



2024

智能光伏十大趋势

持续创新 质胜未来 加速光伏成为主力能源



2024年1月



前言

2023年，碳中和按下加速键。全球光伏新增装机超400GW，储能超100GWh，光储市场持续快速增长。地面电站在中国扩展到流域高原、沙戈荒、农光等多个场景，空间倍增；工商业、户用光伏在欧、美等市场基础上，加速向亚太、拉美、非洲等市场发展，进入千行百业、千家万户。储能也成为新能源发展的关键支撑，光储融合加速光伏从“补充电”成为“主力电”。

根据国际可再生能源机构预测，2030年光伏装机将达到5200GW，2050年达到14000GW，可再生能源比例达90%以上，其中光伏将成为绝对主力。

但在光伏成为主力能源的过程中，仍然存在大量机遇与挑战，需要我们产业通力解决：

其一是并网挑战

光伏系统从大电站，到千行百业，千家万户，正全面高速增长，如何让各类型光伏稳定并网，并长久可靠运行，需要电力电子系统软硬结合的综合能力。

其二是运营挑战

电站规模不断提升，对生命周期运营管理的要求，也不断提高。而海量分布式站点的接入，如何更简单高效的管理，需要云、AI、智能化能力的演进。

其三是安全挑战

安全需要从整个电力系统整体考虑，不仅仅局限于设备本身。同时，我们还要加强，对用户端电力安全稳定的要求，提升系统端到端的安全能力。

针对上述挑战，华为对光伏发展的判断，以一个核心，五大关键特性，四大根技术构成十大趋势，支撑未来光伏的高质量发展。



目录



趋势一

光储成为稳定电源

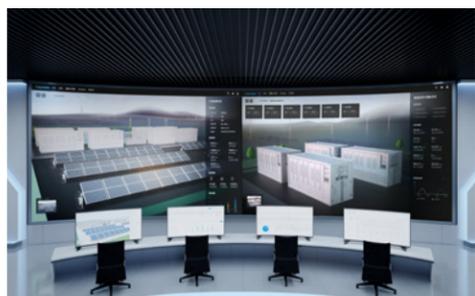
P04



趋势二

千万级电站网元管理

P06



趋势三

全生命周期智能化

P08



趋势四

全场景 Grid Forming

P10



趋势五

四维安全

P14



趋势六

Cell to Grid 储能安全

P18



趋势七

MLPE & CLPE

P20



趋势八

高压高可靠

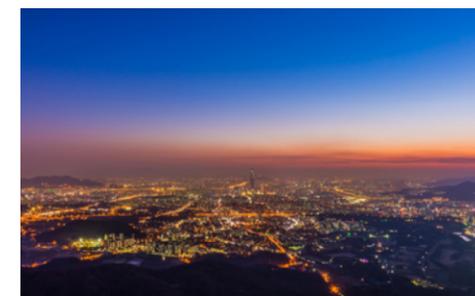
P23



趋势九

高频高密化

P25



趋势十

高品质电能质量

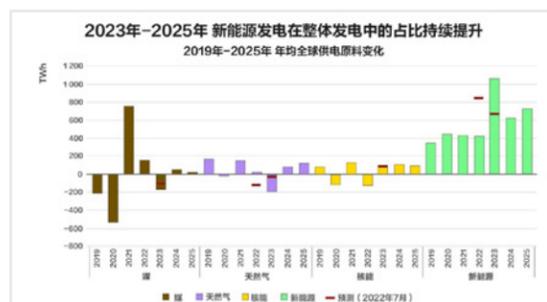
P27

趋势一

光储成为稳定电源

| 背景

据统计，2023年全球光伏新增装机或已突破400GW。国际能源署发布的《2023年电力市场报告》指出，可再生能源电力将成为未来三年全球电力装机增长的“绝对主力”，而光伏在其中将扮演举足轻重的作用。过去，光伏发电受制于度电成本等因素，只能作为补充电出现，在整体电力供应中的占比非常低；而在最近三年，随着光伏建设在全球的全面爆发，其在电力供应中的份额不断提升，尤其在光储融合与光储平价的大背景下，光伏（储）系统已经从过去的补充电源，发展成为稳定能源，并且在未来三年将逐步具备作为主力电源的能力。



› 2019-2025 不同类型能源年发电量变化对比

| 趋势

光储从过去的“补充电”，发展到现在的“稳定电”，以及未来的“主力电”。这其中的驱动因素，主要来自两个方面：

一是商业侧 随着光伏组件、储能等成本持续下降，光伏系统的度电成本在过去三年下降了超过30%，而随着碳酸锂价格的大幅下行，储能度电成本的降幅更是超过了60%，光储供电在更广范围、更多场景中实现了商业闭环，大大加速了应用进程。

二是技术侧 随着光储加速融合，以及一系列新材料、新技术的广泛应用，让光储系统的供电稳定性得以大幅提升。比如碳化硅、氮化镓等第三代半导体的应用，让功率器件的效率和可靠性显著增强；光储系统的安全设计水平也在快速发展，从交流侧安全到直流侧安全，从硬件安全到软件安全、信息安全，从被动安全到主动安全，安全设计正在编织一张多节点、全维度的“保障网”；构网型储能技术的应用，让高比例新能源稳定并网与消纳成为可能；此外，GWh级光储建网能力已经有了实际应用案例。

| 应用探索

华为参与建设的全球最大微网储能项目——沙特红海新城400MW光伏+1.3GWh项目，已在2023年10月成功完成交付。红海新城是沙特“2030愿景”中的标志性里程碑，也是全球首个100%由光储供电的新城项目（生物质油机仅作为紧急备电）。新城建成后，每年可接待百万人次来自世界各地的游客。该项目将诸多的“不可思议”变成事实：首先在经济性方面，光储度电成本低于10美分，不到本地柴油供电成本的1/3，这非常契合沙特实现绿色、可持续发展的目标；此外，得益于智能控制算法，华为光储系统可实现最大2:1的光伏与储能功率比，相同储能容量下可实现更多的光伏接入，大大降低了系统度电成本。（传统方案多为“攒机”方案，为了防止异常情况下光伏电流反灌储能，最多只能实现光储1:1功率比）。

在供电稳定性角度，华为基于Grid-forming构网型储能技术构建了一张独立、富有韧性的电网，具备强大的抗扰与自适应能力，这也是构网型储能技术在全球的首个GWh级项目应用。为了实现100%新能源稳定供电，华为参与了整个电网的架构设计、并基于强大的仿真建模能力与全球最大8.8MW光储并网测试平台进行了反复验证。而一系列新技术的应用，也为这座在沙漠中拔地而起的崭新城市“保驾护航”，典型的有GWh级整网黑启动启动、离网连续故障穿越技术等。红海新城成为沙特2030愿景中的一颗闪耀的明珠，也是人类绿色文明发展中的又一个重要里程碑。



› 沙特红海新城
400MW+1.3GWh
储能项目

趋势二

千万级电站网元管理

背景

2023 年全球新建光伏超过 400GW，储能新增装机量超过 100GW，且光储装机量持续保持高速增长。光储已成为全球各个国家实现双碳目标的重要途径，国际能源署（IEA）表示：“更低的光伏组件价格、更大的光伏系统采用率以及大规模部署的政策推动，将在包括中国、欧盟、美国和印度在内的所有主要市场引发更高的增长量。” 2022-2027 年全球分布式光伏新增装机量占比预计将从 47% 增长到 58%，分布式光伏新增装机容量占比将超过集中式光伏电站，成为新能源领域增量市场的重要组成部分。但是随着千万级电站装机量和接入电网比例越大，对电网的冲击性也越来越大。如何通过发输配用的高效智能调度协同，构建一张多能互补能源数字化网络成为行业发展的关键诉求。



全球光伏新增装机增长趋势预测

趋势

超大规模海量电站纳管 基于 CloudNative 云原生全分布式技术，通过分钟级接入、平滑扩容和大数据分析，实现数千万级光储电站的智能化管理。新型智能化能源管理系统通过集成新能源设备、先进传感技术、信息互通技术、信号控制技术、储能技术，形成具有高度智能化、自动化、互通化等特征，构建一张拥有千万个互通协同能源节点的智慧能源网络，以更好地支撑电力系统安全、可靠、高效运营。

源网荷储协同调度多能互补 到 2030 年前将全球可再生能源发电能力将提高到目前的 3 倍，超大规模的电站的智能调度管理是核心能力，能源与信息技术深度融合是关键技术方向，基于先进的大数据、AI 大模型及 IOT 通信控制技术，将光伏电站、储能、可调负载、新能源车、电网等可控资源聚合运行，实现电源、电网、负荷和储能的高效协同，系统性的提高电力系统功率动态平衡，以实现能源资源最大化利用。

开放的生态对接合作 家庭能量管理在欧洲高速发展，截至目前欧洲累计有 110+W 户家庭已部署家庭能量管理系统，开放的北向生态能力成为行业关键趋势。基于北向生态开放能力的智能预测优化与电力交易结合能力，可实现电站逆变器、储能、电网及智能负载的协同调度机制在电力交易市场获得投资收益最优。

应用探索

华为智能光伏云 – 超大规模千万级电站网元智能管理

截至 2023 年年末，华为智能光伏云已具备了千万级设备稳定接入和管理的能力。基于 CloudNative 云原生架构的分布式技术，综合利用物联网、大数据和人工智能等技术，可对光伏电站进行智能诊断、高效调度、智能巡检等。对接全球大量气象站，可以实现精确到小时级的发电量预测。

深圳龙岗低碳城 – 国内首个零能耗场馆类建筑示范项目

深圳市龙岗区国际低碳城会展中心采用华为数字能源的“能源云网 + 智能光储”方案，建设了国内首个近零能耗园区场馆，安装 1.1MW 光伏、2MWh 储能并通过能源管理智能系统进行“源网荷储”多能互补的友好协同。通过光伏系统、充电网络、能源通信控制器、智慧照明，智能温控的互动协同，实现了园区内的灵活柔性协同调度，进而达成系统能源利用率最优。根据低碳建筑的特性据测算，深圳国际低碳城投入后，每年将生产 127 万度绿电，减少碳排放 606 吨，等效植树 3.1 万棵，为低碳园区的标杆示范项目。



深圳龙岗低碳城 “源网荷储”系统

趋势三

全生命周期智能化

背景

光储电站装机量不断增加的同时，电力电子技术与数字技术的融合也在不断加深。早在 2021 年末，五部门联合发布的《智能光伏产业创新发展行动计划（2021-2025 年）》便从智能设计、智能集成和智能运维等方面给出行动指导。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。光储电站正积极探索数字化转型之路，通过诸如数字化作业平台、无人机巡检系统等智能化的监控、运维与管理的工具来提升电站的运维效率与运行的可靠性。然而，在高速建设、多能互补、协同调度等大背景下，无论是集中式还是分布式光储电站均面临着来自效率、质量和收益等方面的多重压力，电站全生命周期智能化的需求应运而生。

趋势

数智技术将在电站“规、建、维、营”全生命周期发挥关键作用。

电站规划阶段 充分利用无人机、卫星、机器人等进行踏勘，对电站周边环境进行充分评估，提升踏勘质量及效率，辅助光伏电站选址、设计和投资决策。尤其是对于分布式电站，基于无人机图像或高清卫星影响可以识别复杂屋顶的障碍物，精准确定光伏安装容量。自动化的电站设计工具可实现分布式电站的自动设计，包括 3D 屋顶建模、组件排布与接线设计、设备选型等。通过分析历史用电负荷，可以智能推荐储能配置比例，给出投资收益报告。整体规划时间缩短 50%。

电站建设阶段 面积广、选址偏、施工人员多、物料多、施工时间紧张等特点给电站进度和质量的监管带来极大挑战。因施工阶段场站监控还未建成，搭载高清变焦摄像头的无人机便成为场站的流动“监督员”。通过实景建模技术，智能比对现场状态与设计图判断施工进度是否正常；通过视频智能检测组件倾角、桩基位置等是否达标，减少 40% 的质量问题；智能识别堆放异常的物料、未按要求着装的工人以及突发火情等，保障施工现场安全。



电站运维阶段 目前智能化的应用最为广泛，基本可以实现例如发电性能分析、充放电管理、电芯离散分析、故障诊断与定位、异常告警与消缺指引等功能。不断积累的电站数据将在未来几年催生出预测性维护功能，通过建立 AI 故障模型，可预判设备状态走势，提示未来可能发生的风险，有利于场站及时排查、整改与备件；同时，随着场站规模越来越大，站内路网建模与导航也将大规模应用，快速定位，缩短消缺时间。新老功能互相配合，使得运维智能化得以进一步完善，可将整体效率提升 70%。

电站运营阶段 智能化将在收益提升方面做出突出贡献。对于集中式电站而言，AI 大模型的应用将进一步提升短期和超短期光功率预测的准确性以及光储配合的高效性。不仅可以减少弃光、提升消纳，还能减少因预测不准确而导致的罚款。对分布式电站而言，高精度的预测不仅体现在发电上，更体现在用电负荷的预测上：人工智能的应用可以帮助分布式光伏系统更准确地预测电力需求，以便合理规划和调配光伏与储能资源，帮助分布式系统在复杂的电力交易市场中获得最大化的收益。

光储电站全生命周期智能化的实现，可以让光储电站全阶段实现高质量、高效率、高收益，提高电站的可靠性和稳定性，促进新能源的发展和应用。

应用探索

雅砻江柯拉光伏电站位于四川省甘孜州雅江县，项目坐落在川西高原，海拔 4000m 以上，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。柯拉光伏电站与两河口水电站水光互补，是世界级的高原流域型大基地创新标杆。华为智能光伏与雅砻江流域水电开发有限公司成立联合创新中心，以柯拉为起点，与伙伴一同针对光伏电站建设期、运维期、运营期的痛点问题开展关键技术研究，赋能光伏电站智能化运作。通过构建数字底座，利用高精度超短期功率预测、无人机实景建模、数字孪生、智能融合诊断等技术，实现全域感知、精准预测、精细管控，打造大而易管、易管且安全、安全并全面领先的智能化大基地。



趋势四 全场景 Grid Forming

背景

以新能源为主体的新型电力系统是实现碳达峰、碳中和目标的重要载体。

与同步发电机组相比，传统新能源具有低可控和低转动惯量等特性，随着其渗透率的不断提升，发生故障时传统新能源系统无法像同步发电机组一样，主动进行电压和频率支撑，越来越难以适应新型电力系统发展的要求，给电力系统的安全稳定运行带来了极大挑战。

另外，如调相机这样的同步机组方案，初始成本主要由铜线圈、硅钢、合金钢等材料成本构成，并且 1%~2% 的损耗会带来二次投资的电费成本；同时，作为大型旋转设备，需要运维人员 24 小时值守，定期大修小修也会带来高昂的运维成本。生命周期投资成本高，极大地影响业主的投资收益。

趋势

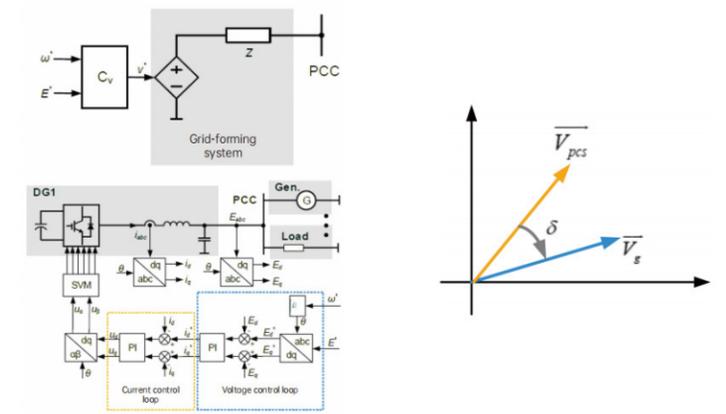
高比例新能源的接入带来的弱电网问题已成为共识，行业纷纷在探索解决此问题的新技术。随着华为智能光伏去年发布十大趋势中的光储发电机，今年整个行业也愈发关注其中 Grid Forming（即构网）这一支撑电网稳定的技术。如国内的新疆、西藏等省份，欧盟和芬兰等组织和国家，也相继发布 Grid Forming 相关政策，支持该技术的发展。



从技术角度，智能光储发电机具备：

01 电压构建技术

借鉴同步机组的电压建立过程，智能光储发电机通过输入给定的电压和相位，以实现从传统的电流控制向电压控制的转变，因此在电力系统中的外特性表现为电压源，能够具备电压构建的能力。



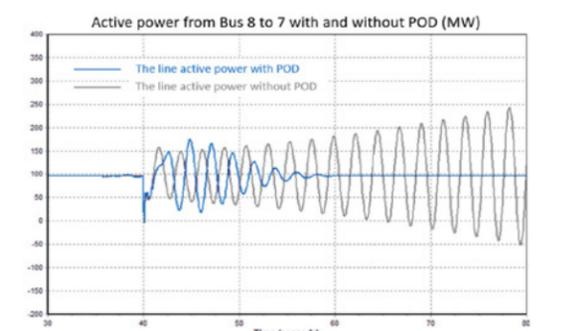
构网型技术基本控制原理框架

02 虚拟惯量支撑技术

通过给定光储发电机的虚拟转动惯量 J 和阻尼系数 D，从控制策略上模拟同步机组的机械运动方程，此时光伏和储能电池可类比于原动机，而变流器等等效为发电机，从而实现对同步机组两阶模式的等效。系统频率变化通常由不平衡功率冲击引起，在此过程中，光储发电机也将感受到不平衡功率的作用，在不平衡转矩的作用下，主动快速将转子动能的变化以电磁功率的形式注入电网，实现对系统的惯量支撑。与同步机组不同的是，电力电子设备的参数受硬件限制小，因此光储发电机的虚拟转动惯量 J 和阻尼系数 D 可灵活设置以适应不同的运行场景，提高对系统频率的控制能力。

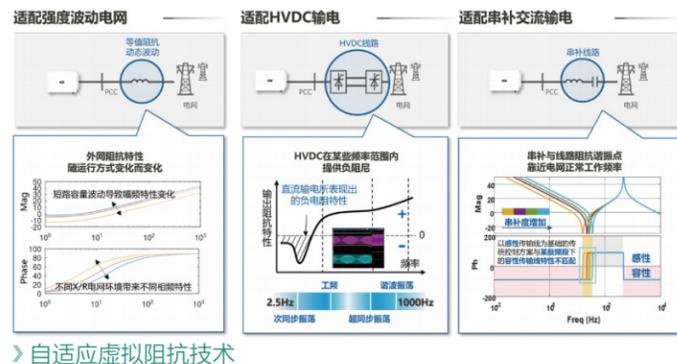
03 POD 功率抑制技术 + 自适应虚拟阻抗技术

同步机组一般在励磁系统中加入电力系统稳定器（PSS），形成附加阻尼控制以提高系统阻尼，从而抑制低频振荡。光储发电机借鉴这一原理，通过在站级控制器（PPC）中引入低频振荡 POD 功率抑制技术，使光储系统具备类同步机组 PSS 功能，输出附加阻尼控制功率，从而达到抑制 0.1 ~ 2.5Hz 低频振荡的效果。下图为在站级控制中对比有无低频振荡 POD 功率抑制功能的仿真效果。针对次 / 超同步振荡问题，



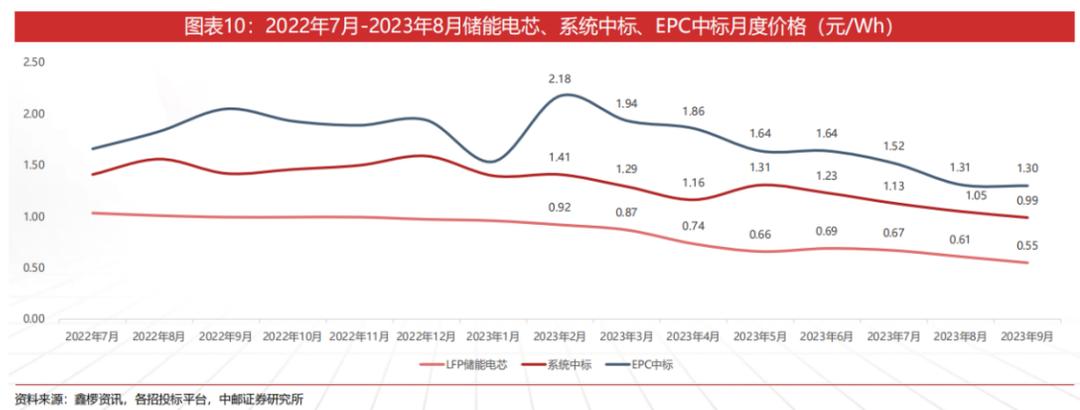
低频振荡 POD 功率抑制效果示意

华为智能光伏解决方案采用自适应虚拟阻抗技术，通过 AI 自学习动态地调整电站本身的电气特性来匹配电网特性，使逆变器和 PCS 主动调节自身阻抗，改变输出阻抗的幅频相频特性，提高稳定性，避免在次 / 超同步频段出现阻尼不足的问题引发功率振荡。从而可以抑制 2.5-100Hz 的振荡抑制。



基于以上技术，在电网的稳定性指标上（即电压、频率、功角三大稳定指标），智能光储发电机具备 3 倍无功电流、最大 20s 时间常数的等效转动惯量、0.1-100Hz 的宽频振荡抑制能力。单纯从能力上看，智能光储发电机方案已经等同于传统的同步机组方案；

从商业价值角度，随着电芯成本的进一步降低，以及数字化智能化技术和并网技术的发展，Grid Forming 方案的经济性相比传统同步机组 + 常规储能的方案也更优，可以带来生命周期投资成本的节省。



政策 + 技术 + 商业价值的多轮驱动，会促使 Grid Forming 的应用场景持续扩大，从当前的大型地面电站向工商业和户用快速扩展，并且也不仅局限在光伏场景，与风电、水电等新能源的结合也将成为可能，从而推动新能源从支撑电网向增强电网，再向全场景增强电网快速发展，保障全场景的稳定消纳，加速构建以新能源为主体的新型电力系统。

应用探索

基于华为研发的智能光储发电机方案，2022 年华为联合华润电力，在中国电科院和青海电科院的指导下，持续开展研究课题的实际验证与示范应用工作，并于 2023 年 1 月在青海共和华润济贫光伏电站共同完成了全球首次构网型光储系统现场测试。本次测试涵盖了构网系统并网稳定性、高 / 低电压单次 / 连续故障穿越、一次调频及惯量响

应特性等一系列测试。该项测试充分验证了构网型新能源发电系统在加强电网运行特性和实现高比例可再生能源目标方面可以发挥关键作用，是新能源技术发展的重要里程碑。



2023 年 9 月，ACWA POWER、山东电建三公司、华为携手建设的全球最大的光储微网项目——沙特红海新城项目全容量并网。作为全球首个 100% 使用新能源供电的城市，也是沙特王国 2030 碳中和愿景规划的重点项目。该项目规划建设 400MW 光伏、1.3GWh 储能，完全由光储系统支撑电网，替代传统油机，为 100 万人口提供清洁稳定电力，助力沙特王国打造全球清洁能源和绿色经济中心，也成为面向未来，全球实现 100% 光储清洁供电的重要实践。



2023 年 9 月，华为联合国家能源集团，在中国电科院和青海电科院的指导下，于青海格尔木宙亮电站共同完成了全球首次弱电网下的构网型储能系统现场测试。本次测试涵盖了不同短路容量比下的电网稳态响应相关测试、电网暂态响应相关测试，以及各短路比下相角跳变，频率跳变，阻抗跳变，低频振荡，变阻尼控制，以及过载能力等其他测试和黑启动测试，共 510 项。该项测试是全球首次弱电网场景下的构网型新能源发电系统特性和指标现场测试，验证了华为智能光储发电机这一构网型发电系统在强网和弱网场景下，均能发挥加强电网运行特性，支撑电网稳定的关键作用，加速实现高比例可再生能源目标，并构建以新能源为主体新型电力系统。



该项测试是全球首次弱电网场景下的构网型新能源发电系统特性和指标现场测试，验证了华为智能光储发电机这一构网型发电系统在强网和弱网场景下，均能发挥加强电网运行特性，支撑电网稳定的关键作用，加速实现高比例可再生能源目标，并构建以新能源为主体新型电力系统。

趋势五

四维安全

| 背景

以新能源为主体的新型电力系统在全球高速发展，为确保新型电力系统长期的稳定运行，我们需要多维度安全考虑系统安全。海内外众多机构、设备厂家等也在对此进行研究，但更多聚焦于能源设备的基础安全，如提供更多的防护和预防措施，还有智能化的检测措施，以确保设备的稳定运行；还有一些机构研究新型电力系统网络的安全，去保障电站信息的安全，个人隐私数据非法获取或篡改的防护等。但是，这些思考点仍然不足，我们需要站在更高的维度找到方案，实现电力系统的长期稳定安全。

| 趋势

安全需求我们从单维“设备安全”走向四维“大安全”，确保新能源电力系统长期稳定可靠运行。这里的四维分别指：

第一维

供应安全，通过构建电站核心设备的供应安全体系，同时确保站级和云端的系统安全可控，全方位夯实新型电力系统的安全基石。这里的电站和新设备，主要是指设备里的关键器件，要具备长期稳定供应的能力。而电力的操作系统，将是电站未来稳定运行的基础，要确保系统的生命周期，且具备稳定的软件更新与升级能力。

第二维

设备安全，结合电力电子与数字技术，通过预防性诊断、精细化管理等措施确保电力系统每个设备节点的安全，构建电力系统长期稳定、高效运行的支柱。各个厂家通过数字化和精细化的措施，不断提升设备的安全防护能力，并且不仅仅做到设备本身的安全，还进一步向外衍生，支持与设备连接的哑设备的安全。比如通过逆变器与光伏优化器的结合，不仅仅做到设备的故障检测，还可对线缆的拉弧，接地、阻抗进行检测，组件的故障进行定位，保证每个节点的安全可靠。

第三维

网络安全，搭建安全可信的网络架构，从产品级到电信级网络安全认证，保障网络的可靠、可用、安全、韧性，实现新型电力网络的骨架安全。对于可靠、可用与韧性，电站对于外部的恶意攻击，首先要做到防止未经授权访问而获取系统信息，保障个人隐私或敏感数据不泄露，并确保信息不被非法授权修改和破坏，相应的措施如安全启动、数字签名以及对证书的集中管理等。然而，这种被动的信息防护难以应对当今复杂多变的网络环境，需从被动安全走向主动安全，提高电站系统的安全韧性。比如实时调整系统入侵检测策略，使电站系统具备自主的入侵检测能力；在检测到网络安全事件或隐患后，能及时响应并采取相应措施，使因网络安全事件受损的功能/服务得以快速恢复，保障业务的连续性。另外，通过将管理系统的组网协议模块化，可最小化外部网络攻击对电站系统产生的影响，最大程度降低经济损失。

第四维

电力系统安全，从适应电网，到支撑电网，再到增强电网；从调度预测控制到应急恢复，通过数字化赋能与电网智能互联，实现多能协同的互补安全和源网荷储的互动安全。新型电力系统的安全，要考虑两个大方面，首先是发电侧的多能互补的安全，水、光、风等能源互补调配，保证能源利用率的最大化。其次，是我们要确保源网荷储整条网络架构上的安全，从发电侧，到传输，再到配网，以及最终的负荷，调配机制，故障穿越，负荷对电能质量的要求等，都需要进行系统考虑。



应用探索

• CC 认证 (Common Criteria)

华为商用逆变器通过了行业首个 CC EAL3+ 认证，引领了光伏行业的安全认证。

• 工业网络安全标准 IEC 62443

华为的网络管理系统、SmartLogger3000 以及 LUNA2000B（工商业储能）和 LUNA2000C（电站储能）获得了 IEC 62443-4-2 SL2 认证；产品开发流程获得了光伏行业最高水平的 IEC 62443-4-1 ML3 认证。

• 信息安全管理标准 (ISO27001)

华为的信息安全管理获得了 ISO27001 系列的认证。

通过技术、行业和全社会的共同努力，将助力光伏行业构建数字信任，实现持续健康发展。



工商业光伏安全白皮书

工商业场景资产重，人员复杂，然而，从整个行业上来看，光伏电站的安全方案设计及安全特性的普及程度仍不尽如人意，实现工商业光伏系统的安全、可靠需要整个行业的携手努力。华为工商业光伏联合莱茵共同发布工商业光伏白皮书，表达坚持把安全放到解决方案的第一位，践行安全至上的设计准则，通过系统化的安全设计方案以及行业领先的安全防护技术实现对工商业主的全方位保护。同时，华为希望可以与业界同仁一起，继续推动工商业光伏安全标准的不断完善，打造百分百安全、可靠的光伏电站，助力千行百业低碳绿色转型，构建可持续的商业运营。



工商业储能安全白皮书



工商业储能直面工厂、医院、商场、园区等应用场景，较传统电站储能而言，场景更复杂、消防难度更大、人员资产更密集，其对于安全的需求尤为凸显。为了让业界可以更全面地了解工商业储能系统中的安全设计，华为和 TÜV 莱茵联合发布“工商业储能安全白皮书”，旨在探讨工商业储能安全，从设备、资产和人身三个维度出发，介绍储能能在工商业场景下的安全挑战和发展现状，以及面向未来的创新技术理念和方向，供行业参考。

雅砻江电站与红海新城的应用

从电力系统架构整体考虑电力系统的安全性，其中雅砻江综合考虑多能互补的稳定运行，红海新城对源网荷储的整体安全进行系统考虑，并且都得到了实践验证。

趋势六

Cell to Grid 储能安全

| 背景

储能的规模应用与安全标准升级，要求其实现从电芯的本体安全到系统级的电网安全。近年来，储能技术的高速发展也带来了一系列的安全挑战，安全事故还是鲜有发生，有电芯缺乏管理导致的隐患，也有在电网侧因高低压穿越失败而产生了安全风险。储能作为新型电力系统的重要组成部分，需要整个行业携手攻克从电芯到电网，全场景、多维度的安全设计，通过有效的管理和控制措施加以应对，从而保证整个电力系统的安全。

| 趋势

储能系统的安全设计需要融合电力电子技术、数字技术、热技术、电化学技术、AI 等技术，通过在电芯、电池包、电池簇、储能系统到电网级多维度精细化的监控与管理，保障储能系统更安全、更高效，实现主动构网。



> Cell to Grid 储能安全

电芯级

储能行业电芯容量越做越大，能量密度越来越高，实际项目中的应用更多的关注系统层级循环次数、能量效率等显性化的指标，对于电芯层级安全标准要求逐渐下降。电池的质量和性能对储能系统的安全性影响很大。为了确保电池的安全性，需要对电池进行严格的测试和质量控制，从源头需要保障电芯的安全可靠，构建、安全体系的第一道防线；

电池包级

行业内普遍通过被动均衡解决电芯间的一致性和不确定性，其成组后的电池包更需要具备精细化的主动控制、主动关断能力，保障发生故障或安全风险时，及时隔离故障单元，影响范围最小化，降低财产损失；

电池簇级

电池簇级的防护采用软硬件相结合，即 BMS 主动控制，结合断路器和熔丝的物理

系统级

隔离，在发生短路或者过流等故障时，实现快速分断；

在系统层面，需要对储能系统的充放电、一致性、健康度等多维度诊断，利用 AI 技术搭建预测模型，做到风险提前识别及预警；同时，从探排消泄多方位，端到端考虑热失控后的保护措施，防止事态进一步恶化；

电网级

储能系统作为调节电网稳定性的重要手段，复杂度高，安全不能局限于设备本体，即电池和 PCS 的简单组合，需结合应用场景，考虑储能在电网运行过程中面临的宽频振荡、暂态过电压、电能质量劣化、孤岛光伏供电稳定性、高低电压故障穿越等问题。储能系统应通过高穿自适应等电网算法技术的不断探索和应用，主动构网，提升电网稳定性。

| 应用探索

2023 年，国内湖北省某百兆瓦级储能项目应用结合华为电池风险预警功能，实现电芯级故障预警，该功能可提前识别内短路、温度采样异常、过流等 10+ 故障问题。同时，在储能运行期间，若发生高电压故障穿越，基于储能系统 DC/DC+DC/AC 双级架构和 PCS 高穿自适应算法，可以在高穿过程动态调整母线电压，保证稳定有功输出，且高穿过程电池电压不变，避免电网侧能量反灌电池，整个电站始终保持安全运行状态。



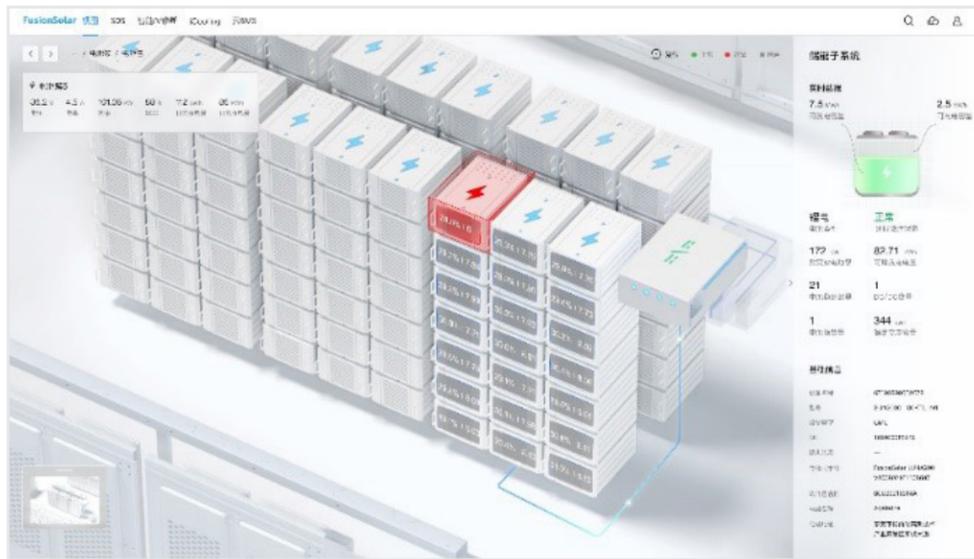
> 湖北公安县
储能电站

趋势七

MLPE & CLPE

背景

分布式光伏在产业政策和技術发展的驱动下近年来迎来蓬勃发展。随着装机总量的快速增长，大面积适装光伏的屋顶资源变得越来越少。面对有遮挡或者多朝向屋顶的场景，如何在保障发电量的同时充分利用屋顶资源成为需要解决的要点问题。另外，分布式光伏多以屋顶为载体，直流侧高压带来安全防护问题需要引起重视，且分布式电站点多面广，只依靠人工难以实现精细化的运维管理。



电芯级精细化管理

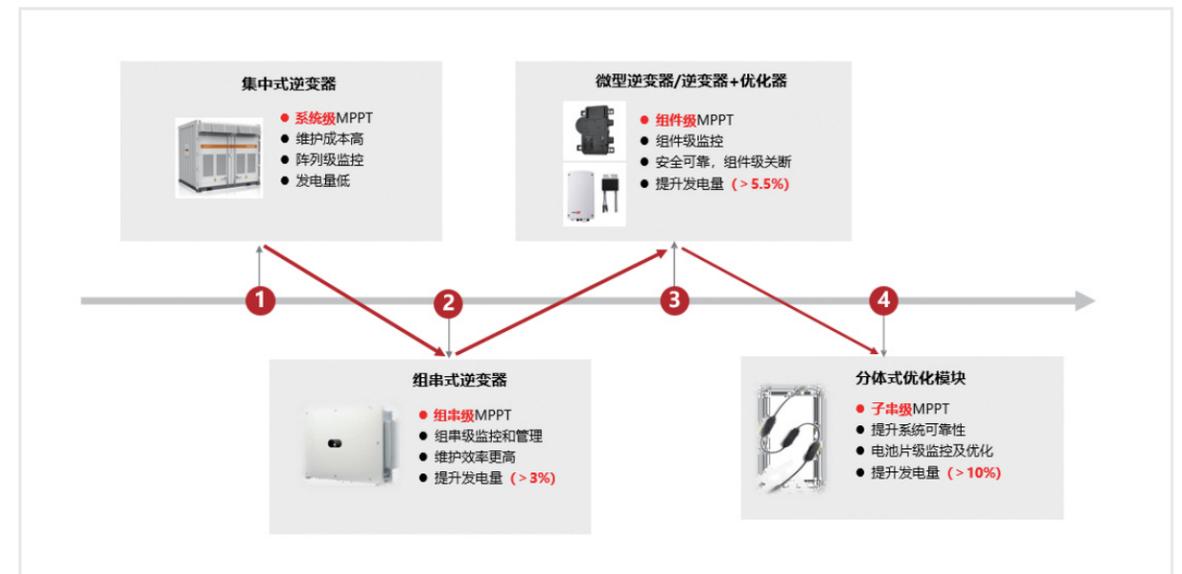
装机总量的逐渐提升，带动组串式储能市场空间不断增大。在锂电池储能系统中，生命周期综合能效和系统安全无疑是最关键的要点。而随着电力电子技术、电化学技术、热管理技术与数字技术在储能领域的融合加深，储能系统的管理颗粒度也从最初针对集中式系统的粗放式管理，发展到电池簇级、电池包级的精细化管理。

因此，如何进一步提分布式光伏的发储电和运维效率，保障更高效和用电安全，实现精细化管理与运维运营成为关键。

趋势

组件级电力电子器件 (Module-level Power Electronics, MLPE) 能对单个或几个光伏组件进行精细化控制的电力电子设备，包括微型逆变器、功率优化器和关断器，**组件级发电、监控和安全关断是其独特价值。**

近年来，各国光伏 RSD (Rapid Shutdown 快速关断) 标准逐步出台落地，美国 NEC2020 规定在紧急情况下 30s 内实现关断，欧洲 VDE-AR-E2100-712 安全标准已强制执行，澳洲 AS5033:2020、泰国 EIT Standard 等也正在执行。随着更多客户对于安全、高发电量等特性的重视，MLPE 的市场价值得到进一步发掘，市场接受度和份额快速提升。以功率优化器为例，全球每年出货量已经达到 2000 万 pcs 以上。回顾光伏电力电子设备的发展历程可以发现，从集中式逆变器到组串式逆变器的迭代发展，实现了从系统级 MPPT 到组串级 MPPT 的升级，系统发电量提升 3% 以上。而从组串式逆变器到以优化器为代表的 MLPE 解决方案的演进，通过实现光伏系统的组件级优化发电和监控，将会让系统发电量和安全性得到进一步提升。



光伏电力电子设备发展历程

正如光伏系统向组件级电力电子 (MLPE) 发展一样，锂电池储能系统也一定会朝着更小的管理颗粒度进发。**电芯级电力电子器件 (Cell-level Power Electronics, CLPE)**，针对电芯开展精细化管理，**有效做到储能系统安全隐患的提前发现、提前预警，并提升电池生命周期可用电量，同时推动储能参与更多样的电力市场交易**，如 VPP 调频等。当前，传统端侧 BMS 只能将有限的数据进行汇总和简单分析，几乎不可能做到故障的早期发现与预警。因此，需要让 BMS (Battery Management System) “更敏感”、“更智能”，甚至要“预知未来”，这有赖于大量数据的采集与运算处理，并结合 AI 技术找到最优解、对趋势做出预判。

应用探索

结合乡村振兴战略的发展，在许昌市襄城县 300MW 整县推进分布式光伏建设项目中，库庄中学整套光伏系统采用全配优化器方案，具备以下特点：



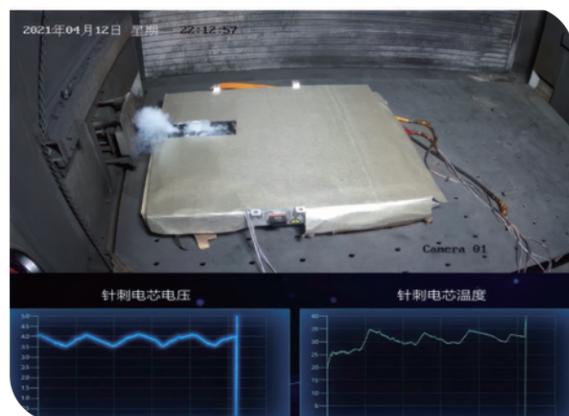
● 满足 NEC2020 安全关断标准，实现用电、安装、运维全方位安全功能。

● 高效智能发电，较传统方案可提升 25.9% 装机容量，大幅提高光伏屋顶空间利用率和美观性。同时，加装优化器系统可以有效减少串并联失配损失，首年提高发电量 6.65%，全生命周期提高发电量 9.7%。

在安全性实践方面，武汉建成中石油第一座“高安全加油站”，系统设计采用全配优化器方案，可实现屋顶电压快速关断至 0V，紧急情况下关闭组件输出，让消防员及时救援成为可能，完全满足加油站对安全的苛刻要求。



应用云 BMS 解决方案，通过部署在储能系统中数量众多的电压、电流与温度传感，将海量数据进行采集与上云，结合 AI 算法与模型，能有效监控电芯状态、并预知态势发展。在电芯针刺试验中，通过直径 1mm 的钢针，模拟衍生型内短路，通过云 BMS 实现小时级电芯热失控预警，将险情控制在萌芽阶段，避免造成更大的损失。云 BMS 技术已在数据量更大、时效性要求更高的电动汽车中得到可靠验证。

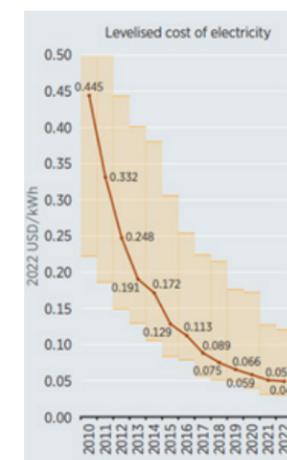


磷酸铁锂电芯针刺试验

趋势八
高压高可靠

背景

据国际可再生能源署发布数据统计，2010 年至 2022 年，光伏电站的全球加权平均度电成本（LCOE）下降了 89%，从 0.445 美元 / 千瓦时（kWh）降至 0.049 美元 / 千瓦时（kWh）。在满足 IEC 标准的前提下，光伏逆变器的设计，通过持续提升直流 / 交流电压等级，可带来系统度电成本下降。不断涌现的光伏技术创新加速度电成本下降，也加速光伏替代传统能源。



光伏电站 LCOE 走势

趋势

交 / 直流电压持续升高

光伏系统 LCOE 的降低很大程度上依赖电压的持续提升。

逆变器系统直流侧电压从 600V 到 1000V，再到当前的 1500V，与之对应的交流侧电压从 270V 和 380V 逐渐增长到当前的 800V。光伏技术不断创新，持续提升直流、交流电压等级，加速了光伏系统的度电成本不断降低。同时，高电压的发展也会降低线缆损耗，提高发电效率，预计未来光伏电站将会继续高压化发展的趋势，直流侧突破 1500V，交流侧突破 1000V 系统。

可靠性进一步提升

进一步提升系统可靠性来应对更高电压带来的冲击。

高压趋势在给光伏行业带来成本下降的同时，也会对光伏系统的可靠性带来新的挑战。

设备可靠性 基于过往的一些研究，在设备可靠性方面，主要通过新材料、新型元器件的应用，开展持续创新，用来支撑光伏逆变器等设备在高电压场景下的稳定运行。

系统可靠性 随着系统电压的提升，带来的风险也逐渐增大，单一的设备可靠无法继续保证系统的稳定运行，预计未来 3~5 年，在系统可靠性方面，通过双极高压架构的设计，以及系统级的安全防护能力，来保证光伏系统的持续可靠运行。

应用探索

2023 年 6 月，中国四川省甘孜州，全球最大、海拔最高的水光互补基地——雅砻江柯拉电站一期 1GW 光伏电站完成并网运行。电站建设在海拔 4000~4600 米的雅砻江流域，全部采用华为直流 1500V 高压智能光伏控制器，高寒高海拔的恶劣环境下，电气安全风险极高，高海拔带来空气稀薄的环境会导致电气设备的绝缘强度降低，且低温也会影响设备的可靠性。截止目前，超 3000 台华为智能光伏控制器稳定运行在高海拔场景中，每年提供超 20 亿 kWh 的清洁能源，这标志着无论是设备可靠性还是系统可靠性都经受了高电压的冲击。



四川雅砻江 1GW 柯拉电站
(直流 1500V 高压)

2020 年 9 月 30 日，国家电投黄河水电携手华为打造全球单体规模最大的光伏电站——青海省海南州 2.2GW 特高压光伏电站正式并网发电。截至 2022 年，9216 台华为智能光伏控制器仍稳定运行在海拔 3100 米的环境中，每年将 50 亿 kWh 清洁电力通过青豫直流送至远在 1500 多公里外的河南驻马店，智能光伏控制器的总可用时长超过 2 千万小时，可用度高达 99.999%。



青海海南州 2.2GW 特高压项目 (逆变器可用度调查)



趋势九 高频高密化

背景

分布式光伏在产业政策和技术发展的驱动下近年来迎来蓬勃发展，但随着装机总量的快速增长，大量优质屋顶已被安装或已经完成设计。面向越来越多的复杂屋顶，如屋顶存在大量空调外机或通讯设备等，大量工商业或者户用屋顶设备安装空间受限，逆变器体积减小和能量密度提升成为关键。此外，复杂屋顶常采用组件级方案，如何为安装商提供更加经济与可靠的优化器方案也成为行业新发展方向。



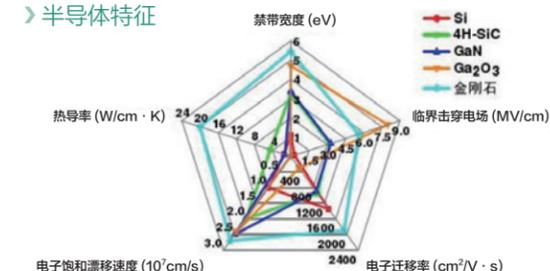
某地复杂屋顶示例

趋势

第三代半导体的应用叠加数字化技术，持续提升电力电子变换器功率密度，推动光伏系统提质增效。针对设备本身，随着单设备功率的增大，由于边际效应的存在，单位成本不断被摊薄，呈现下降趋势，带来优势；但是另一方面，尤其是在分布式电站，单设备功率的增大，也会带来体积和重量的增加，这会导致安装、施工、运维等变得愈发困难，引起这些成本的增加，形成劣势。因此，我们认为未来光伏设备会持续向高频高密化演进。

但是功率密度的提升，不仅仅是简单的将功率做大即可，这里面离不开材料科学、散热技术、工程技术等多种维度技术的升级。首先，是以碳化硅 (SiC) 为代表的，第三代宽禁带半导体器件的发展与应用，其导通压降小、耐高温、耐压高、损耗低，再结合高频磁技术的进一步应用，两者结合，将全面的提高开关器

半导体特征



件的整体工作效率，减少整体损耗，实现设备整体高频化，大幅提高产品能量密度。除此之外，结合技术创新，如高效散热技术与集成驱动技术，预计未来三到五年，光伏逆变器将提升 30% 以上能量密度提升，优化器实现 50% 以上，储能实现 10% 以上，进一步推动光伏设备的提质增效。

应用探索

在双碳背景下，上海市按“应建尽建”的原则，进一步大力推进光伏应用和相关产业高质量发展，实施了一批“光伏+”工程，促进本市能源绿色转型和绿色低碳产业高质量发展。上海鑫国建立分布式 1MW 屋顶光伏项目，助力企业绿色低碳转型。



项目特点

01

助力系统发电量提高 32.3%，解决鑫国自身的用电消纳，利用峰谷电价机制降低成本；

02

通过安全可靠的清洁能源使用，缓解用电紧张的问题，减小企业用电负荷，降低企业碳排，助力绿色工厂建设。

另外，上海鑫国采用 50KW 逆变器 + 优化器方案，逆变器方案采用新一代逆变器技术，相比老款 50KW 逆变器方案，实现能量密度提高 20%，帮助安装商将部分逆变器安装至较为狭窄空间中，此外，整体 1MW 电站安装数千片新一代优化器，其更优经济收益帮助业主实现更高经济收益，且其组件级快速关断以及组件级监控技术，实现更高安全以及更低运维成本，达到真正电站提质增效。



趋势十

高品质电能质量

背景

随着光储的高速发展，光伏成为稳定电，当前的发展任务演变为加快技术进步与突破，持续降本增效，努力实现传统能源的稳定可靠、经济高效替代，满足能源“质”的需求。在未来三到五年的时间中，追求高品质电能质量是一必然趋势。其背后的根因，主要来自两方面，一是整个新型电力系统的快速发展，新能源供给量不断提升；二是高精尖行业的快速增长，各种复杂的、精细的对电能质量敏感的用电设备越来越多，对电力质量事件的敏感度也在不断增强。因此，我们提出“高品质电能质量”这个概念，提供更稳定、更可靠的清洁能源。

趋势

不论是全球的 IEC 标准、还是泛欧标准、还是中国国标，都将不断提升电能质量的要求。

谐波

在现有的标准中，行业对 THDi 的要求是 < 5%，业界普遍做到 < 3%，但是华为通过智能谐波算法，能够将 THDi 做到 < 1%，从而改善供电质量和确保电力系统安全经济运行。而 THDu 未来也会从 < 5% 提升至 < 3%。

EMC 设计

EMC 设计中，不论是 EMI 设计还是 EMS 设计，行业要求也将会从 Class A 往 Class B 提升，在加大产品功率的同时，提升屏蔽电磁干扰能力，提高供电质量的稳定性。

无功 / 有功响应

在工商业场景中，对用电功率因数的合规性要求都是刚需，为更好的做到充分利用电力设备、节约电能、降低损耗，对无功 / 有功响应要求也将会从秒级响应提升为毫秒级响应。

应用探索

信承瑞

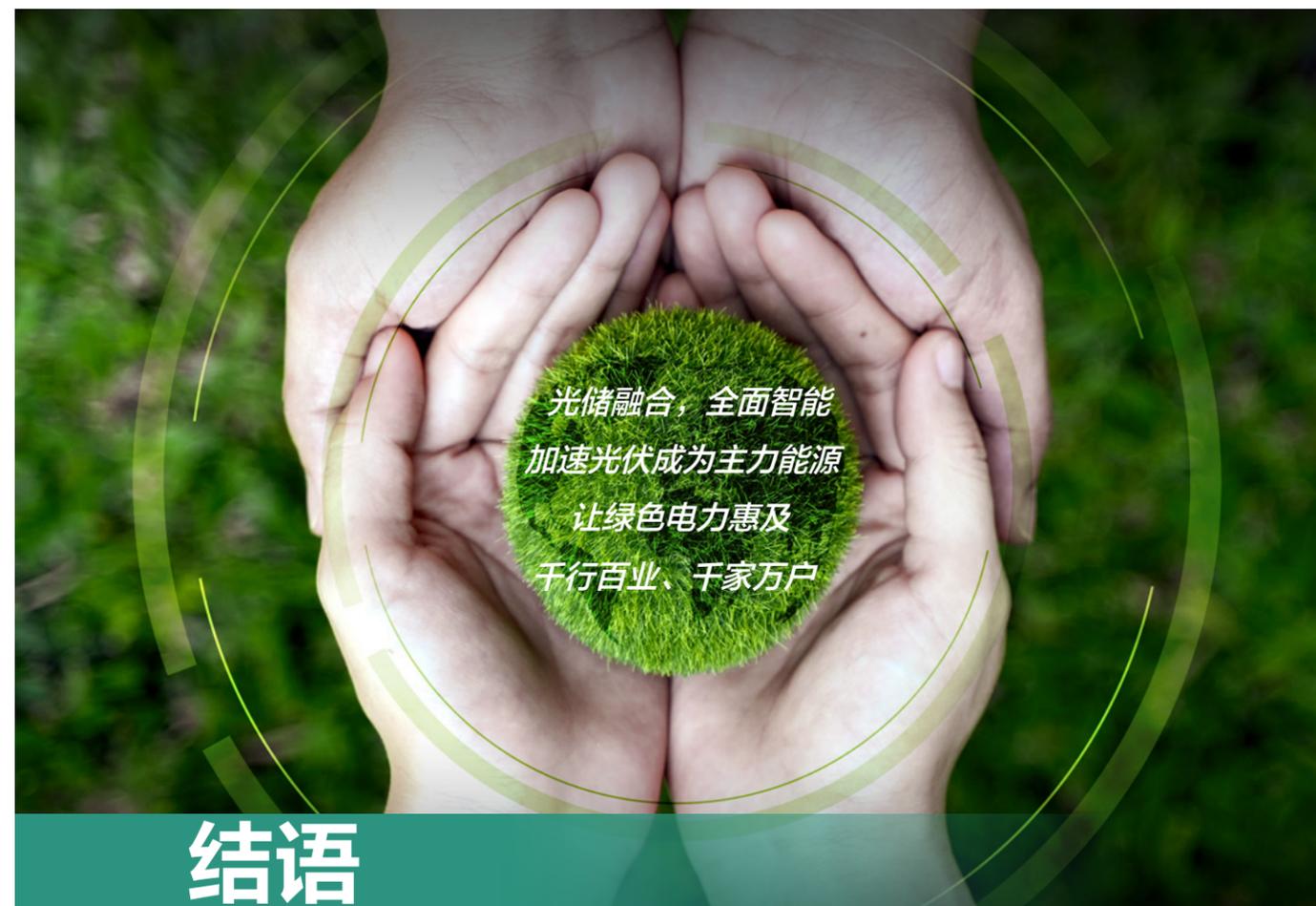
在能耗“双控”与江苏实行市场化电价改革的政策背景下，华为智能光伏联合信承瑞技术有限公司建设了一期 8MWh 储能电站、1.6MW 光伏电站的光储项目，助力其成为江苏第一个实现“光储一体化”的民营企业。

高品质电能质量不仅加速了信承瑞构建现代能源管理体系，降低了公司单位产品综合能耗、电耗，保障了绿色生产的连续性，也更有效地帮助信承瑞尽早实现绿色生产。



盈华

广东盈华分布式光伏示范项目是由盈华材料携手华为数字能源联合打造的智能光伏示范项目，项目利用综合楼和一期、二期厂房屋顶打造粤北地区首个 4MW 级配备优化器工商业项目。项目总面积约 3 万 8 千平方米，总装机容量 4.65MW，预计年发电量 513 万度，相当于节约标准煤 2 万 5 千多吨，减少二氧化碳排放量 6 万 2 千多吨，采用的主要设备为华为智能光伏 50KW 逆变器、1100W 一拖二优化器、智能光伏管理系统等。



结语

立足当下，放眼未来，随着 5G、云、AI 的融合，一个绿色的万物感知、万物互联、万物智能的世界正加速到来。

百舸争流千帆竞，奋楫者先勇向前，在这场变革中，华为愿围绕这一大核心，五大关键特性，四大根技术深度发力，与业界同仁，以及所有关心绿色可持续发展的组织与个人，共同推动早日达成双碳目标，共建绿色美好未来！



版权所有© 华为技术有限公司2024。保留一切权利。

非经华为技术有限公司书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

商标声明

 HUAWEI、华为、 是华为技术有限公司的商标或者注册商标。

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。华为可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

华为数字能源技术有限公司

深圳市福田区华为数字能源

安托山基地

邮编:518043

solar.huawei.com