

平单轴光伏跟踪支架-基础受荷特性与优化设计

王龙威¹, 李 如¹, 豆红强², 谢森华²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 2. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福州 350108)

摘 要: 以高寒高海拔区某大型光伏电站中平单轴光伏支架系统为背景, 依托 ABAQUS 有限元模拟软件, 构建大跨度平单轴光伏支架-基础-面板一体化三维有限元模型, 探讨极端环境下平单轴光伏跟踪系统关键构件的受荷特性与失稳变形机制, 并藉此提供针对性的优化设计建议。结果表明, 受极端风荷载作用, 该大跨度平单轴光伏系统在最大跟踪角度下, 其檩条最大应力达 544.4 MPa, 立柱最大位移达 76.3 mm, 致使局部檩条、H 型钢桩存在潜在屈服破坏风险; 上部结构各构件的变形与其所处位置有关, 整体表现为沿主梁长轴方向呈波浪线型分布, 两立柱的跨中位置同样多发生较大位移, 且在光伏组件悬臂端部最为明显, 其在风荷载作用下的最大变形甚至达 153.2 mm。针对大跨度平单轴跟踪光伏系统中的薄弱部位, 提出可增强局部构件的强度或改变局部结构特征等优化建议以增强其整体稳定性。

关键词: 光伏系统; 数值模拟; 极端荷载; 平单轴; 力学特性; 跟踪

中图分类号: TK513.4

文献标志码: A

0 引 言

近年来, 随着能源消耗速度的不断增加, 以传统能源为基础的能源结构越来越难以适应当前社会的发展需求, 加快发展太阳能对世界可持续发展具有至关重要的战略意义^[1-2]。太阳能在空间分布上存在能量密度低、间歇性的特点^[3-5], 促使国内外诸多学者在太阳能收集、利用等方面提出诸多方法, 并已展开大量研究^[6-7]。从传统的固定式光伏支架到跟踪式光伏支架^[8-9], 从地面光伏到屋顶光伏甚至是水上光伏^[10-11], 从单一的光伏发电到农-光、渔-光、牧-光互补, 光伏发电形式愈显多样, 光-电转换及土地资源利用率不断提高^[12-13]。光伏发电系统作为光-电转换的核心发展迅速, 并以能保持较高发电效率的跟踪光伏发电系统备受青睐, 其中以高效能且仅有一个旋转自由度的平单轴光伏系统最具竞争力^[14]。

面对中国平原低海拔地区的人口密度大、可利用土地面积少、土地审批难度大、租赁成本高, 且太阳能资源相对匮乏等问题, 光伏产业逐步向太阳能资源相对丰富、海拔较高、地形较为复杂的高原山区发展。随之而来的则是高原山区复杂的气候环境, 诸如风、积雪等均严重影响光伏系统的正常运行。同时, 平单轴光伏支架系统连接及传动构件较多且跨度大, 面对极端环境光伏发电系统中的薄弱部位受力特征更加复杂。然而, 目前有关大跨度平单轴光伏受荷特性的研究多集中在单一的光伏系统上部结构, 如孙宁宁^[15]基于 CFD 模拟平单轴光伏支架风荷载作用下的变形与应力特征; 吴立晴

等^[16]结合结构计算方法与 Midas/gen, 探讨了强风作用下平单轴光伏跟踪支架的可靠性; 王峰等^[17]和马文勇等^[14]则分别借助风洞试验研究大长宽比平单轴光伏组件的风荷载特性与平单轴光伏支架大风条件下扭转气动失稳特性。

另一方面, 光伏系统中应用光伏组件的数量取决于支架结构的强度和变形限度, 同时亦受支架下部提供反力的桩基的限制^[18]。但当前在开展光伏系统受荷特性研究时, 多将上部光伏组件结构与下部支架基础人为割裂。譬如, 光伏系统的所有荷载最终是靠其桩基础与地基土的相互作用来承担的, 但当前研究多是将光伏系统中桩基础的受荷边界简化为固定边界, 忽略了桩-土之间的相互作用, 这就导致其与实际工程条件并不一致, 进而无法准确揭示复杂荷载作用下大跨度光伏系统的受荷特性与其失稳变形机制^[19]。可见, 深入开展大跨度平单轴光伏系统上部支架结构与下部基础一体化受荷与其变形特性的研究大有必要。

鉴于此, 本文拟依托高寒高海拔地区某大型光伏电站中平单轴光伏系统, 借助有限元软件 ABAQUS 构建大跨度平单轴光伏支架-基础-组件一体化的三维数值模型, 研究光伏组件在最大光伏跟踪角度状态与不同受荷环境下的大跨度光伏系统跟踪支架-基础-组件的受荷特性, 以期准确揭示现场大跨度平单轴光伏跟踪系统的失稳变形机制, 并藉此提出优化设计方案。

1 工程概况与光伏支架既有受损情况

拟建场地位于海拔高度 4000~4600 m, 为高原山地地貌,

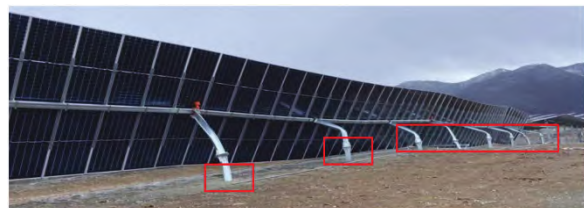
收稿日期: 2023-06-29

基金项目: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科技项目(2023022701)

通信作者: 豆红强(1987—), 男, 博士、副教授, 主要从事基础工程方面的研究与教学工作。douhq@fzu.edu.cn

四周无遮挡,全年平均太阳辐射量达 6434.8 MJ/m^2 ,属于全国太阳能资源最丰富区域(A类)。为提高光伏电站的发电量,增加电站综合利用效率,对场址内地形较为平坦的区域,计划采用平单轴光伏支架,并在建设过程中随坡就势,不对原始地表进行处理,以减少对地表的扰动;同时,拟在最大的 45° 跟踪角度时,光伏组件最低点离地高度设置为 1.8 m ,藉此实现“牧光互补”的光伏电站运营模式。此外,结合场地地基土物理力学性质及地基土的分布特征,拟建光伏阵列及升压站基础选用块碎石土层、强风化砂岩、板岩层作为拟建建(构)筑物地基基础持力层。

然而,在光伏电站建设过程中,由于建设场区跨度范围大,局部平单轴光伏支架布设区域地形条件、外部受荷环境不同,再加上构件运输、安装过程的偶然损伤,不可避免的存在部分支架设计与环境不匹配的情况,支架中局部构件发生变形失稳。现场调研发现,自工程建设以来的变形失稳构件即达到 13 处,其中最为典型为立柱扭曲变形失稳(图 1a)、光伏组件破坏(图 1b)、光伏组件破坏脱落、折断(图 1c)。可见,平单轴光伏支架设计在某些极端工况下仍存在变形失稳风险,因此,有必要借助数值模拟手段有效定位平单轴光伏系统中的薄弱构件,揭示其受荷特性与其失稳变形机制,为大跨度平单轴光伏支架的优化设计提供参考依据。



a. 立柱扭曲变形失稳



b. 光伏组件破坏



c. 光伏组件脱落、折断

图 1 平单轴光伏支架典型受损情况

Fig. 1 Typical damage of flat uniaxial photovoltaic trackers

2 支架-基础一体化数值模型

2.1 有限元模型构建

拟基于 ABAQUS 有限元软件构建平单轴光伏系统一体化分析模型,藉此揭示平单轴跟踪光伏系统支架-基础-面板的受荷与变形响应特征。计算模型包括光伏组件、几字形檩条、C 字形檩条、主横梁、连接轴承、立柱以及桩基础,其中每个光伏组件的尺寸为 $2278 \text{ mm} \times 1134 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,整个光伏系统共装配 2×52 块光伏组件,并沿主梁长轴方向对称排列布

置;檩条、横梁以及立柱的截面信息如图 2 所示,其中支架由 51 根长 2738 mm 几字形檩条、首尾 2 根 2738 mm C 字形檩条以及 9 组立柱与连接轴承组成。光伏组件安装在固定于主横梁的檩条上,以檩条固定并支撑光伏组件的悬臂段。但遗憾的是,为协调光伏系统的安全性与经济性,在实际工程结构设计时檩条长度并未延伸至光伏组件的所有悬臂长度;主横梁通过连接轴承固定于立柱,并藉由连接轴承转动实现范围为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 的光伏跟踪;立柱则约束在延伸出地表 800 mm 的钢桩基础上,以此获得消减上部支架结构外力作用的反作用力,图 3 即为简化后的有限元模型与其细部结构。

模型各构件的几何尺寸均按现场光伏系统等比例构建,各构件几何尺寸如图 2 所示。为提高模型收敛性,防止计算中出现沙漏现象,不可避免地忽略了构件中的部分非必要结构特征,如部分圆角、倒角和钻孔,仅保留有主横梁、檩条等主要受荷结构。同时,光伏系统上部支架中各构件材料主要为 Q355 钢材,拟采用理想弹塑性模型予以模拟;光伏组件则是太阳能玻璃材质,采用线弹性模型予以模拟。表 1 即为相应的计算参数。

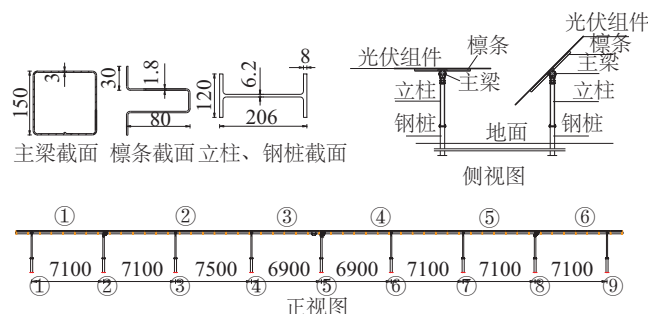


图 2 光伏系统几何结构(mm)

Fig. 2 Geometry structure of PV system(mm)

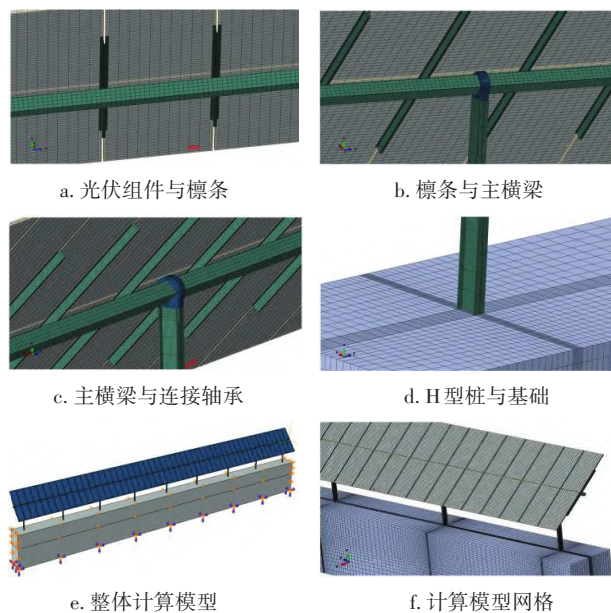


图 3 有限元模型与其细部结构

Fig. 3 Finite element model with its detailed structure

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	弹性模量 E/MPa	泊松 比 μ	屈服应力 f_y/MPa	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
光伏组件	7.0×10^4	0.22		450
Q355 钢	2.06×10^5	0.30	355	7860

材料	弹性模量 E/MPa	泊松 比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
地基土	100	0.30	2100	30	25

需指出的是,模型的网格划分不仅影响着有限元分析计算的精确性,更对分析能否收敛起着决定性的作用。因此,为避免二次积分单元造成接触计算不易收敛的问题,有限元模型中各构件的模拟采用三维实体单元 C3D8R,并采用 8 节点六面体划分网格,加密关键部位网格密度,同时适当放宽非关键部位网格密度。为表征下部基础的荷载响应过程,同样通过三维实体单元 C3D8R 还原钢桩及其周围土体,整个有限元模型划分为 839472 个单元,共计 1252399 个单元结点。钢桩亦为 Q355 H 型钢,总长 2.8 m,其中入土深度 2.0 m,延伸出地表 0.8 m,整个光伏系统共设有 9 根 H 型钢桩与立柱相连;同时为避免边界效应,取 $3 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 65 \text{ m}$ 基础土层区域作为基础受荷过程的研究对象,并选择 Mohr-Coulomb 模型模拟地基土层,具体参数如表 1 所示。

特别的,ABAQUS 有限元计算软件中并未规定模型各参数的计量单位。为此,本文拟以 N、mm、MPa、t 作为力、长度或位移、应力、质量的单位。

2.2 边界条件与荷载

在有限元分析模型中,边界条件的设置用于还原光伏系统的现场运行条件。为此,将模型中地基基础的 4 个侧面侧向位移予以约束固定,且基础底部 3 个方向的自由度全部约束。各光伏系统构件之间则通过摩擦接触或 Tie 接触的方式连接以简化复杂的螺栓锚固结构,进而提高建模效率。具体来说,光伏组件与檩条、檩条与主横梁、主横梁与连接轴承、轴承与立柱等接触表面设置为 Tie 接触;H 型桩与土设置为摩擦接触,其法向为硬接触,切向摩擦系数设为 0.35。

高寒高海拔环境下光伏系统稳定性的影响因素主要源自自重荷载、强风作用以及积雪荷载。在有限元模型中自重荷载可通过软件中的“地应力”功能实现,而风荷载则通过 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[20]中的转换式(1)将风

速转换为风压载荷,并在有限元软件中以表面载荷的形式施加于光伏组件,项目实施区域开阔平坦,有记录的最大风压为 450 Pa。

$$p = \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

式中: p ——最大风压,Pa; v ——最大风速,m/s; ρ ——空气密度,从安全角度考虑,选择数值较大的冬天空气密度 $1.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

对于场地中随天气变化的积雪荷载,经调查发现场地雪荷载基本雪压 S_0 为 $0.50 \text{ kN}/\text{m}^2$,但考虑到当支架传感器收集到大雪信号,光伏系统的控制柜触发大雪保护模式,可清除组件表面大部分积雪,因此在本文模拟过程中光伏组件表面的积雪均按 200 Pa 计算。

需指出的是,本文为还原现场受荷环境,设置有不同受荷工况,分别为考虑自重荷载(记为 W1 工况)、风荷载(W2 工况)、雪荷载(W3 工况)以及风+雪荷载(W4 工况)。

3 计算结果分析

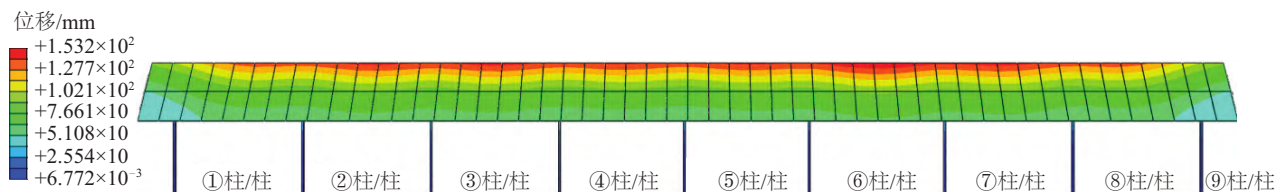
大跨度平单轴跟踪光伏系统的受荷力学与变形特征外部荷载作用息息相关,如支架自重、强风作用及积雪荷载等均可能导致结构受荷特征的变化。为此,本节基于前述数值模拟试验探讨不同受力特征下光伏系统结构的荷载-位移响应,从而进一步分析光伏系统结构的强度与变形特征。

3.1 光伏支架的位移与应力特征

为探讨光伏支架的位移与应力特征,特以极端工况为例进行分析,即光伏组件与地面呈 45° 的最大光伏跟踪角度,也是最不利受风状态(45° 仰角光伏组件)。

由图 4 可知,该工况最大位移出现在立柱 6 与 7 跨中远离地面的光伏组件端部,其值为 153.2 mm。在水平受风状态下,远离地面一侧的光伏组件除光伏系统两侧端部的面板变形较小外,其余部分变形特征基本相同,均表现为远离地面端变形大,靠近地面端变形小的特点。图 4b 中主梁的变形包络特征与前述图 4a 中其上部的光伏组件变形特征基本一致,在跨中出现有较大变形,变形包络特征整体上呈波浪线型。

进一步的,若仅考虑光伏组件中的太阳能电池的受力,如图 5 中最不利风荷载作用下光伏组件中太阳能电池的应力特征,较为明显的,太阳能电池在风荷载作用下沿垂直于主梁长轴方向逐渐减小,且主梁上方的光伏组件应力集中区甚至发展至太阳能电池(线框 a),最大不均匀应力达 5.30 MPa,存在太阳能电池局部受力过大,因而存在局部隐裂的潜在风险,极不利于光伏系统的稳定运行。



a. 光伏组件变形特征



图4 风荷载下45°仰角光伏组件的变形特征

Fig. 4 Deformation characteristics of PV modules with 45° elevation angle under wind load

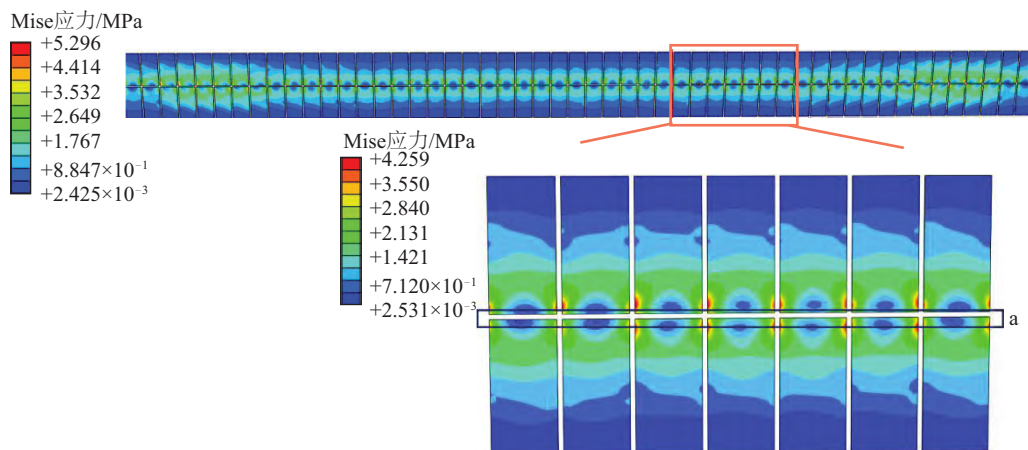


图5 最不利风荷载作用下光伏组件的应力特征

Fig. 5 Stress characteristics of photovoltaic modules under most unfavorable wind loads

图6统计了各工况下45°仰角光伏系统各构件的最大应力。可知,在45°仰角下的光伏组件、主梁以及轴承在其自重及外荷载(风、积雪)作用下最大应力均远未达到屈服破坏强度,而檩条及立柱在风、积雪荷载作用下局部屈服,甚至在W4工况下存在有檩条最大应力达544.4 MPa的情况,远远超出其屈服破坏强度。也即说明在风荷载作用下,光伏系统中的檩条存在局部屈服破坏的风险。结合图7中檩条和立柱最大应力部分云图可发现,檩条的最大应力主要出现在其与主梁连接的边缘,同时接触面的几字形拐角区域(图7a放大区域中的椭圆框线内)应力增长也较为显著,因此在实际

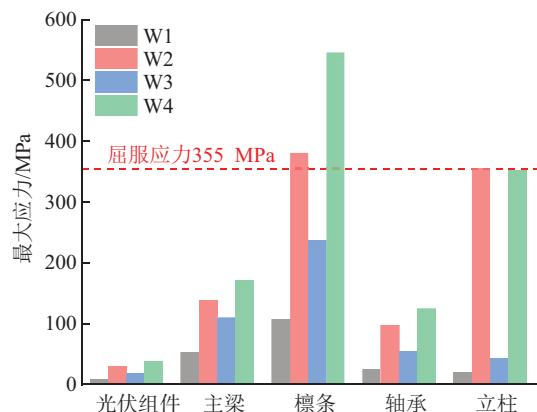
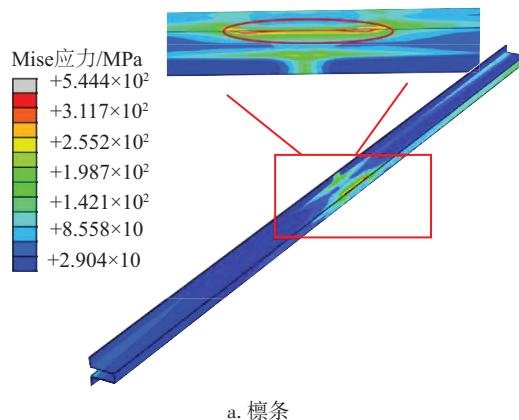


图6 不同工况下45°仰角光伏系统各构件的最大应力

Fig. 6 Maximum stresses in components of photovoltaic system at 45° elevation angle for different cases

工程施工过程中有必要在前述檩条所述区域内部增设加强构件;此外,图7b中立柱的最大应力发生位置(最大跨间距中的立柱7)为立柱与土体交接面处H型钢的翼缘部,实际为延伸出地表的800 mm的H型钢桩部分,同时经统计发现,其余立柱3、6同样在与土体交接面处H型钢的翼缘部,亦将要达到塑性屈服破坏阶段。也即说明该光伏系统在水平极限风荷载作用下,立柱结构强度存在一定的风险,若场地风速增加或立柱安装前存在结构损伤,有可能导致光伏系统的结构失稳。因此,有必要提高立柱的结构稳定性,如在柱低增设翼板、增加翼缘厚度、提高钢材强度等。

图8为风荷载作用下立柱变形前后的应力位移对比,与图1a对比不难发现,由于立柱存在较大的长细比,立柱底部受力较大,而立柱顶部因较大的长细比具有明显位移响应,



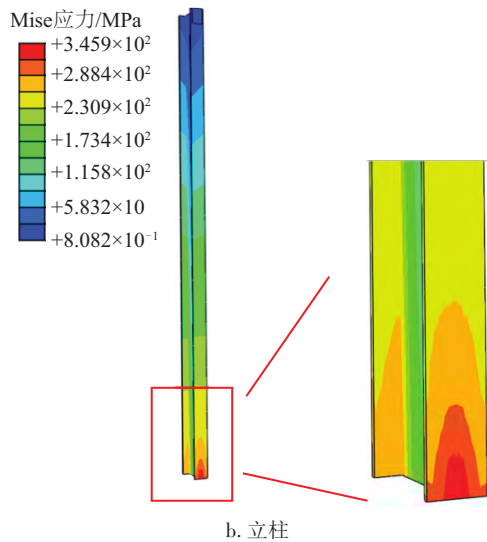


图7 极端风+雪荷载作用下(W4工况)构件最大应力云图
Fig. 7 Maximum stress contour of structural component under extreme wind-snow loads (W4 case)

立柱顶部最大位移达 76.3 mm, 这直接改变了光伏系统原有的受力状态, 不利于平单轴光伏跟踪支架的稳定。

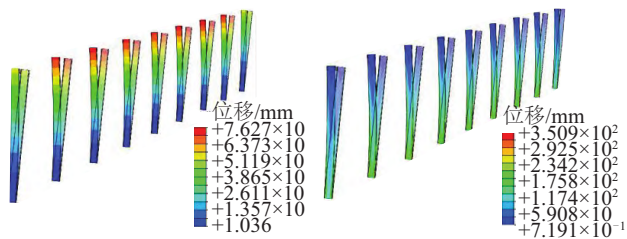
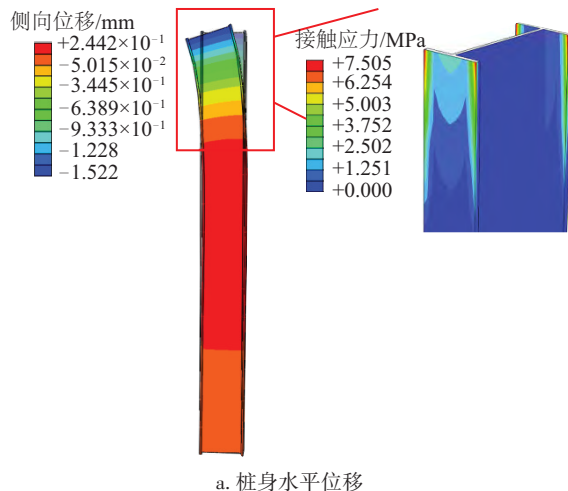


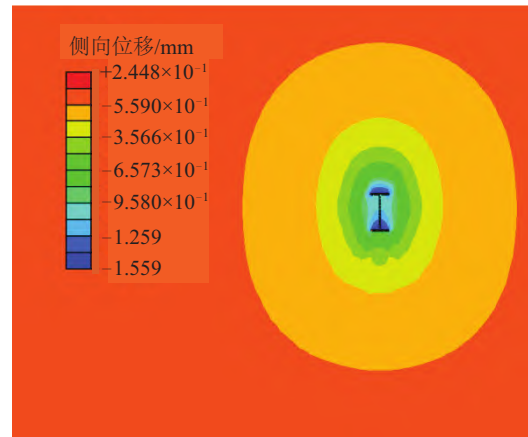
图8 极端风荷载作用下立柱变形前后的应力位移对比
Fig. 8 Comparison of stress and displacement of columns before and after deformation under extreme wind load

3.2 桩-土相互作用

与前述相同, 最不利受风状态下桩身最大应力同样位于最大跨间距中的桩 7 顶部, 图 9 为光伏系统在水平风荷载作用下得到 H 型钢桩 7 及其下土体的水平位移图。不难看出,



a. 桩身水平位移



b. 土体水平位移

图9 桩7及其下土体水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of pile 7 and soil

桩与土的水平位移集中在浅表层, 当桩深超 0.5 m 后位移较小, 几乎接近于 0, 也即说明桩土间嵌固良好。与之相应的, 接触面压力分布变化同样集中在浅表层, 深部接触面压力与风荷载作用前变化不大, 同样说明桩体深部变形小; 从土体位移特征来看, 桩前沿水平受风方向土体受到明显的挤压作用, 出现被动挤压破坏区域。

此外, 图 10 统计了各工况桩顶特征点 Mise 等效应力。由图 10 可发现, 9 根 H 型钢桩在不同受荷条件下, 桩顶受荷特征存在一定的差异, 各工况下光伏系统两端部的桩 1 及桩 9 桩顶荷载常低于其余桩, 且由前所述, 其上部的立柱由于两侧不均匀受力导致的侧向挠曲变形又大于其余立柱。可见, 桩 1、桩 9 与其上部的立柱 1、立柱 9 受力特征并不协调, 桩体竖向受荷较小, 而立柱又受明显的侧向挠曲。此外, 受风工况下桩顶受荷明显远大于其余工况, 这与前述图 6 规律相同, 即在最不利风荷载作用下光伏系统存在一定的风险, 立柱与桩体存在部分区域接近塑性变形阶段。

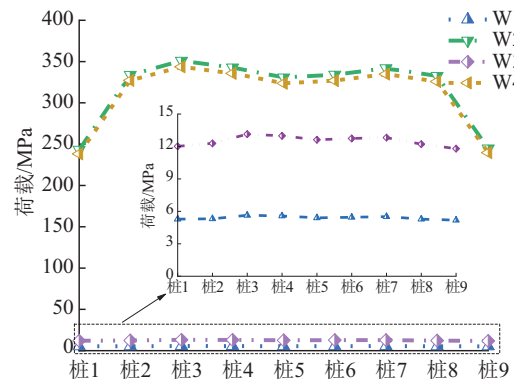


图10 不同工况下桩顶最大Mise等效应力

Fig. 10 Maximum Mise equivalent stress at top of pile for different cases

进一步的, 图 11 中给出了各工况桩底特征点 Mise 等效

应力。由图 11 可知,相较于其余各桩,各工况下光伏系统两端部的桩 1 及桩 9 桩底荷载明显较小,且从整体看,各工况下桩底荷载均处于较小值。这主要由于在有限元模型中 H 型钢桩完全嵌固于土体内部,较好地发挥了桩侧摩阻力的作用。然而在实际工程中,受限于工程地质条件,H 型钢桩较难直接静压入土,需经引孔、静压、回填等一系列流程,对施工要求高,且很难达到有限元模型中完全嵌固的程度。因此,在实际工程中桩底的荷载将远大于图 11 所述,设计施工过程中有必要将桩底设置于坚硬土层,同时尽量确保桩间土的回填与夯实质量。

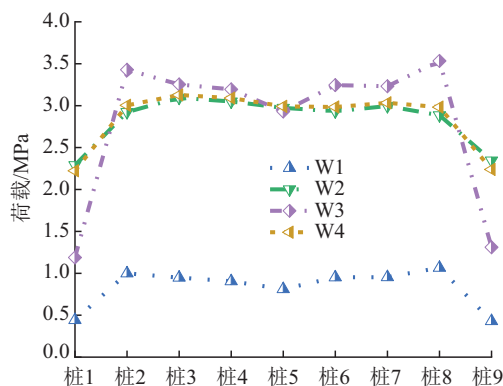


图 11 不同工况下桩端 Mise 等效应力分布

Fig. 11 Mise equivalent stress distribution at base of pile for different cases

4 一体化优化建议

基于前述数值模拟结果,不难发现,由主梁支撑、传动,并将整体联系在一起的平单轴光伏支架,其主梁上的光伏系统构件(檩条、光伏组件)的受荷特征与构件所处位置息息相关,整体上表现为与主梁位移与应力特征相同的发展规律,但又受其局部悬臂结构、光伏跟踪角度的影响,表现出不同的变形特征。而主梁下部用以支撑、固定上部构件的立柱、钢桩的受力与变形特征,更多的受光伏系统外力荷载作用、光伏跟踪角度的影响。因此,为减少光伏组件的应力不均、构件局部受力过大导致的屈服破坏,综合前述一体化结构模型,为保障设备平稳运行,提出如下优化建议。

4.1 立柱优化措施

为保障支架系统的稳定运营,对于高风险区域,如大风力的地形不规则谷地、山峰,坡度大且地形起伏的坡地等立柱两侧焊接钢板、减小立柱高度等方式均能降低立柱长细比,提高支架的整体稳性,同时对于立柱底部受力较大的问题,可通过桩基础外包 C30 混凝土的方式改善柱底集中受力区域的强度。

4.2 檩条优化

图 12 为 W2 工况跨中某一光伏组件的受力云图及现场

光伏组件受损情况。从图 12 中可发现,光伏组件完全悬臂段存在变化明显的应力分界,且在实际极端受损光伏组件中多出现沿此应力分界面断裂的结构失稳现象;而对于光伏组件中应力较为集中区域即线框 a、b,虽存在局部受力过大发生隐裂的风险,但在两侧檩条的支撑下,在极端环境下仍能稳定,而位于檩条支撑段边缘,完全悬臂段的应力分界处,受极端外力作用甚至发生沿应力分界面完全断裂,这就说明檩条能较好地分担光伏组件的受荷。而对于檩条外的完全悬臂段光伏组件由于缺少檩条的分担受荷效果,在极端受荷条件下存在沿檩条末端应力分界断裂风险。因此,可通过适当延长檩条长度或增设斜撑的方式保护其间的光伏组件。特别的,现场测风塔测得最大瞬时风速为 34.4 m/s,远超设计最大风压 450 Pa。

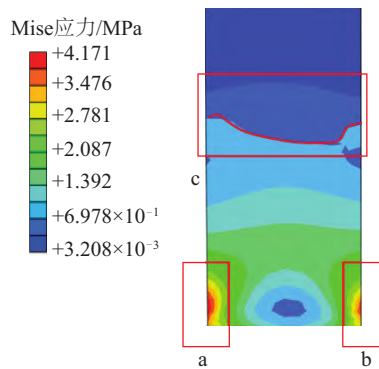


图 12 光伏组件受损及 W2 工况下的受力云图

Fig. 12 Photovoltaic module damage and stress contour for W2 case

进一步的,增设立柱 6 和 7 间的跨中及光伏系统一侧边缘的檩条斜撑,具体如图 13 所示。计算结果如图 14 所示,不难发现,最不利工况下增设斜撑对减小面板及檩条变形表现出有益效果,最多减小光伏组件变形 8 mm、檩条 7 mm。与此同时,由图 15 亦能看出,檩条斜撑对减小原主梁上部应力

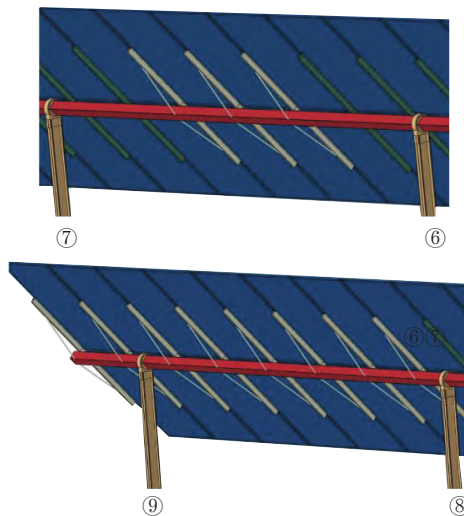


图 13 增设斜撑示意

Fig. 13 Schematic diagram of additional diagonal braces

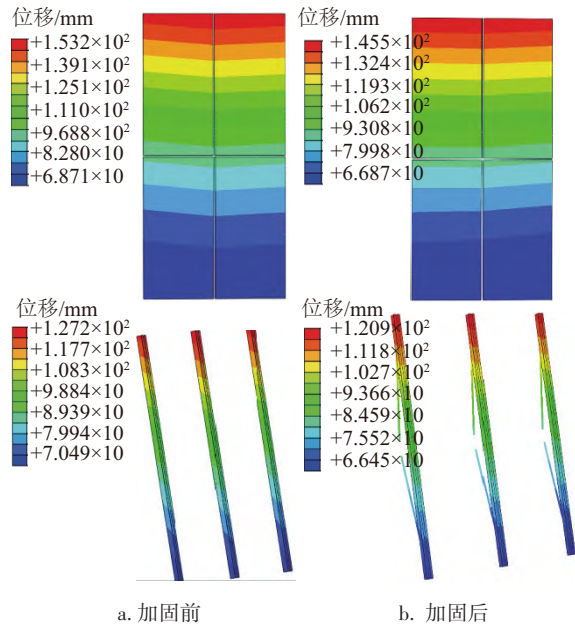


图 14 跨中檩条增设斜撑前后光伏组件、檩条的变形特征
Fig. 14 Deformation characteristics of PV modules and purlins before and after addition of diagonal braces to purlins in span

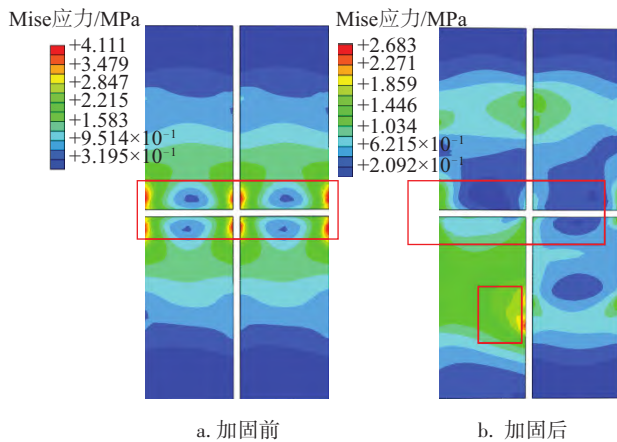


图 15 增设斜撑前后电池板应力特征

Fig. 15 Stress characteristics of panel before and after addition of diagonal braces

集中区,降低光伏组件隐裂风险,最大应力下降达 35.7%,且应力集中部位转而出现在檩条的端部(线框处),也恰恰说明增设斜撑对维持其上部光伏组件稳定性具有较好效果。

而图 16 为前述图 12 相同位置延长檩条长度至 4566 mm (光伏组件无完全悬臂段)光伏组件应力云图。可发现延长檩条长度后,不仅应力集中区域的最大应力有所降低,且应力分布转变为由光伏组件主梁侧沿垂直于主梁向外渐变趋势,也即说明延长檩条长度可提高悬臂欠稳定光伏组件的稳定性。

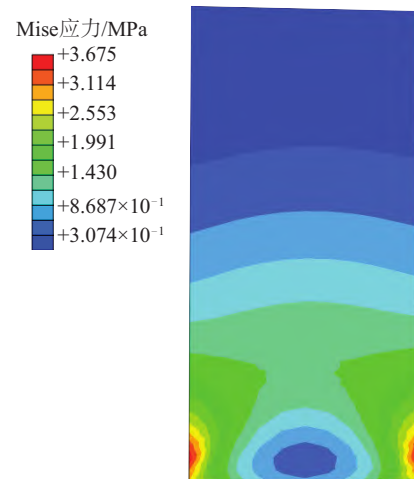


图 16 加长檩条后光伏组件受力云图

Fig. 16 Stress contour of module after lengthening purlin

4.3 构件强度优化

在极端风荷载作用下,构件结构变形特征明显,最大达 153.2 mm,檩条、立柱以及钢桩存在局部屈服破坏的风险。因此,可针对性地在檩条与主梁接触面处增设可嵌入檩条内的钢板加强件。同时,由于 H 型桩在引孔成桩后,建议在桩顶约 0.5 m 处采用强度高的回填料,对高风险区域则建议采用灌浆法处理,一方面提高极端风荷载作用下被动区土体强度,另一方面减少由于高寒地区浅表层冻融导致的桩土界面强度弱化。

5 结 论

面对高寒高海拔区某大跨度平单轴光伏跟踪系统的典型受损情况,借助 ABAQUS 有限元模拟软件,建立了平单轴跟踪光伏支架-基础-面板一体化的三维有限元模型,系统分析了不同受荷环境下最大光伏跟踪角度下的光伏系统跟踪支架-基础-面板的受荷与变形特性,并针对性地提出优化设计建议,得到如下主要结论:

1) 上部结构各构件的变形与其所处位置有关,整体上表现为沿主梁长轴方向波浪线型分布,两立柱的跨中位置同样多出现有较大位移,且在光伏组件悬臂端部最为明显,风荷载作用下在光伏支架远离地面的面板端部出现最大变形达 153.2 mm,光伏组件的不均匀应力高达 5.30 MPa。

2) 在各荷载工况作用下,现有光伏系统中檩条与立柱为局部受荷最明显区域。尤其在 W4 工况下,檩条最大应力甚至达 544.4 MPa,立柱最大位移达 76.3 mm,均不利于光伏系统的安全运营。

3) 桩与土的水平位移集中在浅表层,桩前沿水平受风方向土体受到明显的挤压作用,光伏系统两端部的桩 1 及桩 9 桩顶荷载常低于其余桩。

4) 为减少光伏组件的应力不均、构件局部受力过大导致的屈服破坏,建议采取一定的光伏系统结构及强度优化措

施,如增加两端部檩条长度、增设檩条斜撑或提高光伏系统中桩基础的强度等。

需指出的是,平单轴光伏支架跟踪系统各构件的连接实际应为螺栓锚固结构,而在构建数值模型时并未考虑到螺栓强度对系统强度的影响,且未模拟光伏系统中的液压驱动跟踪装置,对主梁在旋转过程中的扭转特征尚不明晰,这些均有待于进一步研究和完善。

[参考文献]

- [1] 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 W Y, SUN G J, LIU X B, et al. Tests for wind load distribution model of solar panels[J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(7): 8-13.
- [2] 汪俊杰.基于支架参数自适应的单轴光伏跟踪系统算法研究[D].杭州:浙江大学,2019.
WANG J J. Research on algorithm of single-axis photovoltaic tracking system based on support parameter adaptive[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [3] GHOSH H R, BHOWMIK N C, HUSSAIN M. Determining seasonal optimum tilt angles, solar radiations on variously oriented, single and double axis tracking surfaces at Dhaka[J]. Renewable energy, 2010, 35(6): 1292-1297.
- [4] PERPIÑAN O, LORENZO E, CASTRO M A, et al. Energy payback time of grid connected PV systems: comparison between tracking and fixed systems [J]. Progress in photovoltaics: research and applications, 2009, 17(2): 137-147.
- [5] BERNARDI M, FERRALIS N, WAN J H, et al. Solar energy generation in three dimensions [J]. Energy & environmental science, 2012, 5(5): 6880-6884.
- [6] 胡宝琳,吴仁杰,周磊,等.固定式光伏支架受力性能与试验研究[J].太阳能学报,2022,43(8):116-121.
HU B L, WU R J, ZHOU L, et al. Mechanical properties and experimental study on fixed photovoltaic bracket [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(8): 116-121.
- [7] 黄华,张梅,何银涛.固定式光伏支架承载能力试验研究[J].太阳能学报,2020,41(4):7-13.
HUANG H, ZHANG M, HE Y T. Experimental study on load-carrying capacity of fixed photovoltaic bracket [J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(4): 7-13.
- [8] PFAHL A, COVENTRY J, RÖGER M, et al. Progress in heliostat development[J]. Solar energy, 2017, 152: 3-37.
- [9] 窦伟,许洪华,李晶.跟踪式光伏发电系统研究[J].太阳能学报,2007,28(2):169-173.
DOU W, XU H H, LI J. Analysis of solar PV tracking system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2007, 28(2): 169-173.
- [10] 张华.城市建筑屋顶光伏利用潜力评估研究[D].天津:天津大学,2017.
ZHANG H. Research on PV energy potential of rooftop in urban area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [11] 刘浩晨,国振,王立忠,等.漂浮式水上光伏电站锚泊系统设计方法[J].太阳能学报,2019,40(12):3485-3492.
LIU H C, GUO Z, WANG L Z, et al. Design method for mooring system of floating photovoltaic system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2019, 40(12): 3485-3492.
- [12] 魏单,陈琳.“农光互补”光伏电站设计[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2017,13(2):108-112,142.
WEI D, CHEN L. Design on agricultural photovoltaic complementation power station [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (natural science), 2017, 13(2): 108-112, 142.
- [13] 江富平.光伏发电项目综合效益评价研究:以“渔光互补型”光伏电站为例[D].武汉:湖北工业大学,2016.
JIANG F P. The study of comprehensive benefit evaluation in photovoltaic power generation project [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016.
- [14] 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].振动工程学报,2024,37(5):838-846.
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]. Journal of vibration engineering, 2024, 37(5): 838-846.
- [15] 孙宁宁.双主梁平单轴光伏支架系统设计[D].西安:西安理工大学,2018.
SUN N N. Design of single-axis photovoltaic support system with double main beams [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [16] 吴立晴,邵国栋,刘钊,等.强风地区平单轴光伏电站稳定性分析与优化[J].低温建筑技术,2021,43(11):107-110.
WU L Q, SHAO G D, LIU Z, et al. Stability analysis and optimization of horizontal single axis photovoltaic power station in strong wind area [J]. Low temperature architecture technology, 2021, 43(11): 107-110.
- [17] 王峰,王佳盈,王子健,等.大长宽比平单轴光伏板风荷载试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(7):130-139.
WANG F, WANG J Y, WANG Z J, et al. Experimental study on wind load of flat uniaxial photovoltaic panels with large aspect ratio [J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2023, 50(7): 130-139.
- [18] LIN C K, DAI C Y, WU J C. Analysis of structural deformation and deformation-induced solar radiation

- misalignment in a tracking photovoltaic system [J]. Renewable energy, 2013, 59: 65-74.
- [19] 张亮, 朱紫玲, 罗冰冰, 等. 固定式光伏支架可承受荷载有限元分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 15-20.
- ZHANG L, ZHU Z L, LUO B B, et al. Finite element analysis of allowable load of fixed photovoltaic brackets [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(9): 15-20.
- [20] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
- GB 50009—2012, Load code for the design of building structures[S].

LOADING PERFORMANCES AND OPTIMAL DESIGN OF BRACKET-FOUNDATION OF FLAT UNIAXIAL PHOTOVOLTAIC TRACKERS

Wang Longwei¹, Li Ru¹, Dou Hongqiang², Xie Senhua²

(1. Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou 311122, China;

2. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Taking a large-scale photovoltaic power station in alpine and high-altitude area with flat uniaxial photovoltaic racking system as the background, relying on ABAQUS finite element simulation software, we constructed an integrated three-dimensional finite element model of large-span flat uniaxial photovoltaic bracketing-foundation-panel, explored the loading characteristics of the key components of the flat uniaxial photovoltaic tracking system and the mechanism of instability deformation in an extreme environment, and provided the targeted optimization design suggestions. The results show that, under extreme wind load, the maximum stress of purlins in this large-span PV system reaches 544.4 MPa and the maximum displacement of columns reaches 76.3 mm at the maximum tracking angle, resulting in the potential risk of yield damage of local purlins and H-type steel piles; the deformations of superstructure members are related to their locations, and the overall performance shows that they are distributed in a wavy pattern along the long axis of the main girder, the mid-span position of the two columns also has a large displacement. The maximum deformation under wind load is even 153.2 mm, which is most obvious at the cantilever end of the PV module, and it is proposed to enhance the strength of the local components or change the local structural characteristics to enhance the overall stability of the large-span flat uniaxial tracking PV system.

Keywords: photovoltaic system; numerical modeling; load limits; flat uniaxial; mechanical properties; trackers