

智能工厂背景下工业电气自动化发展研究

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]工业电气自动化系统是智能工厂物理执行和过程控制的主要依靠。文章对目前的应用现状和智能工厂互联互通、柔性生产、预测维护、节能降耗等实际需求进行分析,从设备和控制层两个方面入手,主要论述驱动和配电设备联网、状态感知、控制器功能扩展和全厂数据贯通的方案。在此基础上,从前期方案和接口梳理、电气安装和抗干扰布线、程序调试和联锁测试、日常维护和故障处理四个方面给出可操作的工程实施步骤,就人员培训、备件档案管理、用电安全和能耗监测提出长期稳定的运行保障措施,给制造企业的电气自动化系统智能化升级提供实际参考。

[关键词]智能工厂; 电气自动化; 设备联网; 数据贯通

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20211

中图分类号: TP27

文献标识码: A

Research on the Development of Industrial Electrical Automation under the Background of Smart Factory

WANG Yebo

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

Abstract: Industrial electrical automation systems are the main reliance for physical execution and process control in smart factories. The article analyzes the current application status and practical needs of intelligent factory interconnection, flexible production, predictive maintenance, energy conservation and consumption reduction. Starting from the aspects of equipment and control layer, it mainly discusses the solutions of driving and distribution equipment networking, state perception, controller function expansion, and factory wide data connectivity. On this basis, feasible engineering implementation steps are provided from four aspects: preliminary plan and interface sorting, electrical installation and anti-interference wiring, program debugging and interlocking testing, daily maintenance and fault handling. Long term stable operation guarantee measures are proposed for personnel training, spare parts file management, electrical safety and energy consumption monitoring, providing practical reference for the intelligent upgrade of electrical automation systems in manufacturing enterprises.

Keywords: smart factory; electrical automation; device networking; data interconnection

引言

制造业的数字化、网络化发展速度越来越快,智能工厂成了产业升级的主要途径。工业电气自动化系统担负着设备启停、速度调节、逻辑联锁等基本工作,运行好坏直接影响到产线的效率和产品的统一性。近些年来,国产可编程控制器、伺服驱动器的市场份额不断上升,但是高端核心器件、系统集成程度以及长久运行能力还存在不足。很多企业的自动化改造只注重单机设备的更换,忽略了设备之间的数据联通以及工程实施的细节,造成整个系统的效率没有得到充分发挥。

1 工业电气自动化的应用现状与智能工厂的实际要求

目前我国的制造企业电气自动化水平参差不齐。部分

新建工厂已经使用全数字化产线,配有分布式控制系统,可以对生产数据进行集中采集。但是大量的存量工厂仍然使用 PLC 单机控制,变频器、伺服驱动器只完成了速度和位置闭环,运行参数没有上传。配电回路一般采用塑壳断路器加热继电器的常规方式,缺少对电能质量、回路温度的在线监测。控制系统同上层制造执行系统之间的数据接口大多依靠后期的人工开发,通信协议繁杂,数据断点多。

智能工厂对于电气自动化提出了更加具体的要求。首先就是设备状态的透明化。对每台电机、每一个配电回路的电压、电流、温度、运行时间等数据进行实时采集、上传至监控平台,是实现可视化管理的前提。其次就是产线快速切换。包装、装配等场合中,产品规格一变,控制系统就要在几分钟之内把配方参数调用过来并进行伺服轴

行程的调整,不能让人工去修改程序^[1]。其次就是故障的早期预警。通过电流波形、振动特征趋势分析,提前发现轴承磨损或者绝缘劣化,防止突然停机。最后就是能耗的精细化计算。要求电、水、气等能源消耗数据要按照车间、工段甚至设备进行分项计量,为成本归集和节能对标提供依据。这些要求看似简单,但是在电气系统的设计阶段如果没有考虑到,后期追加的代价会成倍增加。

2 设备与控制层的重点升级方向

2.1 驱动与配电设备的联网和状态感知

驱动和配电设备属于电气自动化执行端,它所连接的数据参数越多,就越容易获得丰富的数据。对于新增设备,在选型阶段即应明确通信接口要求。伺服驱动器应该配备 EtherCAT 或者 PROFINET 接口,除了接收位置、速度指令之外,还要上传实际转矩、母线电压、模块温度、编码器反馈等参数。变频器要依靠现场总线或者 Modbus TCP 来发出运行频率,输出电流,散热器温度以及故障代码。配电侧馈线回路应装设带有通信功能的智能断路器或者多功能电表,对三相电压、电流、有功功率、谐波畸变率等进行实时监测。高温、粉尘环境下的关键回路,在电缆接头处加装无线温度传感器,数据一同传入本地网关。表 1 给出了几种典型设备的联网参数配置示例。实际工程中选择通信协议时要兼顾实时性和开放性。运动控制类设备优先使用等时同步实时以太网,配电监测类可以使用 Modbus TCP 接入边缘网关,降低布线复杂度。所有的数据都应该有统一的时间戳,然后汇集到车间级的数据服务器上,成为上层应用的统一数据源。

2.2 控制器功能的扩展与全厂数据贯通

仅仅完成设备联网还不足以达到数据贯通的目的,控制器侧的功能扩展是重点。传统的 PLC 编程主要是逻辑联锁和顺序控制,面向智能工厂的控制器还要完成数据汇聚、协议转换和边缘计算的功能。具体做法就是主控 PLC 机架上配置以太网通信模块,并且创建出多个通信连接。

一路用 EtherCAT 或者 PROFINET 环网和伺服、变频器做实时控制,一路用 Modbus TCP 轮询智能电表和配电单元,第三路作为 OPC UA 服务器,向制造执行系统开放标准的数据接口。

OPC UA 服务器的配置要在程序框架搭建的时候完成。使用 PLC 厂家提供的功能块,把设备状态字、产量累计值、报警代码等信息映射到 OPC UA 节点上,设置合适的采样速率^[2]。对于现场总线接口无法接入的设备,可以采用现场总线转以太网接口来完成协议转换工作,从而防止因强制淘汰而造成设备的浪费。数据贯通之后,制造执行系统可以立刻得到设备开机率、节拍时间和停机原因这些关键数据,不需要再开发专门的数据采集程序。同时在 PLC 侧对采集到的振动、温度等高频数据进行初筛,只将特征值或者超限报警上传,可以有效地降低网络负载和上层平台存储的压力。该架构把控制器由原来的逻辑执行器变成智能工厂数据流里的本地预处理节点。

3 工程实施中的可操作步骤

3.1 前期方案编制与接口梳理

工程成败很大程度上取决于前期方案是否扎实。项目开始以后,应该由电气工程师牵头,逐台对每个受控设备的电气接口类型以及通信能力进行核对。制作接口明细表,记录设备型号、通信协议、物理接口形式、支持的波特率或者通信周期、信号地址范围。对已经利旧的设备进行现场测试,以确定接口文档是否正确。整理控制系统 I/O 点表,区分出硬接线信号和通信信号,确定急停、安全门等安全相关回路还保留有硬接线冗余。

在接口梳理之后,根据梳理出的系统控制网络拓扑图上标注各个网段的带宽和节点数,防止某个网段太忙^[3]。对需要跨子网通信的部分提前规划好路由规则和网关的位置。同时编制功能规格说明书,对系统要实现的功能、报警列表、历史数据记录等逐一进行定义,然后交工艺、设备、信息部门共同确认,作为之后编程和验收的依据。

表 1 驱动与配电设备典型联网参数及通信协议示例

设备类型	采集参数	推荐协议	典型传输周期	用途
伺服驱动器	实际位置、转矩指令值、模块温度、母线电压	EtherCAT	1ms	闭环控制与在线诊断
通用变频器	运行频率、输出电流、散热器温度、故障码	PROFINET 或 Modbus TCP	100ms	状态监视与能效分析
智能断路器	分合闸状态、三相电流、电度脉冲	Modbus TCP	1s	配电回路监测
多功能电表	电压、电流、功率因数、1 至 31 次谐波电压含有率	Modbus RTU	5s	能源管理数据采集
无线温度传感器	电缆接头温度	LoRa 或 ZigBee	10s	过热预警

3.2 电气安装与抗干扰布线

变频器、伺服驱动器工作时会产生强烈的电磁干扰,安装布线不当时会造成通信中断、模拟量信号突然变化等隐性故障。控制柜内动力线缆和信号线缆必须强制分侧布置,柜体两侧各设一个动力线槽和一个信号线槽,间距不小于 150mm。变频器到电机的输出电缆必须用屏蔽电缆,屏蔽层在变频器侧和电机侧两端 360°环接地。编码器电缆应为双绞屏蔽电缆,远离动力线,长距离传输时采用差分信号或者加装中继器。

通信线缆敷设时,以太网线应使用超五类或者六类屏蔽工业网线,水晶头外壳与屏蔽层要可靠压接。桥架内通信电缆和动力电缆分层敷设,同层时要加装金属隔板。控制柜内设置统一的接地铜排,所有的屏蔽层、柜门、门板地线都用编织铜带星形汇集后单点接地。施工完毕后,用网络测试仪逐段检测网线连通性和长度,用便携式电磁场测量仪在变频器满载运行时检测柜内空间电磁场强度,保证无异常。

3.3 程序调试与联锁功能测试

程序编写建议采用模块化结构,把电机起停、阀门控制、模拟量处理等基本功能封装成标准功能块,统一接口定义。程序初稿完成之后,在离线情况下用仿真器校验逻辑运算的结果,排除语法和基本逻辑上的错误。现场上电后按照“先空载后带载、先手动后自动”的顺序进行。先在无电机连接的情况下检测变频器和伺服的输出电压波形和通信指令响应,再连接电机,在低频低速下检查转向和编码器反馈方向,完成速度环和位置环增益的初步整定。

联锁功能测试要制订专项测试清单,逐一检验紧急停止按钮能否切断所有执行机构的动力,安全门打开的时候伺服能不能进入安全转矩关断状态,过载信号能不能触发自动停机并发出报警信息。模拟各种传感器的故障状态,即断线、短路、超量程等,看系统的响应是否符合设计要求。测试时详细记录响应时间和误报情况,对不符合要求的联锁逻辑现场修改后重新测试,直到全部合格为止。调试完毕之后的程序连同注释、符号表一起存档,和其他文件一起组成最终交付文件。

3.4 投运后的日常维护与故障处理

系统投入运行最初的三个月属于故障高发期,必须有专人定时对控制柜内风扇运转状况、滤波电容外表状态、接线端子温度起伏、通信模块显示情况等展开检查。通过使用 PLC 的缓冲区或者上位监控软件的历史报警功能来回溯频发但是持续时间较短的隐性故障,例如间歇性的通信超时、编码器信号扰动等,集中排查并彻底消除。

建立故障代码快速索引手册,把常见驱动器报警代码、PLC 系统故障灯含义、通信中断可能原因及排查步骤整理成册,放在现场控制柜附近。对复杂的故障设置远程诊断通道,由安全网关授权设备厂家工程师远程登录并获取诊断数据,减少故障响应时间^[4]。每月对程序、数据参数做一次完整的备份,备份文件要异地保存,还要检验备份的可恢复性。这些日常的保养工作虽然繁杂,但是却是系统长期稳定运行的基本保证。

4 保证长期稳定运行的配套措施

4.1 操作与维护人员的技能培训

培训内容要和实际设备相结合,不能进行空洞的理论讲解。对操作工进行参数设置、启动停止、异常报警初步判断和报告流程的培训,培训后经过现场实操考核合格才能上岗^[5]。对维修电工来说,培训内容要有电气图纸快速查找、万用表和示波器现场检测、通信故障逐段排查、变频器参数拷贝与恢复。工程师层次要懂得程序在线修改,网络诊断,OPC UA 节点设置以及安全功能检测。每年开展一次复训和技能竞赛,保证技能水平同设备更新同步。

4.2 备件、工具与档案的管理

关键备件的缺失是导致停机时间延长的重要原因。根据设备清单来确定最低安全库存,包含通信模块、电源模块、常用 I/O 模块、继电器、熔断器、操作面板等。维修工具箱要装有数字万用表、过程校验仪、网络测试仪、485/232 转接适配器和相应的编程电缆,由专人保管,定期校准。

档案管理上,电气图纸、网络拓扑图、变量表、程序源代码和版本记录应该集中存放在技术档案室,并且要保留电子副本。每次程序修改或者硬件更换之后,档案管理员应在三天之内对相关文件进行更新,并注明变更的原因和生效时间,不能在现场调试人员口头变更而没有留下记录。

4.3 用电安全与应急防护方案

智能配电系统提高了电能管理水平,但是安全防护的要求并没有降低。高压、低压配电室应装设绝缘监测装置和电弧光保护装置,按周期校核保护定值及开关动作特性是否匹配。现场区域紧急断电按钮的安装位置要覆盖所有的操作点位,用醒目的标识来标明。每年至少开展一次全员参加的触电急救、电气火灾扑救演练,保证发生事故时人员有基本的自救能力。局部放电检测、红外热成像巡检应列入季度计划,主要对电缆接头、开关触头、变频器内部功率模块进行扫描。

4.4 能耗监测与运行成本控制

利用已经建成的智能电表网络,每月对各个车间、各

个主要设备的单位产量电耗进行统计。对比历史数据和同型产线基准,找到异常耗能点。常见的不合理能耗有空压机卸载时间过长、电机空载运行、照明和空调没有按照班次关闭等^[6]。根据识别出的问题采取变频调速改造、改善设备待机状态、安装时序控制开关等低成本的措施。能耗数据同步到班组考核中,用管理手段加强全员节能意识,把运行成本的控制变成日常作业的习惯。

5 结束语

智能工厂创建不是单纯地追求技术的新奇和复杂,在电气自动化打下坚实基础之后,再慢慢达成设备联网、数据互通、精细化管理。本文从设备和控制的联网升级、工程实施的四个关键步骤、四项配套保障措施入手,给出可以参照执行的具体方法。驱动和配电设备按照表列参数进行联网配置,控制器用 OPC UA 实现全厂数据贯通,安装调试过程中严格抗干扰布线,逐项完成联锁测试,投产后通过培训、备件管理、安全预案、能耗管控实现长期稳定运行。以上工作落实到位之后,电气自动化系统就会拥有稳定的底层能力,可以给后面的数据分析以及智能决策提供真实、连续、准确的数据来源,从根本上支持智能工

厂行稳致远。

[参考文献]

- [1]张芳,霍文进,吴静丽,等.基于 PLC 的工业生产线电气自动化改造方案设计与应用 [J].产业与科技论坛,2026,25(10):38-40.
 - [2]齐政.基于以太网通信的电气自动化集成控制技术研究 [J].自动化应用,2026,67(12):273-276.
 - [3]冯印帅.电气自动化技术在冶金工业能耗管理中的应用 [J].流体测量与控制,2026,7(1):87-90.
 - [4]邓国泉.基于深度学习的工业电气自动化系统故障诊断与智能优化控制[J].电气技术与经济,2024(8):60-62.
 - [5]傅桂林.智能化技术在机械电气设备中自动化控制系统的应用研究[J].电子质量,2025(4):35-39.
 - [6]王勇.工业 4.0 背景下数字技术在工业电气自动化系统中的应用[J].现代工业经济和信息化,2024,14(9):77-80.
- 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。