

风荷载作用下柔性光伏支撑索轴力分析*

马文勇^{1,2}, 柴晓兵¹, 高飞³, 马成成¹, 王彩玉¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

(2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心 石家庄, 050043)

(3. 河北鲲鹏电力工程咨询有限公司 石家庄, 053700)

摘要 为了分析风荷载对柔性光伏支架结构中索轴力的影响,通过刚性模型测压风洞试验获得不同风向、倾角和间距比下柔性支撑光伏组件的风荷载,建立 3 类柔性光伏支架分析模型并计算不同工况下的索轴向力。结果表明:支架不同位置的光伏组件风荷载不同,中间区域风荷载较大;将光伏组件的风荷载作为集中荷载施加在柔性索上引起的索轴力较大;不同倾角光伏支架受力随布置形式(间距比)的变化规律也不一致。基于分析结果,建议采用小间距大跨度的柔性光伏支架形式,将间距比控制在 0.1 以内,并将风荷载以集中力的形式施加于柔性索上,通过本研究提出的轴荷比估算风荷载引起的索轴力。

关键词 柔性光伏支架;风洞试验;间距比;索轴力;轴荷比

中图分类号 TU399;TH123⁺.3

引言

由于能源短缺和化石燃料引起的环境问题日益严重,分布式光伏越来越受到青睐。为了解决传统固定光伏支架跨越性差、占地面积大和用钢量大的缺点,柔性光伏支架逐渐在污水处理厂、鱼塘和山地等地表条件复杂地区得到大量应用。柔性光伏支架一般是由承重索、钢梁、斜拉索、钢立柱或钢斜柱组成,承重索通过轴向拉力提供外荷载,其跨度大、柔性大和质量轻的特点决定风荷载是结构设计的主要荷载。针对光伏支架抗风,研究主要集中在传统固定光伏支架风荷载大小^[1-2]和光伏组件风荷载分布规律^[3-4]方面。对于柔性光伏支架,由于索结构本身的非线性特征,风荷载引起的索力比较复杂,目前尚无系统研究。

我国光伏组件风荷载体型系数取值主要参考《建筑结构荷载规范》^[5]和《光伏支架结构设计规程》^[6],这些规范并未给出柔性光伏支架结构类型的风荷载取值,因此有必要对柔性光伏支架风荷载取值进行系统研究。由于索结构良好的力学性能^[7-8],在大跨度张拉结构中应用广泛,如索网幕墙结构^[9-10]、桥梁结构^[11-12]和悬索屋面结构^[13-14]等。柔性光伏支架结构简单,可以将风荷载直接施加于支撑索上,组件与组件之间通常留有间隙,需要研究不同

风荷载加载方式和间距对索轴力的影响。此外,由于索几何非线性特征,施加风荷载大小和索轴力的关系也不清楚,因此开展关于柔性光伏支架抗风的研究具有较强的实际意义。

笔者以建立实用的柔性光伏索轴力估算模型为目的,通过刚性模型测压风洞试验获得柔性支撑光伏组件的风荷载,建立了 3 类柔性光伏支架模型,分析风荷载对柔性光伏支架结构中索轴力的影响,给出了不同基本风压、不同倾角光伏支架和不同跨度柔性索轴力估算参考值,为柔性太阳能光伏支架抗风设计提供建议和参考。

1 风洞试验介绍

试验在石家庄铁道大学风洞实验室^[15]低速试验段进行,低速试验段宽为 4.4 m,高为 3 m,长为 24 m,最大风速为 30 m/s,背景湍流度 $I \leq 0.4\%$ 。

1.1 试验模型及工况

由于光伏组件是刚性的,本研究采用刚性模型测压风洞试验获得光伏组件的风荷载,试验过程中模型未出现明显的振动。该风洞试验并不能反映柔性光伏支架发生风致振动时的气动耦合效应,因此

* 河北省自然科学基金资助项目(E2021210053)

收稿日期:2020-10-11;修回日期:2021-10-12

该风荷载只能用于平均风荷载和支架抖振响应分析。试验模型及参数定义如图1所示,模型缩尺比为1:4,缩尺后单块光伏组件尺寸为248 mm,宽为410 mm,厚为12 mm。光伏组件由有机玻璃板制成,每块组件在30个位置对应布置上、下表面测压点,共60个。试验最大阻塞比(倾角 20°)为1.32%。

试验模型共包含5块光伏组件,图1(b)中1~5表示5个位置(WZ),3为中间位置光伏组件,用WZ₃表示。试验共设置6个间距比,间距比 S/L 为0~0.20,间隔为0.04。倾角 β 为 $0^\circ\sim 20^\circ$,间隔为 5° 。

试验采用均匀流场,来流风速约为9 m/s。压力扫描阀采样频率为330 Hz,采样时间为30 s。风向角 α 为 $0^\circ\sim 180^\circ$,间隔为 15° 。

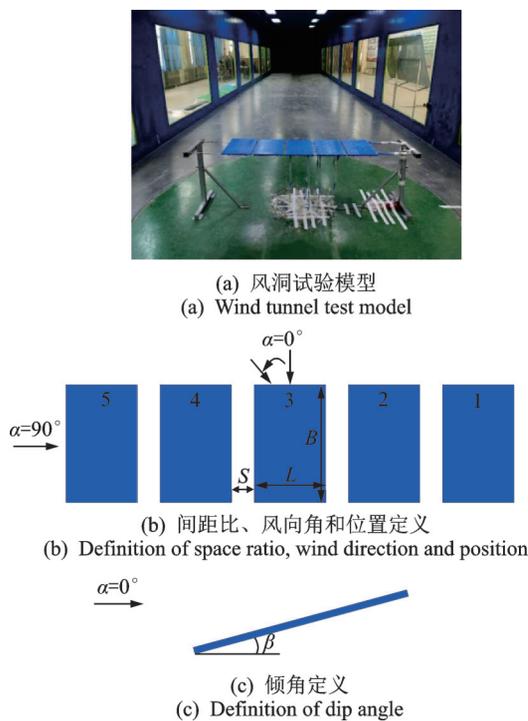


图1 试验模型及参数定义

Fig.1 Test model and definition of parameter

1.2 参数定义

定义风压系数为

$$C_{pi}(t) = (P_{ui}(t) - P_{di}(t)) / 0.5\rho U^2 \quad (1)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_{pi}(t) A_i / BL \quad (2)$$

其中: $C_{pi}(t)$ 为 i 测点风压系数; $P_{ui}(t)$ 和 $P_{di}(t)$ 为 i 测点上表面和下表面风压; C_p 为单块光伏组件风压系数,即体型系数; A_i 为 i 测点的面积。

单排光伏组件体型系数计算公式与单块类似,将 L 换成 $5L$ 即可。体型系数为正表示光伏组件上表面受风压力作用,为负表示受风吸力作用。

2 柔性支撑光伏组件风荷载

风向角是影响光伏组件风荷载大小的重要因素,不同倾角光伏组件风荷载随风向角变化规律类似^[16]。柔性光伏支架倾角一般较小,通常在 10° 左右。图2为 10° 倾角单排光伏组件风荷载体型系数随风向角的变化曲线,可以看出:风压力极大值通常发生在 0° 风向角附近;风吸力极大值通常发生在 150° 或 180° 风向角附近;在 $150^\circ\sim 180^\circ$ 风向角范围内,体型系数随风向角变化趋于平缓。另外,光伏组件同等迎风面积下(例如 30° 和 150° 风向角下迎风面积相同),组件下表面迎风时所受风荷载较大,因此迎风面积并不是决定组件风荷载大小的唯一因素,需要综合考虑 150° 和 180° 两个风向角,获得结构设计的最不利荷载。

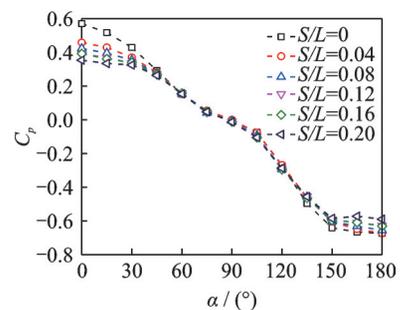


图2 单排光伏组件体型系数随风向角的变化

Fig.2 Variation of pressure coefficient of each row of photovoltaic modules with wind direction

图3为 10° 倾角不同位置光伏组件体型系数随风向角的变化曲线,可以发现,不利风向角跟整体分析类似,风压力和风吸力极大值通常发生在 0° 和 180° 风向角附近。

由以上分析可知,不利风向角通常发生在 0° , 30° , 150° 和 180° ,为了分析安装位置对光伏组件风荷载的影响,图4给出了4个不利风向角下 10° 倾角光

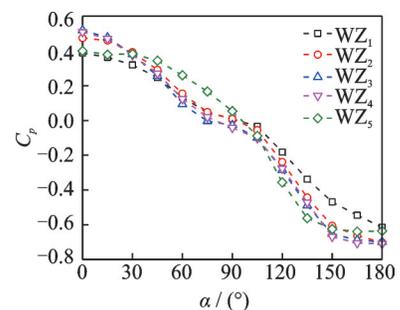


图3 不同位置光伏组件体型系数随风向角的变化($S/L=0.04$)

Fig.3 Variation of pressure coefficient on photovoltaic module at different positions with wind directions($S/L=0.04$)

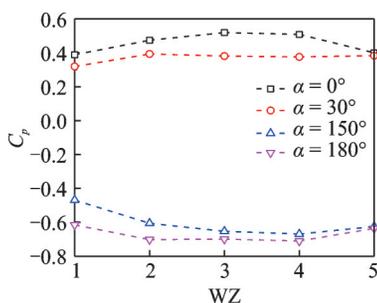


图 4 光伏组件体型系数随安装位置的变化($S/L=0.04$)
Fig.4 Variation of pressure coefficient of photovoltaic module with position($S/L=0.04$)

光伏组件体型系数随安装位置的变化曲线,可以看出,

中间位置(WZ_3)光伏组件所受风荷载较大,此规律和光伏组件中央区域风荷载大于边缘区域^[4,17]规律一致。气流流经单排光伏组件时,由于中间区域光伏组件两侧绕流受限,组件顶部和底部绕流加速,气流由尾流夹卷进入剪切层,曲率半径减小,降低背面风面压力,从而导致中间区域光伏组件风荷载较大。因此,为了满足光伏组件和支架安全,柔性光伏支架模型风荷载体型系数值选用中间位置光伏组件风荷载代替所用光伏组件,表 1 给出了 WZ_3 光伏组件风荷载体型系数值,是所有风向角风压力和风吸力包络的结果。

表 1 WZ_3 光伏组件体型系数

Tab.1 Pressure coefficient of WZ_3 photovoltaic module

$\beta/(^\circ)$	S/L					
	0	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20
0	0/-0.14	0/-0.15	0/-0.15	0/-0.18	0/-0.17	0/-0.17
5	0.23/-0.47	0.20/-0.43	0.14/-0.40	0.15/-0.41	0.14/-0.41	0.12/-0.39
10	0.65/-0.74	0.52/-0.70	0.49/-0.67	0.45/-0.66	0.45/-0.67	0.40/-0.63
15	0.73/-0.81	0.78/-0.80	0.75/-0.85	0.73/-0.87	0.74/-0.89	0.72/-0.88
20	0.77/-0.94	0.86/-0.81	0.92/-0.87	0.92/-0.94	0.90/-1.03	0.92/-1.09

3 柔性光伏支撑索轴力分析

本节主要讨论风荷载加载方式、光伏组件布置形式(间距比)对索轴力的影响,以及施加风荷载大小与支撑索轴力的关系。本节中索轴力 F 仅由风荷载引起,已消除(减去)自重和预应力的影响。

基于 SAP2000 建立 3 类柔性光伏支架模型,钢梁和钢立柱采用 Q345 工字钢,尺寸如下:高为 304.8 mm;上、下翼缘宽度为 127 mm;上、下翼缘厚度为 12 mm;腹板厚为 10 mm。承重索直径为 16 mm,线膨胀系数为 1.2×10^{-5} ,弹性模量为 135 GPa,支架模型梁柱交点距地高度为 3 m。

按照《光伏支架结构设计规程》^[6]风荷载计算方法获得光伏组件上的风荷载,其中:风荷载体型系数值参照表 1;风压高度变化系数取值 1.0;基本风压取值 0.35 kN/m^2 ;按照《索结构技术规程》^[18]规定,索结构风振系数取值 1.5。

荷载施加顺序为索预应力、自重和风荷载,考虑几何非线性,加载顺序不能改变。预应力、自重和风荷载比例系数分别为 1.0, 1.2 和 1.4。索预应力施加采用降温法, $\Delta T = N/\alpha EA$, 其中: N 为轴力; α 为线膨胀系数; E 为弹性模量; A 为索截面积。非线性分析过程中考虑 $P-\Delta$ 效应和大位移。

3.1 风荷载加载方式对支撑索轴力的影响

柔性光伏支架中支撑索通过轴向拉力提供外荷载,由于柔性光伏支架结构简单,为了分析不同风荷载加载方式对索轴力的影响,基于 SAP2000 软件建立柔性光伏支架支撑索风荷载加载模型,如图 5 所示,模型结构跨度为 11.36 m。



图 5 支撑索模型

Fig.5 The model of supporting cable system

为了分析光伏板沿着索轴向的分布方式对支撑索轴力的影响,采用 3 种风荷载加载方式:集中荷载、均布荷载和带间隙均布荷载。其中:集中荷载表示在每块光伏组件对应支撑索位置施加集中力;均布荷载表示荷载均匀分布在支撑索上;带间隙均布荷载表示在光伏组件对应支撑索位置施加均匀荷载,间隙处不施加荷载。带间隙均布荷载间距比 $S/L=0.04$ 。

图 6 分别给出了 0° 和 180° 风向角下 3 种风荷

载加载方式引起的索轴力对比,可以看出:集中荷载加载方式引起的索轴力大于其他2种加载方式;集中荷载和带间隙均布荷载加载方式引起的索轴力相差较小,而集中荷载和均布荷载引起支撑索轴力相差较大。因此,要注意不同风荷载加载方式对支撑索轴力的影响,建议将光伏组件上的风荷载以集中力的形式施加于柔性索上。

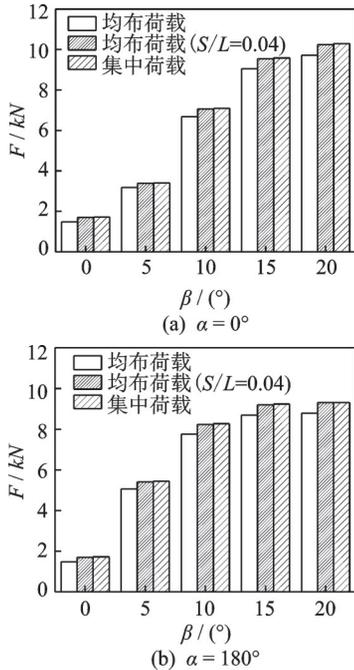


图6 风荷载加载方式引起的索轴力对比

Fig.6 Comparison of axial cable forces caused by wind load model

3.2 光伏组件布置形式对支撑索轴力的影响

为了分析布置形式(间距比)对支撑索轴力的影响,基于SAP2000软件建立30 m跨度的柔性光伏支架。间距的存在既会影响光伏组件风荷载的大小,也会导致同种跨度布置光伏组件数量不同,间距比 S/L 为0,0.04,0.08,0.12,0.16和0.20对应的光伏组件数量分别为30,28,27,26,26和25块。

由于集中荷载加载方式引起的索轴力较大,因此笔者采用集中荷载加载方式,即在每块光伏组件对应支撑索位置施加集中力。图7为180°风向角下索轴力随布置形式(间距比)的变化曲线。当支架倾角为0°时,支撑索轴力随光伏组件布置形式变化不明显,因此对倾角为0°的光伏支架,建议减小组件之间的间隙,尽可能多地布置光伏组件。当支架倾角为5°或10°时,索轴力随间距比的增大而减小;间距比小于0.08时,索轴力减小趋势更明显;间距比大于0.08时,索轴力减小趋势减弱。因此,对倾角为5°

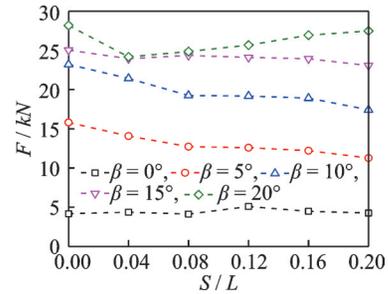


图7 索轴力随布置形式(间距比)的变化

Fig.7 Variation of cable axial force with arrangement (spacing ratio)

和10°的光伏支架,建议将间距比控制在0.08范围内。当支架倾角为15°时,索轴力随间距增大有所减小,但变化趋势不明显。当支架倾角为20°时,索轴力随间距比的增大先减小后增大。

不同倾角光伏支架,索轴力随光伏组件布置形式(间距比)变化规律不一致。对于5°,10°和15°倾角光伏支架,索轴力随间距比增大整体上呈减小趋势。间距比增加减少了光伏组件的布置数量,当支架倾角为0°和20°时,减少光伏组件布置数量,索轴力还略有增加(如0°倾角,间距比为0.12),这主要是因为间距增大了光伏组件的风荷载。因此,跨度相同时,减少光伏组件布置数量,结构受力并不一定是最合理的。

3.3 施加风荷载大小与支撑索轴力关系分析

为了分析施加风荷载大小和对应索轴力的关系,引入轴荷比,其定义为

$$\delta = F/W \quad (3)$$

其中: F 为支撑索轴力; W 为施加的风荷载。

跨度一定时,光伏组件不同间距的布置形式致使支撑索施加风荷载大小不同。图8给出了0°和180°风向角下30 m跨度轴荷比 δ 随间距比的曲线变化。可以发现:0°风向角下,随着间距比的增加,轴荷比呈增大趋势;180°风向角下,随着间距比的增加,轴荷比变化规律不明显,呈现出“跳跃性”。整体上,当间距比为0时,轴荷比较小,说明在此间距下,施加相同风荷载,结构受力较小,因此光伏组件小间距布置形式,使柔性光伏支架结构受力比较合理。

为了进一步分析施加风荷载大小和支撑索轴力的关系,建立9种不同跨度的柔性光伏支架模型,支架跨度 l 为10~50 m,间隔为5 m,采用集中荷载加载方式。由于间距比为0时,荷载利用率较好,因此采用间距比为0。跨度大小反映施加风荷载大小,其中: $l=10$ m跨度对应的光伏组件数量为10块; $l=50$ m跨度对应的光伏组件数量为50块。

图9给出了0°和180°风向角下支撑索轴荷比 δ 随

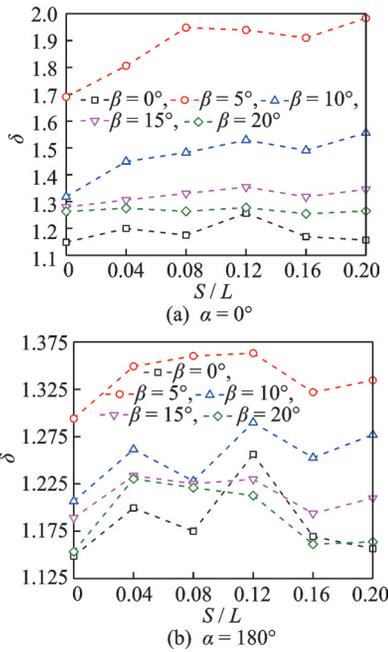


图 8 相同跨度下 δ 随间距比的变化

Fig.8 Variation of δ with spacing ratio under the same span

跨度的变化曲线,可以看出,随着跨度的增大, δ 整体呈减小趋势。以 10° 倾角为例,相比10 m跨度, 0° 风向角下50 m跨度 δ 下降了2.6%, 180° 风向角下50 m跨度 δ 下降了1.6%。这种影响虽然不大,但是增大支架跨度,可以提高利用率,即增大相同的支架跨度(施加相同的荷载增量),对应的支撑索轴力增加量减小。

轴荷比反映了风荷载和对应支撑索轴力的关系。表2给出了不同风压对应轴荷比取值建议,可根据表2估算风荷载引起的索轴力。

表 2 不同风压对应轴荷比取值建议

Tab.2 Suggestions of d at different wind pressures

风压/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$\beta/(\circ)$	l/m								
		10	15	20	25	30	35	40	45	50
0.35	0	1.15	1.16	1.16	1.15	1.15	1.15	1.14	1.14	1.13
	5	1.70	1.70	1.70	1.70	1.69	1.68	1.68	1.67	1.66
	10	1.33	1.33	1.33	1.32	1.32	1.31	1.31	1.30	1.30
	15	1.29	1.29	1.29	1.29	1.28	1.27	1.27	1.26	1.26
	20	1.27	1.27	1.27	1.27	1.26	1.26	1.25	1.24	1.24
0.50	0	1.30	1.30	1.31	1.30	1.30	1.29	1.29	1.28	1.28
	5	1.57	1.57	1.57	1.57	1.56	1.55	1.55	1.54	1.54
	10	1.22	1.21	1.21	1.21	1.20	1.20	1.19	1.18	1.18
	15	1.18	1.18	1.17	1.18	1.17	1.16	1.15	1.15	1.14
	20	1.16	1.16	1.16	1.15	1.15	1.14	1.14	1.13	1.13
0.65	0	1.34	1.34	1.34	1.34	1.33	1.33	1.32	1.32	1.31
	5	1.48	1.48	1.44	1.47	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44
	10	1.13	1.13	1.13	1.13	1.12	1.11	1.11	1.10	1.10
	15	1.10	1.10	1.10	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07	1.06
	20	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05

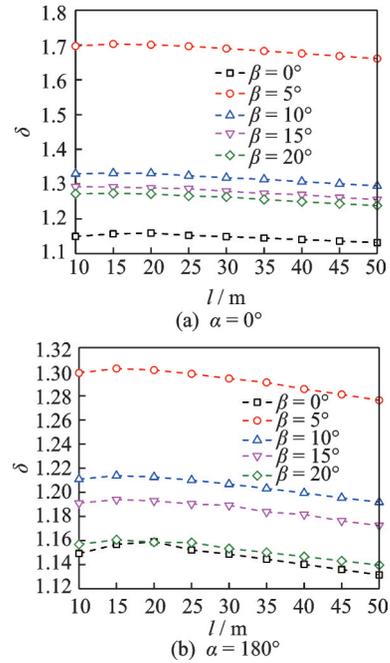


图 9 δ 随跨度的变化

Fig.9 Variation of δ with span

4 结 论

1) 风荷载加载方式影响支撑索轴力大小,集中荷载加载方式引起的索轴力较大。为安全起见,在进行柔性光伏支架抗风设计时,建议将光伏组件的风荷载以集中力的形式施加于柔性索上。

2) 不同倾角光伏支架结构受力随布置形式(间距比)变化规律不一致。跨度相同时,减少光伏组件布置数量结构受力并不一定是最小的,整体上建议将光伏组件间距比控制在0.1以内。

3) 跨度相同时,施加风荷载大小和索轴力关系不明显,整体上间距比为0时,施加相同风荷载,结构受力较小。跨度不同时,轴荷比随着跨度的增大整体上呈减小趋势。综合两者,建议采用小间距比和大跨度的光伏支架。

4) 在进行支撑索轴力估算时,条件类似的情况下,建议采用本研究提出的轴荷比估算柔性光伏支架的索轴力。

参 考 文 献

- [1] AYODEJI A O, HORIA H, KAMRAN S. Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module[J]. *Renewable Energy*, 2015, 78: 657-665.
- [2] WU Z, GONG B, WANG Z, et al. An experimental and numerical study of the gap effect on wind load on heliostat[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(4):797-806.
- [3] 马文勇, 孙高健, 刘小兵, 等. 太阳能光伏板风荷载分布模型试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(7): 8-13. MA Wenyong, SUN Gaojian, LIU Xiaobing, et al. Tests for wind load distribution model of solar panels[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(7):8-13.(in Chinese)
- [4] 马文勇, 柴晓兵, 刘庆宽, 等. 底部阻塞对太阳能光伏板风荷载的影响研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(2): 129-134. MA Wenyong, CHAI Xiaobing, LIU Qingkuan, et al. Study on effect of bottom flow obstruction on wind load of solar photovoltaic panels [J]. *Building Structure*, 2019, 49(2):129-134.(in Chinese)
- [5] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
- [6] NB/T 10115—2018 光伏支架结构设计规范[S].
- [7] 周云岗, 肖汝诚. 大跨径三塔缆索承重桥力学与经济性能[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7): 982-991. ZHOU Yungang, XIAO Rucheng. Economic and mechanical properties of large span three-tower cable supported bridges[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(7):982-991.(in Chinese)
- [8] 胡松, 何艳丽, 王肇民. 大挠度索结构的非线性有限元分析[J]. *工程力学*, 2000, 17(2): 36-43. HU Song, HE Yanli, WANG Zhaomin. Nonlinear analysis of flexible cable structures using the finite element method[J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(2): 36-43. (in Chinese)
- [9] CAI J G, FENG J, CAO H B, et al. Wind-induced vibration response of single-layer cable net supported glass curtain wall[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2010, 32(3):355-360.
- [10] 刘坚, 赵屹峰, 罗赤宇. 单层平面索网玻璃幕墙结构的抗风性能研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(1): 9-14. LIU Jian, ZHAO Yifeng, LUO Chiyu. Research of single-plane cable-net curtain wall on wind resistance[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Sciences Edition)*, 2015, 47(1):9-14. (in Chinese)
- [11] GRANATA M F, LONGO G, RECUPERO A, et al. Construction sequence analysis of long-span cable-stayed bridges[J]. *Engineering Structures*, 2018, 174:267-281.
- [12] CHEN Y H, LI H J, LÜ J M. Post-rehabilitation cable force adjustment of the tension rocker bearing in a PC cable-stayed bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 7(2):56-62.
- [13] 张路, 张淮湧, 施泓, 等. 郑州某奥体中心方案结构可行性设计与分析[J]. *建筑结构*, 2017, 47(S1): 359-363. ZHANG Lu, ZHANG Huaiyong, SHI Hong, et al. Structure feasibility design and analysis of an Olympic Center in Zhengzhou [J]. *Building Structure*, 2017, 47(S1):359-363. (in Chinese)
- [14] CHEN B, WU T, YANG Y, et al. Wind effects on a cable-suspended roof: full-scale measurements and wind tunnel based predictions[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 155:159-173.
- [15] 刘庆宽. 多功能大气边界层风洞的设计与建设[J]. *实验流体力学*, 2011, 25(3): 66-70. LIU Qingkuan. Aerodynamic and structure design of multi-function boundary-layer wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(3):66-70. (in Chinese)
- [16] 江继波, 章正暘, 陆元明, 等. 考虑弯矩的光伏阵列风荷载数值分析[J]. *可再生能源*, 2019, 37(1): 46-52. JIANG Jibo, ZHANG Zhengyang, LU Yuanming, et al. Numerical analysis of wind loads about photovoltaic arrays considering bending moment[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(1):46-52. (in Chinese)
- [17] 马文勇, 柴晓兵, 赵怀宇, 等. 基于偏心风荷载分布模型的柔性支撑索分配系数研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(12): 305-310. MA Wenyong, CHAI Xiaobing, ZHAO Huaiyu, et al. A study on distribution coefficient of a flexible photovoltaic support cable based on an eccentric moment wind load distribution model [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(12):305-310. (in Chinese)
- [18] JGJ 257—2012 索结构技术规程[S].



第一作者简介:马文勇,男,1981年5月生,教授、博士生导师。主要研究方向为结构振动与控制。曾发表《基于偏心风荷载分布模型的柔性支撑索分配系数研究》(《振动与冲击》2021年第40卷第12期)等论文。

E-mail: mawenyong@126.com