

低功耗物联网技术在桥梁（建筑）结构健康监测中的应用

朱明云

江西飞尚科技有限公司，江西南昌，330000；

摘要：随着基础设施老化问题不断加剧，桥梁结构健康监测对于保障通行安全、延长建筑使用寿命具有重要意义。传统监测技术存在功耗高、布线复杂、覆盖范围有限等问题，难以满足长期实时监测的需求。低功耗物联网（LPWAN）技术凭借低功耗、广覆盖、低成本、大连接的核心优势，为桥梁结构健康监测提供了全新的解决方案。本文分析桥梁结构健康监测的核心需求与传统技术瓶颈，梳理主流低功耗物联网技术的特性与适配场景，阐述该技术在桥梁关键参数监测中的应用路径，探讨应用中面临的挑战并展望发展趋势，为相关领域的规模化应用提供理论参考与实践方向。

关键词：低功耗物联网；桥梁结构健康监测；LPWAN 技术；数据传输优化

DOI：10.69979/3029-2727.25.11.102

引言

桥梁是交通基础设施的关键组成部分，其结构健康状况直接影响交通网络的通行安全与运营效率。近年来，受桥梁服役年限增长、交通荷载增加及极端气候等因素影响，裂缝、位移、钢筋锈蚀等结构损伤问题逐渐凸显，若不能及时监测与预警，可能引发重大安全事故。传统桥梁结构健康监测多依赖有线传感器、人工巡检或高功耗无线设备，存在诸多局限性。低功耗物联网技术以低功耗广域网（LPWAN）为核心，能在低功耗前提下实现远距离、大规模数据传输，适配桥梁等大型户外基础设施的监测场景。

1 桥梁结构健康监测的核心需求与传统技术瓶颈

1.1 核心监测参数

桥梁结构健康监测的核心参数可从不同维度划分。力学参数是反映桥梁承载能力与结构稳定性的关键，包括结构应力、应变、振动频率、位移变形等，这些参数能直接体现桥梁在承受交通荷载等外力作用下的结构状态。环境参数对桥梁材料老化速度与结构耐久性影响显著，主要涵盖温湿度、风速、降雨量、腐蚀性气体浓度等，不同环境条件会导致桥梁材料出现不同程度的老化与损伤。状态参数则是判断桥梁结构损伤程度的重要依据，如裂缝宽度、钢筋锈蚀程度、支座沉降等，通过对这些参数的监测，可及时掌握桥梁结构的损伤情况。

1.2 场景需求特性

桥梁结构健康监测的场景需求具有多方面特性。长

期连续性是重要特性之一，桥梁服役周期通常长达数十年，这就要求监测系统能够支持长期稳定运行，减少维护干预，以实现桥梁全生命周期的健康监测。广域覆盖性也不可或缺，大型桥梁跨度较大，监测范围需要覆盖桥面、主梁、桥墩、支座等全结构区域，确保无监测盲区。实时性与预警性同样关键，监测数据需实时传输，当参数超过预设阈值时，系统要能快速触发预警，为应急处置预留充足时间。此外，低维护成本也是场景需求的重要组成部分，桥梁多处于户外复杂环境，监测设备需具备抗干扰、抗恶劣环境的能力，从而降低人工维护频率。

1.3 传统技术瓶颈

传统桥梁结构健康监测技术存在明显瓶颈。有线监测技术的布线成本较高，在系统总成本中占比大，而且对于桥梁复杂结构，如斜拉索、悬索等部位，布线难度极大，后期维护过程中还容易破坏桥梁结构的完整性。传统无线监测技术，如 WiFi、蓝牙等，传输距离较短，无法满足大型桥梁的监测需求，同时功耗较高，设备电池寿命短，需要频繁更换电池，导致维护成本增加，难以适应大规模、长周期的监测工作。人工巡检技术依赖专业人员现场检测，不仅效率低下，而且受人员主观因素影响较大，无法实现 24 小时实时监测，对于桥梁内部结构，如箱梁内部的损伤情况，也难以有效监测，存在监测盲区。

2 适配桥梁监测的低功耗物联网技术类型与特性分析

2.1 主流技术分类与核心参数

适配桥梁监测的低功耗物联网技术有多种类型,每种技术都有其核心参数。LoRa 技术基于扩频调制技术,具备较远的传输距离,在视距场景下表现良好,同时功耗较低,支持星型与 Mesh 组网方式,这种组网特性使其在桥梁长距离、分布式监测场景中具有优势。NB-IoT 技术以蜂窝网络为基础,依托运营商基站覆盖,无需额外自建网关,传输稳定性较高,并且能够支持大量节点连接,在城市桥梁等有基站覆盖的场景中适用性较强。Sigfox 技术采用超窄带调制方式,传输距离更远,功耗极低,设备电池寿命长,但数据传输速率相对较低,适合对数据传输量要求不高,仅需传输少量关键参数的监测场景。此外,还有 Weightless - W、LoRaWAN 等其他技术,它们在传输速率、组网灵活性等方面各有特点,可根据桥梁监测的具体场景需求进行选择。

2.2 技术与监测需求适配性

低功耗物联网技术与桥梁监测需求在多个方面具有良好的适配性。在功耗方面,该技术的休眠电流普遍较低,设备电池寿命较长,能够满足桥梁长期监测对低维护的需求,减少因频繁更换电池带来的不便与成本。覆盖适配方面,LoRa、Sigfox 等技术的远距离传输特性,能够覆盖大型桥梁的全结构区域,无需频繁部署网关,从而降低硬件成本,简化监测系统的部署流程。连接数适配上,NB - IoT、LoRaWAN 等技术支持海量节点连接,可同时接入多个传感器,实现对桥梁多参数、全方位的监测,全面掌握桥梁结构健康状态。环境适配方面,工业级低功耗物联网设备能够承受较宽的温度范围,具备防水、防尘、抗电磁干扰的能力,能够适应桥梁户外复杂的环境条件,保证监测设备的稳定运行。

2.3 技术应用优势总结

低功耗物联网技术在桥梁监测应用中具有多方面优势。成本优势较为明显,该技术无需大规模布线,与传统有线系统相比,硬件与维护成本显著降低,能够在保证监测效果的同时,减少项目投入。部署优势也很突出,低功耗物联网传感器体积小、重量轻,可快速安装在桥梁的关键部位,安装过程中无需破坏桥梁原有结构,对桥梁正常使用影响较小。数据优势体现在支持实时、连续的数据传输,能够捕捉桥梁结构的瞬时变化,为桥梁损伤预警提供精准的数据支撑,有助于及时发现潜在风险。扩展优势方面,该技术支持灵活增减传感器节点,可根据桥梁维护需求的变化,随时扩展监测范围与参数类型,提升监测系统的灵活性与适应性。

3 低功耗物联网技术在桥梁结构健康监测中的

应用架构设计

3.1 整体架构设计

低功耗物联网技术在桥梁结构健康监测中的应用架构可分为多个层级。感知层由低功耗传感器节点构成,主要负责采集桥梁的应力、应变、振动、温湿度等各类参数,传感器节点采用电池供电,并支持休眠 - 唤醒机制,通过这种机制能够有效降低设备功耗,延长电池使用寿命,确保长期稳定采集数据。传输层基于低功耗物联网技术构建,包含网关与传输网络两部分,网关的作用是接收传感器传输的数据,并将其转发至云端平台,传输网络可根据桥梁的实际场景,选择 LoRa Mesh、NB - IoT 等合适的技术,同时优化传输路径,保证数据传输的稳定性与高效性。平台层为云端分析平台,具备数据存储、预处理、分析等功能,能够支持多源数据融合,构建完善的桥梁结构健康数据库,为后续的数据分析与评估提供数据基础。应用层则是面向用户的功能模块,涵盖实时监测 dashboard、损伤预警、健康评估报告生成、历史数据查询等功能,可满足管理部门、运维单位等不同用户的多样化需求。

3.2 传感器节点选型与部署

传感器节点的选型需要遵循一定原则,应根据监测参数的不同,选择低功耗、高精度的传感器。例如,在选择应变传感器时,要注重其低功耗特性,确保设备能够长期运行,同时保证较高的精度,以准确采集应变数据;对于振动传感器,需选择支持宽频带监测的设备,以便全面捕捉桥梁的振动情况。节点部署位置的选择至关重要,应重点部署在桥梁应力集中区域,这些区域受力较大,容易出现结构损伤;易损伤区域也是部署的重点,如支座、伸缩缝等部位,容易发生故障与损伤;在环境敏感区域,如沿海桥梁的腐蚀监测点,也需要合理部署节点,以监测环境对桥梁的影响。部署密度的优化需结合桥梁结构特点与监测精度需求,采用合理的部署方式,在关键区域适当增加节点密度,确保监测数据的准确性与全面。

3.3 传输层网络优化与数据传输

传输层的网关部署需要进行优化,应根据低功耗物联网技术的传输距离与桥梁跨度,合理设置网关位置。在不同场景下,如视距场景与非视距场景,网关部署的间隔距离应有所不同,以确保数据能够有效传输,无传输盲区,保证监测数据的完整性。数据传输策略的选择也很关键,采用“定时上报 + 事件触发”的混合传输模式较为合适。在正常状态下,传感器按一定时间间隔

上报数据,确保实时掌握桥梁状态;当监测参数超过阈值时,立即触发事件上报,能够快速响应异常情况,提升预警响应速度,为及时处理问题争取时间。数据压缩与加密是数据传输过程中的重要环节,传输前对数据进行压缩处理,可降低数据量,减少功耗,提高传输效率。

3.4 平台层与应用层功能设计

平台层的核心功能丰富多样,首先要支持海量数据存储,可采用合适的数据库类型,如时序数据库,以满足大量监测数据的存储需求。数据预处理功能也不可或缺,通过去除噪声、修复异常值等操作,提高数据质量,为后续的数据分析提供可靠的数据。同时,平台层还需集成结构健康评估模型,如基于机器学习的损伤识别模型,通过模型分析监测数据,评估桥梁结构健康状态。应用层的功能模块设计需满足用户实际需求,实时监测模块能够动态展示各监测点的参数与结构状态,使用户直观了解桥梁情况;预警模块可通过多种方式推送预警信息,并分级提示风险等级,便于用户及时采取应对措施;健康报告模块定期生成桥梁健康评估报告,分析结构变化趋势,为桥梁维护提供参考;运维管理模块记录设备维护、电池更换等信息,并提醒到期维护,保障监测系统的正常运行。

4 低功耗物联网技术在桥梁监测中的关键应用场景与实践要点

4.1 结构力学参数监测实践

在桥梁结构力学参数监测实践中,应力与应变监测是重要内容。采用低功耗应变传感器,通过合适的低功耗物联网技术传输数据,能够实时监测桥梁主梁、桥墩在交通荷载作用下的应力变化情况。当应变值持续超过设定阈值时,系统能够及时触发结构过载预警,提醒相关人员采取措施,防止结构因过载受到进一步损伤。振动监测也不可或缺,部署低功耗加速度传感器,可采集桥梁在车辆通行、风力作用下的振动数据,这些数据传输至云端平台后,通过频谱分析等方法识别振动频率变化,根据频率变化情况判断桥梁是否存在结构刚度下降等问题,如支座损坏等,以便及时进行维修与维护。

4.2 环境与耐久性参数监测实践

环境与耐久性参数监测在桥梁监测中具有重要意

义。温湿度与腐蚀监测适用于不同环境下的桥梁,在沿海或工业区域的桥梁上,部署低功耗温湿度传感器与腐蚀传感器,可实时监测环境温湿度变化与氯离子浓度等参数。通过对这些参数的分析,能够了解环境对桥梁混凝土、钢筋的腐蚀速率,根据腐蚀情况提前规划防腐维护工作,延长桥梁使用寿命。风速与雨量监测在大跨度桥梁监测中尤为关键,在悬索桥、斜拉桥等大跨度桥梁上,部署低功耗风速传感器与雨量传感器,实时监测风速、风向与降雨量。

4.3 监测系统运维与管理

低功耗物联网监测系统的运维与管理需要关注多个方面。设备状态监测是基础工作,在云端平台设置设备在线状态监测功能,能够实时查看传感器、网关等设备的运行状态。当设备出现离线或电池电量过低等情况时,系统能够及时提醒运维人员进行检修或更换电池,确保监测设备始终处于正常工作状态,保障监测工作的连续性。数据质量管理也至关重要,建立数据质量评估机制,对传输的数据进行完整性、准确性校验,剔除因传感器故障等原因导致的异常数据,确保监测数据的可靠,为后续的数据分析与评估提供准确的数据支持。

5 结论

低功耗物联网技术为桥梁结构健康监测提供了高效、可行的解决方案,有效弥补了传统监测技术的不足。通过对桥梁结构健康监测核心需求与传统技术瓶颈的分析,明确了低功耗物联网技术的适配性与应用优势。在应用架构设计方面,从感知层、传输层、平台层到应用层的全方位设计,为该技术在桥梁监测中的落地提供了清晰框架。在关键应用场景与实践要点的阐述中,进一步展示了该技术在力学参数、环境与耐久性参数监测及系统运维管理中的实际价值。

参考文献

- [1] 邵怀鑫. 基于物联网技术的铁路桥梁健康状况参数监测系统[D]. 大连交通大学, 2025.
- [2] 黄志贤. 基于NB-IoT的桥梁健康监测系统研究与实践[D]. 苏州大学, 2020.
- [3] 仝鑫隆. 自供电传感器及物联网系统开发和其在桥梁振动监测中的应用[D]. 北京科技大学, 2019.