

工业以太网在电气自动化系统集成中的应用与通信 实时性保障探讨

赖烈强

天地（常州）自动化股份有限公司 江苏 常州 213000

【摘要】：工业以太网在电气自动化系统中广泛应用，解决了传统串行通信技术在高速数据传输、系统稳定性及扩展性方面的限制。通过实现实时数据传输，工业以太网能够在自动化系统中保证高效的数据交换与控制，满足智能制造的需求。本文重点分析了工业以太网在电气自动化系统中的应用场景，并探讨了其通信实时性保障措施，如网络时延、带宽优化及协议优化等技术手段，确保系统稳定高效运行。实时性保障策略的研究为工业自动化系统的智能化和高效化提供了技术支持。

【关键词】：工业以太网；电气自动化；实时性；数据传输；系统稳定性

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.064

引言

在现代工业自动化系统中，数据传输的稳定性与实时性是确保系统正常运行的关键因素。工业以太网凭借其高速、可靠及灵活的特点，已经成为电气自动化系统中不可或缺的通信基础设施。由于自动化系统对数据传输速度和延迟有较高要求，如何保障通信实时性成为了系统设计中的一项重要挑战。随着工业以太网技术的不断发展，新的协议与优化措施不断涌现，旨在解决时延、带宽限制等问题，从而确保自动化控制的高效性与实时性。针对这一问题，工业以太网的应用与通信实时性保障成为了自动化系统设计和升级中的研究热点。

1 工业以太网技术在电气自动化中的核心作用

1.1 工业以太网的基本概念与特点

工业以太网是基于标准以太网技术，为工业自动化和控制系统设计的专用网络通信技术。它不仅继承了以太网的高带宽和成熟的协议体系，还针对工业环境的特殊需求进行了优化。工业以太网在抗干扰、实时性、网络拓扑等方面做了相应的增强，使其能够在复杂的工业环境中稳定运行。与传统的以太网相比，工业以太网能够支持多种实时通信协议，如 EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/IP 等，满足自动化系统对数据传输速度和延迟的严格要求。工业以太网支持灵活的网络拓扑结构，可根据不同的自动化需求实现星型、环型或树型等多种连接方式。

1.2 电气自动化系统的通信需求分析

电气自动化系统通常涉及大量设备的互联与数据传输，要求通信网络具备高效的实时性和高可靠性。系统中的控制器、传感器、执行器等设备需要实时交换控制信号和反馈数据，任何延迟或信号丢失都可能影响系统的运行效果。自动化系统的通信需求不仅限于高速的数据传输，还包括网络的稳定性、冗余设计以及对外界干扰的抗干扰能力^[1]。随着工业 4.0 的推进，自动化系统对数据传输的要求不断提高，尤其是在生产过程中

对即时监控、远程控制和大数据处理的需求日益增加，这也促使通信技术必须能够支持更高的数据吞吐量、更低的延迟和更高的系统可靠性。

1.3 工业以太网在电气自动化中的优势

工业以太网凭借其高带宽、低延迟和开放标准，已经成为电气自动化系统中通信的核心技术。相较于传统的现场总线技术，工业以太网的传输速度更快，能够支持实时数据流的传输，保证系统的及时响应。它能够实现多种设备的联网和集中管理，提供更强的扩展性和灵活性。工业以太网支持标准的网络协议和工具，使得设备间的互操作性大大提高，便于系统的集成和升级。与传统系统相比，工业以太网的成本也更具竞争力，尤其是在长远来看，它通过减少设备数量、降低维护成本等方面展现了优越性。

2 实时性保障的关键技术

2.1 网络时延控制与优化

在工业自动化系统中，网络时延的控制是确保系统高效运行的核心要素之一。时延过大可能导致数据传输延迟，进而影响实时控制的准确性与响应性。为了优化时延，常采用多种策略，如优先级调度和时间戳同步。优先级调度确保高优先级的控制数据能够优先传输，避免低优先级的数据阻塞实时通信。同时，时间同步协议，如 IEEE 1588 精确时间协议（PTP），用于精确同步网络中各设备的时间戳，保证数据传输的时效性和一致性。

2.2 带宽分配与传输效率提升

带宽分配是保证实时数据流畅传输的另一个关键技术。在电气自动化系统中，带宽不足会导致数据拥堵和传输延迟，影响系统的实时性。通过动态带宽分配技术，可以根据实时数据流量的变化，灵活调整带宽的分配，确保数据传输的高效性。为优化带宽利用率，可以采用服务质量（QoS）策略，基于不同的数据流性质和优先级进行带宽资源分配^[2]。对于一些高优

先级的控制数据，系统可以为其预留一定的带宽，确保其在网络繁忙时也能得到保障。采用数据压缩和分帧技术有助于提升传输效率，减少网络带宽的消耗。合理的带宽管理不仅能有效避免数据丢包，还能提高系统的总体性能。

2.3 协议优化及数据传输策略

协议优化在确保实时通信中的高效性和低延迟方面发挥着重要作用。工业以太网中常见的实时通信协议，如 EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/IP，均具备较高的实时性要求。优化这些协议的机制，可以显著提升传输效率与时效性。协议优化的关键之一是减少通信协议中的开销部分，简化数据包结构，减少冗余信息的传输。通过精简传输协议，能有效降低时延并提高数据吞吐量。另一项优化策略是在网络传输中使用批量传输和分时复用技术，将多个控制信号合并成一个数据包传输，减少多次通信的需要，从而减少协议处理时间。边缘计算和局部智能技术的结合也推动了数据传输策略的进步，通过在网络边缘进行数据预处理与分析，能够将实时性要求高的数据流优先处理，减轻中央处理系统的负担。

3 工业以太网在不同电气自动化应用中的实践

3.1 智能制造系统中的应用

在智能制造系统中，工业以太网为各类设备和生产线之间提供了高速、稳定的通信平台。利用其高带宽特性，生产现场的各种自动化设备，如机器人、PLC（可编程逻辑控制器）和传感器，能够实现实时数据交换和远程监控。工业以太网的实时通信能力确保了生产线上的设备协同工作，支持高速的数据传输和动态调整。通过工业以太网，制造系统可以集成先进的数据分析平台，结合物联网技术，实时采集设备的运行状态、生产进度及质量控制数据。这使得生产过程更加灵活，能够根据实时数据进行优化决策，提升生产效率并降低维护成本。系统中的任何故障也能通过网络迅速识别，并及时响应，减少停机时间。

3.2 过程控制系统中的应用

过程控制系统通常用于化工、电力、石油等行业，在这些领域，工业以太网的应用至关重要。其在过程控制中扮演着连接不同设备、实现数据同步和提高系统效率的角色^[1]。通过工业以太网，控制中心能够实时接收来自现场设备的反馈信号，执行复杂的自动化任务，如温度、压力等参数的控制和监测。工业以太网使得设备能够快速、准确地交换信息，从而提高了过程控制的精确度与响应速度。在一些关键过程中的实时性要求较高，工业以太网能够保证数据传输的低延迟和高可靠性，使得过程控制系统能够更加精准地调节生产过程。网络冗余和容错机制也确保了系统的高可用性和安全性，防止单点故障导致的生产事故。

3.3 远程监控系统中的应用

远程监控系统通过工业以太网实现了设备、生产线和整体工厂的远程数据采集和实时监控。这一技术在电气自动化系统中被广泛应用，尤其在跨地域的生产设施中，工业以太网的作用愈加突出。通过将不同地理位置的设备连接到同一网络，操作人员能够在控制室内实时监测远程设备的运行状态，并进行远程操作和调试。工业以太网提供的高带宽和低延迟特性，确保了设备状态信息和操作命令的快速传输。这种远程监控能力显著提升了系统的管理效率和响应速度，减少了现场工作人员的数量并降低了安全隐患。通过集成视频监控、环境监测等子系统，远程监控系统能够实现多维度的数据监控，为工业自动化的优化和精细化管理提供了重要支持。

4 工业以太网与其他通信技术的对比分析

4.1 工业以太网与传统通信技术的优劣

工业以太网与传统通信技术，如串行通信（RS-232、RS-485）相比，展现出了明显的优势。传统通信技术在带宽和实时性方面存在较大的瓶颈，特别是在数据传输速率和支持的设备数量方面。串行通信通常适用于短距离的简单数据传输，但在多设备接入和高速数据交换方面的表现较差，无法满足现代自动化系统日益增长的数据需求。而工业以太网采用的是标准化的以太网技术，支持更高的数据传输速率，并通过标准协议实现设备之间的互联互通。工业以太网的网络拓扑更加灵活，可以支持更大规模的设备连接，且具有更强的扩展性。工业以太网能够支持复杂的实时通信协议，如 PROFINET、EtherCAT 等，保证了更低的延迟和更高的数据传输效率。工业以太网的缺点是部署成本相对较高，尤其是在需要大规模设备接入的场景中，网络架构设计也更为复杂。

4.2 与无线通信技术的比较

工业以太网与无线通信技术各有其适用场景。无线通信技术在灵活性和移动性方面具有显著优势，能够支持大范围的无缝覆盖，适合于需要频繁变动位置的设备或无法布线的环境。工业以太网在实时性、可靠性和数据传输速率上则优于无线通信技术。无线通信技术由于受限于信号干扰、带宽限制以及网络稳定性问题，无法满足一些对实时性要求极高的自动化系统。与无线技术相比，工业以太网提供的有线连接能确保更高的数据传输速度和稳定性，尤其是在高密度数据传输的环境中，工业以太网表现出色^[4]。尽管无线通信技术在传输距离上有优势，但其可能面临的数据丢失和延迟问题，尤其在高噪声工业环境中，严重影响其作为主要通信手段的可行性。在需要高可靠性和低延迟的工业应用中，工业以太网通常比无线通信技术更为优越。

4.3 跨平台集成的挑战与解决方案

工业互联网的快速发展，跨平台集成已成为自动化系统中

一个重要的课题。在不同平台之间，特别是不同通信协议和硬件之间的集成，常常面临着通信标准不统一、数据格式不兼容和协议转换困难等问题。工业以太网在这方面展现了较好的兼容性，但不同厂商的设备和系统往往使用不同的协议和数据格式，导致集成时需要进行大量的转换工作。为解决这一问题，采用统一的通信协议和中间件解决方案成为一种趋势。使用 OPC UA（统一架构）协议，它为设备间的数据交换提供了一个统一标准，确保不同平台之间的互联互通。除此之外，边缘计算技术也为跨平台集成提供了帮助。通过在网络边缘进行数据处理与协议转换，能够减轻中央系统的压力，并有效促进跨平台的数据融合。通过这些技术手段，工业以太网可以与其他技术平台更高效地集成，支持更加复杂和多样化的自动化应用。

5 面向未来的通信实时性优化发展方向

5.1 新型协议的研究与应用

工业自动化系统对实时性要求的不断提高，现有通信协议面临着性能瓶颈。针对这些问题，新型协议的研究正在逐步推进，如 Time-Sensitive Networking(TSN)和 5G 网络中的工业应用协议。这些新型协议的设计旨在通过减少数据传输中的延迟、优化带宽利用和提高网络可靠性，来满足实时数据交换的需求。TSN 通过在标准以太网中引入时间同步机制和流量调度功能，实现高精度的实时数据传输，从而提高网络的确定性。而 5G 技术则凭借其超低延迟和高带宽特性，在远程控制、智能制造等应用场景中表现出巨大的潜力。随着这些新协议的应用推广，未来工业自动化系统将能够更好地应对高实时性要求，推动智能制造和物联网的发展。

5.2 智能网络与边缘计算的结合

智能网络与边缘计算的结合正在成为实时性优化的重要

发展方向。在传统的云计算架构中，大量的数据需要传输到远程服务器进行处理，这样不仅增加了传输延迟，还影响了实时性要求较高的应用^[5]。通过在网络边缘部署计算资源，边缘计算可以在靠近数据源的位置实时处理数据，从而减少数据传输时间，优化实时响应能力。智能网络则通过引入人工智能算法来对数据流进行动态分析与调度，智能化地调整网络资源分配，提升通信的效率与可靠性。结合边缘计算和智能网络，不仅能够有效提升工业自动化系统的响应速度，还能减少带宽压力和延迟问题，增强系统的稳定性和实时性。

5.3 多层次数据传输的优化策略

多层次数据传输的优化策略通过对数据流进行分层处理，以提高传输效率和保证实时性。在工业自动化系统中，不同的数据类型对实时性和带宽的需求各不相同。一些控制信号要求低延迟传输，而一些传感器数据则对实时性要求较低。通过将数据按优先级分层，采用不同的传输策略，可以实现更加灵活且高效的通信。对于关键的实时控制数据，可以采用优先级调度，确保其在网络中获得足够的带宽与最短的传输延迟。而对于非实时性的数据，系统可以采用压缩、缓存和批量传输等技术，降低对带宽的占用并提升系统整体性能。多层次数据传输不仅优化了带宽利用率，还保证了关键数据的实时传输，满足了工业自动化系统对高效、稳定通信的需求。

6 结语

工业以太网在电气自动化系统中的应用已取得显著成效，但其面临的通信实时性问题仍需持续关注与优化。新型协议、智能网络与边缘计算的结合以及多层次数据传输优化策略，为解决这一问题提供了可行的技术路径。随着技术的不断发展，未来工业自动化系统的实时性和稳定性将进一步提升，为智能制造和工业互联网的深度应用奠定基础。

参考文献：

- [1] 程福同.电气自动化系统中工业以太网的实时性保障技术研究[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2025(7):123-126.
- [2] 荣耀.基于以太网通信技术的电气自动化集成控制系统设计与实现[J].通信电源技术,2025,42(1):16-18.
- [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(8):206-208.
- [4] 丁强.PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用分析[J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2025(8):136-139.
- [5] 王志远,杨明川,游祖南,赵俊涛.基于工业以太网的车间自动拧紧设备数字化改造[J].机电工程技术,2025,54(19):170-174.