低碳背景下工业动力系统能效提升的精细化管控策略探究

胡茄芯，穆　易

（泸州老窖股份有限公司，四川 泸州 646000）

摘　要　碳转型的刚性约束正倒逼工业领域重估动力系统的能源逻辑，电机、泵组、风机等耗能单元的效率跃升已成减排攻坚的核心战场。精细化管控跳出单一技术改造的窄口径，以数据穿透设备壁垒，将摩擦、电气、流体与失配损耗显影于全局视图，推动“人治”向“数治”迁移。本文从战略价值、现实困境、系统对策展开探讨，直面数据孤岛、维护滞后、调控失配与组织协同弱化等积弊，提出织密感知网络、前置状态维护、拟合负载寻优、激活全员节能的闭环路径，以期为使透明化能源账本既支撑碳市场合规又转化为可度量的竞争优势提供参考。

关键词　低碳经济；工业动力系统；能效提升；精细化管控

中图分类号：TK01+8　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.028

0　引言

中共中央办公厅、国务院办公厅于2026年4月印发《关于更高水平更高质量做好节能降碳工作的意见》，明确把节能降碳贯穿经济社会发展全过程各方面，支持运用数智技术改造传统产业，持续提升能源资源产出效率。对于工业动力系统运行状况而言，其运行情况直接决定着重点领域能耗强度是否达标。在“十五五”碳达峰攻坚与重点行业节能降碳改造三年行动叠加推进的当下，只考虑单台机器更换高效率电机的方法已不适应时代的需求，需从宏观、数字化方面进行精细化的管控。重新审视力流分配方案，将可能的损耗还原到管理的核心中来，这是制造业绿色发展的根本保障[1]。

1　低碳背景下精细化管控对工业动力系统能效提升的战略价值

低碳转型的刚性约束迫使工业领域重新审视动力系统的能源利用逻辑。精细化不是简单地采用某一项技术，而是重构了对于能效管理的认知框架——是要将模糊的目标转化为可量化、可追踪、可优化的系统性行动。通过先进的传感器和智能仪表能够将隐藏在损耗电量、电流、负载误差背后的能效低劣表现显露无遗，管理者可据此全局感知能量使用的合理性[2]。更深层次的变化体现在决策层面：传统依赖于人的主观判断力的经验式管理转变为基于数据模型分析的数字化管理，将隐性的信息转化为可传承的企业能力。同时，精细化管控构筑的透明化能源账本，为企业参与碳交易、应对碳关税壁垒提供了坚实的数据底座，使能效优势直接转化为市场竞争优势[3]。

2　当前工业动力系统能效管理的现实困境

2.1　数据采集与整合的系统性缺失

因不同厂家提供的设备操作数据以及协议标准不一样，接口也不同，这就导致了工业动力系统的复杂性和难统一性。其中，PLC控制器记录着电机电流与转速，变频器记录的是频率、功率因数、DCS采集的温度和压力信号等。但上述信息都是分散存储的，并没有汇总交汇的地方。即便公司已建立了能源管理系统，若采集端布置不充分且采样频率过慢，也无法精准反映系统实时状态。而部分陈旧仪表缺乏数字化通信功能，需人工读取以获取一小时甚至一天的统计值。这样的数据孤岛现象说明，管理人员看到的只是能源消费中的一部分，无法转化为改善行动的依据[4]。

2.2　设备老化与维护体系的滞后效应

工业动力系统中的核心设备通常设计寿命长达十年以上，许多设备都已使用多年，性能大大下降。滚动物件带来的机械效率下降、绕组绝缘劣化导致的能耗增加以及水泵因腐蚀造成的初始流体模型损伤等问题，无法在正常点检中发现。预知性维修计划多按设备设计寿命周期制定，而非按健康状态制定，易产生

作者简介：胡茄芯（1994-），女，本科，助理工程师，研究方向：能源与动力工程。

过修与欠修并存的现象。备品备件库存管理混乱，关键部位缺件，只能购买替代品，系统适应性越来越差。而维护记录的纸质化管理使得历史追溯困难重重，同类故障反复发生却无人总结规律，经验教训无法沉淀为制度性改进措施[5]。

2.3 运行调控与负载变化的适配失衡

虽然工厂生产负荷不是固定的，订单波动、季节交替、班次调整都会引起动力系统需求侧的显著变化。然而，很多企业的供能系统仍然采用定速运行模式，生产设备都会按照设定的转速运转。在产能较小的时候，会有大量电能被白白浪费在阀门流量调节或是循环回流上。尽管部分装置配备了变频器，但由于对安全余量的担忧，操作人员倾向于使用更大的出力值，造成不必要的能量损耗。负载预测能力的薄弱使得调度决策缺乏前瞻性，面对突发性负荷波动，系统只能被动应对，无法实现供需两侧的动态平衡，运行管理与实际工况之间存在巨大鸿沟[6]。

2.4 人才储备与组织协同的内在矛盾

实施精细化管控需要综合的知识体系，不仅要掌握电气自动化方面的专业知识，还要掌握数据分析工具，同时还需要运用统计分析方法和技术。这对跨界人才而言意味着长期而高昂的学习成本，对中小型企业更是难以实现。目前的工程师们对于新技术的接受程度较低，在思想上也存在较大的分歧，有的老员工甚至对数字化的管理存在抵触情绪。另外，各部门之间相互不理解的现象也很严重，比如生产部门关注的是产量指标的完成情况，设备部关注的是设备故障时间等。财务部门只关注预期费用情况，而能源效率相关指标常被忽视，在绩效考核中缺乏对节能效益的价值激励，导致一线人员缺少主动改善的动力，技术方案也难以落地。

3 低碳背景下推进工业动力系统精细化管控的系统性对策

3.1 构建感知网络，优化数据融通

打破设备间的“信息孤岛”，是解决信息采集难题的重要一步。在新项目的选用上应注重支持 OPC UA、Modbus TCP 等主流工控通信协议，提供标准的数据接入端口，防止不同系统的不兼容情况发生。对于现有设备，则可通过加装智能网关进行协议转换和数据融合，不需对原硬件进行任何改动即可实现数字改造，这种“软升级”路径大幅降低了企业的技改门槛。

根据“关键点全覆盖，重要点按需设”的原则进行传感器布点：如将三相多功能电测仪表安装于电动机进线端，采集全电量信息；在管路的重要节点安装压力变送器、流量计等设备，采集介质真实流速；在轴承座安装振温一体化传感器，采集机组部件状态变化特征量等。针对不同的监视对象，采样频率应该有差别，如电力量的监测要求达到毫秒级以上的采样率才能反映负荷瞬态的变化特征，而机械设备振动信号则需要更高频率的采样（微秒级）才能捕捉到故障萌芽状态下的异常信息。采用边缘计算单元代替集中式云端数据中心的架构，允许在厂级部署边缘服务器完成数据清洗、特征提取、异常报警等功能，并将提取出的有效关键指标上传至主站系统，在保证实时响应的同时避免海量数据涌入造成信息过载。同时，采用 TSDB+RDBS 混合架构进行大数据存储，其中前一种主要处理大量数据的更新和快速读取，后一种则存储设备目录及修理记录等信息，这两类数据可互为转换使用。数据管理包含采集—传输—存储全过程，在此过程中自动发现偏差值、空缺项、突变点等异常情况并采用填补法或冗余校验予以纠正处理，确保后续研究成果建立在坚实可靠的数据基础上，真正实现“垃圾进、垃圾出”的反面警示。

3.2 跟踪状态演变，前置维护关口

由传统周期性机械维护模式向基于设备实际状态的预测性维修模式转变，是保障发动机可靠性及运行效率的有效途径。状态监测系统实时反映设备退化过程并结合历史故障记录进行智能诊断，建立振动频率谱、油液成分及温度曲线等多维特征参数与剩余寿命之间的正确映射关系。当任一特征参数超出正常阈值后，将自动触发等级预警机制，指导维修团队提前备件、安排检修周期，将非计划停机转化为可控的计划内作业，从而彻底打破“坏了再修”的局面。而电动机的线圈热老化模型基于累积温升数据来计算其绝缘寿命周期的衰减速度，如果预测到未来 3 个月内发生故障的概率大于预设阈值，则系统将提出更换建议，避免绝缘击穿导致的重大事故的发生。

当轴承出现疲劳剥落时，通常伴随着特定的频率范围内的振动能量增加，这种现象可以通过包络谱分析来提前几周识别并揭示潜在的问题，从而给购买备用零件和安排检查提供足够的时间。预防性维护的一个重要优点是它能够提高对维修资源分配的有效性。由于各设备的重要性和维修难度不同，该系统根据风险评估自动排序，保证重要性高的设备处于较高的运行水平，冗余非重要设备可允许较长的检修周期，从而合理分配有限的资源。当维护完成后，系统会自动

生成设备的健康档案，记录维修情况及更换部件编号、下次测试时间推荐等内容，并形成闭环管理模式。

3.3 拟合负载曲线，寻优调控路径

实现动力系统供需两侧的动态匹配，不仅需要突破PID控制方式，还需要引入诸如MPC和RL这类先进智能控制算法。首先，建立所有用电负荷的数字孪生体，基于机理建模方法和大数据分析方法准确刻画各用电负荷在不同工况下的性能曲线图。这种模型不仅可以反映稳态运行参数，而且可以模拟启停过程、压差冲击等瞬态响应情况，为优化决策提供可靠模拟试验平台。然后根据整体能耗设定目标函数，在线求解当前最优控制指令，以制造工艺约束为条件设置边界条件，实现从“经验调参”到“自动寻优”的根本性跨越。

对于多台并联运行的泵组或风机，该算法可以依据实时的流量需求来自动确定最优的单位组合及速度分布，使得每个设备都处于其效率区域附近。当负荷逐渐增加的时候，系统首先选择提升正在工作的机器速度，而不是开启备用的机器组，以降低频繁启停造成的能耗及电应力影响。对于具有储气装置的压缩空气系统，该算法将综合考虑管路容量、用气量波动规律及电价时段差异性，在电价低谷期适度提高储气罐压力，在高峰时降低空压机出力，利用储能缓冲实现削峰填谷，这种“错峰储能”策略在实际应用中可将用电成本降低百分之十以上。同样，冷却水系统也是优化的重点对象，在运行过程中根据外界湿球温度的变化情况合理调整冷却塔风机台数及转速，在保证冷凝压力的前提下最大程度减少发散热量的能耗。所有的调试工作都在微秒至秒级时间尺度上进行，并且操作员只需指定生产约束条件，其他一切动作均由算法自主完成，实现了“人定规则、机行优化”的分工协作模式。

3.4 激活全员意识，厚植节能土壤

技术工具的效能发挥最终取决于使用者的认知水平与行为习惯，组织变革以及文化重塑是实现有效掌控的关键部分之一。企业应建立常态化的培训体系，并针对不同的岗位设计定制化课件，管理层则侧重于对价值因子及其商业绩效的认知。企业需深究数据分析技巧和优化原则，而工作人员的主要任务则是熟练掌握智能化设备的使用规则和处理故障的方法。除了传统的教室授课方式外，实践练习和模范企业的参访通常可以提供更为直接的影响力，使理论知识转变为实际的行为指导。

完善工作效果评价机制，细化效益指标到线、组乃至个人并同工资奖金挂钩，每月公示各单位能耗排名及节能率，让节支成果看得见、可比较。此外，还要设立专项奖励办法以奖励提出有效建议者。小改革能带来大收益，这种“微创新”的奖励机制能够调动基层员工的积极性。组建跨部门的精益小组，定期分享成功经验和失败经验，从而打破各个部门之间的信息壁垒，进而鼓励员工在日常巡检中发现异常后及时拍照并上传到系统中，由系统自动生成纠正措施并跟踪闭环，将问题发现与解决问题纳入常规工作程序。随着数据资产的不断积累，企业可以提炼出适用于自身特点的最佳实践手册，将零散的经验固化为标准作业程序，使个人智慧转化为组织能力。

4 结束语

精细化管控的终极形态，是让工业动力系统在每一次负载起伏中都自动校准至能耗最优解。本文构建的四维对策并非平行模块，而是以工业数据底座为支撑载体、预测性维护为运行保障、智能寻优算法为决策核心、全员低碳文化为内生动力的协同运行体系。当边缘节点滤净噪声、孪生模型预判衰退、控制指令追随实时电价与用气曲线、一线工人主动上报“跑冒滴漏”时，电机与泵组便脱离“额定运行”的旧范式，进入“工况自适配”的新常态。这一转型既契合工业能效提升三年攻坚行动中对系统匹配性与实际运行效率的要求，也回应了全国碳市场对企业级碳账本的监管要求。在精细化管控策略的持续赋能下，工业能效提升不再停留在局部技术改良的表层，而是逐步内化为工业生产组织内生的低碳运行机制。

参考文献：

[1] 于佳秋.“双碳”背景下工业企业低碳发展绩效评价研究:以湖州“工业碳效码”建设为例[J].江南论坛,2023(04):51-54.

[2] 倪超,刘伟,苗浩然,等.绿色低碳背景下老旧电厂工业美学提升研究[J].中国房地产业,2025(08):174-177.

[3] 陈友.“双碳”目标背景下工业企业绿色低碳转型研究[J].现代工业经济和信息化,2025,15(02):162-164.

[4] 薛华仪.碳达峰碳中和背景下工业园区绿色低碳转型路径探究[J].区域治理,2024(13):19-21.

[5] 谭映仪.纺织工业在双碳背景下的低碳建筑建造与施工碳减排可行性研究[J].区域治理,2024(14):138-140.

[6] 郑晴,吕琳,刘洋.碳交易背景下黑龙江省工业企业低碳转型问题和对策研究[J].金融理论与教学,2026,44(01):70-75.