


工程建设理论与
实践丛书



CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG
TUJIAN GONGCHENG SHIGONG JISHU

城市轨道交通 土建工程施工技术

梁志国 段李浩 代科 朱敏 主编

 华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通土建工程施工技术/梁志国等主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2022. 8
ISBN 978-7-5680-8596-0

I. ①城… II. ①梁… III. ①城市铁路-轨道交通-土建工程-工程施工 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 160324 号

城市轨道交通土建工程施工技术 梁志国 段李浩 代科 朱敏 主编
Chengshi Guidao Jiaotong Tujian Gongcheng Shigong Jishu

责任编辑:梁任

封面设计:王娜

责任监印:朱玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编:430223

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:武汉科源印刷设计有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:24.5

字数:494千字

版次:2022年8月第1版第1次印刷

定价:98.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

作者简介



梁志国

高级工程师，2000年6月毕业于桂林理工大学土木工程专业，从事地铁土建领域施工与管理工作21年，在中铁一局集团和河南五建集团历任广州、深圳、西安、哈尔滨、大连、郑州的车辆段与停车场项目、正线车站与区间项目的工程部长、项目总工、项目经理、轨道分公司副总经理等。



段李浩

高级工程师，2009年6月毕业于西安建筑科技大学华清学院，现就职于中国水利水电第七工程局有限公司，土木工程方向。发表独著作品2篇，获得发明及实用新型专利1项，获得国家、省部及厅级科研奖1项。



代科

高级工程师，2005年6月毕业于西南石油大学，土木工程专业。从事铁路、市政、公路施工技术和管理工作17年，现就职于中铁上海工程局集团有限公司城市轨道交通工程分公司，发表多篇隧道、桥梁施工技术方面的论文。



朱敏

硕士，高级工程师，2008年6月毕业于西南交通大学，获得桥梁与隧道工程工学硕士学位。现就职于长江勘测规划设计研究有限责任公司，岩土及隧道工程方向。发表论文16篇，获得发明及实用新型专利52项，获得省部级优秀勘察设计奖10项。

编 委 会

- 主 编** 梁志国 河南五建建设集团有限公司
段李浩 中国水利水电第七工程局有限公司
代 科 中铁上海工程局集团有限公司
朱 敏 长江勘测规划设计研究有限责任公司
- 副主编** 饶彩琴 深圳市市政工程质量安全监督总站
姜金言 青岛市地铁六号线有限公司
王伟东 中交二公局第三工程有限公司
- 编 委** 朱伟强 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司
刘龙秋 金华市轨道交通集团有限公司
王俊超 中国水利水电第十一工程局有限公司
吴洪博 中铁十二局集团第一工程有限公司
刘玉强 四川铁科建设监理有限公司
高修海 成都华丰工程勘察设计有限公司杭州分公司
龚选波 北京城建勘测设计研究院有限责任公司

前 言

近年来,中国经济飞速发展,城市化进程逐步加快。在大城市中,地面建筑越来越密集,人口越来越多,交通量越来越大,交通拥堵对社会及经济发展都产生了很大影响。解决交通拥堵问题有各种各样的方法,其中城市轨道交通由于在土地利用、能源消耗、空气质量保护、景观质量提升、客运质量保障等方面的优势,正逐步成为许多大城市交通发展战略中的核心,并形成以地铁、城市快速铁路、高架轻轨等为主的多元化交通发展趋势。今后若干年将是我国城市轨道交通高速建设发展期,需要大量的城市轨道交通专业人员。

为推动城市轨道交通各专业施工作业的标准化管理,实现工程项目管理精细化,全面提升企业整体施工技术管理能力和水平,促进施工管理和作业人员全面掌握施工程序、施工工艺、施工方法,以及质量、安全和环保等方面的要求,作者编写了《城市轨道交通土建工程施工技术》一书。本书主要介绍了城市轨道交通线路设计、轨道结构、车站工程、区间工程、高架桥梁工程、车辆段、给排水系统及结构防水等内容,并基于相关实例,对土建工程技术创新进行了分析与总结。

本书依据现行的施工技术标准、规范、办法编写,内容丰富,图文并茂,力求以通俗易懂的方式传达工程技术知识,兼顾系统性、科学性、实用性、准确性,以便于大家在学习、培训中参考。

本书可供相关专业的全日制或在职学习的学生使用,也可作为继续教育、成人教育的专业课教材,并可供城市轨道交通土建工程领域的工程技术人员参考。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 城市轨道交通的分类及系统制式	(1)
1.2 国内外城市轨道交通发展概况	(5)
第 2 章 线路设计和轨道结构	(10)
2.1 概述	(10)
2.2 线路平面设计	(15)
2.3 线路纵断面设计	(23)
2.4 轨道结构	(27)
第 3 章 车站工程	(37)
3.1 钻孔桩施工	(37)
3.2 SMW 工法桩施工	(47)
3.3 钻孔咬合桩施工	(53)
3.4 地下连续墙施工	(59)
3.5 井点降水施工	(65)
3.6 土钉墙施工	(71)
3.7 冠梁施工	(75)
3.8 网喷混凝土施工	(79)
3.9 锚杆(索)施工	(82)
3.10 内支撑体系施工	(86)
3.11 基坑开挖施工	(91)
3.12 中洞、侧洞法施工	(102)
3.13 洞柱、洞桩法施工	(113)
3.14 竖井施工	(131)
3.15 连通道施工	(136)
3.16 混凝土自防水施工	(142)
3.17 SBS 改性沥青卷材防水施工	(151)
3.18 膨润土防水毯防水施工	(154)
3.19 涂料防水施工	(157)
3.20 细部防水施工	(160)
第 4 章 区间工程	(167)
4.1 盾构机选型	(167)

4.2	端头土体加固施工	(170)
4.3	盾构机吊装和吊拆	(180)
4.4	反力架、负环安装拆除施工	(189)
4.5	盾构始发施工	(194)
4.6	盾构姿态控制	(199)
4.7	土体改良及出土控制	(202)
4.8	同步注浆及二次补浆	(206)
4.9	管片拼装	(208)
4.10	防水施工	(211)
4.11	常压开仓作业	(214)
4.12	带压进仓作业	(218)
4.13	盾构到达掘进	(224)
4.14	洞门环梁施工	(227)
4.15	小半径线路施工	(233)
4.16	小间距盾构掘进施工	(238)
4.17	冻结法联络通道施工	(241)
第5章	高架桥梁工程	(248)
5.1	城市轨道交通高架桥概述	(248)
5.2	上部结构	(251)
5.3	附属结构	(255)
5.4	墩台结构	(257)
5.5	基础	(263)
第6章	城市轨道交通车辆段	(267)
6.1	车辆段概述	(267)
6.2	车辆段的平面布置	(270)
第7章	给排水系统及结构防水	(277)
7.1	给水系统和排水系统	(277)
7.2	结构防水	(282)
第8章	城市轨道交通土建工程施工实例分析	(290)
8.1	工程概况	(290)
8.2	工程地质及水文地质情况	(292)
8.3	周边环境	(299)
8.4	盾构区间掘进的重难点及应对措施	(302)
8.5	盾构到达钢套筒接收施工安全控制的应对措施	(316)
8.6	联络通道施工安全风险控制的应对措施	(321)
8.7	地下工程防水施工的应对措施	(325)



8.8	车站深基坑及周边建(构)筑物、重要管线保护的应对措施	(326)
8.9	征地拆迁、交通疏散及管线改迁等工程的应对措施	(327)
第9章	城市轨道交通土建工程施工技术的创新研究	(329)
9.1	地铁车站下穿既有构筑物小空间下顶板逆作施工	(329)
9.2	基于 Pix4D 倾斜摄影技术的场区地形精测施工	(346)
9.3	基于延伸钢环的盾构始发洞门免破除施工	(363)
参考文献	(380)
后记	(382)

第 1 章 绪 论

1.1 城市轨道交通的分类及系统制式

城市区域利用车辆在固定导轨上运行,主要为客运服务的交通系统称为城市轨道交通。

1.1.1 城市轨道交通的分类

1. 按线路敷设方式分类

按线路敷设方式划分,城市轨道交通可分为以下三类。

(1) 地下线:轨道位于地下(或水下)隧道内的那部分线路称为地下线。线路构筑物形态为单线或双线隧道。由于最早的城市轨道交通位于地下(underground),所以称为地下铁道(the underground),简称地铁;法国称其为 metro,有大容量交通的含义,巴黎有经营地铁的公司取名为 Metro。

(2) 地面线:轨道位于地面的那部分线路称为地面线。线路构筑物形态为路堤或路堑。

(3) 高架线:轨道位于高架桥上的那部分线路称为高架线。线路构筑物形态为高架桥。

2. 按运营范围分类

按线路在城市区域中的运营范围划分,城市轨道交通可分为以下三类。

(1) 市(城)区轨道交通(urban rail transit):服务范围以中心城区为主的城市轨道交通系统。城市市区的地铁、轻轨都属于此类。

(2) 市(城)域轨道交通:服务范围覆盖城市市域的轨道交通系统。这类交通系统在各国的名称不同。法国的 RER(regional express railway)、德国的 S-Bahn(schnellbahn)、美国的区域快速轨道交通(regional rapid rail transit)、日本的私铁等都属于市(城)域轨道交通。

(3) 地区铁路交通(regional railway):服务范围覆盖城市市域及邻近地区的轨道交通系统。由于涉及两个或多个行政区,这类系统一般由国有或私有铁路公司建设和管理,主要为大城市周围的通勤客流服务。日本、德国、美国等大部分发达

国家在 19 世纪末就开始利用国家铁路为城市周围地区的客流服务,主要是大城市周围地区放射方向的客流,行程时间一般在 2 h 以内。有些地区的铁路交通的服务范围主要是大城市市郊,人们习惯称之为市郊铁路(suburban railway),例如东日本旅客铁路公司(JR-EAST)在东京周围开行的短程列车,德国联邦铁路公司(Deutsche Bahn,DB)在柏林周围开行的 RB、RE 列车。有些则主要是为大城市周围的卫星城与中心城的通勤客流服务,人们习惯称之为通勤铁路(commuter railway),例如英国铁路公司在伦敦周围开行的短程列车,美国纽约的长岛通勤列车,日本的私铁(经过两个及以上行政区)。还有些是连接城市群的铁路交通。

3. 按路权分类

路权是指轨道交通系统运行线路与其他交通的隔离程度。轨道交通按路权划分可分为 A、B、C 三种基本类型。

(1) A 类为全封闭系统,与其他交通方式完全隔离,不受平交道和人、车的干扰,一般用于单向运能在 1.6 万人次/h 以上的轨道交通系统。

(2) B 类为半封闭系统,沿行车方向采取设置路缘石、隔离栅、高差等措施与其他交通实体隔离,但在部分交叉路口仍与横向的人、车平交混行,受交叉口信号系统控制,一般用于单向运能在 1.6 万人次/h 以下的轨道交通系统。

(3) C 类为开放式系统,不实行实体分隔,轨道交通与地面交通混合行驶,在交叉口按信号系统规定驶停,也可享受一定的优先权,有轨电车即属于此类。

4. 按车辆特征分类

根据车辆几何尺寸、驱动方式、车轮材料的不同,轨道交通可划分为不同的类别,并有不同的名称。

在车辆几何尺寸上,各国标准有较大差别。目前我国轨道交通车辆的宽度规格有 3 m(A 型车)、2.8 m(B 型车)、2.6 m(C 型车)3 种。日本大阪常规地铁(metro)车型的宽度为 2.89 m,小型地铁(mini-metro)的宽度为 2.45 m(线性电机系统),自动导轨系统(automated guideway transit, AGT)车辆的宽度为 2.4 m。根据不同的驱动方式,轨道交通车辆可分为电传动车、线性电机车、独轨车、自动导轨车、磁(悬)浮车等。

5. 按系统运能分类

系统运能也称系统容量,即线路在一定时间内的单向输送能力,通常用单向小时输送能力表示。在设计轨道交通线路时,系统容量应不小于预测的线路远期高峰小时单向最大断面流量。

根据我国现行的《城市快速轨道交通工程项目建设标准》,城市轨道交通按系统容量可分为 I、II、III 级,单向运能分别为 5 万~7 万人次/h、3 万~5 万人次/h、

1万~3万人次/h,也分别称为高运量(高运能)、大运量(大运能)、中运量(中运能)的轨道交通。

对应不同运能级别的轨道交通系统,线路、车辆及编组、路权、信号等设备也不同。

对高运量线路,一般采用基本宽度为3m的A型车,列车编组通常为6~12节,全封闭线路,具有支持高密度行车(30对/h)的信号系统。通常这类线路的列车最高速度超过80km/h。

对大运量线路,一般采用基本宽度为2.8m的B型车,虽然也多采用全封闭的线路,具有支持高密度行车(30对/h)的信号系统,但列车编组相对较小,一般不超过6节,轨道结构、信号、环控等系统的设计容量明显减小,车辆最高速度、平均站间距也较小。

对中运量线路,车辆宽度就更小,目前我国的C型车基本宽度为2.6m。

1.1.2 城市轨道交通的系统制式

城市轨道交通系统可以从运能、轨道敷设位置、路权、车辆速度及驱动方式等多个方面进行比较严密、细致的划分。此外,由于传播的历史性影响,有些名称在不同的国家具有不同的含义。例如,欧洲有些城市所指的“轻轨”是现代有轨电车,与我国的“轻轨”含义不同。为了便于专业人员及非专业人员相互交流,有必要归纳几种典型的城市轨道交通系统类型作为系统制式或模式。系统制式的名称,需要兼顾本国的习惯称呼,并简明、综合地反映城市轨道交通系统的本质及主要特征。

从目前国内外城市轨道交通的发展状况看,城市轨道交通的系统制式主要有地铁、轻轨、独轨、自动导轨、城市铁路、磁(悬)浮交通等。各种制式的主要特征如下。

(1) 地铁。地铁是大运量的、快速的、全封闭的、线路全部或大部分位于市区的城市轨道交通系统。大运量和快速是地铁的本质特征,车体较宽(2.8~3m),速度较快(80km/h及以上),无平交道口,列车信号与控制系统先进,行车密度可达30对/h。

(2) 轻轨。轻轨是利用现代科技对传统的有轨电车系统进行改造后形成的各类有轨电车系统的总称,由国际公共交通联合会(Union Internationale des Transports Publics,UITP)于1978年3月在比利时布鲁塞尔召开的会议上正式统一命名,英文为light rail transit(LRT)。与地铁相比,轻轨系统在“大”与“快”方面,至少有一方面有所降低,使得其单向运能比地铁小,一般为1万~3万人次/h。轻轨因车辆宽度较小(一般车体宽度在2.6m及以下),而降低了系统容量;因车辆最高运行速度较低(如70km/h)、站间距缩短(如500~800m)、线路存在部分平交

道口等而降低了线路的通行能力。

(3) 独轨。独轨是车辆在一条轨道上运行的轨道交通系统,也称单轨。轨道可以是钢梁、钢筋混凝土梁等形式。车辆可以悬挂在轨道上,这类独轨系统称为悬挂式独轨;车辆也可以骑跨在轨道上,这类独轨系统称为跨坐式独轨。独轨系统多为高架结构,占地少(单支柱宽 $1\sim 1.5\text{ m}$,轨道梁一般宽 0.85 m),对城市的景观及采光等影响小,噪声和振动较低,转弯及爬坡能力强(最小曲线半径为 $50\sim 100\text{ m}$,最大坡度可达 6%),单向运能为 $0.5\text{ 万}\sim 2\text{ 万人次/h}$ 。跨坐式独轨系统一般采用橡胶轮与混凝土轨道梁,由于其滚动摩擦阻力比钢轮、钢轨大,所以该系统能耗较高(比钢轮、钢轨约高 40%)。橡胶轮与轨道间的摩擦会产生橡胶粉尘,对环境有轻度污染。列车在区间发生事故时,由于面积狭小的轨道梁难以安设救援设施,疏散和救援工作都比较困难。该系统适宜用于在市区较窄的街道上建造的高架线路,目前多用于体育场、机场和大型展览馆等场所与市区的短程交通。

(4) 自动导轨。自动导轨一般是指带小型轻量橡胶轮的车辆沿导轨行驶在专用混凝土轨道上的客运系统。典型的 AGT 系统由计算机进行全自动控制,因此可以实现无人驾驶及高密度运营。AGT 的导向方式有侧面导向、中央导向、中央沟导向等。其车辆采用的车轮是特制的橡胶轮,轨道用特制的混凝土做成,也可用钢板焊接而成,轨道结构较复杂。AGT 系统的输送能力比独轨系统小,但其建设费用较低,噪声也较小,通常用于连接新开发区与附近的铁路车站或交通枢纽。

(5) 城市铁路。城市铁路在城市区域内承担城市交通功能,线路大多位于地上。与地铁相比,城市铁路的主要特征是全部或绝大部分线路位于地面以上,其建设成本及运营成本比地铁小得多。与城市间铁路相比,其站间距较短。城市铁路的站间距一般为 1 km (市区)或 $3\sim 5\text{ km}$ (郊区),比城市间铁路的站间距(一般为 10 km)小得多,从而可以适应城市的客流需求。与轻轨相比,城市铁路列车车体较宽(一般与城市间铁路列车同宽),轴重大,最高速度也较快。区域快速铁路(服务于城市市区及郊区)、市郊铁路(仅服务于城市郊区)、通勤铁路(主要服务于中心城与卫星城之间的通勤交通)都是其特殊的时空表现形式。

(6) 磁(悬)浮交通。磁浮车辆的推进原理与线性电机车相同,都是采用线性电机驱动车辆前进,只是线性电机车没有离开轨道,而磁浮车辆距轨道有一定的间隙,实现了无接触运行。用于城市交通的磁浮系统为中低速系统,速度一般在 100 km/h 左右,如英国伯明翰的 Maglev 系统、日本的 HSST-100。中低速磁浮列车的特点如下:①“短定子、长转子”,即定子安装在车辆上,转子铺设在轨道上;②需要对车辆供电,如国防科技大学研制的磁浮系统采用第三、四轨供电方式,供电制式为直流 750 V ;③磁浮系统的导向稳定依靠自稳来实现。磁浮系统的优点是噪声低(非接触支撑)、行驶阻力小、转弯及爬坡能力强;缺点是列车发生故障之后救援相对困难。



1.2 国内外城市轨道交通发展概况

1.2.1 国外城市轨道交通发展状况

1. 大容量轨道交通的起源与发展

(1) 地铁的起源与发展。

1863年1月10日,世界上第一条地铁线路在伦敦通车运营。伦敦地铁的产生有其内在的发展条件与需求。

首先,铁路运输技术日趋成熟,铁路客运需求增长迅速。1804年,英国人特雷维西克试制了第一台行驶于轨道上的蒸汽机车,1825年,世界上第一条铁路在英国开通运营。铁路发展和工业革命推动伦敦等大城市建立了许多工厂,大量的人口涌入城市。1821年至1851年,伦敦人口由120万猛增到270万,人口的增长刺激了城市交通需求的增长。同时,铁路网的迅速扩展促进了城市间交通需求的发展。至1850年,英国铁路网里程达到9799 km,各大城市间的干线铁路基本形成,铁路客运周转量达到17亿人次/年,城市间客流量巨大,迫切需要提高市内交通的集疏运能力。

其次,伦敦市区交通拥堵问题日益严重。在19世纪上半叶,伦敦的城市交通主要依靠马车,众多的地面铁路列车与马车混行,杂乱而低效;伦敦的人口膨胀,富裕的居民搬往郊区,形成高峰时段的通勤交通需求,而市区缺乏直接通往郊区的便捷道路,使得伦敦的城市交通供需矛盾日益突出。

在此历史背景下,伦敦市交通委员会向公众征集伦敦中心区(半径6 km)交通问题的解决方案。征集到的典型方案有:将铁路线引入市中心,在中心区修建中央火车站、环形铁路线、高架的城市铁路等。一位名叫查尔斯·皮尔森(Charles Pearson)的律师在19世纪30年代就有了修建伦敦地下铁道的设想,经过系统论证后他于1843年向伦敦市议会正式提出此设想,但因涉及大规模的拆迁而被议会否定。1852年,伦敦城市总站公司(City Terminus Company)成立,并向议会提出修建地下铁道的建议,但因缺乏财政支持也遭否定。1853年,Bayswater, Paddington及Holborn Bridge铁路公司提出了一份新的地下铁道线路方案,其建设成本不到伦敦城市总站公司所提方案预算的一半,这次的方案获得了议会的批准。

在修建这条世界上谁也没见过的地铁之前,伦敦各大报刊对它的未来进行过各种各样的猜测,如地道会不会塌下来等。

1863年1月10日,在伦敦第一条地铁开放的首日,乘客发送量就达到了4万

人次。由于当时电力机车尚未发明,使用蒸汽机车牵引,再加上通风不畅,乘客常常因烟熏感到气闷,有人甚至昏倒在地铁里。尽管如此,伦敦市民都争相乘坐这种地下列车,因为在拥挤不堪的伦敦地面街道上乘坐公共马车,其条件和速度都不如地铁。这条地铁第一年运送乘客 950 万人次,平均每天 2.6 万人次。地铁成为伦敦历史上第一种多数市民可以负担和使用的公共交通工具。

地铁在其他城市的推广和应用归功于电力机车的发明。1879 年,德国工程师沃纳·冯·西门子(Werner von Siemens)在柏林博览会上展示了实用电力机车。

1881 年,世界上第一条实用的电气化铁路在柏林附近的 Lichterfelde 投入运营。其后,美国也建造了几条试验线,于 1888 年成功地试验出技术先进的电力机车。此后,电力机车迅速推广应用。

1896 年,布达佩斯修建了欧洲最早的电气化地铁,解决了地铁通道的空气污染问题。从此,巴黎(1900 年)、柏林(1902 年)、纽约(1904 年)、东京(1927 年)等发达城市纷纷建设地铁。20 世纪初是世界第一次地铁建设高潮,至第二次世界大战前的 1935 年,欧美有近 20 个城市建设了地铁,总里程约 1400 km。

第二次世界大战以后的 20 余年中,各国又有一批城市建设地铁,包括加拿大的多伦多、蒙特利尔,意大利的罗马、米兰,美国的费城、旧金山,俄罗斯的圣彼得堡,日本的名古屋、横滨,韩国的首尔等,约 30 座城市相继建成了地铁。20 世纪 70 年代能源危机之后,迎来了世界第二次地铁建设高潮。究其原因,一方面,日本、韩国等一些新兴的发达国家的大城市开始快速发展地铁网络;另一方面,欧美等发达国家也从 20 世纪 70 年代的能源危机中“醒悟”过来,重新提倡发展公共交通,大力扩展地铁网络。

(2) 其他大容量城市交通的起源与发展。

地铁之所以比普通铁路及常规公交系统具备更强的城市交通客运能力,关键在于其采用了全封闭线路、保障高密度行车的通信信号、容量大且集散快速的车辆及高站台等。而要达到这些要求并不一定要把线路修建在地下。实际上,各国根据自己的特点还通过其他途径来实现轨道交通系统快速和大容量的目标。这些途径的实质与上述方式是相同的,只是在各国的称呼、经营管理方式有所不同。

伦敦在建设地铁之前,就有了建设高架铁道的实践。1860—1866 年,伦敦建成 4 条横跨泰晤士河的高架铁路,但这些铁路主要为城市间铁路客运服务。

1870 年,纽约建成了世界上第一条用于城市客运的高架铁路(位于曼哈顿的 Greenwich Street 及 9th Avenue)。在伦敦第一条地铁通车后,纽约曾制定了庞大的地铁建设计划,但鉴于当时的施工技术水平及对地铁内空气污染的担心,刚刚开工的地铁项目就被搁置了。然而,纽约的交通设施发展并没有止步,取而代之的是大规模建设高架铁道。1867—1902 年,纽约建成了 302 km 的高架轨道交通网。自 1892 年起,芝加哥也大力修建高架铁道,至 1902 年里程达到 174 km。当时美国第一批建设轨道交通的城市偏向采取低投资修建高架轨道交通的决策,然而由



于噪声污染大及有碍景观,高架轨道交通结构对城市商业区环境的影响很大。因此,当电力机车广泛应用以后,传统形式的高架轨道交通在20世纪20年代初期基本停止了发展。拆除高架轨道线路也变成美国城市在地价高涨情况下的一项重要政策。

德国是系统地运用城市铁路(S-Bahn)来解决城市交通问题的国家。在柏林、汉堡、慕尼黑等大城市都有完善的S-Bahn网络,总里程超过1900 km。这些城市铁路几乎发挥了与地铁一样的效能,但又没有对城市环境产生让人不可接受的影响。这与德国系统地、科学地规划和设计城市铁路网络是密切相关的。通过对线路敷设方式、车站及其附近的建筑物的合理布置,大大减小了地面以上线路在噪声、景观等方面的不利影响,以低造价、低运营成本获得了大容量的、快速的城市交通方式。德国的S-Bahn系统归德国联邦铁路公司管理,从运营效果看,S-Bahn是德国铁路网中运营效率最高的线路。这足以说明,铁路在短途交通(尤其是大城市周围区域)方面是很有发展前途的。

日本的私铁大部分都是地面以上的城市铁路。日本的私铁运营里程超过3000 km,私铁公司是日本经营效益较好的企业。私铁线路建设初期有很多平交道口,后来根据客流量的增长情况,分期加以立交化改造;车站分布结合线路附近的居民点分布或住宅开发规划设置,站间距短则不到1 km,长的可达5 km。东京受有关法规限制,私铁不能深入市中心区,而在大阪等城市则可以到达城市任何区域。

巴黎的RER则是采用把城市铁路与地铁结合起来的模式。RER线在经过市中心区时接近地铁,在郊区时则接近城市铁路。

此外,世界各地的许多大城市利用全国铁路网或地区铁路网开行大城市附近的短途列车,离城市中心的出行时间为1.5~2 h。这些列车在通勤交通、城市群内的城市间交通中发挥了很重要的作用。

2. 中容量轨道交通的起源与发展

中容量轨道交通包括地面有轨电车、现代有轨电车、独轨车、线性电机车等。

中容量轨道交通的发展起源于地面有轨电车,而地面有轨电车的发展又可追溯到公共马车的应用。

19世纪上半叶,马车是城市交通的主要方式。1829年,巴黎引入由马牵引的公共马车,1831年纽约也引入这种车辆。尽管人们对这类马车的需求迅速增长,但它行驶缓慢、颠簸、不舒适,使得城市卫生状况恶化,还容易造成街道的交通拥堵。不久,人们想到把马车放在钢轨上行驶,以提高速度及平稳性,并利用由多匹马组成的马队来提高牵引力,增大车辆规模,降低运输成本。世界上第一条马拉的街面轨道车于1832年在美国纽约的第四大街开始运营,但由于轨道安装难度高而未能得到推广应用。直到1855年,轨道安装成本下降,这种有轨马车才开始大规模

模地替代公共马车,同时也解决了与街道上无轨车辆相互干扰的问题。此后,有轨马车线在美国及欧洲迅速扩展,至1890年总里程达到9900 km。

虽然有轨马车相较于公共马车有了很大的改进,但随着城市人口及车辆的增加,在较大城市中平交道口出现的交通阻塞问题仍然非常严重。因此,人们考虑采用电力代替马来牵引,以提高车辆的运行速度。

电力机车的发明和应用,使得人们很快生产出可应用于城市街道的有轨电车。1881年,德国柏林工业博览会上展示了一列由三辆电车编组的小型有轨电车,它只能乘坐6人,在400 m长的轨道上进行了演示。这次演示给世人提供了重要的启示。

1888年,世界上第一条商业运营的有轨电车线在美国弗吉尼亚州的首府里士满开通。至1890年末,有轨电车迅速替代了有轨马车及缆索铁道。此后,有轨电车发展很快,至20世纪20年代,美国的有轨电车线路总长达到25000 km。到了20世纪30年代,欧洲、日本、印度和中国的有轨电车都有了很大的发展。旧式有轨电车行驶在道路中间,与其他车辆混合运行,又受交叉口红绿灯的控制,运行速度很慢,正点率低,而且噪声大,加、减速性能差。到20世纪三四十年代,随着汽车工业的迅速发展,西方国家的私人小汽车数量急剧增长,城市道路面积严重不足,西欧城市的有轨电车纷纷被拆除。美国的有轨电车系统在20世纪60年代基本上都被拆除了。然而,有轨电车也有其优点,它可以在路面直接换乘,可以小单位频繁发车,节约能源,而且无污染,造价低廉,所以东欧及亚洲的一些城市至今仍在使用。

20世纪六七十年代是地铁建设发展高潮期,由于地铁造价高昂,建设进度受财政和其他因素制约,西方大城市在建设地铁的同时,又重新把注意力转移到地面轨道上来,并开发了噪声低、速度快,走行部转弯灵活,乘客上、下方便,甚至照顾到老人和残疾人上、下的低地板新型有轨电车。在线路结构上,新型有轨电车采用了降噪技术;在速度要求较高的线路上,新型有轨电车采用专用车道;新型有轨电车于繁忙道路交叉处进入半地下或高架交叉,互不影响;速度要求不高的线路可与道路平行,新型有轨电车与汽车混合运行。

随着机电工业及电子技术的迅速发展,各种新型的轻轨交通系统相继被发明,并很快被加以改进,完成了实用化研究,在日本、美国、加拿大、德国等国家的城市内和机场区域被广泛采用。

20世纪八九十年代,环保问题、能源结构问题突出,在可持续发展战略方针指导下,全世界又掀起了新一轮的轻轨交通系统建设高潮。

1.2.2 我国城市轨道交通现状及发展趋势

1. 我国城市轨道交通现状

1906年2月16日,中国第一条有轨电车(单轨“白牌”)在天津正式通车;1908



年,上海第一条有轨电车建成通车;1909年,大连建成了有轨电车;随后,北京、天津、沈阳、哈尔滨、长春等城市大量修建有轨电车线路。这些有轨电车线路在当时的城市公共交通中发挥了骨干作用。

从20世纪50年代初开始,世界各国的大城市纷纷拆除了有轨电车线路。到20世纪50年代末,我国各大城市的有轨电车线路基本拆完,仅剩个别线路,并一直保留至今,且继续承担着公共客运服务功能。

北京是我国第一座开通城市快速轨道交通的城市。1969年10月1日,北京1号线(复兴门—苹果园)内部通车运营(凭参观券乘车,1971年1月15日开始对乘客售票),揭开了我国地铁发展的历史序幕。20世纪,我国开通城市快速轨道交通的城市有天津(1984年)、上海(1993年)、广州(1997年)、香港(1979年)、台北(1996年)。

进入21世纪,我国城市轨道交通快速发展,先后有30多个城市开通了城市快速轨道交通。

2. 我国城市轨道交通发展趋势

近些年是我国城镇化、机动化的快速发展期。同时,小汽车使用量快速增长,导致大城市交通拥堵、大气环境污染及燃油供需矛盾等社会问题突出。具有大容量、快速、节能减排特点的城市轨道交通在我国大有用武之地。随着社会经济的持续发展及城市化进程的推进,我国大城市建设轨道交通的需求会持续增长,城市轨道交通事业将会有良好的发展前景。