

# 重载机车牵引动力协调与能耗优化控制策略

孙飞

国能朔黄铁路公司机辆分公司

DOI:10.12238/pe.v3i5.16564

**[摘要]** 重载机车是铁路货运体系的关键设备,其动力协同管理与能效提升策略直接影响运输效能和环保效益。本文基于牵引系统的工作原理及动态特性,分析了动力分配算法与运行调度、多机车联合作业机制、功率输出调节及稳定性保障技术,并探讨了综合控制系统的部署。进一步提出区间速度曲线优化与滑行调控、多机动力分配节能、制动能量转化存储和基于大数据的智能决策体系等创新措施,构建了完整的能效提升技术路线。通过动力系统协同优化与能耗精细管控的有机结合,打造出高效可靠、节能环保的重载运输解决方案,为铁路现代化发展提供技术支撑和实施路径。

**[关键词]** 重载机车; 牵引动力协调; 能耗优化

**中图分类号:** U260.14 **文献标识码:** A

## Control Strategy for Traction Power Coordination and Energy Consumption Optimization of Heavy-duty Locomotives

Fei Sun

Locomotive and Rolling Stock Branch of Guoneng Shuohuang Railway Company

**[Abstract]** Heavy-haul locomotives are key equipment in the railway freight system. Their power coordination management and energy efficiency improvement strategies directly affect transportation efficiency and environmental protection benefits. Based on the working principle and dynamic characteristics of the traction system, this paper analyzes the power distribution algorithm and operation scheduling, the multi-locomotive joint operation mechanism, power output regulation and stability guarantee technology, and discusses the deployment of the integrated control system. Further innovative measures such as the optimization of interval speed curves and coasting control, energy conservation through multi-engine power distribution, braking energy conversion and storage, and an intelligent decision-making system based on big data have been proposed, thus constructing a complete technical route for energy efficiency improvement. By organically integrating the collaborative optimization of the power system with the precise control of energy consumption, an efficient, reliable, energy-saving and environmentally friendly heavy-haul transportation solution has been created, providing technical support and implementation paths for the modernization of railways.

**[Key words]** Heavy-duty locomotive Traction power coordination Energy consumption optimization

### 引言

重载机车作为铁路货运系统的核心设备,其动力分配协调与能源消耗管理直接影响运输效能和环保指标。长期以来,铁路运输尤其是重载铁路凭借其运能大、效率高、运输成本低的特点而广泛受到世界各国的关注。目前我国已有大秦线、朔黄线等长期运营的重载铁路,但依然不能满足运量需求,近些年,30t轴重重载列车是货运列车重点发展的产品之一。随着货运需求的不断扩大,动力系统的合理调配与能耗调控方案成为行业关注焦点。通过科学配置牵引动力资源并实施精准能耗管控,保障运行安全与环保要求,已成为推动铁路运输技术升级的重要研

究方向。

### 1 重载机车牵引动力基础与运行机制

重载机车作为大宗货物远距离铁路运输的关键设备,其动力传输系统肩负着将能源转换为列车运动能量的重要职能。动力传输的核心在于原动机与传动装置的精密配合:内燃机组、电力单元或混合动力源产生能量,经机械传递系统转化为可调节的机械能,最终通过轮轨相互作用实现列车位移。在此过程中,动力系统需要满足持续大功率输出和低速状态下强牵引力的特殊要求,以适应重载线路中陡坡、急弯及多变气象环境等复杂运行条件。动力性能不仅取决于机车本身的功率参数和传动效能,

还受制于线路纵断面、弯道特性、空气阻力以及列车总重等外部变量。<sup>[1]</sup>为确保运输作业连续稳定,动力传输装置需在各类工况下维持恒定功率输出,保证列车平稳启动、均匀加速及持续定速运行。

牵引动力系统的运作流程包含三个核心环节:能源生成、动力转化及机械传动。在能源生成阶段,系统通过内燃机工作或外部电力输入获取能量,这一过程直接决定着机车的最大功率输出;动力转化环节借助机械传动装置或电力驱动系统将能源转变为可用的牵引力,该环节的性能直接影响整体能效水平;机械传动环节则依靠轮轨间的相互作用完成动力传输,并与运行阻力达成动态平衡状态。

## 2 重载机车牵引动力协调方法

### 2.1 牵引力分配与调度优化

牵引力分配的关键在于综合考虑列车运行阻力特征、轨道坡道参数以及机车性能指标,对多机协同作业时的牵引输出进行科学调配。先进的分配策略将机车牵引力划分为固定牵引分量与可变调节分量两个维度,其中固定分量基于列车总重和轨道状况计算得出,确保列车获得可靠的启动动力与平稳运行保障;可变调节分量则依据实时采集的运行速度、牵引功率和轮轨接触状态等数据,在编组机车间进行智能调配,从而有效应对线路环境变化与运行状态波动。

在列车运行调度过程中,牵引系统与制动装置之间的动态交互关系需要重点考量。借助智能化调度系统,整合轨道实时监控信息与运行时刻表限制条件,可提前制定不同机车在特定区段的动力分配策略。这种优化方法不仅能有效节约牵引电力消耗,还能减轻车厢连接部位的机械损耗。<sup>[2]</sup>在下降坡道区域,适度调减部分机车的动力输出,利用惯性滑行与多级制动配合来维持列车平稳行驶;面对起伏坡道区域,科学调整前、中、后部机车的动力配比,以缓解列车纵向受力波动,实现节能效果与运行安全的双重目标。

### 2.2 多机协同运行模式设计

多机牵引作为重载列车运行的主要形式,其运行方案的核心在于实现各机车动力输出的同步化与协调性。为达成这一技术要求,必须建立标准化的控制体系,确保多台机车在接收相同牵引信号时能够产生一致的动态响应。当前主流的协同方案主要分为三类:主从式控制、自主协调式以及混合式方案,这些方案在实际应用环境、适应能力及可靠性表现上各具特点。为清晰呈现各类运行方案的技术特性,可参考表1中的对比分析。

表1 不同多机协同运行模式的特点与适用性

协同模式	控制方式	信息传递机制	适用线路条件	优势	局限性
主从控制	主机统一发令	单向指令传递	直线及坡度平缓区段	控制结构简单、稳定性高	适应性不足,难以处理复杂工况
自主协调	分布式智能算法	双向实时数据共享	弯道频繁、坡度多变	灵活性强,能量利用率高	系统复杂度大,依赖高可靠通信
混合模式	主机主导+自主修正	主从结合+共享数据	综合线路条件	兼顾稳定性与灵活性	成本较高,实施与维护难度增加

从实践层面来看,主从控制架构在直线轨道区段表现更为突出,其可靠的控制特性和简易的操作流程有效确保了列车运行的安全性能。<sup>[3]</sup>相比之下,自主协调机制在复杂线路环境中应用价值更高,该模式依托实时监测数据实施动力调节,显著提升能源利用效率和系统适应性。混合控制策略在多变线路工况下具有优势,其通过整合主从控制的可靠性与自主协调的智能调节,实现了更全面的适用性。

### 2.3 动力输出匹配与稳定性控制

在重载机车运行过程中,动力系统的协调性对列车纵向动力学特性具有决定性影响。为此,控制系统需采用功率动态分配与自适应平衡技术,使多台机车在加速和制动过程中形成协同工作机制。通过持续采集电机运行参数(包括转速、电流及牵引功率),融合前馈控制与参数自整定策略,保证各机车动力输出特性相互匹配,最终实现列车整体运行状态的平稳过渡。

列车运行稳定性管理需要兼顾纵向作用力的平稳调节与编组间距的精确调控。借助动力学仿真技术,能够预先评估各类运行场景中可能出现的纵向振动幅度,并在控制算法中植入相应的约束机制。<sup>[4]</sup>在坡度变化区域,采用预减速配合渐进式牵引输出策略,有效抑制纵向冲击的最大值;针对连续下坡路段,实施多级制动与能量回馈系统的协同运作,防止制动力集中引发的车体摆动现象。这种控制方式在改善运行舒适度的同时,也为能源利用效率的提高提供了技术支撑。

### 2.4 动力协调系统的集成与实施

动力协调系统的整合必须将牵引力调配、多机协作、功率适配及稳定调控等多项功能融合至一个智能化管控平台。该平台需集成即时数据获取、运行状态监控、智能判断及执行回馈等关键组件。借助与列车控制网络、调度指挥体系及轨旁监测装置的协同运作,能够实现动力协调的全周期管控。在系统实现过程中,通过车载控制单元与无线通讯模组的配合,可实现机车之间牵引与制动力的动态协调;依托调度平台的优化演算,为各运行区间生成最佳的牵引力配置与行车策略。

在具体操作环节,必须着重考量系统的稳定性能与扩容潜力。为确保运转安全,动力调配体系普遍配置多重备份防护与异常切换功能,当核心系统出现问题时,动力调配体系可自主转换至应急状态,防止因设备故障引发的运行隐患。同时,结合智能算法与海量数据分析手段,动力调配体系还能融入深度学习与预判控制模块,增强方案制定与决策判断的自动化程度。经过持续改进升级,该体系能够匹配各类线路条件与运输要求,切实达成重载机车运行的高效性、安全性及节能性三大指标。

## 3 重载机车的能耗优化控制策略

### 3.1 区段速度优化与惰行控制

区段速度优化依托线路纵断面、列车质量及运行时刻表,构建能耗函数,通过动态规划确定最佳速度曲线。速度控制目标不仅在于满足时刻表要求,还需在牵引功率与线路阻力之间形成最优平衡。能耗函数可表示为:

$$E = \int_0^T P(t)dt = \int_0^T F(v) \cdot v dt \quad (1)$$

其中  $E$  为总能耗,  $P(t)$  为牵引功率,  $F(v)$  为速度  $v$  对应的牵引力。通过对能耗函数最小化, 可以得到各区段的目标速度曲线, 实现能耗与运行时间的统一优化。

惰行控制策略着重于在特定路段切断牵引系统, 使列车凭借惯性完成滑行过程。其核心在于预判剩余距离与速度波动趋势, 借助车载监测系统准确计算惰行起始点和持续时长。<sup>[5]</sup>在实际运行中, 该技术常与速度调节结合: 在下坡区提前启动惰行模式, 在平直区延长滑行时段, 这样既能降低能耗, 又能减轻动力装置的负荷。

### 3.2 多机功率分担下的节能调度

在多机牵引模式下, 功率分担直接决定能效。合理分配功率可使各机车运行在最佳效率区间, 避免某些机车长期过载或低效运行。功率分配优化目标可表示为:

$$\min E_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \eta_i^{-1} \quad (2)$$

其中  $E_{total}$  为总能耗,  $P_i$  为第  $i$  台机车输出功率,  $\eta_i$  为该机车在对应工况下的效率。约束条件包括总功率需求满足牵引要求, 以及各机车功率不超过额定范围。

在具体运行过程中, 功率分配可采用主控机车负责大功率输出、辅助机车保持最佳效率区间的方案。当列车行驶在爬坡路段时, 提升前导机车动力输出以确保牵引性能; 在平坦路段, 则适度降低总功率并将部分负荷转移至效率更优的机车。借助这种实时调节机制, 不仅能够实现能源消耗的整体优化, 还能增强列车牵引的可靠性。为加强调控的适应性, 可采用依据实时运行参数的自适应控制策略。自适应控制策略中的控制系统通过监测各机车运行参数, 动态调整功率分配方案, 使列车在各种线路状况下都能实现最佳能耗。

### 3.3 制动能量回收与再利用

制动能量回收利用了列车在减速过程中的动能, 将其转化为电能或其他可用形式。电力机车普遍采用再生制动, 将电能反馈至电网; 在非并网条件下, 则可存储于超级电容或动力电池。回收能量可表示为:

$$E_r = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \cdot \eta_r \quad (3)$$

其中  $E_r$  为回收能量,  $m$  为列车质量,  $v_1$  和  $v_2$  分别为制动初始与结束速度,  $\eta_r$  为回收效率。通过提高储能装置的容量与

充放电效率, 能够显著提升能量再利用率。

在列车运行过程中, 借助动能转换系统能够重新利用制动产生的能量, 这些能量既可为列车提供加速动力, 也能满足车载电子设备的用电需求。尤其是在连续下坡路段, 列车因重力作用积累的动能可被高效回收并存储起来, 这些储备的能量随后能在爬坡阶段发挥作用, 从而实现整个运行线路的能量动态调节。

### 3.4 数据驱动的能耗智能优化系统

随着传感设备性能与信息处理技术的进步, 基于数据分析的智能能耗优化体系已成为能源管理的核心解决方案。该体系整合多维度数据采集网络, 包括动力输出、运行速率、轨道倾斜度、环境气候参数, 建立精准的能耗预估框架。借助智能计算与神经网络技术, 能够在各类运行环境中准确预估能源消耗, 并预先制定最佳调控方案。该体系的核心优势体现在即时响应与动态适应能力上。通过持续学习与迭代优化机制, 可以实时更新能耗预测算法, 并灵活调节运行速度分布、动力配置与滑行方案。

与此同时, 基于数据分析的智能系统能够与调度中心协同运作, 实现列车群的全局性能优化。借助海量数据处理技术, 可在整个路网范围内实施列车运行的统筹规划, 有效防止因局部优化导致的整体能耗上升问题。这种智能化调控机制既显著改善列车运行效能, 也为铁路运输体系的可持续发展奠定了重要基础。

## 4 结语

优化重载机车的牵引质量和降低能耗水平是提高铁路运输效益和实现绿色环保的根本途径。通过牵引力分配、多机协作、动力匹配等方案, 能够实现牵引过程的高效与稳定; 借助调速、供电、能量回馈以及信息化大数据等技术手段, 降低机车的能耗。牵引与能耗策略的协同优化, 为铁路运输从单纯的运输保障向节能减排与智能化转型提供了强劲驱动力。未来, 应通过探索和运用新的计算理论、智能传感器及大数据平台, 构建更加自适应、高效的控制框架, 以实现安全、经济、绿色化的重载运输。

### [参考文献]

- [1] 张志超, 吕凯凯, 储高峰. 重载机车102型钩缓装置动态模拟方法与动力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(2): 12-21.
- [2] 刘佳璐, 閻鑫, 王岩, 等. 车钩防脱台对重载机车车辆动力学性能影响分析[J]. 铁道学报, 2024, 46(7): 42-50.
- [3] 陈清华, 杨云帆, 凌亮, 等. 复杂轮轨摩擦条件下的重载机车防滑控制研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 179-186.
- [4] 田刚领, 叶晖, 谢佳, 等. 锂离子电池储能电站能耗优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1118-1127.
- [5] 黄捷, 李泽毅. 四旋翼无人机编队变换能耗优化仿真教学[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(4): 102-108.

### 作者简介:

孙飞(1986—), 男, 汉族, 陕西渭南人, 本科, 工程师, 研究方向: 重载列车。