

# 复合材料光伏支架梁结构优化分析

杨 成, 陈建钧, 袁伟杰, 吴文超

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

**摘 要:** 在 ABAQUS 中搭建复合材料光伏支架梁的仿真模型, 以 Isight 为平台与 ABAQUS 后台代码进行交互, 集成多岛遗传算法对光伏支架梁结构进行多参数优化设计。对约束变量和设计目标进行参数研究试验设计, 得到 Pareto 图验证优化结果的可靠性, 并对最优支架结构进行线性屈曲分析校核其稳定性。研究结果表明: 采用 Isight 平台集成 ABAQUS 有限元分析软件对光伏支架结构进行多参数优化设计具有较高的效率和可信度。

**关键词:** 复合材料; 有限元分析; 结构优化设计; 光伏支架梁; Isight 集成平台; 多岛遗传算法

**中图分类号:** TM914.4/TB332 **文献标志码:** A

## 0 引 言

截至 2017 年底, 中国累计可再生能源发电补贴缺口总计 1127 亿元, 其中光伏补贴缺口 455 亿元(占比约为 40%), 且呈逐年扩大的趋势, 直接影响光伏行业健康有序发展。国家能源局表示, 分布式光伏建设目标从扩大规模转变为增质提效, 大力支持不需要国家补贴的项目<sup>[1]</sup>。优化光伏系统、降低成本作为光伏产业升级中重要的环节, 必将越来越受到资本市场的重视。

杨涛等<sup>[2]</sup>对太阳能光伏支架受力进行有限元仿真, 通过 Design Explorer 实现产品优化设计, 得到方形管材的最优截面尺寸。柯锐等<sup>[3]</sup>将玻璃纤维增强树脂材料作为光伏支架型材进行支架结构强度校核, 同时进行风洞力学性能测试和多因子老化特性研究, 验证了复合材料光伏支架实际应用的可行性。薛达等<sup>[4]</sup>对冷弯 C 型钢的侧扭性能进行了非线性有限元分析, 研究初始几何缺陷、截面高宽比、卷边宽度和板件厚度对钢梁承载力曲线的影响。但是, 对于光伏支架只是针对孤立的梁进行分析, 未将自动优化手段引入结构设计。本文以聚氨酯复合材料作为型材, 基于 Isight 平台对光伏支架主次梁进行多参数优化分析, 提出一种基于多岛遗传算法的高效率优化分析方法。

## 1 有限元模型的建立

本文针对光伏组件支架的主次梁布置结构进行建

模。次梁为多跨连续梁, 承受光伏组件传来的荷载值; 主梁为两跨连续梁结构, 通过立柱等将荷载传至基础。载荷计算模型如图 1 所示, 次梁跨距为 2300 mm, 相邻次梁间距为 825 mm。

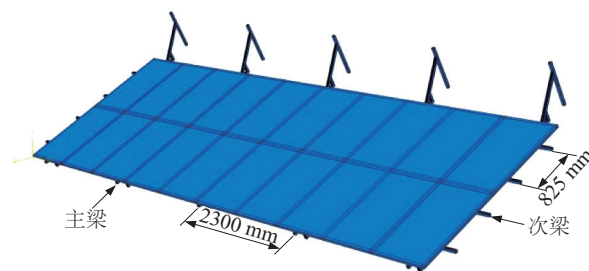


图1 光伏组件装配图

Fig. 1 Assembly of photovoltaic module

光伏支架主次梁均选用目前使用最广泛的 C 型材, 其截面示意图如图 2 所示, 其中支撑面宽度  $a$  为 10 mm。

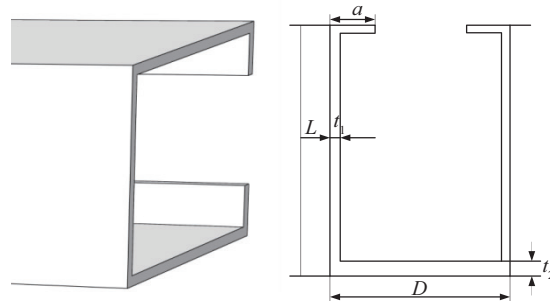


图2 主次梁截面图

Fig. 2 Cross section diagram of main and secondary beams

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51675182)

通信作者: 陈建钧(1977—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事金属材料损伤与断裂理论方面的研究。jjchen@ecust.edu.cn

主次梁采用聚氨酯复合材料,材料力学性能参数如表 1 所示。由于主次梁主要受到纵向弯曲作用,在结构优化设计中忽略纵向拉伸和横向弯曲的影响,弹性模量取值 45.2 GPa。相比光伏支架梁常用的 Q235 钢等钢材,这种复合材料具有较高的纵向拉伸和弯曲强度,承载能力远大于一般钢材,而且质量很轻,便于运输。光伏组件尺寸为 1650 mm×990 mm×40 mm,单块板质量 18.2 kg(自重  $P=0.121 \text{ kN/m}^2$ )。

表 1 聚氨酯复合材料力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of polyurethane composites

材料属性	检测结果
纵向拉伸强度/MPa	1480.0
纵向拉伸弹性模量/GPa	55.6
纵向弯曲强度/MPa	1742.0
纵向弯曲弹性模量/GPa	45.2
横向弯曲强度/MPa	128.0
横向弯曲弹性模量/GPa	10.1

载荷计算模型按 20 块板计,其中风荷载  $W_k$  为 0.389 kN/m<sup>2</sup>,雪荷载  $S_k$  为 0.35 kN/m<sup>2</sup>。实际工程中,要求光伏组件能抵抗 7 级大风,所以荷载组合效应应考虑风荷载组合效应。组合荷载和系统总受力分别如式(1)、式(2)所示。

$$S_d = 1.2P + 1.4W_k + 1.4 \times 0.7 \times S_k \quad (1)$$

$$G_t = S_d \times A_1 \quad (2)$$

式中,  $S_d$  ——组合荷载, kN/m<sup>2</sup>;  $G_t$  ——系统总受力, kN;  $A_1$  ——太阳能板受力面积, m<sup>2</sup>。

根据光伏组件尺寸,受力面积  $A_1$  为 32.67 m<sup>2</sup>,代入各参数值得到系统总受力为 33.75 kN。有限元分析 20 块光伏组件安装在 4 根次梁上,跨距为 2300 mm,共 5 根主梁。主次梁均采用 B31 梁单元建模,单元尺寸为 50 mm,求得次梁上的均布载荷为 0.827 N/mm。模型每根主梁两端约束 3 个平动自由度。载荷及边界条件设置如图 3 所示。

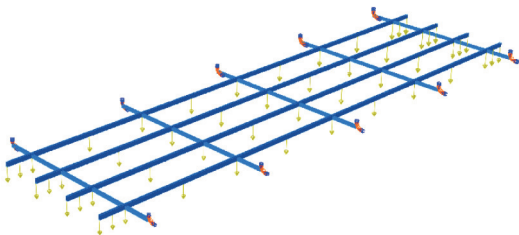


图3 光伏支架梁载荷施加及边界约束示意图

Fig. 3 Load application and boundary constraints schematic diagram of photovoltaic supporting beam

## 2 优化模型的建立

光伏支架梁结构设计的变量主要是几何参数,包括主次梁截面尺寸和次梁的跨距。以单位面积光伏组件所需主次梁总体积( $Ma$ )最小作为优化目标,将支架梁结构的 9 个几何参数( $D_1, H_1, t_{11}, t_{12}, D_2, H_2, t_{21}, t_{22}, S_p$ )作为设计变量,其中  $D_1, H_1, t_{11}, t_{12}$  为次梁截面尺寸,  $D_2, H_2, t_{21}, t_{22}$  为主梁截面尺寸,  $S_p$  为次梁跨距。由图 2 可知,主次梁的截面积分别如式(3)、式(4)所示,设计目标如式(5)所示。

$$S_1 = D_1 \times t_{12} + (H_1 - t_{11} - t_{12}) \times 2 \times t_{11} + 20 \times t_{11} \quad (3)$$

$$S_2 = D_2 \times t_{22} + (H_2 - t_{21} - t_{22}) \times 2 \times t_{21} + 20 \times t_{21} \quad (4)$$

$$Ma = (V_1 + V_2) / A \quad (5)$$

式中,  $V_1$  ——次梁体积,  $V_1 = S_1 \times (S_p \times 4) + 1000 \times 4$ , mm<sup>3</sup>;  $V_2$  ——主梁体积,  $V_2 = S_2 \times 3500 \times 5$ , mm<sup>3</sup>;  $A$  ——光伏组件受力面积,  $A = (S_p \times 4 + 700) \times 3300$ , mm<sup>2</sup>。

根据《光伏电站设计规范》<sup>[5]</sup>知次梁的允许最大挠度  $[\omega_1]$  为  $L/200$ ,主梁的允许最大挠度  $[\omega_2]$  为  $L/250$ ,其中  $L$  为支座间距,取安全系数为 1.5,则次梁的许可挠度  $[\omega_1]$  为  $S_p/300$ ,主梁的许可挠度  $[\omega_2]$  为 9.33 mm。允许应力取纵向弯曲强度 1742 MPa,安全系数为 1.5,许可应力  $[S]$  为 1161.33 MPa。支架梁结构变形图如图 4 所示,在 ABAQUS 中分析后可知主次梁最大挠度分别出现在图中  $C$  点和  $B$  点,其中  $B, C$  两点均为跨中。值得注意的是,次梁最大挠度值为  $B$  点与  $A$  点在  $U_3$  方向上的位移差值。

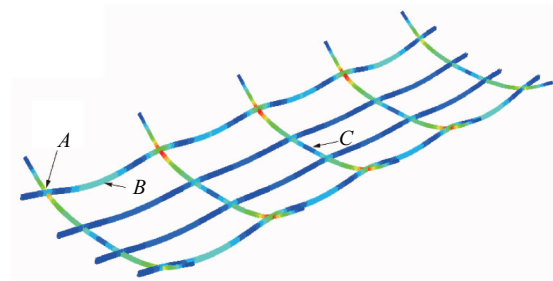


图4 光伏支架梁变形图(放大因子为100)

Fig. 4 Deformation figures of photovoltaic supporting beam(scale factor=100)

综上,对主次梁最大挠度和最大应力约束如式(6)~式(8)所示。

$$\omega_1 = g_1 \leq [\omega_1] \quad (6)$$

$$\omega_2 = g_2 \leq [\omega_2] \quad (7)$$

$$S = g_3 \leq [S] \quad (8)$$

式中,  $\omega_1$  ——次梁最大挠度, mm;  $\omega_2$  ——主梁最大挠

度, mm;  $g_1$ 、 $g_2$ 、 $g_3$ ——状态函数, 是关于 9 个设计变量的函数, 也是优化过程中必须满足的条件;  $S$ ——最大应力, MPa。

在 Isight 中次梁最大挠度约束条件通过 Calculator 组件如式(9)所示进行变换。

$$Eq(\omega_1) = Sp/\omega_1 \geq 300 \quad (9)$$

式中,  $Eq(\omega_1)$ ——等效次梁最大挠度, 为式(6)的等效形式。

9 个设计变量(单位为 mm)的取值范围如式(10)~式(13)所示。

$$20 \leq D_1, D_2 \leq 30 \quad (10)$$

$$30 \leq H_1, H_2 \leq 40 \quad (11)$$

$$2 \leq t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22} \leq 4 \quad (12)$$

$$2000 \leq Sp \leq 3500 \quad (13)$$

Isight 作为一种优化设计的工具, 具有丰富的优化算法和多种代理模型方法, 是一个开放的集成平台, 它提供的过程集成界面可方便地将各种工具(如商业 CAD 软件, 各种有限元计算分析软件及用户自行开发的程序等)集成在一起。本文采用多岛遗传算法集成 ABAQUS 进行多参数分析, 多岛遗传算法是针对遗传算法早熟而提出的一个解决方法, 能得到准确的全局最优解。利用 Isight 平台设计的优化计算线程如图 5 所示, 由优化计算组件、材料计算组件、ABAQUS 结构设计组件和参数计算组件构成一个循环计算回路。

在 Isight 平台上, 复合材料光伏支架梁结构优化设计的目标函数、设计变量、约束变量和优化目标均可通过平台中各输入模块进行设置。设计变量的取值均采

用离散集合的形式赋值, 其中  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $H_1$  和  $H_2$  取值的增量步为 1 mm,  $t_{11}$ 、 $t_{12}$ 、 $t_{21}$  和  $t_{22}$  取值的增量步为 0.1 mm,  $Sp$  取值的增量步为 100 mm, 采用离散集合取值的目的是使优化得到的结果可以更好地应用于工业生产。

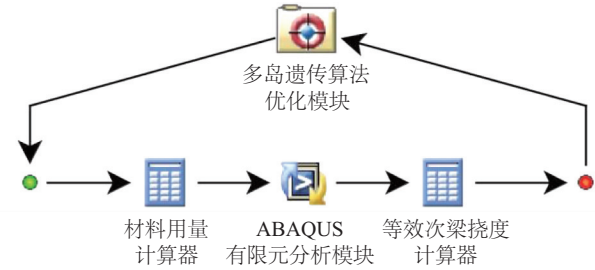


图5 光伏支架梁结构优化设计计算线程

Fig. 5 Flow chart of structural optimization of photovoltaic supporting beams

### 3 结果讨论与分析

在 Isight 的优化方案中, 优化方案的可行性由参数 Design Feasibility 判定, 其中整数“9”标识当前方案为截至目前的最优解。随着优化过程的深入, 最后出现的“Design Feasibility=9”则表征当前方案为全局最优解。在本文的优化过程中, 共出现 11 组“Design Feasibility=9”的解, 结果如表 2 所示。其中最后一组序号为 877 的计算结果为全局最优解。其中次梁截面尺寸  $D_1$  为 23 mm,  $H_1$  为 31 mm,  $t_{11}$  为 2.4 mm,  $t_{12}$  为 2.7 mm, 主梁截面尺寸  $D_2$  为 24 mm,  $H_2$  为 30 mm,  $t_{21}$  为 2.9 mm,  $t_{22}$  为 3.9 mm, 次梁跨距  $Sp$  为 3400 mm。设计目标  $Ma$  为

表2 聚氨酯复合材料力学性能参数

Table 2 Polyurethane composites mechanical properties parameters

循环 次数	次梁截面尺寸				主梁截面尺寸				$Sp$	$Eq(\omega_1)$	$\omega_2$	$S$	$Ma$
	$D_1$	$H_1$	$t_{11}$	$t_{12}$	$D_2$	$H_2$	$t_{21}$	$t_{22}$					
5	24	34	2.5	3.6	21	39	3.5	2.6	3200	369.03	8.04	23.82	0.444
14	23	31	2.6	3.4	26	34	3.8	2.9	3000	330.24	7.97	23.40	0.435
25	22	34	2.4	3.0	26	36	3.1	2.6	3100	335.59	8.94	27.02	0.406
122	22	31	2.4	3.0	27	36	3.1	2.6	3100	304.68	9.01	26.80	0.390
277	23	31	2.4	2.7	25	31	2.9	3.9	3200	323.09	9.24	28.78	0.375
379	23	31	2.4	2.7	24	31	2.9	3.9	3200	324.56	9.29	28.81	0.374
473	23	31	2.4	2.7	25	30	2.9	3.9	3200	327.91	9.30	29.01	0.373
671	23	31	2.4	2.7	25	30	2.9	3.8	3200	328.91	9.33	29.04	0.372
774	23	31	2.4	2.7	25	30	2.9	3.9	3400	344.14	9.28	28.95	0.367
873	23	31	2.4	2.7	25	30	2.9	3.8	3400	345.18	9.31	28.97	0.367
877	23	31	2.4	2.7	24	30	2.9	3.9	3400	345.78	9.33	28.98	0.366

0.36591 mm,根据式(9)得到次梁最大挠度  $\omega_1$  为 9.83 mm,主梁最大挠度  $\omega_2$  为 9.3271 mm,梁最大应力  $S$  为 28.976 MPa。从计算结果可看出,  $E_q(\omega_1)$  并非接近 300,若进一步减小次梁截面尺寸,将导致主梁挠度不能满足要求,主次梁必须作为一个整体系统来研究,这与大多数将主次梁孤立分析的情况有很大差别<sup>[6]</sup>。通过对 9 个设计变量进行参数研究(Parameter Study)试验设计(Design of Experiment,DOE),得到各参数对优化目标和约束变量的影响因子,试验设计计算线程如图 6 所示。参数  $Ma$ 、 $S$ 、 $\omega_2$  和  $E_q(\omega_1)$  的 Pareto 图如图 7 所示,纵坐标表示所有的设计变量,横坐标表示各设计变量对优化目标( $Ma$ )和约束变量( $S$ 、 $\omega_2$  和  $E_q(\omega_1)$ )的相对影响因子,正值表示正相关,负值则表示负相关。

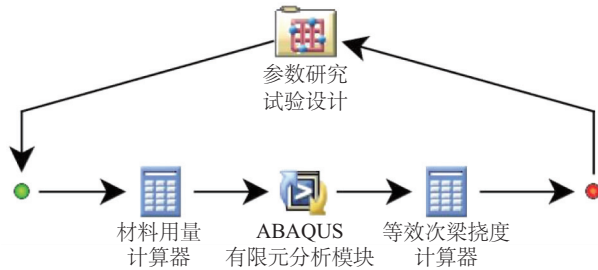


图 6 光伏支架梁结构参数研究试验设计计算线程

Fig. 6 Flow chart of DOE of parameter study according to photovoltaic supporting beam

由图 7a 可知,对  $Ma$  影响最大的参数是  $t_{11}$  和  $t_{21}$ ,相对地腹板厚度  $t_{12}$  和  $t_{22}$  对  $Ma$  的影响较小,  $t_{22}$  影响因子最小。从图 7c 可知,  $t_{22}$  对  $\omega_2$  的影响因子较大,同时  $t_{12}$  对  $\omega_2$  的影响也处于较高的位置。这与优化结果中  $t_{12}$  和  $t_{22}$  相对  $t_{11}$  和  $t_{21}$  取得较大值一致。由图 7a 可知,  $Sp$  与  $Ma$  呈负相关,由图 7b~图 7d 可知,  $Sp$  对约束变量的影响相对较小,故  $Sp$  应在许可范围内取较大值,这也与优化结果一致。经 DOE 试验设计,验证了优化结果的可靠性。

由表 2 可知,梁的最大应力  $S$  远远小于材料的强度,但由于梁一般做成窄而高的形式,且这种复合材料

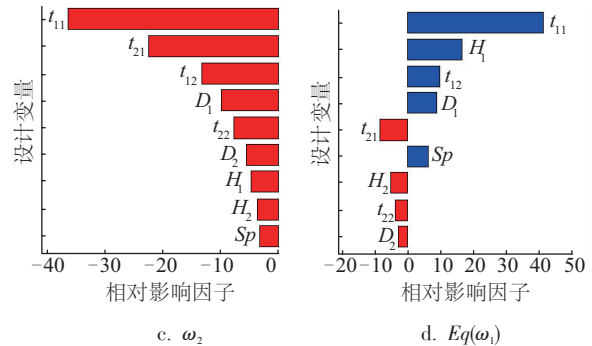
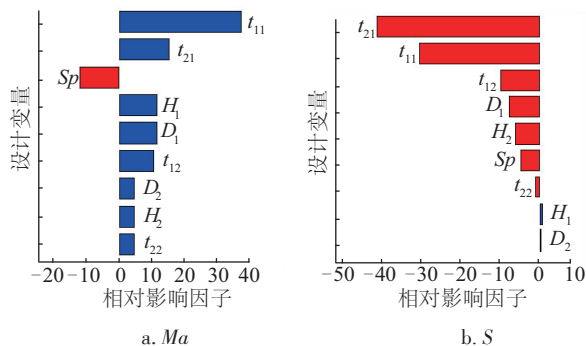


图 7 优化目标( $Ma$ )和约束变量( $S$ 、 $\omega_2$  和  $E_q(\omega_1)$ )的 Pareto 图

Fig. 7 Pareto diagram of optimized objective ( $Ma$ ) and bound variables ( $S$ ,  $\omega_2$  and  $E_q(\omega_1)$ )

型材横向弯曲弹性模量相对较小,在梁跨中部可能产生侧扭屈曲,导致丧失承载能力。基于得到的最优化结构参数,建立支架梁结构有限元模型并进行线性屈曲分析。其中梁截面材料属性设置如表 3 所示,其中  $E_i$  (单位为 GPa)、 $Nu_{ij}$ 、 $G_{ij}$  (单位为 GPa) 分别代表 3 个方向的杨氏模量、泊松比和剪切模量,梁截面材料方向设置如图 8 所示。

表 3 聚氨酯复合材料性能参数

Table 3 Performance parameters of polyurethane composites

$E_1$	$E_2$	$E_3$	$Nu_{12}$	$Nu_{13}$	$Nu_{23}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
55.6	45.2	10.1	0.3	0.3	0.3	10.1	10.1	10.1

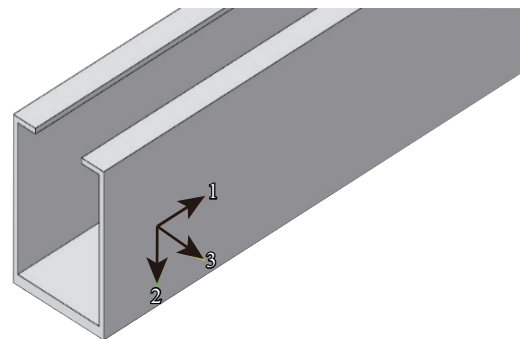


图 8 梁材料方向示意图

Fig. 8 Schematic diagram of material orientation of beam

屈曲分析变形图如图 9 所示,第 2 和第 4 根主梁两端由于次梁横向弯曲作用,由于应力集中产生较大变形,为便于观察,图 9 隐去过大的局部变形。经计算求得第一阶特征值 Eigenvalue=1.103,则该结构的临界载荷为本分析所施加载荷的 1.103 倍,所以在 Isight 平台下得到的最优化结构符合承载性要求。



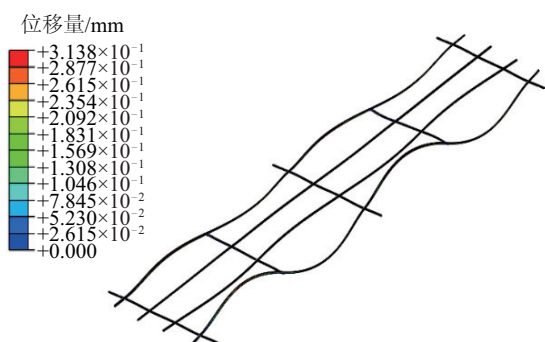


图9 最优结构线性屈曲分析结果图(放大因子为1460)

Fig. 9 Result picture of linear buckling analysis of optimal structure(scale factor=1460)

## 4 结 论

1)采用 Isight 平台能对有限元分析软件、材料计算组件、参数计算组件和结构优化设计组件进行集成,能实现光伏支架梁结构各设计变量的自动取值和结构优化计算的全自动化,从而使整个优化过程效率更高。

2)本文满足设计目标要求和约束条件的复合材料光伏支架梁结构的最优化结果为:次梁截面尺寸  $D_1$  为 23 mm,  $H_1$  为 31 mm,  $t_{11}$  为 2.4 mm,  $t_{12}$  为 2.7 mm,主梁截面尺寸  $D_2$  为 24 mm,  $H_2$  为 30 mm,  $t_{21}$  为 2.9 mm,  $t_{22}$  为 3.9 mm,次梁跨距  $S_p$  为 3400 mm。设计目标  $Ma$  为 0.36591 mm,次梁最大挠度  $\omega_1$  为 9.83 mm,主梁最大挠度  $\omega_2$  为 9.3271 mm,梁最大应力  $S$  为 28.976 MPa。

3)对所有参数进行 DOE 试验设计,验证了优化结果的可靠性,进行最优化结构在预载荷作用下的特征值屈曲分析,可确定结构失稳的临界荷载,进一步确定优化结果的可行性。

4)本文分析所获得的最优解已应用于实践中,光伏系统搭建完成 3 个月以来,未发现任何强度问题。关于最优解的实验验证笔者将在以后的工作中给出。本文工作可为光伏组件安装提供参考。

### [参考文献]

[1] 张宇. 多措并举推动光伏产业质量变革[N]. 中国改革报, 2018-06-13(002).

ZHANG Y. Multiple measures to promote the quality change of photovoltaic industry [N]. China reform daily, 2018-06-13(002).

[2] 杨涛, 范久臣, 刘荣辉, 等. 基于有限元法的太阳能光伏支架结构设计优化[J]. 吉林化工学院学报, 2016, 33(3): 39-44.

YANG T, FAN J C, LIU R H, et al. Design and optimization of photovoltaic support bracket based on finite element method[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2016, 33(03): 39-44.

[3] 柯锐, 朱晓东, 董中强, 等. 复合材料光伏支架结构设计及应用研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(2): 87-93.

KE R, ZHU X D, DONG Z Q, et al. Research on structure design and application of composites photovoltaic support bracket[J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2018(2): 87-93.

[4] 薛达. 冷弯C型钢梁的侧扭屈曲性能[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第14届(ISSF-2014)学术交流会暨教学研讨会论文集. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会, 2014: 6.

XUE D. Lateral-torsional buckling performance of cold-formed C-shaped steel beams [C]//The Symposium on the 14th (ISSF- 2014) Academic Exchange and Teaching Seminar on Structural Stability and Fatigue Branches of China Steel Structure Association. China Steel Structure Association Structural Stability and Fatigue Parallel Sessions, 2014: 6.

[5] GB 50797—2012, 光伏发电站设计规范[S].

GB 50797—2012, Code for design of photovoltaic power plants[S].

[6] 王芝云, 杨林青, 吴二军. 光伏支架受力性能影响参数有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(12): 77-80.

WANG Z Y, YANG L Q, WU E J. Finite element analysis of affecting parameters of photovoltaic support bracket[J]. Low temperature architecture technology, 2015, 37(12): 77-80.

## STRUCTURAL OPTIMIZATION OF COMPOSITE PHOTOVOLTAIC SUPPORTING BEAM

Yang Cheng, Chen Jianjun, Yuan Weijie, Wu Wenchao

*(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)*

**Abstract:** A simulation model of composite photovoltaic supporting beam was built in ABAQUS. Combining the ABAQUS and Isight platform together, the multi-parameter optimization design of photovoltaic supporting beam was carried out based on the multi-island genetic algorithm. DOE (Design of Experiment) Parameter Studies for constrained variables and design objectives were analyzed and the reliability of optimization results was verified by Pareto diagram. The stability of photovoltaic supporting beam was checked by linear buckling analysis for the optimal beam structure. The results show that multi-parameter optimization design of photovoltaic supporting beam integrated ABAQUS and Isight platform has high efficiency and credibility.

**Keywords:** composite materials; finite element analysis; structural optimization; photovoltaic supporting beam; Isight platform; multi-island genetic algorithm