

低地板有轨电车车辆技术特征

Technologies for Low-Floor Streetcar Development

苗彦英

(住房和城乡建设部地铁与轻轨研究中心,北京 100037)

Miao Yanying

(China Metro & LRT Research Center, MOHURD, Beijing 100037, China)

摘要: 近年来,中国有相当多的城市在筹备建设有轨电车系统,许多车辆企业也在积极研发低地板车辆。首先介绍低地板有轨电车车辆类型和研究实践。然后,详细阐述了低地板车辆技术特征,包括模块化设计、低地板设计、减震降噪设计、适应城市道路设计、独立轮转向架、制动系统、供电方式以及安全设计。最后指出,低地板车辆在结构、参数和性能等方面的多元化将增加车辆运营和维修的难度,中国应尽快规范化、标准化低地板车辆和有轨电车建设标准。

Abstract: Many cities are recently gearing up for developing streetcar system and many vehicle manufacturers are developing low-floor vehicles in China. This paper first introduces the researches in different types of low-floor vehicles. Then the paper elaborates the technology characteristics of low-floor streetcars in several aspects: modular design, low-floor design, vibration and noise reduction, consistency with urban roadway design, streetcar bogies with independent wheels, brake system, power supply, and safety design. Finally, the paper points out the diversity design will increase the level of difficulties in vehicle operation and maintenance. Because of that, the industry in China should quickly standardize the low-floor streetcar manufacturing process.

关键词: 城市轨道交通;有轨电车;车辆;低地板;模块化;独立轮转向架

Keywords: urban rail transit; streetcar; vehicles; low-floor; modularity; streetcar bogies with independent wheels

中图分类号: U482.1

文献标识码: A

收稿日期: 2013-06-06

作者简介: 苗彦英(1939—),男,吉林人,教授,主要研究方向:城市轨道交通、城市轨道车辆。

E-mail:myanying1@163.com

0 引言

有轨电车是一种运量介于公共汽车和地铁之间的低运量轨道交通系统,其线路、轨道、车站及设备要求远低于地铁,可以与汽车共用道路,拆迁量少,对城市其他建筑物影响较小。因此,有轨电车以其灵活方便、适应性强、建设周期短、单位综合造价和运营成本较低等优势受到欢迎,在国外各类城市得到广泛应用^[1]。

近年来,中国有相当多的城市在筹备建设有轨电车系统,有的在规划、有的已开工建设。在大城市,有轨电车可作为地铁骨干网络的补充、加密线路;而在中小城市,有轨电车可作为骨干公共交通系统和旅游观光特色线路^[1]。有轨电车系统是继地铁之后,又一呼声很高的轨道交通系统之一。随着城市轨道交通在中国的快速发展,中国城市轨道车辆和机电设备的开发、研究和制造技术有了极大提高和发展,许多车辆企业也在积极研发低地板车辆。本文根据有轨电车系统的使用条件,包括环境条件、线路条件和供电条件,对低地板有轨电车系统车辆技术特征展开研究。

1 低地板车辆类型

随着科学技术的发展,有轨电车车辆出

现多种类型,呈现多样性发展趋势。按照地板高度划分,有70%和100%低地板车辆;按照车轮型式划分,有钢轮钢轨和胶轮导轨;按照车辆长度划分,有单节车和铰接车,铰接车有四轴、六轴和八轴之分;如采用模块化车辆,则有2模块和多模块之分,最多可达8模块。采用何种型的车辆,可根据城市的具体要求、线路条件、车辆技术要求以及车辆国产化要求综合确定。

2000年,中国北车集团大连机车研究所有限公司和大连现代轨道交通有限公司电车工厂共同开发研制了DL6W系列70%低地板车辆,是中国首台低地板有轨电车车辆,地板面高度400 mm,应用于大连有轨电车系统^[2]。

2006—2011年,长春市2条轻轨线路先后通车运营,选用70%低地板车辆^[3],由唐山、湘潭和长春3家公司提供车辆,地板高度尺寸均高于350 mm。

2010年,在科技部“十一五”支撑项目支持下,中国北车长春轨道客车股份有限公司研发100%低地板车辆,并在长春市轻轨线路进行试验。车辆采用铝合金车体、独立轮转向架,地板面高度380 mm。

2013年,中国北车集团唐山轨道客车有限责任公司、中国北车长春轨道客车股份有限公司研发的100%低地板车辆陆续下线,地板面高度均为350 mm。目前,株州、四方、浦镇和大连等轨道车辆企业也在积极研发低地板车辆。

可以看出,中国轨道车辆企业已基本完成有轨电车低地板车辆的研发工作,可以提供70%和100%两种低地板车辆。70%低地板车辆地板面有一定坡度或台阶过渡,乘客在车内移动需注意安全,但车门及其附近地板面高度可达到350 mm,上下车较方便,特别是由于其价格较低,适用于中国城市。100%低地板车辆国产化率水平高低不一,有的可达到70%,有的仅为50%,表明有些关键设备和核心技术还需要从国外购买,必然会增加投资。因此,研发反映城市特色和线路特点、技术水平适合国情、设计制造价格适中、整车性能良好、具有高国产化率的100%低地板车辆任务艰巨。

2 低地板车辆技术特征

2.1 模块化设计

新型有轨电车系统车辆采用模块化设计理念,尤其是运用在100%低地板车辆上,受到普遍欢迎。模块化设计理念是将车辆划分为若干各自独立而又相互联系的模块。模块可以是车辆的一个组成部分、也可以是车辆的一个或几个部件或设备的组合,例如带驾驶室和不带驾驶室端部模块、中间模块、铰接模块、转向架模块等。每个模块可以独立生产和组装,因此,模块化设计使得车辆不再采用贯通式纵梁,结构简化,生产制造也简单方便;更容易保证质量、缩短工时;互换性增强、有利于维修保养;一旦出现故障,只处理或更换该模块即可,不需进行整车作业,可大大节约工时、人力和费用。车辆被划分为若干模块后,利用增减中间模块和铰接模块,可以组成不同编组的列车;增加列车在道路上运营的灵活性,减少车辆在曲线上的内外偏移量,也不易与相邻列车发生碰触;可以满足不同城市、不同地区、不同线路、不同建设阶段的客流需求,可单向或双向运行。

经过30多年发展变化,西门子公司Combino型、阿尔斯通公司Citadis型、庞巴迪公司Flexity型等有轨电车成为知名的100%低地板车辆,并形成标准化、系列化产品。表1为西门子公司Combino型有轨电车不同模块组合系列及其定员,车辆宽度2.3 m。

中国唐山、长春生产的100%低地板车辆均采用模块化设计,并达到系列化水平。按 $6\text{人}\cdot\text{m}^2$ 计算,唐山4模块车辆定员315人,其中座席数88人、站席数227人(见图1);长春5模块车辆定员292人,其中座席数64人,站席数228人(见图2)。中国有轨电车车辆宽度均为2.65 m。

2.2 低地板设计

由于采用模块化设计理念,车辆设计采用低地板形式,车门多而宽、模块间联系为宽大的贯通道,乘客上下车便捷、快速,在车内移动也很方便安全。低地板车辆座椅和门窗等内部设备按人机工学进行设计,车内宽敞明亮,乘坐较为

舒适。

低地板车辆通常采用简易车站，如利用人行道作为站台，与道路融为一体，易于识别，不易迷失方向，有安全感；在受到城市居民欢迎的同时，特别受到外来乘客的好评。

但低地板车辆地板高度为300~350 mm，利用人行道作为站台，乘客需踏步上下车，不太方便，特别是乘轮椅乘客上下车不方便。为了能为老年人、妇女及儿童、身体障碍者和乘轮椅的乘客提供乘车方便性，体现以人为本的理念，可适当提高站台高度，使站台高度与车辆地板高度平齐，并使站台与车辆地板间隙尽量小，乘客可跨步上下车。因此，站台需要开展无障碍化设计，确保乘轮椅乘客上下车方便、安全。

2.3 减振降噪设计

有轨电车主要运行在城市道路上，车辆振动噪声对周围环境影响较大，其振动对路面破坏也很严重，车辆振动噪声是旧式有轨电车被淘汰的主要原因之一。为此，新型有轨电车车辆采用轻量化结构、弹性车轮、二系弹簧、密闭式门窗和铰接结构、电机电气设备减振、加装隔声裙板等措施，有效控制簧下重量，减少车辆振动、轮轨摩擦噪声、

电气设备噪声以及噪声的传递，车内外噪声均得到适当控制，例如唐山100%低地板车辆辅助设备正常工作时车内外噪声(见表2)均处于噪声级别A级。特别是当带有大型玻璃侧窗的流线型车辆运行在铺设草坪轨道线路时，不但噪声对车辆内外环境的影响很小，而且有良好的景观效果。车辆行驶于路面、美观大方的外观造型，给乘客以亲切、舒适的感觉。

表1 西门子公司 Combino 型有轨电车不同模块组合系列定员
Tab.1 Seating capacity of streetcar by different module combination of Siemens Combino

列车长度/ m	座席数/ 人	站席数/人		定员/人	
		按4人·m ² 计算	按6人·m ² 计算	按4人·m ² 计算	按6人·m ² 计算
20.06	47	58	98	105	145
28.30	70	82	138	152	208
29.80	74	91	153	165	227
31.50	78	100	168	178	246
38.00	97	115	193	212	290
39.70	101	124	208	225	309
41.30	105	133	223	238	328
42.90	109	147	247	256	356

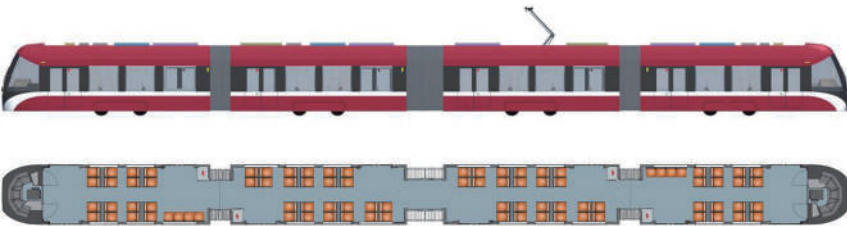


图1 唐山100%低地板有轨电车
Fig.1 Tangshan 100% low-floor streetcar vehicle

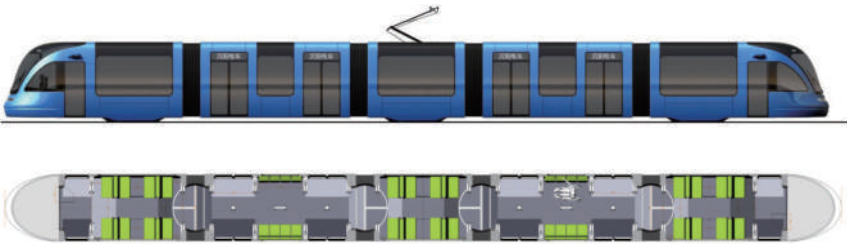


图2 长春100%低地板有轨电车
Fig.2 Changchun 100% low-floor streetcar vehicle

表2 唐山100%低地板车辆车内外噪声
Tab.2 Noise inside and outside Tangshan 100% low-floor streetcar vehicle

车内工况 ¹⁾	速度/(km·h ⁻¹)	噪声/dB	车外工况 ²⁾	速度/(km·h ⁻¹)	噪声/dB
静止	0	65	静止	0	56
匀速运行	40	74	匀速运行	40	76
加速	40	76	加速	40	76

1) 车内中心距离地板高1.5 m处的噪声；
2) 车外距离轨道中心7.5 m，距离地面1.5 m处的噪声。

2.4 适应城市道路设计

有轨电车的轨道主要铺设在城市道路路面上,低地板车辆与其他地面交通方式混行,运行情况复杂。受道路和曲线半径限制,车辆外形尺寸均小于地铁车辆,车宽通常为2.65 m、车长不宜太长。低地板车辆采用模块化设计理念,车体由较短的多个模块铰接组成,转向架轴距较短,提高了车辆通过道路的灵活性,降低车辆通过曲线的内外偏移量,可以通过较小的曲线半径,减少轮缘磨耗,降低线路造价。因此,有轨电车系统适应性得以提高,可更充分有效利用道路资源。

从使用角度分析,有轨电车可应用于各类规模城市和地区,例如中心城区、郊区与旅游区;适用于客流中等或客流较小的线路。从线路布设角度分析,有轨电车因曲线通过能力、爬坡能力较强,可以运用于转弯半径小或地形起伏比较大的城市和地区,运用范围更广。例如,唐山100%低地板车辆可通过最小平曲线半径19 m、最大坡度70‰的线路,已超过低地板有轨电车车辆通用技术条件标准^[4]数值。通常情况下,为了增加轮轨之间的黏着力,防止车轮擦伤,列车还配有撒砂装置。

2.5 独立轮转向架

为降低车辆地板面高度,新型有轨电车将车下电气设备全部转移至车辆顶部,同时采用独立轮转向架。独立轮转向架不能使用常规车轴和轮对,车轴要使用U型轴,左右两车轮解耦,运行时车轴不转动,车轮分别独立自由旋转运行,转速可以不同。独立轮转向架的优点是克服了传统轮对在直线运行时产生的蛇行运动,能消除轮轨间纵向糯滑,可以获得较高的速度;通过曲线时没有滑动和摩擦,且减少轮轨间的磨损和噪声;同时,横向稳定性好,易于实现低地板。但其在直线上的自动对中能力和曲线上的自导向能力均较差,只能依靠轮缘进行导向,因此,轮缘磨耗严重,易造成脱轨事故。

西门子公司开发的Avenio系列有轨电车,采用铰接形式和独立车轮,同时运用一种径向抗扭转装置,来调整单铰接两端模块与转向架摆角的方式,降低车辆通过曲线的轮轨作用力和横向加

速度,进一步减轻轮缘磨耗,并降低车辆脱轨的风险。

经过多年发展,有轨电车转向架也有多种形式。早期曾采用轮毂电机驱动,这种方式虽然体积小、结构紧凑,但由于簧下重量大、轮轨作用力大、结构复杂而未能推广。目前国内外低地板转向架有的采用独立轮转向架,也有采用小车轮刚性轴转向架。

2.6 制动系统

有轨电车系统站间距较小、速度较高,并采用人工驾驶,机动车和行人有可能进入,因此,从运行安全角度考虑,不但要求车辆起动加速度和制动减速度均要大(起动加速度为 $1\sim 1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 、制动减速度为 $1\sim 1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,紧急制动减速度一般为 $2.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,安全制动减速度一般为 $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$),以提高旅行速度,而且要求制动系统容量较大、制动距离较短^[3]。

通常低地板车辆制动系统设有电制动、摩擦制动和磁轨制动等制动方式。每台转向架配有独立的制动控制装置,该装置接收来自列车控制装置和司机手柄的制动指令,控制对应转向架的制动力。常用制动方式以电制动为主,车速降低到一定大小时,由体积小性能好的电液制动取代。电制动不能满足要求时,由非动力转向架电液制动补充。动力转向架的电液制动通常作为停放制动,只有故障时才能作为常用制动使用。紧急制动时,电制动、电液制动、磁轨制动一起投入,通常在非常状态下才使用,由于制动减速度大,冲击也很大。安全制动是在其他制动方式无效时采用的制动模式,转向架的电液制动和磁轨制动同时起作用。

2.7 供电方式

有轨电车牵引供电方式使用最多的是架空接触网供电。这是一种比较成熟的供电技术,在国内外大量使用,具有安全可靠、保养维修容易、造价较低的特点,这种技术中国已完全掌握。但是,线网、线立柱等对城市景观有一定影响。

另一种供电方式是地面供电系统,在线路中间地下铺设玻璃纤维材料制作的工字形导电轨。

控制装置通常安装在轨旁，间隔 22 m。探测回路处于导电轨内部，接收来自围绕在车辆中心下方集电靴周围的天线信号，以激活供电系统。当列车经过时，电力控制装置发射相应信号以激活带电段。另外，每一辆车顶部都配备 11 节电池组块，一旦地面供电发生故障，电池组块可以提供电源，车辆能在低速条件下运行 1 km。2003 年 6 月，法国波尔多市有轨电车部分线路安装地面供电系统，其余线路使用架空接触网供电，两种供电系统电压均为 DC750V。两种供电模式可以在车辆行走时进行转换，当架空接触网供电时，集电靴被抬起；也可在车辆停站时，由驾驶人进行转换。

地面供电系统的不足之处是造价较高，接触板条易受雨水脏物影响。中国尚未应用这一技术，需进一步开发研究。此外还有电池供电、电容供电和混合动力供电等方式，均可实现无接触网运行。2013 年 4 月，唐山完成了中国首列混合动力电源技术的 100% 低地板车辆，可实现无接触网运行。

2.8 安全设计

有轨电车通常采用人工驾驶方式，运行在城市道路上。为防止与其他有轨电车车辆或机动车发生碰撞，每列车两端均设有一个救援用折叠车钩。车头部设有功能先进的防爬吸能结构装置，有效吸收车辆正向、侧向撞击的能量，可以保证驾驶人和乘客安全。紧急情况下，即使与行人发生碰撞，独特的头部结构，可有效避免行人被卷入车底。

车内设置紧急报警及乘客紧急制动装置、逃生窗、安全锤等必备设施，为驾驶人、乘客提供安全保障。此外，车辆内饰和材料满足防火要求。车门具有障碍物探测、手动开关门、机械锁闭、安全回路、零速保护功能。

3 结语

低地板车辆发展至今，技术已达到较高水平，其中低地板、模块化、独立轮转向架技术的应用，使有轨电车在城市中的运用更加方便、经济。然而，由于低地板车辆生产研发企业与多家国外公司合作，低地板车辆在结构、参数和性能等方面，呈现多种类型，必将增加车辆运营、维修的难度，有可能增加造价。因此，中国应尽快规范化、标准化低地板车辆和有轨电车建设标准。

参考文献：

References:

- [1] 国土交通省. 引入与城市道路一体化有轨电车的规划指导[R]. 东京：国土交通省，2005.
- [2] 于禹夫，方力. 现代有轨电车交通系统及其车辆的技术定位[J]. 地铁与轻轨，2003，12(6)：43 - 47.
- [3] 杨丹燕. 长春 70% 低地板轻轨车辆电气系统[J]. 电力机车与城轨车辆，2008，31(6)：8 - 11.
- [4] 长春轨道客车股份有限公司. 低地板有轨电车车辆通用技术条件[R]. 长春：长春轨道客车股份有限公司，2013.

(上接第 95 页)

[42] Su Y, Lu L, Yao D, Zhang Y, Zhiheng L, Zhang Z, Yangmeng W. Transportation Demand Management for Beijing 2008 Olympic Games[C] // Institute of Electrical and Electronics Engineers. Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. St. Louis: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009: 824 - 829.

[43] Zhou Y, Wu Y, Yang L, Fu L, He K, Wang S, Hao J, Chen J, Li C. The Impact of Transportation Control Measures on Emission Reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(3): 285 - 293.

[44] Ministry of Hajj. 1 000 New Buses Added to Pilgrim Transport Fleet[EB/OL]. 2008[2011-02-27]. http://www.hajjinformation.com/display_news.php?id=946.