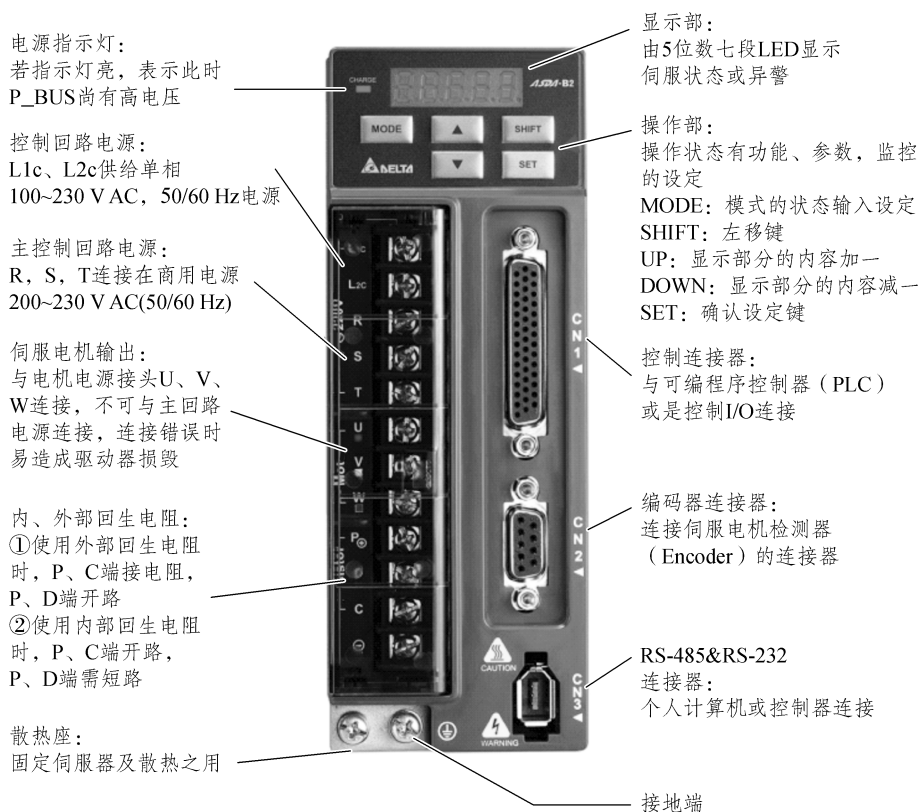


图 1.36 伺服驱动器面板

表 1.9 驱动器操作模式

模式名称	模式代码	说明
位置模式 (端子输入)	P	驱动器接受位置命令，控制电机至目标位置。位置命令由端子输入，信号型态为脉冲
速度模式	S	驱动器接受速度命令，控制电机至目标转速。速度命令可由内部缓存器提供（共三组缓存器），或由外部端子输入模拟电压（-10~+10 V）。命令的选择则根据 DI 信号来选择
速度模式 (无模拟输入)	Sz	驱动器接受速度命令，控制电机至目标转速。速度命令仅可由内部缓存器提供（共三组缓存器），无法由外部端子台提供。命令的选择则根据 DI 信号来选择。原 S 模式中的外部输入的 DI 状态为速度命令零
扭矩模式	T	驱动器接受扭矩命令，控制电机至目标扭矩。扭矩命令可由内部缓存器提供（共三组缓存器），或由外部端子台输入模拟电压（-10~+10 V）。命令的选择则根据 DI 信号来选择
扭矩模式 (无模拟输入)	Tz	驱动器接受扭矩命令，控制电机至目标扭矩。扭矩命令仅可由内部缓存器提供（共三组缓存器），无法由外部端子台提供。命令的选择则根据 DI 信号来选择。原 T 模式中的外部输入的 DI 状态为扭矩命令零

续表

模式名称	模式代码	说明
混合模式	S-P	S 与 P 可通过 DI 信号切换
	T-P	T 与 P 可通过 DI 信号切换
	S-T	S 与 T 可通过 DI 信号切换

表 1.10 内建制动电阻规格

驱动器 /kW	内建制动电阻		内建制动电阻处理的制动容量/W	最小容许电阻值/ Ω
	电阻值/ Ω	容量/W		
0.1	—	—	—	60
0.2	—	—	—	60
0.4	100	60	30	60
0.75	100	60	30	60
1.0	40	60	30	303

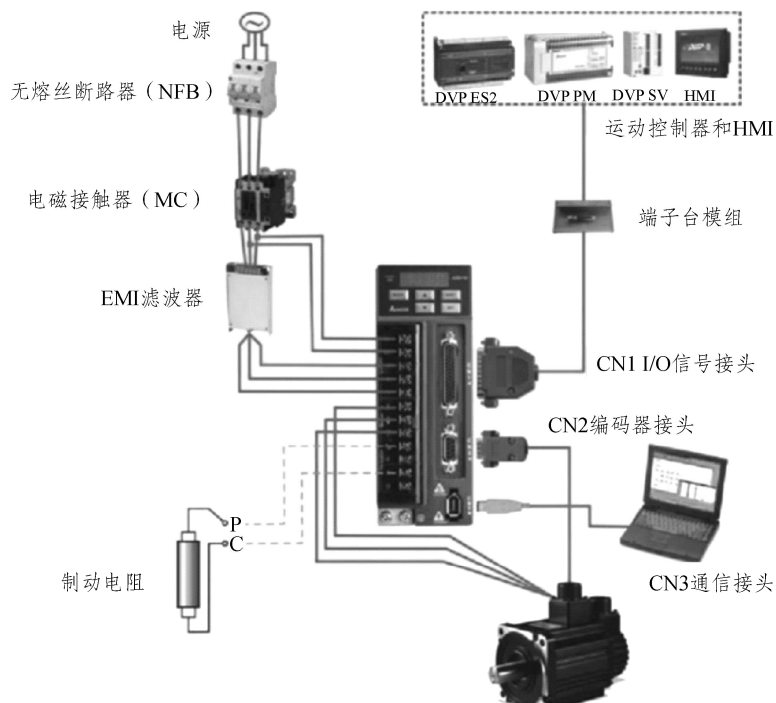


图 1.37 伺服驱动器与电机的接线图

4. 驱动器端子说明

驱动器端子说明如表 1.11 所示。

5. 电源接线法

三相电源接线法如图 1.38 所示。实验台上电源只接两相，T 端子可不接。

表 1.11 驱动器端子说明

端子记号	名称	说明		
L _{1c} 、L _{2c}	控制回路电源输入端	连接单相交流电源		
R、S、T	主回路电源输入端	连接三相交流电源		
U、V、W、FG	电机连接线	连接至电机		
		端子记号	线色	说明
		U	红	电机三相电源电力线
		V	白	
W	黑			
FG	绿	连接至驱动器的接地处 \oplus		
P \oplus 、D、C、 \ominus	制动电阻端子或是刹车单元或是 P \oplus 、 \ominus 接点	使用内部电阻	P \oplus 、D 端短路，P \oplus 、C 端开路	
		使用外部电阻	电阻接于 P \oplus 、C 两端，且 P \oplus 、D 端开路	
\oplus	接地端子	连接至电源地线以及电机的地线		
CN1	I/O 连接器	连接上位控制器		
CN2	编码器连接器	连接电机的编码器		
CN3	通信端口连接器	连接 RS-485 或 RS-232		

注意：当电源切断时，因为驱动器内部大电容含有大量的电荷，请不要接触 R、S、T 及 U、V、W 这六条大电力线。请等待充电灯熄灭时，方可接触。

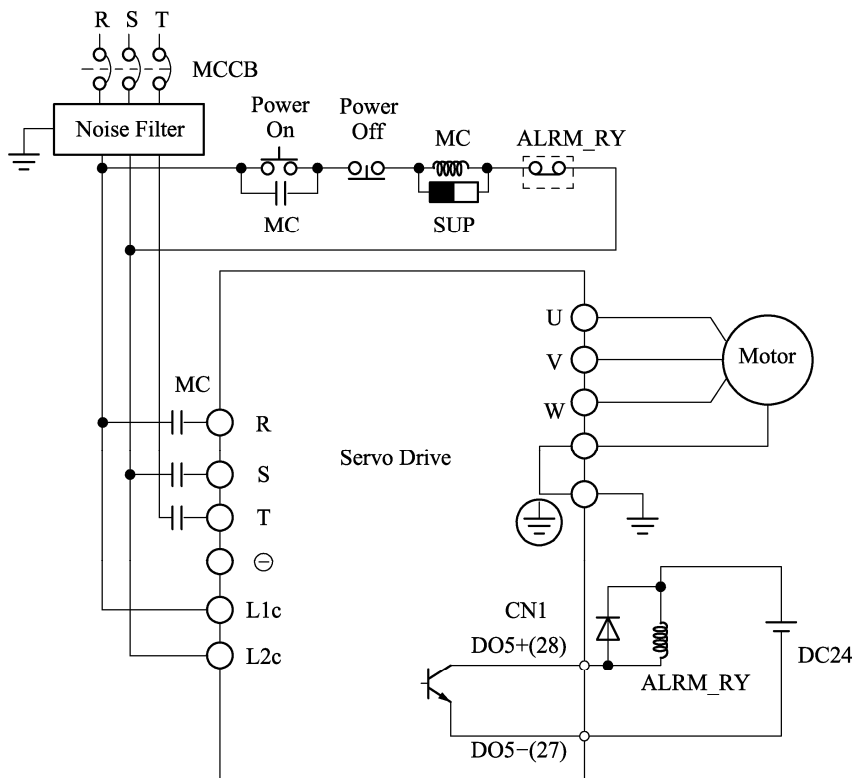


图 1.38 三相电源接线法

6. CN1 信号接头

为了与上位控制器实现更加丰富互相沟通，伺服驱动器提供可任意规划的 6 组输出及 9 组输入。控制器提供的 9 个输入设定与 6 个输出分别为参数 P2-10 ~ P2-17、P2-36 与参数 P2-18 ~ P2-22、P2-37。除此之外，还提供差动输出的编码器 A+、A-、B+、B-、Z+、Z- 信号，以及模拟转矩命令输入、模拟速度/位置命令输入及脉冲位置命令输入。

用户通过 CN1 接头，如图 1.39 所示，可以实现 PLC 等上位机对伺服电机的各种外部控制，具体控制方法见《ASDA-B2 标准泛用型伺服驱动器应用技术手册》。



图 1.39 CN1 I/O 连接端子

7. 空载 JOG 模式试运行

使用 JOG 寸动方式来试转电机及驱动器，该模式不需要连接 CN1，只需要连接 CN2 伺服电机编码器接头即可，步骤如图 1.40 所示。

步骤 1：在驱动器上操纵按钮，设定参数 P2-30 为 1，该参数为强制伺服启动。

步骤 2：设定参数 P4-05 寸动速度（单位：r/min），设定后，按下 SET 键进入 JOG 模式。

步骤 3：按下 MODE 键时，即可脱离 JOG 模式。

1.9 编码器

编码器是一种位置和速度转换器，它将一个轴的角运动或直线运动转换成一系列电子数字脉冲，这些电脉冲被用来控制（产生它们的）机械轴的运动。其外形如图 1.41 所示。

编码器一般包括机械接口、码轮、光电接收器、电气接口四部分。

1. 机械接口

机械接口包含所有允许编码器耦合到机器或应用设备的组件，包括：轴，连接在旋转的机器轴上，按照固定方式设计：实心或孔轴；法兰，将编码器固定并调整到其支架上的法兰；外壳，包含并保护磁盘和电子元件。

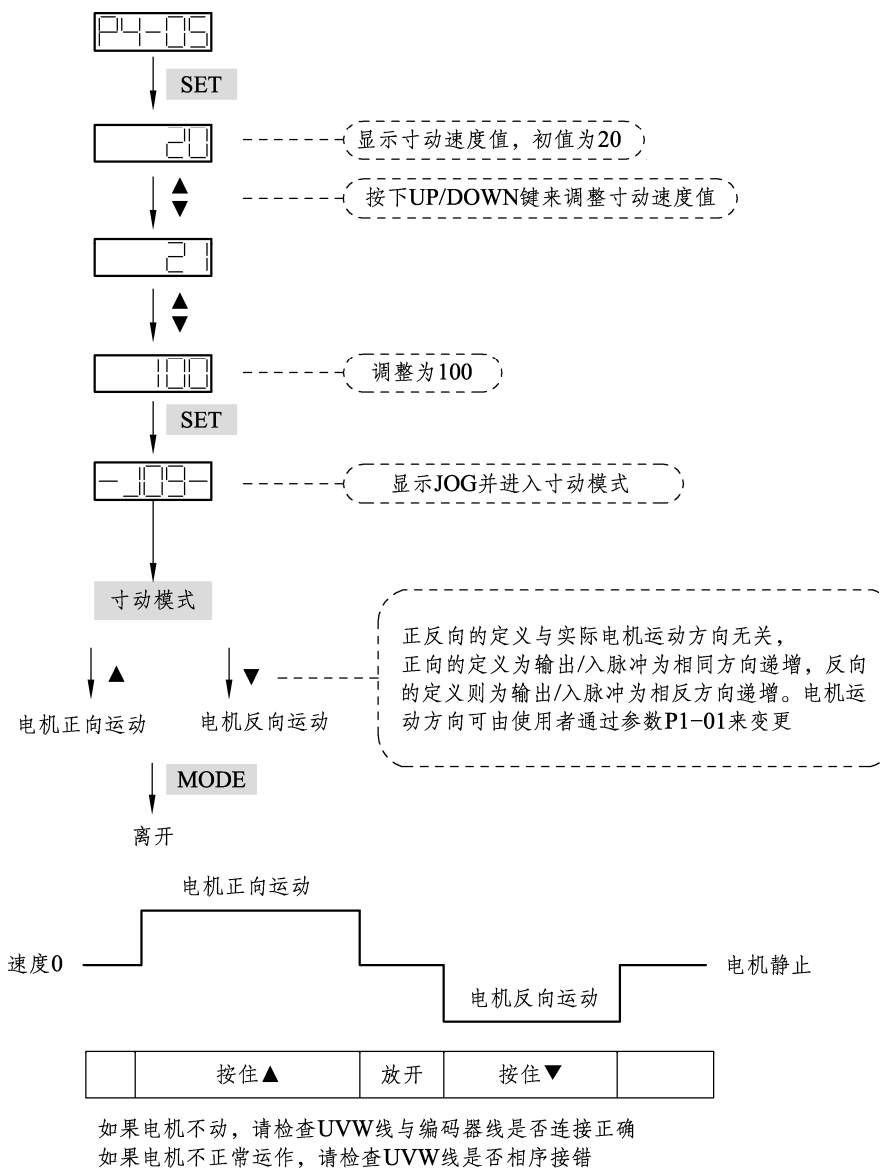


图 1.40 伺服 JOG 模式



图 1.41 编码器

2. 码轮（或磁性致动器或线性刻度）

编码器码轮（或盘）定义了脉冲的传输码；它由一个由塑料、玻璃或金属材料制成的支撑物组成，支撑物上刻有透明或不透明部分交替形成的图案。在线性尺度上，用静止不透明条代替这一图案。采用磁感测时，用磁路（南北）模式代替码轮或线性标度。

3. 光电接收器（或磁传感器）

如图 1.42 所示，光电接收器是由一组传感器（光电二极管或光电晶体管）制成的，这些传感器由红外光源照亮。在接收器和 LED 之间有一个刻度码轮。光将磁盘像投射到接收器表面，接收器表面被一种称为刻线的光栅覆盖，具有相同的磁盘台阶接收器将发生的由圆盘移动引起的光变化转换成相应的电变化。

磁编码器系统是由带磁铁的旋转驱动器和磁传感器将磁场变化转化为电信号制成的。

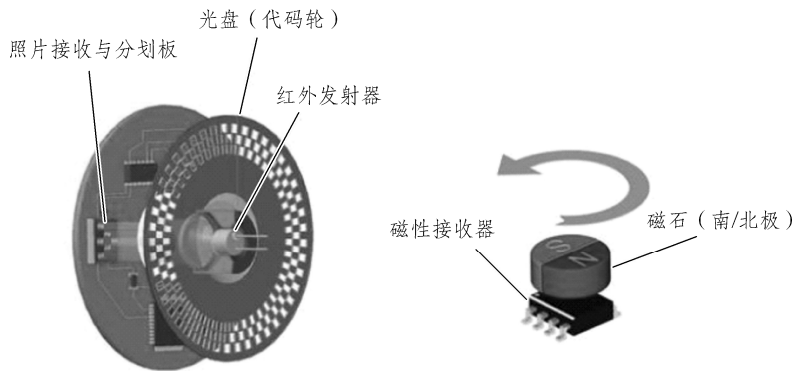


图 1.42 编码器光电接收器原理

4. 电气接口

电子接口是编码器向接收器传输数据的方式。电信号（可以是数字的或模拟的）通过编码器电缆传输到一个智能设备，如接口板，PLC 等。

编码器通过联轴器与丝杆模块相连。实验台上所采用编码器的基本参数如表 1-19 所示。

表 1-9 HN3806-AB-600N 型编码器参数

工作电压	10~30 V	分辨率	600
功率	≤3 W	最大转速	3 000 r/min
信号形式	方波	轴径	8 mm
输出电流	≤20 mA	启动转矩	0.02 N·m

1.10 继电器

继电器是一种电磁控制器件，是当输入量（激励量）的变化达到规定要求时，在电气输出电路中使被控量发生预定的阶跃变化的一种电器。继电器通常应用于自动化的控制电路中，它实际上是用小电流去控制大电流运作的一种“自动开关”。在电路中起着自动调节、安全保护、转换电路等作用。其外观及接线安装座如图 1.43 所示。

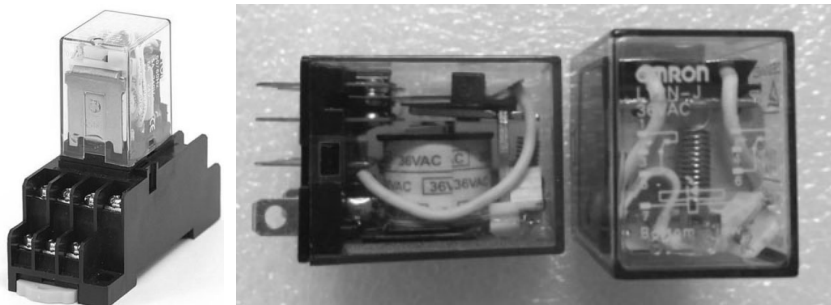


图 1.43 继电器及接线安装座

以 8 脚继电器为例，电路图如图 1.44 所示。因为继电器是由线圈和触点组两部分组成，所以继电器在电路图中的图形符号也包括两部分：一个长方框表示线圈；一组触点符号表示触点组合。

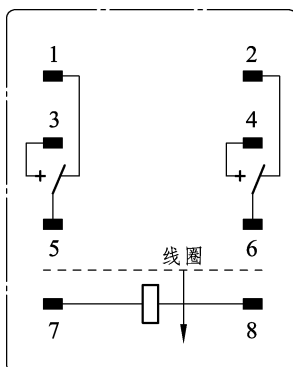


图 1.44 8 脚继电器接线图

7、8 两脚连接继电器线圈。当 7 脚 8 脚不通电时，1-5、2-6 触点导通；当 7 脚 8 脚通电时，3-5 和 4-6 触点导通。

除上述有触点继电器外，实验台上还有一种无触点继电器：固态继电器。它属于半导体元件，接通和断开没有机械触点，具有开关速度快、工作频率高、使用寿命长、动作可靠的优点。

固态继电器一般有两个输入端和两个输出端。当输入端无信号（低电平）时，其输出端为阻断状态；当在输入端施加控制信号（高电平）时，输出端为导通状态。实验台上所用固态继电器实物如图 1.45 所示。输入端控制电压范围 3 ~ 32 V；输出端负载电压范围 24 ~ 380 V。



图 1.45 固态继电器

以上介绍了实验台上具有的主要设备，除完成简单的 PLC 逻辑控制外，还可以进行步进电机速度位置控制、三相电机变频调速控制、伺服电机位置伺服控制等实验。进一步结合 HMI 人机界面设计，实验台上可以进行当前工业现场中的 PLC 控制系统实验调试，对于培养同学们的实际动手能力、编程能力大有益处。