

从运营管理实际谈提高地铁运输经济性的若干策略^{*}

刘菊美

(广州地铁集团有限公司, 510330, 广州//高级工程师)

摘要 对地铁运输经济性现状进行分析,从提高运输效率和降低运输成本方面找出了限制地铁提高运输经济性的因素。在辅助线设计、车辆选型和信号软件设计等方面提出了地铁运输成本的优化建议;在运量与运力匹配、应用列车的节能运行曲线及解决列车“扎堆”进站带来的牵引电能损耗等方面进行研究,制定了具有操作性的优化方案,从而提高地铁运输的经济性。

关键词 地铁运输;经济性;牵引能耗;辅助线设计;运行图优化

中图分类号 F530.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.001

Strategies to Improve Metro Transportation Economy from Perspective of Operation and Management Practice

LIU Jumei

Abstract The current situation of metro transportation economy is analyzed and is studied from two aspects of improving transportation efficiency and reducing transportation cost. Factors restricting metro from improving transportation economy are identified. The optimization suggestions of metro transportation cost are put forward in the aspects of auxiliary line design, vehicle selection and signal software design. Research is carried out in the aspects of matching the traffic volume and capacity, applying the energy-saving operation curve of the train and solving the traction power loss caused by train 'piling up', and operable optimization scheme is formulated. The economy of metro transportation is improved.

Key words metro transportation; economy; traction energy consumption; auxiliary line design; optimized operation diagram

Author's address Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510330, Guangzhou, China

1 地铁运输经济性现状分析

1.1 运输效率分析

地铁运输效率首先要重点关注线路的全周转时间,主要包括列车的旅行速度、停站时间和线路的折返效率;其次,要在合适的时间安排合理的列车数量,以精准匹配运量的需求,避免运力浪费;再次,要确保线路运行的高正点率和高兑现率,减少运营故障对乘客出行的影响。

1.2 运输成本分析

地铁的运输成本中,有两类可变成本:一类是运营人员的工资,另一类是列车牵引需支付的电费和车辆维修成本。线路的运营车公里数越大,其运输成本越大。

1.3 优化建议

地铁线路的运营具有长期性和复杂性,在线路的设计和建设阶段应该优先考虑合理的运营功能性需求。因拆迁征地、地质条件等因素的限制,在地铁线路建设时牺牲了部分运营的便利性和经济性,在运营阶段将导致长期地增加运营成本。为此,本文建议如下:

首先要考虑“修好路”,即设置合理的辅助线。辅助线主要包括出入场线、中间站辅助线和终点站折返线等。合理的辅助线设置,可以确保全线高密度、顺畅运行,起到经济、高效运输的作用。

其次要选择“节能车”。地铁车辆的主要选型包括A型车、B型车及L型车。不同选型的列车,其运输能耗不仅与车辆设计有关,还与线路的站间距、坡度、曲线、载客量、运距等有关。

再次要优化列车运行图。应根据线路的客流特点,合理编制与客流相匹配的列车运行图,优化列车开行计划,以达到节能运行、减少运输损耗的

^{*} 国家重点研发计划基金项目(2020YFB1808102)

目的。

2 设计阶段提高运输经济性的建议

对于地铁线路的设计阶段,本文主要从辅助线设置和车辆选型两个方面提出地铁运输经济性的相关建议。

2.1 辅助线设置

辅助线的设置若不合理,在线路开通运营后会给运营带来长期的运输瓶颈和较高的运营成本,此时再进行辅助线改造,其成本和风险都非常高,改造成功的实例很少。

2.1.1 对出入场线的设置建议

2.1.1.1 出场能力建议

一般而言,设计正线的最小行车间隔为 2 min,车场线为仅有联锁功能的线路。与正线的运输通过能力相比,出场线的出场能力较低,常常成为线路增能时的瓶颈。若将车场设计为全自动运行车场,则需要增加较多的工程投资。在综合考虑运输效率和运输成本后,多数车场线仍仅设计了联锁功能。为此,建议按照出、入场线各 4 min 进行出场能力设计,这样,出、入场线平行作业时可达到 2 min 的出场能力,与正线的最小行车间隔相匹配。

单方向出入场线的出场能力若达不到 4 min 能力,运营时只能采取在客流高峰时段列车被迫提早出场和延迟回场的措施,这将导致正线夜间施工的时间和白天车场施工的时间被压缩。

2.1.1.2 出入场线配置建议

如图 1 所示,最优的出入场线设计方案为八字形方案。该方案下,列车可以同时往两个运营方向发车,也可以同时从两个方向回场,从而最大限度地减少正线列车换端的时间,可提高出场效率,减少列车空驶的车公里数,降低运营成本。八字形出入场线还可以作为一个中间站的辅助线,具备往两个方向折返的能力,必要时还可用于存放备用车。

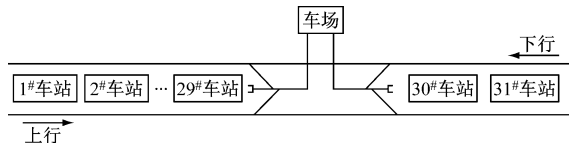


图1 八字形出入场线设计方案

Fig. 1 Design scheme of splayed entrance and exit line

若因线路条件受限,无法采用八字形出入场线,次优的设计方案为出入场线的主出场方向应为车站数量较多、客流较大的方向,简称为“主客流方

向顺向出场设计方案”,如图 2 所示。该方案在客流高峰时段能够快速使主客流方向的行车间隔压缩到 2 min。此外,若线路的终点站(图 2 的 31#车站)发生故障,该方案能够快速地将出入场线变更为线路的第二折返点,保证线路主要区段的运输能力。

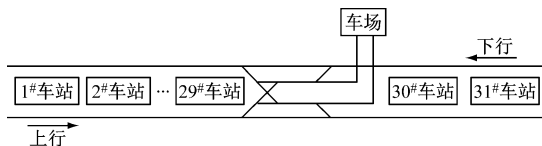


图2 主客流方向顺向出场设计方案

Fig. 2 Design scheme of exit in the direction of main passenger flow

不建议采用主出场方向与主客流方向相反的设计方案。如图 3 所示,若采用与主客流方向相反的方向出场(又称为“主客流方向反向出场设计方案”),场内列车主要往 30#车站的下行方向发车,此时必须在 30#车站的下行站台换端,这样将形成敌对进路,线路的最小发车间隔将超过 4 min,因此,该方案不能作为超车出场的常用组织模式。若要减少换端时间以缩短列车发车间隔,则需要列车两端都安排司机,进而增加了人工成本。若场内列车主要往 30#车站的上行发车,则列车需运行至 31#车站进行站后折返后,再运行回到 30#车站下行,这将增加无效的运输时间和空驶的车公里数。此时如进一步计算终点站的交接班时间,则所需耗时更长,进而造成列车牵引能耗、人工成本的浪费。

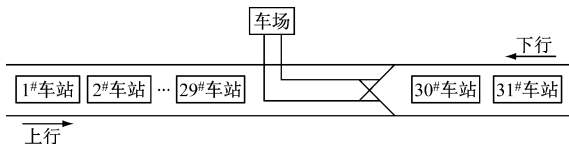


图3 主客流方向反向出场设计方案

Fig. 3 Design scheme of exit in the reverse direction of main passenger flow

2.1.2 对终点站辅助线的设置建议

我国大部分地铁线路终点站的折返能力按照停站时间 30 s、列车折返能力 105 s 进行设计,不同的信号厂家在折返能力上稍有区别。然而实际运营中,很多线路的列车折返能力超过了 120 s,成为了限制线路运力提升的瓶颈。

图 4 为终点站线型布置图。由图 4 可看出,线路折返能力存在差距的主要原因是:① 进站进路的保护区段(D—A—O)需要征用到折返线岔群的交

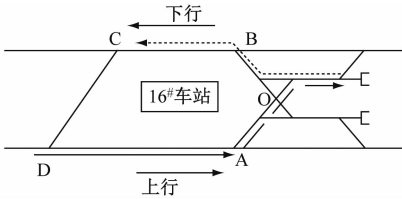
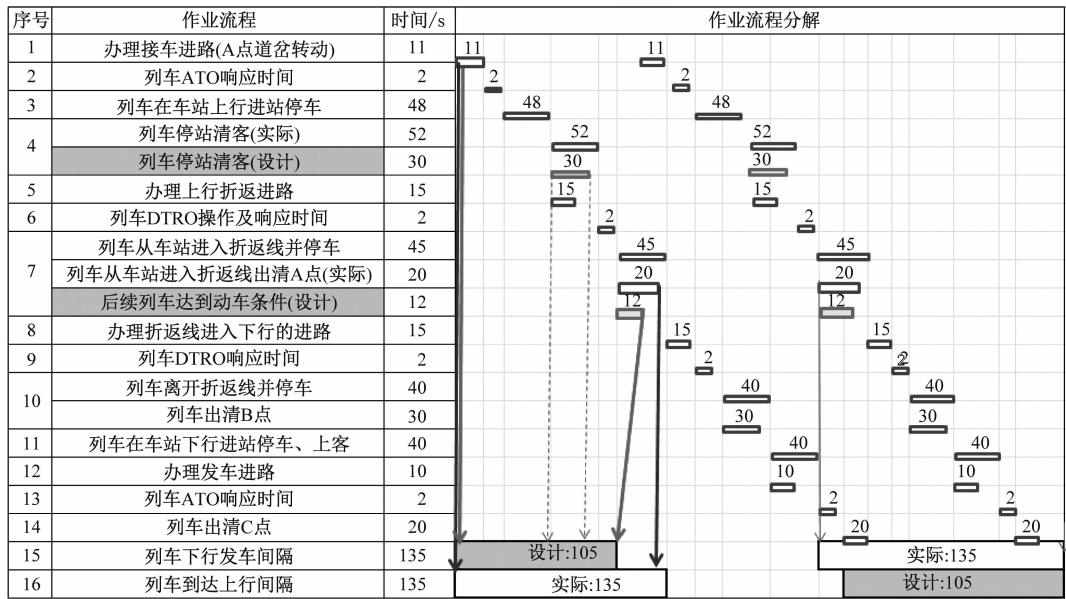


图 4 终点站线型布置
Fig. 4 Terminal line layout

叉渡线,与折返线至下行站台的进路(O—B—C)对冲;②在31#车站上行设置的停站时间不同;③依据运营实际需求,增加了确认站台门和车门的空隙及确认进路等安全管控环节。

图 5 为列车在终点站的折返流程示意图。由图 5 可看出,部分作业流程的设计耗时与实际耗时不同,导致实际折返时间比设计折返时间多 30 s。



注:ATO——列车自动运行;DTRO——无人驾驶自动折返;“作业流程分解”一列中数字的单位均为s,其中:“设计”指折返作业的设计时间,“实际”指折返作业的实际耗时。

图 5 列车在终点站的折返流程示意图
Fig. 5 Schematic diagram of train turn-back process at terminal station

1) 对终点站辅助线土建距离的设置建议。终点站的站后第一副道岔若土建距离不足,将同时影响上行到达列车进站和折返线列车进入下行,对冲进路相互干扰,降低折返效率。建议终点站站台与站后第一副道岔间的距离应满足进站进路保护区段的距离要求。同时该距离也不能过长(不宜大于50 m),以避免折返走行距离过长造成折返能力的不足和列车空驶运行增加的电能浪费。

2) 对终点站辅助线软件的建议:① 进站进路的保护区段不能征用超出站后第一副道岔,一方面避免影响折返线内的列车向下行站台发车,可以平行作业,另一方面也能减少道岔频繁转动带来的设备损耗;② 被保护区段征用的道岔无论位于左位还是右位,折返线发车进路都能正常排列,不影响折返线内列车的正常发车;③ 上行列车出清站后的第一副道岔后,进站进路的保护区段能立即被征用,上行的后续列车可以进站对标。

3) 终点站安全确认的辅助措施。列车停站时间普遍按小于30 s设计,因客流大小不同的原因,实际运营需要的列车停站时间大多为30~60 s。在终点站进行折返作业,除了折返必须的步骤外,还需要考虑确认站台门和车门缝隙无夹人夹物、确认进路安全等安全管控环节,因而在设计时应为上述环节预留10 s左右的安全冗余时间,使得设计的折返能力和实际的折返能力尽可能一致。

2.1.3 对中间站辅助线的设置建议

GB 50157—2013《地铁设计规范》规定:正线应每隔5~6座车站或8~10 km设置停车线,其间每相隔2~3座车站或3~5 km应加设渡线。在此基础上,本文提出优化建议,以进一步提高地铁运输的经济性。

2.1.3.1 距离终点站最近的折返站辅助线设置建议

当终点站出现道岔故障等大幅度降低运营水

平的故障时,距离终点站最近的折返站若具有较高的折返能力,可确保线路上大部分的站点不受终点站故障的影响。如图 6 所示,建议距离终点站最近的折返站应配备与该终点站折返效率一致的折返线,使其具备最小行车间隔 2 min 的临时折返能力。

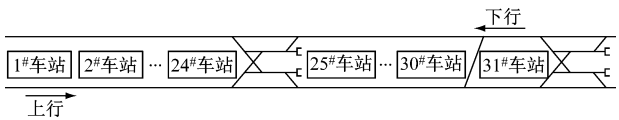


图 6 距离终点站最近的折返站辅助线示意图
Fig. 6 Schematic diagram of auxiliary line of turn-back station closest to terminal station

2.1.3.2 线路中段站点辅助线设置建议

如图 7 所示,对于线路中段的站点,其辅助线需连接 4 个方向,在有故障情况时可使列车灵活进出存车线及折返线。此外,若该站点与车场的距离大于 20 km,其辅助线应设置为单线双列位,并可连接 4 个方向,以便于救援时列车解钩和故障列车存车。

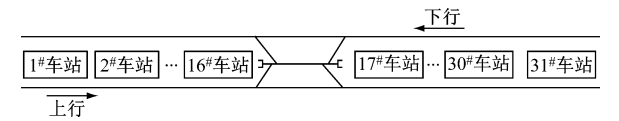


图 7 线路中段站点折返线辅助线示意图
Fig. 7 Schematic diagram of auxiliary line of turn-back line at route middle section stations

2.1.3.3 不建议采用的车站辅助线设置方案

部分经济性不高的辅助线,给运营带来了长期的运行限制和运力浪费,因而,不建议采用以下类型的车站辅助线设置方案:

1) 如图 8 a) 所示,在线路中段站点采用双折返线设置方案,导致次折返方向(下行折返到上行)的

折返效率仅能达到 4 min 的水平,折返效率偏低。

2) 如图 8 b) 和图 8 c) 所示,折返线设计时缺少一个方向的连接,导致列车无法在两个方向均能实现顺畅折返,给线路的运行调整造成较多限制。

3) 如图 8 c) 所示,折返方向设置不合理,限制了折返效率,存车线的开口方向应朝向且靠近 4# 车站,以便于在 4# 车站下行进行列车清客和小交路折返。

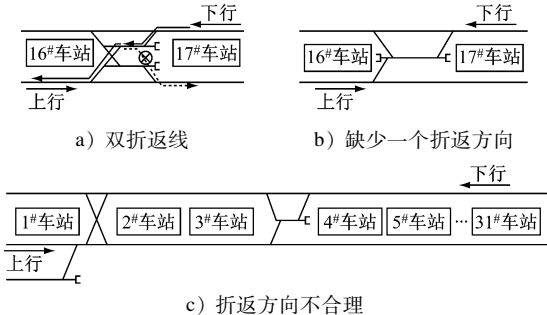


图 8 不建议采用的车站辅助线设置方案示意图
Fig. 8 Schematic diagram of non-recommended setting scheme of station auxiliary line

2.2 车辆选型

截至 2021 年底,广州地铁线网采用 A 型车的线路有 4 条,列车平均牵引能耗为 2.34 kWh/(车 km);采用 B 型车的线路有 7 条,列车平均牵引能耗为 1.93 kWh/(车 km);采用 L 型车的线路有 3 条,列车平均牵引能耗为 2.92 kWh/(车 km)。其中,L 型车的额定载客量最小、牵引能耗最高。

本文对 3 种车型分别选择了两条案例线路,选取这些线路 2021 年的部分参数,对不同车型下的列车平均牵引能耗进行对比分析,其结果如表 1 所示。

表 1 各车型人均能耗对比表(2021 年)

Tab. 1 Comparison of per capita energy consumption of various models (2021)

车型	线路	平均站 间距/km	列车平均 牵引能耗/ (kWh/(车 km))	AW2 下车辆的 额定载客量/ (人/节)	工作日平均 客运量/ (万人次/d)	年运营车公里/ (万车 km)	AW2 下每百人公里的 平均牵引能耗/ (kWh/(100 人 km))
A 型车	A1 线	1.309	2.46	310	107	3 815	0.793 5
	A2 线	2.455	2.14	310	12	1 720	0.690 3
L 型车	L1 线	1.335	3.14	235	106	4 550	1.336 2
	L2 线	1.307	3.16	235	81	3 169	1.344 7
B 型车	B1 线	2.254	2.07	238	115	4 991	0.869 7
	B2 线	1.556	1.67	238	54	2 606	0.701 7

注:AW2——额定载荷工况(车厢内满座、站立区域的乘客密度为 6 人/m²)。

由表1可知:对于AW2下每百人公里的平均牵引能耗,A型车该指标的数值是L型车的55.3%,B型车该指标的数值是L型车的58.6%,L型车的指标值最大。

L型车与B型车的额定载客量相似,可以将二者的牵引能耗进行对比。列车的牵引能耗主要由车型决定,同时受到乘客量大小、是否在站间线路上合理设置V型和W型节能坡,以及列车的牵引/制动频次等因素影响。本文以L1线为例,若L1线其他条件不变,在该线分别采用B型车和L型车两种情况下,对不同车型的节能效果进行计算分析。以1年为统计期,L1线采用B型车与采用L型车相比,可节省的牵引能耗 E 为:

$$E = P_{L1} E_{L1} - P_{L1} (E_{B1} + E_{B2}) / 2 \quad (1)$$

式中:

P_{L1} ——L1线的全年运营车公里;

E_{L1} 、 E_{B1} 、 E_{B2} ——分别为L1线、B1线、B2线的平均牵引能耗。

将2021年的数据代入式(1), $P_{L1} = 4\,550$ 万km, $Q_{L1} = 3.14$ kWh/(车·km), $Q_{B1} = 2.07$ kWh/(车·km), $Q_{B2} = 1.67$ kWh/(车·km),可计算得到一年内B型车比L型车节省牵引能耗约5 824万kWh。由此可得到如下结论:由于地铁线路全年的运营车公里数巨大,若采用节能的车型,其节能效果非常明显。

3 运营阶段提高运输经济性的建议

3.1 对客流与运力匹配性的建议

3.1.1 客流与运力的精准匹配

针对早晚客流高峰时段编制的列车运行图应以满足客流需要为首要目标,增加高峰时段的上线列车数,将线路在高峰时段列车的最大满载率控制在100%以内。而在客流的平峰时段和低谷时段应优化运力安排,并重点优化列车满载率低于30%的运营时段的运力,以提升其运输经济性。

3.1.2 多种运输方式组合使用

1) 大小交路。合适的大小交路运行方案能有效提升大客流区段的运力,减少小客流区段的运力浪费。以广州地铁4号线为例,该线的23个车站中,黄村站—新造站8个车站区段合计的客流量约占该线总客运量的80%,但因新造站未设有折返线,最近的具备物理折返条件的是距离新造站1.1 km的入场线。因该入场线为八字型设置,可将其改造,使其具备折返功能,因此,该线选取的小交路

区间为黄村站—新造站,有效地提升了运输经济性。

2) 不均衡运输。利用不均衡运输方式,在部分时间段单方向提升运力,同时尽量减少所增加的上线列车数,以满足单方向的客流需要。不均衡运输方式适用于具有明显潮汐客流特征的线路。

3) 快慢车。车站内设有越行线的线路,开行快慢车可以缩短部分列车的周转时间。对于在早期建设时期未设有越行线的郊区线路,因线路的长度较长、列车单程旅行时间随之也较长,在行车间隔大于5 min时,对于客流量很小的部分站点,也可开行快车。可将上线列车分为X、Y两组,车站分为A、B两组,单方向组织X组列车载客越行通过A组车站,Y组列车载客越行通过B组车站,可以减少上线列车的总牵引和制动损耗,加快列车周转,节省上线列车数。如将车站编制成不同的越行站组,即:将1[#]站、2[#]站、3[#]站设为越行A组,将6[#]站、7[#]站、8[#]站设为越行B组;将第1列、第3列、第5列经过的列车设为X组,将第2列、第4列、第6列经过的列车设为Y组。每越站1次,列车周转时间可减少50 s左右。

3.1.3 列车满载率过低线路的运输优化

城郊地铁线路因客流的培育期较长,线路开通初期的客流小,列车的满载率低。此类型线路在开行方案上具有较大的优化空间。

3.1.3.1 行车间隔不宜大于10 min

列车在运营时段正常运行时,最大行车间隔不应大于10 min,在早晚收发车时段的最大行车间隔不宜大于12 min。在客运服务方面,应通过手机应用程序、张贴告示等方式,向市民公布各站的列车到站时间,以方便市民根据列车时刻选择乘坐的列车,减少候车等待时间。

3.1.3.2 列车灵活编组

广州地铁13号线一期工程2021年的日均客运量为11.2万人次,该线列车采用8节编组A型车,早、晚客流高峰时段的行车间隔为8 min,列车的最大满载率分别是54%、55%;其他运营时段的行车间隔为10 min,列车的满载率低于15%,运力浪费较大。此类型线路在设计阶段应考虑列车的灵活编组运行,即在客流高峰时段采用大编组或小编组高密度运行,在其余时段采用小编组低密度运行。

可以灵活编组运行的地铁线路,在设计、建设阶段需要设置与之相符的条件:① 土建要按照最大列车编组数来设置站台及辅助线的长度;② 列车要

具备在线上自动解编、连挂的功能;③ 信号系统需配置与不同编组列车混跑的功能,以及与列车在正线和辅助线上全自动解编、连挂等需求相匹配的功能;④ 站台门应能识别不同编组列车,并具备自动开关对应站台门的功能;⑤ PIS(乘客信息系统)、站台乘客导引等客运辅助措施需要根据不同列车编组到站情况予以实时切换。

3.2 对列车运行图进行优化

3.2.1 设计区间运行节能曲线

在客流的平峰和低峰时段增加 ATO(列车自动运行)的惰行时间,减少不必要的列车加减速,可以

有效地达到节能效果。如图 9 所示,可设计 5 个档位的区间运行时间,每档位的时间差为 5 ~ 15 s。其中:第 1 档为全速运行曲线,用以最大程度满足列车提速的要求,此时列车采用全加速或全减速的运行方式,站间运行时间最短、能耗最高,该档位应用于客流高峰时段;第 2 档至第 4 档为中间运行曲线,此时的列车加速度低于全速运行曲线下的列车加速度,增加了 ATO 惰行时间,以达到节能效果,这几个档位可用于客流的高峰时段或平峰时段;第 5 档为最慢运行曲线,此时的列车加速度最小,站间运行时间最长。

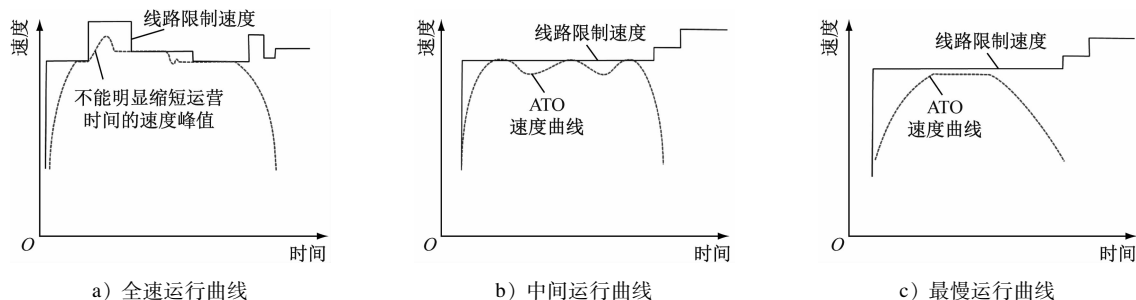


图 9 列车在站间运行的速度曲线示意图

Fig. 9 Schematic diagram of speed curve of train running between stations

3.2.2 优化停站时间

列车运行图设定的停站时间一般为 30 ~ 60 s。高峰客流时段因客流较大,停站时间一般也较大。客流高峰时段在地铁线路的出城方向采用最小停站时间,以及客流平峰和低谷时段在线路两个方向均采用最小停站时间,可以有效地节省全线的总停站时间。如果将每站节省的 5 ~ 20 s 停站时间用于增大临近的站间运行时间,则可以在单程运行时间基本不变的情况下达到列车在区间节能运行的效果。

此外,目前司机确认车门和站台门间无夹人夹物所需的时间较长,每次作业平均耗时 8 s,需要在车门和站台门间增设监测设备,用以辅助司机判断是否有夹人夹物的情况,减少司机确认无夹人夹物的时间,提高监测效率。在监测设备功能完善的情况下,若每次停站时间可减少 5 s,假设在 1 次全周转时间内有 40 次站台作业,则列车周转 1 次可节省 200 s。用减少后的列车周转时间计算上线列车数,在其他参数不变的情况下,上线列车数可减少 1 ~ 2 列。

3.2.3 优化列车运行图的各项参数

在编制列车运行图时,原则上按客流高峰时段

效率优先、其余时段兼顾节能的原则来设置各区间运行时间,在客流平峰时段和低峰时段列车一般使用中间档位(第 2 档至第 4 档)运行。在满足旅行速度等指标的条件下,应对区间运行时间和停站时间进行优化。以广州地铁 13 号线为例,与优化前相比,采用优化后的列车运行图,列车牵引能耗平均节约了 11.6%,区间运行时间增加了 9.7%,列车旅行速度下降至 48.15 km/h(降幅为 7.1%)。

3.3 解决列车“扎堆”所带来的问题

广州地铁 3 号线是典型的大客流、高密度线路,早高峰时段部分区段的列车最大满载率达到 130%。受潮汐大客流的影响,区间列车因等待进站多次起停,列车“扎堆”等待较多。通过优化编排交路,3 号线 2020 年大幅度减少了列车“扎堆”问题,同时降低了约 3% 的列车牵引能耗。

3.3.1 列车晚点造成列车“扎堆”

正常情况下列车按照列车运行图运行,其运行间隔(2 min 以上)均匀。当发生晚点事件时,正常的运行秩序被打乱,CBTC(基于通信的列车控制)信号系统允许后续列车最大限度地靠近前行列车,二者的最小距离可在 30 m 以内。因此,一旦前行列车发生晚点停车,将导致后续列车在区间内“扎堆”

排队等待,进而造成列车在线路上分布不均,局部区域列车的运行间隔小于2 min,而部分区域列车的运行间隔大于4 min。

3.3.2 列车“扎堆”带来浪费

1) 线路拥堵导致区间内多列车自动停车,列车在排队进站和上下乘客过程中多次启动和制动,导致电能的浪费。

2) 列车高速制动的情况下,动能会转化为电能并回馈至接触网。而列车在低速运行时的制动大部分采用气制动形式,此时动能转化为热能后消散在隧道中。

3) 列车正常运行时,同一个供电臂内的列车有牵引也有制动,制动时列车动能转化的电流可同时被牵引的列车所利用,这样既可以充分利用回馈电流,又可以有效防止制动产生的电流抬高接触网的电压。而区间“扎堆”列车的反复起停,破坏了这种回馈电流利用的平衡。

3.3.3 解决列车“扎堆”的具体措施

1) 行车调度采取人工调整措施。行车调度将后续列车同时扣停在站台,控制行车秩序,依次放行,避免区间多列车停车形成拥堵。与此同时,行车调度应控制故障车前方3~4列车的运行秩序,避免故障车与前行列车间产生大的运行间隔,避免出现站台候车乘客滞留,以及由此导致晚点进一步增大的情况。

2) 信号系统设计自动扣车功能。上述的人工操作可以有效地避免故障带来的列车“扎堆”,但对人员操作的时效性要求较高,且操作时需要关注的细节较多,由此人工操作的误差也较大。建议在地铁信号系统设计时应考虑信号系统自动扣车的功能,参照行车调度的扣车操作,自动限制可进入区间的列车数量。如设置某区间允许的最大列车数为2列,当达到该最大列车数时,信号系统将自动把列车扣停在后方站台。行车调度可根据具体的晚点情况,选择开启、关闭该自动扣车功能,或调整该功能的相关数值,此时信号系统可自动调整列车运行秩序,以达到减少列车“扎堆”的目的。

4 结语

对地铁线路运输经济性的考量,应渗透到地铁设计、建设和运营的全过程,以促进地铁的可持续发展。本文建议对地铁运输经济性影响较大的四个方面予以重视:

1) 选择合适的车辆选型。建议尽可能采用可灵活编组的A型车。当近期客流和远期客流差距很大时,还应考虑车辆具备大小编组混跑的能力。

2) 设计合理的软件和硬件。合理设置与客流走向相匹配的各种辅助线,以最大限度地减少全线的运营车公里数;采用优秀的信号软件,以保证全线列车有序、均衡运行,减少运力浪费。

3) 客流与运力的精准匹配。应根据各时段的客流特点,编制经济适用的列车运行图,优化上线列车数和运营车公里数。应进一步研究实现动态调整列车上线数的具体措施,以实现实时的精细化运输组织。

4) 经济适用的运营策略能持续地节能。设备故障和乘客因素都可能扰乱正常的行车秩序,造成列车“扎堆”,采用有针对性的运营策略和解决措施,用以保障地铁列车的通畅运行,是行之有效的节能手段,这需要乘客的理解配合和地铁从业人员长期的努力。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013:43.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013:43.
- [2] 丁建隆. 新时代城市轨道交通创新与发展·广州 2019[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019:51.
DING Jianlong. New era innovation and development of urban rail transit · Guangzhou 2019[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019:51.

(收稿日期:2022-03-17)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn