



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育铁道部规划教材

# 列车牵引计算

(第三版)

饶 忠 主编 陆啸秋 主审



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  
普通高等教育铁道部规划教材

# 列车牵引计算

(第三版)

饶 忠 主 编

焦风川 副主编

陆啸秋 主 审

中国铁道出版社

2010年·北京

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和铁道部规划教材。本书简要阐述了列车牵引的理论基础和计算方法,主要内容包括:铁路轮轨摩擦与黏着的关系,单质点计算与多质点计算问题,列车运行中发生的对列车运行有直接影响的各种外力以及它们在运用中的变化规律,牵引力各种计算标准,列车运行阻力和制动力的计算,列车运行时分和列车制动问题的解算,牵引重量的计算、验算和牵引定数的制定,列车能耗的计算,以及如何用计算机进行上述计算等。

本书可作为高校铁路运输、经济、机车、动车等专业的教材,亦可供铁路选线设计、铁路通信信号等其他专业和有关部门的人员学习或参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

列车牵引计算/饶忠主编.—3版.—北京:中国铁道出版社,2010.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.普通高等教育铁道部规划教材

ISBN 978-7-113-09791-2

I. ①列… II. ①饶… III. ①列车—牵引—计算—高等学校—教材 IV. U260.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 035809 号

书 名: 列车牵引计算 (第三版)

作 者: 饶 忠 主编

责任编辑: 金 锋 电话: 010-51873134 电子信箱: jinfeng88428@163.com 教材网址: www.tdjiaocai.com

封面设计: 崔丽芳

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: 北京新魏印刷厂

版 次: 1996 年 3 月第 1 版 2010 年 8 月第 3 版 2010 年 8 月第 12 次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 9.25 字数: 225 千

印 数: 48 001~53 000 册

书 号: ISBN 978-7-113-09791-2

定 价: 23.00 元 (含光盘)

### 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

## 第三版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和铁道部规划教材,是由铁道部教材开发编导小组组织编写,并经铁道部相关业务部门审定,适用于高等院校铁路特色专业教学,亦可供铁路专业技术人员使用。

在各种现代交通运输方式中,铁路运输扮演着重要的角色。其主要特色是:各种车辆(机车、客车、货车,或动车和拖车)都沿钢铁轨道运行,其主要运行方式不是单个运行,而是互相连结,编组成“列车”或“动车组”(二者以下统称为“列车”),即“成列运行”;在列车中,每辆车的制动装置都不是独立的,而是互相连通组成一个有机的整体,统一由列车前端的司机来操纵。所以,铁路有个独特的“列车牵引”问题,在铁路选线设计和铁路运营管理中都要进行“列车牵引计算”,这是别的运输方式没有的一个重要学科,它在铁路上的用途非常广泛。

本书从第二版出版到现在,已经又十年过去了。在这期间,随着我国改革开放的继续深入和综合国力的迅速增强,我国铁路有了飞跃发展:高速客运专线一条接一条地修建,高速动车组越来越多,客车最高运行速度也从 $120\sim 160\text{ km/h}$ 迅速迈上了 $250\sim 350\text{ km/h}$ 的新台阶;货物列车牵引重量越来越大,货车运行速度也在提高;新型机车、新型车辆、新的制动方式、新型制动机大量涌现,铁路牵引动力和客货车辆(含制动机)在量和质的方面都有重大变化和显著提高。

为适应上述变化和发展,本书第三版进行了下列修订:

1. 删去蒸汽机车和 L3、GL、K1、K2、GK 等制动机的内容;
2. 增加动车组牵引特性、阻力公式、动力制动等方面的内容;
3. 增加“列车制动名称和分类”的概略介绍;
4. 更新“列车制动力二次换算法”的内容;
5. 更新“动力制动”和“列车牵引电算”的内容;
6. 增加“列车制动问题电算”的内容;
7. 随书附送“列车牵引电算(含列车制动问题电算)”光盘;
8. 将“绪论”扩充为第一章并命名为“列车牵引计算总论”(将“轮轨摩擦与黏着的关系”包括牵引黏着和制动黏着等论述提前到这一章,并在这章中增加“牵引计算种类”、“单质点计算与多质点计算”等论述)。

本书第三版由北京交通大学饶忠、焦风川合作编写,饶忠任主编,焦风川为副主编,铁道部运输局陆啸秋主审。本书编写过程中曾得到铁道科学研究院黄问盈研究员的许多关心和帮助,他还亲自执笔为我们更新了第四章第五节“列车制动力二次换算法”的内容。北京交通大学叶星星、刘原也帮助我们做了许多工作,在此一并表示衷心感谢。

本书如有不妥及疏漏之处,欢迎读者指正。

编者  
2009年9月

## 第二版前言

近年来,我国铁路客运提速和货运重载进展迅速,相应的技术装备不断更新,新型内燃、电力机车和新型客、货车辆以及新的制动方式、新型制动机和各种材质闸瓦(闸片)大量投入使用,铁路牵引动力和客、货车辆(含制动机)在量和质的方面均有重大变化和提。主要干线已陆续正式开行最高速度 140km/h 和 160km/h 的快速旅客列车和 4 000~5 000t 的货物列车,高速铁路即将兴建,新型动车组正在研制,有些样车已在试验运用,标志着我国铁路正加快步伐,逐步与国际铁路高速化大趋势“接轨”。

为适应上述变化,经过不断研究、试验和完善,新的《列车牵引计算规程》(简称新《牵规》)于 1999 年 4 月 1 日正式实施。为配合新《牵规》的推广和应用,北方交通大学饶忠对本书进行了全面修订,保持了原有框架和章节,对数据、曲线、计算公式或其系数以及相关例题作了必要的删节、修改、补充和重算,有些名词、概念也进行了相应的调整和修改,此外还增补了新的计算方法和公式。

铁道部科学研究院黄问盈再次对本书进行了全面审定。

书中不妥及疏漏之处,欢迎读者指正。

编者

1999 年 5 月

# 第一版前言

提高列车牵引重量和运行速度,保证铁路行车安全和尽量节约机车能耗,是扩大铁路运输能力、提高铁路工作效益的重要内容。为此,必须讲究科学管理和经济操纵,提高运输管理和列车操纵水平;很好地研究列车的牵引重量、运行速度、制动距离以及机车能耗等与哪些因素有关,怎样在保证行车安全和节能的条件下“多拉快跑”;同时,要让铁路运输管理工作人员及其后备军都具有这方面的知识,既会分析,也会计算。

《列车牵引计算》正是讲述这些理论知识和计算方法的。它主要包括机车牵引力、列车运行阻力和制动力的产生及其在运用中的变化规律,各种机车的牵引力计算标准,列车运行阻力和制动力计算,列车运行时分和列车制动问题的解算,牵引重量的计算和验算以及牵引定数的制定,机车能耗(蒸汽机车煤耗、内燃机车燃油消耗和电力机车电耗)的计算,以及如何用电子计算机进行上述计算等内容。

在编写过程中,我们除了依据铁路高等学校铁道运输专业“列车牵引计算”课程教学大纲的具体要求进行编写之外,还在制动限速、空走时间、作用于列车上的力、轮轨摩擦与粘着的关系,以及牵引电算等论述中,写进了我们多年的教学和科研成果。同时,考虑到读者自学的需要,在每章正文之后列出了复习思考题及课外作业题,并适当增加了一些必要的具体数据,使读者有更多的“量的概念”。因此,本书除了供铁路高等院校运输、运输经济、机车等专业教学使用外,亦可供其他专业和有关部门(如铁路选线设计、铁路通信信号等)的技术人员学习、参考。

本书由北方交通大学饶忠、谢让皋、戴明森及许惊等集体编写。饶忠主编并编写了绪论、第五章、第八章和每章的复习思考题及作业题,谢让皋编写了第一章和第六章,戴明森编写了第三章和第四章,许惊编写了第二章和第七章,铁道部科学研究院黄问盈主审。

初稿完成后,在北方交通大学试用了三年,并函寄有关兄弟院校征求意见。在此基础上,1994年5月由铁道部科学研究院黄问盈主持召开了审稿会。会后,我们又根据审稿会的意见及兄弟院校的函审意见,对初稿作了进一步地修改和补充。

编者

1995年4月

# 目 录

第一章 列车牵引计算总论	1
第一节 概 述	1
第二节 《列车牵引计算规程》的意义和发展	2
第三节 牵引计算中的主要物理量及其符号的制定原则	2
第四节 对列车运行有直接影响的三种外力及其合力	3
第五节 轮轨间的摩擦与黏着	5
第六节 单质点计算与多质点计算	8
复习思考题	9
第二章 牵引力特性及其计算标准	10
第一节 概 述	10
第二节 内燃机车的牵引力特性及其计算标准	11
第三节 电力机车的牵引力特性及其计算标准	14
第四节 动车组及其牵引力特性	15
复习思考题	19
作业题	19
第三章 列车运行阻力的种类和计算	20
第一节 概 述	20
第二节 基本阻力的分析和计算	21
第三节 附加阻力的种类和计算	25
第四节 列车运行阻力计算及实例	28
复习思考题	29
作业题	29
第四章 列车制动力种类、特性和计算	30
第一节 概 述	30
第二节 闸瓦(闸片)摩擦系数的影响因素和实算公式	31
第三节 闸瓦(闸片)压力的计算	33
第四节 列车制动力计算的实算法和换算法	36
第五节 列车制动力计算的等效二次换算法	42
第六节 动力制动的制动力特性和注意事项	48
复习思考题	54



作业题 .....	54
<b>第五章 合力曲线、运动方程及运行时分解算 .....</b>	<b>55</b>
第一节 单位合力曲线和常用制动限速 .....	55
第二节 运动方程及其衍生的时分距离算式 .....	59
第三节 计算列车运行时分的分析法 .....	62
第四节 解算列车运行时分的图解法 .....	66
第五节 计算列车运行时分的均衡速度法 .....	72
第六节 线路纵断面化简 .....	74
复习思考题 .....	77
作业题 .....	77
<b>第六章 列车制动问题解算 .....</b>	<b>78</b>
第一节 列车制动距离及其计算 .....	78
第二节 紧急制动限速和列车最小换算制动率的解算 .....	87
复习思考题 .....	99
作业题 .....	99
<b>第七章 牵引重量和牵引定数 .....</b>	<b>100</b>
第一节 牵引重量的计算 .....	100
第二节 牵引重量的验算 .....	103
第三节 牵引定数的确定 .....	105
复习思考题 .....	107
作业题 .....	107
<b>第八章 列车能耗计算 .....</b>	<b>108</b>
第一节 内燃牵引的燃油消耗量计算 .....	108
第二节 电力牵引的电能消耗量计算 .....	109
复习思考题 .....	111
作业题 .....	111
<b>第九章 列车牵引电算 .....</b>	<b>112</b>
第一节 概 述 .....	112
第二节 原始数据库的生成 .....	114
第三节 列车运行时分的电算 .....	122
第四节 列车制动问题的电算 .....	131
复习思考题 .....	134
作业题 .....	134
<b>参考文献 .....</b>	<b>135</b>
<b>附 表 .....</b>	<b>136</b>



# 第一章

## 列车牵引计算总论

### 第一节 概 述

#### 一、“列车牵引计算”学科的性质和内容

“列车牵引计算”(以前曾称为“机车运转理论”或“牵引计算学”)是专门研究铁路列车在外力的作用下沿轨道运行及其有关问题的实用学科。它以力学为基础,以科学实验和先进操纵经验为依据,分析列车运行过程中的各种现象和原理,并用以解算铁路运营和设计上的一些主要技术问题和技术经济问题。例如,机车牵引重量、列车运行速度和运行时间、列车制动距离、制动限速、制动能力以及机车能耗(燃油耗或电耗)等等。

#### 二、“列车牵引计算”的种类和用途

列车牵引计算有好几种。过去的、传统的、常规的是力争高速运行、求“最短时分”的牵引计算。现在应用最广泛的还是这种常规牵引计算。

在电子计算机技术发展起来之后,人们不但可以利用计算机进行上述常规牵引计算,而且可在“运行时分已定”的条件下利用计算机进行“寻求最佳节能方案”的牵引计算和“研究减轻列车纵向冲击”的牵引计算。如果列车在区间运行时或者机车在车站调车时发生了事故,还可以利用牵引计算来进行模拟,分析事故原因。

由此可见,牵引计算用途很广泛。下面再按部门分别进行介绍:

##### 1. 铁路运输方面

为了使铁路运输提速、重载、安全、高效,在每年修改列车运行图时都需要进行大量的牵引计算;在列车运行或车站调车过程中发生事故时用以分析事故原因。

##### 2. 机车运用方面

除了配合运输方面做好上述工作之外,为了“节能”,还可通过牵引计算,研究先进司机的操纵经验和寻找最佳操纵方案。

##### 3. 选线设计方面

为了计算铁路的通过能力和输送能力、布置车站和机务段(或者说,确定线路纵断面和机车交路),在进行选线设计时必须进行牵引计算。

##### 4. 通信信号方面

为了合理地布置铁路的行车信号机,防止列车超速或“冒进信号”,也要进行牵引计算。

##### 5. 运输经济方面

为了计算设备投资和运营支出,进行各种方案的经济比较等等,也要进行牵引计算。



## 第二节 《列车牵引计算规程》的意义和发展

由于“列车牵引计算”与铁路很多部门有着非常密切的关系,为了使各部门在进行列车牵引计算时有个统一依据和具有可比性,中华人民共和国铁道部曾多次制定和颁布《列车牵引计算规程》(以下简称《牵规》),其中规定了牵引计算方法及所用的主要技术数据的标准,是确定牵引重量和运行时间的依据,计算机车用电、油、煤、水等消耗量的基础。为了避免新建铁路和营业铁路在衔接地点造成浪费,不论是营业铁路、新建铁路还是旧线改造,凡是1 435 mm标准轨距的列车牵引计算,都必须遵照该规程来进行。

影响列车运行的因素很多,也很复杂。要想一一考虑并用理论推导的方法来计算它们是很困难的。因此,只能依据牵引计算的理论,结合大量的试验,整理出一些既简单实用,又符合实际情况的曲线、公式或图表,作为一定时期内的牵引计算标准。《牵规》就是这样制定出来的。但是,铁路情况和机车车辆的运用条件不是一成不变的。随着科学技术的发展,装备会得到更新,管理和操纵的水平会不断提高,这就需要用新的装备、新的测试方法在新的试验条件下进行新的试验,或者采用新的计算方法,即,又可以得出新的计算标准。所以,为了适应不断发展变化的铁路情况和机车车辆运用条件,《牵规》也要不定期地进行修订和改进。中华人民共和国建国之初的第一个《牵规》是1957年12月14日颁布、1958年5月1日开始实行的《蒸汽机车牵引计算规程》。第二个《牵规》是1982年7月12日颁布、1983年1月1日开始实行的。从1958年到1982年的25年间,中国铁路由单一的蒸汽牵引发展成为内燃、电力和蒸汽牵引并存,而且内、电运输量逐步超过了蒸汽牵引的运输量。所以,第二个《牵规》包括蒸汽、内燃和电力三种牵引方面的内容,比第一个《牵规》有了长足的发展和改进。从1983年以后,中国的法定计量制度由采用工程单位制(米制)改变成了采用国际单位制;电子计算机在列车牵引计算上的应用日益广泛;滚动轴承在货车中的比例迅速上升,已经占了绝大多数;列车的牵引重量和运行速度不断提高,新型的机车、车辆,新的制动方式和新型制动机不断涌现。所以,铁道部又在1998年10月15日批准和发布了第三个《牵规》(TB/T 1407—1998),并决定从1999年4月1日开始实行。与第二个《牵规》相比,它修改、补充和增加的内容是:全面采用了新的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燃和电力机车的单位基本阻力公式;修订了内燃和电力机车黏着系数及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;修订和增加牵引重量(牵引质量)计算公式;增加了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;增加了列车牵引电算法的条文,明确地规定“以电算为主”。

## 第三节 牵引计算中的主要物理量及其符号的制定原则

在列车牵引计算中,为了便于表达各物理量之间的数学关系,并便于书写、印刷和校对,规定以一定的符号代表一定的物理量。它是根据《有关量、单位和符号的一般原则》(GB 3101—93)规定的精神,按下列基本原则制定的:



(1) 选用符号尽量符合国家标准和国际标准,并适当照顾过去的使用习惯。

(2) 量的符号通常是单个拉丁字母或希腊字母,有时带有下标或其他说明性标记,量的符号必须用斜体印刷。

(3) 下标尽量采用国际通用的,没有国际通用的则选用汉语拼音字母。下标的字体比基本符号略小,但基准线比基本符号稍低。表示物理量符号的下标用斜体,其他下标用正体印刷。

列车牵引计算中各主要物理量的名称、符号、单位及取值规定,可参看表 1-1,在以后各章节中也将陆续介绍。

表 1-1 列车牵引计算中的主要物理量

主要物理量的名称	单 位	取值规定
区间距离 $S$	km	取至 2 位小数
坡段长度 $L$	m	取为整数
坡道坡度千分数 $i$		取至 2 位小数
牵引力 $F$ 、运行阻力 $W$ 、制动力 $B$	kN	取至 1 位小数
单位牵引力 $f$ 、单位阻力 $w$ 、单位制动力 $b$	N/kN	取至 2 位小数
速度 $v$	km/h	取至 1 位小数
牵引重量(牵引质量) $G$	t	取至 10 的整数倍
区间运行时间 $t$	min	取至 1 位小数
电流 $I$	A	取为整数
电力机车区段耗电量 $Q$	kW · h	取为整数
单位耗电量 $q$	kW · h/(10 <sup>4</sup> t · km)	取至 1 位小数
内燃机车区段燃油消耗量 $E$	kg	取为整数
单位时间燃油消耗量 $e_y$	kg/min	取至 2 位小数
单位燃油消耗量 $e$	kg/(10 <sup>4</sup> t · km)	取至 1 位小数

## 第四节 对列车运行有直接影响的三种外力及其合力

列车牵引计算的中心环节是推导列车运动方程,即研究列车运行中其加(减)速度与列车加(减)速度的相互关系,从而找出列车运行速度、运行距离、运行时间及牵引重量之间的相互关系。为此,首先要研究列车运行中发生的对列车运行有直接影响的各种外力:

### 1. 牵引力 $F$

由机车或动车的动力传动装置引起的与列车运行方向相同的外力。这是司机可以控制的使列车发生运动或加速的力。

在钢轨上运行的列车与外界的接触对象主要是空气和钢轨(电力牵引时还有接触网)。真正能使列车发生运动和加速的人为的外力,目前只能来自于钢轨(轮轨接触点)。

机车或动车是一种能量转换装置。不论是电力机车或电动车组的电能,还是内燃机车或内燃动车组的燃料化学能,都是通过动力传动装置的作用,最终转变成机械能,并传递到动轮上。但是,动力传动装置作用在动轮上的力矩是机车或动车的一种内力矩。如果动轮不压在钢轨上,那么,动轮只能自身旋转,而不能使机车或动车运动。因此,使机车牵引车辆或使动车



和拖车沿轨道运行的外力肯定来自钢轨和轮周。这个力的产生必需具备下列两个条件：

- (1) 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。

这个力的产生过程如下：

当动轮在力矩  $M$  的作用下，轮轨间出现相对运动趋势时，只要轮轨间的静摩擦作用不被破坏，则将产生动轮对钢轨的作用力  $F'$  和钢轨对动轮的反作用力  $F$ ，参看图 1-1。两者的方向相反，大小相等。其值

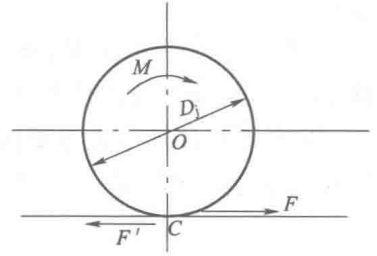


图 1-1 牵引力的产生

$$F = \frac{M}{D_j/2} \quad (1-1)$$

式中  $D_j$ ——动轮直径计算值，即动轮滚动圆半磨耗时的直径。例如，一般国产内燃机车动轮滚动圆的名义直径  $D=1\ 050\text{ mm}$ ，动轮磨耗的限度  $b=37\text{ mm}$ ，则动轮直径计算值  $D_j=D-b=1\ 050-37=1\ 013(\text{mm})$ 。

对于机车或动车来说， $F$  就是由动力传动装置引起的，与列车运行方向相同的外力。它就是司机可以调节的牵引力。

### 2. 列车运行阻力 $W$

列车运行中由于各种原因自然发生的与列车运行方向相反的外力。它的大小是司机不能控制的。它的作用是阻止列车发生运动或使列车自然减速。

列车运行阻力  $W$  由机车运行阻力和车辆运行阻力组成。机车运行阻力以列车运行阻力符号右上角加一撇来表示，车辆运行阻力以右上角加两撇来表示，即列车运行阻力

$$W = W' + W''$$

详细分析参见本书第三章。

### 3. 列车制动力 $B$

由列车制动装置引起的与列车运行方向相反的外力。它是人为的阻力，它的大小是司机可以控制的。它的作用是使列车产生较大的减速度或者在长大下坡道防止列车超速运行，或者防止列车在车站停车时由于坡度或大风而自然溜走。

制动一般是在牵引力为零的情况下进行的。

设一块闸瓦的压力为  $K$ ，轮、瓦的摩擦系数为  $\varphi_k$ ，施行制动时，列车正以速度  $v$  在前行，轮对以角速度  $\omega$  在轨面上滚动。如以轮对为隔离体，并且不考虑其他力的影响，则在轮对总闸瓦压力为  $\Sigma K$  的作用下，产生的闸瓦摩擦力为  $\Sigma K \cdot \varphi_k$ ，如图 1-2 所示。

应注意的是，闸瓦摩擦力  $\Sigma K \cdot \varphi_k$  并不能使列车减速，而只能阻止轮对转动。但是，轮对转动一旦被阻，势必引起轮轨间相对滑动的趋势，产生轮、轨间的相互作用力；车轮给钢轨的作用力  $\Sigma B'_L$  和钢轨对车轮的反作用力  $\Sigma B_L$ 。在静摩擦或者说黏着条件下，由于  $\Sigma B_L$  的作用，阻止轮对滑动，从而在车辆惯性力  $T$  的推动下继续滚动。但是，轮对转速  $\omega$  将降低，列车速度  $v$  亦相应减低。

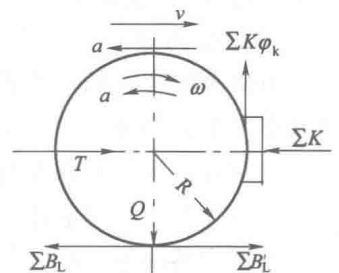


图 1-2 制动力的产生

由此可见， $\Sigma B_L$  是由  $\Sigma K \varphi_k$  作用而引起的，是钢轨作用在车轮轮周上的与列车运行方向相反的外力。这个外力才是使列车急剧减速的制动力，其大小可根据图 1-2 将轮对作为隔离体而建立的力矩平衡方程式  $\Sigma M =$



0 求得:

$$\sum K \cdot \varphi_k \cdot R - \sum B_L \cdot R = I \cdot \alpha \quad (1-2)$$

式中  $R$ ——车轮半径;

$K$ ——每块闸瓦的压力;

$\sum K$ ——一个轮对所受闸瓦压力的总和;

$\varphi_k$ ——轮、瓦间滑动摩擦系数;

$I$ ——轮对的转动惯量;

$\alpha$ ——轮对的角减速度。

可见, 闸瓦摩擦力矩可分为两部分(起两种作用): 一部分是  $\sum B_L \cdot R$ , 其作用是引起钢轨给车轮的纵向水平反作用力  $\sum B_L$ , 使列车获得线减速度  $a$ ; 另一部分是  $I \cdot \alpha$ , 其作用是使转动惯量为  $I$  的各轮对获得角减速度  $\alpha$ 。后一部分占的比例不大。为简化起见, 在计算制动力时通常将它忽略不计(即假定  $I=0$ ), 留到计算制动距离或运行时分的时候再加以考虑(参看第五章第二节)。这样, 制动力在数值上就等于闸瓦摩擦力, 即

$$\sum B_L = \sum K \cdot \varphi_k \quad (\text{kN}) \quad (1-3)$$

根据线路情况和列车运行要求, 机车可以有三种工况, 每种工况下作用于列车上的合力由不同的力组合而成:

(1) 牵引工况。作用于列车上的力有机车牵引力  $F$  和列车运行阻力  $W$ , 其合力

$$C = F - W$$

(2) 惰行工况。作用于列车上的只有列车运行阻力  $W$ 。故合力

$$C = -W$$

(3) 制动工况。作用于列车上的力有列车制动力  $B$  和列车运行阻力  $W$ , 其合力

$$C = -(B + W)$$

当合力  $C > 0$ , 即合力方向与列车运行方向相同, 它是加速力, 列车将加速运行; 当合力  $C < 0$ , 即合力方向与列车运行方向相反, 它是减速力, 列车将减速运行; 当合力  $C = 0$ , 不言而喻, 列车将匀速运行。

合力是正、是负、是大、是小、是零, 决定于组成该合力的牵引力、阻力和制动力的情况以及它们与线路条件、机车车辆和运行速度之间的关系。

## 第五节 轮轨间的摩擦与黏着

### 一、轮轨间的摩擦

按刚体平面运动学的分析: 沿钢轨自由滚动的车轮, 具有不断变化的瞬时转动中心, 车轮和钢轨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上说的静摩擦力, 其最大值——“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  $\mu$  的乘积。这是一种难以实现的理想状态。牵引时倘若能达到这种状态, 则可能实现的牵引力最大值约为轮轨间的最大静摩擦力。制动时如能达到此状态, 则可能实现的制动力最大值也约为轮轨间的最大静摩擦力。

另一种情况恰恰与前相反: 如果在牵引工况下, 轮轨间的纵向水平作用力超过了维持静摩擦的极限值——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飞



快转动,而轮轨间的纵向水平作用力变成了滑动摩擦力,其值比最大静摩擦力小得多,机车运行速度并不高,在铁路术语中把这种状态称为“空转”。这是一种应极力避免的不正常状态。在这种状态下,牵引力反而大大降低,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”,列车没能起动而司机又没有及时采取措施减小动轮受到的力矩,甚至可以发生把钢轨的轨头磨掉,动轮陷入钢轨凹下的深坑内的严重事故。

## 二、轮轨间的黏着

实际上问题比较复杂: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接触而非点接触,不存在理想的瞬时转动中心;机车运行中不可避免地要发生冲击和各种振动,车轮踏面又是圆锥形,所以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。即实际不是纯粹的“静摩擦状态”,而是“静中有微动”或“滚中有微滑”;在运行过程中,由于牵引力(或制动力)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,而且比物理上的“最大静摩擦力”要小得多。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,不用“静摩擦”这个名词,而以“黏着”来代替它。相应地,在黏着状态下轮轨间纵向水平作用力的最大值就称为黏着力,而把黏着力与轮轨间垂直载荷之比称为黏着系数。而且,为便于应用,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是由于黏着系数的变化而引起的。这样,黏着力与运动状态的关系被简化成黏着系数与运动状态的关系。这时,黏着系数也就成了假定值(称为计算黏着系数)。但是,由于它和假定不变的垂直载荷的乘积等于实际的黏着力,所以这个假定用于黏着力计算是可行的。实际上也都是这样用的(以后凡是提到黏着系数,如无特别说明,均指假定值)。

由于牵引和制动时作用于车轮的力矩方向不同、变化规律不同、轮轨间垂直载荷的变化也不同,故黏着系数有“牵引黏着系数”和“制动黏着系数”之分。

从理论上说,牵引黏着系数应大于制动黏着系数。从安全角度上说,制动黏着系数更应取得保守一些。所以,牵引黏着系数一般按正常状态(如干轨)的中值曲线取值,而制动黏着系数一般按不良状态(如湿轨)即接近下限的曲线来取值。

但是对于高速铁路,由于安全要求更高,牵引时“空转”和制动时“滑行”都是绝对不容许的,所以,牵引黏着系数和制动黏着系数全要按不良状态即接近下限的曲线来取值。

## 三、牵引力的黏着限制

由前面牵引力产生和轮轨黏着分析可知,轮周牵引力是由动力传动装置引起的、能使列车沿轨道运行的、司机可以调节的唯一外力,它的大小与作用于动轮上的动力矩成正比,但不能超过轮轨黏着允许的最大值,即牵引力要受“黏着限制”。人们习惯上把受黏着限制的轮周牵引力最大值称为“黏着牵引力”,其实它并不是在轮周牵引力之外的另一个牵引力,只不过习惯上这么称呼而已。

在牵引特性图中以带有阴影的曲线表示黏着牵引力。

黏着牵引力的计算公式为:

$$F_{\mu} = P_f \cdot \mu_i = (P_{\mu} \cdot g) \cdot \mu_i \quad (\text{kN}) \quad (1-4)$$

式中  $P_f$ ——机车(或动车)的黏着重力(动轮对钢轨的垂直载荷之和,或全部动轴荷重之和),



kN;

$P_{\mu}$ ——机车(或动车)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(或动车)黏着重量等于机车(或动车)计算重量(计算质量),t;

$g$ ——重力加速度(取为  $9.81 \text{ m/s}^2$ ,下同);

$\mu_j$ ——机车牵引计算黏着系数。

机车牵引计算黏着系数与环境气候、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,难以用理论方法计算确定。牵引计算中应用的计算黏着系数公式,都是在大量试验的基础上,结合运用经验根据平均值整理得到的。各种机车牵引计算黏着系数的经验公式如下:

$$\text{国产电力机车} \quad \mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \quad (1-5)$$

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

$$8\text{G型电力机车} \quad \mu_j = 0.28 + \frac{4}{50 + 6v} - 0.0006v \quad (1-7)$$

$$\text{国产电传动内燃机车} \quad \mu_j = 0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v} \quad (1-8)$$

$$\text{ND}_5 \text{型电传动内燃机车} \quad \mu_j = 0.242 + \frac{72}{800 + 11v} \quad (1-9)$$

$$\text{日本新干线动车组:干轨} \quad \mu_j = \frac{27.2}{v + 85} \quad (1-10)$$

$$\text{湿轨} \quad \mu_j = \frac{13.6}{v + 85} \quad (1-11)$$

$$\text{德国动车组:干轨} \quad \mu_j = 0.116 + \frac{9}{v + 42} \quad (1-12)$$

$$\text{湿轨} \quad \mu_j = 0.7 \times \left( 0.116 + \frac{9}{v + 42} \right) \quad (1-13)$$

式中  $v$ ——运行速度,km/h。

机车在曲线上运行时,由于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,黏着系数将要减小(通常简称为“黏降”),尤其在小曲线半径时影响更大。所以,在起动车段或限制坡道若有小半径曲线,必须进行修正和牵引重量验算(参看第七章)。

电力机车(三轴转向架)在曲线半径  $R$  小于600 m时,牵引计算黏着系数

$$\mu_r = \mu_j (0.67 + 0.00055R) \quad (1-14)$$

内燃机车在曲线半径  $R$  小于550 m时,牵引计算黏着系数

$$\mu_r = \mu_j (0.805 + 0.000355R) \quad (1-15)$$

#### 四、制动力的黏着限制

由式(1-3)可见,轮轨间的静摩擦力  $\sum B_L$  因  $\sum K \cdot \varphi_k$  而产生,并随它的增大而增大。但是,只有轮对在钢轨上滚动的条件下,  $\sum B_L$  才能等于闸瓦摩擦力  $\sum K \cdot \varphi_k$ 。所以,与牵引力相似,  $\sum B_L$  也要受到轮轨间黏着条件的限制,即

$$\sum B_{L\max} = (\sum K \cdot \varphi_k)_{\max} \leq Q \cdot \mu_z \quad (\text{kN}) \quad (1-16)$$



式中  $Q$ ——轴荷重, kN;

$\mu_z$ ——轮轨间的制动黏着系数。

当  $\sum B_{L_{max}} > Q \cdot \mu_z$  时, 轮对将发生滑行, 即车轮将被“抱死”(不转动), 制动力变为轮轨间的滑动摩擦力  $Q \cdot \varphi$ , 闸瓦摩擦力由动摩擦力变为静摩擦力。  $\varphi$  是轮轨间的滑动摩擦系数, 其值远小于制动黏着系数  $\mu_z$ 。因此, 轮对一旦滑行, 制动力将迅速下降, 如图 1-3 所示。这种现象在低速 ( $\varphi_k$  值较大) 和空车 ( $Q$  值较小) 时最易发生。所以, 为使制动力增大而施加过大的闸瓦压力  $K$ , 反而会降低制动力, 使制动距离延长, 而且轮对滑行还会导致车轮踏面擦伤。

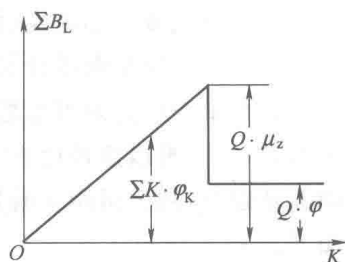


图 1-3 滑行发生过程

为防止货车在空车或装载量不足时出现轮对因制动而滑行的现象, 在标记载重为 50 t 及更重的大型货车制动机上设置有空重车调整装置。其调整手柄在空车位时, 制动缸与降压风缸相通, 制动缸的空气压强较低, 由于降压风缸上装有空车安全阀, 即使紧急制动也不会超过 190 kPa。当调整手柄放在重车位时, 制动缸与降压风缸不连通, 故可获得比空车位大得多的空气压强。所以, 在计算列车制动力时, 对这种大型车辆应按空车、重车予以区分。

## 第六节 单质点计算与多质点计算

众所周知, 从“列车牵引计算”这个学科诞生之日起, 在计算铁路列车沿轨道运行的速度、时分、牵引重量、制动距离、能量消耗等问题时, 为了简化计算, 人们都是把列车看成一个质点, 假定整个列车的质量都集中在列车长度的中心点, 就像物理学中把一个刚体看成一个质点一样。这就是所谓的“单质点计算法”。

后来, 人们发现, 在研究某限速点或限速地段是否超速时, 列车长度问题不能忽略, 这才把列车长度的因素加了进去。即, 从列车头部到达前方限速点或限速区段起点(此时, 列车中心离前方限速点还有半个列车长的距离)就要限速, 然后一直到列车尾部离开该限速点或限速区段起点(此时, 列车中心离开该限速点已有半个列车长的距离)都不能超速。

还有, 如果列车在某特殊地段因故临时停车, 此时列车中心也许正好处在平道或下坡道, 但列车大部分却在较陡的上坡道。按列车中心(单质点)算, 列车再起动车不成问题, 可实际上可能就起动车不了。此时也要考虑列车长度因素, 先按坡段情况分段计算处在不同坡道的列车各段阻力, 然后再相加, 求出整个列车的阻力并与牵引力相比较, 才知道实际上再起动车是否有困难。

把列车长度考虑进去, 列车就不是单质点了, 就由“一个点”变成了很多质点紧密相连而成的“线”, 而且是个随坡度而变的“折线”了。此时, 列车牵引计算就变成“以单质点为主、单质点与多质点混合的计算”。

再后来, 由于列车越来越长, 列车纵向冲击越来越突出。为了研究列车纵向动力作用, 人们不得不把每辆车都看成为一个质点, 而把列车看成为一个“多质点弹性链”(质点之间的连接为弹性连接)。这就是所谓的“多质点计算法”。

由此可见, 每一种计算方法都是因为有所需要才应运而生的。它们都有各自的适用范围。对不同的情况要进行具体的分析。不能简单地认为, 不管在什么情况下, 某种方法就一定





比别的方法优越。

以单质点法计算列车运行时分为例。由于列车中心不断在平道、上坡道和下坡道等各种坡道上移动,把长长的列车看成一个质点所造成的时分误差有正有负,绝大部分会互相抵消。我们利用“运行时分牵引电算软件”对单质点和多质点进行过比较计算,最后的累计误差确实很小很小。但是单质点法简单易行,计算效率较高,所以没有必要全都改用多质点法,只需要在限速范围或“途停”再起动机把列车长度考虑进去就行。

再说列车纵向动力作用的计算,本来就不是常规牵引计算范畴。就好比理论力学和材料力学,两者研究的就不是一个范畴的东西。前者研究物体之间的相互作用或相对运动,它可以把整个刚体看成一个质点;后者研究物体内部的变形和应力,它当然不可以把整个刚体看成一个质点。研究列车纵向动力作用时当然要把每辆车都看成一个质点,而且车与车之间还必须是弹性连接。否则,哪来的列车纵向动力作用?所以,必须把列车看成是“多质点弹性链”。换个角度说,如果研究的是车辆内部各部件之间的相互作用,你还能把一辆车看成一个质点吗?

## 复习思考题

1. “列车牵引计算”是个什么样的学科?它包括哪些内容?
2. “列车牵引计算”在哪些部门有些什么用途?
3. 《牵规》的主要内容是什么?它有什么重要意义?它是怎样制定和完善起来的?
4. 牵引计算中物理量的符号是按什么原则制定的?
5. 牵引计算中研究的是哪些力?它们的定义和不同工况下的组合有什么相同和不同之处?
6. 为什么说,能使列车或动车组沿轨道运行的外力,目前只能来自钢轨(轮轨接触点)?这个外力的产生需要具备哪两个条件?
7. 铁路上的“黏着”与物理学上的“静摩擦”是什么关系?
8. 黏着系数有哪些影响因素?“黏降”是怎么回事?
9. 何谓“黏着牵引力”、“黏着重力”和“黏着重量”?
10. 制动时的车轮“抱死”与牵引时的动轮“空转”有何相同和不同之处?
11. 为什么说,片面贬低“单质点算法”是不对的?