

普通高等院校城市轨道交通“十四五”系列教材

城市轨道交通工程

主 编 王俭朴

副主编 洪 磊 杨亮亮 崔 嵩

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书共分8章,主要有概述、轨道交通下部基础、轨道的结构与设计、城市轨道车辆、限界、城市轨道交通的车站、车辆段以及城市轨道交通的环境影响等内容。

本书内容简明扼要,适用性强,可作为交通运输专业、铁路机车车辆专业、轨道交通车辆专业教材使用,也可作为施工现场技术人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通工程/王俭朴主编. —北京:清华大学出版社,2022.7

普通高等院校城市轨道交通“十四五”系列教材

ISBN 978-7-302-61088-5

I. ①城… II. ①王… III. ①城市铁路—轨道交通—高等学校—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第101001号

责任编辑:许 龙

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:12.5

字 数:299千字

版 次:2022年7月第1版

印 次:2022年7月第1次印刷

定 价:39.80元

产品编号:091714-01

前言

FOREWORD



随着城市化进程的快速发展,城市交通需求持续增长,道路交通拥挤及交通污染等问题日益加剧。城市轨道交通凭借其安全、便捷、高效、绿色、经济等优势,逐步成为大城市解决交通问题的有效方式。我国城市轨道交通“十四五”时期将迎来爆发式增长,全面落实《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》,加快推进城市轨道交通产业变革、科技创新,加快推进城市轨道交通高质量与高效率并重发展,全面建设智慧城市轨道。“十四五”期间我国将新增 3000 km 城市轨道交通运营里程,2025 年末我国城市轨道交通运营里程数将有望突破 10 000 km。

城市轨道交通涉及的相关理论和应用非常广泛,属于一门专业性和综合性非常强的系统工程。由于我国城市轨道交通事业发展迅速,对具有此类相关专业知识的工程技术人员的需求越来越大,而培养这些基础型人才迫切需要一些既高度匹配工程技术特点要求的,又具有适度理论深度的教材或参考书。本书主要是为交通工程、车辆工程等相关专业学习“城市轨道交通工程”课程的学生编写,也可供从事城市轨道交通规划、设计、运用和管理的工程技术人员使用。

本书共分 8 章,具体安排如下:第 1 章概述介绍了城市轨道交通的发展现状和发展趋势;第 2 章轨道交通下部基础介绍了地面线、高架线和地下线的路基工程;第 3 章轨道的结构与设计介绍了轨道结构的组成、轨道几何形位、道岔以及无缝线路;第 4 章城市轨道交通车辆介绍了城市轨道交通车辆的构成和类型、车辆总体、转向架、车钩缓冲器装置以及其他工程车辆;第 5 章限界介绍了车辆限界、设备限界、建筑限界以及限界检查;第 6 章城市轨道交通的车站介绍了车站的分类与站型、车站的设备与应用、车站的运作与管理;第 7 章车辆段介绍了车辆段的组成、作业内容、检修与维护设备;第 8 章城市轨道交通的环境影响介绍了环境噪声、环境振动以及抑制方法。此外,每章后面都配有复习思考题,方便学生复习理解。

全书由南京工程学院王俭朴主编,此外,南京工程学院洪磊、杨亮亮、崔嵩、刘钊、贾萌、董世昌和黄晓翠等参与了部分章节的编写工作。

在编写过程中,本书不仅参考了国内外城市轨道交通相关的著作和论文,也部分引用了国内城市轨道交通相关企业的公开资料,在此谨向有关文献作者及企业部门致以衷心感谢。

鉴于编写人员水平有限,书中难免有不足之处,望广大读者批评指正。

编 者

2022 年 3 月

清华大学出版社

目 录

CONTENTS



第 1 章 概述	1
1.1 城市轨道交通定义与分类	1
1.1.1 城市轨道交通定义	1
1.1.2 城市轨道交通分类	4
1.1.3 城市轨道交通的特点	5
1.2 城市轨道交通发展现状	6
1.2.1 城市与城市交通	6
1.2.2 轨道交通的出现	7
1.2.3 国外城市轨道交通的发展	8
1.2.4 我国城市轨道交通的发展	9
1.3 城市轨道交通的发展趋势	10
1.3.1 世界城市轨道交通的发展趋势	10
1.3.2 我国城市轨道交通的发展趋势	11
复习思考题	14
第 2 章 轨道交通下部基础	15
2.1 地面线路基工程	15
2.1.1 路基结构组成	15
2.1.2 路基设计原则	16
2.1.3 路基的排水	19
2.1.4 路基的防护	23
2.1.5 路基的加固	26
2.2 高架线桥梁工程	28
2.2.1 高架桥梁的类型	28
2.2.2 高架桥梁的设计原则	32
2.2.3 荷载与结构设计	33

2.2.4 桥梁的设备与系统接口	36
2.3 地下线隧道工程	36
2.3.1 地下轨道交通的特点	36
2.3.2 隧道的结构特征	37
2.3.3 隧道结构的设计	40
复习思考题	40
第3章 轨道的结构与设计	41
3.1 轨道结构的组成	41
3.1.1 钢轨	42
3.1.2 轨枕	44
3.1.3 扣件	47
3.1.4 道床	51
3.2 轨道的几何形位	56
3.2.1 形位设计的基本要素	57
3.2.2 曲线轨道的形位	61
3.3 道岔	65
3.3.1 道岔的类型	65
3.3.2 单开道岔的结构构造	66
3.4 无缝线路	70
3.4.1 概述	70
3.4.2 类型	71
3.4.3 发展历史	71
复习思考题	73
第4章 城市轨道交通车辆	74
4.1 城市轨道交通车辆概述	74
4.1.1 城市轨道交通车辆特点	74
4.1.2 城市轨道交通车辆技术参数	77
4.2 城市轨道交通车辆总体	78
4.3 转向架	88
4.3.1 转向架的定义和分类	88
4.3.2 转向架的组成	89
4.4 车钩缓冲器装置	94
4.4.1 车钩缓冲器装置概述	94
4.4.2 车钩	94
4.4.3 缓冲器	98
4.5 其他工程车辆	99
4.5.1 工程车辆基本特点	100

4.5.2 常用工程车辆的基本功能·····	100
复习思考题·····	102
第5章 限界·····	103
5.1 车辆限界·····	104
5.1.1 车辆限界的计算·····	107
5.1.2 车辆限界计算原则·····	107
5.1.3 车辆限界计算要素·····	107
5.1.4 某地铁车辆限界计算·····	108
5.2 设备限界·····	117
5.3 建筑限界·····	118
5.3.1 隧道内建筑限界·····	119
5.3.2 高架建筑限界·····	123
5.3.3 车站建筑限界·····	123
5.3.4 道岔区建筑限界·····	125
5.4 限界检查·····	125
5.4.1 车辆轮廓的检查·····	125
5.4.2 设备的限界检查·····	126
5.4.3 建筑的限界检查·····	127
复习思考题·····	127
第6章 城市轨道交通的车站·····	128
6.1 车站的分类与站型·····	128
6.1.1 车站的分类·····	128
6.1.2 车站的构成·····	130
6.1.3 车站的站型·····	131
6.2 车站的设备与应用·····	132
6.2.1 机电设备·····	132
6.2.2 行车设备·····	136
6.3 车站的运作与管理·····	137
6.3.1 行车作业·····	137
6.3.2 客运服务·····	139
6.3.3 安全管理·····	141
复习思考题·····	143
第7章 车辆段·····	144
7.1 车辆段组成·····	144
7.1.1 车辆段构成·····	144
7.1.2 车辆段规模·····	145

7.1.3 车辆段作业内容	145
7.2 城市轨道交通车辆的检修方式与制度	145
7.2.1 城市轨道交通车辆的检修方式	145
7.2.2 城市轨道交通车辆检修制度	147
7.2.3 车辆段修程维修	148
7.3 车辆段检修与维护设备	150
7.3.1 城市轨道交通车辆检修基地的功能	150
7.3.2 检修基地的选址、布置原则和建设规模	151
7.3.3 车辆运用、检修库房和车间及其主要设备	153
7.4 其他库房及车间	155
7.4.1 不落轮镟床库	156
7.4.2 列车自动洗刷机	157
7.4.3 地面式架车机	159
7.4.4 地下式架车机组	160
7.4.5 轮对压装机	162
7.4.6 转向架清洗机	163
7.4.7 转向架升降台	163
7.4.8 转向架试验台	164
7.5 中心仓库	165
7.6 检修基地的主要线路	166
复习思考题	167
第8章 城市轨道交通的环境影响	168
8.1 环境影响的内容	168
8.1.1 环境影响的主要因素	168
8.1.2 环境影响的主要对象	169
8.1.3 城市轨道交通环境影响评价	169
8.2 环境振动	171
8.2.1 交通环境振动的定义	171
8.2.2 轨道交通环境振动的影响	172
8.2.3 轨道交通环境振动的主要影响因素	172
8.3 城市轨道交通噪声	174
8.3.1 城市轨道交通噪声的特点	175
8.3.2 城市轨道交通噪声的分类	175
8.3.3 城市轨道交通噪声的危害	176
8.3.4 城市轨道交通噪声评价范围及标准	176
8.4 振动和噪声的抑制方法	178
8.4.1 城市轨道交通噪声污染防治措施	178

8.4.2 减振措施·····	182
8.5 其他环境影响 ·····	183
8.5.1 城市轨道交通的电磁环境影响·····	183
8.5.2 城市轨道交通的生态与景观影响·····	184
8.5.3 城市轨道交通环境空气影响·····	184
复习思考题·····	185
参考文献·····	186

清华大学出版社

清华大学出版社



第1章

概 述

1.1 城市轨道交通定义与分类

1.1.1 城市轨道交通定义

根据中华人民共和国建设部发布的《城市公共交通分类标准》(CJJ/T 114—2007)中的定义,城市轨道交通为采用轨道结构进行承重和导向的车辆运输系统,依据城市交通总体规划的要求,设置全封闭或部分封闭的专用轨道线路,以列车或单车形式,运送相当规模客流量的公共交通方式。包括地铁系统、轻轨系统、单轨系统、有轨电车、磁浮系统、自动导向轨道系统和市域快速轨道系统(图 1-1)。

1. 地铁系统

地铁是一种大运量的轨道运输系统,采用钢轮钢轨体系,标准轨距为 1435 mm,主要在大城市地下空间修筑的隧道中运行,当条件允许时,也可穿出地面,在地上或高架桥上运行。按照选用车型的不同,又可分为常规地铁和小断面地铁,根据线路客运规模的不同,又可分为高运量地铁和大运量地铁。

地铁车辆的基本车型为 A 型车和 B 型车,A 型车车辆基本宽度为 3000 mm; B 型车基本宽度为 2800 mm。每种车型有带司机室和不带司机室、动车和拖车的区分。

地铁系统的列车编组通常由 4~8 辆组成,列车长度为 70~190 m,要求线路有较长的站台相匹配,最高行车速度不应小于 80 km/h。

2. 轻轨系统

轻轨系统是一种中运量的轨道运输系统,采用钢轮钢轨体系,标准轨距为 1435 mm,主要在城市地面或高架桥上运行,线路采用地面专用轨道或高架轨道,遇繁华街区,也可进入地下或与地铁接轨。

轻轨车辆包括 C 型车辆和 L 型车辆。轻轨 C 型车和 L 型车都采用钢轮钢轨体系,标准轨距为 1435 mm,车辆基本宽度为 2600 mm。

根据我国《轻轨交通车辆通用技术条件》(CJ/T 5021—1995)的规定,标准 C 型车分



图 1-1 城市轨道交通系统代表性运行图

(a) 地铁系统；(b) 有轨电车；(c) 轻轨系统；(d) 单轨系统；(e) 磁浮系统；(f) 自动导向轨道系统；(g) 市域快速轨道系统

C-I 型、C-II 型和 C-III 型三种。C 型车辆的列车编组,通常由 1~3 辆组成,列车长度一般不超过 90 m,最高行车速度不应小于 60 km/h,站台最大长度不应大于 100 m。L 型列车通常可由 2 辆、4 辆或 6 辆组成,站台长度应小于 100 m。当前,采用直线电机 L 型列车服役的线路不多,在运行的包括广州地铁 4 号线、5 号线、6 号线和北京地铁机场线。

3. 单轨系统

单轨系统是一种车辆与特制轨道梁组合成一体运行的中运量轨道运输系统,轨道梁不仅是车辆的承重结构,同时是车辆运行的导向轨道。单轨系统的类型主要有两种,一种是车辆跨骑在单片梁上运行的方式,称为跨座式单轨系统;另一种是车辆悬挂在单根梁上运行的方式,称为悬挂式单轨系统。

单轨系统适用于单向高峰小时最大断面客流量为1万~3万人次的交通走廊。因其占地面积很少,与其他交通方式完全隔离,故运行安全可靠,建设适应性较强。单轨系统的列车,通常为4~6辆编组,相应列车长度在60~85 m,线路半径不小于50 m、线路坡度不大于60%、站台最大长度不应大于100 m,最高运行速度不应小于80 km/h,平均运行速度一般为20~35 km/h。

4. 有轨电车

单厢或铰接式有轨电车是一种低运量的城市轨道交通,电车轨道主要铺设在城市道路路面上,车辆与其他地面交通方式混合运行,根据街道条件,又可区分为三种情况:混合车道、半封闭专用车道(在道路平交道口处,采用优先通行信号)、全封闭专用车道(在道路平交道口处,采用立体交叉方式通过)。

车辆以单车运行为主,车辆基本长度为12.5 m,也可联挂运行,但不宜超过2辆车联挂。当前的车型发展趋势为低地板车厢,车站布置可考虑设在街道两旁人行道上的单侧布局或设在道路中央分隔带上的中央布局,具体选用应与地区规划、周围地形和环境密切配合,形式可灵活多样,站间距离通常不超过1 km。

导轨式胶轮电车目前仅在天津开发区运行,适用于低运量,所采用的车长为8 m,客运能力小于1万人次/h,最大运行速度为70 km/h。此系统尚不具有普遍性,运营和技术经验还不够成熟,推广应用的前景有待验证,故没有给出具体参数。

5. 磁浮系统

磁浮系统是在常温条件下,利用电导磁力悬浮技术使列车上浮的系统,因此,车厢不需要车轮、车轴、齿轮传动机构和架空输电线网,列车运行方式为悬浮状态,采用直线电机驱动行驶,现行标准轨距为2800 mm,主要在高架桥上运行,特殊地段也可在地面或地下隧道中运行。

磁浮列车是重大客流集散区域或城市群市际之间较理想的直达客运交通方式,也是中运量轨道运输系统的一种先进客运方式,对客运能力1.5万~3.0万人次/h的中、远程交通走廊较为适用。

目前,磁浮系统主要有两种基本类型:一种是高速磁浮列车,其最高行车速度可达500 km/h;另一种是中低速磁浮列车,其最高行车速度可达100 km/h。

高速磁浮系统由于行车速度很高,通常对于站间距离不小于30 km的城市之间远程线路客运交通较为适宜。高速磁浮系统的列车编组通常由5~10辆组成,列车长度130~260 m,要求线路有较长的站台相匹配。

中低速磁浮车辆的主要技术参数为:车辆长度为12~15 m;车辆基本宽度为2600 mm;车辆高度约3200 mm。列车载客定员为:4辆编组为320~480人,6辆编组为480~720人。线路半径不小于50 m;线路坡度不大于70%;最高行车速度不大于100 km/h。中低速磁浮系统由于行车速度相对较低,对于城市区域内站间距大于1 km的

中、短程客运交通线路较为适宜。中低速磁浮系统的列车编组,通常由4~10辆组成,列车长度60~150 m,要求线路有较长的站台相匹配。

由于磁浮系统在我国尚处于新兴技术发展阶段,在城市轨道交通领域的应用经验还有待不断总结,选用这项技术方案时,应做充分的技术经济比较。

6. 自动导向轨道系统

自动导向轨道系统,是一种车辆采用橡胶轮胎在专用轨道上运行的中运量旅客运输系统,列车沿着特制的导向装置行驶,车辆运行和车站管理采用计算机控制,可实现全自动化和无人驾驶技术,通常在繁华市区线路可采用地下隧道,市区边缘或郊外宜采用高架结构。自动导向轨道系统适用于城市机场专用线或城市中客流相对集中的点对点运营线路,必要时,中间可设少量停靠站。

7. 市域快速轨道系统

市域快速轨道系统是一种大运量的轨道运输系统,客运量可达20万~45万人次/日(一般不采用高峰小时客运量的概念),适用于城市区域内重大经济区之间中长距离的客运交通。市域快速轨道列车主要在地面或高架桥上运行,必要时也可在隧道中运行。可选用最高运行速度在120 km/h以上的快速专用车辆,也可选用中低速磁浮列车进行技术经济比较。

1.1.2 城市轨道交通分类

城市轨道交通系统有多种形式,名称也多样,整体上可从技术特征、线路敷设方式和综合技术经济运营三大特性进行分类。

1. 按技术特征分类

城市轨道交通系统技术特征主要是指列车运行过程中所具有的机械特征,主要包括支撑方式、导向方式、驱动方式和运行控制方式四项特征。

(1) 按照支撑方式划分。支撑方式指城市轨道交通列车和轨道间的纵向作用方式,即列车重量的传递方式。轮轨系是最常见的支撑方式,列车的重量通过钢轮传递到钢轨上。也有使用橡胶轮运行在混凝土或沥青轨道上的轮轨系方式。轮轨系支撑方式中根据列车与轨道的位置关系分为坐式和悬挂式。坐式是指列车在上、轨道在下;悬挂式是指列车在下、轨道在上。坐式支撑方式中,既有双轨的形式,也有单轨的形式。磁浮系统是另外一种支撑方式,这种方式下的列车在运行时依靠电磁力从轨道上浮起一定高度。根据磁力的来源不同,又有磁吸式和磁斥式两种形式。

(2) 按导向方式划分。导向方式指采用何种方式将列车约束在轨道方向上,有轮缘导向和导向装置导向两种形式。在钢轮和钢轨的支撑方式下,列车通过轮缘的突起被约束在轨道方向上。采用橡胶轮胎时,因为没有轮缘突起,往往需要额外的导向装置将列车约束在轨道方向上。

(3) 按驱动方式划分。驱动方式包括牵引力的来源和牵引力的传递形式。电力牵引是目前最普遍的城市轨道交通列车驱动方式,此外,人们使用过的牵引力形式还有蒸汽动力、燃气轮机动力、内燃动力等。牵引力传递的形式有黏着制和非黏着制两种,前者通过轮轨间的摩擦实现,但也受制于这种摩擦;后者则与轮轨间的摩擦无关。传统的轮轨系轨道交通方式都是黏着制;采用线性电机技术的轨道交通方式以及磁浮系统则是非黏着制。非黏着制可以实现更大的牵引力和制动力,轨道的铺设也更灵活。

(4) 按运行控制方式划分。城市轨道交通系统中的轨道由多列车共享使用,相邻列车间必须保证一定的运行间隔来确保安全。运行控制方式是指对这种空间间隔进行管理的方式,也决定了列车的驾驶方式。目前,主要存在两种列车运行控制方式:有人驾驶和无人驾驶。其中,有人驾驶的控制方式又分为完全由司机依据目测来驾驶列车和由司机依据地面信号的显示驾驶列车。无人驾驶控制方式是依据目前最先进的列车运行控制系统实现的。

2. 按线路敷设方式分类

按构筑物的形态或轨道的敷设方式划分,城市轨道交通系统有三种类型:

(1) 地下线路。位于地下隧道内的那部分轨道交通线路称为地下线路。其优点是与地面交通完全分离,且不占城市地面与空间,不受气候的影响。其缺点是需要较大的一次性投资,较高的施工技术,较先进的管理,完善的环控、防灾措施与设备;建设过程会影响地面交通,建设与运营成本较高,改造、调整及路面维护均较困难。

(2) 高架线路。位于地面之上的高架桥的轨道交通线路称为高架线路。其优点是既保持了专用道形式,又占地较少,对城市交通干扰也较小,工程造价介于地下线路与地面线路之间,施工、维护、环控、防灾等方面也较地面线路方便;其缺点是要占用一定的城市用地和空间,并有光照、景观、噪声等负效应,也受气候影响。

(3) 地面线路。位于地面的轨道交通线路称为地面线路。地面线路的优点是造价最低,施工简便,运营成本低,线路调整与维护方便;缺点是运营速度难以提高(有部分信号控制的平面交叉点),占地面积较大,破坏城市道路路面,使城市道路交叉口复杂化,容易受气候影响,乘车环境难改善,有一定的污染等负效应。

3. 综合技术、经济、运营特征分类

仅仅依据某一方面对城市轨道交通系统进行分类,难以全面反映各种城市轨道交通的实质与特性。如按照线路敷设方式,可将城市轨道交通系统划分为地下线路、高架线路与地面线路,但由于城市用地功能及土地性质等方面的差异,地铁、轻轨及自动导向轨道等城市交通轨道系统均可能存在地下线路、高架线路与地面线路等多种形式,这种分类并不能较好地体现城市轨道交通的实质与特性。

因此,在实际操作时,往往综合技术、经济与运营特征对城市轨道交通系统进行分类,基于该分类思想,《城市轨道交通技术规范》(GB 50490—2009)中将城市轨道交通系统的分类定义为地铁系统、有轨电车、轻轨系统、单轨系统、磁浮系统、自动导向轨道系统和市域快速轨道系统七类。每个系统的代表性运行图如图 1-1 所示。

1.1.3 城市轨道交通的特点

我国自 20 世纪 80 年代以来,随着国民经济的高速发展和城市规模的扩大,城市交通堵塞、交通事故、空气污染等问题日益严重。近年来,尤其是百万人以上的大城市道路每年以 3%~4% 的速度增加,但机动车每年以 15%~20% 或更高速度增长,因此交通拥堵成为常态。城市轨道交通在 20 世纪之所以备受青睐,是因为与道路交通相比,城市轨道交通具有运量大、安全正点、速度快、能耗少、舒适性好等无可比拟的优势。

(1) 运量大。一辆公共汽车的载客量只有 40~80 人次,轻轨一节车厢载客量为 60~150 人次,地铁一节车厢载客量为 150~200 人次;轻轨一般 2~6 辆编为一组,地铁为 4~10 辆一组;每小时单向输送能力公共汽车为 200~5000 人次,轻轨为 10 000~40 000 人次,

地铁达 30 000~70 000 人次。城市轨道交通输送能力是公共汽车的 5~18 倍。

(2) 安全正点。地铁和轻轨或深埋地下或高架空中,即便行驶于地面也是全封闭的。每条轨道交通都采用双线独立运营,与地面交通之间完全是立交关系,因此其运营十分安全,安全性比道路交通高得多,而且可全天候运行。正因为采取独立运营和立交方式,最大限度地避免了交通事故和交通阻塞,因此能确保行车的正点率在 98% 以上。在北京和上海,坐地铁已经成为“上班族”出行的首选交通方式。

(3) 速度快。安全性和高正点率保证了轨道交通运行的高速度。地铁车辆的设计速度为 80 km/h,旅行速度在 35 km/h 左右。而地面公交车辆的旅行速度很难确保达到 25 km/h。

(4) 能耗少。城市轨道交通车辆都采用电动车组,以电为牵引动力。而城市地面车辆除电车外均以柴油或汽油为能源。电能转换为车辆的机械能的转换效率是 60%~70%,燃料转换为机械能的效率只有 25% 左右,两者相差一倍以上。每一单位运输量的能源消费量,轨道交通系统仅为公共汽车的 3/5,私人用车的 1/6。

(5) 舒适性好。无论是在地铁车站里,还是在车厢里,冬暖夏凉四季如春的温度、柔和的色彩、明亮的灯光、优雅的环境给人以“宾至如归”的感觉,这是颠簸急转的地面公共交通望尘莫及的。

所以,城市轨道交通是在满足城市居民交通需求的条件下,全社会总付出最少的方式,也是满足人文和城市可持续发展要求的最佳方式。

1.2 城市轨道交通发展现状

1.2.1 城市与城市交通

迄今为止,城市的发展已有 5000 多年的历史。在人类社会发展的初期,城市是不同的概念。在奴隶社会向封建社会进化的过程中,城市形态逐渐成熟,有了完整的城墙以区分城市与农村,也有了较清晰的功能分区,尤其重要的是,具有较为完善的道路交通系统是城市发展的重大转折。在这一时期,由于中国封建社会的形成早于欧洲及其他大陆地区,当时中国的城市发展已成较大规模。

一般而言,城市规模发展遵循“自由村落—中心村—镇—小城市—中等城市—大城市—特大城市—城市带—城市圈—城市群”的规律。在城市发展的过程中,随着城市数量的不断增加,城市人口的急剧增加,出现了一个人类社会发展的新趋势——城市化。所谓城市化是指人口由分散的农村向城市集中的社会进程。城市化初期,所有先进交通工具基本上首先用于解决城际交通问题,当城市规模扩大到只有利用交通工具才能保证城市经济生活的正常进行时,城市内部交通系统开始诞生,出现了相应的交通工具并逐渐发展。

城市交通是城市形成与发展的必然产物,是为城市服务的最重要的基础设施。城市交通作为城市经济发展的纽带和命脉,与城市的形成、发展和兴衰紧密相连。正如马克思所说:“没有现代的交通,就没有城市的繁荣。”

虽然城市交通事业的发展有效地保障了城市经济发展和社会进步,但是由于交通需求的过度增长,在城市化的进程中,不断地暴露出大量的问题使城市的发展岌岌可危。

1. 交通拥堵

研究表明,城区交通流的速度每 10 年降低 5%,拥堵的严重性随城市规模的增加而增

加。交通拥堵不但增加了市民在出行中的时间、精力、财力等消耗,而且使交通事故发生的可能性大大提升。交通拥堵问题已经成为当今世界各个城市的通病,如图 1-2 所示。

2. 环保问题

一氧化碳和臭氧是影响人类生存环境的两种主要污染物,城市机动车的尾气排放是城市空气污染的主要来源,如图 1-3 所示。我国 650 多座城市,空气质量达到一级标准的不足 1%,同时,发达国家有 15%的人口生活在 65 dB(A)以上的高噪声环境下,这些噪声主要来源于交通,还有重型货车及夜间装卸引起的振动。



图 1-2 严重的城市交通拥堵



图 1-3 机动车尾气排放

3. 土地消耗

交通设施骤然增加,必然会不同程度地影响城市原有历史建筑群。大量机动车在道路上行驶,在占用道路的同时,还需要配建大面积的停车场,诸如此类均大量消耗土地,破坏城市景观,如图 1-4 所示。

4. 能源消耗

在多数发达国家,运输部门所用的能耗占国家各行业总能耗的 25% 以上,并且交通运输排放大量的二氧化碳,导致全球变暖。



图 1-4 机动车停车

5. 城市分散化

机动车的发展使居民出行距离与出行时间增加,从而使出行时间和空间更为分散;反过来,它又增加了人们对机动车的依赖,减少了公共交通发展的可能性。

重新认识城市交通发展规律,寻求城市交通的可持续发展道路,成为世界所有城市开始关注的问题。优化城市结构,研发耗能少、有利于环保的交通工具,走可持续发展之路,是解决城市交通问题的有效和根本途径,也是 21 世纪世界城市交通发展的必然趋势。

1.2.2 轨道交通的出现

轨道交通很早就作为公共交通在城市中出现。从发达国家城市漫长的交通发展历史可以看出,大客运量的城市轨道交通是从根本上改善城市公共交通问题的有效途径。1662 年,法国科学家与哲学家布莱斯·帕斯卡尔提出公共马车计划,于是在法国巴黎街头出现了一种可供一定人数乘坐的“公共马车”,如图 1-5 所示。它以固定路线、固定价格、按固定站循环的方式运载乘客,这是历史上第一条公共交通线路。无轨公共马车是城市公共交通的先驱,但是它缓慢、颠簸、舒适性较差,容易造成街道拥挤和堵塞。



图 1-5 无轨公共马车

1827 年,世界上第一条城市轨道公共马车出现在纽约百老汇大街上。马车在钢轨上行驶,提高了速度,增加了平稳性,还可以利用多匹马组成马队来提高牵引力,降低运输成本及票价。1832 年,这种城市轨道公共马车在美国纽约的第 4 大街上正式运营。法国工程师罗伯特在 1853 年把它引进巴黎,由于比无轨公共马车更有效率、更舒适,所以大受欢迎。到 1879 年大巴黎区已有 38 条轨道公共马车路线。轨道公共马车在美国及欧洲多

国都得到迅速发展,至 1890 年其轨道里程已经达到 9900 km。轨道公共马车是现代城市轨道交通的雏形,如图 1-6 所示。

伦敦是世界上第一条地铁的诞生地。一条由英国律师皮尔逊设计并投资建设的地下城市铁路(metropolitan railway)于 1863 年 1 月 10 日正式通车运营,如图 1-7 所示。这条地铁从帕丁顿到弗灵顿,总长 6.5 km,其动力是向英国铁路公司租借的蒸汽机车。皮尔逊被誉为“地铁之父”。“Metro”也成了世界上绝大多数国家城市轨道交通的标志和符号。世界第一条地铁的诞生,为人口密集的大都市如何发展公共交通提供了宝贵的经验。



图 1-6 轨道公共马车



图 1-7 伦敦第一条地铁

伦敦地铁虽然线路仅长 6.5 km,但是第一年就运载了 950 万乘客,为解决城市交通拥堵树立了成功的典范。1879 年电力驱动的机车研制成功,使地铁客运环境和服务条件得到了空前的改善,地铁建设显示出强大的生命力。世界上知名大都市和其他城市纷纷效仿伦敦修建地铁,至此,城市轨道交通显示出巨大的优势,成为城市公共交通方式中的“新宠儿”。

1.2.3 国外城市轨道交通的发展

国外城市轨道交通的发展,大致可以分为四个阶段,分别为初步发展阶段、停滞发展阶段、再发展阶段和快速发展阶段。

1. 初步发展阶段(1863—1924 年)

世界第一条地铁的诞生,为人口密集的大都市发展公共交通提供了宝贵的经验。特别是 1879 年电力驱动机车的成功研制,大大改善了地铁的环境,使得城市轨道交通由此步入了连续发展时期。这一阶段,欧美的城市轨道交通发展较快。

城市轨道交通的诸多优点,促使了世界范围内许多发达城市都积极建设城市轨道交通。

自 1863 年至 1899 年,英国的伦敦和格拉斯哥、美国的纽约和波士顿、匈牙利的布达佩斯、奥地利的维也纳及法国的巴黎共 5 个国家的 7 座城市率先建成了地铁。

在进入 20 世纪的最初 24 年里,在欧洲和美洲又有 9 座城市相继修建了地铁,如德国的柏林、汉堡,美国的费城及西班牙的马德里。亚洲最早的地铁是日本东京 1927 年 12 月开通的浅草—涩谷线。

2. 停滞发展阶段(1925—1949 年)

由于战争和汽车工业的发展,造成了城市轨道交通的停滞和萎缩。汽车具有灵活、便捷及可达性好等优点,而城市轨道交通投资大,建设周期长,因此一度失宠。有轨电车的建设停滞不前,有些线路还被拆除,但由于地下空间对于战争的特殊防护作用,部分处于战争状态中的国家反而加速进行地铁的建设,如东京、大阪及莫斯科等。

3. 再发展阶段(1950—1969 年)

随着汽车数量过度增加,使城市道路异常堵塞,行车速度下降,严重时还会导致交通瘫痪,加之空气污染、噪声严重、大量耗费石油资源、市区汽车停车困难等,这些问题使人们重新认识到,解决城市客运交通必须依靠电力驱动的城市轨道交通。在这期间有 17 座城市成为新建地铁城市。

4. 快速发展阶段(1970 年至今)

世界各国城市化的发展趋势,导致人口高度集中,这就要求城市轨道交通高速发展以适应日益增加的运输客流,科学技术的进步也为城市轨道交通发展奠定了良好的基础。很多国家都确立了优先发展城市轨道交通的方针,立法解决建设城市轨道交通的资金来源。这一阶段,平均每年有 1.4 座城市成为新建地铁城市。

截至 2020 年底,全球共有 77 个国家和地区的 538 座城市开通了城市轨道交通,运营里程达到 33 346.37 km,车站数超过 34 220 个。主要分布在欧洲和亚洲,其中,欧洲总运营里程为 16 302.33 km,占全球总里程的 49%,居于全球六大洲首位;其次是亚洲 13 126.06 km,占比 40%。

从轨道交通类型来看,全球地铁轨道交通运营里程最多,达到 17 584.77 km,占比 55%;有轨电车运营里程为 14 174.75 km,占比 42%;轻轨运营里程占比 5%。地铁和有轨电车仍是主流,其中地铁主要分布在亚洲,而有轨电车主要分布在欧洲。在当今世界的大城市和特大城市中,城市轨道交通已在公共交通系统中处于骨干地位。

1.2.4 我国城市轨道交通的发展

我国城市轨道交通起步较晚,其发展过程大致可以分为三个阶段,依次为起步建设阶段、发展与调整建设阶段、快速建设阶段。

1. 起步建设阶段(20 世纪 50 年代—20 世纪 80 年代初)

20 世纪 50 年代,我国开始筹备地铁建设。1965 年 7 月北京开始修建第一条地铁,1976 年建成通车,长度为 54 km,如图 1-8 所示。当时地铁建设的指导思想更注重人防功能。随后建设了天津地铁(7.1 km,现已拆除重建)、哈尔滨人防隧道等工程。

2. 发展建设与调整阶段(20 世纪 90 年代)

20 世纪 80 年代末至 90 年代初,由于城市规模限制及道路等基础设施比较薄弱,北京、上海、广州等特大城市的交通问题非常突出。以上海轨道交通 1 号线(21 km)、北京地铁复

八线(13.6 km)和地铁一期工程改造、广州地铁1号线(18.5 km)等建设项目为标志,我国内地真正以城市交通为目的的地铁项目开始建设。台湾省台北市也于1997年3月开通了第一条地铁线路。进入20世纪90年代,随着上海、广州地铁项目的建设,包括沈阳、天津、南京、重庆、武汉、深圳、成都和青岛等一批城市也开始计划轨道交通建设项目,并进行了大量的前期工作。上海地铁1号线如图1-9所示。



图 1-8 北京地铁1号线



图 1-9 上海地铁1号线

由于各大城市提出的地铁建设项目较多,且地铁建设工程造价较高,1995年12月国务院发布国办60号文,暂停了地铁项目的审批,并要求做好发展规划和国产化工作。同时,国家计划委员会开始研究制定城市轨道交通设备国产化政策。至1997年底,以深圳地铁1号线(19.5 km)、上海轨道交通3号线(24.5 km)和广州地铁2号线(23 km)等作为国产化依托项目,1998年批复了以上3个项目的立项申请,从此城市轨道交通建设项目重新启动。

3. 快速建设阶段(21世纪以来)

截至2021年12月31日,中国内地累计有50座城市投运城市轨道交通线路共9192.62 km,其中地铁7253.73 km,占比78.9%。2021年当年新增洛阳、嘉兴、绍兴、文山州、芜湖5座城市轨道交通运营城市,其中洛阳、绍兴为地铁,芜湖为跨座式单轨,嘉兴、文山州为有轨电车;另外,北京、上海、天津、重庆、广州、深圳、武汉、南京、沈阳、长春、大连、西安、哈尔滨、苏州、郑州、杭州、佛山、宁波、无锡、南昌、青岛、南宁、合肥、石家庄、贵阳、厦门、济南、常州、徐州、株洲等30座城市也均有新线或新段开通运营。城市轨道交通的发展已经取得了巨大的进步。

2021年当年共计新增城市轨道交通运营线路长度1222.92 km。新增运营线路39条,新开既有线路的延伸段、后通段23段。新增1222.92 km的城市轨道交通运营线路共涉及8种制式,其中,地铁971.93 km,占比79.48%;市域快轨133.15 km、跨座式单轨46.31 km、有轨电车38.73 km、导轨式胶轮系统15.4 km、电子导向胶轮系统14.0 km、轻轨2.2 km、磁浮交通1.2 km。

1.3 城市轨道交通的发展趋势

1.3.1 世界城市轨道交通的发展趋势

大城市的经济发展吸引了大量的人员涌入,导致人口不断膨胀,城市轨道交通使城市道路交通的运载能力提高到了更高的水平。各国在城市轨道交通的投资、建设、运营和监督等方面都经历了不同模式的选择,走过了不同道路。各国的城市轨道交通在不断发展并

逐步走向成熟和完善的过程中,呈现出以下四大发展趋势。

1. 投资的多元化

城市轨道交通系统的投资规模越来越大,为了解决资金问题和提高轨道交通建设的效率,很多城市轨道交通都选择由政府和社会资本共同投资。投资主体的多元化现已经成为世界轨道交通的发展趋势。投资主体的多元化可以发挥各主体的优势,同时又可以相互监管和约束,从而使城市轨道交通的建设更有效率。

2. 经营的市场化

很多城市充分发挥市场作用以提高城市轨道交通的运行能力,在城市轨道交通运营上引入市场机制已经成为发展趋势。市场化的经营方式充分考虑了市场经济规律,避免垄断经营或者政府干预太多,能够根据市场信息做出较好的反应,最终提高城市轨道交通的运营效率。

香港借助市场的力量,从资金管理、建设成本控制、运营管理等方 面全方位提高效率,成为世界地铁商业化运作的典范。相反,纽约城市轨道交通由于没有形成合理的竞争机制等原因,导致目前服务质量及运行效率不高。

3. 管理的法制化

很多城市对城市交通实行全面法制化管理以规范各方行为和维护各方利益,以法制化的管理来保障城市轨道交通持续、稳定和高效地运行。城市轨道交通的全面法制化管理也是世界城市轨道交通的重要发展趋势。

德国的城市轨道交通建设和运营已经有百年历史,和德国的其他行业一样,城市轨道交通的技术控制体制也由法律、技术法规和技术标准构成。德国的《乘客运输法》和《城市轨道交通建设与运营规则》适用于城市轨道交通领域。

4. 服务与管理的信息化

城市轨道交通的计算机控制与安全系统大大提高了城市轨道交通车辆运行的自动化程度。无人驾驶技术受到了世界的广泛关注,不仅节省人力成本,也避免了人为操作失误导致的运营故障;城市轨道交通系统配备实时到发信息系统,向乘客及时提供列车到发信息;有轨电车系统则通过 GPS 定位技术优化运营,开发非接触式售票系统,实现一体化联合售票,使现代公共交通体系更具吸引力。

1.3.2 我国城市轨道交通的发展趋势

1. 我国城市轨道交通建设取得的成就

随着大都市圈和新型城镇化建设的不断深入,我国城市轨道交通建设也提速发展,目前已成为世界最大的地铁建设中心、最大的轨道交通技术和装备市场。我国城市轨道交通建设发展的成就主要有以下四点。

(1) 线网规模快速增长、多种制式并行发展。

我国从 21 世纪起进入城市轨道交通快速发展新阶段,以五年为周期,线路规模连续翻番增长,从 2016 年起城市轨道交通运营里程跃居全球第一,已建成轨道交通的城市之多、线路之长位居世界前列。截至 2020 年底,全国建成通车线路长度达到 7969.7 km,国家已经批复实施的建设规划里程(在建和待建)超过 7000 km,在服务社会、拉动内需、支撑城市发展方面做出了重大贡献。

目前,我国共有 7 种城市轨道交通系统制式投入运营,20 座城市有超过两种系统制式投运,约占已开通城市轨道交通运营城市的 45%;其中地铁占比 78.8%,其他制式共计占比 21.2%,对我国城市轨道交通产业化良性发展提供了助力。

(2) 网络化进程加快推进、服务水平全面提升。

随着城市轨道交通持续高速发展,截至 2020 年底,我国内地累计有 45 座城市开通城市轨道交通线路,总运营里程占全球总里程的 23.92%。全球共有 80 座城市的轨道交通运营里程超过 100 km,我国占有 18 座城市;城市轨道交通线网规模前 20 座城市中,我国占有 11 座;上海、北京、广州的城市轨道交通运营里程均超过 500 km,位居世界前列。据统计,运营线路 4 条及以上,且换乘站 3 个以上的城市有 22 座,越来越多的国内城市迈入网络化运营阶段。

我国城市轨道交通客运量与客运强度持续攀升,运输效率达到世界先进水平。全球城市轨道交通客运量排名前十位中,北京、上海、广州、深圳、香港位列其中。2020 年中心城市城市轨道交通客运量占公共交通客运总量出行比率为 38.7%,其中上海、广州、南京、深圳、北京、成都 6 座城市超过 50%。

在运营服务方面,我国也在不断进步完善。从服务时长来看,2020 年我国轨道交通平均运营服务时长为 16.8 h/日,位居前五位的北京、上海、重庆、西安、贵阳均超过 18 h。各个城市根据客流分布和乘客乘车需求不断调整完善客运组织和行车组织,合理设置线路高峰小时最小发车间隔,整体呈现逐步缩短的趋势,2020 年高峰小时最短发车间隔不大于 120 s 的线路共有 16 条,最大行车密度超过 30 对/h 的城市共有 4 座,运营服务水平持续提升。城市轨道交通网络的旅行速度普遍高于国际平均值 35.3 km/h。同时,列车服务可靠度快速提升,远超欧洲城市 100 万车公里/件的平均水平,位居世界前列。

(3) 制度基础不断夯实、标准体系持续健全。

城市轨道交通运营管理制度和运营标准体系不断健全:行业层面已印发 9 个规范性文件和 4 个配套规范;地方层面,苏州、无锡、宁波等 29 座城市出台了地方性法规,天津、哈尔滨、济南等 27 座城市出台了政府规章,北京、石家庄、沈阳等 15 座城市同时出台了城市轨道交通地方性法规和政府规章;已发布城市轨道交通运营标准 15 项(其中国家标准 3 项,行业标准 12 项);7 项运营管理类团体标准正式立项,其中 2 项已进入报批阶段。

(4) 关键技术快速发展、自主水平显著提升。

在不断扩大网络规模的同时,我国城市轨道交通技术也得到了长足的发展。装备技术整体水平实现从跟跑到并跑,多数核心装备已经实现自主;初步建立城市轨道交通产业体系和规划、设计、建设标准规范体系;部分运输装备走向国际市场;同时国家政策法规进一步完善,推动了从国产化到自主化的进程。

在车辆系统方面,轨道交通车辆制造整车技术总体上已跻身世界前列,整车和车辆关键系统均已实现自主化,全面掌握车辆九大关键系统的核心技术,关键系统和重要部件自主化、国产化水平不断提升。在信号系统方面,全自动运行系统的技术水平已经逐渐缩小与国外的差距,逐步实现不同建设期、不同厂商设备的互联互通。具有我国自主知识产权的 CBTC 信号系统已成为我国城市轨道交通信号系统的主流系统。在通信系统方面,轨道交通 LTE-M 建设逐渐由线到网,并且应用于海外援建的轨道交通项目中。在自动售检票系统方面,随着 NFC 技术、电子支付技术的发展,我国多个城市轨道交通陆续开通了 APP 扫码

过闸、银联闪付 NFC 过闸、APP 线上购票线下取票、TVM 扫码购票等多元化支付功能,实现“互联网+”与 AFC 的融合。安检技术也已经趋于成熟,在安检设备灵敏度、稳定性及精准度等方面,已经达到国际一流甚至领先水平。

2. 新时代我国城市轨道交通发展的态势特征

当前和今后一个时期,我国的发展仍处于重要战略机遇期,面临新的国际、国内形势,城市轨道交通将要突出和完善四大功能定位,即聚焦改善出行体验的交通属性、提升城市服务能级的城市属性、关注可持续发展与政策支持的公益属性以及引导产业链升级与科技自强自立的产业属性,满足新时代对交通运输更高质量、更有效率、更加公平、更可持续、更为安全的发展要求。

(1) 城市轨道交通建设即将进入高位平稳发展新阶段。

我国城市轨道交通的第一个发展阶段比世界第一条地铁晚了 100 年,先是缓缓起步,而后,在 21 世纪得益于经济社会高速发展、城镇化快速推进、国家政策的规范和完善、装备国产化和多制式发展等综合因素推动,第一个五年(2001—2005)新建线路 399 km,年均 80 km,为前 35 年的 20 倍,开始快速发展;第二个五年(2006—2010)新建线路约 910 km、第三个五年(2011—2015)新建线路约 2019 km、第四个五年(2016—2020)新建线路约 4200 km,实现连续几个五年规划期的翻番,时间长达 20 年。根据已批规划测算,“十四五”将进入高位平稳发展阶段,五年内将新建线路 3000 km 左右,之后逐步回落,建设强度趋缓趋稳,有利于从高速度发展向高质量发展转变。

(2) 城市轨道交通已经步入网络化发展阶段。

进入“十四五”期间,城市轨道交通将全面进入网络化发展阶段,行业面临建设、运营理念的转变,主要难点是网络顶层管理体系的构建与运转,涉及综合统筹建设运行资金筹措、建设时序选择、资源共享规划、集中建设风险管控、建设运营协同、网络效能发挥、客流调度协同、社会联动响应、管理模式变革等问题。以往城市轨道交通往往根据线网布局规划,逐线建设、叠加成网,实现形态层面的“网络化”,但对于网络化管理缺少统一认识,对于网络级工程缺少统一规划,对于网络化需求缺少统一考虑。未来应基于网络功能顶层设计,按需接入成网,实现功能层面的“网络化”,用网络化的理念、网络化的标准和网络化的统筹去指导网络化的建设和运营,通过网络化管理的顶层设计,构建网络级管理架构,实现统筹建设,解决线路逐次建设引起的线路与网络之间的协调问题,避免频繁升级或改造。

(3) 城市轨道交通运营管理呈现复杂化特征。

随着城市轨道交通网络化进程的持续推进,将大幅提升运营管理难度与复杂度,包括:客流分布的不均衡导致日常大客流风险点较为集中;装备制式多样化导致维护作业更为复杂、误操作可能性增加;运行关联多样化导致事故故障影响传递效应扩大;突发事件耦合化导致难以准确判断与快速处置等。复杂化的运营需求对城市轨道交通提出两方面的要求:一是服务需求多样化,需要考虑开行快慢车、不对称交路等灵活的运行方式,推出一卡通行、一票畅行等便捷的出行服务,以及站内 Wi-Fi、导吃导购导玩导读等多样化的综合服务;二是管控需求精准化,要求能够实现运行状态实时感知、客流趋势动态推演、突发事件精准预警、行车调度自主适配、维护计划自动生成、应急处置智能辅助等功能。

(4) 城市轨道交通发展面临可持续性的挑战。

城市轨道交通的可持续发展,技术层面可通过关键核心技术的攻关有望解决,人才方面

可通过国民教育和职业培训逐步缓解,难点是财务的可持续性和政府债务风险问题。只有多措并举,广开门路,政策支持,勇闯新路,增收节支,才能掌握主动权。迄今为止,全国已开通城市轨道交通运营的城市因地制宜制定政策创新模式,在资金筹措和开源节流方面收到实效。一是站城共建,在国家政策支持下,各地政府出台文件,推进城市轨道交通沿线土地的综合开发,通过物业建设积累城市轨道交通的建设和运营资金;二是充分利用社会资金,不断完善 PPP 融资模式,成功引入包括民营资金在内的社会资本,拓展筹资渠道,改善财务状况;三是加大商业运营力度,运营主体在车站商业、传媒广告、信息通信的基础上不断扩充经营业态,创新模式,增加经营收入,一定程度上延缓了收支缺口扩大;四是进一步挖潜网络资源,全自动运行系统和信号系统互联互通的试验成功,开创了资源最大化的路网共享新途径,节省了投资,降低了建设和运营成本。

同时也要看到,国内城市轨道交通线网客运强度普遍较低,据统计,全国线网客运强度高于 1.5 万人次/km 的城市占比约 17%,线网客运强度低于 0.7 万人次/km 的城市占比为约 46%;低于 0.7 万人次/km 的线路占比约 39%。城市轨道交通企业需要从单一的交通运输服务向多元的综合服务转型,多策并举,实现服务经营业态多元化,在提供更优质服务的同时,提升经营水平,解决收支不平衡与全生命周期可持续发展之间的矛盾。

(5) 智慧城市轨道建设全面启动。

发展智能系统,建设智慧城轨,已形成行业共识,并见诸行动。中国城市轨道交通协会 2020 年 3 月发布《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》,作为行业的顶层设计,已成为城市轨道交通企业制定智能智慧化发展的指导性文件;各地城市轨道交通业主和装备供应商,纷纷编制发展规划、实施意见或行动方案,智慧车站也正在部分城市建设。智慧城市轨道建设将对今后城市轨道交通技术发展产生深远影响。

复习思考题

- 1.1 简述我国城市轨道交通的发展历程。
- 1.2 城市轨道交通的定义是什么?
- 1.3 城市轨道交通如何分类?
- 1.4 简述城市轨道交通的特点。
- 1.5 简述我国城市轨道交通的发展趋势。



第2章

轨道交通下部基础

2.1 地面线路路基工程

2.1.1 路基结构组成

路基是轨道的基础,是经过开挖或填筑而形成的土工建物,其主要作用是满足轨道的铺设、承受轨道和列车产生的荷载、提供列车运营的必要条件。在纵断面上,路基必须保证线路需要的高程;在平面上,路基与桥梁、隧道连接组成完整贯通的线路。

路基直接承受轨道和列车的荷载,并将其传递至地基,路基状态直接关系到线路的质量,并会直接影响列车运行的速度和行车安全。因此,路基必须具备足够的强度、稳定性和耐久性。

在路基工程设计中,轨道和车辆荷载应根据采用的轨道结构及车辆的轴重、轴距等参数计算,并应用换算土柱高度代替。路基工程的地基应满足承载力和路基工后沉降的要求,路基工程的地基处理措施应根据线路设计标准、地质资料、路堤高度、填料、建设工期等通过检算确定。此外,路基设计应符合环境保护的要求,并应重视沿线的绿化和美化设计,防排水设计应保证排水系统完整、通畅。

路基工程主要由路基本体、路基排水设备、防护工程等建筑物组成。

1. 路基本体

路基本体是路基工程中的主体建筑物。它是在天然地层中挖成的堑槽或在地面上用土石堆成的堤埂,是路基工程中直接铺设轨道结构并承受列车荷载的部分。由填方构筑的路基本体称为路堤,如图 2-1(a)所示;由地面开挖形成的路基本体称为路堑,如图 2-1(b)所示。城市轨道交通的路基以路堤更为常见。

2. 路基排水设备

排水设备属路基的附属建筑物,分地面排水设备和地下排水设备两类。地面排水设备用以拦截地面径流,汇集路基范围内的雨水并使其畅通地流向天然排水沟谷,以防止地面水对路基的浸蚀、冲刷而影响其良好状态,主要包括排水沟、侧沟、天沟。地下排水设备用以拦

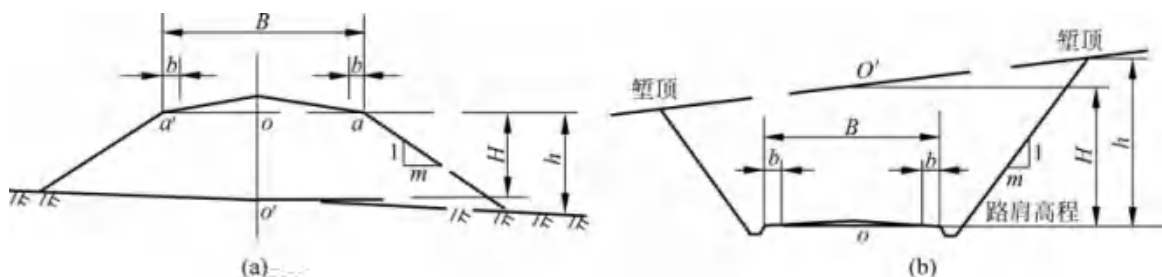


图 2-1 路基本体

(a) 路堤; (b) 路堑

 B —路基宽度; b —路肩宽度; H —路基中心高; h —路基边坡高

截、疏导地下水和降低地下水位,以改善地基土和路基边坡的工作条件,防止或避免地下水对地基和路基本体产生不利影响,主要有排水槽、渗水暗沟、渗水隧洞等。

3. 路基防护和加固建筑物

路基防护设备用以防止或削弱风霜雨雪、气温变化及流水冲刷等各种自然因素对路基本体所造成的直接或间接的有害影响。其种类很多,类型各异。常用的防护设备包括坡面防护和冲刷防护。为了防止路基边坡和坡脚受坡面雨水冲刷,防止日晒雨淋引起土的干湿循环,防止气温变化引起土的冻融变化等因素影响边坡的稳固,常采用坡面防护。为了防止河水对边坡、坡脚或坡脚处地基不断的冲刷和淘刷,应设冲刷防护。防护位置和所采用的类型视水流及其运动规律和防护要求而定。特殊条件下的路基防护,应根据地质、环境等条件采用特殊设计。路基加固建筑物是用以加固路基或地基的工程设施,主要包括护堤、挡土墙、抗滑桩等其他地基加固措施等。设置路基加固建筑物是提高路基稳定性的一种有效措施。

2.1.2 路基设计原则

作为一种土工结构物,路基工程具有材料复杂、路基受环境影响大、路基同时受轨道静荷载和列车动荷载的作用等特点。根据路基工程特点,为满足车辆运行需求、增强安全和舒适性、降低使用成本和延长线路使用年限,在设计、施工及运营维护过程中需对路基承载力、耐久性、整体稳定性、水热稳定性等基本性能加以保证。

1. 路基横断面的设计原则

1) 路肩

路肩的主要作用是保护轨道以下路基土体,防止路基面边缘土体塌落而影响轨道基床的完整状态,也可以在线路维修时作为器材存放处和辅助工作面。

当路肩埋有设备时,路堤及路堑的路肩宽度不得小于 0.6 m,无埋设设备时路肩宽度不小于 0.4 m。当线路通过地下水位高或常年有地面积水的地区,路堤过低容易引起基床翻浆冒泥等危害,路肩设计高程应高出线路通过地段的最高地下水位和最高地面积水水位,并应加毛细水强烈上升高度和有害冻胀深度或蒸发强烈影响深度,再加 0.5 m。若采取降低水位、设置毛细水隔断层等措施,可不受此限制。此外,路肩高程还应满足与城市其他交通衔接和相交等情况时的特殊要求。

2) 路基顶面形状

路基顶面,即铺设轨道的工作面,按形状可分为有路拱和无路拱两种形式。路拱的作用是迅速排除道床下的积水,以保持路基顶面的干燥。

路基顶面应根据基床填料的种类确定是否需要设置路拱。不易渗水的填料必须设置路拱,路拱的形状为三角形,由中心向两侧按大约 4% 的横向排水坡确定,单线路拱高 0.15 m,双线路拱高 0.2 m,底宽等于路基面宽度。渗水性好的填料能较快地向下渗水,故不需要设置路拱,即以渗水土和岩石(年平均降水量大于 400 mm 地区的易风化泥质岩石除外)的路基面为平面。

3) 路基顶面宽度

路基顶面宽度应根据正线数目、配线情况、线间距、轨道结构尺寸、路基面形状、路肩宽度、是否有接触网立柱等计算确定。

① 以双线路基面宽度(见图 2-2)为例,其计算公式如下:

$$B = 2\left(C + x + \frac{A}{2}\right) + D \quad (2-1)$$

其中,

$$x = \frac{h + \left(\frac{A}{2} + \frac{1.435 + g}{2}\right) \times 0.04 + e}{\frac{1}{m} - 0.04} \quad (2-2)$$

式中, B ——路基面宽度(m);

D ——双线的线间距(m):

A ——单线地段道床顶面宽度(m);

m ——道床边坡坡率；

h ——靠近路基面中心侧的钢轨中心处轨枕底以下的道床厚度(m);

e ——轨枕埋入道碎深度(m);

g ——轨头宽度(m);

C ——路肩宽度(m):

x ——砵肩至砵脚的水平距离。

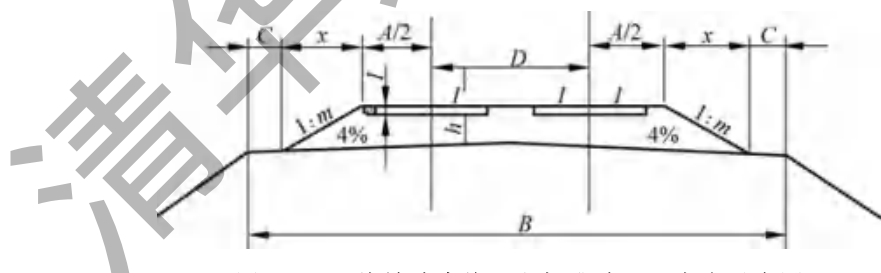


图 2-2 双线铁路直线地段标准路基面宽度示意图

② 区间曲线地段的路基面宽度,单线应在曲线外侧,双线应在外股曲线外侧,按表 2-1 的数值加宽。加宽值在缓和曲线范围内应线性递减。

表 2-1 曲线地段路基面加宽值

曲线半径 R	路基面外侧加宽值	曲线半径 R	路基面外侧加宽值
R 基面外侧	0.5	$1000 < R$ 宽值加宽值	0.2
$600 < R$ 加宽值加	0.4	$2000 < R$ 宽值加宽值	0.1
$800 < R$ 加宽值加宽	0.3		

4) 路基边坡

路基边坡,即路堤的路肩边缘以下或路堑路基面两侧侧沟以外因挖填而形成的斜坡面。路堤边坡坡度应根据填料或土质的物理力学性质、边坡高度、轨道、列车荷载和地基工程地质条件确定,当路堤高度小于等于 8 m 时(城市轨道交通地面线路一般多为低路堤),路堤边坡坡度不应大于 1 : 1.5。

5) 路堤护道

路堤护道是指路堤坡脚与取土坑(或排水沟)之间的部分,其作用是保持路基边坡的稳定,防止雨水冲刷坡脚造成边坡塌方。城市轨道路堤护道宽度不小于 1.0 m,并应向外做成规定坡度的排水坡。

2. 路基本基床的设计原则

路基本基床是指路基上部受轨道、列车动力作用,并受水文气候变化影响较大,需进行处理的土层。

路基本基床应分为表层和底层,表层厚度不应小于 0.5 m,底层厚度不应小于 1.5 m。路基本基床厚度根据动应力在路基面以下的衰减形态,并参考国铁目前采用的基床厚度综合分析方法确定。基床厚度应以路肩施工高程为计算起点。

路基本基床表层如为易风化的软石、黏粉土、黏土或人工填土等,在多雨地区易形成基床病害,故应采取换填或土质改良等措施。特别是浅路堑,地表土较松散,达不到基床压实度的要求,应采取压实措施。

路基本基床各层的压实度不应小于表 2-2 中的规定值。

表 2-2 路基本基床各层的压实度

位置	压 实 指 标	填料类别			
		细粒土和粉砂、改良土	砂类土(粉砂除外)	砾石类	碎石类
基床表层	压实系数 K_h	(0.93)	—	—	—
	$K_{30}/(\text{MPa}/\text{cm})$	(1.0)	1.1	1.4	1.4
	相对密度 D_r	—	0.8	—	—
基床底层	压实系数 K_h	0.91	—	—	—
	$K_{30}/(\text{MPa}/\text{cm})$	0.9	1.0	1.2	1.3
	相对密度 D_r	—	0.75	—	—

路基本基床表层的压实度不应小于表 2-2 中的规定值。基床底层厚度范围内天然地基的静力触探比贯入阻力 P_s 值不应小于 1.2 MPa,或天然地基的容许承载力 $[\sigma]$ 不应小于 0.15 MPa。

3. 路基排水的设计原则

城市轨道交通全线应有完善的排水系统,并宜利用市政排水设施。排水设施应布置合理,当与桥涵、隧道、车站等排水设施衔接时,应保证排水畅通。地面线路基排水必须使降水能顺利排走,同时阻止路基范围外的地表水流入路基,确保路基干燥稳固。

对路基有危害的地下水,应根据地下水类型、含水层的埋藏深度、地层的渗透性等条件,设置暗沟(管)、渗沟、检查井等地下排水设施。

此外,路基排水设备的设计应与水土保持和农田水利的综合利用相结合,同时还应遵守以下原则:

- (1) 设计前必须进行充分的调查研究,使排水系统的规划和设计做到正确合理。
- (2) 与线路平、纵断面设计密切配合,在线路勘测时,注意路基排水问题。在设计纵断面时要注意路基侧沟排水通畅,不致发生淤积及浸泡路基的现象。
- (3) 要照顾农田灌溉的需要。设计线路时,应注意地区灌溉系统,尽量少占农田,并与水利规划和土地使用规划等相配合进行综合规划。一般情况下,不应利用边沟作农田灌溉用途,不得已时,应采取加固措施以防水流危害路基。
- (4) 在不良地质地区,要结合地质构造、山体破碎、岩层渗流等情况,进行单独排水系统设计;在枢纽站、区段站,由于场地宽广、地形平坦,汇水面积大、水源多,排水较困难,应结合该类站场设计,统一布置单独的排水设备,在不淤不冲的前提下,顺畅排走一切来源的水。
- (5) 排水设施的设计,应贯彻因地制宜、就地取材的原则,减少造价。要能迅速有效地排除“有害水”,以免影响路基的强度和稳定性,保证铁路运输的安全。

4. 路基防护的设计原则

对受自然因素作用易产生损坏的路基边坡坡面,应根据边坡的土质、岩性、水文地质条件、边坡坡度与高度以及周围景观等,选用适宜的防护措施。

地面线路地处城市外围、郊区,大多地形平坦,线路路基一般为2~5 m的土质低路堤,坡面防护可选用铁路路基常用的一般防护措施。

一般地段,在适宜于植物生长的土质边坡上应优先用植物防护,如采取种草或喷植草、铺草皮、种植灌木等防护方式,同时也可绿化环境、美化路容。

沿河地段路堤的坡面防护工程常用类型有植物防护,如铺草皮、种防护林,干砌片石护坡,浆砌片石护坡,混凝土护坡等。对于线路穿过郊区水塘、鱼塘的常年浸水路堤,一般采用浆砌片石护坡。

2.1.3 路基的排水

1. 路基地面排水

在细粒土路基中,为使路基经常处于干燥、坚固稳定的状态,必须及时修建地表水排水设施,使地表水迅速排离路基范围,防止地表水停滞下渗和流动冲刷而降低路基的稳定性。

1) 地表水对路基稳定性的影响

地表水渗入路基土体,会降低土的抗剪强度;地表水的流动可造成路基边坡面冲刷和坡脚冲刷;地表水渗入含易溶盐的土(如黄土)中会产生溶蚀作用形成陷穴;在气温下降时,地表水也常成为寒冷地区产生冻害的一个重要因素。因此地表水对路基稳定性会造成严重危害。此外,地表水还给施工及运营造成了许多困难和危害。

路基排除地表水的设施有排水沟、侧沟、截水沟(天沟)、跌水、急流槽及缓流井等。

2) 地面排水设备

(1) 侧沟。如图2-3所示,侧沟设置于路堑的路肩外侧,用以汇集、排除路堑边坡面及路基面范围内的地表水。在线路不挖不填地段也需设置侧沟。

(2) 天沟。天沟设于路堑顶边缘以上适当距离处,一般为2~5 m。视需要可设一道或几道,用以截排堑顶上方流向路堑的地表水。

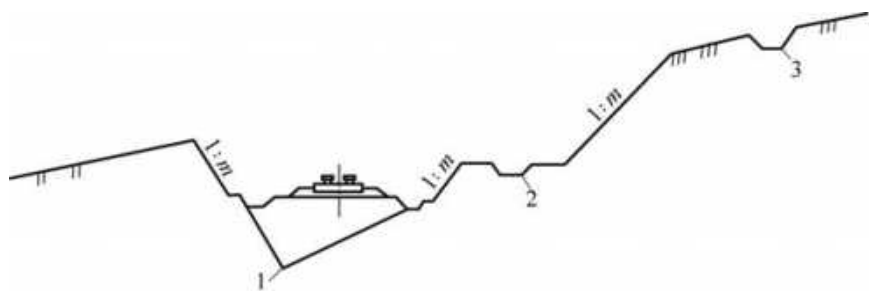


图 2-3 侧沟

1—侧沟；2—截水沟；3—天沟

(3) 截水沟。截水沟设在台阶形路堑边坡的平台上及排水沟、天沟所在部位以外必须截除地表水的地方,用以截排边坡平台以上坡面的地表水,或排水沟、天沟以外流向路基的地表水。

(4) 排水沟。排水沟位于路堤护道外侧,用以排除路堤范围内的地表水及截排自田野方面流向路堤的地表水。一般当地面横坡明显时设置于路堤上方一侧(见图 2-4(a));地面横坡不十分明显时,设置于路堤的两侧(见图 2-4(b))。当条件适宜时,可利用紧靠路堤护道外侧的取土坑,适当控制其断面及深度从而作为排水沟或排水通路。



图 2-4 排水沟

排水沟纵坡、平面设计对出口的高程及是否需要加固等注意事项,基本上与天沟或截水沟相同。但在平坦地带的出口高程受到限制时,其纵坡不缓于 1‰。

(5) 矩形水槽。在土质或地质不良地段,水沟易于变形且不能保持稳定,以及受地形、地物或建筑限界的限制,不能设置占地较宽的梯形水沟时,均宜采用矩形水槽。例如,位于潮湿松软土层或易发生病害地段的水沟,采用矩形水槽可以保持稳定并防止渗漏;又如个别设计较深的侧沟及位于横坡较陡的山坡上的天沟或截水沟,因受水沟顶宽控制,也宜采用矩形水槽。

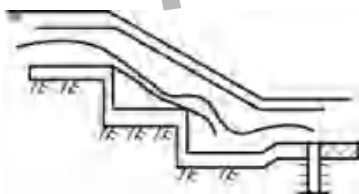


图 2-5 跌水

(6) 跌水。跌水指主槽底部呈台阶状的急流槽,其构造有单级和多级两类,每级高差为 0.2~2.0 m,可利用台阶跌水消能。一般应做铺砌防护,如图 2-5 所示。

(7) 缓流井。如图 2-6 所示,沟底纵坡较陡的水沟,可设计成两段较缓的水沟,并用缓流井连接起来。两段水沟的落水高差最大可达 15 m。

(8) 急流槽。如图 2-7 所示,急流槽为用片石、混凝土材料支撑的衔接两段高程较大的排水设施。主槽纵坡大,水流急,出口设有消力池、消能槛等消能装置,沟底纵坡可达 1:2。设在路堑边坡上的急流槽又称吊沟。