

牟瑞芳 黄振晖◎编著

现代有轨电车

概论



XIANDAI
YOUGUI DIANCHE GAILUN



西南交通大学出版社

牟瑞芳 黄振晖◎编著

现代有轨电车

概论

XIANDAI
YOUGUI DIANCHE GAILUN

西南交通大学出版社

·成都·

图书在版编目 (C I P) 数据

现代有轨电车概论 / 牟瑞芳, 黄振晖编著. —成都:
西南交通大学出版社, 2015.12
ISBN 978-7-5643-4075-9

I. ①现… II. ①牟… ②黄… III. ①有轨电车—概
论 IV. ①U482.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 170063 号

现代有轨电车概论

牟瑞芳 黄振晖 编著

责任编辑 宋彦博

封面设计 墨创文化

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区交大路 146 号)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 成都蓉军广告印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印 张 13.75

字 数 343 千

版 次 2015 年 12 月第 1 版

印 次 2015 年 12 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-4075-9

定 价 49.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着城市化进程的加快，城市交通问题日益突出，如能源危机、环境污染、土地紧缺、交通拥堵等，已经严重影响到城市功能的有效发挥以及人们的生活质量。

首条用于客运的路面有轨车辆于 1807 年在英国启用，是以马匹拉动的，被称为公共马车，随后于 19 世纪上半叶出现在美国。1873 年旧金山修建了缆车线路，以钢缆牵引轨道车辆。同一时期，在一些城市出现了用小型窄轨蒸汽机车牵引的市内有轨交通。1879 年，德国工程师西门子在柏林的博览会上首先尝试使用电力带动轨道车辆。此后俄国的圣彼得堡、加拿大的多伦多都进行过开通有轨电车的商业尝试。匈牙利的布达佩斯在 1887 年创立了首个电动电车系统。在此期间实用的有轨电车被称为旧式有轨电车。其特点是噪声大、性能差、耗电多，而且在速度、舒适度和灵活性等方面与汽车比起来相形见绌。20 世纪 30 年代至 50 年代中期，旧式有轨电车逐渐衰落，许多国家纷纷拆除旧式有轨电车轨道。随着 20 世纪 80 年代车辆制造技术的发展，现代有轨电车应运而生。现代有轨电车与旧式有轨电车的不同之处在于它不但具有现代化的外貌、色彩，而且车辆轻、速度快，车厢内设有空调，采用接触网或接触轨供电。现代有轨电车系统一般包括普通电车、铰接电车、双铰接电车。现代有轨电车的车辆宽度通常受城市道路可容纳性的限制。

现代有轨电车已开始在我国一线和二线城市中得到快速发展。现代有轨电车是一种城市公共交通工具，属轨道交通的一种。其列车编组有单节，也有多节车厢的设计，但是总长度一般不大于 100 m，以避免造成路口交通不畅。有轨电车是一种无污染的环保交通工具，其运量介于城市公共汽车和地铁之间。有轨电车每小时可载客约 7 000 人，与地铁每小时的载客量 12 000 人相比虽小很多，但其投资规模相对于地铁而言也大大降低。据估算，1 km 路面有轨电车线路所需的投资只是 1 km 地铁线路的 1/3。对于中型城市来说，路面有轨电车是既实用又经济的城市公交形式。另外，相对于其他路面交通工具，有轨电车能更有效地减少发生交通意外的概率。因此，有轨电车在城市公交系统中的性价比最高。

目前尚没有一本比较系统地介绍有轨电车的书籍。本书从有轨电车的发展过程入手，分别对有轨电车线路和车站布设及相应条件、车辆技术、供电方式、列车运行控制技术以及运营管理等方面进行比较系统的阐述。本书尽量做到以由浅入深的方式进行介绍，适合从事有轨电车设计、管理、维护工作的设计人员、研究人员参考，也可作为轨道交通专业的大学生教材。

在本书的编写过程中，研究生王列妮、杨锐、于秀珍、孙守平、马秋菊等在资料收集和整理过程中付出了辛勤劳动。本书参考了国内外轨道交通领域的研究成果，谨向原作者和出版社致以崇高的敬意和诚挚的感谢。同时本书在编写过程中得到了唐山客车轨道有限责任公司的大力支持，在此表示感谢。由于编者学术水平有限，加之时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请专家学者和广大读者批评指正。

编 者

2015年11月

目 录

| | |
|-----------------------------|-----|
| 1 概 述 | 1 |
| 1.1 有轨电车的发展历程 | 1 |
| 1.2 现代有轨电车的定义及分类 | 4 |
| 1.3 建设现代有轨电车的意义及其功能定位 | 10 |
| 1.4 国内外现代有轨电车运营现状 | 14 |
| 1.5 现代有轨电车的发展趋势 | 26 |
| 2 线路和车站 | 31 |
| 2.1 线 路 | 31 |
| 2.2 车 站 | 49 |
| 3 车 辆 | 62 |
| 3.1 现代有轨电车车型 | 62 |
| 3.2 车辆的构成及分类 | 65 |
| 3.3 车 体 | 68 |
| 3.4 转向架 | 70 |
| 3.5 制动系统 | 77 |
| 3.6 新型有轨电车的技术特征 | 85 |
| 4 供电系统 | 90 |
| 4.1 系统功能及要求 | 90 |
| 4.2 系统构成及设计原则 | 94 |
| 4.3 供电方式及电源变电所运行方式 | 96 |
| 4.4 中压网络 | 99 |
| 4.5 牵引供电系统 | 109 |
| 4.6 牵引动力系统 | 132 |
| 4.7 杂散电流腐蚀防护系统 | 134 |
| 4.8 动力照明供电系统 | 138 |
| 4.9 电力监控系统 | 143 |
| 5 运营控制系统 | 147 |
| 5.1 系统结构及功能 | 147 |
| 5.2 正线道岔控制 | 154 |

| | | |
|-----|-------------|-----|
| 5.3 | 平交路口信号控制 | 163 |
| 5.4 | 运营调度管理 | 170 |
| 5.5 | 车载及车辆段联锁子系统 | 181 |
| 5.6 | 电车定位技术 | 186 |
| 5.7 | 通信子系统 | 197 |
| 6 | 运营组织 | 201 |
| 6.1 | 交通组织 | 201 |
| 6.2 | 换乘接驳 | 204 |
| 6.3 | 售检票方式 | 205 |
| | 参考文献 | 209 |

1.1 有轨电车的发展历程

有轨电车在世界范围内的发展大致经历了兴起（19 世纪 40 年代至 20 世纪 30 年代）、衰落（20 世纪 40 至 60 年代）、复兴（20 世纪 70 年代至今）三个阶段。

1.1.1 有轨电车的兴起

1. 有轨电车的起源

最早的有轨电车是由在轨道上运营的马车发展而来的。1807 年，在英国威尔士出现了世界上第一条客运轨道公交车，由马匹牵引。后来在美国也出现了类似的交通工具，使用马匹、骡子等畜力进行牵引，在紧急时甚至可以使用人力。

2. 有轨电车的出现

世界上最早的有轨电车出现在德国。1881 年，在德国柏林市举办的世界贸易博览会上，西门子公司展出了采用电力牵引的列车。该列车为一列 3 辆编组的小功率有轨电车，只能乘坐 6 人，在 400 m 长的轨道上往返运行。这是世界上第一列有轨电车，它给世人提供了富有创意的启示。1881 年 5 月，德国西门子公司在柏林附近开通了世界上第一条有轨电车线路，同年，柏林市附近的里希特菲尔德（Lichterfelde）建设的有轨电车线路开通运营，这标志着有轨电车作为客运交通工具投入使用。

与此同时，西方工业国也在积极发展有轨电车：1883 年，英国人福柯修建了英国第一条有轨电车线路，长 2 km，轨距为 2 英尺（1 英尺 \approx 0.304 8 m），后来调整至 2 英尺 9 英寸（约 83.82 cm）。这条线路至今仍在运营，是世界上仍在运营的最古老的有轨电车线路。1885 年 9 月，英国黑泽市开通了英国第一条在街面上运营的有轨电车线路，这条线路至今仍在运营。美国的第一条有轨电车线路于 1886 年在亚拉巴马州蒙哥马利市开通。澳大利亚的第一条有轨电车线路于 1889 年在墨尔本开通。巴西在 1883 年就出现了由电池驱动的有轨电车，但直到

1892 年才在里约热内卢开通了第一条由架空线供电的有轨电车线路。我国最早的有轨电车出现于 1899 年的北京，由德国西门子公司修建，线路连接郊区的马家堡火车站与永定门。

当时，世界上主要的“机动化”交通方式是马车交通——马车铁路和马车道路交通。与马车交通相比，有轨电车具有较高的运行速度和可接受的投资，因而很快在世界范围内取代马车交通并迅速发展起来。

图 1-1 所示为国外最早的有轨电车。

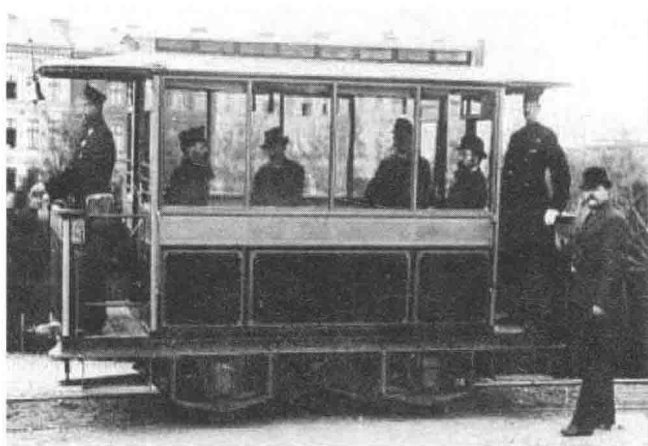


图 1-1 国外最早的有轨电车

3. 有轨电车的发展高潮

20 世纪 20~30 年代，全世界掀起有轨电车发展高潮，城市交通由马车时代真正进入有轨电车时代。19 世纪末，美国的有轨马车线路被快速地改造成有轨电车线路。到 1895 年，美国的有轨电车运营线路已达 12 100 km，同时还有大量的有轨电车线路在建设当中。至 1920 年，美国运营有轨电车的城市共 370 座，线路总长达到 25 000 km，有轨电车拥有量近万辆，年客运量达到 137 亿人次，占美国全部城市客运总量的 88%。1923 年，美国有轨电车的发展达到鼎盛时期，线路总长达 75 600 km，几万人口的小城市也建设了有轨电车线路。这一时期的有轨电车成为现代化城市的象征。

在欧洲，有轨电车也以惊人的速度发展，自 1895 年至 1990 年，约一半的欧洲大城市在兴建或改造有轨电车网络。其中，英国在 1920 年的有轨电车线路总长达到 5 000 km，有轨电车拥有量达到 1.44 万辆，到 1927 年共有 173 条有轨电车线路，线路总长达 4 100 km。法国有轨电车的发展在 1930 年达到高峰期，共有 70 个城市开通 3 400 km 的运营线路。第二次世界大战以前，德国共有 80 个城市建设了有轨电车系统，线路总长近 5 000 km。有轨电车成为当时欧洲各国城市的主要公共交通工具。

1.1.2 有轨电车的衰落

第二次世界大战后，随着汽车工业的发展，家用轿车得到快速发展，同时公共汽车也开

始发展，使得道路条件不得不与之相适应，而有轨电车的存在占用了机动车道，进而阻碍了汽车工业的发展，因此有轨电车不再适合作为汽车工业快速发展大环境下的交通工具。在美国，从 20 世纪 20 年代开始，私人小汽车的发展对有轨电车的客流量形成强烈冲击。越来越多的汽车还造成了道路日益拥挤，阻碍了有轨电车的正常运行。老式的有轨电车由于加速能力低，很难适应在拥挤的混合交通流中运行。另外，轨道养护也需要额外的费用。在这些因素的作用下，越来越多的公交公司开始放弃有轨电车转而运营公共汽车。

在这样的背景下，有轨电车业内也在寻求途径来提升有轨电车的竞争力。一种在当时更加现代化的车型 PCC 被研发出来。这种车型拥有更加良好的加速和制动性能，可以更好地适应拥堵的混合交通流。最早的商业化 PCC 有轨电车应用出现在 1936 年的纽约布鲁克林。到 1952 年，美国和加拿大已经生产了 6 000 辆 PCC 有轨电车。但也就从那时起，美国停止了有轨电车的生产，欧洲则继续生产改进的 PCC 有轨电车。

PCC 车辆的出现减缓了公共汽车取代有轨电车的步伐。但有轨电车系统在车辆技术以外的其他方面却根本没有改进。特别是政府不支持有轨电车获得分离的路权，这就导致 PCC 车辆也不能够保证有轨电车成为一种长期稳定的模式。到 1960 年，美国只有大约 12 个城市还保留有轨电车系统。甚至在一些客流量很大的、有轨电车拥有分离路权的走廊，公共汽车也取代了有轨电车。而拥有分离路权的有轨电车降级为与其他交通工具混行的公共汽车后，走廊上的客流量随之下降。这些现象的出现都是因为公共交通缺乏足够的外部资源支持，公交公司因此不得不为短期利益降低运营成本，而不管远期成本和对客流量的影响。在英国和法国，公交公司也面临着和美国类似的问题：政府在政策上不支持公共交通，拥有分离路权的有轨电车被降级到与其他交通工具混行。逐渐地，英国和法国城市的有轨电车系统也消失了。

我国的上海、北京、天津、沈阳、长春、哈尔滨等多座城市的有轨电车线路也经历了建设和拆除的过程，其中长春、大连始终保存了几条有轨电车线路。

总体而言，旧型有轨电车主要有以下几个缺点：

- ① 有轨电车占用了部分道路空间，阻碍了汽车的通行与发展。
- ② 因当时缺乏对轮轨关系及线路基础方面的研究，因而其行驶噪声大，且转弯处尤为明显。
- ③ 因旧时道路狭窄，加之汽车大量发展后的路权共用，导致有轨电车行驶速度低。

1.1.3 有轨电车的复兴

与发生在美国、英国和法国的拆除有轨电车系统和取消有轨电车的分离路权所对应的是，在德国、荷兰、瑞士、奥地利等欧洲国家，有轨电车的分离路权形式得以保留，甚至在形式上还获得了提升，并且线路长度被延伸。这些国家的很多城市坚持把有轨电车和其他交通方式的分离作为目标。在这样的目标下，有轨电车系统获得了全面提升：使用现代化、大容量的铰接式车辆，修建分离的有轨电车线路，使用特殊信号控制，修建与地铁、公共汽车的换乘枢纽等。这种提升后的模式在速度、可靠性、舒适度和安全性等方面更加类似于快速轨道交通，而不是传统的有轨电车，因此人们赋予这种系统一个新的名字——现代有轨电车。

而美国、法国、英国的那些要么拆除了有轨电车系统，要么取消了有轨电车原有的分离

路权形式的城市，在交通日益拥挤的情况下，为此付出的代价是公交客流量的持续下降。这些城市逐渐意识到，对公交车辆提供分离的路权形式是提升服务水平的最根本前提，而轨道交通在容量、速度、可靠性方面的优势使其比公共汽车更适合分离的路权形式。这种在路权、容量等各方面提升了的系统模式在 20 世纪 70 年代发展成熟并获得了认可，开始在北美约 20 个城市，以及法国、英国、西班牙、爱尔兰、以色列、澳大利亚和许多发展中国家，包括土耳其、埃及、突尼斯、菲律宾和墨西哥等国的城市中得到广泛应用。

在车辆技术方面，自 20 世纪 70 年代出现现代化大容量铰接式车辆后，在 20 世纪 80 年代中期又出现了更具现代化气息的低地板车型。进入 20 世纪 90 年代，国际上有轨电车发展的一种新趋势是将现代有轨电车引入经济活动密集的城市中心区域，如 CBD。在法国的一些城市，现代有轨电车使用高度现代化的车型，在中心城区的街面运行，提供一种类似于传统有轨电车的服务。美国旧金山开辟了一条全新的贯穿整个城市 CBD 的线路。美国波特兰在市中心开通了一条使用现代化车型的街面有轨电车线路，用于补充已有的非常成功的轻轨线路。这条街面现代有轨电车线路已成为中心城区发展和时尚生活的象征。

1.2 现代有轨电车的定义及分类

1.2.1 现代有轨电车的定义

根据《城市公共交通分类标准》，有轨电车属于城市轨道交通系统。英国轨道电车导则给出的有轨电车的定义为：有轨电车是一种中等运量的城市公共交通系统，轨道铺设在城市道路路面上，车辆依靠司机瞭望运行；路权分为混合路权、半封闭路权和路外；运量等级通常为 0.6~1.2 万人次/h，运营速度为 15~25 km/h。

国际公共交通联合会（UITP）没有给出现代有轨电车的明确定义，但在对轻轨的定义中提及了“有轨电车”。其对轻轨的定义为：一种电气化的轨道交通运输模式，其形式可以从有轨电车到部分享有专用路权的快速公共交通系统。

美国公共交通协会（APTA）在其 *Glossary of Transit Terms* 中也没有对现代有轨电车进行明确定义，但指出轻轨也可以叫作有轨电车。APTA 对轻轨的定义是：一种相对于重轨而言运能较低的电气化轨道交通模式，可以使用独立的路权或与其他交通方式共享路权，使用高站台或低站台上、下车，使用多节车辆组成的列车或单节车辆。可见，UITP 和 APTA 都认为有轨电车只是轻轨的一种形式而已，APTA 甚至认为轻轨就可以叫作有轨电车。实际上，虽然轻轨系统是从旧式有轨电车的基础上发展而来的，二者在车辆技术方面存在继承关系，但轻轨系统在系统的运能、路权等级以及旅行速度等方面都远远超出了有轨电车的范畴。

欧洲交通运输部长会议（ECMT）在其 1994 年出版的报告《轻轨公共交通》中讨论了很多按照传统观点来看属于“有轨电车”的系统，而且其对“轻轨”的定义实际上也并不将有

轨电车从轻轨中排斥出去。然而在工程实践中,有轨电车与轻轨、地铁采用的建设标准又有显著不同,是按不同的轨道交通项目来处理的。

世界著名的公共交通系统专家,美国宾夕法尼亚大学教授 Vuchic 认为:有轨电车首先是一种轨道运输模式,包含 1~3 节车厢,大多数情况下在街面与其他交通模式混行,但有时也通过专用路权或优先通行等措施与其他交通方式分离。

我国颁布的《城市轨道交通工程基本术语标准》(GB/T 50833—2012)中指出,有轨电车(tram)是与道路上其他交通方式共享路权的低运量城市轨道交通方式,线路通常设在地面。这依然是对传统有轨电车的一种解释和定义。目前还没有权威机构对“现代有轨电车”或者“轻轨”提出明确的定义。曾有学者对有轨电车、轻轨和地铁从断面运量角度进行了比较笼统的划分,将轨道交通系统划分为三类:小运量系统(4 000~8 000 人/h),即有轨电车系统;中运量系统(10 000~30 000 人/h),即轻轨系统;大运量系统(30 000~60 000 人/h),即地铁系统。但严格从有轨电车的发展来看,该学者提及的“有轨电车”应当是指老式的不拥有分离路权形式的小运量街面有轨电车,因此并不十分契合“现代有轨电车”的概念。

从上述情况不难看出,目前学界对现代有轨电车的定义还存在模糊的边界。因此,综合有轨电车的发展沿革和国内外的定义两方面来看,本书将现代有轨电车定义为:采用模块化的现代有轨电车车辆,具有多种路权方式,与地面交通方式以平交为主的中低运量的城市轨道交通系统。

1.2.2 现代有轨电车的分类

1. 按地板高度分

地板高度是指车厢地板面相对于轨面的高度,主要分为高地板和低地板两大类。高地板有轨电车的地板距离轨面 850~1 000 mm,乘客通过配置在车门处可收放的踏板上下车,不是很方便。随着技术的创新,产生了低地板结构的有轨电车,它将地板高度降至 300~350 mm,使乘客可很方便地上下车,同时也解决了婴儿推车、残疾人轮椅的上下车问题。

现代有轨电车系统(tram system)中最常见的就是低地板车辆系统,属低运量系统,流行于西欧,具有经济、快捷等优点。因受传动系统和电气设备布置的限制,其又有 50%~70%低地板、100%低地板和超低地板(Ultra Low Floor, ULF)之分,其直观的区别在于地板面距轨面的高度。通常地板面高度处于 350~450 mm 的称为部分低地板,处于 200~350 mm 的称为 100%低地板,处于 200 mm 以下的称为超低地板。然而,其严格的划分是根据低地板部分的面积和客室面积之比进行的:如果小于 1.0,称为部分低地板(partial low floor),范围宽至 9%~100%,而常见的是 50%~70%这个比例;如果等于 1.0,则称为 100%低地板。图 1-2 所示是名古屋铁道美浓町线 70%低地板有轨电车示意图,图 1-3 所示为法国斯特拉斯堡 100%低地板有轨电车,图 1-4 所示为澳大利亚的超低地板有轨电车。部分国家采用的低地板车辆的主要技术参数如表 1-1 所示。

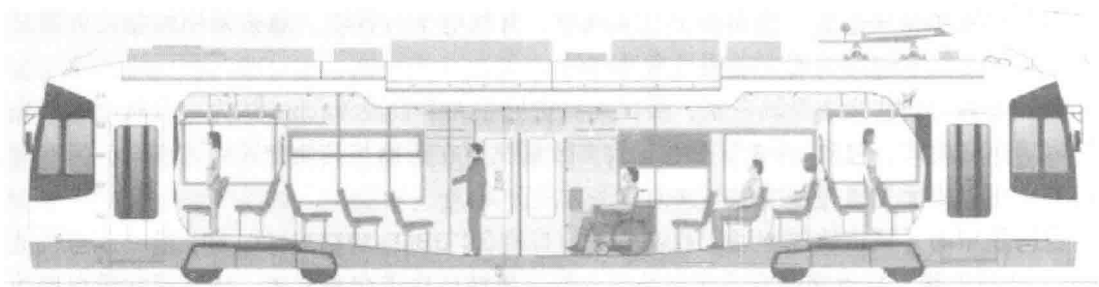
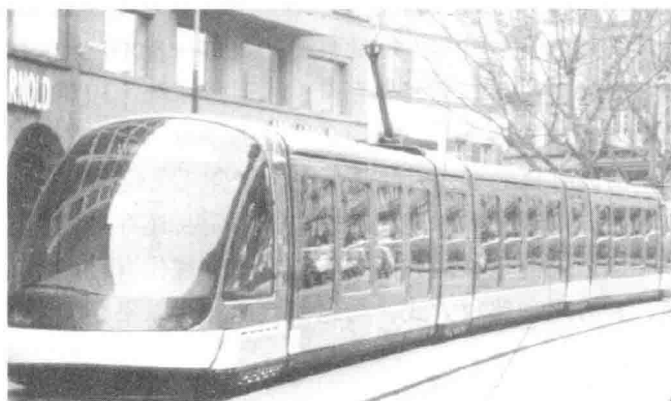


图 1-2 名古屋铁道美浓町线 70%低地板有轨电车示意图



1-3 法国斯特拉斯堡 100%低地板有轨电车



1-4 澳大利亚的超低地板有轨电车

表 1-1 部分国家采用的低地板车辆主要技术参数

| 城市 | 制造商 | 类型 | 轴式 | 车辆数 | 比例/% | 车长/m | 车宽/m | 地板最大高度/mm | 地板最小高度/mm | 质量/t | 最大速度/(km·h ⁻¹) | 最小曲线半径/m | 动车 | 拖车 | 交付年度 |
|-------|-----------|-----------|-----------------|-----|------|------|------|-----------|-----------|------|----------------------------|----------|----|----|------|
| 曼海姆 | Duewag | N/A | B'2'2'B' | 23 | 9 | 25.7 | 2.2 | 889 | 353 | 26 | 60 | 25 | M1 | T1 | 1991 |
| 阿姆斯特丹 | 庞巴迪 | 11G & 12G | B'0'B'0'B'0'B'0 | 45 | 9 | 25.6 | 2.4 | 870 | 280 | 36.9 | 70 | 25 | M2 | | 1989 |
| 巴塞尔 | schindler | Be 4/4 | B'2'2'B' | 19 | 15 | 25.4 | 2.2 | 855 | 325 | 31 | 65 | 12 | M1 | T1 | 1987 |
| 南特 | 阿尔斯通 | N/A | B'2'2'B' | 12 | 18 | 39.2 | 2.3 | 850 | 350 | 51.6 | 70 | N/A | M1 | | 1992 |

续表 1-1

| 城市 | 制造商 | 类型 | 轴式 | 车辆数 | 比例/% | 车长/m | 车宽/m | 地板最大高度/mm | 地板最小高度/mm | 质量/t | 最大速度/(km·h ⁻¹) | 最小曲线半径/m | 动车 | 拖车 | 交付年度 |
|------|-----------|-------------------|--------------|-----|------|------|------|-----------|-----------|------|----------------------------|----------|----|----|------|
| 谢菲尔德 | Duewag | GT8 | B'B'B'B' | 25 | 34 | 34.8 | 2.7 | 880 | 480 | 46 | 80 | 25 | M1 | | 1993 |
| 苏格兰 | Schindler | Abe4/8 | B'0'2'2'B'0 | 23 | 50 | 39.3 | 2.7 | 830 | 390 | 51 | 90 | N/A | M2 | T1 | 1992 |
| 德雷斯顿 | Duewag | 6MGT | B'0'22B'0 | 20 | 64 | 40.5 | 2.4 | 600 | 350 | 42 | 70 | 15 | M2 | T3 | N/A |
| 曼海姆 | 亨舍尔 | 6NGT/ Vanotram | N/A | 2 | 70 | N/A | N/A | N/A | 290 | N/A | N/A | N/A | M2 | T3 | 1996 |
| 里尔 | 布雷达 | VLC | B'111B' | 24 | 80 | 29.9 | 2.4 | 950 | 350 | 40 | 70 | 25 | M4 | T4 | 1993 |
| 布鲁塞尔 | 庞巴迪 | TRAM2000 | A'1'B'0'1'A' | 51 | 100 | 22.8 | 2.3 | 350 | 350 | 31.9 | 70 | 17.5 | M6 | | 1994 |
| 乌兹堡 | LHB | GTW | B'0'B'0'B'0 | 20 | 100 | 29.1 | 2.4 | 350 | 300 | 35 | 80 | N/A | M7 | | N/A |
| 维也纳 | SGP | ULF197-4 | 1A'A'A'A'1 | 100 | 100 | 23.6 | 2.4 | 197 | 197 | 23 | 70 | 18 | M9 | T7 | 1995 |
| 维也纳 | SGP | ULF197-6 | 1A'A'A'A'A'1 | 1 | 100 | 34.9 | 2.4 | 197 | 197 | 32.5 | 70 | 18 | M9 | T7 | 1994 |

由于 ULF 车辆地板超低,如图 1-5 所示,给车辆传动系统、悬挂系统、电气设备布置的设计带来很多困难,在形式上也完全区别于 50%~70%低地板车辆,使制造成本将会有较大增加,因此应该谨慎选择。

从国产化的角度评判,目前成熟的只有 70%低地板车辆,而 100%低地板车辆仍在试验阶段。100%低地板现代有轨电车的国产化能力不足,是影响当前现代有轨电车在国内发展的重要因素。

2. 按制式分

根据运行系统的不同,现代有轨电车主要分为钢轮钢轨式和胶轮+导轨式两种制式,例如阿尔斯通公司的 Citadis 系列属于前者,而劳尔公司的

Translohr 系列属于后者。钢轮钢轨式现代有轨电车由地面的两条 U 型钢轨承担钢轮的重量,同时钢轨对钢轮起导向限制作用。这是从传统有轨电车系统发展并延续下来的,技术较为成熟和可靠。一般情况下钢轨顶面与城市道路路面平齐(见图 1-6)。胶轮+导轨式现代有轨电车轨道由类似道路的行车道和一条引导车辆运行的特殊导轨组成,车辆走行系统与汽车一样为橡胶轮胎,导向轮在导轨的限制下引导车辆运行。这是为减轻道路改建工程量而改进出来的一种折中的系统(见图 1-7)。图 1-8 所示为钢轮钢轨系统与胶轮+导轨系统的对比。

目前,国外主要应用的是钢轮钢轨系统,而国内已经投入运营的则均采用胶轮+导轨系统。

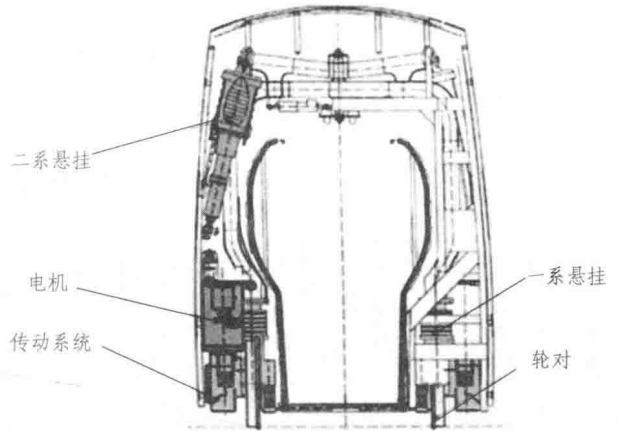


图 1-5 ULF 车辆横断面示意图

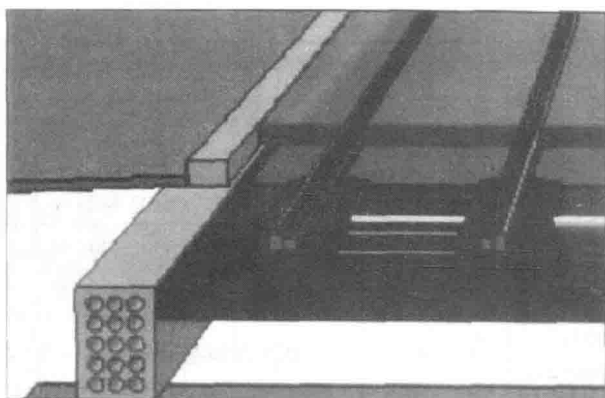


图 1-6 钢轮钢轨式现代有轨电车路面结构

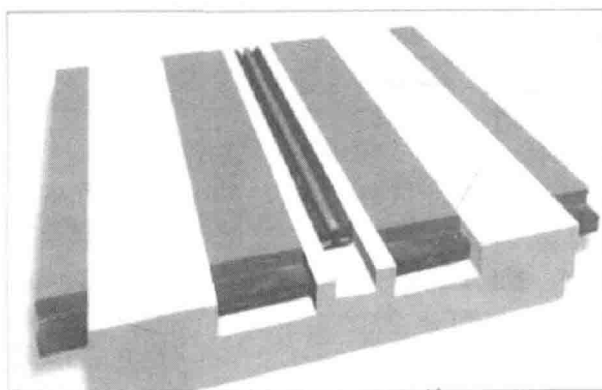


图 1-7 胶轮+导轨式现代有轨电车路面结构



图 1-8 钢轮钢轨系统（左）和胶轮+导轨系统（右）的对比图

表 1-2 列出了两种制式有轨电车的技术性能对比。通过对比，可以看出：① 钢轮钢轨式有轨电车的车内空间、载客量比胶轮+导轨式有轨电车大；② 钢轮钢轨式有轨电车受转向架、钢轮-钢轨摩擦性能限制，在爬坡、转弯、加速、减速等方面的性能不如胶轮+导轨式有轨电

车；③两种制式的有轨电车的车内外噪声比较接近，差距在检测误差范围内（±2 dB）。另外，目前钢轮钢轨式有轨电车的技术比较成熟，单列列车成本比胶轮+导轨式有轨电车低。

表 1-2 两种制式有轨电车的主要指标对比

| 主要指标 | | 钢轮钢轨式有轨电车 (以 Citadis 系列为例) | 胶轮+导轨式有轨电车 (以 Translohr 系列为例) |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 尺寸/m | 车辆长度 | 22~50 | 25~46 |
| | 车辆宽度 | 2.3~2.65 | 2.2 |
| 运能/(人次·h ⁻¹) | 32 m 列车, 4 人/m ² | 200~220 | 160~170 |
| 技术性能 | 最大速度/(km·h ⁻¹) | 70 | 70 |
| | 最大坡度/% | 8 | 13 |
| | 最小转弯半径/m | 20 | 11 |
| | 供电电压/V | 750 | 750 |
| | 最大加速度/(m·s ⁻²) | 1.1 | 1.3 |
| | 紧急减速度/(m·s ⁻²) | 3 | 5 |
| | 供电方式选择/种 | 3 | 2 |
| 噪声/dB | 车辆停靠时车位处 | 62 | 62 |
| | 40 km/h 运行, 车内 | 71 | 69 |
| | 40 km/h 运行, 车外 7.5 m 处 | 76 | 78 |

3. 按供电方式分

供电方式是指牵引电流馈送到电动车辆上的方式，一般分为接触轨（又称第三轨）方式和架空接触网方式（见图 1-9）。目前，有轨电车常采用这两种方式供电。但由于有轨电车属于地面公共交通系统，第三轨供电存在安全性及稳定性隐患，因而架空接触网供电得到更多的应用，第三轨供电则应用到对城市景观要求比较高的地段。为了弥补第三轨供电的缺陷，蓄电池、超级电容技术也得到了大力发展。



图 1-9 地面供电和吊挂电力网系统的现代有轨电车

架空接触网是当前最为成熟和应用最广泛的供电方式。但架空线对于景观的影响，也是在城市发展中非常值得关注的问题。



图 1-10 良好的架空接触网设计实景图

对于这个问题，一方面从架空接触网来看，对立柱和线网进行有效的工业设计后，将大大美化接触网的视觉效果，与周边环境形成良好的结合（见图 1-10）。另一方面，为彻底解决接触网与景观之间的协调问题，多种无架空接触网均已有相应的解决方案，包括 APS 系统（地面第三轨）、感应系统和超级电容系统等。其中，APS 系统已有正式运营线路，后两者均在建设试验线。但无架空接触网系统由于专利技术等原因，供应厂商相对单一，供电系统的造价较高。

1.3 建设现代有轨电车的意义及其功能定位

1.3.1 建设现代有轨电车的意义

现代有轨电车在国外大中城市应用广泛，发展迅速，但在我国尚处于起步阶段。当前，我国城市快速发展，对完善城市综合交通体系、加快发展公共交通、实现绿色出行提出了新的要求。由于现代有轨电车系统具有低碳减排、少污染、保护城市环境的优势，因此推动现代有轨电车发展，构建多层次的城市轨道交通体系，具有重要的现实意义和战略意义。

1. 扩大城市轨道交通系统使用范围，推动城市轨道交通产业发展

现代有轨电车系统与地铁、轻轨、BRT 一样，均为城市公共交通工具，其技术特征、运营特征与地铁、轻轨、BRT 既有类似之处，也有较大的不同。表 1-3 和表 1-4 所示分别为现代有轨电车与地铁、轻轨及 BRT 的技术特征对比。