

大跨度拱桥景观照明网幕系统 风荷载特性及抗风性能研究

谢意华

(广州市南沙区建设中心, 广东 广州 511400)

摘要 为探究大跨度拱桥景观照明网幕系统的风荷载特征并评估其对主体结构安全的影响, 本研究以某拱桥 LED 网幕为工程背景, 采用计算流体力学 (CFD) 数值模拟与有限元结构分析相结合的方法进行研究。首先建立网幕局部精细化数值模型, 基于雷诺平均法与 SST $k-\omega$ 湍流模型开展风场模拟, 研究 20~50 m/s 风速下网幕的阻力特性与风压分布, 获得了整体阻力系数建议值 0.155。其次建立包含网幕的全桥三维结构有限元模型, 考虑索网几何非线性效应, 分析风荷载与结构自重组合作用下的结构响应。研究表明: 与未安装网幕时相比, 安装网幕后的桥梁主体结构在百年一遇风下的最大应力由 223.7 MPa 增至 242 MPa, 增幅 8.2%, 仍满足钢材强度要求; 网幕自身强度足够, 但其最大横向位移达 1.844 m, 存在与吊杆碰撞的风险。

关键词 桥梁工程; 网幕结构; 计算流体力学模拟; 风荷载; 抗风性能

中图分类号: U448.22; U441; TU113.666 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.042

0 引言

随着我国城市化进程的快速推进与夜景经济的蓬勃发展, 大型桥梁已不再仅仅是交通枢纽, 更成为展现城市形象与文化内涵的重要载体。桥梁景观照明作为提升其夜间景观效果的关键手段, 近年来得到了广泛应用。其中, LED 网幕显示系统凭借其出色的动态显示效果、高亮度、节能环保以及可编程控制等优势, 逐渐成为诸多地标性大跨桥梁景观提升工程的首选方案。这类系统通常以柔性索网结构为支撑体系, 表面附着离散分布的 LED 模组, 形成大面积、高透风率的特殊幕状结构, 能够在桥体上呈现丰富多彩的动态影像与文字信息。

网幕系统风荷载特性与传统的桥梁主体刚性结构或建筑密实幕墙存在本质差异^[1]。气流流经网幕时, 同时存在穿透透空区域和绕流实体构件的复杂现象, 使得结构表面风压分布极不均匀, 绕流场结构复杂。现行《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01-2018) 及《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012) 均未对此类特殊柔性透风结构的风荷载体型系数或阻力系数提供明确的计算方法与取值依据^[2-3]。

网幕作为桥梁的附属结构, 属于柔性张拉体系, 在强风作用下可能产生较大的面外变形, 过大的横向

位移可能导致网幕与其它桥梁关键结构构件如吊杆发生接触或碰撞, 引发吊杆的面外弯曲、附加应力、护套磨损乃至疲劳损伤, 威胁桥梁的局部与整体安全。

针对复杂气动外形结构的风荷载研究, 本文以某大跨度拱桥 LED 网幕工程为背景, 综合运用 CFD 数值风洞技术与有限元结构分析方法, 系统研究网幕结构的风荷载特性, 定量评估网幕安装对桥梁主体结构受力性能的影响, 以期类似工程的设计应用提供参考。

1 工程概况

某三主桁钢桁拱桥主跨达 436 m, 采用上下双层桥面布置, 拱肋矢高 109 m。为提升大桥的景观品质, 计划在其主跨单侧安装大型 LED 网幕系统, 用于动态视觉展示。初始设计方案的网幕在拱桥上的总体布置见图 1, 其总体宽度为 296 m, 总体高度为 45 m, 网幕平面距邻近的拱桥吊杆平面约 0.92 m。网幕基本单元由直径 16 mm 的竖向主钢丝绳 (水平间距 0.5 m)、直径 13 mm 的横向钢丝绳 (竖向间距 2.0 m) 以及固定于其上的 LED 显示单元、连接件等构成, 网幕整体透风率约 83%。

该桥景观照明网幕结构新颖, 造型独特, 在强风作用下的风荷载分布较为复杂, 无法直接通过规范或借鉴已有资料获得其风荷载参数, 本研究采用 CFD 数值模拟技术识别其风荷载参数。

作者简介: 谢意华 (1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑工程管理。

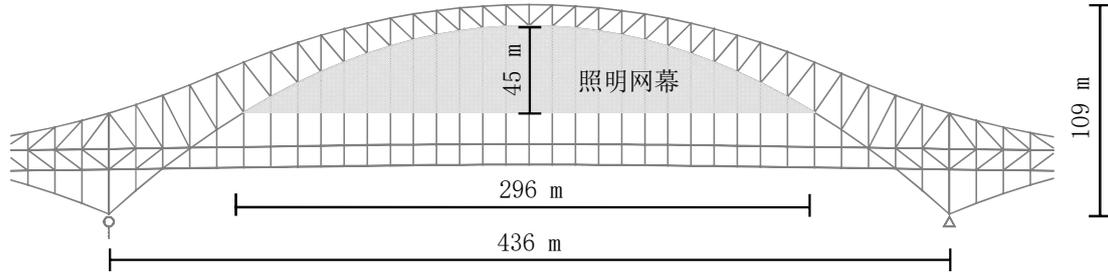


图 1 某大跨度拱桥拟安装的网幕结构布置

2 网幕风荷载数值模拟

2.1 网幕几何模型简化

网幕结构覆盖总面积约 8 872 m², 由基本单元构成, 在空间上具有几何重复性。数值模拟中选取局部基本单元进行建模研究, 所获得的风荷载特性仍能体现网幕结构在实际风场中的整体受力特点。网幕竖向钢丝绳间距为 0.5 m, 横向钢丝绳间距约为 2.0 m。以直径为 Φ16 mm 的竖向不锈钢主钢丝绳为对称中心, 取网幕局部宽 0.6 m × 高 0.4 m 的区域为基本单元, 进行风荷载模拟。模拟中分别考虑包含横向钢丝绳、不包括横向钢丝绳两种情况进行建模并开展风荷载计算, 实际网幕的风荷载为这两种情况下所得风荷载的面积加权平均^[4]。

2.2 数值计算域

将代表基本单元的局部网幕置于数值风洞中, 网幕上游扩展 2 m, 下游扩展 5 m, 建立数值计算域。上游边界设置为速度入口, 下游边界设置为压力出口, 四周侧边设置为对称边界条件, 网幕表面为无滑移壁面。采用混合网格划分方案, 对网幕附近流体区域使用四面体网格进行空间离散, 其最小网格尺寸为 1 mm, 在远离网幕处使用六面体结构化网格, 计算模型网格总数为 5 932 258。

2.3 网幕风荷载阻力系数

在横风向风作用下, 网幕的阻力系数按式(1)计算:

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho U^2 A} \quad (1)$$

式(1)中, D 为作用在网幕上的顺风向阻力 (N); ρ 为空气密度 (kg/m³), 取为 1.25 kg/m³; U 为计算来流风速 (m/s); A 为网幕顺风向名义面积 (m²), 即包含演绎屏、钢棒、钢丝绳和其间透风区域的总面积, 其值为 0.24 m²。

数值模拟得到各个工况下的网幕阻力, 并按式(1)换算为阻力系数, 结果列示于表 1。在 20 m/s 至 50 m/s 的宽风速范围内, 无论是具有横向钢丝绳还是无横向钢丝绳, 计算得到的网幕阻力系数值基本保持恒定, 不随风速 (即雷诺数) 的增加而发生系统性变化, 最大波动范围在 ±1% 以内。这表明, 对于该网幕结构, 在此风速区间内流动已进入自相似区, 由结构气动外形决定的形状阻力 (压差阻力) 占主导地位, 表面摩擦阻力的变化影响甚微。

对比同一风速下正面来风与背面来风的阻力系数值, 两者差异非常小。对于无钢丝绳的工况, 平均差异约为 0.001; 对于有横向钢丝绳的工况, 平均差异约为 0.002; 最大相对差异不超过 1.5%。这说明网幕结构的气动外形近似对称, 在工程设计中, 可以忽略来风方向对整体阻力系数的影响, 偏于安全地取统一值。

从表 1 中还可看出, 无横向钢丝绳的局部网幕平均阻力系数为 0.147, 有横向钢丝绳的局部网幕平均阻力系数为 0.186。横向钢丝绳虽然直径较小, 但其存在增加了结构的阻塞率和气动粗糙度, 导致了额外的压差阻力, 并对流场产生一定的扰动。对于一个宽 0.6 m × 高

表 1 数值模拟的网幕局部阻力及阻力系数

来流风速 U (m/s)	网幕阻力 D (N)		网幕阻力系数 C_D		网幕平均阻力系数
	正面来风	背面来风	正面来风	背面来风	
20	8.88 (11.16)	8.78 (11.13)	0.148 (0.186)	0.146 (0.186)	0.147 (0.186)
30	19.93 (25.01)	19.91 (25.15)	0.148 (0.185)	0.147 (0.186)	
40	35.28 (44.64)	35.09 (44.78)	0.147 (0.186)	0.146 (0.187)	
50	55.51 (70.13)	55.25 (70.35)	0.148 (0.187)	0.147 (0.188)	

(注: 括号外数字为无横向钢丝绳工况, 括号内数字为有横向钢丝绳工况。)

2.0 m 的标准网幕单元,考虑两种局部网幕的面积占比进行加权平均,得到整个网幕的平均阻力系数为 0.155。

3 拱桥及网幕结构风致响应有限元分析

3.1 桥梁和网幕结构有限元模型

采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 对拱桥及网幕结构进行建模。主梁采用 BEAM188 空间梁单元模拟,钢桥面板采用 SHELL63 壳单元模拟,梁、壳单元共节点,吊杆索采用 LINK10 空间杆单元来模拟。墩柱支座对主梁变位的限制作用通过约束梁上节点自由度来实现。网幕的竖向及横向钢丝绳均采用仅受拉的索单元模拟,并为各索段施加了设计初始预应力,其中竖向主索预应力为 8 kN,横向索预应力为 4 kN,以模拟其正常工作状态下的张紧刚度。

3.2 风荷载和自重联合作用下的桥梁结构响应

未安装网幕时,拱桥主体结构等效应力最大的几根杆件均位于拱肋顶部下弦杆处,最大为 223.7 MPa。安装网幕后,最不利应力杆件位置与安装网幕之前相比没有明显变化,桥梁主结构杆件的最大等效应力为 242 MPa,满足《公路钢结构桥梁设计规范》中对于 Q420 钢的强度设计要求。安装网幕稍微降低了桥梁主体的抗风安全裕度(降幅约 8%),但不会直接威胁桥梁主体结构的抗风安全^[5]。

未安装网幕的桥梁在风荷载和自重联合作用下,拱桥主体结构横桥向位移最大值为 0.413 m,位于拱顶处。安装网幕后,拱桥主体结构横桥向位移最大值同样出现在拱顶处,其数值为 0.495 m,增幅约 19.9%。

网幕竖向钢丝绳最大应力为 282 MPa,横向钢丝绳最大应力为 133 MPa。网幕钢丝绳采用抗拉强度标准值为 1 570 MPa 的高强度钢丝,其屈服强度也远高于此。网幕构件的强度安全储备非常充足,不是其自身抗风设计的控制因素。

网幕系统属于桥梁附属设施,其设计寿命不必与桥梁主体结构保持一致,应依据客观工程需求和经济条件酌情选取,为便于设计参考,本研究计算给出了其它几种重现期的设计风速条件下(5年、10年、20年、50年)网幕结构的最大横桥向位移,见表 2。

从表 2 中结果可以看出,即使在 5 年一遇的常遇大风(27.5 m/s)下,网幕位移也已超过 1.4 m,网幕碰撞拱桥吊杆风险在常遇风况下即已存在。可能导致的不利后果有:(1)吊杆面外弯曲,产生附加弯曲应力,影响其轴向受力性能和疲劳寿命;(2)钢丝绳与吊杆护套之间的长期磨损,影响耐久性;(3)碰撞冲击可

能诱发吊杆或网幕的振动,甚至引发更复杂的动力相互作用^[6]。应对措施应考虑在网幕与邻近吊杆之间设置柔性缓冲限位装置,避免硬性碰撞,消耗振动能量。

表 2 不同重现期设计风速条件下网幕结构的最大横桥向位移

设计风速 重现期	桥位 10 m 高度处 平均风速 (m/s)	网幕最大横向 位移 (m)
5 年	27.5	1.486
10 年	29.8	1.575
20 年	32.1	1.661
50 年	35.2	1.774
100 年	37.5	1.844

4 结论

本研究采用 CFD 数值模拟与有限元结构分析相结合的技术路线,对某拱桥大型 LED 景观照明网幕系统的抗风安全问题进行研究,结果表明:

1. 基于局部基本单元的 CFD 模拟能有效识别高透风率网幕的整体风荷载,所得阻力系数(0.155)在 20~50 m/s 风速范围内表现出良好的稳定性,为工程设计提供了关键参数。

2. 网幕传递的风荷载使桥梁主体结构在百年一遇风速下的最大应力增加约 8.2%,虽未超过材料强度,但降低了结构的安全储备,设计中需引起重视。

3. 网幕结构强度并非控制因素,但其在风载下的大幅柔性变形(百年一遇风下横向位移达 1.844 m)会引发与吊杆的接触或碰撞,是该网幕方案后续须重点解决的问题。

参考文献:

- [1] 贺虎成,王铁龙,黄伟,等.某大型焰火网幕风荷载体型系数试验研究[J].应用力学学报,2021,38(04):1611-1615.
- [2] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗风设计规范:JT/T 3360-01-2018[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [4] 刘泽江.公路桥梁抗震性能的精细化数值模拟与损伤识别技术[J].交通世界,2025(25):162-164.
- [5] 张立平.基于数据驱动的桥梁荷载与效应极值预测方法及其应用[D].石家庄:石家庄铁道大学,2025.
- [6] 同[3].