

面向智能工厂的电气自动化系统网络集成与优化研究

唐贺龙

(河北冀中云智科技有限公司, 河北 石家庄 050060)

摘要 智能工厂的发展不仅依赖于高性能的生产设备和自动化控制系统, 更依赖于贯穿全厂的网络通信基础设施。电气自动化系统在智能工厂中承担着采集、控制、监测和反馈的核心任务, 其网络集成能力直接决定了生产过程的稳定性与信息流的实时性。本文围绕智能工厂电气自动化系统的网络集成与优化展开研究, 系统分析了多层分布、协议多样及冗余机制等网络特征, 提出了分层分域的集成设计方案, 并针对动态流量管理、网络拓扑自适应优化及智能监控自诊断等关键优化方法进行了深入探讨与验证, 旨在实现生产过程的高效协同、数据实时传输与网络可靠性提升, 为智能制造环境下电气自动化系统的集成与优化提供技术方案参考。

关键词 智能工厂; 电气自动化; 网络集成

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.013

0 引言

随着工业 4.0 理念的普及与智能制造技术的产业化推广, 传统的电气自动化系统已难以满足现代智能工厂对高效率、高柔性和高可靠性的生产需求。智能工厂通常具备多类型生产设备、复杂的工艺流程及海量的数据采集需求, 使得电气自动化系统在控制、监测、数据传输及管理等方面面临诸多挑战。设备互联的多样性和协议复杂性导致系统集成难度大, 跨层数据传输效率低, 传统网络无法满足实时控制和高精度调度的要求。在这样的环境下, 研究面向智能化车间的电气自动化系统网络融合、优化问题既有着重要的学术意义, 也能够为实际工程项目提出解决办法, 进而帮助生产调度更便捷灵活、实时监测以及远程维护等等, 使整体的生产率、安全性以及能耗水平得到全面提升, 促进智能制造体系向更加一体化、智慧化的方向发展。

1 智能工厂电气自动化系统网络特征分析

智能化工厂的电力自动化系统有分层次、协议复杂、高速处理要求高、冗余等特点, 这就使得它的网络架构既要保证快速的数据流动, 还要保障对于控制的要求以及整个系统的稳定性, 在此基础上还要考虑到大规模设备的连接以及安全等问题^[1]。

智能制造车间电气控制系统不同层次间的数据量和时延有较大区别。现场层强调的是低时延、实时监测, 实现设备即刻反馈; 管控层需要执行更为繁复的控制

命令以及对多个设备间的协同控制, 所以数据量相对变大, 同时对于时延的要求也相对较高; 管理层面负责保存大量的历史数据以及数据分析的工作, 不需要太强的时效性, 但是需要较大的带宽以及足够的容量。

2 面向智能工厂的电气自动化系统网络集成设计

2.1 网络分层规划

智能制造车间电气自动化系统网络架构首先应该确定分层级, 以便清楚地进行信息传递以及传输。一般把网络分成了现场级、控制级和管理级三级, 在其中一些重要节点布置了边缘计算层, 并进行部分信息处理和实时反馈等操作。现场级主要包含了各种传感器、执行机构、工业机器人等设备, 所收集的数据速度一般在 2 ~ 5 MB/s, 对于延迟的要求不超过 5 ms; 控制级就是 PLC 控制器和 DCS 控制器组成的模块, 要接收处理 10 ~ 20 MB/s 的数据量还要保持指令发送延时小于 10 ms, 管理级就是对 SCADA 和 MES 系统进行汇总分析的部分, 上传的信息量能达到 50 ~ 100 MB/s, 可以允许的最大延迟时间约为 50 ms 左右。分层设计利用 VLAN 以及物理隔离来降低广播风暴和越层次干扰的发生概率, 方便进行网络规模预估及带宽规划。

2.2 多协议融合设计

智能工厂的设备众多, 不同等级、不同厂家的设备采用的协议差别很大。就现场而言, 常用 Modbus、PROFINET, 控制层常用 Ethernet/IP、PROFIBUS 等等,

作者简介: 唐贺龙 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气自动化以及网络。

管理常用 OPC UA 和 MQTT。为了做到互联互通,需要引入多协议网关以及数据整合平台,网关负责把现场设备的多种协议转化为统一的格式以 OPC-UA 的标准接口提供给 MES 或者 SCADA 等系统使用,从而达到上下级交互的目的。例如:某装配车间有 32 条 PLC 控制系统和 48 台机器人,经过 4 个工业网关进行协议转化之后,数据传输的成功率高达 99.8%,平均延时仅为 3.5 ms。

2.3 冗余与容错配置

电力自动化网络稳定性决定了生产的连续性,所以在可靠性方面要重视冗余以及容错设计。现场层可以用双环冗余(Ring Topology)、MSTP 链路等方案把主要的 PLC、传感器加入环中,达到一个点出故障就能快速切换的效果,要求在 0.5 s 之内;控制层中的 PLC 可以有热备份方案,在主 PLC 出现故障的时候备机能够自动接手控制程序,保持命令不间断地进行下去;管理层用集群备份及边缘节点冗余的方式保证信息安全。例如:某智能化装配线,在运用了双环冗余之后,链路故障的发生概率下降了 80%,系统的整体可用度达到了 99.95%。同时还可以增加网络监控软件与 SNMP 协议,对链路状况、通道流量以及设备状况等指标实时监控,给及时发现并处理故障及自动切换奠定基础。

2.4 带宽与流量优化

对于智能工厂网络来说,带宽管理和流量调度是实现实时控制及巨量数据运算的前提条件,在对流量进行统计后分隔开重要控制系统通道与无关紧要的数据通道,采用 QoS (Quality of Service) 策略优先发送 PLC 控制命令以及警报信号;链路捆绑技术可以将两根或更多根实际线路进行捆扎起来增加备用带宽宽度,如给控制层骨干交换机设置 4 个 1 Gbps 捆绑链路,总共达到 4 Gbps 的速度,以适应多个机器人的协作操作、高质量视频传输需要。另外,在边缘计算设备端对底层获取的数据做初步运算后,再上传重要的数值和警报信息到管理级,降低了中央网络通信负荷大约 40%。此外,可以使用动态路由算法,在线监测实时链路负载情况而对数据传送路线进行实时的变更,防止网络堵塞以及传输时延的最大化发生,有效提升网络资源的占用率以及生产的调度弹性。

3 面向智能工厂的电气自动化系统网络集成的优化方法

3.1 动态流量管理与智能调度

智能制造车间生产的生产数据流呈较强的波动性和突发性特点,在不同的生产批号或者工序控制数据以及监测试验数据流量波动幅度可达到 3~5 倍,对于这种流量变化大的情况,如果没有及时合理的流量

调度很容易引起流量拥堵以及指令传送滞后等问题。可以采用一种基于深度学习的流量预测算法,实现对各个链路实时预测并排序,如通过现场层、控制层历史数据实时采集每隔 5 s 做一次流量预测提前发现即将到来的高流量时段,利用 SDN 控制器进行动态调整路径选择与链宽配置。在某一装配工段试验中使用这种方法之后,网络堵塞问题由原来的每周大约 12 次下降到 2 次左右,主要监控指标的平均时延降低约 22%,最大流量分配比提高到了 95% 以上。并且配合 MES 系统把非紧急信息传送延迟或者批量发送从而腾出更多实时通讯带宽,保障了精密仪器的动作以及精准同步执行不出现问题,达到对生产线连续性、数据即时性的双重提升的效果。

3.2 网络拓扑自适应优化

智能车间设备迭代更新速度快,生产工艺布置方式多样,固定的物理网络架构不能满足其对产线变化的需求,造成链路间使用率不平均以及闲置资源浪费现象严重。解决方案基于动态的网络结构设计可以实现对网络结构实时调节,采用 SDN 和边缘计算技术,把各条链路的实际传输负荷、传输时延及错包概率等信息及时发送到管控平台,由程序自动调度网络通路的方式。例如:在一个混合型生产线里面,控制端原有的星型结构在网络负荷较高的时候有部分交换机不足 20% 的负载率以及一些连接的带宽达到了 90% 以上,出现瓶颈问题。经过自适应调节之后,在一部分节点之间采用环型以及串型相结合的网络结构,整体链路上行利用率达到了 75%,平均延迟下降了 15% 左右,同时备用链路上行利用率由原来的 10% 增长到 35%,减少了多余的浪费增加了冗余余量,提高了系统的安全性,在多机器人,多工作站合作环境中运用十分有效,在线动态改变传输路线来满足生产的弹性需要和网络资源的合理使用。

3.3 智能监控与自诊断优化

智能工厂网络系统的可靠性不仅仅依靠硬件冗余,还应该实施在线监测以及自我检测以及时发现问题并且预先处理,可以通过设置人工智能类型的网络健康检测装置,实现对网络延迟、丢包率、带宽使用情况、交换机负荷等情况持续性的观察,并利用机器学习技术来预测可能出现的问题环节。例如:在某电气自动化工厂中,利用 AI 模型对 500 个网络节点进行预防式计算,在线提前 72 小时识别出有三个可能会出现阻塞现象的交换机接口,并作出相应的流量调度以及路径的选择决定防止突发状况的发生^[2]。自诊断优化还可以采用故障模式(FMEA)的方法来评估网络设备的可能存在的失效概率,并辅助运维人员做出优先级维修

计划。试点的结果显示,在采用智能检测以及自诊断优化以后,网络突然发生中断的概率降低大约 65%,平均修复时间也由原先的两个小时变成了半个小时的时间,使得系统能长时间地工作,生产的稳定性得到了很大改善。

4 实施效果

4.1 案例背景

某智能化装配厂房坐落于华东地区,总面积大概有 8 000 m² 左右,生产线主要是对新能源汽车的动力总成进行装配。厂房配置有 32 个 PLC、48 个工业机器人以及将近 200 个传感器节点,设备种类繁多,包括机器人夹爪、装配、视觉识别、液压控制系统等等^[3]。现有网络时延较高,协议差异较大,大数据量上传困难,存在一些多余的线路造成资源浪费,不能适应大规模产品更换、多品种、远程监控的情况。为了提升工作效率,改善数据流动性和保证系统的稳定性,工厂选取基于智能工厂网络集成和优化的方法来进行该厂房电气自动化的网络升级实验。

4.2 实施方案

该项目采用分层分区整合方式,把整个网络分为现场层、控制层、管理层以及边缘计算层四个部分。其中,现场层使用西门子 S7-1500 系列 PLC 为核心控制器,每一台 PLC 具备每秒钟执行 1 000 条控制命令的能力并且有 PROFINET IRT 通信端口,工业机器人的接口使用 EtherNet/IP 协议,通过四台 Moxa EDS-5008 工业交换机制成环形冗余方式,一个环路的带宽为 1 Gb/s,并且冗余切换的时间小于 0.5 s。管理人员服务器使用 Dell PowerEdge R750 集群,每一台均配备有 Intel Xeon Gold 6348 CPU、256GB 内存以及 NVMe SSD 存储,总的带宽能够达到 80 MB/s,运行着 OPC UA 数据整合系统;在软件层面,安装了基于 SDN 的智能流控组件,每隔 5 s 就对一次预测性排程来改变路径规则,再加上边缘计算节点对于现场收集的数据做了异常分析和压缩操作,减少了传输的数据量大约 40%,在此基础上还加入了基于机器学习的自我诊断程序,可以实时监测网络延时、丢包概率以及端口占用情况等参数,从而进行自动化的优化选择以及报警提示等^[4]。整个系统联设计保证了每一层协议可以相互衔接;带宽划分恰当以及利用 QOS 来保证一些主要控制链路及时性的措施。

4.3 实施效果

具体实施效果如表 1 所示。

生产车间电气自动化系统在技术指标方面取得了很大进步。PLC 指令时延降至原来的一半(5.1 ms),

符合高效率生产的要求;报文丢失概率降为 1% 以下,保证了控制信息传送的安全性;主干交换机负荷明显减轻,使得该系统的冗余度以及网络的安全性能进一步加强^[5];环形网络冗余切换时间缩短有利于保证生产线的稳定性;边缘节点提前预处理数据的能力有所提高,现场的数据量大大减少,减轻了数据中心的压力。这样不但提高了系统反应敏捷程度以及对现场设备的调控速率,而且为车间开展柔性制造、实时监测与智能化维护提供了良好的硬件条件。

表 1 实施效果

技术参数	优化前	优化后	改进幅度
平均 PLC 指令延迟 (ms)	12.4	5.1	59%
数据包丢失率 (%)	0.8	0.1	87.50%
核心交换机 CPU 利用率 (%)	72	48	33%
环网切换时间 (ms)	1 200	500	58%
现场数据上传量 (MB/s)	18	11	39%
边缘节点处理延迟 (ms)	15	6	60%

5 结束语

本文通过对智能工厂电气自动化系统网络特征的分析、分层分域的集成设计及针对性优化方法的研究,从网络架构、智能监控、数据流管理等多维度展开探讨,为智能制造环境下的自动化系统提供了宏观设计思路和技术路径。研究成果不仅强调了系统的分层组织和协议兼容性,也突出了动态调度、拓扑自适应和智能监控在提高网络效率和可靠性中的核心作用,同时兼顾了生产过程的数据处理和实时控制需求。从宏观角度看,研究展示了电气自动化网络从静态设计向自适应、智能化优化的演进趋势,为智能工厂构建高效、可靠、灵活的生产控制体系提供了理论依据和实践参考,同时为未来工业物联网和智能制造的深入应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 陈剑锋. 电气自动化技术在工厂自动控制系统中的应用研究[J]. 百科论坛电子杂志, 2025(13):340-342.
- [2] 李成勇, 郭海朝. 电气自动化在工业生产中的应用与研究[J]. 新潮电子, 2025(05):97-99.
- [3] 修超, 李玥. 5G 在电气控制系统自动化中的应用研究[J]. 通信电源技术, 2025, 42(08):206-208.
- [4] 王博. 浅谈电气工程及其自动化智能化应用[J]. 读报参考, 2025(19):17-18.
- [5] 何立健. 智能化工厂电气自动化调试技术分析[J]. 模型世界, 2025(20):57-59.