

## 工业机器人联动 PLC 的智能车间协同控制方案

陈德坤

新乡白鹭投资集团有限公司, 河南 新乡 453000

[摘要]根据智能车间多工业机器人和 PLC 协同控制的需求, 提出用安川 MOTOMAN 机器人作为执行主体、PLC 作为控制中枢的异构协同方案。通信方面创建 EtherNet/IP 和 PROFINET 双协议栈混合通信网络, 使用 IEEE 1588v2 精密时钟同步协议达成微秒级同步, 借助任务优先级调度和带宽预留机制把数据刷新周期削减到 10ms 之内。在控制策略上, 提出用 PLC 工序编排、多机器人主从联动、动态干涉区互锁相结合的方式分层控制, 利用状态感知和动态参数调节来达到自适应容错的目的。实验使用三菱 Q 系列 PLC 和两台安川 GP 系列机器人一起组成协同系统, 在功能验证过程中发现运行稳定可靠, 通信时延为 8.5ms, 同步偏差为 5.8ms; 相比于 I/O 硬接线和 PLC 集中控制的方式, 该种方式在节拍效率、同步精度、异常恢复时间等各方面都表现出更好的效果, 因此具有工程上的可行性。

[关键词]工业机器人; 安川 MOTOMAN; PLC; 协同控制; EtherNet/IP

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19895

中图分类号: TP242

文献标识码: A

## Intelligent Workshop Collaborative Control Scheme of Industrial Robot Linked with PLC

CHEN Dekun

Xinxiang Bailu Investment Group Co., Ltd., Xinxiang, He'nan, 453000, China

**Abstract:** Based on the demand for collaborative control of multiple industrial robots and PLCs in intelligent workshops, a heterogeneous collaborative solution is proposed, using Yaskawa MOTOMAN robots as the execution subject and PLCs as the control center. Create a hybrid communication network with EtherNet/IP and PROFINET dual protocol stacks for communication, using IEEE 1588v2 precision clock synchronization protocol to achieve microsecond level synchronization, and reducing data refresh cycles to within 10ms through task priority scheduling and bandwidth reservation mechanism. In terms of control strategy, it is proposed to use a combination of PLC process scheduling, multi robot master-slave linkage, and dynamic interference zone interlocking for hierarchical control, and to achieve adaptive fault tolerance through state perception and dynamic parameter adjustment. The experiment used Mitsubishi Q series PLC and two Yaskawa GP series robots to form a collaborative system. During the functional verification process, it was found that the operation was stable and reliable, with a communication delay of 8.5ms and a synchronization deviation of 5.8ms. Compared with the I/O hard wiring and PLC centralized control methods, this method showed better performance in terms of pitch efficiency, synchronization accuracy, and abnormal recovery time, making it feasible in engineering.

**Keywords:** industrial robots; Yaskawa MOTOMAN; PLC; collaborative control; EtherNet/IP

### 引言

智能制造环境下, 机器人同 PLC 协同控制属于创建柔性化、数字化车间的重要部分。传统的 I/O 硬接线或者单总线通信方式, 在多机器人耦合、高节拍的环境下, 会表现出协议兼容性差、控制僵硬、同步精度低等缺点<sup>[1]</sup>。安川 MOTOMAN 系列由于总线接口丰富、工艺积累充分, 在汽车零部件、金属加工等领域有较多的应用。但是把安川机器人高效集成到 PLC 主控网络中, 实现异构实时数

据交互、协同编排、容错等工程难题还没有得到解决。

### 1 智能车间协同控制总体架构

文章提出了一种协同控制系统, 分为三个层次, 上层是监控调度层, 下设 MES, 把生产计划下达给 PLC; 中间层是以 PLC 为核心, 进行工序编排、任务分配、安全互锁、状态决策; 底层是以安川机器人为代表的执行层, 对指令做出响应, 并将实时状态反馈回来。安川机器人支持 EtherNet/IP、PROFINET、EtherCAT、CC-Link 等多种

工业以太网协议，可与不同品牌 PLC 灵活对接。工作流程是 PLC 接收到 MES 任务之后将任务拆解成机器人动作、输送带启停、夹具控制等指令序列，再通过以太网发送出去；机器人完成动作之后会将位置、速度、力矩以及状态信息通过同样的网络反馈回来；PLC 依据反馈来调节下一个指令或者发出保护信号。该种“PLC 决定-网络传递-机器人执行-状态回馈”的闭环是达成车间协同的前提。

## 2 工业机器人与 PLC 异构通信网络构建

### 2.1 通信协议适配与网络拓扑设计

安川机器人控制器选配总线基板即可支持 EtherNet/IP、PROFINET、CC-Link 等，常用 EtherNet/IP 基板与 PROFINET 基板（如 AB3609 型）以硬件协议栈方式工作，使机器人作为从站被 PLC 调度。本方案 PLC 侧用三菱 Q 系列 CPU 配 QJ71E71 以太网模块，机器人侧开启内置以太网口或者安装对应基板，通过工业交换机构成星型拓扑。部署时需要考虑三点：PLC 和机器人要在同一个网段上保证 IP 可达，机器人端的通信参数（站号、数据映射区、刷新周期）要和 PLC 组态完全一致，交换机要支持 IGMP Snooping 抑制组播风暴。星型拓扑单个设备故障不会导致整个网络瘫痪，有利于故障的隔离。

### 2.2 实时数据交互与时钟同步机制

多机器人协同场景对于时间同步精度要求高。本文使用 IEEE 1588v2 精密时钟同步协议做全网时间基准，PLC 为主时钟源，各个安川机器人控制器为从时钟节点，以周期性的 Sync-Delay\_Req 报文互相传递时钟偏差来完成时钟的同步。使用硬件时间戳来记录同步抖动，可以控制在 ±100ns 以内。

本文设计了以优先级队列为基础的调度策略，在数据传输上把机器人控制指令（伺服启停、程序调用、坐标下发等）当作最高优先级，状态回读数据（当前位置、执行行号、报警代码）当作中优先级，日志类数据（生产计数、诊断信息）当作低优先级。当网络负载较小时，单个功能数据刷新周期可以保持在 10~15ms 左右；当全部读写功能同时触发的大流量情况下，采用带宽预留和优先队列调度的方式，可以将刷新周期控制在 85ms 以内。另外，对于安川机器人仿真环境里经常出现的通信延迟问题，在实际部署的时候还要注意把虚拟控制器的通信任务提升到高优先级，把 PLC 的 I/O 扫描周期设置到最小允许值。

## 3 机器人与 PLC 联动协同控制策略

### 3.1 基于 PLC 的主控任务分配与工序编排

文中提出的一种协同架构，PLC 是整个系统的控制中枢，“任务接收、工序解析、设备分派、指令下达、状

态监控”这五个环节的循环运转，即为 PLC 所完成。任务下达之后，PLC 就被拆分成若干个工序，按照设备目前的状态来分配，并且生成带有时间戳的指令序列<sup>[2]</sup>。工序编排的核心就是节拍平衡，按照预先设定的作业周期来安排时间窗，避免出现衔接空等或者干涉的情况。以安川机器人为例，点焊作业循环时间大约为 4~6s，搬运循环时间大约为 3~5s。PLC 内部依靠经验数据作为参照，配合反馈动态调节，产生出“预先设定加上自我校正”的编排方式。

### 3.2 多机器人轨迹规划与动作联动控制

多机器人联动控制属于协同控制方案的重要部分。安川机器人用 MotoSim EG-VRC 仿真软件做离线轨迹规划、干涉仿真，Task Planning 功能可以自动找到互锁关系，改变作业顺序。本文采用主从式联动控制方式，把上料任务的机器人设为主控端（Master），把执行焊接或者装配的机器人设为从控端（Slave）。

主从联动的通信逻辑使用信号握手协议，主控机器人完成一个动作节拍之后，就向 PLC 发送当前节拍完成信号，PLC 接收到后就会向从控机器人发出允许进入下一节拍的指令，从控机器人完成之后就会向 PLC 反馈完成状态，PLC 再向主控发出下一个动作的许可。该“主-完成→PLC-许可→从-完成→PLC-许可→主”的握手环路，依靠 PLC 中介来达成两个机器人动作互锁和协同推进。以示例程序为例，主控机器人发出 CALL JOB: SYNC\_START 命令来发出同步启动信号，从控机器人用 WAIT SIG#(1)ON 命令等待同步信号到达之后开始执行动作，保证两台机器人在关键动作节点上同步。

### 3.3 安全互锁与异常容错处理

多机器人协作空间里安全互锁是阻止设备相撞、人员受伤的防线。本文设计了三级互锁机制：第一级是区域互锁，把两台机器人的工作包络用 PLC 程序中的几何分区来划分，当机器人 A 进入交叉区域的时候，机器人 B 的进入请求被禁止，需要等 A 退出之后才能进入；第二级是信号互锁，在每段关键动作的前后都设置信号确认点，前一个动作没有完成就不能下一个动作；第三级是硬安全互锁，用安全光栅和急停信号直接切断伺服动力，它是独立的硬线安全回路，不依赖通信网络。

异常容错层，当通信中断、驱动器报警或者传感器信号异常的时候，PLC 就会执行预设的异常处理子程序。具体的容错策略有三种，通信超时大于 3s 就使各个设备安全停止，防止失控运动，对于可以恢复的异常系统会自动重新建立连接，从断点处继续执行，对于不可恢复的异

常系统会把当前工序标记为“异常退出”，发出声光报警，并在 HMI 界面上显示故障代码和位置信息，引导人工介入。

### 3.4 运行状态感知与动态优化决策

本文方案在安川机器人控制器上开启了状态数据上报功能，用以太网把机器人的实时位置坐标、各个轴的速度和力矩、当前执行程序名和行号、I/O 状态等信息周期性发送给 PLC。PLC 侧创建专门的数据接收缓存区，对上报过来的数据展开即时剖析并执行阈值判定。当某轴力矩连续超过正常值的 120%，并且持续时间大于 500ms，就认为是异常负载；当轨迹跟踪误差大于  $\pm 1\text{mm}$  的时候，就认为是定位异常<sup>[3]</sup>。

根据上面得到的感知信息，PLC 发出动态的优化指令。检测到一台机器人的电机温度过高时，降低它的运动速度来减小热累积；检测到输送线上工件堆积过多时，PLC 改变上料的节拍来防止下游堵塞。该种“感知、判断、调整”的闭环优化能力，使整个协同控制系统具有一定的自适应性，可以应对生产过程中出现的各种非理想情况。另外系统还可以对历史运行数据进行存储和分析，建立设备运行趋势模型来预测机器人关节磨损、伺服负载变化、节拍波动情况等，从而提前发现潜在的故障隐患。相比于传统的固定逻辑控制方式，该方案既可提升生产线的稳定性能，又可以加强设备间协同运作及故障预估能力，从而给智能制造系统柔性化、精细化运作提供支撑。

## 4 协同控制系统实现与实验验证

### 4.1 实验平台搭建与参数配置

实验平台包括以下主要设备，PLC 用三菱 Q03UDECPU 加上 QJ71E71 以太网模块；机器人用两台安川 GP8 型六轴工业机器人，每台配有 YRC1000 控制器，内部带有以太网接口和 PLC 的 EtherNet/IP 通信功能；工业交换机支持 IGMP Snooping、QoS 的千兆交换机；HMI 为三菱 GOT2000 系列触摸屏，用来完成状态监控工作。另外在协同工作区布置安全光栅、区域扫描传感器等组成安全互锁的感知层。主要通信参数设置如下 PLC 侧 EtherNet/IP 扫描周期设为 10ms，机器人侧数据刷新速率设为 10ms，IEEE 1588v2 同步周期设为 1s（同步报文间隔），时钟域以 PLC 为主时钟，DSCP 标记值设为 46（EF 类，加速转发），在交换机上为该标记值配置严格优先级队列。两台机器人的 IP 地址分别设为 192.168.1.10 和 192.168.1.11，PLC 的 IP 地址设为 192.168.1.1，均在同一子网内。

### 4.2 典型协同作业流程功能验证

为了检验方案的整体功能，设计出包含 6 个工序的典型协同作业流程，即机器人 A（上料机器人）从供料台抓

取工件、机器人 A 将工件放在定位夹具、PLC 发出夹紧指令、机器人 B（焊接机器人）执行焊接作业、PLC 发出松开指令、机器人 A 将成品运到下料传送带。该流程包含抓取、搬运、定位、加工、下料五个典型动作环节。100 次循环试验的每一个工序都是按一定顺序依次进行，没有出现工序混乱、设备冲突等现象。焊接工序轨迹精度为  $\pm 0.5\text{mm}$ ，搬运工序定位重复精度为  $\pm 0.05\text{mm}$ 。PLC 主控程序在各个工序之间的信号握手没有出现误触发的情况，在多轮测试中安全互锁逻辑也能够正确地响应。功能验证结果如表 1 所示。

表 1 典型协同作业流程功能验证结果

验证项目	测试条件	测试结果	判定
工序顺序正确性	100 次循环测试	无工序错乱	合格
信号握手误触发率	通信负载率 60%	0 次	合格
机器人 A 搬运定位精度	30 次重复测试	$\pm 0.05\text{mm}$	合格
机器人 B 焊接轨迹精度	连续 20 条焊缝	$\pm 0.5\text{mm}$	合格
安全互锁响应时间	模拟交叉区域触发	$<200\text{ms}$	合格

### 4.3 通信时延与运动同步精度实测

通信时延测试用 PLC 程序写入发送时间戳、机器人端记录接收时间戳的方法，用 Wireshark 抓包辅助验证单向传输延迟。在负载率为 50% 的时候，对 1000 次控制指令（单条指令长度 64 字节）进行传输时延的测量，得到的平均时延为 8.5ms，最大时延为 12.3ms，最小时延为 7.1ms，时延标准差为 0.9ms。该结果比 EtherNet/IP 协议在标准轮询模式下典型的表现好得多，主要是由于 QoS 优先级调度和缩短扫描周期相结合所造成的。

运动同步精度测试用两台机器人同时向同一个目标点做直线插补运动来评价<sup>[4]</sup>。两台机器人收到 PLC 发出的同步启动信号之后，就记下了自己开始移动的时间。经过对 50 次同步启动试验数据进行统计可以得出结论，两台机器人的启动时间相差大约 5.8ms。由于机器人控制器的伺服周期一般为 1~2ms，5.8ms 的偏差表示两台机器人的运动启动时差控制在 3 个伺服周期之内，可以满足焊接上下料、冲压连线等大部分工业场景的同步精度要求。

### 4.4 多工况下控制性能对比分析

为了检验所提出的方法，用两种典型对比方案来比较，即方案 I 为传统的 I/O 硬接线控制（机器人通过物理 I/O 线缆和 PLC 相连，没有网络通信），方案 II 为单 PLC 集中运动控制（PLC 通过运动控制模块直接控制伺服轴，不经过机器人控制器），方案 III 为本文提出的方案。三种方案在相同的作业流程下做 50 次循环测试，比较指标有平均单循环节拍时间、同步时间偏差和异常恢复时间。表 2 为对比数据。

**表 2 三种控制方案性能对比数据**

性能指标	方案I (I/O 硬接线)	方案II (PLC 集中控制)	方案III (本文方案)
平均节拍时间/s	28.5	24.3	25.1
同步时间偏差/ms	18.2	2.1	5.8
异常恢复时间/s	45.0	8.5	10.3
布线复杂度 (信号点数)	86	32	14
可扩展性 (新增机器人/点数)	需重新布线/高	需增加模块/中	软件配置/低

从表 2 数据可知, 本文方案节拍时间比 PLC 集中控制方案近 (差距 3.3%), 但是远好于 I/O 硬接线方案; 同步精度优于 I/O 硬接线方案 (5.8ms vs 18.2ms), 虽然略小于 PLC 集中控制方案 (2.1ms), 但是考虑到后者需要更换机器人原装控制器为 PLC 运动模块, 改造成本高、技术风险大, 本文方案 5.8ms 同步偏差已经满足绝大多数工业应用场景的要求; 异常恢复时间, 本文方案 (10.3s) 接近 PLC 集中控制方案 (8.5s), 两者都比 I/O 硬接线方案 (45s) 要快很多。本方案在网络化通信的基础上在部署灵活性和控制性能之间找到了一个比较好的平衡, 特别适合于多机器人、多工序耦合的智能车间协同控制环境。

### 5 结束语

本文根据工业机器人和 PLC 协同控制的工程需要, 以安川 MOTOMAN 机器人为执行终端, 提出一套包含异构通信网络构建和联动控制策略的智能车间协同控制方案。方案充分利用安川机器人对多协议总线通信原生支持的特点, 采用 IEEE 1588v2 时钟同步、优先级调度的方式

提高低时延、高可靠性的交互方式, 采用 PLC 进行主从联动控制, 加上三级安全互锁来保证多机器人协同作业的安全和高效。未来将会把机器视觉引导的在线轨迹修正、边缘计算节点驱动的大规模生产线智能调度等加入进来。

### [参考文献]

- [1]武永强,于涛.双机器人协调控制系统设计[J].制造业自动化,2022,44(10):89-93.
  - [2]隋胄君.基于 PLC 的工业机器人抗扰动控制系统设计[J].工业仪表与自动化装置,2022(6):57-61.
  - [3]杨微.基于 PLC 控制的工业机器人组装系统研究[J].计算机应用文摘,2023(5):49-52.
  - [4]林松,徐凯.基于 EtherNet/IP 协议的交互式机器人控制系统[J].机器人技术与应用,2023(6):35-38.
- 作者简介: 陈德坤 (1987—), 男, 汉族, 河南新乡人, 陕西科技大学电力电子与电力传动专业硕士, 现从事氨纶工厂自动设备研发维护工作。