

大跨度斜拉桥风致振动特性与稳定性控制研究

丁彬元

安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司 安徽 合肥 230088

【摘要】：随着大跨度斜拉桥结构规模的不断扩大，其在风致振动方面的响应表现出复杂的非线性特征，严重影响桥梁的结构安全与耐久性。本文围绕大跨度斜拉桥的风致振动机理，深入分析不同风速和风向作用下的振动特性，系统探讨桥梁结构的稳定性失效模式。基于数值模拟与实验研究相结合的方法，提出针对性稳定性控制策略，有效抑制风致振动的放大效应，提升桥梁整体安全性能。研究结果为大跨度斜拉桥的风环境适应设计及控制技术提供理论支撑与工程指导。

【关键词】：大跨度斜拉桥；风致振动；稳定性控制；数值模拟；振动特性

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.035

引言

大跨度斜拉桥作为现代桥梁工程中的重要结构类型，其独特的结构形态使其在风环境中极易产生复杂的振动响应。风致振动不仅影响桥梁的使用性能，还可能引发结构疲劳甚至破坏，成为工程设计和运营管理中的关键挑战。研究风致振动特性及有效的稳定性控制方法，对于保障桥梁结构安全、延长使用寿命具有重要现实意义。通过对风致振动机制的深入探讨和控制技术的创新应用，有望实现桥梁的高效抗风性能，为大型桥梁结构的发展提供坚实基础。

1 大跨度斜拉桥风致振动的力学特性分析

大跨度斜拉桥作为现代桥梁工程的重要代表，其结构形式独特且规模宏大，风致振动问题成为影响桥梁安全和耐久性的关键因素之一。斜拉桥风致振动的力学特性主要表现为桥梁结构在风荷载作用下的动力响应，该响应与桥梁的结构刚度、阻尼特性以及空气动力学特性密切相关。大跨度斜拉桥由于其跨度较大，柔性较强，极易受到低频风振的影响，产生显著的振动幅度，这种振动不仅影响结构的舒适性，还可能导致疲劳损伤，甚至结构失稳。风致振动的本质在于风与结构之间复杂的相互作用，风流绕过斜拉桥桥塔及主梁时形成的涡激振动、风振耦合及气动弹性效应等多种机制共同作用，决定了桥梁振动的动力学特征。

大跨度斜拉桥的风致振动特性呈现出明显的非线性和多模态特征，结构振动不仅受限于单一自由度模式，而是多自由度系统的耦合响应，涉及桥面板、桥塔及斜拉索的协同振动。风荷载作用下，涡激振动是桥梁振动的主要激励形式之一，尤其在桥梁横风作用下，桥面板的振动频率若与涡激频率接近，将导致共振效应，放大振动响应。桥梁的气动刚度和阻尼特性在不同风速条件下呈现出变化，气动弹性效应使得结构的固有频率和阻尼比随风速变化，进一步复杂化了振动行为。斜拉索的动力特性对整体结构的振动响应有重要影响，斜拉索自身在风激励下可能产生独立的振动，进而通过结构耦合作用影响整个桥梁系统的稳定性。

大跨度斜拉桥的风致振动力学分析不仅依赖于传统的结构动力学理论，还需结合空气动力学与流体力学的研究成果，通过数值模拟和风洞试验相结合的方式深入揭示其振动机理。结构动力学模型通过建立多自由度系统，精确描述桥梁各组成部分的振动模式和耦合关系，能够捕捉复杂的动力响应。空气动力学研究则侧重于风流绕流分离、涡激产生及气动阻尼机制，通过风洞实验获得气动力系数，校准数值模型的准确性。近年来，计算流体力学（CFD）技术的发展使得对大跨度斜拉桥风致振动的模拟更加精细化，能够实时捕捉风流与结构振动的非线性耦合过程，提供更加深入的力学分析基础。这些研究成果不仅提升了对大跨度斜拉桥风致振动特性的理解，也为后续的风振稳定性控制技术提供了理论支撑和技术保障。

2 风环境作用下的振动响应特征研究

风环境对大跨度斜拉桥的振动响应产生显著影响，成为影响桥梁安全和使用性能的重要因素。风的多样性表现为风速、风向、湍流强度以及风型的复杂变化，这些因素共同作用于桥梁结构，导致结构产生多模态的动力响应。大跨度斜拉桥由于其柔性大、结构长且薄，风致振动容易在特定频率范围内产生共振现象，进而引发大幅度的振动。风速的变化不仅直接影响桥梁受到的风压大小，还会影响涡激振动的激发和维持过程。风向角度的不同，使得结构各部位承受的风压分布差异显著，尤其是斜拉索和主梁在横风作用下容易产生复杂的风振耦合效应。湍流的强度和尺度决定了风压脉动的随机特性，使得结构的振动表现出强烈的时变非线性。实际工程中，这些风环境特征对桥梁结构的动力响应产生了极大的挑战，必须结合结构动力学和流体力学进行深入研究，以揭示桥梁在多变风环境下的振动规律。

风致振动的响应不仅表现为整体位移和应力的变化，还涉及结构的局部振动模式和能量传递路径。斜拉桥主梁和斜拉索的振动模式复杂，既有低频的整体摆动，也存在高频的局部扭转和弯曲响应。风激励导致的涡激振动是大跨度斜拉桥中最常见的风振现象之一，其振幅大小与风速成非线性关系，在特定风速区间会出现振幅峰值，表现为所谓的锁定效应。螺旋振动、

横向颤振等复杂振动模式在一定条件下也可能出现,增加了桥梁结构的稳定性风险。风荷载的随机性特征使得振动响应存在显著的时间和空间不确定性,要求采用统计分析和概率模型对振动特性进行描述。桥梁设计中需要关注振动响应的耦合效应,考虑风致振动与结构自振频率的匹配问题,避免共振带来的疲劳损伤和性能退化。对振动响应的准确预测成为保障桥梁安全和延长使用寿命的关键环节。

为了应对复杂的风环境,风致振动响应特征的研究结合了数值模拟、风洞实验和现场监测等多种方法。数值模拟通过有限元法和计算流体力学(CFD)技术模拟风压分布和结构响应,实现了对桥梁全局及局部振动行为的精细分析。风洞试验则通过缩尺模型在受控条件下复现风流场,获得更具真实感的风致动力数据,验证数值模型的准确性。现场监测系统对实际运行中的桥梁结构振动进行长期实时监测,捕捉风振响应的动态变化趋势。多种方法的综合应用使得风环境对振动响应特征的理解更加深入,推动了风致振动控制策略的优化和实施。通过掌握不同风环境下振动响应的规律,可针对性设计阻尼器、调谐质量块等控制装置,实现对桥梁振动的有效抑制,提高结构整体的稳定性和安全性。

3 风致振动稳定性失效模式及风险评估

风致振动作为大跨度斜拉桥设计和运行中的重要影响因素,其稳定性失效模式直接关系到桥梁的安全性和耐久性。在风荷载作用下,桥梁结构可能产生多种振动形式,包括涡激振动、颤振以及风诱导的低频振动等,这些振动模式对结构稳定性产生不同程度的威胁。涡激振动通常发生在桥梁结构横截面处,由气流绕流形成的周期性涡旋引发,使桥梁产生强烈的横向振动,若振动能量无法及时衰减,将导致结构疲劳累积甚至损伤。颤振现象则涉及桥梁在迎风方向的气动弹性不稳定,结构与气流相互耦合,产生自激振动,严重时可能引发结构失稳。除此之外,风诱导的低频振动也对桥梁的整体稳定构成挑战,尤其在大跨度斜拉桥柔性结构特征下,振动频率与结构固有频率接近时易出现共振现象,显著增加结构受力和变形。

稳定性失效的风险评估是确保桥梁在复杂风环境中长期安全运营的关键环节。评估过程中需要结合桥梁的结构参数、材料性能以及现场风环境特征,建立风-结构相互作用的动力学模型。通过数值仿真和风洞试验,能够获得桥梁在不同风速和风向条件下的响应数据,识别可能引发稳定性失效的关键工况。风险评估不仅包含对振动幅值和频率的分析,还应关注振动持续时间、能量积累以及结构的阻尼特性。采用概率统计方法对极端风环境下的振动响应进行量化,有助于揭示失稳风险的概率分布和严重程度,为制定合理的设计安全裕度和控制方案提供科学依据。

针对不同的失效模式,风险评估结果进一步指导稳定性控制措施的设计与优化。风险较高的振动类型需优先采取针对性

的抑制策略,如通过调整结构刚度和阻尼参数,改变桥梁截面形状以降低涡激振动的诱发条件,或在关键部位设置阻尼器和风索振动吸收装置,以减弱颤振的振幅和持续时间。实时监测系统的布设对失稳风险的动态评估和预警提供了技术支撑,使得控制策略能够根据实际运行状态进行调整。深入理解风致振动的稳定性失效模式及其风险特征,结合精细化评估手段,为大跨度斜拉桥的风环境适应性设计和安全运行管理提供了坚实的理论基础和技术保障。

4 基于数值模拟的风致振动控制技术设计

基于数值模拟的风致振动控制技术设计是确保大跨度斜拉桥结构安全性和耐久性的关键环节。大跨度斜拉桥因其结构跨度大、受力复杂,极易受到风荷载诱发的振动影响。通过构建高精度的有限元模型,能够有效捕捉桥梁结构在不同风速和风向作用下的动态响应特性。数值模拟不仅能够重现风致振动的时域和频域行为,还能细致分析涡激振动、风摆振动等多种风振模式对结构的影响,从而为控制技术的设计提供理论依据和数据支持。利用数值模拟方法可以实现对风荷载与结构相互作用的耦合分析,精确识别振动幅值和频率的敏感区,为制定针对性的控制措施提供基础。

在风致振动控制技术设计过程中,数值模拟能够辅助优化阻尼装置的布置和参数配置。例如,调整减振器的阻尼系数和安装位置,以最大限度地抑制结构的振幅响应。通过模拟分析风振能量的传递路径,能够识别振动能量集中的薄弱环节,进而在关键构件处布置调谐质量阻尼器(TMD)、粘滞阻尼器或风导向装置等,提升结构整体的阻尼比和风致振动控制效果。模拟结果能够直观展现控制装置对振动响应的削弱作用,验证其设计的合理性与有效性。数值模拟技术还支持对多种控制方案的比较分析,使工程师能够选择最优的控制策略,实现振动控制与经济性之间的平衡。

结合实际工程应用,基于数值模拟的风致振动控制技术设计在大跨度斜拉桥结构中展现出显著的优势。通过多工况、多参数的仿真分析,能够预判风致振动可能导致的结构疲劳和稳定性风险,为后续的施工和运营阶段提供决策支持。模拟数据还可指导现场安装与调试,确保阻尼装置达到预期的控制效果。随着计算能力和仿真技术的提升,数值模拟在风致振动控制中的作用愈发重要,不仅提升了设计的科学性和精准性,也降低了结构因风振失稳导致的安全隐患。

5 稳定性控制策略的工程应用效果分析

针对大跨度斜拉桥风致振动稳定性控制策略的工程应用效果,研究表明,通过合理设计的控制系统能够显著提升桥梁在风荷载作用下的稳定性表现。具体控制措施包括阻尼器安装、风导向结构优化以及结构刚度调整等多种手段,这些措施在实际工程中被广泛应用并取得良好效果。阻尼器能够有效吸

收振动能量,降低桥梁的振幅和加速度,从而缓解风致振动引发的结构疲劳,延长桥梁使用寿命。风导向结构优化则通过改变桥梁表面气流分布,减小风压脉动和涡激振动现象,进一步稳定结构响应。结构刚度调整通过局部加固或整体结构优化设计,提升桥梁的抗风能力,减少振动诱发的形变,保障结构安全。

在多项风洞试验和数值模拟验证中,应用上述控制策略的大跨度斜拉桥表现出显著的振动抑制效果。振动幅值降低超过30%,关键风速下结构稳定性得以增强,极大减少了由于风致振动可能导致的动态失稳风险。多点布置的智能阻尼系统可以根据风速及振动状态实时调整阻尼参数,实现对振动能量的动态吸收,有效避免共振现象的发生。结合风洞实验数据,结构动力响应的频率特性得到优化,振动频率远离桥梁固有频率,降低了结构共振的概率,增强了桥梁整体稳定性。工程实践表明,基于数值模拟的控制方案能够准确指导控制装置的布设位置与参数设置,实现经济高效的振动控制。

稳定性控制策略的工程应用不仅在振动幅值抑制方面表

现优异,在维护桥梁长期结构健康监测中也发挥了重要作用。通过集成振动监测系统,能够实时采集桥梁动态响应数据,配合控制装置的调节机制,形成闭环控制体系,实现结构状态的主动管理。该体系提升了桥梁抗风性能的适应性,保证了大跨度斜拉桥在复杂多变风环境中的运行安全。工程案例显示,稳定性控制措施的持续优化与实施,有效防止了结构疲劳裂纹的产生,降低了维护成本,同时增强了桥梁的耐久性和使用可靠性,体现了现代桥梁工程中风致振动控制技术的重要价值。

6 结语

大跨度斜拉桥风致振动的稳定性控制对于保障结构安全性和延长使用寿命具有重要意义。通过阻尼器、风导向优化及结构刚度调整等多种控制措施的综合应用,显著改善了桥梁在风荷载作用下的动力响应,降低了振动幅值与共振风险。结合数值模拟与风洞试验验证,控制策略的工程应用展现出良好的效果,提升了桥梁的抗风性能和稳定性水平。未来,持续完善动态监测与智能控制系统,将进一步推动大跨度斜拉桥风致振动控制技术的发展,确保桥梁结构的长期安全运行。

参考文献:

- [1] 王建华,刘志强.大跨度斜拉桥风致振动特性研究[J].桥梁科学,2021,36(4):12-20.
- [2] 李明,张晓东.风致振动控制技术在斜拉桥中的应用[J].土木工程学报,2020,53(2):45-53.
- [3] 陈海波,赵宇.基于数值模拟的大跨度桥梁风致振动分析[J].结构工程师,2019,35(6):33-39.
- [4] 孙伟,何建军.斜拉桥风环境下的稳定性失效模式研究[J].桥梁建设,2022,42(3):28-35.
- [5] 田鑫,刘鹏飞.大跨度桥梁阻尼装置设计与风振控制效果[J].现代结构工程,2021,47(1):18-25.