



文章编号: 1003-1421(2019)03-0006-06

中图分类号: U116.1

文献标识码: A

DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2019.03.02

基于最小费用最大流改进算法的多种交通方式开行方案协同优化研究

A Study on the Collaboration and Optimization for Multiple Traffic Modes Operation Plan based on the Minimum Cost and Maximum Flow Improvement Algorithm

赵璐阳¹, 王丽娟¹, 宋金凤²

ZHAO Luyang¹, WANG Lijuan¹, SONG Jinfeng²

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北东方学院 交通学院, 河北 廊坊 065001)

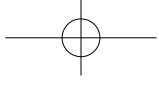
(1.School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 2.School of Traffic, Hebei Oriental University, Langfang 065001, Hebei, China)

摘 要: 为降低日常非拥挤状态下城际间综合运输系统的客运总成本, 对运输通道内多种交通方式的列车开行方案或车辆运行作业计划进行了协同优化。以广义运输成本最小为目标函数, 以成本和客流为约束条件, 将协同优化归纳为最小费用最大流问题。为提高计算效率, 根据图论中最小费用最大流常用算法之一的最小费用路算法设计出协同优化改进算法。以示例路网为基础, 构建协同优化合适算例进行改进算法应用。结果表明, 协同优化可以有效降低非拥挤状态下综合运输系统客运总成本, 其改进算法表现出良好的有效性和准确性。

关键词: 城际铁路; 开行方案; 协同优化; 非拥挤状态; 最小费用最大流; 广义成本

Abstract: To reduce the total passenger transport cost of the intercity integrated transport system in the daily non-congested state, this paper collaboratively optimizes the train operation plan or vehicle running plan of the multiple traffic modes in the system. Collaborative optimization is summed up to the minimum cost maximum flow problem which takes the minimum social generalized transport cost as objective function and takes the cost and passenger flow as constraints in the public perspective. It designs plans to improve related algorithms according to one of the most commonly used algorithms about the minimum cost maximum flow in graph theory to improve the computational efficiency. After using an appropriate numerical example of collaborative optimization based on the example road network which is designed to improve algorithm application, the results show that the collaborative optimization can effectively reduce the total passenger transport cost of the integrated transport system under non-congested conditions, and the improved algorithm is effective and accurate in solving problems.

Keywords: Intercity Railway; Operation Plan; Cooperation and Optimization; Non-congested State; Minimum Cost Maximum Flow; Generalized Cost



0 引言

城际铁路具有快速、便捷、舒适、环保等特点,《中长期铁路网规划》中明确提出要发展城际铁路以补充现代高速铁路网。城际铁路在城际间客运市场内与原有的既有铁路和公路运输存在竞争,同时因其票价较高、定线定员开行、路网规模有限等特点,又与既有铁路和公路运输存在协同优化的可能。因此,加强城际铁路、既有铁路和公路的协同合作,可以更好地服务于城市间客运市场。

目前国内对列车开行方案优化的研究较多,如从坐席分配、列车运行图、开行时段^[1-3]等角度入手,通过对基于 Logit^[4]等模型构建的客流分配模型的求解,采用“按流开车”原则对铁路列车开行方案进行优化。除从微观角度针对某种交通方式的开行方案进行优化研究外,还有学者从宏观角度对多种交通方式间协同优化进行了研究。李国文等^[5]研究了客运通道内多种交通方式间客流分配的协同优化问题;胡辉等^[6]利用 Benders 分解技术对多方式物流运输网络优化模型的求解进行研究。求解交通相关问题时,图论理论被部分学者应用,Gutiérrez-Jarpa 等^[7]通过最小费用最大流算法为公路配送及轨道交通选线提供了优化思路;张天伟等^[8]利用最短路求解思路优化了城际铁路设站时的城市选择方法。目前协同优化方法多样,图论相关理论虽然被广泛应用于求解各类交通问题,但利用最小费用最大流理论对多种交通方式开行方案进行协同优化的研究还相对较少。为此,在现有研究基础上,关注非拥挤状态下城际间运输通道内多种交通方式的旅客运输问题,并设计最小费用最大流的改进算法,对多种交通方式开行方案进行协同优化。

1 问题描述

1.1 假设条件

城际间交通系统大部分时期处于运能充足的状态即客流非拥挤状态的情况,通过对多种交通方式开行方案的协同优化研究,可以减少运能浪费并降低广义运输总成本,引导旅客合理选择出行方式并引导多种交通方式有序竞争。因此,非拥挤状态

下城际间运输通道内多种交通方式的开行方案协同优化,主要考虑如何满足城际综合运输系统内大城市与中小城市间的旅客运输需求,包括旅客的换乘可能。城际间运输通道多种交通方式客运路网如图 1 中所示。

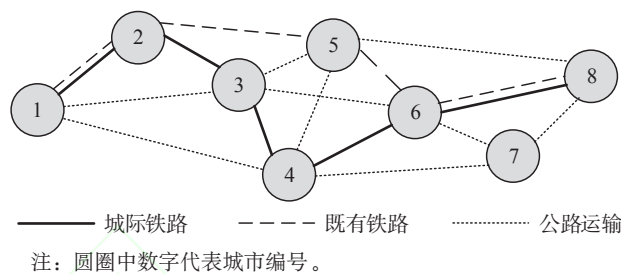


图 1 城际间运输通道多种交通方式客运路网

Fig.1 Multiple transport modes network in intercity transport corridors

城际间运输通道内多种交通方式开行方案协同优化研究,假设相邻城市间至少存在 1 种即公路运输的客运直达交通方式,而城际铁路及既有铁路只在大城市设枢纽站可始发或终到列车,2 个大城市间的中小城市所设车站均为中间站,仅可停靠列车。

1.2 参数及变量定义

大城市 1 与大城市 N 分别为城际列车的起点和终点,依次对沿线中小城市进行 1, 2, \dots , N 的自然序列编号。对城际间 K 种常用交通方式进行编号,规定 $K=1$ 表示城际铁路, $K=2$ 表示既有铁路, $K=3$ 表示公路运输。其余参数及变量分为以下 4 类。

(1) 成本类参数。 C_{ij}^K 为城市 i 到相邻城市 j 之间第 K 种直达交通方式的广义运输成本 ($i, j=1, 2, \dots, N, K=1, 2, 3$), 元/人, 取值范围 $C_{ij}^K \geq 0$ 或 $C_{ij}^K = -1$ 。认为当 $i=j$ 时 $C_{ij}^K=0$; 当城市 i 与相邻城市 j 间不存在 K 种直达交通方式时, 或当城市 i 与城市 j 不是可直达的相邻城市时, $C_{ij}^K = -1$ ($K=1, 2, 3$)。 C^K 为开行一列列车的广义运输成本 ($K=1, 2$), 元/列, 取值范围 $C^K > 0$ 。

(2) 0-1 变量。 t_{ij}^K 为判断是否为最低广义运输成本的 0-1 变量, 当第 K 种直达交通方式是城市 i 到相邻城市 j 之间最低广义运输成本时, t_{ij}^K 为 1, 否则为 0。此时 $t_{ij}^K=1$ 的集合形成了城际运输通道内最低成本路网。 T_{xy} 为城市 x 与城市 y 间相邻 OD 路段最低广义运输成本的集合, 即 $T_{xy} = \{t_{ij}^K=1 | t_{xc}^K=$

$1, \dots, t_{dy}^K=1\}$, 为首尾相连的相邻 OD 路段的 0-1 变量集合, 其中 x 与 c , 以及 d 与 y 分别为相邻城市。

(3) 客流量类参数。 a_{xy} 为城市 x 至城市 y 的 OD 客流量, 人, 取值范围 $a_{xy} \geq 0$ 。 A_{ij} 为城市 i 到相邻城市 j 间路段客流承担量, 人, 取值范围 $A_{ij} \geq 0$ 。

(4) 其他参数及变量。 V^K 为 K 种交通方式的单位载客量即每趟列车或客车的载客量, 人/列或人/辆, 取值范围 $V^K > 0$ 。 L^K 为城际铁路与既有铁路的合理开行数 ($K=1, 2$), 列。其中合理开行数包括基础开行数 $L_{基}^K$ 和可调开行数 $L_{调}^K$ 2 个部分。 L_{ij}^3 为城市 i 与相邻城市 j 间公路运输的合理开行数, 辆, 取值范围 $L^K \geq 0$, 且为整数。

1.3 协同优化

为方便计算, 需简化实际运输网络。首先, 判断各城市间是否存在直达交通方式, 即 2 个城市是否相邻; 其次, 比较各相邻城市间广义运输成本, 确定成本最低的交通方式, 逐一为 0-1 变量 t_{ij}^K 赋值, 从而得到城际运输通道内最低广义运输成本客运路网, 形成实际问题的赋权有向简单图。城际运输通道内最低广义运输成本客运路网示意图如图 2 所示。

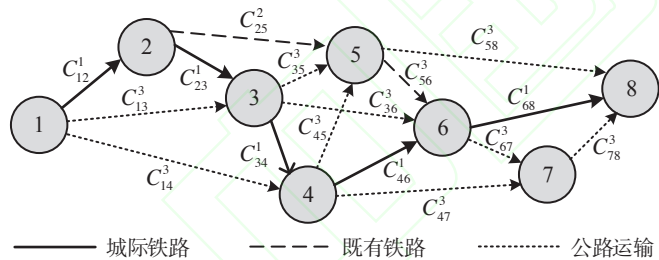


图 2 城际运输通道内最低广义运输成本客运路网示意图

Fig.2 Lowest social generalized transport cost passenger transport network

(1) 成本参数逻辑关系。根据已知各相邻城市间多种交通方式的广义运输成本可得出城际铁路或既有铁路单向开行一列列车的广义运输成本, 即

$$C^K = \frac{1}{2} V^K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}^K \quad K=1, 2; C_{ij}^K \geq 0 \quad (1)$$

式中, 认为相邻城市间上行和下行列车开行时广义运输成本相等, 故列车单向开行时的广义运输成本等于往返开行时的一半。

(2) 客流参数逻辑关系。根据已知 OD 客流量

及计算出的 OD 间成本最小路径, 对客流进行 0-1 分配, 从而得到各相邻 OD 路段的初始客流承担量 A_{ij} , 此时计算出的各 OD 间客流承担量应满足

$$A_{ij} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N \sum_{K=1}^3 a_{xy} t_{ij}^K \quad t_{ij}^K \in T_{xy}; i, j=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中, 如果 T_{xy} 的集合中不存在 $t_{ij}^K=1$ 的成员, 则取 $t_{ij}^K=0$ 。当某 OD 间并非成本最小路径或并非相邻 OD 路段时认为其不承担客流, 即 $A_{ij}=0$ 。在计算时, A_{ij} 的数值可能会被调整, 调整后的客流承担量仍记为 A_{ij} 。

(3) 目标函数。所构建优化模型的目标函数为广义运输总成本最低, 即

$$\min z = \sum_{K=1}^2 C^K L^K + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_{ij}^3 C_{ij}^3 A_{ij}^3 \quad (3)$$

式中: $\sum_{K=1}^2 C^K L^K$ 为城际铁路与既有铁路当前开行方案产生的总广义运输成本; $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_{ij}^3 C_{ij}^3 A_{ij}^3$ 为公路运输当前开行方案产生的总广义运输成本, 具体费用大小与问题求解结果有关。

(4) 0-1 变量约束。求解最短路时为避免重复选线, 已确定的 0-1 变量应满足

$$\sum_{K=1}^3 t_{ij}^K + \sum_{K=1}^3 t_{ji}^K \leq 1 \quad i, j=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

(5) 客流约束。去往某城市的客流量及该城市发出的客流量应满足以下关系

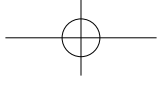
$$\sum_{j=1}^N A_{ij} - \sum_{j=1}^N A_{ji} = \sum_{y=1}^N a_{xy} - \sum_{y=1}^N a_{yx} \quad i=x=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

即从城市 i 发出路段的总客流承担量与进入城市 i 路段的总客流承担量之差, 应等于客流 OD 表中在城市 i 下车的总客流量与在城市 i 上车的总客流量之差。

(6) 开行约束。为保证协同优化的开行方案可提高运能的利用率, 故开行方案应满足

$$\sum_{K=1}^2 V^K L^K + V^3 L_{ij}^3 \geq t_{ij}^K A_{ij} \quad K=1, 2; i, j=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$\sum_{K=1}^2 V^K (L^K - 1) + V^3 L_{ij}^3 < \max(t_{ij}^K A_{ij})$$



$$K=1, 2; i, j=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

根据假设条件,在非拥挤状态下城际间运输通道内多种交通方式的开行方案协同优化运能充足,可满足客流需求,即如公式(6)所示。公式(7)目的是为确保运能的高效利用,避免开行过多列车。

由于公路运输时每辆车载客量较少,在协同优化开行方案时认为其合理开行数量应与客运需求相匹配,即公路运输提供的运能刚好满足公路运输需求。即

$$t_{ij}^3 A_{ij} = V^3 L_{ij} \quad i, j=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

由于此类问题使用数学模型求解较复杂,当与实际网络相结合,利用网络的某些性质求解将有效提高其计算效率,因而将此类问题归纳为图论中最小费用最大流问题,并设计相关改进算法进行求解。

2 多种交通方式开行方案协同优化模型改进算法

对传统的最小费用最大流理论进行改进,认为其弧容量为各路段客流承担量而非路段通过能力,弧费用为各路段广义运输成本。在计算时对最小费用最大流常用算法之一的最小费用路算法进行了改进。首先,认为弧容量为弧流量的下限而非上限,计算结束时各弧流量需大于等于其容量但不宜过大;其次,认为弧容量是动态可变的,允许客流承担量即弧容量在路段间进行合理调整;最后,当弧流量大于等于弧容量时表示该弧已被满足,不能再作为增广链的一部分。改进算法分为3个部分,第1部分仅考虑铁路运输并依据传统算法求解出基础开行数;第2部分考虑3种交通方式并依据上述要求,通过寻找最小费用增广链调整系统流量,迭代至所有弧容量被满足;第3部分比较得出总费用最低的开行方案,确定可调开行数。

2.1 基础数据计算

根据运筹学图论中的最短路径理论,使用Dijkstra算法求出每一对OD点间已知的广义运输成本的最短路,并将结果记录在最短路径集合表中。最短路径集合表样式如表1所示。在表1的基础上利用0-1分配法将已知OD交通客流量表中所有客流分配至其对应的最短路上,分配时需确保客流的连

续,从而可快捷准确得出路段客流承担量表。路段客流承担量表样式如表2所示。

在计算最短路时可能出现成本相等的线路,称其为“可相互替换线路”,2条线路分别被括起或用斜体表示。按照“括起初始计算线路,斜体表示可替换线路”的原则进行标注,此2条线路不同时参与计算。

表1 最短路集合表样式

Tab.1 Shortest path set table style

最短路集合	t_{1j}^1	\dots	t_{mn}^1	t_{ij}^2	\dots	t_{mn}^2	t_{ij}^3	\dots
T_{1j}	1							
T_{2j}		[1	1]				I	
\dots								
T_{mn}								

表2 路段客流承担量表样式

Tab.2 Section passenger flow bearing table style

客流量	最短路集合	t_{1j}^1	\dots	t_{mn}^1	t_{ij}^2	\dots	t_{mn}^2	t_{ij}^3	\dots
a_{1j}	T_{1j}	a_{1j}							
a_{2j}	T_{2j}		a_{2j}	a_{2j}					
\dots	\dots								
a_{mn}	T_{mn}								
路段客流承担量	A_{1j}	\dots	A_{mn}	A_{ij}	\dots	A_{mn}	A_{ij}	\dots	

将相邻城市间的路段客流承担量及其最低广义运输成本按照 (A_{ij}, C_{ij}^K) 的形式记录下来,从而得到计算所需的最小费用最大流基础图。多种交通方式协同优化最小费用最大流基础图如图3所示。

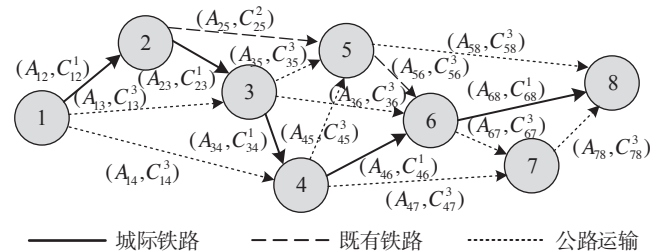


图3 多种交通方式协同优化最小费用最大流基础图

Fig.3 Basic map of minimum cost maximum flow for collaborative optimization of multiple traffic modes

2.2 算法步骤

由于城际铁路及既有铁路在开行时,需从城市1始发至城市N终到,期间提供的运能一定,适用最小费用最大流的求解原则。而公路运输可从任

意城市始发至周边城市终到, 根据客流需求可直接求解开行方案, 但不适用最小费用最大流的求解原则。故在计算的第 1 部分, 即使用最小费用最大流理论计算时暂不考虑 $t_{ij}^3 = 1$ 的路段。在计算的第 2 部分即使用迭代算法计算时再加入此部分。多种交通方式协同优化最小费用最大流计算图如图 4 所示。

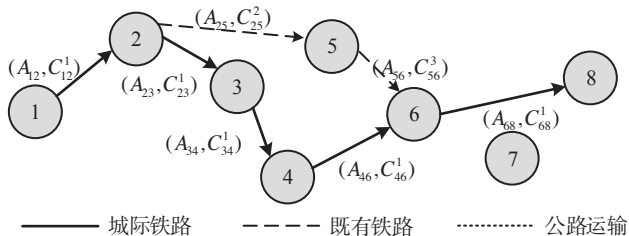


图 4 多种交通方式协同优化最小费用最大流计算图

Fig.4 Calculation of minimum cost maximum flow for collaborative optimization of multiple traffic modes

(1) 计算第 1 部分。

步骤 1: 使用最小费用最大流理论解法求解出当前计算图的最小费用最大流。

步骤 2: 得到协同优化开行方案的基础开行数 $L_{基}^K$, 并确定计算第 2 部分迭代算法的初始值。在计算基础开行数时可采用四舍五入的方法提高运输效率。

(2) 计算第 2 部分。

步骤 3: 设还需增开 n 趟城际列车或 m 趟既有列车, 并设 n 和 m 的初始值为 0。

步骤 4: 调整图中弧容量, 将铁路沿线可由公路运输改为铁路运输的客流需求进行调整。

步骤 5: 将剩余客流需求统一分配给各相邻城市间的公路运输。

步骤 6: 求解得出当前开行方案下目标函数 z 的值, 记作 z_{nm} 。

步骤 7: 判断城际铁路及既有铁路线路上是否存在剩余客流需求未被满足, 若存在则 $n = n + 1$ 或 $m = m + 1$, 转至步骤 4 分别迭代 1 次, 并记录成本较低的 z_{nm} 开行方案, 以简化后期迭代; 若不存在则转至步骤 8。

(3) 计算第 3 部分。

步骤 8: 求解出 z_{nm} 的最小值。

步骤 9: 确定出开行方案的可调开行数 $L_{调}^K$, 得出非拥挤状态下城际间多种交通方式协同优化的开行方案, 计算结束。

算法中步骤 4 所提到的可由公路运输改为铁路运输的客流需求是指某 OD 对间客流有多种交通方式可选, 从广义运输成本角度公路运输的成本最低。但是, 如果增开城际铁路或既有铁路, 需将此部分客流需求从公路运输调整至城际铁路或既有铁路上来, 从而提高城际间综合运输系统整体的运能利用率。

3 算例应用

以图 1 为例, 对城市 1 至城市 8 上行方向的协同优化开行方案进行计算, 以验证协同优化及其改进算法的有效性和准确性。

假定已知运输通道内相邻城市间多种交通方式的广义运输成本及各城市间 OD 客流, 且在换乘时暂不考虑旅客换乘时间成本。成本及客流取值差异不影响模型计算过程及结果有效性, 即利用该模型总能找到当前问题的最优协同开行方案, 故算例按城际铁路、既有铁路、公路运输成本依次增大设置广义运输成本, 依据大中小城市规模间出行数量依次减少设置 OD 客流, 具体如下。

(1) 城际铁路各 OD 点间的广义运输成本。城际铁路线路为: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$ 。各段线路成本为: $C_{12}^1 = 40$ 元, $C_{23}^1 = 30$ 元, $C_{34}^1 = 30$ 元, $C_{46}^1 = 30$ 元, $C_{68}^1 = 40$ 元。

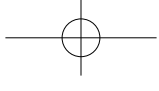
(2) 既有铁路各 OD 点间的广义运输成本。既有铁路线路为: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 8$ 。各段线路成本为: $C_{12}^2 = 50$ 元, $C_{25}^2 = 60$ 元, $C_{56}^2 = 40$ 元, $C_{68}^2 = 50$ 元。

(3) 公路运输各 OD 点间的广义运输成本。公路广义运输成本如表 3 所示。

表 3 公路运输广义运输成本表 元

Tab.3 Generalized transport cost table for road transport

起点	终点							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	60	80	100	-1	-1	-1	-1
2	60	0	40	-1	80	-1	-1	-1
3	80	40	0	40	40	70	-1	-1
4	100	-1	40	0	60	60	90	-1
5	-1	80	40	60	0	50	-1	100
6	-1	-1	70	60	50	0	40	60
7	-1	-1	-1	90	-1	40	0	40
8	-1	-1	-1	-1	100	60	40	0



(4) OD 调查上行客流量。OD 调查上行客流量如表 4 所示。

表 4 OD 调查上行客流量表 万人
Tab.4 OD survey traffic flow at up direction

起点	终点								总发送数
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0.4	0.5	0.2	0.2	0.3	0.1	0.5	2.2
2		0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8
3			0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.8
4				0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.6
5					0	0.2	0.1	0.4	0.7
6						0	0.1	0.4	0.5
7							0	0.3	0.3
8								0	0
总到达数	0	0.4	0.7	0.4	0.5	0.9	0.6	2.4	5.9

(5) 多种交通方式的单位载客量。 $V^1=600$, $V^2=1\ 500$, $V^3=50$ 。

通过已知数据可完成准备工作, 首先使用 Dijkstra 算法得出各 OD 点间最短路集合, 在此基础上, 可计算出各 OD 点间路段客流承担量。其次计算出开行每列车的广义运输成本 $C^1=10.2$ 万元/列, $C^2=30$ 万元/列。

在此基础上, 通过第 1 部分算法, 可计算出 2 种铁路交通方式的基础开行数 $L_{基}^1=32$ 列, $L_{基}^2=1$ 列。

通过第 2 部分算法, 经 11 次迭代后, 城际铁路及既有铁路线路上均不存在剩余客流需求, 故迭代完成。其中在第 7 次迭代后, 城际铁路线路上已不存在剩余客流, 故不再参与迭代。

进入算法第 3 部分, 比较 11 次迭代所得出的 18 种开行方案, 可得 $\min z_{nm} = z_{10} = 499.3$ 万元, 相应可调开行数为 $L_{调}^1=1$ 列, $L_{调}^2=0$ 列。故通过协同优化问题计算可得到 3 种交通方式的合理开行数分别为: $L^1=33$ 列, $L^2=1$ 列, $L_{14}^3=24$ 辆, $L_{23}^3=40$ 辆, $L_{25}^3=30$ 辆, $L_{35}^3=20$ 辆, $L_{36}^3=40$ 辆, $L_{45}^3=20$ 辆, $L_{46}^3=44$ 辆, $L_{56}^3=110$ 辆, $L_{67}^3=120$ 辆, $L_{78}^3=60$ 辆。

4 结束语

研究以城际铁路为主导的城际间运输通道内多种交通方式开行方案的协同优化, 对有效降低旅客

运输系统在非拥挤状态下的广义运输总成本具有重要意义。考虑广义运输成本及 OD 客流 2 个要素, 将协同优化归纳为最小费用最大流问题, 并依据其常用算法设计出协同优化改进算法以提高计算效率。协同优化结果为城际间运输通道内多种交通方式的日常开行方案提供了合理方案建议, 在降低综合运输系统日常广义运输总成本的同时, 可以促进多种交通方式间有序竞争, 还可以对更大规模的城市群或更多种类的交通方式进行深入研究, 考虑换乘成本等因素, 探讨更加高效的算法。

参考文献:

- [1] 蓝伯雄, 吴李知. 高速铁路客运网络列车开行方案优化模型[J]. 中国管理科学, 2010, 18(6): 51-58.
LAN Boxiong, WU Lizhi. Optimization Model for Line Planning in Rail Passenger Transport Network[J]. Chinese Journal of Management Science, 2010, 18(6): 51-58.
- [2] 苏焕银, 史峰, 邓连波, 等. 面向时变需求的高速铁路列车开行方案优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 110-116, 135.
SU Huanyin, SHI Feng, DENG Lianbo, et al. Time-dependent Demand Oriented Line Planning Optimization for the High-Speed Railway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5): 110-116, 135.
- [3] 张琳奇, 聂磊, 付慧伶, 等. 高速铁路节假日列车开行方案优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(11): 57-62, 66.
ZHANG Linqi, NIE Lei, FU Huiling, et al. Optimization Model for High-Speed Railway Line Planning during Holidays[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(11): 57-62, 66.
- [4] 吴文娴. 铁路通道内客流分担率及客运组织策略研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 126-130.
WU Wenxian. Research on the Share Rate of Passenger Flow and Transportation Organization Strategy in Railway Transportation Corridor[J]. China Railway Science, 2011, 32(2): 126-130.
- [5] 李国文, 张建旭. 客运通道出行 OD 多方式划分模型及其实现算法[J]. 公路, 2016, 61(3): 144-148.

(下转第 42 页)

- [3] 康洪军, 赵 鹏, 杨 帅, 等. 可变编组动车组合理运用方式及其适用范围分析[J]. 综合运输, 2017, 39(9): 64–67.
KANG Hongjun, ZHAO Peng, YANG Shuai, et al. Rational Application Mode and Application Scope Analysis of Variable Configuration EMU Train[J]. China Transportation Review, 2017, 39(9): 64–67.
- [4] 李丽辉, 朱建生, 强丽霞, 等. 基于随机森林回归算法的高速铁路短期客流预测研究[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(9): 67–71.
LI Lihui, ZHU Jiansheng, QIANG Lixia, et al. Study on Forecast of High-Speed Railway Short-term Passenger Flow based on Random Forest Regression[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(9): 67–71.
- [5] 吕晓艳, 刘彦麟, 颜 颖, 等. 铁路客流总量预测方法研究[J]. 铁路计算机应用, 2016, 25(2): 1–2.
LYU Xiaoyan, LIU Yanlin, YAN Ying, et al. Forecasting Method for Railway Passenger Flow[J]. Railway Computer Application, 2016, 25(2): 1–2.
- [6] FABIO S. An Integrated Forecasting and Regulation Framework for Light Rail Transit Systems[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2006(7): 59–73.
- [7] 纪鸿濛. 高速铁路客运需求分析与客运量预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
JI Hongmeng. Passenger Demand Analysis and Passenger Volume Predict of High-Speed Rail[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] 闫志刚, 李俊清. 基于熵值法和变异系数的大熊猫分布区生态系统评价[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4007–4016.

- YAN Zhigang, LI Junqing. Assessment of Ecosystem in Giant Panda Distribution Area based on Entropy Method and Coefficient of Variation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 4007–4016.
- [9] 王洪业, 吕晓艳, 周亮瑾, 等. 基于客流预测的铁路旅客列车票额智能分配方法[J]. 中国铁道科学, 2013(3): 128–132.
WANG Hongye, LYU Xiaoyan, ZHOU Liangjin, et al. Intelligent Seat Allotment Method for Railway Passenger Train based on Passenger Flow Forecast[J]. China Railway Science, 2013(3): 128–132.
- [10] 姚恩建, 程 欣, 刘莎莎, 等. 基于可达性的城轨既有站进站出站客流预测[J]. 铁道学报, 2016, 38(1): 1–7.
YAO Enjian, CHENG Xin, LIU Shasha, et al. Accessibility-based Forecast on Passenger Flow Entering and Departing Existing Urban Railway Stations[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(1): 1–7.
- [11] 侯维磊, 刘力军, 崔晶娜. 基于GRA-PCA-GA-BP网络模型的铁路货运量预测分析[J]. 铁道货运, 2017, 35(1): 54–58.
HOU Weilei, LIU Lijun, CUI Jingna. Forecast Analysis of Railway Freight Transport Volume based on GRA-PCA-GA-BP Network Model[J]. Railway Freight Transport, 2017, 35(1): 54–58.

收稿日期: 2018–06–20

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题 (2017J008–A)

责任编辑: 金 颖

(上接第 11 页)

- [6] 胡 辉, 顾丽琴, 倪 明. 基于 Benders 分解的多方式物流运输网络优化模型[J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(2): 72–77.
HU Hui, GU Liqin, NI Ming. Optimization Model of Multi-mode Logistic Transportation Network based on Benders Decomposition[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015, 32(2): 72–77.
- [7] GUTIÉRREZ-JARPA G, DONOSO M, OBREQUE C, et al. Minimum Cost Path Location for Maximum Traffic Capture[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010,

- 58(2): 332–341.
- [8] 张天伟, 赵媛媛, 闫绍辉, 等. 城际铁路设站城市选择优化模型[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(1): 75–80.
ZHANG Tianwei, ZHAO Yuanyuan, YAN Shaohui, et al. Optimization Model of Selecting Cities Setting Inter-city Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy, 2018, 40(1): 75–80.

收稿日期: 2018–01–09

基金项目: 河北省社会科学基金项目 (HB16GL075)

责任编辑: 金 颖