

现代有轨电车新型地面供电方式分析

李雪松¹, 景海林^{2,3}, 李鹤群³, 赵国平^{2,3}

- (1. 中交铁道设计研究总院有限公司, 北京 100097;
2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 辽宁 大连 116052;
3. 中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052)

摘 要: 对现代有轨电车车辆的供电系统, 从工作原理、应用前景进行了详细的介绍和比较分析, 并对我国新建城市轨道交通车辆供电方式的选择提出了看法和建议, 认为地面供电方式更具有优势。

关键词: 现代有轨电车; 地面供电系统; 供电方式; 应用分析

中图分类号: U482.1; U223.5⁺1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.01.116

Analysis on Novel Ground Power Supply Mode of Modern Tramcar

LI Xuesong¹, JING Hailin^{2,3}, LI Hequn³, ZHAO Guoping^{2,3}

- (1. CCCC Railway Consultants Group Co., Ltd., Beijing 100097, China;
2. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Dalian, Liaoning 116052, China;
3. CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116052, China)

Abstract: Power supply systems of modern tramcar were introduced and compared from working principle and the application prospect, and some opinions and suggestions on the choice of power supply mode of the new urban rail transit vehicles in domestic were put forward, which indicated that the ground power supply mode had more advantages.

Keywords: modern tramcar; ground power supply system; power supply mode; application analysis

0 引言

随着城镇化及城市群的发展, 现代有轨电车作为城市骨干公共交通网络“补充、延伸、联络、过渡”的作用愈发突出。现代有轨电车最显著的特点是造价低、节能环保, 其轨道可直接在现有公路上铺设, 车辆在地面停靠。现代有轨电车运行系统建造成本仅为地铁的 1/4~1/3, 且工期短、污染少, 载客量、乘坐舒适感、稳定性均高于公共汽车, 且兼备城市观光功能, 因此, 为助其发展很有必要对其供电方式进行分析。

1 传统有轨电车供电方式

传统的城市轨道交通车辆有 2 种供电方式: 一种

是架空接触网供电, 另一种是地面接触轨供电。架空接触网优点是结构简单、架设方便、投资成本小、散热条件好; 缺点是网络复杂和集中时, 不易架设、在城市中心架设接触网及支柱会影响城市景观、限制公路通行车辆高度, 且工作条件差, 易受环境条件如冰、风、雨、雪、温度、化学腐蚀、雷电等的影响。地面接触轨供电优点是不会影响城市景观, 不会受到极端天气影响; 缺点是容易受到异物、积水的损坏, 且安全性不高, 在电分段与道岔处需隔断, 在一定程度上会增加车辆牵引系统设计成本。

2 现代有轨电车地面供电方式

为避免上述 2 种传统供电方式的缺点对现代有轨电车的设计、运营、维护产生不利的影响, 近些年国

内外轨道交通领域提出了多种新的现代有轨电车供电方式, 并得到了广泛验证。

2.1 TramWave 供电方式

TramWave 是意大利安萨尔多公司基于自然磁力技术开发的一种地面供电系统, 主要由玻璃钢槽、负极回流条、插座盒、供电模块、柔性接触带、供电电缆等零部件组成。

2.1.1 工作原理

TramWave 地面供电系统采用的是自然磁力技术, 安装在车辆转向架下方的集电器与地面模块内的弹性磁铁条都装有永磁材料, 当集电器处于放下状态时,

模块内的弹性磁铁条受磁力作用上升, 使模块表面与电源正极连通, 集电器通过与区段供电模块的金属板板面接触从而将供电电源正极引入车内。只有与集电器接触的区段金属板才有电, 而当集电器离开模块表面后, 弹性磁铁条受重力作用, 回落到与安全负极相接触的位置, 模块表面失电, 安全负极维持各区段接地; 当集电器处于收起状态时, 集电器与模块之间的磁力强度不足以吸起弹性磁铁条, 因此无法激活地面供电模块, 所有区段维持接地状态。图1为 TramWave 地面供电系统示意图。

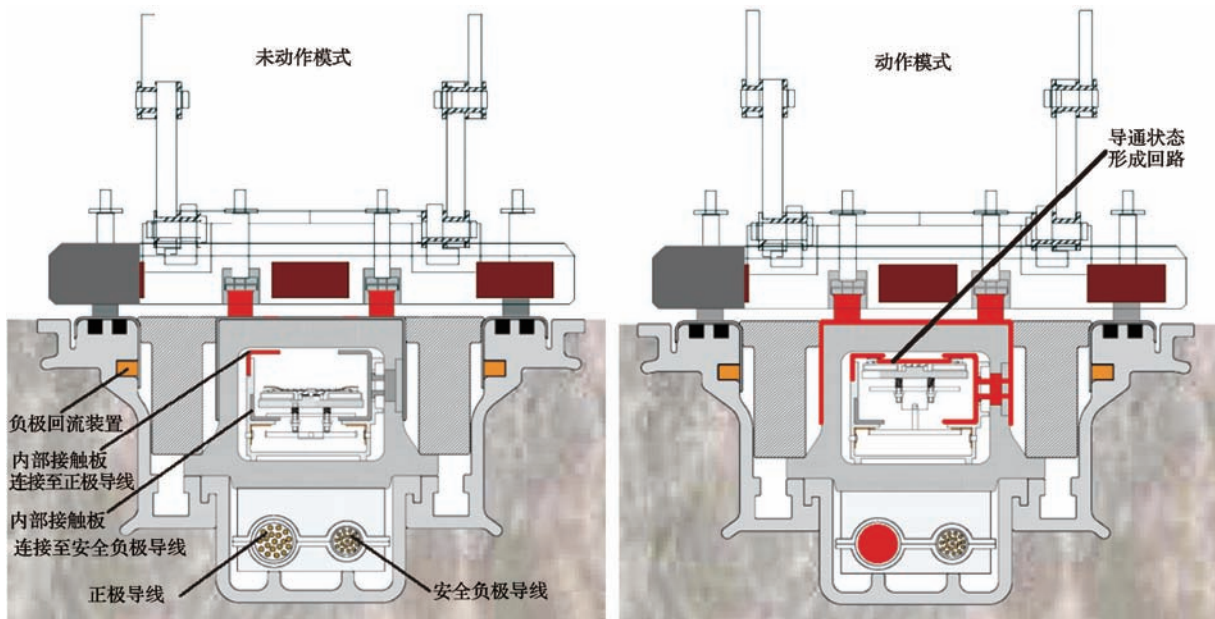


图1 TramWave 地面供电系统工作示意图

2.1.2 应用分析

①安全性: 地心引力将确保 TramWave 地面供电系统的基础状态为安全情况, 当集电器没有位于供电模块正上方时, 弹性磁铁条将维持在未激活状态。意外情况下, 若模块内部导电棒卡在上端, 导致弹性磁铁条因重力落下后, 供电模块仍处于导电状态, 系统将立即断开保护开关; 若水渗入模块, 当积水情况不严重时, 系统可维持正常运作; 淹水水位过高时, 系统将立即断开保护开关。因有电区域永远只有与集电器接触的区段, 故无触电的危险。此外负极回流是通过模块而不是像传统轨道交通车一样负极为走行轨, 因此无杂散电流, 可确保乘客安全。

②经济性: TramWave 地面供电系统的投资成本约为 (1 500~2 000) 万元 /km。

③可用性: TramWave 地面供电系统可与传统架空接触网结合使用, 实现混合方式供电。模块化组件组合生产车辆可大幅缩短系统的开发时程, 降低车辆购置及维修成本。目前意大利的那不勒斯 (试验线)、广东珠海有过该系统的应用。通过应用分析,

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, 其运用成熟度需根据实际情况进行全方位的检验。

2.2 APS 供电方式

APS 是法国阿尔斯通公司基于车地无线通信技术开发的一种地面供电系统, 主要由供电接触轨、供电箱、感应装置、车载天线、集电靴等零部件组成。

2.2.1 工作原理

APS 地面供电系统采用地面接触轨供电、钢轨回流制式。供电接触轨位于两条走行轨之间, 走行轨、接触轨轨面均与地面持平。接触轨的导电段每 8 m 增设一段 3 m 的绝缘段, 如图2所示。

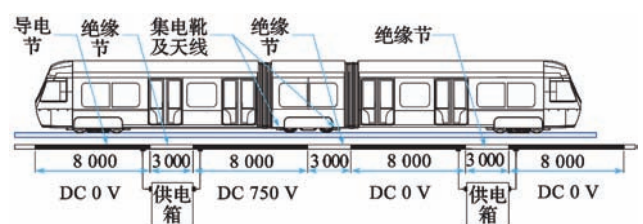


图2 APS 地面供电系统构成示意图

接触轨每 22 m 由 DC 750 V 一个直流分段供电, 只有当车辆通过时, 由无线电控制的开关才使接触轨通电。安装在车底 2 个转向架的集电靴获得供电。车辆通过后, 接触轨与走行轨相连, 电压为零。工作流程如下:

①列车的 2 个集电靴位于供电段 A, 供电箱 AB 的 AK1 闭合, AK2 断开, 导电段 A 电压为 DC 750 V, 列车通过 2 个集电靴受流, 走行轨回流; 此时 BK1、CK1、DK1 断开, BK2、CK2、DK2 闭合, 导电段 B、C、D 电压为 0, 如图 3 所示。

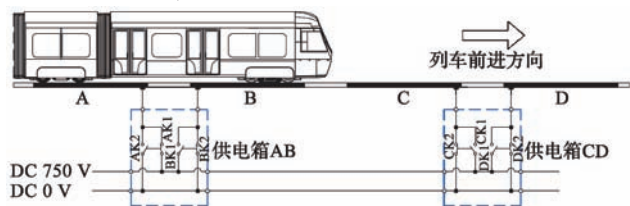


图 3 APS 地面供电系统工作示意图 1

②列车继续运行, 位于列车前端的集电靴进入导电段 A、B 之间的绝缘段, 供电箱 AB、CD 的全部开关状态与图 3 一致, 导电段 A 电压为 DC 750 V, 列车通过后端的集电靴继续受流, 此时导电段 B、C、D 电压为 0, 如图 4 所示。

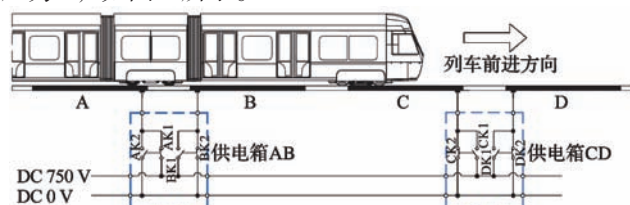


图 4 APS 地面供电系统工作示意图 2

③列车继续运行, 导电段 B 检测到列车, 供电箱 AB 的 BK1 闭合, BK2 断开, 导电段 A、B 通过不同的 2 个集电靴为列车供电, 此时导电段 C、D 电压为 0, 如图 5 所示。

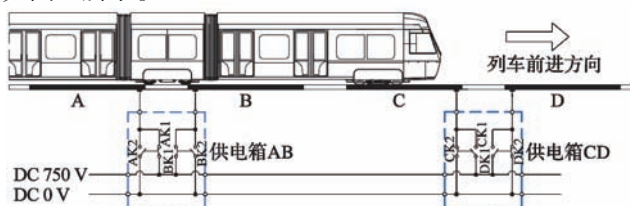


图 5 APS 地面供电系统工作示意图 3

④列车继续运行, 位于列车后端的集电靴进入导电段 A、B 之间的绝缘段, 导电段 A 检测不到列车, 供电箱 AB 的 AK1 断开, AK2 闭合, 列车前端的集电靴通过导电段 B 受流, 此时导电段 A、C、D 电压为 0, 如图 6 所示。

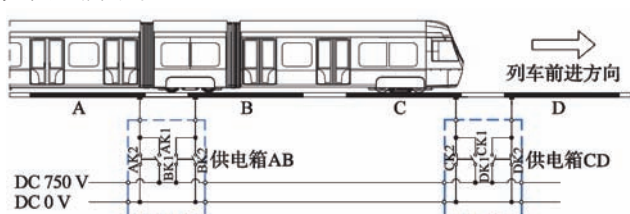


图 6 APS 地面供电系统工作示意图 4

⑤列车继续运行, 列车的 2 个集电靴进入导电段 B, 共同为列车供电, 供电箱 AB、CD 的全部开关与上图位置一致, 此时导电段 A、C、D 电压为 0, 如图 7 所示。

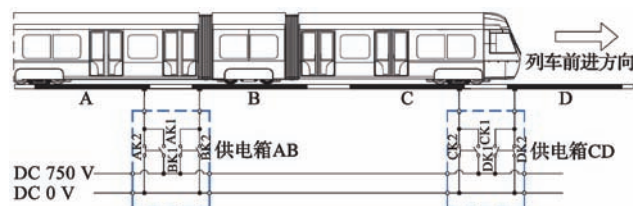


图 7 APS 地面供电系统工作示意图 5

APS 供电系统可使列车按上述过程持续运行, 列车可持续受流。

2.2.2 应用分析

①安全性: APS 地面供电系统工作机制决定了仅有当列车通过时, 该导电段带电, 且每节导电段的长度小于列车长度, 带电的导电段均处于列车覆盖的底部, 其余导电段处于接地状态, 可保证行人安全。

②经济性: APS 地面供电系统的投资成本约为 (4 000~5 000) 万元 /km。

③可用性: APS 地面供电系统可与传统架空接触网结合使用, 实现混合方式供电。目前国外多个城市有过该系统的应用。沿线埋设大量分区接触轨旁设备, 除了积水会对其造成较大程度的影响, 该系统在实际应用中碰到的另一个问题是绝缘段的磨损每年达 1 mm, 与导电段的高度产生差异, 这种差异无疑会缩短集电靴的寿命, 并且可能会影响其正常工作。此外, 积水和雨雪也会对该系统的正常使用带来隐患。

2.3 Primove 供电方式

Primove 是加拿大庞巴迪公司基于电磁感应技术开发的一种地面供电系统, 主要由直流供电电缆、逆变装置等部件组成。

2.3.1 工作原理

Primove 供电系统是在轨道中间敷设 DC 750 V 直流供电电缆, 并根据需要每隔一定距离设置一套逆变装置, 直流馈电电路由 2 个独立并完全绝缘的电缆组成, 与沿导轨布置的逆变器相连接, 由供电电缆供电。逆变器将 DC 750 V 直流电逆变为高频 AC 400 V 交流电, 从而使一次绕组区域得电, 在通过敷设在轨道中间的 3 条电缆时, 地面侧电路会产生感应磁场。车辆侧感应电路安装在车辆底下, 通过电磁感应原理, 感应出 AC 400 V 交流电, 再经过车辆整流装置将其转换为 DC 600 V 的直流电, 供牵引传动、辅助电源系统、车载储能系统使用。该系统的传递效率取决于二次绕组与一次绕组之间的间隙大小, 由于这个间隙会在列车运行中随着车体垂直方向的振动而变化, 所以传递效率一直在变化。工作原理如图 8 所示。

从图 8 可知, DC 750 V 直流供电电源经逆变、整流为牵引逆变器、辅助电源系统及车载储能系统供电, 牵引逆变器将直流输入经过逆变为交流异步电机供电。

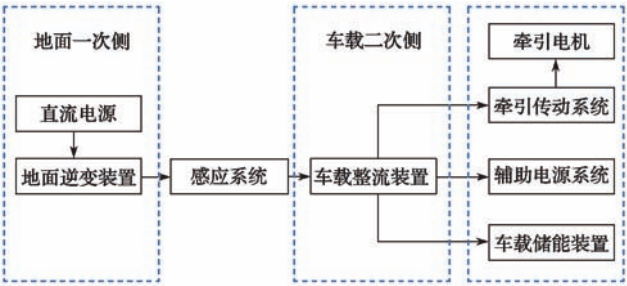


图 8 Primove 地面供电系统工作示意图

2.3.2 应用分析

①安全性: Primove 地面供电系统感应产生的电流是闭路的, 因此轨道内不会产生回流电流, 同时车辆侧高压设备的损坏不会造成顶网等事故的发生。

②经济性: Primove 地面供电系统的投资成本约为 (2 000~2 500) 万元 /km。

③可用性: Primove 地面供电系统可与传统架空接触网结合使用, 实现混合方式供电。目前仍处于试验验证阶段。尽管无线电感应的效率能达到 90% 以上, 但是由于能量的走向经过了逆变装置、无线电感应传输、整流装置等多个环节, 因此其系统效率较传统的接触式牵引系统低, 整个系统的效率在 50%~60% 左右; 地面一次侧与车载二次侧实现了物理隔离, 不会有集电靴和接触轨之间的磨耗问题, 雨雪天气也不会对系统的正常工作造成影响。

3 比较和分析

综合考虑国内外已执行、在执行的现代有轨电车供电方式, 架空接触网供电仍然是运用最广泛、最经济的供电方式 (见表 1)。但从现代有轨电车的定位及

表 1 现代有轨电车地面供电方式比较

项目	TramWave	APS	Primove
优势	技术新颖, 安全可靠	技术成熟, 供电可靠	无接触供电, 无磨耗
劣势	磨耗大、运营维护工作量大; 采用分段地面供电, 需铺设特殊轨道, 制造和后期运营维护成本高	磨耗大、积水预防难度大; 采用分段地面供电, 需铺设特殊轨道, 制造和后期运营维护成本高	多级能量传输、效率较低; 采用分段地面供电, 需铺设特殊轨道, 制造和后期运营维护成本高

发展趋势来看, 地面供电方式的有轨电车仍具有相当的优势。首先地面供电方式减少了架空接触网、承力索、电线杆所造成的视觉污染, 对现有城市基础设施影响较小; 其次地面供电方式应对极端特殊天气的能力更强。

4 结语

现代有轨电车供电系统是整个城市轨道交通非常重要的组成部分。相较于 TramWave 和 Primove 地面供电系统, 采用 APS 供电系统和架空接触网组合供电方式更为合理可行。架空接触网供电系统成本低、前期投入少、后期维护简便, 比较适合应用在远郊或地面低洼易产生积水的区域; 在路况较好、城区中心采用 APS 地面供电系统以保护城市现有景观。

参考文献:

[1] 苏国强, 郑磊, 黄坤林. 新型有轨电车供电方式分析 [J]. 铁路技术创新, 2013(6): 46-49.

[2] 吴泳江, 李芾. 现代有轨电车新型供电方式发展及运用现状 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2014(5): 5-9.

[3] 胡松, 刘志萍, 徐维祥. 我国新型有轨电车车辆选型及供电方式研究 [J]. 现代交通, 2014(3): 33-38.

[4] 沈继强. 现代有轨电车车辆选型和供电方式 [J]. 中国市政工程, 2012(5): 68-71.

[5] 吴梦芹. 新型轨道交通方式之现代有轨电车系统发展对策研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.

[6] 王健全, 袁富卫. 城市有轨电车供电方式探讨 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2015(1): 47-51.

[7] 陈志雄. 现代有轨电车无接触网技术应用分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2014(4): 117-121.

[8] 何斌. 现代有轨电车供电系统方案研究 [J]. 成都: 西南交通大学, 2016.

[9] 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): 105-108.

[10] 朱亮, 张继彤, 张济民. 低地板有轨电车无接触网供电技术的研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2014(9): 84-88.

[11] 孙康, 佟刚. 现代有轨电车供电方式的选择分析 [J]. 科技视界, 2015(11): 301-303.

[12] 吴其刚. 现代有轨电车系统发展的重难点及对策研究 [J]. 铁道工程学报, 2013(12): 89-92.

作者简介: 李雪松 (1986-), 男, 工程师, 长期从事轨道交通线路勘察设计及轨道车辆电气化研究。

(上接第 93 页)

[5] Shin K B, Lee J Y, Cho S H. An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus [J]. Composite Structures, 2008, 84(3): 228-240.

[6] Anghileri M, Castelletti L M L, Pirola M, et al. C IV class tram crashworthiness assessment [J]. International Journal of Crashworthiness, 2008, 13(4): 425-435.

[7] 雷成, 肖守讷, 罗世辉. 城际动车组车头耐碰撞性研究 [J]. 机车电传动, 2013(1): 60-63.

[8] Schroeder MP. Developing CEM design standards to improve light rail vehicle crashworthiness [C] //Proceedings of the 2006 IEEE/ASME Joint. Rail conference, 2006: 141-147.

[9] Bocchieri R T, Kirkpatrick S W, Navarro-Northrup C, et al.

Collision Safety Improvements for Light Rail Vehicles Operating in Shared Right of Way Street Environments [C]. Texas: ASME 2009 Rail Transportation Division Fall Technical Conference, 2009: 61-70.

[10] Kovandova H, Valka R. Experimental Study of Non-Compatible Collision of Rail and Road Vehicle [J]. Promet-Traffic-Traffico, 2014, 26(6): 459-466.

[11] 李兆凯. 营运客车多形态正面碰撞安全性及评价方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

作者简介: 李 铎 (1989-), 男, 硕士, 从事机车车辆设计与可靠性研究。