

东莞市轨道交通2号线地铁快线关键技术标准

陆永芳

(东莞市轨道交通有限公司, 东莞 523000)

摘要: 东莞市轨道交通2号线按120 km/h设计, 已突破目前《地铁设计规范》的适用范围。列车超过100 km/h时, 将带来舒适度降低、运行能耗增加、隧道通风、设备设施承压大、受电弓磨耗大及故障率高等问题。为解决列车高速运行带来的问题, 结合具体工程条件, 对舒适度、线路、车辆、隧道以及区间设备设施等关键技术进行深入研究, 形成关键技术标准在项目建设中实施。2号线首期段于2016年5月27日以ATO模式、最高行车速度120 km/h开通试运营。实践证明, 上述关键技术保证了2号线技术可行、经济合理、环境舒适的要求。随着城市的发展, 运行速度超过100 km/h的地铁快线越来越多, 2号线关键技术标准研究给东莞后续地铁快线及其他城市地铁快线设计、建设提供有力的支撑和帮助。

关键词: 地铁快线; 舒适度; 线路; 车辆; 隧道

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)04-0024-04

Key Technical Standard for Rapid Metro of Dongguan Rail Transit Line 2

LU Yongfang

(Dongguan Rail Transit Co., Ltd., Dongguan 523000)

Abstract: Designed to run at 120 km/h, the Dongguan rail transit line 2 has surpassed the current scope of *Code for Design of Metro*; when a vehicle runs faster than 100 km/h, problems arise, such as low comfort, high operating energy consumption, blocked tunnel ventilation, increased pressure on equipment, pantograph abrasion, and high malfunction rate. Solution to these problems requires conduction of in-depth research on key technologies, such as comfort level, line, vehicle, tunnel, and interval facilities; these can then be used in conjunction with specific engineering conditions to form key technical standards for implementation in project construction, ensuring the technical feasibility, economic rationality, and environmental comfort of the project. As the city develops, there are more and more rapid metro lines running faster than 100 km/h; this research on the key technical standards on Line 2 will offer powerful support and assistance for follow-up rapid metro design and construction, both in Dongguan and other cities.

Keywords: rapid metro; comfort level; line; vehicle; tunnel

东莞市位于珠三角城市群两大中心城市广州与深圳之间, 为分散组团式城市。东莞市轨道交通2号线首期线路(东莞火车站—虎门火车站段)总长37.8 km, 其中地下线长33.73 km, 站间距最大为5.073 km, 平

均站间距为2.632 km。车辆采用6辆编组B型车、120 km/h的最高运行速度, 突破了现行《地铁设计规范》^[1](GB 50157—2013)和《城市轨道交通工程建设标准》^[2](建标 104—2008)100 km/h最高速度的适用范围。有必要根据地铁快线自身的特点, 结合东莞市轨道交通2号线具体工程条件深入研究技术可行、经济合理、环境舒适的技术标准。2号线设计初期开展了一系列专题研究进行地铁快线关键技术标准的制

收稿日期: 2019-03-26 修回日期: 2019-05-16

作者简介: 陆永芳, 男, 高级工程师, 从事轨道交通工程建设管理工作, 305545486@qq.com

定。下面阐释2号线关键技术标准的论证过程,旨在抛砖引玉,为其他地铁快线建设提供借鉴和参考。

1 速度目标

东莞确立了以轨道交通为骨干的现代化城市公共交通体系来解决各个组团及组团间的交通需求。东莞市轨道交通线网由1、2、3、4号线共4条市域骨干线路构成,途经市域范围32个镇街中的22个,服务于沿线镇街市域范围中短距离的快速出行,通过与珠三角区域轨道交通(广深港高铁、九广铁路、穗莞深和佛莞惠城际、广州地铁线网、深圳地铁线网以及惠州地铁线网)衔接,支持东莞与广州、深圳、香港和惠州的区域合作。因此,全程出行时间需控制在1h以内,市区至常平、松山湖、虎门等主要组团出行时间控制在0.5h左右。针对线路长(60km左右)、站间距大(平均站间距3~5km)的特点,综合考虑工程建设的经济性和运行的高效性,大于3km区间最高运行速度控制在110~120km/h,2~3km区间最高运行速度控制在100~110km/h,小于2km区间最高运行速度控制在100km/h以下,采用分区段最高运行速度目标值^[3]。

2 地铁高速运行带来的问题

设计最高运行速度目标值为120km/h,尽管低于高速铁路,但高于《地铁设计规范》(GB 50157—2013)和《城市轨道交通工程项目建设标准》(建标104—2008)限定的列车最高运行速度100km/h。根据地铁系统的运行环境特点及国内外相关线路运营的经验教训,列车在隧道内高速运行引起的问题不容忽视^[4]。经过类似工程的调研分析,当地铁列车运行速度超过100km/h后,将引起以下问题:①舒适度低。列车较长时间在区间隧道内快速运行,或突入隧道洞口、经过中间风井等断面突变处时,将诱发隧道内空气压力变化,导致车厢内空气压力变化,压力波动将会给司乘人员带来不适感觉,降低乘车舒适度;②运行能耗增加。隧道内列车运行阻力随着车速和车体前后压差而增加,增加运行能耗;③隧道通风。运行能耗的增加,直接引起隧道热量积聚和温度升高,给运营时隧道内活塞通风带来不利影响;④设备设施承压。快速运行所诱发的隧道内空气压力波动将导致站内隧道处两侧的屏蔽门承受一定风压交变,同时安装于隧道内两侧的射流风机以及设置于联络通道内的门体也将受到一定影响;⑤受电弓磨耗大、故障率高。本线最高速度为120km/h,在此速度下弓网关系将比100km/h以下运行速度发

生较大变化,引起电流更大、弓网共振,导致受电弓磨耗增加、磨耗不均匀、故障率高,弓网间拉弧现象更加明显。

3 关键技术标准

3.1 空气压力舒适度指标

在参考英国、日本、德国等发达国家高速列车气压变化对人体舒适性影响的研究基础上,借鉴高速铁路对舒适度标准的研究,在广州地铁3号线和香港地铁新机场快线等车厢内压力变化测试及乘客“不适”调查的基础上统计被测人员对压力变化的感受,从而得到压力舒适度标准。在广州地铁3号线列车车厢内测试表明,气压变化最大值大于700Pa/3s时,耳膜有反应,气压变化最大值大于800Pa/3s时,耳膜反应增强,稍有不适的感觉。结合2号线同一乘客乘坐频率高的特点,2号线车辆客室内压力 $\leq 700\text{ Pa/3s}$;对于司机室,司机在其中的工作时间相对较长,经受压力波动的频次更多,选择司机室车厢内压力 $\leq 600\text{ Pa/3s}$ ^[5]。

3.2 线路设计标准

结合列车安全性、旅客舒适性和轨道专业超高设置等指标,对线路平面最小曲线半径(适用于最高行车速度)、缓和曲线长等重要参数进行了研究。本线按120km/h设计,已突破目前《地铁设计规范》的适用范围,国铁虽有相应速度等级的设计规范,但其或考虑客货混运、或考虑高低配速,在适用尺度和工况方面均与本工程有所不同。因此,根据本线特点制定切实可用的标准也是工程设计中的一大重点。

3.2.1 最小曲线半径

最小曲线半径主要与最大超高和允许欠超高有关,而最大超高与欠超高均是与舒适度有关的指标。由于120km/h地铁快线速度较高,且列车站席较多,根据国内外铁路及城市轨道交通的建设经验,为了保证快线列车运行中的乘坐舒适度,仍按《地铁设计规范》取最大允许欠超高为61mm。 $R=1\,200\text{ m}$ 半径曲线时,在保证未被平衡的横向加速度为0(乘客舒适度最佳)情况下,列车速度可满足120km/h,故定为最小半径一般情况值; $R=850\text{ m}$ 半径曲线时,在保证未被平衡的横向加速度为 0.4 m/s^2 (乘客舒适度下限值)情况下,列车速度可满足120km/h,故定为最小半径困难情况值;考虑到特别困难地段受工程投资及难度等因素影响,列车采用限速运行,结合地铁规范及小半径曲线运行偏磨现象,特别困难时半径采用450m。

3.2.2 缓和曲线长度

设置缓和曲线的目的主要是为了满足曲率过渡、超高过渡等,达到列车运行平稳、安全及旅客舒适度的要求。缓和曲线长度主要受超高顺坡率、超高时变率、未被平衡离心加速度(即欠超高)时变率3个因素的影响。速度大于100 km/h部分的缓和曲线,按照线路最大超高为150 mm、最大欠超高为61 mm计算;速度小于等于100 km/h部分的缓和曲线,按照《地铁设计规范》线路最大超高为120 mm、最大欠超高为61 mm计算。

3.2.3 竖曲线设置

两相邻坡段的坡度代数差大于或等于2‰时,应设置竖曲线连接。最小竖曲线半径 R 与竖向加速度 a 、行车速度 V 有关,影响舒适度。速度大于100 km/h条件下竖曲线半径参照地铁规范公式: $R=0.077 V^2/a$ 计算。

a 的取值为0.1~0.154 m/s²(一般情况)、0.17~0.26 m/s²(困难情况)。由此计算得到:一般情况值为列车以120 km/h速度通过竖曲线时,竖向加速度 $a=0.154$ m/s²,需要竖曲线半径为7 215 m,向上取整为8 000 m。困难情况值为列车以120 km/h速度通过竖曲线时,竖向加速度 $a=0.260$ m/s²,需要竖曲线半径为4 274 m,向上取整为5 000 m。

3.3 盾构隧道内径研究

3.3.1 高阻塞比带来的问题

从中国国铁的运行情况分析,列车以100 km/h以上速度运行时,空气动力学效应并不明显。但城市轨道交通的行车密度大,且地下线区间隧道多数为单线单洞隧道,阻塞比(列车断面与隧道断面比值)是国铁的4倍以上,在高阻塞比情况下,列车运行速度大于100 km/h时,隧道内空气动力学效应就很明显^[6]。由于车速的提高,隧道内气压变化剧烈,引起车内气压的变化,会降低乘车人员和隧道内的作业人员的舒适度;隧道活塞风加强会给隧道内的作业人员和设施带来安全问题;隧道洞口产生微气压波会对环境产生影响;隧道内行车阻力的变化引起牵引能耗的变化;牵引能耗变化使得列车在隧道内的发热量相应增加,给隧道通风带来影响。因此,盾构隧道内径选择时要考虑空气动力学带来的相关问题。

3.3.2 最高运行速度区间

根据模拟牵引计算,长度 ≥ 2 km区间,列车运行速度可以达到110~120 km/h。2号线长度在2~3 km

的区间有5个,长度在3 km以上的区间有4个(其中展览中心站—东莞虎门站区间少部分为高架)。对于长度大于3 km的区间,信号推荐最高运行速度为110 km/h,实际运行速度为110~120 km/h;长度小于3 km的区间(共10个)最高运行速度为100 km/h,实际运行速度为100~110 km/h。

3.3.3 舒适度指标满足性问题

数据仿真计算结果表明^[7],在不考虑车辆气密性指标时,长大区间隧道(长度 ≥ 3 km)有中间风井,区间盾构隧道内径采用6.0 m,在出洞口等断面变化处增设喇叭口,其面积为隧道面积的1.5倍,长度为20 m时,车内压力变化能够满足舒适度指标为766 Pa/3s。在车辆为流线型车头、车辆气密性指标为3~5 s时,能满足舒适度要求。

3.3.4 牵引能耗分析

在内径5.4 m盾构洞径条件下,列车速度由100 km/h提高到120 km/h,牵引能耗增加7%;隧道内径由5.4 m扩大到6.0 m,牵引运行能耗降低了2%~4%,当隧道内径进一步扩大到6.2 m时,牵引运行能耗基本与内径6.0 m相同。速度为120 km/h、内径为6 m条件下的牵引能耗,仅比速度为100 km/h、内径为5.4 m条件下的能耗高3.27%。

3.3.5 小结

通过对舒适度、牵引能耗分析,对于长度 ≥ 3 km的长大区间隧道,为满足隧道通风及舒适度的要求,盾构隧道内径采用6.0 m,对于长度 ≤ 3 km的长大区间隧道采用普通断面(内径5.4 m);对于内径6.0 m盾构的管片厚度和分块进行了研究计算,综合考虑管片结构受力以及经济配筋等因素,厚度为350 mm,管片分块方式采用目前国内常用的“1+2+3”模式,管片间采用螺栓连接,螺栓型号为M27,采用8.8级钢。

3.4 土建结构

列车较长时间在区间隧道内以100 km/h以上速度快速运行时,在突入隧道洞口、经过中间风井等断面突变处时,将诱发隧道内空气压力变化,也导致车厢内空气压力变化,压力波动将会给司乘人员带来不适的感觉,降低乘车舒适度。根据仿真计算^[7],在速度小于100 km/h的地下区间的洞口位置可不作特殊处理,在列车速度超过100 km/h的地下区间隧道需设置缓冲段,缓冲段长度不小于一节车厢的长度(20 m),缓冲段扩大断面为隧道断面的1.55倍,且在缓冲段顶板和侧壁开设总面积不小于隧道断面30%的孔洞。

列车在 2 号线展览中心站至虎门火车站区间地下隧道最高运行速度超过 100 km/h, 在该区间由地下转为高架的洞口位置设置缓冲结构。考虑到区间隧道及配电所位置的限制, 将缓冲结构设置在明挖 U 形槽段, 缓冲段长 30 m, 在 U 形槽结构上设置顶板和中隔墙, 隧道洞口板高 4.5 m, 缓冲段出口板高 7.5 m, 顶板、中隔墙内开孔, 开孔率达到 36%。

3.5 车辆

3.5.1 采用流线型车头

为缓解空气动力学带来的问题, 列车车头采用流线型。经过仿真计算^[7], 当列车最高运行速度为[100 km/h, 110 km/h]时, 车头流线型长度不应小于 1.0 m; 当最高运行速度为[110 km/h, 120 km/h]时, 车头流线型长度不应小于 1.5 m。

2 号线采用最高运行速度为 120 km/h 的 B 型车。根据计算, 列车头部由最小断面至最大断面的长度约 2.5 m 左右即可获得较好的减阻及控制隧道内压力变化的效果。因此, 2 号线车体基本长度分别为 19 000 mm(中间车)及 20 500 mm(端车), 端车比中间车加长 1 500 mm; 车钩连接中心点距离分别为 19 920 mm(中间车)及 21 260 mm(端车), 端车的车钩连接中心点距离比中间车加长 1 340 mm, $\Delta L=900$ mm。

3.5.2 车辆密闭性技术标准

在隧道内径为 6 m 的条件下, 为满足司乘人员舒适度要求, 整车气密性指标定为 3~5 s, 车辆采用 3 车门, 每个客室每侧设 3 个电动塞拉门, 车门开度不小于 1 400 mm, 车体材料采用铝合金, 车体按空气压力密封结构设计, 列车贯通道增强密闭性, 空调系统的新风口和排风口应设置压力波保护装置, 直通车下的管路和电缆孔应采取必要的密封措施。

3.5.3 受电弓

相关研究表明, 列车运行速度高于 100 km/h 后, 弓网关系变得较为复杂, 对受电弓静态指标和动态指标的要求均较高。2 号线接触网采用刚性悬挂, 根据国外经验, 对刚性悬挂的受电弓应选择大于运行速度一到两个等级, 如 160 km/h 运行速度应选取 250 km/h 的受电弓, 以减轻弓头质量和弓网冲击, 同时采用气囊减振措施。结合本线线路特性及速度条件, 采用 2 架 160 km/h 时速的受电弓, 刚性悬挂部分通过采用线夹、合理布置跨距等方式达到改善弓网关系的目的, 受电弓采用质量轻、防震性能好、追随性好和集电稳定性好的气囊式受电弓, 保证高速运行状态下弓网良

好的匹配性, 有效减少受电弓拉弧、打火的情况, 降低故障率, 减少磨耗。

3.5.4 空调设备

车辆空调设备的主要功能除调温和向客室提供新鲜空气外, 空调系统的新风口和排风口设置压力波保护装置, 在确保车内新鲜风量的情况下, 可根据车内外压力变化情况自动实现风口的开闭。考虑到司机室空气压力变化最大, 为改善司机的舒适性, 司机室设置独立空调。

3.6 区间设备与设施

上下行区间隧道之间有联络通道及防火门等设施, 列车在区间隧道内运行时, 与对面区间隧道在相通的孔道或门的位置产生压差, 如果上下行区间隧道内列车在这些位置交会时, 其压差会更大。2 号线在设计阶段, 区间设备与设施安装已考虑了列车运行引起的空气压力和风压的影响, 并采取有效措施防止区间设备、设施和零部件掉落危及行车安全; 位于区间上下行隧道之间的分隔结构考虑上下行列车长期运行产生的最不利空气压力作用下的结构安全及抗疲劳强度。2 号线运营隧道内径 6 m 盾构隧道监测结果表明, 最大正压为 818 Pa, 最大负压 1 039 Pa, 最大压差为 1 857 Pa。

4 结语

东莞市轨道交通 2 号线首期段于 2016 年 5 月 27 日以 ATO 模式、最高行车速度 120 km/h 开通试运营, 已安全运营 1 000 d 以上, 司乘人员在舒适度方面感觉良好, 设备故障和能耗较小。

2 号线在舒适度、线路、车辆、隧道以及区间设备设施等关键技术标准研究成果在项目实施中得到了落实, 有效地解决了地铁列车高速运行带来的诸如舒适度、运行能耗、隧道通风、区间隧道设备设施承压高等一系列问题。随着城市的发展, 运行速度超过 100 km/h 的地铁快线越来越多, 2 号线关键技术标准研究及建设运营给东莞后续地铁快线及其他城市地铁快线设计、建设提供了有力的支撑及帮助。

参考文献

- [1] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

(下转第 60 页)