

# 水工结构健康监测中的无线传感器网络优化研究

高万军

甘肃省景泰川电力提灌水资源利用中心 甘肃白银 730400

**摘要:** 无线传感器网络在水工结构健康监测领域得到了广泛应用, 不过在实际运行时, 它遭遇了能耗过高、数据传输不稳定以及监测精度受限等棘手问题。本文深入探究了网络拓扑、数据采集传输和能量管理等方面的关键难题, 并提出了一系列针对性的优化策略, 包括基于节点分布优化的拓扑控制、高效的数据融合与压缩技术, 还有能量收集和均衡管理方法。经实践验证, 这些策略切实降低了网络能耗, 提升了数据传输的可靠性与监测精度, 延长了网络的使用寿命, 为水工结构的安全运行与维护提供了坚实的技术保障。

**关键词:** 水工结构; 健康监测; 无线传感器网络; 优化策略

## 引言

水工结构是水利工程的核心, 其安全稳定关乎社会经济发展与人民生命财产安全。服役久了易出现裂缝、渗漏等病害, 传统人工巡检和固定监测点的方式效率低、实时性差、覆盖不足, 无法满足现代高精度、全方位、实时化的监测需求。无线传感器网络凭借自组织、低成本、高灵活的特性, 为水工结构健康监测带来新契机, 但实际应用中存在节点能量有限、环境干扰数据传输、海量数据处理存储难等问题, 对其优化研究意义重大。

## 一、无线传感器网络在水工结构健康监测中的应用现状

近年来, 国内外的科研团队针对无线传感器网络在水工结构健康监测领域的应用展开了广泛而深入的研究, 成功研发出多种适用于不同水工结构的无线传感器节点。这些节点在实际工程中发挥了重要作用, 为水工结构的安全监测提供了有效的技术手段。在大坝安全监测领域, 通过在坝体内部和表面合理布置应变传感器节点, 能够实时获取坝体的应力应变数据, 为大坝的安全评估提供关键的数据支持。在水闸运行监测方面, 位移传感器节点可精确监测闸门的开启与关闭位移, 确保水闸的正常运行, 保障水利工程的安全调度<sup>[1]</sup>。

尽管WSN在水工结构健康监测中取得了一定的成果, 但在实际应用中仍面临诸多严峻挑战。从环境因素来看, 水工结构所处的复杂恶劣环境, 对传感器节点的性能和网络通信产生了严重的负面影响。高湿度环境会导致传感器节点的电气性能下降, 缩短节点的使用寿命。水浸可能直接损坏节点的硬件设备, 导致节点失效。强

电磁干扰则会严重影响数据传输的稳定性, 增加数据传输的丢包率和误码率。从能量供应角度分析, WSN节点大多采用电池供电, 能量有限, 而水工结构的监测周期通常长达数年甚至数十年, 频繁更换电池或重新部署节点在实际操作中几乎难以实现。此外, WSN采集的监测数据量庞大且具有时空相关性, 传统的数据处理、融合与传输方法, 难以满足现代水工结构健康监测对数据处理高效性和准确性的要求, 数据冗余问题严重, 降低了数据的可用性和监测系统的整体性能。综合来看, 这些挑战相互关联, 环境因素影响数据传输和节点寿命, 进而加重数据处理负担, 能量供应问题又限制了节点的持续工作能力, 共同制约着WSN在水工结构健康监测中的发展, 因此需要系统性的优化策略来解决。

## 二、无线传感器网络优化的关键技术

### (一) 网络拓扑结构优化

网络拓扑结构是决定WSN性能的关键因素, 它直接影响网络的通信模式、能量消耗以及数据传输效率。在水工结构健康监测场景下, 设计合理的网络拓扑结构, 需综合考虑监测区域的几何形状、结构特点以及节点的分布密度等多方面因素<sup>[2]</sup>。分层式拓扑结构作为一种有效的优化方案, 将监测区域划分为多个子区域, 每个子区域内的节点通过特定的算法选举出一个簇头节点。簇头节点负责收集本簇内节点的数据, 并进行初步的数据融合与处理, 然后将处理后的数据转发至sink节点。这种结构通过缩短节点间的通信距离, 减少数据传输的跳数, 从而降低了节点的能量消耗。同时, 分层式拓扑结构具有良好的可扩展性, 便于在监测区域扩大或节点数量增加时, 进行灵活的调整和优化。

为了更好地适应水工结构的动态变化,可根据结构的实际变形情况和监测需求,动态调整节点的簇头选举和分簇策略。具体而言,利用结构力学原理和历史监测数据构建变形预测模型,当预测到某一区域变形加剧时,通过实时监测数据进一步分析该区域的应力应变变化趋势,结合预先设定的重要性指标体系,精准判断区域重要性。此时,适当增加该区域的簇头节点数量,提高数据采集和传输的频率,以获取更详细的结构状态信息。而在变形较小的区域,减少簇头节点数量,降低能量消耗。这种动态调整机制能够使网络拓扑结构更好地适应水工结构的变化,保障网络的稳定运行,提高监测系统的可靠性和有效性。

例如,在某大型混凝土重力坝健康监测项目中,该坝体监测区域面积大、结构复杂。采用分层式拓扑结构后,将坝体划分为多个子区域,每个子区域内的传感器节点通过分布式簇头选举算法选出簇头节点。簇头节点对本簇内节点采集的数据进行融合和压缩处理后,再将数据转发至sink节点。与传统的平面拓扑结构相比,分层式拓扑结构显著降低了节点的平均能量消耗,提高了数据传输的成功率。

## (二) 数据采集与传输优化

为了提升监测数据的质量和传输效率,需要对数据采集与传输过程进行全面的优化。在数据采集环节,根据水工结构的监测指标和精度要求,合理设置传感器的采样频率和采集时间至关重要。采样频率过高会导致数据冗余,增加数据处理和传输的负担。采样频率过低则可能遗漏重要的信息,影响监测结果的准确性。同时,采用多传感器数据融合技术,将不同类型传感器采集的数据进行融合处理,能够提取更具代表性和准确性的信息。例如,在应变测量中,温度变化会对测量结果产生显著影响,通过将应变传感器与温度传感器的数据融合,利用数学模型消除温度干扰,可有效提高应变测量的准确性。

在数据传输方面,采用高效的数据压缩算法对采集到的数据进行压缩处理,能够大幅减少数据传输量,降低网络带宽的占用。例如,基于小波变换的数据压缩算法,通过对数据进行多分辨率分析,去除数据中的冗余信息,实现数据的高效压缩。同时,优化数据传输路由,选择能量消耗低、通信质量好的路径进行数据传输,可避免数据在网络中出现拥塞和碰撞。基于蚁群算法的路由优化策略,通过模拟蚂蚁觅食过程中释放信息素的行为,寻找最优的传输路径,有效提高了数据传输的可靠

性和效率<sup>[1]</sup>。

在某大型水闸健康监测项目中,采用自适应采样算法,根据水闸的运行状态动态调整传感器的采样频率。在水闸正常运行时,降低采样频率。在水闸开启或关闭过程中,提高采样频率。通过这种方式,既保证了监测数据的完整性,又减少了数据冗余,降低了数据传输量。在此基础上,结合水闸运行的力学模型和水流动力学原理,进一步优化采样频率的调整策略,使其更精准地匹配水闸运行状态的变化。同时,采用基于蚁群算法的路由优化策略,提高了数据传输的成功率,降低了平均传输延迟。

## (三) 能量管理优化

能量管理是无线传感器网络优化的核心内容,它直接关系到网络的运行寿命和性能。一方面,采用能量收集技术,如太阳能、水流动能、温差能等,为节点提供额外的能量补充,可有效延长节点的使用寿命。在露天的水工结构表面部署太阳能电池板,将太阳能转化为电能,为传感器节点充电。太阳能能量收集技术具有清洁、可再生、分布广泛等优点,适用于大多数露天水工结构。

另一方面,优化节点的能量消耗模式,通过调整节点的睡眠与唤醒周期,使节点在非监测和传输数据时处于低功耗睡眠状态,减少能量浪费。此外,合理分配节点间的能量负载,避免部分节点过早耗尽能量,导致网络出现能量空洞,影响整个网络的性能。

以某水库大坝健康监测项目为例,在大坝表面部署太阳能电池板为传感器节点充电。采用动态睡眠唤醒机制,根据节点的能量状态和监测任务需求,动态调整节点的睡眠与唤醒周期。当节点能量较低且监测任务不紧急时,延长节点的睡眠时长。当节点能量充足且监测任务紧急时,缩短节点的睡眠时长。进一步引入智能能量调度算法,根据不同区域的监测重要性和节点能量储备情况,动态分配能量,优先保障关键区域节点的能量供应,确保网络的整体监测能力不受影响。通过这种方式,有效延长了节点的平均使用寿命,提高了网络的稳定性。

## 三、无线传感器网络优化策略

### (一) 基于机器学习的节点部署优化

利用机器学习算法对水工结构的历史监测数据和环境信息进行深度分析,可以预测结构的变形趋势和潜在病害区域,从而实现更精准的传感器节点部署。以神经网络算法在大坝应力应变监测中的应用为例,通过采集不同时段、不同工况下大坝的应力应变数据,利用神经网络强大的非线性映射能力对数据进行建模。模型经过

训练和优化后,能够准确预测应力集中区域和易发裂缝部位,针对性地增加这些区域的节点密度,可有效提高监测分辨率和准确性。

为了进一步提升节点部署方案的合理性和网络覆盖的均匀性,还可以结合遗传算法等优化算法。遗传算法通过模拟自然选择和遗传变异机制,在众多可能的节点部署方案中进行全局搜索和优化<sup>[4]</sup>。例如,在一个复杂形状的水工混凝土结构监测项目中,利用遗传算法对节点位置、数量和分布进行多轮优化,最终得到一种节点分布方案,既保证了网络对整个结构的有效覆盖,又避免了节点的过度密集部署,提高了监测效率和资源利用率。

### (二) 数据驱动的传输路由优化

根据水工结构的实时监测数据和网络拓扑结构动态调整数据传输路由,能够显著提升数据传输的可靠性和效率。采用强化学习算法可实现网络中节点根据当前能量状态和通信质量自主学习和选择最优传输路径。在一些大型水工建筑群落监测网络中,设置多个sink节点,当监测数据的紧急程度和重要性不同时,通过强化学习算法,节点能够根据自身情况动态选择路径传输数据。对于紧急且重要的数据,优先选择能量充足、通信质量好的路径传输,确保数据及时送达监测中心。

同时,数据驱动的方法可以根据水工结构的动态变化实时调整传输路由。例如,在某水工围堰工程监测中,随着围堰内水位的不断变化和工程施工进度推进,水工结构的形态和应力状态也在不断变化。通过实时监测这些变化,动态更新传输路由,确保数据能够适应结构变化,准确、可靠地传输,为工程决策提供及时有效的支持。进一步引入深度学习模型,对历史监测数据和实时数据进行深度分析,提前预测结构变化趋势,从而更前瞻性地调整传输路由,提高数据传输的时效性和稳定性。

### (三) 协同能量管理与数据处理

将能量管理和数据处理协同考虑,是提升无线传感器网络性能的关键思路。首先,通过优化节点的能量消耗来提高数据处理效率。例如,在节点设计中采用低功耗的传感器和处理器,从硬件层面降低能耗。同时结合能量收集技术,使节点能够实现能量自给自足,在能量充足的情况下更高效地处理数据。其次,在数据处理方面采用分布式计算方法是一个重要方向。将数据处理任务合理分配到不同节点上进行分布式计算,可避免单个节点因负载过重而性能下降<sup>[5]</sup>。如在某大型水工枢纽工程监测中,各传感器节点对本地数据进行初步处理,将

处理后的关键信息传输至汇聚节点进一步整合分析。这种方式不仅减轻了汇聚节点的负担,还提高了整个网络的数据处理能力和容错能力。

除此之外,借助协同过滤等技术对采集数据进行预处理也十分必要。它可以去除噪声和异常数据,提高数据质量和可用性。在某水工隧道健康监测项目中,由于隧道环境复杂,传感器采集的数据中常包含一些由于电磁干扰产生的异常值。通过协同过滤算法,这些异常值被有效识别和摒弃,保证了后续分析和决策的准确性。进一步研究多源数据融合下的协同过滤算法优化,结合不同类型传感器数据的特点,提高异常数据识别的准确率和处理效率,提升数据质量。

### 结论

无线传感器网络在水工结构健康监测领域具有广阔的应用前景,但目前仍面临网络能耗高、数据传输不稳定、监测精度受限等问题。本文通过系统分析WSN在水工结构健康监测中的应用现状和优化关键技术,提出基于机器学习的节点部署优化、数据驱动的传输路由优化以及协同能量管理与数据处理等优化策略。这些策略有效降低了网络能耗,提高了数据传输的可靠性与监测精度,延长了网络寿命,为水工结构的安全运行与维护提供了有力的技术支持。未来研究应紧密结合实际工程需求,开展更多实验研究和工程应用,不断完善WSN的优化技术,推动其在水工结构健康监测领域的广泛应用,助力水利工程安全监测技术向智能化、高效化方向发展。

### 参考文献

- [1] 马玲, 张天翔. 基于无线传感器网络技术的高压电力设备在线监测方法[J]. 电气技术与经济, 2025(1): 176-178
- [2] 安威鹏, 刘榕飞. 基于多目标优化策略的最佳无线传感器布置[J]. 小型微型计算机系统, 2025, 46(3): 751-758
- [3] 任志强, 黄秉章, 黄榜彪, 邓卿, 何刚宇. 面向结构健康监测WSNs的ACPSO-LEACH协议[J]. 物联网技术, 2025, 15(5): 52-57
- [4] 翁顺, 张之越, 高珂, 朱宏平. 柔性压阻应变传感技术在结构健康监测领域的研究进展[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(7): 242-261
- [5] 王超伟. 基于LoRa技术的电流互感器内部压力监测装置的研究与应用[J]. 自动化博览, 2024, 41(5): 52-57