文章编号：1003-1421(2026)03-0130-11
引用格式：马祥. 基于多层次轨道交通的枢纽机场联通轨道交通规划实证研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(3)：130-140.
MA Xiang. Empirical Research on Planning of Connecting Hub Airports with Rail Transit Based on Multi-Level Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(3)：130-140.

基于多层次轨道交通的枢纽机场联通轨道交通规划实证研究

马 祥

(中铁第四勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430063)

摘 要：推进枢纽机场联通轨道交通是扩大机场辐射范围、提升航空服务水平的重要手段，但是当前面临政策不稳定不精准、既有理论研究指导性不足、轨道交通规划囿于城市轨道交通、部分建成项目效益较差等问题，亟需开展枢纽机场衔接轨道交通的科学规划研究。通过梳理国家层面发布的相关政策，辨识指导意见的共性及差异性，进一步区分城市轨道交通专线、城市轨道交通复合线路、利用高速铁路/城际铁路承担机场客流3类，开展枢纽机场联通轨道交通的实证研究，提出了基于多层次轨道交通的枢纽机场联通轨道交通规划方法：应根据机场功能定位、地理位置、运输需求、多层次轨道交通规划等确定机场联通轨道交通规划及实施方案；慎重规划“城市轨道交通专线”；应优先考虑构建城市轨道交通复合线路或利用既有铁路承担机场客流。以珠三角枢纽机场佛山侧为例进行分析，以期为国内枢纽机场联通轨道交通规划、优化以及政策制定提供参考。

关键词：枢纽机场；轨道交通规划；政策；实证分析；城市轨道交通专线；城市轨道交通复合线路

中图分类号：U212 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250210003

Empirical Research on Planning of Connecting Hub Airports with Rail Transit Based on Multi-Level Rail Transit

MA Xiang

(China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: Promoting connecting hub airports with rail transit is an important means to expand the radiation scope of airports and improve the level of aviation service. However, there are problems such as unstable and inaccurate policies, insufficient guidance of existing theoretical research, the limitation of rail transit planning to urban rail transit, and poor benefits of some completed projects. It is urgent to carry out scientific planning research on connecting hub airports with rail transit. The relevant policies issued at the national level were sorted out. The commonalities and differences of the guiding opinions were identified. The three types of lines including special urban rail transit line, composite urban rail transit line, and the utilization of high speed railway/intercity railway to undertake airport passenger flows were further distinguished. Empirical research on connecting hub

收稿日期：2025-02-10
基金项目：国家铁路局科研课题(KFJF2024-061)；中铁第四勘察设计院集团有限公司开发计划课题(2022K064，KY2023044S，KY2023048S)

airports with rail transit was carried out. A planning method for connecting hub airports with rail transit based on multi-level rail transit was proposed. The planning and implementation plan of connecting hub airports with rail transit should be determined according to the airport function positioning, geographical location, transportation demand, multi-level rail transit planning, etc. It should be undesirable to blindly pursue "special urban rail transit line", and priority should be given to build composite urban rail transit lines or use existing railways, thereby undertaking the airport passenger flow. By taking Foshan side of Pearl River Delta Hub Airport as an example for analysis, it is expected to provide references for the planning and optimization of connecting hub airports with rail transit, as well as the formulation of policies.

Keywords: Hub Airport; Rail Transit Planning; Policy; Empirical Analysis; Special Urban Rail Transit Line; Composite Urban Rail Transit Line

0　引言

推进枢纽机场联通轨道交通，对于扩大机场辐射范围、加快构建内外联通的综合交通运输体系、提升我国航空枢纽国际竞争力、不断满足广大人民群众安全、便捷、舒适的航空出行需要等具有重要意义[1-2]。2010年以来，伴随着枢纽机场、轨道交通的高速度发展，我国着力推进了枢纽机场衔接轨道交通的规划建设工作，总体实现有序发展，但同时也面临着政策不稳定不精准、既有理论研究指导性不足、轨道交通规划囿于城市轨道交通、部分建成项目效益较差等问题。为此，有力有序处理好枢纽机场与轨道交通的关系，是当前枢纽机场及配套轨道交通规划面临的关键问题。

在枢纽机场联通轨道交通方面，国家层面发布了10余项相关政策，开展了系列研究工作。相关政策可以分为城市轨道交通、民用航空、综合交通3类，总体来看可以支持枢纽机场衔接轨道交通，但政策条文不够精准。相关研究大致可以分为轨道交通引入机场方案[3-5]、轨道交通运输组织[6-8]、枢纽衔接轨道交通规划3类，重点对轨道交通规划进行分析：钱堃等[9]分析了城市轨道交通在机场集疏运体系中的竞争力；吴炳毅[10]、卢恺等[11]着重分析了国内外相关经验；孙艺恬等[12]、张晋等[13]聚焦于城市轨道交通，从理论层面对城市轨道交通专线、城市轨道交通复合线路进行了对比分析；梁英慧等[14]认识到了枢纽机场轨道交通规划存在问题，提出应加强规划的顶层设计；唐怀海等[15]亦认识到当前枢纽机场衔接轨道交通存在的客流效益不理想、盲目引入轨道交通等问题。综上，既有研究奠定了良好的基础，但是仍然存在两个方面的问题：一是既有研究多聚焦于理论层面、宏观层面，对实际工作的指导性仍有不足；二是既有研究多聚焦于枢纽机场与城市轨道交通的衔接，对多层次轨道交通的研究仍有不足。

为此，开展基于实证的枢纽机场联通轨道交通规划研究工作，系统梳理国家层面的相关政策，辨识其共性及差异性；分类对国内枢纽机场衔接轨道交通线路及客流情况开展实证分析，分析成功、失败的原因并总结经验教训。以珠三角枢纽机场佛山侧为例，统筹考虑区域内多层次轨道交通规划，兼顾人民群众便捷出行效率和项目客流效益，提出机场衔接轨道交通的分期规划方案，以期为国内其他机场轨道交通集疏运的规划、优化及政策制定提供参考。

1　枢纽机场联通轨道交通相关政策

近年来，国家层面高度重视枢纽机场联通轨道交通工作并发布了多项政策，大致可以分为3类：一是从城市轨道交通角度制定的政策，着重于城市轨道交通规划时应如何衔接枢纽机场；二是从民航角度制定的政策，着重于枢纽机场应如何衔接轨道交通；三是从综合交通角度制定的政策，着重于如何加强不同交通方式间的衔接。枢纽机场联通轨道交通相关政策如表1所示。

总体来看，政策文件有2个方面的共识：①枢纽机场联通轨道交通的必要性及重要意义，国家层面支持枢纽机场衔接轨道交通，扩大机场的服务范围，提升综合交通服务水平；②枢纽机场联通轨道交通应当考虑客流效益，如2015年国家发展和改革委员会印发的《关于加强城市轨道交通规划建设管理的通知》发改基础〔2015〕49号、2017年国

表1　枢纽机场联通轨道交通相关政策

Tab.1　Policies related to connecting hub airports with rail transit

序号	类别	发布主体	时间	政策文件	主要要求
1	城市轨道交通	国家发展和改革委员会	2015年	关于加强城市轨道交通规划建设管理的通知	衔接普通机场优先考虑复合功能线路，衔接规划年吞吐量超过5 000万人次的机场，研究设置专用线路的必要性
2		国务院办公厅	2018年	关于进一步加强城市轨道交通规划建设管理的意见	城市轨道交通规划要与枢纽机场等规划相衔接，通过交通枢纽实现方便、高效换乘
3		国家发展和改革委员会	2021年	“十四五”城市轨道交通规划建设实施方案	加强城市轨道交通与枢纽机场等主要交通枢纽的衔接，提升综合运输服务质量
4	民用航空	中国民用航空局、国家发展和改革委员会、交通运输部	2016年	中国民用航空发展第十三个五年规划	大中型枢纽机场应尽可能引入高速铁路、城际铁路或市郊铁路
5		中国民用航空局、国家发展和改革委员会、交通运输部	2021年	“十四五”民用航空发展规划	以枢纽机场为中心节点，按照应联尽联原则，强化与干线铁路、城际铁路、城市轨道交通等衔接联通
6		中国民用航空局	2018年	新时代民航强国建设行动纲要	构建具有中国特色的“航空+高铁”的大容量、高效率、现代化的快速交通运输服务体系
7		中国民用航空局	2020年	民航局关于加强民用运输机场总体规划工作的指导意见	轨道交通分担率达到30%以上
8	综合交通	国家发展和改革委员会	2013年	促进综合交通枢纽发展的指导意见	民用运输机场应尽可能连接城际铁路或市郊铁路、高速铁路，具备条件的城市，应同站连接城市轨道交通或做好预留
9		国务院	2017年	“十三五”现代综合交通运输体系发展规划	基本实现利用城市轨道交通等骨干交通方式连接年吞吐量超过1 000万人次的机场
10		国家发展和改革委员会	2020年	关于促进枢纽机场联通轨道交通的意见	国际枢纽机场应联通干线铁路或城际铁路或市域(郊)铁路或城市轨道交通，区域枢纽机场应尽可能联通干线铁路或城际铁路或市域(郊)铁路或城市轨道交通

务院印发的《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》国发〔2017〕11号均对机场的吞吐量作出了要求。

但是，既有的政策文件存在2个方面的问题。①不稳定性。10余份文件均有各自的表述，没有形成统一的、一致的要求，开展枢纽机场联通轨道交通规划时在执行文件选择方面存在困难。②不精准性。大部分文件的表述比较宏观，少部分表述微观的文件描述不够具体，指导性不强。如2020年中国民用航空局印发的《民航局关于加强民用运输机场总体规划工作的指导意见》提出“轨道交通分担率达到30%以上”，但是针对如何达到30%并没有具体的指导意见；再如2020年国家发展和改革委员会印发的《关于促进枢纽机场联通轨道交通的意见》提出“国际枢纽机场应联通干线铁路或城际铁路或市域(郊)铁路或城市轨道交通”，“或”字的范围过于广泛。

政策的共识推动地方政府在开展枢纽机场规划建设时积极谋划引入轨道交通，更好服务人民群众出行，但是政策的不稳定性、不精准性亦导致各地开展工作时缺乏明确具体的指导，从而结合各自实际情况开展了探索，有些探索是成功的，有些探索是失败的。在此背景下，有必要开展实证分析，总结成功的、失败的原因，更好指导下一步的枢纽机场衔接轨道交通规划、优化及政策制定工作。

2　枢纽机场联通轨道交通实证分析

梳理国内枢纽机场联通的轨道交通线路，总体可以分为3类。

（1）城市轨道交通专线。新建城市轨道交通线路，主要为机场服务，部分线路亦兼顾沿线城市客流，城市轨道交通专线如表2所示。城市轨道交通专线在我国的占比并不高，其中首都机场线、长沙磁浮基本上单纯为枢纽机场服务，成都地铁10号线、昆明地铁6号线、南京地铁S1线、郑州地铁9号线在为机场服务的同时兼顾沿线城市客流。城市轨道交通专线的典型特点是设站偏少、速度目标值在100 km/h及以上、乘坐舒适，但是发车间隔较大、客流效益较差，如首都机场线的日均客流为2.3万人/d，长沙磁浮的日均客流为1.5万人/d。

（2）城市轨道交通复合线路。新建城市轨道交通复合线路，以城市功能为主，兼顾为机场服务，

表2　城市轨道交通专线

Tab.2　Special urban rail transit line

	机场名称	吞吐量/(万人/a)	城市轨道交通	发车间隔/min	线路长度/km	设站数量/个	设计速度/(km/h)	旅行时间/min	旅行速度/(km/h)	车型及编组	日均客流量/(万人/d)
1	北京/首都	5 288	首都机场线	10	30	5	110	53	34	4L	2.3
2	成都/双流	3 014	地铁10号线	8	38	16	100	48	47	6A	10.7
3	昆明/长水	4 203	地铁6号线	15	25	8	100	32	47	6B	4.9
4	南京/禄口	2 734	地铁S1线	7	37	9	100	44	51	6B	8.5
5	郑州/新郑	2 536	地铁9号线	13	41	19	100	58	42	6B	16.3
6	长沙/黄花	2 725	长沙磁浮	10	19	3	140	27	41	中低速磁浮、3节编组	1.5

城市轨道交通复合线路如表3所示。城市轨道交通复合线路的占比较高，包括上海地铁2号线、广州地铁3号线等。复合线路的典型特点是客流效益普遍较好，主要问题是部分线路速度目标值偏低，导致城市中心至机场的时间较长，乘客体验较差，如武汉地铁2号线速度目标值为80 km/h，全程运输时间为2 h，中心城区至机场的时间为1 h左右。适当提高技术标准可以缩短旅行时间，提升乘客体验，如广州地铁3号线速度目标值为120 km/h，全程运输时间为70 min，中心城区至机场的时间为50 min左右。

（3）利用高速铁路、城际铁路承担机场客流。随着我国高速铁路、城际铁路的发展，地方政府推动高速铁路、城际铁路进机场，利用高速铁路、城际铁路承担机场客流如表4所示。以铁路分担率作为衡量标准，利用高速铁路、城际铁路承担机场客流呈现明显的两极分化现象。

较为成功的线路有长春龙嘉机场的长珲城际铁路、兰州中川机场的兰中城际铁路、海口美兰机场的海南环岛铁路、石家庄正定机场的京广高速铁路、郑州新郑机场的郑机城际铁路等，城际铁路的分担率较高，总结其原因如下。一是较远的出行距离，通常城市中心距离机场30 km以上。较远的出行距离，导致公路的时间、费用相对较高，铁路的时间、费用优势更为明显。二是铁路是通道内的唯一的轨道交通选择，不是唯一选择时在服务范围上有明显区分。上述5条线路中，4条均为通道内的唯一线路，郑机城际铁路虽然不是唯一线路，但是

表3　城市轨道交通复合线路

Tab.3　Composite urban rail transit line

	机场名称	吞吐量/(万人/a)	城市轨道交通	发车间隔/min	线路长度/km	设站数量/个	设计速度/(km/h)	旅行时间/min	旅行速度/(km/h)	车型及编组	日均客流量/(万人/d)
1	上海/浦东	5 448	地铁2号线	5.0	64	30	80	97	40	8A	150.0
2	广州/白云	6 317	地铁3号线	2.0	64	30	120	80	48	6B	180.2
3	深圳/宝安	5 273	地铁11号线	5.5	54	19	120	66	49	8A	100.1
4	西安/咸阳	4 137	地铁14号线	5.5	29	18	100	40	44	6B	8.7
5	上海/虹桥	4 249	地铁10号线	2.5	46	37	80	74	37	6A	79.2
6	重庆/江北	4 466	单轨3号线	10.0(机场站发车间隔)	67	45	80	111	36	6/8单轨	77.0
			地铁10号线	5.0	44	26	100	72	37	6As	38.4
7	杭州/萧山	4 117	地铁1号线	3.5	52	33	80	66	47	6B	82.2
8	武汉/天河	2 586	地铁2号线	3.0	61	38	80	108	34	6B	129.1
9	长沙/黄花	2 725	地铁6号线	5.0	48	34	80	83	35	6A	50.9
10	乌鲁木齐/地窝堡	2 509	地铁1号线	10.0	28	21	80	52	32	6A	10.0
11	天津/滨海	1 847	地铁2号线	10.0	27	20	80	51	32	6B	26.0
12	贵阳/龙洞堡	1 947	地铁2号线	7.0	41	32	80	75	33	6B	29.7

注：上海地铁2号线采用多交路分时段运行图，其中浦东机场平峰发车间隔为5 min，中心区段高峰发车间隔为2.5 min，日均客流量较大；重庆江北国际机场同时衔接单轨3号线和地铁10号线，单轨3号线为多交路分时段主支线运行，江北机场平峰发车间隔为10 min，中心区段高峰发车间隔为2.5 min，地铁10号线发车间隔为5 min。

表4　利用高速铁路、城际铁路承担机场客流

Tab.4　Utilization of high speed railways and intercity railways to undertake airport passenger flows

	机场	衔接线路	铁路发送量/(万人/a)	机场吞吐量/(万人/a)	铁路分担率/%	距离/km	公路时间/min	公路费用/元	是否唯一轨道交通	列车时间/min	列车费用/元	列车频率/(对/d)
1	长春/龙嘉	长珲城际铁路(长春—珲春)	208	1 548	26.9	38	47	111	是	14	10	26
2	兰州/中川	兰中城际铁路(兰州西—中川机场)	160	1 564	20.5	67	63	141	是	48	20	16
3	海口/美兰	海南环岛铁路(海口—三亚)	317	2 434	26.0	40	42	83	是	35	10	30
4	石家庄/正定	京广高速铁路(北京西—广州南)	81	986	16.4	35	60	99	是	14	15	14
5	郑州/新郑	郑机城际铁路(郑州东—郑州航空港)	211	2 536	16.6	37	41	87	否	17	12	49
6	成都/双流	成绵乐城际铁路(江油—峨眉山)	99	3 014	6.6	23	27	62	否	15	8	16
7	三亚/凤凰	海南环岛铁路	33	2 178	3.0	14	32	44	是	8	7	14
8	武汉/天河	汉孝城际铁路(汉口—云梦东)	29	2 586	2.2	29	34	75	否	12	7	8
9	北京/大兴	京雄城际铁路(北京西—雄安)	29	3 941	1.5	50	51	132	否	29	21	17
10	揭阳/潮汕	梅汕高速铁路(梅州西—潮汕)	16	718	4.5	21	38	63	是	12	10	5
11	贵阳/龙洞堡	贵广高速铁路(贵阳东—广州南)	57	1 947	5.9	29	39	69	否	11	7	8
12	徐州/观音	徐盐高速铁路(徐州东—盐城)	14	299	9.4	36	45	86	是	15	14	4
13	银川/河东	银西高速铁路(银川—西安北)	36	771	9.3	40	44	95	是	17	11	12

郑机城际铁路主要服务于郑东新区、郑州地铁9号线主要服务于郑州老城区，两者的服务范围区分明显，不形成明显的竞争关系。三是较高的服务频率，通常能达到高峰小时2列车以上。较高的服务频率降低了乘客的出行时间，提高了铁路的竞争力。

相对较差的线路有成都双流机场的成绵乐城际铁路、三亚凤凰机场的海南环岛铁路、武汉天河机场的汉孝城际铁路、北京大兴机场的京雄城际铁路、贵阳龙洞堡机场的贵广高速铁路等，城际铁路的分担率普遍较低，总结其原因如下。①出行距离较短，通常城市中心距离机场30 km以下。较近的出行距离，导致铁路与公路在出行时间、费用方面没有太大的差距，铁路优势不明显。②铁路在同通道中不是唯一的轨道交通选择。铁路与城市轨道交通相比在服务频率、进出站流程等方面短板突出，若同通道中有其他轨道交通，则明显降低其竞争力。③服务频率较低，乘客等待的时间较长。

3　枢纽机场联通轨道交通规划思路与原则

3.1　规划思路

基于国家相关政策及实证分析，提出基于多层次轨道交通的枢纽机场联通轨道交通的规划方法，主要思路如下。

（1）明确枢纽机场概况。明确枢纽机场的地理位置、与城市中心区的距离、功能定位、预测年度吞吐量等基本信息。应注意机场吞吐量为双向客流量；开展客流分析时应同时考虑机场旅客、接送人员、机场工作人员等。

（2）论证枢纽机场联通轨道交通必要性。结合政策要求，从地理位置、功能定位、预测运量等方面论证枢纽机场联通轨道交通的必要性。原则上，枢纽机场应当衔接轨道交通，但应充分认识到枢纽机场客流量级水平与城市轨道交通客流量级水平有较大的差距。

（3）提出枢纽机场联通轨道交通规划方案。突破城市轨道交通的限制，从多层次轨道交通的角度出发，梳理区域内各类轨道交通规划，提出城市轨道交通专线、城市轨道交通复合线路、利用高速铁路/城际铁路承担机场客流等多种规划方案。针对多种规划方案，统筹考虑乘客出行便捷度(出行距离、出行时间、出行费用等)、项目工程投资及客流效益等因素，提出总体规划方案及分期实施意见。

3.2　规划原则

结合实证分析，提出枢纽机场联通轨道交通规划的6项原则。

（1）根据枢纽机场的地理位置、功能定位、运输需求、多层次轨道交通规划等确定枢纽机场联通轨道交通规划及实施方案。

（2）非常慎重选择城市轨道交通专线，2024年全球机场最高吞吐量为亚特兰大机场的1.08亿人/a，

我国机场最高吞吐量为上海浦东机场的7 679万人/a，约为双向21万人/d，其量级水平与城市轨道交通量级水平有较大差距。国内已经开通的首都机场线、长沙磁浮等城市轨道交通专线客流效益均相对较差。若选择城市轨道交通专线，应通过多点多线换乘以强化路网衔接、合理确定制式、采用高架或地面敷设方式、减少列车编组，实现提升客流效益、降低工程造价。

（3）不具备利用高速铁路/城际铁路的情况下，在城市轨道交通专线与城市轨道交通复合线路间，优选城市轨道交通复合线路。城市轨道交通复合线路兼顾城市客流、机场客流，总体效益更好。针对城市轨道交通复合线路设站过多、旅行时间较长的问题，应适当提高速度目标值以缩短旅行时间，提升乘客体验，力争实现中心城区至机场1 h通达。

（4）城市中心距离枢纽机场30 km以上时，优选利用高速铁路/城际铁路承担机场客流，其在时间、费用等方面相对公路有明显优势，且服务频率不宜低于2对/h，以避免服务频率较低削弱竞争力，长珲城际铁路引入长春龙嘉机场、海南环岛铁路引入海口美兰机场等验证了其可行性。同通道不应规划城市轨道交通线路，若必须规划时应在服务空间范围上有明显区分，如郑机城际铁路与郑州地铁9号线。

（5）城市中心距离枢纽机场30 km以下时，审慎选择利用高速铁路/城际铁路承担机场客流。30 km以内时，利用高速铁路、城际铁路需叠加两端的接驳时间，与公路相比在时间、费用方面没有明显的优势，铁路分担率较低，海南环岛铁路引入三亚凤凰机场、梅汕高速铁路引入揭阳潮汕机场等验证了其正确性。

（6）利用高速铁路/城际铁路承担机场客流时，远期可结合高速铁路/城际铁路能力利用、枢纽机场空港经济区开发等，预留城市轨道交通复合线路的弹性并慎重实施。

4　珠三角枢纽机场案例分析

4.1　珠三角枢纽机场概况

珠三角枢纽机场位于粤港澳大湾区西翼、佛山市高明区与肇庆市高要区交界处，距离佛山、肇庆中心城区分别约70 km、30 km，珠三角枢纽机场地理位置示意图如图1所示。珠三角枢纽机场主要服

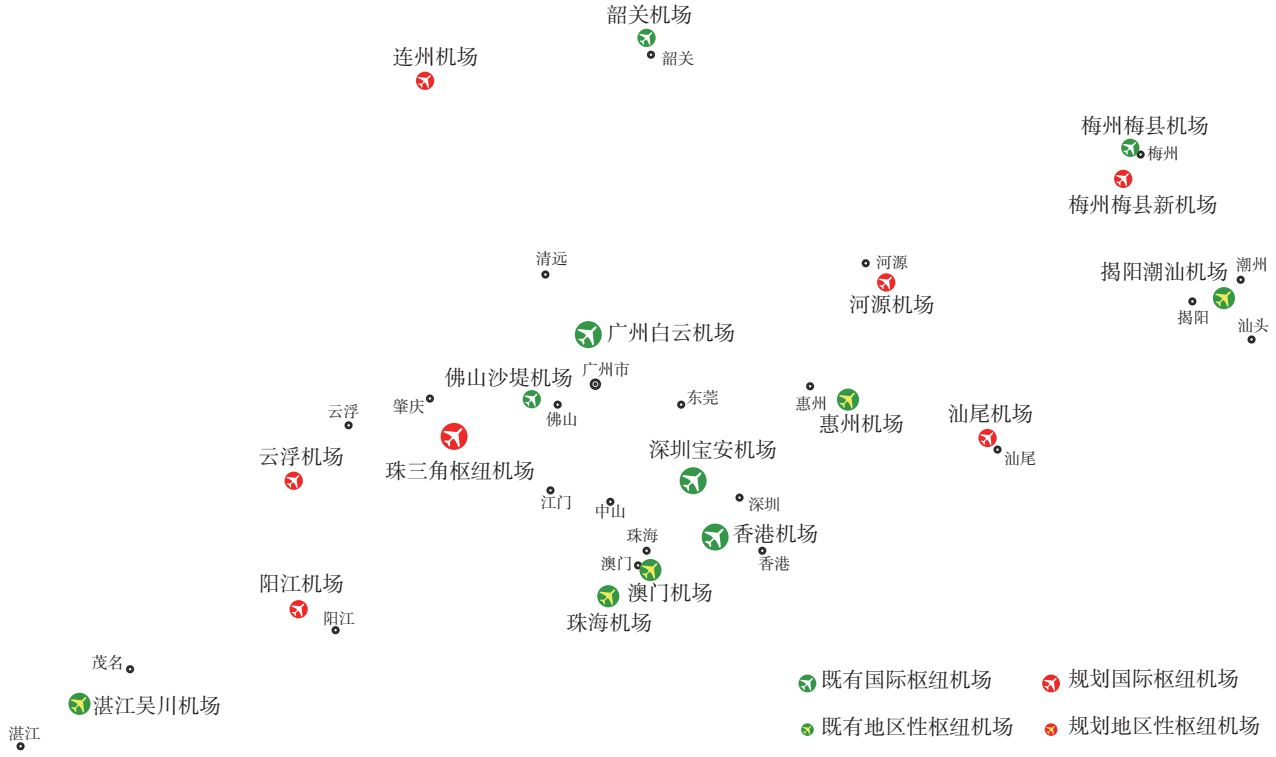

图1　珠三角枢纽机场地理位置示意图

Fig.1　Geographical location of Pearl River Delta hub airport

务佛山、肇庆、广州、云浮、江门等珠江西岸城市的航空出行，规划定位为区域性枢纽机场、广州国际航空枢纽的重要组成部分、珠江西岸的综合交通枢纽，规划近、远期旅客吞吐量分别为3 000万人/a、6 000万人/a。

4.2　引入轨道交通必要性分析

（1）从地理位置来看，珠三角枢纽机场距离佛山中心城区约70 km，距离最近的佛山市高明区约40 km，已经超过了国内大部分的机场，如首都机场(32 km)、武汉天河机场(20 km)、长春龙嘉机场(37 km)、郑州新郑机场(37 km)、长沙黄花机场(33 km)、深圳宝安机场(31 km)。若采用公路接驳方式，佛山市中心城区接驳时间约1 h、费用约300元；佛山市高明区接驳时间约0.5 h，费用约160元。为此，提高乘客出行便捷性，降低乘客出行成本，珠三角枢纽机场应当引入轨道交通。

（2）从功能定位来看，珠三角枢纽机场定位为区域性枢纽机场。根据国家发展和改革委员会《关于促进枢纽机场联通轨道交通的意见》(发改基础〔2020〕576号)，“区域枢纽机场应尽可能联通干线铁路或城际铁路或市域(郊)铁路或城市轨道交通，有效辐射周边300~500 km范围内的地区”“正确处理经济效益与接入时机的关系，有序开展项目前期工作，统筹确定机场轨道交通系统的开工时间”。为此，落实政策要求，珠三角枢纽机场应当引入多层次轨道交通，合理确定轨道交通建设时机。

（3）从运量预测来看，珠三角枢纽机场近、远期吞吐量为3 000万人/a、6 000万人/a。叠加接送人员、机场工作人员后，近、远期单向客运量为2 085万人/a、3 936万人/a，即5.7万人/d、10.8万人/d。其中，佛山市客运量近、远期占比分别为40.52%，38.56%，分别为2.3万人/d、4.2万人/d。为满足乘客出行需求，珠三角枢纽机场应当引入轨道交通。

综上，统筹考虑降低乘客出行成本、落实政策要求、满足乘客出行需求等，珠三角枢纽机场应当引入轨道交通，但是需处理好规划方案、建设时机问题。

4.3　珠三角枢纽机场佛山侧规划方案

4.3.1　规划城市轨道交通专线的适应性

根据上述珠三角枢纽机场、轨道交通及佛山市近远期客运量预测，按照佛山市各区的人口计算，原规划城市轨道交通专线串联了禅城区、南海区、高明区，近、远期机场客运量为486万人/a、873万人/a；按照50%的轨道交通分担率，近、远期轨道交通线路运量为243万人/a、437万人/a，佛山市各区人口及客运量如表5所示。远期客运量为1.2万人/d，70 km线路的客运负荷为0.02万人/km，客流效益较差。综上，规划城市轨道交通专线存在一定的不适应性。

4.3.2　利用高速铁路、城际铁路方案

区域内在建铁路有广湛高速铁路(广州—湛江北)、珠肇高速铁路(珠海鹤洲—肇庆东)高明至珠三角枢纽机场段，规划线路有肇顺南城际铁路(肇庆—顺德—南沙)，区域铁路网规划如图2所示。从能力利用角度来看，根据相关设计文件，广湛高速铁路、肇顺南城际铁路、珠肇高速铁路高明至珠三角枢纽机场段近、远期均有富余能力，区域内主要线路能力利用及富余情况如表6所示。从时间及费用来看，禅城区、南海区客流利用广湛高速铁路，铁路距离为61 km，时间约13 min，费用约32元，相

表5　佛山市各区人口及客运量

Tab.5　Population and passenger volume of districts of Foshan City

	人口/万人	机场运量(单向)/(万人/a)		轨道承担运量(单向)/(万人/a)	
		近期	远期	近期	远期
禅城区	133	118	212	59	106
南海区	367	326	586	163	293
顺德区	323	287	516	144	258
三水区	81	72	129	36	65
高明区	47	42	75	21	38
合计	951	845	1 518	423	759
禅城区、南海区、高明区合计	547	486	873	243	437

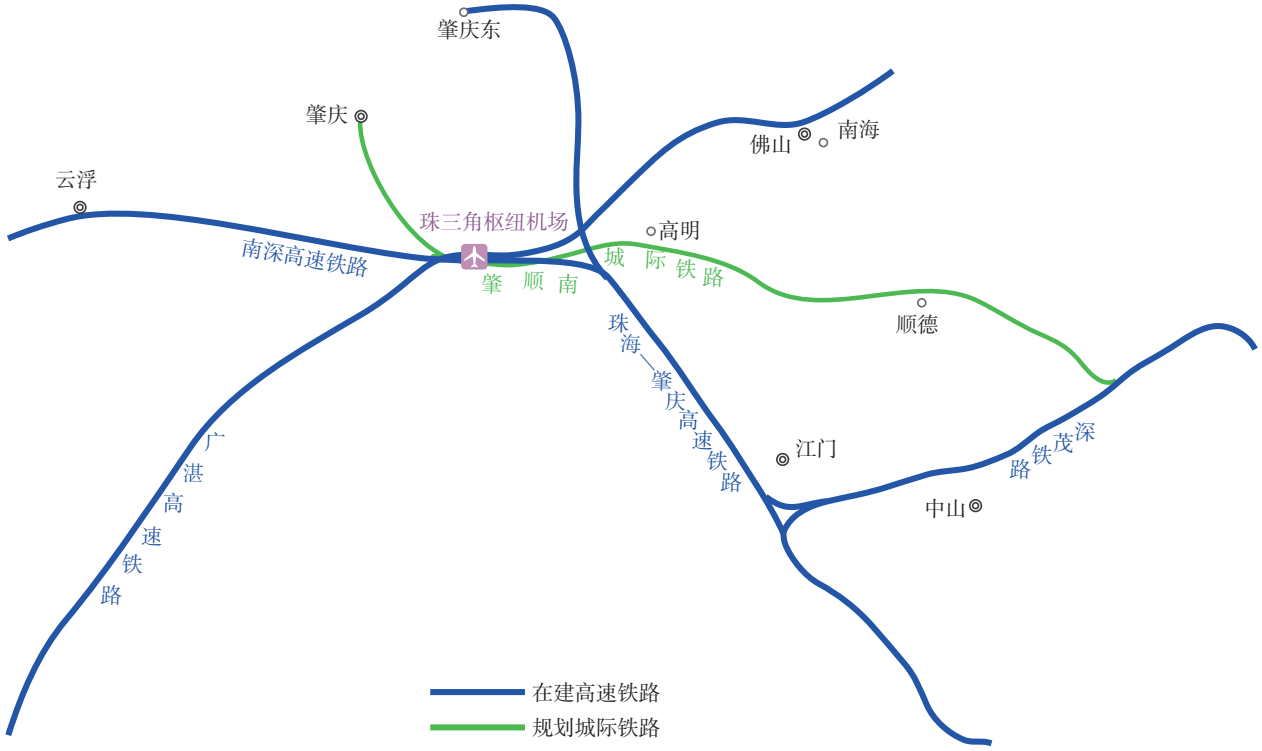

图2　区域铁路网规划

Fig.2　Regional railway network planning

表6　区域内主要线路能力利用及富余情况

Tab.6　Capacity utilization and surplus of main lines in region

线路名称	区段	近期			远期		
		客流密度/(万人/a)	客车对数/(对/d)	富余能力/(对/d)	客流密度/(万人/a)	客车对数/(对/d)	富余能力/(对/d)
广湛高速铁路	广州—阳江	2 040	86	74	2 597	120	40
肇顺南城际铁路	高明—南沙	1 072	52	108	1 470	82	78
珠肇高速铁路	高明—机场	1 572	76	84	2 020	93	67

比公路(70 km，1 h，300元)有很大优势；顺德区客流利用肇顺南城际铁路等，铁路距离为90 km，时间约25 min，费用约47元，相比公路(107 km，80 min，400元)有很大优势；高明区客流利用珠肇高速铁路高明至珠三角枢纽机场段，铁路距离为29 km，时间约7 min，费用约15元，相比公路(40 km，50 min，160元)有优势，不同交通方式出行时间及费用比较如表7所示。综上，统筹考虑区域铁路能力利用情况、不同交通方式时间及费用对比，可以利用高速铁路、城际铁路承担机场客流。

表7　不同交通方式出行时间及费用比较

Tab.7　Comparison of travel time and costs of different transportation modes

	交通方式	里程/km	时间/min	费用/元
禅城区、南海区	铁路	61	13	32
	公路	70	60	300
顺德区	铁路	90	25	47
	公路	107	80	400
高明区	铁路	29	7	15
	公路	40	50	160

4.3.3　新建城市轨道交通复合线路方案

考虑到广湛高速铁路远期的能力利用情况、临空经济区的开发等，提出了新建城市轨道交通复合线路方案作为弹性预留、审慎实施。结合佛山市城市轨道交通现状及规划情况，可考虑佛山地铁2号线向西延伸。目前，佛山地铁2号线一期(广州南—南庄)已经建成，线路长度31.7 km，速度目标值为100 km/h，采用地铁B型车，运行时间约45 min；佛山地铁2号线二期(南庄—西安)正处于设计阶段，线路长度23.5 km，设站11座，速度目标值为100 km/h，采用地铁B型车，佛山地铁二期建设规划如图3所

示。在此基础上，规划地铁2号线西延(西安—珠三角枢纽机场)，线路长度约35 km。

为缩短运行时间，一是建议2号线二期 车站增加越行线，每越行1个车站可以节省时间1 min左右；二是建议2号线西延 采用120 km/h的技术标准，相对100 km/h节省时间5 min。采取上述措施后，全线运行时间为91 min，佛山中心城区至珠三角枢纽机场时间为68 min，基本实现佛山中心城区至机场1 h通达，佛山地铁2号线运营时间计算如表8所示。

在车辆选型、列车编组及运输组织方面，远期客运量为1.2万人/d，高峰小时系数按照15%计算，高峰小时客运量约1 800人/h。结合客运需求、机场乘客对于舒适性的要求，建议采用横纵结合的舒适性车辆(横排60人/辆、纵排46人/辆)；4编组列车载客能力约为200人/列，高峰开行9对/h，发车

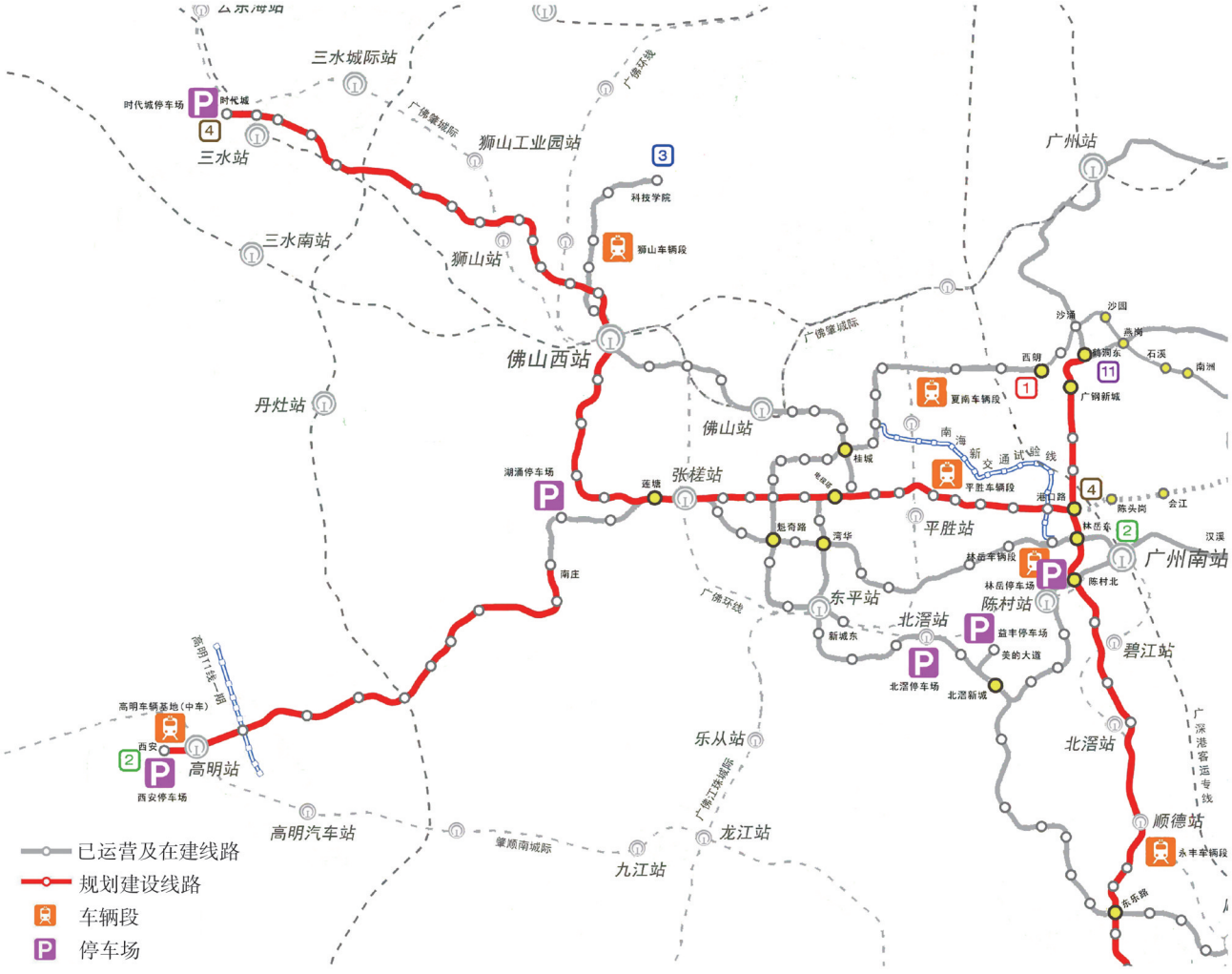

图3　佛山地铁二期建设规划

Fig.3　Phase II construction planning of Foshan metro

表8　佛山地铁2号线运营时间计算

Tab.8　Operation time calculation of Foshan metro line 2

	里程/km	原规划		本次优化	
		速度目标值/(km/h)	时间/min	速度目标值/(km/h)	时间/min
广州南—南庄	32	100	45	100	45
南庄—西安	24	100	28	100(增加越行)	23
西安—机场	35	100	28	120	23
合计	90	—	101	—	91

间隔为7 min。此外，为降低建设成本，建议采用地面或高架敷设方式为主。

4.3.4　推荐方案

综上，针对珠三角枢纽机场佛山侧轨道交通规划方案如下。近期，优先利用广湛高速铁路、肇顺南城际铁路、珠肇高速铁路高明至珠三角枢纽机场段承担机场客流，但需要处理3个方面的问题。一是加强与中国铁路广州局集团有限公司的对接，通过购买服务的方式增开列车；二是尽快推进肇顺南城际铁路开工建设；三是完善佛山站、高明站、顺德学院站等主要车站集疏运体系，并探索“空铁通”“空铁畅行”等服务产品。远期，预留佛山地铁2号线西延的弹性和条件。西延段采用120 km/h技术标准以缩短运行时间，舒适性车辆以提高服务水平，4节编组以避免能力虚糜同时又保持一定的服务频率，地面或高架敷设方式以降低建设成本。同时，对2号线二期部分车站增加越行线以开行大站快车。

5　结束语

针对枢纽机场联通轨道交通规划问题，实证研究提出了基于多层次轨道交通的枢纽机场联通轨道交通规划方法，总结了轨道交通规划的6项原则，核心在于非常慎重选择城市轨道交通专线、城市中心距离机场30 km以上时优先利用高速铁路及城际铁路、不具备条件时优选城市轨道交通复合线路。研究对于科学确定枢纽机场轨道交通规划方案，解决枢纽机场盲目引入轨道交通、部分线路客流效益较差等问题具有重要作用。下一步，将着力推动研究成果应用到国内枢纽机场联通轨道交通的规划、优化及政策制定中。

参考文献：

[1] 耿兴荣，汪　烨，郭怡杏. 我国枢纽机场引入轨道交通的协调性研究[J]. 综合运输，2021，43(10)：39-42.
GENG Xingrong，WANG Ye，GUO Yixing. On the Coordination of Introducing Rail Transit into Domestic Hub Airports[J]. China Transportation Review，2021，43(10)：39-42.

[2] 李国栋，李如苑. 高速铁路对粤港澳大湾区机场群航线网络分层次影响研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(5)：132-140.
LI Guodong，LI Ruyuan. Hierarchical Influence of High Speed Railway on Airport Route Network in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(5)：132-140.

[3] 欧阳杰，梁　旭. 机场地区高铁站与机场轨道站双枢纽布局模式研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(1)：42-50.
OUYANG Jie，LIANG Xu. Research on Dual-Hub Layout Mode of High Speed Railway Station and Airport Rail Station in Airport Area[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(1)：42-50.

[4] 黄　鹏. 高速铁路引入既有航空枢纽相关问题分析[J]. 铁道运输与经济，2023，45(3)：77-83.
HUANG Peng. Analysis on Problems Related to Introducing High Speed Railway into Existing Aviation Hub[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(3)：77-83.

[5] 陈　俊. 长赣铁路引入黄花机场方案研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(10)：119-126.
CHEN Jun. Introduction of Huanghua Airport into Changsha-Ganzhou High Speed Railway[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(10)：119-126.

[6] 刘晓庆，孙继营，杨晓飞，等. 北京大兴国际机场轨道交通专线延时运营方案设计研究[J]. 铁道运输与经济，2022，44(1)：127-133.
LIU Xiaoqing，SUN Jiying，YANG Xiaofei，et al. Design of Operation Extension Plan for Beijing Daxing International Airport Express at Night[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(1)：127-133.

[7] 孙继营，杨晓飞，刘晓庆，等. 北京地铁大兴机场线客流特征分析与行车组织方案研究[J]. 城市轨道交通研究，2023，26(3)：119-124.
SUN Jiying，YANG Xiaofei，LIU Xiaoqing，et al. Analysis of Beijing Daxing Airport Express Passenger Flow Characteristics and Train Organization Scheme Study[J]. Urban Mass Transit，2023，26(3)：119-124.

[8] 王　欢. 上海轨道交通2号线列车编组“4改8”实践[J]. 城市轨道交通研究，2023，26(S1)：143-146.
WANG Huan. Practice of “4 to 8” Train Formation for Shanghai Metro Line 2[J]. Urban Mass Transit，2023，26(S1)：143-146.

[9] 钱　堃，唐继孟，张素燕，等. 城市轨道交通在机场枢纽集疏运体系中的竞争力分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2014，14(3)：168-173.

QIAN Kun, TANG Jimeng, ZHANG Suyan, et al. Competitiveness Analysis of Urban Rail Transit in Airport Access System[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(3): 168-173.

[10] 吴炳毅. 国内机场快速轨道交通规划与建设特征分析[J]. 都市快轨交通, 2011, 24(5): 18-20.
WU Bingyi. Features for the Design and Construction of Rapid Rail Transit to Airports[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(5): 18-20.

[11] 卢　恺, 韩宝明, 鲁　放. 我国轨道交通机场线规划与运营主要问题探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(8): 1-5.
LU Kai, HAN Baoming, LU Fang. Typical Problems in Planning and Operation of Rail Transit Airport Line in China[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(8): 1-5.

[12] 孙艺恬, 王　治, 张　亮, 等. 北京新机场轨道交通与市区线网衔接规划方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(6): 31-36.
SUN Yitian, WANG Zhi, ZHANG Liang, et al. Integration Planning of Beijing New Airport Line and Urban Rail Transit Network[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(6): 31-36.

[13] 张　晋, 李松峰, 王　波. 城市轨道交通机场线规划适应性研究[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(6): 38-43.
ZHANG Jin, LI Songfeng, WANG Bo. Planning Adaptability of China's Airport Rail Transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(6): 38-43.

[14] 梁英慧, 郑　攀, 葛春景. 枢纽机场联通轨道交通的对策和建议[J]. 综合运输, 2022, 44(1): 36-39, 92.
LIANG Yinghui, ZHENG Pan, GE Chunjing. Countermeasures and Suggestions for Connecting Rail Transit and Hub Airports[J]. China Transportation Review, 2022, 44(1): 36-39, 92.

[15] 唐怀海, 潘昭宇. 枢纽机场与多层次轨道交通体系的衔接布局[J]. 城市交通, 2020, 18(4): 79-86.
TANG Huaihai, PAN Zhaoyu. Connecting Layout between Hub Airport and Multilevel Rail Transit System[J]. Urban Transport of China, 2020, 18(4): 79-86.

(责任编辑　刘宁馨)

(上接第129页)

Society, 2015, 37(4): 1-7.

[13] 徐长安, 倪少权, 陈钉均. 基于两阶段算法的运行图与天窗协同优化[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4): 882-888.
XU Chang'an, NI Shaoquan, CHEN Dingjun. Collaborative Optimization for Timetable and Maintenance Window Based on Two-Stage Algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4): 882-888.

[14] 徐长安, 李晟东, 陈钉均, 等. 列车运行图天窗分段与衔接优化技术研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 68-72, 102.
XU Chang'an, LI Shengdong, CHEN Dingjun, et al. Segmentation and Connection Optimization Technique for Maintenance Window in the Train Timetable[J]. Computer Simulation, 2021, 38(3): 68-72, 102.

[15] 王宇强, 魏玉光, 林　枫. 成网条件下基于运行图铺画的高速铁路通过能力计算研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(10): 1-8.
WANG Yuqiang, WEI Yuguang, LIN Feng. Research on Capacity Calculation Based on Train Timetable Generating in High Speed Railway Network[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(10): 1-8.

[16] 赵　鹏. 双线电气化铁路综合维修"天窗"开设相关问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[17] 姜良杰, 袁晓军. 陕北地区铁路煤炭运输需求分析及预测[J]. 铁道货运, 2024, 42(10): 39-48.
JIANG Liangjie, YUAN Xiaojun. Analysis and Forecast of Railway Coal Transportation Demand in Northern Shaanxi Region[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(10): 39-48.

[18] 宋浚哲, 刘　畅. 联网、补网、强链背景下货车车流径路优化方案及效益研究[J]. 铁道货运, 2024, 42(10): 23-32.
SONG Junzhe, LIU Chang. Optimization Plan and Economic Benefit of Wagon Routes Against a Background of China Railway Network Capacity Enhancement Plan[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(10): 23-32.

(责任编辑　李丹丹)