



高等学校土木工程专业系列教材

四川省2008年度重点图书



URBAN METRO AND LIGHT RAIL TRANSIT

# 城市地下铁道与 轻轨交通

周晓军 周佳媚 编著  
高波 主审

四川省 2008 年度重点图书

西南交通大学出版基金资助

高等学校土木工程专业系列教材

# 城市地下铁道与轻轨交通

Urban Metro and Light Rail Transit

周晓军 周佳媚 编著

高 波 主审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书是为满足高等院校土木工程专业地下铁道与轻轨交通方向本科教学需要而编写的教材。全书共分 22 章,按城市轨道交通规划、地下铁道与轻轨交通设计原理、地下铁道与轻轨交通施工以及城市轨道交通环境评价和运营管理 4 篇组织编写。第 1 篇主要介绍城市轨道交通发展历史、体系组成、规划与可行性研究以及路网规划与设计的基本原则等;第 2 篇主要介绍地铁与轻轨车站建筑设计、车站建筑装修、车站衬砌结构、区间隧道衬砌结构、地铁结构计算、地铁高架结构建筑设备、地铁环境与灾害控制以及耐久性设计等;第 3 篇主要介绍地铁与轻轨车站和区间隧道的常用施工方法;第 4 篇主要介绍地铁与轻轨交通工程建成后的环境评价、行车组织和运营管理等专业方面的基本知识。本书内容丰富,涉及专业面广,同时还给出了地铁与轻轨设计、建设的部分工程实例,具有较强的实用性和系统性,便于读者理解和自学。本书对城市地下铁道和轻轨交通工程的设计与施工具有参考价值。

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学校本科生和研究生使用,也可供从事地下铁道与轻轨交通设计与施工的工程技术人员和管理人员阅读参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

城市地下铁道与轻轨交通 / 周晓军, 周佳媚编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2008.5  
(高等学校土木工程专业系列教材)  
ISBN 978-7-81104-842-1

I. 城… II. ①周…②周… III. ①城市铁路: 地下铁道—高等学校—教材②城市铁路: 轻轨铁路—高等学校—教材 IV. U23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 037503 号

---

高等学校土木工程专业系列教材

城市地下铁道与轻轨交通

周晓军 周佳媚 编著

\*

责任编辑 杨勇

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 210 mm × 285 mm 印张: 28.375

字数: 979 千字

2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-842-1

定价: 49.80 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

大力发展以地下铁道为代表的城市快速轨道交通系统是解决我国中心城市公共交通运输矛盾的重要途径。自从北京地铁1号线于1969年10月1日建成通车以来,我国先后有香港、台北、高雄、天津、上海、广州、深圳、南京、青岛、长春、沈阳、重庆、武汉、大连等10多个城市建成地下铁道或轻轨交通,到2006年12月,全国城市地铁与轻轨总运营通车里程达到500 km,年客运量已经超过了16.7亿人次。目前,成都、杭州、西安、济南、哈尔滨、长春、合肥、郑州、昆明、宁波、苏州、福州、佛山、长沙、厦门、无锡、澳门等20多个城市正在积极修建和筹划地下铁道或轻轨等轨道交通运输体系。轨道交通在我国具有广阔的发展前景,因此,急需大量从事地下铁道和轻轨等轨道交通工程规划、设计和建设的专门技术人才。当前,国内众多高等院校均在积极从事这方面的专业设置和人才培养工作,但缺乏系统的专门教材和参考书目。

本书即为满足地下铁道和轻轨交通工程教学需要,以新近修订的中华人民共和国国家标准《地铁设计规范》(GB 50157—2003)和《地下铁道工程施工及验收规范》(GB 50299—1999)等为主要依据而组织编写。书中重点介绍了国内外城市地下铁道与轻轨交通通过多年规划、设计、建设和科学研究等方面取得的成功经验,注重培养学生掌握基础知识、基本理论和基本技能,拓宽学生的专业知识面,进而提高学生分析问题和解决问题的能力。本书结合内容叙述列出了地铁和轻轨设计与建设的部分工程实例,内容具有较强的理论性、系统性和实用性,每章前后还分别给出了有关本章的关键概念和小结,并安排有复习思考题,便于学生自学阅读。本书既可满足高等院校土木工程相关专业教学的需要,也可供从事城市轨道交通规划、设计、施工和运营管理的工程技术人员学习与参考。

全书按城市轨道交通规划、地下铁道与轻轨交通设计原理、地下铁道与轻轨交通施工以及城市轨道交通环境影响评价和运营管理4篇组织编写,共分为22章。其中第2篇的第10章由周佳媚副教授编写,其余章节由周晓军教授编写。全书由周晓军教授统稿,高波教授主审。

在本书编写过程中,参阅了国内各兄弟院校,有关设计、科研和施工单位的研究成果与相关资料,获益匪浅,并引用了国内有关城市地下铁道和轻轨交通领域专家、学者的研究成果,在此向本书所列参考文献的作者表示衷心的感谢。同时,本书的出版得到了西南交通大学土木工程学院隧道与地下工程系全体教师的大力支持,他们提出了许多宝贵的意见,此外也得到了西南交通大学出版基金的资助,在此一并表示谢忱!

同时,还要衷心感谢中铁二院工程集团有限责任公司地铁分院的李德才教授级高级工程师和石义军高级工程师,他们分别审阅了本书,并提出了宝贵的意见和建议,使本书增色不少。

由于城市地下铁道与轻轨交通涉及较多专业与技术领域,又限于时间和水平,书中内容未能涵盖所有的专业领域,疏漏和错误之处也在所难免,敬请读者提出批评和宝贵意见,以便今后进一步地修订和补充完善。

编著者

2008年4月

# 目 录

## 第 1 篇 城市轨道交通规划

第 1 章 绪 论	1
1.1 城 市	1
1.2 城市规划	2
1.3 城市公共交通	4
1.4 世界城市地铁概况	6
1.5 我国城市地铁概况	7
1.6 城市地铁与轻轨建设的基本条件	8
本章小结	11
思考题	11
第 2 章 城市轨道交通的发展历史	12
2.1 世界城市轨道交通发展简史	12
2.2 我国城市交通现状及存在的问题	20
2.3 加快发展城市轨道交通体系	22
2.4 城市轨道交通发展阶段的划分	23
本章小结	24
思考题	24
第 3 章 城市轨道交通体系的组成	25
3.1 概 述	25
3.2 地下铁道	26
3.3 城市铁路	29
3.4 轻 轨	32
3.5 独轨交通	38
3.6 新交通系统	41
3.7 索轨交通	43
3.8 磁浮交通	48
3.9 常导中、低速磁浮交通	54
本章小结	55
思考题	55
第 4 章 城市轨道交通的规划与可行性研究	56
4.1 城市轨道交通的规划	56
4.2 可行性研究的内容和方法	60
4.3 轨道交通客流量预测	64
4.4 轨道交通经济效益评价	73
本章小结	79
思考题	79
第 5 章 城市轨道交通路网的规划与设计	80
5.1 引 言	80

5.2 城市轨道交通系统的基础知识 .....	80
5.3 路网规划设计原则 .....	84
5.4 地铁限界 .....	99
5.5 地下铁道的线路设计 .....	105
本章小结 .....	125
思考题 .....	125

## 第 2 篇 地下铁道与轻轨交通设计原理

<b>第 6 章 地下铁道与轻轨交通车站建筑</b> .....	126
6.1 地下铁道车站的平面布局 .....	126
6.2 地铁车站的位置与类型 .....	130
6.3 地铁车站建筑设计 .....	134
6.4 地铁车站出入口设计 .....	146
6.5 地铁车站的通风及防灾设计 .....	151
6.6 地铁车站的综合开发与空间利用 .....	156
6.7 轻轨车站建筑设计 .....	157
本章小结 .....	160
思考题 .....	160
<b>第 7 章 地下铁道与轻轨车站建筑装修</b> .....	162
7.1 概 述 .....	162
7.2 地铁车站的吊顶 .....	163
7.3 地铁车站照明及照度标准 .....	163
7.4 地铁车站的装修 .....	167
7.5 地铁车站装修实例 .....	168
本章小结 .....	171
思考题 .....	171
<b>第 8 章 地下铁道车站衬砌结构与构造</b> .....	172
8.1 明挖法施工的车站结构 .....	173
8.2 盖挖法施工的车站结构 .....	179
8.3 矿山法施工的车站结构 .....	186
8.4 盾构法施工的车站结构 .....	188
8.5 换乘站的隧道衬砌结构 .....	190
本章小结 .....	194
思考题 .....	194
<b>第 9 章 地下铁道区间隧道衬砌结构与构造</b> .....	195
9.1 概 述 .....	195
9.2 明挖法修建的隧道衬砌结构与构造 .....	195
9.3 矿山法修建的隧道衬砌结构与构造 .....	199
9.4 盾构法修建的隧道衬砌结构与构造 .....	202
9.5 特殊地段的隧道衬砌结构 .....	206
本章小结 .....	208
思考题 .....	208

第 10 章 地下铁道结构计算 .....	209
10.1 地下铁道结构的工作特性 .....	209
10.2 地下铁道结构设计的特征和顺序 .....	209
10.3 作用在地下铁道结构上的荷载 .....	211
10.4 区间隧道衬砌结构静力计算 .....	218
10.5 车站结构静力计算 .....	225
10.6 暗挖车站结构计算原则 .....	228
10.7 地下铁道结构抗震分析 .....	230
本章小结 .....	236
思考题 .....	236
第 11 章 地铁与轻轨高架结构 .....	237
11.1 高架结构设计 .....	237
11.2 高架结构计算 .....	241
11.3 轻轨高架结构的施工 .....	242
11.4 高架轨道交通的施工技术 .....	249
11.5 独轨交通的高架结构 .....	250
本章小结 .....	255
思考题 .....	255
第 12 章 地下铁道环境与灾害控制 .....	256
12.1 地铁通风与空调 .....	256
12.2 地铁防水 .....	274
12.3 地铁给排水 .....	286
12.4 地铁防灾设计 .....	288
12.5 城市轨道交通信号控制系统 .....	297
本章小结 .....	300
思考题 .....	300
第 13 章 地下铁道与轻轨交通的耐久性设计 .....	301
13.1 概 述 .....	301
13.2 劣 化 .....	303
13.3 设计耐用年限 .....	304
13.4 地铁杂散电流的腐蚀与防护 .....	313
13.5 地铁区间隧道内杂散电流的防护措施 .....	318
13.6 区间隧道钢筋混凝土碳化对混凝土耐久性的影响 .....	319
本章小结 .....	320
思考题 .....	320

### 第 3 篇 地下铁道与轻轨交通施工

第 14 章 明挖法 .....	321
14.1 概 述 .....	321
14.2 敞口放坡法 .....	326
14.3 板桩法 .....	331
14.4 井点法降低地下水位的设计与计算要点 .....	335

14.5	降排水方案选择与设计应注意的问题	337
14.6	旋喷法	338
14.7	挖孔桩围护结构	341
14.8	钻孔灌注桩围护结构	342
14.9	水泥土搅拌桩	343
14.10	劲性水泥土搅拌桩	344
	本章小结	345
	思考题	346
<b>第 15 章</b>	<b>盖挖法</b>	<b>347</b>
15.1	概 述	347
15.2	地下连续墙	350
15.3	桩 基	357
	本章小结	364
	思考题	364
<b>第 16 章</b>	<b>暗挖法</b>	<b>365</b>
16.1	新奥法施工	365
16.2	浅埋暗挖法	367
16.3	矿山法	376
	本章小结	385
	思考题	385
<b>第 17 章</b>	<b>盾构法</b>	<b>386</b>
17.1	概 述	386
17.2	盾构的基本构造及其分类	386
17.3	盾构施工基本参数的选择	391
17.4	盾构施工技术	395
17.5	盾构施工的地表变形	397
	本章小结	398
	思考题	398
<b>第 18 章</b>	<b>顶管法</b>	<b>399</b>
18.1	概 述	399
18.2	顶管的基本组成	402
18.3	顶管法的顶力计算	404
18.4	顶管法施工技术	404
	本章小结	406
	思考题	406
<b>第 19 章</b>	<b>冻结法</b>	<b>407</b>
19.1	水平冻结的应用历史和现状	407
19.2	地层冻结原理	408
19.3	人工冻土的力学特性	410
19.4	常规盐水冻结	413
19.5	液氮冻结	415
19.6	冻结法的应用	417
	本章小结	419
	思考题	419



## 第4篇 城市轨道交通环境评价和运营管理

第20章 城市轨道交通工程的后评估	420
20.1 概 述	420
20.2 后评估的内容	421
20.3 后评估所需的资料 and 文件	421
本章小结	422
思考题	422
第21章 轨道交通工程环境评价	423
21.1 概 述	423
21.2 各种城市交通方式的资源环境比较	423
21.3 城市轨道交通振动与噪声	424
21.4 缓解城市轨道交通振动与噪声的措施	426
本章小结	427
思考题	427
第22章 轨道交通工程行车组织与运营管理	428
22.1 概 述	428
22.2 行车组织	428
22.3 客运管理	432
22.4 安全与防灾对策	433
本章小结	436
思考题	437
附录1 我国《地铁设计规范》(GB 50157—2003)中规定的地下结构设计要求	438
附表1.1 地下结构混凝土的最低设计强度等级	438
附表1.2 地下结构混凝土的最大计算裂缝宽度允许值	438
附表1.3 地下结构受力钢筋的混凝土保护层最小厚度	438
附表1.4 明挖法修建的地下结构防水措施	438
附表1.5 矿山法修建的地下结构防水措施	439
附表1.6 盾构法修建的地下结构防水措施	439
附表1.7 车站设备及管理用房计算温度与换气次数	439
附表1.8 铁路隧道围岩分级	440
附表1.9 各级围岩的物理力学指标	440
附录2 我国《城市地下空间开发利用管理规定》	441
参考文献	443

# 第 1 篇 城市轨道交通规划

## Section One Urban Rail Transit Planning

### 第 1 章 绪 论

#### Chapter One Introduction

##### 关键概念

城市公共交通 (Urban Public Traffic) 公共交通结构 (Public Traffic Composition) 地下铁道 (Metro, Subway, Tube, Underground) 轻轨交通 (Light Rail Transit)

#### 1.1 城市 (City, Municipality, Metropolis)

城市是人类文明进步的重要标志,也是一个国家或地区的政治、经济、文化与科学技术中心。在通常意义上讲,城市是人口稠密,具有生产、生活和行政管理等功能的区域,一般包括了住宅区、工业区和商业区。城市的行政管辖功能可能涉及较其本身更为广泛的区域。从“城市”的字面意义上看,它是“城”和“市”的组合。在原始社会,人类聚居时为了防御野兽和相邻部落的侵袭以及躲避恶劣的气候现象,在居民点外围挖掘了壕沟,并且用土、木和石材等砌筑围墙,形成了“城 (City)”的雏形 (Embryonic Form)。随着社会的发展特别是到封建社会以后,“城”的作用和构造日益完善,但其本身作为防御性构筑物的本质一直没有变化。生产力的发展带来了剩余产品,也出现了商品交换,随着商品交换数量的增加,社会中逐渐出现了专门从事商品交易和赢取利润的商人,其交换场所也逐渐固定下来,于是就形成了“市 (Market)”。由此可见,“市”的产生要晚于“城”。

人类社会发展史上的第二次劳动大分工将人类居住点划分为“城市”和“农村 (Countryside)”。前者以商业交换和手工业为主,而后者以农业为主。“城市”产生于原始社会向奴隶社会过渡的时期,它与私有制和阶级分化是同步进行的。

“城市”从其产生的从事商业交换活动并具有防御功能的居民聚居点而言,其相对简单的特性维持了几千年时间。近代资本主义工业革命 (也称做第二次产业革命) 给城市的发展带来了巨大的影响。随着工业的快速发展,城市人口数量逐渐增多并集中起来,城市化的速度也迅速加快,致使城市规模迅速扩大。

工业发展成为城市巨变的决定性因素。蒸汽机和电能的运用,使人们从单纯依赖风力、水力的自然能源中摆脱出来,逐步走向依靠人工能源更有序组织生产的高层次工业生产局面,使生产能够更加集中于城市。工业发展吸引了大批劳动力,进而修建了大量的工厂与作坊,相应地,在工厂与作坊周围产生了工人居住区和为其生活服务的各类公共设施,这被称为“工业化初期城市发展的典型形态”。

随着工业的进一步发展,出现了火车、轮船和汽车等先进的运输工具,同时产业部门也相应增多,分工更加细致。相应地,各种交通工具和它们特殊的运输线型以及站点选址的要求,对原来城市道路系统带来很大冲击,同时也因为交通对城市发展的巨大作用,城市结构布局也出现了较大变化。此外,生活水平的提高和需求的多样化,给城市带来了各类更为复杂的新型公共建筑,而工业生产规模的扩大、原料需求的增多,出现了大量产品的仓储场所和运输通道,这些因素使得城市用地的种类和功能得到极大丰富,引起城市结构布局的复杂化,也对各类生产与生活设施的合理匹配和布置提出了更高的要求,使城市的中心地位愈发增强。

从现代城市的意义上讲，“城市”体现了“人口”、“产业结构”和“行政”3方面的含义。城市是人类社会经济发展到一定阶段的产物，是人文、经贸、科学技术与文化复合而成的高度集中的社会实体，是一定地域范围内政治、经济、文化的中心。它包括国家或地区按行政区划划分而设立的首都、直辖市、市、镇、未设镇的县城以及独立的工矿区 and 城市型的居民点。

城市经济学对城市做了不同能级的分类，如小城市、中等城市、大城市、国际化大都市、世界城市等。对城市能级分类的一个标准是城市的人口规模。中国根据市区非农业人口的数量把城市分为4个等级，即人口少于20万的为小城市，20万~50万人口的为中等城市，50万人口以上的为大城市，其中又把人口超过100万以上的大城市称为特大型城市。

按城市综合经济实力和世界城市发展的历史来看，城市分为集市型、功能型、综合性、城市群等类别，这些类别也体现了城市发展的各个阶段。

就中国而言，1955年对“城市型居民点”的定义为，市县人民政府所在地，常住人口大于2000人、非农业人口超过50%以上的居民点，即俗称的“城市户口”所在地；另外，常住人口1000人以上、非农业人口超过75%的工矿点，也可被定为“城市型居民点”。

按行政区划，各类城市型居民点被划分为“直辖市、市、县、镇”等，划分依据主要是人口和国民经济产值。另外，从城市常住人口的数量出发，可分为“特大、大、中和小”城市几类。从城市不同功能类型的角度，还可分为港口贸易城市、旅游城市、矿业城市及以某种产业为主的城市等。

## 1.2 城市规划 (City Planning, Urban Planning)

城市规划是在人们认识到如何改善生存环境，满足生活、生产和安全等方面的需要，并按已有经验对居住点进行修建、改造时产生的。

城市规划的根本目的在于改善和提高人民生活、生产环境水平，促进生产力发展。城市规划的基本任务就是以城市社会、经济发展目标为依据，合理布置城市空间，使之更好地促进生产力发展，提高人民生活水平。

从某种意义上讲，城市规划是一种生产关系的建设。既然是生产关系的建设，城市规划就必然带有阶级性和时代的局限性。例如，中国古代封建社会具有代表性的城市布局都采用了中轴对称的布局手法，皇宫位于最中间的部位，城市布局尊卑主次分明，在一定程度上是封建儒家思想的体现；而“邻里单位”等西方城市规划理论中明确提出不同阶层的居民尽量集聚在一起居住的观点，实质上体现了资产阶级在当时的社会改良、阶级调和的论调。

在我国，改革开放前的城市规划受计划经济的影响，在城市用地布局中不太强调发展第三产业，于是某些大城市的中心地段并未用于发展商业服务，而是布置了工厂或住宅，土地无偿使用，土地资源难以得到有效利用；而改革开放以后，城市规划的指导思想也发生了巨大变化，开始将发展生产力放到首要地位，合理布局城市空间，开始实行土地有偿转让，如北京、上海、天津、广州、深圳、成都、南京等中心城市在开展城市的改造过程中，大量的人口迁居实际上就是重新调整产业结构和用地布局，体现“黄金地段，黄金效益”的结果。

由此可见，城市规划是一个国家和地区的政治反映，也是时代特征的反映。美国国家资源委员会则直接称城市规划是“一种政策活动”。

理论发展是以物质基础为条件的，当第二次产业革命的风暴席卷欧洲，资本主义得到迅速发展的时候，城市的自发生长已不可能满足城市健康发展的要求，工业的高度集中吸引了大量的资金和人口，从而带来了严重的污染和土地价格的暴涨。在有限的土地上掘取高额利润的同时，除了环境污染外还产生了以交通问题为主的其他诸多矛盾，既危害了人民的生活，也严重妨碍了资产阶级自身的利益。为了避免城市衰退现象的出现，资产阶级提出了如何解决这些矛盾的城市规划理论，妄图解决资本主义社会各种城市矛盾，虽然往往因为规划师的阶级立场所限致使规划设想成为主观臆断或难以取得预期效果，但是，有特定研究对象和范围、有体系、有深度的系统的现代城市规划学形成并迅速发展了起来。对世界范围的城市规划工作产生较大影响的理论，按其发展演绎的次序有“田园城市”理论、“卫星城镇”理论、“雅典宪章”、“邻里单位”理论和“有机疏散”理论等，有关这方面的内容读者可参阅相关的城市规划论著和文献，本书不在赘述。

城市规划工作的基本内容是，依据城市的经济社会发展目标和有关生产力布局的要求，充分研究城市的自

然、经济、社会和区域发展的条件，确定城市的性质，预测城市发展规模，选择城市用地的发展方向；按照工程技术和环境的要求，综合安排城市各项工程设施，并对各项用地进行合理布局。

城市规划的最大目的就是促进生产力的发展和改善人类的生活水平。在进行城市规划时，一个必须考虑的重要概念就是城市容量，它是指一个城市在某一时期对人口和人类活动以及与人活动有关的各类设施（如建筑物、道路等城市设施）的容纳能力。这种容纳能力是综合性的，其包含有人口容量、建筑容量、交通容量、环境容量等。城市容量是一个动态发展变化的事物，其容量总和的大小取决于城市用地面积、条件、城市的社会经济技术发展程度等因素。在其他条件不变的情况下，用地面积的大小和社会经济技术发展程度的高低与城市容量的大小成正比。如将城市容量作为一个总系统，则其子系统如人口容量、建筑容量、交通容量等之间并不是孤立的，而是相互联系的，如图 1.1 所示。

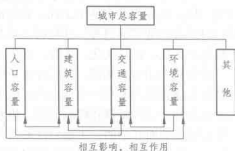


图 1.1 城市容量系统

在这些众多的子系统中，人口容量是最重要的，它的大小制约着其他容量的发展，同时，其他容量也反作用于人口容量。所以，城市容量是一个相互关联而总是处在寻找相互协调平衡状态中的系统。当人口过多过快发展时，建筑容量出现不足，增加建筑容量后往往又引发交通容量和环境容量下降，最终的结果是生活环境恶化，人口开始向外围疏散。这种恶性循环的结果是城市衰退，国外很多发达城市都曾有过类似的经验。诚然，出现城市衰退的原因是多方面的，如过度投机、汽车的快速发展等。但从本质上讲，它是城市各种容量之间的比例和配置失调的结果。当然，城市各种容量的最优化比例和配置不是恒定不变的，而是受历史生产力水平与社会经济和文化等因素的制约。

城市发展，自始至终面临着一个如何拓展城市容量的问题。在影响城市容量大小的诸多因素当中，城市各种容量的协调与全面发展是一个要点，即在城市中往往因为一种容量因素的制约，而影响了其他多种容量的发展，当这一主要因素得到解决时，城市理论容量能得到较大的拓展。城市人口、建筑、交通、基础设施和环境容量之间的平衡发展是至关重要的。

从城市容量及其相互关系来研究城市发展问题的时候，还存在这样 2 个概念，即“城市实际容量”和“城市理论容量”。城市实际容量，就是指城市在某一阶段实际发生的承载容量情况；而城市理论容量则指在某一阶段的当前条件下，在各种主客观因素的相互制约下，城市所能达到的最大理论承载能力。

城市规划工作实际上就是一个不断调整城市发展与城市理论容量，城市理论容量与实际容量，城市各种容量之间的平衡发展关系的过程。城市容量的拓展必然要落实到城市空间方面，所以，拓展城市容量的根本方法是开发城市空间。

城市空间可划分为城市的上部空间、地面空间和地下空间 3 大部分。从城市发展史来看，地面空间最先得得到开发和利用，其次是上部空间，最后才是城市地下空间。究其原因，主要是与经济技术条件和人们的生活习惯有关。当然，某些特殊情况例外，如我国陕西、甘肃、山西等省的黄土高坡，从古至今一直以窑洞（也属于地下空间的应用范畴）为主要起居空间。城市空间的拓展一般可以分为 2 种方式：① 外延式水平方向扩展；② 内涵式立体方向扩展。

前者以增加城市用地为主，后者则在不断增加城市用地的情况下，以通过向上和向下寻求空间为主进行拓展。当然在城市发展的过程中二者并不排斥，即可以独立存在，也可以同时出现在城市建设中。

现代大城市和特大城市的中心地区人口密集、建筑物林立、空间拥挤、交通堵塞，特别是历史旧城或经过改造发展起来的大城市，这些矛盾和问题尤为突出。如何合理规划城市的基础设施和制订城市各项技术经济指标，使其达到最大的社会和经济效益，使城市逐步具备高效、文明、舒适、安全、可持续发展的现代化城市的功能，是城市管理和建设者的首要任务。

长期以来，城市交通、基础设施及城市容量的扩大主要是通过扩展城市地面用地来实现的，但城市用地的短缺已成为矛盾的焦点。因此，合理开发与综合利用城市地下空间资源，不仅成为缓解当前存在的各种城市矛盾，满足某些社会和经济发展的特殊需要，而且为进一步建设现代化城市开辟了广阔的前景。城市地下工程正是在这样一个总的背景下应运而生的。

城市地下工程是从事研究和建造城市各种地下工程的规划、勘测、设计、施工和维护的一门综合性应用科学与工程，是土木工程的一个重要分支。在城市地面以下土层或岩体中修建各种类型的地下建筑物或结构物的工程，均称为城市地下工程，它包括交通运输方面的地下铁道、公路隧道、地下停车场、地下商业街或穿越障碍的各种地下通道等；还包括工业与民用方面的各种地下制作车间、电站、各种储存库房、商店、人防与市政地下工程，以及文化、体育、娱乐与生活等方面的联合建筑体等。

开发和利用城市地面、上部与地下空间资源，拓展城市容量，解决城市发展过程中存在的诸多问题和矛盾，特别是交通容量的不足以及日益增长的人员出行和物资运输与运输方式单一问题之间的矛盾，就必须合理解决城市公共交通的发展和规划问题。纵观发达国家城市发展的历史，城市容量的拓展和空间的开发首先是结合城市交通改造而开始的，主要包括城市轨道交通系统、城市道路隧道与步行道系统等。在进行城市交通改造的同时，还应考虑地下综合管线廊道即市政工程地下综合体的规划与建设。

### 1.3 城市公共交通 (Urban Public Traffic)

城市公共交通 (Urban Public Traffic) 是指在城市及受其影响的郊区范围内，为方便公众的出行和物资的运送，利用各种运输工具按一定线路运送旅客和物资的运输系统，如铁路、公路、航空、水运等，狭义上一般指城市定线运营的道路公共汽车及铁路等交通。城市公共交通系统由道路、交通工具、乘降站点设施等物理要素构成。它对城市政治、经济、文化、科学技术等方面的发展均具有极其深远的影响。城市公共交通按照运输方式划分为道路交通、轨道交通以及航空和水运。

城市公共交通按照路权的使用性质可以分为共用路权的道路交通 (Road Transport) 和专用路权的轨道交通 (Rail Transport)。道路交通主要包括公共汽车 (Bus)、公共汽车快速交通 (Mass Transit)、出租车 (Taxi Cab)、无轨电车 (Trolley)、人力车 (Ricksha, Rickshaw) 等。城市轨道交通主要包括以下各种应用：城市区域铁路 (Regional Railway)、地下铁道 (Subway, Metro, Underground, Tube)、轻轨 (Light Rail) 或轻铁 (Light Metro)、电车 (Tram, Tramway)、索轨铁路 (Cable Rail Transit, Funicular)、高速铁路 (Express Railway)、齿轨铁路 (Rack Railway)、单轨铁路 (Mono Railway)、磁浮铁路 (Maglev Railway)、客运自动轨行车 (People Mover)、自动导向系统 (Automatically Guided System)、微型地铁 (Mini-Metro)、胶轮地铁 (Rubber Tyred Metro) 和索道 (Aerial Tramway) 等。几种不同方式的城市轨道交通的主要技术指标见表 1.1。

表 1.1 几种城市轨道交通方式的主要技术指标

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

根据国内外城市轨道交通建设与发展的状况，总结出它所具备的基本特点是：

- (1) 必须是服务大众的公共交通运输系统 (Public Transport System)。
- (2) 其运输线路位于城市及其影响范围内 (in City Proper or Downtown and Suburb)。
- (3) 列车以电力驱动方式运营 (Electrically Powered)。
- (4) 运输线路的大部分需独立于其他交通体系，如道路、其他铁路以外，且路权一般专有。

(5) 列车采用高频率发车的方式运行 (High Frequency)。

凡符合上述特性的城市公共交通就可以归属于城市轨道交通系统。

现代城市公共交通结构通常由下列运输系统组成:公共汽车、出租车、无轨电车、快速有轨电车、地下铁道等客运系统,有些城市还包括市郊铁路、轮渡、索道、缆车和磁悬浮客运交通等。现就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 (Metro, Subway, Underground, Tube)

地下铁道是指主要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公共交通体系,称为城市地下铁道 (Urban Metro),简称地铁。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。因为地铁运输几乎不占用街道面积,也不干扰地面的交通,有些国家称其为“街外运输”,而美国纽约则称为“有轨公共交通线 (Mass Transit Railway)”。

随着改革开放,国民经济的飞速发展,作为城市基础设施建设的一个重要方面,我国城市公共交通必须而且也必然会获得巨大的发展。在我国城市人口不断增加,机动车和非机动车数量迅速增长,很多大城市交通紧张的状况日益突出,市区的客运交通流量猛增,而城市人均道路面积很低。比如上海市人均道路面积仅为  $2.2 \text{ m}^2$ ,要增加道路面积已非常困难。因此,城市道路拥挤、交通堵塞的状况日益严重。目前,很多城市道路的平均车速已下降至  $10 \text{ km/h}$  以下,很多路口交通负荷度已经饱和。根据国内外实践经验,建设大容量快速轨道交通包括地铁和轻轨等轨道交通运输系统是缓解大城市公共交通紧张状况的有效途径。尤其是在市内,修建地下铁道、轻轨和中低速磁浮交通系统,并开发利用地下空间将是今后城市发展的主要趋势。

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。在城市中心区等繁华商业地带 (Central Business District),地铁的出入口可以建在最繁华的街区,或建在大型百货商店以及其他公共场所的建筑物内,以便乘客,增大客流量。

(2) 修建地铁可以改造地面环境,降低噪声和减少废气污染,为把地面变成优美的步行街区创造条件。

(3) 地铁可节省地面空间,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) 城市地铁具有一定的防御战争和抵御地震破坏的能力。

因此,对于大城市,尤其是国际化特大城市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,但地铁建设周期长,投资昂贵。例如,北京地铁“复八线”的工程造价达到  $5.61 \text{ 亿元/km}$ 。上海地铁从准备到 1995 年开通运营,历经多年,地铁 1 号线工程实际投入  $4.76 \text{ 亿元/km}$ ,而 2 号线则增加到  $7.03 \text{ 亿元/km}$ 。广州地铁一期工程实际投入 140 多亿人民币,另加 5 亿多美元贷款,地铁每公里投资现时已达 8 亿元人民币以上。而轻轨的造价相对要低一些,如上海明珠线轻轨的投资为  $3.71 \text{ 亿元/km}$ 。天津滨海轻轨工程投资约为  $65 \text{ 亿元}$ 人民币,全长约  $46 \text{ km}$ ,共设车站 19 座,包括 5 个预留车站,为目前中国线路最长的轻轨,其投资也为  $1.41 \text{ 亿元/km}$ 。深圳地铁 1 号线的造价为  $5 \text{ 亿元/km}$ ,其中土木工程投资占 40%,机电设备投资占 21%,通信信号投资占 8%,其他 (如拆迁等) 占 31%。而与地面铁路相比,即使是自然条件十分恶劣的青藏铁路,其预算也才为  $1 \text{ 亿元/km}$  左右,这就是为什么地铁建设大都是政府行为且少有赢利的原因,而在线路规划方面一旦离开市区进入郊外都要采用地面或高架线路的方式。因此,一个城市是否修建地铁和轻轨,还必须根据国民经济状况等综合因素经过可行性论证才可以确定。

### 2. 轻轨交通 (Light Rail Transit)

轻轨交通是在有轨电车的基础上发展起来的城市轨道交通系统,其输送能力为  $1.5 \sim 3.0 \text{ 万人次/h}$ 。它的车辆轴重较地铁轴重轻,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比较轻,因而称之为轻轨。其站台标准有高低之分,路权形式也有多种。伦敦把轻轨路权分为 3 种:

(1) LRT1 —— 与其他交通及行人共享路面。

(2) LRT2——线路固定于道路上,在紧急情况下其他车辆可驶入其路面,类似公共汽车专用道。

(3) LRT3——路权专用,线路与其他交通及行人全部隔离,或是立交化的地面铁路,或是地下或高架铁路。它具有运量较大、速度快、乘坐舒适安全、运行经济、建设成本比地铁低等特点。

快速轻轨交通是指具有专用路权的轻轨系统。它又可分为旧车改进型、新线建设型及新交通系统型 3 种:

(1) 旧车改进型是将有轨电车分阶段加以改进,使其车辆逐步实现高性能,轨道线路路权专有化、地下化或高架化,并实现运转单人操纵。德国、比利时、瑞士、意大利等国修建的轻轨交通就属于这种类型。

(2) 新线建设型是英、法及北美等国自 20 世纪 70 年代开始利用城市废弃的既有铁路修建比较经济的城市轨道交通系统,如法国巴黎的 RER 系统即属于这种类型。

(3) 新交通系统型,它比新线建设型更进一步,是作为一个独立系统开发的快速轻轨运输系统。加拿大开发的线性电机驱动的轻轨车辆和英国伦敦 Docklands (船坞地)的轻轨车辆相当于这种类型,加拿大研制的线性电力机车已在多伦多、温哥华、底特律等城市使用。

地下铁道与快速轻轨交通又统称为快速轨道交通,是具有专用路权的大容量客运列车系统,具有高标准化的站台并有不同程度的自动化设施。

### 3. 独轨交通 (Monorail Transit)

独轨交通又称单轨交通,可分为跨座式和悬挂式 2 种:前者跨在一根走行轨道上行走,其重心位于走行轨道上方;后者车辆悬挂于可在轨道梁上行走的走行装置的下面,其重心处于轨道梁的下方,因其轨道梁比较窄,仅为 85 cm,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。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约大 40%;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,疏散和救援工作都比较困难。该系统适宜于在市区较窄的街道上建造高架线路,目前一般多用于运动会、体育场、机场和大型展览会等场所与市区的短途联系。

### 4. 有轨电车 (Tramway)

有轨电车通常采用地面线,有时具有隔离的专用路基和轨道。隧道或高架区间仅在交通拥挤的地带才被采用。旧式的有轨电车由于其与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 20 km/h,单向运能可达 2 万人次/h。

## 1.4 世界城市地铁概况 (Brief Review of World Metros)

1863 年 1 月 10 日,世界上第 1 条地下铁道在英国伦敦的 Bishops 与 Paddington 之间用明挖法施工并建成通车,列车用蒸汽机车牵引,线路长约 6.4 km,区间隧道断面为矩形双线断面,宽度为 8.69 m,高度为 5.18 m。1890 年 12 月 18 日,在伦敦首次采用盾构法施工,建成另一条地铁线路,由电力机车牵引,线路长约 5.2 km,区间隧道断面为圆形断面。随后世界上又有纽约 (1867 年)、芝加哥 (1892 年)、布达佩斯 (1896 年)、格拉斯哥 (1897 年)、波士顿、维也纳 (1898 年)、巴黎 (1900 年) 等城市修建了地铁。其中芝加哥修建的全部为高架线,直到 1943 年才建成第 1 条地下线;英国格拉斯哥的地铁起初是列车在轨道上用缆索牵引,到 1936 年才改用电力牵引。

20 世纪上半叶,有柏林、纽约、东京、莫斯科等 12 座城市修建地铁,截止到 1963 年的 100 年间,世界上建有地铁的城市共计 26 座。1964—1980 年的 17 年中,又有 30 多座城市修建了地铁,到 1985 年世界上有大约 60 座城市正在修建或计划兴建地铁,当时全世界地铁运营里程总计约 3 000 余 km,其中纽约、伦敦均达 400 km,巴黎接近 300 km,莫斯科和东京接近 200 km,莫斯科地铁的客运量居世界首位,2007 年统计平均每昼夜可达 900 万人次,每年客运量达 32.8 亿人次,占全市公共交通总客运量的 41%。

世界各国的地铁各有其特色和不同的建设思想,莫斯科地铁是最豪华的地铁,有“欧洲地下宫殿”之称。天然料石、欧洲传统灯饰与莫斯科气势宏伟的博物馆群辉映成趣,市区 9 条地铁线路纵横交错,可以说

是前苏联城市公共交通总体规划与建筑业水平的体现,各车站的具体设计毫不雷同,花岗岩选材、选色、附属圆雕、浮雕各具特色,简直是一座地下的艺术博物馆。美国纽约地铁拥有“世界之最”之称,线路最长为432.4 km;线路最多共30条;车站最多有498个,但设施较为陈旧。新加坡地铁车站清洁、明亮、一尘不染,是世界上最安全、最清洁、管理最好的地铁。

日本东京都是地铁的一个中转枢纽,可有八九层地铁线路穿过,而且均设有上、下行电梯;穿行于日本地铁之间绝没有疲劳奔波的感觉,而感到一种游览的乐趣。巴黎地铁是世界上更方便的地铁,每天发车4960列,在主要车站的出入口,均设有电脑显示应乘线路和换乘地点等,使乘客一目了然。法国里尔地铁是目前世界上最先进的地铁,全部由微机控制、无人驾驶,地铁轻便、省钱、省电,车辆运营中噪声和振动都很小。

## 1.5 我国城市地铁概况 (General Outline of Metro in China)

我国于1965年7月1日在北京开始修建第1条地铁,第1期工程全长19 km,于1969年10月1日投入运营,第2期工程是沿二环路修建的地铁环线,全长23 m,于1971年3月破土动工至1984年9月建成通车。北京地铁复兴门至八王坟线全长13.5 km,于1988年破土动工至2000年9月28日建成通车。北京地铁1号线的东段八王坟至通州区全部为高架线路,全长17.2 km,已于2003年12月27日开通运营。此外北京地铁5号线全长27.7 km,其中地下线路为14.8 km,地面和高架线路有12.8 km,已于2007年10月8日开通。到2015年,北京地铁线路总长将超过570 km。

北京地铁已在城市公共交通中发挥了巨大的作用,仅1995年日平均运输旅客152万人次,年运输旅客5.58亿人次,其中外地乘客占70%左右,并创下了满载率世界第一、单车运行公里世界第一等2项世界纪录。另据统计,2004年北京地铁1、2号线共运送乘客5.47亿人次,13号线客运量超过4000万人次,同比增长89.93%,八通线客运量超过1600万人次,2004年北京地铁全年客运量达到6.0668亿人次,突破北京地铁年客运量的历史最高纪录,其中2004年10月1日达234万人次,2007年11月16日地铁全网客运量达到289万人次。

天津市地铁于1970年4月动工,1980年1月开始试运营,到1984年12月28日正式通车,运营里程长7.4 km。上海第1条长约16.1 km的南北地铁1号线于1990年1月19日破土动工,于1995年4月10日正式运营。此外,广州、南京、深圳、青岛等城市地铁1号线已经投入运营,而其他线路正在建设当中。香港地铁始建于1975年,1980年MIS (Modified Initial System) 全部完工并运营。

目前,我国100万人口以上的城市多达49座,其中已有重庆、成都、哈尔滨、武汉、沈阳、西安、杭州和宁波等20多个城市正在修建或计划兴建地铁以及快速轻轨交通,规划的城市轨道交通总里程达到5000 km,因此,在我国城市发展地铁及轻轨等城市轨道交通运输系统的前景是非常广阔的。到2015年中国城市轨道交通投入运营里程可达到1700 km。

世界上轨道交通很早就作为公共交通在城市中出现。随着科学技术和城市化的发展,大运量的轨道交通在现代大城市中起着越来越重要的作用。经济发达国家城市的交通发展历史表明,只有采用大运输量的地铁和轻轨交通系统,才是可以从根本上改善城市公共交通运量不足的有效途径。

我国发展大运量轨道交通的历史也并不短,40年前北京就开始了地铁建设,而且想建地铁的城市也不少,但一直因地铁造价太高而未能实施。至今一些人口百万以上的大城市,仍然用传统的公共汽车和无轨电车来维持客运的做法,已经越来越不能满足城市居民高效率出行的需要。因而目前很多大城市又在考虑和规划修建轨道交通系统。我国大城市除北京外,天津、上海、广州、深圳、南京、重庆、大连、青岛、武汉、沈阳、长春、鞍山、成都、西安、香港、台北、高雄都在修建现代化的地铁与轻轨等轨道交通系统。北京、上海、天津、广州、长春、大连、重庆、武汉、香港、台北、深圳、南京等城市虽已有地铁线路在运营,但远远不能较为普遍地满足需要。

由于我国城市轨道交通的应用技术和基础理论还处于开拓阶段,项目实施的大多数情况是要靠引进技术和设备,设备国产化率低,成为工程造价昂贵的主要原因。因而提高我国城市轨道交通行业的技术力量,发挥自主建设能力,努力降低工程造价,已是健康发展大运量轨道交通的关键所在。

为了克服交通堵塞、环境污染等“城市病”,必须加快发展以轨道交通为骨干的城市客运公共交通系统——这已成为人们的共识。城市轨道交通的特点就是快捷、安全、准时、容量大、能耗低、污染轻。为了建设生态型城市,实现可持续发展的和谐社会与城市,还应将“摊大饼式”即外延式水平方向扩展的城市发展模式



改变为伸开的“手掌形模式”即内涵式立体扩展的模型。因为城市呈伸开的“手掌状”发展，就可以使市区外围与绿地、树林等疏密相间。而“手掌形模式”城市发展的骨架就是城市轨道交通。城市轨道交通就是对环境友好的“绿色交通”。

高频率发车、低候车时间是城市轨道交通与城市间铁路（干线铁路）在运营方式上的最大区别。城市轨道交通按运量大小可分为城市快速铁路（市郊铁路）、地铁与轻轨和独轨交通、磁悬浮交通等4大类。城市快速铁路连接城市郊区与中心区，在郊区采取全立交的地面或高架方式，进入市中心区后转入地下。由于城市快速铁路速度快、运量大、站间距长、运价比较低，它将成为生态型城市轨道交通中的“主力军”。

而地铁在大城市中心区具有独特的优势，借此人们可以不受高楼林立、车辆拥堵的阻隔，实现快速流动。

“轻轨”这一概念主要指其车辆的轴重比地铁车辆的轴重轻，约为10t左右，因而国际公共交通联合会（Union of International Public Transport）于1978年3月在比利时首都布鲁塞尔召开的会议上，确定了轻轨交通的统一名称，英文为Light Rail Transit，简称LRT。现代化轻轨交通受到了欧洲各国的青睐，发展很快。特别是1994年11月23日，法国斯特拉斯堡的流线型车头、超低底盘、装有极大绿色车窗的新式有轨电车出现在街头时，受到了人们的热烈欢迎，该轻轨车辆如图1.2所示。该轻轨系统每小时单向客运量可达3万人次。可以断言以现代高新技术为支撑的轻轨交通作为更普遍化、更接近市民的大众运输工具，可能成为21世纪城市公共交通的一大标志，见图1.3~1.8。



图 1.2 法国斯特拉斯堡低地板轻轨车辆



图 1.3 维也纳国家大剧院前的现代有轨电车



图 1.4 21 世纪轻轨车



图 1.5 法国的新型有轨电车



图 1.6 高地板轻轨车



图 1.7 低地板轻轨车



图 1.8 德国的轻轨车

## 1.6 城市地铁与轻轨建设的基本条件 (Prerequisites for Metro and LRT Construction)

国际金融界普遍认为，可以用国民生产总值（GNP）的1%作为长时期（一般为10年以上）发展大城市轨