

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.114



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



塔式光热电站定日镜结构风致响应与 振动控制研究综述

廖驰, 钟杰, 戴靠山, 刘仰昭

(四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室; 建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要:光热发电技术是太阳能利用的重要手段之一,其中,塔式光热发电技术因其大规模储能等优势,具有较好的应用前景。定日镜作为塔式光热电站的重要单元,其抗风安全性直接影响电站的正常运行。从结构体系、风荷载、风致响应与振动控制等方面对定日镜结构抗风设计中的关键问题进行文献综述,得到以下结论:定日镜主要采用“大尺寸反射镜+框式镜架+独立柱式基座”的结构形式;风荷载模拟中存在定日镜的尾迹区湍流分析困难、镜体峰值荷载难以预测及缺乏实测值验证等问题;风致响应受来流风湍流强度、定日镜工作角度及镜场布置等因素影响较大;风致振动控制可通过挡风墙物理隔离、调整定日镜结构形式以及采用减振器控制等技术手段实现。然而,镜群风干扰效应、来流风-定日镜结构流固耦合及微振控制技术的研究有待进一步开展,以期为提高定日镜结构的抗风安全性提供技术依据。

关键词:定日镜;结构体系;风荷载;风致响应;振动控制

中图分类号:TU391;TK513.1 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2023)02-0166-13

A state-of-the-art review of wind-induced response and vibration control of heliostat structures in concentrated solar power plants

LIAO Chi, ZHONG Jie, DAI Kaoshan, LIU Yangzhao

(Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Ministry of Education; College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China)

Abstract: Solar thermal energy technology is one of the important means of solar energy utilisation, among which tower solar thermal energy technology has advantages such as large-scale energy storage and has good application prospects. As an important unit of a tower solar thermal power plant, the wind safety of the heliostat directly affects the normal operation of the plant. This paper presents a literature review of the key issues in the wind resistance design of heliostats in terms of structural system, wind loads, wind induced response and vibration control, etc. The following conclusions are obtained: Heliostats mainly adopt the structural form of

收稿日期:2021-01-08

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(YJ202031)

作者简介:廖驰(1996-),男,主要从事能源基础设施振动控制研究,E-mail:lliaochi@163.com。

钟杰(通信作者),男,副研究员,E-mail:zhjehit@scu.edu.cn。

Received:2021-01-08

Foundation item: Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. YJ202031)

Author brief: LIAO Chi (1996-), main research interest: energy infrastructure vibration control, E-mail: lliaochi@163.com.

ZHONG Jie (corresponding author), associate professor, E-mail: zhjehit@scu.edu.cn.

“large size reflector + frame mirror frame + monopole base”; The wind load simulation has problems such as difficulties in analyzing the turbulence in the wake of the heliostat, difficulty in predicting the peak load of the mirror and lack of verification of the measured values; Wind-induced response is strongly influenced by the turbulence intensity of the incoming wind, the working angle of the mirror and the layout of the mirror field, etc.; Wind vibration control can be achieved by the physical isolation of the wind barrier, adjustment of the mirror structure and the use of vibration damper control. However, further research is needed on the effects of wind disturbance in mirror groups, fluid-structure coupling of incoming wind and mirror structures and micro-vibration control techniques, in order to provide a technical basis for improving the safety of mirror structures against wind.

Keywords: heliostat; structural system; wind load; wind-induced response; vibration control

“十四五”时期,中国经济社会发展开创了新的局面,能源行业转向高质量发展阶段,随着碳中和概念的提出,绿色低碳能源技术将成为主流^[1]。太阳能是总量最为丰富的绿色能源,在众多太阳能发电技术中,塔式太阳能光热发电技术又因电力稳定、支持调峰等优势^[2],极具商业开发潜力。图1为塔式光热发电系统示意图^[3]。

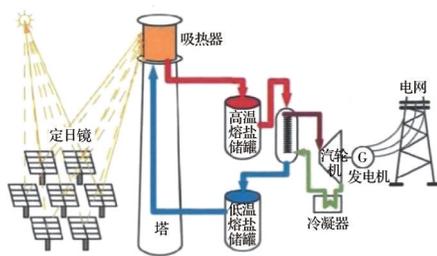


图1 塔式太阳能热发电系统示意图^[3]

Fig. 1 Schematic diagram of tower solar thermal power generation system

定日镜作为塔式光热电站的基本光学单元,成本约占整个电站的40%~50%^[4],其本质是安装在支撑结构上的一种聚焦型反射镜,主要通过机械驱动的方式汇聚太阳能并使之反射进入吸热器。由于定日镜的风敏感性,理想布置位置应在年均风速、最大风速相对较小的地区^[5]。但受限于辐射量与场地大小等条件,镜场通常位于空旷的荒漠、戈壁等区域^[6],结构受风荷载影响较大,设计时需要通过合理的结构选型和振动控制加强定日镜的抗风能力,从而降低运维成本、提高综合经济效益。

鉴于此,针对定日镜的结构体系、风荷载、风致响应及振动控制等关键问题进行综述,为定日镜的抗风设计提供参考。

1 定日镜结构体系

定日镜主要由反射镜、跟踪控制系统和支撑结构组成,对传统定日镜而言,支撑结构通常包括扭矩管、镜架和基座,如图2所示。当定日镜处于工作状态时,跟踪控制系统根据计算机对阳光入射角的判别,驱动镜架与扭矩管绕其中心轴旋转,实现高度角的变化,同时,上部结构绕基座中心轴旋转,实现方位角的变化。定日镜的总体性能要求满足镜面平整、机械强度高及聚光能力强等特性^[5],在结构选型时,通常将风荷载作为控制荷载^[7],以降低建造成本和提高镜场效率为目标对反射镜与支撑结构进行选型。

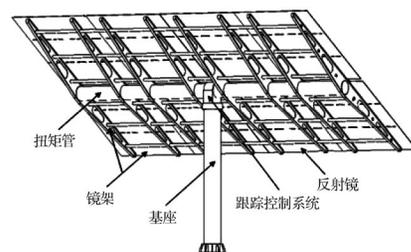


图2 定日镜结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heliostat structure

1.1 反射镜

现有商业化电站采用的定日镜多为超白玻璃反射镜,厚度一般为2 mm以上,镀银层作为反射层,后加铜层和保护漆用以过渡和保护^[8]。设计时按镜面尺寸将定日镜分为小型镜面(10 m²以下)、中型镜面(10~50 m²)、大型镜面(50~120 m²)和超大型镜面(120 m²以上)^[5]。

研究表明^[9],反射镜尺寸与镜体的抗风设计和生产成本直接相关:在单位面积成本一定的前提下,因抗风设计要求,镜架、基座和地基方面的成本与反射镜面积呈1.5次方的关系,因此,大尺寸定日

镜的支撑结构、驱动装置和制造用设施成本占比较高,而小尺寸镜面受风荷载影响较小,成本主要集中在跟踪控制系统和排管布线方面,表1为张宏丽等^[4]统计的不同尺寸定日镜费用。另有研究^[10]从设计风速的角度出发,指出对大于 40 m²的定日镜而言,在较小的设计风速下(5 m/s),单位面积成本约为常数;而在较大的设计风速下(15 m/s),单位面积成本与尺寸正相关,因此,对于绝大多数地区,采用中型定日镜可获得最佳的综合效益。

现有定日镜的尺寸多集中在中型和超大型,如表2所示^[4-5,11-17],这是由于规模化生产下大尺寸定日镜成本更低导致的^[9]。但尺寸的增大放大了风荷载的影响,使结构设计、加工和安装更为困难,因此,业内还未就反射镜的最佳尺寸达成共识,有待于进

表 1 不同尺寸定日镜的费用(\$/m²)^[4]

部件	30 m ²	148 m ²
镜面单元	39	43
驱动装置	71	52
镜架、基座和地基	17	38
跟踪控制	27	8
场地布线	18	8
制造用设施等	54	45
安装及检查	11	4
总费用	237	198

一步的研究。总的来讲,对不同的项目,设计商需要做出取舍,从生产制造、驱动控制、安装调试、土地利用和吸热器这5个方面考虑镜面大小带来的抗风控制等技术问题和运行维护等成本问题^[9,11]。

表 2 塔式电站中的定日镜参数^[4-5,11-17]

Table 2 Parameters of heliostats in tower power stations

项目名	定日镜	厂商	国家地区	数量/台	面积/m ²	工作风速/(m·s ⁻¹)	生存风速/(m·s ⁻¹)	参考文献
MHPS横滨项目	CSIRO	CSIRO	日本	150	7.2	15	40	[11-12]
USDOE能源开发计划	ATS	ARCO	美国		148.0	12	40	[13]
GemaSolar项目		Sener	西班牙	2 650	120.0		10~12	[4]
Ivanpah项目		Brightsource	美国	173 500	15.1	14	40	[14]
中控德令哈 50 MW 项目	SHE202B	中控太阳能	中国青海	27 135	20.0	24	40	[5]
首航敦煌 100 MW 项目	SUNCAN	首航光热	中国甘肃	>10 000	115.7	10		[15]
中电哈密 50 MW 项目	Stellio	SBP	中国新疆	14 000	48.5	15	40	[5,16]
玉门鑫能 50 MW 项目	P3	鑫晨光热	中国甘肃		9.6	17	25	[17]

面型的选择是玻璃反射镜选型的又一重要因素。Winston等^[18]指出,定日镜的理想面型为离轴抛物面,如图3所示,此面型能够完美地将太阳光反射进吸热器,但其商业化应用受限于加工制造等问题。为此,孟力^[19]提出了一种非均匀刚度分布设计的平板机构,通过施加集中弯矩实现近似离轴抛物面的成型,此方法得到的柔性定日镜聚光面积减小了45.5%。研究同时指出,该定日镜在重力和风荷载作用下的变形与反射镜厚度和厚度比呈反比,但遗憾的是该研究未考虑风致振动问题。

实际工程中,出于成本低廉化、生产规模化与控制简单化的考虑,面型多设计为平面或球面^[20-21]。通常来讲,平面镜的制造与安装相对简单,但镜面反射特性导致其聚光效率偏低,需要与二次反射镜组合使用。球面镜的使用则需要将曲率半径设置为反射镜与吸热面中心距离的两倍,以提高光学效率^[22],因而制作与安装成本略高。在此基础上,魏秀

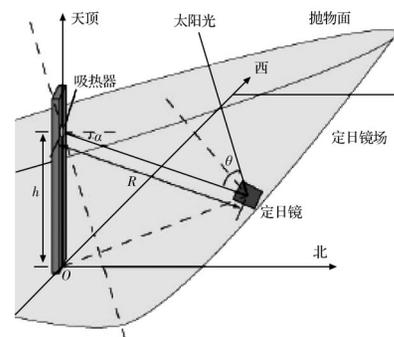
图 3 离轴抛物面面型^[19]

Fig. 3 An off-axis paraboloid

东等^[23]提出了轮胎面反射镜,并于中科院北京电工所进行了实验镜的测量,资料显示,与普通球面镜相比,此面型的聚光性能提升十分明显,并且由于采用了抛物面模具的制作方法,面型加工难易程度与球面镜相当。此外,也有研究者进行了高次曲面镜^[24]、可调弧的复合镜^[25-26]等面型的探索,但研究中

暴露出加工复杂、安装困难等问题,导致其难以应用于工程,且相关研究多聚焦于定日镜的光学性能,缺少风致响应等内容。

除玻璃反射镜外,通过内部压力改变调整曲率的金属反射膜也是一个研究方向,图4所示为张力金属反射膜定日镜^[19]。美国桑地亚国家实验室对此进行了测量^[27],结果显示,与玻璃反射镜相比,每平方米反射膜减重高达70%。但0.2~0.5 mm的膜厚使结构在强风条件下的变形较大,且由于反射率低、结构复杂等问题限制了金属反射膜的大规模商业化应用,目前,仅部分槽式电站采用此结构形式^[28]。



图4 张力金属反射膜定日镜^[19]

Fig. 4 Tension metal reflector heliostat

1.2 支撑结构

定日镜支撑结构的研究一般从镜架和基座出发。传统镜架存在两种结构形式^[22,29]:一种是DAHAN定日镜所采用的板式镜架,通常采用“面”连接形式与反射镜相连,且由于背板具有保护作用,因而反射镜可以加工得很薄。该镜架的优势在于其抗风能力较强且成型效果较好,但美中不足的是,此结构加工成本较高;另一种形式是Ivanpah电站所采用的框式镜架,与板式镜架相比,该种镜架减轻了结构质量,但在重力与风荷载作用下的连接牢固性偏弱。对于框式镜架而言,当反射镜面积较小时,采用“点”连接,即通过粘接片连接镜架与反射镜,但此连接形式弱化了镜面的成型效果,并且由于粘接点的数量有限,易出现局部应力集中现象。相对“点”连接而言,“线”连接更适用于框式镜架,此连接形式增加了接触面积,避免了过大的应力集中,然而在较大风荷载作用下的连接松动依然是导致定日镜不规则振动的重要诱因。

主流基座按结构形式的不同分为圆形底座式与独立柱式。圆形底座式基座的强度与稳定性较

为优良,但由于结构复杂、易遮挡光线且难以解决轨道密封与防沙问题而较少被采用。相对而言,独立柱式基座则因结构简单、易于修建而应用广泛,但值得关注的是,该基座形式在简化结构的同时,也降低了抗风稳定性。因此,结构设计时需要更全面地考虑到风荷载的影响,通常从结构的正常运行状态与极限破坏状态进行评估,以确定结构设计方案,具体过程如下^[5,10,30-31]。

首先,基于定日镜测压模型的风洞试验,计算定日镜的表面风压系数 ΔC_{Pi} 。

$$\Delta C_{Pi} = \frac{P_i^f - P_i^b}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (1)$$

式中: P_i^f 和 P_i^b 分别为各测压孔所在位置正负表面风压值; ρ 为所在地区的空气密度; v_0 为参考高度处的风速。

然后,将各测点的风压系数 ΔC_{Pi} 分别表示为平均净风压系数 $\Delta C_{Pi,mean}$ 与脉动风压系数 $\Delta C_{Pi,rms}$ 。

$$\Delta C_{Pi,mean} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta C_{Pi}}{N} \quad (2)$$

$$\Delta C_{Pi,rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta C_{Pi}^2 - N \cdot \Delta C_{Pi,mean}^2}{N}} \quad (3)$$

式中: N 为测点数。

根据式(2)与式(3)所得数据,对不同测点依次求得时程范围内的最大峰值风压系数 $\Delta C_{Pi,max}$ 与最小峰值风压系数 $\Delta C_{Pi,min}$ 。

$$\Delta C_{Pi,max} = \Delta C_{Pi,mean} + g \cdot \Delta C_{Pi,rms} \quad (4)$$

$$\Delta C_{Pi,min} = \Delta C_{Pi,mean} - g \cdot \Delta C_{Pi,rms} \quad (5)$$

式中: g 为峰值因子,脉动风常近似作高斯过程考虑,取值为3.5。

另一方面,基于定日镜风洞试验中的测力天平数据,计算阻力系数 C_{F_x} 、升力系数 C_{F_z} 、倾覆力矩系数 C_{M_y} 、铰链力矩系数 $C_{M_{\theta}}$ 与方位力矩系数 C_{M_z} 在内的分力系数。

$$C_{F_x} = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 A} \quad (6)$$

$$C_{F_z} = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 A h} \quad (7)$$

$$C_{M_y} = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 A H} \quad (8)$$

$$C_{M_{H_y}} = \frac{M_{H_y}}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 A h} \quad (9)$$

$$C_{M_z} = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 A H} \quad (10)$$

式中： F_x 、 F_z 、 M_y 、 M_{H_y} 、 M_z 分别为阻力、升力、倾覆力矩、铰链力矩与方位力矩，如图 5 所示^[30]，由风洞试验确定； ρ 为定日镜所在地的空气密度值； H 为立柱底到镜架中心高度； h 为镜架高度； v_H 为 H 高度处的平均风速； A 为定日镜的镜面面积。

最后，收集汇总峰值风压系数与分力系数，同时比较不同风向角与俯仰角（图 6 为风向角与俯仰角的示意图^[31]）的结果，以得到最不利工况，在确保结构具有一定安全冗余度的条件下，选取支撑结构的截面尺寸等参数^[32]。在此基础上，对定日镜结构进行有限元建模分析，通过施加镜面风压与整体荷载得到结构的风致响应进行校核，确定各构件的应力与变形不超过设计要求。

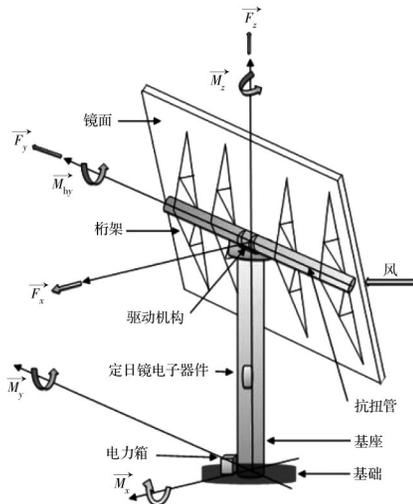


图 5 定日镜系统的示意图^[30]
Fig. 5 Schematic of heliostat system

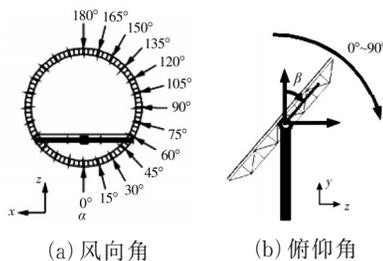


图 6 风向角和俯仰角^[31]

Fig. 6 Wind direction angle and elevation angle

同时，现有商业化电站中反射镜的尺寸越来越大，甚至摩洛哥 NOOR III 电站单台定日镜面积已高达 178 m²^[33]，由此带来一系列负面影响，例如，上部结构的质量增加引起结构自振频率降低、风致响应增大等。因此，除支撑结构的常规设计外，还需要进一步的结构优化，其思路主要是计算得到定日镜的最低用钢量，即设支撑结构各构件的截面尺寸为设计变量，以风荷载作用下的应力与变形不超过设计允许为约束条件进行钢截面尺寸的最小优化。冯煜等^[34-35]的研究结果显示：众多设计变量中，扭矩管与镜架的厚度是定日镜轻量化设计中的重要参数，其中扭矩管壁厚的增加极大程度上降低了反射镜的最大位移，而镜架厚度改变带来的影响则对应于结构应力与一阶固有频率。通过对结构各参数进行调整，定日镜的总质量减小了 198 kg，减重率达 12.31%，轻量化效果显著。此外，研究^[36-37]在对比了空心钢管立柱、纯混凝土柱与钢管混凝土立柱的抗风性能后指出：钢管混凝土立柱更适用于定日镜结构，对其进行优化设计可降低 55% 左右的用钢量。

2 风荷载模拟

对光热行业的关注与政策的推动激励了定日镜优化方案的产生，其目的在于，在不改变定日镜性能的前提下，降低成本，实现这一目标的挑战之一便是风荷载：较大的风速产生较大的风荷载，导致结构破坏，即使较小的风速，也有可能因为风荷载的影响降低聚光效率^[37]，因此，对定日镜风荷载的模拟显得尤为重要。

风荷载的模拟方法通常包括数值模拟与风洞试验。现有的数值模拟技术包括直接模拟法 (DNS)、大涡模拟法 (LES) 与雷诺时均模拟法 (RANS) 等。其中，RANS 计算简单、耗时较少，被研究者们广泛采用。其思路是将控制方程进行统计平均，只计算平均运动，忽略各尺度的湍流脉动^[38-39]。然而，这样简化削弱了风荷载对支撑结构与镜面交界这一薄弱位置的影响，因此，在进行定日镜的脉动风响应分析时易产生较大误差。同时，RANS 模型过高地估计了定日镜迎风面边缘处的湍流动能，并且存在难以准确分析定日镜尾迹区湍流和预测结构的峰值荷载等问题^[40]。因此，部分研究者采用了更符合实际且精度更高的 LES 方法^[38]、RANS-LES 方法^[39]等作为替代，表 3 所示的计算模型误差也验证了相关模型的优越性^[40]。需要指出的是，包括 LES、分离涡模型 (DES) 在内的方法较

RANS占据更多的资源^[41-42],因此,研究者应根据自身需要选取不同的数值方法。

表3 各模型计算误差^[40]

Table 3 Calculation error of each model

参数	%				
	标准 $k-\epsilon$	RNG $k-\epsilon$	Realizable $k-\epsilon$	LES	DES
平均风压系数					
平均误差	35.28	15.25	19.12	12.12	11.59
最大误差	78.86	35.33	48.44	23.90	22.58
脉动风压系数					
平均误差	82.59	55.92	75.50	6.16	3.69
最大误差	84.24	59.67	76.80	22.52	9.26

除数值模拟技术外,风洞试验也是解决定日镜风荷载问题的另一重要手段。为保证试验精度要求,需对定日镜进行缩尺以控制几何相似性,常用的缩尺比为1:10~1:40^[43-45],需要指出的是,缩尺模型对连接件等细部结构很不友好,其响应通常难以观察,因此常做简化处理。此后调整斯托哈罗数(Strouhal, St)、欧拉数(Euler, Eu)等物理参数实现运动相似性的控制,通常认为,定日镜等钝体结构周围的气流受雷诺数(Reynolds, Re)影响较小,故将其忽略^[46]。试验过程中根据研究需求对风向角和俯仰角进行调整,以实现各工况的模拟,获得测点风压与风荷载分力,典型角度工况通常为 15° 的倍数,例如最不利受荷工况为风向角 $\alpha=180^\circ$,俯仰角 $\beta=0^\circ$ 。现有定日镜风洞数据较少,根据公开的文献可以了解到Honeywell公司在佐治亚技术研究所的9FT亚音速回流式风洞中进行了91组测试,得到了风荷载与定日镜风向角和尺寸的关系^[43];Wang等^[47]、王莺歌等^[48]、宫博等^[49]通过HD-2风洞测试了130种工况下的DAHAN定日镜1:10模型,得到了模型在垂直风向和水平风向下的时程风压,并利用风洞天平测量了定日镜整体荷载。

在定日镜早期研究中仅考虑了平均风,并将其视为静力作用^[50],所得结果与预期有很大差异^[51]。直到Peterka等^[52]考虑脉动风后得到更真实的实验数据,定日镜风荷载模拟中的脉动风因素才被人们所重视。湍流强度作为衡量脉动风能量大小的重要参数,对作用在定日镜结构上的风荷载影响极大。有研究指出,当定日镜高度较低时,大气边界层湍流强度的增加会显著提高定日镜的峰值载荷系数^[53]。当定日镜从沙漠等平坦地区移动至开阔地

区时,随着地面粗糙度的增加,纵向湍流强度大约从13%增加到21%,此时,定日镜工作位置的阻力系数、倾覆力矩系数与方位角系数增加了一倍^[53];而在地面粗糙度相同的情况下,垂向湍流强度从8%变化至13%时,升力系数与铰链力矩系数分别增大28%与54%^[53]。Emes等^[32]进一步指出,随着处于避险停放位置的定日镜尺寸的增加,低粗糙度地形下的定日镜峰值铰链力矩减小了47%,高粗糙度地形中增加了75%;相比之下,处于工作位置的定日镜在低粗糙度地形下的倾覆力矩和方位力矩分别下降了30%和41%,在高粗糙度地形下则分别增加了49%和65%。Jafari等^[54]进一步研究了湍流强度、积分尺度与脉动风阻力系数的关系,指出脉动阻力系数和峰值阻力系数均随二者的增加呈对数增长。

实际工程中,定日镜风荷载设计主要采用等效风荷载法,其思路是在基本风压上附加各种系数以讨论不同因素的影响^[55],主要参数有风荷载体型系数、风振系数和风压高度变化系数。其中,定日镜的风荷载体型系数多参考建筑结构,但相较于独立墙壁等建筑结构的三面绕流而言,定日镜面板属于四面绕流,因此,宫博等^[56]基于湖南大学HD-2风洞试验数据的研究,将定日镜的风荷载体型系数修正为1.67。同时,区别于时域法的大量计算与复杂过程,宫博等^[57]利用简便的多阶模态力法进行了定日镜风振系数的推导,其结果与时域法对比显示:除 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 工况外,精度偏差均小于10%,由此为定日镜结构设计提供了参考。王莺歌^[45]则对比了包括惯性荷载法在内的4种方法,其结果显示,Holmes^[58]提出的惯性力-LRC法更适用于定日镜结构,并提出用稳态结果估算脉动风压系数和采用修正Model2公式估算整个方形板在高度范围内的垂直迎风情况^[59],同时,给出了包括Model1、Model2、Selvam公式和黄本才公式的使用范围。

总的来说,研究者们对风荷载的模拟研究取得了一定成果,然而相关研究多依靠对相似性准则或经验参数进行简化处理,以此得到的结果精度难以保证,同时,现有研究缺少风压、风荷载等实测数据加以佐证,因此,还需开展定日镜的现场实测研究。

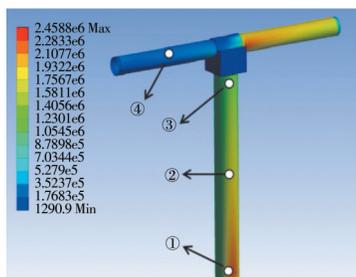
3 风致响应分析

定日镜是风敏感结构,当暴露于较大风速下时,镜体前缘出现由大涡旋破裂引起的高压区域,诱使峰值铰链力矩的出现及共振现象的产生,导致结构破坏^[10,60-61]。因此,定日镜的风致响应研究十分

必要,常用的分析手段包括时域分析和频域分析。

时域分析通常直接将时程风压作用于物体,利用 Newmark- β 法或线性加速度法等对风荷载作用下的运动方程进行求解,以获得定日镜结构响应。相较于时域分析而言,频域分析的计算效率更高,其原理是以随机振动理论为基础,通过传递函数将荷载与响应相联系。部分学者对此进行了系统研究:王莺歌等^[48]利用脉动风荷载时程数据对 130 种工况下的定日镜进行风致响应分析,其结果显示,当俯仰角 β 较小时,镜面各部分背景响应接近,结构底部存在多阶共振区;而当 β 增大时,气流在镜面近端分离、远端附着形成脱落旋,上部动力响应增加。此外,王莺歌等^[62]提出,将本征正交分解法(POD)与完全二次型组合法(CQC 法)共同运用到定日镜的频域分析,将计算中 $N \times N$ 阶功率谱矩阵转换为阶次更低的 $M \times M$ 阶矩阵,在保证精度的同时大大降低了计算量。宫博等^[49,63]则在频域法的基础上,使用三质点模型推导了不同条件下的位移响应,得到风致位移响应根方差,并分析了包括基于 Darvenport 谱、拟合谱和逐步积分法在内的 3 种频域计算方法,最终得出的基于 Darvenport 谱的风致响应计算方法更具优势。

传统定日镜的使用寿命为 30 a^[64],在其 30 a 的使用期内,结构会经历数千万次循环风荷载的作用,这些周期作用容易使定日镜产生累计疲劳损伤。Blackmon^[64]通过参数分析,预测了定日镜结构在风荷载、风向角、尺寸和耐力极限条件影响下的安全系数,同时指出^[65],定日镜固有频率范围内的强烈阵风会诱导共振现象的发生,长此以往,会在一定程度上影响定日镜的疲劳寿命,并建议增大结构阻尼以减轻结构响应。Luo 等^[66]则采用雨流法对定日镜进行疲劳分析,结果显示,当以图 7 立柱底部节点 1 为观测点时,受疲劳损伤影响,结构最短寿命为 27.53 a。此外,损伤较大的工况集中在俯仰角 30° 和 50° 、风速 7 m/s 时。



注: ①②③④分别表示节点1、2、3、4。

图 7 定日镜局部应力图^[66]

Fig.7 Local stress diagram of the heliostat obtained

除疲劳损伤外,由于极端条件下来流的不稳定,风荷载作用于结构上引起强烈的动力响应,形成不均匀的压力分布,影响定日镜的生存能力^[67],因此,极端风条件下的定日镜通常需要保持避险停放位置。Peterka 等^[52]在其研究报告中指出, $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=90^\circ$ 是最合适的定日镜避险停放位置,然而冯煜对此结果表示了质疑^[68-69],在对不同位置的风荷载分力系数与特征值屈曲荷载系数进行研究后提出,结构在 $\alpha=90^\circ$ 、 $\beta=90^\circ$ 时更宜作为避险停放位置,并指出包括风阻力、倾覆力矩和方位角力矩系数在内的三分力系数对结构风致响应影响较大。实际工程中,通常由成千上万台定日镜按一定布置排列形成场区,镜与镜之间存在的风干扰作用极大地影响了定日镜正常工作。为得到真实的干扰影响,马瑞霞等^[70]运用超级计算机进行大规模模拟,得到的风荷载信息较好地匹配了中国建筑荷载规范,这对今后定日镜场的优化及定日镜群的风振控制理论研究大有裨益。

然而,考虑到风荷载作用下定日镜场的模拟难度较大且计算资源占用量较多,更多的研究者采用简化模拟的手段寻找定日镜群之间的干扰规律,通常将其表达为干扰因子,即受干扰与无干扰时风力系数的比值,大小主要取决于布置方式、工况与间距的不同。辐射状布置的镜场受斜前方定日镜的影响,干扰因子通常大于 1^[71];而在纵列布置时,由于外排镜体的保护作用,一定范围内下游定日镜受扰较小,但由于旋涡脱落、地面效应和塔架效应的综合影响,处于 $\alpha=180^\circ$ 、 $\beta=90^\circ$ 工况时扰动剧增,峰值铰链力矩表现为孤立定日镜的 7 倍^[72]。此外,Yu 等^[72]与 Emes 等^[73]系统分析了纵列布置时避险停放位置的两定日镜间距影响,结果显示,当间距为两倍弦长时,由于大湍流涡旋被上游镜体阻断,相较于孤立定日镜而言,下游结构的峰值阻力、峰值升力与铰链力矩分别减少 60%、30% 与 40%。与此同时,Boddupalli^[38]采用 LES 方法模拟了受扰定日镜的尾迹区,如图 8 所示,其结果显示,湍流涡旋可扩展到镜面长度的 3 倍,且扰动长度会随着镜面倾角的增加而增加,故建议采用尾迹区扰动长度作为镜体间距较为合适。

以上基于风致响应分析方法、疲劳损伤与干扰效应的研究中仍然存在研究对象局限等问题。例如,现有研究仅针对传统四边形面板定日镜,其成果也仅限于典型角度工况,没有考虑风场与结构之间的双向流固耦合。同时,镜场间的相互干扰效应研究多针对辐射布置与纵列布置情况,对于 Campo

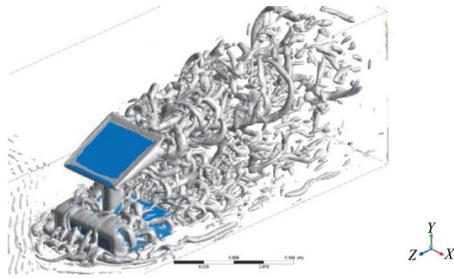


图 8 1 000 Hz 下的涡流强度等值面^[38]

Fig. 8 Vortex intensity isosurface at 1 000 Hz

圆形布置、仿生型布置等新布置方式的干扰效应研究还较少。因此,接下来,分析不同镜面形状的影响,综合考虑不同因素下孤镜与镜群的风致响应是需要重点研究的问题。

4 风致振动控制方法

定日镜工作时需要以一定角度追踪太阳光,当遇到较大风速时,风荷载作用会引起结构振动,影响定日镜跟踪精度^[74]。现有定日镜的风致振动控制研究还比较薄弱,研究者主要还是从物理隔离、气动稳定性与减振系统着手进行振动控制。

现有的物理隔离手段主要是在镜场内建立挡风墙,从风环境着手进行控制,图 9 所示为挡风墙后环境风速的衰减^[75]。由于风流与风墙的相互作用会在定日镜背向来流一侧产生再循环区,区域内脉动风压存在明显的非高斯性,为避免现有规范过高估计脉动风压的高斯性^[75],宜选择 99.5% 保证率的目标概率法计算极值风压。同时,挡风墙的建立需保证合理的风墙高度、开口尺寸、孔隙率以及间距。结合 Bendjebbas 等^[75]、范涛^[76]、徐欢欢^[77]的研究结果可以得知,采用 0.8 倍定日镜高度的挡风墙,较小的开口尺寸,40% 的孔隙率与 6 倍高度的间距能够取得较好的防护效果。然而,上述研究依然存在一些不足,比如实验设置的高度与孔隙率变量较少且定日镜场布置情况单一等,因此,还需进一步深化以取得更有效的结论。

除物理隔离外,现有策略主要还是依靠改善定日镜的结构气动稳定性实现振动控制。针对传统定日镜而言,Pfahl 等^[78]给出了纵横比与各风荷载分力的影响关系,如表 4 所示(r_a 为纵横比),可以预见,在一定程度上,采用较大的纵横比有利于支撑结构和仰角驱动器的尺寸设计,但不利于方位角驱动器^[41,78]。此外,有研究^[79]分析了立柱高度与镜面压力系数的关系,指出其峰值与立柱高度正相关,并且当立柱高度增加时,脉动风波动也随之增加,

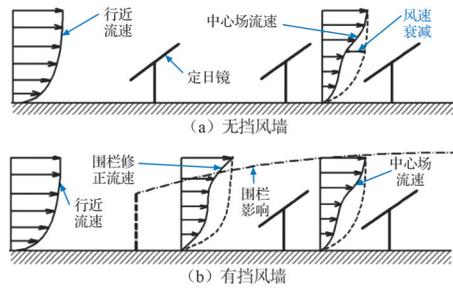


图 9 挡风墙后环境风速的衰减^[75]

Fig. 9 Attenuation of ambient wind speed behind wind retaining wall

因此,采用较低的立柱可有效避免结构共振。

表 4 纵横比对风荷载分力的影响^[78]

Table 4 Impact of aspect ratio on wind load components

(α, β)	分力	r_a 影响	分力	r_a 影响
(0, 0)	F_x	$\sim 1/r_a^{0.25}$	M_y	$\sim 1/r_a^{0.25}$
(0, 60)	F_x	$\sim 1/r_a^{0.25}$	M_{Hy}	$\sim 1/r_a^{0.65}$
(0, 60)	F_z	$\sim 1/r_a^{0.25}$		
(60, 0)			M_z	$\sim r_a^{0.35}$
(0, 90)	F_x	$\sim 1/r_a^{0.45}$	M_{Hy}	$\sim 1/r_a^{0.45}$
(0, 90)	F_z	$\sim r_a^{0.25}$	M_y	$\sim 1/r_a^{0.45}$
(90, 90)	F_y	$\sim 1/r_a^{0.25}$	M_x	$\sim 1/r_a^{0.15}$

由于独立柱式结构始终无法避免结构稳定性差的问题,有研究者提出了一些新的结构形式,为振动控制研究提供了一些新的思路。如新疆哈密电站采用的五边形 Stellio 定日镜,利用镜面中心向反射镜边缘延伸的弦杆将外部荷载均匀传递至下部支撑结构,因其独特的荷载传递路径,相较普通定日镜而言,有更好的稳定性,并且 Stellio 的五边形面型也提高了单位面积下的发电效率^[80],Stellio 定日镜与普通定日镜荷载传导路径的对比如图 10 所示^[12]。相关新型结构还包括 SBP 公司研发的夹层镜面板^[12]、eSolar 研发的联合三脚架支撑^[81]和龙岩智康太阳能科技有限公司研发的树型支撑等。

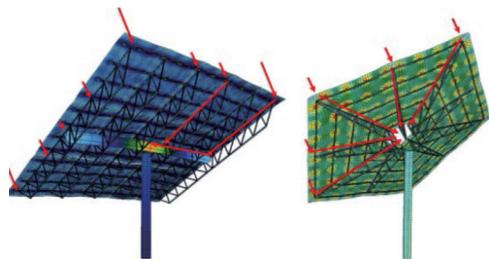


图 10 Stellio 与普通定日镜荷载路径对比^[12]

Fig.10 Comparison of load conduction paths between Stellio and ordinary heliostat

此外,有研究对图 11 所示带轮缘驱动器的自治轻型定日镜进行了研究^[74]。该定日镜采用了带有防风装置的夹层面板并配以减振器,实现进一步的风致振动控制,经过 42 m/s 的暴风条件测试可知,防风装置将定日镜在避险停放位置的铰链力矩降低了 40%,配以减振器后可进一步降低结构 30% 的峰值荷载。

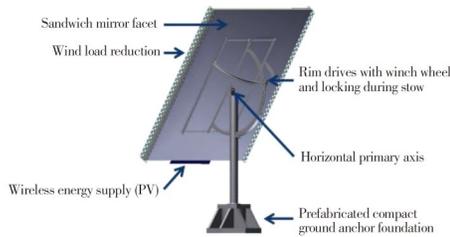


图 11 带轮缘驱动器的自治轻型定日镜^[74]

Fig.11 Autonomous light-weight heliostat with rim drives

对现有研究总结可知,其成果大多从增设挡风墙、改变结构气动稳定性或利用阻尼器等方法实现振动控制,然而相关试验数据披露较少,同时,相关设计增加了定日镜成本,不利于推广。因此,进行不同风致振动控制措施的经济性、实用性对比分析研究,以确定最优方案成为一项重要工作。同时,现有研究多以强风条件下的定日镜为对象进行控制研究,然而,由于定日镜与吸热塔的距离十分远,微小的振动对结构聚光性能的减弱会因距离增加而成倍放大,因此,关于较小风速作用下定日镜的微振研究还需补充。

5 结论与展望

光热发电技术是解决能源危机的重要手段之一,而塔式光热发电技术具有大规模储能的优势,能够较好应对能源危机。定日镜作为塔式光热电站的重要组成部分,已有较多学者对其开展了针对性研究,笔者主要从其结构体系、风荷载模拟、风致响应及振动控制等方面进行概述,得出以下主要结论:

1)从抗风控制问题出发,镜场理想选址应在年均风速、最大风速相对较小的地区,然而实际选址通常难以达到预期条件。现有厂商在考虑了抗风控制与经济成本等问题后,多选择“大尺寸反射镜+框式镜架+独立柱式基座”的技术路线。

2)定日镜的风荷载模拟多依靠风洞试验与数值模拟技术,其中,湍流强度对结构受力影响较大。

在结构设计时通常采用等效风荷载法,从风振系数、风荷载体型系数和风压系数等方面对问题进行简化。同时,部分学者还将惯性力-LRC法和多阶模态力法等方法应用于定日镜的风荷载求解中,并得到了一些成果。

3)现有定日镜的风致响应分析常围绕时域法与频域法展开,在此基础上,有学者探讨了三质点模型、共用POD和CQC等技术手段的适用性。除此之外,相关风致响应的分析还包括最佳避险停放位置、结构疲劳损伤与定日镜场的风干扰问题等。

4)现有定日镜风致振动控制方法包括挡风墙物理隔离、改善结构气动稳定性与减振器控制等技术手段。其中,大多定日镜厂商采取改变定日镜的几何特征或优化结构体系来实现风振控制,主要包括采用五边形镜面、设置三脚架支撑等。

综上所述,现有定日镜风致响应与风致振动控制的研究已取得了一些成果,但目前仍存在着一些问题:

1)现有研究缺少定日镜风压、风荷载等相关数据的实测资料对数值模拟与风洞试验加以佐证。

2)越来越多异形定日镜相继面世,现有结论是否适用于类似结构还未可知,相关研究还需进一步推动。

3)定日镜流固耦合问题与镜场干扰效应分析还较少,期待后续研究对此完善。

4)定日镜的风振控制研究已有部分成果付诸实际,但其经济性、实用性是否最优还未可知,后续相关研究可对此进行总结。

5)由于定日镜与吸热塔的距离十分远,微小的振动对结构聚光性能的减弱会因距离增加而成倍放大,因此,关于较小风速作用下定日镜的微振研究还需补充。

参考文献

- [1] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议:(二〇二〇年十月二十九日中国共产党第十九届中央委员会第五次全体会议通过)[N]. 人民日报, 2020-11-04(1).
Recommendations of the Central Committee of the Communist Party of China on formulating the fourteenth five-year plan for national economic and social development and long-term goals for 2035 [N]. Xinhua News Agency, 2020-11-04. (in Chinese)
- [2] 许利华, 侯晓东, 刘可亮. 塔式熔盐太阳能光热发电技

- 术[J]. 能源研究与信息, 2020, 36(3): 135-142.
- XU L H, HOU X D, LIU K L. Tower solar thermal power generation technology with molten salts as working fluid [J]. Energy Research and Information, 2020, 36(3): 135-142. (in Chinese)
- [3] 宋红, 张庆宝. 太阳能热发电系统介绍及站址选择[J]. 太阳能, 2019(2): 13-18.
- SONG H, ZHANG Q B. Introduction of solar thermal power generation system and its site selection [J]. Solar Energy, 2019(2): 13-18. (in Chinese)
- [4] 张宏丽, 王树群. 定日镜及其成本分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2016, 12(4): 297-301.
- ZHANG H L, WANG S Q. Solar heliostat and its cost analysis [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2016, 12(4): 297-301. (in Chinese)
- [5] 许继刚. 塔式太阳能光热发电站设计关键技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 47-62.
- XU J G. Key technology of tower solar thermal power station design [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 47-62. (in Chinese)
- [6] 王传辉, 申彦波, 田启明, 等. 中国西北地区环日辐射及其对太阳能热发电影响的数值模拟研究[J/OL]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 186-192.
- WANG C H, SHEN Y B, TIAN Q M, et al. Numerical simulation circumsolar normal irradiance and its effect on solar thermal power generation in Northwestern China [J/OL]. Acta Energetica Sinica: 2021, 42(11): 186-192. (in Chinese)
- [7] ZHANG Y, XU F B, SONG B. The key points in the design of supporting structures for dual-track tracking CSP system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1975: 921-929.
- [8] 安钢, 秦新锋, 宋学文, 等. 超白玻璃的发展与现状探讨[J]. 玻璃, 2021, 48(2): 18-23.
- AN G, QIN X F, SONG X W, et al. Discussion on the development and current situation of ultra-clear glass [J]. Glass, 2021, 48(2): 18-23. (in Chinese)
- [9] 张宏丽, 王树群. 塔式电站中定日镜尺寸的选择[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2017, 13(3): 199-203.
- ZHANG H L, WANG S Q. Discussion on selecting the size of heliostats for solar power tower plants [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2017, 13(3): 199-203. (in Chinese)
- [10] EMES M J, ARJOMANDI M, NATHAN G J. Effect of heliostat design wind speed on the levelised cost of electricity from concentrating solar thermal power tower plants [J]. Solar Energy, 2015, 115: 441-451.
- [11] COVENTRY J, CAMPBELL J, XUE Y P, et al. Heliostat cost down scoping study - final Report [R]. Australian: Australian Solar Thermal Research Institute (ASTRI), 2016.
- [12] PFAHL A, COVENTRY J, RÖGER M, et al. Progress in heliostat development [J]. Solar Energy, 2017, 152: 3-37.
- [13] THOMAS R M. Catalog of solar heliostats [R]. SolarPACES, Köln: 2000.
- [14] 上海电气亮源光热工程有限公司. 产品样本简介[EB/OL]. (2019-10-22)[2021-05-07]. Shanghai Electric BrightSource Solar Energy Co., Ltd. Product Sample Profile [EB/OL]. (2019-10-22)[2021-05-07]. (in Chinese)
- [15] 国家光热联盟. 首航节能敦煌100 MW 熔盐塔式光热电站建设与运行全过程[EB/OL]. (2019-07-26)[2021-05-07]. China Solar Thermal Alliance. The whole process of construction and operation of Dunhuang 100 MW molten salt tower photothermal power station [EB/OL]. (2019-07-26)[2021-05-07]. (in Chinese)
- [16] BALZ A M, KECK T, SCHIEL W, et al. SunSonne [EB/OL]. [2021-05-07].
- [17] CSPPLAZA. 玉门鑫能50 MW 光热项目一号模块满功率测试和联调圆满完成[EB/OL]. (2019-08-09)[2021-05-07]. CSPPLAZA. The full power test and joint adjustment of module 1 of Yumen Xinneng 50 MW photothermal project have been successfully completed [EB/OL]. (2019-08-09)[2021-05-07]. (in Chinese)
- [18] WINSTON R, MIÑANO J C, BENÍTEZ P. Imaging applications of nonimaging concentrators [M]// Nonimaging Optics. Amsterdam: Elsevier, 2005: 219-234.
- [19] 孟力. 面向塔式太阳能聚光系统的柔性定日镜设计[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- MENG L. Design of compliant heliostats for solar power tower system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [20] 佟锴, 杨立军, 宋记锋, 等. 聚光太阳能集热场先进技术综述[J]. 发电技术, 2019, 40(5): 413-425.
- TONG K, YANG L J, SONG J F, et al. Review on advanced technology of concentrated solar power concentrators [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(5): 413-425. (in Chinese)
- [21] 赵天野, 姜肇国, 徐熙平, 等. 基于抛物线方程和梯度折射率计算方法的太阳能聚光器设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(5): 49-55.
- ZHAO T Y, JIANG Z G, XU X P, et al. Design of solar concentrator based on parabola equation and gradient index calculation method [J]. Journal of

- Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 43(5): 49-55. (in Chinese)
- [22] 程松, 邹宗峰. 平面桁架构建的定日镜面形支撑结构优化及实验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(12): 2310-2320.
CHENG S, ZOU Z F. Optimization and experiment of heliostat surface shape bracing structure based on plane truss [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(12): 2310-2320. (in Chinese)
- [23] 魏秀东, 卢振武, 林梓, 等. 太阳能塔式电站轮胎面定日镜的设计及性能分析[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2468-2472.
WEI X D, LU Z W, LIN Z, et al. Design and performance analysis of toroidal heliostat in solar tower power plant [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2468-2472. (in Chinese)
- [24] 刘祖平. 一种跟踪和聚光的全新理论: 陈应天在太阳能利用研究领域的重大创新[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(12): 1245-1256.
LIU Z P. An innovative theory of tracking and focusing: Chen's substantial innovation in solar energy utilization research [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(12): 1245-1256. (in Chinese)
- [25] 王云峰, 季杰, 李明, 等. 多平面镜线性组合太阳能聚光器的设计和聚光特性[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0422002.
WANG Y F, JI J, LI M, et al. Performance analysis and design of multi-plane mirrors linear combination solar concentrator [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0422002. (in Chinese)
- [26] KUSSUL E, BAIDYK T, MAKEYEV O, et al. Flat facet parabolic solar concentrator with support cell for one and more mirrors [J]. WSEAS Transactions on Power Systems, 2008, 3(8).
- [27] 李明, 王会利, 颜立强. 集光型太阳能反射镜材料研究[J]. 太阳能, 2013(6): 41-43, 47.
LI M, WANG H L, YAN L Q. Research on concentrating solar mirror materials [J]. Solar Energy, 2013(6): 41-43, 47. (in Chinese)
- [28] CSPPLAZA. 光热发电关键设备和组件的创新方向[EB/OL].[2020-08-05].
CSPPLAZA. Innovation direction of key equipment and components of CSP [EB/OL].[2021-05-07]. (in Chinese)
- [29] 钟史明. 塔式太阳能热发电综述[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2013, 9(1): 1-6.
ZHONG S M. Brief description for tower solar thermal power generation [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2013, 9(1): 1-6. (in Chinese)
- [30] BENAMMAR S, TEE K F. Structural reliability analysis of a heliostat under wind load for concentrating solar power [J]. Solar Energy, 2019, 181: 43-52.
- [31] XIONG Q W, LI Z N, LUO H Y, et al. Wind tunnel test study on wind load coefficients variation law of heliostat based on uniform design method [J]. Solar Energy, 2019, 184: 209-229.
- [32] EMES M J, JAFARI A, COVENTRY J, et al. The influence of atmospheric boundary layer turbulence on the design wind loads and cost of heliostats [J]. Solar Energy, 2020, 207: 796-812.
- [33] 王波. 摩洛哥 NOORIII 塔式电站定日镜面积达 178 m² 创下纪录[J]. 能源研究与信息, 2016, 32(4): 194.
WANG B. Moroccan NOORIII tower power station heliostat area reached a record of 178 m² [J]. Energy Research and Information, 2016, 32(4): 194. (in Chinese)
- [34] 冯煜, 陈小安, 谭惠文, 等. 风场作用下的定日镜轻量化设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1915-1922.
FENG Y, CHEN X A, TAN H W, et al. Lightweight design of heliostat in wind field [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(5): 1915-1922. (in Chinese)
- [35] 冯煜. 塔式太阳能定日镜抗风性能及轻量化设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 15-155.
FENG Y. Wind resistant performance and lightweight design of tower solar power heliostat [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 15-155. (in Chinese)
- [36] 陈健陵, 陈勇军, 陈旭, 等. 定日镜构架支撑柱采用钢管混凝土结构的经济效益分析[C]//中国动力工程学会锅炉专业委员会2012年学术研讨会论文集. 昌吉, 2012: 169-177.
CHEN J L, CHEN Y J, CHEN X, et al. Economic benefit analysis of the use of steel tube concrete structure in the support column of the heliostat frame[C]//Boiler Professional Committee of Chinese Society of Power Engineering: Chinese Society of Power Engineering, China Power Engineering Society Boiler Professional Committee 2012 Academic Seminar Conference Proceedings 2012: 9. (in Chinese)
- [37] 宫博, 李正农, 王莺歌, 等. 定日镜结构优化分析[C]//第18届全国结构工程学术会议论文集. 广州, 2009: 367-370.
- [38] BODDUPALLI N, GOENKA V, CHANDRA L. Fluid flow analysis behind heliostat using LES and RANS: a step towards optimized field design in desert regions [C]//Abu Dhabi, United Arab Emirates. Author (s), 2017.
- [39] WOLMARANS J R, CRAIG K J. One-way fluid-

- structure interaction of a medium-sized heliostat using scale-resolving CFD simulation [J]. *Solar Energy*, 2019, 191: 84-99.
- [40] 卢春玲, 刘宇杰, 李正农. 基于分离涡方法的定日镜风效应研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 440-449.
LU C L, LIU Y J, LI Z N. Research on wind effect for detached eddy simulation of heliostat [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(3): 440-449. (in Chinese)
- [41] MARAIS M D, CRAIG K J, MEYER J P. Computational flow optimization of heliostat aspect ratio for wind direction and elevation angle [J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 148-157.
- [42] GHANADI F, YU J, EMES M, et al. Numerical investigation of wind loads on an operating heliostat [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1850(1): 130003.
- [43] HONEY W. Wind tunnel test of 1:30 scale heliostat field array model [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories. 1978: 4-65.
- [44] PFAHL A, BUSELMEIER M, ZASCHKE M. Determination of wind loads on heliostats [C]// *Solarpaces Conference*. DLR, 2011: 1-8.
- [45] 王莺歌. 塔式太阳能定日镜结构风荷载特性及风致响应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011: 14-155.
WANG Y G. Research on wind load's characteristics & wind induced response of solar power tower heliostat [D]. Changsha: Hunan University, 2011: 14-155. (in Chinese)
- [46] PFAHL A, UHLEMANN H. Wind loads on heliostats and photovoltaic trackers at various Reynolds numbers [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(9): 964-968.
- [47] WANG Z F, WU Z Y, LIU X B, et al. Wind dynamics testing on Dahan heliostat [M]. 2008.
- [48] 王莺歌, 李正农, 宫博, 等. 定日镜结构风振响应的时域分析[J]. *振动工程学报*, 2008, 21(5): 458-464.
WANG Y G, LI Z N, GONG B, et al. Time-domain analysis on wind-induced dynamic response of heliostat [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2008, 21(5): 458-464. (in Chinese)
- [49] 宫博, 李正农, 吴红华, 等. 太阳能定日镜结构基于频域的风振响应分析[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(6): 759-763.
GONG B, LI Z N, WU H H, et al. Deflection analysis for reflector plate of heliostat based on thin plate flexure theory [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(6): 759-763. (in Chinese)
- [50] 张相庭. 结构风工程理论·规范·实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
ZHANG X T. Structural wind engineering theory, specification and practice [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)
- [51] SUN H H, GONG B, YAO Q. A review of wind loads on heliostats and trough collectors [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 206-221.
- [52] PETERKA J, DERICKSON R. Wind load design methods for ground-based heliostats and parabolic dish collectors [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1992.
- [53] PFAHL A, RANDT M, MEIER F, et al. A holistic approach for low cost heliostat fields [J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 178-187.
- [54] JAFARI A, GHANADI F, EMES M J, et al. effect of free-stream turbulence on the drag force on a flat plate [C]//21st Australasian Fluid Mechanics Conference. 2018.
- [55] BROWNE M T L, TAYLOR Z J, LI S H, et al. A wind load design method for ground-mounted multi-row solar arrays based on a compilation of wind tunnel experiments [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 205: 104294.
- [56] 宫博, 李正农, 王莺歌, 等. 太阳能定日镜结构风载体型系数风洞试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(9): 6-9.
GONG B, LI Z N, WANG Y G, et al. Wind tunnel test study on the wind load shape coefficient of heliostat [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2008, 35(9): 6-9. (in Chinese)
- [57] 宫博, 李正农, 王志峰, 等. 多阶模态力法研究定日镜等效风荷载[C]//第19届全国结构工程学术会议论文集. 济南, 2010: 520-524.
GONG B, LI Z N, WANG Z F, et al. Study on equivalent wind load of heliostat using multi-order modal force method [C]// *National Structural Engineering Conference*. 2010: 512-516. (in Chinese)
- [58] HOLMES J D. Effective static load distributions in wind engineering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(2): 91-109.
- [59] 王莺歌, 李正农. 流场物理特性在脉动风压系数估算中的应用[J]. *力学与实践*, 2012, 34(3): 53-57, 83.
WANG Y G, LI Z N. Application of flow field's physical properties in estimating fluctuating wind pressure coefficient [J]. *Mechanics in Engineering*, 2012, 34(3): 53-57, 83. (in Chinese)
- [60] EMES M J, JAFARI A, GHANADI F, et al. Hinge and overturning moments due to unsteady heliostat pressure distributions in a turbulent atmospheric boundary layer [J]. *Solar Energy*, 2019, 193: 604-617.
- [61] EMES M J, ARJOMANDI M, GHANADI F, et al. Effect of turbulence characteristics in the atmospheric surface layer on the peak wind loads on heliostats in stow

- position [J]. *Solar Energy*, 2017, 157: 284-297.
- [62] 王莺歌, 李正农, 李秋胜, 等. POD法在定日镜风响应计算中的应用[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(12): 107-111, 183.
WANG Y G, LI Z N, LI Q S, et al. Application of pod in calculation of heliostat's dynamic response to wind induction [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(12): 107-111, 183. (in Chinese)
- [63] 宫博. 定日镜和幕墙结构的抗风性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012: 18-165.
GONG B. Wind resistance performance analysis on heliostat and curtain [D]. Changsha: Hunan University, 2012: 18-165. (in Chinese)
- [64] BLACKMON J B. Heliostat drive unit design considerations-Site wind load effects on projected fatigue life and safety factor [J]. *Solar Energy*, 2014, 105: 170-180.
- [65] BLACKMON J B, WEBER A H, CHISWELL S R. Wind gust distribution analysis and potential effects on heliostat service life [J]. *Solar Energy*, 2015, 120: 221-231.
- [66] LUO H, LI Z, XIONG Q, et al. Study on the wind-induced fatigue of heliostat based on the joint distribution of wind speed and direction [J]. *Solar Energy*, 2020, 207: 668-682.
- [67] ARJOMANDI M, EMES M, JAFARI A, et al. A summary of experimental studies on heliostat wind loads in a turbulent atmospheric boundary layer [C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA2020)*, 2020.
- [68] 冯煜, 陈小安. 三维风场各分量对定日镜动态响应的影响研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(8): 156-163.
FENG Y, CHEN X A. Effect of each direction component in 3D wind field on dynamic response of heliostat [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(8): 156-163. (in Chinese)
- [69] FENG Y, CHEN X A, SHAN W T. Evaluation of survival stow position and stability analysis for heliostat under strong wind [J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23(11): 3006-3017.
- [70] 马瑞霞, 李正农. 基于超级计算的大规模定日镜场风环境模拟[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2018, 43(4): 1338-1349.
MA R X, LI Z N. Wind environment simulation on large-scale heliostat field by supercomputing [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2018, 43(4): 1338-1349. (in Chinese)
- [71] 王莺歌, 李正农, 卢春玲. 定日镜群风荷载干扰效应的数值模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(6): 2403-2412.
WANG Y G, LI Z N, LU C L. Numerical simulation of heliostat group's wind load interference effects [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(6): 2403-2412. (in Chinese)
- [72] YU J S, EMES M J, GHANADI F, et al. Experimental investigation of peak wind loads on tandem operating heliostats within an atmospheric boundary layer [J]. *Solar Energy*, 2019, 183: 248-259.
- [73] EMES M J, GHANADI F, ARJOMANDI M, et al. Investigation of peak wind loads on tandem heliostats in stow position [J]. *Renewable Energy*, 2018, 121: 548-558.
- [74] PFAHL A, BRUCKS A, HOLZE C. Wind load reduction for light-weight heliostats [J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 193-200.
- [75] BENDJEBBAS H, EL-HADJ A A, ABBAS M. Numerical simulation of the effect of wind barrier openings on high-speed wind flow around a heliostat field [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 61: 443-456.
- [76] 范涛. 挡风墙对定日镜风效应影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
FAN T. The research on the influence of wind-break wall on the heliostat [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [77] 徐欢欢. 太阳能利用相关结构风效应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
XU H H. The research on wind effect of solar energy utilization structure [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [78] PFAHL A, BUSELMEIER M, ZASCHKE M. Wind loads on heliostats and photovoltaic trackers of various aspect ratios [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(9): 2185-2201.
- [79] MAMMAR M, DJOUIMAA S, GÄRTNER U, et al. Wind loads on heliostats of various column heights: an experimental study [J]. *Energy*, 2018, 143: 867-880.
- [80] BELAID A, FILALI A, GAMA A, et al. Design optimization of a solar tower power plant heliostat field by considering different heliostat shapes [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(14): 11524-11541.
- [81] RICKLIN P, SLACK M, ROGERS D, et al. Commercial readiness of eSolar next generation heliostat [J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 201-208.