

城市轨道交通线路长大陡坡设计的探讨

王春森

(广州地铁设计研究院有限公司, 广州 510010)

摘要: 为了探讨城市轨道交通长大陡坡在连续提升超过16 m的情况下,车辆的制动及电机温升的可行性,通过对城市轨道交通长大陡坡的含义、特点及需要解决的相关问题进行论述,并结合仿真模拟和工程测试等方法,论证了轨道交通长大陡坡在一定的范围内制动影响和电机温升是安全的,并通过深圳4号线试验来验证设计,最终证明了长大陡坡的设计所采用的措施是有效的、科学的。

关键词: 轨道交通线路;长大陡坡;仿真模拟;工程测试;制动

DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.02.011

中图分类号: U 231

文献标志码: A

文章编号: 1672-741X(2012)02-0184-04

Discussion on Design of Long Steep Slope Section of Urban Rail Transit Lines

WANG Chunsen

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: The signification and characteristics of long steep slope section of rail transit lines, as well as the problems to be solved regarding the long steep slope section, are discussed. Simulation and engineering test made shows that the vehicle brake influence and the electrical motor heating occurring within a certain range of long steep slope section of rail transit lines are safe. The design is verified in the design of No. 4 line of Shenzhen Metro, which demonstrates that the measures taken for the long steep slope section are effective and rational.

Key words: urban rail transit line; long steep slope section; simulation; engineering test; brake

0 引言

随着城市的不断发展以及“退二进三”的策略,大多城市实施了新的发展战略,对调整、优化、提升城区建设提出了新的要求。基于此,城市轨道交通建设也逐渐突破城市中心区,向城市外围区、城市拓展区、卫星城或新城延伸。在一些地势变化大的城市,如重庆地铁1号线、深圳地铁4号线、南宁地铁2号线和长沙地铁4号线等,面临由于本身城市形态带来的特殊地形,地铁线路和常规市区内的不同,在线路设计时都遇到了长大陡坡问题。文献[1]通过对工程中长大陡坡的设计实例及深圳4号线的测试和验证,提出了列车在正常运营情况下,只要列车的性能满足长大坡度的要求即可;文献[2]以清连一级公路升级改造工程为例,对解决长大陡坡路段存在的有关问题进行了探讨;文献[3]结合包家山特长隧道3号长大陡坡有轨斜井快速施工正洞的工程实践,着重介绍长大有轨斜井隧道的现场施工组织;文献[4]结合乌鞘岭特长隧道4号长大陡坡有轨斜井快速施工左线平导的工程实践,介绍适合长大有轨斜井施工的斜井提升、运输设备配

套技术及平导快速掘进技术;文献[5]介绍旅客列车在长大下坡道上平稳操纵方法,给出具体实例和相关数据,测试结果证明该方法可使旅客列车在长大下坡道上安全、平稳地运行;文献[6]介绍了太原西山特长隧道1号长大陡坡斜井施工的设备选型及其轨道布设。而上述研究未涉及长大陡坡设计车辆的制动及电机温升的相关问题,本文就此展开探讨。

1 概述

根据建标104—2008《城市轨道交通工程项目建设标准》,“线路长大坡度地段”是指列车运行在连续上坡时,可能导致列车不能正常牵引运行而造成运行速度下降至过低,或在故障条件下发生列车停车再启动的困难。在该坡道下坡运行时,可能需要控制速度运行,以免制动力不足而失控,为此应检查列车下坡时是否具有充分的制动力,其电阻制动力与空气制动力之和应大于下滑力,此外还要考虑电机温升的安全问题。上述问题随车辆性能和环境条件的差异而不同,尤其应注意在高架线路或受气候条件影响时,轮轨粘着条件有较大差异。对于“线路长大陡坡地段”在城

收稿日期:2012-02-16;修回日期:2012-03-10

作者简介:王春森(1980—),男,四川达县人,2003年毕业于西南交通大学土木工程专业,本科,工程师,主要从事城市轨道交通线路规划、设计与研究工作。

市轨道交通的有关规范和标准中没有确切的定义和规定,选线设计人员难以定性判断,为此根据近年来各城市有关人士的研究,初步提出表1作为一般条件下长大坡道的控制值。当线路设计参数大于表1规定值时,需作安全验算。

表1 正线线路长大陡坡规定值

Table 1 Values specified for long steep slope section of main line

车 辆	线路坡度/%	连续提升高度/m
钢轮/钢轨	30	16
系统车辆	50	20
跨座式单轨车辆	50	24

2 研究意义

修建地铁工程的目的是为安全、快速、大批量地运送旅客,实现这一目标要通过列车的快速、高效、安全的运行来完成,地铁建设应该首先保证地铁列车安全有效地运行。在地铁建设中,各种设施的设计应无条件保证列车正常运行,并最终受到列车运行的检验。由此可以看出,要想达到地铁工程总系统的优化设计和地铁各子系统相互呼应,其协调配合的关键是列车运行。因此,在设计过程中,应将地铁列车的运行融入到各子系统的设计中去,使各子系统的设计得到优化控制和协调配合。本文着重就线路长大坡度设计与列车运行的制动影响以及制动对踏面升温的影响等方面进行分析,运用仿真模拟方法论述长大陡坡线路设计可行性,为轨道交通线路的合理设计提出可行性建议。

3 制动影响分析

陡坡对制动的影 响主要表现在制动距离延长和制动能量增加 2 个方面。从制动距离方面来说,在下坡时制动距离将延长。通常,B 型车紧急制动平均减速度设计为 1.2 m/s,最大常用制动平均减速度为 1.0 m/s;初速为 80 km/h 时,平直道紧急制动距离为 206 m,初速 80 km/h,30‰的下坡道,紧急制动距离约为 277 m。从制动能量角度来说,国内地铁一般采用平直道连续三次紧急制动校核热负荷能力。下坡道制动能量包括列车动能和列车势能,以最大轴质量 16 t 计算,单轴一次紧急制动动能约为 4 MJ,势能约为 1.3 MJ,坡道附加产生的势能仅为动能的 1/3。具体到 30‰的坡道,连续提升 16 m,意味着坡道长度约为 533 m,针对该坡道,即便是进入坡道立即紧急停车,然后加速到 80 km/h(在 30‰下坡道从 0 开始加速到 80 km/h,加速距离也不低于 200 m),仅可能产生一次在坡道上的紧急制动,即便按连续两次紧急制动,也不会比平直道连续三次紧急制动情况恶劣。因此,单一的 30‰的坡道,连续提升 16 m,可以解决紧急制动问题。

在正常情况下,常用制动优先采用电制动,以西门子为代表的欧系牵引系统及南车时代公司牵引系统电制动能力很强,常用制动时空气制动几乎不参与,不存在摩擦制动热量累积问题,线路条件几乎对摩擦制动没有影响。电制动失效时,根据经验,国内 B 型地铁,采用踏面制动,纯空气制动一般能以 55 ~ 65 km/h 速度运营一个往返;而采用盘式制动,纯空气制动一般能以 90 km/h 运营一个往返。纯空气制动的热负荷能力与线路条件密切相关(如线路坡道、站间距、停站间隔等),需针对线路条件做专门的热负荷仿真计算。

对于救援工况,首先应考虑的是制动距离。从能量的角度分析,制动初速的影响要远大于坡度的影响,救援工况制动能量可以达到。一列空载列车救援一列重载列车,在 30‰的坡道上为保证制动距离,一般限速设为 25 km/h,如果坡道提高,救援限速还要降低;如果正线坡道超过 40‰时,救援时制动力将趋于与下滑力平衡,一列空载列车将可能无法救援一列重载列车。

4 仿真模拟分析

针对地铁制动踏面温度的升高,以地铁 A 型车辆 30‰坡道纯空气带闸运行踏面温度仿真模拟计算。图 1,2,3 分别为踏面初始温度 40,150,200 ℃时列车进行坡道制动时的踏面温度变化曲线。

1) 仿真条件。车轮轮径 840 mm;列车轴质量按广州地铁 1 号线车辆动车 AW3 载荷轴重计算;列车带闸运行速度 80 km/h;列车采用纯空气制动;环境温度 40 ℃;坡道参数为 30‰;制动过程中车轮踏面允许的极限温度为 400 ℃,但实际运行中不建议超过 350 ℃。

2) 踏面初始温度 40 ℃。在图 1 中,列车在坡道持续制动 450 s 后车轮温度达到 350 ℃,但实际运行过程中由于列车需要频繁制动,车轮踏面温度远高于 40 ℃;因此不建议按此作为坡道设计的依据。

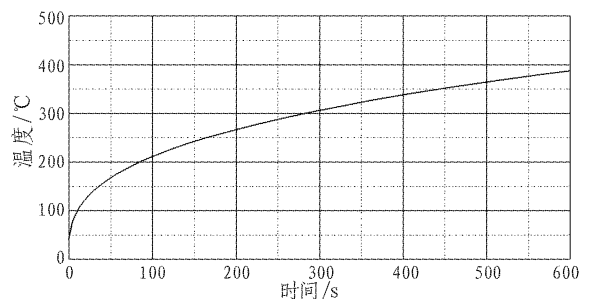


图1 踏面初始温度 40 ℃坡道制动踏面温度变化曲线

Fig. 1 Variation of brake tread temperature in slope braking when original temporary of brake tread is 40 ℃

3) 踏面初始温度 150 ℃。图 2 曲线显示的是踏面初始温度为 150 ℃时列车进入坡道制动阶段,在坡道持续制动 200 s 时踏面温度达到 350 ℃,370 s 时达到

400 ℃。

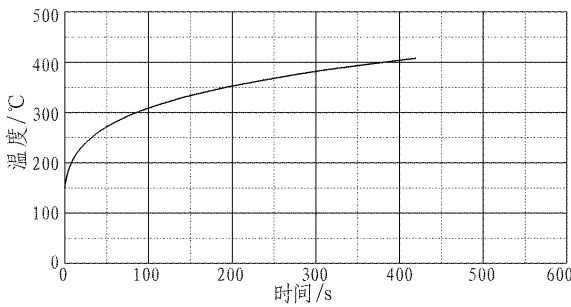


图 2 踏面初始温度 150 ℃ 坡道制动踏面温度变化曲线

Fig. 2 Variation of brake tread temperature in slope braking when original temporary of brake tread is 150 ℃

4) 踏面初始温度 200 ℃。图 3 曲线显示的是踏面初始温度为 200 ℃ 时列车进入坡道制动阶段,在坡道持续制动 100 s 时踏面温度达到 350 ℃,235 s 时达到 400 ℃。

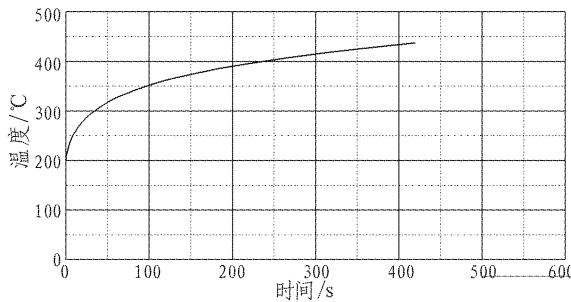


图 3 踏面初始温度 200 ℃ 坡道制动踏面温度变化曲线

Fig. 3 Variation of brake tread temperature in slope braking when original temporary of brake tread is 200 ℃

5) 模拟演算结论。通过仿真模拟分析,初始温度为 150 ℃ 时,其持续制动时间为 200 s,踏面温度达到 350 ℃。按照地铁 80 km/h 速度,30‰ 坡道纯空气带闸运行踏面温度仿真模拟,并通过行车牵引计算,站间距可达到 3.5 km,连续抬升约 100 m。当初始温度为 200 ℃ 时,其持续制动时间为 100 s,踏面温度达到 350 ℃。按照地铁 80 km/h 速度,30‰ 坡道纯空气带闸运行踏面温度仿真模拟,并通过行车牵引计算,站间可达到 1.3 km,连续抬升约 39 m。对于城市轨道交通站间距一般为 1.2 ~ 2.0 km,从模拟分析均能满足要求;但对于郊区及外延伸线路存在长大站间距线路,站间距多为 2.0 ~ 3.5 km,有条件对其连续长大坡度进行优化设计,并在其陡坡区间增设缓坡条件来避开连续带闸运行的情况。

5 设计案例

1) 长沙地铁 4 号线。长沙地铁 4 号线一期工程中阜埠河路站—南湖新城站—赤黄路站三站两区间,站间距分别为 2.2 km 和 1.9 km。阜埠河路站—南湖新城站区间下穿湘江且避让南湖新城过江隧道,南湖新

城站埋深达 28 m;南湖新城站—赤黄路站区间受本身地势高差影响,两站轨面高差约 37 m。轨面标高须由 11.6 m 抬升到 48.4 m,其纵断面见图 4。

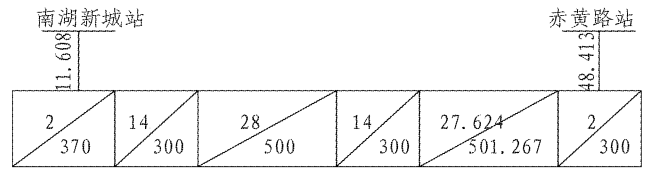


图 4 南湖新城至赤黄路纵断面图

Fig. 4 Longitudinal profile of Nanhuxincheng-Chihuanglu section

通过多方案比选,该区间采取了如下方法来解决长大陡坡的问题:①合理确定两端车站的埋深,有利于坡度的改善。南湖新城站在满足过湘江的情况下尽量抬高轨面标高,这是由于赤黄路站受电缆管线控制轨面标高不能压低。②在 2 个大坡度之间增加了长 300 m 的 14‰ 缓坡,这样可以降低持续带闸制动使踏面温度升高,起到缓解过度的作用。③对于站端上坡设置了长 300 m 的 14‰ 缓坡再接 28‰ 大坡度,使车站出站后在最短时间内达到最大速度,降低长时间牵引电机的过热。

2) 深圳地铁 4 号线。深圳地铁 4 号线二期工程中康站至梅林检查站,站间距约 2.9 km,中间隧道穿越大脑壳山,该山海拔 385.4 m,两站的轨面标高只差约 77 m。其中,大脑壳山南端到梅林检查站,轨面标高须由 39 m 抬高至 90 m。在设计中通过多方案比选,该区间采取了相关措施解决了长大坡度的问题,经过 4 号线开通至今的运营情况看,证明了长大陡坡的设计所采取的一些措施是有效的、科学的。

6 结论与讨论

随着城市轨道交通建设从城市中心区转向外围区,长大陡坡地铁案例逐渐增多。本文通过列车制动影响分析、热负荷仿真模拟计算和工程案例测试,验证了长大陡坡设计在采取一些措施和优化设计后列车连续带闸制动的有效性和科学性。在我国,长大陡坡案例还处在研究和设计讨论阶段,是一门比较新的课题,还需要作专题深入研究和工程案例实践证明(如长大陡坡的耦合激励、长大陡坡度的定量定义、长大陡坡的危害、长大陡坡的预案、长大陡坡的平稳操纵方法等)。

参考文献 (References):

- [1] 张学军. 地铁长大坡道设计相关问题的探讨[J]. 都市快轨交通, 2005(5): 63-65. (ZHANG Xuejun. A discussion on the long steep grade design in Metro and its problems [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2005(5): 63-65. (in Chinese))

- [2] 杨海,林宣财,吴善根,等. 长大陡坡路段改造工程总体方案研究[J]. 公路,2008(7):35-37.
- [3] 马智品. 长大陡坡有轨斜井辅助正洞施工组织[J]. 公路隧道,2009(4):38-42.
- [4] 王占龙,李庚许,陈梅初. 长大陡坡斜井快速施工平导的设备配套技术[J]. 铁道标准设计,2005(6):95-98.
- [5] 张梦华. 对旅客列车在长大下坡道上平稳操纵方法的探讨[J]. 机车电传,2002(3):59-61.
- [6] 姜杰. 特长公路隧道大坡度斜井提升施工技术[J]. 公路交通科技:应用技术版,2010(6):209-211.

(上接第179页)

- [9] 李怀国. BP神经网络与模糊控制在隧道施工中的预测与应用[J]. 建筑工程,2008,5(20):77-81. (LI Huaiguo. Prediction and application of BP neural network and fuzzy control in the construction of tunnel[J]. Architectural Engineering, 2008,5(20):77-81. (in Chinese))
- [10] 林敏. 基于人工神经网络的隧道监测数据预测模型仿真研究[D]. 西安:长安大学机械设计及理论专业,2010. (LIN Min. The study of model prediction for highway simulation of data monitoring tunnel based on neural network [D]. Xi'an: Machinery Design and Theory, Chang'an University, 2010. (in Chinese))
- [11] 杨茜. BP神经网络预测方法的改进及其在隧道长期沉降预测中的应用[J]. 北京工业大学学报,2011,37(1):92-97. (YANG Qian. Improvement and application of BP neural network prediction method in long-term tunnel settlement prediction[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011,37(1):92-97. (in Chinese))

(上接第183页)

- [7] 陈洪,李国富. 膨润土防水材料的防水机理及基本性能指标的测定[J]. 徐州工程学院学报:自然科学版,2009,24(2):38-39. (CHEN Hong, LI Guofu. Waterproof mechanism of bentonite-based waterproof material and measurement method of the basic performance index[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Sciences Edition, 2009,24(2):38-39. (in Chinese))
- [8] 周正兵,王钊,王俊奇. GCL——一种新型复合土工材料的特性及应用综述[J]. 长江科学院院报,2002,19(1):35-38. (ZHOU Zhengbing, WANG Zhao, WANG Junqi. An overview about properties and application of a new geocomposite——GCL[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002,19(1):35-38. (in Chinese))
- [9] 李宪,束一鸣,武良今,等. 新型防渗材料 GCL 的一些特性试验[C]//全国第六届土工合成材料学术会议论文集. 北京:中国土工合成材料工程协会,2004:416-422. (LI Xian, SHU Yiming, WU Liangjin, et al. Some performance tests of the new waterproof material GCL[C]//National Sixth Geotextile Academic Conference Proceeding. Beijing: CTAG, 2004:416-422. (in Chinese))
- [10] 陈彤,黄琦. 新型防水材料——膨润土防水毯[J]. 江西建材,2005(3):23-25. (CHEN Tong, HUANG Qi. A new waterproof material——GCL[J]. Jiangxi Building Materials, 2005(3):23-25. (in Chinese))