

高速公路桥梁抗风性能分析与设计优化

李柱

辽宁省交通运输事业发展中心 辽宁沈阳 110003

摘要: 在现代公路网中,跨越河湖、海湾或峡谷的桥梁往往承担着高强度的交通任务。风作为常态外部荷载之一,其作用不仅体现在对桥梁静力平衡的影响,更会通过动力耦合引发结构振动、传递能量,甚至在一定条件下导致不稳定现象。只有把风荷载的作用机理、荷载获取方式、响应分析与抗风设计有机结合起来,才能确保桥梁在设计寿命周期内具备足够的安全性、可用性和舒适性。

关键词: 高速公路;桥梁;抗风性能;设计

高速公路桥梁抗风性能设计优化措施中,结构加固是提升抗风稳定性的关键环节,需结合主动加固技术与材料创新。

一、高速公路桥梁抗风性能分析

1. 风荷载参数与设计标准

高速公路桥梁抗风性能分析涉及风荷载参数与设计标准的综合考量,风荷载参数,设计基准风速,以100年重现期风速为基准,保证率99%(即设计基准期内超过该风速的概率为1%)。施工阶段风速通常取成桥状态的0.5~0.7倍,如日本明石海峡大桥施工阶段风速为37m/s(成桥46m/s)。风荷载组成,平均风:静态作用,按标准气象条件计算。脉动风:动态作用,需通过有限元分析模拟结构振动响应^[1]。静阵风系数(G_y):综合平均风与背景脉动,与地面粗糙度、高度及加载长度相关。横向风荷载,对高大桥梁尤为关键,需专门分析侧向振动,通过断面优化(如流线型设计)和减震措施(如阻尼器)控制。设计标准,规范依据,《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)明确风速等级、荷载组合及稳定性要求。早期版本如JTG/T D60-01-2004亦提供基础参数参考。抗风措施,结构设计:匹配风区特性,采用气动断面(如开孔箱梁)降低风致振动。减震技术:安装调谐质量阻尼器(TMD)或主动控制装置。风洞验证:通过CFD模拟和物理试验验证抗风性能。特殊工况,施工阶段:需单独验算,风速重现期缩短至2~5年,荷载按成桥状态0.5倍取值。极端气候:考虑台风、冻雨等叠加效应,动态调整设计参数。

2. 气动稳定性分析

(1) 静力失稳:高速公路桥梁抗风性能分析中,气

动稳定性与静力失稳是核心研究内容,需结合风荷载特性与结构响应进行综合评估:静力失稳机制,扭转发散:当风速超过临界值时,主梁扭转变形产生的附加攻角导致气动力矩增量超过结构抵抗力矩,引发扭转失稳。例如悬索桥施工阶段因临时铰接刚度降低,静风失稳临界风速显著低于成桥状态。横向屈曲:横向静风荷载超过主梁侧向屈曲临界荷载时发生,常见于大跨径柔性桥梁。气动稳定性关键因素,断面优化:通过风洞试验或CFD模拟(如ANSYS FLOTRAN)优化主梁截面,采用流线型风嘴、中央开槽等措施降低三分力系数,提升颤振临界风速。例如苏通大桥断面CFD模拟结果与风洞试验吻合度达90%以上。风场特性:复杂地形(如峡谷)导致非均匀风场,需考虑负攻角与风向角影响。高速泸定大桥通过稳定板设计应对32.6m/s瞬时风速。分析方法,静力法:基于平衡条件计算临界荷载,适用于有限自由度体系。非线性分析:大跨桥梁需考虑几何非线性效应,如悬索桥施工阶段采用三维非线性模型评估静风稳定性。规范要求,《公路桥梁抗风设计指南》明确要求:颤振临界风速需高于设计风速1.2倍以上,涡振振幅限制为梁宽的1/20~1/100。重要桥梁需通过全桥气弹模型试验验证。(2) 动力失稳:高速公路桥梁抗风性能分析中,气动稳定性与动力失稳是核心研究领域,气动稳定性分析,风荷载作用机制,斜风作用下,桥梁主梁截面会产生六分量气动力(升力、阻力、扭转力矩等),需通过风洞试验测定气动参数。例如,青马大桥采用1:100比例节段模型,在边界层风洞中测试了斜风攻角下的气动力系数。抗风设计规范公路桥梁设计指南要求主梁扭转振幅控制在 $1^\circ \sim 5^\circ$,竖向振幅为梁宽的1/100~1/20,并通过

全桥气动弹性模型试验验证稳定性。阻尼器（如TMD、TLD）可有效抑制涡振和抖振。动力失稳机理，内在失稳现象，当桥梁垂直弯曲模态与弯扭模态频率重合时，移动荷载（如车流）会引发振动模式反复转换，导致持续大幅振动。虎门大桥事故中，即使移除路障后仍观测到此类失稳。风振可靠性评估，需结合风荷载统计特性（平均风速分布、脉动风谱）与结构概率模型，计算颤振、抖振等失效概率。主梁风振失效概率分析方法包括稳定失效（颤振）、安全失效（抖振）和刚度失效（涡振）三类。防控技术，气动措施：优化主梁截面形状（如开槽箱梁）以降低涡激振动。结构措施：安装调谐质量阻尼器（TMD）或主动控制装置。监测预警：实时监测风速、振动响应，结合功率谱分析预警失稳风险。

二、高速公路桥梁抗风性能设计优化措施

1. 断面优化

高速公路桥梁抗风性能设计优化中，断面优化是核心措施之一，主要通过气动外形调整降低风致振动风险。断面气动优化，流线型设计，采用钝体截面改为流线型断面（如带悬臂的箱梁），可减少涡激振动和抖振效应。例如雅康高速泸定大渡河大桥通过风洞试验将钢桁架断面优化为开槽透风结构，显著抑制了紊流干扰。开槽与导流措施，桥面纵向开槽或安装抑流板能破坏漩涡形成，降低风压差。研究表明，透风率30%~40%的开槽断面可使颤振临界风速提升20%以上。辅助结构优化，阻尼器集成，结合断面优化，在拉索或桥面安装调谐质量阻尼器（TMD），可进一步吸收振动能量。如《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01-2018）明确要求大跨桥梁需同步考虑气动与机械减振措施。动态风场适配，针对峡谷等特殊地形，通过1:2000缩尺地形模型模拟非均匀风场，调整断面攻角适应性。泸定大桥将试验攻角范围扩展至 $\pm 7^\circ$ ，验证了极端风况下的稳定性。规范与技术创新，现行标准（如DB41/T 419—2024）要求跨峡谷桥梁必须通过虚拟风洞试验验证断面性能，并采用BIM技术优化气动-结构耦合设计。未来趋势包括智能材料断面（如形状记忆合金）和实时风振主动控制系统的应用。

2. 阻尼减振

阻尼减振技术，阻尼减振技术原理，阻尼减振技术通过将风致振动能量转化为热能耗散，降低结构响应幅度。其核心在于利用阻尼器与结构的相对运动产生阻尼力，抑制振动扩散。例如，电涡流阻尼器通过导体板在磁场中运动产生电涡流，将动能转化为热能实现耗能；

而粘滞阻尼器则通过内部流体摩擦耗散能量。这类技术显著提升桥梁在风荷载下的稳定性，尤其适用于大跨度桥梁的涡振控制。关键技术类型，电涡流阻尼器，优势：全金属结构，无接触摩擦，耐久性达50年，维护成本低。应用场景：适用于大跨度桥梁塔梁连接处，如洞庭湖大桥采用轴向阻尼器控制地震与车辆荷载下的振动。调谐质量阻尼器（TMD），功能：通过质量块与弹簧系统共振，吸收特定频率振动。局限性：控制模态单一，需较大安装空间。阻尼伸臂系统，创新点：将主梁转角转化为水平位移驱动阻尼器耗能，解决多模态涡振问题。案例：高层建筑减振技术移植至桥梁，验证了其有效性。高阻尼隔震橡胶支座，作用：柔性适应地震变形，提升行车舒适性，同时具备抗老化性能。设计优化策略，多技术协同：结合电涡流阻尼器与TMD，覆盖宽频振动控制。材料创新：采用高阻尼橡胶或永磁材料，增强能量耗散效率。风洞验证：通过气动措施（如断面开槽）与阻尼器联合设计，优化抗风性能。挑战：需平衡阻尼器安装空间与结构刚度，避免对桥梁受力体系产生不利影响。未来方向，智能化阻尼器：开发自适应调节系统，实时响应风荷载变化。标准化设计：推动阻尼减振技术纳入桥梁抗风规范，提升行业应用水平。

3. 结构加固

高速公路桥梁抗风性能设计优化措施中，结构加固是提升抗风稳定性的关键环节，需结合主动加固技术与材料创新。以下是主要措施及技术要点：主动加固技术应用，预应力碳板加固，通过施加预应力使碳纤维板主动参与受力，可显著提升桥梁刚度和承载力，同时减小挠度变形。该技术采用高强I级碳纤维板，抗拉强度远超钢材，且具有耐腐蚀、重量轻等优势，施工无需大型设备，适合交通繁忙场景。体外预应力加固，在箱梁腹板或跨中区域增设预应力钢束，改善应力分布并封闭裂缝。例如，跨中腹板加厚混凝土并植入剪力筋，结合预应力束张拉（如715.2钢束），可提升抗弯能力与整体刚度。材料与工艺优化，复合加固材料，钢板粘贴：箱梁底板采用Q345B钢板条加固，通过高强螺栓固定并注入环氧树脂胶，增强抗裂性。碳纤维布：适用于局部补强，但对整体刚度提升有限，需与其他技术协同使用。结构局部强化，桥面铺装层采用C40钢纤维混凝土，掺入聚丙烯纤维（ $1.8\text{kg}/\text{m}^3$ ）以抑制裂缝扩展。墩顶负弯矩区增设无黏结预应力钢束（如215.2钢束），外包HDPE防锈蚀，提升抗疲劳性能。抗风设计规范与测试，遵循标准，

依据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01-2018)进行风荷载计算,包括基本风速、紊流强度等参数,确保加固方案符合抗风性能要求^[1]。风振测试与验证,通过风振频率测定、加速度监测及涡激振动测试,评估加固后桥梁的动力响应,确保其满足颤振临界风速等指标。案例参考,输电塔预应力体系加固:采用X形预应力筋布设,提升整体抗倾覆与抗扭能力,该技术可借鉴至桥梁墩台加固。智慧监测系统:结合交通运行安全风险预警系统,实时监测风荷载与结构响应,实现动态维护。通过上述措施,可有效优化桥梁抗风性能,延长使用寿命并保障运营安全。

三、如何优化桥梁设计以增强其抗风性

1. 结构加固技术

结构加固是增强桥梁抗风性的基础。包括增加横向与纵向支撑以提高整体稳定性,调整桥墩的质量与密度以增强其抗风能力,以及运用机械原理加固桥面。

2. 风洞测试的运用

通过风洞测试模拟桥梁在真实风环境中的表现。根据测试结果,可以对桥梁结构进行针对性加固,以应对可能出现的风险。

3. 桥墩基础优化

加深桥墩底座的基础深度,以及适度调整桥墩间的距离,都能有效提升桥梁的抗风性能。这些措施旨在增强桥墩的稳定性并减少风力对桥梁的直接冲击。

4. 增设防风设施

在桥梁上增设如防尘网等防风设施,可以有效降低风力对桥梁的影响,进一步提高其抗风能力。通过综合运用结构加固技术、风洞测试、桥墩基础优化以及增设防风设施等多种方法,我们可以显著提升桥梁的抗风性能。

四、高速公路桥梁抗风性能设计规范与技术创新

设计规范体系演进。规范升级路径,我国公路桥梁抗风设计规范历经三次重大修订:2004版首次建立抗风设计框架,2018版(JTG/T 3360-01)实现三大突破:全国基本风速图精细化分区,虚拟风洞试验技术纳入标准,

行车安全风灾阈值量化,2025年新增峡谷风专项条款,针对负攻角风场优化气动参数,核心指标创新,关键技术突破,气动设计革命,三维稳定板系统:花江峡谷大桥首创“上下水平稳定板+中央稳定板”复合结构,使桥面涡振抑制效率提升40%,负攻角优化:针对大渡河峡谷风特性,通过7度风洞试验验证,消除传统设计中的涡振风险,智能监测体系,多普勒激光雷达实现风速场实时重构,预警响应时间缩短至15秒。雷视拟合设备构建车辆-桥梁耦合振动模型,通行安全阈值动态调整,材料工艺创新,阻尼型中央扣设计:泸定大桥采用铰接式耗能装置,使结构阻尼比提升至1.5%。碳纤维拉索:风雨激振振幅降低60%,使用寿命延长至120年,典型工程实践,雅康高速泸定大桥,突破点:解决峡谷风非平稳特性,技术组合:1:2000地形模型风洞试验,负攻角气动优化,耗能型中央扣,花江峡谷大桥,创新亮点:全球首座抗风结构兼具空中跑道功能,下稳定板采用蜂窝夹层结构,风阻系数降低25%。未来发展趋势,规范智能化,2025版《公路桥梁抗风设计规范》拟引入AI辅助设计模块,实现风荷载参数自动优化,数字孪生应用,深中通道项目已建立桥梁全生命周期数字模型,实时模拟百年风况演变,绿色抗风技术,光伏一体式稳定板、自修复阻尼材料等低碳技术进入工程验证阶段。

总之,高速公路桥梁是现代交通基础设施的重要组成部分,对于保障道路的安全畅通起着至关重要的作用。而在桥梁设计与施工过程中,抗风设计是不可或缺的一个环节。因为在高速公路上,高大的桥梁往往面对着巨大的风力冲击,如果不进行合理的抗风设计与施工,那么就有可能导致桥梁发生倾斜、倒塌等严重事故。

参考文献

[1] 来冬生. 高速公路桥梁抗风性能分析与加固方案设计[J]. 工程建设与发展, 2025, 4(1): 123-125. DOI: 10.12417/2811-0722.25.01.041.

[2] 胡昕东. “高速公路桥梁抗风性能数值分析方法研究.” 越野世界, no.21, Jan.2024, pp.59-60.