

工业电气自动化在智能制造中的应用探讨

王叶波

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054001

[摘要]工业电气自动化是智能制造指令的执行者,其质量好坏直接影响到产线运行的稳定性、效率。文章主要研究现场级的控制、驱动、传感、通信技术,结合自动加工与装配、物料搬运与仓储、工艺参数在线监测、设备用电与能效优化四种车间的应用,说明电气系统的工作方式。最后从元器件选型和系统匹配、控制柜布局 and 现场抗干扰、安全回路和保护功能设计、与上层管理系统数据对接四个方面来论述工程实施时应注意的措施。

[关键词]工业电气自动化;智能制造;可编程控制器;数据对接

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20140

中图分类号: TP27

文献标识码: A

Exploration on the Application of Industrial Electrical Automation in Intelligent Manufacturing

WANG Yebo

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054001, China

Abstract: Industrial electrical automation is the executor of intelligent manufacturing instructions, and its quality directly affects the stability and efficiency of production line operation. The article mainly studies on-site control, drive, sensing, and communication technologies, combined with the application of four workshops: automatic processing and assembly, material handling and warehousing, online monitoring of process parameters, and optimization of equipment power consumption and energy efficiency, to explain the working mode of electrical systems. Finally, measures to be taken during project implementation are discussed from four aspects: component selection and system matching, control cabinet layout and on-site anti-interference, safety circuit and protection function design, and data integration with upper management systems.

Keywords: industrial electrical automation; intelligent manufacturing; programmable controller; data integration

引言

制造业向智能制造转型的过程中,决策和执行怎样衔接一直是一个难题。上层系统生成的排产、工艺优化和质量分析指令,最后要通过电气自动化系统来执行,变成接触器吸合、电机转动、气缸动作。目前业界对于人工智能等上层技术的讨论很多,但是对于电气自动化方面的关注较少。一些智能化改造项目虽然顶层设计很周全,但是在控制柜布线、现场总线选型、接地系统设计等方面出了问题,投产后误报警频发,通信偶发中断,伺服轴出现不明原因的抖动。

1 智能制造对电气自动化的实际需求

智能制造对于电气自动化系统的要求都是从产线运行实践中来的。第一,控制指令必须被确定地执行。上层优化算法下发的参数调整指令,执行端必须在规定时间内做出响应。运动控制指令的延迟不能超过几毫秒。以辊压

机厚度闭环为例,测厚仪检测出偏差之后,PLC 就必须在下一个扫描周期内完成 PID 运算,并把修正值写入伺服液压缸的压力或位置设定值。整个过程用时越少,极片上厚度超差段越短。因此控制层和驱动层之间的通信要使用实时以太网。第二,设备状态要透明。过去依靠人工巡视,智能制造要求中控室可以实时看到整条生产线的状态、工艺参数和报警。常见的做法就是给主控 PLC 配上以太网模块,接入车间环网,用 OPC UA 或者 Modbus TCP 从站的方式发布状态字和工艺数据。上层的 SCADA 或者 MES 系统只需要订阅相关的节点就可以获取到数据,不需要和底层的硬件一一建立私有协议。第三,柔性切换要快。多品种小批量生产需要更换规格。机械工装的更换不可避免,电气参数的切换应能一键完成。PLC 程序中要事先存入各种产品的工艺参数配方。HMI 下发配方编号后,程序会自动将参数写入伺服、温控器、比例阀等对应

的寄存器。配方要参数齐全，便于扩展，每一个参数都有明确的地址映射。如果靠人工逐项设置，不仅费时而且容易漏设或者设错，造成整批产品的质量事故。第四，故障响应要分层次。在少人化运行的情况下，安全回路要更加可靠，自诊断能力也要提高^[1]。出现故障时，系统需要能够区分是急停、周期停止还是降级运行，并把故障代码和当时的环境数据传送到远程诊断平台，以便于快速找到问题。这四个需求互相联系，指令确定执行需要实时通信和高性能 PLC，状态透明化需要规范的数据接口，柔性切换对程序架构有要求，故障分层次需要电气设计和安全管理制度的配合。

2 现场级核心电气技术

2.1 可编程控制器与分布式 I/O

可编程控制器是车间控制的中枢。一台轧机主控 PLC 要处理辊缝调节、张力闭环、液压伺服、收放卷同步、故障连锁，还要采集几十路模拟量，程序量一般都在几万步以上。选择时主要看扫描周期、程序存储器容量、浮点运算能力、支持的通信协议。分布式 I/O 是现场布线的一种重要方式。传统的集中式架构把传感器信号用长线引到主控制柜，费线材，而且容易受到谐波干扰。分布式方案将 I/O 模块就近安装在设备旁边的接线箱中，通过一根 EtherCAT 或者 PROFINET 网线进行通信，引线长度大大缩短。模块的防护等级不得小于 IP67，适应油雾、粉尘环境。PLC 程序应以功能块的形式出现，并采用参数化的形式。每一个设备对应一个功能模块，输入引脚有控制指令、使能、连锁状态，输出有运行反馈、故障代码、能耗数据。功能块内部实现了启停、故障处理、状态拼接等逻辑。这种方式可以复用、便于测试。同类型的设备只需要修改实例参数，不容易出错。

2.2 伺服驱动与变频调速

伺服系统是决定设备运动精度、执行速度的主要部分。电池极片辊压、高速贴片、精密磨削等对伺服驱动器和电机匹配度要求较高的工艺中，伺服驱动器与电机的匹配是

否恰当，会直接影响到调试时间以及指标能否达标。选型时要校核惯量匹配、转矩裕度、动态响应带宽。负载惯量和电机转子惯量的比值一般控制在 10 以内。超过这个值系统加减速容易产生振荡，反复调谐也很难消除。如果惯量比太大，应先考虑加装减速机或者换用大惯量电机，不能只依靠驱动器内部的滤波器来硬压。这样就会降低系统的刚度，增大轨迹跟踪误差。变频调速主要用在风机、水泵、传送带等速度控制为主的场合。变频器不但是节电工具，而且是一个状态感知节点。它利用总线接口将频率、电流、母线电压、散热器温度等参数传送到控制端，可以进行能效分析以及劣化判断。负载不变，散热器温度一直上升，风扇或者风道被堵住。按照这样的安排进行预防性维护，可以防止意外跳闸。多轴同步是工程上的难题。印刷、复合、分切等工艺需要多个辊筒保持线速度一致，一般用虚拟主轴加电子齿轮的方式。PLC 内创建一根虚拟主轴，各个实体轴根据设定的齿轮比跟着走。齿轮比只需改变参数即可调整。实现该方案的前提是通信周期短、抖动小。EtherCAT 在一个毫秒周期内同步抖动为微秒级，已经可以满足大部分卷材设备的要求。

3 车间典型应用环节

3.1 自动加工与装配控制

自动加工、装配是电气自动化应用最集中的部分。一条自动化加工单元由数控设备、上下料机构、定位夹紧装置、吹屑冷却装置和尺寸检测工位组成。这些组件在 PLC 的统一调度之下，按照工艺节拍一起工作。装配控制的难点就是力位混合控制。轴承压装过程中，压装过程要定位准确、压装力曲线要监控。正常压装时，力随位移变化有规律。PLC 采集到的力曲线出现异常的拐点，说明工件卡住了、过盈量不准确或者对位不准，系统要立即停止并发出报警信号。为了达到此目的，在 PLC 中预先设定力值包络线，并编写实时比较逻辑，对 PLC 的采样和运算能力有一定的要求。表 1 为自动加工单元中常见的几种工艺及其对应的电气控制要点。

表 1 自动加工单元典型工艺及电气控制要点

工艺类型	执行元件	传感器配置	控制核心要点
压装	伺服压机或电缸	位移传感器、力传感器	力位混合控制，设置力值包络线报警
拧紧	伺服拧紧轴	扭矩传感器、角度编码器	扭矩与角度双闭环控制，记录拧紧曲线
点胶	螺杆阀或喷射阀	流量计、激光测高仪	胶量精确计量，轨迹速度与出胶量同步
激光焊接	振镜、伺服工作台	功率计、同轴视觉相机	功率斜坡控制，保护气时序与运动同步

在这些工艺环节当中,传感器采集到的过程数据要按照时间戳以及工件编号进行关联保存。这是产品质量档案的基础,也是后来改进工艺参数、查找质量问题的依据。

3.2 物料搬运与仓储自动化

物料搬运与仓储自动化使用堆垛机、穿梭车、提升机、输送线和 AGV。核心问题就是定位精度以及调度逻辑是否可靠。立体仓库中,堆垛机行走、提升用变频驱动,定位用激光测距仪或者条码定位系统。快接近目标货位时,PLC 控制变频器从高速切到爬行速度,当定位传感器发出到位信号时,再抱闸。行走定位精度要控制在 3mm 内,提高方向误差不能大于 2mm。程序计算加减速距离的时候,必须考虑到负载的惯性以及制动响应的时间,避免出现过冲或者行程不足的情况。输送线电气设计的主要目的就是防止货物碰撞、堵料。每段输送线由一台小功率变频器驱动,各个段之间用光电传感器检测货物的位置。PLC 依据前后工位的占用情况来决定本段是启是停。多分合流节点 PLC 根据上游来料和下游接纳能力来决定货物走向哪条支线。AGV 和固定设备之间存在着易出问题的界面。AGV 到达之后,需要和固定输送线进行物料交接。双方的安全互锁逻辑要严密,AGV 确定到并且停止之后,固定侧才可以开始交接机构的运作;交接完毕之后固定机构再次被复位之后,AGV 才会离开。关键安全连锁信号应该用硬接线冗余来保证,在网络短时间中断的情况下也不会造成机械干涉。

3.3 工艺参数在线监测与报警

工艺参数的在线监测属于智能制造同传统自动化之间最明显的区别。传统的模式依靠事后抽检,在线监测将检测点位放在加工过程中,即边生产边检测边反馈。

实施在线监测首先要确定监测什么以及怎样采样。温度这样的慢变量,每秒采一次就足够了;振动、压力冲击这些快变量,采样的频率要达到几千赫兹^[2]。为了平衡存储与通信的负担,常采用触发式采集,即正常时只记录统计值,当信号超过预警阈值的时候才开始高速原始波形采集,截取事件前后几秒的数据上传保存。报警管理是伴随着在线监测而产生的现实问题。传感器多了,报警次数就会上升。如果不设置报警死区和延时确认机制,操作人员很快就会因为报警太多而变得麻木。PLC 报警功能块中,为每一个报警点设置开启延时和关闭延时,消除由于信号抖动引起的瞬间误报。报警应按严重程度分为提示、警告、故障三级。提示级只记日志,警告级触发黄灯,故障级触

发红灯并连锁停机。工艺参数超限报警和设备故障报警,在逻辑上应该分开。前者是产品不合格要隔离复检,后者是设备有故障要停机维修。两类报警的响应流程不同,HMI 上也应分区显示,不能混淆。

3.4 设备用电监测与能效优化

设备用电监测要完成两个任务,即成本核算和设备健康评价。同一台设备加工同一种产品,单位产量耗电量一直上升,一般说明传动部件磨损或者润滑变差。它是一种不需要使用振动传感器的退化指示信号。于主配电柜进线回路及主要用电支路装设多功能电力仪表。仪表通过 RS485 口,用 Modbus RTU 协议将电压、电流、有功功率、功率因数等数据传送给 PLC 或者专用能源采集器。动力回路和照明、空调等辅助回路要分开计量。采集周期设为 1~15min,既有利于趋势的捕捉,也有利于减轻通信的负担。

4 工程落地关键措施

4.1 电气元器件选型与系统匹配

选择电气元器件时,在性能满足的前提下,应先考虑长供货周期产品是否可以替代、备件是否通用。PLC CPU 模块、伺服驱动器功率模块等核心器件应选择厂商承诺供货期超过十年的成熟系列,不能使用刚上市、没有大量验证的新品。系统匹配需要考虑三个接口。电气接口需要确认供电电压、数字 I/O 电平、模拟量信号类型,保证可以直接连接,不需要转换模块。通信接口应采用统一的协议,不能将各种总线混在一起,造成配置复杂、维护困难。机械接口要核对安装尺寸、散热空间和进出线方式,画布置图时逐个确认,防止到货后装不上。

4.2 控制柜布局与现场抗干扰

控制柜布置会影响长期运行的稳定性。变频器、伺服驱动器等发热器件集中装在柜体上部或者下部,配有独立的风道。PLC、I/O 模块等对温度敏感的器件放在中部,远离热源。动力线、信号线分开走,间距不小于 200mm。交叉处呈 90° 直角通过,减少耦合^[3]。接地是抗干扰最基础、最容易出问题的一个环节。每个控制柜应设专用接地铜排,所有器件的接地端子以放射状就近接入,不得串联。控制柜的接地铜排用不小于 16mm² 的铜线引到车间公共接地网。变频器到电机的电缆必须使用屏蔽电缆,屏蔽层两端接地。伺服编码器的信号线要用双绞屏蔽线,不能和动力线走同一个线槽。

4.3 安全回路与保护功能设计

安全回路的设计要符合安全等级的要求。急停、安全

门监控、光栅保护等安全功能的信号采集和处理必须采用经过认证的安全继电器或者安全 PLC,不能用普通的 PLC 代替。硬接线安全回路中,急停按钮、安全门开关的接触点用双通道方式接入安全继电器两个输入回路。安全继电器比较两路信号,只有两路都闭合的时候才允许输出吸合。任一通道短路或者断路时,安全继电器就会强制断开输出并自锁,只有手动复位才能重新启动。安全输出信号不能由普通的 PLC 逻辑来控制。安全状态信号只用作显示,是只读变量,不能参与驱动接触器或者阀门。安全与工艺控制回路之间界限要清楚,不能越界。

4.4 与上层管理系统数据对接

电气系统同 MES、ERP 的数据对接,属于信息集成的重要部分。顺不顺主要看接口定义是否规范。一般使用 OPC UA 或者 MQTT。OPC UA 适合于车间级的结构化交互,信息模型完善,可以进行报警和历史数据的处理^[4]。MQTT 协议轻量,适合广域网、上云,按需选择,不强求统一。上传的数据应包含设备状态、生产计数、工艺参数、报警记录和能耗五个方面,并且带有时标。数据点的名称要统一命名,建议用“线体编号-工位编号-设备类型-参数名”这种四段式,防止重名造成解析错误。调试阶段逐点核对上位机与现场显示值是否一致,模拟量要检查有效位数和刷新频率。通信稳定性、吞吐量要通过生产负荷下的压力测试来保证,不能只在空载时检查连通性。

5 结束语

工业电气自动化在智能制造当中相当于建筑的承重结构。没有稳定的、快速的、透明的电气执行层,上层的分析、排产和工艺优化就很难在生产中取得实效。文章就加工装配、物料搬运、工艺监测、能效优化这四个场景展开,论述了电气系统运行方式及实施方法,给出了元器件选型、抗干扰、安全回路、数据对接等落地措施的建议。未来数字孪生、虚拟调试能缩减从设计到投运的时间,边缘计算把故障诊断、参数调节下放至车间,削减对上层资源的依赖。

[参考文献]

- [1]赵迪.电气自动化技术在智能制造中的应用探讨[J].中国科技纵横,2025(15):68-70.
- [2]居玮,张雨桐,刘大海.电气自动化在智能制造中的应用与发展趋势研究[J].仪器仪表用户,2024,31(12):129-131.
- [3]李达.新型工业化背景下电气自动化技术在智能制造产线中的应用研究[J].现代工业经济和信息化,2026,16(4):101-102.
- [4]刘宝峰.电气自动化技术在智能制造中的应用研究[J].长江信息通信,2025,38(2):211-213.

作者简介:王叶波(1981—),男,汉族,河北邢台人,电气工程师,2004年7月毕业于河南机电高等专科学校,电气自动化专业,大专,现主要从事锂电辊压分切设备、自动化控制设计研究。