降低运维成本并提高可靠性的创新解决方案

白皮书

目录

1. 执行摘要 01

2. 引言 06

3. 天合跟踪直接和间接运维活动 09

4. 部件减少与设计改进 14

5. 预防性设计、验证和质量控制 22

6. 运维成本降低与终身可靠性 34

7. 结论 42

Alvaro Gallegos | 项目管理

Laura García | 产品管理

Juan Manuel Gómez | **Felix Sabando** | 产品研发

Pablo Martín | 质量、安全、健康和环境

Wenjin Cai | **Marisa González** | 市场、营销

TrinaTracker
天 合 跟 踪

1

执行摘要

1 执行摘要

可用率

正常运行时间 / 总运行时间可用率适用单个组件或全套系统。 组件可用率易于计算，相关数据易收集。 计算系统可用率则须全面考虑相关部件， 复杂程度更高。

BNEF

彭博新能源财经

纠正性维护

=计划外维护

CAD

计算机辅助设计

CAPEX

资本支出

直接运维工作

光伏系统使用寿命期间开展的运维工作（计划外 / 纠正性维护）。

MTBF预估值

跟踪支架正常运行时间 / 工厂运行期间跟踪支架故障次数。

FR

故障率

FEM

有限元法

FMEA

失效模式及后果分析

电网平价

替代能源度电成本（LCOE）低于或等于当前电网价格

间接运维工作

针对跟踪支架的工程设计与生产环节采取行动，减少项目运营阶段的直接运维工作。

IRENA

国际可再生能源署

IRR

内部收益率

LCOE

度电成本

MTBF

“平均故障间隔时间”指跟踪支架平均无故障运行小时数。该数值可根据年度数据计算得出，并以统计分析为界限。应清楚标明跟踪支架各个部件的平均故障间隔时间。统一整合相关数据并酌情取平均值，跟踪支架作为整套组件系统计算。统一整合相关数据并酌情取平均值，跟踪支架作为整套组件系统计算。跟踪支架技术文档含平均故障间隔时间计算方案。

NDCs

国家自主贡献

运维

运行维护

OPEX

运营支出

预防性维护

按时定期维护跟踪支架，防止出现支架组件故障、跟踪支架失灵的情况。

PV

光伏

R&D

研发

定期计划性维修

=预防性维护

按期更换电池

跟踪支架机电设备标准质保期五年 （含跟踪支架自供电单元电池）。 具体更换时间以电池寿命期间性能为准。

TCU

跟踪支架执行控制器

Unplanned Maintenance

支架部件维护 / 更换或预防 / 维修支架故障或生产不足等问题。

运维成本与系统运行长期可靠性是采购跟踪支架的关键评估因素。

天合跟踪作为领先市场的跟踪支架解决方案供应商，秉持以客户为中心的理念进行产品设计与服务。本白皮书将详细介绍天合跟踪如何通过预防式产品设计、产品集成设计、严格的产品验证等措施降低运维费用与度电成本，同时降低光伏系统生命周期的故障率，保障持续有效运行。

可再生能源发电量占总发电量的比例正快速增长，有益于大幅减少温室气体排放量，助力实现**《巴黎协定》**设定的 2050 年气候变化目标。

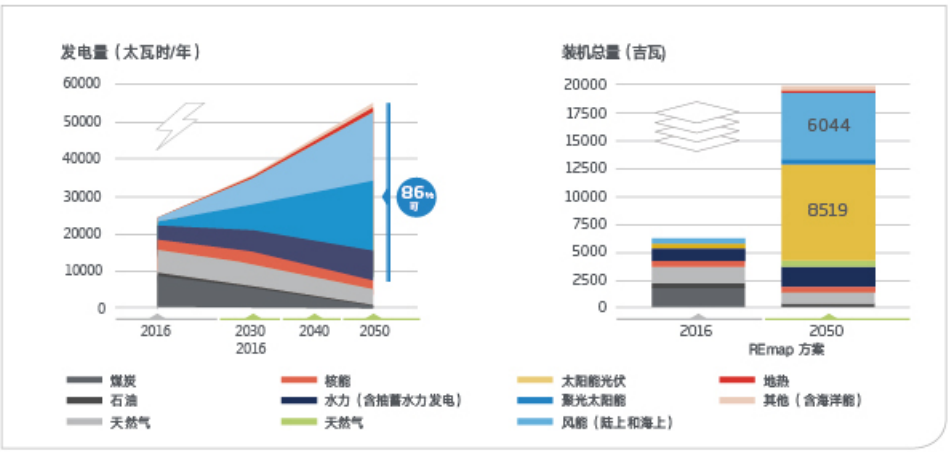
此外，**国际可再生能源署（IRENA）**发布数据称，2020 年全球新增可再生能源装机容量为 260 吉瓦，较 2019 年增长近 50%。

具体而言，预计到 2050 年，太阳能光伏发电将占全球总电力需求的四分之一（25%），跃升为全球最大的能源来源之一。光伏能源增长势头迅猛，得益于价值链不断创新创造，在提高能源生产效率的同时进一步**削减成本**。

大型光伏发电站的度电成本**稳步下降**，已在多个市场实现电网平价。除了优化能源生产环节之外，运维成本及系统长期可靠性是采购跟踪支架的关键评估因素。光伏装机平均使用寿命为 20 至 25 年。因此运维服务费用直接影响到客户企业的投资回报率。

天合跟踪作为领先市场的跟踪支架解决方案供应商，秉持以客户为中心的理念设计打造产品与服务。本白皮书将详细介绍天合跟踪如何在产品设计环节及连接运行阶段**降低运维费用与度电成本，同时提高跟踪支架系统使用寿命期间的可靠性。**

可再生能源在全球能源结构中的占比不断增长



据国际可再生能源署称

光伏电力正引领能源革命。预计到 2050 年，全球太阳能发电量将达到 **8519 吉瓦**。光伏能源的市场潜力巨大、发展前景看好，未来势必成为主要能源之一

图表1: 电力来源占比

2

引言

2 引言

全球能源格局正在发生深刻变革。 过去十年间， 清洁能源以前所未有的速度迅猛发展。 可再生能源的表现远超预期并屡次刷新纪录， 越来越多的国家承诺推动能源转型进程。

能源转型的核心要素之一是各国政府依据**《巴黎协定》**作出的**国家自主贡献承诺**。

据彭博新能源财经 （BNEF） 估计， 到 2050 年， 可再生能源投资将占新增发电装机容量的 77%。 国家政策鼓励、 产能效率提升以及运营成本下降等因素不断吸引投资者进入清洁能源市场。

太阳能的成本竞争力不断提高，加上技术持续改进， 确保度电成本稳步下降， 从而提升市场吸引力。

具体而言， **公用事业规模光伏电站**已成为富有吸引力的投资领域， 其安装联网耗时较短、 产能规模易于预测， 因此投资风险相对较低。

然而， 太阳能对市场的主要吸引力源自其不断提高**成本竞争力**， 加上技术持续改进， 确保度电成本保持较低水平。

光伏系统是否能够大规模应用主要受**更低度电成本驱动**， 而该数值直接取决于光伏系统的发电能力、 安装费用以及项目寿命期间的运营成本。

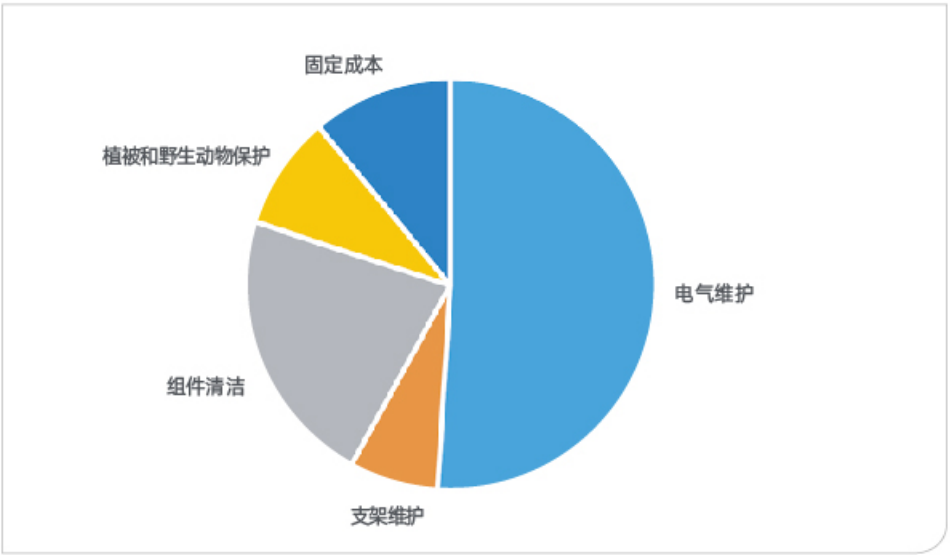
妥善规划预防性运维工作， 对于降低故障率、 减少产量损失至关重要。

运维成本在整个投资周期内举足轻重， 极大影响到大型地面光伏电站的度电成本和盈利能力。

运营成本有别于初始投资， 不仅不稳定， 而且受制于外部因素。 其中包括计划性维护和计划外维护、 运营人员、 土地租赁费用、 财产税和其他运营相关费用。

$$\text{度电成本} = \frac{\text{初始投资} + \text{运维成本}}{\text{发电量}}$$

光伏系统运维成本



图表2⊠ 运维成本主要占比

3

天合跟踪直接和间接运维活动

3.1 直接运维活动

3.2 间接运维活动

3.1 直接运维活动

跟踪支架运维活动 分为直接运维和间接运维两种。

跟踪支架运维活动分为**直接运维**和**间接运维**两种。

直接运维活动指**预防性维护**任务， 旨在提前排除可预见的跟踪支架故障。

直接运维活动包括润滑部件、 检查电气和机械接头、 核查立桩公差等。

跟踪支架运维工作				
类型	部件	举措	阶段	缓解措施
直接	电机预防性维护	润滑电机	运营	减少（每兆瓦电机数）
直接	推杆预防性维护	润滑推杆	运营	减少（每兆瓦推杆数）
直接	螺栓接头预防性维护	测量拧紧扭矩	运营	减少（每兆瓦螺栓接头数）
直接	轴承预防性维护	目视检查	运营	减少（每兆瓦轴承数）
直接	执行控制器预防性维护	检查电气机械连接件	运营	减少（每兆执行控制器数量）
直接	电机消耗过度	核查立桩公差	装配	立桩截面及新轴承设计
直接	传感器组件	检查电气机械连接件	运营	

表1: 跟踪支架直接运维工作示例

为排除部件故障或失灵而采取的措施属于**纠正性维护或计划外维护**。 发生电机消耗过度的情况时， 光伏系统使用寿命将大打折扣。 为解决此问题而采取的措施即为纠正性维护或计划外维护。

所有纠正性维护举措均会产生相关费用， 影响电站的度电成本。 跟踪支架因机电或机械部件发生故障而产生的维护成本包括以下类别：

1. **部件更换费用**， 其中包括人工、 产品和物流费。
2. 跟踪支架无法正常使用而导致的**产能损失**。

智能控制和监控

天合跟踪监控与数据采集系统 （SCADA） 是下一代智能支架控制系统， 可使光伏发电厂所有者和授权操作人员能够监控和安全控制其光伏系统。 这种增强型控制系统不仅提升了发电量， 而且还使得光伏系统能够在各种气候条件下可靠运行。

天合跟踪监控与数据采集系统价值介绍

对现有跟踪支架进行智能化改造， 使传统跟踪支架不仅是提高光伏组件发电量的动力装置， 而且是集智能跟踪、 远程监视和控制、 数据采集、 分析、 故障预判和运维建议及快速处理的智能跟踪解决方案。

集中式智能操作

借助数字技术， 数字跟踪支架解决方案提供面向全球、 集成化、 全流程的自动化管理和操作手段， 提高跟踪支架的运行效率和可用率， 降低由于运维不当或不及时带来的发电量损失， 降低维护成本。

图1: 监控与数据采集系统仪表盘

3.2 间接运维活动

跟踪支架间接运维活动主要考虑组件清洁以及组件**离地高度**对除草影响的工程设计。

- 跟踪支架设计环节必须考虑**组件清洁系统**的兼容性。 组件清洁系统通常有助于降低支架系统的后期运维成本， 运行期间保障更高的发电量。

- **工程设计时， 组件离地高度的考量**直接决定除草剂、 除草设备使用频率以及其他相关运维成本。

跟踪支架运维工作			
类型	部件	举措	考虑阶段
间接	组件清洁	跟踪支架与清洁机器人的兼容性	研发和工程设计
间接	高草	除草措施	研发和工程设计

表2: 跟踪支架间接运维工作示例

机械清洁

图2: **开拓者 2P** 跟踪支架最佳位置

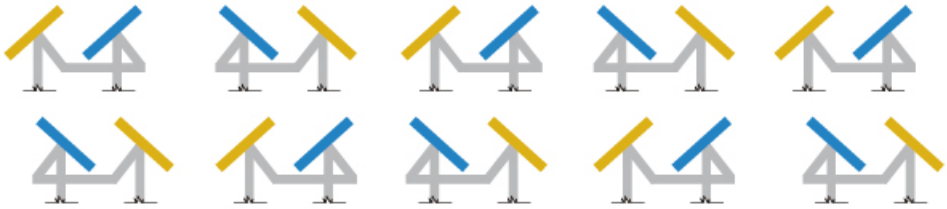


图3: **安捷 1P** 跟踪支架最佳位置

清洁双排联动跟踪支架时， 可将相邻支架反向倾斜放置， 先清洁正面相对的各个支架， 然后再翻转方向， 按相同方法清洁剩余支架，从而达到最低清洁成本。

与机器人清洁的设计兼容性

天合跟踪与技术成熟的清洁机器人公司合作， 共同设计机器人集成解决方案。

尽管采用**天合跟踪**清洁机器人解决方案会导致项目投资成本高于传统清洁方式，但其**发电量增益和内部收益率也相对更高**。

定制化设计

装配监管

桥接与机器人测试

运维监管

4

部件减少与设计改进

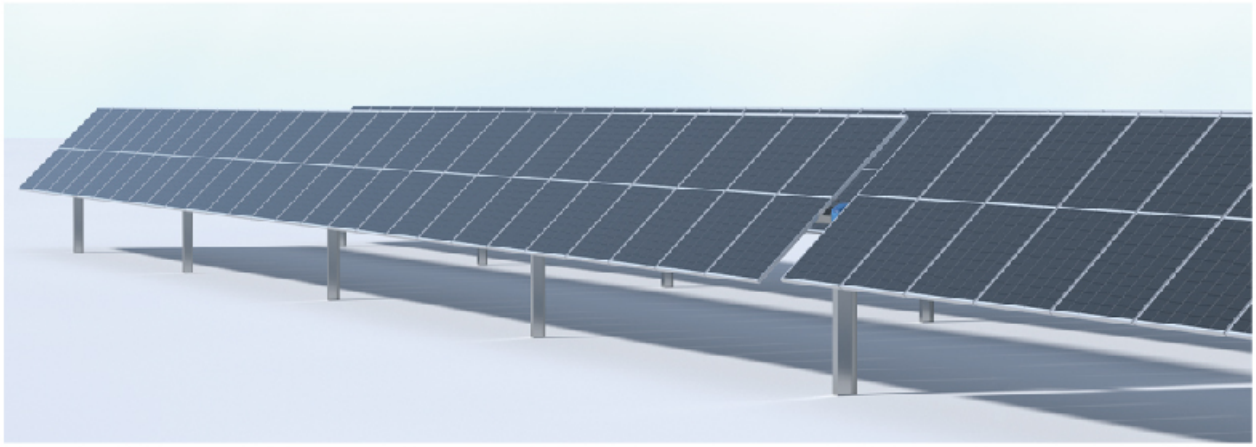
4.1 减少部件数量

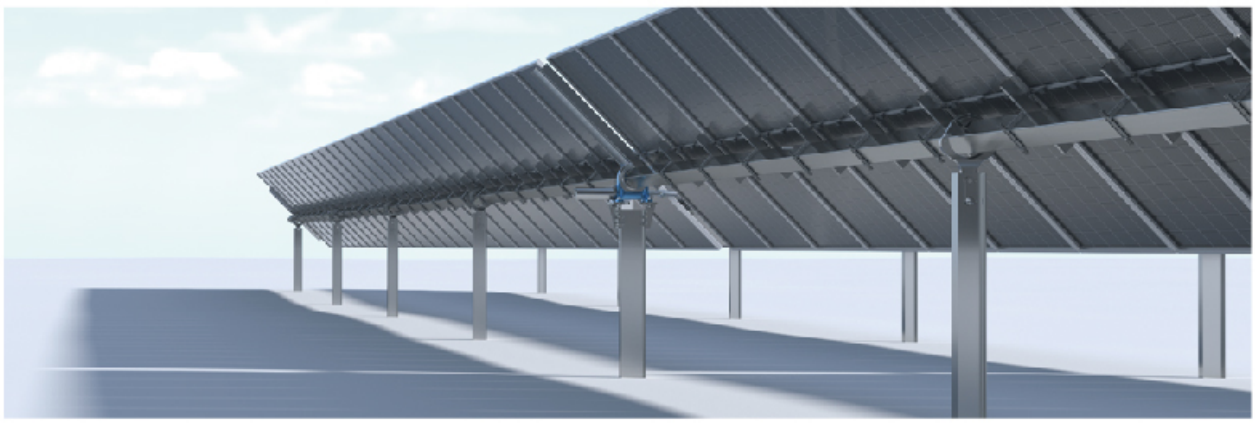
4.2 4.2设计改进

4.1 减少部件数量

减少部件数量， 可降低运维服务需求， 并相应削减运维成本。 优化特定部件数量可对度电成本产生重大影响。

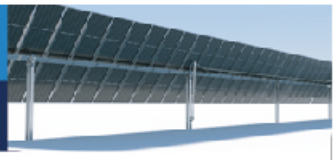
1. 每兆瓦电机数
2. 每兆瓦推杆数
3. 每兆瓦轴承数
4. 每兆瓦执行控制器数量
5. 每兆瓦螺栓接头数





开拓者2P部件数量更少

设计升级，优于之前的2P产品



- 单个开拓者 **2P** 跟踪支架适配 **0.062** 兆瓦 （**+101%**）， 而之前的 2P 支架系列仅适配 **0.031** 兆瓦。
- **17 个开拓者 2P** 跟踪支架即可满足 **1 兆瓦组件使用需求** （**-50%**）， 而之前的 2P 支架则需要用到 **33** 个。
- **每兆瓦使用的开拓者 2P 跟踪支架**（约 **49.60** 吨）重量比之前 2P 型号（约 **59.60** 吨）有所减轻 （**-16%**）。
- 每兆瓦减重原因在于以下核心部件实现减重：
  > 轴承 （**-49%**）
  > 电机 （**-50%**）
- 使用全新**开拓者 2P 跟踪支架**， 每兆瓦螺栓接头 （潜在故障点） 重量减少 **26%**。
- **开拓者 2P** 产品设计兼容 **550** 到 **600** 瓦等大尺寸组件。 因此， 装机容量相同的情况下，所需组件数量更少。

天合**跟踪**升级 2P 跟踪支架， 采用全新产品设计， 减少部件数量， 从而大大**降低故障率**。 **升级版开拓者 2P** 跟踪支架比旧版产品的维护需求更少、 **运维**成本更低、 电力损失更小， 停机维修或更换支架部件的概率显著降低。

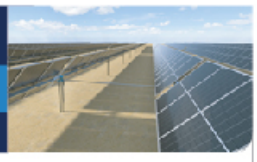
跟踪支架	组件（瓦）	组件（跟踪支架数量）	功率（兆瓦 / 跟踪支架）	每兆瓦跟踪支架数量	重量（千克/兆瓦）	轴承（每兆瓦数量）	电动推杆（每兆瓦数量）	推杆总数（每兆瓦数量）	电机（每兆瓦数量）	接头（每兆瓦数量）
旧版产品2PX45	340	90	0.031	32.68	59,641	261.4	32.7	32.7	32.7	19,608
开拓者2PX56	550	112	0.062	16.23	49,656	132.9	16.2	53.2	16.2	14,844
旧版2P产品与开拓者2P产品对比	61.8%	24.4%	101.3%	-50.3%	-16.7%	-49.1%	-50.3%	62.8>%	-50.3%	-24.3%

表3: 旧版2P产品与开拓者2P产品部件数量对比表格

（*）数据源自物料清单、采购计划和技术图纸集，适用典型外侧（32%）、边缘（46%）和内侧（26%）支架布局结构。

（*）数据仅用于说明，基于典型布局结构计算得出。

与旧版 1P 双排产品设计相比，安捷 1P 升级设计款使用的部件数量更少



- 单个安捷 **1P** 跟踪支架适配 **0.061** 兆瓦 （**+50%**）， 而之前的双排跟踪支架系列仅适配 **0.041** 兆瓦。
- **16** 个**安捷 1P** 跟踪支架即可满足**一兆瓦组件使用需求** （**-33%**）， 而之前的 **1P** 双排跟踪支架则需要用到 **25** 个。
- 每兆瓦减重原因在于以下核心部件实现减重：
  > 执行控制器 （**-33%**）
  > 轴承 （**-11%**）
  > 电机 （**-33%**）
- 使用全新安捷 **1P 跟踪支架**， 每兆瓦螺栓接头 （潜在故障点） 重量减少 **33%**。
- **安捷 1P** 产品设计兼容 **550** 到 **600** 瓦等大尺寸组件。 因此， 装机容量相同的情况下， 所需组件数量更少。

天合跟踪升级双排 **1P** 跟踪支架， 采用全新产品设计， 减少部件数量， 从而大大**降低故障率**。 升级版**安捷 1P** 维护需求更少。 由于节省了因纠正性维护而造成的停机时间， 使用全新优化版跟踪支架可提高发电量并降低**运维**成本。

跟踪支架	组件（跟踪支架数量）	功率（兆瓦/跟踪支架）	每兆瓦跟踪支架数量	重量（千克/兆瓦）	轴承（每兆瓦数量）
旧版双排 1P 跟踪支架	74	41	0,02	1.832	294,8
安捷 1P	111	61	0,02	2.668	262,1
安捷 1P 产品与旧版双排 1P 产品对比	50,0%	50,0%	-33,3%	45,7%	-11,1%

表4: **安捷 1P** 产品与旧版双排 **1P** 产品部件数量对比表格

（*） 数据源自物料清单、 采购计划和技术图纸集， 适用典型外侧 （32%）、 边缘 （46%） 和内侧 （26%） 支架布局结构。

（*） 数据仅用于说明， 基于典型布局结构计算得出。

4.2 改进设计

立柱

▶ 新型**开拓者 2Px56** 在设计上不再采用 C 形立桩， 其桩基搭配使用 W 形立桩， 降低电机和轴承的故障率。

▶ 全新 W 形立桩结构更为硬挺且刚度更高，改善立桩移动效果，减少 “超公差” 立桩数量。

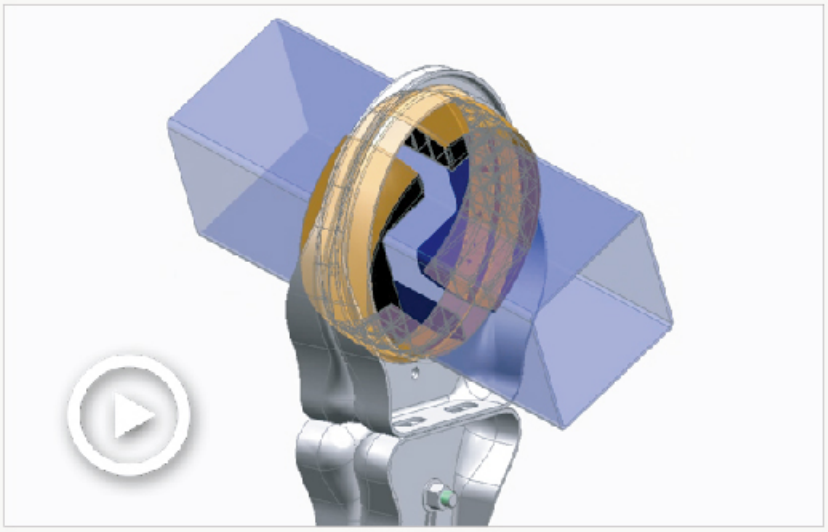
▶ 旧版 2P 跟踪支架使用的 C 形立桩具有以下特点：

- 由于撞击碰撞， 底面和顶面均易严重变形。
- 冲压过程中， 由于误差过大 （扭转和垂直度）， 导致轴承支座联接处出现缺陷， 随后产生故障。
- 因跟踪太阳朝向需要使用额外功率， 导致电机消耗过度， 使用寿命缩短。 原因在于立桩超出公差 （扭转和垂直度）。
- 运行期间产生噪音。

优化的球形轴承和轴承接头

开拓者 2P 升级轴承设计：

- 天合跟踪获三维立体球形轴承专利， 近 15 年前在萨拉戈萨州祖埃拉 （Zuera） 工厂 （11 兆瓦） 首次安装使用至今， 尚无一例故障事件发生， 证明产品高度可靠。 此外， 球形轴承也在不断优化。
- 由于转动方向不易预测， 使用 C 形立桩后， 需要重新设计轴承支座和轴承， 相关接头亦需要专门定期维护， 提高接头使用效率。
- 下部轴承支座与 W 形立桩的结合处为圆孔设计， 取代开槽孔。 转动幅度受到限制， 接头使用寿命显著延长。
- 上部轴承支座为单件设计， 减少上部法兰件及故障隐患点。
- 部件由聚酰胺和玻璃纤维制成， 当跟踪支架移动时， 转轴滑动的同时自行完成润滑。
- 天合跟踪球形轴承。 自我维护。 减少电厂运行阶段的运维工作量与成本。



视频 1： 三轴球形轴承运动

图 4： 改版前的球形轴承

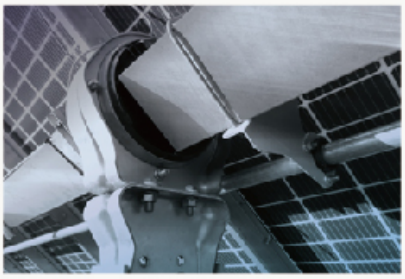


图 5： 全新球形轴承

扭矩管

- 更大的组件意味着支架转轴上的扭矩更大。 升级后支架的扭矩管截面更大， 厚度更大， 强度更高。 坚固的扭矩管为系统带来更高固有频率， 避免动态效应。 新设计将**扭矩管的尺寸增加 28%**。
- 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。

多点驱动系统

- **开拓者 2P** 采用**多点驱动系统**减少扭矩管扭转跨度， 提高固有频率和阻尼， 有效减少**抖振**产生的**扭转荷载**。
- **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。

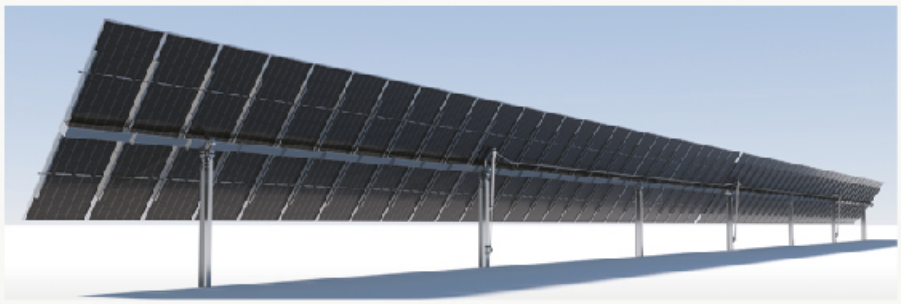


图6: **配置**多点驱动系统的开拓者2P

图7: 测试场地条件下进行支架测试

优化檩条

- 光伏设施需要解决的核心问题在于如何在机械荷载与大尺寸组件之间找到最佳平衡点。
- 跟踪支架中使用**檩条**为组件提供了**额外刚性**。 随着大尺寸组件的引入， 对檩条进行了加强设计， 以提升开拓者 2P 的刚性。
- 由于振动导致檩条与扭矩管之间的紧固变得容易松动， 因此产生的动态效应亦较为常见。 **坚固的檩条**防止组件微开裂和松动。

图像8: 加固檩条设计

执行控制器

安捷1P和开拓者2P

天合跟踪智能控制器开发多种通讯方式，以适应最新行业趋势发展并满足客户不同的需求。

天合跟踪全新“**智合SuperTrack**”算法提升发电量可达8%。

- 目前维护需求低，只需简单检查即可。
- 可以通过远程解决软件更新和执行控制器常见问题，从而大幅节省运营成本。

此类设备的效率不断提高。 在不久的将来， 从经济角度出发， 可能有必要对电厂使用的跟踪支架部件进行全面更新换代。 更高的能源产量将抵消更换部件的费用。

5

预防性设计、验证和质量控制

5.1 产品设计与验证方法

5.2 质量控制

5.1 产品设计与验证方法

天合跟踪研发部 （R&D） 负责验证安捷 1P 和开拓者 2P 组件。 在验证之前，按照严格的方法对控制器、 驱动系统和结构组件进行测试和评估， 以满足内部和外部质量标准、 荷载要求并确保高效运行。

预防性设计

设计

结构部件 由天合跟踪设计， 必须满足内部质量要求、第三方验证和行业标准。 天合跟踪的工程师使用广泛用于机械设计的先进 “CAD” （计算机辅助设计） 软件设计支架元件。

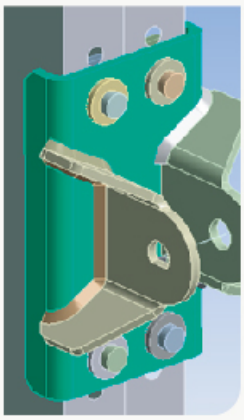


图9： 使用CAD设计的图形

结构部件的验证方法

FEM（有限元法）计算

设计获得批准后， 还必须进行有限元研究，工程师应用从不同计算中获得的荷载来模拟支架在现场将遇到的真实和具体条件。

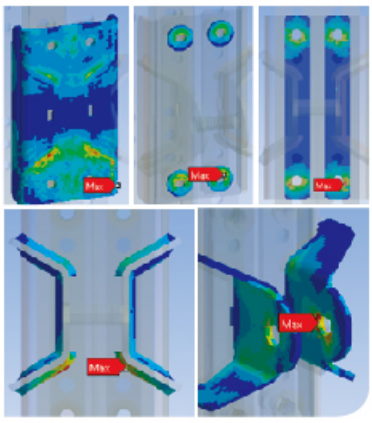


图10(1, 2, 3, 4, 5): 有限元计算示例

接头计算

对支架中所有接头进行的计算符合UNE-EN 1993-1-8:2013标准。

$F_{v,Rd}$	60288	N
a_v	0,6	
f_{ub}	800	
A_s	157	
Y_{M2}	1.25	
螺栓公制尺寸	16	
螺栓等级	8.8	
使用率%	42%	

失效模式	螺栓	铆钉
每个剪切面的抗剪力	$F_{v,Rd} = \frac{a_v \ f_{ub} \ A}{Y_{M2}}$ - 剪切面穿过螺栓的螺纹部分时（A 是螺栓 As 的拉应力面积）： • 对于4.6、5.6和8.8类：av=0,6 • 对于4.8、5.8和10.9类：av=0,5 - 剪切面穿过螺栓的无螺纹部分时（A 是螺栓的总截面）：av=0,6	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \ f_{ur} \ A_b}{Y_{M2}}$

保护策略定义

根据支架配置、项目位置或现场天气条件确定不同的保护管理策略。

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。

图11： 雪荷载

视频2： 暴风雪

减轻组件正压的大雪天气保护策略

光伏装机在北欧、北美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。

通过集成作为传感器封装件一部分的积雪传感器， 雪荷载引发的潜在问题得到缓解。传感器封装件连接至 NCU， 控制支架行为以及在由于恶劣天气条件而激活任何积雪传感器时朝向保护位置的运动， 从而避免系统面临不必要的风险。

在积雪传感器检测到积雪的情况下， 警报将被激活， 支架将相应旋转， 以避免产生积雪。

策略的重点在于实现支架的准确旋转， 避免积雪产生。

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等国家部分地区的一大问题。 冰雹产生的后果对光伏设施可产生严重影响。

项目设计集成了警报系统。

测试

组件原型按照实际复制， 并在安装时承受系统将支撑的荷载。

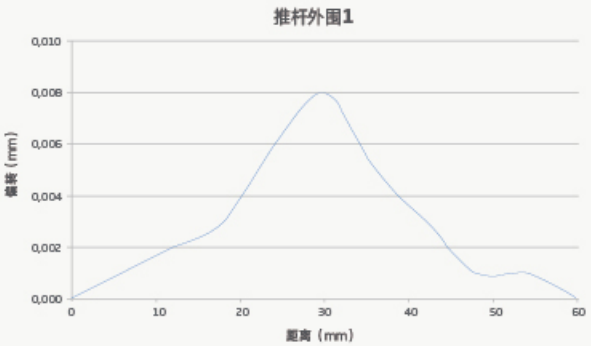


图 12 测试原型和（照片和图表）：结果

验证和文件编制

只有在顺利通过规定的高标准实验室测试、 试验和模型试验后， 支架组件才会接受验证并纳入文件编制。

风洞测试

为了验证支架稳定性， 风工程咨询公司 CPP 和 RWDI 复制了开拓者 2P 和安捷 1P 足尺寸原型， 并执行了风洞测试， 使两款支架承受静态、 气动弹性和动态荷载。

测试项目包括**压力模型风洞研究、 二维截面模型测试和数值模型**以及新增的全气动弹性模型测试。

压力模型测试能够更准确地确定不同行距、 离地间隙、 立桩间距或支架长度的静态系数。 此外， 通过添加从模态分析 （自然频率） 和自由振动测试 （阻尼比） 中获得的数据， 获得了 DAF （动态放大系数）。

通过**二维截面模型**， 能够使用数值模型进行气动稳定性分析和抖振响应分析。 从二维截面模型中获得的数据的优点在于， 结果适用于范围广泛的支架尺寸。

通过比较**数值模型**的结果和气动弹性风洞测试的结果， 验证了数值模型的输出。

风洞测试评估了主要结构元件 （立桩、扭矩管和檩条） 和连接组件 （轴承和驱动器） 对风荷载的反应。

根据风洞测试的结果， 公司确定了主要结构元件 （立桩、 扭力管和檩条） 和连接组件 （轴承和驱动器） 的风荷载， 并提供了升级支架设计和实现更精确的现场适应性所需的输出。

SBP （第三方独立技术专家公司） 批准了天合跟踪采用的计算程序， 其输出来自风洞测试。

在这些测试中， 支架系列得到优化， 以确保所有系统组件的可靠性和适应性。

设计方案经过审查， 其中包括更坚固的立桩、增加组件刚度的檩条、更硬的扭矩管、1P 和 2P 配置的不同保护策略、 定制的支架布局和多点驱动系统。

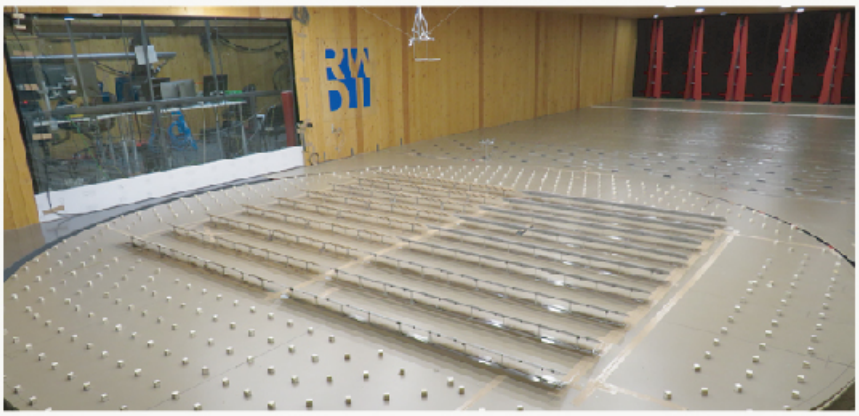


图13: 全气动弹性模型测试

跟踪支架

执行控制器

在内部测试控制组件及其功能， 以确保可靠性并降低功能失调风险， 控制组件还须符合行业标准和认证。

IEC 6100

- 传导无线电发射
- 静电放电抗扰度
- 辐射、射频和电磁场抗扰度
- 电快速瞬变/脉冲群抗扰度
- 浪涌抗扰度（3级）
- 传导干扰和感应射频场抗扰度
- 工业环境抗扰度

光伏系统

- 跟踪支架设计资质

盐雾加速腐蚀

- 450小时加速试验

CE标志

IEC 61010

- 测量、 控制和实验室用电气设备的安全要求

机柜测试

- 进水/进尘类别
- 影响类别2

图14： 跟踪支架执行控制器

回转驱动测试

天合跟踪始终进行回转驱动测试，将驱动器与所有其他支架元件相关的所有组件相结合，确保系统在极端条件下以最佳状态运行。

数据表规格

- 回转驱动器 + 电机要求表
- 防护等级 IP 65
- -40°C ~ +80°C

国际电工委员会测试要求

环境测试

在室内极端温度下进行测试。 执行生命周期以保证运行效率。

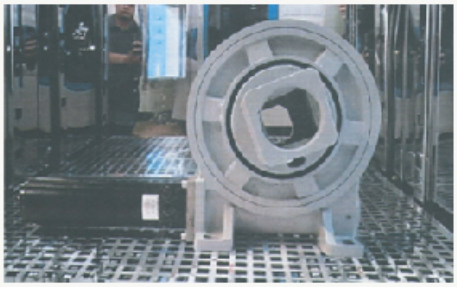


图15: 环境测试

静态最大保持扭矩

此测试验证驱动器的静态荷载性能 （保持扭矩和安全系数）。 用液压油缸在距回转驱动器的中心 1.5 米处猛推， 传感器显示推力为 2,600KG 时， 实际保持扭矩升高到最大。 这种状态必须保持一分钟， 重复 3 次。

图16: 静态最大保持测试

回转驱动测试

动态最大荷载测试

跟踪旋转期间， 记录在有或无额外重量的条件下支架电机的消耗情况，以获得不同参数， 包括功耗关系、效率和速度影响。

图17: 动态最大荷载测试

维护

天合跟踪产品在出厂前已注入足量润滑脂。温度范围：-4℃~+80℃

- 计划实施时必须每五到六年检查一次润滑
- 10年后必须根据产品状况进行润滑
- 回转驱动器旋转时，必须通过塞孔连续注入润滑脂
- 如果没有充分润滑，推杆可能损坏或缩短使用寿命。

在执行控制器 + 机械驱动器上执行的功能测试

在执行控制器 + 机械驱动器上执行的功能测试

为了验证支架的正确操作， 必须执行一些测试， 以确定不同执行控制器与回转驱动器之间具有强大兼容性。

IEC 62817测试要求

在涉及支架结构的部分中， 只需要执行法规中提到的一些不同测试：

支架精度

测量支架

精度计算

目视检查

功能测试验证

- 追踪极限检定
- 限位开关操作
- 停电和反馈传感器上出现阴影后的自动太阳跟踪
- 手动操作
- 紧急停止
- 维护模式
- 工作温度范围
- 标示风、雪、冰雹和保护

性能测试

- 每天消耗的能量和峰值功率。
- 标示时间、标示能量和最大功率

机械测试

- 定点系统驱动器瞄准控制的重复性测试
- 静态荷载下的变形测试
- 扭转刚度、机械位移、发动机扭矩和间隙测试
- 极端风荷载下的力矩

机械测试

加速机械循环 对原型进行加速寿命测试， 条件为运行 10 年的支架和 3,650 次循环。 记录所有数据， 定期检查所有组件。

图18: 加速机械循环

5.2 质量控制

天合跟踪在系统的整个产品生命周期内持续评估和测量组件的质量。 在产品设计的第一阶段确定故障率 （例如与电机、 控制箱、 驱动系统、 电池和轴承相关的故障率）。

该方法旨在降低光伏装机厂投产前的故障风险。

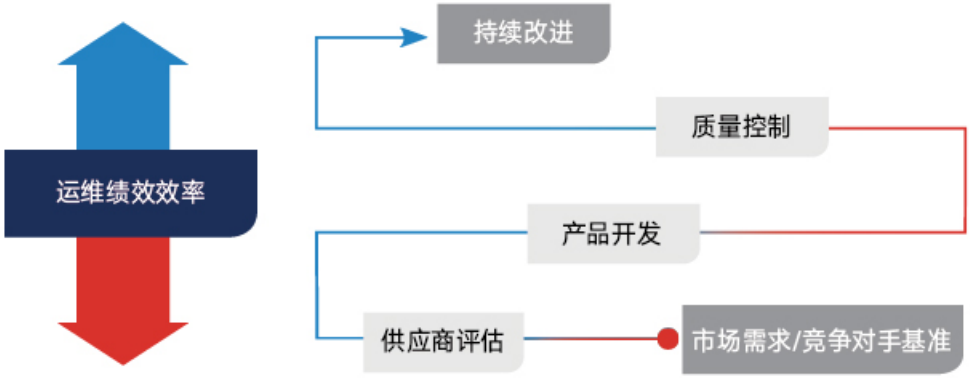
此外， 为了确保高效性能和最低水平的服务维护， 天合跟踪坚守一项关键原则：为支架组件确立最低要求的质量水平。 天合跟踪进行内部和外部检查， 以确保所有组件都符合商定的质量标准。

检验的主要组件包括：

检验的主要组件	
立柱（W）	由 S355JR 碳钢制成，适合热浸镀锌，或由适合后续处理的其他质量钢材制成，以保护其免受腐蚀。 在美国， 必须根据标准 ASTM A6/A 6M 中规定的尺寸公差制造和检验 W 型材。 镀锌涂层必须符合标准 UNE EN ISO 1461 或 ASTM A 123。
扭矩管	由 S355JR 碳钢制成，适合热浸镀锌，或由适合后续处理的其他质量钢材制成，以避免腐蚀。 根据标准：UNE EN ISO 10219中规定的尺寸公差制造和检验。镀锌涂层符合标准： UNE EN ISO 1461 或 ASTM A 123。 在具体项目中，根据地形特性或合同约定， 可采用热浸镀锌以外的防腐蚀措施， 如再镀锌。在这种情况下， 涂层必须符合标准： UNE EN ISO 10346。
檩条	由碳钢制成， 适合锌镁 （ZM） 合金防腐涂层， 通常为 S350GD 钢。 必须根据标准： UNE EN ISO 10162 中规定的尺寸公差制造和检验。 锌镁涂层必须符合标准 UNE EN ISO 10346。

螺钉	由碳钢制成。 必须根据标准： **UNE EN ISO 4759** 中规定的尺寸公差制造和检验。 根据标准： **UNE EN ISO 4042**， 碳钢螺钉需要额外涂层来保护其免受腐蚀： 锌镍涂层 + 密封件。
螺栓	由 8.8 型碳钢制成， 符合标准 **UNE EN ISO 898-1**。 机械和化学性能必须符合 **UNE EN ISO 898-1** 中规定的要求。
螺母	由 8 型碳钢制成， 符合标准： **UNE EN ISO 898-2**。 机械性能符合 **UNE EN ISO 898-2** 中的要求。 化学性能符合标准 **DIN 267-4**。
垫圈	由 **A** 型碳钢制成。 机械性能符合 **UNE EN ISO 7089** 和 **UNE EN ISO 7090** 中规定的要求。 化学性能符合标准： **DIN 267-26** 和 **DIN 17221**。
机械零件	通常由 **S275JR**、 **S355JR** 或更高等级的碳钢制成， 适合热浸镀锌、 离心，或由其他碳钢制成， 适合锌镁 （**ZM**） 合金防腐涂层， 通常为 **S350GD** 钢。根据标准： **UNE EN ISO 22768** 中规定的尺寸公差制造和检验。 热浸镀锌涂层必须符合标准 **UNE EN ISO 1461** 或 **ASTM A 123**。 锌镁涂层符合标准 **UNE EN ISO 10346** 中规定的要求。
天合压块	由**天合跟踪**专门设计的组件。 该元件提高支架性能并降低故障率， 减少设施生命周期内的运维服务， 从而降低成本。

天合跟踪的预防性维护方法和质量控制能够降低组件故障率， 从而减少设施生命周期内所需的运维服务并降低成本。



检验规程

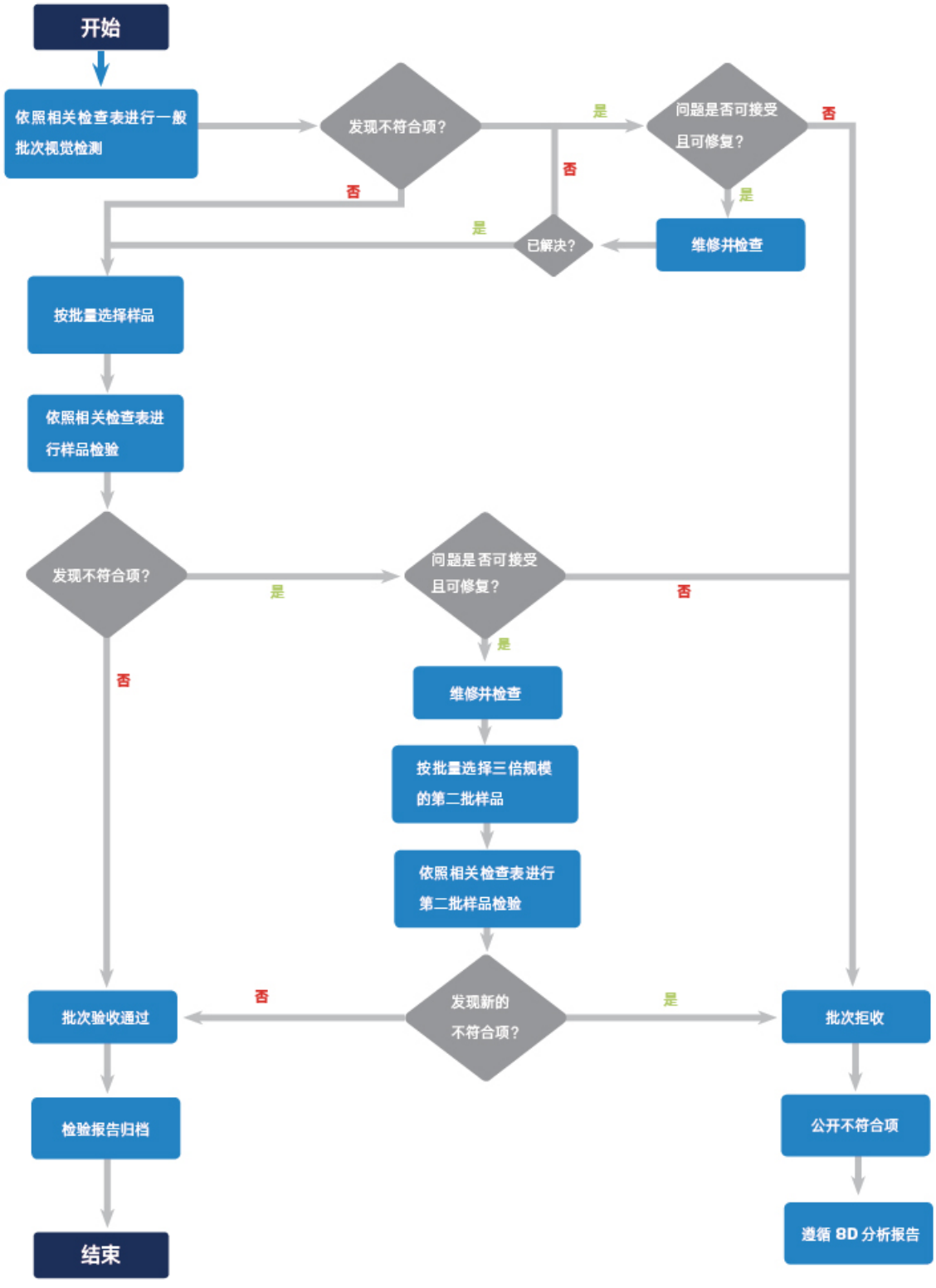


图19: 天合跟踪检验规程

6

运维成本降低与终身可靠性

6.1 降低故障率

故障率（FR）是反映纠正性运维成本的指标。天合跟踪始终专注于降低度电成本，旨在利用自身资源持续减少产品故障并实现最佳能源生产。

作为全球领先的太阳能解决方案供应商之一，天合跟踪提供全新的安捷1P和开拓者2P先进支架，与大尺寸组件兼容，故障率极低，仅需简单运维。

此外，天合跟踪还与天合光能一脉相承，执行全新的严苛质量控制流程，保障产品可靠性。公司的质量控制方法适用于供应商、质量、产品设计准确性和验证、风险缓解等重要因素。

此外，天合跟踪与业界领先的风力咨询公司RWDI和CPP合作，对安捷1P和开拓者2P开展风洞测试，获得准确的跟踪支架设计数据，以提高支架可靠性，降低故障率。两款支架都具有低故障率，即使搭配大尺寸组件使用而且安装在恶劣地形和/或极端天气条件下亦是如此。

减少安捷1P和开拓者2P系列的部件数量有助于实现低故障率。

如下所示故障率参考安捷1P和开拓者2P以前支架产品（SP160和单排1P）平均故障报告、新支架部件数量以及大尺寸组件兼容性而估算得出。

质保	部件名称	单个跟踪支架配置数量	每100兆瓦配置数量	计划外运维时间（小时/年）
5年	回转驱动器底座	2.0	3,190	2.33
5年	回转驱动电机	1.0	1,595	0.00
5年	轴承	16.0	25,520	1.60
5年	跟踪支架执行控制器	1.0	1,595	0.65
5年	自供电模块	2.0	3,190	0.20
5年	通信控制器	0.0083	13	0.38
5年	电池	1.0	1,595	0.00
5年	风速计	0.0083	13	0.10

表5: 按部件分析**安捷P1**故障率示例

质保	部件名称	单个跟踪支架配置数量	每100兆瓦配置数量	计划外运维时间（小时/年）
5年	推杆（电动和非电动）	3.3	5,359	0.77
5年	推杆电机（电动）	1.0	1,624	0.00
5年	轴承	8.2	13,317	6.66
5年	跟踪支架执行控制器	1.0	1,614	0.34
5年	自供电模块	2.0	3,248	0.21
5年	通信控制器	0.0083	14	0.09
5年	电池	1.0	1,624	0.03
5年	风速计	0.0083	14	0.06
5年	回转驱动器底座	0.0	0	0.00
5年	回转驱动电机	0.0	0	0.00

表6: 按部件分析**开拓者P2**故障率示例

6.2 终身可用性

天合跟踪提供监控系统， 允许对光伏发电站进行每日可用性评分检查。 警报和事件也通过系统进行监控和记录。 此解决方案提高了可用性， 并允许快速实施纠正措施。

天合跟踪的高可用性得益于零部件的减少、 详细的产品设计和验证以及严格的质量控制。

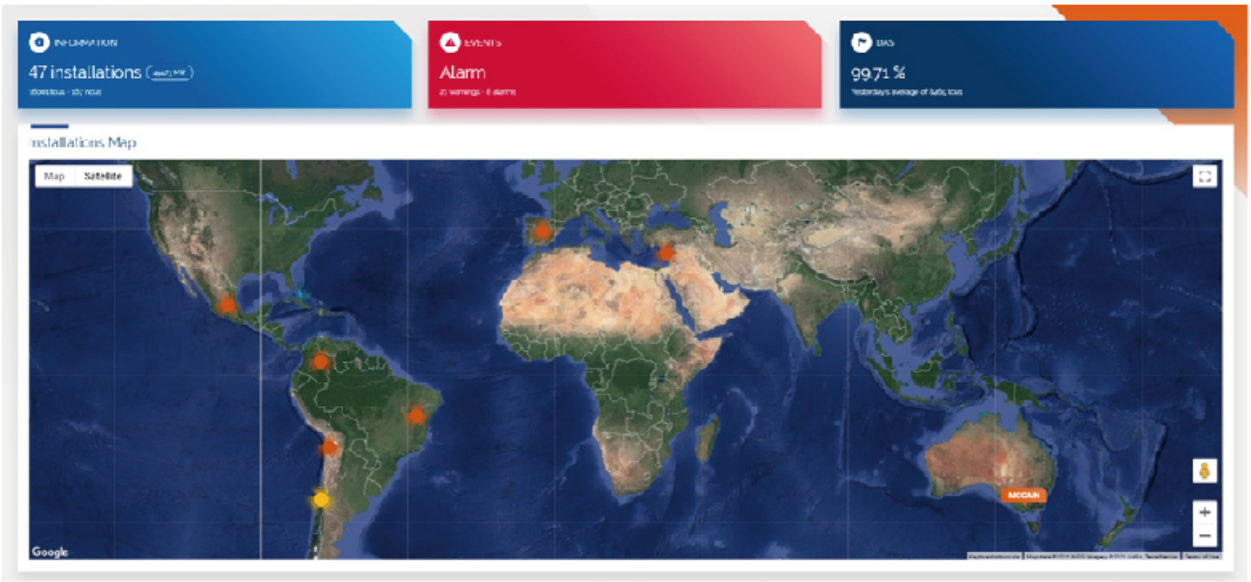


图20: 全球天合跟踪光伏系统的每日可用性评分（DAS）

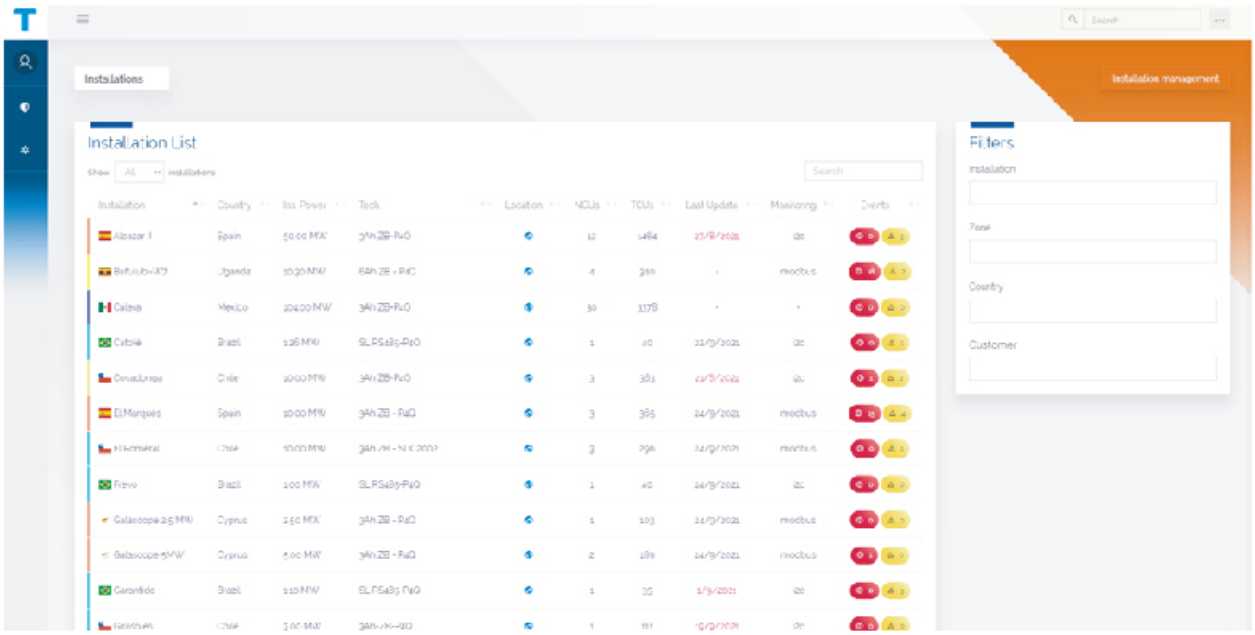


图 21: 系统列表

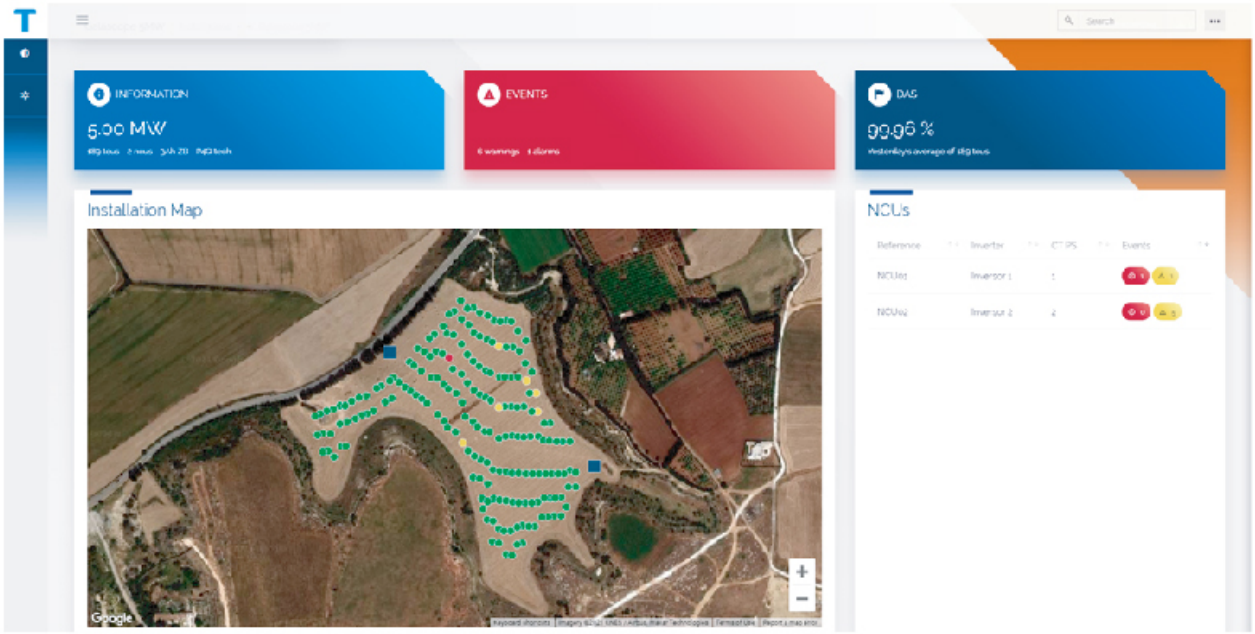


图 22: 系统信息

6.3 跟踪支架运维成本降低

预估运维成本

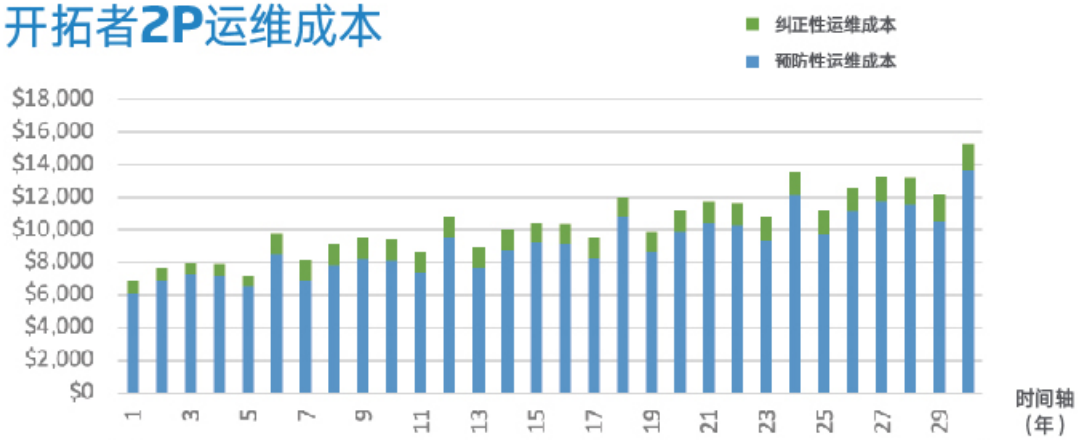
开拓者2P

根据跟踪支架运维手册计算预防性运维成本，预估运维成本为 98968.57 美元 /100 兆瓦。

开拓者 2P 纠正性运维成本 （计划外运维）预计为 13539.89 美元 /100 兆瓦。

天合跟踪开拓者 2P 预估运维成本总计：112508 美元 /100 兆瓦（0.0011 美元 / 瓦）

相比上一代 2P 跟踪支架，天合跟踪开拓者 2P 的运维成本预计降低 -33%。



图表 3: 开拓者 2P （550 瓦组件） 预估运维成本

开拓者 2P	
项目规模 （兆瓦）	100
组件功率 （瓦）	550
单排组件数	112
兆瓦规模项目排数 / 电池	1,624
每小时人工费率 （以美元计）	43
年劳动力成本增长率	2.0%
净现值折现率	8%

表 7: 开拓者 2P （550 瓦组件） 预估运维成本假设条件

预估运维成本

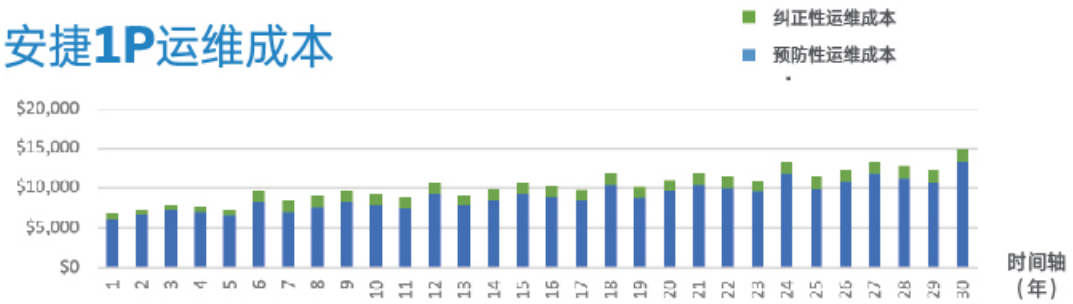
安捷1P

根据跟踪支架运维手册计算预防性运维成本。预估运维成本为 106262 美元 /100 兆瓦。

安捷 1P 纠正性运维成本 （计划外运维） 预计为 12045 美元 /100 兆瓦。

天合跟踪安捷 1P 预估运维成本总计： 118307 美元 /100 兆瓦 （0.0012 美元 / 瓦）

相比之前的双排型号， 天合跟踪安捷 1P 的运维成本预计降低 -25%。



图表 4: 安捷 1P （550 瓦组件） 预估运维成本

安捷 1P	
项目规模 （兆瓦）	100
组件功率 （瓦）	550
单排组件数	114
兆瓦规模项目排数 / 电池	1,595
每小时人工费率 （以美元计）	43
年劳动力成本增长率	2%
净现值折现率	8%

表 8: 安捷 1P （550 瓦组件） 预估运维成本假设条件

清洁机器人

项目	人工清洁	机器人清洁	差数
频率	每月一次	每日一次	+ 30天
设备价格	0	350 欧元	+ 350欧元
CAPEX	0	4200 欧元	+ 4200欧元
OPEX（20年）	14400 欧元	9815 欧元	- 4585 欧元
项目总投资金额	14400欧元	14.015 欧元	- 385 欧元
发电量增益与非运维成本	6%	18%	+ 12%
内部收益率与非运维成本	0.03%	0.36%	+ 0.33%

表 9: 20兆瓦项目清洁费用对比

备注：上述测算是根据中国西北的100MW的规模和运维成本测算

7

结论

7 结论

天合跟踪研发部验证了安捷 1P 和开拓者 2P 部件和系统的设计。 在验证之前， 按照严格的方法对控制器、 驱动系统和结构元件以及连接件进行测试和评估， 以满足内部和外部质量标准的要求、 满足系统荷载要求并确保高效运行。

得益于**成本竞争力**的不断提升， 太阳能投资具有显著吸引力。 尽管公用事业规模光伏项目的预期使用寿命不断延长， 但预期**运营支出**却大幅度减少。

除了优化能源生产环节之外， **运维成本**是采购跟踪支架的关键评估因素。 考虑到光伏装机的平均寿命在 20 到 25 年之间， 缺乏预防性措施会导致运维服务及成本增加， 这可能不利于获得较低的**度电成本**。

作为全球领先的太阳能解决方案供应商之一， **天合光能**提供全新的**安捷 1P** 和**开拓者 2P** 先进支架， 与大尺寸组件兼容， 故障率极低， 仅需简单运维以及有限的校正措施。

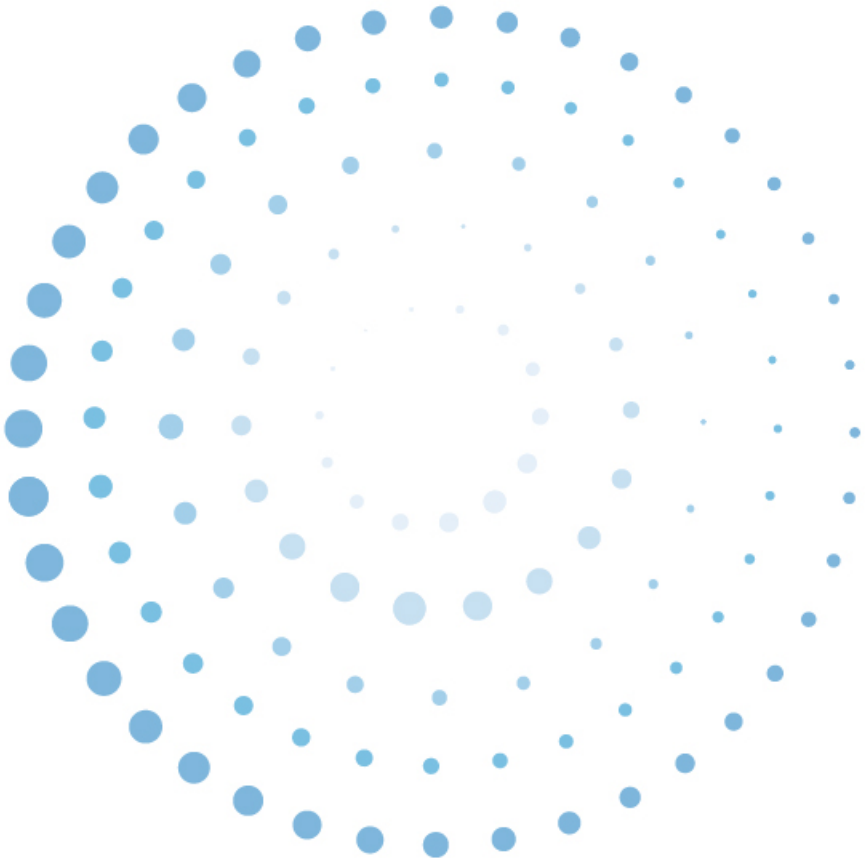
天合跟踪始终专注于降低**度电成本**， 旨在利用自身资源持续减少产品故障并实现最佳能源生产。

因此， **天合跟踪**研发部验证了**安捷 1P** 和**开拓者 2P** 部件和系统的设计。 在验证之前， 按照严格的方法对控制器、 驱动系统和结构元件以及连接件进行测试和评估， 以满足内部和外部质量标准的要求、 满足系统荷载要求并确保高效运行。 以上所有举措将助力提高跟踪支架的可靠性， 减少潜在故障。

为了确保高效性能和最低水平的服务维护， **天合跟踪**坚守一项关键原则： 为支架组件确立最低要求的质量水平。

天合跟踪进行内部和外部检查， 以确保所有零部件都满足内部质量要求， 符合行业标准， 并实现第三方验证。

此外， **安捷 1P** 和**开拓者 2P** 中的组件数量显著减少， 从而减少了运营生命周期内所需的直接运维的工作量。

总之，得益于**天合跟踪**计划的预防性举措，如今只需对支架进行简单有限的运维，从而降低运营成本和**度电成本**， 减少在执行维修和更换任务时因中断运行而可能造成的电力损失。 因此， 预防性策略有助降低运营支出成本和度电成本。

天合跟踪自有的内部验证方法建立起严格的测试体系和质量标准。 跟踪支架的各个部件在内部测试过程中都以降低部件和系统整体故障率为目标， 确保在实际项目应用过程中， 整个系统在生命周期内的故障率最低。