

# 中国与巴西规范光伏支架风荷载对比分析

张效玮

齐鲁理工学院

**摘要:** 关于光伏结构风荷载计算的问题, 中国和巴西规范存在较大差异。首先对两国风荷载计算规范进行介绍, 再通过数值模拟对光伏组件和支架模型风场特性进行分析, 并与依据两国规范和经验公式计算得出的结果进行对比。分析结果表明, 两国规范均不考虑风脉动效应对地面光伏结构的影响, 不同规范和经验公式计算所得的风荷载差异明显, 应用巴西规范进行光伏结构设计偏保守。

**关键词:** 光伏; 风荷载; 巴西规范; 数值模拟

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.24.054

## 引言

随着“一带一路”倡议在国际社会上不断获得认可与支持, 中国电力企业也越来越多地开拓海外如巴西的业务, 其中光伏产业的市场开发尤为迅速。而在项目开展过程中会涉及结构风荷载计算, 直接使用中国规范将与实际工程要求不符, 因此熟悉并应用当地的巴西规范进行风荷载计算是十分必要的。

关于光伏结构风荷载的计算, 中国采用《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[1]</sup>及《光伏支架结构设计规程》(NB/T 10115—2018)<sup>[2]</sup>, 巴西采用《结构风力》(NBR 6123—1988)<sup>[3]</sup>。为比较这些规范计算方法之间的差异, 国内学者已经对其进行了一些针对性的研究<sup>[4-5]</sup>。而在光伏结构的风荷载模拟和计算实例方面, 高亮等<sup>[6]</sup>通过结合风洞实验和数值模拟的方法对光伏组件表面风荷载进行分析和验证, 并提出考虑多种因素影响下的风荷载计算公式。许宁等<sup>[7]</sup>采用CFD方法对光伏阵列系统进行风场特性研究, 得出不同状态下光伏组件体型系数的变化规律, 并提出体型系数的建议取值。黄张裕等<sup>[8]</sup>通过对数值模拟结果和各国规范的经验公式计算结果, 提出适用于我国实际情况的光伏面板风荷载体型系数。

现有研究虽然已经对光伏系统的风荷载进行了大量模拟和计算, 但并未就中国和巴西规范中规定的光伏结构附近风场特性进行对比和分析。本文通过数值模拟方法对光伏结构简化模型的相关流场进行计算, 同时与中国和巴西规范中经验公式的风荷载计算结果进行对比, 所得结果将为巴西地区光伏工程建设提供参考。

## 一、风荷载计算方法

### (一) 国内设计规范

中国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[1]</sup>中规定与《光伏支架结构设计规程》(NB/T 10115—2018)<sup>[2]</sup>一致, 风荷载标准值按下式计算:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中,  $w_k$  为风荷载标准值 ( $kN/m^2$ );  $\beta_z$  为高度  $z$  处的风振系数;  $\mu_s$  为风荷载体型系数;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $w_0$  为基本风压 ( $kN/m^2$ )。

### (二) 巴西设计规范

巴西《结构风力》(NBR 6123—1988)<sup>[3]</sup>中规定当不考虑风湍流效应时, 作用在结构上风力按下式计算:

$$F = C_e A q(z) \quad (2)$$

$$F = C_a A q(z) \quad (3)$$

式中,  $C_e$  为外部体型系数;  $C_a$  为阻力系数;  $A$  为结构面积;  $q(z)$  为设计风压。

$q(z)$  设计风压的计算公式为:

$$q(z) = 0.613 V_k^2 \quad (4)$$

式中  $V_k$  为不同高度的特征风速。

当考虑风湍流效应时, 巴西标准采用设计风速  $V_p$ , 其定义为当地空旷平坦地面 (地面粗糙度 II 类) 上 10m 高度处 50 年一遇 10min 内的平均最大风速, 该定义与中国规范的基本风速完全一致。两者关系为:

$$V_p = 0.69 S_1 S_3 V_0 \quad (5)$$

式中,  $S_1$  为山形系数;  $S_3$  为统计系数;  $V_0$  为基本风速。中国规范的光伏支架设计按照 25 年一遇的回归期执行, 而针对巴西规范, 本文取 50 年为研究的计算重现期。所研究的光伏结构位于平坦地区, 50 年寿命期建筑,  $S_1 = 1.0$ ,  $S_3 = 0.88$ , 则有:

$$V_p = 0.6072 V_0 \quad (6)$$

可得本文中国标准基本风速为巴西标准基本风速的 0.6072 倍。

### (三) 模拟及计算参数确定

本文研究的风速取值为巴西规范下的基本风速  $30m/s$ 。

在使用中国标准计算时, 基本风速为

$0.6072 \times 30 = 18.216 \text{ m/s}$ ;  $\beta_z$ 取1.0;  $\mu_s$ 按《光伏支架结构设计规程》(NB/T 10115—2018)<sup>[2]</sup>中表4.1.3-1的规定选用;  $\mu_z$ 取1.0。

在使用巴西标准计算时,  $C_e$ 外部体型系数及特征风速按《结构风力》(NBR 6123—1988)<sup>[3]</sup>中表和经验公式取用和计算, 其余的系数按上文提到的数值计算。巴西规定建筑基本周期等于或小于1s时, 脉动影响很小, 由于光伏支架高度为1.5m, 刚度较大, 周期小于1s, 因此不考虑风的脉动效应。

在进行数值模拟时, 由于风速在不同高度处有变化, 因此不能使用30m/s的风速直接模拟, 需要依照平均风剖面的计算方法来转换。目前, 主要有对数律和指数律两种表示方法。实验数据表明, 对于近地面的平均风速轮廓规律, 采用对数律更为精确。对数律公式如下:

$$\bar{v}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln(z/z_0) \quad (7)$$

式中,  $k$ 为Karman常数;  $z$ 为任一点的高度;  $\bar{v}(z)$ 为 $z$ 高度处的平均风速;  $u_*$ 为摩擦速度;  $z_0$ 为参考高度, 通常取10m;  $z_0$ 为地面粗糙长度, 本文取0.055m。

通过针对10m处高度风速的转换, 数值模拟的取值风速为19.061m/s。

## 二、光伏模型数值模拟

### (一) 光伏模型建立

光伏组件组装时会形成光伏组串, 为减小网格数量和计算时间, 选择单个组件为研究对象建立模型。光伏组件为2274×1134×30的长方体, 以倾角 $b$ 为20°, 风向角 $a$ 为0°的状态研究, 图1给出了光伏组件风向角和倾角的定义。

光伏支架长细比较大, 因此与光伏组件分别建模, 截取部分代表性支架为研究对象建立模型。截取部分支架为中部两根驱动立柱、推拉臂和部分主梁, 总迎风面积为1.776m<sup>2</sup>。

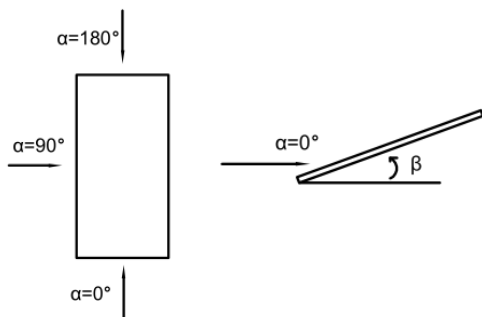


图1 风向角和倾角的定义

### (二) 模型网格划分

采用六面体非结构化网格对光伏组件及支架的流场进行划分。为了平衡运算效率与运算精度, 将整个计算流域划分为网格加密区和非加密区。

进行光伏组件建模时, 将靠近光伏组件的部分区域设置为加密区, 其余部分设置为非加密区, 并考虑边界层设置。整个流域为长方体, 其中入流面与光伏板中心距离10m, 出流面与光伏板中心距离20m, 底面模拟为地面, 与光伏板中心距离1.5m, 顶面与光伏板中心距离8.5m, 两侧均与光伏板中心距离5m。阻塞率计算得小于3%, 满足要求。

进行光伏支架建模时, 将靠近光伏支架的部分区域设置为加密区, 其余部分设置为非加密区, 并考虑边界层设置。整个流域为长方体, 其中入流面与光伏板中心距离2m, 出流面与光伏板中心距离4m, 底面模拟为地面, 光伏支架底部与底面连接, 顶面与光伏板中心距离2.36m, 两侧均与光伏板中心距离8.05m。阻塞率计算得小于3%, 满足要求。二者网格划分示意图2所示。

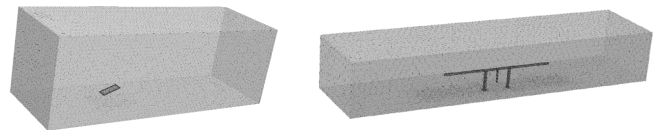


图2 模型网格划分示意图

### (三) 湍流模型选择

使用瞬态求解设置; 流域中的流体选择为空气, 不考虑其压缩性, 保持密度恒定。

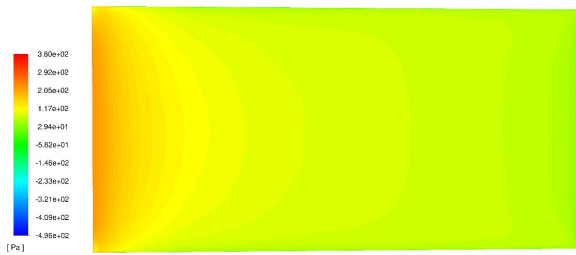
湍动模型中的k-e模型适用于模拟远离壁面充分发展的湍流流动, k-w模型对钝体外部扰流模拟结果较好, 而SST k-w模型集合了k-w模型和k-e模型的优点。因此, 本文中选取SST k-w模型求解流体的运动状态。

### (四) 边界条件设定

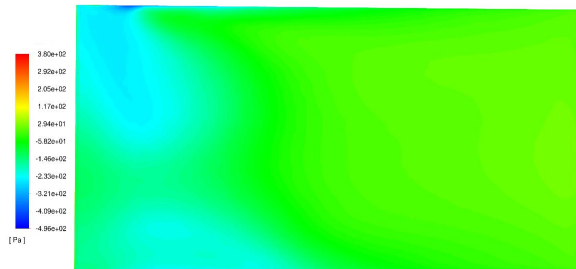
底面为无滑移壁面 (wall) 边界, 侧面及顶面为对称 (symmetry) 边界。入口使用速度入口 (velocity-inlet), 入口风速19.061m/s, 出口为压力出口 (pressure-outlet)。模型表面为无滑移壁面 (wall)。

### 三、计算结果对比分析

图3-4分别为光伏组件模型迎、背风面的压力云图及光伏支架模型迎、背风面的压力云图。

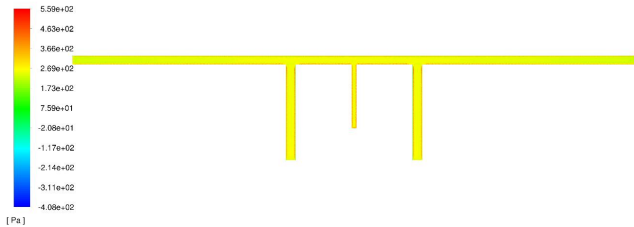


(a) 迎风面压力分布图

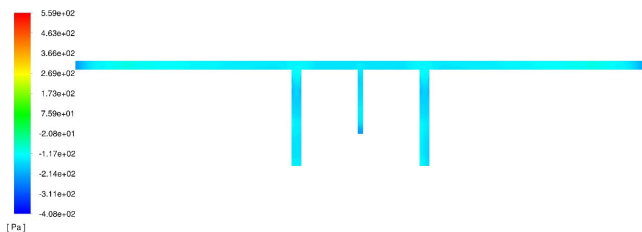


(b) 背风面压力分布图

图3 光伏组件表面压力分布图



(a) 迎风面压力分布图



(b) 背风面压力分布图

图4 光伏支架表面压力分布图

由图3可得，光伏组件迎风面压力呈渐变式分布，前端压力较大，随后逐渐递减；背风面前端存在减速区，压强为负值，存在较大吸力，随后吸力变小且趋于平均。由图4可得，光伏支架迎风面压力分布均匀，边缘处压力大于中心处；背风面压强为负值，存在吸力，由于体型的影响，吸力分布不均匀。

基于前文得到的风荷载计算参数分别依据中国和巴西规范计算光伏组件所受风荷载，并与模拟结果对比，如表1所示。

表1 光伏模型模拟风荷载与规范计算结果

计算方法	$v_0 (V_0) / (m/s)$	$w_0 (q(z)) / (kN/m^2)$	$F / (kN)$ (组件)	$F / (kN)$ (支架)
中国规范	18.216	0.2032	0.4454	0.5431
巴西规范	30	0.2916	0.6061	0.7768
数值模拟	19.061	0.2225	0.4068	0.6328

由表1可知，由于巴西规范采取的基本风速较大，光伏组件及支架计算得出的风压大于中国规范计算的风压，分别约为1.35倍和1.43倍，说明在进行结构设计时必须按照当地规范进行计算，以免发生较大偏差。而通过数值模拟得出的风压远小于巴西规范，与中国规范相接近，两者相互验证，说明了规范计算和数值模型的合理性和准确性。数值模拟、中国规范计算的风压均小于巴西规范计算的风压，说明了巴西规范偏保守，相应的，其所指导的结构设计也将更加安全。

#### 四、结论

本文通过数值模拟方法对光伏组件及支架结构表面风荷载进行分析，并将模拟结果与中国和巴西规范的经验公式计算结果进行对比，得出以下结论：

- a) 针对高度较低的地面光伏结构，中国和巴西规范均不考虑风的脉动效应的影响。
- b) 使用巴西规范计算所得风荷载偏大，在进行光伏结构设计时偏安全。
- c) 不同规范计算得出的风荷载差异明显，必须根据当地要求进行光伏结构受风承载力验算。

#### 参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 30—57.

[2] 国家能源局. 光伏支架结构设计规程: NB/T 10115—2018 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018: 5—7.

[3] ABNT. Forces in Buildings Due to the Wind: NBR 6123—1988 [S]. Rio de Janeiro: National Publishing House, 1988: 4—18.

[4] 胡合江, 鲁伟, 尹洪涛. 中国与巴西规范风荷载计算分析比较 [J]. 建材世界, 2019, 40 (4): 70—74.

[5] 刘天英, 李晓俊, 宋大伟. 中国与巴西标准顺风向风荷载作用比较 [J]. 吉林电力, 2018, 46 (3): 1—5.

[6] 高亮, 窦珍珍, 白桦, 等. 光伏组件风荷载影响因素分析 [J]. 太阳能学报, 2016, 37 (8): 1931—1937.

[7] 许宁, 李旭辉, 高晨崇, 等. 光伏系统风荷载体型系数分析 [J]. 太阳能学报, 2021, 42 (10): 17—22.

[8] 黄张裕, 左春阳. 太阳能跟踪器光伏面板风荷载体型系数的数值模拟研究 [J]. 特种结构, 2014, 31 (4): 101—107.