

既有建筑结构健康监测的自动化技术应用研究

杨宝红 丁氏 刘明宇

江西省建筑技术促进中心

摘要：本研究探讨了在既有建筑物中实施结构健康监测自动化技术的关键性及其具体实施策略，目的在于通过提升监测工作的效率和准确性，确保建筑物的结构安全并增加其使用年限。研究着重于物联网传感器的优化布局、智能巡检系统的创新开发与应用，以及云计算与边缘计算技术的融合运用，利用尖端自动化工具，可以实时搜集并深入解析建筑的运行数据，快速识别并解决潜在的结构隐患，有效减少维护开支，同时提升资源配置效率。研究显示，自动化监测系统不仅让监测工作更精准、更持续，还通过集中处理数据和智能化分析，提高了运营的效率，为建筑健康监测领域带来了全新的技术视角和洞见。

关键词：既有建筑结构；健康监测；自动化技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.19.014

引言：伴随着城市的快速发展，现有建筑物的基础稳固性和长期可靠性逐渐成为公众关注的焦点。传统的建筑健康监测长期依赖人工实地巡查，此类方法耗时较长、成本较高，并且很难做到实时与连续的监控。物联网传感器、智能巡检系统、云计算和边缘计算等自动化技术的融合应用，使得监测工作更加高效、精准，同时大幅削减了维护开销，并提升了资源配置的合理性。本项探索专注于利用先进的自动化技术对现有建筑架构进行健康评估，目的是借助精准的科学数据来预见并防止潜在的结构性故障，从而增加建筑的使用年限，保障民众的生活品质与安全不受威胁。

一、既有建筑结构健康监测应用自动化技术的重要性

利用先进的自动化监测技术，能即时获取既有建筑物的各项指标信息，其中包括但不限于裂缝扩展、振动频率、位移程度以及温度和湿度波动等数据，利用此类数据可以实时掌握建筑物的状况，预见潜在的结构问题，从而及时采取必要的修复作业，防止发生灾难性的结局。借助先进的自动化技术，监测工作得以在精度和效率上实现飞跃，而传统人工方式因其耗时费力且难以持续，难以做到对建筑结构的微小变动进行实时与全方

位的监控，利用全天候运行的自动化监测系统，包括传感器和无人机等高科技设备，对建筑物进行全面监控，保障即便是极其微妙的变动也能即刻捕捉。自动化技术的应用还有助于节省成本和资源，在没有自动化监测的情况下，建筑维护往往是基于固定周期的检查，可能导致在问题尚未明显时就进行不必要的维护，或者在问题已经发展到严重阶段时才采取行动。自动化监测能够提供持续的、实时的数据流，使得维护团队可以在必要时立即响应，而不是依赖预定的检查时间表。及时的干预不仅可以防止问题的恶化，减少修复成本，还可以避免因突发故障而导致的运营中断^[1]。

二、既有建筑结构健康监测的自动化技术应用策略

（一）物联网传感器部署优化

在现有建筑物的健康监测和评价范畴，物联网感知设备正日益成为提高准确性和效率的关键。精确选择合适的传感器的类型和安装位置，以及利用多用途传感器实现综合应用，是建立高效的监测系统的两项关键策略，该策略不仅关乎数据的质量好坏和处理速度的快慢，更直接决定监测系统的成本效果和实际应用价值。选择适当的传感器的设置地点需要周密的初步调查和设计计划，以一座历史悠久的楼宇为例，其结构支撑系统可能由各类建材搭建，如砖石、木材和钢铁，在选取能够同时追踪压力和位移的传感仪器时，选择一种适用的感应元件的确非常关键。如一种广泛使用的传感器是基于压力电效应的应力片，其能测定微妙的形态变化，精确性高达0.001mm。针对由振动或周期负载引起的反应进行观测时，往往需要装备精度可达微米/秒²级别的加速度测量仪，通常在建筑结构的重要连接部位，如梁柱结合处，或者那些容易发生损伤的区域。而使用计算机辅助设计（CAD）软件，结合结构力学分析，可以模拟不同负载条件下的应力分布图，从而科学地确定传感器的最佳部署位置。

此外，多功能传感器的集成应用在提高系统效率和降低成本方面表现出巨大的潜力，一种新型的多功能传感器可能集成了温度、湿度和化学腐蚀监测功能。此类传感器的优点在于可以在一个单元内提供多种监测功

能，从而减少了总体部署数量，简化了系统架构。如一个集成式传感器能够同步检测建筑物内的温度差异与水分含量状况，其温度监测范围为 -20°C 到 85°C ，湿度测量的精确度则控制在 $\pm 2\% \text{RH}$ 以内。在部署此类传感器时，通常选择靠近建筑外壳的区域，可以有效监测外部环境变化对内部结构可能造成的影响。同时，此类传感器的数据通过无线网络传输到中心数据库，数据传输间隔可根据监测需求调整，常见的设置是每5min传输一次，保证了数据的实时性和准确性。

（二）智能巡检系统开发与应用

在建筑结构健康监测的自动化技术中，智能巡检系统的核心在于数据处理与分析及其与其他系统的集成与自动化。数据处理与分析是确保建筑安全与延长其使用寿命的关键，通过利用先进的机器学习模型，如卷积神经网络这类基于图像识别的系统，可以对建筑物表面的裂缝和形变进行实时监测分析，其是保障建筑构造稳固与延长其服务周期的关键所在。如智能巡检系统中的图像识别算法可以在分辨率为 1920×1080 的照片中，准确识别出宽度仅为 0.1mm 的细小裂缝。此外，结构振动数据通过采用傅里叶变换处理，可以分析频率在 0.1Hz 到 50Hz 之间的振动模式，从而预测可能的结构失败^[2]。

经过分析的数据必须通过整合性系统自动化地传输至维护决策支持系统，在此过程中集成和自动化的环节尤为关键，当监测到关键部件的振动频率不停地保持在 35Hz 以上时，预警机制会立刻激活，并在系统后台自动记录这一事件，生成维护工单。维护工单将依据问题的紧迫性和潜在的波及范围，自主进行等级划分，并据此派遣给对应的修理小组。该系统能够智能地连接历史维修信息和气候信息，如当气温连续升高至 35°C 以上时，某些零部件的故障率会增加 10% 。此类数据助力系统预见在极端气候条件下可能增长的维护需求，整合与自动化不仅加快了反应速度，还通过数据的统一处理和评估，提高了运维的工作效率，系统能够综合来自各类传感器的资讯，如将位移传感器与应力传感器的读数进行联合剖析，从而更精确地评估建筑物的健康状况。通过智能化的数据整合方法，使得分析过程中能够纳入更多变量，从而显著提升了判断的准确性。

（三）云计算和边缘计算的整合应用

在现有建筑的健康状况监控领域，将云计算方法和边缘技术结合的技术创新是一个划时代的转变，此类结

合不仅优化了数据处理过程的步骤，也极大地增强了实时性能和适应性。在设计初期，需要清晰定义像智能传感器和边缘服务器这样的边缘处理装置的功能，设备一般负责初步数据采集和处理初级数据。在监测建筑状态时，边缘处理装置能以每秒100个数据点的速度检测建筑物的振动频率，同时精确到 0.01°C 监测温度波动。边缘计算设备具备快速响应能力，并且能够在数据传送之前执行初步的预处理和分析，如运用临界值判断来判定数据是否超出了正常范围，此类判定是基于事先确定的标准进行的，如果某个传感器的温度值达到了 50°C 以上或者振动频次超过 500Hz ，那么就会将其标记为异常状态^[3]。

经过筛选的大量数据集和异常数据被传入云端，借助云计算系统所拥有的强计算力，可以进行更精细的数据处理工作，如采用先进算法深入分析数据走势，同时进行预防维护。基于云计算技术的模型系统，能够每小时进行自动更新，以此同步新型数据架构的发展趋势。该模型需要即时处理来自众多传感器的海量数据，且对数据处理速率的要求极高，延时必须保持在毫秒级，以确保系统的快速反应能力。在进行整合使用时，还需充分考虑数据安全和个人隐私保护问题，如借助边缘计算装置在本地对敏感信息进行处理，从而大大减少原始数据直接上传到远程服务器的需求。这样做不仅减少了传输过程中的带宽使用，显著提升了数据保护水平，只有经过仔细甄别和加密转换的数据才会被传输至云存档，全程采用如AES 256位加密等安全保障手段以确保数据传送环节的安全系数^[4]。

（四）智能预警与远程监控系统建设

打造一套高端智能预警远程监控体系，成为既有建筑健康状况监控领域的一大要务，该系统融合了先进技术，如物联网传感器技术、云计算平台、边缘计算技术和AI技术，旨在实现即时、精准的结构健康状况监控及异常状况预警。建立全面系统关键所在先进感应技术，有别于传统监控装置，此类感应器可检测从细微震动至关键结构变动的宽范围指标，其具有极高的敏感度及持续不断的运行能力，一款创新的光纤感测装置，能够以 0.5 纳米的高精度检测裂缝的出现，该设备每十秒自动上传一次资料至附近的数据中心，确保了信息取得的实时性与连续性。在地面层实施系统数据的处理和分析，交由边缘处理设备承担，其主要职能为初步筛选数据与

初步处理，利用嵌入式AI技术，装置能即时辨识并处置异常信息，如若监测到建筑物的振动速率超出既定的10Hz安全阈值，系统将立刻激活报警系统。该监管架构中，预警系统作为关键部分，基于数据处理自动完成对警报级别的精确划分，一旦检测数据连续三次超出正常范围，系统将提升预警级别，并经多样渠道告知有关人员。预警告警信息将通过加密代码的电子邮件、即时通讯信息以及专门开发的移动应用程序实时传递，保障技术援助小组能够快速采取对策，建筑管理者和工程师可借助一个清晰便捷的操作平台，随时随地通过远端观测设备查看即时监测信息。

三、既有建筑结构健康监测的自动化技术应用优势

(一) 提高监测效率和精确性

自动化手段在建筑物的实时健康监测，显著提高了监控效能和准确度，对于保障建筑物稳定性以及延长使用寿命起到了重要作用。依靠人工进行的传统监控方式，其耗时较长，且人工判断往往产生偏差，导致监控频率与准确性难以达到严格要求。相比之下，自动化检测手段借助多种传感器——包括振动、应力和环境监测设备可以对建筑结构实行不间断的即时监控。如使用自动化技术，感应器能每分钟对关键参数进行数百次精准测定，而传统方法可能每月只检查一次，高频率的数据采集极大提高了监测的及时性和连续性。在精确性方面，借助高级的数据分析技术，特别是机器学习技术，可以准确检测到微小的变化和潜藏的风险，某项调研指出，自动化监测手段在识别建筑物损伤上的精确性可以达到98%，相比之下人工评估的精准度仅有75%。此外，自动化设施能够集成各类传感器所采集的数据，通过数据整合技术，提高分析的完整性和精确度。如在风力作用下，结构的响应可以通过加速度计和倾角传感器的数据综合分析，精确地计算出结构的动态响应^[5]。

(二) 成本效益与资源优化

在对既有建筑结构的健康管理过程中，应用自动化技术带来了明显的成本降低和资源利用改进，通过自动化监管系统，使得建筑维护和修补工作能够基于即时信息进行，避免了频繁的传统检查，同时避免了因发现问题迟缓而需要支付的高额修理成本。此外，借助自动化手段优化了资源配置，提升了运营效能，精密传感器和数据分析工具能够准确识别问题所在，消除无效及过量维护，进而使资源利用效率大幅提高。如对于一个装有

智能传感器的大型办公楼，监测数据可以帮助决策者了解哪些部分是真正需要维护的，与整体检查相比精确检查可以节省约30%的维护资源。同时，通过自动化技术的运用，对专业技术人员的依赖显著减少，日常监控工作变得更加标准化和简便，明显降低了技术人员的工作压力，使技术人员能更集中精力解决更复杂的技术问题和紧急事件。自动化检测技术的实施还带来了设备运行效率的提升，通过实时监测和预测维护，设备故障率显著降低，这直接延长了设备的使用寿命并减少了替换成本。数据显示，在引入自动化监测系统的建筑中，关键结构元件的寿命平均延长了15%。效率的提升不仅节省了成本，也为建筑的可持续管理提供了支持，降低了环境影响。详情见表1。

表1 既有建筑结构健康监测的自动化技术应用优势

监测系统类型	测量频率	结构损害检测准确性	潜在维护成本节约	部件使用寿命延长
传统监测	每月一次	75%	-	-
自动化监测	每分钟数百次	98%	高达 30%	部件寿命平均延长 15%

结语

通过本研究的深入分析和探讨，充分认识到自动化技术在既有建筑结构健康监测中的重要作用和实际应用价值。实现高效的监测系统不仅能够实时监控建筑健康状况，预防潜在风险，还可以显著提高维护工作的针对性和时效性，降低成本。展望未来，随着技术的进一步发展和应用普及，自动化监测将成为建筑健康管理的重要支柱，为城市建筑安全提供坚实保障。

参考文献

- [1]徐德志, 沈杰, 徐衍, 等. 智慧诊断技术在结构健康监测中的应用研究——以常州市北环路小学教学楼为例[J]. 四川建筑科学研究, 2023, 49 (03): 60-66.
- [2]王子龙. 基于建筑结构振动的健康监测现状分析及展望[J]. 建筑安全, 2022, 37 (05): 25-28.
- [3]任毅, 袁兵, 曹淑上. 基于物联网的既有建筑结构健康智能化监测云平台设计[J]. 重庆建筑, 2020, 19 (12): 8-10.
- [4]李俊杰. 既有城镇建筑的结构健康监测技术及策略分析[J]. 工程质量, 2020, 38 (12): 9-11+20.
- [5]祝庭, 白杰, 杨叶, 等. 既有城镇建筑结构的健康监测技术及方案[J]. 工程建设, 2019, 51 (08): 64-67.