

# 双层索系柔性光伏支架结构受力性能研究

袁焕鑫<sup>1</sup>, 宋薏铭<sup>1</sup>, 杜新喜<sup>1</sup>, 王若林<sup>1</sup>, 马文勇<sup>2</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要** 目的 研究双层索系柔性光伏支架结构在风荷载作用下的静力性能与动力响应。方法 采用 ABAQUS 有限元软件开展双层索系柔性光伏支架结构的静力性能、动力特性、动力响应和风振系数分析, 探究了跨度、横向连接系间距以及挠度限值等影响因素对支架结构受力性能的影响。结果 结构的风振响应随着跨度的增加而增大; 结构跨中挠度及上层索索力随横向连接系间距的增大而增大; 增大上层索预应力可以减小结构的动力响应, 而下层索预应力过大会导致结构的风振响应增大。结论 通过研究给出了双层索系柔性光伏支架结构的风振系数取值范围以及上、下层索的初始预拉力设置建议, 可以为其结构抗风设计提供参考。

**关键词** 柔性光伏支架; 双层索系; 静力性能; 动力响应; 风振系数

中图分类号 TU399

文献标志码 A

**引用格式:** 袁焕鑫, 宋薏铭, 杜新喜, 等. 双层索系柔性光伏支架结构受力性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 395-403. (YUAN Huanxin, SONG Yiming, DU Xinxi, et al. Study on structural performance of double-layer flexible photovoltaic Support structure[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3): 395-403.)

## Study on Structural Performance of Double-layer Flexible Photovoltaic Support Structure

YUAN Huanxin<sup>1</sup>, SONG Yiming<sup>1</sup>, DU Xinxi<sup>1</sup>, WANG Ruolin<sup>1</sup>, MA Wenyong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, China, 430072; 2. Civil Engineering College, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, China, 050043)

**Abstract:** The double-layer flexible photovoltaic support structure displayed strong nonlinearity, large deflection and wind sensitivity, which requires in-depth studies on the structural performance. By means of the ABAQUS finite element (FE) software, the static behavior, the dynamic characteristics and response, and the wind vibration coefficient of the double-layer flexible photovoltaic support structure were investigated. The influences of the key parameters including the span length, the spacing of the horizontal connection system and the limit value of deflection on the

收稿日期: 2023-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278208)

作者简介: 袁焕鑫(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢结构、光伏支架结构等方面研究。

structural performance were examined. It has been revealed that the wind-induced response of the structure increased with larger span length, and the mid-span deflection and the internal force of the upper-layer cables increased with increasing values of the spacing of the horizontal connection system. Moreover, the dynamic response of the structure can be reduced by raising the prestressing value of the upper-layer cables, while excessive prestressing of the lower-layer cable leads to amplified wind vibration response. The range of the wind vibration coefficient of the double-layer flexible photovoltaic support structure was provided, together with the prestressing suggestions for both the upper and lower-layer cables, which are capable of providing references for the anti-wind design of the structure.

**Key words:** flexible photovoltaic support structure; double-layer cable system; static performance; dynamic response; wind vibration coefficient

柔性光伏支架结构具有结构跨度大、灵活性好、经济性好等优势,在山地、鱼塘、污水处理厂、工业园区等场地具有良好的应用前景<sup>[1]</sup>。柔性光伏支架结构可采用单层索系、双层索系悬索结构形式,其中双层索系柔性光伏支架结构包括上、下两层预应力索以及横向连接系等,其外形和受力特点与传统平面桁架类似,又被称为“索桁架”。双层索系结构具有较好的形状稳定性,一般适用于中大跨度的柔性光伏支架。

由于双层索系柔性光伏支架结构的强非线性、大挠度、风敏感等特性,其结构受力特性比较复杂,而且目前没有专门的设计规范。国内外已有部分学者对柔性光伏支架结构开展了相关研究。高亮等<sup>[2]</sup>通过风洞试验研究了光伏组件风荷载分布情况,探究了光伏组件倾角、间距、阵列中位置等因素对风荷载体型系数的影响规律。马文勇等<sup>[3-4]</sup>采用风洞试验手段对柔性光伏支架结构的风荷载进行了研究,提出了风荷载体型系数取值建议和索力分配建议。王泽国等<sup>[5-6]</sup>对多排单层索系柔性光伏支架结构进行了有限元分析,研究表明,考虑脉动风空间相关性会导致结构的动力响应增大,横向连接系可以有效增强结构的整体性。杜航等<sup>[7]</sup>采用风洞试验和有限元方法,研究了单层索系柔性光伏支架的组件表面风压和结构风振系数,并给出

了风振系数建议值。宋慧铭等<sup>[8]</sup>开展了单层索系柔性光伏支架结构的静力和动力响应分析,提出了风振系数建议值与减小风振响应的有效措施。X. H. He 等<sup>[9-10]</sup>开展了双层索系柔性光伏支架结构的风洞试验和数值模拟,探究了间距、倾角、初始索力和索径对结构受力特性的影响,发现结构的风振响应随着风速的增大而明显增大,可以设置横向连接系来减小结构的风振响应。H. Ding 等<sup>[11]</sup>采用有限元方法对双层索系柔性光伏支架结构的破坏模式和承载力进行研究,提出了基于极限状态设计方法的光伏支架结构设计方法。J. Q. Liu 等<sup>[12]</sup>通过风洞试验研究了双层索系柔性光伏支架结构的风致响应和临界风速,分析了不同稳定索形式对支架结构临界风速的影响。

从已有的研究结果来看,当前的研究主要针对单层索系结构,而双层索系结构的跨度更大,结构形式更为复杂,因此有必要对双层索系柔性光伏支架结构的受力特性进行深入研究,为结构设计提供参考。基于此,笔者采用 ABAQUS 有限元软件建立了双层索系柔性光伏支架结构模型,开展结构的静力性能、动力特性、风振响应、风振系数的研究,探明结构跨度、横向连接系间距以及挠度限值等关键参数对结构受力性能的影响,并提出结构风振系数取值和拉索初始预拉力设置建议。

# 1 结构静力性能分析

## 1.1 有限元模型

采用 ABAQUS 有限元软件建立双层索系柔性光伏支架结构模型(见图 1)。模型包括两排柔性光伏支架结构及其横向连接系,其中上、下层索的初始形态分别设为直线和抛物线,模型矢高取为  $L/20$  ( $L$  表示模型总跨度)。由于研究对象为双层索系柔性光伏支架结构,为了提高计算效率,模型中对支承结构进行了简化,仅以  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴平动与绕  $X$  轴转动约束代替支承结构的作用。上、下层承重索采用不同直径的  $1 \times 7$  无粘结预应力热镀锌钢绞线,抗拉强度  $R_m = 1\,860\text{ MPa}$ ,弹性模量  $E_0 = 1.95 \times 10^5\text{ MPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.3$ 。横向连接系杆件采用  $\phi 40 \times 4\text{ mm}$  的 Q235 圆钢管,且两端均为刚接。为了合理考虑光伏组件对结构上层索的拉结作用,在两根上层索之间设置直径 40 mm 的刚性杆,且间隔 2 m 布置。采用 B31 线性梁单元进行网格划分,上、下层索的网格划分长度分别设为 1 000 mm、500 mm,其余杆件的网格长度为 250 mm,单元数量为 948 个。为了验证网格长度的合理性,建立网格长度缩小十倍的对比模型,该模型单元数量为 7 274 个。计算结果显示,7 274 个单元和 948 个单元数量模型的挠度差距为 0.6%,索力差距为 0.4%,表明采用 948 个单元数量进行计算可以取得良好的收敛性和准确性。

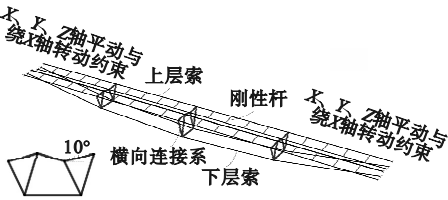


图 1 双层索系结构有限元模型

系结构模型,承重索和横向连接系杆件自重由 ABAQUS 有限元软件自动计算,通过降温法<sup>[13]</sup>施加承重索预拉力,并将光伏组件自重、风荷载和雪荷载经换算后以线荷载的形式施加到承重索上。分别在永久荷载状态和设计荷载状态下进行静力分析。永久荷载状态对应悬索结构和光伏组件自重状态,主要用于结构挠度控制,通过调整上、下层索的预拉力值,使得横向连接系处的挠度  $y_1$  接近为 0,且相邻横向连接系之间的上层索挠度  $y_2$  小于  $l/200$ (见图 2)。设计荷载状态包括风压(索和光伏板自重、风压荷载和雪荷载)和风吸工况(索和光伏板自重、风吸荷载),主要用于控制索力不超过拉索的抗拉力设计值,防止结构失效。

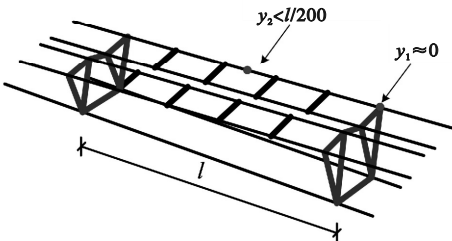


图 2 永久荷载状态下双层索系结构挠度控制

Fig. 2 Deflection control of double-layer cable system structure under permanent load condition

在以上挠度控制标准下,对不同跨度的双层索系结构模型进行非线性有限元分析,下层索所需的索径和初始预拉力随跨度的变化情况如图 3 所示。

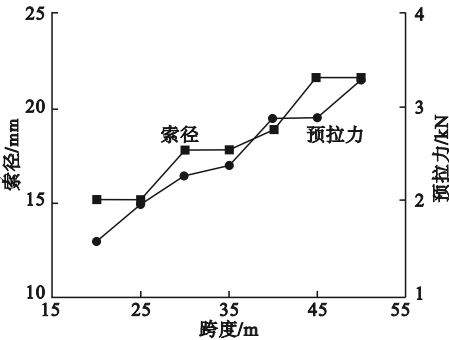


图 3 下层索初始预拉力和索径随结构跨度的变化

Fig. 3 Variation of initial pretension and cable diameter of lower-layer cable with different spans

## 1.2 静力性能分析

建立跨度介于 20 ~ 50 m 的 7 个双层索

由图3可知,随着双层索系结构跨度的增加,下层索初始预拉力和索径均呈近似阶梯状增长,表明需要逐渐增大下层索的索径,同时增大其初始预拉力值。

图4给出了在风吸和风压荷载工况下,双层索系结构的挠度和索力随跨度变化的静力计算结果。从图中可以看到,尽管结构跨中挠度在两种荷载工况下均随跨度的增大而增加,但风吸工况下结构挠度的增长更为明显;同时,风压工况的下层索和风吸工况的上层索的索力随跨度的增加明显增大,且风压工况的下层索索力最大。风压工况的上层索索力受跨度变化的影响较小,这是因为悬索结构每隔一定间距设置了横向连接系,风吸工况的下层索出现了松弛,其索力基本为零。

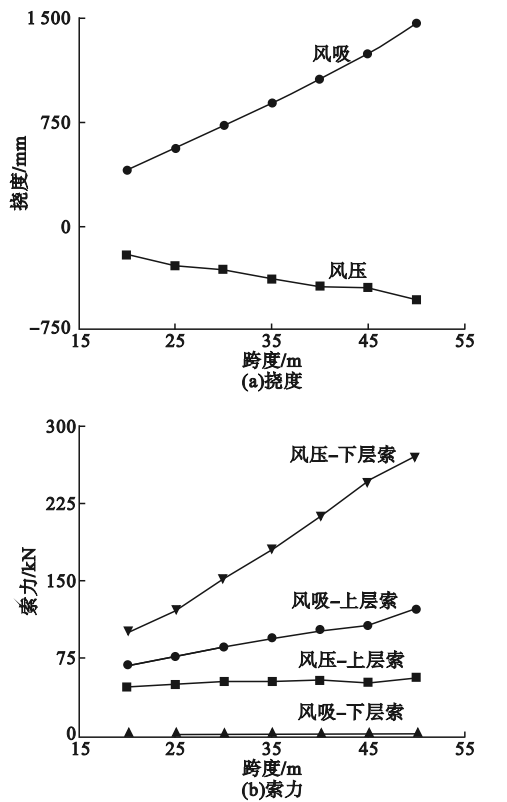


图4 风吸和风压工况下不同跨度结构的挠度和索力影响

Fig. 4 Influence of different spans on the deflection and cable force under wind suction and wind pressure conditions

## 2 结构动力响应分析

### 2.1 动力特性

考虑光伏组件和索结构自重作用,采用Block Lanczos法对50 m跨双层索系结构模型进行模态分析,得到结构前3阶自振模态和频率,结果见表1。可以看出,结构前3阶振型均以竖向振动为主,且结构自振频率较小。由于实际应用中柔性光伏支架结构往往以光伏阵列的形式布置,各排支架之间每隔一定间距设有横向连接系,其整体性较强,结构的水平向位移发展受限,故结构的风致振动分析需主要关注其竖向振动。

表1 50 m跨双层索系结构前3阶振型及频率

Table 1 First 3 orders of vibration pattern and frequency of 50m span double-layer cable system structure			
阶数	周期/s	频率/Hz	自振模态
1	1.597	0.626	
2	1.299	0.770	
3	0.978	1.022	

### 2.2 风振响应分析

脉动风速谱可由风功率谱和相干函数等概率性特征描述,其中风功率谱与脉动风能量在频域上的分布有关,相干函数与脉动风的空间相关性有关,采用Davenport谱作为脉动风功率谱<sup>[14]</sup>。当纵向长度较大时,结构各个部分所承受的风荷载并不完全一致,需要考虑空间相关性。考虑到双层索系结构模拟点距离较近,其相关性强,采用Shiotani经验公式<sup>[15]</sup>作为相干函数。

对于50 m跨的双层索系结构,分别取结构横向12.5 m处点A和37.5 m处点B进行风荷载模拟,随机生成的脉动风速模拟结果如图5所示。从图中可以看出,尽管A点和B点的脉动风速谱总体比较相似,仍存在



一定的差别。目标谱与模拟谱的功率谱对比结果如图6所示,可以看出二者吻合良好。

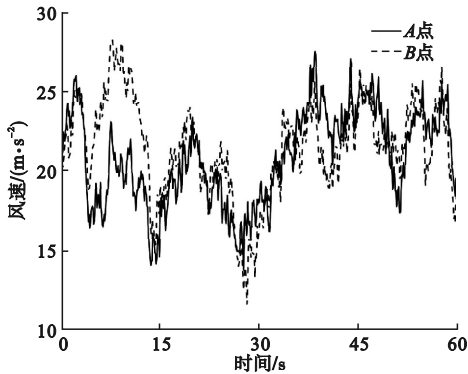


图5 A、B 两点的模拟脉动风速谱

Fig. 5 Wind speed spectra at points A and B

利用伯努利公式将随机生成的风速时程转换成风压时程,将换算后的风压以线荷载的形式施加到上层索上,对50 m 跨度双层索系柔性光伏支架结构进行动力分析,风压和风吸工况下的计算结果分别如图7和图8所

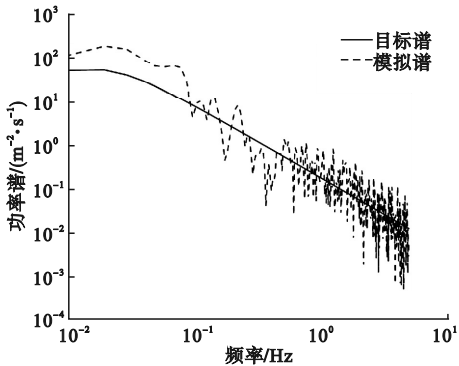


图6 目标谱与模拟谱对比

Fig. 6 Comparison of target and simulated spectra

示。从图中可以看出,在风压工况下,下层索索力远大于上层索,且索力变化幅度较大,横向连接系处与跨中处的挠度与加速度响应较为接近;在风吸工况下,下层索出现松弛,且索力变化幅度较大,横向连接系处和跨中处的挠度响应比较接近,跨中处的加速度响应较为显著。

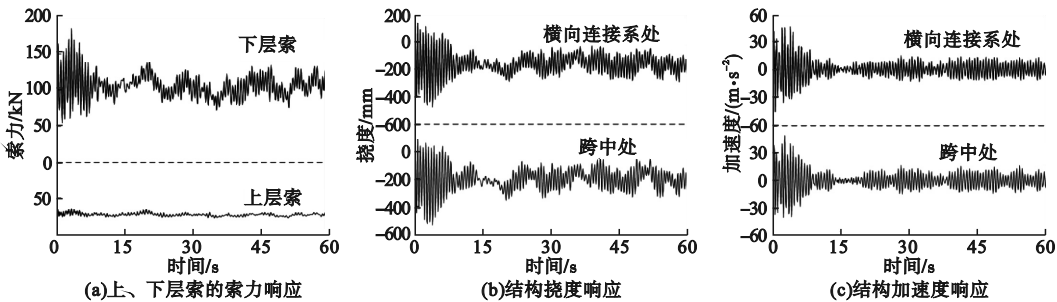


图7 风压工况下50 m 双层索系结构动力响应

Fig. 7 Dynamic response of 50 m double-layer cable system structure under wind-pressure condition

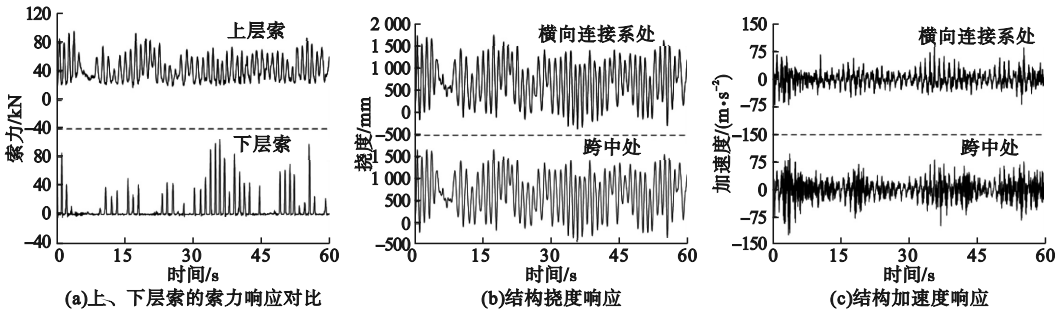


图8 风吸工况下50 m 双层索系结构动力响应

Fig. 8 Dynamic response of 50m double-layer cable system structure under wind suction condition

2.3 风振系数

风振系数一般指风荷载总响应与平均风

响应的比值,其中风荷载总响应包含脉动风与平均风的响应,风振系数 $\beta_z$ 可按式(1)

计算<sup>[16]</sup>:

$$\beta_z = \frac{Y_s + Y_d}{Y_s} = 1 + \frac{Y_d}{Y_s} = 1 + \frac{g \times \sigma_i}{Y_s} \quad (1)$$

式中: $Y_s$  为平均风引起的响应; $Y_d$  为脉动风引起的响应, $Y_d = g \times \sigma_i$ ,其中  $\sigma_i$  为该点响应的均方差,  $g$  为对应的峰值因子, 取为  $3.0^{[17]}$ 。

10 组不同风压时程下 50 m 跨双层索系结构的风振系数计算结果见表 2,表中  $\beta_{z1}$  为索力风振系数, $\beta_{z2}$  为位移风振系数。对 10 组风压时程的模拟结果取平均值,风压工况下  $\beta_{z1}$  和  $\beta_{z2}$  平均值分别为 1.99 和 2.38,风吸工况下  $\beta_{z1}$  和  $\beta_{z2}$  平均值分别为 3.58 和 2.50。由风振响应分析可知,风压工况的下层索索力远大于风吸工况,此时索力在结构设计中起控制作用,而风吸工况的结构挠度远大于风压工况,此时挠度在结构设计中起控制作用。因此,可以取风压工况的  $\beta_{z1}$  和风吸工况下的  $\beta_{z2}$  作为结构风振系数的建议值,在结构未设置稳定索的情况下,50 m 跨双层索系结构风振系数建议取为 1.8~2.7。

表 2 50 m 双层索系结构风振系数

Table 2 Wind vibration coefficients of 50 m double-layer cable system structure

时程	风压工况		风吸工况	
	$\beta_{z1}$	$\beta_{z2}$	$\beta_{z1}$	$\beta_{z2}$
时程 1	2.05	2.50	3.51	2.72
时程 2	1.92	2.33	3.86	2.64
时程 3	1.89	2.20	3.00	2.43
时程 4	2.05	2.47	3.75	2.53
时程 5	2.04	2.40	4.02	2.58
时程 6	2.03	2.47	3.31	2.35
时程 7	1.91	2.27	3.31	2.48
时程 8	1.98	2.33	3.69	2.36
时程 9	2.07	2.52	3.82	2.54
时程 10	1.95	2.27	3.53	2.31

3 结构设计关键参数分析

3.1 结构跨度影响

由上述结构静力与动力响应分析可知,

双层索系结构在风吸工况下的响应比较显著,因此采用风吸工况对结构进行分析。以 5 m 为增量,共建立 20~50 m 跨度的 7 个双层索系结构模型,分析得到风吸工况下结构的动力响应随跨度的变化情况,结果如图 9 所示。从图中可以看出,随着结构跨度的增加,结构跨中挠度响应明显增大,50 m 跨模型的挠度幅值约为 20 m 跨模型的 3 倍;上层索的索力响应也随跨度的增加而逐渐增大,且 50 m 跨模型的索力幅值约为 20 m 跨模型的 1.5 倍。

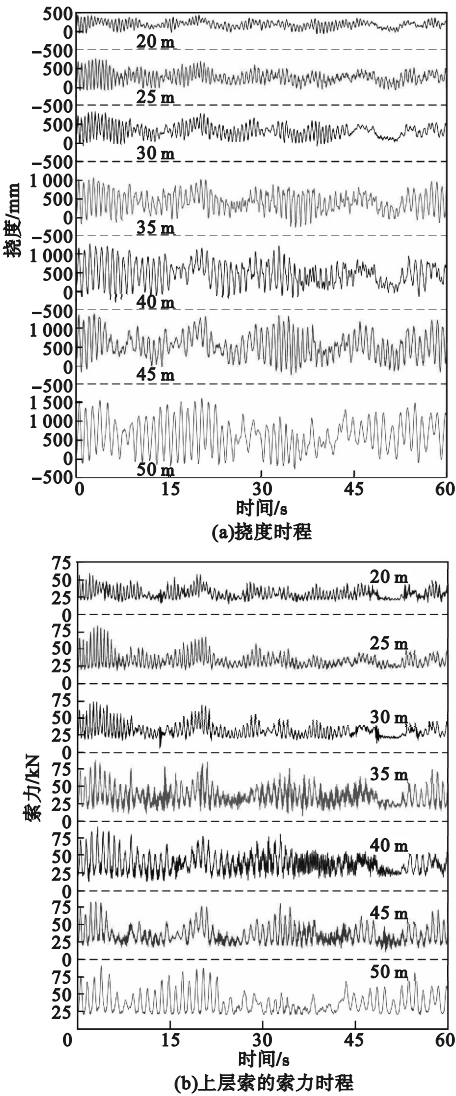


图 9 不同跨度下双层索系结构动力响应  
Fig. 9 Dynamic response of double-layer cable system structure with different spans

3.2 横向连接系间距影响

以 50 m 跨双层索系结构模型为对象,设置 4 种不同的横向连接系间距 (5 m、7 m、12.5 m、25 m), 分析结果如图 10 所示。从图中可以看出,随着横向连接系间距的增大,

风吸和风压工况下的跨中挠度均增大,风压工况的上层索索力随之增大,下层索索力稍有减小,而风吸工况的上层索索力先略有增大后基本不变,下层索处于松弛状态。

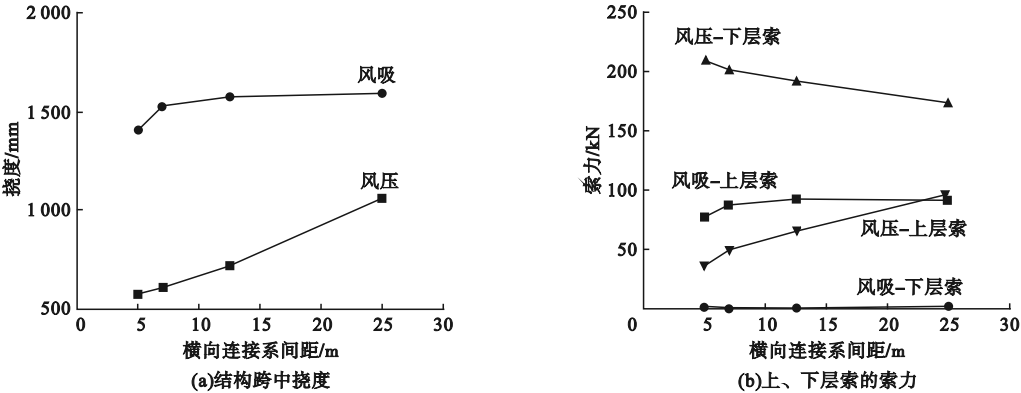


图 10 横向连接系间距的影响

Fig. 10 Influence of the spacing of horizontal connection system

不同横向连接系间距时在风吸工况下的动力计算结果如图 11 所示。从图中可以看出,随着横向连接系间距增大,结构跨中挠度幅值以及响应均明显增大,且上层索的索力

也明显增加。与横向连接系间距为 25 m 的计算结果相比,当横向连接系间距为 5 m 时,结构跨中挠度响应幅值和上索索力幅值分别减小了 23.6% 和 15.2%。

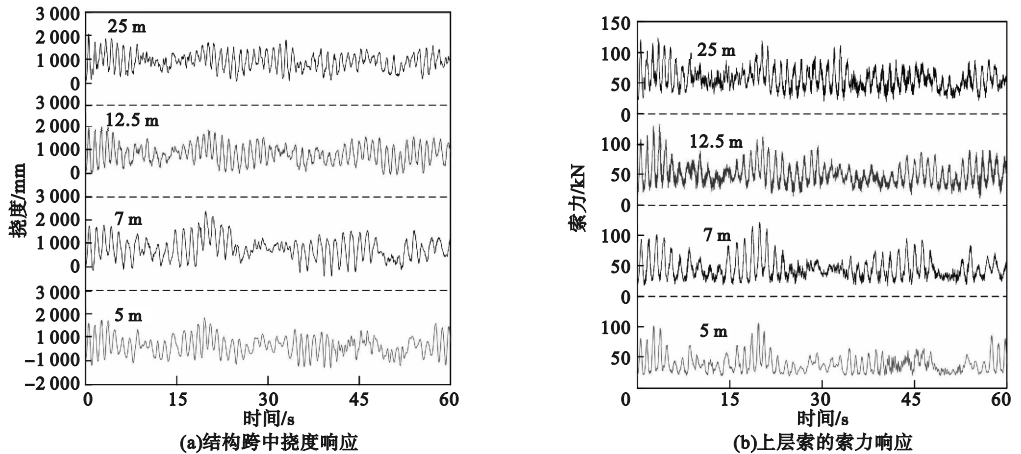


图 11 横向连接系间距对结构动力响应的影响

Fig. 11 Effect of spacing of horizontal connection system on dynamic response of structure

3.3 初始预拉力影响

以 10 kN 为增量,对 50 m 跨双层索系结构模型的上层索施加 20 ~ 70 kN 的初始预拉力,风吸工况下的 6 组计算结果如图 12 所示。从图中可以看出,随着上层索初始预拉力的增大,结构跨中挠度明显减小,上层索的

索力增大,但变化幅度减小。当上层索的初始预拉力超过 60 kN 后,继续增大上层索的预拉力对于减小跨中挠度的效果不明显,而索力却大幅增长。

以 5 kN 为增量,对 50 m 跨双层索系结构模型的下层索施加 3 ~ 28 kN 的初始预拉

力,由于风吸工况的下层索处于松弛状态,故采用风压工况进行计算,6组计算结果如图13所示。从图中可以看出,下层索初始预拉力

力设置过大时,会使得结构跨中出现较大的向上反拱变形,且导致结构跨中挠度和下层索的索力响应明显增大。

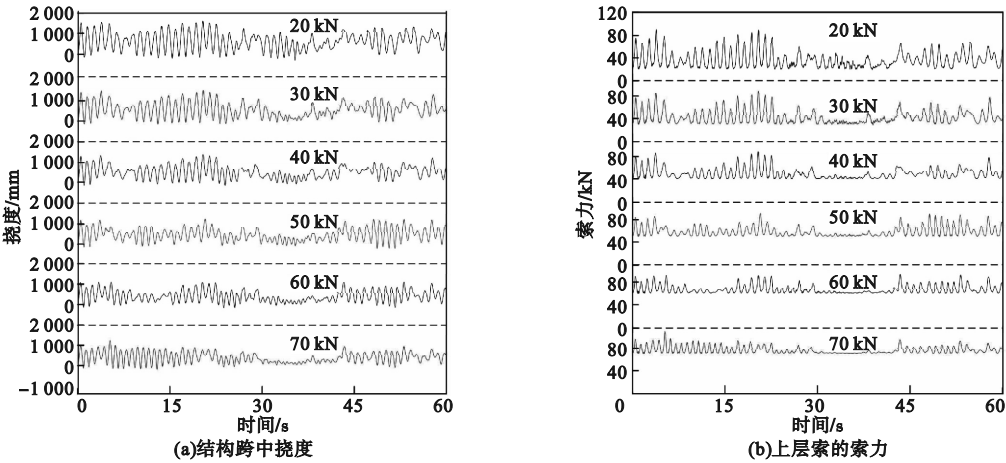


图 12 风吸工况的上层索初始预拉力影响

Fig. 12 Influence of pre-tension of upper-layer cables for wind suction condition

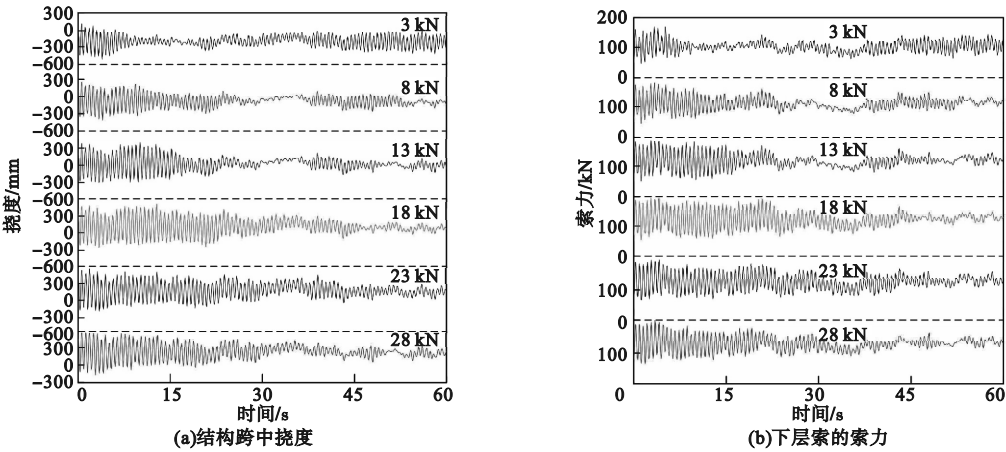


图 13 风压工况的下层索初始预拉力影响

Fig. 13 Influence of prestressing of lower-layer cable for wind pressure condition

4 结 论

- (1) 对不同跨度的双层索系柔性光伏支架进行静力分析,随着双层索系结构跨度的增加,下层索初始预拉力和索径均随跨度呈近似阶梯状增长,同时风吸工况的结构下层索处于松弛状态。
- (2) 开展了双层索系结构的动力特性与动力响应分析,研究表明结构以竖向振型为主,风吸工况的挠度和加速度响应大于风压工况,而风压工况的索力响应大于风吸工况。

- (3) 完成了 50 m 跨双层索系结构的风振系数计算分析,可以取风压工况的索力风振系数和风吸工况的位移风振系数作为结构风振系数的建议值,在未设置稳定索的情况下,结构风振系数建议取值为 1.8~2.6。
- (4) 随着双层索系结构跨度增大,结构挠度、索力及风振响应明显增大;随着横向连接系间距增大,结构跨中挠度及上层索的索力明显增大;增大上层索的初始预拉力有利于减小结构的动力响应,而下层索的初始预拉力设置过大会使得结构出现反拱,导致风振响应增大。



## 参考文献

- [1] 袁焕鑫,杜新喜,赵春晓,等. 柔性光伏支架关键技术研究[R]. 中国电机工程学会专题技术报告 2022,北京:中国电力出版社,2023.  
(YUAN Huanxin, DU Xinxi, ZHAO Chunxiao, et al. The research of key technologies of flexible photovoltaic brackets [R]. Technical reports on selected topic of CSEE 2022, Beijing: China Electric Power Press, 2023.)
- [2] 高亮,窦珍珍,白桦,等. 光伏组件风荷载影响因素分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 1931-1937.  
(GAO Liang, DOU Zhenzhen, BAI Hua, et al. Analysis of influence factors for wind load of PV module [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(8): 1931-1937.)
- [3] 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.)
- [4] 马文勇,柴晓兵,马成成. 柔性支撑光伏组件风荷载影响因素试验研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 10-18.  
(MA Wenyong, CHAI Xiaobing, MA Chengcheng. Experimental study on wind load influencing factors of flexible support photovoltaic modules [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(11): 10-18.)
- [5] 王泽国,赵菲菲,吉春明,等. 多排大跨度柔性光伏支架的振动控制研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(增刊1): 29-34.  
(WANG Zeguo, ZHAO Feifei, JI Chunming, et al. Analysis of vibration control of multi-row large-span flexible photovoltaic supports [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2020, 53(S1): 29-34.)
- [6] 王泽国,赵菲菲,吉春明,等. 多排多跨柔性光伏支架的风致振动分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(增刊2): 75-79.  
(WANG Zeguo, ZHAO Feifei, JI Chunming, et al. Wind-induced vibration analysis of multi-row and multi-span flexible photovoltaic support [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2021, 53(S2): 75-79.)
- [7] 杜航,徐海巍,张跃龙,等. 大跨柔性光伏支架结构风压特性及风振响应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 67-74.  
(DU Hang, XU Haiwei, ZHANG Yuelong, et al. Wind pressure characteristics and wind vibration response of long span flexible photovoltaic support structure [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2022, 54(10): 67-74.)
- [8] 宋慧铭,袁焕鑫,杜新喜,等. 单层索系柔性光伏支架静力与动力响应研究[J/OL]. 建筑结构 [2023-09-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2833.TU.20230913.1607.003>.  
(SONG Yiming, YUAN Huanxin, DU Xinxi, et al. Research on static and dynamic response of single layer flexible photovoltaic support structure [J/OL]. Building structure [2023-09-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2833.TU.20230913.1607.003>.)
- [9] HE X H, DING H, JING H Q, et al. Wind-induced vibration and its suppression of photovoltaic modules supported by suspension cables [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2020, 206: 104275.
- [10] HE X H, DING H, JING H Q, et al. Mechanical characteristics of a new type of cable-supported photovoltaic module system [J]. Solar energy, 2021, 226: 408-420.
- [11] DING H, HE X H, JING H Q, et al. Design method of primary structures of a cost-effective cable-supported photovoltaic system [J]. Applied sciences, 2023, 13(5): 2968.
- [12] LIU J Q, LI S Y, LUO J, et al. Experimental study on critical wind velocity of a 33-meter-span flexible photovoltaic support structure and its mitigation [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2023, 236: 105355.
- [13] 马文勇,柴晓兵,高飞,等. 风荷载作用下柔性光伏支撑索轴力分析[J]. 振动·测试与诊断, 2023, 43(2): 271-276.  
(MA Wenyong, CHAI Xiaobing, GAO Fei, et al. Axial force analysis of flexible cable supported photovoltaic under wind load [J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2021, 2023, 43(2): 271-276.)
- [14] 杨永清,冯睿为,黄坤,等. 风缆系统对管线悬索桥动力特性的影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(6): 981-989.  
(YANG Yongqing, FENG Ruiwei, HUANG Kun, et al. Impacts of the wind-cable system on dynamic characteristics of the pipeline suspension bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(6): 981-989.)
- [15] 阎石,郑伟. 简谐波叠加法模拟风谱[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(1): 1-4.  
(YAN Shi, ZHENG Wei. Wind load simulation by superposition of harmonic [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2005, 21(1): 1-4.)
- [16] 郭涛,杨渊茗,黄国强,等. 山区峡谷地形下柔性支撑光伏阵列的风振特性研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 131-140.  
(GUO Tao, YANG Yuanming, HUANG Guoqiang, et al. Wind-induced vibration analysis of flexible photovoltaic support structure under mountain canyon terrain [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(11): 131-140.)
- [17] 陆锋. 大跨度平屋面结构的风振响应和风振系数研究[D]. 杭州:浙江大学, 2002.  
(LU Feng. Study on wind-induced dynamic response and wind load factor for long-span flat roof structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)