

刚性供电网条件下 120 km/h 地铁 受电弓弓网动态匹配问题

李 军, 汪 波, 郑 玄, 陈明国

(南车株洲电力机车有限公司 电气设备分公司, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 李 军 (1979—), 男, 工程师, 现从事轨道车辆受流产品的研发工作。

摘 要: 针对广州地铁3号线北延项目出现的受电弓燃弧问题, 对多个项目的受电弓应用进行对比分析, 找到出现燃弧的可能原因, 并通过弓网仿真计算, 提出受电弓的改进措施及建议, 以保证刚性接触网条件下120 km/h地铁受电弓弓网动态受流稳定性。

关键词: 广州地铁3号线; 刚性悬挂供电网; 弹簧式受电弓; 气囊式受电弓; 燃弧; 动态匹配

中图分类号: U231; U264.3⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2014)01-0080-04

Pantograph and Catenary Dynamic Matching for 120 km/h Metro Pantograph under Stiff Catenary Condition

LI Jun, WANG Bo, ZHENG Xuan, CHEN Ming-guo

(Electrical Equipment Branch Company, CSR Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Aim to the pantograph arcing problem in Guangzhou metro line 3 northern-extension project, pantograph application in several projects was compared and discussed to find the potential causes of arcing; then, with pantograph and catenary simulation, improving measures and suggestions for pantograph were presented to ensure 120 km/h metro pantograph dynamic current-collection stable under stiff catenary condition.

Keywords: Guangzhou metro line 3; stiff catenary; spring-type pantograph; pneumatic pantograph; arcing; dynamic matching

1 问题的由来

广州地铁3号线分为广州3号线项目、广州3号线北延项目及广州3号线增购项目三期工程, 是国内第1条最高运行速度120 km/h、采用刚性悬挂供电网的地铁线路。该线路目前有3种运营车型, 分别使用了3种型号的受电弓, 车辆上线运行过程中, 其中的广州3号线北延项目受电弓出现了较严重的燃弧问题, 具体车辆与受电弓配置及弓网动态配合情况见表1。

2 原因分析

为更好地解决广州3号线北沿项目的燃弧问题, 南车株洲电力机车有限公司联合广州地铁公司、国内知名院校针对此情况展开了专题调查研究, 并且经过长期的跟踪、试验, 分析认为导致上述各项目受电弓弓网配合差异较大的主要原因有主电路配置差异、电流差异和受电弓类型差异3方面。

表1 受电弓配置及弓网动态配合

项目 / 编组	受电弓配置	受电弓生产厂家、型号	运营情况
广州3号线 /3节编组	2架受电弓	南车株洲电力机车有限公司 TSG14弹簧弓 2条60 mm宽碳滑板	无明显燃弧现象
广州3号线 北延 /6节编组	2架受电弓	Schunk (牵引供应商采购) SBF920弹簧弓 4条60 mm宽碳滑板	有明显连续燃弧现象
广州3号线 增购 /6节编组	2架受电弓	南车株洲电力机车有限公司 TSG18F气囊弓 2条60 mm宽碳滑板	无明显燃弧现象

2.1 主电路配置差异

广州地铁3号线车辆采用3节编组, 车顶主电路直接连接在一起, 在运营时2架受电弓同时升起为主电路供电(如图1所示), 即使运营中出现1架受电弓离线, 另

一架也能继续为整个主电路供电, 并保证离线受电弓电位与供电网线一致, 能够有效避免燃弧问题。

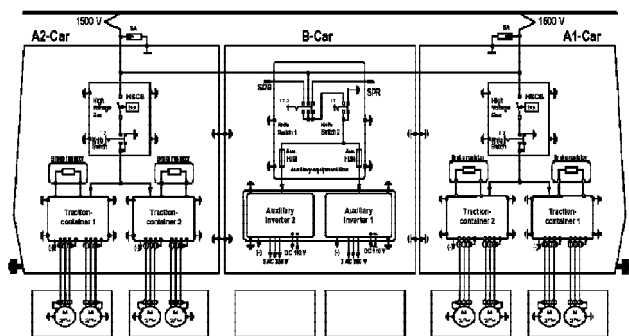


图1 广州地铁3号线车辆主电路图

广州地铁3号线北延及广州地铁3号线增购车辆为6节编组、2个单元, 每个单元主电路是相互独立的(如图2所示), 只有1个受电弓, 一旦受电弓运行过程中出现冲击振动容易导致离网, 弓网之间瞬间产生电势差, 击穿空气产生燃弧现象。

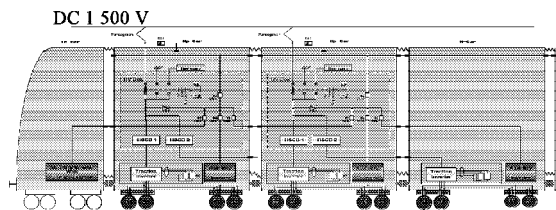


图2 广州地铁3号线北延车辆主电路

2.2 电流的差异

广州地铁3号线车辆3节编组, 每架弓仅分担3节车总电流的一半电流, 而目前广州地铁3号线北延项目车辆6节编组, 每架弓分担3节车总电流, 2种车受电弓承受的电流大小差一倍, 在其他条件一定的情况下, 电流大更易产生燃弧现象。

2.3 受电弓类型的差异

广州3号线3节编组车辆, 采用南车株洲电力机车有限公司的TSG14型弹簧式受电弓; 广州地铁3号线北沿项目6节编组车辆采用Schunk公司的SBF920型弹簧式受电弓; 广州地铁3号线增购项目采用南车株洲电力机车有限公司的TSG18系列气囊式受电弓。

气囊式受电弓具有更好的弓网动态跟随性, 能够更好地满足大电流、刚性悬挂供电网条件下的弓网动态稳定性要求, 保证了广州地铁3号线增购项目受电弓运行过程中的稳定受流, 避免了燃弧问题的产生。

3 解决措施

在车辆编组已定型的条件下, 为更好地提高弓网动态跟随性, 只能是改进受电弓的相关性能参数以提高弓网配合的稳定性。

3.1 弓网动态仿真计算分析

气囊式受电弓由于采用气动升弓装置, 具有更好的弓网动态跟随性, 是受电弓的发展趋势。以下将针对气囊式受电弓的相关性能参数, 进行受电弓及刚性

供电网线的建模分析, 如图3所示。弓网动力学仿真分析输出结果显示, 刚性网供电条件下, 弓网间的动态集电稳定性主要与受电弓弓头悬挂刚度、弓头质量及网线的跨距等因素有关。

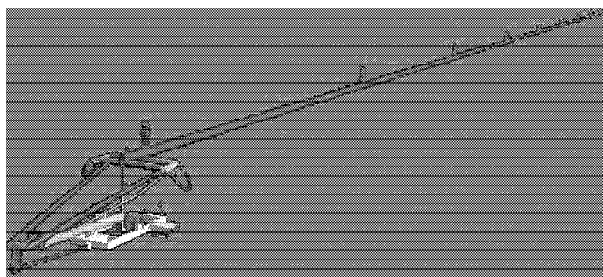


图3 受电弓弓网动态仿真模型

3.1.1 弓头悬挂刚度 K 仿真

受电弓运行过程中, 弓网之间有一定的冲击振动, 受电弓弓头悬挂主要是吸收弓网之间的高频冲击振动。弓头悬挂刚度的大小与刚性悬挂网线的匹配性影响着弓网之间的受流稳定性。弓头悬挂刚度仿真趋势图如图4所示。

图4中当弓头刚度 K 值逐渐增大时曲线显示弓网接触压力波动范围。

刚度 K_1 : 压力平均值120 N, 最大值264 N, 最小值-2.94 N, 波动范围266.94 N;

刚度 K_2 : 压力平均值120 N, 最大值254.6 N, 最小值-2.48 N, 波动范围257.12 N;

刚度 K_3 : 压力平均值120 N, 最大值229.8 N, 最小值8.7 N, 波动范围221.1 N;

刚度 K_4 : 压力平均值为120 N, 最大值223.73 N, 最小值19.74 N, 波动范围203.99 N;

刚度 K_5 : 压力平均值为120 N, 最大值183.73 N, 最小值72.74 N, 波动范围110.99 N;

分析上述数据显示, 在一定范围内, 弓

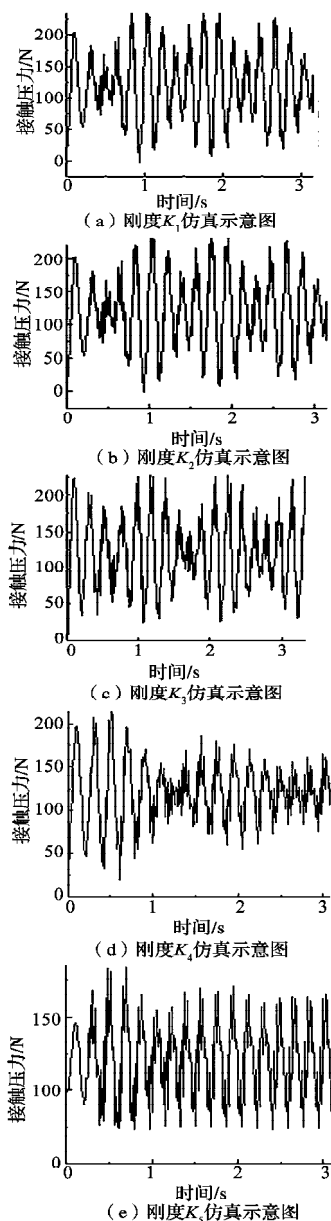


图4 弓头悬挂刚度仿真趋势图

头悬挂刚度越大,受电弓弓头运行中的振动幅度范围越小,弓网接触压力的变化范围也越小。

3.1.2 弓头质量仿真

受电弓的设计原则是尽量降低运行时靠近网线的受电弓部件质量,运行时弓头直接与网线接触受流,弓头质量越小越有利于弓网受流稳定。弓头质量仿真趋势图如图5所示。

质量 m_1 : 压力平均值120 N,最大值199.39 N,最小值54.28 N,波动范围145.11 N;

质量 m_2 : 压力平均值120 N,最大值215.43 N,最小值44.15 N,波动范围171.28 N;

质量 m_3 : 压力平均值120 N,最大值224.11 N,最小值6.54 N,波动范围217.57 N。

图5仿真结果显示弓头质量小,受电弓运行过程中,动态接触压力的波动范围小,更有利于弓网之间的弓网动态跟随性。

3.1.3 网线跨度仿真

刚性悬挂供电网线的平整程度是受电弓稳定受流的基本条件之一。要保证受电弓的稳定受流,要求与受电弓接触的供电网线滑动面平滑顺直,网线连续不平滑程度变化应尽量小。供电网线的连续不平滑程度由悬挂刚体的挠度和刚度来决定,在汇流排定型的情况下,悬挂跨距增大导致供电网线挠度的增加,对受电弓的稳定受流不利。因此,为了提高列车的运营速度,必须减小刚性悬挂的挠度。图6为不考虑隧道施工误差和汇流排变形情况下,不同跨距对刚性悬挂连续梁跨

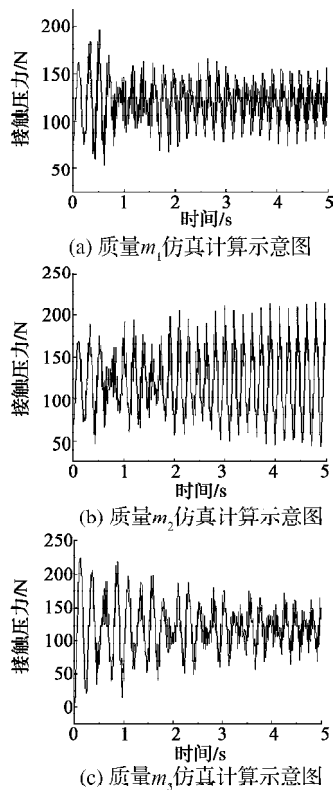


图5 弓头质量仿真趋势图

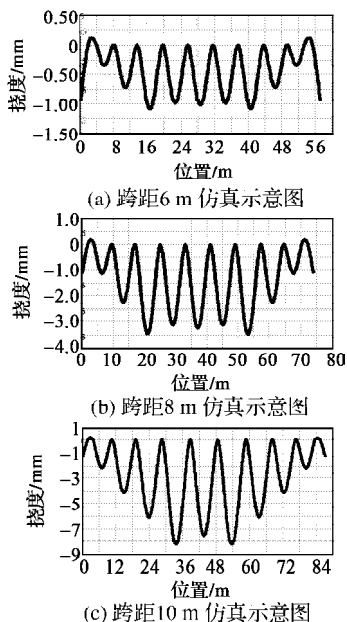


图6 不同跨距下刚性接触网的挠度变化曲线

内挠度变化曲线。

从图6对比可看出,在行车速度和受电弓参数一定的情况下,跨距减小刚性悬挂网线的挠度也小,8 m跨距时仅为3.5 mm,当跨距增加到10 m时,其挠度相应增大至8 mm以上,其不平滑程度将发生较大变化。虽然从表面上看6 m跨距下扰度较小只有1.1 mm,但如果考虑到刚性悬挂施工精度的要求和工程结构、线路等因素的变化,6 m跨距并不是最佳选择,更何况6 m跨距下的网线固有频率过高,容易与受电弓固有频率重叠导致共振离线发生。8 m跨距情况下悬挂刚体的连续平滑度要明显好于10 m跨距,网线固有频率较低,可以有效避开受电弓固有频率,是一个较佳的选择。

网线跨距仿真示意图如图7所示。图7中,受电弓弓头刚度 K 值一定,网线悬挂跨距分别为6 m、8 m和10 m。

跨距 $L=6$ m: 压力平均值120 N,最大值224.02 N,最小值16.43 N,波动范围207.59 N;

跨距 $L=8$ m: 压力平均值120 N,最大值207.55 N,最小值17.94 N,波动范围为189.61 N;

跨距 $L=10$ m: 压力平均值120 N,最大值为241.61 N,最小值-0.51 N,波动范围为242.12 N。

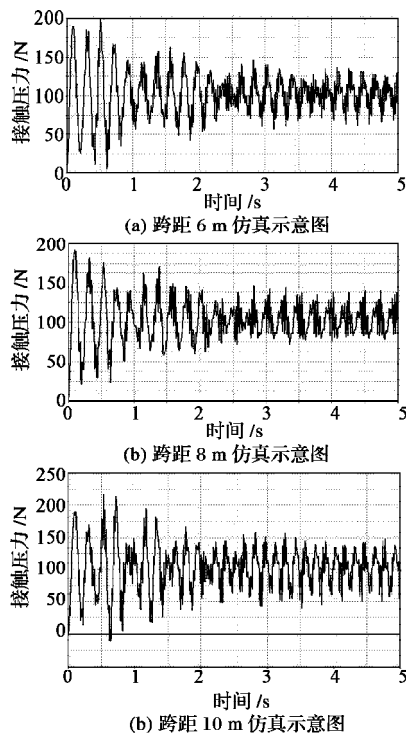


图7 网线跨距仿真示意图

图7仿真结果显示,在刚度一定的情况下,跨距为8 m的网线更有利于动态运行时的弓网跟随性。此外,从工程经济的角度考虑,在刚性悬挂设计时,也推荐采用8 m的跨距,可减少悬挂点数量和降低施工成本。

3.2 弓网振动频率匹配

为更好保证运行过程中的弓网动态跟随性,受电弓选型过程中,需避免受电弓固有频率与网线固有频率重合(或接近),从而避免产生共振。

经查相关资料及计算公式后可知:供电网线最高固有频率约为5.5 Hz。在列车加速过程中(速度0~120 km/h),网线的固有频率在0~5.5 Hz之间变化。

广州地铁3号线受电弓的固有频率为5.2 Hz,广州地铁3号线北延伸线受电弓的固有频率约为3.6 Hz。网线固有频率是0~5.5 Hz,与广州地铁3号线北延伸线受电弓频率重叠,与老广州地铁3号线受电弓频率在110 km/h以

上速度时也较接近。但老广州地铁3号线是3节双弓, 弓间距是27 m不是6 m的倍数, 双弓出现同时离线的概率极小, 所以实际运营几乎没有燃弧; 而广州地铁3号线北延线弓间距接近48 m是6 m的倍数, 双弓恰好可能同时离线, 尤其是在速度70~90 km/h加速大电流区段, 对应的网线固有频率(3.3~4.2 Hz)恰好与受电弓固有频率3.6 Hz重叠, 弓网之间可能产生共振离线, 因此广州地铁3号线北延线燃弧严重。

网线的固有频率随着速度的增加而逐渐上升, 受电弓的固有频率只跟本身的特性刚度有关, 只要错开弓和网的固有频率, 就能有效地抑制共振。广州地铁3号线北延受电弓出现严重燃弧问题的原因之一可能是由于弓网固有频率重叠导致共振离线。广州地铁3号线增购项目中, 针对上述问题, 广州地铁和南车株洲电力机车有限公司展开了联合攻关, 从网线固有频率的调整和受电弓固有频率的优化上着手, 已成功解决了棘手的弓网燃弧问题。

3.3 受电弓其他杆件质量影响

受电弓相关研究资料表明, 为更好地提高受电弓弓网动态跟随性, 应尽量减小受电弓运动杆件的质量, 特别是受电弓使用时与供电网线最接近的杆件, 如上

框架, 质量越小, 越能够更好地提高受电弓弓网动态稳定性。

4 结语

①综合考虑, 对于刚性接触网而言, 采用8 m的跨距可能比较合适。此时, 列车运行时的网线固有频率最大只有4.1 Hz, 避免了与受电弓固有频率重叠引起共振。

②采用较小弓头质量、较高的弓头悬挂刚度气囊式受电弓, 提高受电弓的固有频率, 有效地避开了网线的固有频率, 提高了受电弓弓网动态稳定性。

③气囊式受电弓由于采用气动升弓装置, 相较于弹簧式受电弓具有更加稳定的弓网动态跟随性, 建议在刚性悬挂供电网线及车辆运行速度大于80 km/h的地铁项目中, 采用单臂轻型气囊式受电弓。

参考文献:

- [1] 安孝廉. 受电器[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [2] 刘惟信. 机械最优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 238~242.
- [3] 马良骥. 受电弓机构综合及优化设计[D]. 成都: 西南交通大学, 1988.

(上接第79页)

作为工程产品, 特别是应用于公共基础设施的产品, 必须做到安全可靠、技术成熟。就目前的技术发展水平而言, 超导储能并不可行。

城市轨道交通站点之间的距离一般很短, 为1 km左右, 列车加减速、停车启动频繁。地铁列车的制动装置要求具有操控灵活、动作迅速、停车平稳准确及制动力大等特点。频繁的充放电会严重损害蓄电池, 因此蓄电池方案并不适合城市轨道交通。

超级电容储能与飞轮储能各具优势。通过表4的比较不难发现, 尽管超级电容在充电时间方面短于飞轮, 但飞轮储能的能量密度更高, 采购、维护成本更低, 因而更具优势。

6 结语

为了使车辆能较好地处于再生制动状态, 并保证电网供电安全, 合理利用再生制动的能量对于节能环保、降低成本具有重要意义。通过上文所做的简介与比较, 分析地铁列车再生制动能量的特点, 从节能环保角度出发, 以安全为基础, 为求最小的投资获取最大的效益, 飞轮储能方案无疑是第一选择。

参考文献:

- [1] 王彦峥, 苏鹏程. 城市轨道交通再生电能回收技术方案的研究[J]. 电气化铁道, 2002, 2: 37~40.

- [2] 许爱国. 城市轨道交通再生制动能量利用技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [3] 肖大帅. 基于超级电容的城轨车辆再生能量存储利用系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [4] 闫强华. 超导储能脉冲放电系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [5] 杨志轶. 飞轮电池储能关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
- [6] 张 松, 张维煜. 飞轮储能工程应用现状[J]. 电源技术, 2012(3): 435~439.
- [7] 蒋启龙, 张昆仑, 连级三. 磁浮轴承系统的数学模型与控制分析[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(4).
- [8] Voigt B, Mierke T, Lorenz U, Kramer K. 1MWh-battery for the Berlin subway system[J]. Proceedings of the 34th International Power Sources Symposium, 1990: 68~71.
- [9] Toshifumi Ise, Masanori Kita, Akira Taguchi. A hybrid energy storage with secondary battery[J]. IEEE Trans On Applied superconductivity, 2005(2): 1915~1918.
- [10] Leung E M W, Bailey R E, Hilal M A. Hybrid Pulsed Power Transformer (HPPT): Magnet Design and Results of Verification Experiment[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(2): 1508~1510.
- [11] Subkhan M, Komori M. New Concept for Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB[J]. IEEE Trans On Applied superconductivity, 2011, 21(3): 1485~1488.

