

数字碳中和优秀企业实践 案例集 工业篇

(2024 年)

中国信息通信研究院泰尔终端实验室

2024年1月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

前 言

由二氧化碳等温室气体排放引起的全球气候变暖已经成为本世纪人类面临的最大挑战之一，及早实现碳中和、保护地球家园已达成全球共识。数字技术对碳中和具有重要促进作用，中国信息通信研究院面向钢铁、建材、石化化工及其他行业公开征集数字技术赋能碳中和的案例，经过公开征集、初期筛选等环节，最终在多项案例中遴选出 15 个典型案例，形成《数字碳中和优秀企业实践案例集 工业篇（2024 年）》案例集，为政府部门和企业推进工业脱碳提供有力借鉴和参考。

案例聚焦数字技术赋能钢铁、建材、石化化工及其他行业，遴选“减排效益好、示范效应强”的典型应用，从案例简介、技术应用、赋能效果等方面介绍应用案例，形成可复制可推广的路径模式，助推数字技术在工业领域的应用场景落地，助力我国新型工业化绿色低碳高质量发展。

目 录

一、背景概述	1
二、流程制造业：钢铁	2
（一）攀钢 5G 低碳智慧矿山方案	2
（二）宝钢股份数字化碳管理平台	5
（三）智能控制冶金感应加热技术及装备	7
（四）冷轧产线智慧排程系统	10
三、流程制造业：建材	14
（五）冀东水泥智慧能源管理系统	14
（六）华新水泥数字化管控中心	18
四、流程制造业：石化化工	20
（七）东明石化一体化能源管理与过程自动化	20
（八）石科院氢气资源高效利用技术	22
五、离散制造业	26
（九）华为数字化低碳供应链管理	26
（十）联想供应链科学减碳 ESG 数智平台	28
（十一）三菱电机碳中和战略与实践	32
（十二）施耐德电气端到端“灯塔工厂”	36
（十三）万帮数字“星星充电”移动能源网	38
六、数字产业	41
（十四）广东电信韶关数据中心 AI 节能调优及间接蒸发冷却技术应用	41
（十五）北京市气象局数据中心数字化节能减排	49

图 目 录

图 1 5G 低碳智慧矿山.....	3
图 2 一种用于大功率分时控制的逆变模组结构.....	10
图 3 规则引擎应用.....	12
图 4 多工序联动的一体化排程技术.....	13
图 5 智慧能源管理系统.....	17
图 6 华新水泥数字化管控中心.....	19
图 7 石科院氢气资源高效利用技术路线.....	24
图 8 以绿色低碳目标为牵引的供应链数字化.....	26
图 9 纸件标签信息上云.....	27
图 10 供应链 ESG 数智化平台功能框架.....	29
图 11 智能化绿色制造理念.....	33
图 12 生产管理与能源管理互联的智能化能源管理系统.....	34
图 13 面向工厂等需求侧的电动汽车充放电及分布式能源的智能管理系统.....	35
图 14 AI 节能平台架构示意图.....	42
图 15 液冷 AI 节能算法原理示意图.....	44
图 16 AI 节能算法拓扑示意图.....	45
图 17 AI 在线推理原理图.....	45
图 18 推理步骤图.....	46
图 19 推理决策的过程图.....	46
图 20 干模式运行示意图.....	47
图 21 湿模式运行示意图.....	48
图 22 混合模式运行示意图.....	48
图 23 45°C 温水水冷技术.....	50

一、背景概述

近年来，我国工业发展迅速，工业体系不断健全，总体规模不断扩大，工业领域节能提效工作取得积极进展，工业企业节能降耗成效显著。然而，工业依然是我国能源消费和碳排放的重点领域，其能源消费总量占全国能源消费总量超过60%。因此，工业绿色低碳转型成为我国实现碳达峰碳中和目标和新型工业化的必经之路。

当前，我国聚焦高端化、智能化、绿色化，深入推进数字化与绿色化融合创新，重点部署数字技术赋能全社会降碳。《信息通信行业绿色低碳发展行动计划（2022-2025）》将“赋能全社会降碳促达峰”作为重点任务之一，提出以各行业数字化、智能化、绿色化转型需求为导向，以产业绿色低碳转型、居民低碳环保生活和城乡绿色智慧发展等领域为重点，加快提升数字技术与垂直行业应用深度融合的服务供给能力，助力经济社会数字化绿色化转型。《工业领域碳达峰实施方案》指出要推动数字赋能工业绿色低碳转型，强化企业需求和信息服务供给对接，加快数字化低碳解决方案应用推广。

随着数字技术的逐渐成熟，数字技术与能源、工业、交通、建筑、农业、城市等各行业的应用场景也日渐丰富，虚拟电厂、数字工厂、智慧出行、智慧医疗、智慧教育等应用场景层出不穷。在工业领域，通过数字技术优化生产工艺，模拟生产工序，自主完成最优物料配比、质量检测、入库出库等一系列工序，避免能源资源浪费，提高能源资源利用效率，达到环保设备效率最优化、生产制造效率最佳化的生产效果。

从本次征集的应用案例来看，主要聚焦数字技术赋能钢铁、建材、石化化工及其他行业中的优秀企业降碳，选取的案例其成果已落地并具备代表性，其中包含案例简介、技术应用、赋能效果等方面。形成的《数字碳中和优秀企业实践案例集工业篇（2024年）》，以期为政府部门和企业推进工业脱碳提供有力借鉴和参考，助力我国工业绿色低碳高质量发展。

二、流程制造业：钢铁

（一）攀钢 5G 低碳智慧矿山方案

1. 案例简介

攀钢集团矿业有限公司，始建于上世纪 60 年代中期的三线建设时期。作为攀钢高炉冶炼的主要原料供应基地，公司拥有钒钛磁铁矿、白云石矿等矿山。2022 年生产铁精矿 1336.28 万吨、钛精矿 150.56 万吨、冶金辅料矿 83 万吨，铁精矿产量位居全国前列，钛精矿产量持续保持全国第一。

在“双碳”的推动下，传统矿山如何在加快数智化转型步伐的同时，进一步体现“绿色”与“可持续发展”是当前矿山发展面临的重要问题。攀钢联合华为打造 5G 智慧矿山项目，在实现钻机、电铲、矿用卡车单点智能化作业基础上，打通穿、采、运全流程的智能化，聚焦智能化生产、无人化物流、数字化运维、AI 质检、网络化协同及工业互联网平台建设等，提升安全生产效率，降低能源资源消耗，推进产业智能化、绿色化融合发展。



来源：攀钢集团矿业有限公司

图 1 5G 低碳智慧矿山

2.技术应用

在网络规划优化阶段，针对矿山办公网、控制网、视频网等多张矿山生产经营所需网络，对业务进行精准画像，按照整体架构进行网络规划，构建架构最优、传输资源利用率最高，机房空间资源最省、能源动力配套极简的 ICT 基础设施建设与网络演进方案。

网络优化与业务演进阶段，针对业务需求变化对矿山专网进行持

续调优，让矿山网络网随业动、精准高效。以多网合一为目标，最终打造出可实现无障碍覆盖的精准、极简、智能运作的目标网络。

ICT 基础设施建设部分，将绿色锂电、自然风空调与云化资源等绿色技术运用到矿山边缘数据中心和网络基础设施建设中，推出了绿色低碳的网络与边缘基础设施，通过“源（绿色电力）、蓄（绿色蓄冷）、用（智能用冷）”三元组，年度电费得到下降。

5G+OICT 融合实现矿山无障碍远程操控，支撑绿色矿山低碳、安全、智能、高效开采。华为通过利用 5G 技术大带宽、低延时和广连接优势，将为矿山生产各系统提供统一优质的通信网络，有效提高开采过程设备互联和人机交互能力，矿产资源开采实现高效智能化。通过矿山设备的智能化升级，用 5G 远控改造，将现场作业人工撤离生产现场，拉远到安全舒适的远程操控中心。

大数据+AI 加持，做好能源大管家工作，助力矿山经营的“智能管控”与矿山能源的“精打细算”。矿山清洁能源，如风、光发电受气候条件和环境因素的影响较大，具有强随机性、间歇性和波动性，难免会有能源浪费。通过矿山端边网云协同的数字化集成，让矿石流、能源流、数据流三江共入绿海，通过运用人工智能技术，实现复杂因素影响下的能源长短期预测和动态调度。

3. 赋能效果

在 ICT 基础设施建设方面，年度电费下降 20%，实现边缘数据中心绿色能源的高效使用。不止为企业节约了成本，更响应国家号召在环境保护，绿色能源使用的可持续发展上做出表率。

在矿山无障碍远程操控方面，实现矿山生产的“本质安全”，同时由于设备实现智能作业，矿工只需在旁监控其流程运作顺畅，一人可同时操控5台矿车，大大提高人工效率以及设备使用率。此外，基于5G的精确实时定位技术、设备到设备（D2D）物联通信技术，可实现精准定向开采，从而提高矿产资源开采品质。

在大数据+AI加持方面，引导电力系统达到源-荷互济，用AI实现矿山能源的“精打细算”。

（二）宝钢股份数字化碳管理平台

1. 案例简介

2017年12月全国碳排放权交易体系启动，2021年6月全国市场建成，2021年7月16日正式启动上线交易。首批纳入的为电力行业，宝钢股份目前尚未纳入全国统一碳市场，但已从2014年起陆续参与上海、湖北和广东三个地方碳市场。地方碳市场政策各不相同，碳排放核算规则不一致，碳配额价格不同，各市场之间无法通用，但各钢铁公司对于碳履约的财务处理方式相同。

宝钢股份数字化碳管理平台，基于工业互联网架构，构建于云边协同大数据中心上，集成各生产单元生产、质量、能源、环保排放、资源综合利用、运输、出厂、销售、检化验、财务等系统的海量实时数据，进行实时碳管理模型运算，动态跟踪公司各单元碳排放、实现基于数字化平台的在线双碳创新应用。

2. 技术应用

平台依托宝钢股份大数据中心，采用云计算、大数据、人工智能

等技术，汇集碳相关数据，覆盖公司全流程、全工序、全品种，包含碳核算、碳足迹、碳资产三大核心模块。

（1）构建组织碳核算框架，实现碳核算

企业碳核算是按照相关标准，对企业范围内碳排放的相关参数进行收集、统计、记录，并将所有排放相关数据进行计算、累加，得到企业温室气体排放总量的一系列活动。

（2）构建“LCA 产品碳足迹”管理功能

依据 LCA 方法论，采用矩阵运算法则，将 LCA 业务模型按照实际生产路径的顺序，代入 LCA 算法模型矩阵内部，进行多维度统一的 LCA 运算，生成 LCI 清单的元数据模型。使用物料平衡法对数据合法性进行校验，输出结果，全面评价产品对生态环境的影响，提供产品碳足迹。

产品碳足迹模块，实现了宝钢四基地厚板、薄板、硅钢、条材、钢管产品，明细到卷的产品碳足迹计算。基于海量的产品碳足迹结果数据及与之关联的生产过程活动数据，可进行丰富、灵活、多维度的碳足迹分析，支撑公司能源结构优化、产品降碳减排。

（3）构建“碳资产”管理功能

碳资产管理模块基于宝钢股份参与国内碳市场取得的经验，整合各级碳市场的碳排放交易系统、配额注册登记系统、CCER 系统、碳排放报告系统以及企业内部的碳资产管理信息，面向 11 家控排单元构建股份公司统一的碳资产及交易数据管理功能，为钢铁行业进入全国碳交易市场做好充分准备，支撑各基地及单元的碳排放履约过程，

降低碳履约成本。模块提供公司配额管理、排放管理、交易管理、履约管理过程中的信息查询、履约报告生成、交易及履约分析等功能，为股份层面内部交易协调、督导提供数据依据，实现碳资产数据滚动更新，实时监测配额盈缺。

3.赋能效果

碳管理水平：宝钢股份数字化碳管理平台遵循国际 ISO14064、ISO14067 等系列标准，依据 LCA 方法论建模，并首次对相关范围排放进行了核算；包含了组织碳、产品碳，是一套全面的企业“双碳”应用数据平台以及公司全品种的碳排放和碳足迹计算平台，完善了股份公司碳管理体系工作。

经济效益：数字化碳管理平台投运后，配合创新能源管理和节能技术提升，宝山基地吨钢碳排放强度从 2.16 左右下降到 1.98 以下。按宝山基地的产能规模推算，假设碳价为 65 元/吨，减少的碳成本约为 1.8 亿元。

（三）智能控制冶金感应加热技术及装备

1.案例简介

目前钢铁生产过程中对连铸坯补热、热轧板热处理加热、冷轧连退过程加热、冷轧硅钢补热等基本采用燃气炉的形式进行加热。随着国家“双碳”政策的实施，钢铁行业作为能耗和排放大户，面临的碳排放压力越来越大，因此寻找更清洁的能源替代传统的燃气炉是减少碳排放的最有力途径。以绿电作为钢铁制造过程的主要能源，实现全产线的电气化应该成为适应能源结构转型的未来方向，其中，感应加

热代替传统燃气炉加热是全产线电气化转型的关键。

感应加热技术主要是通过交流电产生的交变磁场，交变磁场在被加热工件上形成了交变感应涡流，工件内的感应涡流形成焦耳热从而加热工件。相对于传统的燃气炉，感应加热以电能为能量来源，因此可以极大地提高能源利用效率，减小碳排放，更精确的控制加热功率。上海宝信软件股份有限公司“智能控制冶金感应加热技术及装备”开发致力于更贴合现场使用环境及生产工艺的装备。其中感应加热电源技术的感应加热全数字锁相器及其应用方法、横磁感应加热温度均匀性自动调整等方面进行深入研究，不断推出具有自主知识产权的创新产品。

钢铁生产过程中感应加热技术应用场景众多，不同场景下对感应加热装备的要求存在很大差异。因此，需要根据不同应用场景，设计和制造适用于各种材料和工件的感应加热设备。开发高能效、低能耗的感应加热装备，以减少能源消耗和环境污染。通过优化加热过程的控制算法和设备结构，提高能量利用率和加热效率，减少能源浪费和二氧化碳排放。

2. 技术应用

（1）实施路径与方法

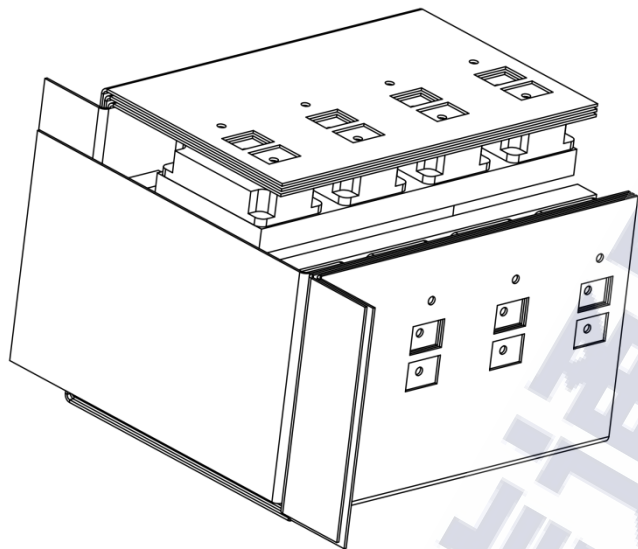
明确感应加热应用场景，根据不同应用场景进行感应加热装备的个性化设计。感应加热装备主要包括：感应加热器、感应加热电源及控制系统。

（2）应用场景和关键技术

感应加热技术及装备的关键技术有：

①感应器：针对不同的应用场景，感应加热器要求各异。如中间坯边部加热对感应器耐温性要求极高，感应加热器必须具备自适应调节功能应对中间坯的变形；冷轧连退炉段的感应加热其除了需要耐温性能高，还必须具备较高的密封性。因此感应加热器的设计必须综合考虑结构、电磁、高频电流及高温等综合条件。

②感应加热电源：感应加热电源的关键技术在于逆变模组设计及感应加热电源的功率控制。在 100KHz 以下的应用场景，IGBT 因其耐压性能，相对于 MOS 管和 SiC 管，在大功率电源中有很大的优势。但是 IGBT 的开关频率超过 50KHz 时，开关损耗会大幅增加，对电路板的驱动功率需求大幅增加，功率输出也会大幅降低。为了扩大 IGBT 在高频的应用场景，需对 IGBT 采取并联和分时控制的策略，分时控制的思路是通过多管并联的交替开断实现负载频率数倍于 IGBT 的开关频率，在该过程中，各模组间的均流及其重要。图 2 所示是一种多管并联的逆变模组结构，基于叠层母排的三明治结构使得模组间的杂散电感和线路损耗大大降低，更有利于多模组并联的实现。



来源：上海宝信软件股份有限公司

图 2 一种用于大功率分时控制的逆变模组结构

3.赋能效果

节能高效：相比传统的加热方式，感应加热设备能够更快地将能量传递给工件，加热速度更快，能耗更低。以热轧板回火感应加热为例，传统燃气炉效率为 50%，感应加热效率 80%，因此吨钢能耗降低 30%。

环保：感应加热采用电能为能源来源，加热过程中无污染物及二氧化碳排放。

精确控温：通过传感器和反馈机制，设备可以根据工件的温度变化进行实时调整，提高加热过程的稳定性和一致性。

（四）冷轧产线智慧排程系统

1.案例简介

在冷轧产线的生产过程中，不合理的物料生产接续将导致机组断带，影响机组产能的发挥。为避免断带现象的发生，计划员往往会使

用无合同的返回卷作为过渡料。这样的处置虽然保证了机组正常生产，却由于引入了无合同的物料，导致机组发挥了无效产能，计划既低效，又浪费能源。而现状往往是生产计划人员在繁多的订单要求、流向要求、生产规程、物料位置约束下，仅靠人脑与经验很难在短时间内编制出综合最优的作业计划。亟需借助智能化手段，解决生产计划排程问题。

上海宝信软件股份有限公司采用“业务机理模型+AI技术”的模式构建冷轧产线智慧排程系统。系统功能贯穿排前、排中与排后生产计划全生命周期。基于AI算法的排前决策分析技术能智能识别排产场景，推荐排产策略，使计划安排更全局。基于业务机理模型与AI技术的机组智慧排程模型自动排定钢卷的生产时序，为机组生产低碳、顺行提供了保障。在一体化排程技术的支撑下，多机组能够协同排产，既能降低库存，又能发挥产能。规则引擎也帮助客户实现了排程业务知识的系统化管理与传承。

基于业务机理模型、AI技术、规则引擎技术与一体化排程技术构建冷轧产线智慧排程系统。该系统在湛江钢铁实施后，生产计划自动化率超90%。助力湛江钢铁在节能减排、计划管控效率、订单交付、现货发生率、产能发挥、在制品库存等关键指标全面优化。

2. 技术应用

（1）实施路径与方法

① 基于规则引擎技术实现排程模型可配置

冷轧产线智慧排程系统通过规则引擎技术将生产计划排程业务

管理中的规程、经验与知识转换为数字化规则，为系统提供业务知识数据支撑。规则引擎技术的应用在实现生产计划规程数字化的同时，也实现了如“高耗电量产品错峰生产”等业务规则、排程场景的灵活配置与扩展。



来源：上海宝信软件股份有限公司

图3 规则引擎应用

② 共创排前决策分析技术实现排程智能决策

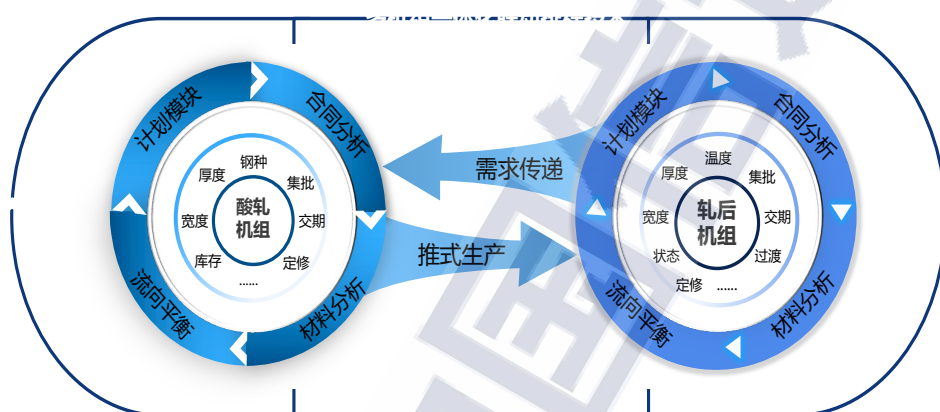
冷轧产线智慧排程系统总结归纳生产管理人员排前排程环境与选料的业务知识并结合 AI 算法，创新实践排前决策分析技术，针对合同、材料、库存、集批等与排程选料密切相关的要素进行多维度分析，智能推荐合适的排程策略。

③ 由传统算法升级为 AI 算法，大幅提升机组排程准确性

机理模型充分考虑如何有效发挥产能，避免产能浪费等低碳要素与规格跳跃、工艺集批等机组排程业务要素，构建在“碳中和”背景下与冷轧生产管控业务高度适配的排程系统。在智能排程机理模型的基础上，采用深度学习等自学习技术，回归分析各机组品种产能基准、各机组排程规程与排程策略，提升了排程结果的准确性。

④由单机组排程升级为一体化排程，实现多机组协同优化

业务团队与技术团队密切合作，创新实践出冷轧区域多工序联动的一体化排程技术，采用虚拟、实物相结合的方式以及推拉式的排程策略，实现了前后工序生产计划的协同排程。该技术的应用降低了轧后库的在制品库存，缩短了合同交付周期，使湛江钢铁冷轧区域生产计划编制质量大幅度提升。



来源：上海宝信软件股份有限公司

图4 多工序联动的一体化排程技术

(2) 关键技术

①通过规则引擎技术实现业务知识数字化

传统的排程技术依靠生产管理人员的排程经验构建排程算法，排程经验在算法中以定制化代码的方式实现。通过将规则引擎与排程系统结合，实现生产计划规程数字化，既大幅提升排程系统的可配置程度，满足排程多场景的需要，也实现了生产排程业务知识的传承与优化。

②通过“业务机理模型+AI技术”实现生产计划低碳化

系统采用“业务机理模型+AI技术”的方式构建排程算法，通过

预分析模型识别存在的过渡缺口，提前预留好必需的过渡料；使用排程模型对作业计划的规格、工艺等过渡进行优化、合理安排物料生产顺序。

③通过一体化排程技术实现多机组计划联动化

传统的排程系统通常针对单机组排程构建而成。宝信软件冷轧产线智慧排程系统实现多工序联动的一体化联排，该技术能够统筹各机组的规程、库存、集批、合同要素，助力钢铁企业实现低库存、低成本、高效率生产与少人化计划编制。

3.赋能效果

节能减排：以湛江钢铁硅钢退火机组为例，单月返回卷使用量较系统投入前减少了近 500 吨，降低了无效产能。每年节约 419 吨标准煤，减少了 285 吨碳排放，实现碳减排。

经济效益：以 2020 年为例，冷轧产线智慧排程系统在湛江钢铁产生经济效益达两千余万元。

三、流程制造业：建材

（五）冀东水泥智慧能源管理系统

1.案例简介

唐山冀东水泥股份有限公司（下称冀东水泥）是北京金隅集团股份有限公司控股的大型国有上市公司。业务范围涵盖水泥制造、固废处置、技术咨询、现代信息服务等。截至 2021 年底，共有 109 家子公司，产业布局国内 13 个省（直辖市、自治区）和南非，熟料年产能 1.1 亿吨，水泥年产能 1.7 亿吨，位居全国第三、世界第四。

水泥生产线主要能源介质为煤、电、水、压缩气、柴油等，需要抄录生产系统电表数据并通过这些数据简单计算出了生产线各工序总用电量及单耗用电数据，企业没有对生产线煤、压缩气、水、油、烟气排放（环保）、质量、生产信息等数据进行记录，无法做到及时有效的能源数据异常分析判断、能效分析、用能指导等功能，能源管理单一粗放化。需要通过建设能源管理系统，实现煤、电、水、压缩气、柴油等能源数据的监控、分析、统计、管理等功能，为企业提供全面的能源采集、能源管理、统计分析和优化用能决策，实现能源管理的自动化、信息化，达到节能降耗的效果。

冀东水泥根据不同生产企业的实际情况，以准确的能源计量为基础，将能源控制管理与生产调度控制有机结合，通过对生产线、工艺、设备等能耗数据的对比对标分析管理，为改善用能结构，优化生产工艺过程，以及技改技措的实施提供可靠依据。

公司总部层面通过对下属生产企业用能情况的实时监控，提高工作效率，强化公司对能源的管控力度。通过能源管理系统建设，最终实现总部和各生产企业双层能源管理水平的有效提升，达到安全稳定、经济平衡、节能减排、优质环保的基本目标。

2.技术应用

（1）实施路径与方法

能源管理系统建设应用由公司统一规划设计，统筹组织建设，以能源利用过程为主线，以能耗数据采集、存储、统计分析及进一步比对为基础，实现能源精细化管控，匹配生产，安全供能，优化用能结

构，提高调度掌控能力。

具体方法如下：

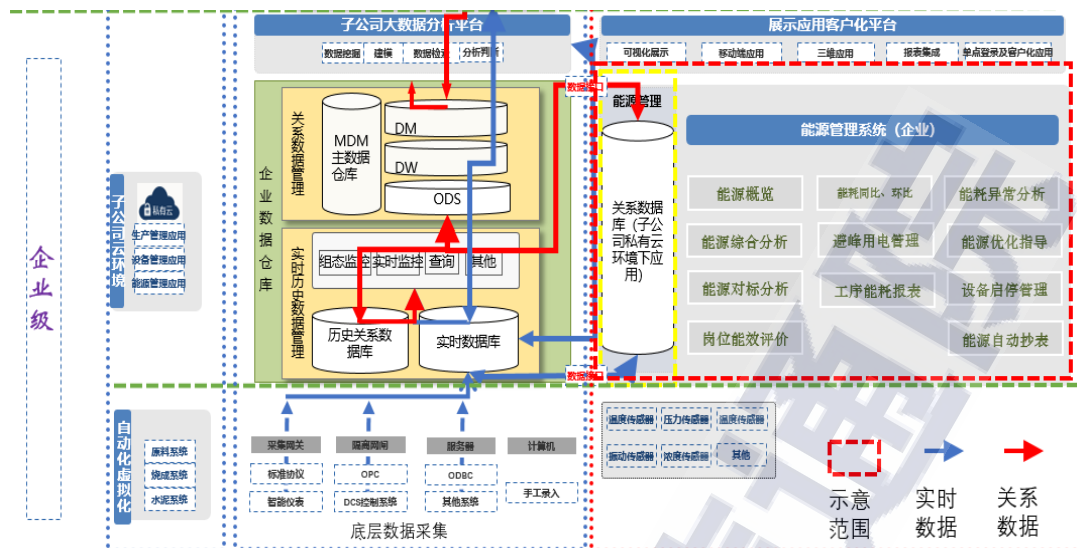
①能源介质计量仪表电能表、水表、压缩空气表等安装，通讯电缆铺设，远传通讯调试。

②数据资源集成采集。厂区内现有的 DCS 控制系统数据信息、能源介质电、煤、水、气、油数据、质量数据、烟尘排放环保数据、产量等数据进行采集集成，建立数据采集服务器和实时数据库服务器，实现数据资源共享。

③能源管理系统软件平台搭建。结合公司现场实际情况、建设一套满足公司实际情况的能源管理软件平台。主要包括实时监控子系统、能源管理子系统、能效分析子系统、用能指导子系统，移动端访问等。

（2）应用场景和关键技术

能源管理系统是支撑公司能源管理领域工作深入开展的抓手，能源管理系统包括数据采集与存储管理、生产过程监视、综合统计、指标分析统计对标、诊断优化等能源管理功能；帮助生产企业实现能源数据的集中管理、能耗周期统计、能源使用过程监视、能源利用效率评价及对标考核、能效优化指导等应用管理；通过系统的数据挖掘和关联追溯分析特性，确保能源管理从整体到局部、从结果到过程、从异常现象告警到原因分析，直到责任部门岗位的透明可视、准确、全面、实时，为生产企业界定节能职责、挖掘节能潜力、制定节能改造方案提供辅助决策数据支撑。



来源：唐山冀东水泥股份有限公司

图 5 智慧能源管理系统

3.赋能效果

精益化管理：能源管理系统将生产、能耗、质量等相关数据、工艺参数等自动采集后，按照管理人员分析问题的思维方式进行数据梳理和展示，帮助管理层及时高效获取数据，快速追溯问题根源，落实各级责任，实现精益化生产管理。

决策科学性：能源管理系统实现生产、能源管理的精确监控管理，及时、准确、全面、系统地了解生产详情及能耗分布使用情况，科学分析各类生产问题，提高决策的科学性。

能耗节约：单体企业按照能源管理实施前，生料分步电耗 14.42kWh/t,熟料分步电耗 28.61kWh/t,水泥分步电耗 32.44kWh/t。能源管理系统实施后，主要对生料、熟料、水泥的主要用能设备耗能情况进行监控，出现异常耗能情况，及时预警，进行量化分析，并采取相应技术及管理措施，原料、烧成、水泥三个工序实现电耗降低 1.5%

左右，生料分步电耗可降到 14.2kWh/t 左右，熟料分步电耗可降到 28.18kWh/t 左右，水泥电耗可降到 32.0kWh/t 左右。

（六）华新水泥数字化管控中心¹

1. 案例简介

华新水泥股份有限公司（下称华新水泥）创始于 1907 年，被誉为“中国水泥工业的摇篮”，其主要的业务涵盖了水泥、混凝土、骨料、环保、装备制造及工程、新型建筑材料等。公司在国内 12 省市及海外拥有分子公司 270 余家，水泥年生产能力已达到 1.1 亿吨，为中国制造业 500 强和财富中国 500 强企业。

作为水泥行业领头羊的华新水泥，把握机遇，率先开始数字化转型。华新水泥在华为云的助力下，通过核心业务应用全面数字化、IT 与 OT 融合，构建横向到边、纵向到底的数字化体系，以数据驱动业务，在激烈的市场竞争中取得优势。

通过信息化管控集成应用，华新水泥打通了管理层、生产执行层直至生产现场的信息通道，使得企业业务流程得以优化；生产数据的实时上传为合理调度、均衡生产提供了强有力的支持，使企业生产效率得到较大幅度的提高。

华新水泥数字化转型实践，最大程度实现了水泥生产与工业互联网融合，生产智能化和运营管理数字化项目，使企业的信息化管理由局部应用走向全面综合应用，由粗放管理变为精细管理，从而显著提升企业的管理水平和综合竞争能力。

¹ 摘自“中国建筑材料联合会”公众号，网址 <https://mp.weixin.qq.com/s/BA9b8-tZWqIC-jsWmV4-A>

2.技术应用

华为云首先通过数据平台，搭建了华新水泥统一的数据平台，理清该企业的数据资产，进一步统一定义、数据标准和规则，并确定唯一的数据源。在数据确定后双方对华新水泥整体进行方案设计，分别进行分层架构和集成方案设计，数据模型、数据标准、数据质量规则、数据指标、数据服务接口设计，并最终开发实施。

通过不断的数字化建设，华新水泥已实现对各类数据的钻取、展现、分析、预警，达成对未来的分析优化，真正起到以数据驱动业务的作用，数据管控中心的为各级单位和部门提供业务数据服务和分析工具，实实在在服务于执行层面各业务决策。



来源：华新水泥股份有限公司

图 6 华新水泥数字化管控中心

3.赋能效果

生产效率：在工业互联网和数字技术的帮助下，华新水泥智能工

厂 50 名工人就可以完成万吨生产线的全部工作。而同样规模的传统生产线，需要 300 人以上。通过智能化升级改造，华新水泥行车生产效率提升 30%，质检生产效率提升 20%，巡检效率大幅提升，生产一线可以减少用工三分之一以上。

环境效益：通过技术升级和智能化改造，部分水泥生产线污染物排放量较原来下降 60%，单位熟料热耗下降 40%，碳排放强度下降 12%。

管理运营效率：实施智能制造系统后，华新营销数字化在线平台水泥及熟料销量占公司总销量的比例高达 95% 以上；通过采购数字化平台可降低采购综合成本 10%~20%；智慧物流发货系统，发运效率提高 100%，客户满意度比原来提升了 16.5 个百分点。

四、流程制造业：石化化工

（七）东明石化一体化能源管理与过程自动化

1. 案例简介

“十四五”时期是我国石油化工有限公司转型升级和高质量发展的关键时期。面对全球能源变革及“双碳”目标，如何加快数字化转型与低碳工艺革新成为石油化工企业面临的时代考题。山东东明石化集团有限公司（下称东明石化）作为地炼龙头企业，更是承担着带动产业数智化与可持续发展的重任。而施耐德电气在能源管理和自动化领域的积累与实践让两家企业开展合作。

通过绿色低碳，助推东明石化“双碳”从规划到落地。施耐德电气从全局思维出发，为东明石化提供契合现状、符合长远定位的顶层

战略规划与行之有效的“双碳”落地路径，由能源使用与能效优化切入，以标准化配置的配电产品及数字化技术打通从设计、建造到运营、维护的全流程，逐步提升东明石化全生命周期减碳的绿色表现。

基于 EcoStruxureTM 架构定制数字化方案，打通能源管理与自动化。基于 EcoStruxureTM 架构与平台，施耐德电气为东明石化提供了一体化能源管理与过程自动化（EcoStruxure Power & Process），通过安全可靠，互联互通的元器件、边缘控制系统与应用、服务和分析产品，全面提升东明石化运营效率、经济效益与绿色收益。在施耐德电气 AVEVA 先进过程控制系统和 AVEVA 工艺实时优化技术的助力下，东明石化 500 万吨/年的原料预处理装置自控率水平由原先不足 50% 大幅提升至 98% 以上，保证装置始终运行在最优化点上，区别传统“经验主义”操作方式，实现“数字化的精耕细作”。

2. 技术应用

施耐德电气通过全生命周期陪伴式服务，护航“安、稳、长、满、优”。结合双方在电气技术、自动化技术层面与工艺及项目层面的专长，在数字化工厂建设及运营的全生命周期范围内，施耐德电气深度参与其中，如在工程立项初期，参与到与设计院的对接工作中，在设计阶段及时发现问题并提供专业建议。在建设过程及后期运营中，更是起到至关重要的作用，如 AVEVA 先进过程控制系统与 AVEVA 工艺实时优化是流程工业的“精益操作”，从手动“大开大合”变为自动“小幅精调”，需要及时提供各种分析化验数据，供系统及时优化计算。施耐德电气在系统上线之后，提供全程陪伴式服务，分班次培

训操作人员，释放数字化技术与管家式服务的更大价值。

AVEVA 数字化智能化解决方案全方位保障各个项目的供电可靠性以及项目建设运营、维护效率。如先进过程控制及在线实时优化组合方案能够稳定装置生产，提高安全性，节能降耗。

基于 EcoStruxure 三层架构提供运营一体化解决方案，东明石化运营效率和经济效益显著提高。安全可靠，互联互通的元器件实现了底层数据的采集/互联互通，为数据驱动运营优化打下基础，提升基层数字化水平，为一线员工减轻负担；边缘控制软件优化了过程控制、安全控制、管线监控等一系列领域的运营表现。

3. 赋能效果

成本节约：AVEVA 数字化智能化解决方案根据进料和产品价格，优化生产，调整产品结构，一年时间即可回收投资成本，之后每年成本节约不低于 1000 万，实现成本节约。单装置预计年化经济效益超过 1000 万 RMB。

碳减排效益：施耐德电气从全局思维出发，为东明石化提供切合现状、符合长远定位的顶层战略规划与行之有效的“双碳”落地路径。从能源使用与能效优化切入，借由数字化工厂 AVEVA 软件解决方案实现了相当于每年万吨级的碳减排。

（八）石科院氢气资源高效利用技术

1. 案例简介

中石化石油化工科学研究院有限公司（以下简称石科院）是中国石化直属的石油炼制与石油化工综合性科学技术研究开发机构，创建

于1956年。石科院以石油炼制技术的开发和应用为主，注重油化结合，致力于炼油、石油化工、石油产品、新能源、资源循环、环保、新材料和智能化八大领域的研究，正在向全方位的以炼油为主、油化结合的能源型研发机构转变。

石科院拥有自主知识产权的石油炼制全流程技术平台，是国内炼油企业主要的技术提供者，具备支撑和引领现代化炼油厂建设、生产和发展的综合能力。石科院以打造世界一流的绿色低碳能源化工科学研究院为发展愿景，为石化行业高质量低碳发展提供全方位技术支撑。

基于石科院对临氢装置工艺机理的深入认知，结合人工智能和过程系统集成优化技术，构建了氢气资源高效利用技术平台。从制氢装置原料优化、临氢装置节氢管理、氢气资源回收利用和氢气网络整合优化四个关键环节入手开展氢气系统集成优化技术，实现氢气资源的梯级高效利用和精细管理，提高全厂氢气利用效率，最大程度降低装置氢耗、系统能耗和二氧化碳排放。利用氢夹点分析技术与氢气网络数学规划模型，优化分配和综合利用氢气资源，提高资源利用效率，助力企业低碳高质量发展。

2. 技术应用

利用氢夹点分析技术，诊断炼化企业氢气系统当前运行状况，挖掘系统用氢瓶颈，深度分析节氢潜力及优化方向，提供氢气流股优化匹配规则；

对加氢装置进行严格模拟，开展用氢装置节氢管理，将加氢装置的反应动力学模型耦合于氢气网络优化模型之中，实现氢气网络与用

氢装置协同优化，集成优化氢气分配网络和加氢装置的最佳操作条件；

构建氢气网络超结构数学规划模型，在实际约束限制下优化设计氢气网络拓扑结构。混合整数非线性规划模型可综合考虑压力约束、逻辑限制、提纯和压缩单元数学模型、投资成本和回收期等约束，以年度总成本最小为目标函数，充分权衡节氢量、投资成本和操作成本三者之间的关系；

结合炼化企业总图布置，考虑管网压力、区域加氢装置氢气消耗特点，综合权衡工程投资成本和操作运行成本，充分依托现有氢管网进行优化改造，实现氢气网络集成优化。



来源：中石化石油化工科学研究院有限公司

图7 石科院氢气资源高效利用技术路线

具体的氢气资源高效利用优化策略包括两个层面，分别是装置层面和系统层面。装置层面的优化策略主要是针对耗氢装置、产氢装置和氢气提纯回收装置开展的诊断分析与优化。耗氢装置的优化思路主要包括：耗氢装置的操作优化，耗氢装置的氢气配置优化，耗氢装置高低分操作压力和操作温度优化以及耗氢装置换热网络优化。产氢装

置的优化思路包括：制氢装置制氢原料的优选以及制氢装置二氧化碳的捕集。氢气提纯回收装置的优化思路包括：PSA/膜分离装置操作条件优化（包括压力、处理量、回收率等），PSA/膜分离装置产品氢气纯度优化以及原料气的选择优化。

此外，通过构建加氢装置的机理模型或数据驱动模型，可以进行加氢装置的原料优化、产品性质预测、操作条件优化和节氢管理。将其与全厂氢气网络优化模型相耦合，可以充分考虑临氢装置原料、工艺条件与产品质量要求，从根本上解决装置用氢变化后对氢气网络造成的影响。此外，可以将装置用氢变化所带来的产品分布收益加入到目标函数中，将产品硫、氮、金属含量指标加入到约束条件中，从而实现包括油品收益在内的炼油厂收益最大化。

3.赋能效果

石科院针对 Z 炼厂开展氢气系统诊断与优化，现阶段优化措施以优化降低氢气系统能耗为主，开展氢气-燃料气系统协同优化，预计降低炼油能耗 0.8kgoc/t 原料；中长期优化方案以提高氢气利用率为主，优化产用氢，加大氢气资源的回收利用，提高全厂氢气利用率 8 个百分点，实现碳减排 16.1 万吨/年。

石科院针对 C 炼厂开展耦合加氢装置模拟的氢气系统集成优化，现阶段氢气系统优化方案可提高全厂氢气利用率 1.5 个百分点，实现二氧化碳减排 1.2 万吨/年；中长期氢气系统优化方案可提高全厂氢气利用率 3.8 个百分点，实现二氧化碳减排 3.1 万吨/年，同时实现了轻烃资源与氢气资源的综合回收利用。针对 A 炼厂提出采用“膜分离预

提浓+PSA”工艺回收全厂氢气资源的方案,可回收 9187Nm³/h 氢气,提高全厂氢气利用率 5 个百分点,实现碳减排 6.6 万吨/年。

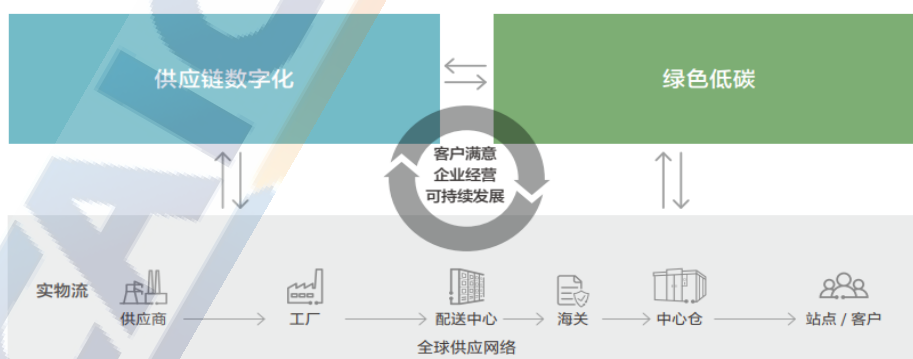
五、离散制造业

（九）华为数字化低碳供应链管理

1. 案例简介

华为全球物流体系覆盖了 170 多个国家、300 多个物流仓储节点、超过 4 万条的运输线路,以及船、飞机、铁运、汽车及快递等全球各种运输方式。

华为供应链负责华为产品的原材料获取、生产制造、运输及派送交付给客户,碳排放始终伴随着供应链的价值流全过程。为此,华为设计了基于实物流的碳核算架构以开展碳足迹管理。结合华为供应链数字化转型的实践,提出了供应链“绿数成赢”(Green Digital Win-Win)的低碳供应链理念。供应链数字化和绿色低碳是供应链业务的一体两面。企业供应链在开展数字化转型的同时,也通过提升效率、降低成本实现了碳减排。



来源：华为技术有限公司

图 8 以绿色低碳目标为牵引的供应链数字化

2.技术应用

为了给供应商减碳提供便利，华为通过分析供应商的送货路径，针对 140 多个电子制造服务商(EMS)和协同设计制造管理商(JDM)等生产伙伴的货物往返节点，精确规划送货路径，优化华为接收节点，减少车次及里程。供应链通过生产指令驱动高效制造和实物流转，生产指令的精准性会直接影响用电能耗和碳排放。结合 AI 算法进行指令均衡性管理，通过关联性数据分析发现，每提升 1%的生产均衡性，能耗降低约 1.2%。

经过体系化标签设计、数字化标签内容，将二维码和条码纳入到必要标签，通过扫码调用标签信息的方式获取关键内容，将更多信息存储在华为云中的专用数据模块，从而减少实物标签粘贴。



来源：华为技术有限公司

图 9 纸件标签信息上云

3.赋能效果

ISC+数字化供应链转型降低了实物的生产能耗、优化了运输路径

里程、减少了资源消耗，提升了原材料直送到工厂的比例，减少了运输里程以及原材料仓库面积，折合减碳 34.5 吨。同时，数字化业务过程的无纸化为公司和伙伴节省了大量的纸张，减少了树木砍伐。据核算，该优化举措每年可帮助华为节约包装、包材纸张约 9,995 万张，减少碳排放约 330 吨/年。

（十）联想供应链科学减碳 ESG 数智平台

1. 案例简介

联想集团（下称联想）是一家成立于中国、业务遍及 180 个市场的全球化科技公司。联想聚焦全球化发展，树立了行业领先的多元企业文化和运营模式典范，服务全球超过 10 亿用户。联想作为全球领先 ICT 科技企业，秉承“智能，为每一个可能”的理念，为用户与全行业提供整合了应用、服务和最佳体验的智能终端，以及强大的云基础设施与行业智能解决方案。

随着 ESG 理念的加速普及，对企业 ESG 管理提出了更高要求，但过往 ESG 相关数据存在收集方式原始、数据缺失、数据连通性低等问题，联想供应链 ESG 数字化平台上线，为数据的实时共享、端到端数据可视化提供了解决方案，从环境、社会、公司治理三个方面展示数据和及其合规性，便于企业及时识别风险、解决问题。

根据 ESG 数智化建设分阶段的工作内容，供应链 ESG 数字化平台的核心目标可总结为：建立集中的 ESG 数据管理门户，形成数据驱动的见解，以实现闭环 ESG 管理，提高 ESG 团队工作效率，加强全球供应链 ESG 品牌，并将全球供应链的 ESG 管理经验转化为产品，

赋能行业与社会，在 ESG 领域为联想全球供应链构建起一套市场领先的管理平台。整个平台将会作为业务的控制台，收集并整合来自联想全球供应链上下游的相关 ESG 数据，提升日常的工作效率，减少人力成本。



来源：联想（北京）有限公司

图 10 供应链 ESG 数智化平台功能框架

第一层：源头数据采集。数据主要来源于内部及外部两部分：平台内接 ERP、采购、供应商、物流等系统获取内部主数据；平台外接行业数据库或第三方系统收集外部大数据用于数据分析。

第二层：跨职能数据池。基于第一层经过初步处理的数据，进一步将其划分为供应商、物流供应商、产品、运输数据池，为各模块的 ESG 数据计算提供必要信息。

第三层：数据建模与流程管理。在数据池基础上进一步数据清洗，建立数据模型，以供业务单元（供应商、物流、产品、制造基地）使用。在本层建立 ESG KPI 可视化报表，展示 ESG 指标的达成情况（如合规性、风险控制及碳管理等等），对数据进行有效的闭环管理和进

度监控。

第四层：智能数据决策。基于平台下三层基础功能，细分智能应用场景，提供分析决策。如通过模拟计算，将减少全供应链碳排放这样的大指标拆解到每一个业务模块中，以便更精细化进行分析和决策。

2.技术应用

（1）实施路径与方法

基础建设阶段：着手建设供应链 ESG 数字化平台，将分散无序的数据汇集至各模块的数据池，通过平台串联起各 KPI 指标，增加数据可视性，打好平台数据基础。在此阶段，重点保证联想内部数据的准确性和有效性。

精益求精阶段：在上一阶段基础之上，将 ESG 管理范围继续扩大，关注到供应商等外部数据的准确性和有效性，帮助供应商提高数据核算准确度。在此阶段，联想关注实际产出值和理论目标值之间的距离，以及行业竞争对手和生态合作伙伴数据，设定明确细分的目标，缩小差距提高效率。

赋能行业阶段：在协助供应商准确核算数据后，联想将进一步协助供应商的减排工作。在此阶段，联想真正实现了数字化平台对 ESG 的赋能，利用数据驱动智能决策，从而最大化地提升管理效率。

（2）应用场景

从业务角度来看，ESG 数字化平台可以将概念化的理念或者目标，具象到每个业务场景，通过对业务场景中的具体数据进行线上化管理。从技术实现角度，借助系统的图表配置，用户可以快速实现看

板内容更改，不需要个性化开发；借助系统的工作流配置，可以支持系统快速匹配业务场景，输出对应的管理流程。该系统可以有效帮助企业开展数据采集、分类管理、数据分析等工作，快速提升企业 ESG 管理水平，降低全球供应链 ESG 相关潜在风险，同时带动供应链上下游企业整体的绿色数据管理的提升，推动全价值链的可持续发展。

（3）关键技术

①工业互联网

通过工业互联网技术对联想自有工厂以及联想 ODM 工厂、建筑等大型设施的环境指标、供应链信息、模具使用情况和产品生命周期，人员管理、安全管理、信息管理等方面数据获取，提高企业治理的透明度和效率，降低管理成本和风险。

②人工智能

人工智能协助联想进一步优化端到端供应链，从而达到降低产品能耗，提升效能并减少碳排放的目的。在应用人工智能的基础上，联想将进行不同应用场景下的多目标优化模拟，改造生产线路以提高资源利用效率。

③隐私计算

隐私计算是一种安全的数据处理方式，能够在保护数据隐私的前提下进行数据共享和分析。隐私计算的应用将帮助联想在保护供应商数据隐私的前提下，进行数据分析和评估，从而更好地管理和改进供应商的 ESG 表现，提高联想自身的 ESG 治理水平。

3. 赋能效果

碳减排成效：联想集团持续使用 ESG 数字化管理平台，引导和带动上下游产业链共同行动，合力减少碳足迹。2021/22 财年，联想集团采购目录内 94% 的供应商对其温室气体排放数据进行了第三方验证，92% 的供应商有公开的温室气体减排目标，78% 供应商跟踪并报告可再生能源生产和购买情况，28% 的供应商加入科学碳目标倡议，联想集团的长期目标是 95% 的供应商能够参与科学碳减排活动。

供应链管理：ESG 数字化平台基于供应链数据中台、可视化分析工具，帮助客户整合端到端数据，打造绿色供应链，提升管理效率、推进绿色发展。

社会效益：以数字化为核心的技术革命，可对经济转型和低碳发展起到重要作用。ESG 数字化平台针对遍布全球各地超过 2000 家供应链企业，通过数据真实性、准确性、完整性和及时性管理降低 ESG 潜在风险和出海绿色合规成本，并通过数字化、智能化技术加速产品、企业及供应链 ESG 治理，助力中国碳中和转型。

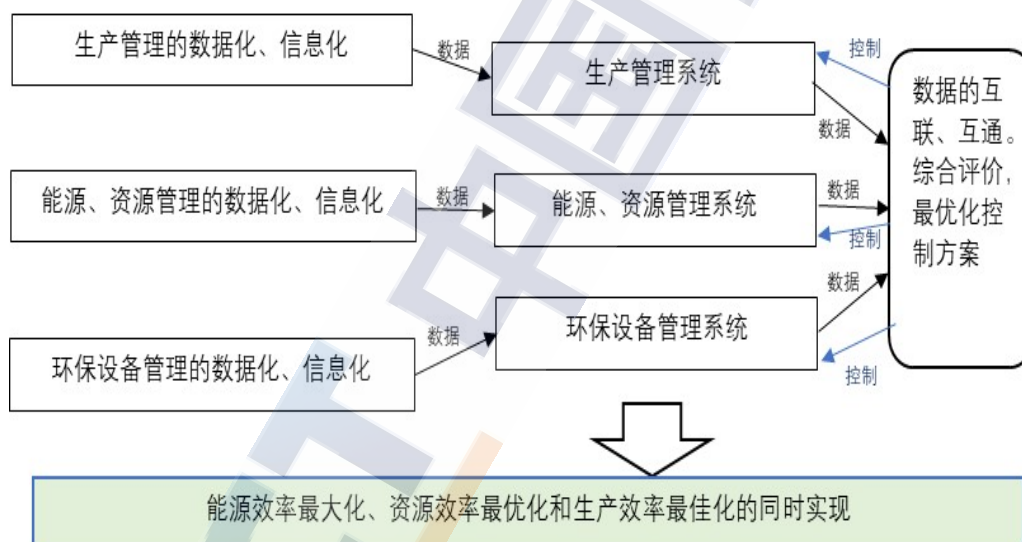
（十一）三菱电机碳中和战略与实践

1. 案例简介

三菱电机集团（下称三菱电机）成立于 1921 年，是一家具有百年历史的世界 500 强企业。三菱电机秉承“Changes for the Better”的企业宣言，为实现可持续发展与安心、安全、舒适性并存的富足社会不懈努力。三菱电机是引领全球市场的电机产品供应商。作为一家跨国企业，在百年的历史中，始终致力于尖端技术及专业领域的研究、开发与制造。主要从事信息通信系统、电子元器件、重电系统、工业

自动化系统、汽车零部件和家用电器等业务，并在卫星、高端制造等领域处于世界领先地位。

我国制造业的电力使用量约占全国总用电量的 70%，提高能源效率是制造业迫切需要解决的问题。三菱电机提出了运用信息通信技术实现绿色制造的智能化绿色制造理念，并通过具体实践事例探讨了智能化绿色制造的实现方法和课题，力求为我国制造业的绿色转型和碳中和提供思路和解决方案。智能化绿色制造是指利用信息化、智能化技术促进绿色制造，解决绿色制造实施中的问题，达到能源和资源效率的最大化、生产效率的最佳化，实现真正意义上的绿色制造。



来源：三菱电机集团

图 11 智能化绿色制造理念

三菱电机率先在中国倡导推进智能化绿色制造综合解决方案 E-JIT，E-JIT 是 Environment & Energy Just in time 的缩写，该解决方案将生产管理系统、能源管理系统、环保设备管理系统互联、在大数据分析的基础上持续改善生产效率、能源资源效率，有效推进碳中和。另外“电动汽车充放电及分布式能源智能管理系统”提高了电力系统

的稳定性并减少了电力设备的固定资产投资，降低了工厂的电力成本。

2.技术应用

应用实践 1：运用智能化能源管理系统实现制造现场的节能

三菱电机自动化机器制造(常熟)有限公司在生产实践中运用 E-JIT 智能化绿色制造理念,开发并导入了智能化能源管理系统(图 12)。该系统采用自主开发的控制软件和可编程控制器等工业自动化产品,充分结合互联网技术将生产计划与系统联动,使用温湿度传感器和电能监测模块实时收集制造现场的温度、湿度、照明、电压、电流及用电量等数据,并根据生产计划和数据分析的结果实时控制制造现场的空调、加湿器、除湿机、空压机的运行。



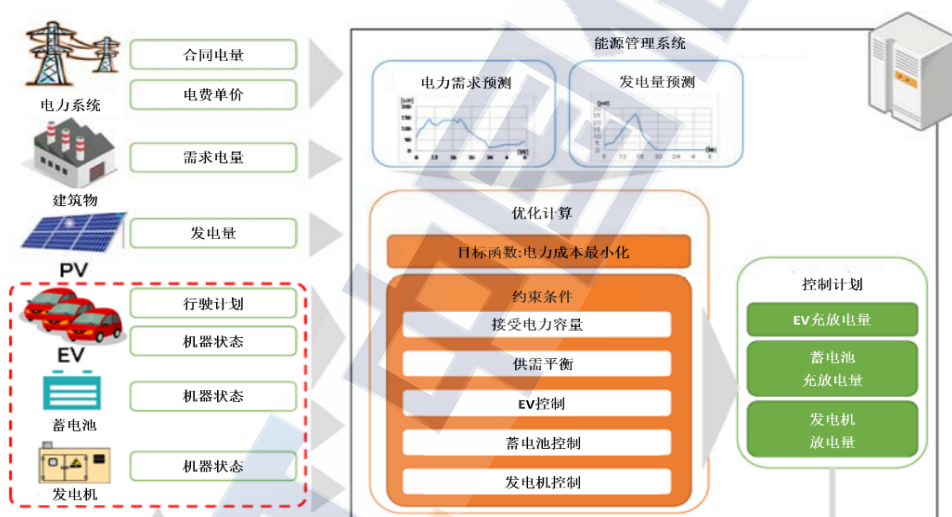
来源：三菱电机集团

图 12 生产管理与能源管理互联的智能化能源管理系统

应用实践 2：电动汽车充放电及分布式能源智能管理系统

三菱电机汽车部件(中国)有限公司导入了“面向工厂等需求侧的电动汽车充放电及分布式能源的智能管理系统”(图 13)。综合利用分布式能源和电动汽车(EV),以互联互通的形式集成到能源管理系统

中，能源管理系统通过人工智能对 EV 的充放电实行最优化控制。随着 EV 的普及，大量 EV 充电时会给电网系统带来巨大的压力，导致电力短缺以及电网系统的不稳定。另一方面，光伏（PV）等分布式能源的发电量受天气变化影响较大，供应不稳定，大量的分布式能源并网会导致电网系统波动，引发电网系统安全问题，造成资源的严重浪费。三菱电机将 EV 作为工厂的蓄电池加以利用，并与分时电价单价联动、预测 PV 发电量，优化 EV 的充放电时间表，实现用电负荷曲线的“削峰填谷”。



来源：三菱电机集团

图 13 面向工厂等需求侧的电动汽车充放电及分布式能源的智能管理系统

3.赋能效果

应用实践 1：三菱电机自动化机器制造(常熟)有限公司通过一系列工业自动化与 IT 技术结合的措施，确保制造现场在保证合适的生产环境的前提下，使能源消耗处于最合理的状态，消除不必要的能源浪费。自 2015 年系统导入以来，工厂整体的能源使用效率提高了 10% 以上，单台产品制造用能降低了 27%。该工厂于 2019 年被工信部认

定为“国家级绿色工厂”。今后该工厂计划积极推动 E-JIT 解决方案的应用与持续改善的实施，通过持续提高能源效率和扩大可再生能源利用等方式逐年削减绿色电力证书的采购量。

应用实践 2：三菱电机汽车部件(中国)有限公司的“电动汽车充放电及分布式能源智能管理系统”提高了电力系统的稳定性并减少了电力设备的固定资产投资，2019年导入后约降低了工厂 5% 电力成本。

（十二）施耐德电气端到端“灯塔工厂”

1. 案例简介

施耐德电气是一家拥有 185 年历史的世界 500 强法国工业巨头，服务于工业自动化和能源管理这两大领域。施耐德电气推动数字化转型，服务于楼宇、数据中心、基础设施和工业市场。施耐德电气通过集成世界领先的工艺和能源管理技术，从终端到云的互联互通产品、控制、软件和服务，贯穿业务全生命周期，实现整合的企业级管理。

施耐德电气中国区有 23 家工厂，始建于 2001 年的无锡工厂是唯一的一家电子能力制造中心。施耐德电气无锡工厂也是施耐德电气在中国获评的首家端到端“灯塔工厂”。2021 年 9 月 27 日，施耐德电气无锡工厂收获了一块沉甸甸的“金字招牌”——“灯塔工厂”。世界经济论坛（WEF）当日发布新一期全球制造业领域“灯塔工厂”名单，施耐德电气无锡工厂榜上有名。

针对以“碳中和”为主要议题的气候变化挑战，施耐德电气做出了一系列承诺，将减排范围从自身向整个价值链拓展，减排效果从碳中和向净零排放递进，从而加速可持续发展进程。无锡工厂以组装生

产小批量、多品种产品为特点，在精益制造和数字化转型方面长期处于领先地位。此前，无锡工厂已成为施耐德电气的“零碳工厂”，工信部认证的国家级“智能制造标杆”和“绿色工厂”，获评端到端“灯塔工厂”彰显了无锡工厂以数字化提升效率、促进端到端减排等方面的卓越成就，为中国乃至全球制造业向绿色智能制造升级树立了典范。

2. 技术应用

在采购环节，数字化供应商系统生态圈可动态模拟、实时预测工厂需求与供应商产能，实现透明高效的自动化供应链管理。

在生产环节，工厂的智能柔性仓储解决方案充分实现仓储灵活度和效率提升，节省了仓储空间。工厂部署了 5G 柔性乐高生产线，可按业务需求快速调整生产布局。

在交付环节，施耐德电气以人工智能与大数据实现智慧包装，广泛采用绿色环保包材，加强循环利用和回收，并通过大数据算法为物流运输电动汽车规划最佳交付路线。

3. 赋能效果

生产效率：在采购环节，工厂的准时交货率提高了 30%。在生产环节，工厂的智能柔性仓储解决方案可节省仓储空间多达 52%。工厂部署的 5G 柔性乐高生产线，产线布局调整时间从几周缩短到一天甚至数小时，产品上市时间也因此缩短了 25%。

节能减排：在交付环节，加强了循环利用和回收，并通过大数据算法为物流运输电动汽车规划的最佳交付路线，显著减少能耗。

（十三）万帮数字“星星充电”移动能源网

1. 案例简介

万帮数字能源股份有限公司成立于2014年，长期深耕新能源汽车充电设备的研发制造。旗下的核心品牌之一，星星充电基于物联网与车联网技术，为全球客户打造充电全生命周期平台。星星充电占地面积37,000 m²，厂房面积13,600 m²，产品线涵盖交直流设备、充电枪头、电源模块、智能电柜、换电设备等，掌握着智能控制、物联网、大功率定制等核心研发能力。基于物联网与车联网技术，星星充电兼具统一支付、交易管理、运营维护等多样化功能，打造了用户充电全生命周期平台，为全球客户提供设备、平台、用户和数据运营服务。

星星充电首创提出“移动能源网”概念，即借助于移动的交通工具、移动的能源载体、移动的补能设施和移动的通讯终端所构建的时空泛在能源互联网络。创新“云管端”即“硬件+软件+服务”的商业模式，堪称数字能源生态中国样本。依托于施耐德电气在供应链咨询和能源管理方面的专业经验和技術优势，构建高韧性、高效协同的供应链，并打造智能配电与光储充一体化管理，赋能星星充电效率提升与“低碳”升级。

2. 技术应用

星星充电秉持“一端能源互联，一端产业互联”的企业战略，致力于提高能源利用效率，促进结构调整和节能减排，助力新能源产业发展壮大，最终实现“推动人类交通电动化，引领全球能源数字化”的长远梦想，在其低碳升级构建“移动能源网”道路上聚焦以下方面：

提升隐患识别能力：在场站分布分散、设备运行环境优劣不一，关键回路缺少电力参数及温度监测，难以及时识别电气设备连接隐患的条件下，从管理与技术双线提升隐患识别能力，避免可能导致的电气火灾等情况。

构建运维管理工具：分散充电场站的配电设备构建运营工具，当配电设备发生故障时，运维中心及时接收告警且快速定位故障点。

建设统一能碳管理平台：实现监测和分析各场站的绿电消纳、储能充放电、电力成本、碳排放等，使得企业管理者和能源工程师提出的节能减排目标，难以在各充电场站落地。星星充电采用了绿电优先模式，会结合天气情况、光伏发电能力与用电负荷等，通过大数据与人工智能算法等，进行智能预测、分析、调度。星星能碳 SaaS 平台也是全国首个免费开放的碳盘查平台，由中国质量认证中心 CQC、TUV 莱茵、盟浪科技等共同打造，可提供免费碳排查、打通碳标准、共享碳数据、在线碳认证、自主碳交易、共建碳生态等全价值链数字化解决方案。

虚拟电厂完整发展路线设计：通过与电动汽车、云控技术的有机结合，星星充电还形成了包括参与调节电网功率、电力辅助服务市场、“源荷网储”互动、代理购售电等在内的、一条完整的“虚拟电厂”的发展路线，并在广东、江苏、浙江、山东、冀北、华北、上海、湖南、四川等多个省份参与了电网调节互动。

数字能源管理解决方案：基于 EcoStruxure 三层架构搭建，包含互联互通的产品，如 TH150S 无线单相温度传感器、物联网网关

PAS700、EasyLogic DM2000 多功能电力仪表、ComPact NSX 塑壳断路器、EasyPact EZS-S 塑壳断路器、TeSys Deca 电动机控制与保护、C9 微型断路器；边缘控制，如 POI+站控大师（EcoStruxure™站控大师）；以及应用、分析与服务，如 EcoStruxure™供应链顾问，POA-EM（EcoStruxure™ 配电运营顾问-能碳管理应用）。

聚焦移动能源网生产、存储、传输、管理、交易、消费 6 个链路产品全矩阵、全球标准、全栈自研，形成以充电网为主的星星充电品牌和以能源微电网为主的星星能源品牌，并全面开放充电网、微电网与虚拟电厂运营网，助力数字基础设施与能源基础设施建设。

3.赋能效果

能源效率提升方面，在能源的生产、传输、交易和管理等环节中最重要的是能源转换、传输效率提升，作为新能源领域较为综合的服务商，星星充电遵循技术驱动、规模化发展的路线，在产品研发上探索碳化硅等技术的应用，提高能源转换效率。

绿色电力交易方面，星星充电不止于满足客户对生产过程可再生能源的要求，在国内率先建设绿电交易平台、零碳充电站，并在多次公开活动，如星星充电年度的 828 低碳节中，对绿电使用进行推广，同时在 APP 上为用户提供减碳成果和绿电购买证书。

供应商减碳方面，星星充电目前正在探索向供应商推广可再生能源的使用，未来将提供服务帮助供应商完成光伏电站的建设。通过制定能效优化评估体系与碳减排路径设计，预计每年可实现约 674 吨碳减排，能碳管理平台充分赋能“低碳”充电站建设。

六、数字产业

（十四）广东电信韶关数据中心 AI 节能调优及间接蒸发冷却技术应用

1. 案例简介

中国电信粤港澳大湾区一体化数据中心项目位于韶关市高新区浈江产业园，占地面积为 98 亩。该项目（一期）项目总建筑面积约 9.5 万平方米，拟新建 4 栋数据中心、2 栋动力中心、1 栋算力交易撮合中心、1 栋设备房共 8 栋楼房及相应的室外工程，将建成满足通信、算力业务功能的专用建筑群。该项目定位为中国电信集团和省级通信网络枢纽，部署建设天翼云华南算力枢纽节点，汇聚粤港澳大湾区云、网、边能力，充分发挥算力资源集约共享优势，为大湾区乃至华南地区的政务服务、相关行业客户提供上云用云以及算力运营、管理、调度等服务。以打造全国一体化算力网络重要战略节点的制高点，成为全国一体化大数据中心绿色低碳创新样板标杆为目标，服务华南地区及粤港澳大湾区一体化大数据协同创新体系，铸牢粤港澳大湾区发展“数字底座”。

为了更好的提升能源效率，降低 PUE，该项目针对 A2 机楼部署一套 AI 节能调优方案，要求此方案能够对 A2 机楼约 576 个液冷及配套机柜，总功率 21000kw 的数据中心进行能效管理和节能优化，利用 AI 训练出数据中心的能效模型，根据当前室外工况和负载情况推理出最佳调优组合并下发至相应群控系统，对数据中心整个制冷系统进行实时调优，使数据中心送冷量曲线智能、精准、可靠地匹配贴合

需冷量曲线，从“制冷”变“智冷”，达到数据中心节能降碳的目的。

A1 数据中心一至四层机房采用间接蒸发冷却空调（AHU），最大化利用自然冷源，基于韶关气象数据全年自然冷却时间达到 50%以上。IT 设备终期规划冷负荷约为 14800kW，建筑冷负荷为 600kW，系统总冷负荷为 15400kW。其中一楼设置 2 个机房，AHU 空调按 6+1 冗余配置；2~3 楼每层设置 4 个机房，AHU 空调按 5+1 冗余配置；4 楼设置 4 个机房，AHU 空调按 4+1 冗余配置，AHU 空调合计 82 台。

2.技术应用

（1）AI 节能技术方案架构及流程图

AI 节能调优技术方案的整体架构如下图所示：



来源：华为技术有限公司

图 14 AI 节能平台架构示意图

主要包括以下关键要素：

①本地数据预处理系统（DCIM 网管系统）：主要负责数据采集及推理策略下发。通过采集器及群控系统，对数据中心的运行数据进

行实时采集，采集周期为 5 分钟/次。同时推理平台给出最佳制冷策略后，由本地数据预处理系统（DCIM 网管系统）下发至第三方群控系统执行。

②节能平台：含本地推理模块及节能维优模块。推理平台根据训练平台下发的能耗模型，结合实时的 IT 负载率、室外环境参数（温湿度等），给出最佳执行策略。节能平台可基于 3D 能耗模型对数据中心全供电链路能耗进行分层分级的实时展示和能耗诊断，对节能策略实行统一管理，呈现节能收益等。

③AI 模型训练与推理平台：将采集的海量数据进行自动化治理，利用治理后的高质量数据，通过神经网络算法，开展动态模型训练，生成数据中心能耗模型。

④底层群控系统及动环监控系统：采集制冷设备运行数据并上报给本地数据预处理系统，执行本地数据预处理系统下发的节能策略。

（2）AI 节能的算法原理

模型训练算法原理：

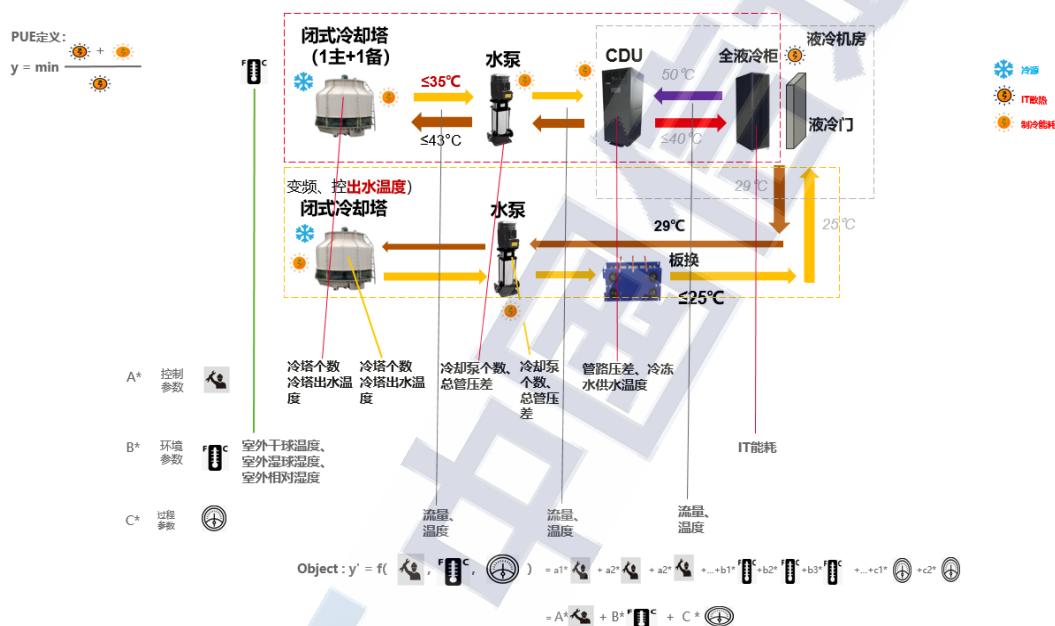
将 AI 建模所涉及的参数分为控制参数、环境参数和过程参数三大类，以下是关于这三大类参数的基本定义：

控制参数：是指系统所有可以直接设置、下发的参数，比如设备运行台数、CDU 出水温度设定、供回水压差设定、冷却水出水温度设定、冷却塔逼近度等。

环境参数：是指对系统能耗有强烈影响，但是不受系统影响的客观参数，比如室外温湿度、业务负载等。

过程参数：是指系统内部的一些观察参数，不能被直接控制，但是环境参数和控制参数变化时，会因这些参数的改变而明显发生变化的参数，比如水泵频率、水流量、压力等。

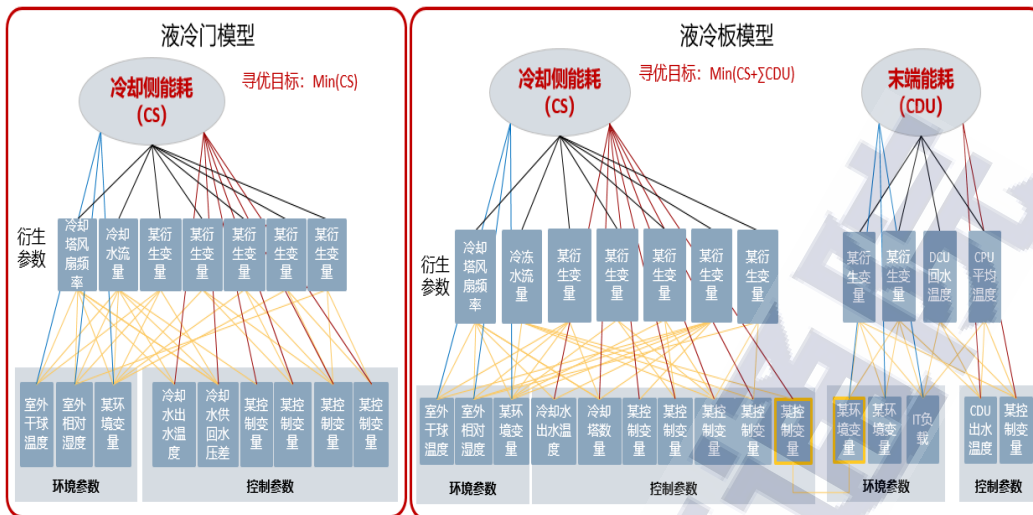
建模（构建训练）：收集所有的 X（控制参数、环境参数、过程参数）和能耗值 y，灌入神经网络，计算所有参数对能耗的系数矩阵，从而完成模型训练（主模型）。



来源：华为技术有限公司

图 15 液冷 AI 节能算法原理示意图

具体的算法拓扑原理图如下：



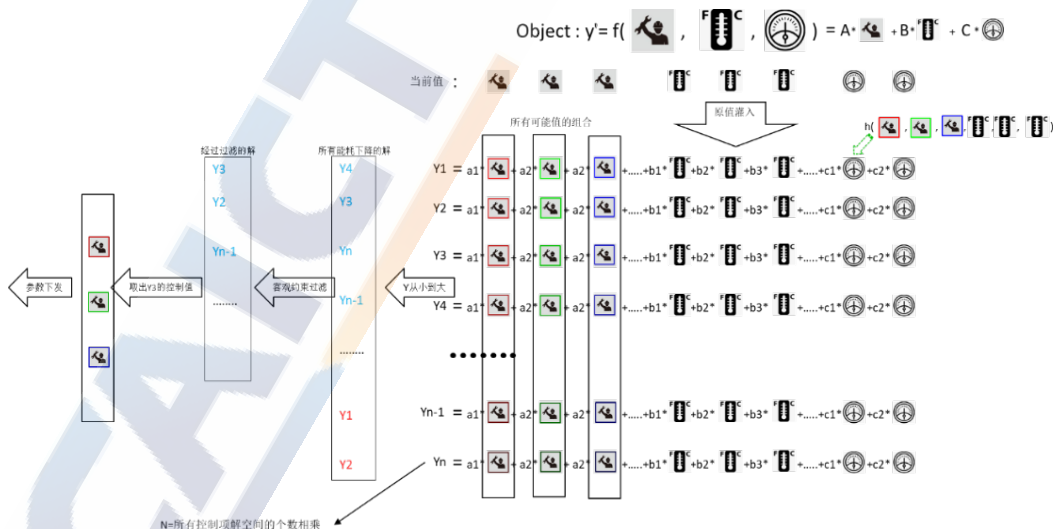
来源：华为技术有限公司

图 16 AI 节能算法拓扑示意图

在线推理算法原理：

在线推理使用遗传算法或者贪婪算法根据当前时刻环境变量同时将所有控制变量组合代入训练生成的能耗-变量模型计算能耗值，选取能耗最低的值对应的一组控制参数作为调优策略进行下发。

AI 推理的算法原理图如下：



来源：华为技术有限公司

图 17 AI 在线推理原理图

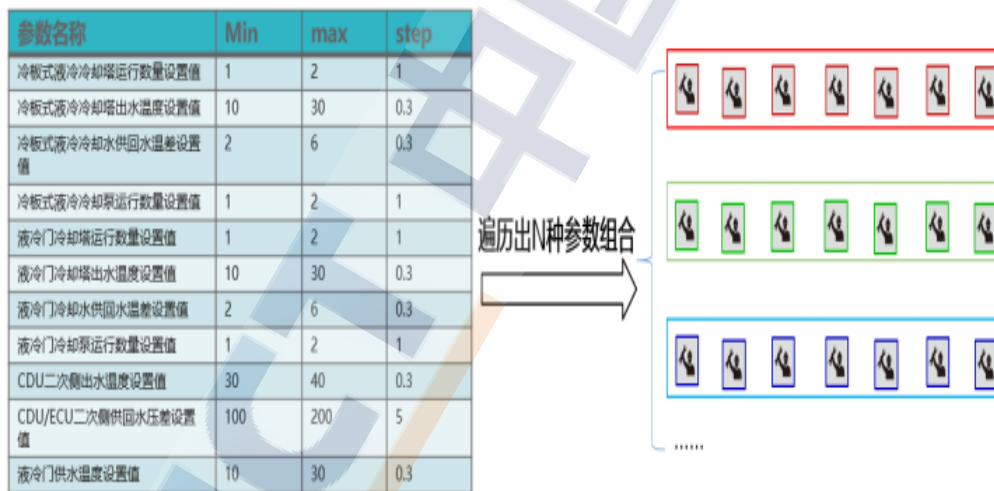
推理步骤如下：



来源：华为技术有限公司

图 18 推理步骤图

推理决策的过程如下图：



来源：华为技术有限公司

图 19 推理决策的过程图

基于制冷能耗的预测模型，获取与制冷能耗敏感的特征值，利用特征值，进行业务训练、给出业务的预测模型。主要是保障业务运行的 SLA，如冷量的保障等。

最后，利用系统可调整的参数作为输入，将制冷能耗预测模型，业务预测模型作为约束，利用寻优算法，获取调优参数组，下发到控制系统，实现制冷系统的能耗调优。

（3）间接蒸发冷却机组（AHU）技术方案原理

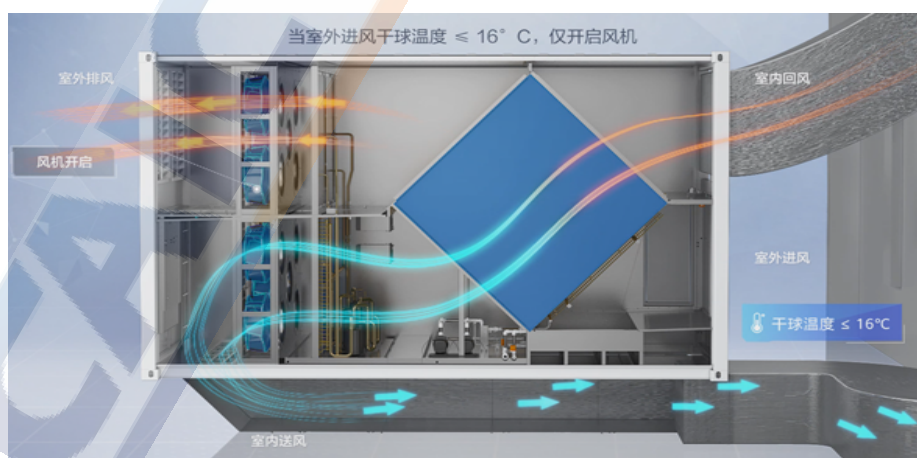
间接蒸发冷机组（AHU）是新型制冷方式设备，其采用间接换热技术，最大程度利用自然冷，降低数据中心 PUE。

工作原理如下：

间接蒸发冷却机组为整体式，在数据中心现场安装风管、水管及配电后即可投入使用，机组有三种运行模式，干模式：仅风机运行，完全采用自然冷却；湿模式：风机和喷淋水泵运行，利用喷淋冷却后的空气换热；混合模式：风机、喷淋水泵、压缩机同时运行。

控制逻辑及制冷原理介绍：

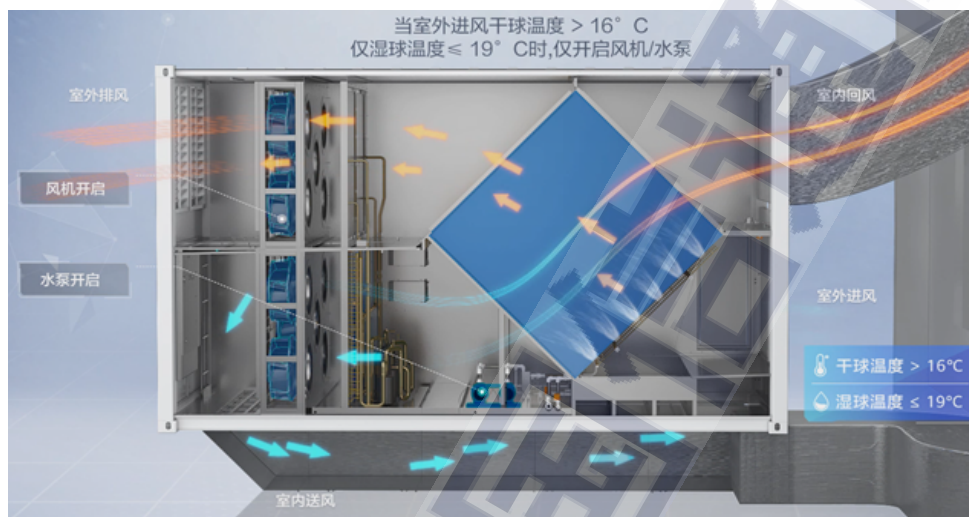
①干模式：在室外干球温度 $\leq 16^{\circ}\text{C}$ ，仅需要开启直流无刷 EC 风机，通过室外新风与室内空气交叉换热，利用自然冷源进行制冷，从而达到节能目的。



来源：华为技术有限公司

图 20 干模式运行示意图

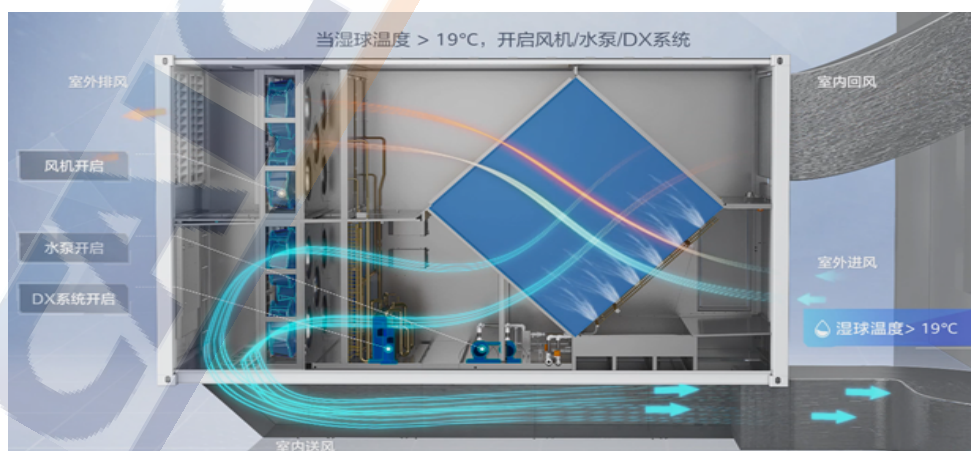
②湿模式：随着室外温湿度逐渐升高，在干球温度 $>16^{\circ}\text{C}$ ，且湿球温度 $\leq 19^{\circ}\text{C}$ 区间，优先开启水泵，进行雾化喷淋空空换热芯，利用水在蒸发过程中吸收室内空气的热量来进行制冷，从而达到节能的目的。其中，喷淋效率高达90%，且水泵功耗远小于压缩机功耗。



来源：华为技术有限公司

图 21 湿模式运行示意图

③混合模式：随着室外温度进一步升高，湿球温度 $> 19^{\circ}\text{C}$ ，进一步开启直流变频压缩机、电子膨胀阀等关键节能器件，根据负载需要，自动调整压缩机频率，实现高效节能。



来源：华为技术有限公司

图 22 混合模式运行示意图

三种运行模式可以结合气象参数和机组自身的特性曲线，结合智能控制，进行寻优调节，达到节能的目的。

3.赋能效果

本项目 A2 栋智算中心采用了 AI 节能调优数字化节能技术。可实现 PUE 从 1.21 降低到小于等于 1.15，能耗降低 5%，年节约用电量 1095 万度。相当于减少 3394.5 吨标准煤的消耗。A1 机楼采用间接蒸发冷却机组，全年自然冷却时间达到 50%以上，PUE 值小于或等于 1.25，相比同地域平均 PUE 为 1.45 数据中心，一年省电 2593 万度，相当于减少 8038.3 吨标准煤的消耗。WUE 值小于或等于 1.4L/kWh，相比采用传统冷冻水方案 WUE 在同地域达到 2.45 L/kWh，每年可以节水 13.6 万吨。

在项目落地期间形成的创新成果对数据中心节能降碳具有重要的指导意义，并可在其它同类型数据中心进行复制推广。形成自愈、自治、自优化的基础设施节能降碳方案，树立行业标杆，引领数据中心低碳标准。

（十五）北京市气象局数据中心数字化节能减排

1.案例简介

北京市气象局是中国气象局下属机构，也是北京市政府的工作部门。根据授权承担北京市行政区域内公众气象预报、灾害性天气警报、农业气象预报、火险气象等级预报等公共气象服务工作。气象预报号称是最复杂的数学计算，要用计算机在几分钟内解开无数道偏微分方程式，所以需要依托于强大的数据中心进行计算、预测。

在北京气象局，之前为了维持数据中心能够正常运转，每天需要耗电 20000 千瓦时来保持它工作需要的低温。传统的做法是用冷水降温，将 CPU 表面温度控制在 50 度之下，但冷水降温法耗电量大、水需求量大、管理成本高。北京气象局迫切需要一个能够提升数据中心 PUE 值的创新技术。联想自主研发的 45℃ 温水水冷技术为北京气象局提供了解决方案。

2. 技术应用

联想自主研发了 45℃ 温水水冷技术，用于降低数据中心能耗，该技术采用使用 18~45℃ 的去离子水作为冷媒，使用间接液冷方式，对服务器 CPU、内存、硬盘等主要部件设置微通道进行散热冷却，大幅度降低了空调用电和服务器风扇能耗，经热循环后的温水接近 60℃，还可回收热量用于室内供暖，在绿色环保和节能减排方面更具优势。



来源：联想（北京）有限公司

图 23 45℃ 温水水冷技术

3. 赋能效果

联想 45℃ 温水水冷技术通过减少对空调和散热器的需求，可节约 40% 以上的能耗成本，PUE 可降至 1.1 以下（PUE=1.1，相当于如果有 10 度电用于运算数据，只需要 1 度电用于散热），远低于国内大型数据中心平均 PUE 值 1.69。能源再利用效率 ERE 更是超过 80%。如果北京气象局核心业务计算能力提升近 20 倍的情况之下，一年减少用电近 200 万度，可供 1400 户普通居民使用一年。

中国信息通信研究院 泰尔终端实验室

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-68094183

传真：010-68094183

网址：www.caict.ac.cn

