

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.01.007

轨道交通列车节能运行组织措施探讨

付义龙, 荆敏, 沈景炎

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 轨道交通已成为各城市的能耗大户, 降低能耗是轨道交通可持续发展的重要组成部分。结合工程和运营实践, 围绕列车运行, 从行车组织、进出站运行控制、停站时间调整、列车运行控制等多方面、多角度对可能的列车运行节能措施进行总结提炼。结合当前轨道交通运营技术的创新发展, 提出将不对称运行图编制、单向加车、精细化行车组织、利用配线接发车、合理的运营裕量取值等纳入到措施中, 为轨道交通工程建设和运营提供参考。

关键词: 节能; 轨道交通; 行车组织; 不对称运行

中图分类号: U231.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6073(2020)01-0036-04

Energy-saving Operation and Organization Measures of Rail Transit Trains

FU Yilong, JING Min, SHEN Jingyan

(Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., LTD., Beijing 100037)

Abstract: Because rail transit has become a major energy user in cities, reducing energy consumption is an important part of the sustainable development of rail transit. By combining engineering and operation practice, the possible energy-saving measures of train operation are summarized and refined from the aspects of train operation organization, operation control of entering and leaving the station, adjustment of stopping time and train operation control, etc. Current rail transit operation technology innovation and development are combined to propose asymmetric running, one-way extra buses, traffic organization, and use of sidings for arrival-departure of trains. Reasonable operating margin values, such as innovation content in the measures of operation, are forward-looking, and the actual engineering of orbit transportation construction and operation has reference and guidance significance.

Keywords: urban rail transit; energy saving of traffic organization; revision; asymmetric operation

节约能源是我国社会和经济发展的—项长远战略方针, 是轨道交通建设和运营管理的一项极为紧迫、重要的任务, 也是降低运营成本、提高运营效率、实现城市轨道交通可持续发展的重要内容。

运营设备能耗取决于列车运行能力需求、设备配置以及本身技术水平等, 属于相对固定能耗; 而列车运行能耗与客流特征、需求以及其配套的行车组织模式等关系密切, 属于相对动态能耗^[1]。

笔者从相对动态能耗角度, 提出列车节能运行组织的相关措施。受制于当前国内轨道交通运营能耗计量设

备设施配置、相关研究以及数据积累的局限性, 对节能措施的效果较难进行定量验证, 故主要从定性为主、定量为辅的角度对列车运行组织节能措施进行探讨^[2]。

1 行车组织节能措施

1.1 组织大小交路行车

当轨道交通线路断面客流分布差异性较大时, 可采用多交路(2个交路或3个交路)的行车组织方式, 实现列车节能运行。

大部分轨道交通线路越接近线路端点, 开发强度越低, 客流规模越小, 同时, 在规划设计阶段往往提供了实现大小交路运营的工程条件。组织大小交路运营可提高客流断面较小地段的列车满载率, 减少列车空驶里程, 利于节约能耗^[3]。

收稿日期: 2019-08-19 修回日期: 2019-09-03

第一作者: 付义龙, 男, 高级工程师, 从事轨道交通运营设计、咨询工作, 78513294@qq.com

1.2 组织部分列车空载运行

当轨道交通客流断面上下行不均衡性较大时,在客流断面较小的方向上,可采取组织列车不载客、过站不停车的行车组织措施,降低列车牵引能耗。

当轨道交通线路主要服务于衔接外围组团与中心城的通勤客流出行时,往往呈现早高峰大量的进城客流,出城客流量较小;晚高峰呈现大量的出城客流,进城客流则较少,由此造成客流断面存在方向上较大的不均衡性。

以深圳地铁4号线一期线路^[4]为例,其早高峰客流断面如图1所示。

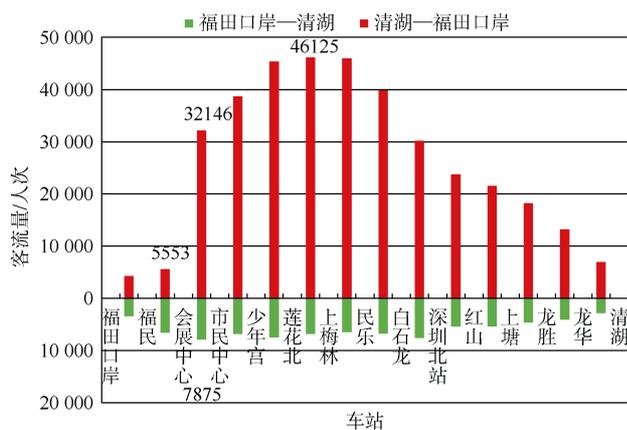


图1 深圳地铁4号线一期线路早高峰客流断面

Fig. 1 Shenzhen Metro Line 4 phase I project: morning peak traffic profile

从图中可知,4号线一期线路早高峰时段进城客流断面大(往福田口岸站方向),出城客流则较小(往清湖站方向),且4号线车辆段位于线路北端,从龙华站至龙胜站区间接轨,面对龙华站。在运营实践中,4号线运营单位(港铁(深圳)公司)从降低列车运行能耗角度出发,在出城方向(福田口岸站—清湖站)采取部分列车空载、过站不停车的行车组织方式,空载过站不停车与站站停列车开行比例为1:2,减少早高峰时段约1/3列车的制动、启动能耗,在运营实践中已取得较好的节能效果^[4]。

1.3 利用配线多点接/发车

1) 高峰/平峰列车运行间隔调整时,应充分利用配线实现多点接发车作业。

在运营早高峰到达之前,可利用平峰、行车间隔较大的时段,向沿线配线发出部分列车,待高峰到达时,利用配线实现多点加发车,可减少从车辆段发车带来的列车空驶,利于降低列车运行能耗。

同理,在高峰结束后,可将部分下线列车直接驶入沿线配线,待晚高峰时,同样可利用配线实现多点发车,减少列车空驶。

2) 当局部区段存在可预见性的大客流时,可采取利用车辆基地或沿线配线向大客流方向组织多点发车的策略。

当轨道交通线路经过的局部区段(诸如经过商业中心、体育场馆、火车站等)发生可预见性的大客流时,可通过利用沿线配置的停车线向大客流方向组织多点发车、单向加车的运行组织方式,应对大客流,利于降低列车运行能耗。多点发车的行车组织策略,可避免从车辆基地发车带来的走行距离长、行车能耗高等不足。

1.4 组织不对称交路行车

当高峰时段上行/下行方向断面客流不均衡性较大时,可利用线路两端分布的车辆基地或配线,组织列车不对称运行。如南京地铁3号线在配属车辆有限的情况下,为充分发挥运输效率,采取不对称行车组织模式。

南京地铁3号线是南京市开通的第2条过江线路,是南京市轨道交通的一条南北向骨干线路,2018年日均客流量已达76.82万人次;现状采用大小交路运行,小交路运行范围为林场站至胜太西路站。早高峰大交路最小行车间隔为10 min 40 s;小交路由胜太西路站—林场站最小行车间隔为5 min 20 s;而由林场站—胜太西路方向,则利用林场停车场向秣周车辆段单向加车,组织不对称行车的方式,单向加车14列,小交路范围内的最小行车间隔为2 min 30 s,大大提高了高峰时段进城方向的运输能力,取得了较好的运营效果,运行交路图如图2所示^[5]。

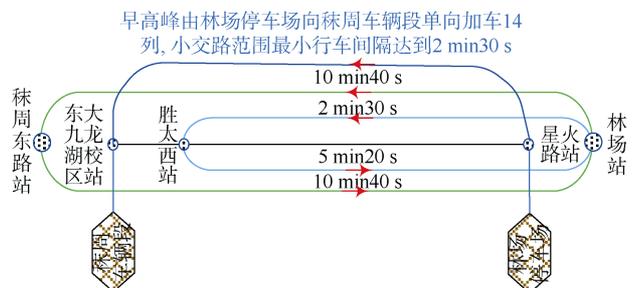


图2 南京地铁3号线早高峰不对称行车组织交路图

Fig. 2 Route map of asymmetric traffic organization during the morning rush hour of Nanjing Line 3

1.5 精细化行车组织

1) 行车组织宜针对高峰/平峰或特殊时段,有针

对性地制定行车组织方案、编制列车节能计划运行图,实现精细化行车组织。

轨道交通不同运营时段、地段,客流差异性较大,有针对性地、精细化地制定运营组织方案,可提高运营效率,降低运营成本,减少行车能耗。在运营实际中,常常采用针对不同时段、地段的客流差异性需求制定相应的行车组织方案,达到提高满载率、减少列车空驶、降低运营成本的目的,同时降低运行能耗。特别强调的是,特殊时段既包含节假日,也包含沿线部分站点可能产生的规律性突发客流时段,轨道交通行车组织均应将特殊时段纳入到行车方案制定范围。

2) 行车组织应充分利用车辆基地咽喉区接发车能力,缩短高峰前后接发列车作业时间,减少列车空驶。

轨道交通运营是一个系统工程,只有充分发挥本系统内所有设备、设施的效率,才能够确保系统运营效率的充分发挥。从当前轨道交通运营实际来看,车辆基地咽喉区接发车能力对轨道交通运营效率和能耗影响较大。客流高峰时段前后,车辆基地存在较长时间大量的接发车作业,提高咽喉区接发车效率,可减少接发车作业时间,减少列车空驶,可降低列车运行能耗^[6]。

2 停站作业调整措施

2.1 高峰/平峰停站时间调整

在全周转时间基本不变(不增加在线运行车组数)前提下,高峰/平峰时段可采用不同停站时间,降低平峰时段列车在区间的最高运行速度。

轨道交通高峰、平峰客流存在差异性,在运营实际中从便于行车管理等角度出发,往往采用相同停站时间,造成按照高峰客流确定的停站时间,在平峰时段存在不能有效利用的情况。为此,从降低列车运行能耗角度提出在平峰时段针对客流规模较高峰时段有明显减少的车站,将停站时间适当缩短,例如缩短3 s,并将此3 s时间调整至相邻区间,则可降低平峰时段列车在区间的运行速度,进而达到节能的目的^[3]。

以最为常见的平均站间距1.2 km、B型车6辆编组、列车最高运行速度为80 km/h的线路为例,按照相对理想的状态(满员、V字坡)、最高速度为80 km/h运行,区间运行能耗为31 kW·h;若将停站时间缩短3 s,列车在区间运行增加3 s,最高速度降低至约70 km/h,区间运行能耗则为25 kW·h,节能约20%,节能效果较为明显。

2.2 上下行方向采用不同停站时间

上行/下行方向客流差异性较大时,可减少客流较

小方向车站停站时间,提高客流断面较小方向的旅行速度,从而减少上线列车。

从各城市轨道交通运营现状看,大部分线路以服务通勤客流为主,客流断面在方向上存在较大的不平衡性,如北京地铁5号线、13号线、八通线、4号线等。针对此客流类型的线路,减小客流断面较小方向上的停站时间,可提高旅行速度,减少上线列车数量,降低列车运行能耗。以线路长度30 km、车站25座、平均站间距1.25 km、旅行速度接近35 km/h、列车最高运行速度80 km/h的线路为例,若高峰时段断面客流较小方向上的每座车站能够减少5 s停站时间,则全周转时间可减少约125 s,远期高峰小时按照2 min行车间隔运营的前提下,则可减少1列上线列车。

3 优化进站/出站作业措施

3.1 再生制动能量利用

处于同一供电分区内运行的列车,出站牵引工况与进站制动工况宜合理衔接,提高再生制动能量的利用率。

目前国内地铁列车再生制动的节能效果是很明显的。同一供电分区内各列车之间的启动加速和制动减速的时机配合恰当,则再生制动能量被同一供电分区内的相邻列车吸收得越充分,其再生制动能量利用率越高^[7]。再生制动能量利用在运营实践中,通过运行图编制得以体现,并通过运行图落实到行车过程中。运行图编制时,应尽可能做到处于同一供电分区内的列车出站启动加速、进站制动减速合理衔接,使得进站制动列车产生的再生制动能量最大限度地被出站启动加速的列车所利用,达到降低列车运行能耗的目的。

为提高再生制动能量利用,在列车运行控制上,ATS(automatic train supervision,自动列车监控)系统根据计划运行图规定的列车进站/出站时间,统筹控制同一牵引供电分区内的列车运行,适当调整进出站时间,充分利用再生制动能量。需要强调的是,列车的节能控制是一个多目标控制问题,在单列车运行节能控制的基础上,考虑多列车运行的节能控制,实现再生制动能量利用。在编制计划运行图时,通过技术手段调整列车的发车间隔或者追踪距离,使得同一供电分区的不同列车牵引和制动时间重叠,实现再生制动能量的有效利用。

3.2 优化压缩停站时间,降低空调能耗

在满足必要的乘降、设备设施动作和人工作业时间前提下,宜压缩停站时间,减少车厢内外热量交换,

降低列车空调运行能耗。

列车能耗由牵引能耗、空调能耗及车厢其他设施能耗 3 部分组成, 2.1、2.2 中, 已就调整停站时间对降低列车牵引能耗进行了分析。本节从降低空调能耗角度进行分析。在满足乘客乘降、设备设施动作时间和人工作业时间的前提下, 应尽可能压缩停站时间, 目的是减少车门处于打开状态下的车厢内外热量交换, 可有效降低列车空调能耗^[8]。此措施在北京地铁 4 号线运营实践中得以应用, 从精细化运营角度降低能耗, 取得一定的节能效果。

4 列车运行调整措施

4.1 高峰时段行车间隔调整

在高峰时段, 当行车间隔达到或接近系统设计最小行车间隔时, 宜避免行车间隔不均匀引起列车运行调整、区间停车、再启动等情况的发生。

当轨道交通线路运营的行车间隔达到或接近系统设计的最小行车间隔时, 意味着留给列车在区间运行时间的可调整裕量较小, 由于各种突发因素极易引起行车间隔不均匀, 进而引起部分列车不必要的制动, 增加列车牵引能耗。

从轨道交通运营列车运行指挥角度出发, 尽可能实现全线列车运行间隔的均匀性, 以充分利用有效的运营裕量, 否则部分列车在运行区间极有可能产生不必要的制动、牵引工况频繁转换的情况, 甚至会引起列车在区间停车, 增加列车牵引能耗。

在控制方式上, ATO(automatic train operation, 列车自动驾驶)系统与 ATS 系统和 ATP(automatic train protection, 列车自动保护)系统结合, 合理控制牵引、惰行、制动工况转换的频度。ATO 系统在计算站间速度-距离曲线时, 应充分考虑列车牵引及制动特性、线路条件、列车运行阻力、列车载荷等各种因素对列车运行能耗的影响, 在保证乘客舒适度、准点到达的前提下, 采取不同的牵引、制动、惰行控制策略, 尽量减少工况的转换频度, 以使每一运行等级下的列车牵引能耗, 尽可能为所确定区间运行时分的最低值。

4.2 调整平峰时段加速度

在平峰时段, 列车运行控制系统可采取适当减小牵引加速度的控制策略。

轨道交通线路采用“高峰高断面设计理念”, 即满足高峰小时、高断面客流需求。同样, 列车启、制动加速度亦如此。笔者针对平峰时段, 对运输能力要求

降低时, 提出适当降低平峰时段的启动加速度, 降低启动段的列车能耗。如以站间距 1.5 km、列车最高运行速度 80 km/h 为例, 采用 0.5 m/s² 和 0.8 m/s²^[9] 分别加速至最高速度, 区间运行能耗分别为 33 kW·h 和 34 kW·h, 降低启动加速度, 能耗降低约 2.7%, 对降低能耗是有利的。

4.3 列车运行控制调整措施

1) 依据列车运行控制曲线, 合理确定列车运行调整范围, 减少列车在区间运行中不必要的运用制动和牵引工况。

轨道交通列车按照追踪方式运行, 追踪间隔受到列车停站、折返或非正常因素影响, 列车间的运行间隔呈现过程的动态性。为此, 针对列车控制曲线提出合理的调整范围要求, 目的是在满足合理的列车动态追踪间隔条件下, 不会出现调整范围不足或过大的情况。当调整范围不足时, 会引起列车在区间实施制动或牵引工况; 当调整范围过大时, 则会降低系统运行效率。

根据国外相关研究成果, 列车运行调整范围一般宜控制在 15~35 s^[10], 调整范围大小与管理水平、客流规模、信号技术水平等密切相关。基于我国当前轨道交通信号制式以采用 CBTC 为主, 信号装备技术水平较高, 运营调整预见性更强, 且经过 30 多年的轨道交通运营经验积累和技术发展, 轨道交通运营调整范围宜按照 15 s 取值。

2) 列车出站利用节能坡加速运行时, 宜在节能坡段终点, 达到最高运行速度; 进站减速运行时, 宜在节能坡起点启动制动工况。

轨道交通线路采用高站台、低区间的节能坡形设计理念, 利于降低列车运行能耗(节能设置在站端时利于节能, 当远离站端时反而增大能耗)。结合工程实践, 根据工程建设经验得知: 当列车出站加速至节能坡终点, 达到列车最高运行速度; 列车进站减速, 从节能坡坡底开始进入惰行状态或制动状态时, 列车运行可充分利用节能坡, 是有利于节能的。

在控制方式上, 采取当列车遇到区间上坡制动减速时, ATO 系统综合考虑坡度、坡长等因素, 经过系统自动计算后, 请求减小制动力, 避免减速度过大、偏离目标速度曲线引起不必要的再次牵引。在进站节能坡、隧道上高架等区段 ATO 系统综合考虑坡度、坡道长度等因素影响, 经计算后, 请求施加合理的牵引力, 避免在牵引和制动间多次切换, 造成牵引能耗的增加。

(下转第 48 页)