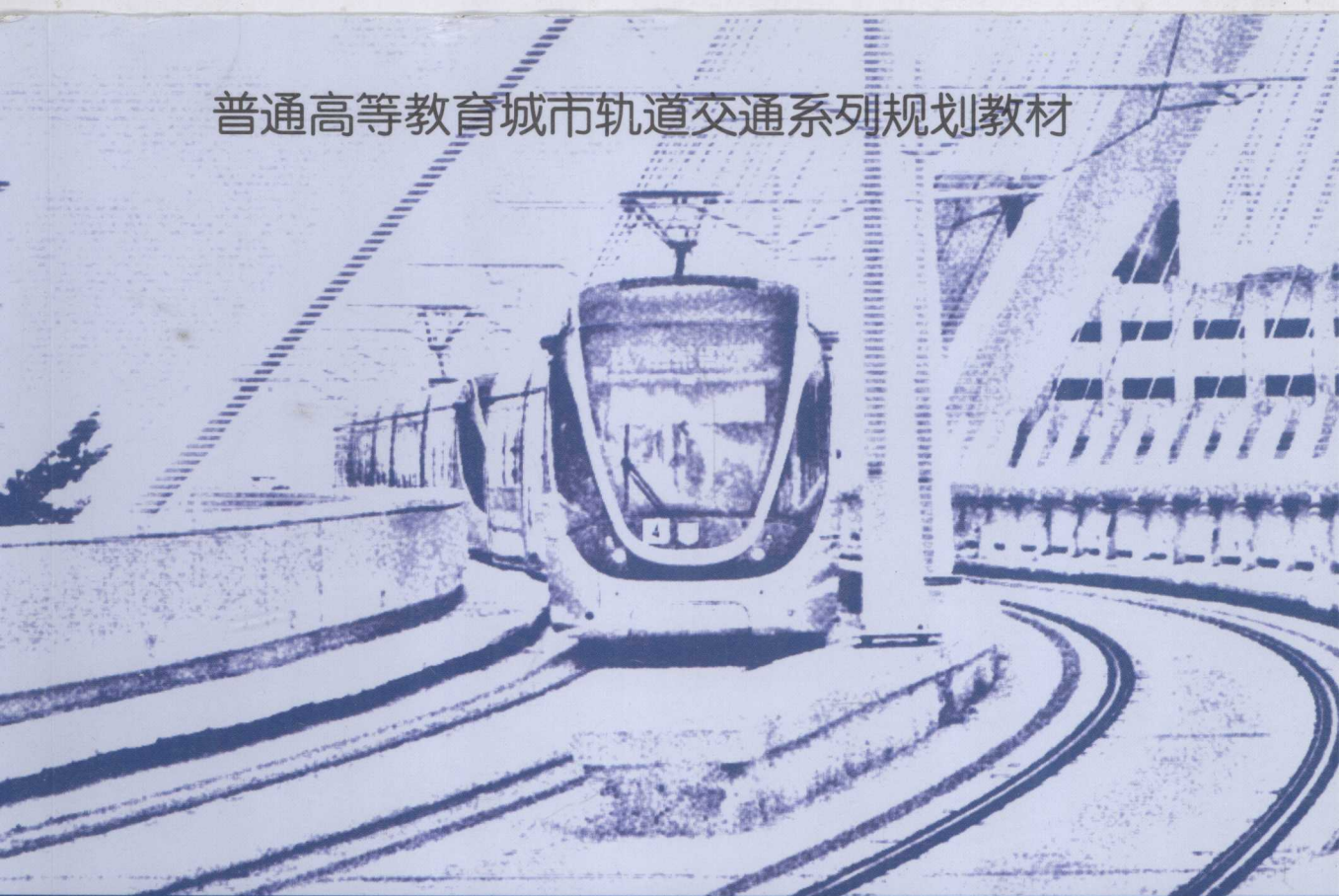


普通高等教育城市轨道交通系列规划教材



列车运行计算与设计

Train Performance Calculation and Design

(第二版)

主 编 毛保华 李夏苗

副主编 刘海东 丁 勇

主 审 卫和君 牛惠民



人民交通出版社

China Communications Press

U239/1001.1

U239
1001.1-1

普通高等教育城市轨道交通系列规划教材



NUAA2013065682

列车运行计算与设计

Train Performance Calculation and Design

(第二版)

主 编 毛保华 李夏苗
副主编 刘海东 丁 勇
主 审 卫和君 牛惠民



人民交通出版社
China Communications Press

2013065682

内 容 提 要

本教材是在北京交通大学与中南大学、兰州交通大学、石家庄铁道大学等高校协作编写的《列车运行计算与设计》(第一版,2008年)基础上修订再版的。本书系统介绍了列车运行过程涉及的原理、方法与应用技术,全书共分12章,内容包括:列车牵引力,列车运行阻力,列车制动力,合力曲线、运动方程及时分解算,列车制动问题解算,牵引质量的确定,列车运行能耗计算及节能技术,自动闭塞区段信号布置方法,多列车运行计算与分析,城市轨道交通列车运行计算,高速列车运行计算及列车运行计算软件。

本书可作为交通运输相关专业的本科生、研究生教材或教学参考资料,亦可供相关专业政府决策与管理、设计与咨询人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

列车运行计算与设计/毛保华,李夏苗主编.--2

版.--北京:人民交通出版社,2013.8

ISBN 978-7-114-10571-5

I. ①列… II. ①毛…②李… III. ①列车—运行—
设计计算—高等学校—教材 IV. ①U292.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 083103 号

普通高等教育城市轨道交通系列规划教材

书 名: 列车运行计算与设计(第二版)

著 作 者: 毛保华 李夏苗

责任编辑: 吴燕伶

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16.5

字 数: 387 千

版 次: 2008 年 1 月 第 1 版

2013 年 8 月 第 2 版

印 次: 2013 年 8 月 第 1 次印刷 总第 3 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10571-5

定 价: 36.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

8882808108

第二版前言

近年来,我国铁路技术水平有了较大提升,在机车车辆装备技术、高原铁路施工技术、客运专线技术、重载运输技术以及城市轨道交通等领域取得了一系列进展。根据国家《中长期铁路网规划》(2004)和《中长期铁路网调整规划方案》(2008),到2020年,全国铁路营业里程将达到12万km,其中新建高速铁路将达到1.6万km,电化率达到60%,主要繁忙干线实现客货分线,基本形成布局合理、结构清晰、功能完善、衔接顺畅的铁路网络,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。

同时,我国城市化与机动化引起的交通拥挤、交通事故以及交通环境污染已成为备受瞩目的问题。各大城市都认识到发展以轨道交通为骨架的公共交通是解决中心城区诸多交通问题的根本出路。2000年至2005年,中国内地城市轨道交通每年新增运营里程约80km;2006年至2010年,内地城市轨道交通每年新增运营里程177km。资料表明,到2012年5月,全国已有14座城市开通、运营城市轨道交通。预计到“十二五”末,中国内地城市轨道交通运营里程将从2011年底的1630km增长至3000km左右。未来十年,中国内地城市轨道交通建设投资有望超过3万亿元人民币。

2003年,北京交通大学在将交通运输、交通工程两个专业合并为交通运输大类专业的基础上,设置了铁道运输、城市道路交通、城市轨道交通以及运输与物流四个专业方向。2008年,北京交通大学交通运输学院正式成立了城市轨道交通系,并开始招收城市轨道交通专业本科生。2012年,学院组织修订,形成了新一版的城市轨道交通专业培养方案。

“列车运行计算与设计”是城市轨道交通专业方向的专业必修课程,也是支撑整个运输过程组织与优化的重要技术基础,它与“城市轨道交通规划与设计”、“城市轨道交通系统运营管理”两门专业主干课,“城市客运管理”、“轨道交通列车运行控制技术”、“城市规划”等理论必修课程,“轨道交通综合实验实践”必修课程以及“轨道交通资产管理与运营补贴”、“市郊运输技术”、“轨道交通调查与出行行为分析”、“城市综合交通发展与土地利用”等专业选修课程一起构成了该方向的专业课程体系。

本教材是在北京交通大学与中南大学、兰州交通大学、石家庄铁道大学等高校协作编写的《列车运行计算与设计》(第一版,2008年)基础上修订再版的。在编写过程中,参考了大量国外相关文献以及国内轨道交通系统列车运行计算方面的成果与数据,也融合了作者们近几年开展的科学研究与教学活动成果。全书力求全面、系统地反映列车运行过程涉及的原理、方法与应用技术。

本版教材大致保留了第一版教材的章节框架,修订的主要内容包括以下六个方面:

(1)根据相关领域最近的科技发展水平,更新了列车运行计算基本理论与方法中的部分模型与数据。

(2)在列车运行过程能耗计算及节能技术部分,增加了基于牵引功耗和基于经验公式的列车运行能耗两种推算方法,补充了列车运行节能技术领域的最新成果。

(3)在信号布局部分,从可操作角度完善了自动闭塞区段固定闭塞方式下的信号布置方法,增加了准移动闭塞方式下的信号布置方法。

(4)在城市轨道交通列车运行计算部分,凝练提出了基于加、减速度的列车运行过程计算方法,细化了城市轨道交通系统列车牵引力、阻力及制动力计算的内容。

(5)在高速列车运行计算部分,凝练了高速列车牵引计算过程的特点,补充了高速列车牵引力、阻力及制动力的计算内容;增加了高速列车制动控制、高速列车制动距离的计算等内容。

(6)在列车运行计算软件部分,增加了国内外列车运行计算相关软件的介绍。

本教材推荐学时为48学时,包括8学时的课程设计。32学时条件下,第7、8、9、12章可安排为自学内容。

本书可以作为相关专业的本科生教材或教学参考资料,同时,对与轨道交通系统相关的政府决策与管理人员、设计与咨询人员都有很好的参考价值。

参加本版教材编写的有毛保华(前言,第9、10章)、李夏苗(第6章)、陈绍宽(第1章,附录1)、柏赟(第2章)、刘海东(第3、8、12章)、王保山(第4、9章)、丁勇(第5、7、11章)。由毛保华(北京交通大学)、李夏苗(中南大学)任主编,刘海东(北京交通大学)、丁勇(北京交通大学)任副主编,卫和君(全路通信信号设计研究院)、牛惠民(兰州交通大学)审定。

本书编写得到了北京市精品教材的立项支持。在全书修订过程中,得到了中铁第四勘察设计院集团有限公司方琪根教授级工程师与苏梅教授级高级工程师、石家庄铁道大学王明生教授、铁道部工程设计鉴定中心李建新高级工程师、铁道第三勘察设计院集团有限公司牛会想教授级高级工程师、中铁第一勘察设计院集团有限公司张凌高级工程师、广州铁路局孙年友高级工程师等专家的指导。澳大利亚 Wollongong 大学的 Tin-kin Ho 副教授为本次修订提供了许多宝贵意见。北京交通大学交通运输学院城市轨道交通系彭宏勤、杜鹏、冯雪松、刘智丽、刘爽等老师参与了本书引用的部分科研项目的工作。博士研究生张增勇、许奇、梁肖等参加了部分项目及本书的资料整理工作。

本书撰写是在北京交通大学城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室和交通运输实验中心完成的。全书引用了大量国内外作者发表的有关轨道交通列车运行计算的相关文献,在出版过程中得到了人民交通出版社的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

毛保华

2013年5月于北京交通大学

第一版前言

经济的发展与人们生活水平的提高凸显了交通问题的严重性,在道路交通受到越来越多的拥堵、事故、污染等压力困扰的同时,世界范围内的城市间铁路与城市轨道交通迎来了一个新的发展契机。近年来,我国在“中长期铁路网规划”中提出了2020年的四个总体发展目标,这些目标包括:

- 迅速扩大路网规模 全国铁路营业里程达到100000万km,其中客运专线约10000km,客货混行的快速铁路约20000km,都市圈和城市带内城际客运铁路约2000km。

- 路网结构更加合理 主要繁忙干线实现客货分线,增建四线或多线,客货流重要运输通道畅通无阻,全国复线里程达到50000km左右,电气化里程达到50000km左右,复线率和电气化率均达到50%左右。

- 极大提高路网质量 路网主骨架进一步完善,主要繁忙运输通道建设成为设施完备,具有国际先进水平的高标准、高质量、大能力的现代化铁路。

- 快速提升技术水平 客运高速、快速和货运快捷、重载技术、机车车辆、通信信号、安全检测和控制、信息网络和服务技术等达到国际先进水平。

在城市轨道交通领域,北京、上海、广州、天津、南京、长春、大连、武汉、深圳、重庆等已建有轨道交通系统,合计超过500km。杭州、沈阳、哈尔滨、石家庄、西安、青岛、宁波、无锡等城市均在规划轨道交通或申请轨道交通立项。2006年北京市完成轨道交通投资81.6亿元,涉及4号、5号、10号、八通及机场线。广州市该年完成城市轨道交通投资91.46亿元,在建线路涉及7条,共计200km。预计2010年,北京、上海、广州等城市的城市轨道交通系统均可望突破300km。此外,长江三角洲、珠江三角洲及环渤海地区三大经济圈的城际轨道交通建设计划也相继展开,轨道交通将成为城市、地区居民出行不可或缺的重要交通工具。

在轨道交通系统建设过程中,对列车运行过程进行有效地设计与组织是整个轨道交通系统设计的重要任务之一。由于列车运行过程涉及许多因素,如何准确、快速地计算出列车在各种不同条件下的运行效果并予以评价是列车运行计算的任务。传统的列车牵引计算是基于手工的。手工计算精度差、效率低,工程师们一直在探讨更有效的方法。20世纪80年代初,计算机技术得到了极大普及,人们开始研制软件来解决这一问题。早期的软件重点在于模拟手工计算过程,目的是将工程师手工的经验通过计算机再现出来,提高计算效率,减小手工计算的工作量。20世纪90年代以来,在同国外软件的交流过程中,人们进一步考虑精度和通用性方面的问题。例如,不再对线路换算坡道进行化简、不再将列车作为质点来考虑,软件能够同时计算多列车的运行过程,系统的输入、输出界面更为友好等。在铁路运输的设计与管理过程中,与此相关的行业技术文件是《列车牵引计算规程》和《铁路运输技术管理规程》。

我国的《列车牵引计算规程》是针对标准轨距(1435mm)铁路列车的运行过程,制订的关

于列车运行相关问题的计算方法和使用数据的标准,包括:机车车辆的计算公式和图表,计算牵引质量、绘制速度线、时间线、确定区间运行时分的原则和方法等。新中国成立以来,《列车牵引计算规程》经历了三次重要的编制与修订。第一次是1957编制的《蒸汽机车牵引计算规程》,那时我国铁路主要以蒸汽牵引为主,该规程主要针对蒸汽机车的运用与管理。1982年,针对我国铁路内燃、电力和蒸汽牵引并存的局面,铁道部有关部门组织了修订,补充了许多新内容。1998年,铁道部有关部门根据铁路发展提出的新要求全面修订、补充了《列车牵引计算规程》。补充内容包括:全面采用了以国际单位制为基础的国家法定计量单位制;增加了新型机车车辆的数据和曲线,修改和增加了新型内、电机车的单位基本阻力公式;修订了内、电机车黏着系数和小半径曲线黏着系数的计算公式;修订和增加了内燃机车牵引力修正系数;修订和增加牵引质量(牵引质量)计算公式;增加滚动轴承货车和新型客车的单位基本阻力公式;增加了高磷铸铁闸瓦、低摩合成闸瓦、高摩合成闸瓦和客车盘形制动闸片的摩擦系数和闸瓦压力的计算公式;修订了客、货列车制动空走时间和机车单机空走时间的计算公式;明确地规定“以电算为主”等。

本书是作者们在多年科学研究的基础上,结合现代铁路列车运行过程管理及决策的特点,融合现代计算机软硬件和通信信息的最新成就,全面介绍了轨道交通系统列车运行过程设计的理论与方法,希望能够推动我国轨道交通系统的设计与管理技术的发展。

与传统的铁路列车牵引计算学科相比,本书的主要特点包括以下几方面:

第一,全面分析讨论了包括传统铁路、城市轨道交通、高速铁路列车运行过程计算的技术需求及其特点,通过对设计与运营管理部门生产实践需求的分析,介绍了相关的基础理论、方法与模型技术。

第二,在传统的牵引计算学科基础上,讨论了不同机车类型、不同机车牵引模式(有级/无级/调整)、不同机车牵引策略(节时/节能/定时)、多列车下不同信号闭塞制式下的列车运行过程计算方法及相关设计技术。

第三,结合作者开发的列车运行计算商业软件,全面分析比较了国内外列车运行过程计算的理论与方法,在传统的列车运行计算基础上,讨论了列车运行过程与变电站系统、信号系统的一体化设计方法及技术。

第四,全面介绍了列车运行过程的参数设计优化方法,重点包括:

- 给定机车车辆及线路环境下的机车节能操纵优化方法;
- 列车运行晚点条件下,列车运行“赶点”及“赶点”效果评价方法;
- 基于列车运行过程特征的线路平纵断面优化设计方法;
- 基于列车运行过程的列车运行组织优化设计方法等。

本书由北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室的研究人员联合中南大学、兰州交通大学、石家庄铁道学院的有关教师,在多年科学研究工作的基础上共同编写完成的。其中毛保华负责绪论、第十一章,陈绍宽负责第一章,王明生负责第二章,牛惠民、朱昌锋负责第三、第五章,程晓卿负责第四章,丁勇负责第六章,刘海东负责第七、第八章,李夏苗负责第九章,徐彬负责第十章的编著工作。全书由毛保华、李夏苗统稿。书稿最终由北京全路通信信号研究设计院卫和君、铁道第四勘察设计院集团公司苏梅审定。

在本书的编写过程中,得到了轨道交通控制与安全国家重点实验室杨肇夏、杨浩、高自友、孙全欣和铁道部鉴定中心李建新以及香港理工大学电机工程系何天健(Tin-kin Ho)博士、英国伯明翰大学电机工程系 C J Goodman 博士、香港安尚有限公司邵乐基(L K Siu)博士、北京地铁研究所蒋玉琨教授级高级工程师等专家的帮助。与本书相关的一系列科学研究工作还得到了国家自然科学基金委员会铁道联合基金、铁道部科技司、北京交通大学科研基金的资助以及北京全路通信信号研究设计院、北京城建设计研究院、铁道第一、二、三、四勘察设计研究院等单位许多专家和工程技术人员的大力支持。实验室的研究生贾文峥、柏赞、周方明等同志参加了本书书稿的最终整理及图表绘制工作。本书在出版过程中得到了人民交通出版社的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

毛保华

2007 年 12 月于北京交通大学

目 录

■ 第1章 列车牵引力	1
1.1 牵引力的形成及分类	1
1.2 电力机车的牵引特性	8
1.3 内燃机车的牵引特性	13
1.4 动车组的牵引特性	18
1.5 牵引力的计算标准和取值规定	22
习题	25
■ 第2章 列车运行阻力	26
2.1 概述	26
2.2 基本阻力	27
2.3 附加阻力	33
2.4 列车运行阻力计算	37
习题	38
■ 第3章 列车制动力	39
3.1 列车制动方式	39
3.2 列车制动力的产生及限制	41
3.3 闸瓦压力摩擦系数	43
3.4 闸瓦压力	46
3.5 列车制动力的计算	48
3.6 动力制动力	58
3.7 高速列车制动	62
习题	65
■ 第4章 合力曲线、运动方程及时分解算	67
4.1 作用于列车的合力	67
4.2 合力曲线图的绘制及应用	67

4.3 列车运动方程式.....	72
4.4 列车速度时分曲线的计算.....	75
4.5 列车速度时分曲线的绘制.....	76
4.6 线路纵断面化简.....	82
习题	85

第5章 列车制动问题解算 87

5.1 概述.....	87
5.2 制动距离及其计算.....	88
5.3 列车换算制动率的解算.....	97
5.4 列车紧急制动限速的解算.....	98
习题.....	102

第6章 牵引质量的确定 103

6.1 概述	103
6.2 牵引质量的计算	104
6.3 牵引质量的验算	108
6.4 牵引定数的确定	110
习题.....	113

第7章 列车运行能耗计算及节能技术 114

7.1 内燃机车用油量计算	114
7.2 电力机车耗电量计算	117
7.3 列车运行能耗的其他计算方法	119
7.4 列车运行节能技术	121
习题.....	133

第8章 自动闭塞区段信号布置方法 134

8.1 自动闭塞系统的基本原理	134
8.2 信号布置的目标及要求	138
8.3 信号布置检验	141
8.4 信号布置方法	144
8.5 案例设计 & 分析	149

习题.....	153
第 9 章 多列车运行计算与分析	154
9.1 多列车运行过程的影响因素	154
9.2 列车追踪间隔时间计算	157
9.3 多列车运行计算原理	159
9.4 案例设计及分析	165
习题.....	168
第 10 章 城市轨道交通列车运行计算	169
10.1 城市轨道交通列车运行计算的要素	169
10.2 城市轨道交通列车运行计算方法	176
10.3 案例设计与分析	181
10.4 城市轨道交通线路优化设计	184
习题.....	188
第 11 章 高速列车运行计算	189
11.1 高速列车运行计算的要素	189
11.2 高速列车运行计算方法	201
11.3 案例设计及分析	209
习题.....	212
第 12 章 列车运行计算软件	213
12.1 概述	213
12.2 通用列车运行计算系统(GTMS)	217
12.3 通用列车运行计算系统(GTMS)的应用	228
习题.....	231
附录 部分机车牵引计算数据表	232
参考文献	247

第 1 章

列车牵引力

牵引力是列车运行动力的来源,它通过牵引机车或动车产生。自 19 世纪 20 年代火车诞生以来,铁路从最早的以蒸汽机为动力,已经发展进入到主要由内燃机车、电力机车等提供动力的时代,这三种方式均属于动力集中模式。随着近代高速铁路与城市轨道交通的发展,基于动力分散策略的动车组也已成为一种重要的牵引方式。本章主要介绍列车牵引力的形成与分类、黏着牵引力、电力机车的牵引特性、内燃机车的牵引特性,并简单介绍了动车组牵引特性。此外,本章还介绍了列车牵引力的计算标准和取值规定。

1.1 牵引力的形成及分类

1.1.1 列车牵引力的定义

机车产生的牵引力是与列车运行方向相同并可由司机根据需要进行控制的外力。列车牵引力是由机车动力装置发出的内力经传动装置传递,在轮周上形成切线方向力,再通过轮轨间的黏着而产生的、由钢轨反作用于轮周上的外力。

1.1.2 列车牵引力的形成

对电力机车进行分析可知,牵引力是由牵引电动机产生的内力传递到钢轨后得到的钢轨对机车的反作用力。电力机车牵引力的产生过程是:接触网的高压交流电由机车受电弓引入主变压器的原边绕组,再经动轮、钢轨,回到牵引变电所,构成回路。以交—直传动电力机车为例,机车上的主变压器将高压交流电变为低压交流电,由次边绕组经整流器整流后变为直流电供给牵引电动机,牵引电动机转轴输出转矩 M_d ,并通过齿轮传给动轮,再通过动轮与钢轨间的相互作用,产生钢轨对动轮的切向反作用力,即机车牵引力,使机车运动起来。因此,电力机车牵引过程的实质是电能变为机械能、内力引起外力的过程。

下面从力学角度对机车牵引过程进行分析,如图 1-1 所示。机车通过轮对将自身重量 P_g 作用在钢轨上,通过轮轨接触点 C ,产生钢轨对车轮的法向反作用力 N 。当牵引电动机输出转矩 M_d 时,通过大小齿轮啮合,传递给动轮一个转矩 M 。然后 M 驱动半径为 R 的动轮绕其圆心 O 转动时,受到轮轨接触面摩擦的阻碍,从而形成车轮与钢轨间的作用力 F' 与反作用力 F 。此时 M 转化为 F' 和 F'' 力偶,由 F' 作用于钢轨,得到钢轨的反作用力 F 。由于轮轨间的黏着作用(将在 1.1.3 节中介绍),反作用力 F 阻碍了动轮与轨面间的滑动,因此 F'' 推动动轮以 C 为瞬时转动中心滚动,并将力传递给轴箱,再通过转向架及车架传至车钩,牵引列车前进。牵引力

的计算方法如式(1-1)所示。

$$F = \frac{M}{R} \quad (1-1)$$

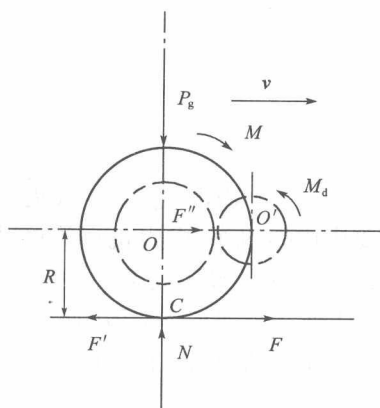


图 1-1 机车牵引力的形成示意图

1.1.3 黏着牵引力

1) 轮轨间的摩擦

轨道交通车辆是通过轮轨与轨道间的接触摩擦来实现运动的,根据刚体平面动力学的分析:沿轨道自由滚动的车轮,具有不断变化的瞬时转动中心,车轮和轨道的各个接触点在它们接触的瞬间是没有相对运动的,轮轨之间的纵向水平作用力就是物理学所说的静摩擦力。静摩擦力最大值被定义为“最大静摩擦力”,是一个与运动状态无关的常量。它等于钢轨对车轮的垂直支持力 N 与静摩擦系数 μ 的乘积。其实,这只是一种从刚体力学角度出发的、难以实现的理想状态。如果能达到

此状态,则可能实现的牵引力最大值约为轮轨间的最大静摩擦力。

另一种情况则相反:轮轨间的纵向水平作用力超过了维持静摩擦力的极限值——最大静摩擦力,轮轨接触点发生了相对滑动,机车动轮在强大力矩的作用下快速转动,轮轨间的纵向水平作用力则变成了滑动摩擦力,其值比最大静摩擦力小很多,机车运行速度很低,在铁路术语中把这种状态称为“空转”。“空转”是一种应极力避免的不正常状态,在这种状态下,牵引力反而大幅度降低,钢轨和车轮都将遭到剧烈磨损。如果在列车起动时发生机车动轮“空转”,列车未能起动而司机又没有及时采取措施减小动轮所受力矩的情况下,可能发生钢轨的轨头被磨掉,甚至是动轮陷入钢轨凹下深坑内的严重事故。

2) 轮轨间的黏着

车轮和钢轨在很高的压力作用下都有变形,轮轨间实际是椭圆面(Hertz 曲面)接触,而非点接触,如图 1-2 所示,并不存在理想的瞬时转动中心;机车运行过程中又不可避免地要发生冲击和各种振动,车轮踏面又形成圆锥形,因此,车轮在钢轨上滚动的同时必然伴随着微量的纵向和横向滑动。也就是说,实际中,轮轨间不是纯粹的“静摩擦状态”,而是“静中有微动”或“滚中有微滑”的情形。在运行过程中,由于牵引力和惯性力不是作用在同一水平面内,造成机车前后车轮作用于钢轨的垂直载荷不均匀分配。所以,轮轨间纵向水平作用力的最大值实际上与运动状态有关,而且比物理学上常提到的“最大静摩擦力”小很多。因此,在轨道交通牵引和制动理论中,在分析轮轨间纵向力问题时,避免用“静摩擦”这个名词,而更多地以“黏着”来代替它。在黏着状态下,轮轨间纵向水平作用力的最大值被定义为黏着力,黏着力与轮轨间垂直载荷之比称为黏着系数。为方便应用,还假定轮轨间垂直载荷在运行中固定不变,即黏着力的变化完全因黏着系数的变化而引起,因而黏着系数实际上是一个假定值(称为计算黏着系数)。然而,由于它和假定不变的垂直载荷的乘积等于实际的黏着力,因此这个假定值用于黏着力计算是合理可行的,实际上的计算也都是按此假定进行(本书中凡是提到黏着系

数,如无特别说明,均指假定值)。

3) 蠕滑

进一步分析牵引工况轮轨接触处的弹性变形,可深化对黏着的认识。如图 1-3 所示,在动轮正压力的作用下,轮轨接触处产生弹性变形,形成椭圆形的接触面。从微观上看,两接触面是粗糙不平的。由于切向力的作用,动轮在钢轨上滚动时,车轮和钢轨的粗糙接触面产生新弹性变形,接触面间出现微量滑动,即蠕滑。

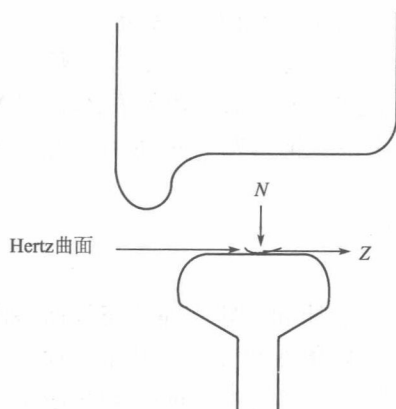


图 1-2 黏着力 Z 产生原理

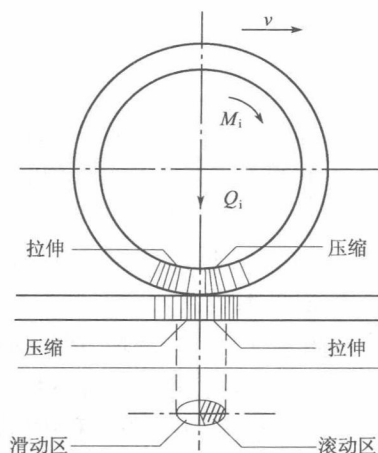


图 1-3 牵引工况轮轨接触处的弹性变形

蠕滑的产生是由于在车轮接触面的前部产生压缩,后部产生拉伸,而在钢轨接触面的前部产生拉伸,后部产生压缩。车轮上被压缩的金属,在接触表面的前部与钢轨被拉伸的金属相接处。随着动轮的滚动,车轮上原来被压缩的金属陆续放松,并被拉伸,而钢轨上原来被拉伸的金属陆续被压缩,因而在接触面的后部出现滑动。

轮轨接触面存在两种不同区域:接触面的前部,轮轨间没有相对滑动,称为滚动区,在图 1-3 中用阴影线表示;接触面的后部,轮轨间有相对滑动,称为滑动区。这两个区域的大小随切向力的变化而变化。当切向力增大时,滑动区面积增大,滚动区面积减小。当切向力增大到一定程度时,滚动区面积变为零,整个接触面间出现相对滑动,轮轨间的黏着被破坏,即出现空转。

蠕滑是滚动体的正常滑动。动轮在滚动过程中必然会产生蠕滑现象。伴随着蠕滑产生静摩擦力,轮轨之间才能传递切向力。由于蠕滑的存在,牵引式动轮的滚动圆周速度将比其前进速度高。这两种速度的差称为蠕滑速度,蠕滑的大小用蠕滑率 σ 表示。

$$\sigma = \frac{\omega R_i - v}{v} \quad (1-2)$$

式中: v ——动轮的前进速度;

ω ——动轮转动的角速度;

R_i ——动轮半径。

轮轨间由于摩擦产生的切向力反过来作用于驱动机构。随着切向力的增大,驱动机构内的弹性应力也增大。当切向力达到极限时,由于蠕滑的积累波及整个接触面,发展为真滑动。

积累的能量使车轮本身加速,这时驱动机构内的弹性应力被解除。由于车轮的惯性和驱动机构的弹性,在轮轨间出现滑动→黏着→再滑动→再黏着的反复振荡过程,一直持续到在驱动机构中重新建立起稳定的弹性力为止。

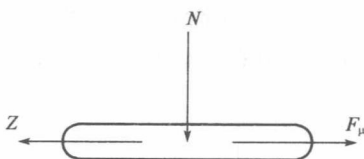


图 1-4 黏着力 Z 与黏着牵引力 F_μ

4) 计算黏着牵引力

黏着牵引力是由于轮轨间黏着作用而产生的机车牵引力,如图 1-4 所示。在机车牵引特性图中,其通常以带有阴影的曲线表示。

机车黏着牵引力的理论计算公式为

$$F_\mu = P_f \cdot \mu_j = (P_\mu \cdot g) \cdot \mu_j \quad (\text{kN}) \quad (1-3)$$

式中: P_f ——机车黏着重力(机车动轮对钢轨的垂直载荷之和,或全部动轴荷重之和),kN;

P_μ ——机车黏着质量,对内燃机车和电力机车,因全部车轮均为动轮,故机车黏着重量等于机车计算质量,t;

g ——重力加速度(文中如无专门说明,均取 9.81m/s^2);

μ_j ——计算黏着系数。

计算黏着系数与气候环境、运行速度、机车构造、线路品质和轮轨表面状态等诸多因素有关(例如,图 1-5 反映了计算黏着系数与列车运行速度、气候条件的关系),其难以通过理论方法计算确定。因此,牵引计算过程中应用的计算黏着系数公式都是在大量试验的基础上,结合机车运用经验,根据平均值测算得到的。

几种机车的计算黏着系数的经验公式如下:

① 国产电力机车

$$\mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \quad (1-4)$$

② 6K 型电力机车

$$\mu_j = 0.189 + \frac{8.86}{44 + v} \quad (1-5)$$

③ 8G 型电力机车

$$\mu_j = 0.28 + \frac{4}{50 + 6v} - 0.0006v \quad (1-6)$$

④ 国产电传动内燃机车

$$\mu_j = 0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v} \quad (1-7)$$

⑤ ND₅ 型电传动内燃机车

$$\mu_j = 0.242 + \frac{72}{800 + 11v} \quad (1-8)$$

式中: v ——运行速度,km/h。

液力传动内燃机车的计算黏着系数目前还缺乏充分的试验资料,没有制定通用的计算公式,因此可暂用电传动内燃机车的公式进行计算。

根据上述公式(1-4)~公式(1-8),将计算黏着系数与速度的关系列入表 1-1。

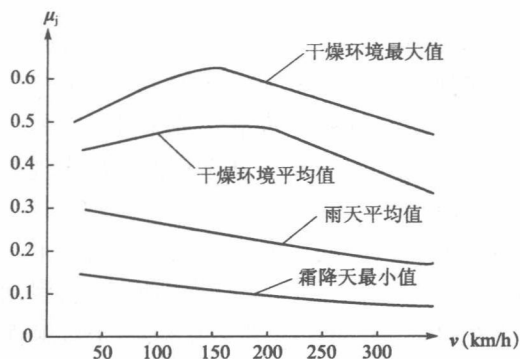


图 1-5 黏着系数与运行速度、气候条件间的关系

各种机车不同运行速度下的计算黏着系数

表 1-1

机 型 \ 速度 (km/h)	0	10	20	30	40	50	60
国产各型电力机车	0.360	0.307	0.286	0.275	0.269	0.264	0.261
6K 型电力机车	0.390	0.353	0.327	0.309	0.294	0.283	0.274
8G 型电力机车	0.360	0.310	0.292	0.279	0.270	0.261	0.254
国产电传动内燃机车	0.327	0.269	0.260	0.257	0.255	0.253	0.253
ND ₅ 型电传动内燃机车	0.332	0.321	0.313	0.306	0.300	0.295	0.291

从表 1-1 可看出,随着运行速度的提高,各种机车的计算黏着系数都有所下降。不同类型机车的计算黏着系数有所区别,主要原因是它们的走行部结构不同。电力机车中,6K 型电力机车的计算黏着系数最高,与它所采用的 B₀-B₀-B₀ 转向架和低拉牵引拉杆等结构有关。

日本新干线高速列车运营初期,为防止滑行发生,计算黏着系数使用了较为保守的计算数值,其基本计算公式为

$$\mu_j = \frac{13.6}{85 + v} \quad (1-9)$$

由于考虑了恶劣天气的影响,应用公式(1-9)计算所得的计算黏着系数取值为 0.02 ~ 0.04,明显偏小。随着新干线车辆技术的不断提高,100 系动车的黏着系数增加至 0.04 ~ 0.08,300 系动车的黏着系数增加至 0.04 ~ 0.10。黏着系数的提高减少了动轴数量,因而降低了运营成本。图 1-6 为新干线 0 系、100 系和 300 系动车的黏着系数变化趋势。

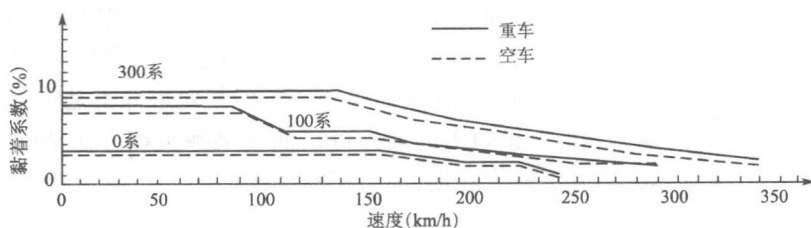


图 1-6 新干线 0 系、100 系、300 系动车黏着系数变化趋势

◀5) 黏着牵引力的修正

当机车在曲线轨道上运行时,由于外侧钢轨超高及内外侧动轮走行距离不同引起横向和纵向滑动等原因,黏着系数将会减少,通常简称为“黏降”,特别是在小半径曲线时影响更显著。因此,起动地段或限制坡道部分如果存在小半径曲线,必须进行修正和牵引质量验算。

电力机车在曲线半径 R 小于 600m 时,修正计算黏着系数为

$$\mu_r = \mu_j (0.67 + 0.00055R) \quad (1-10)$$

内燃机车在曲线半径 R 小于 550m 时,修正计算黏着系数为

$$\mu_r = \mu_j (0.805 + 0.000355R) \quad (1-11)$$

◀6) 黏着牵引特性

黏着牵引特性是指机车黏着牵引力与机车速度之间的关系。根据不同速度下的黏着牵引力,可以在直角坐标图中绘出黏着牵引力与速度的关系曲线,通常称为黏着牵引力曲线。一般在机车牵引特性曲线图中表示为带有阴影的曲线。

实际上,机车黏着牵引力是机车牵引力的一个限制值,机车牵引力是机车本身所具有的能力,机车黏着牵引力与机车牵引力两者必须很好地配合才能使机车特性发挥到最佳状态。对于电力机车来说,如果牵引电动机动力过大,超过黏着牵引力,那么牵引电动机的功率就不能充分发挥,机车真正能实现的牵引力是根据黏着牵引力限制值得到的黏着牵引力;反之,假如牵引电动机的牵引力小于黏着牵引力,则机车牵引力受到牵引电动机动力的限制,机车能实现的牵引力大小等于牵引电动机的动力大小。在不同条件下机车能实现的牵引力事实上是上述两种牵引力中的较小者。例如,当 SS₃ 型电力机车的速度 $v = 60\text{km/h}$ 时,黏着牵引力为 353.2kN,而牵引电动机在 8-Ⅱ级时,其牵引力为 255.1kN,此种情况下,轮周上的牵引力为牵引电动机牵引力,其值等于 255.1kN。

4.7) 提高黏着牵引力的方法

近年来,随着牵引电动机制造水平的不断提高,机车黏着特性越来越不能满足牵引力正常发挥的需要,尤其是当机车在低速和中速运行状态时,黏着力不足问题已成为限制牵引力、制动力发挥的关键问题。因此,铁路运营部门在掌握机车动轮空转的规律的基础上,采取预防措施,以提高黏着系数,使机车的黏着质量被充分利用,常用的方法有以下几个方面。

(1) 改善轮轨接触面的状态

①撒砂是目前最常用,也是最简单的一种方法。在雨、雾、霜、雪及冰冻的天气情况下,轮轨黏着系数会降低约 20% ~ 30%,在油污的情况下可能降低约 50%,此时通过撒砂可以使机车黏着系数提高到 0.225 左右。需要引起注意的是,为了得到预期的效果,必须使用质量较好的砂子,即砂子的颗粒大小、成分、硬度和湿度适合。不过,大量撒砂或频繁撒砂会影响轨道电路的信号传输,并且会增加后续通过列车的运行阻力,而且还对滚动轴承不利。虽然对于高速列车来说,采用撒砂来增加黏着系数的方法比较简单、经济,但其效果并不是十分理想。

②通过机械方法清洁钢轨表面。钢轨上的油污可以通过某些机械方法清除,使轮轨恢复正常的黏着系数,但是具体清洁方法较为麻烦,不易实际操作。

(2) 提高机车走行部质量

①保持机车技术状态良好,尽可能使所有的动轮具有相同的半径;保持弹簧装置的良好状态,使各动轴具有均衡的荷重;加强轮对保养,防止车轮踏面擦伤。

②机车走行部应及时清洁,防止润滑油脂滴到车轮踏面和轨面上。

(3) 优化设计

在新型机车设计阶段,应该合理选择机车牵引电动机的布置方式,降低牵引点高度,减少弹簧质量,以避免过多轴重转移,提高黏着质量的利用率;把多台电动机在机械上连接起来也是降低空转的措施之一;还可以通过牵引电动机的无级调速控制,使牵引力变化均匀。

(4) 加装空转保护措施

新型机车一般都装有防空转自动检测保护装置(也称黏着控制系统),使机车在空转刚刚发生时,就能检测出来,并能自动采取措施消除空转,从而保证机车正常运行。

目前,国内外常见的黏着控制系统主要有校正型和蠕滑率控制型两大类。城市轨道交通车辆要求动车具有良好的防空转和防滑行性能,大多采用校正型的黏着控制系统。

当轨道交通车辆产生空转时,会有如下情况发生:①空转轮对转速不正常地大幅度上升。

②空转牵引电动机电流不正常地大幅度下降。③串联电路中一台电动机的端电压迅速上升,