

地铁与轻轨

DI TIE YU QING GUI



张庆贺 朱合华 庄荣 等编著

人民交通出版社

Ditie Yu Qinggui

地铁与轻轨

张庆贺 朱合华 庄荣 等编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为高等学校土木、交通、铁道工程类专业教科书,系统介绍了地铁与轻轨交通工程在规划、设计、施工与灾害和防护方面的知识,具体包括:线路规划与设计、车站建筑设计、地铁与轻轨施工、地铁与轻轨设备系统、灾害与防护等内容。

本书既可作为从事地铁与轻轨交通工程勘察设计、施工、监理、监测和科学研究的工程师和技术人员的工具书,也可供岩土、工民建、铁道、道路与隧道工程等专业领域的师生和科技工作者参考,并可作为短训班培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

地铁与轻轨/张庆贺等编著. —北京:人民交通出版社, 2001.11

ISBN 7 - 114 - 04134 - 9

I .地... II .张... III .①地下铁道 - 基本知识
②轻轨铁路 - 基本知识 IV .U23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 084664 号

地铁与轻轨

张庆贺 朱合华 庄 荣 等编著

正文设计:彭小秋 责任校对:宿秀英 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787 × 1092 $\frac{1}{16}$ 印张:26.25 字数:648 千

2002 年 3 月 第 1 版

2002 年 3 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001 - 4000 册 定价:39.00 元

ISBN 7 - 114 - 04134 - 9
U·03023

序

由同济大学地下建筑工程、环境、电气和机械工程系的各位资深教授共同费心撰写的这本专业教学用书《地铁与轻轨》即将付梓问世,承张庆贺主编的邀约,要我为本书写述推荐,我当乐以从命。

众所周知,随着我国城市建设事业的飞速发展,继北京地铁之后,晚近十余年来,上海、广州、深圳、南京、青岛等诸大城市纷纷兴起了大规模建造地下铁道的热潮。以上海市为例,地铁1号线、2号线相继投入运营,对缓解地面交通,特别是广大职工上下班的交通拥挤状况有了极大程度的改善,社会效益十分显著;而上海市明珠线一期轻轨交通,利用早前沪杭铁路已废弃的旧有线路,建造高架型轻轨交通,通行二年多来,交通负荷也逐年递增,自市北江湾至铁路南站只需约40分钟便可安全、迅速地直达,完备了上海市内西缘的南北交通联络,也自然地组成了与内、外环线高架道路系统不可或缺的配套项目。这些为民造福、功在千秋的实事工程,市民们欢欣鼓舞,无不额首称庆!无怪国内许多大城市,在条件许可的情况下,也都以大力修建地铁、轻轨为市府的头号市政建设任务。自己作为地下工程建设战线的一名老兵,深感可喜可贺。

为此,作为与国家基本建设事业相适应的高校某些相关专业,适时地开设“地铁与轻轨”这门新课,并积极撰写本门新课的专业教材,当然是顺理成章应办的一桩好事。我对本书经粗阅一过,觉得它深入浅出,以学生容易接受的文字分章阐述,条理清楚,资料翔实、丰富,书中各个章节能够很好地相互配合成一个整体,使青年学子阅读后将可具备这一专业领域的基本知识,也有利于教师备课和相关专业技术人员的参考学习。

我喜见本书的早日出版,并高兴地写了上面的一点文字,代之以序。

张 钧

2001年仲秋,于同济园

前 言

本书为普通高等学校土木、交通、铁道工程专业教科书。它既可用作从事地铁与轻轨工程勘察设计、施工、监理、监测和科学研究的工程师的工具书,也可以用作岩土工程、工民建、铁道工程、道路与隧道工程等专业科技工作者及大专院校师生、短训班学员的参考书。

随着城市轨道交通的迅速发展,作者自1998年暑假开始在同济大学土木学院地下建筑与工程系开设“地铁与轻轨”选修课,受到许多本科生、研究生、施工企业短训班学员的热烈欢迎。但由于缺少这方面系统的教材给教学工作带来诸多不便,适逢人民交通出版社编辑与作者联系,乐于出版本书,于是促成了本书的完成。

本书第一章介绍了大中城市公共交通的困境及城市轨道交通发展的历史现状和前景;第二章介绍地铁与轻轨路网,线路规划和设计,简要说明轨道工程特点及地铁隧道及车站的限界;第三章介绍了地铁和轻轨车站区间隧道建筑装饰设计原理方法;第四章重点叙述各种类型的地铁轻轨车站与隧道结构材料选择、荷载计算,内力分析,断面设计;第五章介绍地铁轻轨车站、隧道施工组织设计编制,施工方法、施工工艺,施工过程中经济、进度、质量、安全管理控制方法;第六章重点介绍地铁轻轨工程供配电、通讯、信号、给排水、通风排烟和环境控制工程的原理和设计方法;第七章详细阐述了地铁与轻轨工程受到自然灾害和人为灾害破坏机理及防护对策。各章节中插入丰富的工程实例、图片,以便于阅读和理解。每章后附有一定数量思考练习题,供学员课后复习巩固和提高。

本书由张庆贺、朱合华和庄荣教授主编。第一、二、七章及第五章第一、二、五节由张庆贺、黄宏伟教授编写;第三章由庄荣教授编写;第四章由朱合华教授、丁文其、周生华讲师编写;第五章第三节由上海地铁公司总工程师葛世平高工编写;第五章第四节由王聿讲师编写;第六章第一节由刘昌讲师、陈艳琳工程师编写;第六章第二节由吴喜萍副教授编写;第六章第三节由高乃云副教授、彭海清高工编写;第六章第四、五节由刘昌讲师编写。全书各章节由张庆贺教授做了统稿及校对。作者同事同济大学地下工程系地下建筑教研室的同志对本书编写提纲提出了宝贵意见,上海市市政工程局总工程师白云教授级高工、上海地铁建设总公司副总工程师宋博高工、铁道部第四勘察设计院耿露云、邓朝晖高工以及刘国彬教授等为本书提供了许多有用资料,人民交通出版社的领导、编辑、校审人员为本书的出版付出辛勤劳动。此外,朱小龙、朱忠隆、王慎堂、刘军、朱小华等研究生为本书的打印、校对、编排做了大量工作。

作者的老师、中国科学院院士孙钧教授于百忙之中为本书写了序。

在本书付梓之日,作者对于他们为本书的编写和出版所给予的支持和帮助一并表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,作者虽力求通俗易懂、便于自学,兼顾系统性、准确性、科学性、实用性,但因时间和水平有限,书中有不当和错误之处,敬请同行专家和读者批评指正。

作者

2001年4月5日

于上海同济大学

目 录

第一章 绪论	1
第一节 我国大中城市的交通问题	1
一、大中城市的交通现状	1
二、引起城市交通阻塞的原因	2
三、解决城市公共交通问题的途径	3
第二节 地铁和轻轨交通的特点	3
一、共同的特点	3
二、不同的特点	3
三、地铁和轻轨交通在城市公共交通中的地位	8
第三节 地铁和轻轨交通的发展	8
一、国外地铁和轻轨的发展	8
二、发达国家地铁建设的经验	13
三、中国地铁的发展	14
思考题	20
第二章 地铁与轻轨交通线路规划与设计	21
第一节 线路网络规划	21
一、规划设计原则	21
二、网络规划内容	23
三、路网规划对城市发展结构的影响	29
四、城市轨道交通线路客流预测	33
五、交通方式选择	37
第二节 线路设计	41
一、基本规定	41
二、选线	42
三、线路平面设计	47
四、线路纵断面设计	52
第三节 轨道工程设计	55
一、钢轨	55
二、扣件	57
三、轨枕	64
四、道床	64
五、轨距加宽、超高	70
六、线路标志	72
第四节 限界	72

一、限界确定的原则	72
二、地铁隧道限界	73
三、轻轨高架桥面建筑限界	78
思考题	80
第三章 地铁与轻轨车站的建筑设计	81
第一节 概述	81
第二节 地铁车站建筑设计	82
第三节 轻轨车站建筑设计	103
第四节 地铁与轻轨车站建筑设计实例	111
思考题	139
第四章 地铁与轻轨交通的结构设计	140
第一节 地铁车站的结构设计	140
一、地铁车站结构选型的原则与特点	140
二、地铁车站的结构形式	141
三、地铁车站结构的荷载内力计算与设计	147
四、地铁车站结构的构造设计	151
第二节 地铁区间隧道的结构设计	153
一、地铁区间隧道结构选型的原则和特点	153
二、地铁区间隧道的结构形式	154
三、地铁区间隧道的截面设计与构造	160
四、地铁区间隧道结构的荷载内力计算方法	164
五、地铁区间隧道的结构设计	164
第三节 轻轨交通的结构设计	173
一、选型的原则	173
二、轻轨车站结构形式	174
三、轻轨交通的截面设计与构造	174
四、高架桥结构设计	176
第四节 地铁设计实例	177
一、工程概况	177
二、设计要求	178
三、结构形式	178
四、计算条件	179
五、围护结构计算	182
六、车站使用阶段横向框架结构计算	185
七、车站纵向分析	186
八、抗浮验算	187
九、抗震要求	187
十、人防验算	187
十一、结构防水	188
第五节 轻轨高架桥车站设计实例	188

一、工程概况	188
二、设计原则及技术标准	189
三、结构形式	189
四、荷载类型及组合	190
五、工程地质概况及基础选型	192
思考题	192
第五章 地铁与轻轨交通的施工	194
第一节 施工组织与管理	194
一、施工组织设计	194
二、施工总平面图	197
三、施工进度计划	204
四、质量管理	207
五、经济管理	210
六、现场管理	213
第二节 施工方法选择和新工艺、新材料、新设备	216
一、施工方法选择	216
二、新工艺、新材料、新设备	224
第三节 车站施工	233
一、常用施工方法	233
二、工程实例	236
三、发展与展望	242
第四节 区间隧道的施工	243
一、山岭地区区间隧道的施工	243
二、软土地区深埋隧道的施工	249
三、水下沉管隧道施工	256
第五节 轻轨高架桥车站及线路的施工	260
一、基础施工	260
二、立柱施工	261
三、桥梁施工	261
四、轻轨高架车站施工	265
思考题	267
第六章 地铁与轻轨设备系统	268
第一节 供配电系统	268
一、供电方式	268
二、负荷等级	268
三、供配电系统内容	268
四、供电系统管理自动化(SCADA)	272
五、车站动力、照明	273
六、车站人防电气设计	276
七、防雷与接地	277

八、杂散电流防护	277
第二节 通风和环境控制系统	278
一、概述	278
二、舒适图和 PMV—PPD 指标	278
三、地铁环境控制特点	280
四、地铁环控系统分类	280
五、得热量计算	284
六、通风量的计算	286
七、防排烟系统	287
八、阻塞通风和通风空调设备	290
第三节 给水排水及消防系统	292
一、消防设计	293
二、给水排水设计	296
第四节 通信和信号系统	299
一、通信	299
二、信号	306
第五节 自动售检票系统(AFC)	309
一、票制及票务管理	309
二、系统组成及功能	309
思考题	310
第七章 灾害与防护	311
第一节 灾害分类	311
第二节 防灾设计的原则及技术要求	313
一、防灾设计原则	313
二、技术要求	313
第三节 地下铁道地震灾害防护	318
一、地下铁道震害调查	318
二、抗震设计方法	323
三、抗震构造措施	326
第四节 防杂散电流	327
一、杂散电流产生	327
二、杂散电流测定	327
三、防迷流专业要求	328
四、工程实例	328
第五节 火灾防护	331
一、地下工程火灾发生的特征和危害	332
二、地铁工程火灾的防护对策	336
三、地下铁道工程消防	338
第六节 地铁工程的防水	343
一、防洪涝积水回灌	343

二、地铁工程防水材料	343
三、地铁车站防水	346
四、盾构法圆形隧道衬砌结构防水	352
第七节 施工诱发环境灾害的预测和防护	356
一、引言	356
二、建筑物和公用设施损坏判据	357
三、施工监测	361
四、沿线建筑物调查	364
五、建筑物及管线的保护方法	364
六、建筑物、构筑物、管线保护实例	365
第八节 战争灾害的防护	379
一、现代战争的特点	379
二、地铁工程防护设计	380
三、地铁工程平战功能转换	386
思考题	387
附录	388
参考文献	404

第一章 绪 论

地铁和轻轨都属于城市快速轨道交通的一部分,因其运量大、快速、正点、低能耗、少污染、乘坐舒适方便等优点,常被称为“绿色交通”。世界范围内人口向城市集中,城市化步伐加快,大中型城市普遍出现人口密集,住房紧缺,交通阻塞,环境污染严重,能源匮乏等所谓“城市病”。地铁和轻轨经过 150 年的发展,机车车辆、自动控制、通信和信号等技术方面有了很大的进步,很多方面代表和体现了当今高新科学技术发展的水平。发达国家的经验表明,地铁和轻轨是解决大中城市公共交通运输的根本途径,对于 21 世纪实现城市持续发展有非常重要的意义。

第一节 我国大中城市的交通问题

一、大中城市的交通现状

1. 交通阻塞,行车速度慢

交通阻塞,行车速度缓慢,已成为我国许多城市普遍存在的突出问题,就连新兴城市深圳也不例外。北京市主干道平均车速比 10 年前降低 50% 以上,而且以每年递减 2km/h 的速度持续下降。在 60 年代公交运营速度平均为 40km/h 左右,到了 90 年代已下降到 10km/h。市区 183 个路口,据统计严重阻塞的达 60%,阻塞时间达半小时。上海市一些重要路段的平均车速仅 8km/h。公交的服务水平日益下降,客运效益越来越差,以至造成大量自行车涌上街头,出租汽车、私人轿车不断增加。

2. 交通秩序混乱

我国城市传统的混合用地模式,即步行、自行车、低运输量的公共交通工具为主的出行方式,限制了城市客流的疏散。各种车辆混行在道路上,交通次序混乱,交通事故频增。目前我国城市自行车总数已超过一亿辆,一些特大型城市自行车的保有量达几百万辆以上。一辆公共汽车的载客量相当于上百辆自行车的载客量,而几辆自行车在道路上运营空间就占去相当于一辆公共汽车所占道路面积。大量的自行车随意穿行街道,必然造成交通阻塞,车速低。公共汽车、无轨电车等的客运能力仍然较弱,难以满足大城市交通主干线客流需求。

3. 耗能多,污染严重

我国一些大城市环境形势日益严峻,大气污染日益加剧。全国 500 多座城市,大气质量达到一级标准的不到 1%,北京、沈阳、西安、上海、广州均列入世界十大空气污染最严重的城市。资料表明,一辆公共汽车可以代替 15~20 辆私人汽车,一个拥有 600 辆公共汽车的车队可以使街道上的小汽车减少 12 000 辆,这十分有利于缓解交通阻塞的状况。轿车载客的社会费用为公共交通的 6~8 倍,能耗高达 3~4 倍,空间占用量高 9 倍,环境污染损失高达 9 倍。交通运输虽然不能直接创造财富,但它能把生产、分配、交换和消费在空间上连接起来。越是发达的地区,交通运输的时间价值越高。根据上海市资料,由于交通拥挤所造成的经济损失占当年

国民经济总值的 10%；而由于交通保障不力，使企业投入增加，生产率下降，这种间接的损失约为直接损失的 45%。同样，若以北京“五五”期间车速为标准进行计算，仅公共汽车乘车的时间损失一项，每年的经济损失就高达 792 亿元。

二、引起城市交通阻塞的原因

1. 道路面积少

交通阻塞的关键在于城市道路面积和城市面积比例及人均道路面积太低，见表 1-1。

世界主要都市人口与道路密度对比表

表 1-1

城 市	人口密度(人/km ²)	道路面积占城市面积(%)	人均道路面积(m ²)
东京	13 158	15.0	11.3
大阪	11 809	17.6*	14.9
汉城	18 047	12.0*	6.5
德里	6 579	16.45*	25*
海德拉巴	17 036	17*	10.06*
马德拉斯	22 133	12.7*	5.72*
雅加达	12 435	7.5*	6.09*
开罗	31 522	33.6*	10.6*
布宜诺斯艾利斯	14 827	17.9*	12.10*
巴黎	20 445	15*	7.32*
巴塞罗那	16 459	15.9	9.69
莫斯科	8 953	8.12	9.10
伦敦	4 363	9.3*	21.3*
纽约	8 886	12.38*	13.9*
曼谷	3 554		
北京城区	27 000	8.4	4.4
上海城区	40 000	8.3	1.6

注：1. * 估计数字，假设了道路宽 10m；

2. 资料来源：《世界大都市比较统计年表》1994、《国际统计年鉴》1996 年。

上海每公里道路汽车拥有量为 506 辆，北京为 345 辆，为发达国家汽车拥有量的两倍乃至数倍。长期以来，我国城市人均道路面积一直处于低水平状态，改革开放以来，才有较大发展，人均道路面积由原来的 2.8m² 已上升到 6.6m²，但仍远远低于国外大城市水平（如东京 10.3m²，纽约 28.3m²）。而道路基础设施也滞后于机动车辆的发展，目前全国民用机动车辆保有量已达 2 831.54 万辆，其中汽车 1 038.20 万辆，摩托车 1 280.95 万辆，并且正在以 13% 的年平均增长率发展。以北京为例，1981 ~ 1994 年北京市区道路平均递增 3.45%，而车辆保有量平均递增 14.6%。北京的快速道路占全国首位，立交桥数量占全国城市立交桥的一半，即使如此北京道路面积改革开放以来仅增加 0.6 倍，而同期机动车数量却增加了 10 倍，1996 年底达到 111 万辆。

2. 人口密集、客流量大

近年来我国城市化步伐加快，百万人口以上的城市已达 35 座之多，50 ~ 100 万人口之间的城市也超过 43 座。按照国际标准，城市人口密度大于每平方公里 2 万人，属于拥挤情况。我

国城市人口平均为 4 万/km²,局部地区有 16 万人/km²。北京市内的四个区平均 2.7 万人/km²,均处于饱和状态,属于世界人口最稠密城市之一,而诸如上海、重庆、沈阳等城市的人均建设用地仅有 50m² 左右,在如此狭小的空间布置工业、居住、办公和交通用地,必然导致人均道路面积和城市绿地的减少。我国许多大中城市交通主干道的高峰每小时客流量均超过 3 万人次,有的高达 8~9 万人次,低运输量的公共交通运输工具很难适应客流增长的需要。

3. 缺乏科学的现代化管理

路网规划不合理,各种交通工具换乘联运不便,停车场、加油站、维修点配套不齐,现有的道路、高架、地铁使用效率不高,居民利用机动车出行的程度低,平均每人每天只有 0.8 次。上海目前每公里地铁承担的客运量不到香港的 1/3,小于应有的负荷。市民的交通文明意识和交通法规有待提高和改进。现代化的交通工具,一流的管理,文明的乘客,才能做到道路的畅通无阻。

三、解决城市公共交通问题的途径

随着城市的发展以及人民生活水平的提高,人们的出行次数和出行距离均有增加,交通流量更有大幅度增加。据预测,到 2010 年,我国 20 多个大城市主要干道的高峰小时单向断面客流量将高达 3~7 万人次/小时。如此巨大的客流量,单采用运能 8~9 千人次/小时的地面公共汽车已不能解决问题,与机动车道分离行驶的自行车只能作为短途客运的补充,而大量发展私人轿车在目前尚不符合中国的国情。我国许多大城市建设用地十分有限,不能无限制的扩展道路。因此,应结合城市的总体规划,做好城市快速轨道交通——地铁和轻轨的规划,有计划地、分期分批地建造地下铁道、高架轻轨、郊区快速铁路,并与公共汽车、出租车、有轨电车、轮渡等交通工具有机结合,互为补充。同时也应改进现有的交通法规,强化城市居民交通文明意识。发展城市交通应围绕安全、高效、有序、经济和环保的要点,逐步使交通结构合理,供求平衡,实现 21 世纪的可持续发展。

第二节 地铁和轻轨交通的特点

一、共同的特点

地铁和轻轨均属于城市快速轨道交通的一部分。轨道交通还包括单轨交通、新交通、磁悬浮交通等交通系统。它们虽各有特色,但都能为居民提供优质快速的交通服务。地铁和轻轨交通客运量大、速度快、安全、正点、污染小、低能耗、方便舒适,世界上又称之为“绿色交通”。

二、不同的特点

1. 轮轨系统

地铁和轻轨都是利用轨道作为车辆导向运输方式,以钢轮和钢轨(胶轮和钢筋混凝土凹槽)为走行系统的交通方式。

(1)钢轨选用原则上应以轨道承受的荷重来区分。虽然轻轨车辆轴重较轻,如我国轻轨样车的轴重只有 100kN,但为了保证客车车辆运行的质量,使钢轨有较长的使用寿命以及适应无缝线路的需要,在正线上宜采用 50kg/m 的钢轨,在车场支线内可采用 43kg/m 的钢轨。上海明珠轻轨线的轨道设备考虑到运营强度和城市环境条件,努力减少运营期间轨道设备的维修,选

用 60kg/m(PD₃ 型)高强度耐磨钢轨。目前我国地铁钢轨均采用 60kg/m 的重型钢轨,只有车场空车运行、速度低的区段,才选用 50kg/m 和 43kg/m 的轻型钢轨,而且地铁和轻轨都趋向于选用重型钢轨,因为重型钢轨不仅能增强轨道的稳定性,减少养护和维修工作量,并能增大回流断面,减少杂散电流。

(2)弹性扣件和减震垫层的作用是固定钢轨正确位置,阻止钢轨纵向和横向位移,防止钢轨倾翻,还能提供适量的弹性,并将钢轨所受的力传递给轨枕或道床承轨台。北京地铁一、二期工程均采用 DTI 型扣件,经过三十几年的试铺使用和地铁运营的实践,扣件状态良好。北京地铁复八线、复兴门至西单段铺设 DTIV 型扣件。上海地铁 1 号线一般减震地段铺设 DT III 型扣件。轻轨线扣件分为轻轨 I 和轻轨 II 型扣件。上海明珠轻轨线选用自行研制的 WJ-2 型分开式大调整量小阻力的弹性扣件,可以使钢轨纵向力与桥梁结构合理匹配。高架轻轨的减震垫层为压缩型橡胶垫板,置放在钢轨和承轨台之间。

(3)轨道结构从运营管理和环境保护方面考虑,城市高架轨道交通不适宜采用有碴轨下基础,多采用弹性支承轨道结构、无枕式整体道床。上海明珠轻轨高架线选用承轨台式新型整体轨下基础。轨枕式整体道床和浮置板式整体道床在地铁工程中广泛应用,因为重量大,会加大桥梁的荷重,增加工程造价,故不宜用在高架轻轨线上。

2. 运输量

地铁是特大容量的公共交通工具,轻轨为大容量的交通运输工具,而有轨电车和公共汽车为小容量的交通运输工具。地铁单向高峰每小时载运 30 000 ~ 90 000 人次,轻轨单向高峰平均每小时客运量为 10 000 ~ 30 000 人次,有轨电车和公共汽车单向高峰平均每小时载客量低于 10 000 人次。

3. 线路的规划

(1)轻轨高架线路。轻轨线以高架线和地面线路为主,只有在繁华市区不得已时才采用地下线,以浅埋区间段为宜,一般不设地下车站。轻轨线主要沿街道布线,时而转弯,时而高架或入地,线路的曲率半径小,坡度大。根据我国城市的特点和车辆的技术条件,建议正线运行速度以 $v \leq 35\text{km/h}$,平曲线最小曲率半径 $R_{\min} = 100\text{m}$,特殊地段可以采用半径 $R = 50\text{m}$,最大坡度 $i_{\max} = 60\text{‰}$ 。

(2)地铁线路。早期的地铁,大部分线路都设在地下,自 70 年代以来,地铁吸收了轻轨的一些技术优点,并且为了减少造价,只是在市区建筑物密集的地段设在地下,在市郊结合部和郊区,在建筑场地和环境允许的情况下,线路和车站均建在地面和高架上。地铁线路沿主要交通干道布线,在商业、文化、政治中心和交通枢纽附近布置地下车站。由于地铁速度快,运量大,为了减少轮轨的磨耗,一般情况下地下铁道正线最小曲率半径为 300 ~ 600m,特殊地段为 250 ~ 300m。北京地铁一期特殊地段最小曲率半径为 200m,但钢轨磨耗严重。地铁二期最小曲率半径为 250m,磨耗情况尚可,在曲率半径 $R \geq 300\text{m}$ 的线路上,未发现不正常磨耗现象。地铁由于高密度行车和大运输量,为了保证行车的安全正点,原则上要求列车失去部分(最大可达到一半)牵引动力的条件下,仍能用另一部分牵引力将列车从最大坡度上启动,为此最大坡度阻力及各种附加阻力之和不宜大于列车牵引力的一半。我国地铁设计规范规定,正线最大坡度采用 30‰,困难地段为 35‰,一般重车的最大坡度值为 40‰ ~ 45‰,隧道线路要满足纵向排水要求,最小坡度一般不宜小于 3‰。

4. 车辆及其编组

轻轨车辆较地铁车辆新颖,有单节四轴车、双节单铰六轴车、三节双铰八轴车。车辆间采

用铰接,可使车辆节间贯通,有利于乘客均匀分布及增加载客量,每组车可以单行,也可以联挂编列,可以通过小的曲率半径($R = 25\text{m}$)和大坡度($6\% \sim 7\%$)地段,适应能力强。

北京地铁使用的车辆是由长春客车厂生产的,车体由普通碳素钢构成,车辆较重,车身防腐性能差,很难满足高密度行车的需要。列车在启动和制动时,纵向冲击感明显,由于电阻发热,又没有制动装置,所以能耗较大。

上海地铁1号线引进德国80年代水平的铝合金车体整车,具有较好的防腐蚀性能,重量较轻,能耗不高(比北京地铁车辆可节能20%左右)。车辆传动变控方式和制动方式采用较先进的风冷(GTO)斩波调压技术,并有空气制动、电阻制动和再生制动装置,可满足高密度行车间隔短的需求。还配备有模拟制动的自动运行装置,远期可实现自动驾驶。由于空气干燥和滤清装置技术性能良好,可保证制动和车门开关控制等元件正常使用。

90年代末期,上海地铁2号线和广州地铁1号线引进了德国制造先进的地铁车辆,车辆的传动控制系统已改为当今最先进的交流变频调压(VVVF)传动技术,与其相匹配的也都是技术先进的机电设备。

5. 土建工程

轻轨线区间和车站常建在高架桥上,常规采用上承式T形梁和箱梁预应力结构,也有采用建筑高度较小的槽型梁、下承式脊梁以及超低高度的板式结构。轻轨高架桥的墩台形式常用的有倒T形桥墩、T形桥墩、双柱式桥墩和Y形桥墩。轻轨高架桥系永久性城市建筑,设计中应考虑结构在制造、运输、安装及运营过程中应具有规定的强度、刚度及稳定性,且要求施工简便快捷,对城市交通干扰少,并考虑城市景观,结构寿命应按50年以上考虑。高架桥的总体设计中,下部结构应具有足够的强度、稳定性,以避免在荷载作用下的过大位移和转动。桥梁下部结构的造型对整个桥梁结构的设计方案有较大影响,在桥梁美学方面具有独特的功能,合理地选型能使上下部结构协调一致,轻巧美观,并能使轻轨高架桥与城市环境和谐、匀称,使人有一种赏心悦目的感觉。

轻轨车站包括车站进出口、售票室和其他用房,高架车站的站房,应尽量布置在地面,以降低工程造价,站房也可以利用桥下空间或者利用街道两侧空地、绿化带、街心公园布置。跨越设施及垂直交通、乘客越线、行人过街和垂直交通应综合考虑,高架车站应尽量利用桥下空间解决跨越的功能。

高架线的垂直交通布置,通常为两种方式:一种为街道两侧布置垂直交通,经天桥进入站台,即天桥进出方式;另一种是利用桥下空间,单跑楼梯通向休息平台,再经由双跑楼梯走向两侧高架站台,或直接通向岛式站台,即桥下进出式。两种方式各有优缺点,应根据高架桥所处地形条件、道路条件及景观要求综合考虑。

车站设施较简单,地面车站上主要建筑是装有风雨篷的站台,其高度与车厢地板面相当,有利于乘客上下,减少停顿时间。上海明珠轻轨线高架车站选用轻型钢网架顶盖结构,上盖彩钢板,造型新颖别致。

设置在地下的地铁车站和区间隧道,结构复杂,施工困难。软土层中浅埋地铁车站多为两层三跨框架结构,大多采用明挖法,市区为减少施工干扰也有采用盖挖法和逆作法。岩石当中修建的地铁车站,一般采用钻爆法或者新奥法施工,结构形式多为拱形、搭拱形和多跨拱形。区间隧道施工方法视地质条件的不同而异,软土地区多为盾构法施工,钢筋混凝土管片在盾壳掩护下拼装成圆形隧道。在岩石地质情况下,依照技术经济条件可以采用岩石掘进机(TBM)机械化施工,也可以采用新奥法等施工方法。深埋地铁车站和隧道,需借助三圆、多圆异形盾

构和其它特殊性能的隧道掘进机。

6. 振动和噪声的控制

地面和轻轨高架线上运营的列车,需加强消音和减震的防护措施。在车辆选择上采用“弹性车辆”,在吸收冲击中能起主要作用。轮上装有“旋转圆盘”,可以吸收车辆通过曲线时的噪声。在轮对与转向架之间,有橡胶弹簧装置,可吸收三个方向以上的自由振动。在轨道上除采用长距离无缝线路外,还设有橡胶弹性垫层减少噪声及振动传递,在轨道的两侧还设置了吸音挡板。国外对轻轨交通噪声控制要求是车内为 67 ~ 70dB;车速在 50km/h 时,两侧 7.5m 的距离以外控制在 76 ~ 80dB 范围内,小于公共汽车噪声。地铁车站和线路深埋于地下,振动噪声对于外界的干扰较少,只要做好车厢内的减震和减噪即可。

7. 速度和正点率

地铁和轻轨线通常实行全隔离式或大部分隔离的措施,列车运营受外界干扰少,正点率高。国内地铁列车最高行驶速度为 120km/h,地铁的运营速度为 30 ~ 40km/h。轻轨线路受坡度、转弯半径等限制,最大行驶速度 45km/h,运营速度 25 ~ 30km/h。

8. 供电方式

由城市电网对地铁和轻轨系统供电分为:集中式、分散式、混合式。沿线所有用电负荷通过沿线变电所,形成一个完整的供电网络。内部供电系统分为三部分:主变电所、牵引变电系统和变配电系统,其中牵引变电系统为地铁运行提供动力。北京、天津地铁采用走行轨供电方式,也即所谓的第三轨供电;上海、广州地铁采用架空接触网供电。新建的轻轨交通,电压制式应按国际标准 DC750V 电压级选用,并采用架空线接触网的馈电方式。

9. 通风、空调和采暖

轻轨交通的地面、高架线路和车站不需要专门的通风设备。北方寒冷地区需考虑高架车站和运营车厢的采暖。南方炎热地区,则要采用空调设备来保持车站和车厢内有适宜的温度和湿度。

地铁在运营中将产生大量的热量和废气,大量的客流集中疏散也要消耗新鲜空气,排出 CO₂。地铁的车站和区间线路均被围岩介质严密地包裹,热量散发不出,地面新鲜空气和内部空气无法交换。为了保证乘客旅行的舒适度,区间隧道除利用列车行驶的活塞风外,不能满足空气对流交换时,还要增加机械进排风。车站和车厢内采用空调,可保证站内和车厢内一定的空气温湿度。车站站台和区间隧道之间还装有屏蔽门系统。地铁的通风排烟设施,对于一旦发生的火灾的救护也是十分必要的。

10. 信号

大部分轻轨系统可以在没有信号装置的情况下安全行驶,但在道口、曲线地段、隧道内或了望距离受到限制的地段,应设置信号,以保证行车的安全。如果行车的速度快,密度大,就应设置自动闭塞信号系统。

地下铁道内信号系统应尽量选用列车自动控制系统——现代信号系统。由于条件限制或初期运量不足等原因,也可采用由信号、联锁闭塞、机车信号、自动停车、调度集中等设备组成的中等水平传统信号系统。现代信号系统即列车自动控制系统(ATC)主要由三个子系统组成:①列车自动防护系统(ATP);②列车自动驾驶(ATO)子系统;③列车自动监控(ATS)子系统。当前,我国在地铁信号系统方面与发达国家有一定的差距,主要设备尚需依靠进口。北京地铁引进了英国西屋信号公司的列车自动控制系统,上海地铁引进美国的通用信号列车自动控制系统,广州地铁引进了德国西门子等公司研究的通用连续式列车控制系统 L_{ZB}-80。因此,尽

快实现地铁、轻轨信号系统的国产化是当务之急。

11. 通讯

通讯系统是组织轨道交通运输生产的神经中枢,为其它自动化系统提供通道。它服务于行车调度、运营管理,提供快速可靠的指挥手段和实施科学管理的方法。通讯网按传输媒介不同可分为有线通讯、无线通讯;按传输对象不同可分为语音、数据和图像通讯;按使用性质不同又可分为专用通讯、公务通讯、广播和闭路电视等。地下铁道比轻轨客运量大,行车速度快,公务联系密切频繁,如果没有一套行车专用指挥系统,就必须设置独立的内部通讯网。地铁建设周期长,一旦建成后再进行改造比较困难,因此新建地下铁道工程应优先采用数字通讯技术。地下铁道一旦发生火灾和其它灾害事故时,需迅速传达信息下达指令,单独设一套防灾救灾通讯系统势必增加更多投资,长期不使用设备也难以保持良好的状态。因此在设置地下铁道路控自动电话、调度电话、区间电话和列车无线电话等通讯设备时,既要考虑平时使用,又要兼顾事故发生的非常情况下的应用。

12. 给排水系统

地铁和轻轨给水水源选择应优先选用城市自来水,排水方式优先利用城市排水系统,地面和高架轻轨排水设施类似于地面铁路工程。

地下铁道宜采用生产、生活和消防共用的给水系统,这样不仅可以节省给水管道,降低工程造价,而且使用管理也比较方便,如北京地铁、天津地铁、青岛和南京地铁。根据经济比较,也可采用生产、生活与消防用水分开的给水系统,如上海地铁1号线的地铁消火栓给水系统就是单独设置的。

地铁的排水系统可分为:结构渗漏水排水系统、消防及冲洗废水系统、粪便及生活污水排水系统、隧道洞口及露天出入口雨水排水系统等。

13. 灾害防护

地铁和轻轨在施工和运营期间都可能受到火灾、洪水、台风、地震、滑坡、泥石流、雷击、严寒、大雪等自然灾害的影响,也可能受到战争、人为工程事故危害,给生命和财产造成极大损失。1969年11月11日,北京地铁因电气故障,使电气机车发生火灾,浓烟聚集,由于排烟设备不完善,未能形成有组织的排烟,因此烟气四处扩散,并从口部逸出,给人员的疏散和救援带来极大困难,多人被烟气熏倒,200多人中毒受伤。世界各国地铁因火灾造成的灾害时有发生,因此地下铁道应特别注重火灾防护,要设置可靠的火灾自动报警系统和自动消防、通风排烟系统。地下铁道对于战时空袭有得天独厚的优越条件,有的国家也结合人防工程要求设计地铁车站和隧道。这样一来,战时地下铁道不但可以疏散客流,而且还可当做战时人员的掩蔽部,可谓一举两得。只有在地震等级高、震源离地铁工程较近时,地震才对地铁车站和隧道产生损害,例如1997年阪神大地震,造成大阪和神户多处地铁车站和隧道受到不同程度严重破坏。地震对轻轨高架桥墩台剪切破坏更严重,因此高架轻轨必须考虑抗震设防,采取相应构造措施。

14. 自动售检票系统

地铁和轻轨均需要自动售检票系统(Automatic Fair Collection System,简称AFC)。地铁因客运量大,行车间隔短,运行速度快,世界各国地铁大都采用自动售检票系统,而轻轨线售检票系统则不像地铁要求那样高。

地铁售检票系统有开放式和封闭式两类。开放式系统在地铁站台上不设检票口闸门,敞开的通道直通站台,上车前或在车上注销车票,随机查票。这种售检票系统投资少,紧急疏散