



Trina Tracker
天合跟踪



智能跟踪技术
SuperTrack 智合
白皮书



SuperTrack 智合

目录

一. 摘要

1.1 缩略语

1.2 引言

二. 背景

2.1 常规跟踪算法介绍

2.2 常规跟踪算法不足

三. SuperTrack 智合定义及主要价值点

四. SuperTrack 智合算法介绍

4.1 高散射辐照天气跟踪角度优化 STA

4.2 复杂地势逆跟踪角度优化 SBA

五. SuperTrack 智合系统构架

六. 实证数据及发电增益潜力

6.1 实证数据

6.2 增益潜力评估及第三方认证

七. 结语

一. 摘要

1.1 缩略语

STA: 智能跟踪算法	SBA: 智能逆跟踪算法
BIM: 双面辐照模型	IAM: 入射角修正
MPPT: 最大功率点跟踪	TCU: 跟踪支架控制器
NCU: 通讯控制器	SCADA: 数据采集与监视控制系统
CGC: 北京鉴衡认证中心	GCR: 土地利用效率

1.2 引言

国际可再生能源署预测，到 2050 年，可再生能源发电量将占全球发电量 86%，其中光伏电站占全球总发电量 25%。气候雄心峰会上，我国国家领导人郑重承诺完成“30·60”双碳目标，并明确 2030 年风电、光伏发电装机达到 12 亿千瓦以上。

随着国内光伏装机容量与日俱增以及度电补贴的取消，光伏上网电价“退坡”已成必然之势。在此情况下，国内集中式光伏电站的建设还面临着可用平坦土地越来越少，地形越来越复杂，地价越来越贵的难题，为了进一步提高经济效益，国内越来越多的企业开始选择跟踪太阳能系统。

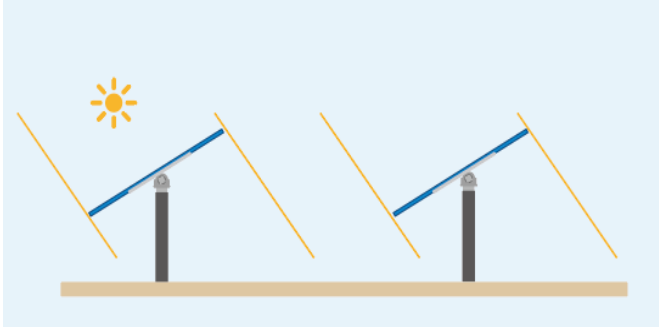
目前，跟踪系统已经能够明显降低光伏电站的度电成本（LCOE）。随着组件技术越来越成熟，通过技术降本的可能性越来越小。原材料价格提升，使得光伏系统成本下降空间非常小，甚至有回弹趋势。但是相比固定支架，跟踪支架可以有效提高发电量，从而保持较低的 LCOE。根据彭博的调研，全球范围内跟踪支架的度电成本自 2020 年以来已经低于固定支架。

虽然使用常规跟踪算法的跟踪系统发电性能已经有所提升，但是为了增加跟踪系统不平坦地势的适应性，提升不同天气情况下的发电量，扩大跟踪系统应用场景，智能跟踪算法应运而生。

二. 背景

2.1 常规跟踪算法介绍

图 1：天文算法跟踪角度示意图



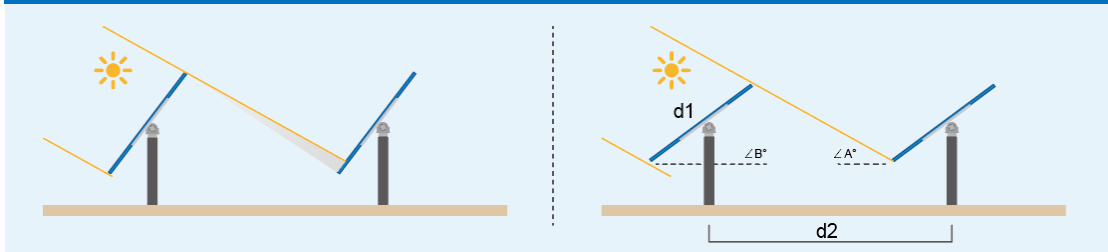
常规跟踪算法由视日阶段天文算法及逆跟踪阶段逆跟踪算法组成，该方案控制逻辑简单，工程实用性较强，在平单轴跟踪系统中广泛应用。

其中天文算法是指基于日地关系，获取当地经纬度、时间等信息，计算太阳相对位置（即太阳光线入射角），依据组件法向向量与太阳入射

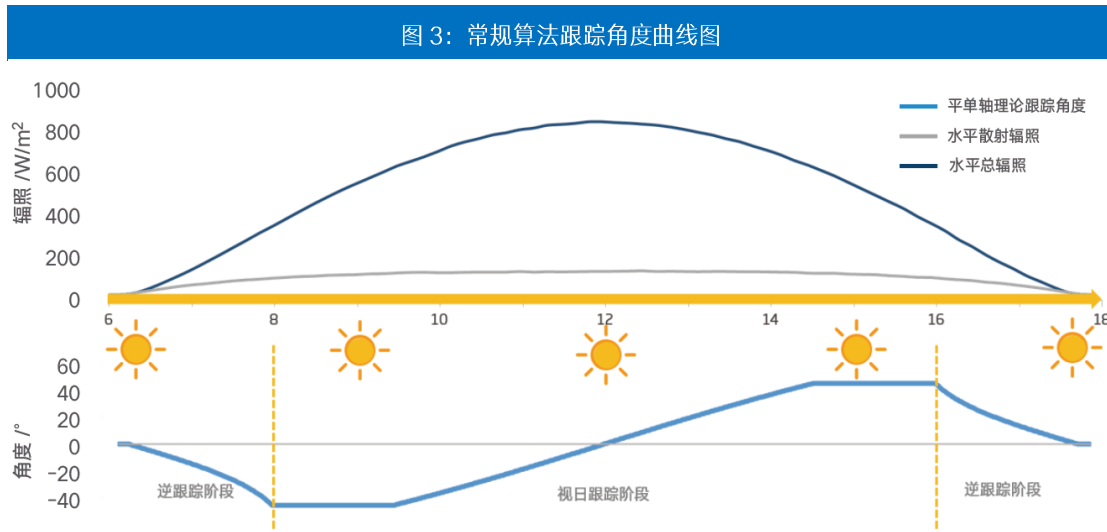
光线夹角越小，组件接收到的辐照越高原则，求得平单轴理论跟踪角度。（图 1）

早晚阶段，太阳高度角较低，按照天文算法计算得到的支架跟踪角度较大，导致阵列间产生阴影遮挡，造成发电损失，因此在早晚阶段采用逆跟踪算法，即随着太阳升起/降落，跟踪角度逐渐增大/减小，因与太阳运动方向相反，故称为逆跟踪。逆跟踪角度可根据太阳入射光线、阵列间距、阵列宽度等求得，保证前排阵列刚好不遮挡后排阵列，如图所示。（图 2）

图 2：逆跟踪算法跟踪角度示意图



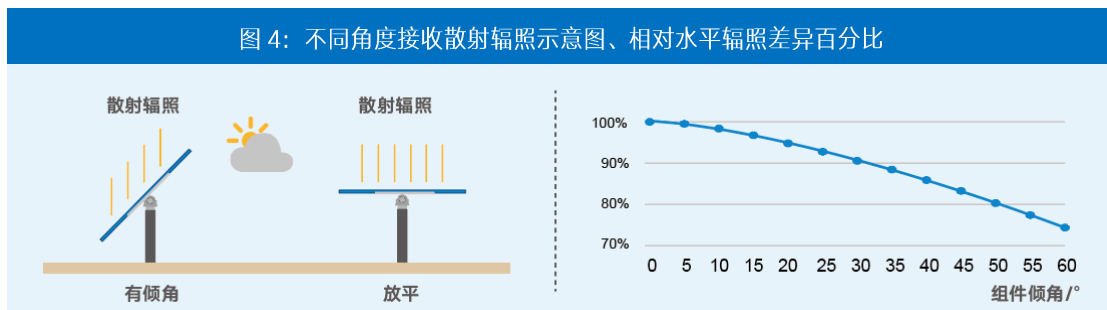
同时，跟踪支架设置限位角保护，如 45°，因此常规跟踪算法的理论运行曲线如图所示。(图 3)



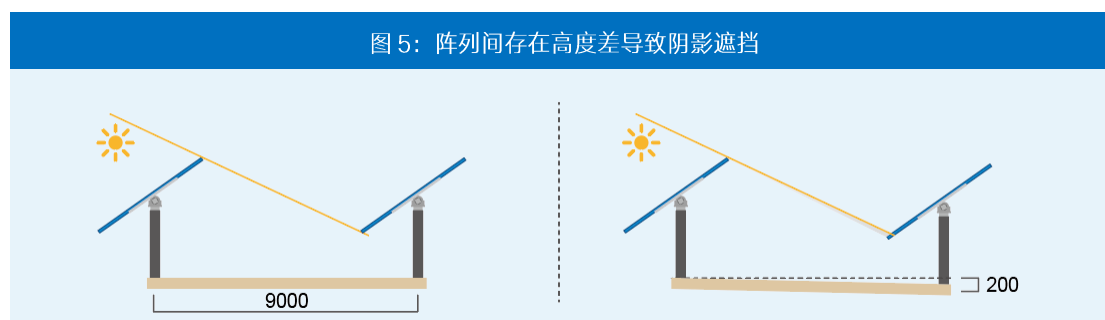
2.2 常规跟踪算法不足

常规跟踪算法只考虑高直射辐照天气、平坦地势、单面组件接收辐照最大化。实际项目中大多使用双面组件，且存在地势起伏和施工误差，在早晚逆跟踪阶段产生阴影遮挡，造成发电损失；同时高散射辐照天气（阴天）仍按常规跟踪算法转动，没有充分利用散射辐照。因此常规跟踪算法未完全发挥跟踪支架发电优势。

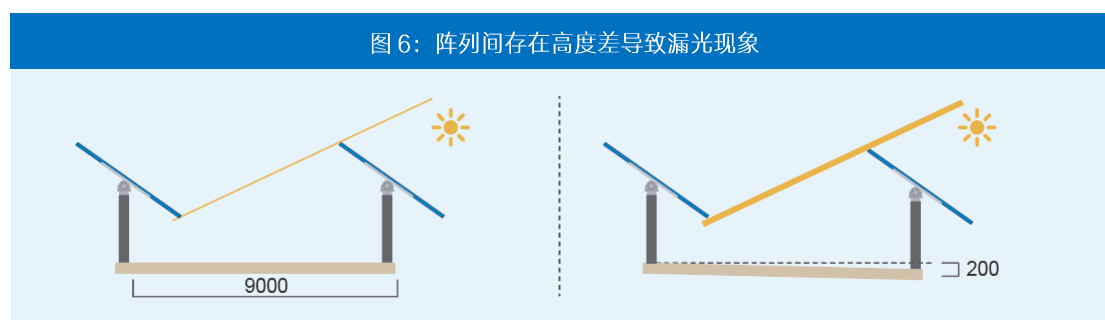
真实天气状态存在高直射辐照天气（晴天）、多云及高散射辐照天气（阴天、雨天），部分地区阴、雨天较多，全年占比可达 50%以上。根据天空散射辐照模型，高散射辐照天气，随着组件倾角的增大，组件正面接收到的散射辐照逐渐减小，小角度时组件接收到的散射辐照大于视日跟踪角度，如图所示，组件放平接收到的散射辐照高于带倾角组件，且组件倾角越大，差异越大。例如，视日跟踪角度 45°时，相比放平，辐照损失可达 15%。(图 4)



同时，工程实际中，项目地并非完全平坦地势，且坡地跟踪项目逐年增加，由于地势起伏和安装误差等影响，阵列间存在相对高度差，仍按平地逆跟踪角度转动，则会在逆跟踪阶段导致阵列间产生阴影遮挡，造成发电损失，如9m阵列间距，阵列间存在20cm高度差，逆跟踪时间段产生阴影遮挡，高直射天气，瞬时发电功率损失可达40%。(图5)



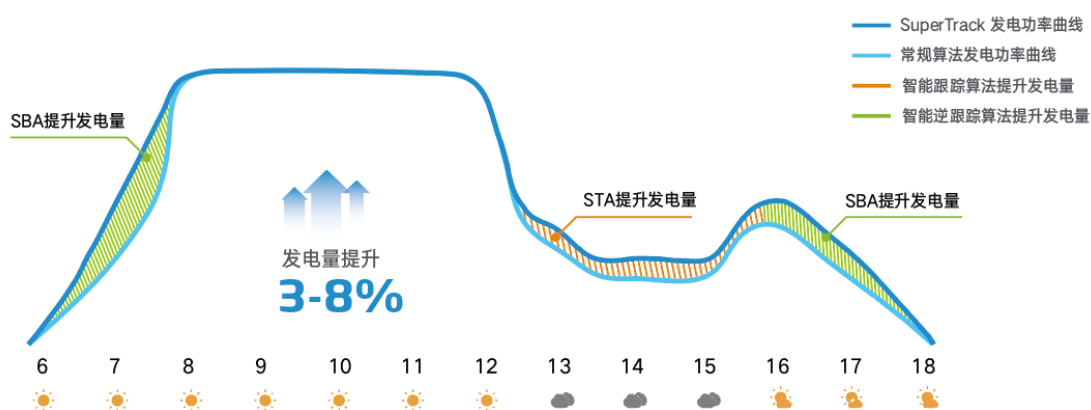
同时，由于阵列间地势差异，如在上午产生遮挡，在下午逆跟踪阶段则会存在漏光现象，导致辐照资源利用不充分。(图6)




三. SuperTrack 智合 定义及主要价值点

常规跟踪算法并未充分激发平单轴发电潜能，因此天合跟踪独创性地开发了智能跟踪技术-SuperTrack 智合，包含智能算法、多源数据、软件平台，从组件最优发电性能出发，针对不同天气状态，实时计算双面组件最佳发电角度，同时智能识别地势起伏特征，每排独立优化逆跟踪角度，避免或减少前后排阴影遮挡，充分挖掘跟踪支架发电潜能，与常规跟踪算法相比，发电量增益高达 3-8%。(图 7)

图 7: SuperTrack 智合算法增益效果示意图



 <p>高发电量</p>	 <p>高适应性</p>	 <p>高智能化</p>	 <p>高稳定性</p>
---	---	--	---

- 相比常规跟踪算法 发电量有效增益3-8%
- 满足客户多样化需求
- 自感知 自学习 自决策
- 长期项目实证
- 适应复杂地形、多种天气
- 发电模型专利技术
- 有效减少支架转动

四. SuperTrack 智合算法介绍

SuperTrack 智合 包含两大核心模块：

1 智能跟踪算法：STA
用以优化高散射辐照天气

2 智能逆跟踪算法：SBA
用以解决复杂地势带来的遮挡问题

图 8: SuperTrack 智合智能控制逻辑框图

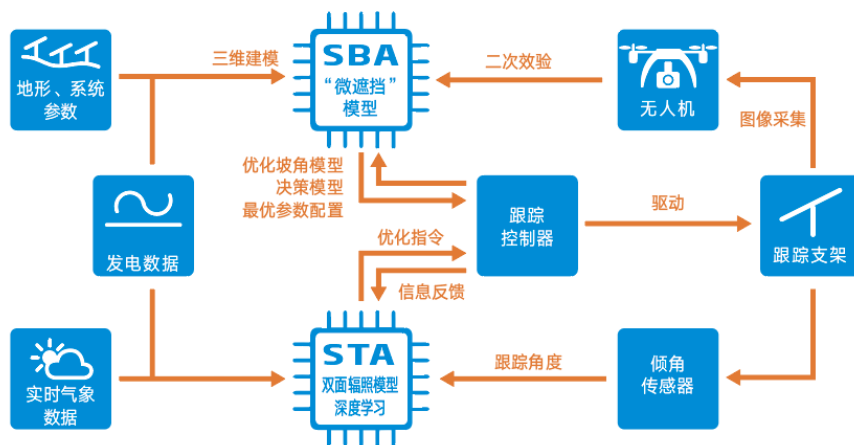
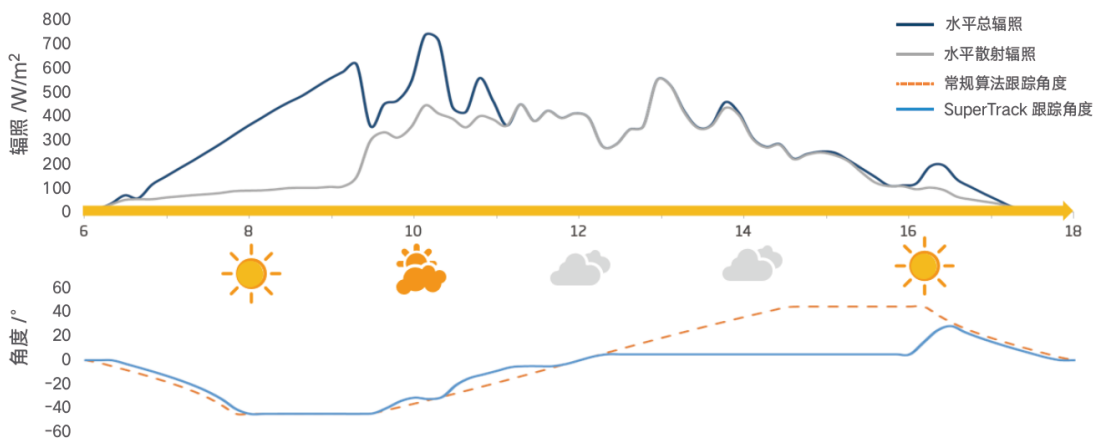


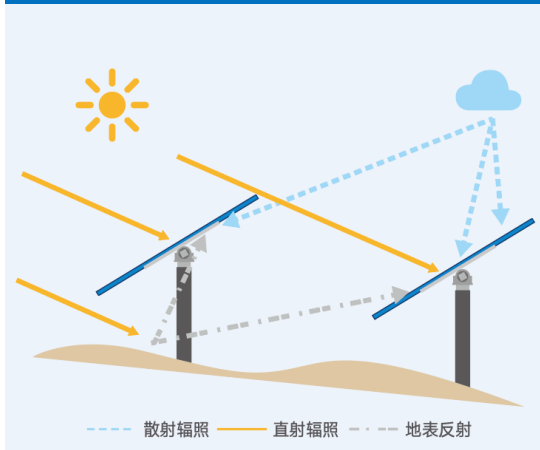
图 9: SuperTrack 智合与常规算法跟踪角度对比图



4.1 高散射辐照天气跟踪角度优化 STA

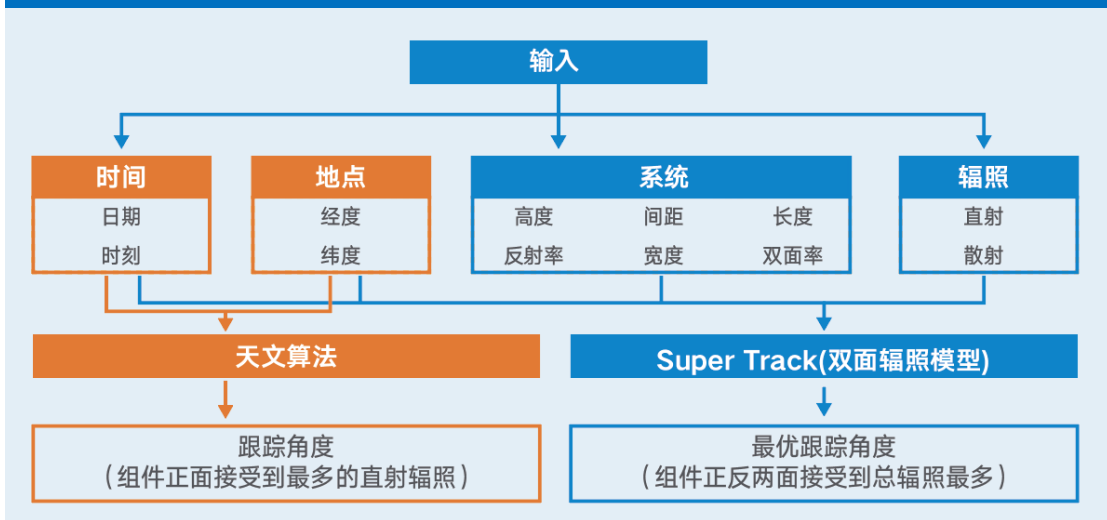
4.1.1 双面辐照模型

图 10: 双面组件接收辐照示意图



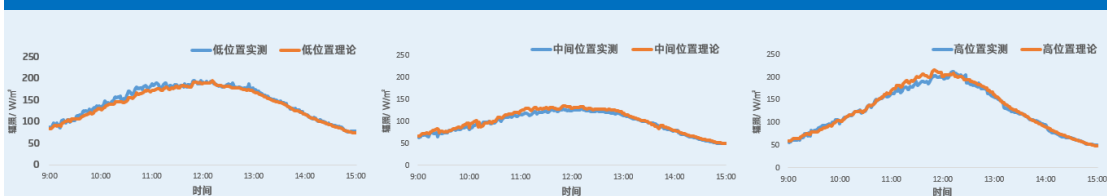
双面组件应用占比逐年增大，在大型平单轴跟踪系统中替代单面组件已经成为一种趋势，常规天文跟踪算法只考虑正面辐照最大化，而双面组件则需考虑正反两面总辐照最大化，因此，双面组件跟踪角度与单面组件跟踪角度在不同条件下存在一定差异。天合首创双面组件辐照模型，全面考虑 12 项关键因素，计算正面直射辐照、散射辐照、反射辐照以及背面反射辐照、散射辐照，最终求解双面组件总辐照。(图 10) (图 11)

图 11: 影响双面组件发电的主要因素



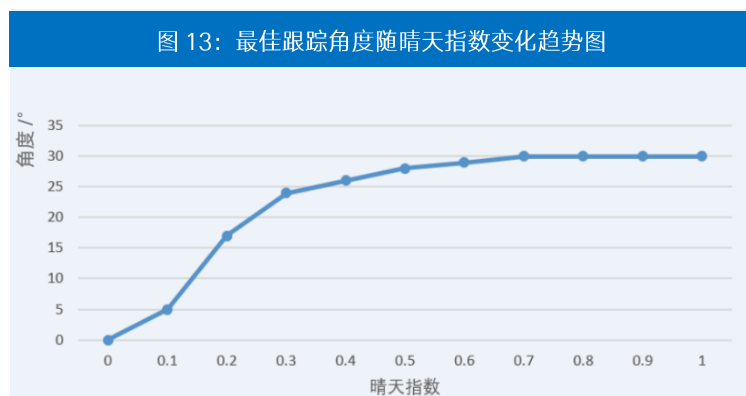
如图所示，常州实证场地，在不同时间点、不同地表反射率、不同天气状态及不同位置进行辐照模型的准确性验证实验，长期实验结果显示，模型预测值与实测值趋势基本一致，整体误差在 5%以内，模型准确可靠。(图 12)

图 12: 模型理论计算背面辐照值与实测值差异



4.1.2 高散射辐照天气跟踪角度优化

基于双面辐照模型，不同天气状态下的跟踪角度不同，该处定义晴天指数（0-1）代表不同天气状态，晴天指数越高代表天气越晴，直射辐照占比越高，散射辐照占比越低，对应的，晴天指数越低，散射辐照占比越高，直射辐照占比越低。举例计算常州地区秋季某一时刻，在不同晴天指数下的最佳双面组件跟踪角度，如图 13 所示，晴天指数较高时(如 0.9)，理论跟踪角度为 30°可获得最大辐照量；晴天指数较低时(如 0.2)，理论跟踪角度为 17°可获得最大辐照量；晴天指数极低时(阴雨天)，理论跟踪角度为 0°可获得最大辐照量。



晴天指数下的最佳双面组件跟踪角度，如图 13 所示，晴天指数较高时(如 0.9)，理论跟踪角度为 30°可获得最大辐照量；晴天指数较低时(如 0.2)，理论跟踪角度为 17°可获得最大辐照量；晴天指数极低时(阴雨天)，理论跟踪角度为 0°可获得最大辐照量。

STA 依托双面辐照模型 BIM(Bifacial Irradiance Model)专利技术，深度学习双面组件多参数影响下的发电特性，根据气象及系统运行数据，实时动态寻优最佳跟踪角度，提升高散射辐照天气发电量。

天合光能深耕光伏发电领域多年，通过对光伏组件长期发电性能的研究，积累了丰富经验。如图 14 所示，通过建立发电模型，多维度分析，进一步优化跟踪角度(如阴天放置小角度)，确保组件长期发电最佳。



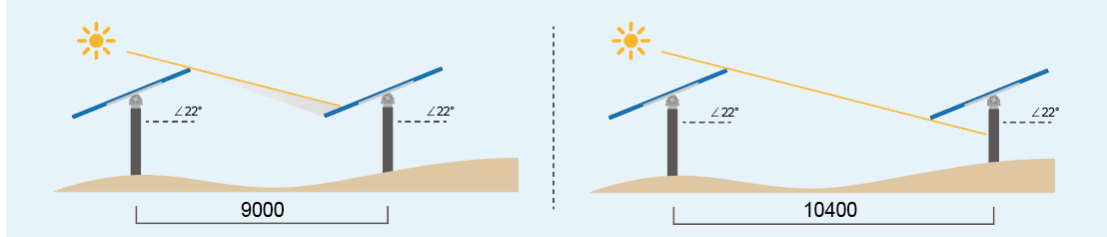
在高散射条件下，STA 可在保证发电量的同时，减少支架转动次数和转动角度，从而延长电机和支架的使用寿命。如表 1 所示，典型阴天，相比常规跟踪算法，SuperTrack 智合可减少 80%的转动角度及转动次数，常州地区，全年平均转动角度可减少约 17%，转动次数可减少约 28%。

表 1: 典型阴天常规跟踪算法与 SuperTrack 智合转动角度及次数对比

常规跟踪算法		SuperTrack		
转动角度	200°	转动角度	40°	-80%
转动次数	200	转动次数	40	-80%

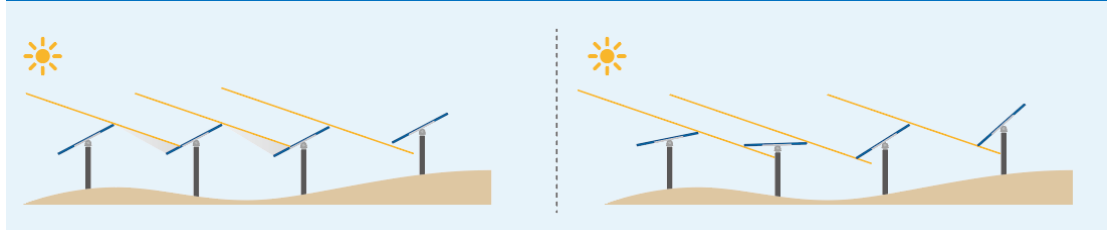
4.2 复杂地势逆跟踪角度优化 SBA

图 15: 增大阵列间距避免阴影遮挡



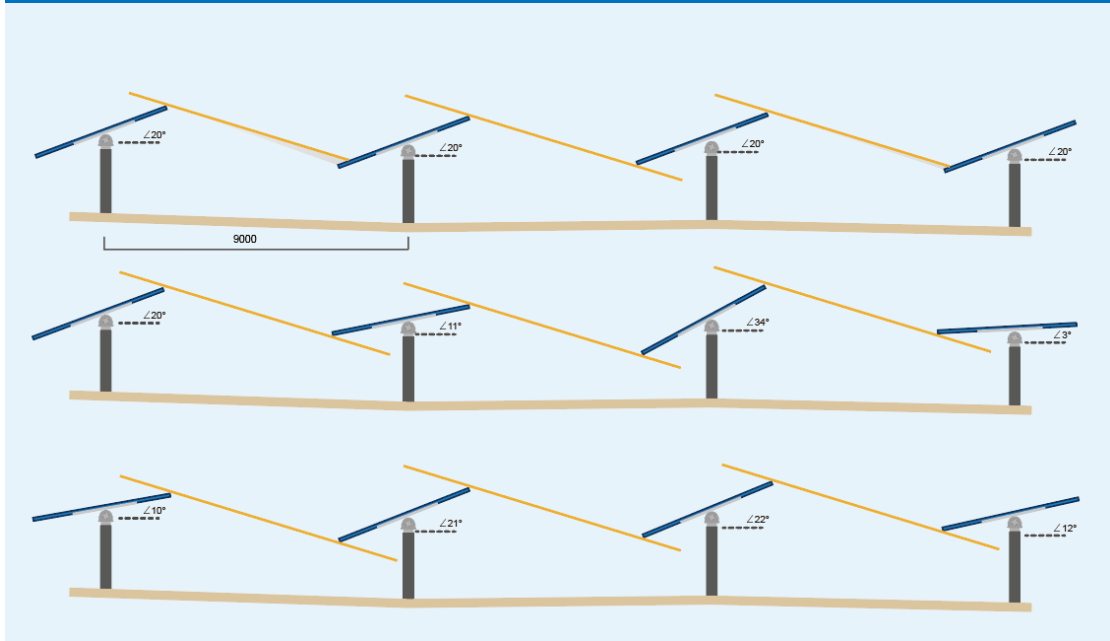
如图 15，理论上可以通过增大阵列间距来弥补常规逆跟踪算法的不足，但实际项目中，阵列间距基本保持一致，而阵列间高度差不同，适当增大间距后，部分阵列仍会存在遮挡，同时还会增大漏光现象，并且增加土地成本，因此调节各排逆跟踪角度的方案应用性更高。

图 16: SuperTrack 智合逆跟踪优化算法效果示意图



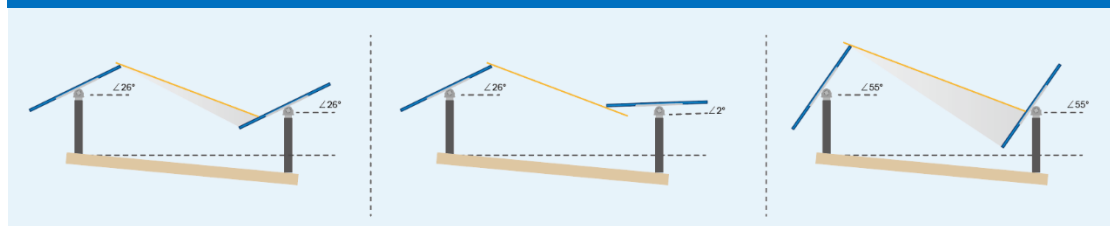
如图 16 所示，SBA 利用系统运行数据寻优扰动训练和（或）无人机传感技术识别遮挡，构建三维地形，基于机器学习算法、“微遮挡”发电模型，迭代决策输出整体发电量最优逆跟踪角度群组，有效提升逆跟踪阶段发电量。实现了复杂地势的识别和跟踪角度的优化，充分发挥跟踪支架的发电优势。

图 17: SuperTrack 智合逆跟踪优化角度举例



基于天合光能对组件遮挡发电特性的长期研究，对理论逆跟踪角度进行了二次优化，如分析阵列间失配影响，得到逆跟踪优化角度群组。如图 17 所示，阵列间存在高度差，如仍按平地逆跟踪角度 20° 转动，则第二、四排会产生阴影遮挡造成发电损失。SuperTrack 智合智能逆跟踪算法可通过无人机传感技术和（或）发电数据有效识别地形信息，根据真实地形减小被遮挡阵列角度，增大漏光阵列角度，获得 20° 、 11° 、 34° 、 3° 角度群组。同时通过迭代仿真，利用决策模型分析失配损失等进行二次角度优化，最终得到 10° 、 21° 、 22° 、 12° 优化角度群组，减小逆变器 MPPT 失配损失等，以保证全局输出功率最大。

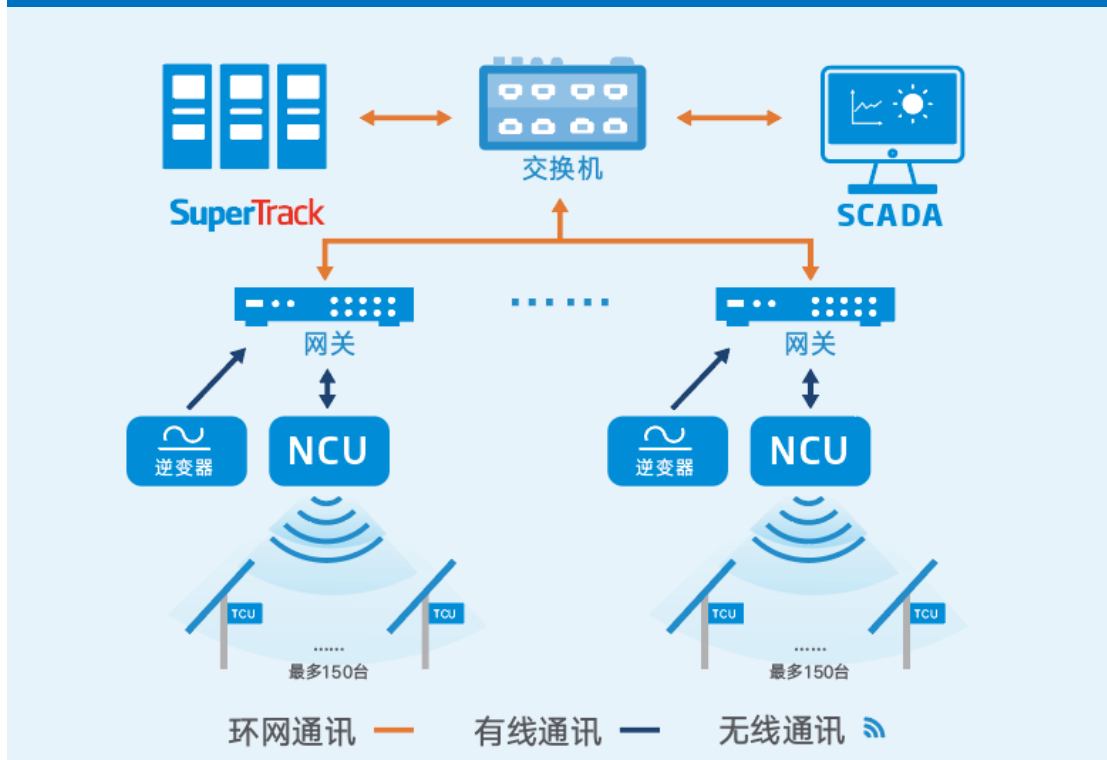
图 18: 角度转小至不遮挡与角度转大遮挡一半方案对比



如图 18 所示，针对跟踪阵列的遮挡问题，一般算法是减小支架角度至组件不遮挡，但是当地势差较大时，需要减小的角度过多甚至放平或反转，这样会导致组件接收的辐照减小，IAM 损失变大。因此，适当地改变角度至部分遮挡可能是较好的一种优化方式。通过对比不同优化方式的输出结果，保证整体发电最佳才是最合理的。

五. SuperTrack 智合系统构架

图 19: SuperTrack 智合系统构架



天合智能跟踪系统包括跟踪支架、跟踪支架控制器（TCU）、通讯控制器（NCU）、SuperTrack 智合平台、SCADA，同时灵活匹配逆变器等设备，打造了光伏跟踪系统一体化解决方案，见图 19 及表 2。

表 2: 100WM 光伏电站配置表

	跟踪支架	TCU	NCU	软件平台	传感设备
SuperTrack	1500套	1500台	10~20台	1套	1套
常规跟踪	1500套	1500台	10~20台	/	/

注：传感设备根据项目区域划分灵活增加;NCU 数量根据地形及排布确定。

六. 实证数据及发电增益潜力

6.1 实证数据

6.1.1 铜川 30MW 山地项目

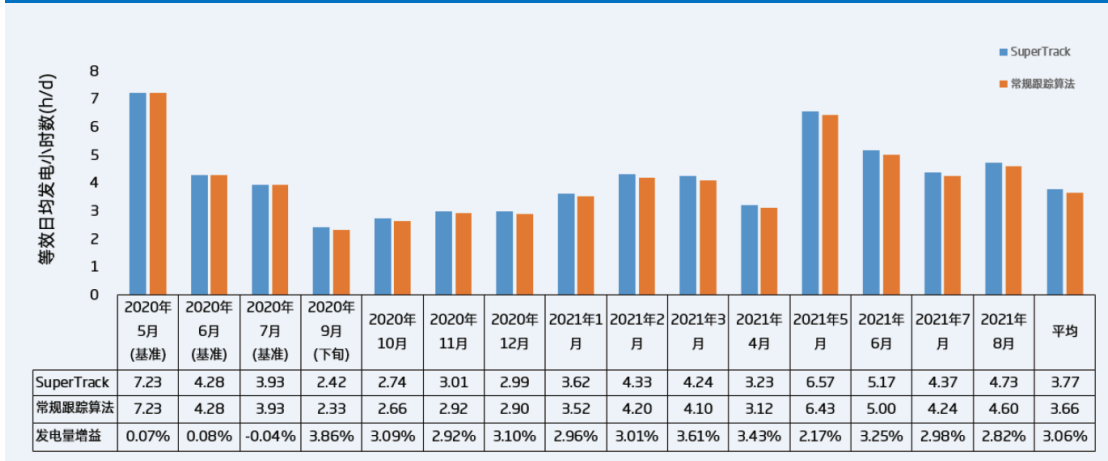


实证电站位于陕西省铜川市宜君县，电站采用双面组件+平单轴跟踪系统，从中挑选地形相近的兆瓦级光伏阵列进行验证。具体项目信息如表 3 所示：

表 3: 铜川 30MW 山地项目

项目地	陕西铜川	测试时间	2020年5月~2021年9月
经纬度	35.14°N, 109.17°E	地势	平均坡度约 3%
工作温度	-21.0°C ~ 39.7°C	组件	TSM-NEG6MC.20(II)
辐照量	1300kWh/m ² ~1400kWh/m ²	支架	开拓者 2P
散射占比	53%	GCR	0.41
地表条件	草地	高度	3.5m

图 20: 不同月份的等效发电小时数及发电增益对比



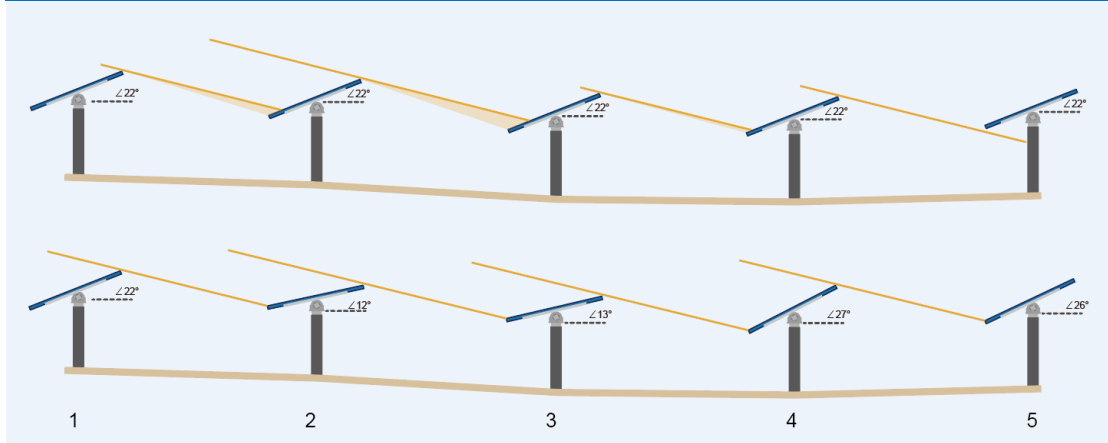
如图 20 所示，电站于 2020 年 5 月并网运行，5~7 月所有阵列采用常规跟踪算法，作为阵列间差异的评估基准。对比测试从 2020 年 9 月正式开始，部分阵列仍然采用常规跟踪算法，对比阵列集成 SuperTrack 智合算法，阵列遮挡比例均约在 33%左右，实证测试连续进行一年，结果显示智能算法阵列发电提高 3.06%。CGC 全程监测了该实证项目，对数据的准确性和有效性进行了权威鉴定，充分认可了 SuperTrack 的先进性和可靠性。

图 21: 逆跟踪阶段常规跟踪阵列与 SuperTrack 智合阵列遮挡情况实拍图



如图 21 铜川项目实拍图所示，不平整地势，常规跟踪阵列存在阴影遮挡及漏光现象。SuperTrack 智合阵列根据地形情况，每排阵列进行不同的逆跟踪角度优化，避免遮挡的同时尽可能减少漏光，提升逆跟踪阶段发电量。

图 22：常规跟踪阵列与 SuperTrack 智合阵列角度对比



具体举例如图 22 所示，选取铜川项目地阵列中 5 排支架，相对坡度分别为 3.2%、6%、1.1%、-2.6%（正值表明前排支架高于后排），上午 6:37，太阳入射角为 14°，按照常规跟踪算法，支架角度均为 22°，支架 2、3、4 的光伏组件均会产生阴影遮挡，同时阵列支架 4 和 5 之间存在漏光现象，造成辐照损失；按照 SuperTrack 智合算法优化后的支架角度分别为 22°、12°、13°、27°、26°，避免遮挡及漏光现象，有效减少发电损失。

图 23：典型阴天 SuperTrack 智合与常规跟踪阵列角度对比



如图 23 所示，在阴天或者雨天，SuperTrack 智合根据天气情况，将支架放置在小角度或将支架放平（图中右侧），可以获得更大发电增益。典型阴雨天，日发电量增益可达 12.86%。

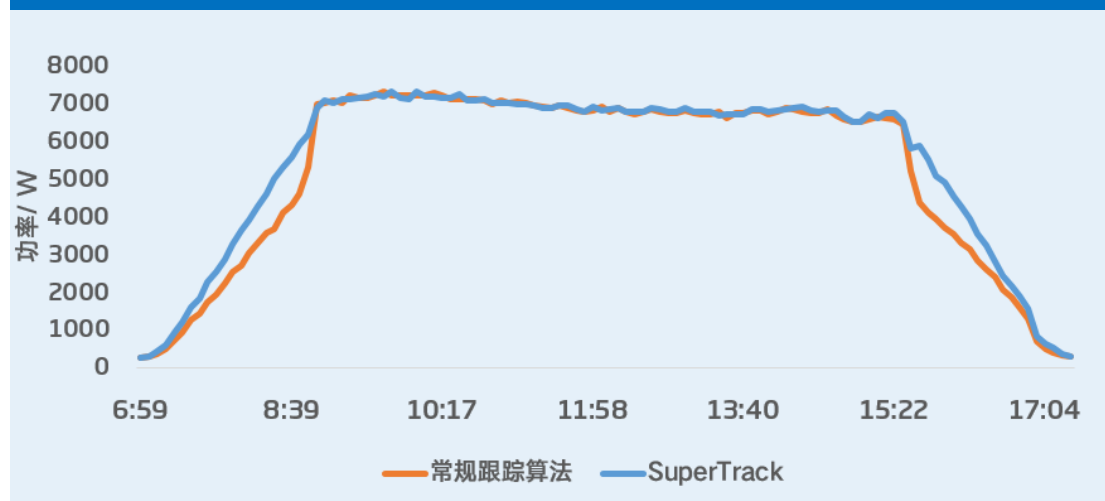
6.1.2 常州实证场



天合光能在江苏常州地区同样进行了电站实证，集成 SuperTrack 智合智能跟踪算法的阵列，发电量均有明显提升。

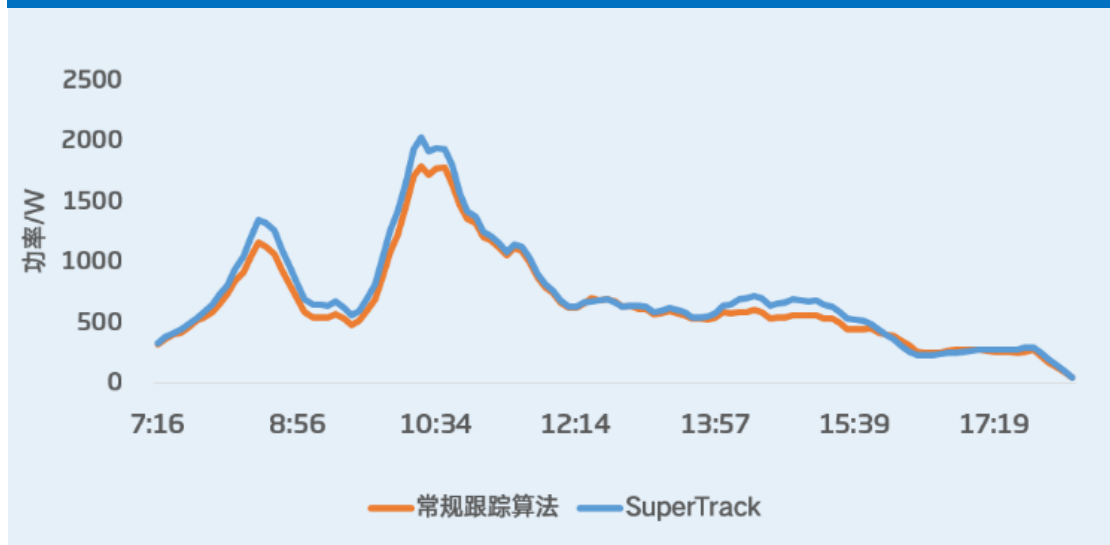
如图 24 所示，典型晴天，视日跟踪阶段，阵列输出功率相近，而逆跟踪阶段，常规算法阵列由于阴影遮挡导致输出功率较低，SuperTrack 智合阵列避免阴影遮挡，瞬时功率提升可达 35%，发电增益可达 4.64%。典型阴天情况下常规跟踪算法按照视日角度转动导致输出功率较低，SuperTrack 智合阵列转至小角度使整体发电增益达到 9.41%，如图 25。

图 24：典型晴天功率增益



注：该增益对比针对早晚均有遮挡的单排跟踪支架。

图 25：典型阴天功率增益



6.1.3 南宫实证场



天合光能在河北南宫市 400MW 项目应用了 SuperTrack 技术，选取相邻两个阵列进行算法对比，跟踪系统 2021 年 6 月开始运行发电，排除并网断电、设备调试，至 9 月底，有效运行天数 77 天，其中高散射天气 25 天，高散射天气的平均发电增益为 3.84%，其中典型阴天发电增益可达 8.03%。

6.2 增益潜力评估及第三方认证

影响发电增益的主要因素有纬度、地势差（遮挡阵列占比及坡度）、散射辐照占比及方案设计（如阵列间距）等，不同地区跟踪增益潜力的模拟结果如下表 4 所示：

表 4：不同地区增益潜力评估表

城市	纬度	GCR	散射辐照占比	遮挡引起的发电损失		STA 增益	SBA 增益	总增益
				Pvsyst	天合模型			
新加坡	1.37°N	0.70	56.0%		7.35%	2.23%	5.88%	8.11%
班加罗尔	12.99°N	0.64	41.7%	5.83%	6.73%	1.08%	5.38%	6.46%
曼谷	13.70°N	0.64	55.3%		5.58%	1.70%	4.46%	6.16%
墨西哥城	19.43°N	0.60	42.5%		5.84%	0.88%	4.67%	5.55%
吉达	22.30°N	0.58	39.4%	4.12%	5.59%	0.59%	4.47%	5.06%
广州	23.14°N	0.57	66.8%		3.78%	2.26%	3.02%	5.28%
哥伦比亚	34.01°N	0.46	45.6%		4.30%	0.77%	3.44%	4.21%
铜川	35.14°N	0.45	56.8%	2.36%	2.98%	1.16%	2.38%	3.54%
北海道	43.23°N	0.33	54.1%		2.79%	0.91%	2.23%	3.14%

注：遮挡损失及 SBA 增益根据坡度 6%、阵列遮挡数量占比 50%计算

天合跟踪基于自研模拟软件，选取全球不同纬度、不同气候条件的典型城市进行遮挡损失仿真及增益潜力评估，TUV 南德使用行业权威软件 PVsyst 对其中典型城市进行了遮挡损失仿真验算，与天合自研软件计算结果趋势一致。

SGS 对 SuperTrack 智合增益评估过程及结果进行了核实，SGS 表示：根据天合跟踪自研模拟软件的评估，STA 增益主要与项目地全年散射占比有关，散射占比越高，STA 增益越大，如

在广州地区，STA 增益在 2%以上；SBA 增益与 GCR、地势坡度、遮挡阵列占比等相关，GCR 越大，坡度越大，遮挡阵列占比越高，SBA 增益越高，如低纬度地区新加坡按标准设计，GCR 占比大，逆跟踪阶段时间长，SBA 增益潜力大。SGS 认为天合跟踪的模拟过程严谨合理，模拟数据准确可靠。

同时，CGC 全程监测了天合跟踪实证项目，对数据的准确性和有效性进行了权威鉴定，CGC 在报告中给出以下结论：天合跟踪在位于铜川的项目地进行为期一年的实地测试。测试结果显示，搭载 SuperTrack 智合的光伏阵列，发电量提高 3.06%，CGC 表示该测试数据真实有效。



七. 结语

跟踪系统以其高发电的特点，市场占比逐渐增大，天合跟踪一直致力于技术创新，提高跟踪系统发电量、降低 LOCE，提高 IRR。SuperTrack 智合依托双面辐照模型、“微遮挡”发电模型等，深入研究组件发电特性，实时动态寻优最佳跟踪角度，提升高散射辐照天气及复杂地势发电量，充分发挥跟踪支架的发电优势，较常规跟踪算法，发电增益 3-8%。

SuperTrack 智合具有高智能化、高适应性等特点，自感知、自学习、自决策，系统优化过程无需人工参与，全面适配天合跟踪支架，满足客户多样化需求，灵活应用于不同项目。

经过诸多项目地长达一年以上的实证测试，SuperTrack 智合技术稳定可靠，保证跟踪系统持续的发电增益，第三方对实证数据进行了权威鉴定，真实有效。

在新能源市场迅速发展的大背景下，光伏产业正在走向平价上网，提高发电量是行业永恒的追求，未来，SuperTrack 智合技术将广泛应用于天合跟踪系统，最大程度上挖掘跟踪系统发电潜力，使系统效率最大化，降低度电成本，给客户带来更高的收益，为实现“双碳”目标助力。