

智能土木工程在现代建筑结构中的具体应用

张志新

河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着建筑行业数字化、智能化转型加速推进,传统土木工程在安全性、适应性与可持续性方面逐渐难以满足现代建筑的综合性性能需求。智能土木工程通过引入传感、自学习、智能控制以及新型材料等技术,使建筑具有感知、判断与响应能力,实现从被动承载向主动调节的转变。文中基于现代建筑结构的发展需求,系统分析智能土木工程核心理念、关键技术体系以及在韧性结构、减隔震系统、健康监测、智能维护等方面的实际应用。研究表明,智能土木工程能够显著提升建筑的安全性、耐久性与运行效率,为复杂环境下的结构长期服役提供可靠保障。文章进一步提出智能土木工程发展的挑战与未来方向,为相关工程实践与技术创新提供参考。

[关键词]智能土木工程; 建筑结构; 结构健康监测; 智能材料; 减隔震技术

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18836

中图分类号: TU31

文献标识码: A

The Specific Application of Intelligent Civil Structures in Modern Building Structures

ZHANG Zhixin

Hebei Institute of Architectural Design & Research Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the accelerated digital and intelligent transformation of the construction industry, traditional civil structures are gradually unable to meet the comprehensive performance requirements of modern buildings in terms of safety, adaptability, and sustainability. Intelligent civil structures enable buildings to have sensing, judgment, and response capabilities by introducing sensing, self-learning, intelligent control, and new materials technologies, achieving a transition from passive load-bearing to active regulation. Based on the development needs of modern building structures, this article systematically analyzes the core concepts, key technical systems, and practical applications of intelligent civil engineering structures in resilient structures, seismic isolation systems, health monitoring, intelligent maintenance, and other areas. Research has shown that intelligent civil structures can significantly improve the safety, durability, and operational efficiency of buildings, providing reliable guarantees for long-term service of structures in complex environments. The article further proposes the challenges and future directions for the development of intelligent civil engineering structures, providing reference for related engineering practices and technological innovations.

Keywords: intelligent civil engineering structure; building structure; structural health monitoring; intelligent materials; seismic isolation technology

引言

在新时代城市建设快速推进的背景下,建筑结构在安全性、耐久性与功能性方面面临严峻挑战。传统土木工程主要依赖材料本体性能和工程设计进行被动抗力配置,难以对环境变化、荷载作用及损伤发展做出主动反应,导致结构长期服役状态不易掌握,维护成本高、风险大。智能土木工程通过融合传感监测、信息采集、人工智能、智能材料与自动控制等技术,为结构赋予感知、分析、判定与主动调节能力,使其能够适应复杂荷载环境,从而显著提高建筑安全韧性与服役性能。随着传感技术、智能材料、数据处理能力以及智能算法的迅速发展,智能土木工程理论体系逐渐完善,并在桥梁工程、高层建筑、大跨度建筑及重要基础设施中得到应用。然而,现阶段智能结构系统仍面临设计标准不足、系统集成复杂、成本较高等问题,需要对其核心技术体系与实际应用路径进行深入研究。基于此,本文从智能土木工程的基本原理、关键技术

体系及工程应用三个方面展开系统分析,旨在为智能土木工程在现代建筑中的普及提供理论支撑与实践指导。

1 智能土木工程的概念体系与发展基础

1.1 智能土木工程的内涵与技术特征

智能土木工程是指能够通过传感器、智能材料及数据处理技术实现自感知、自诊断与主动调节的土木工程结构系统。其核心在于利用智能技术实现结构信息的实时采集、损伤分析、风险识别以及控制响应,使结构在遭受外界作用时具备自适应能力。智能土木工程一般具有以下技术特征:可感知性、可识别性、可调控性与可学习性。通过这些功能,结构可从被动承受荷载的传统模式转向主动优化性能的现代模式。

1.2 智能土木工程发展的理论基础

智能结构的理论基础主要包括结构动力学、材料科学、信息技术与控制理论等。结构动力学使得工程师能够从系统角度理解结构在荷载作用下的响应特性;材料科学推动

智能材料的发展,如形状记忆合金、压电材料、自修复材料等;信息技术的进步使传感数据采集与大数据分析成为可能;控制理论则为结构主动控制提供方法,使智能结构能够实施自动调节。

1.3 建筑行业应用智能结构的动因

当前建筑行业对结构性能的要求越来越高,既需要结构安全与可靠,又希望降低维护成本、提升使用效率。随着极端天气、地震等自然灾害频发,传统结构体系难以应对复杂荷载的不确定性。智能土木工程通过实时监测与主动调节,可显著提升结构抗灾能力、延长服役寿命,从而成为现代建筑发展的必然方向。

2 智能材料在智能土木工程中的应用基础

2.1 形状记忆合金在结构韧性提升中的作用

形状记忆合金具有超弹性与自愈能力,能够在极端变形后恢复原状,是提升结构抗震韧性的关键材料。其在梁柱节点、支撑构件及桥梁伸缩装置中的应用,可有效减少结构的残余变形,降低地震后修复成本。

2.2 压电材料的感知与驱动功能

压电材料兼具传感与驱动功能,可将力学信号转换为电信号并作出反馈。压电传感器可用于结构振动监测、损伤识别;压电致动器可用于结构主动控制,如调节阻尼或改变构件刚度,使结构具备响应外界荷载的能力。

2.3 自修复材料提高结构耐久性的潜力

自修复材料通过在结构内部预埋特定成分,使其在裂缝产生时自动触发修复反应,从而封闭裂缝并阻止进一步扩展。这一过程能够在早期损伤阶段发挥作用,有效降低裂缝对结构耐久性的不利影响。自修复混凝土在长期服役的工程结构中表现出显著优势,尤其适用于隧道、桥梁等维修难度较大、运行周期较长的工程类型。材料在服役过程中具备一定自我修复能力,可减缓环境侵蚀和荷载作用造成的性能衰减。随着裂缝修复效果的持续发挥,结构整体性能得以保持稳定,人工检测与修补需求明显减少。

3 结构健康监测技术在智能土木工程中的关键作用

3.1 传感网络构建实现结构信息实时获取

结构健康监测系统以传感器网络为核心支撑,通过在关键部位布设应变、位移、加速度、温度及光纤等多类型传感器,对结构运行状态进行持续感知。多源传感数据的协同采集,使结构在不同荷载与环境条件下的响应特征得到全面反映,运行状态更加直观透明。监测数据能够真实记录结构在长期服役过程中的变化规律,为识别性能退化与潜在损伤提供可靠依据。传感网络具备连续采集与远程传输能力,使管理人员能够及时掌握结构安全状况,减少对定期人工检查的依赖。随着数据积累的不断积累,监测结果可用于支撑损伤分析与安全评估模型的建立,提升评估结论的科学性与准确性。稳定、高效的传感网络体系,

为结构安全管理与精细化运维提供了坚实的数据基础。

3.2 基于数据分析的结构损伤识别与性能评估

结构健康监测系统在运行过程中持续采集应变、加速度、位移等多源传感数据,为结构状态评估提供了丰富的信息基础。通过对这些数据进行系统处理与特征提取,可有效识别结构刚度退化、连接部位松动以及裂缝逐步扩展等损伤特征。频率分析与模态分析方法能够从整体动力特性变化中反映结构性能演化情况,为损伤定位提供依据。随着数据规模和复杂度不断提升,机器学习技术在损伤识别中的作用日益突出。通过对大量已知工况与损伤样本进行训练,模型能够自动学习关键特征,实现对结构异常状态的快速判断。该类方法显著提升了诊断效率与准确性,减少对人工巡检和经验判断的依赖,使结构安全评估更加智能、高效和可靠。

3.3 健康监测结果驱动的智能控制响应机制

智能结构通过持续获取健康监测数据,能够实时感知自身受力状态与环境变化,为主动控制系统的触发提供可靠依据。当监测结果显示振动幅度或应力水平异常时,系统可自动启动相应控制措施,如调节阻尼装置工作状态、激活隔震机构或改变局部结构刚度,使结构响应保持在安全范围内。控制策略依据实时数据动态调整,使结构具备一定的自适应能力。健康监测与主动控制的紧密结合,使结构运行由被动承受转变为主动调节,响应过程更加精准高效。结构在不同工况下能够保持稳定性能,减少损伤累积风险。该类智能响应体系提升了工程运行安全性与管理效率,为复杂结构在长期服役中的可靠运行提供了重要技术支撑。

4 主动控制与被动控制技术在智能结构系统中的应用

4.1 主动控制技术提升结构抗震与减振能力

主动控制系统通过传感器实时获取结构所受荷载与响应信息,并依托控制算法对数据进行分析,进而驱动致动器实施精准调节,从源头上抑制结构振动发展。该类系统能够根据外部环境变化与结构状态,持续调整控制策略,使振动控制过程更加灵活高效。主动质量阻尼器在高层建筑中可通过反向运动抵消结构振动,明显改善风致振动对使用舒适性的影响。液压致动器在桥梁结构中的应用,使结构在强风或地震作用下保持更稳定的受力状态。主动控制系统具备响应迅速、调节精度高的特点,能够显著降低结构动力反应水平。随着传感技术与控制算法的不断进步,主动控制在提升高层建筑与桥梁抗风抗震性能方面展现出广阔应用前景。

4.2 半主动控制技术的节能与稳定优势

半主动控制技术通过调节阻尼装置的工作状态来实现结构振动控制,在保证安全性的同时兼顾系统稳定性与能耗效率。该类技术依托变阻尼器、磁流变阻尼器等装置,

根据结构响应变化快速调整阻尼参数,使振动能量得到有效耗散。由于调节过程所需能量较低,即使在供能受限的情况下也能保持稳定运行。半主动控制系统响应速度快,能够及时适应不同荷载条件下的结构动力特性变化,在地震作用过程中发挥良好控制效果。阻尼性能的可调性使结构在多种工况下保持合理受力状态,减少损伤累积。凭借可靠性与适应性优势,半主动控制技术在工程与高性能结构设计中得到广泛应用,成为智能结构体系中的重要组成部分。

4.3 被动控制技术在智能结构体系中的辅助作用

被动控制技术通过隔震、消能与减震装置等方式,利用材料和构造本身的物理特性吸收和耗散外部输入能量,从而降低结构振动响应。该类技术不依赖外部能源或复杂控制系统,在地震和风荷载作用下具有稳定可靠的性能表现。隔震装置可有效延长结构自振周期,减小地震能量传递,消能与减震装置则通过耗散机制降低振动幅度。尽管被动控制不具备实时调节能力,但其结构简单、维护需求低,适合作为长期运行的基础防护手段。在智能结构体系中,被动控制技术常与主动或半主动控制方式协同应用,共同构成多层次防护体系。多种控制手段的合理组合,有助于提升结构整体韧性与安全水平,使工程在复杂荷载作用下保持稳定可靠的工作状态。

5 智能土木工程在现代建筑工程中的具体应用路径

5.1 在高层建筑中的抗风抗震应用

高层建筑结构因高度较大、整体柔性较强,在风荷载与地震作用下易产生明显振动,对结构安全与使用舒适性带来挑战。通过在建筑中布置智能调节装置,可对结构响应进行实时调控,使振动水平保持在合理范围内。主动或半主动控制技术能够根据监测数据调整控制策略,增强结构对外部荷载变化的适应能力。结构健康监测系统对位移、加速度及应变等参数进行持续采集,为控制系统提供可靠信息来源。智能阻尼器与调节质量系统在运行过程中吸收并耗散能量,有效降低结构振动幅度。多种智能技术的协同应用,使高层建筑在保障安全性的基础上提升使用舒适度,已逐渐成为现代高层建筑结构设计中的重要组成部分。

5.2 在桥梁工程中的安全监测与智能调控

桥梁结构在服役过程中长期承受车辆荷载、温度变化及环境侵蚀等多重作用,结构状态具有显著的动态特征。健康监测系统通过布置传感设备,可对桥梁应力水平、裂缝扩展趋势及整体变形情况进行持续监测,使结构运行状态得到直观反映。基于监测数据,管理人员能够及时掌握关键构件的受力变化,为安全评估与维护决策提供依据。形状记忆合金等智能材料的应用,使桥梁伸缩装置与支座具备更好的变形适应能力,有助于缓解温度作用与荷载变

化带来的不利影响。智能控制与检测系统的结合,减少了对人工巡检的依赖,提升了养护工作的针对性与效率,为桥梁长期安全运营提供了更加可靠的技术保障。

5.3 在地下与大跨结构中的应用前景

地下结构与大跨空间结构受力复杂,长期处于多变环境中,对变形控制、材料耐久性 & 环境适应能力提出了更高要求。智能材料与传感系统的引入,使结构具备对外部环境变化和自身响应状态的感知能力。通过对位移、应变、温湿度等关键参数的持续监测,可实时掌握结构运行状况,为安全评估提供可靠数据支撑。在隧道工程中,智能监测有助于及时发现围岩变形或衬砌受力异常,降低施工与运营风险。大跨屋盖结构在风荷载、温度作用下的响应过程,也可通过智能系统进行动态分析。依托精准的数据反馈,管理人员能够及时采取调控措施,提升工程在施工期与运营期的安全性与可靠性,为复杂结构的长期稳定运行提供有力保障。

6 结论

智能土木工程是现代建筑结构向高性能、安全性与可持续性发展的必然趋势。研究表明,通过传感监测、智能材料、主动控制系统与数据分析方法的综合运用,结构可实现从被动承载向主动调节的转变,显著提升建筑的安全性、韧性与使用效率。智能技术的引入为结构健康监测、抗震抗风设计以及结构维护提供了新途径。然而,智能结构技术在工程应用中仍面临标准体系不完善、成本较高、技术集成难度大等挑战,未来需加强材料与结构耦合研究、智能算法应用研究以及集成化系统的工程化验证工作。随着技术的不断成熟,智能土木工程将在更多重要建筑工程中发挥关键作用,为土木工程的持续发展提供强有力的技术支撑。

[参考文献]

- [1]肖靖,崔宁,张彤彤,等.追求理想筒体之路——我国超高层建筑的早期技术演变及设计实验[J].建筑学报,2025(1):7-13.
- [2]方耀卿,贾思媛,董晓伟.人工智能技术在城市更新中的应用研究——以东莞市为例[J].智能城市,2025,11(12):125-128.
- [3]万茹,戴卿,王丽园.基于 CIM 的智慧市政运管养平台架构研究[J].智能城市,2025,11(8):7-10.
- [4]李曾悦.基于 BIM 技术与数据驱动的智能建筑智慧运维管理研究[J].智能城市,2025,11(6):79-81.
- [5]郭晓晓.绿色建造技术在施工中的研究与应用[J].陶瓷,2025(1):169-171.

作者简介:张志新(1979.3—),女,汉族,毕业学校:河北理工学院,现工作单位:河北建筑设计研究院有限责任公司。