天合跟踪基于超高功率组件应用的风工程研究

白皮书2.0

编号：TDMS-003-V1
2021年7月

TrinaTracker
天 合 跟 踪

目录

1. 摘要 1

1.1 缩略语 2

1.2 引言 3

2. 组件技术演变以及对新跟踪支架设计的影响 4

2.1 迈向大组件新时代 5

2.2 大尺寸组件对跟踪支架设计的影响 7

3. 风荷载对跟踪支架结构的影响 10

4. 跟踪支架设计中与风相关的关键因素 12

4.1 引言 13

4.2 风对跟踪支架设计的影响 14

4.3 倾角定义 15

4.4 支架长度分析 16

4.5 组件压力分析 17

5. 风洞实验 20

5.1 风洞实验中的压力模型 22

5.2 二维截面模型测试和数值模型 26

5.3 全气弹模型试验 30

6. 天合跟踪产品设计 31

6.1 结构设计与验证 32

6.2 保护策略介绍 35

6.2.1 大风天气保护策略 35

6.2.2 大雪天气保护策略 35

6.2.3 冰雹天气保护策略

7. 天合跟踪差异化研发和工程能力 36

7.1 竞争优势介绍 37

7.2 程序与方法 38

7.3 先进工程解决方案 39

7.4 6GW＋全球装机量 40

8. 结语 41

TrinaTracker 天合跟踪

1

摘要

1.1缩略图

1.2引言

Trina Tracker
天 合 跟 踪

1.1 缩略语

BOS	光伏平衡系统（光伏系统除组件外所有部件的成本）
W	瓦特
RWDI	Rowan Williams Davies & Irwin Inc.（风工程咨询公司）
CPP	Cermak Peterka Petersen Inc.（风工程咨询公司）
DOE	实验设计
IEC	国际电工委员会
UL	美国安全试验室
P	竖装
PV	光伏
DAF	动态放大系数
GCN	阵风（压力）系数
O&M	运行维护
FEM	有限元法
NCU	通信控制器
R&D	研发
LCOE	度电成本

TrinaTracker 天合跟踪

1.2 引言

光伏产业在过去两年中经历了巨大演变，见证了发电效率的大幅提高和系统成本的大幅下降。

太阳能市场进入了一个新的组件时代，其特点之一是600W+大型组件的量产大幅度提高发电量，提高单位组串的功率，从而降低BOS成本。

大组件的设计需要采用新的机械和电气特性，以容纳更大硅片并结合更低的开路电压、更高的短路电流以及全新组串设计。

采用600W+的大尺寸组件对系统风荷载要求更高，从而影响支架的稳定性和可靠性，因此新一代的光伏系统最关键的挑战是对支架设计进行重新配置。

大组件时代的光伏安装最关键的挑战之一是对跟踪支架设计进行重新配置。

采用600W+组件对系统风荷载更高，从而影响支架的稳定性和可靠性。

天合跟踪将研发和工程设计资源聚焦在实现跟踪支架各项性能参数的优化，解决大尺寸组件产生的相关可靠性和稳定性问题，例如高风压对组件的影响，大组件对跟踪支架频率的影响等。天合跟踪与领先的风工程机构RWDI和CPP合作，准确调整支架设计，降低风险并保证最佳发电量和系统可靠性。

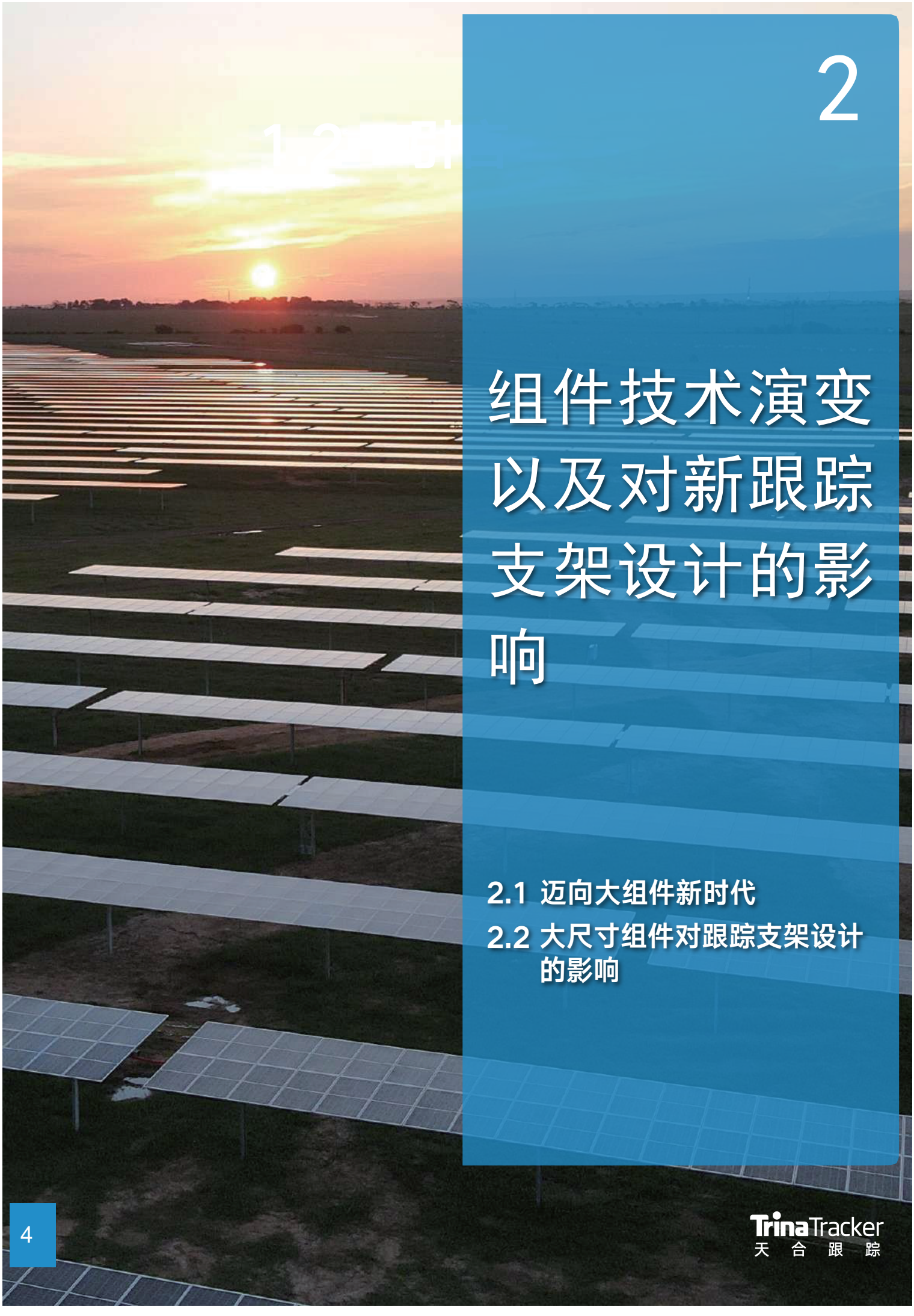
动态和气动弹性效应以及对外部风荷载的分析是设计兼容大尺寸组件跟踪支架的关键因素。

通过全面的实验设计和组件静载测试工作，验证风荷载对组件和支架的影响，确保设计同时满足IEC和UL标准。

由此，兼容600W+组件的天合跟踪开拓者2P和安捷1P系列根据对系统进行的多次测试和计算收集的结果进行升级，以保证最佳发电性能、可靠性能和最低的运维成本。

1P和2P支架由于排布方式不同，设计考量因素也会不同，大组件带来的的气动弹性不稳定性和风压分析是系统设计的关键因素。

从风洞分析和测试中收集的数据明显改进了计算方法，从而确定支架设计升级的要求。新设计的关键要素是引入新的结构多点驱动系统用于提高扭转刚度，并确定跟踪支架新的安全保护角度。



2

组件技术演变以及对新跟踪支架设计的影响

2.1 迈向大组件新时代

2.2 大尺寸组件对跟踪支架设计的影响

2.1 迈向大组件新时代

从 21 世纪初到 2014 年，组件行业经历了一系列重大变化。2018 年双面组件的到来成为一个重要的技术里程碑，随后可容纳宽大硅片的大尺寸组件在 2019 年面世（M10：182x182mm 和 M12：210x210mm ）。

大尺寸组件的批量供应和发电量的提升推动系统成本价格大幅下降。此外，以此相关的光伏系统的技术变更需求也随之产生，例如由于大组件尺寸和重量明显增加，需要对跟踪支架进行机械和电气参数进行重新配置，保证最优可靠性和最佳发电量。

天合光能是一家领先的组件制造商和系统解决方案提供商，在组件研发、工程和跟踪支架设计方面拥有深厚经验，公司研发设计过程中优先考虑气动弹性、稳定性和组件兼容性，打造既能保障系统发电量和系统稳定性，又兼顾大尺寸组件的跟踪支架设计。

大组件尺寸和重量明显增加，需要对跟踪支架进行机械和电气重新配置。

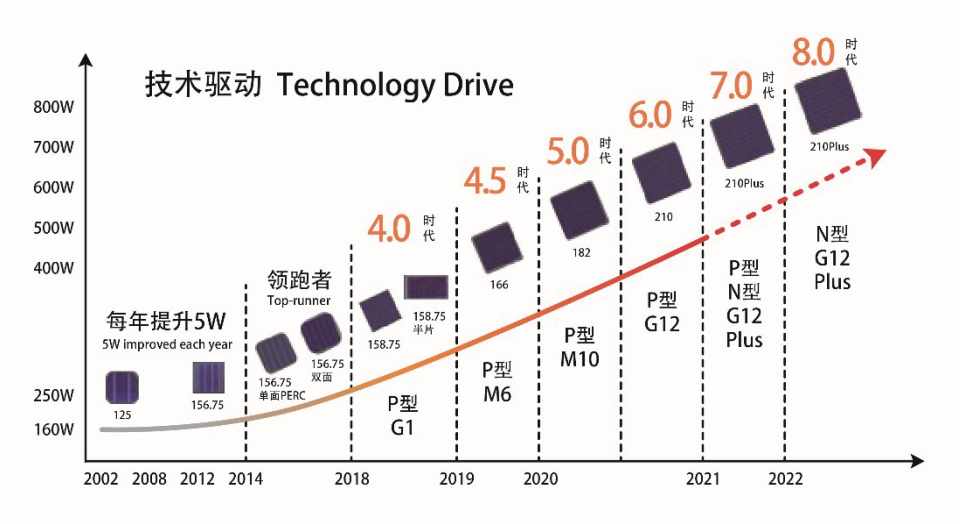


图 1- 图表： 2002 年 -2022 年光伏电池技术路线图

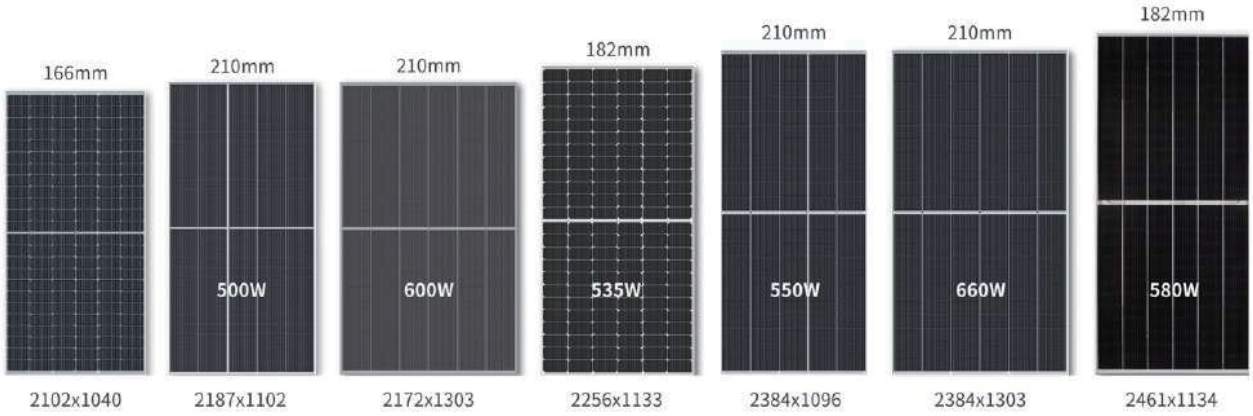


图 2： 光伏组件尺寸变化

2018年-2021年组件参数变化									
时间		2018	2019上半年	2019下半年	2020上半年	2020下半年		2021上半年	2021下半年
功率（瓦）		370	400	450	500	550		600	660
硅片型号		157mm	158mm	166mm	210mm	182mm	210mm	210mm	210mm
边框厚度（mm）		35	30	35	35	35	35	35	35
电气	开路电压（V）	48.3	49.9	49.3	51.5	49.5	38.1	41.7	45.9
	短路电流（A）	9.83	10.39	11.6	12.13	13.85	18.39	18.42	18.45
	温度系数（%/°C）	-0.29	-0.25	-0.27	-0.25	-0.28	-0.25	-0.25	-0.25
机械	尺寸（mm）	1960x992x35	2024x1002x30	2094x1038x35	2187x1102x35	2256x1133x35	2384x1096x35	2172x1303x35	2384x1303x35
	尺寸增加%	基数	4.3	11.8	23.9	31.5	34.4	45.6	59.8
	重量（千克）	21.5	26	23.3	30.1	32.3	32.6	35.3	38.7

图 3- 表格： 大组件机械、电气性能参数表

2.2 大尺寸组件对跟踪支设计的影响

大尺寸组件在跟踪支架安装应用时面对各种动态行为，包括更重的荷载。

跟踪支架的设计和配置与光伏组件的尺寸密切相关。

大尺寸组件应用在跟踪支架过程中将面对各种动态行为，包括更重的荷载。

大尺寸组件意味着更长的支架长度和宽度，需要更牢固的结构以及坚固的横截面，以支撑额外重量并保持对抗风效应的稳定性。

由于一排中装配的组串（串联组件）数量变化，支架的电气配置也会受到大尺寸组件的影响。

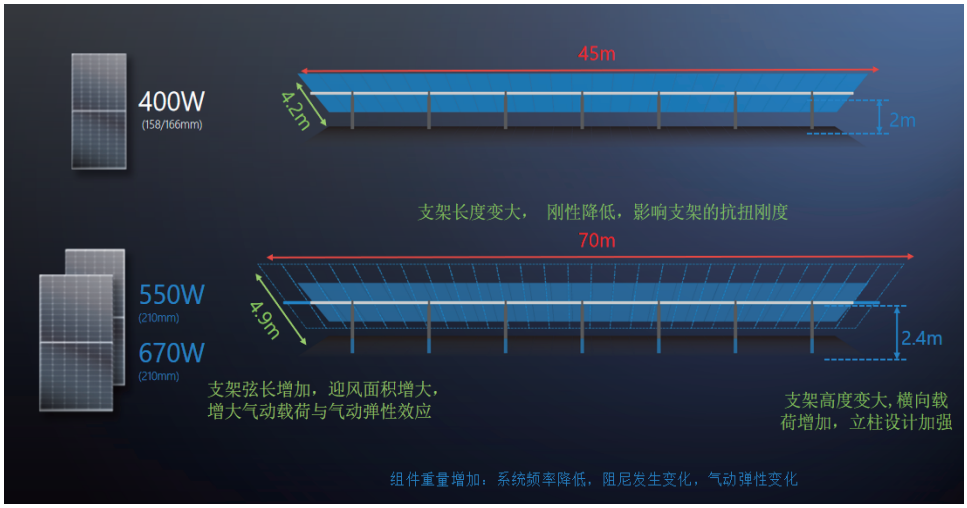


图4： 大尺寸组件对跟踪支架设计的影响概述

大尺寸组件相同数量条件下的支架更长。

采用大尺寸组件意味着组件的重心离支架扭转中心更远。因此，对于相同配置，方管将具有较低的扭转固有频率。

通常情况下，更多的重量进一步远离支架的扭转中心意味着更低的固有频率和阻尼变化，因此使用更长的弦长需要更精确的气动弹性计算。

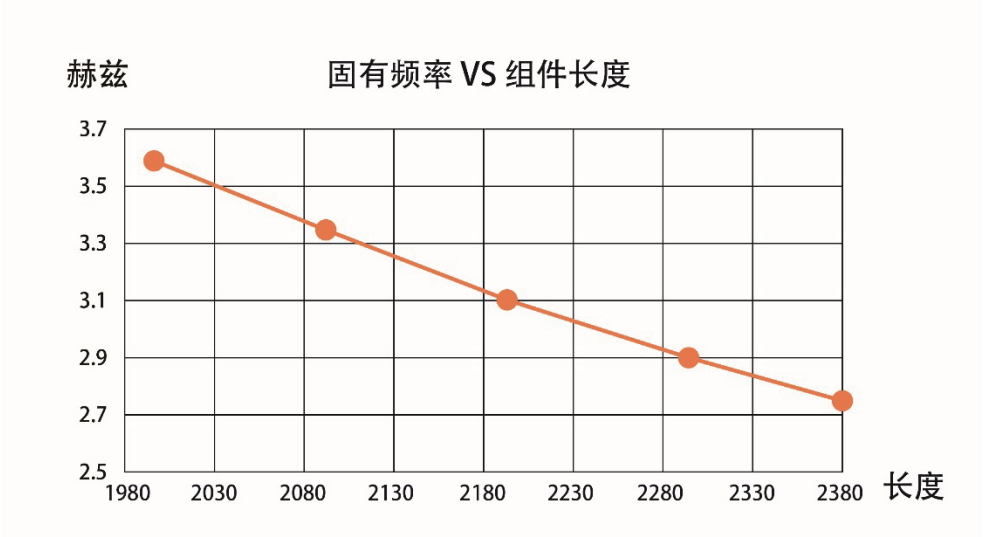


图 5- 图表： 固有频率 VS 组件长度

相同数量条件下，安装大尺寸组件的支架更长，会产生更高的失稳风险，同时还需应对更高的扭矩带来的挑战。

这个问题的解决方案包括沿支架长度方向安装更高刚度的扭矩管。此外，通常在单点驱动的情况下，支架更长意味着频率更低，刚度越弱，系统失稳的风险越大。

对于相同数量的立桩，光伏组件上的荷载压力越高，其桩基反作用力越大。桩基反作用力是 2P 支架确定使用大风速下小角度保护的原因之一。

下表总结了跟踪支架为兼容大尺寸组件并保持系统可靠性可能做出的设计改动。

组件变化	支架刚度和稳定性变化	对支架 / 部件设计的影响
长度增加	支架弦长变长 对气动弹性临界风速的影响	结构刚度要求更高 大风保护角度调整
宽度增加	支架长度变长 扭转刚度、频率变低	驱动系统改进
表面扩大	组件表面上风荷载更高 锁定系统扭矩更高 地基反力更高 立柱高度增加	支架表面积更大 檩条刚度更高 方管加强 大风保护角度调整
质量增加	固有频率更低 阻尼变化 对气动弹性临界风速的影响	改进驱动系统 大风保护角度调整

图 6– 表格：　跟踪支架兼容大组件的主要变更点

3

风荷载对跟踪支架结构的影响

TrinaTracker
天 合 跟 踪

3 风荷载对跟踪支架结构的影响

结构上的风载荷分布需要通过考虑主要风向上的平均风载荷和脉动风载荷来确定。风荷载的脉动部分是由湍流风（抖振）和结构的动态响应（共振）引起的。对于柔性、轻阻尼的结构，共振引起的惯性载荷会对脉动风载荷产生显著影响。

迄今为止，通过 RWDI（风工程咨询公司）研究，天合跟踪已经意识到风在光伏跟踪支架的某些部分引起振动或失稳的三种机制。

共振

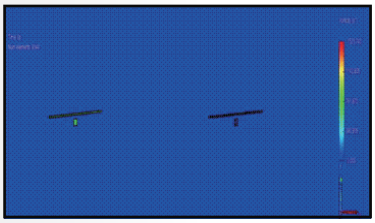


图 7- 视频： 抖振

风流经支架阵列的第一行会产生尾流，由此引起的尾流共振效应会导致后续阵列发生共振。

共振发生后，处于下风向的跟踪支架的动态抖振响应会增加，这是由于窄带频率上与上风向的涡旋脱落相关的能量增大引起的。静态压力分析中通过计算动态放大系数来描述这种类型的增强激励。这种共振发生的主要取决于结构系统的固有频率、风速、弦长以及系统的阻尼。

颤振

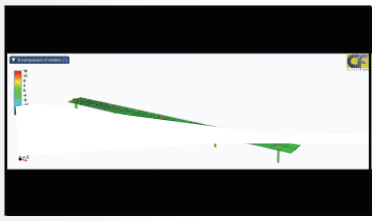


图 8- 视频： 颤振

对于一个从单一位置驱动的中央扭矩管系统来说，扭转振动模态较容易发生，通常以颤振的形式在每行的末端产生。

颤振是一种自激的气动失稳现象，其受到的气动自激力取决于结构本身的运动，并能造成振幅相当大的扭转运动或扭转和竖弯方向的耦合振动。

当气动弹性力传递的能量不能被系统阻尼消耗时，就会发生颤振。

扭转发散

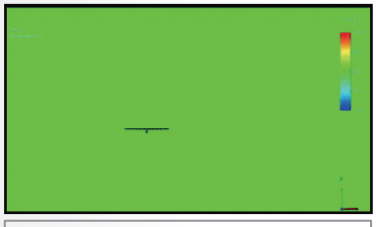
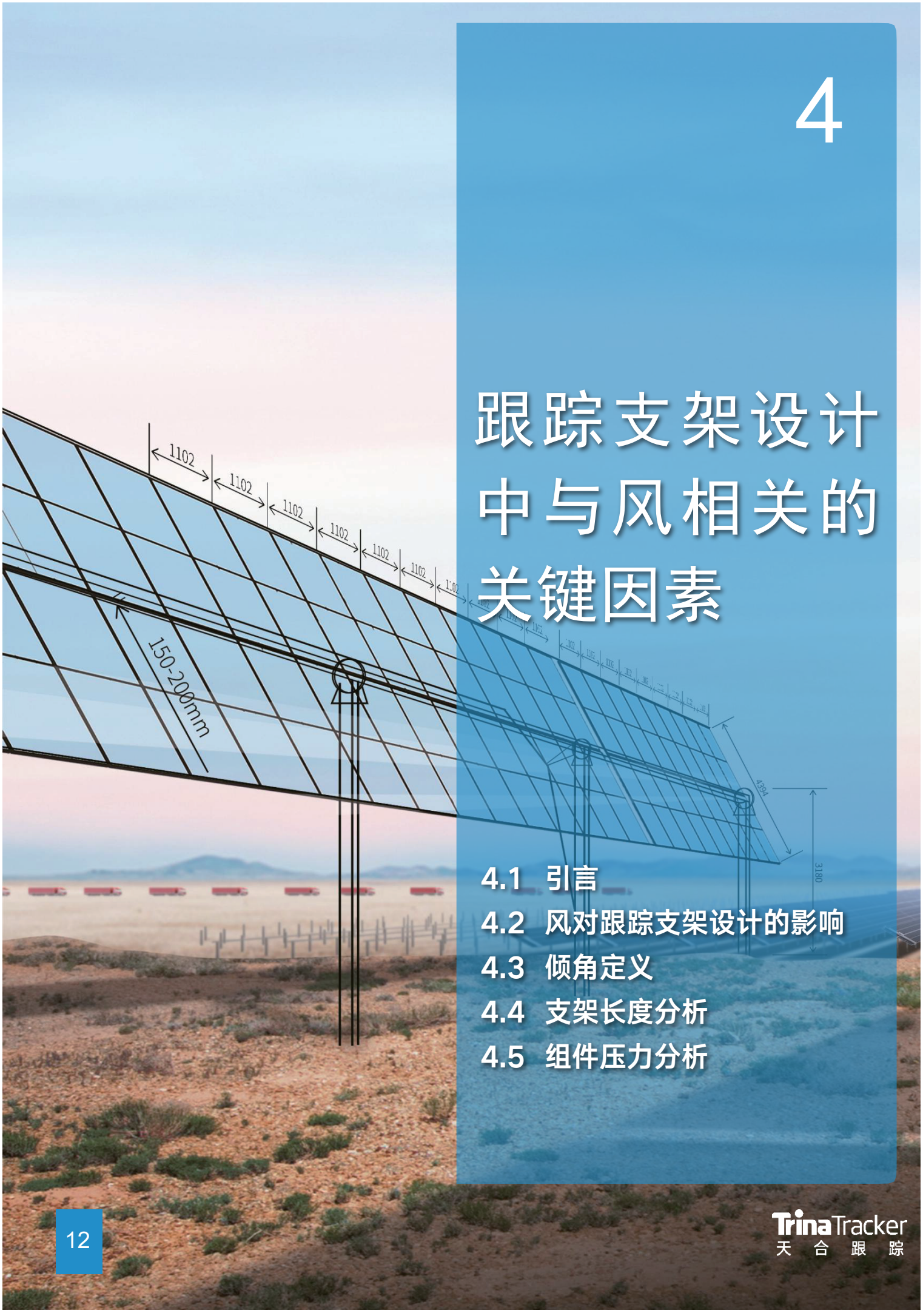


图 9- 视频： 扭转发散

对于一个较为柔性的中央扭矩管系统来说，在旋转时施加到每行上的扭矩变化可能会超过扭矩管的承受能力，从而引发与气动弹性静力学相关的扭转发散效应。

扭转发散效应是一种在给定风速下，结构在气动俯仰力矩的作用下发生大幅度偏转的静态失稳效应。这种偏转会导致攻角的增大，从而增大了作用在结构上的气动俯仰力矩，进一步增加了偏转的角度，直至超过结构的弹性极限，导致结构破坏。



4

跟踪支架设计中与风相关的关键因素

4.1 引言
4.2 风对跟踪支架设计的影响
4.3 倾角定义
4.4 支架长度分析
4.5 组件压力分析

TrinaTracker 天合跟踪

4.1 引言

天合跟踪根据倾斜角、跟踪支架长度和组件压力的特定定义参数生产安捷 1P 和开拓者 2P 规模原型。通过实施风洞测试，对这些原型样机进行动态和静态载荷试验。

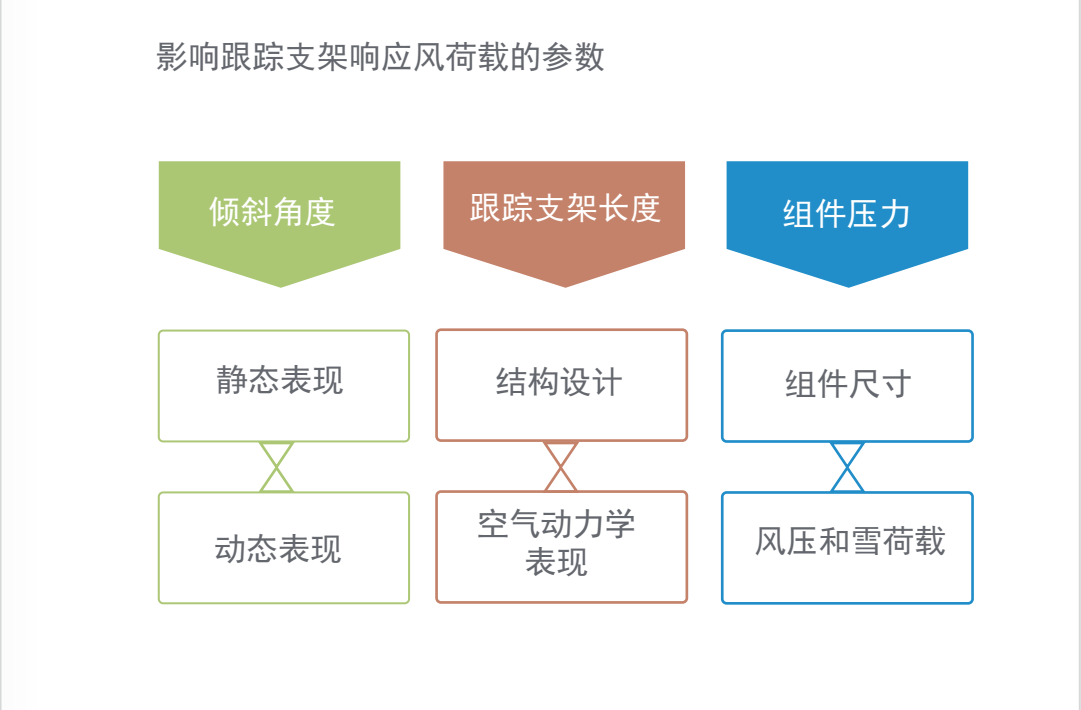


图 10（1&2）： 载荷和结构设计

4.2 风对跟踪支架设计的影响

风对支架的影响中最关键的是当风速超过支架结构允许的极限时发生的扭转运动，可产生不可控制的扭转振动，进而导致跟踪支架的不稳定。

跟踪支架结构由一个中心扭矩管组成，立桩均匀分布其间。

装配大尺寸组件的支架结构易受各类扭转气动不稳定性的影响，具体取决于其几何形状和动态特性（频率、阻尼）。

支架结构的常规计算与分析会考虑正常运行状态和保护状态时的风荷载的不同数值大小和压力分布，以及相对高风速下的气弹动态载荷对支架的影响。

风对支架的影响中最不利的是当风速超过支架结构允许的限值时发生的发散且不可控的扭转运动，进而导致跟踪支架不稳定而发生破坏。通过严密的临界风速计算，确保设计风速不超过此限值，避免支架气弹失稳。

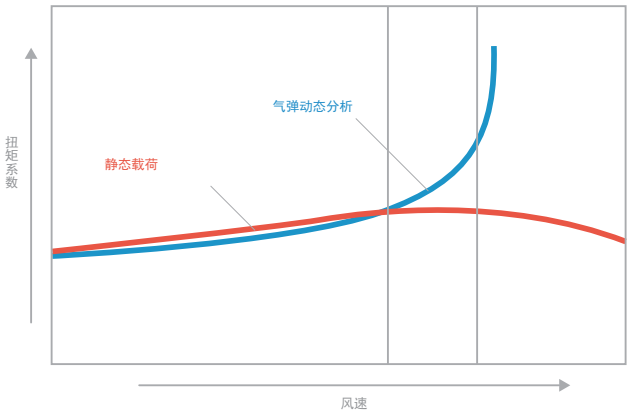


图 11- 图表：　静态载荷和气动分析

本文中所涉及的两种支架配置（1P 和 2P）需要采用两种不同的设计方法。根据支架的系统特性，以及从与业内领先风工程咨询机构 RWDI 和 CPP 合作开展的风洞测试中所取得信息，天合跟踪对其采用了不同的设计标准。

4.3 倾角定义

综合分析表明，必须采用不同的设计标准确定结构的倾角。

高倾角条件下主要由静态荷载决定，而低倾角条件下的设计根据动态载荷确定。

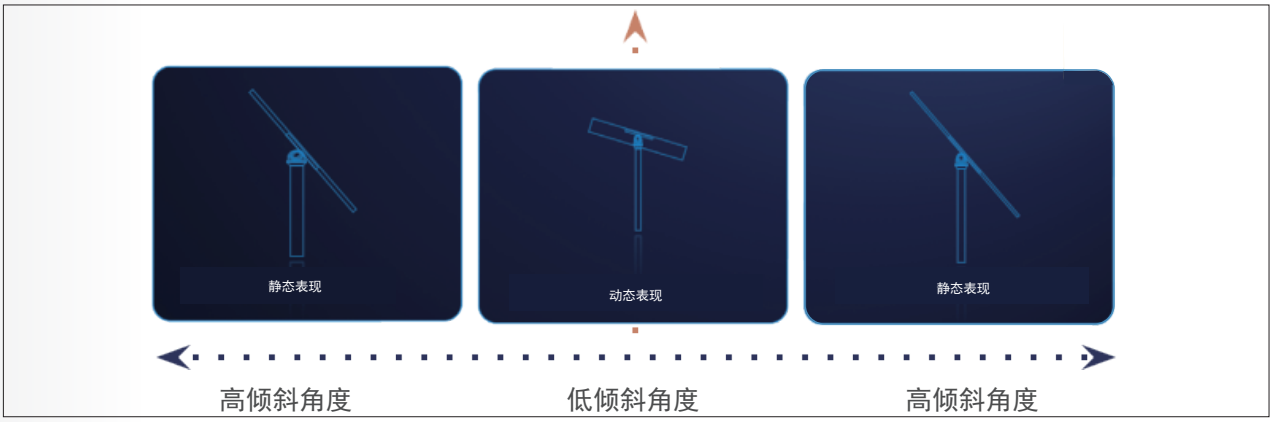


图 12： 动态和静态特性与倾角的关系

静态特征

静态荷载，包括压力系数和动态放大系数，决定高倾角条件下的设计。

关键结构件和部件根据静态和扭转荷载分析得出的数据进行设计。

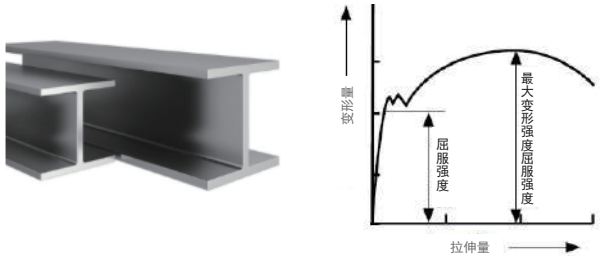


图 13： 荷载和结构设计

动态特征

气动荷载决定低倾角条件下的支架设计。刚度和阻尼参数是此范围的基本输入信息。通过加入多点驱动系统的设计能够增加结构刚度。

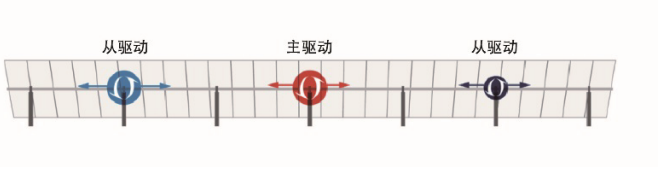
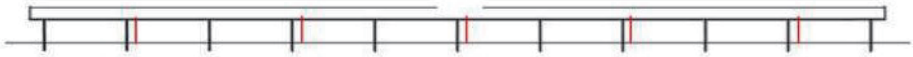


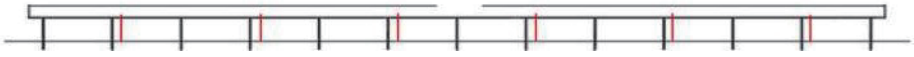
图 14： 多点驱动系统

4.4 支架长度分析

支架长度由一排中装配的组件数量决定，该数量取决于单套支架中可以容纳的组串数量。单套支架长度越长一般可以一定程度上降低跟踪支架成本，但也不是意味着，支架长度越长越好，以 2P 产品为例，如果做到 90m，将遇到的挑战，进行相应的分析。



外侧 开拓者 4 组串 90 米 13 根立桩 6 个线性推杆



内侧 开拓者 4 组串 90 米 11 根立桩 5 个线性推杆

在分析风对 90 米长的天合跟踪 2P 结构的影响后，发现以下潜在风险：

图 15： 不同支架长度的配置

动态问题

更长的支架本质上更不稳定。由于其需要进行额外加固，结构成本因此增加。

安装公差更小

长跨度需跨越现场各种坡度变化，增加施工成本，带来更高风险。高坡度会对立桩产生更大的横向推力。通过采用更大规格立桩可解决该问题，同时会大大增加基础成本。

振动

更长的支架易受更高风压影响，会造成紧固件松动。90 米长的支架需要在运维服务中增加扭矩检查频次。

土地利用

更长的支架占地面积更大，因此，装机容量会因用地地形适应能力受限而降低。

耗电量

部件越长越重，其系统电机能耗越高。

4.5 组件压力分析

组件表面的风压系数随倾角而增加，并影响支架的大风保护策略。

大尺寸组件可能导致支架机械性能降低。系统的大风保护策略在这方面至关重要。尤其是针对 1P 而言，但 2P 支架也可能由于大风保护策略倾角而导致组件承受压力增加。

在极端风力条件下，2P 在低倾角下保证更高的容许压力，1P 在高倾角下保证更高的容许压力。在高倾角条件下，支架承受来自暴露于较大风压的组件的更高外部动态荷载。同时，由于扭转振动引起的气动弹性不稳定性也更小。

因此，如何平衡动态荷载与气动弹性不稳定性是支架设计中的最大挑战。

如何平衡动态荷载与气动弹性不稳定性是支架设计中的最大挑战。

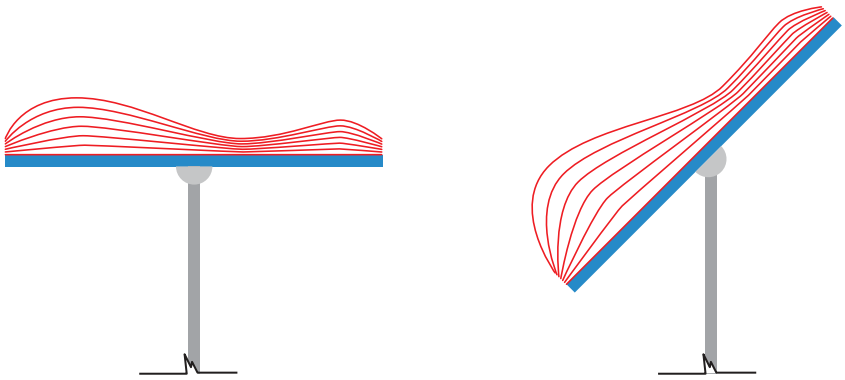


图 16：　不同倾角下的组件压力分布

组件表面风荷载压力由风洞压力系数乘以项目中已计算出的标准风压计算得出。组件上表面的压力假设通过考虑雪压得出。

而组件下表面的压力假设中可以排除雪的因素。

为了界定容许的组件压力，按照以下步骤进行了各种计算：

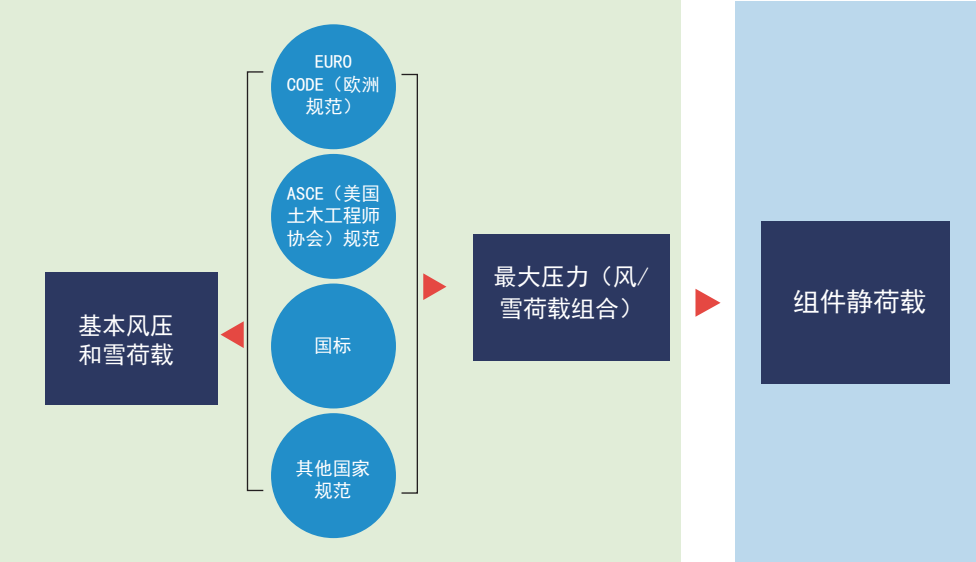
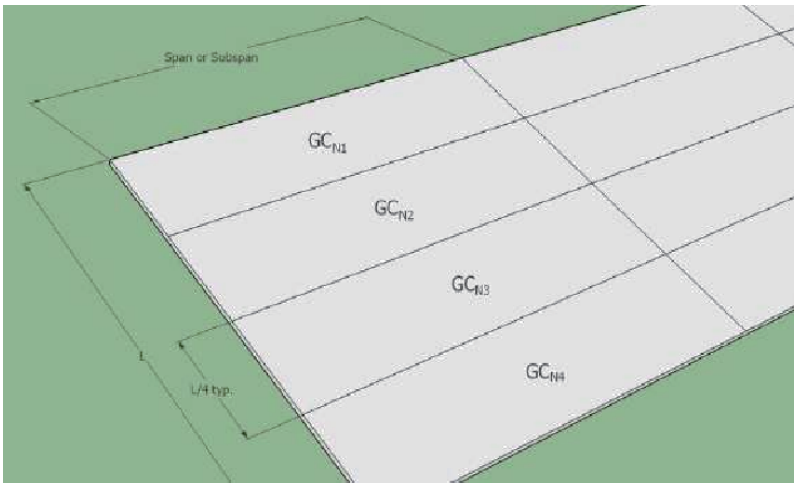


图 17：　将基本风 / 雪荷载压力转换为组件设计荷载的步骤

1P 配置中的压力分布呈现阶梯型。



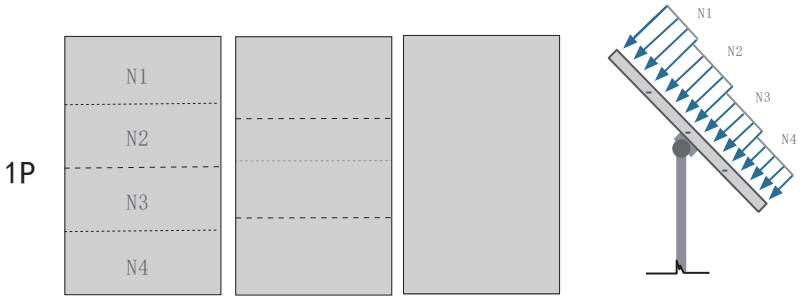


图 18： 1P 配置组件风压分布

2P 支架光伏组件的压力分布呈矩形

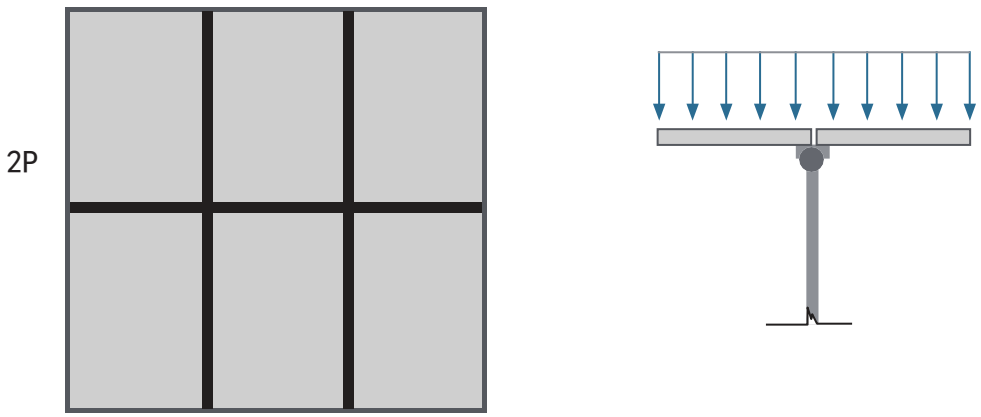


图 19： 2P 配置组件风压分布

5 风洞实验

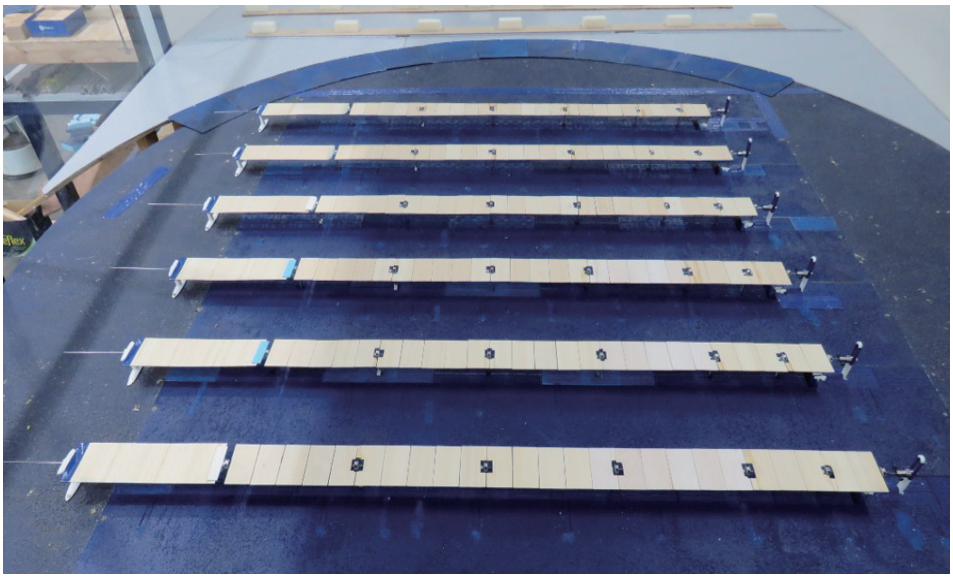
5.1 风洞实验中的压力模型
5.2 二维截面模型测试和数值模型
5.3 全气弹模型试验

TrinaTracker 天合跟踪

5 风洞实验

风载荷对跟踪支架刚度和稳定性的定量影响可以通过风洞测试中的风压分析，并结合组件压力来进行研究。跟踪支架的结构设计需要依赖这些参数进行。

跟踪支架长度是根据客户的要求确定的。



5.1 风洞实验中的压力模型

全尺寸跟踪支架的峰值响应可以通过一种结合了风荷载、阵风荷载和惯性风荷载影响的分析方法得到。这种结合增大了已知的等效静态风荷载，由此产生了 DAF（动态放大系数）。

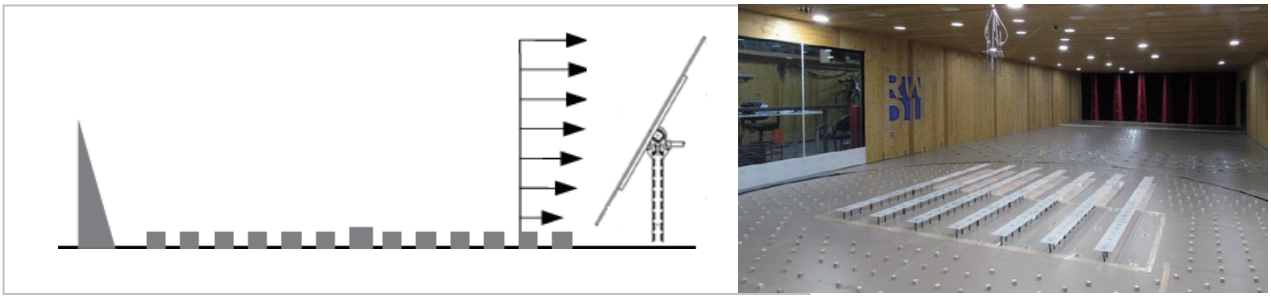


图 20： 静态系数和 DAF（动态放大系数）系数的模型测试

静态风荷载系数

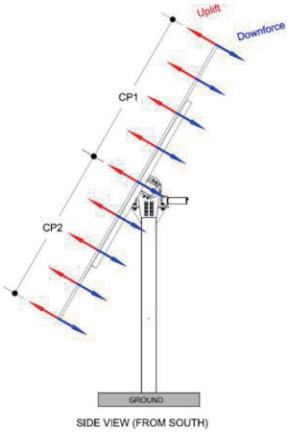


图 21：上压力和下压力图

上压力和下压力在弦向两侧的分布情况如图所示，在后续的图表中分别以 CP1 和 CP2 表示。

负压力系数 CP 或“上压力”的方向定义为垂直于光伏组件上表面向外，而正压力系数 CP 或“下压力”的作用方向则垂直向内。该定义与 ASCE 7 标准一致。对于扭矩或力矩（CM）来说，其系数对应于整个弦长方向上扭矩的积分。同时，在扭转方向上可以承受的极限工况也一并提供。

假若假定系统的结构是无限刚性的，则这些系数不需要考虑任何动态（惯性）效应。反之，这些静态系数则应该乘以适当的系数来进行修正（考虑动态效应）

动态风荷载系数

表格中的静态风载荷系数不考虑任何共振（或惯性）载荷的作用。而用于放大静态系数的动态（或惯性）风载荷系数（DFs）则通过由抖振引起的脉动风载荷的增加来确定。

全尺寸结构的风载荷测定

使用以下公式可以通过已知的系数计算得到全尺寸结构上的风荷载：

ASCE 7 安装

$$F_N = q_z \cdot (CP_{Static} \cdot DF) \cdot A$$

$$M_{torque} = q_z \cdot (CM_{Static} \cdot DF) \cdot A \cdot L$$

欧洲规范安装

$$F_N = q_b \cdot C_e \cdot (CP_{Static} \cdot DF) \cdot A$$

$$M_{torque} = q_b \cdot C_e \cdot (CM_{Static} \cdot DF) \cdot A \cdot L$$

其中：

F_N 和 M_{torque} 是扭矩管所受的法向力和力矩；

q_z 是根据 ASCE 7 确定的（即低于 15 英尺为常数，且 Kd = 0.85）在区域 A 的质心高度 z 处计算的动压；

q_b 是根据欧标确定的基本风压；

C_e 是区域 A 的质心高度 处 z 的暴露系数，由欧标进行确定；

A 是与 CP1、CP2 系数相关的面积大小或与 CM 系数相关的面积大小

L 为弦长；

静态系数已经提供给了天合跟踪；

“DF”是提供给天合跟踪的动态系数，需要应用于产生最大负载的工况。

体型（压力）系数：如下图所示，在相同的风速下，跟踪支架在不同角度下的压力分布不同，体型（压力）系数是压力与基本风压的比值（如下图所示）：

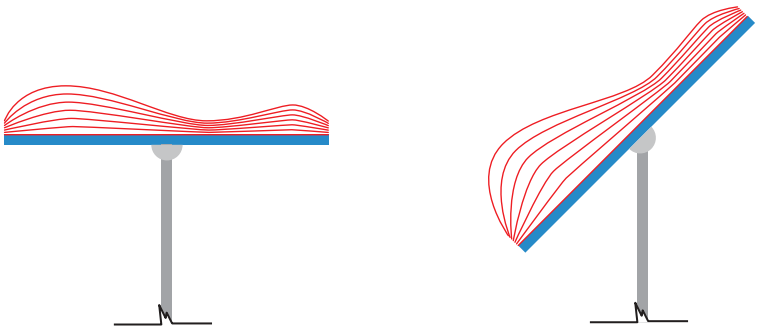


图 22： 不同角度下的风压分布 s

$$CP=GC_N=C_{p,net}=\frac{P_{net}}{\frac{1}{2}\rho\cdot V^2\cdot K_{z\,ASCE}}$$

$$CM=\frac{T_{torque}}{\frac{1}{2}\rho\cdot V^2\cdot K_{z\,ASCE}\cdot A\cdot L}$$

在风速不断变化的情况下，脉动风与系统结构相耦合产生共振。不同刚度的系统会产生不同程度放大的风荷载。

压力风洞测试是在刚性跟踪支架模型上进行的。获得的数据包括静态风荷载和动态风荷载。压力系数和力矩系数使用静态风荷载进行计算。

另一方面，动态风荷载用于定义动态放大系数（DAF），如下所示：

$$DAF=\sqrt{1+\frac{\pi}{4\zeta}\frac{fs(f)}{\sigma^2}}$$

f System inherent frequency

ζ Damping ratio

$\frac{fs(f)}{\sigma^2}$ Normalized spectral density at the natural frequency (f).

包括 DAF（动态放大系数）在内的总峰值载荷可以使用以下表达式进行描述，该表达式包括平均值、背景分量（“B”）和共振分量（“R”）。

$$P_{total}=P_{mean}\pm P_{rms}\cdot\sqrt{(g_{Bp})^2+(g_{Rp})^2\cdot(DAF^2-1)}$$

用于估算响应峰值因子 gBp 的常用表达式可以从达文波特针对具有近似高斯分布的响应的研究中获得：

$$g_R = \sqrt{2\ln(\nu T)} + \frac{0{,}577}{\sqrt{2\ln(\nu T)}}$$

其中 v 是循环速率，通常保守地取为结构固有频率； T 是最大值出现的时间间隔。

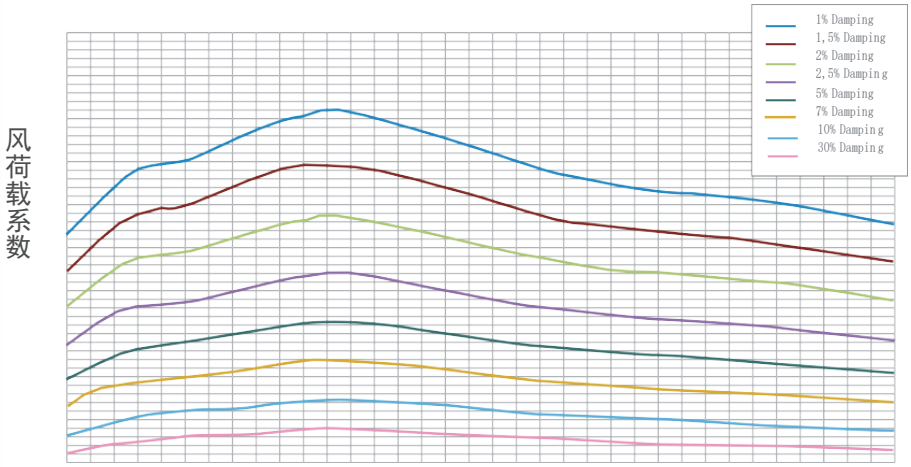


图 23- 图表： 动态放大系数

此外，计算 DAF（动态放大系数）前需要确定跟踪支架的不同模态，并进行自由振动测试（fvt）。

图 24： 跟踪支架模态

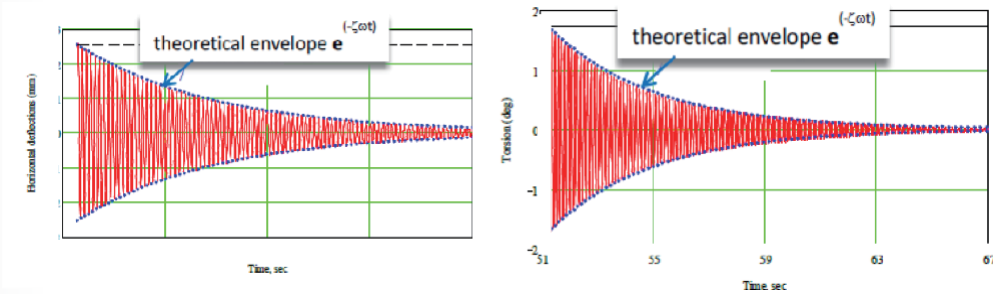
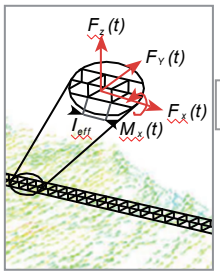


图 25- 图表： 跟踪支架模态

5.2 二维截面模型测试和数值模型

该测试称为“气动导数识别法”，由RWDI（风工程咨询公司）指定专门在Vanguard 2P 系列上执行。

该测试通过测量二维截面的气动导数、静态气动力和力矩系数来定义跟踪支架的自激力。这些参数对于进行三维颤振分析，三维 抖动响应分析和风载荷的计算至关重要。



物体在动态风载荷作用下的运动方程为：

$$[M]\{Z\} + [C]\{\dot{Z}\} + [K]\{Z\} = \{F\}_{SE} + \{F\}_{BUFF}$$

向量[M]、[C]和[K]对应系统的质量、阻尼和刚度矩阵，{F}SE & {F}BUFF代表自激力和抖振力。

图 26： 用于三维颤振分析的运动方程

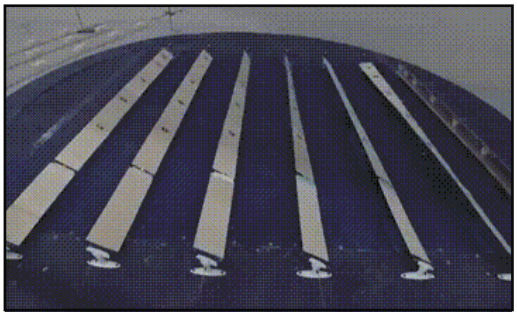


图 27： 二维截面模型测试的模型

跟踪支架的稳定性、动态风载荷和自激力由气动弹性风洞实验进行研究。

跟踪支架的截面模型是一个代表全尺寸跟踪支架的典型截面的刚性模型。该模型是根据天合跟踪提供的几何、质量、质量惯性矩和动态数据设计的。

截面模型安装在弹簧悬架系统上。悬挂系统内置于支撑墙中，弹簧和阻尼件置于每面墙开始和结束处的整流罩内以免受到风的影响。弹簧悬挂系统允许通过激光位移传感器模拟和测量扭转运动。跟踪支架截面的阻力、升力和力矩载荷是通过嵌入式高精度称重传感器测量的。

阻尼是通过安装在屏蔽风洞壁内钻机上的磁涡流阻尼装置添加到系统中的。

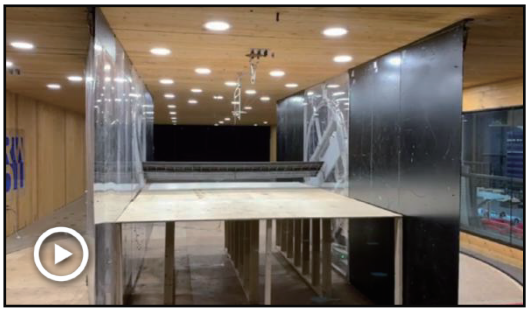


图 28- 视频： 2D 截面模型测试
资料来源：RWDI（风工程咨询公司）实验室

在平稳流动中进行不同倾角下的动态测试，以测量二维截面的气动导数。

在每个测试中，风速以小量增长的方式逐渐增加并记录模型发生的扭转运动。在每个风速增量处采集多个自由振动样本，以提升对气动导数估算的精度。

悬挂装置还用于测量模型被固定时的的静力和力矩系数。

二维截面模型测试确定了气动导数。

对于易受垂直和扭转运动影响的结构，例如大跨度，两自由度气动导数是指自激气动力和力矩中的 Hi* 和 Ai* 系数。

$$L_{se} = \frac{1}{2}\rho U^2 L\left[kH_1^*\frac{h}{U} + kH_2^* L\frac{\alpha}{U} + k^2 H_3^*\alpha + k^2 H_4^*\frac{h}{U}\right],$$

$$M_{se} = \frac{1}{2}\rho U^2 L^2\left[kA_1^*\frac{h}{U} + kA_2^* L\frac{\alpha}{U} + k^2 A_3^*\alpha + k^2 A_4^*\frac{h}{U}\right],$$

其中：

L ，M 分别为自激升力和单位长度的力矩；

k 是折合频率 $k = 2\pi f L / U$；

h，α 分别是结构的垂直和扭转挠度，其上方的小点代表对于时间的导数；

L 是代表宽度（通常是弦长）；

ρ 为空气密度（1.225 kg/m3）；

U 为结构所处高度处的平风速。

气动导数是降低频率折合频率和折合风速的函数。

在获得峰值旋转和峰值力矩后，可以通过更灵活的方法来获得考虑气动弹性效应后的每行跟踪支架的峰值力矩。这里提供了基于抖振方法得到的“动态”风载荷系数。

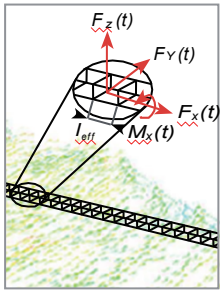
跟踪支架的稳定性和包括自激力在内的动态风载荷由 RWDI（风工程咨询公司）的三维颤振分析和三维抖动响应分析方法进行研究。

气动导数定义了自激力和力矩，用于：

三维颤振分析

三维颤振分析可以获得由气动失稳现象引起的风的动态作用。

采用了 RWDI（风工程咨询公司）的三维颤振分析程序来评估跟踪支架的气动稳定性。通过考虑平均风廓线以及跟踪支架整体的动态与气动特性，该分析程序能够预测颤振的发生。



物体在动态风载荷作用下的运动方程为：

$$[M]\{Z\} + [C]\{\dot{Z}\} + [K]\{Z\} = \{F\}_{SE} + \{F\}_{BUFF}$$

向量［M］、［C］和［K］对应于系统的质量、阻尼和刚度矩阵，{F}SE & {F}BUFF 表示自激力和抖振力。

图 29：　用于三维颤振分析的运动方程

三维颤振分析的程序包括建立结构频率和结构总阻尼随风速变化的函数。风和结构的动态变化所产生的流固耦合效应会导致附加（ 或降低 ）的气动刚度和气动阻尼，从而改变结构的频率与阻尼。当系统的总阻尼变为负数时，此时的风速对应着气动失稳的发生，而临界风速则可以通过一个静态倾斜角度角的范围来确定。天合跟踪在设计结构时，跟踪支架应在低于该临界风速下运行或者停放。

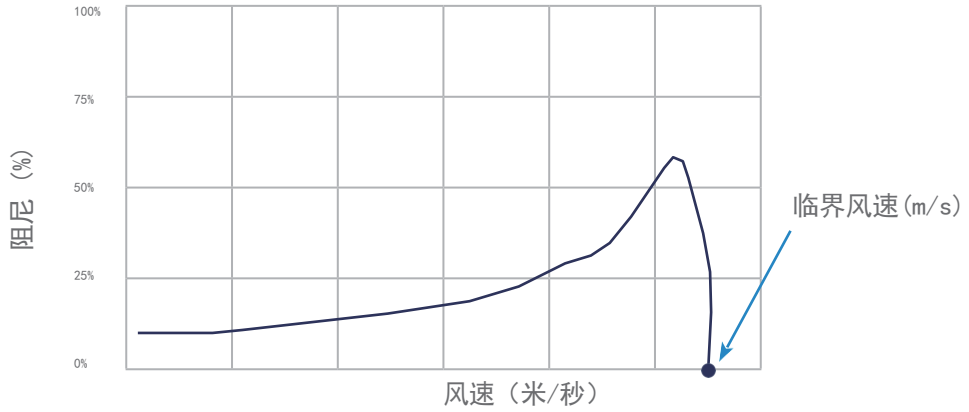


图 30- 图表：　根据阻尼比确定的临界风速

利用气动导数能评估跟踪支架在每个倾斜角度处的稳定性。数值方法的使用定义了跟踪支架的弦长和固有频率。通过判断阻尼是否为负值可以确定临界风速。

三维抖振响应

三维抖振响应分析结合了平均风载荷、阵风载荷和惯性风载荷，以获得等效的静态设计风载荷。

考虑所有预期阵风结构和开阔地形条件的持续时间，通过模拟 1 小时统计平稳风事件来确定结构的三维抖振响应。

输入参数包括静态气动力和力矩系数、质量、极惯性矩、跟踪支架尺寸、模态频率、模态形状、结构阻尼和湍流风特性。

结构的全局响应分析结果来自于沿跟踪支架长度方向上的脉动湍流场的积分。

天合跟踪获得的结构的最大扭转角和峰值力矩考虑了整个跟踪支架阵列的气动弹性效应和“动态”风载荷因素。

这些系数应与来自压力方法的静态风荷载系数相结合使用。

本报告中描述的截面模型技术是用于评估单排跟踪支架（或阵列中的第一行）处于自激力占主导地位的正常风方位角时的风致抖振响应的理想方法。然而，在评估不同的风方位角和阵列内的多行时，它是有局限性的。对于特定的系统来说，这可以通过一个全气动弹性模型的研究来完成，但超过了当前的范畴。

5.3 全气弹模型试验

全气动弹性模型的试验在 1P 和 2P 跟踪支架上进行。从 2P 的实验结果来看，全气弹试验验证了二维截面模型试验的结果。另一方面，进行相同的测试来确定 1P 跟踪支架的停放位置的策略。

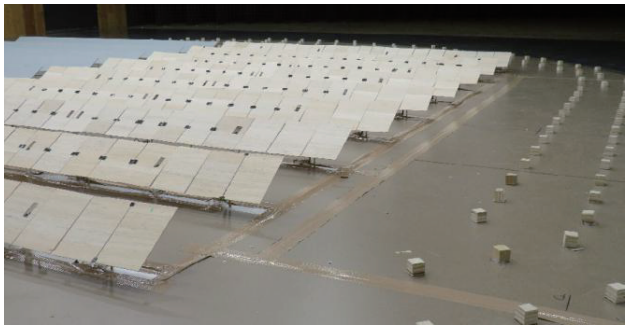


图 31： 全气动弹性模型试验的模型
资料来源：RWDI（风工程咨询公司）实验室

三维气动弹性模型试验可以用于评估跟踪支架的气动稳定性和风致抖振响应。

对于单个跟踪支架的设计，模型本质上是集中质量动态模型，其中扭矩管的扭转刚度特性由模型内的缩放的扭矩梁提供。

组件的外部几何形状和质量特性使用安装在沿扭矩梁离散位置的“壳”进行建模。这些壳由手工分段建造，主要由轻木制成，并牢固地固定在由弹簧钢制成的扭矩梁上。

这些分段结构同时考虑了质量惯性矩（MMI）沿跟踪支架跨度的分布，同时保持精确的几何形状以确保空气动力和力矩的正确分布。

一旦建立了物理模型，就可以通过实验测量每一行的扭转模态频率，并将其与目标值进行对比。

全气动弹性模型的输出结果是扭矩和确定停放位置的临界风速。这些结果验证了从二维 截面模型测试和数值测试中获得的数据。

6

天合跟踪产品设计

6.1 结构设计与验证
6.2 保护策略介绍
6.2.1 大风天气保护策略
6.2.2 大雪天气保护策略
6.2.3 冰雹天气保护策略

TrinaTracker
天 合 跟 踪

6.1 结构设计与验证

升级跟踪支架使其适应大尺寸组件，需要对结构设计作出许多改变，以保证系统在所有工况下的可靠性和最佳发电性能。

相关静态、动态和气动弹性分析以及组件压力分析说明为多种计算提供各种系数（包括“DAF”），使系统符合各国的设计规范和标准。受力与扭转数据分析对于确定支架设计至关重要。

因此，升级跟踪支架使其适应大尺寸组件，需要对结构设计作出许多改变，以保证系统在所有工况下的可靠性和最佳发电性能。

支架设计的升级考虑了如下几种核心部件：

提高扭矩管强度静态风荷载系数

更大的组件意味着支架转轴上的扭矩更大。升级后支架的方管截面更大，厚度更大，强度更高。坚固的方管为系统带来更高固有频率，避免动态效应。新设计将方管的尺寸增加 12%。

面积确定后，其他需要调整的部件通过“CAD”软件进行重新设计。

支架中最复杂构件的设计通过“有限元法”进行配置。该分析可识别出需要调整厚度或进行加固的应力集中部位。

有限元分析不足以确定支架所需进行的调整，因为有限元法计算通常针对系统孤立部位。

因此，结构中承受荷载的其他部位受到的变形影响结果并非 100% 符合实际情况。所以需要进行全尺寸荷载测试获取此类数据。

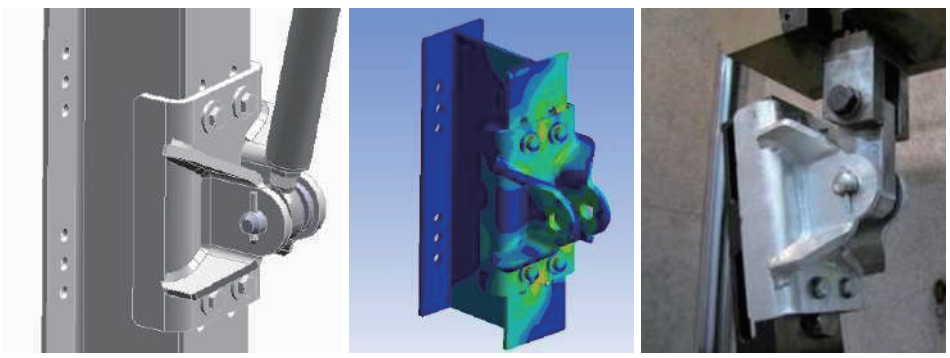


图 30（1、2、3）：　推杆座设计过程

多点驱动扭矩分布

2P 配置中的扭转锁和方管减少扭转跨度，提高固有频率和阻尼，并限制方管旋转。采用 1P 和 2P 配置的长支架会降低扭转刚度，因此采用多点驱动扭矩分布，有效减少抖振产生的扭转荷载。

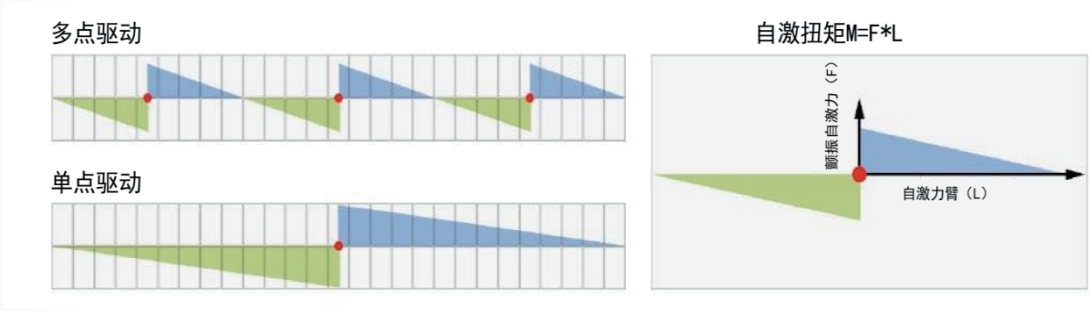
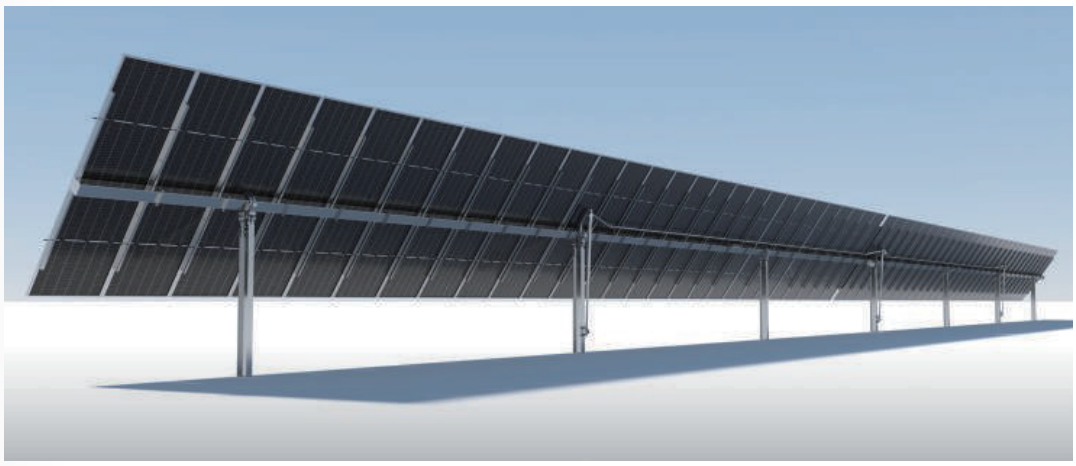


图 32： 多点驱动和单点驱动的扭矩分布图

天合跟踪在自有场地组装试验支架，用于全面验证系统性能和功能，测试多点驱动方式，并在不同条件下进行能耗和荷载测试。



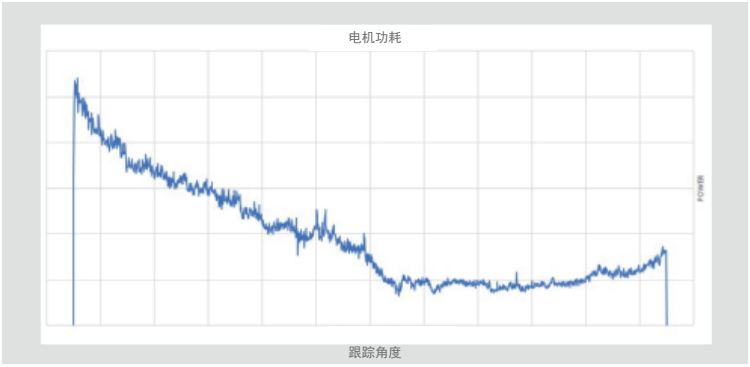


图 33： 测试场地条件下进行支架测试

优化檩条

大尺寸组件荷载更具有挑战性。新的跟踪支架使用加强版檩条为组件提供了额外刚性。

跟踪支架的动态振动能够解开固定在方管上的檩条，坚固的檩条防止组件松动。

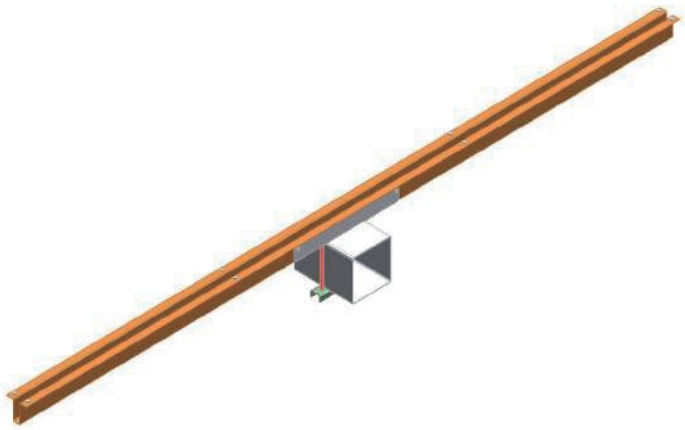


图 34： 加固檩条设计

优化立柱

1P 和 2P 支架部件经过优化减少了单套支架安装的立柱数量。升级后支架所用的立柱横截面更大，以避免因撞击造成的问题，例如局部碰撞或扭曲。减少支架的立柱数量可将土壤相关问题的风险降至最低。

组件测试

组件静态载荷测试用于证明组件可在不同倾角下支撑压力并满足 IEC 61215-2 标准要求。关键输入信息取自压力和吸力假设。

6.2 保护策略介绍

根据支架配置、项目位置或现场天气条件确定不同的保护策略。

6.2.1减轻组件负压的大风天气保护策略

在 1P 配置中，选择高倾角保护位置。即使组件上的风压很高，此位置也可将动态效应最小化。

在 2P 配置中，保护位置设置为低倾角。在此位置，动态行为支配设计，并使光伏组件上的最大压力最小化。安装多点驱动系统，以避免气动弹性不稳定性。多点驱动系统将方管固定在不同点，与传统单固定点 2P 配置相比，扭转频率提高 3 倍。

6.2.2减轻组件正压的大雪天气保护策略

图 35： 雪荷载

光伏装机在北欧、美国北部等全年数月均有大量频繁降雪的地区正在不断扩大。

因此，组件的雪荷载压力成为需要克服的重大挑战，是决定支架设计的关键因素。

通过结合警报系统，雪荷载引发的潜在问题得到缓解。雪天保护报警器的激活 / 不激活由 NCU 传感器发出命令和 / 或操作员手动控制。支架将相应旋转，以避免产生积雪。

根据支架配置、项目位置或现场天气条件确定不同的管理策略。

策略的重点在于实现支架的精确旋转，避免积雪产生。

6.2.3冰雹天气减轻损坏情况保护策略

冰雹对组件的影响已成为中国和美国部分地区的一大问题。冰雹产生的后果对光伏设施的可靠性和性能可产生严重影响。

项目设计集成了新的警报系统以降低相关风险。冰雹报警器由 NCU 发出指令激活，同时也可根据操作员标准激活。系统报警激活后，支架的旋转将减少冰雹对组件的直接影响

7

天合跟踪差异化研发和工程能力

7.1 竞争优势介绍
7.2 程序与方法
7.3 先进工程解决方案
7.4 6GW+全球装机量

TrinaTracker 天合跟踪

7.1 竞争优势介绍

天合跟踪是天合光能（股票代码：688599）TrinaSolar（SHA：688599）的子公司，是世界领先的光伏和智能能源解决方案供应商。

天合光能涵盖光伏行业价值链中的所有业务：光伏产品、研发、制造、销售、光伏项目开发、工程总承包、运维、智能微网和多能互补系统的开发和销售以及天合跟踪云运维管理，是太阳能领域的佼佼者。

过去五年里，天合光能在彭博新能源财经发布的报告中连年获得 100% 可融资性评级。

竞争优势

- 自有研发工程部
- 团队拥有超过50名经验丰富的高素质工程师
- 在建模、计算和工程设计方面具备综合专业知识
- 深谙太阳能行业技术和市场
- 6吉瓦电站根据客户需求和现场条件定制设计支架
- 支架已在超过40个国家安装
- 运用内部资源进行岩土工程设计、结构设计、有限元法分析、物理测试、软硬件设计、项目深化设计、产品研发
- 与领先的风工程咨询公司（RWDI和CPP）合作
- 先进的工程设计
- 设计开发的技术符合最高的欧洲和美国标准（分别通过IEC62817和UL3703认证）

RC RUSCHEWEYH CONSULT　ALTRAN　art energy　BLACK & VEATCH

7.2 程序与方法

天合跟踪实施严格而细致程序和方法，确保支架运行良好，避免潜在故障。

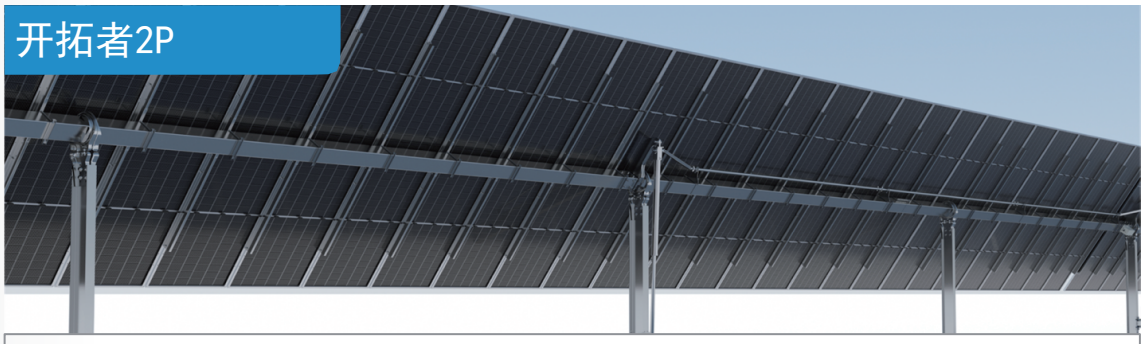
公司不仅提供问题的解决方案，还充分利用每一个问题使其成为帮助支架增值的机会。

解决的问题	方法	价值
新支架如何兼容大型组件	组件支架兼容设计	企业和产品可靠、具有可融资性
复杂地形与恶劣应用环境	独特的球面轴承和多点驱动系统	
	严格风洞试验	
企业资产负债表不具备可融资性	稳健的企业资产负债表	
上网电价快速下降	智能算法 可有效减少阴影遮挡影响的工程设计	高发电量
缺少提高发电的高效技术		
上网电价下降，投资者需要保持项目收益率	组串更长 / 立柱数更少	低系统成本
系统成本降速变缓	快速安装	
受制于居高不下的劳动力成本和复杂的地形与环境，运维成本逐年攀升	监控与数据采集系统运维平台	智能化运维平台
传统运维效率低下		
因非集成化交付方式而导致延迟交付	集成化一站式交付组件和跟踪支架	高交付效率

图 35– 表格： 以客户需求为导向的产品设计推杆座设计过程

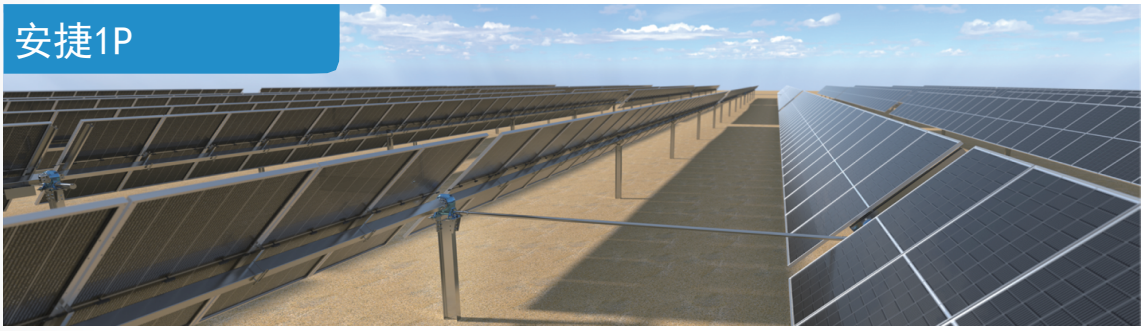
7.3 先进工程解决方案

开拓者2P



- 组件两排竖装，与 670W 超高功率组件匹配兼容，搭配多点驱动设计，更稳定可靠
- 每套跟踪支架最多安装 120 块组件
- 独立单排跟踪支架，易于操作和维护活动
- 每套支架 7 根立柱，每 MW102 根，降低施工成本
- 坡度适应性最多可至 15% N/S
- 搭载 SuperTrack 智能跟踪算法提升发电量高达 8%

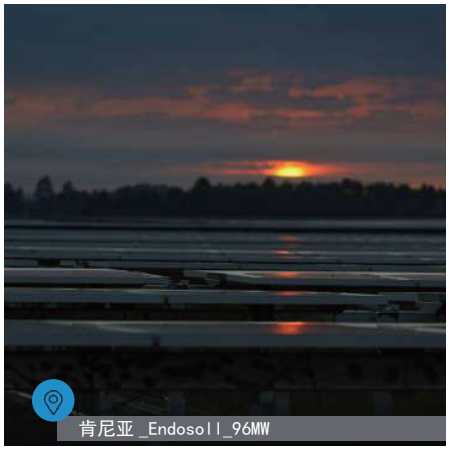
安捷1P



- 组件一排竖装，与 670W 超高功率组件匹配兼容，最优化双面背面发电量
- 每套跟踪支架最多安装 120 块组件，节省每兆瓦电机、控制器和电池（节省资本支出和运营支出）
- 双排联动跟踪支架
- 优化的坡度适应性最多可至：20% N/S，10% E/W
- Trina Clamp 减少了安装时间和成本
- 搭载 SuperTrack 智能跟踪算法提升发电量高达 8%

7.4 6GW+全球装机量

中国 _ 河北南宫 _400MW


肯尼亚 _Endosoll_96MW

智利 _33MW

阿根廷 _La Cumbre_32MW

中国 _ 青海 _602MW

西班牙 _Arasur_22MW

8

结语

TrinaTracker
天 合 跟 踪

8 结语

从测试中提取的信息的准确性，对于验证为减轻风相关风险所采用的战略解决方案并保证最佳发电量和跟踪支架可靠性至关重要。

当前光伏市场大尺寸组件供应旺盛，标志着太阳能行业的一个重要里程碑，并且给跟踪产品带来新的技术挑战。

光伏发电厂的大尺寸组件功率更高,并且相同装机容量下占地面积更小。然而，组件面积增加意味着产生更高风荷载压力，对支架的稳定性和耐久性产生不利影响。

因此，在如今的大尺寸组件时代，支架设计面临的一大挑战就是减轻与风有关的风险。

支架企业需要做出快速高效的反应，跟上行业趋势。支架设计也要进行相应升级，以适应兼容大尺寸组件。

设计升级所需的新参数和计算对于实现最佳发电量和系统可靠性尤为重要。因此，天合跟踪与领先的风力咨询公司 RWDI 和 CPP 合作，专注于风洞测试的工程和研究。采用符合现场条件的组件表面实际风速和荷载压力对支架进行测试，利用所取得的数据决定系统如何升级。从测试中取得信息的准确性对于验证旨在减轻与风相关的风险并保证最佳发电量和支架可靠性的解决方案策略至关重要。

光伏产业正在走向电网平价；输出功率提高是光伏行业整个价值链中所有参与者不懈努力的方向。作为商业化程度最高的产品,大尺寸组件已成为降低 BOS（光伏平衡系统）成本和 LCOE（度电成本）的主要贡献因素。作为领先的组件和支架制造商，天合光能已经为技术变革做好充分准备。我们将遵循技术发展趋势，不断优化跟踪支架设计，带来更可靠、兼容、智能的解决方案。

Trina Tracker

天合跟踪