

光伏电站支架系统结构抗台风设计实践

史磊

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 广东沿海太阳辐照资源丰富, 为了利用好光资源, 开发建设光伏电站, 就必须研究光伏电站的重要结构物——光伏组件支架系统的抗台风设计。支架系统的设计参数选择对于工程的安全性、经济性均影响非常大。[方法] 将以广东沿海某光伏电站为例, 从台风荷载参数取值, 结构体型系数, 构造措施等方面, 结合有限元软件数值模拟及台风灾害后评估, 介绍光伏电站支架系统结构抗台风设计的要点及实践经验。[结果] 项目建成后, 先后经历了“天鸽”(17级)、“山竹”(14级)台风正面吹袭考验, 在经历台风后, 整个光伏区阵列受损较小。[结论] 项目建成后, 遭遇几次超过12级以上的台风正面吹袭, 并未造成严重损失, 支架系统结构设计是比较成功的, 设计理念和方法得到了印证, 可为实际应用提供指导。

关键词: 光伏电站支架系统; 台风; 钢结构; 风洞试验

中图分类号: TK519; TU392.5 **文献标志码:** A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0090-05

Design and Practice of Typhoon Resistance for Supporting Bracket System of PV Power Station

SHI Lei

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] There are abundant solar irradiation resources in Guangdong coastal areas. In order to make good use of the light resources, we need to develop and build photovoltaic power stations in these areas, so it is important and necessary to study the typhoon resistance design of photovoltaic supporting bracket system, which is an important structure of photovoltaic power stations. The design parameters of the supporting system have a great influence on the safety and economy of the project. [Method] Taking a photovoltaic power station along Guangdong coast as an example, this paper introduced the key points and practical experience of typhoon resistance design of the supporting system of photovoltaic power station from the aspects of typhoon load parameters, structural shape coefficient and structural measures, combined with numerical simulation of finite element software and post-typhoon disaster assessment. [Result] After the completion of the project, it experiences the test of typhoon "Hato" (Level 17) and "Mangosteen" (Level 14). After the typhoon, the whole photovoltaic array suffers less damage. [Conclusion] After the completion of the project, several typhoons above grade 12 hit the front of the project, which does not cause serious losses. The structural design of the bracket system is relatively successful, and the design concept and method are confirmed, which can provide guidance for practical application.

Key words: supporting bracket system of PV power station; typhoon; steel structure; wind tunnel test

广东沿海太阳辐照资源丰富, 适合建设光伏电站发电, 充分利用阳光资源, 提供清洁的可再生能源。台风是广东沿海常见的自然灾害, 光伏电站的结构外露, 受台风吹袭影响较大, 建设光伏电站, 就必须根据台风的影响, 对电站中的光伏组件支架系统进行有针对性的抗台风设计, 避免外露构件受

吹袭损毁(如图1所示)。抗台风设计的参数取值, 对项目的安全性、经济性均影响巨大。因此抗台风设计是否成功就成为光伏电站经济稳定运行的关键因素。

本文以广东沿海台山地区某光伏电站设计实践为例, 从台风荷载参数取值, 结构体型系数, 构造措施等方面, 结合有限元软件数值模拟及台风灾害后评估, 介绍光伏电站支架系统结构抗台风设计的要点及实践经验。

收稿日期: 2019-05-05 修回日期: 2019-08-22

基金项目: 中国能建广东院科技项目“水面光伏关键技术研究”(EX04761W)



图1 台风“温比亚”使某光伏电站受损情况

Fig. 1 Damage photo of a photovoltaic power station caused by typhoon Rumbia

项目位于台山市西南约 50 km，场址距离海岸线约 10 km。项目装机容量 50 MWp，占地面积约 50 hm²，规划建设 110 kV 升压站一座，以 1 回 110 kV 架空线路送出。项目厂址场址属冲积平原地貌，场地为鱼塘、沿海滩涂，地势平坦开阔；场址极端最高气温 39.6 ℃，极端最低气温 -1.6 ℃；年均降雨量约为 2 200 mm。

本项目光伏组件安装方案采用固定倾角方式，基础采用 PHC300A 型高强预应力管桩，光伏支架采用冷弯薄壁型钢结构。场址为鱼塘，水深 1~1.5 m，泥面以下 8~10 m 均为承载力极低的淤泥，其下为粘性土；场址地震设防烈度为 7 度，地震加速度值 0.10 g，地震分组为第一组，场地特征周期 0.35 s；场址 50 a 一遇基本风压为 0.55 kPa。

1 风荷载参数

我国结构工程抗风设计所依据的各类结构抗风设计规范中，描述风特性的主要参数，多参考国外同行业规范和局部观测资料，而这些局部资料主要取自中高纬度地区，无法涵盖低纬度地区，尤其是台风频繁影响的广东沿海地区。因此，台风荷载参数的取值显得尤为重要，需要独立分析。^[1]

1) 台风荷载取值

我国习惯称形成于 26 ℃ 以上热带洋面上的热带气旋 (Tropical cyclones) 为台风，按照其强度，分为六个等级：热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风。其中台风风力为 12 ~ 13 级，底层中心风速 32.7 ~ 41.4 m/s；强台风风力 14 ~ 15 级，底层中心风速 41.5 ~ 50.9 m/s；超强台风风力 > 16 级，底层中心风速 > 51.0 m/s。^[2]

依据《热带气旋等级》(GB/T 19201—2006)，台风风速的定义底层中心附近，时距为 2 min 的最大平均风速 (m/s)，而我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)，将设计风荷载采用是不同重现期场址 10 m 高度，10 min 平均最大风速。若直接采用台风风速作为设计风速，由于台风的观测风速时距短，风荷载将被放大。根据文献 3^[3]，按照离海风不同时距风速间的换算关系，依贝努利公式计算，空气密度按照规范取值 $\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$ ，经换算可得到 10 min 平均风速的换算风压值如表 1 所示：

表 1 台风换算风压

Tab. 1 Typhoon converted wind pressure

热带气旋	等级	换算基本风压值 /kPa		
		最小	最大	平均
台风	12 级	0.542	0.691	0.614
	13 级	0.694	0.869	0.779
强台风	14 级	0.874	1.078	0.973
	15 级	1.083	1.314	1.196
超强台风	16 级	1.319	1.591	1.452
	17 级	1.596	1.900	1.745

对比表 1 与《建筑结构荷载规范》中 50 a 一遇基本风压值，当采用台风风速换算的风压值作为结构设计的基本风压时，其风荷载要大于荷载规范取值。考虑到增大设计风压同时会增大建设成本，不利于项目提高项目的收益率，因此通常情况，结合保险公司对光伏电站遭受台风灾害的起赔条件为遭受 12 级以上的台风，因此选用 12 级台风换算风压作为设计基本风压。

2) 体型系数

根据《光伏电站设计规范》对地面光伏组件风压体型系数统一取值为 1.3。而《建筑结构荷载规范》中将迎风面分为上部和下部，根据角度不同及风向不同分别取值，小于 10° 时上部取 ±1.3，下部取 ±0.5；大于 30° 时上部取 ±1.4，下部取 ±0.6；期间插值。《光伏支架结构设计规程》^[4] 对体型系数采取了更为细致的规定，如表 2 所示：

表 2 《光伏支架结构设计规程》体型系数取值

Tab. 2 Body shape coefficient value

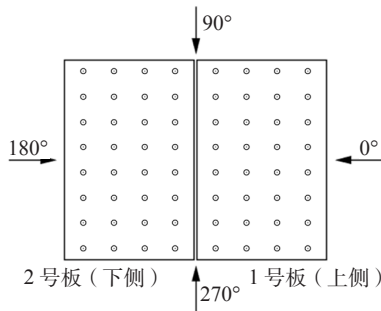
体型系数	体型 β	$\leq 15^\circ$	20°	30°	40°	55°
μ_{s-1}	体型系数 μ_{s-1}	0.8	0.85	1.0	1.3	1.3
μ_{s-2}	体型系数 μ_{s-2}	-0.95	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6

为充分了解光伏方阵体型系数的真实情况，我们采用了缩尺比例 1 : 4.5 的物理模型在风洞试验^[5]

进行了模拟。试验按照 0°~360° 每 15° 一个风向角，设置 24 个试验风向角；安装倾角以此分别为 0°、10°、16°、18°、19°、20°、21°、22° 共 8 个倾角工况。试验模型如图 2 所示。



(a) 风洞试验缩尺模型

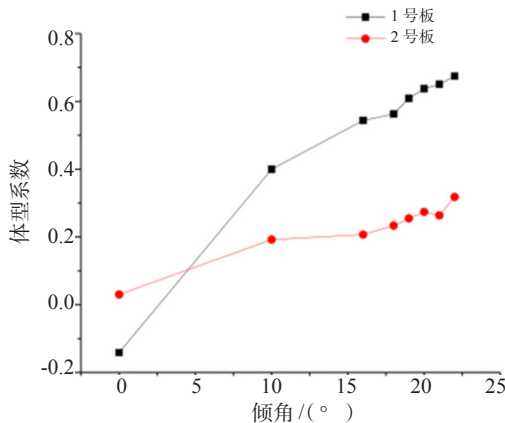


(b) 光伏板测点分布

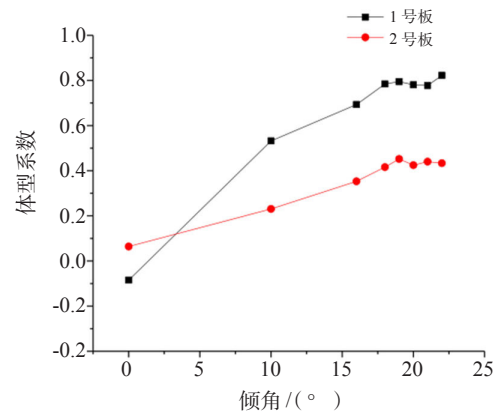
图 2 风洞试验缩尺模型与光伏板测点分布

Fig. 2 Scale model of wind tunnel test and point distribution of photovoltaic plate

光伏板距离地面 0.8 m 高度（鱼塘有水）和 2.2 m 高度（鱼塘无水）时的不同的试验结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，倾角越小，体型系数越小；上侧光伏板的体型系数大于下侧光伏板；随着安装高度的增加，体型系数有所增大；20° 倾角时整体的体型系数约为 0.6，16° 倾角时整体的体型系数约为 0.52。



(a) 上侧光伏板的体型系数与倾角关系



(b) 下侧光伏板的体型系数与倾角关系

图 3 风洞试验得到的体型系数

Fig. 3 Scale model of wind tunnel test and point distribution of photovoltaic plate

对比三本规范的体型系数取值，试验结果与《光伏支架结构设计规程》^[4] 的 $\mu_{s,1}$ 较为接近，比《建筑结构荷载规范》及《光伏电站设计规范》偏小很多。考虑到试验结果并不能代表所有工况，本项目设计拟偏保守取值，按照《光伏电站设计规范》取值设计。同时，在辐射量损失很少的情况下，将年辐射量最大倾角 18° 降低至 16° 倾角作为光伏板安装倾角，以降低所受风荷载。

2 支架结构有限元模拟

本项目采用大型通用有限元计算分析软件 SAP2000，对支架结构进行了模拟计算分析，光伏支架平面及立面布置如图 4 所示。支架采用 Q235B 级冷弯薄壁型钢，桩基础采用 PHC300A 型管桩，桩基嵌固点距离泥面以下 1.2 m，出露泥面以上约 2.0 m，基本风压取 0.68 kPa（按 12 级台风考虑）；体型系数偏安全取 1.3；粗糙度类别按 A 类地区；其余参数按照规范取值。计算模型如图 4 所示，结构布置图如图 5 所示。

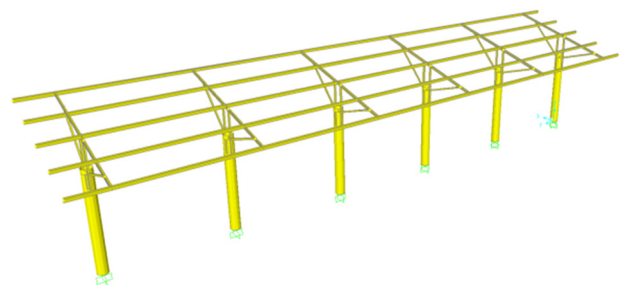
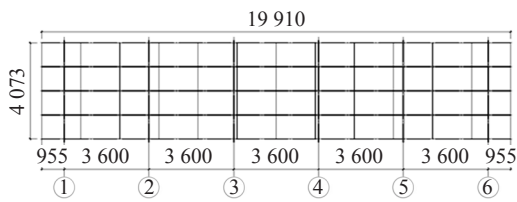
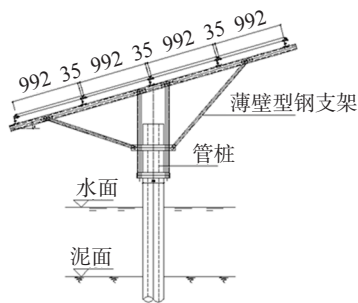


图 4 SAP2000 计算模型

Fig. 4 SAP2000 computational model



(a) 平面图



(b) 立面图

注：图中尺寸单位为 mm。

图5 光伏支架平面及立面布置图

Fig. 5 Photovoltaic support plan

计算结果显示，支架结构前四阶频率为 0.25 s, 0.17 s, 0.16 s, 0.13 s, 振动模态如图 6 所示：

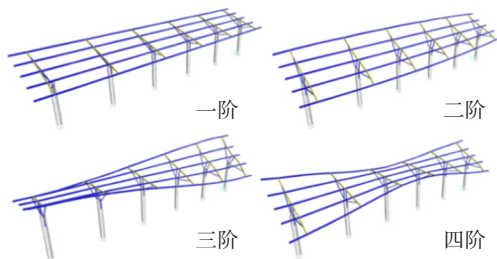


图6 前四阶振动模态

Fig. 6 Fourth order vibration modes

从上图中可以看出，一阶振动模态为纵向平动，二阶振动为横向平动，三阶与四阶模态均为扭转。构件强度计算结果如图 7 所示，变形计算结果如图 8 所示。

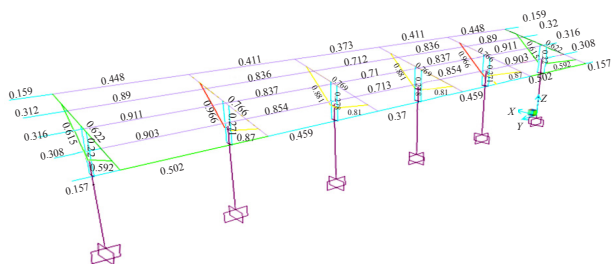


图7 支架应力比计算结果

Fig. 7 Calculation results of stress ratio of support

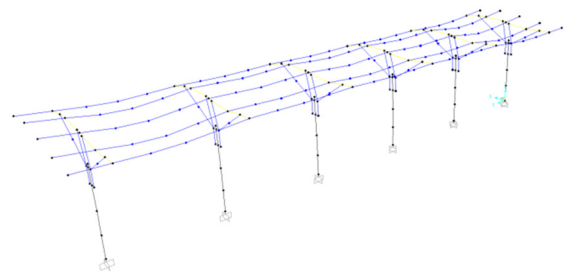


图8 支架变形示意图

Fig. 8 Deformation sketch of support

计算结果显示，斜梁最大应力比为 0.76，纵向檩条最大应力比为 0.91，斜撑最大应力比为 0.67，立柱最大应力比为 0.288，各构件均满足规范要求；纵向檩条最大变形为 6.9 mm，满足规范小于 1/250 梁跨（14.4 mm）要求；支架顶端水平位移最大值为 19 mm，满足规范小于 1/60 支架高度（50 mm）要求。

3 组件连接节点

轻型钢结构遭受台风荷载时，屋面通常是最薄弱环节，甚至檩条都尚未遭遇严重破坏屋面板就已被掀去。^[6] 光伏面板与支架结构构成的体系也与之类似。光伏组件自身承载力较高，一般光伏组件均应满足 IEC61215 标准中正面 5.4 kPa，背面 2.4 kPa 的承载力要求。但光伏板边框较薄，通常只有 1.5~1.8 mm，边框与支架横梁的连接，当光伏组件采用螺栓连接，在台风瞬时极大风速作用下极容易撕裂，造成“飞板”现象；当采用压块连接，由于压块接触面积大，在风吸力作用下，不宜发生边框撕裂，但压块在长期的受风荷载振动中，容易松脱，造成组件连续脱落；因此，结合螺栓安装不宜松脱的优点，采用压块与螺栓共同连接，同时错开在不同位置，对防止台风荷载作用下的组件脱落更为有利。

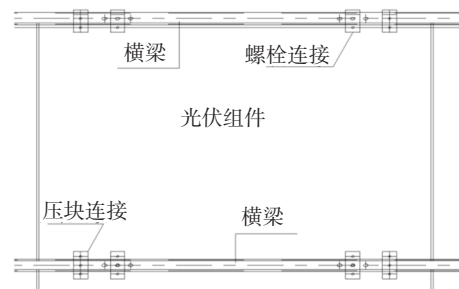


图9 光伏板连接大样

Fig. 9 Photovoltaic board connection sample

当组件竖排布置时，支架横梁与组件仅有四个交叉连接点，也即组件只能四点连接，而当组件横向布置时，组件长边与横梁平行，可以采用多点连接（如图9所示），增加连接点的数量后，可有效防止“飞板”现象的发生。

4 台风考验结果

项目建成后，自2017年先后经历了13号台风“天鸽”（17级），14号台风“帕卡”（12级）正面在台山登陆，2018年又经历14级台风“山竹”（14级）。在经历台风后，整个光伏区阵列受损较小。损坏主要发生在光伏方阵外围角部，有少数支架立柱发生了南向的倾斜弯曲变形，分析原因主要是由角部局部阵风较大产生的倾覆力所致；同时外排上部少量组件脱落，印证了支架上部所受风荷载较下部较大，脱落原因推断是局部安装未到位所致；此外，个别阵列出现了面板起伏现象，分析原因主要是在风荷载作用下，部分支架抱箍出现了滑移，引起了横梁弯曲变形所致。3种情况分别如图10展示的3张照片所示。



(a) 少数支架立柱发生了南向的倾斜弯曲变形



(b) 外排上部少量组件脱落



(c) 部分支架抱箍出现了滑移

图10 台风“山竹”过后支架受损轻微

Fig. 10 After typhoon "MANGKHUT", the bracket was damaged slightly

5 结论

本项目自建成后，遭遇2次超过12级以上的台风正面吹袭，并未造成严重损失，支架系统结构设计是比较成功的，设计理念和方法得到了印证，可为实际应用提供指导。

通过本项目的设计与实践检验，可以得出以下结论：

1) 光伏电站抗台风设计首先需要确定风荷载的基本风压取值，可根据业主要求，按照台风风速换算风压值进行选取。

2) 降低安装倾角，可以有效降低光伏面板风荷载体型系数，提高支架承受风荷载的能力；对于外排边角部的光伏支架应构造上增加构件强度，提高抗台风承载力。

3) 加强连接节点，包括采用横排布置方式，同时螺栓加压块组合方式安装，防止光伏组件脱落；增强抱箍的竖向承载力，必要时设置抗滑移构造。

当然抗台风除了电站设计外，还应通过加强日常的巡检，台风前的安全排查，购买工程保险等方式以减少台风灾害损失。

参考文献：

- [1] 宋丽莉, 毛慧琴, 汤海燕, 等. 广东沿海近地层大风特性的观测分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(6): 731-736.
- [2] 中国气象局. 地面气象观测规范 风向和风速: GB/T 35227—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 林雯, 方平治, 雷小途, 等. 台风条件下不同时距最大平均风速之间的转换系数研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(1): 42-50.
- [4] 国家能源局. 光伏支架结构设计规范: NB/T 10115—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [5] 梁枢果. 广东某光伏项目风洞试验研究报告[R]. 武汉: 武汉大学结构风工程研究所, 2016.
- [6] 肖玉凤. 基于数值模拟的东南沿海台风危险性分析及轻钢结构风灾易损性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

作者简介：

史磊（通信作者）

1975-，男，河南新郑人，高级工程师，结构专业，工程硕士，主要从事新能源设计及工程建设工作（e-mail）shilei@gedi.com.cn。



史磊

（责任编辑 郑文棠）