

朔黄铁路：钢铁动脉的 ESG 密码：以重载创新技术驱动运输效能革命

摘要：在科技创新引领可持续、高质量发展的时代背景下，作为我国西煤东运第二大通道的运管单位，国能朔黄铁路发展有限责任公司（简称“朔黄铁路”）大力培育重载铁路运输领域新质生产力，不断突破关键技术，成功开行我国编组最长、载重最大的 3 万吨级重载组合列车，显著提升了铁路运输能力和能源供应保障水平，彰显了朔黄铁路以科技创新驱动能源领域新质生产力发展的生动实践。本案例阐述 3 万吨重载列车的技术突破与实践路径，并从环境（E）、社会（S）、治理（G）三个维度呈现其 ESG 价值创造——构建可持续运营体系、实现保供能力跨越式提升、引领管理数智化转型，为国家能源集团谱写中国式现代化新篇章贡献朔黄力量。

一、实施背景

（一）国家战略擘画发展蓝图：交通强国与科技强国的时代命题

能源安全是关系国计民生的“国之大者”。习近平总书记明确指出：“能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题。”《交通强国建设纲要》要求“加强新型载运工具研发，实现 3 万吨级重载列车重大突破”，将重载技术创新定位为国家能源运输体系“低碳化、智能化、韧性化”转型的核心路径，为高质量发展提供战略支撑。

（二）行业变革呼吁新质引擎：重载技术的规模效应与范式价值

面对能源供应的刚性需求与运输效率瓶颈，重载铁路技术凭借其革命性的规模效应成为关键突破口。“3 万吨级重载列车”总重达 32400 吨，全长逾 4 公里，单列载煤 25920 吨，其运输能力相当于 648 辆 40 吨卡车的总运量，年增运能 315 万吨。这不仅大幅减少了关键通道的列车运行频次和密度，成倍提高了线路周转效率与枢纽通过能力，其“集约化、单元化、少干扰”的运营模式更显著降低了调度复杂性及行车安全风险，构筑起“稳定畅通”的能源供应链防线。同时，大规模集运带来的单位周转能耗与碳排放显著降低，使其成为绿色低碳运输典范。该技术的成功实践经验与技术模板，对我国乃至全球重载铁路网络的升级与高效运输模式的推广，具有里程碑意义。

（三）朔黄铁路勇立创新潮头：能源保供与重载领军的使命征程

作为国家能源集团“能源保供压舱石、能源革命排头兵”战略的核心载体，朔黄铁路始终将保障能源大动脉安全高效运行视为首要责任。肩负“重载看朔黄”的行业领军使命，公司以提升保供能力为目标、突破技术瓶颈为方向，将 3 万吨级重载列车开行列作为破解运能瓶颈、驱动产业升级的战略工程。这场攻坚远非简单的运能叠加，而是向世界级技术高峰——如牵引动力精准协同、万吨单元毫米级同步操控、超长编组空气制动效能、3‰大坡度下重载平稳运行——发起的挑战。朔黄铁路举全公司之力，集产学研之智，精雕细琢每个技术细节，实现国家能源通道能力的极限突破，并在重载技术前沿领域树立起中国标准与朔黄印记的丰碑，这为全球重载运输贡献可复制方案与 ESG 价值，筑牢国家能源安全基石。

二、主要做法

（一）持续突破重载技术边界，建立万吨谱系，形成 3 万吨重载列车的发展路

径

朔黄铁路构建了覆盖万吨、1.6 万吨、2 万吨至 3 万吨级的完整重载技术谱系，成为中国重载铁路发展的“进化样本”。

2000 年首趟列车开行，创下中国铁路“当年铺通、当年运营、当年盈利”纪录；2009 年开行“1+1”组合万吨列车，正式迈入重载时代；2016 年开行首列搭载 TD-LTE 移动通信系统的 2 万吨重载列车；2020 年开行 1.6 万吨重载组合列车，实现任意车型随机编组；2024 年成功开行 3 万吨级重载列车，圆满完成交通强国试点任务；同年 9 月深度融合人工智能、北斗定位与列车控制的无人驾驶重载列车开行，标志着重载运输进入“智能无人化”新阶段。

这一系列突破性成就，实现了朔黄铁路从“有人驾驶”到“无人驾驶”、从“万吨级”到“3 万吨级”的历史性跨越，为 3 万吨重载列车的发展奠定了坚实基础。



图 1 各类机车型号发展变迁，实现单元“万吨级”到“3 万吨级”的里程碑式跨越

（二）实现关键核心技术突破，构建系统支撑体系，夯实 3 万吨重载列车发展根基

朔黄铁路 3 万吨重载列车开行面临三大核心挑战：

1. 极端复杂线路动态挑战：全线高差 1532 米，41% 为山区路段，包含 170 公里连续长大坡道（最大坡度 12‰）及最小 400 米曲线半径。复杂线路加剧列车与线路动态耦合作用，增大纵向冲动与车钩失稳风险。

2. 超长编组操纵控制挑战：长编组多机车牵引指令延时超 3 秒以上，制动性能离散性大，司机操纵经验差异容易引发断钩、脱轨等事故。

3. 全系统协同保障挑战：列车组合分解受站场资源限制，运输调度、股道利用与既有列车混跑存在协同盲区。

针对上述挑战，朔黄铁路构建了“理论建模—操纵优化—系统保障—装备研发”

四位一体技术体系，取得系列突破性成果：

关键技术一：空间耦合动力学建模技术

提出重载列车空气制动系统精细化建模方法，结合流体力学与多体动力学理论，精准模拟空气波传递特性（计算误差 $<5\%$ ）。构建融合纵向、三维机车及钩缓装置动力学的耦合模型，实现复杂线路下车钩力、脱轨系数等关键参数的量化预测分析（仿真结果与试验误差 $<10\%$ ），攻克 3 万吨列车动态特性预测难题。

关键技术二：安全平稳操纵优化技术

创新长大下坡道空电联合循环制动动态匹配方法，建立“空走—暂态—稳态”三阶段模型，将区间停车缓解率从 80% 降至 30%；构建连续起伏坡道多目标优化模型，实现百公里区段兼顾平稳与节能的操纵曲线（优化生成曲线时间 <2 秒）。开发基于规范性、精准性、精细性维度的司机操纵分级评价系统，推动操纵标准化。

关键技术三：系统协同保障体系

制定 3 万吨列车运输组织方案（混编 25t/30t 轴重车型），制定 3.5 亿—4.5 亿吨运量梯度下的混跑策略；创新场站能力适应性评估方法，优化关键枢纽（神池南、肃宁北等）股道使用方案，实现不具备接发车条件场站的股道灵活调度。实施线桥结构强化（高墩桥梁基础加固、钢混结合梁替换等），满足 3 万吨级承载标准。

关键技术四：自主核心装备研发

研制集成 LKJ15、TAX 等数据的安全平稳操纵装置，可生成多目标优化速度曲线，辅助司机实时决策；开发 LTE-R 无线重联同步操纵装置，将主从控机车间指令时滞控制在 2 秒以内，克服传统数字电台误码率高、干扰严重弊端；部署机车远程监测与诊断装置（OCS），实现牵引、制动等关键系统状态实时监测、故障预警与远程诊断。

（三）构建全面运营技术体系，成就“大国重器”，展现 3 万吨重载列车战略价值

朔黄铁路 3 万吨重载列车常态化运行需突破高安全性（实时防控断钩、脱轨风险）、高稳定性（保证日均 1 列以上的开行频次）、高适应性（适配不同运量目标下的混跑场景）三重核心挑战。为此，公司系统性构建智能化、常态化运维体系，以技术创新全面支撑大国重器高效运行：

1. 全球领先智能装备：引领重载机车技术革命

2024 年 3 月，朔黄铁路主导研发的国内首台新型智能重载电力机车在株洲下线，标志着我国重载铁路装备正式迈入“智慧化”新阶段。

技术突破：全球最大功率永磁直驱（单机牵引功率 10,400 千瓦），相较同轴数传统机型，单台机车单趟运量可提升 1,200 吨，综合年运量可提升近 28 万吨。

战略价值：为 3 万吨列车提供安全可靠牵引动力，奠定重载装备自主化技术基石。



图 2 由朔黄铁路主导研制的国内首台新型智能重载电力机车顺利下线

2.基础设施韧性升级：自主构建强化评估体系

朔黄铁路联合科研院所攻克 30 吨轴重及以上线路强化加固与评估技术,解决 2 万吨、3 万吨重载运输的适应性和耐久性问题，建成自主知识产权的重载铁路强化体系：

桥梁加固：研发辅助钢梁、体外预应力自平衡、拼装钢桁梁 3 种重载铁路桥梁强化技术，建立 30 吨及以上轴重条件下既有基础设施检测与评估方法，承载能力突破 3 万吨级标准。

智能监测：研发重载铁路轨道路基快速连续检测、桥梁静动力性能检测与实时监测、桥梁与路基服役状态评估等技术，实现基础设施服役状态全周期智能评估。

3.车辆系统可靠性跨越：智能化与轻量化双突破

机车系统升级：为降低 3 万吨列车开行难度，朔黄铁路联合相关企业攻克机车变流器、网络控制系统、车体及制动系统等关键技术，配置基于数据驱动的集智能驾驶技术、智能运维系统和智能诊断技术为一体的重载机车智能系统；应用全新架构变流器及微机控制空气制动机，形成高可靠性电传动与制动系统。

车辆效能跃升：为解决车辆本身自重问题，提高 3 万吨列车煤炭装卸效率，联合研制的 KM81 铝合金煤炭漏斗车，突破轻量化车体及低动力转向架技术，提升制动波速，降低列车纵向冲动，卸车效率提升 50%，卸货时间压缩 30%。

4.全自主机车无线同步系统：3 万吨重载技术零的突破

采用国产基于 TD-LTE 通信全自主研发的机车无线同步操控系统，搭配牵引网络控制、空气制动等先进重载列车组合技术，实现大功率交流电力机车与重载型货车车辆等生产要素的全面融合。其中，机车无线重联同步控制系统，通过“主—从”

机车协同控制，成倍提升编组吨位，实现运输效率、组织效率、人员配置全面优化提升，实现了 3 万吨级重载列车在全自主技术应用领域的新突破。

5.智能驾驶与检测体系：定义国际重载运维新标杆

检测体系方面：为解决 3 万吨列车面临的“七大之最”（弯道最多、坡道最大、桥隧涵最密集、自然环境最恶劣、列车操纵难度最大、施工组织最复杂、设备养护最难）难题，进一步探索 3 万吨重载列车动力学规律以及对弓网、线路、机车、同步网络状态等工况常态化检测，成功研发世界唯一一台集成了钢轨探伤、路基道床、轨道几何、接触网检测系统等 11 个检测系统的**重载铁路综合检测车**，实现了基于在同一时空坐标内“动态监测、静态监控、综合分析、立体养护、状态检修、寿命管理”的重载铁路运营检修模式，达到国际领先水平。改进现有综合检测（试验）机车，加装 30 个测点，搭载重载列车失稳监测装置、车钩测力装置，建立车钩受力、车钩摆角、钩缓伸缩量、振动加速度等 8 项重载列车运行动力学数据库，有效提升 3 万吨级重载列车动态监测及科学化管理水平。



图 3 对重载铁路基础行车设施开展全方位、立体化智能检测

智能驾驶方面：朔黄铁联合国内装备制造企业等自主研发重载列车智能驾驶辅助系统并实现全球首次应用，该系统基于自主研发的最高安全等级的 SIL4 平台，深度融合牵引网络控制、空气制动与无线同步核心技术，实时监测列车运行状态和线路信息；自主规划最优运行曲线，替代人工操纵；自主控车实现精准跟随与安全防护，系统性提升列车安全和运营效益。

朔黄铁路通过智能装备、韧性设施、可靠车辆、自主通信、智慧检测五大技术体系的系统性突破，不仅建成全球领先的 3 万吨重载列车全链条运营能力，更以 100%自主核心技术成就国家战略性“大国重器”，全面彰显其保障能源安全、引领高端装备升级、抢占重载技术制高点的三重战略价值。

三、实施效果

（一）在环境（E）方面，织就“绿经纬”，绘呈生态可持续画卷，推动重载低碳发展

3 万吨重载列车采用国产大功率交流传动机车、4G 通信网络、机车无线重联技术，在保障列车运行安全的前提下，有效提升动力传输效率，降低运输能耗；新型智能重载电力机车应用了全球首创大功率碳化硅变流器、大转矩永磁牵引电机、大牵引力直驱转向架，整车能量转化效率由 85% 提升至 90%，单台机车运营一年可节省约 33 万千瓦时（相当于 180 户家庭一年的用电量）。在铁路沿线合理布局新能源发电设施，实现重载列车运营清洁用电，2024 年 6 月，肃宁北分布式光伏发电项目成功并网试运行，利用铁路沿线的闲置土地和空间资源，铺设高效光伏板，年供公清洁电能 1745.36 兆瓦时。朔黄铁路针对 3 万吨重载列车复杂的运营管理和维护需求，构建覆盖管理、运营、检维修等全领域的统一大数据体系，实时采集列车运行状态、设备性能、能耗等数据，并传输至大数据平台进行分析和处理，基于大数据分析结果，实现对列车运行的精准调度和设备的预测性维护，避免因设备故障导致的列车停运和能源浪费，以数据要素赋能低碳产业升级；全力打造生态文明“零碳站区”标杆，以黄大铁路利津站为试点实施建筑节能改造，通过采取布设光伏清洁能源、增加节能减排措施、水资源循环利用、固碳生态环境改造、智慧化双碳系统运用等措施，打造“花海长廊”观光式线路，将其打造为集智慧清洁、“零”碳排放于一体的黄河流域生态文明示范站点，让绿色发展理念在站区建设中落地生根。

（二）在社会（S）方面，锻造“钢脊梁”，保供能力跨越式提升，打造重载品牌名片

筑牢能源安全运输的“钢铁动脉”。全程保持零事故率，有力践行“能源保供”使命。截至 2025 年 7 月 28 日，3 万吨列车安全运行 2.2 万公里，累计运送煤炭 101.088 万吨，所发电量满足约 100 万城镇居民一年的生活用电。

培育重载运输事业的“钢筋铁骨”。依托国能运输技术研究院、重载铁路高效运输技术行业工程研究中心等平台，着力培养重载运输领域人才，开展优秀专家、大国工匠、青年人才“三支队伍”建设，引进集团首席科学家等高端人才，实施“首席师”制度，创新“学员—学习司机—万吨司机—2 万吨司机—3 万吨司机”成长阶梯，实行“先从控后主控，先平原后山区，先空车后重车”的培养程序，锻造出 43 人“重载先锋”、29 名“大熊猫”级乘务员的专业军团，不仅满足了 3 万吨重载列车等前沿技术应用的需求，更为重载铁路行业输出了可复制的人才培养标准与实践经验，为我国重载运输领域的持续突破提供了核心人力支撑与智力储备。



图 43 万吨级重载列车在朔黄铁路驰骋

（三）在治理（G）方面，铸成“中国芯”，引领管理数智化建设，重塑重载运输生态

为保障 3 万吨重载列车安全、高效、持久开行，真正推动以 3 万吨重载列车为代表的一系列重载新质生产力的有效释放，在万物皆可“数”的时代背景下，朔黄铁路深度实施全面数智化转型升级，打造“数智朔黄”数据赋能平台，构建“两横一纵”数智化管理架构，实现“人、物、环、管”全要素、全天候、高协同、实时化的运输组织价值创造，并通过高质量维修养护设备设施优化经营量、本、利平衡。提升了重载铁路运营效率，为重载铁路行业治理现代化提供了可借鉴的“朔黄方案”，为传统产业践行 ESG 理念、推动数智化升级提供了可复制的现代化转型范本。2024 年，随着“数智朔黄”数据赋能平台的建设运行，朔黄铁路全年 17 项运输指标累计刷新纪录 19 次，年运量突破 3.71 亿吨，创历史新高；运维废旧物资处置时长由 60 天缩短至 30 天，招标采购周期平均缩减 18.5 天，大中修投资减少 3.5 亿元；通过智能铺排不同型号机车上线比例及牵引类型，机车节电量 2.87 亿度、节约电费 2 亿元，万元产值二氧化碳排放量比目标值降低 31%，节能降耗实现双赢。



图 5 2025 年 5 月 11 日，朔黄铁路成功举办“数创赋能智驭纵横——‘数智朔黄’建设发布会”

国能朔黄铁路公司将全面践行“三个排头兵”的时代要求，以全链条自主技术铸就重载运输“大国重器”，未来将持续深化三重布局：通过打造“零碳站区”、加快神池南工业化大场景建设、推进“交能融合”与多源贯通供电一体化供能工程，实现零碳化延伸；依托 SL4 级重载列车智能驾驶全面应用，在数据流、业务流、效率流、能耗流与价值流协同中打造数智化转型样板，实现智能化跃迁；同时以中国标准主导重载铁路国际规则制定，为“一带一路”能源走廊提供核心支撑，推动全球化输出。紧密围绕国家战略导向，朔黄铁路将以“火车头”的担当和“领跑者”的作为，持续巩固在重载铁路技术、运营与人才领域的全面领先地位。

面向新征程，公司将继续深化 ESG 管理创新，聚焦铁路运输数智化、重载化与绿色化转型，以更优质的履责实践强化重载品牌引领力，为国家能源集团谱写中国式现代化新篇章注入更强朔黄动能。