

普通高等教育城市轨道交通系列规划教材



城市地铁与轻轨工程 (第2版)

Urban Subway and Light Track (2nd Edition)

高峰 主编

非外借



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

普通高等教育城市轨道交通系列规划教材



城市地铁与轻轨工程 (第2版)

Urban Subway and Light Track (2nd Edition)

高峰 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书结合我国快速发展的轨道交通建设实践,针对高等院校教学需求,全面系统介绍了城市地铁与轻轨工程的规划设计、施工技术及监控量测技术,全书共分十二章,其主要内容包括:绪论;城市轨道交通路网的规划;城市轨道交通线路与轨道工程;地铁与轻轨车站的建筑设计;地下车站结构工程;区间隧道工程;地铁结构的计算;高架结构工程;地下铁道的施工技术;地铁防水设计;城市轨道交通环境与灾害控制;信息化施工监测。本书内容翔实,涉及知识面广,切实反映了近年来轨道交通建设领域的最新技术与诸多先进成果。

本书可供城市轨道交通、隧道与地下工程、市政建设工程等相关专业的高等院校学生学习使用,也可以供从事城市与轨道交通规划、设计、施工和运营管理的相关技术人员参考和学习。

图书在版编目(CIP)数据

城市地铁与轻轨工程 / 高峰主编. — 2 版. — 北京:
人民交通出版社股份有限公司, 2019.8
ISBN 978-7-114-15779-0

I. ①城… II. ①高… III. ①地下铁道—铁路工程②
轻轨铁路—铁路工程 IV. ①U23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 176913 号

普通高等教育城市轨道交通系列规划教材

书 名: 城市地铁与轻轨工程(第 2 版)

著 者: 高 峰

责任编辑: 谢海龙

责任校对: 张 贺

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.cpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京印匠彩色印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 23

字 数: 517 千

版 次: 2012 年 2 月 第 1 版

2019 年 8 月 第 2 版

印 次: 2019 年 8 月 第 2 版 第 1 次印刷 总第 6 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15779-0

定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

第2版前言

本书于2012年第一次出版,随着科学技术的发展,相关规范不断更新。为更好的适应当前的教育要求和工程实际,编者在广泛征集意见的基础上,于2019年6月开始对第1版进行修订。修订版在保留第1版内容丰富的特色的基础上进行了更新、修订和补充。

本次修订的内容主要有以下两个方面:

(1)对所涉及的相关规范进行了更新。将《城市道路交通规划设计规范》(GB 50220—95)更新为《城市道路交通组织设计规范》(GB/T 36670—2018),将《地铁设计规范》(GB 50157—2003)更新为《地铁设计规范》(GB 50157—2013),将《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)更新为《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016),将《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)更新为《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),将《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.2—2005)更新为《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017),将《给排水工程结构设计规范》(BGJ 69—84)更新为《给排水工程结构设计规范》(GB 50069—2002),将《城市道路设计规范》(CJJ 37—90)更新为《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012),将《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)更新为《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),将《铁路桥梁钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—2005)更新为《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017)。并根据最新规范调整了相关参数的取值以及相关计算公式。

(2)补充、修正、完善相关内容。将第一章中的城市地铁与轻轨工程修建条件根据国务院最新文件要求进行了修正,同时将世界城市轨道交通里程统计数据 and 排名顺序以及中国大陆地区的里程统计数据及排名顺序更新至2018年统计数据。将第三章中第二节的道岔部分进行了适当补充。将第七章中暗挖圆形衬砌结构计算中的例题计算部分进行了步骤细化和答案修正,便于读者阅读和理解。此外,还将上一版的排版及印刷错误进行了修正。

希望采用本教材的广大师生和读者,对使用过程中发现的问题,提出宝贵的意见和建议,以利于今后的再次修订,使之更臻完善。

编者
2019年6月

第1版前言

随着我国国民经济的飞速发展,城市化进程的进一步加快,我国众多城市的轨道交通迎来了新的机遇和挑战。由于城市地铁和轻轨在改善交通状况、节省城市用地、减少环境污染等诸多方面具有明显优势,国内众多大中型城市纷纷开始大兴城市轨道交通工程,一些大专院校土木工程及交通工程专业也都开设了相关的课程。本书作为给相关专业提供的专业教材,具有信息丰富、资料全面、内容新颖的特点,保证了理论体系的科学性和专业的针对性,突出了以培养人才为目的的指导思想,用学生容易接受的文字分章阐述,条理清楚,书中各章节能够很好地串联成一个整体,大中专生在阅读本书后可掌握该领域的基本知识,同时本书也可作为从事城市轨道交通建设的科研人员、管理人员、规划人员的工具书和参考书。

本书内容涵盖城市轨道交通路网的规划,城市轨道交通线路设计,地铁与轻轨车站、区间隧道及高架结构工程的设计、计算及施工工艺的建筑设计,城市轨道交通环境与灾害控制。教材共分十二章,第一章为绪论部分,总体介绍目前城市轨道交通发展概况及前景。第二章介绍城市轨道交通路网的基本结构及路网规划的设计原则、方法及步骤。第三章介绍城市轨道交通路线总体设计方法及轨道工程结构设计和轨道交通限界相关内容。第四章介绍地铁与轻轨车站的特征及建筑设计原则。第五章分别针对地下车站的不同施工工艺、适用条件及结构设计做了详细介绍。第六章介绍区间隧道工程的结构类型及其设计方法。第七章为本书的一个重点章节,介绍了地下铁道工程的主要计算模型及作用荷载,并详细介绍了地铁车站及区间隧道的静力计算过程及抗震分析过程。第八章介绍了高架结构工程(包括高架区间桥梁结构、高架车站结构及高架结构墩与基础)的结构形式、设计计算方法与过程及其施工技术。并对重庆轨道交通中首先采用的单轨交通做了单独的介绍。第九章介绍了地下铁道的各种施工技术。第十章详细介绍了不同形式的地下铁道工程的防水设计。第十一章介绍城市轨道交通环境控制措施与防灾设计。第十二章介绍信息化施工监测的内容、方法及作用。

本书由重庆交通大学高峰教授统稿。其中第一章、第六章和第七章由高峰教授编写;第二章和第三章由梁波教授编写;第四章由张学富教授编写;第五章由黄明奎教授编写;第八章由王成教授编写;第九由王先义副教授编写;第十章由李明副教授编写;第十一章由付钢副教授编写;第十二章由涂忠仁副教授编写。关宝树教授对全书进行了审阅,提出了很多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有欠妥之处,敬请专家和读者批评指正,不胜感谢。

编者
2012年2月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 城市轨道交通的概况	1
第二节 城市地铁和轻轨建设的条件	4
第三节 城市轨道交通的发展现状及前景	6
思考题	10
第二章 城市轨道交通路网的规划	11
第一节 路网规划设计原则	12
第二节 路网基本结构	14
第三节 轨道交通客流量预测	21
第四节 路网方案设计的基本方法	32
第五节 路网方案设计步骤	38
思考题	40
第三章 城市轨道交通线路与轨道工程	41
第一节 线路设计	41
第二节 轨道工程设计	55
第三节 轨道交通限界	65
思考题	72
第四章 地铁与轻轨车站的建筑设计	73
第一节 概述	73
第二节 地铁车站建筑设计	74
第三节 轻轨车站建筑设计	97
思考题	104
第五章 地下车站结构工程	105
第一节 地下车站明挖结构	105
第二节 地下车站暗挖结构(矿山法)	109
第三节 地下车站暗挖结构(盾构法)	114
思考题	119
第六章 区间隧道工程	120
第一节 区间隧道的结构类型	120

第二节	区间隧道的结构设计方法	126
思考题		127
第七章	地铁结构的计算	128
第一节	地铁结构的计算方法	128
第二节	结构荷载计算	130
第三节	区间隧道衬砌结构静力计算	147
第四节	车站结构静力计算	160
第五节	暗挖车站结构计算原则	165
第六节	地下铁道结构抗震分析	167
思考题		170
第八章	高架结构工程	172
第一节	概述	172
第二节	高架区间桥梁结构	172
第三节	高架车站结构	180
第四节	高架结构墩与基础	182
第五节	高架结构设计计算	184
第六节	桥上附属结构	188
第七节	轨道高架桥梁施工技术	191
第八节	单轨交通的高架结构	198
思考题		203
第九章	地下铁道的施工技术	204
第一节	明(盖)挖法施工	204
第二节	浅埋暗挖法施工	227
第三节	盾构法施工	233
第四节	沉管法施工	247
第五节	冻结法施工	254
思考题		260
第十章	地铁防水设计	262
第一节	地铁防水概述	262
第二节	地铁防水等级标准	268
第三节	结构主体防水设计	270
第四节	地下车站防水设计	273
第五节	明挖区间隧道防水设计	276
第六节	矿山法(新奥法)区间隧道防水设计	278
第七节	盾构法区间隧道防水设计	282
第八节	沉管法区间隧道防水设计	287
第九节	车站与区间隧道防水衔接	290

思考题	293
第十一章 城市轨道交通环境与灾害控制	294
第一节 城市轨道交通的通风与空调	294
第二节 给水与排水及消防系统	303
第三节 供电系统	309
第四节 地铁防灾设计	319
第五节 城市轨道交通运营管理设备	322
思考题	335
第十二章 信息化施工监测	336
第一节 信息化施工监测的设计原理	336
第二节 浅埋暗挖法施工监测	337
第三节 盾构法施工监测	344
第四节 明挖法施工监测	346
思考题	355
参考文献	356

第一章

绪 论

城市轨道交通是城市公共交通系统的重要组成部分,城市轨道交通的定义是“通常以电能为动力,采取轮轨运转方式的快速大运量公共交通的总称”,它包括地铁、轻轨、市郊铁路、有轨电车以及磁悬浮列车等多种类型。

当今世界范围内人口向城市集中,城市化步伐加快,大中型城市普遍面临人口密集、住房紧缺、交通阻塞、环境污染严重、能源匮乏等所谓的“城市问题”,城市道路交通已经难以满足城市交通的需求,城市轨道交通以其用地省、运能大(轨道线路的输送能力是公路交通输送能力的近 10 倍),成为城市现代化立体交通系统中的骨干,被称为“城市交通的主动脉”。

第一节 城市轨道交通的概况

城市轨道交通是指以轨道交通运输方式为主要技术特征,在城市公共客运交通系统中具有中等以上运量的轮轨交通系统(有别于道路交通),主要为城市公共客运服务,是一种在城市公共客运交通中起骨干作用的现代化立体交通系统。城市轨道交通主要包括以下几类:有轨电车(Tramway)、地下铁道(Metro)或称为快速轨道交通(Rapid Rail Transit, RRT)、轻轨交通(Light Rail Transit)、独轨交通(Monorail)、自动化导向交通(Automated Guideway)、磁浮交通系统(Maglev System)、缆索轨道交通(Cable Railway)等。几种主要的城市轨道交通的主要技术指标见表 1-1。

几种城市轨道交通方式的主要技术指标

表 1-1

指 标		单位	地下铁道	轻轨交通	独轨交通	有轨电车
平均站间距离	市区	m	500 ~ 800	800 ~ 1 000	700 ~ 1 500	600 ~ 1 200
	市郊	m	1 000 以上	1 000 以上	2 000 以上	—
最高行车速度		km/h	90	80	80	60
旅行速度		km/h	30 ~ 45	25 ~ 35	18 ~ 43	16 ~ 20
行车最小间隔		s	50 ~ 90	90	90	90
每辆车容量		人	150 ~ 310	190 ~ 336	80 ~ 180	110
列车编组		辆	4 ~ 10	2 ~ 6	2 ~ 6	1 ~ 3
单向运输能力		万人次/h	3 ~ 8	2 ~ 4	1 ~ 2	1 ~ 1.4

下面将目前国内外城市通常采用的主要轨道交通系统简单介绍如下。

1. 地下铁道

地下铁道,简称地铁,主要指在大城市的地下修建车站和隧道,并在其中铺设轨道,以电动快速列车运送大量乘客的城市铁路系统,但是在城市郊区以及人员车辆较少的地方,地铁线路可延伸至地面或高架桥上。地铁运输几乎不占用街道面积,也不干扰地面交通。

地铁交通车辆大部分采用动力分布式(即动车组),而不采用动力集中式。另外,部分较为先进的系统已开始引入列车自动操作系统,如伦敦、巴黎、新加坡和我国的台湾、香港等地车辆通常都不需控制列车。更先进的轨道交通系统正在向无人操控的全自动方向发展,例如,世界上最长的自动化LRT(Light Rapid Transit)系统——温哥华 Skytrain,整个LRT系统所有的车站及列车均实现了“无人管理”。

在交通拥挤、行人密集、道路又难以扩建的街区,以地铁代替地面交通工具,具有许多优点,其主要表现在以下几个方面:

(1)地铁交通具有安全、快捷、方便、准时的特点,可为乘客赢得效益,乘坐地铁通常要比利用地面交通工具节省 $1/2 \sim 2/3$ 的时间。它以车组方式运行,载客量大、准点率高、安全舒适。对于多条地下铁道立体交叉的情况,在交叉节点处设有楼梯、自动扶梯或垂直电梯,换乘极为方便。同时,由于地铁的行驶路线不与其他运输系统(如地面道路)重叠、交叉,因此行车受到的交通干扰较少,可节省大量通勤时间。

(2)修建地铁可以改造地面环境。一方面地铁建于地下,可以减小对地面的噪声;另一方面,地铁列车是以电力驱动,相对于以石油为能源的汽车,地铁交通没有废气的排放,大大降低了对地面生活环境的影响。

(3)地铁可节省地面空间。通过地铁建设建立起城市立体交通系统,能保护城市中心区域有限的地面资源,完善城市的交通服务功能。

(4)地铁修建可以带动周边经济发展。地铁建设及开通会带动沿线地产、商业的增值,加速人口的流动,乃至拉动区域、城市的发展。从这点上来说,建设地铁可以为城市在其他方面带来长期丰厚的回报。

(5)城市地铁具有一定的防御战争和抵御地震破坏的能力。由于地铁位于地下,比较隐蔽,所以在战争状态下一般不易成为轰炸的目标,且地铁在修建时已经充分考虑了人防要求。另外,由于地铁隧道在地下围岩的约束下随围岩变形协调,所以在地震作用下能够很好地抵御地震的灾害作用。从近些年来的地震情况来看,地铁所遭受的破坏程度相对桥梁等地上建筑来说比较轻。

因此,对于大城市,尤其是对国际化特大城市来说,建设地铁是非常必要的。从目前已建成地铁的城市来看,一般认为,当城市人口超过100万时就有考虑修建地铁的必要性。

同时,城市地铁建设和运营中还面临着很多问题,主要表现在以下几个方面:

(1)地下铁道的建造和运营成本高。由于地下工程的复杂性和不确定性,地下建造成本要远高于地面建设。一般来说,地铁工程的每千米造价在4亿~7亿元之间,且车辆每辆列车的造价动辄就高达数千万元。此外,地铁的运营维护成本也很高,即使搭乘人流再大,所收票额也仅供日常运营开销,地铁修建所投入的高昂成本很难通过售票等措施的收入收回。目前,世界上除香港、新加坡等少数城市的地铁系统能够实现真正意义上的盈利外,其他地铁线路基

本依靠政府的补贴修建和维持运营。

(2)地下铁道的建设周期长。地铁建设过程包括挖掘地下洞室、铺设铁轨、安装设备以及进行各种调试工作,地铁从开始动工到投入运营需要很长的时间。

(3)前期准备时间长。由于需要规划和政府审批,甚至还需要试验,建设地铁的前期准备时间较长。从开始酝酿到付诸行动破土动工需要非常长的时间,短则几年,长则十几年都是有可能的。

(4)运营中的安全性有待提高。虽然地铁对于雪灾和冰雹的抵御能力较强,但是对水灾、火灾和恐怖活动等抵御能力很弱。考虑到地铁的构造,极易导致因为这些因素而发生悲剧。

①水灾:由于地铁内的系统所处高程低于地平线,而导致地上的雨水容易灌入地铁内。因此,地铁在设计时不得不规划充分的防水排水设施,即使如此,依然有可能发生地铁站淹水事件。为此,在发生暴雨之时,地铁车站入口的防潮板和线路上的防水闸门都要关闭。

②火灾:以前,人们不太重视地铁站内的防火设施,而车站内一旦发生火灾,瞬间就会充满烟雾,从而引发严重的灾祸。1987年11月18日,英国伦敦地铁国王十字车站发生火灾,导致31人死亡。产生火灾的原因之一是伦敦地铁内采用了大量木质建筑。因此,日本地铁部门规定在地铁站内禁烟来避免火灾。

2003年2月28日,韩国大邱广域市的地铁车站因为人为纵火而发生火灾,12辆车厢被烧毁,192人死亡,148人受伤。这次火灾造成如此严重死伤的原因除了车厢内部装潢采用可燃材料之外,车站区域内排烟设施不完善也是重要因素,加上车辆材质燃烧时产生了大量的一氧化碳等有害物质,导致不少人中毒死亡。

③恐怖活动:由于地铁的空间狭小、人流量大、单位空间内人员密度大,发生灾难引起的伤亡大且救援困难,且引起的社会反响较大,所以地铁往往也容易成为恐怖分子袭击的目标。其中,比较典型的当属莫斯科地铁。2004年2月6日,俄罗斯莫斯科一列地铁列车在运行中发生爆炸,造成近50人死亡,130多人受伤。2004年8月31日,莫斯科里加地铁站附近发生恐怖爆炸事件,造成10人死亡,51人受伤。2010年3月29日早晨7点50分左右,莫斯科市卢比扬卡地铁站内一节车厢发生爆炸;其后,莫斯科地铁文化公园站发生爆炸;随后又发生第三起爆炸事故,地点位于和平大街地铁站。此次事件被称为莫斯科地铁连环爆炸案。

自地铁出现以来,工程师们就不断持续研究如何提高地铁的安全性。

2. 轻轨交通

轻轨交通是在有轨电车的基础上发展起来的以电力驱动车辆与列车在特定保护下,但不一定与城市道路立体交叉的轻型、便捷的城市客运方式。其输送能力为1.5万~3.0万人次/h。它的车辆轴重较地铁车辆轴重轻,因此,施加在轨道上的荷载相对于城市铁路和地铁的荷载来说要小一些,因而称之为轻轨。

轻轨交通是城市轨道交通的一种,是目前缓解城市交通压力的主要形式之一,因为它具有诸多优点,而越来越被人们所认可。它的主要优点有:

(1)相对于普通的城市公共交通而言,它具有运量大,噪声低、污染小、速度快、安全性高以及正点运行的优点。

(2)对于地铁等其他城市轨道交通来说,它的灵活性更高,而且投入的成本要小很多。一般情况下,地铁的平面曲线半径不小于300m,而轻轨一般在100~200m之间,转弯能力和与其他建筑的协调能力比地铁要灵活得多。

3. 独轨交通

独轨交通又称单轨交通,是指车辆在一根轨道上运行的轨道交通系统,通常区分为跨座式和悬挂式两种:跨座式是指车辆跨坐在轨道梁上行驶;悬挂式是指车辆悬挂在轨道梁下方行驶,其重心处于轨道梁的下方。因其轨道梁比较窄,仅为85cm,故对城市的景观及日照影响较小。

独轨交通具有噪声低、振动小、对城市的景观及日照等影响小、通过小半径曲线能力和爬坡能力强等优点。另外,跨座式独轨系统尤其适合复杂多变的地形。我国第一条独轨运输系统是重庆市较新线跨座式独轨运输系统,整个工程的一期工程于2004年底建成通车,线路共18个车站,全长18.878km。

但是,独轨交通也有运能小、速度低、能耗大、粉尘污染等缺点。此外,由于橡胶轮与混凝土轨面的滚动摩擦阻力比钢轨大,所以,其能耗要比普通钢轮钢轨的轨道交通大40%左右;橡胶轮与轨道间的摩擦会形成橡胶粉尘,对环境有轻度污染;列车运行在区间发生事故时,面积狭小的轨道梁难以安设救援设施,造成疏散和救援工作都比较困难。因此,尽管独轨交通已经经历了一个多世纪的发展历程,但它在世界范围内却并没有得到广泛的应用。

4. 有轨电车

有轨电车是一种公共交通工具,简称电车,通常采用地面线,有时具有隔离的专用路基和轨道,列车只有单节,最多不超过3节。旧式的有轨电车由于与其他公共汽车及行人共用街道路权,且平交道口多,因而其运行所受的干扰多、速度慢、通行能力低,单向运输能力一般在1万人次/h以下。现代有轨电车与运量较低的轻轨交通已很接近,只是车辆尺寸稍小一些,运营速度接近20km/h,单向运能可达2万人次/h。

有轨电车自1879年在柏林博览会上首次尝试使用以来,已有140多年的历史。它在城市交通体系中具有自己的优点,主要包括:对于中型城市来说,路面电车是实用廉宜的选择;无须在地下挖掘隧道;相较其他路面交通工具,路面电车能更有效地减少交通意外发生的概率;路面电车以电力驱动,车辆不会排放废气,是一种无污染的环保交通工具。

5. 磁浮交通系统

磁浮列车不同于一般轮轨黏着式铁路,它是一种利用电磁感应作用使车轮浮在轨道上行驶的客运交通系统,其驱动方式是靠磁力推进,其运行速度可达300km/h以上。目前,使磁浮列车走向实用化的技术开发已基本完成,磁浮交通已经在中低速(80~120km/h)和高速(430km/h)实现了商业运用,在中速和超高速领域的研究仍在持续进行中。

第二节 城市地铁和轻轨建设的条件

近年来,城市轨道交通在我国得到较快发展,部分特大城市相继建成了一批项目,使城市交通状况得到了明显改善,同时,城市轨道交通的发展使大批房屋建到郊区,这不仅有利于建

设生态城市,还能大幅度降低房价,使更多的居民买得起住房,从而推动房地产市场以及整个产业链的发展,为促进经济和社会发展起到了重要作用。

城市轨道交通的一个主要弊端就是造价太高,而我国的建设投资模式单一,资金不足,限制着我国城市轨道交通的发展,甚至在一些地方引起因盲目建设城市轨道交通,导致债务负担沉重,运营后亏损严重的状况。因此,城市轨道交通项目应坚持量力而行、有序发展的方针,必须确保城市轨道交通建设与城市经济发展水平相适应。对经济条件较好、交通拥堵问题比较严重的特大城市,其城市轨道交通项目可予以优先支持。

城市地下铁道经过一个多世纪的发展,线路完全在地下的只占少数,包括我国的北京和天津,多数城市的地铁线路,都在不同程度上包括地面段和高架段,只有在通过中心城区时才进入地下段。香港的二期地铁线总长仅 10.5km,却有 1.2km 在地面,1.9km 为高架,地下段只有 7.4km。据统计,全世界 96 个城市地铁当中,地下线占统计总全线长的 35.4%,地面线占 51%,高架线占 13.6%;而全世界 26 个城市轻轨当中,地下线仅占 15.9%,地面线占 79.3%,高架线占 4.8%。因此,城市轨道交通的建设应使地下、地面和高架合理布局,以尽量降低工程建设的造价。

综上所述,城市地铁与轻轨工程建设的必要前提条件,大体应该从以下几点考虑。

(1) 一般认为人口超过 300 万的城市就可以考虑建设地铁与轻轨的可能性,但这只是宏观的和笼统的推测,不能以此作为建设地铁的决定性依据。

(2) 评估一个城市是否修建地铁与轻轨的重要因素,还要考虑主要交通干线上单位时间客流量的大小,即现状和可以预测出的未来单向客流量是否超过 3 万人次/h,且在采取增加地面公共电汽车车辆、完善城市现有的公共道路交通系统以及拓宽城市地面道路等措施后,仍无法满足客流量的增长时,才有必要考虑建设地铁与轻轨。

(3) 地下铁道和轻轨应成为城市快速轨道交通系统的组成部分,为了降低整个运输系统的造价,还应合理布置地下、地面和高架线路之间的相互衔接关系,尽量缩短线路在地下段的长度,以降低轨道交通的建设投资。

(4) 地下铁道与轻轨的建设必须根据国民经济状况、城市经济实力、设备国产化概率和施工与运营管理技术水平等综合因素经过可行性论证才可以确定。

城市轨道交通过高的造价不仅使多数城市难以承受,盲目建设还容易造成国民经济的局部失衡,为此,国务院于 2003 年明确指出城市快速轨道交通系统的建设要坚持“量力而行,有序发展”的原则,并且规定了建设地铁和轻轨的城市应达到的基本条件。

(1) 地方财政一般预算收入在 300 亿元以上。

(2) 国内生产总值达到 3 000 亿元以上。

(3) 城市总人口超过 700 万,城区人口在 300 万以上。

(4) 规划线路的客流规模要达到单向高峰 3 万人次/h 以上。

城市轨道交通建设资金需求量大,仅靠政府单一的投资渠道建设,难以满足城市建设发展的需要,资金不足曾一度成为制约城市轨道交通建设的重要因素。对此采取的主要办法有改革建设经营管理体制,按市场经济规律办事,逐步开放城市轨道交通市场,实行投资渠道和投资主体多元化,鼓励社会资本和境外资本以合资、合作或委托经营等方式参与城市轨道交通投资、建设和经营,并采取招标的方式公开、公正地选择投资者。在融资渠道上,鼓励和支持企业

采取盘活现有资产、发行长期建设债券和股票上市等方式筹集资金。城市轨道交通沿线土地增值的政府收益,应主要用于城市轨道交通项目的建设。

同时,要改革国有城市轨道交通企业的经营体制,引入竞争机制,增强企业活力,提高管理水平和效益。要通过加强管理,理顺价格,开拓经营范围,提高企业自我积累、自我发展的能力,减轻城市财政压力,逐步实行自负盈亏。

借鉴西方发达国家城市轨道交通的建设经验,可以采取以下几个具体措施:

(1)城市轨道交通建设与沿线物业综合开发相结合,让沿线物业土地出让的收入投入到轨道交通工程建设。

(2)积极利用外资,加快城市轨道交通建设步伐。

(3)实行轨道交通建成线沿线单位有偿受益。

(4)设立轨道交通建设专项基金。

(5)采取合作开发的策略。

(6)建立中央政策性投、融资体系,组建国家开发银行,为轨道交通项目进行融资。

(7)通过发行轨道交通建设的国家中长期债券,筹集轨道交通建设的部分资金。

第三节 城市轨道交通的发展现状及前景

一、世界城市地铁与轻轨的发展

1863年1月10日,用明挖法施工的世界上第一条地铁在伦敦建成通车,列车用蒸汽机车牵引,线路全长约6.4km,区间隧道断面为矩形双线断面,宽度为8.69m,高度为5.18m。1890年12月,伦敦首次用盾构法施工,建成另一条线路,由电气机车牵引,线路长约5.2km,区间隧道断面为圆形断面。虽然城市轨道交通诞生已有一百多年,但重视和大规模修建城市轨道交通系统则是在第二次世界大战结束以后。20世纪下半叶以来,伴随着世界范围内的城市化进程,大城市逐步形成了目前以地下铁道为主体,多种轨道交通类型并存的现代城市轨道交通新格局。据日本地下铁道协会统计,到1999年全世界有115个城市建成了地下铁道,线路总长度超过了7000km。

截至2018年底,全球共有72个国家和地区493座城市开通城市轨道交通,运营里程超过26100km,车站数超过26900座。其中,56个国家和地区的179座城市开通地铁,总里程达14219.36km,车站数超10631座;20个国家和地区的53座城市开通轻轨,总里程达1293.68km,车站数为1077个;58个国家和地区400座城市开通有轨电车,其中有里程数据来源的236座城市的有轨电车总里程达10609.05km,车站数超过15200个。

表1-2显示了截至2018年底全球各大洲城市轨道交通总体线网规模。

2018年世界各大洲城市轨道交通运营里程汇总

表1-2

大洲	地铁长度(km)	轻轨长度(km)	有轨电车长度(km)	总计长度(km)
亚洲	8137.35	836.25	332.6	9306.2
欧洲	3569.46	324.23	10253.25	14146.94

续上表

大 洲	地铁长度(km)	轻轨长度(km)	有轨电车长度(km)	总计长度(km)
北美洲	1 410.2	122	—	1 532.2
南美洲	1 005.95	11.2	—	1 017.15
非洲	96.4	—	23.2	119.6
总计	14 219.36	1 293.68	10 609.5	26 122.09

世界各国地铁各具特色。纽约是当今世界地铁运行线路最长的城市,其设施较为陈旧,但方便快捷且价格低廉。中国、墨西哥城与首尔(汉城)分别是世界上地铁发展最快的国家和城市,墨西哥的地铁如今有拉美规模最大、最现代化的地铁网络,首尔(汉城)的地铁也是四通八达,截至2015年年底,整个轨道交通系统共19条路线,总长度已达596.9km,其中地铁里程314km。莫斯科地铁以其宏大的建筑规模和华美的地铁站风貌闻名于世,其整个地铁系统中早期建成的车站均有其独特风貌,都经过建筑师和艺术家的精心设计,以不同的历史事件或人物为主题,采用五颜六色的大理石、花岗石、陶瓷和彩色玻璃镶嵌出各种浮雕和壁画装饰,辅以华丽的照明灯具、富丽堂皇的大理石地面,美不胜收,故有“地下宫殿”之美誉。巴黎地铁是最方便的地铁,地铁站间距非常短,班次也很多,每天发出4960次列车。法国里尔地铁是当今世界最先进的地铁,全部由微机控制,无人驾驶,轻便、省钱、省电,车辆行驶中噪声、振动都很小,高峰时每小时通过60次列车,为世界上行车间隔最短的全自动化地铁。美国旧金山地铁是当今世界地铁列车速度之冠。新加坡地铁是世界上最安全、最清洁、管理最好的地铁。

1978年3月,国际公共交通联合会(EITP)在比利时首都布鲁塞尔会议上,确定了新型有轨电车交通的统一名称,英文为Light Rail Transit,简称轻轨交通(LRT)。20世纪八九十年代,环保、能源结构问题突出,在经济可持续发展战略方针指导下,全世界掀起了新一轮的轻轨交通系统建设高潮。

截至2018年,世界城市轨道交通发展排名情况见表1-3。

各国(地区)城市轨道交通排名(单位:km)

表1-3

国家/地区	地铁	轻轨	有轨电车	总计	国家/地区	地铁	轻轨	有轨电车	总计
中国	5 010.8	422	328.7	5 761.5	白俄罗斯	37.3	—	129.4	166.7
德国	398.6	—	2749	3 147.6	马来西亚	51	91.5	—	142.5
美国	1 268.7	28	—	1 296.7	芬兰	35	—	96	131
法国	267.5	89.9	825.9	1 183.3	智利	118	—	—	118
俄罗斯	568.2	10	504.9	1 083.1	希腊	84.7	—	27	111.7
日本	790.6	96.2	—	886.8	斯洛伐克	—	—	91.5	91.5
英国	479.5	44.5	344	868	泰国	59.7	23	—	82.7
西班牙	440.925	58.475	366.9	866.3	埃及	7.9	—	—	77.9
韩国	730.5	47.5	—	778	委内瑞拉	63.6	11.2	—	74.8
波兰	29	—	737.6	766.6	阿联酋	74.6	—	—	74.6
乌克兰	112.8	—	601.9	714.7	克罗地亚	—	—	66.2	66.2
意大利	155.9	66.327	362.5	584.727	丹麦	20.4	—	44	64.4

续上表

国家/地区	地铁	轻轨	有轨电车	总计	国家/地区	地铁	轻轨	有轨电车	总计
印度	527.9	11.7	—	539.6	阿根廷	54.7	—	—	54.7
比利时	39.9	—	480.7	520.6	菲律宾	13.75	36.55	—	50.3
罗马尼亚	71.4	—	432.7	504.1	塞尔维亚	—	—	43.5	43.5
捷克	65.2	—	333.6	398.8	哥伦比亚	42.1	—	—	42.1
荷兰	119.5	—	271	390.5	阿尔及利亚	18.5	—	23.2	41.7
瑞典	108	—	268.8	376.8	爱沙尼亚	—	—	39	39
巴西	374.1	—	—	374.1	爱尔兰	—	—	38.2	38.2
奥地利	83.3	—	285.3	368.6	阿塞拜疆	36.7	—	—	36.7
墨西哥	258.5	—	—	258.5	乌兹别克斯坦	36.2	—	—	36.2
伊朗	256.7	—	—	256.7	秘鲁	34.6	—	—	34.6
土耳其	217.83	34.63	—	252.46	多米尼加	27.35	—	—	27.35
挪威	85	—	160.1	245.1	格鲁吉亚	27.1	—	—	27.1
加拿大	141.5	94	—	235.5	波黑	—	—	22.9	22.9
瑞士	5.9	—	224.65	230.55	朝鲜	22	—	—	22
匈牙利	39.4	—	189.3	228.7	沙特阿拉伯	18.1	—	—	18.1
中国台湾	201.2	25.7	—	226.9	波多黎各	17.2	—	—	17.2
拉脱维亚	—	—	213.9	213.9	巴拿马	15.8	—	—	15.8
新加坡	119.1	79.5	—	198.6	亚美尼亚	13.4	—	—	13.4
保加利亚	40	—	154	194	哈萨克斯坦	11.3	—	—	11.3
葡萄牙	44.1	—	144.2	188.3	卢森堡	—	—	4.6	4.6
中国香港	174.7	3.8	—	178.5					

二、中国地铁与轻轨的发展

中国第一条现代化城市轨道交通线路是1969年10月1日建成通车的北京地铁1号线。经过40多年的发展,中国城市轨道交通不断创新,已从单一的地铁发展为城市轻轨、市郊铁路乃至城际铁路的多样化、立体化交通系统,从蒸汽机牵引发展为电气化牵引。

我国第一批得到国家批准建设轨道交通项目的城市有北京、上海、天津、广州、南京、深圳、武汉、西安、重庆、成都、哈尔滨、长春、沈阳、杭州和苏州,共15个城市。在2007年,又有南宁、宁波、无锡、大连、东莞、昆明、郑州、长沙、福州和贵阳10个城市在制订规划或报批之中。此外,还有合肥、青岛、济南、石家庄、厦门、太原、大同和兰州等一批城市也在筹备轨道交通,筹备轨道交通的城市总计达到40多个。截至2018年底,中国大陆地区共有35个城市开通城市轨道交通运营线路185条,运营总长度5761.5km。据不完全统计,共有63个城市的城市轨道交通网规划获批(含地方政府批复的19个城市),其中,城市轨道交通线网建设规划在实施的城市共计61个,在实施的建设规划线路总长7611km(不含已开通运营线路)。到2020年,全国总里程预计将达到约6100km。据统计,截至2018年中国已建成城市轨道交通的城市见表1-4。

2018年各城市地铁运营情况统计汇总表

表 1-4

城 市	线路条数(条)	线路长度(km)	客运量(万人次)
北京	20	617	384 162.9
上海	15	669.5	369 840.0
天津	5	166.7	35 983.3
重庆	7	214.9	43 874.2
广州	13	473.8	300 806.0
深圳	8	285.9	163 702.4
武汉	8	263.7	89 933.2
南京	5	176.8	101 267.1
沈阳	2	59	31 603.0
长春	2	38.6	4 901.9
大连	2	54.1	12 893.4
成都	6	222.1	115 754.2
西安	4	123.4	74 624.6
哈尔滨	2	21.8	9 742.0
苏州	3	120.7	32 413.7
郑州	3	93.6	29 340.7
昆明	3	88.7	19 957.7
杭州	3	114.7	52 985.2
佛山	—	21.5	—
长沙	2	48.8	24 699.8
宁波	2	74.5	12 437.1
无锡	2	55.7	10 312.0
南昌	2	48.5	14 175.8
青岛	2	44.9	1 3946.7
福州	1	24.6	6 087.6
东莞	1	37.8	4 605.1
南宁	2	53.1	21 362.1
合肥	2	52.3	15 323.6
石家庄	2	28.4	8 760.2
贵阳	1	33.7	744.1
厦门	1	30.3	4 164.6
乌鲁木齐	1	16.7	244.0
总计	131	4 354.3	2 010 648.2