山东科学
SHANDONG SCIENCE
第37卷 第4期 2024年8月出版
Vol.37 No.4 Aug.2024
DOI:10.3976/j.issn.1002-4026.20230098
【交通运输】

高速铁路枢纽场站能力综合利用研究

张杰[1],何世伟[2*],赵日鑫[2],陈旻瑜[1],刘杰[1]
(1.山东铁路投资控股集团有限公司 运营管理部,山东 济南 250014;2.北京交通大学
综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室,北京 100044)

摘要:为统筹利用高速铁路枢纽内的旅客运输资源,研究高速铁路枢纽内客运场站的分工问题。以枢纽内列车总作业时间最小和场站能力协调为优化目标构建多目标整数规划模型,通过设计增广 ε-约束算法求解模型的近似非支配前沿。以郑州高速铁路枢纽为例展开实例分析,从定性和定量的角度分别对原有方案与优化方案的差异及能力适应性进行比较,验证模型及算法的可行性和有效性。结果表明,增广 ε-约束算法可以为所提出模型寻找到高质量的代表性非支配解,所得出的优化方案能够降低枢纽内列车的作业时间,提高场站能力利用协调度,可为高铁枢纽地区扩能改造、能力优化等措施的决策提供可靠参考依据。

关键词:铁路运输;能力利用;多目标优化;高速铁路枢纽;车站分工
中图分类号:U291.7　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1002-4026(2024)04-0121-10
开放科学(资源服务)标志码(OSID):

Study on comprehensive utilization of high-speed railway hub stations

ZHANG Jie[1], HE Shiwei[2*], ZHAO Rixin[2], CHEN Minyu[1], LIU Jie[1]
(1.Operation Management Department, Shandong Railway Investment Holding Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;
2.Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To make comprehensive use of the passenger transportation resources in a high-speed railway hub, this study explores the division of labor among passenger stations within a high-speed railway hub. Herein, a multiobjective programming model was developed with the objectives of minimizing the total train operation time and coordinating the capacities of the stations in the hub. The augmented ε-constraint algorithm was used to solve the approximate nondominated frontier of the model. Using the Zhengzhou high-speed railway hub as a case study, the differences between the existing plan and the optimized plan and their adaptabilities were qualitatively and quantitatively compared to validate the feasibility and effectiveness of the proposed model and algorithm. The results show that the augmented ε-constraint algorithm can identify high-quality representative nondominated solutions for the proposed model. Moreover, the optimized plan can reduce the train operation time within the hub and enhance the coordination of station capacity

收稿日期:2023-06-12
基金项目:山东铁路投资控股集团有限公司科研项目(2022-SDRI-YY-0002)
作者简介:张杰(1971—),男,高级工程师,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:15866750097@163.com
*通信作者,何世伟,男,教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:shwhe@bjtu.edu.cn

utilization. Thus, this study provides reliable references and reasonable suggestions for decision-making regarding capacity expansion, transformation, and optimization of high-speed railway hub areas.

Key words : railway transportation; capacity utilization; multi-objective optimization; high-speed railway hub; division of labor among stations

随着《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》和《新时代交通强国铁路先行规划纲要》等政策的相继发布,构筑现代化综合交通枢纽成为实现我国交通运输高质量发展的关键目标之一。高速铁路枢纽作为综合交通枢纽的重要组成部分,其运输组织将会对路网整体的运输效率产生深远影响。在当前高铁枢纽衔接线路不断增多,旅客运输需求和列车开行数量不断增加的背景下,列车在枢纽地区的作业组织过程愈发复杂,枢纽能力趋于紧张。因此,如何统筹优化高铁枢纽综合能力,使枢纽内各客运场站间的分工更加合理,是当前高速铁路枢纽运输组织工作的重要研究方向。

关于铁路客运枢纽运输组织,国外学者对枢纽内多客站间的综合优化研究相对较少,大多聚焦于大型枢纽客运站运输组织优化,通过优化车站内部的作业组织提高通过能力,进一步提升路网的整体运输效率。文献[1]构建了整数规划模型优化路网中心车站的作业组织,并以实际案例验证了模型的有效性;文献[2]考虑了线路中断对复杂枢纽地区车站作业的影响,以最小化列车延误时间为目标构建混合整数规划模型,对比分析了不同解锁策略下的优化效果;文献[3]应用多商品流、网络流与协调性理论,将铁路枢纽客运站分工的径路选择问题构建为线性规划模型,并使用蚁群优化算法进行求解;文献[4]研究了枢纽区域内列车的实时调度问题,并对不同类型的中断场景进行分析;文献[5]研究了铁路运行中断条件下乘客和列车的动态调度优化。国内学者研究集中在偏宏观的枢纽车站分工及选址问题[6-7],考虑列车路径优化的车站分工问题。如文献[8]将枢纽衔接各方向间的客流转化为车流,通过构建枢纽运输网络优化车流在枢纽内的走行径路,基于备选径路集构建了以旅客出行成本最小化为目标的混合整数规划模型;文献[9]建立了以通过铁路枢纽的车流量最大化为目标的铁路枢纽通过能力计算模型,给出了确定铁路枢纽通过能力的计算方法和流程;文献[10]考虑高速铁路场站股道设备差异性,构建高速铁路枢纽场站分工与股道运用协调优化模型,对高速铁路枢纽场站的合理分工问题进行了研究;文献[11]借鉴车流径路优化方法,细化考虑车站多种能力约束建立了高铁枢纽车站分工优化模型,使得模型更贴合实际;文献[12]从能力运用、运输组织等方面量化设计指标,运用 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)评价方法对评价模型进行设计,研究了高速铁路客站分工问题;文献[13]从到发线运用、动车所能力的角度对高速铁路枢纽客运站作业分工方案进行优化研究,并分别采用 GUROBI 求解器、启发式算法进行求解。

综上所述,现有的相关研究中大多将相同 OD 的列流作为整体考虑,不能较好地考虑枢纽内列车换向问题。本文在研究高速铁路枢纽综合利用的过程中,综合考虑线路及场站能力、列流可分割、车站布置图等因素,通过对枢纽相关列流的车流径路及枢纽内停站方案进行优化,可以得到适用性更强的枢纽能力综合利用优化方案。

1 问题描述及建模思路

本文所研究的高铁枢纽能力综合利用优化问题可以归纳为:已知高铁枢纽网络拓扑结构、各类设备资源能力现状及枢纽范围内的动车组列流 OD 分布,通过分析各类列车在枢纽内的作业需要,确定每支列流在枢纽内的走行径路及作业车站,最终得到高铁枢纽能力综合利用方案。但研究中存在部分与传统铁路车流径路优化问题不同的情况,作如下考虑:

(1)车流径路优化需要事先确定每支列流的流量和起终点,但由于各方向与枢纽间始发终到列流的起终点未知,且受动车所整备能力的限制,始发终到车流的 OD 量成为未知量。因此,模型通过建立枢纽内虚拟站点,将各个方向与枢纽间始发终到列流的起终点设置在该虚拟站点,从而将始发终到列流看作通过列流

一并考虑,实现两类列流的综合优化。

(2)本文所研究的对象为高速铁路客运枢纽,同一去向的列车可能在枢纽内的不同车站进行停站作业。因此,模型允许同一 OD 列流中的列车选择不同的走行径路和作业车站,既满足了旅客运输组织的需要,也有利于设备资源的均衡运用,提高了综合利用方案的灵活性和模型的适用性。

(3)在高铁枢纽网络中,一个“点”代表一个高铁车站,受车站具体布置图的影响,并非该站所衔接的每条线路间都有满足列车不换向通过车站的直接进路,甚至部分方向间不具备换向通过的条件,即存在限制车站办理某一方向列车通过作业的情况。因此,需要细化考虑枢纽内车站的站型布置情况,对列车的走行径路进行限制,使模型的计算结果更符合实际。

2　数学模型

2.1　模型假设

为便于模型构建和描述,作以下假设:

(1)高速铁路枢纽中各类场站能力均已扣除普速列车和城际动车组列车的占用;

(2)枢纽内除车站通过能力、线路通过能力和动车所整备能力外,其他条件均满足作业要求;

(3)每支始发终到列流 OD 包含的列车数及其在枢纽内整备作业比例已知;

(4)每支通过列流 OD 包含的列车数及其在枢纽内停站作业比例已知;

(5)所涉及的动车组列车均为长编组,即 2 组标准动车组列车。

2.2　符号定义

模型中所涉及集合、参数和变量定义见表 1。

表 1　集合、参数及变量定义

Table 1　Definitions of sets, parameters, and variables

符号	定义
$G=(N,A)$	高铁枢纽及周边路网
N	所有车站(节点)集合,以 i,j,k,p,q,p_0 为索引
I	枢纽内站点集合, $I \subseteq N$
I_1	枢纽内待分工站点集合, $I_1 \subseteq I$
I_2	枢纽内其他节点集合, $I_2 \subseteq I$
P	枢纽外车站集合, $P \subseteq N$
A	路网上相邻两个车站间的路段集合,以 (i,j) 为索引
A_1	枢纽内路段集合, $A_1 \subseteq A$
OD	OD 列流集合,以 (p,q) 为索引
R	每支列流 OD 的径路方案集合,以 r 为索引
t_1^i	列车在 i 站进行停站作业所需的时间,单位:min
t_2^i	列车在 i 站停站作业时如进行折返换向作业所需的额外时间,单位:min
t_3^i	列车在 i 站进行始发终到作业所需的时间,单位:min
t_{ij}	列车通过弧 (i,j) 所需的时间,其中虚拟线路对应的弧 t_{ij} 或 $t_{ji}=t_3^i-t_1^i$,其他线路对应的弧 t_{ij} 按列车实际运行时间计算,单位:min
φ_i	i 站列车通过能力,单位:列/d
ω_i	i 站动车运用所整备能力,单位:列/d
c_{ij}	弧 (i,j) 的最大通过能力,其中虚拟线路对应的弧 $c_{ij}=M$,其他线路对应的弧 c_{ij} 按线路实际通过能力计算,单位:列/d
$v_{\varphi,i}$	i 站通过能力负荷,单位:列/d
$v_{\omega,i}$	i 站动车运用所整备能力负荷,单位:列/d

表 1(续)

符号	定义
f_{pq}	由 p 发往 q 列车数量,单位:列/d
α_{pq}	由 p 发往 q 列车需要在枢纽内进行整备作业的比例
β_{pq}	由 p 发往 q 列车需要在枢纽内进行停站作业的比例
$W_{i,jk}$	列车在 i 站通过条件的点-弧关联元素,若列车可经弧 (j,i) 接入车站 i,且不换向直接通过车站后再经弧 (i,k) 发出,则 $W_{i,jk}=1$;需要停站折返换向通过时为 0;不能通过时为-1
$x^{pq,r}$	正整数变量,表示由 p 发往 q 的第 r 组列车中包含的列车数,单位:列
$y_{ij}^{pq,r}$	0-1 变量,若由 p 发往 q 的第 r 组列车途经线路 (i,j) 取 1,否则为 0
$z_i^{pq,r}$	0-1 变量,若由 p 发往 q 的第 r 组列车在 i 站进行停车作业取 1,否则为 0
$\bar{x}^{pq,r}$	辅助 0-1 变量,若 $x^{pq,r}>0$,则 $\bar{x}^{pq,r}=1$,否则为 0
$\bar{z}_i^{pq,r}$	辅助 0-1 变量,若由 p 发往 q 的第 r 组列车在 i 站进行折返换向作业取 1,否则为 0

2.3 模型建立

基于以上定义的符号,高铁枢纽能力综合利用问题可构建为如下多目标数学优化模型 P,模型 P 以高铁枢纽内总作业时间最小和枢纽内场站能力协调为目标。

$$\min z_1=\sum_{(p,q)}\sum_{R}\sum_{(i,j)\in A_1}t_{ij}x^{pq,r}y_{ij}^{pq,r}+\sum_{(p,q)}\sum_{R}\sum_{i\in I_1}\left(t_1^i\beta_{pq}x^{pq,r}z_i^{pq,r}+t_2^ix^{pq,r}\bar{z}_i^{pq,r}\right), \tag{1}$$

$$\min z_2=\sum_{i\in I_1}\left|\frac{v_{\varphi,i}}{\varphi_i}-\frac{v_{\omega,i}}{\omega_i}\right|, \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{(i,j)}y_{ij}^{pq,r}-\sum_{(i,j)}y_{ji}^{pq,r}=\begin{cases}\bar{x}^{pq,r} & i=p\\ 0 & i\neq p,i\neq q,\forall(p,q)\in \mathrm{OD};\forall r\in R;\forall i\in N\\ -\bar{x}^{pq,r} & i=q\end{cases}, \tag{3}$$

$$\sum_{(i,j)}y_{ij}^{pq,r}+\sum_{(i,j)}y_{ji}^{pq,r}\leqslant\begin{cases}2\bar{x}^{pq,r} & i\in I\\ \bar{x}^{pq,r} & i\in P\end{cases},\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall i\in N, \tag{4}$$

$$x^{pq,r}y_{ij}^{pq,r}-x^{qp,r}y_{ji}^{qp,r}=0,\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall(i,j)\in A, \tag{5}$$

$$\sum_{(i,j)}y_{ij}^{pq,r}+\sum_{(i,j)}y_{ji}^{pq,r}\geqslant z_i^{pq,r},\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall i\in I_1, \tag{6}$$

$$\sum_{i\in I_1}z_i^{pq,r}=\bar{x}^{pq,r},\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R, \tag{7}$$

$$y_{ji}^{pq,r}=z_i^{pq,r},\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall(i,j)\in A,p=j=p_0, \tag{8}$$

$$y_{ij}^{pq,r}=z_i^{pq,r},\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall(i,j)\in A,p=i=p_0, \tag{9}$$

$$x^{pq,r}z_i^{pq,r}-x^{qp,r}z_i^{qp,r}=0,\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall i\in I_1, \tag{10}$$

$$2(y_{ji}^{pq,r}+y_{ik}^{pq,r})\leqslant W_{i,jk}+z_i^{pq,r}+3,\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall i\in I_1,\forall(j,i),(i,k)\in A, \tag{11}$$

$$z_i^{pq,r}+2(y_{ji}^{pq,r}+y_{ik}^{pq,r})\leqslant W_{i,jk}+\bar{z}_i^{pq,r}+4,\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall i\in I_1,\forall(j,i),(i,k)\in A, \tag{12}$$

$$z_i^{pq,r}\geqslant\bar{z}_i^{qp,r},\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall i\in I_1, \tag{13}$$

$$2(y_{ji}^{pq,r}+y_{ik}^{pq,r})\leqslant W_{i,jk}+3,\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,\forall i\in I_2,\forall(j,i),(i,k)\in A, \tag{14}$$

$$x^{pq,r}\geqslant x^{pq,r+1},\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r\in R,r\neq\max(r), \tag{15}$$

$$\sum_{i\in I}z_i^{pq,r_a}\oplus z_i^{pq,r_b}+\sum_{(i,j)}y_{ij}^{pq,r_a}\oplus y_{ij}^{pq,r_b}\geqslant\bar{x}^{pq,r_a},\forall(p,q)\in \mathrm{OD},\forall r_a,r_b\in R,r_a<r_b, \tag{16}$$

$$\sum_{R}x^{pq,r}=f_{pq},\forall(p,q)\in \mathrm{OD}, \tag{17}$$

$$x^{pq,r} - \bar{x}^{pq,r} f_{pq} \leqslant 0, \forall (p,q) \in \mathrm{OD}, \forall r \in R, \tag{18}$$

$$x^{pq,r} - \bar{x}^{pq,r} \geqslant 0, \forall (p,q) \in \mathrm{OD}, \forall r \in R, \tag{19}$$

$$\sum_{(p,q)} \sum_{R} x^{pq,r} y_{ij}^{pq,r} \leqslant c_{ij}, \forall (i,j) \in A, \tag{20}$$

$$v_{\varphi,i} \leqslant \varphi_i, \forall i \in I_1, \tag{21}$$

$$\sum_{(p,q)} \sum_{R} \sum_{(i,j)} x^{pq,r} y_{ij}^{pq,r} \beta_{pq} = v_{\varphi,i}, \forall i \in I_1, \tag{22}$$

$$v_{\omega,i} \leqslant \omega_i, \forall i \in I_1, \tag{23}$$

$$\sum_{(p,q),q=p_0} \sum_{R} x^{pq,r} z_i^{pq,r} \alpha_{pq} + \sum_{(p,q),p=p_0} \sum_{R} x^{pq,r} z_i^{pq,r} \alpha_{pq} = v_{\omega,i}, \forall i \in I_1。 \tag{24}$$

优化目标 z_1 如式(1)所示,表示各支动车组列流在枢纽内线路上的运行时间和在枢纽内车站的总作业时间,以确定各列流在枢纽内的走行径路和作业车站。优化目标 z_2 如式(2)所示,表示枢纽内各主要车站到发线与动车所能力利用的协调程度,避免二者能力利用率相差较大,不利于车站设备的均衡运用。同时可以区分枢纽内总作业时间相近条件下的若干个综合利用方案之间的优劣性。

本文所提出的模型考虑包括 5 类约束,分别是路径约束、停站约束、方案约束、列流量约束、能力约束。路径约束如式(3)~(5)所示,其中式(3)为网络流平衡约束;式(4)表示网络中的节点流入流出限制,避免路径成环;式(5)表示成对 OD 列流在枢纽内的走行路径应该由相同弧段构成,以满足实际运营的需要。停站约束如式(6)~(14)所示,其中式(6)表示只有列车经过枢纽内的某站时才可以停站的逻辑前提;式(7)表示每列车在枢纽内的停站作业次数限制;式(8)和式(9)分别表示枢纽内始发、终到列车的停站作业限制,即当枢纽内列车经过虚拟线路 (p_0,i) 或 (i,p_0) 时,该列车为始发终到列车,必须在节点 i 停站进行始发、终到作业;式(10)表示成对 OD 列流在枢纽内应有相同的停站作业车站。式(11)~(13)表示场站布置图对列车通过车站的限制,当车站 i 的两衔接方向 (j,i) 和 (i,k) 间具备不换向直接通过车站的条件时,即 $W_{i,jk}=1$,列车可以停站或不停站通过;当衔接方向间需要停站折返换向通过时,即 $W_{i,jk}=0$,列车如通过该站则必须停站;当两衔接方向间不能通过列车时,$W_{i,jk}=-1$,该列车不能依次经弧 (j,i) 和 (i,k)。式(14)表示其他不考虑停站的车站或线路所对通过列车的限制,只有衔接方向间具备通过条件时,即 $W_{i,jk}=1$,列车可以依次经弧 (j,i) 和 (i,k) 通过该节点。方案约束如式(15)~(16)所示,包括方案排序约束和方案不重复约束,以保证优化结果中各列流 OD 列车开行方案的合理呈现。其中式(15)表示由 p 发往 q 的多组列车运行方案按列车数由大至小排序;式(16)表示由 p 发往 q 的多组列车中不应有重复的运行方案。列流量约束如式(17)~(19)所示,包括运输需求约束和相关辅助变量的逻辑约束,以保证路网运输需求可以得到满足。能力约束如式(20)~(24)所示,其中式(20)表示枢纽内各线路的通过能力约束;式(21)和式(22)分别表示车站通过能力约束及车站通过能力利用的计算方法;式(23)和式(24)表示动车运用所整备能力约束及动车运用所整备能力利用的计算方法。

综上所述,由公式(1)~(24)构成的模型 P 为双目标非线性整数规划模型,为了降低求解难度并实现对该模型的精确求解,应用线性化方法将模型 P 转化为双目标线性整数规划模型 Q。

3　求解算法

ε-约束算法是一类有效的多目标整数规划算法,其核心方法是先保留原问题的 1 个目标,然后限制其他目标的取值并将其添加到约束中,通过动态调整受限目标取值并求解对应单目标问题的方法获得原问题的代表性非支配解。但当部分受限目标对应的约束式不起作用时,原始 ε-约束算法有可能得到弱非支配解。对此,Mavrotas 等[14]在原始算法的基础上提出了增广 ε-约束算法可确保只搜索非支配解,提高了求解效率。目前增广 ε-约束算法已被应用于解决运输和物流等领域中的多目标优化问题,并取得了良好的效果[15],本文采用定制的增广 ε-约束算法求解模型 Q。对于模型 Q,以保留总时间目标最小化为例,对总协

调度目标进行约束，令 e_2 为总协调度目标的约束水平，令 $s_2 \geqslant 0$ 为总协调度目标对应约束的松弛变量，求解算法如下。

Step 1：为期望搜索到 $g+1$ 个代表性非支配解，设 $g+1$ 个均匀分布的格点，将总协调度目标的取值范围 r_2 等分为 g 个区间，各区间的长度为 r_2/g。

Step 2：令 k 为总协调度目标格点的索引，从 0 开始编号，对于格点 $k=0,\cdots,g$，令其所对应的总协调度目标的约束水平 $e_2 = z_2^{\max} - r_2 k/g$，计算增广模型的最优解，以求得代表性非支配解。

Step 3：判断是否达到终止条件。若在当前格点 k 处，存在最优解，则获得了对应的非支配解，令 $k=k+\lceil s_2^* g/r_2 \rceil$，算法继续，此时若 $s_2^* > r_2/g$，则意味着在下一个甚至接下来几个格点处将搜索到相同的非支配解，区别仅在于松弛变量 s_2 的取值。因此，算法可安全地跳过接下来的 $\lfloor s_2^* g/r_2 \rfloor$ 个冗余格点。若在格点 k 处未找到可行解，则意味着在后续格点继续加强约束水平仍将返回不可行解，算法结束。若 $k=g$，则表示所有格点已完成搜索，算法结束。

Step 4：若算法结束时未获得预计数量的非支配解，可根据需要增加格点数重新搜索，也可根据决策者关注的目标范围针对性地进行搜索。

4 案例分析

郑州高铁枢纽在规划年度内办理动车组列车作业的车站有郑州站、郑州东站、郑州西站和郑州南站。其中，除郑州西站不办理始发终到作业外，其余车站均办理一定量的始发终到作业。根据郑州枢纽内主要车站及其衔接线路方向示意图，整理可得郑州高铁枢纽网络简化示意图及各节点编号如图 1 所示。

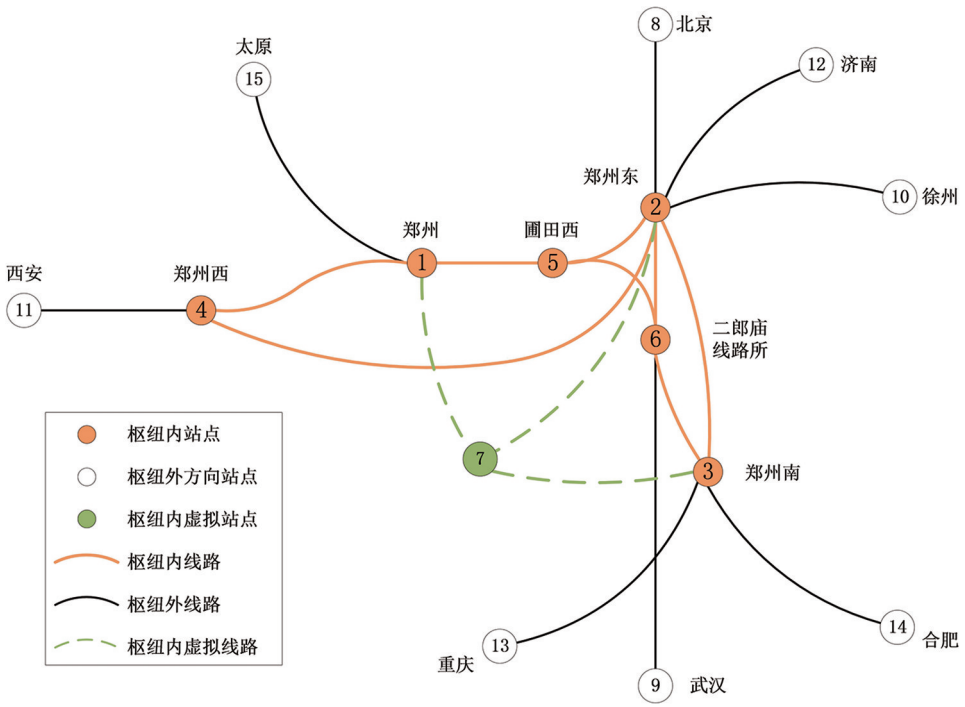

图 1 规划年度郑州高铁枢纽网络简化示意图

Fig.1 Simplified map of the Zhengzhou high-speed railway hub network in the planning year

本节以文献[16]中的数据为基础构造研究案例，所研究枢纽内节点除主要客站郑州站、郑州东站、郑州南站外，还包括与枢纽内线路分支有关的郑州西站、圃田西站和二郎庙线路所。设置 3 个主要客站的车站通过能力 φ_i 分别为 88、608、587 列/d；动车所整备能力 ω_i 分别为 8、120、48 列/d；车站停站作业时间和始发终到作业时间参考《高速铁路设计规范》[17]中计算车站通过能力时采用的列车占用到发线时间表取值，3 个主要客站的停站作业时间 t_1^i 分别为 13、10、10 min/列，在站折返换向额外所需作业时间 t_2^i 均为 14 min/列，始发

终到作业时间 t_3^i 分别为 21、20、20 min/列;车站与相邻线路间的通过条件点-弧关联元素 $W_{i,jk}$,根据每个待分工车站及其他枢纽内重要节点的具体布置图和衔接线路情况分别取值。郑州高铁枢纽地区线路相关参数取值及路网列流 OD 数据分别如表 2 和表 3 所示。

表 2　郑州枢纽地区相关线路数据

Table 2　Relevant line data of the Zhengzhou hub area

线路	弧段 (i,j)	t_{ij}/min	c_{ij}/(列·d^{-1})	线路	弧段 (i,j)	t_{ij}/min	c_{ij}/(列·d^{-1})
郑州—郑州西	1,4	8	120	郑州东—徐州	2,10	50	215
郑州—圃田西	1,5	3	84	郑州东—济南	2,12	47	263
郑州—虚拟点	1,7	8	*M*	郑州南—二郎庙	3,6	9	85
郑州—太原	1,15	28	199	郑州南—虚拟点	3,7	10	*M*
郑州东—郑州南	2,3	9	245	郑州南—重庆	3,13	156	287
郑州东—郑州西	2,4	11	245	郑州南—合肥	3,14	42	273
郑州东—圃田西	2,5	3	32	郑州西—西安	4,11	72	221
郑州东—二郎庙	2,6	2	273	圃田西—二郎庙	5,6	3	85
郑州东—虚拟点	2,7	10	*M*	二郎庙—武汉	6,9	17	273
郑州东—北京	2,8	36	263				

注:各弧段上下行两方向的数据指标取值相同。

表 3　郑州枢纽地区列流 OD 数据(f_{pq} / α_{pq} / β_{pq})

Table 3　OD data of the train flow in the Zhengzhou hub area(f_{pq} / α_{pq} / β_{pq})

站点	郑州	北京	武汉	徐州	西安	济南	重庆	合肥	太原
郑州		23/0.3/1	33/0.35/1	24/0.3/1	30/0.2/1	35/0.25/1	46/0.3/1	36/0.25/1	10/0.2/1
北京	23/0.3/1		61/0/0.4	10/0/1	26/0/0.6		86/0/0.5	12/0/0.6	
武汉	33/0.35/1	61/0/0.4		26/0/0.5	5/0/0.6	25/0/0.6			9/0/0.5
徐州	24/0.3/1	10/0/1	26/0/0.5		50/0/0.5		35/0/0.4		16/0/0.7
西安	30/0.2/1	26/0/0.6	5/0/0.6	50/0/0.5		22/0/0.5		22/0/0.6	
济南	35/0.25/1		25/0/0.6		22/0/0.5		26/0/0.5		
重庆	46/0.3/1	86/0/0.5		35/0/0.4		26/0/0.5			
合肥	36/0.25/1	12/0/0.6			22/0/0.6				40/0/0.5
太原	10/0.2/1		9/0/0.5	16/0/0.7				40/0/0.5	

采用模型 Q 和定制增广 ε-约束算法对郑州枢纽主要车站进行能力综合利用优化研究,验证所提出模型及算法的有效性。其中增广 ε-约束算法采用 Python 语言编程,优化模型通过调用数学规划优化器 GUROBI 9.1.2 求解。优化方案集合 R 最大值取 3,场站能力协调度允许的最大差值 m_0 取 0.4。增广 ε-约束算法中 g 取 10,即搜索 11 个非支配解。其中在搜索范围端点处的两个非支配解更具代表性,分别表示松弛总协调度目标(Z_2)最劣时求解总时间目标(Z_1)最优,定义为优化方案 I;和松弛总时间目标最劣时求解总协调度目标最优,定义为优化方案 II,并将两个优化方案与原分工方案进行对比分析。

4.1　优化方案对比分析

根据求解结果可以整理得到所有 OD 列流的走行径路和作业车站,限于篇幅此处只列出其作业车站,其中原规划方案、优化方案 I 和优化方案 II 的客站分工结果对比如表 4 所示。经过对比分析可知,两优化方案与郑州枢纽总图规划文件中的原车站分工方案基本相符,可以说明所研究模型及算法的有效性。与原分工方案相比,优化方案 I 可以在降低总作业时间 2.8%的同时提高场站能力协调度 8.3%,在两个优化目标下均优于原分工方案。优化方案 II 可以在增加总作业时间 1.7%的情况下提高场站能力协调度 87.1%,意味着当前枢纽场站设备“忙闲不均”现象较为严重,不利于枢纽能力的综合利用。

表 4 优化方案车站分工结果

Table 4 Division of labor among stations in the optimized plan

列车类型	方向	原分工方案			优化方案 I			优化方案 II		
		郑州	郑州东	郑州南	郑州	郑州东	郑州南	郑州	郑州东	郑州南
始发终到列车	枢纽—北京	—	23	—	—	23	—	—	23	—
	枢纽—合肥	—	—	36	—	—	36	—	—	36
	枢纽—济南	—	15	20	—	35	—	—	23	12
	枢纽—太原	10	—	—	10	—	—	10	—	—
	枢纽—武汉	—	33	—	—	33	—	—	33	—
	枢纽—西安	15	15	—	10	20	—	9	21	—
	枢纽—徐州	—	24	—	—	24	—	—	24	—
	枢纽—重庆	—	20	26	—	—	46	—	45	1
	合计	25	130	82	20	135	82	19	169	49
通过列车	北京—合肥	—	6	6	—	—	12	—	—	12
	北京—武汉	—	61	—	—	61	—	—	61	—
	北京—西安	—	26	—	—	26	—	—	26	—
	北京—徐州	—	10*	—	—	10*	—	—	10*	—
	北京—重庆	—	54	32	—	—	86	—	—	86
	合肥—太原	20	—	20	—	—	40	1	—	39
	济南—重庆	—	16	10	—	—	26	—	—	26
	武汉—济南	—	25	—	—	25	—	—	25	—
	武汉—太原	9	—	—	9	—	—	9	—	—
	武汉—西安	5	—	—	5	—	—	5	—	—
	武汉—徐州	—	26	—	—	26	—	—	26	—
	西安—合肥	22	—	—	—	8*	14	6	8*	8
	西安—济南	—	22	—	—	22	—	—	22	—
	徐州—太原	10	6	—	—	16	—	16	—	—
	徐州—西安	—	50	—	—	50	—	—	50	—
	徐州—重庆	—	22	13	—	—	35	—	—	35
	合计	66	324	81	14	244	213	37	228	206
优化目标 Z_1		24 438.2			23 733.0(−2.89%)			24 854.8(+1.70%)		
优化目标 Z_2		1.000 7			0.917 5(−8.31%)			0.128 7(−87.14%)		
总计列车数		91	454	163	34	379	295	56	397	255
到发线通过能力利用率		142.5%	97.2%	41.5%	62.5%	87.2%	63.9%	95.0%	94.7%	51.3%
动车所整备能力利用率		125.0%	64.0%	90.8%	100.0%	64.0%	95.0%	95.0%	81.8%	51.3%

注：* 表示该列车运行方案在作业站点需进行停站换向作业。

计算各方案郑州枢纽内主要车站到发线通过能力、动车所整备能力利用情况，可以发现原分工方案将在规划年度使郑州站到发线通过能力和动车所整备能力分别超出其能力负荷限值 42.5%和 25%。同时郑州东站到发线能力不足，枢纽能力极度紧张。运用本文所构建的高铁枢纽能力综合利用优化模型对案例进行求解，两种优化策略下得到的优化方案 I、II 均能达到优化目的，使枢纽内场站资源设备合理运用。优化方案 I、II 均将部分在郑州站、郑州东站办理的列车作业转移至郑州南站办理，使两车站到发线通过能力和动车所整备能力负荷都处于合理的范围内，同时降低郑州南站到发线能力虚靡的程度，有利于提高枢纽地区路网的整体运输能力，起到“削峰填谷”的效果。

4.2　算法对比分析

以非支配解质量为标准,将定制的增广 ε -约束算法(AECA)与既有研究普遍采用的线性加权求和算法(WSA)进行对比,评估两个多目标规划算法对高速铁路枢纽能力综合利用问题的适用性。采用均匀分布策略生成目标权重,分别约束总时间目标和总协调度目标进行求解。两类算法在共计 3 个场景下分别搜索 11 个代表性非支配解后得到的近似非支配前沿如图 2 所示。

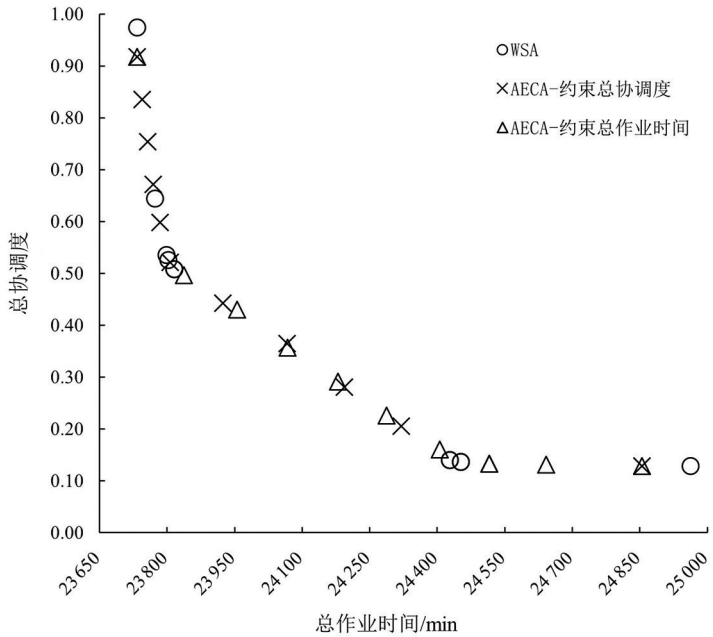

图 2　近似非支配解前沿

Fig.2　Approximate nondominated solution frontier

由图 2 可知,在非支配解的质量方面,AECA 算法在约束总协调度场景下获得 11 个非支配解,在约束总作业时间场景下获得 10 个非支配解,但由于算法跳跃机制的存在,未产生冗余计算。而 WSA 算法得到 3 个重复的非支配解和 2 个支配解,存在冗余计算。在非支配解的区分度和分布程度方面两类算法有显著差异。对于 WSA 算法,大多数解集中在原问题非支配解前沿的端点和拐点处,区分度不明显,不利于决策者辨识;与此相反,AECA 算法可绘制出区分度更为明显且分布更均匀的近似非支配前沿。因此,从非支配解的区分度和分布程度来看,增广 ε -约束算法在两个算法中更具竞争力。

在计算时间方面两类算法差异不显著,平均每次模型求解计算时间均不超过 60 s,且原问题是在宏观战略决策角度对高速铁路枢纽能力的综合利用进行优化,对计算时间的要求并不严格,且决策者更倾向于获得高质量的近似非支配前沿。综上所述,相比于线性加权求和算法,增广 ε -约束算法更适合求解双目标高速铁路枢纽能力综合利用优化问题。

5　结语

本文建立了以枢纽内列车总作业时间最小和车站到发线动车所能力协调为目标的高铁枢纽能力综合利用优化模型,定义了刻画列车在车站通过条件的点-弧关联元素并提出了 OD 列流可分割条件下的运行方案约束方法,提高了本文研究的适用性。且所提出的方法能够在合理时间内获得一组非支配的高速铁路枢纽能力综合利用优化方案,可为高铁枢纽地区扩能改造、能力优化等措施的决策提供可靠参考依据和合理建议。同时算法对比分析表明,相较于线性加权求和算法,本文提出的定制增广 ε -约束算法不仅可以确保生成均匀分布的非支配解,还可以有效避免冗余计算,更适合求解多目标高速铁路枢纽能力综合利用优化问题。

参考文献：

[1]CAIMI G, FUCHSBERGER M, LAUMANNS M, et al. A model predictive control approach for discrete-time rescheduling in complex central railway station areas[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(11): 2578-2593. DOI: 10.1016/j.cor.2012.01.003.

[2]PELLEGRINI P, MARLIÈRE G, PESENTI R, et al. RECIFE-MILP: an effective MILP-based heuristic for the real-time railway traffic management problem[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2609-2619. DOI: 10.1109/TITS.2015.2414294.

[3]SAMÀ M, PELLEGRINI P, D′ARIANO A, et al. Ant colony optimization for the real-time train routing selection problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 85: 89-108. DOI: 10.1016/j.trb.2016.01.005.

[4]SAMÀ M, PELLEGRINI P, D′ ARIANO A, et al. On the tactical and operational train routing selection problem[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 76: 1-15. DOI: 10.1016/j.trc.2016.12.010.

[5]SZYMULA C, BEŠINOVIĆ N. Passenger-centered vulnerability assessment of railway networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 136: 30-61. DOI: 10.1016/j.trb.2020.03.008.

[6]毛保华. 枢纽地区铁路客运站布局与分工优化[J]. 铁道学报, 1992, 14(1): 47-55.

[7]史跃亚, 王慈光, 崔丽莉. 客运专线引入枢纽后客运站合理布局的探讨[J]. 交通科技, 2007(4): 109-111. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7570.2007.04.039.

[8]赵军, 李愈, 任其亮, 等. 铁路枢纽内客运站分工的优化模型及算法[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 148-153. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2011.01.024.

[9]张超, 孟令君, 金磊, 等. 铁路枢纽通过能力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(2): 86-90. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2014.02.14.

[10]毕明凯, 何世伟, 殷玮川, 等. 高速铁路枢纽场站资源统筹利用及运能适应性研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(6): 11-20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2018.06.002.

[11]刘耀, 何世伟, 毕明凯. 高铁枢纽客运站分工及能力适应性研究[J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(3): 13-18. DOI: 10.13291/j.cnki.djdxac.2018.03.003.

[12]刘宁馨, 徐利民, 杨瑜, 等. 铁路枢纽客运站分工方案协调性评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(6): 70-77. DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2022.06.11.

[13]王沂栋. 考虑场站股道运用的高速铁路枢纽客运站作业分工优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022: 31-74.

[14]MAVROTAS G, FLORIOS K. An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact Pareto set in multi-objective integer programming problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219(18): 9652-9669. DOI: 10.1016/j.amc.2013.03.002.

[15]黄丽霞, 赵军. 危险货物铁公联运办理站选址问题多目标优化[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 235-246. DOI: 10.13196/j.cims.2019.01.024.

[16]刘耀. 高速铁路枢纽能力统筹利用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 21-48.

[17]国家铁路局.高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S].北京:中国铁道出版社有限公司,2014.