HUAWEI

EY 安永
Building a better working world

电力数字化 2030



构建万物互联的智能世界

序言一

实现碳达峰、碳中和是国家的战略目标。电力系统要为实现“双碳”目标承担自己的责任，建设以新能源为主体的新型电力系统是实现这一目标的重要途径。

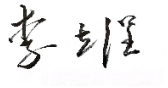
我国电力行业碳排放约占全国碳排放总量的 40%，要实现碳达峰、碳中和目标，电力行业任务重、责任大，承担着主力军作用。在确保电力系统安全平稳供应的同时实现深度减排，发展可再生能源是根本，提高能源效率是关键，电力系统的数字化是核心技术支撑。

新型电力系统建设以“电力+算力”为核心途径和驱动力。电力方面，以新能源为主体将深刻改变传统电力系统的形态、特性和机理。源网荷储融合变换、协同发展，构成“大电网+主动配电网+微电网”的电网形态；算力方面，以数字数据为基础，构建强大的软件平台，以软件定义电力系统，将信息技术、计算技术、传感技术、控制理论、人工智能、互联网等与电力系统深度融合，实现电力系统的数字化、信息化、智能化，建成可见、可知、可控的透明化电力系统。

在“双碳”目标和新型电力系统建设的背景下，终端电能消费大幅度提升，电能除了直接使用，还间接制造能源，实现广域电气化。广域电气化打破传统电网和产业边界，向各领域全面渗透，各行业与电力领域融合交互，由此形成的新型能源生态系统，具有灵活性、开放性、交互性、经济性、共享性等特性，实现电力系统的智能、安全、可靠、绿色、高效。

《电力数字化 2030》报告描绘通过数字化技术与电力技术的深度融合构建起电力系统数字孪生蓝图；围绕源网荷储一体协同新形态下数字绿色电厂、电网数字巡检、多源自愈配网、多能协同互补、跨域电力调度、赋能绿色低碳六大核心业务场景进行了详细分析；从数字化边端、泛在通信网络、算力和存储、算法和应用四大数字化技术应用领域寻找技术支撑；提出绿色网络、安全可靠、泛在感知、实时网联、智能内生、服务开放的六大电力数字化技术特征；并建议通过构建基于云边协同的技术架构，打造开放、高效、智能的电力数字化新引擎，支撑并驱动电力系统升级转型，加速新能源消纳，推动“双碳”目标的实现。

《电力数字化 2030》结合企业自身的技术优势、经验积累和对于电力系统的理解，对电力数字化 2030 的实现路径做了比较具体的规划，对数字化发展目标进行了量化预测，具有实用性和前瞻性，对能源电力行业发展和跨行业协同合作有很好的参考价值。



中国工程院院士

华南理工大学电力学院教授

中国南方电网专家委员会主任委员

序言二

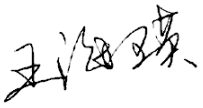
从 1875 年世界上第一座火力发电厂建设完成，电力行业已经历了近 150 年的发展和沉淀，成为了能源行业的柱石。

过去的 20 年中，世界能源行业和产业格局发生了剧烈且深刻的变化。世界各国纷纷为减少人类活动对气候变化影响而努力推动温室气体减排，石化能源行业受到自然资源储量限制而发展降速，新材料、工程和发电技术显著的进步帮助可再生能源发电大幅提高效率、降低成本，从而有可能成为电力供应的主力军，智能电网基础原理和电力系统技术的发展推动了电网运行和管理变得更加柔性、坚强和智能，电池技术和工业制造能力质的突破促进了电动交通工具的推广和应用。与此同时，数字孪生、云边一体化的物联网、人工智能、高带宽无线通讯等数字化相关技术在物联感知、数据采集、边缘计算以及智能分析等方面的巨大进步也对电力行业的发展和创新提供了有力保障。

尽管如此，整个电力行业还是面临着诸多挑战，如何进一步提高可再生能源的电力生产和消纳，从而减少对于化石能源的依赖？如何在保证安全可靠前提下尽可能地响应更加多元化的用电需求？如何持续降低用电成本？等等。可以预见，未来 10 年，在能源技术和数字化技术高速发展的推动下，全球的电力行业将迎来一个发展和变革的高峰。

从传统的“发输变配用调”产业链条贯通发展到现如今“源网荷储协同”产业场景融合，电力行业面临的挑战复杂度从二维级别升级到了三维甚至多维。以“云、大、物、智、移”为典型代表的数字化技术发展也出现了元宇宙、Web3.0、边端智能、6G、万兆无线通讯、量子计算、量子通讯等大量分支和升级。本次白皮书的编写，工作小组通过反复讨论和斟酌，确定以行业场景作为基本要素出发点，从多维度拆解和分析相关的问题和挑战，结合优秀的业务和技术实践，适度展望未来的发展需求，以期可以更清晰地把握根本原因，更准确地锁定关键技术，更有效地思考解决方案。

安永（中国）企业咨询有限公司在中国乃至全球为电力行业客户提供多年的服务，深度参与并见证了全球电力行业几十年的发展和变革。我们清楚地看到，数字化技术的应用已经成为全球电力行业发展的关键成功要素之一。数字化技术自身的发展也越来越快，领域细分也越来越多。电力行业相关企业如何“在正确的时间，选择正确的技术”变得更加重要也更加困难。希望《电力数字化 2030》可以在这方面做到抛砖引玉，带来价值的启发，帮助相关企业抓住未来 10 年电力行业的发展机遇，获得更大的成功！



大中华区咨询服务主管合伙人

安永（中国）企业咨询有限公司

序言三

当今世界，绿色发展已经成为一个重要趋势，中国、欧盟、北美纷纷发布了通过低碳化、电气化、网络化、智能化全面进行能源结构变革，推进碳达峰、碳中和进程的战略举措。落实绿色发展目标，能源是主战场，电力是主力军，电力数字化是关键!

全球重要电力市场提出构建“SmartGrid”、“IntelliGrid”的发展目标，国内领先的电力企业也提出构建“数字电网”的愿景，这些新型电网均具备可靠、灵活和经济的电力和信息流传送，安全稳定的网络通信和系统控制，全面的信息集成和数字化监控，自由的电力交易和分布式电源接入，电网与用户之间双向互动等特点。

电力数字化转型发展的最终目的是确保电力系统高效稳定运转，提升能源效率，推动“双碳”目标的实现。通过全面连通物理世界与数字空间，将电力系统中的设备信息、生产过程等转化为数字表达，打造电力系统在虚拟空间中的“数字镜像”。完成物理世界与数字空间从虚实映射到深度交互的演进，进而实现整个电力系统的数字孪生。通过电力数字孪生除了可以实现电网的安全、智能之外，还可以依托大范围互联和调度，实现针对风、光等具备间歇随机、海量离散、波动不可控的清洁能源的高效开发和利用。

要实现电力数字孪生的宏伟蓝图，需要将电力电子技术和数字技术进行深度融合。通过数字技术助力低碳发展，需要构建更加开放、更加高效、更加智能的数字平台；需要推进通信、控制等电力行业标准化的建设，推进电力系统设备联接互通，并将智能注入行业。围绕“发-输-变-配-用”等电力系统全环节，持续创新连接、计算、智能等 ICT 价值，推进构建现代设备资产全寿命管理体系，降低电力资产的运行风险、延长使用寿命、提高设备安全性和运营效率；推进构建现代客户全方位用能服务体系，为用户推荐最优的用能方案，最大化能源利用效率，减少能源浪费、建设高效型社会；推进构建新一代调度控制支撑体系，提高电力系统灵活性和稳定性，实现“源网荷储”协调互动、提高整体能源使用效率；推进构建新型电力交易体系，还原电力的商品属性，让绿电交易成为“双碳”的重要抓手，持续推进能源清洁消纳。

数字技术的持续创新，将推动行业可持续发展。基于未来 10 年 ICT 技术和全球电力企业的数字化发展趋势的综合研判，我们乐观地预测 2030 年行业领先的数字化电力企业终端网联化率将超过 95%，云化渗透率超过 60%，边缘智能的采用率将超过 60%，电力通信可靠性达到 7 个 9；电力数字化将具备绿色网络、安全可靠、泛在感知、实时网联、智能内生和服务开放的关键技术特征。通过数字化技术的深度采用，将打破传统电力系统“源随荷动”的强计划属性，未来电力供需将变得越来越灵活和弹性。

电力数字化的未来既充满想象空间也面临各种挑战，需要发电商、电网运营商等传统电力企业、电动汽车等新业态、科技企业、园区运营商、平台服务商等跨界参与者的共同努力和参与才能够实现“源网荷储”端到端的成功转型。让我们携起手来，勇于探索、持续创新，共筑电力数字化 2030！



华为常务董事

ICT 基础设施业务管理委员会主任

目录



前言 1

第一章、电力数字化背景及目标 2

（一）电力数字化发展背景 2

（二）电力数字化核心目标 2

第二章、电力数字化场景描绘 4

（一）电力数字化蓝图构想 4

（二）电力数字化典型场景分析 6

场景一：数字绿色电厂 8

全周期数字孪生 8

关键技术应用 1：空间计算与 3D 建模助力场景仿真，提升效率 9

关键技术应用 2：机器学习有效支撑电厂决策，优化经营 9

远程智能集控 10

关键技术应用：云边协同，发挥三要素价值 10

场景二：电网数字巡检 12

智能巡线 12

关键技术应用 1：空天地一体+边缘智能，巡线工作智能全覆盖 13

关键技术应用 2：电力专网，实现可靠通信 13

关键技术应用 3：新一代通信——通感融合 13

智能变电站 14

关键技术应用 1：边端协同，打造数字员工 14

关键技术应用 2：高级智能，实现预测性维护与变电设备延寿 14
场景三：多源自愈配网 16
多源配网运营 16
关键技术应用 1：规范接入实现即插即用 17
关键技术应用 2：从终端智能到边缘智能 17
关键技术应用 3：从电缆通信到光纤通信 17
自愈配网调控 18
关键技术应用 1：全面感知监测，为自愈性配网建设提供数据基础 18
关键技术应用 2：光通信实现快速精准负荷控制 18
关键技术应用 3：机器学习助应对更优、恢复更快 19
场景四：多能协同互补 20
智慧园区 20
关键技术应用 1：ICT+能源路由，设备灵活接入、碳排精准计量 21
关键技术应用 2：智能算法与大数据，用能自主调优、多能协同调度 21
智慧楼宇 21
关键技术应用 1：数字孪生能耗管理 22
关键技术应用 2：多形式智慧储能，实现多能双向灵活调配 22
场景五：跨域电力调度 24
智能电网调度 24
关键技术应用 1：强大算力支撑海量数据处理 25
关键技术应用 2：光网络支撑实时可靠通信 25
虚拟电厂 25
关键技术应用 1：人工智能与大数据，实现最优调度 25
关键技术应用 2：统一终端与标准协议助力远程调度与控制 26
场景六：赋能绿色低碳 28

碳交易 28

关键技术应用：区块链实现绿电确权，加速消纳 29

碳普惠 29

关键技术应用：区块链规范电力领域减碳行为认证 29

电力数字化技术在六大核心业务场景中的应用总结 31

第三章、电力数字化技术特征 32

（一）关键技术特征 32

特征一：绿色网络 32

全光网，为算力提供绿色运力保障 32

特征二：安全可靠 33

三层防御，保障内生安全 33

技术融合，促进原生可信 34

特征三：泛在感知 35

智能终端，打造“物联、数联、智联”全息感知网 35

特征四：实时网联 36

5G + Wifi/GWL，内外搭配降低端到端时延 36

特征五：智能内生 37

电力智算一张网，打造最强算力底座 38

微型机器学习（TinyML），让边缘更智能 38

特征六：服务开放 39

开放式云网架构，实现数据共享、能力共惠、生态共建、产业共荣 40

（二）目标技术架构 42

电力数字化发展倡议 45

参考资料 46



前言

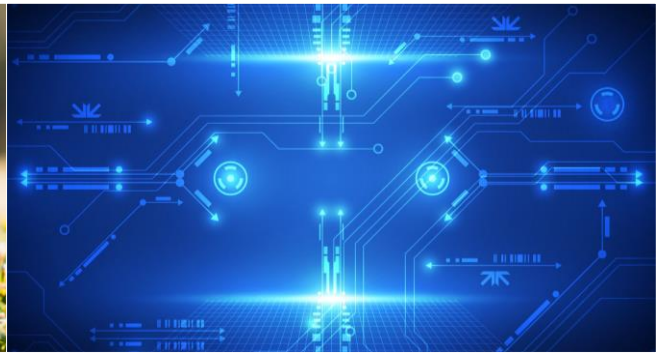
当今世界，绿色低碳发展已经成为一个重要趋势，许多国家把发展绿色低碳产业作为推动经济结构调整的重要举措，全球正在加快绿色低碳基础设施布局。中国于 2020 年 9 月提出力争于 2030 年前二氧化碳排放达到峰值，并努力争取 2060 年前实现碳中和的“3060”双碳目标，开启了“双碳”目标引领下的绿色低碳高质量发展新征程。北美大力推动5550亿美元的清洁能源计划，在基础设施、清洁能源等重点领域加大投资，并重点补贴电动车的购买者和安装屋顶太阳能的家庭。欧盟计划 2021 年至 2030 年间，每年新增 3500 亿欧元投资，推进电动汽车、公共交通运输等实现减排目标。其中，德国将放弃化石燃料的目标提前至 2035 年，拟加速风能、太阳能等可再生能源基础设施建设，实现100%可再生能源供给。

落实绿色低碳发展目标，能源是主战场，电力是主力军。通过不断提高终端电气化率，能有效降低全社会对传统化石能源的依赖，提升高品位电力能源的渗透。其中，以光伏和风电为代表的新能源将扮演举足轻重的作用。

随着新能源发电装机的持续提升，**高比例**可再生能源为电力系统叠加**高比例**电力电子设备的同时，也催生出诸多“新”特性——电网侧，能源资源配置将呈现**高弹性**；负荷侧，电气化能源消费因双向多源而呈现**高互动**；交易侧，本地低碳能源供应将促使能源消费呈现**低成本**；运营侧，各类能源系统将依托数字孪生实现**高融合**。

面向 2030，电力数字化技术的不断发展和深度应用，将成为推动电力系统升级的关键成功因素，帮助电力系统更好适应并应对“四高一低”变化趋势。未来，在电力数字化**新型数字引擎**的驱动下，电力系统将变得**更安全**、**更绿色**、**更高效**、**更友好**，让电能更好地服务千行百业、进入千家万户。





第一章、电力数字化背景及目标

（一）电力数字化发展背景

电力行业正在经历深度转型。未来，电力系统将呈现两大重要变化，为电力数字化技术的发展和应用明确了基本方向：

1、能源结构绿色化

从电力供给侧看，随着“双碳”政策的不断加压，新能源投资建设需求必将持续快速增长，未来将建设更多大型风光基地以及大规模分布式新能源设备，以逐步取代传统能源发电厂，推动能源结构从“以传统能源为主体”向**“以新能源为主体”**转变。

以中国为例，重点建设的新能源基地大多分布于西部地区、北部地区等人口密度与用电负荷相对较低的区域，而对能源的需求主要来自东部和南部人口稠密区域；北美也面临同样境遇，风、光资源分布与经济发达程度也存在区域错配。因此，对于幅员辽阔的地区，大规模新能源基地电量外送仍是提高电力系统可再生能源比例的重要方式，这对**电网远距离传输和消纳能力、储能设备配套建设及灵活运营**等方面提出新的要求。

此外，欧盟各国区域面积小，可以就近利用既有资源，因此在靠近用户侧涌现出大量分布式光伏与分散式风电设备，这些在配网负荷系统中出现的电源对配电网络的稳定运行带来新的挑战。

2、供电模式互动化

从电力消费侧看，随着全社会对能源可持续发展认识的不断加深，以及疫情的长期蔓延，终端用户对可靠性更强、价格更便宜的本地能源消纳的诉求愈发明显，这将催生出越来越多的配网级分布式能源加入电力系统运行，促使供电模式从“以大型发电厂为中心”向**“以产消者为中心”**转变。

随着原先以负荷为主的配网系统逐步向源荷一体升级，供电模式也将从过去的“源随荷动，生产计划主导，进行单向逐级电力传输”，向**“源荷互动，以消纳更多可再生能源为目标，根据供需变化进行双向灵活调配”**发生转变。用户对能源消费的自主权更大、选择面更广，从被动用电到主动消费，将衍生出对**用电需求的准确预测、电量资源的灵活调配、配网的韧性和平衡**等方面的新需求。

（二）电力数字化核心目标

电力数字化转型和发展的最终目的，就是随着电力系统升级，消纳更多以风、光为代表的绿色低碳电力，促进源网荷储高效互动，确保电力系统高效稳定运转，提升能源效率，推动碳达峰、碳中和的实现。

综合产业各方的观点，我们认为电力数字化建设有五大核心目标：

1、支持资产安全与效率提升

随着电力系统转型发展，新的新能源电厂、分布式电源及电子设备会逐步融入并替代老旧设备。但在转型过程中，作为传统重资产行业，存量电力资产仍然发挥着重要作用。**发电侧**，传统能源仍然承担着保底电源的职能，一些大容量、高效率、低排放的火电机组，在一定时间内仍然是发电主力，同时火电机组未来也承担着调峰调频、平抑新能源出力波动的重要职责；**输配电侧**，由交、直流特高压大量电网基础设施构成的电力传输网络，仍是跨域

及城市电力传输的根本保障。增量资产方面，抽水蓄能电站、压缩空气和电化学**储能**将是实现“源网荷储”一体化协调互动的核心与关键，未来势必会有大量的储能设备投入建设运营。

因此，**以安全为核心**，电力数字化的首要目标就是**降低电力资产的运行风险、延长使用寿命、提高安全性和运营效率**，确保电力去碳化转型的平稳过渡与供电安全可靠。

2、支持新能源并网消纳

与传统能源相比，新能源发电具有**随机性、波动性、间歇性**等特点，同时对极端天气的耐受能力较弱，导致电量生产、电力输出等面临不确定因素，造成电压、频率等出现波动，对电网的供电可靠性产生较大影响。近年来，伴随着大规模新能源基地建设的推进，弃风、弃光以及新能源脱网等现象仍然频发，新能源发电并网成为推进落实电力行业绿色低碳的关键掣肘。

因此，通过感知、预测、控制、调度等一系列电力数字化技术手段的应用，**高比例消纳来自源端和荷端新能源发电量，抵消新能源并网对电网运行带来的波动**，是电力行业积极落实“碳达峰”、“碳中和”的关键所在。

3、支持源网荷储协调互动

随着大型新能源设施、分布式能源系统以及不同规模储能装置的大量应用，在**以难以预测的自然资源可用性为基础**的电力生产和**以用户实时需求为导向**的电力消费间，不再是两条完全匹配的曲线，容易形成电能的供需错配。

通过电力数字化技术的应用，聚合电源、储能等各类资源，并基于需求动态变化情况，协调出力、优化控制，实现削峰填谷，提高电力系统灵活性和稳定性，是实现源网荷储协调互动、提高整体能源使用效率的核心手段。

4、支持绿色电能市场化交易

过去，绿色电能的发展主要依托政府补贴来推动，但要想促进长期可持续的良性发展，赋予**绿色电能商品属性**，推动绿电交易市场化转型才是长久之计。目前，绿电市场化交易处于试点阶段，交易主体多元、认证流程复杂，存在**成本高、难追溯、易篡改**等潜在风险。

通过电力数字化技术的应用，让用电企业自愿为绿电支付溢价，激发各类市场主体主动参与绿电交易的热情，是让绿电交易成为“双碳”重要抓手的关键措施。

5、支持能源低成本、高效能使用

以建设资源节约型、环境友好型社会为目标，做到**“用更少的资源、产生更多的能源”**，是实现可持续发展的必由之路。

面对各类用户不断变化的用电方式和日益多元的用电需求，基于电力数字化技术，为用户提供准确的用能分析、进行合理的能效对标、匹配最优的用能方案，从而最大化能源利用效率，是减少能源浪费、建设高效型社会的重要途径。

第二章、电力数字化场景描绘

（一）电力数字化蓝图构想

在去中心化、终端电气化的行业背景和发展趋势推动下，电力系统“源、网、荷、储”的互动会逐步加速、加深，打破传统价值链的边界，打破传统电力系统“源随荷动”的强计划属性，电力供需将变得越来越灵活、随机。

围绕电力数字化总体发展目标，未来在数字化边端（边端采集与控制）、泛在通信网络（地面通信与卫星通信）、算力和存储（云平台、云边端协同、空间计算与区块链）、算法和应用（人工智能、图计算与高级分析等）等新一代数字化使能技术的大力发展和广泛应用下，将全面联通物理世界与数字空间，通过将电力系统中的设备信息、生产过程等转化为数字表达，打造电力系统在虚拟空间中的“数字镜像”。同时，通过数字化监控、智能化分析、数智化自治等数字化能力的进阶式提升，完成物理世界与数字空间从虚实映射到深度交互的演进，进而实现整个电力系统的数字孪生。

具体来看，电力数字孪生可以分为三种形态：

1、数字化监控

监控的目的是通过泛在感知、高速通信及平台存储，对电力设备资产的运行过程及运行状态全面、精准、实时地在数字空间中进行反映，并基于多维数据对设备资产进行全生命周期的动态监控与诊断，从而实现对各类电力场景的**“比特感知瓦特”**。感知网络的建立和机理模型的构建是实现电力系统高效数字化监控的基础；同时，数据互通和泛在物联也需要数据加密技术的支持以确保信息安全。

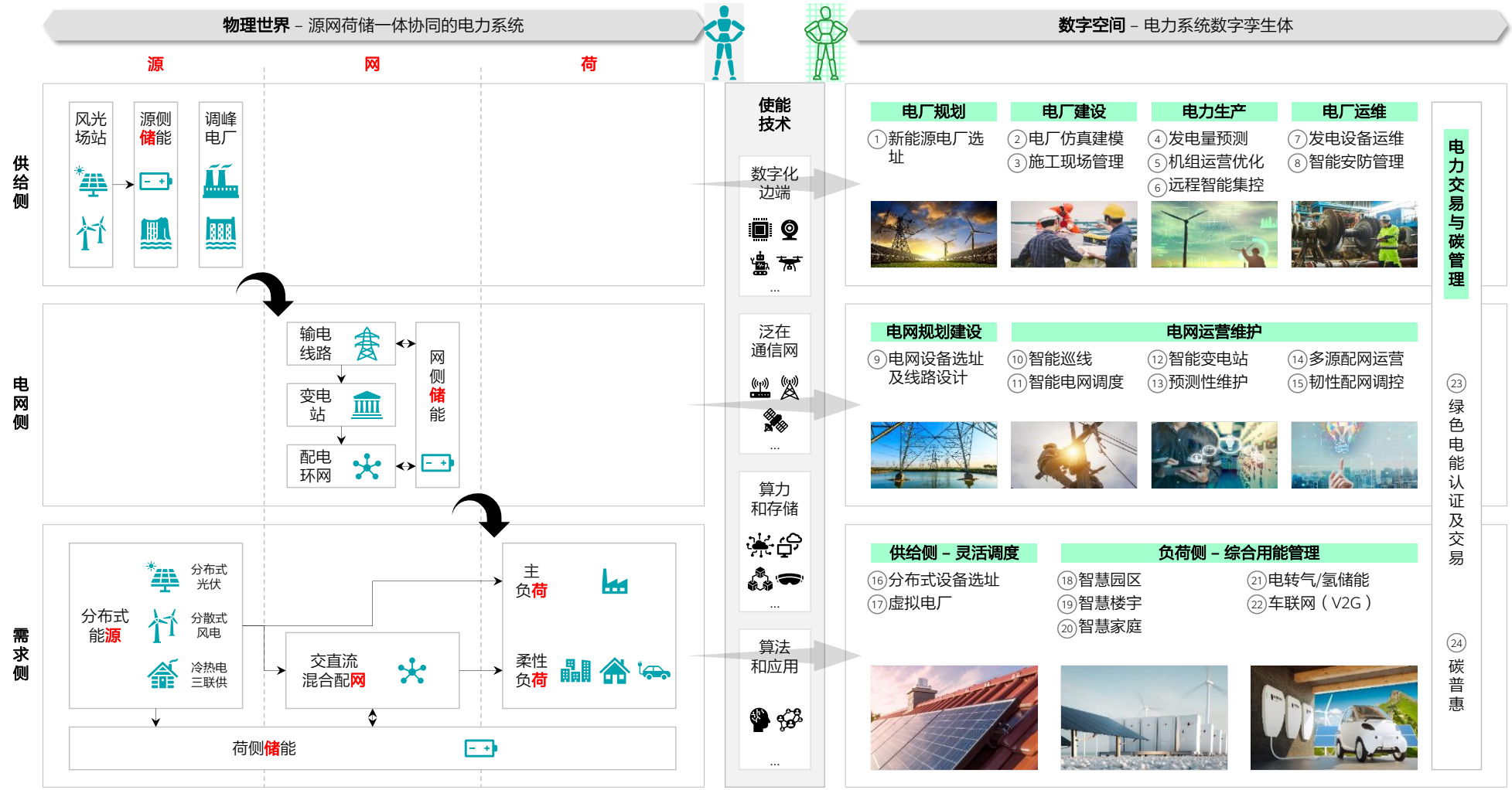
2、智能化分析

智能化分析的目的是基于确定的运行模式和机理规则，对发电机组、输配电网、电力负荷等未来运行变化进行分析预测与模拟反馈，为基于现有体系的运营优化和系统控制提供决策支持，从而实现对各类电力场景的**“比特管理瓦特”**。算力和算法是提高电力系统智能化分析准确性的核心技术，通过构建涵盖多领域多学科复杂数据模型以及数字空间的仿真模拟，可以帮助物理实体进行优化和决策，并形成有效闭环。

3、数智化自治

数智化自治是指基于跨系统、跨模块的海量数据交互，依托自适应、自进化的复杂算法模型，通过数字空间共享的智能成果，主动识别出当前物理世界运行模式的“瓶颈”，下达决策性指令或提出预见性改造方案，从而通过数字空间的“决策自治、成果反哺”，促进物理世界与数字空间的深度交互，实现**“比特增值瓦特”**。由于涉及到大量跨系统数据的交换与共享，因此除了高级分析等人工智能技术外，区块链及隐私计算等技术也是关键。

图表 1 面向 2030，电力数字孪生蓝图构想



（二）电力数字化典型场景分析

1、典型场景选择

我们从价值属性和技术成熟度属性两大维度，对基于电力数字孪生下的众多电力数字化场景进行了拆解和评估，梳理出了三类场景定义：

1）**当前热点场景：**这类场景市场规模增长较快且已有相对成熟的数字化解决方案，可以视为相关企业电力数字化能力建设的“入门标准”；

2）**未来重点场景：**这类场景普遍体现出了对供电可靠及“双碳”的显性价值，但大规模应用仍待关键能源技术与信息化技术的突破和支撑；

3）**其他场景：**这类场景或者已是红海市场、或者商业价值尚不明朗，不纳入本白皮书研究范围。

在此基础上，将热点场景和重点场景进一步总结归纳，最终形成面向 2030 电力数字化的六大核心业务场景：

场景一：数字绿色电厂 3 4 5 6 7 8；

场景二：电网数字巡检 10 12 13 ；

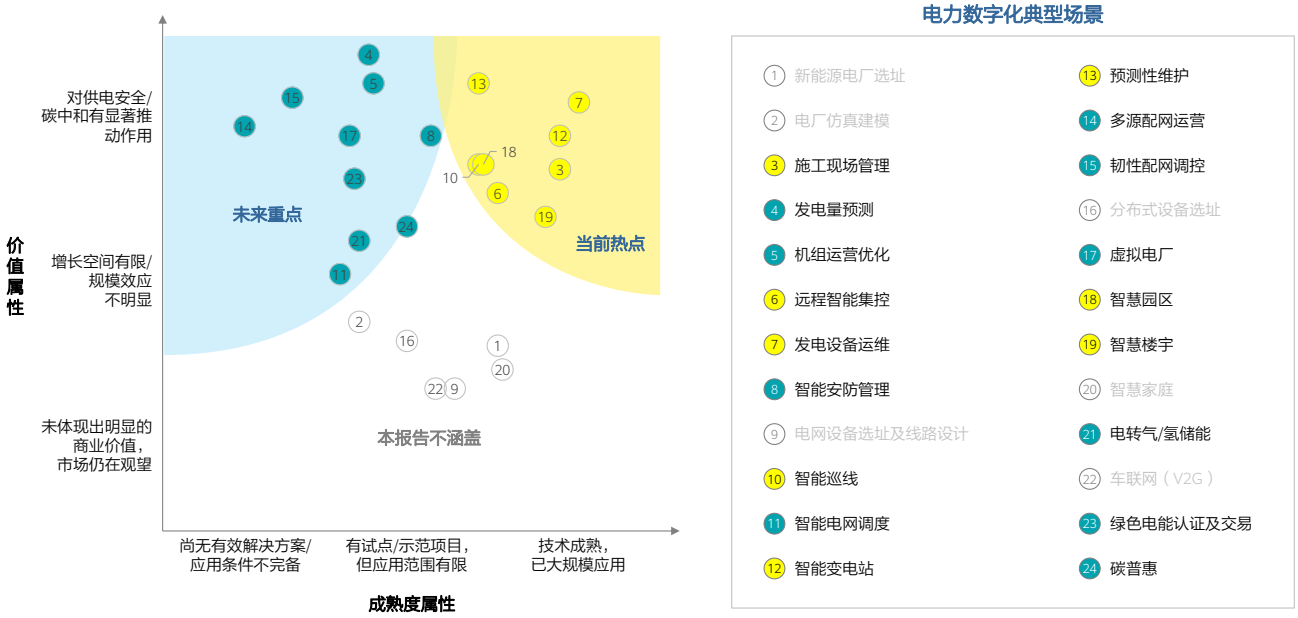
场景三：多源自愈配网 14 15 ；

场景四：多能协同互补 18 19 21 ；

场景五：跨域电力调度 11 17 ；

场景六：赋能绿色低碳 23 24 。

图表 2 电力数字化场景评估模型



2、典型场景分析

安全、效率、绿色是面向 2030 电力行业转型发展的关键议题。当前，围绕电力系统升级建设，在供电安全可靠、关键设备延寿、厂网运行效率、新能源消纳与交易等方面还面临诸多挑战。

在电力数字化总体发展目标下，我们将进一步探讨电力数字化在未来电力系统六大业务场景中的核心价值与关键技术应用支撑。

图表 3 电力行业发展转型关键挑战总结

2030 电力关键场景	对应行业转型的关键挑战		
	安全	效率	绿色
数字绿色电厂	▸ 偶发厂区安防问题，造成人财损失	▸ 各场站独立运营，业务管理不统一	▸ 对天气变化响应不足，造成电量损失
电网数字巡检	▸ 对安全隐患感知不足，故障被动响应；人工巡检危险性高	▸ 人工巡检效率低	▸ 对运行故障定位响应不及时，影响新能源消纳
多源自愈配网	▸ 抵御极端情况能力弱，恢复供电慢	▸ 故障定位慢、响应不及时	▸ 新能源电力接入对配网运行扰动大
多能协同互补	▸ 储能作为核心技术，存在火灾爆炸事故隐患	▸ 多种能源形式之间没有有效联动，能源梯级利用不足	▸ 源荷储互动不足，碳排削减/抵消不到位
跨域电力调度	▸ 限电限产频发	▸ 负荷侧参与需求侧响应积极性有限	▸ 大电网对新能源电力消纳能力不足
赋能绿色低碳	▸ 信息安全问题、数据失真	▸ 审核、认证环节多、周期长	▸ 机制不健全，影响主体参与积极性



场景一：数字绿色电厂

在环境可持续、能源安全等因素影响和推动下，电力系统核心向新能源和分布式转移，大型风电场与光伏电站将承担着提高电力系统绿色电量渗透水平的核心作用。大规模新能源场站具有“看天吃饭”、地理位置偏远、分布分散等特性，上网电量也依赖大电网对新能源电量的消纳能力，为提高有效发电量、延长设备使用寿命、及时响应配合大电网进行出力调节等，在设备巡检、电厂运维、远程控制等方面都存在智能化管理需求。

在未来新能源电厂管理中，电力数字化技术将应用于贯穿电厂全生命周期的数字孪生、基于跨域物联的远程集控等场景，实现电厂智能化管理水平跃升。

全周期数字孪生

新能源电厂全生命周期数字孪生将涵盖规划建设、计划生产和运营维护三个环节。在规划建设阶段，通过建设现场的数字孪生，有效推动工程落地；在计划生产阶段，通过生产过程的数字孪生，合理优化生产策略；在运营维护阶段，通过对生产设备的数字孪生，及时改善设备状态；全周期中，通过对生产环境的数字孪生，大力保障资产与人身安全。

在基于数字孪生的新能源电厂管理中，边端数据采集（包括传统生产信息监测管理系统与多样化的传感设备）已具备一定基础，如何有效利用积累下来的海量数据、充分挖掘数据资产价值，是新能源发电商提升效率的关键。其中，空间计算与机器学习将发挥重要作用。

关键技术应用 1：空间计算与 3D 建模助力场景仿真，提升效率

1）全周期 BIM 支持：在规划建设期，根据设备参数、现场图像与周边环境等数据，通过空间计算与 3D 建模仿真还原施工现场情况，对工程全过程进行基于 BIM 模型的动态监测管理，对与规划偏离情况、项目建设风险或安全隐患进行预警和分析，确保工程进度与质量。

与此同时，BIM 模型不仅能在基建阶段指导施工建设，通过电子化移交的方式，还能为场站生产运营、持续升级改造、设备变更退役等各环节提供可视化的管理支撑，有效解决跨领域、跨专业的数据烟囱与协同难题。值得注意的是，电子化移交不仅能提升电厂管理效率，在电网建设运营等场景下同样能发挥重要作用。

2）三维动态安防管理：三维立体展示厂区全景，通过电子围栏，对员工位置与高度等信息进行监控，自动触发安全预警；同时，基于对重点区域与危险源的实时监控结果，准确识别安全隐患、及时告警，并在紧急情况发生时，自动规划最优撤离路径，最小化安全事故发生概率，保证人员安全、资产安全。

3）沉浸式技能培训与远程巡检：借助 XR 终端全息模拟设备故障场景，为员工提供高质量的沉浸式检维修培训，有效提升员工专业能力，提高设备维修效率；同时，借助可穿戴设备，可以实现便捷的远程专家巡检，与设备监测相结合，能进一步提高设备巡检的准确性。

关键技术应用 2：机器学习有效支撑电厂决策，优化经营

1）更精准的发电量预测：与传统能源出力稳定不同，新能源“看天吃饭”的特性大大提高了新能源发电计划制定的难度，基于历史发电水平的生产计划容易与实际情况出现较大偏离。

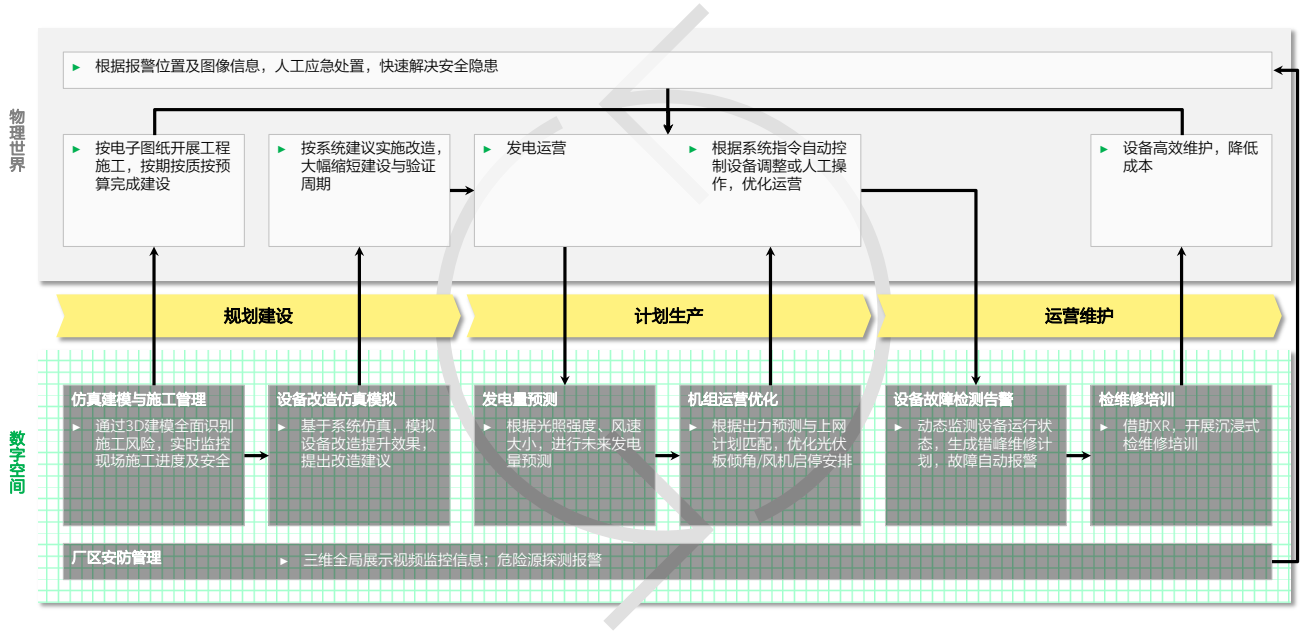
机器学习为新能源电厂运营商提供了有效解决方案。基于历史天气情况、新能源设备历史出力水平等海量数据进行学习建模，结合气象预测以及边端采集到的设备实际运行参数等多维变量，对新能源设备未来出力功率及发电量进行更准确的长短期预测，一来可以为新能源发电计划的制定或调整提供决策支持；二来可以基于预测结果优化新能源设备运营策略；同时，与配套储能设备相结合，还能根据发电量预测结果与电力市场价格变化，灵活调整储能充放电策略，提高经济回报。

2）更高效的自主运营控制：基于边端设备对风机尾流、光伏板积尘等情况的动态监测结果，结合气候变化以及短时发电量预测情况，根据机器学习得出的算法模型及数字空间模拟结果，对光伏板倾角、风机扇叶速度与角度、风机启停与出力情况等生成针对单个设备的自动控制指令，实现新能源场站的最优运营策略。

3）更及时的设备缺陷预警：对发电设备运行参数进行监测，基于对设备历史缺陷及检维修记录的学习模型，对当前及即将发生的设备缺陷进行评估并及时预警，合理安排错峰检维修，减少非计划停机。

依托空间计算与机器学习的电厂数字孪生，能够帮助新能源发电商实现贯穿电厂全生命周期的虚实交互与闭环管理，基于数字空间对当前的反映以及对未来的预测，为物理世界采取相应措施提供决策支持与指引，最终提高电厂运营效率。

图表 4 新能源电厂全生命周期数字孪生运行模式



远程智能集控

大型电力企业运营将面临一些新的挑战，一方面由于新能源电厂位置偏远、分散，场站与设备巡检成本高昂，不同电厂管理也相对独立，造成统一性和协同性不足；另一方面对跨界电厂投资者来说，自建新能源电厂也缺乏有效的运营管理手段。通过云边协同技术架构的搭建和应用，打造支持远程智能集控的新能源电厂运营平台，可实现跨地域的机组设备管理，并有效降低新能源电厂运营成本、提高运营效率，从而解决上述挑战。

关键技术应用：云边协同，发挥三要素价值

1）泛在物联、数据融通：泛在物联是实现云边协同的第一步。当前，许多设备厂商都已在电力设备或组件中嵌入了各类传感器，但不同厂商所采用的技术路线不同，导致标准不统一、数据不互通。因此，需要搭建企业级物联云平台，统一不同设备所采集的数据标准与通信标准，打通不同电厂设备间的数据壁垒，实现数据的全面接入、开放共享与统筹管理。同时，大量跨域数据的处理和分析也有赖于更加可靠的低时延网络通信技术的支持。

2）边缘算力提升：边缘算力提升是实现云边协同的第二步。通过各类传感器采集到的海量实时数据上云存储与计算会对云端资源造成挤压，影响数据处理的时效性，而一旦网络出现故障，整个场站的运行也将受到影响。通过边缘智能终端的部署，将云端的算力资源向边缘侧进行灵活分配，实现分布式计算，既提高了本地数据处理的时效性与响应速度，又有效避免了因数据传输带来的安全隐患，实现“即时交互”与“稳定安全”。

3）核心算法前移：核心算法前移是实现云边协同的第三步。基于边缘数据处理，如何快速准确识别设备故障状态或对设备运行进行及时控制调整，都需要算法模型的支撑。依托云端汇集的全局设备数据资源进行建模与机器学习，形成具有全局认知的算法模型，并将其部署到边缘智能终端上，让边缘设备装上“大脑”，实现“逻辑集中、物理分散”，通过智能前移完成对边缘数据的精准分析与高效处理。

通过云边协同的模式，可以实现各电厂间的数据融通，支撑模型搭建，并通过边缘智能终端的部署，提高边缘侧数据分析与响应能力，让新能源企业及电厂运营商能够通过移动终端实现跨域的远程操控和统筹管理，帮助新能源电厂运营从“局部改善”走向“全局提升”。

最佳实践：对近 1100 台风机设备与超 15 万块光伏板的实时监测与控制

中国某平台服务商依托设备物联及云边协同解决方案，以“边缘计算、预警预测、领域协同、开源架构”为技术特征，帮助客户企业通过终端设备实现风电、光伏场站的集中监控和无人值守，自动识别并预测设备的异常运行状态，基于健康度管理状态对场站设备开展维护，从而降低近 20%的运营成本、提升 10%发电量。

组件级传感：通过安装智能麦克风于风机塔筒门框侧，监听扫风声音，预警叶片缺陷；对传动链关键部件、变桨偏航控制等各类组件的全方位感知，让设备运营变得实时可视，化更换为检修。

云边协同：采用最新边缘计算技术，通过设备直连、场站端数据预处理等手段，在边缘层完成大量数据处理，提升效率、降低云端负荷，实现考核级的数据准确；云端通过数据标准化集成，对各项运行指标进行动态监测和控制，同时可对各电厂表现进行直观对标，便于指标下达。

机器学习：基于环境因素对发电量影响的深度学习，使用 5000 核并行计算进行发电量预测，使得平均风功率预报准确率高达 90%、高于行业平均水平 7%，光功率预报准确率达 93%、高于行业平均水平 1%；同时，学习结果也能为新建项目提供参考与决策支持。

数字绿色电厂中，电力数字化技术应用小结

从关键使能技术当前应用程度看，大多数企业仍然对不同场站采取分别建设、各自运营的模式，“数据孤岛”多，集中控制采用率较低；同时，厂区内通信覆盖相对完善，但广域通信能力不足。未来需重点研究突破的方向包括：

- **提高设备网联水平：**加强各类传感设备数据标准化程度，实现数据互通。
- **提高广域通信能力：**采用低时延、高可靠通信技术，保障大量实时数据的采集、处理与分析。
- **搭建集控运营平台：**搭建以云边协同架构为基础的运营平台，提升边缘算力与智能化水平，实现本地快速、准确响应。
- **提高 AI 渗透率：**加强人工智能训练，提高发电量预测、设备故障诊断等关键模型的成熟度与准确性。
- **提高场站与设备安全管理效率：**加强 3D 建模在安防管理与沉浸式检维修培训的应用，提高安全保障力度，提升员工面对真实故障的实操能力。



场景二：电网数字巡检

电网线路是电力系统的“骨骼”，变电站是连接不同骨骼的“关节”。一张健康的电网之于电力系统，就好比一幅骨密度高的骨架对于人体的支撑，是电力系统高效运行的前提条件。

未来，大规模新能源发电量的上网、大量分布式电源在配电网络中的接入，都会改变电网设备传统运行方式，对设备健康水平及使用寿命带来影响。以往定期点检、重输轻配的电网巡检模式已不能满足电力系统升级带来的新要求，亟需一种更全、更频、更快、更准的巡检手段。

电力数字化技术可以为电网设备提供全天候、全方位、全自主的健康“体检”，帮助打通电网巡线的数字通路、保证变电枢纽的安全高效运转，实现电网设备延寿，保障整个系统的供电安全。

智能巡线

输电线路距离长、配电线路范围广，对于巡线工作来说都具备一定挑战。目前，许多地区（尤其是偏远山区等公网信号薄弱的地方）输配电线路巡线仍然依靠人力爬山涉水，效率很低。部分推广无人机巡线的地区，也主要靠人工现场操控，人工基于采集图像进行异常判断；同时，无人机存在禁飞区与巡线盲区，而在极端天气等线路故障易发的情况下，也难以发挥作用。

要让巡线效率更高、风险排查更准，就必须依靠更智能、更丰富的巡线手段以及更快速、更可靠的通信网络，保障线路运行安全与供电可靠。

关键技术应用 1：空天地一体+边缘智能，巡线工作智能全覆盖

1）天地侧：通过无人机、雷达球机、非电气量综合传感器等多种边端采集设备互相补充，对塔基入侵物及各类电网运行异常进行全面感知和监测。

图表 5 各类边端采集设备在智能巡线中的应用

核心边端采集设备	目标效果
无人机	通过红外热成像/3D 建模，实时判断线路与障碍物距离
雷达球机	**雷达：**利用精度高、抗干扰能力强的毫米波技术，实现对动态入侵物体的全天候、高分辨、多目标识别 **球机：**根据雷达探测到的区域坐标，进行主动抓拍及监控追踪
非电气量综合传感器	**线路运行状态：**温度、舞动等 **线路安全隐患：**覆冰、鸟巢、树障等

2）空侧：通过低轨卫星的遥感能力，突破无人机巡线的区域限制和气候限制，真正实现全覆盖、全天候的高精度实时监测。在电网运行因极端天气造成巨大安全隐患而亟需抢灾时，卫星遥感与遥测技术将发挥无可替代的作用。

3）边缘智能：出于电力系统供电可靠性的要求，电网线路对监测数据处理和分析的时效性及精准度要求很高，需要边缘侧能够对随时出现的异常情况做出快速反应和准确判断。因此，“云端训练、边缘执行”将成为未来智能巡线的标准模式，即——依托云端强大的算力，对海量非结构化图像数据与结构化运行监测数据进行学习建模，并通过远程部署的方式赋能边端；在边缘侧，让基于机器学习的标准化诊断代替基于个人经验的差异化判断，对异常情况进行精准识别、自动告警，大幅提高电网巡线效率的同时，高度保障塔基安全与供电可靠。

关键技术应用 2：电力专网，实现可靠通信

电网线路因地理位置、电压等级与传输距离不同，会呈现不同的数据通信特征——特高压骨干网架或无信号覆盖的偏远地区，可以根据实际情况采用基于 MS-OTN 的新一代光通信技术或光纤复合架空地线（OPGW）确保 1000 公里以上的超长距离通信传输；中长距离线路，可以采用可靠性高、抗干扰能力强、无惧恶劣气候的微波技术，降低高额光纤投资成本，实现快速部署；低电压等级线路，因通信距离短，可以采用摄像头无线链式组网的方式，实现轻量化部署。通过因地制宜的电力专网建设，帮助消除信号盲区，提高数据传输效率。

同时，考虑到单个网络节点因网络质量原因可能引发的信息中断进而导致对整个电力系统运行的影响，需在通信网络建设时考虑多路径传输保护方案，并增加边缘侧数据缓存与断点续传的能力，确保路径切换时数据连续性与一致性。

关键技术应用 3：新一代通信——通感融合

面向 2030 年，随着 5.5G/F5.5G/6G/F6G 技术不断成熟，接入网络将集通信、感知、计算能力于一身，通过亚毫秒级时延、厘米级定位、毫米级成像、光纤精密感知等关键技术，实现“通信感知融合”，打开物理世界与数字空间实时交互的“新通道”。

未来，通过支持大带宽、强实时的新型边端采集设备的应用，结合图像识别与异常感知的模型训练，并依托满足电力要求、高可靠的通信网络，可进一步解决电网巡线效率难题，打造**“智慧千里眼”**。

智能变电站

变电站是电力运输的“交通枢纽”，对电网系统的重要性不言而喻。现阶段，变电站管理以固定布控点位的摄像头为主，存在巡检死角，仍需通过高危的人工作业进行补充；同时，变电设备仍然采取计划性检修这种预防性维护的方式，造成设备使用寿命的缩短与频繁更换。

未来的智能变电站需要依托更强大、更灵活的感知设备以及更先进的故障预测模型，在实现变电站日常自主运行和管理的同时，提高设备维护的正向效果，延长设备使用寿命，消除非计划停机。

关键技术应用 1：边端协同，打造数字员工

未来智能变电站将以无人值守为目标，巡检工作由站内外的各类机器军团代为执行，包括：无人机、轮式机器人、挂轨式机器人、重要点位定点摄像头等多种边端采集设备，实现全方位、无死角的变电站巡检，提高巡检全面性及效率。

同时，为了满足对变电枢纽设施清障的高实时性要求，在云边协同的基础上，进一步将算力赋能到端，依托边端协同的解决方案，让大数据和 AI 走出云端、站上“前线”，让机器设备成为“眼睛”、人工智能成为“大脑”，赋能各类智能机器人完成数据采集、过滤、存储、分析、挖掘等一系列动作，对站内安全隐患及设备状态异常等进行诊断和预警，识别故障区域、部位及原因，并完成自动检维修派单及应急处置。

此外，为避免因网络干扰导致的通信中断对变电站巡检与管理的影响，需同时加强端侧设备的本地数据缓存能力与离线计算能力，确保端侧设备在下线期间也能正常开展变电站的智能巡检工作，进一步保障供电安全。

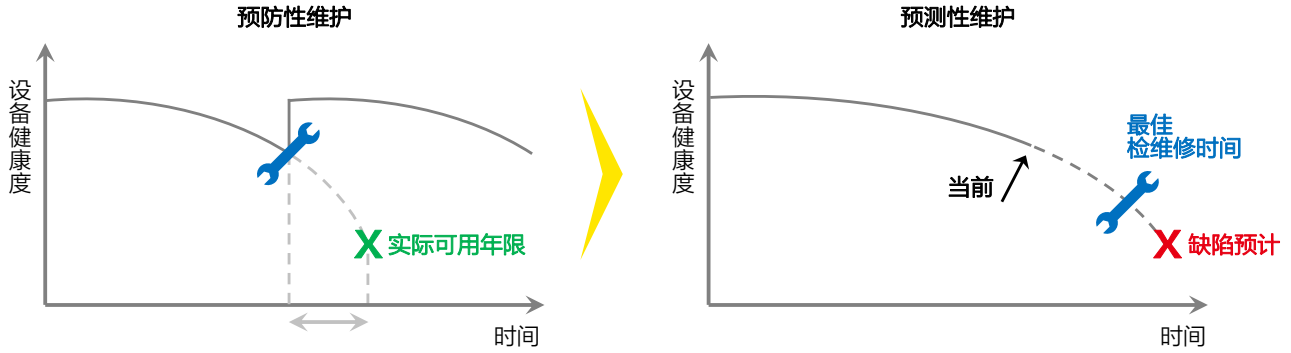
关键技术应用 2：高级智能，实现预测性维护与变电设备延寿

延长变电设备使用寿命的关键，在于精准判断设备故障发生的时间点，并在临近故障点前进行针对性维护。但由于目前变电设备维护都采取计划性检修，因此基于历史检维修记录的数理预测模型并不能真实反映设备运行状态的变化和趋势。

未来，需要探索更先进的人工智能，通过图计算、高级分析、无监督学习等相关技术，对包括设备历史缺陷记录、试验记录、运行状态与机理模型等多种相关要素进行深度学习，从而构建更复杂的设备缺陷诊断与预测模型，对设备当前运行状态进行综合评估与健康度分析的同时，基于多维影响因素模拟，对未来可能发生的设备故障风险及其原因进行更精准的预测，判断最佳人工介入的时间节点，并提供相应检维修方案与物资需求，便于电力运营商提前准备并开展培训。

通过“机器人+AI”的有机融合，全方位监测站区安全及设备运行状态，实现故障诊断与告警；同时，依托高级人工智能实现预测性维护，打造**“智慧大脑”**，完成对变电设备故障的“先知、先决、先行”。

图表 6 从预防性维护到预测性维护



电网数字巡检中，电力数字化技术应用小结

从关键使能技术当前应用程度看，智能设备在不同区域电网巡检工作中的渗透率参差不齐，对故障监测的识别率、响应速度等也都偏被动，设备检维修基本采取计划驱动的预防性维护。

未来需重点研究突破的方向包括：

- **提高智能设备巡检率：**实现电网线路与变电站智能设备巡检 100%覆盖。
- **提高通信效率：**电力专网覆盖率 100%，毫秒级传输时延，确保无信号盲区；同时，探索并推进新一代移动通信技术应用，进一步实现通感融合。
- **提高边缘自治能力：**搭建云边端协同架构，推动算力与算法不断前移，提高异常诊断与响应时效性，同时加强本地缓存与数据断点续传能力。
- **提高 AI 渗透率：**加强人工智能训练，提高各类电网设备异常识别准确性，降低误报、漏报率；探索图计算等高级 AI 应用，逐步提高变电设备预测性维护比例。



场景三：多源自愈配网

城市配电网是连接电网与终端用户的桥梁，配电网的安全稳定运行对企业开展日常经营和居民安居乐业有着重要的保障作用。随着能源结构发生变化、供电模式发生调整，电力供应的重心已经逐渐从主干电网慢慢向配电网络发生偏移，这就要求未来城市配电网必须兼顾稳定性和灵活性，同时加强应对突发事件的运行能力，通过数字化、智能化技术的应用和加持，最终实现“刚中带柔、柔中带刚、刚柔并济、相得益彰”的建设目标，从负荷侧提高电网系统对新能源的消纳能力。

多源配网运营

随着高比例分布式电源和多样化负荷的接入，城市配电网将呈现出“有源”、“多向”、“双高”的特征，分布式新能源设备出力的间歇性、反向供电场景下造成的电压突变与潮流变化、电力电子设备对电网运行造成的谐波污染等，都会对城市配电网络的运行管理提出新的挑战和要求。因此，未来有源配电网运行管理的核心目标之一，就是加强常态情景下的电网稳定，通过电力电子技术与 ICT 技术的深度融合支持灵活性电源接入，保障电网在应对电源和负荷波动以及发生随机扰动时，能够正常有序运行，最大程度降低故障发生率。

关键技术应用 1：规范接入实现即插即用

分布式电源主要通过逆变器、换流器等电力电子设备实现电源转换，接入配电网络。但由于各分布式电源设备都是根据实际应用场景设计，存在拓扑架构差异大、电气接口不统一、通信协议不一致等情况，造成配网管理困难。

因此，在电力电子设备技术方面，需要采用高功率密度、支持多种电气接口、可以实现多模块自主并联的统一电源转换设备，扩展供电系统的接入容量，提高各类开关电源的标准化程度、可维护性与互换性，并通过统一的信息模型与物联协议，让设备差异在本地终结，大幅缩短接入调试时间，为在有源、多向的新型配网系统中实现基于 ICT 技术的全局监测、统筹调度、源网荷储协同控制等提供硬件基础。

关键技术应用 2：从终端智能到边缘智能

新型配电网络升级改造过程中，存在一次设备与二次设备接口不匹配、不同厂商间无法兼容等现象，不利于后期设备功能扩展以及配电设备运行水平和效率的提升。

一二次电气设备融合是一条有效途径。通过让一次设备带有部分二次设备的智能单元，提高设备智能化程度，如：让开关设备自带测量监测功能，对双侧相电压、相电流、零序电压、零序电流、谐波污染等电能质量参数进行主动感知和监测，通过优化算法及特征库对分布式电源并网后的污染源进行分析定位，支撑电能质量的精准治理。

然而，设备改造涉及面广、成本高昂、实施难度大，边缘技术的应用或许是更具经济性和实操性的解决方案。设备侧，通过信息模型与物联协议的统一，保证数据的实时监测和有效归集；边缘侧，提高边缘计算的能力，对端侧数据进行集中处理，保证更好的计算性能的同时，降低对终端智能化的要求。

边缘智能在电动汽车有序灵活充电上也能发挥重要作用。当电动汽车通过充电桩接入配电网络时，充电桩会实时采集充电功率、剩余电量等车端相关数据，并上传至边缘网关；边缘网关在配电计划允许的最大可用容量下，根据不同充电点位的实际接入情况，对单个充电桩的充电功率、充电启停时间进行灵活调节和控制，形成台区内的最优充电策略。

关键技术应用 3：从电缆通信到光纤通信

传统端边设备互联需要依赖通讯线实现，但分布式电源数量多、分布广，投资成本高、布线难度大。通过电力线宽带载波通信技术（HPLC），可以实现通讯线和电力线合二为一，只要有电力线的地方就能接入端侧设备，有效解决远端设备互联难的问题，实现“零接线”的高效互联与高频通信。与传统低速窄带电力载波相比，HPLC 技术使用 2MHz-12MHz 的通信频段，可以达到>1Mbps 的传输速率、<30ms 的网络时延。

未来，随着接入电源规模不断扩大，需感知和监测的数据体量会呈现指数级增长，配电网络对通信带宽和时延的要求也会越来越高。光纤通信有着从 Gbps 到 Tbps 的接入速率、<1ms 的网络时延能力，通过从广域网到台区的下沉式通信网络升级改造，将推动新型多源配网的运行效率实现跨越式提升。

通过电力电子技术与 ICT 技术融合，加强边缘智能与通信升级，实现分布式电源的广泛接入以及配电网络的平稳运行，提高新能源消纳水平，保障供电可靠与安全。

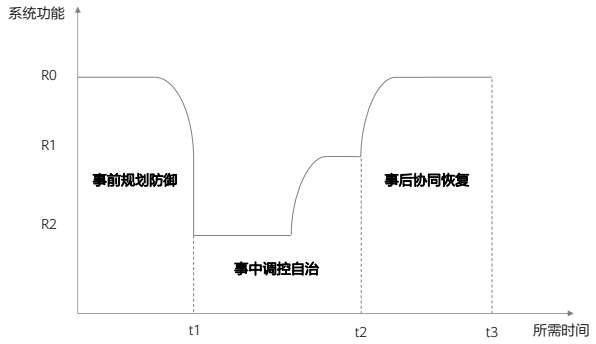
自愈配网调控

在确保常态情景下的电网稳定外，城市配电网建设还需要进一步提升故障应急情景下的电网应变水平以及极端情景下的电网恢复水平。

极端事件具有“小概率、大影响”与不确定性等特点，容易引发城市配电系统大规模停电事故。为了避免因极端事件所引发的故障影响规模及范围进一步扩大，减少故障造成的损失以及对关键负荷和居民城市生活带来的消极影响，增强配电网络的自愈性成为破题关键。

“自愈性”是指配电网络在面对极端事件时，能够快速适应、有效应对、及时恢复的能力。自愈性配网的建设与实现可分为三个阶段：极端事件发生前，通过线路加固、强化配电网络架构等电网改造以及分布式电源接入，提高配网面对极端事件的**抵御力**；极端事件发生时，通过“孤岛模式”快速隔绝故障设备或线路，保证未遭受攻击部分安全稳定运行的同时，对故障进行精准定位与及时抢修，提高配网面对极端事件的**适应力**；极端事件发生后，利用分布式电源、储能设备、电动汽车等灵活性电源，通过需求侧管理的方式，协助负荷完成按供电优先级的多阶段恢复，提高配网面对极端事件的**恢复力**。

图表 7 极端事件下自愈性配网三阶段供电曲线



感知通信技术与数字驱动技术将有效支撑自愈性配网的“三力”提升。

关键技术应用 1：全面感知监测，为自愈性配网建设提供数据基础

设备与线路状态感知体系的搭建是提升配网自愈性的基础。通过传感终端，对电气量、状态量、环境量等配网系统内部运行状态和外部态势变化数据以及用户用能状态数据等，进行全面感知与实时监测，为设备风险识别、故障定位抢修与灾后运行恢复提供决策支持。

最佳实践：AIoT 助风险识别更快、故障定位更准

中国某 IoT 解决方案提供商通过高精度电子式电流互感器对线路电流、对地电场等状态进行实时感知，全面支撑配网故障监测与诊断。当发现状态异常时，终端自动触发高采样暂态录波，采集后送回主站。主站云平台通过机器学习，对各录波文件进行快速分类，结合线路拓扑准确定位故障区段并识别故障原因，及时告警并告知检修人员故障定位结果，大幅缩短故障查找和响应处置时间，实现故障区域快速恢复供电。

该解决方案提供商已部署近 5000 套稳定可靠运行设备，线路电流测量精度达 1%，接地故障监测准确率接近 90%，短路故障定位准确率达 100%。

关键技术应用 2：光通信实现快速精准负荷控制

与输电线路相比，配电网络通信技术相对薄弱，光缆建设不足、通信条件差，对配网供电安全形成制约。网络层，随着以 5G 为代表的无线通信技术发展，配网安全运行得到一定程度改善。物理层，新一代光通信技术也取得突破，通过 OLT 与 OTN 融合将进一步提升配网信息通信能力，取消了接入网与传送网之间的协议转换，实现数据传输的超低时延，可以在极端情况发生时，快速切除非关键、非必

要负荷，保证配电网络的供电可靠性，对各类故障或扰动进行安全防御。

关键技术应用 3：机器学习助应对更优、恢复更快

1）极端事件预测：根据不同极端事件类型，对事件发生概率及频率进行建模；同时，构建不同事件与配网设备元件故障率之间的关联。基于事件预测及故障预测模型的计算结果，能够高效配套极端事件发生时的抗灾应急措施，并更好地分配抢修人员及资源。

2）孤岛划分策略：极端事件发生时，自愈性配网将实行孤岛管理，即根据配电网络连接的本地电源与负荷的类型、容量、位置以及重要程度，将目标配网的停电区域划分为若干个孤岛，每个孤岛内包含一个或多个电源，进行配电网孤岛控制。

通过机器学习不断优化完善相应算法模型，可以形成面对不同极端事件或不同故障情况时的最优孤岛划分策略，保证尽可能多的负荷在最短时间内恢复供电的同时，有利于在故障排除后快速切换回并网模式，最小化配网停电损失。

通过配电网络设备状态感知与信息通信基础设施的完善和升级，加强配网主动防御、及时应对故障事件的能力；同时，随着人工智能和大数据的应用，进一步提升故障应对的有效性，缩短故障持续时间，快速恢复正常供电。

多源自愈配网中，电力数字化技术应用小结

从关键使能技术当前应用程度看，城市配电网络感知与通信基础相对薄弱，难以对各类分布式新能源、储能设备等并网导致的潮流变化、谐波污染等做出及时、有效的反应。

未来需重点研究突破的方向包括：

- **提高边端采用率：**加强边缘计算能力，对海量接入设备的运行数据进行集中高效处理，降低配网设备改造成本。
- **提高通信实时性：**对配电网络进行光纤升级改造，实现海量数据的低时延高速传输（T 级速率、毫秒级时延），大幅提升系统运行效率。
- **提高 AI 渗透率：**通过机器学习训练对故障进行精准定位、对极端事件进行准确预测，为故障应对提供有效支撑，加快灾后恢复速度。

场景四：多能协同互补

随着终端电气化加速与储能技术的突破，电能将是未来能源供应体系的核心。在一定区域范围内，通过微电网或微能网的建设，依托电力数字化技术与能源技术的深度融合，可以实现电、热、气等多种能源形式间的灵活转换与协同互补，在加强区域供电供能可靠性保障的同时，也提高了能源综合利用效率与能源服务质量，最终实现净零排放。

微电网/微能网具有源网荷储一体融合的特性，可以独立自治运营，也可以通过开关与上级电网相连，进行电量交换。智慧园区和智慧楼宇是微电网/微能网的两个典型应用场景。



智慧园区

随着当前城镇化发展重心从“高速度”转向“高质量”，全面推进城市数字化转型已成为城市建设的重要工作。智慧园区作为城市产业聚集和生产生活的主要载体，是智慧城市建设的核心内容。

通过云大物智移新一代数字化技术的深入应用以及与未来电力系统中各类电力电子设备的融合，将为智慧园区打通“监测–分析–预测–优化”的用能管理闭环与“巡检–预警–处置”的电能管理闭环（对配网电能质量监测及运行故障定位的关键技术支撑，详见场景三），并实现多能协同调度与能源梯级利用，提高能源综合利用效率，打造智慧零碳园区。

关键技术应用 1：ICT+能源路由，设备灵活接入、碳排精准计量

1）**“采得上来”：**园区内能源供应设备与消费设备类型众多，包括分布式光伏设备、分散式风电设备、电化学储能设施等供电系统，冷热电联供、热泵、储热设施等供热系统，供气站、氢储能设施等供气系统，以及工厂、楼宇、电动汽车、路灯等用电负荷系统。

基于电力电子变换和控制技术构成的能源路由器，能够为各类设备提供多种电气接口形式，通过协议标准化让差异化终端设备集成互联，因此将成为微网系统内的核心设备与能量枢纽。与 5G 等数字化技术结合后，能源路由器在**计量、控制**的基础功能上，又具备了**通信与智能决策**的能力，可以将设备运行状态、能量使用情况等信息进行实时采集和传输，实现数据的统一归集、分类计量，同时也能根据用户指令或上级调度中心指令，对能量流向及功率进行主动或自主管理。

2）**“用得明白”：**基于能源路由器对用能数据的全面采集和实时汇总，能够准确捕捉、追踪碳足迹，并根据预置的计量因子规则，对园区碳排放总量进行精准计量核算与实时监测，让数据可靠可信，为基于 IOC 的可视化碳管理，以及碳配额管理和碳资产交易奠定基础。

关键技术应用 2：智能算法与大数据，用能自主调优、多能协同调度

1）**“用得节省”：**基于对园区内各类负荷海量用能数据的实时采集和分类计量，通过对不同类型负荷用能模型的学习，利用大数据分析与边缘计算能力，对园区内空调使用、照明亮度等能耗行为进行智能控制与自主调优，实现节能。

2）**“供得灵活”：**通过人工智能算法，对园区内各类分布式电源进行出力预测、对各类用电系统进行负荷预测，并结合气象预测数据、电力市场交易价格变化、电网需求侧响应要求等各种相关因素，计算出全局性的智能化调度方案，对园区内各类供能系统的出力时间、出力功率等下达调度控制指令。同时，根据短期气候变化对电源出力和用电负荷的影响预测，对调度策略进行及时优化调整。

在供大于求的用电低谷时，通过能量转换技术与各类储能设备，将多余电能进行逐级多次利用，利用方式除了通过电化学储能直接进行电能存储外，还能通过电转气（Power2Gas）等新兴能源技术将电能转化为氢能，一方面可以通过储氢装置实现能量存储，另一方面也可以通过混合燃气供应的方式降低燃气采购；在供小于求的用电高峰时，可以释放储能设备中的存量电能，或将多余的热能、氢能进行能量转化。通过电、热、气等多种能源形式间的互济互补，最终提高园区内能源供应自给自足的能力。

通过能源路由器对园区内海量终端电能设备进行遥测、遥信、遥控，并基于用能分析与预测，对各类供能设备及负荷进行遥调，实现广域内基于全局性策略的优化调度与能源共享，提高能源综合利用效率。

智慧楼宇

楼宇作为城市核心基础设施之一，其智能化也是智慧城市建设的重要组成部分。在数字孪生、人工智能等数字化技术的渗透下，楼宇将变得无与伦比得敏锐而智慧，配套储能设备建设运营，将自主营造出更舒适、更安全、更节能、更环保的工作与生活空间。

关键技术应用 1：数字孪生能耗管理

通过设备感知与建筑的三维可视化 BIM 模型，准确计量并清晰呈现各片区的实时能耗情况及变化，对用能行为进行分析，辅助运营决策。同时，结合人流数、环境监测数据、空气质量、日照强度等因素，基于先进算法，自动生成并下达设备启停、温度调节、光暗度调节等控制指令，通过智能网关实现按设备、按区域的灵活控制与调节。

最佳实践 1：楼宇数字平台助力伙伴降耗降本

某高科技制造企业自主研发“软硬一体化、云边一体化、强弱一体化”的楼宇数字平台，拥有多项创新专利技术，成为智慧门店运营管理的引领者。

该企业智慧门店核心解决方案包括：

1、能实现基于插座颗粒度的能源采集与控制，通过功率监测与内置温度监测，对异常情况进行实时告警，能够对每一个单独的插座进行及时和定时远程控制，保证使用安全；

2、能够基于实时负荷参数或灯光运行状态，通过智能算法对空调系统及新风系统的运行状态和设定值、照明设备光照度和启停时间等对象进行自动控制调节，也支持按区域、按单个设备进行一键远程控制；

3、通过对环境参数、设备运行参数等关键指标进行监测，结合算法模型与多维度数据分析，对环境健康度、关键设备健康度进行诊断、评估、预测。对于预测性缺陷，提前 4 天-2 周运维告警，避免异常停机。

该企业已与全球多个大型商超项目及专营店项目合作。某门店在该楼宇数字平台的应用与管理下，年节能预估 1.1 万千瓦时，年度单位面积用能量从每平方米 343.7 千瓦时下降至 281.1。

关键技术应用 2：多形式智慧储能，实现多能双向灵活调配

随着“被动房”的出现与增加，占楼宇能耗 50% 的暖通空调将被“自然热源为主、电动热泵为辅”的新型供热方式取代，能耗将大大降低。对于建设分布式光伏设备的楼宇来说，将有极大概率从“可控负荷”变成“可调电源”，楼宇可以被当做一个大型储能设施参与到配网运营中，起到削峰填谷的作用。

基于对电力市场价格变化的监测预测以及需求侧响应的要求，形成智能楼宇用电与反向供电策略，并依托智能网关对表后储能设备进行充放电开关与方向的调节控制，通过“低买高用”进一步降低能源成本，通过“低买高卖”实现峰谷套利、提高智能楼宇的经济性。

同时，通过被动式超低能耗建筑配套的余热回收设备及储热装置，可以在热源充足时同步实现热能的反向供应，甚至通过热能与电能的互相转换，进一步实现多能协同、效益最优的智慧楼宇能源供应与存储方式，从“电力产消者”向“多能产消者”升级。

最佳实践 2：打造多能互补的近零能耗建筑

某全球领先的欧洲工业数字化企业在中国某北方海滨城市打造了一座总面积 1.38 万平方米的被动房技术中心。该被动房建筑在不使用主动采暖和空调系统的情况下，冬天室温也能始终保持在 20 摄氏度以上，创造室内舒适环境的同时，实现近零能耗。

据统计，该建筑每年可以节约一次能耗将近 130 万千瓦时，减少碳排 664 吨，相当于 53000 棵树木的碳汇。

该企业在全球多个地区都在深耕智慧楼宇解决

方案。在数个大量采用电供暖系统的区域，该企业已开始探索将楼宇当做“电池”，集成到电网中，成为分布式能源系统的组成部分。同时，将楼宇一段时间内多余的热能进行回收，并转化成电能存储，在用电高峰时售卖储存的电力，反向补充电力市场上的资源，继而实现电力的削峰填谷。

多能协同互补中，电力数字化技术应用小结

从关键使能技术当前应用程度看，增量园区的设备网联化水平较高，但存量园区仍然存在大量“哑设备”与异构网络，不利于全局管理和精准控制；分布式电源以及负荷终端仍多通过单向开关接入，无法支撑源网荷储一体协同，进而达到能源效率提升的目标；园区/楼宇因缺少数据中心的算力支撑，对源、网、荷的变化波动进行实时响应和调度决策的能力不足。

未来需重点研究突破的方向包括：

- **加速能源双向控制改造：**提高基于柔性变电站技术的能源路由器的安装部署率，满足对电力流向和功率大小按需灵活控制调节的需求，帮助分布式电源更友好地接入电网，为各种形态微电网通过反向供电参与电网运行提供电力电子技术支撑。
- **构建边缘能力：**通过**算力下沉**的方式，赋予边缘数据存储、处理、应用的能力，减少海量设备运行数据和负荷用能数据回传造成的带宽占用和时延损失，提高计算实时性；加强基于多种能源形式互济互补与储能配套的能量调度模型的训练学习，促进运营最优，并通过云边协同的方式，将云端训练完的大模型在边端进行简化应用，在缺少数据中心强大算力支撑的情况下，提高**边缘智能性**。
- **加速园区网络升级改造：**随着园区内接入设备越来越多，需要尽快升级完善园区宽带通信网络建设，满足边缘侧对数据采集与传输的高带宽、低时延要求。



场景五：跨域电力调度

2021 年以来，受极端天气高发、燃料价格上涨、疫情持续蔓延等多元因素共同影响，全球多个国家和地区都出现了能源短缺现象，不得不采取非季节性的拉闸限电等非常手段进行保供，对城市生产生活造成严重影响。

通过合理的调度安排，将负荷较低或有电量盈余地区的电量，利用输配电网络输送到限电地区，实现跨域电力的应急支援与调节，是解决限电问题的有效途径之一。跨域电力的调度有两种实现方式：一是通过智能电网调度，实现不同区域电网间的协调互动；二是通过虚拟电厂平台运营，实现电能优化再分配。

智能电网调度

不同国家和地区对电网调度的侧重略有不同。以中国为例，随着大规模风光基地的建设运营，在电力供需呈现区域错配的背景下，特高压主干电网将成为未来消纳大型风光基地所发电量、实现新能源电力远距离大规模输送的核心力量。2022 年，中国政府就明确提出“要加大力度规划建设以大型风光电基地为基础、以其周边清洁高效先进节能的煤电为支撑、以稳定安全可靠的特高压输变电线路为载体的新能源供给消纳体系”，特高压线路的投资新建以及围绕特高压电网的电力输送调度将成为行业关注热点。

万变不离其宗，无论电力系统形态何如、电网调度重点何在，算力和运力都是海量数据环境下，

促进电力系统高效智能调度的核心驱动力。

关键技术应用 1：强大算力支撑海量数据处理

大规模间歇性、波动性出力的新能源发电设备并网后，电力调度需要处理的数据量呈现指数级增长，亟需通过大型及超大型数据中心的建设，为海量电网运行数据提供稳定存储、高性能计算、精准分析的强大算力支撑。通过“电力+算力”的融合，为深度学习、模型训练、图像处理等技术应用提供了发挥空间，助力发现潜藏在海量数据背后的新能源时代电网运行规律，推动数字电网建设。

关键技术应用 2：光网络支撑实时可靠通信

数据中心对海量电网运行数据的调用以及变电枢纽对电力调度实时数据的接收，都需要依托高安全、高可靠、大带宽、低时延的通信网络来实现。新一代光通信技术抗干扰能力强、50 毫秒级故障恢复速度快、单纤容量大、支持远距离传输，将成为未来数字化电网的最佳通信载体，确保电网调度的快速响应和快速执行。

通过强大算力与高效通信能力的构建，为电力系统实现全局性更精准的电力调度提供支撑。

虚拟电厂

虚拟电厂不改变物理网络结构，而是通过软件平台聚合了分散而各自独立的电源设备、储能设备、可控负荷等，通过灵活的调度管理与电网高效互动，既能作为“正电厂”向电力系统供电，又能作为“负电厂”消纳系统内的富余电力，实现多时空电量平衡，提高电网安全与新能源消纳能力。

虚拟电厂的高效运营需要计量、通信、调度三大核心技术的支撑。

关键技术应用 1：人工智能与大数据，实现最优调度

智能调度决策是虚拟电厂的核心能力。通过为聚合的各类电源及储能设备制定合理有效的调度安排，能够最大程度保障电网平衡运行，提高能源利用效率，同时提高各聚合方的经济收益与参与积极性。

虚拟电厂的调度决策有两大核心依据：

1）以供定调：虚拟电厂有两种方式参与电力市场交易，一是基于可调电源的发电能力，决定直接参与电力现货市场交易竞价的可调电量；二是根据电网需求侧响应要求，参与调峰、调谷、调频等电力辅助服务，平抑电网波动、保障电网平衡。在这样的模式下，对可调电源的出力变化或可控负荷的需求变化进行准确判断，是支持调度决策的关键要素。

人工智能技术的深入应用，将大幅提高预测模型的准确性。通过稀疏建模、集成学习或其他机器学习方式，建立气候情况、发电性能、用电需求等相关数据间的影响关系，并根据未来天气变化情况对供需曲线进行**准确预测**。

另外，多源配网的复杂性意味着分布式电源或储能设备的运行状态或将随时出现变化和调整。因此，虚拟电厂运营商也需要对聚合的可调电源进行实时状态监测，当设备状态或出力情况发生变化时，及时更新调整预测模型参数，并基于实时预测结果**动态调优**出力策略，实现灵活调度。

2）以价定调：虚拟电厂聚合的各类电源因其特性不同，出力曲线也不同。虚拟电厂运营商可以基于对可调电源的出力预测，结合电力市场价格预测，通过数据建模对不同机组进行差异化调度，提高聚

合方与运营商的经济收益。

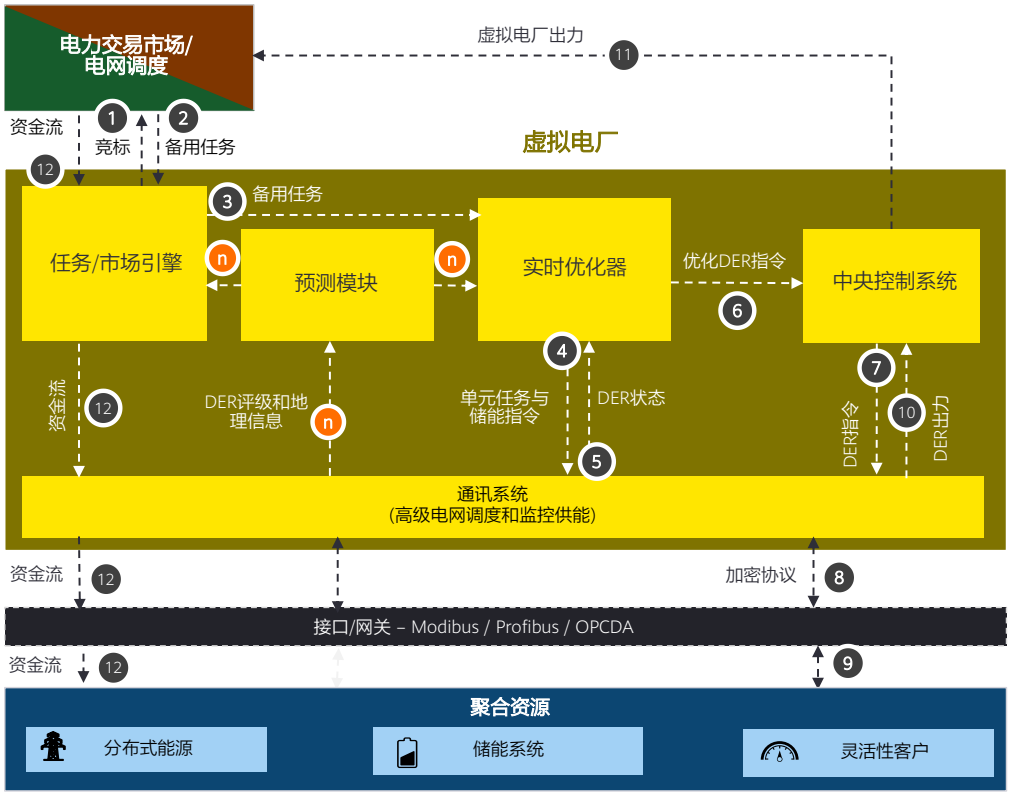
以德国电力市场为例：对于生物质、热电联产等出力稳定的机组来说，机组出力变化可与电力市场现货交易价格走势相一致，因此可以只在需求高峰时（价格较高）进行发电；而对于光伏、风电等“看天吃饭”的新能源设备来说，需要根据电力市场每 15 分钟更新一次的报价水平安排调度。

通过人工智能与大数据技术的应用，帮助虚拟电厂运营商实现对可调电量的准确预测与动态调优，并通过可调电源出力与电力市场价格匹配情况因势利导，提高虚拟电厂各参与方效益。

关键技术应用 2：统一终端与标准协议助力远程调度与控制

对聚合的各类电源及储能设备的全面感知、精准计量和高效通信，可以为虚拟电厂运营商的智能调度决策提供数据基础。领先的虚拟电厂运营商往往会在达成接入协议前在各电源或储能设备处安装统一的终端设备，并提供 Modbus/Profibus/OPCDA 等标准通讯协议，以此保证对分散的、不同类型设备数据的高效获取以及调度指令的及时下达。

图表 8 虚拟电厂运行模式



最佳实践 1：发电侧虚拟电厂运营

发电侧聚合为主的虚拟电厂以提高新能源并网消纳为核心目标。

欧洲某以分布式新能源设备及生物质、CHP、小水电等灵活调节电源为主体的虚拟电厂，通过在电源端安装远程控制装置并为其免费提供发电量评估的方式，将电源及其各种运行参数集成到虚拟电厂平台的中央控制系统，并获取其发电能力数据。

虚拟电厂运营商根据电源运行参数、电网状态

以及电力市场交易价格等情况，对各电源进行远程控制——分布式新能源设备因其间歇性发电，将直接参与电力市场竞价；灵活性调节电源可同时参与电力市场竞价与电力平衡市场，获取容量电费与调频服务费。

该虚拟电厂运营商聚合的电源资源相当于 4 座 60 万千瓦大型火电机组，占当地电力平衡市场 10% 的份额。

最佳实践 2：负荷侧虚拟电厂运营

负荷侧聚合为主的虚拟电厂以需求侧响应、降低能耗为核心目标。

某以可控负荷为主体的虚拟电厂，围绕用户侧的表后储能设备，实现了“车+桩+光+储+荷+智”生态系统整合。该虚拟电厂运营商邀请符合要求的负荷用户加入平台，当电网用电需求增加而电力供应不足时，虚拟电厂将通过调动储能设备中的电能来支持电网运行，参与负荷响应的用户可以从中获得直接经济激励。

该项目启动 2 个月不到的时间，已接入区域内 2500 名用户，并网太阳能容量达 16.5 兆瓦，能为电网提供相当于一个小型发电厂的电量。未来，该虚拟电厂运营商将在更广的区域范围内推广这种运营模式。

最佳实践 3：源网荷储一体化虚拟电厂运营

源网荷储一体化协同的虚拟电厂以提高能源总体利用效率为目标。

中国首个虚拟电厂试点项目一期工程，通过智能管控平台实时接入并控制了横跨三省市、总容量约 16 万千瓦的可调资源，涵盖蓄热式电采暖、可调节工商业、智能楼宇、智能家居、储能、电动汽车充电站、分布式光伏等 11 类对象，通过设备数据和互动信息的计算与存储，集成了能源运行管理、交易、服务等多项功能，与电力系统保持实时交互。

从运营效果上看，该虚拟电厂通过需求侧响应的方式，夏季为当地电网提供了近 10%的空调所需负荷，冬季预计可增发清洁能源 7.2 亿千瓦时、减排 63.7 万吨二氧化碳，有效实现了清洁能源的高效利用和灵活可调。

跨域电力调度中，电力数字化技术应用小结

从关键使能技术当前应用程度看，电力数据中心建设与通信网络升级处于起步阶段，虚拟电厂运营也仍然在探索和试点阶段。

未来需重点研究突破的方向包括：

- **提高对电网调度的算力和运力支撑：**增加数据中心算力、提高算效；持续加强电网即时通信能力。
- **加强虚拟电厂运营中 AI 的应用：**提高对可调电源出力的准确预测，合理安排调度。

场景六：赋能绿色低碳

电力行业实现“双碳”目标极具挑战，除了可再生能源替代传统能源、发展循环经济之外，数字技术和数字平台因其广泛触达、实时记录、全面增信、正向激励等优势，在实现绿色低碳的发展目标中，正发挥越来越重要的作用。



碳交易

碳交易的核心是将环境“成本化”，借助市场力量将环境转化为一种有偿使用的生产要素，将碳排放权、绿色电力这种有价值的资产作为商品，通过市场化交易撮合的方式，提高新能源发电商与电力用户的参与积极性，保证绿色电力消纳占比逐步提高。

以中国为例，当前碳交易体系包括碳配额、国家核证自愿减排量（CCER）、绿色电力等三种商品形态。碳配额规定了控排企业的排放上限；CCER由非控排企业申请、经监管部门核准后，可抵消控排企业的超额排放量；绿色电力可减少对传统能源

发电量的购电需求，从而直接降低碳排放。三类商品互相补充，对整个电力系统的低碳化生产和运作带来积极作用。其中与电力行业直接相关的绿色电力是在电力中长期交易框架下，为光伏、风电等新能源单独设立的交易品种，在电网保障性收购之外，又打开了一条供需双方对带有绿色标识的新能源电力进行直接交易的新通道。为进一步提高新能源电量的消纳水平，中国政府在政策导向上给予了绿色电力诸多优先权，优先组织、优先安排、优先执行、优先结算，未来将吸引更多的主体参与到市场化交易中来。

关键技术应用：区块链实现绿电确权，加速消纳

绿色电力交易刚刚开闸，在绿色电力生产、交易、结算、核证的过程中，面临重复计量、反复核对校验、甚至数据造假等挑战。

区块链技术以其去中心、防篡改、公开透明等特性，能保障数据可信与交易可靠。具体来看，利用区块链技术的分布式记账功能实现全环节数据的上链存证，利用共识机制保证数据的相互校验与真实性，利用智能合约完成交易自动执行与高效结算，利用电子签名核发绿证，实现每一笔绿色电量的精确追溯与全生命周期追踪，提高了绿电消费认证的权威性。

区块链技术的应用，将对建立高效、公平、开放的绿色电力交易市场起到至关重要的作用。

碳普惠

碳普惠是指对公众和小微企业的绿色低碳行为进行量化，并建立起以政策鼓励、商业激励和核证减排量交易相结合的正向引导机制。

目前，电力行业节能减碳行为的方法学由各碳普惠平台各自确定，尚无行业统一标准，导致部分绿色低碳行为未能被纳入碳普惠统计范畴（例如：用户安装分布式光伏设备，通过新能源电力自发自用实现了节能减碳，但在电力系统的认知里，该用户只是少花了一笔电费而已），影响了碳普惠正向引导作用的发挥。

而一旦形成相应的方法学，如何对符合条件的公众行为进行统一的权威性认证，也是碳普惠机制推广面临的挑战之一。

关键技术应用：区块链规范电力领域减碳行为认证

碳普惠生态具有参与人数多、分布广、流程复杂等特点，区块链技术特点与之相契合：通过分布式账本、共识校验、智能合约等区块链相关技术，对满足电力行业方法学条件的节能减碳行为、减碳量、减碳量对价及其流向等进行全面记录，实现数据增信。同时，与物联网技术相结合，通过数据的自动感知、采集、上链，进一步减少人为干预，确保数据真实性。另外，通过隐私保护技术，也能够在数据公开透明的同时，对个人信息进行有效保护。

最佳实践：新能源车企的碳积分应用系统

中国某新能源车企通过在车内搭建的开放生态平台，连接了整车 341 个传感器和 66 项控制权，将相关信息实时记录到去中心化的区块链中，并利用智能合约自动将汽车的行驶数据、排放数据等转化为碳积分。车主可以在碳积分应用系统中，使用积分兑换相应奖励，享受到因减碳行为带来的福利和权益，对低碳行为起到了良好的正向引导和激励作用。



赋能绿色低碳中，电力数字化技术应用小结

从关键使能技术当前应用程度看，区块链技术在碳普惠场景下的落地实践相对广泛，但主导方多为政府机构或平台服务商；绿电交易市场仍在试点阶段，区块链技术处于技术研究、专利申请、标准制定阶段。

未来需重点研究突破的方向包括：

- **提高区块链渗透率：**各区域电力批发市场随绿电交易机制的建立，完成上链交易；在智慧园区、负荷侧虚拟电厂等触达终端用户的场景中，也积极研究探索区块链在零售电力撮合、碳行为认证上的应用。

电力数字化技术在六大核心业务场景中的应用总结

综合未来电力系统六大核心业务场景对电力数字化使能技术的应用来看，核心技术支撑集中体现在以下几个方面：

1、**“端”：设备网联化**程度决定了边端数据采集效率以及设备可控性，未来需通过**接口统一化**、**协议标准化**实现对各类电力设备的泛在感知，实现关键设备**全接入**；

2、**“边”：**云边端协同能力的建设可以提高数据处理与分析的表现，未来需进一步拓展云边端协同架构的覆盖面，提高**边端采用率**与**智能前移**，根据实际业务需求更好地平衡业务响应的**实时性**与数据分析的**准确性**；

3、**“管”：**电力通信专网的构建将为提升数据传输效率及供电可靠性提供大力保障，未来需实现 Gbps 甚至 Tbps 级的**高带宽**、ms 甚至 μs 级的**低时延**，确保海量数据的高效传输和处理；

4、**“云”：**人工智能的广泛应用将为数字孪生时代下源网荷储各环节带来强大支撑，未来需进一步提高 **AI 算力**以及 AI 在发电量预测、预测性维护、电网监测、用能分析与灵活调度等各场景的**渗透和采用**；

5、**“数”：区块链**为能量流、数据流的交互提供了**互信保障**，未来需加强在各类电力交易以及能源计量领域的应用。

图表 9 电力数字化技术在六大核心业务场景中的应用总结

电力数字化使能技术		数字绿色电厂		电网数字巡检		多源自愈配网		多能协同互补		跨域电力调度		赋能绿色低碳	
		全周期数字孪生	远程智能集控	智能巡线	智能变电站	多源配网运营	自愈配网调控	智慧园区	智慧楼宇	智能电网调度	虚拟电厂	碳交易	碳普惠
数字化边端	边端采集	★	★	★	★	★	★	★	★	△	★	△	△
	控制终端	△	★	△	△	★	★	★	★	△	★	–	–
泛在通信网络	地面通信	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	△	△
	卫星通信	△	△	★	△	△	△	△	–	–	–	–	–
算力和存储	云资源平台	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	–	–
	云边端协同	△	★	★	★	★	★	★	△	△	△	–	–
	空间计算	★	△	△	△	△	△	△	★	–	–	–	–
	区块链	–	–	–	–	–	–	△	△	–	△	★	★
算法和应用	人工智能	★	★	★	★	△	★	★	★	△	★	–	–
	图计算与高级分析	△	△	△	★	△	△	△	△	△	△	–	–

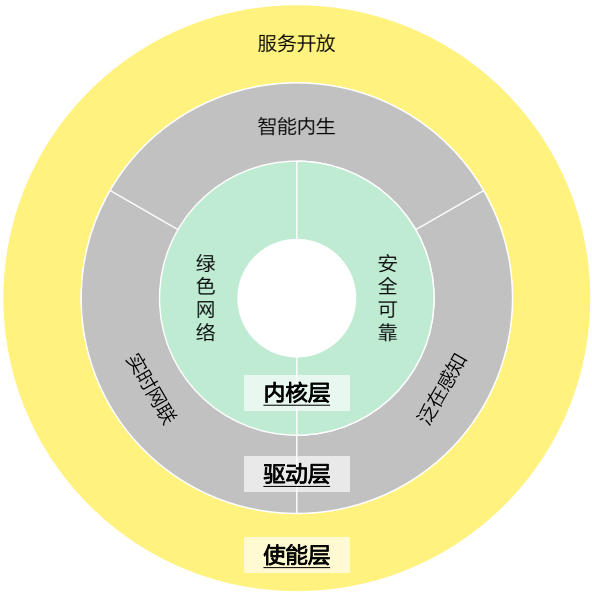
★：核心技术；△：辅助技术；–：不适用

第三章、电力数字化技术特征

（一）关键技术特征

伴随未来电力系统内各业务场景纵深化发展对物联感知、网络通信、云计算、大数据、人工智能、区块链等新一代数字化技术的需求，我们认为电力数字化技术将在三个层次上呈现出六大关键特征：

图表 10 面向 2030，电力数字化关键技术特征



内核层

为电力系统搭建一个绿色和安全的网络环境，是数字孪生时代下电力系统建设最核心的目标和基本原则。

特征一：绿色网络

电力数字化技术的发展和应用不仅要帮助电力系统提高新能源电量的消纳能力，同时也要降低电力系统本身因高电子电力设备渗透、高数据处理效率要求等导致的能耗增加。全光网能在物理层面构建一张充分支撑业务需要、高度满足能效要求的底层通信网络，从而提升整个电力系统由内而外的绿色低碳水平。

全光网，为算力提供绿色运力保障

全光网（AON）是指各通信节点间的信息端到端传输与交换完全靠光子实现，没有电子信号的介入，从而降低因电子设备或光电转换对传输速率带来的负面影响，打造信息“高速公路”，有效支撑源网荷储各类业务处理对高带宽、低时延的要求。全光网能够大大简化通信站点和机房设置，压降传统通信设备部署 70-80%的空间需求以及 40%以上的能耗，大幅减少碳足迹，成为电力数据的绿色运力。

全光网的建设内容包括线路“光化”与节点“光化”：

1）传输线路“全光化”：光通信网络因其巨大可用频谱（10 THz）、超大容量（100 Tbps）、超高速率（1 Tbps），成为未来超宽带通信技术的最佳传输方案。从目前产业发展趋势来看，光传输技术有两大突破焦点：进一步提升传输速率与进一步提高单纤容量。

G.654.E 光纤拥有超低衰减系数、超大有效面积，能够显著延长无中继传输距离，从而大量降低中继站建设需求，相当适合承载特高压系统对 400G 或超 400G 传输性能以及超长距离传输的要求，大幅提升电力通信传输能力。同时，光频谱也将从 C 波段向 **C+L 波段**扩展，很快将实现单纤 32T 的超大容量，主干光纤网络将进入 80 波 x 400G 的时代，为电力数字化转型和数字经济发展搭建强大的基础设施能力。此外，采用 **oDSP 算法**的光传

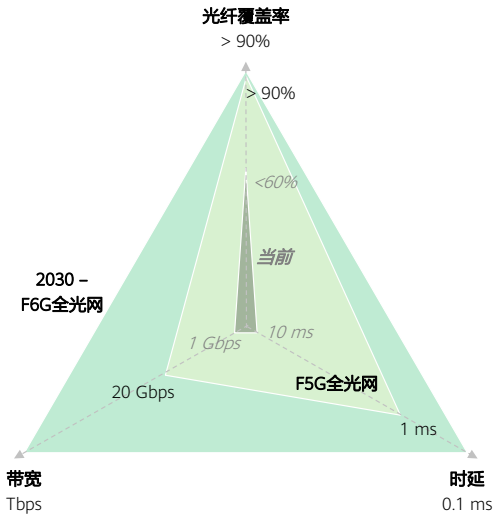
输网络（OTN）还能进一步提升通信性能：同等传输距离下，传输容量将提升 40%；同等传输容量下，传输距离将延长 20%。

2）传输节点“全光化”：光交叉连接（OXC）技术是实现完整全光网的核心解决方案。通过一张光背板，将成百上千的光纤集成起来，实现免连接、“0”跳纤，极大降低设备占用空间和能耗的同时，提高了系统可靠性，也提供了更灵活的配置能力——只需要通过控制系统进行光背板的波长控制，即可实现新业务的快速开通。

绿色网络关键衡量指标及参考

带宽和时延是衡量网络性能的最核心指标。提高光纤网络的覆盖率，完成高品质、确定性的全光网络升级，是实现绿色网络的重要措施。

图表 11 绿色网络关键衡量指标及目标参考



特征二：安全可靠

数字孪生下的电力系统，会接入大量具有异构协议的设备，设备会产生每秒数以亿计的数据量，数据会通过复杂的通信网络进行高频传输并为各类软件系统或应用服务所调用——伴随着电力数字化的深度转型，电力通信网正面临着前所未有的安全性挑战。未来电力系统对通信网络的要求将不仅是安全可靠，而且要数字可信。网络安全上，构建“传输层–网络层–数据层”的三层防御体系；数字可信上，构建可信根、分布式信任、数据安全与隐私的数据安全框架。二者之间有侧重，也有协同。

三层防御，保障内生安全

网络系统的运行安全除了可以通过防火墙部署等方式进行保障之外，未来也将从传统集中式防护、外挂式的架构向网络内生安全新架构演变。

1）传输层“防中断”，业务不断：电力通信网作为电力系统的关键基础设施，也需要通过构筑网络安全的**三道防线**，来加强对电力数字化的支撑。具体来看，通过**设备级冗余保护**，在系统出现器件异常时快速切换至备用器件，保证设备正常运行；通过**链路级冗余保护**，在发生光纤损坏时，可以基于协商机制快速切换至保护链路，实现业务的快速恢复；通过**网络级冗余保护**，当主网络出现大面积瘫痪时，依托独立双平面快速切换至备用网络，提高电力通信网面对极端情况的应对能力。

在电力通信网的冗余设计时，可以根据实际情况采取分层分级的冗余保护机制。对于骨干输电网，可以考虑配置完整的三道防线，确保电力可靠通信和安全调度；对于配电网络，可以在提供设备级冗余保护的同时，灵活配置链路级或网络级冗余保护。

2）网络层“防攻击”，网络不瘫：首先，通过对通信协议和网络设备改造，在 IPv6 报文头部嵌入可信标识和密码凭证，网络设备可以基于标识的验证来确认请求的真实性和合法性，防止伪造与假冒，构建细粒度的接入验证和溯源能力，提升**架构韧性**。其次，构建云网安一体化协同的安全服务架构，对网络攻击威胁事件进行自动化响应、秒级处置，实

现**全局防御**。第三，通过图计算和联邦学习等人工智能技术，对产生威胁的关联事件进行分析，完成威胁识别模型自进化，持续提升威胁事件检出率，实现对威胁事件的**动态检测**和**智能分析**。

同时，由于用户规模和复杂度增长，安全策略的数量也呈指数级增长，传统人工模式的规划管理将无法适应，未来需要进一步研究基于 AI 的流量与业务特征自学习与建模技术、基于特征模型的风险预测和安全策略编排技术、安全策略冲突检测及自动优化技术等。

3）数据层“防勒索”，数据不丢：在网络层通过防火墙和沙箱对勒索病毒进行过滤和识别的基础上，在数据层构筑最后一道网络安全防线。在生产区，基于 AI 模型及时检测和阻截勒索病毒，并通过本地存储安全快照，实现业务秒级恢复；同时，通过备份区和隔离区的本地备份和隔离存储，进一步防止数据丢失、保障数据安全。

技术融合，促进原生可信

区块链与隐私计算技术的有机结合，能有效解决密钥泄露风险、隐私数据保护、算法协议漏洞等行业难题，从而大力推动数据要素资产化发展，是确保数据全生命周期安全合规的重要技术路线。

4）可信根：可信的数据源是安全可信的基础，组件（芯片和操作系统）层面的可信执行环境（Trusted Execution Environment）是被广泛认知且应用的方案，未来电力通信网络将在网元设备中引入芯片级的可信计算技术，在网元底层基础上构建一个可信、安全的软硬件运行环境，实现从芯片、操作系统再到应用的逐级验证，确保数据的真实。

5）分布式信任：为满足云、管、边、端复杂的安全可信要求，需要以区块链技术来构建网络基础数字资源（包含联接、计算等）的可信服务体系，通过分布式记账、共识机制、去中心化的秘钥分配等，保证资源所有权和映射关系的真实性，防止匿名篡改、非法劫持等安全可信问题。

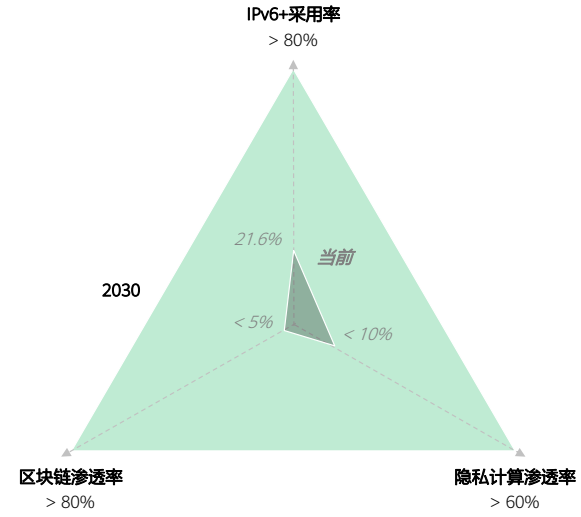
6）数据安全与隐私：网络在用户接入和业务感知点将接触到用户数据，在保障用户信息安全方面，需进一步强化对用户 ID、通信数据等信息加密传输的能力，并通过假名化、密态计算等技术最终实现用户信息全透明——即在保护数据隐私不对外泄露的前提下，对数据进行计算与分析，促进高可靠的共享交换，实现**“数据可用不可见”**。

安全可靠关键衡量指标及参考

通过基于 IPv6+的网络内生安全、支持 AI 的管理安全和网络冗余保护设计，能够从网络架构的不同层面提高电力通信网的安全可靠性。

通过可信根、基于区块链的分布式可信、支持隐私计算等技术的数据可信，保证了数据处理及使用过程的安全保密，提高相关技术的渗透率和采用率，可以实现更广泛、更安全的数据协同。

图表 12 安全可靠关键衡量指标及目标参考



驱动层

泛在感知、实时网联、智能内生反映了海量电力数据从采集、传递到处理分析的电力数字化核心业务流程，是驱动未来电力系统从数字化到数智化的技术底座。

特征三：泛在感知

从形态上看，随着电力数字化的不断渗透，未来电力系统将逐步形成两张网：一张连接了各类电力设备的物理网络与一张打通了海量生产、运营、消费数据的信息网络。通过两张网的数实相融、深度交互，推动电力系统高效运行。

构筑高效的感知网络，提高数据采集的量和质，并基于感知实现信息交互与智能处理，是清晰描绘、高效支撑电力数字化两张网的基础。

智能终端，打造“物联、数联、智联”全息感知网

智能终端是泛在电力物联网建设的基础。

首先，智能终端实现万物“物联”。伴随源网荷储的不断融合和协同升级，电力系统形态会越来越错综复杂，电源侧、骨干网各节点、台区侧、负荷侧、储能侧等电力系统的各个角落每时每刻都会产生海量的数据信息。泛在感知就是要通过各种手段和方式，采集到电力系统内能量流的变化、各类设备运行状态的变化、影响电力系统运行的外部环境的变化等等这些关键信息，打造**“六全”**泛在感知体系——通过电气量、状态量、环境量、空间量、行为量等各类传感装置对电网线路的**全覆盖**，视频摄像头、红外线光谱仪、激光雷达、低轨卫星、通信感知等多样化感知设备对大电厂、输配电网、变电站等大型基础设施的**全巡检**，一二次融合设备或能源网关对分布式电源、储能设备、用能设备、测量表计的**全接入**，对电力系统进行**全方位**、**全天候**的**全息**感知，奠定泛在感知的物理基础。

其次，智能终端实现万物“数联”。在靠近设备侧完成物联感知的基础上，需要进一步加强**边缘侧能力**——通过规约转化器，在理解各类规格七国八制、接口五花八门的设备和系统差异化通信规约的基础上，通过算法完成不同规约间的相互转换，实现统一接入标准、统一通信语言，将原本分散的海量异构数据进行转换、翻译、归集，打破“烟囱式”的系统和应用架构，让这些信息从单一数据变成数据集合，让电力系统中的各类终端设备从物理相连走向化学相融，为全局性的业务处理和调度决策提供数据支撑。未来，随着分布式软总线技术的成熟应用，可以进一步通过自动发现周围新设备的方式完成更主动的异构组网，真正突破“七国八制”的规约限制。

同时，由于数据类型越来越多样化、数据体量越来越庞大，传统的窄带通信已经无法适应万物互联、泛在感知的需求，需要进一步提升边缘与感知终端通信模块的宽带化能力，让不同类型、不同容量的“数据车”都能无障碍“上高速”。目前，中国的高科技制造企业已经开始全面抢占布局**“HPLC+HRF”双模通信**市场，通过宽带电力线载波及高速射频通信技术的互相补充，拓宽通信模块的场景泛用性，通过双信道同时进行数据收发拓展通信带宽，为泛在感知提供更加鲁棒的通信保障。

第三，智能终端实现万物“智联”。电力系统对异常事件快速响应和及时处理的要求很高，面对海量数据，传统的云端收集汇总、分析训练及结果反馈闭环难以充分保障业务实时性，因此亟需通过智能前移与决策下沉的方式，将云端模型部署到**边缘智能终端**，通过边缘智能终端对感知设备采集上来的数据信息进行计算并下达决策和控制指令，赋予了边缘厂站本地局部自治的能力，实现**智能控制**。

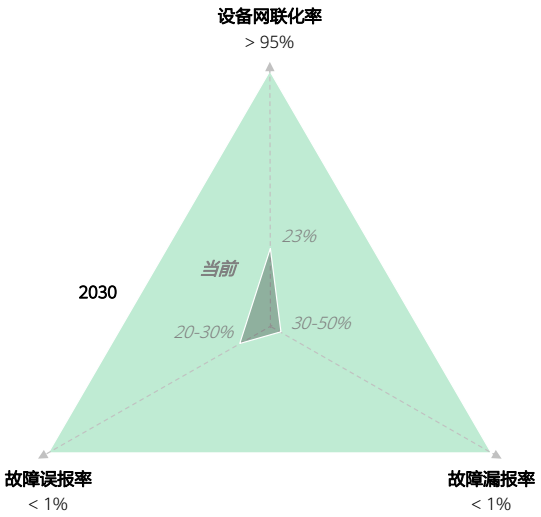
同时，随着物联技术的不断发展，终端采集到的数据信息中会出现大量非结构化数据，预计未来将有超过 80%的数据信息都与图像有关。**机器视觉**提供了一种由计算机系统对厂站内外部环境进行自动识别、测量、定位、检测的方式，通过算法的持续优化、云端与边缘的交互协同，实现对本地采集图像的快速、精准判断，赋予了边缘厂站及感知终端自主行动和运作的能力，实现**智能识别**。

最终，通过智能终端的**“物联、数联、智联”**，打造业务数据本地采集、本地处理、设备本地控制的泛在感知闭环，大幅提高数据采集数量与质量的同时，有效保证业务响应和处理速度。

泛在感知关键衡量指标及参考

提高终端设备的联网接入量，保证数据采集数量与质量，并通过机器视觉技术帮助更好识别图像信息，提高对电力系统运行异常、设备异常、环境异常的识别率与准确性，是泛在感知的发展目标。

图表 13 泛在感知关键衡量指标及目标参考



特征四：实时网联

电力通信是电力系统的重要组成部分，电能质量监测数据、电气设备开关控制指令、电量合理分配调度指令等信息的发送和接收，都有赖于电力通信网络实现。

打通可靠的传输通道，是落实电力系统控制调度自动化和智能化的基础，是确保电网安全、经济调度的重要技术手段。未来的电力系统中，设备类型多、出力特性不同，电力流量和流向难以完全提前精准预知，为了能够及时处理应对各类扰动及突发情况，对通信实时性的要求会越来越高。

5G + Wifi/GWL，内外搭配降低端到端时延

移动通信技术与无线局域网通信技术互为补充，可以在源网荷储各环节进行灵活组网，实现端到端的低时延实时通信。

5G uRLLC：5G 作为移动通信技术的代名词，在广域范围内，以及在无人机和智能机器人巡检等需要移动和数据高速传输的场景下，有着无可比拟的作用。

依托于网络切片技术，5G 可以支持三大典型应用场景：eMMB（增强移动宽带）、uRLLC（超可靠低时延通信）和 mMTC（大规模物联网通信）。其中，uRLLC 可以实现通信基站与终端传输时延双向小于 0.5 ms，专为对时延高度敏感的场景提供服务和支撑，有效满足电力系统运行要求，有助于终端设备对监测到的安全隐患、系统运行异常等情况进行及时响应和处理，保障供电安全与可靠。

自 2018 年以来，3GPP 移动通信标准连续发布了 Release 15、Release 16、Release 17 三个标准版本，通过灵活的帧结构、基于时隙/mini-slot 的调度机制、PDCCH 下行信道监听周期配置、PUCCH 上行信道免调度授权机制等子技术的引入和迭代，不断增强 uRLLC 技术在超低时延和超高

可靠方面的表现。Release 17 版本在优化低时延技术的同时，也引入了两大全新特性：一是非地面通信网络（NTN）技术，可以和卫星直连通信，也可以在任意两个终端间直连通信，为发生极端事件时的紧急通信提供了更加灵活的解决方案；二是将毫米波频段从 52.6 GHz 提高到了 71 GHz，通过带宽的延展进一步增强 uRLLC 的服务能力。

未来，随着毫米波频谱在移动通信技术上的深入应用，通信频谱与感知频谱会发生重合，在 6G/F6G 时代将实现通信感知融合，并将通信时延表现提升到亚毫秒级，进一步支撑电力数字化建设。

Wifi：Wifi 作为无线局域网通信技术的代名词，与 xG 技术相比，更适用于厂站内通信或智慧园区等一定区域范围内设备密集度高的场景。

自 IEEE 802.11 协议标准制定以来，Wifi 技术已经发展到了第六代，具有高速率、低时延、多连接的优势。速率上，Wifi 6/6E 支持 2.4 GHz/5 GHz 双频段，理论速率可以达到 9.6 Gbps；时延上，Wifi 6/6E 运用的 OFDMA 和 MU-MIMO 技术可以支持多设备同时接入，大幅度提高了并发量，降低了约 30%的时延。同时，Wifi 6/6E 引入了目标唤醒时间（TNT）的调度机制，通过和终端设备的协商，实现 Wifi 的灵活按需唤醒，能降低约 30%的功耗。

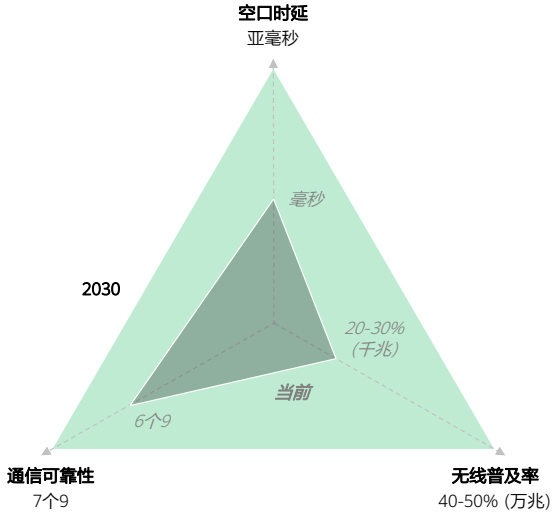
未来，随着在通信速度和覆盖范围上的持续突破，Wifi 技术会向更高频段、更高速率、更低时延的方向演进。从目前已经公布的技术特性上看，下一代 Wifi 将进一步拓宽带宽至 320MHz、将调制方式提升到 4096 QAM，通过更宽的信道、更高的流量密度实现 30 Gbps 的超高速通信；同时，下一代 Wifi 技术将引入 Multi-RU 技术和多链路（MLO）技术，通过多频谱资源分配以及多个 Wifi 间动态切换的方式增强网络抗干扰能力，从而降低通信时延。

GWL：Wifi 技术在快速发展与应用的同时，也面临因管理帧、认证帧的伪造或信息泄露而导致的安全隐患。出于电力行业安全性的要求，中国厂商主导研发了基于 WAPI 安全协议和国密体系的，为电网、电厂和综合能源服务等无线接入场景规划的 GWL 无线局域网安全接入方案。GWL 融合了数通、光网络、安全芯片等相关技术，包括有线接入网、WLAN、移动终端等软硬件设备和安全管理平台，与 Wifi 相比又增加了从用户接入认证到数据传输的全程加密（除协议约定公开信息外），在实现大带宽、全覆盖、低时延通信的同时，大幅提高了无线通信的安全性能。

实时网联关键衡量指标及参考

实时网联的目标是持续提升通信时延与网络可靠性表现，支撑数字孪生电力系统各环节对于数据传输和业务响应实时性的要求。

图表 14 实时网联关键衡量指标及目标参考



特征五：智能内生

未来的电力系统中，千兆瓦级的火电机组将逐渐被兆瓦级甚至容量更小的新能源机组替代，加上

分布式能源系统的大量涌现，电源、储能、可控负荷等各类设备的数量会越来越多。在泛在感知与实时网联的基础上，意味着整个电力系统需要处理的数据也将呈现指数级、爆发式增长。

提供强大的算力支撑的同时，构建能够根据不同业务需要与时延要求，在云边端间实现存储与计算资源按需分配、灵活调度的算力网络，是实现精准预测、有效控制、高效协同的保证。

电力智算一张网，打造最强算力底座

未来，各区域电力公司的算力中心将不再是独立系统。通过新型网络技术可以将地理位置分散的各算力中心节点连接起来，动态实时感知各节点算力资源状态，从而实现全局范围内的算力统筹分配、计算任务调度及数据结果传输共享，实现分布式并行算力加速，构建**“电力算力一张网”**，不仅能“东数西算”，还能“东数西存”、“东数西训”等，可以有效解决单个 AI 算力中心上线即饱和的资源稀缺问题。

同时，面对未来源网荷储一体协同下的复杂调度，也需要更强大的求解能力支撑，帮助电力运营商在指数级增长的海量业务数据和变量中准确规划出最优调度方案和应对策略。传统求解器开发及使用壁垒极高，高度依赖专家经验，也难以实现动态调参。通过**“AI+运筹学”**的有机结合，能够让 AI 取代人脑，实现从专家建模到智能建模、从人工调参到 AI 自适应动态调优的升级，大幅降低了求解器使用门槛，在建模效率、求解效率、求解规模、求解速度等方面实现新的突破。

随着人工智能时代对算力需求的不断增加，未来基于摩尔定律的半导体芯片也将面临算力瓶颈，而光子芯片作为新一代芯片技术，可以承载并实现**量子计算**，将算力提升成百上千倍。目前，光量子芯片技术仍在研究和探索阶段，未来值得期待。

此外，算力中心的大规模建设，为智能内生提供了能力支撑的同时，也带来了大量的电力消耗。据统计，全球数据中心电力需求约占全球总用电量的 1%，电能利用效率（PUE）达 1.65。人工智能不仅能作为高级算力提高算效，在降低算力中心能耗上也能有大作为——通过算力中心内的传感器收集温度、电量、泵速、耗电率、设定值等各种数据，依托这些监测数据进行分析，并根据模型计算结果自动调整算力中心的运行控制阈值，有效控制用于冷却的能量消耗，降低 PUE，提供绿色算力。

微型机器学习（TinyML），让边缘更智能

根据 Gartner 预测，至 2025 年，75%的数据将产生于数据中心之外的边缘，数字化转型正从云端走向网络与终端，电力行业也不例外。对于电力行业来说，各类业务对实时性要求很高，为能及时响应源网荷储的各类需求，电力系统对云端算力下沉以及边缘智能的诉求会愈发强烈。

边缘智能的有效性取决于算法模型的性能，模型性能取决于训练效果，而训练效果则依赖于大量数据的灌入和计算。然而在边缘侧，往往没有那么多的数据样本可以进行训练，同时样本特征也存在一定局限性，这就导致完全利用边缘数据训练出来的模型难以有效支撑业务决策对精度的要求。因此，如何解决好“最后一公里”的问题，是实现边缘智能的关键。**微型机器学习（TinyML）**作为专门研究如何设计、训练、优化适用于边缘场景的算法和模型的新兴领域，正受到越来越多的关注。

TinyML 与传统机器学习都是通过数据上云对大模型进行初始训练；TinyML 与传统机器学习最大的不同在于对训练后期模型的部署和优化上。为了能够嵌入边缘设备、适配有限的计算资源，

TinyML 必须对大模型进行深度压缩，一般包含模型蒸馏、模型量化两个核心环节，最终在编码和编译后完成边端部署。

模型蒸馏：在云端完成大模型的初始训练后，TinyML 会对模型进行修改，以构建一个内存占用更小、形式更紧凑的模型，这个过程就称为模型蒸馏。模型蒸馏的方式包括知识蒸馏与模型剪枝两类。**知识蒸馏**的核心思想是将一个或多个大模型的预测结果迁移到轻量级的单模型上，发挥大模型的泛化能力以帮助小模型进行训练。**模型剪枝**的原理是将卷积层到全连接层内的大量神经元激活值趋近于 0 的冗余参数去除，在不影响输出预测的情况下，让精简后的神经元具备同样的模型表达。剪枝完成后，需对模型进行重新训练并微调输出结果。

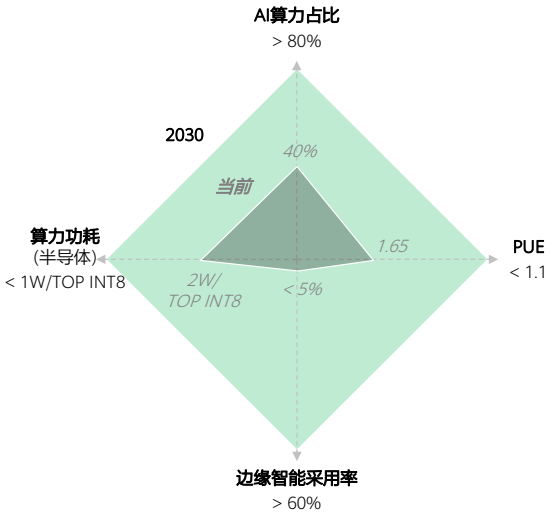
模型量化：经过模型蒸馏后，需要对小模型进行量化，以与边端设备格式兼容的、更少位数的数据类型对云端训练出来的 32 位甚至 64 位浮点型数据进行近似表示，从而达到减小模型尺寸、降低内存消耗、加快推理速度的作用。

在可接受的精度损失范围内，经过蒸馏和量化的小模型可以缩减约 30 倍尺寸大小，同时提高了 4 倍推理速度。通过“云端训练、边缘推理”的协同模式，TinyML 大大提高了边缘智能的可靠性，支撑智能内生的实现。

智能内生关键衡量指标及参考

强化人工智能技术的应用基础，打造绿色算力网络。同时，通过智能前移，不断加强 AI 对业务的支撑度。

图表 15 智能内生关键衡量指标及目标参考



使能层

服务开放是催化剂，通过服务开放加速能力共享、生态共建，实现更广泛的参与，使能技术底座发挥更大价值。

特征六：服务开放

随着数字基础设施建设不断提质换挡，数字化转型已经从“少部分人的事”发展进入全社会共融的时代。许多企业有强烈的数字化转型诉求，但囿于能力不足、开发成本有限、可扩展性差等关键挑战，转型脚步有所放缓。

掌握核心技术的供应商可以通过服务平台化、共享化的方式，接入集成产业内各环节、各类型运营商，供其调取平台上多样化的资源、工具或应用服务能力，赋能其节约基础设施投资、降低应用开发门槛、削减运营管理成本，通过技术普惠让接入企业享受高效的电力行业标准化服务，或快速自定义个性化的服务需求。同时，通过应用服务积累沉淀下来的业务数据也可以成为开放平台新的学习资料，有助于平台能力的持续迭代升级，为平台接入

方提供更好、更优质的服务。

开放式云网架构，实现数据共享、能力共惠、生态共建、产业共荣

数字化转型建设过程中，云是核心、数据是关键、网是基础。通过云、网能力的持续升级和开放共享，让数字化转型从单一厂家、单一系统的能力建设走向全行业、全生态的能级提升，让领先的 ICT 能力集成并赋能电力行业，为产业链上下游各类参与主体提供 IaaS、PaaS、SaaS、NaaS 等各类型服务，有效提升全行业数字化能力，支撑电力数字化转型。

1）云开放

通过开放集成，多样化企业上云路径；通过开放工具，助力企业实现低成本高效敏捷开发。

无侵入式集成：随着近年来数字化技术对行业的加速渗透，不同电力企业或多或少都有自己的数字化足迹，彻底的“推陈出新”不仅会造成历史投资的浪费，也会影响企业数字化转型的效率，与服务开放的初衷不符。因此，云服务的开放需要考虑如何通过 API、数据接口、消息等方式，完成云平台与既有系统的应用适配和数据集成，支持跨云连接，为企业提供多种上云路径，通过“立而不破”，更好地帮助企业实现基于既有应用系统的效率快速提升以及未来渐进式的升级改造和逐步搬迁。

云原生技术：云原生技术的应用可以赋能企业最大化利用云的能力、发挥云的价值，做到敏捷开发、可复制、可扩展，大幅提高开发效率、降低开发和运维成本，将成为企业实现数字化转型的最佳路径，是达成服务开放的重要推手。

云原生技术包括容器、容器编排与管理、DevOps 等内容。以 Docker 为代表的**容器技术**为企业提供了专门用于开发、测试和部署新应用程序的环境，通过松耦合和执行环境隔离的方式，可以让应用进行频繁迭代更新，而不会影响其他应用服务的使用。以 Kubernetes 为代表的**容器编排技术**，可以对容器化的应用服务进行更有效地负载均衡监测、调度管理、故障隔离、自动化恢复等操作。DevOps 开发运维协作理念也是云原生技术的重要体现，具体包括低代码/零代码开发、持续集成、持续交付、持续部署等相关技术——**低代码/零代码**开发工具可以面向企业业务人员提供丰富的预置组件以及 UI 编排、流程编排、逻辑处理、模型构建等各类编排能力，通过图形化托拉拽的方式实现快速建模，便于用户企业快速自定义实现基于数字孪生的运维管理；**持续集成（CI）**是通过 CI 服务器对每次新增代码进行自动编译、测试、结果输出，以判断新老代码的正确集成，与传统的阶段集成相比能更易于定位错误、提高代码合并效率；**持续交付（CD）**在持续集成的基础上更进一步，通过在类生产环境中的自动测试、模拟、反馈，确保新增代码在生产环境中的可用性，确认无误后由相关人员手动在生产环境进行部署；**持续部署**又将持续交付提升到了一个新的水平，从新代码提交到新功能部署上线全流程都无需人工干预，而是通过完全自动化的方式实现。

AI 普惠：人工智能是电力行业迈向数智化全面数字孪生的核心动能，但从当前行业渗透情况看，AI 应用因其成本高、训练难等挑战，仍呈现点状、少量。未来，将 AI 打造成面向千行百业的通用能力，是数字化服务开放的重要目标。

AI 普惠，即构建行业级的超大预训练模型，依托涵盖自然语言处理（NLP）大模型、机器视觉大模型（CV）、多模态大模型、科学计算大模型等多种算法能力，通过集中式预训练持续积累沉淀行业通用知识，形成电力行业标准通用模型，并泛化到

更多场景，减少人为干预和消耗，赋能人工智能从传统作坊式开发向现代工业化开发转变，形成通用、易用的 AI 开发流水线，赋能更多电力行业业务人员快速自定义部署，并对预训练模型持续迭代反馈，让 AI 应用**训练更快、性能更佳、效率更高、质量更优**。

综上，依托云平台的开放接入、云原生技术与 AI 普惠，打通平台方与运营方的协同合作与互惠共赢。

2）数据开放

云平台虽然解决了企业或联盟内部的数据流通，但又引发了新问题——在多云以及边缘云时代，数据分布式存储下，云和云之间形成了新的“数据孤岛”，存储资源无法高效共享，导致资源利用率低，数据也难以跨云联动、无缝流通，数据迁移、复制、备份、整合难。

未来，通过构建统一的底层数据存储资源池，可以将包括全闪、融合、高密、蓝光等多样化的存储硬件设备统一到一套开放的软件架构中，通过存储资源与多云的连接与融合，打破多云时代下新的“数据孤岛”困局，帮助打通源网荷储各环节的数据交互，促进数据高效使用。同时，统一的存储资源池还能结合上层不同电力业务场景需求匹配不同的资源服务等级，按需进行存储资源的分配与发放，大幅提高存储资源利用率的同时，也确保了用户体验的一致性。

3）网络开放

随着人工智能的深入应用，网络也衍生出了**“自动驾驶”**的能力，根据自动驾驶网络分级定义看，目前网络自动化水平处于 L2.5 阶段，可以在 AI 模型的支持下实现面向特定环境、特定网络单元的自治。

通过 AI 技术和高性能网络近似测量等仿真技术的深度结合和深化应用，能够基于多维度信息对真实网络进行全面分析、缜密推理，对网络未知状态进行精准判断和有效预测，让网络向更高级的认知智能持续演进，实现全生命周期的网络 L5 级自动驾驶。L5 级自动驾驶网络能提供两大维度的认知智能：一是时间维度，根据历史网络性能变化和告警信息，对未来即将出现的性能劣化进行准确预测；二是功能维度，根据多网络环境的态势感知和理解学习，判断网络功能即将出现的变化（如：信道变化、安全态势改变等）。基于对两大维度变化趋势的认知，通过模型完成智能决策，最终基于决策结果进行网络动态配置与重构，让网络具备自适应决策自治的能力。

展望未来，网络平台服务商可以通过 API 的方式向运营商开放，为接入用户提供高可靠、全自动的网络性能服务与保障。

图表 16 电信管理论坛（TMF）自动驾驶网络分级定义

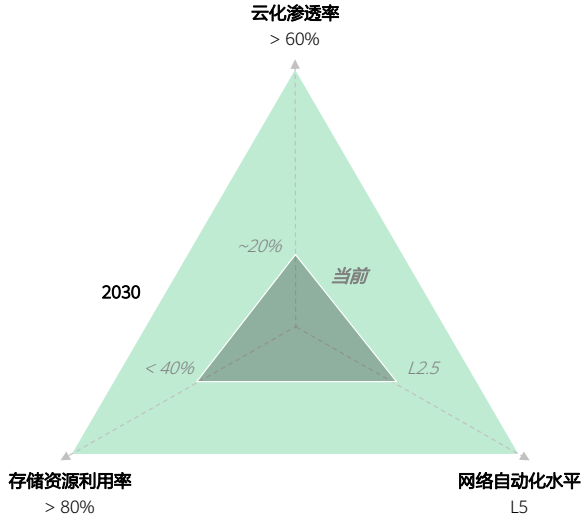
等级	L0：人工运维	L1：辅助运维	L2：部分自治	L3：条件自治	L4：高度自治	L5：完全自治
业务	不涉及	单个用例	单个用例	可选多个用例	可选多个用例	任意
执行	人工	人工/自动	自动	自动	自动	自动
感知	人工	人工	人工/自动	自动	自动	自动
分析/决策	人工	人工	人工	人工/自动	自动	自动
意图/体验	人工	人工	人工	人工	人工/自动	自动

最终，依托开放式云网软硬件架构的建设集成以及能力输出，提高电力行业整体数字化能力，实现**数据共享、能力共惠、生态共建、产业共荣**。

服务开放关键衡量指标及参考

数据存储资源池的构建能实现数据的云化整合，网络自动化水平建设能保障服务水平不断提升，最终提高全社会电力企业的云化渗透率，实现服务开放。

图表 17 服务开放关键衡量指标及目标参考



（二）目标技术架构

电力数字化六大关键技术特征的实现和落地，需要完善的架构体系来支撑。

目前，大型能源与电力企业都纷纷结合各自业务发展与信息化基础设施现状，规划适合自身的技术架构。虽然各企业数字化水平不断提升，但站在电力系统“一张网”的视角看，仍然存在边端终端设备异构、云边协同应用不足、应用开发周期过长等关键挑战，各系统的分开建设、独立运行造成资源和数据不共享，容易形成“数据孤岛”、导致电力数字化的“马太效应”，不利于全行业共同发展和进步，不利于源网荷储跨时空的一体化协同，不利于电力数字孪生蓝图构想与目标的实现。

面向未来，电力行业需要对当前的技术体系进行全面整合、持续升级，打磨出一套**更加开放、更加高效、更加智能**的技术架构，使能电力数字化转型，实现端到端电力数字孪生的宏伟愿景。

目标技术架构应当采用“云管边端+场景应用”的多层次体系，包括前边、后云和云边协同三大关键要素：前边通过**算力化**和**标准化**，实现海量的数据归集；后云通过**平台化**和**专业化**，让复杂业务向云汇聚；云边协同通过**智能化**和**一体化**，促进高效实时的业务交互。

图表 18 电力数字化转型目标技术架构



目标技术架构应具备**开放、高效、智能**三大核心特征。

开放

技术架构的开放具体体现在兼容性和扩展性上。

首先，通过南向、北向接口的**标准化**，消除异构设备在电气接口与通信协议上的差异，实现物理分散、逻辑集中的广泛灵活接入，保证技术架构的兼容性。其次，通过边缘架构的**开放式接口**，支持多平台、多厂家集成，实现边端组件共享、算力共享。同时，通过组件化、模块化的**分层解耦**模式，支持多环境部署，实现跨云的资源打通、数据融通，提高架构部署的扩展性。最后，搭建兼容适配业界主流开发框架的**云端技术底座**，为平台上不同使用人员的快速开发提供技术条件。

高效

未来的技术架构要能为各接入方提供便捷高效的“开发-部署-运维”端到端服务。

高效开发：基于高兼容性的技术底座，在云平台上提供丰富的开发工具集合，通过低代码/零代码技术，赋能接入方业务人员快速自定义业务应用，降低开发成本、提高开发效率，并依托云原生技术完成快速验证测试，大幅缩短应用开发周期。

高效部署：加强边缘侧标准化升级改造，大幅简化边端架构的复杂度，通过云端开发、边端应用的方式，保障开发内容在海量接入前边的一致性和可复制性，实现一次开发、批量部署、快速交付、应用协同，避免资源的重复消耗和浪费。

高效运维：基于自行业实践中梳理提炼并经充分验证的标准业务流程和数据规范，转化成电力行业标准化应用服务群，在云平台的应用超市内上架，供发电商、输电网络运营商、配网系统运营商等各

类角色按需进行订阅，为其提供基于云的集中远程运营维护服务，打通地理位置分散、各自独立运营的管理对象，通过统一管控实现对跨地域、跨电厂业务管理及运维服务的一致性。

智能

未来的技术架构不仅要满足业务标准化建设，更要有效支撑业务智能化发展。

首先，边缘侧通过全面感知、实时采集的能力，不断沉淀积累多维度数据，并周期性地向云端同步推送，为 AI 深度挖掘提供海量汇总数据支撑，实现**从边到云的数据协同**。其次，云端则发挥“大脑”作用，基于海量数据进行不断的学习训练和模型进化，并将迭代后的 AI 模型及时推送到边缘侧部署应用，加速业务数据的本地推理，实现**从云到边的算法协同**。依托云边协同的架构和思路，充分发挥云端进行模型训练的有效性、充分调动边端参与业务管理的主动性，最终帮助电力数字孪生实现跨层级的全域智能。

开放、高效、智能的目标技术架构本身可持续演进，通过数据协同、应用协同、智能协同等，**构筑电力行业的数字引擎**，帮助持续提升电力系统运行的效率和质量，推动电力数字化转型行稳致远。

电力数字化发展倡议



“众人拾柴火焰高，十指抱拳力千斤。”顺应能源结构绿色化、供电模式互动化的电力行业发展趋势，面对“四高一低”的电力系统新特性，需要集合电力行业各参与主体的力量，以支持资产安全与效率提升、支持新能源并网消纳、支持源网荷储协调互动、支持绿色电能市场化交易、支持能源低成本高效能使用五大核心目标为指引，围绕源网荷储一体协同新形态下数字绿色电厂、电网数字巡检、多源自愈配网、多能协同互补、跨域电力调度、赋能绿色低碳六大核心业务场景，从数字化边端、泛在通信网络、算力和存储、算法和应用四大数字化技术应用领域寻找技术支撑，实现绿色网络、安全可靠、泛在感知、实时网联、智能内生、服务开放六大电力数字化技术特征，搭建一套基于云边协同的技术架构，打造开放、高效、智能的电力数字化新引擎，全面支撑并驱动电力系统升级转型，加速新能源消纳，最终推动“双碳”目标的达成落实。

同时，电力数字化的发展转型也挑战重重，既有赖于能源、信息化等多领域关键技术的突破，又需要政策机制的支撑保障。

“融合”是技术发展的关键词。面对源网荷储互动频繁、“四高一低”特性突出的未来电力系统，电力数字化离不开信息技术、通信技术、电力技术的深度融合，ICT 基础设施商、软件商、电力电子设备商、能源科技机构等需要快速打破固有的行业壁垒，通过建立产业联盟或促成战略合作的方式，加速技术层面的跨产业融合和交互。同时，基于电力数字孪生的新兴业态（如：虚拟电厂等），也需要尽快推进通信、控制等行业标准化建设的相关工作。

“完善”是政策保障的关键词。随着绿色电力交易、虚拟电厂跨境调度、配电网络点对点交易等新兴交易形式的涌现，如何在现有框架的基础上，搭建或进一步完善与之相匹配的、更灵活的撮合交易机制，形成多种形态并存的电力交易体系，是政策机构和监管部门亟需研究并解决的课题。

电力数字化转型让未来的电力系统充满了想象空间。随着电力数字化的不断发展和深入，电力数字孪生的目标愿景将愈发清晰并触手可及。未来已来，不论是发电商、电网运营商等传统电力企业，还是电动汽车等新业态，抑或是科技巨头、园区运营商、平台服务商等跨界参与者，这场数字化赋能电力系统绿色化、高效化的革命都离不开全行业、全社会的共同努力和参与。**让我们一起携手共进，共筑电力数字化 2030!**

参考资料

1、《新型电力系统数字技术支撑体系白皮书》
国家电网，2022

2、《数字电网实践白皮书》
南方电网，2021

3、《绿色之径——新型电力系统行业洞察》
施耐德电气，2022

4、《数字孪生电网白皮书——电力企业数字化转型之道》
工业 4.0 研究院，2022

5、《随机性电源即插即用发展及展望》
李瑞生，供用电杂志，2017

6、《城市韧性配电网建设与发展路径》
何维国等，电网技术，2022

7、《韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望》
许寅等，电工技术学报，2019

8、《从计算中心走向算力网络，人工智能悄然“豹变”》
徐勇，人民邮电报，2022

9、《6G 典型场景和关键能力》
IMT-2030（6G）推进组，2022

10、《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023 年）》
工业和信息化部，2021

11、《工业互联网平台应用数据地图（2021 年）》
国家工业信息安全发展研究中心，2021

华为技术有限公司

华为的愿景与使命是把数字世界带入每个人、每个家庭、每个组织，构建万物互联的智能世界。

深圳市龙岗区坂田华为基地
电话: (0755) 28780808
邮编: 518129

www.huawei.com

安永 | 建设更美好的商业世界

安永的宗旨是建设更美好的商业世界。我们致力帮助客户、员工及社会各界创造长期价值，同时在资本市场建立信任。

在数据及科技赋能下，安永的多元化团队通过鉴证服务，于 150 多个国家及地区构建信任，并协助企业成长、转型和运营。

在审计、咨询、法律、战略、税务与交易的专业服务领域，安永团队对当前最复杂迫切的挑战，提出更好的问题，从而发掘创新的解决方案。

安永是指 Ernst & Young Global Limited 的全球组织，加盟该全球组织的各成员机构均为独立的法律实体，各成员机构可单独简称为“安永”。Ernst & Young Global Limited 是注册于英国的一家保证（责任）有限公司，不对外提供任何服务，不拥有其成员机构的任何股权或控制权，亦不担任任何成员机构的总部。请登录 ey.com/privacy，了解安永如何收集及使用个人信息，以及在个人信息法规保护下个人所拥有权利的描述。安永成员机构不从事当地法律禁止的法律业务。如欲进一步了解安永，请浏览 ey.com。

APAC no. 03015707
ED None

ey.com/china

商标声明

HUAWEI，HUAWEI，是华为技术有限公司的商标或者注册商标，EY，是安永（中国）企业咨询有限公司商标或者注册商标，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，华为技术有限公司、安永（中国）企业咨询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、安永（中国）企业咨询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。

本材料的信息搜集、研究与编撰的过程不涉及转让或应用任何美国出口管制條例规管的软件和技术。

版权所有 © 华为技术有限公司、安永（中国）企业咨询有限公司 2022。保留一切权利。

非经华为技术有限公司、安永（中国）企业咨询有限公司书面同意，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。