

城市轨道交通车辆

重庆地铁1号线车辆能耗
测试及仿真节能研究

肖 华¹, 徐剑波², 何海兴³, 李卫红³

(1. 株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001;
2. 重庆轨道交通(集团)有限公司, 重庆 401120;
3. 南车电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 肖 华(1981-), 男, 硕士, 工程师, 现从事城轨系统研究开发及相关工作。

摘 要: 针对普遍关注的列车运营能耗和节能技术问题加以研究, 精确测量列车正线运营能耗, 通过设计仿真模型及算法, 将仿真结果与实测结果进行对比分析, 利用能耗仿真进一步量化并探索轨道交通的各项节能措施。

关键词: 能耗测试; 能耗仿真; 节能技术; 重庆地铁1号线

中图分类号: U231; U268.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-128X(2015)01-0065-03
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.01.018

Energy-consumption Measurement and Energy-saving
Simulation Research in Chongqing Metro Line 1

XIAO Hua¹, XU Jianbo², HE Haixing³, LI Weihong³

(1. Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. Chongqing Rail Transit Group Co., Ltd., Chongqing 401120, China; 3. CSR Research of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: With attentions to vehicle energy-saving technology, energy consumption in metro operation was accurately measured. By design simulation models and algorithm, with comparative analysis of measurements and simulation results, methods of energy-saving in metro operation was researched.

Keywords: energy-consumption measurement; energy-consumption simulation; energy-saving technology; Chongqing metro line 1

0 引言

随着我国各主要城市的交通出行压力日渐增大, 城市轨道交通建设也在快速发展。轨道交通的快速发展极大地缓解了城市交通压力, 但同时也带来了电能消耗的迅速增加。随着各主要城市投入运营的地铁车辆越来越多, 有必要展开能耗相关研究。如准确测量运营地铁列车的实际能耗, 并通过设计仿真模型和算法, 将仿真结果与实测能耗进行对比分析, 以进一步探索地铁列车节能的各种途径。

重庆作为一个“山城”, 地铁线路的弯道和坡道较多, 因此轨道公司对运营列车的实际能耗也更为关注, 特组织车辆和牵引系统供应商对重庆地铁1号线列车在正线线路上ATO运营模式下的实际能耗进行测试(AW0和AW2工况), 并计算重庆地铁列车的单位耗电量(如吨公里耗电量、车公里耗电量等)。同

时通过设计仿真模型和算法对重庆地铁车辆进行实际线路的能耗仿真, 在验证和确认仿真结果的有效性后, 利用仿真模型进一步量化影响列车能耗的因素, 如车辆自重、列车运行模式、列车旅行速度等。

1 列车实际能耗测试

重庆地铁的能耗测试选取地铁1号线108号车在AW0、AW2载荷工况下分别进行。由于列车网络系统配置了ERMe模块(事件记录模块), 完整记录了各节车辆的电压、电流、速度、力矩等与耗电量相关的信息, 数据可用来分析列车实际运行状况并进行能耗计算, 因此无需额外加装电压、电流传感器。列车耗电量计算的数据来自于两路: 一是在显示屏上由各运行设备(如DCU和SIV)计算并由列车网络进行记录的耗电量; 二是对ERMe记录的相关变量数据进行计算。列车耗电量计算方法如下:

牵引耗电量 = $\sum$ (每节动车DCU中间电压 × 每

节动车 DCU 中间电流 $\times \Delta t$), 单位为 kW·h。

辅助耗电量 = Σ (每节车 SIV 电网电压 $\times$ 每节车 SIV 输入电流 $\times \Delta t$), 单位为 kW·h。

1.1 AWO/AW2 载荷耗电量测试结果与分析

1.1.1 能耗测试条件

空车质量	202.73 t
AW2 载荷	83.22 t
最大运行速度	80 km/h
齿轮传动比	6.312 5
列车能耗测量时列车采用 ATO 驾驶模式, 并采取与实际载客运营时完全一致的停站时间。	

1.1.2 能耗测试结果

108 车在 ATO 运行模式下, 根据 ERMe 记录的相关变量数据, 计算得出列车 AW0 载荷条件下, 测试能耗如表 1 所示。

表 1 AWO 列车耗电量结果 kW·h				
起点→终点	牵引耗电量 (A)	再生制动耗 电量(B)	辅助耗 电量(C)	总耗电量 $A-0.92B+C$
沙坪坝→小什字	235.336 86	120.267 46	29.335	154.025 833 6
小什字→沙坪坝	238.894 26	129.763 94	29.335	148.846 435 2
列车往返全程	474.231 12	250.031 40	58.670	302.872 268 8

108 车在 ATO 运行模式下, 根据 ERMe 记录的相关变量数据, 计算得出列车在 AW2 载荷条件下, 测试能耗如表 2 所示。

表 2 AW2 列车耗电量结果 kW·h				
起点→终点	牵引耗电量 (A)	再生制动 耗电量(B)	辅助耗 电量(C)	总耗电量 $A-0.92B+C$
沙坪坝→小什字	308.3	177.1	29.335	174.703
小什字→沙坪坝	307.4	184.9	29.335	166.627
108 列车往返全程	615.7	362.0	58.670	341.330

注: 此处的系数 0.92 为再生制动吸收能力比, 即有功功率和机械功率的比值。在列车能耗的测试计算中, 将列车和供电网分开, 在列车制动工况下, 列车再生制动的能量, 只要没有通过制动电阻吸收, 则认为全部回馈到电网, 并认为回馈到电网的能量能被完全利用, 因此, 再生制动吸收能力比就是列车能量传递效率。在重庆地铁 1 号线能耗计算过程中, 用实测的电功率 ($P_{电}=U_d I_d$) 和仿真计算得出的机械功率 ($P_{机}=FV$) 的比值, 通过取多组数据求平均得出再生制动吸收能力比 0.92。

1.1.3 列车单位耗电量计算

列车单位耗电量计算如下:
列车吨·公里耗电量 = 总耗电量 / (列车质量 $\times$ 运行总里程) = $302.872\ 268\ 8 \div (202.73 \times 15.268 \times 2)$ = $0.048\ 924\ 8(\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{吨}\cdot\text{公里}))$
车辆每公里耗电量 = 总耗电量 / (车辆节数 $\times$ 运行总里程) = $302.872\ 268\ 8 \div (6 \times 15.268 \times 2)$ = $1.653\ 1(\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{车}\cdot\text{公里}))$

列车变动部分耗电量 = 列车定员总耗电量 - 列车空车耗电量 = $341.33 - 302.872\ 268\ 8 = 38.457\ 731\ 2(\text{kW}\cdot\text{h})$

列车变动部分吨·公里耗电量 = 列

车变动部分耗电量 $\div$ (AW2 载荷 $\times$ 运行总里程) = $38.457\ 731\ 2 \div (83.22 \times 15.268 \times 2) = 0.015\ 134$ ($\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{吨}\cdot\text{公里})$)

2 车辆能耗仿真计算

2.1 仿真模型及算法设计

①辅助耗电量在不同载荷下均视为一个定值, 故只在仿真结果中采用测试的一个定值进行单位耗电量的计算。

②将 ATO 驾驶模式总体视为 3 个过程: 一是列车启动阶段, 按照最大牵引力运行至最高速度; 二是列车匀速运行的中间过程; 三是制动进站阶段, 低速段空电配合进站。

③采用载客应用的电机特性数据和列车参数作为仿真计算的输入。

④对列车在 37 km/h 和 35 km/h 2 种平均旅行速度下分别进行仿真计算, 并对仿真结果分析比较。

2.2 列车能耗仿真计算结果

2.2.1 旅行速度为 37 km/h

AW0 载荷条件下往返全程, AW0 仿真耗电量如表 3 所示。

表 3 AWO 全程往返仿真耗电量 kW·h			
区间	牵引耗电量	再生制动耗电量	总耗电量
沙坪坝→小什字	240.7	135.4	116.132
小什字→沙坪坝	243.5	139.2	115.436
重庆 1 号线 AW0 往返全程	484.2	274.6	231.568

AW0 耗电量仿真计算结果与实测结果对比如表 4 所示。

表 4 仿真计算结果与实测结果对比

参数	工况	实测 ERM	仿真	总耗电量	
				实测 ERM	仿真
固定耗电量平均值 / (kW·h/(吨·公里))	牵引	0.076 3	0.078 200	0.039 113 37	0.037 406 6
	再生制动	0.040 4	0.044 300		
固定耗电量平均值 / (kW·h/(车·公里))	牵引	15.500 0	15.856 690	7.929 453 76	7.583 442 5
	再生制动	8.200 0	8.992 664		

2.2.2 旅行速度为 35 km/h

AW0 载荷条件下往返全程, AW0 仿真耗电量如表 5 所示。

表 5 AWO 往返全程仿真耗电量结果 kW·h			
区间	牵引耗电量	再生制动耗电量	总耗电量
沙坪坝→小什字	208.6	115.4	102.432
小什字→沙坪坝	208.5	116.3	101.504
重庆 1 号线 AW0 往返全程	417.1	231.7	203.936

AW0 耗电量仿真计算结果与实测结果对比如表 6

表 6 仿真计算结果与实测结果对比

计算参数	工况	实测 ERM	35 km/h 仿真	总耗电量	
				实测 ERM	35 km/h 仿真
固定耗电量平均值 / (kW·h/(吨·公里))	牵引	0.076 3	0.067 4	0.039 113 4	0.032 94
	再生制动	0.040 4	0.037 4		
固定耗电量平均值 / (kW·h/(车·公里))	牵引	15.500 0	13.700 0	7.929 453 8	6.678 54
	再生制动	8.200 0	7.600 0		