文章编号:1674-2974(2024)05-0106-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024052

不同布置形式平单轴光伏支架颤振性能研究

牛华伟[1†],陈权[1],姜东[2],李红星[2]
(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司,陕西 西安 710075)

摘 要:对1V和2V两类不同布置形式平单轴光伏支架开展缩尺比为1/6的弹性悬挂节段模型测振风洞试验,研究了倾角(-60°~60°)、阻尼水平和光伏组件之间有无间隙对结构颤振性能的影响.结果表明:1V在-30°~30°倾角下发生明显的扭转颤振,2V在±10°、±20°和±30°时发生明显的扭转颤振;对于两类支架,结构颤振临界无量纲风速随倾角绝对值的增大先减小后增大,最大差值超过3.87倍(1V)和2.45倍(2V),且相同工况下,负倾角颤振性能优于正倾角;建议选择0°作为结构大风保护角度;1V和2V结构颤振性能随阻尼比的增大而提升,但和2V相比1V颤振性能提升对于阻尼比更不敏感;光伏组件之间的间隙对结构颤振性能基本无影响.

关键词:平单轴光伏支架;风洞试验;颤振;倾角;阻尼比;间隙
中图分类号:TU352.2;TU375.4 **文献标志码**:A

Study on Flutter Performance of Flat Single-axis Tracking Photovoltaic in Different Arrangement Forms

NIU Huawei[1†], CHEN Quan[1], JIANG Dong[2], LI Hongxing[2]
(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Northwest Electric Power Design Institute Co. Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: Through the wind tunnel test by section models with a scale ratio of 1/6 for the 1V and 2V flat single-axis tracking photovoltaic, the influences of inclination angles (-60° to 60°), damping level, and gap between photovoltaic modules on the wind vibration characteristics of the structure are investigated. Results indicate that 1V exhibits obvious torsional flutter at inclination angles from -30° to 30°, while 2V exhibits such flutter at ±10°, ±20°, and ±30°; when the absolute value of inclination angles is increased for the two types of photovoltaic, the critical dimensionless wind speed of structural flutter first decreases and then increases; the maximum difference exceeds 3.87 times (1V) and 2.45 times (2V), and under identical operating conditions, the negative inclination angles perform better than the positive inclination angles on the flutter; it is recommended to set 0° as the wind protection angle of the structure; when the damping ratio is increased, both 1V and 2V's flutter performance improve, although 1V's improvement in flutter performance is less sensitive to damping than 2V's. The gaps between photovoltaic modules have virtually no effect on the flutter performance of the structure.

* **收稿日期**:2023-05-17
基金项目:国家自然科学基金面上项目(52178477),National Natural Science Foundation of China(52178477)
作者简介:牛华伟(1978—),男,河南驻马店人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: niuhw@hnu.edu.cn

Key words:flat single-axis tracking photovoltaic;wind tunnel test;flutter;inclination angle;damping ratio;gap

平单轴光伏支架可根据太阳光照实时调整倾角,相比于固定式支架,发电量可提高大约20%~40%[1],市场应用占比较高.但该类支架扭转刚度很小,扭转频率低,对风荷载十分敏感,现场以及边界层风洞试验中均有发现平单轴光伏支架颤振现象.

众多学者对该类支架风荷载和风致振动等问题进行了一系列的试验与理论分析研究.Giovanni 等[2]采用CFD方法评估了地面平单轴太阳能光伏板阵列的平均风荷载.Chu 等[3]通过风洞试验研究了风向、倾角、结构布置高度、屋顶女儿墙高度、相邻建筑物等因素对于安装在平顶建筑顶部的平单轴支架风荷载影响.邹云峰等[4]通过刚性模型测压风洞试验,得到平单轴光伏结构在典型倾角和风向角下的表面风压分布,并将实验得到的风荷载与参考不同规范计算得到的风荷载进行比较.Kurt 等[5]认为固有频率高于1 Hz的平单轴光伏支架,也应考虑其自激和抖振效应.Eva 等[6]通过分析和试验研究了惯性参数、长宽比、扭矩管刚度对平单轴光伏支架颤振的影响.马文勇等[7]通过弹性悬挂节段模型,研究了倾角、气动阻尼、气动刚度等参数对平单轴光伏支架扭转气动失稳的影响.周承军等[8]通过理论分析、数值模拟与风洞试验,得出跟踪式光伏支架大风保护角度为0°的结论.Ayodeji 等[9]和 Shademan 等[10]的研究表明,光伏组件之间的间隙对光伏组件表面的风压分布有着重要的影响.

平单轴光伏支架的颤振对结构有着巨大的破坏作用,需要进行重点关注.为完善平单轴光伏支架颤振性能研究内容,以1V和2V两类不同布置形式的平单轴光伏支架为研究对象,进行缩尺比为1/6的弹性悬挂节段模型风洞测振试验,研究倾角、阻尼水平和光伏组件之间间隙对结构颤振性能的影响.

1　工程背景

按照光伏行业常用命名方式,沿结构侧向布置1块光伏组件的平单轴光伏支架称为1V,沿结构侧向布置2块光伏组件的称为2V,其典型截面如图1所示.

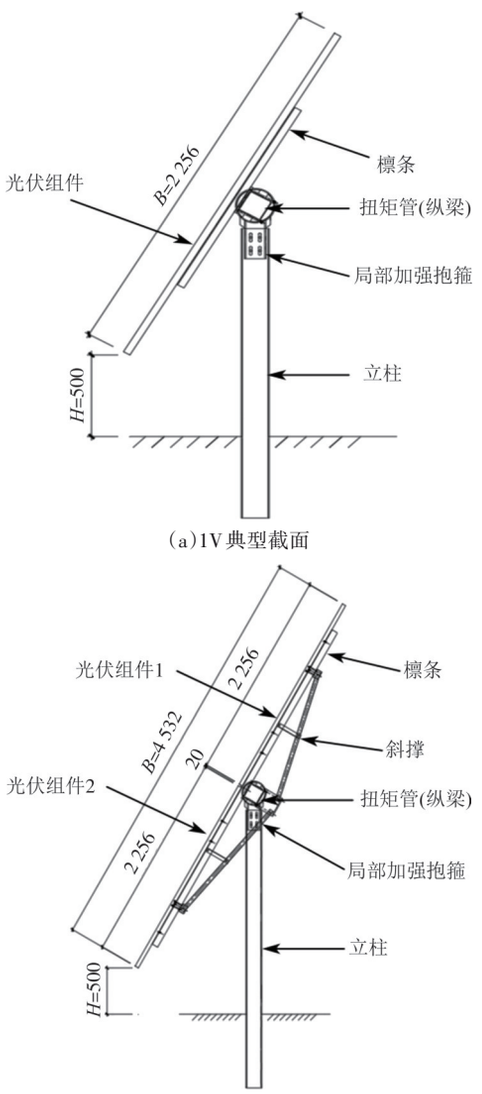


图1　平单轴光伏支架典型截面(单位:mm)

Fig. 1　Typical cross-section of flat single-axis tracking photovoltaic(unit:mm)

1V全长 L=89.872 m,宽度 B=2.256 m,结构合计78块光伏组件,单块光伏组件长 L_1=2.256 m,宽 B_1=1.133 m,厚 T=0.04 m;结构由光伏组件、檩条、扭矩管与下部立柱构成.2V结构全长 L=44.294 m,结构宽度 B=4.532 m,结构合计39块光伏组件,光伏组件尺寸与1V相同.与1V不同的是,由于侧向布置有2块光伏组件,为了提高结构扭转刚度,在扭矩管与光伏组件之间设置了斜撑.平单轴光伏支架工作时,驱动装

置做功使得光伏组件绕着扭矩管转动,以达到实时调整结构倾角获得更多太阳辐射的目的.1V 和2V 工作倾角α范围为-60°~60°,倾角示意如图2所示.



(a)正倾角 (b)负倾角

图2 倾角定义示意

Fig. 2 The definition of inclination angle

2 试验概述

2.1 试验模型

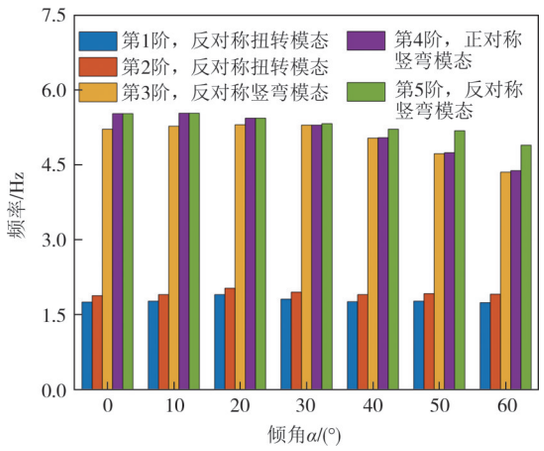
利用有限元软件ANSYS建立1V和2V不同倾角下(间隔10°)有限元模型共计14个,建模时光伏组件采用SHELL181壳单元模拟,檩条、斜撑、扭矩管、和立柱等支撑结构采用BEAM188空间梁单元模拟,各构件间的连接通过BEAM4或约束方程进行模拟.光伏支架各立柱分别与地面固结;驱动立柱(跨中位置立柱)与对应扭矩管位置刚接,其余立柱与扭矩管连接处释放沿扭矩管轴向转动自由度,约束其余方向平动与转动自由度,以实现光伏组件绕扭矩管转动.

1V和2V结构前五阶动力特性分析结果如图3所示.两类平单轴光伏支架下部结构刚度主要由通长的扭矩管提供,不同倾角下结构质量与质量惯性矩分布有一定的区别,结构的频率会有一定的差距.

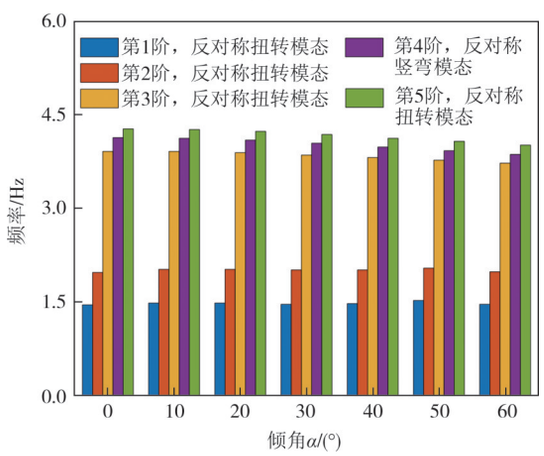
1V因结构长度更大,其动力特性受倾角的变化影响更严重.以α=0°为描述基准,1V不同倾角下结构频率最大差值为-20.65%,2V不同倾角下结构频率最大差值为-6.54%(前五阶对比).但不同倾角下,结构各阶模态对应的振型基本一致.

以α=60°为例:1V和2V扭转刚度较小,最先出现的均为扭转模态,两类平单轴光伏支架第1阶扭转模态和竖弯模态分别如图4和图5所示.

1V第1阶扭转模态和竖弯模态频率分别为1.74 Hz和4.35 Hz,对应的等效质量和等效质量惯性矩分别为65.07 kg/m和74.31 kg·m²/m;2V第1阶扭转模态和竖弯模态频率分别为1.46 Hz和3.86 Hz,对应的等效质量和等效质量惯性矩分别为137.42 kg/m和182.48 kg·m²/m.



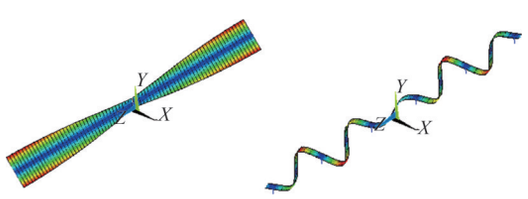
(a)1V



(b)2V

图3 1V和2V前五阶模态动力特性

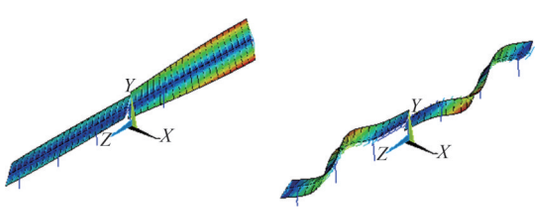
Fig.3 The dynamic characteristic of the first five modes for 1V and 2V



(a)第1阶扭转模态 (b)第1阶竖弯模态

图4 1V典型振动模态

Fig.4 Typical vibration modes of 1V



(a)第1阶扭转模态 (b)第1阶竖弯模态

图5 2V典型振动模态

Fig. 5 Typical vibration modes of 2V

参考桥梁抗风经验,选取光伏支架的主要吸能

构件(上部光伏组件及部分附属构件)即存在自激力的构件制作弹性悬挂节段模型(后续简称节段模型)开展平单轴光伏支架颤振性能研究.选取第1阶扭转和第1阶竖弯为研究模态,综合光伏支架原型尺寸、风洞阻塞比以及模型等制作因素,拟定节段模型几何缩尺比λ_L=1∶6,风速比λ_U=1∶3,计算得到频率比λ_f=2∶1.在保证几何外形相似的前提下,考虑弹性参数、惯性参数和阻尼参数的相似,选择原结构包含8块光伏组件的部分进行缩尺.α=60°时,节段模型主要设计参数见表1.

表1　节段模型参数

Tab.1　The parameters of section models

节段模型	长×宽×厚/(mm×mm×mm)	质量/(kg·m^{-1})	质量惯性矩/(kg·m)	竖弯基频/Hz	扭转基频/Hz
1V原型	9 134×2 256×40	65.07	74.31	4.35	1.74
1V节段模型	1 540×380×7	1.85	0.06	8.61	3.45
2V原型	9 204×4 532×40	137.42	182.48	3.86	1.46
2V节段模型	1 540×758×7	3.85	0.14	7.68	2.90

节段模型如图6所示,扭矩管、檩条和斜撑由不锈钢制作,檩条和斜撑通过焊接与扭矩管连成整体;光伏板由轻质木板制作,通过胶水与檩条相连.节段模型由8根对称布置的弹簧进行悬挂,可进行竖向和扭转两自由度振动,为便于调节角度,模型两侧对称设置有带螺栓孔的2块ABS板,通过调整ABS板相对位置可实现模型倾角的精准调节.



(a)1V节段模型　　(b)2V节段模型

图6　节段模型图片

Fig. 6　The pictures of section models for 1V and 2V

2.2　数据处理说明及动力特性标定

通过在模型跨中扭矩管两侧对称布置2个激光位移计测试模型上、下游的位移,模型的扭转位移计算见式(1):

$$\theta = \arctan\left(\frac{Z_1 - Z_2}{D}\right)\cdot\frac{180}{\pi} \tag{1}$$

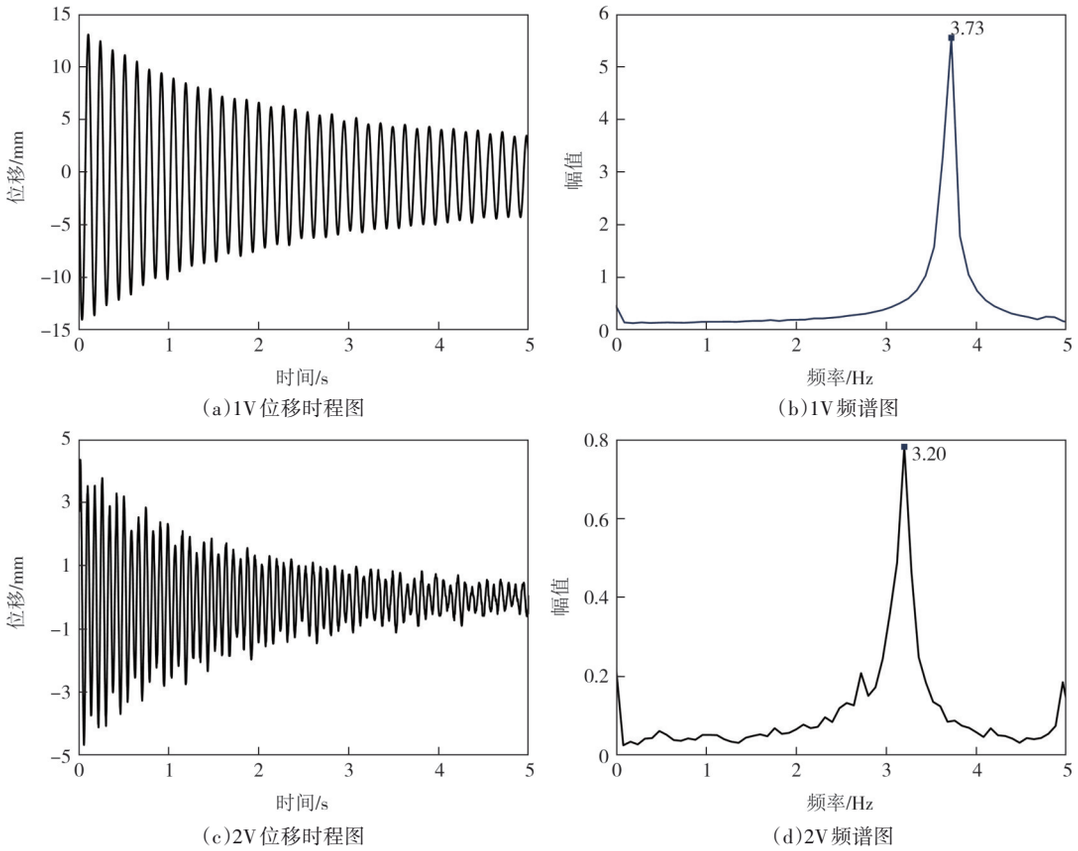
式中:θ为模型扭转角度;Z_1和Z_2为模型上、下游激光位移计测试得到的数据;D为上、下游激光位移计之间的水平距离.

为便于统一描述各工况下结构颤振性能差异,文中风速均采用无量纲风速,其定义见式(2):

$$U^* = \frac{U}{fB} \tag{2}$$

式中:U为风洞来流风速;f为结构风致振动频率,静止时f取结构一阶扭转频率f_t;B为结构宽度.

为了检验1V和2V模型的振型、频率及阻尼比,需进行模型动力特性标定.以60°倾角为例,给出对应模型扭转模态动力特性标定结果,标定中的位移时程以及频谱如图7所示.由图可知,1V和2V模型实测扭转频率分别为3.73 Hz和3.20 Hz,与表1中对应的设计值误差分别为8.12%和10.34%;1V和2V模型对应的扭转阻尼比分别为0.57%和0.79%;根据动力特性标定结果最终确定模型风速比分别为1∶2.77和1∶2.73.



(a)1V位移时程图 (b)1V频谱图

(c)2V位移时程图 (d)2V频谱图

图7 动力特性标定结果

Fig.7 Calibration results of dynamic characteristics

3 风洞试验

3.1 倾角对光伏支架颤振性能的影响

开展1V和2V不同倾角(−60°~60°,间隔10°)风致振动风洞试验测试工作,测试在湖南大学风工程试验研究中心HD−2大气边界层风洞高速试验段进行,该试验段宽3.0 m,高2.5 m,试验风速在0~58 m/s之间连续可调.

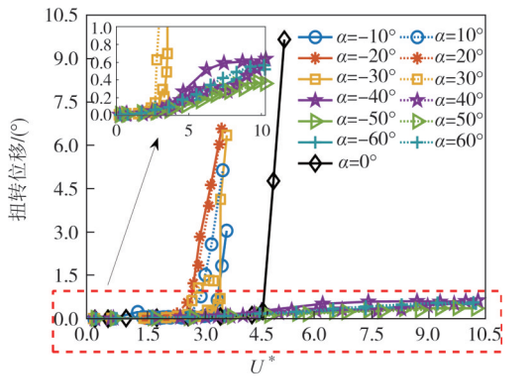
测试流场为均匀流场(后同),1V和2V系统扭转阻尼比分别为0.57%和0.79%.光伏支架各倾角下扭转位移测试结果如图8所示.测试结果表明,−30°~30°倾角范围内,1V结构扭转位移会在某个风速下突然表现出明显的发散即“硬颤振”现象,形式表现为扭转颤振.与1V类似,2V在该倾角范围内也会发生扭转颤振,不同的是α=0°时2V结构表现出极好的颤振性能.

结构颤振临界风速如图9所示,两类光伏支架气动稳定性对倾角变化十分敏感,对于1V:α=20°时结构颤振性能最差(U*=2.66),α=40°时结构颤振性能最优(U*>10.29),两者之间差距超过3.87倍.对于2V:α=30°时结构颤振性能最差(U*=2.72),α=0°时结构颤振性能最优(U*>6.66),两者之间差距超过2.45倍.

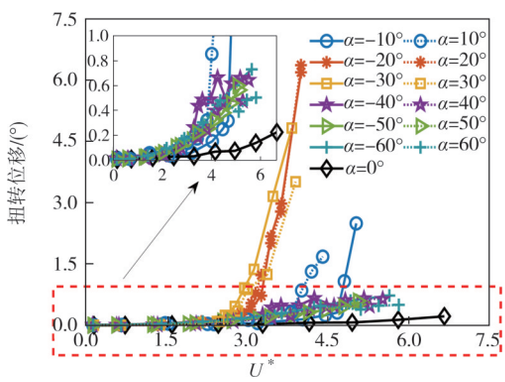
随着倾角绝对值的增大,结构颤振无量纲临界风速均呈现先减小后增大的趋势;相同工况下,负倾角颤振临界风速优于正倾角,即负倾角颤振性能更优.大倾角情况($|\alpha|>30°$),1V和2V均表现出较为优良的颤振性能,但此时,结构迎风面积较大,结构承受较大的静风荷载,综上,对于平单轴光伏支架,推荐α=0°作为结构的大风保护角度.

3.2 阻尼比对光伏支架颤振性能的影响

结构发生颤振时,结构每振动一周,自激力对结构做正功(好比荡秋千),气流对结构输送能量,结构振动会越来越大[11].阻尼可以起到耗散能量的作用,对于提高结构颤振稳定性有较好的效果.但现行光伏规范中,并未对光伏支架阻尼比进行规定,已有文献中相关研究也比较空白.故本节选取最先发生颤振的20°倾角(1V)和30°倾角(2V)进行不同阻尼比



(a)1V 测试结果



(b)2V 测试结果

图 8　光伏支架不同倾角扭转位移

Fig. 8　Torsional displacement of photovoltaic under different inclination angles

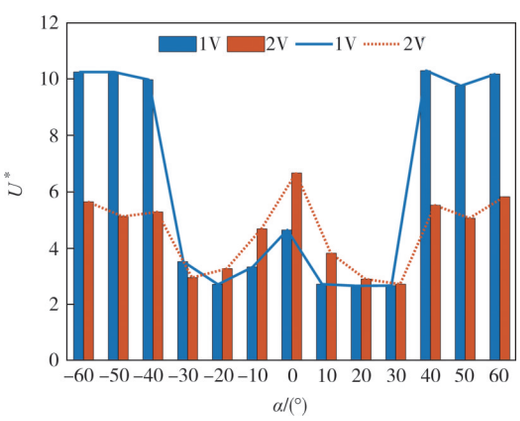


图 9　光伏支架不同倾角颤振无量纲风速

Fig. 9　Flutter dimensionless wind speeds of photovoltaic under different inclination angles

注:部分倾角在测试最大风速下仍未发生颤振,图中颤振无量纲临界风速由测试时的最大风速通过式(2)换算得到.

下测试,研究阻尼比对光伏支架颤振性能的影响.在节段模型弹簧上缠绕电工胶带为节段模型系统附加阻尼,最终调整 1V 系统扭转阻尼比分别为 0.93% 和 1.22%,2V 系统扭转阻尼比分别为 1.24% 和 1.43%.不同阻尼比下光伏支架风振测试结果如图 10 所示.

由图 10 可知,对于 1V:在阻尼比从 0.57% 变到 0.93% 和 1.22% 的过程中,光伏支架颤振临界无量纲风速 U^*分别为 2.66、2.64 和 2.67,发现结构颤振性能基本不受阻尼水平影响.对于 2V:在阻尼比从 0.79% 变到 1.24% 和 1.43% 的过程中,光伏支架颤振临界无量纲风速 U^*分别为 2.72、>3.88 和>4.58,结构颤振性能随阻尼比的增大而提升,且对阻尼比十分敏感.

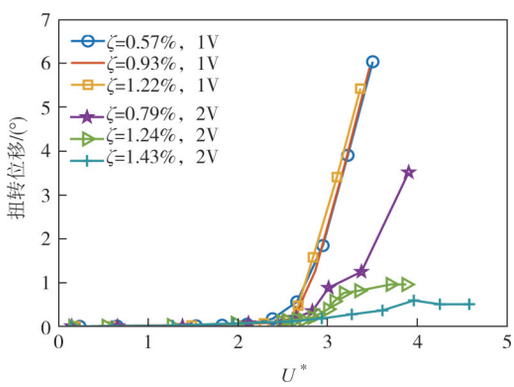


图 10　光伏支架不同阻尼比下扭转位移

Fig. 10　Torsional displacement of photovoltaic under different damping ratios

为研究高阻尼水平对 1V 颤振性能的影响,本节采用永磁式板式电涡流阻尼器[12]对节段模型系统(α=20°)附加高阻尼,然后进行风洞试验测试.试验时,可通过调整导体板与永磁体之间的气隙间距实现节段模型系统阻尼比的连续调节.布置有板式电涡流阻尼器的 1V 节段模型如图 11 所示.

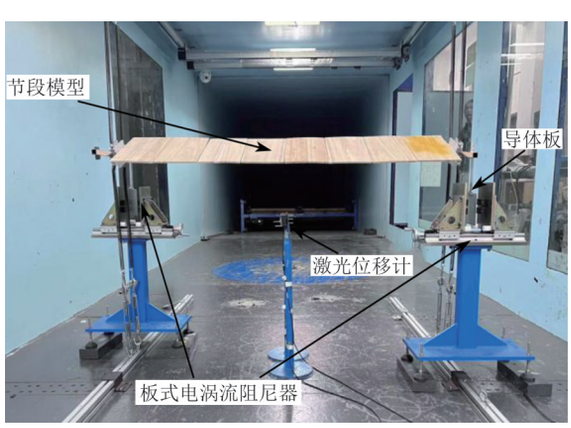


图 11　安装板式电涡流阻尼器的节段模型图片

Fig.11　The picture of section model mounting plate type eddy current damper

本节忽略导体板带来的质量变化,仅关注阻尼比变化对于结构颤振性能的影响.安装板式电涡流阻尼器后的测试结果见图 12.阻尼比从 0.68% 提高到 3.05%、4.60%、10.0% 和 20.0% 的过程中,结构颤振临界风速分别提高了 10.81%、40.84%、>214.71%

和>214.71%.综合图9可知,1V和2V结构颤振性能随阻尼比的增大而提升,但和2V相比1V颤振性能提升对于阻尼比更不敏感.

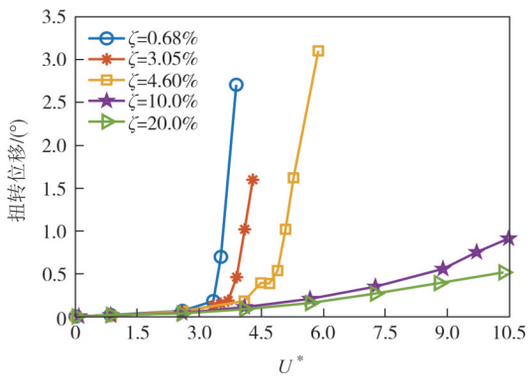


图12 1V高阻尼情况下扭转位移

Fig.12 Torsional displacement of 1V under the higher damping ratio

3.3 组件间隙对光伏支架颤振性能的影响

根据调研,各光伏电站不同类型光伏支架体系中光伏组件之间均有一定间隙.从施工与运营角度,是因为无间隙会导致光伏组件尺寸过大,安装以及后续维修养护(特别是需要更换时)比较困难;从风工程角度而言,无间隙状态会使得光伏组件承受更大的风荷载,对于结构安全不利.Ayodeji等[9]和Shademan等[10]开展了光伏组件间隙对于结构风压分布及结构周围流场影响的研究,证明了光伏组件安装间隙对于光伏支架抗风的重要性.

为研究光伏组件之间间隙对光伏支架颤振性能的影响,现用轻质止水胶带将1V各光伏组件之间间隙封闭,封闭间隙后的节段模型局部如图13所示.以α=20°为例,进行风洞试验测试,测试结果如图14所示.

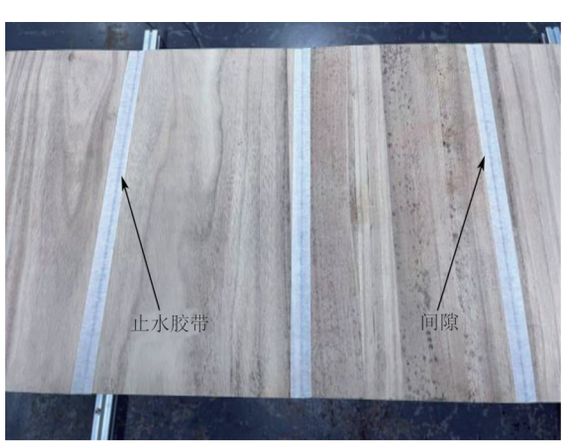


图13 1V节段模型局部

Fig.13 The part of the section model of 1V

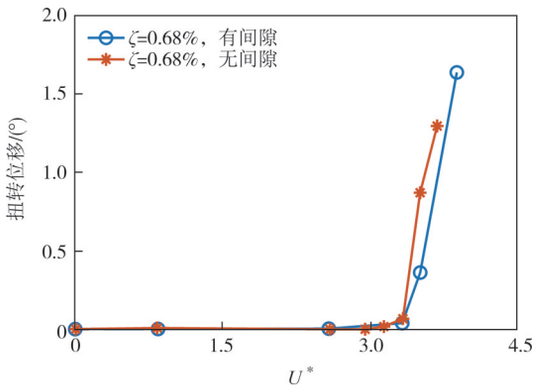


图14 有无间隙1V扭转位移

Fig.14 Torsional displacement of 1V with or without gap between modules

与预测的结果一致,封闭光伏组件之间的间隙会导致结构承受更大的风荷载,进而无间隙状态结构风致振动位移较之有间隙状态更大.从测试结果看来,封闭间隙前后结构颤振无量纲临界风速均为3.34,有无间隙对于光伏支架颤振性能基本无影响.综上,在光伏支架开展抗风研究时,对于是否考虑光伏组件之间的间隙需要就研究重点慎重决定.

4 结 论

通过弹性悬挂节段模型,研究了1V和2V两类不同布置形式平单轴光伏支架不同倾角下结构颤振性能,并讨论了阻尼水平和光伏组件之间有无间隙对结构颤振性能的影响,有如下结论:

1)不同倾角下,平单轴光伏支架颤振性能有较大的差距.1V会在−30°~30°倾角下发生明显的扭转颤振,2V会在±10°、±20°和±30°时发生明显的扭转颤振,其颤振临界风速最大差值超过3.87倍(1V)和2.45倍(2V).

2)相同工况下,平单轴光伏支架负倾角颤振性能优于正倾角.

3)对于1V和2V两类平单轴光伏支架,结构颤振临界无量纲风速随倾角绝对值的增大呈现先减小后增大的规律,综合考虑结构承受风荷载大小及结构颤振性能,建议选择0°倾角作为结构大风保护角度.

4)1V和2V结构颤振性能随阻尼比的增大而提升,但和2V相比1V颤振性能提升对于阻尼比更不敏感.

5)封闭光伏组件之间的间隙对于平单轴光伏支架颤振性能基本无影响,但结构风致振动响应会变大.

参考文献

[1] 曾珍珍. 光伏发电系统最大发电量的智能控制[D]. 上海:东华大学,2016.
ZENG Z Z. Intelligent control for maximum generating capacity of PV power generation system [D]. Shanghai: Donghua University, 2016. (in Chinese)

[2] GIOVANNI P R, GIULIANO D S. Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel arrays [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2017, 170: 283-293.

[3] CHU C R ,TSAO S J. Aerodynamic loading of solar trackers on flat-roofed buildings [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2018, 175: 202-212.

[4] 邹云峰, 李青婷, 殷梅子,等. 跟踪式光伏结构风荷载规范规定值与风洞试验值对比[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 1331-1340.
ZOU Y F, LI Q T, YIN M Z, et al. Comparison of wind load standard values of tracking photovoltaic (PV) structure with wind tunnel test values[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(4): 1331-1340. (in Chinese)

[5] KURT S, DAVID B. Effects of vortex shedding in arrays of long inclined flat plates and ramifications for ground-mounted photovoltaic arrays [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 133: 146-149.

[6] EVA M G , EDUARDO B M, JORGE P G, et al. Influence of inertia and aspect ratio on the torsional galloping of single-axis solar trackers[J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112682.

[7] 马文勇, 康霄汉, 张晓斌, 等. 均匀流场下平单轴光伏支架扭转气动失稳特征试验研究[J/OL]. 振动工程学报: 1-10(2022-11-25)[2023-05-17]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20221124.1727.002.html.
MA W Y, KANG X H, ZHANG X B, et al. Experimental investigation on the torsional aerodynamic instability characteristics of single-axis PV trackers in smooth flow [J/OL]. Journal of Vibration Engineering: 1-10(2022-11-25)[2023-05-17]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20221124.1727.002.html.(in Chinese)

[8] 周承军,陈亮,陈创修,等. 平单轴光伏支架在大风保护状态时的最佳倾角研究[J]. 太阳能,2019(7): 52-59.
ZHOU C J, CHEN L, CHEN C X, et al. Study on the optimal inclination angle of flat single-axis photovoltaic in high wind protection state[J]. Solar Energy,2019(7): 52-59. (in Chinese)

[9] 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.

[10] SHADEMAN M, BARRON R M, BALACHANDAR R, et al. Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2014, 41: 728-738.

[11] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 86-87.
CHEN Z Q. Bridge wind engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 86-87. (in Chinese)

[12] 黄智文, 马伟猛, 华旭刚, 等. 一种用于风洞节段模型的永磁电涡流阻尼连续调节装置:CN215414303U[P]. 2021-01-18.
HUANG Z W, MA W M, HUA X G. A permanent magnet eddy current damping continuous adjustment device for wind tunnel section model: CN215414303U[P]. 2021-01-18. (in Chinese)