

现代有轨电车工程

— XIANDAI YOUGUI DIANCHE

G O N G C H E N G

主编◎陆 云

主审◎刘达德



西南交通大学出版社

现代有轨电车工程

XIANDAI YOUGUI DIANCHE

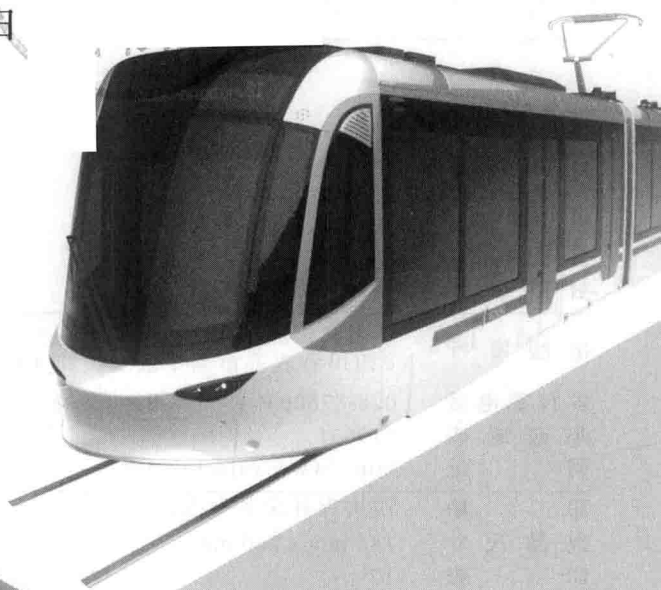
GONGCHENG



主 编◎陆 云

副主编◎李 俊 唐 阳

主 审◎刘达德



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书概述了有轨电车的发展历程以及现代有轨电车在城市公共交通系统中的地位和作用,并充分反映了国内外现代有轨电车最新的科技成果;同时全面系统地介绍了现代有轨电车车辆和线路的总体及其各个组成部分的基本概念、结构、性能和工作原理。全书包括绪论,现代有轨电车概述,车体及司机室,车内设施及其布置,车辆模块间的连接装置,转向架,牵引传动系统,辅助供电系统,空调系统,现代有轨电车TCMS及信号控制系统,现代有轨电车供电系统,现代有轨电车线路系统、运营管理设备和车辆基地,现代有轨电车工业设计,国内外典型有轨电车介绍等14个部分。

本书可作为从事现代有轨电车工程研发与设计人员的参考材料,也可作为城市轨道交通专业的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代有轨电车工程 / 陆云主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2015.4
ISBN 978-7-5643-3851-0

I. ①现… II. ①陆… III. ①有轨电车—车辆工程
IV. ①U482.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 076035 号

现代有轨电车工程

主编 陆云

出版人 阳晓
责任编辑 李伟
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 | 四川森林印务有限责任公司 |
| 成品尺寸 | 185 mm × 260 mm |
| 印张 | 17 |
| 字数 | 425 千 |
| 版次 | 2015 年 4 月第 1 版 |
| 印次 | 2015 年 4 月第 1 次 |
| 书号 | ISBN 978-7-5643-3851-0 |
| 定价 | 68.00 元 |

课件咨询电话: 028-87600533

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

在第一次工业革命时代，社会生产力迅速发展，各种原料和产品的运输成为十分突出的问题。落后的交通运输工具成为大工业生产的障碍，因而火车的发明和交通运输技术的变革随着工业革命的兴起而迅猛发展，极大地加强了地区间的工业、生活、商业等各行业间的联系，将世界紧密联系在一起，促进了世界人民间的交往、物质流通和思想交流。如今，当第一次工业革命的产物和第三次工业革命的产物——信息技术结合在一起的时候，焕发出了新的生机，也将更大程度地改变未来的交通方式、改变运载的效率、改变能源利用的效率和模式。第三次工业革命的核心就是能源利用效率的提升，城市轨道交通可以说是其中的典范之一。在这种革新的交通运输体系下，互联网技术、使用存储技术存储间歇式能源、利用互联网技术将电网转化为能源共享网络、运输工具所需能源与共享电网平台对接，这些重要的思想和技术都充分体现在现代有轨电车系统中。所以，现代有轨电车定会成为城市交通的必然选择之一。

在 2014 年度第 10 届德国柏林国际轨道交通技术展览会（Inno Trans 2014）上，我们看到了轨道交通的发展和演变。其产业的理念从最初的轨道，到运输，直至现在的移动（Mobility），其称谓和内涵都发生了巨大的变化。现代的移动代表了整个社会的人和物的位移与流动；而这两者都需要集约、高效、环保、舒适和安全。这就表明一场交通的变革正在来临。此次庞巴迪（Bombardier）公司展示的主题就是：The Evolution of Mobility！展示的子主题分别是：效率、能力和城市流动。该公司将其现代有轨电车的解决方案命名为：城市交通运输的未来（The Future of Urban Transport）。西门子（Siemens）集团更是在这个时期调整了众多的相关业务部门，整合出一个名为 Mobility 的综合部门。可以看到，各大公司都把现代有轨电车作为一个独立的、重要的、不断发展提升的部分来对待，可见其重要性非同一般。他们在总体策略上都把可持续发展的四大基础——能量、效益、经济和生态组合在一起，作为技术和产品发展的导向。

1881 年，西门子创始人维尔纳·冯·西门子发明了世界上第一台电力牵引的有轨电车，从此掀开了有轨电车的序幕，至今已历经 130 余年。有轨电车是最早出现的城市轨道交通运工具，广泛服务于世界各地许多城市的公共交通。该时期的有轨电车属于旧式有轨电车，由于其存在一些缺点，加之逐渐被汽车取代，故旧式有轨电车逐渐被淘汰。20 世纪 70 年代前后，一些发达国家重新开发出融有许多高科技装备的现代有轨电车。

综观现代有轨电车系统，相比于原来的有轨电车系统有几个比较突出的特点：

（1）定制化设计：客户的差异化和对效率的要求使得定制化设计成为必然的趋势。

（2）强化的安全性：定位技术、信息技术、监控技术、高防火材料和设备、高度可靠的制动技术大大提高了安全性。

（3）舒适性：通过先进的附加设施，可在视觉、信息、门窗、空调等各方面提高乘客乘坐的舒适度。

（4）尖端科技的应用：包括无障碍上下车；转向架上低的簧下质量改善了运行品质；低的噪声、振动；运用最先进的节能环保技术，达到节约能源、保护环境，并可提升车辆的总体性能；主动的经济节能管理系统技术可以使总的能量消耗降低 30% 以上，甚至可无接触供

电等；基于 IP 的维护和服务数据实现远程作业支持；应用模块化技术开发的产品为各类用户提供了良好的服务和支持。

(5) 基于易维护理念进行的设计，使其具备了高可靠性，并降低了寿命周期成本。

(6) 按全面模块化的理念编组车辆，实现了灵活高效的运能调节能力。

随着城市的扩张、城镇化的发展、节能和环保的需求，现今迫切需要高效率、环境友好型和高度集成、集群的快速运输系统。其解决方案就是建设城市智能交通系统。作为城市轨道交通重要组成部分的现代有轨电车系统在其自身变革的同时，已成为整个智能交通系统的重要载体。

近几十年来，我国城市轨道交通发展迅速，前期主要发展地铁和轻轨交通，近期已在着力发展现代有轨电车系统。目前，我国已有 70 多个城市提出建设现代有轨电车线路的计划；其中过半数城市已有具体建设规划，或正在修建之中。国内从事现代有轨电车研发、生产的企业已有多家，它们在国家技术政策的支持下，通过引进、吸收、自主创新等途径创造出了显著的业绩。就整体而言，我国现代有轨电车事业方兴未艾，其前景是辉煌的。

由于我国在现代有轨电车领域发展相对滞后，迫切需要做更多的研究和实践。为了了解、研究和推动相应的产业和技术，本书编者进行了大量的国外、国内实地考察，对欧洲、美洲和东南亚以及国内最主要应用有轨电车的城市进行了考察，与最主流的业主、公司企业和科研机构进行了广泛的交流和研讨，比较全面地了解到当前现代有轨电车的发展现状。鉴于目前国内有关现代有轨电车的专著尚不多见，本书编者结合目前正在实施的现代有轨电车项目，并结合相应的调研、工程设计、车辆和机电设备的研发与教学实践，在参阅了国内外大量文献、资料的基础上编写了本书，藉此对我国现代有轨电车事业做一些有益的工作。

本书力求阐述现代有轨电车及其主要设备的基本概念、结构、性能和工作原理，内容包括：绪论，现代有轨电车概述，车体及司机室，车内设施及其布置，车辆模块间的连接装置，转向架，牵引传动系统，辅助供电系统，空调系统，现代有轨电车 TCMS 及信号控制系统，现代有轨电车供电系统，现代有轨电车线路系统、运营管理设备和车辆基地，现代有轨电车工业设计，国内外典型有轨电车介绍等。本书带有*号的彩色图片放在西南交大出版社网站多媒体资源板块，请通过扫描右下方二维码获取。

本书由成都市新筑路桥机械股份有限公司陆云、李俊、王轶，西南交通大学唐阳、王海军、何俊、杜润、殷俊、吴小平、李怀仙，北京城建设计发展集团股份有限公司高莉萍组成的编写团队完成编写；全书由北京交通大学刘达德主审。

本书在编写过程中参考、引用了国内外同行专家、学者的著述和文献，在此谨向有关专家、学者表示诚挚的谢意；同时得到了长沙广义变流技术有限公司的大力支持，在此谨向该公司表示衷心的感谢。

诚挚感谢中央高校基本科研业务费专项资金资助 (Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, 2682014CX013EM) 及牵引动力国家重点实验室开放课题 (TPL1209) 的联合资助！本教程较多内容反映了这些项目的研究成果。

由于编者水平有限，且成书仓促，书中不妥之处在所难免，敬请读者指正。



陆 云

2015 年 1 月

目 录

| | |
|--------------------------------|----|
| 0 绪 论 | 1 |
| 0.1 国内外有轨电车的发展 | 1 |
| 0.2 现代有轨电车在城市交通系统中的地位和作用 | 2 |
| 0.3 现代有轨电车的特点 | 4 |
| 1 现代有轨电车概述 | 6 |
| 1.1 现代有轨电车的主要特点 | 6 |
| 1.2 现代有轨电车的基本组成 | 7 |
| 1.3 现代有轨电车的分类 | 8 |
| 1.4 现代有轨电车的技术参数 | 10 |
| 2 车体及司机室 | 13 |
| 2.1 车 体 | 13 |
| 2.2 司机室 | 19 |
| 3 车内设施及其布置 | 28 |
| 3.1 内装材料 | 28 |
| 3.2 车 门 | 29 |
| 3.3 车 窗 | 32 |
| 3.4 座 椅 | 32 |
| 3.5 无障碍设施 | 34 |
| 3.6 立柱扶手 | 34 |
| 3.7 车内照明系统 | 35 |
| 3.8 乘客信息设备 | 36 |
| 3.9 应急系统 | 36 |
| 4 车辆模块间的连接装置 | 39 |
| 4.1 车辆模块间的铰接装置 | 39 |
| 4.2 贯通道装置 | 43 |
| 4.3 车钩缓冲装置 | 46 |
| 4.4 防爬及溃缩吸能装置 | 51 |
| 5 转向架 | 57 |
| 5.1 概 述 | 57 |
| 5.2 转向架构架 | 62 |

| | | |
|-----------|----------------------------|------------|
| 5.3 | 车轮、车轴 | 64 |
| 5.4 | 一系悬挂装置 | 70 |
| 5.5 | 二系悬挂装置 | 72 |
| 5.6 | 轴箱装置 | 80 |
| 5.7 | 驱动装置 | 82 |
| 5.8 | 基础制动装置 | 86 |
| 5.9 | 牵引装置 | 88 |
| 5.10 | 附件装置 | 89 |
| 5.11 | 国外典型低地板有轨电车转向架综述 | 90 |
| 6 | 牵引传动系统 | 103 |
| 6.1 | 概述 | 103 |
| 6.2 | 受电弓 | 105 |
| 6.3 | 牵引逆变器 | 107 |
| 6.4 | 牵引控制单元 | 111 |
| 6.5 | 牵引电机 | 112 |
| 6.6 | 电制动 | 118 |
| 7 | 辅助供电系统 | 121 |
| 7.1 | 概述 | 121 |
| 7.2 | 辅助逆变器 | 122 |
| 7.3 | 辅助直流电源 | 125 |
| 7.4 | 蓄电池及充电机 | 127 |
| 8 | 空调系统 | 130 |
| 8.1 | 概述 | 130 |
| 8.2 | 司机室空调系统 | 135 |
| 8.3 | 客室空调系统 | 139 |
| 8.4 | 空调系统的运行控制 | 144 |
| 8.5 | 通风系统 | 146 |
| 8.6 | 采暖系统 | 150 |
| 9 | 现代有轨电车 TCMS 及信号控制系统 | 152 |
| 9.1 | 概述 | 152 |
| 9.2 | TCMS 的组成及功能 | 153 |
| 9.3 | 有轨电车信号控制系统 | 160 |
| 10 | 现代有轨电车供电系统 | 170 |
| 10.1 | 现代有轨电车牵引供电系统的类型 | 170 |
| 10.2 | 架空接触网供电系统 | 171 |
| 10.3 | 第三轨（接触轨）供电系统 | 176 |

| | | |
|-------|---------------------------------|-----|
| 10.4 | Tramwave 系统 | 178 |
| 10.5 | Primove 无线供电系统 | 180 |
| 10.6 | 现代有轨电车储能供电系统 | 180 |
| 11 | 现代有轨电车线路系统、运营管理设备和车辆基地 | 187 |
| 11.1 | 概 述 | 187 |
| 11.2 | 线路及限界 | 187 |
| 11.3 | 轨道及路基 | 192 |
| 11.4 | 车站及站台设施 | 200 |
| 11.5 | 运营管理设备 | 202 |
| 11.6 | 车辆基地 | 205 |
| 12 | 现代有轨电车工业设计 | 211 |
| 12.1 | 有轨电车工业设计的必要性 | 212 |
| 12.2 | 有轨电车中工业设计的影响 | 220 |
| 12.3 | 有轨电车工业设计的步骤 | 226 |
| 12.4 | 评价有轨电车工业设计的质量 | 230 |
| 13 | 国内外典型有轨电车介绍 | 233 |
| 13.1 | Siemens 公司现代有轨电车 | 233 |
| 13.2 | Alstom 公司现代有轨电车 | 239 |
| 13.3 | 日本川崎重工株式会社现代有轨电车 | 242 |
| 13.4 | 日本近畿现代有轨电车 | 244 |
| 13.5 | Bombardier 公司现代有轨电车 | 247 |
| 13.6 | Ansaldo Breda 公司现代有轨电车 | 252 |
| 13.7 | PESA 公司现代有轨电车 | 253 |
| 13.8 | Crotram 公司现代有轨电车 | 254 |
| 13.9 | Durmazlar Makine 公司现代有轨电车 | 256 |
| 13.10 | Vossloh 公司现代有轨电车 | 257 |
| 13.11 | Skoda 公司现代有轨电车 | 259 |
| 13.12 | Stadler Rail AG 公司现代有轨电车 | 260 |
| 13.13 | 国内现代有轨电车 | 262 |



0 绪 论

0.1 国内外有轨电车的发展

城市有轨电车从 19 世纪末期至今，经历了蓬勃兴起、广泛应用、停滞废弃和重新快速发展 4 个阶段。

从 19 世纪末至 20 世纪初，由于当时发达国家的城市发展、人口密集，人们对城市公共交通的迫切需求，有轨电车首先在德国、美国先后出现。在此后的二三十年间，有轨电车在欧洲、北美、澳大利亚、日本、印度等国家和地区得到普遍应用。我国于 1908 年首先在上海建成了国内第一条有轨电车线路，随之在大连、北京、天津、沈阳、长春、鞍山等城市先后建成有轨电车线路并通车，但通车里程有限。这一时期的有轨电车受到当时技术条件的限制，车辆结构、内部设备、轨道、电网、信号、调度、行车速度、载客量等方面都欠先进，属于旧式有轨电车。其轨道多设在城市道路中央部位，与其他道路车辆共享街道路权，共同受道路信号控制，因而常出现各种车辆相互干扰、拥堵现象。另外，旧式有轨电车还存在正点率低、车辆运行噪声干扰环境等缺陷。尽管如此，直到 20 世纪 50 年代末期，有轨电车都一直在城市的主要公共交通工具中担当着城市客运交通的繁重任务。

20 世纪 30 年代，特别是第二次世界大战以后，汽车工业迅速发展，表现为私人轿车以及各类大、中、小型汽车数量急剧增加。由于汽车运行不需要特殊的道路基础设施，汽车行驶速度、可靠性、灵活性等均超越了城市有轨电车，致使汽车成为人们出行的主要交通工具，并逐渐取代了有轨电车。从 50 年代开始，国外许多城市逐渐废弃了有轨电车。稍晚于这一时期，我国各城市也先后拆除了有轨电车线路，代之以公共汽车和无轨电车。但大连、长春、鞍山的有轨电车一直在使用。在各类汽车成为城市道路交通运输工具的主力以后，其数量逐年增加，所造成的城市交通负面问题日益突出：道路交通拥堵不堪；汽车行驶速度降低，从而派生出因汽车发动机不能按正常经济特性运转出现排气冒黑烟，比一般尾气排放更加污染空气；公交汽车运量有限，又常因交通拥堵使乘客出行晚点；同时还存在汽车行驶噪声污染环境的普遍问题。上述问题是城市交通面临的普遍问题，影响着城市的进一步发展。70 年代以来，世界发达国家为解决和满足城市公交运量日益增长的需求，开始努力开发大运量的轨道交通作为发展城市公共交通的重点。初期以修建地铁为主。地铁的客运量大，运行速度较高，是城市轨道交通的主力；但地铁投资高、建设周期长、工程量大、工程复杂程度高。因而考虑结合城市不同地区和客运量的区别，开始设计建造轻轨交通体系。为改善和加强城市地面交通的运输能力，人们又重新重视地面有轨电车交通系统。从 70 年代前后，首先在欧洲依靠现代技术，开发出性能优良的现代有轨电车。至今，现代有轨电车已在世界许多国家重新快速发展起来。

国外致力于现代有轨电车研发并兼作供应商的公司主要有 Siemens、Alstom、Bombardier、



CAF（西班牙铁道车辆制造商）、Ansaldo、Stadler/ABB、Skoda 等。这些公司研发的不同类型现代有轨电车具有以下共同的特点：节能、环保、运行安全、可靠，运能和运行速度比旧式有轨电车有明显提高；特别注重车辆的人性化设计，乘坐舒适度好；车辆具有鲜明的现代外观色彩等。如今，现代有轨电车在许多国家和地区被广泛应用。据有关资料统计，有近 50 个国家、400 多个城市建成了有轨电车交通体系。

目前，我国的城市有轨电车交通事业尚处于起步阶段。我国 2012 年颁布的《“十二五”综合交通运输体系规划》中提出：“根据不同城市的规模和特点，制定差别化的轨道交通发展目标。有序推进轻轨、地铁、有轨电车等城市轨道交通网络建设。”从 20 世纪 90 年代以来，随着我国国内有轨电车市场的需求，技术政策的支撑，我国有轨电车的生产企业、理论研究和决策机构就国内开发城市现代有轨电车交通的市场前景、经济投入、技术攻关、生产实践等问题进行了深入研究。结果认为：我国应开发现代有轨电车交通，以满足各类城市发展对不同公共交通模式的需求，缓解公交压力。并认为，现代有轨电车这种“绿色”交通工具，在我国新兴城市、大城市支线以及中小城市会得到推广，有很大的发展空间和广阔的市场应用前景。在此背景下，大连机车车辆有限公司、长春轨道客车股份有限公司、唐山轨道客车有限责任公司、青岛四方机车车辆股份有限公司、南京浦镇车辆有限公司、株洲电力机车有限公司、成都市新筑路桥机械股份有限公司、湘电集团有限公司等众多生产现代有轨电车的企业，分别通过引进、消化国外先进技术，合作开发以及自主研发等方式制造出了中国本土的现代有轨电车，并积极开拓国内外现代有轨电车市场。目前，国内大部分生产企业都均已生产出首列样车，有的企业已经小批量生产现代有轨电车供国内市场，甚至有的企业已进入国际市场。

随着我国现代有轨电车成功研发和投产的实现，2002 年至 2012 年间，大连、天津、上海、长春等市按城市规划相继建成了有轨电车线路并投入运营。另外，沈阳、苏州、南京、北京、常州、佛山、三亚、珠海等十余个城市的有轨电车交通线路有些已建成试运营，有些已动工兴建，计划近年内正式运营。此外，我国香港地区早年就有了地面双层有轨电车，运营至今，占有重要的地位。综上所述，现代有轨电车在我国将迎来新的建设高潮。

0.2 现代有轨电车在城市交通系统中的地位和作用

目前，我国的许多城市按其城市规划都在向周边地区扩张，人口密集程度有增无减，相应的城市交通拥挤状况日益突出。我国城市和国外城市一样，为解决公共交通问题，一般都选择了交通模式多元化的方案。城市交通系统的类型如图 0.1 所示。

在尚未修建轨道交通系统的城市中，人们出行主要依赖图 0.1 所示的公交汽车、私家机动车辆和非机动车辆。在已建成轨道交通系统的城市中，由于轨道交通的运量大、运行速度高，有良好的可靠性和准时性，人们出行多愿选择轨道交通。国外大城市如纽约、伦敦、巴黎、柏林、莫斯科、维也纳、东京等均已建成轨道交通网络。同类轨道交通之间或不同轨道交通之间均可换乘，四通八达。乘坐轨道交通车辆出行的人数一般占整个公共交通乘客总人数的 50% 以上。我国首都北京的城市轨道交通规划建设成效显著，至 2014 年 5 月底，北京城市轨道交通运营线路已达 18 条，里程 544 km，承担公共交通出行的比例超过了 40%。由此可见，城市轨道交通在城市交通系统中占有相当重要的地位。

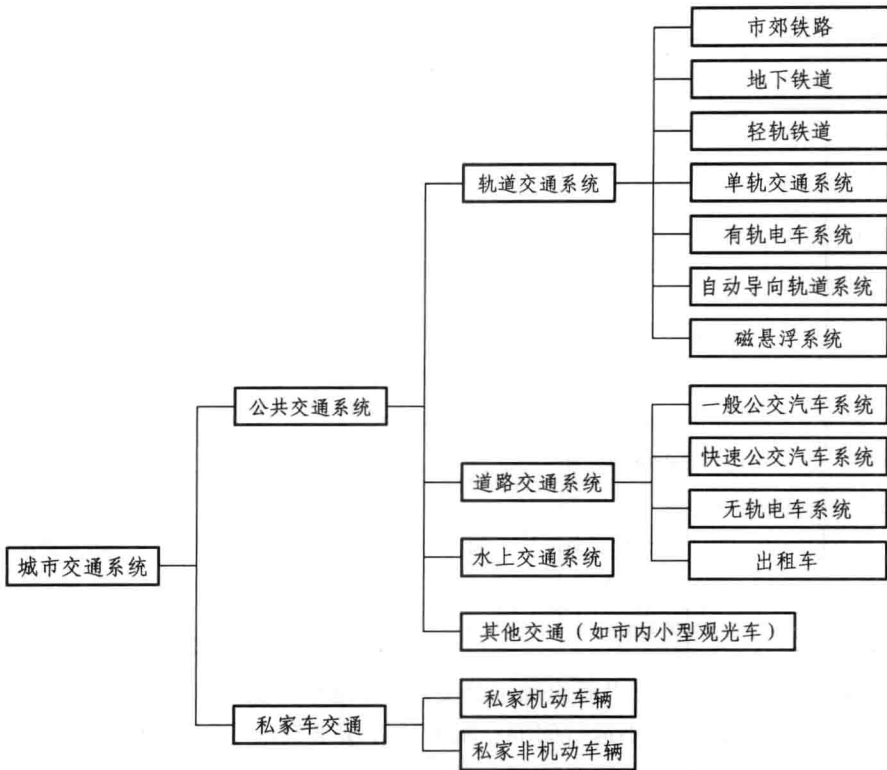


图 0.1 城市交通系统

现今，国内外城市轨道交通系统中，虽然有着 7 种不同的类型，但多以地铁、轻轨和有轨电车为主要类型。现将人们出行选择不同公共交通类型时所关心的几项指标列于表 0.1 中（表中数据主要参考国内统计值）。

表 0.1 城市主要公共交通类型比较

| 类型 | 车辆编组数/节 | 运量 / (万人/h) | 旅行速度 / (km/h) | 站间距 /km | 运行最小间隔/min | 准时性 | 乘坐舒适度 | 乘降便捷性 | 票制 |
|-----------|------------------------|-------------|---------------|---------|------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------|
| 公共汽车、无轨电车 | 一般只有 1 节；大型车 2 节（中间铰接） | 0.5~0.8 | 10~15 | 0.5~1 | 约 5 min；早晚峰值时 8~10 min | 发车时间固定；中途若拥堵，中间各站不能准时 | 有空调设备尚好；无空调设备乘坐不舒适 | 车辆地板高度约 500 mm 以上，乘降车不便 | 单一票价，或计程票价，不能一票换乘 |
| 地铁 | 4~8 | 5~7 | 40~60 | 1.5~2 | 约 3 | 准时 | 好 | 对于地下和高架车站，如无自动电梯，乘车不便；站台乘降车方便 | 计程票价；少数城市可一票换乘 |



续表

| 类型 | 车辆编组数/节 | 运量/(万人/h) | 旅行速度/(km/h) | 站间距/km | 运行最小间隔/min | 准时性 | 乘坐舒适度 | 乘降便捷性 | 票制 |
|------|---------|-----------|---|---------|------------|--------------------------------|-------|----------------------------|----------------|
| 轻轨交通 | 4~6 | 2~3.5 | 30~35 | 0.8~1.5 | 2~3 | 准时 | 好 | 对于高架车站如无自动电梯,乘车不便;站台升降车辆方便 | 计程票价;少数城市可一票换乘 |
| 有轨电车 | 3~5 | 0.8~1.2 | 专用轨道有轨电车约30 km/h;市内与其他车辆混行有轨电车 15~20 km/h | 0.5~1.5 | 约3 | 有专用轨道的有轨电车准时;与其他车辆混行的有轨电车准时性较差 | 好 | 低地板有轨电车乘降便捷 | 计程票价;少数城市可一票换乘 |

由表 0.1 中几项指标数值可以看出城市公交汽车、地铁、轻轨和有轨电车 4 种公交车辆的运量、旅行速度、站间距、最小运行间隔、准时性、乘坐舒适度和票制等之间存在着差别。从运量而言,城市有轨电车是处于轻轨和公共汽车之间的较低运量的路面有轨公交类型。按照有轨电车载客量及其在城市市区的布局特点,有轨电车成为地铁、轻轨与公交汽车之间的有益补充。在国外,现代有轨电车已成为中、小城市市内公共交通的骨干;在我国也可作为城市特别是新兴卫星城内部公交的主流选择。有轨电车制造业可成为轨道交通工业的重要组成部分,也可为沿线商业开发、物业增值提供良好的机会。

0.3 现代有轨电车的特点

现代有轨电车是利用电气牵引驱动、地面固定轨道导向、低地板式、具有适宜运量的城市轨道交通车辆。现代有轨电车具有高效、灵活、节能、环保、乘坐安全舒适的总体特征。

现代有轨电车从动车、拖车、浮车的车辆总体到主要部件均采用模块化设计,使其制造、维护保养、检修均经济、规范、便捷。其列车的编组也按模块化方式,运营部门可根据不同客流量增加或减少中间车体模块,达到合理运输的目的。

现代有轨电车的供电系统主要采用架空接触网供电方式,可靠、经济,可适用于各种类型的有轨电车。另外,还有地面第三轨等几种供电方式。

现代有轨电车的线路,一般按照城市交通规划沿市区道路走向布设。在有些城市,设置半封闭型有轨电车专用线路。现多数线路采用与其他车辆混行的形式。线路的最小曲线半径可小于 20 m,便于沿市区街道布设。

现代有轨电车属于经济性较高的城市轨道交通车辆,建设投资少、建设周期短、能源消



耗少、运输效能高。现代有轨电车不像汽车那样排出废气且轮轨系统有减振降噪措施，如采用弹性车轮或阻尼车轮，轨道可采用无缝钢轨、轨道镶装阻尼器等，使其运行噪声比一般公交汽车降低约 5 dB。由于乘坐便捷，又与其他公交车辆换乘方便，故有减少私家汽车数量的潜在能力，有利于城市环保。

现代有轨电车为司机可视驾驶方式，操纵灵敏，极少发生交通意外事故。

现代有轨电车采用低地板、空调通风系统，车厢内设有轮椅、自行车停放处所等人性化设计，使乘客乘坐舒适，便于乘客特别是老年人、儿童和残障人士乘降。车辆外形可按用户要求，按其地方特色、人文理念等设计选择车辆的外形、外饰、内装，使有轨电车系统融入当地城市文化特色中，可成为现代城市的一道流动风景线。因而，现代有轨电车是城市可持续发展的绿色环保交通系统，且是促进城市发展的积极因素。

当然，有轨电车也具有一定的负面影响，如有轨电车需要在城市街道中布设轨道，占用道路资源；有轨电车必须沿固定轨道行驶，机动性差；在与其他车辆混行的道路上，可能造成交通拥堵；有轨电车的架空接触网影响市容以及轮轨运行噪声干扰环境等。但现代有轨电车的应用实践表明，上述负面影响可得到最大程度减小。有轨电车的轨道可布设在城市街道的一侧，而不是街道中央，或者开辟专用半封闭式线路，一般不会造成额外的交通拥堵；现代有轨电车可采用第三轨等无接触网的地面供电方式，则不会影响市容；如前所述，现代有轨电车的车轮和轨道采用了降噪措施后，运行噪声显著降低。以上情况在国外现代有轨电车运用实践中都得到了证实。



1 现代有轨电车概述

现代有轨电车是一种中低运能、设计新颖、环境友好、资源节约的交通运输工具，是在传统有轨电车的基础上全面改造升级的一种公共交通方式。其特征是采用电气牵引轮轨导向的低地板式电动车辆，运行在专用轨道上，融合了轨道交通和市政道路两种特质，主要承担公交职能，采用平交道口和优先信号。

1.1 现代有轨电车的主要特点

现代有轨电车在大城市中可以承担地铁等骨干公共交通网络的“补充、延伸、联络、过渡”等辅助功能。常规公交是城市公交的基础，重在实现城市功能片区的良好连通；现代有轨电车是城市客运交通的补充，注重对走廊内的服务和对轨道、常规交通的衔接。现代有轨电车主要有以下特点：

1. 人性化设计

车辆地板略高于地面高度，方便乘客上下车。由于车辆行驶在轨道上，其运行条件优于公交汽车。车辆制造工艺要求高，车厢的外观和内部环境较好。

2. 平稳性良好

由于采用了交流传动和微机控制制动技术，并且在较平顺的轨道上行驶，车辆在运行时的加速度和制动产生的减速度受到了严格控制，其平稳性明显优于公共汽车。

3. 中低运输能力

现代有轨电车运输能力为 0.8 万人/h~1.2 万人/h（通过重联等措施，还可加大），介于公共汽车和轻轨之间，属于中低运量系统。

4. 线路布设灵活，易于实施

线路平面一般最小曲线半径为 20 m，最大坡度为 50%~80%，可适应城市道路技术标准。线路可灵活布置于城市道路及绿化带，且容易延伸，车站增减灵活，改造升级成本低。

现代有轨电车多采用与市政公交线路混行模式，其线路主要在地面设置。现代有轨电车一般具有优先通行权，可采用成熟的城市轨道交通和城市公共交通信号控制。

5. 建设成本较低，周期短

现代有轨电车每公里的建设成本为地铁的 1/5、轻轨的 1/3，建设周期比轻轨和地铁要短得多。

6. 绿色环保

现代有轨电车采用电力驱动，无废气排放；采用减振隔噪措施，振动噪声小；无废水、废渣排放，是环境友好型的绿色交通系统。



1.2 现代有轨电车的基本组成

现代有轨电车的基本组成有车体、转向架、车端连接装置、制动装置、车辆内部设备与驾驶设备、受流装置、牵引传动系统、列车控制管理系统等。

1. 车 体

车体是容纳乘客和司机驾驶的地方，又是安装与连接其他设备及部件的基础和骨架。车体一般由底架、端墙、侧墙和车顶等组成，分为有司机室车体和无司机室车体两种。大部分现代有轨电车前、后两端均为有司机室车体，适用于双向行驶，车辆在终点站不需要调头折返，两车体的结构和造型完全相同。少数现代有轨电车采用单向驾驶，但前、后两端车体的结构和造型通常也是相同的。

2. 转向架

转向架的位置介于车体与轨道之间，引导车辆沿钢轨行驶和承受来自车体及线路的各种载荷并缓冲作用力，是保证车辆运行品质的关键部件。转向架一般由构架、弹性悬挂装置、轮对轴箱装置和基础制动装置等组成，分为动力转向架和非动力转向架。当前现代有轨电车所使用的转向架结构形式是多样化的，转向架的选择能直接决定车体结构形式和地板面高度。

3. 车端连接装置

车端连接装置通常是指车钩缓冲装置、各种铰接装置、贯通道装置、车端阻尼装置、电气信号连接装置等，其主要作用是将车辆编组成列。铰接装置在现代有轨电车上使用非常广泛，当前的低地板车辆绝大多数采用铰接方式连接编组。车钩缓冲装置安装于车辆的前、后两端，主要用于牵引故障车辆，只有少数单体车辆仍然通过车钩装置进行编组运行。贯通道装置将各节车体连贯成一整体，方便乘客在车间通行，并起密封作用。车端阻尼装置可有效衰减车辆间的各向振动。电气信号连接装置将各车体间的通信信号、电气连接起来，可实现全车统一控制。

4. 制动装置

制动装置是保证现代有轨电车准确停车及安全运行所必不可少的装置，主要由机械部分、空气（液压）管路部分和电气控制部分组成。

现代有轨电车线路的站间距离较地铁短，而最高速度可达 80 km/h，因此要求现代有轨电车加速快、减速快，对制动性能的要求高。现代有轨电车通常装备 3 种制动方式：电制动、盘形制动及磁轨制动。电制动为再生制动和电阻制动。司机给出制动指令后，电制动优先，其不足部分由盘形制动补足。当车速降至 10 km/h 时，电制动自动切断，仅用盘形制动使列车停车。电制动是再生制动优先，若接触网不能吸收再生制动的电能时，自动转换成电阻制动，制动电流经车上装设的制动电阻转换成热能。

5. 车辆内部设备与驾驶设备

车辆内部设备包括服务于乘客的车体内的固定附件装置和服务于车辆运行的辅助设备。其中，车电、通风、取暖、空调、座椅和拉手等属于前者，蓄电池箱、继电器箱、主控箱、空气压缩机、总风缸、电源变压器、各种电气开关和接触器箱等属于后者。车辆两端司机室内布置驾驶设备。



6. 受流装置

从接触导线（接触网）或导电轨（第三轨）将电流引入动车的装置称为受流装置或受流器。现代有轨电车的受流装置主要有轨道式受流器（第三轨受流）和受电弓受流器两种形式，而形式多样的第三轨供电和电能智能管理是发展方向。

7. 牵引传动系统

牵引传动系统包括变压器、变流器、牵引电机和齿轮传动系统等。受流装置从供电系统将电流引接到车内，通过变压器、变流器变换后传递给牵引电机，牵引电机驱动减速齿轮，从而驱动车轮转动。

8. 列车控制管理系统

列车控制管理系统将关系密切的各子系统集成在一起，实现各子系统的相互联系和协同工作，从而保证有轨电车正常运行。

1.3 现代有轨电车的分类

有轨电车按照不同的方式有不同的分类。

1. 按运行系统划分

现代有轨电车按运行系统的不同可分为钢轮钢轨制式和胶轮导轨制式两种。两者在外形上比较接近，区别在于：钢轮钢轨制式的车辆是在两条槽型钢轨上运行，钢轨既承担钢轮的质量，又对钢轮起导向限制作用，如沈阳浑南所使用的100%低地板现代有轨电车。胶轮导轨制式车辆是在安装有一条特殊钢轨的道路上运行，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，如上海张江所使用的法国劳尔有轨电车。

2. 按低地板面占整个车辆地板面的比例划分

按照低地板面占整个车辆地板面的比例可将现代有轨电车划分为3种类型：

(1) 10%~50%低地板车辆，采用传统轮对式转向架，其低地板面不相互贯通，如图1.1所示。其中，图(a)在中间车体中部采用低地板，低地板面积较小；图(b)是两端车体中部采用低地板，低地板面积较大；图(c)是3节车体均采用低地板结构，低地板面积最大。

(2) 60%~70%低地板车辆，如图1.2所示。车辆两端为高地板面，采用传统轮对式转向架；车辆两传统转向架之间采用贯通式低地板，其下方使用独立旋转车轮式转向架。

(3) 100%低地板车辆，其低地板面整车全部贯通，如图1.3所示，全部采用独立旋转车轮式转向架。

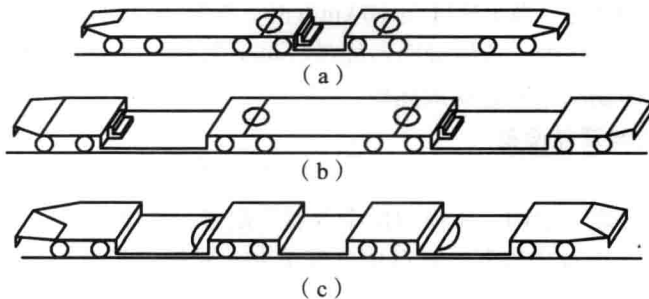


图 1.1 10%~50%低地板车辆地板示意图

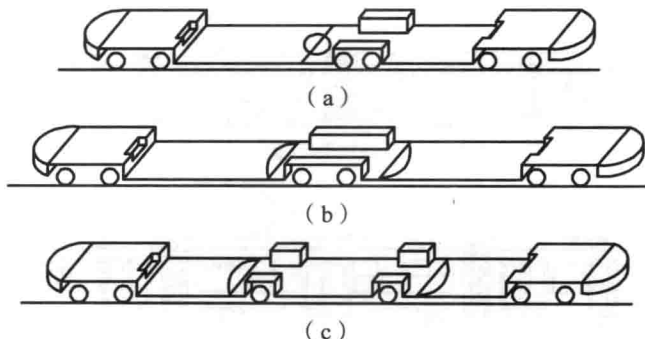


图 1.2 60%~70%低地板车辆地板示意图

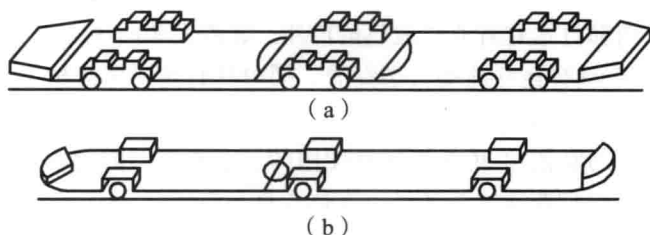


图 1.3 100%低地板车辆地板示意图

3. 按车体结构形式划分

现代有轨电车结构形式灵活多样，主要分为：铰接型、单车与浮车组合型、单车型、传统与单车组合型，如图 1.4 所示。单车型和单车与浮车组合型两种结构形式已得到广泛运用，铰接型结构目前主要用于 ULF (Ultra Low Floor) 车辆。单车是指每个车体中部设置一台转向架，如 GTN、R3.3、Combino Plus 等。单车与浮车组合型是指在端部头车与中间单车之间，或中间单车与中间单车之间“抬”一车体的方式，被“抬”车体下方不设转向架，而采用各种铰接装置与相邻车体联挂在一起，这种用得非常普遍，如 Jtram、Combino、Citadis、Sirio 等。铰接车是指相邻两车共用一台转向架，如斯柯达 Forcity 15T (中间车辆) 和 ULF 有轨电车 (每一车辆)。单车与浮车组合的形式在 100%低地板有轨电车中使用最为普遍，也有用于 70%低地板有轨电车的，但是数量不多 (如 S70 Paris)，采用这种结构，转向架数量可以减少，充分利用轴重，经济性较好。浮车的车体下方无转向架，车体设计简单方便，可节省车辆生产制造成本。但浮车车体的所有载荷全部通过两端铰接承担，故铰接强度和车体疲劳强度设计非常关键。西门子公司的 Combino 型列车发生过车体和铰接结构裂纹的问题。传统与单车组合型也有应用，如图 1.4 (d) 所示。

