基于弧长法的光伏支架极限承载力计算

远东集成科技有限公司 ■ 黄小东 * 张超 刘丕群

摘　要：首先采用有限元方法对所建立的光伏支架模型进行线性屈曲分析，得到其 1 阶临界载荷值，然后引入其 1 阶屈曲形状的 0.01 倍作为初始几何缺陷，并基于弧长法对该模型进行考虑初始几何缺陷的非线性屈曲分析，计算结果表明，非线性屈曲分析得到的模型极限承载力小于线性屈曲分析结果，说明光伏支架结构对初始几何缺陷的响应比较明显，因此，对光伏支架结构进行考虑初始几何缺陷的非线性屈曲分析是十分必要的。另外，在生产加工、运输、安装等环节要尽可能避免产生初始几何缺陷。

关键词：光伏支架；弧长法；屈曲分析；初始几何缺陷；临界载荷；极限承载力

0 引言

在光伏发电系统中，光伏支架作为直接支撑光伏组件的核心结构 [1]，要经受诸如强风、雨雪、冰雹等因素的影响，支架结构在光伏电站运行期内的结构稳定性成为光伏支架设计的重要考虑因素 [2]。若光伏支架结构的设计强度不够，有可能影响其稳定性，进而影响光伏电站的正常运行；反之，若光伏支架结构的设计过于保守，就有可能造成材料的浪费，同时提高光伏电站的建造成本 [3]。因此，有必要对光伏支架结构的稳定性展开研究。

本文通过建立一个基本光伏单元的有限元模型，并对其进行线性屈曲分析和考虑初始几何缺陷的非线性屈曲分析，计算得到光伏支架系统的极限承载力，为光伏支架的合理设计提供依据。

1 光伏支架初始几何缺陷

常见的光伏支架初始几何缺陷形式包括：1) 光伏支架多采用细长形型钢构件，而构件在加工、吊装、运输及安装过程中，由于方法或操作不当，往往会使构件产生初始弯曲 (挠度) 变形，这种变形也是光伏支架最为常见的初始几何缺陷；2) 光伏支架薄壁型钢构件在吊装或运输过程中，若受到冲撞或撞击，易造成构件的局部变形；3) 若构件实际尺寸与设计尺寸存在一定的偏差，或构件在安装时存在安装误差，则构件在安装时可能产生初始扭转变形。

2 弧长法原理

弧长法作为结构非线性屈曲分析的常用方法，可用于求解结构的最大临界载荷。通常结构分析的一般方程为：

$$K(x_i)=F_i \tag{1}$$

式中，x 为位移向量；i 为第 i 个载荷步；K 为系统刚度矩阵；F 表示载荷。在非线性屈曲分析时，系统的载荷为比例加载，设定 λ 为载荷比

收稿日期：2017-06-29

通信作者：黄小东 (1974—)，男，高级工程师，主要从事地面光伏电站设计方面的研究。163001@600869.com

2018.02印刷.indd 23 2018-2-24 10:54:01

例系数，则式 (1) 可表示为：

$$K(x_i)=\lambda F_i \tag{2}$$

此时，系统方程组共有 n 个方程，合计 $n+1$ 个未知量。为了能够成功求解式 (2)，必须补充一个约束条件，补充的控制方程为 [4]：

$$(x_i^j-x_{i-1})^2+(\lambda_i^j-\lambda_{i-1})^2=l_i^2 \tag{3}$$

式中，j 为第 j 个迭代步。

由该控制方程可知，式 (3) 的迭代求解过程如图 1 所示，方程求解的迭代路径为以点 (x_{i-1},λ_{i-1}) 为圆心、l_i 为半径的圆弧。因此，该方法被称为弧长法。

本研究采用弧长法对结构进行非线性屈曲分析，可避免由于计算时载荷值设置不合适而导致求解失败，或者计算结果在临界载荷附近发生跳跃，造成计算结果不够准确。

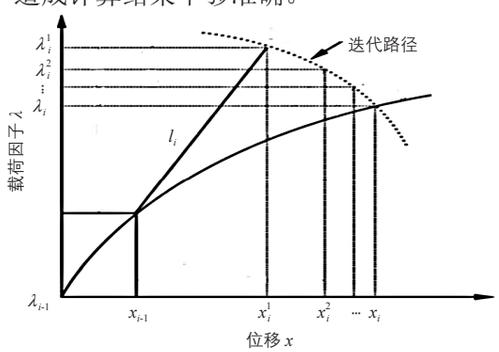


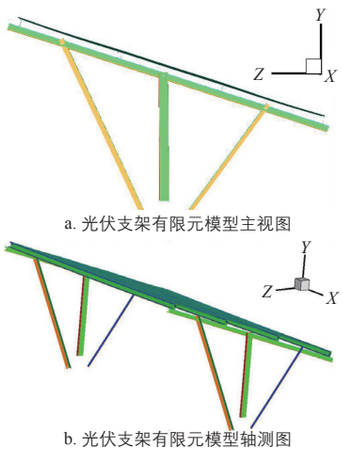
图 1 弧长法迭代求解示意图

3 有限元计算

3.1 有限元模型的建立

本文以某光伏电站的支撑系统为例，选取光伏支架的一个基本单元建立有限元模型，采用连续壳单元对模型进行网格划分，如图 2 所示。其中，光伏组件尺寸为 1662 mm×996 mm×6 mm；安装倾角为 18°；立柱规格为矩管 100 mm×40 mm×2.5 mm；前斜支撑规格为等边角钢 L40×3；后斜支撑规格为等边角钢 L56×3；檩条规格为 C 型钢 84 mm×40 mm×15 mm；斜梁规格为 C 型钢 60 mm×40 mm×10 mm；单元跨距为 3700 mm。

该光伏电站恒载荷为 0.15 kN/m^2，活载荷为 0.576 kN/m^2。为了能够得到光伏支架系统的极限



a. 光伏支架有限元模型主视图

b. 光伏支架有限元模型轴测图

图 2 光伏支架有限元模型

承载力，本研究选择在组件表面施加 1.4 倍活载荷与 1.2 倍恒载荷的载荷组合，即 1.2×0.15 kN/m^2+1.4×0.576 kN/m^2=9.864×10^{-4} MPa。

3.2 线性屈曲分析

线性屈曲分析又称作特征值屈曲分析，其目的是为了得到支架结构的特征值。特征值与所加载荷的乘积即为结构的屈曲临界载荷 [5]。

通过对本研究建立的光伏支架结构模型进行线性屈曲分析可知，结构发生第 1 阶屈曲时的变形如图 3 所示。结构的第 1 阶特征值为 2.084，结合所施加的载荷 9.864×10^{-4} MPa，可得到结构的第 1 阶屈曲载荷为 2.084×9.864×10^{-4}=2.056×10^{-3} MPa。即在光伏组件表面施加 2.056×10^{-3} MPa 的压力载荷会造成光伏支架结构第 1 阶屈曲。

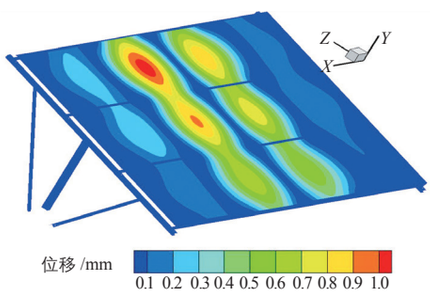


图 3 结构第 1 阶屈曲变形示意图

提取模型的前 6 阶特征值，分别为 2.084、2.229、2.553、2.804、3.034、3.333，各阶特征值间隔较小，表明屈曲临界力对结构的初始缺陷较为敏感，需要进行缺陷敏感性分析。

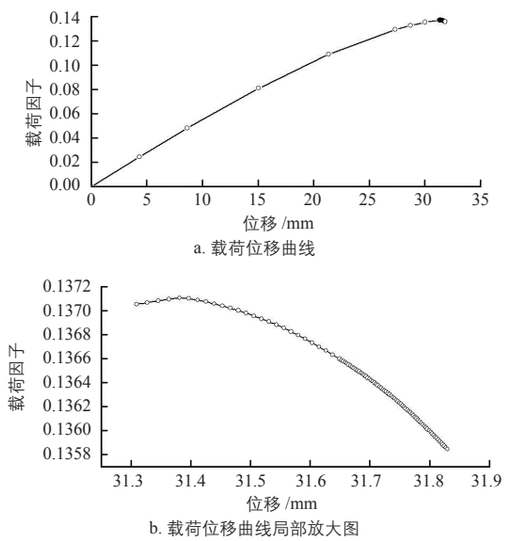
2018.02印刷.indd 24 2018-2-24 10:54:02

3.3 非线性屈曲分析

结构的屈曲响应很大程度上取决于初始几何缺陷，理想模型分析得到的屈曲临界力并不保守，因此，需要对所建立的光伏支架模型引入初始缺陷进行非线性屈曲分析[6]。本研究将线性屈曲分析得到的第 1 阶屈曲形状的 0.01 倍 (1%) 作为初始几何缺陷，并采用弧长法对光伏支架模型进行非线性屈曲分析，以便得到其考虑初始几何缺陷的屈曲临界力。

根据线性屈曲分析可知，模型的第 1 阶屈曲临界载荷为 2.056×10^{-3} MPa，在非线性屈曲分析中给模型施加 0.01 MPa 的均布载荷，停止条件中最大载荷比例系数设置为 1。

对所建立的有限元模型进行非线性屈曲分析，可得模型的载荷位移曲线如图 4 所示，其中图 4b 为载荷位移曲线在极值点附近的局部放大图。由图 4 可知，载荷位移曲线在点 (31.363，0.1371) 处开始出现下降，则该点为曲线的极值点，进而可知模型的临界载荷为 0.1371×0.01 MPa$=1.371\times10^{-3}$ MPa，小于线性屈曲分析的结果 2.056×10^{-3} MPa。

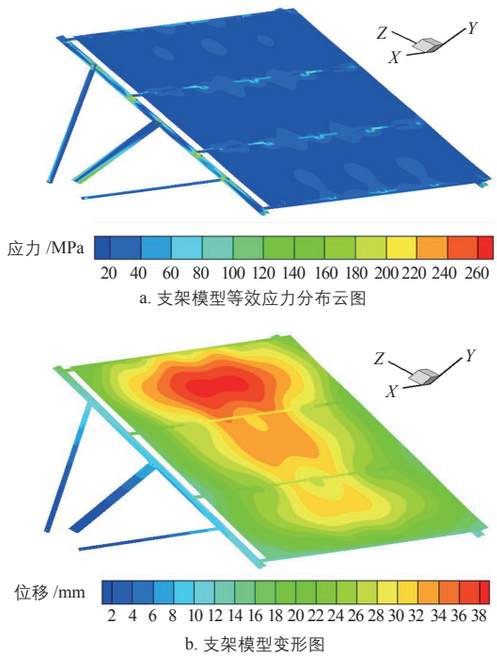


a. 载荷位移曲线

b. 载荷位移曲线局部放大图

图 4 载荷位移曲线

支架结构在临界载荷作用下的等效应力分布和变形结果如图 5 所示。由图 5 可知，最大等效应力位于檩条、檩托及斜梁的安装区域，其应力可达 265.087 MPa，结构的最大变形为 38.645 mm。



a. 支架模型等效应力分布云图

b. 支架模型变形图

图 5 临界载荷下支架模型等效应力云图和变形图

4 结论与分析

本文采用有限元方法对所建立的光伏支架模型进行了线性屈曲分析，得到其第 1 阶临界载荷值，然后基于弧长法对该模型进行了考虑初始几何缺陷的非线性屈曲分析，计算结果表明：

1) 非线性屈曲分析得到的模型极限承载力为 1.371×10^{-3} MPa，小于线性屈曲分析结果 2.056×10^{-3} MPa，说明由于初始几何缺陷的存在使得结构的极限承载力大幅度减小，结构对初始几何缺陷的响应比较明显。因此，对支架结构进行考虑初始几何缺陷的非线性屈曲分析是十分必要的。

2) 在生产、加工、运输、安装等环节都有可能导致结构出现初始几何缺陷，在这些环节需要严格注意，尽可能采取一定的保护及预防措施，避免初始几何缺陷的产生。

3) 本研究采用连续壳单元对模型进行网格划分并计算，能充分考虑到采用标准规范计算所不能考虑的杆件偏心布置、异型截面规格等情形，所得到的结果更接近于实际情况。 (转第 30 页)

2018.02印刷.indd 25 2018-2-24 10:54:03

由表 4 可知，在光伏组件中，不论被遮挡的电池片数量是多少，只要被遮挡的电池片处于同一子串中，就会影响这一子串的输出。如遮挡方式 1、2、7～17、19 和 20 中，被遮挡的电池片都并联于一个旁路二极管内，因此只有 1/3 的电池片会被短路，所造成的功率损失约在 29%，这与软件所模拟的情况 1 相符；遮挡方式 3～6 分别会对组件中的 2 个电池子串和 3 个电池子串造成影响，其造成的功率损失约在 60% 和 95%，与软件所模拟情况 3 中的遮挡 2 块电池片和遮挡 3 块电池片所造成的组件功率损失基本一致。

遮挡方式 18 为遮挡 3 个子串中的 6 块电池片 50% 面积，其输出功率为 151.46 W，相比遮挡 3 个子串中 6 块电池片 100% 面积 (遮挡方式 6)，功率损失要减少 41.73%。随着单片电池片上遮挡面积的减小，在遮挡方式 18 下，该组件的旁路二极管仍处于截止状态，未被导通，因此其输出功率较被完全导通时提高 134 W。

另一方面，遮挡方式 20 与 21 遮挡的电池片数量虽然一样，但由于遮挡电池片在组件中遮挡的位置不一致，所导致的功率损失也不尽相同。遮挡方式 20 只影响了 1 个子串，因此组件功率输出为 224.85 W；而遮挡方式 21 在 3 个子串中都造成了遮挡影响，但在其中 1 个子串中遮挡的面积并不是很大，没有导致该子串被旁路，因此功率输出比同样对 3 个子串都造成遮挡影响的遮挡方式 5 高，为 98.62 W。

4 结论

综上所述，通过软件模拟及现场实验测试分析，可得出局部阴影对光伏组件输出特性的研究结果为：

1) 在单个电池片遮挡面积小于 50% 时，通过被遮挡的电池片电流降低，组件输出功率随电流减小而降低；当单个电池片遮挡面积超过 50% 后，该电池片并联的旁路二极管被导通，组件输出功率降低 1/3 左右。

2) 当多个被遮挡电池片并联于 1 个旁路二极管内，不论被遮挡的电池片数量多少，其导致的组件输出功率损失约为 29%；当被遮挡电池片影响 2 个旁路二极管时，组件输出功率降低 2/3 左右；当被遮挡电池片分别并联于 3 个旁路二极管内，组件最终输出功率将降低至 17 W 左右。

3) 组件被局部阴影纵向贯穿遮挡 (遮挡方式 17) 时的输出功率损失率比横向贯穿遮挡 (遮挡方式 6) 时减少 67.3%。

参考文献

[1] 胡义华，陈昊，徐瑞东，等．光伏电池板在阴影影响下输出特性 [J]. 电工技术学报，2011, 26(1): 123 － 128.
[2] 翟载腾，程晓舫，丁金磊，等．被部分遮挡的串联光伏组件输出特性 [J]. 中国科学技术大学学报，2009, 39(4): 398 － 402.
[3] 陶磊，王艾，孙龙林，等．阴影遮挡下的光伏组件特性分析 [J]. 太阳能技术产品与工程，2015, (7): 22 － 27.
[4]El Basri Y, Bressan M, Seguier L, et al. A proposed graphical electrical signatures supervision method to study PV module failures[J]. Solar Energy, 2015, (116): 247 － 256.
[5]Zhou Tianpei, Sun Wei. Study on maximum power point tracking of photovoltaic array in irregular shadow [J].Electrical Power and Energy System, 2015, (66): 227 － 234.
[6] 柴亚盼，童亦斌．阴影遮挡下组串式 MPPT 应用研究 [J]. 大功率变流技术，2014,(4): 20 － 24.
[7] 蒋浩．光伏组件单列布置形式的优化 [J]. 电力与能源，2013, (4): 90 － 93.
[8] 张志跟，李娜，傅冬华．浅谈光伏组件旁路二极管 [A]. 第 14 届光伏大会论文集 [C]. 北京，2014.
[9]GB 50797-2012, 光伏发电站设计规范 (2012 版)[S].

(接第 25 页)

参考文献

[1] 黄小东，姜涛，张超，等．地面光伏电站管桩基础极限承载力的模拟计算 [J]. 太阳能，2015, (7): 37 － 39.
[2] 章海灿，杨松，沈道军，等．分布式光伏电站的屋面选择与支架结构方案研究 [J]. 太阳能，2016, 03: 60 － 63.
[3] 张勇成，田介花，贾艳刚．一种固定式光伏发电支架系统优化及参数化设计 [J]. 太阳能，2012, 11: 27 － 29.
[4] 杨帆，岳珠峰，李磊．基于弧长法的加筋板后屈曲特性分析及试验 [J]. 应用力学学报，2015, 32(1): 119 － 124.
[5] 韩庆华，刘锡良，陈志华．周边双层中部单层球面网壳结构的特征值屈曲分析及其极限承载力 [J]. 建筑结构学报，2002, (3): 69 － 74.
[6] 侯和涛，李国强． 初始几何缺陷对非强支撑钢框架柱性能的影响 [J]. 工程力学，2008, (3): 85 － 90.

2018.02印刷.indd 30 2018-2-24 10:54:06