

A short red horizontal line is positioned to the left of the main title.

ABB 电气碳中和白皮书

电气化 + 数字化赋能低碳社会

ABB 可持续发展愿景



目录

04	序言
06	第一章 背景：为什么要实现碳中和？
07	第二章 碳中和目标的战略规划
08	第三章 碳中和的实现路径
13	第四章 实现碳中和的三大挑战
14	第五章 电气化 + 数字化赋能低碳社会
16	第六章 智慧园区的碳中和
27	第七章 智慧建筑的碳中和
37	第八章 智慧交通的碳中和
48	第九章 数据中心的碳中和
59	致谢

序言



赵永占
ABB 电气中国负责人

在地球生态环境的严峻挑战之下，如何推动人类社会与自然环境的和谐发展，成为我们每个人必须面对的时代命题。目前，全球已有 130 多个国家和地区提出“零碳”或“碳中和”目标。作为大国表率，2020 年中国提出力争于 2030 年前达到碳峰值，2060 年前实现碳中和的宏伟目标。

当前，中国超过 90% 的二氧化碳排放量来自于电力、工业、交通和建筑四大领域。而产业园区和数据中心作为社会经济的重要载体，在蓬勃发展的同时也成为新晋的能耗和碳排放大户。随着中国减碳按下“加速键”，深入分析并挖掘重点行业的减碳潜力无疑是实现碳中和目标的关键举措。

ABB 作为全球电气化和自动化的领先企业，始终将可持续发展理念贯穿于价值链始终，并在迈向碳中和的进程中积极担负自身使命和责任，利用技术专长，共同推动这项全球性的事业向前。2020 年 ABB 发布 2030 年可持续发展目标，承诺到 2030 年实现自身运营碳中和，并赋能客户减少排放，通过平衡社会、环境和经济的需求，共建美好世界。

定位于行业赋能者，ABB 致力于通过电气化、自动化、数字化并举的创新技术，以及聚焦清洁能源利用、能源效率优化、电气化率提升三大领域的解决方案，助力电力、工业、交通、建筑等行业提升能源效率，推进绿色低碳转型。

思之深，方能行之远。对于当前仍处于工业化进程的中国，迈向碳中和之路会面临重重考验。为此，ABB 电气中国将长期以来在各重点行业的经验与洞察，梳理、提炼并以白皮书的形式呈现给业界，希望能在共同求索的道路上为企业和产业的碳中和实践提供有益的参考。

愿各界携手同心，共行碳中和之路。



蒋英
ABB 电气中国数字化业务负责人

全球经济发展会因突发事件而放缓，但前进的方向不会改变，人类城市化进程仍将持续，能源消耗不断增长。环境气候变化已成为我国可持续发展的重要挑战，而化石能源终将枯竭，能源问题亟待解决。当前，我们正在经历一场能源变革。推进可再生能源的建设和消纳，提升能源使用效率，需要通过技术进步实现能源生产和消费模式的转变。

能源互联网技术随着互联网技术的进步而全面发展，实现新一代能源系统和互联网技术的深度融合，已成为能源转型的重要技术支撑，也是实现“3060”双碳目标的根本途径。“双碳”战略的实施需要通过“互联网 + 智慧能源”构建绿色低碳、安全高效、开放共享的能源生态，并在能源的“源 - 储 - 荷”环节进行相应布局。

在能源结构转型过程中，能源生产形式将从现在的单一集中式发电过渡到集中式和分布式发电和谐并存的模式，城市作为能源的主要消费区域也将成为分布式能源生产的基地。而新能源是间歇性能源，可控性差，将会造成电网的极不稳定性。如何在实现新能源最大化就地消纳的同时确保电网的安全稳定将是一个挑战。

以建筑和交通领域为代表的能源消费端，再电气化需求提升将加大能源供给侧的压力。而很多城市老城区配电系统增容难度很大，能源供给不足，配电系统无法支撑大容量扩容。如何通过“源 - 储 - 荷”之间精准调控，提高能源使用效率，降低用电的增容需求并减少碳排放成为城市发展的主要难题。

构建以新能源为主体的新型电力系统将实现高比例的分布式能源接入，传统的电网调峰模式也将从单一对发电侧调峰转型为发电侧和需求侧共担的调峰模式。如何将城市配电网内的各种能源、储能、用电设备集合起来，承担电网的调峰工作并进行自动优化负荷的调控，将是未来创新技术的主要发展方向。

“双碳”战略目标推动能源转型变革发展，既有机遇更有挑战。《ABB 电气碳中和白皮书》阐述了能源转型变革中即将面对的各种挑战，基于 ABB 多年来在各行业的技术和经验，提供面对这些问题的解决之道。

未来已来，将至已至。能源结构转型变革的序幕正式拉开，ABB 作为全球电气化和自动化的领先企业，将通过不断迭代的数字化创新技术助力客户实现低碳减排，共同谱写安全、智慧和可持续的电气化未来。

第一章 背景： 为什么要实现碳中和？

地球上的生命之所以存在，主要取决于气候系统的微妙平衡。而自工业化以来，人类活动排放的各类温室气体特别是二氧化碳急剧增加，超过了大自然的消纳能力，从而导致地球温度升高，引发气候变化，对地球生态系统造成难以挽回的损害。

保护地球家园，控制温室气体排放是关键。世界各国在应对气候挑战的共同行动中，形成了《联合国应对气候变化框架公约》、《京都议定书》和《巴黎协定》等一系列具有法律约束力的减排文件。2015 年签署的《巴黎协定》确定了将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2 摄氏度以内，并努力将温度上升幅度限制在 1.5 摄氏度以内的目标。对于岛屿国家而言，这 1.5 摄氏度温升生死攸关。

目前，全球已有 130 多个国家提出了“零碳”或“碳中和”的气候目标。2020 年，中国提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和的承诺，这不仅体现了中国主动承担应对气候变化国际责任的担当和决心，也将有助于中国加速技术创新与产业升级，形成绿色可持续的新经济发展模式。

碳中和并不是指零排放，而是指温室气体的排放量与大自然吸收量平衡，温升不再发生变化，保持地球生态系统的完整性。

第二章 碳中和目标的战略规划

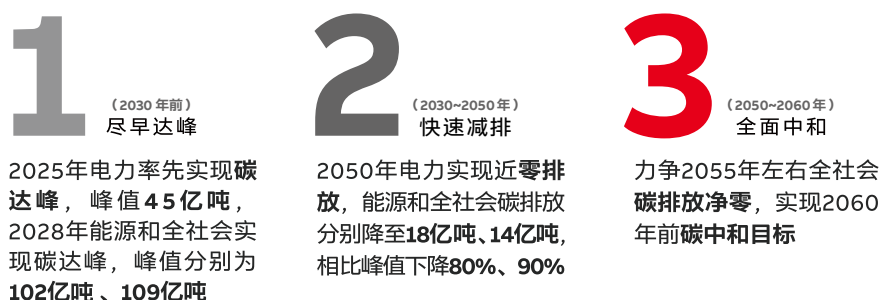
针对“3060”时间表，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》提出了实现碳中和路径上的目标。

2025 年，绿色低碳循环发展的经济体系初步形成，重点行业能源利用效率大幅提升。单位国内生产总值能耗比 2020 年下降 13.5%；单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%；非化石能源消费比重达到 20% 左右；森林覆盖率达到 24.1%，森林蓄积量达到 180 亿立方米，为实现碳达峰、碳中和奠定坚实基础。

2030 年，经济社会发展全面绿色转型取得显著成效，重点耗能行业能源利用效率达到国际先进水平。单位国内生产总值能耗大幅下降；单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65% 以上；非化石能源消费比重达到 25% 左右，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上；森林覆盖率达到 25% 左右，森林蓄积量达到 190 亿立方米，二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降。

2060 年，绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建立，能源利用效率达到国际先进水平，非化石能源消费比重达到 80% 以上，碳中和目标顺利实现。

根据全球能源互联网发展合作组织（GEIDCO）的报告，为实现 2060 年全社会碳中和目标，中国总体可按照尽早达峰，快速减排，全面中和三个阶段有序实施。



第三章 碳中和的实现路径

碳中和目标对于正处于工业化进程的中国来说是个巨大的挑战和考验。当前，中国在全球二氧化碳及温室气体排放中的占比分别约为30%和26%，是2019年全球排放占比最高的单一国家^[1]。

如果将中国的碳排放量细化到具体行业，会发现电力和工业这两大高排放领域占据了超过70%的份额，交通占比约11%，建筑占比约7%。

推动能源结构演进是实现高碳排放行业中短期内脱碳的重要举措。而不同行业落实碳中和目标的路径和模式也不尽相同。

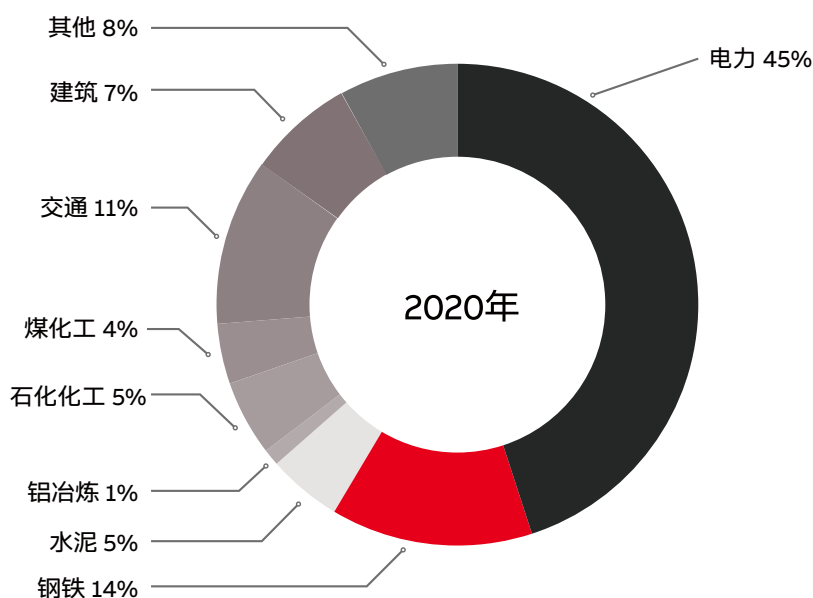


图 3-1 不同行业的碳排放占比

数据来源：《中国能源统计年鉴 2020》

注 [1] 数据源自《碳经济学 - 中国走向净零碳排放之路：清洁能源技术革新》

电力领域的减碳路径

电力行业贡献了中国 45% 的二氧化碳排放量，居所有行业之首。目前，中国电力结构仍然以火力发电为主，2020 年火电在全国总发电量中的占比高达 68%。逐步降低煤电占比，是电力行业减碳的必由之路。

提高清洁能源发电

过去十年中，受益于规模效应的显现和资本成本的降低，风电、光伏发电成本持续下降，特别是光伏发电项目单位千瓦平均造价下降了 75% 左右^[2]，其度电成本已接近煤炭等传统化石燃料发电，为改变能源行业的格局提供了契机。

减少煤电占比需要加快非化石能源发展，建设清洁低碳、安全高效的能源体系，提高能源供给保障能力。此外，加快西南水电建设，安全稳妥地推动沿海核电建设，大力提升风电、光伏发电规模，建设一批多能互补的清洁能源基地也是关键。

发展储能技术

清洁能源发电加速发展也亟需储能解决方案的大

规模落地建设，以应对日间和季节性用电需求的波动。目前，抽水蓄能、电网级储能电池等技术在规模化应用方面已经取得一定进展。到 2025 年，抽水蓄能投产总规模将超 6,200 万千瓦^[3]，新型储能装机规模达 3,000 万千瓦以上^[4]，并有望解决储能技术的挑战。

建设电网基础设施

发展清洁能源要坚持集中式和分布式并举。这既需要坚强的输电网络实现清洁能源的大规模远距离输送，也需要更加灵活的柔性配电网络，以满足分布式能源的快速发展和新型用能设备的广泛接入。处理好清洁能源发展与系统安全、供电保障以及系统成本之间的平衡，是推动能源转型发展的重要一环。

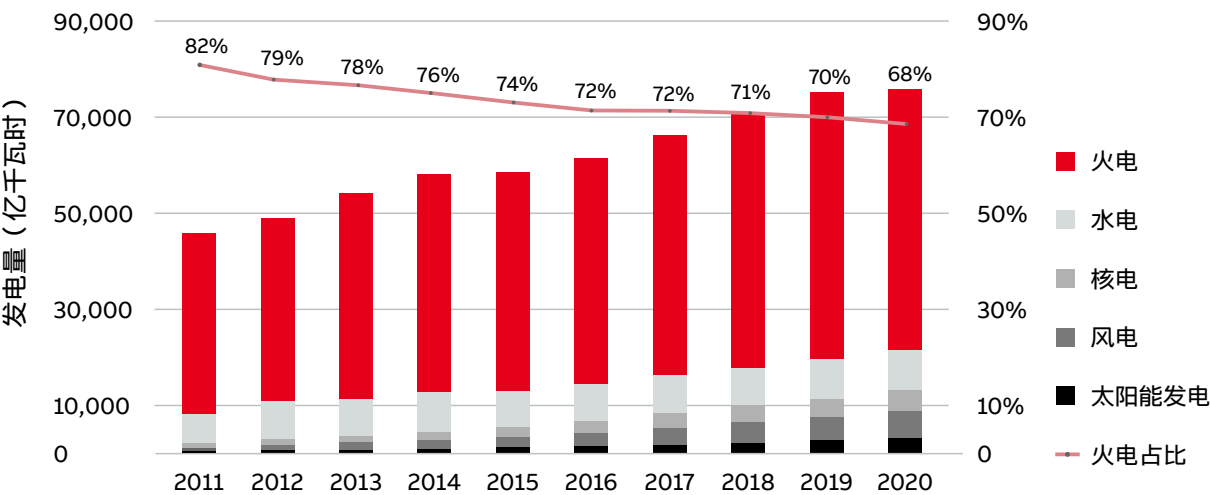


表 3-2 近十年全国发电量结构及火电占比

数据来源：国家统计局、国家能源局、中国电力企业联合会

注 [2] 数据源自国家能源局

注 [3] 数据源自《抽水蓄能中长期发展规划（2021-2035 年）》

注 [4] 数据源自《国家发展改革委 国家能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见（征求意见稿）》

工业领域的减碳路径

工业领域是能源消费和二氧化碳排放的重要来源。工业领域的碳排放主要来自于工业燃烧、工业流程和工业排废，特别是钢铁、水泥等重工业，贡献了工业领域 50% 以上的碳排放量。针对中国工业排放现状，推进工业电气化、提高能源效率、发展循环经济、推动碳捕集 (CCUS) 技术是实现工业减排的四个重要抓手。

推进工业电气化

工业燃烧供热占工业排放量的 60% 以上^[5]。随着工业电气化发展，以电力替代煤炭、石油等化石能源来驱动工业生产过程，可以有效减少二氧化碳排放。目前，工业电气化已成功应用于低温和中温生产工艺，对于一些高温生产工艺，采用清洁氢能等作为替代燃料，则具有更高的经济性和技术可行性。

提高能源效率

过去十年中，中国在提高能源效率方面一直处于全球领先地位，而能效提升大部分来自工业领域。调整优化技术和工艺路线，提高系统能源利用效率，研发创新低碳产品等，既能减少能源活动二氧化碳排放，也能减少工业过程二氧化碳排放。

发展循环经济

工业系统中除了提高能效，还应鼓励发展循环经济

的技术，如废旧的钢、铝和其他金属以及塑料的回收利用。其中基于废钢的电弧炉法基本只消耗电力，仅有 11% 的能源投入来自煤炭^[5]，相比高炉-转炉法具有更加低碳的能源结构。

发展碳捕集技术

碳捕集、利用与封存技术 (Carbon Capture, Utilization and Storage, 简称 CCUS) 是指将生产过程中排放的二氧化碳进行收集，提纯并继续投入到生产过程当中，实现对碳的循环再利用。

目前很多碳捕集技术还在实验室阶段，但从长远看，碳捕集有望成为人类应对全球气候变化的关键技术之一。如果其经济性、成熟度及安全等方面通过工业化规模的测试论证，碳捕集技术则可与发电、炼油、煤化工等产业做有效整合，为未来工业领域提供 15%~20% 的减排空间。

注 [5] 数据源自世界钢铁协会



交通领域的减碳路径

2020 年，交通运输行业碳排放量占中国二氧化碳排放量的 11%，是电力和工业之后的第三大排放源，但是交通运输行业的脱碳难度却非常高。与发电相比，交通运输处于脱碳成本曲线的“高成本区”。交通运输行业的碳排放方式众多、结构复杂、统计困难，因此需要找到具有减排潜力的环节，采取针对性的举措。

公路运输

当前，公路运输业正处于一个世纪以来最重大技术变革的起点，交通电气化和清洁氢能是应对脱碳挑战的核心。2020 年，中国汽车工程学会发布《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》，路线图中指出 2035 年中国的混动车和新能源车将各占 50%，汽车产业将实现全面电动化转型。要确保新能源车在道路车辆保有量中接近 100% 的渗透率，需要对电网和充电站进行大规模的基础设施投资。

为了覆盖不同类型的车辆（如重载车辆、公共交通、市政车辆、乘用车）和不同类型的应用场景（如场站、工业园区、商场、社区、路侧）的充电需求，需要建设多层次的充电解决方案，并与现有的用电系统进行有效调控，保证资源的最大化利用。

轨道交通

中国轨道交通领域已经形成了相对成熟的电气化解决方案，其中高速铁路、货运干线铁路、地铁已经基本实现全面电气化。保证现有电气化轨道交通继续可靠运行，提高能源利用效率，加快普通铁路的电气化改造，以及在港口、重工业等领域实现“公转铁”，是中国轨道交通电气化下一阶段的主要方向。

航空和船舶

在交通运输领域，航空和船舶行业的脱碳难度较高，使用燃料替代和港口岸电及空港陆电，是目前解决方案的关键所在。

燃料替代：在航空领域，生物能源特别是可持续航空燃料，与航空煤油相比减排可达 80%，是减少航空碳排放的主要方式。而在船舶行业，短期的液化天然气和中长期的清洁氢是两个主要的低碳燃料替代解决方案。

港口岸电和空港陆电：港口船舶岸电供电系统替代船舶辅机发电，可实现靠港船只的零碳排放。飞机靠港也可以利用地面供电，实现廊桥电能替代：在登机廊桥下安装静电电源和飞机地面专用空调，在飞机停靠廊桥后关闭辅助动力装置，完全由地面以清洁能源方式提供飞机所需的电能，替代过去使用航空燃油的方式。



建筑领域的减碳路径

建筑业的直接碳排放占中国年度碳排放总量的 7%，但建筑行业运行阶段的能耗却很高，2018 年已达到 10 亿吨标准煤，约占全国总能耗的 21%^[6]。如何降低建筑能耗、提高能源使用效率、达到绿色建筑标准，是实现建筑业低碳目标的关键一环。

在建筑设计阶段，可采用绿色设计理念，根据地理条件合理设置太阳能采暖、制热水及发电装置、风力发电装置、水地源热泵，充分利用环境提供的天然可再生能源。同时，可采用节能的建筑围护结构及设备，使用适应当地气候条件的平面形式及总体布局。

在施工阶段，通过快速施工工艺、清洁施工工艺、循环使用施工工艺、保温施工工艺等手段可以提高能源使用效率，节约能源，增加材料利用率。

在运行阶段，供暖和供冷是建筑物的主要能耗构成。

绿色建筑内的暖通空调系统及热水系统可通过采用可再生能源、高性能系数的冷热源机组、变频泵等多项节能技术，提高其系统能效比。绿色建筑的照明和用电设备可以采用高效率的设备和先进的控制策略，从而提高能源利用率。

此外，BAS（楼宇自动化系统）能够分项计量建筑内各系统的耗能量，发现有节能潜力的系统，并提出有针对性的改进措施，对设备的运行情况进行有效调节，从而减少不合理的能源消耗，提高系统管理水平。

注 [6] 数据源自中国建筑节能协会建筑能耗统计专业委员会



第四章 实现碳中和的三大挑战

在各行业的低碳转型过程中，工业电气化、交通电气化及新型数字基础设施的发展，会推动电力消费的持续增加，到 2050 年电能在终端能源的消费比重将提高至 50% 左右。践行“3060”战略，能源转型是关键，电力是主力军，需要不断深化电力改革和持续推进技术创新以解决新型电力系统发展在“源 - 网 - 荷”侧带来的三大主要挑战。

行业	2035 年	2050 年	电气化特点
工业	43%	52%	步伐稳
建筑	54%	65%	潜力大
交通	13%	35%	速度快

表 4-1 各行业电气化发展特点

数据来源：《国家电网 2050：“两个 50%”的深度解析》，汤芳，张宁，代红才，国网能源研究院

挑战一：源——如何推进清洁能源建设及清洁能源发电效率提升？

针对碳中和的时间表，大力发展分布式能源建设，推动可再生能源就近消纳还面临很多困难和实际问题。分布式能源发电设备运行状态感知能力弱，运行管理极其复杂，现有调度管理模式和信息化手段不能充分满足新能源调度的需要。传统集中式发电调控管理不适用于分布式能源微网的管理，需要开发新能源自主运行控制及多源协调控制系统。

挑战二：网 —— 如何构建新型电力配电网以适应更高比例的清洁能源接入？

新一代电力系统为了适应更高比例的清洁能源的接入，未来将推进单端电源系统向多端电源系统转变，形成大电网、微电网、分布式电网有机互补的多元电网形态，以及发展“源 - 网 - 荷 - 储”一体化就近利用等模式。“十四五”期间，数字新基建、电动充电桩、电能替代、需求侧响应和基于数字

技术的“虚拟电厂”均对更加灵活互动的配电网系统提出迫切需求。

挑战三：荷——负荷侧模式如何实现由单向流动向“源 - 网 - 荷 - 储”双向互动模式转变？

以工业、交通、建筑、新型数字基础设施为代表的能源负荷侧，将推动传统用能方式从单一能源消费转变成能源生产和消费相结合，并利用先天优势在负荷侧建设风电、光伏等清洁能源发电设施。通过定义及识别用能设备的用电可调节度，深度挖掘电动汽车、柔性负荷等可调节负荷的灵活性价值，并通过能源管理系统将负荷侧打造成能源调节的基础。

通过“虚拟电厂”聚合分布式能源、柔性负荷、电动汽车和储能系统等不同类型的资源，基于先进的数字化技术实现多种分布式资源的协同优化运行，实现“源 - 网 - 荷 - 储”协调控制，最终形成区域乃至国家层级的能源高弹性网络，保障电力行业的低碳安全运行，提升电力系统的整体运行效益。

第五章 电气化 + 数字化赋能低碳社会

ABB 一直是低碳路上的践行者。2020 年 11 月，ABB 发布了 2030 年可持续发展战略与目标，提出到 2030 年实现自身运营碳中和，并赋能客户减少排放，通过平衡社会、环境和经济的需求，为所有利益相关方创造价值。

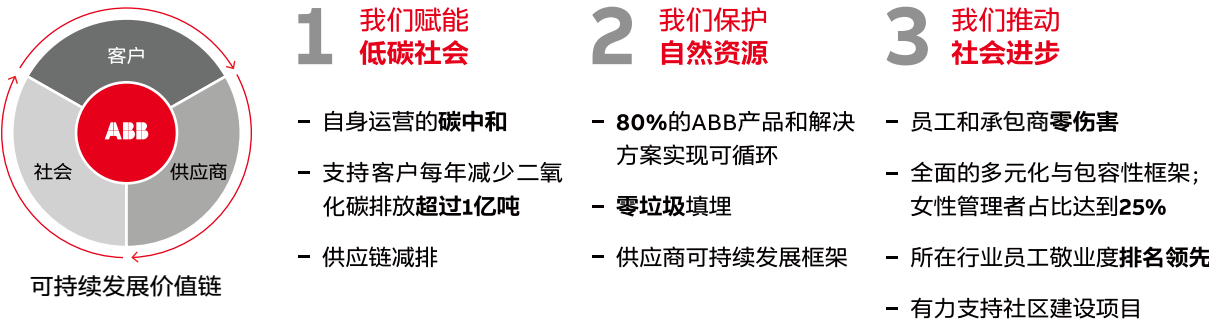


图 5-1 ABB 2030 年可持续发展目标

ABB 电气将通过电气化 + 数字化的创新技术，聚焦清洁能源利用、能源效率优化、电气化率提升三大领域，赋能低碳社会。

清洁能源利用

ABB 的控制设备可以保证风电、光伏等清洁电力的可靠运行。在过去 30 余年，ABB 为世界各地领先的风电机组客户提供了 3.5 万台发电机，覆盖中国 70% 的风机，积极推进中国清洁能源的发展。

ABB Ability™ 智慧能源及配电管理系统可以帮助园区提高清洁能源的就地消纳。该系统可监控整个园区的能源供应及负荷情况，并进行优化计算，根据园区能源需求及供应情况分析清洁能源的最优配置比例，从而助力园区最大限度利用清洁能源。

能源效率优化

ABB Ability™ 智慧能源及配电管理系统可以将园区生产区域，办公区域以及公共区域能源系统互联，统筹调控全系统能源生产与消费，智能预测生产负荷，主动调配可调节负载，灵活调节建筑能源，满足多种应用场景下智能高效的管理需求，提高总体能源使用效率，实现节能减排。

电气化率提升

从发电端到用电端，ABB 提供智能中低压配电、关键电源、楼宇产品及控制系统、电动汽车充电等



电气化全系列产品及解决方案，以数字化创新技术助力电气化转型的加速，推动全社会电气化率的提升。

针对电动交通的发展趋势，基于 ABB Ability™ 数字化平台，ABB 充电桩集成了高级网络工具，可以对充电桩实施远程诊断，及时发现故障，从而确保充电桩的稳定、高效运行，降低运维成本。同时，ABB 完善的配电解决方案可以帮助电网客户提高资产利用率，满足电气化带来的负荷提升需求。

作为全球电气化和自动化的领先企业，ABB 将创新融入基因。在中国，ABB 积极承担企业社会责任，坚持数字化创新，在促进自身绿色发展的同时，帮助客户、合作伙伴实现长期可持续发展。ABB 立足电力、工业、交通、建筑等多个行业，提供智慧电力、智慧园区、智慧建筑、智慧交通、智慧城市等数字化解决方案，支持中国迈向碳中和宏伟目标。

第六章 智慧园区的碳中和

- 17 现状：产业园区减碳意义重大
- 18 未来：碳中和园区的全新样貌
- 19 挑战：统筹协调与科学部署下所面临的重重困惑
- 21 解决之道：低碳理念与绿色技术的交融
- 25 未来已来：碳中和园区的有力印证

《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中提出，“推进电网体制改革，明确以消纳可再生能源为主的增量配电网、微电网和分布式电源的市场主体地位”。园区能源具有消耗总量大、利用形式丰富等特点，园区型智能微电网建设是实现我国“双碳”战略的重要手段之一，具有重大的创新空间和实践意义。

现状： 产业园区减碳意义重大

自 1979 年深圳蛇口工业园打响了我国产业园区发展的第一炮，园区建设正式步入快车道，以科技创新驱动的高新区、科技园和以商贸流通驱动的物流园、自贸区相继涌现，推动着我国社会经济的飞速发展。

截至 2018 年，经中央核定的国家级和省级工业园区共计 2,543 家，其他各级各类工业园区总数超过 20,000 家，贡献了全国工业产值的一半以上以及全国生产总值的三分之一。2018 年，我国国家级经济技术开发区的生产总值为 10.2 万亿元，国家级高新技术产业开发区的生产总值为 11.1 万亿元，二者在同期国内生产总值占比超过 23%^[1]。若考虑省级及省级以下产业园区，江苏省产业园区对全省 GDP 增长率贡献达到 80%，安徽则达到 50%^[2]。

与此同时，产业集群的壮大以及生产规模的扩增也为能源消耗带来了一定压力，各类产业园区的能源消费总量已超过全国能源消费总量的 1/3^[1]。

产业园区的能耗压力主要来自以下方面：

一、电能占园区用能比重持续上升

依照产业集群的多元化用能需求来看，离散制造业类生产以电能驱动为主，辅助系统中采暖和空调占总能耗比例较大；过程工业类产业用电占比较小，蒸汽及冷需求应用较多；新兴研发类产业与建筑能

耗相似，电能消费占比较大。随着工业电气化的推进，预计到 2050 年全国工业生产电能占终端用能比重将达 52%，各类建筑电能占终端用能比重达到 65%。

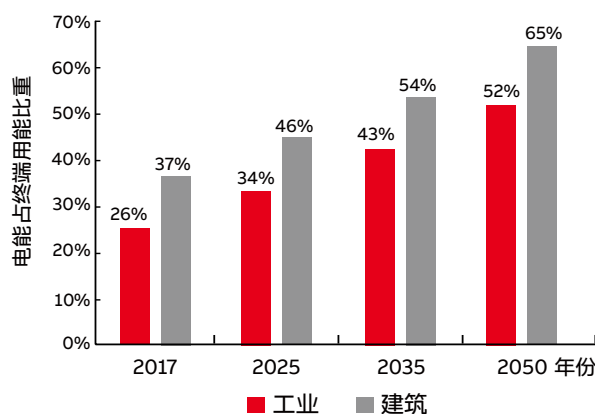


图 6-1 各终端部门电气化水平

数据来源：国家电网公司

二、现有园区供电方式与低碳路径相矛盾

从园区能源结构分析，由于受我国电能生产现状所限，2020 年采用电网供电的园区 67.8% 的电力供应仍然依靠化石能源；而且以单向供电为主的现有园区配电网结构无法适应大量分布式能源的接入，而未来转变后的园区多端供电模式会导致电源波动频繁，难以快速定位并切除故障点；另外，随着越来越多的电力电子设备和光伏发电接入电网，变流环节容易造成能源损耗，同时所产生的谐波对电网的电能质量也存在一定影响。

注 [1] 数据源自《工业园区综合能源服务的绿色金融支持分析》，梁楠楠

注 [2] 数据源自中国产业园区持续发展联盟执行主席 任浩

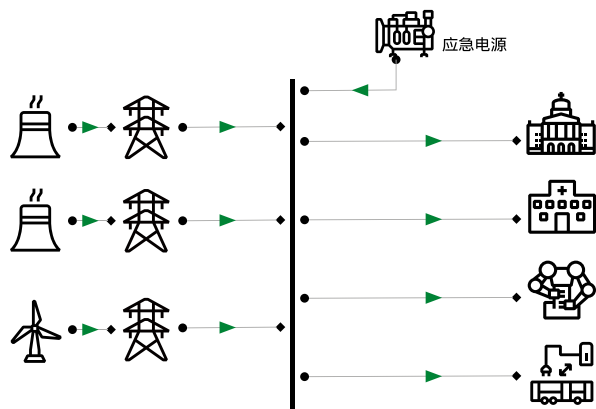


图 6-2 传统配电网

三、综合能源管理体系依旧落后

从园区能源管理情况来看，目前多数老旧园区缺乏有效的能源信息采集手段，能源管理数字化水平有待提升。而新建园区内的能源信息系统多为各自孤岛运行的独立系统，信息流通存在障碍，无法通过数据交互实现系统之间的调控和优化。

如何加快构建以新能源为主体的新型电力系统，助力园区实现高碳排放电能的有效替代，在这场广泛而深刻的变革中如期实现“3060”双碳目标？借助电网体制改革，以微电网、增量配电网为依托，优先从综合能源管理体系建设着手，借助数字化手段，深入挖掘园区综合能源系统的绿色低碳效应，探寻电能综合能源利用体系“最优解”，打造面向未来的碳中和园区。

未来：
碳中和园区的全新样貌

未来的碳中和园区在自身规划、建设、管理等方面系统性地融入低碳理念，利用节能、减排、固碳、碳汇等多种手段，通过产业绿色化转型、设施集聚化共享、资源循环化利用等途径，在保证生产

活动安全高效的前提下，让园区实现碳排放与吸收自我平衡。

一、柔性交直流混合微电网保障大规模分布式清洁能源接入

电能将是未来园区能源消费的主要形式。与传统园区不同的是，将有大量分布式风、光、氢、余热、生活垃圾、生物质等非化石能源发电就近接入园区微电网，多种能源互补利用，综合保障能源供应的安全稳定；电力传输宜交则交，宜直则直，缩减了电力电子器件的使用，从而抑制谐波的产生。交流微电网与直流微电网独立控制的同时又互为备用，提高系统的可靠性；微电网能量管理系统实现能量的优化分配与平衡，建立“源 - 网 - 荷 - 储”一体化网络，保证微电网的经济高效运行。

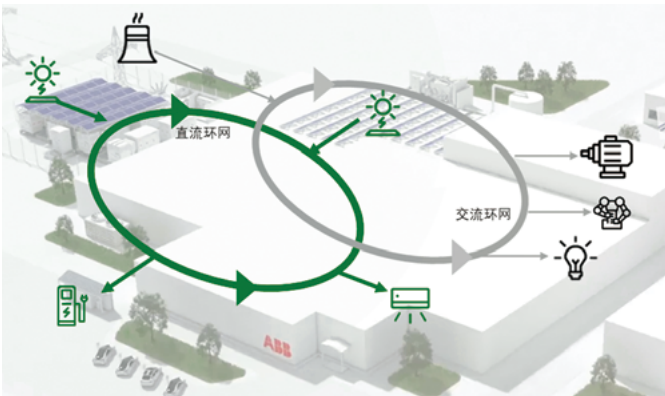


图 6-3 柔性交直流混合微电网

二、多能互补，实现产业协同共生

利用先进的物理信息技术和创新管理模式，构建“互联网 +”智慧能源系统，整合园区内不同类型的能源资源、储能设施及电气化交通等要素，通过天然气冷热电联供、分布式能源和能源智能微电网等方式，结合新兴技术实现多能协同供应和能源

综合梯级利用，推动能源清洁生产和就近消纳，实现异质能源间的协同规划、交互响应和互补互济，在满足园区内多元化用能需求的同时，有效提升能源利用效率，降低能源生产与消费成本。

同时，挖掘园区内部和园区间的产业共生潜力，将生产过程中的副产品及废物等回收利用，达到资源的最优化配置，形成绿色共享的闭环流动循环系统。

三、打造碳中和园区的数字化生命体

让园区成为有温度的数字化生命体是实现低碳发展的有效捷径。未来的智慧能源管理系统将全面地掌握园区内的能源生产、使用和碳排放情况，实现生产、传输、存储和消纳等环节的全程可视和智能分析，自动为园区内企业管理碳资产配额，完成碳汇交易。

同时，数字时代下的园区工作方式也将发生改变，包括无感打卡、智慧停车、无人食堂、智能会议、共享工位、数字化办公等，进一步减少资源消耗，赋予园区更多低碳内涵。

挑战： 统筹协调与科学部署下所面临的重重困惑

随着碳达峰、碳中和目标升级为国家战略，产业园区的低碳化转型势在必行。一方面，高排放园区面临着限产、停产的政策约束。另一方面，受限于电力送出和消纳条件，清洁能源发电建设的重点将从传统集中式大容量过渡到集中式与分布式并行的格局，以园区为单位的微电网将成为清洁能源建设的重要新方向。在统筹协调与科学部署中推动园区绿色低碳发展，普遍面临如下挑战：

一、如何科学制定低碳发展战略，部署低碳发展技术架构

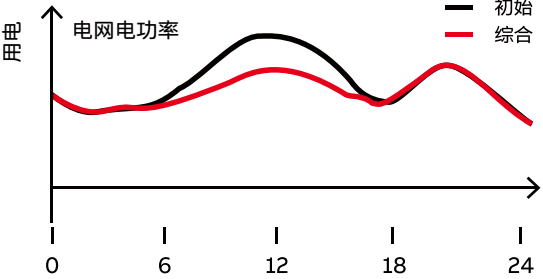
打造完善的能源绿色管理体系是园区实现低碳目标的核心底座。大部分园区仍停留在环境管理体系的认证与建设阶段，能源管理体系建设相对滞后，且缺乏行之有效的低碳发展技术架构；其次，园区普遍缺乏适用的标准规范及相关核算经验，无法对园区内或厂界范围内的温室气体及其他排放物进行精准核算、分析，并制定相关改善策略。这就需要园区结合自身特性来主动探索减碳技术架构，从全局层面考虑能源供给、消费、分配和管理上的发展趋势和兼容性，避免重复投资。

二、如何在园区微网上进行多策略柔性调控

在园区低碳发展的技术架构中，设备层级（子系统）的技术相对成熟，如光伏发电电子系统、楼宇自控子系统、电机驱动变频化、照明设施直流化、园区交通电气化等。但园区微网层面的能源调控系统则处于起步阶段。如何以园区为边界，对各个设备进行有机调控，实现能源微网的供应低碳化和消耗可控化，是园区需要深入研究的课题之一。

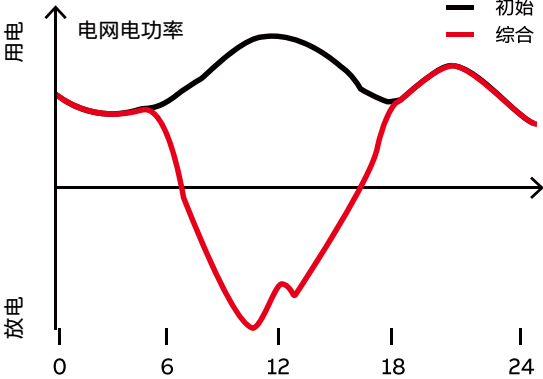
在园区能源微网内，新能源发电特性与园区负荷特性存在天然“时间差”，仅靠清洁能源发电建设无法实现能源供应的低碳化。小规模分布式光伏发电量远无法满足园区日常运营的电力需求；大比例建设光伏发电难以做到就地消纳，且日间发电的随机性与负荷波动性成叠加式，可能加剧电网公共连接点的功率波动，影响大电网供电的稳定性。如何实现在大比例清洁能源渗透的同时，兼顾就地消纳和电网稳定，是园区亟待解决的问题。

场景1：少量分布式光伏



- 光伏可全部消纳
- 大部分能源来自市电，光伏小于10%

场景2：大比例分布式光伏



- 无法就地消纳，投资回报率低
- 电网公共连接点功率波动加剧

图 6-4 不同规模的分布式光伏消纳能力对比

为实现能源脱碳目标，未来电网峰谷电价将进一步加大，传统随机用能方式将面临越来越大的能源成本上涨压力；随着园区内新能源汽车充电基础设施等可调节负载的增加，以及园区内冷、热、气等可控用能系统的完善，负荷侧的弹性用能调节能力将趋于增加。而在现有园区管理体系中，各主体在碳排放管控上彼此独立，各类能源系统间也相互割裂。如何科学部署园区能源管理体系架构，实现高效负荷侧需求响应调节，从而提高能源使用效率，降低峰值能源需求，是园区在运营阶段的痛点所在。

三、如何保障未来园区能源微网高效自主运行

新能源的大比例建设及消纳、高电气化率和可靠供电等特性对未来园区的能源微网有着更为严苛的要求。

园区配电技术路线上，传统园区电力系统均采用全

交流配电网架构，随着光伏新能源发电系统、新能源汽车充电基础设施、园区边缘型数据中心等直流发电和负载的增加，传统交流配电方案在配电效率、电能质量及安全性等方面面临新的挑战；主流的单一辐射式配电网灵活性较差，无法高效满足不同建筑主体间的能源互济需求，难以支撑园区弹性网络建设。

能源微网的安全自主运行很大程度上取决于微网的供电可靠性以及对电气故障的处理能力，而这背后也面临着重重考验：

1. 需求端：供电可靠性要求日渐严苛

以国家电网公司在核心城市建设的 A+ 配电网示范区为例，要求示范区供电可靠率达到 99.999%，即年停电时间小于 5 分钟。这不仅需要外部电网具备超高的供电稳定性，也对园区能源微网系统内部的可靠运行提出了更高要求。

2. 供电端：多端供电模式导致故障处理复杂性呈指数级增长

由于分布式能源发电在地理位置上较为分散，造成整个电网结构中具有多个分散的电源点，园区电网从单一电源的辐射型网络变成多端电源的网状结构。当系统发生故障时，故障电流的方向和大小会随之变化，保护装置的动作电流整定和时限整定将变得更为困难，可能造成保护选择性失效，引发越级跳闸等继电事故，为人工巡检增加了工作难度。

面对以上两点供需矛盾冲突，园区能源微网需要在供电可靠性、故障处理时效性和人员工作强度等方面找到统筹兼顾的解决方案。

解决之道：
低碳理念与绿色技术的交融

一、建立科学碳管理策略，整体布局低碳能源系统

在低碳园区的建设上，园区管理者应战略先行，依照相关国际、国内标准与行业政策，大力构建清晰的绿色管理体系，在园区运营活动中强化低碳发展理念，整体布局低碳能源系统，打造示范性低碳园区。

1. 构建清晰的绿色管理体系，以组织与规章为切入点，保障低碳园区的实现

园区管理层及园区内各企业须成立专项能源管理团队，依据相关要求与能源管理方针，结合自身能源使用特点，加快建设 ISO50001 能源管理体系，将能源目标指标、能源绩效参数、能源监测

分析、能源审计、能源计量等管理要求进行有机关联、系统整合，借助先进的数字化手段与综合能源管理平台，建立可视化的能源管理体系，为打造绿色低碳园区、工厂夯实基础。

2. 强化低碳发展理念，充分优化碳排放强度

以制造单元为例，充分考虑绿色制造和智能制造的融合，降低万元产值能耗及单位产品能耗；在园区基础设施的设计规划、工程建设与升级改造上依照绿色环保要求，采用高能效设备和工艺，减少温室气体及其他排放物的排放；建立明确的碳排放核查管理细则，可根据 ISO14064《温室气体计算与验证》，结合第三方机构对园区内各主体的温室气体年排放量进行核算，让低碳发展有迹可循。



图 6-5 园区科学碳管理策略图

3. 整体布局低碳能源系统，以绿色技术践行低碳园区建设

园区低碳能源系统的本质是构建以新能源为主体的园区能源微网，其关系到园区整体规划布局及未来发展。典型园区能源微网架构参考如下图所示，园区可视其规模及行业属性差异进行相应的变形拓展。

能源端：电源侧的分布式能源正逐步部署，除了传统的园区外电源，需在园区内以建筑物为主体，规划分布式光伏、储能、风电等电源设备的安装空间及电源接口；在应急电源方面，需考虑园区能源微网的孤网运行情况，以替代应急柴油发电机的使用；电能在未来仍有较大的发展空间，需考虑由此带来的负荷侧电力容量的增加，以及相关的能源接口和设施空间等需求；随着能源转化技术的广泛应用，电、冷、热、气等多种能源可高效灵活转换、互济互通，需统筹规划负荷容量。

配电网络：随着直流发电和用能设施的增多，除传统的交流配电架构外，需在配电末端考虑分布式直流微电网的设计，以便分布式能源就地消纳；在不同园区外电源间可建设直流配电系统，用于灵活调整各线路负荷率，并解决园区电能质量等问题；配电网络架构需从原来的放射型网络向单环网及双环网等更高可靠性供电网络过渡，为园区弹性网络构建能源全局流动的基础。

能源管理：典型园区级能源管理系统由边缘控制层和能源管理平台构成。边缘控制层主要用于秒级乃至毫秒级控制，如故障定位、静态减载、平抑光伏波动、储能削峰填谷、孤网运行控制等功能，并承担能源设施的通讯接口；能源管理平台负责园区分钟级调度以及大数据分析等功能，如负荷预测、虚拟电厂策略、资产健康管理等，两层架构并行，实现对园区能源的一体化管理。

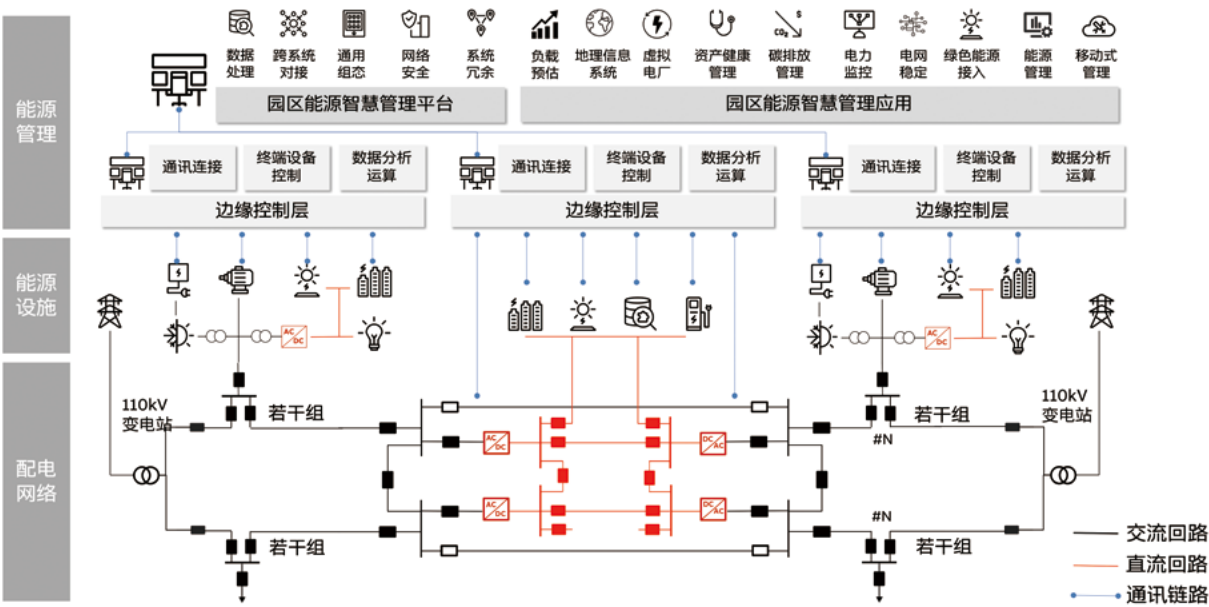


图 6-6 园区能源微网架构图

二、“源 - 储 - 荷”多策略柔性调控助力园区弹性微电网建设

多策略柔性调控基于园区全局视角出发，以能源安全和碳排放最低为目标，进行“源 - 储 - 荷”多策略柔性控制，将“源随荷动”的模式转变为“源荷互动调优”模式，释放碳减排潜力。

实现多策略柔性调控需突破以下难点：

1. 园区多端能源供应，负荷波动大，调控策略复杂

园区内多端供电、多级配电、末端用电等环节，以及冷、热、气等子系统的全融合对多策略调控系统网络稳定性和系统兼容性提出了更高要求。且由于“源 - 储 - 荷”各设施的波动特性、调节裕度、响应特性均不同，受调控的成本及用能体验的影响，多策略柔性调控难度较大，需要融合 OT 和 IT 技术，以确保调控的合理性和低碳性。

2. 调控场景不同，调控策略多变

随着外部能源环境的变化，以及内部分布式发电的波动性，不同园区的智能节碳、限电运行模式、安

全备用模式等典型能源调控场景需定制不同控制策略，要求具备丰富的能源系统运行经验，以确保策略的完整性及模式切换过程中的稳定性。

3. 能源安全性对调控实时性和可靠性有着高要求

由于能源系统处于实时供需平衡状态，如多策略柔性调控中的削峰管理、调频功能、平抑新能源波动及后备电源等，均要求有毫秒级的响应控制速度，所以高时效性是保障能源安全调控的核心。

基于成熟的智慧能源管理系统，ABB“源 - 储 - 荷”多策略柔性调控方案可实现园区设施的全融合，通过能源调控两层架构实现快速可靠调控。其中，能源管理系统层负责全局调控策略的实时推演分析，生成对各种分布式能源和可控负荷的调节指令；边缘控制层通过超链接响应平台控制需求，进行快速可靠的设备控制。

多策略柔性调控可分为：多策略的新能源调控及多策略负荷侧需求柔性调控。

多策略的新能源调控是指利用储能的灵活性，降低

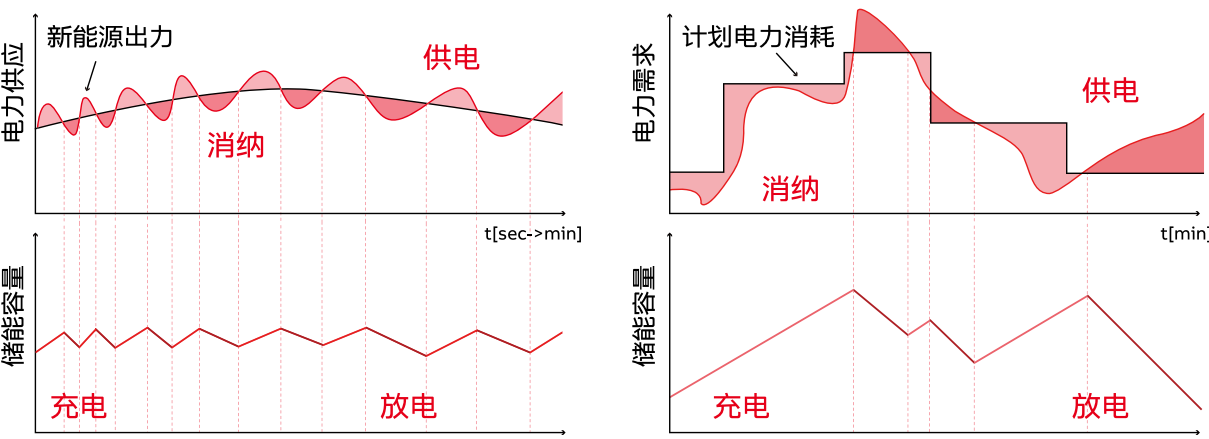


图 6-7 多策略新能源调控

新能源输出的波动性并进行削峰管理，降低园区峰值功率，同时留有一定的备用容量，以便作为园区的备用电源。由于分布式光伏和分布式储能的异地、大量离散性接入，对分布式光伏和储能的控制策略也需进行多层级调配。基于智慧能源管理平台，以园区具体能源架构为基础进行机理性建模分析，包括系统架构、可调节裕度、响应速度、系统安全性评估等元素，以数据分析和预测为驱动，进行日前及日内实时分布式发电预测和负荷预测，综合进行新能源调控推演，得出兼顾低碳和安全的新能源控制策略，并依托成熟可靠的边缘控制器，进行毫秒级控制，如新能源并网控制、出力控制、储能并网控制、储能出力控制等，在新能源大比例渗透的园区微网内，可视场景需要实现削峰管理、调频功能、电能质量管理、平抑新能源波动及后备电源等功能。

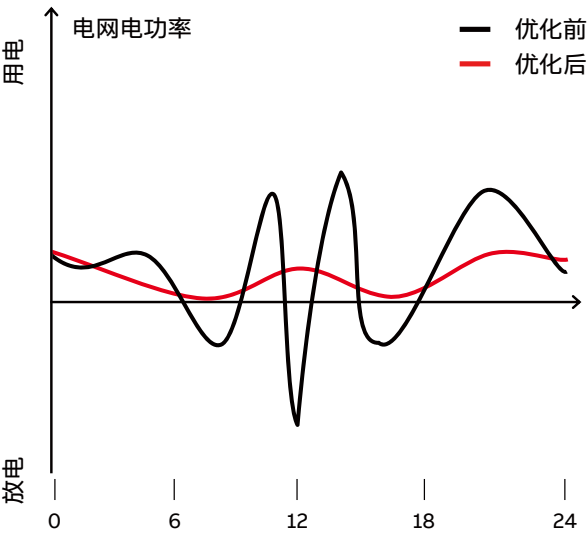


图 6-8 多策略负荷侧需求柔性调控

多策略负荷侧需求柔性调控，旨在通过对部分可控负荷的柔性调节，以不影响负荷功能性运转为基础，有序的分时段控制负荷用能需求，达到弹性用能的目的。多策略负荷侧需求柔性调控有助于新能源的就地消纳，同时降低电网基础设施投资。由于园区负荷层面体量大、分布广，控制成本不同，负荷重要性等级不同，响应速度不同，故而需要统筹谋划，制定用能调控组合，达到高效用能。基于智慧能源管理平台，以建筑体为调节对象，首先结合天气、人流、生产等跨系统数据，进行负荷预测及可调空间分析；其次，与建筑自动化系统、充电桩系统等进行跨系统联接，以便进行快速可靠的负荷柔性控制；根据实时的运行模式，如智能节碳模式、限电运行模式、安全备用模式等，由园区级能源管理系统进行全局调控，实现微电网的低碳高效运行。

三、自主运行，确保园区能源微网的高效稳定

园区能源微电网的高效稳定运行是低碳园区的基础保障，而新能源的随机性、不稳定性、间歇性等特点可能导致微电网的电力支撑能力减弱。因此，在规划设计阶段需进行如下综合考量。

合理的结构布局：满足分层分区原则，任一元件断开，应能保持系统的稳定运行。

合理的系统互联：能合理控制系统短路电流，交直流相互适应、协调发展。

合理的能源储备：在故障后经调整的运行方式下，园区系统应具有相应的静态稳定储备，并满足再一次故障后的稳定运行需求。

在运行阶段要重点考虑园区微电网整体故障处理方案。依托成熟的 IEC61850/GOOSE 数字化电力通信技术，园区微电网整体故障自知自愈方案以边缘设备的高速自主通信为基础，结合园区微电网拓扑动态进行实时分析，实现电力故障的自知自愈。目前，该方案在行业内已有应用落地，但大多仅局限在同一电压等级电网的故障自愈场景中，后备方案仍待提高。基于此，ABB 进一步完善了园区微电网整体故障处理方案，实现年均停电小于 30s，供电可靠性高达 99.9999%。具体特点如下：

1. 全域覆盖故障范围

相较于成熟的 10kV 配电领域，该方案率先在 400V 侧的开关设备上实现 IEC61850 通讯支持，并完成了中、低压配电设备的通讯打通，将故障范围的快速处理扩大到低压配电侧。

2. 率先支持 5G 通讯网络

故障自知自愈依赖于快速且可靠的通讯传输技术，重要的通讯报文要求点对点通讯延时小于 3ms，传统方案均依靠光纤专网进行传输，投资较大。随着 5G 技术趋于成熟，其低延时特性可替代光纤通信。据此，ABB 携手知名 5G 厂商，完成基于 5G 通讯技术的故障自知自愈方案的研究和测试，率先实现在 5G 网络上进行 IEC61850/GOOSE 二层网络通信，可完美替代传统光纤网络。

3. 丰富的故障处理应用

首先，在故障处理可靠性上引入了通讯连接状态在线监测技术，并且当通讯中断时，可自动触发预案，确保故障选择性切除。其次，针对分布式能源接入

产生的防孤岛等问题，提供基于 GOOSE 通信的全面保护，可在 10ms 内检测孤岛状态，选择性的进行快速防孤岛保护，保障分布式能源的稳定供应。同时，提供创新的单相接地故障诊断算法，可全面识别多种不同的接地故障，准确率高达 99.9%，特别是针对电缆线路的间歇性接地诊断，可提前发现早期电缆故障，避免事故的扩大。

未来已来： 碳中和园区的有力印证

为践行低碳发展战略，ABB 于 2019 年在德国打造了集团首个碳中和生产基地——ABB Busch-Jaeger 工厂。通过 2 年时间对低碳园区进行升级建设，包括分布式光伏、储能、充电设施以及智慧能源管理系统。在晴朗的日子里，光伏发电可满足工厂 100% 的日常运营电力需求。为了满足高峰时段的用电需求，工厂额外的绿色能源均来自经认证的零碳电力，项目预计每年可减少 CO₂ 排放超过 630 吨，降低 4.2% 的能源成本。

为了进一步探索多策略精准柔性调节的应用，推进园区绿色化转型，ABB 正在对厦门工业中心智慧园区实施升级建设项目。

该项目包括屋顶光伏和车棚光伏发电系统，并配套储能和交直流充电设施。为配电架构部署 DC750V 直流配电技术，实现光、储、充及直流空调、照明等负荷的直流微网运行。智慧能源柔性调节系统为现有园区能源管理、楼宇自控系统、充电桩系统进行统一联接，部署多策略柔性调控系统，包括：

新能源发电调控功能：精准控制园区功率因数，降低新能源并网波动性。

负荷需求侧管理：对园区内充电桩、暖通空调、照明系统进行柔性调节，降低负荷波动性。

部分区域孤网运行试点：通过能源管理平台确保园区内可靠并网、离网切换，以及孤网运行的稳定控制。

预计项目实施后，绿色能源可替代园区超过 80%

的外部电力供应，在部分时间段可实现 100% 新能源供应，每年减少 CO₂ 排放超过 13,000 吨，实现园区低碳转型。

随着项目运行数据的不断积累，以及 ABB 自身技术的持续升级，未来还将对现有策略进行迭代更新，探索更多创新应用场景，如光伏发电预测、大区域孤网运行控制以及部署更多调控策略等，助力建设碳中和示范园区。



图 6-9 ABB 厦门工业中心

— 第七章 智慧建筑的碳中和

28 现状：建筑减碳任重道远

29 未来：打造净零碳建筑

30 挑战：提效减排是实现建筑净零碳的关键

32 解决之道：三大路径助力减碳目标

35 R-CELLS，绿色建筑未来已来

36 结语：未来可期，商机无限

现状：
建筑减碳任重道远

中国政府制定的“3060”双碳战略目标，将对我国能源转型以及各行各业的未来发展产生深远影响。在飞速的城镇化建设过程中，建筑业作为全国三大用能行业（工业、交通和建筑）之一，与能源消费和碳排放密切相关，在迈向碳中和的道路上承担了重要使命。

一、建筑行业碳排放的总量庞大，约占全社会碳排放总量的二分之一

中国是世界上既有建筑和每年新建建筑量最大的国家，现有城镇总建筑存量超过 600 亿平方米。在此基础上，中国每年新增建筑面积约 30~40 亿平方米。《中国建筑能耗研究报告（2020）》显示，2018 年全国建筑全过程碳排放总量为 49.3 亿吨，占全国碳排放比重的 51.3%。

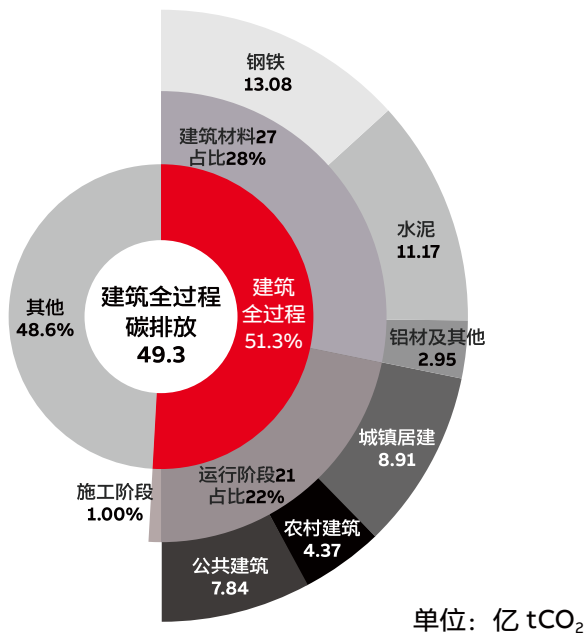


图 7-1 2018 年建筑行业全生命周期碳排放占比
数据来源：《中国建筑能耗研究报告（2020）》

二、建筑行业目前主要依赖化石能源，运行阶段化石能源占比超 90%

纵观建筑全产业链，碳排放总量主要来自建筑建造（包括建材的生产和建筑施工）和建筑运行两个阶段。建筑运行过程中的碳排放既包括通过燃烧方式产生的直接碳排放（如炊事、热水、燃煤采暖等），也包括电力热力供应造成的间接碳排放。随着我国逐渐进入城镇化新阶段，建筑运行阶段的碳排放占比将逐步上升。

目前建筑运行阶段能源结构中大部分仍然是采用化石能源，而可再生能源比例大概只有 6%。未来如何建设更多清洁能源并实现最大消纳，成为建筑行业碳减排的重要实现路径。



图 7-2 建筑运行能耗总量
数据来源：中国建筑节能协会、清华大学建筑节能研究中心

三、建筑行业能耗增幅显著，推高了碳排放总量

建筑行业不仅是碳排放大户，也是能耗大户。近年来我国建筑能耗总量增幅也十分显著。以公共建筑为例，2019 年全国公共建筑面积约为 152 亿 m²，公共建筑总能耗（不含北方供暖）为 3.42 亿 tce（吨标准煤当量）。公共建筑总面积的增加，用能需求增长等因素导致了公共建筑单位面积能耗，从 2001 年的 17kgce/m² 增长到 26kgce/m² 以上。

在建筑运营过程中，暖通空调系统和照明系统能耗占比将近 50%~70%。针对暖通和照明系统的节能增效是实现建筑碳中和目标的重中之重。

未来：
打造净零碳建筑

为了推动建筑行业的碳减排，各国都在积极探索碳减排的思路和方向。欧洲、美国等发达经济体已将住宅，公共建筑的绿色低碳列为气候行动的重要事项。

相较于建筑全生命周期的其他碳排放，有效降低建筑运行碳排放被普遍认为是建筑行业目前亟需解决的问题。许多国际机构相继发布了针对建筑运行碳排放的净零要求及标准。

例如，世界绿色建筑委员会（WGBC）提出，到2030年所有新建建筑必须实现运营阶段净零碳排放，即建筑所有的能耗都由现场或者场地外的可再生能源提供。而到2050年，所有的建筑实现运营阶段净零碳排放。

净零碳建筑通常需要具备以下特征：



大力推动可再生能源的利用和消纳，优先使用本地可再生能源，其次是场外可再生能源。



降低能源消耗，提升能源效率，确保建筑高效运营以减少能源浪费。



测量和披露碳排放信息，跟踪记录年度运营的碳排放情况，并提供有效的测量数据。



强化建筑认证监管体系，并涵盖节水、节材、垃圾处理等相关领域。

我国零碳建筑的发展路线

2019年1月住建部发布的《近零能耗建筑技术标准》GBT51350-2019界定了我国“零能耗建筑”的概念，即充分利用建筑本体和周边的可再生能源资源，使可再生能源年产能大于或等于建筑全年全部用能的建筑。

国务院2021年10月份最新印发的《2030年前碳达峰行动方案》为建筑行业如何实现绿色低碳，指明了方向：

1. 加快优化建筑用能结构

深化可再生能源建筑应用，推广光伏发电与建筑一体化应用。提高建筑终端电气化水平，建设集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的“光储直柔”建筑。到2025年，城镇建筑可再生能源替代率达到8%，新建公共机构建筑、新建厂房屋顶光伏覆盖率力争达到50%。

2. 加快提升建筑能效水平

加快更新建筑节能、市政基础设施等标准，提高节能降碳要求，推进重点用能设备节能增效。到2025年，城镇新建建筑全面执行绿色建筑标准。

3. 全面提升节能管理能力

对项目用能和碳排放情况进行综合评价，从源头推进节能降碳，提高节能管理信息化水平。

以上三个实现建筑零碳排放的途径，离不开技术的创新和产品的迭代，也将为建筑行业带来全新的挑战和发展机遇。

挑战：
提效减排是实现建筑净零碳的关键

然而，基于目前的能源使用习惯和能效管理方式，要实现建筑的净零碳和低能耗目标面临着很多挑战：

一、清洁能源供给不足，传统供给模式遭遇瓶颈

清洁能源是实现建筑净零碳目标的必选项，然而目前广泛使用的屋顶光伏发电技术不能满足建筑自身对清洁能源的全部需求。外部环境和电力系统正在发生的变革，让依赖于场外大电网的传统供给模式遇到了瓶颈。新能源自身属性给建筑安全、稳定、高效用能带来难题。

1. 自身建设新能源的基础薄弱

目前，城市特别是大城市和中心城区建筑密度高，发展新能源的场地和空间有限，大规模建设光伏，风电等新能源的基础薄弱，同时屋顶光伏发电难以满足当前建筑对清洁能源的应用需求。

2. 过分依赖场外清洁能源，将推高用能成本及风险

分时电费政策将让过分依赖场外清洁能源实现净零碳且用能弹性不足的建筑用户面临成本挑战。除了新能源本身的波动，极端天气等外部环境剧烈变化，给建筑造成用电安全风险。

3. 新能源供需存在时差，不平衡不匹配矛盾突出

以太阳能和风能为主的新能源有明显的时间特征，对于建筑，其用能和新能源发电存在不同步和不匹配，会出现阶段性的供给过剩和短缺，给建筑用能

带来挑战的同时清洁能源未能获得最大化消纳，进一步削弱了新能源的使用效率。

二、在满足用户体验前提下，如何通过提升能源使用效率来减少碳排放

减少建筑的整体能源需量和综合碳排放是建筑净零碳的必然要求，随着城镇生活水平的提升，用户体验要求也越来越高，如何有效实现建筑内的能耗管控是一个重要课题。

1. 再电气化带动能源使用需量继续攀升

随着用户对于用能体验要求越来越高，更适宜的温湿度、通风、室内光环境等将成为建筑的标配。而更好的用户体验势必需要建筑引入更多的电气设备，建筑的进一步电气化将导致能源消耗需求增加，而设备增加本身也是一种碳排放增加。如何使电气设备高效运行，以进一步降低用电需量并实现净零碳建筑，是摆在建设者和运营者面前的一个挑战。

2. 粗放用能模式带来不必要的隐性能源浪费

电气设备的增加使得设备的管理以及联动控制变得更加复杂，信息孤岛及电气设备不合理使用会造成不必要的能源浪费，增加运营阶段碳排放。

三、运营管理需要兼顾敏捷、低碳等需求

随着建筑大量使用清洁能源，运营管理人员的角色也从原来单纯的用电管理变成要对“发输配用”全面负责。加上再电气化范围变大，设备数量增多，用户对于用能稳定性和舒适性的要求越来越高，运营管理过程需要兼顾敏捷，低碳等多重需求。

运营环节的挑战来自几个方面：

1. 大量冗余设计让运营环节承压，带来运营期的能源浪费及额外碳排放

建筑电气专业前期设计余量过大，不仅在建设期造成配用电设备、线缆投资浪费，还因没有合理选择变压器而出现“大马拉小车”的轻载运行情况。叠加两部制电价的收费规则，造成建筑运营过程中的用能和费用浪费，产生额外碳排放。

2. 本地重载部署带来系统臃肿和管理复杂难题

建筑的日常运行依托两大本地监控系统：能源管理和楼宇自动化控制系统，本地系统的部署和运营阶段成本均较高。在运营过程中，因业主方的忽视、

系统集成商质保期后失联，系统常常沦为摆设，并出现大量设备掉线状况。自动化控制系统因各类现场控制器的故障彻底失去作用，运维人员需奔走各处手动控制，使得整个楼宇失去感知和调控能力，效果和效率大大降低。

3.“跑断腿”的运维方式，无法应对现代建筑运维需求

智能建筑不断迭代引入更多类型的设备，让整个强弱电系统更复杂，而传统的定期维护不能满足智能建筑的需求：维护过于频繁会造成过维护，浪费人力物力；维护不及时会造成欠维护，增加系统的运行风险，并且传统的定期维护会产生不必要的碳排放。



解决之道：
三大路径助力减碳目标

为应对上述挑战，打造面向未来的净零碳和低能耗建筑，行业需要加速推进面向碳达峰、碳中和的系统性变革，在能源供给、能源消费和能源管理等方面实现新突破和新跨越，着力解决供需全链条的矛盾和挑战，为建筑安全稳定高效的使用清洁能源提供保障；同时，打造基于全生命周期的低碳运营和敏捷管理模式，帮助建筑在不断优化用户体验的基础上实现整体能源使用需量和碳排放的减少。

ABB 致力于通过如下三大解决之道突破上述瓶颈问题。

一、优化能源结构和能源管理，破解建筑对清洁能源的需求与供给矛盾

建筑在使用清洁能源方面的供需矛盾，除了需要夯实清洁能源的供给外，也需着力解决新能源带来的波动性、不同步以及最大化消纳等新问题，这需要

对建筑的能源供给结构和管理模式进行系统性重构，行业需从如下方面入手：

1. 光伏建筑一体化（BIPV），提升建筑自身清洁能源生产能力

随着新能源建设成本的降低和发电效率的提升，以及投资新能源的回收周期的缩短，建筑业建设光伏的意愿逐步增强。特别是随着光伏材料技术的进步，光伏与建筑正从结合走向融合。针对建筑屋顶空间有限的情况，未来可通过光伏建筑一体化（BIPV）的方式增加新能源接入，屋顶、墙体均能发电，从而提升建筑自身清洁能源生产能力。此外，通过光伏建筑一体化可降低屋顶和墙体的升温，进而降低建筑物的整体温度，这为减少空调的应用及降低能耗打下基础。

2. 重构建筑供配电，实现多电源支撑

未来，一些低密度建筑可以根据自身特点和条件，逐步构建以分布式新能源为主供，主网为补充的新型电力系统。对于局部富裕的新能源，可通过隔墙



售电的方式实现建筑间，园区间的清洁能源调剂和区域互济；在场内清洁能源供给不足的情况下可通过场外新能源补给，形成多元电源支撑、大电网与分布式微网并举的供需耦合新机制。

为匹配供电系统的变革，建筑配电也将面临新的重构，ABB 针对未来建筑，前瞻性的布局直流配电技术，重构建筑配电系统。

与常规光伏建筑相比，光伏直流建筑更方便分布式能源、储能和直流负载及变频交流负载的接入，省去部分交直流变换装置，降低损耗，减少建设成本。此外，直流微电网可与现有交流微电网或配电网互联，形成多元电源支撑，大大增加用电灵活性，减少对主网的依赖。

3. 柔性调控，构建供需动态平衡新模式

新能源能否最大化有效消纳，是解决供需矛盾的重要方面。供给侧和需求侧的不同步问题是建筑光电消纳问题的关键节点。ABB 依托在电力行业的技术优势，从两个维度为行业赋能。

智能调优，实现“源荷互动”和协同运作。ABB 智慧能源管理系统可对“源 - 网 - 荷 - 储 - 端”进行多策略的柔性调控，根据清洁能源发电量、环境因素、电费规律，负荷情况等调配清洁能源、储能和可调节负载，以释能和蓄能的形式实现建筑本体的“虚拟电厂”管理和“源荷互动”，在解决供需不同步的

基础上全面提高能源使用效率，实现清洁能源的最大化就地消纳。

需求响应，实现供需紧平衡。在尖峰时段和清洁能源供给紧张时，根据光伏实际发电状况和可调节负载属性灵活调整使用时间，实现建筑内部的能源共济和有序用电，实现清洁能源供需的紧平衡。

例如在商业写字楼里，通过对充电桩等可调节负载进行管理可实现有序用电：中午是写字楼的用电低谷，却是光伏发电高峰，此时充电桩可满功率充电实现对清洁能源的及时消纳，而在清洁能源供给紧张的用电高峰时段，根据电动汽车剩余电量可灵活调整部分车辆充电时间或者减少瞬时充电功率，实现清洁能源供需的紧平衡。

二、全面提升能效，实现以人为本的节能降耗和深度减排

在低碳目标的约束下，ABB 致力于通过科技手段实现低碳与体验的双赢，通过全面能效提升，打造以人为本的建筑节能降耗和深度减排，在不降低用户体验的前提下实现整体能源使用需量和碳排放的控制。

1. 源头节能，提升用电设备能效水平

通过创新应用提高设备的能源使用效率。通常的建筑电气有很多单独的节能措施，如照明设备选用高效节能灯具和节能型整流器，电动机选用高效节能电动机和变频调速措施，采用无功补偿的装置降低功率因素等，电气设备零部件设计应尽可能使用低环境负荷材料。

同时采用科技高效的新设备是节能的一大路径，如高效电制冷/热、高密度低成本蓄冷/热、储能等技术，可以提升现有技术装备能效水平，降低建设运营成本。

2. 场景化控制，实现用能过程的精益节能和深度减排

建筑就像活的有机体，多个系统必须实现互通及算法协同工作，才能达到舒适，节能的效果。ABB 智慧楼宇控制是监控和管理所有建筑机电设施的中央系统，能实现从暖通空调 (HVAC)、照明控制、安全到公用设施和废弃物不同场景的控制。

工作空间的照明、舒适的温度等受到建筑内外部因素的影响，对于办公空间照明的“恒照度”算法，就需要结合室内光源、色温及室外光照强度等因素，当室外光照强度增加，室内照明会根据预先设定的办公照度及监测到的现有办公桌面的照度，经过计算自动调节光源的照度及色温，使得办公的照度恒定在最适合的程度。通过电动窗帘智能模块的算法，用以实现百叶窗的“向日葵”功能，叶片随着环境自动翻转，以保持舒适的工作空间。

三、利用数字化技术，帮助建筑实现运营管理的低碳和敏捷

考虑到建筑面对的变革以及长生命周期，建筑运营管理环节的低碳尤为重要。通过基于全生

命周期的数字化手段，ABB 帮助建筑用户实现运维管理过程的低碳和敏捷，助力建筑资产的保值增值。

1. 数字化平台和计算工具，为合理化设计等提供依据

数字化平台和计算工具在运营、建设、设计过程提供数据支撑及验证手段。借助 ABB Doc Win 数字化设计和选型工具、EAM 能效与资产健康管理平台的可视化统计数据 and 云端大数据给出的建议和结论，科学地制定建筑能源管理和运营策略，为新能源、储能、配用电设计等提供依据，获得最优方案，为低碳运营提供基础。

2. 轻量化云端部署，为低碳敏捷的“云运维”提供条件

即插即用的终端设备配合轻量化的云平台，改变了系统部署和建设投资的理念，将原本复杂的本地系统化繁为简，在控制、采集设备端即可实现与云端平台直接联系，减少通讯转换和数据交换环节的设备，进而降低故障点和运维设备数量，并提高系统稳定性。

25%

ABB 智慧楼宇自动系统无缝对接 ABB 智慧能源管理中台，可节省 30% 用电运营成本和 25% 能源成本。

42 万

北京 ABB 低压电器有限公司光伏发电及系统集成项目实施并网，预计年发电量 42 万度，每年将减少约 400 吨温室气体排放。

30%

KNX 远程运维服务云平台将打通云 - 边 - 端协同，以及未来在云端进行的持续迭代，可以让 i-bus® 智能建筑控制系统有效减少 30% 现场服务频次。

在平台端，基于云的方案具备嵌入各种系统的能力，同时保证部署的敏捷性。其次，将建设期投入高，一次性买断的本地平台部署模式转变为基于云平台的灵活的功能订阅模式（软件即服务），按需、按年购买，减少了平台持有成本。轻资产运营实现了提升现金流的目的，将平台成本分摊在整个运营期，系统和平台则由专业的厂家或集成商进行托管维护，不必为系统可用性担心。

低碳敏捷的“云运维”增加了管理和运维人员主动使用的意愿。各种接入互联网的设备使用云平台不受时间和空间限制，管理和运维人员只需通过清晰的可视化界面即可获得简单的系统使用和配置过程，轻松获得对建筑的掌控感。

3. 大数据技术助力智慧运维

云计算、大数据、机器学习等新技术，对数据分析和积累，建立运维诊断专家数据库，实现预测性维护。通过故障自诊断，定位故障并发起处理流程，安排

服务工单形成运维流程闭环，提供运维措施和预案指导运维人员；系统经过对既往故障与解决措施的存储分析与自学习，不断自我迭代，使运维专业知识与经验得以传承。结合能源管理系统与楼控系统的通信交互，持续优化控制逻辑和节能效果，实现系统之间的配合与持续改进，让建筑运营低碳智能。

R-CELLS，绿色建筑未来已来

在“双碳”目标背景下，绿色建筑是未来的发展方向。ABB 携手天津大学建筑学院打造的 R-CELLS 被动式太阳能新型建筑，将未来的愿景照进现实。

R-CELLS 作为太阳能零碳建筑原型，提出了“一生的健康生态住居”理念。R 代表可持续建筑的特征，CELLS 借鉴生物细胞自组织、自适应、自循环及多样复制的特点，创造能够智慧化响应环境变化，能源自给自足，可复制、可扩展的模块化建筑原型。



图 7-3 R-CELLS 被动式太阳能新型建筑

1. 利用可再生能源实现零能耗

R-CELLS 建筑以太阳光为主要电能来源，采用不对称 V 型屋面形式，增加南向得热和采光，最大限度实现冬季被动式太阳能的利用。增加屋面光伏面积，为主动式太阳能的利用提供足够的空间。辅以蓄电池组在满足日常生活所需电能基础上，将多余电能传输至电网，实现建筑的“零能耗”。太阳能小屋也可作为电能交易的“产销者”，降低用户用能成本。R-CELLS 建筑方案中应用 ABB 的交直流供配电设备作为能源管理。

2. 全数字化智能解决方案打造舒适低碳的环境

R-CELLS 建筑将太阳能、暖通、新风、空调系统互联互通，打造“零能耗、恒温、恒湿”的住宅居住环境，并通过性能模拟优化和参数化设计方法，来适应不同环境和气候条件。另外，ABB i-bus® KNX PEONIA 系列集节能降耗、智能便捷为一体，可对 R-CELLS 建筑的室内温度、湿度进行自动调节，并设置夏季 / 冬季两种工况模式，自动切换，既满足用户对舒适度的需求，也降低能耗，减少碳排放。

3. 远程云平台实现低碳运维管理

R-CELLS 建筑通过传感器监控每个电气回路的能源消耗数据，设备运行状态以及数据管理分析。通过云平台对接，用户可以从 PC 或手机端随时查看并掌控运营数据，并实现设备主动性预测性维护，能耗分析及优化，现场故障报警处理等。

建筑减碳，全产业链协同发力，运行阶段净零先行。R-CELLS 建筑充分体现了建筑业的智慧化和可持续发展趋势。其集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的设计，也成为“光储直柔”建筑的一个缩影。在绿色低碳要求下，R-CELLS 建筑为人们打造了更加美好的建筑空间。



结语：

未来可期，商机无限

通过创新技术，用绿色能源替代部分化石能源；通过数字科技，优化能效管理，打造智慧建筑生命体，是实现建筑业高质量发展的必要条件。ABB 电气中国秉承创新、绿色、开放的发展理念，将助力建筑业最终实现碳中和的伟大目标。

智慧建筑，绿色低碳
未来可期，商机无限

第八章 智慧交通的碳中和

38 现状：交通领域减碳潜力巨大

39 未来：交通将实现全面电气化

40 挑战：交通电气化转型中如何实现低碳运行

42 解决之道：综合全局，科学系统剖析

46 未来已来：交通领域的突破与应用

47 结语：绿色交通，伴你同行

现状：
交通领域减碳潜力巨大

2011 年杰里米·里夫金在其出版的《第三次工业革命》里指出，从传统的运输工具向插电式以及燃料电池动力车转变，是实现第三次工业革命的五大支柱之一。2021 年 10 月，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》发布，其中将加快推进低碳交通运输体系建设，包括优化交通运输结构，推广节能低碳型交通工具，积极引导低碳出行，作为推进碳达峰、碳中和工作的重点。

当前，中国已是名副其实的交通大国，高速铁路里程，高速公路里程，城市轨道交通运营里程、港口万吨级及以上泊位数量等均为世界第一。

交通运输快速发展的同时带来能源消耗的快速增长。2019 年，交通领域能源消耗约 4.49 亿吨标煤^[1]，占比全国能源总消耗比重的 9.24%；碳排放总量 12 亿吨左右，在七个大类行业中排名第三^[2]，是支撑我国实现“双碳”目标的关键领域。

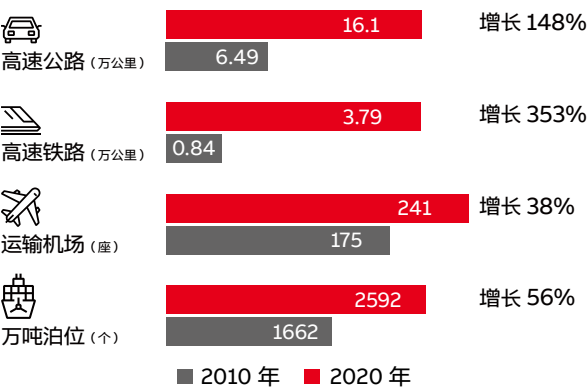


图 8-1 近十年中国交通发展里程数和增速

数据来源：交通运输部

交通运输能源消耗快速增长的原因可以归结为几个方面：

一、化石燃料直接燃烧是交通行业碳排放的主要来源

按照碳排放来源看，2018 年汽油、柴油、电力和航空煤油在交通部门终端能耗的占比分别为 40%、46.1%、1.6% 和 12.3%^[3]。推进交通电气化是道路运输和铁路运输重要的减排手段。另一方面，当前中国的电力供应仍以火电为主，2020 年火电发电量在全国发电量的占比高达 68%。单纯依托现有的电力供应，难以满足交通行业的低碳发展需求。

二、私家车保有量增加

交通方式对单位碳排放的影响中，自驾或乘坐出租车的单位里程碳排放量最高，是公共汽车、地铁等公共交通的 5~10 倍。2020 年底中国私家车保有量为 2.4 亿辆，较 2010 年增长 273%。鼓励使用

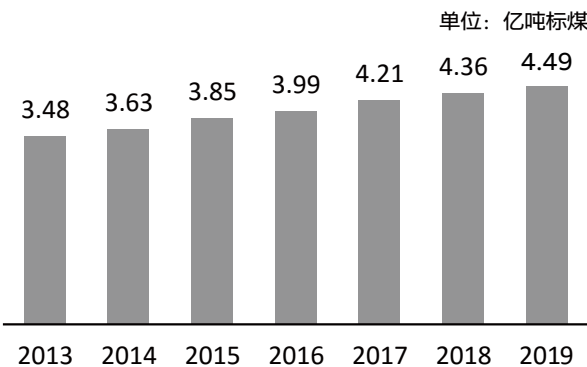


图 8-2 中国交通运输业能源消耗

数据来源：国家统计局

注 [1] 数据源自 国家统计局

注 [2] 数据源自 国际能源署官网

注 [3] 数据源自《中国交通部门低碳排放措施和路径研究综述》，袁志逸，李振宇等

公共交通，特别是电气化的城市轨道交通和电气化铁路是低碳发展的有效实践。

三、 交通设施全生命周期内产生间接碳排放

当前交通设施生产和使用过程中，仍在使用各类温室气体以及不可降解的材料。同时，道路拥堵等交通状况也会增加不必要的碳足迹。交通低碳发展需要采用更多新技术、新设备、新材料以及通过减少出行需求，改变出行方式，提高运行效率来减少全生命周期的碳排放。

未来：
交通将实现全面电气化

道路上，人们看不到曾随处可见的油罐车，不需要到处寻找加油站，在街边、商场停车场内就可以轻松解决充电问题，即使在万里黄沙的内陆，也无需面对“里程焦虑”。当人们准备出行时，只需要根据大数据平台提供的路线指引，就可以避免堵车的烦恼，也会极大降低出行成本。这些场景正是未来交通的正确打开方式。

面对交通低碳化发展，氢能和燃料电池系统、先进生物燃料等清洁能源技术将广泛应用。出于安全性、成本、出行效率、技术成熟度等考量，电气化在各类交通方式中的渗透率将大幅提高，甚至实现完全替代。

交通电气化发展会带来如下改变：

一、 电气化交通工具将从能源消费品转变为与电网互动的能源生产设备

电气化交通工具可以根据系统负荷状态实现有序充电，也可以作为新能源微电网的储能要素，参

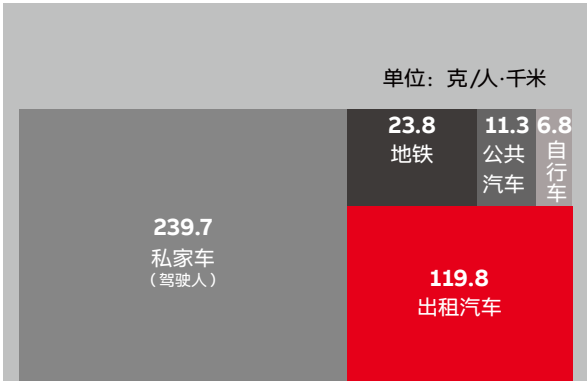


图 8-3 各种交通形式的碳排放量对比

注：地铁、公共汽车均为定员载荷
数据来源：《城市客运交通碳排放水平估算及低碳途径》，曹伯虎等



公路交通电气化

- 2030 年，电动汽车保有量会超过 1 亿辆
- 电动化的公共巴士，乘用车，货运车辆广泛应用



轨道交通电气化

- 全国铁路和城市轨道交通全面电气化
- 矿山、港口等实现“公转铁”，以电驱动绿色货运



航空电气化

- 空港陆电助力绿色机场
- 电动飞行、电力垂直起降飞行器提供短途轻载运输服务



水运电气化

- 港口岸电谱写绿色航运
- 轻型船舶实现电气化，燃料电池等驱动大型船舶

图 8-4 各种交通方式电气化的未来

与到新能源微电网的运行中，大幅降低新能源微电网的投资成本，提高其经济性，并降低电网峰谷差，实现能源辅助服务，减少系统损耗，提高设备利用率。

二、电气化交通发展带动智慧可靠的电力供应系统建设

电气化交通带来能源需求和用电负荷的大幅增加，需要更加智慧可靠的电力供应系统，从而将随处分布的清洁能源发电系统灵活接入。

三、未来交通与数字化科技结合，产生巨大变革

电气化交通可以通过数字技术实时感知各个发电设备、储能设施、传输通道以及用能设施的状态，并结合出行需求分析和交通工具电量状态，预测各处充电设备的用能需求，智能调节电能供应方式和输送通道，保证交通工具便捷高效地获取绿色、稳定、可靠的电力供应。智慧交通管理系统将“人 - 车 - 能 - 路 - 云”等交通参与要素有机地联系在一起。

从大数据分析技术实现智能化交通协调管理，到共享出行、自动驾驶，数字化技术为建设智能、高效、绿色的交通生态系统做出巨大贡献。

挑战：交通电气化转型中如何实现低碳运行

随着交通电气化的蓬勃发展，全面电气化势必造成新的挑战。一方面，依靠现有煤电为主的能源供应结构，无法快速实现交通低碳发展；另一方面，用电负荷需求激增不仅影响配电网的负荷平衡，而且给配电网带来能源供给，输送和负荷调配的困难。与此同时，大幅增长的输配电设备本身的低碳化需求，也成为不可回避的难题。

一、如何提高交通行业绿电使用比例，构建行业绿色低碳发展？

交通电气化会带来用电量的大幅提升。2020 年，铁路、道路运输、电动汽车用电量约为 1,515 亿千瓦时，占全社会用电总量的 2.1%；到 2035 年，假设铁路全部实现电气化改造，轨道交通运营里程翻番，电动汽车保有量达到 11,800 万辆^[4]，三种交通类型用电量将达到 8,213 亿千瓦时，按照 2035 年全社会用电量 12.6 万亿千瓦时计算^[5]，三种交通类型用电量在全社会用电量中占比 6.5%，对用电量增长贡献度达到 13%。

而目前，火电在全国发电量结构中仍居于首位，单纯依靠现有燃煤发电为主的能源供应结构，无法快

用电量（亿千瓦时）								
	电气化铁路		道路运输业		新能源汽车		全社会用电量	三种交通方式用电量占比
	里程（万公里）	用电量	城市轨交里程（公里）	用电量	保有量（万辆）	用电量		
2020 年	0	904	7,545	371	500	300	75,110	2.1%
2035 年	0	1,769	15,000	738	11,800	5,707	126,000	6.5%

表 8-5 交通电气化对全社会用电量的影响

注 [4] 数据源自《面向汽车革命的顶层设计与战略协同》
注 [5] 数据源自《2021 中国电力供需分析报告》

速实现交通行业的低碳发展。如何提高交通行业绿电使用比例，减少现阶段对电网供电的依赖，是交通行业实现绿色低碳发展的关键路径。

二、如何在配电侧科学合理地电力增容，实现社会效益和经济效益最大化？

交通电气化会带来海量的间歇性、随机性大功率用电负荷，这将改变配电网负荷结构。

一方面，为了更便捷的充电体验，大功率充电技术成为电动汽车充电设施发展方向。从 2016 年至 2019 年，中国新增直流充电桩的平均功率从 69.2 千瓦增长到 115.8 千瓦，增幅 67.3%。以 ABB 的 Terra 系列充电桩为例，其百公里续航的充电时间从 20 分钟缩短到 3 分钟，最高输出功率从 60 千瓦增大到 360 千瓦，增幅高达 500%。

另一方面，电动车保有量持续增加。到 2050 年

中国的汽车电气化率预计将达到 80%，电动车保有量达 3.5 亿辆。大量电动汽车集中在负荷高峰期充电将加重电力系统运行负担。由于电动汽车充电负荷具有较大的随机性，电网优化控制的难度也会加大。

从城市建设角度，配电侧电力增容也要兼顾经济效益和社会效益。中心城区的环境资源比较紧张，电力设施增容，将对所在区域电力负荷形成挑战；而偏远地区商业和经济活动不足，设备利用率较低，投资回报不足。在兼顾经济效益和社会效益的同时，配电侧如何科学合理地进行电力增容至关重要。

三、如何在电力设备层实现低碳运营，为绿色低碳交通体系奠定基石？

交通电气化的发展也带来电力设备数量的大幅攀升。

充电场站类型	充电场景	充电设备	充电速率	充电需求可引导性	负载特征
集中式专用充电站	公交、出租、物流、网约等	直流	快充	弱	饱和型负荷运营需要，在充电时间和配电容量上趋于饱和
分散式公共充电桩	科技园、写字楼、CBD 等	交流为主直流为辅	慢充	弱	潮汐型负荷办公区白天与早高峰负荷叠加；居民区与晚高峰用电负荷叠加
集中式公共充电	运营商市内充电场站	直流为主	快充	中	综合性负荷时与周围商业用电、生活用电负荷叠加
城际快充站	高速服务区	直流	快充	弱	冲击性负荷随到随充，快速充电

表 8-6 充电基础设施的“需求侧”特征

电力设备的低碳化发展和运行，成为实现交通低碳化的重要一环。

例如，轨道交通领域为了适应现场要求，普遍采用 SF₆ 气体绝缘开关设备以提高环境适应性，节约安装空间和减少设备维护量。中国每年就有上万台 SF₆ 气体绝缘开关设备被投入运行到高速铁路和地铁建设中。而 SF₆ 是六大温室气体之一，其全球变暖潜能值 GWP 高达 23,500，且废弃和处置难度大。为了保证绝缘水平，电力设备的部件还大量使用了高耗能和难以降解的绝缘材料等。只有在电力设备层实现低碳转型，才能为绿色低碳交通体系奠定基础。

解决之道： 综合全局，科学系统剖析

“源、网、荷、储、端”是实现能源安全可靠供应、清洁高效利用的重要支撑手段，也是当前的热门研究课题。推进交通领域的源网荷储一体化和多能互补发展，通过多能互补综合能源系统建设，保障大规模新能源顺利消纳，为交通低碳化发展提供了思路。

交通电气化发展中遇到的来自能源端、负荷侧、配电网及终端设备本身的挑战，要从全局考虑，打破以往多个系统孤岛运行方式，实现“源、网、荷、储、端”的协同运行。强弱电打通，强电部分增强分布式能源灵活接入能力，弱电部分实现单一子系统的内部优化，实现动力能源的高效传输；同时以能量流为核心，打造以柔性调控主体、创新配电结构为依托的新型智慧能源管理示范平台，实现跨功能及区域的横向能源优化过程，全面提高能源使用效率，通过数字化技术，实现负荷的分区管理和有序充电，运用合理的电

力增容模式，保障能源可靠供应。

与此同时，通过采用最新技术，在满足甚至超越原有性能基础上实现绝缘气体以及其他绝缘材料的低碳化，从而实现从发电端到用电侧，再到设备自身的全面低碳化，助力全社会的“双碳”目标。

一、多策略精准柔性调控，助力交通行业绿色用电

多策略精准柔性调控包括多策略新能源精准调控和多策略负荷侧需求柔性调控，从全局视角出发，以能源安全和减少碳排放为目标，将源随荷动的模式转变为源荷互动调优模式，释放减碳潜力。

1. 利用分布式新能源，提升交通绿电使用比例

根据第三次全国国土调查主要数据公报，我国交通运输用地 955.31 万公顷（14,329.61 万亩），大量城市空间可以因地制宜装设分布式发电系统，特别是机场航站楼、高铁车站、地铁车辆站场、港口仓库、公路服务区以及路肩、隔离带等空间非常适合分布式光伏建设。

大范围试点布局分布式光伏发电系统，按照就近建设、就近消纳的原则，通过合理地利用绿色能源，可以减少对电网供电的依赖。分布式光伏的接入，可有效降低电网接入点最大需量的要求，缓解交通电气化带来的配电侧电力扩容压力。

2. 创新型交直流混合微网，源网荷多维融合，提高能源使用效率

众所周知，分布式光伏以直流方式接入，用电侧大功率直流快充与交流充电共存，各类场站照明系统采用直流光源。随着电能供给方式改变，大量交直流充电设施接入，如果管理不当会引发电力安全稳定和电能质量等问题。然而，以电网固有的交流形

态为能源端，需要频繁进行交直流转换，必然会带来一定量的能源损失和不必要的能源浪费。

采用新型的交直流混合微网模式，可以极大地减少能源转换带来的损耗。交直流混合微网，即在原有交流系统的基础上辅之以智慧直流微电网，该模式具有线损小、可靠性高、无需相频控制、电能质量优、接纳分布式电源能力强等特点。

智慧能源柔性直流配电技术以数字技术为基础：从能量流上，将“源、网、荷、储、端”纳入综合管理范畴，引入新能源多端、双向供电发展，实现智慧能源柔性管理，精细调配。

从能源结构上，将设备层与边缘系统结合，实现配电信息深加工，提高信息利用率及系统综合管理能力。

从能源系统功能上，通过数字建模，AI 技术，实现系统全要素健康评估、运行监管、能耗跟踪、主动运维。

二、建立科学负荷侧管理系统，实现配电侧合理电力增容

大量分布式新能源的接入，可以在一定程度上缓解配电侧电力增容的压力，但在一些场景下，仍需要对负荷侧进行科学系统性管理。以充电设施为例，通过有序充电和分区管理，可降低用电端的功率波动，构建弹性能源网络。跨系统的能源调度，用能优化，可释放潜在的能源新动力，最大限度降低远期扩容需求，从而实现合理电力增容，在兼顾社会效益和经济效益的同时，实现智慧用电，助力供配电系统碳减排。

1. 构建充电设施有序充电管理系统

降低用电端的功率波动，构建弹性能源网络。实时监测回路变压容量及结余，并结合光伏发电量、储能放电容量，通过经济算法动态拟合负载峰值及有序管理启动值，以平衡一段时间内的用电容量需求。以一个 2,000 户的居民区配电设施为例，在配置充电桩时，无序充电下小区用电总容量要增加

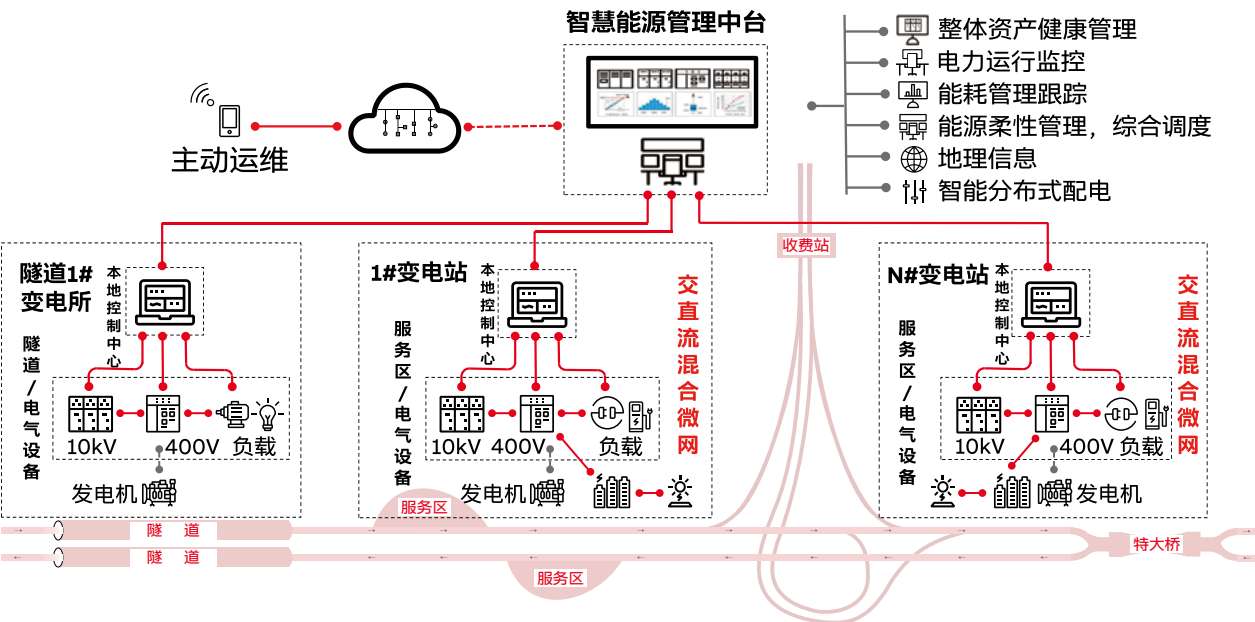


图 8-7 新型交直流混合微网在高速公路上的应用示例

105%；而在有序充电模式下用电仅增加 35%，并减少约 50% 的充电桩成本，显著降低对电网最大负荷的影响。

2. 引入充电设施差异化分级管理模式

用户在自主权衡时间效益和经济效益的同时，供配电系统可以将输出功率维持在拟定负荷值范围之内，有效避免充电站负荷对原有电力系统容量的冲击。

以充电站有序充电 & 分级管理模式为例，当充电站负载需求低于拟定负载峰值时，充电站按既有的运营模式，实现按需充电过程；当充电站负载需求超过拟定负载峰值时，进入动态优化过程，自主启动有序充电管理，适当降低普通组充电电流，延长充电时间，通过时间效应换取经济充电费用。

3. 构建以智慧能源管理中台为核心，跨系统综合能源调优系统

打破各个系统间的能源信息壁垒，形成多维大数

据，为实现能源全面管理优化打好基础，释放系统间可调用的能源，有效降低尖峰负荷，缓解对电力系统的容量需求。以图 8-8 为例，当系统按既定模式自主分级管理和有序充电运作后，假如 VIP 区又有车辆驶入，充电站负载需求远超过拟定负载峰值时，可通过智慧能源管理中台，跨系统综合调优，比如降低空调系统出力（据统计，空调每升高 1℃可释放约 10% 的电力负荷），释放出的负荷供 VIP 区充电使用，实现低碳管理及尊享服务并举。与此同时，智慧能源管理中台亦可在必要时，降低充电设施的供电容量，以满足场站应急需要。极端情况下，还可以将签约车辆电池作为应急电源，通过 V2G 的方式向其他负荷反向供电。

除充电设施，交通设施规模庞大的动力照明、环境控制系统以及独立的子系统，可以全部集成在智慧能源管理中台上进行系统、科学地管理，从而发挥系统和设备整体的优势和潜力。

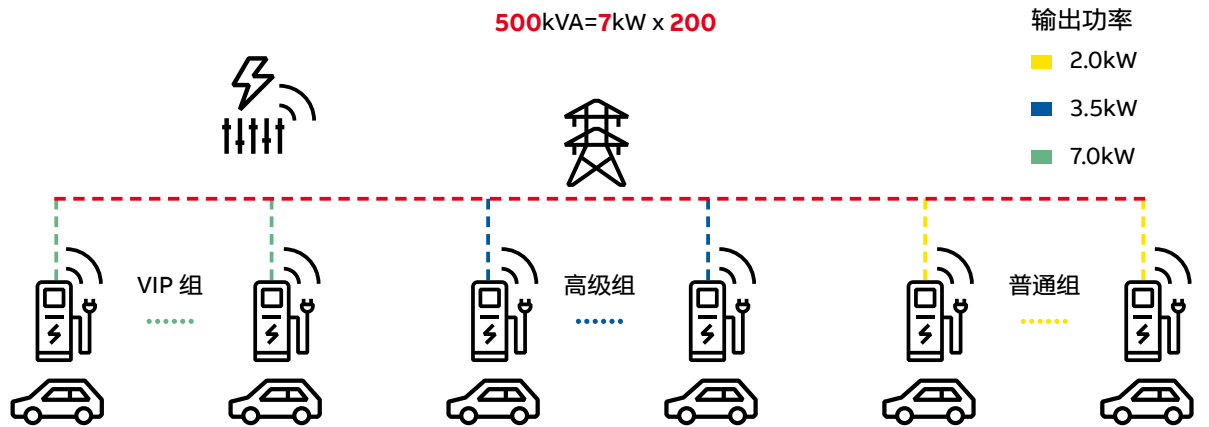


图 8-8 充电站有序充电 & 分级管理模式

三、绿色环保技术奠定低碳交通体系基石，护航绿色交通

绿色环保技术、环保材料的发展和应用，会带来系统性能及设备整体能效的显著提升，为交通低碳化转型提供重要驱动力。例如，采用非晶合金或硅橡胶等新材料，可以在电力变压器的运行及生产过程中降低能耗，提高效率；采用可重复使用的 PT 热塑性材料替代环氧树脂，可以降低生产及处置环节的碳排放；采用新型设计的主母线及元器件可以降低热损耗。

在电气设备维度，许多企业积极致力于环保技术及环保材料的研发和推广。目前，交通行业大量使用的 SF₆ 开关设备，已经推出多种替代方案。

12kV 及以下的气体绝缘开关设备，业内可以完全采用氮氧为主的混合干燥空气（零碳排放）来替代 SF₆。

12kV 以上设备，业内普遍采用二元混合气体的方式：通过一种电负性较强的气体与另一种或多种化学物理性能稳定的非电负性气体按一定比例混合而构成的绝缘气体。其特点是保持了电负性气体较强的绝缘能力，同时减小了电负性气体对局部电场畸变的敏感程度，并能降低电负性气体的用量，进一步降低气体的制造成本。

ABB 公司参与研发的加强型空气 AirPlus，是目前 SF₆ 替代环保介质研究中最有前景的技术之一。AirPlus 是一种混合气体，由约 20% 的 C₅F₁₀O（简称 C5）和 80% 的干燥空气组成，其 GWP<1，和普通空气基本一致，相比 SF₆ 气体降幅超过 99.99%。AirPlus 的 ODP 值（消耗

臭氧潜能值）为 0，其电气绝缘性能在相同的气体压力下和 SF₆ 相近，完全满足高、中压开关设备的使用要求。

另外，在正常工作条件下，甚至发生燃弧时，使用 Airplus 绝缘的充气柜可以提供更好的安全保障。

AirPlus 的效益：

在一条典型的地铁工程中，如果每台 35kV 中压气体绝缘开关设备使用 6kg SF₆，30 个变电所使用的 SF₆ 就达到 2,000kg，相当于 4.7 万吨 CO₂ 排放。如果一个大城市有 30 条同等规模的地铁线路，则折合 141 万吨的碳减排。以此类推，全国每年在轨道交通领域新增设备仅采用环保型替代一项，即可带来非常可观的环境效益和社会效益。

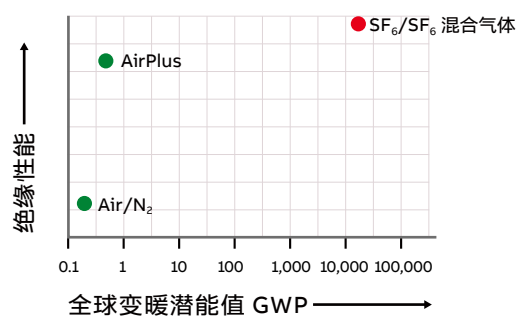


图 8-9 SF₆ 替代气体性能对比

未来已来： 交通领域的突破与应用

近年来，交通电气化已经处在加速发展的进程中，与其相关的新理念、新技术、新材料都取得了相应的突破和应用，并且在减碳方面取得了一定的成果。在分布式能源接入，充电设施，设备环保方面，ABB 均有所建树。

一、分布式能源接入领域

ABB 凭借在全球范围内二十多年的专业积累，依托 ZEE600 智慧能源管理中台，为用户容量规划、系统设计、运维管理提供一站式解决方案，让微电网建设更容易、系统架构更加经济可靠、运维更简单、效益更显著，并通过构建以新能源为主体的微电网，提升交通行业绿电使用比例，助力行业碳减排。

二、充电设施领域

ABB 坚持推进“车 - 桩 - 人”有机融合的智能充电基础设施建设，通过对充电设备和车辆安全的实时管理与预测维护，实现用户体验感和运营运维便利性的双重提升。

ABB 严格按照国际和国家相关的安全标准设计检测，基于安全、可靠、智能化三大原则，推出可覆盖各种应用场景的创新充电系统。例如，20kW 直流 V2G 充电桩积极参与能源互联网建设，350kW 大功率液冷充电系统和 600kW 充电系统，可以提供超级充电的完美体验。

此外，基于联网服务，ABB 充电设备配备了完整的后台管理软件系统，可实现远程协助，定制故障诊断、排除和维修，远程更新和升级等功能，

并且充电设备可轻松接入不同的第三方软件系统，在满足未来连接需求的同时也极具成本效益，从而为新能源电动汽车的大力普及打下良好基础，为“双碳”目标创造必要的基础设施条件。

三、设备环保领域

ABB 在产品设计、制造以及使用的全生命周期中始终秉承环境友好的理念，并积极响应 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和的国家策略。

自 2014 年开始，以干燥空气或 AirPlus 为绝缘介质的气体绝缘开关柜已得到了多个国内外项目的应用和验证。

2019 年，多台 40.5kV 的 ZX2 AirPlus 环保型气体绝缘开关柜（相当于约 1.2 万吨直接碳减排）在国内某大型城市的地铁工程顺利送电，并于次年成功进入了商业运营阶段。

2021 年，ABB 推出了符合 GB/T 24021-2001 idt ISO 14021:1999《环境管理 环境标志与声明自我环境声明（II 型环境标志）》的 VD4 真空断路器，这也是中国首批通过中国环境标志（II 型）产品认证的产品。推出符合环保要求的 Emax2 系列低压空气断路器，采用可降低交流损耗的新型叠层母线的 NeoGear 低压开关柜等，这些设备将被逐步应用到未来的交通项目中。



结语： 绿色交通，伴你同行

交通运输是能源消耗的大户，也是节能减排的重点领域之一。要打好减碳攻坚战，推进交通行业的低碳绿色发展势在必行。ABB 致力于应用创新的电气化、数字化技术加速赋能能源转型，构建绿色智能交通产业链，并通过端到端解决方案连接用户、合作伙伴、产品和场景，用多维度、专业的服务满足各方需求，加速中国交通电气化进程。

绿色交通，伴你同行！
我们身旁的青山绿水，是交通电气化减碳最好的勋章。

— 第九章 数据中心的碳中和

- 49 现状：数据中心减碳需求日益突出
- 51 未来：数据中心绿色低碳发展路径
- 51 挑战：数据中心减碳面临多重难题
- 53 解决之道：三大着力点优化数据中心发展
- 57 未来已来：创新技术奠定减碳基础
- 58 结语

现状：
数据中心减碳需求日益突出

数据中心发展拉升能源需求

数字经济作为全球经济发展的新引擎，正在以前所未有的速度推动着不同经济主体的持续变革。庞大的数据信息管理需求，也正在促进着以数据中心为代表的新型基础设施步入飞速发展的阶段。2010 年以来，全球互联网流量每年增加约 30%。2020 年，在新冠疫情的影响下，全球网络流量受到视频流量、电话会议、在线游戏、社交网络等数字应用增长的推动而激增，当年 2~4 月中旬的增长率就高达 40%。国际能源署（IEA）最新研究显示，伴随物联网持续发展，未来对数据服务的需求将呈现出指数级增长。在此推动下，全球数据中心平均增速高达 7%。随着我国数字经济转型不断推进，以及新一代通信技术的应用和物联网 IoT 的落地实施，近 5 年机架投放市场的年平均增速高达 30%^[1]。到 2023 年底，预计全国数据中心机架规模年均增速将仍然保持在 20% 左右^[2]。

随着数据中心建设的快速发展，能源需求也会持续攀升。如何全面响应国家“双碳”号召，增强全社会

可持续发展能力，需要从数据中心的碳足迹出发，探索低碳数据中心的长远发展路径，逐步实现数据中心的碳中和目标。

数据中心的碳足迹分析

从数据中心全生命周期来看，以温室气体核算标准的边界定义，需要分别从三个范畴来分析数据中心的碳足迹——企业所有或可控制的排放源带来的直接温室气体（GHG）排放、以能源使用为主体的能源间接 GHG 排放、以组织活动引起的其他间接 GHG 排放（包括使用的资产、设备的生产过程所产生的 GHG 排放）。

碳排放量若按由高到低排序，排在首位的应是数据中心运行过程中消耗化石能源等带来的间接碳排放，其次是数据中心建设使用的材料和设备生产过程中产生的碳排放，以及生命周期结束处理时所产生的碳排放，最后则是运营过程中的直接碳排放。

碳足迹 1：以能源使用为主体的能源间接碳排放位列首位

数据中心是高耗能行业，其用电需求正在随着建设数量、规模的不断扩大而急剧攀升。由中国工程建

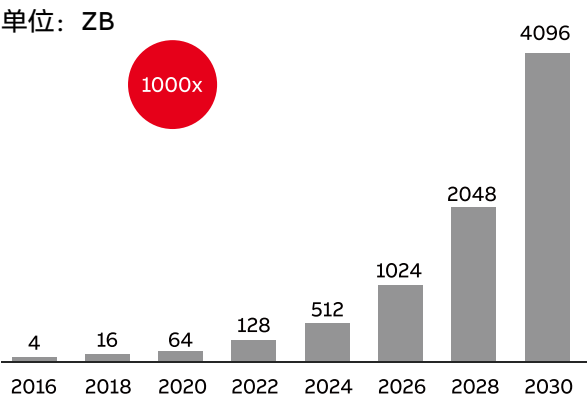


图 9-1 中国数据规模增长预测

数据来源：赛迪顾问

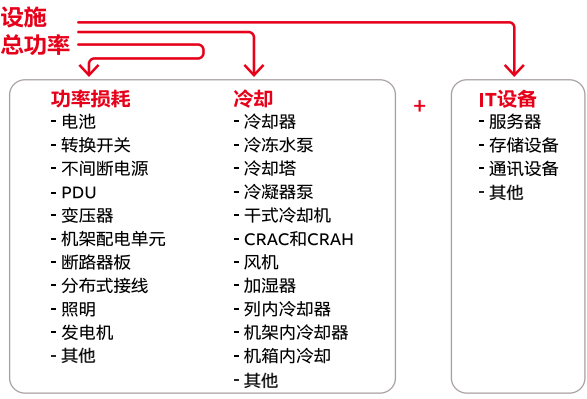


图 9-2 设施总功率示意图

数据来源：ABB 白皮书《数据中心能源效率和管理》

注 [1] 数据源自《全国数据中心应用发展指引（2020）》
注 [2] 数据源自《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023 年）》

设标准化协会城乡建设信息化与大数据工作委员会和中国投资协会能源投资专业委员会联合发布的《零碳中国·数据中心》蓝皮书，对数据中心的用电及其由此带来的二氧化碳排放进行了深入浅出的研究。数据显示，2020 年全国数据中心用电量为 870 亿度，占全社会用电量的 1.16%，产生的二氧化碳排放约为 7,290 万吨。预计到 2030 年，数据中心用电量可能在 2020 年基础上翻一番，高达 1,800 亿度，用电量产生的碳排放值将达到全社会碳排放的 1.5%。所以改变能源供给结构，关注可再生能源的开发和利用，探索基于多能互补的数据中心能源供应的多元融合模式，是低碳数据中心发展之路的重要举措。

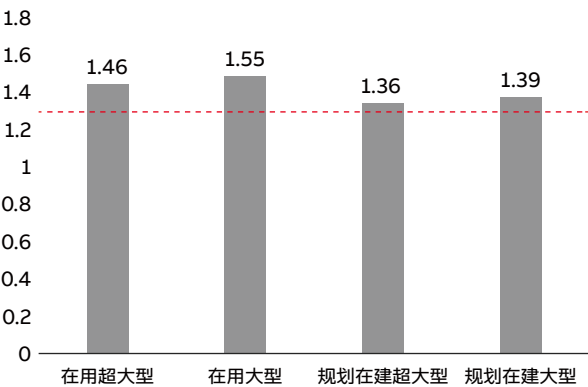


图 9-3 2019 年全国数据中心 PUE 值情况

数据来源：《全国数据中心应用发展指引（2020）》

就个体来说，超大型数据中心需满足 IT 设备、冷却系统、照明系统及供电系统的用电需求，规模耗电量高达上百兆瓦。传统数据中心 PUE 偏高，电能使用效率低，也制约着数据中心低碳发展。为了进一步提高效率，我国主要城市已经把 PUE 作为新项目审批的重要指标之一。上海市 2021 年 4 月发布的《上海市数据中心建设导则（2021

版）》中，在设计指标方面，要求新建大型数据中心项目，综合 PUE 严格控制不超过 1.3；在投入运行后，要求综合 PUE 第一年不应高于 1.4，第二年不应高于 1.3。深圳市 2019 年 4 月发布的《深圳市发展和改革委员会关于数据中心节能审查有关事项的通知》中，对于 PUE 值低于 1.25 的数据中心，新增能源消费量可给予实际替代量 40% 以上的支持。

近年来，数据中心行业通过众多技术创新来提高数据中心用能效率——用新型冷却方案代替传统的水冷或风冷，液冷技术的起步到试点应用，耐高温 IT 设备与自然风冷配合，高算力低功耗芯片的开发，服务器风道创新设计，HVDC 构架减少配电环节的电能损耗等。（更多信息可参考白皮书《[提高数据中心能效的十种方式](#)》）。响应政策要求、加大管控力度，进而促进电能使用效率提升，降低碳排放，这也成为低碳数据中心发展之路中的重要保障^[3]。

碳足迹 2：覆盖数据中心全生命周期资产投入及运营管理产生的间接碳排放

数据中心属于重资产型基础设施，建设初期资产投入占比一般为电气 45%、暖通 25%、土建 20%、其他（弱电、智能化、消防等）10%。电气部分在数据中心资产投资中占比最高，远高于民用建筑电气投资 10% 的常规水平。这些设施的生产制造和原材料的使用都会排放二氧化碳。同时运营过程需要投入更多资源进行有效管理，也会带来间接二氧化碳排放，而且此部分的排放相对分散，难于统计和管理。若能优化供配电结构，减少传统模式电气设备冗余配置，采用新型设备，不但可以优化数据中心投资及管理成本，也将直接助力碳减排。

注 [3] 数据源自《提高数据中心能效的十种方式》

碳足迹 3：数据中心运行过程中拥有和控制的排放源产生的直接碳排放

数据中心拥有和控制的排放源相对较少，主要包括备用电源启动直接产生的碳排放，如柴油发电机组的柴油燃烧或天然气燃烧。其次还包括如冷却系统制冷剂泄露产生的温室气体、冷却系统排污水中的 NXO(氮氮气体)、电气系统绝缘气体 SF₆、以及取暖燃料(煤、油、甲烷)等焚烧产生的气体泄露。

以柴油燃烧为例，估算碳排放值——据全球新能源网数据显示，柴油的 CO₂ 排放因子是 74,100 kg/TJ，柴油的净热值是 43 TJ/Gg，故单位质量柴油完全燃烧排放的 CO₂ 质量约是 3.1863kg。2,000kW 柴油发电机组在额定状态下运行，一小时油耗量约为 482~602 升，取最低值 482 升，相当于 385.6kg。但因月度试车或应急供应总使用时间不多，数据中心年均柴油发电机组直接碳排放一般不超过千吨，以实际项目计算为准。当天然气作为备用电源时，其主要成分是甲烷，标准状况下 1,000 立方体积，CO₂ 排放量为 1,964kg。若能结合电化学储能站的合理配置，实现毫秒级启动供电，发挥其“顶峰”能力，可减少柴油发电机的开机时间，从而利于碳减排。

未来： 数据中心绿色低碳发展路径

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》，明确提出到 2035 年，生产生活方式绿色转型成效显著，能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高，单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放分别降低 13.5%、18%，非化石能源占能源消费总量比重提高到 20%。

以此为基础，《新型数据中心发展三年行动计划（2021~2023 年）》着重引导新型数据中心走向高效、清洁、集约、循环的绿色发展道路：一、加快先进绿色技术产品应用；二、持续提升能源高效清洁利用水平；三、优化绿色管理能力^[4]。

“双碳”目标的发布，将进一步引导与推动新型数据中心向低碳绿色方向发展，最终实现碳中和目标。我们应结合碳足迹现状，发挥创新技术优势，探索数据中心安全高效、低碳、集约、数字化的发展道路，从而实现高效管理，助力数据中心“双碳”愿景的实现。

挑战： 数据中心减碳面临多重难题

一、能源结构待优化

数据中心的能源结构调整是数据中心低碳发展的重要举措，通过清洁能源的接入和利用，来减少传统火电的能源消耗是满足数据中心长期可持续发展的重要保障。清洁能源部署分为集中式部署和分布式部署。集中式部署主要由电网公司通过建设大型新能源发电站来实现电力脱碳，其中包括集中式光伏电站或风力发电，新能源电站一般建设规模大、占地面积广，多以土地资源、光照资源或风力资源为主要因素进行选址建设，多分布于西北及西南地区。但是，此类地区对于数据中心选址来说欠缺客户和网络两个重要资源。如果通过建设专用输电设施将规模化的新能源进行跨区域输送至合适站址，其本体投资高、输送损耗大、运维成本高，不是合理高效的做法。因此，单纯依靠集中部署清洁能源的电力脱碳方式来帮助数据中心进行能源结构调整并非首选方案。

注 [4] 数据源自《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023 年）解读》

因地制宜，因时制宜，立足数据中心站址当地资源禀赋，合理部署分布式清洁能源，就近建设、就近消纳，可完全实现主动管理，避免被动限电风险，是改变传统单一能源结构，实现低碳数据中心发展的最优选择。经研究，要实现分布式清洁能源作为主体能源为数据中心提供能源供给，需要解决以下两个核心问题。

1. 选择怎样的供电结构来实现风、光等新能源的安全接入？

当前我国使用的是以工频交流电网和火电为主的电力系统，在以风、光等清洁能源发电为主的区域，新能源的随机性、波动性与当地电网的实时平衡特性需求往往会产生冲突，不同频率的谐波会引起当地电网的电压波动，基波电流在电压影响下发生畸变，同时非线性负载如变频器、整流器、逆变器、开关电源、UPS 等亦会影响电网稳定性。当风力、光伏发电发生故障时，无论是直驱风机还是逆变器都存在低电压穿越的过程，无法提供充足的无功，这样就会造成电网系统电压在较长一段时间内跌幅震荡，从而发生大面积脱网事故。因此，改变传统的供电结构，解决接入风电、光电后产生的电压暂降及无功问题，使以风电、光电为主的供电系统更安全、高效地运行，是数据中心能源结构调整中亟需解决的问题。

2. 采用怎样的能源管理策略来适应分布式清洁能源发电特点？

传统用户侧能源供给策略无法适应分布式清洁能源柔性管理需求。众所周知，数据中心在同一时期内，其负荷相对稳定，波动一般不超过 10%，而分布式清洁能源为主体能源供给后，其波动性的特点使之无法在传统能源供给策略下实现供与用之间的动态匹配，这样就会使新能源消纳不充

分，从而出现弃风、弃光现象，无法高效利用清洁能源，也无法降低网侧容量需求。如何使电力负载由目前的刚性转为柔性，以适应电源侧大比例的不可调控电源，成为今后接入和利用风电、光电的待解难题。

二、供电架构需调整

改变数据中心能源结构后，还需关注以怎样的供配电网架结构实现电力能源再分配及管理过程。

传统数据中心供配电等级多，如大型数据中心一般为 9 层级的配电结构：35kV 开关站 - 10kV 高压配电柜 - 10kV 配电柜 - 变压器 - 低压配电柜 - 密集母线 - 配电柜 - UPS 系统 - 列头柜。每增加一个层级则增加一个故障隐患点，往往要通过变压器、UPS 关键电源、备用电源的冗余配置来增强供电可靠性。随着中低压配电系统中的设备增加，整个供配电系统就会变得更加复杂，从而导致数据中心初期设备资本投入居高不下，后期运维支出持续走高。

随着数据中心负载迅速增长，传统的供配电结构还需要面临来自低压侧的各种挑战，如高损耗、过热、高故障电流水平等。不仅如此，单体数据中心的建设规模也越来越大，若按现有供配电高冗余配置方案设计，其占地面积也将随之增加，机房楼内的关键电源及低压配电系统将更严重制约 IT 系统使用效率的提升。要解决这一问题，优化配电等级，减少低压配电系统并打通能源共享线路，实现能源多策略柔性配置，提高供电可靠性，取代硬件高冗余配置是最佳切入点。此外，优化数据中心的供配电复杂性，实现数据中心资产轻量化、低消耗，从资产源头减排也成为低碳数据中心技术创新的重要方向。

三、全生命周期管理仍存深化空间

完成能源结构及供配电架构优化后，数据中心将步入建设、运营、改造、退役等主体生命周期环节。在此过程中，专注于安全管理的同时，还需提高综合效率，包括能源使用效率、配电管理效率、运维效率、风险管理效率、碳排放改进效率跟踪等。其核心是打破信息壁垒，改变传统区块式管理模式，通过能量流与信息流的交织，深化平台管理功能，形成数据中心能源管理中枢。

解决之道：
三大着力点优化数据中心发展

一、优化能源结构、管理能源供给过程，从化石能源高消耗中减排

数据中心供电，采用多源分布式 10kV 柔性直流智能配网，直流配电系统可比交流配电系统节能 5%~15%。将多个电源系统互联时，其各端的交流电网可以按各自的频率和相位运行，不需进行同步调整。多电源系统互联可加强区域电网的互联互通，有助于实现清洁能源高效安全接入。

同时，策略性地部署储能系统可提高电网的运行性能和可靠性，更好地整合可再生能源，平衡供需。应用多端口能量交互设备及柔性综合调控，可构成数据中心以直流为主的交直流混合微网，最大化利用清洁能源、电网容量。

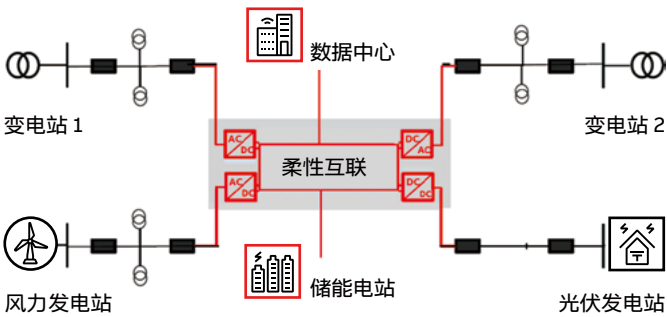


图 9-4 10kV 柔性直流配网架构

闭环运行模式可改善区域电网功率因数，提高配网运行效率，同时改善电压暂降，提高电能质量和供电可靠性。通过柔性控制系统，可实现功率按需调节、均衡负载，发挥相邻电网的“间接储能系统”作用，对数据中心用电实现区域间功率调控，减少配套变电站建设和输配电升级改造的投资，充分利用电网容量，实现资源高效利用，减少系统总体成本。

10%

电能效率：在服务器为 40%~60% 负载时，测量出来的“从电网到服务器电源”结果比交流供电系统的效率高 10%。

15%

投资成本：比交流供电系统的投资成本降低 15%。

25%

空间节省：比交流供电系统的占用空间减少 25%。

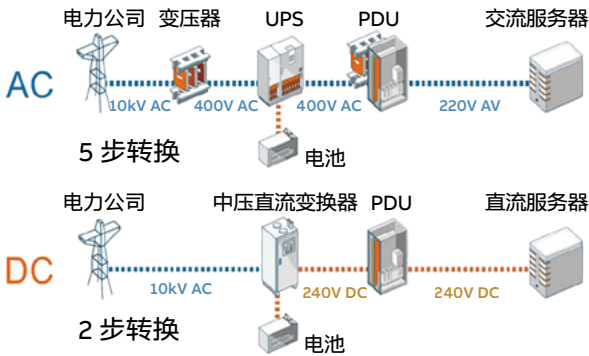


图 9-5 直流配电系统与交流配电系统对比

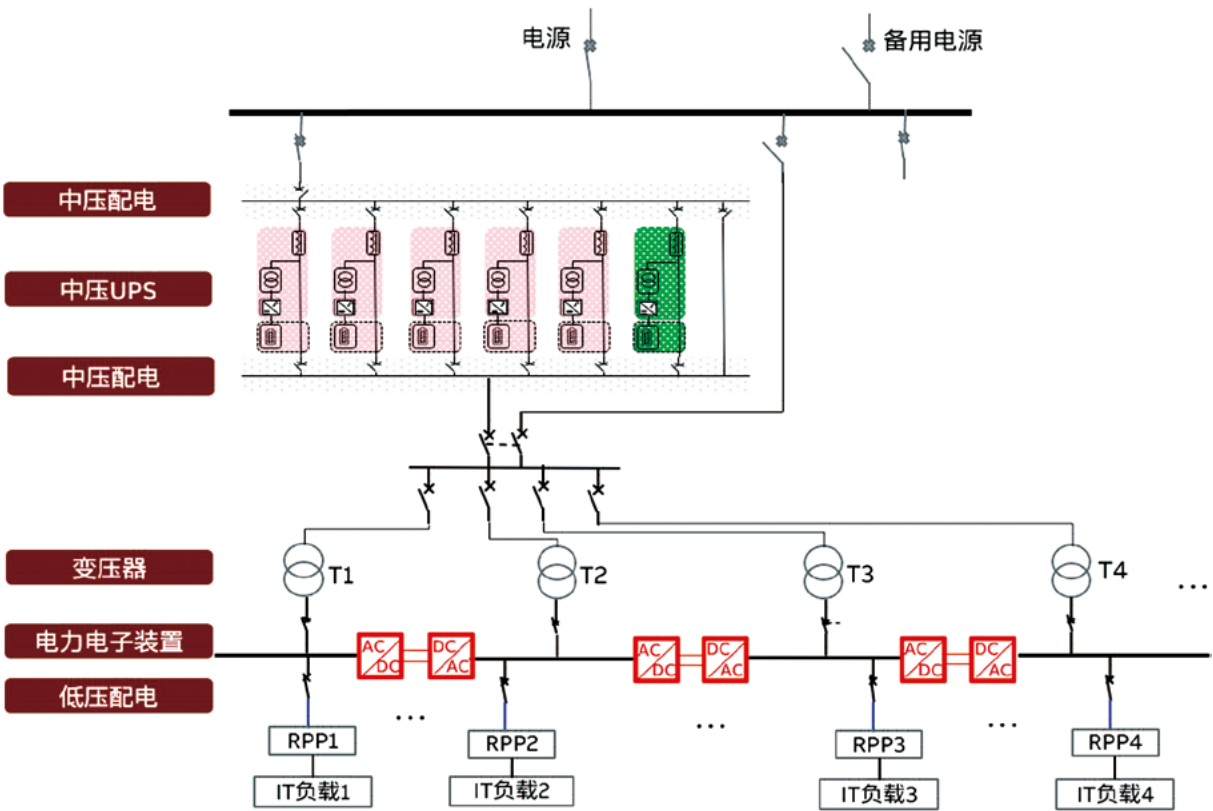


图 9-6 数据中心供配电架构

二、共享能源、创新架构，优化高冗余配置，从资产源头减排

数据中心供配电架构，需针对高备用电源点进行优化，以创新的电力电子技术实现结构调整及能源共享，优化冗余备份。其架构示意如图 9-6：

1. 通过关键电源前置，简化低压配电环节，减少配电资产投入，释放机房空间

中压 UPS 采用户内或户外模块化部署结构，基于负载需求进行阶段性部署；也可与变压器进行一体化模块设计，进一步减少配电层级；

“高供高计”取代“高供低计”，有效减化低压区域分散计量；

针对具体机房谐波环境和无功负荷情况采用高压补偿与就近补偿，解决传统低压侧集中补偿无法满足数据中心感性负载和容性负载同时存在而出现无效的后补偿问题；

关键电源前置，可以有效减少低压配电的复杂性，简化 25%~30% 低压配电系统，使得低压侧分散进入负荷中心，提升机房利用率并增强维护便捷性，利于节能增效。以 10MW 数据中心为例，低压方案占地面积通过关键电源前置方式可以节省约 50% 机房室内空间。

2. 通过电力电子技术，实现能源共享，动态调整变压器负载率及 UPS 并网容量，减少高备用能源需求

通过电力电子换流器，将两段交流系统形成直流转

换互联，在直流区域内，基于潮流控制，进行能源共享及动态分配，将变压器的结余容量作为备用容量进行释放，实现变压器与负载所需容量在不同变压器之间的能源匹配。如每台变压器按 70% 带载设定，另三台变压器的结余容量可满足任一变压器故障时为其后端回路提供电能的需求，减少独立变压器及控制线路的冗余配置。以变压器能源的柔性调控，灵活应对现实负载接入与规划设计负载间的差异，提高能源使用效率，同时减少变压器回路的配置数据，减少资产投入。

变压器的上一级配电环节——中压 UPS，在负载率 50%~75% 时效率最高可达到 98%。为进一步减少损耗，能源控制过程需要增强 UPS 策略优化，在变压器与负载经济匹配的基础上，通过线路负荷预测对 UPS 并机进行调优，使其工作在经济负载率下，保持 98% 的高效运行，以全面提高能源部署灵活性及经济性。以相同规模的 IT 负荷为例，低压 UPS 配电系统假设 25% 时间运行在

25% 负载率下，50% 时间运行在 50% 负载率下，25% 时间运行在 75% 负载率下，通过 UPS 负载效率曲线计算其系统损耗发现，与中压能源共享 UPS 方案相比，在 UPS 单项上的系统损耗将减少 76.9%~83.5%。

能源共享路径打通，还将为柴发系统配置优化提供新路径。在新能源接入方案中，可以结合储能系统，对柴发系统进行优化配比。通过余量基线设定及能源轨迹跟踪，在市电停电时，结合当前负载需求，优先采用储能系统供应，减少柴油发电需求，进而减少柴油燃烧造成的碳排放增量。

三、通过数据中心全息管理，提高综合管理效率，从全生命周期管理中实现减排

无论是成本管理需求，还是碳减排社会责任的加持，目前数据中心对于能源内驱管理的需求越来越高。全息管理以能量流为管理主线，与信息流结合，

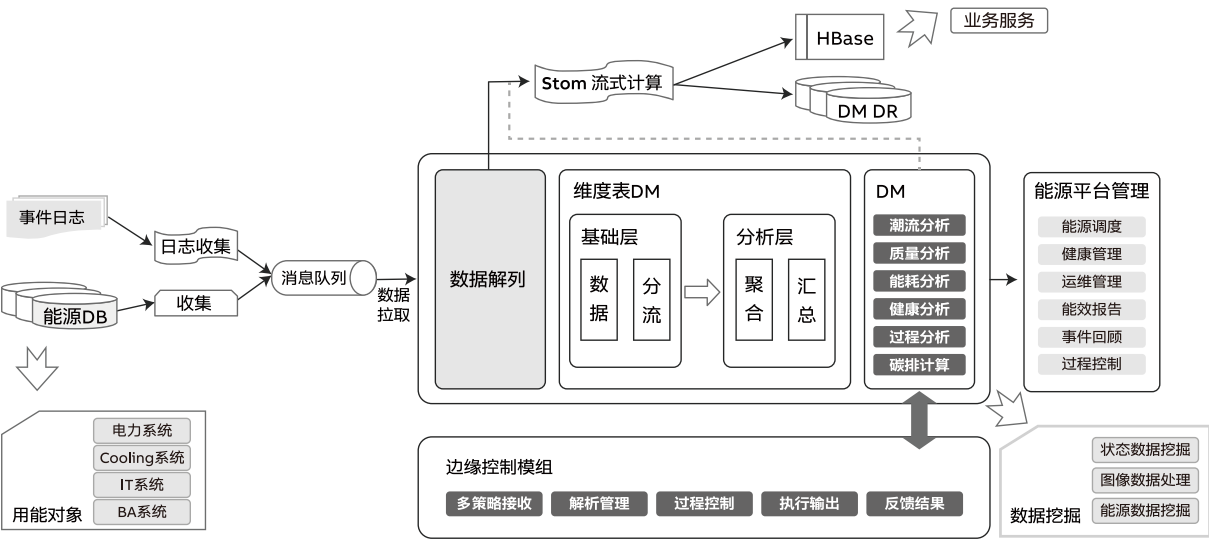


图 9-7 数据流架构

通过数据流建模，管理数据中心动力能源总脉络；通过边缘控制模组与中心管理平台，构建数据中心能源耦合体系，管理能源柔控、能效调优、健康监测、智慧运维、应急管理、过程控制、碳排放绩效等。

1. 对能源轨迹进行柔性调优

新能源接入，通过潮流分析、负荷预测及能源预测，部署能源调度策略，实现源、储、荷三维多对象的能源调控过程，验证能源接入的使用效率，并结合各维度碳排放影响因子，进行碳排放计算及绩效跟踪。

2. 对系统能效进行动态调优

从能耗机理模型出发，动态挖掘 IT 系统、冷却系统、供电系统间基于能源转化做功，建模能源消耗间的匹配关系，优化 PUE。投运后的数据中心，大部分电能被服务器等存储运算设备消耗，同时 IT 设备也需要运行在一个稳定的环境。根据数据中心数据流的各组成部分，如回路负载容量、冷源消耗与制冷量、电源电池余量、运行的服务器数量位置等建立一套机房能耗模型，然后根据这些变化进行水系统及制冷系统输出的动态调整，可最大程度保证 IT 设备高效率运行，降低能耗。

3. 对配电系统进行全链路监控

对数据中心供配电系统提供全链路的监测与监控，从中压到低压、配电柜到 UPS、列头柜到 PDU 直至末端分支，对链路上的设备进行精确的测量与监控。比如对数据中心的电气设备采集、传输和监测设备内置的电气参数（如电流、电压、频率、有功、无功和视在功率和电能、功率因数、峰值因数、谐波、磨损率等），将电气系统的各项电气参数深度可视化是数据分析的基础之一，也是安全运行管理的重要保障。



4. 对配电设备进行智慧运维

针对供配电设备提供实时健康监测，生命周期内全方位的预测性维护，取代传统的预防性维护，主动预测失效风险，提供基于状态的运维建议，实现真正的智慧运维，做到用数字化技术改变现状并面向未来。预测性维护指以来自设备的信息和管理平台的数据模型为基础，所有设备持续执行自检，以提高设备运行的连续性和可靠性，延长设备的使用寿命和原有的更换周期，大幅降低生产制造这些设备所产生的碳排放。

5. 对运维人员进行实训演练

平台智慧管理过程也需要兼顾人员培训能力。通过为数据中心运维人员提供线路故障、设备故障、操作故障模拟并进行应急演练，提高应急事件处理能力，减少在发生实际故障时因应对不力造成的额外损失（如操作失误造成供电意外中断、事故范围扩大、设备损毁等），减少不必要的碳排放。在智慧管理过程中，巩固和提升运维人员专业技术水平及维护能力。

数据中心全息管理可以提高能源、资产、人员的协调统一，持续发展，并在全生命周期中贯彻系统安全运行、能源高效利用和人员健康。

未来已来： 创新技术奠定减碳基础

以可持续发展为目标，数据中心行业正在国家政策的引导下向高效、清洁、集约、循环的绿色低碳方向发展。不断涌现的创新技术为新型数据中心转型奠定了良好的基础，其中，数字化创新技术以其更新迭代的发展特点开创了数据中心能源供给及管理的新路径。

一、基于 IoT 技术，通过数字孪生，实现健康感知、隐患识别，提高设备风险管控能力

基于 IoT 技术的发展，从老化机理出发，通过传感部署以及算法优化，构建配电设备的数字孪生模型，实时监测配电设备的健康数据，动态评估健康状态，精准识别健康隐患并针对隐患进行预测性维护，全面降低设备故障风险，延长设备“浴盆曲线”，提高其可靠性，为数据中心供配电架构简化提供基础，从而打破传统的配电设备管理瓶颈，化解无法精准把握配电设备的劣化进程，以及受限于运行过程可检测手段所造成的运维效率及风险管控能力相对低下的问题。

二、基于数字化通讯技术、优化数字化保护功能，提高配电系统自知自愈能力

数字化通讯技术助力实现配电系统的自知自愈，灵活应对配电系统的不同运行工况，对配电系统进行实时监控、精准计量以及无盲区保护。在关键电源

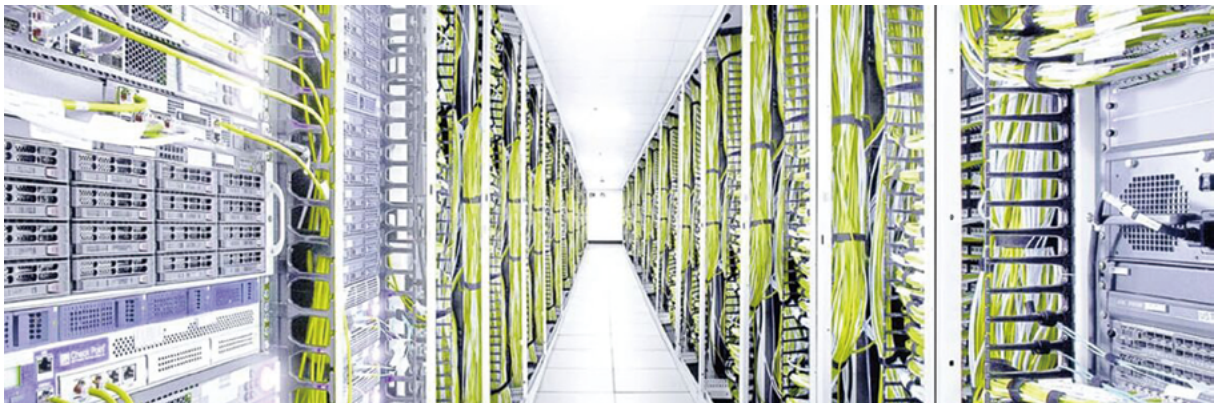
前置方案中，供配电架构将全面简化，但中压配电部分的运行工况较传统方案略为复杂，需要更为全面的保护能力。通过 IEC61850 改变传统信息交互方式，通过优化保护触发逻辑、部署预案机制、将分布式管理与集中监控相结合，实现任何工况下线路故障的精准识别，40ms 快速定位故障，200ms 迅速隔离故障并恢复系统供电，全方位提高配电系统自知自愈能力。同时纵观整体配电系统，通过数据架构层的过程管理，针对系统故障进行过程回顾，为不同系统故障提供事件诊断参考，辅助决策。

三、智能电网柔性交互技术，实现能源共享，提高能源使用效率

ABB 依托电力电子技术的进步和在配电领域的专业积累，采用基于 IGBT 的静态变流器，构建配电网柔性直流互联解决方案，实现了异源互联，闭环运行，潮流可控和互济，均衡负载，减少冗余及变电站建设，充分释放电网 100% 容量。

ABB Ability™ 综合能源管理系统以柔性直流配网技术为主，结合传统交流配电，采用分布式及模块化设计，支持微网的分期部署需求以及未来可扩展、可复制的长远目标。

- 优化利用新能源，即最大化新能源发电利用率
- 允许不同供应商的电力设备接入
- 保证离网运行模式下的系统安全稳定





可再生能源和数字化使我们开发利用、分配和消耗能源的方式发生根本性变化。唯一可以确定的是，新技术将不断超越想象，助梦想照进现实。不断涌现的创新技术，也为数据中心能源供给和管理模式的转型奠定了基础，使其沿着可持续发展的目标，积极探索绿色低碳的未来。

结语

数字产业化、产业数字化、数据正成为数字经济发展的主要支柱，新型数据中心作为“双碳”愿景下的重点行业，将在高效、清洁、集约、循环的绿色道路阔步前行。ABB 也愿与各界同仁通过技术创新共同助力数据中心早日实现碳中和的发展目标。

致谢

本白皮书由 ABB 电气出品。

ABB 主要参与编写人员

蒋 英 艾 睿 多 鹏 纪朝阳 李新宇 刘建成 刘 阳
邱 杰 阙福恒 宋 健 苏君平 苏丽华 王彬彬 王大江
王海东 王 童 王永芳 肖春华 杨 希 殷 雯 宇 民
苑成博 张 峰 张丽娜 赵 馨

白皮书编制过程中也得到了多位专家的宝贵建议和指导，使内容的专业性和实用性得以提升。

鸣 谢（按照姓名字母排序）

陈 冰 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司
丁 聪 上海邮电设计咨询研究院有限公司
姜庆国 中国能源研究会配售电研究中心
李炳华 CCDI 悉地国际集团
刘 耿 上海电气科学研究所
徐辰波 美国绿色建筑委员会（USGBC）和绿色事业认证公司（GBCI）
严 兰 上海市城市建设设计研究总院（集团）有限公司
周伏秋 国家发改委能源研究院



联系我们

www.abb.com.cn

ABB（中国）客户服务热线

电话：800-820-9696 / 400-820-9696

电邮：cn-ep-hotline@abb.com

