

# 国内外跨座式单轨车应用概况及其电气牵引系统技术方案分析

张 宾<sup>1</sup>, 张 丽<sup>2</sup>, 刘俊明<sup>3</sup>, 翟丽佳<sup>3</sup>

1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 重庆 401120;
3. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)

**摘 要:** 基于城市轨道交通快速发展的大背景, 阐述了跨座式单轨车和悬挂式单轨车的发展历程, 以及国内外跨座式单轨车的应用情况, 探讨跨座式单轨车的技术成熟度。重点介绍了跨座式单轨车电气牵引系统的主要方案及特点, 对比分析了主要接地保护方案的优劣, 展望跨座式单轨车后续发展的关键技术及推广情况。

**关键词:** 城市轨道交通; 跨座式单轨车; 悬挂式单轨车; 电气牵引系统; 主电路; 接地保护; 重庆单轨3号线  
**中图分类号:** U232 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-128X(2021)02-0031-06

## Application of Straddle-type Monorail Vehicle in China and Abroad and Technical Scheme Analysis of Its Electric Traction System

ZHANG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, LIU Junming<sup>3</sup>, ZHAI Lijia<sup>3</sup>

1. Zhuzhou CRRC Time Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd., Chongqing 401120, China;
3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China )

**Abstract:** Based on the background of the rapid development of urban rail transit, the development course of straddle-type monorails and suspended monorails was expounded, as well as the application of straddle-type monorails in China and abroad, and the technical maturity of straddle-type monorails was discussed. The main scheme and characteristics of the straddle-type monorail electrical traction system were mainly introduced, the advantages and drawbacks of the main grounding protection schemes were analyzed and compared, and the key technology and promotion of straddle-type monorail vehicle were prospected.

**Keywords:** urban rail transit; straddle-type monorail; suspended monorail; electrical traction system; main circuit; grounding protection; Chongqing monorail line 3

## 0 引言

近年来, 城市轨道交通作为一种载容量大、绿色环保、节约土地资源的运输方式, 成为城市发展的必然选择<sup>[1-3]</sup>。从车辆类型划分, 城市轨道交通车辆分为

大运量的地铁, 中、低运量的自动旅客捷运、有轨电车、磁浮车辆、直线电机车辆、单轨等。单轨根据轨道梁的安装方式分为跨座式单轨和悬挂式单轨2种类型。其中, 跨座式单轨为车辆骑行于轨道梁上方, 通过导向轮和稳定轮骑跨在轨道两侧; 悬挂式单轨为车辆悬挂于轨道梁下方, 轨道梁为下部开口箱型梁, 车辆走

收稿日期: 2019-12-01; 修回日期: 2020-11-01

通信作者: 张 宾(1985—), 男, 工程师, 长期从事城市轨道交通电气牵引系统技术集成的研究工作;

E-mail: zhangbin4@csrzc.com

行轮与导向轮均置于箱型梁内<sup>[4-6]</sup>。本文将介绍跨座式单轨车在国内外的应用情况并对其所用电气牵引系统的主要技术方案进行对比分析。

## 1 国外跨座式单轨车的应用情况

对于单轨系统,其历史比地铁更为悠久,世界首条单轨交通于 1825 年诞生在英国,比世界第一条地铁(伦敦地铁)提前近 40 年。从马拉车、蒸汽机牵引、螺旋桨驱动、内燃发动机驱动到电力驱动,单轨系统交通经历了近 200 年的历史。随着技术的发展,单轨系统技术也逐步发展为 2 类:Alweg 单轨系统和 Safège 单轨系统,即跨座式单轨和悬挂式单轨。

Alweg 为瑞典企业家名字的缩写,由该企业家主导研发了 Alweg 单轨系统,此系统是最为成功的单轨系统,世界各地的单轨系统大多基于此系统原型而研发。1960 年,Alweg 技术授权给日本日立公司,并于 1964 年完成羽田机场单轨建设,此项目首次采用了单轨道岔系统,至今仍然在运营。

1919 年,25 家公司组建了 Safège 联盟公司,其成员包括轮胎制造商米其林和雷诺汽车,Safège 联盟公司研发出了 Safège 单轨系统,后来法国将其公共产业收归国有。目前运行的日本湘南悬挂式单轨系统、千叶悬挂式单轨系统和德国杜塞尔多夫机场悬挂式单轨系统都是基于此系统开发研制。

单轨起源和技术革新在欧洲,影响力形成在美国,兴盛在亚洲。国外跨座式单轨应用情况如表 1 所示。

## 2 国内跨座式单轨车的应用情况

我国首次引进的跨座式单轨系统为 2005 年开通的重庆单轨 2 号线,电气牵引系统采用日本日立的技术,后对其进行国产化,已成熟应用在重庆单轨 2 号线和 3 号线,重庆单轨 3 号线也是迄今为止世界跨座式单轨线路最长的单轨,重庆单轨也是我国唯一批量运营的单轨线路。近年,国内各车辆供应商也在研发各种新型的跨座式单轨车辆,国内跨座式单轨应用情况如表 2 所示,车辆部分参数如表 3。

表 1 国外跨座式单轨车应用汇总(不含悬挂式单轨)

Table 1 Application summary of the straddle-type monorails in abroad(exclusive suspension monorails)

国家/城市(州)	项目名称	运行速度/(km·h <sup>-1</sup> )	牵引系统供货商	开通年份
德国	伍珀塔尔单轨	60	Eugene Langen	1901
美国/加利福尼亚州	迪士尼乐园单轨		Mark I,Mark II (Alweg,WDI) Mark III, Mark V (WDI) Mark VII (WDI, Bombardier)	1959
美国	西雅图单轨	72	Alweg	1962
日本/东京	羽田机场单轨	80	HITACHI	1964
日本/大阪	世博园单轨	50	HITACHI	1970
美国/佛罗里达州	迪士尼世界单轨	89	Mark IV (WDI) Mark VI (WDI, Bombardier)	1971
日本	北九州单轨	65	HITACHI	1985
澳大利亚	悉尼单轨	60	Von Roll	1988
日本	大阪单轨	70	HITACHI	1990
美国/新泽西州	纽瓦克单轨	60	Von Roll → Adtranz → Bombardier	1996
美国/佛罗里达州	杰克逊维尔单轨	56	Bombardier	1997
日本/多摩市	多摩单轨	60	HITACHI	1998
日本	冲绳单轨	60	HITACHI	2003
马来西亚	吉隆坡单轨	60	HITACHI → Scomi	2003
美国/内华达州	拉斯维加斯单轨	80	Bombardier	2004
俄罗斯	莫斯科单轨	60	Intamin	2005
新加坡	圣淘沙单轨	60	HITACHI	2007
阿联酋/迪拜	朱美拉棕榈岛单轨	70	HITACHI	2009
巴西/圣保罗	单轨 15 号线	80	Bombardier	2014
印度	孟买单轨	80	Scomi	2014
韩国/大邱	单轨 3 号线	70	HITACHI	2015
巴西/圣保罗	云轨 17 号线		比亚迪	在建
伊朗	库姆单轨		SPA	在建
沙特	利雅得单轨		Bombardier	在建
俄罗斯	Krasnogorsk 单轨		Morton	在建
巴西/圣保罗	单轨 18 号线		Scomi	暂停
巴西	玛瑙斯单轨		Scomi	暂停

表 2 国内跨座式单轨车应用汇总 (不含悬挂式单轨)

Table 2 Application summary of the straddle-type monorails in China (exclusive suspension monorails)

城市	项目名称	运行速度 / (km·h <sup>-1</sup> )	牵引系统供货商	开通 (或车辆下线) 年份
重庆	重庆单轨 2 号线	80	HITACHI	2005
重庆	重庆单轨 3 号线	80	HITACHI, 中车四方所, 中车时代电气	2011
青岛	四方永磁跨座式单轨	80	中车时代电气	2016 (车辆下线)
深圳	比亚迪云轨	60	比亚迪	2016
银川	比亚迪云轨	60	比亚迪	2017
株洲	株机永磁跨座式单轨	80	中车时代电气	2018 (车辆下线)
长春	长客新一代跨座式单轨列车	80	中车四方所	2018 (车辆下线)
青岛	四方新一代跨座式单轨列车	100	中车时代电气	2020 (车辆下线)

表 3 跨座式单轨车主要参数对比

Table 3 Main parameter comparison of straddle-type monorails

项点	国内			国外	
	项目 1 (重庆)	项目 2 (四方)	项目 3 (株机)	项目 1 (庞巴迪)	项目 2 (Scmi)
车辆宽度 /mm	2 900	2 900	3 100	3 147	3 080
车辆长度 /mm	15 500/14 600	15 500/14 600	14 995/14 020	13 210/11 845	11 000
车辆高度 /mm	3 840	3 840	3 835	3 019	3 200
走行轮轮径 /mm	1 006	1 006	1 006	1 006	1 006
车辆质量 /t	28.6/27.6	28.6/27.6	29.82/28.59	14(平均)	15
直流供电网压 /V	1 500	1 500	1 500	750	750
运营速度 / (km·h <sup>-1</sup> )	80	80	80	80	80
恒转矩段加速度 / (m·s <sup>-2</sup> )	0.83	0.84	1.0	1.1	1.3
最大常用制动减速度 / (m·s <sup>-2</sup> )	1.1	1.1	1.1	1.2	1.5
紧急制动减速度 / (m·s <sup>-2</sup> )	1.2	1.2	1.2	1.3	1.5
传动比	6.55	6.55	11.00		4.17
牵引电机类型	异步牵引电机	异步牵引电机	永磁牵引电机	永磁牵引电机	异步牵引电机
电机功率 /kW	105	105	130		120
冷却方式	变流器走行风冷	变流器走行风冷	变流器水冷, 电机自通风冷却	变流器水冷	变流器水冷

### 3 电气牵引系统关键技术的方案分析

对于跨座式单轨车电气牵引系统的应用情况, 不同厂家有不同的方案, 下面将对于应用较为成熟的方案进行对比分析, 主要从车辆技术参数、系统主电路、接地保护方案等方面进行对比分析。

#### 3.1 车辆主要参数

国内外成熟应用的跨座式单轨车的主要技术参数对比如表 3 所示。

#### 3.2 主电路

重庆单轨 3 号线车辆由 3 个或 4 个动力单元组成, 每个单元由 1 辆全动车和 1 辆半动车构成。自主牵引系统与原车牵引系统单元的主电路分别如图 1 和图 2 所示。在 2 个牵引系统方案中, 单元的主要设备配置基本相同, 牵引系统均由熔断器箱、断路器箱、电抗器箱、牵引逆变器和牵引电机等主要设备构成, 以下

将分析其主要的不同点。

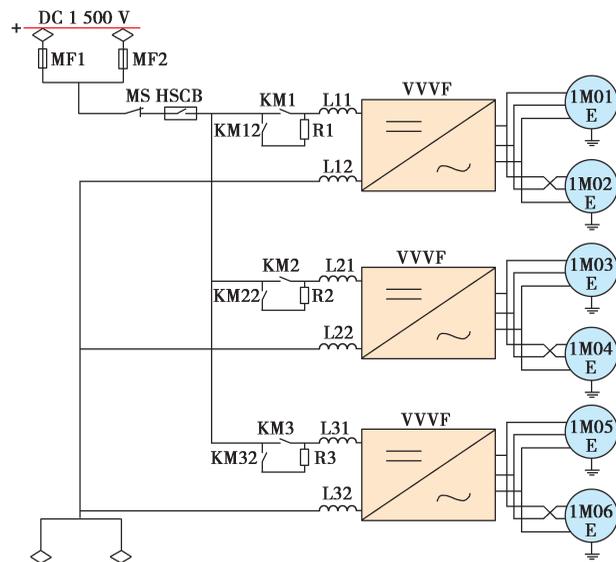


图 1 重庆单轨 3 号线自主牵引系统主电路  
Fig. 1 Self-developed traction system main circuit of Chongqing straddle-type monorail line 3

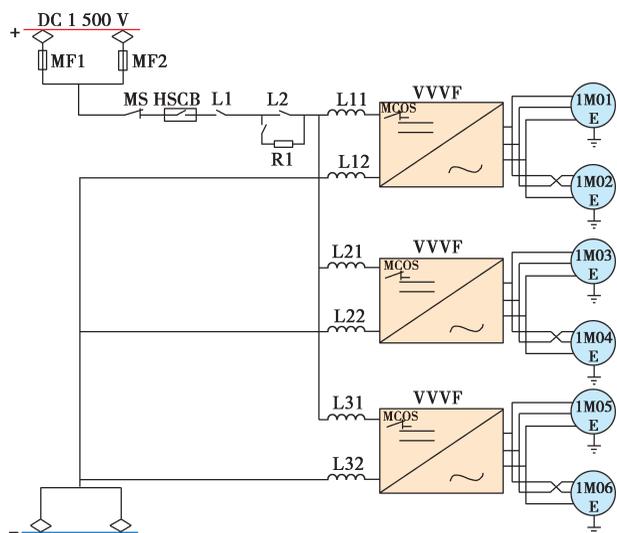


图2 重庆单轨3号线原车牵引系统主电路

Fig. 2 Original traction system main circuit of Chongqing straddle-type monorail line 3

1) 充电回路

自主牵引系统主电路的每个逆变器前端分别设置一路充电回路，用于对每个牵引逆变器的支撑电容进行充电。其控制逻辑如下：①斩波回路未开通、本车高速断路器已闭合、网压正常、接收到来自车辆的向前或向后方向控制指令，控制单元输出“充电接触器KM12/KM22/KM32合”指令进行充电；②当充电接触器已闭合，并且支撑电容电压在一定的时间内上升到一定值后，控制单元输出“短接接触器KM1/KM2/KM3合”指令；③在控制单元确认短接接触器闭合后延时撤消“充电接触器合”指令。此时，牵引高压回路建立完成。在车辆运行过程中，短接接触器为常闭状态，充电接触器为断开状态，主电路充电逻辑图如图3所示。

原车牵引系统主电路的3台牵引逆变器前端设置一路充电回路，同时对3台牵引逆变器的支撑电容进行充电。其控制逻辑如下：①斩波回路未开通、本车高速断路器已闭合、网压正常、接收到来自车辆的向前或向后方向控制指令，控制单元输出“充电接触器L1合”指令进行充电；②充电接触器已闭合、支撑电容电压在一定的时间内上升到一定值后，控制单元输出“短接接触器L2合”控制指令。此时，牵引高压回

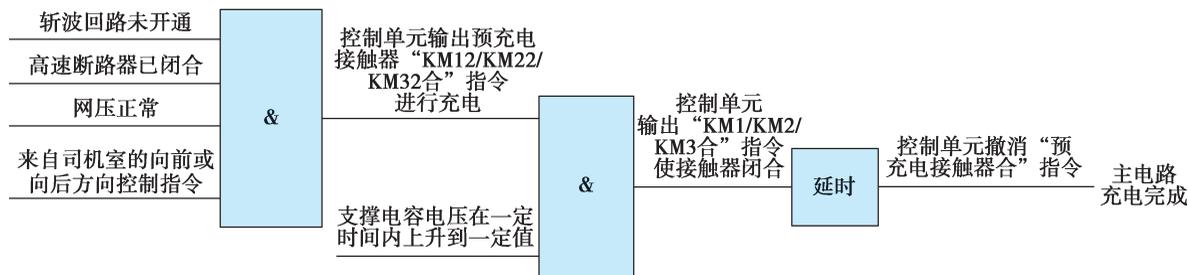


图3 重庆单轨3号线自主牵引系统主电路充电逻辑

Fig. 3 Charging logic of self-developed traction system main circuit of Chongqing straddle-type monorail line 3

路建立完成，处于待命状态。在车辆运行过程中，L1和L2均为闭合状态。

2) 故障隔离

由于主回路存在差别，当充电回路后端故障而需要隔离此路牵引回路时，自主系统仅需断开此回路的短接接触器，其他正常回路可正常工作。对于原车，当充电回路后端或逆变器前端故障时，将通过断开高速断路器将此单元全部隔离；当逆变器后端故障时，将通过自动断开逆变器内部的MCOS开关进行保护，复位时需要人为在车下完成开关的恢复工作。

3.3 车辆与供电接地保护方案

跨座式单轨车均采用橡胶轮胎，其接地保护方案与传统采用钢轮的地铁车辆不同。根据应用情况，一般有3种接地方案：浮轨接地、GR保护接地和大地轨接地。由于大地轨接地工程实现较为复杂，所以常用的接地保护方案为采用浮轨和GR保护的接地方案。

3.3.1 浮轨接地保护方案

浮轨的接地保护方案原理图见图4，与传统采用钢轮钢轨的地铁项目的接地方式类似，车辆牵引系统设置差分检测系统来检测后端短路故障；设备与车体等电位，车体与负极间设置接地电阻；车辆进站后，车体与大地连通以保证乘客的安全；地面变电站负极轨和大地绝缘，但在负极轨和大地之间增加监测点，当电压高于门槛值时，将负极轨和大地通过接触器接通放电，以保证负极轨几乎处于接地状态。车辆到站后，通过车辆接地刷与地面的接地带连接，保证车体与大地等电位，确保人身安全。

3.3.2 GR接地方案

GR保护接地方案已成熟应用在重庆单轨2号线和3号线车辆上，原理图见图5。车体与负极轨间不直接连通，两者之间设置GR继电器，当检测到车体与负极轨间电压大于100V时，GR继电器动作，车辆跳主断路器。地面变电站负极轨和大地之间同样设置64D保护继电器，当检测到大地与负极轨间电压大于200V时，保护继电器动作。车辆到达车站后，通过车辆接地刷与地面的接地带搭接，保证车体与大地等电位，以确保人身安全。

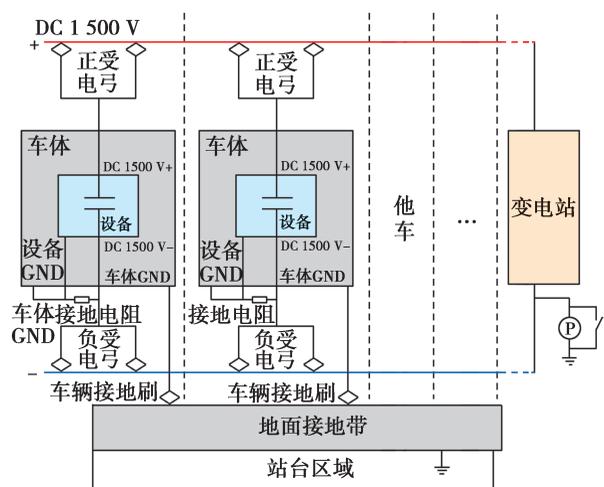


图4 浮轨接地保护方案原理图

Fig. 4 Schematic diagram of floating rail grounding protection scheme

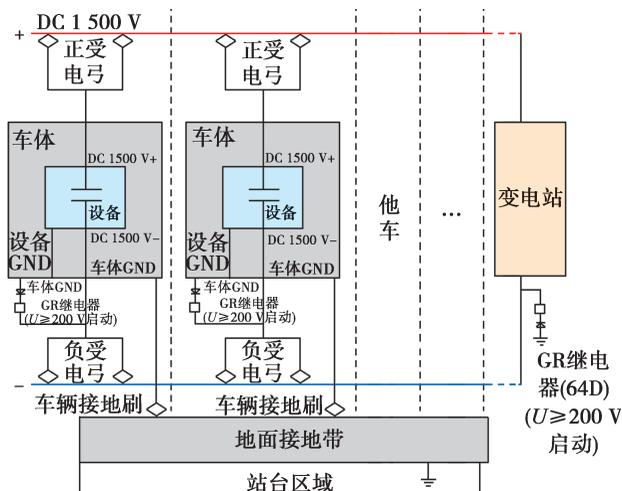


图5 GR保护的接地方案原理图

Fig. 5 Schematic diagram of GR protection grounding scheme

### 3.3.3 2种接地方案的对比说明

采用GR接地方案, 车辆正母线和负母线贯通, 并且车体间连通, 当发生GR故障, 本列车各个单元

会同时出现GR故障; 如果车站内的列车C发生接地故障, 车站内的其他列车E同样会报故障, 同时变电站的64D同样会报保护接地故障, 原理见图6。当发生GR故障, 辅助系统将停机。

GR保护接地的优点是供电系统至车辆, 如有接地故障均可检测出来, 是对系统全面的检测, 但同样存在如下劣势: ①点故障导致整车甚至他车报故障, 使故障扩大化; ②在有接地死故障情况下, 如不能确定故障点并进行隔离, 列车将无法继续运营; ③对于司乘人员确定故障点后继续运营的操作复杂。

根据如上描述, 对于跨座式单轨车的接地检测建议采用地铁通用的接地检测方案, 即采用浮轨接地方案。高压主电路保护采用分层分级的保护机制; 系统级采用差分电流的检测方式, 结合供电系统的电压检测共同实现对供电系统以及车辆高压系统的保护。

## 4 关键技术的应用分析

随着技术的不断发展, 诸多新技术已应用在城市轨道交通车辆上, 同样, 随着跨座式单轨车市场以及平台的多样化, 诸多新技术也将同样应用在跨座式单轨车上。

### 4.1 永磁同步牵引系统技术的应用

永磁同步牵引系统技术已成熟应用在高铁、动车和地铁车辆上, 永磁同步牵引系统正逐步取代异步牵引系统, 成为下一代牵引系统。永磁同步牵引电机拥有高功率密度、高效率、高功率因数、低噪声的特点, 可以提高牵引功率和节能降耗, 跨座式单轨车的牵引电机也逐步由永磁电机所替代。此方案已成熟应用在多个跨座式单轨车项目中。

### 4.2 并网供电技术

交流并网供电作为一项新技术已逐步应用于跨座式单轨车领域, 交流并联供电除需进行电压幅值比较

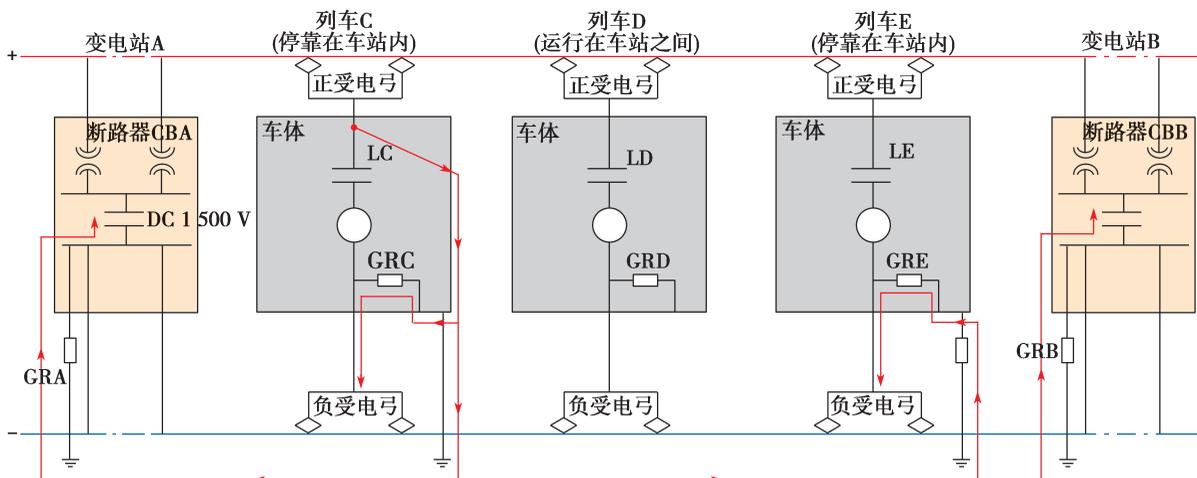


图6 GR接地故障原理图

Fig. 6 Schematic diagram of GR grounding fault

外, 还需进行相位和频率比较。交流并网供电技术的最大优势在于供电系统在降级模式下, 配合列车控制系统(TCMS系统)使负载的利用率得到最大化, 尤其在夏季和冬季, 当单台辅助逆变器故障时, 仍可通过其余辅助逆变器冗余容量确保所有空调系统的正常运行, 使乘坐舒适性得到进一步的保证。

#### 4.3 主辅一体变流器的应用

目前, 跨座式单轨车牵引系统的电气设备通常采用主辅分离方案, 冷却方式有强迫风冷和走行风冷。为使跨座式单轨车产品的尺寸和重量大幅降低, 可采用主辅一体的变流器。为优化器件的散热以及降低设备运行的噪声, 确保乘坐的舒适性, 主辅一体变流器采用水冷方式。此轻量化的设计方案已应用在某跨座式单轨车项目中。

#### 4.4 以太网技术的应用

以太网技术具有以下优点: ①以太网技术对物理干扰的隔离性好; ②采用环网、双网口、链路汇聚、主控等多级冗余, 可靠性高; ③控制功能丰富、响应速度更快; ④能实现单点维护更新、网络自动配置、故障诊断、数据入库自动下载。因此, 实时以太网技术已在制造、电力、能源、交通、军工等多个行业广泛应用。轨道交通领域的列车以太网通信网络国际标准已发布, 相关产品也陆续推向市场, 以太网技术也已成熟应用多个跨座式单轨车项目中。

#### 4.5 无车载制动电阻的应用

现阶段成熟应用的跨座式单轨车, 车辆上均无制动电阻, 电制动产生的能量反馈给电网, 然后通过地面变电站的能馈装置或吸收装置进行能量的消耗。无车载制动电阻, 在降低车辆重量的同时, 也降低了列车运营过程中的能耗。

## 5 结语

由于跨座式单轨车的后期维护成本高, 供电、道岔、

转向架等系统较为复杂, 载客量小等原因, 现阶段批量运营的跨座式单轨车仍比较少。随着各国城市布局越来越紧凑, 城市交通构成越来越复杂, 城市轨道交通已进入了多元化发展的阶段, 而单轨交通则能适应这一阶段的发展特点。因此, 可以预见在不远的将来, 在世界和国内轨道交通市场中, 跨座式单轨车必将会批量建设并投入运营。

#### 参考文献:

- [1] 李芾, 许文超, 安琪. 悬挂式单轨车的发展及其现状[J]. 机车电传动, 2014(2): 16-20.  
LI Fu, XU Wenchao, AN Qi. Development and current status of suspended monorail vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(2): 16-20.
- [2] 丁荣军, 陈文光. 地铁车辆用交流传动系统的设计[J]. 机车电传动, 2001(5): 17-19.  
DING Rongjun, CHEN Wenguang. Design of AC drive system for metro vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2001(5): 17-19.
- [3] 李伟, 陈文光, 陈超录, 等. 自主知识产权跨座式单轨列车牵引电传动系统设计[J]. 机车电传动, 2013(3): 34-39.  
LI Wei, CHEN Wenguang, CHEN Chaolu, et al. Design of electric drive system for straddle-type monorail car with independent intellectual property rights[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(3): 34-39.
- [4] 宫文平. 跨座式单轨车辆特点及国内外应用情况[J]. 国外铁道车辆, 2013, 50(1): 5-7.  
GONG Wenping. Features of the straddle type monorail vehicle and the application in China and abroad[J]. Foreign Rolling Stock, 2013, 50(1): 5-7.
- [5] 闫长安. 莫斯科第一条单轨铁路概况[J]. 现代城市轨道交通, 2005(3): 62-64.  
YAN Chang'an. Overview of the first monorail in Moscow[J]. Modern Urban Transit, 2005(3): 62-64.
- [6] 江一. 日本单轨铁路[J]. 铁道知识, 1999, 2(2): 29.  
JIANG Yi. The monorail in Japan[J]. Railway Knowledge, 1999, 2(2): 29.