

Exploration of innovative structural system to improve wind resistance performance of large span bridge

Yuancheng Fang

Tongxiang Huatong Industrial Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang, 314599, China

Abstract

With the vigorous development of transportation, large-span bridges play a crucial role in overcoming geographical obstacles such as rivers, lakes, and seas. However, due to their lightweight and low-damping structural characteristics, large-span bridges are prone to significant vibrations under wind loads, severely impacting their safety and durability. This paper aims to explore innovative structural systems for enhancing the wind resistance of large-span bridges. It first analyzes the wind-induced vibration issues and their hazards faced by large-span bridges, then discusses the limitations of traditional wind-resistant measures. Subsequently, it delves into the research progress of innovative structural systems from aspects such as new structural forms, application of smart materials, and structural optimization design. Finally, it looks forward to the future development directions of innovative structural systems for improving the wind resistance of large-span bridges, aiming to provide theoretical support and technical references for the wind-resistant design of large-span bridges.

Keywords

large span bridge; wind resistance performance; innovative structural system

大跨度桥梁抗风性能提升的创新结构体系探索

房缘铖

桐乡市华通实业有限公司, 中国·浙江·嘉兴 314599

摘要

随着交通事业的蓬勃发展, 大跨度桥梁在跨越江河湖海等地理障碍方面发挥着至关重要的作用。然而, 大跨度桥梁由于其轻柔、低阻尼等结构特性, 在风荷载作用下易产生大幅振动, 严重影响桥梁的安全性和耐久性。本文旨在探索大跨度桥梁抗风性能提升的创新结构体系。首先分析了大跨度桥梁面临的风致振动问题及其危害, 接着阐述了传统抗风措施的局限性, 然后从新型结构形式、智能材料应用以及结构优化设计等方面详细探讨了创新结构体系的研究进展, 最后对未来大跨度桥梁抗风性能提升的创新结构体系发展方向进行了展望, 以为大跨度桥梁的抗风设计提供理论支持和技术参考。

关键词

大跨度桥梁; 抗风性能; 创新结构体系

1 引言

大跨度桥梁作为现代交通基础设施的重要组成部分, 其建设规模和技术水平不断取得新的突破。然而, 大跨度桥梁所处的自然环境复杂, 风荷载是其设计过程中必须考虑的关键因素之一。风荷载作用下, 大跨度桥梁可能发生涡激振动、颤振、抖振等多种风致振动现象, 这些振动不仅会引起桥梁结构的疲劳损伤, 降低桥梁的使用寿命, 严重时甚至会导致桥梁结构破坏, 造成巨大的经济损失和人员伤亡。因此, 提升大跨度桥梁的抗风性能具有重要的现实意义。传统的抗风措施, 如设置风障、安装调谐质量阻尼器 (TMD) 等, 在一定程度上能够提高桥梁的抗风能力, 但随着桥梁跨度的

不断增大和结构形式的日益复杂, 这些传统措施逐渐暴露出局限性。因此, 探索创新的结构体系以提升大跨度桥梁的抗风性能成为当前桥梁工程领域的研究热点。

2 大跨度桥梁面临的风致振动问题及其危害

2.1 涡激振动

当气流吹拂桥梁结构, 会在其表面形成周期性的漩涡脱落现象。这些漩涡并非毫无规律, 而是以特定频率不断生成、分离。一旦漩涡脱落频率与桥梁结构的固有频率相近, 结构便会受到激发, 进而产生涡激振动。涡激振动属于限幅振动类型, 振幅通常不算大。然而, 若桥梁长期处于这种振动状态, 结构内部会反复承受应力变化, 从而引发疲劳损伤, 对桥梁正常使用造成不利影响。

2.2 颤振

颤振属于一种特殊的自激振动现象。当桥梁结构处于

【作者简介】房缘铖 (1994-), 男, 中国浙江桐乡人, 本科, 助理工程师, 从事桥梁工程研究。

风环境中，风会向结构输入能量。一旦结构从风中获取的能量超过其自身阻尼所消耗的能量，振动便会持续增强。随着能量不断累积，振动幅度会越来越大，最终极有可能致使桥梁结构遭受严重破坏。颤振现象一般出现在高风速状况下，对于大跨度桥梁而言，它是极为危险的风致振动形式之一，需高度重视。

2.3 抖振

抖振作为一种特殊的振动现象，源于脉动风作用。脉动风风速、风向不断变化，由此引发桥梁产生随机振动，这便是抖振。通常情况下，抖振的振幅相较于颤振要小。然而，其随机性特征带来了严重问题。在行车过程中，抖振会使桥梁产生不规则晃动，降低行车舒适性。同时，长期处于抖振状态下，桥梁结构会反复承受应力变化，加速结构疲劳损伤，影响其疲劳性能。

2.4 风致振动危害

风致振动对桥梁产生多方面危害。在结构安全层面，它会直接冲击桥梁的稳定性，威胁结构安全。从耐久性角度而言，长期的风致振动会使桥梁构件持续承受交变应力，进而引发裂缝、疲劳损伤等状况，加速结构老化，缩短桥梁使用寿命。同时，当振动幅度过大时，桥梁的晃动会严重影响车辆行驶的平稳性，增加行车安全隐患，给过往人员的生命财产带来潜在威胁。

3 传统抗风措施的局限性

3.1 机械式减振装置的局限性

传统的机械式减振装置，如 TMD、调谐液体阻尼器（TLD）等，虽然在一定程度上能够抑制桥梁的振动，但存在一些局限性。例如，TMD 的减振效果依赖于其参数的精确设计，且当桥梁结构参数发生变化时，TMD 的减振性能可能会下降。此外，机械式减振装置的安装和维护成本较高，且在极端风荷载作用下，其可靠性也面临挑战。

3.2 结构外形优化的局限性

对桥梁结构外形进行优化，如采用流线型主梁截面、增设导流板等手段，确实能在一定程度上降低桥梁所受的风荷载。然而，这种优化方式存在明显局限性。从桥梁功能角度看，外形调整需确保满足交通通行、承载等基本要求，不能因追求抗风而影响正常使用。美观方面，桥梁外形往往需与周边环境相协调，过度优化可能破坏整体景观效果。经济性上，外形优化可能增加施工难度和成本。

4 大跨度桥梁抗风性能提升的创新结构体系研究进展

4.1 新型结构形式

在桥梁工程领域，为提升大跨度桥梁的抗风性能，多种新型结构形式应运而生。分体式钢箱梁结构便是其中之一，它将主梁分割成多个独立箱室，并借助横隔板完成连接。这种独特构造能巧妙改变桥梁周边的气流走向，使气流分布

更为合理，进而显著降低风荷载对桥梁的冲击力。与此同时，分体式钢箱梁结构在抗扭性能和局部稳定性方面表现优异，能够有效抵御风荷载引发的扭转和局部变形，为桥梁的抗风能力提供坚实保障。混合梁斜拉桥结构则巧妙融合了混凝土梁与钢梁的优势。在跨中区域采用钢梁，利用钢材强度高、自重轻的特点，大幅减轻结构自重，使桥梁具备更强的跨越能力，能够轻松跨越更宽阔的水域或峡谷。而在边跨部分采用混凝土梁，借助混凝土刚度大、稳定性好的特性，增强结构的整体刚度和稳定性。这种合理搭配能够优化桥梁的动力特性，让桥梁在风荷载作用下更不易发生大幅振动，降低风致振动的发生概率，保障桥梁在复杂风环境下的安全运行^[1]。悬浮隧道 - 桥梁组合结构作为新型跨海交通结构形式，将悬浮隧道与桥梁有机结合。通过这种创新组合，有效减小了桥梁的跨度，从源头上降低了风荷载对桥梁的影响。并且，两种结构的优势互补，提升了结构的整体稳定性和抗风性能，为跨海交通建设提供了更可靠、更安全的解决方案，推动桥梁工程向更高水平发展。

4.2 智能材料应用

在桥梁工程中，为提升桥梁抗风性能与耐久性，智能材料的应用发挥着重要作用。形状记忆合金（SMA）凭借独特的形状记忆效应与超弹性脱颖而出，它能在受力变形后恢复原始形态。将 SMA 引入桥梁结构，可充当智能阻尼器。当风荷载作用于桥梁引发振动时，SMA 在相变过程中会产生恢复力，以此消耗风荷载输入的能量，有效抑制桥梁振动。而且，SMA 还具备桥梁损伤自修复的潜力，当桥梁结构出现细微损伤，其特性可促使损伤部位在一定程度上自我修复，显著提高桥梁的耐久性。磁流变液（MRF）作为一种智能流体，展现出卓越的粘度调节能力。在外加磁场作用下，MRF 的粘度能实现瞬时且可逆的变化。把 MRF 应用于桥梁减振装置，能够依据风荷载的实时大小，精准调整减振装置的阻尼特性，达成智能减振目的。相较于传统机械式减振装置，MRF 减振装置响应速度更快，调节范围更广，能更灵活地应对不同强度的风荷载。压电材料因具有正压电效应和逆压电效应而备受关注，它具备机械能与电能相互转化的能力^[2]。在桥梁结构中运用压电材料，可制成压电传感器与压电驱动器。压电传感器能实时感知桥梁的振动状态，将振动信息转化为电信号输出；压电驱动器则根据传感器反馈的信息，对桥梁结构施加反向作用力，主动调节桥梁振动，实现主动减振，为桥梁在复杂风环境下的安全稳定运行提供有力保障。

4.3 结构优化设计

在提升大跨度桥梁抗风性能的结构优化设计领域，基于性能的设计方法与多目标优化设计发挥着关键作用。传统的桥梁设计多聚焦于结构的强度和稳定性，然而基于性能的设计方法则将目光投向桥梁在不同风荷载作用下的实际性能表现。该方法通过设定一系列性能目标，如对桥梁振动幅

值设定严格的限制标准,确保在强风作用下桥梁的振动幅度处于安全可控范围;同时,将舒适度要求纳入考量,保障桥梁在正常使用过程中能为过往车辆和行人提供平稳、舒适的通行环境。在设计过程中,运用概率分析和可靠性理论,充分考虑风荷载的不确定性以及结构性能的变异性。这种方法不仅确保桥梁结构具备足够的安全性,还能使桥梁更好地适应复杂多变的风荷载环境,提高桥梁在各种风况下的适应性和可靠性。在大跨度桥梁抗风性能提升的结构优化设计中,需兼顾多个目标。结构重量影响桥梁的造价与施工难度,抗风性能关乎桥梁的安全运营,经济性则是项目决策的重要因素^[1]。多目标优化设计应运而生,采用遗传算法、粒子群算法等先进的优化算法,能够在多个目标之间进行综合权衡与优化。这些算法通过模拟自然进化过程或群体智能行为,在庞大的设计空间中搜索最优解,从而找到结构重量、抗风性能和经济性之间的最佳平衡点,得出最优的结构设计方案,为建设安全、经济、适用的大跨度桥梁提供有力支持。

5 未来发展方向展望

5.1 多学科交叉融合

在未来的大跨度桥梁抗风性能提升创新结构体系研究中,多学科交叉融合将成为重要趋势。流体力学能深入剖析风与桥梁结构相互作用的复杂机理,精准模拟不同风况下桥梁周边的气流分布、压力变化等情况,为抗风设计提供基础数据和理论支撑。材料科学的发展为桥梁结构带来新的可能,研发具有高强度、轻质量、良好韧性和抗疲劳性能的新型材料,能增强桥梁自身抵抗风荷载的能力。控制理论则可应用于桥梁的振动控制,通过智能控制系统实时监测桥梁振动状态,并迅速做出响应,调整结构参数或施加反向作用力,抑制振动。综合运用流体力学、材料科学、控制理论等多学科知识开展研究,能够充分发挥各学科优势,相互补充、协同创新,从而开发出更高效、更可靠的抗风技术和结构体系,推动大跨度桥梁建设迈向新高度。

5.2 数字化与智能化

在信息技术蓬勃发展的当下,数字化与智能化在大跨度桥梁抗风性能提升领域展现出巨大潜力,正成为重要发展方向。传感器技术如同桥梁的“神经末梢”,能精准感知桥梁在风荷载作用下的振动情况,实时采集振动幅度、频率等关键数据。大数据分析则是对这些海量数据进行深度挖掘的“利器”,通过分析数据规律,可提前洞察桥梁振动趋势。人工智能算法基于大数据分析结果,构建智能模型,实现对桥梁风致振动的精准预测。基于此,可构建一套完整的实时

监测、预警和智能控制系统。一旦监测到异常振动,系统能迅速发出预警,并根据预设策略自动调整桥梁结构参数或启动减振装置,进行智能控制^[4]。数字化与智能化的深度融合,将极大提高大跨度桥梁的抗风性能,为桥梁在复杂风环境下的安全稳定运营提供坚实保障。

5.3 绿色与可持续发展

在桥梁抗风结构体系设计领域,绿色与可持续发展理念正日益受到重视,成为未来发展的重要导向。在材料选用方面,积极采用环保材料成为关键举措。这类材料不仅在生产过程中对环境影响较小,而且在桥梁使用过程中也具备更低的污染排放特性,从源头上减少了对生态环境的破坏。同时,通过优化结构形式来减少材料用量。借助先进的结构分析技术和设计理念,在保证桥梁抗风性能的前提下,对结构进行精细化设计,避免材料的浪费,实现资源的合理利用^[9]。此外,还需全面考虑桥梁全生命周期的抗风性能。从规划设计阶段到建设施工,再到运营维护,始终将抗风性能与能源消耗、环境污染等因素相结合,采取有效的措施降低桥梁建设和运营过程中的能源消耗,减少废弃物排放,推动桥梁工程向更加绿色、可持续的方向发展。

6 结论

大跨度桥梁抗风性能提升的创新结构体系研究是桥梁工程领域的重要课题。传统的抗风措施存在一定的局限性,难以满足日益增长的桥梁抗风需求。通过探索新型结构形式、应用智能材料以及进行结构优化设计等创新方法,可以有效提高大跨度桥梁的抗风性能。未来,多学科交叉融合、数字化与智能化以及绿色与可持续发展将成为大跨度桥梁抗风性能提升的创新结构体系研究的重要发展方向。通过不断探索和创新,有望为大跨度桥梁的抗风设计提供更先进、更可靠的技术手段,保障桥梁的安全运营,推动桥梁工程技术的不断进步。

参考文献

- [1] 潘韬,肖海珠,赵林,等. 大跨度桥梁超宽分体三箱梁抗风性能及控制措施研究 [J]. 桥梁建设, 2020, 50 (S2): 29-35.
- [2] 王锋,赖笑. 大跨度半拱式异形桥梁抗风性能研究 [J]. 建筑技术开发, 2017, 44 (03): 131-132.
- [3] 吴志勤,何超. 大跨度桥梁抗风措施研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2015, (11): 65-69+14.
- [4] 葛耀君. 大跨度桥梁抗风的技术挑战与精细化研究 [J]. 工程力学, 2011, 28 (S2): 11-23.
- [5] 项海帆,葛耀君. 大跨度桥梁抗风技术挑战与基础研究 [J]. 中国工程科学, 2011, 13 (09): 8-21.