

柔性支架风洞试验报告复核 及数值仿真分析报告



北京鉴衡认证中心有限公司 编制

关于本报告的声明

1、本报告所依据的事实仅限于报告形成前北京鉴衡认证中心有限公司（以下简称“我公司”）根据委托单位提供的有关文件、口头说明等文件资料，并假定该等文件资料是真实、有效、合法的。我公司不承担因委托单位提供错误、虚假、不完整或侵犯他人权益的信息、资料等而产生的任何法律责任。

2、本报告结果仅与测试/委托服务期间内被检测、被校准或被抽样样品的情况和相关事实有关，测试/委托服务期间外若样品情况发生变化，导致报告结果与测试/委托服务期间外的事实情况不符的，我公司不承担任何法律责任。

3、本报告并不就会计、审计、资产评估等事项发表任何意见；对于此类事项的描述，我公司仅依赖于有关会计报表、审计报告、资产评估报告、验资报告和相关技术或资质认证文件，以及相关专业技术人员提供的技术资料的判断、理解和结论。我公司在本报告中对有关会计报表、审计报告、资产评估报告、验资报告和相关技术或资质认证文件、专业技术人员的结论意见中的任何数据或结论的引述，并不意味着我公司对数据、结论的真实性和准确性做出任何明示或默示的保证。

4、受本次测试/委托服务的时间及所获得信息范围、来源所限，本报告仅限于对测试/委托实证服务期间内我公司所知的情况进行分析和判断。

5、本报告未加盖我公司印章和骑缝章无效。

6、本报告无编写、审核、批准人签字无效。

7、本报告涂改、增删、缺页无效；除全文复制外，未经我公司批准不得部分摘录、复制报告。

8、如对本报告内容有异议，请在收到本报告之日起十五日内向我公司提出书面意见，否则将视为对本报告无异议。

概 况

项目名称	柔性支架风洞试验报告复核及数值仿真分析报告		
报告编号			
编写	年 月 日		
审查	年 月 日		
批准	年 月 日		
检测单位 (盖章)	北京鉴衡认证中心有限公司		

目录

1 项目简介	2
2 风洞报告评估	2
2.1 试验概况复核	2
2.2 结构原型与模型设计复核	2
2.3 试验工况设计复核	3
2.4 试验结果复核	3
2.5 原始数据与报告一致性复核	3
2.6 报告的局限性与改进建议	3
2.7 报告最终评价	4
3 柔性光伏支架结构承载力复核验算	4
3.1 工程概况	4
3.2 荷载分析	5
3.2.1 恒载	5
3.2.2 风荷载、雪荷载	6
3.2.3 温度效应	6
3.2.4 地震效应	6
3.2.5 检修荷载	6
3.2.6 荷载组合	7
3.3 上部结构复核	8
3.3.1 承载能力极限状态复核	8
3.3.2 正常使用极限状态复核	10
3.4 结论与建议	11
4 柔性光伏阵列颤振特性 CFD 数值模拟	12
4.1 几何建模与计算域设定	12
4.2 网格划分	12
4.3 边界条件设置	13
4.4 流固耦合实现	13
4.5 计算参数设置	15
4.6 网格无关性验证	15
4.7 结果分析	15
5 结论与建议	17

1 项目简介

受江苏东软智能科技有限公司委托，根据东软鸥翼梁柔性光伏项目资料，北京鉴衡认证中心有限公司对《东软鸥翼梁柔性光伏 支架风洞试验研究报告》（以下简称风洞报告）的完整性及可靠性进行评估，之后对柔性光伏支架结构承载力进行复核算，最后通过 CFD 数值模拟针对多排 M1 进行颤振临界风速研究。

柔性光伏支架结构承载力进行复核算选址于江苏省江阴市城东街道肖山水厂内，具体位于扬子江路北侧、长江南侧、澄塞河东侧区域。光伏系统采用双跨双层柔性支架结构形式，单跨标准跨度为 40.00m，双跨总跨度 80.00m，整体采用 8 排式布置。根据项目场地及上游地貌特征，确定场地粗糙度类别为 B 类，25 年重现期基本风压取值为 0.38kN/m^2 。本次柔性光伏支架结构的承载力复核算及颤振临界风速专项研究，所有计算参数均严格依据委托方提供的正式设计资料及风洞试验分析报告确定。

2 风洞报告评估

2.1 试验概况复核

1、核心参数与试验目的：风洞报告在第 1.1 节与 1.2 节中明确界定了研究对象为两款总跨度 80m、单跨 40m 的双跨双层柔性光伏支架方案（M1 方案与 M2 方案），详细给出了两种方案的光伏组件规格（ $2384\text{mm} \times 1134\text{mm} \times 30\text{mm}$ ）、支架排间距（M1 方案为 3.5m、M2 方案为 2.6m）、排间连接形式（鸥翼梁/桁架）、主拉索关键参数（ $\phi 15.2\text{mm}$ 钢绞线）等核心技术参数，表述清晰完整。风洞报告对于试验目的（系统研究两款柔性支架结构的风致响应特性、全面评估其抗风安全性能）的表述逻辑清晰，内容完整准确。

2、试验设备与风场模拟：风洞报告第 3.6 节说明试验在湖南科技大学大气边界层风洞进行，详细列出了试验段尺寸、转盘系统、风速测量仪、三维位移分析仪、索力传感器等关键试验设备的主要技术参数（包括量程、精度等）。设备选型科学合理，技术参数满足本次试验的精度与量程要求，试验条件合规。此外，风洞报告第 3.8 节明确指出，试验以《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 规定的 B 类地面粗糙度为模拟目标，通过尖劈与粗糙元相结合的方式实现了大气边界层的精确模拟。风洞报告中的图 12 详细展示了试验模型所在转盘区域内平均风速和湍流度的实测数据与理论目标值的对比情况，分析结果表明实测的平均风速剖面 and 湍流度剖面均与目标值高度吻合，验证了风场模拟的有效性和准确性，能够合理描述典型 B 类地貌的大气边界层风场特性。

2.2 结构原型与模型设计复核

1、原型结构一致性：风洞报告在 2.1 节所述的基于 SAP2000 软件平台构建有限元模型，其组件尺寸、结构体系形式及材料性能参数（详见表 2）均严格遵循风洞报告 1.1 节中的文字说明及设计图纸要求。模型中各构件的几何尺寸定义清晰，材料力学性能参数取值明确。

2、试验模型设计与制作：风洞报告 3.3 节与 3.4 节详细阐述了试验模型各组件的材料选型与制作工艺。在材料选择方面，报告明确采用亚克力板模拟结构组件、钢丝绳模拟拉索系统、3D 打印树脂材料制作连接构件、钢板和

铝材分别模拟梁、柱构件，选材方案科学合理；在制作工艺方面，报告对配重控制精度、粘接工艺质量、预张力调节方法等关键环节进行了系统说明。工艺描述详实完备，技术细节清晰。

3、相似准则满足度：风洞报告 3.1 节是核心要点，系统阐述了柔性光伏支架气弹模型需满足的弗劳德数、柯西数、斯脱罗哈数等相似准则，并在表 5、表 6 中进行了详细对比。风洞报告明确指出在雷诺数与弗劳德数无法同时满足时，优先满足弗劳德数，该处理原则对于以重力刚度为主、频率较低的柔性索结构是正确的。

4、动力特性验证：风洞报告 3.5 节通过对比原型目标频率、模型目标频率与模型实测频率（表 10、表 11），验证了模型制作的准确性，误差在 2.52% 以内，满足工程精度要求。

2.3 试验工况设计复核

工况设计合理、全面。风洞报告明确了 4 种结构阵列（M1R1, M1R8, M2R1, M2R8）和 7 个风向角（ 0° 至 180° ，间隔 30° ）的组合，覆盖了单排与多排、两种结构形式以及在风压和风吸区间内均匀分布的风向。该设计能系统研究结构形式、阵列效应和风向角的影响，与“评估抗风性能、明确最不利工况”的试验目的匹配。

2.4 试验结果复核

1、异常数据处理：风洞报告对异常数据进行了合理处理并加以说明。例如，在 4.5 节计算风振系数时，明确指出“由于单排模型在较低的风速下即发生大幅非线性振动，其风振系数不具有指导意义，故不计算”，考虑到评估内容为多排支架整体抗风性能，此处理方法是合适的。

2、数据分析过程：风洞报告第 4 章构建了完整而严谨的数据分析体系。本章首先明确定义了位移均值、均方根值等关键参数（图 17）及风振系数的计算方法（公式 4.2），并通过时程图、风速响应曲线、空间位置对比图等，展示了结构位移和索力的动态响应特征。整个分析过程层次分明、论证充分，不同工况下的数据变化符合气动力学基本规律，各环节结论相互印证、逻辑自洽。

3、结论科学性：风洞报告结论（如 M2 抗风性能更优、最不利风向角、风振系数取值等）均以数据分析为直接依据，论据充分，结论明确，达到了试验目的。报告 5.2 节提出的工程建议合理，具有实用价值。

2.5 原始数据与报告一致性复核

风洞报告中的主要结论均有对应的图表和数据支撑，数据流可追溯，与实际原始数据一致。

2.6 报告的改进说明

1、问题：在风洞报告 2.2 节的表 3 中，工况“结构方案 2/8 排”的编号误写为“M2R2”，与风洞报告全文其他部分（如表 4、正文）使用的“M2R8”矛盾。应统一修正为“M2R8”。需要在风洞报告最终版中统一校对。处理：已对风洞报告全文进行统一校对，将表 3 中的“M2R2”修正为“M2R8”，确保了全文工况标识的一致性。

2、问题：风洞报告 1.1 节及 2.1 节均提及光伏组件自重为 33kg，但在有限元模型计算时转换为“ 0.21kN/m^2 ”的均布面荷载。此转换需与组件尺寸（ $2.384\text{m} \times 1.134\text{m}$ ）核算。经计算，33kg 对应重量为 0.323kN ，除以面积（ $2.384 \times 1.134 \approx 2.70\text{m}^2$ ）得面荷载约为 0.120kN/m^2 ，与报告的 0.21kN/m^2 不符。需核实组件自重或面荷载取值的准确性。处理：通过尺寸为 1.4m （上索间距） $\times 1.134\text{m}$ （板宽）的“虚面”进行等效分配，经核算面荷载准确

3、问题：横梁和斜拉索的弹性模量写为“ 2.06×5 ”，明显为笔误，应为“ $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ”，需要做对应修改。处理：已修正为钢材标准值“ $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ”。

4、问题：风洞报告中未提供气弹模型试验所对应的阻尼比数据。这项评估结构风致振动响应特性的关键参数，需要予以补充，以确保分析依据的完整。处理：已在报告试验方法章节补充了阻尼比参数

5、问题：未说明各工况下的具体风速加载梯度（如起始风速、步长、最大试验风速），仅提及“在确保模型安全的情况下加载最大风速”，需要予以补充。处理：已在试验步骤部分补充说明。

6、风振系数计算方法标准。但未给出基于风洞实测响应计算该系数的具体数据（例如在参考风速下，最大位移响应与平均位移的比值），表 13 为“建议取值”，略显牵强，未充分展示计算依据，需要予以补充。处理：已在数据分析章节中增设“风振系数计算”子节。

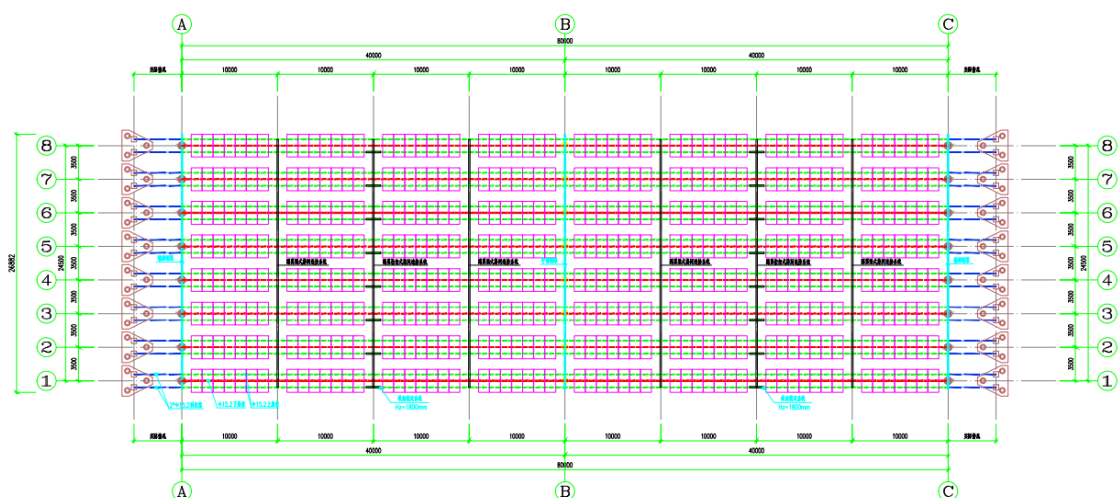
2.7 报告最终评价

该风洞研究报告系统地验证了鸥翼梁连接体系的有效性，对比了两种倾角与排距方案的优劣，技术路线合理，数据基本翔实，结论明确。但存在少数关键参数缺失、个别数据笔误及一致性待核实的问题，需要在最终版本中予以补充和修正，以进一步提升报告的严谨性与。补充完成后，其关于优先采用 M2 方案并重点强化排间连接设计的核心结论可直接采纳，用于指导后续实际工程的施工图设计与实施。

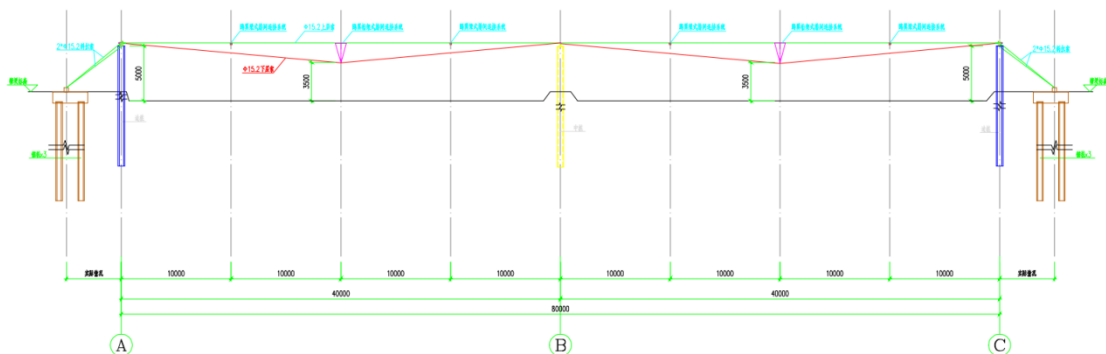
3 柔性光伏支架结构承载力复核算

3.1 工程概况

根据委托方的要求，光伏柔性支架结构跨度为 80.00m，单跨跨度均为 40.00m 的双跨双层柔性光伏支架进行了结构分析，每排均采用双跨的结构形式，结构布置均采用 8 排模型，各排之间的排间距为 3.5m，柱高为 5.00m，上层组件索间距为 1.4m，通过上部组件索的高度差异自然形成 15° 的组件倾角，中间采用鸥翼梁与鸥翼桁架作为排间连接以增强结构整体性。结构形式设计图如图 3.1-1 所示。承重索为 $\phi 15.2$ 热镀锌钢绞线，稳定索采用 $\phi 15.2$ 热镀锌钢绞线，斜拉索采用 $2 \phi 15.2$ 预应力钢绞线，材料强度 $f_{pk}=1860 \text{ MPa}$ ，承重索预应加 65KN，主索预应力 25KN。



(a) 平面布置图



(b) 典型方阵纵向剖面图

图 3.1-1 支架典型立面图

柔性光伏支架结构不同构件需设定不同材料参数，设定的几何参数及材料参数表分别见表 3.1-1。

表 3.1-1 结构几何参数及材料参数表

构件	弹性模量 (MPa)	泊松 比	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	设计参数
柱	3.8×10^4	0.2	2500	C80 预应力混凝土管桩，中柱： $\Phi 400 \times 95\text{mm}$ ，边柱： $500 \times 125\text{mm}$
横梁	2.06×10^5	0.3	7850	Q355 方钢管：边梁 $200 \times 200 \times 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ ；中梁 $200 \times 200 \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$
斜拉索	2.06×10^5	0.3	7850	2 根 $1 \times 7-15.2$ 钢绞线
上层索	1×10^5	0.3	7850	$1 \times 7-15.2$ 钢绞线
下层索	1.9×10^5	0.3	7850	$1 \times 7-15.2$ 钢绞线
横向连接系	2.06×10^5	0.3	7850	Q235: $C40 \times 40 \times 3$ 、 $C50 \times 50 \times 3$

本报告根据委托方提供的设计文件《01. 计算设计模型（3D3S 文件）》以及《02. 典型方阵光伏组件结构布置图.pdf》，对于光伏柔性支架的上部结构进行分析。

由于委托方提供的文件中并没有关于本项目的基础和支架-基础连接节点的设计图纸，故本次分析无法对基础和支架-基础连接节点的设计分析，仅对对于光伏柔性支架的上部结构进行分析。

3.2 荷载分析

需要注意的是，根据《柔性光伏支架结构设计规程》(T/CSEE 0394-2023)、《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)等相关规范以及委托方提供的《东软鸥翼梁柔性光伏支架风洞试验研究报告-20260510》、《附件：组件型号》进行荷载参数取值。

3.2.1 恒载

光伏组件尺寸：2278mmx1134mmx30mm

光伏组件质量：31.8kg (0.32kN)

3.2.2 风荷载、雪荷载

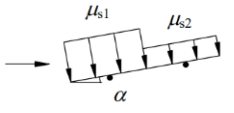
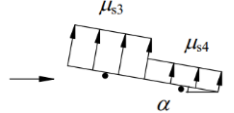
根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 中附录 E，江苏省江阴市的基本风压、基本雪压以及升温降温如表 3.2-1 所示。

表 3.2-1 环境荷载取值

25 年重现期基本风压	50 年重现期基本风压	25 年重现期基本雪压	50 年重现期基本雪压	低温	高温
0.38kN/m ²	0.50 kN/m ²	0.36kN/m ²	0.45	-8℃	39℃

光伏组件倾角为 15°，根据《柔性光伏支架结构设计规程》(T/CSEE 0394-2023) 其体型系数取值见表 3.2-2。根据托方提供的《东软鸥翼梁柔性光伏支架风洞试验研究报告-20260510》，该柔性支架的风压风振系数取 $\beta_z=1.64$ ，风吸风振系数取 $\beta_z=1.83$ 。立柱高度 5.0m，B 类粗糙度类别下，高度修正系数为 $\mu_z=1.0$ 。

表 3.2-2 风荷载参数取值

工况	基本风压 w_0 (kPa)	体型系数 μ_s		风压高度变化 系数 μ_z	风振系数 β_z	风荷载标准值 w_k (kPa)
风压工况	0.38		$\mu_{s1}=1.1$	1.0	1.64	0.6855
			$\mu_{s2}=0.5$			0.3116
风吸	0.38		$\mu_{s3}=-1.1$	1.0	1.83	-0.7649
			$\mu_{s4}=-0.5$			-0.3477

当光伏组件阵列布置，阵列数大于 7 排时，可对第 3 行以后的体型系数进行折减，折减系数可取 0.8。故在风压工况和风吸工况可以在对应风向情况下，在第四和第 5 排做折减。

根据《柔性光伏支架结构设计规程》(T/CSEE 0394-2023) 第 5.2.3 条可知，当光伏组件倾角 $\leq 25^\circ$ 时，顶面积雪分布系数取为 $\mu_r=1.0$ ，即雪荷载标准值 $s_k=0.36\text{kN/m}^2$ 。

3.2.3 温度效应

根据委托方提供的设计依据，结构合拢温度约 15℃ 左右，则升温工况 +24℃，降温工况 -23℃。

3.2.4 地震效应

本项目位于江苏省江阴市，根据《中国地震动参数区划图》及《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 (2016 年版)，江阴市基本烈度为 6 度，基本地震动峰值加速度为 0.05g，抗震分组为第三组。光伏支架设计等级为丙级、结构安全等级为三级、抗震设防类别为丁类。依据《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 (2016 年版) 第 3.1.2 条：抗震设防烈度为 6 度时，除本规范有具体规定外，对乙、丙、丁类的建筑可不进行地震作用计算。故本项目不做地震作用计算。

3.2.5 检修荷载

根据现行行业标准《光伏支架结构设计规程》NB/T 10115-2018 第 4.3.7 条：光伏支架设计时，宜考虑施工检修荷载，宜取点荷载 1kN，作用于支架最不利位置。建议根据实际情况，对于检修工况进行验算，如委托方认为检修时可不产生额外检修荷载，则可不进行验算，但应对此情况做出补充说明。

3.2.6 荷载组合

风吸工况参与的组合中，恒载对结构有利，根据《柔性光伏支架结构设计规程》(T/CSEE 0394-2023)中的规定，恒载的分项系数取 $\gamma_G=1.0$ ；索体的初始预应力帮助抑制索体松弛，同样对结构有利，其分项系数同样取 $\gamma_G=1.0$ 。参考现行国家规范《工程结构通用规范》GB 55001-2021，本项目验算时涉及的荷载组合如下，其中风载 1 为风压工况，风载 2 为风吸工况，温度 1 为升温工况，温度 2 为降温工况：

- (1) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 1}$
- (2) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 温度 1}$
- (3) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 温度 2}$
- (4) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 雪荷载}$
- (5) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 1} + 1.500 \times 0.600 \text{ 温度 1}$
- (6) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 1} + 1.500 \times 0.600 \text{ 温度 2}$
- (7) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 0.600 \text{ 风载 1} + 1.500 \times 1.000 \text{ 温度 1}$
- (8) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 0.600 \text{ 风载 1} + 1.500 \times 1.000 \text{ 温度 2}$
- (9) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 0.600 \text{ 风载 1} + 1.500 \times 1.000 \text{ 雪荷载}$
- (10) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 1} + 1.500 \times 0.700 \text{ 雪荷载}$
- (11) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 雪荷载} + 1.500 \times 0.600 \text{ 温度 1}$
- (12) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 雪荷载} + 1.500 \times 0.600 \text{ 温度 2}$
- (13) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 0.700 \text{ 雪荷载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 温度 1}$
- (14) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 0.700 \text{ 雪荷载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 温度 2}$
- (15) $1.000 \times \text{初始态} + 1.000 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 2}$
- (16) $1.000 \times \text{初始态} + 1.000 \times \text{恒载} + 1.000 \times 1.000 \text{ 风载 1} + 1.000 \times 0.700 \text{ 雪荷载}$
- (17) $1.000 \times \text{初始态} + 1.000 \times \text{恒载} + 1.000 \times 0.600 \text{ 风载 1} + 1.000 \times 1.000 \text{ 雪荷载}$
- (18) $1.000 \times \text{初始态} + 1.000 \times \text{恒载} + 1.000 \times 1.000 \text{ 风载 2}$
- (19) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 2}$
- (20) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 2} + 1.500 \times 0.600 \text{ 温度 1}$
- (21) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 2} + 1.500 \times 0.600 \text{ 温度 2}$
- (22) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 0.600 \text{ 风载 2} + 1.500 \times 1.000 \text{ 温度 1}$
- (23) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 0.600 \text{ 风载 2} + 1.500 \times 1.000 \text{ 温度 2}$
- (24) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 0.600 \text{ 风载 2} + 1.500 \times 1.000 \text{ 雪荷载}$
- (25) $1.000 \times \text{初始态} + 1.300 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 2} + 1.500 \times 0.700 \text{ 雪荷载}$
- (26) $1.000 \times \text{初始态} + 1.000 \times \text{恒载} + 1.500 \times 1.000 \text{ 风载 1}$
- (27) $1.000 \times \text{初始态} + 1.350 \times \text{恒载} + 1.400 \times 0.600 \text{ 风载 1}$

(28) $1.000 \times \text{初始态} + 1.350 \times \text{恒载} + 1.400 \times 0.600 \text{ 风载} 2$

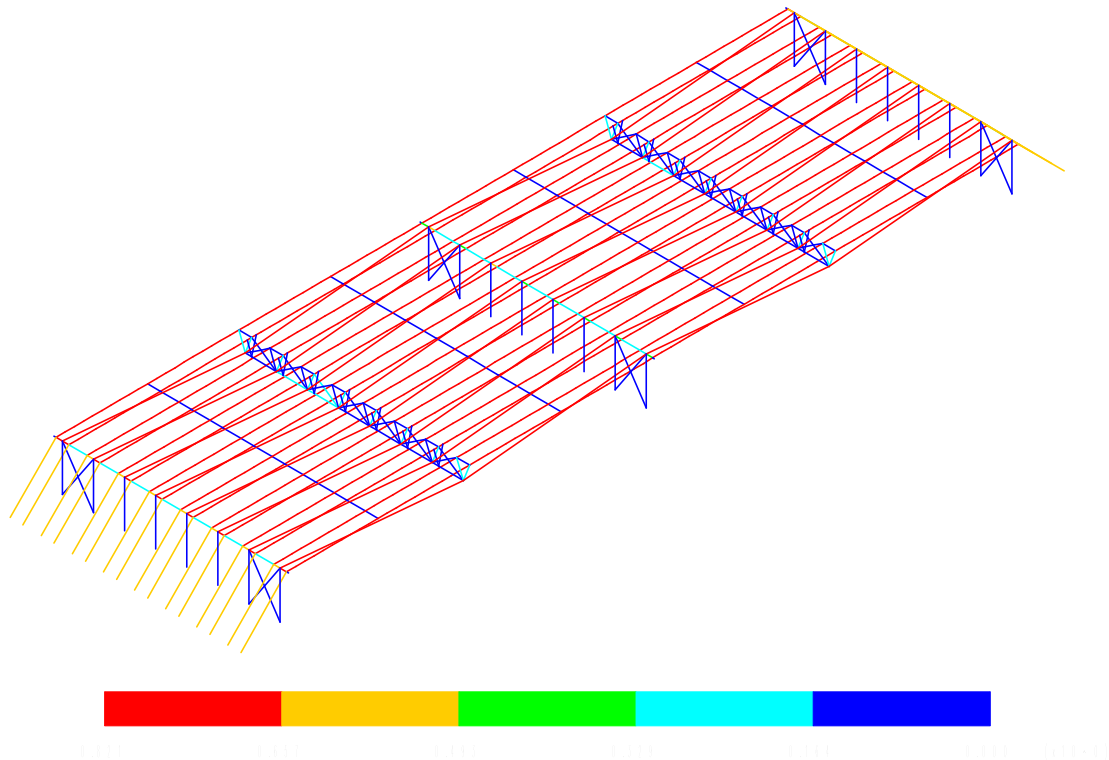
3.3 上部结构复核

结构验算时各工况均采用均布节点导荷，恒荷载施加在重力方向；风荷载施加在光伏组件法向，转化成节点力分别施加 X 向和 Z 向；雪荷载转化成节点力施加 Z 向。柔性支架的设计使用年限为 25 年，安全等级为三级，根据《光伏电站设计标准》GB 50797-2012（2024 版）第 6.8.4 条，结构重要性系数取 $\gamma_0=0.9$ 。

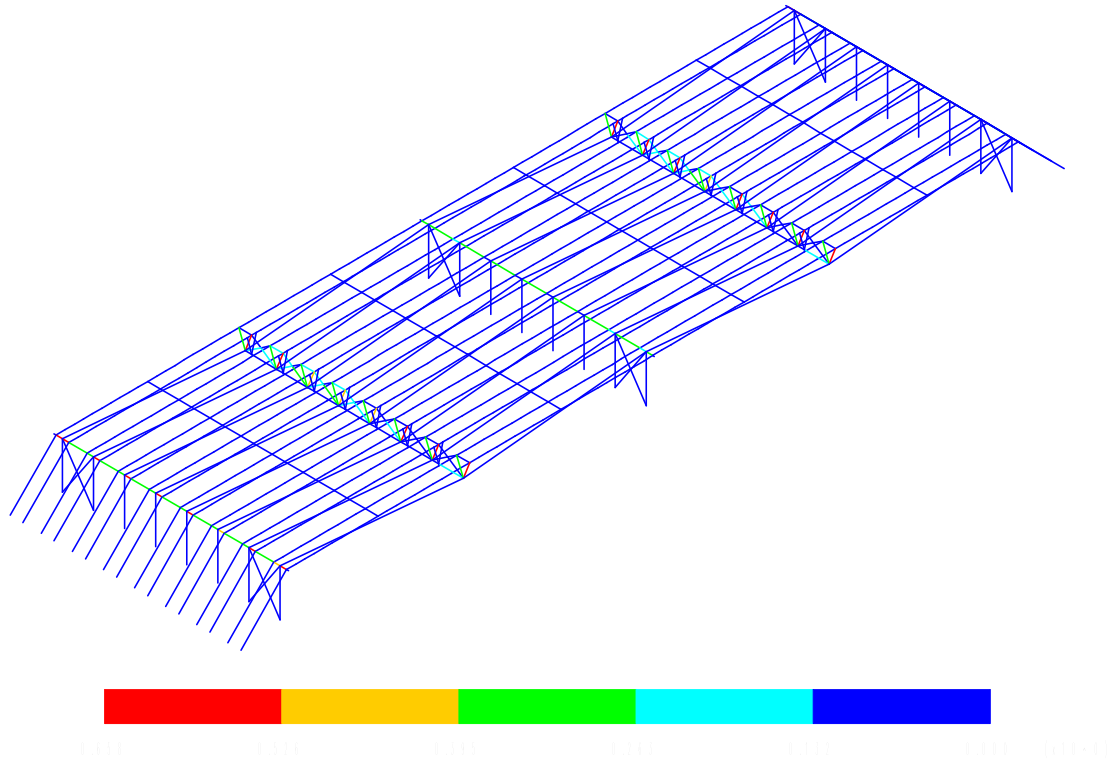
3.3.1 承载能力极限状态复核

需要注意的是，因结构方案中选用的索体截面以及钢绞线材料强度均不在结构设计软件的材料库中，需自行定义，将索体按只受拉杆件建模，即索体验算最小破断力时，仅验算其强度应力比，净截面断裂验算结果不做参考。

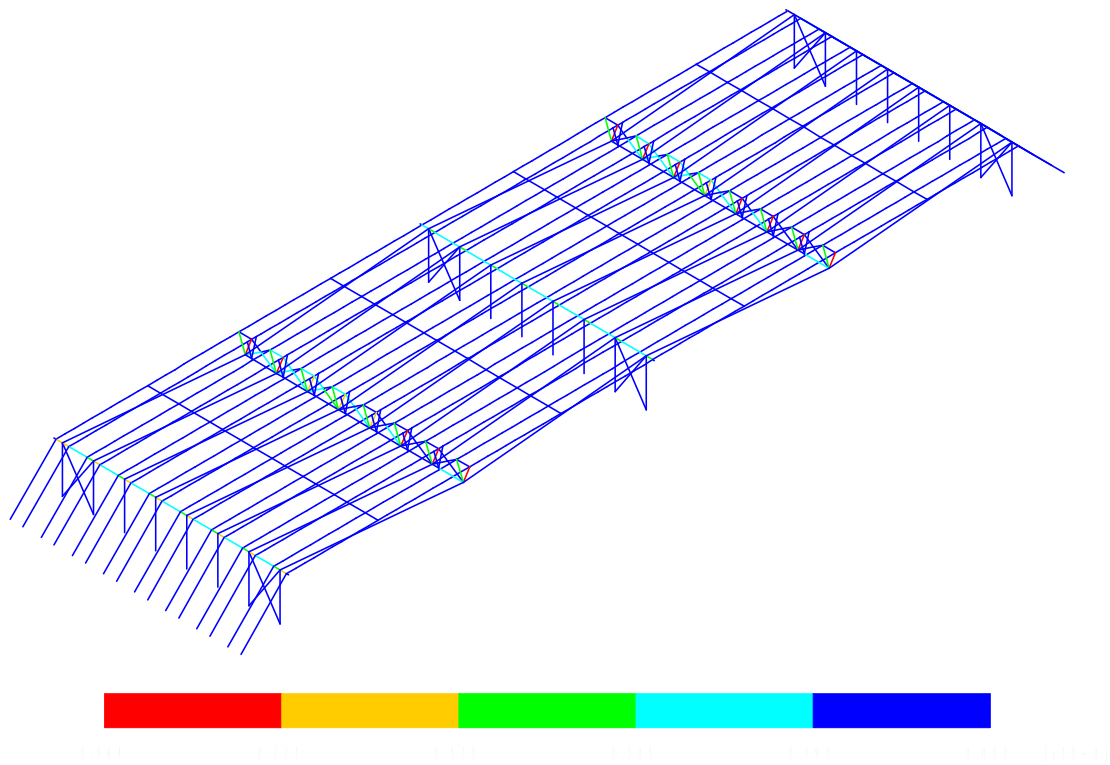
光伏柔性支架结构的承载能力极限状态验算如图 3.3-1 所示，包含强度应力比验算，绕 2 轴稳定性应力比验算，以及绕 3 轴稳定性应力比验算。如验算结果所示，最大强度应力比为 0.998，最大绕 2 轴稳定性应力比为 0.607，最大绕 3 轴稳定性应力比为 0.943，均未超过 1.0，满足设计要求。



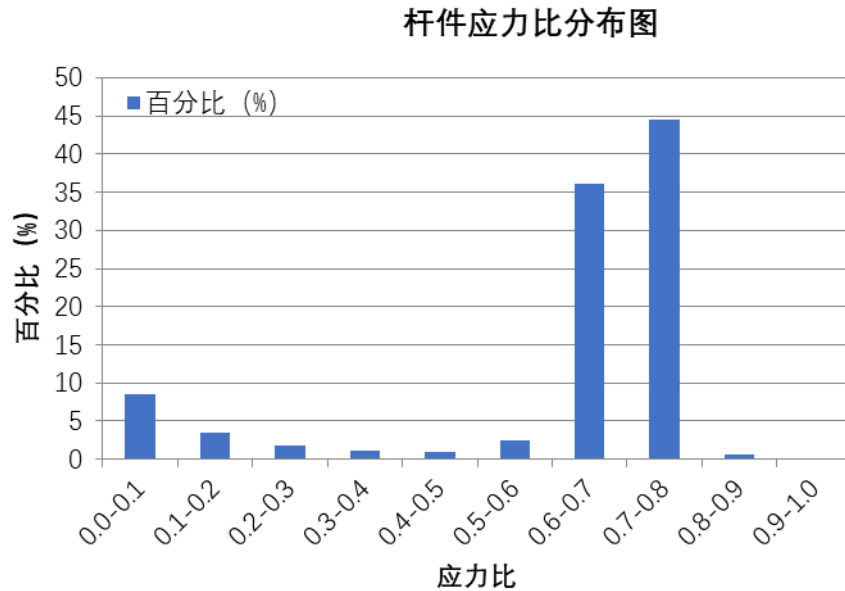
a. 强度应力比验算结果



b.绕 2 轴稳定性应力比验算结果



c.绕 3 轴稳定性应力比验算结果



d. 验算结果统计

图 3.3-1 支承结构验算结果

综上，柔性支架结构的极限承载力满足设计要求。

3.3.2 正常使用极限状态复核

根据委托方的设计依据，正常使用极限状态下的索体挠度验算主要参考《柔性光伏支架结构设计规程》(T/CSEE 0394-2023)中的相关规定，即双层索系在一般使用状态下挠度不应大于 $L/150$ (即安装完光伏组件后的常温状态)，上层索跨度取为相邻横向连接系的间距。一般状态下，索体的挠度如图 3.3-2 所示，最大挠度变形 141.611mm，挠度与跨度之比 $1/247$ ，满足设计要求。

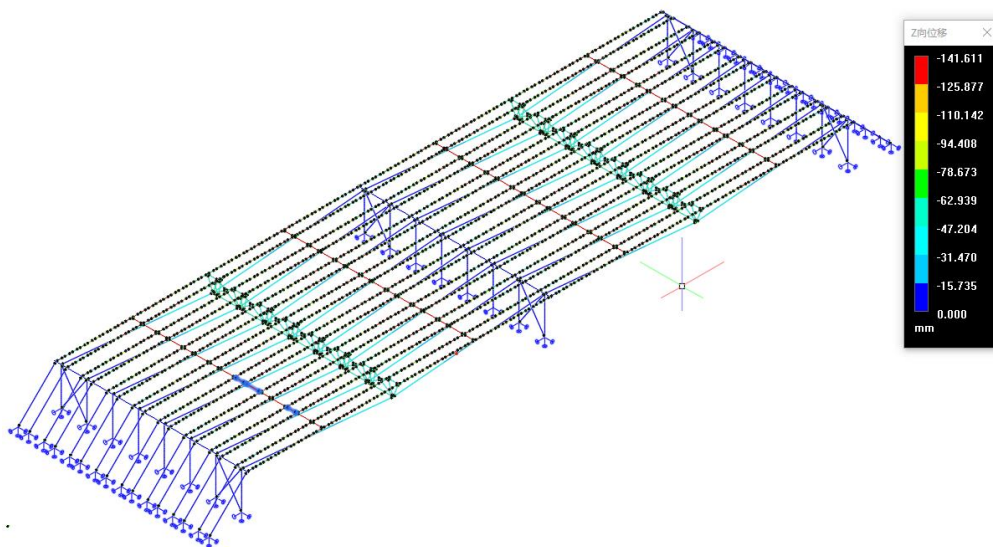


图 3.3-2 索体一般使用状态下挠度验算

参考现行行业标准《光伏支架结构设计规程》NB/T 10115-2018 中第 3.2 节，在风荷载标准值下，光伏支架结构钢立柱的柱顶水平位移容许值不应大于柱高的 $1/60$ ；钢梁的挠度容许值不应大于跨度的 $1/250$ 。风荷载标准值下，

立柱初始态到荷载态下的侧移如图 3.3-3 所示,柱顶的侧向位移最大值为 14.026mm,侧向位移与柱高比值为 1/356,满足要求。横梁的挠度验算如图 3.3-4 所示,最大挠度变形 3.135mm,挠度与跨度之比 1/1116,满足设计要求。

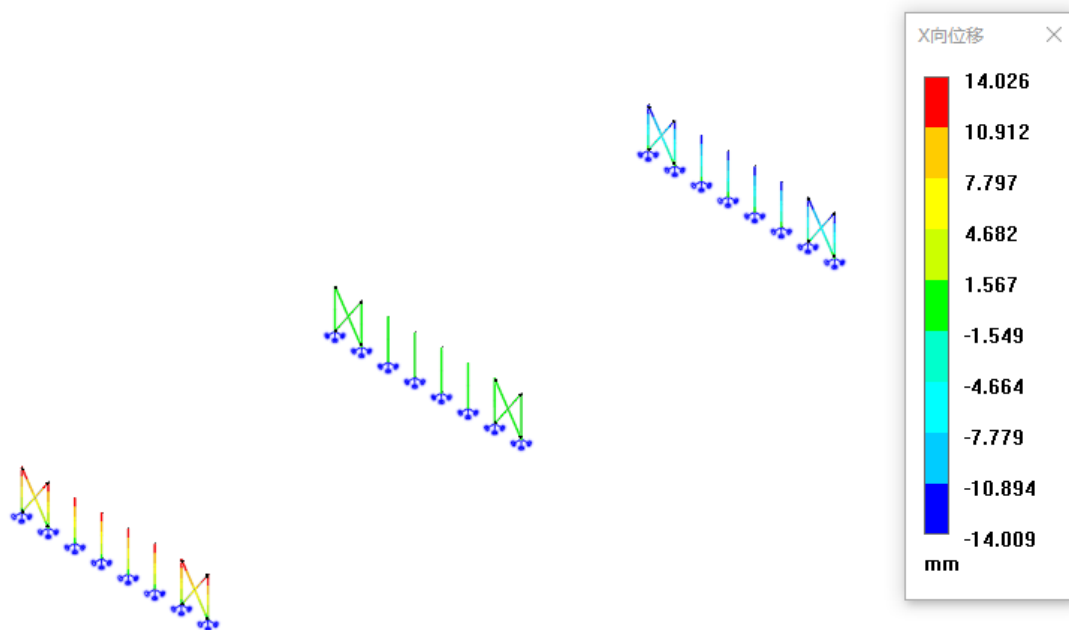


图 3.3-3 柱顶侧移变形验算结果

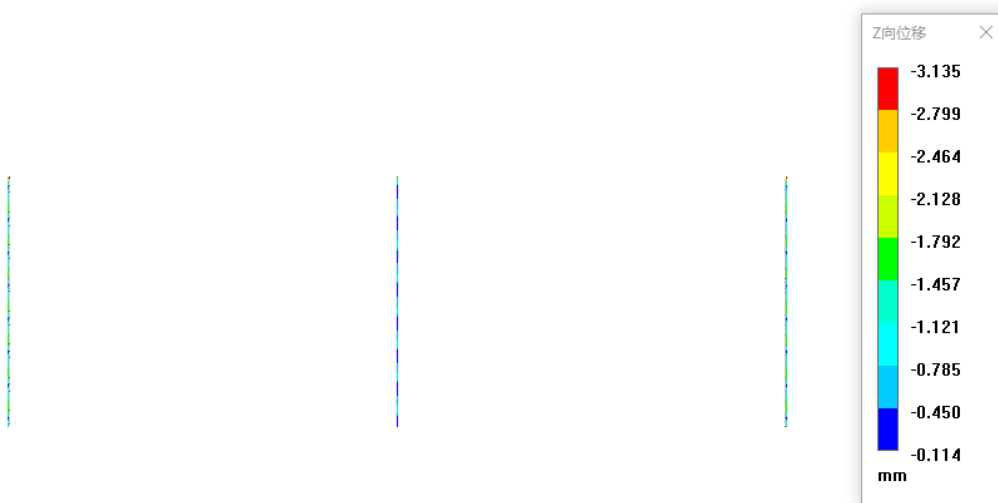


表 3.3-4 钢梁挠度验算结果

综上,根据委托方提供的设计依据,柔性支架结构的正常使用极限状态符合设计要求。

3.4 结论与建议

经复核,基于委托方提供的设计资料以及相关依据,光伏柔性支架上部结构受承载力满足设计要求。

4 柔性光伏阵列颤振特性 CFD 数值模拟

4.1 几何建模与计算域设定

如图 4.1-1 所示，计算区域采用矩形设定。模型特征长度定义为 B ，其中模型质心距入口 $6.5B$ ，距计算域两侧各 $6B$ ，距出口 $15B$ 。入口边界采用随高度变化的大气边界层速度入口条件，离地 $5m$ 高度处的风速范围为 $20 - 30m/s$ 。沿气流方向依次布置光伏组件 PV1、PV2、PV3 和 PV4。本研究采用以下假设：(1) 假定光伏组件是纯刚体结构。(2) 准定常假定应用于本次数值仿真中。(3) 光伏组件所在流体域是不可压缩流的。

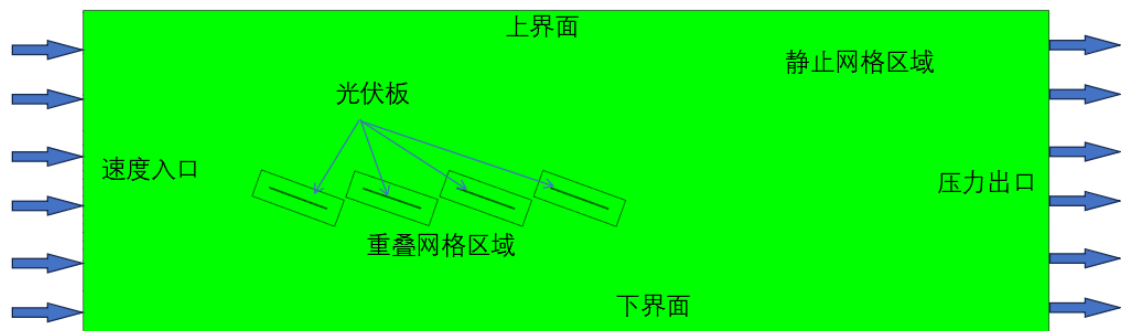


图 4.1-1 计算域边界示意图

4.2 网格划分

为实现流固耦合计算，采用“重叠网格结合背景网格”的方案来模拟网格运动。在光伏组件断面周围设置刚性网格区域，该部分网格将跟随光伏断面作刚体运动。网格系统由背景网格与构件网格两部分构成。计算域的整体网格划分如图 4.2-1 至 4.2-2 所示，全域采用结构化网格。在断面附近的加密区域，网格尺寸设置为 $0.003m$ ；外围非加密区网格尺寸为 $0.1m$ ，网格增长率取 1.15 。此外，在壁面区域设置了 10 层以上的边界层网格，边界层采用四边形网格，并根据所选湍流模型的要求，将首层网格尺寸按 $Y^+ \approx 30$ 进行设置。

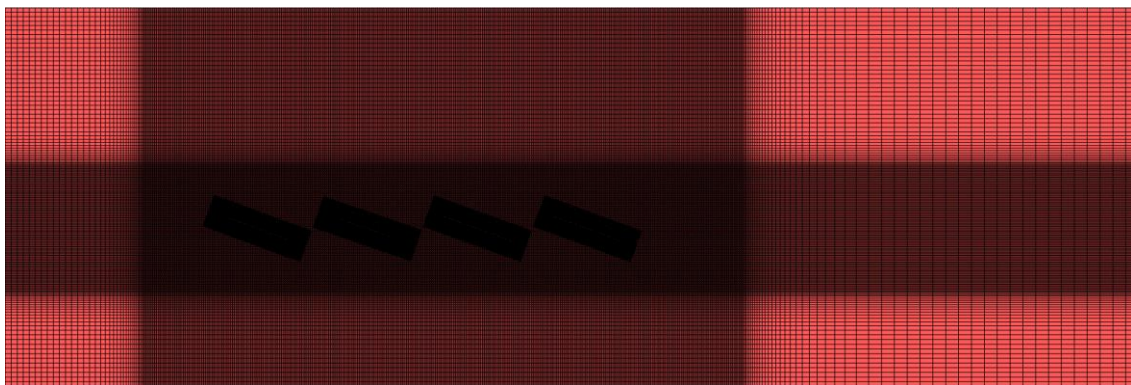


图 4.2-1 整体网格划分图

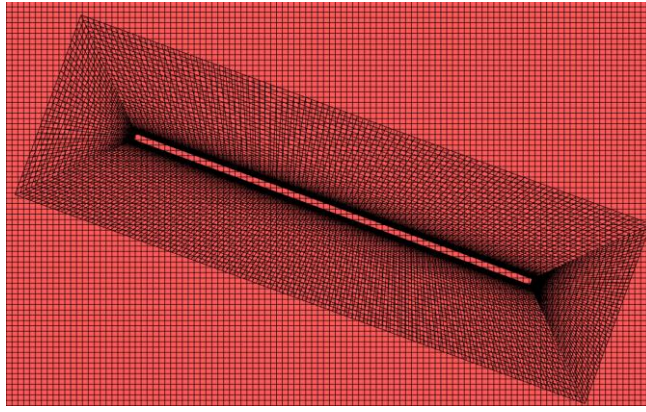


图 4.2-2 重叠网格划分图

4.3 边界条件设置

入口边界条件：来流为梯度风剖面，模拟 B 类地貌，沿 z 方向的风速剖面为：

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0 \times l_s}{z_0 \times l_s} \right) \quad (4.3-1)$$

来流湍流特性通过直接给定湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 值的方式来定义：

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \cdot \ln \left(\frac{z + z_0 \times l_s}{z_0 \times l_s} \right) + C_2} \quad (4.3-2)$$

$$\omega = \frac{u_*}{\kappa \sqrt{C_\mu}} \frac{1}{z + z_0 \times l_s} \quad (4.3-3)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa (z + z_0 \times l_s)} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z + z_0 \times l_s}{z_0 \times l_s} \right) + C_2} \quad (4.3-4)$$

式中参数 u 是平均速度 (m/s)； k 是湍动能 (m^2/s^2)； ω 是湍流频率 (1/s)； ε 是湍动能耗散率 (m^3/s^2)； l_s 是无量纲模型缩尺比； u_* 是摩擦速度 (m/s)，取值为 1.2； κ 是卡门常数； z 是离地高度 (m)； z_0 是粗糙长度 (m)，取值为 0.05； C_μ 是湍流模型常数，取值为 0.04； C_1 取值为 -0.075、 C_2 取值为 0.955。

出口边界条件：压力出口。

流体域顶部和两侧：对称边界条件。

光伏表面和地面：无滑移壁面条件，并对壁面条件进行粗糙度修正。

4.4 流固耦合实现

由于光伏组件相对较薄，横向跨度相对较大，光伏组件在左右横风向方向上的受力和变形相对较小，因此在设计中通常可忽略。本文数值模拟考虑扭转及竖向耦合振动，将柔性光伏系统简化为竖向、扭转的二维振动弹簧-质量-阻尼系统，如图 4.4-1 所示。

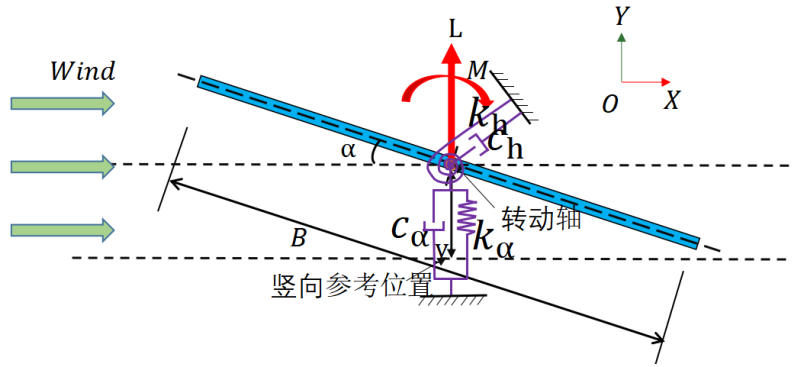


图 4.4-1 柔性光伏组件振动简化二维模型

单块光伏组件动力学方程为：

$$\ddot{y}(t) + 2\xi_h\omega_h\dot{y}(t) + \omega_h^2y(t) = F_L(t)/m \quad (4.4-1)$$

$$\ddot{\alpha}(t) + 2\xi_\alpha\omega_\alpha\dot{\alpha}(t) + \omega_\alpha^2\alpha(t) = M_\alpha(t)/I_m \quad (4.4-2)$$

式中， $\ddot{y}(t)$ ， $\dot{y}(t)$ ， $y(t)$ 分别为 t 时刻下结构竖向运动加速度、速度和位移； $\ddot{\alpha}(t)$ ， $\dot{\alpha}(t)$ ， $\alpha(t)$ 分别为 t 时刻下结构的扭转运动加速度、速度和位移； ξ_h ， ξ_α 分别为结构的竖向运动阻尼比和扭转运动阻尼比，其中主要包含结构自身阻尼与压电效应产生； ω_h ， ω_α 分别为结构竖向运动圆频率和扭转运动圆频率； $F_L(t)$ ， $M_\alpha(t)$ 分别为 t 时刻下结构所受到的竖向气动自激力和气动力矩； m ， I_m 分别为结构的单位长度质量和以扭心为参考点的单位长度质量矩。

微分方程求解方法可以 Newmark- β 法等数值方法进行求解。而 Newmark- β 法作为专门的求解动力响应微分方程的方法，该方法则假设：

$$y_{t+\Delta t} = y_t + \dot{y}_t\Delta t + (0.5 - \beta)\ddot{y}_t\Delta t^2 + \beta\ddot{y}_{t+\Delta t}\Delta t^2 \quad (4.4-3)$$

$$\dot{y}_{t+\Delta t} = \dot{y}_t + (1 - \gamma)\ddot{y}_t\Delta t + \gamma\ddot{y}_{t+\Delta t}\Delta t \quad (4.4-4)$$

式中， y_t 为当前时刻的位移值； $y_{t+\Delta t}$ 为下一时刻的位移值； β 和 γ 均为系数。将上述的式子中的 $\ddot{y}_{t+\Delta t}$ 与 $\dot{y}_{t+\Delta t}$ 写成 $y_{t+\Delta t}$ ， y_t ， $\dot{y}_t$ ， $\ddot{y}_t$ 的表达式：

$$\ddot{y}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}(y_{t+\Delta t} - y_t) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{y}_t - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{y}_t \quad (4.4-5)$$

$$\dot{y}_{t+\Delta t} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}(y_{t+\Delta t} - y_t) + \left(\frac{\beta - \gamma}{\beta}\right)\dot{y}_t + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{y}_t\Delta t \quad (4.4-6)$$

将上两式代入式(4.4-1)中，并且写成如下显式形式：

$$\bar{k}y_{t+\Delta t} = \bar{L}_{t+\Delta t} \quad (4.4-7)$$

式中， $\bar{k}$ 为等效刚度； $\bar{L}_{t+\Delta t}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的等效外力。

$$\bar{k} = m\omega_h^2 + \frac{1}{\beta\Delta t^2}m + \frac{2\gamma}{\beta\Delta t}m\xi_h\omega_h \quad (4.4-8)$$

$$\begin{aligned} \bar{L}_{t+\Delta t} = & L_{t+\Delta t} + m\left[\frac{1}{\beta\Delta t^2}y_t + \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{y}_t + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{y}_t\right] + \\ & 2m\xi_h\omega_h\left[\frac{\gamma}{\beta\Delta t}y_t + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)\dot{y}_t + \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\gamma}{\beta} - 2\right)\ddot{y}_t\right] \end{aligned} \quad (4.4-9)$$

进而计算下一时刻的位移值：

$$y_{t+\Delta t} = \bar{L}_{t+\Delta t} / \bar{k} \quad (4.4-10)$$

位移加速度 $\ddot{y}_{t+\Delta t}$ 则由式子(4.4-5)确定；而 $\dot{y}_{t+\Delta t}$ 由式子由(4.4-6)确定。

4.5 计算参数设置

采用瞬态计算，湍流模型选用为 SST $k-\omega$ 模型，SST $k-\omega$ 模型对模拟建筑结构分离具有较好的模拟精度，并且计算效率较高。压力与速度耦合采用 Simplec 算法，各量值迭代残差小于 1×10^{-3} 且壁面压力监控值稳定后视为计算收敛。

4.6 网格无关性验证

为兼顾计算机的计算能力和数据结果的准确性，本文数值模拟对网格划分情况进行网格无关性分析，以确定分析时可采用的最小网格数量。对计算域进行 3 种不同网格尺寸的网格划分，分别为粗网格(21 万)、中网格(32 万)和细网格(42 万)。在同一风场条件下，对 3 种网格模型进行计算分析，以光伏组件扭转角度响应振幅为评价标准，结果如表 3.5-1 所示。从数值上来看，随着网格数量的增大，参数的数值解越来越趋向于定值。从 21 万网格到 32 万网格相邻数据相差约为 6.1%，从 32 万网格到 42 万网格相邻数据相差约为 1.8%，故可认为中网格的数值仿真结果已收敛。在权衡计算精度和计算时间后，认为中网格最为适合本文模拟研究，计算域网格数量为 32 万，网格无关性验证完毕。

表 3.5-1 网格无关性验证

网格类型	扭转角度振幅/ (°)
粗网格 (21 万)	21.2
中网格 (32 万)	22.5
细网格 (42 万)	22.9

4.7 结果分析

根据 CFD 流固耦合模拟得到的 PV 结构响应参数随风速变化趋势分析，在 20-30 m/s 的风速范围内，PV1、PV2、PV3、PV4 四个光伏组件表现出明显的颤振特征差异。从角度均值和 Y 方向位移均值的变化趋势来看，在风速低于 27 m/s 时，各光伏组件的响应相对平稳，呈近似线性增长；然而当风速达到 27 m/s 时，PV1 的 Y 方向位移均值出现急剧跳跃，从约 0.2 m 突增至 0.8 m 左右，同时其角度均值也显著增大，这表明 27 m/s 可能是 PV1 结构失稳的临界风速。

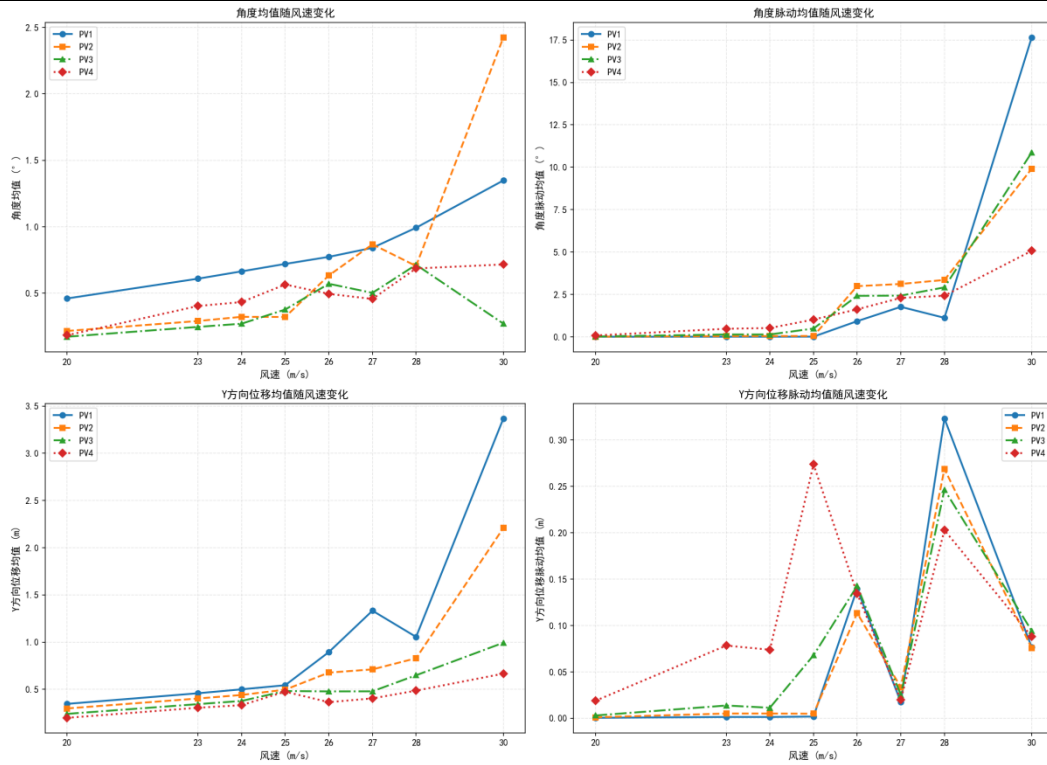


图 4.6-1 柔性光伏组件随风速变化响应

在 27-30 m/s 风速区间内，PV1 表现出明显的颤振特征，显示 5 个典型风速（24、25、26、27、28 m/s）下 PV1-PV4 的角度和位移时程曲线。其角度脉动均值和 Y 方向位移脉动均值在此区间内显著放大，说明结构振动幅度剧烈增加，流固耦合系统进入不稳定状态。特别是在 30 m/s 时，PV1 的角度响应接近 2.0° ，Y 方向位移均值远超其他光伏组件，呈现出典型的发散性失稳特征，这符合颤振或驰振的物理表现。

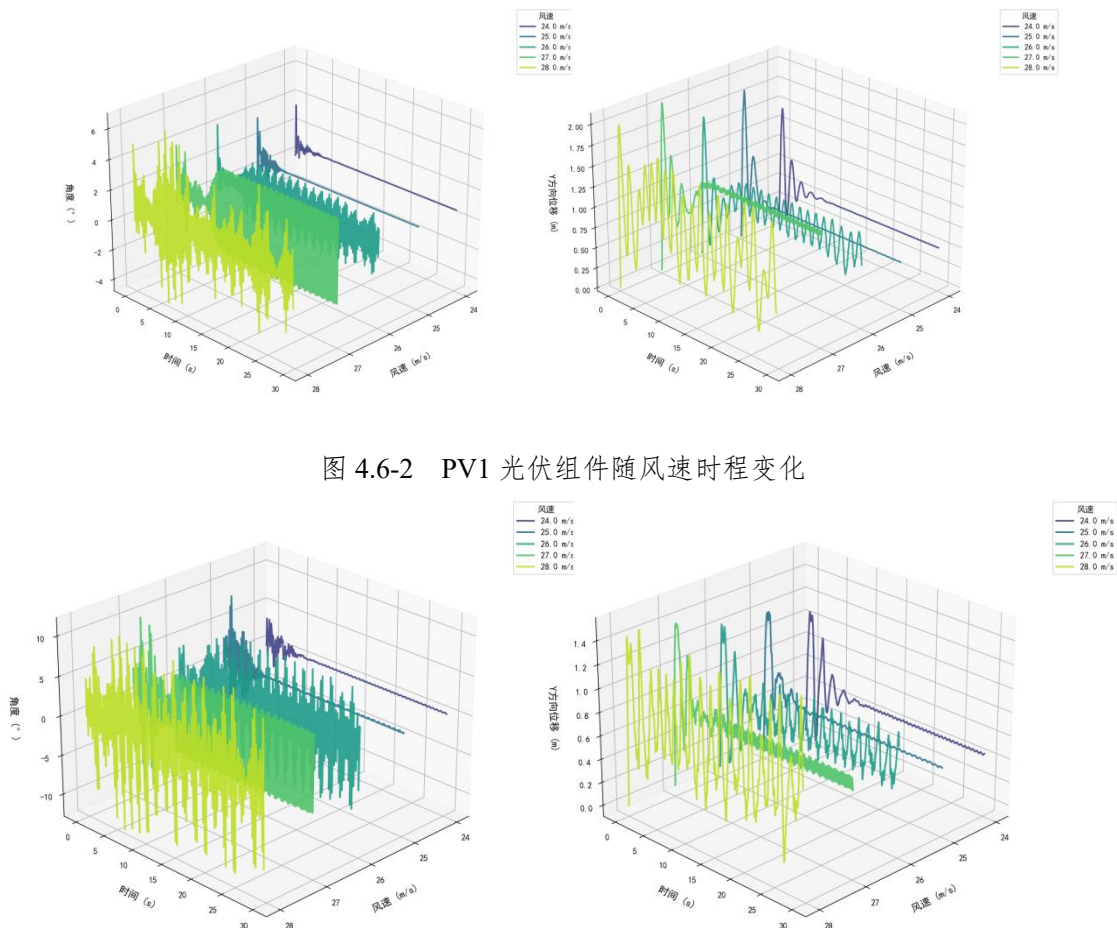


图 4.6-2 PV1 光伏组件随风速时程变化

图 4.6-2 PV2 光伏组件随风速时程变化

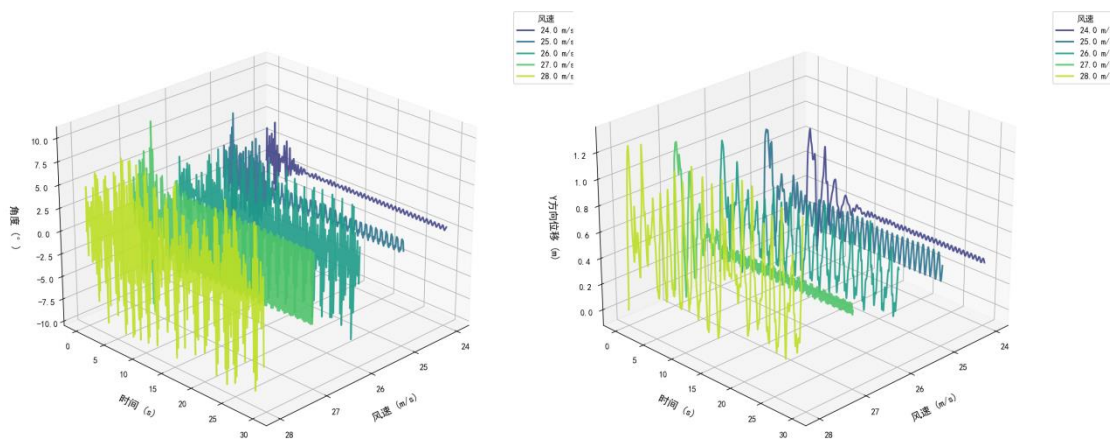


图 4.6-2 PV3 光伏组件随风速时程变化

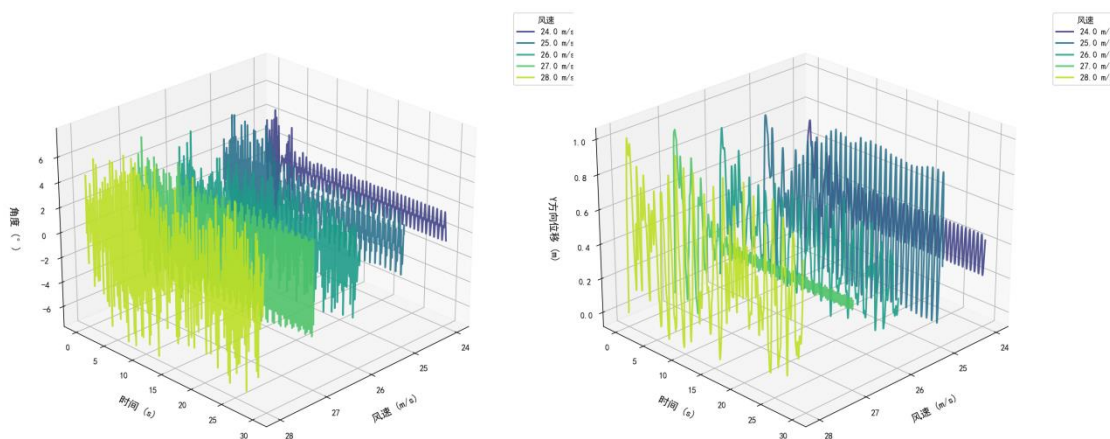


图 4.6-2 PV4 光伏组件随风速时程变化

相比之下，PV2、PV3、PV4 在相同风速区间内未表现出类似的剧烈失稳。虽然这些光伏组件的响应参数也随风速增加而增大，但变化相对平缓，没有出现 PV1 那样的突变现象。值得注意的是，PV4 的角度和位移响应在 30 m/s 时甚至略有下降，这可能与其在阵列中的位置有关，受到了上游光伏组件尾流干扰的效应。

综合各参数变化趋势，PV1 在 27-28 m/s 区间内最可能发生颤振，这可能是由于其在光伏阵列中处于特定位置，导致其承受的气动载荷和流动条件与其他光伏组件不同。颤振本身不直接导致瞬时破坏，但其引发的长期、大幅的连续振动，会使光伏支架、连接件和玻璃承受高频交变应力，最终因金属疲劳而逐渐失效（如螺栓松动、焊缝开裂、玻璃破裂）。在 B 类地貌下，对应于 10 米高度处 25 年一遇基本风压 0.38 kN/m^2 ，在 5 米高度处的风速约为 22.2 m/s，此设计风速低于 27-28 m/s 的颤振临界风速，表明结构在 25 年一遇的设计风速下，发生颤振可能性比较低。

5 结论与建议

1、被评估的《东软鸥翼梁柔性光伏支架风洞试验研究报告》技术路线合理，数据基本翔实，结论明确。报告系统地验证了鸥翼梁连接体系的有效性，并得出 M2 结构方案（排间距 2.6m）的抗风性能显著优于 M1 方案（排间距 3.5m）的明确结论。针对需补充与修正的内容，报告方已在最终版中完成全面核查和落实，相关问题均已修改完毕。

2、基于委托方提供的设计资料及相关规范，对优选出的 M2 方案（8 排阵列）进行上部结构承载力复核算算。

结果表明，在考虑风、雪、温度等荷载组合下，结构的强度、稳定性（最大应力比 $0.998 < 1.0$ ）以及正常使用状态下的挠度与位移（如索体挠跨比 $1/247$ ，满足 $\leq 1/150$ 要求）均满足设计要求。

3、通过 CFD 流固耦合数值模拟对多排 M1 的颤振特性进行研究。结果表明，在 B 类地貌下，当 5 米高度处风速达到 27-28 m/s 时，阵列中迎风第一排（PV1）光伏组件可能发生颤振失稳，表明结构在 25 年一遇的设计风速下，发生颤振可能性比较低。



为行业进步提供解决方案 推动社会可持续发展



官网: <http://www.cgc.org.cn>

地址: 北京市东城区和平里北街6号尚8远东科技文化园26号楼3层

邮编: 100013

电话: +86-10-59796665

传真: +86-10-64228215