文章编号：1003-1421(2026)07-0109-10
引用格式：林枫，李敬伟，张晓栋，等. 高速铁路成网下基于供需适配的列车运行优化方法研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(7)：109-118.
LIN Feng，LI Jingwei，ZHANG Xiaodong，et al. Research on Train Operation Optimization Method Based on Supply-Demand Matching under High Speed Railway Network Formation[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(7)：109-118.

高速铁路成网下基于供需适配的列车运行优化方法研究

林　枫[1]，李敬伟[2]，张晓栋[3]，黄建秋[2]，李怡娜[2]，郭一唯[1,4]

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081；2.京沪高速铁路股份有限公司 运输管理部，北京　100043；3.中国国家铁路集团有限公司 科技和信息化部，北京　100844；4.中国铁路列车运行图技术中心，北京　100081)

摘　要：为了高质量用好繁忙高速铁路运输能力，提升以繁忙高速铁路为主干道的路网能力综合运用效率，针对高速铁路成网条件下以供给能力与旅客需求适配为目标的列车优化调整方法进行研究。首先依据运行图数据，提出高速铁路列车径路搜索方法，得出区域路网内目标OD的平行径路，从而计算目标OD的供给能力。对已开行列车的供需适配情况进行定量化分析，提出任意两点之间的供给能力与旅客需求适配度计算方法，开发了供给需求匹配分析系统，精准识别列车供给能力不能满足旅客需求的城市OD及其径路，提出了高速铁路列车优化方法，实现了路网能力的协同运用和列车高质量开行。应用实例表明，通过对繁忙高速铁路客座率较低列车的优化调整，实现繁忙高速铁路能力的有效运用，实现路网能力的精细化运用，更好满足旅客出行需求，提升铁路运营效益。

关键词：高速铁路；供需适配；列车优化调整；路网能力综合运用；径路搜索方法
中图分类号：U292.4　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251023001

Research on Train Operation Optimization Method Based on Supply-Demand Matching under High Speed Railway Network Formation

LIN Feng[1]，LI Jingwei[2]，ZHANG Xiaodong[3]，HUANG Jianqiu[2]，LI Yina[2]，GUO Yiwei[1,4]

(1. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Transportation Management Department, Beijing-Shanghai High Speed Railway Co., Ltd., Beijing 100043, China;
3. Science, Technology and Information Department, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China;
4. China Railway Train Working Diagram Technology Center, Beijing 100081, China)

Abstract: To utilize the transport capacity of busy high speed railways with high quality and enhance the comprehensive utilization efficiency of network capacity with busy high speed railways as the backbone, this paper investigated a train operation optimization method aimed at the matching of supply capacity and passenger demand under the condition of high speed railway network formation. First, based on train working diagram data, a train route search method of high speed railways was

收稿日期：2025-10-23
通信作者：郭一唯(1989—)，男，甘肃永靖人，中国铁道科学研究院集团有限公司运输及经济研究所副研究员。
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(P2024X006)

proposed to obtain parallel routes for target ODs in the regional network, thereby calculating the supply capacity of the target ODs. Quantitative analysis was conducted on the supply-demand matching status of operating trains, a calculation method for the matching degree of supply capacity and passenger demand between any two points was proposed, and a supply-demand matching analysis system was developed. This system precisely identified city ODs and their routes where the train supply capacity could not meet passenger demand, and a high speed railway train optimization method was proposed, achieving the coordinated utilization of network capacity and high-quality train operation. Application examples indicate that through the optimization and adjustment of trains with low load factors on busy high speed railways, the effective utilization of busy high speed railway capacity is achieved; refined utilization of network capacity is realized; passenger travel demands are better satisfied, and railway operational benefits are improved.

Keywords: High Speed Railway; Supply-Demand Matching; Train Optimization and Adjustment; Comprehensive Utilization of Railway Network Capacity; Route Search Method

0　引言

随着我国高速铁路网的逐渐扩大和客流量的不断提升，我国部分高速铁路干线运输能力已近饱和，无法满足旅客出行的需求。随着郑济高速铁路(济南西—郑州东)、沪宁沿江高速铁路(南京南—太仓)、沪苏湖高速铁路(上海虹桥—湖州)等开通，与京沪高速铁路(北京南—上海虹桥)的互联互通跨线运行导致后者输送能力短缺，例如济南西至曲阜东行车密度已经接近极限，无法增加列车。京沪高速铁路运输能力的紧张直接影响了以其为主干的路网能力及运用效率。中国国家铁路集团有限公司2025年工作会议明确提出，挖掘高速铁路繁忙干线运输潜力，分类实现高速铁路速度与密度的有机结合，整体提升高速铁路网运输能力。高质量用好繁忙高速铁路所辐射的路网能力是亟需解决的关键问题。

高质量用好繁忙高速铁路及其所辐射路网能力，最重要的是按需开车，对于旅客需求较高的OD和径路要增加列车，而对于需求较低的OD和径路则要适当减少开行列车，将空出的线路能力让给需求较高的OD。此外，随着高速铁路成网且逐步加密，尤其是东部和南部路网较为密集，最突出特点是形成了若干条平行径路，为旅客列车产品的多样化开行提供了更多可能性。

针对高速铁路成网后路网能力高质量运用的研究，目前较为欠缺，国内研究尚未触及旅客需求层面，仅从能力高效运用方面研究运输能力的提升，包括点线能力协调运用、停站方案优化、路网能力内涵和计算等方面[1-3]。欧洲等国家虽然也存在能力紧张情况，但是由于车站能力未出现瓶颈，线上运行列车的速度等级较少，研究重点主要在突发情况下路网能力是否满足旅客出行需求等方面[4-6]。

此外，在高速铁路成网条件下基于供需适配提出列车运行调整优化研究的模型和算法很少，刘琳玥[7]提出了高速铁路成网下长距离列车开行模式选择研究，建立了长距离直达或中转换乘选择模型，为长距离直达列车开行方案设计提供了方法和依据。目前国内已开展的研究主要集中在车流径路优化[8-9]、旅客列车开行方案优化[10]、城际铁路列车交路优化[11-12]等方面。其中旅客开行方案研究是基于列车径路确定情况下进行的，不涉及列车径路优化问题。旅客列车径路优化方面，以往研究主要是以OD之间最短径路作为列车最优径路，优化目标有径路最短或吸引客流最多等。赵小刚[13]针对铁路运输组织中的突发事件，提出可行径路的生成方法并对可行径路进行评估，选出最优径路。王喆等[14]运用遗传算法对旅客列车运行径路进行优化，针对某一OD之间若干条径路进行最短路求解，并应用于太原至徐州的实际案例中，验证了该方法计算收敛速度较快且效率较高。闫绍辉[15]针对路网中同一OD之间存在着多条有效可达路径，不同的跨线列车运行路径方案对线路和车站作业影响程度不同，为了降低跨线对路网的影响，对跨线列车运行路径进行研究。从车站和区段2个角度，研究跨线列车运行路径优化方法。杜艳平等[16]针对铁路运输组织突发紧急情况，运用模糊综合评价方法，评估列车运行径路各区段的风险概率，提出了旅客列车运行径路求解模型，运用蚁群算法进行求解，从而得到

最优列车运行径路。本研究提出了成网条件下高速铁路列车运行径路搜索方法，实现了重要城市之间列车运行径路以及径路上列车信息有效生成，和供给能力的有效计算。相比传统基于“物理网络拓扑”(如K最短路)的径路生成方法，提出的基于“实际运营数据”的径路搜索方法，能够大幅降低径路搜索规模，规避了物理可行但实际运营(如设备适配性、走行时间较长、能力制约、换向占用时间长等)不合理的径路，提高了搜索效率和结果的有效性。对已开行列车的供需适配情况进行定量化分析，提出任意两点之间的供给能力与旅客需求适配度计算方法，开发了供给需求匹配分析系统，精准识别列车供给能力不能满足旅客需求的城市OD及其径路，将繁忙京沪高速铁路上开行效益较差的列车向供给能力不足的OD调整运行径路，提出了高速铁路列车径路优化方法，为后续列车开行优化提供调整方向，从而有效释放发达高速铁路网红利，实现繁忙高速铁路线网能力的精细化运用，更好地满足旅客的出行需求。

1　问题描述

京沪高速铁路作为我国重要的繁忙高速铁路，承接了路网内各个方向的跨线列车，在京沪高速铁路全线列车中占比约83%。目前最繁忙区段在崔马庄线路所—泰安、泰安—曲阜东以及宿州东—蚌埠南等，基本图日开行列车均在160对以上，是主要的能力瓶颈区段，且处在京沪高速铁路中间区段，因此给增开全线列车或长区段列车带来较大难度，难以满足干线中长距离旅客运输需求。同时，京沪高速铁路运行本、跨线列车的平均客座率相对较高，但是部分列车的运行效益并不理想，主要存在2种情况：一是本、跨线列车中整车客座率较低，主要是始发、终到站客流需求不高或中途经由线路客流吸引力不足；二是跨线列车在京沪高速铁路区段的客座率较低，主要是因为运行时间域较早或较晚、或停站较多导致总运行时间较长等因素，这种情况从目前技术角度是无法改善的，旅客对于较早或较晚的出行需求较低、停站设置与繁忙干线能力高效运用有一定的关联性。

因此用好京沪高速铁路线路能力的关键是对整车客座率较低的列车进行径路优化，包括始发、终到站以及运行径路等方面，实现列车客座率提高和效益提升，高质量用好京沪高速铁路和路网能力。研究通过求解高速铁路成网下OD供给需求度指标，以及基于供需适配的列车开行优化方法，构建了列车优化调整的辅助决策指标与优化方法，为列车开行和运营决策提供参考。

2　高速铁路成网下基于供需适配的列车开行优化研究

随着路网结构的完善，列车可选择的运行径路也较多，为更好地满足旅客出行需求，有必要对已开行列车的供需适配情况进行定量化分析，提出任意两点之间的供给能力与旅客需求适配度计算方法，为后续列车开行优化提供调整方向，同时为列车客座率提高、铁路收益增加以及更好满足旅客出行需求提供理论支撑。

提出任意两城市之间的供给需求度$P_{o\text{-}d}$指标来反映供给能力与旅客需求的适配情况，在计算两城市之间供给能力时，首先需要在路网内搜索出实际运营的列车径路，计算各径路供给能力之和作为两城市OD之间的供给能力。之后，通过计算OD之间所有径路内列车的客流量，从而得出两城市之间的供给需求度$P_{o\text{-}d}$。

由于铁路列车运行图每隔一段时间会进行调整(一般是按季度调整，此外暑期和春运也会调整)，因此供给需求度会随着开行列车的变化而变化，供给需求度只能反映一段时间内开行列车供给能力与旅客需求的适配情况，当列车运行图调整后，需要对调整后的供需适配情况进行重新计算。运行图调整后的一段时段内，每天开行列车是固定的，但各铁路局集团公司会根据实际运营情况对很少一部分列车进行停开等微调整，由于占比较小，因此不考虑微调列车对总体列车供给能力的影响。

2.1　成网条件下高速铁路列车运行径路搜索方法

在以往径路搜索方法中，都是依据高速铁路车站与车站、车站与线路之间物理连接关系，进行列车径路搜索。由于我国高速铁路网络规模较大，车站与线路之间连接关系较复杂，搜索形成的理论径路中，部分径路实际并未开行。

高速铁路已成网运行若干年，且每年都在进行列车径路的优化调整，当前运行图中展示的实际运行列车径路既考虑了技术层面的可行性，又综合考虑了旅客的运输需求。因此，运用运行图数据进行成网条件下的列车径路的快速搜索，既能大幅降低径路搜索问题的规模，同时搜索出的列车径路均是实际运行的径路，避免了生成未使用但是可行的列车径路，从而能够有效计算出两城市之间的实际供给能力，研究提出了成网条件下高速铁路列车运行径路搜索方法，以径路的经由序列为依据，运用定点定步长双向搜索算法，实现了重要城市之间平行运行径路以及径路上列车信息有效生成，以及供给能力的有效计算。具体方法如下。

2.1.1　数据导入

（1）读取城市与对应高速铁路车站数据表。目前我国大部分重要城市都有2个及以上的高速铁路车站，且这部分高速铁路车站一般会连接2条及以上的高速铁路线路。为了搜索出两城市OD之间的所有列车运行径路，首先建立城市与相关联高速铁路车站数据表。本研究获取了2023年全国GDP排名前100名和所有省会城市，共106个城市。

（2）读取运行图系统导出的局域路网内列车径路信息表。根据研究的局域路网规模，从列车运行图软件中生成局域路网内相关线路的列车径路信息作为初始输入数据，包括列车车次、始发终到站、实际停站、经由线路、定员等。实际停站用来判断该列车是否经停目标OD，从而判断对于某个OD来说该车的类型(始发终到列车、始发非终到列车等)。研究列车数量取决于研究路网规模，一般列车数量都是成百上千列。

2.1.2　计算步骤

根据筛选出的城市名单生成的研究目标OD集合，计算该OD下列车平行径路以及每条径路的列车信息。采用定点定步长双向搜索算法，输出OD之间的列车径路信息，每条径路下的列车种类(包括始发–终到、始发–非终到、非始发–终到、非始发–非终到等4种列车)、车次、定员、所有列车的总定员数，具体如下。

步骤1：根据列车的实际停站和始发、终到站信息，筛选目标OD包括的所有列车以及列车经由线路等信息，一列列车的经由线路组成了一条列车运行径路，设目标OD的列车运行径路集合为$Q=\{q \mid q=1, 2, \cdots, n\}$，任选一条列车运行径路作为初始径路，$M$为径路包含的经由高速铁路线路数量。

步骤2：对目标OD的所有列车运行径路进行公共线路串循环检索。其中公共线路是所有列车必须经由的线路，本研究以京沪高速铁路为公共线路，由公共线路和相邻其他线路组成了公共线路串，并获取公共线路在每个公共线路串中的位置。

步骤3：设定检索步长$steps=n$，检索步长决定了公共线路串包含线路数量，且每一检索串必须包含公共线路“京沪高速铁路”，以线路中公共线路为起点，从公共线路向左扩展第$n-1$个线路作为第一个公共线路串，若存在则输出该径路，若不存在则向右滑动1条线路形成新的公共线路串，直至公共线路作为公共线路串的最左侧线路为止，共滑动n次，形成了待选公共线路串*TestPath Mode*集合进行径路检索，选择径路出现最多的选定模式串*ChoosedPath Mode*集合，将选定模式串加入禁忌搜索列表，更新所有待搜索公共线路串；检索步长一般设置不超过4条，因为OD之间每条径路中连续4条线路不同即判断为新的径路，从而提升检索效率。

步骤4：依次分别设定检索步长$step=n-1, n-2, \cdots, 2$；继续滑动选出相应的待选模式串和选定模式串，将选定模式串加入禁忌搜索列表，更新所有待搜索径路，直到滑动后形成的新径路不包含公共线路串。径路搜索过程图如图1所示。

步骤5：径路模式计算完成。

2.2　供给需求度计算方法

由于任意两城市之间每天开行的列车基本是固定的，因此每天的供给能力是相同的，用N表示两城市o，d每天的供给能力，在高速铁路成网运营下，两点o，d之间的运行径路不止一条，通过2.1中提出的列车运行径路搜索方法得出两城市之间实际运行径路，然后统计不同径路的列车信息，从而得出两城市o，d之间的供给能力N_{o-d}；在统计两城市o，d之间的客流量S_{o-d}时，由于办理列车作业不同，分配到的席位比例是不同的，列车信息分别按照作业类型不同划分为始发–终到、非始发–终到、始发–非终到和非始发–非终到4类，不同类型列车分

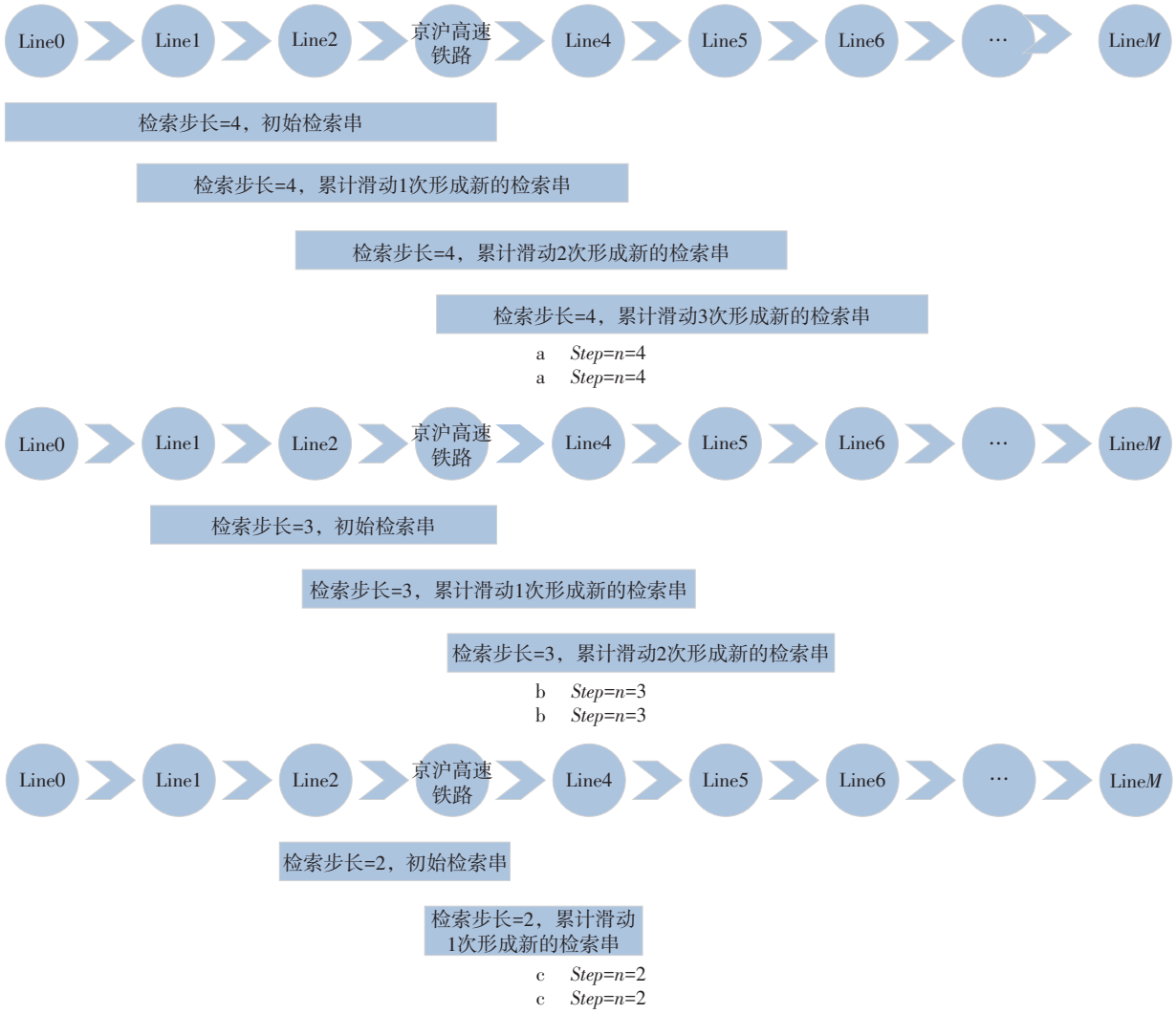

图1　径路搜索过程图

Fig.1　Route search process diagram

配的席位比例是不同的，一般情况下，办理始发–终到作业的车站分配的席位比例相对较大，这里不研究票额的动态分配，席位比例是基于历史数据或当前运营策略给定的静态比例。两城市o，d之间的供给能力N_{o-d}和供给需求度P_{o-d}计算公式如下。

$$N_{o-d}=\sum_{r=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}c_i^r\lambda_i^r \tag{1}$$

式中：N_{o-d}为两城市o，d每天的供给能力，席位；c_i^r为径路r上列车i的席位数，席位；λ_i^r为径路r上列车i的席位数比例，根据列车i的始发、终到站与两城市o，d是否一致，将列车分为始发–终到、非始发–终到、始发–非终到和停站–停站4类。

$$P_{o-d}=S_{o-d}/N_{o-d} \tag{2}$$

式中：P_{o-d}为两城市o，d供给需求度；S_{o-d}为两城市o，d客流量，人。

通过两城市o，d之间供给需求度的计算，可以得出供给能力与旅客需求的适配情况，如果该值较小，说明供给能力充足不需要加车；若该值较大，说明供给能力小于旅客出行需求，有必要适当加车。

2.3　成网条件下基于供需适配的列车开行优化方法

开行效果不佳的既有列车，主要原因有供大于求、方向不适、时刻不佳、速度较慢、价格偏高、区段太短、停站吸引旅客范围不足等。通过采用2.1列车运行径路搜索方法和2.2供需匹配度计算方法，运用Java和Python研发了高速铁路成网下供给需求适配度计算系统，实现了径路、客流量、列车定员等关键数据的统一关联生成，能够计算目标城市OD之间供给能力与需求的适配关系，能够快速、

有效计算路网内大批量城市OD之间供给能力与需求的适配度，识别有加车需求的OD集合，从而为列车优化开行提供方向。

通过梳理2023—2025年京沪高速铁路列车运行图列车优化调整实际案例和铁路局集团公司现场人员列车优化调整经验，析出列车开行优化方法主要包括：增开、停运、更改OD、改经由、改开行规律、增减编组、改运行时刻、改停站等常见调整方法，以及交路同质性、车底在线重联、解编、选择性车底置换等特殊调整措施。这些方法适用的场景和调整难度各不相同，这里运用供需适配度计算方法，主要采用更改OD的开行优化方法。

2.3.1　列车径路优化目标

依托高速铁路成网优势，以繁忙高速铁路所在区域的客流优势带动其他线路的客流，实现列车客座率的提升，从而更充分地用好繁忙高速铁路各区段能力。研究筛选出京沪高速铁路客座率较低的跨线车后进行开行优化，通过路网内主要OD的供需适配度计算，找出客流需求较高的OD集合，在满足能力、客流和交路等方面约束条件下，将客座率较低的跨线车调整至需求较高的OD，实现客座率最大化。

通过供给需求适配度计算系统能够生成有加车需求的OD集合，作为列车调整的目标OD集合，该OD集合按照供需适配度从高到低进行排序，优先选择供需适配度较高的OD作为调整优化后的目标，之后根据约束条件的筛选确定最终调整后的OD。

$$\max Z = \sum_{k \in K} X_k \tag{3}$$

式中：K为客座率较小且需要进行调整的列车集合，K={1，2，…，k}；X_k为第k列列车完成径路调整后的实际客座率；Z为客座率较小列车调整后的客座率总和。

2.3.2　约束条件

约束条件主要包括2方面，一是客流需求约束，包括被调整列车的选择以及列车调整后平行径路的选择；二是能力约束。

（1）客流需求约束。

①被调整列车选择限制。不是所有客流量低的列车都要调整，被调整列车需要满足与前、后列车的出发间隔时间不大于1 h，保证调整后旅客有可选择列车。

$$\begin{cases} \left| t_k^{\mathrm{dep}} - t_{k-1}^{\mathrm{dep}} \right| \leqslant 60 \\ \left| t_k^{\mathrm{dep}} - t_{k+1}^{\mathrm{dep}} \right| \leqslant 60 \end{cases} \quad \forall k \in K \tag{4}$$

式中：t_k^{dep}为第k列调整后列车的出发时间，min；t_{k-1}^{dep}为第k列列车前序相邻列车的出发时间，min；t_{k+1}^{dep}为第k列列车后序相邻列车的出发时间，min。

②列车调整后平行径路选择约束。通过供需适配度得出调整后OD集合，系统同时会生成OD内实际运行的平行径路信息以及各径路的列车平均客座率，优先选择平均客座率较高的平行径路作为列车调整后的开行径路。

$$R_m \geqslant R_{m'} \quad \forall m' \in M_k,\ \forall k \in K,\ Y_{km} = 1 \tag{5}$$

径路唯一性约束为

$$\sum_{m \in M_k} Y_{km} = 1 \tag{6}$$

式中：m为当前选择的径路；R_m为当前选择径路的客座率；m'为其他备选径路；$R_{m'}$为其他备选径路的客座率；M_k为第k列列车可选择的径路集合；Y_{km}为0–1决策变量，Y_{km}=1表示第k列列车选择了第m条备选径路，Y_{km}=0表示第k列列车未选择第m条备选径路。

③列车调整后始发、终到时间限制。始发时间不早于6:00(360 min)，终到时间不晚于24:00(1 440 min)。

$$\begin{cases} t_k^{\mathrm{dep}} \geqslant 360 \\ t_k^{\mathrm{arr}} \leqslant 1\,440 \end{cases} \quad \forall k \in K \tag{7}$$

④列车调整后与相邻列车的出发间隔时间约束。为保证列车调整后具有一定的稀缺性，与相邻列车的出发间隔时间不小于t_0。t_0的选择需要根据线路的繁忙程度动态制定。

$$\begin{cases} \left| t_k^{\mathrm{dep}} - t_{k-1}^{\mathrm{dep}} \right| \geqslant t_0 \\ \left| t_k^{\mathrm{dep}} - t_{k+1}^{\mathrm{dep}} \right| \geqslant t_0 \end{cases} \quad \forall k \in K \tag{8}$$

式中：t_0为根据实际客流需要确定的同一OD同一径路列车的最小间隔时间，min。

（2）能力约束。

①区段能力制约。调整后的线路要有能力加车，若不能加车则无法变更径路。

$$Y_{km} \leqslant C_{line,\ m} \quad \forall k \in K,\ \forall m \in M_k \tag{9}$$

式中：$C_{line,\ m}$为0–1变量，表示第m条径路对应线路的剩余能力，$C_{line,\ m}$=1表示有能力可以加车，$C_{line,\ m}$=0表示没能力加车。

②同交路列车影响。在繁忙干线列车交路内，

若调整后列车与后续列车可接续，不能交换交路。若不能接续，则需要和其他交路列车进行交换。

$$\sum_{p \in P_k} W_{kp} = 1 - S_k \qquad \forall k \in K \tag{10}$$

$$S_k \in \{0, 1\} \qquad \forall k \in K \tag{11}$$

$$W_{kp} \in \{0, 1\} \qquad \forall k \in K, \forall p \in P_k \tag{12}$$

式中：S_k为第k列列车的接续状态，S_k=1表示列车k调整后与原交路后续列车可接续，S_k=0表示不可接续；W_{kp}为第k列与第p列列车的交路交换状态，W_{kp}=1表示k与p交换交路，W_{kp}=0表示不交换。

③列车调整后车底利用率约束。调整后列车与同交路接续列车的总运营时间不能超过原来开行天数。

$$T_k^c \leqslant T_k^o \qquad \forall k \in K \tag{13}$$

式中：T_k^c为第k列列车与同交路接续列车总运营时间，h；T_k^o为第k列列车原交路下的总运营时间上限，h。

3　案例分析

选取以京沪高速铁路相关联的东部路网内中国铁路济南局集团有限公司(以下简称“济南局集团公司”)担当列车作为优化对象，提出列车优化调整方案，并假设客座率提升等同于运营效益提升。输入京沪高速铁路相关联的东部路网济南局集团公司担当列车运行图数据，以及2024年7—9月份暑运高峰期客流数据，运用列车运行径路搜索方法和供需匹配度计算方法，计算分析山东省主要城市与其他主要城市之间的供需匹配度，得出客流需求较高OD集合，山东省内主要城市OD供给需求度排序表如表1所示。

在表1的基础上，梳理出山东省各地区去往全国其他主要城市供给需求度较高的城市分布及其OD个数，山东省内主要城市供给需求度较高的OD分布表如表2所示。根据表2数据，为运营较差的列车提供优化方向及目标OD。

从表2分析可知，山东省内主要城市旅客出行需求相比供给能力较高的OD主要集中在华北、华东、西北、华中、东北地区；而在西南、华南地区旅客需求相比供给能力较低。但是对于贵阳、成都、重庆、东莞、南昌、南宁、泉州、厦门等城市，由于存在并行径路，因此会分担一部分客流，此外，在途经京沪高速铁路的径路中供给需求度相对较低。通过梳理2024年京沪高速铁路本线、跨线列车平均客座率较低的列车及其交路信息，筛选出需要优化的列车对象，根据表2中提出的优化后OD建议，运用研究提出的列车优化方法，提出列

表1　山东省内主要城市OD供给需求度排序表

Tab.1　Ranking table of supply-demand degree of major city ODs in Shandong Province

O	D	平均值	O	D	平均值	O	D	平均值	O	D	平均值
临沂	北京	1.60	烟台	威海	0.37	青岛	合肥	0.27	潍坊	烟台	0.20
济南	临沂	1.00	菏泽	济南	0.37	泰安	西安	0.27	潍坊	威海	0.20
青岛	北京	0.98	泰安	淄博	0.37	淄博	济南	0.27	临沂	沈阳	0.20
威海	北京	0.83	济南	菏泽	0.35	济南	郑州	0.25	菏泽	泰安	0.20
临沂	济南	0.80	烟台	济南	0.35	济南	潍坊	0.25	济南	南通	0.20
临沂	青岛	0.67	潍坊	北京	0.35	潍坊	济南	0.25	烟台	泰安	0.20
淄博	上海	0.58	淄博	威海	0.33	淄博	烟台	0.25	潍坊	南通	0.20
青岛	临沂	0.57	淄博	青岛	0.33	济宁	济南	0.25	济宁	泰安	0.20
泰安	临沂	0.57	济南	青岛	0.32	威海	泰安	0.25	淄博	潍坊	0.20
烟台	北京	0.53	济南	北京	0.32	淄博	南京	0.23	青岛	南通	0.18
菏泽	北京	0.53	潍坊	青岛	0.32	济南	武汉	0.23	济南	石家庄	0.18
临沂	泰安	0.52	济南	烟台	0.30	济南	威海	0.23	威海	天津	0.18
济宁	临沂	0.48	青岛	潍坊	0.30	泰安	烟台	0.23	青岛	连云港	0.18
泰安	济南	0.45	潍坊	上海	0.30	青岛	淄博	0.23	济南	杭州	0.18
济南	淄博	0.43	青岛	天津	0.28	青岛	泰安	0.23	潍坊	合肥	0.18
临沂	济宁	0.43	济宁	北京	0.28	青岛	南京	0.22	临沂	天津	0.18
淄博	北京	0.42	济南	西安	0.28	潍坊	杭州	0.22	泰安	潍坊	0.18

表2　山东省内主要城市供给需求度较高的OD分布表

Tab.2　Distribution table of major city ODs with high supply-demand degree in Shandong Province

序号	到达城市	OD组数	OD供给需求度分布	平均值
1	北京	10	临沂—北京(1.6)、青岛—北京(0.98)、威海—北京(0.83)、烟台—北京(0.53)、菏泽—北京(0.53)、淄博—北京(0.42)、潍坊—北京(0.35)、济南—北京(0.32)、济宁—北京(0.28)、泰安—北京(0.28)	0.61
2	上海	6	淄博—上海(0.58)、潍坊—上海(0.3)、济南—上海(0.17)、济宁—上海(0.17)、泰安—上海(0.15)、青岛—上海(0.12)	0.25
3	石家庄	3	泰安—石家庄(0.28)、济南—石家庄(0.18)、济宁—石家庄(0.17)	0.21
4	合肥	6	淄博—合肥(0.28)、青岛—合肥(0.27)、济南—合肥(0.22)、潍坊—合肥(0.18)、泰安—合肥(0.17)、济宁—合肥(0.1)	0.20
5	杭州	7	淄博—杭州(0.28)、潍坊—杭州(0.22)、济南—杭州(0.18)、青岛—杭州(0.15)、济宁—杭州(0.15)、泰安—杭州(0.13)、烟台—杭州(0.12)	0.18
6	西安	7	济宁—西安(0.42)、济南—西安(0.28)、泰安—西安(0.27)、潍坊—西安(0.12)、淄博—西安(0.1)、威海—西安(0.03)、烟台—西安(0.02)	0.18
7	南京	7	淄博—南京(0.23)、青岛—南京(0.22)、潍坊—南京(0.17)、烟台—南京(0.12)、济南—南京(0.1)、济宁—南京(0.1)、泰安—南京(0.1)	0.15
8	南通	6	济南—南通(0.2)、潍坊—南通(0.2)、青岛—南通(0.18)、济宁—南通(0.12)、泰安—南通(0.1)、淄博—南通(0.07)	0.15
9	太原	1	济南—太原(0.15)	0.15
10	天津	10	青岛—天津(0.28)、威海—天津(0.18)、临沂—天津(0.18)、济南—天津(0.15)、烟台—天津(0.13)、泰安—天津(0.13)、济宁—天津(0.1)、淄博—天津(0.1)、菏泽—天津(0.1)、潍坊—天津(0.08)	0.14
11	武汉	6	济南—武汉(0.23)、济宁—武汉(0.17)、潍坊—武汉(0.12)、淄博—武汉(0.12)、泰安—武汉(0.08)、青岛—武汉(0)	0.12
12	郑州	7	济南—郑州(0.25)、济宁—郑州(0.13)、潍坊—郑州(0.12)、淄博—郑州(0.1)、泰安—郑州(0.1)、威海—郑州(0.03)、青岛—郑州(0.02)	0.11
13	连云港	4	青岛—连云港(0.18)、潍坊—连云港(0.1)、济南—连云港(0.08)、淄博—连云港(0.07)	0.11
14	沈阳	9	临沂—沈阳(0.2)、济宁—沈阳(0.12)、济南—沈阳(0.1)、淄博—沈阳(0.08)、泰安—沈阳(0.08)、威海—沈阳(0.07)、烟台—沈阳(0.05)、潍坊——沈阳(0.05)、青岛—沈阳(0.03)	0.09
15	银川	2	济南—银川(0.12)、济宁—银川(0.05)	0.09
16	福州	3	泰安—福州(0.17)、潍坊—福州(0.05)、淄博—福州(0.03)	0.08

车优化调整案例。

根据被调整列车选择的约束条件，以及客座率较低的限制，选出被调整列车为G345，G348。交路中G345和G348全年整车平均客座率和全年京沪高速铁路线上平均客座率分别为70.6%，45.29%，55.46%，43.73%，京沪高速铁路线上客座率和整车客座率均相对较低，调整列车信息表如表3所示。表3中整车客座率是指列车全程运行的平均客座率，线上客座率是指列车在京沪高速铁路运行区段内平均客座率。

表2中供给需求度较高的城市排序依次是北京、上海、石家庄、合肥、杭州等，将这些城市作为列车调整的目标OD集合，之后通过约束条件进一步筛选确定最终调整后的OD。

从区段能力约束看，由于G345和G348占用京沪高速铁路运行区段为济南西—蚌埠南，但从京沪高速铁路运行图看，蚌埠南—上海虹桥方向能力紧张，因此可用能力为蚌埠南—北京方向的区段；从始发、终到时间限制看，由于G345从济南西出发时间较早，为6:46，因此其出发时间只能提早至6:00；从车底利用率约束和列车调整后与相邻列车的出发间隔时间约束看，为了提高车底利用率以充分运用京沪高速铁路区段能力，考虑已开行列车的情况，目前到达杭州和温州方向中没有6:00始发的列车，因此建议将G345和G348的始发、终到站调整为济南—温州。从列车调整后平行径路选择约束看，目前从济南开往温州的列车径路主要有3条，济南到温州的列车径路信息如表4所示。从同交路列车影响看，由于该交路列车只有一个方向，因此不存在无法接续的问题。

表3　调整列车信息表

Tab.3　Information table of adjusted trains

交路序号	车次	全年整车客座率/%	全年京沪高速铁路线上客座率/%	运行区段	运行时间
1	G345	70.60	54.29	济南西—福州	6:46—14:26
	G348	55.46	43.73	福州—济南西	14:46—22:41

表4　济南到温州的列车径路信息

Tab.4　Train route information from Jinan to Wenzhou

OD	径路	已有高速铁路列车(全年平均整车客座率/全年平均线上客座率)/%	定员/人	是否有能力
济南—温州	京沪高速铁路济南西—南京南、宁杭高速铁路南京南—杭州东、沪昆高速铁路杭州东—塘雅线路所、金温线塘雅线路所—温州南	G1734(72.08/63.7)，G33(93.32/94.49)，G181(80.84/81.82)	1 193 1 193 1 193	第1条径路京沪高速铁路段有能力，宁杭高速铁路湖州—杭州东能力紧张，有一定的可调整空间，金温线能力相对充足
	京沪高速铁路济南西—南京南、宁杭高速铁路南京南—杭州东、杭深线杭州东—温州南	G343(68.65/60.99)，G197(70.5/65.96)，G183(81.94/89.28)	556 1 005 1 193	
	京沪高速铁路济南西—上海虹桥、沪昆高速铁路上海虹桥—塘雅线路所、金温线塘雅线路所—温州南	G1227(81.61/93.79)	1 102	

最早出发的2列车是G1734和G343，始发时间分别为7:07，7:15，从2列车的客座率情况看出，G1734在定员较高的情况下，客座率相对较高，因此建议列车采用第1条径路。从该径路已开行列车的运营情况看出客座率在63.7%~94.49%，相比G345和G348调整前的客座率有了较高提升，而且列车调整后运营里程减少，运营成本也相对减少，因此调整后能够直接提升列车的运营效益。由于调整后列车的客座率无法预测，因此不研究效益。

第1条径路中能力较为紧张的区段为京沪高速铁路济南—南京南、宁杭高速铁路湖州—杭州南杭甬场。对部分列车进行调整，G345调整前、后运行图如图2所示，运行图中调整步骤如表5所示。

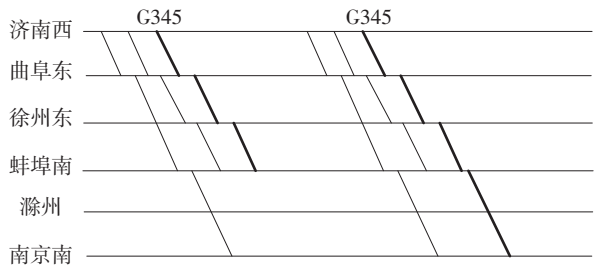

图2　G345调整前、后运行图

Fig.2　Train working diagrams of G345 before and after adjustment

表5　运行图中调整步骤

Tab.5　Adjustment steps in train working diagram

序号	步骤
1	G7794在定远减停站，在蚌埠南、滁州加停站
2	G295在滁州减停站，在定远加停站，由于南京南停9 min，因此对接续时间无影响

G345在宁杭高速铁路南京南至杭州南杭甬场内延长运行区段后，加车前、后列车运行图如图3所示。运行图加车调整步骤如表6所示。

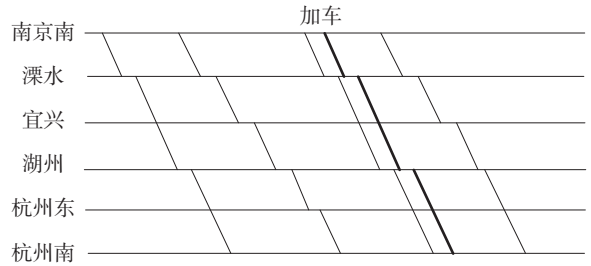

图3　加车前、后列车运行图

Fig.3　Train working diagrams before and after adding trains

表6　运行图加车调整步骤

Tab.6　Adjustment steps of adding trains in train working diagram

序号	步骤
1	G7681在句容西减停站，在湖州高速场、宜兴、溧水减1 min停时
2	G7619从南京南京沪场至湖州向右平移1 min(未改变终到时间)
3	G295从南京南京沪场至杭州南杭甬场向右平移1 min
4	G7605从南京南京沪场至杭州南杭甬场向右平移1 min
5	G7691在句容西加停站，在德清高速场减停站
6	D2198(与G7691相邻)在德清高速场加停站(可不停)，在杭州东宁杭场减2 min停时，在宜兴减1 min停时
7	G9421从南京南所至宜兴左移2 min，杭州东宁杭场左移1 min，对接续线路开行无影响
8	G7458从南京南所至湖州高速场左移2 min，对接续线路开行无影响
9	G7693从湖州高速场至杭州东宁杭场到达线左移2 min，对接续线路开行无影响
10	G7477从南京南所至杭州南杭甬场左移2 min，对接续线路开行无影响
11	G7694从南京南所至杭州南杭甬场左移2 min，对接续线路开行无影响
12	G9305从杭州东宁杭场提前2 min出发，对接续线路开行无影响
13	在G7694和D2198之间加1列车，停2或3站

4　结束语

随着高速铁路网逐步扩大、跨区域多径路联通、

客流量不断提升，我国繁忙高速铁路运输能力的紧张直接影响了以其为主干的路网能力运用效率，无法有效满足旅客出行需求。研究充分运用线网能力，提出高速铁路径路搜索方法、供给能力与客流需求匹配分析方法、高速铁路列车径路优化方法，深度挖掘繁忙高速铁路主动脉、主通道的巨大潜力，进一步释放发达路网红利，实现繁忙高速铁路线网能力的精细化运用，更好地满足旅客的出行需求。后续将对高速铁路网进行区域划分，针对不同区域客流特征，提出不同区域路网的列车优化策略。

参考文献：

[1] 陈　韬. 高速铁路车站通过能力计算理论与方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2016.

[2] 林　枫. 高速铁路车站列车进路分配计算方法研究[J]. 铁道运输与经济，2019，41(10)：46-51.
LIN Feng. A Study on Train Route Allocation Scheme of High Speed Railway Terminal Station[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(10)：46-51.

[3] 赵　东，胡思继. 高速铁路通过能力利用状态评估方法研究[J]. 铁道学报，2020，42(10)：16-22.
ZHAO Dong，HU Siji. Research on Assessment of Utilization of Carrying Capacity for High Speed Railway[J]. Journal of the China Railway Society，2020，42(10)：16-22.

[4] LU Q，DESSOUKY M，LEACHMAN R C. Modeling Train Movements through Complex Rail Networks[J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation，2004，14(1)：48-75.

[5] MORLOK E K，CHANG D J. Measuring Capacity Flexibility of a Transportation System[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2004，38(6)：405-420.

[6] BURDETT S，STEWART L A，RYDZEWSKA L. A Systematic Review and Meta-Analysis of the Literature：Chemotherapy and Surgery versus Surgery Alone in Non-Small Cell Lung Cancer[J]. Journal of Thoracic Oncology，2006，1(7)：611-621.

[7] 刘琳玥. 高速铁路成网条件下长距离列车开行模式研究[J]. 铁道运输与经济，2019，41(3)：18-22.
LIU Linyue. A Research on the Operation Mode of Long-Distance Train of High Speed Railway Network[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(3)：18-22.

[8] 孙　民. 面向货车车流径路的铁路网点线通过能力数字化分析方法[J]. 铁路物流，2025，43(3)：1-8.
SUN Min. Digital Analysis Method for Railway Network Point and Line Passing Capacity for Freight Wagon Flow Routing[J]. Railway Logistics，2025，43(3)：1-8.

[9] 周明玺，郑平标，秦　胜. 考虑技术站编组去向的车流径路优化研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(3)：17-28，64.
ZHOU Mingxi，ZHENG Pingbiao，QIN Sheng. Traffic Routing Optimization Considering Train Destinations of Technical Stations[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(3)：17-28，64.

[10] 李亚为. 基于客流需求的高速铁路列车开行方案与运行图优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2024.

[11] 朱　洁. 珠三角城际轨道交通线网跨线列车交路优化研究[D]. 成都：西南交通大学，2012.

[12] 张强锋. 城际客运专线列车开行方案研究[D]. 成都：西南交通大学，2010.

[13] 赵小刚. 突发事件下列车运行径路生成及评价研究[D]. 北京：北京建筑大学，2015.

[14] 王　喆，彭其渊，谢小淞. 基于遗传算法的铁路旅客列车开行路径优化的研究[J]. 铁路计算机应用，2006，15(12)：4-6.
WANG Zhe，PENG Qiyuan，XIE Xiaosong. Research on Optimization of Railway Passenger Train Path Based on Genetic Algorithms[J]. Railway Computer Application，2006，15(12)：4-6.

[15] 闫绍辉. 高速铁路跨线列车运行路径优化[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2020.

[16] 杜艳平，赵小刚. 突发事件下旅客列车径路选择[J]. 物流技术，2014，33(6)：203-206，232.
DU Yanping，ZHAO Xiaogang. Study on Passenger Train Route Selection in Event of Outbreak Incidents[J]. Logistics Technology，2014，33(6)：203-206，232.

(责任编辑　魏　然)