

DITIE GONGCHENG

JIANZAO JISHU

地铁工程 建造技术

姜晨光 ◆ 主编



化学工业出版社

本书从实用的角度出发,系统地阐述了地下铁道工程建造的基本理论和技术。其中包括地铁路基与轨道、地铁土建施工、地铁工程施工监测、地铁工程验收、地铁工程运营监测、地铁工程养护等内容。并给出了12个工程范例,对地下铁道工程建设活动和相关科学研究工作具有一定的指导意义和参考价值。

本书可供各级政府建设主管部门、交通主管部门、地铁管理部门、地铁建设部门、地铁工程设计及施工人员、地铁工程建设与管理人人员、工程勘察工作者、地铁工程研究者、土木工程施工人员、土木工程企业管理人员作为工作或学习中的参考,本书也可以作为地铁工程的工具书使用,还可以作为土木工程专业、道路与铁道工程专业研究生或高年级学生的课外辅助教材或阅读材料。

图书在版编目(CIP)数据

地铁工程建造技术/姜晨光主编. —北京:化学工业出版社, 2010.2

ISBN 978-7-122-07235-1

I. 地… II. 姜… III. 地下铁路-铁路工程-工程施工 IV. U231

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第227113号

责任编辑:董琳

文字编辑:余纪军

责任校对:顾淑云

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张14¼ 字数380千字 2010年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前言

地铁是国际公认的解决大城市交通问题的首选技术，以其运量大、速度快、时间准、能耗低、污染少和安全舒适的特点赢得了世界各大城市的青睐。我国大城市的交通堵塞和拥挤问题历来都是令城市管理者和老百姓头痛的问题，解决这一问题的惟一出路就是发展地铁（或叫轨道交通）。我国已建成运营的地铁线路已接近 1000 公里，还有 1000 多公里的地铁线路正在建设之中，地铁建设的春风正在席卷神州大地，可以说我国的城市交通已经进入地铁时代。目前，我国 100 万人口以上的城市已达 43 个，这些大城市、特大城市都面临着建设地铁和继续增建地铁的问题。

地铁工程是一个涉及多学科的工程科学技术，经验性极强。地铁工程投资大、难度大、风险大，既有理论问题更有实践经验问题。从世界第一条地铁诞生到今天，地铁已走过了近 150 年的历程，国外发达国家在地铁建设领域已经积累了非常丰富的经验，而我国则相对稚嫩，因此，目前国内地铁建设中出现的些许问题也就不足为怪了。笔者在多年的地铁建设咨询工作中，深感地铁修建的不易，只有不断地积累经验、不断地深入研究其科学规律才能把握住地铁工程的脉搏，才能确保地铁建设的顺利进行和地铁运营的长治久安，鉴于此，不揣浅陋撰写了此书。

本书是笔者在江南大学从事教学、科研和工程实践活动的经验积累之一，也是笔者近 30 年土木工程生涯的部分心得。本书的撰写借鉴了国内外大量的实际工程资料，吸收了许多前人及当代人的宝贵经验和认识，也包含了笔者对地铁工程的感悟和认识以及实践积累的研究成果。希望本书的出版能有助于地铁建造技术的发展和提高，为我国城乡建设的健康可持续发展做出贡献。

全书由江南大学姜晨光主笔完成，无锡市建设局顾持真、朱焯昕、何跃平、孙清林、冯伟洲、姜科、宋艳萍、成美捷、夏正兴、范春雨、沈建；莱阳市规划建设管理局王世周、李振源、盖玉松、王秀峰、吕振勇、姜奕峰、张晓勤、宋林松、时永宝、姜同阳；莱阳市房产管理局宫树本、修金荣、姜子明、董风波；烟台市莱阳中心医院郭培强、王凤娟；中铁十四局集团王守慧、刘泉维、周先民、李振刚、尚清喜；江南大学姜忠平、姜勇、张大林等同志（排名不分先后）参与了部分章节的撰写工作。

初稿完成后，李锦铭、王浩闻、苏文磬、徐至善、黄建文五位教授级高工提出了不少改进意见，为本书的最终定稿做出了重大的贡献，谨此致谢！

限于水平、学识和时间关系，书中内容难免存在疏漏和不妥之处，敬请读者批评与指正。

姜晨光

2009 年 9 月于江南大学

目 录

第 1 章 地铁路基与轨道	1
1.1 地铁布置与路基	1
1.2 地铁轨道强度计算	5
1.3 无缝线路	8
1.4 地铁轨道结构及部件	9
1.5 地铁轨道几何形位	21
1.6 地铁路基工程施工	27
1.7 地铁有碴轨道工程施工	59
第 2 章 地铁土建施工	77
2.1 地铁土建施工的特点	77
2.2 地铁矿山法施工	77
2.3 地铁明挖法施工	82
2.4 地铁盖挖法施工	86
2.5 地铁暗挖法施工	89
2.6 地铁盾构法施工	94
2.7 地铁沉管法施工	103
2.8 地铁冻结法施工	106
2.9 地铁地下连续墙法施工	109
2.10 地铁掘进机法施工	116
2.11 地铁隧道施工组织设计与施工管理	116
第 3 章 地铁工程施工监测	126
3.1 地铁工程施工监测的特点	126
3.2 地铁工程沉降监测	126
3.3 地铁穿越工程监测	128
3.4 地铁浅埋暗挖法施工监测	130
3.5 地铁盾构法施工监测	134
3.6 地铁明(盖)挖法施工及竖井施工监测	138
3.7 地铁工程监测的基本原则	143
3.8 地铁工程施工测量	148
第 4 章 地铁工程验收、运营监测与养护	152
4.1 地铁工程验收的基本原则	152
4.2 地铁土建工程验收	153
4.3 地铁设备工程验收	162
4.4 地铁工程运营监测	164

4.5 地铁隧道的养护	165
-------------------	-----

第5章 地下铁道工程范例 167

5.1 梁溪市轨道交通建设及线网规划环境影响评价报告	167
5.2 长春市轨道交通线网规划方案简介	174
5.3 香菱地铁明挖深基坑与暗挖隧道施工监测	176
5.4 太行地铁超浅埋暗挖平顶直墙结构施工技术	184
5.5 邛山地铁矿山法暗挖区间分区防水设计与施工	186
5.6 南岭地铁复合地层盾构施工技术	188
5.7 东海市地铁4号线开平门站深基坑施工	192
5.8 长白山地铁天池站主体围护结构锚索设计与施工	197
5.9 祁连山地铁昆仑区间盾构隧道施工	201
5.10 银河湾地铁软流塑地层竖井施工	204
5.11 百脉泉地铁竖井沉井法施工	208
5.12 幕府山市轨道交通3号线建设工程环境影响报告	211

参考文献 220

1	.....	1
2	.....	2
3	.....	3
4	.....	4
5	.....	5
6	.....	6
7	.....	7
8	.....	8
9	.....	9
10	.....	10
11	.....	11
12	.....	12
13	.....	13
14	.....	14
15	.....	15
16	.....	16
17	.....	17
18	.....	18
19	.....	19
20	.....	20
21	.....	21
22	.....	22
23	.....	23
24	.....	24
25	.....	25
26	.....	26
27	.....	27
28	.....	28
29	.....	29
30	.....	30
31	.....	31
32	.....	32
33	.....	33
34	.....	34
35	.....	35
36	.....	36
37	.....	37
38	.....	38
39	.....	39
40	.....	40
41	.....	41
42	.....	42
43	.....	43
44	.....	44

1.1 地铁布置与路基

1.1.1 地铁工程设计的基本内容

地铁工程设计的内容主要有以下4个方面:

- ① 从经济的角度论证所设计线路在交通运输系统中的地位、作用和效益,并论证其可行性;
- ② 全线线路的平面和纵剖面设计;
- ③ 路基、线路、上部建筑、桥梁、隧道、涵洞等工程设计;
- ④ 车站、机务、给水、供电、地铁信号等项目的设计。

地铁选线设计是整个地铁工程设计中关系全局的总体性工作。选线设计的主要工作内容包括以下3点。

- ① 根据国家政治、经济和国防需要,结合线路经过地区自然条件、资源分布、经济发展等情况,规划线路的基本走向(即方向),确定地铁的主要技术标准。
- ② 根据沿线地形、地质、水文、交通、环境等自然条件设计线路空间位置。
- ③ 科学合理布置线路上的各种建(构)筑物(比如车站、桥梁、隧道、涵洞、路基、挡墙等),并确定其类型和大小,达到总体上互相配合、整体上协调优化、全局上经济合理的目的。

线路空间位置设计的主要内容是线路的平面设计与纵断面设计。目的是在保证行车安全和平顺前提下,兼顾工程投资和运营费用关系的平衡。所谓“行车安全和平顺”是指地铁列车行车过程中不脱钩、不断钩、不脱轨、不途停、不运缓、乘坐舒适等。这些要求在设计规范中通常都有详细的做法说明,设计时必须遵守。

地铁线路平面是指地铁中心线在水平面上的投影,它由直线段和曲线段组成。线路平面设计的基本要求包括以下3点:

- ① 为节省工程费用和运营成本,一般应力求缩短线路长度;
- ② 为保证行车安全和平顺,应尽量采用较长直线段和较大的圆曲线半径。线路平面的最小半径根据地铁等级、行车速度和行车条件等综合确定;
- ③ 为保证列车平顺地从直线段驶入曲线段,一般在圆曲线的起点和终点处设置有缓和曲线。设置缓和曲线的目的是使车辆的离心力缓慢增加以确保行车的平稳性,同时使外轨超高以增加向心力,从而与离心力的增加相平衡。

地铁纵断面是指地铁中心线在立面(铅垂面)上的投影,是由坡段及连接相邻坡段的竖曲线组成的。坡段的特征通常用坡段长度和坡度值表示。

地铁定线就是在地形图上或地面上选定线路的走向,并确定线路的空间位置。通过定线,确定各有关设备和建(构)筑物的分布与类型。这些设备与地铁工程的运营成本直接相关,是一项综合性工程,它通常要考虑以下4个因素:

- ① 设计线路的意义和与周边其他建设活动的配合关系;
- ② 设计线路的经济效益和运量要求;

- ③ 设计线路所处的自然环境条件；
- ④ 设计线路主要技术标准和施工条件等。

1.1.2 地铁路基

地铁路基是承受并传递轨道重力及列车动态作用的结构，是轨道的基础，是保证列车正常运行的重要构筑物，见图 1-1 和图 1-2。

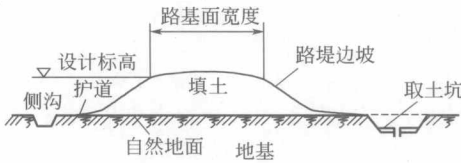


图 1-1 填方路基



图 1-2 挖方路基

路基由路基体和附属设施两部分组成。路基面、路肩和路基边坡构成路基体。路基附属设施是指为保证路肩强度和稳定而设置的排水设施、防护设施、加固设施等，排水设施包括排水沟等，防护设施主要是植树种草等，加固设施主要有挡土墙、扶壁支挡结构等。路基横断面是指垂直于线路中心线的路基。形式有路堤型、半路堤型、路堑型、半路堑型、不填不挖型等。

路肩稳定性是指路基抵抗因列车动态作用及各种自然力影响而出现的道碴陷槽、翻浆冒泥、路基剪切滑动与挤起等现象的能力。主要应考虑的因素包括路基的平面位置和形状、轨道类型及其上的动态作用、路基体所处的工程地质条件、各种自然应力的作用等。地铁设计中必须对路基的稳定性进行验算。

1.1.3 地铁线路设计的基本要求

地铁线路按其运营中的作用分为正线、辅助线和车场线。地铁线路在城市中心区宜设在地下，在其他地区条件许可时可设在高架桥或地面上。地铁地下线路平面位置和埋设深度应根据地面建筑物、地下管线和其他地下构筑物的现状与规划、工程地质及水文地质条件、采用的结构类型和施工方法以及运营要求等因素经技术经济综合比较后确定。地铁每条线路应按独立运行进行设计，地铁线路间及与其他交通线路间的相交处应立体交叉。地铁线路间应根据需要设置联络线，联络线宜采用单线。地铁车站应设置在客流量大的集散点和地铁线路的交会点，车站间的距离应根据实际需要确定（市区控制在 1km 左右、郊区不宜超过 2km）。地铁轨道设计应保证列车安全、平稳、快速运行，其构造应具有足够的强度、稳定性、弹性和耐久性，并应满足绝缘、减振、防锈等要求。

地铁线路平面的最小曲线半径应满足表 1-1 的规定。在正线上当曲线半径等于或小于 2000m 时圆曲线与直线间应根据曲线半径及行车速度按表 1-2 设置缓和曲线。对道岔附带曲线可不设缓和曲线和超高，但其曲线半径不得小于道岔导曲线半径。地铁线路一般不宜采用复曲线（困难地段有充分技术依据时可采用复曲线），当两圆曲线的曲率差大于 1/2000 时应设置中间缓和曲线（其长度应根据计算确定并不得短于 20m），正线及辅助线的圆曲线最小长度不宜小于 20m（困难情况下不得小于一个车辆的全轴距）。正线及辅助线上两相邻曲线间的夹直线长度不应小于 20m，车场线上的夹直线长度不得小于 3m。车站站台段线路应设在直线上（困难地段可设在曲线上但半径不应小于 800m）。道岔应设在直线地段，道岔端部至曲线端部距离不宜小于 5m（车场线可减少到 3m）。道岔宜靠近车站设置，但道岔基本轨端部至车站站台端部距离不得小于 5m。正线和辅助线上宜采用 9 号道岔，车场线应采用不

大于7号的道岔，设置交叉渡线两平行线的线间距对9号道岔为4.6m或5.0m，对6号与7号道岔可采用4.5m或5.0m。折返线有效长度远期为列车计算长度加24m（不包括车挡长度）。

表 1-1 最小曲线半径

线路	一般情况/m	困难情况/m
正线	300	250
辅助线	200	150
车场线	110	80

表 1-2 缓和曲线长度

		m												
$v/(km/h)$	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	
R/m	2000	30	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	1500	40	35	30	25	20	20	20	20	—	—	—	—	
	1200	50	40	35	30	25	20	20	20	—	—	—	—	
	1000	60	50	45	35	30	25	20	20	20	—	—	—	
	800	75	60	55	45	35	30	30	25	20	20	—	—	
	700	75	70	65	50	40	35	30	25	20	20	—	—	
	600	75	70	70	60	50	45	35	30	20	20	20	—	
	500	—	70	70	65	60	50	45	35	20	20	20	20	
	450	—	—	70	65	60	55	50	40	25	20	20	20	
	400	—	—	—	65	60	60	55	45	25	20	20	20	
	350	—	—	—	—	60	60	60	50	30	25	20	20	
	300	—	—	—	—	—	60	60	60	35	30	25	20	
	250	—	—	—	—	—	—	60	60	40	30	25	20	
	240	—	—	—	—	—	—	—	—	40	35	30	20	
	230	—	—	—	—	—	—	—	—	40	35	30	25	
	220	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	30	25	
210	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	30	25		
200	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	35	25		
190	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	35	30		
180	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	35	30		
170	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	30		
160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	30		
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	35		

注：表中R为曲线半径（m）；v为设计行车速度（km/h）；L为缓和曲线长度（m）。高速行车时参考铁路设计标准。

地铁正线最大坡度一般不得超过3%，困难地段可采用3.5%，辅助线最大坡度一般不得超过4%，以上规定均不包括各种坡度折减。隧道内正线最小坡度不宜小于0.3%（困难地段在确保排水的条件下可采用小于0.3%的坡度），隧道内的车站站台段线路坡度宜采用0.3%（困难时可设在0.2%或不大于0.5%的坡道上）。地面和高架桥上的车站站台段线路宜设在平道上（困难时可设在不大于0.5%的坡道上），车场线可设在不大于0.15%的坡道上。道岔宜设在不大于0.5%的坡道上（困难时可设在不大于1%的坡道上）。车站站台段线路应设在一个坡道上，地下车站宜接近地面设置（有条件时宜布置在纵断面的凸型部位上）

并设置合理的进、出站坡度。隧道内的折返线和存车线应布置在面向车挡的下坡道上（其坡度宜为 0.2%）。当两相邻坡段的坡度代数差等于或大于 0.2% 时应设竖曲线连接，竖曲线的半径应符合表 1-3 的规定。线路纵向坡段长度不宜小于远期列车计算长度并应满足相邻竖曲线间夹直线长度的要求（其夹直线长度不宜小于 50m）。车站站台和道岔范围内不得设置竖曲线（竖曲线离开道岔端部的距离不应小于 5m）。

表 1-3 竖曲线半径

线别		一般情况/m	困难情况/m
正线	区间	5000	3000
	车站端部	5000	2000
辅助线			2000
车场线			2000

地铁正线及辅助线应采用 50kg/m 及以上的钢轨，车场线应采用 43kg/m 的钢轨。钢轨接头应采用对接，曲线内股应采用现行标准的缩短轨（当采用缩短轨接头对接有困难时可采用错接，其错开距离不应小于 3m）。正线地段和半径为 250m 及以上的曲线地段应铺设无缝线路，在地面线及高架线上铺设无缝线路可按现行有关铁路规范执行。两相邻道岔间插入短钢轨的最小长度应满足表 1-4 的规定。正线及辅助线上的钢轨应设轨底坡（其坡度为 1/40），但在道岔和道岔间不足 25m 的直线段不应设轨底坡。混凝土整体道床钢轨扣件的形式应通过技术经济比较确定，并应采用构造简单、具有足够扣压力和耐久的弹性扣件，并能满足调整轨距和水平的要求，轨下应采用绝缘弹性垫层。

对辅助线和车场线半径等于及小于 200m 的曲线地段的轨距应按标准轨距加宽，其加宽值应符合表 1-5 规定。辅助线的曲线轨距加宽应在缓和曲线范围内或在直线段递减，车场线的轨距加宽应在直线段递减。线路的曲线超高值计算公式为

$$h = 11.8v_c^2/R \quad (1-1)$$

式中 h ——超高值，mm；

v_c ——列车通过速度，km/h；

R ——曲线半径，m。

圆曲线的最大超高值不得超过 120mm，当设置的超高不能满足行车速度要求时允许有不大于 0.4m/s² 的未被平衡横向加速度。混凝土整体道床的曲线超高采取外轨抬高超高值的一半和内轨降低超高值的一半的办法设置，碎石道床的曲线超高采取外轨抬高超高值的办法设置。曲线超高值应在缓和曲线内递减顺接，无缓和曲线时应在直线段递减顺接，超高顺坡率不宜大于 0.2%（困难地段不应大于 0.3%）。轨下基础的结构形式应通过技术、经济比较确定。地铁隧道内应采用混凝土整体道床，其强度不低于 C30，需要加强地段应增设钢筋。高架线宜采用新型轨下基础，地面线宜采用轨枕碎石道床。矩形隧道内混凝土整体道床的轨道建筑高度不宜小于 500mm，圆形隧道的轨道建筑高度不宜小于 700mm，道床面应有不小于 3% 的横向排水坡，道床面至承轨台间的距离宜为 30~40mm。采用钢筋混凝土短轨枕式混凝土整体道床时短轨枕宜在工厂预制，混凝土强度等级应大于 C25，底部宜伸出钢筋以加强与混凝土整体道床的连接。采用连续支撑混凝土整体道床时应采用整体灌注式。混凝土整体道床排水沟的纵向坡度可与线路坡度一致，水沟横断面应根据相关因素确定。隧道内正线及辅助线的直线段和半径大于或等于 400m 的曲线地段每公里铺设短轨枕数为 1680 对，半径 400m 以下的曲线地段和大坡道上每公里铺设短轨枕数为 1760 对，地面线的碎石道床直线地段和半径大于或等于 400m 的曲线地段每公里铺设轨枕数为 1680 根，半径为

400m以下的曲线地段每公里铺设轨枕数为1760根,车场线每公里铺设轨枕数为1440根。碎石道床的防爬装置应按国家现行有关规范规定设置。隧道内道岔区宜采用钢筋混凝土短轨枕式混凝土整体道床,地面线和车场线道岔区可采用木枕或钢筋混凝土轨枕碎石道床。道岔整体道床的扣件在导曲线和一般部位应与隧道内正线扣件一致,其他部位扣件可另行设计。隧道内混凝土整体道床与洞外碎石道床相连时衔接处应设弹性过渡段。地面线的直线段碎石道床顶面宽度为3m,车场线为2.9m,半径等于及小于400m的曲线地段外侧应加宽0.1m,铺设无缝线路地段及安装接触轨一侧也应适当加宽。碎石道床的最小厚度在直线段轨枕下应为300mm,车场线轨枕下应为250mm。地面线的路基面宽度、路拱形状、路堤、路堑边坡和高度及排水设施等设计应按国家现行的《铁路路基设计规范》规定执行。地铁线路上应设百米标、坡度标、制动标、圆曲线和缓和曲线始点及终点标、曲线标、竖曲线始点及终点标、水准基点标、限速标、警冲标、停车位置标等标志。隧道内百米标、限速标、停车位置标应设在行车方向的右侧,警冲标应设在两会合线间(其位置应根据设备限界及安全量确定),隧道外的标志可按国家现行有关规范规定设置。

表 1-4 道岔间插入短钢轨的最小长度

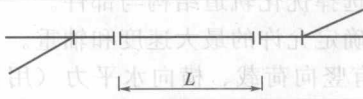
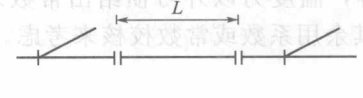
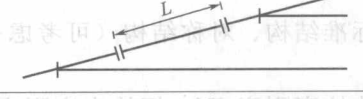
道岔位置	线别	插入短钢轨长度(L)	
		一般地段/m	困难地段/m
	正线及辅助线	12.5	6.25
	车场线	4.5	0
	正线及辅助线	6.25	4.5
	车场线	4.5	3.0
	正线	6.25	4.5
	辅助线	6.25	3.0
	车场线	4.5	3.0

表 1-5 辅助线和车场线曲线轨距加宽值

曲线半径/m	加宽值/mm
200~151	5
150~101	10
100~80	15

1.2 地铁轨道强度计算

地铁轨道结构力学分析是设计、验算和改进轨道结构的理论基础,主要包括以下3方面内容。

① 整体结构力学分析 应用力学基本理论结合轮轨相互作用原理,分析轨道在机车车辆不同运营条件下所发生的动态行为(即它的内力和变形分布)。

② 部件结构力学分析 对主要部件进行强度核算,以便对轨道薄弱环节进行加强,达到优化轨道工作状态,提高轨道承载能力,最大限度地发挥轨道的潜能并提高效益的目的。

③ 轨道结构参数最佳匹配设计 为轨道结构的合理配套和设计开发新型轨道结构类型及材料提供理论依据。

轨道强度计算包括静力计算(不考虑动力荷载影响)、准静态计算(利用静态基本原理,考虑一定的动力影响)、动力计算3方面内容。

静力计算主要利用连续弹性基础理论和连续弹性点支撑理论,两种理论在变形等计算结果上相差不大,但弯矩计算常常会相差9%~10%,前者计算过程简单、使用较多,后者过程繁琐、使用较少,应用第二种方法必须具备连续梁的三弯矩方程解算能力、懂得差分方程和有限元方法。

准静态计算在静力计算基础上考虑了动力增值系数。动力增值系数是通过轨道的动力响应试验借助数理统计分析获得的,我国对 $v_{\max}=120\text{km/h}$ 情况下的系数具有系统、完整的研究成果(对高速条件下的研究比较欠缺,多借鉴国外技术参数)。

地铁轨道结构力学分析的目的有以下2个方面。

① 荷载条件一定时,从轨道强度的角度选择优化轨道结构与部件。

② 轨道结构一定时,从轨道强度的角度确定允许的最大速度和轴重。

地铁轨道结构力学分析考虑的荷载主要有竖向荷载、横向水平力(用系数来考虑)、纵向水平力(包括启动、制动,CWR纵向力等,温度力以外习惯给出常数)。为简化计算过程,在轨道计算分析中常以竖向荷载为主,其余用系数或常数校核来考虑。

1.2.1 连续弹性基础梁理论

连续弹性基础梁理论的基本假设是采用标准结构、对称结构(可考虑一根轨)、钢轨铺在连续基础上(不考虑钢轨重量)。

连续弹性基础梁理论的计算参数包括钢轨抗弯刚度 EI 、钢轨支座刚度 D (钢轨支座顶面单位下沉时需要加于支座顶上的力)、刚比系数 K_0 (轨道系统特性参数)、轨道刚度 K_1 (钢轨产生单位下沉所需的竖向荷载)、道床系数 C (表征道床与路基弹性特征的系数,指道床表层(顶面)产生单位下沉必须给道床顶面施加的单位面积的力)、钢轨支点弹性系数 D' (表征钢轨支点弹性特征,指钢轨支点产生单位下沉时必须在支点上施加的力(扣件及枕下基础的等效刚度(串联情况下))、钢轨基础弹性系数 K_2 (表征钢轨连续基础的弹性特征,指钢轨基础产生单位下沉时施加给单位长度基础上的力)。

连续弹性基础梁理论多根据材料力学原理,通过求解微分方程实现,轮载群作用下的计算过程为迭代、循环、叠加等。

1.2.2 轨道动力响应的准静态计算

目前,所谓结构动力分析准静态计算,名义上是动力计算,实质上仍是静力计算。即静态计算加动力增值函数的准静态计算方法。我国通过对大量实测数据的数理统计得到 $v \leq 120\text{km/h}$ 情况下的动力增值系数包括速度系数 α 和偏载系数 β 。速度系数 α 指列车在直线区间轨道上运行时,由于轮轨间动力效应导致作用在钢轨上的动轮载 P_d 要比静轮载大,其增量随行车速度增加而增大。偏载系数 β (外、里轨都有)指列车通过曲线时,由于存在未被平衡的超高(欠超高或余超高)产生偏载,使外轨或内轨轮载增加,其增量与静轮载的比值称为偏载系数。

日本则采用正常轮重、设计轮重、异常轮重指标进行计算。德国则分动、静载，设定置信度 t 、均方差 s ，借助数理统计原理进行计算。

1.2.3 轨道结构部件的强度计算

1.2.3.1 钢轨强度验算

钢轨应力包括残余应力、基本应力、局部应力和附加应力等。验算钢轨强度时，基本应力包括竖向荷载作用下的动弯应力和因温度变化产生的温度应力。局部应力包括车轮踏面与钢轨接触处产生的接触应力和螺栓孔周围及钢轨截面发生急剧变化处的应力集中。接触应力是由于轮轨接触面积很小出现局部应力的高度集中，大大超过钢轨的屈服极限引起头部压溃、成高低不平的波浪形轨面，而在钢质较脆时会产生头部劈裂和其他种类的钢轨伤损。钢轨常有轨头处易断裂问题，由接触疲劳应力引起，而头受拉不是主要原因。

1.2.3.2 轨枕强度验算

轨枕强度验算通常以弹性基础上的短梁进行，依变形曲线验算弯矩情况（是否开裂、轨枕弯矩）及枕上荷载情况（通过看枕上压力，判断是否会压溃）。木枕抗弯能力好、抗压性能差、弹性好，一般只需验算抗压能力。混凝土枕（抗压强度大）主要验算其抗弯能力。

1.2.3.3 道床与路基面的应力验算

道床与路基面的应力验算通常有 3 个假定：

- ① 道床应力按内摩擦角线性地向下传递；
- ② 不考虑邻枕荷载影响（一个枕两端的互相影响也不考虑）；
- ③ 道床顶面压力是均匀分布的。

1.2.4 整体道床计算

整体道床计算方法依据叠加原理，纵向采用弹性地基叠合梁法，横向采用有限长梁的初始参数法。

1.2.4.1 轮轨主要研究内容与特点

地铁轮轨研究主要考虑振动特性、轮轨动力、不平顺敏感性（敏感波长的变化）、不均匀路基沉降（瞬时、长期）、各种过渡段、车辆本身等因素。

轮轨主要研究内容还包括动力性能及相关参数的测试手段、测试仪器、测试方法与结果的处理等，利用较深的、交叉学科或边缘学科的理论分析探讨应用中的问题（包括滚滑、运动稳定性、参数共振、随机振动、新型数值积分方法等；弹性、塑性、流变性；散体、固体力学；线性、非线性有限元、边界元、杂交元、无限元等），为动力设计或改进结构性能（比如高速道岔）提供依据，在静态、动态理论研究的基础上重新探讨工务维修方法及标准（包括各种速度范围下的不平顺管理；大机养护维修方法等；无缝线路的动态稳定；轨检方法；可靠度设计理论与方法；减振降噪等）。

1.2.4.2 轨道动力学模型

轮轨动力学以轮轨关系为核心，着重研究轮轨相互动态作用及其相关问题，主要包括轮轨接触几何学、轮轨蠕滑理论、轮轨接触振动、轮对运动学、运动稳定性、导向理论等。

轨道动力学的研究模型很多，包括分布参数模型和集总参数模型。分布参数模型包括弹性基础梁模型和弹性点支撑梁模型。弹性基础梁模型包括 Euler 模型和 Timoshenko 梁模型。弹性点支撑梁模型包括单层支撑梁模型和多层支撑梁模型。集总参数模型包括单自由度轨道模型、双自由度轨道模型、多自由度轨道模型。等效集总参数模型是根据一定等效性原则，把一个具有复杂分散参数体系的轨道结构，变换成为一个具有少数自由度的质量-弹簧-阻尼集总参数简化模型。集总参数轨道模型只能用于定性分析轮轨系统动力学问题。

置连续弹性基础梁模型与连续弹性离散点支撑梁模型的不同之处在于前者将轨下基础作为均匀分布的整体地基、地基特性符合 Winkler 假定,后者则把轨下结构描述成为一系列按轨枕间距相隔的离散弹性-阻尼点支撑体系。在低速范围内两种模型的预测结果相差不大,在高速时连续弹性基础梁模型会过高地估计轮轨动力作用,而连续弹性点支撑梁模型所得结果在整个速度范围内均能基本吻合。

Euler 梁模型考虑钢轨的弯曲变形而不考虑其剪切变形。Timoshenko 梁模型引入了梁的剪切应变,并考虑梁的旋转惯性从而使梁的受力分析更加完整,同时,其剪应变参数也便于同现场实测参量相比较。Timoshenko 梁模型理论分析甚为复杂,而 Euler 梁模型因简化了计算过程,故为工程界普遍采用。

单层支撑模型将整个轨下基础在竖向视为一种等效弹性-阻尼支撑方式,而不单独考虑轨枕、道床的作用。双层支撑模型考虑了轨枕的作用,包括轨枕质量、轨下垫层的影响。而三层支撑模型则进一步考虑了道床的动力影响,模型对道床质量、弹性乃至路基弹性的作用等均有充分反映。

1.3 无缝线路

无缝线路是 20 世纪轨道结构最重要的先进成果和进步,是各国优先发展的轨道结构形式。我国 1957 年在铁路上开始正式铺设无缝线路,至今已有 26000km 以上,主要铁路干线均铺有无缝线路。无缝线路依对内部温度应力处理方式的不同,可分为温度应力式、放散温度应力式两种。

温度应力式无缝线路的结构形式是由一根焊接长钢轨及两端 2~4 根标准轨组成,并采用普通接头的形式。无缝线路铺设锁定后,在钢轨内部会产生很大的温度力(其值随轨温变化而异)。温度应力式无缝线路结构简单、铺设维修方便,因而应用广泛。对直线轨道,铺设 50kg/m 和 60kg/m 轨,每公里配 1840 根混凝土枕时,铺设温度应力式无缝线路允许轨温差分别为 100℃和 108℃。

放散温度应力式无缝线路分自动放散式和定期放散式两种,适用于年轨温差较大的地区。自动放散式为消除和减少钢轨内部温度力允许长轨条自由伸缩,在长轨两端设置钢轨伸缩接头,为了防止钢轨爬行,在长轨中部使用特制的中间扣件(可使钢轨在垫板上伸缩,还有消除因列车作用引起爬行的弹簧复原装置)。

定期放散温度应力式无缝线路的结构形式与温度应力式相同。根据当地轨温条件,把钢轨内部的温度应力每年调整放散 1~2 次。放散时松开焊接长钢轨的全部扣件,使它自由伸缩,放散内部温度应力,用更换缓冲区不同长度调节轨的办法(温度不同伸缩区长度也不同)保持必要的轨缝。每次放散应力需耗费大量劳力,作业很不方便。

根据我国无缝线路的发展历程,我国将无缝线路分为普通无缝线路($L=1000\sim 2000\text{m}$)、区间无缝线路($L\leq$ 区间长度)、跨区间无缝线路($L>$ 区间长度并焊连无缝道岔)三类。无缝线路的优点是行车阻力下降 10%~20%、节省能源、延长部件寿命 15%~30%、减少维修费用 20%~35%,适于高速行车,使旅客舒适,振动与噪声降低。

无缝线路的缺点是因钢轨承受巨大温度力会发生断轨(冬天)、跑道(夏天)现象(尤其在刚开始铺设无缝线路时更易发生,一般要求 1 年(一个周期)后交付运营部门),对养护维修要求高(要严格按照轨温进行作业),轨条长(需专用设备与方法来运输、装卸与施工,比如长轨运输车),焊接质量非常关键。无缝线路先工厂接触焊(电阻焊、闪光焊)(通过去杂质—通电高温—挤压—打磨,焊成长度约 500m 或 250m 以内的长轨)再现场焊。无缝线路焊接方法包括小型气压焊(用于工厂和现场,采用乙炔、氧气瓶,高温后挤压,设备

重)、接触焊(工厂)、铝热焊(现场、尤其是岔区)。无缝线路焊接工艺和质量至关重要,应予高度重视。

无缝线路作为一种新型轨道结构,其最大特点是夏季高温季节在钢轨内部存在巨大的温度压力,容易引起轨道的横向变形。

在列车动力或人工作业等干扰下,轨道弯曲变形有时会突然增大,这一现象常称为胀轨跑道(在理论上称为丧失稳定),将严重危及行车安全。无缝线路稳定性计算的主要目的是研究轨道胀轨跑道的发生规律,分析其产生的力学条件及主要影响因素,计算出保证线路稳定的允许温度压力。因此,稳定性分析对无缝线路设计、铺设及养护维修具有重要理论和实践意义。

无缝线路设计前应针对无缝线路需求提出线路加强要求。无缝线路应锁定轨温,确保冬不断、夏不胀(包括按强度条件确定允许轨温变化幅度(拉压)、按稳定条件确定允许轨温变化幅度、确定设计锁定轨温等工作),应合理计算与确定伸缩区长度和预留轨缝,合理进行轨条布置与防爬行观测桩设置(根据无缝线路类型(普通、区间、跨区间)布置轨条与设置防爬行观测桩的指标(一些控制点)),应科学布置防爬器。线路爬行是造成轨道病害的主要原因之一。无缝线路地段,如发生爬行,其后果较普通线路更为严重。因为它除产生一般的轨道病害外,还会因钢轨受力不均而改变原来的锁定轨温。在无缝线路的伸缩区和缓冲区上,因钢轨可能有伸缩,必须布置足够的防爬设备,保证无相对于轨枕的纵向移动。为此,要求钢轨与轨枕间的扣件阻力大于轨枕与道床间的纵向阻力。

无缝线路的铺设过程是:[专用列车运长轨(250~500m)]→[现场焊连(用铝热焊焊成1~2km长(也称其为单元轨节长度))]→[专用机具(如铺轨机)铺设到线路并锁定(普通无缝线路即结束)]→[对跨区间CWR,继续铺设单元轨条并与原轨条焊连(连入法);或不与原锁定轨条焊连,成为1~2km的各段CWR(中间缓冲区),最后各段焊连(联合法)]。

无缝线路的维修应遵守规程,应注意按轨温维修(一切工作以轨温为依据,如若动接头,则可能会因巨大稳定压力将轨道完全顶严),不破坏或改变原来的工作状态(若锁定轨温 20°C ,如松开接头,则在 43°C 时松开),应加强轨道阻力与平顺性,合理作好应力放散工作(即为改变CWR原锁定轨温而进行的工作。在控制温度范围外铺设时,在一定条件下应进行应力放散。应力放散主要有滚筒放散和强制放散两种方法),应注意作好应力调整(均匀固定区应力值温度)工作(对因作业不当引起的固定区温度力不均,松开固定区扣件(部分或全部)不改变锁定轨温,伸缩区扣件及防爬器不动,列车碾压。轨温变化时,铺以撞轨)。

1.4 地铁轨道结构及部件

1.4.1 地铁轨道组成及作用

1.4.1.1 地铁轨道的组成

地铁轨道由钢轨、轨枕、道床、路基等组成,见图1-3。地铁轨道部件包括钢轨、轨枕、扣件、联结零件、道床、道岔等。

地铁轨道加强设备主要有防爬设备、轨距杆、轨撑等。防爬(爬行一般指钢轨相对轨枕的爬行)设备设置在枕轨间,是当钢轨相对于轨枕爬行时阻止轨爬行的设备(因现代扣件性能较好,现已较少使用)。在线路曲线上安装轨

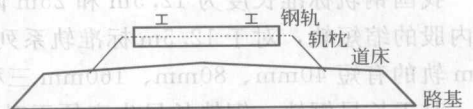


图1-3 地铁轨道组成图

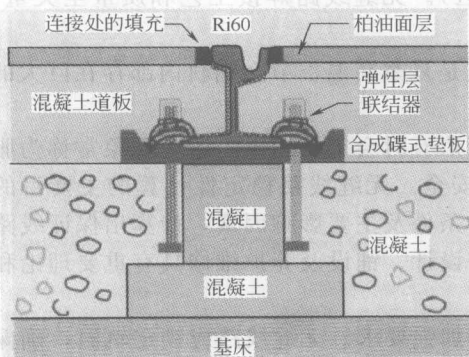


图 1-4 无碴轨道结构

撑和轨距杆可提高钢轨横向稳定性，防止轨距扩大。

1.4.1.2 地铁轨道结构种类

目前，地铁轨道结构大致可分为有碴轨道和无碴轨道（见图 1-4）2 类。有碴轨道的特点是弹性好、维修方便、但易变形。无碴轨道的特点是造价高、维修难、弹性差、噪声大，代表性的有日本的板式和德国的雷达 2000 轨道，无碴轨道用在路基上效果差些，用在隧道或桥上效果好些。我国的城市轨道交通宜采用无碴轨道，无碴轨道美观、污染少、结构轻便、维修率低等。

1.4.1.3 地铁轨道结构的作用

地铁轨道结构应保证机车车辆规定的最大载重和最高速度运行时具有足够的强度、稳定性、平顺性和合理的维修周期。所有的地铁均必须以轨道状态保障为前提来发展。地铁轨道结构的作用主要体现在以下 4 个方面。

- ① 承受列车荷载。列车荷载是重复性、随机性很大的动载，与行车速度（ v ）、轴重、机车车辆状态、轨道状态等有关。涉及动力关系、接触力学、蠕滑力学等科学问题。
- ② “承上补下”作用（即向下传递荷载）。当路基、桥梁性能不足时需要轨道来补足（比如大秦铁路、胶新铁路路基沉陷严重时通过增道碴克服不均匀沉降确保运营），具有维修经常性和周期性的特点。
- ③ 吸收或减缓列车荷载，为下部结构提供一个平和的荷载条件。
- ④ 引导、支撑列车。要求轨道有精确的几何尺寸（比如焊接接头不平顺要求）。

1.4.2 钢轨

1.4.2.1 钢轨功用

钢轨为车轮提供连续、平顺和阻力最小的滚动表面，引导列车运行方向；直接承受车轮的巨大压力，并分散传递到轨枕；在电气化铁道或自动闭塞区段还兼做轨道电路用。

1.4.2.2 钢轨质量要求

对钢轨质量、断面、材质三个关键要素均有相应要求，具体如下：

- ① 足够的强度和耐磨性；
- ② 较高的抗疲劳强度和韧性；
- ③ 一定的弹性；
- ④ 足够光滑的顶面；
- ⑤ 良好的可焊性；
- ⑥ 高平直度。

1.4.2.3 钢轨几何尺寸

(1) 钢轨长度

我国钢轨标准长度为 12.5m 和 25m 两种，对于 75kg/m 钢轨只有 25m 长一种。用于曲线内股的缩短轨，对于 12.5m 标准轨系列的缩短轨有短 40mm、80mm、120mm 三种；对于 25m 轨的有短 40mm、80mm、160mm 三种。

对于长尺钢轨，钢轨长尺生产便于对钢轨进行热预弯，消除钢轨矫直前的弯曲度，减少钢轨的残余应力。由于长尺钢轨两端可以锯掉 0.8~1.5m，因而可消除原标准长度钢轨两端

的矫直盲区和探伤盲区，在提高生产率的同时可充分保证钢轨的平直度和内部质量。法国生产的钢轨已由原来的 36m 改造为 72~80m，德国则改造成 120m，我国也在加紧进行 100m 长尺钢轨的研制。

(2) 钢轨断面

钢轨型号依重量 38kg/m、43kg/m、50kg/m、60kg/m、75kg/m（标准）的不同，断面尺寸也有所不同。CHN60 钢轨断面与 UIC60E1 钢轨断面见图 1-5。

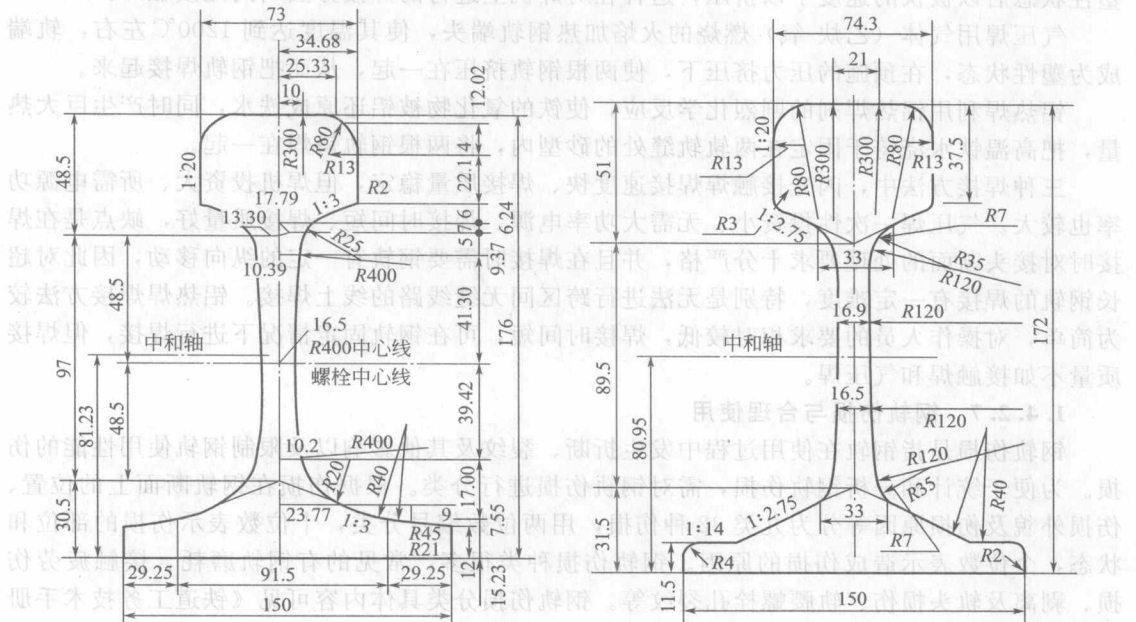


图 1-5 CHN60 钢轨断面与 UIC60E1 钢轨断面

1.4.2.4 钢轨材质

钢轨的物理力学性能包括强度极限、屈服极限、疲劳极限、伸长率、断面收缩率、冲击韧性及硬度等。常用的有 U74 碳素钢（抗拉强度 $\sigma_b = 785\text{MPa}$ ）、U71Mn 合金钢（ $\sigma_b = 883\text{MPa}$ ）、PD3 高碳微钒钢（ $\sigma_b = 980\text{MPa}$ ）等。我国秦沈铁路采用 PD3 全长淬火高碳微钒钢（ $\sigma_b = 1300\text{MPa}$ ）寿命比原来提高 50% 以上，淬火采用电感应加热的方法，通过局部改变轨头钢的组织提高钢轨的强度和韧性。

1.4.2.5 钢轨接头和轨缝

轨道上钢轨与钢轨间用夹板和螺栓连接称为钢轨接头。接头处轮轨动力作用大、养护维修工作量大，接头是轨道结构的薄弱环节之一。

钢轨接头的联结形式按其相对于轨枕的位置可分为悬空式和承垫式两种；按两股钢轨接头相互位置可分为相对式和相错式两种。我国一般采用相对悬空式，即两股钢轨接头左右对齐，同时位于两接头轨枕间，这样可抗冲击，提高支撑刚度。

钢轨接头按其性能又可分为普通接头、异形接头、绝缘接头、焊接接头、导电接头、伸缩接头、冻结接头等。另有过桥鱼尾板代替鼓包的新夹板。

为适应钢轨热胀冷缩需要，在钢轨接头处要预留轨缝。预留轨缝应满足以下 2 条件。

- ① 当轨温达到当地最高轨温时轨缝应大于或等于零，使轨端不受挤压力，以防温度压力太大而胀轨跑道。
- ② 当轨温达到当地最低轨温时，轨缝应小于或等于构造轨缝，使接头螺栓不受剪力