

制造业自动化研发：机器人、PLC 与伺服系统的协同应用

邓大方

身份证号：440222198311121035

DOI:10.61369/ME.2025040015

摘 要： 介绍工业机器人、PLC 和伺服系统的原理及协同作用，阐述市政工程自动化应用进展，包括轨道交通、管廊运维等。分析市政工程特殊技术要求，强调系统适应性、可靠性等。还涉及制造业自动化研发相关技术及协同系统关键技术路径等内容

关 键 词： 市政工程自动化；制造业自动化；系统协同

Manufacturing Automation R&D: Synergistic Application of Robot, PLC and Servo System

Deng Dafang

ID: 440222198311121035

Abstract： Introduces the principles and synergy of industrial robots, PLC and servo systems, and describes the progress of municipal engineering automation applications, including rail transit, pipeline corridor operation and maintenance. It analyses the special technical requirements of municipal engineering and emphasizes system adaptability and reliability. It also covers manufacturing automation research and development related technologies and synergistic system key technology paths

Keywords： municipal engineering automation; manufacturing automation; system synergy

引言

随着科技的不断进步，自动化技术在市政工程和制造业等领域的应用日益广泛。2020 年发布的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》强调了自动化、智能化技术在工程建设中的重要性，为相关研究和应用提供了政策支持。市政工程中的轨道交通、管廊运维等场景已取得一定自动化进展，其在复杂工况下对自动化设备的技术要求以及系统集成经验，对制造业自动化研发具有借鉴意义。从工业机器人运动控制原理涉及的机器人、PLC 和伺服系统，到制造业自动化研发中的硬件集成、编程控制平台开发，再到协同系统关键技术实现路径，这些都与市政工程自动化发展相互关联，共同推动相关领域的进步。

一、制造业自动化技术基础概述

（一）机器人、PLC 与伺服系统技术特性

工业机器人的运动控制原理基于其多关节的协同运动，通过精确的算法实现对末端执行器位置、姿态和轨迹的精确控制^[1]。PLC 具有强大的逻辑控制功能，能够根据预设的逻辑规则对工业生产过程中的各种输入输出信号进行控制和调节，确保生产流程的有序进行。伺服系统则采用闭环调节机制，通过不断检测实际位置与目标位置的偏差，并进行实时调整，以实现高精度的位置控制。机器人在灵活性和复杂操作方面具有优势，PLC 在逻辑处理上表现出色，伺服系统则提供了高精度的动力控制。三者相互补充，机器人的运动控制可由 PLC 进行逻辑调度，伺服系统为机

器人提供精准动力，共同推动制造业自动化的发展。

（二）协同应用发展现状

国内外市政工程领域自动化设备的应用已取得一定进展。在轨道交通方面，自动化技术广泛应用于列车运行控制、车站设备监控系统，提高了运营效率 and 安全性^[2]。例如，无人驾驶列车技术的发展，减少了人为操作失误。在管廊运维场景中，通过传感器、机器人等设备实现对管廊环境及设施的实时监测和维护。自动化的巡检机器人能够在管廊内自主导航，及时发现并报告潜在问题，如管道泄漏、设备故障等。同时，系统集成技术将各个子系统整合，实现数据共享和协同工作，进一步提升了市政工程的自动化水平和管理效能。

二、市政建设工程自动化需求特征

（一）市政工程特殊工艺要求

地下管廊施工与道路桥梁养护等市政工程场景对自动化设备存在特殊技术要求。地下管廊施工环境复杂，设备需具备良好的耐候性，以适应潮湿、阴暗等恶劣条件，确保长期稳定运行^[3]。同时，可能存在可燃气体等危险因素，要求设备有相应的防爆等级，保障施工安全。在运动精度方面，无论是地下管廊施工中的管道铺设设备，还是道路桥梁养护中的检测及修复设备，都需要精确的运动控制，以保证施工质量和养护效果。例如，道路桥梁养护中的自动化检测设备，需精确运动以全面检测结构病害位置及程度，为后续修复提供准确依据。

（二）城市基础设施智能化挑战

市政建设工程面临诸多复杂工况，对自动化系统的适应性提出了高要求。不同地质条件差异明显，从松软地基到坚硬岩层，从富水地层到干燥区域，都会影响设备作业方式；气候环境多样，温度、湿度、降水等变化会改变工程材料性能和设备运行状态，如高温可能加速设备老化，高湿度需考虑防潮防锈^[4]。施工空间限制也很突出，在老旧城区或地下工程中，狭窄空间要求设备具备紧凑结构和精准操控能力。

市政建设常涉及多点位协同作业，比如道路施工中多个路段同时进行挖掘、铺设等，自动化系统需高效协同，实现各点位设备精准配合，避免工序冲突。系统可靠性至关重要，市政工程启动后，设备故障可能导致严重工期延误和经济损失。因此，自动化系统需高可靠性，能长时间稳定运行，通过优化设计和监测机制减少故障，确保工程按计划推进，在复杂环境中保持稳定性能。

三、协同系统关键技术实现路径

（一）系统架构设计

1. 硬件集成方案

在制造业自动化研发的硬件集成方案中，设计满足 IP65 防护等级的分布式 I/O 系统是核心环节。IP65 防护标准能为系统构建可靠的防护屏障，可在多尘、潮湿等恶劣工业环境中有效阻隔粉尘侵入，防止低压喷水对内部电路元件造成损害，确保各类信号接口与控制模块长期稳定运行，为自动化生产流程提供持续的硬件支撑。

建立 PLC 与伺服驱动器的功率匹配模型同样不可或缺。这一模型需基于生产场景的实际负载特性，精准计算两者在不同工况下的功率需求与输出能力。通过动态适配 PLC 的逻辑控制指令与伺服驱动器的动力输出参数，可避免因功率过剩导致的能源浪费，或因功率不足引发的设备运行卡顿、机械磨损加剧等问题。

这种硬件层面的协同设计，既能保障分布式 I/O 系统在复杂环境中的抗干扰能力，又能通过功率参数的精准匹配提升整个协同系统的响应速度与运行效率，从硬件基础上筑牢制造业自动化生产的稳定性与可靠性根基^[5]。

2. 软件平台构建

开发基于 CODESYS 的编程控制平台，需深度整合机器人、PLC 与伺服系统的核心功能。平台实现机器人路径规划时，要构建精确数学模型，全面纳入工作环境约束条件，像障碍物分布、作业空间边界等因素都需转化为模型参数，通过算法迭代生成最优运动轨迹，确保末端执行器在复杂场景中既能规避障碍，又能保持轨迹精度^[6]。

针对伺服系统的动态补偿联动，需设计适配的控制算法。算法要实时捕捉负载变化、机械形变等干扰因素，通过参数动态调整抵消误差，比如在高速运动切换时，快速修正因惯性产生的位置偏移，保障系统在不同工况下的高精度与稳定性。

依托 CODESYS 的开放性架构，可将机器人驱动模块、PLC 逻辑控制程序、伺服调节算法无缝集成至统一平台。这种集成模式支持设备间数据实时交互，让机器人运动指令、PLC 逻辑判断与伺服动力输出形成闭环响应，在制造业自动化场景中充分释放三者协同效能，助力生产效率与产品质量提升。

（二）通信协议优化

1. EtherCAT 实时总线配置

在协同系统关键技术实现路径中，通信协议优化的核心在于 EtherCAT 实时总线配置。EtherCAT 作为高性能实时工业以太网技术，其独特的数据处理机制为多轴伺服系统同步控制时序难题提供了针对性解决方案。通过科学配置该总线，能搭建毫秒级响应的网络架构，确保控制指令与反馈信号在极短时间内完成传输。

配置过程中，需对总线参数进行精细化设定。波特率需匹配系统数据传输量，传输模式选择要契合生产场景对实时性的要求，以此保障数据在高负载状态下仍能保持高速且稳定的传输性能。网络拓扑结构的优化同样关键，通过合理规划节点布局与连接方式，可最大限度降低信号传输延迟，减少电磁干扰对数据完整性的影响。

借助 EtherCAT 的分布式时钟机制，各从站设备能实现微秒级时间同步，使多轴伺服系统的动力输出与位置控制形成精准配合，完美满足复杂运动轨迹对同步控制的严苛标准，为协同系统的高效运行筑牢通信基础^[7]。

2. 冗余通信机制设计

为确保市政施工现场复杂电磁环境下的数据传输可靠性，需采用双环网拓扑结构并设计冗余通信机制。该机制以通信协议优化为基础，依托特定算法实现高效数据传输与精准错误检测，能在数据传输过程中快速识别并标记异常数据包，保障信息完整性。

冗余通信路径的设置强化了系统容错能力，主通信路径发生故障时，备用路径可即时启动切换流程，整个过程无需人工干预，确保数据传输连续无中断。双环网拓扑结构构建的两条独立通信环路，支持数据在双环路上同步传输，形成双向校验机制，通过对比两路数据一致性进一步降低传输错误率。

这种冗余通信机制的设计，针对性解决了复杂电磁环境下信号干扰导致的数据传输出错与中断问题，为协同系统各设备间的

指令交互与状态反馈提供稳定信道，从通信层面保障市政工程自动化系统在恶劣环境中持续可靠运行^[8]。

四、市政工程实施核心要点

（一）项目规划阶段

1. 多专业协同设计

在项目规划阶段的多专业协同设计中，建立 BIM 模型至关重要。通过 BIM 模型可进行管线碰撞检测，精确确定自动化设备的安装空间以及供电需求^[9]。不同专业的设计信息集成在 BIM 模型中，各专业设计师能够实时共享和交互信息，及时发现并解决设计冲突。例如，电气专业可依据模型确定供电线路的走向和布局，避免与其他管线发生碰撞。机械专业则能根据模型中的空间信息，合理规划自动化设备的安装位置，确保设备运行不受空间限制，同时满足其对供电等基础设施的要求，提高市政工程设计合理性和可行性。

2. 环境适应性评估

在市政工程的项目规划阶段，环境适应性评估至关重要。需考虑多方面因素，如地理环境，包括地形、地貌、地质条件等，不同的地理环境可能对工程基础结构产生影响^[10]。气候条件也是关键，温度、湿度、降水、风速等气候因素会影响工程材料的性能和使用寿命。例如，在高温地区，材料可能出现变形、老化加速等问题；在高湿度地区，需考虑防潮防锈措施。此外，还需评估周边环境的影响，如周边是否存在污染源、噪音源等，以及工程对周边生态环境的潜在影响，确保市政工程能够在其所处环境中稳定、可持续地运行。

（二）施工调试阶段

1. 机电联调规范

在市政工程施工调试阶段的机电联调规范中，对于 PLC 程序需制定分段调试规程。要明确各段程序的功能及预期效果，通过逐步测试确保程序逻辑的准确性和稳定性。同时，建立伺服系统参数自整定流程至关重要。需确定合理的参数整定方法和标准，使伺服系统能够根据实际工况自动调整参数，以达到最佳运行状态。在机电联调过程中，要注重 PLC 与伺服系统之间的协同性，确保两者之间的信号传输准确无误，实现对机电设备的精确控制，提高市政工程整体运行效率和质量。

2. 安全联锁验证

在市政工程施工调试阶段的安全联锁验证中，设置多重安全回路至关重要。通过逻辑互锁机制，可有效预防施工现场意外事

故。例如，在涉及到电气设备、机械装置等多个系统协同工作的场景下，当一个系统出现异常情况时，逻辑互锁机制能够确保相关联的其他系统及时做出响应，如停止运行或进入安全模式。这种互锁机制是基于对市政工程施工过程中各种潜在危险的深入分析而设计的，它涵盖了从设备启动、运行到停止的各个环节，确保在任何可能出现危险的情况下，都能通过安全联锁装置的作用，保障施工人员的安全以及设备的正常运行，避免因某个局部故障而引发更大的安全事故和工程损失。

（三）运维管理阶段

1. 预测性维护体系

构建基于振动频谱分析的设备健康监测系统，需利用传感器采集设备运行时的振动信号，通过频谱分析技术提取特征参数，以此判断设备的健康状况。建立设备状态监测模型，实现对设备故障的早期预警。同时，建立备件寿命周期数据库，记录备件的安装时间、使用时长、更换频率等信息。结合设备的运行数据和维护记录，分析备件的磨损规律和更换周期，为备件的采购和库存管理提供依据，确保在设备需要维修时能及时获取合适的备件，提高运维管理的效率和设备的可靠性。

2. 远程诊断机制

开发市政专用云服务平台对实现远程诊断至关重要。通过该平台可进行 PLC 程序远程更新，这能及时修复程序漏洞或升级功能，确保市政工程设备的正常运行。同时，平台具备故障代码实时分析能力，当设备出现故障时，能迅速获取故障代码并进行精准分析。这不仅可以快速定位故障原因，如传感器故障、执行器异常或逻辑错误等，还能为维修人员提供有效的维修建议。借助云服务平台的大数据分析功能，还可对故障发生的频率、类型等进行统计分析，为后续的设备维护和优化提供数据支持。

五、总结

市政建设领域自动化系统集成经验为制造业自动化研发提供了借鉴。通过对该领域经验的总结，我们能够更好地理解不同技术在实际应用中的协同方式。在此基础上，提出面向智慧城市发展的数字孪生技术融合方案，这一方案有望进一步提升自动化系统的智能化水平，使其能够更好地适应复杂的城市环境。同时，展望 5G+MEC 边缘计算在设备协同控制中的创新应用前景，5G 的高速通信和 MEC 边缘计算的低延迟特性，将为机器人、PLC 与伺服系统的协同应用带来更高效、更精准的控制能力，推动制造业自动化研发向更高水平发展。

参考文献

- [1] 尚玉亮. 机器人关节位置伺服系统的信号与能量协同控制 [D]. 青岛大学, 2022.
- [2] 杨晓宇. 多关节机器人伺服系统的信号与能量协同优化控制 [D]. 青岛大学, 2023.
- [3] 杨新新. 基于 PLC 的袋装螺蛳粉自动化包装设备研发 [D]. 广西科技大学, 2023.
- [4] 王赟晓. PLC 在喷涂机器人系统中的设计与应用 [D]. 东南大学, 2021.
- [5] 刘魁. 基于 STEAM 理念的软体机器人教具研发与应用研究 [D]. 西南科技大学, 2022.
- [6] 刘英会, 岳伟利, 张宗彩. 传感器技术在制造业自动化中的应用 [J]. 机械工程与自动化, 2023(4): 162-164.
- [7] 孙伟. 基于 PLC 并联打磨机器人控制系统设计 [D]. 中国民航大学, 2016.
- [8] 蒙臻, 倪敬, 周晶, 等. 工业机器人伺服系统服役性能综合性实验设计 [J]. 实验技术与管理, 2020, 37(6): 48-52.
- [9] 吉凤. 基于 PLC 与伺服电机控制的机械手设计方案 [J]. 科技资讯, 2012(24): 115-115, 141.
- [10] 毛宝海, 李志良, 储文璇, 等. 基于系统协同的科研财务服务体系构建研究 [J]. 教育财会研究, 2023, 34(3): 66-71.