

铁路枢纽城市的客运铁路列车开行计划优化^{*}

周 军¹ 周菁楠¹ 罗 钦² 李 伟²

(1. 深圳市规划国土发展研究中心, 518040, 深圳; 2. 深圳技术大学广东省高校轨道交通智慧运维工程技术开发中心, 518118, 深圳// 第一作者, 高级工程师)

摘 要 针对铁路枢纽城市, 提出综合考虑“外围发车, 中心停靠”的客运铁路列车开行模式, 构建以提高旅客出行便捷为优化目标的混合整数线性规划模型, 并转换为经典线性规划模型利用算法求解器求解, 以深圳为例研究列车开行计划的优化。研究结果表明, 综合考虑“外围发车, 中心停靠”模式下的列车开行计划能够更好地发挥网络车站的能力利用率, 并明显提升旅客出行便捷度。

关键词 铁路运输; 铁路枢纽; 外围发车; 开行计划; 混合整数线性规划模型

中图分类号 U292

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.014

Optimization of Train Operation Plan for Passenger Dedicated Lines in Railway Hub Cities

ZHOU Jun, ZHOU Jingnan, LUO Qin, LI Wei

Abstract From the perspective of railway hub cities, train operation mode for passenger dedicated lines comprehensively considering ‘suburban departure, central stop’ is put forward. Mixed integer linear programming model targeting optimization of passenger travel convenience is constructed and is converted to classical linear planning model to be solved with algorithm solver. Shenzhen is taken as example to study optimization of train operation plan. Research results show that the train operation plan comprehensively considering ‘suburban departure, central stop’ mode exerts higher capacity utilization rate of network stations and significantly improves the passenger travel convenience.

Key words railway transportation; railway hub; suburban departure; operation plan; mixed integer linear programming model

First-author's address Shenzhen Planning and Land Development Research Center, 518040, Shenzhen, China

在《中长期铁路网规划(2016)》公布的 19 个全国铁路综合枢纽城市中, 有不少铁路枢纽城市已经

建成多个客运车站, 部分城市郊区车站经改扩建后已具备办理始发终到作业的能力, 能够为市中心枢纽站分担压力。基于此, 枢纽城市内的客运铁路列车运营组织模式可以呈现多样化, 例如“中心发车, 外围停靠”, “外围发车, 中心停靠”等。

国内外学者在城际铁路运营组织和运营方案的优化等方面进行了众多研究。在运营组织方面, 高速铁路跨线列车始发范围^[1]、停站方案优化^[2]、高速铁路运营方案^[3]等研究, 主要是通过研究实际的客流时空变化特征, 进行铁路的运输组织优化^[4-5]。在运营方案方面, 列车的编组及开行频率^[6]、列车开行方案^[7]、运营时刻表编制^[8]等优化的目标大都是铁路运营收益最大化及旅客支出最小化等^[9,10]。

对于大型城市而言, “外围发车, 中心停靠”的列车开行模式能够解决众多城市发展过程中遗留的问题, 如解决车站、线路能力紧张, 中心区车站附近缺乏足够的动车所等配套设施用地空间, 满足市郊客流需求逐步增加、客流出行需求更加多样化等。铁路枢纽城市的城际铁路采用“外围发车, 中心停靠”模式, 不仅能缓解铁路运力资源, 还能提升城际铁路的旅客运输服务。本文结合城市铁路枢纽网络和旅客出行需求, 研究综合考虑“外围发车, 中心停靠”运营模式下的列车开行计划优化。

1 城市内客运铁路运营模式

考虑到铁路枢纽城市郊区车站具备办理始发终到作业, 枢纽城市内部的客运铁路列车运营组织模式根据发车方向和停站方案等可以大致分为: ①中心发车, 外围停靠; ②中心发车, 外围不停靠; ③外围发车, 中心停靠; ④外围发车, 中心不停靠。上述 4 种模式的优缺点对比分析见表 1。“中心发车,

^{*} 国家社会科学基金项目(20BGL301)

“外围停靠”的模式是国内外较为常见的运营模式，例如国内的北京、上海，国外的东京、巴黎等；而“外围发车，中心停靠”的模式中比较典型的城市有柏林。

表 1 枢纽城市城际铁路不同运营模式的对比分析		
运营模式	优点	缺点
中心发车， 外围停靠	带动中心区域经济发展； 有助于城市的对外辐射	枢纽用地较大； 中心枢纽能力紧张； 扩建难度大
中心发车， 外围不停靠	缩短城际出行时间	造成外围枢纽能力浪费； 不能有效满足客流需求
外围发车， 中心停靠	满足铁路客流需求； 减少城市交通压力； 提升客运服务水平； 单个通道多点服务	对线路能力要求较高
外围发车， 中心不停靠	方便城市间的联系； 促进外围地区的发展	不利于城市内部联系； 造成枢纽、线路能力浪费

对于部分大型城市而言，随着城市的发展，铁路运输的发展受到一定的限制：一方面，部分市中心区铁路客运站能力利用率接近饱和，线路能力紧张，一定程度上限制了铁路运输的发展；另一方面，中心区车站附近没有足够的动车所等配套设施用地空间，难以满足远期客流的运输需求，但位于城市郊区的客运站能力和线路能力仍有很大的利用空间，造成一定程度上的运能浪费；再者，随着城市的发展，居民居住区的外移，市郊客流需求逐步增加，致使客流出行需求更加多样化，但是传统的运营组织主要采用由市中心向周边区域辐射的模式，不利于旅客的出行。

考虑到城市郊区车站具备整备、列检功能，能够办理始发终到作业，而中心车站也能够办理停站通过作业和部分始发终到作业，“外围发车，中心停靠”模式能够有效提高各条线路的资源共享性，提高运行效率，减少旅客在途时间，提升旅客的服务效率。从服务旅客的角度分析，客运铁路的“外围发车，中心停靠”运营模式可以实现城市各副中心与中心区的连通，满足区域之间、中心之间快速通达，加强城市中心区与郊区的铁路联系，实现供需关系平衡，为郊区旅客提供便捷舒适的客运服务，满足人民群众日益增长的出行需求。从运营组织

和资源共享的角度分析，该模式可以同时实现不同线路、车站间动车检修基地和动车运用所等资源共享，并可减少中心区枢纽动车所等配套设施用地，为远期规划线路接入预留弹性。

以深圳为例：深圳北站及深圳站等车站位于中心区，受限于周边用地情况，难以改扩建以增大车站运输能力；机场东站及坪山站等车站位于郊区，具备改扩建条件。目前，机场东站与坪山站均规划新增 4 台 8 线，改扩建完成后，这两站规模将达 8 台 16 线，并配建动车所等。此外，深圳中心城区房价高企、用地紧张，城市居住区范围不断外移，致使城市外围的城际铁路客运需求增加。

2 枢纽城市的列车开行计划模型

2.1 目标函数构建

本文针对铁路枢纽城市客运铁路的车站能力限制、区间能力限制、运输能力限制等条件，以列车始发站、停靠站及开行对数等为主要参数，构建综合考虑“外围发车，中心停靠”的列车开行计划优化模型。

以列车开行计划为模型自变量，令 i, s 表示车站， j 表示线路， $x_{sj}^{(i)}$ 表示在线路 j 上从车站 i 始发并于中途停靠车站 s 的列车对数， $x_{ij}^{(i)}$ 表示在线路 j 上从车站 i 始发的列车对数，且需满足中途停站列车对数不超过该线路的始发列车对数， $x_{sj}^{(i)} \leq x_{ij}^{(i)}$ ；则 $(x_{ij}^{(i)} + \sum_s x_{ij}^{(s)})$ 表示线路 j 上所有停靠车站 i 的列车对数，包括本站始发列车及他站始发本站停靠列车。

以旅客出行的便捷性和线路运输能力建立优化目标。客流需求越大的车站开行列车数量越多，则客流运输越便捷，故旅客出行的便捷性用客流量与列车开行对数的乘积来表示。以旅客出行的便捷性为优化目标，则开行计划模型的目标函数为：

$$F = \max \sum_i \sum_j (f_{ij} (x_{ij}^{(i)} + \sum_s x_{ij}^{(s)})) \quad (1)$$

式中：

f_{ij} ——城市区域内从车站 i 前往线路 j 的客流量。

2.2 目标函数的约束条件

根据实际情况，构建一系列约束条件。

约束条件一：车站能力限制。始发列车占用的车站通过能力和停站列车占用的车站通过能力之和不能超过车站的设计通过能力，即：

$$\sum_j (x_{ij}^{(i)} + \beta \sum_s x_{ij}^{(s)}) \leq C_i \quad \forall i \quad (2)$$

式中:

β ——以列车始发占用站通行能力为基准的列车停站占用车站能力折减系数,参照 TB 10621—2014《高速铁路设计规范》,列车始发作业占用到发线的时间为 22 min,列车停站作业占用到发线的时间为 13 min,故本文取 $\beta=0.6$;

C_i ——车站 i 的通过能力。

约束条件二:运输能力要求。从车站始发和途经的列车运能之和要满足客流需求:

$$(x_{ij}^{(i)} + \sum_s x_{ij}^{(s)}) P_j \geq f_{ij} \quad \forall i, j \quad (3)$$

式中:

P_j ——线路 j 上运营列车的运输能力,假设相同线路上运营的列车定员相同。

约束条件三:中途停站列车数量限制。车站始发列车对数需大于中途停站的列车对数:

$$x_{sj}^{(i)} \leq x_{ij}^{(i)} \quad \forall s, j \quad (4)$$

约束条件四:线路的实际通行能力。线路开行列车对数受限于线路的实际通行能力:

$$\sum_i x_{ij}^{(i)} = T_j \quad \forall j \quad (5)$$

式中:

T_j ——线路 j 的实际通过能力。

约束条件五:区段能力限制。发往线路的列车对数不得超过该线路区段的设计通过能力。各城际线路均由一系列线路区段构成,对所有线路的所有区段,有:

$$\sum_i \alpha_{ijk} x_{ij}^{(i)} \leq C_{jk} \quad \forall j, k \quad (6)$$

式中:

α_{ijk} ——从车站 i 发向线路 j 的列车是否经过线路区段 k ,若经过则 $\alpha_{ijk} = 1$,否则 $\alpha_{ijk} = 0$;

C_{jk} ——线路 j 上第 k 个区段的列车通过能力。

2.3 算法设计

在约束条件下,目标函数已转化为经典的单目标规划问题。经分析发现,经过车站 i 的两个自变量 $x_{ij}^{(i)}$ 和 $x_{ij}^{(s)}$ 有强相关性,即后者的取值受限于前者。为编程求解计算方便,将这两个自变量整合为一,即 x_{sji} ,如式(7)所示, $s=i$,即为本车站始发列车, $s \neq i$ 表示列车由车站 s 始发、经停车站 i 。

$$\left. \begin{array}{l} x_{ij}^{(i)} \rightarrow x_{iji} \\ x_{ij}^{(s)} \rightarrow x_{sji} (s \neq i) \end{array} \right\} \Rightarrow x_{sji} \quad \forall s \quad (7)$$

则目标函数相应转换为:

$$F = \max \sum_i \sum_j (f_{ij} (x_{iji} + \sum_{s \neq i} x_{sji})) \quad (8)$$

随着目标函数的转换,开行计划模型也转换为混合整数线性规划模型(MILP),可以通过 Cplex、GAMS、Lpsove 等商业求解软件直接求解。为更好地处理分析计算结果,本文利用 Visual Studio + Lp-solve 软件联合求解。

3 案例分析

3.1 项目现状及规划概况

以深圳为例对其城际铁路开行计划进行优化。目前,深圳地区的国家铁路呈“双十字”布局:已运行的有广深铁路、广深港客运专线(以下简为“广深港客专”)及厦深铁路,在建的有赣深客运专线(以下简为“赣深客专”)和深茂铁路,规划新增的有深汕高铁、深南高铁、深永高铁及深河高铁。未来,深圳地区将形成“三主四辅”的铁路枢纽布局,如图 1 所示。

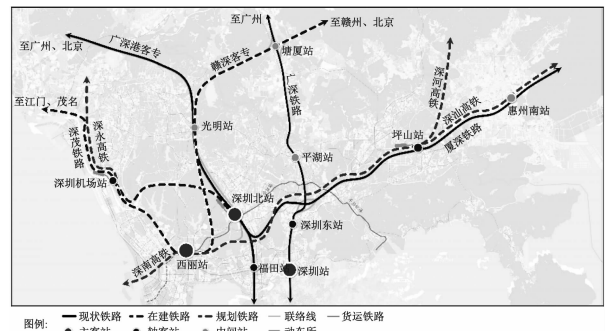


图1 深圳铁路枢纽布局图^[11]

深圳铁路枢纽将实现贯通运营。横向走行的深汕高铁、厦深铁路、深茂铁路、深南高铁及深河高铁均具备列车跨线运行能力,可在机场站、西丽站、深圳北站及坪山站进行跨线运营。纵向走行的广深铁路、广深港客专及赣深客专可通过联络线在西丽站及深圳站等车站进行跨线运营。

本文案例分析计算中采用的远景年深圳各区前往各客运铁路线路的预测客流量如表 2 所示。同时计划客运铁路线路列车开行计划如表 3 所示。从表 3 中可以看出:目前深圳铁路枢纽主要采用的列车运营模式还是从市中心始发,中途选择性停靠市郊车站,部分线路和车站的能力利用不均衡,其中位于市郊的机场东站能力利用率仍不足 20%。

3.2 模型计算与分析

根据式(8)及 5 个约束条件,利用 Visual Studio

+ Lpsolve 软件,对深圳铁路枢纽的开行计划模型联合求解。求解得到的最优开行计划如表 4 所示。

表 2 远景年深圳各区前往各高铁线路的预测客流量										单位:万人次/d
行政区	预测客流量									
	厦深铁路	广深铁路	广深港客专	深南高铁	深永高铁	深汕铁路	深河高铁	深茂铁路	赣深客专	
福田区	0.723	0.530	0.916	0.096	0.772	0.675	0.579	0.241	0.265	
罗湖区	1.021	0.749	1.293	0.136	1.089	0.953	0.817	0.340	0.374	
南山区	1.046	0.767	1.325	0.139	1.116	0.976	0.837	0.349	0.384	
盐田区	0.877	0.643	1.111	0.117	0.935	0.818	0.701	0.292	0.321	
宝安区	0.715	0.524	0.905	0.095	0.762	0.667	0.572	0.238	0.262	
龙岗区	0.863	0.633	1.093	0.115	0.921	0.805	0.690	0.288	0.316	
龙华区	0.551	0.404	0.698	0.073	0.587	0.514	0.441	0.184	0.202	
坪山区	0.986	0.723	1.249	0.132	1.052	0.921	0.789	0.329	0.362	
光明区	0.904	0.663	1.145	0.121	0.964	0.844	0.723	0.301	0.332	
大鹏区	0.723	0.530	0.916	0.096	0.772	0.675	0.579	0.241	0.265	

表 3 计划客运铁路列车开行计划													
始发站	客车到发线/条	列车计划开行数(对/d)										到发线接发车能力/对	能力利用率/%
		厦深铁路	广深铁路	广深港客专	深南高铁	深永高铁	深汕铁路	深河高铁	深茂铁路	赣深客专	合计		
机场东站	16	0	0	0	0	0	0	0	20	0	20	203	10
深圳北站	20	10	0	130	0	100	0	0	50	29	319	380	84
坪山站	16	45	0	0	0	0	100	50	0	0	195	243	80
深圳站	8	0	104	0	0	0	0	0	0	0	104	120	87
福田站	8	0	0	50	0	0	0	0	0	20	70	121	58
西丽站	22	45	18	10	100	0	50	50	55	55	383	402	95

表 4 综合考虑“外围发车,中心停靠”模式的列车开行计划													
始发站	客车到发线/条	列车计划开行数(对/d)										到发线接发车能力/对	能力利用率/%
		厦深铁路	广深铁路	广深港客专	深南高铁	深永高铁	深汕铁路	深河高铁	深茂铁路	赣深客专	合计		
机场东站	16	4(经停深圳北站)	0	0	0	8	26(经停西丽枢纽)	0	0	0	149	203	73.4
深圳北站	20	60(经停坪山站)	0	173(经停福田站)	0	21(经停机场东站)	0	0	97(经停机场东站)	0	362	380	95.3
坪山站	16	27	0	0	0	1(经停西丽枢纽)	27	44	26(经停西丽枢纽)	0	223	243	91.8
深圳站	8	9(经停坪山站)	111	0	0	0	0	0	0	0	120	120	100.0
福田站	8	0	0	17(经停深圳北站)	0	0	0	0	0	0	120	121	99.2
西丽站	22	0	0	0	100	70(经停机场东站)	97(经停坪山站)	0	0	103	400	402	99.5

根据模型的约束条件一,车站能力利用率由式(2)计算,由表4可知,在最优列车开行计划中,位于市中心区的深圳站、深圳北站及西丽站的車站能力利用率均接近饱和。因此,部分列车的发车作业应适当向机场东站和坪山站等市郊车站迁移。

表4中部分线路的列车采用了“外围发车,中心停靠”的列车开行模式。厦深铁路中有4对列车、深汕铁路中有26对列车每天从深圳西部市郊的机场东站始发,经停市中心区域的西丽站。这些列车旨在满足位于西部市郊地区的大量客流需求,从而实现深圳西部地区和中部地区的贯通。在深茂铁路,每天有26对列车从坪山站始发,经停中心区的西丽站,其服务于东部市郊的部分客流需求。此外,还有部分列车采用“中心发车、外围停靠”的列车开行模式。深永高铁每天从深圳北站始发21对列车,并停靠机场东站。

经分析发现,在优化的列车开行计划中,综合考虑“外围发车,中心停靠”的客运列车运行模式能提升旅客出行的便捷程度。其模型的目标函数值优化后为556 307万人次·列,而既有模式下(表3)的目标函数值为445 046万人次·列,相比提升了22.5%。可见,“外围发车,中心停靠”模式确实能方便市域内铁路旅客出行,减少旅客在市内的交通量,能够兼顾网络能力利用和客运服务水平。

4 结语

为缓解网络运能紧张,优化铁路运输组织,本文在铁路枢纽城市具备多发车站的前提下提出了综合考虑“外围发车,中心停靠”的客运列车运营组织模式,并以提高铁路网络的通过能力和方便城市内部旅客出行为优化目标,以车站通过能力和线路通过能力等为约束条件,构建客运铁路列车开行计划的混合整数线性规划模型。以深圳为例进行了列车开行计划的优化研究,结果表明,相比于原

有模式,综合考虑“外围发车、中心停靠”模式的客运列车开行计划对车站利用率和旅客出行便捷程度均有一定提升。该模式有利于缓解中心车站用地紧张、能力扩展不足等缺陷,也有利于加强城市市郊与市中心的联系,满足市郊和中心区的旅客就近乘车的需求,吸引铁路出行的潜在客流,从而缓解交通压力。

参考文献

- [1] 张玉召,张红伟,文娟娟.车底需要数最少的旅客列车始发范围优化模型[J].铁道工程学报,2011(4):111.
- [2] 陆遥.京沪高铁通过能力利用优化研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.
- [3] 杨杰.基于路网的城市轨道交通组织行车策略研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [4] 吕苗苗,倪少权,张强峰.基于区域协同的高速铁路客运组织创新模式研究[J].交通运输工程与信息学报,2019(3):80.
- [5] 邓晓庆,孙永海,徐旭晖,等.城市空间结构目标约束下高铁综合枢纽布局——新一轮铁路枢纽布局规划思考[J].城市规划,2018(增刊1):75.
- [6] 邓连波,王峰,周钊,等.城际直达列车开行计划优化研究[J].铁道科学与工程学报,2013(6):97.
- [7] 李得伟,韩宝明,李晓娟,等.基于节点服务的高速铁路列车车站方案优化模型[J].铁道学报,2013(6):1.
- [8] KASPI M, RAVIV T. Service-orient line planning and timetabling for passenger trains[J]. Transportation Science, 2013(3):295.
- [9] FU H, NIE L, MENG L, et al. A hierarchical line planning approach for a large-scale high speed rail network: the China case[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 75: 61.
- [10] 史峰,李彦霖,胡心磊,等.面向服务水平的高速铁路列车开行计划优化[J].中国铁道科学,2018(5):127.
- [11] 深圳市城市交通规划设计研究中心.深圳市综合交通十三五规划(送审稿)[R].深圳:深圳市城市交通规划设计研究中心,2016.

(收稿日期:2021-01-27)

《城市轨道交通研究》官方网站网址变更公告

根据同济大学对所属单位官方网站管理的统一要求,从2021年7月15日起,《城市轨道交通研究》官方网站网址(原网址:www.umt1998.com)变更为:https://umt1998.tongji.edu.cn。给各位作者、读者带来不便,敬请谅解。

上海铁大城市轨道交通研究杂志社有限公司

2021年7月1日