

Wind load on solar panel surface: numerical wind engineering study

Kangjie Wei¹ Weijuan Wang² Yaguang Yan^{1*}

1. Civil Engineering College, Hebei Polytechnic University, Handan, Hebei, 056000, China

2. Shougang Jingtang Iron and Steel United Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063000, China

Abstract

In recent years, solar energy has gained widespread attention as a clean energy source. The installation of solar panels on buildings significantly impacts the design of photovoltaic systems. This paper employs numerical simulation methods to analyze surface wind load effects on solar panel installations. The study first outlines the fundamental concepts of wind load and identifies key factors influencing solar panel wind loads. Subsequently, it details the numerical simulation process for solar panels, including geometric modeling, boundary condition configuration, and mesh generation. Finally, by simulating the effects of varying wind speeds and directions on solar panel wind loads, the paper proposes essential design principles and precautions for wind-resistant solar panel systems.

Keywords

solar panel; wind load; numerical simulation; wind speed; tilt Angle

太阳能电池板表面风荷载数值风工程研究

魏康杰¹ 王伟娟² 闫亚光^{1*}

1. 河北工程大学土木工程学院, 中国·河北 邯郸 056000

2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 中国·河北 唐山 063000

摘要

近年来, 太阳能作为清洁能源受到了广泛的重视, 太阳能电池板安装在建筑上将影响到光伏系统设计。本文利用数值模拟的方法对太阳能电池板安装在建筑上受到的表面风荷载问题进行分析。首先, 简要阐述风荷载的基本概念, 明确影响太阳能电池板风荷载的相关因素; 在此基础上详细地阐述太阳能电池板的数值模拟过程, 包括几何建模、边界条件设定、网格生成等过程; 最后通过模拟不同风速和不同风向对太阳能电池板风荷载的影响, 提出电池板抗风设计的要点和注意事项。

关键词

太阳能电池板; 风荷载; 数值模拟; 风速; 倾斜角度

1 引言

伴随着全球能源结构的变化, 太阳能发已经成为广泛应用的一种清洁能源。太阳能电池作为太阳能发电的基本组件, 在电池板安装环节受多种环境作用, 其中主要是风荷载的作用, 太阳能电池板的安装影响着其安全性及使用性能, 因此研究风荷载对太阳能电池板的作用机理及其影响规律具有重要的意义, 以达到优化电池板设计提高其抗风性能的目的。

2 风荷载的基本概念

风荷载指的是物体受风荷载后所受力荷载, 是对风与物相互作用后产生的压力和力矩之和的总和, 风荷载在风工程中不仅受风速的影响, 而且还受到风压、物体结构和环境的影响。太阳能电池板中的风荷载主要体现为风速、风向对电池板产生压力。由于风是通过空气流动作用在电池板的迎风面上, 因此其产生的力的大小与分布会受多重因素的影响。风荷载通常是通过风压来估算的, 而风压就是利用风的流速和风荷载的相互关系而得来的^[1]。根据风压的理论公式可知, 风压的强度与风速的大小呈正比, 因此在风速较大时其风荷载值也会很大。风荷载不仅是一个静止的荷载, 同时还具有很强的动态性。由于风速和风向的不可预测性, 因此所产生出的风荷载作用力也会存在波动, 特别是在大风环境中风荷载作用力的波动性和非线性会十分明显。

【作者简介】魏康杰(2001-), 男, 中国山东东营人, 硕士, 从事结构抗风研究。

【通信作者】闫亚光(1978-), 男, 中国河北邯郸人, 博士, 副教授, 从事隧道空气动力学方面的研究。

3 太阳能电池板表面风荷载影响因素

3.1 风速

风速是影响风荷载强弱的重要因素，而风速越大，风荷载也会变得越大，因为风速与风压呈二次方关系，当风速提高后，单位面积上受到风荷载的大小就增加，也就意味着风荷载变得越大。风荷载的强弱和风速分布有着密不可分的关系，在风速影响之下，风速的分布不仅会导致风荷载本身大小发生变化，还会导致风荷载沿电池板面分布的形式有所不同。在风速大小的规律上，风速一般服从的是离地高度增加，风速升高的理论，但在现实环境中，因为地面环境的影响，会出现诸如山丘、建筑物等遮挡障碍物，也会造成现实环境中风速分布的杂乱及不均匀，周围高低起伏的地面以及障碍物，都会导致风速大小的不均匀分布。

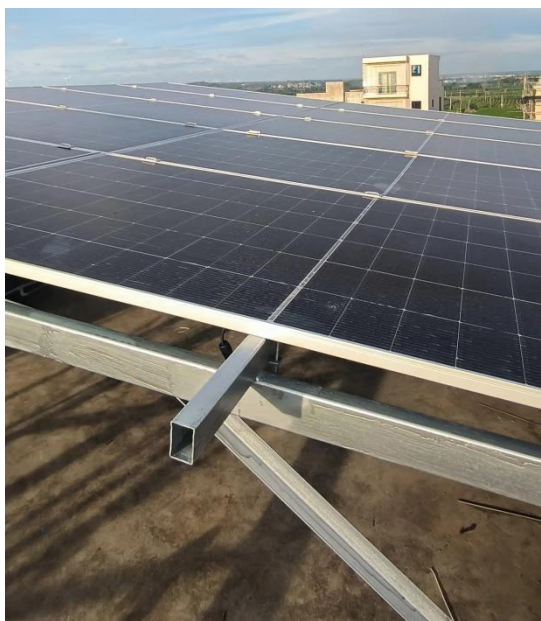


图1 太阳能电池板表面

3.2 风向

风向是影响太阳板风荷载分布的另一个因素。风向改变除了会使风速发生变化以外，也会改变风与太阳板面之间的相对方位角。当风向改变时，由于气流方向和太阳板面的相对方位角发生变化，进而造成太阳板受风压分布不均的现象。随着风向的改变，太阳板面上不同位置会承受不同的风荷载，甚至可能造成局部太阳板面上风荷载集中的现象。如当风正对着太阳板面吹来时，太阳板面的迎风面压力较大，侧面方向的区域风荷载相对较小^[2]。

3.3 电池板的倾斜角度

电池板的安装角度影响到其受到的风荷载的大小及分布形式，倾斜度越大的电池板迎风面积越大，所受风荷载也越大，即电池板迎风面积越大，单位面积风流对其表面产生的流动阻力越大，使电池板表面所受的风荷载越大。大倾斜度电池板在受到风荷载作用时有可能稳定性差，造成电池板

振动变形，相反，小倾斜度电池板受风荷载时的风阻力较小，风荷载作用在电池板表面时则不会造成电池板较大的振动变形。

4 太阳能电池板风荷载数值模拟的具体过程

4.1 几何建模

一是几何模型中，太阳能电池板尺寸需要准确。常见的获取太阳能电池板数据来自实际的设计图纸及生产商提供的技术文件，电池板尺寸一般指的是电池板的板面长度、宽度及厚度，电池板表面形状（电池板表面是否存在较小的凸点、凹点等）。虽然表面细节信息在建模时通常略去，但在考虑较高精度时，表面细节可能对风的变化起到较大的影响。二是安装角度对风荷载的影响。太阳能电池板通常有一个倾斜角进行安装，安装角不仅影响其发电能量，还对其风压作用效果有影响。太阳能电池板倾角决定了电池板的迎风面，影响风荷载的大小及作用位置，是几何建模中需要准确地输入其值的参数。对于不同安装倾角，风流经过其方向有所改变，且风流不同影响风荷载有所差异，常采用计算机辅助设计软件进行电池板的几何建模，几何建模后将其转化为数值计算软件所需格式进行数值计算。几何模型越精确，其风荷载计算越准确，其计算效率越高。电池板建模中，通常会对其某些细节进行忽略，或者将其复杂的电池板支架简化为简单的几何图形。此种简化模型能减小计算量，但在精度要求比较高的情况下还需要进一步完善模型。最后一个步骤是对得到的几何模型进行网格划分准备。电池板表面及其周边风场需要进行网格划分将这些空间部分网格细分，以便数值计算软件能够对这些区域进行精准计算风荷载的分布。因此，几何模型的设计不仅要满足实际工程的需要，而且要考虑对模拟网格的划分方便，进而对这些区域进行风荷载计算需要能够体现出电池板表面及其周边流动的准确性。

4.2 边界条件设置

首先，风速是最直接影响风荷载大小的因素，风速的大小决定了空气流动的动量大小，进而决定风给电池板作用的阻力大小，风速的设置一般依据当地的气象资料，并可依据不同的高度，不同地理环境或风速分布模型设置。对太阳能电池板进行风荷载的模拟一般应该针对电池板所处的地理环境和地理位置设置相应的风速大小，对于风速分布模型的计算一般是通过对风在不同高度分布、风向与地表摩擦、局部地形变化导致风的速度变化及风的湍流进行考虑。例如，在城市环境或者山区，风速分布大多复杂，一般会基于风速测量或气象数据对当地风速分布进行模拟。风向是确定风荷载分布的另一个重要影响因素，因为风向决定了风和太阳能电池板表面的角度，风与电池板表面不同的角度对电池板的作用风荷载是不同的，因此，在风向设置方面，一般根据电池板安装所在位置的平均风向，以模拟反映实际工程中风流特征，在风向的设置方面，风向对于电池板受力最大的迎

风面的风荷载大小影响很大,风向的变化也直接影响着局部范围内集中力的出现或者减弱^[3]。因此,可以考虑准确的设置风向来模拟电池板迎风面的风荷载在不同风向下的变化情况。除了上述的风速、风向参数外,空气密度也是计算风荷载的重要参数。由于气温、大气压力以及风的含水量等因素的影响,会造成空气密度发生变化。正常状况下,大气情况下空气密度为 1.225kg/m^3 ,但是受到大气高度、气候等因素的影响,不同位置处空气密度均存在变化。因此,空气密度的变更应该以实际大气状态为前提,使得风速和风压计算过程中更具有针对性;特殊区域的空气密度变更,可能会导致风荷载发生较大的差别。

4.3 网格划分

网格密度需根据模拟对象的复杂程度选择,对于太阳能电池板的风荷载数值模拟,其模拟网格的划分应以电池板表面和电池板周围流场区域最为关键。因为风速和压力这类物理量,在这些区域内可能会出现较大变化,须采用网格密度较小的网格加以描述,这样才可以较好地展现风速、压力的变化趋势。在电池板表面,该处是电池板区域风荷载作用主要区域,在网格密度较高的情况下,能够降低风速和压力计算中的误差,以便保障风荷载分布的准确性。对于电池板周围和远处区域,在不改变风速和风压的情况下,网格可以适当放宽。电池板周围的流场区域是整个数值模拟过程中较为重要的一项区域,该区域内风速及压力变化均较大,其网格划分时需将网格密度增大,而对于电池板周围和远处区域,在满足仿真模拟的基础上,对风速和压力均影响较小,应采用较为粗糙的网格划分方式,提高计算效率。适当的网格划分可以在保障计算精度的基础上提高计算资源利用率,以免计算资源的过度消耗。网格划分类型可影响数值计算的准确性。常见的网格划分类型主要为结构化网格与非结构化网格。在太阳能电池板风荷载数值模拟中,因其涉及电池板和周围电池板区域,该区域的几何形状较为复杂,所以采用非结构化网格通常是较为合适的,其划分方案可以根据实际情况进行调整,非结构化网格更易于适应不同形状的区域及具有不同边界的区域,在网格划分时能够更加精确地展现各个物理量。

4.4 风速分布与压力分析

太阳能电池板的风荷载数值模拟过程中风速分布、风荷载数值是另一个极为重要的环节,通过风荷载数值模拟能够获得电池板表面不同风速下风速大小分布以及相应的风荷载数值分布。在数值模拟过程中,通过流体流动数值模拟技术可获得不同风速、不同风向条件下电池板表面风速的大

小分布情况,借助压力大小的变化得出不同风荷载下太阳能电池板风荷载的大小分布情况。太阳能电池板风荷载压力分布可通过流体力学中的计算流体模拟技术(CFD)实现,流场中风速大小、流向以及空气扰流等诸多因素都会影响风速大小以及风荷载大小^[4]。当太阳能电池板风荷载数值模拟流场风速大小分布达到稳定时,进一步进行太阳能电池板表面压力数值模拟,得出太阳能电池板表面压力大小分布。因为流场风速扰动通常会使风荷载在空间方向呈现出非均匀、不稳定的分布特性,因而太阳能电池板不同方向位置的风荷载大小存在一定的差异。压力分析除了能够反映风荷载的大小,还能帮助设计人员辨识出电池板表面有可能出现的高风压区域,这些高风压区域的压力过大则会造成电池板产生较大的变形甚至破坏。压力分析对完善电池板设计,保证电池板在风荷载作用下的稳定安全使用具有重要价值^[5-8]。

5 结语

风荷载是太阳能电池板在设计中必须考虑的关键问题之一。本文采用数值模拟方法分析太阳能电池板风荷载对太阳能电池板表面的影响,分析了风速、风向、电池板倾角等参量的影响机理。研究发现在风荷载分布过程中,风速、风向为主要的影响因素;电池板倾角对风荷载大小及分布有显著影响。通过数值模拟的合理手段,可为太阳能电池板抗风设计提供理论依据,为实际工程提供指导。

参考文献

- [1] 马靖云,陈作钢,冯榆坤.船用太阳能光伏柔性支架风荷载数值模拟[J].船舶工程,2024,46(7):66-73.
- [2] 袁行飞,吕晓东,兆瓦级太阳能热气流发电站风荷载的数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(1):99-105.
- [3] 吴耀鹏,李峙,解国良.基于雷诺平均法的典型结构风荷载特性研究[J].力学研究,2024,13(2):63-73.
- [4] 房彦山,张国飞,唐雯静.太阳能光伏板阵列风压特性数值模拟研究[J].电力勘测设计,2018,30(4):76-80.
- [5] 阮龙森,李兴成.基于深度学习的太阳能电池板表面缺陷检测[J].组合机床与自动化加工技术,2025,(03):199-203+208. DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2025.03.038.
- [6] 付波,廖和千.一种改进YOLOv8s的太阳能电池板表面缺陷检测算法[J].软件导刊,2025,24(03):185-192.
- [7] 苏益,李志国,李佳辉,等.铁路沿线太阳能电池板及支架立柱的抗风性能[J].铁道建筑,2020,60(02):152-156.
- [8] 李佳辉.独立柱式太阳能电池板风荷载特性及抗风性能研究[D].西南交通大学,2019. DOI:10.27414/d.cnki.gxjnu.2019.000695.