



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



同济大学 胡用生 主编

XIANDAI GUIDAO CHELIANG DONGLIXUE

现代轨道车辆动力学

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

责任编辑：程东海

封面设计：薛小卉



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

地址：北京市宣武区右安门西街8号

邮编：100054

网址：WWW.TDPRESS.COM

ISBN 978-7-113-10434-4



9 787113 104344 >

定 价：35.00 元



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代轨道车辆动力学

同济大学 胡用生 主 编
王福天 主 审

中国铁道出版社

2009年·北京

内 容 简 介

本书共十一章,主要内容包括:轨道车辆动力学基础,轨道车辆的振动与模型,钢轮钢轨系统车辆动力学,磁浮车辆动力学原理,轮胎式轨道车辆动力学,牵引、制动、黏着与纵向动力学,轨道车辆柔刚体动力学,轨道车辆与线桥耦合动力学,轨道车辆的主动控制,轨道车辆的空气动力学与噪声,轨道车辆开发与参数识别及模型评估。

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

现代轨道车辆动力学/胡用生主编. —北京:中国铁道出版社,2009.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-113-10434-4

I. 现… II. 胡… III. 轨道车-动力学-高等学校-教材 IV. U216.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 141665 号

书 名:现代轨道车辆动力学

作 者:胡用生 主编

责任编辑:程东海 电话:010-51873135

封面设计:薛小卉

责任校对:孙 玫

责任印制: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:三河市华业印装厂

版 次:2009年11月第1版 2009年11月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:18.5 字数:461 千

书 号:ISBN 978-7-113-10434-4/U·2552

定 价:35.00 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

《现代轨道车辆动力学》是继王福天教授主编的《车辆动力学》(1981年首版)、《车辆系统动力学》(1994年首版),张定贤教授主编的《机车车辆轨道系统动力学》(1996年首版)后,为了适应我国大力发展城市轨道交通、磁悬浮交通、高速重载运输时对轨道车辆研究、设计制造、运用维护等方面技术人才的急迫需求,根据过去十多年来国内外在轨道交通领域中采用新理论、新技术的现实,并考虑轨道车辆动力学与控制的理论和实践的新发展、新成果进行了内容扩充,新增了磁浮车辆动力学原理(第四章),轮胎式轨道车辆动力学(第五章),轨道车辆柔刚体动力学(第七章),轨道车辆与线桥耦合动力学(第八章),轨道车辆的主动控制(第九章),轨道车辆的空气动力学与噪声(第十章),轨道车辆开发与参数识别及模型评估(第十一章)等内容。

本书主要面向轨道车辆本科学生,也可作为载运工具、交通工程等专业的本科教材或辅助教材。

由于不少内容是第一次纳入,在理论仿真与控制等方面很多内容又有一定深度,在本科教学中可根据教学时数,以主要基础内容进行授课,其他一些较深内容可做适当简略介绍。本书也可作非车辆本科来源研究生的教材使用,讲授内容可按研究方向适当补充。

本书还结合实际工程问题,为设计、生产与现场工程技术人员提供支持,可作为轨道交通车辆运用、研究、生产部门技术参考用书。

本书由同济大学胡用生任主编,王福天任主审,沈钢、陆正刚任副主编,各章编写人员有:胡用生[第一、二(第四节)、四、六、八(第一节)、十一章],王福天(第二章),沈钢[第三章、第四章(整车仿真段)],陆正刚(第七章),应之丁(第六章部分),任利惠(第五章),周劲松(第九章),张济民[第十章、第九章(第七节)],顾萍[第八章(第二节)]。参与第四章、第六章、第八章编写计算的有黄俊俊、徐翔与江翁。参与全书梳理的有孙丽霞、洪春雷、耿跃、展春波等。本书由四方车辆研究所曹志礼作了全面审阅,并提出许多宝贵意见。

本书内容丰富,不少内容首次编入,限于水平难免有误或不当之处,敬请使用者与技术专家指出,再版时补正。

编 者

2009年6月于同济大学

目 录

绪 论	1
第一章 轨道车辆动力学基础	3
第一节 轨道车辆的基本类型与结构	3
第二节 轨道车辆的基本走行原理	6
第三节 轨道的线路结构与不平顺	9
第四节 轨道车辆动力学性能	15
复习思考题	19
第二章 轨道车辆的振动与模型	20
第一节 轨道车辆的垂向振动	20
第二节 轨道车辆的横向振动	29
第三节 轨道车辆的随机振动	36
第四节 轨道车辆非线性条件下自激振动的极限环	53
复习思考题	59
第三章 钢轮钢轨系统车辆动力学	61
第一节 钢轮钢轨关系	61
第二节 钢轮钢轨车辆的蛇行运动与稳定性	68
第三节 钢轮钢轨车辆的曲线通过	78
第四节 运行安全性	91
复习思考题	95
第四章 磁浮车辆动力学原理	96
第一节 EMS 型常导磁浮车辆动力学	97
第二节 EDS 型超导磁浮车辆动力学	114
复习思考题	117
第五章 轮胎式轨道车辆动力学	118
第一节 轮胎式轨道车辆	118
第二节 跨坐式单轨车辆的动力学方程	127
第三节 单轨车辆的曲线通过与安全性	131
复习思考题	138
第六章 牵引、制动、黏着与纵向动力学	139
第一节 轨道车辆的牵引、制动与黏着控制	139
第二节 列车纵向动力学基础	152
第三节 调车作业中的非稳态冲击工况	155
第四节 列车非稳态运行时的纵向动力学	159

复习思考题	164
第七章 轨道车辆柔刚体动力学	165
第一节 柔刚体系统动力学及模态综合法	165
第二节 轨道车辆柔刚体系统建模方法	176
第三节 轨道车辆柔刚体系统仿真分析	180
第四节 轨道车辆柔刚体动力学和控制联合仿真	185
第五节 轨道车辆动力学分析与仿真软件的发展	188
复习思考题	192
第八章 轨道车辆与线桥耦合动力学	193
第一节 轨道车辆与线路耦合振动	193
第二节 轨道车辆过桥时的车桥耦合动力学	209
复习思考题	222
第九章 轨道车辆的主动控制	223
第一节 车辆的主动及被动悬挂系统	223
第二节 轨道不平顺功率谱的时域反演	224
第三节 天棚减振器及补偿滤波器控制	227
第四节 主动悬挂最优控制	231
第五节 半主动控制	236
第六节 主动悬挂的运用	241
第七节 摆式列车中的主动控制	243
复习思考题	250
第十章 轨道车辆的空气动力学与噪声	251
第一节 气流对轨道车辆的影响	251
第二节 空气动力学的基本理论与方法	252
第三节 列车空气动力学研究方法	256
第四节 列车周围流场分析	259
第五节 轨道车辆噪声及控制	263
复习思考题	271
第十一章 轨道车辆开发与参数识别及模型评估	272
第一节 新产品开发中动力学理论与试验研究	272
第二节 轨道车辆参数的识别与模型评估	274
第三节 理论指导下新型转向架的开发与试验	278
复习思考题	284
参考文献	285

绪 论

现代轨道交通采用车辆连挂的车组或列车,由动力驱动或被动牵引,沿轨道或导向线路运行,属大运量的地面快速运输方式,其最大优点是速度高、能耗低、占地小、运量大。大多采用清洁的电力驱动,是应对经济全球化时代油气能源枯竭与生态环境污染严重困扰的最好交通工具,因此具有绿色交通与节能意义的现代轨道交通日益成为陆上交通运输的主要组成部分。

具有近两百余年悠久历史的轨道交通已从传统方式发展为高速重载铁路、现代地铁、轻轨与独轨、新交通系统和磁悬浮交通等形式。目前我国正成为世界经济增长最快的地区,随着高速铁路、城市轨道交通与磁悬浮等轨道交通在我国得到快速发展,一些过去未知的新问题将出现在我们面前,因而必须重视在这些领域的理论研究与技术发展。

现代轨道车辆动力学是对运行中的轨道车辆之间、车辆与导向线路之间、车辆各主要运动部件之间的相互作用机理进行系统研究的理论,其基本任务是弄清与解决列车或车辆在运行时面临的安全性、平稳性和稳定性等一系列复杂的机理性问题。轨道等支承和引导列车运行,它们的激励引起列车与轨道间的相对运动,引起两者间支承与约束或导向力变化,车轨耦合作用是现代轨道车辆运行平稳和安全的基础因素。现代轨道车辆动力学在综合研究的基础上剖析现有轨道车辆技术,改进或创新更先进及实用的轨道车辆结构形式,以系统理论来指导设计、研究、试验与维护。在我国跨越到高速与重载运输并持续发展的形势下,面对列车与线路的振动、冲击和动态载荷不断增大引起的矛盾,轨道车辆动力学应从确保运行安全平稳方面着手,以提高疲劳强度、减少磨损、延长寿命、降低维护费用为目标,研究与之相关的各类交叉问题,提出减少动态载荷、改善车辆间、车线间、部件间作用的有效措施。

由于现代轨道交通的各类车辆在支承与走行机理等方面存在着某种程度上的差异,本书将以它们共同的动力学原理和原则作为基础出发,针对不同的支承、走行和导向方式加以分析,主要内容如下:

1. 研究和确定各类轨道车辆走行或运行原理,从动力学和控制角度提供设计原则。
2. 研究和确定各类轨道车辆在导向线路上的安全和平稳运行的条件及控制技术。
3. 研究轨道车辆走行、悬挂、牵引、制动和缓冲环节中关键结构与参数,介绍动力学机构中被动系统与主动、半主动控制的设计原理。
4. 研究和确定列车动力学与车辆动力学理论模型、系统分析和计算机动态仿真技术。研究线路运行试验和室内试验方法特别是实车或部件的特性分析与参数识别等方法,研究理论模型、试验验证和评估方法等。
5. 研究轨道车辆与线桥动力学耦合问题,提出如低动力转向架的结构与参数的优选。
6. 研究列车中各类部件的动态作用,以便确定动态载荷,为动态强度设计和疲劳试验研究提供依据;根据动力学理论提出相关的多维激振实验台与实验控制方法。
7. 研究噪声和空气动力学等其他问题。提出减噪与低空气阻力的走行技术。

现代轨道车辆动力学与控制理论涉及到弹性体滚动时的接触理论,运动稳定性理论,随机或非线性振动理论,刚体与柔性体耦合动力学理论,磁浮与导向控制理论,现代控制理论,电力

电子控制技术,地面车辆空气动力学,噪声与冲击控制,系统与参数识别技术,数字信号处理技术,计算机仿真技术,新材料与应用技术等多学科交叉领域。学好和运用好这门课程,需要掌握各类车辆走行原理,车辆或列车的动力学建模与控制系统理论,不仅要对车辆的特殊机械装置和线路桥梁等工程结构有所了解,更需在应对或处理复杂的应用问题上具备工程化概念,善于将复杂问题抽象或简化,抓住关键因素予以解决与处理。

轨道车辆动力学的理论发展大致可分为前后两个阶段,前期属于探索与简化理论模型计算分析的阶段,从20世纪六七十年代开始,随着车辆动力学理论、计算技术与电子计算机的发展,过去很难处理的复杂系统建模与求解能得以实现,因而以高速和磁悬浮列车为代表的一系列轨道车辆在后阶段迅速开发成功。

在21世纪新产品开发时,我国需要跨越目前从经验设计到理论分析与试验验证再返回修改的传统开发阶段,进入到一个以系统的前沿理论为先导,虚拟设计和仿真分析结合的开发设计高级平台,力争在产品研发阶段中能准确预测产品的各项性能,动态载荷和可靠性,优化产品设计,在掌握和发展现有理论的基础上,勇于创新 and 开拓,正确地采取新的原理和结构,通过理论模型的仿真,加速验证和评估,缩短我国新产品的研发周期,及早进入世界的前沿。

近二十年来我国在现代轨道车辆动力学多方面的研究已达到或接近国际水平,现代计算机技术和各类工程应用软件为我们解决复杂问题铺平了道路。在轨道交通技术不断进步的今天,在消化吸收国外先进的理念及技术的基础上,通过努力与实践,我们就可以为未来地面大运量交通工具的发展和创新贡献出自主的理论和技術。

第一章 轨道车辆动力学基础

第一节 轨道车辆的基本类型与结构

地面车辆承担着旅客和货物的运输,其基本组成是车体和走行部。车体装载人员或货物,走行部则承载车体并驱动或引导车体运行。

即使是在平面直线上,四轮方向定位很好的车辆也会从直线方向上跑偏,原因之一是在线路不平顺下,轮子所受垂向与横向力均有不同程度的变化,从而引起车辆产生方向偏离。单个汽车只能依靠驾驶者操纵沿设定方向前进,如果是多个车辆连挂的车组,靠头车的方向来引导后部车辆,显然会产生很大的侧摆而无法正常运行。因而,由机车牵引的多个车辆连挂的列车只能依靠导向线路(包括电子导向方式)来引导列车的运行,这也是产生轨道(导向)车辆的基本原因。

一、轨道车辆的不同走行方式

现代轨道车辆大致可归为三类:钢轮钢轨车辆、轮胎式轨道车辆、磁悬浮轨道车辆。各类轨道车辆的主要差异在于走行方式。

1. 钢轨车辆走行方式

干线铁路及大部分地铁与轻轨采用传统带轮缘的钢质轮对在钢轨上走行的方式,其走行部见图 1—1。

这种传统方式从早期的蒸汽机牵引,经过一百多年的发展形成了现代轨道车辆技术。轮对与钢轨承受着轨道车辆运行时的垂直、横向与纵向力,滚动阻力小,载重大运行速度高,因而是轨道交通的主要走行方式。

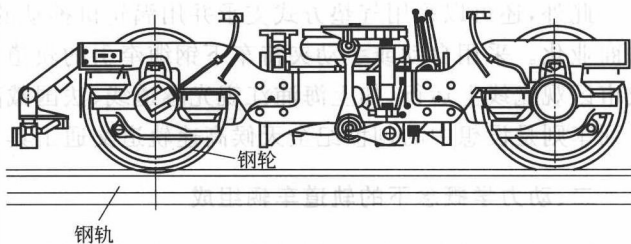


图 1—1 钢轨车辆走行部(转向架)

2. 轮胎走行方式

跨座或悬吊式独轨及少量地铁和新交通系统车辆则采用多组走行与侧面导向的充气轮胎作为走行部沿导向轨道前进。图 1—2 为一悬吊式独轨车辆走行系统的结构示意图。

除了侧向轮胎接触式的导向方式外,非接触式的电子定位导向方式也在研究中。采用轮胎走行的优点是:它与路面的黏着力比钢轮钢轨方式大,爬坡力强,噪声也较小。通常运行速度在 80 km/h 左右,载重量中等,较适应在城市轨道交通系统中运用。

3. 磁悬浮走行方式

磁浮车辆通过所谓磁轮和磁浮架与导向轨道间的垂向、横向电磁斥力或引力来支承、定位并引导车体,靠移动磁场的直线电机驱动车体沿轨道运动。图 1—3 为两种系统的示意图,EMS 为常导电磁悬浮方式,EDS 为超导电动悬浮方式。目前已有多种悬浮方法获得了发展,

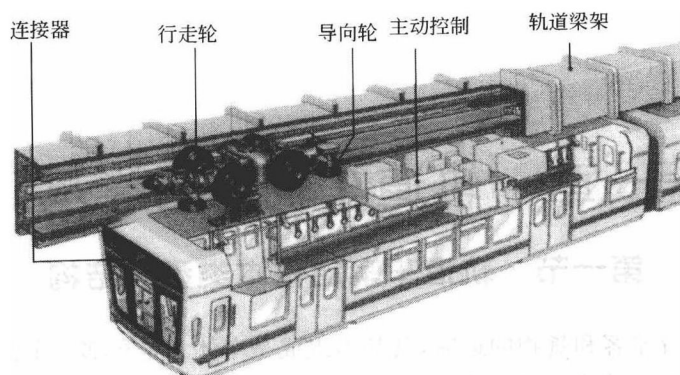


图 1-2 悬吊独轨车及其走行系统

运行速度从中低速到高速,有广泛的运用前景,高速磁悬浮交通在我国首先进入了商业运营。

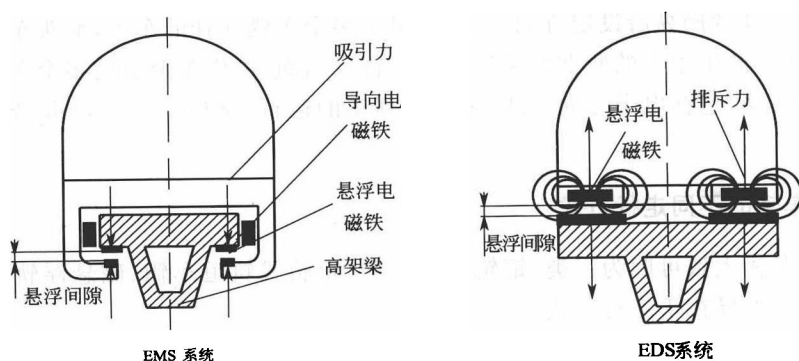


图 1-3 磁悬浮走行系统

此外,还可以采用气垫方式支承并用涡轮机推动的气垫悬浮轨道车辆,但因噪声过大而无法商业化。采用自动或手动夹持车下钢缆牵引的轨道车辆,则在一些流量较小的机场联络线或市区观光线上运行,如上海浦江观光隧道线、法国戴高乐机场线或旧金山缆车线等。真空管道列车则是设想中的创世纪全天候高速轨道交通工具,已在策划开拓中。

二、动力学概念下的轨道车辆组成

轨道车辆通常由车体、驱动部、走行部、制动部与连接部等组成。其主要功能如下:

1. 驱动与制动部主要用于产生并控制车辆前进或停止运行的纵向力。按有无牵引动力,大致分为动车与拖车两种形式。动车的内燃机或电机通过变速系统驱使动轮旋转,在导向轨道上产生带摩擦性质的水平黏着力,推动动车并牵引拖车沿线路前进。装有现代直线电机的轨道车辆(包括磁浮车辆)则通过走行部的直线电机与轨道上的感应轨道间产生的移动磁场力以非接触方式推动车辆前进。也有利用涡轮发动机推动的试验高速列车及其他方式。

2. 多个轨道车辆纵向连接编组为列车,在车辆间的连接部则设置连接器或车钩缓冲器,传递列车中纵向牵引或制动力并吸收由这些载荷变化时产生的车辆纵向振动或冲动。传统列车在牵引或制动工况时,因各车作用力分配不均匀,会产生前后车辆间的纵向冲动。由于重载列车采用空气制动,制动时制动波速的滞后效应会引起列车中某些位置的前后车辆间产生数值可达几百吨的纵向冲击力。为减少纵向振动和冲击力,车辆间的车钩后部装有缓冲器。图 1-4 为一缓冲器的示例。

这种缓冲器具有弹性与阻尼性质,在很大程度上缓和冲击并吸收纵向振动能量,对减小重载列车或车组内纵向冲动有很大作用。采用没有空气制动波滞后的电控制动方式的高速客运列车和城市轨道车辆则因列车编组量小,各车所受作用力分配较均匀,纵向冲动小,缓冲器的吸振容量相对可以小些。

3. 走行部是车辆的关键部分,各类轨道车辆均是通过复杂的走行部来实现车辆在导向轨道上安全、快速、平稳的运行。牵引与制动力通常可通过走行部与车体间刚度较大的牵引拉杆来传递。为了隔离走行部与轨道不平顺相互作用产生的冲击传至车体,在车体与走行部间设置了传递载荷并起缓冲和吸振作用的弹簧减振器系统。

转向架构架通过柔性较高的二系悬挂装置(中央)来支承上部车体,包括如空气弹簧,心盘,旁承,垂向、横向液压减振器,纵向牵引拉杆等悬挂元件,并通过一系(初级)悬挂连接其下方的轮对或磁轮,约束它们的运动并传递轮轨作用力,一系悬挂缓和轮轨冲击并对高频冲击起隔离作用。一系悬挂下方部件如轮对简称为簧下质量,簧下质量过大时会明显增大它们在线路不平顺下的冲击载荷。动车的构架通常装有电机和传动减速箱、基础制动装置等。在车体与构架、轮对之间设置悬挂装置,可以有效地控制车辆在不平顺下的振动。

4. 车体可以相对构架作运动,弹簧悬挂柔性可缓和轨道传来的大部分激励并改善旅客舒适度。由于多级悬挂中减振器的阻尼作用,外界激起的车体振动能量将在振荡时被消耗。车辆系统中的阻尼通常用相对阻尼比评价。

除磁悬浮车辆可能采用柔性底架和多磁浮架支承的悬挂方式外,大多数轨道车辆都采取前后两个独立的走行部(转向架)支承并引导车体运行。

在统一动力学概念的轨道车辆的结构中,车体通过二系纵向、横向、垂向悬挂系统(弹簧阻尼)支承在前后转向架构架上,而构架则通过一系悬挂定位支承在轮对或磁轮上,轮对或磁轮则受下部轨道起支承、导向、驱动的接触力或非接触磁浮广义力 F_x 、 F_y 、 F_z 及力矩 M_x (其值由轮轨间的接触特性或磁浮控制特性所决定)等的的作用。除了各种走行部底部作用力的成因不同外,从轮对、构架直到车体组成的轨道车辆上部振动体系基本是相同的。

车体作为刚体弹性支承在走行部上,它具有 6 个自由度和相应的主振型:沿 x 方向为伸缩振型,沿 y 方向为横摆, z 方向则为沉浮。而车体绕 x 方向的转动(θ)定义为侧滚振动,绕 y 方向为点头(ϕ),绕 z 方向为摇头(φ),见图 1—5。同样,转向架的一些部件如构架,也具有类似的刚体振动自由度。

但是车体、构架等并不完全是刚体,它们自身具有弹性,除去刚体振动外,车体作为弹(柔)性体,还具有自身的弹性体振动,如绕着 x 轴的扭转振型,绕 y 或 z 轴的弯曲振动。车

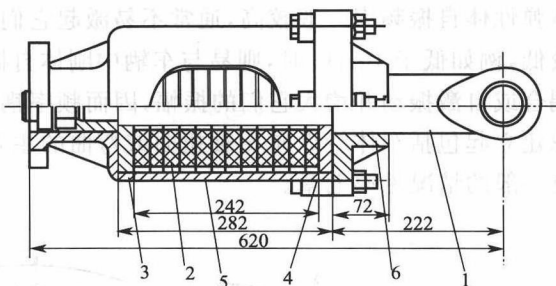


图 1—4 车钩后部缓冲器

1—牵引杆组成;2—缓冲弹簧片;3—前从板;
4—后从板;5—缓冲器体;6—后盖

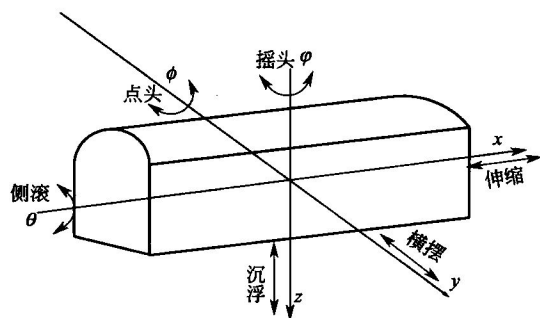


图 1—5 车体的基本振动形式

体弹性体自振频率一般较高,通常不易激起它们的弹性体振动。如果车体的弹性体自振频率较低,例如低于 10 Hz 时,则易与车辆中刚体自振频率或蛇行运动频率等相近,会产生它们的耦合或自激振动并增大它们的振幅,因而频率耦合是不利的。此时在整车动力学模型中应考虑建立起包括车体绕纵向 x 轴扭曲或弯曲的主要弹性体振动自由度的模型,如图 1—6 所示。更一般的情况见第七章。

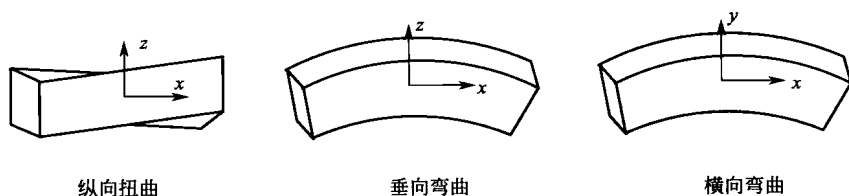


图 1—6 考虑弹性体振动时车体的三个主要振型

第二节 轨道车辆的基本走行原理

一、传统钢轮钢轨车辆走行部原理

带轮缘与锥度踏面的钢质轮对在两根钢轨上运行,是经过多年考验的经典走行方式。在轮对中心偏离线路中心时,锥型踏面可形成左右轮轨接触处滚动圆的半径差,从而具有返回线路中心线的能力,见图 1—7。

在车辆重力作用下,钢轮与钢轨的弹性变形接触面通常是一个近似椭圆的接触斑。轮轨间的接触斑可传递轮轨间的垂向、横向与纵向力,对转向架和车体提供支承力、导向力(横向力)、驱动力与制动力。动车工况时,动力装置产生的扭转力矩使动轮转动,轮轨之间产生沿轨道的纵向力,也就是所谓的黏着力,该力将推动车辆前进。

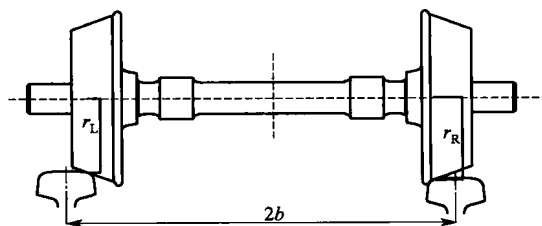


图 1—7 轮对左右滚动圆半径差

传统轨道在线路上设有多种道岔,来引导车辆变道,如进侧线靠站停车。因此车轮必须具有轮缘,以引导车轮沿道岔形成的线路方向运行,并产生变道时所需的横向导向力。这种导向力在车辆通过小半径曲线时也同样重要。轮缘的另一重要作用是阻止轮对横向移动量过大时,轮对从钢轨顶面脱落形成脱轨事故。在直线段运行时,如果轮缘根部始终贴靠钢轨侧面则将很快磨薄轮缘,因此轮缘与轨侧间必须留有间隙。如果车轮踏面是圆柱,轮对仍可能横移至轮缘碰磨钢轨侧面,产生严重磨耗。因此经过多年试验研究,解决方法是车轮采取如图 1—8 所示的锥形或具有等效锥度的凹形踏面。

在扰动下轮对中心偏离轨道中心线,左右轮子踏面与钢轨顶面接触点的滚动圆半径将产生差异,

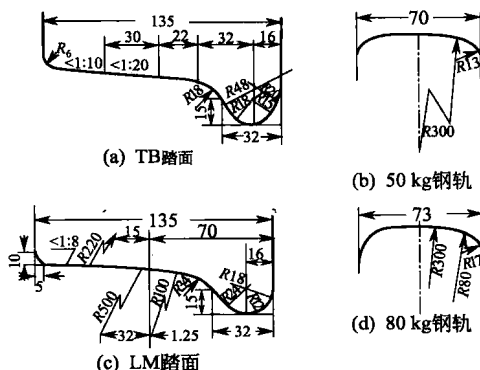


图 1—8 车轮踏面形状

见图 1—7, 在纯滚动条件下, 大半径一侧轮子将绕小半径一侧轮子作水平转动, 这会使轮对返回到线路中心线, 表明锥型踏面的轮对具备横向偏移后的复原能力。然而复原运动又会使轮对随着车辆前行时产生左右摆动和水平转动, 形成了图 1—9 中所示的周期性蛇行运动。

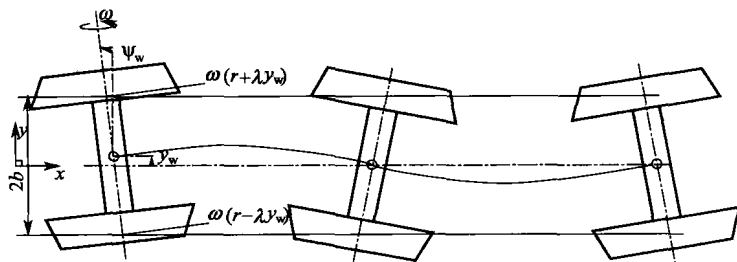


图 1—9 轮对蛇行运动

为了弄清运动的波长, 假设没有定位约束而缓慢前进的自由轮对在微量横移 y 后, 左右轮在轨面上将准静态地进行纯滚动的几何学运动, 由左右接触点处的轮径差可得到以下公式:

$$R = \frac{br_0}{\lambda y} \quad (1-1)$$

式中 R ——轮对横移 y 后所作的摇头运动轨迹的半径;

r_0 ——平衡位的名义车轮滚动圆半径;

b ——左右车轮滚动圆的横向间距之半;

λ ——车轮踏面锥度或等效斜率。

y ——运行距离 x 的函数。

由曲率关系得

$$\frac{1}{R} = -\frac{\ddot{y}}{(1 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1-2)$$

因偏移量 y 很小, 而 $\dot{y}^2$ 与 1 相差很多, 故上式可简化为 $\frac{1}{R} = -\ddot{y}$ 。由两式可导出

$$\ddot{y} + \frac{\lambda}{br_0} y = 0 \quad (1-3)$$

设其解为: $y = y_0 \cos p_n x$, 其中 $x = vt$; p_n 为几何波的圆频率 (rad/m), $p_n = \sqrt{\frac{\lambda}{br_0}}$; 则自由轮对车

速为 v 时的蛇行圆频率 (rad/s) 为 $\omega = \sqrt{\frac{\lambda}{br_0}} v$, 其时域中的蛇行频率 (Hz) 为 $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda}{br_0}} v$, 它的

几何蛇行波长 (m) 表示为 $L_\omega = \frac{2\pi}{p_n} = 2\pi \sqrt{\frac{br_0}{\lambda}}$ 。

上式表明轮对在准静态下运行的几何蛇行波长与 $\sqrt{br_0}$ 成正比, 与 $\sqrt{\lambda}$ 成反比。如果 b 、 r_0 、 λ 这三个因素不变, 自由轮对蛇行波长基本不变。当车速 v 确定后, 蛇行的时域频率则是速度与波长之比值; 车速接近零时, 蛇行频率接近零, 而速度快时蛇行频率就高。相同速度下几何蛇行波长短, 则时域中蛇行频率高。

随着车速逐步提高, 走行部的蛇行频率随之上升, 并在某个速度区间与轨道车辆上部车体自身的振动频率相耦合。如果耦合时整体阻尼显得不足, 蛇行运动就会增大振幅, 特别是车体振动明显扩大, 这是一种自激振动, 这种先出现的车体蛇行失稳也称一次蛇行。出现速度称车

体失稳临界速度。随着速度升高,一次蛇行失稳有可能收敛。当车速进入更高的某个速度时,整车对转向架的蛇行控制力下降,转向架或轮对出现剧烈蛇行失稳,而车体振幅反而相对减小,该速度称二次蛇行或转向架蛇行。一旦进入转向架蛇行,失稳将不会随速度提高而重新稳定。

钢轮钢轨系统的车轨作用力依赖弹性体滚动接触力,轮胎车辆也如此。由于橡胶体变形大,接触处滚动滑动量要大得多。在高速下,轮胎式车辆也会因自身的振动诱发轮胎的滚滑力变化,从而也会产生类似的自激侧偏和滚摆运动。

除了线路方向变化引起轨道车辆振动外,轨道自身的随机性不平顺,包括基础弹性的随机性变化,都会引起车辆的振动。为了减少车辆与线路的作用力,除了在车辆内部设置各种弹性与阻尼的所谓被动悬挂外,必要时还会布置带控制调节能力的主动或半主动悬挂系统。

二、轮胎式轨道车辆走行部原理

轮胎之所以运用于轨道交通,主要考虑以下特点:①与导轨面的黏着力较钢轮钢轨方式大,因而较适应在丘陵地形的城市中使用;②轮胎充气后具有优良的三向弹性,起到了一系悬挂作用,垂向挠度可达到几十毫米,走行部因而可省去一系悬挂;③低速走行噪声小,如图 1—10 所示。

但是轮胎变形大,承载能力要比相同直径的钢轮小,目前轴重一般在 10 t 以内。充气轮胎与轨道接触面积较钢轮钢轨接触斑增大上百倍,良好的弹性也使轮胎与轨道间的所谓滑滚率相对轮轨蠕滑率增大很多。这些弹性变形与滑滚量在轮胎与轨道之间产生了垂直、导向、驱动和制动力。这些力是表面弹性变形力和表面接触摩擦力的复杂组合,与轮胎相对轨道的运动状态有密切关系。与钢轮钢轨方式不一样,轮胎式轨道车辆往往轮胎数量多,轮胎变形量大,接触面积增大,橡胶的变形滞后效应较大,因而滚动阻力比钢轮钢轨方法大。轮胎与轨道接触弹性良好,故而轨道不平顺引起的轮胎与轨道的垂向动态作用力比钢轮钢轨间的冲击力减小很多,速度不高时噪声下降明显,这对减轻高架桥的结构十分有利。

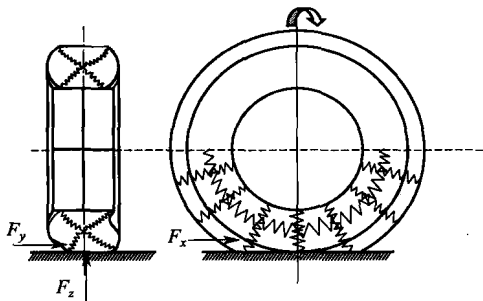


图 1—10 轮胎在轨面上的三向弹性

采用轮胎导向时,转向架上的左右导向轮胎横向布置,导向轮胎滚动面与导向轨的侧立面相接触,由侧向接触反力来引导轨道车辆从直线转向曲线运行。直线运行时,两侧的接触反力是平衡的,当车辆由直线转向曲线时,轨道车辆在曲线导向侧的导向轮胎变形加大,增大了该侧的横向水平反力。而另一侧导向轮胎变形减小,削弱了这侧的横向反力。两侧合力引导轨道车辆沿曲线转向。

由于高架独轨梁宽度小,左右走行轮胎靠近后可减少转向阻力与轮胎磨损,然而采用这种方式使走行轮胎与导向轮胎组合的车体抗侧滚刚度变小,会产生较大的车体侧滚运动,因而在导向轮胎下方还需增加稳定轮胎。现代机场内换乘和城市中经常使用的一种轮胎式自动导向轮胎式运输(AGT)车辆的左右轮距大则不需要稳定轮胎,见图 1—11(a)。

轮胎与轨道面的附着面积大,黏着系数较高,能发挥较大的轮轨黏着力,可以在线路起伏大的区段牵引和制动轨道车辆,我国的山城重庆就选用了独轨交通,见图 1—11(b)。

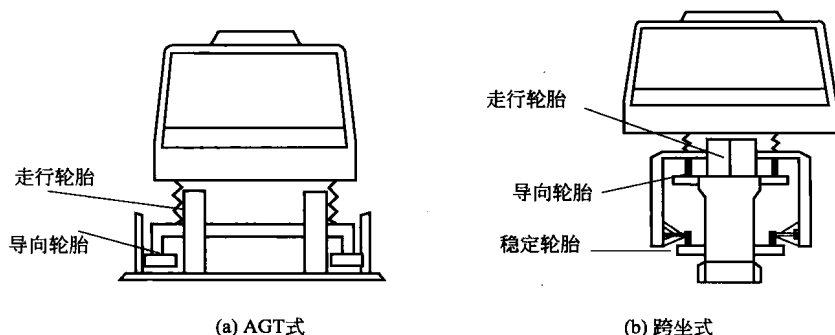


图 1—11 轮胎式轨道车辆导向形式

三、磁悬浮车辆走行部原理

近二十年来磁浮车辆逐渐进入商业运营。常导短定子伯明翰机场线和爱知世博线及常导长定子上海浦东机场线都证明了磁悬浮轨道交通的商业运用,有希望在 21 世纪的轨道交通网中占据相当份额。

与靠轮轨接触力实现支承和导向的原理不同,磁悬浮车辆通过所谓磁轮或悬浮架与支承和导向轨道间的电磁斥力或吸力来支承车体并平衡动态力。一般采用电磁导向力引导车辆转向,并靠移动磁场电磁力驱动车辆沿轨道运行,见图 1—12。

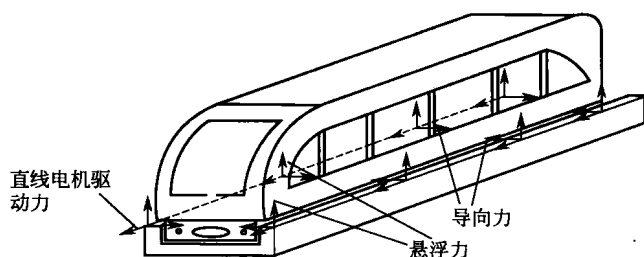


图 1—12 磁悬浮支承与电磁驱动导向

上述三条商业线都采用了电磁吸力型(EMS)技术。另一种磁悬浮车采用的是电动斥力式(EDS)技术,它通过迅速移动的车载磁场在地面轨道感应磁场中产生向上斥力来进行悬浮,车载强磁场通常需要用超导方式形成。目前在日本已兴建了几十公里的超导悬浮车实验线。

第三节 轨道的线路结构与不平顺

一、轨道结构

轨道或导向线路的作用是支承与引导列车沿设计线路方向运行,它承受车辆重量、横向载荷和牵引制动时的纵向力。传统轨道由钢轨、轨枕、道床与路基等组成,见图 1—13。

钢轨表面硬度高且耐磨,轨面平滑滚动阻力小,其轨头具有与车轮踏面相匹配的断面轮廓,可提供导向力并提高车辆抗蛇行的动力学性能和轮轨磨损性能。

钢轨通过扣件固定在轨枕上,以保持轨距并防止纵横向移动。左右钢轨在轨枕上有一个内倾的轨底坡,以适应钢轮踏面的斜度,保证轮轨表面垂直力能通过钢轨中部的立面。轨枕下

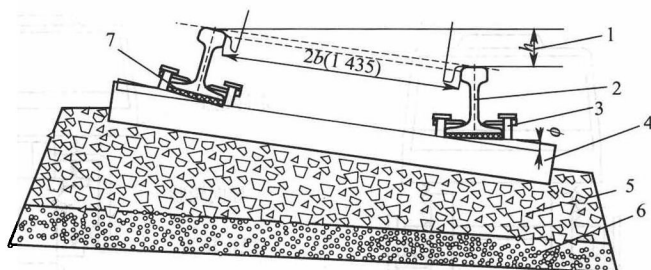


图 1—13 轨道结构图

1—超高；2—钢轨；3—扣件；4—轨枕；5—道砟；6—路基；7—轨枕垫

的道床由石砟组成，能有效地吸收轮轨振动，将轮载扩展到面积更大的路基上。但石砟道床吸收振动的结果是石砟磨损，弹性降低，造成道床永久变形或沉降，从而形成轨道的几何高低及水平不平顺，也带来道床的弹性不均匀，这对轨道车辆的运行不利。为了保持线路稳定并减少维护量，高速铁路及城市轨道包括磁悬浮线路，多采用高架形式及整体道床结构。独轨与磁浮轨道则由高架轨道梁与支柱等组成，见图 1—14。

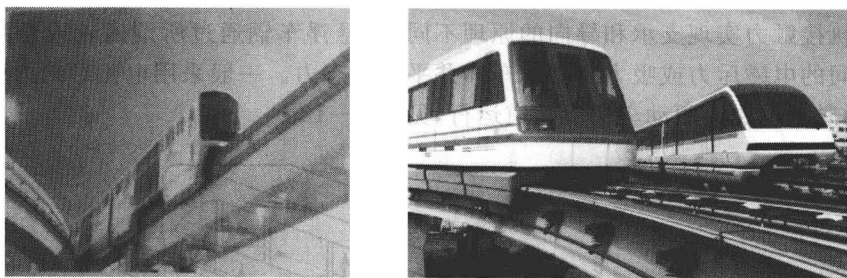


图 1—14 独轨与磁浮高速轨道

轨道的结构具有弹性阻尼特点，它的几何与弹性不平顺是形成轮轨振动的基本要素，要设计性能良好的轨道车辆，必须考虑轨道的几何与力学特性。

二、轨道的不平顺

在直线或曲线路段，承受车辆垂直载荷的左右钢轨或轮道（磁浮感应轨），在高低和左右方向上相对理想平直轨道或设计的轨道曲线所形成的偏差称轨道不平顺。

轨道不平顺由表观的几何不平顺和弹性不平顺组成，车辆低速通过轨道时测得的准静态不平顺是这两种不平顺的合成。当车辆在动态下快速通过轨道时，测得的轨道随机不平顺中将包含有动力作用下的弹性变形，称动力不平顺。显然同一轨道在不同车辆通过时，测得的轨道不平顺存在一定差异。计算轨道车辆响应时则可以采用一个公认的轨道不平顺来开展分析与评估比较。除非特殊需要，一般认为它已包含动态不平顺的作用因素。这表明，轨道车辆动力学分析采用的轨道不平顺谱通常被当作一个刚性谱来运用，轮心在垂向将沿着轨面运行，轮轨间的作用力不会引起轨道的再变形。这在研究车辆上部振动时可行，但在第八章中研究走行部特别是轮对与轨道弹性耦合振动与冲击时，轨道系统的弹性特征将不能忽视。

轨道不平顺含有三种性质的基本组成：周期性、随机性、局部或单一性。

在轨道坐标下，轨道不平顺将以约束轮对踏面运动的左右轨顶面相对设计轨面与侧面中