



南開大學
Nankai University

智能工业控制系统实践

实 验 报 告

张恒硕

2212266

智能科学与技术



目录

目录	2
一、 课程目的	3
二、 先导内容	3
1. 工业控制系统 (I1)	3
2. PLC 基本认识 (I1)	3
3. 实验设备与控制对象	3
(1) Micro800 系列控制器 (I1)	3
(2) 工控柜 (I2)	4
(3) PowerFlex 变频器 (I4)	4
(4) 滚珠丝杠 (I4)	5
(5) PanelView 触摸屏 (I5)	6
(6) 同步带 (I6)	6
(7) 三轴写字机 (I9)	6
(8) 小型手臂机器人 (I11)	7
4. CCW 软件 (I2)	7
5. 通用工业协议与 RSLink 通讯方法 (I2)	8
三、 实践过程与思考	9
1. 绪论 (I1)	9
2. CCW 编程 (I2)	10
3. 跑马灯 1——数字量控制 (I3)	10
4. 滚珠丝杠运动 (I4)	10
5. 跑马灯 2——触摸屏控制 (I5)	10
6. 同步带步进相对运动 (I6)	10
7. 同步带步进绝对运动 (I7)	10
8. PLC 控制自主设计 (I8)	11
9. 三轴写字机单轴运动 (I9)	11
10. 三轴写字机三轴联合运动 (I10)	11
11. 小型手臂机器人三自由度运动 (I11)	12
12. 小型手臂机器人协同控制 (I12)	12
四、 课程收获	12
1. 工业控制系统及控制流程	12
2. 被控对象的运动控制	13
3. 工业 PLC 控制系统	13
五、 感想和认识	14
1. 课程感想	14
2. 分布式控制系统 (DCS)	14
3. 罗克韦尔自动化	16

一、课程目的

1. 加深对智能机电以及工业自动化系统的概念和控制流程的认识；
2. 熟悉常用被控对象（如滚珠丝杠、同步带步进电机、三轴写字机、小型手臂机器人等）的基本原理，并掌握其使用方法，进行运动控制；
3. 深入理解工业 PLC 的控制系统体系结构，掌握控制器基本原理与编程实现；
4. 提高动手实践、分析问题与系统设计的能力，并自主进行创新性、开放性设计实验；
5. 研究工业过程和工业中的人工智能，掌握工业控制系统原理。

二、先导内容

1. 工业控制系统（I1）

计算机控制技术与工业生产结合产生的工业自动化，控制具体的物理过程，直接关系到被控物理过程的稳定性和人员设备的安全。这样的工业控制系统由软硬件和辅助设备构成，并可以根据制造业加工生产的特点，分为离散制造业控制系统和流程工业控制系统。下图图 2-1 展示了一个智能工业系统的概念图。

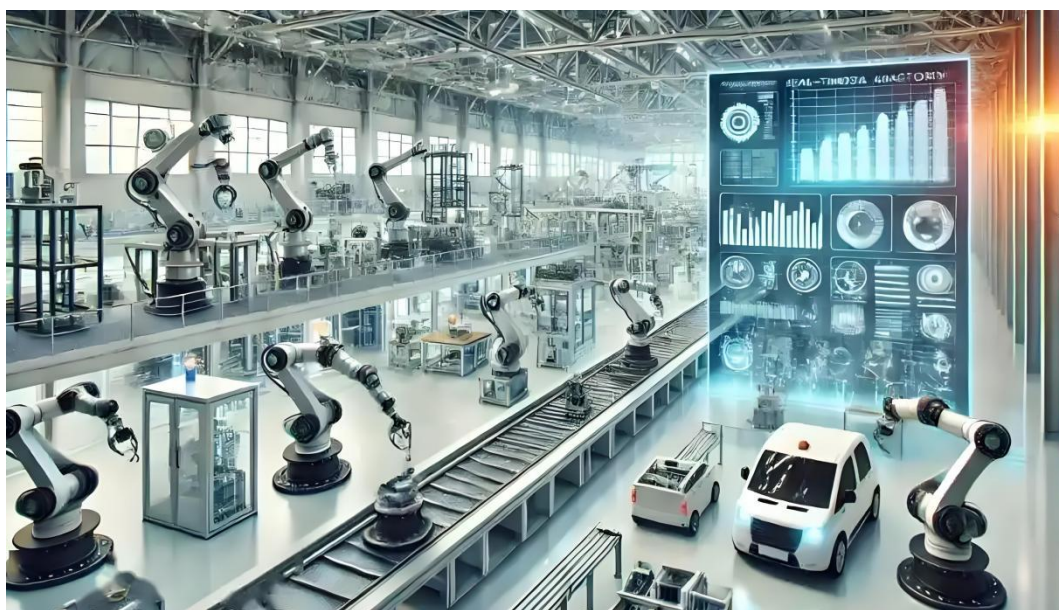


图 2-1 智能工业系统概念图

2. PLC 基本认识（I1）

PLC（Programmable Logic Controller），即可编程控制器，是指以计算机技术为基础的新型工业控制装置。其于 1969 年被美国数字设备公司（Digital Equipment Corporation, DEC）首次研制，改变了之前通过导线、继电器、接触器及各种元件按逻辑关系硬接线的状况，提高了控制的驱动能力、可靠性、方便性、性价比和拓展性。其工作分为输入采样、用户程序执行和输出刷新三个阶段，应用范围包括开关量的逻辑控制、运动控制、过程控制和数据处理等。

3. 实验设备与控制对象

(1) Micro800 系列控制器（I1）

Micro800 系列控制器是罗克韦尔自动化 (Rockwell Automation) 提供的一系列紧凑型、经济高效的 PLC，适用于小型工业自动化应用，配置简化，易于使用，提供了足够的灵活性和扩展性。



本实验中有很多和罗克韦尔自动化相关的设备、软件，右图图 2-2 是该公司的标志。

图 2-2 罗克韦尔自动化公司标志

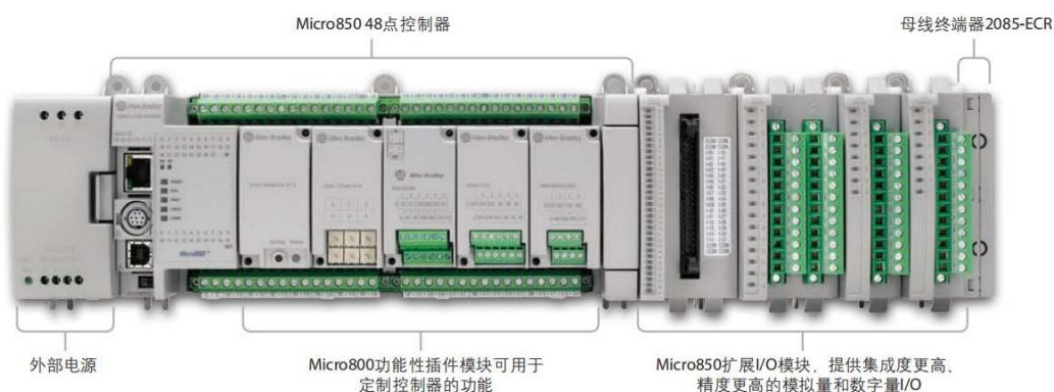


图 2-3 Micro850 构造

实验中使用的是 Micro850 控制器，其构造如上图图 2-3。

(2) 工控柜 (12)

工控柜中集成了各种设备，其余设备将在其他部分介绍，这里说明柜门上的按钮和灯。图 2-4 给出的是作为编程软件全局变量的按钮 I 和灯 O，它们分别是系统的输入和输出。图 2-5 则是工控柜的开关部分，轻轻旋转急停按钮上电，按下断电。

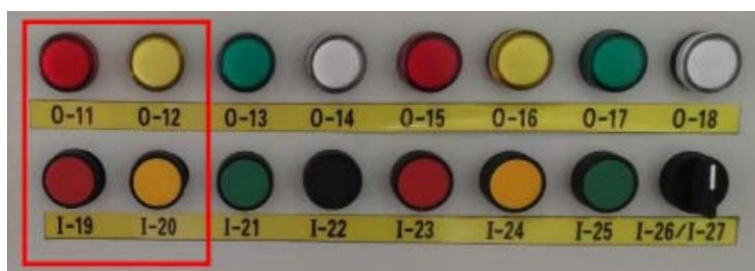


图 2-4 输入输出



图 2-5 开关

(3) PowerFlex 变频器 (14)

变频器是控制电机转动方向、转动频率的装置，实验中使用的 PowerFlex525

低压交流变频器是罗克韦尔自动化制造，专为小功率电机应用设计，其构造如下图图 2-6。它具备面板操作和远程操控两种模式，广泛应用于需要精确速度控制或节能运行的各种场合。



图 2-6 PowerFlex525 低压交流变频器构造

(4) 滚珠丝杠 (14)



图 2-7 滚珠丝杠构造

滚珠丝杠是常用的传动元件，主要功能是将旋转运动转换成线性运动，同时兼具高精度、可逆性和高效率的特点，其构造如上图图 2-7。设备两侧的限位开关能保证不越位运动。丝杠的型号为“1204”，代表丝杠直径 12mm，螺距 4mm。

滚珠丝杠的原理图如下图图 2-8 所示。丝杠和螺母上各加工有圆弧形螺旋槽，套装起来形成螺旋形滚道，其内装满滚珠。当丝杠相对螺母旋转时，丝杠的旋转面通过滚珠推动螺母轴向移动，同时滚珠沿螺旋形滚道滚动，使丝杠和螺母之间的滑动摩擦转变为滚珠与丝杠、螺母之间的滚动摩擦。螺母螺旋槽的两端用回珠管连接起来，使滚珠能够从一端重新回到另一端，构成闭合的循环回路。

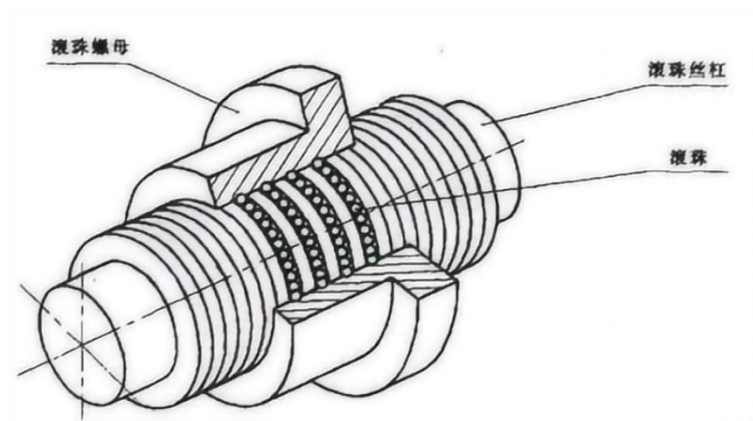


图 2-8 滚珠丝杠原理图

(5) PanelView 触摸屏 (15)

PanelView 800 图形终端由罗克韦尔自动化制造，作为适用于独立机器的可视化解决方案，能够兼容微小型控制器，具有多功能显示和多个通信协议，能够确保与不同类型的控制系统无缝集成。它还支持远程监控，安全易用。其正反面结构如下图图组 2-9 所示。



图组 2-9 PanelView 触摸屏的正（左图）、反（右图）面

(6) 同步带 (16)

同步带由一条内周表面设有等间距齿的环形皮带和具有相应齿的带轮组成，其结构如下图图 2-10。运行时，步进电机驱动，将脉冲转化为角位移，由齿槽啮合传递运动和动力，实现皮带传动。同步带具有传动比准确、对轴作用力小、结构紧凑、耐油、耐磨、抗老化的优点。



图 2-10 同步带结构

(7) 三轴写字机 (19)

三轴写字机能在 XYZ 空间内进行三轴运动。PLC 发出脉冲信号，经三台步进电机驱动器驱动三台高扭矩步进电机，实现不同维度的运动。其结构如左图图 2-11，其具有刚性高、不易形变、精度高的特点。



图 2-11 三轴写字机（旧设备）结构

(8) 小型手臂机器人 (I11)

小型手臂机器人具有多个自由度，能实现物体的抓取、移动和放置。其底端的转盘可以在水平维度旋转，而肢体部分的两个旋转轴保证了更多样的姿态。其具体结构如下图图 2-12。在使用工控柜操纵手臂机器人时，要先保证手臂机器人呈倒“L”状，并确保其底盘能进行水平维度的旋转，没有到达限位。



图 2-12 小型手臂机器人结构

4. CCW 软件(I2)

CCW (Connected Components Workbench) 是罗克韦尔自动化开发的一款集成设计软件，其图标如右图图 2-13 所示。通过提供控制器编程和仿真、设备配置以及人机界面



图 2-13 CCW 软件图标

(Human-Machine Interface, HMI) 编辑器的集成，极大简化了人机交互的工作。其可以用于 Micro800 系列控制器的编程和组态，并与人机界面终端编辑器集成，具有易于编程、易于配置、易于测试和部署的特点。CCW 有如下图图 2-14 所示的配置 (configure)、编程 (program)、可视化 (visualize) 三个模式，功

能完善。

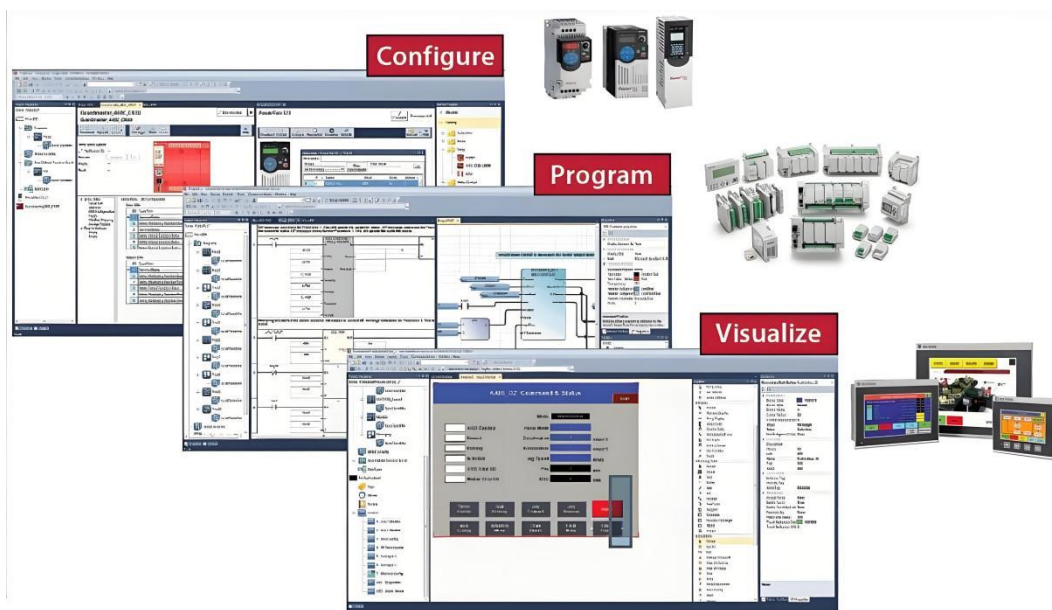


图 2-14 CCW 的三种模式

在编译过程中，梯级是实现的最小单元，遵循从上到下、从左到右的编译顺序，逻辑清晰。

5. 通用工业协议与 RSLink 通讯方法（12）

工业生产过程中，设备、功能单元、计算机之间的通信遵从一定的协议——通用工业协议（Common Industrial Protocol, CIP），其具有较好的灵活性、实时性、确定性、可重复性和可靠性。以太网工业协议（Ethernet Industrial Protocol, EtherNet/IP）定义了一个开放的工业标准，将传统的以太网与工业协议相结合，具有广泛的应用范围、较高的通信速率、较高的性价比被良好的网络共享能力。

RSLinx 是罗克韦尔自动化为用户提供的通讯管理软件，为可编程控制器与软件建立起通讯联系。以下图图 2-15 展示了由 RSLinx 串联起来的自动化网络结构。

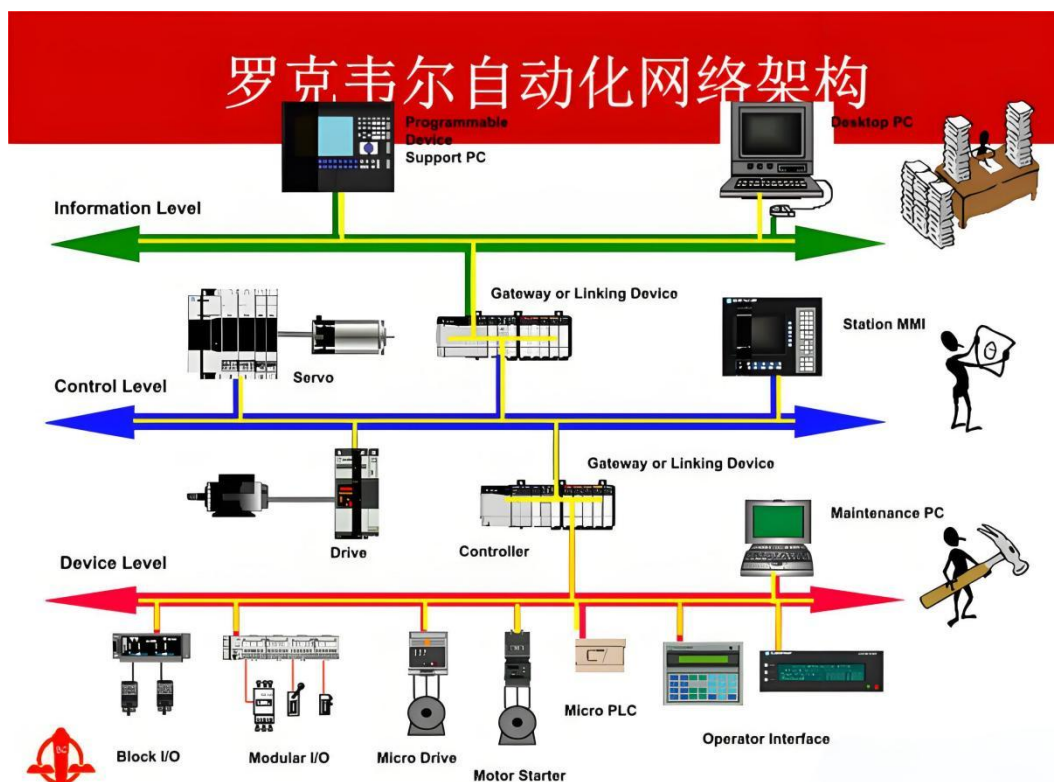


图 2-15 自动化网络结构

三、实践过程与思考

以下是每节课的实践过程记录，包含实验的原理、操作、注意事项和实践遇到的问题及其对应的解决方法。

1. 绪论（11）

本节课观看了一系列工业智能相关的视频，深刻感受到了工业智能化浪潮的到来。视频包括美的集团的全自动化空调生产线、华为的智能工厂、肉制品自动化加工工厂和木刷自动化生产厂。视频中的工作车间实现了高度自动化智能化，大幅削减了人力成本。这种智能化工厂的逐步普及既会带来生产力的解放和生产效率的爆炸，同时也可能带来低技术水平劳动群体的就业挑战。后者是重要的社会问题，但与本课程无关，这里不做讨论。

作为开启《智能工业控制系统实践》课程的绪论，对“工业智能与人工智能的深层联系”这一问题进行了深入思考：工业智能基于人工智能的技术框架，包括机器学习、自然语言处理、计算机视觉等核心技术，通过大量数据的收集、处理和分析来优化性能和决策过程，进而提高效率。相比于模仿人类智能行为，解决各种复杂问题的人工智能这个概念，工业智能更侧重于解决实际工业场景中的具体问题，如智能生产、设备故障诊断、供应链优化等，来提高生产效率、降低运营成本、提升产品质量，以促进企业的转型升级和高质量发展。工业智能还处于发展探索的阶段，在部分企业得以应用，远没有普及。总的来说，人工智能是总的一个大领域，其难度主要来源于学术层面；工业智能作为实际应用的交叉特化领域，难度主要来自现实的复杂性。二者是相辅相成的，人工智能技术的进步可以促进工业智能的发展，工业智能的需求则促使人工智能前进。

2. CCW 编程 (12)

本节课了解了图形化的人机交互编程语言 CCW，对其进行了初步的认知与调试。经过老师的讲解和具体的操作，对菜单中的各种功能和常用指令块有了一定的了解，并熟悉了梯形图编程语言和它的执行过程。

本节课还了解了工业系统中的通讯方式，并将计算机、交换机、工控柜中的 PLC 建立起了联系。

3. 跑马灯 1——数字量控制 (13)

本节课实现了跑马灯的简单编程任务。作为简化版，两灯交替闪烁的程序由三个部分组成，一个是开始按钮，一个是两灯交替的循环程序，一个是结束按钮，其中循环程序通过延时得到交替效果。在其基础上，对中间循环部分进行复制、扩大，便得到了走马灯的程序。本次任务较为简单，主要熟悉了整个开机、编程、连接、操作、关机的过程。在后续实验中比较重要的是链接过程中的四个选择框，尤其是其中的以太网选项，为保障通过数据线连接，要选择“否”。

4. 滚珠丝杠运动 (14)

连续两节课实践了滚珠丝杠的滑块控制，分别使用变频器的面板操作和远程控制，实现了对滑块的启停、运动方向、运动速度的控制。使用变频器面板操作时，要为变频器配置正确的参数，之后断电并等待变频器熄灭后重新上电。远程控制时则要编写相应的程序，需要注意的是，反复向变频器下载程序时，其上的红灯会亮，表示变频器内有积压的程序，这时需要对其进行清零。实验中遇到了很多情况，比如工控柜跳闸、错误操作导致线断等，更换了实验台，最后得到了正确的实验结果。

5. 跑马灯 2——触摸屏控制 (15)

本节课实现了跑马灯的交互界面控制实验。通过数据线，计算机与 Micro850 控制器、PanelView800 人机交互界面连接，实现了用人机交互界面控制跑马灯实验的功能。在进行简单的人机交互界面设计时，配置了三个按钮，分别与启动、停止和转至终端配置的功能链接，其中最后一个功能保障了实验结束后能够返回主界面。在实验时，如果触摸屏有原有的程序，需要清除；如果有启动应用程序，也要进行重设。实验中，更换后的实验台的 Micro850 控制器的地址与给定的地址不同，修正后得到正确的实验结果。

6. 同步带步进相对运动 (16)

本节课进行了同步带步进控制实验的双向相对运动实验。同步带的原理是：步进电机驱动主动轮，带动皮带运动，进而带动从动轮运动。通过光电传感器的反馈，可以对皮带进行精确的控制，以进行运动、停止、往复等一系列行为。步进电机转一圈为 200 个脉冲，本次实验中驱动器细分为 4，则驱动器 800 个脉冲步进电机转一圈，步进角为 0.45 度。在程序中，要配置运动轴，修改动态和原位。在连接被控对象和 PLC 时，需要注意线要插进相对应的孔里。

7. 同步带步进绝对运动 (17)

本次课在上次课的基础上，进行了同步带步进控制实验的绝对运动控制，并

通过编码器获得实际的脉冲数。为了获得脉冲数，需要将程序中记录的脉冲数转换为对应的输出格式。

8. PLC 控制自主设计 (18)

这两次课综合前面数次课的实验成果，实现了用触摸屏对灯、丝杠和同步带的协同控制。首先，将前面的程序集合起来，并对重复变量进行不同的命名。其后设计触摸屏的布局，并将按钮与相应的功能进行关联。最后，将滚珠丝杠运动的位置图和同步带运动的脉冲数展示在可视化交互界面上。在实验中遇到了一些问题，主要是由于前面实验数次更换实验台导致的。比如变频器的地址和参数等未进行调节，Micro850 控制器的地址与给定的地址不同（之前实验发现过该问题）。最后成功实现了触摸屏对三种操作的控制，并实现了在屏幕上显示相应数据的功能。

设计的触摸屏如下图图 3-1：

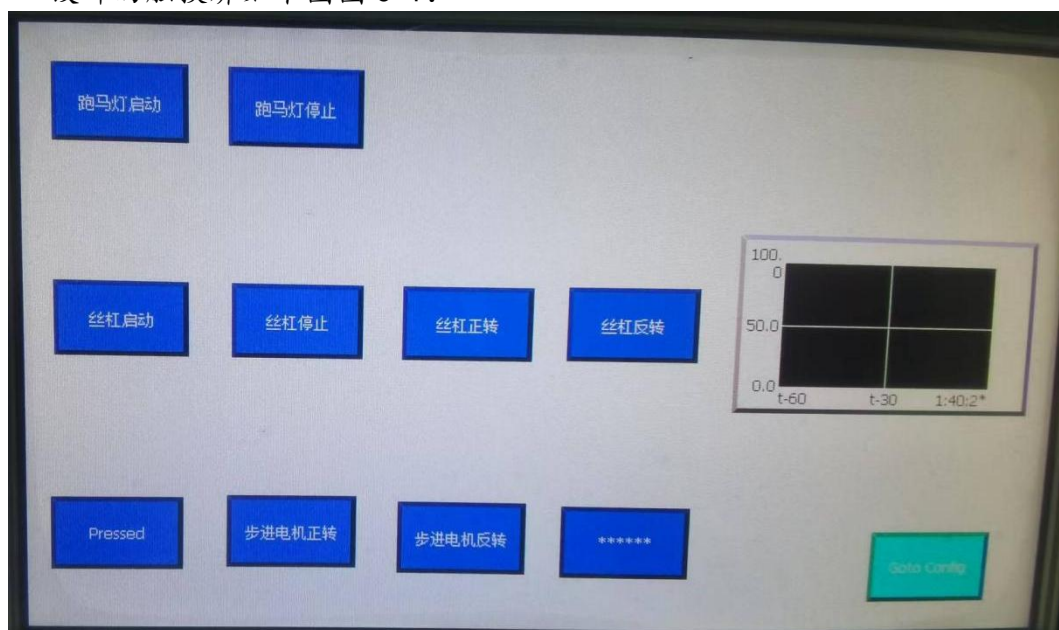


图 3-1 触摸屏设计

9. 三轴写字机单轴运动 (19)

本次课调试了三轴写字机设备。三轴写字机的 xyz 三轴使用 T 型丝杠，使紧握的笔能进行三个维度不同范围的运动。在同步带步进相对运动控制实验的程序基础上，配置了第二、第三个维度的运动轴，并增加了相应的按钮和梯级，修改相关参数。在使用工控台进行控制时，上电后，可以进行三个维度正反向共六个方向的控制。实验前，需要注意调节步进电机驱动器的拨钮。在连接被控对象和 PLC 时，需要注意线要插进相对应的孔里。另外，推荐的设置参数中，位移量和速度都偏小，为方便在后续的实验调节笔的位置，将这些参数调大了不少。

10. 三轴写字机三轴联合运动 (110)

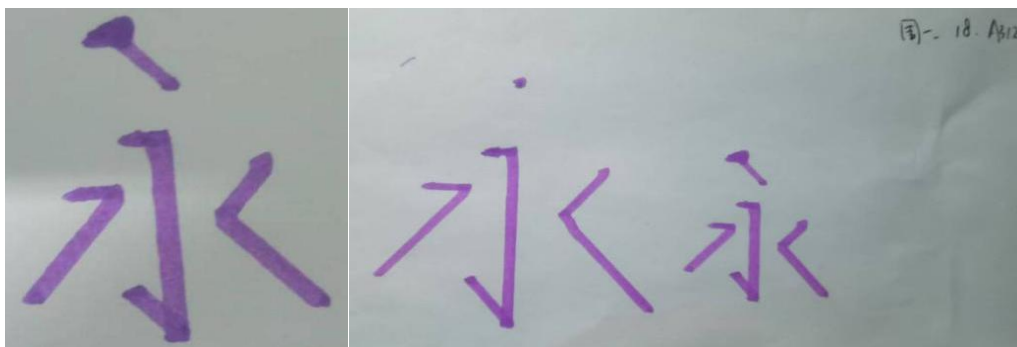
连续三节课，尝试了使用三轴写字机完成一个汉字的书写。我们选取的是“永”字，其作为书法练习的重点字，包含所有常见的笔画，能表现写字机的各种运动。

我们首先构建了“永”字的书写笔顺表。按照正确的书写笔顺，我们把永字的各个笔画和提笔移动部分拆分成了二十余步的简单笔画（横、竖、撇、捺、提

笔、落笔），并设定了每个笔画在各个方向上的移动距离。之后，我们为每个简单笔画构建了各自的梯级，按顺序排列。为简单起见，我们将所有运动的速度统一。接着，我们仿照跑马灯程序的交替逻辑，实现了笔画之间的延时连动。最后，通过工控柜操纵三轴写字机，完成了“永”字的书写。

在多次书写的尝试过程中，我们经历了大量试错的经历，诸如笔画间的延时时间不够，导致连续两笔在同一纬度上的运动抵消；笔画的长度设定不合理，导致完成的字十分怪异；笔与纸的距离过远或过近，前者导致无法书写，后者会带来墨点或带动纸移动；最重要的问题是，由于按照正确笔顺进行书写，固定从左上到右下完成书写，这导致每次都会积累相同方向的位移，每进行几次尝试就要使用之前的程序调节笔和载物台的位置。最后这个问题其实也很好解决，在完成字之后，抬笔移动到初始位置，这样就只需要每次移动纸张的位置，而无需进行繁琐的调节了。

书写结果如下图图组 3-2，其中左图是老师审核的版本，右图中左侧的则是放大笔画后的版本，二者都由于开始时笔距离纸过远或过近而造成了第一笔的失误。



图组 3-2 书写结果

11. 小型手臂机器人三自由度运动（I11）

本次课就小型手臂机器人的三自由度运动进行了实验。在程序上，手臂机器人与之前的三轴写字机有很多相似之处，值得一提的不同点是，前者增加了软限位。上电的同时，手臂机器人会记录原点，按动其他三个按钮，分别会进行顺逆时针的旋转和复位，前者会达到边界位置，后者会回到原点。在连接被控对象和 PLC 时，需要注意线要插进相对应的孔里，与之前不一样的是，线与孔的标号并不一致，需要注意方向。

12. 小型手臂机器人协同控制（I12）

本次课与相邻小组合作，完成了小型手臂机器人的协同控制。实验中，需要将两组的主副装置（PLC 和计算机）统一连接到一个交换器上，通过两个计算机的程序的联动，在主机的操控下，使两个手臂机器人完成一致的动作。为实现沟通，主机需要知晓副机的 PLC 地址，并传输一个在主副机上数据类型相同的数据达成协作。

四、课程收获

1. 工业控制系统及控制流程

工业控制系统相当于一个“智能工厂”，在这个工厂中，所有机器能够相互交流，并根据预设目标自动调整行为。系统工作的每一个环节都是精心策划和执行的。

- 感知层：如同人的感官一样，各种传感器遍布整个系统，负责收集温度、压力、位置、速度等各种参数数据。这些数据为后续决策提供了依据。
- 通信层：得益于高效稳定的通信网络，信息在系统内快速流动。从现场总线到无线网络，不同的通信方式确保了数据可以在正确的时间到达正确的地点，让各个部分无缝协作。
- 决策层：作为工业控制系统的“大脑”，基于收到的数据，使用预先设定的规则或先进的算法，做出即时反应，决定如何调整生产过程中的变量。
- 执行层：决策层下达指令后，执行器立即将数字信号转化为实际操作。

2. 被控对象的运动控制

被控对象的运动控制涉及到使用各种控制器、传感器和执行器来确保设备按照预定的方式运行，包括位置、速度、加速度和其他动态特性。这种控制对于保证生产效率、产品质量以及操作安全性至关重要。

- 控制架构
 - 开环控制：控制系统根据预设条件发出指令给执行器，但不会基于实际输出反馈调整输入。简单便宜，但在面对外部干扰或内部参数变化时不够灵活。
 - 闭环（反馈）控制：通过传感器监测被控对象的实际状态，并将这些信息反馈给控制器，后者会比较期望值与实际值的差异，然后调整控制信号以减少误差。相比于开环控制，闭环控制能够提供更高的精度和稳定性。
- 运动模式
 - 点到点运动：从一个固定位置移动到另一个固定位置的控制方式。
 - 连续路径控制：沿着特定轨迹移动的控制，要求系统能够实时调整速度和方向以保持路径的准确性。
- 控制策略
 - PID 控制：作为一种广泛应用的控制算法，通过调节 P、I、D 参数来最小化目标值与实际值之间的误差。
 - 自适应控制：当系统的动态特性发生变化时，自动调整控制参数以维持性能。
 - 模型预测控制（MPC）：利用数学模型预测未来的系统行为，并据此优化当前的控制动作。

- 安全与监控

为了确保安全操作，现代运动控制系统通常配备了多种保护机制，例如过载保护、紧急停止按钮以及故障诊断功能。此外，远程监控和数据分析也成为了提升系统可靠性和维护效率的重要手段。

3. 工业 PLC 控制系统

工业 PLC 控制系统是现代工业自动化的核心组成部分之一，其具有可靠性、灵活性、模块化设计、实时性的特点。前文已就其工作原理进行了简单的介绍，这里不做赘述。

随着技术的进步，PLC 也在不断发展，呈现出以下趋势：

- 集成更多功能：如嵌入式 Web 服务器、通信网关等功能，使得远程监控和管理更加便捷。
- 更高的性能：更快的处理器、更大的内存空间以及更先进的算法，提高了 PLC 的数据处理能力和响应速度。
- 开放性和互操作性：支持多种通信协议，促进不同品牌设备间的互联互通。
- 智能化：结合人工智能技术，使 PLC 具备自我诊断、预测性维护等功能，进一步增强了系统的可靠性和效率。

五、感想和认识

1. 课程感想

在本课程中，学习了 ccw 编程语言，了解了数种基本的被控对象，补全了控制工程理论知识与实际工业、生活应用的距离。其他理论类课程介绍了各种控制理论，但是并没有相应的实际转化，学习后有脱离感。在本课程的实践过程中，尤其是编程实现过程中，有很多地方印证了相应的控制概念，让理论知识有了实感。

2. 分布式控制系统 (DCS)

作为补充学习，通过资料检索，以下对分布式控制系统 (Distributed Control System, DCS) 的相关内容进行拓展。

DCS 是为控制分布于广阔地理区域内的工业过程专门设计的系统，允许在不同地理位置对设备进行集中监控和管理。每个地理位置的控制器可以独立执行本地控制功能，保持与其他控制器通信，并将数据发送到中央控制室，以便进行更高级别的监督和决策。

DCS 的核心理念是将控制功能分散到各个过程区域中，每个区域都配备有自己的控制器来处理特定的任务。这些控制器与中央计算机相连，后者负责整体协调和管理。当传感器检测到某些参数的变化时，信息会立即被传输给本地控制器进行初步分析和响应；同时，这些数据也会上传至中央计算机供进一步处理。操作人员可以通过 HMI 界面实时监控整个系统的运行状况，并根据需要调整设定值或启动/停止某些设备。以下图图 5-1 给出了一个 DCS 的具体例子。

(Virtual Reality, VR) 为远程培训、故障排除提供了新途径。同时,随着全球对环境保护的关注度不断提高,DCS 也在不断改进算法和技术,力求降低能源消耗,减少碳排放,达成绿色节能。

DCS 不仅仅是自动化系统,还是推动工业 4.0 转型的重要力量之一。从传统的工厂自动化到如今的智能制造业,DCS 持续演进,适应着不断变化的技术环境和市场需求,通过其独特的架构和特性,为复杂工业环境提供了高效的解决方案,是现代工业自动化不可或缺的一部分。

3. 罗克韦尔自动化

课程中应用的设备和软件多数来自罗克韦尔自动化公司,对其产生了兴趣,作为拓展研究,补充它的一些相关信息。

罗克韦尔自动化成立于 1903 年,最初名为 Allen-Bradley 公司,由 Lynde Bradley 和 Stanton Allen 创立,制造各种电气组件,并逐渐转型为工业控制产品的主要供应商。1985 年,Allen-Bradley 被洛克威尔国际 (Rockwell International) 收购,成为其下一个部门。到了 1996 年,为更专注于自动化市场,又从洛克威尔国际中分离出来独立上市,即今天的罗克韦尔自动化。

罗克韦尔自动化的主要产品包括 ControlLogix 控制器架构、FactoryTalk 生产管理软件解决方案、Kinetix 高性能的运动控制和驱动系统、Allen-Bradley 工业自动化组件等。