

车辆—无碴轨道—桥梁系统 振动特性及其应用

CHELIANG WUCHAGUIDAO QIAOLIANG XITONG ZHENDONG
TEXING JIQI YINGYONG

李广慧 等著



黄河水利出版社

车辆—无碴轨道—桥梁系统 振动特性及其应用

李广慧 刘 伟 著
王中平 杨广军

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书系统地论述和总结了国内外学者近几年来在轨道交通与无碴轨道领域内所进行的研究工作。其主要内容包括无碴轨道结构的分析与建模,钢轨和箱梁结构的分析与建模,车辆—无碴轨道—桥梁系统耦合振动分析模型的建立以及求解其动力方程的数值方法,轮轨作用力迭代求解方法的改进,轨道不平顺功率谱及数值模拟,无碴轨道系统的结构特性对车桥振动响应影响的分析,无碴轨道系统结构减振优化设计的应用实践。

可供轨道交通和铁道工程中的桥梁设计、施工及相关研究人员阅读,也可供高等学校土木、交通、水利等工程专业的研究生和高年级本科生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

车辆—无碴轨道—桥梁系统振动特性及其应用/李广慧
等著. —郑州:黄河水利出版社,2007.9
ISBN 978-7-80734-270-0

I. 车… II. 李… III. 无碴轨道—研究 IV. U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 140084 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 66020550 66028024 66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787mm×1 092mm 1/16

印张:15.5

字数:355 千字

印数:1—1 000

版次:2007 年 9 月第 1 版

印次:2007 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-80734-270-0/U·27

定价:35.00 元

前 言

进入 21 世纪以后,我国的城市轨道交通、高速铁路和快速客运专线等有轨交通迎来了历史性的发展机遇。其将形成覆盖我国主要城市的城市公共交通网、快速客运网和高速铁路网。为了适应有轨交通发展的需要,必须加强技术创新,全面提高技术装备水平;必须依靠科技进步,在工务工程中广泛采用新技术、新设计、新工艺和现代管理方法。作为有轨交通基础的轨道结构是一个复杂的系统,为了降低轮轨动力作用,特别是降低高速机车车辆对轨下基础的动力作用,保持轨道平顺稳定,减少养护维修费用,降低振动和噪声,高速轨道结构必须具有优良的减振性能。传统的轨道结构和轨道力学及分析方法已经不能适应现代铁路轨道的需要,轨道工程和轨道力学在吸收国外先进技术的基础上需要理论创新、方法创新。少维修、高稳定性的无碴轨道的开发与应用,是有轨交通轨道结构发展的必然趋势。但无碴轨道结构刚性大、同时还会反射部分噪声,因此减振降噪是无碴轨道结构必须解决的问题。

由于无碴轨道结构的复杂性,目前国内外采用的车辆-桥梁系统(以后简称“车桥系统”)动力分析模型,大多没有详细考虑桥上无碴轨道结构的建模以及车辆、无碴轨道和桥梁之间的动力耦合作用。滞后的无碴轨道结构减振理论研究,显然无法满足我国有轨交通快速发展的技术需求。例如,在对浮置板式无碴轨道进行减振结构设计时,往往将浮置板式无碴轨道简单视为质量-弹簧的一级隔振系统,为了增加减振效果而把浮置板加工得很笨重,对施工、维修和经济效益各方面都带来很多不利因素,限制了浮置板式轨道结构的发展和应用范围。

本书着重探讨了无碴轨道结构对整个动力耦合系统(车辆、钢轨、无碴轨道和桥梁等系统)的影响规律及其在工程中的应用。本书的研究工作主要包括以下 6 个方面:

(1)建立了较为完善的无碴轨道、桥梁和车辆耦合振动的模型。对于广泛应用于有轨交通的三种无碴轨道结构——板式轨道、弹性支承块式轨道和浮置板式轨道,本书系统地分析了它们的结构特点,将其视为二级隔振系统,并根据轨道板长度尺寸的大小,建立了轨道板结构基于弹性支承上的自由-自由边界的梁模型和刚体模型,并且考虑了车辆、钢轨、无碴轨道、桥梁运动方程的动力耦合作用,分别进行了系统的比较、分析和求解;同时,讨论了两种模型的适用范围,给出了弹性支承的多跨连续 Euler 梁的理论模型以及本征值问题的求解方法,得到了连续支承 Euler 梁的本征值问题的理论解,从理论上证明了将钢轨看做有限长简支梁的可靠性。

(2)对轨道板结构特性进行了减振分析。本书分析了轨道板的结构特性,即质量、抗弯刚度、高度和纵向布置等方面对车辆、无碴轨道和桥梁耦合振动影响的规律。本书的分析表明:轨道板的质量增加与车桥系统振动的改善无必然联系,而系统的振动与轨道板的抗弯刚度和轨道板的纵向布置有关;本书还定量分析了它们之间的关系。建议高架桥上的轨道板结构(包括浮置板)采用空心板,以减轻桥梁的恒载和增加轨道板的抗弯刚度。

(3)对轨道板下支承材料性能进行了减振分析。本书系统地分析了连续整体型轨道板和预制式轨道板下支承材料的刚度系数、阻尼系数和支承间距的变化等因素对钢轨、箱梁和车厢振动的影响规律。为了取得较为理想的减振效果,本书对支承材料的刚度系数和阻尼系数值给出了合理的取值范围,对轨道板下支承的材料特性的选择给出了建议。

(4)对钢轨下橡胶垫板材料性能进行了减振分析。本书系统地分析了连续型轨道板和预制式轨道板上或轨下橡胶垫板的刚度系数、阻尼系数的变化对钢轨、桥梁和车厢振动的影响规律。为了取得较为理想的减振效果,本书对轨下橡胶垫板的刚度系数值和阻尼系数值给出了合理的取值范围,对轨下橡胶垫板的刚度系数、阻尼系数等材料性能的选择给出了建议。

(5)秦沈客运专线板式无碴轨道的减振结构优化设计。针对秦沈客运专线沙河大桥桥上通过高速列车时不能满足车辆运行平稳性标准的情况,通过对车桥系统耦合振动的分析,从轨道板的结构(采用空心板、增加截面抗弯刚度、修正纵向尺寸)、轨道板下的橡胶垫板布置以及轨下橡胶垫板的材料性能等方面通过车桥系统耦合振动分析等方面,提出了满足车辆运行平稳性标准和桥梁动力性能评定标准的若干改进建议。

(6)车桥系统耦合振动中轮轨作用力迭代求解的方法和车辆模型的改进及校核。通过车桥耦合振动结果的分析,以及 ANSYS 软件的计算所进行的校核,对文献[145]给出的车辆振动模型和轮轨接触力迭代求解方法给予了改进,结果的分析 and 比较表明了本书给出的改进方法的合理性。

本书是由郑州航空工业管理学院建筑工程管理系的李广慧、杨广军,以及河南通和高速公路养护工程有限责任公司的刘伟、河南高速公路发展有限责任公司的王中平共同执笔完成的,在本书完成过程中,得到了上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院的黄醒春教授的大力支持和帮助,在这里表示衷心的感谢。

本书系统地论述和总结了国内外学者近几年来在轨道交通与无碴轨道领域内所进行的研究工作。其主要内容包括:无碴轨道结构的建模,钢轨和箱梁结构的建模,车辆-无碴轨道-桥梁系统耦合振动模型以及求解其动力方程的数值方法,轮轨作用力迭代求解方法的改进,轨道不平顺功率谱及数值模拟,无碴轨道系统的结构特性对车桥振动响应影响的分析,无碴轨道系统结构减振优化设计的应用实践。本书内容取材新颖,紧跟学术前沿,同时注重与实际联系。期望该书对读者能有一些启发和帮助。然而,限于作者水平,错误和不当之处还请读者批评指正。

最后,感谢国家自然科学基金委员会对本书的完成所给予的资助。

作者

2007年2月

目 录

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 有轨交通系统概要	(1)
1.2 减振降噪型无碴轨道结构	(5)
1.3 车辆与结构动力相互作用研究的历史回顾	(14)
1.4 车辆与结构动力相互作用研究的发展现状	(18)
1.5 本书研究的意义、方法和内容	(21)
第 2 章 车辆-桥梁系统的振动性能评价标准	(24)
2.1 桥梁上列车运行安全性与旅客乘坐舒适度的控制因素	(24)
2.2 车辆运行安全性标准	(26)
2.3 车辆运行平稳性标准	(28)
2.4 桥梁动力性能评定及标准	(33)
第 3 章 结构动力和减振分析的基本理论和方法	(42)
3.1 多自由度线性系统的振动	(42)
3.2 隔振与减振原理	(48)
3.3 梁的弯曲振动	(57)
3.4 直接积分法	(64)
第 4 章 车辆-无碴轨道-桥梁系统动力方程的建立	(69)
4.1 高速铁路和轨道交通高架桥的特点	(69)
4.2 引起车桥系统振动的原因	(70)
4.3 车桥动力相互作用的分析方法	(70)
4.4 轨道不平顺及其数值模拟	(72)
4.5 简支梁在移动车轮加簧上质量作用下的振动分析	(77)
4.6 车辆(机车)计算模型及运动方程	(86)
4.7 钢轨、无碴轨道与桥梁的计算模型及运动方程	(88)
4.8 钢轨的连续多跨梁理论模型及其振型函数的确定	(97)
4.9 车辆、无碴轨道和桥梁系统的计算模型及运动方程	(111)
第 5 章 车桥耦合振动分析的程序校核以及轮轨作用力迭代求解方法的改进	(123)
5.1 分离模型的分析方法	(124)
5.2 轮轨接触力迭代求解方法的改进	(127)
5.3 程序的校核	(128)
5.4 分离模型方法的数值仿真结果	(131)
5.5 结论	(134)

第 6 章 无碴轨道系统的结构特性对振动响应影响的分析	(136)
6.1 车辆、无碴轨道、桥梁的耦合振动分析	(136)
6.2 轨道板结构质量变化对车桥耦合振动的影响	(145)
6.3 轨道板结构抗弯刚度或高度变化对车桥耦合振动的影响	(153)
6.4 轨道板纵向布置对车桥耦合振动影响的分析	(159)
6.5 轨道板下弹性支承刚度系数对车桥耦合振动的影响	(167)
6.6 轨道板下支承阻尼系数对车桥耦合振动的影响	(175)
6.7 轨道板下分布式支承间距对车桥耦合振动的影响	(182)
6.8 钢轨下橡胶垫板刚度系数对车桥耦合振动的影响	(188)
6.9 钢轨下橡胶垫板阻尼系数对车桥耦合振动的影响	(195)
6.10 关于系统响应的频域分析的讨论	(203)
第 7 章 无碴轨道系统结构减振优化设计的应用实践	(211)
7.1 秦沈客运专线沙河大桥车桥系统动力分析	(211)
7.2 轨道板结构的改进	(215)
7.3 轨道板下支承材料的改进	(220)
7.4 钢轨下橡胶垫板材料性能的改进	(223)
第 8 章 总结与展望	(227)
8.1 车辆、无碴轨道和桥梁系统耦合振动分析的总结	(227)
8.2 本书研究的创新性	(230)
8.3 有待进一步研究的问题	(231)
参考文献	(234)

第1章 绪 论

1.1 有轨交通系统概要

地面交通按大类分为无轨交通(主要指公路)和有轨交通两类^[1]。有轨交通,泛指利用轨道作为机车车辆导向的交通方式,它是科学进步和大规模的商品化生产与经济交往的产物。若以 1825 年英国在达林顿—斯托克顿之间修建的世界第一条由蒸汽机车头做牵引的铁路(21km)(Railway)作为世界有轨交通诞生的标志的话,有轨交通发展至今已有 180 多年的历史了,是现代交通运输系统的重要组成部分。

有轨交通从它的作用与空间分布来看,有城间轨道交通(习惯称铁路)和城市快速轨道交通(有时简称城市轨道交通或轨道交通)之分。我国的经济处于快速发展期,城市化进程的步伐也在大大加快,客货运输的需求不断增长。建设以快速铁路为主干的国家铁路网络和以轨道交通为主体的城市公共交通网络,是我国未来交通运输发展的重要内容。

1.1.1 铁路的建设与发展

1.1.1.1 世界铁路的建设与发展

世界铁路的建设是从经济发达的西方国家开始的。1825 年英国达林顿—斯托克顿间诞生了世界第一条铁路之后,当时世界上经济比较发达的美国、法国、德国等国纷纷效仿修建本国铁路,使铁路成为当时先进生产力的代表;在 19 世纪后半叶至 20 世纪初,由于铁路在与水运的竞争中,在速度和价格方面表现出了极大的优越性,西方国家(如美国)在政府投资导向的支持下,进入铁路修建的高潮期;20 世纪 20 年代后,在公路运输崛起以及铁路盲目建设过快的情况下,铁路发展基本上呈停滞状态。特别是第二次世界大战后,欧洲主要发达国家在战后重建中,公路和航空运输发展迅猛,铁路与公路和航空的竞争更加激烈,铁路客货运输量锐减,在无利可图甚至严重亏损的状况下,美、英、德、法等国封闭和拆除了部分铁路。但一些发展中国家开始重视铁路建设。

在改革铁路管理体制的同时,探索其在速度和舒适度上的突破。1964 年,世界上第一条高速铁路在日本诞生,随之而来的是铁路运行速度的不断刷新,铁路这个传统产业又焕发出了新的活力。最近 30 多年来,世界上工业发达国家积极组织研究和开发新技术,促进了高速铁路的发展。日本、法国、德国、意大利、西班牙等国已经修建了多条高速铁路;韩国及我国台湾地区也正在修建高速铁路。各国为何钟情于高速铁路?其主要原因在于:高速铁路具有快速、安全、舒适、环保和大运量、低能耗、全天候等优势,符合可持续发展的要求,在运输市场上具有强大的竞争力。另外,高速铁路不仅有机会创造良好的经济效益,而且可以带动沿线城市的经济发展,取得良好的社会效益。当今世界,发展高速铁路是技术进步的大趋势,是实现铁路现代化、信息化的必由之路。

当今铁路发展两大趋势是客运高速和货运重载。高速和重载运输是铁路现代化的重要标志,同时也带动了铁路运输各生产部门设备和管理的现代化,当然也对线路设计和施工提出了更高的要求。

1.1.1.2 中国铁路的建设和发展

旧中国的铁路建设走过一条漫长而曲折的道路。1876 年未经我国清政府批准由英国擅自修建的上海吴淞铁路(14.5km)是中国大陆上出现的第一条铁路,比世界铁路的问世整整晚了 51 年。在新中国成立前的 70 余年里,旧中国处在列强入侵、军阀混战和国民党腐败政府的统治中,旧中国的铁路发展缓慢、数量少,到 1949 年才建成 2 万多公里;布局偏,仅东北地区的铁路就占中国铁路总长度的 40% 以上;各线间标准低且不统一,宽轨、准轨、窄轨并存;帝国主义分割经营及战乱造成全路管理混乱。

新中国成立后,中国铁路的发展有了长足的进步,主要表现在:①重点突出,铁路建设高潮迭起;②铁路网发展迅速,基本形成了横贯东西、沟通南北、连接亚欧的路网骨架;③依靠科技,提高建设水平,在长江、黄河上架起了“长虹”,修建了长、大隧道,诞生了第一条重载和准高速铁路,革新了牵引动力,使轨道结构现代化;④铁路的建设也带动了铁路通信信号、客货运输组织与管理向现代化迈进^[2]。

建设现代化的交通运输体系,是 21 世纪我国经济建设战略重点之一。我国幅员辽阔,人口众多,资源分布不平衡等因素决定了铁路在综合交通运输体系中的骨干地位。在改革开放的形势下,我国铁路建设取得了长足进步,特别在最近十几年,铁路建设更是持续快速地发展。目前,全国铁路营运里程已近 70 000km^[3],但是我国铁路总体上还处于运输能力不足、技术装备水平较低的阶段。主要干线运输能力长期紧张,客货混跑限制了运输速度的提高。为适应国家经济社会发展和运输市场的需求,我国铁路客运发展的主要目标和任务是:在繁忙的干线上建设快速客运专线,实行客货分线运输;发展高速铁路,逐步形成高速客运网;对主要干线进行提速改造,形成覆盖面较宽的快速客运网。“十五”期间经改造形成的规模为 14 000km 左右、客车运行速度 120~160km/h 的快速客运网,做到了运输距离 500km 范围内列车朝发夕至,1 200km 范围内夕发朝至,2 000km 范围内一日到达。同时,正在深入进行石家庄—太原、郑州—西安、武汉—广州等客运专线与京沪高速铁路的方案比较,积极开展建设准备工作。修建高速铁路和提速、改造既有线都迫切需要加强高速铁路技术和装备的研究。

1.1.2 城市轨道交通的建设和发展

城市轨道交通指市郊铁路、地铁、轻轨、有轨电车和磁悬浮列车等轨道客运交通系统。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、乘坐舒适方便等特点,常被称为“绿色交通”。由于世界范围内人口向城市集中,城市化步伐加快,大中城市普遍出现人口密集,住房紧缺,交通阻塞,环境污染严重,能源匮乏等所谓的“城市病”,而地铁和轻轨经过 150 多年的发展,机车车辆、自动控制、通信和信号等技术都有了很大的进步,很多方面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运输的根本途径,对 21 世纪实现社会经济的可持续发展有非常重要的意义。

1.1.2.1 国外地铁和轻轨的发展

1863年,世界上第一条用蒸汽机牵引的地下铁道线路在英国伦敦建成通车,至今已有140年的历史了。世界第一条地下铁道的诞生,为人口密集的大都市如何发展公共交通取得了宝贵的经验,特别是1879年电力驱动机车的研制成功,使地下客运环境和服务条件得到了空前的改善,地铁建设显示出强大的生命力。从此以后,世界上一些大城市相继修建了地下铁道交通。1886年,美国蒙哥马利市出现了轻轨,从此有轨电车也得到了很快的发展。

回顾轨道交通的发展史,它和其他事物一样,遵循着哲学的普遍规律,即否定之否定的发展过程:有轨电车从大发展到大拆除;然后汽车登上历史舞台,逐渐成了城市交通的主角;到20世纪末,以地铁和轻轨为代表的城市轨道交通又恢复了它的主导地位,这是个螺旋式的上升过程。

(1)19世纪末到20世纪30年代,城市轨道交通经历了诞生和发展时期。轨道交通在城市客运交通中占主角地位。

(2)20世纪30~40年代,随着汽车工业的迅猛发展,由于汽车方便、灵活、舒适,深得人们喜爱;而有轨电车噪声大、有振动、欠舒适、速度慢而逐渐失去人们的青睐;地铁也由于造价昂贵、乘坐不便,遭到了冷落。

(3)20世纪50年代以后,由于小汽车的疯狂发展,道路阻塞、交通危机困扰着世界各大城市。痛定思痛,人们认识到只有发展以轨道交通为骨干的公共交通,才是搞好城市客运交通的唯一出路。目前,世界上已有100多座城市建成了地铁,还有一些城市正在筹建。

(4)20世纪60年代,科学技术的发展为改造有轨电车创造了技术条件,使有轨电车得到了新生。新生后的有轨电车在速度、能耗、噪音、振动、车重、爬坡、制动和运载能力等方面均优于原有有轨电车;在造价(仅为地铁的 $1/3 \sim 1/5$)、工期、灵活、方便等方面也优于地铁。1978年3月国际公共交通联合会(EITP)在比利时首都布鲁塞尔举行的会议上,确定了新型有轨电车的统一名称:Light Rail Transit(即轻轨交通,简称“轻轨”)。20世纪80年代和90年代,全世界又掀起了新一轮的轻轨交通系统的建设高潮。据粗略统计^[6],现如今已有50多个国家修建了360多条轻轨线路。

1.1.2.2 我国的地铁和轻轨的发展

我国的轨道交通始于1908年,上海建成了第一条有轨电车线路^[6],而1965年7月1日北京市动工兴建的北京地铁则翻开了我国现代城市轨道交通建设新的一页。我国城市轨道交通的发展状况须从北京和上海说起。

1.1.2.2.1 北京城市轨道交通

早在20世纪60年代,北京开始修建地铁,1969年第一条线路通车,全长23.6km;1984年第2条线路(环线)通车,全长19.9km;2000年开始,北京开始建设第一条城市轻轨铁路(13号线),全长40.85km,于2003年2月全线开通;2002年,北京第二条轻轨(八通线)开始建设,于2003年底开通,全长18.964km。综上所述,截至2004年底,北京地铁共有车站70座、线路114km,分布在4条运营线中。

北京市的城市轨道交通的规模会随着2008年奥运会的临近,将有一个大发展。2003

年底已开建的北京地铁5号线揭开了奥运地铁战役的新篇章;2004年底开工建设的地铁4号线是北京市区轨道交通网中贯穿南北的一条交通主干线。北京的城市轨道交通建设将以每年40km的速度发展,预计到2008年将建成300km地铁和轻轨,2010年将建立以城市快速轨道交通为主的四通八达的公共交通体系,2030年将建成1000km的现代城市轨道交通体系。那时,北京市的居民从居住区在5分钟内即可到附近的地铁口乘上地铁。

1.1.2.2.2 上海城市轨道交通

上海市的现代城市轨道交通建设始于1995年开通的上海地铁1号线。后来地铁1号线向南延长至莘庄站,向北延长至共富新村,全长33km,共设车站25座、地面站12座。2000年底,地铁2号线和轻轨明珠线相继建成通车。上海地铁2号线为东西向行驶,全长27.6km。轨道交通明珠线一期全长24.97km,线路沿地面或高架,其中地面线3.6km、高架线21.37km。轨道交通4号线(明珠线二期)于2003年开始建设,2005年通车,全长22km。轨道交通5号线北起莘庄站,与轨道交通1号线衔接,沿沪闵路往南至交通大学附近,从东川路折向西南直至天星路上,全线共设11座车站,全长17.2km,除起点端的410m地面线外,均为高架线路,是国内首条城市高架轨道交通轻轨线路。

2003年上海建成了世界上第一条磁悬浮快速列车线路,此线路自浦东新区陆家嘴到浦东国际机场,全长35km,它的建成展示了最新的城市轨道交通线路在中国大地上开通。

上海市的轨道交通已经制定了一个宏伟的规划,将组成一个宏大的城市轨道交通体系。在未来二三十年内,将组建市级线或快速轨道线4条,所谓市级线就是城市轨道交通网络的骨干线,它可从市中心到达市区各大交通枢纽;同时建成8条市区级轨道线。它们将一起构成上海市的轨道交通大网络。

1.1.2.2.3 其他城市轨道交通

我国的其他城市,如广州、天津和深圳的轨道交通也有不同程度的发展。此外,大连、长春、武汉、重庆、南京、郑州等城市已经开始建设轻轨或地铁,沈阳、杭州、成都和西安等城市即将开始建设本市的地铁。

21世纪是中国城市轨道交通的新纪元,经济大发展促进城市化的发展,中国将成为世界上城市轨道交通最大的市场。21世纪初,中国的城市化水平已达到45%,城市人口已达到4.2亿。已有10多座大城市进入城市轨道交通市场,已承建了450km的地铁和轻轨线路。在2021年,可能建造33条地铁和轻轨线路,总长650km。

从全国范围来看,以北京为中心的城市轨道交通大网络、以上海为中心的长江三角洲轨道交通大网络和以广州、深圳为双中心的珠江三角洲轨道交通大网络将在近10~20年内形成,而沈阳、大连、天津、成都、西安、南京、苏州、武汉、重庆等大城市的轨道交通体系也呈星罗棋布之势。我国城市轨道交通在经济发展大潮的推动下必将灿烂辉煌。

1.1.2.3 轨道交通发展方向

轻轨没有产生之前,有轨电车和地铁有一条明显的界限。自轻轨诞生以来,就显示出它的强大的生命力,其飞速地发展,采用了更多的新技术,客运量越做越大,已接近甚至达到了地铁的客运量;而地铁也吸收了轻轨的新技术,从大编组、大间隔、重车体向小编组、小间隔、轻车体方向发展。20世纪70年代以后发展的地铁,由于高架技术的日趋成熟(噪声、振动等问题得到解决),高架桥部分的比例有了明显的增加。

近几年来,由于新技术的不断发展和应用,地铁和轻轨相互渗透发展,其差别越来越小,而且有着共同发展的趋势。按此趋势发展下去,城市轨道交通系统(有轨电车除外),除去客运量大小上的差别外(地铁单向高峰载运3万~6万人次/小时,而轻轨单向高峰载运1万~3万人次/小时),其他方面就很难找到差别了。也许有朝一日,人们不再区别轻轨和地铁,而只需在客运量方面分几个档次。最近我国的轨道交通专家建议,用不着人为地去区分轻轨还是地铁,可通称快速轨道交通,因为达到一定的客运量是目的(客运量可分几级),而架设方式则是达到这一目的的手段,手段可以根据不同的客观因素灵活选择。东南亚一些国家把城市快速轨道交通称为集运系统,台湾则称为捷运系统。

1.2 减振降噪型无碴轨道结构

随着我国铁路客运专线、高速铁路的修建和城市轨道交通的发展,振动与噪声问题也引起了各个方面的关注,如果不加以有效的控制,其污染将成为制约有轨交通发展的主要因素。有轨交通的振动和噪声控制在设计阶段就应该加以考虑,这时可采用控制方案有较大的选择余地,一般可以以较小的代价取得较好的控制效果。如果等建成之后再进行治疗和补救,不但所需费用高,给有轨交通的功能和美观会带来不利的影响,而且会构成种种技术困难,使很多原本可以采用的减振降噪手段难以实施,不易取得理想的治理效果。例如,日本的新干线通车后仅几个月,就因噪声问题招致沿线居民的强烈抗议,之后花费十多年时间和大量的资金才使该问题得以缓解,而无法改造的沿线路段和桥梁不得不采用了全封闭处理,花费甚高,且影响美观;美国纽约等城市也有类似的教训。

有轨交通的减振降噪不仅可以产生明显的社会效益,还可带来更加可观的经济效益。合理的减振降噪措施可以缩小沿线噪声重污染区域范围,增加沿线可开发的土地面积,间接效益将是巨大的。1996年10月我国通过了《中华人民共和国环境噪声污染防治法》,其中第三十九条规定了应当减轻因铁路运行造成的环境噪声污染。城市轨道交通振动和噪声的防治可作为环保产业的一部分,在城市轨道交通环境建设方面和经济与环境协调的可持续发展方面都具有重要而独特的意义。

对于减振降噪措施,轨道结构的选择也是一个主要的方面。本节就会对有轨交通中减振降噪型的无碴轨道结构的选择与设计作一些介绍。

1.2.1 无碴轨道结构的振动和噪声特点

1.2.1.1 有碴轨道和无碴轨道结构

轨道结构按其轨下基础的不同可分为两大类^[2-5]:有碴轨道(有碎石道床)和无碴轨道(无碎石道床)结构。有碴轨道结构具有造价相对较低、施工速度较快、维修方便及弹性较好等优点。在有碴轨道的应用中,人们逐渐发现了它的缺点:①有碴轨道养护维修量大;②有轨交通线路在其运营期间内进行养护维修几乎不可能;③地铁和轻轨线路在城区内以隧道和高架形式穿越居多,其养护维修作业在空间上受到极大的限制,且隧道内工作条件十分恶劣;④采用有碴轨道道床增加了高架线上桥梁的自重,因而需加大梁高和桩基尺寸,增加投资。此外,有碴轨道道床的粉尘也给城市环境造成污染。

相对于有碴轨道,无碴轨道具有以下显著优点:稳定性、平稳性、刚度均匀性较好,维修工作量少,简洁易清洗,减少桥梁恒载,降低梁桥的刚度和造价,特别是对消除或减少道床变形其具有更为突出的效果。因此,无碴轨道逐渐被世界上许多国家所重视,并在近几十年里,许多国家对无碴轨道结构已开展了长期、系统的研究工作。一些国家,如日本、德国,已把它作为高速铁路和城市轨道交通的主要结构形式加以发展和利用。

1.2.1.2 无碴轨道结构的振动和噪声特点

少维修、高稳定性的无碴轨道的开发与应用,是有轨交通轨道结构发展的必然趋势。但无碴轨道结构存在刚性大、反射部分噪声等缺点,因此减振降噪是无碴轨道结构必须解决的问题。

轨道结构的噪声分为轮轨噪声(摩擦、振动、冲击引起的轮轨噪声辐射)和桥梁结构的噪声(桥梁振动引起的噪声辐射),振动源为轨道不平顺。由于噪声和振动在 500 ~ 1 000Hz 频率范围内线性相关,且钢轨在此范围内是主要辐射体,因此抑制钢轨振动,减少钢轨的振动加速度和频率,对降噪起着关键作用。通过对轨道结构各组成部分参数(比如刚度、阻尼、质量等)的合理匹配可以达到这一目的。轨道结构的减振,可采用隔振技术,阻断振动的传播途径,使得钢轨作为振源向周围土介质或向梁跨结构传递的振动较小,从而避免结构的“二次噪声”。

1.2.1.3 减振降噪型无碴轨道的设计原则

轨道结构的减振降噪应根据不同的环境要求来设计,从而做到物尽其用,经济合理。根据上述无碴轨道结构噪声和振动产生特点的分析,综合其他因素,其减振降噪型轨道结构的设计应遵循以下原则^[9]。

(1)在列车长期动荷载作用下,轨道结构应保持安全、可靠的几何状态,并具有足够的承载能力、强度储备和使用耐久性。

(2)轨道结构的振动质量、刚度和阻尼应根据轨道结构动力学原理进行合理选择,以适应减振降噪要求,使结构体系有最大的减振降噪效果,并能减缓轮轨之间的冲击荷载,减轻钢轨的磨耗和波磨。

(3)结构简单,便于组织快速施工和安装,便于配套设备和机械的应用,施工进度应符合铺轨的要求,对于混凝土道床的局部损坏,应考虑修复的可能性。

(4)在轨道的基础已确保坚实稳定的前提下,仍需要考虑因施工误差、曲线超高变化以及预应力混凝土桥梁的伸缩、上拱等因素引起的轨面标高的改变。为此,配套的扣件设计应考虑足够的调整量和可行的调整方法。

(5)合理选材,轨道部件国产化,从而控制轨道结构的成本。由于无碴轨道可大幅度降低维修费用,其综合的经济效益可被接受,从而有推广应用的价值。

(6)因为减振材料的寿命不如混凝土,其少量维修是必要的,因此减振材料的更换应方便。

1.2.2 轨道结构部件与一般减振降噪措施

1.2.2.1 轨道结构部件

轨道结构部件包括钢轨、扣件、轨下基础、道碴、无缝线路,以及其他相关设备(如车

挡、防脱装置、线路标志)。其中,与轨道结构减振降噪相关的是前五项内容,而钢轨、扣件和轨下基础对减振降噪的关系最为密切。

对于钢轨的选型,选用 50kg/m 的钢轨较 60kg/m 的似乎更为经济合理。但从减振降噪的角度来看,50kg/m 轨型的竖向刚度要比 60kg/m 轨型减少 36.7%,故重型钢轨受列车的冲击振动相对较小,更有利于减振降噪。

道岔一直是轨道结构的薄弱环节,由于车轮通过的部件多,造成的振动冲击和噪声也较多,因此从减振降噪角度,可以考虑使用无缝线路,但由于造价较高,目前尚存争议。根据地铁设计规范,轨道交通的正线应铺设无缝线路,可降低轮轨噪声 5~10dB。

轨道的弹性,尤其是整体道床,主要取决于扣件的弹性。国内外都做了大量的研究工作,研制开发了满足不同减振要求的钢轨扣件。在减振要求一般的地段,上海地铁采用 DTⅢ型扣件,该扣件采用二级减振,在钢轨和铁垫板下都设绝缘橡胶板,弹性好,比北京地铁采用的 DTⅠ型减少 5~10dB。

减振要求较高的地段,德国科隆、美国华盛顿、法国巴黎、中国上海以及新加坡的地铁均采用了轨道减振型扣件(Cologneegg)。该扣件的承轨板和底座之间用减振橡胶硫化粘贴在一起,利用橡胶圈的剪切变形,获得较低的竖向刚度,较 DTⅠ型扣件加速度传递函数减少 15~10dB,较 DTⅢ型扣件减少 10~20dB,减振效果显著,能有效减少对周围环境的干扰。

轨下基础的选择,后文将作详细论述。

1.2.2.2 一般减振降噪措施

一般减振降噪措施有:

- (1)采用 60kg/m 重型钢轨;
- (2)全线铺设焊接长钢轨无缝线路,减少钢轨接头;
- (3)采用弹性扣件;
- (4)对无碴轨道的施工及养护制定严格的规程,以保持轨道结构长期稳定与线路平顺;
- (5)定期打磨钢轨,提高轨面平顺度,同时镟圆车轮,提高车轮的圆顺度;
- (6)小半径曲线钢轨侧面涂油,以降低尖叫噪声和钢轨侧磨。

1.2.3 无碴轨道结构

无碴轨道分类,国内外不尽一致,本章主要介绍 3 种铺设在铁路和轨道交通上的减振降噪型无碴轨道:弹性支承块式轨道、板式轨道和浮置板式轨道。

1.2.3.1 弹性支承块式无碴轨道

瑞士国营地铁首次采用弹性支承块式无碴轨道结构(LVT)。瑞士联邦铁路的轨道检查记录显示,运营了 1~7 年的轨道几何状态仍可保持在标准范围内,最大限度地减少了轨道的维修量,总运营费用较有碴轨道可节省 50%。由于其特有的减振、降噪、减磨等优越性能,后来被世界许多国家,如丹麦、英国、法国、葡萄牙等所采用。最高时速 200km/h 的英吉利海峡隧道通过多种无碴轨道结构比较,采用了该种结构形式(见图 1.1),并于 1993 年 6 月开始运营。

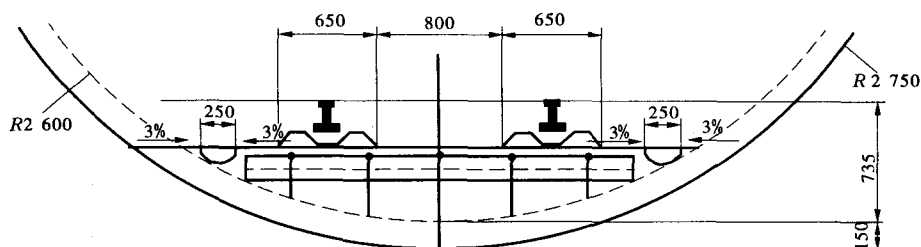


图 1.1 英吉利海峡隧道的 LTV 无碴轨道结构(单位:mm)

在我国,弹性支承块式无碴轨道结构在国铁中刚刚开始应用,在 18km 长的秦岭隧道内,铺设了这种结构的轨道。此外,我国的秦沈客运专线也部分地铺设了这种轨道结构的试验段,以验证其减振性能。由于这种轨道结构减振降噪的效果较为明显,因此对于在城市轨道交通中对振动和噪声较为敏感的地段,特别是高架结构,LTV 轨道结构是一种比较理想的方案^[9]。广州地铁 1 号线已铺设,北京地铁于 1972 年在东十四条站铺设了这种轨道,现场测试结果较一般整体轨道振动加速度降低 30%,减振效果良好。经过 20 多年的运营使用,技术状态仍良好。上海地铁 1 号线向北延伸,部分高架地段采用了这种轨道,其结构形式如图 1.2 所示。

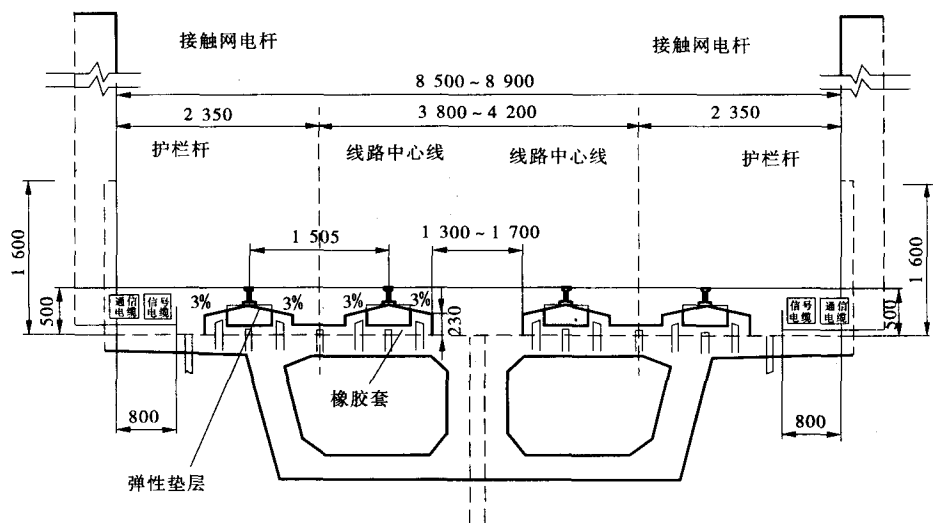


图 1.2 高架桥上的弹性支承块式无碴轨道(单位:mm)

1.2.3.1.1 结构组成^[3]

弹性支承块式无碴轨道结构由钢轨及扣件、钢筋混凝土支承块、块下弹性垫层、橡胶靴套、混凝土道床板及混凝土底座等组成,如图 1.3、图 1.4 所示。弹性垫层为无碴轨道提供垂向弹性,橡胶靴套提供横向弹性。弹性垫层质地均匀,使钢轨受力均衡,轨道几何形位易于保持等特点。

1) 钢筋混凝土支承块

支承块采用普通钢筋混凝土结构,混凝土强度为 C50,支承块顶面尺寸为 $624\text{mm} \times$

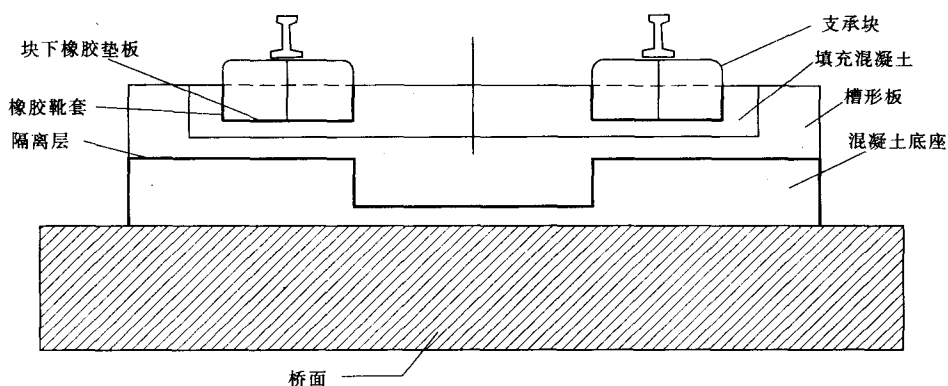
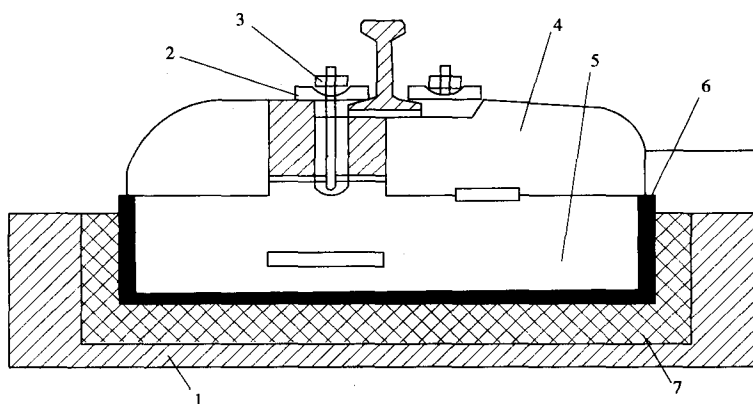


图 1.3 高架桥上弹性支承块式无碴轨道结构



1—基础混凝土;2—扣件;3—螺栓;4—钢筋混凝土轨枕块;
5—泡沫橡胶垫;6—橡胶套;7—水泥砂浆

图 1.4 弹性支承块式无碴轨道结构

324mm,底面尺寸为 600mm×290mm,轨下截面高度为 200mm。

2) 橡胶靴套

橡胶靴套是配合支承块使用,靴套的周围和底层厚度均为 7mm。橡胶靴套的功能是缓冲列车横向荷载的冲击作用,故在其横向端面设有沟槽以产生弹性,底部不设沟槽,要求支承块橡胶靴套的静刚度为 140~165kN/mm。

3) 块下弹性垫层

块下弹性垫层是放置在橡胶靴套之内支承块的下方的,其平面尺寸为 596mm×284mm,厚度为 12mm。块下弹性垫层的上、下表面均设有沟槽,以满足轨道弹性的要求,块下弹性垫层的静刚度为 95~110kN/mm。

4) 混凝土道床板

混凝土道床板由弹性支承块和 C40 级填充混凝土组成。支承块中心距为 600mm,以每 7~8 个支承间距作为一个道床板长度单元,按设计要求配筋。

5)混凝土底座

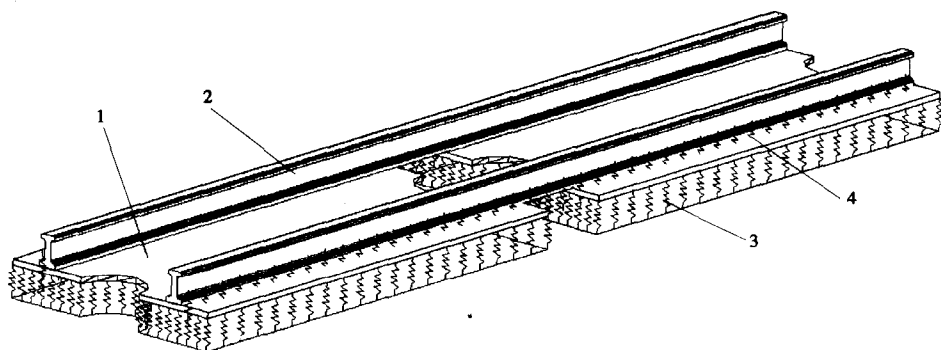
混凝土底座应与隧道或高架桥桥面上的预留钢筋连接并用同等级的混凝土使之灌注成一体结构,其截面为 $200\text{mm} \times 2\,730\text{mm}$,按最小配筋率配筋。道床板与底座之间设隔离层,使道床板具有可修复性。

1.2.3.1.2 经济效果

按照一般隧道弹性支承块式整体道床的实际工程费用,并考虑今后改进材质和结构可能增加的费用,预计单线每公里 250 万~400 万元(其中不包括扣件、钢轨及钢轨焊接铺设费用),这种整体轨道工程费用较为低廉。弹性支承块式整体道床轨道结构建议用于有一般减振要求的 1 类地区,如居民区、商业区域等。

1.2.3.2 板式(Slab)轨道

这种轨道结构是在类似混凝土高架桥、岩石隧道等坚硬基础上,铺设预制的混凝土或预应力混凝土板而得名的,板与混凝土基床之间填充沥青水泥浆。板式轨道主要在日本铁路中使用^[2,3],其东北、上越和北陆新干线几乎全部使用这种轨道结构,板式轨道用于桥梁和隧道的全部线路上,分双向预应力板(用于寒冷地区)和钢筋混凝土板,形式上有平板式和衬型轨道板。我国的秦沈客运专线的狗河特大桥和双何特大桥上也都铺设了这种板式轨道^[6]。板式轨道的构造如图 1.5、图 1.6 所示。



1—轨道板;2—钢轨;3—水泥沥青(CA)砂浆;4—轨下胶垫

图 1.5 板式轨道的构造

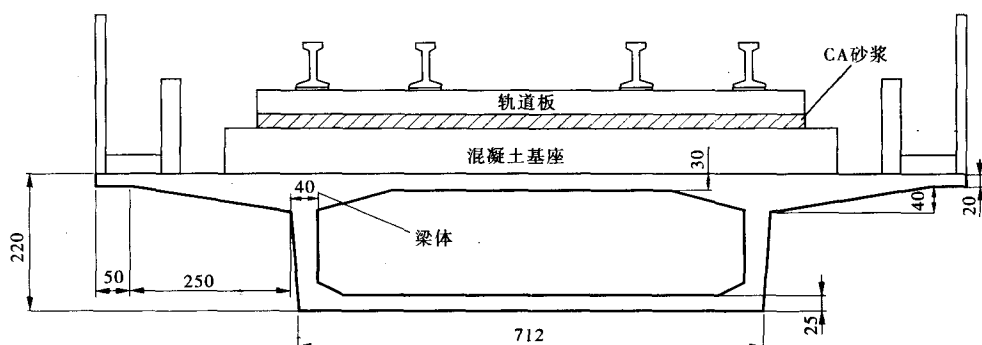


图 1.6 板式轨道断面图(单位:cm)