



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



同济大学 赵洪伦 主编

GUIDAO CHELIANG JIEGOU YU SHEJI

轨道车辆结构与设计

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

轨道车辆结构与设计

同济大学 赵洪伦 主 编
龚积球 主 审

中国铁道出版社

2009年·北京

内 容 简 介

本书主要介绍由轨道导引的广义轨道车辆(铁道机车车辆、城市轨道车辆与磁浮车辆以及其他新型轨道交通车辆)结构、作用、原理和设计分析技术。内容包括:轨道交通系统概况,轨道车辆总体,走行部原理及基本结构,走行部重要部件结构与设计,牵引驱动及缓冲连接装置,制动装置,车体设计及其典型结构,车辆结构强度设计与分析,轨道车辆结构被动安全设计等九章。

本书为高等学校相关专业教材,也可供研究生和有关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

轨道车辆结构与设计/赵洪伦主编. —北京:中国铁道出版社,2009.2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-113-09561-1

I. 轨… II. 赵… III. 轨道车-结构设计-高等学校-教材 IV. U216.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 009641 号

书 名:轨道车辆结构与设计
作 者:赵洪伦 主编

责任编辑:程东海 编辑部电话:010-51873135
封面设计:薛小卉
责任校对:孙 政
责任印制:金洪泽 陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)
网 址:<http://www.tdpress.com>
印 刷:中国铁道出版社印刷厂
版 次:2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷
开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:19.25 字数:485 千
印 数:1~3 000 册
书 号:ISBN 978-7-113-09561-1/U·2414
定 价:36.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

社会的进步和生产力的发展,推动着现代交通运输业的飞速发展。轨道交通历史悠久,由于其自身的特点和优势,成为地面交通的主要支柱之一。

多年来,我国的轨道交通一直以铁路交通形式为主,在国民经济中占有重要的地位。20世纪80年代以来,随着国民经济的持续快速增长,城市化步伐日益加快,人口高速聚集,大型城市客运公交的矛盾愈发突出,而发展大容量城市轨道交通,形成一个以城市轨道交通为骨干的、立体的公共交通网络,成为大城市解决客运交通问题的共识,也成为增强城市活力、改善城市环境以及促进大城市及其周边区域经济可持续发展的一项重要策略。与此同时,日趋成熟的高速铁路技术在世界各地开始普及,我国铁路经过多次提速后,也已在近期实现了200 km/h客运速度的目标,并向更高的速度进军。另一方面,同属于轨道交通并被誉为“21世纪新交通系统”的高速磁浮交通的新发展,尤其上海高速磁浮交通示范线的建成及其成功的商业运行,又使之深受国人的瞩目,现在高速和中低速磁浮交通也已列入我国科技发展计划。在这样的形势下,显而易见,轨道交通将在我国的地面交通运输中发挥愈来愈大的作用,而轨道交通建设人才的培养也成为我国经济发展中需要重视的一项工作。

轨道车辆是轨道交通的运输载体,是直接关系到轨道交通运行品质和运行安全的关键设备之一。由于轨道交通系统形式以及运输对象的差别,形成了轨道车辆结构的多样性,同时随着科技的发展和现代社会对交通运输越来越高的要求,不仅磁浮列车和高速列车,许多轨道车辆都是集成了机械、电气、控制、材料等多学科高技术含量的综合性机电产品。鉴于目前国内铁道与城市轨道交通建设日新月异,轨道车辆制造业欣欣向荣的新形势,为了适应我国轨道交通车辆人才建设的需要,编者在轨道车辆本科专业方向多年的教学基础上,吸收国内原有相关教材中钢轮钢轨交通系统的部分内容,结合教师自己的科研成果,同时也收集了国内外在轨道车辆领域的最新技术和信息,经多人共同努力编写了本教材。

科学技术的发展促进了轨道交通技术的发展,并使轨道交通系统及其运输工具呈现出多元化的新趋势,以适应社会对交通模式经济合理以及个性化的需求,

但整体而言,它们仍然有其共性和相通之处。因而,本书力图从系统的角度出发,将轨道交通作为一个大系统考虑,再对主要系统的车辆按应用程度和发展前景分别予以叙述。介绍内容包括轨道交通车辆以及磁浮车辆与其他新型轨道车辆的结构、作用、原理和设计分析技术。

本书由同济大学赵洪伦主编,龚积球主审。全书共分九章,其中:第一章由赵洪伦编写,第二章由周劲松、罗湘萍和赵洪伦共同编写,第三、第四章由任利惠、沈钢编写,第五章由罗湘萍、周劲松编写,第六章由应之丁编写,第七、第八章由赵洪伦、王文斌编写,第九章由王文斌、赵洪伦编写。

本书主要面向轨道车辆本科学生,也可供研究生和轨道车辆专业技术人员参考。

本教材被列入教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材建设项目,并得到同济大学教材、学术著作出版基金委员会资助。本书在编写后,夏寅荪、成建民和杨国桢教授共同予以审阅,在此谨表示衷心感谢。

现代轨道车辆技术发展迅速,设计涉及内容愈加广泛而丰富,本书受篇幅所限,会有所遗漏和疏忽,同时限于编者水平,难免有错误或不当之处,敬请使用本书的高校师生、读者及轨道车辆领域的专家与工程技术人员批评指正,以便再版时补充和修改。

编 者

2009年1月

目 录

第一章 轨道交通系统概况	1
第一节 概 述	1
第二节 轮轨交通系统	1
第三节 磁浮交通系统	10
第四节 轮胎交通系统	17
第五节 其他轨道交通系统	21
复习思考题	25
第二章 轨道车辆总体	26
第一节 车辆的特点、分类及组成	26
第二节 车辆主要技术参数	30
第三节 车辆限界	38
第四节 车辆总体设计	45
第五节 典型轨道车辆总体布置	47
复习思考题	58
第三章 走行部原理及基本结构	59
第一节 走行部的功能与结构原理	59
第二节 走行部的分类	61
第三节 轮轨系统典型走行部的结构	64
第四节 磁浮车辆走行部的结构	88
第五节 新型结构形式的走行部	91
复习思考题	102
第四章 走行部主要部件结构与设计	103
第一节 轮 对	103
第二节 轴箱及轴箱定位装置	111
第三节 弹簧悬挂元件	116
第四节 减振元件	132
第五节 构架结构与设计	139
第六节 转向架与车体连接装置	141
复习思考题	145
第五章 牵引驱动及缓冲连接装置	146
第一节 牵引驱动装置类型	146
第二节 驱动轴系联轴器	154
第三节 缓冲连接装置的用途及分类	158

第四节 密接式缓冲连接装置·····	159
第五节 缓冲器的种类、性能及结构·····	167
复习思考题·····	172
第六章 制动装置 ·····	173
第一节 制动控制系统·····	173
第二节 基础制动装置·····	183
第三节 电磁制动与非黏着制动·····	189
复习思考题·····	190
第七章 车体设计及其典型结构 ·····	191
第一节 车体的功能、结构承载形式及主要类型·····	191
第二节 车体的轻量化设计·····	194
第三节 高速列车车体设计·····	205
第四节 典型车体结构·····	212
复习思考题·····	238
第八章 车辆结构强度设计与分析 ·····	239
第一节 车辆强度设计内涵及其技术进展·····	239
第二节 轨道车辆工作载荷·····	241
第三节 结构有限元静强度分析·····	253
第四节 车辆结构模态分析·····	261
第五节 车辆结构的疲劳强度分析及寿命估算·····	266
复习思考题·····	280
第九章 轨道车辆被动安全设计 ·····	282
第一节 车辆被动安全技术概述及耐撞击安全性能评价·····	282
第二节 车辆被动安全系统组成及设计·····	285
第三节 撞击吸能元件及装置·····	289
第四节 乘员二次碰撞安全防护·····	292
第五节 车辆碰撞仿真和试验技术·····	295
复习思考题·····	300
参考文献 ·····	301

第一章 轨道交通系统概况

第一节 概 述

现代交通科学技术的进步已使传统的轨道交通模式不断向着多元化的方向发展。

在我国的轨道交通史上,铁路这一由钢轮、钢轨为基础组成的以城市间客货运输为主的交通系统无疑占据着极为重要的地位,而日益增长的电气化铁路更代表了轨道交通向环保、节能和洁净能源型的绿色交通的发展方向。

最近十多年来,我国国民经济的蓬勃发展加快了城市化的进程,也使大城市公共交通的问题愈见突出。城市轨道交通系统建设已成为我国许多大城市新世纪经济建设的热点,并将在我国交通运输中发挥重要的作用。

传统的城市轨道交通,虽然具有许多突出的优点,可是建设成本高、建设周期长,对城市噪声、振动、景观等生态环境的影响,在某些情况下尚难以得到理想的解决方案,因此,世界上许多国家在地铁与轻轨的基础上进行变革与创新,又派生出多种新型城市轨道交通系统,它们在走行、导向、驱动等方式甚至在研发的思维理念上具有许多独到的优点。这类城市轨道交通系统中,有轨道导向新交通系统、应用直线电机牵引的直线电机交通系统、采用橡胶车轮和高架轨道梁线路的独轨系统以及采用柔性复合索轨的交通系统等。一般来说,这些轨道交通系统多为中运量系统,普遍具有造价低、建设速度快、对城市生态环境影响小、运作弹性佳等特点,因而了解这些系统,对于当前我国许多城市选择合适的城市轨道交通模式以解决日益紧张的城市交通具有积极意义。

磁浮交通是一种新生的轨道交通系统,其 450~500 km/h 的最高行驶速度和约 300 km/h 的平均速度在地面交通中具有一定优势,因而有较大的发展潜力,而建造的投资过大,是其不足之处。上海高速磁浮交通示范线的建成和商业试运行的初步成功,也使国人对磁浮交通有了切身体验并予以更大的关注和期待。

鉴于以上轨道交通系统状况,本章将根据我国的应用现状及其发展前景分别予以叙述。

第二节 轮轨交通系统

钢轮钢轨交通系统一般称为轮轨交通系统,简称轮轨系统,也是轨道交通中历史悠久应用广泛的一种交通系统。根据运用区域的不同,轮轨交通系统通常被分为铁路交通和城市轨道交通两类系统。它们之间既有许多共同之处,又有其自身的特点。轮轨交通系统有以下共同的基本特点:

1. 车辆成列在铁路上运行。轮轨交通系统是由多节车连挂成的列车和铁路线路组成的一个整体系统。列车由动车和拖车组成,动车是列车中的动力驱动车,拖车则是无动力的从动车。传统轮轨系统的线路通常由两根钢轨以及支承钢轨的轨枕与道床等构成。

2. 自行导向。列车通过钢轮在钢轨上运行,鉴于其特殊的轮轨结构,车轮能沿钢轨在直

线和曲线上运行而无需操纵运行方向的机构。

3. 低运行阻力。由于钢—钢之间较小的摩擦阻力,因而轮轨系统克服运行阻力所需的能耗较小。

4. 独特的轮轨关系。因钢轮与钢轨形成点接触状态,这种轮轨接触点的运动也就形成了独特的轮轨系统动力学问题。随着列车运行速度和载重量的提高,使得轮轨系统的车轮与线路之间、列车中各连接车辆之间的动作用力增大以及系统振动加剧,这是对于铁路交通与城市轨道交通车辆设计中具有共性的课题。

但由于运行区域的不同,使铁路交通和城市轨道交通无论在线路构造和车辆性能要求等方面都形成了一定的差别。

一、铁路交通系统

铁路交通是轨道交通中历史最悠久、使用最普遍的传统钢轮钢轨交通系统,也是我国主要的中长距离地面交通运输模式,并在国民经济中起着非常重要的作用。一般铁路运输采用动力集中的模式,即由机车作为动力车牵引(或推挽)无动力的车辆(客车或货车)前进的方式。近年来,随着客运动车组的出现,反映出传统的铁路交通向着新的运行模式发展的趋势。动车组按牵引动力方式又可以分为内燃动车组和电力动车组,若按动力配置方式又可以分为动力集中式和动力分散式两类。

与其他运输方式相比,铁路交通有其独特的优势。主要有以下几个方面:

(1)运量大,运距长。铁路运输包括旅客运输和货物运输,由于采用车辆编组连挂组成列车运行的运输模式,且连挂的客车一般都在10节以上,货物列车更可达到数十节之多,甚至100多节,而运输距离则可长达数千公里,因而铁路列车的运量和运距都是其他地面运输方式不易达到的。

(2)能耗较低。就运输一定数量的货物或旅客而言,铁路运输所消耗的能源要小得多。

(3)高速铁路客运速度一般在200 km/h以上,最高可达350 km/h,是地面交通系统中除高速磁浮交通以外最快速的安全和舒适的现代客运交通系统。

(一)铁路交通的形式

铁路交通的功能主要在于城市间旅客和货物运输,因而可根据运输的对象分为客运与货运两种主要的铁路交通形式。

在交通运输中,速度和运量是两个最重要的功能指标,也是直接影响交通系统的运载工具及线路的主要因素。早期的铁路交通,由于列车速度普遍较低,因而普遍采用客货车混跑的运输模式,这也是我国多年来一直沿用的形式。但随着社会的发展和科学技术的进步,以及人们对时间和效率的追求,铁路客运与货运共用同一条线路的模式已难以适应现代社会的需求。相对而言,客运比货运对速度的提高更为迫切,而货运则对运量的增加更加关注,鉴于这一情况,在国外普遍采取客货分流的措施,即将客运线路与货运线路分开,各自独立运行。近二十年间迅速崛起的高速铁路又将客运交通按列车速度划分为普通客运与高速铁路两种运输模式。国际上把运行时速在200 km以上(含200 km)的铁路称为高速铁路,以示与时速200 km以下普通铁路的区别。

在我国,高速铁路已经开始建设,客货分流也正在逐步得以实施。

(二)铁路系统线路的基本构造

线路是列车运行的基础。铁路线路是由路基、轨道和桥隧建筑物组成的一个整体工程。

列车在线路上行驶,轮轨直接接触,机车车辆与线路相互产生影响。只有合理确定两者的结构性能才能取得较好的运行效果。

根据铁路在路网中的作用、性质和远期客货运量,铁路划分为三级:Ⅰ级铁路是铁路网中起骨干作用的铁路,远期年客货运量大于或等于 15 Mt 者;Ⅱ级铁路是铁路网中起骨干作用或起联络、辅助作用的铁路,远期客货运量在 7.5~15 Mt 之间者;Ⅲ级铁路是为某一区域服务、具有地区运输性质的铁路,远期年客货运量小于 7.5Mt 者。

不同等级的铁路,在修建、养护和容许的最高行车速度等方面的技术标准是不同的。

1. 线路的基本结构

线路包括轨道、路基和桥隧建筑物。其中路基和桥隧建筑物是轨道的下部基础。在桥梁部分以外的线路结构如图 1—1 所示。

图中路基是线路的基础,轨道为线路的上部建筑。轨道又由钢轨、轨枕、联结零件、道床、防爬设备及道岔等主要零部件组成。钢轨、轨枕及道床等线路上部建筑,虽然由不同力学性质的材料组成,但却是一个结构的统一体。它们之间存在着既联系又制约的关系,组成一个等强度的整体结构。

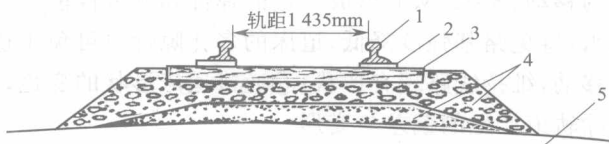


图 1—1 铁路线路基本结构

1—钢轨;2—中间联结件;3—轨枕;4—道床;5—路基

线路结构需要与运量、机车车辆轴重及行车速度三个运营参数相配套。线路按结构状态与运量的关系分为特重型、重型、次重型、中型及轻型五种。

在 20 世纪 80 年代中期我国路网平均轨道质量还不足 50 kg,而 60 kg 级的钢轨铺设比较零散。20 世纪 80 年代末期对繁忙干线进行了强化改造,在这些线路上全面推广 60 kg 级轨道结构。

轨距是轨道构造中一项重要技术指标。轨距为两钢轨头部内侧间与轨道中心线相垂直的距离,并规定在轨顶下 16 mm 处测量。在世界各国铁路发展的历史中形成了各种不同尺寸的轨距,各种轨距下的限界及相应的机车车辆尺寸也各不相同。我国除个别冶金、矿山、森林、地方铁路外,绝大部分线路的轨距为 1 435 mm,称为“标准轨距”(简称“准轨”)。大于 1 435 mm 的称为“宽轨”;小于 1 435 mm 的称为“窄轨”。由于历史原因,我国台湾省的铁路轨距为 1 067 mm,云南省的部分路段的轨距为 1 000 mm,简称为“米轨”。

直线处准轨轨距允许的误差为 $+6 \sim -2$ mm。轮轨间应保持适当的游间,以便轮对能顺利沿直线运行并通过曲线。轮轨之间的配合除要规定轨距、轨距公差外,还要使钢轨顶面与车轮踏面间配合得合适。轨头曲线一般由多段圆弧组成,而机车、车辆的踏面均呈圆锥状,其中一种的母线为直线,称为锥形踏面;另一种的母线为曲线,称为磨耗型踏面。不论何种踏面,车轮均是外侧直径小,内侧直径大,为此要设置轨底坡(轨底坡定为 1/40),使轨头内倾,以适应车轮踏面的形状。

钢轨的作用是承担来自车轮的压力并引导车轮前进。钢轨断面为工字形。其类型以每米质量的千克数表示。我国大部分为 50 kg/m 轨,繁忙干线采用 60 kg/m 轨。美国的钢轨较重,多在 66 kg/m 以上;俄罗斯的情况和我国接近,其中重型钢轨为 65 kg/m。

钢轨通过扣件(中间连接件)与轨枕连结,扣件的主要功用是阻止钢轨对于轨枕的纵、横向移动,保持钢轨的正确位置。轨枕按其材质分为木枕、钢筋混凝土轨枕和钢轨枕三类。我国现在大量采用钢筋混凝土轨枕,因为它能大量节约木材,又能保证轨枕尺寸一致,弹性均匀,使运

行平顺性得到提高。轨枕的作用是承受钢轨传下来的垂向力和水平力,并把力传布于道床,从而有效地保持钢轨的轨距、方向和位置。每公里线路配置的轨枕根数随线路等级及平面、纵断面的结构条件而异。一般线路每公里铺设的轨枕根数是:木枕分 1 840、1 760、1 680 三挡;混凝土轨枕分 1 840、1 760、1 680、1 600 四挡。

轨枕的缺点是不能连续支承钢轨,因而使道床局部受力较大,产生轨道沉陷的情况也较多,线路维修工作量随之加大。为克服此缺点,正在发展一些新型轨下基础,连续铺设的钢筋混凝土轨枕板及整体道床是常见的两种形式。

道床的面层为质地坚韧、耐风化的碎石道砟。道床的主要功用有以下五点:①能把轨枕传下来的力均匀地散布到面积较大的路基面上去;②轨枕传下来的动作用力使碎石之间产生适当的移动、摩擦,从而形成一定的弹性和减振性能;③具有孔隙,能渗透地表水,使路基上不会积水,避免路基强度降低,道床的多孔隙性也可免于遭受北方冬季结冰造成的冻害;④阻止轨枕移动,维持线路现有形状;⑤通过道床形状的变化,调整或校正线路的平面及纵断面形状,并消除轨道产生的偏差与变形。

2. 线路纵断面构造

线路的纵断面根据地形变化,必然有上坡、下坡及平道,但为了运营的目的,线路的坡度不应过大,相邻坡段的坡度值之差也不应过大,且在一个区段内坡段数不宜过多。

(1) 限制坡度

限制坡度是铁路的主要技术标准之一。因列车牵引重量受限制坡度的约束,故不同等级的铁路为了满足一定的年输送能力,要规定限制坡度的大小,一般不得超过以下数值:

I 级铁路:一般地段 6‰,困难地段 12‰。

II 级铁路:一般地段 12‰,困难地段 15‰。

III 级铁路:一般地段 15‰,困难地段 20‰。

(2) 变坡点与坡段长度

两相邻坡段的交点叫变坡点;两变坡点之间的水平距离叫坡段长度。坡段长度对工程和运营均有很大的影响,坡段愈长则变坡点数目越少,运行的平顺性越好,因为列车通过变坡点时,将在车钩上产生附加应力。

改建既有线和增建第二线时,在困难条件下,可采用 200 m 的坡段长度。

(3) 相邻坡段的连接

列车通过变坡点时,车钩内产生附加应力,若该应力值过大,司机操纵不良,很可能产生断钩事故。为了保证行车的安全与平顺,相邻坡段坡度的代数差不得大于该线路重车方向的限制坡度。为了让列车能平顺地由一个坡段过渡到另一个坡段,不使车钩上、下错动过大而脱钩;以及不致使旅客列车产生过大的垂向加速度而影响舒适性,在变坡点处设置圆曲线型的竖曲线,一般 I、II 级线路竖曲线半径为 10 000 m,III 级线路为 5 000 m。

(4) 驼峰构造

在编组站,为加快货物列车的分解与编组,人工设置一个土堆,称为“驼峰”。换言之,在区段中的坡段是为了适应地形稍加改变而成的,而驼峰却是人为设置的坡度与竖曲线。

3. 线路平面构造

在线路的平面图中需要有直线区段、圆曲线区段以及连接两者的缓和曲线;在站场中的多股道之间要用道岔连接它们。

(1) 直线

直线沿平面向前延伸分为有缝线路及无缝线路两种,无缝线路是用普通标准长度的钢轨在线路上焊接而成的长钢轨。我国钢轨的标准长度为 12.5 m 及 25 m 两种,两股钢轨在直线地段时,轨顶应在同一水平面上。钢轨的接头为线路的薄弱处,往往由于磨损、变形而造成局部下陷。我国采用左、右轨同时出现轨缝的对接接头方法。为减小与控制垂向载荷的不均匀分配,要求正线和到发线沿线路长度方向每 18 m 的距离范围内无超过 4 mm(其他线为 6 mm)的三角坑。

(2) 曲线

在曲线区段,由于有列车的离心力,因此在此区段线路受力较大,它是线路的薄弱环节。列车运行于曲线区段要克服附加的阻力,相应的运营费用要增大,行车速度要受曲线半径的限制,轮轨间的磨耗也比直线区段严重得多。

曲线最小半径既与线路等级有关,又与地形有关。对于 I、II 级线路,一般地段的最小曲线半径规定为 800 m,困难地段为 400 m;对于 III 级线路一般地段的最小曲线半径为 600 m,困难地段为 300 m;我国规定在普通线路上最大的曲线半径为 4 000 m。

为了给运动的列车提供一个向心力,曲线区段的外轨要比内轨高。外轨的超高值 $h(\text{mm})$ 是根据该曲线的半径 $R(\text{m})$ 及列车的速度 $v(\text{km/h})$ 的大小来确定的。

当超高值符合下式时,超高提供的向心力可全部平衡离心力,即

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

我国在曲线区段所取的最大超高为 $h_{\max} = 150 \text{ mm}$,在此超高度下若允许未平衡的离心加速度为 0.45 m/s^2 ,则在曲线区段允许的最大运行速度为

$$v_{\max} = 4.3 \sqrt{R} \quad (1-2)$$

在该超高度下,离心力与向心力平衡时允许的速度为

$$v \approx 3.6 \sqrt{R}$$

表 1—1 为按上式计算出来的曲线处的最大运行速度及两力平衡时的运行速度。

表 1—1 车辆在曲线处的运行速度

曲线半径(m)	250	300	400	600	800	1 000	1 200	1 500
最大允许速度(km/h)	68	74	86	105	122	136	149	166
力平衡时的速度(km/h)	47	62	72	88	102	114	125	139

为了使列车能顺利地通过曲线,除外轨需设置超高外还要加宽曲线处的轨距。其加宽值规定如下:曲线半径超过 350 m 者不加宽;300~350 m 者加宽 5 mm;250~299 m 者加宽 10 mm;250 m 以下者加宽 15 mm。

(3) 缓和曲线

为了保证行车的安全与平顺,在直线与圆曲线之间设置一段缓和曲线。在缓和曲线范围内,曲线半径由无限大逐渐变到圆曲线半径,外轨超高由零逐渐上升到圆曲线的超高值,轨距由标准轨距逐渐加宽到圆曲线的加宽程度。在两个不同半径的圆曲线之间也可以设置缓和曲线,其曲率半径、外轨超高和轨距加宽也是由一个圆曲线的规定值逐渐过渡到另一个圆曲线的规定值。

为了保证列车运行的平顺性和旅客的舒适性,缓和曲线的长度不能太短,应保证在缓和曲线上外轨超高的顺坡不大于 2‰,而且缓和曲线长度不小于 20 m。一段圆曲线的两边均为缓和曲线,为了避免一辆客车可能会同时处于两段缓和曲线上造成行车不平稳的因素,规定两段

缓和曲线所夹的圆曲线长度必须在 20 m 以上。在地形比较困难的地段,有时两相邻的反向圆曲线位置较近,造成圆曲线端部的两段缓和曲线相邻更近。为了满足线路维修及列车运行平顺的要求,两相邻缓和曲线之间必须夹一段直线,该直线的长度在 I、II、III 级线路上分别不小于 30 m、25 m 和 20 m。

(4) 道岔

在铁路站场,机车车辆往往要从一条线路转往另一条线路,这就要利用道岔。道岔的种类虽多,但最常用的是“普通单开道岔”,它约占道岔总数的 90% 以上(见图 1—2)。这种道岔的主线为直线方向,侧线可由主线向左(或向右)岔出。

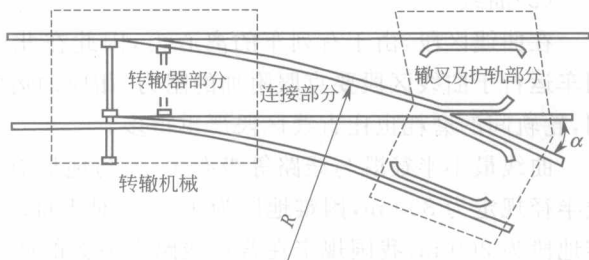


图 1—2 普通单开道岔

(三) 高速铁路的线路要求

当列车运行速度超过 200 km/h 后,不仅轮轨间的动作用力迅速增加,而且一系列有关空气动力学的技术问题亟待解决,因此,尽管高速铁路的基本构造大致与常规线路近似,为了适应列车高速运行及降低动荷作用,高速客运线路与普通线路相比应有较大的变化。

我国拟建的京沪高速铁路拟定为 300 km/h 的高速客运专线,并在以后将速度提高到 350 km/h,以此确定线路的各项技术标准。

1. 最小圆曲线半径

多数已建高速铁路的国家规定 $R_{\min}$ 为 6 000 m,个别建高速线路较早的国家 $R_{\min}$ 定在 4 000 m,德国 ICE 规定 $R_{\min}$ 为 7 000 m,对个别地段确有困难处 $R_{\min} \geq 5 100$ m。我国京沪高速铁路拟定 $R_{\min} = 7 000$ m,个别困难处 $\geq 5 500$ m。与圆曲线有关的一些技术标准我国京沪高速线规定如下:最大超高 $h_{\max} = 180$ mm,欠超高与过超高之和的允许值 $h_{\max}$ 一般为 110 mm,困难条件下放宽到 140 mm;实设超高与欠超高之和的允许值 $h_{\max}$ 一般为 220 mm,困难条件下放宽到 260 mm。缓和曲线采用三次抛物线,缓和曲线的长度与圆曲线半径有关,在 $R = 7 000$ m 时规定其一般长度为 570 m,根据地形条件可在 460~700 m 之间调整。两相邻曲线间夹直线的最小长度或两缓和曲线间夹圆曲线的最小长度,一般规定为 $L_{\min} \geq 0.8 v_{\max}$ 。我国京沪高速铁路还规定了最大曲线半径: $R_{\max} \leq 12 000$ m,对个别困难处允许 $\leq 14 000$ m,否则就改用直线。

2. 道岔

道岔是线路平面构造中不可缺少又是线路的薄弱环节。欲使道岔适应高速运输,既要采用大号码的道岔以改善其平面参数,又要采用可动辙叉心轨(或翼轨)等结构措施,以改善其平顺性。例如法国的 64 号单开道岔,直向过岔速度可达 260~300 km/h,侧向过岔速度也可达 220 km/h。我国在京沪高速铁路拟采用 18 号及 41 号道岔,它们的直向过岔速度均可达 300 km/h,侧向过岔速度分别限制在 80 km/h 及 160 km/h 以下。

3. 坡度

为了节约建线时的土方工作量,高速客运专线可依据地形选取较大的坡度,如日本的高速线最大坡度为 15‰,法国吸取并发展了日本的经验,成功地实现了 35‰ 的最大坡度。我国京沪高速铁路由于建在东部地势较平坦处,拟定的最大坡度为 12‰。

4. 线间距

高速列车贴地高速运行,与飞机不同,它引起的空气动力学问题具有其特殊性。已建高速铁路国家的线间距多在 4.2~4.7 m 间,且有增大的趋势,我国京沪高速线拟定的线间距为 5.0 m。高速线的隧道一般为双线单洞,车辆横截面与隧道横断面的面积比值,称为隧道的阻塞比 β 。日本东海道新干线建得较早,隧道横截面面积 64 m², $\beta=0.19$,出现了较多的空气动力学问题;德国 ICE 铁路吸取了这个教训,隧道横截面面积加大至 82 m², $\beta=0.13$;我国京沪高速线拟定隧道横截面面积为 100 m², $\beta=0.10$ 。此外,还要把隧道两端做成喇叭口状,以缓解空气压力的变化,我国将喇叭口缓冲结构的长度规定在 11~50 m。

二、城市轨道交通系统

城市轨道交通系统是随着城市的发展而发展起来的一种旅客运输交通系统,其牵引动力一般为电力,而动力配置则属于动力分散形式。

近百年来世界经济的迅速发展,推动了城市的规模与人口的不断扩张。从 20 世纪初城市人口约占总人口的 20%到今天已达 50%左右,许多发达国家城市人口的比例达 80%。就我国而言,百万以上人口的大城市已达 40 余个,上海、北京等已成为千万人口的特大城市。

现代大都市对公共交通提出了以下两方面的要求:第一,鉴于城市一般都有早、晚两个上下班高峰期,因而城市交通设施必须有与其良好的适应性,公共交通应能满足一昼夜内客流随时间的波动性;第二,要求在平均的上下班的里程内有可接受的旅途时间。

我国城市公共交通的现状是,除北京、上海、广州、天津等几个大城市已建成一定里程的地铁线路外,大多数城市采用传统的公交模式,随着城市出租车的迅速发展和私人轿车越来越多进入家庭,使城市道路交通雪上加霜,公共交通已成为我国城市面临的一大挑战。

西方发达国家城市交通发展所经历的道路值得我们借鉴,上一个世纪的上叶,它们大力提倡小汽车进入家庭,以致造成城市道路交通堵塞,空气污染严重,能源耗费加剧。于是,后来重新调整以优先发展公共交通为策略,重点建设以快速轨道交通系统为骨干的城市公共交通网络,逐步实现多层次、多平面、立体化的城市交通网络体系,从而使城市公共交通走上健康的良性循环的道路。

城市快速轮轨交通系统是近代高科技的产物,采用全封闭道路,立体交叉,自动信号控制调度系统和轻型快速电力驱动机组。行车密度可达 1.5~2.0 min,平均旅行速度可达 40 km/h,最高车速 80 km/h,单向载客能力最大可达 6~8 万人次/h,其疏通城市客流的功能比之传统的道路公共交通工具,具有无与伦比的优越性。电气化的轨道交通还被誉为绿色交通的美称。

(一)城市轨道交通系统的主要形式

目前国外运营的城市快速轨道交通主要有:地下铁道(简称地铁)和快速轻轨交通两种形式;这是与大铁路轮轨系统极为相似的一种运行模式。但在地铁交通中,还有一种胶轮地铁系统也常被归类于城市快速轨道交通系统之列,它们属于部分轮轨系统。

1. 地下铁道

自 1865 年伦敦出现第一条地下铁道后,经一个多世纪,全球已建成地下铁道总里程约 5 000 多公里,主要集中于欧洲、日本和北美工业较发达的国家近 90 座城市。

地下铁道有以下特征:

(1)线路全部或大部建于地下,采用标准或非标准轨距。国外许多大城市的地下铁道线路在市中心区车站和区间均设地下,当线路延伸到近郊时,常采用高架或地面运行,以达到节约

投资的目的。

(2)新建线路投资昂贵,建造周期长,成本回收时间也较长。

(3)由于线路全隔离、全封闭,可以实现信号控制调度的自动化,行车密度最短可达 $1.5 \sim 2.0 \text{ min}$,车辆时速最高可达 80 km ,平均旅行速度可达 $30 \sim 40 \text{ km/h}$ 。

(4)客运量大,单向最大客运量可达 $6 \text{ 万} \sim 8 \text{ 万人次/h}$,这对于大城市中心区高峰期乘客的疏通十分有效。

(5)地铁列车的编组数决定于客运量和站台的长度,一般为 $6 \sim 8$ 辆。站台长一般 $100 \sim 200 \text{ m}$,站间距通常在 $0.5 \sim 1.5 \text{ km}$ 。车种按有无动力可分为动车与拖车,一般采用动车与拖车混合编组可节约车辆投资。

(6)对地铁车辆的消音减振和防火均有严格要求,应能满足客容量大、安全、快速、舒适和节能等方面的要求。

(7)受电的制式主要有直流 750 V 第三轨受电或直流 1500 V 架空线受电弓受电。对于发车频率高、车辆所取电流流量大的情况,受电额定电压宜采用 1500 V ,以利减少电压降低和电能损失,加大牵引变电站的距离,提高列车再生制动的回收率。

2. 城市快速轻轨交通

城市快速轻轨交通是在老式的地面有轨电车上发展起来的。在 20 世纪初,有轨电车是城市重要的公共交通工具。但由于行驶速度低,噪声大,乘坐舒适性差,而且在狭窄的道路上妨碍汽车的行驶,所以我国在 20 世纪中叶大多已被拆除。

实际上有轨电车有其优点,它可以在路面直接换乘,可以小单元频繁发车,节约能源,而且无空气污染,造价特别低廉,所以东欧和前苏联许多城市一直在使用。

基于有轨电车的某些优点,在 20 世纪 70 年代以后国外重新审视这种运输型式在城市公共交通中的作用,并采用线路隔离、自动化信号调度系统和高新技术的车辆等改造措施,从而形成所谓城市快速轻轨运输 LRT(英文 Light Rail Transit 的缩写)和轻轨车辆 LRV(英文 Light Rail Vehicle 的缩写)。与一般的铁路相比,其轨道和车辆都是轻型的,其运输系统相对也比较简单,较适宜于中等运量城市及大城市近郊的交通客运系统。

现代的轻轨交通,是一种集多专业先进技术于一身的系统工程,在信号自动控制和集中调度配合下,将能快速而安全地完成中等运量的旅客运输任务。轻轨交通有以下特征:

(1)它是以钢轮和钢轨作为走行系统的一种交通方式,车辆的牵引动力为电力,可以采用直流、交流或线性电机驱动。

(2)轻轨交通的建设投资要比地铁少得多,通常轻轨 1 km 造价仅为地铁的 $1/2 \sim 1/5$ 。

(3)轻轨交通的单向客运能力一般为 $2 \sim 4 \text{ 万人次/h}$,它介于地铁和公共汽车之间,属于中等客运能力的一种公交形式。

(4)轻轨线路可以为地面、地下和高架混合型,一般与地面道路完全隔离,采用半封闭或全封闭专用车道。在通过交叉路口处,采用立体交叉形式,保证车辆以较高速度运行。

(5)轻轨车辆有单节 4 轴车,双节单铰 6 轴车和 3 节双铰 8 轴车。每组车可以单节运行,也可联挂编列。要求车辆能通过小半径曲线($R=50\text{m}$)和大坡度($6\% \sim 7\%$)地段。

(6)轻轨车辆轴重一般 $10 \sim 12 \text{ t}$,车辆要求轻量化,从而可降低线路工程的投资。

(7)对车辆和线路的消音和减震有较高要求。通常采用弹性车轮、空气弹簧、自导向和迫导向径向转向架等措施,以减轻车辆运行和通过曲线的噪声。同时采用无缝长钢轨线路,弹性钢轨扣件和路基弹性层,达到减少噪声和振动的传递。必要时在轨道两侧设隔音挡板。国外

对轻轨车辆的噪声控制范围,车内噪声范围在 67~75 dB,在车速 50 km/h 时,距车辆 7.5 m 距离外测得噪声应小于 76~80 dB。

(8)电压制式以直流 750V 架空线(或第三轨)供电为主,也有部分采用直流 1 500 V 和直流 600 V 供电。

(9)轻轨车站分为地面、高架和地下三种形式,要根据线路位置、地形条件、行车组织要求和乘客流量来决定车站的形式和规模。车站的站台长度应按列车长度和停车误差 ± 2 m 而定,站台长度应不小于远期设计列车长度加 4 m,一般为 60~100 m。

由于现代化的轻轨交通具有投资省、建设周期短、灵活性强、运行成本低等特点,在关键地段和市中心区采用高架或地下铁道的专用车道,再配合信号调度控制系统的自动化,使之能适应运量大、速度快、安全、准点的要求。所以近几年来世界各国大城市的轻轨铁路交通(LRT)得到迅速发展,欧洲、北美和发展中国家有百余座城市已规划或建造 LRT 交通系统,其中就包括我国十余座城市。

表 1—2 世界著名城市公共交通方式分担客运的比率

城市名	轨道交通(%)	公共汽车无轨电车等(%)
东京	86.0	14.0
伦敦	89.0	11.0
纽约	68.0	32.0
巴黎	65.0	35.0
莫斯科	49.0	51.0
柏林	54.0	46.0
首尔	65.0	35.0

世界著名城市公共交通方式分担客运的比率见表 1—2,从中可以看到这些大城市的轨道交通在城市公交所占的重要地位。

(二)城市轨道交通线路的基本构造

总体而言,城市轨道交通的线路结构与干线铁路交通系统线路差别不大。

一个较大的不同是:地下铁道大多采用无砟轨道结构,最普遍采用的为混凝土整体道床,通过钢轨扣件把钢轨直接与混凝土整体道床连结起来。根据道床结构形式的不同又可分为整体灌注式、轨枕式和支承块式三种形式。北京与天津地铁采用支承块式,香港地铁采用整体灌注式。

美国华盛顿、亚特兰大、纽约,以及加拿大多伦多城市铁路采用弹性支承轨道结构和浮置板轨道结构。弹性支承轨道结构也是一种无砟轨道结构,其结构如图 1—3 所示。双块式轨枕的轨枕块支承在泡沫橡胶上,用橡胶套把泡沫橡胶套在轨枕上,再用水泥砂浆把轨枕连同橡胶套与基底混凝土粘牢。

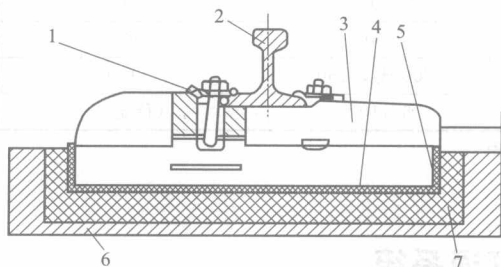


图 1—3 弹性支承轨道结构

1—扣件;2—钢轨;3—钢筋混凝土轨枕;4—泡沫橡胶垫;
5—橡胶套;6—基础混凝土;7—填充砂浆

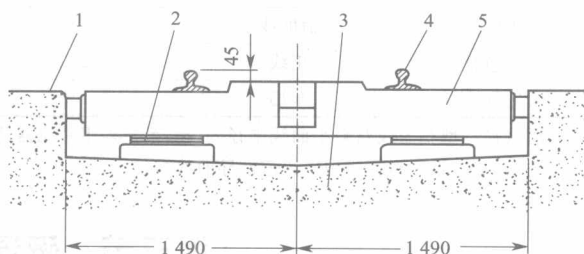


图 1—4 浮置板轨道结构

1—路缘;2—橡胶支承板;3—轨道基床;
4—钢轨;5—直轨道板

浮置板轨道结构最早由德国科隆地铁首次采用。图 1—4 为我国香港轻轨交通所采用的浮置板轨道结构示意图。其基本原理是在轨道上部建筑与基础间插入橡胶支承板,该支承板相当于一个固有频率远低于激振频率的线性谐振器,从而起到防止振动传入基础而达到较好的减振效果。

图 1—5 为用于轻轨交通的高架桥上的无砟轨道结构,纵向承轨台高 150 mm,分段断开,以利排水,两纵向支承间设置高 200 mm 的矮墙以代替通常使用的护轨。无砟轨道结构可减小轨道恒载,降低工程造价,另外可大大减小轨道维修工作量;缺点是二次混凝土浇注施工复杂,施工精度要求很高,要求扣件具有一定的调整钢轨高低和左右位置的能力。此外,这种结构还要解决好减小振动和噪声,防止迷流腐蚀和铺设无缝线路的问题。表 1—3 列出了我国推荐的城市快速轨道交通线路工程主要技术标准。

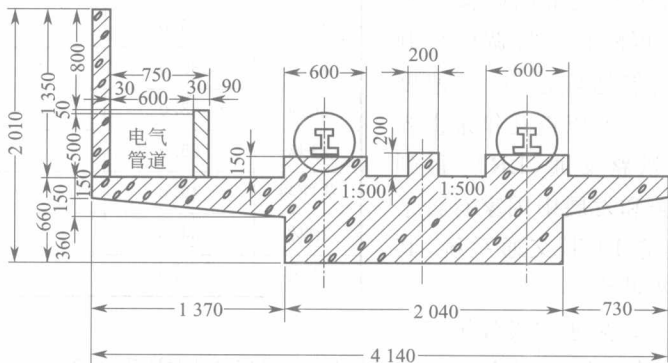


图 1—5 高架混凝土桥无砟轨道结构

表 1—3 线路工程主要技术标准

基本车型		A	B	C
最小曲线半径 (m)	正线	300~350	250~300	50~100
	辅助线	250	150~200	25~80
	车场线	150	80~110	25~80
最大坡度 (‰)	正线	30~35	30~35	60
	辅助线	40	40	60
	车场线	1.5	1.5	1.5
竖曲线半径 (m)	正线	3 000~5 000	2 500~5 000	1 000
	辅助线	2 000	2 000	1 000
钢轨 (kg/m)	正线	≥60	50~60	50
	辅助线	≥50	≥50	50
道岔 (N_0/R_0)	正线	9/200	9/200 或 7/150	7/150
	车场	7/150	6/110	(待定)

注:(1)C 型车的线路最小曲线半径 80 m,系指采用受流器的车辆。

(2) N_0 系指道岔号, R_0 为道岔导曲线半径。

第三节 磁浮交通系统

一、概 述

传统的轮轨交通系统是利用钢轮与钢轨的黏着作用推动列车前进,利用轮缘与钢轨的相