

摘要

海上风电机组长期运行于高盐雾、高湿度、强风浪等恶劣海洋环境，设备故障率较高，传统人工巡检方式效率低、成本高，难以实现实时监控与故障预警。本文针对大型海上风电机组的安全运行需求，设计了一套基于西门子 S7-1200 PLC 和 TP1200 触摸屏的监控系统。系统采用分层分布式架构，配置电流、电压、温度、功率、光强、烟雾等六类传感器，实时采集风电机组和升压变电站的关键运行参数；通过 PLC 完成数据采集、逻辑判断和报警控制，建立涵盖过流、欠流、过压、欠压、超温、低温、功率异常、光强异常、烟雾异常等 13 类故障的代码体系；采用 WinCC 组态软件设计触摸屏界面，实现运行状态显示、参数设置、趋势图、报警记录等功能。经 PLCSIM 仿真和 HMI 联调验证，系统数据采集准确、故障判断正确、报警响应及时，单台机组年均可节约故障停机损失约 7.2 万元、运维成本约 12 万元，可为海上风电场的安全稳定运行提供可靠技术支撑。

关键词：海上风电机组；PLC；安全监控；故障诊断；人机界面；SCADA

Abstract

Offshore wind turbines operate for long periods in harsh marine environments characterized by high salt spray, humidity, and strong waves, leading to higher equipment failure rates. Traditional manual inspection is inefficient and costly, making real-time monitoring and fault early warning difficult. This paper designs a monitoring system based on Siemens S7-1200 PLC and TP1200 touchscreen to meet the safety operation requirements of large offshore wind turbines. The system adopts a layered distributed architecture and deploys six types of sensors for current, voltage, temperature, power, light intensity, and smoke to collect key operating parameters of wind turbines and step-up substations in real time. The PLC performs data acquisition, logic judgment, and alarm control, and establishes a fault code system covering 13 fault types including overcurrent, undercurrent, overvoltage, undervoltage, overtemperature, low temperature, power abnormality, light intensity abnormality, and smoke abnormality. The WinCC configuration software is used to design the touchscreen interface for operation status display, parameter setting, trend charts, and alarm records. Verification through PLCSIM simulation and HMI joint debugging shows that the system achieves accurate data acquisition, correct fault judgment, and timely alarm response. The system can save approximately 72,000 yuan per unit per year in fault downtime losses and 120,000 yuan in operation and maintenance costs, providing reliable technical support for the safe and stable operation of offshore wind farms.

Keywords: Offshore wind turbine; PLC; Safety monitoring; Fault diagnosis; HMI; SCADA

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 国外研究现状.....	3
1.2.2 国内研究现状.....	3
1.2.3 存在的问题与发展趋势.....	4
1.3 论文主要内容及章节安排.....	5
第 2 章 海上风电机组组成及工作原理.....	7
2.1 海上风电机组组成部分介绍.....	7
2.1.1 风轮机组件.....	7
2.1.2 机舱及其它部件.....	7
2.1.3 升压变电站.....	8
2.2 海上风电机组工作原理.....	9
2.2.1 风能捕获原理.....	9
2.2.2 功率特性曲线.....	10
2.2.3 运行状态与控制策略.....	11
2.2.4 电气系统工作原理.....	11
2.2.5 安全保护机制.....	12
2.3 本章小结.....	12
第 3 章 设计方案及硬件选型.....	13
3.1 设计方案.....	13
3.1.1 设计目标与要求.....	13
3.1.2 系统总体架构设计.....	13
3.1.3 模块化设计思想.....	14
3.1.4 软件设计流程.....	15
3.2 硬件选型.....	16
3.2.1 PLC 控制器选型.....	16
3.2.2 触摸屏选型.....	17
3.2.3 传感器选型.....	18
3.2.4 信号调理电路.....	23
3.2.5 其它辅助设备.....	23
3.3 系统的开发环境.....	24
3.3.1 PLC 编程软件.....	24
3.3.2 触摸屏组态软件.....	24
3.3.3 系统集成与测试环境.....	25
3.4 本章小结.....	25
第 4 章 设备的硬件电路设计及软件开发.....	26
4.1 控制系统的整体结构设计.....	26
4.2 主控制器 PLC 选型.....	26

4.3 输入输出模块与信号点分配	28
4.3.1 数字量输入点分配	28
4.3.2 数字量输出点分配	29
4.3.3 模拟量输入点分配	29
4.4 硬件接线	30
4.4.1 电源接线	30
4.4.2 数字量输入接线	30
4.4.3 数字量输出接线	30
4.4.4 模拟量输入接线	31
4.5 PLC 程序设计	32
4.5.1 主程序设计	32
4.5.2 系统控制程序设计	34
4.5.3 故障判断程序设计	35
4.5.4 数据采集与转换程序设计	36
4.5.5 报警输出程序设计	38
4.6 本章小结	39
第 5 章 大型海上风电机组安全运行监控系统界面设计	41
5.1 监控系统组成与 HMI 通信连接	41
5.1.1 监控系统组成	41
5.1.2 HMI 与 PLC 通信连接	42
5.2 触摸屏操作界面设计	43
5.2.1 主监控画面设计	43
5.2.2 参数设置画面设计	44
5.2.3 趋势图画面设计	45
5.2.4 报警记录画面	45
5.3 触摸屏操作界面变量连接	46
5.4 本章小结	47
第 6 章 系统仿真及调试	48
6.1 PLC 程序仿真运行调试	48
6.1.1 仿真环境搭建	48
6.1.2 程序下载与运行	49
6.1.3 调试步骤与功能验证	50
6.2 HMI 操作系统仿真调试	52
6.2.1 正常运行状态模拟	52
6.2.2 故障状态模拟与报警验证	53
6.3 系统总体调试结果	54
6.4 经济效益分析	56
6.5 本章小结	57
第 7 章 总结与展望	58
7.1 总结	58
7.2 展望	59
参考文献	60
致谢	63
附录	64

附录部分梯形图	64
---------------	----

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近年来，全球对能源的需求量持续增长。在我国，面对日益严峻的资源环境约束、复杂多变的气候变化形势以及经济发展对能源供应的迫切需求，推进“碳达峰、碳中和”战略目标已成为能源领域发展的核心任务[1]。传统的火力发电技术主要依赖煤炭、石油等化石能源，这些能源在燃烧发电过程中会释放大量的二氧化碳等温室气体，对全球气候环境造成严重影响。为了应对能源危机，促进可持续发展，以风能、太阳能、地热能等为代表的清洁能源发电技术正在全球范围内快速发展，其中风力发电技术由于技术相对成熟、发电成本持续下降而备受关注。

海上风能具有资源储量丰富、风速条件稳定、不占用宝贵的陆地资源等突出优势。近年来，我国海上风电产业呈现出蓬勃发展的良好势头，装机规模不断扩大，已成为推动清洁能源发展的重要力量。然而，海上风电机组长期运行在复杂的海洋环境中，需要承受高盐雾腐蚀、高湿度、强风浪冲击、雷电等多种极端工况的考验，这些恶劣条件对设备的安全性和长期可靠性提出了极高的要求[5][7]。与陆上风电机组相比，海上风电机组的故障发生率更高，设备维护成本随之增加，一旦发生严重故障，不仅会造成巨大的经济损失，还会导致供电中断，影响电网稳定运行[11][15]。

目前，海上风电机组在运行过程中面临着诸多技术挑战和安全隐患。由于海洋环境的特殊性，传统的依靠人工定期巡检的监控方式存在效率低、成本高、安全风险大等明显不足，难以实现对机组运行状态的连续实时监控和故障的早期预警[17][18]。风电机组内部设备包括发电机、变流器、变压器等关键部件，这些设备通常集中安装在空间有限的机舱内，一旦发生短路、过载、温度异常等故障，很容易引发火灾等严重事故，导致大面积停电并造成重大经济损失。因此，开发一套功能完善的安全运行与监控系统，实现对海上风电机组关键运行参数的实时采集、智能分析和及时预警，对于保障机组安全稳定运行、提高发电效率、降低

运维成本具有重要的现实意义[23][25]。

本设计针对大型海上风电机组的安全运行需求,提出基于可编程逻辑控制器 PLC 的监控系统解决方案。系统通过配置电流传感器、电压传感器、温度传感器、功率传感器、光强传感器和烟雾传感器等多种检测装置,实时采集风电机组和升压变电站的运行数据,利用 PLC 控制器完成数据处理和逻辑判断,通过触摸屏实现人机交互和数据显示[2][6]。该系统的应用能够有效提升海上风电机组的安全运行水平,降低故障发生率,提高设备利用率和发电效率,并实现火灾等异常工况的早期预警。

1.1.2 研究意义

本研究的理论意义主要体现在技术理论创新、系统设计方法和故障诊断理论三个方面。技术理论创新方面,将 PLC 控制技术引入海上风电机组监控领域,探索了自动化控制技术在新能源发电系统中的创新应用途径[6][27]。通过深入研究传感器数据采集、PLC 程序设计、人机界面开发等关键技术,进一步完善了风电机组自动化控制的理论体系,为海上风电监控系统的优化设计提供了重要的技术参考和理论依据[26][30]。系统设计方法方面,采用模块化设计理念,构建了基于 PLC 的海上风电机组安全监控系统架构,为相关工程应用提供了系统化的设计方法和工程实现路径。故障诊断理论方面,建立了基于多参数融合的故障判断逻辑和报警机制,通过综合分析电流、电压、温度、功率等关键参数,有效提高了故障诊断的准确性和可靠性。

本研究的实践意义主要体现在安全保障、经济效益和技术推广三个方面。安全保障方面,实现对海上风电机组关键运行参数的实时监测和故障预警,及时发现潜在安全隐患,有效提高机组的安全性和可靠性[28]。通过自动报警和故障记录功能,帮助运维人员快速定位和处理故障,减少故障停机时间,降低事故风险。经济效益方面,系统采用模块化设计,具有良好的可扩展性和维护性,可为海上风电场的集中监控和智能运维提供技术支撑[23][25]。通过减少故障停机时间,提高设备利用率,能够带来可观的经济效益。同时,降低人工巡检成本,提高运维效率,进一步降低运营成本。技术推广方面,本系统设计思路和技术方案可为其他海上风电场的安全监控系统建设提供参考,推动行业技术进步和标准化发展。

从个人发展层面来看，本设计涵盖了电气控制、PLC 编程、传感器应用、人机界面设计等多个专业知识领域，能够全面提升专业技能和工程实践能力。通过完成从需求分析、方案设计、硬件选型、软件编程到系统调试的完整开发流程，培养了系统工程思维和解决复杂工程问题的能力，为今后从事自动化控制相关工作奠定了坚实基础。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

国外在风电机组监控技术方面的研究起步较早，技术发展相对成熟。欧美等发达国家的海上风电场普遍采用 SCADA 即数据采集与监视控制系统进行集中监控，实现了对风电机组运行状态的实时监测、故障诊断和远程控制功能[19][22]。这些系统通常具备完善的数据采集、存储、分析和可视化功能，能够为运维人员提供全面的设备状态信息。

国外研究者将先进控制算法应用于风电机组安全控制领域，提升了系统的稳定性和安全性。例如，基于模型预测控制 MPC 的动态安全控制方法，能够根据风电机组的实时状态预测潜在风险，提前采取控制措施[3][5]。自适应控制算法则能够根据环境变化和系统特性自动调整控制参数，提高系统的适应性和鲁棒性。

在故障预测和健康管理方面，国外研究取得了重要进展。基于大数据分析和人工智能技术的故障预测方法得到广泛应用，能够通过分析历史运行数据，识别设备性能退化趋势，提前预测潜在故障，实现从被动维护向主动维护的转变。机器学习、深度学习等人工智能技术在风电机组状态监测、故障诊断、寿命预测等方面展现出良好的应用前景。

此外，国外在传感器网络、物联网技术、云计算平台等方面也开展了大量研究工作，为风电机组监控系统向智能化、网络化方向发展提供了技术支撑。

1.2.2 国内研究现状

国内海上风电产业近年来发展迅速，监控技术水平不断提升。国内学者在风电机组控制策略、故障诊断、状态评估等方面开展了大量研究工作，取得了一系列重要成果[4][9][10]。

在 PLC 技术应用方面，国内研究者在风电机械自动化控制系统中广泛应用 PLC 技术，通过合理的程序设计和参数配置，实现了对风电机组的精确控制

[2][6][27]。西门子 S7 系列 PLC 因其可靠性高、功能强大、编程灵活等优点，在风电控制系统中得到广泛应用。基于 PLC 的风电监控系统能够实现数据采集、逻辑判断、报警控制等多种功能，大大提高了系统的自动化水平。

在控制算法研究方面，国内学者开展了基于模糊 PID 控制器的海上风电机组仿真研究，研究表明先进控制算法能够有效改善系统性能，提高控制精度和响应速度[14]。基于主动尾流控制的风电机群协同优化调度技术也取得了重要进展，能够提高整体发电效率[4]。

在状态监测和故障预警方面，基于监测数据的风电机组状态监控和故障预警技术取得了重要进展[17][18][21]。通过分析运行数据，建立故障诊断模型，能够实现对设备异常状态的早期识别和预警。基于大数据分析的风电机组运行状态监测方法，能够从海量数据中提取有价值的信息，为故障诊断和预测提供数据支撑[17]。

在系统集成和应用方面，国内研究者开展了大型风电场 SCADA 系统的设计与实现工作，建立了集中监控平台，实现了对多台风电机组的统一监控和管理[25]。风电场远程集中化生产运营监控平台的建设，为风电场的高效运营提供了技术保障[23]。

1.2.3 存在的问题与发展趋势

尽管国内外在风电机组监控技术方面取得了重要进展，但仍存在一些亟待解决的问题。系统集成度和智能化水平有待提高，部分监控系统功能相对单一，缺乏综合分析能力，难以实现多参数融合分析和智能决策，系统之间的信息孤岛问题仍然存在，影响了整体监控效果。传感器布置和数据采集方案需要优化，传感器选型、安装位置、信号调理等方面需要进一步优化，以提高监测精度和可靠性，海上恶劣环境对传感器的防护等级和可靠性提出了更高要求。故障诊断算法的准确性和实时性还需改进，误报和漏报现象仍然存在，故障诊断的准确率有待提高，复杂故障的诊断时间较长，难以满足实时性要求[16][20]。恶劣环境适应性方面，海上环境的高盐雾、高湿度、强电磁干扰等特点，对电气设备和传感器的可靠性提出严峻挑战，需要进一步提高设备的防护等级和抗干扰能力。

未来发展趋势主要体现在智能化网络化发展、故障预测和健康管理、风电机组协同控制、远程监控和智能运维等方面。监控系统将向智能化、网络化方向发

展，充分利用物联网、云计算、大数据、人工智能等新技术[1][23]，通过构建智能监控平台，实现数据的实时采集、智能分析和远程控制。故障预测和健康管理技术 PHM 将得到更广泛应用，实现从被动维护向主动维护转变[7][16]，通过建立设备健康状态评估模型，实现故障的早期预警和预防性维护。风电机群协同控制和优化调度技术将成为研究热点，通过协调多台风电机组的运行状态，提高整体发电效率和经济效益[4][9]。远程监控和智能运维平台将进一步完善，通过远程数据传输和智能分析，降低运维成本，提高运维效率[15][23]，结合无人机、机器人等先进技术，实现远程巡检和故障处理。

1.3 论文主要内容及章节安排

本论文以大型海上风电机组的安全运行与监控系统为研究对象，设计并实现一套基于 PLC 的监控系统，实现对风电机组和升压变电站关键运行参数的实时监测、故障诊断和报警控制。论文的主要研究内容包括：分析海上风电机组的组成结构和工作原理，了解风电机组各组成部分的功能和特点，为监控系统的设计提供理论基础；设计监控系统的总体方案，包括硬件系统设计和软件系统设计，硬件系统主要包括 PLC 控制器、传感器、触摸屏、信号调理电路和报警装置等，软件系统采用模块化设计思想，包括数据采集、数据处理、逻辑判断、报警控制和人机交互等功能模块；完成硬件电路设计和软件开发，硬件电路设计包括 PLC 硬件组态配置、I/O 地址分配、硬件接线等，软件开发包括 PLC 程序设计、触摸屏界面设计、通信配置等；进行系统仿真和调试，验证系统功能的正确性和可靠性，分析系统的经济效益。

本论文共分为 7 章，各章主要内容安排如下：

第 1 章 绪论。介绍研究背景及意义，分析国内外研究现状，阐述论文的主要内容和章节安排。

第 2 章 海上风电机组组成及工作原理。介绍海上风电机组的主要组成部分，包括发电机、变流器、变压器等关键设备，分析风电机组的工作原理和运行特性。

第 3 章 设计方案及硬件选型。提出监控系统的总体设计方案，包括系统架构、功能模块划分等；完成硬件设备的选型，包括 PLC、传感器、触摸屏等关键设备的选型；介绍系统的开发环境。

第 4 章 设备的硬件电路设计及软件开发。详细设计 PLC 硬件组态配置、I/O 地址分配、硬件接线方案；完成 PLC 程序的设计与开发，实现数据采集、逻辑判断、报警控制等功能。

第 5 章 大型海上风电机组安全运行监控系统界面设计。建立 HMI 与 PLC 之间的通信连接；设计触摸屏操作界面，包括主监控画面、参数设置画面、历史数据查询画面、报警记录画面等；完成触摸屏界面变量与 PLC 数据的连接。

第 6 章 系统仿真及调试。进行 PLC 程序仿真运行调试，验证程序逻辑的正确性；进行 HMI 操作系统仿真调试，验证界面功能和数据通信的可靠性；分析系统总体调试结果，进行经济效益分析。

第 7 章 总结与展望。总结论文的主要工作和研究成果，分析系统的特点和优势，指出存在的不足，并对未来的研究方向进行展望。

第 2 章 海上风电机组组成及工作原理

2.1 海上风电机组组成部分介绍

海上风电机组是一种将风能转化为电能的复杂机电一体化设备，主要由风轮机组件、机舱系统、升压变电站等核心部分构成。相比陆上风电机组，海上风电机组需要应对高盐雾、高湿度、强风浪等极端海洋环境条件，这些恶劣工况对设备的防护等级、长期可靠性和可维护性都提出了更加严格的要求[8][11]。本节将系统介绍海上风电机组各主要组成部分的结构特征和功能作用。

2.1.1 风轮机组件

风轮机组件是海上风电机组捕获风能的核心装置，主要由叶片、轮毂、主轴等关键部件构成。叶片是风轮机中最为重要的部件，其设计质量直接决定了风能捕获效率的高低。目前，大型海上风电机组普遍采用三叶片设计，叶片长度可以达到 80 米甚至更长，通常采用玻璃纤维增强复合材料或碳纤维复合材料制造，这些材料具有质量轻、强度高、抗腐蚀性能好等优点。

轮毂是连接叶片和主轴的重要部件，需要承受来自叶片的巨大载荷。轮毂内部通常集成有变桨系统，该系统通过调节叶片桨距角来控制风轮机的转速和功率输出。变桨系统在风电机组安全运行中发挥着关键作用，当风速超过额定值或系统检测到故障时，可以通过变桨操作使叶片处于顺桨位置，从而减少风能捕获量，有效保护机组安全[13]。

主轴的作用是将风轮机捕获的机械能传递给发电机，在工作过程中需要承受巨大的扭矩和弯矩。主轴通常采用高强度合金钢材料制造，表面经过特殊的防腐处理，以适应海上恶劣的腐蚀环境。主轴与轮毂、发电机之间通过联轴器进行连接，联轴器具有缓冲和减振功能，能够有效减少振动对设备造成的不利影响。

2.1.2 机舱及其它部件

机舱是风电机组的心脏部分，内部集中安装了发电机、齿轮箱、变流器、控制系统等关键设备。机舱通常采用流线型外形设计，具有良好的空气动力学性能，能够有效减小风阻。机舱外壳采用高强度材料制造，具有良好的密封性能和防腐性能，能够有效阻止盐雾、湿气等有害物质进入机舱内部。

发电机是风电机组中将机械能转换为电能的核心设备。大型海上风电机组通常采用永磁同步发电机或双馈异步发电机。永磁同步发电机具有效率高、功率密度大、维护工作量少等突出优点，在海上风电机组中得到了广泛应用[12]。发电机的定子绕组和转子磁极需要具备良好的绝缘性能和防护能力，以适应海上高湿度的工作环境。

变流器是连接发电机和电网的重要设备，其主要功能是将发电机输出的频率可变的交流电转换为与电网频率一致的交流电。变流器通常采用全功率变流器或部分功率变流器结构，内部包含整流器、直流环节和逆变器等部分。变流器中的功率半导体器件如 IGBT 是整个系统的薄弱环节，需要实时监测其温度、电流等关键参数，以防止过载和过热故障的发生[8]。

齿轮箱的主要作用是提高发电机转速，通常采用行星齿轮结构，具有传动比大、结构紧凑等优点。齿轮箱是风电机组中故障率相对较高的部件之一，需要配备良好的润滑系统和冷却系统，并实时监测其温度、振动等运行参数。

控制系统是风电机组的大脑，负责协调各个部件的工作，实现风电机组的启动、运行、停机等各项控制功能。控制系统通常包括主控制器、变桨控制器、变流器控制器等，各控制器之间通过通信网络进行连接，实现信息交换和协调控制。

此外，机舱内还安装有冷却系统、润滑系统、安全系统等辅助设备。冷却系统用于发电机、变流器等设备的散热，通常采用强制风冷或液冷方式。润滑系统为齿轮箱等旋转部件提供必要的润滑，保障设备正常运行。安全系统包括火灾报警、紧急停机装置，为机组安全运行提供保障。

2.1.3 升压变电站

升压变电站是海上风电场的重要组成部分，主要承担将风力发电机组产生的电能进行升压、汇集和输送的任务。由于海上环境的特殊性，变电站设备需要面对高盐雾、高湿度、强风浪等恶劣工况，这些条件对设备的防护等级和可靠性提出了更高的要求[8][11]。

升压变压器是变电站的核心设备，负责将风电机组输出的低压电能升压至电网电压等级。海上风电场通常采用箱式变电站结构，变压器安装在密封的箱体内部，具有良好的防护性能。变压器需要实时监测其温度、油位、压力等关键参数，以防止过热和故障的发生。

开关设备包括断路器、隔离开关、接地开关等，用于电能的分配、控制和保护。开关设备需要具备良好的操作可靠性和电气性能，能够在恶劣环境下正常工作。开关设备的操作机构需要定期进行维护，以保障其动作可靠。

保护装置包括继电保护、过流保护、过压保护等，用于检测和切除故障，保护设备和电网安全。保护装置需要具备高可靠性和快速动作特性，能够及时识别和切除故障，防止故障范围的扩大。

控制系统负责变电站的监控、控制和保护，通常采用 PLC 或 DCS 系统实现。控制系统实时监测变电站各设备的运行状态，实现远程监控和自动控制功能 [12][15]。

2.2 海上风电机组工作原理

海上风电机组的工作原理是将风能转换为机械能，再通过发电机将机械能转换为电能。整个能量转换过程涉及空气动力学、机械传动、电磁转换等多个物理过程。本节将系统阐述风电机组的工作原理，包括风能捕获原理、功率特性、运行状态等内容。

2.2.1 风能捕获原理

风能是空气流动所产生的动能，风电机组通过叶片捕获风能并将其转换为机械能。根据贝茨理论，风轮机能够捕获的风能功率可以用以下公式表示：

$$P = (1/2)\rho A V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2-1)$$

式中： P 为风轮机捕获的机械功率，单位为 W ； ρ 为空气密度，单位为 kg/m^3 ； A 为风轮扫掠面积，单位为 m^2 ； V 为风速，单位为 m/s ； C_p 为风能利用系数，是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数。

叶尖速比 λ 定义为叶片叶尖线速度与风速的比值，其表达式为：

$$\lambda = R\omega/V \quad (2-2)$$

式中： ω 为风轮机角速度，单位为 rad/s ； R 为风轮半径，单位为 m ； V 为风速，单位为 m/s 。

风能利用系数 C_p 反映了风轮机捕获风能的效率，其理论最大值上限为 0.593，即贝茨极限。实际风电机组的 C_p 值通常在 0.3-0.5 之间，具体数值取决于叶片设计、控制系统等因素。 C_p 与叶尖速比 λ 和桨距角 β 的关系可以近似表示为：

$$C_p = (0.44 - 0.02\lambda) \sin[\pi(\lambda - 2)/(15 - 0.3\beta)] - 0.001\lambda(\beta - 2) \quad (2-3)$$

由公式 2-1 可知，风轮机捕获的功率与风速的三次方成正比，风速的微小变化会引起功率的较大波动。因此，风速是影响风电机组发电量的最关键因素。

2.2.2 功率特性曲线

风电机组的功率特性曲线反映了机组输出功率与风速之间的关系，是评价风电机组性能的重要指标。典型的功率特性曲线如图 2-1 所示，可以划分为以下几个运行阶段。启动阶段（A-B 段）是指当风速低于切入风速（通常为 3-4 m/s）时，风电机组处于停机状态，不产生电能。当风速达到切入风速时，风电机组开始启动，输出功率随着风速的增加而逐渐增加。功率上升阶段（B-C 段）是指当风速处于切入风速和额定风速之间时，风电机组处于部分负荷运行状态。在此阶段，控制系统通过调整变桨角度，使风轮机保持最佳叶尖速比，实现最大功率跟踪（MPPT），输出功率按照风速的三次方关系快速增加。额定功率阶段（C-D 段）是指当风速达到额定风速（通常为 11-15 m/s）时，风电机组输出功率达到额定功率。在此阶段，控制系统通过变桨控制，使输出功率保持恒定在额定值，防止过载。切出阶段（D 点以后）是指当风速超过切出风速（通常为 25 m/s）时，出于安全考虑，风电机组自动停机，输出功率降为零。

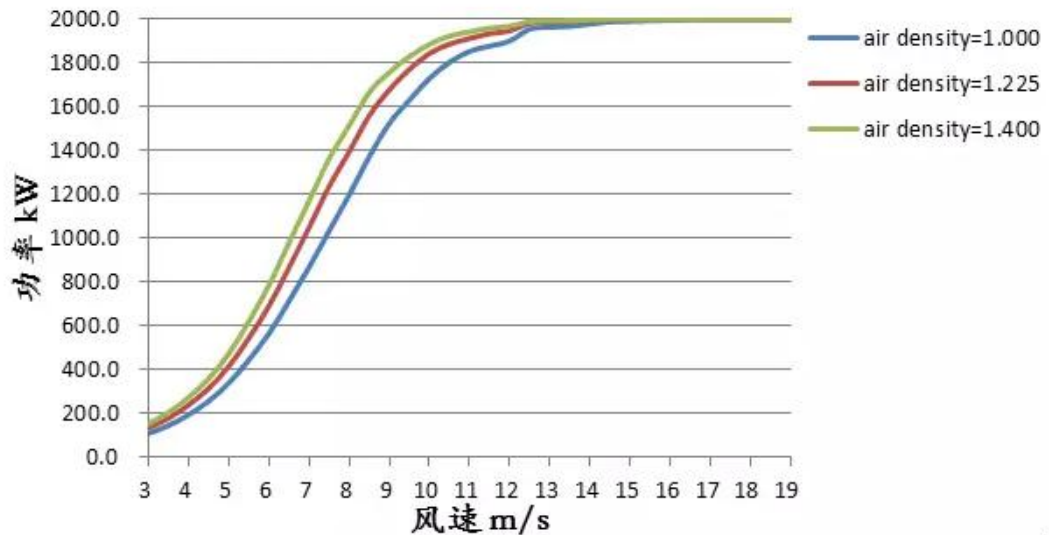


图 2-1 风电机组功率特性曲线示意图

功率特性曲线反映了风电机组在不同风速条件下的发电能力，是风电场设计和运行的重要依据。通过监测实际功率曲线与设计功率曲线的偏差，可以判断风

发电机组的运行状态和性能退化情况。

2.2.3 运行状态与控制策略

海上风电机组根据风速和运行条件的不同，可以处于不同的运行状态，包括待机状态、启动状态、运行状态、故障状态、停机状态等。控制系统根据风速、功率、温度等参数，自动切换运行状态，确保机组安全高效运行。

待机状态是指当风速低于切入风速或高于切出风速时，风电机组处于待机状态。在此状态下，变桨系统使叶片处于顺桨位置，风轮机不旋转，发电机不发电。启动状态是指当风速达到切入风速时，控制系统启动风电机组。启动过程包括变桨系统调整叶片角度、风轮机加速、发电机并网等步骤。启动过程需要平稳、快速，避免对电网造成冲击。运行状态是指当风速处于切入风速和切出风速之间时，风电机组处于运行状态。在此状态下，控制系统根据风速变化，实时调整变桨角度和变流器参数，实现最大功率跟踪或恒功率控制。故障状态是指当检测到过流、过压、超温、振动异常等故障时，风电机组进入故障状态。控制系统根据故障类型和严重程度，采取相应的保护措施，如紧急停机、报警等。停机状态是指当风速超过切出风速、发生故障或需要维护时，风电机组进入停机状态。停机过程包括变桨顺桨、发电机脱网、机械制动等步骤，机组得以安全停止。

2.2.4 电气系统工作原理

海上风电机组的电气系统主要包括发电机、变流器、变压器等设备，负责将机械能转换为电能并输送到电网。

发电机的工作原理基于电磁感应定律。当风轮机带动发电机转子旋转时，转子磁场在定子绕组中产生感应电动势，从而产生电流。永磁同步发电机的转子采用永磁体，不需要励磁电流，具有效率高、结构简单等优点。双馈异步发电机的转子采用绕组，通过变流器控制转子电流，实现变速恒频运行。

变流器是连接发电机和电网的关键设备，其工作原理是将发电机输出的频率可变的交流电转换为与电网频率一致的交流电。变流器通常采用背靠背结构，包括机侧变流器和网侧变流器。机侧变流器控制发电机，实现最大功率跟踪；网侧变流器控制并网电流，实现单位功率因数并网。

变压器将发电机输出的低压电能升压至电网电压等级。大型海上风电机组通常输出 690V 或更高电压，通过升压变压器升压至 35kV 或更高电压，然后通过

海底电缆输送到陆上变电站。

2.2.5 安全保护机制

海上风电机组在运行过程中面临各种安全风险，需要建立完善的安全保护机制。主要的安全保护措施包括过流保护、过压/欠压保护、超温保护、超速保护、振动保护和火灾保护。过流保护是指当电流超过设定值时，保护装置动作，切断电路，防止设备损坏。过压/欠压保护是指当电压超出正常范围时，保护装置动作，保护设备安全。超温保护是指当发电机、变流器等设备温度超过设定值时，保护装置动作，防止设备过热损坏。超速保护是指当风轮机转速超过设定值时，保护装置动作，通过变桨或机械制动使机组停机。振动保护是指当机组振动超过设定值时，保护装置动作，防止设备损坏。火灾保护是指当检测到火灾时，火灾报警系统动作，启动灭火装置，保护人员和设备安全。

这些安全保护机制需要实时监测相关参数，及时发现异常并采取保护措施，保障风电机组安全运行。

2.3 本章小结

本章系统介绍了海上风电机组的组成结构和工作原理。从风轮机组件、机舱系统、升压变电站三个方面介绍了海上风电机组的主要组成部分，分析了各组成部分的结构特点和功能。从风能捕获原理、功率特性曲线、运行状态与控制策略、电气系统工作原理、安全保护机制等方面详细阐述了海上风电机组的工作原理。

通过本章的分析，可以得出以下结论。海上风电机组是一个复杂的机电一体化系统，由多个子系统组成，各子系统之间需要协调工作，才能实现高效、安全、可靠的运行。风电机组的功率输出与风速的三次方成正比，风速是影响发电量的最关键因素，控制系统通过变桨和变流器控制，实现最大功率跟踪或恒功率控制。风电机组在不同风速和运行条件下处于不同的运行状态，控制系统需要根据实际情况自动切换运行状态，保障机组安全高效运行。海上风电机组面临高盐雾、高湿度、强风浪等恶劣环境，对设备的防护等级和可靠性提出了更高要求，需要完善的安全保护机制。

本章内容为后续章节的监控系统设计提供了理论基础，有助于理解需要监测的关键参数和故障类型，为系统设计提供指导。

第 3 章 设计方案及硬件选型

3.1 设计方案

3.1.1 设计目标与要求

针对大型海上风电机组的安全运行需求，本监控系统设计需要满足以下基本要求。实时性要求：实时采集和显示风电机组的关键运行参数，数据采集周期不大于 1 秒，便于运维人员及时了解机组运行状态。可靠性要求：具有高可靠性，能够适应海上恶劣环境，连续运行故障率低于 5%，监控系统本身需稳定运行。准确性要求：传感器测量精度满足工程要求，电流、电压测量精度不低于 0.5 级，温度测量精度不低于 A 级 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ ，功率测量精度不低于 1.0 级。智能化要求：自动识别过流、过压、欠压、超温、功率异常、光强异常、烟雾异常等故障状态，报警响应时间不超过 2 秒，报警准确率达到 95%以上。可操作性要求：触摸屏界面设计友好，操作简便直观，实现运行状态实时显示、参数设置、历史数据查询、报警记录查看等功能。

3.1.2 系统总体架构设计

本监控系统采用分层分布式架构设计，如图 3-1 所示，主要包括传感器检测层、信号调理层、PLC 控制层和人机交互层。

传感器检测层负责采集风电机组和升压变电站的运行数据，包括电流传感器、电压传感器、温度传感器、功率传感器、光强传感器和烟雾传感器等。这些传感器分别监测发电机、变流器、变压器等关键设备的电流、电压、温度、功率等运行参数，以及机舱环境光强和烟雾浓度，覆盖需要监控的部位，实现火灾预警和异常工况的早期发现。

信号调理层将传感器输出的原始信号进行滤波、隔离、转换等处理，输出标准的 4-20mA 电流信号或 0-10V 电压信号，供 PLC 采集。信号调理电路采用光电隔离技术，隔离电压达到 2500V，有效防止强电干扰进入控制系统。

PLC 控制层是系统的核心，采用西门子 S7-1200 PLC 作为主控制器，负责数据采集、逻辑判断、报警控制等功能。PLC 通过模拟量输入模块采集传感器数据，通过数字量输出模块控制报警装置，通过以太网接口与触摸屏进行数据交换。

人机交互层采用西门子 TP1200 Comfort 触摸屏，实现运行状态显示、参数设置、数据查询等功能，为运维人员提供友好的操作界面。

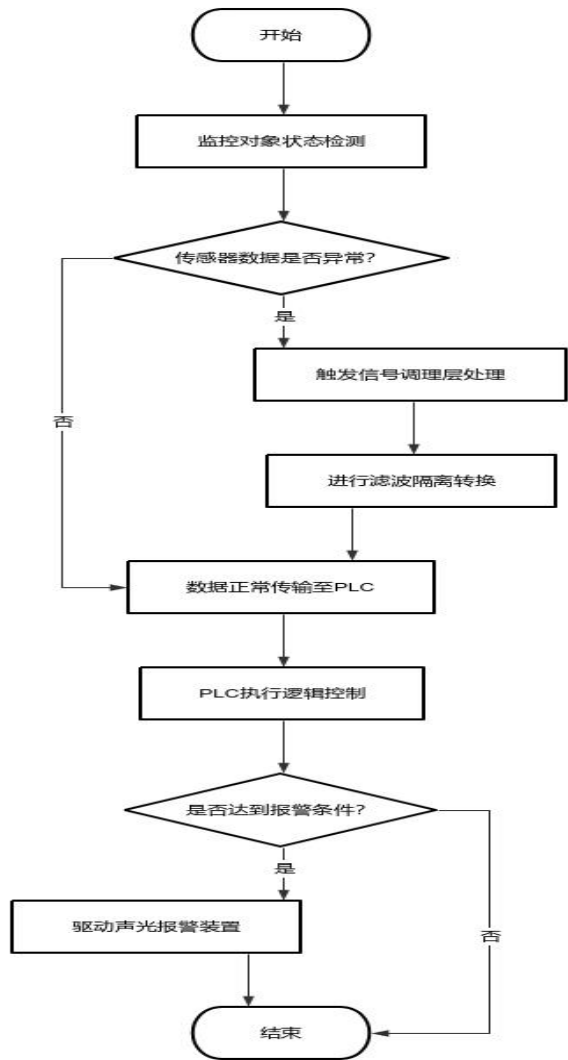


图 3-1 系统总体架构图

3.1.3 模块化设计思想

系统采用模块化设计思想，将整个监控系统划分为独立的功能模块，各模块功能明确，接口标准化，便于系统的设计、开发、调试和维护。主要功能模块包括数据采集模块、数据处理模块、逻辑判断模块、报警控制模块和人机交互模块。数据采集模块负责实时采集传感器数据，包括电流、电压、温度、功率、光强、烟雾浓度等六类运行参数，该模块通过 PLC 的模拟量输入模块实现，具有高速采样、多通道采集等特点。数据处理模块对采集的原始数据进行滤波、标定、转换等处理，提高数据质量和可靠性，该模块采用数字滤波算法，滤除干扰信号，提

高测量精度。逻辑判断模块根据设定的阈值和判断逻辑，对处理后的数据进行判断，识别异常状态和故障类型，该模块采用多条件逻辑判断和延时确认机制，提高故障判断的准确性。报警控制模块当检测到异常状态时，自动启动声光报警装置，记录报警信息，并通过触摸屏显示故障详情，该模块具有报警优先级管理、报警记录存储等功能。人机交互模块实现运行状态显示、参数设置、历史数据查询、报警记录查看等功能，为运维人员提供友好的操作界面，该模块通过触摸屏实现，支持多画面切换、数据曲线显示等功能。

各模块之间通过数据交换实现协同工作，模块化设计使得系统具有良好的可扩展性和维护性，便于后期功能升级和故障排除。

3.1.4 软件设计流程

系统软件设计采用自顶向下的设计方法，设计流程如图 3-2 所示。设计过程包括需求分析、系统架构设计、详细设计、系统集成和测试等步骤。需求分析阶段明确系统功能要求，系统架构设计阶段确定各功能模块，详细设计阶段包括 PLC 程序设计和触摸屏界面设计，系统集成和测试阶段验证系统功能。

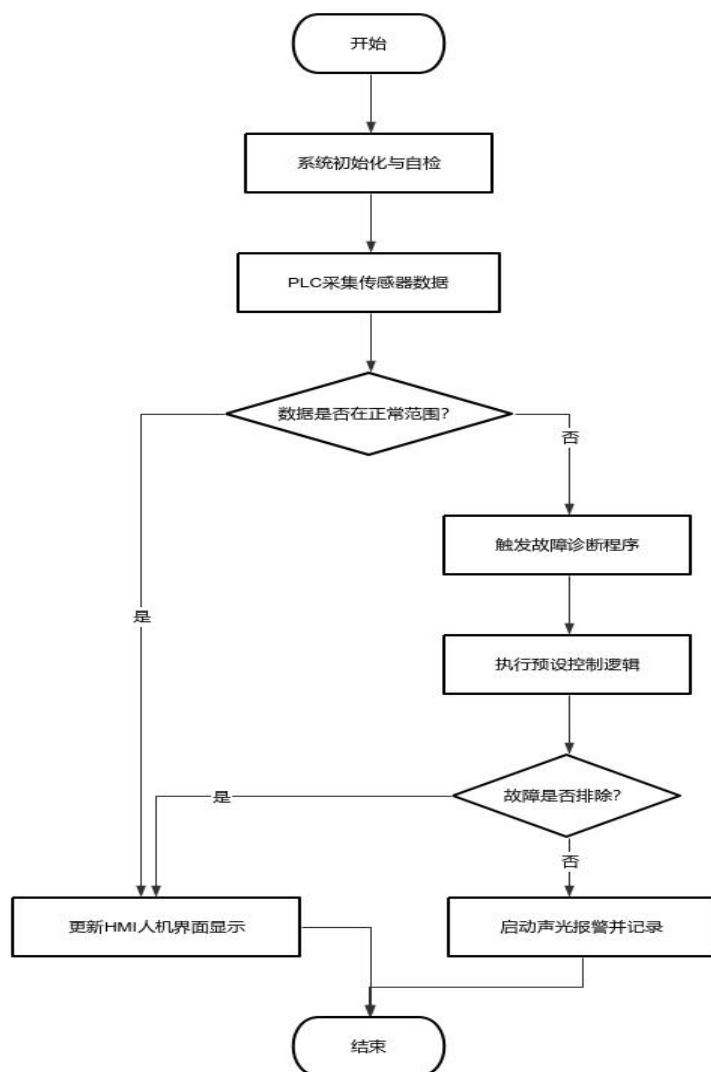


图 3-2 软件设计流程图

3.2 硬件选型

3.2.1 PLC 控制器选型

PLC 控制器是监控系统的核心设备，其选型直接影响系统的性能和可靠性。根据系统功能要求和技术指标，本设计选择西门子 S7-1200 系列 PLC 作为主控制器。

S7-1200 PLC 是西门子公司推出的紧凑型可编程控制器，具有高性能、丰富的扩展能力、强大的通信功能、高可靠性和编程方便等特点。采用 32 位 ARM 处理器，运算速度快，能够满足实时控制要求，CPU 1214C 具有 14 个数字量输入、10 个数字量输出、2 个模拟量输入，满足本系统的基本 I/O 需求。支持多种扩展模块，包括模拟量输入模块 SM1231、SM1234，数字量输入模块 SM1221、数字

量输出模块 SM1222 等,可以根据实际需求灵活配置。内置以太网接口,支持 S7 通信、TCP/IP 通信等多种通信协议,能够方便地与触摸屏、上位机等设备进行数据交换。采用工业级设计,工作温度范围宽,抗干扰能力强,适合海上恶劣环境,防护等级达到 IP20,满足控制柜内安装要求。支持博途 TIA Portal 软件进行编程,采用梯形图、功能块图等多种编程语言,编程直观、调试方便[31][32]。

本系统选择 CPU 1214C 作为主控制器,配置 SM1234 模拟量输入模块用于采集 6 路传感器信号,即电流、电压、温度、功率、光强、烟雾浓度,满足本系统对多路模拟量采集的需求。图 3-4 为 S7-1200 CPU 1214C 及模拟量模块实物图。



图 3-3 S7-1200 CPU 1214C 及模拟量模块

3.2.2 触摸屏选型

触摸屏作为人机交互界面,需要具有良好的显示效果、快速的响应速度和友好的操作界面。本设计选择西门子 TP1200 Comfort 触摸屏。

TP1200 Comfort 触摸屏具有高分辨率显示、快速响应、多种通信接口、丰富的功能和工业级设计等特点。12 英寸 TFT 彩色显示屏,分辨率达到 1280×800 像素,显示清晰,色彩丰富,能够清晰显示运行数据和状态信息。采用高性能处理器,画面切换速度快,数据刷新周期短,能够满足实时监控要求。支持以太网、串口等多种通信接口,能够方便地与 PLC 进行数据交换,支持 S7 通信协议,与 S7-1200 PLC 通信稳定可靠。支持多画面设计、数据曲线显示、报警记录、历史数据查询等功能,能够满足监控系统的各种需求。防护等级达到 IP65,能够适应工业环境,工作温度范围宽,适合海上环境使用[35]。

通过 WinCC 组态软件,可以设计出功能强大、界面美观的监控画面,包括

主监控画面、参数设置画面、历史数据查询画面、报警记录画面等。图 3-5 为 TP1200 Comfort 触摸屏实物图。



图 3-4 TP1200 Comfort 触摸屏

3.2.3 传感器选型

传感器是监控系统的“眼睛”，其选型直接影响测量精度和系统可靠性。根据监测参数的不同，本系统需要选择电流传感器、电压传感器、温度传感器、功率传感器、光强传感器和烟雾传感器共六类传感器。

电流传感器选择霍尔电流传感器与电流变送器组合。霍尔电流传感器基于霍尔效应原理，能够非接触式测量大电流，具有高精度、高隔离、响应速度快等优点。电流变送器将传感器输出的信号转换为标准的 4-20mA 电流信号，便于 PLC 采集。主要技术参数包括：测量范围为 0-800A，精度等级为 0.5 级，响应时间小于 10ms，输出信号为 4-20mA，工作温度为 -20℃~+70℃，防护等级为 IP65，安装方式为螺栓固定。图 3-6 为霍尔电流传感器及变送器实物图，电流传感器输出特性曲线如图 3-7 所示，输出电流与输入电流呈线性关系，满足测量

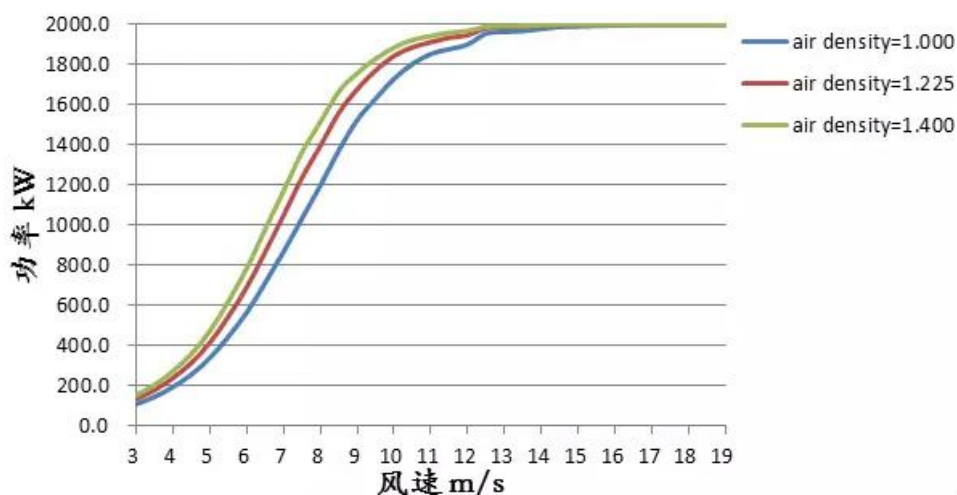


图 3-5 电流传感器输出特性曲线

电压传感器选用电压互感器与电压变送器组合方式。电压互感器将高电压按比例关系转换成低电压，一般将线路电压转换成 100V 或更低等级的标准二次电压。电压变送器将互感器输出的电压信号转换为 4-20mA 或 0-10V 标准信号，便于 PLC 采集处理。主要技术参数包括：测量范围为 0-690V，精度等级为 0.5 级，线性度为 $\pm 0.2\%$ ，温度稳定性为 $\pm 0.1\%/10^{\circ}\text{C}$ ，输出信号为 4-20mA 或 0-10V，工作温度为 $-20^{\circ}\text{C}\sim +70^{\circ}\text{C}$ ，防护等级为 IP65。图 3-8 为电压互感器及变送器实物图。



图 3-6 电压互感器

温度传感器选用 PT100 铂电阻温度传感器配温度变送器。PT100 是一种稳定性和线性度都比较好的铂丝热电阻传感器，测温范围宽，精度高。温度变送器将

PT100 的电阻信号转换为 4-20mA 标准电流信号输出。主要技术参数包括：测量范围为-40℃~+120℃，精度等级为 A 级 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ ，响应时间小于 10s，输出信号为 4-20mA，工作温度为-40℃~+85℃，防护等级为 IP65，安装方式为螺纹安装或表面贴装。图 3-9 为 PT100 铂电阻温度传感器及变送器实物图。



图 3-7 PT100 温度传感器

功率传感器选用智能电量变送器，能够同时测量有功功率、无功功率、功率因数等电参数。该传感器通过内部微处理器对电压和电流信号进行采样计算，得到实时功率值，并转换为 4-20mA 或 0-10V 标准信号输出。主要技术参数包括：测量范围为 0-10MW，精度等级为 1.0 级，输出信号为 4-20mA 或 0-10V，工作温度为-20℃~+70℃，防护等级为 IP65，保护功能包括过压保护和过流保护。图 3-10 为智能电量变送器实物图。



图 3-8 智能电量变送器

光强传感器用于监测机舱内部环境光强，当光强异常升高时可能预示电气短路或火灾隐患。选用光电式光强传感器配变送器，测量范围为 0-500 Lux，输出 4-20mA 标准信号，防护等级 IP65，适用于海上高湿度环境。烟雾传感器用于火灾早期预警，选用光电式或离子式烟雾传感器配变送器，测量范围为 0-500 ppm，输出 4-20mA 标准信号，响应时间小于 30 秒，能够在火灾萌芽阶段及时发出报警信号。图 3-11 为光强传感器及烟雾传感器实物图。

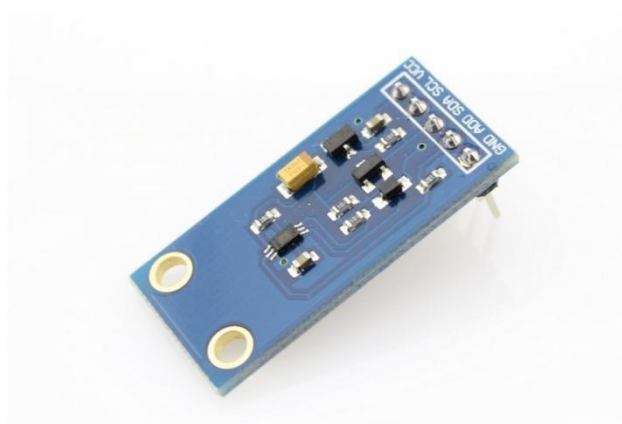


图 3-9 光强传感器



图 3-10 烟雾传感器

传感器主要参数汇总如表 3-1 所示。

表 3-1 传感器主要参数表

参数名称	电流传感器	电压传感器	温度传感器	功率传感器	光强传感器	烟雾传感器
测量范围	0~800 A	0~690 V	-40~120 °C	0~10 MW	0~500 Lux	0~500 ppm
输出信号	4~20 mA	4~20 mA	4~20 mA	4~20 mA	4~20 mA	4~20 mA
精度等级	0.5 级	0.5 级	A 级 ±0.15 °C	1.0 级	±5%	±10%
响应时间	<10 ms	<20 ms	<10 s	<100 ms	<1 s	<30 s
工作温度	-20~+70 °C	-20~+70 °C	-40~+85 °C	-20~+70 °C	-20~+70 °C	-20~+70 °C
防护等级	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65

3.2.4 信号调理电路

信号调理电路的主要作用是将传感器输出的 4-20mA 电流信号或 0-10V 电压信号进行滤波、隔离和保护，使信号质量满足 PLC 模拟量输入要求。

信号调理电路采用光电隔离、滤波处理、保护功能和信号转换等技术。采用光电隔离技术，隔离电压达到 2500V，有效防止强电干扰进入 PLC 系统，提高系统的安全性和可靠性。配置 RC 滤波电路，滤除高频干扰信号，提高测量精度，滤波电路的时间常数根据信号特性进行优化设计。具有过压保护、过流保护功能，当输入信号超出正常范围时自动限幅，保护 PLC 模拟量输入模块不受损坏。将不同规格的传感器信号统一转换为 PLC 可识别的标准信号，便于系统集成和维护。

3.2.5 其它辅助设备

其它辅助设备包括声光报警装置、电源模块和通信线缆。声光报警装置包括蜂鸣器和指示灯，用于在检测到异常状态时发出声光报警信号，提醒运维人员及时处理。蜂鸣器采用 24V 直流供电，声音响度可调。指示灯采用 LED 灯，具有亮度高、寿命长、功耗低等优点。电源模块方面，系统采用 24V 直流电源为 PLC、传感器、报警装置等设备供电，电源模块选择工业级开关电源，具有高可靠性、高效率、宽输入电压范围等特点，能够适应海上电网波动。通信线缆方面，PLC 与触摸屏之间采用以太网线连接，通信线缆选择工业级屏蔽双绞线，具有良好的抗干扰性能，通信稳定可靠。图 3-12 为 24V 开关电源、多层警示灯及蜂鸣器实物图。



图 3-11 声光报警装置



图 3-12 24V 开关电源

3.3 系统的开发环境

3.3.1 PLC 编程软件

本系统采用西门子博途 TIA Portal 即 Totally Integrated Automation Portal 软件进行 PLC 编程。TIA Portal 是西门子公司推出的统一工程平台，集成了 PLC 编程、HMI 组态、驱动配置等功能，具有统一平台、多种编程语言、丰富的功能库、在线调试和仿真功能等特点。在一个软件平台中完成 PLC 编程、触摸屏组态、驱动配置等所有工作，提高了工程效率。支持梯形图 LAD、功能块图 FBD、结构化文本 ST 等多种编程语言，满足不同编程习惯和需求。提供丰富的功能块库，包括数学运算、逻辑判断、数据处理等功能块，简化编程工作。支持在线监控、在线修改、强制变量等功能，便于程序调试和故障排除。提供 PLCSIM 仿真软件，可以在没有实际硬件的情况下进行程序仿真和测试[31][33]。

本系统主要使用梯形图语言进行编程，梯形图语言直观易懂，适合逻辑控制程序的编写。

3.3.2 触摸屏组态软件

触摸屏组态采用 WinCC 软件，WinCC 是西门子公司的人机界面组态软件，具有丰富的画面元素、数据连接、报警功能、历史数据和多语言支持等特点。提供按钮、文本、图形、曲线、报警等多种画面元素，能够设计出功能强大、界面美观的监控画面。支持与 PLC 的数据连接，能够实时读取和写入 PLC 数据，实现

数据交换。支持报警组态，能够设置报警条件、报警级别、报警显示等功能，实现完善的报警管理。支持历史数据记录和查询，能够记录运行数据，生成数据曲线，便于分析和诊断。支持多语言界面，便于国际化应用[35]。

3.3.3 系统集成与测试环境

系统集成与测试在实验室环境下进行，采用的设备包括 PLC 硬件、触摸屏、传感器模拟器、信号发生器和示波器。PLC 硬件采用西门子 S7-1200 PLC，CPU 1214C 及扩展模块。触摸屏采用西门子 TP1200 Comfort 触摸屏。传感器模拟器用于模拟传感器输出信号，进行系统测试。信号发生器用于生成标准信号，验证系统测量精度。示波器用于观察信号波形，分析信号质量。

在系统集成过程中，进行硬件连接和配置，接着进行软件编程和组态，随后进行系统联调和测试，使系统功能正常、性能满足要求。

3.4 本章小结

本章系统介绍了大型海上风电机组安全运行监控系统的设计方案和硬件选型。从设计目标与要求、系统总体架构设计、模块化设计思想、软件设计流程等方面阐述了系统的设计方案。系统采用分层分布式架构，包括传感器检测层、信号调理层、PLC 控制层和人机交互层，采用模块化设计思想，将系统划分为数据采集、数据处理、逻辑判断、报警控制、人机交互等功能模块。

从 PLC 控制器、触摸屏、传感器、信号调理电路、其它辅助设备等方面详细介绍了硬件选型。选择西门子 S7-1200 PLC 作为主控制器，TP1200 Comfort 触摸屏作为人机界面，配置电流、电压、温度、功率、光强、烟雾等六类传感器，使系统满足功能要求和性能指标。

介绍了系统的开发环境，包括 PLC 编程软件 TIA Portal、触摸屏组态软件 WinCC，以及系统集成与测试环境。

通过本章的设计和选型，为后续章节的硬件电路设计和软件开发奠定了基础，满足大型海上风电机组安全运行监控的需求。

第 4 章 设备的硬件电路设计及软件开发

4.1 控制系统的整体结构设计

大型海上风电机组安全运行监控系统的硬件设计是系统实现的基础，合理的整体结构设计使各功能模块协调工作，实现预期的监控功能。本节根据第三章确定的系统架构和硬件选型方案，对控制系统的整体结构进行详细设计。

本监控系统采用分层分布式架构，自上而下分为人机交互层、PLC 控制层、信号调理层和传感器检测层四个层次。人机交互层位于系统最上层，采用西门子 TP1200 Comfort 触摸屏作为人机界面设备，负责运行状态的实时显示、报警信息的提示、参数设置以及历史数据查询等功能，为运维人员提供直观友好的操作界面。PLC 控制层是系统的核心，采用西门子 S7-1200 系列 PLC、CPU 1214C 作为主控制器，负责接收传感器采集的数据、执行逻辑判断、产生报警控制信号，并通过以太网与触摸屏进行数据交换。信号调理层介于传感器与 PLC 之间，将传感器输出的 4-20mA 电流信号或 0-10V 电压信号进行滤波、隔离和转换处理，使信号质量满足 PLC 模拟量输入模块的采集要求。传感器检测层位于系统最底层，包括电流传感器、电压传感器、温度传感器、功率传感器、光强传感器和烟雾传感器等，实时采集风电机组和升压变电站关键设备的运行参数。

各层之间通过标准化的信号接口进行连接。传感器检测层输出的模拟信号经信号调理电路处理后，接入 PLC 的模拟量输入模块；PLC 的数字量输入端口接收现场按钮、开关等开关量信号；PLC 的数字量输出端口驱动声光报警装置；PLC 与触摸屏之间通过以太网采用 S7 通信协议进行数据交换。这种分层设计使得系统结构清晰、职责明确，便于后期的维护和功能扩展。

4.2 主控制器 PLC 选型

PLC 控制器是监控系统的核心设备，其性能直接影响系统的可靠性、实时性和扩展能力。在大型海上风电机组安全运行监控系统中，PLC 需要完成多路模拟量数据采集、复杂的逻辑判断、报警控制以及与触摸屏的通信等功能，因此 PLC 的选型至关重要。

目前市场上主流的 PLC 品牌包括西门子、三菱、欧姆龙、罗克韦尔等。考虑

到本系统需要采集 6 路模拟量信号即电流、电压、温度、功率、光强、烟雾浓度，接收多路数字量输入如启动、停止、急停、模式切换、复位、测试、传感器使能等，输出多路数字量控制报警装置，且需要与西门子触摸屏进行无缝通信，本设计选择西门子 S7-1200 系列 PLC 作为主控制器。表 4-1 对主流 PLC 的性能进行了对比分析。

表 4-1 主流 PLC 性能对比表

型号	品牌	数字量 I/O	模拟量通道	通信接口	编程软件	适用场景
S7-1200 CPU1214C	西门子	14DI/10DO	2 路 AI	以太网	TIA Portal	中小型自动化
FX5U-32MT	三菱	16DI/16DO	4 路 AI	以太网	GX Works3	通用控制
CP1H-X40DT	欧姆龙	24DI/16DO	4 路 AI	串口 / 以太网	CX-Programmer	低成本应用
CompactLogix	罗克韦尔	可扩展	可扩展	EtherNet/IP	Studio 5000	大型系统

从表 4-1 可以看出，西门子 S7-1200 PLC 在通信接口、编程软件集成度方面具有明显优势，且与 TP1200 触摸屏同属西门子产品，通信配置简便、兼容性好。S7-1200 系列支持通过扩展模块增加 I/O 点数，满足本系统对模拟量采集的需求。表 4-2 列出了本系统所选 CPU 1214C DC/DC/DC 模块的主要技术参数。

表 4-2 PLC CPU 模块主要技术参数

参数名称	技术指标
工作电压	24V DC
程序存储器	100KB
工作存储器	50KB
集成数字量输入	14 点，24V DC

参数名称	技术指标
集成数字量输出	10 点，24V DC，0.5A
集成模拟量输入	2 路，0–10V
通信接口	PROFINET，2 个端口
编程语言	LAD、FBD、SCL、GRAPH
防护等级	IP20
工作温度	-20℃~+60℃

4.3 输入输出模块与信号点分配

根据监控系统的功能需求，需要对 PLC 的输入输出信号进行合理的地址分配。合理的 I/O 分配能够使程序结构清晰、便于调试和维护，同时为触摸屏变量连接提供明确的地址映射。本系统采用西门子 S7-1200 PLC，通过 CPU 模块集成的数字量 I/O 和扩展的 SM1234 模拟量输入模块实现信号采集与控制输出。

4.3.1 数字量输入点分配

数字量输入信号主要来自现场操作按钮、模式切换开关以及传感器使能开关等。这些信号用于系统的启停控制、模式选择、故障复位等操作。表 4-3 列出了数字量输入点的分配方案。

表 4-3 数字量输入点分配表

PLC 地址	信号名称	接线端口	备注
I0.0	启动按钮	1M	常开触点，按下有效
I0.1	停止按钮	1M	常开触点，按下有效
I0.2	急停按钮	1M	常开触点，按下有效
I0.3	模式切换开关	1M	ON- 自动模式，OFF- 手动模式
I0.4	复位按钮	1M	常开触点，故障复位
I0.5	测试按钮	1M	常开触点，系统自检

PLC 地址	信号名称	接线端口	备注
I0.6	传感器使能	1M	ON- 允许数据采集，OFF- 禁止采集

4.3.2 数字量输出点分配

数字量输出信号用于驱动多层警示灯、蜂鸣器以及各类状态指示灯，实现故障的声光报警和运行状态的直观显示。表 4-4 列出了数字量输出点的分配方案。

表 4-4 数字量输出点分配表

PLC 地址	信号名称	接线端口	备注
Q0.0	多层警示灯绿色	1L	系统正常运行指示
Q0.1	多层警示灯红色	1L	故障指示
Q0.2	多层警示灯蜂鸣器	1L	故障声光报警
Q0.3	手动模式指示灯	1L	手动模式运行指示
Q0.4	故障报警指示灯	1L	综合故障报警
Q0.5	过流报警指示灯	1L	过流故障专用指示
Q0.6	故障声光报警	1L	报警延时后启动
Q0.7	故障闪烁指示灯	1L	故障状态闪烁提示
Q1.0	预留	1L	扩展备用
Q1.1	预留	1L	扩展备用

4.3.3 模拟量输入点分配

模拟量输入信号来自各类传感器，经信号调理电路转换为 0-27648 范围内的整数值，对应 0-10V 或 4-20mA 标准信号，供 PLC 进行数据采集和转换。本系统配置两块 SM1234 模拟量输入模块，共 8 个模拟量通道，实际使用 6 路。表 4-5 列出了模拟量输入点的分配方案。

表 4-5 模拟量输入点分配表

PLC 地址	信号名称	量程范围	单位	备注
--------	------	------	----	----

PLC 地址	信号名称	量程范围	单位	备注
IW64	电流模拟量输入	0-800	A	发电机 / 变流器电流
IW66	电压模拟量输入	0-690	V	变压器输出电压
IW68	温度模拟量输入	-40-120	°C	关键部位温度
IW70	功率模拟量输入	0-10	MW	发电功率
IW72	光强模拟量输入	0-500	Lux	机舱环境光强
IW74	烟雾浓度模拟量输入	0-500	ppm	火灾预警

4.4 硬件接线

硬件接线是连接各电气元件的关键环节，正确的接线方案使信号可靠传输，避免干扰和误动作。本节根据 I/O 分配方案和 PLC 接线规范，设计系统的硬件接线方案。

4.4.1 电源接线

系统采用 AC220V 市电作为总电源，经开关电源转换为 DC24V 直流电源，为 PLC、传感器、触摸屏和报警装置供电。PLC 的 L+ 和 M 端子接入 24V 直流电源正负极；SM1234 模拟量模块通过背板总线从 CPU 获取电源，其 L+ 和 M 端子需与 CPU 电源并联，模块方能正常工作。触摸屏通过专用电源适配器供电，报警装置蜂鸣器、指示灯经中间继电器由 PLC 的 Q 输出驱动，负载电源为 DC24V。

4.4.2 数字量输入接线

数字量输入信号采用共阴极接线方式，所有输入信号的公共端接 1M 端子即 24V 负。启动按钮、停止按钮、急停按钮、复位按钮、测试按钮采用常开触点，一端接 24V+，另一端分别接 I0.0、I0.1、I0.2、I0.4、I0.5。模式切换开关和传感器使能开关根据状态将相应输入端与 24V+ 接通。急停按钮采用红色蘑菇头按钮，具有机械自锁功能，紧急情况下可可靠动作。

4.4.3 数字量输出接线

数字量输出采用分组接线，Q0.0~Q0.7、Q1.0~Q1.1 的公共端接 1L 即 24V 正。多层警示灯绿色 Q0.0、红色 Q0.1、蜂鸣器 Q0.2 等负载一端接 24V-，另一端经 PLC 输出触点接 24V+。当输出为 1 时，PLC 内部触点闭合，负载得电工作。指

示灯和蜂鸣器额定电压为 24V DC，直接由 PLC 驱动；若负载功率较大，需增加中间继电器隔离。

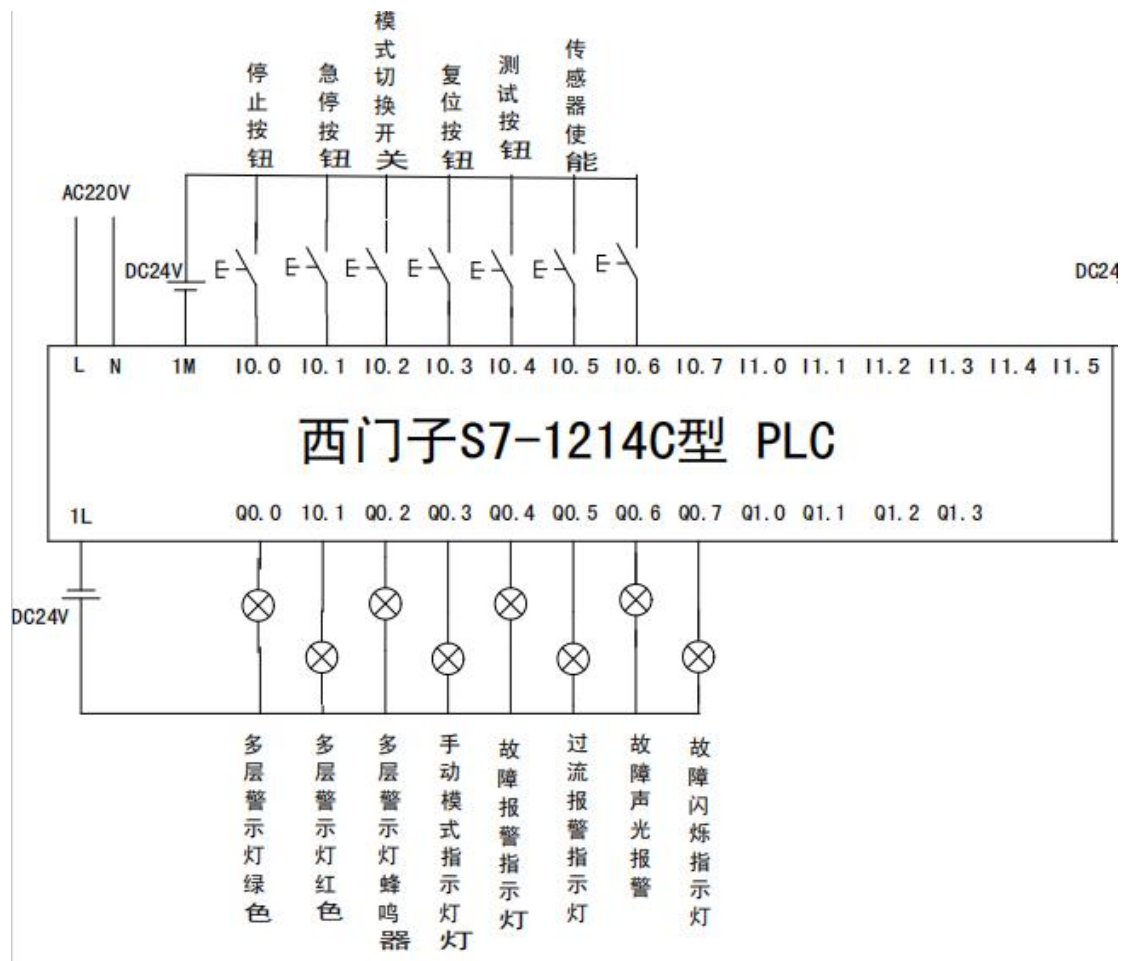


图 4-1 PLC 电源 输入输出接线图

4.4.4 模拟量输入接线

模拟量输入采用两块 SM1234 模块，每块模块提供 4 个差分输入通道。电流、电压、温度、功率传感器输出的 4-20mA 信号经信号调理后，正端接模块的 0+、1+、2+、3+ 端子，负端接 0-、1-、2-、3- 端子。光强传感器和烟雾传感器接入第二块模块。模拟量模块的 L+ 和 M 需接入 24V 电源，A/D 转换电路方能正常工作。屏蔽线单端接地，减少电磁干扰。

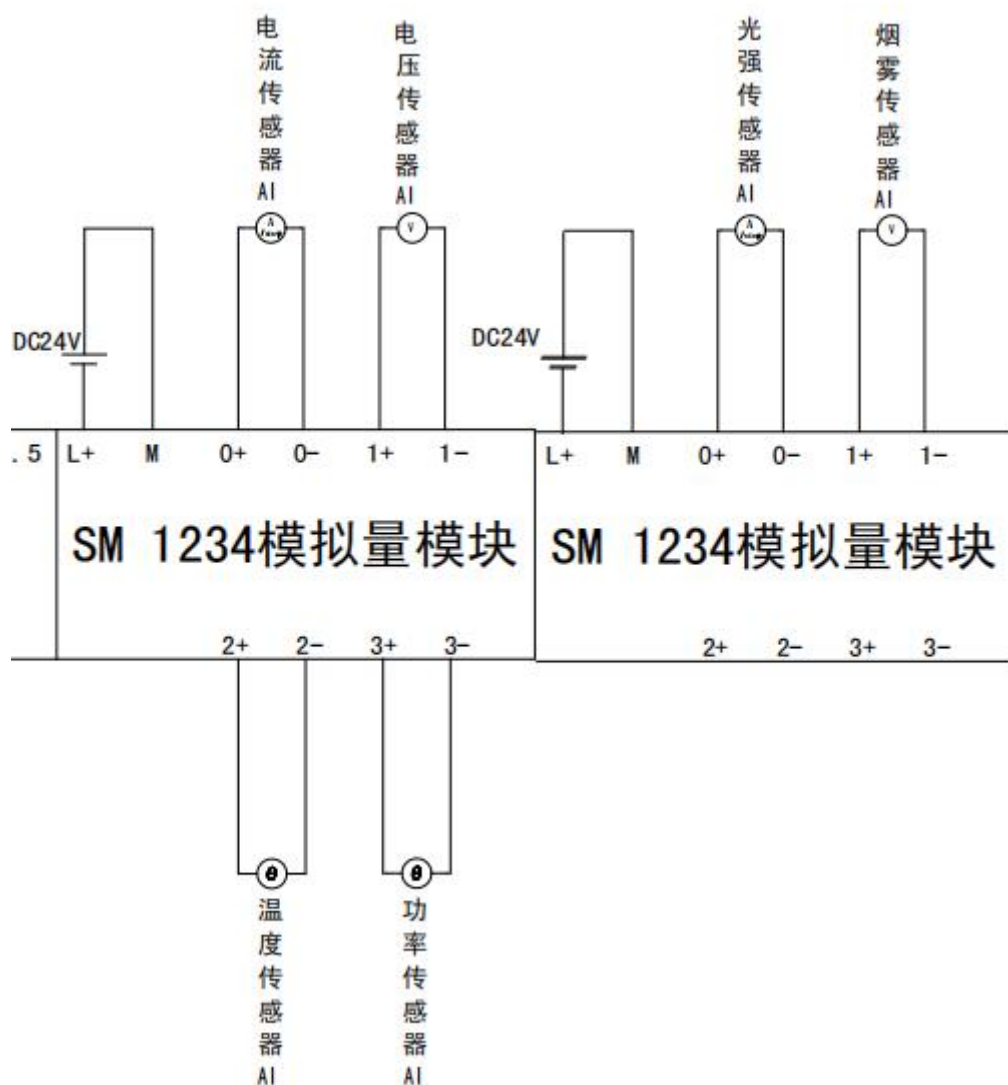


图 4-2 模拟量输入接线图

4.5 PLC 程序设计

PLC 程序设计是监控系统软件实现的核心，采用模块化设计思想，将系统功能划分为多个功能块 FC，由主程序 OB1 统一调用。程序设计采用博途 TIA Portal 软件，使用梯形图 LAD 语言编写，程序结构清晰、逻辑明确，便于调试和维护。

4.5.1 主程序设计

主程序存储在组织块 OB1 中，每个 PLC 扫描周期执行一次。主程序按固定顺序依次执行各功能块，实际调用顺序为 FC1→FC4→FC3→FC5→FC6→FC7→FC8→FC2→FC9。FC1 完成初始化后，FC4 进行数据采集与转换，FC3 执行系统控制，FC5 进行故障判断，FC6 输出报警，FC7 统计运行时间，FC8 驱动指示灯，FC2 完成报警阈值初始化，FC9 处理触摸屏参数

设置。该顺序保证数据先采集、再判断、后输出，数据流传递正确。图 4-7 为主程序流程图。

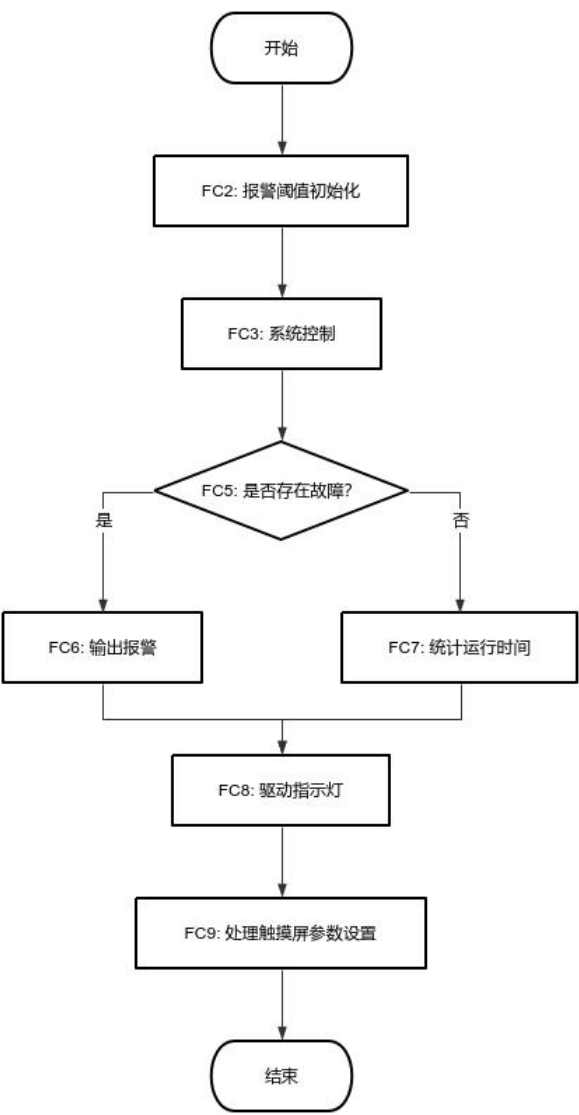


图 4-3 主程序流程图

表 4-6 主程序功能块调用表

功能块	名称	功能说明
FC1	初始化	首次扫描时寄存器清零、警示灯自检
FC2	报警阈值初始化	设定电流、电压、温度、功率等报警上下限

功能块	名称	功能说明
FC3	系统控制	启动 / 停止 / 急停 / 复位、模式切换、自动使能控制
FC4	数据采集与转换	NORM_X、SCALE_X 量程转换，1s 周期采集模拟量数据
FC5	故障判断	过流 / 欠流、过压 / 欠压、超温 / 低温、功率异常等判断
FC6	报警输出	报警闪烁、声光报警、指示灯逻辑输出
FC7	运行时间统计	60s 累加计时，实现运行时间分钟级计数
FC8	输出指示灯	手动 / 自动模式指示灯显示
FC9	触摸屏参数设置	参数保存、恢复默认、故障确认处理

4.5.2 系统控制程序设计

系统控制程序 FC3 实现系统的启停控制、急停处理、故障复位和模式切换功能。采用置位 S、复位 R 指令实现启停逻辑：当启动按钮 I0.0 或触摸屏启动信号 M31.0 有效，且无急停、无故障、无停止状态时，置位系统运行状态 M0.0；当停止按钮 I0.1 或触摸屏停止信号 M31.1 有效时，置位系统停止状态 M0.1 并复位运行状态。急停按钮 I0.2 具有最高优先级，按下后立即复位运行状态、置位急停状态 M0.3，并将故障代码设为 999。复位按钮 I0.4 采用下降沿触发，清除故障标志和故障代码，为重新启动创造条件。图 4-8 为系统启动控制梯形图。

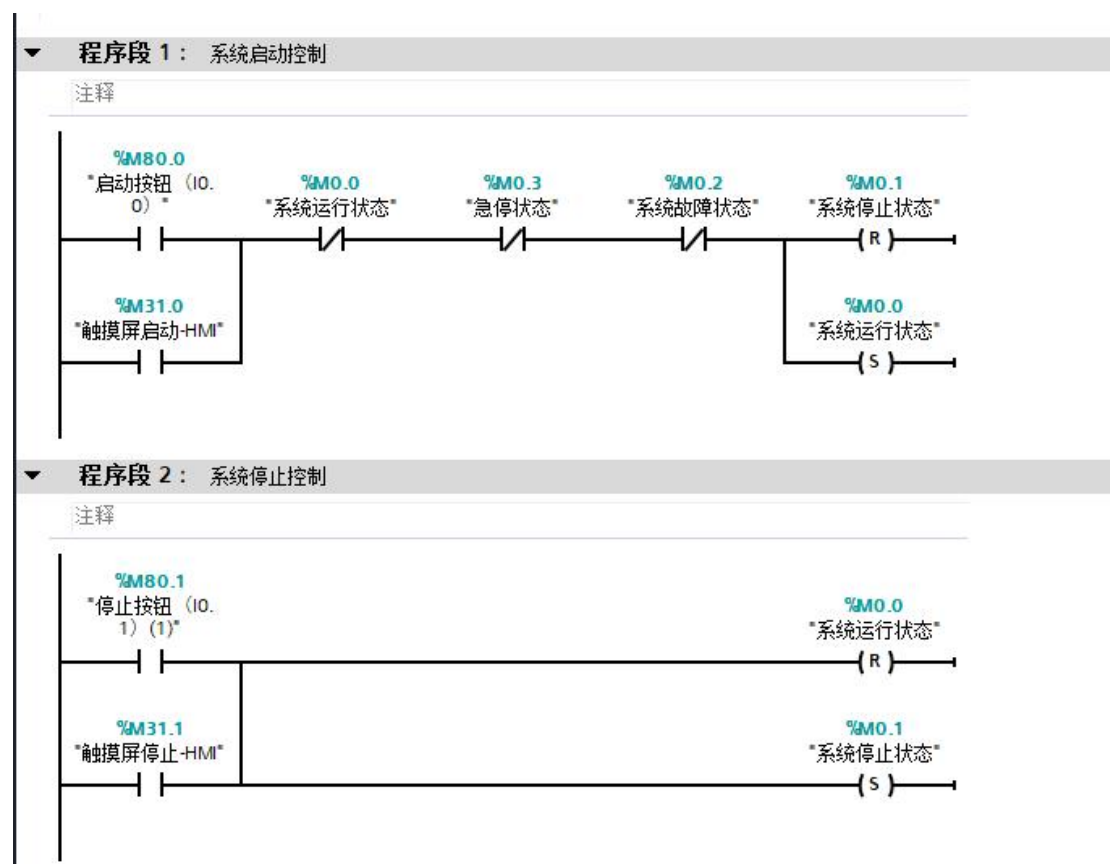


图 4-4 系统启动控制程序

4.5.3 故障判断程序设计

故障判断程序 FC5 对采集的电流、电压、温度、功率、光强、烟雾浓度等参数与设定的上下限阈值进行比较，超出范围时置位相应的报警标志并写入故障代码。故障代码采用三位数字编码：101/102 为过流/欠流，201/202 为过压/欠压，301/302 为超温/低温，401/402 为功率超限/功率异常，501/502/503/504 为光强和烟雾相关，999 为急停。判断条件需同时满足系统运行、数据采集使能、无急停、无系统故障，避免误报。功率异常采用可配置延时确认，通过触摸屏 MW344 设定、单位分钟、默认 5 分钟，防止短时波动触发报警。表 4-7 为故障代码与报警标志对应表。

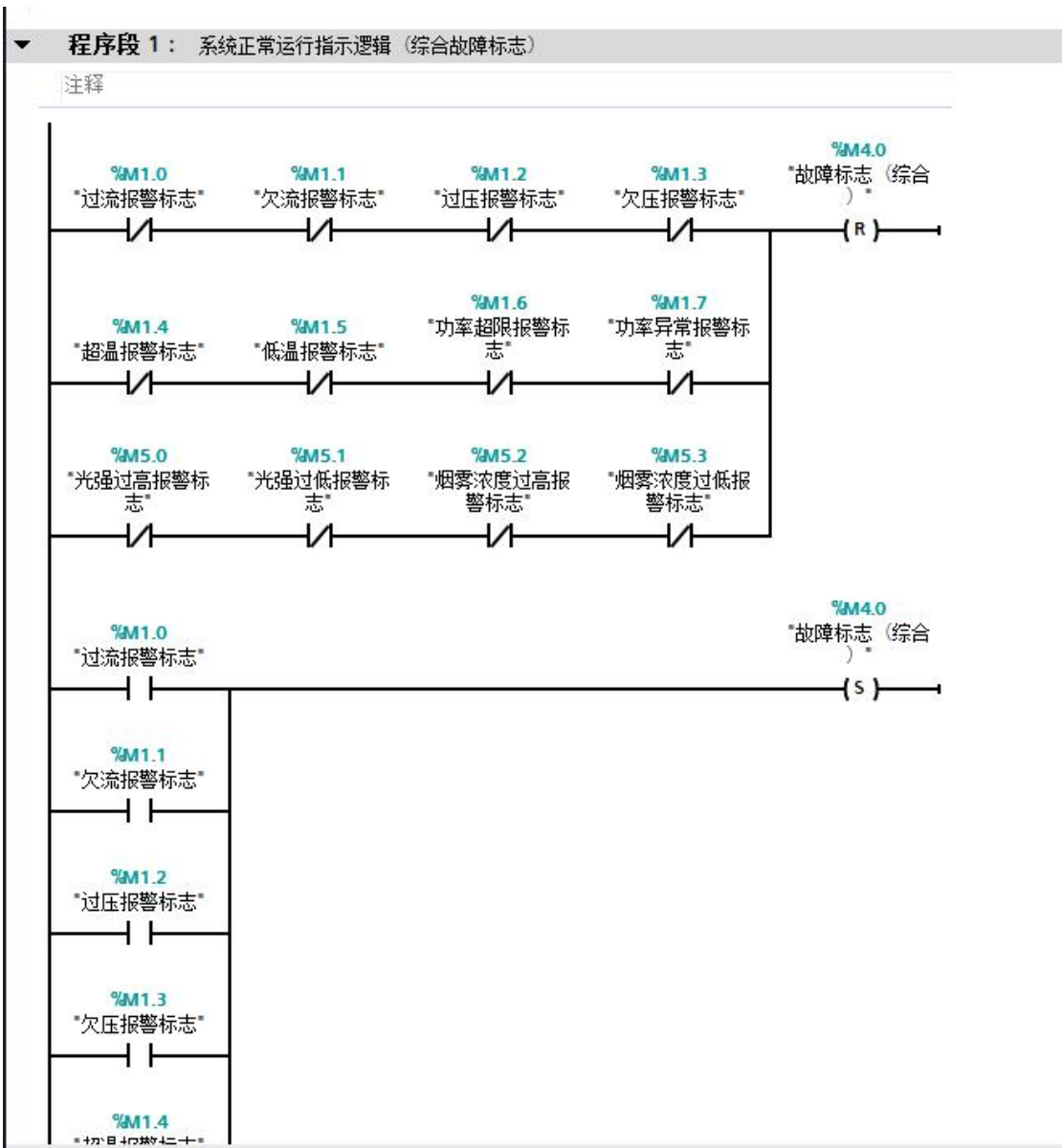
表 4-7 故障代码与报警标志对应表

故障代码	故障类型	报警标志	处理方式
101	过流	M1.0	声光报警、记录
102	欠流	M1.1	声光报警、记录

故障代码	故障类型	报警标志	处理方式
201	过压	M1.2	声光报警、记录
202	欠压	M1.3	声光报警、记录
301	超温	M1.4	声光报警、记录
302	低温	M1.5	声光报警、记录
401	功率超限	M1.6	声光报警、记录
402	功率异常	M1.7	声光报警、记录
501	光强过高	M5.0	声光报警、记录
502	光强过低	M5.1	声光报警、记录
503	烟雾浓度过高	M5.2	声光报警、记录
504	烟雾浓度过低	M5.3	声光报警、记录
999	急停	M0.3	立即停机、故障代码显示

4.5.4 数据采集与转换程序设计

数据采集与转换程序 FC4 负责将模拟量输入模块采集的原始整数值 0～27648 转换为具有物理意义的工程值。程序采用西门子标准指令 NORM_X 和 SCALE_X 实现量程转换：NORM_X 将输入值归一化到 0.0～1.0 范围，SCALE_X 将归一化值映射到设定的工程量程。例如，电流量程 0～800A 时，原始值 13824 对应工程值 400A。程序采用 1 秒周期调用，通过定时器或时钟触发，避免每个扫描周期重复计算，降低 CPU 负载。当触摸屏仿真模式启用时，PLC 可优先采用 MW100～MW120 中的触摸屏输入值进行转换，便于仿真调试。转换后的工程值存储于 MD204、MD208、MD212、MD216、MD348、MD364 等双字寄存器，供故障判断和触摸屏显示使用。



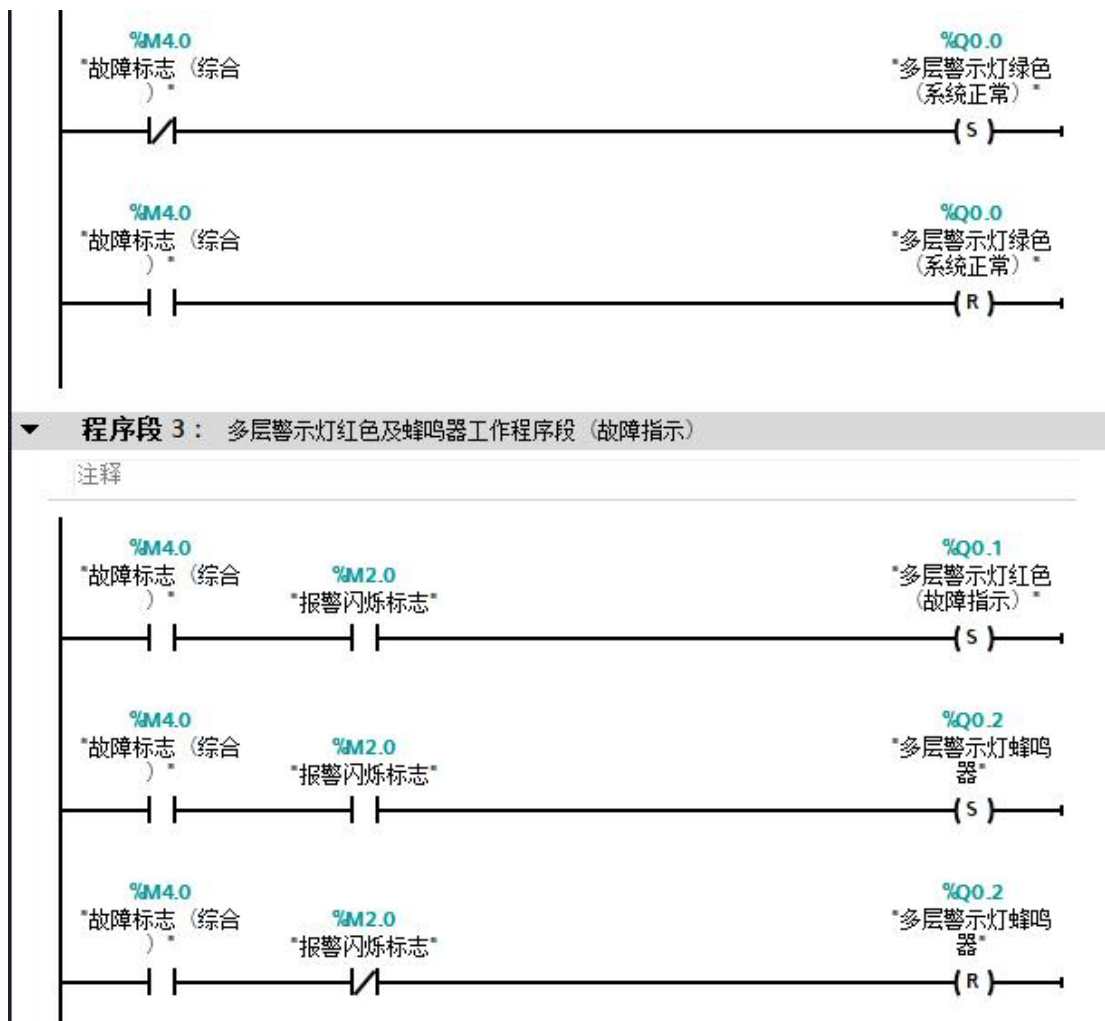


图 4-5 数据采集与转换程序

4.5.5 报警输出程序设计

报警输出程序 FC6 根据故障判断结果驱动声光报警装置。当任一故障标志 M1.0~M1.7、M5.0~M5.3 置位时，程序启动 2 秒延时定时器，延时结束后置位报警输出，驱动红色警示灯 Q0.1 和蜂鸣器 Q0.2，同时置位故障闪烁指示灯 Q0.7。采用延时确认可避免瞬时波动引起的误触发。报警输出采用故障闪烁逻辑，通过时钟脉冲实现指示灯周期性亮灭，增强警示效果。故障确认后，通过触摸屏 M32.0 或复位按钮清除故障标志，报警输出随之复位。急停状态下，报警立即输出，无延时。

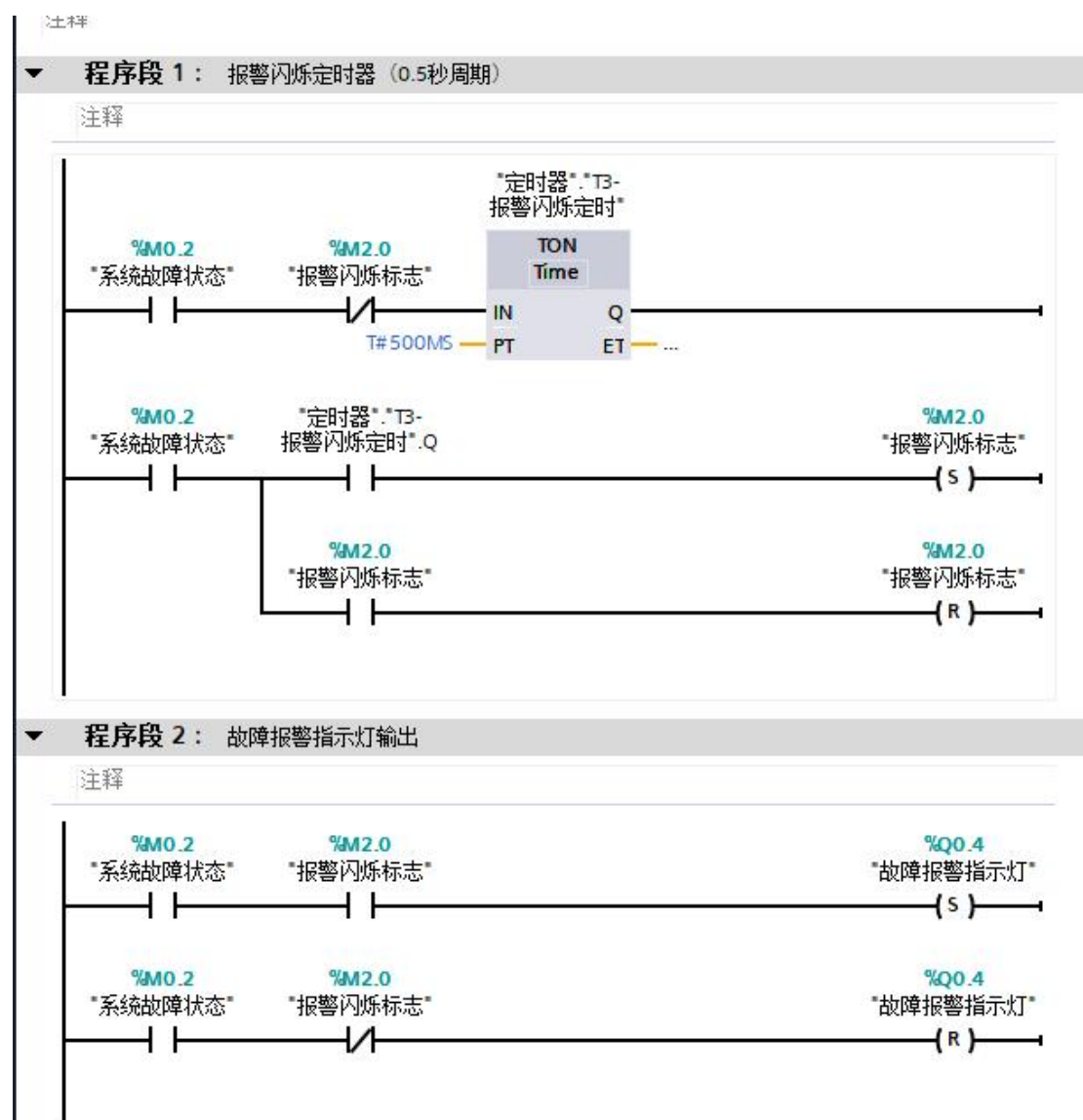


图 4-6 报警输出程序

4.6 本章小结

本章完成了大型海上风电机组安全运行监控系统的硬件电路设计与 PLC 程序开发，主要工作包括以下几个方面。

在硬件选型环节，本章对主控制器 PLC 及其扩展模块进行了选型设计。结合风电机组和升压变电站的实际运行参数，从测量精度、环境适应性、抗干扰能力等多维度对主流 PLC 进行了技术评估和对比分析，最终选定西门子 S7-1200 系列 PLC、CPU 1214C 作为主控制器，配置 SM1234 模拟量输入模块以满足电流、电压、温度、功率、光强、烟雾浓度等 6 路模拟量信号的采集需求。传感器采用霍尔电流传感器、电压互感器、PT100 铂电阻温度传感器、智能电量变送器等，配合具有 4-20mA 标准信号输出的隔离变送器，实现强电与弱电信号的安全转换与可靠

传输。

在硬件接线图部分，设计时充分考虑了运行安全性和可靠性。系统采用 AC220V 市电经开关电源转换为 DC24V 直流供电，数字量输入采用共阴极接线方式，数字量输出采用分组接线驱动声光报警装置。I/O 端口地址分配严格遵循功能分区原则，数字量输入、数字量输出、模拟量输入分别编制了地址分配表，并将地址表与硬件接线图一一对应，为后续程序设计和现场接线提供了明确依据。

在控制软件体系方面，采用模块化编程思想构建了完整的 PLC 控制程序。主程序采用循环扫描执行方式，按 FC1→FC4→FC3→FC5→FC6→FC7→FC8→FC2→FC9 的顺序依次调用九个功能块。系统控制程序实现了启停、急停、复位的置位复位逻辑，故障判断程序建立了涵盖电流、电压、温度、功率、光强、烟雾等 13 类故障的代码体系，并采用延时确认机制减少误报。程序结构清晰、逻辑明确，为第五章触摸屏界面设计与第六章系统调试奠定了软件基础。

第 5 章 大型海上风电机组安全运行监控系统界面设计

人机界面 HMI 是操作人员与监控系统交互的窗口，承担着运行状态显示、参数设置、报警提示、数据查询等重要功能。本章在第四章 PLC 程序设计的基础上，采用西门子 WinCC 组态软件，设计触摸屏操作界面，建立 HMI 与 PLC 之间的通信连接，实现监控数据的可视化展示和操作指令的便捷输入。

5.1 监控系统组成与 HMI 通信连接

5.1.1 监控系统组成

大型海上风电机组安全运行监控系统由监控主机、PLC 控制器、各类传感器和执行机构组成。监控主机采用西门子 TP1200 Comfort 触摸屏，作为人机交互的核心设备，负责接收并显示 PLC 上传的监测数据，同时将操作人员的控制指令下发给 PLC。PLC 控制器采用西门子 S7-1200、CPU 1214C，实时采集电流传感器、电压传感器、温度传感器、功率传感器、光强传感器、烟雾传感器等检测装置的数据，执行逻辑判断和报警控制。执行机构包括多层警示灯、蜂鸣器、各类状态指示灯等声光报警装置，由 PLC 数字量输出直接驱动。图 5-1 为监控系统组成框图。

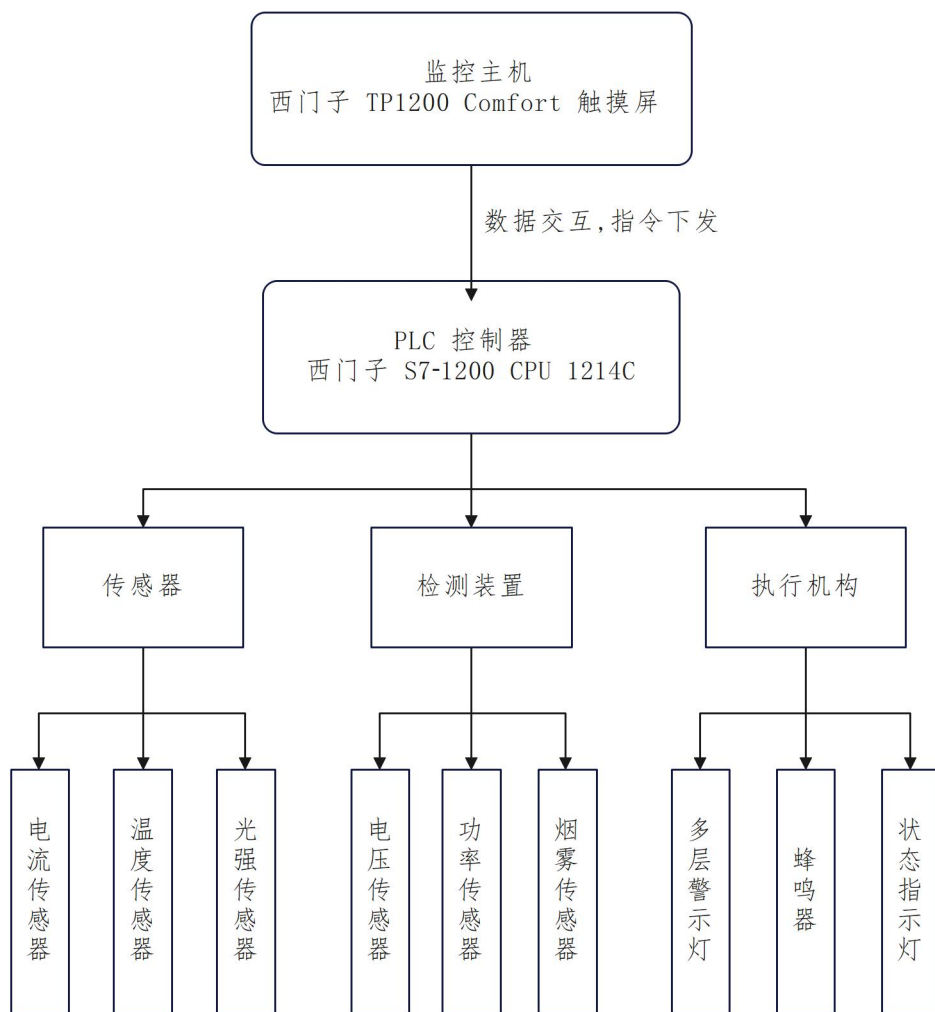


图 5-1 监控系统组成框图

5.1.2 HMI 与 PLC 通信连接

HMI 与 PLC 之间采用以太网连接，通信协议为西门子 S7 协议。在博途 TIA Portal 中创建 HMI 项目时，需将 HMI 设备与 PLC 设备添加至同一项目中，并配置连接参数。连接配置包括：选择 PLC 作为通信伙伴，设置 PLC 的 IP 地址为 192.168.1.1，HMI 的 IP 地址需与 PLC 在同一网段如 192.168.1.2，选择 S7 连接类型。配置完成后，WinCC 组态软件可自动识别 PLC 中的变量，触摸屏通过该连接实时读写 PLC 数据区。通信周期设置为 500ms，画面刷新及时、操作响应灵敏。

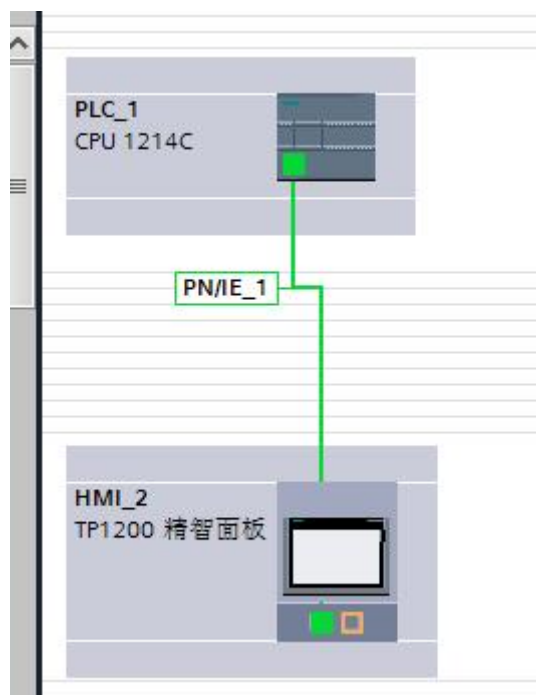


图 5-2 HMI 与 PLC 通信连接

5.2 触摸屏操作界面设计

触摸屏界面设计采用 WinCC 组态软件，在 TIA Portal 集成环境中与 PLC 项目协同开发。界面设计遵循简洁直观、分区明确、操作便捷的原则，共设计主监控画面、趋势图画面两个主要界面，通过画面切换按钮实现各界面之间的导航。

5.2.1 主监控画面设计

主监控画面是系统默认显示画面，集中展示风电机组的运行状态和关键监测参数。画面顶部为标题栏，显示"大型海上风电机组的安全运行与监控系统"；左侧为控制区，布置启动、停止、复位、急停、手动、自动六个操作按钮，采用按下置位、释放复位的模式，与 PLC 中的 M31.0~M31.5 触摸屏控制变量对应；右侧为系统运行状态区，通过圆形指示灯显示运行、停止、故障、手动、自动五种状态，指示灯颜色根据 PLC 变量 M0.0、M0.1、M0.2、M0.4、M0.5 动态变化；中部为模拟量输入控制区，采用滚动条和 I/O 域组合，实现电流、电压、温度、功率、光强、烟雾浓度的模拟输入和实时值显示，用于仿真调试；下部为监测参数实时显示区和报警信息区，显示当前电流、电压、温度、功率、光强、烟雾浓度的转换值，以及故障代码和报警描述。图 5-3 为主监控画面示意。

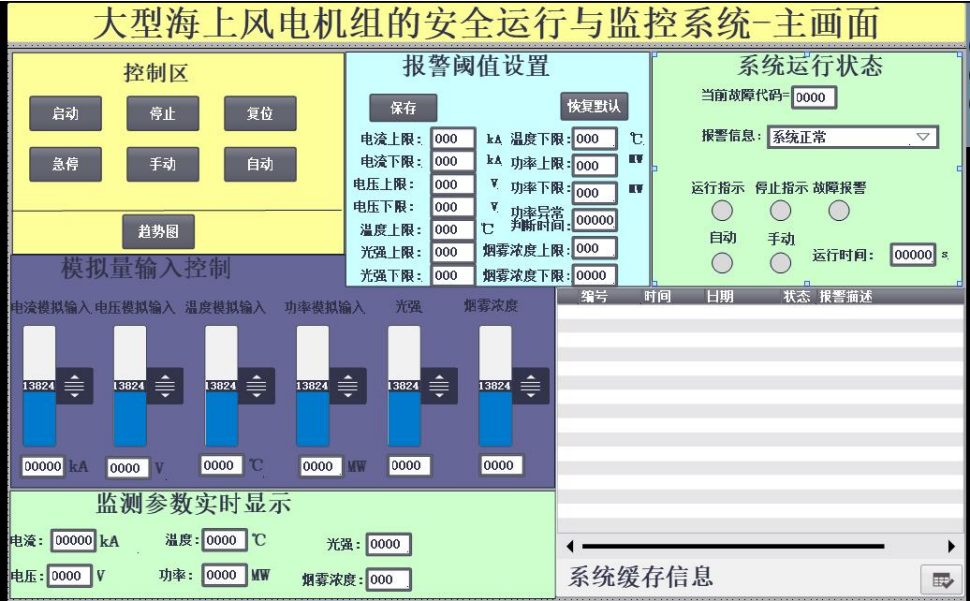


图 5-3 主监控画面

5.2.2 参数设置画面设计

参数设置画面用于配置各监测参数的报警阈值，运维人员可根据现场实际情况调整上下限数值。画面分为报警阈值设置区和模拟量输入区两大部分。报警阈值设置区以表格形式列出电流上下限、电压上下限、温度上下限、功率上下限、光强上下限、烟雾浓度上下限、功率异常判断时间等参数，每项参数配有 I/O 域供输入设定值，单位标注于右侧。画面顶部设置"保存"和"恢复默认"两个按钮，保存按钮将设定值写入 PLC 报警值寄存器，恢复默认按钮将各参数恢复为出厂预设值。模拟量输入区与主画面类似，通过滚动条调节电流、电压、温度、功率、光强、烟雾的模拟输入值，便于仿真测试。图 5-3 为参数设置画面布局示意。



图 5-4 参数设置画面

5.2.3 趋势图画面设计

趋势图画面用于显示监测参数的历史变化曲线，便于分析运行趋势和故障前后的数据变化。系统设计两个趋势图页面：第一页包含电流趋势图、电压趋势图、温度趋势图、功率趋势图，每个趋势图以绿色曲线显示实时值，以黑色和红色虚线分别显示上下限设定值；第二页包含光强趋势图和烟雾浓度趋势图。趋势图采用触发的实时循环模式，X轴为时间轴，Y轴为参数值，支持缩放、平移等操作。画面顶部设置"主页"和"下一页"/"上一页"按钮，实现与主画面及趋势图页面间的切换。图 5-4 为趋势图画面布局示意。



图 5-5 趋势图画面

5.2.4 报警记录画面

报警记录通过主监控画面和参数设置画面中的报警视图控件实现。报警视图与 PLC 的报警缓冲区 AlarmBuffer 关联，可显示未决报警和未确认报警，支持按报警编号、时间、报警状态、报警文本、日期、报警类别等列进行排序和筛选。

报警视图配置确认按钮，操作人员可对报警进行确认操作。报警描述与故障代码通过文本列表关联，当故障代码为 101 时显示"过流"，为 102 时显示"欠流"，以此类推，实现故障代码的可读化显示。



图 5-6 报警记录画面

5.3 触摸屏操作界面变量连接

触摸屏界面中的每个显示和操作元素均需与 PLC 变量建立连接，才能实现数据的实时交换。变量连接在 WinCC 组态软件的变量编辑器中完成，变量可从 PLC 项目自动导入，也可手动创建并指定 PLC 地址。表 5-1 为主监控画面主要变量连接表，表 5-2 为参数设置画面主要变量连接表。

名称	数据类型	连接	PLC 名称	PLC 变量	地址	访问模式	采集周期
光强上限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	光强上限设定值		符号访问	1 s
光强上限设定值(1)	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	光强上限设定值		符号访问	1 s
光强上限设定值(2)	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	光强上限设定值		符号访问	1 s
光强上限设定值(3)	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	光强上限设定值		符号访问	1 s
光强上限设定值(4)	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	光强上限设定值		符号访问	1 s
光强上限设定值(5)	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	光强上限设定值		符号访问	1 s
光强上限设定值(6)	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	光强上限设定值		符号访问	1 s
光强下限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	光强下限设定值		符号访问	1 s
功率上限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	功率上限设定值		符号访问	1 s
功率下限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	功率下限设定值		符号访问	1 s
功率异常判断时间	Int	HMA_连接_1	PLC_1	功率异常判断时间		符号访问	1 s
参数保存按钮	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	参数保存按钮		符号访问	1 s
复位重置默认按钮	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	复位重置默认按钮		符号访问	1 s
复位完成标志	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	复位完成标志		符号访问	1 s
手动模式标志	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	手动模式标志		符号访问	1 s
温度上限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	温度上限设定值		符号访问	1 s
温度下限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	温度下限设定值		符号访问	1 s
报警上限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	报警上限设定值		符号访问	1 s
报警下限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	报警下限设定值		符号访问	1 s
电压上限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	电压上限设定值		符号访问	1 s
电压下限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	电压下限设定值		符号访问	1 s
电流上限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	电流上限设定值		符号访问	1 s
电流下限设定值	Dint	HMA_连接_1	PLC_1	电流下限设定值		符号访问	1 s
系统停止状态	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	系统停止状态		符号访问	1 s
系统运行状态	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	系统运行状态		符号访问	1 s
自动模式标志	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	自动模式标志		符号访问	1 s
触摸屏停止-HMI	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	"触摸屏停止-HMI"		符号访问	1 s
触摸屏启动-HMI	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	"触摸屏启动-HMI"		符号访问	1 s
触摸屏复位-HMI	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	"触摸屏复位-HMI"		符号访问	1 s
触摸屏急停-HMI	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	"触摸屏急停-HMI"		符号访问	1 s
触摸屏手动模式-HMI	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	"触摸屏手动模式-HMI"		符号访问	1 s
触摸屏自动模式-HMI	Bool	HMA_连接_1	PLC_1	"触摸屏自动模式-HMI"		符号访问	1 s

图 5-7 触摸屏变量连接表

上述变量连接表与第四章 PLC 程序中定义的变量地址一一对应，HMI 与 PLC 数据交换准确一致。触摸屏的读写变量在操作时直接访问 PLC 的 M 区、MD 区和 MW 区，无需额外的数据块映射，简化了组态配置。

5.4 本章小结

本章完成了大型海上风电机组安全运行监控系统的触摸屏界面设计，主要工作包括以下几个方面。

在监控系统组成与通信连接方面，明确了监控主机 TP1200 触摸屏、PLC 控制器、传感器、执行机构的层次关系，建立了 HMI 与 PLC 之间的以太网 S7 通信连接，配置了连接参数和通信周期，为数据交换提供了可靠的通信基础。

在触摸屏操作界面设计方面，采用 WinCC 组态软件设计了主监控画面、参数设置画面、趋势图画面和报警记录画面。主监控画面集成控制按钮、状态指示、模拟量输入、监测参数显示和报警信息；参数设置画面实现报警阈值的配置和保存；趋势图画面提供电流、电压、温度、功率、光强、烟雾六类参数的历史曲线显示；报警记录通过报警视图控件实现故障信息的集中展示和确认操作。

在变量连接方面，编制了主监控画面和参数设置画面的变量连接表，将触摸屏的显示和操作元素与 PLC 的 M 区、MD 区、MW 区变量建立一一对应关系，数据读写正确、实时刷新。通过本章的界面设计，运维人员可以直观地监控风电机组运行状态、便捷地调整报警参数、及时地查看故障信息，为系统的安全运行提供了有力的人机交互支撑。

第 6 章 系统仿真及调试

系统仿真及调试是验证监控系统功能正确性和可靠性的关键环节。本章采用 PLCSIM 仿真软件对 PLC 程序进行离线仿真调试，采用 WinCC 运行系统对触摸屏界面进行仿真调试，通过模拟各种运行工况和故障场景，验证系统的数据采集、逻辑判断、报警控制和界面显示等功能是否满足设计要求。

6.1 PLC 程序仿真运行调试

PLC 程序仿真运行调试是在无实际硬件的情况下，利用西门子 PLCSIM 仿真软件模拟 PLC 的运行环境，对第四章开发的 PLC 程序进行逻辑验证和功能测试。通过仿真调试，可以及早发现程序中的逻辑错误，减少现场调试工作量，提高开发效率。

6.1.1 仿真环境搭建

PLC 程序仿真调试在博途 TIA Portal 集成环境中进行。在 TIA Portal 中打开已完成的 PLC 项目，确认程序块、数据块、硬件组态等均已正确配置后，在菜单栏选择"在线"->"仿真"->"启动"，或直接点击工具栏中的仿真按钮，系统将自动启动 PLCSIM 仿真器并加载当前项目的 PLC 程序。仿真器启动后，会在计算机中虚拟出一台 S7-1200 PLC，其运行行为与真实 PLC 一致，支持程序下载、在线监控、变量强制等功能。图 6-1 为 PLCSIM 仿真启动后的程序在线监控界面示意。

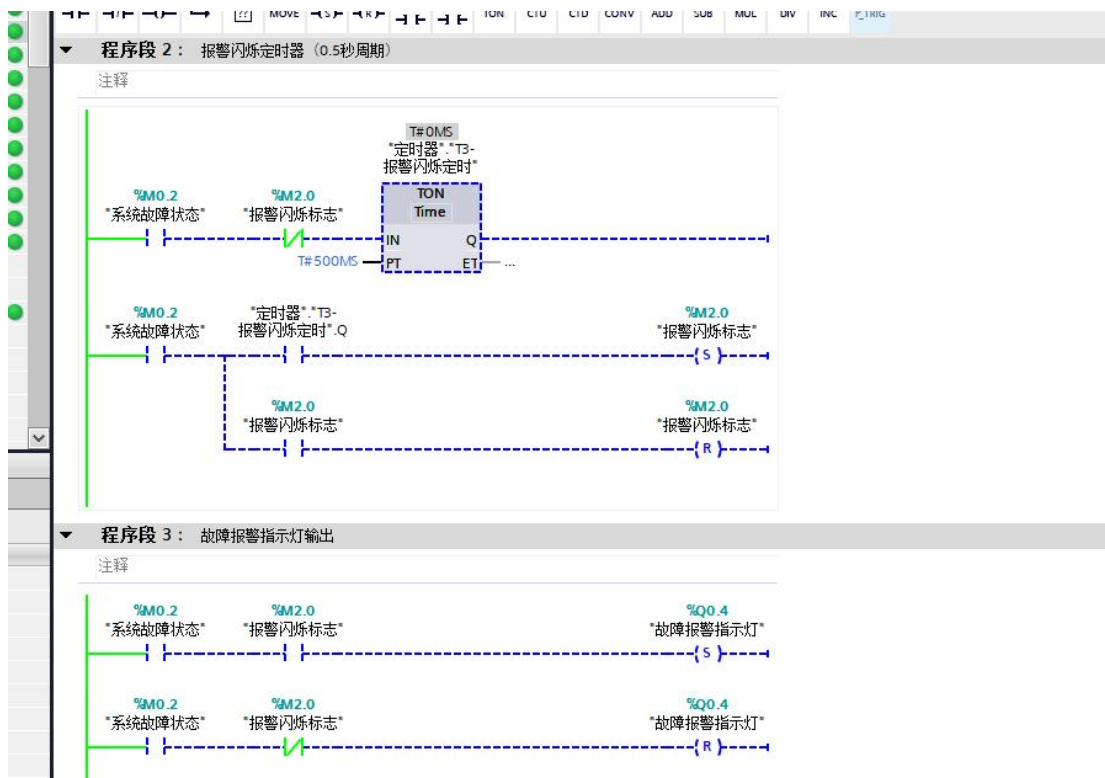


图 6-1 PLCSIM 仿真程序在线监控界面

6.1.2 程序下载与运行

仿真器启动后，需将 PLC 程序下载至仿真 PLC。在 TIA Portal 中选择"在线"-">"下载到设备"-">"软件（全部）"，或使用快捷键，系统将程序块、数据块下载至 PLCSIM。下载完成后，将 PLC 从 STOP 模式切换至 RUN 模式，程序开始循环扫描执行。此时可通过"监控表"功能实时观察变量的当前值，包括系统运行状态（M0.0）、系统停止状态（M0.1）、故障代码（MD200）、当前电流值（MD204）等。监控表支持修改变量值进行强制测试，例如将 MW100 设置为 13824 可模拟电流传感器输出 50%量程，验证数据采集与转换逻辑是否正确。



图 6-2 程序下载和运行

6.1.3 调试步骤与功能验证

PLC 程序仿真调试按功能模块分步验证。初始化功能：首次扫描时，故障代码 MD200、运行时间 MD220 等寄存器应被清零，多层警示灯执行自检。系统控制功能：强制 M31.0 为 1，M0.0 应置位；强制 M31.1 为 1，M0.1 应置位；强制 M31.3 为 1，M0.3 应置位且 MD200 为 999。数据采集与转换：在监控表中修改 MW100~MW120 的数值，MD204、MD208、MD212、MD216、MD348、MD364 应按 NORM_X 和 SCALE_X 公式正确转换。故障判断功能：将 MD204 设置为大于 MD312，M1.0 应置位且 MD200 为 101。表 6-1 为 PLC 程序仿真调试测试项目表。

表 6-1 PLC 程序仿真调试测试项目表

				验
序	测试	测试方法	预期结果	证
号	项目			状
				态
1	初始	观察系统首次扫描过程	寄存器全部清零、多层警示灯 完成自检	通 过
	化功 能			
2	启动	强制触摸屏启动变量	系统运行状态标志 M0.0=1，	通

序 号	测试项目	测试方法	预期结果	验证状态
	控制	M31.0=1，确保无故障、无急停信号	运行指示灯亮起	通过
3	停止控制	强制触摸屏停止变量 M31.1=1	系统停止状态标志 M0.1=1，运行状态标志 M0.0=0，停止指示灯亮起	通过
4	急停控制	强制触摸屏急停变量 M31.3=1	急停标志 M0.3=1，故障代码 MD200=999，系统立即停机	通过
5	复位功能	系统出现故障后，强制触摸屏复位变量 M31.2 产生下降沿	所有故障标志清零，故障代码 MD200=0，系统恢复待机状态	通过
6	电流采集转换	设定触摸屏电流仿真输入 MW100=13824，开启数据采集使能	转换后当前电流值 MD204≈200A（对应量程 50%），采集稳定无波动	通过
7	过流报警	系统正常运行时，使当前电流值 MD204 大于过流报警阈值 MD312	过流报警标志 M1.0=1，故障代码 MD200=101，声光报警启动	通过
8	欠压报警	系统正常运行时，使当前电压值 MD208 小于欠压报警阈值 MD236	欠压报警标志 M1.3=1，故障代码 MD200=202，声光报警启动	通过
9	超温报警	系统正常运行时，使当前温度值 MD212 大于超温报警阈值 MD240	超温报警标志 M1.4=1，故障代码 MD200=301，声光报警启动	通过
10	运行	保持系统运行状态标志	运行时间（分钟）MD220 自	通过

			验
序 测试	测试方法	预期结果	证
号 项目			状
			态
时间	M0.0=1，持续计时 60 秒	动递增 1，计时准确无偏差	过
统计			

通过上述调试步骤，PLC 程序的初始化、系统控制、数据采集、故障判断、报警输出、运行时间统计等核心功能均得到验证，程序逻辑正确，满足设计要求。

6.2 HMI 操作系统仿真调试

HMI 操作系统仿真调试是在 PLC 仿真的基础上，启动 WinCC 运行系统对触摸屏界面进行仿真运行，验证 HMI 与 PLC 之间的数据通信、界面显示和操作控制功能。通过 HMI 仿真，可以检验第五章设计的界面布局、变量连接和报警显示是否正确，为系统联调奠定基础。

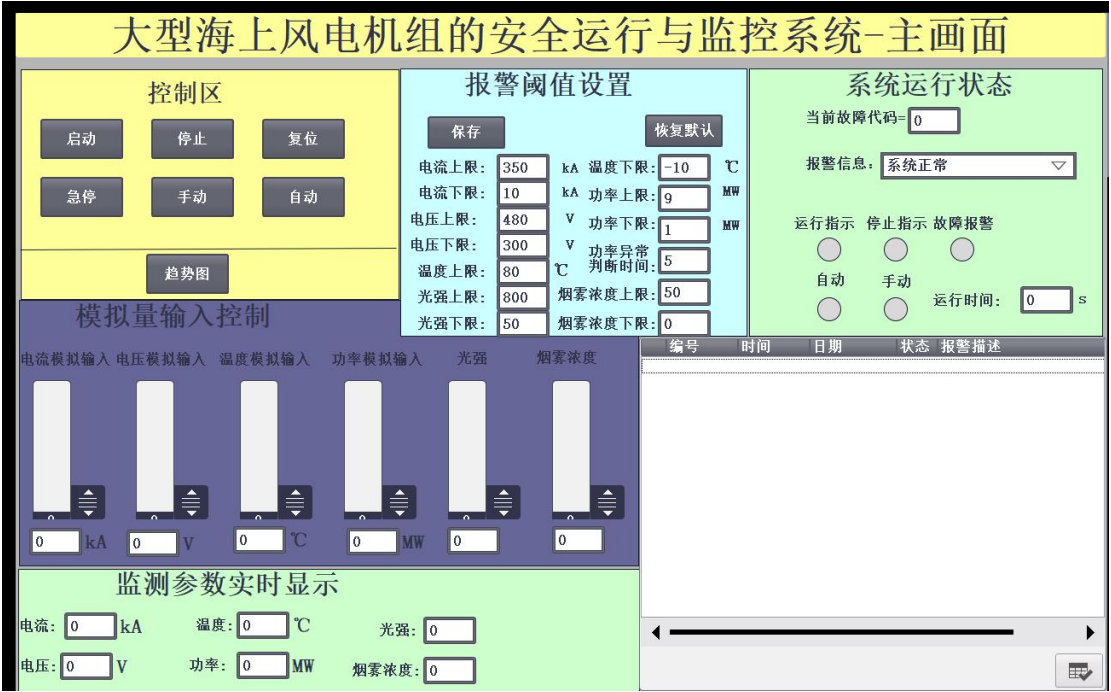


图 6-3 HMI 仿真界面

6.2.1 正常运行状态模拟

正常运行状态模拟用于验证监控系统在风电机组正常发电工况下的显示与

控制功能。仿真时启动 PLCSIM 并运行 PLC 程序，再启动 WinCC 运行系统、选择"使用仿真"模式，使 HMI 与仿真 PLC 建立连接。在触摸屏主监控画面上，点击"启动"按钮或通过监控表强制 M31.0 为 1，系统进入运行状态。此时，将电流、电压、温度、功率、光强、烟雾等模拟量输入 MW100~MW120 设置为正常范围内的数值，例如电流对应 200A、电压对应 400V、温度对应 50℃、功率对应 5MW，各参数均处于报警阈值之内。

当系统处于正常运行状态时，主监控画面应实时显示上述监测参数，运行指示灯绿色点亮，停止指示灯和故障指示灯熄灭，故障代码显示为 0，运行时间开始累加。监控系统通过触摸屏进行数据记录和显示，各参数均以绿色状态指示正常。图 6-2 为正常运行状态下的主监控画面示意。

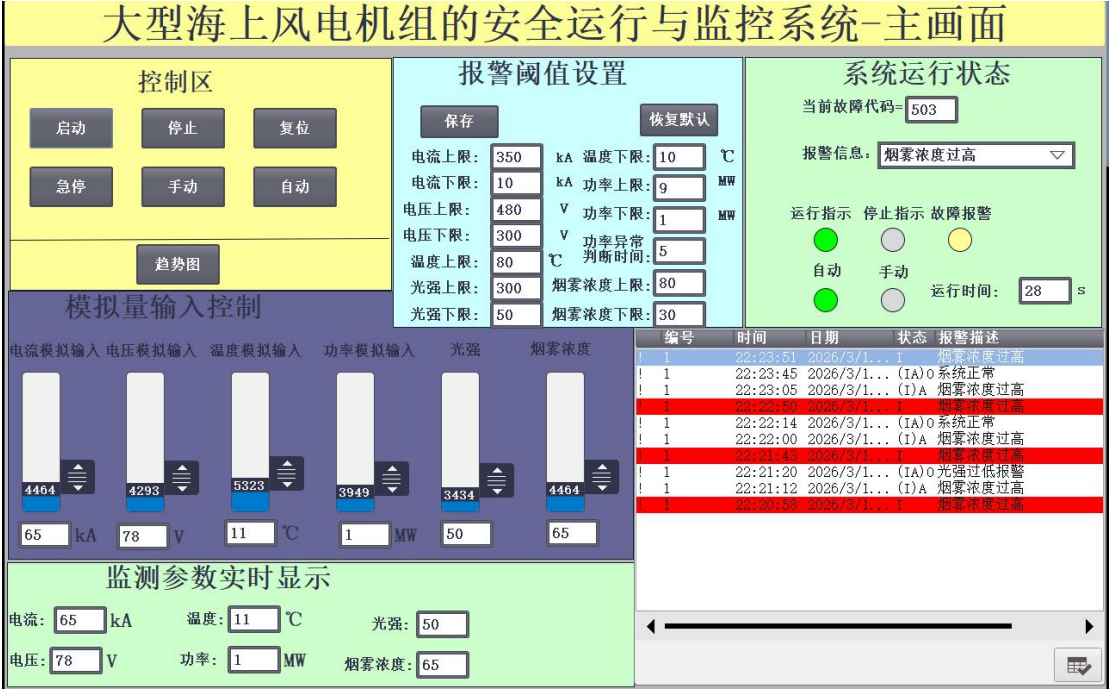


图 6-4 正常运行状态监控界面示意

6.2.2 故障状态模拟与报警验证

为验证故障诊断和报警功能，需模拟各类故障工况。将电流模拟量输入 MW100 对应的转换值设置为大于电流上限如 650A，系统应检测到过流故障，故障代码变为 101，故障指示灯点亮，红色警示灯和蜂鸣器启动，报警视图显示"过流"报警信息。类似地，可模拟欠压 MD208 小于电压下限、超温 MD212 大于温度上限、功率超限 MD216 大于功率上限等故障，验证故障代码 202、301、401 等是否正确显示。急停模拟时，点击"急停"按钮，系统应立即进入急停状态，故

障代码显示 999，所有运行指示熄灭。通过上述仿真，HMI 的报警显示、故障代码映射、声光报警指示等功能均得到验证。

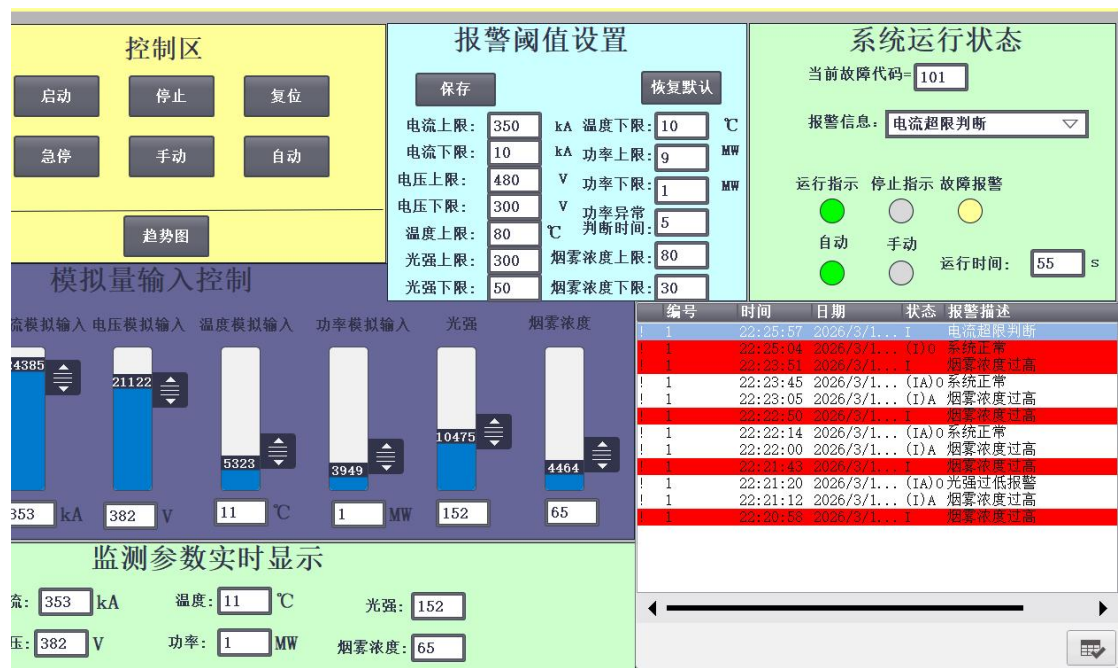


图 6-5 故障报警状态示意图

6.3 系统总体调试结果

在完成 PLC 程序仿真和 HMI 界面仿真后，进行系统总体调试结果分析。将 PLC 仿真与 HMI 仿真联合运行，从系统启动、参数设置、正常运行、故障报警、复位恢复等完整流程进行测试。表 6-2 为系统总体调试结果汇总表。

表 6-2 系统总体调试结果汇总表

序 号	测试项目	测试方法	预期结果	验 证 状 态
1	初始 化功 能	观察系统首次扫描过程	寄存器全部清零、多层警示灯	通 过
			完成自检	
2	启动 控制	强制触摸屏启动变量 M31.0=1，确保无故障、无急停	系统运行状态标志 M0.0=1，	通 过
			运行指示灯亮起	

序 号	测试项目	测试方法	预期结果	验证状态
		信号		
3	停止控制	强制触摸屏停止变量 M31.1=1	系统停止状态标志 M0.1=1，运行状态标志 M0.0=0，停止指示灯亮起	通过
4	急停控制	强制触摸屏急停变量 M31.3=1	急停标志 M0.3=1，故障代码 MD200=999，系统立即停机	通过
5	复位功能	系统出现故障后，强制触摸屏复位变量 M31.2 产生下降沿	所有故障标志清零，故障代码 MD200=0，系统恢复待机状态	通过
6	电流采集转换	设定触摸屏电流仿真输入 MW100=13824，开启数据采集使能	转换后当前电流值 MD204≈200A（对应量程 50%），采集稳定无波动	通过
7	过流报警	系统正常运行时，使当前电流值 MD204 大于过流报警阈值 MD312	过流报警标志 M1.0=1，故障代码 MD200=101，声光报警启动	通过
8	欠压报警	系统正常运行时，使当前电压值 MD208 小于欠压报警阈值 MD236	欠压报警标志 M1.3=1，故障代码 MD200=202，声光报警启动	通过
9	超温报警	系统正常运行时，使当前温度值 MD212 大于超温报警阈值 MD240	超温报警标志 M1.4=1，故障代码 MD200=301，声光报警启动	通过
10	运行时间	保持系统运行状态标志 M0.0=1，持续计时 60 秒	运行时间（分钟）MD220 自动递增 1，计时准确无偏差	通过

序 号	测试项目	测试方法	预期结果	验证状态
	统计			

综合调试结果表明，本监控系统在仿真环境下运行稳定，数据采集准确，故障判断正确，报警响应及时，人机界面友好，各项功能均满足第三章提出的设计目标与要求。

6.4 经济效益分析

本监控系统的应用可为海上风电场带来可观的经济效益和社会效益，主要体现在以下几个方面。

1) 降低故障停机损失。海上风电机组单机容量大，停机一小时造成的发电损失可达数万元。本系统通过实时监测和故障预警，能够及时发现过流、超温、功率异常等隐患，避免故障扩大化，减少非计划停机次数。按每年减少 3 次故障停机、每次停机 8 小时、单机功率 5MW、电价 0.6 元/kWh 计算，单台机组年均可减少损失约 7.2 万元。

2) 降低运维成本。传统人工巡检方式需要定期派遣人员登机检查，海上作业成本高、风险大。本系统实现远程集中监控，运维人员可通过触摸屏和上位机掌握机组状态，减少登机巡检频次。按每台机组每月减少 2 次海上巡检、每次巡检成本约 5000 元计算，单台机组年均可节约运维成本约 12 万元。

3) 延长设备寿命。通过温度、电流、功率等参数的实时监测和超限保护，可防止设备长期过载运行，降低关键部件的磨损和老化速度，延长发电机、变流器、变压器等设备的使用寿命，间接降低设备更换和维修成本。

4) 提高发电效率。系统支持自动模式下的风速条件判断，当风速处于切入与切出之间时自动使能运行，避免人工误操作导致的启停延误，提高机组可利用率和发电量。

综合以上分析，本监控系统具有良好的经济性和推广价值，可为海上风电场的安全稳定运行和降本增效提供有力支撑。

6.5 本章小结

本章完成了大型海上风电机组安全运行监控系统的仿真调试与经济效益分析，主要工作包括以下几个方面。

在 PLC 程序仿真调试方面，利用 PLCSIM 仿真软件搭建了仿真环境，完成了程序下载与运行，按照初始化、系统控制、数据采集、故障判断、运行时间统计等模块进行了分步验证，编制了调试测试项目表，各项功能均通过验证，程序逻辑正确。

在 HMI 操作系统仿真调试方面，进行了正常运行状态模拟和故障状态模拟。正常运行状态下，监测参数实时显示，运行指示灯正常，故障代码为 0；故障状态下，各类故障代码正确映射，声光报警及时启动，报警视图显示完整。HMI 与 PLC 的通信连接稳定，数据刷新及时。

在系统总体调试结果方面，对通信连接、启停控制、数据采集、故障判断、报警输出、参数设置、趋势图等进行了综合测试，调试结果汇总表明系统功能满足设计要。

在经济效益分析方面，从降低故障停机损失、降低运维成本、延长设备寿命、提高发电效率四个维度进行了定量和定性分析，论证了本监控系统的经济性和应用价值。

第 7 章 总结与展望

7.1 总结

海上风电作为清洁能源的重要组成部分，在"双碳"战略背景下发展迅速[1]。然而，海上风电场设备分布分散、运行环境复杂、人工巡检效率低，对机组的安全运行与监控提出了更高要求。本设计针对大型海上风电机组的安全运行需求，开发了一套基于 PLC 的监控系统[2][6][27]，通过模块化程序设计、硬件适配和人机界面创新，实现对电流、电压、温度、功率、光强、烟雾等核心参数的实时监测与预警，为风电机组全生命周期管理提供技术支撑。

1) 系统架构层面。本系统采用"传感器检测层—信号调理层—PLC 控制层—人机交互层"四层协同架构，以西门子 S7-1200 PLC 为核心控制器[31][32]。传感器检测层配置电流互感器、电压互感器、PT100 铂电阻温度传感器及变送器，采用屏蔽电缆进行信号传输；PLC 控制层完成数据采集、逻辑判断和报警输出，根据系统运行状态激活相应监控模块；人机交互层采用西门子 TP1200 智能触摸屏，提供可视化界面、趋势视图、动态报警指示和历史数据存储，实现故障快速定位。

2) 程序设计方面。本系统在程序设计上采用"主程序+功能块复用"的混合编程模式，突破传统顺序控制的局限。主程序 OB1 按 FC1→FC4→FC3→FC5→FC6→FC7→FC8→FC2→FC9 顺序调用九个功能块，实现初始化、数据采集与转换、系统控制、故障判断、报警输出、运行时间统计、输出指示、报警阈值设定和触摸屏参数设置；采用 NORM_X 和 SCALE_X 指令将模拟量原始值转换为工程值，提高代码复用性；建立涵盖过流、欠流、过压、欠压、超温、低温、功率异常、光强异常、烟雾异常等 13 类故障的代码体系，并采用功率异常可配置延时确认机制，默认 5 分钟，有效减少误报。FC 功能块实现 A/D 转换和量程线性化，减少重复代码，提高可维护性。

3) 系统验证阶段。本系统采用 TIA Portal V15 进行数字仿真，利用 PLCSIM 创建虚拟 PLC 环境，注入典型故障场景如过流、欠压、超温、功率超限、急停等进行功能测试。验证结果表明，系统能够准确在仿真界面上显示报警状态，触发声光报警，并根据可配置阈值和实时监测值正确发出温度、功率等各类报警，满

足设计目标。

4) 经济效益。本系统通过模块化硬件设计降低扩展成本,通过远程集中监控减少现场维护频次、节约运维成本[23][25],通过预测性维护策略延长齿轮箱等关键部件更换周期[16],单台机组年均可节约故障停机损失约 7.2 万元、运维成本约 12 万元,有效降低全生命周期成本。

7.2 展望

电力系统智能化水平持续提升,PLC 在风电机组监控领域的应用潜力仍有待挖掘。结合本系统的设计经验,对未来研究方向提出以下展望。

1) 结合高压柜进行设计。可将测量与计量装置如电压互感器、电流互感器、电能表等直接集成于高压柜内,通过标准化接口将全部数据馈送至 PLC。利用 PLC 的数据处理能力进行实时分析,并在工业触摸屏上显示关键参数,有望替代传统开关柜显示装置,实现全数字化管理,且无需大幅改动现有硬件结构。

2) 配置无线传输。海上风电场范围广阔,有线通信存在敷设困难、信号衰减、维护不便等问题。可引入成熟的无线通信技术如 4G/5G、LoRa、ZigBee 等,实现风电机组、监控中心与运维终端之间的高效稳定数据传输,在现有架构基础上仅需扩展无线通信模块即可实现。

3) PLC 数据交换。可进一步强化 PLC 之间的数据交换能力,采用主从或分布式控制架构。每台风电机组配置本地子 PLC,将运行数据上报至运维中心的主 PLC;主 PLC 进行综合分析,通过 HMI 集中展示多台风电机组的运行状态,形成集中监控界面[25],在现有基础上仅需扩展协议栈和多屏显示即可实现。

参考文献

- [1] 黄晟,凌吉莉,魏娟,等. 大规模风电机群服役质量调控方法研究综述[J]. 电工技术学报,2025,40(10):3274-3300.
- [2] 呼吉亚. 基于 PLC 技术的风电机械自动化控制系统的设计[J]. 自动化应用,2024,65(19):66-68.
- [3] Liu Y. Adaptive system design of wind turbine parameters based on Lyapunov stability[J]. International Journal of Frontiers in Engineering Technology,2024,6(5).
- [4] 胡阳,张冲,房方,等. 基于主动尾流控制的风电机群协同优化调度[J]. 动力工程学报,2024,44(04):566-574.
- [5] Xu Q,Wu Y,Zhang X,et al. Dynamic safety control of offshore wind turbine based on model predictive control[J]. Ocean Engineering,2024,299:117041.
- [6] 张孝芳. 面向风电机械自动化控制系统的 PLC 主控器设计与应用研究[J]. 自动化与仪器仪表,2024,(03):255-259.
- [7] 曾祺玮. 海上风电机群试运行的故障容错性能评估方法研究[J]. 电工技术,2023,(19):31-34.
- [8] 王志. 计及风电机侧变流器频率参数对 IGBT 可靠性影响机制的寿命建模研究[D]. 重庆大学,2022.
- [9] 朱家文. 海上风电机群控制策略及优化研究[D]. 贵州大学,2022.
- [10] 王冰,袁越,袁晓玲,等. 风力发电机组及海上风电机群控制技术[M]. 南京:南京大学出版社,2021:286.
- [11] 王雨娇. 海上风电机组可靠性问题的思考[J]. 科技视界,2021,(17):107-108.
- [12] 周宏林. 10MW 海上风电双绕组永磁电机建模与工况研究[J]. 电气传动,2020,50(09):8-14.
- [13] 张伟. 某品牌 87-2000 永磁型风电机变桨系统控制策略优化[C]//中国农业机械工业协会风力机械分会. 第七届中国风电后市场交流合作大会论文集. 中国华电集团有限公司甘肃公司,2020:200-209.
- [14] 张美满,包雄关. 基于模糊 PID 控制器的海上风电机系统仿真模拟[J]. 船舶工程,2020,42(03):105-108+115.
- [15] 涂亮,刘斯明,郑丹. 基于海上风电产业发展的风电机维修市场[J]. 海洋开发

与管理,2019,36(08):72-76.

[16] 郭慧东. 海上风电机群运行状态评价与维修决策[D]. 北京交通大学,2018.

[17] 石睿. 基于大数据分析的风电机组运行状态监测方法研究[D]. 长春工业大学,2018.

[18] 郭敏. 基于 CUSUM 控制图的风力发电机组的状态监控研究[D]. 长沙理工大学,2018.

[19] Farming; Data on Farming Described by Researchers at University of Duisburg-Essen (New Control of Wind Turbines Ensuring Stable and Secure Operation Following Islanding of Wind Farms)[J]. Energy Weekly News,2017.

[20] 何海军. 风电机组可用性设计风险分析及提升研究[D]. 西南交通大学,2017.

[21] 张永辉. 基于监测数据的风力发电机故障预警研究[D]. 沈阳工程学院,2017.

[22] Bae Systems Plc; Patent Application Titled "Wind Turbine Mitigation in Radar Systems" Published Online (USPTO 20160069993)[J]. Energy Weekly News,2016.

[23] 吕明明. 风电场远程集中化生产运营监控平台建设探究[J]. 智能城市,2015,1(01):53-55.

[24] 王珏. 兆瓦级双馈风力发电机组控制系统研究与设计[D]. 东北大学,2014.

[25] 肖一卓. 大型风电场 SCADA 系统的设计与实现[D]. 东北大学,2014.

[26] 汤敏. 基于 DES 理论的风电机组监控系统设计方法[D]. 长沙理工大学,2014.

[27] 曹丽敏. PLC 在大型风电控制系统中的应用[D]. 电子科技大学,2013.

[28] 吕贵龙. 风力发电机组安全防护监控技术研究[D]. 上海电力学院,2013.

[29] 俞文胜,石磊. 数据采集与监视控制系统在 1.25 MW 风电场中的设计及应用[J]. 发电设备,2012,26(02):108-110.

[30] 魏仲,晁勤,马成兴,等. PLC 控制器在风电机组中的应用[J]. 信息技术,2009,33(01):97-98+101.

[31] 廖常初. S7-1200 PLC 编程及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2019.

[32] 西门子(中国)有限公司. SIMATIC S7-1200 可编程控制器系统手册[M]. 2018.

[33] 向晓汉. 电气控制与 PLC 应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2020.

[34] 王卫兵. PLC 编程及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2018.

[35] 陈建明. 电气控制与 PLC[M]. 北京:电子工业出版社,2019.

- [36] 殷洪义. 可编程控制器选择设计与维护[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
- [37] 张万忠. 西门子 S7-1200 PLC 项目教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2018.
- [38] 李道霖. 电气控制与 PLC 应用[M]. 北京:电子工业出版社,2019.

致谢

时光荏苒，转眼间本科阶段的学习生活即将画上句号，毕业论文的完成也标志着大学时光的落幕。然而，人生的征途仍在继续，在此谨向陪伴我一路走来的家长、老师和同学们致以最诚挚的感谢。

我要向指导教师致以最崇高的敬意和最诚挚的谢意。在论文的开题报告和初期设计阶段，导师给予了大量的指导和帮助。本论文从选题、方案设计到系统实现与调试，都是在导师的悉心指导和亲切关怀下完成的。导师在整个设计过程中不断提出宝贵建议，对开题报告进行了耐心细致的指导，其认真负责的态度和严谨治学的精神令我深受感动。同时，感谢论文中所涉及的图片、文献的研究者们，正是他们的研究成果为现代电力系统的发展奠定了坚实基础。

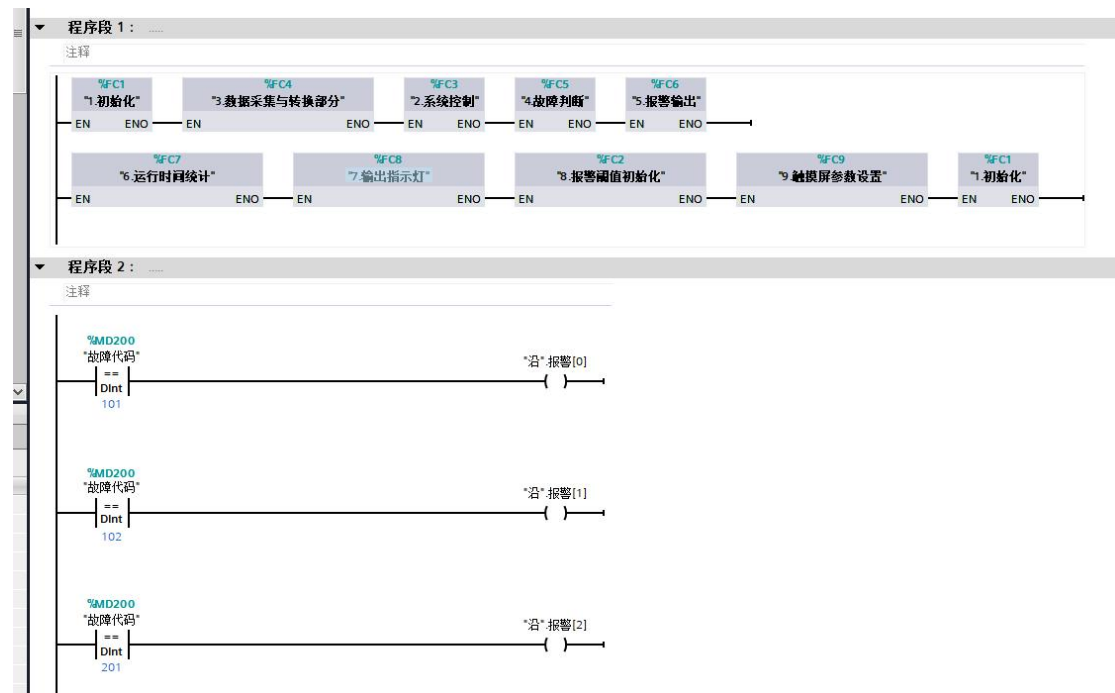
感谢在过去几年的学习生涯中给予我很大帮助的各位老师。老师们的辛勤付出和无私奉献如同一盏明灯，照亮了我前行的道路，使我在知识的海洋中不断探索，收获满满。老师们的耐心指导和鼓励犹如春风化雨，让我在学习路上勇往直前，不断超越自我。

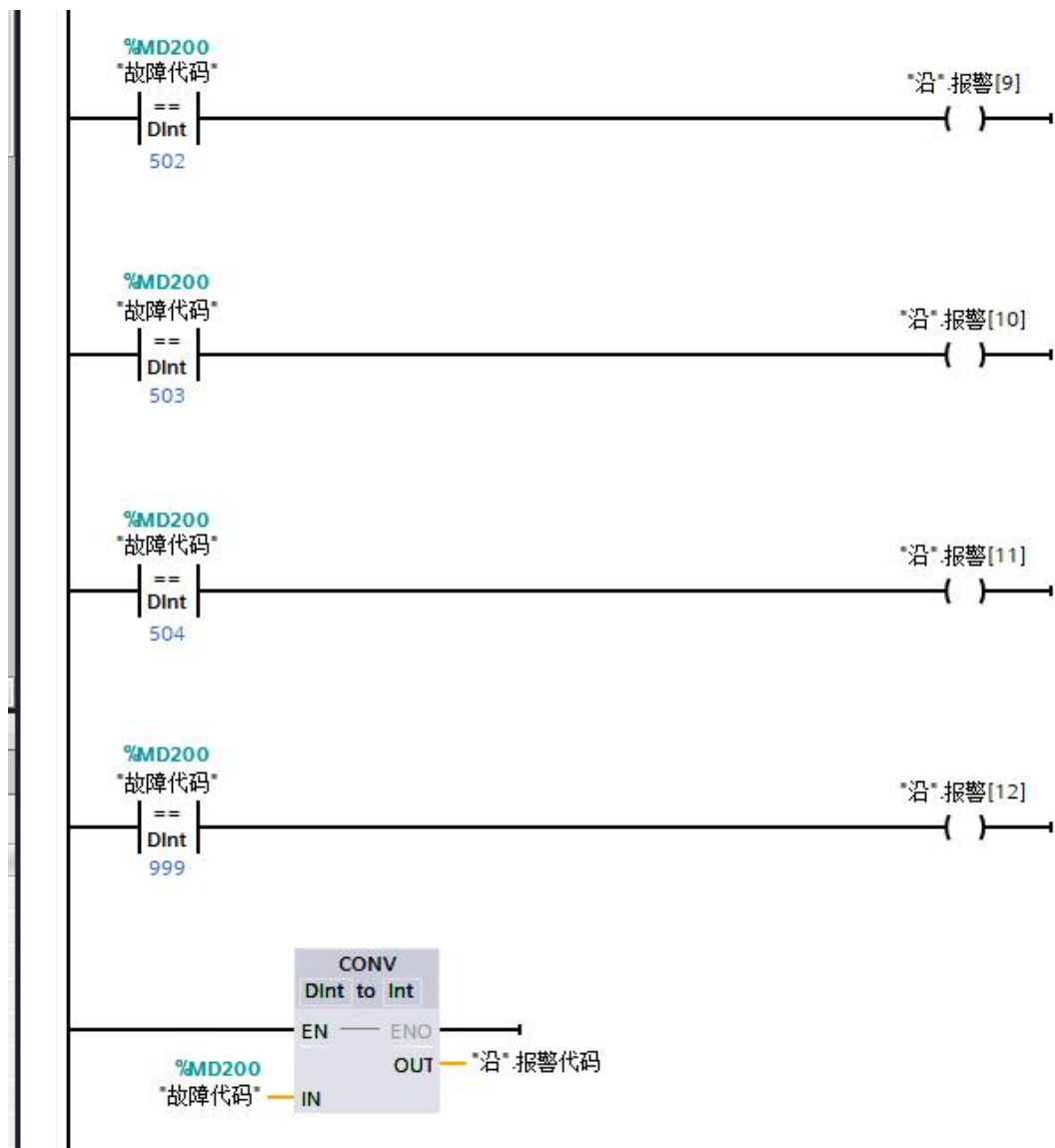
衷心感谢我的父母。从蹒跚学步到求学之路，你们给予了我无尽的爱与支持。你们默默奉献，为我创造了良好的学习环境，让我能够心无旁骛地投入学业。在我遇到挫折与困惑时，你们的鼓励与信任如同灯塔，为我指明方向、给予力量。我将继续努力，以实际行动回报你们的养育之恩。

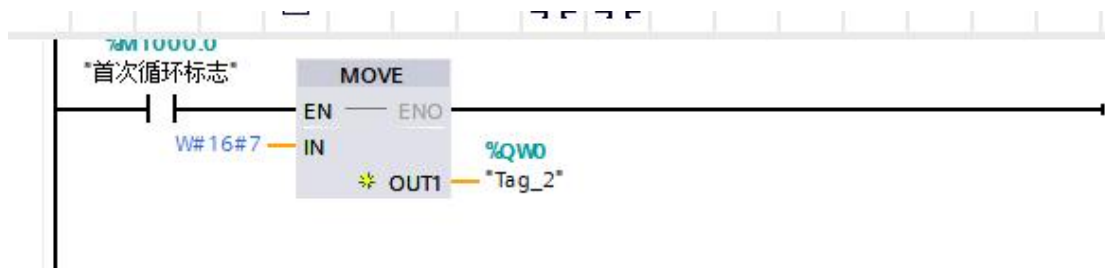
路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。在漫长而充满挑战的人生道路上，我将怀揣着对知识的渴望与对梦想的执着，积极投身于我国电力行业的发展之中。电力行业作为国家经济发展的重要支柱，其每一步创新与进步都关乎国家的繁荣与民众的福祉。愿以所学所长，为清洁能源事业贡献绵薄之力。

附录

附录部分梯形图



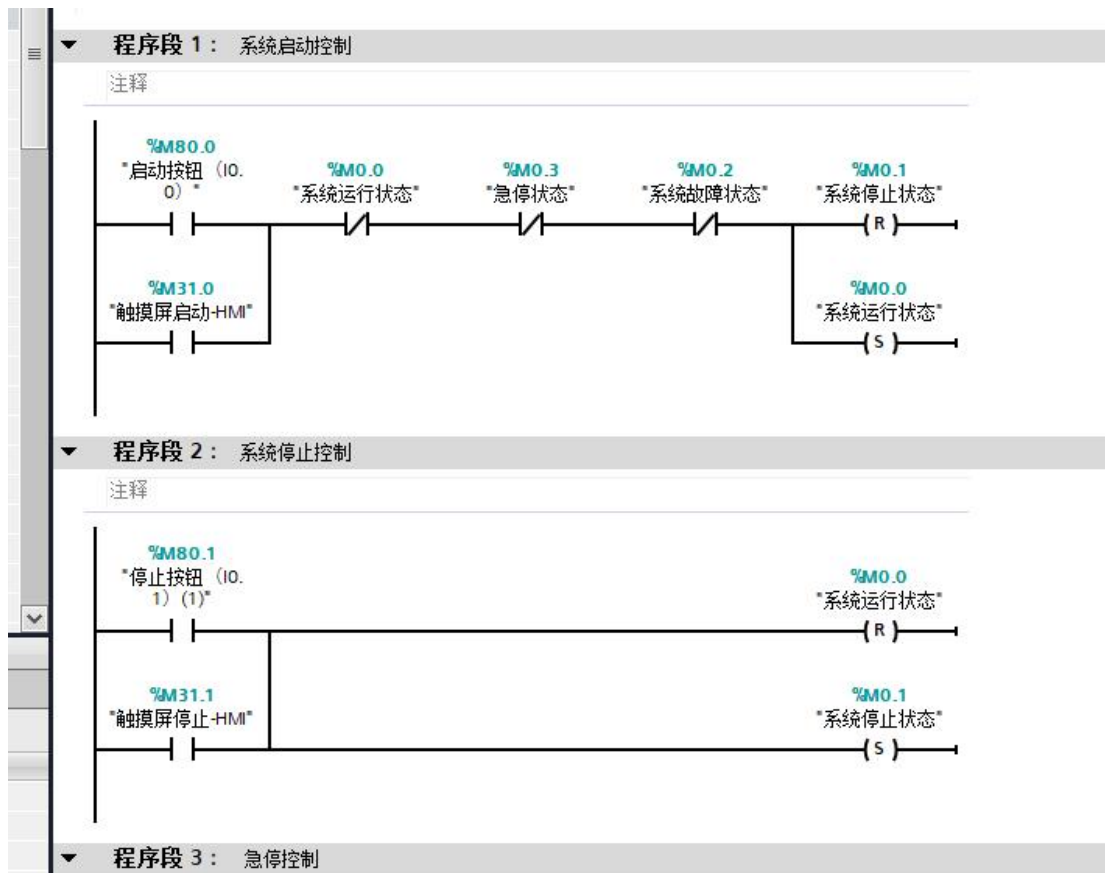




▼ 程序段 2：寄存器初始化清零（首次扫描）

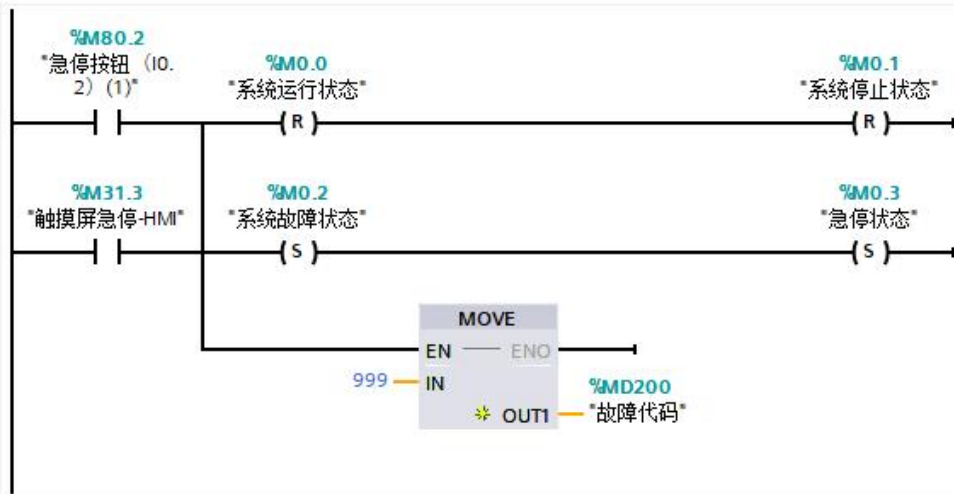
注释





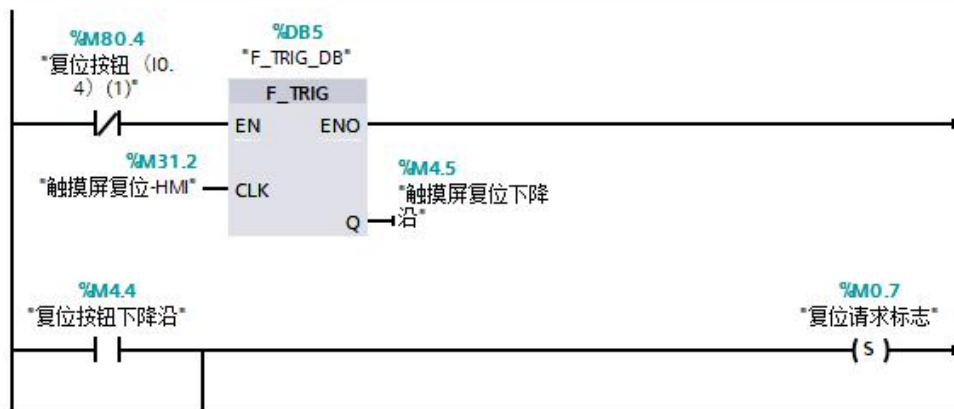
程序段 3：急停控制

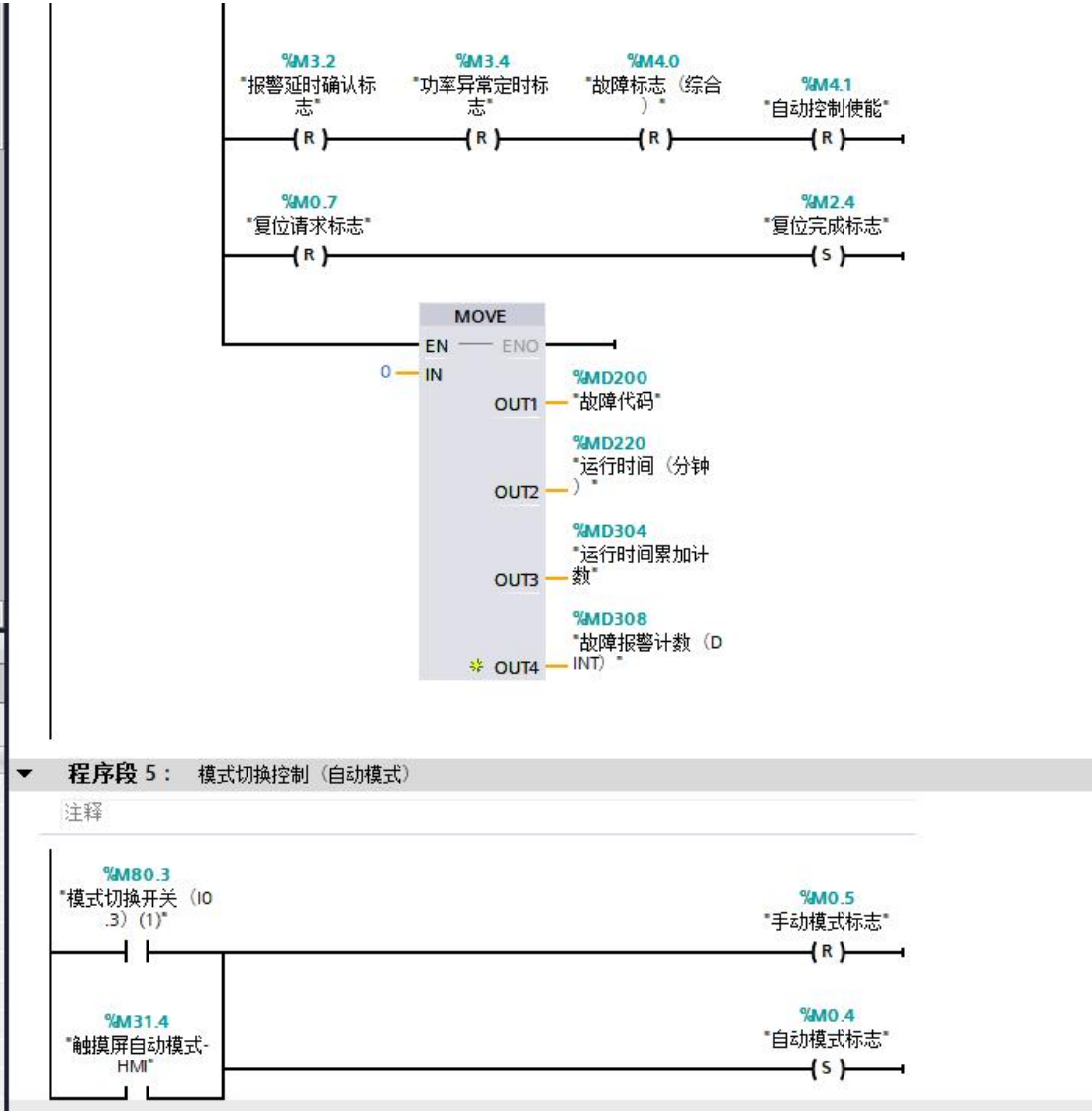
注释



程序段 4：故障复位功能（下降沿触发）

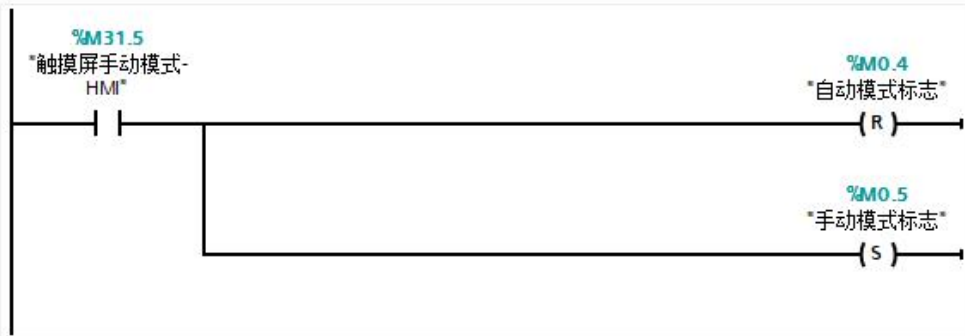
注释





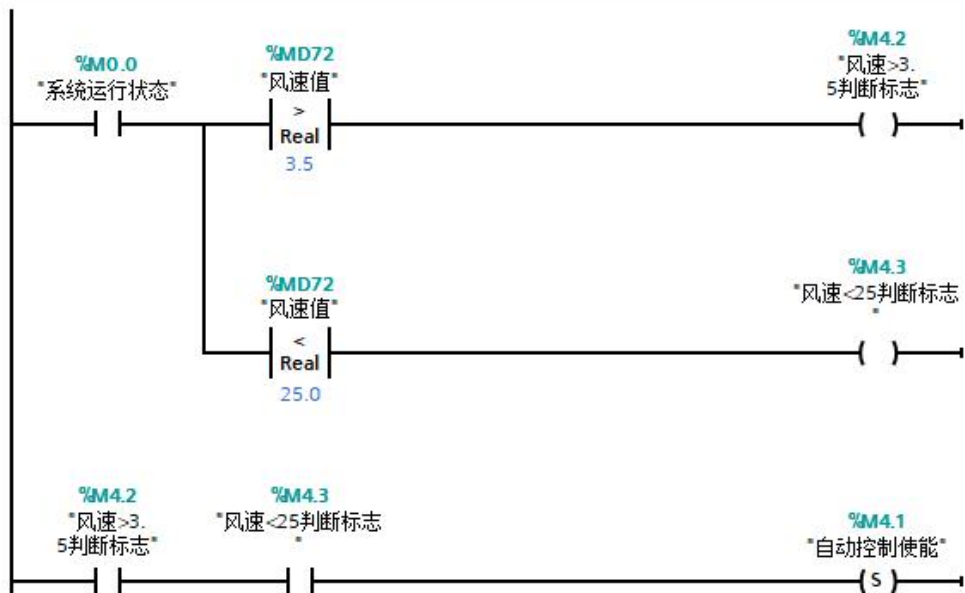
程序段 6：模式切换控制（手动模式）

注释



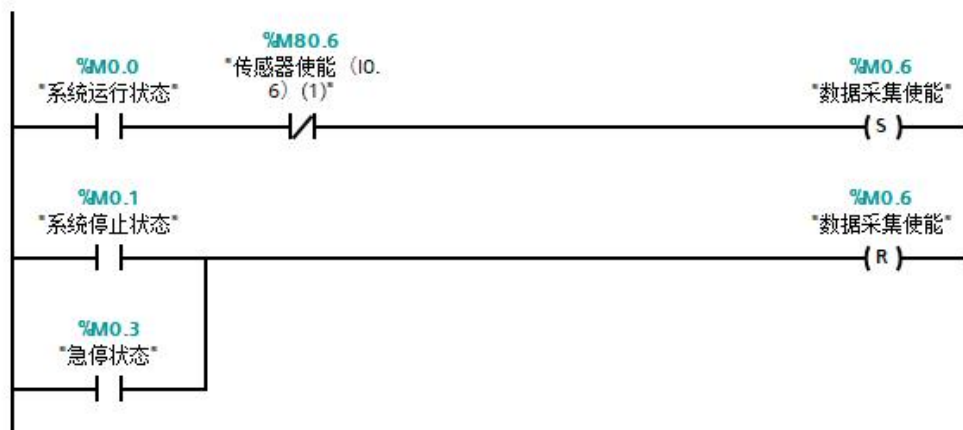
程序段 7：自动控制使能（基于风速条件）

注释



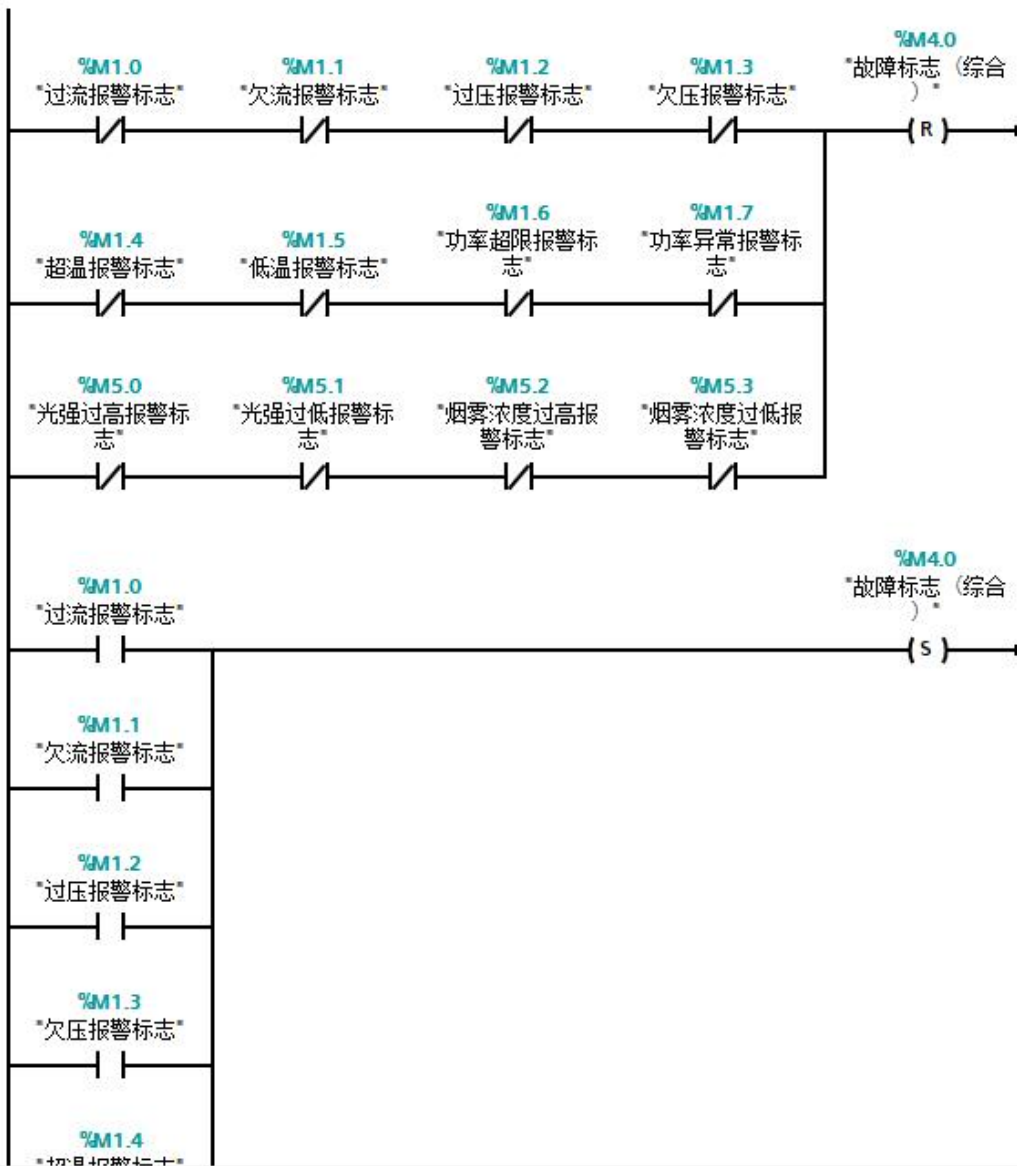
程序段 8：数据采集使能控制

注释

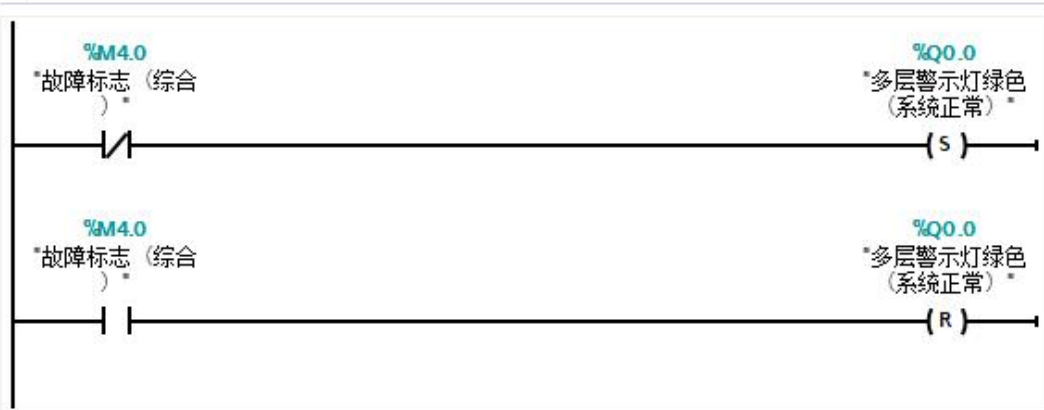


▼ 程序段 1：系统正常运行指示逻辑（综合故障标志）

注释

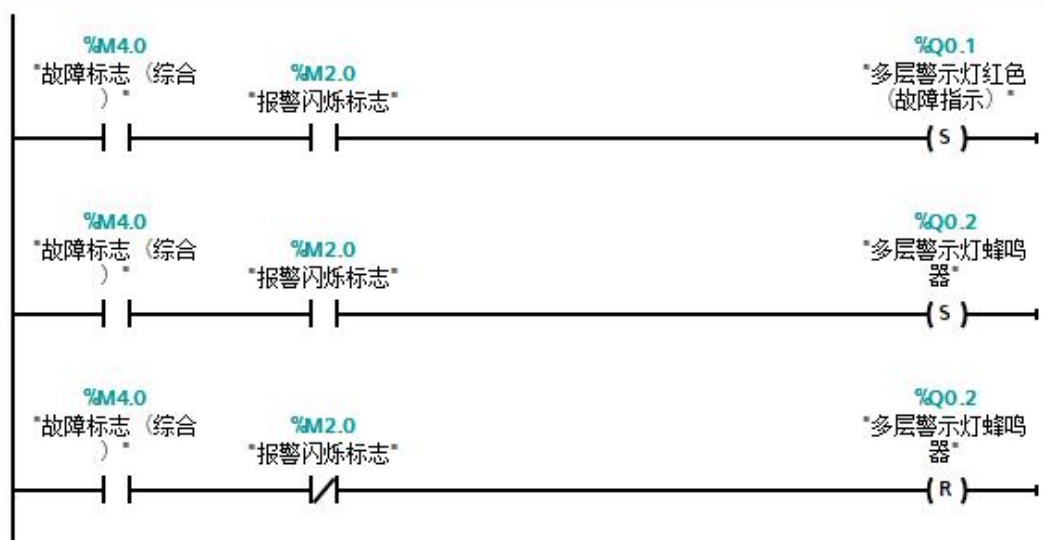


注释



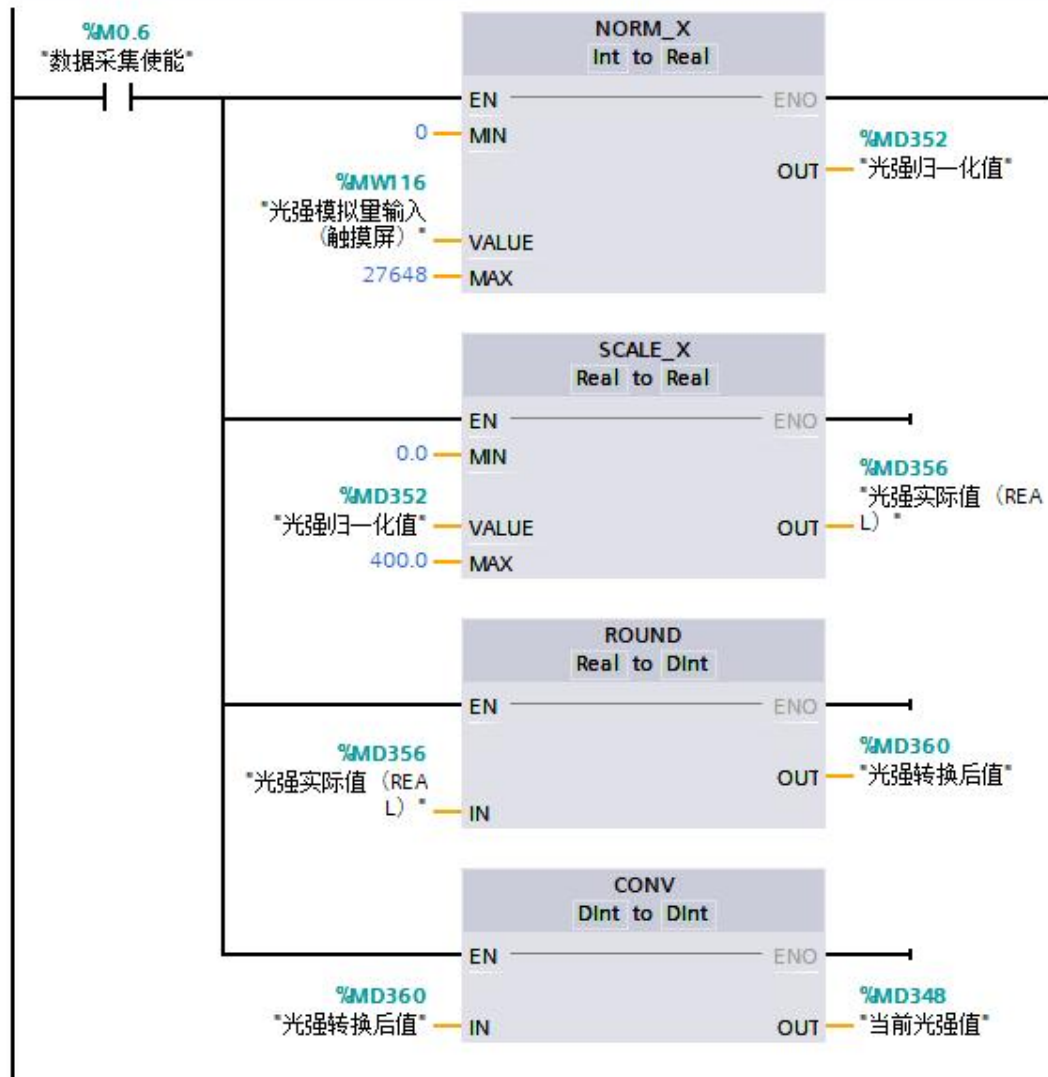
▼ 程序段 3：多层警示灯红色及蜂鸣器工作程序段（故障指示）

注释

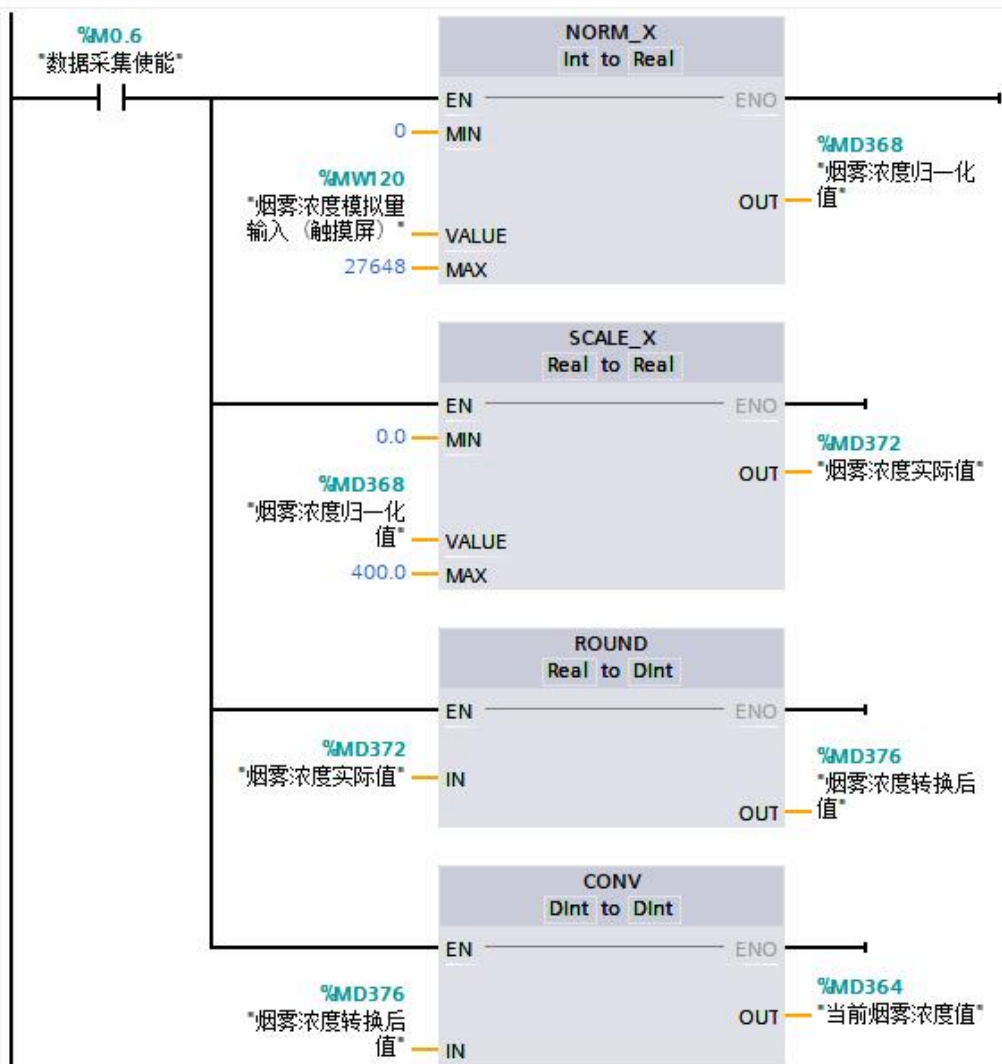


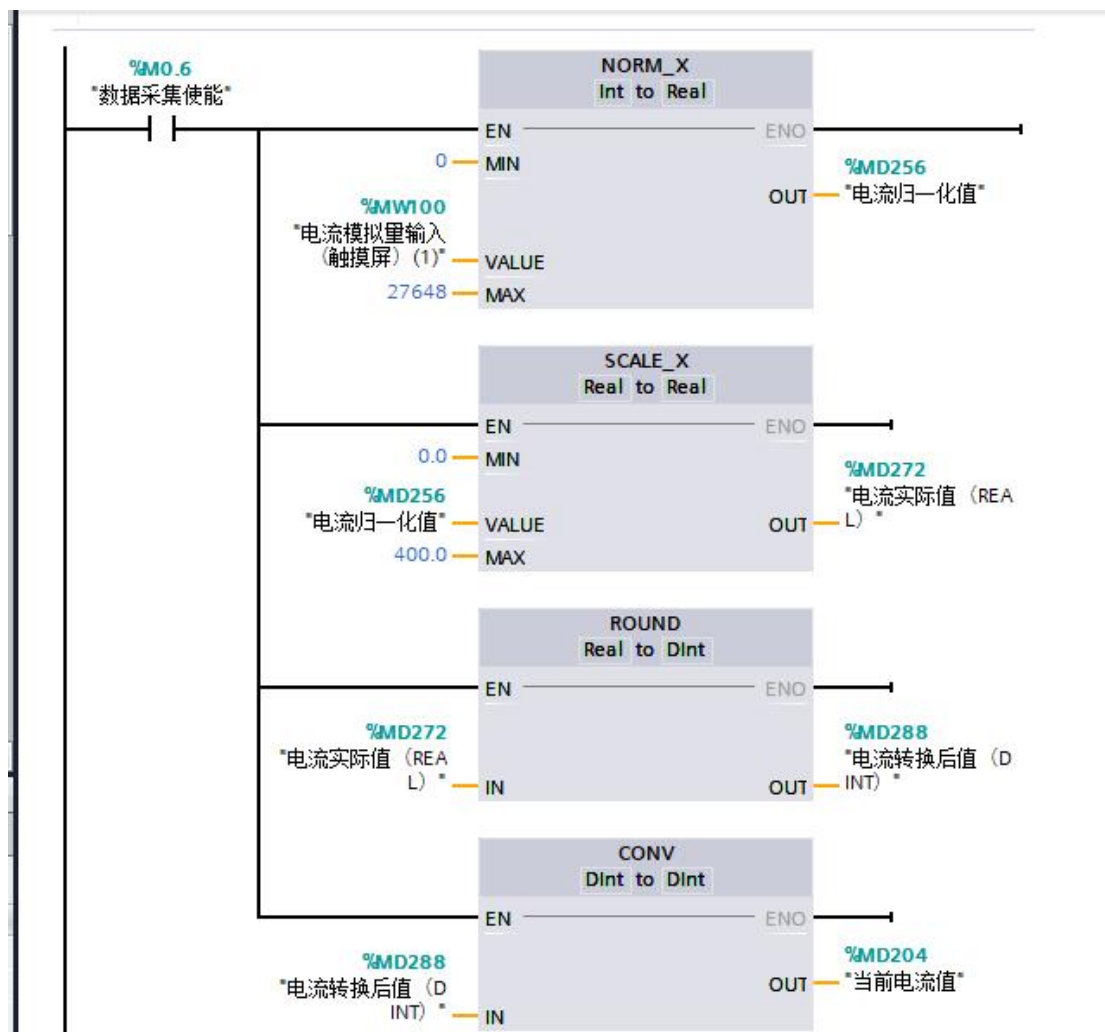
程序段 4： 光强模拟量输入转换 (NORM_X + SCALE_X)

注释

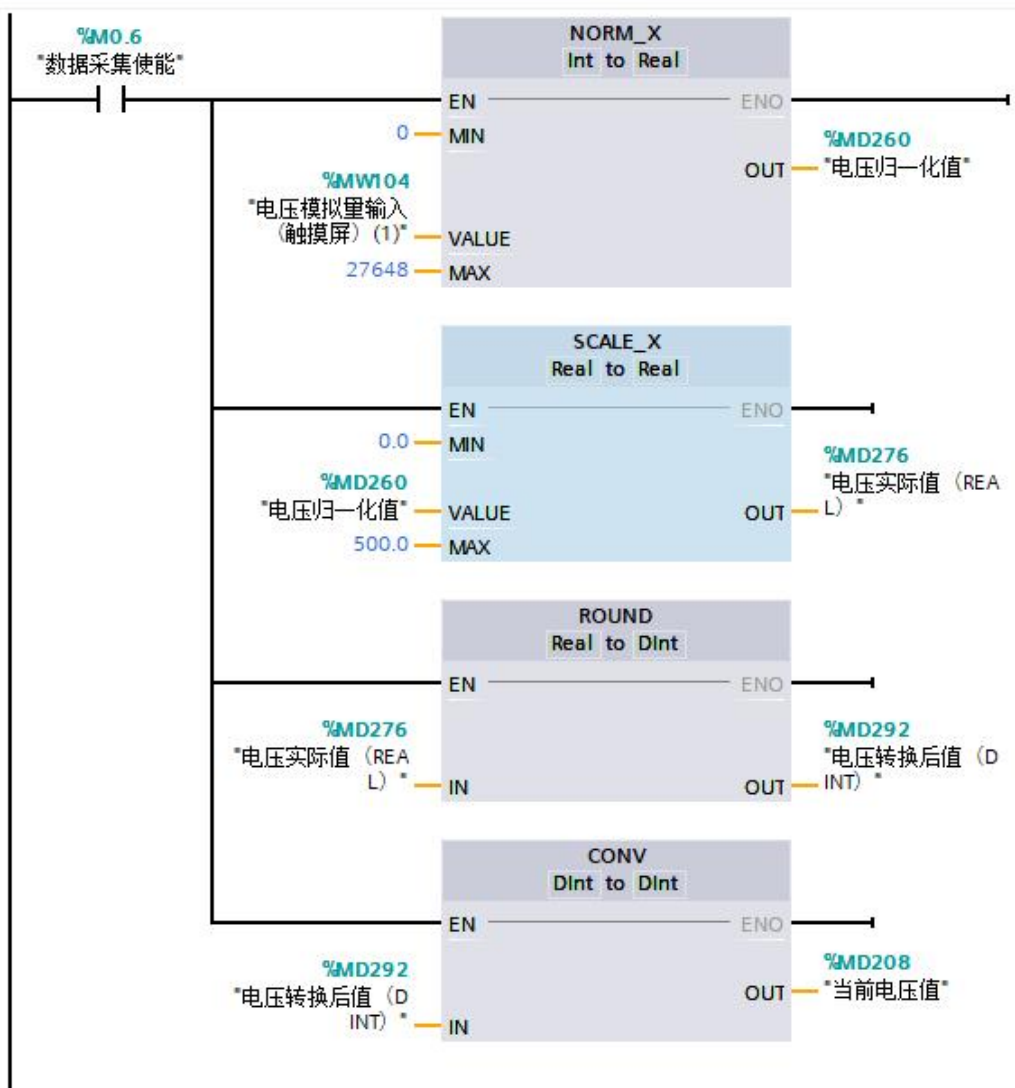


注释



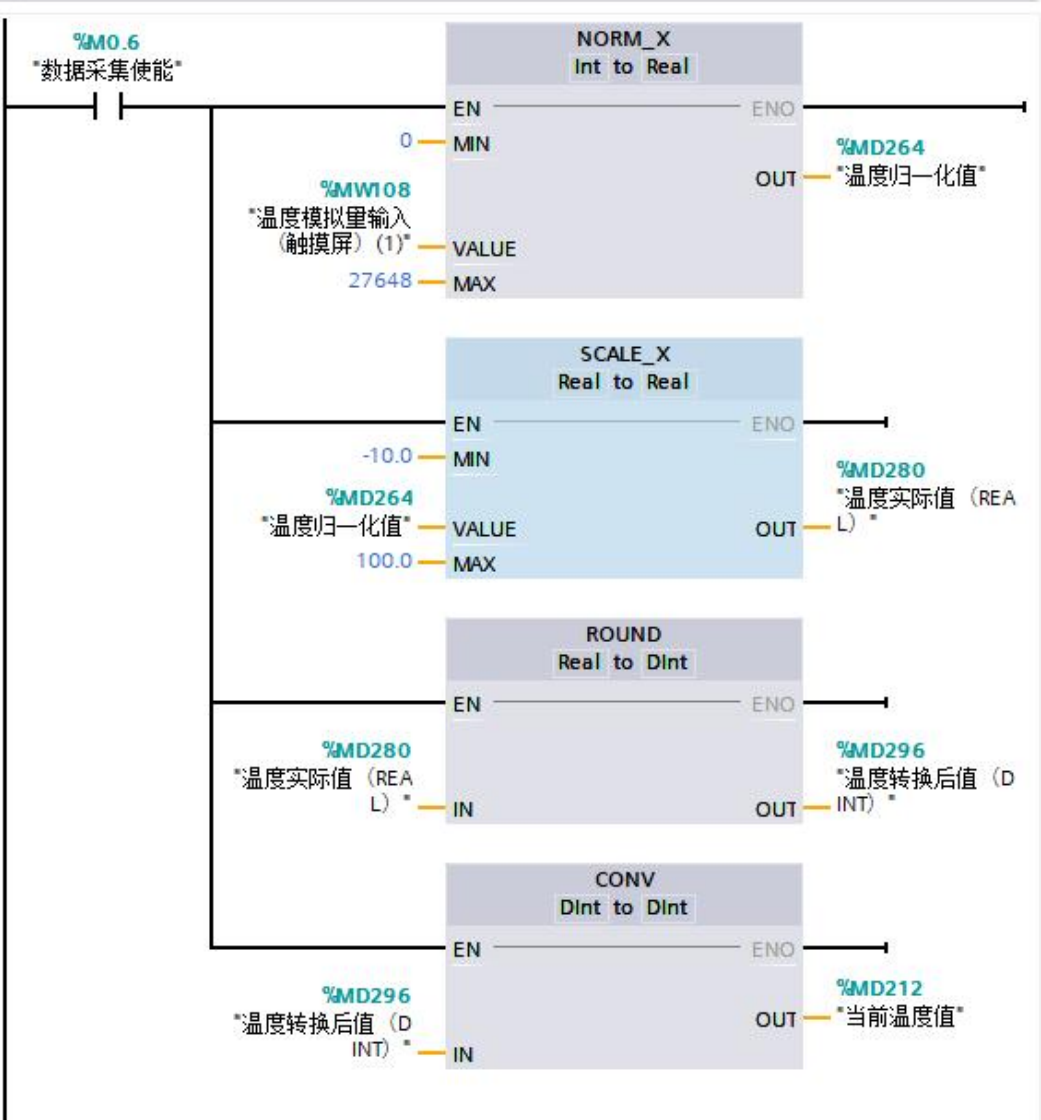


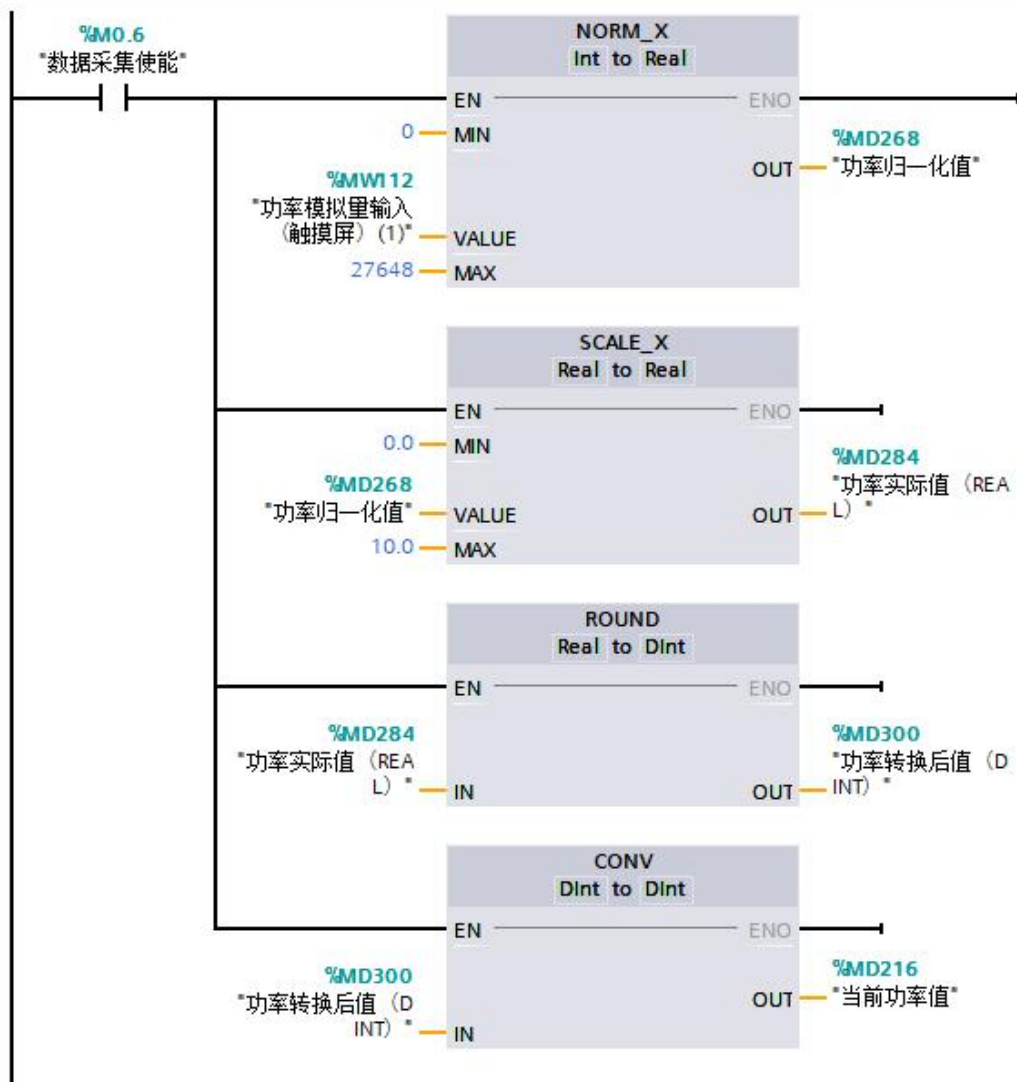
注释



程序段 8： 温度模拟量输入转换 (NORM_X + SCALE_X)

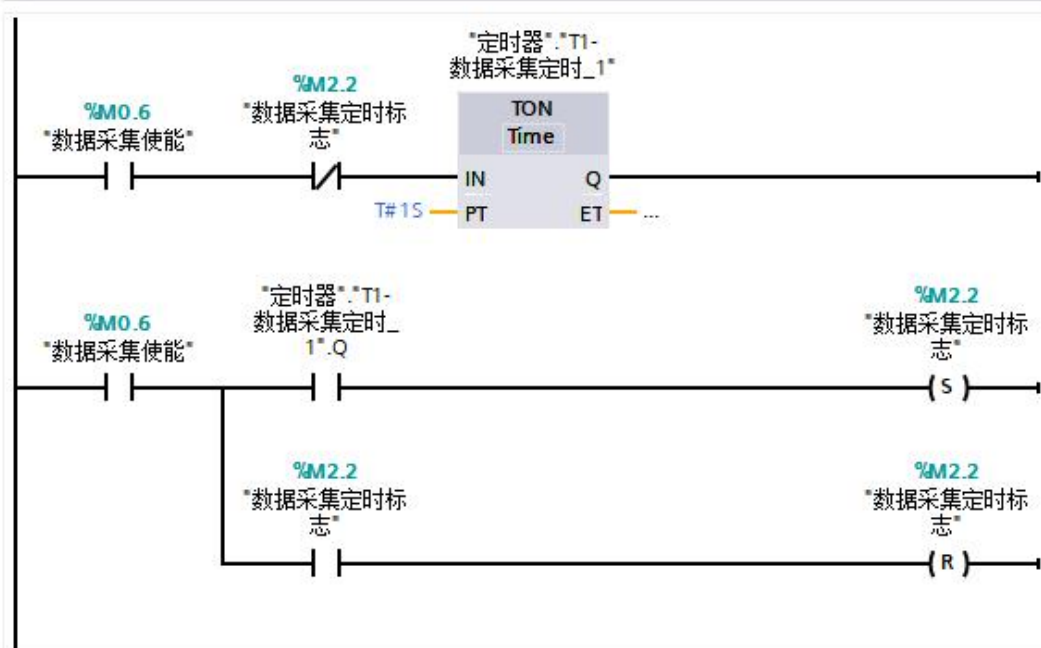
注释





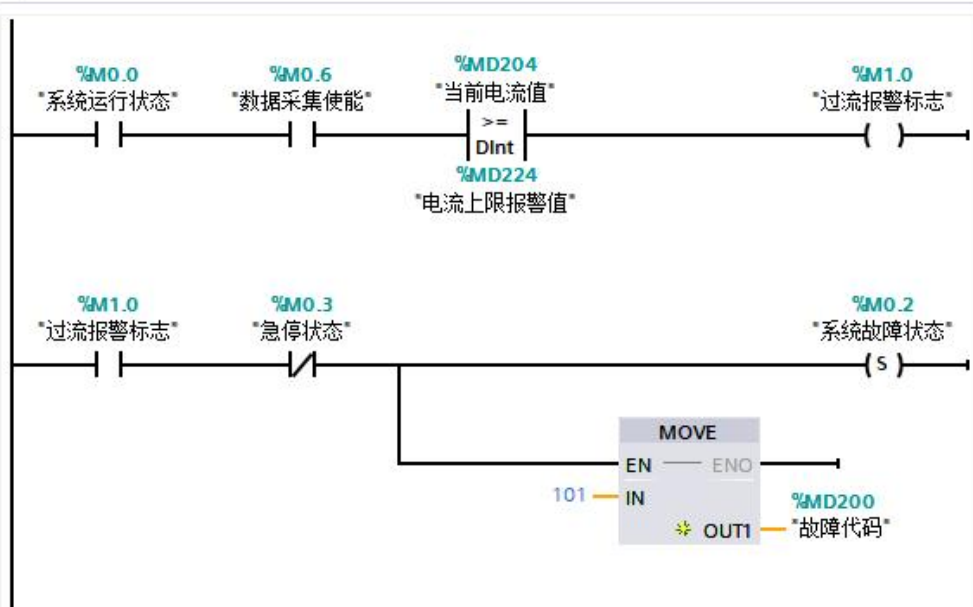
程序段 10：数据采集定时器（1秒周期）

注释



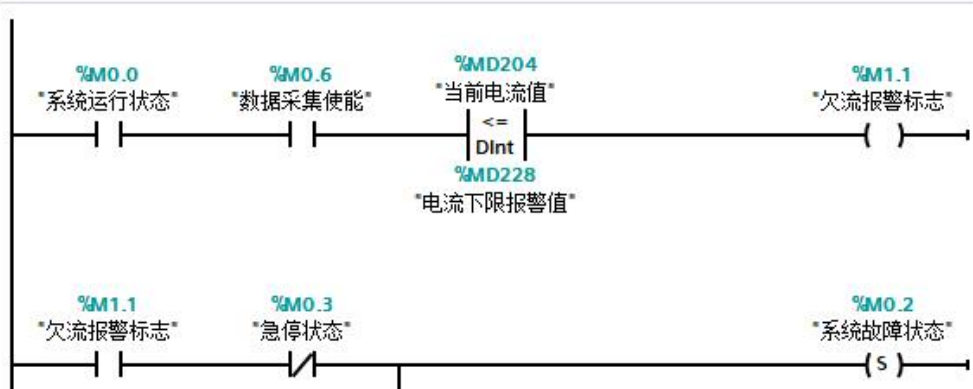
▼ 程序段 1： 电流超限判断（过流）

注释



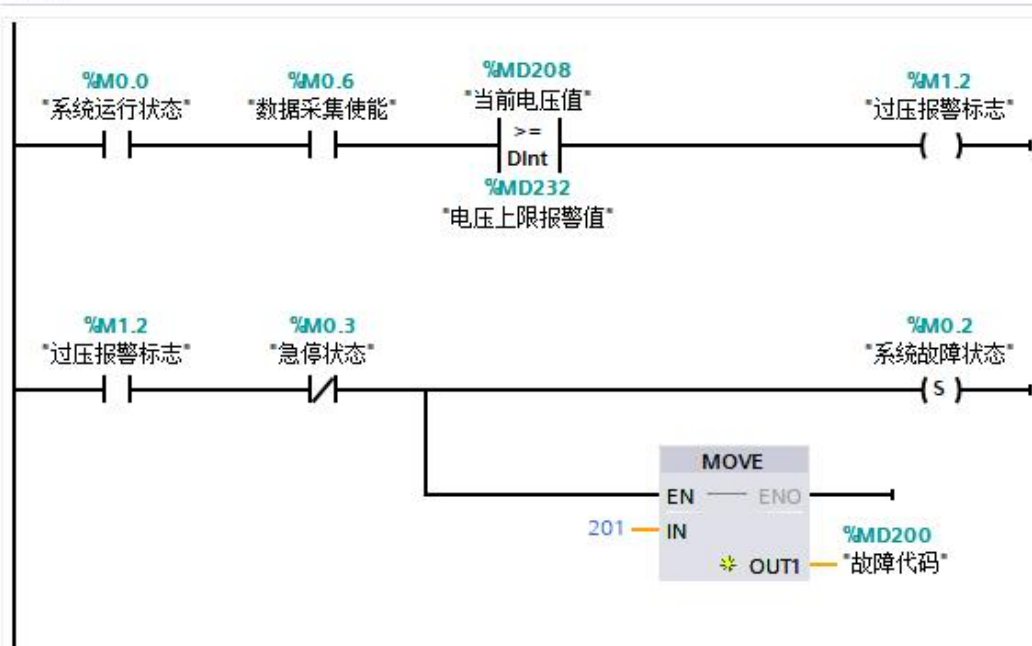
▼ 程序段 2： 电流超限判断（欠流）

注释



▼ 程序段 3：电压超限判断（过压）

注释



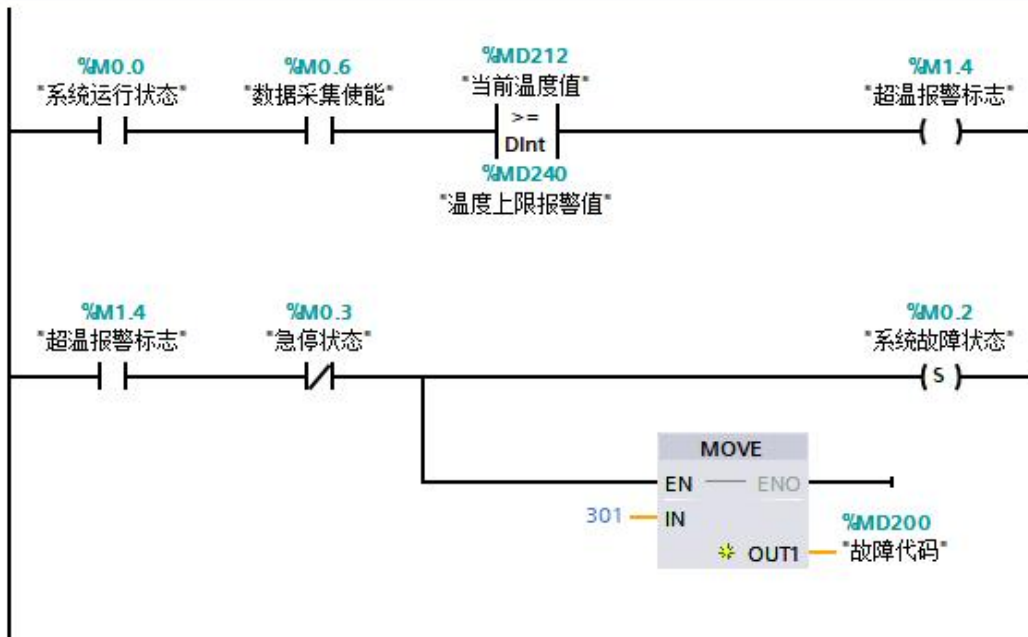
▼ 程序段 4：电压超限判断（欠压）

注释



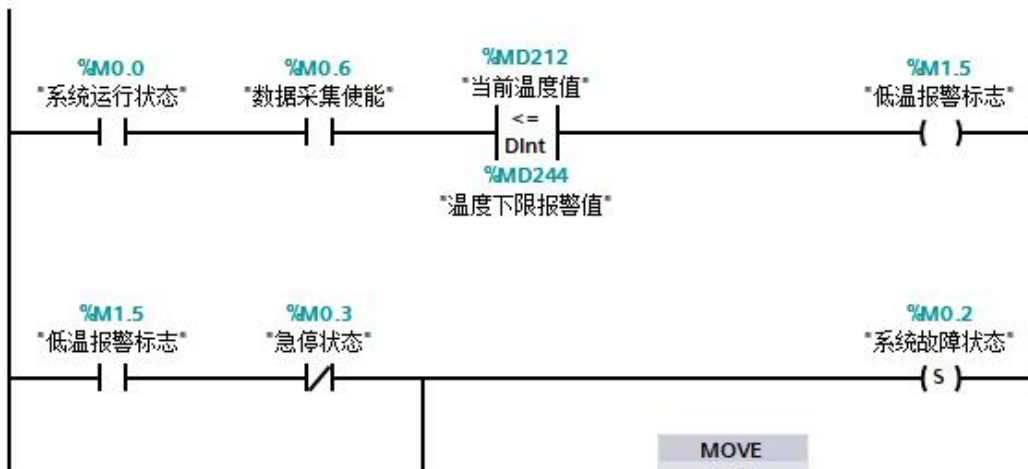
▼ 程序段 5：温度超限判断（超温）

注释



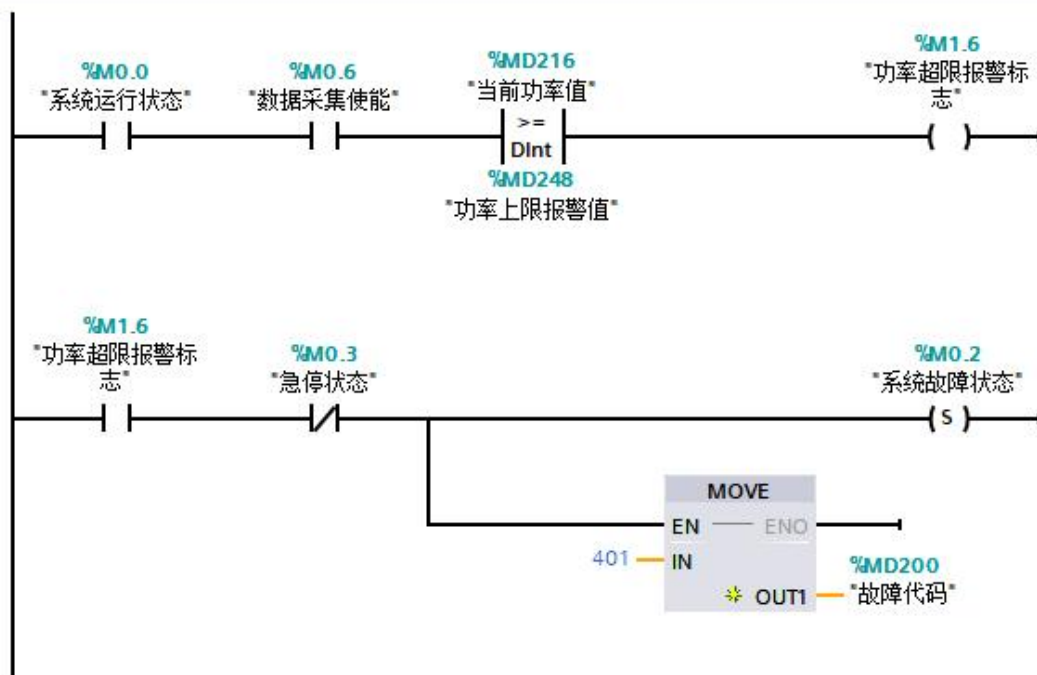
▼ 程序段 6：温度超限判断（低温）

注释



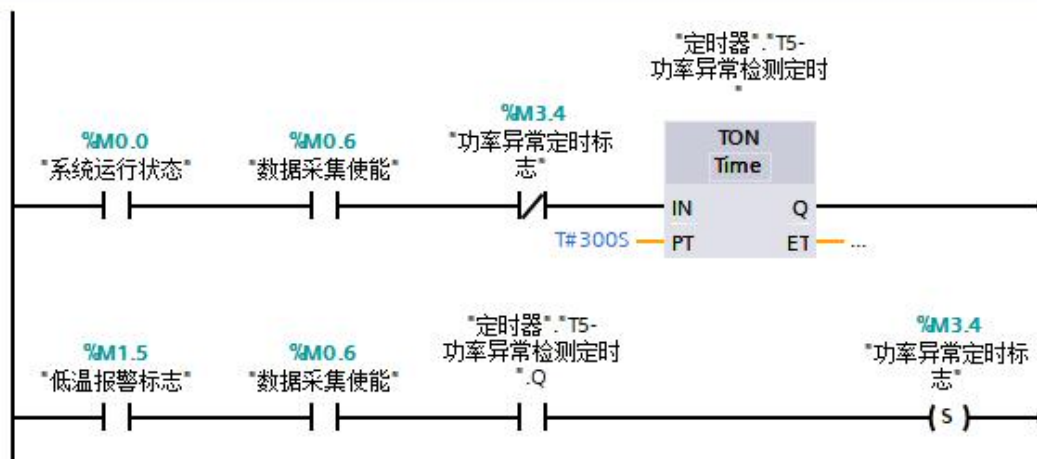
▼ 程序段 7：功率超限判断（功率超限）

注释

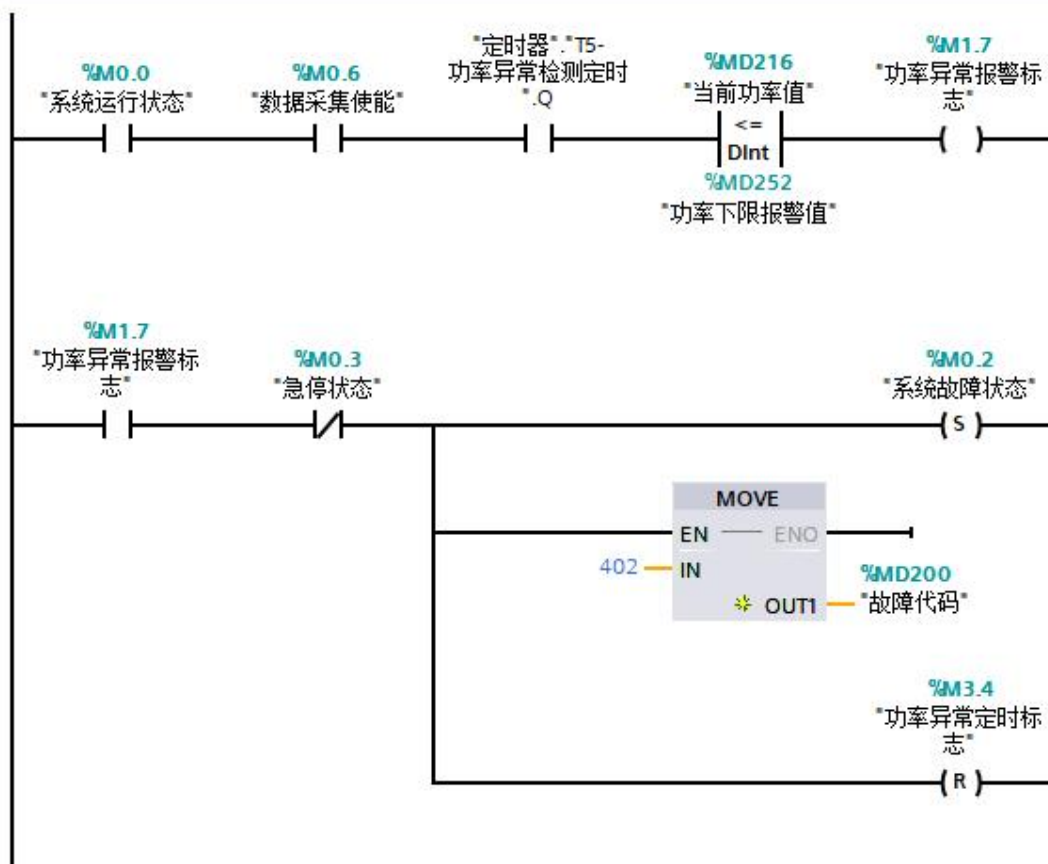


▼ 程序段 8：功率异常判断（功率异常检测定时器启动）

注释



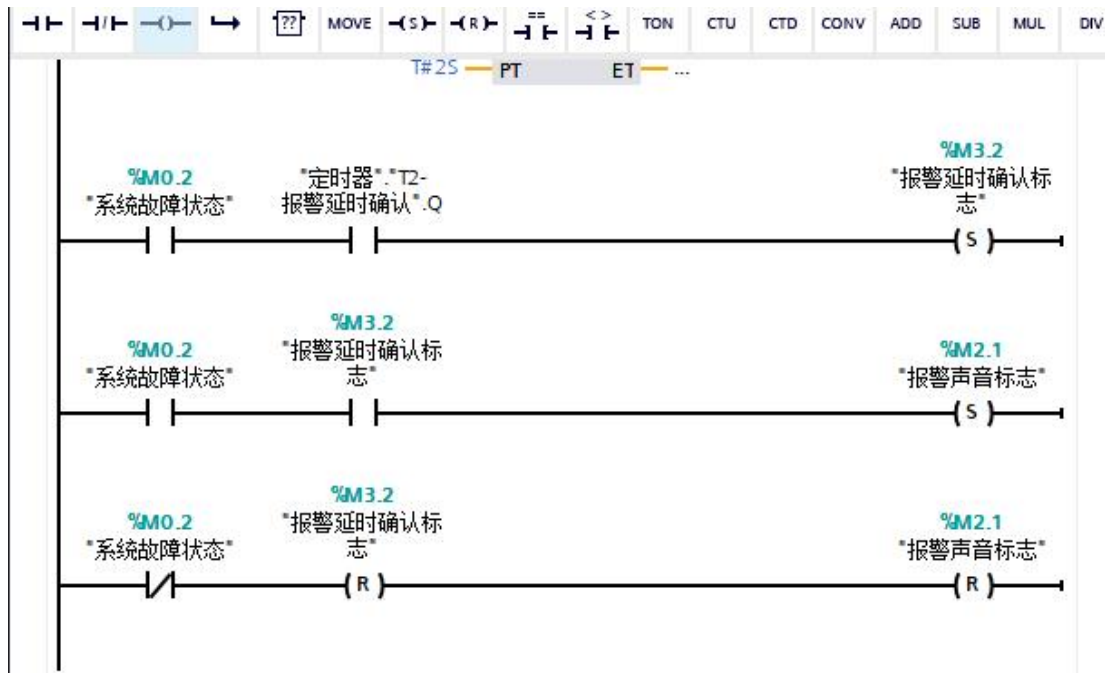
注释



程序段 10：光强超限判断（光强过高）

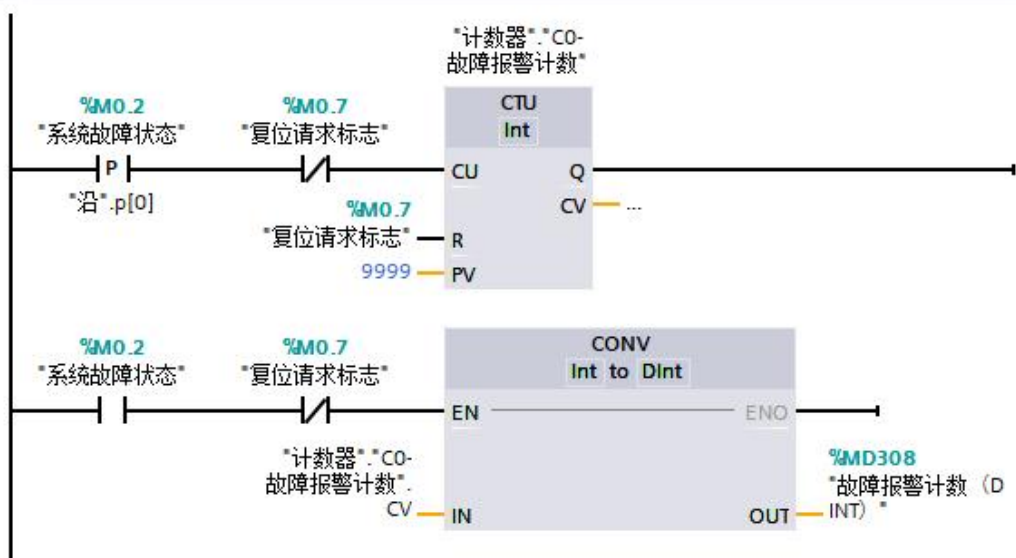
注释





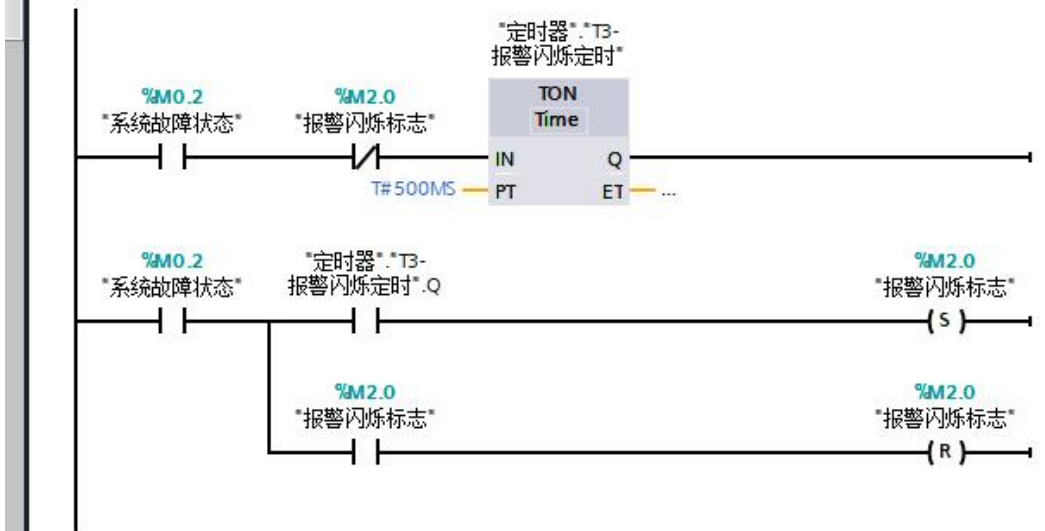
程序段 15：故障报警计数

注释



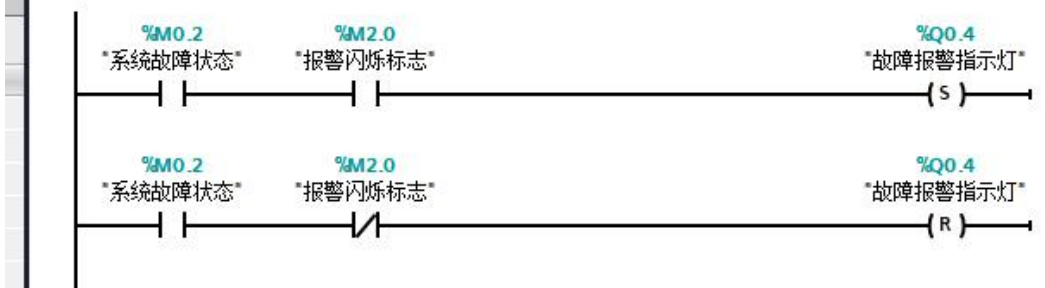
▼ 程序段 1：报警闪烁定时器（0.5秒周期）

註



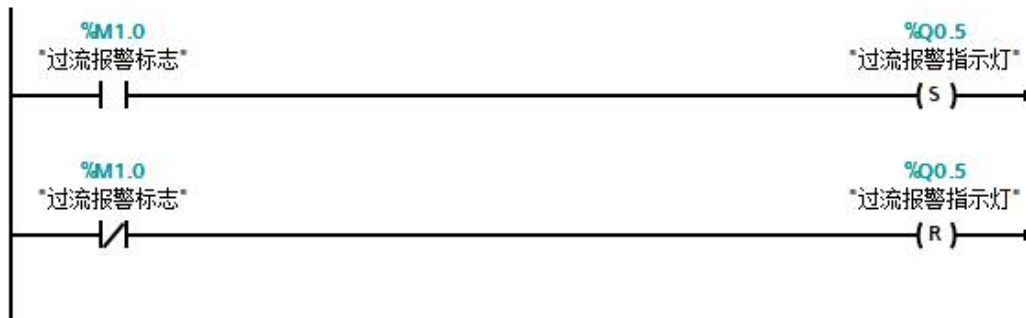
▼ 程序段 2：故障报警指示灯输出

陳其南



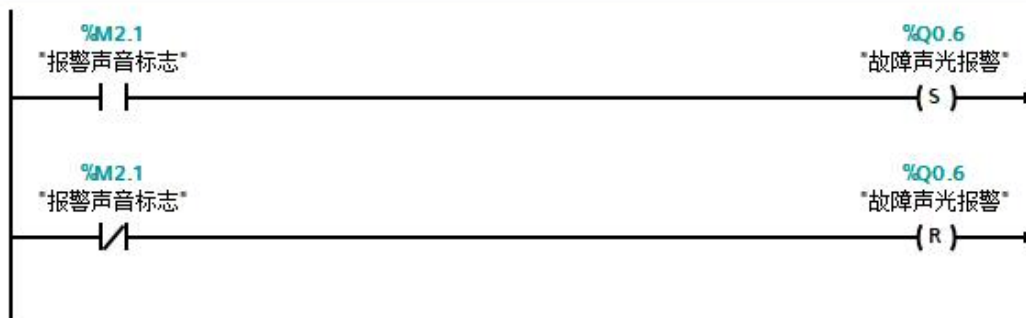
▼ 程序段 3：过流报警指示灯输出

注释



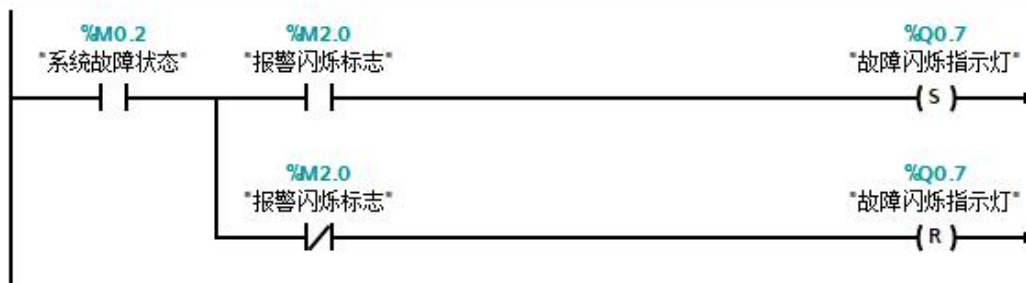
▼ 程序段 4：故障声光报警输出

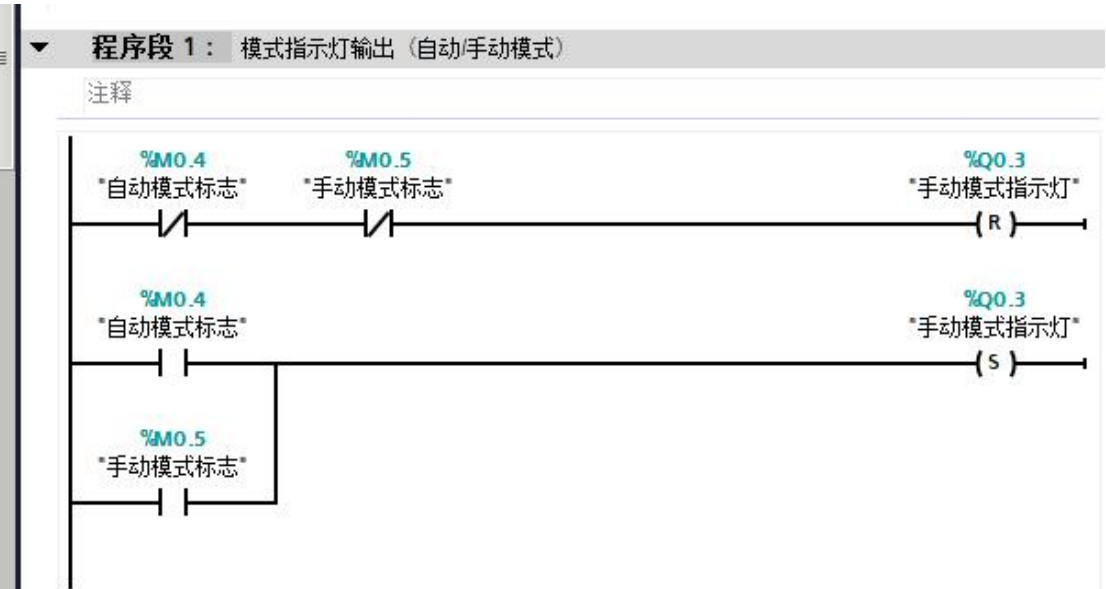
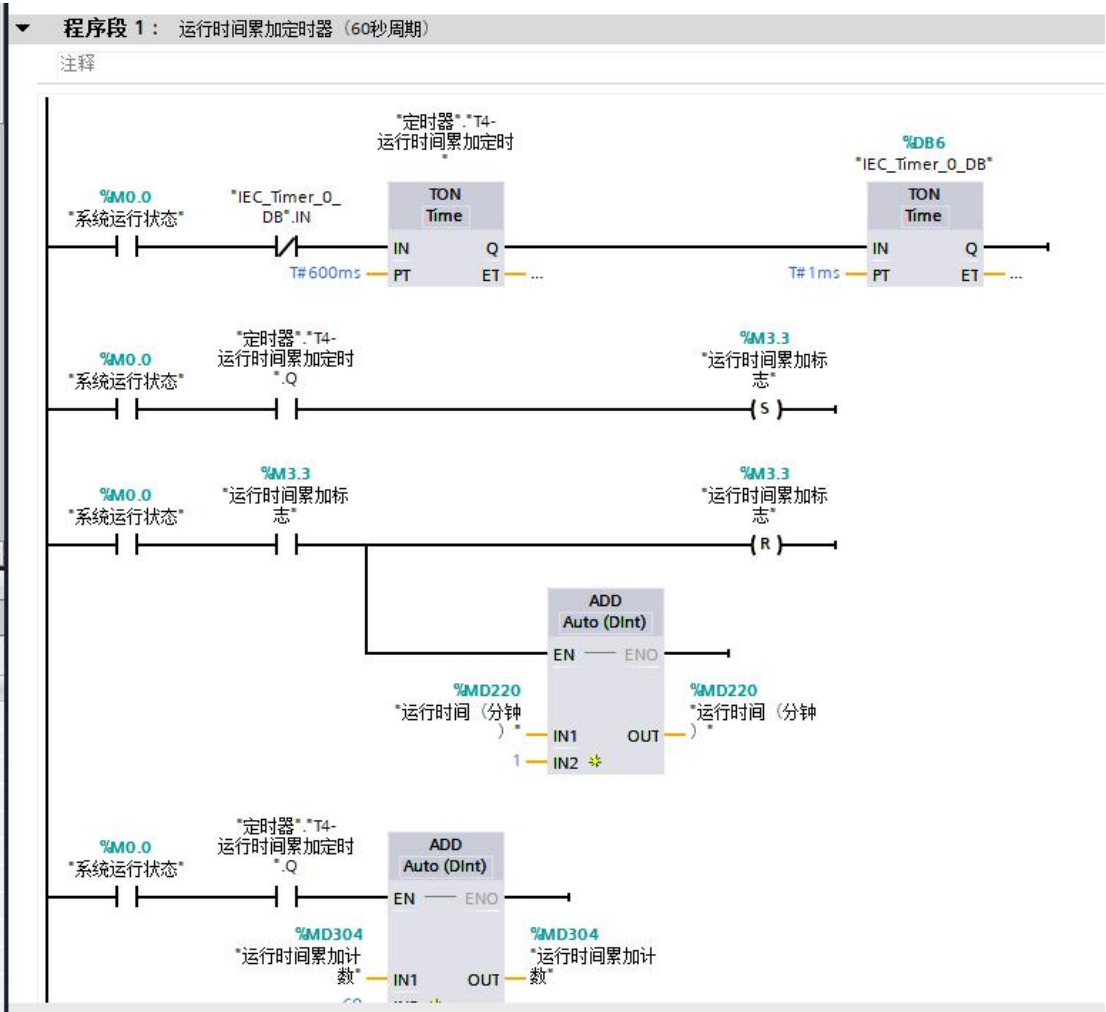
注释

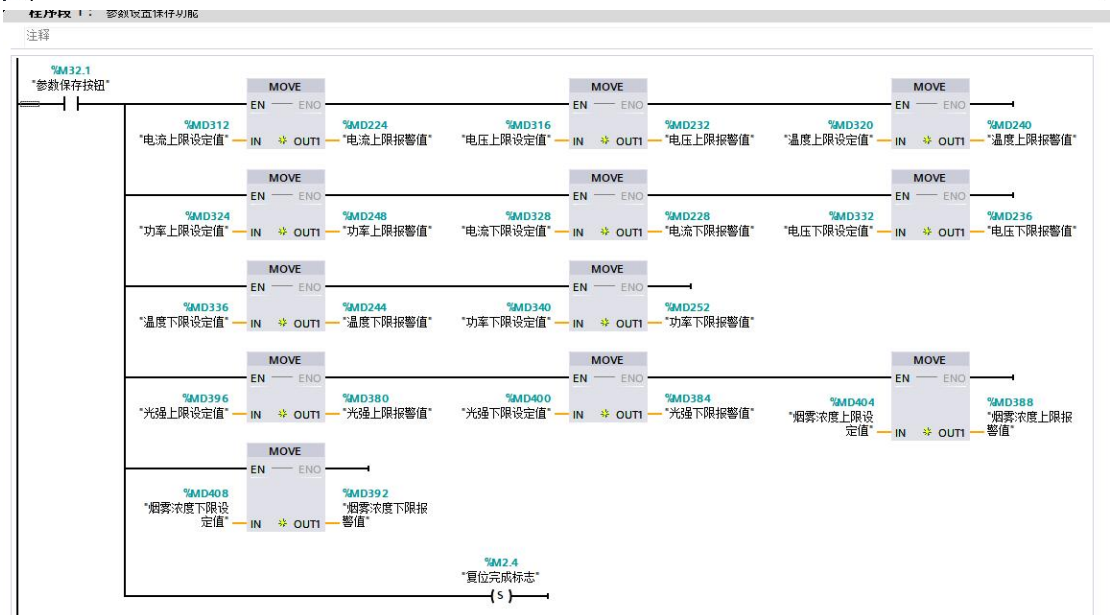
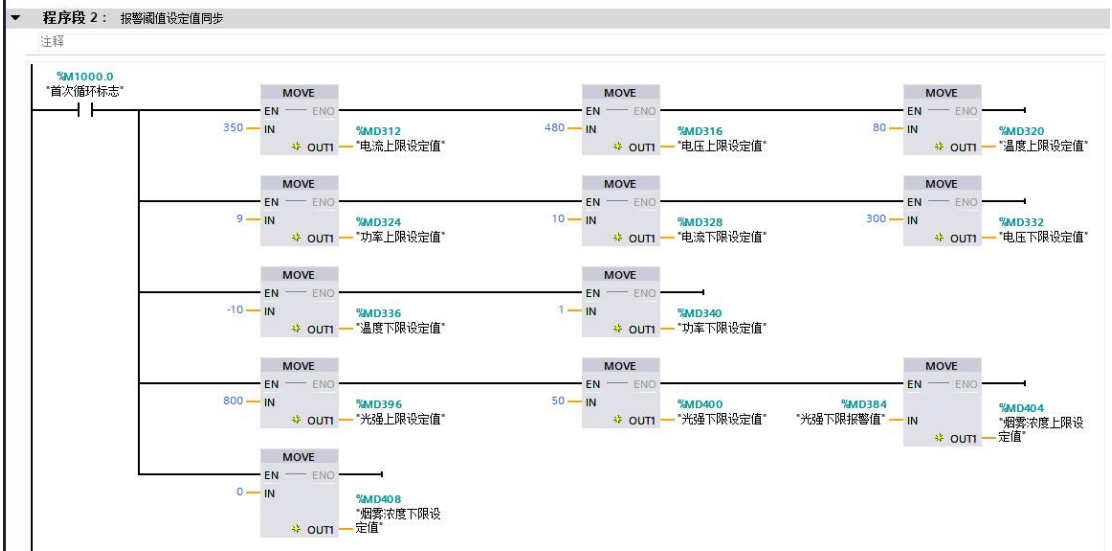
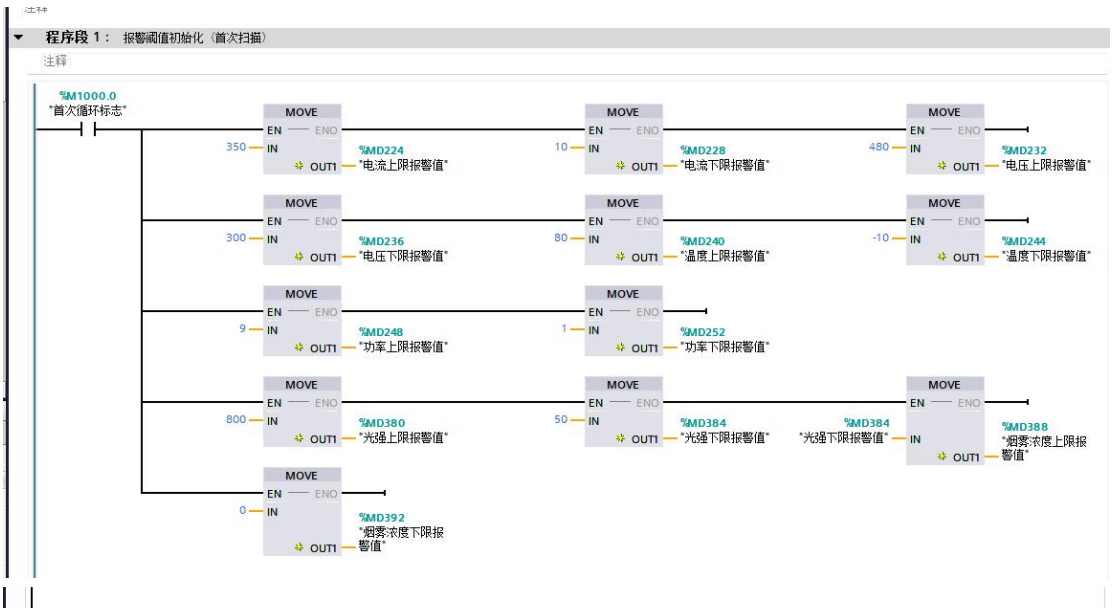


▼ 程序段 5：故障闪烁指示灯输出

注释



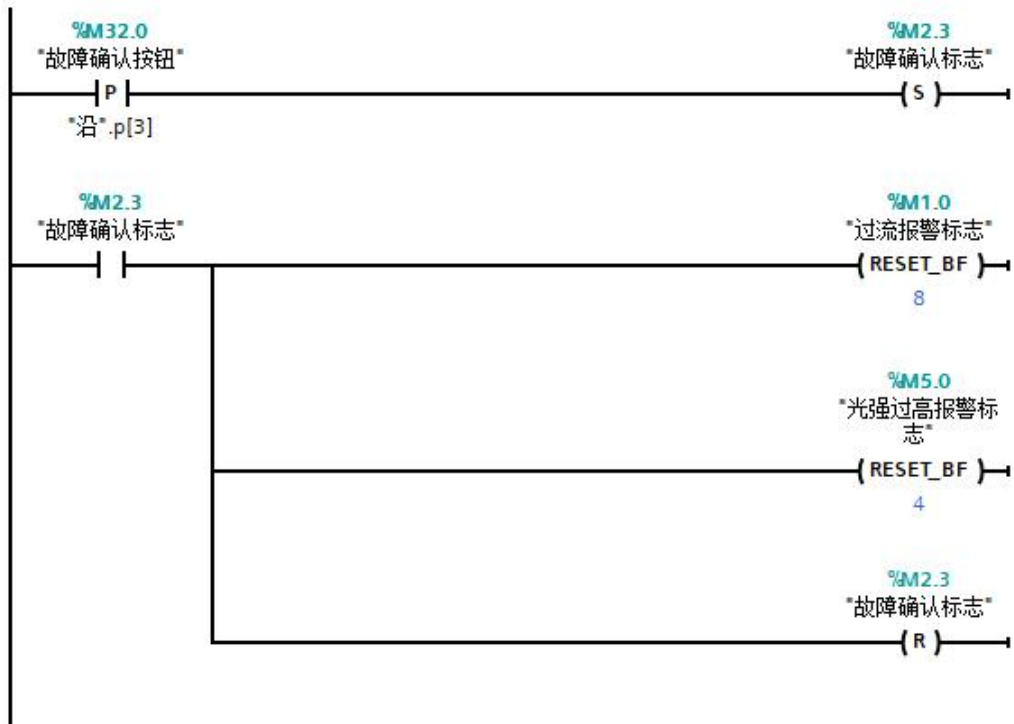






▼ 程序段 3：故障确认功能

注释



▼ 程序段 4：功率异常判断时间设置 (MW344)

注释

