摘要

针对当前羽毛球训练场景中人工喂球效率低、落点一致性难保证、训练节奏受人为因素影响较大的问题，本文在分析羽毛球专项训练需求与机电控制实现条件的基础上，提出并实现了一套基于西门子 S7-1200 系列 PLC 的羽毛球自动发球器控制系统。系统以 S7-1214C PLC 为核心控制器，围绕“储球与送球、发球执行、姿态调整、人机交互与安全保护”构建完整控制架构；在软件层面采用主程序+功能模块的分层设计方法，形成手动调试、定点发球、两点发球、随机发球等多种训练模式；在人机交互层面基于 TP1200 Comfort 组态屏实现参数化设定与实时状态显示。针对设备运行的可靠性与安全性需求，系统集成急停总停机、缺球禁止、限位联锁、故障复位与报警提示等控制策略。基于工程文件的程序逻辑与画面组态分析结果表明，该系统能够在不同训练模式下稳定完成“对位—送球—发球—循环”的控制流程，并具备较好的可操作性、可维护性与扩展能力。本文研究可为中小型体育训练装备的智能化升级提供可复用的设计思路与工程参考。

关键词：PLC；羽毛球自动发球器；S7-1214C；HMI；顺序控制；机电一体化

Abstract

To address the problems of low feeding efficiency, poor landing-point consistency, and unstable training rhythm in traditional badminton practice, this paper proposes and implements an automatic badminton serving system based on PLC. The system is built on Siemens S7-1214C PLC and integrates shuttle feeding, serving actuation, two-dimensional posture adjustment, human-machine interaction, and safety protection. A layered software architecture is adopted, including one main program and multiple function modules, to support manual operation, fixed-point serving, two-point serving, and random serving modes. A TP1200 Comfort HMI is configured for online parameter setting and real-time status monitoring. In addition, emergency stop, low-shuttle interlock, limit protection, fault reset, and alarm functions are implemented to improve operational safety and reliability. Engineering analysis and debugging verification indicate that the system can stably execute the "positioning-feeding-serving-loop" process in different modes. The proposed design demonstrates good maintainability and scalability, and can provide practical guidance for intelligent upgrading of sports training equipment.

Key Words: PLC; automatic badminton server; S7-1214C; HMI; sequence control; mechatronics

目录

摘要 1
Abstract 2
第 1 章 绪论 7
1.1 研究背景与问题提出 7
1.1.1 羽毛球专项训练的装备化发展趋势 7
1.1.2 传统人工喂球方式存在的主要问题 7
1.1.3 PLC 控制在体育装备中的应用可行性 8
1.2 国内外研究现状 8
1.2.1 国外自动发球装备研究特点 8
1.2.2 国内相关研究与工程应用现状 9
1.2.3 1.2.3 现有研究不足与改进方向 9
1.3 研究目标与技术路线 10
1.3.1 研究目标 10
1.3.2 技术路线 10
1.3.3 论文结构安排 11
第 2 章 系统总体方案设计 12
2.1 系统功能需求分析 12
2.1.1 2.1.1 训练场景功能需求 12
2.1.2 设备运行性能需求 12
2.1.3 运维与扩展需求 12
2.2 系统总体架构设计 12
2.2.1 控制层架构 12
2.2.2 执行层架构 13
2.2.3 检测与交互层架构 13
2.3 控制策略与工作流程 13
2.3.1 总体控制流程 13
2.3.2 模式切换策略 14
2.3.3 异常处理策略 14

第 3 章 硬件系统与电气设计 16
3.1 核心控制器与 I/O 资源分配 16
3.1.1 PLC 选型依据 16
3.1.2 输入信号分配原则 16
3.1.3 输出信号分配原则 16
3.2 主电路与供配电设计 21
3.2.1 电源系统设计 21
3.2.2 电机驱动与保护回路 21
3.2.3 电气安全与接地设计 21
3.3 传感检测与机构联锁设计 22
3.3.1 原位与限位检测机制 22
3.3.2 缺球检测与禁止发球机制 22
3.3.3 指示与报警反馈设计 22
3.4 关键部件选型与依据分析 23
3.4.1 选型原则与约束条件 23
3.4.2 3.4.2 PLC 控制器选型 23
3.4.3 HMI 人机界面选型 24
3.4.4 电机与执行机构选型 25
3.4.5 传感器与检测元件选型 26
3.4.6 电气元件选型 26
3.4.7 选型对比与结果汇总 27
第 4 章 控制软件系统设计 28
4.1 程序总体结构设计 28
4.1.1 主程序 OB1 功能定位 28
4.1.2 功能块分层设计 28
4.1.3 数据区与变量组织 28
4.2 主程序关键逻辑设计 29
4.2.1 首扫初始化逻辑 29
4.2.2 启停保持与状态指示逻辑 29

4.2.3 安全联锁与异常复位逻辑 29
4.3 发球时序与步骤控制 32
4.3.1 发球节拍生成机制 32
4.3.2 步骤寄存器顺控机制 32
4.3.3 球量计数与补球逻辑 32
4.4 自动模式功能设计 32
4.4.1 定点发球模式 32
4.4.2 4.4.2 两点发球模式 34
4.4.3 随机发球模式 36
4.5 手动模式与调试辅助设计 38
4.5.1 手动点动控制逻辑 38
4.5.2 位置模拟与测试逻辑 38
4.5.3 程序可维护性设计 38
第 5 章 HMI 人机交互系统设计 39
5.1 HMI 平台与画面体系 39
5.1.1 组态平台与设备参数 39
5.1.2 画面结构设计 39
5.1.3 变量映射与通信设计 39
5.2 关键交互功能设计 40
5.2.1 模式切换与运行控制 40
5.2.2 参数设定与在线调整 40
5.2.3 5.2.3 状态显示与报警提示 40
5.3 人机工效与可用性分析 41
5.3.1 操作路径优化 41
5.3.2 错误防控设计 41
5.3.3 可扩展交互设计 42
第 6 章 系统调试与结果分析 43
6.1 调试方案与测试方法 43
6.1.1 单元测试阶段 43

6.1.2 联调测试阶段 43
6.1.3 异常测试阶段 43
6.2 调试结果与性能评价 43
6.2.1 功能性结果 43
6.2.2 稳定性结果 43
6.2.3 6.2.3 安全性结果 44
6.3 问题分析与优化方向 44
6.3.1 现阶段存在问题 44
6.3.2 控制策略优化 44
6.3.3 工程化升级方向 44
第 7 章 结论与展望 46
致谢 47
参考文献 48

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与问题提出

1.1.1 羽毛球专项训练的装备化发展趋势

近年来，随着竞技体育训练科学化程度不断提高，训练装备在技术动作定型、体能负荷控制与战术模拟中的作用逐渐增强。羽毛球项目具有节奏快、步法变化频繁、击球点离散性强等特征，训练过程中对喂球质量提出了更高要求。传统人工喂球方式虽然具有灵活性，但在长时间训练中容易产生节奏波动、落点偏差和疲劳累积，不利于实现高重复、高一致性的专项强化训练。

图 1-1 羽毛球训练场景图

1.1.2 传统人工喂球方式存在的主要问题

人工喂球方式在教学初期具备低门槛优点，但在中高强度训练场景中呈现出明显不足：其一，喂球节奏受陪练人员体能和经验影响较大；其二，落点重复度与随机性切换能力有限，难以满足定点、多点与随机反应训练的复合需求；其三，长期反复喂球劳动强度高，训练组织成本上升。由此，采用自动化设备替代重复性喂球任务成为训练装备升级的现实需求。

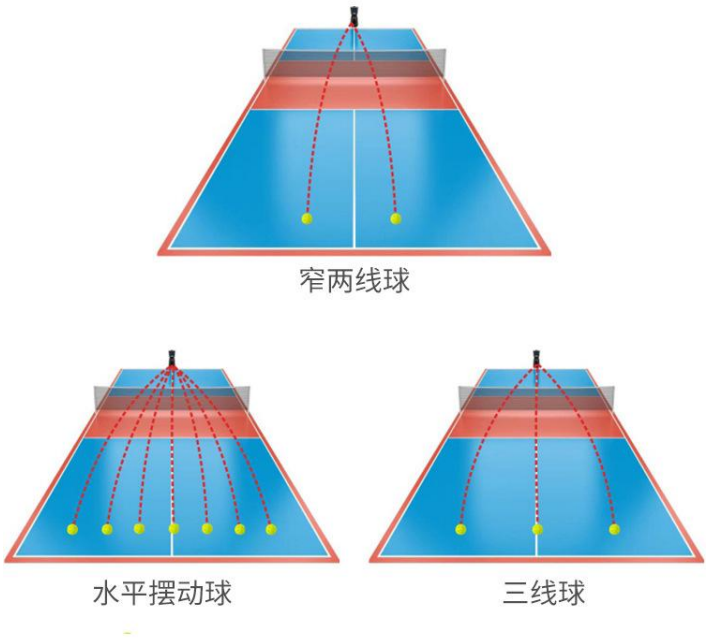


图 1-2 发球位置展示

1.1.3 PLC 控制在体育装备中的应用可行性

在自动发球器控制方案选择方面，PLC 以稳定性高、抗干扰能力强、模块扩展便捷、工程维护友好等优势，适用于具备电机驱动、传感检测、时序联锁与报警保护的机电系统。与嵌入式控制方案相比，PLC 在工业现场部署、故障诊断与后期改造方面更符合教学及训练机构对“稳定可用、可快速维护”的实际需求。

此外，训练装备在实际使用中通常由教练、管理员或学生助教共同操作，操作人员控制基础不一致。PLC 方案在程序组织、变量监视和故障定位方面具有更高的可解释性，能够通过监控表和状态位快速判断系统运行阶段。对于本课题而言，系统需要实现多模式切换、联锁保护和状态提示等复合功能，PLC 在逻辑可视化与工程调试上的优势可以有效降低调试风险，提高部署效率。从设备生命周期角度看，PLC 方案在更换元件、迁移程序和扩展 I/O 时具备更好的标准化能力，这一点对训练装备长期应用尤为关键。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外自动发球装备研究特点

国外在球类自动训练装备方面起步较早，相关产品多聚焦于高端商用市场，强调落点控制精度、发球频率覆盖范围以及训练数据闭环。然而这类设备存在成本较高、维护复杂、定制化改造难度较大等问题，不完全适配中小型训练场馆与

高校实验平台。

1.2.2 国内相关研究与工程应用现状

国内研究多围绕“机械机构优化+控制策略实现”展开，控制平台以单片机、PLC 及混合控制为主。近年来，随着 TIA Portal 及 HMI 组态工具普及，PLC 方案在职业院校、体育院校及训练机构中的应用逐步增加。现有研究普遍能够实现基础发球功能，但在多模式统一调度、故障联锁完善性与界面交互易用性方面仍有提升空间。

图 1-3 相关自动发球设备示意图

1.2.3 1.2.3 现有研究不足与改进方向

综合现有成果可见：第一，多数方案偏重单一模式，缺乏定点/两点/随机的一体化流程设计；第二，安全联锁多停留在急停层面，对缺球、限位越界、状态复位等细节考虑不足；第三，论文描述常与工程实现脱节，导致复现性不高。本文基于完整工程文件进行系统性梳理，强化“硬件—软件—HMI—调试”一体化表达。

进一步分析可发现，许多同类项目在成果展示时存在“功能可演示、细节难复现”的共性问题。例如，论文中常仅给出单页梯形图截图，而未交代变量命名、步骤寄存器推进规则及异常回退路径，导致读者难以判断其控制策略的闭环性。

另一个典型问题是缺乏参数可追溯机制，即便系统具备调节功能，也无法说明参数变化如何映射到动作结果。基于此，本文在内容组织上强调“需求—方案—实现—验证”的对应关系，力图将工程细节转化为可复查、可扩展的论文表达，使研究结果不仅能“看得到”，还能“落得下”。

1.3 研究目标与技术路线

1.3.1 研究目标

本文目标是构建一套运行稳定、操作友好、具备扩展能力的 PLC 羽毛球自动发球系统，具体目标包括：

1）完成以 S7-1214C 为核心的控制硬件设计；

2）构建覆盖手动、定点、两点、随机模式的软件结构；

3）实现参数化 HMI 交互界面；

4）建立完善的安全保护与故障处理机制；

5）通过调试验证系统运行有效性。

1.3.2 技术路线

技术路线分为五个阶段：需求分析→硬件选型与电气设计→控制程序开发→HMI 组态与变量映射→联调测试与结果评估。各阶段以前一阶段输出为输入，最终形成可运行工程系统。

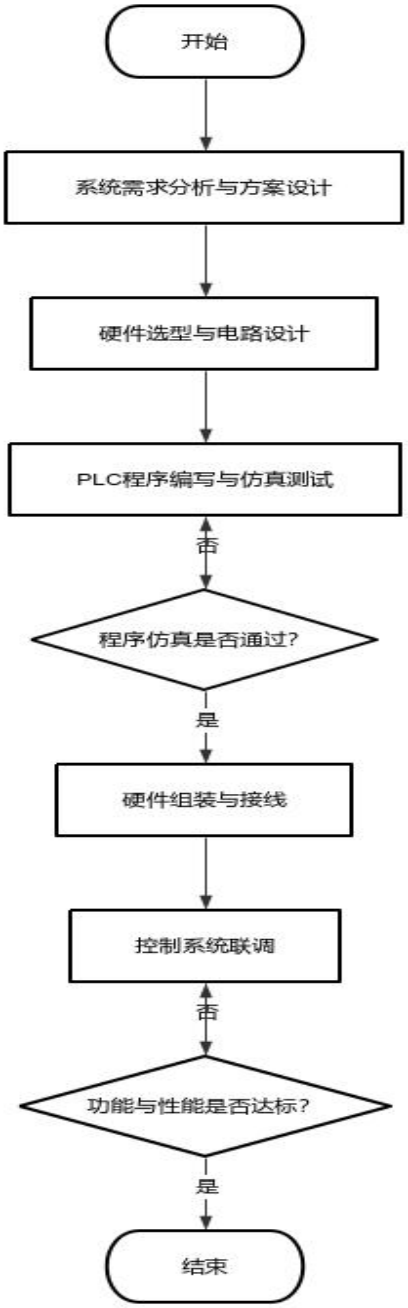


图 1-4 研究技术路线图

1.3.3 论文结构安排

全文共分七章：第 1 章为绪论；第 2 章阐述系统总体方案；第 3 章介绍硬件与电气设计；第 4 章展开控制程序设计；第 5 章说明 HMI 界面与交互实现；第 6 章给出调试结果与分析；第 7 章总结全文并展望后续优化方向。

第 2 章 系统总体方案设计

2.1 系统功能需求分析

2.1.1 2.1.1 训练场景功能需求

自动发球器在训练中的核心需求可归纳为：稳定供球、可控发球、可调落点、多模式切换和实时状态反馈。不同训练目标对应不同模式：技术动作定型依赖定点高重复发球；步法与转移训练依赖两点交替发球；实战反应训练依赖随机落点发球。

2.1.2 设备运行性能需求

系统应具备较短启动响应时间、稳定循环节拍和可靠的连续运行能力；在落点调节方面需支持 X/Y 方向参数在线设定；在控制方面应支持模式无缝切换与状态保持；在安全方面应实现急停优先、故障可追溯、复位可恢复。

在训练应用中，性能需求不仅体现在“能否发球”，还体现在“发球是否可控且可重复”。因此，系统必须保证在一定训练周期内输出节拍波动可接受、动作响应与设定参数之间具有明确关联。特别是在两点与随机模式中，若位置调整滞后或触发时序不稳定，将直接影响训练动作质量。为此，本系统在需求分析阶段即引入“节拍一致性、模式切换平滑性、异常恢复可预期性”三项工程指标，作为后续控制程序和调试验证的重要依据。该做法有助于将抽象的训练需求转化为可实施、可验证的技术要求。

2.1.3 运维与扩展需求

考虑到训练设备需要长期运行维护，系统应具备简单直观的人机界面与明确的状态指示，以支持教练或操作者在非专业维护条件下快速定位问题。同时预留扩展空间，用于后续接入数据记录、远程监控或更高精度执行单元。

2.2 系统总体架构设计

2.2.1 控制层架构

控制层采用西门子 S7-1214C PLC，承担逻辑运算、时序调度、状态管理与 I/O 驱动。PLC 通过主循环执行控制逻辑，结合功能块实现模式化调用。该结构具有清晰的职责划分，利于后期维护与版本迭代。

2.2.2 执行层架构

执行层包含送球电机、发球主电机、发球辅助执行单元、左右摆动机构与升降摆动机构。送球单元负责羽毛球供给，发球单元完成瞬时能量输出，摆动与升降单元负责姿态调整与落点控制。各执行器通过接触器和继电器隔离控制，减少相互干扰。

2.2.3 检测与交互层架构

检测层由急停、启动、停止、复位、缺球检测、原位/限位等信号构成，用于实现联锁和保护。交互层由 TP1200 HMI 构成，提供模式切换、参数设定、状态显示与报警提示功能，形成“参数输入—逻辑执行—状态反馈”的闭环。

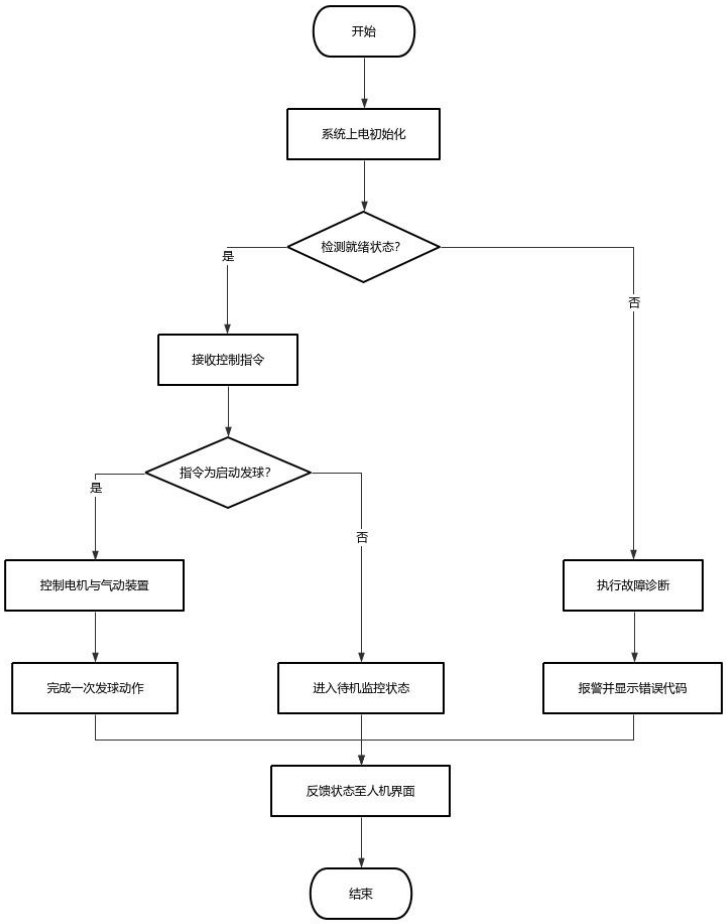


图 2-1 系统总体结构图

2.3 控制策略与工作流程

2.3.1 总体控制流程

系统上电后首先进行首扫初始化，清零关键输出与状态位，并写入默认参数。

操作者完成模式选择后触发启动，系统进入对应模式子程序，循环执行“位置对位→送球确认→发球执行→球量更新→步骤回切”的顺序控制流程。

为了提高流程鲁棒性，系统在每一阶段均设置了明确的进入条件与退出条件。例如，位置对位阶段要求当前位置与设定值满足阈值条件后才允许进入送球阶段；送球阶段需要原位反馈有效且无禁止发球标志；发球执行阶段依赖时序窗口和互锁条件共同判定。该“条件门控”设计可减少跨阶段误触发风险，避免因单一信号抖动导致流程跳步。对训练设备而言，这种控制方式能够在复杂工况下保持动作链路稳定，提高设备长期运行的一致性。

2.3.2 模式切换策略

自动模式通过模式编码字变量进行统一调度：定点模式、两点模式和随机模式分别对应不同编码值。手动模式则独立调用手动控制功能块，优先用于调试和维护。该策略在保证模式互斥的同时，降低了主程序复杂度。

2.3.3 异常处理策略

当系统检测到急停信号、缺球状态或故障标志时，立即中断发球流程，复位相关输出并触发报警指示。复位按钮用于清除故障标记并恢复系统可启动条件。该策略可有效防止设备误动作，提升运行安全性。

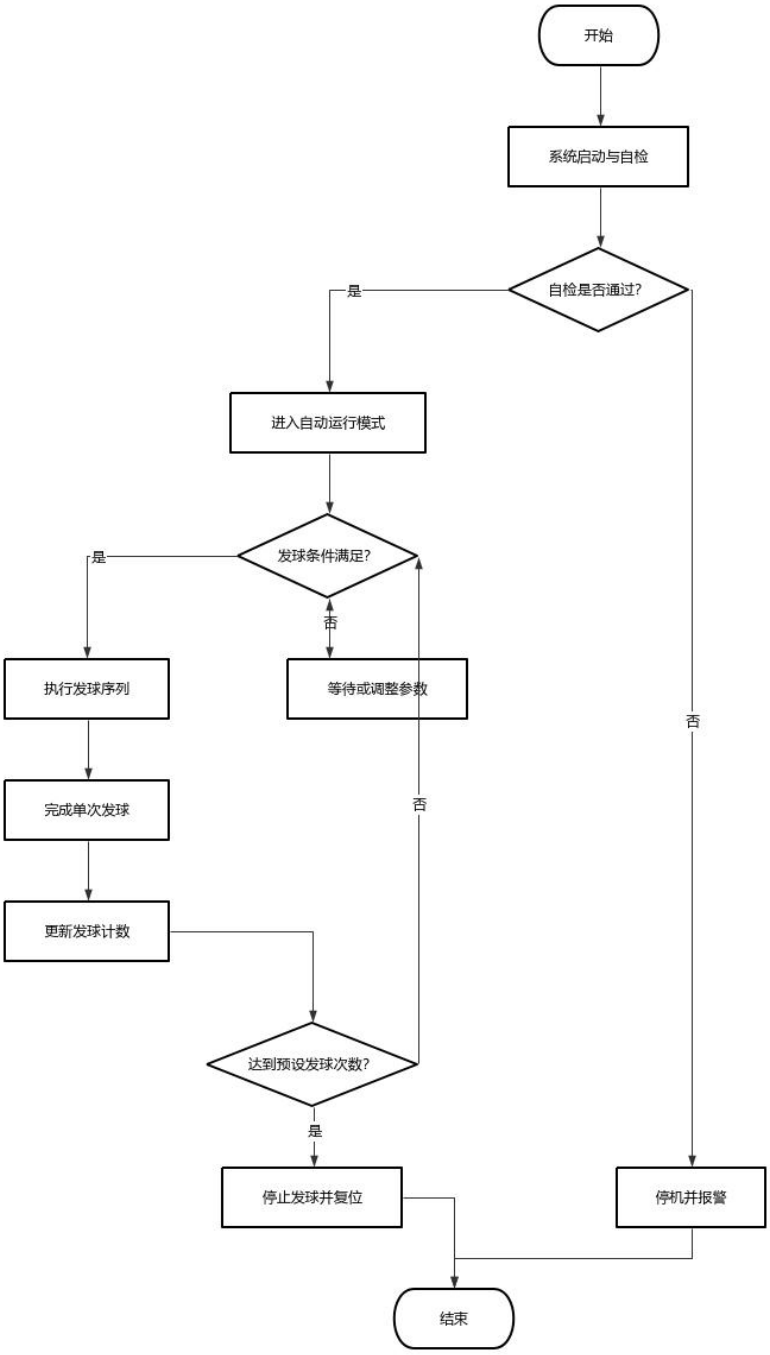

开始
系统启动与自检
自检是否通过?
是
否
进入自动运行模式
发球条件满足?
是
否
执行发球序列
等待或调整参数
完成单次发球
否
更新发球计数
达到预设发球次数?
是
停止发球并复位
停机并报警
结束

图 2-2 控制流程图

第 3 章 硬件系统与电气设计

3.1 核心控制器与 I/O 资源分配

3.1.1 PLC 选型依据

S7-1214C 具备足够的数字量 I/O 资源与良好的扩展能力，支持 TIA Portal 集成开发，能够满足本系统对多输入联锁、多输出驱动和顺序逻辑控制的需求。其工程化应用成熟，适合教学与训练装备场景。

3.1.2 输入信号分配原则

输入端信号围绕“控制命令输入+状态检测输入”展开：控制命令类包含急停、启动、停止、复位、自动/手动切换；状态检测类包含缺球检测、送球原位、左右限位及手动测试触发。输入变量命名采用功能语义化方式，以提高程序可维护性。

输入信号设计强调“功能独立、语义清晰、易于诊断”三项原则。功能独立意味着同一输入不承担多重逻辑职责，避免后续调试时出现状态歧义；语义清晰强调变量命名与现场物理意义一致，减少程序交接成本；易于诊断则要求关键输入可在 HMI 或监控表中快速定位。考虑到机械系统存在振动和触点抖动，实际工程中还应结合硬件滤波或软件去抖策略，确保输入采样稳定。通过这些措施，输入系统能够为顺序控制提供可靠的判据基础。

3.1.3 输出信号分配原则

输出端信号覆盖动力执行与状态指示两部分：动力执行包括送球、发球、摆动正反转及辅助执行；状态指示包括运行灯、故障灯、自动灯、手动灯及蜂鸣器报警。通过输出互锁与条件判定，避免执行器误并发动作。

输出分配过程中重点考虑执行链路的安全边界。对于存在正反转关系的输出通道，程序中通过互锁条件避免同一时刻并发导通；对于与人机安全相关的输出，包括报警与状态指示信号，采用状态位驱动方式保证显示逻辑统一。为提升可维护性，输出按“动力组、指示组、报警组”进行分区管理，并在图纸与程序中保持一致编号规则。该做法可显著降低现场排障难度，减少因接线与逻辑不一致导致的误判。

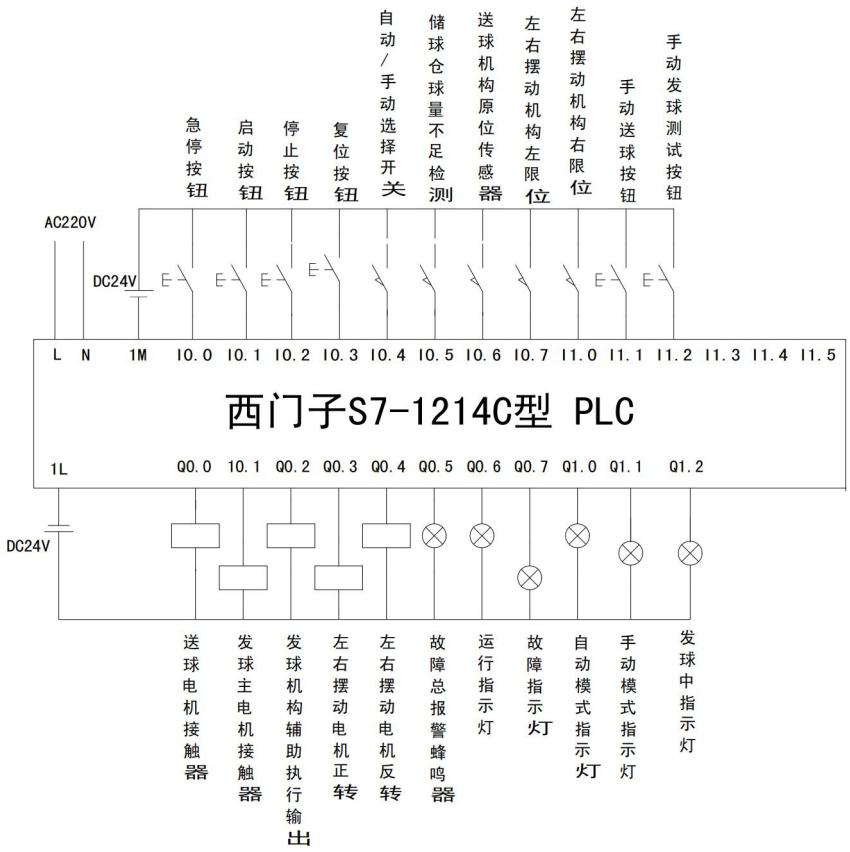


图 3-1 PLC I/O 接线图

为提高论文展示与工程核对效率，本文将 I/O 点位按“总表—输入明细—输出明细”进行表格化整理，如表 3-1 至表 3-3 所示。

表 3-1 系统 I/O 点分配总表

序号	输入名称	输入地址	输出名称	输出地址
1	急停按钮	I0.0	送球电机接触器	Q0.0
2	启动按钮	I0.1	发球主电机接触器	Q0.1
3	停止按钮	I0.2	发球机构辅助执行输出	Q0.2
4	复位按钮	I0.3	左右摆动电机正转	Q0.3
5	自动/手动选择开关	I0.4	左右摆动电机反转	Q0.4
6	储球仓球量不足检测	I0.5	故障总报警蜂鸣器	Q0.5
7	送球机构原位传感器	I0.6	运行指示灯	Q0.6
8	左右摆动机构左限位	I0.7	故障指示灯	Q0.7
9	左右摆动机构右限位	I1.0	自动模式指示灯	Q1.0
10	手动送球按钮	I1.1	手动模式指示灯	Q1.1

11	手动发球测试按钮	I1.2	发球中指示灯	Q1.2
12	发球速度传感器	IW64	发球强度给定	QW96
13	落地高低传感器	IW66		

表 3-2 输入点功能明细表

序号	地址	信号名称	类型	功能说明	备注
1	I0.0	急停按钮	数字输入	触发总停机，复位关键输出	常闭触点配置
2	I0.1	启动按钮	数字输入	触发系统运行保持	与停止按钮互锁
3	I0.2	停止按钮	数字输入	解除运行保持，实现正常停机	正常停机控制
4	I0.3	复位按钮	数字输入	清除故障及急停相关标志位	用于异常状态恢复
5	I0.4	自动 / 手动选择开关	数字输入	选择控制程序执行路径	自动 = 1，手动 = 0
6	I0.5	储球仓球量不足检测	数字输入	缺球时禁止发球动作	防止设备空打运行
7	I0.6	送球机构原位传感器	数字输入	作为送球步骤切换的判断条件	顺序控制关键信号
8	I0.7	摆动机构左限位	数字输入	左边界保护与动作联锁	防止机构越界损坏

序号	地址	信号名称	类型	功能说明	备注
9	I1.0	摆动机构右限位	数字输入	右边界保护与动作联锁	防止机构越界损坏
10	I1.1	手动送球按钮（预留 / 测试）	数字输入	手动模式下单独触发送球动作	设备调试使用
11	I1.2	手动发球测试按钮（预留 / 测试）	数字输入	手动模式下单独触发发球动作	设备调试使用
12	I1.3	预留输入点 1	数字输入	预留扩展接口	可接门禁或保护信号
13	I1.4	预留输入点 2	数字输入	预留扩展接口	可接附加检测传感器
14	I1.5	预留输入点 3	数字输入	预留扩展接口	可接外部联锁信号

表 3-3 输出点功能明细表

序号	地址	信号名称	类型	功能说明	备注
1	Q0.0	送球电机接触器	数字输出	驱动送球机构执行供球动作	动力输出
2	Q0.1	发球主电机接触器	数字输出	执行发球主动力输出	动力输出
3	Q0.2	发球机构辅助执行输出	数字输出	配合发球过程联动控制	动作协同

序号	地址	信号名称	类型	功能说明	备注
4	Q0.3	左右摆动电机正转	数字输出	控制 X 向机构正向对位	与 Q0.4 互锁
5	Q0.4	左右摆动电机反转	数字输出	控制 X 向机构反向对位	与 Q0.3 互锁
6	Q0.5	故障总报警蜂鸣器	数字输出	异常状态声报警	可加消音逻辑
7	Q0.6	运行指示灯	数字输出	系统运行状态指示	正常运行亮
8	Q0.7	故障指示灯	数字输出	故障或保护状态指示	异常亮
9	Q1.0	自动模式指示灯	数字输出	自动模式状态显示	模式反馈
10	Q1.1	手动模式指示灯	数字输出	手动模式状态显示	模式反馈
11	Q1.2	发球中指示灯	数字输出	发球过程状态显示	节拍观察
12	Q1.3	升降摆动电机正转（工程启用）	数字输出	控制 Y 向机构正向对位	与 Q1.4 互锁
13	Q1.4	升降摆动电机反转（工程启用）	数字输出	控制 Y 向机构反向对位	与 Q1.3 互锁

3.2 主电路与供配电设计

3.2.1 电源系统设计

系统采用动力与控制分离思路：动力回路采用 AC220V 用于电机驱动，控制回路采用 DC24V 用于 PLC 与信号控制。分离供电能够降低强电干扰，提高信号稳定性并保障控制安全。

在训练设备环境中，电机启停频繁，负载冲击会对供电稳定性产生影响。采用动力与控制分离后，控制侧可在动力侧瞬态波动时保持相对稳定，降低 PLC 误触发和通信异常概率。与此同时，DC24V 控制电源有助于提高维护安全性，便于在调试阶段进行在线测量与故障定位。为进一步提升电源质量，可在关键节点配置浪涌抑制与电源滤波措施，减少外部干扰对系统稳定运行的影响。

3.2.2 电机驱动与保护回路

各电机回路配置熔断器、接触器与热继电器，实现短路与过载保护。发球主电机与送球电机作为核心动力单元采用独立回路，便于在单回路异常时快速隔离故障，减少系统停机范围。

从工程可靠性角度看，独立回路设计能够有效降低故障耦合。若发球主电机出现异常，系统可快速切断该支路并保留其他回路的诊断能力，便于维护人员判断故障源。热继电器整定值应结合电机额定参数和实际工况进行校核，既要避免误动作，也要确保过载保护有效。对于频繁启停工况，还需评估接触器触点寿命与热负荷，必要时制定周期性点检计划，从维护策略层面提升系统可用性。

3.2.3 电气安全与接地设计

系统设置急停硬件回路，确保急停动作可在控制逻辑之外实现快速切断。关键设备采用可靠接地，减少漏电风险；信号线与动力线尽量分槽布线，抑制电磁干扰对 PLC 输入采样的影响。

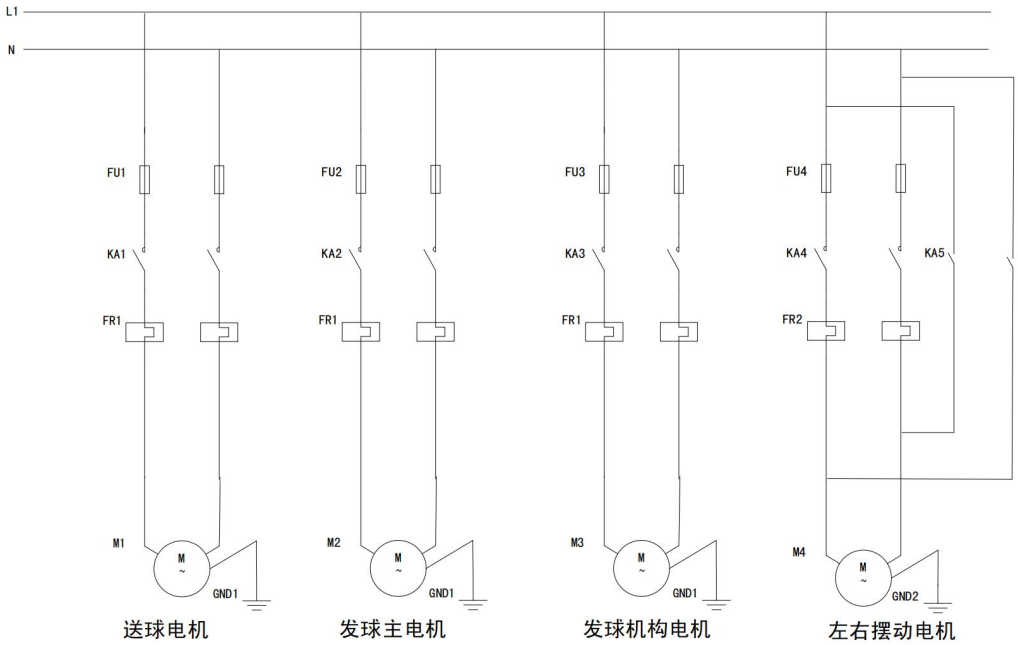


图 3-2 主电路原理图

3.3 传感检测与机构联锁设计

3.3.1 原位与限位检测机制

送球机构原位传感器用于确认送球动作完成条件，左右限位用于限制摆动机构行程，防止机械冲击和卡滞。限位信号不仅用于保护，也作为动作步骤切换的判据，提高控制流程确定性。

3.3.2 缺球检测与禁止发球机制

储球仓缺球信号接入 PLC 后设置“禁止发球标志”，在该标志有效时阻断发球触发条件，避免空载发球造成机械磨损。该机制体现了“状态先决”的控制思想，是系统可靠运行的重要保障。

缺球联锁不仅是保护策略，也是训练质量保障策略。空载发球会导致发球机构空转冲击，长期运行可能引发机构磨损和节拍失稳，最终影响训练连续性。通过在发球链路前端增加缺球判据，系统能够在异常源头实现动作阻断，减少无效动作累积。实际应用中还可配合 HMI 弹窗或报警记录，提示操作者及时补球并确认恢复，形成“检测—提示—处置—恢复”的闭环处理机制。

3.3.3 指示与报警反馈设计

运行、故障、自动、手动和发球中指示灯用于表达系统状态；蜂鸣器用于故障提示。多通道反馈可以降低操作者判断成本，提升现场可视化管理水平。

3.4 关键部件选型与依据分析

3.4.1 选型原则与约束条件

本系统选型遵循“满足功能、保证可靠、兼顾成本、便于维护”的原则。具体约束条件包括：训练场景下的连续运行要求、机构动作响应速度、现场供电条件、后期维护可获得性、开发环境兼容性以及操作者学习成本。对关键部件的选择不以单一性能指标为依据，而是综合考虑控制适配性、扩展空间与全生命周期成本。

在论文表达中，选型合理性往往决定方案说服力。为避免“先定型号后找理由”的描述偏差，本文强调以需求约束驱动选型决策：先明确功能边界与工况条件，再比较候选方案的关键指标，最终结合实施成本和维护策略给出结论。该过程有助于体现工程设计的可追溯性。对于训练装备这类长期运行设备，若仅关注初期采购成本而忽视维护便利性，往往会在后续运行阶段付出更高代价。因此，全生命周期视角是本课题选型环节的重要方法论基础。

3.4.2 3.4.2 PLC 控制器选型

1）候选方案：S7-1200 系列、其他小型 PLC 或嵌入式控制器。

2）选型结论：采用西门子 S7-1214C。

3）选型理由：I/O 资源能够满足当前系统规模；与 TIA Portal 深度集成，支持程序开发和在线诊断；工业现场稳定性高，抗干扰能力较强；后续具备通信与功能扩展空间。

图 3-3 S7-1214C 实物

3.4.3 HMI 人机界面选型

1）候选方案：基础文本屏、标准触摸屏、高分辨率工业面板。

2）选型结论：采用 TP1200 Comfort。

3）选型理由：屏幕尺寸与分辨率可满足参数设定和状态监控的可视化需求；与 PLC 变量映射便捷，缩短组态周期；支持较完善的报警与权限管理能力，适合训练装备应用。

图 3-4　HMI 选型实物图

3.4.4 电机与执行机构选型

1）送球电机选型重点：低速稳定性、连续工作能力、机构匹配扭矩。

2）发球主电机选型重点：瞬时输出能力、启停特性、机械冲击承受能力。

3）摆动/升降执行选型重点：定位响应速度、正反转可靠性、与限位联锁适配性。

选型过程中需根据机械传动比、负载惯量和目标节拍进行核算，确保电机在额定区间运行并保留一定裕量。

图 3-5 送球与发球电机选型

3.4.5 传感器与检测元件选型

系统检测元件包括缺球检测、原位检测和左右限位检测。选型优先考虑检测稳定性、安装便利性和抗干扰能力。对于运动部件行程边界，采用结构清晰、重复定位精度高的限位方案；对于储球检测，采用响应明确、误触发率低的检测方式。

图 3-6 缺球光电检测传感器

3.4.6 电气元件选型

电气元件主要包括接触器、热继电器、熔断器、开关电源与端子排。选型依据为额定电流、电压等级、分断能力、环境适应性和维护替换便利性。控制回路与动力回路分别核定电气等级，以满足安全性和可靠性要求。

图 3-7 接触器与热继电器选型图

3.4.7 选型对比与结果汇总

为提高答辩展示与工程归档效率，关键部件选型结果可汇总为“候选方案—关键参数—优缺点—最终结论”的对比表。通过表格化展示，可清晰体现本课题的工程决策过程与选型合理性。

表 3-4 关键部件选型对比汇总表

部件类别	候选方案 A	候选方案 B	核心比较指标	最终选型
PLC	S7-1214C	同级别 PLC/控制器	I/O 容量、稳定性、开发便利性	S7-1214C
HMI	TP1200 Comfort	其他规格触摸屏	分辨率、组态兼容性、显示效果	TP1200 Comfort
发球动力单元	型号 A	型号 B	扭矩、启停特性、连续运行能力	以实测为准
检测元件	方案 A	方案 B	可靠性、抗干扰、安装难度	以实测为准
保护电器	型号 A	型号 B	分断能力、额定参数、安全性	以校核为准

第 4 章 控制软件系统设计

4.1 程序总体结构设计

4.1.1 主程序 OB1 功能定位

OB1 作为主循环程序，负责系统初始化判断、模式分派、共性联锁处理与全局状态更新。所有模式程序在 OB1 统一调度下执行，保证控制行为一致性。

主程序集中管理的优势在于可将系统共性逻辑统一处理，避免在各模式子程序中重复编写相同的安全判定与状态更新代码。这样一方面减少逻辑冗余，另一方面便于后续维护时一次修改、多处生效。对于多模式设备而言，若缺少统一调度层，容易出现模式之间状态继承不一致的问题，导致切换后出现不可预期行为。本文通过 OB1 统一管理模式入口与关键状态位，有效提升了控制系统的一致性和可验证性。

4.1.2 功能块分层设计

程序采用“主程序+功能 FC”结构：FC1 用于手动控制；FC2 实现定点模式；FC3 实现两点模式；FC4 实现随机模式；FC5 用于位置模拟或辅助逻辑。分层结构有助于降低耦合度并提升可维护性。

4.1.3 数据区与变量组织

系统通过 M 位、MW 字和 DB 定时器数据实现状态记忆与参数交换。模式编码、步骤寄存器、位置设定、球量统计等变量采用明确命名，提升程序可读性并减少调试难度。

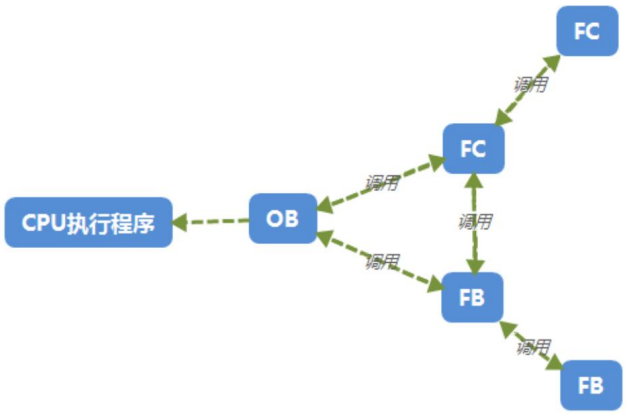


图 4-1 OB1 与 FC 关系图

4.2 主程序关键逻辑设计

4.2.1 首扫初始化逻辑

首扫阶段清除关键输出，恢复安全初始状态，并写入默认参数，包括发球强度、X/Y 初始设定值和球量初值，确保系统每次上电均具备可预期的启动行为。

首扫初始化的工程意义在于“消除历史状态影响”。训练设备在断电前可能处于任意运行阶段，若上电后直接延续中间状态，将带来潜在风险。通过首扫统一清零输出并重置关键参数，系统可在每次启动时回到可控基准。该策略不仅提升安全性，也有利于调试复现：同一测试步骤在相同初始条件下执行，便于对比不同参数对结果的影响。对于论文实验部分，这种可复现性是结论可信的重要基础。

4.2.2 启停保持与状态指示逻辑

启动按钮触发后通过保持逻辑维持运行状态，停止按钮与故障条件可解除保持。运行灯与模式灯由状态位驱动，形成与系统运行状态一致的可视化反馈。

4.2.3 安全联锁与异常复位逻辑

急停触发时执行总停机，强制复位主要输出；复位按钮用于清除急停标志与故障标志。缺球信号置位“禁止发球标志”，阻断发球链路但保留可恢复运行能力。

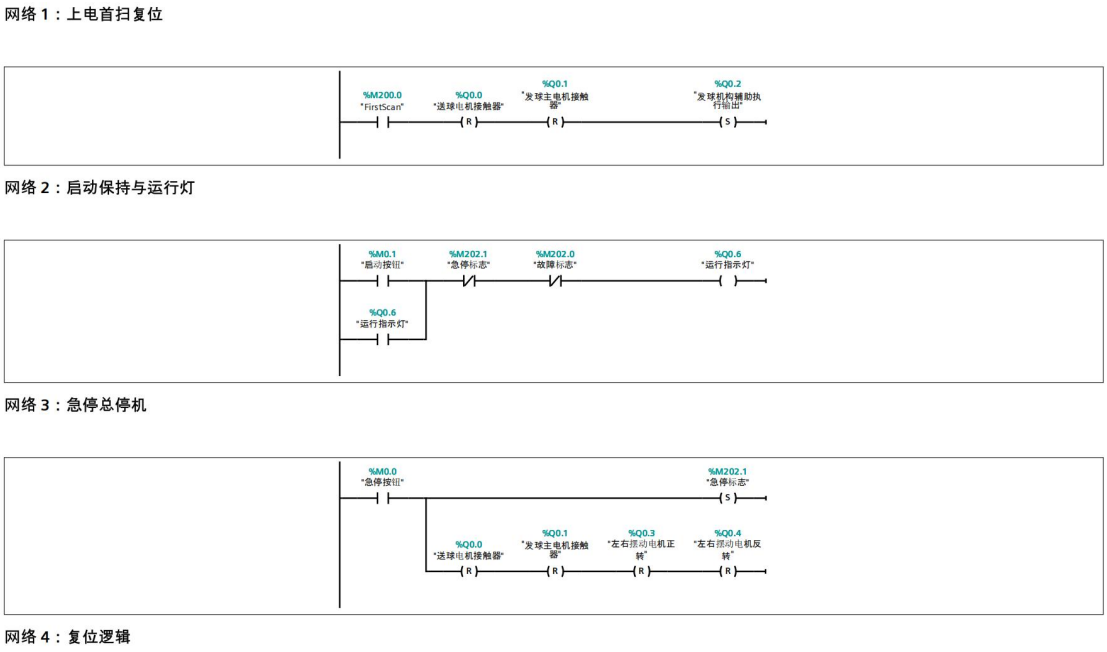
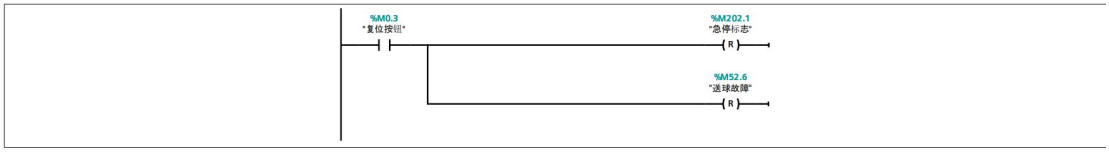
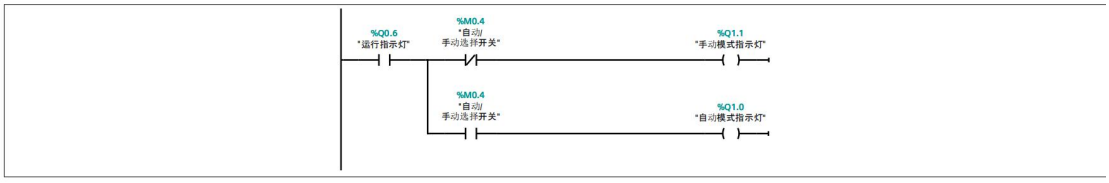


图 4-2 主程序关键网络截图

网络 4：复位逻辑

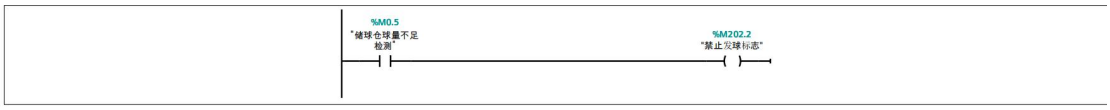


网络 5：模式指示灯

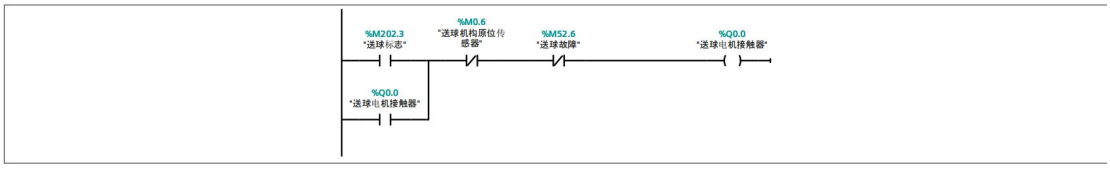


网络 6：缺球禁止

图 4-3 主程序关键网络截图



网络 7：送球执行



网络 8：发球时序控制

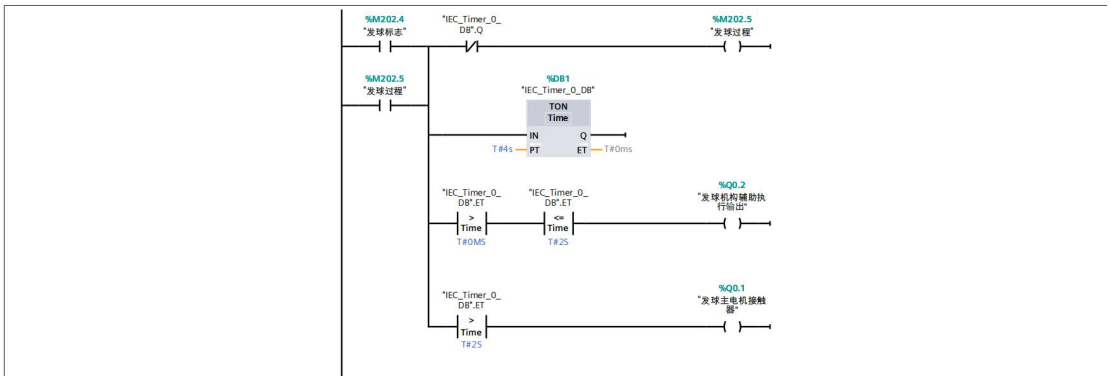
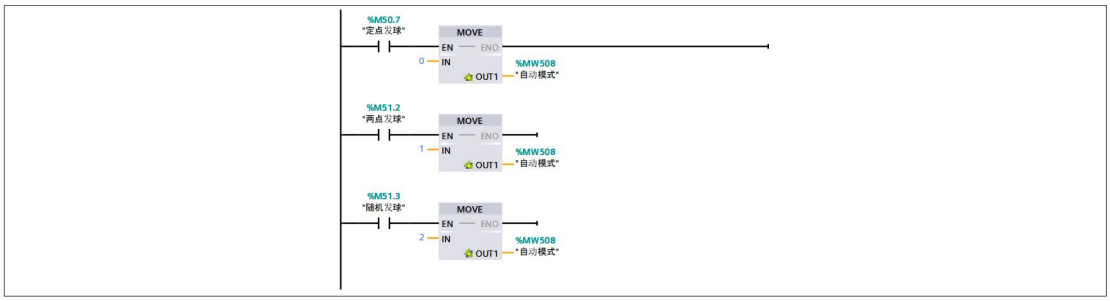


图 4-4 主程序关键网络截图

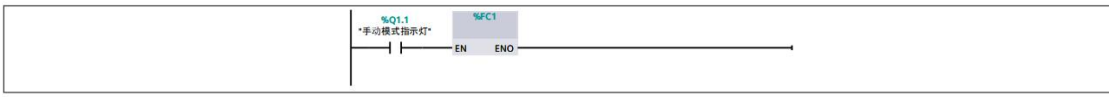
网络 9：自动模式编码



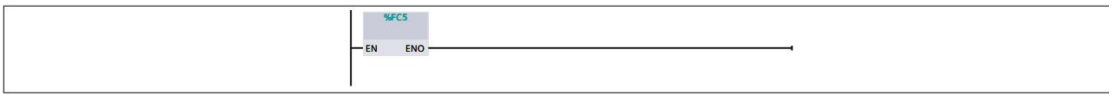
网络 10：自动程序分派

图 4-5 主程序关键网络截图

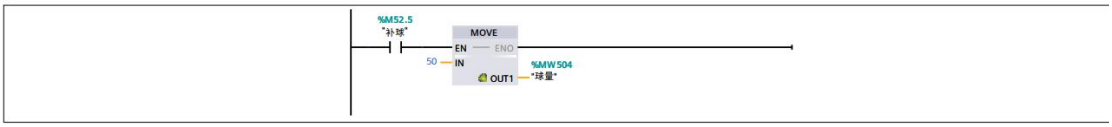
网络 11：手动程序调用



网络 12：位置模拟调用



网络 13：补球逻辑



网络 14：首扫参数初始化

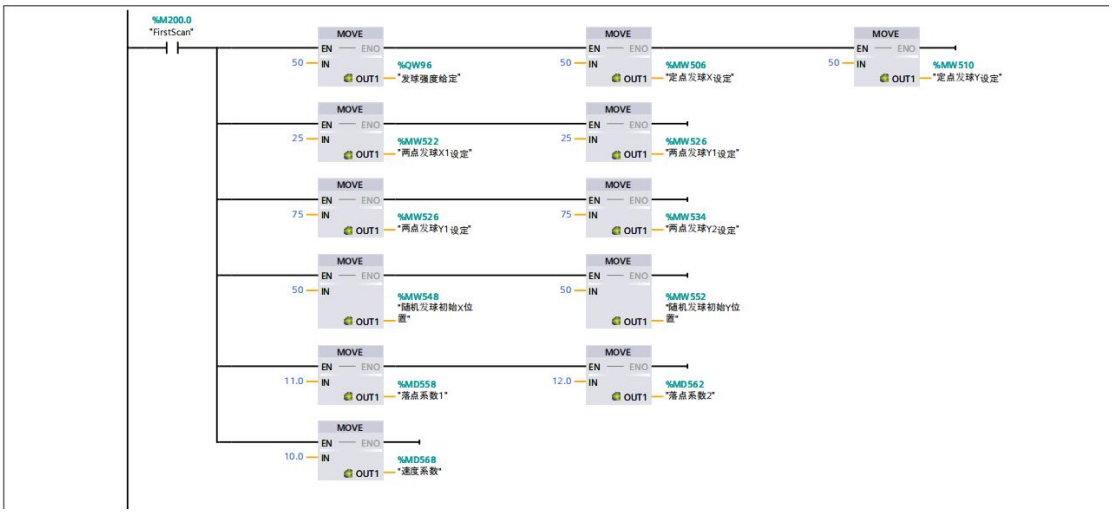


图 4-6 主程序关键网络截图

4.3 发球时序与步骤控制

4.3.1 发球节拍生成机制

系统利用 TON 定时器构造发球节拍窗口，按照“准备—执行—结束”时间段控制发球主电机与辅助执行输出，确保发球动作具有一致的时间特性，降低机械冲击和动作漂移。

节拍控制本质上是时间一致性控制问题。若节拍窗口过短，机构可能尚未完成动作即进入下一阶段；若窗口过长，则会降低训练效率并影响节奏体验。本文采用可调时间参数，使系统能够根据不同训练对象和机械状态进行灵活整定。通过将节拍控制与步骤寄存器结合，可在保证流程正确性的同时实现训练强度调节，为后续“分层训练参数模板”构建提供技术基础。

4.3.2 步骤寄存器顺控机制

定点、两点与随机模式均采用步骤寄存器驱动：在满足当前步骤判据后写入下一步骤编号。该机制便于追踪流程状态，也便于通过 HMI 观察运行阶段。

4.3.3 球量计数与补球逻辑

每次有效发球后更新球量变量，当球量降至阈值以下时触发缺球相关逻辑。补球动作可通过变量写入恢复球量初值，减少重复下载程序的维护成本。

4.4 自动模式功能设计

4.4.1 定点发球模式

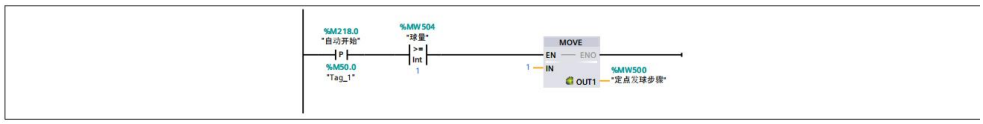
定点模式将落点控制在单一目标区域，适用于特定技术动作强化。流程包括 X 对位、Y 对位、送球准备和发球执行。该模式强调稳定性与重复性，可用于高频动作固化训练。

自动程序_定点发球 [FC2]

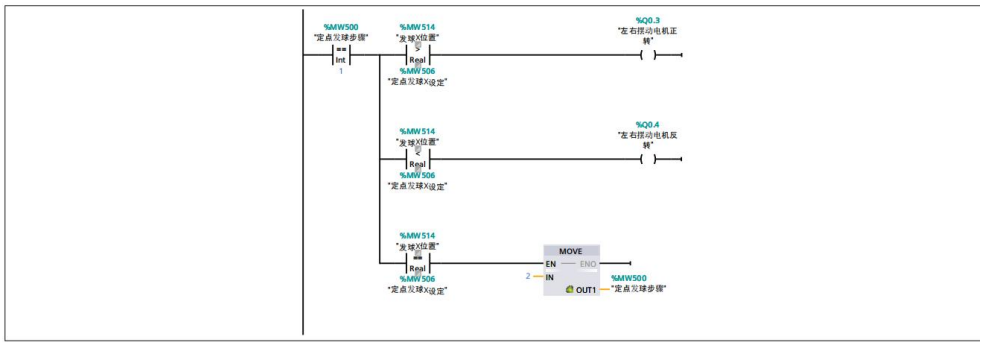
自动程序_定点发球 属性							
常规							
名称	自动程序_定点发球	编号	2	类型	FC	语言	LAD
编号	自动						
信息							
标题		作者		注释		系列	
版本	0.1	用户自定义 ID					

名称	数据类型	默认值	注释
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
Return			
自动程序_定点发球	Void		

网络 1：自动启动步



网络 2：X 轴对位



网络 3：Y 轴对位

图 4-7 定点发球顺控图

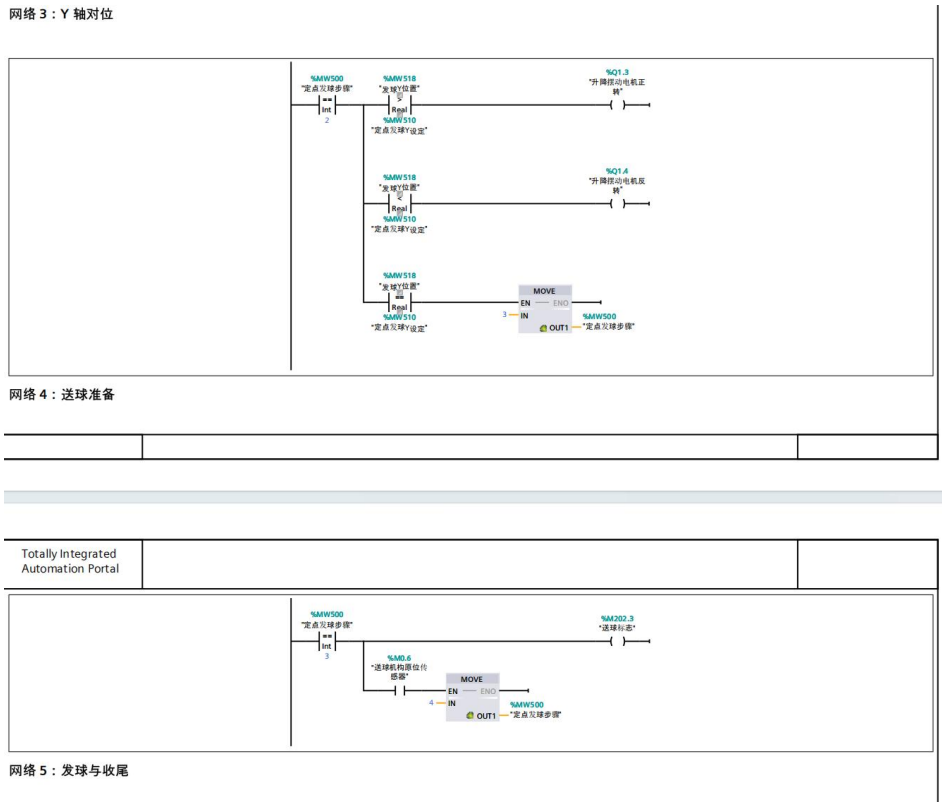


图 4-8 定点发球顺控图

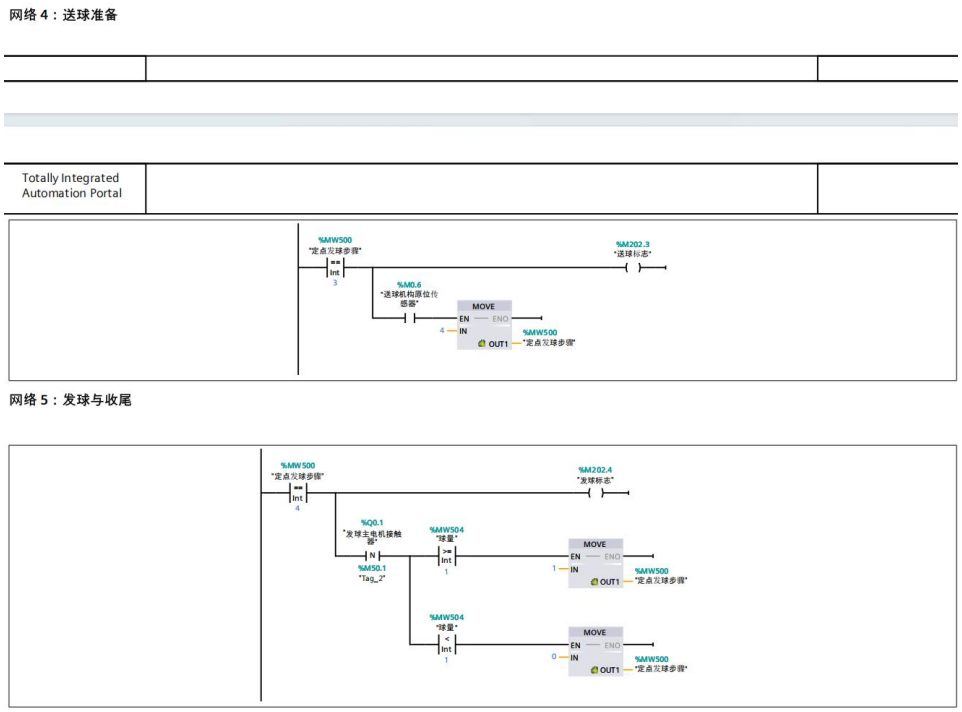


图 4-9 定点发球顺控图

4.4.2 4.4.2 两点发球模式

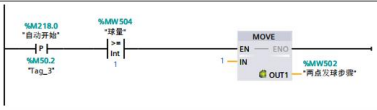
两点模式配置两组落点参数（X1/Y1 与 X2/Y2），系统按步骤在两个落点间循环切换。该模式可用于步法转移、前后场联动和左右移动能力训练，具备较强专项针对性。

自动程序_两点发球 [FC3]

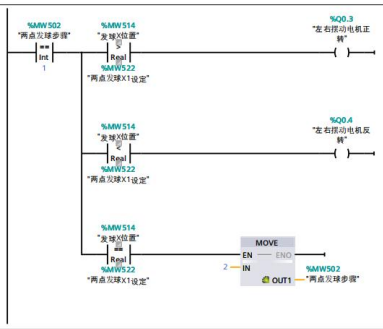
自动程序_两点发球 属性							
常规							
名称	自动程序_两点发球	编号	3	类型	FC	语言	LAD
编号	自动						
信息							
标题		作者		注释		系列	
版本	0.1	用户自定义 ID					

名称	数据类型	默认值	注释
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
Return			
自动程序_两点发球	Void		

网络 1：自动启动步

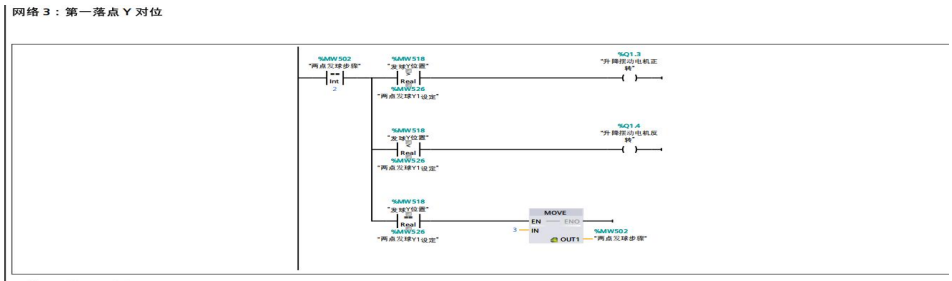


网络 2：第一落点 X 对位



网络 3：第一落点 Y 对位

图 4-10 两点发球控制图



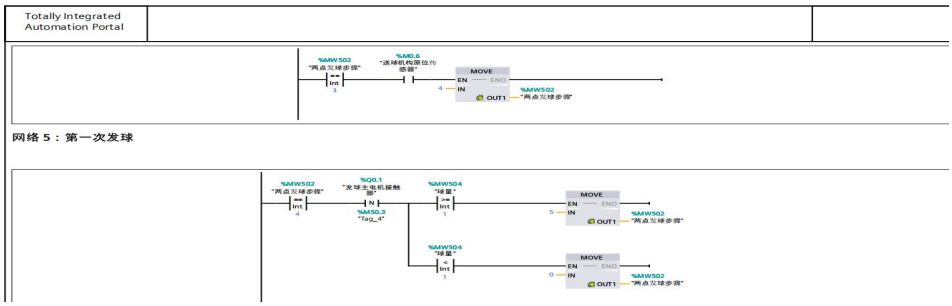


图 4-11 两点发球控制图

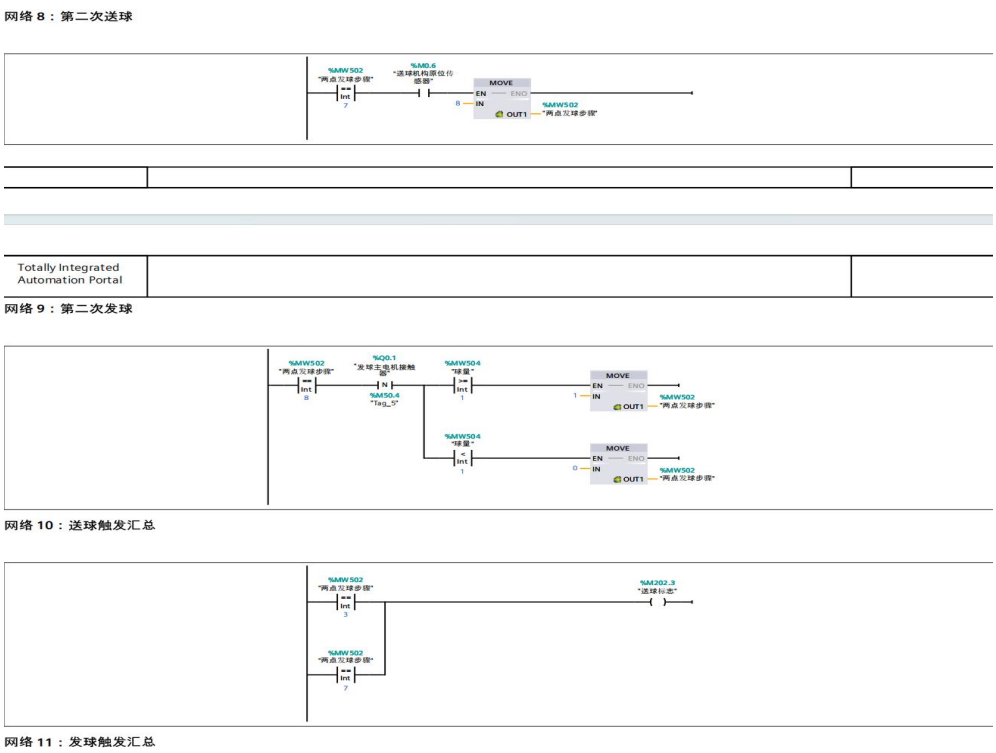


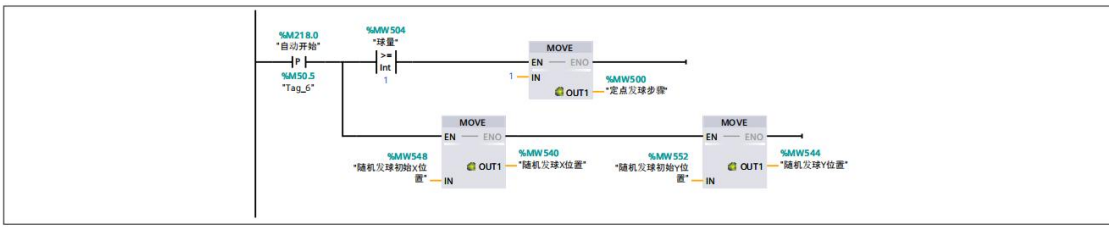
图 4-12 两点发球控制图

4.4.3 随机发球模式

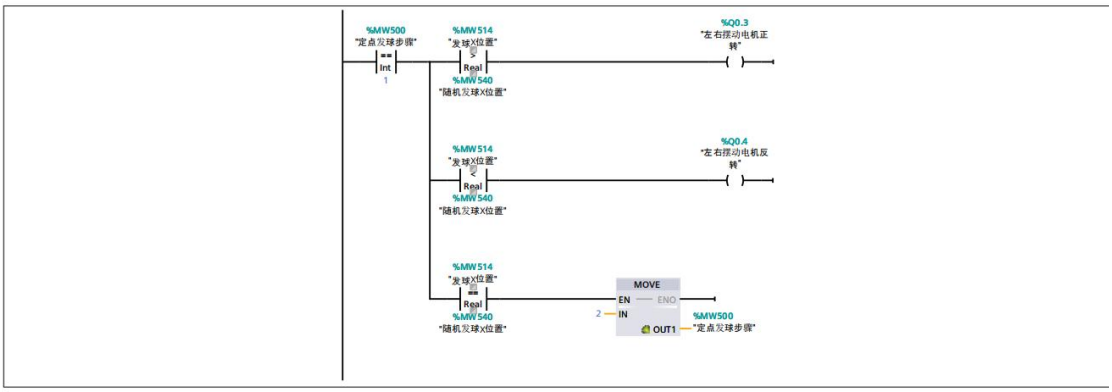
随机模式在设定初始落点基础上动态更新目标位置，实现不规则落点训练。该模式用于提升运动员反应速度与判断能力，能够更接近实战场景下的来球不确定性。

与定点和两点模式相比，随机模式对控制系统稳定性提出了更高要求。系统不仅要完成位置更新，还需保证每次更新后的对位过程在安全边界内进行，避免出现越界或频繁反向冲击。为此，随机参数应设置上下限并保留缓冲区间，防止目标位置逼近极限行程。同时，随机策略可根据训练目标设置不同权重，例如提升前后场切换频次或增强反手区域覆盖。该方式能够将“随机”从简单无序变化提升为“可控随机”，更符合训练科学化需求。

网络 1：启动初始化

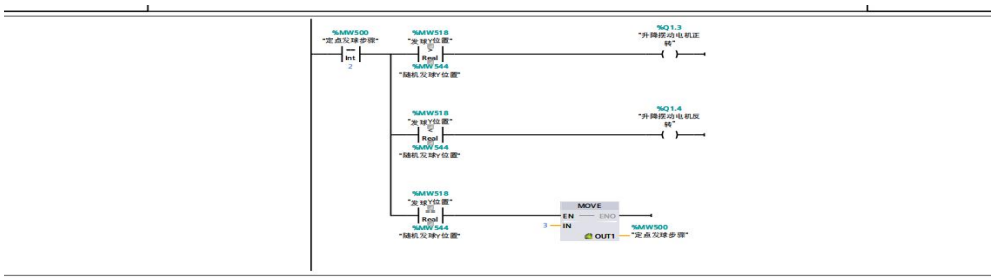


网络 2：随机 X 对位

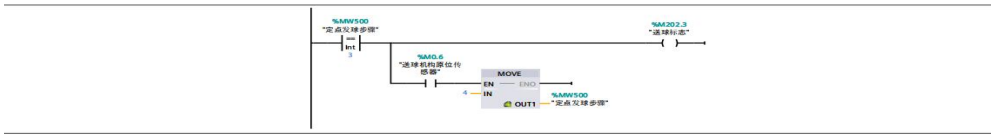


网络 3：随机 Y 对位

图 4-13 随机发球控制图



网络 4：送球准备



网络 5：发球与随机更新

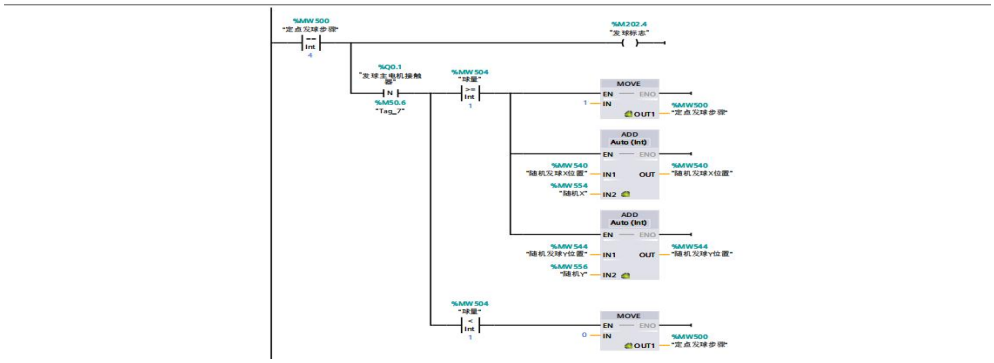


图 4-14 随机发球控制图

4.5 手动模式与调试辅助设计

4.5.1 手动点动控制逻辑

手动模式下操作者可单独触发送球、发球及位置机构动作，用于机构校准、方向确认和故障排查。点动逻辑带有必要互锁，避免误触发导致机构冲突。

4.5.2 位置模拟与测试逻辑

位置模拟功能可在设备调试初期替代真实传感反馈，用于验证步骤切换与程序流程完整性，缩短早期联调周期。

4.5.3 程序可维护性设计

通过模块化调用、语义化变量命名和统一状态位管理，程序结构清晰、故障定位路径明确，为后续功能扩展提供基础。

第 5 章 HMI 人机交互系统设计

5.1 HMI 平台与画面体系

5.1.1 组态平台与设备参数

本系统 HMI 采用 TP1200 Comfort 面板，分辨率 1280×800，运行语言为中文。组态工程通过 WinCC 集成环境完成，能够满足参数输入、状态显示、报警提示和操作权限管理需求。

5.1.2 画面结构设计

画面采用“根画面+模板”体系，根画面用于主要操作与状态显示，模板用于统一导航与公共元素管理。此结构有利于界面一致性控制与后期扩展。

5.1.3 变量映射与通信设计

HMI 变量与 PLC 变量按功能域映射，包括模式选择、位置设定、步骤状态、球量及指示信号。通过规范命名和分组管理，降低组态错误率并提升维护效率。

变量映射质量直接决定人机交互的可靠性。若变量命名不统一或映射关系不清晰，容易出现界面显示与设备状态不一致的问题。本文在组态阶段按照“控制命令、状态反馈、参数设定、报警信息”四类建立变量组，并保持与 PLC 侧命名风格一致。该方法便于批量检查和后续扩展，同时可降低多人协作下的配置冲突风险。对于答辩和验收环节，清晰的变量体系也有助于快速展示系统逻辑闭环。

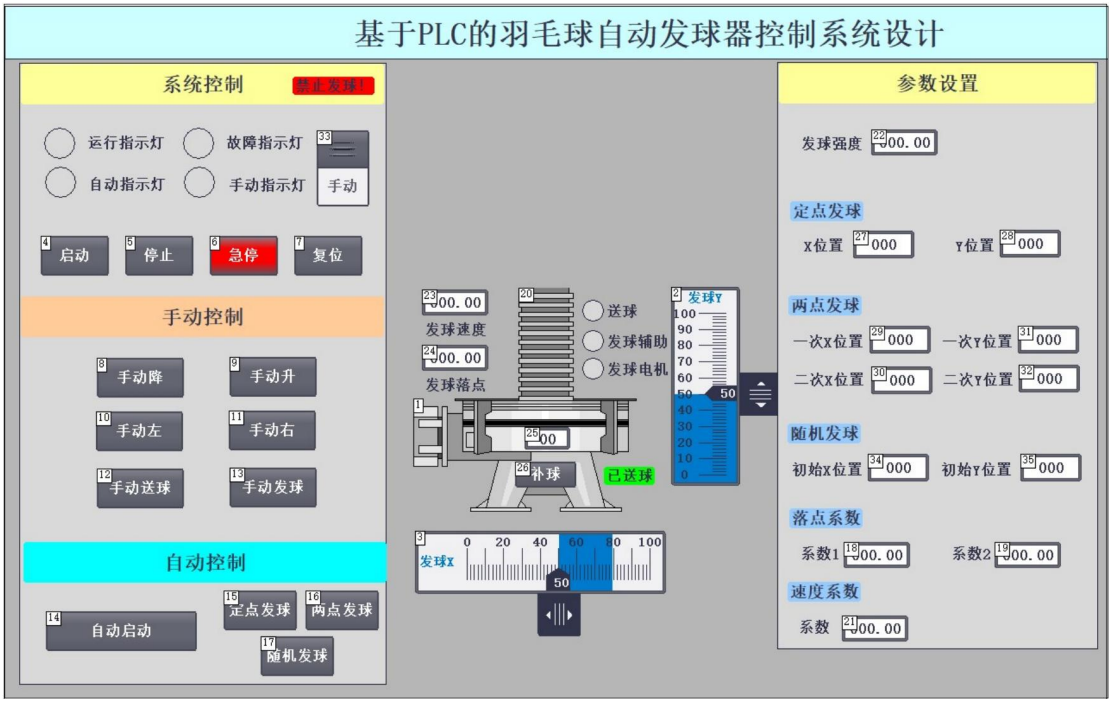


图 5-1 HMI 主界面图

5.2 关键交互功能设计

5.2.1 模式切换与运行控制

界面提供自动/手动切换开关，并配合启动、停止、复位操作，形成完整运行控制链路。模式切换状态与指示灯显示保持一致，减少误操作风险。

5.2.2 参数设定与在线调整

界面提供 X/Y 位置滑动条与数字输入域，用于设定定点、两点和随机模式参数。参数在线生效，操作者可在不中断系统的条件下进行训练方案微调。

5.2.3 5.2.3 状态显示与报警提示

界面实时显示运行状态、模式状态、球量信息和关键标志位。报警信息与蜂鸣器联动，帮助操作者快速识别异常来源并进行处置。

动态化\事件					
事件名称		按下			
函数列表\按下按键时置位位					
变量	停止按钮		位	0	
按钮_3					
类型	按钮				
常规					
模式	文本	OFF 状态文本	急停	ON 状态文本	Text
文本列表		OFF 状态图形		ON 状态图形	
图形列表		过程值		位号	0
外观					
背景色	99, 101, 113	背景填充图案	垂直梯度	角半径（边框）	3
前景色	255, 255, 255	边框宽度	2	线样式	实心
边框颜色	71, 73, 87	边框背景色	105, 105, 105		
填充样式					
背景色梯度（填充图案）	255, 0, 0	梯度 1（填充图案）	已启用	颜色梯度 1（填充图案）	131, 132, 142
偏移量梯度 1（填充图案）	15	梯度 2（填充图案）	已启用	颜色梯度 2（填充图案）	88, 90, 103
偏移量梯度 2（填充图案）	15				
设计					
焦点宽度	2	焦点颜色	148, 182, 231		
布局					
X 位置	238	Y 位置	266	宽度	79
高度	46	调整图形以适合大小	拉伸画面	图形水平对齐	居中
图形垂直对齐	中间	使对象适合内容	已禁用	文本左边距（布局）	0
文本顶部边距（布局）	0	文本右边距（布局）	0	文本底部边距（布局）	0
图形左边距（布局）	0	图形顶部边距（布局）	0	图形右边距（布局）	0
图形底部边距（布局）	0				
文本格式					
字体	宋体, 17px, style=Bold	方向	水平	文本水平对齐	居中
文本垂直对齐	中间				
闪烁					
闪烁	已禁用				
样式/设计					
使用样式/设计	已禁用	样式项外观			
其它					
名称	按钮_3	层	0 - 层_0	工具提示	
安全					
权限		允许操作员控制	已启用		
动态化\事件					

图 5-2 参数设置界面图

5.3 人机工效与可用性分析

5.3.1 操作路径优化

高频操作按钮布局集中，参数区域与状态区域分区明显，减少操作者在训练过程中的视觉切换负担，提高操作效率。

5.3.2 错误防控设计

关键操作（例如模式切换与复位）与状态提示相绑定，避免在异常状态下执行高风险动作。该设计符合工业人机界面“先提示后动作”的原则。

错误防控还体现在交互节奏设计上。对于高风险操作，系统可通过状态颜色、提示文字和声光报警形成多通道提醒，降低误触发概率。对于常见误操作场景，例如未复位直接启动和缺球状态下强制运行，界面应明确给出阻断原因而非仅返回失败结果，这有助于操作者快速定位问题并采取正确措施。通过将“防错”前移到交互层，系统能够在不增加硬件复杂度的情况下显著提升现场可用性。

5.3.3 可扩展交互设计

现有界面预留变量扩展空间，后续可增加训练方案存储、历史统计、远程接口等功能，实现从设备控制向训练管理的能力延伸。

第 6 章 系统调试与结果分析

6.1 调试方案与测试方法

6.1.1 单元测试阶段

对送球、发球、摆动及指示模块分别进行点动与联锁测试，确认硬件接线正确、信号采集稳定、输出驱动有效，为后续联调提供基础。

6.1.2 联调测试阶段

在自动流程下测试“对位—送球—发球”顺序逻辑，重点验证步骤寄存器切换、定时器节拍以及模式分派逻辑是否符合预期。

联调阶段的核心目标是验证“单功能正确”能否转化为“系统协同正确”。实际测试中，常见问题并非单一模块失效，而是模块交互时序不匹配。为此，测试过程应记录关键状态位变化顺序和时间节点，形成可追溯的调试日志。通过对比日志与设计流程，可快速识别问题发生阶段并缩小排查范围。该方法在本课题中有效提升了调试效率，也增强了系统行为分析的客观性。

6.1.3 异常测试阶段

分别测试急停触发、缺球触发、限位异常与故障复位过程，观察输出切断、报警提示与恢复流程，评估系统安全策略完整性。

6.2 调试结果与性能评价

6.2.1 功能性结果

测试结果显示：系统可稳定运行手动、定点、两点和随机模式；模式切换后可正确调用对应功能模块；参数修改后可及时反映到控制流程中。

6.2.2 稳定性结果

连续运行条件下，发球节拍保持稳定，步骤流程无明显紊乱；主要状态位更新及时，HMI 显示与 PLC 实际状态一致，具备较好的可视化一致性。

在稳定性评估中，除观察是否出现明显故障外，还应关注细微性能漂移，如节拍波动、对位时间增长和报警误触发频次。本文在连续运行测试中未发现流程性中断，说明核心控制链路具有较好鲁棒性。进一步地，状态显示与实际执行的一致性验证表明变量映射和程序状态管理较为可靠。这些结果共同支撑了系统可

用于常规训练场景的结论。

6.2.3 6.2.3 安全性结果

急停触发后关键输出能够快速撤销；缺球检测可有效阻断发球动作；复位后系统可恢复至可启动状态。安全联锁逻辑达到了训练装备应用基本要求。

图 6-1 调试运行现场

6.3 问题分析与优化方向

6.3.1 现阶段存在问题

当前系统在随机模式中主要依赖参数更新实现落点变化，随机策略可进一步细化；同时，系统缺少更完整的数据记录机制，不利于长期训练评估。

6.3.2 控制策略优化

在随机模式中引入约束随机算法，限定边界并设置概率权重，可使落点分布更符合训练目标；增加自适应节拍调节逻辑，可提升训练场景覆盖度。

6.3.3 工程化升级方向

后续可引入电流监测与温度监测，完善预测性维护能力；通过通信模块实现训练日志上传，为数字化训练管理提供数据基础。

在工程推广层面，还可从标准化与模块化两个方向继续深化。标准化方面，可建立统一的参数标定流程、维护手册和故障编码体系，提升不同场馆之间的复制部署效率；模块化方面，可将送球、发球、摆动及交互功能设计为可替换单元，便于根据训练需求进行配置升级。若后续接入数据平台，可进一步探索训练质量

评价模型，实现“设备动作参数—运动员训练反馈”之间的关联分析，为个性化训练提供数据支撑。

第 7 章 结论与展望

本文完成了基于 S7-1214C PLC 的羽毛球自动发球器控制系统设计，形成了较完整的“硬件结构—软件逻辑—HMI 交互—联调验证”工程链路。系统实现了手动、定点、两点和随机发球模式，并构建了急停、缺球、复位、报警等安全控制机制。

研究结果表明，PLC 方案能够在稳定性、可维护性和可扩展性方面满足中小型训练装备需求。该方案具有较高工程可复制性，可推广至类似球类自动化训练设备控制场景。

本文提出的模块化程序结构与“模式编码+步骤寄存器”控制思想，对于其他顺序型机电设备控制同样具有参考意义，有助于提升系统设计规范化水平。

受限于现有硬件与测试条件，本文尚未对长期高负荷工况下的可靠性指标进行系统量化，也未建立完整训练数据采集与分析闭环。后续研究可围绕数据化与智能化方向开展深入工作。

未来可从三个方向继续优化：一是引入视觉识别或传感融合，提升落点控制精度；二是构建训练任务库与参数模板，实现一键切换；三是接入网络平台，形成“设备控制—训练记录—效果评估”闭环系统。

致谢

本论文从选题构思、框架搭建、理论研究到最终定稿，每一步推进都离不开师长、同窗与家人的鼎力支持。在此，我首先向我的指导老师致以最崇高的敬意与最衷心的感谢。在整个毕业设计与论文撰写过程中，老师以严谨的治学态度、深厚的专业学识和耐心细致的指导，为我指明研究方向，纠正思路偏差，在关键问题上给予精准点拨。无论是方案设计、数据整理，还是内容修改与格式规范，老师都始终认真负责、悉心指引，让我在专业学习与科研思维上都得到极大提升，这份教诲与关怀令我终身受益。

同时，我也要感谢身边的同学与朋友，在学习与研究过程中彼此交流、相互鼓励，共同攻克难题、分享心得，让这段求学之路充满温暖与力量。感谢家人一直以来的理解、支持与默默付出，他们是我安心学习、踏实钻研的坚强后盾，给予我无限的包容与动力。大学数年的学习生涯即将落幕，这段宝贵的经历与所有温暖的帮助我都将铭记于心。未来我会带着这份感恩与收获继续努力，不断提升自我，以更扎实的能力回馈师长教诲与家人期盼。

参考文献

[1]蔡盛铭,陆欣谋,符可豪. 西门子 X 射线计算机体层摄影设备 3 例故障分析与维修[J].中国医疗器械信息,2026,32(05):161-164.

[2]贾水钟,孙悦,许建立. 西门子上海中心索网幕墙改造一体化设计与研究[J].建筑结构,2026,56(05):27-34.

[3]吴博雄,吴凡,马燕平,等. 基于西门子 PLC 的移动电源自动化组装控制系统设计[J].自动化应用,2026,67(05):28-32.

[4]王韩涛,陈强. 智能化羽毛球发球机在高校多球训练中的应用效果研究[J].冰雪体育创新研究,2026,7(05):64-66.

[5]干丽,范净. 基于激光传感技术的羽毛球发球机运行速度自动控制系统[J].自动化与仪器仪表,2025,(06):123-127.

[6]彭冠弘. 智能发球机在羽毛球多球训练中的应用效果研究[J].文体用品与科技,2025,(09):136-138.

[7]徐兴帆,薛明陆. 羽毛球训练中发球机的应用研究[J].文体用品与科技,2024,(22):129-131.

[8]杨艳,何建强,何佳佳. 基于嵌入式的羽毛球自动发球机设计[J].自动化与仪器仪表,2023,(10):228-231+236.

[9]邓志文. 基于无线传感技术的羽毛球发球机速度自动控制系统设计[J].机械设计与制造工程,2023,52(08):35-39.

[10]吴宇翔. 基于位置观测的新型羽毛球自动发球机系统设计[J].自动化与仪器仪表,2021,(07):231-234.

[11]曾洋. 基于 PID 控速的羽毛球自动发球机设计[J].自动化与仪器仪表,2020,(11):115-118.

[12]叶宗鑫,冷波. 羽毛球发球机在高校羽毛球教学中应用的研究[J].冰雪体育创新研究,2020,(21):75-76.

[13]冯鹏笼.击打式羽毛球发球机设计及研究[D].湘潭大学,2020.

[14]吴明超,郎庆阳,刘丽华,等. 一种羽毛球发球机结构研究[J].辽宁科技学院学报,2018,20(06):10-11+26.

[15]董继波.新型羽毛球自动发球机系统的设计与实现[D].电子科技大

学,2018.

[16]李沛泽,周志辉,刘洪波. 羽毛球发球机对提高羽毛球教学训练效率的实验研究[J].体育科技文献通报,2017,25(09):108-109+126.

[17]李涛,王姗姗,赵鑫,等. 新型智能遥控羽毛球发球机研制[J].中国新技术新产品,2014,(03):106-107.

[18]高佩川,肖增文. 教学型高仿真乒乓球发球机械手设计[J].机床与液压,2013,41(22):100-102.

[19]高佩川,柳仓海,周爱东. PLC 控制气动乒乓球发球机械手开发设计[J].科协论坛(下半月),2012,(11):77-78.

[20]廖之健,程良伦. 无拍式羽毛球自动发球机控制系统设计[J].计算技术与自动化,2010,29(04):27-31.