



交通运输大类专业
城市轨道交通方向
核心课程教材

Train Performance Calculation and Design

列车运行计算与设计

主 编：毛保华
副主编：李夏苗 牛惠民
主 审：卫和君 苏 梅



人民交通出版社

China Communications Press

要 要 容 内

本书为城市轨道交通专业2008年教育部、交通运输部联合颁布的《城市轨道交通专业人才培养方案》中规定的一门专业必修课程。本书主要介绍城市轨道交通列车运行计划编制、列车运行图编制、列车运行调整、列车运行图优化设计、列车运行图实施与评价等方面的内容。本书可作为城市轨道交通专业及相关专业的教材，也可供从事城市轨道交通运营管理的工程技术人员参考。

交通运输大类专业
城市轨道交通方向
核心课程教材

Train Performance Calculation and Design

列车运行计算与设计

主 编：毛保华

副主编：李夏苗 牛惠民

主 审：卫和君 苏 梅

号 811010 报 (8002) 字 港 时 录 CIP 第 1 版 2008 年 11 月 1 日

书 号 7-114-06980-1

定 价：30.00 元

印 数：1000 册

出 版 社：人民交通出版社

社 址：北京人民交通出版社

网 址：<http://www.cctpress.com.cn>

邮 政 编 码：100001

电 话：(010) 63996000

传 真：(010) 63996001

发 行 所：北京人民交通出版社

经 销 处：北京人民交通出版社

印 刷 厂：北京人民交通出版社

开 本：787×1092

印 张：18

字 数：418 千字

版 次：2008 年 1 月第 1 版

印 次：2008 年 1 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 978-7-114-06980-1

定 价：30.00 元

(本书定价仅供参考，实际定价以书价为准)



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

北京交通大学杨肇夏教授主持教育部教改项目,该项目 2005 年获得国家优秀教学成果二等奖。根据教改研究和试点,目前在交通运输大类下设置“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。根据教学需要,北京交通大学组织了国内多所院校和研究机构编写本系列交通运输类专业城市轨道交通方向核心课程教材,包括《城市轨道交通规划与设计》、《城市轨道交通系统运营管理》、《列车运行计算与设计》、《城市客运管理》四门骨干课程。

本系列教材可以作为交通运输类专业及相关专业的本科生、研究生的教材或教学参考资料,同时,亦可供相关专业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

列车运行计算及设计 / 毛保华主编. —北京:人民交通出版社, 2008. 1

ISBN 978 - 7 - 114 - 06980 - 2

I. 列… II. 毛… III. ①城市铁路 - 运行 - 计算 - 高等学校 - 教材 ②城市铁路 - 运行 - 设计 - 高等学校 - 教材
IV. U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 010118 号

书 名: 列车运行计算与设计

著 作 者: 毛保华

责任编辑: 陈志敏

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) 85285656, 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787 × 960 1/16

印 张: 18.5

字 数: 318 千

版 次: 2008 年 1 月 第 1 版

印 次: 2008 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 06980 - 2

印 数: 0001 ~ 3000 册

定 价: 30.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



QIANYAN

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,在道路交通受到愈来愈多的拥堵、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100 000km,其中客运专线约10 000km,客货混行的快速铁路约20 000km,都市圈和城市带内城际客运铁路约2 000km。

- 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50 000km,电气化里程达到50 000km,复线率和电气化率均达到50%。

- 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



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》,而其基础是《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。建国以来,《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行与管理。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:

首先,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问题,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著完成的。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苏梅审定。

在本书的编著过程中,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



MULU

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	9
1.3 内燃机车的牵引特性	15
1.4 动车组的牵引特性	21
1.5 牵引力的计算标准和取值规定	27
1.6 内燃与电力牵引特性的比较	34
习题	35
第 2 章 列车运行阻力	36
2.1 概述	36
2.2 基本阻力	38
2.3 附加阻力	45
2.4 起动阻力	49
2.5 列车运行阻力计算	50
习题	51
第 3 章 列车制动力	52
3.1 列车制动力的产生及限制	53
3.2 闸瓦压力摩擦系数	55
3.3 闸瓦压力	58
3.4 列车制动力的计算	62
3.5 机车动力制动力	75
3.6 高速列车制动	81
习题	88



第4章 合力曲线、运动方程及时分解算	90
4.1 作用于列车的合力	90
4.2 合力曲线图的绘制及应用	91
4.3 列车运动方程式	95
4.4 列车速度时分曲线的计算	98
4.5 列车速度时分曲线的绘制	99
4.6 线路纵断面化简	106
习题	109
第5章 列车制动问题解算	110
5.1 概述	110
5.2 制动距离及其计算	111
5.3 列车换算制动率的解算	121
5.4 列车紧急制动限速的解算	122
5.5 列车常用制动限速	134
5.6 国外铁路制动距离计算	142
习题	146
第6章 列车运行能耗计算及节能技术	148
6.1 内燃牵引能耗计算	148
6.2 电力机车耗电量	153
6.3 列车运行节能设计	155
习题	172
第7章 自动闭塞区段信号机布局方法	173
7.1 自动闭塞系统的基本原理	174
7.2 信号机布局的基本目标	178
7.3 信号机布置检验	181
7.4 信号机布置方式	182
7.5 信号机布局计算系统	190
7.6 算例设计及分析	195
习题	197

第 8 章 多列车运行计算与分析	198
8.1 列车运行过程影响因素	198
8.2 信号闭塞方式	199
8.3 不同闭塞方式下追踪列车间隔时间的计算	204
8.4 多列车运行计算原理	206
8.5 案例设计及分析	212
8.6 小结	215
习题.....	216
第 9 章 牵引质量的确定	217
9.1 概述	217
9.2 牵引质量的计算	218
9.3 牵引质量的验算	222
9.4 牵引定数的确定	225
习题.....	228
第 10 章 城轨与高速列车运行计算	230
10.1 城轨列车运行计算.....	230
10.2 高速列车运行计算.....	238
10.3 案例设计及分析.....	251
习题.....	255
第 11 章 列车运行计算软件	256
11.1 列车运行计算软件的发展.....	256
11.2 国内列车运行计算软件介绍.....	258
习题.....	280
参考文献	281

第1章

列车牵引力

章

列车牵引力是列车运行动力的来源,通过牵引机车或动车产生。从19世纪20年代火车诞生之初以蒸汽机为动力,发展到今日,列车已经主要由内燃机车、电力机车等提供动力。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驾驶员根据需要控制的外力。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

通过对电力机车进行分析,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。以交一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。机车牵引力的理论计算方法如下:

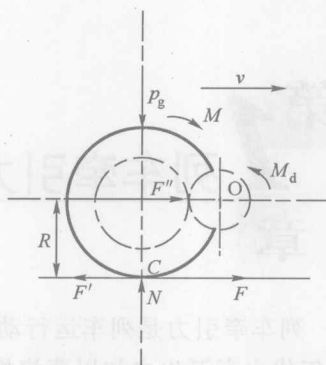


图 1-1 机车牵引力的形成示意图

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

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,机车动轮在强大转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

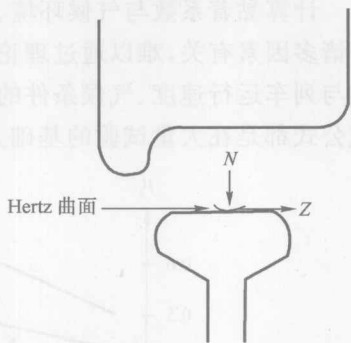


图 1-2 黏着力 Z 产生原理

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,在铁路牵引和制动理论中,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. 计算黏着牵引力

黏着牵引力是由于轮轨间黏着作用产生的机车牵引力,如图 1-3 所示。在机车牵引特性图中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如下:

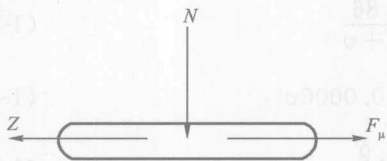


图 1-3 黏着力 Z 与黏着牵引力 F_μ

$$F_\mu = P_t \cdot \mu_t = (P_\mu \cdot g) \cdot \mu_t \quad (\text{kN}) \quad (1-2)$$

式中: P_t ——机车的黏着重力(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 ——机车黏着重量(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重量(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,难以通过理论方法计算确定,例如,图 1-4 反映了计算黏着系数与列车运行速度、气候条件的关系。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。

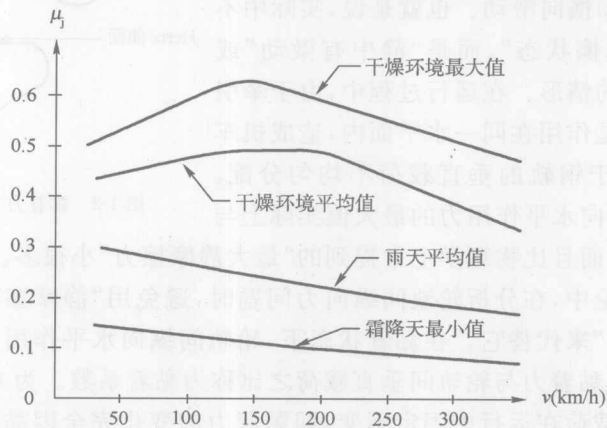


图 1-4 黏着系数与运行速度、气候条件间的关系

几种机车的计算黏着系数的经验公式如下:

$$\text{国产电力机车} \quad \mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \quad (1-3)$$

$$6\text{K 型电力机车} \quad \mu_j = 0.189 + \frac{8.86}{44 + v} \quad (1-4)$$

$$8\text{G 型电力机车} \quad \mu_j = 0.28 + \frac{8.86}{44 + v} - 0.0006v \quad (1-5)$$

$$\text{国产电传动内燃机车} \quad \mu_j = 0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v} \quad (1-6)$$

$$\text{ND}_5 \text{ 型电传动内燃机车} \quad \mu_j = 0.242 + \frac{72}{800 + 11v} \quad (1-7)$$

上述式中: 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,没有制订通用的计算公式,因此可暂用电传动内燃机车的公式进行计算。

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:

$$\mu_1 = \frac{13.6}{85 + v} \quad (1-8)$$

由于考虑了恶劣天气的影响,应用式(1-8)计算所得的计算黏着系数取值在 0.02~0.04 之间,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 1-5 为新干线 0 系、100 系和 300 系动车的黏着系数变化趋势。

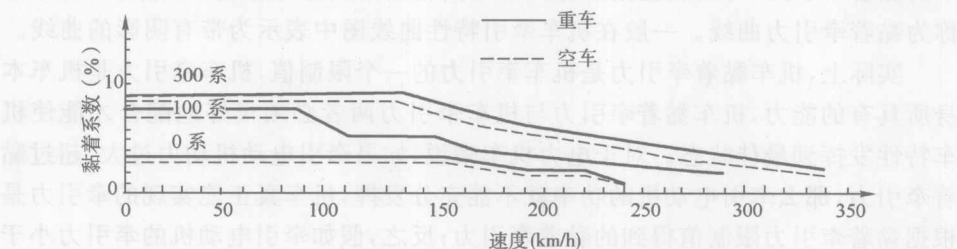


图 1-5 新干线 100 系 300 系动车黏着系数变化趋势

4. 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”,特别是在小曲线半径时影响更显著。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:

$$\mu_r = \mu_1(0.67 + 0.00055R) \quad (1-9)$$

内燃机车在曲线半径 R 小于 550m 时,修正计算黏着系数

$$\mu_r = \mu_1(0.805 + 0.000355R) \quad (1-10)$$

根据上述式(1-9)和(1-10)表达的修正计算黏着系数与速度的关系列入表 1-1。

各种机车不同运行速度下的计算黏着系数

表 1-1

速度(km/h) 机 型	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 电力机车	0.390	0.353	0.327	0.309	0.294	0.283	0.274
8G 电力机车	0.360	0.310	0.292	0.279	0.270	0.261	0.254
国产电力传动内燃机车	0.327	0.269	0.260	0.257	0.255	0.253	0.253
ND ₅ 内燃机车	0.332	0.321	0.313	0.306	0.300	0.295	0.291



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,如表 1-1 所示。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 型机车的计算黏着系数最高,与它所采用的 $B_0-B_0-B_0$ 转向架和低拉牵引拉杆等结构有关。

5. 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 SS_3 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 。

6. 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充分被利用,常用的方法如下:

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 $20\%\sim 30\%$,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。虽然对高速列车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,减小弹簧下质量以减少轴重转移,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,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。

1.1.4 机车牵引力的分类

常用的机车牵引力分类方法有两种,一种是按机械功传递顺序分,另一种是按能量转变过程分。

1. 按机械功传递顺序分类

按机械功传递顺序牵引力分为指示牵引力、轮周牵引力与车钩牵引力三类。

1) 指示牵引力

假设内燃机车柴油机气缸中燃气对活塞所做的机械功毫无损失地传动到动轮周上所得到的机车牵引力。指示牵引力是一个理想情况下的概念,可由测定柴油机气缸中的指示功来计算得到,通常仅在机车设计阶段使用。

2) 轮周牵引力

机车通过动力传动装置的作用,将电能(电力牵引)或化学能(内燃牵引)最终转变成机械能,并传递到动轮上。然而,动力传动装置作用在动轮上的力矩是机车的一种内力矩,假如动轮不作用于钢轨上,则动轮只能自身旋转,而无法使机车运动。因此,使机车牵引车辆沿轨道运行的外力来自钢轨和轮周,称为轮周牵引力。轮周牵引力产生有两个必需具备的条件:

(1) 机车动轮上有动力传动装置传来的旋转力矩

(2) 动轮与钢轨接触并存在摩擦作用

轮周牵引力的产生过程为:当机车的动轮在力矩 M 的作用下,轮轨间出现



相对运动趋势时,如果轮轨间的静摩擦作用不被破坏,那么动轮产生对钢轨的作用力 F' 和钢轨对动轮的反作用力 F ,如图 1-6 所示。 F' 与 F 两个力的方向相反、大小相等,数值通过式(1-1)计算。

显然,反作用力 F 是由动力传动装置引起的,与列车运行方向相同的外力,本质是可由司机调节的机车牵引力。由于作用于 F 动轮轮周(踏面),因此通常称其为轮周牵引力。

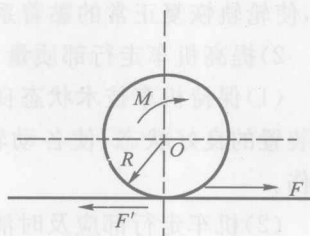


图 1-6 轮周牵引力的产生

(3) 车钩牵引力

机车牵引力为机车牵引客、货车辆的纵向力,此力通常也称为车钩牵引力或挽钩牵引力 F_g ,如图 1-7 所示。欧美一些国家以车钩牵引力作为牵引力计算标准,原因是其容易测量。计算牵引质量时用车钩牵引力也比较方便。不足之处是:在计算列车运行速度和运行时间的时候要以整个列车为单独整体,而车钩牵引力是机车和车辆之间相互作用的内力,如图 1-7 所示,因此车钩牵引力 F_g 不是使整个列车发生运动或加速的外力。

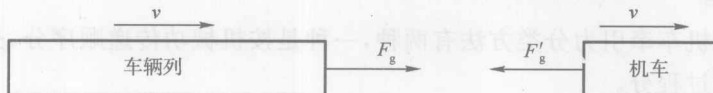


图 1-7 车钩牵引力的概念

列车匀速运行时,车钩牵引力 F_g 等于轮周牵引力 F 减去机车运行阻力 W' ,是实际作用在车钩上的牵引力,即

$$F_g = F - W' \quad (\text{kN}) \quad (1-11)$$

式中: W' ——机车运行阻力,KN。

注意:按我国《列车牵引计算规程》(以下简称《牵规》)规定,机车牵引力以轮周牵引力为计算标准,即以轮周牵引力来衡量和表示机车牵引力的大小。由于动轮直径的变化会影响牵引力的大小,因此《牵规》又规定,机车牵引力按轮箍半磨损状态进行计算。不论是设计还是试验资料,所提供的轮周牵引力和机车速度数据,必须换算到轮箍半磨损状态。

2. 按能量转变过程分类

电力机车的电能是由牵引变电所供给,进入机车的单向交流电经过变压整流后输入牵引电动机(交—直流传动电力机车),将电能转变为带动轮对转动的机械功,然后借助于轮轨间的黏着作用转变为动轮周牵引力所做的机械功。因此,