

# 市域动车组无网自走行技术的应用

王子超<sup>1</sup> 师睿<sup>2</sup> 姚海英<sup>3</sup> 马泽宇<sup>3</sup> 马彬睿<sup>3</sup> 李军<sup>3</sup> 吴健<sup>4</sup>

(1. 中国中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春; 2. 神州高铁技术股份有限公司, 100044, 北京;

3. 北京北交新能科技有限公司, 100044, 北京; 4. 北京交通大学电气工程学院, 100044, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 结合某城市新一代全自动无人驾驶市域动车应用项目,介绍了利用车载储能系统实现市域动车的无网自走行,既解决了市域动车在正线上因受电失败而导致不能正常运营的问题,又解决了市域动车因故停在分相区后只能等待救援才能驶离分相区的问题,实现市域动车的全自动无人救援。分析了市域动车车辆利用钛酸锂车载储能系统在 AW3 载荷条件下,分别在平直道上牵引 15 km(隧道)以及在 20‰坡道上牵引 600 m(分相区)的牵引仿真计算,提出了对车载储能系统的能量和功率需求,并综合两种需求提出了系统解决方案。方案中提到除了满足牵引能量和功率需求以外,针对轨道交通行业对子部件体积、重量、安全以及智能化方面的需求,车载储能系统选择钛酸锂作为最终的储能设备;并结合 BMS(电池管理系统)的功能讲述了高效合理利用车载储能系统,实现系统利用率的最大化。

**关键词** 市域快轨; 钛酸锂车载储能系统; 无网自走行

**中图分类号** U266

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.035

## Application of Netless Self-running Technology for Urban EMU

WANG Zichao, SHI Rui, YAO Haiying, MA Zeyu, MA Binrui, LI Jun, WU Jian

**Abstract** Taking the application project of a new generation of fully automatic unmanned urban EMU in certain city, netless self-running function of urban EMU achieved by adopting on-board energy storage system is introduced, which has solved the problem of urban EMU abnormal operation on the trunk line due to electricity failure, and the problem that urban EMU will park in neutral zone after failure occurs and can only exit with help of rescue, realizing fully automatic unmanned rescue for urban EMU. The traction simulation calculation of 15 km traction on straight path (tunnel) and 600 m traction on 20‰ slope (neutral zone) are analyzed respectively, under the AW3 load conditions of urban EMU vehicle using lithium titanate on-board energy storage systems. The energy and power demands for on-board energy storage system are brought about, and the system solutions that consider both aspects are put for-

ward. Other than meeting the demand of traction energy and power, the scheme also mentioned the demand from rail transit industry for subcomponent parts size, weight, safety, and intelligent management, lithium titanate is eventually chosen as the energy storage equipment for the on-board storage system. With the function of the battery management system (BMS), how to make efficient and reasonable use of on-board energy storage system and to maximize the system utilization are depicted.

**Key words** surban EMU; lithium titanate on-board energy storage system; netless self-running

**First-author's address** CRRC Changchun Rail Car Co., Ltd., 130062, Changchun, China

随着我国城市轨道交通的迅猛发展,大型城市的轨道交通已由市区往郊区、市域延伸。而市域快轨线路因为连接中心城区和郊区,所以在线路设计中一般会存在隧道和分相区。虽然市域轨道在建设和运营方面会考虑牵引供电的安全性和可靠性,但仍不可避免因供电系统故障、弓网故障、人为(恐怖)破坏、偶发因素、自然灾害等引起市域轨道车辆供电中断或瘫痪。如果车辆停在隧道内,极易引起恐慌,诱发次生灾害。当车辆正常受电失败时,利用无网自走行车载储能系统将车辆牵引至最近车站,疏散乘客下车,能有效缩短整条线路恢复正常运营应急处置的时间,缓解乘客恐慌,减小社会舆论及社会关注度。近几年,已有一些城市的部分地铁线路增加了地铁车辆的无网自走行功能,如天津地铁 2 号线、5 号线以及 6 号线 2016 年就在部分车辆上进行了改造,增加了车辆的无网自走行功能。而市域动车一般车辆网压较高,车辆又较地铁车辆重很多,所以市域动车的无网自走行功能对车载储能系统的功率输出及升压装置功率输出要求就很高。综合考虑性价比,提出一种适用于市域动车无网自走行的解决方案很有必要。而基于无人驾驶

技术,如何实现车辆在正常受电失败后自动进入无网自走行模式,也需要综合考虑车载储能系统的智能化设计。

## 1 无网自走行需求

市域轨道交通大多采用交流 25 kV、直流 1 500 V 两种供电制式。不管哪种供电制式,都存在供电故障的情况,如主变电所故障、柔性架空接触网移位或变形、牵引变电所故障、车辆误停在分相区等。这些故障都会影响车辆的正常运营,轻者影响乘客的正常出行,重者会造成乘客恐慌,引发社会舆论的关注。尤其对于存在长距离地下或隧道的线路,一旦车辆不能正常供给照明及通风,将会给乘客带来极大的心里恐慌。如果车辆能够利用车载储能系统实现车辆的无网自走行,就能解决上述问题。

## 2 无网自走行系统方案

### 2.1 概述

车辆无网自走行功能的实现主要通过控制车载储能系统、蓄电池牵引控制箱、牵引变流器以及 AC/DC(交/直流电)双向变流器的顺序投入来实现。在整个无网自走行模式下,车辆要与正常供电模式互锁,并通过蓄电池牵引控制箱中的二极管防止正常网压逆流至蓄电池储能系统。

无网自走行车载储能系统的设计要综合考虑整车安装空间、最严苛的牵引工况、储能系统的选型以及车载储能系统的利用率,实现无网自走行车载储能系统方案最优和利用率最大化。

以某市域线路为例,车辆采用 6M2T8 编组。为实现车辆的无网自走行功能,车辆设置两组独立的 DC 600 V 牵引蓄电池,并设置两组独立的牵引蓄电池双向变流器。

正常牵引模式下,双向 AC/DC 变流器将交流三相 380 V 电源整流为直流电源,并通过通讯与 TCMS(列车监控系统)以及 BMS(电池管理系统)进行数据交互,为牵引蓄电池系统充电。

无网自走行模式下,牵引蓄电池通过双向变流器向 AC 380 V 母线提供电源,为牵引系统相关冷却通风负载以及空调、空压机供电,同时通过牵引蓄电池开关箱接入牵引变流器中间直流母线,为 M1 和 M4 车上的牵引逆变器供电,供 8 台牵引电机工作。

### 2.2 车辆无网自走行牵引仿真计算

#### 2.2.1 最大牵引力计算

车辆参数如表 1 所示。

表 1 车辆参数表

参数	数值
车辆最大运行速度 $v/(\text{km/h})$	50
超载时车辆静态质量/ $\text{t}$	543.40
超载时车辆动态质量/ $\text{t}$	575.88

列车全运行阻力  $F_r$  为各种阻力之和:

$$F_r = F_{\pi} + F_{rc} + F_{rs} \tag{1}$$

式中:

$F_r$ ——列车全运行阻力;

$F_{\pi}$ ——运行阻力;

$F_{rc}$ ——曲线阻力;

$F_{rs}$ ——坡道阻力。

1) 运行阻力。运行阻力  $F_{\pi}$  按 Davis 公式计算:

$$F_{\pi} = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \tag{2}$$

式中:参数  $a$ 、 $b$  和  $c$  取决于列车编组和载客情况。阻力系数参数如表 2 所示。取  $v = 50 \text{ km/h}$ ,经计算得, $F_{\pi} = 9.67 \text{ kN}$ 。

表 2 阻力系数参数表

参数	数值
载客情况	AW3
$a/\text{kN}$	5.22
$b/(\text{kN}/(\text{km/h}))$	0.011 9
$c/(\text{kN}/(\text{km/h})^2)$	0.001 54

2) 坡道阻力。坡道阻力  $F_{rs}$  按以下公式计算:

$$F_{rs} = \frac{m_{\text{stat}} g S}{1\ 000} \tag{3}$$

式中:

$m_{\text{stat}}$ ——列车静态质量,取 543 400 kg;

$g$ ——重力加速度,9.81  $\text{m/s}^2$ ;

$S$ ——计算坡度,%。

取  $S = 0$ ,代入式(3)计算得  $F_{rs} = 0 \text{ kN}$ 。

3) 曲线附加阻力。曲线附加阻力  $F_{rc}$  与曲线半径、列车速度、曲线外轨超高以及轨距加宽、车辆轴距等许多因素有关,计算时一般都采用经验公式。参考中国铁道出版社出版的《动车组牵引计算与仿真系统》,又考虑动车组全长在曲线内,公式如下:

$$F_{rc} = m_{\text{stat}} (2\ 000/R) g \tag{4}$$

式中:

$R$ ——正线最小曲线半径,m。

式(4)中,取 $R=600\text{ m}$ ,计算得 $F_{\text{rc}}=17.8\text{ kN}$ 。

故 $F_{\text{r}}=F_{\text{rr}}+F_{\text{rc}}+F_{\text{rs}}=27.47\text{ kN}$ 。

4) 根据公式 $F=m\cdot a$ 推导出:

$$(F-F_{\text{rr}}-F_{\text{rs}}-F_{\text{rc}})=m\cdot a \tag{5}$$

式中:

$F$ ——车辆牵引力;

$F_{\text{rr}}$ ——列车基本阻力;

$F_{\text{rs}}$ ——线路坡道阻力;

$F_{\text{rc}}$ ——线路曲线阻力;

$m$ ——列车动态质量,取 $575\,880\text{ kg}$ ;

$a$ ——加速度。

车辆在AW3(超载)状态下,按照 $a=0.28\text{ m/s}^2$ 的启动加速度启动,车辆需要克服基本阻力、坡道阻力和曲线附加阻力。经计算得 $F=188.7\text{ kN}$ 。所以车辆最大牵引力设定在 $170\text{ kN}$ 。牵引力特性曲线如图1所示。

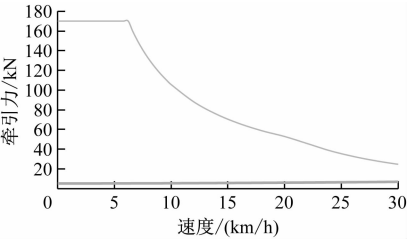


图1 牵引力特性曲线

2.2.2 正线牵引仿真计算

正线上的车辆无网自走行仿真计算,按照车辆AW3载荷条件下平直道运行 $15\text{ km}$ 。牵引计算仿真结果如图2所示。图中,线路电流是全车总的牵引网侧电流,是2个牵引蓄电池的总电流。

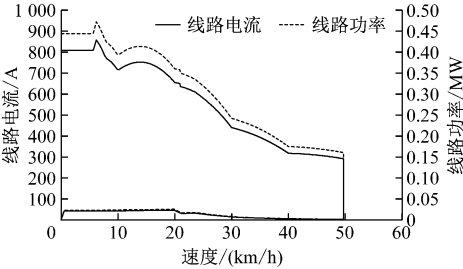


图2 正线线路电流、线路功率与速度曲线

2.2.3 分相区牵引仿真计算

分相区的车辆无网自走行仿真计算按照车辆AW3载荷条件下 $20\%$ 坡道运行 $600\text{ m}$ 。牵引计算仿真结果如图3所示。

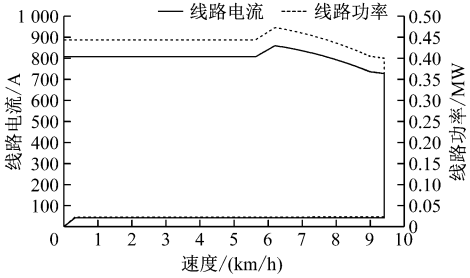


图3 分相区线路电流、线路功率与速度曲线

2.2.4 车载储能系统功率和电量需求分析

通过牵引仿真计算,可以得到对车载储能系统的功率和电量需求。具体需求如表3所示。

表3 车载储能系统功率和电量统计表		
项目	平直道牵引 15 km	20%坡道牵引 600 m
负载	AW3	AW3
牵引线电压/V	550	550
最大线路电流/A	859	860
均方根线路电流/A	344.0	734.4
最大电机电流/A	229.0	228.9
均方根电机电流/A	53	178
最高速度/(km/h)	50.0	9.5
运行时间/min	20.7	4.1
牵引能耗/kWh	66.2	34.0
380 V 辅助能耗/kWh	35	7
总能耗/kWh	101.2	41

综合考虑两种无网自走行的工况,每组车载储能系统需要满足以下要求:① 每组车载储能系统能够承受的最大峰值电流 $\geq 860\text{ A}/2=430\text{ A}$ ;② 每组车载储能系统能够承受的持续平均电流 $\geq 734.4/2=367.2\text{ A}$ ;③ 每组车载储能系统额定电量 $\geq 101.2\text{ kWh}/2=50.6\text{ kWh}$ 。因此,车辆可以配置两组标称容量为 $80\text{ Ah}$ 、额定电压为 $\text{DC } 662.4\text{ V}$ 、电量为 $52.9\text{ kWh}$ 的钛酸锂电池,每组钛酸锂电池持续放电电流为 $400\text{ A}$ ,峰值放电电流为 $560\text{ A}$ 。这样就能满足上述无网自走行对储能系统的要求。

2.3 无网自走行车载储能系统控制逻辑

2.3.1 无网自走行车载储能系统投入条件

蓄电池牵引控制流程如图4所示。

2.3.2 无网自走行车载储能系统退出条件

以下条件任意一个出现,牵引蓄电池牵引指令将撤销,蓄电池牵引使能信号复位,撤销后复位电动转换开关:① 任意1台牵引蓄电池启动信号置0;② 或者任意1台牵引蓄电池“牵引蓄电池OK”信

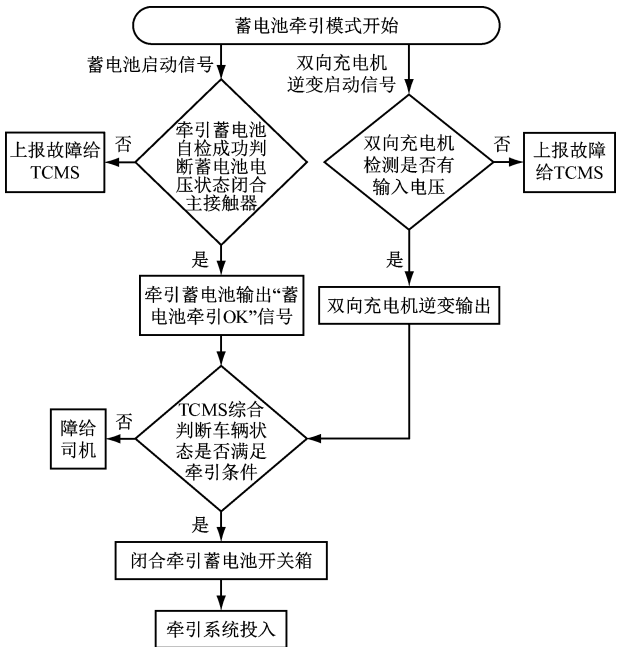


图4 蓄电池牵引控制流程

号置0;③或任意1台牵引蓄电池无故障信号置1(1代表故障)。

3 车载储能系统蓄电池的选型

目前轨道交通行业车辆多数使用镍镉碱性电池,少数使用铅酸电池。钛酸锂电池目前在CR400BF动车组上作为辅助蓄电池批量应用,部分也在地铁车辆上使用。铅酸蓄电池、镍镉碱性电池、钛酸锂电池的性能参数如表4所示。

表4 不同种类蓄电池性能参数

电池类型	铅酸蓄电池	镍镉碱性电池	钛酸锂电池
标称电压/V	2.0	1.2	2.3
能量密度/(Wh/kg)	35~40	40~60	60~110
记忆效应	有	有	无
温度范围/℃	-30~40	充电:-40~45 放电:-40~50	充电:-40~45
充放电倍率	(0.1~1.0) C	(0.1~2.0) C	充电:(2~8) C 放电:(3~12) C
自放电率/(%/月)	4~6	15~20	1~2
循环寿命/次	800 (20℃,0.2 C)	2 500 (20℃,0.2 C)	10 000 (20℃,1 C)
使用寿命/a	5~6	10~15	10~15
质量/t	1.0	1.0	0.6

轨道交通车辆等车载储能设备因为要安装在车辆上,安装空间和质量都有严格要求,而钛酸锂电池能量密度高,相同电量的蓄电池,钛酸锂电池要比碱性电池轻10%~20%。另一方面,轨道交通行业车辆的使用寿命一般为30a,钛酸锂电池的长寿命特性也适合应用在轨道交通车辆上。

钛酸锂电池配置电池管理系统后,能够实时监控蓄电池状态,一旦发现异常及时上报整车。在蓄电池发生严重故障时还会切断电路进行保护,智能化程度更高。钛酸锂电池还具有免维护性,整个寿命周期只需要定期维护即可,不需要定期添加电解液和消除记忆效应。这在很大程度上减轻了蓄电池的维护工作量。

铅酸电池由于对温度极为敏感,又考虑铅污染问题,欧洲各国已禁止使用。镍镉电池由于镉重金属污染,欧洲禁止生产。镍氢电池由于能量密度不高,评估为过渡产品。其他三元和磷酸铁锂等电池由于安全性能不高,所以不建议应用在轨道交通行业。因此,从免维护、能量密度角度,钛酸锂电池是未来发展的方向。

4 系统利用率最大化

无网自走行车载储能系统除了能满足车辆受电失败的应急牵引之外,还能在车辆段内使用。在车辆段区域内,列车在进行出入库、调车、转轨、自动洗车等作业时,使用车载储能系统供电牵引列车,无需电网供电。

另外,当车辆辅助逆变器故障时,也可以通过投入牵引蓄电池和双向变流器的方式来实现牵引蓄电池为车辆辅助负载供电。但是此种工作模式区别于车辆无网自走行模式,蓄电池牵引控制箱中的接触器不需要闭合,钛酸锂车载储能系统只需要为车辆辅助负载供电,双向变流器工作在逆变模式。

5 结语

本文通过提出市域轨道车辆需要无网自走行的需求,进而得出实现车辆无网自走行功能的解决方案。方案又从车载储能系统电路设计、整车控制以及车载储能系统选型等方面进行了阐述和总结,为以后市域轨道交通车辆的无网自走行功能工程化打下了基础。

参考文献

[1] 王子超,高硕遥.地铁钛酸锂电池车载储能系统研究[J].城市轨道交通研究,2017(10):36.  
[2] 沈涛,周巧莲.城市轨道交通车辆电池应急牵引功能的实现[J].城市轨道交通研究,2016(7):110.  
[3] 曹春伟,孙健,陈兴虎.地铁列车蓄电池紧急牵引研究[J].汽车与车辆,2017(8):54.

(收稿日期:2020-08-18)