

城市轨道交通网络运营资源共享方法与技术进展

毛保华*,高自友

(北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室,北京 100044)

摘要: 网络条件下的城市轨道交通运营资源共享是一项复杂的工作.本文首先提出了城市轨道交通网络运营资源管理研究的三大主要领域,即前期建设与运营一体化方法与技术、网络环境下的负荷均衡方法与技术,以及基于资源共享的运营组织方法与技术.其次,结合案例分析评述了三大领域中既有的成果与伦敦、东京等典型城市的运营实践案例和经验.第三,针对当前亟需深化研究的资源共享方法与技术领域,以车辆基地为案例,从实践角度调研了部分城市车辆基地共用的案例,提出了其对提高网络运营效率的贡献.最后,研究指出了我国城市轨道交通网络化运行环境下资源共享领域值得深化研究的主要方向.

关键词: 城市交通;城市轨道交通;网络化运营;资源共享;换乘管理;车辆基地

Progress of Operational Resources Sharing Methods for Urban Rail Networks

MAO Bao-hua, GAO Zi-you

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The operational resources sharing for urban rail networks is complex work. This paper firstly sorts out the operational resources sharing of urban rail network as three sections such as the integration of construction and operation at earlier stage, the operational balance of train loadings under network environment and the operational methods and applications based on network resources sharing. Secondly, it analyzes the experiences of some forerunner cities such as London and Tokyo by case studies. Thirdly, taking the train depots as an example, it investigates several practical sharing cases and summarizes the contributions of resource sharing on operational efficiency of urban rail networks. Finally, the paper advances some research focuses existed in the operational resource sharing studies for those Chinese cities with urban rail network systems.

Keywords: urban traffic; urban rail transit; network operations; resource sharing; interchange management; train depot

0 引言

我国城市轨道交通的发展受3种利好因素驱动:一是,城市化快速发展下的人口快速集聚导致的出行总量增长;二是,城市机动化背景下地面道路资源不足引发的不断加剧的道路交通拥挤;三是,国家经济持续增长下的城市经济快速发展后的财政能力.过去20年来,内地城市轨道交通从

1997年的4个城市,运营里程88.2 km增长到2017年的34个城市,5 021.7 km.2017年年底开通运营的34个城市中,11个城市的运营里程超过了100 km.

城市轨道交通网络运营管理的标志可以从3个方面来认识:一是物理网络架构,一般有3条线路、3个换乘站、能形成构造多路径的回路结构^[1];

收稿日期:2018-01-08

修回日期:2018-03-09

录用日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71621001,71390332).

作者简介:毛保华(1963-),男,湖南祁阳人,教授.

*通信作者:bhmao@bjtu.edu.cn

二是构成网络的不同线路之间出现可影响运营效率的组织因素,例如,站点间的旅行速度、列车拥挤程度、换乘效率等影响乘客的出行选择;三是网络出现各线路共用的、影响各线路运营方案的资源,例如,车辆基地、调度指挥中心、多线共用的综合换乘枢纽直接影响网络运行组织方案与运输成本。

因此,关于城市轨道交通网络运营管理方法与技术的研究可分为3个领域:第1个领域是与线路物理架构设计相关的前期建设与运营一体化方法与技术,重点体现在换乘站规划、设计与运行组织,包括换乘点的选择、线路换乘站类型的选择、换乘站设计及换乘站流线设计与管理;第2个领域兼顾供需双方的网络负荷均衡技术,主要涉及网络运行效率的改善及出行服务水平提高两个目标,重点要针对网络客流时空不均衡性特征研究运力配置方案,其具体内容如与列车交路和编组相关的列车开行方案设计、可改善乘客可达性的线路间列车过轨技术应用、考虑线路间接续的列车时刻表优化编制、换乘站的运行管理等;第3个领域是网络条件下运营资源共享与管理技术,重点涉及车辆基地、调度指挥中心、安全应急管理资

源的优化配置方法等。

目前,关于前2个领域的研究已有较多成果^[1],而对第3大领域的研究还亟待深化。网络条件下运营资源共享方法与技术是从资源共享角度研究提高网络运行效率的方法,由于城市轨道交通系统的盈利能力普遍低下,这方面的研究对于提高城市轨道交通的可持续发展能力具有尤为重要的现实意义。

1 网络前期建设与运营一体化技术

对城市轨道交通成网运营的最初关注点在于换乘设计方面。由于城市轨道交通投资大、建设周期长,许多线路建设的时间相差甚远,基于城市轨道交通的建设环境条件,陆续出现了“十”字形、“一”字型、“T”形与“L”形换乘设计形式,对换乘设计改善的研究与实践经历了从换乘站形式改善到线路间多点换乘(代表城市为伦敦)、多线路列车并/过轨运营组织(代表城市为东京)的过程。

图1是伦敦国铁(National Rail)进入市区后与地上铁路(London Overground)及地铁(Bakerloo)多线多点换乘的案例。

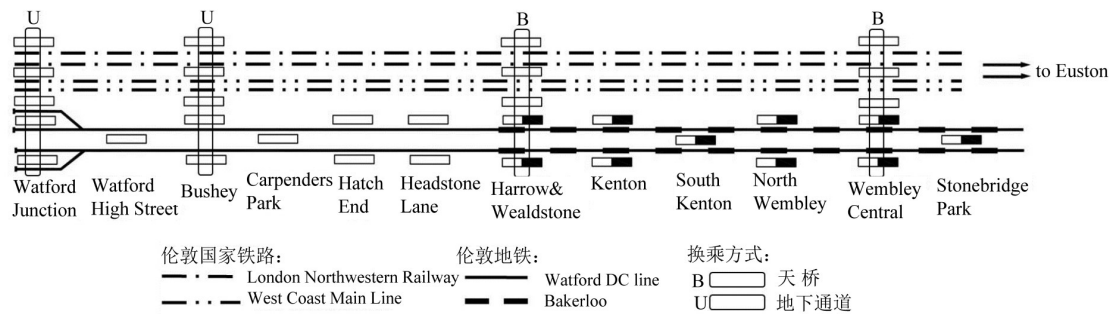


图1 国铁进入伦敦市区后与城市轨道交通的衔接案例

Fig. 1 A case of connection between national rail after entering London with urban rail line

图1中,英国国家铁路实际上由2条并线组成,分别是London Northwestern Railway和West Coast Main Line;前者由West Midlands Trains公司负责运营,主要服务于伦敦西北部的长距离旅客出行,起点为Euston站,终点为Birmingham New Street;后者1837年开通,起点也是Euston站,终点则是苏格兰的格拉斯哥中央站。黑实线为伦敦地上铁路Watford DC line,负责提供从Euston到赫特福德郡的通勤服务,1917年开通。Harrow & Wealdstone是地铁Bakerloo线起始站,1906年开始运营。

Watford Junction站1837年开通,1858年改造并定名,1841年Bushey换乘站开通。1842年Hatch End站开通,Watford High Street站开通于1862年。1913年Headstone Lane站开通运营。Carpenders Park站最早于1914年4月随London Northwestern Railway开通运营,1917年曾关闭,1919年重新开放后交由London Electric Railway公司(后来成为London Underground公司)运营。1917年,Harrow & Wealdstone、Kenton、North Wembley、Wembley Central、Stonebridge Park等站开通运营。1933年,

South Kenton 开通运营.不难看出,国铁与地铁 Bakerloo 线可以在 Harrow & Wealdtone 及 Wembley Central 两站换乘,地上铁路 Watford DC Line 线除上述两站外,与国铁还可以在 Watford Junction 和 Bushey 两站换乘;而 Bakerloo 线与 Watford DC Line 线在 Harrow & Wealdstone 等站完全共线运行.

图2给出了伦敦市区2线共线运营再向市郊分叉延伸运营的1个例子.伦敦 District Railway 线于1879年开通,与后来1932年开通的 Piccadilly 线形成共线、共站运营.1903年, Piccadilly 线西延开通了 North Ealing 等站,1938年, District Railway 线西延开通了 Ealing Broadway 等站.两线在 Ealing Common 与 Action Town 形成了共线并行换乘关系.可以看出; Earling Broadway 站是国铁、District 线与 Central 线的换乘站,3条线经地下通道可以实现便捷换乘.

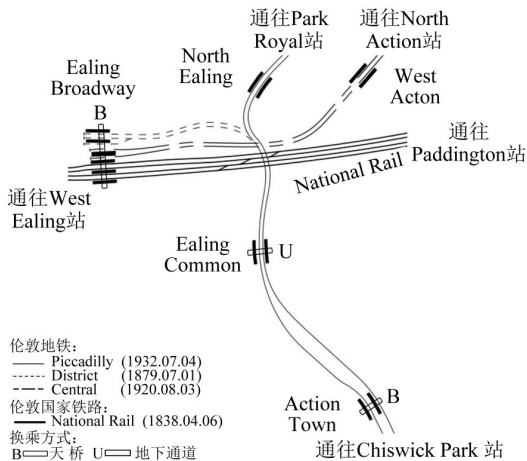


图2 District 线与 Piccadilly 线共线及延伸换乘关系
 Fig. 2 The relationship between District line and Piccadilly line collocation

图3是3线换乘的1个案例.图中3条线在该段的开通时间大致是:1879年开通的 District Railway 线、1872年开通的 Circle 线及1932年开通的 Piccadilly 线.从站点开通时间看, Circle 线的 High St Kensington、Gloucester Road 与 South Kensington 开通于1868年, Earl's Court 开通于1871年.不难看出: Piccadilly 线与 District 线可以在 South Kensington、Gloucester Road 及 Earl's Court 这3站换乘; Piccadilly 线与 Circle 线可以在 South Kensington、Gloucester Road 及 High St Kensington 这3站换乘; District 线与 Circle 线也可以分方向在 South Kensington、Gloucester Road 及 High St Kensington 这3站换乘.

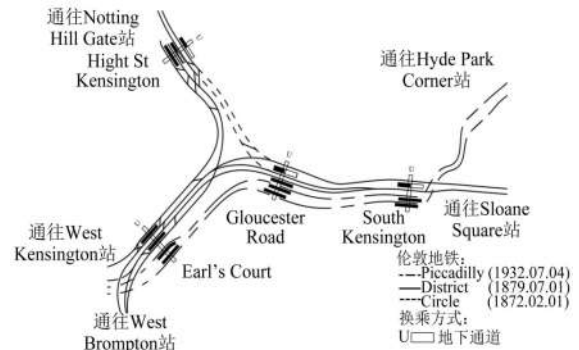


图3 3线换乘案例

Fig. 3 A case of transfer among three lines

东京是另一个成功利用过轨运营技术方便乘客、改善网络运行效率的城市.图4是东京地铁千代田线与国铁常磐线及私铁小田急等线过轨的1个例子.通过组织私铁(近郊有轨电车)、中心城区地铁(山手线以内)及城市间铁路(JR 线路)间的列车过轨,东京较好地实现了多点换乘,成功地减轻了地铁、私铁与国铁3个系统部分换乘站负荷过大的问题.

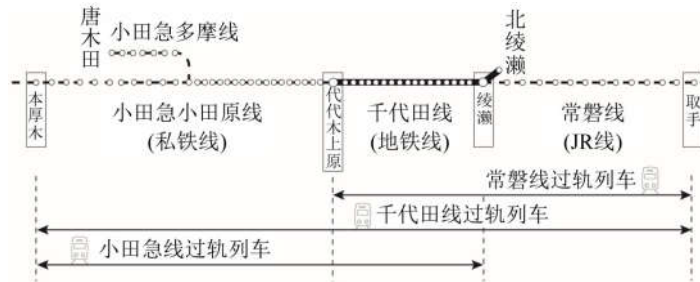


图4 东京多线过轨与换乘组织示意图

Fig. 4 Schematic diagram of Tokyo multi line through service and transfer organization

同台换乘设计案例在20世纪初就已出现,典型例子有伦敦的 Finchley Road 地铁站、纽约的 Quesboro Plaza 站及东京的赤坂见附站等。不过,充分发挥同台换乘优势的典型例子应该是中国香港的实践。香港轨道交通网络中设计了通过2线换乘站4站台实现8个方向同台换乘的案例,如图5所示,太子与旺角两站可实现观塘线与荃湾线8个

换乘方向的同时同台换乘。这一设计尽管增加了线路在区间的施工难度与成本,但大幅度提高了乘客的换乘效率,压缩了乘客换乘走行时间,体现了城市轨道交通“百年工程”的特点;而且节省了两站换乘通道的建设投资,实际上也节省了车站建设空间和运营成本。

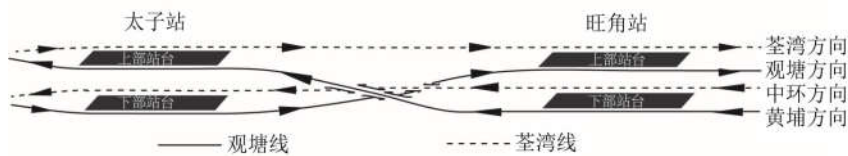


图5 两站同台换乘

Fig. 5 Two stations transfer at the same platform

2 基于客流时空不均衡特性的网络负荷均衡方法与技术

成网运营管理研究的第2大领域是如何在满足运营企业运行效率目标与乘客服务质量要求的前提下,解决城市轨道交通网络客流分布时间与空间不均衡性所导致的网络负荷不均衡问题。统计表明:城市交通系统不同时段客流有很大不同,超低峰、低峰、平峰、次高峰、高峰各时段小时客流量的比可达1:3:5:10:14;其中,高峰小时占全天客流量约14%。在1个城市中,列车在不同时间、不同区间负荷相差甚大。以2014年12月北京地铁1号线为例^[3],该线按全日列车在各断面的负荷即满载率的平均值约为26.4%,9:30-17:00间全线各断面平均负荷低于50%,其中68%断面平均负荷小于30%;早高峰7:30-8:30间65.9%断面平均负荷大于50%,最大满载率达95.9%。从全网络运行情况看,早、晚高峰负荷分别为63.0%、48.7%,早6:00前和晚23:00后列车在各断面负荷小于8%。这些数据可以看出列车在不同时间、不同区间负荷的具体差异。

针对客流时间不均衡性的运力调配方法主要有行车间隔控制方法,即根据不同时间段的客流分布确定相应的列车开行数量。不过,行车间隔控制直接涉及乘客等待时间,进而影响客运服务水平。根据我国《城市轨道交通运营管理规范》^[3],开通运营的城市轨道交通线路应有一定的服务水平要求即最大行车间隔,以体现其公益性及建设效果。

当某些时间段客流量过低时,可能造成列车能力利用率过低;此时可以通过开行小编组列车来缓解这种能力浪费。

平衡客流空间不均衡性的方法主要有多交路技术^[4]。不过,多交路的采用受线路设计与建设阶段折返条件设置的影响,列车在折返站的运行也对线路通过能力有一定影响。多交路可能会导致部分长距离乘客列车间换乘次数的增加,降低长距离乘客的服务水平。为此,在站点上下车客流量不均衡性较大、线路较长的市郊线路上开行快慢车是提高长距离乘客出行效率的一种组织方法。

提高城市轨道交通服务水平的方法,除了出行时间的节省外,减少旅客走行距离和换乘次数也是一个重要方面。为此,许多城市致力于优化换乘组织方案,包括组织列车过轨运行以提高直达乘客比例、改善换乘站列车时刻表衔接与配合以降低乘客换乘等待时间、优化首末班车时刻以提高换乘成功率等。Domschke^[4]最早针对地铁等公共交通系统研究了等间隔发车情形下的时刻表协调优化方法。研究在给定公交发车周期(如4、5、10 min)下,以周期内发车时间为0-1变量,以所有换乘方向换乘等待时间之和最小为优化目标,建立了0-1整数规划模型,并结合贪婪算法、模拟退火算法与分支定界算法等设计了启发式算法求解模型。Goverde^[5]研究优化换乘站列车时刻表以减少乘客等待时间的方法。Wong等^[6]以香港地铁网络

为例,以所有乘客总换乘等待时间最小为目标,以不同线路各列车在各换乘站的到发时间为决策变量,构建了混合整数线性规划模型,提出了不等间隔非平行运行图下的列车时刻表协调优化方法.Kwan等^[7]研究了基于乘客满意度指数的多目标条件下大型公交枢纽列车时刻表的衔接优化问题,分析了运行时间偏差对满意度的影响。

针对城市轨道交通首末班车问题,徐瑞华等^[8]以末班车衔接成功客流量最大为目标确定网络末班车衔接方案,构建了末班车衔接方案的赋权有向图模型,并利用最大生成树原理求解模型.Kang等^[9]研究了末班车衔接关系下换乘冗余时间与换乘等待时间的数学刻画方法;并以末班车发车时间、区间运行时间、停站时间与列车发车间隔为决策变量,以网络夜间主换乘方向的“换乘冗余时间”最小为优化目标,同时对换乘成功性与换乘等待时间进行优化,利用遗传算法求解,提出了网络末班车时刻表协调优化方法.Bookbinder等^[10]研究了公交网络上的换乘点布局优化问题,建立了一个以乘客不便性函数为目标的二次分配模型,并得到了可改善换乘的解.Daduna等^[11]以德国城市为案例研究了时刻表协调的实际经验,认为该问题的实际复杂性主要涉及网络结构及其复杂性、不同线路的行车间隔及需求的多样性等方面。

由于城市轨道交通网络换乘站数量多,换乘站时刻表的协调是一个十分复杂的问题,既要考虑换乘客流量的大小从而确定需要重点兼顾的主客流方向,又要考虑换乘站之间的关系,以确保多数旅客的利益。总的来看,上述技术的应用增加了城市轨道交通运营企业日常工作的复杂性,其应用水平实际上也是城市轨道交通运营是否进入成熟期的重要标志。

3 基于共享的网络资源管理方法与技术

成网运营管理的第3大领域是集规划与运营于一体的资源共享条件下的运营管理技术与方法。传统上,由于建设时序差异,各线基本上单独设立车辆基地与指挥中心。随着线网密度的增加,线间关系日益紧密,车辆基地与指挥中心通过改扩建

进行共享的必要性增加。这种必要性不仅体现在通过资源共享可以提高线网的协调运行的效率,也体现在资源共享可以降低运营成本、减少补贴,对人口密度高、土地资源紧缺的我国城市具有尤为重要的现实意义。我国各城市轨道交通系统建设速度远高于国际平均水平,不少城市轨道交通线路同时设计、同时施工,这为资源共享创造了良好前提条件。

3.1 车辆基地共享案例

在日本东京地下铁中,银座线所属上野车辆基地规模较小,车辆检修与运用受到限制,地上部分能容纳7列车,地下部分能容纳13列车。银座线2018年运营使用6节编组列车,配车40列(240节),由于上野车辆段的能力相当于银座线全线配车的1/2;故只承担银座线列车的列检和月检,如图6所示。

丸之内线所属的中野车辆基地占地59 248 m²,列车留置能力达168列。丸之内线1988年以来使用02系通勤型电车,直流600V第三轨供电,丸之内线共配置6节编组列车53列(318节),最大运用列车为50列,其余3列为备用编制,由中野车辆段负责检修。

两线在赤坂见附站附近实现互联互通,银座线的列车在赤坂见附站可过轨进入丸之内线。因此,丸之内线中野车辆段除了负责丸之内线全部车辆的月检等任务外,还负责银座线车辆的定期检修和部分车辆的夜间停放,实际上成为两线共享的车辆基地。

我国香港小蚝湾车厂占地面积约30万m²,是香港东涌线、机场线与迪士尼线3线共用的车辆段,位于机场快线和东涌线主线北侧的填海土地,但不直接和迪士尼线路轨连接,迪士尼线列车来往车厂,须途经机场快线和东涌线欣澳站至小蚝湾的一段共用路轨,如图7所示。港铁东涌线使用直流传动通勤型韩制列车,列车编组为8节编组,机场快线全线11列及东涌线12列列车均用此电动列车。迪士尼线全线3.5 km,共设2座车站,均为地面站,在欣澳站与东涌线和机场快线换乘,运营列车为4节编组类型。

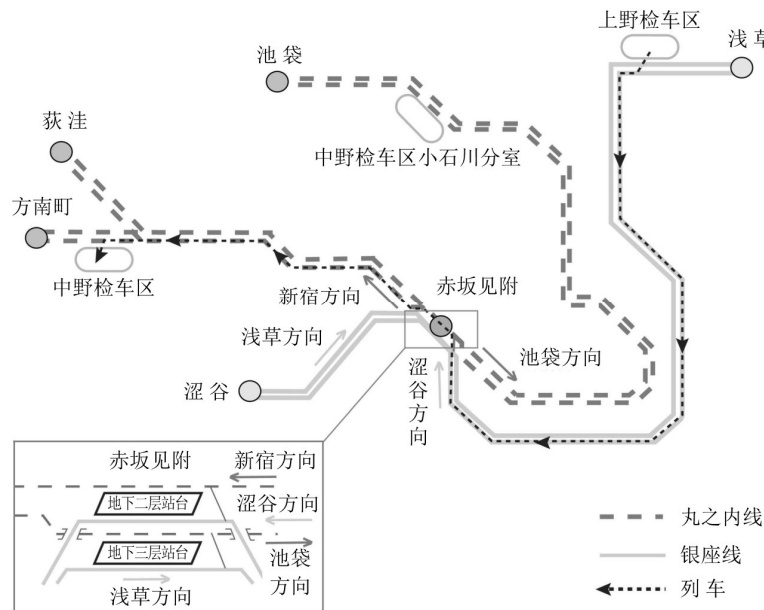


图6 丸之内线中野车辆段服务银座线案例

Fig. 6 The case of the Nakano depot serving the Giza line

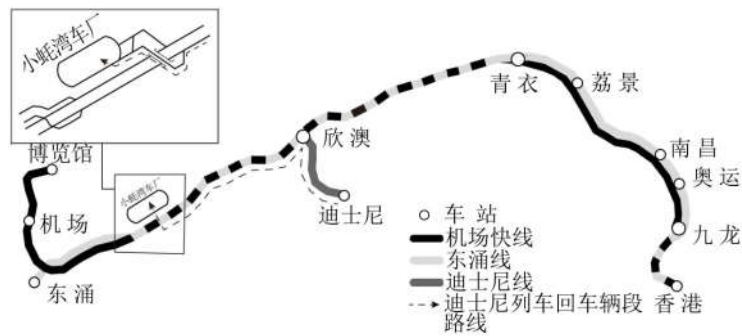


图7 迪士尼线列车经过东涌线和机场快线到小蚝湾车厂

Fig. 7 Disney line trains run through Tung Chung line and airport express line to Siu Ho Wan depot

表1给出了我国部分城市车辆段与停车场共设的例子。

表1 内地部分城市车辆段和停车场共用案例
Table 1 Case of several cities depots and parking lots for sharing

| 城市 | 车辆段/停车场 | 服务线路 |
|----|---------|----------------|
| 北京 | 马泉营车辆段 | 14号线、15号线 |
| | 宋家庄停车场 | 5号线、10号线、亦庄线 |
| | 五路停车场 | 6号线、10号线 |
| 上海 | 北翟路车辆段 | 2号线、13号线 |
| | 龙阳路车辆段 | 2号线、7号线 |
| 广州 | 川杨河停车场 | 11号线、13号线、16号线 |
| 南京 | 嘉禾车辆段 | 2号线、3号线 |
| 南京 | 小行车辆段 | 1号线、2号线、10号线 |
| 武汉 | 三金潭车辆段 | 3号线、8号线 |

3.2 车辆基地资源共享类型的划分

从表1可以看出,内地车辆基地共用也已有不少案例.总体上看,基地共享案例大致可分为3类:

第1种类型是土地共用型,即多条线路的车辆基地共用1块土地,相关设施仍分别布置.如位于北京的马泉营车辆段,占地面积26.5万 m^2 ,建筑面积12.19万 m^2 ,2010年8月投入使用,服务于北京地铁14号线(东段2014年12月运营,京港地铁公司管辖)和15号线(2010年12月运营,北京地铁运营公司管辖)两线列车的停放、维护、保养和检修等.

第2种类型是功能共用型,即多条线路的检修运用功能集中配置,但线路所属列车不互用.如位于北京的宋家庄停车场是北京地铁5、10号线和亦

庄线共用的停车场。宋家庄停车场可停放亦庄线车辆11列,5号线车辆13列,10号线列车40列,主要承担车辆运用周转和列检任务,定期维修工作均不在停车场进行。

广州嘉禾车辆段也是这种类型的1个例子。该车辆段主要负责广州地铁2号线配属列车的保养及维修任务,以及广州地铁3号线(体育西路站—机场北站)配属列车的停放、月检、双周检、定修任务。由于2号线列车采用A型车6辆编组,3号线列车采用B型车6、3节组合编组,两线的列车运用计划也需分别编制。

第3种类型是各线车辆类型基本相同,列车可以互用,因而可以编制统一的列车运用与乘务周转计划,提高车辆资源的利用效率。例如,伦敦尼斯登车辆段(Neasden Depot)坐落于英国伦敦Metropolitan线尼斯登站(Neasden Station)和温布利公园站(Wembley Park Station)之间,占地面积2.56万m²,是伦敦地铁最大的列车检修段;车辆段内部停车场规模较大,拥有22条长约300m的股道,每条股道可容纳2列8编组列车,故能停放44列8编组列车。列检库房总长度接近500m,拥有12条股道,整个车辆段能够容纳至少70列8节编组列车。该车辆段主要服务于大都会线(Metropolitan Line)及高峰时刻的朱比利线(Jubilee Line),同时也为哈默史密斯和城市线(Hammersmith & City Line)、环线(Circle Line)及地区线(District Line)提供大修服务。

3.3 车辆基地共享的效益研究

多线共用车辆基地为列车的充分利用提供了前提。对于城市轨道交通系统来说,由于城市土地紧张,多线共用车辆基地还可以节省车辆基地用地,降低建设造价。

对于运营来说,当共用基地的列车类型兼容时,车辆基地的共用为多线编制统一的列车周转计划提供了基础。由于城市交通客流时间与空间的差异性,不同线路的共用可以实现列车运用的互补,提高列车运用效率,降低相对高昂的列车购置费用。多基地(Multiple Depot)车辆时刻表编制问题(Vehicle Scheduling Problem)是一个“NP-hard”的组合优化问题,这方面已有一些探索。例如,

Carpaneto等^[12]研究了多车辆基地条件下时刻表编制问题(MDVSP),提出了时刻表优化的分枝定界法。Dell'Amico等^[13]将多基地公交车辆时刻表编制作为NP-Hard问题,建立了将给定需求矩阵分配到不同车辆段所属车辆的模型,可以使所用车辆数最小及运营费用最低。Desaulniers等^[14]研究了有时间约束的公交车线路与乘务计划编制问题,提出了一个通用框架。Huisman等^[15]在此基础上建立了多基地车辆与乘务组计划一体化编制的两类不同模型,提出了结合列生成与拉格朗日松弛方法的算法。Pepin等^[16]研究了多车辆基地时刻表编制问题,分析比较了5种启发式算法的效果,并发现列生成启发式在有足够计算时间及稳定性要求时效果最好,而大邻域搜索方法在计算时间及解的质量方面更有优势。

不难看出,车辆基地共享条件下的车辆运用问题是一个公交运营企业行车组织与管理问题。城市轨道交通网络线路相对固定,不同类型线路客流的时间分布与方向性特征存在一定差异,这种差异正好为线路间通过协调互补等方法来提高列车利用效率提供了客观需求与优化契机。另一方面,城市轨道交通系统拥有AFC系统,能较容易地获得详细的客流时空特性数据,这为共享车辆基地的列车运用方案优化研究提供了便利条件。不过,应当指出,多线路列车运用共享需要以各线路对列车运行的兼容性为基础,制式差异及其带来的不兼容性是资源共享的主要障碍。

4 结 论

总的来看,资源共享实践面临两方面的主要困难:一方面,线路建设存在时序差异,即不同线路建设时间不同,这使得共享设施的规划与预留实施存在困难;另一方面,共享资源所涉及的预留会导致先期工程建设成本、涉及与施工难度的增加。例如,预留的换乘设施可能改变首期工程的拆迁规模,增加首期工程造价,共享的车辆基地也是如此。

因此,从资源共享角度探讨网络化运营技术的协调与优化是一个长期的战略课题。要解决上述难题,首先,要在规划阶段对资源共享方案有比较

充分的研究与论证,从城市规划与土地利用等角度确保推荐的方案具有较强的可操作性.其次,在设计与建设阶段,应强化规划成果的指导作用,将规划中的资源共享内容作为整个规划方案的要点来控制,确保在后续各阶段得到实施而不是被忽略.第三,在运营管理阶段要树立效率意识,城市轨道交通本身尽管是公益性事业,但经营者强化对效率的追求与其公益性并不矛盾,还能够促进城市轨道交通的可持续发展.

过去10年是我国城市轨道交通快速发展的10年,我国城市轨道交通开通的运营里程已达到全球的1/3,在硬件方面取得了举世瞩目的成就.总体上,我国城市轨道交通建设正从高速发展阶段走向科学发展阶段.在这个阶段中,如何强化规划与建设对运营的支撑,着实树立“规划、建设与运营一盘棋”的理念是值得城市轨道交通行业深化思考的重要课题.慢工出细活,在这方面,香港与东京的诸多经验值得思考和借鉴.

参考文献:

- [1] 毛保华,张政,陈志杰,等.城市轨道交通网络化运营组织技术研究评述[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(6):155-163.[MAO B H, ZHANG Z, CHEN Z J, et al. A review on operational technologies of urban rail transit networks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(6): 155-163.]
- [2] 史芮嘉.城市轨道交通系统输送能力利用率测算及优化研究[D].北京:北京交通大学,2017.[SHI R J. Calculation and optimization for the conveying capacity utilization of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.]
- [3] GB/T 30012-2013,城市轨道交通运营管理规范[S].2013.[GB/T 30012-2013, Regulations for operation management of urban rail transit[S]. 2013.]
- [4] DOMSCHKE W. Schedule synchronization for public transit networks[J]. Operations Research Spektrum, 1989, 11(1): 17-24.
- [5] GOVERDE R M B. Synchronization control of scheduled train services to minimize passenger waiting times[C]. Transport, Infrastructure and Logistics; Competition, Innovation and Creativity: Proc.4th TRAIL Annual Congress Part 2, Delft: Delft University Press, 1998.
- [6] WONG R C W, YUEN T W Y, FUNG KW, et al. Optimizing timetable synchronization for rail mass transit[J]. Transportation Science, 2008, 42(1): 57-69.
- [7] KWAN C M, CHANG C S. Timetable synchronization of mass rapid transit system using multi-objective evolutionary approach[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2008, 38(5): 636-648.
- [8] 徐瑞华,李璇.城市轨道交通网络末班车衔接方案的综合优化[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(10):1510-1516.[XU R H, LI X. Comprehensive optimization for connection scheme of last trains in urban mass transit network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(10): 1510-1516.]
- [9] KANG L, WU J, SUN H, et al. A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015(72): 112-127.
- [10] BOOKBINDER J H, DÉSILETS A. Transfer optimization in a transit network[J]. Transportation Science, 1992, 26(2): 106-118.
- [11] DADUNA J R, VOß S. Practical experiences in schedule synchronization[C]//Daduna J R, Branco I, Paixão J M P (eds) Computer-Aided Transit Scheduling. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995: 39-55.
- [12] CARPANETO G, DELL'AMICO M, FISCHETTI M, et al. A branch and bound algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem[J]. Networks, 1989, 19(19): 531-548.
- [13] DELL'AMICO M, FISCHETTI M, TOTH P. Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problem [J]. Management Science, 1993(39): 115-125.
- [14] DESAULNIERS G, DESROSIERS J, LOACHIM I, et al. A unified framework for deterministic time constrained vehicle routing and crew scheduling problems[C]//Crainic T G, Laporte G. (Eds.) Fleet management and logistics. Boston, MA: Springer, 1998: 57-93.
- [15] HUISMAN D, FRELING R, WAGELMANS A P M. Multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling[J]. Transportation Science, 2005, 39(4): 491-502.
- [16] PEPIN A S, DESAULNIERS G, HERTZ A, et al. A comparison of five heuristics for the multiple depot vehicle scheduling problem[J]. Journal of Scheduling, 2009, 12(1): 17-30.