



地面电站数智运维

解决方案技术白皮书

北京鉴衡认证中心有限公司

阳光智维科技股份有限公司

国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室

联合发布

2024年6月



前言

截至 2023 年底，我国光伏发电累计装机已突破 600GW，在电力装机中的占比已排名第二。回顾过去近 20 年的产业发展，我国的光伏发电经历了从无到有、从小到大的发展历程。随着产业规模的不断扩大，高速增长过程中遗留问题及在电力系统中高比例接入带来的问题开始集中显现，粗放、扩张型的发展方式已不可持续，光伏产业需要立足长远，基于产业的发展愿景，站在新的起点上，审视、规划下一步的发展路径和方式。

图0-1.中国2007年~2023年光伏装机量统计 (单位: 万kW)

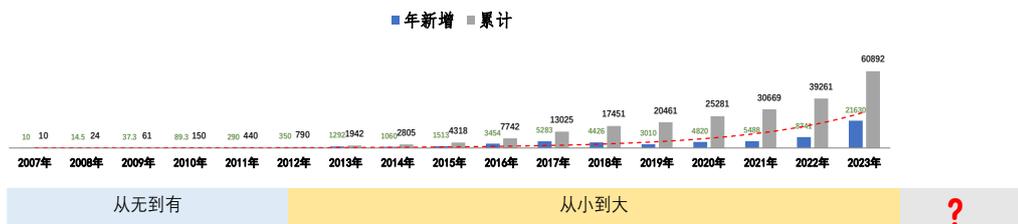
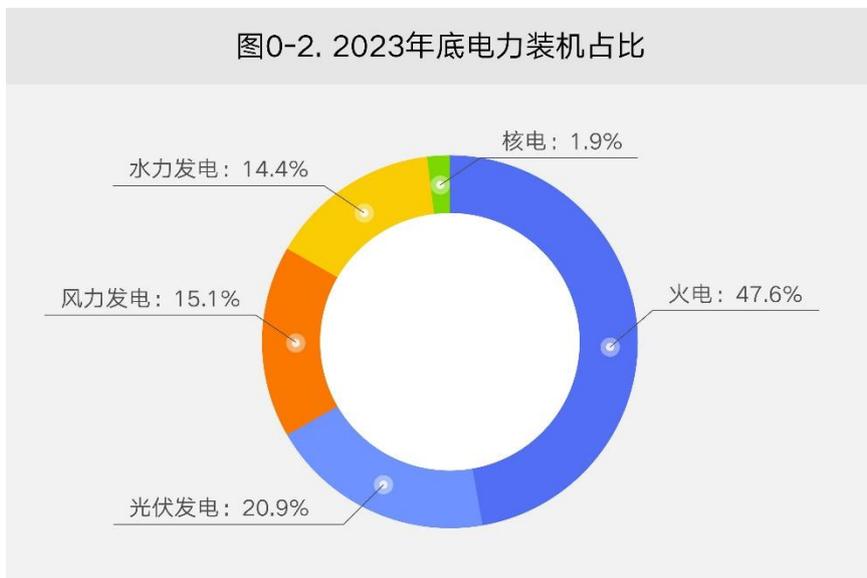


图0-2. 2023年底电力装机占比



继平价上网后，光伏发电在大部分地区已可以实现更低价上网，产业发展的主要矛盾已由“量”“价”间的矛盾转变为“量”“质”间的矛盾。消纳和送出、光伏用地、质量和安全已成为制约产业健康发展的主要瓶颈，光伏人需要直面问

题和挑战，寻求破解之道。

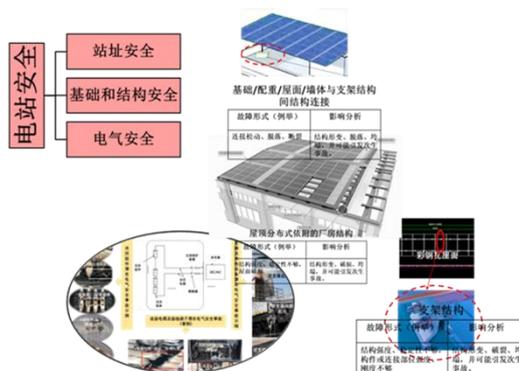
图0-3. 消纳和送出（示例）



图0-4. 集中式地面电站可利用土地（示例）



图0-5. 质量和安全例



技术进步和创新仍是破解光伏产业发展瓶颈的钥匙

国家已明确“构建以新能源为主体的新型电力系统”的发展战略，光伏行业首先需要研究的是如何建设和管理光伏电站才能满足未来电力系统的需要。图 0-6 为根据近几年产业发展遇到的问题及技术研究方向归纳出的未来电站应有特征图示。



对照图 0-6 所示的目标要求，光伏产业还有许多工作要做，从技术角度来看，某些方面尚处于起步研究或早期发展阶段，特别是在以下方面：

1. 土地的集约和复合化利用；
2. 满足电网能量管理和调度响应需要的构网型发电系统及源网荷储一体化建设；
3. 电站数智化建设、运营及安全和可靠性管理；
4. 生态型光伏电站的建设。

过去近 20 年里，依靠科技进步和创新，光伏发电实现了平价和低价上网，成本下降支撑了产业的高速、大规模发展；当下，产业发展环境已发生深刻变化，制约产业发展的瓶颈趋于多样、纵深，深层次问题的解决更离不开产业技术进步和模式创新。

“数智可控”是实现光伏发电高质量发展的首要支撑

光伏发电除间歇、波动出力外，还具有占地广、系统形式复杂、设备量大，故障源点多、散、杂等特点，建设过程“人工监控”的建管模式，运维过程“人工为主、系统自主为辅”的运管模式，除效率低下外，电站建设和运营质量也难以得到保证。

表 0-1. 典型光伏电站运维模式解析

	普通电站	数智电站
运维任务	监盘、常规巡检、数据上报、操作、消缺、维护、检修、预防性试验、常规检测、无人机巡检、应急处置、组件清洗、场区除草、固定可调支架调整、参与“两个细则”、参与电力交易和碳交易	
运维方式	电站现场值班、运检一体	区域运维、运检分离，电站现场无人值班、少人值守
人员配置	集中式电站 12MW/人，分布式电站 8MW/人	30MW/人
运维成本	2.5 分/W	1 分/W

图 0-7 为鉴衡在某区域内，从两家运维单位运管的电站中各选取 20 座样本电站，以一年为考核期，发电量对比分析结果。图中，“年度发电量均值指数”可以综合反应电站的建设和运维质量，“月度发电量均值指数极差”主要反应电站的运维质量。总体看，两家运维单位所运管电站的“月度发电量均值指数极差”均较大且离散度较高，意味其运维质量均有较大提升空间；图 0-8 为两家运维单位运管电站故障发电量损失情况对比，图 0-9 为两家运维单位运维绩效分项指标考核结果，从图 0-7~图 0-9 中各项指标的串接、对比分析结果看，运维单位勤奋程度及发现和解决问题能力与故障发电量损失率、年度发电量高度正相关。

图0-7. 不同运维单位运维电站发电指标对比

注1: A、B两家单位在同地区运维的可比类型电站中各选择20座样本电站进行对比分析。
 注2: 年度均值指数=某座电站年实际利用小时数/40座样本电站同期年利用小时数均值;
 月度均值指数极差=电站月度均值指数最大值-电站月度均值指数最小值。

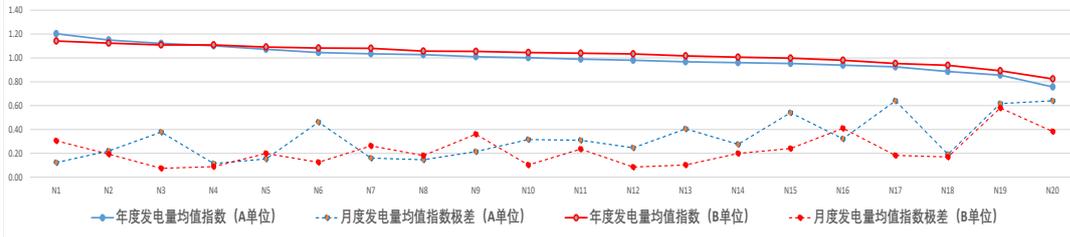


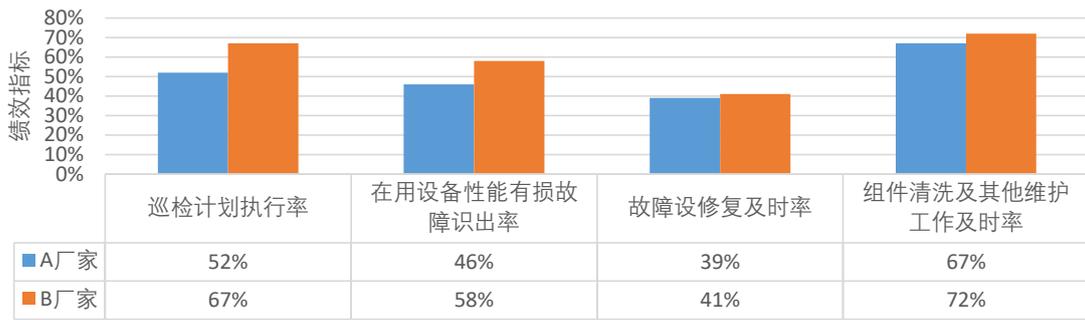
图0-8. 故障发电量损失率对比

注1: A、B两家单位在同地区运维的可比类型电站中各选择20座样本电站进行对比分析。
 注2: “显性故障发电量损失”指纳入电站统计范围的发电量损失; “隐性故障发电量损失”指未纳入统计范围, 由于设备或运维缺陷导致、高出正常损失水平的部分。



图0-9. 运维绩效分项指标对比

注: A、B两家单位在同地区运维的可比类型电站中各选择20座样本电站进行对比分析。



透过前述示例, 可以体会到以“人工和经验”为主的电站运检模式除成本较高外, 也难以实现运维的预期效果, 以数据为核心, 以通讯网络、数据处理、智能诊断等技术为支撑, 实现数字化、智能化转型为光伏产业的不二选择。

一. 光伏电站数智运维技术现状与展望

1.1 技术发展现状

近些年，产业加大了光伏电站运维技术的研发力度，技术叠代速度在加快，但远不能满足产业发展的需要，基于表 1-2 中的阶段划分及判定标准，粗略判断，数智运维总体水平仍处在初级发展阶段。

表 1-2.数智化运维技术等级划分

运维核心功能	数智化阶段/功能等级划分		
	初级阶段（一代）	中级阶段（二代）	未来
监测和感知	具备 GB/T31366、DL/T5003 及其他适用标准所要求内容的自动监测功能。主要监测内容包括：组串及以上系统级别电学参数（含模拟量和状态量）；逆变器、变压器等设备关键器件和位置的热学参数；站场级气象参数；消防和安保的音视频信号；采用线上和人工巡检相结合的方式进行检测。	一代技术基础上， 在线热学参数的监测范围扩展至关键电气连接部位； 对特定区域和类型的电站，根据需要进行结构和地质方面的自动监测； 采用无人机或机器人进行联合巡检。	具备表 1-1 所述的全部功能
诊断与决策	具备 GB50797、GB/T 19964、GB/T 29319、NB/T32004 及其他适用标准所要求、基于固定/设定阈值的自主诊断和控制功能；主要采用人工和离线检测为主的故障诊断方式；光伏区采用人工干预的控制方式。	依靠系统自带、具备自适应、自学习功能模型或平台技术， 对低效或存在故障的单元进行在线或模型诊断； 对系统内常见的电气安全故障进行自主闭环管理。	
控制与响应			

检修和维护 设备检修和维护人工操作 实现组件的自动清洗。
护 为主。

对照未来数智化运维应有的状态或特征，目前统称为“智能”或“智慧”运维的系统，形象地说，尚处在“眼不明、耳不聪、手脑待发育”的阶段。

(1) 总体来看，目前的电站监测系统断点、盲点（线）还较多，例如：

- 判断组件质量状况、环境影响及长期可靠性所需数据信息还主要靠离线检测获取；
- 判断系统结构性能及长期可靠性所需的监测信息基本上处于盲区；
- 故障诊断或事故调查所需的数据信息大多依靠进一步检测或人为经验推演。

下一步，宜借助声、光、电、热、形等方面信号的监测和感知技术，围绕精准、高效地实现电站及其分子系统和设备运行状况、故障和长期可靠性诊断、光功率和电量高精度预报或预测及其他方面的信息需求，开展电站监测系统及相关技术的扩展和深化研究。

(2) 近几年，系统及其设备的故障检测和诊断是电站技术开发重点方向之一，包括：

- 系统性能在线检测和诊断技术，例如组串 IV 在线检测技术；
- 电气安全故障在线检测和控制技术，例如绝缘失效、拉弧、过流等电气故障的检测和诊断；
- 设备质量自动检测技术，例如无人机 IR 和 EL 在线检测和机器人自动巡检技术。

总体看，电站现有在线、自动检测和故障诊断系统还处在初级阶段，存在的突出问题有：

- 检测能力不足，见 1；
- 数据和经验积累不充分，对事故或故障致因及关联关系的理论研究不深入，故障诊断模型自适应、自学习能力不够；
- 数据间的系统串接不够。

故障诊断是数智化运维系统建设的重中之重，下一步，宜按照“故障/事故—

“一源点—一致因素”三位一体的研究和开发模式，以全系统、全性能在线或自动诊断为目标，以故障监测和诊断模型或平台技术开发为中心，以源点数据信息的获取为重点，全方位地开展故障诊断技术的研发工作。

(3) 已投运的光伏发电系大多按现行标准要求配置了自动化的运行控制和故障响应设备，主要包括 GB/T 19964 及其他涉网标准要求的控制设备，系统级继电保护和故障响应设备，设备级运行控制和故障响应设备。现有控制系统存在响应速度和精度不够、粗放、闭环和趋优控制能力不足等方面的问题。下一步，宜依托现代数字和电子技术，深度开发可与其他环节闭环、响应速度和控制精度能够充分满足新型电力系统和故障处置要求的控制系统。

(4) 自动维护和检修方面，近些年，行业将技术开发的重点放在组件自动清洗方面，相关技术也已得到了较大范围应用。但是，总体看，光伏发电检修和维护方面的自动化程度还较低，远不能满足电站运检需要，下一步，宜借用无人机、机器人、机械手及其数智化设备和技术，开发出适用光伏特点、可以实现全方位人工替代的运检设备和系统。

1.2 愿景和目标

长远看，光伏电站建设和运营阶段均需实现数智化转型，图 1-1 为光伏发电数智化建设和运维愿景图示。

图1-1. 光伏发电数智化愿景图示



围绕图 1-1 描绘的发展愿景，表 1-1 给出了未来电站的运维需求及数智化运维系统的建设目标，图 1-2 给出了数智化运维信息管理的网架结构，图 1-3 给出了数智化运维的管控流程（示例）。

表 1-1. 数智化运维概念设计

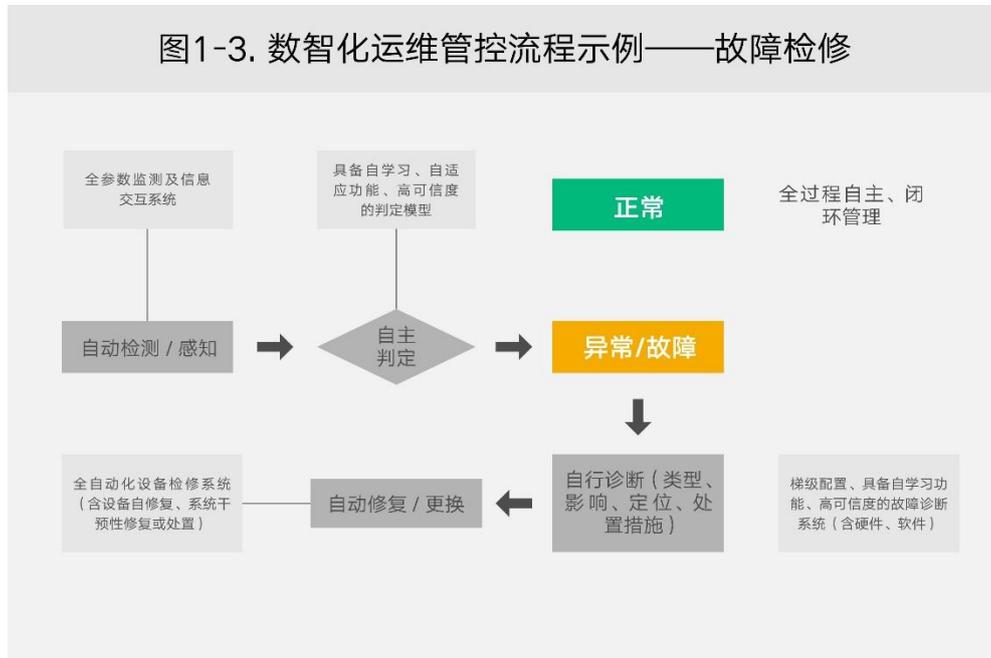
运维需求		全数智化运维系统建设目标指引
厂站	系统发电效率、安全状况、运行环境监测	<p>监测：1) 对发电系统及其设备参数进行全方位、高精度、自主监测或感知。适用时，包括：电学、热学、声学、光学、力学、气象学、结构、地质、化学等方面的参数，含正常运行状态，故障和事故状态；2) 复合应用时，满足其他生态环境及其他方面自主监测需求；3) 检修和维护时，对设备状态、人员行为、作业质量进行实时监控和在线管理。</p> <p>诊断和响应：基于获取的数据信息，以及系统或设备配置的诊断模型、自学习功能、控制设备，能够对系统及其设备运行状况做出准确判断。发现故障时，特别是可能诱发安全事故的故障，可以自行诊断并自主响应，包括故障检测、定位、确认、分断、隔离、预警及其他动作措施。</p>
	系统和设备故障检修/事故处理	
	调度响应和优化控制	
	系统和设备维护/更新	
	安全生产和环境管理	

	<p>运行控制：基于运行监测结果及其他信息、各方面指令、优化控制模型和自学习功能，自主趋优控制；针对异常天气及其他紧急情况，能够自主进行免灾管理。</p> <p>预报、分析和预测：1) 基于各方面的数据信息，能够对系统及其设备发电性能、安全状况、结构质量、地质条件进行准确分析和预测；2) 基于气象条件及系统运行状况的监测结果、系统模型（含自学习功能），能够高精度地进行光功率预报。</p> <p>维护、检修、应急：基于监测、分析和诊断结果，利用系统配置的自动化设备，系统自主进行维护、检修和应急管理。</p> <p>二次系统可信性管理：对系统本身的可信性进行自主管理。</p>
<p>复合化应用时，其他业态管理</p>	
<p>电网</p> <p>电能质量和供电安全保障</p> <hr/> <p>电网侧调度</p> <hr/> <p>厂站端调度</p> <hr/> <p>辅助服务</p>	<p>1) 自动监测并网点电能质量、电网波动情况并接收电网调度指令，按需求配置自动化设备。可根据监测结果、电网调度指令及电力辅助服务需要，自主响应和调控，全方位地满足安全、可靠、可控的供电需求；</p> <p>2) 根据电网支撑和调节需要，对站内设备群调、群控，自主寻优。</p>
<p>区域（含用电负荷侧）</p> <p>集群式能量管理（含同类型、不同类型电源和储能）</p> <hr/> <p>源、网、荷一体化管理</p>	<p>1) 即时监测集群内电源的出力情况和特性，以及受电端用电或耦合负荷的用电情况和电能质量，对整个网络群调、群控，趋优管理；</p> <p>2) 根据气象信息、集群内电源和负荷的运行状况、其他信息，精准预测供用电波动及平衡情况，自主决策和调控。</p>
<p>业主单位（含区控、总部级）</p> <p>辅助决策</p>	<p>自动上传和生成所需的各类数据信息、报表。</p>
<p>其他</p> <p>电量交易管理</p> <hr/> <p>碳资产管理</p>	

图1-2. 全方位数智化运维信息管理网架结构图示



图1-3. 数智化运维管控流程示例——故障检修



二. “阳光智维”新一代数智运维技术特点和创新点

2.1 技术特点

2.1.1 多源融合，全维挖掘故障本质特征

随着智能运维系统的不断发展，仅依靠电站常规的设备时序数据，已越来越难以满足分析、诊断、预警系统对全面高品质数据的要求，多种数据源融合，已成为智能运维系统发展的趋势。在分析层面，全面、准确、定制化的光资源数据对系统分析的重要性不言而喻；在诊断层面，基于传统时序数据和基于图像、声音等非结构化数据的诊断方式各有所长，融合诊断已成为大势所趋；在预警层面，温度、压力、化学成分等非电气量数据往往对潜在故障反应更灵敏，在常规电气量数据之外，采集利用这些非电气量数据对于提高故障预警的敏感性、特异性意义重大。

阳光智维新一代数智运维系统除了采集原有的 SCADA 数据之外，还在设备的关键部件上安装有各种类型的传感器，弥补设备原有测点不足的问题，对没有远传功能的现场表计，则用摄像头拍摄表计，并通过表计识别算法，将拍摄到的非结构化数据转化为结构化数据，对环境、人员等不易转化为结构化数据的场景，则采用摄像头拍摄加图像识别算法直接加以应用。

多种数据融合体现在以下方面：

- (1) 非结构化数据尽量转化为结构化数据；
- (2) 不同数据源时钟同步；
- (3) 不同数据源相互校验；
- (4) 不同数据源协同应用；

数据的全面高品质体现在以下方面：

- (1) 采集的数据覆盖范围广，涵盖设备、环境、人员等场景，既有结构化数据也有非结构化数据；

(2) 采集的数据均经过数据校验算法校验，数据质量高。

2.1.2 AI 深度应用，全面赋能数智运维

集中光伏行业专家和人工智能专家的智慧，深度融合物理机理模型和人工智能模型，让最新 AI 科技赋能光伏运维，做最懂光伏运维的 AI 产品。

光伏电站作为多参数输入多参数输出的高度复杂物理系统，要实现精细化故障诊断，简单的阈值判断已不可行，人工智能模型在模拟高度复杂物理系统方面有着独特优势，同时光伏电站故障数据的稀缺性，又使得物理机理模型仍然不可或缺。物理机理模型资源消耗小，可解释性强，人工智能模型拟合能力强，深度融合物理机理模型和人工智能模型，能够集中两者的优势，在精细化故障诊断领域起到“1+1>2”的效果。

目前，AIGC 技术方兴未艾，将 AIGC 技术与行业专有知识相融合，构筑垂直行业大模型，已成为各行各业推进数智化变革的核心内容。阳光智维为破解光伏运维人员批量培养难题，基于 30GW+ 的运维实践，数十名行业专家的丰富经验，利用 AIGC 技术将专家经验固化到智能问答系统里，能够快速赋能海量的运维人员，实现运维的降本增效。

2.1.3 诊疗兼备，运行效率最优解

坚持电站系统观念，融入运维企业对电站系统的全面深入理解，始终以电站系统全局最优为目标，更贴近电站业主的运维诉求，促进运维全面提升。

区别于传统监控系统以监为主，附带少量遥控功能，阳光智维着眼于影响电站发电量的三大关键因素（环境、设备、控制策略），创新性地提出电站控制策略诊断及优化，不但全面监视，更智能控制，在优秀控制算法的加持下，可以发挥环境和设备的最大潜力，达到系统全局最优。

在传统诊断系统有诊无疗、重诊轻疗的背景下，运维人员在获取诊断结果后仍面临着落地执行层面费脑、费时、费力的问题，阳光智维率先洞察业主对于诊

断结果落地执行的强烈需求，深入研究落地执行支撑技术，拓展智能运维系统的应用边界，真正帮助运维人员解决落地执行层面遇到的问题，打通智能运维全链条闭环的最后一公里。

2.2 技术创新点

2.2.1 多源融合，全维挖掘故障本质特征

2.2.1.1 光资源评估系统

光资源评估系统是光伏电站规划、设计、运维和电力交易的关键工具。本系统的建设旨在通过集成多源数据融合、先进的 AI 算法和大数据分析，实现对光资源的精确评估和预测，从而优化光伏电站的选址、设计和运维管理。关键目标包括如下：

(1) 通过高精度的光资源评估系统，降本增效，即减少对地面辐照仪的依赖，降低建设和维护成本，提供更加精确和可靠的气象、辐照数据，支撑光伏电站的规划、设计和运维。

(2) 通过核心设备监测与诊断功能，实时监测辐照表等关键设备的状态，自动诊断并提醒运维人员处理数据异常，提高数据的准确性和电站的运维效率。

(3) 利用未来光资源预测功能，为电力交易提供准确的发电量预估，帮助交易者制定更合理的交易策略，降低市场风险，提高交易效率和盈利能力。

本节详细介绍了系统的全貌、关键技术、应用目标和核心技术指标，以期为阳光智维数智运维业务提供科学、准确的光资源评估。

2.2.1.1.1 系统全貌

本系统具有以下功能：

(1) GIS 电站地图

在“电站地图”页面，如图 2-21，可以通过可交互的 GIS 地图查看运维电站的地理分布、搜索电站、查看电站数量和电站概要信息以及新建电站。

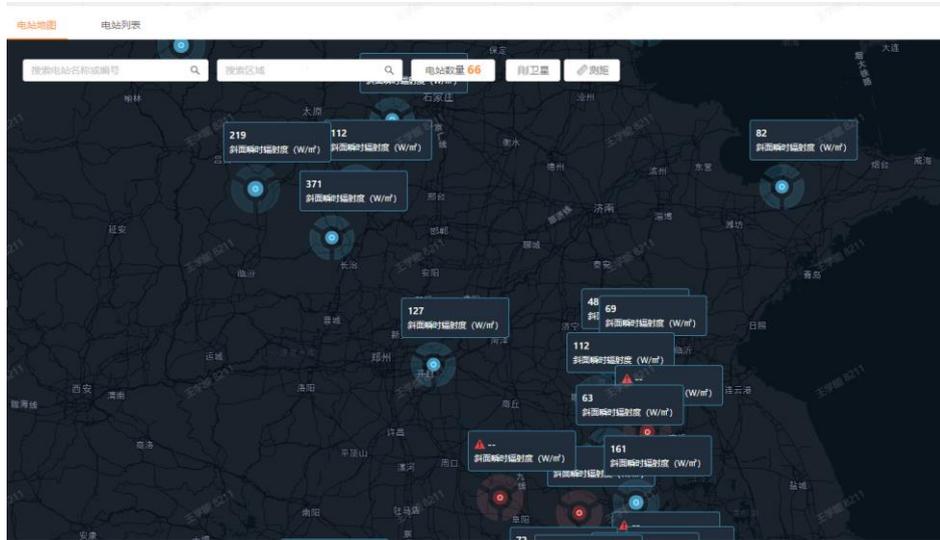


图 2-21 GIS 电站地图

(2) 区域光资源历史评估（电站选址）

利用多源数据包括气象卫星数据、地面气象台站观测数据和地面电站辐射测量数据，通过大数据及 AI 算法提供我国 2022 年至今所有区域的年度太阳能资源数据，数据包含：水平面总辐射量(GHI)，倾角总辐射量(GTI)、气象数据和地貌等数据，时空分辨率为 1 小时、25 公里。此功能可直观的反映出我国不同地区的太阳能资源，帮助电站选址。表 1 列出了多源数据的变量名、数据含义和来源，系统利用大数据技术对数据源进行缺失、异常处理，严格把控数据质量。

表 1 多源数据变量

变量名	含义	来源
SSR	地表短波辐射	气象卫星 Himawari 8、FY4A
CLT	云类型	气象卫星 Himawari 8、FY4A
CFR	云覆盖率	气象卫星 FY4A

COT	云光学厚度	气象卫星 Himawari 8、FY4A
CTH	云顶高度	气象卫星 Himawari 8、FY4A
AOT	气溶胶光学厚度	气象卫星 Himawari 8、FY4A
AE	Angstrom 指数	气象卫星 Himawari 8、FY4A
SOA	太阳高度角	地面气象台
ASL	海拔	地面气象台
TEMP	气温	地面气象台
RH	相对湿度	地面气象台
PRCP	降雨量	地面气象台
WS	风速	地面气象台
PRS	气压	地面气象台
GHI1	地面气象台站的地表水平面总辐射量数据	地面气象台
GHI2	我司自建电站的地表水平面总辐射量数据	我司自建电站
GTI2	我司自建电站的倾斜表面总辐射量数据	我司自建电站

(3) 全国任一点辐照量精细评估 (PR、发电量测算)

利用多源数据包括气象卫星数据、地面气象台站观测数据和地面电站辐射测量数据，通过大数据及 AI 算法得到任一点实时及历史的精确辐照数据，时空分辨率为 10 分钟、5 公里，数据包含：GHI、GTI、云参数、气溶胶参数和基本地面气象数据。此功能可对电站进行如下工作：

- 已建成电站系统效率评估

- 电站的发电量测算
- 未来光资源预测

依据修正后的数值天气预报实现对我国任一区域未来光资源的预测，辐照预测分为超短期(4h)、短期(72h)和中长期(168h)，分辨率为 1h。根据光资源实时评估和预测优化电力交易决策，可以精确地预估光伏发电量从而制定更为合理的交易策略和报价，如图 2-22 所示，以期减少市场风险，提高交易效率和盈利能力，精准预测还可以帮助电力供应商为客户提供更具吸引力的绿色能源套餐，同时鼓励用户根据预测的可再生能源可用性调整用电行为，促进需求侧管理。

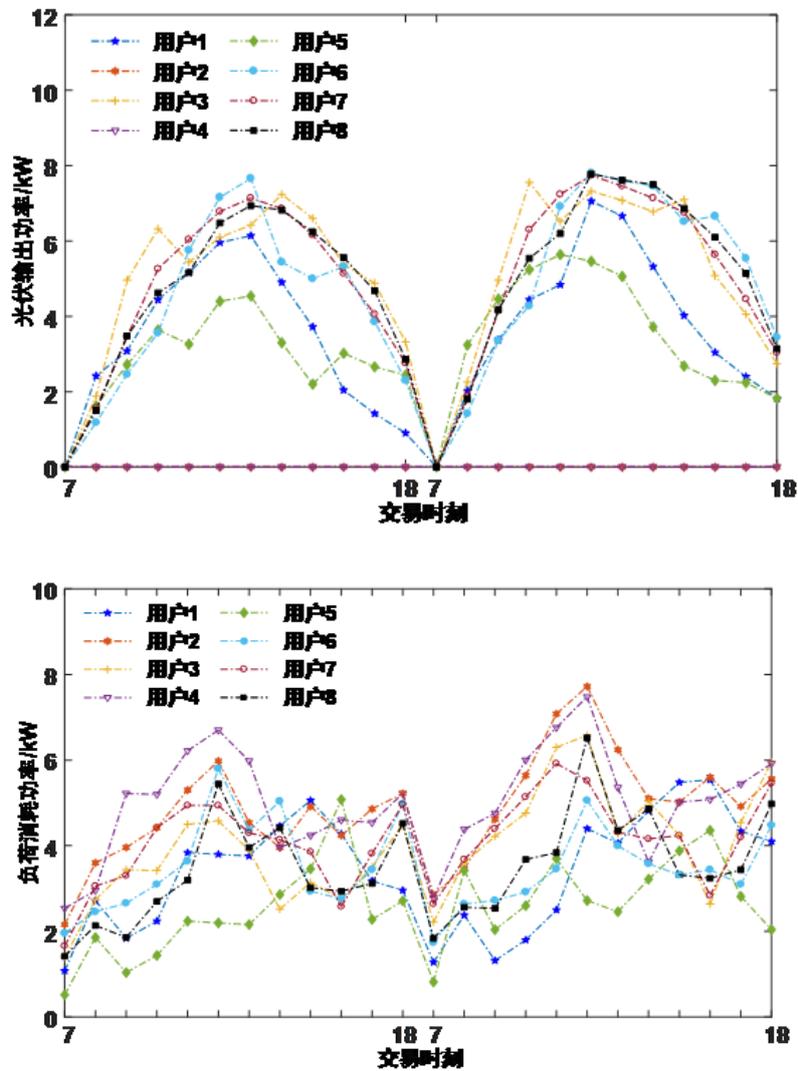
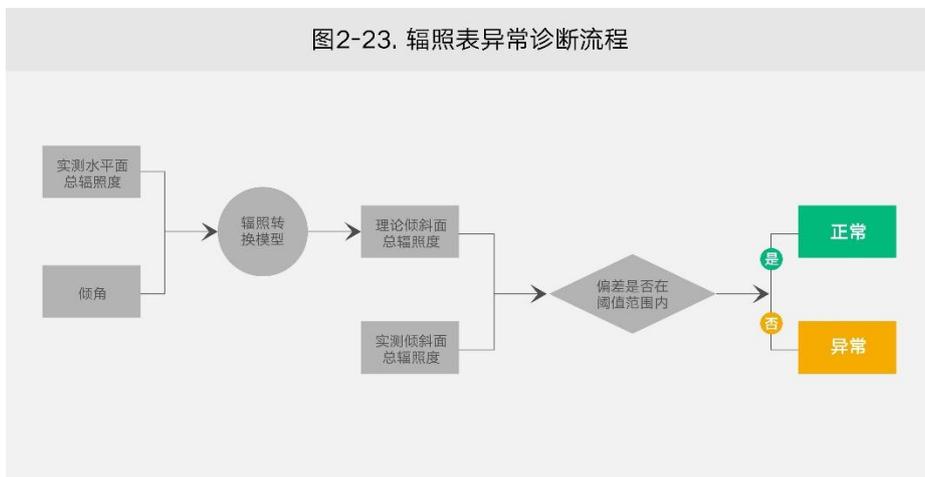


图 2-22 交易时刻光功率预测和各用户净功率预测

- 核心设备监测与诊断

实时监测如辐照表等核心设备状态，自动诊断数据异常。具体流程如图 2-23。辐照表是光伏电站监测太阳辐照度的重要核心设备，也是对全天空成像仪和气象卫星数据进行修正必不可少的工具，和其他设备一样，辐照表使用过程中也会面临着各种问题，由于辐照表自身不具备诊断功能，导致辐照表出现问题不易被发现，异常的辐照数据被用于光伏电站发电量测算、系统效率分析等场景，导致错误的决策。阳光智维首创辐照表异常诊断，通过水平面倾斜面总辐照度转换模型，识别数据存在异常（如辐照表被遮挡、水平表和倾斜表数据接反、倾斜表朝向偏移、数据漂移等）的辐照表，提醒运维人员及时进行针对性维护，提高辐照数据可用率。

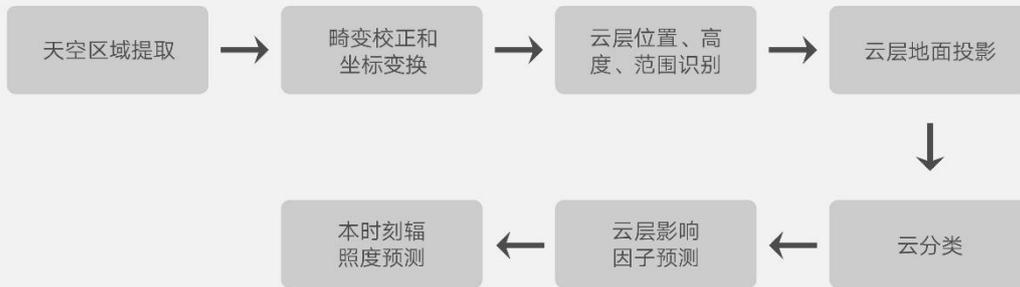


2.2.1.1.2 关键技术

(1) 基于全天空成像仪的光资源评估技术

通过全天空成像仪拍摄电站上空云层分布情况，对拍摄的图像进行天空区域提取、图像畸变校正和坐标变换，识别天空中的云层分布情况，根据云层位置、高度、范围和太阳方位计算得到云层影响范围，根据云分类和受云层影响地面实测辐照数据进行建模，得到不同类型的云对辐照度的影响因子，实现公里级辐照度仿真，如图 2-24。

图2-24. 基于全天空成像仪的光资源评估技术路线



(2) 基于多源数据的有量测的光资源评估

有量测区域，利用空间距离划分区域，对气象卫星、地面气象站数据以及地面高精度辐照表数据进行建模；无量测区域基于模型反馈权重的多维特征聚类以及静动态空间一致性区域模型迁移推导。可得到精度可以媲美高精度辐照表的网格化辐照数据，可以实现任意地点任意倾角无表获取高精度辐照数据, 如图 2-25、2-26。

图2-25基于多源数据的有量测的光资源评估技术路线



图2-25基于多源数据的有量测的光资源评估技术路线

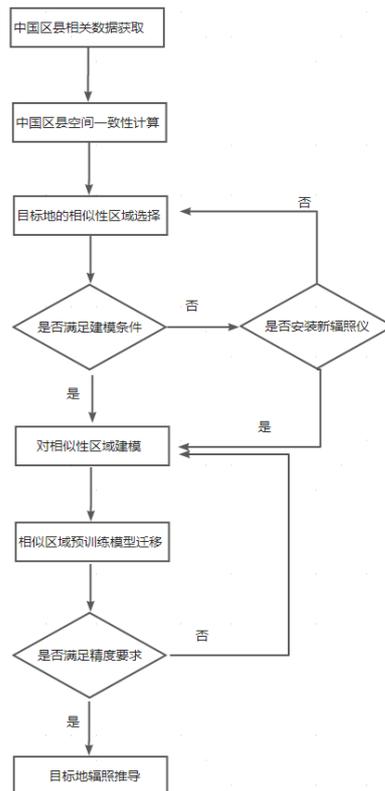
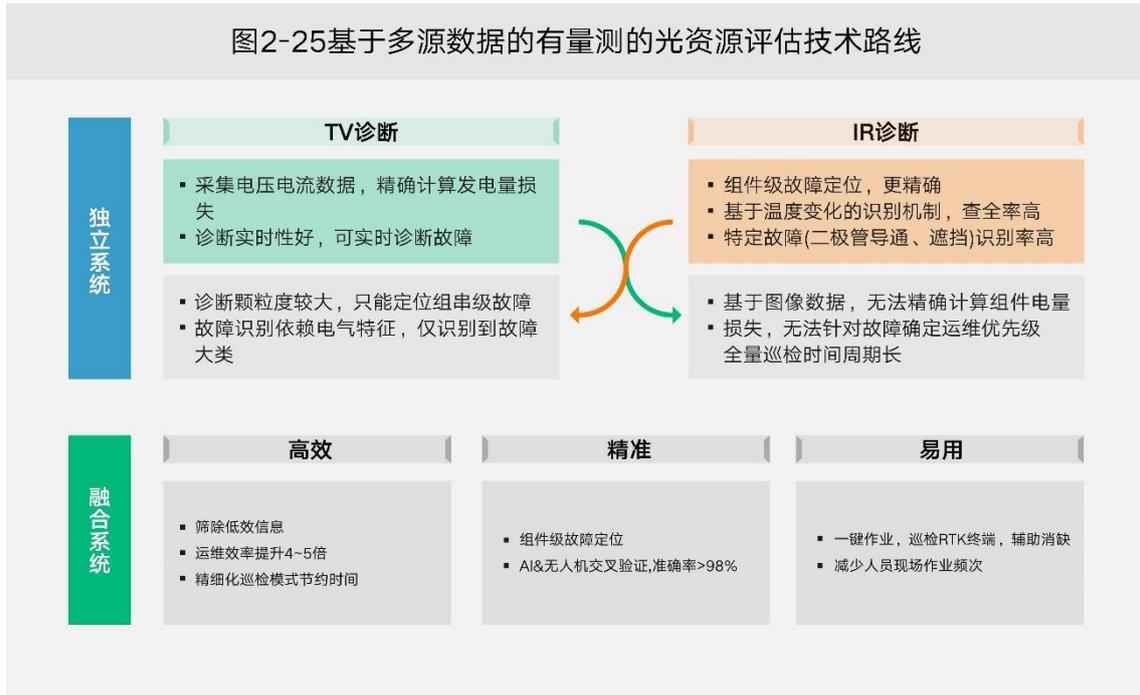


图 2-26 基于静态空间一致性无量测光资源评估技术路线

其中区域划分基于模型反馈权重的多维特征聚类，将区域进行相似性划分，并以中心点所在数据计算区域空间代表一致性，映射到地图网格内，如图 2-27。空间一致性的计算，对于待推导经纬度所在区域，利用皮尔逊相关挑选静态相似

区域，对于静态相似区域进行有量测辐照建模，通过调整参数或增加辐照数据量，直到模型精度满足要求。对于满足精度要求的模型，迁移至待推导区域，进行推导。

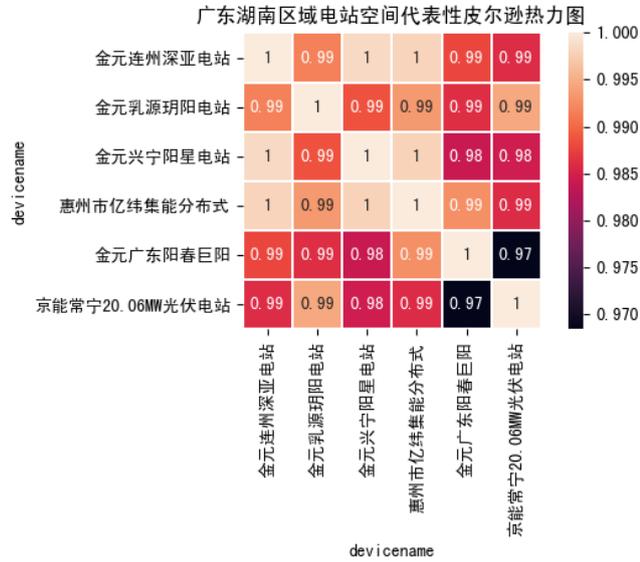


图 2-27 部分区域电站空间一致性热力图

模型采用基于双层 GRU+Attention 深度学习算法进行建模推导。

BiGRU-Attention 模型共分为三部分：输入层、隐含层和输出层。其中，隐含层由 BiGRU 层、Attention 层和 Dense 层（全连接层）三层构成。BiGRU-Attention 模型结构如图 2-20 所示，其中双层 GRU 模型捕捉时间序列的长期依赖关系，Attention 机制提升模型对重要特征的关注度。

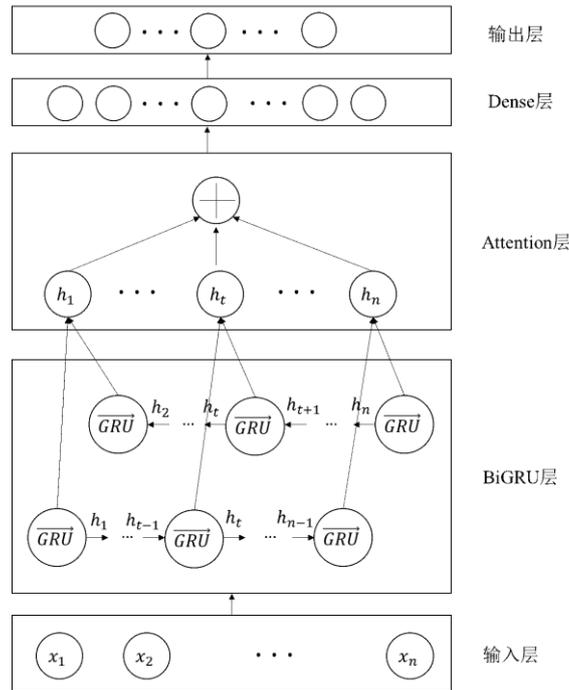


图 2-28 BiGRU+Attention 模型结构

(3) PR 修正算法

通过辐照与发电水平之间关系，实现对光伏电站 PR 的异常检测与修正。主要包括：

- 1) 多源数据融合
- 2) 异常数据剔除
- 3) 归一化处理与模型构建：
- 4) PR 计算与分层：
- 5) 异常检测与修正逻辑：

- 使用三倍标准差作为阈值识别异常辐照，仅修正辐照，不直接调整发电量。
- 根据天气状况和 PR 值的大小，决定是修正辐照还是标记发电量异常，确保数据的一致性和准确性。
- 历史数据辅助修正：对于需要修正的辐照值，利用电站历史数据中相近发电水平的系统效率均值进行辅助修正，增强修正的合理性。

2.2.1.1.3 应用目标

应用目标	场景分析	状态
辐照评估	推导历史及实时太阳能资源	现阶段
发电量测算	预测光伏电站的发电量，为数智电站的运营管控和电力市场交易提供重要支撑	现阶段
PR 测算	通过评估光伏电站的 PR 来反映电站的运行水平	现阶段
设备监测与诊断	监测辐照表状态 灰尘遮蔽损失统计	未来
选址设计	确定光伏电站的最佳位置及组件排列方式	未来

2.2.1.1.4 核心技术指标

技术	指标
GHI 辐照评估	±5%
GTI 辐照评估	±5%
置信区间	90%

2.2.1.2 TV/IR 融合诊断

光伏电站依靠人工巡检排查故障效率低，难查全，存在安全隐患。利用 AI 算法实现光伏电站的故障诊断识别便应运而生，其中 TV(时序数据诊断)利用采集到的高精度电流和电压曲线信号，通过大数据学习和 AI 识别算法建立了丰富的故障模型库，可快速识别光伏组串故障，让电站运维变得更高效、更便捷、更智能和更经济。IR(红外热成像)诊断利用算法对无人机采集到的红外及高清可见光图像进行识别，从而判断出热斑、遮挡、二极管等故障类型。TV 检测快，且能呈现发电量的损失；IR 利用红外结合可见光图片，检测更精细。两套系统各有优势，但是多套运维系统独立运行给场站值班人员的使用也带来了一定的困扰。什么时候要用哪套系统？如何运维才是最高效的？

我司设计的 TV 与 IR 融合诊断的解决方案，有效解决电站运维难题。该解决方案可以一键启动 TV 与 IR 两套诊断系统，且提供两种巡检模式：极速模式和精细模式。在极速模式下，先由 TV 对光伏电站全面检测，再针对故障组串进行 IR 诊断，节约无人机飞行耗电，更精准，能充分发挥 TV 快，IR 细的优势；在精细模式下，TV 与 IR 同时全量检测，对组件的内外进行全面细致的诊断，由表及里地发现所有问题。

2.2.1.2.1 系统全貌

本系统具有以下功能：

(1) TV 诊断

TV 诊断主要功能包含组串低效诊断、汇流箱故障诊断、逆变器低效诊断、通讯故障诊断等功能。TV 诊断通过实时电压电流等数据，实现对光伏电站中组串、汇流箱、逆变器等设备进行设备停机、通讯中断及设备低效等类型故障诊断识别。下表为 TV 诊断覆盖设备类型及故障类型。

设备类型	故障类型	故障原因
逆变器	设备停机	绝缘阻抗异常
		孤岛保护

		交流过压
		交流欠压
		漏电流保护
	
	通讯中断	网络中断或设备运行异常
		MPPT 异常
	设备低效	温度异常
		异常降额
汇流箱	设备停机	电缆短路或断路
	通讯中断	网络中断或设备运行异常
	支路零电流	保险丝熔断或 MC4 插头连接问题等
		草木遮挡
		固定遮挡
组串	组件低效	旁路二极管短路
		异物遮挡或外力破坏
		积雪覆盖
		未知原因

(2) IR 诊断

IR 诊断主要功能包含组串分割、组件缺陷检测和组件缺陷定位。组串或组件缺陷一般包括外部缺陷如遮挡、碎裂、污损等，内部缺陷如二极管故障等，IR 诊断系统可检测识别的缺陷类型如表 2-1 所示。针对不同种类型缺陷，可通过巡检无人机搭载不同类型光谱成像设备进行缺陷图片/视频数据的采集，常见有可见光成像设备、红外成像设备。

表 2-1 光伏组件缺陷类别

故障名称	形成原因	故障表现
热斑	部分电池片受到遮挡或自身原因导致电流降低，成为负载消耗能量在组件内形成局部过热现象	组件红外光下呈现亮点或斑状热斑
组件表面污秽	组件边缘积灰、鸟粪、铁锈、附着物等组件表面污秽现象，易导致发电效率降低以及热斑等故障形成	可见光下可见灰尘、底部积灰、铁锈等； 红外光下可见单个或多个斑状、条状、块状热斑
组件遮挡	组件周边树木、杂草遮挡，建筑、电线杆等固定遮挡以及组串缝隙中杂草遮挡等，易形成热斑	可见光下可见遮挡；红外光下斑状热斑或条形热斑
组件碎裂	组件由于外力作用或玻璃自爆，组件表面玻璃破碎	可见光下可见碎裂；红外光下热斑亮点或亮斑
接线盒故障	组件质量或散热不当导致组件二极管击穿或短路现象，严重导致整个接线盒烧毁	红外光下条状区域亮斑
组串开路	熔丝熔断，电缆断路，MC4 端子烧坏或松脱等因素	红外光下组串整体呈现不发电或整体热斑
组串短路	人为接线错误，电缆绝缘损坏、直流线路老化等因素导致	红外光下组串不规则散状热斑
组件缺失	拆卸、环境外力导致组件缺失、偏移	可见光及红外下组件缺漏

红外与可见光下组件缺陷呈现特征如图 2-13，热斑、遮挡、缺失、开路、短路、碎裂等组件或组串缺陷，缺陷特征表象亦会根据电站类型呈现多样化特征表现。

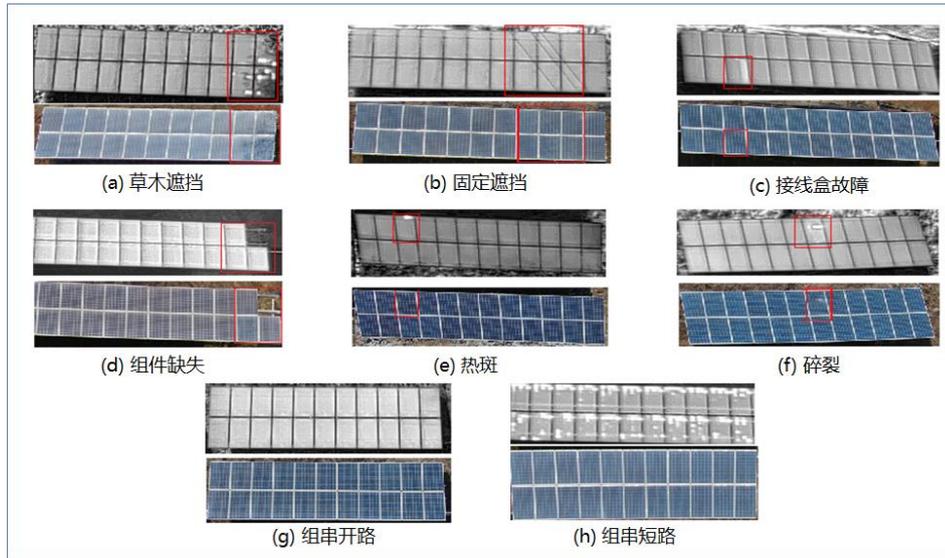


图 2-12 光伏组件缺陷视觉特征

(3) TV 诊断与 IR 诊断融合诊断

当前 IR 诊断系统主要是基于全部组件全量巡检，且巡检结果基于 IR 图片，无法实现损失量化，无法评估运维优先级。TV 诊断系统通过电压电流数据，实现缺陷组串的初筛，利用 IR 精准飞检/诊断/定位，同时结合电压电流发电数据获取当前组串的发电功率与标准组串发电功率进行对比分析可以精准评估发电量损失比，实现多系统数智融合。

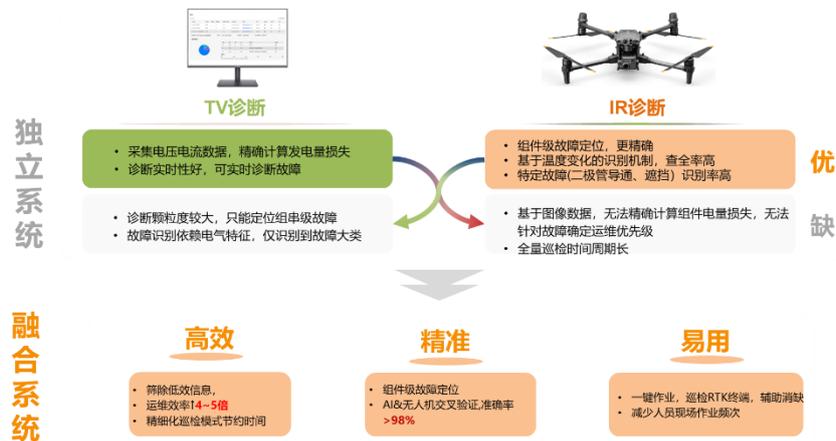


图 2-11 TV 诊断与 IR 诊断融合

TV 诊断与 IR 诊断的整体流程如图 2-12 所示，该系统支持 TV 诊断、IR 诊断以及 TV 诊断与 IR 诊断的融合诊断，完成诊断后可以生成诊断报告并在页面展示诊断结果。

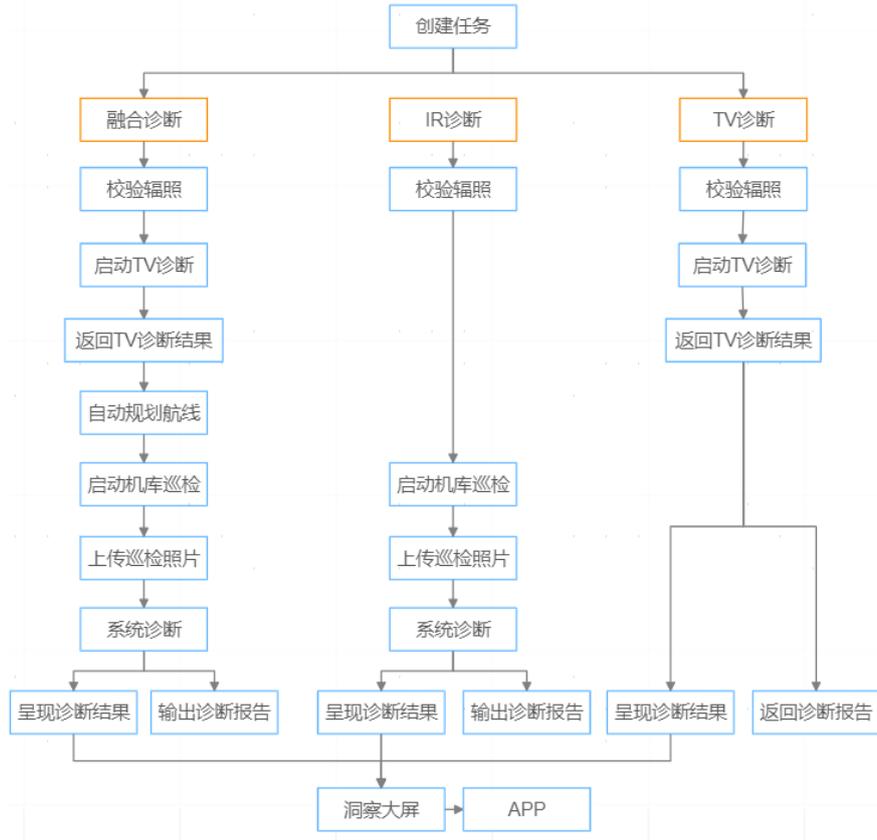


图 2-12 TV 诊断与 IR 诊断流程图

2.2.1.2.2 关键技术

(1) 基于电站画像和时空特性的组串草木遮挡判断

草木遮挡是导致组件低效的常见原因之一，基于电站画像的草木遮挡低效诊断算法，该算法基于不同草木特性、气候特征、区域位置、遮挡数据等时空参量，应用 AI 算法，包括电站画像评估法、近邻网络数据重构法、朝向自寻聚类法、自学习正常/异常分类法等。基于多维度数据对电站进行精细化画像评估，面向画像评估对电站组串进行朝向自寻聚类，根据空间朝向聚类结果进行自学习正常/异常分类法低效诊断，基于低效诊断结果对草木遮挡特征进行时间趋势分解建立诊断模型。

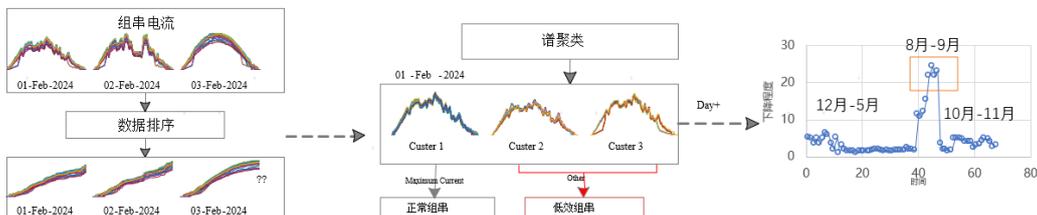


图 2-14 基于电站画像和时空特性的组串草木遮挡诊断

(2) 基于核密度估计的遮挡判断算法

组串低效定位需要剔除电站环境变化、气象条件波动等影响，该算法关于组串电流映射的固有特性提出了检测和定量评估阴影故障的方法。利用多个循环的 5 阶多项式拟合方法，引入理想晴朗天气中的当前峰值，修正当前发电数据，为了区分故障和性能下降由天气条件和环境变化引起的异常，将每个组串的标准化数据月份用于映射，通过概率计算自身固有的工作特性密度，基于固有值变化率的异常值检测工作曲线，不受现场设备、场景、天气等变化的限制，具有较高的精度和对阴影的强判别能力各类场景低效组串的诊断，可以减少运维周期和成本，进一步提升适用性。

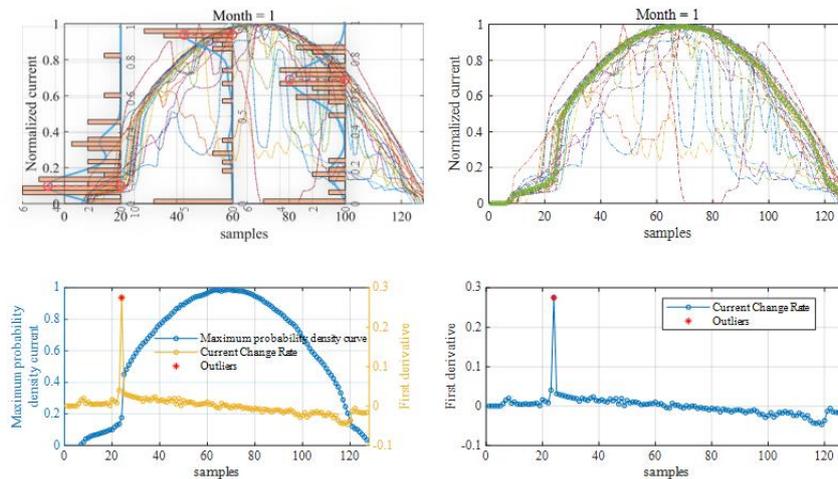


图 2-15 基于核密度估计的遮挡诊断示意图

(3) 组串分割技术

光伏板组串分割是通过语义分割算法对已经通过无人机建模得到的 tif 图进行切片推理，得到光伏板组串的前景区域，使用轮廓检测方法提取在 tif 图中光伏板组串的位置信息，并结合电站 tif 图的经纬度坐标得到光伏板组串的经纬度位置坐标，并以组串相对位置作为标签进行输出，从而实现组串数量的统计以及巡检后缺陷组串的进行显示。

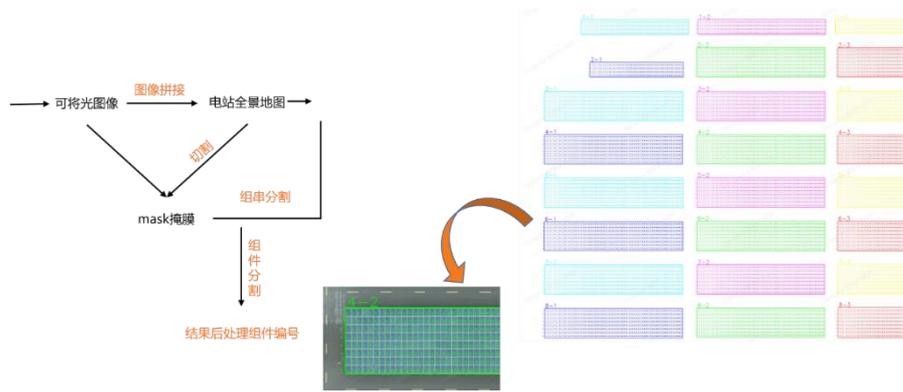
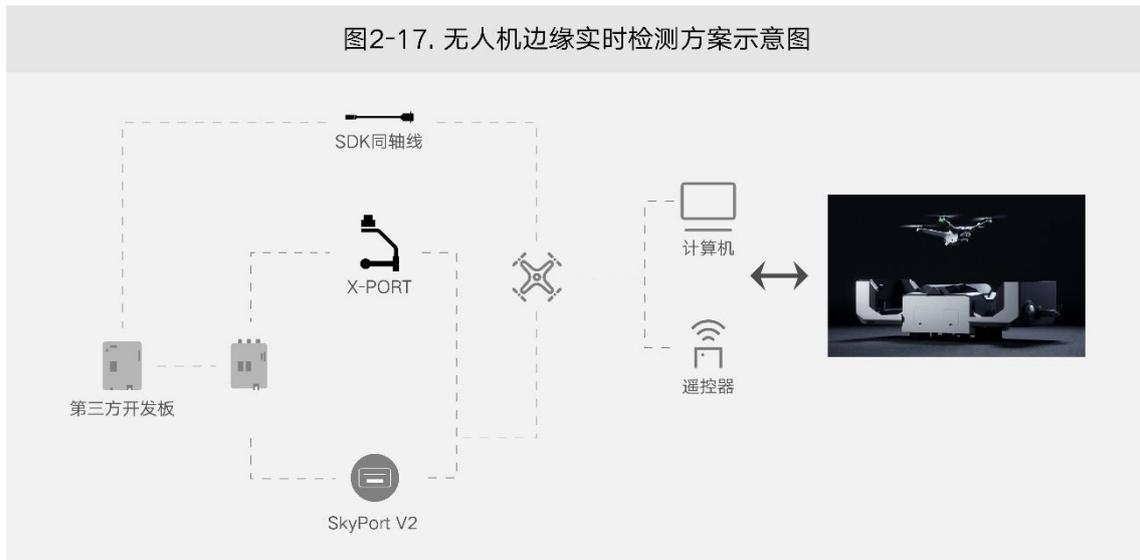


图 2-16 组串分割流程

(4) 边缘实时检测技术

组件缺陷检测采用机器视觉目标检测技术，结合边缘计算技术可以在无人机端侧实时检测组串缺陷，并进行缺陷原因分析及结果上传。为了实现对光伏电站组件进行实时缺陷检测识别，将缺陷检测识别部署到边缘计算设备中，然后将边缘计算设备搭载到无人机上，实时读取无人机相机拍摄的图片进行实时缺陷检测识别。

图2-17. 无人机边缘实时检测方案示意图



边缘侧与云端进行边缘协同，云端接收采集数据进行算法模型训练、量化，下发规则模型至边缘侧进行实时检测推理，推理结果回传至云端进行进一步分析处理。

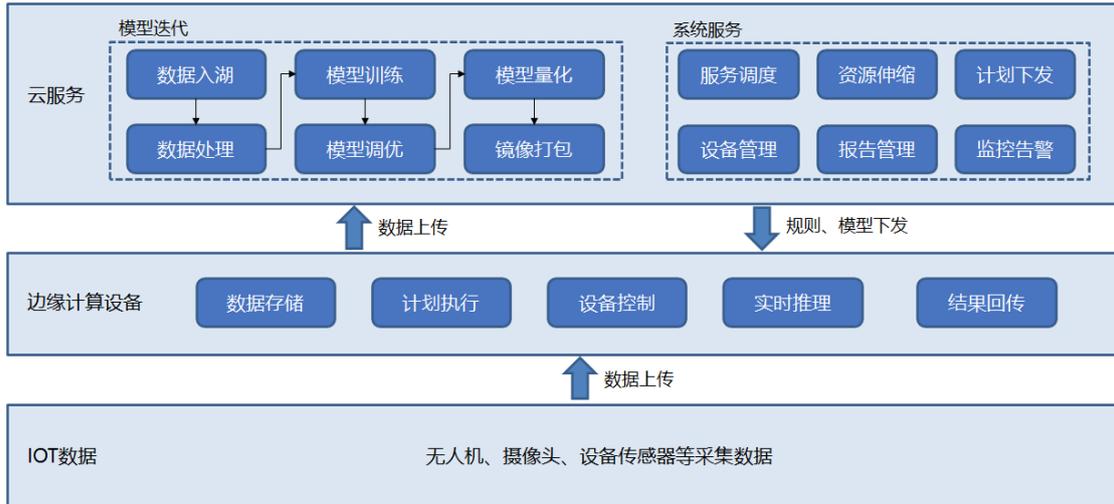


图 2-18 无人机云边协同检测示意图

(5) 组件缺陷定位技术

对整个光伏电站进行高精度航测，生成带差分 GPS 信息的电子地图后，采用三维重建方法和多模态信息融合定位策略，可生成 SFM 重建的电站红外图像点云。基于组串、组件和三维点云进行组件缺陷多维度自修正的缺陷点定位，从而进行直接的地理位置定位，将缺陷位置在电子地图中进行标注。根据定位信息可进行导航，指引用户在现场完成缺陷定位和缺陷消除工作。

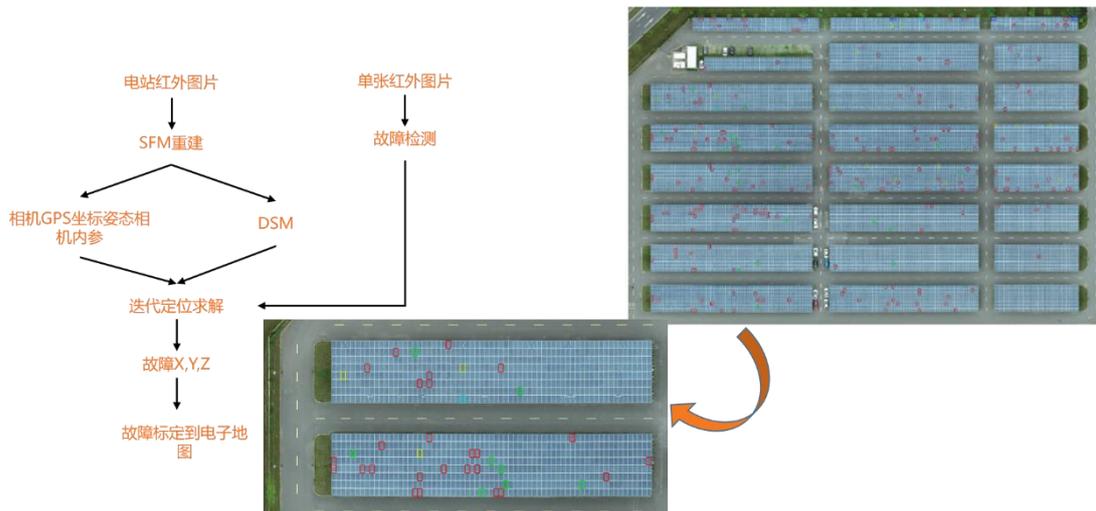


图 2-19 无人机组件缺陷定位示意图

2.2.1.2.3 应用目标

TV 诊断系统诊断出可维护的低效组串，将组串编号发送给 IR 诊断系统，IR 诊断系统通过编号获取到组串高精度地理坐标，搭载红外相机和可见光相机云台的无人机自动起飞，前往低效组串处定点复检，利用红外图片和可见光图片进行故障诊断，判定该低效组串上故障类型，并定位到故障组件。利用 TV 诊断和 IR 诊断的各自优势，实现对整个光伏电站进行由内而外的故障诊断识别。

目前已实现 TV 诊断与 IR 巡检的融合诊断识别，接下来将继续扩充融合诊断系统的应用，在解决光伏组串自动反向供电的基础上，利用搭载 EL 镜头对低效组串进行 EL 故障检测，对光伏组串进行更加全面的故障诊断识别，EL 检测可发现组件内部的故障问题，如组件隐裂、破片、黑边等。利用 TV 诊断系统、IR 诊断系统、EL 检测的联动实现对组串进行外部和内部的故障检测识别，对光伏组串进行全面的故障诊断，及时发现故障并定位根因。

应用目标	场景分析	状态
TV 诊断	实现对光伏电站中组串、汇流箱、逆变器等设备的故障诊断	现阶段
IR 诊断	实现对各种场景下光伏电站所有组件缺陷的检测识别定位	现阶段
TV 与 IR 融合诊断	实现全场景下（山地、水面、平地等）的光伏组串故障诊断识别	现阶段
多系统融合诊断	引入 EL 检测系统，对光伏组串进行更加全面的故障诊断	未来

2.2.1.2.4 核心技术指标

本系统充分利用 AI 诊断与无人机巡检系统的各自优势，可以快速准确的对光

伏组串进行故障诊断识别，可实现组串缺陷检测定位的准确率达到 98%以上。

类型	准确率	召回率
TV 诊断	>95%	>95%
IR 诊断	>98%	>96%
TV 与 IR 融合诊断	>98%	>96%

2.2.1.3 设备故障预警

光伏运维，安全是根基，设备安全又是电站安全的基础，光伏电站最常见也是最严重的事故就是火灾事故，而导致火灾事故的主要原因有两点：直流侧绝缘损坏、设备散热异常

现有的诊断系统在绝缘异常和散热异常的诊断上存在以下问题：

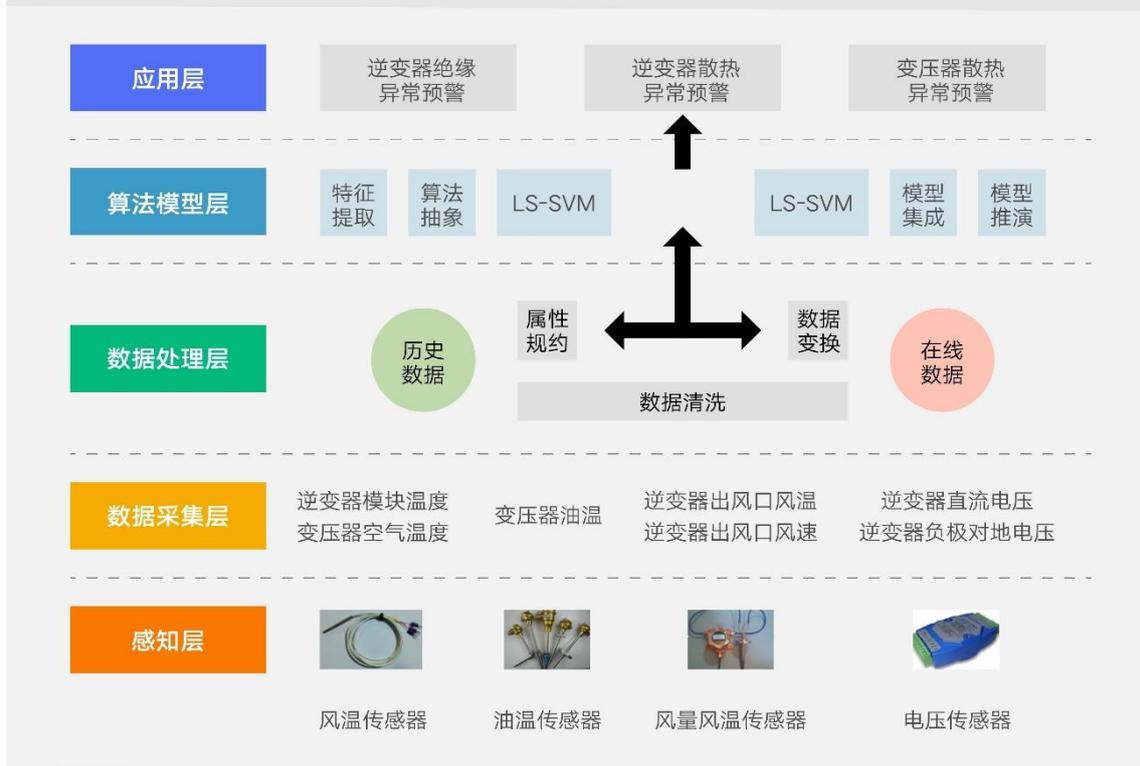
(1) 绝缘异常诊断主要依赖绝缘阻抗值，而大部分逆变器的绝缘阻抗只在逆变器并网前检测，在并网后无法做到实时诊断，尽管逆变器并网后一直在实时检测漏电流，但漏电流的大小除与绝缘阻抗有关外，还与逆变器的拓扑结构和调制算法有关，在优秀的拓扑结构和调制算法加持下，可以做到即使绝缘阻抗较低，漏电流仍然较低，实际在生产中，很多逆变器直到因为绝缘故障烧毁，漏电流保护也没有动作，因此单纯由漏电流诊断绝缘异常并不灵敏，无论是绝缘阻抗检测还是漏电流检测均无法定位到故障组串，需要人工排查；

(2) 散热异常主要是基于固定阈值诊断，灵敏度低。

2.2.1.3.1 系统全貌

基于以上问题本系统包括逆变器绝缘异常预警和设备散热异常预警诊断功能，系统层级如图所示。

图2-32设备安全预警算法图示



2.2.1.3.2 关键技术

(1) 基于模型集成的逆变器绝缘异常预警

逆变器直流侧线缆众多，特别是组串到直流汇流箱或组串式逆变器之间的直流线缆由于防护薄弱、环境恶劣、施工质量得不到保证，经常发生绝缘损坏，导致直流拉弧，极易引发火灾。

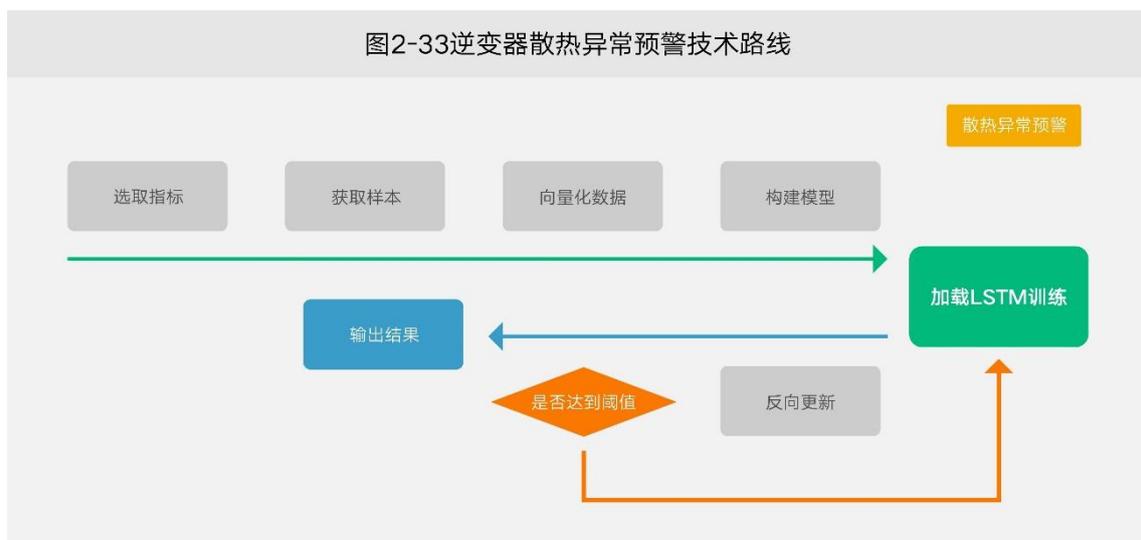
现有逆变器的绝缘阻抗诊断往往做不到实时诊断，且不够灵敏，诊断结果无法定位到组串，排查费时费力。阳光智维逆变器绝缘阻抗诊断根据逆变器是否投入防 PID 模式，采用不同的诊断逻辑，主要以逆变器直流电压和负极对地电压作为判据，因为这两个参数是实时检测的，因而采用这两个参数作为判据能够做到实时诊断，当逆变器投入防 PID 模式时，负极对地电压应维持在一个略大于零的值，如果负极对地电压出现较大波动，说明逆变器出现绝缘异常；当逆变器未投入防 PID 模式时，负极对地电压和正极对地电压应基本均衡，当正负极对地电压出现较大偏差，说明逆变器出现绝缘异常，检测到逆变器绝缘异常后，目前尚需通过人工排查故障组串，将来通过软硬件结合，自动控制汇流箱、组串式逆变器

MPPT 通断，能够定位到绝缘阻抗低的组串，大大减轻运维人员排查工作量。

(2) 基于 LSTM 逆变器散热异常诊断

逆变器由于工作在户外，极易受到外界环境的影响，异物进入风道的情况时有发生，加上风机作为逆变器中唯一的转动部件，是逆变器中故障率最高的部件，逆变器风道异常或风机异常，均会造成逆变器散热异常，使得逆变器过温，轻则造成逆变器降额或停机，严重的甚至导致火灾。

逆变器散热异常诊断主要根据逆变器模块温度对逆变器出风口风量和风温进行建模，逆变器的风机转速一般是根据模块温度进行调节的，通过历史数据可以学到风机流量（与风机转速成正比）和模块温度的关系，进而输入当前时刻的模块温度就可以预测逆变器出风口风量，当逆变器出口风量明显低于预测风量时，诊断为风量异常（风道堵塞或风机转速异常）；逆变器出风口风温与逆变器模块温度、冷风温度、风量、换热面清洁程度有关，通过历史数据可以学到逆变器出风口风温与逆变器模块温度、冷风温度、风量的关系，进而输入当前时刻的逆变器模块温度、冷风温度、风量就可以预测逆变器出风口温度，当逆变器出口风温明显低于预测风温时，诊断为换热面脏污。逆变器散热异常诊断能在逆变器产生实际后果（降额或停机）之前预警，且能区分风量异常和换热面脏污，相比固定阈值诊断大大提高了灵敏度。



(3) 基于遗传算法优化参数的 LS-SVM 油浸自冷变压器散热异常诊断

光伏电站的箱变和主变一般采用油浸自冷变压器（冷却方式为 ONAN），作为充油设备，一旦发生火灾，极难扑救。变压器过温运行导致绝缘下降，绝缘下降产生油箱内部故障，最终引起变压器火灾事故。

传统的变压器散热异常诊断主要靠油温或绕组温度阈值进行诊断，灵敏度差。阳光智维变压器散热异常诊断采用对变压器油温建模的方式进行诊断，变压器油温的温升与变压器产生的热量以及散热效率有关，变压器产生的热量来源于变压器的损耗，变压器的损耗可以通过输入电量减去输出电量得到，也可以计算出变压器铜损和铁损相加得到，散热效率与变压器油温与空气温度的差成正比，通过输入一段时间内变压器的产生热量和散热热量，可以预测出变压器的油温温升，变压器油温的初始值加上预测的油温温升即可得到预测油温，当实际油温明显高于预测油温时，诊断为变压器散热异常，具有灵敏度高的优势，能够发现早期散热异常，避免发生火灾事故。

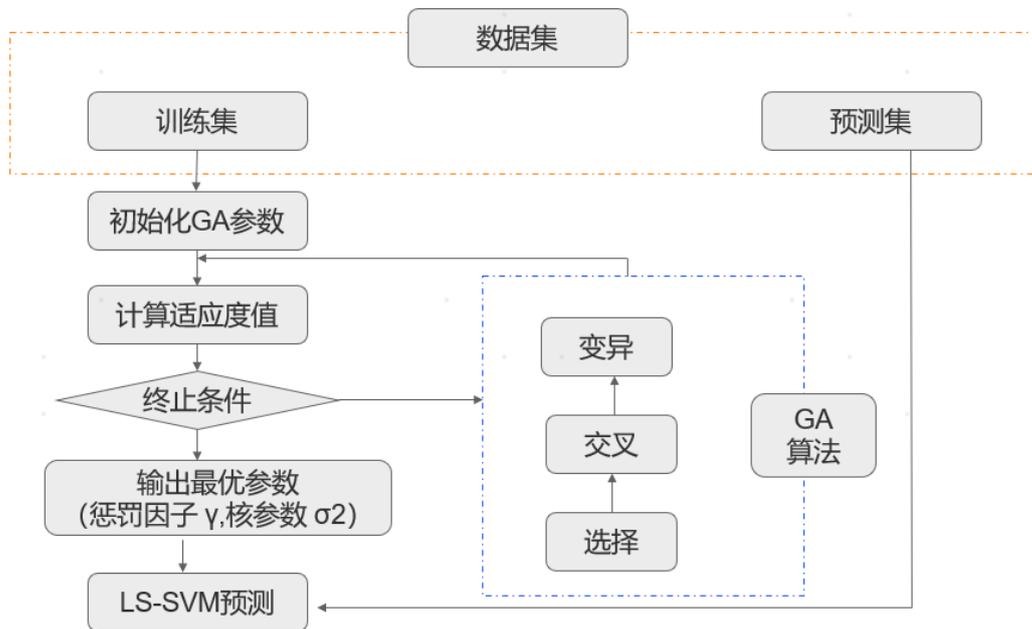


图 2-34 GA+LS-SVM 算法模型结构

2.2.1.3.3 应用目标

应用目标	场景分析	状态
逆变器绝缘异常预警	应用于集中式电站集	现阶段

	中式逆变器及组串式 逆变器下绝缘异常诊 断	
逆变器散热异常预警	应用于集中式逆变器 和组串式逆变器散热 异常诊断	未来
变压器散热异常预警	应用于油浸自冷变压 器散热异常诊断	未来

2.2.1.3.4 核心技术指标

设备故障预警算法，对设备数据进行 5 层处理，可以准确快速的对设备进行故障预警。

类型	准确率	召回率
逆变器绝缘异常预警	>92%	>80%

2.2.1.4 设备隐性损失诊断

逆变器运行过程中除故障停机造成的显性损失外，还会由于各种原因产生隐性损失，由于隐性损失一般没有遥信信号告警，运维人员不能及时发现，所以隐性损失往往持续很长时间，甚至伴随逆变器终身，在逆变器生命周期内隐性损失要远大于显性损失，目前市场上对逆变器隐性损失进行诊断的产品尚处于空白，阳光智维首创逆变器隐性损失诊断产品，通过逆变器隐性损失诊断模型，识别逆变器由于自身原因导致的隐性损失（非外界指令导致的降额运行或组件低效导致的逆变器功率低），帮助运维人员及时发现隐性损失，减少发电量损失。

2.2.1.4.1 系统全貌

本系统设备隐性损失诊断主要包括 4 个方面：

- (1) 逆变器异常降额：逆变器由于内部异常（如温度异常、风机异常、交流电压异常等）导致的主动降额。
- (2) 逆变器 MPPT 故障：逆变器 MPPT 失去调节能力，直流电压基本不随外界

环境变化而变化，逆变器 MPPT 故障又可分为全局 MPPT 故障（即所有 MPPT 均失去调节能力，通常为控制板问题）和局部 MPPT 故障（即部分 MPPT 失去调节能力，通常为升压板问题）。

（3） 逆变器 MPPT 性能不佳：逆变器工作点陷入在局部功率最大点，无法找到全局最大功率点（多发生在局部遮挡比较严重的组串式逆变器）。

（4） 逆变器内部逆变单元或 MPPT 功率分配不合理：由于逆变器内部逆变单元或 MPPT 的装机容量不均衡导致逆变器整体未达到最大功率或未限电，而局部逆变单元或 MPPT 出现限功率的情况，这种情况主要是由于逆变器内部逆变单元或 MPPT 的功率指令是按逆变单元或 MPPT 个数平均分配的，不能按照逆变单元或 MPPT 的实际装机容量智能分配。

2.2.1.4.2 关键技术

在本系统中，针对上述四类隐性损失，分别研发了如下算法进行诊断

（1） 逆变器异常降额

逆变器异常降额造成的发电量损失是十分巨大，逆变器异常降额时主要表现为在没有外部限功率指令时，逆变器全部直流电压明显高于最大功率点电压且同时逆变器功率值变化趋势明显变小。如图 2-28 所示，黄色曲线和绿色曲线为异常降额逆变器功率曲线，红色曲线和蓝色曲线为正常逆变器功率曲线。黄色曲线和绿色曲线在早上 7 点到下午 15 点一直处于降额状态中。

本系统主要通过离线的滑动窗口结合多重时序的采样技术，捕捉逆变器直流电压和发电功率的变化规律，采用了联合电压和功率值关联分析算法。通过突变点检测，动态贪心策略突变区间计算等计算出电压突变的区间，在电压突变区间内，联合电压的突变状况和功率值的变化状况共同分析是否有降额存在。

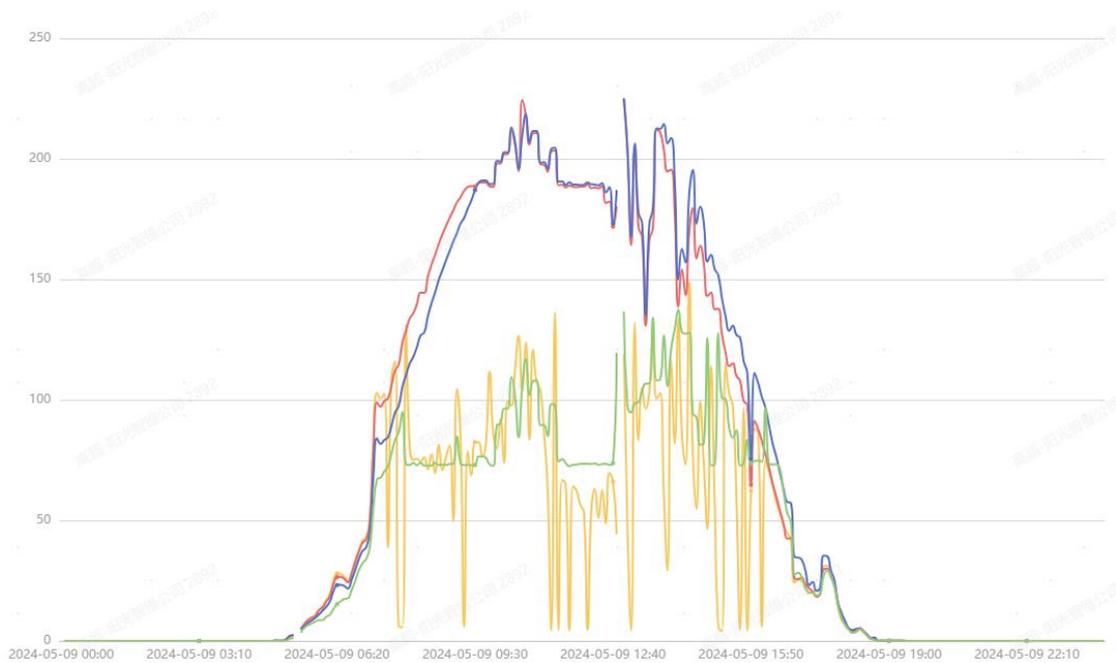


图 2-28 逆变器异常降额实例

(2) 逆变器 MPPT 故障

逆变器 MPPT 故障关键特征为逆变器直流电压基本恒定。如图 2-29 所示，蓝色曲线为 MPPT 故障逆变器功率曲线，黄色曲线为正常逆变器功率曲线，其 3 路 MPPT 直流电压（绿色曲线）均在 200V 左右波动，导致其功率远低于同等装机容量的正常逆变器。

根据直流电压基本恒定的特性，本系统重点分析电压恒定数值的稳定性以及持续性。在此基础上本系统提出和使用基于差分互信息的逆变器 MPPT 故障诊断算法，互信息是信息论中的一个核心概念，用于量化两个随机变量之间的统计相关性。它衡量当一个随机变量的值确定时，另一个随机变量的不确定性减少的程度。本系统在判断断 MPPT 接入情况后计算每时刻电压差分变化的相关互信息，通过互信息值判定两个差分之间的不确定性，以此得出逆变器是否存在 MPPT 故障。

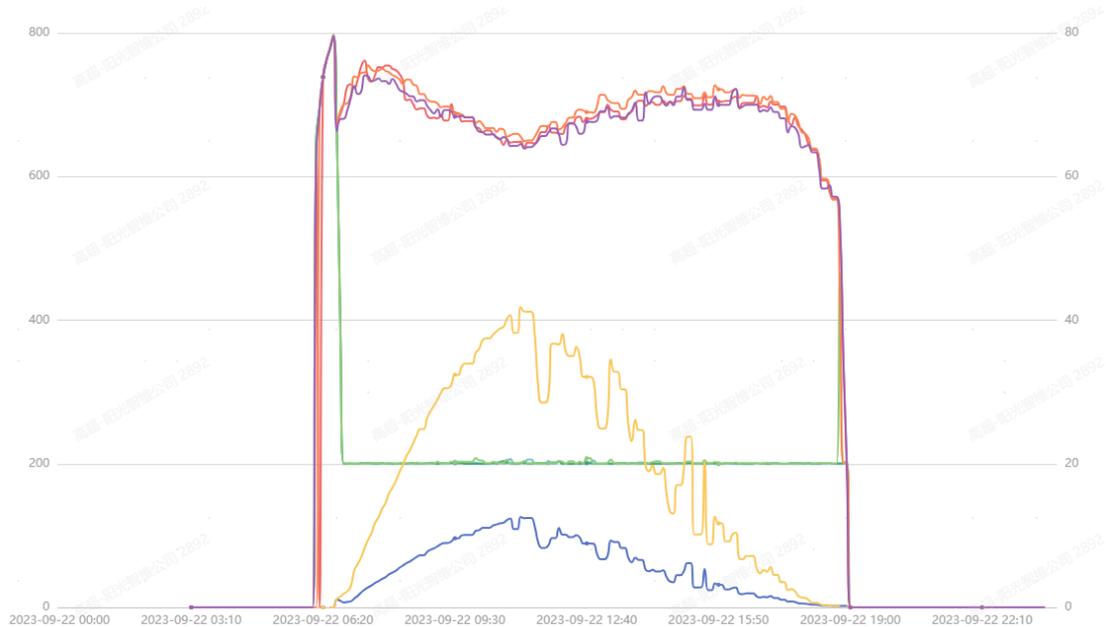


图 2-29 逆变器 MPPT 故障实例

(3) 逆变器 MPPT 性能不佳

在逆变器 MPPT 性能不佳时，逆变器的部分（非全部）直流电压明显高于最大功率点电压且组串电流异常。如图 2-30 所示，该逆变器所接组件上午存在局部遮挡，浅绿色曲线表示的组串电流，一直到中午遮挡消失电流才明显上升，深绿色曲线表示该组串电流对应的直流电压，可以看出该直流电压一直偏高，直到遮挡消失。该路 MPPT 在局部遮挡期间未找到全局最大功率点，而是陷入在局部最大功率点，导致性能不佳。

本系统通过综合分析逆变器直流电压异常变化时对应是否存在电流异常变化情况，提出了基于重构的异常偏离度诊断算法，其主要思想是结合电压历史数据，分析出电压每时刻正常数值。从而重构出完整且正常电压曲线，在构建曲线的同时使用肘方法确定其重构数值范围。重构完成后，识别出电压异常点的同时，计算同时刻电流偏离度。使用孤立森林检测偏离度的异常值，给出是否 MPPT 性能不佳。

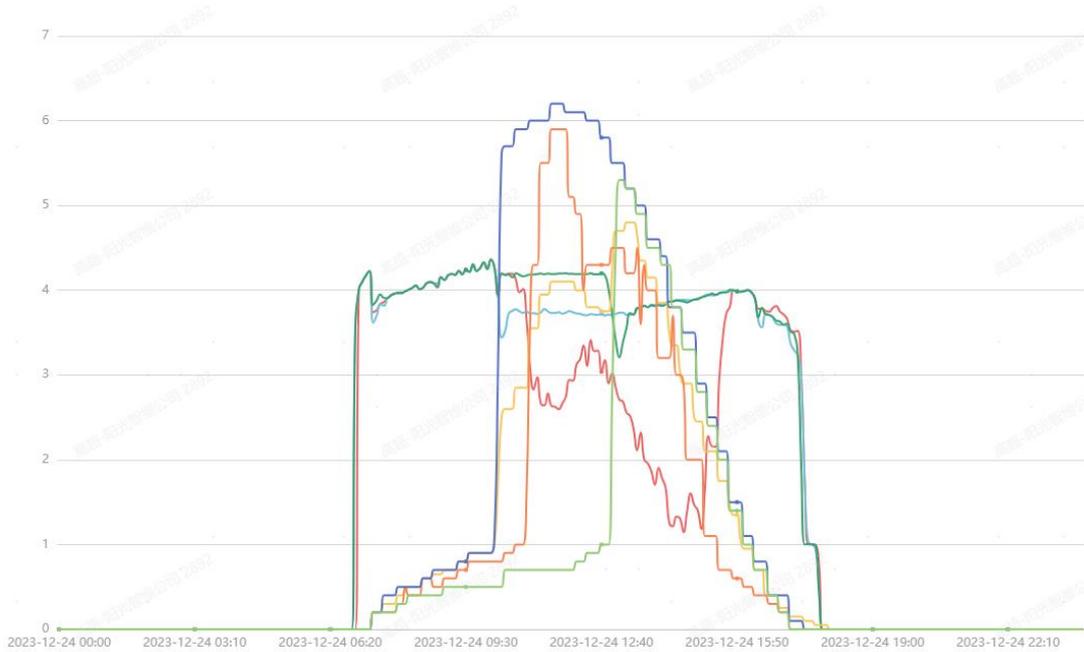


图 2-30 逆变器 MPPT 性能不佳实例

(4) 逆变器内部逆变单元或 MPPT 功率分配不合理

如图 2-31 所示，该逆变器的功率指令是 1453.16kW，实际功率（蓝色曲线）却只有 1345.62kW，其中逆变单元 1 的实际功率（黄色曲线）是 727.70kW，恰好是功率指令的一半，说明逆变器在给内部逆变单元分配功率指令的时候是平均分配的，但是逆变单元 2 实际功率（红色曲线）是 620.29kW，其原因是逆变单元 2 装机容量较小（占逆变器总装机容量的比例远小于 50%），导致按平均分配给它的功率指令没有被全部利用，最终导致逆变器的实际功率达不到功率指令，会产生电量损失和造成 AGC 调节精度不达标。

判定未达到最大功率且未限电情况下，MPPT 电压明显高于最大功率点电压这一特征，本系统提出和使用滑动变化是否一致性诊断算法，利用一定大小的滑动窗口计算每路 MPPT 电压变异系数，变异系数是一种衡量数据中各观测值变异程度方法。根据窗口内变异系数值离散程度，以及窗口间离散程度，判断是否存在分配不合理情况。

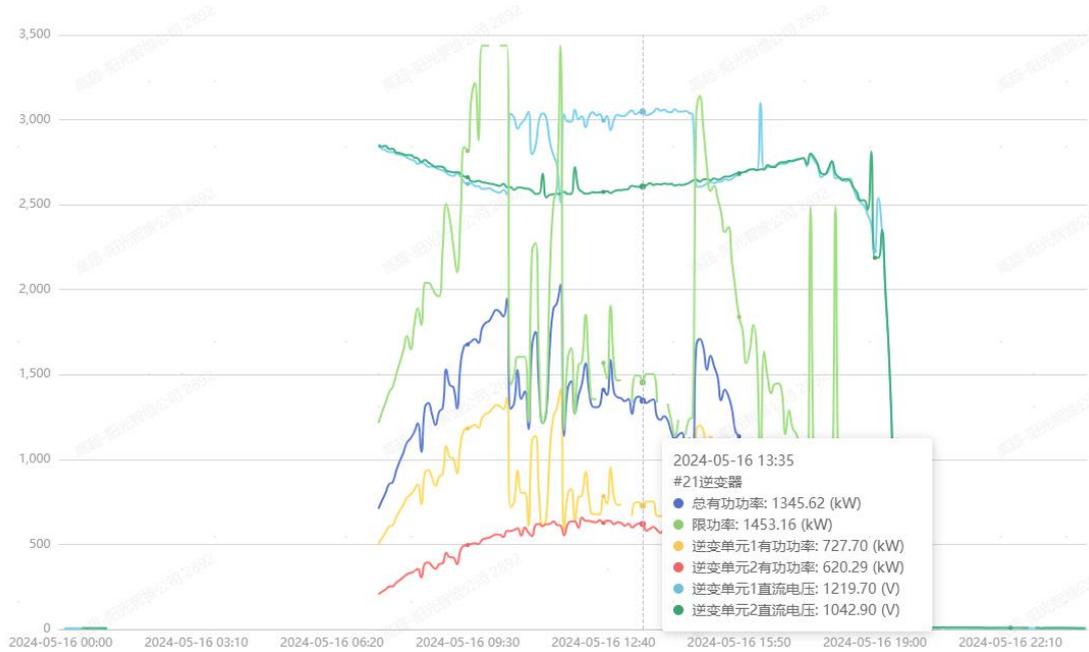


图 2-31 逆变器内部逆变单元功率分配不合理实例

2.2.1.4.3 应用目标

3

应用目标	场景分析	状态
逆变器异常降额	应用于集中式逆变器和组串式逆变器下异常降额诊断	现阶段
逆变器 MPPT 故障	应用于集中式逆变器和组串式逆变器下 MPPT 故障诊断	未来（方案设计完成）
逆变器 MPPT 性能不佳	应用于集中式逆变器和组串式逆变器下 MPPT 性能不佳诊断	未来（方案设计完成）
逆变器内部逆变单元或 MPPT 功率分配不合理	集中式逆变器内部逆变单元功率分配不合理诊断 组串式逆变器下内部 MPPT 功率分配不合理诊断	未来（方案设计完成）

2.2.1.4.4 核心技术指标

隐性诊断	核心技术指标
逆变器异常降额	准确率不低于 97%，召回率不低于 90%

2.2.2 AI 深度应用，全面赋能数智运维

2.2.2.1 iSolarChat 智维助手

随着光伏装机容量的快速增长，光伏运维行业面临着前所未有的挑战与机遇。这个领域不仅要求高效利用自然资源，还必须确保系统的稳定运行，以最大化能源产出并最小化环境影响。然而，光伏电站往往地理位置偏远，设备分布广泛，加之技术复杂度高，使得运维工作既耗时又费力，对人员的专业技能有极高要求。

在此背景下，光伏运维行业呈现出以下几个显著特点：

- （1）高度依赖专业知识：运维人员需要掌握电气、机械、自动化控制等多个领域的知识，以及对特定新能源技术的深入了解，以便快速诊断和解决各类故障。
- （2）数据量庞大且分散：风电场、光伏电站等产生海量的运行数据，这些数据分散于不同的系统和设备中，有效整合与分析这些数据成为提升运维效率的关键。
- （3）即时响应需求迫切：电力供应的连续性和稳定性至关重要，任何停机或效率下降都可能造成重大经济损失，因此对故障的快速识别与处理能力是运维工作的核心。

因此，需要一款智能协助人员进行运维工作，减少运维工作的难度。而当前人工智能技术（AI）的飞速发展，尤其是自然语言处理（NLP）、机器学习（ML）以及生成式 AI（如 AIGC）的突破，为光伏运维行业带来了革新性解决方案。光伏运维行业的特殊性及其对高效、智能化管理的需求，与 AI 技术的最新进展形成了完美的契合点。当前基于 RAG 技术的 iSolarChat 智维助手工具，不仅可以大幅提升运维效率与准确性，还能促进知识的积累与传承，为光伏行业的可持续发展注入强劲动力。

2.2.2.2.1 系统全貌

iSolarChat 智维助手系统旨在协助电站人员进行电站运维工作，当前阶段已实现基于大模型生成及结合知识库的故障诊断建议对齐功能：

(1) 用户互动：提供全天候的智能客服，解答日常基础问题，如文档撰写格式、电站行为规范等；

(2) 智能故障诊断：结合光伏设备的历史数据和检索相关故障案例，提高故障诊断的准确性和响应速度，并可提供详细的修复指南。未来智维助手将打通电站数据，对多维度多模态数据进行管理 & 监控，包含以下功能：

(3) 数据管理：集成和管理不同来源的电站数据，包括发电量、光辐照值、风速等，通过归纳总结生成电站综合报告；

(4) 资源管理：电站资源、人员配置等电站基础信息集成，构建电站画像，基于电站画像实现电站资源的优化配置。

(5) 实时监控：实时监控电站组件运行状态，结合组件历史运行数据，可及时发出组件故障预警通知。

(6) 实时数据访问：通过检索最新的设备状态、气象数据和市场动态，提供实时的运维建议和决策支持。

(7) 优化运维策略：利用丰富的信息源，生成优化的运维计划和策略，提升光伏电站的整体效益。

(8) 知识共享和培训：通过检索技术文档和操作手册，生成详细的培训材料和操作指南，并结合虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术进行互动培训，帮助运维人员快速掌握新知识和技能。

基于 AIGC 大模型的 iSolarChat 智维助手应用后将显著提升运维工作的智能化水平和效率，为标准化运维提供可靠工具支撑。

2.2.2.2.2 关键技术

iSolarChat 智维助手工具主要基于生成式大模型技术，并主要通过 RAG 技术（检索增强生成，Retrieval-Augmented Generation）进行问答检索优化。RAG 技术是一种将信息检索和生成模型结合起来的自然语言处理（NLP）方法。它通过从大型知识库中检索相关信息来增强生成模型的回答能力。RAG 技术在各种应用

场景中具有显著优势，尤其适用于需要高准确性和信息丰富度的任务。RAG 技术的主要有以下优势：

(1) 增强信息丰富度

- 广泛知识覆盖：通过集成大型知识库，RAG 可以访问和利用大量的信息资源。这使得生成的回答更加详尽和信息量丰富。
- 最新信息获取：相比仅依赖训练数据的生成模型，RAG 可以实时检索最新的信息，确保回答内容的时效性和准确性。

(2) 提高回答准确性

- 减少幻觉现象：纯生成模型有时会生成不准确或虚假的信息，而 RAG 通过检索真实数据源来提供支持，从而显著减少幻觉现象。
- 依赖可信资源：检索到的内容通常来自可信的知识库或文档，提高了回答的可靠性和可信度。

(3) 增强模型灵活性

- 多领域适用：RAG 可以应用于不同领域的知识库，适应多种场景需求，无论是技术文档、法律法规还是医疗知识，都能提供高质量的回答。
- 动态知识更新：知识库可以动态更新，使得 RAG 模型能够及时反映最新的研究成果和行业动态，而无需频繁重新训练模型。

(4) 提高效率和性能：

- 减少模型复杂度：通过将部分信息获取任务外包给检索系统，减少了生成模型的复杂度，从而提高了整体系统的效率和性能。
- 灵活扩展性：可以根据需求增加不同的知识库，灵活扩展系统的知识范围和能力。

iSolarChat 智维助手模型训练数据集主要由以下数据构成：

- (1) 安全规范：光伏电站安全工作规程、阳光智维运维人员作业范围等；
- (2) 公司管理文件：转编需知等；
- (3) 运维设备介绍：SG225HX 用户手册、SG320HX 用户手册等；
- (4) 消缺案例：母线相电压为零(PT故障)处理案例、上网关口表数据不准确处理案例等；
- (5) 员工手册：社保知识员工手册(1)、住房公积金员工手册(1)等；

- (6) 运维管理：生产运维中心运维管理奖惩明细 20220607 等；
- (7) 作业指导：阳光智维光伏电站设备检修规程、阳光智维光伏电站设备运维规程等；
- (8) 开源通用数据：gpt4 公开数据集等。

基于上述数据集训练得到 iSolarChat 模型，当前可以实现全天候的智能问答，可以提供关于办公、运维基础知识等问答功能。



图 2-10 iSolarChat 智维助手问答实例

此外，iSolarChat 融合电站设备故障知识库，如图 2-11，现场操作人员基于该知识库获取电站故障原因及故障解决建议，如图 2-12。

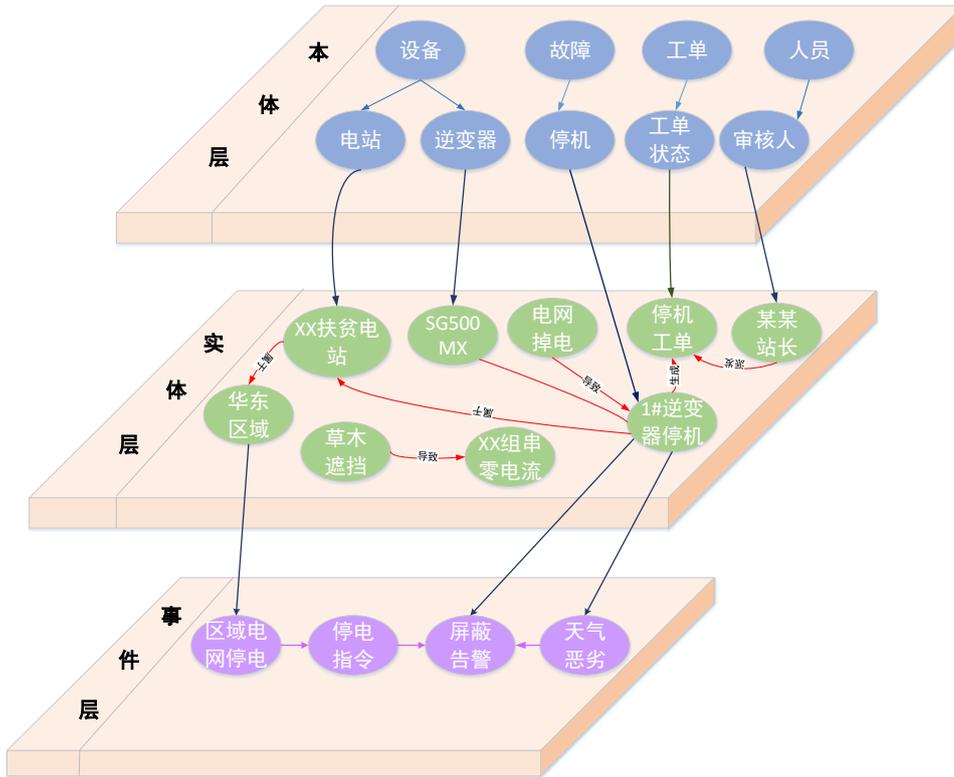


图 2-11 iSolarChat 电站电源系统故障知识库（局部）

组件碎裂如何解决

组件碎裂通常是光伏电站中的一种常见问题，处理这种情况需要遵循一定的流程：

- 安全第一：** 确保在处理碎裂组件时遵守所有安全规程，包括穿戴个人防护装备，避免触电和物理伤害。
- 记录缺陷：** 在SolarEye运维管理系统中登记此缺陷，详细描述碎裂情况，包括位置、程度、可能原因等。
- 风险评估：** 评估碎裂组件对周围组件和系统性能的影响，以及可能存在的安全隐患。
- 制定方案：** 根据碎裂严重程度，决定是否立即更换或采取临时措施，如安装遮光板防止碎片产生额外电流。
- 资源调度：** 安排合适的人员和设备进行处理，如电站自主处理或联系外部专业团队。
- 执行消缺：** 执行修复或更换工作，确保工作符合质量要求，并在完成后闭环工单。
- 原因分析：** 调查碎裂原因，如制造缺陷、自然灾害、安装不当等，以便采取预防措施。
- 文档更新：** 更新电站维护记录，记录整个处理过程和结果。
- 预防措施：** 根据分析结果，加强组件检查，防止类似事件再次发生。

图 2-12 电厂设备故障解决建议

2.2.2.2.3 应用目标

RAG 技术将检索和生成有机结合，充分发挥两者的优势。此外，基于 RAG 技术的 iSolarChat 智维助手融合电站设备故障知识库，为当前的光伏电站数智化运维提供强有力的技术支持和创新解决方案。而在光伏电站智能化运维场景中，为进一步提高运营效率、优化性能以确保系统的可靠性和安全性，未来的智能助手需要实现更多的应用目标，这些应用目标如下表。

应用目标	场景分析	状态
用户互动与支持	提供全天候的智能客服支持，解答运维人员和管理人员的各种问题，提供实时的技术支持和建议；根据用户需求和偏好，提供个性化的运维服务和建议，提高用户满意度	现阶段
智能故障诊断与修复	快速定位故障原因，提供准确的故障诊断报告，执行自动化的故障修复操作，提供详细的修复指南给运维人员	现阶段
实时监控与预警	实时监控光伏电站的各个组件的运行状态，及时发出预警通知	未来
优化与预测分析	提供优化建议，利用预测模型对未来的发电量、设备寿命、市场需求等进行预测，帮助制定长期运维和投资策略	未来
数据管理与报告	集成和管理来自不同来源的数据，自动生成各类运维报告和分析报告	未来
知识库与培训	建立并维护一个动态更新的知识库，支持智能助手的知识扩展和更新；利用虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术进行互动培训	未来
智能调度与资源管理	智能调度运维任务和人员，优化资源配置，提高工作效率；管理库存和备件需求，确保关键备件的及时供应，减少设备停机时间	未来

2.2.2.2.4 核心技术指标

iSolarChat 智维助手可以有效的帮助运维人员进行电站运维工作，极大的减少运维人员工作量。为评估 iSolarChat 智维助手效果，考虑到运维领域主观性较强，这里将运维领域分为结果准确性、信息量覆盖率、语句通顺性、安全合规性指标进行测试，将测试结果分为极差（1分）、较差（2分）、一般（3分）、较好（4）、极好（5分）5个等级进行赋分，为避免评分出现主观性，邀请十位业务专家对 iSolarChat 生成结果进行三轮评分，取评分结果的中位数作为最终结果。

评估指标	分数
结果准确性	>4
信息量覆盖率	>4.1
语句通顺性	>4.2
安全合规性	>4.4

2.2.3 诊疗兼备，运行效率最优解

2.2.3.1 AGC/AVC 控制策略诊断及新一代光伏电站智能 AGC/AVC 系统

光伏电站的设备数量多，地域分散，设备出力受环境影响大，AGC、AVC 控制难度要远大于传统能源，而市场上的光伏电站 AGC、AVC 产品基本都是由传统能源 AGC、AVC 厂家提供的，控制策略基本沿用传统能源的思路，在实际应用中产生了很多问题，造成巨大的发电量损失和“两个细则”考核。

现有 AGC、AVC 产品的主要问题有：

(1) 限功率场景下，AGC 系统分配功率指令时，没有考虑逆变器的实际发电能力，或者对逆变器的实际发电能力评估不准确，发电能力小的设备功率指令给得过高，发电能力大的设备功率指令给得过低，导致电站实际功率达不到功率指令，不但 AGC 调节精度达不到要求，还造成发电量损失，图 2-21 是一个方阵内所有逆变器的功率曲线，可以看出发电能力大的逆变器被限电，功率曲线呈锯齿状，而发电能力小的逆变器没有被限电，功率曲线平滑；

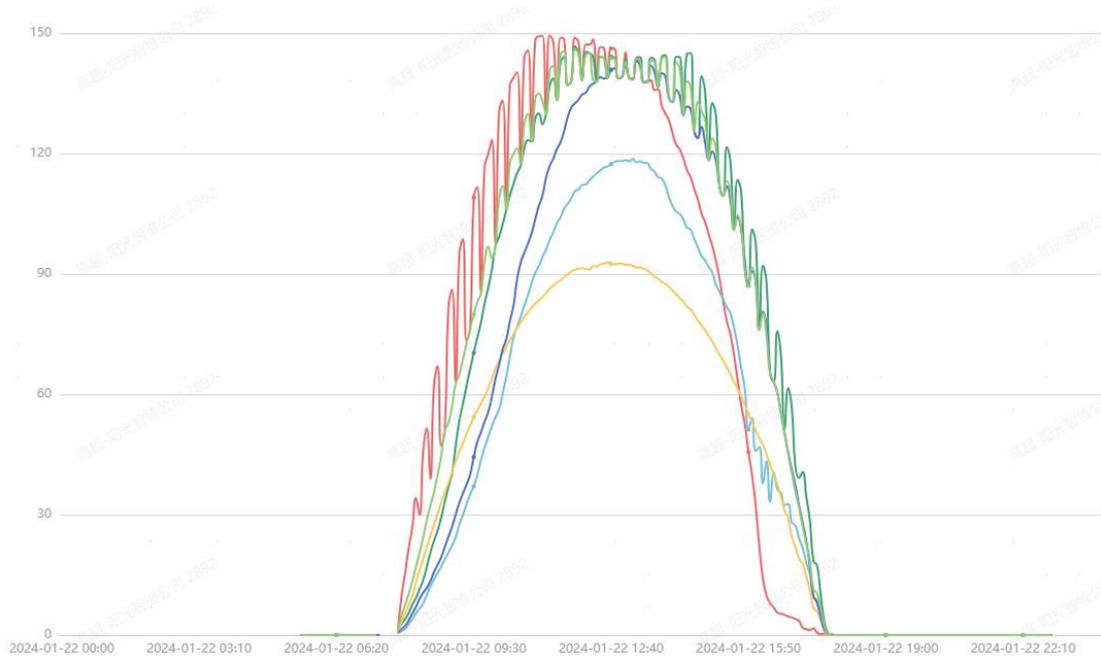


图 2-21 AGC 指令分配不合理导致逆变器限功率

(2) 逆变器的功率指令上限没有设置成逆变器的最大允许功率，现在逆变器基本都有一定的过负荷能力，即逆变器可以在额定功率以上一定范围内运行，如果逆变器的功率指令上限没有设置成逆变器的最大允许功率，而是设置成额定功率，相当于逆变器的这部分过负荷能力没有被利用，造成发电量的损失，如图 2-22 所示，该逆变器型号为 SG3300UD，允许最大功率为 $3300 \times 1.15 = 3795\text{kW}$ ，实际该逆变器最大限功率指令为 3661kW ，显然该逆变器的功率指令上限设置不合理；

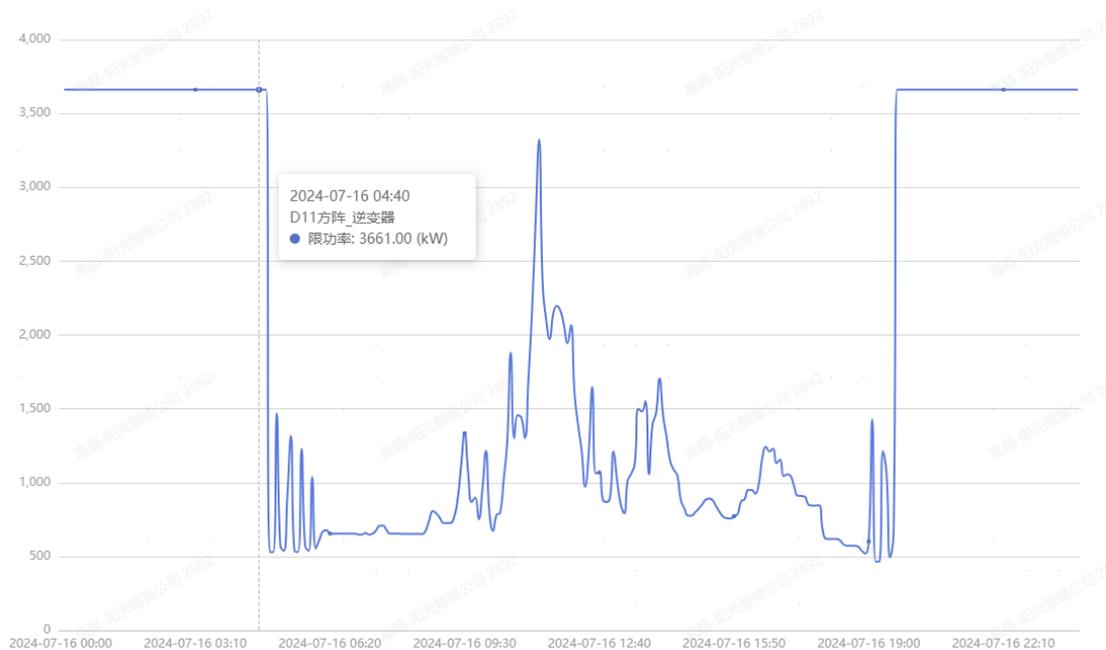


图 2-22 逆变器功率指令上限设置不合理实例

(3) AGC 的有功功率变化率设置不合理，新能源电站的有功功率由气象条件决定，气象条件的快速变化必然引起电站有功功率的快速变化，随着电网中新能源装机占比越来越高，新能源电站的有功功率快速变化可能对电网形成冲击，为限制新能源电站有功功率的过快变化，不少区域电网的“两个细则”中均有针对新能源电站有功功率变化率的考核，如果 AGC 系统里有功功率变化率设置得过高，则不满足电网关于有功功率变化率的要求；如果 AGC 系统里有功功率变化率设置得过低，同样可能不满足电网关于 AGC 调节速率的要求（AGC 调节速度不能过慢），而且在辐照快速上升（比如电站上空的云快速移走）时，有功功率恢复速度较慢，产生电量损失；

(4) 无功功率产生环流，由于无功功率性质（发出感性无功、吸收感性无功）通常用正负号表示，而各种无功设备之间关于正负号的定义并不统一，导致无功设备之间产生无功功率环流，造成能量的浪费，如图 2-23 所示，逆变器的无功功率为正代表从电网吸收无功功率，SVG 的无功功率为正代表向电网发出无功功率，如果 AVC 同时向逆变器和 SVG 都下发正的无功功率指令，则两者的无功功率实际流向相反，意味着有一部分无功功率在电站内部形成了环流，而没有输送给电网，这部分无功功率实际被浪费了，而且环流的形成也增加了损耗。

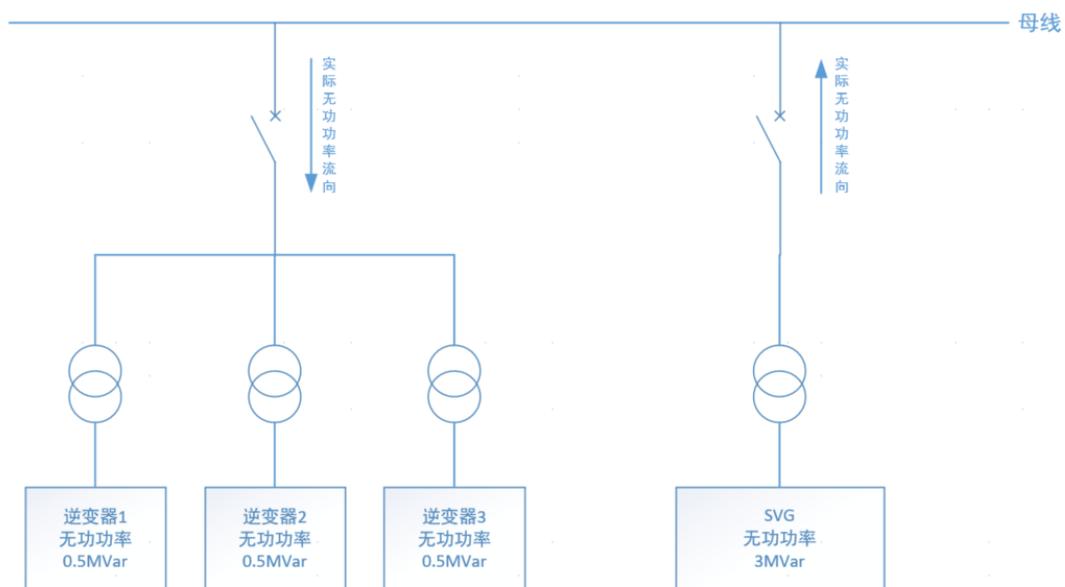


图 2-23 无功功率环流示意图

(5) 升压站无功设备和逆变器无功功率分配不合理，没有充分利用升压站无功设备的无功容量，导致大量无功功率在升压站和光伏场区之间长距离传输，产生大量能量损耗，如图 2-24 所示；

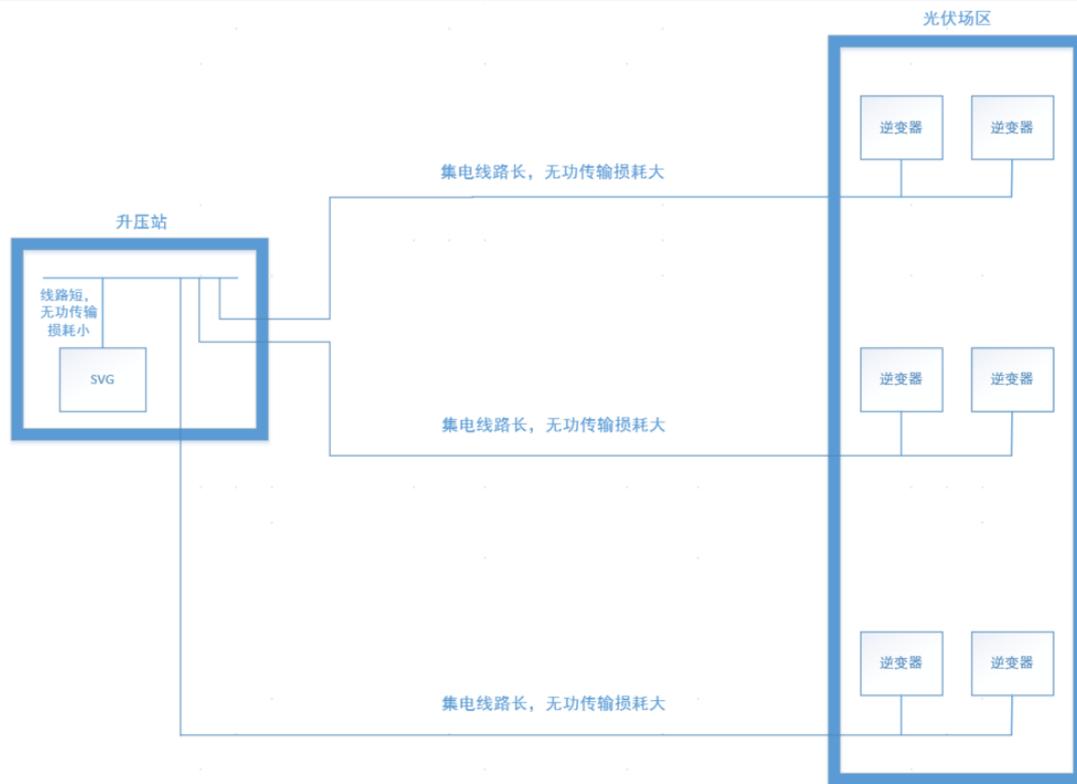


图 2-24 光伏电站无功功率传输损耗示意图

(6) 逆变器有功功率被无功功率挤占，逆变器的主业是发有功功率，但逆变器的总容量是一定的，无功功率发多了，留给有功功率的空间必然减少，有功功率直接产生收益，无功功率不直接产生收益，如果在全站逆变器仍有无功能力的前提下，部分逆变器却出现了无功功率挤占有功功率的情况，相当于牺牲了这部分逆变器的有功能力，造成电量损失，如图 2-25 所示，1#逆变器无功功率巨大，导致有功功率被挤压，而 6#逆变器无功功率很小，仍然有无功容量，此时 6#逆变器可以分担一些无功负荷，从而使 1#逆变器的有功功率不会被无功功率挤占；

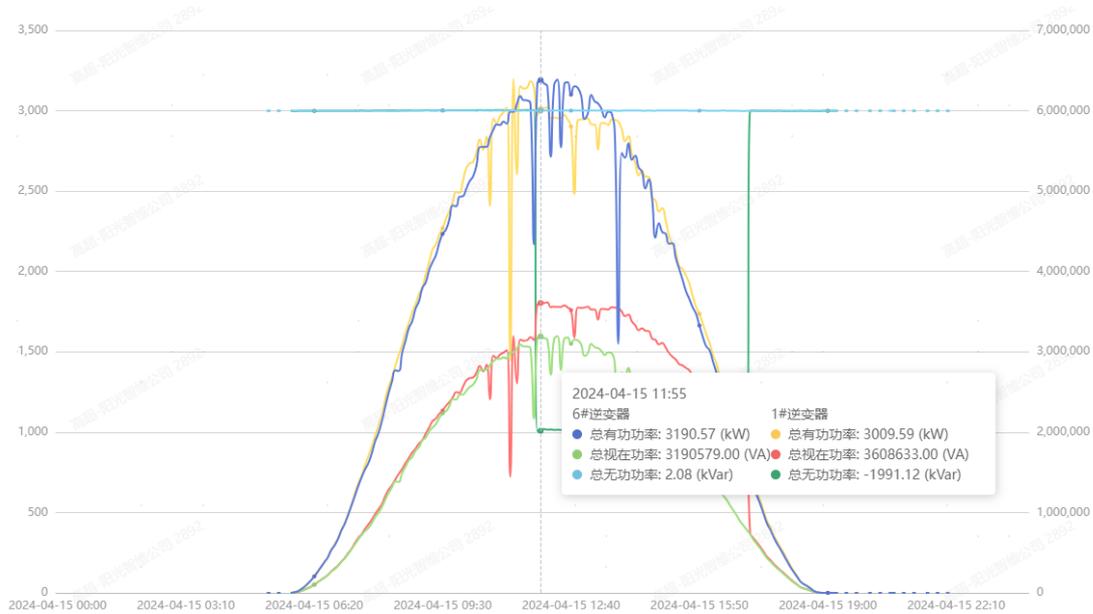


图 2-25 逆变器有功功率被无功功率挤占实例

(7) 逆变器因为无功功率过大导致过压/欠压停机，因为线路的电压降主要是无功功率造成的，大量的无功功率沿着集电线路传输，必然导致集电线路电压降增大，在满足站内母线电压合格的要求下，逆变器交流电压必然极大偏离正常电压，甚至达到过压/欠压保护定值，造成逆变器停机，不但起不到支撑电网的作用，反而对电网造成冲击，如图 2-26 所示，该逆变器发出的感性无功功率巨大，导致逆变器交流电压已经达到过压保护定值（594V），逆变器频繁停机。



图 2-26 逆变器无功功率过大导致过压停机实例

2.2.3.1.1 系统全貌

目前市场上尚无对光伏电站 AGC、AVC 控制策略进行诊断的产品，阳光智维首创光伏电站 AGC/AVC 控制策略诊断，包含图 2-27 所示的 7 项诊断功能，从经济性角度诊断电站 AGC、AVC 控制策略是否合理，及时发现有功功率指令、无功功率指令存在异常的设备，减少发电量损失和“两个细则”考核。新一代光伏电站智能 AGC/AVC 系统则是在 AGC/AVC 控制策略诊断技术的基础上开发的专门应用于光伏电站的新型 AGC/AVC 系统，能够克服现有 AGC/AVC 系统存在的弊端，代表了光伏电站 AGC/AVC 系统的演进方向。

图2-27AGC/AVC控制策略诊断示意图



2.2.3.1.2 关键技术

(1) 光伏电站 AGC 控制策略诊断技术

AGC 控制策略诊断主要围绕全站是否发挥最大发电能力进行诊断，从 AGC 的控制目的得到以下三条认知：

- 1) 当全站不限电时，方阵和逆变器均不应限电，当全站限电时，全站实际出力应接近限功率指令；
- 2) 逆变器的功率指令上限应等于逆变器的最大允许功率；
- 3) 逆变器和全站的有功功率变化率应在满足电网要求的前提下最大化；

基于以上认知，有以下诊断逻辑：

当全站不限电时，若任一方阵或逆变器限电，诊断该方阵或逆变器功率指令

异常。

当全站限电时，若任一非样板方阵未限电，诊断该方阵功率指令异常。

当方阵限电时，若方阵下任一非样板逆变器未限电，诊断该逆变器功率指令异常。

若逆变器的功率指令上限小于逆变器的最大允许功率，诊断该逆变器功率指令上限设置不合理。

若逆变器的有功功率变化率不满足电网要求或虽然满足电网要求但没有设置成最大值，诊断逆变器有功功率变化率设置不合理。

若 AGC 的有功功率变化率不满足电网要求或虽然满足电网要求但没有设置成最大值，诊断 AGC 有功功率变化率设置不合理。

(2) 新一代光伏电站智能 AGC 控制策略

基于对光伏电站 AGC 控制技术的深入理解，提出新一代光伏电站智能 AGC 控制策略：

- 对每台逆变器的最大发电能力进行建模，将实时的倾斜面总辐照度、组件温度等参数输入模型可以得到逆变器实时最大发电能力；
- 计算方阵的最大发电能力和最小发电能力；
- 计算方阵和逆变器的向上可调节能力和向下可调节能力；
- 将全站的待调节量按方阵的向上/向下可调节能力比例进行分配；
- 将方阵的待调节量按逆变器的向上/向下可调节能力比例进行分配；
- 一次调节完成后若方阵功率指令和实际出力仍存在偏差，在方阵内部进行二次调节。

(3) 光伏电站 AVC 控制策略诊断技术

AVC 控制策略诊断主要围绕全站无功功率导致的损耗是否最小进行诊断，从 AVC 控制的目的得到以下四条认知：

- 1) 全站无功设备间不应形成无功功率环流；
- 2) 应优先让位于升压站内的无功设备发无功，场区内的逆变器后发无功，且场区内应优先让距离升压站电气距离近的逆变器优先发无功；
- 3) 在全站逆变器仍有剩余容量的前提下不应存在逆变器有功功率被无功功率挤占情况；

4) 逆变器发无功功率不应导致逆变器过压/欠压停机;

基于以上认知, 有以下诊断逻辑:

当同一层级的设备之间存在无功功率环流(即无功功率方向相反)时, 诊断设备无功功率环流;

当升压站内的无功设备尚有富余无功能力时, 若场区内逆变器在发无功功率, 诊断升压站、场区无功功率分配不合理;

当全站逆变器视在功率之和小于逆变器最大允许视在功率之和时, 若某台逆变器在发无功功率且该台逆变器的视在功率等于最大允许视在功率, 诊断该逆变器有功功率被无功功率挤占;

当某台逆变器在向电网输送无功功率时, 若该逆变器交流电压接近过压保护定值, 且该逆变器不发无功功率时, 交流电压正常, 诊断逆变器无功功率过大导致过压;

当某台逆变器在从电网吸收无功功率时, 若该逆变器交流电压接近欠压保护定值, 且该逆变器不发无功功率时, 交流电压正常, 诊断逆变器无功功率过大导致欠压。

(4) 新一代光伏电站智能 AVC 控制策略

基于对光伏电站 AVC 控制技术的深入理解, 提出新一代光伏电站智能 AVC 控制策略:

- 根据母线电压指令计算得出全站无功功率指令;
- 根据无功功率对电压的影响原则以及无功功率平衡原则判明无功功率性质与设备无功功率正负符号之间的对应关系;
- 将全站无功功率指令待调节量优先分配给升压站内无功设备(SVC、SVG、储能变流器等), 分配时按判明的无功功率性质对应的正负符号生成指令;
- 若升压站内无功设备无功容量已用完, 且仍有无功指令未分配完, 将剩余无功指令分配给逆变器, 分配时按判明的无功功率性质对应的正负符号生成指令;
- 按逆变器距升压站电气距离大小分配无功指令, 优先分配给电气距离最近的逆变器, 且当逆变器视在功率或交流电流达到最大允许值时, 即不再分配无功指令;

- 当逆变器交流电压接近过压保护定值时，不再分配感性无功功率指令，当逆变器交流电压接近欠压保护定值时，不再分配容性无功功率指令。

2.2.3.1.3 应用目标

应用目标	场景分析	状态
光伏电站 AGC/AVC 控制策略诊断	诊断现有 AGC/AVC 控制策略不经济	现阶段
新一代光伏电站智能 AGC/AVC 系统	代替现有 AGC/AVC 控制系统	未来

2.2.3.1.4 核心技术指标

系统	技术指标
AGC/AVC 控制策略诊断系统	准确率>95%，召回率>90%

2.2.3.2 高精度设备定位导航系统

光伏电站建设覆盖范围大，设备数量特别多，寻找特定设备往往需要耗费较长时间，特别是组件的寻找更为困难。常规的地图导航无法在光伏电站内使用，运维人员只能依赖竣工图纸寻找设备，但竣工图纸可能与实际情况不一致，且竣工图纸对道路通行条件没有标注，可能会误导运维人员，运维人员迫切需要能够在电站内部使用的高精度设备导航。

2.2.3.2.1 系统全貌

光伏电站设备导航系统由数据管理，高精度设备地图，设备层级关联，消缺路径规划系统组成。设备端应用包括无人机采集设备，GIS 建模软件，RTK 移动基站，手持终端导航设备等。技术端应用包括竣工图设备标签提取，电子地图分割和故障消缺路径规划。

(1) 数据管理

数据管理融合了电站全貌的航线规划数据，GIS 建模数据，瓦片地图数据，设备层级数据和设备诊断数据。使用连接 RTK 网络或移动基站的无人机对电站可见光数据采集，数据经机场上云 API 云端存储或传输至私有化共享存储中用于电

子地图构建和三维瓦片地图切片。

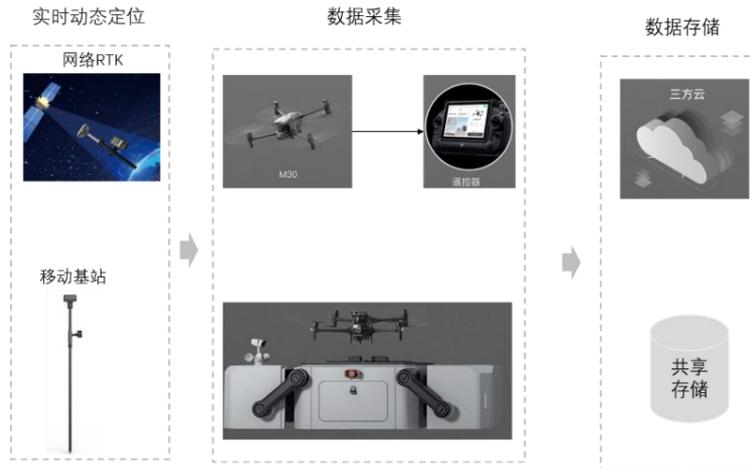


图 2-1 无人机数据采集链路示意图

(2) 高精度设备地图

将采集到的可见光数据导入地理信息系统（GIS）软件中进行处理和分析，生成高精度的电站电子地图。通过 OCR 识别算法提取电站竣工图中各类设备（逆变器，汇流箱和组串等）名称和位置信息，再对电站电子地图进行自动化分割标注，获取组串和组件的位置信息，最后将电站电子地图和竣工图的设备名称和地理位置进行一一匹配关联形成高精度设备地图。如下图 2-2 所示为高精度设备导航地图，清晰标注出光伏区方阵，汇流箱和组串等设备信息。如下图 2-3 为电子地图组串中组件位置提取和编号，精确给出组件级最小设备层级信息和组件在组串中的逻辑编号。



图 2-2 高精度设备地图

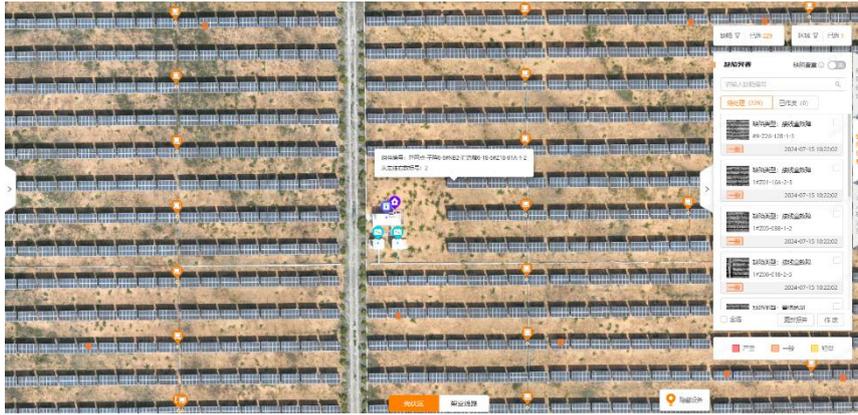


图 2-3 高精度设备地图组件位置标号

(3) 上下级设备关联显示

上下级设备关联和电站的高精度设备地图联动，提供了电站全貌的设备层级信息。当鼠标移到某一台汇流箱上，会自动高亮该汇流箱的逆变器以及该汇流箱所接的所有组串，让设备层级关系一目了然，如下图 2-4 所示。图 2-5 为光伏外输电线路设备和位置标记，以及输电线路在光伏区域位置的空间排布。



图 2-4 电子地图上下级设备关联图示

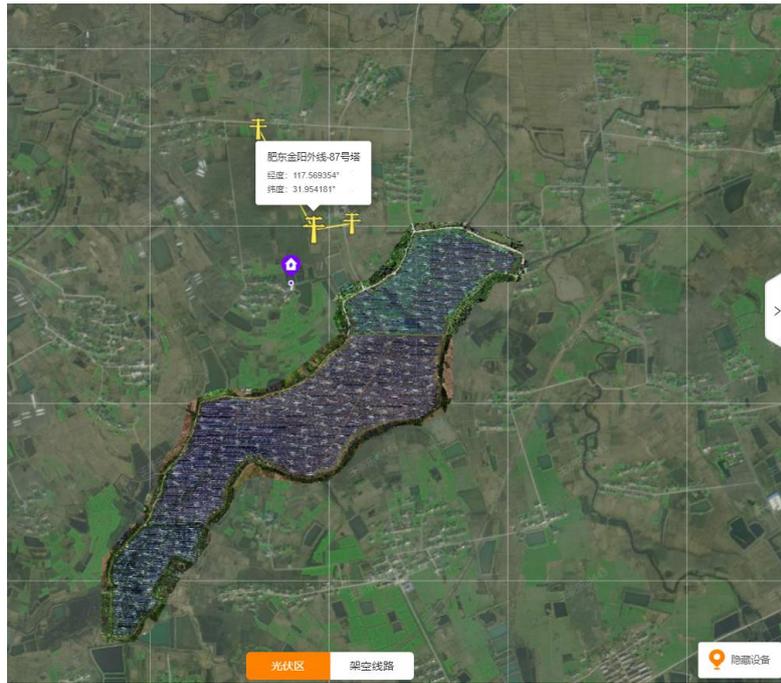


图 2-5 输电线路杆塔设备图示

(4) 运维消缺路径规划:

当运维人员需要前往现场消缺时，系统通过多目标路径规划算法推荐最优消缺路径，最优消缺路径考虑以下因素：

- 工具最优：根据消缺故障所处位置的地形地貌，推荐最佳驾乘工具，例：汽车/电动船/步行等
- 关联设备优先：当故障处理需要操作关联设备时，系统会自动将关联设备纳入导航。比如当同一汇流箱下多个组串出现短路或缺失等故障时，路径规划优先将同一汇流箱下故障纳入同一路径消缺，避免运维人员来回对汇流箱进行断电和恢复。
- 时间最短：当消缺故障分布在不同电站的不同区域，系统依据距离度量测算最短的故障消缺路径图，减少运维人员在途时间。
- 严重故障优先消缺：当多个故障并存时，运维人员选择按故障的严重程度规划消缺路径，优先对严重故障进行消缺。

如下图 2-7 和 2-8 为 APP 端消缺故障总览，基于光伏电站设备导航地图，标记故障在设备导航地图中位置，并划分故障严重程度，路径规划算法依据消缺考虑因素的权重自动生成最优导航路径，导航路径会自动标记故障消缺路径上所经

设备信息，便于运维人感知消缺路径的实时位置。

消缺导航设备采用手持 RTK 终端，如下图 2-9 所示，该设备内置专业化高精度定位模块，配合抗干扰螺旋天线，实现了厘米级的定位精度，确保了运维消缺的故障定位的准确性和效率。

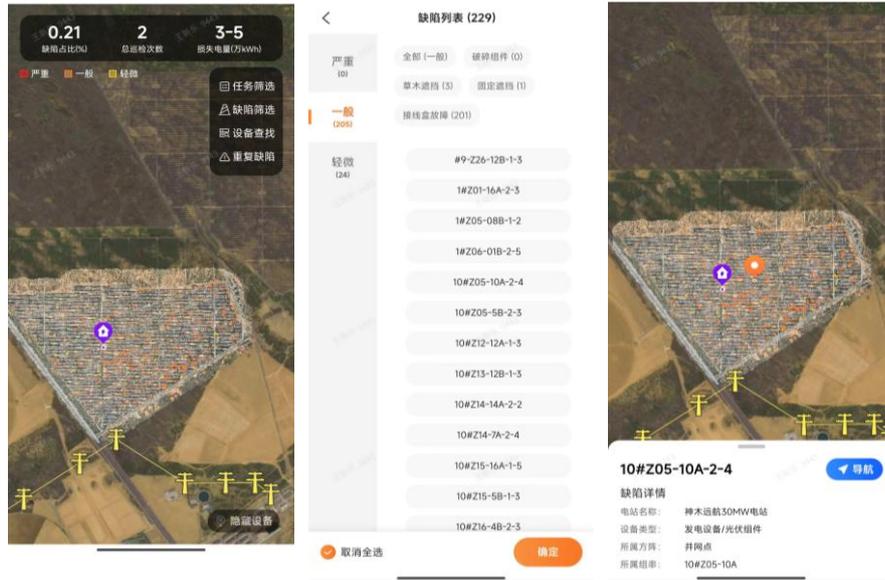


图 2-7 app 端消缺故障总览（左），故障严重等级划分（中）和缺陷位置导航（右）

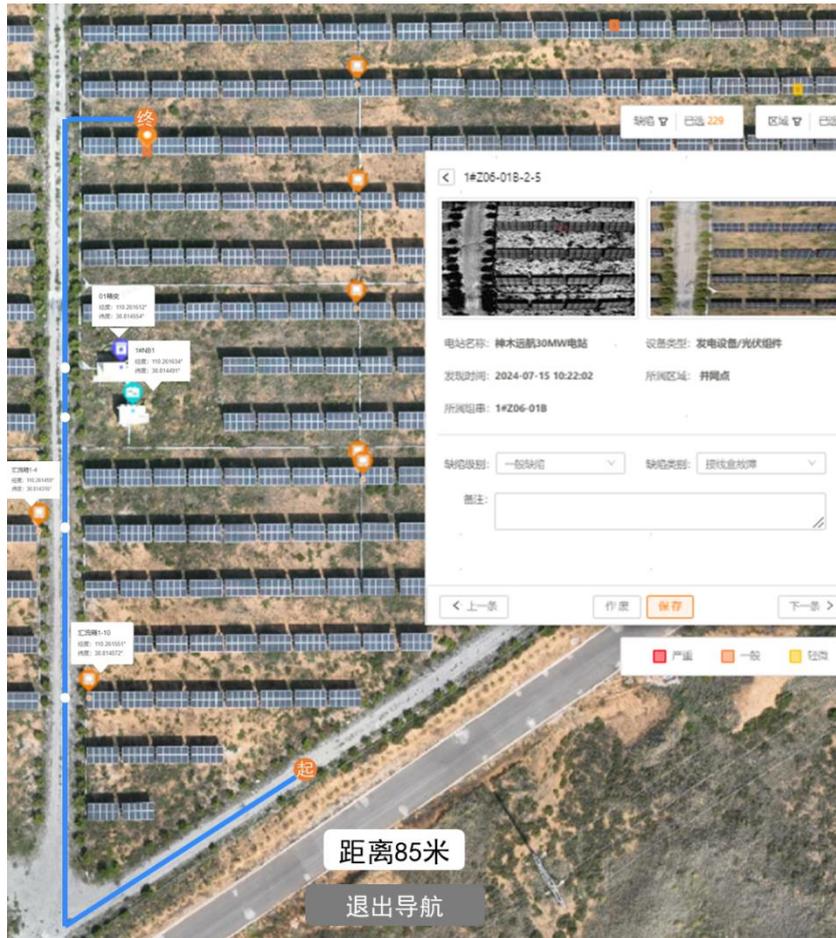


图 2-8 电站故障消缺路径规划图示



图 2-9 手持终端导航设备

2.2.3.2.2 关键技术

(1) 高精度设备地图:

利用无人机采集的 RTK 影像数据生成区域的建模电子地图，并对电子地图中各类设备进行标号，形成电站的设备导航地图。

- 电站建模:

通过航线规划软件对电站区域进行航线规划，飞行时设定航向，旁向和飞行高度等关键参数采集光伏面板可见光建模数据，采集数据通过三维 GIS 软件生成所拍摄区域的数字表面模型 (DSM)，简称电子地图。

- 组串和组件分割:

针对电站电子地图，通过图像逐像素分割和自适应组件填充算法分离出电子地图中的组串和组件，获取组串和组件的经纬度坐标信息，如下图 2-10。组串和组件的四角经纬度坐标标记全景地图中行成电子地图的组串和组件的分割结果，如下图 2-11 所示

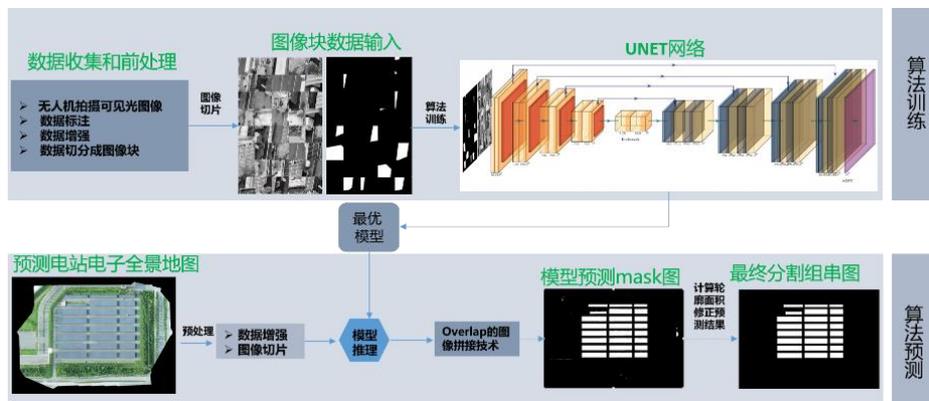


图 2-10 电站组串分离方案



图 2-11 电子地图组串和组件分割图示

- 逆变器、汇流箱等设备提取和编号映射：

利用 CAD 竣工图及电站电子地图，实现竣工图中设备的提取并在电子地图中标记设备名称和地理位置。主要包括将 CAD 竣工图中各个方阵的图片提取，通过智能算法识别出竣工图中逆变器、汇流箱和组串设备的编号和在竣工图中的位置。基于竣工图和电子地图中组串的相对位置，对竣工图和电子地图的方阵图片进行校准，最后将竣工图中识别的设备名称逐一映射至电子地图语义分割的底图中，获取电站高精度设备地图，如下图 2-12，2-13 所示。

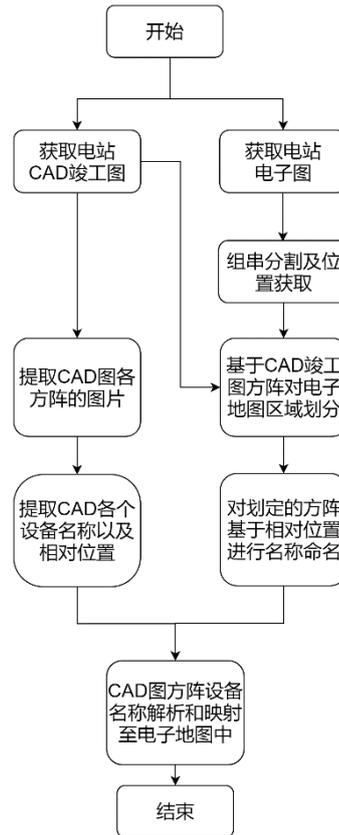


图 2-12 CAD 图纸设备映射电子地图流程图

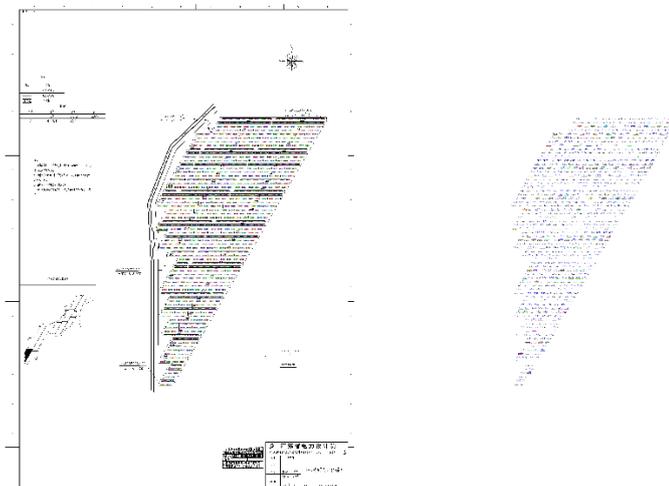


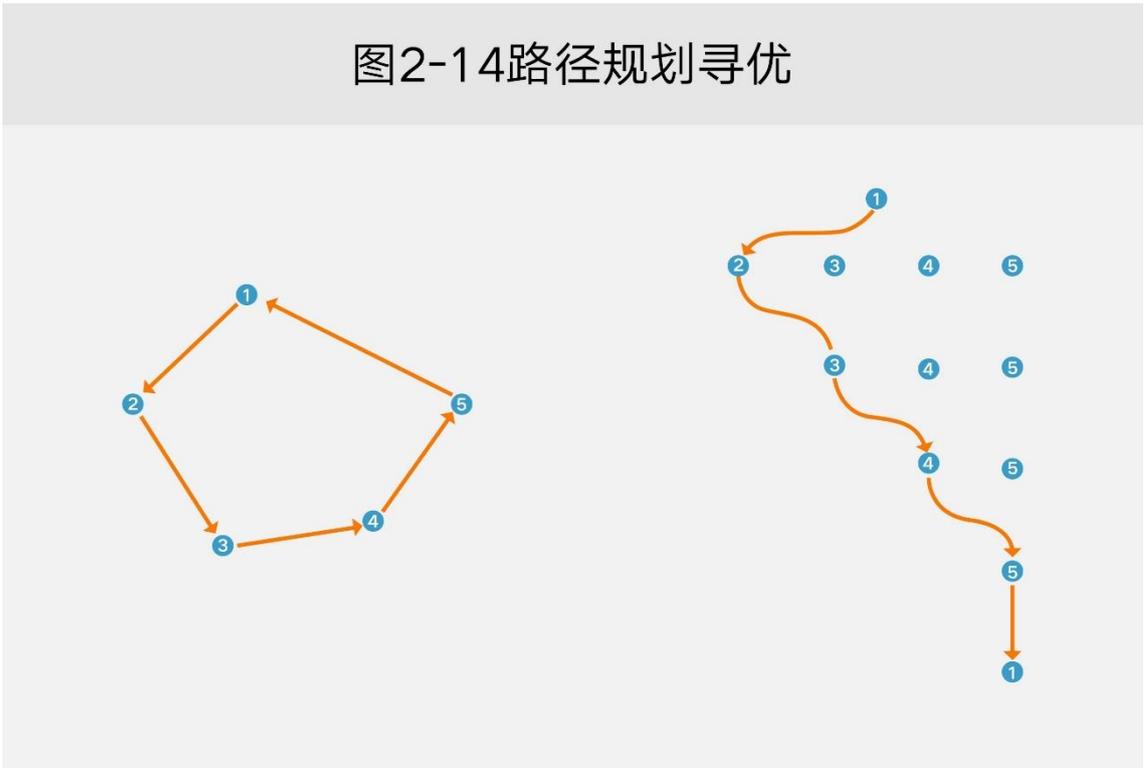
图 2-13 CAD 竣工图方阵标签提取图示

- 路径规划:

针对光伏电站的消缺故障路径规划问题，路径寻优算法充分融合消缺路径的多维度考量，包括消缺时间最小化、关联设备的最优访问顺序以及对严重故障的优先处理。

- 1) 节点定义：光伏电站中的每个故障点被视为路径规划图中的一个节点。
- 2) 边定义：任意两个节点之间存在连边，边的权重可以是两故障点间的物理距离加上处理前一个故障所需的时间，考虑到关联设备优化，若故障点间存在关联性，可减小其间的权重。
- 3) 目标函数：寻找一条访问所有故障点的最短路径，同时确保严重故障优先处理，以及优化关联设备的访问顺序，可采用遗传算法，线性规划或图最短路径算法等获取全局最优解。

图2-14路径规划寻优



4)

2.2.3.2.3 应用目标

应用目标	场景分析	状态
设备导航	快速定位相关设备位置，及时检修和维护	现阶段
路径规划	依据高精度设备地图，对离散故障规划最优消缺路径	未来

2.2.3.2.4 核心技术指标

设备位置标定准确率=电子地图中设备位置标定准确数量/竣工图中设备总数，标定精度>98%。

设备类型覆盖率=电子地图标定设备类型总数/竣工图中设备类型总数，设备覆盖精度 100%。

导航精度：导航系统测量位置与真实位置之间的误差大小。导航精度<0.5 米。

2.2.3.3 自主维护检修

自动维护检修是智能化的关键“最后一公里”，让机器代替运维人员从事一些繁重的、危险性大的工作，对提高电站运维效率，降低运维成本，实现电站本质安全具有重要意义。

2.2.3.3.1 系统全貌

(1) 自动消防系统

光伏电站场区大，设备密集，环境复杂，一旦发生火灾事故，蔓延速度极快，运维人员赶到火灾地点耗时长，且光伏场区设备多为带电设备或充油设备，火灾扑救难度大，扑救过程中容易造成次生伤害。自动消防系统通过遍布场区的烟火探测系统，能够第一时间发现初期火灾，并自动起飞灭火无人机，根据火灾类型携带合适的灭火剂，前往火灾地点灭火，极大增强了电站的火灾扑救能力。

自动消防系统主要由烟火检测系统、无人机灭火系统组成，烟火检测系统负责通过烟雾传感器和图像识别技术检测现场是否存在烟火，一旦存在烟火，发出报警信息并启动无人机灭火系统；无人机灭火系统负责通过无人机携带灭火剂前往火灾地点进行灭火。

(2) 更换组件机器人

更换组件是光伏电站最常见的检修工作，由于组件重量越来越大，以及电站环境越来越复杂，更换组件也变得越来越繁重和危险。更换组件机器人具备导航能力和外界感知能力，通行能力强，自适应不同高度的支架和组件类型，自动抵

达，自动断电，自动更换，自动送电，自动检测更换过的组件是否正常发电，自动返回，全过程无需人员参与，是人工更换组件效率的 2~3 倍，且没有安全风险。

更换组件机器人由环境感知系统、智能决策系统、运动驱动系统组成，环境感知系统负责通过传感器获取周围环境信息，智能决策系统负责对环境信息进行处理，生成决策指令，运动驱动系统负责执行决策指令。

2.2.3.3.2 关键技术

(1) 烟火检测技术

采用传感器和计算机视觉技术相结合的方案，对逆变器、汇流箱、箱变等密闭设备内部采用烟雾传感器检测初起火灾，对组件及环境等开放区域，采用搭载烟火识别算法的摄像头识别烟雾及火焰。基于计算机视觉技术的烟火识别算法包含以下步骤：

图像获取和预处理：通过摄像机或其他设备获取烟火图像，并对图像进行预处理，包括调整图像大小、去除噪声、增强对比度等操作，以提高后续处理的准确性；

特征提取：从预处理后的图像中提取烟火的特征，常用的特征包括颜色、形状、纹理等。颜色特征常用的方法有 HSV 颜色空间、RGB 颜色空间等。形状特征通常使用边缘检测、轮廓提取等方法。纹理特征可以使用纹理描述符等方法；

特征分类和识别：通过深度学习算法 YOLOv5 对提取到的特征进行分类和识别；

动态帧检测：对视频前后的烟雾、火焰等连续视频帧进行综合识别分析，充分利用烟雾、火焰随时间连续变化的特征，有效区分干扰源，能够极大程度的降低火灾误报率、提高识别精准度和速度；

结果输出和应用：根据分类和识别的结果，进行相应的处理和应用。可以根据需要进行报警、记录、统计等操作，以实现烟火的自动检测和识别。

(2) 无人机烟火跟踪技术

烟雾传感器或摄像头检测到烟火后，会传回烟雾传感器或摄像头自身的地理坐标，灭火无人机会根据传回的地理坐标自动飞往烟雾传感器或摄像头所在区域，

到达火灾区域后灭火无人机调整飞行高度上升至高空，通过搭载的双光摄像头检测烟火，根据烟火与无人机的相对位置调整航向和航速，直到烟火位于无人机的正下方，锁定烟火后无人机下降至适当高度，释放灭火剂，在灭火过程中，无人机会自动跟踪烟火位置，直至检测不到烟火，此时无人机会再次上升，从更高高度检测烟火，若检测不到烟火，说明火灾已扑灭，无人机自动返航，若仍能检测到烟火，则调整航向航速跟踪烟火，重复上述灭火步骤。

(3) 通用人形机器人技术

通用人形机器人技术包含机器人技术、人工智能技术以及机器人与人工智能融合技术，分别对应人类的身体、大脑及小脑功能，搭载高性能伺服关节以及视觉、听觉、触觉等全方位感知系统，能够自主观察周围环境与建立 3D 语义地图，设计高精度行走轨迹和准确避障，具有高度灵活机械手，并结合手眼协调能力，可完成抓取、搬运、拆卸、安装等复杂动作，在标准化作业场景中可以代替人类工作。

2.2.3.3.3 应用目标

应用目标	场景分析	状态
烟火检测系统	用于光伏电站火灾检测，缩短火灾发现时间	现阶段
无人机灭火系统	用于光伏电站火灾扑救，缩短火灾扑灭时间	未来
更换组件机器人	用于代替人工进行组件更换	未来

3. 综合评审及性能验证

为全面验证地面电站数智运维解决方案的技术水平、应用效果及技术成熟度，2024 年 4 月至 7 月，鉴衡派出验证组对“阳光智维”开发的“地面电站数智运维解决方案”进行了综合评审，并选择样本电站对方案中采用的 8 项创新性技术进行了性能验证。

图 3-1 为评审与验证过程概览, 图 3-2 为性能验证指标框图。

基于综合评审和性能验证结果, 综合评定：“阳光智维”开发的“地面电站数智运维解决方案”达到“智维二代”的技术和性能水平，为行业领先。

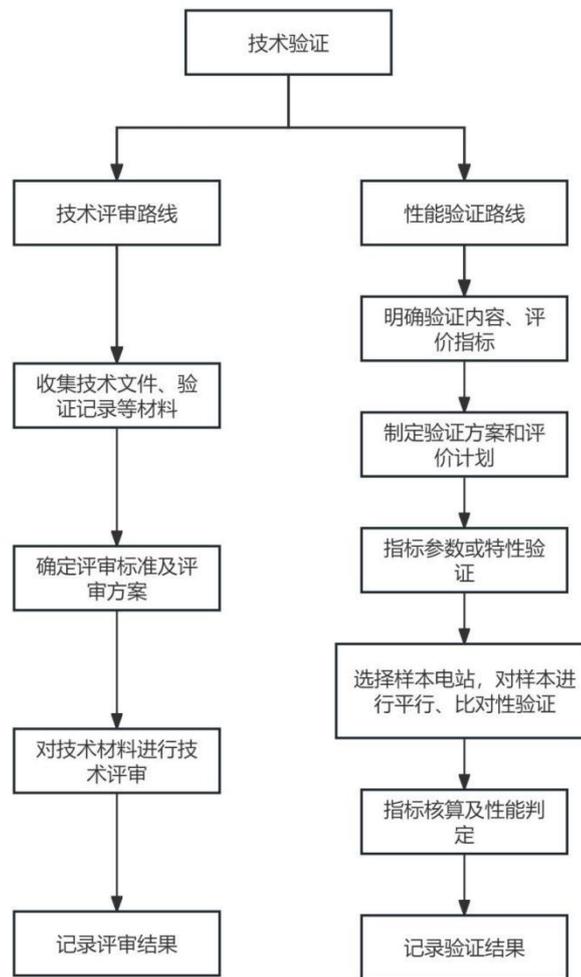


图 3-1 评审与验证过程

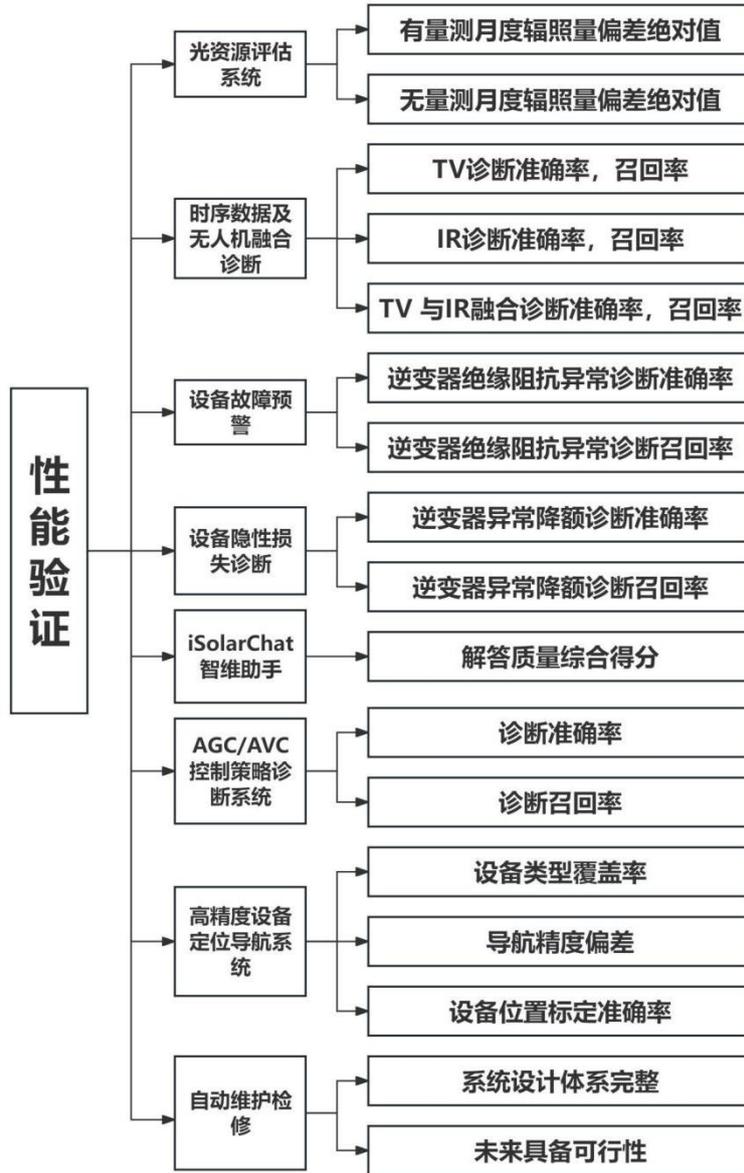


图 3-2 性能验证指标框图

3.1 综合评审

阳光智维自 2017 年开始进行数智运维集控系统技术研发，并于 2018 年发布了 V1 版数智运维集控系统解决方案产品，针对产业技术进步及不断变化的应用需求，“阳光智维”对 V1 版产品进行了持续优化和升级，目前已形成新一代智维方案。“阳光智维”新一代智维方案应用了先进的通信和软件架构，多种数据源及物理机理模型和人工智能模型深度融合及交互设计，使得光伏电站运维更便捷、更精准、更高效。

在地面电站数智运维系统解决方案形成过程中，“阳光智维”注重原创性技术的开发和应用，形成了一系列专有和专利技术。截至目前，“阳光智维”在光伏发电系统故障诊断领域形成 10 项

发明专利，在控制策略诊断领域形成 2 项发明专利，在灰尘分析领域形成 2 项发明专利，在系统优化领域形成 2 项发明专利，详见表 3-1 及图 3-3。

表 3-1 专利列表

序号	专利名称	领域
1	电站及其故障设备的电量损失计算方法、相关应用设备	故障诊断
2	一种光伏设备故障诊断方法及其应用装置	故障诊断
3	一种光伏电站损失电量的计算方法、装置及存储介质	故障诊断
4	光伏逆变器故障检测方法、设备及介质	故障诊断
5	一种逆变器限功率运行诊断方法、装置及监控设备	故障诊断
6	Method and system for determining shielding to photovoltaic string	故障诊断
7	光伏发电跟踪系统的异常检测方法、装置及存储介质	故障诊断
8	低效组串的定位方法、装置及计算机存储介质	故障诊断
9	一种光伏组串遮挡判断方法及系统	故障诊断
10	光伏电站的故障确定方法、装置、处理器与光伏系统	故障诊断
11	光伏电站 AVC 指令异常判断方法和装置	控制策略诊断
12	一种光伏电站 AGC 指令异常诊断方法及系统	控制策略诊断
13	光伏组件清洁方法、装置、设备及计算机可读存储介质	灰尘分析
14	光伏组件的灰尘检测装置及方法	灰尘分析
15	一种逆变器失配优化方法、装置及设备	系统优化
16	一种光伏组件的降温控制方法、装置及系统	系统优化



图 3-3 专利证书表

3.2 性能验证

为全面验证图 3-2 中各项技术的性能水平，验证组选择 4 个样本电站，针对图 3-2 中的各项指标，抽取电站运维中的相关数据信息，在书面评审的基础上，选择合肥市肥东金阳光伏电站进行了现场验证。4 个样本电站包括合肥市肥东金阳光伏电站、大同市左云光伏电站、六安市霍邱华钦光伏电站、宿州市灵璧光伏电站。图 3-4 为合肥市肥东金阳光伏电站实景图，表 3-2 为各项指标的验证与评定结果。



图 3-4 金阳光伏电站实景图

表 3-2. 应用性能验证与评定结果

内容/指标	指标要求阈值	验证结果	评定结果
1.光资源评估系统	1.有量测月度辐照量偏差绝对值<5% 2.无量测月度辐照量偏差绝对值<5% 3.置信区间 90%	1.90%置信区间内，有量测月度辐照量偏差绝对值最大值 4.26% 2.90%置信区间内，无量测月度辐照量偏差绝对值最大值 4.98%	符合
2.TV/IR 融合诊断	1.TV 诊断准确率≥95%，召回率≥95% 2.IR 诊断准确率≥97% 召回率≥96% 3.TV 与 IR 融合诊断准确率≥98%，召回率≥96%	1.TV 诊断准确率 96.6%，召回率 95% 2.IR 诊断准确率 98.3%，召回率 96.7% 3.TV 与 IR 融合诊断准确率 98.3%，召回率 96.7%	符合
3.设备故障预警	1. 逆变器绝缘阻抗异常诊断准	逆变器绝缘阻抗异常诊断准确率	符合

	确率>92% 2. 逆变器绝缘阻抗异常诊断召回率>80%	93.75% 逆变器绝缘阻抗异常诊断召回率 88.23%	
4.设备隐性损失诊断	1. 逆变器异常降额诊断准确率>97% 2. 逆变器异常降额诊断召回率>90%	逆变器异常降额诊断准确率 97.82% 逆变器异常降额诊断召回率 91.83%	符合
5.iSolarChat 智维助手	解答质量得分>4分	解答质量得分为4.2/4.5分, 满足解答质量得分大于4分的要求	符合
6.AGC/AVC 控制策略诊断	1.诊断准确率>95% 2.诊断召回率>90%	1.诊断准确率 100% 2.诊断召回率 98.46%	符合
7.高精度设备定位导航系统	1.设备位置标定准确率 100% 2.设备类型覆盖率 100% 3.导航精度偏差<0.5米	1.设备位置标定准确率 100% 2.设备类型覆盖率 100% 3.导航精度最大偏差 0.491米	符合
8.自主维护检修	1.系统设计体系是否完整 2.未来具备可行性	1.确认系统设计体系完整 2.确认未来具备可行性	符合