

基于有限元法的有轨电车 TramWave 地面供电系统接触带优化分析*

邸新元¹ 孙冰¹ 武杰文¹ 张灿² 董亮² 肖嵩²

(1. 中国中车大连机车车辆有限公司, 116022, 大连; 2. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 在有轨电车 TramWave 地面供电系统中, 能量由集电靴和地面供电模块内接触带的相互作用提供给车辆。当有轨电车在取电时, 集电靴电刷和地面供电模块表面金属板之间由于摩擦导致材料损耗严重。为了减少材料磨损, 提高地面供电系统的性能, 提出一种单条型接触带代替现有的双条型接触带结构, 并采用有限元方法进行了对比分析。仿真结果表明, 单条型接触带相较于双条型接触带具有更好的性能, 并且在有轨电车产生偏移的情况下能产生更大的吸附力。

关键词 有轨电车; TramWave 地面供电系统; 接触带; 有限元仿真

中图分类号 U482.1.09

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.006

Optimization of Ferromagnetic Strip for TramWave Ground Power Supply System Based on Finite Element Calculation

DI Xinyuan, SUN Bing, WU Jiewen, ZHANG Can, DONG Liang, XIAO Song

Abstract In TramWave ground power supply system, the tram energy is provided by the interaction between current collector and ferromagnetic strip within the ground power supply module. When the tram is extracting the electric power, the friction between the brush of current collector and the metal plate on the ground power supply module surface will lead to serious material loss. In order to reduce the material wear and improve the performance of ground power supply system, a single strip contact belt is proposed to replace the existing double-strip contact belt structure, and finite element calculation is used to make a comparative analysis. The simulation results show that the single-strip contact zone has better performance than the double-strip contact zone, and can produce greater adsorption force when the tram is in deviation condition.

Key words modern tram; TramWave ground power supply

system; ferromagnetic strip; finite element simulation

First-author's address CRRC Dalian Co., Ltd., 116022, Dalian, China

采用地面接触轨供电的有轨电车, 与采用接触网供电的传统有轨电车相比, 具有电磁辐射低、占用空间小、视觉污染良好、建设工期短等优势, 可以有效缓解城市交通压力, 市场前景十分广阔^[1-3]。意大利安萨尔多公司的 TramWave 系统是一种具有代表性的有轨电车地面供电系统^[4]。经过实际运营检验, TramWave 地面供电技术是安全、可靠的, 但是仍有一些技术问题需要进一步分析和解决^[5]。

安装在车辆转向架下方的集电靴在工作时, 需要与地面供电模块表面的金属板滑动接触, 才能给机车供电。在有轨电车取电阶段, 集电靴处于在拖拽状态, 因此, 正、负极电靴与金属板摩擦造成材料损耗。到目前为止, 国内外大多数研究学者主要研究 Tram Wave 系统的供电模式和工作原理, 未对 TramWave 系统在运行时遇到的相关技术问题进行分析^[1-2]。

针对以上问题, 本文建立了 TramWave 地面供电系统接触带受力有限元模型, 并对该系统的磁场进行分析。同时, 针对地面供电系统磨损严重问题提出一种单条型接触带结构, 并进行仿真对比。

1 有轨电车 TramWave 地面供电系统结构

有轨电车 TramWave 地面供电系统主要由安装在车辆转向架下方的集电靴和沿运行线路铺设的地面供电模块构成^[6]。集电靴由外壳、永磁铁、电刷组成, 地面供电模块由接触带、玻璃钢槽、电缆等

* 国家重点研发计划资助(2017YFB1201004)

零部件组成。其供电模块截面如图 1 所示。

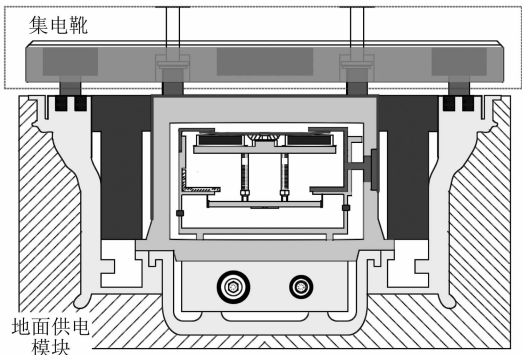


图 1 有轨电车 TramWave 地面供电模块截面图

TramWave 地面供电系统创新性地使用了永磁体的吸附力和接触带的自身重力,通过两者间的相互作用来实现电路的导通及关断^[2-6]。同时通过集电靴和地面供电模块表面金属板的接触为电车提供持续和稳定的电能。随着列车的行驶,模块内的柔性接触带受集电靴的吸附力作用上升,此时模块表面与电源正极连通。集电器通过与供电模块表面金属板接触给电车供电。而当集电靴离开模块表面,柔性接触带在重力作用下,回落到安全负极,模块表面断电。行人和汽车可以安全通过有轨电车轨道。

2 TramWave 地面供电系统接触带有限元仿真分析

目前,在磁场分析方面,由于有限元仿真的方法具有快速、高效、低成本和设计灵活等特点,因此采用有限元三维建模的方法对磁场进行仿真,被广泛应用于磁场分析的研究中。本文有限元模型的前处理和后处理都通过 Ansys 分析软件实现。由于 TramWave 地面供电系统的零部件多、建模工作量大,需要对模型进行简化处理以减少计算量,因此模型忽略了细小部件等细节。忽略这些元素不会对所关心的计算结果产生影响,但可以大大减小运算量,显著提高工作效率^[7-10]。此外,由于本文不关注接触带的柔性变化,因此研究的接触带是刚性结构,不发生形变。

根据实际尺寸建立集电靴和地面供电模块的几何模型,其截面如图 2 所示。模型中集电靴内安装 28 块永磁铁,可划分为由 20 块永磁铁构成的工字形永磁铁和 8 块永磁铁(前后各 4 块)构成的预抬永磁铁。预抬永磁体的充磁方向与工字型永磁

铁的充磁方向相反。永磁铁的具体材料参数如表 1 所示。

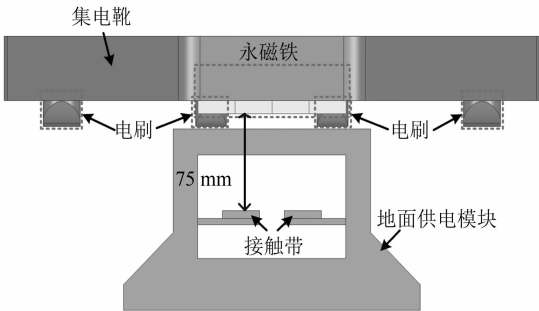


图 2 有轨电车 TramWave 地面供电系统接触带几何模型截面图

表 1 永磁铁材料参数

材料参数	取值
密度/(g/cm ³)	7.85
矫顽力/(kA/m)	1 029
剩磁/T	1.410
相对磁导率	1.051
最大磁能积/(kJ/m ³)	381
电导率	0.67
固有矫顽力/(kA/m)	1 085
Young's modulus(杨氏弹性模量)/(kN/mm ²)	140~170

利用上述参数,建立了集电靴和地面供电模块的有限元模型(见图 3),集电靴可以沿着地面供电模块以不同速度进行直线运动。并在瞬态条件下进行了一系列仿真。图 4、图 5 分别是车速为 30 km/h 时的接触带涡流分布图和车速为 30 km/h 时集电靴底部和接触带表面磁密分布图。

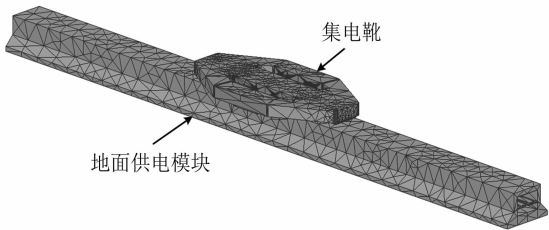


图 3 地面供电系统接触带有限元模型网格划分图

从图 4 可以看出,接触带的涡流最大值出现在工字形永磁铁和预抬永磁铁之间,与列车的运行速度有关,并且分布集中。列车以 30 km/h 的速度运动时,前涡流集中区域的最大涡流密度为 104.68 kA/m²,约是后涡流集中区域最大涡流密度的 1.39 倍。

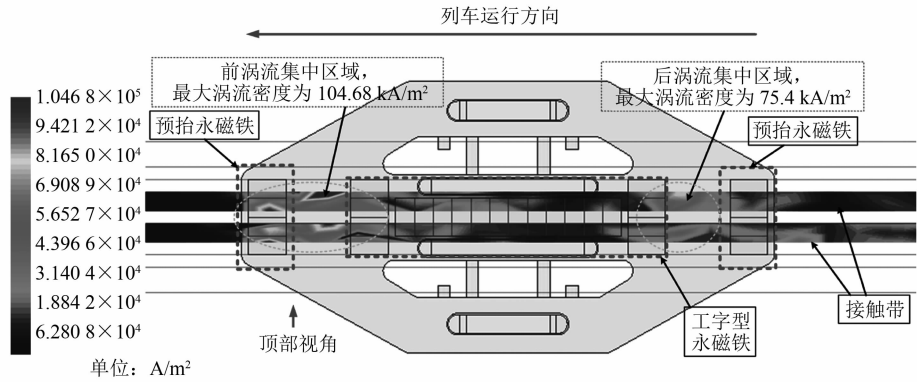


图 4 车速为 30 km/h 时接触带涡流分布图

从图 5 可以看出,集电靴接触带上磁场强度最大值为 1.80 T,但集电靴前端接触带上的磁通密度集中区域面积明显小于后端的磁通密度集中区域。这说明集电靴前端接触带上产生的涡流,对磁通密度产生的影响可能比后端的影响更大。

接触带受到吸附力的矢量分布如图 6 所示。从图 6 可以看出,在集电靴运动的前方,接触带受到的吸附力小于集电靴后方的吸附力。该仿真结果验证了涡流对磁通密度的影响。

3 TramWave 地面供电系统接触带结构优化

集电靴和地面供电模块的磨损程度与摩擦力大小相关。摩擦力 F 的计算公式如下:

$$F = \mu \times F_N = \mu \times (G + F_{\text{吸}}) \quad (1)$$

式中:

- μ ——摩擦系数;
- F_N ——集电靴对地面的压力;
- G ——集电靴的重力;
- $F_{\text{吸}}$ ——集电靴对磁性钢带的吸附力。

为了减少集电靴和地面供电模块之间不必要的磨损,同时保证集电靴对接触带之间足够的吸附力以满足地面供电系统定供电,根据式(1),可以通过减轻集电靴的质量来实现。本文通过改变接触带的结构、增大集电靴对接触带的吸附力,并在此基础上减少永磁铁的体积来减小集电靴的质量。

本文提出了一种单条型结构的接触带,其材料参数和现有接触带相同,结构参数如表 2 所示。模型 A 是现有地面供电模块内的接触带,为改进的结构提供对比。在研究单条型结构接触带对吸附力影响的同时,本文还对集电靴的质量和吸附力之间的关系进行了研究。

表 2 接触带模型结构参数

名称	形状	截面面积/mm ²	长度/m
模型 A	双条型	180	3
模型 B	单条型	360	3
模型 C	双条型	240	3
模型 D	单条型	480	3

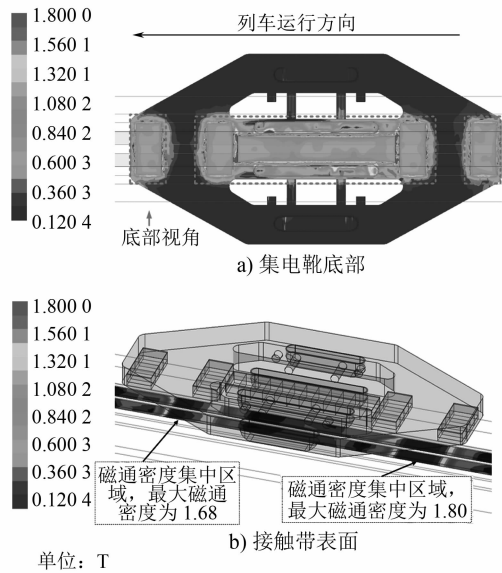


图 5 车速为 30 km/h 时集电靴底部和接触带表面磁通密度分布图

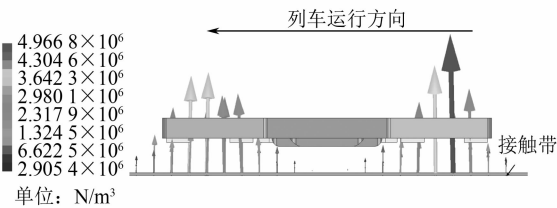


图 6 接触带受力矢量图

接触带和集电靴的距离越近,吸附力越大,因

此研究接触带距离集电靴最远的情况具有代表性。接触带位于托架上,接触带和集电靴的距离最大,为 75 mm。静止状态下,集电靴停留在接触带中部,集电靴和不同类型接触带之间的吸附力如表 3 所示。由表 3 可知,单条型接触带相较于双条型接触带,静止吸附力均有提高。通过模型 A 和模型 C 以及模型 C 和模型 D 之间的对比可以看出,吸附力会随着接触带的质量增加而大幅度增加。

表 3 静止状态下集电靴与不同接触带间吸附力统计表

名称	吸附力/N	增长率/%
A	80.267	0
B	84.938	5.820
C	101.664	26.657
D	108.580	35.274

图 7 是当集电靴沿着供电模块以 30 km/h 的速度做直线运动时,模型 A、B、C、D 中接触带受到吸附力的曲线。此时,接触带距离集电靴下表面 75 mm。结果表明,与现有双条型接触带相比,相同质量下,单条型接触带受到的吸附力更大。

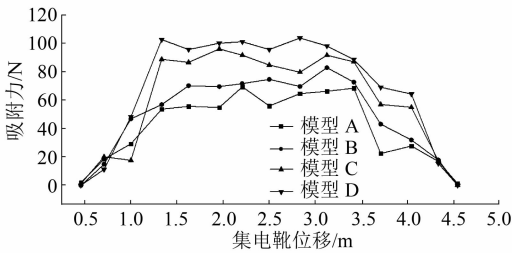


图 7 集电靴速度为 30 km/h 时的吸附力变化曲线

地面接触轨型有轨电车在线路上运行时,经常会导致集电靴的偏移,这主要由于来自线路和车辆本身等各种振源的影响,如轨道的不平顺、有轨电力通过道岔、集电靴正负极电刷触碰到硬点等。集电靴的偏移会影响接触带受到的吸附力,如果吸附力减小可能会增加列车受流的不稳定性,这种特殊情况也需要在接触带的选择中加以考虑。

单条型接触带和双条型接触带在集电靴偏移情况下的吸附力对比如图 8 所示。随着集电靴的偏移值由 0 增大到 10 mm,模型 A 和模型 C 中双条型接触带受到的吸附力均减小。当偏移值为 10 mm 时,模型 A 的吸附力减小了 4.0%,模型 C 的吸附力减小了 3.7%。而随着集电靴的偏移值增大,集电靴与模型 B、模型 D 中的单条型接触带之间的吸附力增大。当集电靴偏移值为 10 mm 时,模型 B 的吸

力增加了 3.0%,模型 D 的吸附力增加了 2.3%。

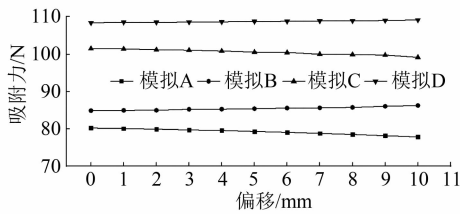


图 8 车速为 30 km/h 时集电靴偏移值和吸附力的关系

通过以上研究表明,静止状态下,相同质量的单条型接触带相较于双条型接触带能产生更大的吸附力。相同结构下,质量越大的接触带能产生更大的吸附力。因单条型接触带在集电靴产生偏移时能产生更大的吸附力,不会对列车的正常供电产生不利影响。因此,单条型接触带相较于双条型接触带是更好的选择。

4 结语

随着 TramWave 地面供电系统的普及,面临越来越多的技术挑战。本文通过结合地面供电系统的结构和材料数据,建立了地面供电系统中集电靴对接触带吸附力的有限元模型。该模型可以分析集电靴和柔性钢带之间的静态和动态电磁作用,计算集电靴和地面供电模块中接触带之间的吸附力。本文针对减少集电靴的电刷和地面供电模块表面金属板材料损耗,提出一种单条型结构的接触带结构。仿真结果表明,单条型接触带能够产生更大的吸附力,因此能够减小永磁铁体积和摩擦力;单条型接触带在集电靴偏移时能产生的更大吸附力,不会影响有轨电车的正常供电。

参考文献

[1] 李雪松,景海林,李鹤群,等. 现代有轨电车新型地面供电方式分析[J]. 机车电传动,2018(2): 94.

[2] 赵金凤,陈吉刚,赵云云,等. 新型有轨电车供电系统地面供电模式研究[J]. 电气化铁道,2018(1): 60.

[3] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[R]. 北京: 中华人民共和国中央人民政府,2016.

[4] PASTENA, LUIGI. A Catenary-free electrification for urban transport: an overview of the tramwave system[J]. IEEE Electrification Magazine,2014,2(3): 16.

[5] 何治新. 现代有轨电车牵引供电方式选择[J]. 城市轨道交通研究,2013(7): 115.

[6] 秦骥. 基于现代有轨电车的地面供电技术研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学,2017.