

工业物联网边缘计算网关硬件系统优化设计研究

沈国锋, 汤国祥*

中国电信股份有限公司杭州萧山区分公司, 浙江 杭州 311200

DOI: 10.61369/TACS.2025140011

摘 要 : 工业物联网边缘计算网关是连接现场感知层、控制层与平台层的重要基础设备, 在设备接入、协议转换、边缘计算、数据预处理与远程协同等方面发挥着关键作用。随着工业现场数据规模不断扩大、设备类型持续增多以及实时处理需求日益增强, 传统工业物联网网关在接口兼容性、计算协同性、供电稳定性、连续运行能力与抗干扰性能等方面逐渐暴露出一定局限, 难以充分满足复杂工业场景下多源异构数据接入与边缘智能处理的实际需求。为提升工业物联网边缘计算网关的工程适用性与系统可靠性, 本文围绕其硬件系统组成及典型运行环境, 分析当前网关在接口扩展、边缘处理、功耗控制、热管理与工业防护等方面存在的问题, 并从多接口接入与隔离、主控与协处理器协同、电源与散热系统、存储与通信模块、抗干扰与可靠性设计等方面提出系统化优化思路。研究表明, 围绕工业现场应用特征开展硬件系统优化设计, 有助于提升边缘计算网关的数据接入能力、实时处理能力、长期稳定运行能力及复杂环境适应能力, 可为工业物联网边缘基础设施建设提供有益参考。

关 键 词 : 工业物联网; 边缘计算网关; 硬件系统; 优化设计; 工业通信

Research on Optimized Design of Hardware System for Industrial Internet of Things (IIoT) Edge Computing Gateway

Shen Guofeng, Tang Guoxiang*

Hangzhou Xiaoshan District Branch, China Telecom Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311200

Abstract : The Industrial Internet of Things (IIoT) edge computing gateway serves as a critical infrastructure connecting the field sensing layer, control layer, and platform layer, playing a pivotal role in device access, protocol conversion, edge computing, data preprocessing, and remote collaboration. As the scale of industrial field data continues to expand, the variety of device types increases, and the demand for real-time processing grows, traditional IIoT gateways gradually reveal certain limitations in terms of interface compatibility, computing collaboration, power supply stability, continuous operation capability, and anti-interference performance. These limitations make it challenging for them to fully meet the practical needs of multi-source heterogeneous data access and edge intelligent processing in complex industrial scenarios. To enhance the engineering applicability and system reliability of IIoT edge computing gateways, this paper analyzes the existing issues in the gateway's hardware system, including interface expansion, edge processing, power consumption control, thermal management, and industrial protection, based on its hardware components and typical operating environments. It then proposes systematic optimization strategies from aspects such as multi-interface access and isolation, main and co-processor collaboration, power supply and cooling systems, storage and communication modules, and anti-interference and reliability design. The research indicates that optimizing the hardware system design based on the characteristics of industrial field applications can improve the gateway's data access capabilities, real-time processing capabilities, long-term stable operation capabilities, and adaptability to complex environments, providing valuable references for the construction of edge infrastructure in the Industrial IoT.

Keywords : Industrial Internet of Things (IIoT); edge computing gateway; hardware system; optimized design; industrial communication

引言

随着工业数字化、网络化与智能化水平不断提升, 工业物联网已成为制造、能源、冶金、仓储、环境监测与设备运维等领域的重要技术支撑。在工业现场, 海量传感器、执行器、PLC、仪表及专用控制装置持续产生多类型数据, 传统依赖中心平台统一处理的模式在

实时性、网络负载、可靠性与安全性方面逐渐面临压力。边缘计算理念的引入，使数据在靠近设备侧的位置完成采集、过滤、聚合、分析和局部决策成为可能，而工业物联网边缘计算网关正是实现这一过程的核心硬件节点。

从工程应用角度看，工业物联网边缘计算网关不同于一般消费类网络终端，其不仅要完成常规数据转发任务，还承担协议适配、边缘计算、异常事件识别、局部缓存、状态监测与远程运维等功能^[1]。因此，网关硬件系统既要具备较强的多接口接入能力和一定的本地计算能力，又要具备较高的供电稳定性、工业环境适应性和长期连续运行能力。尤其在工厂车间、变配电站、矿山井下、物流仓储以及设备密集型产线中，现场常伴随电磁干扰、温升明显、粉尘潮湿、供电波动和网络结构复杂等情况，这些因素都对网关硬件系统提出了更高要求。

当前部分工业物联网边缘计算网关虽然已具备以太网、串口、无线通信和本地存储等基础功能，但在系统设计层面仍存在一些共性问题^[2]。例如，多源设备并发接入条件下接口资源分配不够合理，主控与通信模组之间协同性不足，边缘计算任务与通信转发任务容易相互争用资源，电源系统分域设计不完善，长时间运行时热量累积明显，接口防护与抗干扰能力欠佳等。这些问题会导致网关在复杂工业现场中出现数据延迟增大、通信不稳定、异常重启、局部死机或寿命下降等现象，影响工业物联网系统整体运行质量。

基于此，本文以工业物联网边缘计算网关为研究对象，在分析其硬件系统构成和典型问题的基础上，围绕多接口接入、边缘处理协同、电源与散热优化、存储与通信保障以及工业防护等方面展开硬件系统优化设计研究，以期为面向工业现场的边缘计算网关开发与工程部署提供设计思路。

一、工业物联网边缘计算网关硬件系统现状分析

（一）硬件系统构成单元解析

工业物联网边缘计算网关硬件系统通常由主控处理单元、通信接口单元、边缘计算支撑单元、电源管理单元、数据存储单元、人机交互与维护接口单元以及工业防护单元构成^[3]。主控处理单元主要承担系统调度、协议解析、设备管理、边缘任务协调和数据控制等功能；通信接口单元负责连接现场设备与上层平台，常见接口包括 RS485、RS232、CAN、以太网、DI/DO、USB 以及 4G、Wi-Fi、LoRa 等无线通信模块；边缘计算支撑单元则用于承载数据清洗、特征提取、规则判断与轻量分析等本地任务；数据存储单元用于缓存运行日志、临时业务数据和断网续传信息；电源管理单元为系统提供多路稳定供电并兼顾过压、欠压和浪涌防护；工业防护单元则主要服务于电磁兼容、接口保护、隔离与环境适应。

在实际应用中，不同工业场景对网关硬件系统的关注重点并不完全一致。面向生产线设备互联的网关更强调总线接入能力与协议适配效率，面向边缘智能分析的网关更重视处理器性能与存储资源，面向室外或复杂站点的网关则更强调电源可靠性与环境防护能力。因此，工业物联网边缘计算网关的硬件系统设计不能简单照搬通用嵌入式终端方案，而应结合工业现场需求进行模块化、针对性优化。

（二）多接口异构接入能力与协同效率不足

工业现场设备来源复杂、通信协议多样、接口类型不统一是边缘计算网关长期面临的典型问题。一方面，网关需要同时兼容 Modbus、CAN、私有串口协议、工业以太网及部分无线接入链路，不同接口在速率、时序、隔离要求和协议处理负载方面差异较大^[4]；另一方面，多类设备并发接入时，若接口电路设计缺乏分层隔离与资源协调，容易导致通道争用、数据拥塞和局部异常传播，降低系统整体处理效率。

部分现有网关在硬件系统上虽集成了多种接口，但接口间电气隔离不充分、收发驱动能力分配不合理、缓冲机制不足，导致在高并发或复杂接线条件下出现丢包、误码、响应延迟和接口故障扩散等问题。此外，若主控单元需要同时承担协议解析、数据封装和接口轮询任务，也会使网关在现场设备数量增加后出现实时性下降、任务阻塞和系统负载过高等现象。

（三）边缘计算任务增长带来的处理与存储压力加大

随着工业现场对本地分析、异常识别和快速响应需求不断增强，边缘计算网关已不再只是简单的数据转发节点，而逐步承担数据预处理、逻辑判断、阈值告警、缓存转发和轻量模型推理等工作^[5]。这意味着网关硬件系统需要在有限体积和成本条件下兼顾通信转发与本地计算两类任务。若硬件架构设计不合理，主控处理器在处理边缘任务时容易挤占通信资源，进而影响设备轮询和数据上送效率。

与此同时，工业现场数据具有持续性、突发性与多源性特点，部分业务场景还要求网关具备断网缓存和历史追溯能力^[6]。如果存储单元容量不足、读写性能有限或耐久性设计不到位，在长时间写入、高频日志记录和断点续传等业务下，系统容易出现缓存溢出、读写延时增加以及存储介质寿命缩短等问题。这些问题都会削弱边缘计算网关的稳定性和工程可用性。

（四）供电、散热与工业环境适应能力仍有待提升

工业物联网边缘计算网关通常需要长时间连续运行，部分场景甚至要求全天候无人值守工作。在这种条件下，电源系统的稳定性、散热系统的合理性以及抗干扰能力直接决定网关能否可靠运行。然而，一些现有网关仍存在供电分域不清、纹波抑制不足、峰值负载支撑能力弱和热设计粗放等问题。当现场存在供电波动、电机启停干扰或高温封闭环境时，网关容易出现重启、通信模块掉线、处理器降频甚至存储异常等现象。

此外，工业现场常伴随静电放电、浪涌冲击、电磁辐射、粉尘潮湿与机械振动等复杂环境因素。若接口防护、接地结构、屏

蔽设计和结构防护不到位, 不仅会降低数据传输稳定性, 还可能引发器件老化加速和故障率上升。由此可见, 工业物联网边缘计算网关在硬件系统层面的优化已不仅是性能提升问题, 更是其工程落地与长期部署的基础条件。

二、工业物联网边缘计算网关硬件系统优化设计

(一) 多接口接入与电气隔离电路的模块化优化设计

为提升工业物联网边缘计算网关的现场接入能力, 应首先对通信接口电路进行模块化优化设计。对于 RS485、CAN、DI/DO 和工业串口等常用接口, 可采用分组布局、独立隔离与分通道防护相结合的方式, 降低不同接口之间的耦合干扰和故障传播风险。对高频使用接口应配置独立收发芯片、终端匹配与必要的浪涌抑制电路, 对长距离接线或强干扰场景下的接口则应优先考虑数字隔离与隔离供电设计, 以增强接入稳定性^[7]。

在接口扩展策略上, 可通过主板加子板或基础板加功能板的方式, 提高网关对不同工业现场的适配能力^[8]。这样既有利于标准化设计, 也能减少因单一硬件版本兼容过多接口而带来的资源浪费和布线复杂度上升问题。对于高并发设备接入需求, 可在接口侧引入缓冲收发与状态检测机制, 使主控单元能够更准确地感知各接口工作状态, 提升系统级资源调度效率。

(二) 主控与协处理器协同架构的优化设计

边缘计算网关在硬件架构上不宜仅仅依赖单一主控处理器承担所有任务。为兼顾实时通信与边缘计算需求, 可构建“主控处理器+协处理器”或“应用处理器+实时控制单元”的分层协同架构。主控处理器主要负责系统管理、协议栈运行、数据封装和上层服务协调, 协处理器则承担高速接口管理、实时采集、局部规则执行或简单预处理任务。通过这种架构划分, 可减轻主控在高并发通信条件下的负载压力, 提高网关在复杂业务下的稳定性^[9]。

在具体实现上, 可利用多核处理平台、低功耗 MCU 配合高性能边缘计算模块, 或采用具备实时处理优势的专用控制单元承担接口轮询与时序控制。主控与协处理器之间应通过高速总线或共享存储机制进行数据交互, 并配置明确的任务边界和异常切换策略。通过硬件层面的协同设计, 能够避免通信任务与计算任务相互阻塞, 从而提升网关本地分析能力和整体响应速度。

(三) 电源管理与散热系统的稳定化优化设计

工业边缘计算网关通常需要同时为处理器、通信模组、存储器、接口收发器和传感辅助模块提供多路供电, 因此电源管理系统必须采用分域供电与分级稳压设计。对主控与边缘计算核心单元, 可采用效率较高的 DC-DC 方案以降低整体功耗; 对模拟接口、时钟电路和部分通信前端, 则宜采用低噪声 LDO 进行二次稳压, 以提升供电纯净度。为应对工业现场供电波动, 还应在输入端配置过压、欠压、反接和浪涌防护模块, 并辅以适当的滤波和储能设计, 增强系统抗冲击能力。

散热系统方面, 可结合机壳结构、元器件布局和功耗分布进行一体化设计。对于功率较高的处理器、无线模组和电源芯片, 应优先进行热源分散布局, 避免高热密度器件集中堆叠; 必要时

可通过导热片、散热壳体、金属背板及风道优化等方式提升散热效率。对于密闭型工业网关, 应特别关注长期运行条件下的热积累问题, 通过降低热点温升来保证处理器稳定性、存储寿命和通信模块可靠性。

(四) 存储与通信模块的可靠化优化设计

工业物联网边缘计算网关在实际运行中常面临网络波动、上层平台不稳定和现场数据持续积累等问题, 因此必须提高存储与通信模块的可靠性。存储系统应采用“运行缓存+持久存储”相结合的结构, 将高频临时数据与长期日志数据分开管理。对于频繁写入的业务, 应优先考虑耐久性较强、具备掉电保护机制的工业级存储介质, 并通过循环写入、分区管理和异常恢复机制降低数据损坏风险。

通信模块方面, 网关通常需要同时支持上行回传和下行控制, 因此在硬件选型上应兼顾带宽、稳定性与工业适应性。对以太网、4G 或 Wi-Fi 等通信单元, 应合理规划供电与天线布局, 降低与主控、高速存储和开关电源之间的相互干扰。对关键业务链路, 还可加入链路状态检测与故障切换支撑电路, 为远程运维和断链重连提供基础保障。通过提升存储与通信模块可靠性, 可有效增强网关在断网缓存、异常恢复和长期部署条件下的系统韧性。

(五) 抗干扰、防护与可维护性的系统化优化设计

工业边缘计算网关的硬件系统优化不能仅停留在功能模块提升层面, 还应从系统工程角度强化抗干扰、防护与可维护性设计。首先, 在 PCB 布局中应明确划分电源区、接口区、计算区和射频区, 减少不同功能模块之间的串扰; 关键走线应尽量缩短回流路径, 避免跨分割面布线带来的附加干扰。其次, 在外部接口处应配置静电防护、共模抑制和浪涌吸收电路, 对易受冲击的通信口和电源口实施重点保护。

在结构设计上, 可根据工业场景需要配置金属屏蔽、接地弹片、防尘防潮结构和抗振固定方式, 以提高网关在复杂环境中的长期稳定性。同时, 为了便于运维与升级, 硬件系统应预留标准化调试接口、状态指示单元和维护端口, 并在关键模块中加入基础自检与状态反馈支撑。这样不仅有利于提升设备运行透明度, 也便于现场人员快速定位故障、缩短维护时间。整体而言, 抗干扰与可维护性设计是工业物联网边缘计算网关由“可用”走向“好用”和“耐用”的关键环节。

三、结语

本文围绕工业物联网边缘计算网关的硬件系统优化设计展开研究, 结合工业现场多源接入、边缘处理、连续运行和复杂环境部署等实际需求, 分析了当前网关在接口协同、边缘计算支撑、电源与散热、存储与通信以及工业防护等方面存在的主要问题。在此基础上, 从多接口接入与隔离、主控与协处理器协同、电源与散热系统优化、存储与通信可靠化以及抗干扰与可维护性提升等方面提出了系统化优化设计思路。

总体来看, 工业物联网边缘计算网关作为连接现场设备与工

业平台的重要节点，其性能提升不能仅依赖软件层面的协议适配与业务优化，更需要从底层硬件系统架构出发，构建兼顾接入能力、处理能力、稳定性与环境适应性的工程实现方案。通过面向应用场景的硬件系统优化，可有效增强网关在复杂工业现场中的

持续运行能力和边缘服务能力。后续还可结合不同工业场景对计算负载、通信规模与部署环境的差异需求，进一步细化模块配置与系统集成方案，以推动工业边缘网关向高可靠、低维护与智能化方向发展。

参考文献

- [1] 武丽英, 沈林涛. 工业物联网网关设计 [J]. 自动化仪表, 2020, 41(9): 51-53, 58.
- [2] 栾燕, 张娟娟, 张健. 工业网关分类及关键指标分析 [J]. 自动化仪表, 2020, 41(7): 93-97.
- [3] 张帅, 郑金龙, 李猛, 李岳扬. 一种基于嵌入式处理器的多协议网关设计 [J]. 电子制作, 2022(7): 13-17.
- [4] 孙常青, 郑富全, 胡代荣, 周广旭, 许兆霞. 基于云的工业物联网网关设计与实现 [J]. 信息技术与信息化, 2020(12): 166-168, 172.
- [5] 郭家伊. 基于边缘计算的工业物联网容器管理引擎设计 [J]. 计算机时代, 2021(7): 38-41, 45.
- [6] 于海飞, 张爱军. 基于 MQTT 的多协议物联网网关设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 45-51.
- [7] 郑美芳, 余波, 魏海生, 潘加琴. CAN 总线和以太网间的网关设计与实现 [J]. 中国管理信息化, 2021, 24(10): 213-214.
- [8] 施永贵. 可配置物联网网关设计与实现 [J]. 物联网技术, 2022, 12(6): 51-54.
- [9] 游小荣, 顾剑柳, 邓丰. 工业互联网环境下边缘计算网关软件设计与实现 [J]. 信息技术与信息化, 2022(1): 29-32.