

城市轨道交通

广州地铁 1 号线受电弓
整体替换改进分析

冯鹤腾

(广州地铁集团有限公司 运营事业总部,
广东 广州 510380)

摘 要:为解决广州地铁 1 号线原受电弓因技术陈旧产品停产造成零配件无法采购、维护难度高和维护成本高的难题,提出了对其受电弓进行替换改进的设想,通过对多种受电弓进行对比,选择以 TSG18 气囊弓为基础,然后进行多项改进,实际运营情况表明改进效果良好。

关键词: 广州地铁; 受电弓; 替换; 改进

中图分类号: U231; U264.3⁺4 **文献标识码:** B

文章编号: 1000-128X(2015)06-0086-05

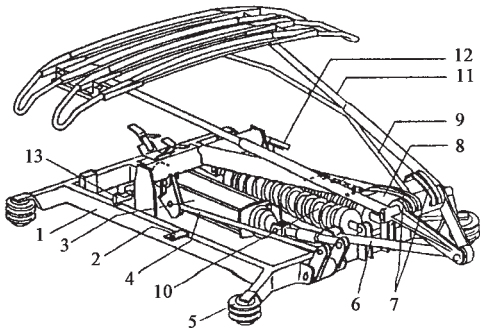
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.06.023

广州地铁 1 号线受电弓投入运用至今已有 17 年,部分机械零部件因磨损或疲劳需更新,如受电弓升弓弹簧、降弓装置、降弓装置铰链和弓头引导杆等。该型受电弓采用的是 20 世纪 80 年代的技术(上框架采用碳钢材料,弓头悬挂采用单橡胶弹簧元件悬挂),产品目前已停产,部分零配件无法采购或采购成本昂贵。考虑到受电弓维护的经济成本、难度和维护后受电弓稳定性等因素,有必要开展 1 号线受电弓整体替换改进。

1 技术可行性分析

1.1 广州地铁 1 号线受电弓结构原理

广州地铁 1 号线受电弓如图 1 所示。



1—底架; 2—地线连接端; 3—降弓装置; 4—连杆; 5—绝缘子;
6—连接杆; 7—编织导线; 8—下臂; 9—弓头引导杆; 10—升弓弹簧;
11—上臂; 12—电缆线连接端; 13—快速降弓阀

图 1 广州地铁 1 号线受电弓

升弓时,列车升弓电磁阀得电,打开列车主风管与受电弓降弓装置气缸的回路,主风管的压缩空气进

入气缸给气缸充气,压缩空气克服气缸内的降弓弹簧力,使得升弓弹簧拉动受电弓下臂,连接杆配合下臂转动使得上臂上升,完成升弓动作。引导杆的作用是使弓头在上升和下降过程中尽量保持水平。由于升弓初期气缸内无压力,而且压缩空气推动气缸内活塞运动时,受气缸内降弓弹簧的反作用力也相对较小,因此气缸内活塞运动相对较快,整个受电弓升弓初期表现速度较快。随着气缸内降弓弹簧不断被压缩,降弓弹簧的反作用力不断增大,气缸内的活塞运动越来越慢,直到弓头滑板与接触网接触并达到一定的压力后停下。从而表现出升弓后续阶段较为缓慢,这有利于减少弓网间的冲击。

受电弓的降弓过程包含先快后慢的 2 个阶段,都是利用快速降弓阀通过改变受电弓的降弓装置气缸释放压缩空气的快慢来实现。目的是实现先快后慢的一个降弓过程,避免降弓时接触网与弓头碳滑板之间产生电弧,又能减少下降时对弓架的冲击。

1.2 广州地铁受电弓类型和技术可行性对比

目前国内外受电弓生产厂家较多,且经过 20 余年的发展,应用在城轨车辆上的各型受电弓均已非常成熟。目前广州地铁车辆受电弓有弹簧弓和气囊弓 2 种,具体情况见表 1。

表 1 广州地铁各车型受电弓情况

线路	车辆类型	最高运行速度/(km·h ⁻¹)	受电弓类型	接触网类型
1 号线	A1	80	8WL0 296-2YD51, 弹簧弓	刚性 (柔性改刚性)
1、8 号线	A2/A3	80	Fb700.58, 弹簧弓	刚性、刚柔
2、8 号线	A4/A5	80	TSG18D, 气囊弓	刚性
3 号线	B1	120	TSG14, 弹簧弓	刚性
3、3 北、广佛	B2/B3	120	SBF920, 弹簧弓	刚性
3 北线	B4	120	TSG18F, 气囊弓	刚性
4、5、6 号线	L1/L2/L3	120	Fb 800.09, 弹簧弓	柔性 (段内使用)

为了便于维护,选取广州地铁 A4/A5 型车辆 TSG18 系列受电弓、B1 型车辆 TSG14 受电弓和 B2/B3 型车辆 SBF920 系列受电弓与 1 号线受电弓进行对比,选出与 1 号线车辆受电弓技术参数相近的受电弓作为整体替换改进的基础,相关技术参数对比见表 2。1 号线受电弓与目前城市轨道交通 A 型车主流的受电弓在接触力和受流性能等机械、电气参数方面相差不大,整体替换的技术难题主要集中在机械接口,包括机械安装接口和气路安装接口。

TSG18 系列气囊弓(见图 2)在刚性悬挂供电网条件下最大运行速度是 120 km/h,能够很好地满足广州 1 号线悬挂供电网 80 km/h 的运行要求。根据广州地铁 1 号线受电弓车顶安装尺寸(见图 3),可以对 TSG18 系列受电弓进行改进,改进后受电弓的气、电及机械等接口能够符合现有车辆的相关接口要求,满足现有车辆的安装要求。TSG18 受电弓的主要性能参数与 1 号线受电弓相近,存在的主要差异是受电弓的折叠长度,现场实

测 1 号线车顶受电弓安装空间长度约为 2 245 mm，要保

证受电弓端部到车顶安装空间前后面距离最小为 50 mm

左右，满足标准 EN 50124 要求的最大电气间隙 43 mm，

因此要求改进后的 TSG18 受电弓折叠长度≤ 2 145 mm。

表 2 广州地铁在用受电弓技术参数对比

参数名称	8WL0 296-2YD51 受电弓	TSG18 受电弓	TSG14 受电弓	SBF920 受电弓
机械形式	弹簧弓	气囊弓	弹簧弓	弹簧弓
直流标称电压 /V	1 500	1 500	1 500	1 500
直流电压范围 /V	1 000 ~ 1 800	1 000 ~ 1 800	1 000 ~ 1 800	1 800 (污染程度 PD4, 上部电压种类 OV3)
额定工作电流 /A	1 050	1 050	1 500	1 500
车辆静止时最大电流 /A	250 (1 根接触网) 460 (2 根接触网)	450	450	400 (1 根接触网)
最大短时电流 (5 s) /A	2 400	2 700	2 700	2 700
设计速度 / (km•h ⁻¹)	Max.90	Max.120	130	Max.120
运行速度 / (km•h ⁻¹)	80	80	120	120
最大升弓高度 /mm	1 700	≥ 2 550	1 700	2 750 ± 100
受电弓折叠长度 /mm	约 2 015	约 2 480	约 2 000	2 340 ± 10
受电弓折叠高度 (含绝缘子) /mm	332 ₋₁₀	310 _{0⁺¹⁰}	≤ 360	332 ₋₁₀
整个弓头宽度 /mm	1 550 ± 5	1 550 ± 10 (可定制)	1 550 ± 5 (可定制)	1 550 ± 5
弓头高度 /mm	235	235 ± 10 (可定制)	235 ± 10 (可定制)	可调整
滑板尺寸 /mm	35 × 22 × 800	长度 800 ± 1 或 950 (可定制)	长度 800 ± 1 或 950 (可定制)	(1 050 ± 1) × 60 × 22 (可定制)
升弓时间 /s	6 ~ 10	≤ 8 (可调)	≤ 7 (可调)	7~8
降弓时间 /s	约 5	≤ 7 (可调)	≤ 7 (可调)	7~8
滑板数量 / 条	4 或 2	4 或 2	4 或 2	4 或 2
滑板类型	浸金属碳滑板	浸金属碳滑板	浸金属碳滑板	浸金属碳滑板
标称静态接触压力 /N	120 ± 10	120 ± 10 (可调)	120 ± 10 (可调)	120 ± 10
静压力调节范围 /N	100 ~ 140	70 ~ 140	70 ~ 140	100 ~ 140
工作环境温度 /℃	- 25 ~ 40	-25 ~ 40	- 25 ~ 40	-25 ~ 40
额定工作气压 /kPa	750 ~ 900	约 550	750~900	750~900
最小供风气压 /kPa	最小 350	约 400	约 300	400
最大供风气压 /kPa	最大 1 000	900	900	1 000
安装尺寸 (4 点) /mm	1 200 × 1 300	(900 ± 1) × (1 100 ± 1) 可调整	(900 ± 1) × (1 100 ± 1) 可调整	(900 ± 1) × (1 100 ± 1) 可调整
总质量 (包括支持绝缘子和气控箱) /kg	151	≤ 140	≤ 155	约 141

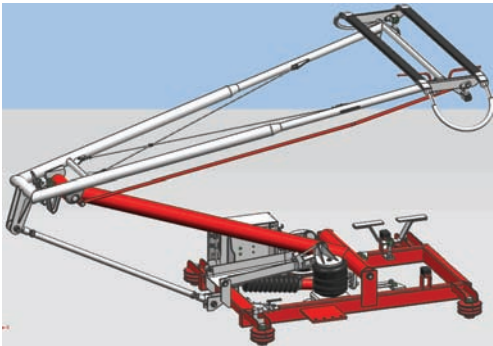


图 2 广州地铁 TSG18 系列受电弓

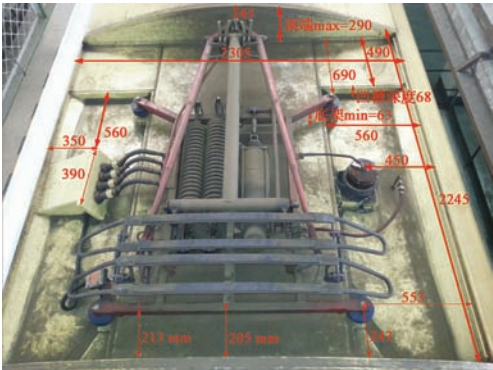


图 3 广州地铁 1 号线受电弓车顶安装尺寸

目前 TSG18 系列气囊弓使用在广州地铁 2、8 号线 A4/A5 型车和 3 号线北延线 B4 型车上，运营至今约 6 年时间，该型受电弓总体故障率较少且弓网配合良好，只是在 A4/A5 型车上偶尔出现弓头橡胶弹簧元件老化松动和在 B4 型车上出现弓角开裂的故障。

TSG14 弹簧式受电弓（见图 4）使用在广州地铁 3 号线 B1 型车上，刚性悬挂供电网线条件下最大运行速度 120 km/h，也能够很好地满足广州地铁 1 号线悬挂供电网线 80 km/h 的运行要求。TSG14 受电弓的主要性能参数与 1 号线受电弓相近，主要存在的差别是安装尺寸及气、电、机械等接口安装要求，根据广州地铁 1 号线受电弓车顶安装尺寸，也能对 TSG14 受电弓进行改进以满足 1 号线车辆安装要求。

TSG14 型受电弓目前在广州地铁 3 号线 B1 型车使用，在 B1 型车维修过程中发现受电弓上臂支架存在裂纹问题和升、降弓时间不可调等重大故障。

SBF920 系列受电弓（见图 5）为弹簧式受电弓，该系列受电弓目前使用在广州地铁 3 号线北延线 B2 型车和广佛线 B3 型车上，刚性悬挂供电网线条件下最大运行速度 120 km/h。通过改进，同样能满足 1 号线车

辆的使用要求，但是该型受电弓在 3 号线北延线 B2 型车上弓网匹配情况一般，在运营中弓网拉弧火花严重和受电弓碳滑板安装托架出现裂纹等重大故障。

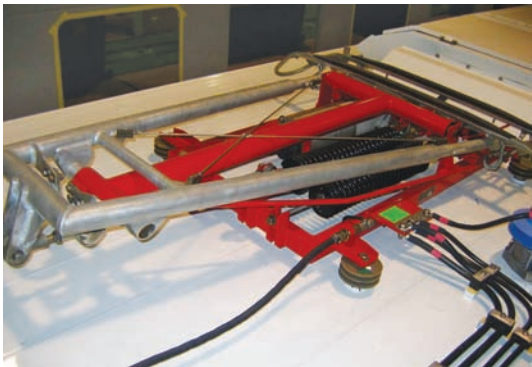


图 4 广州地铁 3 号线 B1 型车 TSG14 受电弓



图 5 广州地铁 SBF920 受电弓

1.3 确定 TSG18 气囊弓为替换基础

通过表 3 对比 TSG18 气囊弓、TSG14 弹簧弓和 SBF920 弹簧弓的弓网匹配性、正线运营故障情况和维护难易程度，得出 TSG18 气囊弓弓网匹配较好、维护成本较低且零配件通用性强，确定选择 TSG18 气囊弓作为替换 1 号线受电弓的基础。

表 3 TSG18、TSG14 和 SBF920 受电弓在运用和维护等方面对比

项 目	TSG18 气囊式受电弓	TSG14 弹簧式受电弓	SBF920 弹簧式受电弓
弓网匹配性	较好	一般	一般
正线运营故障情况	故障程度轻，故障率不高	故障程度严重，故障率中等	故障程度严重，故障率不高
备件采购	较易，多数零配件为国产件	较难，多数零配件进口	较难，多数零配件进口
备件通用性	通用性强，目前 A4/A5 及 B4 受电弓大部分通用	通用性一般，与 B1 受电弓部分通用	通用性一般，与 B2/B3 受电弓通用
可维护性	维护较易	维护较复杂	维护较复杂
备件采购周期	气囊和缓冲器为进口，但为主流产品，采购成本低且采购周期短	升降弓装置为进口备件，成本高且采购周期长	升降弓装置为进口备件，成本高且采购周期长
维护成本	较低	高	高
结论	优选 TSG18 受电弓作为替换 1 号线受电弓的基础		

2 TSG18 气囊弓改进

目前 TSG18 系列受电弓在 B4 型车上偶尔出现弓角开裂和在 A4/A5 型车上出现弓头橡胶弹簧元件老化松动的故障。针对这种故障，替换使用在 1 号线车辆上的受电弓需在 TSG18 气囊式受电弓的基础上进行改进。

2.1 为避免弓角开裂故障对原弓角作出的改进

针对弓角开裂的故障，在原 TSG18 受电弓弓头上取消原弓角封闭式弯管焊接结构，同时取消原弓角碳滑板安装支架上连接件，将上述结构改进为铸铝式弓角，并分段连接在两侧，减少焊接部分，优化弓角结构，见图 6。

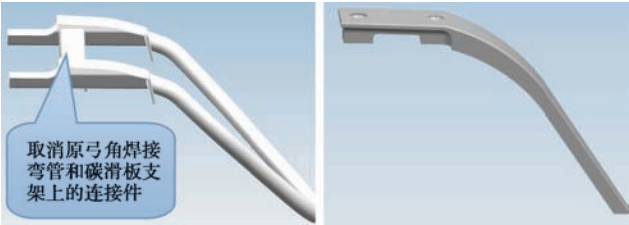


图 6 铸铝弓角与原弓角对比示意图

将原端部为 35 mm 宽的碳滑板改进为 60 mm 等宽的碳滑板，有助于提高碳滑板整体的强度，见图 7。与碳滑板相配的碳滑板支架宽度也增加到 60 mm，同时取消原有碳滑板支架的过渡圆弧，向上延伸包裹住碳滑板，提高了此处的结构强度。碳滑板和铸铝弓角通过螺栓连接在碳滑板支架上，见图 8。



图 7 新碳滑板与原碳滑板对比示意图

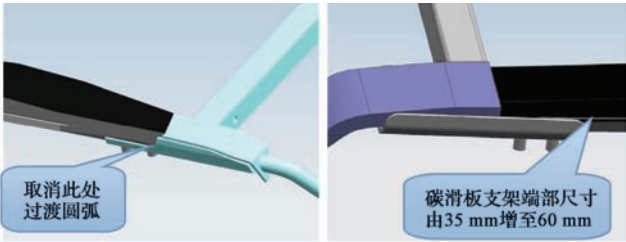


图 8 碳滑板支架端部尺寸由 35 mm 增至 60 mm

2.2 弓头悬挂方式的改进

针对弓头橡胶弹簧元件老化松动的故障，弓头悬挂元件由原来的橡胶弹簧元件改进为弹簧盒结构，对碳滑板和铸铝弓角进行支撑时采用 4 个弹簧盒，对称分布在弓角两侧，见图 9。

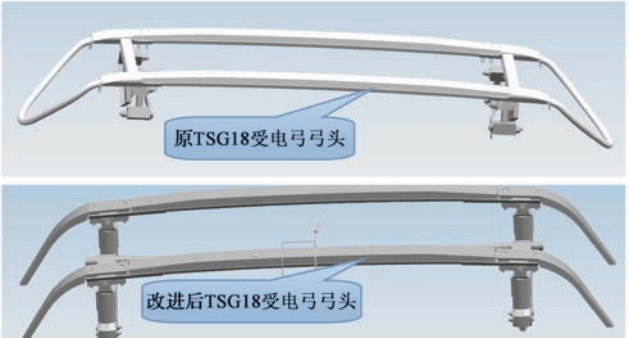
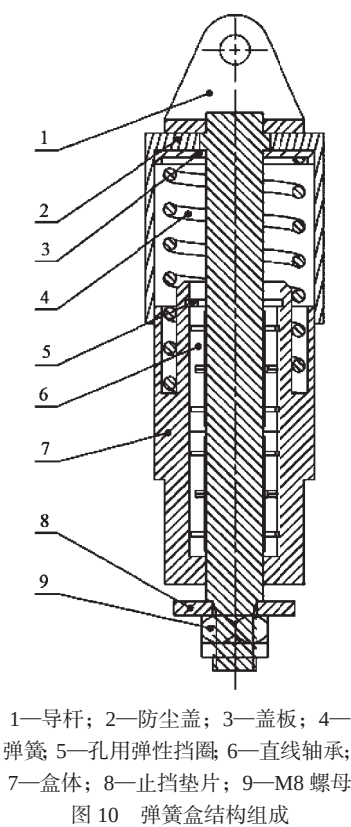


图 9 改进后 TSG18 受电弓弓头与原弓头对比示意图

弹簧盒由图 10 中部件组装而成，当碳滑板与供电网线接触时，导杆会压缩弹簧向下运动，同时安装在弹簧盒的下部的直线轴承能够保证导杆在运动过程保持良好的直线性。采用 4 个弹簧盒对称布置在弓头两侧，每 2 个弹簧盒为一组托住一块碳滑板和两侧弓角，此种结构能够保证具有较高的稳定性和可靠性。

针对采用弹簧盒和采用橡胶弹簧元件 2 种悬挂方式，广州地铁进行了弓网试验对比，实测车辆受电弓与刚性接触网动态相互作用性能参数，从弓网接触



力、受电弓振动加速度以及燃弧率等方面，对弹簧盒和橡胶弹簧元件 2 种悬挂方式进行对比评估，见表 4。

采用弹簧盒悬挂方式的受电弓在燃弧率、弓头水平冲击和垂向振动方面优于采用橡胶弹簧元件的受电弓。另外，采用弹簧盒悬挂方式的受电弓在弓网动态接触力方面虽然略大于采用橡胶弹簧元件的受电弓，但也满足动态接触力在 0 ~ 300 N 的使用要求。因此在实际运营过程中，采用弹簧盒悬挂方式的受电弓弓头缓冲吸振性能应更为良好，有助于提高受电弓的运行寿命。

3 试验

改进后符合广州地铁 1 号线车辆安装要求的 TSG18 受电弓需进行装车考核。装车考核之前，先进行地面测试。地面测试合格后再进行装车，然后对已安装 TSG18 受电弓的列车过限界门测试，保证受电弓不超限界。限界测试合格后，在列车静止状态下通电试验（列车静止状态下的温升试验）。然后安排进行在试车线上进行测试，完成运行时额定电流状态下的受流试验。试车线测试受电弓合格后，再安排进行正线尾班车上线试验。在试验合格后交付运营并对正线运行状态进行跟踪。

表 4 弹簧盒和橡胶弹簧元件 2 种悬挂方式受电弓弓网试验性能对比

试验项目	橡胶弹簧元件悬挂方式（简称方式 1）	弹簧盒悬挂方式（简称方式 2）	对比结果
接触力分布	弓网接触力的平均值处于 115.83 ~ 147.36 N 范围内	弓网接触力的平均值处于 132.4 ~ 166.93 N 的范围内	方式 2 受电弓在弓网动态接触力方面略大于方式 1
接触力最大 / 最小值	受电弓动态运行过程中，2 种悬挂方式的受电弓接触力的最大、最小值均分布在 0 ~ 406.49 N 范围内。99.99% 的弓网接触力的瞬间值位于 0~300 N 之间；由于受电弓弓头振动加速度增大导致弓网接触力的惯性力增大，引起的弓网接触力大于 300 N，该部分数据所占比例约为 0.01%		
弓头振动加速度	瞬时最大值为 2.25g	瞬时最大值为 2.178g	方式 2 受电弓弓头振动加速度小于方式 1
弓头水平冲击加速度	最大水平加速度为 68g，当时列车的运行速度为 99.699 km/h	最大水平加速度为 6.796g，当时列车的运行速度为 120 km/h	方式 2 受电弓水平冲击加速度明显低于方式 1
燃弧情况	80 km/h 时燃弧率为 0.464‰，110 km/h 时燃弧率为 4.18‰	100 km/h 时燃弧率为 0.26‰，110 km/h 时燃弧率为 0.31‰，120 km/h 时燃弧率为 0.349‰	标准 EN 50367-2006 要求燃弧率不大于 2‰视为合格，方式 1 受电弓在速度为 110 km/h 时，燃弧率为 4.18‰，略高于标准要求，方式 2 的燃弧率全部符合要求

3.1 地面测试

目检：受电弓包含的所有电气和机械部件没有任何物理缺陷并已进行了表面处理。

尺寸测量：测量受电弓基本尺寸，都符合表 5 要求。

地面升降弓试验：对受电弓进行地面升降弓试验，试验在环境温度和额定气压下进行，受电弓平稳升到最高工作高度，无引起损坏的冲击，升降弓时间为 7~8 s，降弓动作时无引起损坏的冲击，对受电弓进行气密性试验，无泄漏。

表 5 改进后 TSG18 受电弓基本尺寸

测试内容	测试要求
弓头长度	(1 550 ± 5) mm
弓头高度	235 mm
落弓长度	≤ 2 145 mm
落弓高度	≤ 350 mm
最大升弓高度	≥ 1 700 mm
最低位置保持力	≥ 30 N
安装孔尺寸	1 200 mm × 1 300 mm
工作高度静接触力	(120 ± 10) N

3.2 限界测试

将地面测试合格的 TSG18 受电弓安装于广州地铁 1 号线列车上, 安装前对受电弓车顶安装面进行绝缘漆喷涂处理, 装车后受电弓通过 1 号线限界门并满足限界要求。

3.3 车辆静止状态下通电试验

受电弓升弓与接触网进行受流试验, 车辆静止通电 30 min, 碳滑板和接触网线之间力为标称静态力。受电弓任何部位(包括碳滑板在内)都没有变形和过热痕迹。电流通过轴承、转轴和导流线时没有使其损伤。

3.4 试车线测试

安装有通过通电试验的 TSG18 受电弓的列车上试车线进行测试, 此时受电弓弓头传送电流为列车运行时的额定电流。测试的受电弓无任何过热痕迹。

3.5 正线尾班车测试

安装通过试车线测试的 TSG18 受电弓的列车进行正线尾班车测试, 测试受电弓与正线接触网匹配性和运行状态。正线运行状态良好。

3.6 正线运营跟踪

安装通过正线尾班车测试的 TSG18 受电弓的列车进行正线运营。截至目前改进后的 TSG18 受电弓已经装车运营跟踪 7 000 km, 检查受电弓弓头状态良好,

碳滑板无烧灼无裂纹, 碳滑板磨耗情况良好; 受电弓部件完好, 不存在碰撞和摩擦痕迹; 复测受电弓拉力正常; 检查所有紧固件无松动; 检查编织导线状态良好; 检查受电弓升降弓时间正常。

4 结语

改进后的 TSG18 受电弓只要装车正线运营 5 万 km 以上且满 6 个月, 检查受电弓状态良好, 则可认为 1 号线受电弓整体替换改进成功。广州地铁 1 号线受电弓整体替换改进的试验成功解决了原受电弓零配件无法采购、维护难度高和维护成本高的难题, 为广州地铁车辆维修节约了大量成本, 同时也为其他轨道车辆部件维修手段的选择提供了参考。

参考文献:

- [1] Adtranz. 广州地铁一号线车辆维修手册 [Z]. 德国: ABB Daimler-Benz Transportation, 1997.
- [2] 西门子(中国)有限公司, 广州地铁三号线维修手册 [Z]. 株洲: 西门子(中国)有限公司, 2005.
- [3] GB/T 21561.1—2008, 轨道交通机车车辆受电弓特性和试验 第 2 部分: 地铁与轻轨车辆受电弓 [S].
- [4] TB/T 1456—2004, 铁路应用 机车车辆 干线机车车辆受电弓特性和试验 [S].

(上接第 85 页)

端电压仍然大于 88 V, 消耗容量低于 90%, 可见所选蓄电池能满足蓄电池牵引的要求。

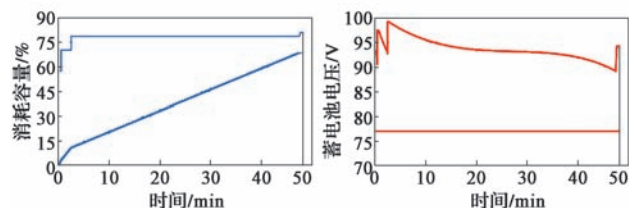


图 6 蓄电池消耗容量与电压变化仿真波形

6 蓄电池牵引优点

随着人们对地铁车辆运营可靠性提出更高要求及列车制造技术不断创新, 地铁列车采用车载蓄电池进行紧急牵引技术也逐步完善, 其优点体现在:

- ①车辆段维修库内可不设第三轨, 保证了维修人员、司机及保洁人员的安全;
- ②提高了正线运行车辆的可靠性;
- ③可扩展在较短的区间实现紧急牵引, 从而改变了救援模式, 使上海 16 号线整个系统的可靠性增强;
- ④可实现车场的紧急牵引, 从而减少了车辆段的

调车机数量。

7 试验

经试验验证列车在 AW3 载荷、速度 3.5 km/h、平直干燥轨道上运行 400 m 时蓄电池的电压仍然保持在 100 V 左右, 达到了预期设计目的。

8 结语

蓄电池牵引技术在地铁列车上有着很好的应用前景, 尤其是对采用第三轨受流的地铁车辆。本文所描述的电路和软件设计同样适用于重联列车的蓄电池牵引功能, 即当 2 列车重联运行时, 蓄电池牵引功能仍然有效, 4 组蓄电池可分别给 4 个牵引逆变器供电。

参考文献:

- [1] 肖世雄. 蓄电池紧急牵引技术在地铁列车上的应用 [J]. 机电设备技术, 2010(8).
- [2] 曹增明. 上海轨道交通 11 号线南段工程车辆蓄电池牵引系统设计与研究 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2012(3).
- [3] 周利. 上海轨道交通 16 号线列车控制电路设计 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2009(3).
- [4] 西门子(中国)有限公司. 上海轨道交通 16 号线工程车辆技术规格书 [S]. 株洲: 西门子(中国)有限公司, 2010.