

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20240406001

文章编号:1674-599X(2025)02-0044-09

引用格式:唐浩俊,李土周,胡腾飞,等.大跨桥梁亮化索网的风载识别及静风响应分析[J].交通科学与工程,2025,41(2):44-52.

Citation: TANG Haojun, LI Tuzhou, HU Tengfei, et al. Wind load identification and static wind response analysis of lighting cable nets for long-span bridges[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 44-52.

大跨桥梁亮化索网的风载识别及静风响应分析

唐浩俊^{1,2,3}, 李土周¹, 胡腾飞¹, 杨博开¹, 高子龙¹, 李永乐^{1,2,3}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 风工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031; 3. 西南交通大学 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 四川 成都 611756)

摘 要:【目的】深入探究大跨桥梁亮化索网体系的抗风性能,确定索网的风荷载及其静风响应,从而为桥梁亮化工程的设计提供科学依据,确保索网结构的安全性与稳定性。【方法】首先,设计了亮化索网的气动力测试模型,并通过风洞试验识别了不同来流风向角下不同密度索网的气动力系数。然后,采用有限元分析软件建立了三种具有代表性的亮化索网的有限元模型,基于风洞试验结果模拟了作用在索网上的气动力,并详细分析了索网的静风响应行为。【结果】随着索网密度的增大,索网受到的风荷载也随之增大,且索网密度对风荷载的影响随着风速的增大而增大。但当来流垂直于桥轴线时,风向角在一定范围内变化对索网气动力影响不大。在静风响应方面,高密度索网的位移更大,但不同索网模型应力分布的差距并不明显。此外,索网的位移响应随风向角的变化并不显著,但会造成横向钢丝绳受力不均匀,一侧较大而另一侧较小。【结论】基于以上研究结果,提出了优化索网抗风性能的措施。具体而言,增大竖向钢丝绳的初拉力或在索网与桥面之间增设斜向索可以有效减小索网的静风响应,且这两种措施的有效性可以叠加,从而进一步提高索网的抗风稳定性。

关键词:空气动力学;风洞试验;索网风载;静风响应;抑制措施

中图分类号:O355

文献标志码:A

Wind load identification and static wind response analysis of lighting cable nets for long-span bridges

TANG Haojun^{1,2,3}, LI Tuzhou¹, HU Tengfei¹, YANG Bokai¹, GAO Zilong¹, LI Yongle^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Wind Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to deeply explore the wind resistance performance of the lighting cable net system of long-span bridges, and determine the wind load and corresponding static wind response of lighting cable nets, thereby providing a scientific basis for the design of bridge lighting projects and ensuring the safety and stability of the cable net system. [Methods] Firstly, the test model for aerodynamic forces of lighting cable nets was designed, and aerodynamic coefficients of cable nets with different densities and wind directions were identified by wind tunnel tests. Then, the finite element models of three representative lighting cable nets were built by employing finite element analysis software, and the aerodynamic forces acting on cable nets were simulated based on the results of wind tunnel tests, with the static wind response analyzed in detail. [Findings] The wind load on cable nets increases with the rising cable net density, with the higher wind speed leading to a more

收稿日期:2024-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52178507);四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0431, 2022NSFSC0004)

通信作者:唐浩俊(1988—),男,副教授,主要从事桥梁风工程方面的研究工作。E-mail:thj@swjtu.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

significant effect of cable density on wind load. However, when the incoming flow is perpendicular to the bridge axis, changes in the wind direction angle within a certain range have little influence on the aerodynamic forces of the cable nets. In terms of static wind response, the displacement of high-density cable nets is larger, but the stress distribution difference among models with different cable densities is not significant. Additionally, the displacement response of the cable nets does not change significantly with the variation of the wind direction angle, but it can cause uneven stress distribution in the horizontal steel wire ropes, with one side experiencing greater stress and the other side less.

[Conclusions] Based on the above results, measures to optimize the wind resistance performance of the cable nets are proposed. Specifically, increasing the initial tension of vertical steel wire ropes or adding inclined cables between the cable net and the bridge deck can effectively reduce the static wind response of the cable net. Additionally, the effectiveness of the two measures can be superimposed, thereby enhancing the wind resistance stability.

Key words: aerodynamics; wind tunnel test; wind load on cable net; static wind response; suppression measure

大跨度桥梁具有优美的造型,但其结构的抗风问题受到广泛关注^[1-3]。近年来,大跨度桥梁除在交通运输方面发挥“本职”作用外,在景观亮化方面也扮演着重要角色,其借助灯光效果提升着城市的形象。但是,桥梁经过亮化改造后,需要关注可能出现的抗风问题。

在斜拉索、拱桥吊杆的表面安装发光二极管(light-emitting diode, LED)是目前常用的一种亮化方式,如图1(a)、1(b)所示。改造后的整幅索面、拱面相当于一个屏幕,其借助LED灯的调控来演绎动画。但是,灯具的存在除了会改变斜拉索、吊杆的气动外形,其质量还会影响斜拉索、吊杆的动力特性^[4-5],引起其抗风性能的改变。陈政清等^[6]指出在重庆夔门大桥斜拉索上安装亮化灯具后,在6 m/s的风速下该桥发生了大幅度驰振。安苗等^[7]以某安装了椭圆形灯具和矩形线盒的斜拉索为工程背景,研究了其驰振特性及增加结构阻尼对驰振的抑制效果。周傲秋等^[8]对两种亮化灯具的安装方案进行了风洞试验,研究结果表明,灯具的存在增大了斜拉索发生驰振的概率,而直接安装LED点光源可以降低斜拉索发生驰振的概率。亮化灯具的存在除了影响柔性索的驰振性能外,对其涡振性能亦有较大的影响^[9-10]。斜拉索和吊杆都是重要的传力构件,其安全关系到结构整体的受力安全,应予以重视。

近年来,为了取得更好的亮化效果,在主拱与主梁间安装软性LED网屏的工程案例逐渐增多,如图1(c)所示。西安市欧亚大道跨越浐河的拱桥、梧州市高旺大桥、广州市明珠湾大桥等桥梁就采用了这种亮化方式。但是,亮化网屏属于索网体系,是典型的柔性结构,自质量小,阻尼比和自振频率也小,对风荷载非常

敏感,抵抗风荷载的能力较差,此类结构一般挠度较大,具有较高的几何非线性。在实际工程中亮化网屏局部拉索易出现松弛现象,导致LED等发生偏转,影响亮化效果。此外,亮化网屏的风荷载还会传递至桥梁,对桥梁主体结构的抗风性能可能造成影响。

对于平面索网体系,人们在玻璃幕墙以及空间承重结构方面的研究较为深入。鲁建等^[11]对椭圆形无



(a) 既有吊杆外附灯罩



(b) 既有吊杆外附点光源



(c) 新增亮化索网

图1 拱桥亮化的常见方式

Fig. 1 Common methods for the lighting of arch bridges

内环索网结构体系进行了静力性能研究,发现在弹性范围内,结构响应与荷载呈线性关系。冯若强等^[12]发现在脉动风荷载作用下结构的振动以第一阶模态为主。施刚等^[13]通过对单层平面索网结构静力承载性能的研究,发现横索与竖索之间连接节点的失效几乎不影响结构的承载性能,但这一点在桥梁工程方面未见相关的研究报道。

为了识别桥梁亮化索网的风荷载,明确其静风响应特性,本文首先按照1:3的缩尺比制作点光源-钢丝绳亮化结构的风洞试验模型,通过风洞试验测试了三种透风率情况下亮化索网的气动阻力、升力;然后,以某座中承式系杆拱桥为参考,确定亮化索网的跨度和高度,采用ANSYS软件建立三种密度亮化索网的有限元模型,把试验得到的风荷载作为节点荷载施加在各模型上,对亮化索网结构进行静风响应分析,得到不同

工况下的位移响应;最后,针对亮化索网的响应特性,研究减小索网静风响应的优化措施并评价其效果,为后续亮化工程的设计和研究提供参考。

1 工程背景

本文以某中承式钢箱梁系杆拱桥为工程背景,其主拱跨径为310.0 m,拱轴线为悬链线,矢高为77.5 m,矢跨比为1/4。其中,亮化网屏沿着主拱与上桥面满布,跨径248.0 m,高46.0 m;LED点光源由两根直径3 mm的304不锈钢钢丝绳与锁扣固定,点光源的竖向间距为0.25 m,横向间距为0.50 m(也是两组索的间距);为了增强索网的整体刚度,沿高度每隔6.0 m在左右两端连接一根直径4 mm的304不锈钢钢丝绳,竖向钢丝绳与横向钢丝绳采用十字卡扣约束,如图2所示。

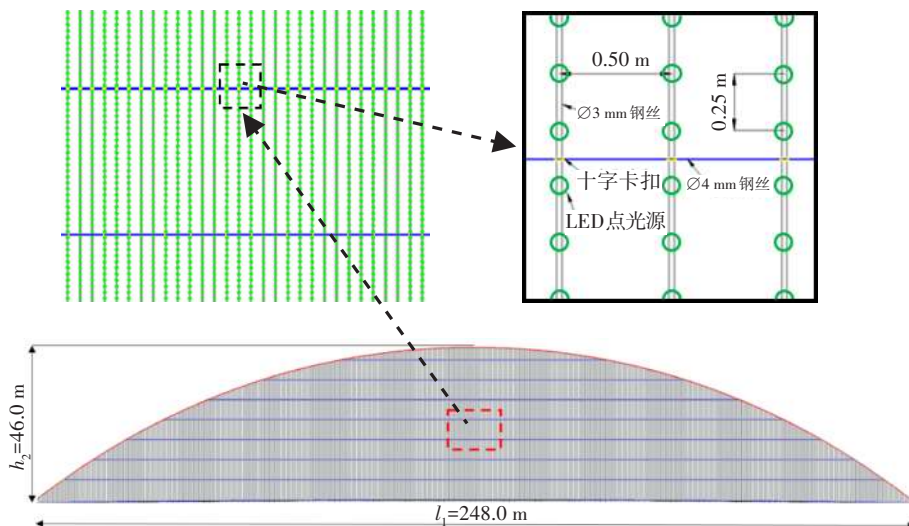


图2 亮化索网结构

Fig. 2 Lighting cable net structure

2 气动力系数风洞试验

2.1 试验节段模型及风洞试验设备

为方便叙述,本文将由点光源与两根直径3 mm的钢丝绳组成的结构称为索。试验模型的几何缩尺比为1:3,钢丝绳的直径为1 mm,两根钢丝绳的间距为8 mm,索长1 890 mm,点光源以及灯带按实物原型简化、缩尺后,再由3D打印而成,点光源的外径为15 mm,具体构造如图3所示。为了保证索具有足够的刚度,索的两端固定在钢框上,钢框强度较大,在索的作用下不会发生变形。为研究索的密度对索网结构气动性能的影响,本文在原有模型(中密度索网模型)的基础上增加两种不同密度的索网模型,即高密度索网模型和低

密度索网模型。三种索网模型的索间距 l_n (n 为索的数量)与索直径 l_0 之比、索数量、透风率见表1。安装在风洞中不同索网的节段模型如图4所示。模型的两侧放置在测力天平上以测量其受到的静风荷载。试验在西南交通大学XNJD-1工业风洞第一试验段中进行,试验中直接测试均匀来流作用下模型的静力三分力。

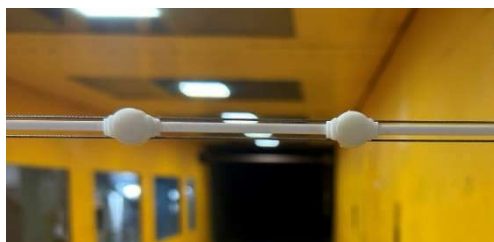


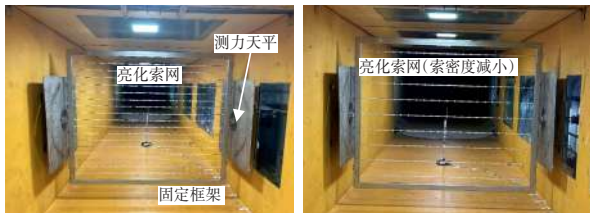
图3 试验模型细部构造

Fig. 3 Detailed structure of the test model

表1 模型主要设计参数

Table 1 Main design parameters of the model

模型	l/l_0	索的数量 n	透风率/%
高密度索网	10.375	17	91.5
中密度索网	20.750	9	95.5
低密度索网	41.500	5	97.5



(a) 高密度索网

(b) 中密度索网



(c) 低密度索网

图4 不同索密度试验模型

Fig. 4 Test models of different cable densities

索网节段试验模型的截面为矩形,尺寸为2.4 m(宽)×2.0 m(高),试验前先进行三分力标定。试验中保持来流风向角不变,通过旋转模型的方式实现 $-5^\circ \sim 25^\circ$ 风向角的模拟(以 1° 为间隔)。在模型上游放置微压计测试来流风压。试验风速为6、8、10、15 m/s。

由于试验模型所测的气动力是索网与钢框的总气动力 F_T ,故还需要测试钢框的气动力 F_S ,两者之差才是索网的气动力 F ,即 $F=F_T-F_S$ 。

气动力系数是描述静风荷载的一组无量纲参数,如图5所示。通过静力三分力试验可得到风轴坐标系中模型的气动力。以索网的测试面积作为特征尺寸,可将阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 定义如下:

$$C_D(\alpha) = 2F_D(\alpha)/(\rho U^2 BL) \quad (1)$$

$$C_L(\alpha) = 2F_L(\alpha)/(\rho U^2 BL) \quad (2)$$

式中: F_L 为索网受到的平均升力; F_D 为索网受到的平均阻力; α 为来流风向角; ρ 为空气密度,取 1.225 kg/m^3 ; U 为来流风速,其取值将在后文中给出; B 为索网模型的宽度,即框架的内侧高度1.60 m; L 为模型的有效长度,即框架内侧的宽度1.89 m。

2.2 试验结果及分析

图6给出了三种索网节段试验模型在不同风速下阻力系数 C_D 随风向角的变化关系。从图6可以看出,随着索密度的增大,模型阻力系数随之增大。在不同测试风速和风向角下,阻力系数平均值由低索密度下

的0.016增大至中、高索密度下的0.060和0.095。三种索网节段模型的阻力系数随风向角的增大呈现上下波动的变化规律。对于高密度索网模型,在较低风速下,阻力系数波动较大,随着风速的增大,阻力系数逐渐稳定下来,随着风向角的增大,阻力系数的波动幅度有所减小;对于中密度索网模型,阻力系数随风速增大而减小的现象最明显;低密度索网模型的阻力系数随风速变化不大,说明低密度索网的雷诺数效应相对于另外两种索网模型而言最小。总体来说,当风速达到10、15 m/s时,不同密度索网模型的阻力系数随风向角的波动均较小,而在6、8 m/s的低风速下其波动较大,这与索网模型本身有一定关系。在较低的风速下,索网受力相对较小,不同风向角下的测试结果出现了一定的波动;在较高的风速下,索网受力相对较大,不同风向角下的测试结果相对稳定。

图7给出了三种索网节段试验模型在不同风速下升力系数 C_L 随风向角的变化。从图7可以看出,当来流风速较小时,索网的升力系数与其密度相关,密度较

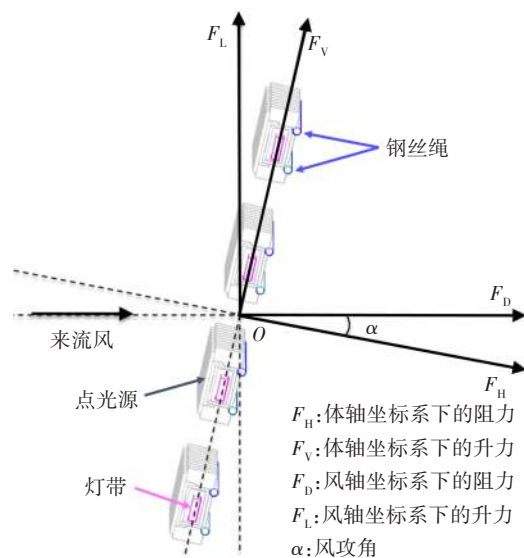
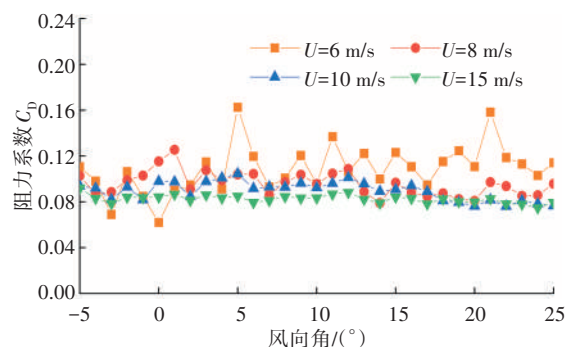


图5 来流风向角定义

Fig. 5 Definition of the wind direction angle of incoming flow



(a) 高密度索网模型

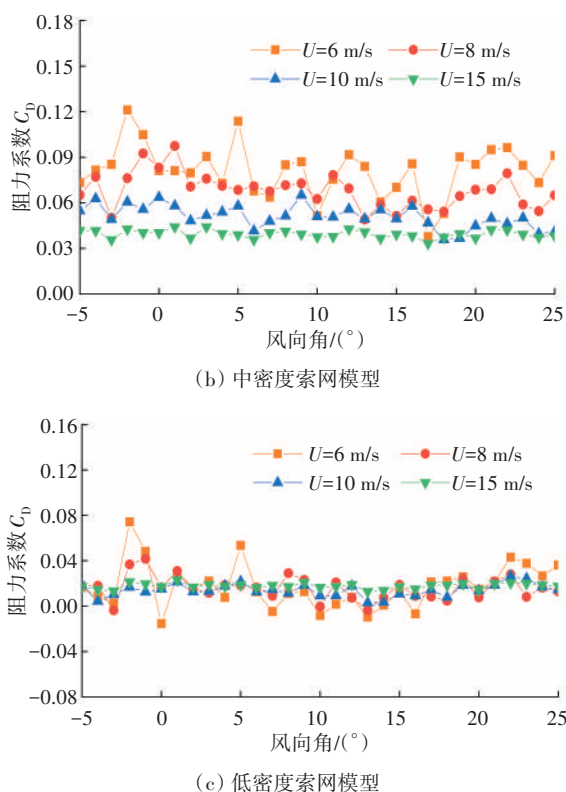
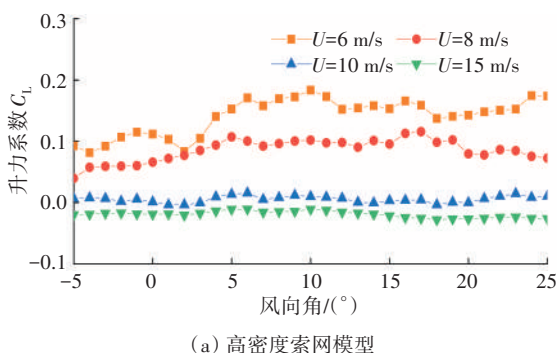


图6 不同风速下阻力系数随风向角的变化

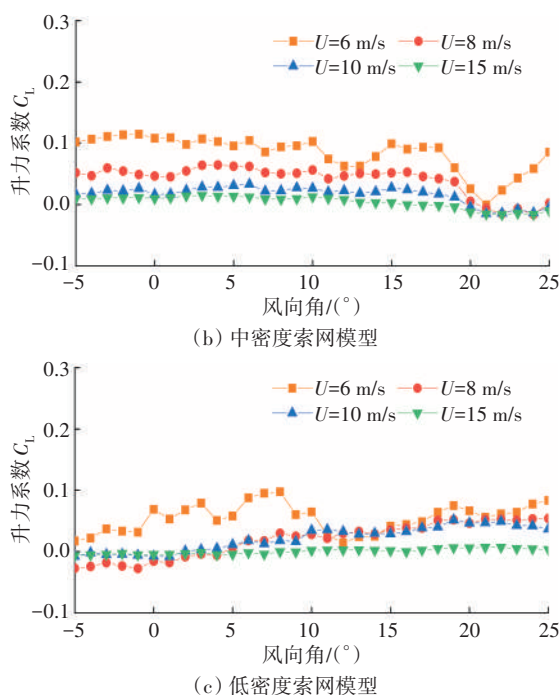
Fig. 6 Variations of the resistance coefficient with the wind direction angle at different wind speeds

大的索网对应的升力系数亦较大,密度较小的索网对应的升力系数则较小。同时,索网升力系数受来流风向角的影响比阻力系数的大,尤其是当来流风速较小时。当来流风速较大时,三种密度索网的升力系数均趋于零,受来流风向角的影响也明显减小。

通常,桥梁主梁断面的气动力系数受风速的影响很小,但索网的气动力系数在一定程度上与风速的大小有关,这可能与低风速下索网气动力的测试精度较低和高风速下索的晃动有关,也可能是因为索网的气动特性具有一定的雷诺数效应,尤其是高密度索网。考虑到试验风速较小时模型气动力的识别精度有限,而试验风速较大时模型会发生晃动,建议采用10 m/s风速下的测试结果进行索网气动力系数的取值。



(a) 高密度索网模型



(c) 低密度索网模型

图7 不同风速下升力系数随风向角的变化

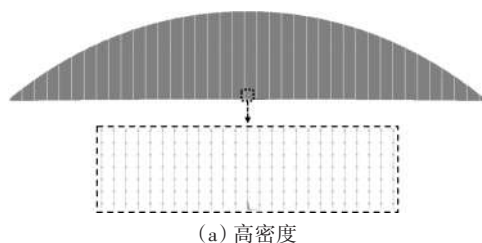
Fig. 7 Variations of the lift coefficient with the wind direction angle at different wind speeds

3 静风响应分析及抑制措施

本节首先建立不同密度索网的有限元模型并计算其静风响应,然后以中密度索网模型为对象,设计相应的抑制措施,根据静风响应的变化评价措施的有效性。

3.1 有限元模型介绍

本文采用有限元软件ANSYS建立了三种密度索网模型,如图8所示。模型中,钢丝绳采用LINK10杆单元模拟,将索中的两根钢丝绳简化为一根钢丝绳,钢丝绳的初拉力通过设置初应变的方式施加。点光源的质量可用MASS21质量块单元等效加载在节点上。考虑主体结构的索网与索网单独受力时的位移差别较小,本文在对索网进行风振响应分析时不考虑主体结构的影响^[14]。通过计算、对比可知,钢丝绳端部约束条件(固定约束或铰约束)对索网整体刚度的差异性影响可忽略,故竖向钢丝绳与主拱、桥面连接处的约束直接采用固结,横向钢丝绳两端点处的约束同样采用固结。此外,由于索网安装在拱肋的外侧,与吊杆不在同



(a) 高密度

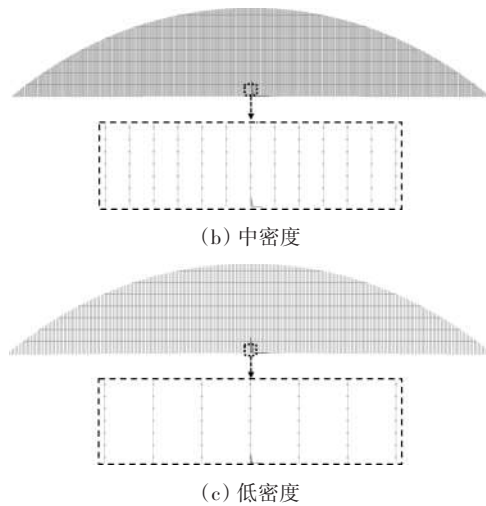


图8 不同密度索网的有限元模型

Fig. 8 Finite element models of cable nets with different densities

一平面内,它们之间亦无连接,故在有限元模型中没有包含吊杆。本文将风洞试验测得的风荷载等效为节点荷载施加在索网节点上。

3.2 静风响应分析

3.2.1 位移响应分析

本节分别对三种不同密度索网模型进行静力分析,得到不同风向角、不同风速下各索网模型的位移响应情况。

图9给出了15 m/s风速下三种不同密度索网模型的最不利位移 S 响应云图,高密度索网模型最不利位移响应对应的风向角为 -5° ,中密度索网模型的为 $+22^\circ$,低密度索网模型的为 $+1^\circ$ 。由图9可知,三种不同密度索网模型在施加风荷载后的位移云图的形状几乎一样,节点位移最大值都位于中间区域,并逐渐向外侧减小。其中,高密度索网模型中间区域的节点位移为1.700~1.896 m,中密度索网模型中间区域的节点位移为1.591~1.789 m,低密度索网模型中间区域的节点位移为1.297~1.460 m。在索网模型的其他区域,随着索密度的增大,节点位移的梯度也随之增大。

图10进一步给出了三种密度索网模型节点最大位移随风向角、风速的变化规律。由图10可知,随着风向角的变化,三种密度索网模型的节点最大位移虽有波动,但整体变化不显著,尤其是高密度索网。随着计算风速的增大,高密度索网模型的节点最大位移随

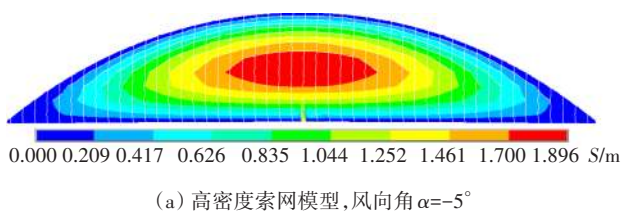
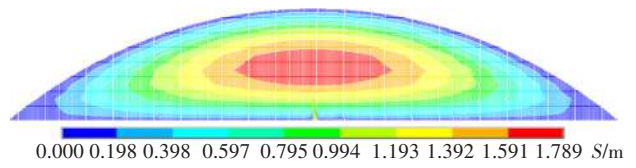
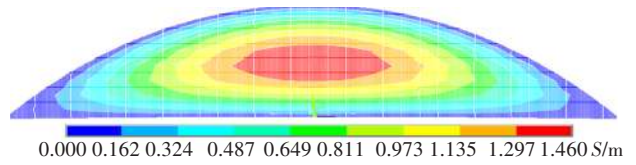
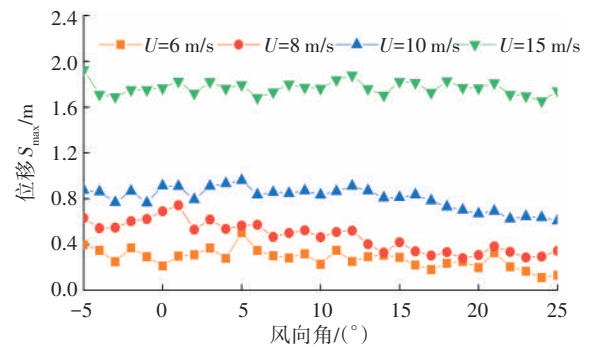
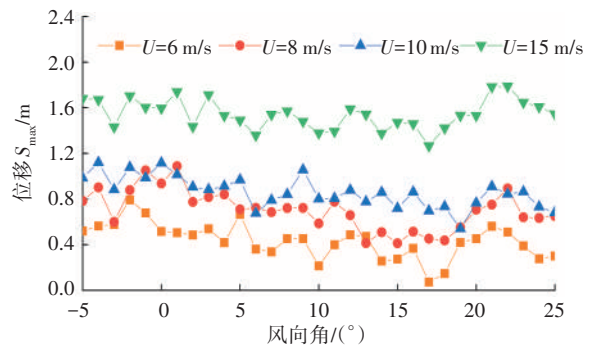
(a) 高密度索网模型,风向角 $\alpha=-5^\circ$ (b) 中密度索网模型,风向角 $\alpha=+22^\circ$ (c) 低密度索网模型,风向角 $\alpha=+1^\circ$

图9 不同索网模型的最不利位移云图

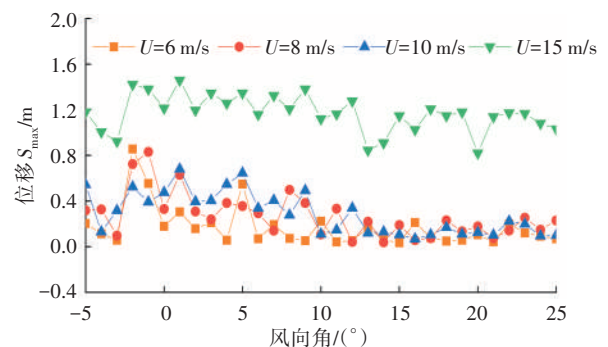
Fig. 9 Most unfavorable displacement of different cable net models



(a) 高密度索网模型



(b) 中密度索网模型



(c) 低密度索网模型

图10 不同风速、风向角下各密度索网模型的节点最大位移

Fig. 10 Maximum displacement of each cable net model with different densities under different wind speeds and directions

之变大;对于中、低密度索网模型,当风速在6~10 m/s区间变化时,节点最大位移的变化并不显著,但当风速增大到15 m/s时,中、低密度索网模型的节点最大位移明显增大。此外,在相同风速下节点最大位移随着索密度的增大而增大。

3.2.2 应力分析

图11给出了15 m/s风速下三种密度索网模型最不利位移响应对应的应力云图。由图11可知,不同密度索网模型竖向钢丝绳的应力分布相近。其中,高、中、低密度索网模型竖向钢丝绳的应力 σ 分别为16.6~19.1 MPa、16.5~19.5 MPa、17.4~19.7 MPa。

相较于竖向钢丝绳,索网的横向钢丝绳数量较少,故受力更不利。考虑风向角时,横向钢丝绳的应力从一侧端点向另一侧端点增大。由图11还可知,当来流的风向角为 -5° 时,高密度索网模型横向钢丝绳的应力最大值为233.5 MPa;当中密度索网模型受 $+22^\circ$ 风向角、低密度索网模型受 $+1^\circ$ 风向角的来流作用时,其横向钢丝绳的应力最大值分别为43.2、69.4 MPa。分析发现,横向钢丝绳的应力大小主要与作用在模型上的升力的大小及方向有关。

3.3 抑制措施

在桥梁的运营过程中会不可避免地遇到大风天气,这会导致作用在索网上的力显著增大。为了减小索网的风致响应,可考虑采用合适的抑制方法、措施。本节将以中密度索网模型为例,进一步对柔性索网风致响应的抑制措施开展研究。根据索网的构造特性及风致响应行为,本文在以下三个方案中进行比选。

方案一:改变索网自身的参数。由于横向钢丝绳的受力更不利,故首先调整其参数。保持初拉力不变,将横向钢丝绳的直径由4 mm增大至10 mm,每隔1 mm设置一个计算工况,但索网最大位移保持在1.79 m;保持直径不变,将横向钢丝绳的初拉力由500 N增大至1 500 N,每隔100 N设置一个计算工况,但索网最大位移仅仅降低至1.77 m(图12)。由此可以看到,改变横向钢丝绳的参数对索网响应的影响很小,这可能与其数量过少有关。若将竖向钢丝绳的初拉力由500 N增大至1 500 N,则抑制效果十分显著,索网最大位移降至0.592 m(图12)。

方案二:在索网上增设抑制措施。在某一高度的横向钢丝绳上增设直径4 mm的斜向索,斜向索的另一端与桥面最外侧相连。其中,斜向索的竖向投影距离为 H ,取6~24 m;水平投影距离为 L ,如图13所示。首先取 $L=5$ m(考虑索网与桥面最外侧的距离)。在增设斜向索后,索网的位移响应侧视图见图14(a)。由于

索网的最大位移响应值介于12~30 m,故斜向索约束 $H=6$ m处的横向索对位移响应的抑制作用很有限。随着 H 的增大,斜向索的抑制效果增强,约束高度以上部分的位移响应减小而约束高度以下部分的位移响应增强,如图14(b)所示。但是,当 H 大于某临界值时,约束高度以下索网的位移响应反而超过约束高度以上索网的位移响应。此外,斜向索对索网位移响应的抑制效果与 L 的大小亦有关系,如图15所示。由图15可知,当 $H=6, 12$ m时,较小的 L 就能发挥斜向索的作用,增大 L 对位移响应的抑制效果影响不大。当 $H=18, 24$ m时,较大的 L 才能使斜向索发挥作用。

需要说明的是,以上分析仅从抑制效果上讨论了 L 的影响。以本文的背景工程为例,若取 $H=12$ m、 $L=2$ m,则此时索网的最大位移 $S_{\max}=0.763$ m。虽然 $S_{\max}$ 没有达到最小,但斜向索的安装相对容易实现。若要进一步减小 $S_{\max}$,还可将竖向钢丝绳的初拉力增大至1 500 N,对应的 $S_{\max}$ 将减小至0.299 m。可见,增加斜向索的初拉力对 $S_{\max}$ 的影响有限。

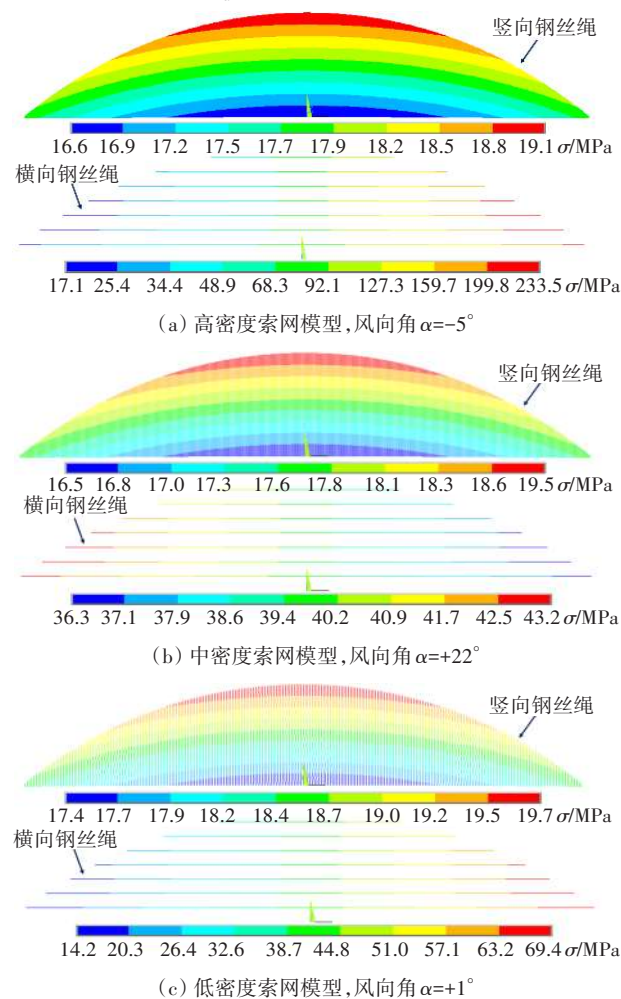


图11 各密度索网模型的最不利应力云图

Fig. 11 Most unfavorable stress of each cable net model with different densities

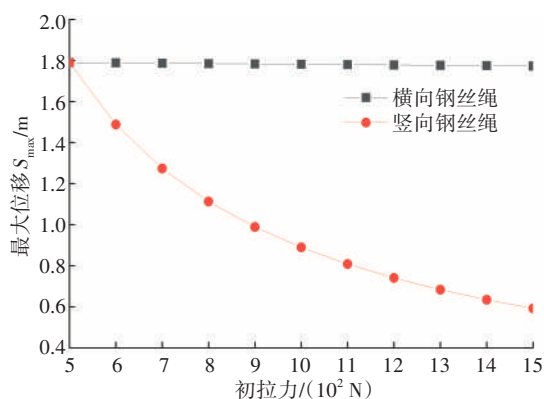


图12 方案一的抑制效果

Fig. 12 Suppression effect of scheme 1

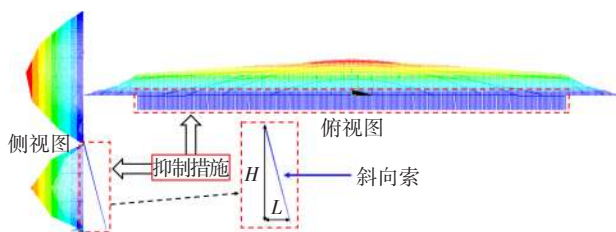


图13 斜向索示意图

Fig. 13 Inclined cable

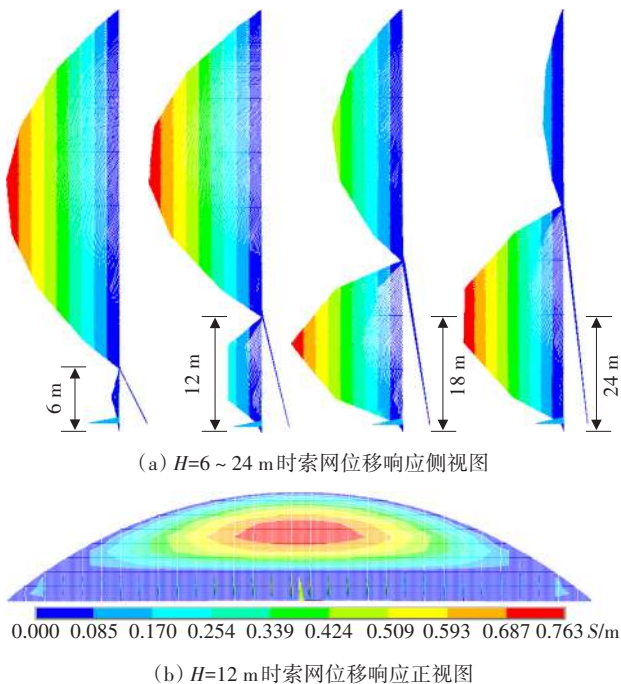


图14 增设斜向索后索网的位移云图

Fig. 14 Displacement of cable nets after the addition of inclined cables

综上所述,若要减小索网的静风响应,可以加强索网钢丝绳自身的刚度或增设外部抑振措施。若通过增大钢丝绳初拉力来提高索网刚度,还应考虑索网对拱、梁受力和变形的影响。若通过增设外部措施(如增设斜向索)来提高索网刚度,应根据桥梁构造、索网的位

移要求来确定其合适的位置对斜向索的底部进行约束,避免对人行道净空造成影响。

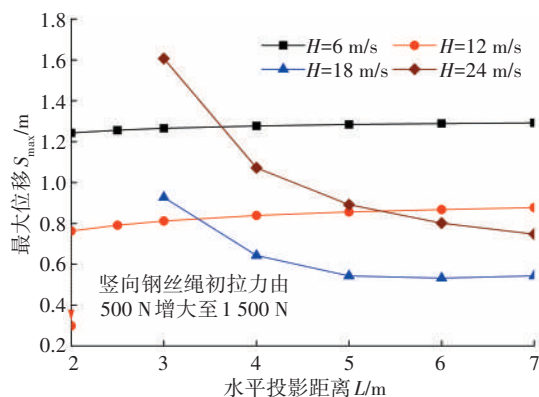


图15 斜向索参数对最大位移的影响

Fig. 15 Effects of the parameters of inclined cables on the maximum displacement

4 结论

本文针对大跨桥梁亮化索网的风荷载进行了风洞试验识别,计算了索网结构的静风响应,提出了抑制措施,得到以下主要结论:

1) 亮化索网的气动力系数随索密度的增大而增大。在较小的来流风速下,索密度对风荷载的影响更显著。当来流垂直于桥轴线时,风向角在一定范围内的改变对索网气动力系数的影响有限。

2) 亮化索网中部的位移响应最明显,最大位移随风速、索密度的增大而增大。相较于竖向钢丝绳,横向钢丝绳数量较少,故受力更不利。风向角对索网的位移响应影响有限,却会造成横向钢丝绳受力不均匀,一侧较大而另一侧较小。

3) 增大竖向钢丝绳的初拉力,或在索网与桥面之间增设斜向索,可抑制索网的静风响应,且这两种措施的有效性可以叠加。斜向索的抑制效果与其长度、倾角有关,相关参数的取值可根据桥梁的构造、索网的位移要求来确定。

参考文献(References):

- [1] 陈银伟,王旋,马行川,等.某上跨铁路桥梁涡振特性及气动优化试验研究[J].交通科学与工程,2023,39(6):83-92. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023101723121984.
CHEN Yinwei, WANG Xuan, MA Xingchuan, et al. Study on vortex-induced vibration performance and aerodynamic optimization test of an overpass railway bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (6): 83-92. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023101723121984.

- [2] 李春光, 毛禹, 颜虎斌, 等. 非对称异型箱梁斜拉桥涡振性能试验研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 87-94. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.003.
LI Chunguang, MAO Yu, YAN Hubin, et al. Experimental study on vortex induced vibration performance of asymmetric special shaped box girder cable stayed bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 87-94. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.003.
- [3] 陈应高, 康佳, 唐浩俊, 等. 高陡山区大跨度钢箱梁悬索桥风致振动试验和气动外形优化[J]. 振动与冲击, 2023, 42(18): 241-249. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.18.027.
CHEN Yinggao, KANG Jia, TANG Haojun, et al. Wind-induced vibration test and aerodynamic optimization of a long-span suspension bridge with steel box girder located in cliffy mountainous areas[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(18): 241-249. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.18.027.
- [4] 董国朝, 陈政清, 罗建辉, 等. 安装亮化灯具导致的斜拉桥拉索风致驰振固耦合分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 67-75. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.01.011.
DONG Guochao, CHEN Zhengqing, LUO Jianhui, et al. Fluid-structure interaction analysis of wind-induced galloping of cables with lamps of cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 67-75. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.01.011.
- [5] DENG Z Q, TANG H J, HU B, et al. Aerodynamic instability of stay cables with lighting fixtures[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(7): 2508-2521. DOI: 10.1007/s12205-021-0113-y.
- [6] 陈政清, 李寿英, 邓羊晨, 等. 桥梁长索结构风致振动研究新进展[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 1-8. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2022043.
CHEN Zhengqing, LI Shouying, DENG Yangchen, et al. Recent challenges and advances on study of wind-induced vibrations of bridge cables[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(5): 1-8. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2022043.
- [7] 安苗, 李寿英, 陈政清. 安装椭圆形灯具和矩形线盒的斜拉索驰振[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 74-81. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2022051.
AN Miao, LI Shouying, CHEN Zhengqing. Galloping of stay cables installed with elliptical lamp and rectangular box [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(5): 74-81. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2022051.
- [8] 周傲秋, 余海燕, 许福友. 亮化灯具安装后斜拉索三维气动性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(4): 379-384. DOI: 10.7511/dllgxb201904008.
ZHOU Aoqiu, YU Haiyan, XU Fuyou. Experimental study of aerodynamic performance of 3D stay cables with lighting lamp [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(4): 379-384. DOI: 10.7511/dllgxb201904008.
- [9] 邓周全, 唐浩俊, 李永乐, 等. 亮化灯具对既有斜拉索风致振动影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 44-50, 73. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.06.007.
DENG Zhouquan, TANG Haojun, LI Yongle, et al. Experimental research on the wind-induced vibration of stay cables with lighting fixtures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(6): 44-50, 73. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.06.007.
- [10] 唐浩俊, 邓周全, 王泽文, 等. 既有拱桥光彩亮化改造后吊索的涡振性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 64-73. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2022050.
TANG Haojun, DENG Zhouquan, WANG Zewen, et al. Vortex-induced vibration of hangers equipped with lighting fixtures of existing arch bridges [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(5): 64-73. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2022050.
- [11] 鲁建, 薛素铎, 李雄彦. 椭圆形无内环索网结构受力性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(5): 783-789. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.05.008.
LU Jian, XUE Suduo, LI Xiongyan. Analysis on mechanical performance of ellipse cable-net structure without inner ring cables [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(5): 783-789. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.05.008.
- [12] 冯若强, 武岳, 沈世钊. 单层平面索网幕墙结构的风激励动力性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(2): 153-155, 237. DOI: 10.3321/j.issn: 0367-6234.2006.02.001.
FENG Ruoqiang, WU Yue, SHEN Shizhao. Wind-induced dynamic performance of cable net glazing [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(2): 153-155, 237. DOI: 10.3321/j.issn: 0367-6234.2006.02.001.
- [13] 施刚, 左勇志, 郑敬杰, 等. 考虑损伤因素的单层平面索网静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(3): 9-17. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.03.002.
SHI Gang, ZUO Yongzhi, ZHENG Jingjie, et al. Experimental study on the single-layer plane cable net with the influence of damages [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(3): 9-17. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.03.002.
- [14] 吴丽丽, 王元清, 石永久. 玻璃幕墙中主体结构对单层索网结构风振响应的影响研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(7): 97-101, 112, 189. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.07.033.
WU Lili, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu. Influence of building structure on wind-induced responses of monolayer cable net in glass facades [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(7): 97-101, 112, 189. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.07.033.

(责任编辑:石月珍)