

塔吊结构健康监测与安全预警系统研究

何丽康

中交一公局第三工程有限公司 北京 100000

摘要: 针对塔吊施工安全隐患, 本文深入研究塔吊结构健康监测与安全预警系统。系统总体架构涵盖感知层、传输层等, 感知层通过多种传感器采集塔吊运行参数, 传输层实现数据高效传输。关键技术中, 传感器技术保障监测精度, 数据处理与传输技术解决海量数据处理难题, 结构健康评估与预警技术精准判断塔吊健康状态。该系统可实时监测塔吊结构状态, 及时发现安全隐患并预警, 对提升塔吊施工安全水平、推动建筑行业智能化发展具有重要意义。

关键词: 塔吊结构健康监测; 安全预警系统; 传感器技术

引言

塔吊作为建筑施工的关键设备, 其安全运行关乎工程进度与人命财产。但实际中塔吊安全事故频发, 暴露出传统监测方式的不足。为此, 开展塔吊结构健康监测与安全预警系统研究迫在眉睫。通过先进技术实时掌握塔吊结构状态, 及时预警隐患, 不仅能降低事故风险, 也为建筑行业安全施工提供有力支撑。

一、塔吊结构健康监测与安全预警系统总体架构

(一) 感知层

感知层作为塔吊结构健康监测与安全预警系统的基石, 其性能优劣直接关乎整个系统的监测精度与可靠性。该层主要由多种功能各异的传感器协同构成, 这些传感器犹如系统敏锐的“神经末梢”, 精准捕捉塔吊运行过程中各类关键参数, 为后续的数据处理与安全评估提供原始且关键的数据支撑。

应力传感器和应变传感器是监测塔吊结构受力情况的核心部件, 通常采用电阻应变片原理进行工作。在塔吊的起重臂、塔身、平衡臂等关键结构件上, 应力传感器通过粘贴在结构表面, 将结构所受的应力变化转化为电阻值的变化, 进而通过测量电路将电阻变化转换为电信号输出; 应变传感器则直接测量结构件的应变, 通过计算应变与材料弹性模量的关系, 间接获取结构的应力大小。由于塔吊在吊装作业时, 起重臂承受着巨大的弯矩和拉力, 塔身需抵抗垂直压力与水平风力, 平衡臂则起到维持塔吊整体平衡的作用, 因此这些部位安装的应力、应变传感器能够实时监测结构在复杂受力状态下的力学响应。一旦结构出现局部应力集中或应变异常增大, 就意味着可能存在结构损伤或超载风险, 传感器会及时

将这些数据反馈给系统。位移传感器在塔吊监测中同样不可或缺, 常见的有激光位移传感器和拉线式位移传感器^[1]。激光位移传感器通过发射激光束, 利用激光反射原理测量塔吊结构的位移变化, 具有非接触式测量、精度高、响应速度快等优点; 拉线式位移传感器则通过拉绳与塔吊结构相连, 当结构发生位移时, 拉绳带动传感器内部的测量元件, 将位移量转化为电信号。在塔吊的起重臂端部、塔身节点等部位安装位移传感器, 能够实时监测塔吊在荷载作用下的变形情况。例如, 起重臂在吊装重物时可能会发生弹性变形, 若变形量超出正常范围, 可能预示着起重臂结构存在潜在缺陷, 位移传感器捕捉到的异常数据可为及时排查隐患提供依据。

(二) 传输层

传输层作为连接感知层与数据处理与分析层的桥梁, 承担着将塔吊运行关键数据进行高效、稳定传输的重要使命。在实际应用中, 其性能的优劣直接影响着系统对塔吊实时状态的监测能力和预警的及时性。当前, 塔吊数据传输主要依托有线传输和无线传输两种方式, 它们各自具备独特的技术特性与应用场景。

有线传输方式以以太网和RS485为典型代表。以太网基于TCP/IP协议, 通过网线或光纤作为传输介质, 能够实现高速、稳定的数据传输, 其传输速率可达100Mbps甚至更高, 且具有良好的抗干扰能力和兼容性。在塔吊施工现场, 若塔吊与现场监控中心距离较近(通常在几百米范围内), 且具备方便布线的条件, 以太网是理想的选择。例如, 在一些相对规整、场地有限的小型建筑工地, 可通过铺设专用网线, 将塔吊上感知层采集的数据直接接入监控中心的网络交换机, 确保数据在局域网内快速、稳定传输, 减少数据丢失和延迟。

RS485采用平衡差分信号传输,具有传输距离远(可达1200米)、抗干扰能力强、支持多节点通信等特点。它适用于塔吊分布较为集中,且对传输距离有一定要求的场景。在实际应用中,多个塔吊的传感器数据可通过RS485总线进行串联,只需两根数据线即可实现数据的双向传输,有效降低了布线成本和施工难度。不过,有线传输方式也存在局限性,一旦线路出现破损、老化或受到施工机械破坏,可能导致数据传输中断,影响系统正常运行,且其灵活性较差,难以适应塔吊频繁移动或施工现场布局复杂多变的情况。无线传输方式则凭借其灵活便捷的特性,在塔吊数据传输中占据重要地位。GPRS(通用分组无线服务技术)基于现有的GSM网络,具有覆盖范围广、永远在线、按流量计费等优势。它适用于塔吊位置分散、布线困难的偏远地区或大型施工现场。塔吊上的传感器数据通过GPRS模块打包后,利用移动网络信号传输至数据处理中心^[2]。虽然GPRS的传输速率相对较低(通常为几十kbps),但对于塔吊运行参数这类数据量相对较小、对实时性要求不是极高的监测数据来说,能够满足基本需求。4G/5G技术的出现则极大地提升了无线传输的性能。4G网络传输速率可达100Mbps以上,5G网络更是具备超高速率(理论峰值可达10Gbps)、低延迟(毫秒级)和大容量连接的特点。在塔吊应用场景中,4G/5G网络能够实现数据的实时、高清传输,不仅可以快速传输塔吊的常规运行参数,还能支持塔吊监控视频等大数据量信息的回传。例如,当塔吊出现异常情况时,高清监控视频可通过5G网络迅速传输至监控中心,帮助技术人员更直观地判断故障原因。Wi-Fi技术则常用于塔吊与现场临时监控设备之间的短距离数据传输,其传输速率高(可达几百Mbps)、成本低,在施工现场的局域范围内,可实现塔吊数据的快速汇聚和初步处理。但无线传输方式也面临信号干扰、网络覆盖盲区等问题,尤其是在高楼林立的城市建筑工地或信号遮挡严重的山区施工现场,可能会出现信号不稳定、数据丢包等情况。

二、塔吊结构健康监测与安全预警系统关键技术

(一) 传感器技术

传感器技术作为塔吊结构健康监测与安全预警系统的核心支撑,其性能表现直接决定了系统对塔吊运行状态捕捉的精准度和预警判断的可靠性。在塔吊复杂多变的施工环境中,传感器不仅要面临强电磁干扰、剧烈振动、高湿度、高低温交替等恶劣条件,还需长期稳定地监测塔吊结构在动态荷载、风力作用下的细微变化,因

此对传感器的精度、灵敏度、稳定性和抗干扰能力提出了严苛要求^[3]。

光纤光栅传感器基于光纤的光弹性效应与弹光效应,通过将外界物理量(如应力、应变)的变化转化为光纤光栅中心波长的漂移进行测量。其核心优势在于抗电磁干扰能力极强,由于传输介质为光信号,完全不受施工现场电动机、电焊机等强电磁设备的干扰,能在复杂电磁环境下稳定输出准确数据。此外,光纤光栅传感器的测量精度可达微应变级别,能够敏锐捕捉塔吊结构在长期运行中产生的微小应力、应变变化。其分布式测量特性尤为适用于塔吊这种大型结构件,一根光纤上可串联多个光栅传感器,沿塔吊起重臂、塔身等关键部位布置,实现对结构不同位置的应力、应变分布进行实时监测,通过分析波长变化规律,可精准定位结构损伤或应力集中区域。例如,在超高层塔吊施工中,随着建筑高度攀升,塔吊所受荷载与风载不断变化,光纤光栅传感器能够持续监测各部位应力变化,为施工方评估塔吊结构安全性提供关键数据。MEMS(微机电系统)传感器采用微纳加工技术,将机械结构、传感器元件、信号处理电路集成在微小芯片上。其体积通常仅为几立方毫米,重量极轻,安装在塔吊上几乎不影响结构原有力学性能,同时成本相对较低,便于大规模应用。以MEMS倾角传感器为例,其基于微机械加速度计原理,通过检测重力加速度在敏感轴上的分量来计算塔吊倾斜角度,测量精度可达 0.01° ,能够实时感知塔吊在风力、吊装作业等因素影响下的细微倾斜变化。MEMS振动传感器则利用微机械结构的振动特性,将振动加速度信号转换为电信号,其频率响应范围广,可覆盖塔吊运行过程中从低频的结构振动到高频的机械传动振动等多种振动模式。在塔吊日常运行监测中,MEMS传感器凭借其高集成度和小体积优势,可灵活安装于塔吊的驾驶室、回转机构、变幅机构等部位,实时监测设备运行状态,一旦检测到异常振动或倾斜角度,立即将数据传输至系统进行分析预警。

(二) 数据处理与传输技术

塔吊运行过程中,随着时间推移与作业工况的不断变化,传感器持续采集应力、应变、振动、倾角等多维度数据,形成海量的监测数据。这些数据蕴含着塔吊结构健康状态与运行风险的关键信息,但也给系统带来了数据处理与传输的巨大挑战。如何高效处理和传输这些数据,成为保障塔吊结构健康监测与安全预警系统稳定运行的核心问题之一^[4]。

在数据处理领域，先进算法的应用是提升数据处理速度与准确性的关键。以小波分析算法为例，其基于多分辨率分析理论，能够将时域信号分解到不同尺度的频域空间中，通过对信号进行多层分解与重构，有效提取信号的局部特征。在塔吊振动数据处理中，小波分析算法可将复杂的振动信号分解为不同频率成分，精准识别出正常运行振动与异常振动特征。例如，当塔吊的回转机构出现轴承磨损故障时，会产生特定频率的异常振动信号，小波分析算法能够从大量混杂的振动数据中提取出这些异常频率成分，通过与正常振动信号特征对比，判断出故障类型与程度，进而为结构损伤识别提供有力依据。此外，机器学习算法在塔吊数据处理中也发挥着重要作用。基于历史数据训练的神经网络模型，能够学习塔吊正常运行状态下的参数模式，当实时监测数据偏离该模式时，系统可快速判断塔吊可能存在的安全隐患。支持向量机算法则可通过构建最优分类超平面，对塔吊结构健康状态进行分类评估，如将结构状态划分为正常、预警、危险等不同等级，为后续的安全决策提供直观的参考。

（三）结构健康评估与预警技术

结构健康评估与预警技术作为塔吊安全监测系统的核心支柱，其性能直接决定了系统对塔吊潜在风险的识别与防范能力。该技术以建立科学完备的评估体系为基础，深度融合塔吊历史运行数据与实时监测数据，通过多元化技术手段对塔吊结构健康状态进行精准量化分析，从而实现安全隐患的早期预警与干预^[5]。

在结构健康评估方法领域，基于力学模型的方法以经典力学理论为基石，通过构建塔吊结构的有限元模型，将塔吊复杂的力学行为进行数学抽象。该方法依据塔吊设计参数与实际工况，模拟计算塔吊在不同荷载组合下的应力、应变、位移等力学响应。例如，在建立起重臂力学模型时，需综合考虑钢材的弹性模量、截面尺寸、吊装荷载分布以及风载作用等因素，通过有限元软件进行数值计算，得出理论力学参数。将这些理论计算结果与传感器实时采集的应力、应变数据进行对比，若两者偏差超过设定阈值，即可判断塔吊结构可能存在异常。此类方法具有物理意义明确、可解释性强的优点，适用于塔吊设计阶段的结构校核与初步健康评估，但由于实际施工中塔吊工况复杂多变，且模型参数难以完全反映结构的真实状态，单独使用时存在一定局限性。基

于数据驱动的方法则依托机器学习算法，通过对海量历史数据的深度挖掘，构建塔吊结构健康状态与监测数据之间的非线性映射关系。以神经网络为例，通过搭建多层感知器结构，将塔吊应力、应变、振动、倾角等多维度监测数据作为输入层，经过隐藏层的特征提取与学习，在输出层输出结构健康状态的评估结果。在训练过程中，利用大量标注好的历史数据对网络进行优化，使神经网络能够自动学习不同健康状态下数据的特征模式。支持向量机算法则通过寻找最优分类超平面，将塔吊结构健康状态划分为正常、轻微损伤、严重损伤等类别。例如，在某工地塔吊监测项目中，通过收集近三年的塔吊运行数据，利用支持向量机算法训练模型，该模型对塔吊结构损伤的识别准确率达到92%以上。数据驱动方法无需精确的力学模型，能够适应复杂多变的工况，但依赖大量高质量数据，且模型的可解释性相对较弱。

结语

塔吊结构健康监测与安全预警系统通过感知层、传输层的协同配合，以及传感器技术、数据处理与传输技术、结构健康评估与预警技术的综合应用，实现了对塔吊运行状态的实时监测与精准预警。该系统有效提升了塔吊施工的安全性，降低了安全事故发生概率，为建筑施工安全提供了可靠保障。未来，随着物联网、大数据等技术的深入发展，持续优化系统性能、探索多技术融合应用，将进一步推动塔吊安全监测向智能化、高效化迈进，助力建筑行业高质量发展。

参考文献

- [1] 屈建军. 塔式起重机三杆格构柱附着结构强度计算安全分析[J]. 中华建设, 2024, (06): 117-119.
- [2] 姜浩. 群塔钢结构施工安全管理技术研究[J]. 四川建材, 2023, 49 (09): 246-247+256.
- [3] 刘晓英, 林丽, 李逢春. 外附式塔吊在超高斜交网格混合结构塔台中的研究与应用[J]. 建筑施工, 2022, 44 (08): 1937-1939.
- [4] 李俊, 任鑫, 刘洪键, 李威威. 既有结构作为塔吊基础的安全影响分析[J]. 天津建设科技, 2022, 32 (03): 44-46.
- [5] 卢丛政. 安全风险评估方法在超高层钢结构项目中的应用实践[J]. 建设监理, 2021, (11): 8-10+40.