

文章编号: 1003-1421(2026)08-0098-10

引用格式: 苏璇, 廖代富, 宋宗莹, 等. 重载铁路列车群组开行模式设计研究[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(8): 98-107, 123.
SU Xuan, LIAO Daifu, SONG Zongying, et al. Design of Train Group Operation Mode for Heavy-Haul Railways[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 98-107, 123.

重载铁路列车群组开行模式设计研究

苏璇¹, 廖代富², 宋宗莹¹, 赵军²

(1. 中国神华能源股份有限公司 煤炭运输部, 北京 100011; 2. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 611756)

摘要: 列车群组开行模式作为群组运行的基础, 直接影响着列车群组运行效率与重载铁路运输能力。为高效组织列车群组运行, 对重载铁路列车群组开行模式设计方法开展研究。首先, 提出列车群组开行模式的概念, 明确其是由单元列车类型、数量与组合顺序2个核心要素构成, 基于此将典型群组开行模式分为纯普列群组、纯万吨列车群组和普列与万吨列车混合群组3类, 提出以通过能力利用率、输送能力适应率和供电能力适应率为核心指标的群组开行模式比选方法。最后, 以朔黄线为例开展实证研究, 提出12种候选群组开行模式并进行方案比选, 结果表明采用“3列万吨列车组群”的开行模式能在满足运量需求和供电能力限制下充分发挥朔黄线的输送能力。

关键词: 重载铁路; 群组运行; 开行模式设计; 运量需求; 供电能力

中图分类号: U294.1 文献标识码: A DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251231002

Design of Train Group Operation Mode for Heavy-Haul Railways

SU Xuan¹, LIAO Daifu², SONG Zongying¹, ZHAO Jun²

(1. Coal Transportation Department, China Shenhua Energy Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: The train group operation mode serves as the foundation for group operations and directly influences both the efficiency of train group operation and the transport capacity of heavy-haul railways. To improve the efficiency of train group operations, this paper investigates methods for designing train group operation modes for heavy-haul railways. First, the concept of the train group operation mode is introduced, and it is clarified that it consists of the following elements: unit train type, quantity, and formation sequence. Based on this, typical train group operation modes are classified into three categories: pure conventional train groups, pure 10 000-ton train groups, and mixed groups of conventional trains and 10 000-ton trains. Furthermore, a comparison method for train group operation modes is proposed, with three key indicators: utilization rate of passing capacity, adaptability rate of transport capacity, and adaptability rate of power supply capacity. Finally, using the Shuohuang Railway as a case study, twelve candidate train group operation modes are proposed and compared. The results show that the operation mode of “three 10 000-ton train grouping” can fully utilize the transport capacity of the Shuohuang Railway under the constraints of transport

收稿日期: 2025-12-31

通信作者: 赵军(1986—), 男, 四川宜宾人, 西南交通大学交通运输与物流学院教授。

基金项目: 中国神华能源股份有限公司项目(SHGF-24-6); 国家自然科学基金联合基金项目(U2569210)

demand and power supply capacity.

Keywords: Heavy-Haul Railway; Train Group Operation; Operation Mode Design; Transport Demand; Power Supply Capacity

0 引言

在全球经济持续增长和贸易活动不断扩大的背景下,重载铁路在煤炭、矿石等大宗货物运输上具有不可替代的作用。但随着运量需求的逐年增加,在既有运行模式下,仅通过增大列车重量、提高列车速度和加大行车密度等策略已难以满足货运需求。列车群组运行通过将多列单元列车进行协同控制构成群组列车,实现小编组、高密度、大运能灵活机动的运行模式^[1],是应对持续增长运量需求的有效措施。列车群组开行模式设计作为群组运行实施前的首要环节,其关键在于确定群组列车内单元列车的类型、数量以及排列顺序,群组开行模式设计是否合理,直接决定了群组运行的可行性,也从根本上制约着线路的运输能力。一个理想的开行模式应满足以下3方面要求:①线路通过能力利用率应维持在合理区间,在保障资源高效利用的同时,为调度调整提供可能;②输送能力应与货运需求相匹配,并留有一定冗余,以应对运量增长;③牵引供电需求应处于供电系统安全承载范围之内,避免因供电能力不足引发大规模扩容改造,从而有效控制投资成本。因此,设计兼顾设施利用、运能匹配与供电安全的群组开行模式,对推动列车群组运行的实际应用、提升运输经济效益具有重要意义。

目前,关于重载铁路群组运行模式的研究仍处于起步阶段,相关研究主要集中在重载铁路列车群组控制和群组运输计划优化方面。既有关于群组控制的研究主要集中于列车纵向动力学模型、列车智能驾驶、智能制动等方面,宋宗莹等^[1]对此进行了较为全面的综述。在群组运输计划优化方面,Chen等^[2]构建了以加权最小运输成本和货物旅行时间为目标的混合整数规划模型,开发模拟退火算法求解。随后,Zhuo等^[3]构建以运量最大为目标的混合整数非线性规划模型,并开发模拟退火算法求解。卓岑羽等^[4]考虑运输时间与运输成本并引入货运需求重要度,构建了重载铁路混编群组列车开行方案的多目标优化模型,设计启发式求解算法求解。在

此基础上,倪少权等^[5]和王天琨等^[6]分别针对多元群组列车与单列混行问题和单元列车多车站组群/解群与多元群组列车混行问题构建了混合整数非线性规划模型,前者开发基于改进粒子群优化算法的求解方法,后者开发遗传算法求解。在运行计划调整上,Ma等^[7]针对重载铁路列车群组运行下的时刻表调整问题,以最小列车延误为目标构建了混合整数线性规划模型,开发基于模拟退火和蚁群算法的启发式算法求解。吕苗苗等^[8]考虑重载铁路列车群组运行模式下的区间中断场景,以调整区段内列车总旅行时间和总延误始发时间最短为目标构建了多目标模型,设计带有非支配排序的粒子群多目标优化算法求解。

此外部分研究涉及重载铁路群组运行模式下运行图编制、线路通过能力计算、集疏运系统适应性和车站资源利用等方面。宋宗莹等^[9-12]设计了群组运行模式下的列车运行图智能编制系统并建立了以总旅行时间最小为目标的单元列车运行图优化模型,设计改进的粒子群算法求解;杨晓明等^[13]通过分析群组运行下单线重载线路列车在站作业及会让方式,构建了群组运行下单线重载铁路最小运行图周期计算的混合整数线性规划模型,并基于此提出单线重载铁路群组运行下的通过能力计算方法。王付军等^[14]针对群组运行下站场内股道调度与分配问题,以解编组时间最少为目标构建了整数规划模型,开发自适应遗传算法求解。吕苗苗等^[15]针对群组运行模式下重载铁路的空车调配问题以区段内空列的总空费时间最短和通过能力最大为目标构建了多目标模型,设计带精英策略的非支配排序遗传算法求解。

综上,既有研究取得了一定的成果,但暂无围绕群组开行模式设计的相关研究。群组开行模式作为群组列车运行的前提条件,直接影响群组列车运行效率和线路运输能力,因此有必要对重载铁路列车群组运行下的群组开行模式进行系统研究,以推动群组运行模式落地实施。通过分析列车群组的组成明确了列车群组开行模式的核心要素并基于此归类典型的开行模式,然后构建以通过能力利用率、

输送能力适应率及供电能力适应率为核心的量化比选方法,并以朔黄线为例开展了案例分析,研究结果可为重载铁路实施群组运行提供开行模式方案。

1 列车群组开行模式定义与分类

重载铁路列车群组开行模式是为提升运输效率和线路输送能力而采用的一种行车组织方式。其定义为:在固定的运输通道内,依据统一的技术标准,将若干列车具备独立牵引与运行能力的重载单元列车,通过虚拟连挂的方式形成一列群组列车,实现整体调度、协同控制与综合管理的运行模式。该模式主要由2个核心要素构成。

(1) 单元列车类型,即构成群组列车的基础单元列车,主要在牵引质量、编组形式、机车数量等技术参数上存在差别。

(2) 单元列车数量与组合顺序,即确定群组列车包含的单元列车数量,并明确不同类型单元列车在群组中的排列顺序。例如,5 000吨列车(以下简称“普列”)与万吨列车混合组群的群组模式中,有“普列在前”或“万吨列车在前”2种排序方式。

当前我国重载铁路上开行的列车类型较为多样,包括普列、万吨列车,以及由多列普列或万吨列车按一定技术条件机械连挂组合形成的组合万吨、组合2万吨乃至组合3万吨列车。鉴于当前我国重载铁路路网中较少有技术站的到发线有效长能直接完成2万吨或3万吨整列列车的组合、分解作业,若将其作为单元列车将不利于群组列车的组群与解群作业。因此暂不考虑2万吨列车和3万吨列车作为单元列车,将单元列车类型严格限定为“普列”和“万吨列车”2种。

在列车群组运行下,列车群组开行模式根本上取决于基础的单元列车类型、数量以及单元列车的

排序关系。基于不同的运输需求与线路条件,通过灵活配置这些基础单元、数量和排列关系,主要衍生出以下几种典型的群组开行模式。

(1) 纯普列群组模式。纯普列群组模式以普列为唯一单元列车类型,可通过增加群组内单元列车数量(通常为2~6列)来提高单列群组列车的净载重与区间的通过列车数量,纯普列群组运行如图1所示。由于该模式的单元列车仅为普列,故该模式对车站到发线有效长要求最低,组群或解群作业可在不同股道并行完成,因此具备广泛的适应性。但随着群组内普列数量的增加,对车站咽喉区的占用次数和作业强度显著上升,多次连续发车或接车使车站作业频繁,对车站作业组织提出更高要求;且普列单列牵引质量小,增加单元列车数量带来的总重增长不如万吨列车显著,因此在整体运能上通常劣于万吨列车为单元列车的群组模式。

(2) 纯万吨列车群组模式。纯万吨列车群组模式以万吨列车为唯一单元列车类型,通常由2~3列万吨列车组群为一列群组列车,纯万吨列车群组运行如图2所示。该模式在单列运能、运输效率方面具有显著优势,相较于纯普列群组模式可在运量需求不变的情况下,减少单元列车数量或群组列车的行车量,从而在不改变线路输送能力的前提下降低线路的通过能力利用率,充分发挥万吨列车在运输效率上的巨大优势。但该模式对设施条件要求较高,特别是车站的到发线和牵引供电所的供电能力,若车站到发线不能容纳整列单元列车,则在编组万吨列车(或组合)时需要借助站内的联络线或专用线等,将显著增加群组列车在车站的作业时间,降低运输能力;且万吨列车运行需消耗更多电能,若牵引供电能力不足,则可能导致牵引供电所负荷过大或列车起动困难。总体而言,该模式更适用于



图1 纯普列群组运行

Fig.1 Pure conventional train group operation

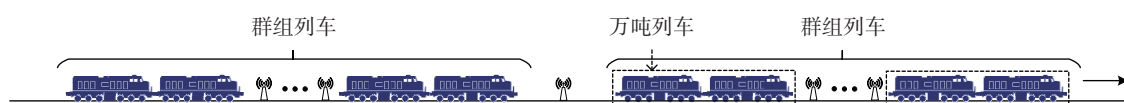


图2 纯万吨列车群组运行

Fig.2 Pure 10 000-ton train group operation

运量需求大、线路坡度条件较好且车站到发线有效长度充足的线路,可在完善的牵引供电系统下充分发挥其运能优势。

(3) 普列与万吨列车混合群组模式。普列与万吨列车混合群组模式的单元列车类型有普列和万吨列车2种,具体各类型列车的数量及组合排序方式取决于线路运量需求和车站设施条件等。根据群组中不同类型列车的排列顺序,该模式可分为“普列在前”与“万吨列车在前”2种,普列与万吨列车混合群组运行如图3所示。该模式主要源于线路沿线基础设施条件不均衡或列车来源结构复杂等实际情况,一方面可利用普列的较强灵活性满足部分车站到发线有效长不足的约束,另一方面可通过万吨列车承担主要的运输任务,提高整体运输效率。与前2种模式相比,混合群组模式在运输效率与基础设施适应性之间实现了一定平衡,既能在不显著增加供电负荷的情况下提升运输能力,又能通过合理的各类型单元列车组合调节牵引供电能力需求。但其运行组织复杂度较高,不同牵引质量与运行特性的列车在群组运行过程中对调度及车站作业协调提出更高要求。

2 列车群组开行模式比选方法

为系统评估不同列车群组开行模式在既有基础设施条件下的运行适应性与运输效能,构建以通过能力利用率、输送能力适应率和供电能力适应率为核心指标的综合比选方法。选取通过能力利用率、输送能力适应率与供电能力适应率3个指标,分别对应设施利用、运能匹配与供电安全3个维度。该方法通过采集基础数据生成若干候选的列车群组开行模式,并在统一的评价体系下进行对比分析,以选出技术可行、经济合理且具备实施条件的列车群

组开行模式。

2.1 比选指标

2.1.1 通过能力利用率

通过能力是指在采用一定类型机车车辆和行车组织方法条件下,铁路区段的各种固定设备在单位时间内所能通过的最多列车数或对数。在群组运行模式下,线路的通过能力随着群组列车内的单元列车类型和单元列车数量的变化而变化,且在单线和双线区段具有不同的运行特点。基于宋宗莹等^[12]提出的群组运行下线路通过能力计算方法,群组运行模式下的通过能力利用率计算方法如下。

(1) 群组运行下单线重载铁路线路通过能力 $N_{\text{群组}}^{\text{单平}}$ 计算方法。

$$N_{\text{群组}}^{\text{单平}} = n_{\text{群}} \cdot \frac{T_{\text{运营}} - T_l}{T} \quad (1)$$

式中: $n_{\text{群}}$ 为群组列车包含的单元列车数量,列; $T_{\text{运营}}$ 为总运营时间, min; T_l 为天窗时间, min; T 为运行图周期, min。

(2) 群组运行下双线重载铁路线路通过能力 $N_{\text{群组}}^{\text{双平}}$ 计算方法。

$$N_{\text{群组}}^{\text{双平}} = n_{\text{群}} \cdot \left[\frac{T_{\text{运营}} - T_l}{\max \left\{ I_{\text{区间}, i}^{\text{组间}}, I_{\text{出发}, i}^{\text{组间}}, I_{\text{到达}, i}^{\text{组间}} \right\}} \right] \quad (2)$$

式中: $I_{\text{区间}, i}^{\text{组间}}$, $I_{\text{出发}, i}^{\text{组间}}$, $I_{\text{到达}, i}^{\text{组间}}$ 分别为线路($i, i+1$)区间或 i 站的组间区间追踪间隔时间、组间出发追踪间隔时间及组间到达追踪间隔时间, min。

(3) 满足运量需求的群组列车行车量计算方法。令 $G_{\text{需}}$ 为线路的年度运量需求,则平均每日需要开行的群组列车数量 $N_{\text{群组}}^{\text{需}}$ 可由下式进行计算。

$$N_{\text{群组}}^{\text{需}} = \frac{G_{\text{需}} K_{\text{波}}}{(365 - T_l) Q_{\text{群组}} \varphi_{\text{载}} Y_{\text{满}}} \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{群组}}$ 为单列群组列车牵引总重, t; $\varphi_{\text{载}}$ 为货

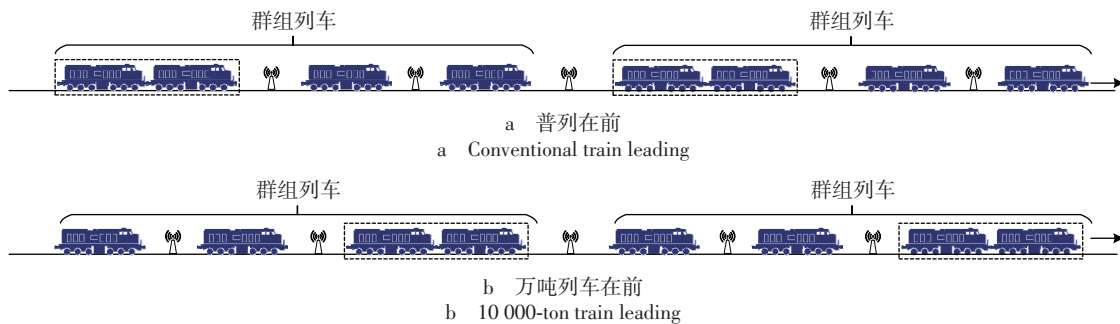


图3 普列与万吨列车混合群组运行

Fig.3 Mixed group operation of conventional trains and 10 000-ton trains

物列车平均载重系数； $Y_{\text{满}}$ 为货车满载率； $K_{\text{波}}$ 为月间运量波动系数。

(4) 通过能力利用率计算方法。基于式(1)或式(2)可计算出一个群组开行模式在单线或双线区段的平图通过能力 $N_{\text{群组}}^{\text{平}}$ ，基于式(3)可计算出在满足运量需求下每日需要开行的群组列车数量。基于此，一个群组开行模式在满足运量需求下的通过能力利用率可由下式进行计算。

$$w = \frac{N_{\text{群组}}^{\text{需}}}{N_{\text{群组}}^{\text{平}}} \quad N_{\text{群组}}^{\text{平}} \in \{N_{\text{群组}}^{\text{单平}}, N_{\text{群组}}^{\text{双平}}\} \quad (4)$$

通过能力利用率 w 是评估铁路区段运输负荷与效率的核心指标。当通过能力利用率过高，线路的行车量接近饱和时，线路将转变为路网的瓶颈区段，从而导致列车延误概率增加、应对突发事件的调整能力减弱，最终影响整个路网的运输能力。而通过能力利用率过低，则表明该线路的基础设施与运输资源存在闲置，造成运输资源浪费。在实际运营中，受车站咽喉、到发线等约束，实际通过能力可能低于平图通过能力，但由于这些约束对不同开行模式的影响基本一致，采用平图通过能力作为基准仍能有效反映各模式的相对能力水平。参考蒋洁滢^[16]对高速铁路网络能力优化的研究，将通过能力利用率的取值区间限定为0.6~0.8，一方面能留有部分通过能力以应对可能的货运需求增长，一方面也限制通过列车数不能过低，有效控制线路资源浪费。

2.1.2 输送能力适应率

输送能力适应率是评判群组开行模式合理性的重要指标之一，其核心意义在于衡量开行模式设计的运输能力与既定运输需求之间的匹配程度。一个好的开行模式应在满足运量需求的前提下，尽可能避免能力冗余，若设计运能远高于实际需求，将导致固定设施和移动设备利用率低下，造成资源闲置与经济效益损失；若设计运能无法满足需求，则会引起货物积压、运输时效难以保证。

(1) 输送能力计算方法。开行模式的理论运能 $G_{\text{群能}}$ 由群组列车的单元列车类型、数量以及群组列车开行数量所决定，具体计算方法如式(5)所示。

$$G_{\text{群能}} = \frac{(365 - T_1) N_{\text{群组}}^{\text{平}} Q_{\text{群组}} \varphi_{\text{载}} Y_{\text{满}}}{K_{\text{波}}} \quad N_{\text{群组}}^{\text{平}} \in \{N_{\text{群组}}^{\text{单平}}, N_{\text{群组}}^{\text{双平}}\} \quad (5)$$

(2) 输送能力适应率计算方法。输送能力适应率 g 计算方法如式(6)所示。

$$g = \frac{G_{\text{需}}}{G_{\text{群能}}} \quad (6)$$

输送能力适应率可表示开行模式的运能与运输需求之间的匹配关系，为确保运能一定能满足运量需求，输送能力适应率 g 应严格小于1，越接近1则表示运能与运量需求越相近。由计算方法可知，对同一群组开行模式，输送能力适应率与通过能力利用率具有正相关关系。在运输需求不变时，线路通过能力利用率直接决定了输送能力与既定运输需求之间的匹配程度。故参照通过能力利用率将匹配度值 g 的理想取值区间同样设定为0.6~0.8。

2.1.3 供电能力适应率

在重载铁路列车群组开行模式设计中，群组列车的高效运行依赖于强大的供电能力。评估牵引供电能力是否满足群组开行模式的供电需求，其本质在于将现有牵引变电所可能同时供应的最大群组列车数量与群组开行模式下牵引变电所可能同时供应的最大群组列车数量进行比对校验。

(1) 群组列车的功率计算方法。令 P, p 分别表示线路上的牵引变电所集合和索引，参考Zhou等^[17]关于高速铁路供电能力的研究，群组列车在牵引变电所 P, p 的供电分区内的平均加速度 $a_p^{\text{加}}$ 可由下式进行计算。

$$a_p^{\text{加}} = \max \left\{ \left(\frac{v_p - u_p}{t_p^{\text{运}}} \right) + r_p^{\text{运阻}} + r_p^{\text{线阻}}, 0 \right\} \quad \forall p \in P \quad (7)$$

式中： u_p, v_p 分别为群组列车驶入牵引变电所 $p \in P$ 的供电分区时的速度和驶出牵引变电所 $p \in P$ 的供电分区时的速度，m/s； $t_p^{\text{运}}$ 为群组列车在牵引变电所 $p \in P$ 的供电分区内的运行时间，s； $r_p^{\text{运阻}}, r_p^{\text{线阻}}$ 分别为群组列车在牵引变电所 $p \in P$ 的供电区间内的运行阻力加速度(与列车的运行速度和机车类型相关)和线路附加阻力加速度(与线路条件相关)，m/s²。

将群组列车在区间内视为速度为 v 的匀速运行，则总阻力加速度为 $r_p^{\text{运阻}} + r_p^{\text{线阻}}$ ，据既有货运电力机车在运动过程的受力计算方法^[18]，可分别由式(8)和式(9)计算出群组列车的单位基本运行阻力 ω_0 和变电所 $p \in P$ 的供电区间内的单位附加运行阻力 ω_j^p 。

$$\omega_0 = A + Bv + Cv^2 \quad (8)$$

$$\omega_p^p = \omega_i^p + \omega_r^p + \omega_s^p \quad \forall p \in P \quad (9)$$

式中: A, B, C 为基本阻力系数, 由机车机型决定; $\omega_i^p, \omega_r^p, \omega_s^p$ 分别为变电所 $p \in P$ 的供电区间内的单位坡道阻力、曲线阻力、隧道附加阻力, N/kN。

由式(8)和式(9)计算结果可知群组列车运行基本阻力和附加运行阻力对群组列车造成的运行阻力加速度 $r_p^{\text{运阻}}$ 和线路附加阻力加速度 $r_p^{\text{线阻}}$ 分别为

$$r_p^{\text{运阻}} = \frac{\omega_0 g_z}{1000} \quad \forall p \in P \quad (10)$$

$$r_p^{\text{线阻}} = \frac{\omega_f g_z}{1000} \quad \forall p \in P \quad (11)$$

式中: g_z 为重力加速度, 取值为 9.8 m/s^2 。

则群组列车在牵引变电所 $p \in P$ 的供电分区内的能耗 $e_p^{\text{群组}}$ 可由式(12)计算得出。

$$e_p^{\text{群组}} = M_{\text{群组}} a_p^{\text{加}} \cdot \frac{u_p + v_p}{2} \cdot t_p^{\text{运}} \quad \forall p \in P \quad (12)$$

式中: $M_{\text{群组}}$ 为单列群组列车的总质量, t。

群组列车在牵引变电所 $p \in P$ 的牵引供电分区内的功率 $y_p^{\text{群组}}$ 可近似由式(13)计算得出。

$$y_p^{\text{群组}} = \frac{e_p^{\text{群组}}}{t_p^{\text{运}}} = M_{\text{群组}} (r_p^{\text{运阻}} + r_p^{\text{线阻}}) v_p \quad \forall p \in P \quad (13)$$

(2) 牵引变电所能承载的最大群组列车数量计算方法。牵引变电所的功能是将三相高压电转换为 2 个单相的交流电, 然后向铁路上下行 2 个方向的接触网供电。基于此供电方式, 若一个牵引变电所 $p \in P$ 的装机容量为 S_p , 则该牵引变电所可同时供应的最大群组列车数量 b_p 可由下式进行计算。

$$b_p = \frac{\eta S_p}{y_p^{\text{群组}}} \quad \forall p \in P \quad (14)$$

式中: η 为牵引供电系统的综合效率(小于 1), 包括变压器、电机等能量损耗。

(3) 牵引变电所供电分区内同时运行的群组列车数量计算方法。群组运行模式下, 牵引变电所 $p \in P$ 的供电分区内可能同时运行的群组列车数量 π_p 可由下式进行计算。

$$\pi_p = \frac{t_p^{\text{运}}}{1440/N_{\text{平群组}}} \quad \forall p \in P \quad (15)$$

(4) 供电能力适应率计算方法。牵引变电所 $p \in P$ 的供电能力适应率 θ_p 可由下式进行计算。

$$\theta_p = \frac{\pi_p}{b_p} \quad \forall p \in P \quad (16)$$

为确保群组列车能稳定运行, 牵引变电所 $p \in P$ 能同时供应的最大群组列车数量 b_p 应严格大于其可能供应的群组列车数量 π_p 。且 Zhou 等^[17]研究表明, 若供电系统以接近满载的状态运行, 列车运行调整空间将极为有限, 系统难以应对实时功率波动与突发事件干扰。故为确保群组运行的稳定性, 还应预留一定的供电能力, 以应对可能的运行波动与突发状况。为此, 牵引变电所 $p \in P$ 的供电能力的适应率 θ_p 应小于 0.9。

2.2 比选步骤

为确保重载铁路列车群组开行模式设计的科学性, 需对运输需求进行精准分析, 对多种可能的开行模式进行综合比选, 将基础设施条件与运输组织目标深度融合, 最终选出技术可行、经济合理且效能最优的开行模式。其核心步骤包括基础数据采集、开行模式生成、开行模式比选以及开行模式推荐。

步骤 1: 基础数据采集。收集线路基础数据(正线数目、区间长度、坡度、曲线半径等)、车站基础数据(技术站、中间站的到发线数量及有效长等)、机车车辆数据、各牵引变电所的装机容量以及供电分区划分、群组运行的关键技术参数(群组间追踪间隔时间、群组内单元列车追踪间隔时间等)以及线路的运量需求等。

步骤 2: 候选开行模式生成。在群组开行模式的生成过程中, 首先应确定备选的单元列车类型, 可选范围为普列、万吨列车或二者混合。在单元列车类型确定的基础上, 进一步构建具体的群组列车开行模式, 明确群组内单元列车的组合结构, 若仅采用单一类型的单元列车, 则结合运量需求等实际情况确定群组列车内的单元列车数量; 若单元列车为普列和万吨列车 2 种, 则需进一步确定各类单元列车的数量及其排序关系。

步骤 3: 开行模式比选。列车群组开行模式的比选指标包括: 通过能力利用率、输送能力适应率和供电能力适应率。首先计算群组开行模式下的线路通过能力和在满足年度运量需求时每日的行车量, 基于此计算出满足运量需求时的线路通过能力利用率; 其次, 计算群组开行模式的输送能力适应率, 评判开行模式能否满足运量需求且留有部分能

力以应对未来可能的货运需求增长;最后,计算供电能力适应率,主要校验牵引变电所的供电分区内可能供应的群组列车数量是否小于其能同时供应的最大群组列车数量。通过上述指标的精确计算,可全面刻画各群组开行模式的运营效能与技术可行性。

步骤4: 开行模式推荐。对上述比选指标的计算结果进行多维度分析,选出技术可行且经济合理的开行模式。首先,以通过能力利用率为核心效率指标,若一个开行模式在满足运量需求下的通过能力利用率处于0.6~0.8,表明该模式对线路资源的占用较少且没有大量运输资源浪费。其次,输送能力适应率必须满足运量需求,其值应不大于0.8,同时不小于0.6以避免因运能过度闲置而导致资源浪费。最后,结合供电能力适应率综合评价开行模式的可行性,若有牵引变电所的供电能力适应率高于0.9,则为保证运营安全需考虑实施适当的扩容改造措施。

3 朔黄线案例分析

3.1 基础数据

朔黄线(神池南—黄骅港)是国家能源集团中国神华国家Ⅰ级电气化重载铁路,长582.4 km;共设置车站31座,到发线有效长有1 050 m, 1 800 m和2 800 m 3种规格;共设置有15个牵引变电所,朔黄线牵引变电所分布如图4所示。2025年朔黄线年计划运量为3.57亿t,而既有运输模式下的图定运能为4.03亿t,既有运输模式在运能提升方面已接近上限,难以匹配未来运量的持续增长需求,因此,在朔黄线上实施列车群组运行具有广阔前景。

2025年朔黄线的年度天窗时间为16.5 d。据朔黄线现行列车编组,设置普列的净载重为4 060 t/列,

万吨列车的净载重为8 120 t/列;为实现资源的充分利用,且考虑重载铁路上运行的货车应尽可能装满载,满载率取100%;路网的货物运输量波动较小,月间运量波动系数取1.11;群组列车运行速度设置为80 km/h。在计算供电能力适应率时,以HXD1型机车为基础机车,机车的基本阻力系数 A , B , C 分别取值为1.2, 0.006 5和0.000 279^[18];为便于计算,取朔黄线的平均坡度为4‰,平均曲线半径为1 800 m,平均隧道长度为2 000 m,参考张志文等^[18]提出的阻力计算方法并结合式(10)和式(11)可计算总阻力加速度约为 -0.04 m/s^2 ;取牵引变电所综合效率为0.85。

3.2 候选列车群组开行模式

朔黄线现行的列车编组模式有组合3万吨、组合2万吨、组合万吨、万吨和普列5种,其中组合3万吨列车长为3 990.4 m,结合朔黄线上技术站的到发线有效长来看,暂无车站有足够的到发线有效长能直接接发此列车,故在实际作业过程中,通常结合车站咽喉、联络线等其他资源完成3万吨列车的组合、分解作业;组合2万吨列车的长度为2 683.6 m,虽然朔黄线上有部分车站的到发线有效长(2 800 m)能直接完成2万吨列车的组合、分解作业,但出于作业组织与效率等方面的综合考虑,在后续的群组开行模式设计中不将3万吨和2万吨列车作为基础单元列车类型;单元万吨与组合万吨的最短和最长编组分别为1 341.8 m和1 808.4 m,普列最短为686.4 m,最长为904.2 m,均可直接作为群组列车的基础单元列车类型。基于此,以达成运量需求为目标,对不同类型单元列车的数量、排序进行组合,生成以下12种备选群组开行模式。①模式1: 3列普列群组运行。②模式2: 4列普列群组运行。

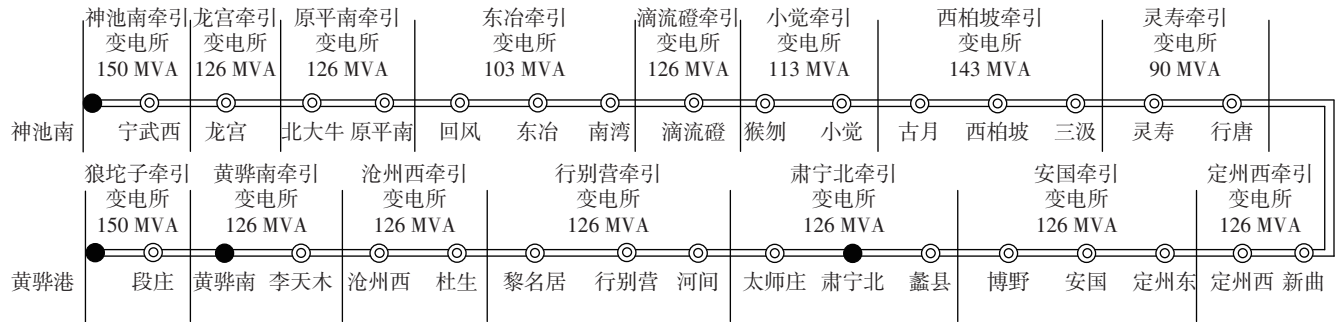


图4 朔黄线牵引变电所分布

Fig.4 Distribution of traction substations along Shuohuang Railway

③模式3：5列普列群组运行。④模式4：6列普列群组运行。⑤模式5：2列万吨列车群组运行。⑥模式6：3列万吨列车群组运行。⑦模式7：1列普列和1列万吨列车群组运行(普列在前)。⑧模式8：2列普列和1列万吨列车群组运行(普列在前)。⑨模式9：2列普列和2列万吨列车群组运行(普列在前)。⑩模式10：1列普列和1列万吨列车群组运行(万吨列车在前)。⑪模式11：2列普列和1列万吨列车群组运行(万吨列车在前)。⑫模式12：2列普列和2列万吨列车群组运行(万吨列车在前)。

3.3 群组开行模式比选

首先对各群组开行模式的通过能力利用率和输送能力适应率进行计算，群组开行模式的通过能力利用率和输送能力适应率对比如表1所示，为便于指标对比，将所有列车折算为普列，折算时将1列万吨列车视为2列普列。在提出的12种开行模式中，模式12的运能提升最为显著，其在满足近期货运需求时，线路通过能力利用率和输送能力适应率均低于60%，表明该模式的运能远高于近期货运需求。相比之下，模式1与模式3的运能提升较为有限，线路通过能力利用率和输送能力适应率均高于80%，仅能基本满足当前运量需求，对未来运量增长的适应空间较小。其余9种模式的表现则较为均衡，其通过能力利用率和输送能力适应率均处于60%至80%之间。这意味着这些模式在满足近期货运需求的同时，也为行车调度调整与未来运量增长留有一定的弹性空间，能够更好地应对群组运行中可能出现的突发事件与运量波动。进一步观察发

现，模式7，8，9和模式10，11，12仅单元列车的排序不同，但相较于普列在前，万吨列车在前时出发追踪间隔和到达追踪间隔更小，区间追踪间隔相同，使得普列在前的群组开行模式计算周期(取值为出发追踪间隔、到达追踪间隔和区间追踪间隔的最大值)更长。故在普列与万吨列车混合群组模式中，万吨列车在前通常能提供更大的运能。

进一步对朔黄线的各群组开行模式的供电能力适应率进行计算，群组开行模式供电能力适应率对比如表2所示，限于篇幅，表2中仅展示各群组开行模式下的部分计算结果：当供电能力适应率均未超过90%时，仅展示适应率最高的3座牵引变电所；若存在适应率高于90%的牵引变电所，则展示所有高于90%的牵引变电所的计算结果。从供电能力适应率来看，12种群组模式随着运能的逐渐提升对供电能力的需求也逐渐增大。对于运能较小的群组开行模式1和7，朔黄线现有的供电系统能完全满足其运行要求，且留有部分冗余。但随着开行模式运能的逐渐增长，现行供电系统的供电能力也越加紧张，模式2，3，8，10下均存在部分牵引变电所的供电能力适应率高于80%，但均不超过90%，说明现有的供电系统仍能有效应对。随着运能的进一步提升，出现牵引变电所的供电能力适应率高于90%甚至大于100%的模式。模式4，5，6，9，11，12均有部分牵引变电所的供电能力适应率高于90%，若在朔黄线上实施这些开行模式，为保障运行安全与常态化运营，则需考虑对这些供电能力适应率高于90%的牵引变电所进行扩容改造。

表1 群组开行模式的通过能力利用率和输送能力适应率对比
Tab.1 Comparison of passing capacity utilization rates and transport capacity adaptability rates for various group operation modes

群组开行 模式	区间追踪 间隔/min	出发追踪 间隔/min	到达追踪 间隔/min	计算 周期/min	单列群组 列车净载重/t	近期货运 需求/亿t	$N_{平}/$ 群组 (单元/d)	$N_{平}/$ 群组 (普列/d)	$N_{需}/$ 群组 (普列/d)	通过能力 利用率/%	输送 能力/亿t	输送能力 适应率/%
模式1	4.2	12.2	12.6	12.6	12 180	3.57	114	342	281	82	4.36	82
模式2	5.6	13.8	14.4	14.4	16 240	3.57	100	400	281	70	5.10	70
模式3	6.9	17.0	17.9	17.9	20 300	3.57	80	400	281	70	5.10	70
模式4	8.2	18.6	19.7	19.7	24 360	3.57	73	438	281	64	5.58	64
模式5	4.1	13.5	13.9	13.9	16 240	3.57	103	412	281	68	5.25	68
模式6	6.1	18.5	19.3	19.3	24 360	3.57	74	444	281	63	5.65	63
模式7	3.5	12.6	13.2	13.2	12 180	3.57	109	327	281	86	4.17	86
模式8	5.2	14.2	15.0	15.0	16 240	3.57	96	384	281	73	4.89	73
模式9	6.9	18.3	19.9	19.9	24 360	3.57	72	432	281	65	5.51	65
模式10	3.5	11.5	11.5	11.5	12 180	3.57	125	375	281	75	4.78	75
模式11	5.2	13.1	13.3	13.3	16 240	3.57	108	432	281	65	5.51	65
模式12	6.9	18.1	18.2	18.2	24 360	3.57	79	474	281	59	6.04	59

表2 群组开行模式供电能力适应率对比

Tab.2 Comparison of power supply capacity adaptability rates for various group operation modes

群组开行模式	牵引变电所	最大供应群组 列车数/列	可能供应群组 列车数/列	供电能力 适应率/%
模式1	灵寿	5.46	4.20	77
	定州西	7.64	5.74	75
	行别营	7.64	5.72	75
模式2	灵寿	4.09	3.69	90
	定州西	5.73	5.03	88
	行别营	5.73	5.02	88
模式3	灵寿	3.27	2.95	90
	定州西	4.58	4.03	88
	行别营	4.58	4.02	88
模式4	灵寿	2.73	2.69	99
	定州西	3.82	3.67	96
	行别营	3.82	3.67	96
	龙宫	3.82	3.59	94
模式5	灵寿	4.09	3.80	93
	定州西	5.73	5.18	90
	行别营	5.73	5.17	90
模式6	灵寿	2.73	2.73	100
	定州西	3.82	3.72	97
	行别营	3.82	3.72	97
	龙宫	3.82	3.64	95
模式7	灵寿	5.46	4.02	74
	定州西	7.64	5.48	72
	行别营	7.64	5.47	72
模式8	灵寿	4.09	3.54	86
	定州西	5.73	4.83	84
	行别营	5.73	4.82	84
模式9	灵寿	2.73	2.66	97
	定州西	3.82	3.62	95
	行别营	3.82	3.62	95
	龙宫	3.82	3.54	93
模式10	灵寿	5.46	4.61	84
	定州西	7.64	6.29	82
	行别营	7.64	6.28	82
模式11	灵寿	4.09	3.98	97
	定州西	5.73	5.43	95
	行别营	5.73	5.42	95
	龙宫	5.73	5.31	93
模式12	灵寿	2.73	2.91	107
	定州西	3.82	3.97	104
	行别营	3.82	3.97	104
	龙宫	3.82	3.88	102
	滴流磴	3.82	3.62	95
	黄骅南	3.82	3.61	95
	原平南	3.82	3.54	93
	肃宁北	3.82	3.51	92

综合比较各模式的3个指标计算结果,模式1和7因运输能力偏小而不具优势。模式2,3,8,10在3个指标上表现较为均衡,可在基本不改造当前牵引供电系统的条件下有效提升运能。其中,模式2,3的单元列车类型只有普列且运能略高于模式8和10,更适应当前运量需求,可作为当前运量需求下的群组列车开行模式。然而,受限于单列群组列车净载重和相关技术条件,模式2,3,8,10运能提升空间有限。若着眼于长远提升朔黄线的输送能力,则需采用运能提升更为显著的开行模式。模式4,5,6,9,11,12均需要加强部分牵引变电所(灵寿、定州西、行别营、龙宫等)的供电能力。其中,模式6的优势明显,其通过能力利用率和输送能力适应率均为63%(位于60%~80%),拥有较强的输送能力,且单元列车只有万吨列车,避免了普列和万吨列车混合组群带来的运营组织复杂化。同时,朔黄线上车站的到发线有效长完全满足直接接发万吨列车的条件,为该模式的实施提供了基础设施保障。在此基础上,线路仍可灵活补充少量普列以适应多元化运输需求。

综上所述,若仅面向当前运量需求,建议采用模式2或3(4或5列普列组群);若以长远发展和大幅度提升线路运能为目标,则模式6(3列万吨列车组群)更具有优势,但为保障该模式常态化安全运营,需考虑对灵寿、定州西、行别营、龙宫4个牵引变电所进行适当扩容改造。

4 结束语

研究提出群组运行下重载铁路线路列车群组开行模式的设计方法,定义了列车群组开行模式由单元列车类型、单元列车数量与组合顺序构成,设计3类典型的列车群组开行模式;基于此提出了以通过能力利用率、输送能力适应率和供电能力适应率为核心的群组开行模式比选方法;最后利用朔黄线实际数据进行案例论证,验证了所提出方法的可行性。结果表明:对于朔黄线,若以满足近期运量需求为目标,采用4~5列普列组群模式,可在基本不改造牵引供电系统的条件下实现稳定群组运行;若着眼于长远、大幅提升线路输送能力,则采用3列万吨列车组群模式,并配套实施灵寿、定州西等牵

引变电所的扩容改造,以支撑系统安全稳定群组运行,此外,可灵活增开少量普列,以兼顾沿线车站的多样化运输需求。未来研究可探索路网层面多条线路间跨线列车群组开行模式的设计与协调方法,研究给定群组开行模式下的车站组合分解与组群解群作业方案。

参考文献:

- [1] 宋宗莹,丁辉,王兴中,等.基于列车群组运行的重载铁路运输组织研究综述[J].铁道运输与经济,2024,46(10): 73-81, 97.
SONG Zongying, DING Hui, WANG Xingzhong, et al. Review of Heavy Haul Railway Transportation Organization Based on Group Train Operation[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(10): 73-81, 97.
- [2] CHEN W Y, ZHUO Q Y, ZHANG L. Modeling and Heuristically Solving Group Train Operation Scheduling for Heavy-Haul Railway Transportation[J]. Mathematics, 2023, 11(11): 2489.
- [3] ZHUO Q Y, CHEN W Y, YUAN Z Y. Optimizing Mixed Group Train Operation for Heavy-Haul Railway Transportation: A Case Study in China[J]. Mathematics, 2023, 11(23): 4712.
- [4] 卓岑羽,陈维亚,宋宗莹,等.重载铁路混编群组列车开行方案编制模型与算法[J].铁道科学与工程学报,2025,22(2): 569-578.
ZHUO Qinyu, CHEN Weiya, SONG Zongying, et al. A Model and an Algorithm for Generating Mixed Group Train Operation Scheme of Heavy-Haul Railway Transportation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(2): 569-578.
- [5] 倪少权,龚梓烨,宋宗莹.基于列车群组运行的双线重载铁路群组计划优化研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(6): 2479-2492.
NI Shaoquan, GONG Ziyi, SONG Zongying. Optimization Study of Group Plan on Double-Track Heavy-Haul Railways Based on Group Train Operation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(6): 2479-2492.
- [6] 王天琨,宋宗莹,吕苗苗.考虑路网车流调配的重载铁路群组计划编制方法研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(8): 3414-3424.
WANG Tiankun, SONG Zongying, LYU Miaomiao. Research on Heavy-Haul Railway Group Train Planning Considering Traffic Allocation in Railway Network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(8): 3414-3424.
- [7] MA X L, ZHOU M, WANG H W, et al. Virtual-Coupling-Based Timetable Rescheduling for Heavy-Haul Railways under Disruptions[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2024, 11(5): 7045-7054.
- [8] 吕苗苗,王一博,赵德言,等.区间中断场景下重载铁路群组列车运行调整优化方法研究[J/OL].铁道学报,2025(2025-06-26). <https://link.cnki.net/urlid/11.2104.U.20250626.0835.002>.
LYU Miaomiao, WANG Yibo, ZHAO Deyan, et al. Adjustment and Optimization Method for Heavy Haul Railway Group Train Operation under Section Blockage Scenarios[J/OL]. Journal of the China Railway Society, 2025(2025-06-26). <https://link.cnki.net/urlid/11.2104.U.20250626.0835.002>.
- [9] 宋宗莹,龚梓烨,王鹏,等.基于群组运行模式的列车运行图智能编制系统设计[J].铁路计算机应用,2024,33(11): 85-89.
SONG Zongying, GONG Ziyi, WANG Peng, et al. Train Operation Diagram Intelligent Compilation System Based on Cluster Operation Mode[J]. Railway Computer Application, 2024, 33(11): 85-89.
- [10] 宋宗莹,梁芮嘉,王鹏,等.基于群组运行的重载铁路列车运行图优化研究[J].铁道经济研究,2024(5): 28-37.
SONG Zongying, LIANG Ruijia, WANG Peng, et al. Optimization of Heavy-Haul Train Operating Diagram Based on Group Operation[J]. Railway Economics Research, 2024(5): 28-37.
- [11] 中国神华能源股份有限公司,西南交通大学.重载铁路列车群组运行下技术站通过能力计算方法及装置:CN119953432B[P].2025-11-18.
- [12] 宋宗莹,周芳如,谢琦,等.重载路网列车群组运行情景推演及运能协调度评估研究[J].铁道运输与经济,2025,47(7): 126-139.
SONG Zongying, ZHOU Fangru, XIE Qi, et al. Scenario Deduction of Train Group Operation and Capacity Coordination Evaluation for Heavy-Haul Railway Networks[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(7): 126-139.
- [13] 杨晓明,杨在旭,宋宗莹.基于虚拟编组技术的单线重载铁路通过能力计算方法研究[J].铁道运输与经济,2024,46(6): 17-26, 41.
YANG Xiaoming, YANG Zaixu, SONG Zongying. Calculation Method for the Capacity of Single-Track Heavy-Haul Railway Line Based on Virtual-Coupling Technology[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(6): 17-26, 41.
- [14] 王付军,刘鸿飞,崔莉,等.重载列车群组运行模式下

(下转第123页)