



清洁能源大基地 数字化技术 白皮书

序言一（雅砻江）

随着“双碳”目标的提出，到 2030 年以风电光伏为主的新能源装机规模将达到 12 亿千瓦，我国加快构建以新能源为主的新型电力系统。雅砻江公司作为四川最大的发电企业和行业龙头企业，是我国唯一由一个主体完整开发一个大型流域的公司。我们将充分发挥“一个主体开发一条江”、多能互补条件优越、调节能力强大、基础条件坚实等显著优势，加快推进雅砻江流域水风光一体化示范基地建设，助力构建新型能源体系，服务国家能源安全和“双碳”目标实现。

科技创新是新质生产力的核心要素。我们正在积极探索以新质生产力引领清洁能源转型，以数字化打造科技创新高地。雅砻江流域是国家规划的全球最大水风光一体化示范基地，具有新能源项目规模大、海拔高、生态保护要求高、地形条件复杂等特点。大基地的规划、建设、运维、运营的难度和挑战面临着十分复杂的情况，亟需通过应用信息技术提升流域开发管理的效率和决策的科学性。

流域高原大基地是最复杂、最挑战、最有代表性的场景之一。我们与华为共同成立联合创新中心，以柯拉电站和扎拉山电站为实践基地，通过联合攻关、协同创新，共同推进清洁能源大基地智能设计、智能建设、智能运维、智能运营等关键技术的研究，降低项目全生命周期成本，实现水风光资源综合效益最大化，促进能源产业数字化、智能化升级，共同打造清洁能源科技创新高地。以数字化构建开放共享的创新生态圈，促进能源产业数字化、智能化升级，并向全球提供可借鉴、可复制、可推广的清洁能源大基地建设经验，从而助推能源产业智慧转型升级和高质量发展。



序言二（华为）

碳中和是一场引领社会深刻变革的壮丽征程，国际社会逐渐达成了通过减少碳排放来应对全球气候变化的共识，绿色低碳发展已然成为一个重要趋势。光作为最易获得、最洁净的能源之一，迎来了前所未有的“爆发式”增长。“十四五”期间，国内年度光储电站装机增量都将保持在100GW以上，九大清洁能源基地总装机量将超过600GW。光伏正逐渐替代传统能源，成为全球绝对主力能源。根据BloombergNEF最新预测，2025年~2030年，全球年均装机容量将超过700GW，到2030年，全球累计光伏装机容量将达到6.7TW。

电气化、数字化、智能化是推进碳中和的三大关键路径。在许多国家，建设超过百兆瓦甚至吉瓦级的清洁能源大基地已成为明确趋势。大基地具有占地面积大、地处偏远、设备数量多等特点，面临着来自规划、建设、运维到运营全过程、多方面的挑战。随着数字化、智能化技术的不断演进，5G、AI、云计算、大数据、物联网等技术迎来爆发式应用，用“比特”管理“瓦特”的概念已经深入人心。因此，电站全生命周期数字化的需求应运而生。我们融合能量流与信息流，以数字为基础构建强大的软件平台，从数据采集、数据分析、数据治理、数据可视、数据作业、数据运营六大方面入手，将信息技术、传感技术、人工智能、控制技术应用其中，实现大基地全生命周期的可视、可管、可控、可优，保障电站智能、安全、高效运行。

《清洁能源大基地数字化技术白皮书》基于华为与雅砻江流域水电开发有限公司的联合创新应用实证，系统地介绍了大基地光伏电站数字化的最新技术与实践成果，旨在助力光伏电站数字化技术的发展和应用，加速光伏电站实现数字化、智能化、无人化。我们愿与行业伙伴共同探索产业数字化转型创新路径，助力“双碳”目标达成。



目录

CONTENTS

序言一（雅砻江）	01
----------------	----

序言二（华为）	02
---------------	----

1. 大基地数字化发展背景和挑战	05
-------------------------------	-----------

电站规划设计挑战	05
----------------	----

电站工程建设挑战	07
----------------	----

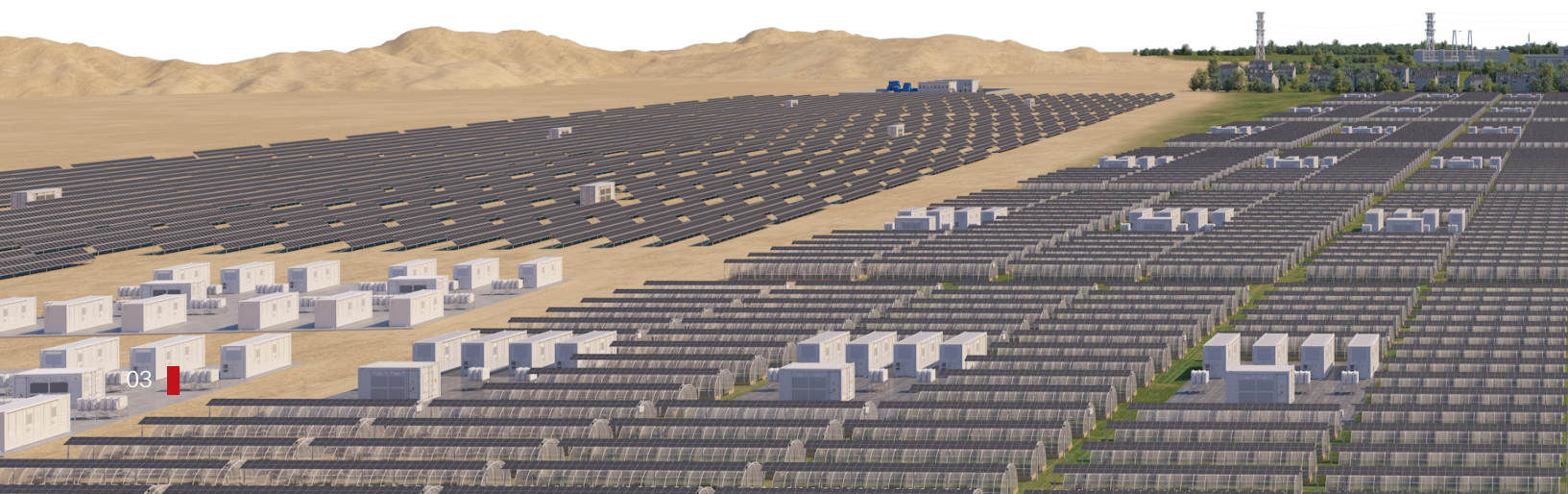
电站运维消缺挑战	07
----------------	----

电站生产运营挑战	08
----------------	----

2. 大基地数字化应用场景	09
----------------------------	-----------

数字化电站设计	09
---------------	----

数字化电站建设	10
---------------	----



■ 数字化工程建设联合创新实践 13

数字化电站运维 14

■ 数字化电站运维联合创新实践 20

数字化电站运营 21

■ 数字化电站运营联合创新实践 25

3. 结语 26



01

大基地数字化 发展背景和挑战

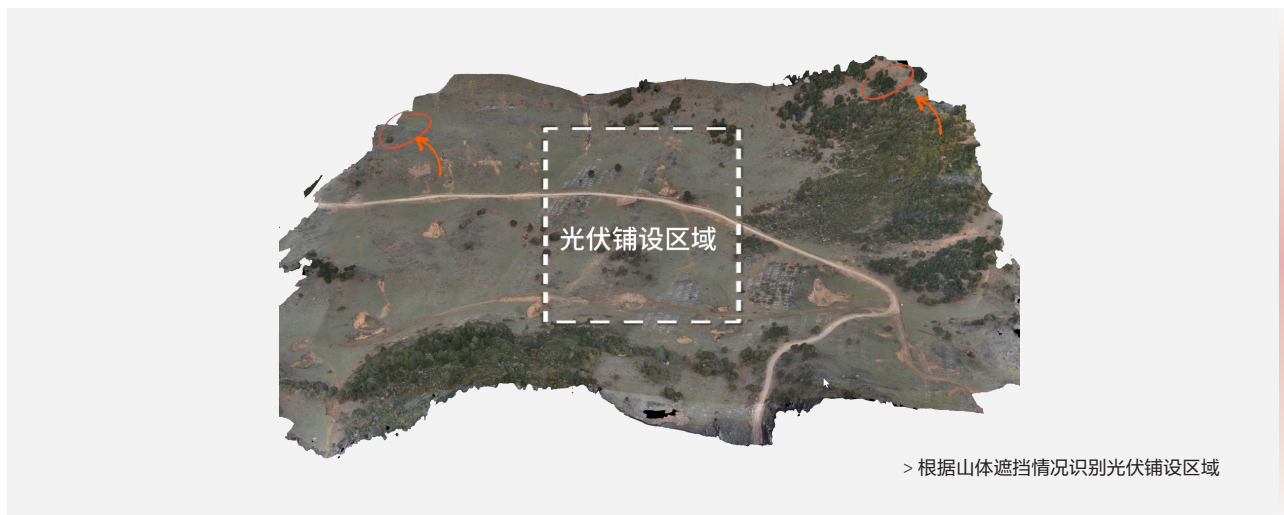
光伏电站的数字化概念最先兴起在电站运维领域。通过大量收集设备的生产数据和告警数据形成数据平台，再结合从水电、火电延续而来的工单、两票系统，实现最基本的运维管理功能。随着数据的不断积累，在 2014 年，通过基本的统计学分析识别异常设备的方法已成为业内较为成熟的运维方式，这便是光伏电站数字化的雏形。至 2017 年后，运用智能摄像头、无人机、机器人、AI 分析算法等进行场站巡检、故障识别、灰尘清扫等更为先进的故障分析方式也进入市场。

随着新能源渗透率越来越高，电站规模越来越大，环境越来越复杂。流域高原场景是所有场景中地势最复杂、环境最恶劣的场景之一。复杂的地貌、恶劣的气候和海量的发电设备不仅使得电站运维问题逐渐突出，也为电站的合理规划设计、高质量建设、稳定并网、高效运行、安全运营等带来了新的挑战，而数字化技术成为大基地开发的关键技术。

1.1 电站规划设计挑战

清洁能源大基地普遍建设在沙戈荒、流域高原等偏远地区，气象环境复杂。这样的地理地质环境也导致历史数据积累少，难以对规划和设计形成有效指导。部分场景如西南“流域大基地”及东部近海“海光大基地”，光伏建设经验少，在规划设计时面临较高的综合挑战。

- **地形复杂，选址难度大：**超大规模电站的设计涉及数十平方公里，如何在可用土地面积范围内做最优位置选择是行业面临的严峻挑战。



- **缺少可靠数据：**电站大部分建设于无人区，无人区地质数据信息少，实际土地情况可能与设计有偏差。



- **设计工作量大：**随着电站规模增加，依赖人工经验进行设计出图与方案优化的效率不能满足要求。

1.2 电站工程建设挑战

光伏电站建设周期短，如何做好施工现场的监管是目前发电企业面临的一大难题。光伏电站建设期面临的主要挑战有：

- **工程进度难知晓：**自然环境恶劣，人工作业效率低，且项目建设工程量大、工期紧张。人工统计分析难度高，难以有效掌控施工现场实际情况。
- **工程质量难把控：**施工人员多为临时工，水平参差不齐，易造成施工质量管理不到位的情况。建成后，无法实现全量检测，项目验收时工程质量评估困难。
- **施工安全难监管：**施工高峰期工人数量多且工地有重型设备，建设初期缺少监控装置，人员安全管理难度大。



1.3 电站运维消缺挑战

光伏大基地具有占地面积广、设备数量多、选址偏远的特点，同时还面临环境差、气候恶劣等问题。这些因素给光伏电站的日常运维工作带来巨大的困难和挑战，如：

- **发现故障难：**人眼只能发现较为明显的故障，如组件大面积碎裂、遮挡等，无法发现二极管故障、地势缓慢沉降等隐蔽性问题，并且人工巡检效率低，无法查全，只能抽检。对于组件安装高度在 1.8 米以上或地形陡峭的山地电站，人工巡检很难发现组件的问题，安全隐患大。
- **排障计划制定难：**由于电站设备数量巨大，日常产生的告警与巡检发现的问题多。运维人员只能凭借经验优先处理认为重要的故障，无法准确判断哪些问题对发电影响较大、哪些问题处理起来收益最大。
- **设备查找难：**光伏场区占地面积广，子阵间跨度大，从升压站到光伏场区作业的通勤距离长，场区内都是自建道路，无站内导航。设备告警后，根据逆变器编号或组串 / 组件编号在缺少路径导航的帮助下很难找到具体的位置，耗费大量时间。
- **消缺作业不规范：**不规范的作业可能会引发安全风险或者造成设备故障，造成更大损失。因此，需要通过技术手段将运作流程标准化，保障故障其实及时发现，快速定位和高效处置问题。

1.4 电站生产运营挑战

光伏电站建成投运后，在长达 25 年的运行周期内会面临来自发电、并网、安全多方面的挑战，如：

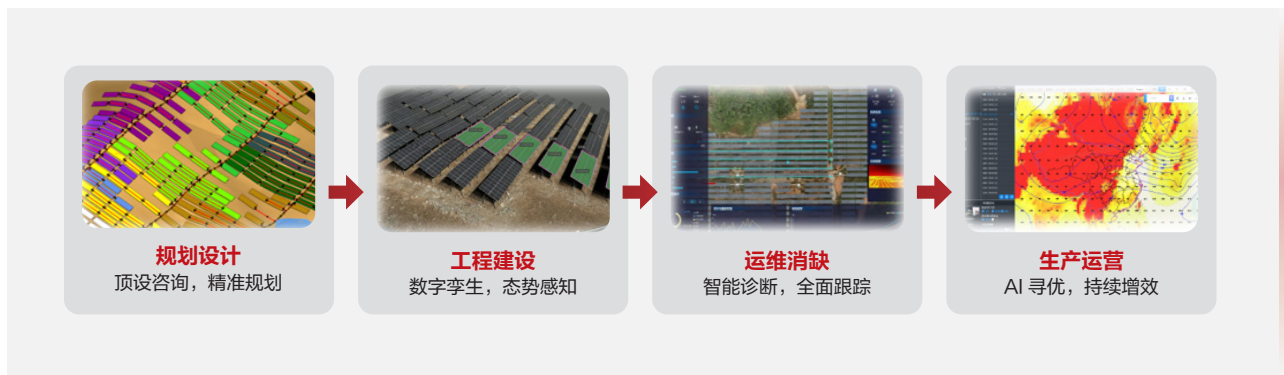
- **电站发电效率下降：**电站运行一段时间后，除了设备故障外，由于组件衰减、组件积灰、设备老旧等多方面因素，电站的 PR 值逐渐偏离设计值，带来较大的发电损失。
- **预测难调度难：**光伏发电具有随机性、波动性、间歇性特点，功率预测需要结合多种气象数据推演而出，难度很高。而预测准确度将影响电网调度，进而可能导致电网发生宽频振荡、暂态过电压等。对于多能互补的大基地而言，预测准确度也影响着调度的效率，光功率预测的不准确将影响如水电、火电等其它能源的生产计划，损害整体收益。

综上所述，电站数字化技术在光伏电站大基地设计、建设、运维及运营中具有广泛的前景。全生命周期的数字化技术可以提高工勘准确性和设计质量、提升建设效率、降低建设成本、提升运行维护效率、安全性，推动多能互补大基地的稳健发展。

02

大基地数字化 应用场景

数字化在电站设计、电站建设、电站运维和电站运营四大阶段起到关键作用。其中包含工程探勘、仿真设计、施工进度管理、工程质量管理、工地安全管理、设备运维管理、电站运行保障、电站智能控制、多能协同、辅助决策、场站运营管理等多个方面，贯穿电站的全生命周期。



2.1 数字化电站设计

在电站设计阶段，通过利用 3D 建模和设计软件等进行选址、建模、绘图和模拟等，可以提升选址精准度，简化选址流程。同时帮助运维人员提升设计效率、减少设计错误，实现高质量建站。

■ 电站勘测

在电站规划时，无人机可以作为 GIS 系统的补充，通过下挂测绘相机 + 激光雷达构建高精度三维实景建模，为设计人员提供厘米级的地质勘探数据，且具有经济可行性，满足电站早期设计要求。

同时利用 AI 算法对采集数据自动化精细分析，提前识别不适合施工区域。通过设计阶段的提前考虑，减少现场实际施工过程中受到的土地使用条件和环境的限制。



■ 设计与仿真

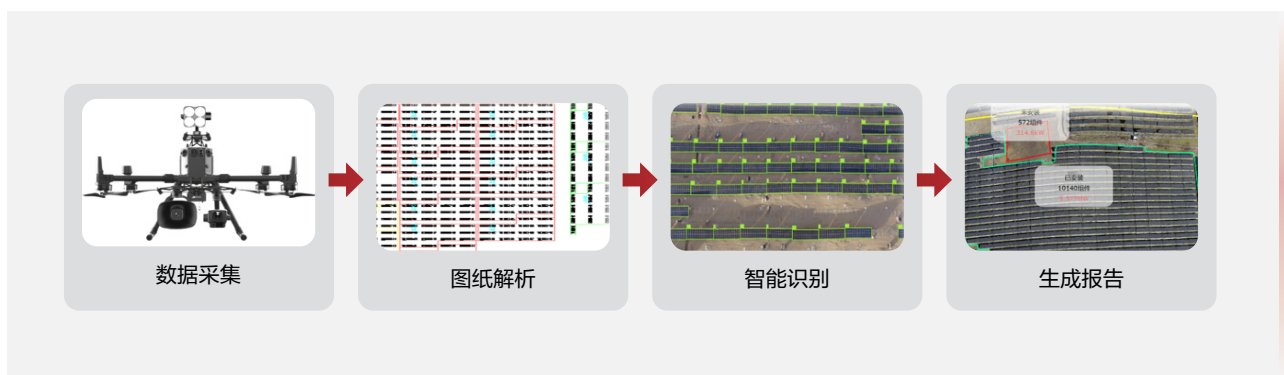
通过 3D 设计软件创建电站的模型实现自动组件排布与自动接线，大幅提升设计院的设计及方案优化效率。此外还可以通过仿真软件结合天气、温度等因素模拟出光伏板在不同时间的辐射接收情况，获得更为准确的电站发电信息，帮助电站实现高效、高质量设计。

■ 2.2 数字化电站建设

在工程建设阶段，由于基础的监控与通讯设施建设不完善，采用部署更自由、更快捷的无人机来对进度、质量和安全进行监管便成为更有效、更经济的手段。

■ 工程进度管理

有效的工程进度的监管手段不仅可以确保电站建设如期完成，还能避免因人为失误造成的错建、漏建。无人机可以搭载摄像头和激光雷达对场站进行高精度的三维信息采集，再将信息传回到数据中台进行分析。通过无人机测绘建模、图像处理、深度学习等技术对电站正射影像及倾斜影像进行采集和处理，再将结果与 CAD 设计图纸解析结果中对应目标进行对比，可以批量识别无人机图像中不同位置的不同的基建结构，并进一步计算出当前时刻桩体、支架、组件等安装数量，精准统计施工进度。



■ 工程质量监测

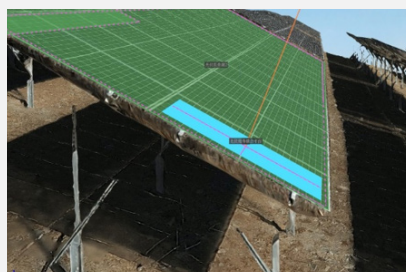
通过大规模三维重建技术和增量建模技术得到电站的实景三维模型后，利用智能图像处理技术对模型中的实体进行分割识别出光伏板、桩基，再通过矢量倾角识别算法和垂直度监测算法判定出组件安装角度和桩体垂直度，监测现场实际工程与设计方案的偏差，有效提高光伏场站施工过程的质量管控能力。

组件倾角检测方案对比



> 人工巡检

VS



> 组件倾角智能识别

桩基垂直度检测方案对比



> 人工巡检

VS



> 桩基垂直度智能识别

■ 工程安全监管

采用四光云台无人机飞行设备，通过 RTP 视频流媒体服务进行直播，可实现对施工现场的有效监控。根据现场复杂多变的危险因素建立不同的识别模式和模型，基于机器视觉的图像识别技术对危险区域入侵、未戴安全帽、高处作业未系安全绳等不安全行为进行自动识别，并通过无人机喊话设备对违规人员进行督导或劝离。



> 无人机识别未佩戴安全帽



> 无人机识别危险区域入侵

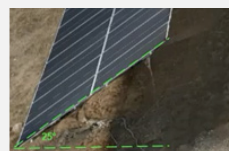
基于部署无人机按照不同的场景需求建立不同的识别模式和规则，实现对场站周边的生态环境、道路等其它基础设施进行检测和保护。也可依托对于组件三维结构变化的分析，实现对地势沉降的监测，进而识别山体滑坡风险并给出预警。



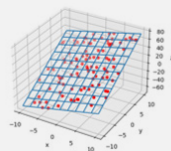
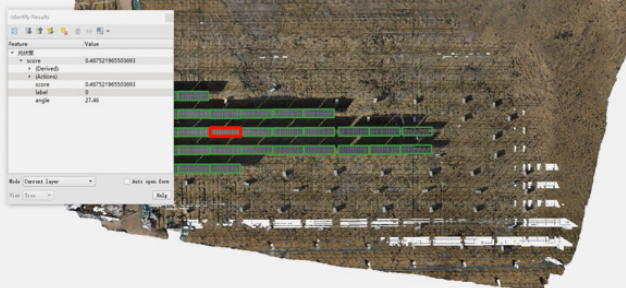
无人机采集数据



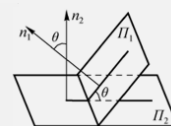
3D 模型构建



生成组件倾斜角



光伏板平面拟合



光伏板倾角计算

> 检测组件倾角识别地势沉降风险

通过数字化手段，将零碎、分散的工程建设过程数据以看板和报表形式统计并可视化呈现，使管理人员快速知晓电站施工进度，全面了解电站建设质量，及时识别违规作业、危险作业行为，帮助业主高效率、高质量、高安全建站。并且在电站建设完成后只需更换软件系统，无人机及其机库便可以继续用于场站的日常运维，最大化利旧。

数字化技术，特别是无人机技术及相关算法在施工早期的介入，可以有效避免人力物力资源的浪费，提升监管效率，降低监管成本。

■ 数字化工程建设联合创新实践

扎拉山光伏电站位于四川省凉山州盐源县，场址区域在海拔 3200 米至 4200 米之间，占地约 18 平方公里，装机规模达 117 万千瓦，于 2023 年 8 月 25 日正式开工，计划 2025 年全容量并网发电。电站建成后，每年发出的电量可节约标准煤约 65 万吨、减少二氧化碳排放约 180 万吨。



雅砻江集团与华为携手创新，联合解决方案生态伙伴一起设计、开发并在扎拉山光伏电站首次部署了智能工程管理平台解决方案。厘米级的实景建模引擎帮助还原了电站的三维地貌，在线进行施工进度跟踪，智能识别错建、漏建情况；通过高精度的倾角 / 垂直度识别算法对桩基和组串的施工质量进行监测，开发并调优算法，当前准确率达 99%，可以帮助客户避免 30-40% 的施工误差，提升建站质量与电站发电效率。

2.3 数字化电站运维

光伏运维是保证光伏电站正常运转的关键环节，它涵盖了设备日常巡检、定期维护、故障排查等方面的工作，确保电站的安全、稳定、高效运行。电站智能运维是光伏电站数字化程度较为成熟的部分。最早的运维只在单个电站内部进行，随着光伏行业的迅速发展，光伏装机量快速增长，一方面发电集团有了对其下属所有电站统一管理的诉求，另一方面行业亟需摆脱对经验丰富的工程师的依赖。光伏电站运维正从单点分散逐步转向为多点集中。现在提到电站运维，可以分为站内运维和集维中心两种。随着新能源电站朝着“少人无人”和“运检分离”方向发展，较为理想的构思是：场站侧无人值守，生产系统自动将运行态势上报到集控集维中心，集维中心根据场站侧上报的数据统一集中分析、对比和呈现。发现故障时向区域检修中心下派工单，由检修中心派工程师上站解决问题。一个高效的电站运维数字化方案的应该涵盖如下方面的内容：首先，场站侧可以感知、收集并传递大量的运行和巡检信息给集维侧。其次，集维侧要有对得到的数据具备挖掘、处理、分析能力，评估工作重要性等级，做出合理的规划，减少人力的浪费。最后，处理结果返回到场站后，运维人员要能快速定位问题设备并进行修理，使其正常运行。

通过数字化手段将运维流程固化下来，站内和集维相互配合，将巡检、分析、诊断、定位、修复等融于一体，打造高效的一站式检运维综合管理平台，端到端全面覆盖整个运维流程，这将是近年来光伏运维的趋势所在。



数字孪生平台
从“线”到“点”，组件级精准诊断

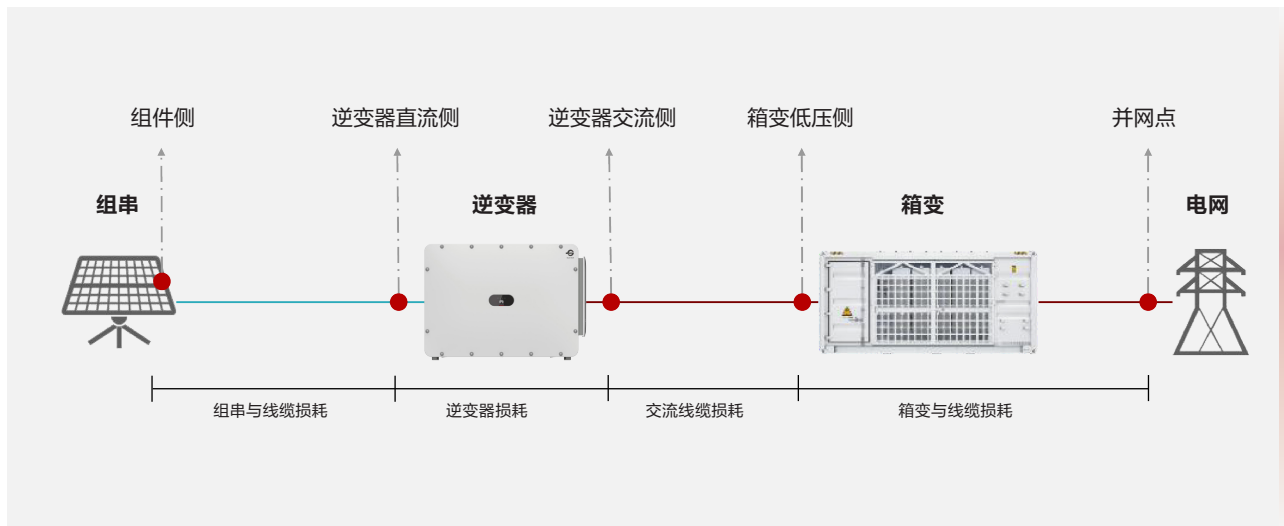
■ 数字孪生电站

数字孪生技术以物理世界为基座打造一个虚拟的管理空间，为光伏电站生命周期的运维管理提供基础。数字孪生电站可以支撑电站建立起业务、人员、设备之间的智能互联平台，将地形地貌、场站布局、设备型号、发电数据、安全数据、管理数据等信息融入 3D 场站中，还原场站运行状态与细节，为实时监控、设备定位等功能提供虚拟环境容器，真正实现“比特感知瓦特”。



■ 全链路诊断

全链路诊断是在传统“五点四段”损耗分析基础上进行的演进。通过采集和分析组件、逆变器直流侧、逆变器交流侧、箱变低压侧和电网侧五处发电、告警和诊断数据，不仅可以精确分析出四段重要损耗，还能最直观呈现整个发电链路运行状态和发电效率，快速识别安全隐患。



• 离散率分析：

离散率分析是在光伏电站中广泛使用的性能分析手段，它通过数学方式识别发电量偏差与平均值相差较远的发电单元，进而提示该发电单元可能出现的问题。这种方式可以用在组串式逆变器/单个组串上，优点是高效、易用，缺点是无法准确识别这种发电异常是否由确切的故障引起，需要人工对偏差超过某个数值的组串逐一排查。

• 智能 IV 诊断：

华为智能 IV 诊断特性是充分利用组串式逆变器采集的组串电流及电压数据，深入学习光伏组串在电站应用场景中可能的故障，针对不同的故障建立对应的故障识别及诊断模型。不同类型的组件故障在 IV 曲线上留下的信号不同，模型建成后可以基于对光伏组串 IV 曲线的分析识别组串的信息，判断组串是否存在异常。其优点是扫描速度快，可判定故障类型和计算发电损失，帮助运维人员确定运维优先级。



• 智能融合诊断：

随着电站规模增加，组件运维矛盾突出。通过无人机搭载的摄像机和传感器进行图像和信号采集，可以捕捉到组件的表面细节和温度数据；利用先进的图像识别和数据分析技术，能够精准识别出组件的故障类型，从而对光伏组件进行全面的检查和诊断。但无人机巡检存在一定弊端，如：电池续航时间有限、全检耗时长、无法得知发电损失等。

智能融合诊断集成 IV 扫描与无人机 AI 图像识别两种核心技术，是华为联合伙伴首创实现的高效组件级故障诊断方案。先采用华为智能 IV 诊断对待检测区域进行诊断，定位故障组串；再启动无人机对故障组串进行二次排查，进一步精确定位到故障组件。融合方案不仅实现了组件级故障定位，还缩短了飞行目标范围，解决了无人机的续航问题。正常情况下，1GW 电站 1 周内即可完成全量诊断，全程无需人工上站。

优点：

准确：两种诊断模式交叉验证，组件故障识别准确率 > 96%。

高效：圈定范围后再小范围细致筛查，仅处理影响发电的故障，提升故障定位效率 80%。

易用：远程一键作业，无需人工上站核查，站内 + 卫星导航辅助闭环消缺。



■ 智能作业路径规划与导航

合理的作业路径规划可有效提升消缺效率。在路径规划将发电量损失、人工成本、备件成本、告警密度、告警修复时长、告警密度等经济指标考虑在内是非常必要的，可以帮助运维管理者确定出经济性最优的消缺方案。基于数字孪生技术绘制场站路网，提前做好路径寻优，一次消缺多个故障点，可指导运维人员有序消缺。

由于缺乏逆变器位置信息，普通导航无法有效指导站内运维，融合 GPS 定位技术与场站实际施工图纸与站内导航也是运维阶段必不可少的手段之一。它可以有效缩短故障设备查找时间，大幅度提高故障处理效率。在运维中心大屏上可看到运维人员的实际路径，实现作业过程的管理。



■ 作业全流程管理

电站的运维作业常在户外且强电环境，存在一定的危险性，因此对作业规范性的管理提出了更高的要求。数字化技术的应用，尤其是移动通讯技术和 AI 摄像头的配合，可以使电站作业过程的管理更加规范化。电站作业区内利用人脸识别技术和 AI 识别技术，不仅可以对作业人员的资格进行认证，避免无证作业，还能对作业区异物入侵、工作人员着装规范性进行监控。

通过部署站内 GPS 定位系统，可以对运维人员的行动轨迹做追踪。当到工程师到达摄像头覆盖区域时摄像头自动启动，对作业过程进行录像并保存，便于对作业过程进行回溯，全面规范消缺、检修等作业流程，预警和保护光伏电站运检人员安全。通过全流程可追溯机制，实现对委外作业的可控可管。



■ 数字化电站运维联合创新实践

雅砻江柯拉光伏电站位于四川省甘孜州雅江县，项目分布在川西高原海拔 4000 米至 4600 米间，面积约 16 平方公里，约等于 80 个“鸟巢”体育场。电站装机规模 100 万千瓦，光伏组件达 200 多万块。

以柯拉电站为实践基地，华为与伙伴一起，为雅砻江水电集团打造了一个覆盖端到端流程的“智能运维驾驶舱”。以华为智能光伏电站管理系统为站内数据底座，负责场站内的发电、告警数据收集，并通过离散率分析、智能 IV 诊断、智能融合诊断技术对电站进行全面诊断。将告警和诊断信息上送至解决方案生态伙伴的集维系统的故障池中，由系统对故障运维的经济性进行分析并根据优先级和分布自动规划运维路线。通过路网建模绘制的站内导航系统，可将运维人员快速引导至故障设备。同时，该系统可以联动集团工单系统，实现故障闭环。



经场站实测，站内导航可缩短逆变器定位时间 30% 以上，大幅缩减运维人员走动寻找的距离，降低人员在高海拔作业的危险性。运维驾驶舱覆盖了端到端的运维流程，可提升整体运维效率 50%+，有效减轻了高海拔光伏基地的运维压力，加速电站少人无人进程。

2.4 数字化电站运营

在长达 25 年的电站生命周期内，电站会面临自身效率衰减、电网消纳困难、设备安全问题等多方面的挑战。除了做好运维消缺工作，减少电站带病运行之外，通过吸收先进的数字化、智能化的技术，促进电网消纳、提升全生命周期发电量、提高电站安全性也是至关重要的。

PR 深度分析

光伏系统 PR（Performance Ratio，系统效率）是光伏电站发电效率的一个关键评价指标，也是评价一个电站质量的关键因素。系统效率 PR 的高低受到电站选址、技术路线、建设施工质量、设备性能、运维及时性、天气因素等多方面的影响。PR 值是整个电站在扣除所有损耗后，实际输入到电网的电能与理论上应有发电量的比例关系。

$$PR^* = \left(\frac{E_{OUT,\tau}}{CI} \right) / \left(\frac{G}{G_0} \right)$$

PR：系统效能

$E_{OUT,\tau}$ ： τ 时段内光伏电站输出的总发电量

CI：光伏电站装机容量

G： τ 时段光伏方阵倾斜面单位面积总辐照量

G_0 ：标准条件下的辐照度

*PR 计算方法引用自 GB/T 39854 《光伏发电站性能评估技术规范》

实际上，电站在运行时会因为各种原因产生损耗从而使 PR 值无法达到最初的设计值。华为和伙伴共同研发的 PR 深度分析方案，可以帮助用户深度分析各类型的发电损耗，找出影响 PR 的关键因素。通过对集电线故障、跟踪支架故障、逆变器故障、箱变故障、阴影遮挡、冰雪遮挡以及设备低效等故障损失进行分析。通过各段损耗在不同电站下的横向对比和不同时间段内的纵向对比，找出损失大的环节，为运维专家提供运维决策参考，指导及时高效和精准的运维，提升发电量，增加电站收益，也为未来新建设电站提供数据支撑。



■ 高精度光功率预测

光伏发电具有随机性、波动性、间歇性特点。气象预测是功率预测的重要输入，气象预测的偏差会给光功率预测带来严重的负面影响，光功率预测的不准确将影响电网调度，进而影响新能源的消纳。当前气象预测的来源主要以数值天气预报的结果为主，最权威的是欧洲气象中心的 EC 数据。其采用的数值天气预报方式对算力要求较高，计算耗时长，数据更新频率低。实际应用中预报的最近有效时间与起报时间的间隔超过 24 小时，导致预测精度差。

运行过程中电站可能由于突发检修或设备损坏导致短期内不能按照额定功率发电，无法修正此类历史数据也会影响到功率预测准确性。业界普遍采用人工填报的方式对发电数据异常进行修正，准确性难以得到保障，从而直接影响预测模型训练的效果

光伏功率预测不但受预测气象偏差和突发情况的影响，也受组件和设备衰减或季节变化的影响。这种发电特性的变化是一个较为长期而缓慢的过程，其影响不能完全准确的预测。业界普遍在发电特性变化显性表现出预测精度降低后再进行预测模型调整，往往造成至少 3-5 天的模型优化滞后，进而对预测精度产生负面影响。

精确的光功率预测可以减少考核罚款，提升新能源消纳，有利于多能互补和电力交易，且可以辅助制定更合理的运维检修计划。华为将气象大模型与 AI 辐照转功率算法相结合，实现高精度电站区域小时级滚动光功率预测，并结合数据治理和模型自更新技术，及时对预测模型进行修正，保障短期、超短期光功率预测的准确性。

• 气象大模型：

华为气象大模型使用适应地球坐标系统的三维神经网络（3D Earth-Specific Transformer）为基本框架，输入全球高空变量和地表变量，输出未来天气状态。

气象大模型相比传统数值天气预报，不但预测性能更优，且推理速度更快。其预测结果均优于 EC 的 IFS 值且推理提速超过 10000 倍，实现了秒级计算 24 小时预报的能力。

得益于 AI 大模型强大的数据融合能力，区域气象大模型融合了国产实况场数据、高精度卫星数据、全球大模型推理数据、数值天气预报数据、电站附近观测数据等进行模型训练和推理，从而实现快速迭代、低延时预报、新能源电站定制化等能力。既可以将更接近预报目标时间的数据用于业务预报，也可以实现电站区域级定制化优化预测，从而进一步提高预测精度。



• 数据治理：

数据质量是影响预测模型质量的又一个重要因素。结合预测气象、光伏发电的特点，华为整合包含缺失值处理、异常值处理等十余种数据治理方法，在功率预测各个环节把控数据质量。

通过对电站上千告警信号的梳理规整，形成了从逆变器到全站“告警信号 - 发电受限”映射模型，结合华为逆变器的最大发电能力数据，实现了功率预测模型分钟级别的电站发电能力修正响应，数据质量得到及时、有效改善，提升模型训练效果。在无需外界干预的情况下，可快速感知电站最大发电能力的变化，减少此类停机检修事件对光功率预测精度的影响。

• 模型自更新技术：

云端部署的方案普遍滞后 3-5 天才能修正模型，相比之下华为的模型自更新技术在短期和超短期预测的精确度上更具有优势，可有效应对电站发电特性的中长期不可逆的变化带来的影响。华为模型自更新技术结合云端协同部署的方案，在保证模型稳定性的同时实现 15 分钟滚动更新预测，有效应对电站长期运行过程中由于温度等环境因素变化，或组件衰减导致的发电特性变化带来的影响。



■ 数字化电站运营联合创新实践

雅砻江柯拉电站项目于 2024 年上半年部署了 PR 深度分析系统，该系统不仅可以呈现整站及单个子阵的发电效率，还通过分析各部件发电数据，给出包括组件损耗、低效设备损失、直流线缆损耗、箱变损耗、交流线缆损耗、设备故障损失、积灰 / 冰雪损失等在内的 13 类发电损失，可以通过 PR 看板直观看出对电站发电损失的分布，快速识别最影响发电的问题。不仅辅助运维人员制定运维计划，改善柯拉电站的发电效率，还可以通过未来和其他电站的横向比较，帮助客户获得建站和设备选型经验，使能客户可持续、高质量建站。

同时，柯拉光伏电站也是“水光互补”电站。光伏发出的电通过 500 千伏输电线路接入两河口水电站，与水电站“打捆”输出稳定电源。光电与水电“夏季丰水期、冬季枯水期”特点形成天然互补，经济效益最大化，但这也对光功率预测的准确度提出了更高的要求。为了解决这个问题，华为创新性地将气象大模型应用在了光伏领域，并将气象模型的网格精细化，使其更符合光伏场站局部的气象状况。同时通过将数据治理和模型自更新技术与 AI 算法结合，开创了更为精准的辐照转功率技术。大模型 + AI，使场站的短期光功率预测准确度平均值达到 90%+，显著减少了光功率预测精确度低于 85% 的情况，减少考核电量，提升电站收益，实现更高效的水光互补。





可再生能源与数字技术、电力电子技术相融合已成为必然趋势。光伏电站在过去的十年中逐步从基础的数据监控收集，走向了智能分析与策略优化。从单设备、单场站的运维消缺走向了多场站、集中化的营维管理。然而，迄今为止的发展仅仅是数字化、智能化的开端。根据当前的行业趋势及未来技术的发展展望，未来十年信息流与能量流的融合将达到一个全新的高度，电站数字化将从“运维数字化”走向“营维数字化”，再迈向“规－建－维－营”全生命周期的数字化新高度。这一历程不仅仅是对技术的简单追求，更是对可持续发展理念的最佳实践。

科技进步与能源转型的相互促进正在深刻改变能源发展的前景。5G、IoT 技术的发展将感知采集的范围从数据流扩展到视频流；大数据、AI 和 GPS 导航的使用将电站运维管理从对设备运行状态的分析诊断带入端到端全流程的运维和管理工作中；云及大模型的应用促进了物理世界与数字世界的交融；强大的算力使光伏电站自主学习和迭代成为可能。“比特”不仅感知、管理“瓦特”，更能优化、预测“瓦特”。

未来的光伏电站将是全生命周期数字化的电站，数字化、智能化、无人化是其核心特征。它可以更好地与电网、其它能源及用户需求协同，形成一个高效、灵活、可持续的能源生产和供应系统，在全球能源结构转型中扮演更加关键的角色。华为将与更多解决方案生态伙伴携手同行，持续助力光伏电站技术的创新与发展，与行业共同迎接一个更加绿色、智能的未来。

版权所有 © 华为数字能源技术有限公司 © 雅砻江流域水电开发有限公司 2024。保留一切权利。
非经华为技术有限公司、雅砻江流域水电开发有限公司书面许可，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本文档内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

商标声明

 HUAWEI  为华为技术有限公司的商标。

 国投  雅砻江水电 YALONG HYDRO 为雅砻江流域水电开发有限公司的商标。

在本手册中以及本手册描述的产品中，出现的其他商标、产品名称、服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，华为技术有限公司、雅砻江流域水电开发有限公司不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任。

华为技术有限公司、雅砻江流域水电开发有限公司可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

本材料是为提供一般信息的用途编制，并非旨在成为可依赖的会计、税务、法律或其他专业意见。请向您的顾问获取具体意见。

编写组

华为数字能源技术有限公司：黄重月、郝应涛、孙雨航、朱军卫、张琦玮、王文渊、叶璟、张宇琦、汤化、刘刚、王哲、陈建辉、徐亮、黄云龙

雅砻江流域水电开发有限公司：张鹏、熊开智、李名川、周洪波、吴火兵、周济芳、何勇、杨志伟、康子军、戚翔宇、冯振海、徐亮