文章编号：1003-1421(2026)06-0082-08
引用格式：郭根材，单杏花，贺振欢，等.考虑存车与检修的动车组交路方案编制优化模型研究[J].铁道运输与经济，2026，48(6)：82-89.
GUO Gencai，SHAN Xinghua，HE Zhenhuan，et al. Optimization Model of EMU Circulation Plan Considering Vehicle Storage and Maintenance[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：82-89.

考虑存车与检修的动车组交路方案编制优化模型研究

郭根材[1]，单杏花[1]，贺振欢[2]，刘彦麟[1]

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所，北京 100081；2.北京交通大学 交通运输学院，北京 100044)

摘 要：为探讨高速铁路动车组交路编制优化问题，分析动车组交路编制的主要影响因素，对比列车开行方案编制、列车运行图编制两阶段优化动车组交路方案的流程与特征；以列车为点、接续关系为边，设计以接续边类型表述检修、存车、接续作业的动车组接续服务网络，将动车组交路编制问题转换为一类特殊的网络流问题；综合考虑动车组检修与多日交路的存车作业需求，以总检修次数最小为目标，基于网络流平衡与累计递推思想，构建列车到发时刻信息不确定条件下考虑存车与检修的动车组交路方案编制优化模型；针对局部铁路网结构进行了案例研究，并对模型进行求解，验证了动车组交路方案编制优化模型的有效性，为合理设计动车组交路、提高运力资源运用效率提供理论参考。

关键词：高速铁路；动车组交路方案；动车组接续服务网络；整数规划模型；检修；存车
中图分类号：U292.5 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251110002

Optimization Model of EMU Circulation Plan Considering Vehicle Storage and Maintenance

GUO Gencai[1]，SHAN Xinghua[1]，HE Zhenhuan[2]，LIU Yanlin[1]

(1. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To explore the optimization of high speed railway EMU circulation plans, this paper analyzed the main influencing factors of EMU circulation, and compared the process and characteristics of optimizing EMU circulation plans in the train operation planning and train working diagram stages. By taking trains as nodes and connection relationships as edges, an EMU connection service network was designed, in which edge types represent maintenance, storage, and connection operations, thus transforming the EMU circulation planning problem into a special network flow problem. Considering the requirements of EMU maintenance and storage operations in multi-day circulation plans, an optimization model for EMU circulation was constructed based on network flow balance and cumulative recursion concepts, under conditions of uncertain train arrival and departure times, with the objective of minimizing the total number of maintenance operations. A case study was conducted

收稿日期：2025-11-10
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2024X037)；国家自然科学基金项目(U2568220)

on a local railway network, and the model was solved using CPLEX software. The results show that the proposed optimization model for EMU circulation plans is effective and provides a theoretical reference for rationally designing EMU circulation plans and improving the utilization efficiency of transport capacity resources.

Keywords: High Speed Railway; EMU Circulation Plan; EMU Connection Service Network; Integer Programming Model; Maintenance; Vehicle Storage

0　引言

动车组交路方案综合考虑列车开行需求、运力资源布局、动车组配属、检修标准等因素，明确了旅客列车在车底交路中的接续关系。结合列车时刻表是否已明确，动车组交路方案可以分为列车开行方案编制、列车运行图编制2个阶段编制优化。列车开行方案编制阶段主要优化动车组交路接续车次序列、检修地点、存车地点等，作为列车运行图编制的输入；列车运行图编制阶段主要在已有交路方案基础上进行交路接续时间优化，也可以结合列车运行图编制进行动车组交路的全要素优化。

国内外大部分学者在给定列车时刻表条件下，基于多旅行商理论[1]、多商品网络流理论[2]构建动车组交路优化模型，目标函数主要有动车组车底数最少[3]、交路总损失里程最小[4]、交路总接续时长最小[5]、非配属动车所检修次数最小[6]等，主要考虑因素有交路接续里程与时长[7]、检修能力[8]、空车调拨回送[9]、离所时间[4]、客座率偏好[10]等；部分学者基于给定列车时刻表考虑了动车组交路可变编组问题[11-12]、动车组夜间存放问题[13]；部分学者将动车组交路与运力资源配置[14]、检修运用计划[15-16]、列车运行图[17-18]进行一体化优化，构造了动车组交路计划与运用计划、列车运行图的综合优化模型。这些研究为列车时刻表给定条件下优化动车组交路方案，协同优化动车组交路与列车运行图提供了基础理论，但不能完全适应列车开行方案编制阶段的动车组交路优化问题，需要进一步考虑列车时刻表不确定条件下多日交路方案的动车组过夜存放、每日运行时长限制等问题。

研究针对动车组交路方案编制问题，分析铁路生产实践中列车开行方案、列车运行图编制阶段的动车组交路优化流程，结合动车组过夜存放、每日运行时长限制等设计需求，基于网络流平衡与累计递推思想构建了列车到发时刻信息不确定条件下考虑存车与检修的动车组交路方案编制优化整数规划模型，并进行了案例求解验证，实现给定列车开行需求的车底交路方案自动求解生成。

1　动车组交路方案影响因素与优化流程分析

1.1　影响因素

动车组交路方案编制过程中需要根据列车开行需求，综合考虑旅客列车的接续顺序、交路里程、存车检修地点等，尽可能使交路里程与时长接近检修标准，编制过程中主要考虑的因素如下。

（1）担当与配属。我国铁路按铁路局集团公司配属管理动车组，列车担当局与动车组配属局一般保持一致。为提高动车组利用效率，各铁路局集团公司综合考虑客流需求及动车组利用特征，在列车运行图调整阶段通过增开、停运、延长/缩短运行区段等手段调整列车开行方案，同步调整车底交路方案。

（2）运用检修标准。动车组交路的里程与天数应满足对应型号动车组的一级修里程和时长检修标准。随着智能化检查技术提升，部分动车所采用了机检与人检轮替的检修模式，动车组交路的里程与时长检修标准进一步延长。

（3）动车组异地存放。动车组交路可以分为单日交路、两日交路、三日交路等，动车组在非检修日需要在存车场或具备存车条件的车站进行夜间存放。动车组异地存车可以使不配置动车所的城市的列车始发终到时间不局限于车底立折服务时间窗内，扩展了列车服务时间范围。

（4）日运用时长。我国高速铁路采用垂直天窗模式，为保障综合维修作业需在夜间停止运营。动车组交路每日运用时长应小于扣除综合维修作业时间后的最大运营时长。

（5）配属局检修。考虑到跨铁路局集团公司的动车组检修作业会涉及到费用结算等问题，设计动车组交路时检修作业地点一般安排在配属所，虽然

在一定程度上会影响动车组运用效率，但有利于减小管理成本。

1.2　动车组交路编制流程

动车组交路方案优化根据前后衔接业务可以分为列车开行方案编制和列车运行图编制2个阶段优化，动车组交路方案优化流程如图1所示。列车开行方案编制阶段优化交路方案主要是根据列车开行需求安排确定最大化接近动车组检修里程与时长的车次序列，作为约束条件输给运行图编制系统；列车运行图编制阶段全要素优化交路方案是根据运行图编制的列车始发终到时间，确定满足折返作业或接续作业要求，且交路里程最大化的车次序列。列车开行方案编制阶段优化交路方案可以实现交路车次的折返/接续时间最小，动车组运用效率相对较高；列车运行图编制阶段优化列车交路可以减少列车运行图编制约束，有利于最大化利用车站、线路能力。

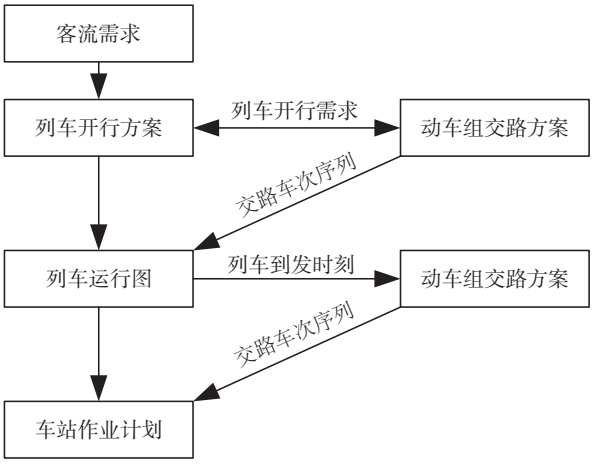

图1　动车组交路方案优化流程

Fig.1　Optimization process of EMU circulation plans

2个阶段的优化核心均为寻找最大化接近检修里程与时长标准的交路车次序列集合，实现运力资源最大化利用；二者的差异为：运行图调整阶段优化动车组交路时列车运行时长、列车到发时刻以及车底接续时间是精准的；列车开行方案编制阶优化动车组交路时，列车运行时间是估算的，车底接续时间一般按最小接续时长考虑。另外，列车运行图编制阶段优化动车组交路时由于列车到发时间明确，列车接续关系可以根据列车到发时刻的间隔时长进行筛选，列车接续组合规模要小于列车开行方案编制阶段的列车接续组合规模。

在列车运行图调整实践中，铁路市场营销人员根据客流需求与运力资源配置情况，分析确定列车起讫点、径路、频率等列车开行方案要素，统筹考虑车底来源及其担当交路的里程与时长、存车与检修地点等，通过反复比选分析确定满足客流出行需求的列车开行方案与满足检修标准的动车组交路方案，其中动车组交路方案的里程与时长尽可能接近检修标准，在此基础上提交给运输工作人员编制列车运行图、车站接发车作业方案，确定列车在沿途各站的到发时刻和运用股道。

1.3　动车组接续服务网络设计

结合网络属性，动车组交路可以认为是由多个列车构成的一个回路，即从动车所出发，按照顺序担当相关列车后返回动车所进行一级检修作业。根据设计对象，网络可以分为铁路物理网络、以列车始发终到站为点的接续服务网络、包含停站信息的列车服务网络等多种类型。结合动车组交路编制需求，以列车为点、接续关系为边，构建动车组接续服务网络，通过边的类型属性分别表示列车接续、检修、存车作业。当边为接续边时表示列车之间存在交路接续关系，当边为存车边时表示列车之间有存车作业，当边为检修边时表示列车之间存在检修作业，三类型边存在包含关系，即检修边包含存车边，存车边包含接续边。

根据列车终到站与始发站的关联关系分析列车接续可行性，筛选所有可行的备选动车组接续关系，构建动车组列车接续服务网络如图2所示。图2为1个动车运用所、1个存车场、6列列车构成的列车接续服务网络，其中绿色圆圈表示需要分配车底的列车，灰色虚线表示备选接续关系，蓝线表示选中的车底接续关系，紫线表示存车接续关系，红线表示检修接续关系，列车L_1，L_2和列车L_3，L_4，L_5，

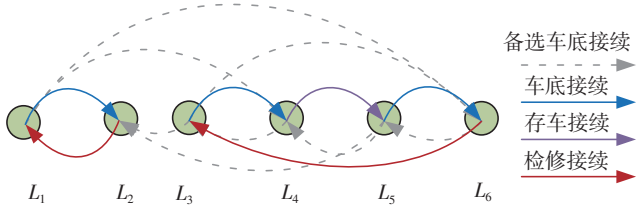

图2　列车接续服务网络

Fig.2　Train connection service network

L_6分别构成2个列车交路，其中列车L_2和列车L_6终到车站后需要入动车所进行检修作业，列车L_4终到车站后需要进入存车场进行存车作业。

考虑到每列列车均需安排动车组交路，每列列车有唯一的接续列车与被接续列车。在动车组接续服务网络中，可以认为每个点均有唯一的流入流量与唯一的流出流量，动车组交路编制优化问题可以转化为一类特殊的网络流问题。通过调整接续边的类型，表示交路方案的车底接续、检修、存车等作业；结合累计递推思想，根据接续边类型递推更新列车的交路累计运行里程、累计运行时长、日累计运行时长等交路特征参数，从而可以判断动车组交路的合理性。

2　考虑检修与存车的动车组交路方案编制模型

为提高动车组交路方案编制的灵活性、简便性，在列车开行方案编制阶段根据列车开行需求自动生成合理的交路车次序列，结合网络流平衡与累计递推思想，基于动车组接续服务网络设计列车接续关系、交路累计里程、交路累计时长、日交路累计时长等变量，构建列车到发时刻信息不确定条件下考虑存车与检修的动车组交路方案编制优化模型。

2.1　符号与变量

为方便问题描述，研究所使用的集合、参数、决策变量、辅助决策变量描述如下。

模型涉及的集合有：动车组接续服务网$G=(L, E)$；L为列车集合，$i\in L$，$j\in L$；E为动车组交路的备选列车接续关系集合，$e\in E$，$e=(i, j)$为列车i与列车j的交路接续关系；P为动车组交路集合，$p\in P$；W为动车所集合，$w\in W$；S为存车场集合，$s\in S$。

模型涉及的参数有：l_i为列车i的开行距离，km；π_i为列车i的运行时长，min；t_{ij}为列车i与列车j的交路接续时长，min；T为动车组一级修时长标准，min；D为动车组一级修距离标准，km；B为动车组每日可担当的最大运行时长，min；o_i为列车i终到后是否具备检修条件的参数，当列车i的终到站连通动车所时取1，不连通时取0；ω_i为列车i终到后是否具备存车条件的参数，当列车i的终到站连通存车场时取1，不连通时取0；κ_i^w为列车i终到车站与动车所w的对应服务关系，当列车i的终到站连通动车所w时取1，不连通时取0；γ_i^s为列车i终到车站与存车场s的对应服务关系，当列车i的终到站连通存车场s时取1，不连通时取0；n_w为动车所w的检修能力，组/d；m_s为存车场s的存车能力，组/d。

模型涉及的决策变量有：x_{ij}为列车i与列车j是否存在交路接续关系，如果列车j为列车i的后续交路列车则为1，否则为0；y_{ij}为列车i与列车j间是否存在一级修作业，如果列车j为列车i的后续交路列车且进行一级修作业则为1，否则为0；z_{ij}为列车i与列车j间是否存在存车作业，如果列车j为列车i的后续交路列车且进行存车作业则为1，否则为0。

模型涉及的辅助决策变量有：q_{ip}为列车i与交路p对应关系，如果列车i属于交路p则为1，否则为0；d_i为列车i的交路累计运行里程变量，km；t_i为列车i的交路累计运行时长变量，min；r_i为列车i在跨天交路的每日累计运行时长变量，min。

2.2　目标函数

动车组交路的优化目标一般有配属需求数量最小、检修次数最小、接续总时长最小等。在列车开行方案编制阶段优化动车组交路方案时，列车到发时刻信息不确定，列车间的接续时长不能精确计算，只能根据实际运营经验估算；另外，考虑到动车组配属需求数量、检修次数最小、总接续时间存在一定相关性，本研究以动车组总检修次数最小为目标构建模型目标函数。在满足动车组修程修制条件下，通过最小化动车组检修次数，使得动车组交路里程与时长尽可能接近检修标准，实现最少数量的动车组完成列车担当任务，有利于降低铁路运营成本，提高动车组运用效率。

$$\min z=\sum_{e=(i,\ j),\ e\in E} y_{ij} \tag{1}$$

式中：z为动车组交路的总检修次数。

2.3　约束条件

（1）流量平衡约束。每个列车都需要安排交路且只能有唯一的接续列车和被接续列车，即列车接续服务网中每个列车节点的流入车流量和流出车流量均为1。

$$\sum_{e=(i,\ j),\ e\in E} x_{ij}=1 \qquad \forall i\in L \tag{2}$$

$$\sum_{e=(i,\ j),\ e\in E} x_{ij}=1 \qquad \forall j\in L \tag{3}$$

（2）交路约束。每个列车只能包含在唯一的交路中；2列车存在接续关系时，2列车应在同一交路中。

$$\sum_{p\in P} q_{ip}=1 \qquad \forall i\in L \tag{4}$$

$$x_{ij}q_{ip}=x_{ij}q_{jp} \qquad \forall e=(i,\ j),\ e\in E,\ p\in P \tag{5}$$

（3）接续边耦合约束。检修边与存车边、检修边之间存在耦合关系，只有列车接续服务网的接续边被选定时才能安排检修作业与存车作业；列车安排检修作业时也包含了存车作业。

$$x_{ij}\geqslant y_{ij} \qquad \forall e=(i,\ j),\ e\in E \tag{6}$$

$$x_{ij}\geqslant z_{ij} \qquad \forall e=(i,\ j),\ e\in E \tag{7}$$

$$y_{ij}\leqslant z_{ij} \qquad \forall e=(i,\ j),\ e\in E \tag{8}$$

（4）交路里程约束。利用累计递推思想设计累计里程变量的递推约束关系，只有列车存在接续关系时累计里程才会在列车间传递，动车组进行检修作业后累计里程重新计算统计，为当前列车的运行里程；所有列车的交路累计里程小于检修里程标准。

$$d_j=l_j+\sum_{i\in L}\left(x_{ij}-y_{ij}\right)\cdot d_i \qquad \forall j\in L \tag{9}$$

$$d_i\leqslant D \qquad \forall i\in L \tag{10}$$

（5）交路时长约束。利用累计递推思想设计累计时长变量的递推约束关系，只有列车存在接续关系时累计时长才会在列车间传递，动车组进行检修作业后累计时长重新计算统计，为当前列车的运行时长；交路累计时长应小于检修时长标准。

$$t_j=\pi_j+\sum_{i\in L}\left(x_{ij}-y_{ij}\right)\cdot(t_i+t_{ij}) \qquad \forall j\in L \tag{11}$$

$$t_i\leqslant T \qquad \forall i\in L \tag{12}$$

（6）检修地点约束。一个动车组交路仅安排1次一级检修；为避免动车所之间的检修费用结算，动车组只有在列车终到站连通配属所时才安排一级检修作业。

$$\sum_{e=(i,\ j),\ e\in E} y_{ij}q_{ip}\leqslant 1 \qquad \forall p\in P \tag{13}$$

$$y_{ij}\leqslant o_i \qquad \forall e=(i,\ j),\ e\in E \tag{14}$$

（7）存车地点与日运行时长约束。由于高速铁路综合维修天窗设置在夜间，多日动车组交路需要在存车场或具备存车条件的车站过夜存放；动车组日运用时长小于扣除综合维修作业时间后的最大运营时长。利用累计递推思想，设计日交路累计运行时长变量的递推约束关系，当列车存在存车作业时，交路的日累计运行时长重新计算统计。

$$z_{ij}\leqslant \omega_i \qquad \forall e=(i,\ j),\ e\in E \tag{15}$$

$$r_i\leqslant B \qquad \forall i\in L \tag{16}$$

$$r_j=\pi_j+\sum_{i\in L}\left(x_{ij}-z_{ij}\right)\cdot(r_i+t_{ij}) \qquad \forall j\in L \tag{17}$$

（8）检修存车能力约束。动车所与存车场安排的检修作业数量与存车作业数量应满足其检修与存车能力限制。

$$\sum_{e=(i,\ j),\ e\in E} \kappa_i^w\cdot y_{ij}\leqslant n_w \qquad \forall w\in W \tag{18}$$

$$\sum_{e=(i,\ j),\ e\in E} \gamma_i^s\cdot z_{ij}\leqslant m_s \qquad \forall s\in S \tag{19}$$

2.4　模型线性化

由于模型中出现了2个变量的乘积，构建的动车组交路编制优化模型为非线性整数规划模型。为方便求解，针对两个变量的乘积引入中间变量，通过增加约束条件将模型线性化。例如对于公式(9)中出现的乘积组合$x_{ij}d_i$，通过引入整数中间变量$u_{ij}=x_{ij}d_i$，当u_{ij}，x_{ij}，d_i满足公式(20)和(21)时，实现乘积组合$x_{ij}d_i$转换为线性约束。

$$d_i-\alpha(1-x_{ij})\leqslant u_{ij}\leqslant d_i \tag{20}$$

式中：α为极大数。

$$0\leqslant u_{ij}\leqslant \alpha x_{ij} \tag{21}$$

利用该逻辑对模型中的其他变量的乘积引入中间变量，并设置对应的约束条件，将模型转换为整数规划线性模型。

3　案例分析

3.1　案例背景

以局部路网结构为对象进行案例研究，涉及8个节点枢纽，其中节点S_1，S_4，S_5，S_6，S_7具备检修、存车条件，检修能力为8组/d，存车能力为8组/d；节点S_2，S_3，S_8仅具备存车条件，存车能力均为4组/日。案例路网开行S_1至S_4的本线列车，开行S_1，S_3至S_5，S_6，S_7，S_8的跨线列车，共计列车24列。案例路网结构与列车开行结构如图3所示。

列车运行时长根据区间运行时分、列车停站次数、起停车附加时分等因素估算；备选列车接续关

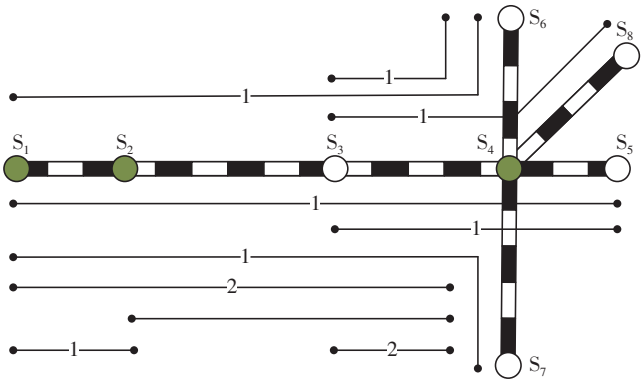

图3　案例路网结构与列车开行结构

Fig.3　Railway network structure and train operation structure of case study

系根据列车间的终到站与始发站关系确定，列车接续时长按最短列车接续时间25 min考虑。将图3中的列车开行方案结合开行频率、上下行方向拓展为车次列车，列车开行需求信息如表1所示。

考虑到同类方案中列车的前后接续关系对求解结果没有影响，尤其短途城际列车在固定区段折返运行，为降低列车接续关系的组合规模，可以将部分短途列车间的接续关系固化，预留部分短途列车与长途列车进行灵活组合，从而降低列车接续组合规模与模型求解规模。根据列车始发站与终到站、检修与存车条件，筛选所有可行的备选列车接续关系，进一步设计列车接续服务网络以及检修、存车地点的约束参数，其列车节点数量为24个，接续边数量为100条。结合动车组运用技术条件设置模型参数，动车组检修里程标准取4 400 km，检修时长标准取48 h；动车组交路日累计最大运行时长取1 080 min。

表1　列车开行需求信息

Tab.1　Train operation information

方案编号	起点	终点	运行时长/min	运行里程/km
B1	S_4	S_1	720	1 600
B2	S_4	S_1	720	1 600
B3	S_1	S_4	720	1 600
B4	S_1	S_4	720	1 600
C1	S_4	S_2	420	1 200
C2	S_2	S_4	420	1 200
D1	S_4	S_3	120	240
D2	S_4	S_3	120	240
D3	S_3	S_4	120	240
D4	S_3	S_4	120	240
E1	S_1	S_2	240	400
E2	S_2	S_1	240	400
G1	S_1	S_7	900	2 200
G2	S_7	S_1	900	2 200
H1	S_1	S_6	900	2 200
H2	S_6	S_1	900	2 200
I1	S_1	S_5	840	1 900
I2	S_5	S_1	840	1 900
L1	S_3	S_8	240	610
L2	S_8	S_3	240	610
M1	S_3	S_5	180	550
M2	S_5	S_3	180	550
N1	S_3	S_6	300	840
N2	S_6	S_3	300	840

3.2　案例计算

运用商业软件对模型进行求解，计算环境的处理器为Intel(R) Core(TM) i7-9750H，内存为16 GB，计算案例的动车组列车交路方案，求解时间设置为3 600 s，求解获得总检修次数为7次的交路方案，动车组交路的数量为7个，存车次数为7次。求解获得的动车组交路方案给出了各交路的交路天数、车次序列、检修与存车地点，案例动车组交路方案1如表2所示。

表2　案例动车组交路方案1

Tab.2　EMU circulation plan of Case 1

序号	车次序列	交路天数/d	存车地点	检修地点	交路里程/km
1	E1—C2(存)—B1(检)	2	S_4	S_1	3 200
2	D1—D3—B2(存)—B3(检)	2	S_1	S_4	3 680
3	B4—D2(存)—M1—I2(检)	2	S_3	S_1	4 290
4	M2—D4—C1—E2(存)—I1(检)	2	S_1	S_5	4 290
5	G2(存)—G1(检)	2	S_1	S_7	4 400
6	H2(存)—H1(检)	2	S_1	S_6	4 400
7	N2—L1—L2(存)—N1(检)	2	S_3	S_6	2 900

为集约化管理动车组检修与存车作业，取消S_6，S_7检修条件，取消S_8存车条件，重新对案例进行求解，获得新的动车组交路方案，即案例动车组交路方案2如表3所示。

3.3　计算结果分析

从求解结果可以看出，2个方案的交路个数与动车组平均交路里程相同，但由于检修地点与存车地点的限制不同，交路方案的车次序列发生变化，2个交路方案均满足动车组的检修距离与时长标准。方案1的交路里程方差为389 966.7，大于方案2的

交路里程方差值，说明检修与存车地点越多，动车组交路方案的差异性越大，组合也越灵活，有利于动车组交路方案设计。案例动车组交路里程方差分析如表4所示。

表3　案例动车组交路方案2

Tab.3　EMU circulation plan of Case 2

序号	车次序列	交路天数/d	存车地点	检修地点	交路里程/km
1	G1(存)—G2(检)	2	S_4	S_1	4 400
2	D2—23—C1(存)—E2—B4(检)	2	S_2	S_4	3 680
3	H1(存)—H2(检)	2	S_6	S_1	4 400
4	M2—L1—L2(存)—N1—N2—M1(检)	2	S_3	S_5	4 000
5	B2—E1(存)—C2(检)	2	S_2	S_4	3 200
6	B1(存)—B3—D1—D4(检)	2	S_1	S_4	3 680
7	I2(存)—I1(检)	2	S_1	S_5	3 800

表4　案例动车组交路里程方差分析

Tab.4　Variance analysis of EMU circulation mileage for case studies

组别	检修地点数量	存车地点数量	交路数量	累计里程/km	平均里程/km	方差
方案1	5	3	7	27 160	3 880	389 966.7
方案2	3	2	7	27 160	3 880	184 000.0

4　结束语

以动车组接续服务网络为基础，利用累计递推思想，设计了交路累计里程变量、累计时长变量、日累计时长变量及递推关系，以总检修次数最小为目标，构建了考虑存车与检修的动车组交路方案编制优化模型，实现列车时刻表不明确条件下多日动车组交路方案的商业软件求解，为列车开行方案编制阶段优化动车组交路提供了一种新方法。后续研究还需要进一步聚焦模型的高效求解算法设计，以及动车组交路方案与列车开行方案、列车运行图的协同编制问题[19]，实现列车开行方案、列车交路方案和列车运行图根据动态客流需求变化进行灵活调整。

参考文献：

[1] 赵　鹏，富井规雄．动车组运用计划及其编制算法[J]．铁道学报，2003，25(3)：1-7.
ZHAO Peng，TOMII Norio. Train-Set Scheduling and an Algorithm[J]. Journal of the China Railway Society，2003，25(3)：1-7.

[2] ALFIERI A，GROOT R，KROON L，et al. Efficient Circulation of Railway Rolling Stock[J]. Transportation Science，2006，40(3)：378-391.

[3] 林柏梁，沈姚铭，钟文健，等．车底数最小化的动车组交路计划优化[J]．中国铁道科学，2023，44(5)：210-221.
LIN Boliang，SHEN Yaoming，ZHONG Wenjian，et al. Optimization of the Electric Multiple Units Circulation Plan with the Minimum Number of Train-Set[J]. China Railway Science，2023，44(5)：210-221.

[4] 郭倩倩，王振宇，林柏梁．离所时间限制下动车组交路计划优化研究[J]．铁道学报，2023，45(11)：11-19.
GUO Qianqian，WANG Zhenyu，LIN Boliang. Research on Optimization of EMU Routing Plan under Time Limit of Departure from Station[J]. Journal of the China Railway Society，2023，45(11)：11-19.

[5] 李　建，林柏梁，耿令乾，等．基于交路接续的动车组运用计划优化模型与算法[J]．交通运输系统工程与信息，2015，15(5)：172-177，194.
LI Jian，LIN Boliang，GENG Lingqian，et al. Optimization Model and Algorithm for Motor Trainset Utilization Scheduling Based on Routes Connection[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2015，15(5)：172-177，194.

[6] 李亚轩，聂　磊，谭宇燕．成网条件下的动车组交路计划编制方法[J]．铁道学报，2025，47(10)：11-22.
LI Yaxuan，NIE Lei，TAN Yuyan. Optimization of EMU Circulation Plan under High Speed Railway Network[J]. Journal of the China Railway Society，2025，47(10)：11-22.

[7] 李　华，韩宝明，张　琦，等．动车组交路计划优化模型与算法研究[J]．铁道学报，2013，35(3)：1-8.
LI Hua，HAN Baoming，ZHANG Qi，et al. Research on Optimization Model and Algorithm of EMU Circulation Plan[J]. Journal of the China Railway Society，2013，35(3)：1-8.

[8] 江政杰，聂　磊，贺振欢，等．考虑检修能力约束的动车组交路计划优化模型与算法[J]．铁道运输与经济，2016，38(10)：77-82.
JIANG Zhengjie，NIE Lei，HE Zhenhuan，et al. Optimization Model and Algorithm for EMU Routing Plan with Constraint of Maintenance Capacity[J]. Railway Transport and Economy，2016，38(10)：77-82.

[9] 郑亚晶，李耀辉，靳文舟．考虑重联和空车回送的动车组周转优化研究[J]．华南理工大学学报(自然科学版)，2021，49(4)：80-89.

ZHENG Yajing, LI Yaohui, JIN Wenzhou. Study on the Optimization of EMU Turnover with Considering Reconnection and Empty Return[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(4): 80-89.

[10] 周丽萍，赵红森，李艳英，等. 考虑客座率偏好的动车组周转计划编制研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(8)：8-16.
ZHOU Liping, ZHAO Hongsen, LI Yanying, et al. Circulation Plan for EMUs Considering Load Factors[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(8): 8-16.

[11] 钟庆伟，张永祥，王　典，等. 基于列车车次的动车组运用优化模型与算法[J]. 西南交通大学学报，2021，56(2)：385-394.
ZHONG Qingwei, ZHANG Yongxiang, WANG Dian, et al. Optimization Model and Algorithm for Train-Set Scheduling Based on Trip Sequence[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(2): 385-394.

[12] 武晋飞，薛　冰，单杏花. 考虑旅客需求的可变编组动车组运用优化方法研究[J]. 铁道学报，2024，46(10)：1-10.
WU Jinfei, XUE Bing, SHAN Xinghua. Research on Optimization of Flexible Train Composition Circulation Plan Considering Passenger Demand[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(10): 1-10.

[13] 牛家鑫，赵　鹏，乔　珂，等. 考虑存车条件的动车组交路计划优化方法[J]. 铁道学报，2025，47(1)：11-20.
NIU Jiaxin, ZHAO Peng, QIAO Ke, et al. Optimization Method for Railway Rolling Stock Planning Considering Parking Conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(1): 11-20.

[14] 苗建瑞，王　莹，杨肇夏. 基于最优接续网络的动车组交路计划优化模型与算法研究[J]. 铁道学报，2010，32(2)：2.
MIAO Jianrui, WANG Ying, YANG Zhaoxia. Research on the Optimization of EMU Circulation Based on Optimized Connecting Network[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(2): 2.

[15] 耿敬春，肖荣国，倪少权，等. 客运专线动车组周期性运用计划编制的研究[J]. 铁道学报，2006，28(4)：17-21.
GENG Jingchun, XIAO Rongguo, NI Shaoquan, et al. Research on Periodicity of Motor Train Set Scheduling for Special Lines for Passenger Traffic[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(4): 17-21.

[16] 王忠凯，史天运，张惟皎，等. 动车组运用计划和检修计划一体化编制模型及算法[J]. 中国铁道科学，2012，33(3)：102-108.
WANG Zhongkai, SHI Tianyun, ZHANG Weijiao, et al. Model and Algorithm for the Integrative Scheduling of EMU Utilization Plan and Maintenance Plan[J]. China Railway Science, 2012, 33(3): 102-108.

[17] 安　迪，武晋飞，张宇墨. 高速铁路列车运行图一体化自动编制方法研究[J]. 铁道学报，2024，46(2)：12-21.
AN Di, WU Jinfei, ZHANG Yumo. Integrated Automatic Timetabling Method for High Speed Railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(2): 12-21.

[18] 张　慧，蒋佳锟，鲜楚逸，等. 混合交路模式下城市轨道交通交路计划与时刻表综合优化研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(12)：171-180.
ZHANG Hui, JIANG Jiakun, XIAN Chuyi, et al. Comprehensive Optimization of Routing Plan and Timetable of Urban Rail Transit Based on Nested Rail Route[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(12): 171-180.

[19] 宁　健，范家铭，王　鹏，等. 铁路列车运行图优化技术研究综述[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：1-16，29.
NING Jian, FAN Jiaming, WANG Peng, et al. Review of Research on Optimization Technology of Railway Train Working Diagram[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(8): 1-16, 29.

(责任编辑　刘宁馨)