



普通高等教育铁道部规划教材

电传动列车概论

连级三 主编 张大勇 主审



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育铁道部规划教材

电传动列车概论

连级三 主 编

张大勇 主 审

中国铁道出版社

2011年·北京

内 容 简 介

本书为普通高等教育铁道部规划教材。全书共八章,主要包括:列车牵引理论基础、高速铁路与高速列车、电力机车及动车组机械部分、高速动车组电传动系统、高速电动列车供电系统、城轨电动列车、电传动内燃动车组、电力机车及电动车组测试技术等。

本书为高等学校铁道机车车辆专业教材,也可作为职业教育教材,还可供从事轨道交通机车车辆的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电传动列车概论/连级三主编. —北京:中国铁道出版社,2011.4

普通高等教育铁道部规划教材

ISBN 978-7-113-12349-9

I. ①电… II. ①连… III. ①电力机车—高等学校—教材 IV. ①U264

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 008654 号

书 名:电传动列车概论

作 者:连级三 主编

责任编辑:阙济存 电话:010-51873133 电子信箱:td51873133@163.com 教材网址:www.tdjiaocai.com

编辑助理:张 博

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:2011年6月第1版 2011年6月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:18.5 字数:450千

印 数:1~3000册

书 号:ISBN 978-7-113-12349-9

定 价:38.00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

本书是普通高等教育铁道部规划教材,是由铁道部教材开发领导小组组织编写,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以及铁路专业技术人员使用。本书为铁道机车车辆系列教材之一。

从引进时速 200 km 高速列车技术,到自主开发时速 350 km、380 km“和谐号”动车组;从京津城际铁路、武广高铁运营,到京沪高铁即将开通,我国高速铁路发展达到国际领先水平。为了适应高铁发展,培养列车电传动方面的人才,铁道部组织编写本套系列教材。本书为其中之一,它对高速铁路和客运动车组电传动的基本专业知识进行了概述,以便读者对列车电传动有全面的了解。

2001 年编者曾编写过《电传动机车概论》一书,得到了良好的反应,本教材在其基础上加以修改和补充,主要补充有关交流异步牵引电动机变频调速和动力分散牵引模式的内容,之所以原书中的有关直流(或脉流)串励牵引电机和机车动力集中牵引模式的许多内容保留,原因之一是这些内容仍是铁路电力牵引的最基本知识;其二是高速铁路和客运高速动车组发展初期都是首先采用直流串励牵引电机,虽然交流传动必然将取代直流传动牵引,但在我国目前仍然有相当数量的直流传动机车车辆在运行,取代须有一个过渡时期;至于牵引模式,欧洲开始采用动力集中牵引模式,而日本结合本国国情从一开始就采用了动力分散牵引模式。随着经济发展,必然要求列车有愈来愈高的速度,为此采用交流异步牵引电机变频调速和动力分散牵引模式已成必然趋势。目前我国已有四种这类电动列车组,它们是 CRH1、CRH2、CRH3 和 CRH5,这些动车组均有专著进行详细介绍,本书仅对其中 CRH2 动车组作较多的关注。

本书由西南交通大学连级三主编,铁道部运输局张大勇主审。参加编写的有:赵叔东(第一章 列车牵引理论基础),鲍维千和郭育华(第二章 高速铁路与高速列车),鲍维千(第三章 电力机车及动车组机械部分),郭育华(第四章 高速动车组电传动系统),李群湛、吴积钦和方岩(第五章 高速电动列车供电系统),长春客车股份有限公司卢西伟(第六章 城轨电动列车),胡汉春(第七章 电传动内燃动车



组),周文祥(第八章 电力机车及电动车组测试技术),全书电子文稿由王滢副教授负责整理。

本书内容广泛,难免有疏漏和不妥之处,敬请读者不吝指教。

编 者

2011年5月于西南交通大学

目 录

第一章 列车牵引理论基础.....	1
第一节 轮轨相互作用原理.....	1
第二节 列车运行阻力.....	9
第三节 列车运行方程式	15
复习思考题	21
第二章 高速铁路与高速列车	22
第一节 高速铁路的发展	22
第二节 高速动车组的分类	30
第三节 高速动车组的发展	33
第四节 高速列车的阻力、牵引力和功率.....	44
第五节 黏着系数、轴重.....	49
第六节 高速时的轮轨作用	52
第七节 高速列车的空气动力学问题	54
第八节 高速列车的制动	57
第九节 高速弓网关系	61
第十节 车辆的轻量化	63
第十一节 摆式列车	65
复习思考题	67
第三章 电力机车及动车组机械部分	68
第一节 电力机车转向架	68
第二节 车 体	86
第三节 动车组转向架	91
第四节 动车组车体	99
复习思考题.....	103
第四章 高速动车组电传动系统.....	104
第一节 概 述.....	104
第二节 动车组电传动单元.....	105
第三节 动车组电传动系统.....	126
第四节 辅助电源系统.....	131



复习思考题	136
第五章 高速电动列车供电系统	137
第一节 电力系统与电能生产基本概念	137
第二节 牵引供电系统概论与供电方式	141
第三节 牵引变电所主设备与电气主接线	147
第四节 同相牵引供电系统	157
第五节 接触网与受流技术	160
复习思考题	169
第六章 城轨电动列车	170
第一节 直流牵引电机及其控制	170
第二节 交流牵引电机及其控制	180
第三节 磁阻电机及其控制	197
第四节 轻轨车辆机械部分	200
复习思考题	211
第七章 电传动内燃动车组	213
第一节 内燃牵引电传动系统概述	213
第二节 内燃动车组交一直流传动系统	219
第三节 内燃动车组交流传动系统	235
复习思考题	252
第八章 电力机车及电动车组测试技术	254
第一节 机车车辆与测试技术的进步	254
第二节 机车车辆试验的分类与特点	256
第三节 高速列车的测试技术	258
第四节 机车车辆质量与测试标准	260
第五节 电力机车的质量与测试标准简介	264
第六节 试验装备与试验设施	273
第七节 动车组的试验要点	280
复习思考题	287
参考文献	288



称为“黏着”。黏着状态下的静摩擦力 f_i 又称黏着力。

试验研究表明,轮轨间的黏着与静力学中的静摩擦具有十分相似的物理性质。驱动转矩 M_i 产生的切向力 F_i 增大时,黏着力 f_i 随之增大,并保持与 F_i 相等。当切向力 F_i 增大到某一数值时,黏着力 f_i 达到最大值。若使切向力 F_i 再继续增大, f_i 反而迅速减小。试验证明,黏着力 f_i 的最大值 $f_{i\max}$ 与动轮对的正压力 G_i 成正比,即

$$f_{i\max} = \mu G_i \quad (1-2)$$

最大黏着力与轮对正压力的比例常数称为黏着系数,用 μ 表示。上式表明,在轴重一定的条件下,轮轨间的最大黏着力由轮轨间黏着系数的大小决定。

当轮轨间出现最大黏着力后,若继续加大驱动转矩,切向力 F_i 将大于最大黏着力,动轮上的 O' 点将向左移动,轮轨间出现相对滑动,黏着状态被破坏。动轮由纯滚动变为既有滚动,又有滑动。此时对动轮的反作用力 f_i 由静摩擦力变为滑动摩擦力,其值迅速减小;与此同时,动轮的转速上升。这种因驱动转矩过大,轮轨间的黏着关系被破坏,使轮轨间出现相对滑动的现象,称为“空转”。动轮出现空转时,轮轨将依靠滑动摩擦力传递切向力,这就大大削弱了传递切向力的能力,同时造成动轮踏面的擦伤。因此,机车在牵引运行中,应尽量防止出现动轮的空转。

黏着系数是由轮轨间的物理状态确定的,因此要提高每轴牵引力,只有加大轴重,但轴重的增加,又受轮轨间允许作用力的限制,特别对高速列车更是如此。因此要增加一台机车的牵引力,往往通过增加动轴数来达到。

上述只是对黏着最浅显的解释,黏着的问题远远比上述情况要复杂得多。黏着的弹性变形理论,有利于深化对黏着的认识。我们利用图 1-2 作简要说明。

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 F_i 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,即所谓“蠕滑”。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触。随着动轮的滚动,车轮上被压缩的金属陆续地被放松而伸长,而钢轨则由拉伸变为压缩,因而在接触面的后部出现滑动。

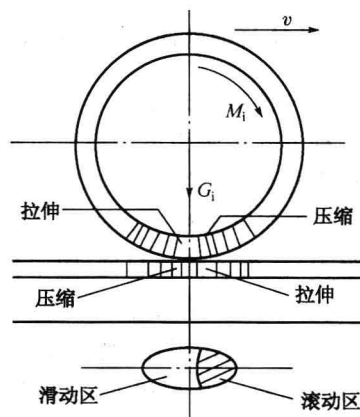


图 1-2 牵引工况轮轨接触处的弹性变形

轮轨接触面存在两种不同状态:接触面的前部,轮轨间没有相对滑动,称为滚动区,在图 1-2 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。这两个区域的大小将随切向力的变化而变化。当切向力增大时,滑动区面积不断增大,滚动区面积越来越小,直到为零。当滚动区面积为零时,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,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。用蠕滑率 σ 表示蠕滑的大小,则



$$\sigma = \frac{\omega R_i - v}{v} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 v ——动轮的前进速度；

ω ——动轮转动的角速度。

轮轨间由于干摩擦产生的切向力(蠕滑力)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。当切向力达到极限摩擦时,由于蠕滑的积累而累及整个接触面,使之发展成为真滑动,能量将被用来加速车轮本身,这时驱动机构内的弹性应力被解除。因为车轮的惯性和驱动机构的弹性,而在轮轨间建立起黏滑振动。这种振动导致“滑动—黏着一再滑动—再黏着”的反复振荡过程,一直持续到重新在驱动机构中建立起稳定的弹性应力为止。

二、机车牵引力及限制

1. 牵引力的形成

由图 1-1 可知,由于轮轨间存在黏着,静止的动轮受驱动转矩 M_i 的作用后,在动轮上的 O' 点受到大小相等、方向相反的切向力 F_i 和黏着力 f_i 的作用。 O' 点保持相对静止,成为动轮的瞬时转动中心。作用在轮轴中心 O 点的力 F'_i ,将使动轮绕 O' 点转动,引起轴承对轮轴的水平反作用力 T 。只要驱动转矩 M_i 足够大,动轮即绕瞬时转动中心转动,瞬时转动中心沿钢轨不断前移,机车产生平移运动。

从整个机车来看,驱动转矩归算到轮心的作用力 F'_i 和轴承对轮轴的反作用力 T 是一对内力,而钢轨对动轮的摩擦反作用力 f_i 是动轮受到的唯一水平外力。只有 f_i 存在,机车才有可能产生平移运动,故 f_i 称为动轮的轮周牵引力。

机车的轮周力 F 为机车各动轮的轮周牵引力之和,即

$$F = \sum f_i \quad (1-4)$$

机车的轮周牵引力部分克服机车内的各种阻力,其余通过转向架、车体传递到车钩,牵引列车前进。车钩上的那部分牵引力称为挽钩牵引力,以 F_w 表示,则

$$F_w = F - w' \quad (1-5)$$

式中 w' ——机车总阻力。

由上可知,机车牵引力是动轮受驱动转矩作用后形成的。因为驱动转矩是可以控制的,因而机车的牵引力可以受司机控制。

2. 黏着对牵引力的限制

如上所述,调节牵引电动机转矩的大小,可以改变切向力 F_i 的值,只要黏着没有破坏,就可以得到不同的轮周牵引力,机车所能实现的最大牵引力受黏着条件的限制。由黏着条件决定的最大黏着力,也就是动轮不空转所能实现的最大牵引力,称为机车的最大黏着牵引力,用 $F_{\max}$ 表示,其值为

$$F_{\max} = \mu_{\max} G$$

式中 $\mu_{\max}$ ——机车的最大黏着系数；

G ——机车的黏着重力。

机车黏着重力的常用单位为吨力(9.8 kN),简称为吨,与机车黏着质量之间有关系式

$$G = P_{\mu} g$$



这时

$$F_{\max} = \mu_{\max} P_{\mu} g \quad (1-6)$$

式中 P_{μ} ——机车黏着质量, t;

g ——重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

机车牵引力的单位为 N 或者 kN, 式(1-6)中的牵引力为 kN。

当机车各动轴中的驱动转矩归算到轮缘的作用力超过黏着牵引力时, 黏着条件相对最差的动轴首先产生空转, 机车的牵引力立即下降。

因为每轴的正压力, 也称轴重, 受到钢轨、路基、桥梁等限制, 所以欲增加机车的牵引力, 一般是增加机车的动轴数。

三、黏着系数与计算黏着系数

机车的黏着质量确定之后, 实际能够得到的最大牵引力决定于动轮钢轨间黏着系数 μ 。

机车在运行中, 动轮与钢轨间的黏着系数受很多因素影响。其中主要的有:

①动轮踏面与钢轨表面的状态。动轮踏面与钢轨表面干燥或雨后附有薄锈, 黏着系数增大; 如有冰、霜、雨、雪、油垢或潮湿, 黏着系数减小。在钢轨上撒砂能较大地提高黏着系数。

图 1-3 表示干燥钢轨与潮湿钢轨的黏着系数变化情况, 显然黏着系数受轨面状态的影响很大。该图为法国国铁的试验结果, 图中实线为计算平均值。

②线路的质量。钢轨越软或道砟的下沉量越大, 黏着系数越小; 钢轨不平或直线地段两侧钢轨顶面不在同一水平, 动轮所处位置的轨面状态不同, 黏着系数减小。

③运行速度的高低。运行速度增高, 加剧了动轮对钢轨的纵向和横向滑动及机车振动, 黏着系数减小。

④机车有关部件的状态

a. 各动轴上牵引电动机的特性不完全相同, 在同一运行速度下发出的轴牵引力不同。牵引力大的轮对将首先发生空转。

b. 每个动轮的直径不同。在相同驱动转矩时, 直径小的动轮发出的力大, 容易首先发生空转。

c. 每个动轮的动负荷不同, 机车运行中因车钩的作用以及弹簧悬挂和线路状态的影响, 使得各动轮之间的负荷重新分配。动负荷轻的动轮将首先空转。

以上所述都导致整台机车的黏着系数减小。

牵引计算若按最大黏着系数来计算, 则机车运行将处于空转的状态, 这是不容许的。因而牵引计算中采用的黏着系数是经过专门试验制定的, 称为计算黏着系数, 用 μ_j 表示, 它是机车在通常条件下能够实现的最高黏着系数。在黏着条件不好时, 还必须采用撒砂等改进黏着的措施。机车的计算黏着牵引力 F_j 用下式表示

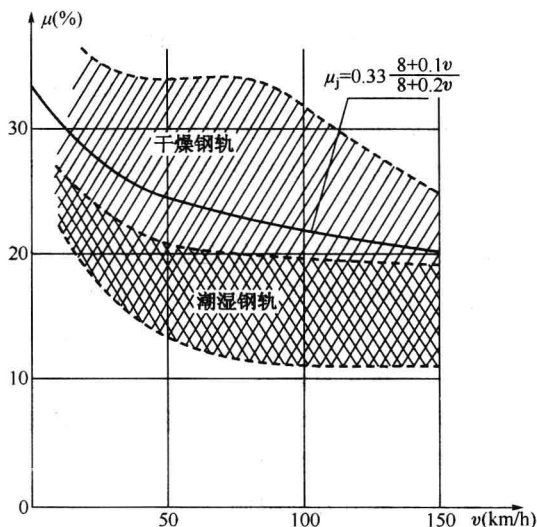


图 1-3 黏着系数与轨面状态的关系



$$F_j = \mu_j P_\mu g \quad (\text{kN}) \quad (1-7)$$

中国铁道部行业标准的《列车牵引计算规程》中规定了各型电力机车和内燃机车计算黏着系数的计算公式,按 TB/T 1407—1998 规定:

(1)国产各型电力机车的计算黏着系数 μ_j 按下式计算:

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

(2)6K 型电力机车的计算黏着系数 μ_j 按下式计算:

$$\mu_j = 0.189 + \frac{8.86}{44 + v} \quad (1-9)$$

(3)8G 型电力机车的计算黏着系数 μ_j 按下式计算:

$$\mu_j = 0.28 + \frac{4}{50 + 6v} - 0.0006v \quad (1-10)$$

(4)电力机车(三轴转向架)在曲线半径小于 600 m 的线路运行时,曲线上的计算黏着系数 μ_r 按下式计算:

$$\mu_r = \mu_j (0.67 + 0.00055R) \quad (1-11)$$

(5)ND₅ 型内燃机车的计算黏着系数 μ_j 按下式计算:

$$\mu_j = 0.242 + \frac{72}{800 + 11v} \quad (1-12)$$

(6)各型电力传动内燃机车的计算黏着系数 μ_j 按下式计算:

$$\mu_j = 0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v} \quad (1-13)$$

(7)内燃机车在曲线半径小于 550 m 的线路上运行时,曲线上的计算黏着系数 μ_r 按下式计算:

$$\mu_r = \mu_j (0.805 + 0.000355R) \quad (1-14)$$

从以上式子中可以看到:

①各种车型的计算黏着系数是不同的,这是因为各种机车结构及性能不同所致。

②计算黏着系数随速度增加而减小。

③内燃机车的计算黏着系数一般小于电力机车,其原因之一是由于燃油的消耗,使实际黏着质量减小之故。

四、轴重转移与轴重补偿

1. 轴重转移

机车的轴重是指机车在静止状态时,每个轮对加于钢轨的正压力,在机车出厂前应将机车各轴的轴重调整至尽可能相同。实际上,在牵引运行时,由于轮周牵引力与作用在车钩上的列车阻力不在同一水平线上,使得各轮对的轴重发生变化,有的增载,有的减载。这种机车运行时的轴重重新分配称为牵引力作用下的轴重转移。当然,机车总的黏着质量是不会改变的。

利用图 1-4 及简单计算,定性说明轴重转移性质的关系。实际的轴重转移计算要复杂得多。

图 1-4 所示为四轴电力机车牵引运行时的受力情况(忽略机车阻力)。机车垂直力的传递是通过轮对与转向架之间的一系弹簧和转向架与车体之间的二系弹簧实现的;水平力则是通



过动轮的轴箱以及中央支承传递。

设机车各动轮所发挥轮周牵引力相等。

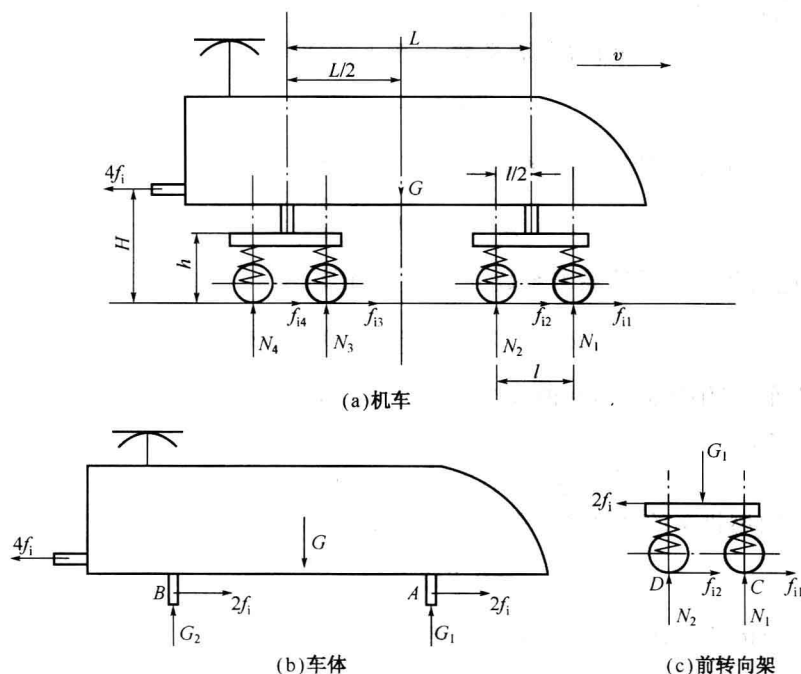


图 1-4 四轴电力机车受力分析

机车处于静止状态时,力 f_i 均为零。由图 1-4(a)可得

$$N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = \frac{G}{4} \quad (1-15)$$

各轮对轴重 P_i 均匀分配,等于钢轨的反作用力 N_i ,为机车重力 G 的 $1/4$ 。

牵引状态下,车体与转向架的受力情况如图 1-4(b)、(c)所示。

以车体为隔离体, B 点的力矩方程式为

$$4f_i(H-h) + G_1L - G\frac{L}{2} = 0 \quad (1-16)$$

得

$$G_1 = \frac{G}{2} - \frac{4f_i(H-h)}{L} \quad (1-17)$$

同理,由 A 点的力矩方程式可得

$$G_2 = \frac{G}{2} + \frac{4f_i(H-h)}{L} \quad (1-18)$$

由式(1-17)、式(1-18)可知,在牵引力及车钩力的作用下,前转向架减载、后转向架加载。

以前转向架为隔离体, D 点的力矩方程式为

$$2f_i h - G_1 \frac{l}{2} + N_1 l = 0 \quad (1-19)$$

$$N_1 = \frac{G_1}{2} - \frac{2f_i h}{l} \quad (1-20)$$

同理,由 C 点的力矩方程式可得



$$N_2 = \frac{G_1}{2} + \frac{2f_i h}{l} \quad (1-21)$$

由式(1-20)、式(1-21)可知,在同一转向架内,前轮对减载,后轮对加载。

将式(1-17)代入式(1-20)、(1-21)得

$$N_1 = \frac{G}{4} - 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} + \frac{h}{2l} \right) \quad (1-22)$$

$$N_2 = \frac{G}{4} - 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} - \frac{h}{2l} \right) \quad (1-23)$$

同理可得

$$N_3 = \frac{G}{4} + 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} - \frac{h}{2l} \right) \quad (1-24)$$

$$N_4 = \frac{G}{4} + 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} + \frac{h}{2l} \right) \quad (1-25)$$

式(1-22)~式(1-25)说明,在牵引工况下机车轴重进行了再分配,沿列车运行方向,前轮对减载,后轮对加载。最大的轴重减载量发生在第一个轮对,其最大减载量为

$$P_{i\max} = 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} + \frac{h}{2l} \right) \quad (1-26)$$

轴重转移一般由两部分组成。一部分是因车钩牵引力和中央支承处的水平作用力不在同一水平线上而引起的转向架之间的轴重转移,前转向架的轴重减载,后转向架的轴重增载,其转移量为式(1-26)的前一项;另一部分是因轮周牵引力与中央支承处的水平作用力不在同一水平线上而引起的转向架内部的轴重转移。前轴轴重减载,后轴轴重增载,其转移量为式(1-26)的后一项。

上述计算中,忽略了一系弹簧与二系弹簧对轴重转移的影响。实际上弹簧有很大影响,而且轴重转移不仅受到机车的结构参数(如 H 、 h 、 L 、 l 等)的影响,而且还与牵引电动机的布置方式和传动方式等许多因素有关。

2. 轴重转移对计算黏着系数的影响

轮对发挥的最大黏着力与轴重成正比。轴重越小,轮对发挥的最大黏着力越小,轮对也越容易产生空转。因此,机车牵引运行时,通常减载最大的轮对将首先产生空转,使整台机车发挥的黏着牵引力减小,机车的计算黏着系数将降低。

轴重转移导致机车黏着牵引力减小的原因是机车的黏着质量没有得到充分利用。我们用黏着质量利用系数 η 来反映黏着质量利用的程度。

$$\eta = \frac{G - \Delta G_{\max}}{G}$$

所以,考虑到轴重转移,机车的计算黏着系数可以用下式表示:

$$\mu_i = \eta \mu$$

在牵引工况下,轴重转移是必然会产生,在某些情况下甚至可以达到轴重的 20% 或更高,也就是黏着质量的 20% 或更多一些没有发挥作用。而且轴重转移最大时,正是机车发挥最大牵引力的时候。例如当机车启动及爬坡时,正需要发挥较大的牵引力,而此时轴重转移恰恰也最大。因此,努力减小轴重转移,提高黏着质量利用系数,对充分发挥机车的牵引力具有重要意义。为了减小轴重转移的影响,可以采用低位牵引拉杆和电气补偿的方法,提高黏着质量利用系数。



轴重转移的电气补偿是利用电气控制的办法,使驱动轴重小的动轴的牵引电动机的输出转矩减小,而驱动轴重大的动轴的牵引电动机的输出转矩加大,以加大机车牵引力。

五、列车制动力的形成

列车运行中为了降低运行速度或使列车停车,利用制动装置产生与列车运行方向相反的外力,称为列车制动力。

产生列车制动力的方法很多,除了广泛使用的闸瓦制动以外,还有盘形制动、电阻制动、再生制动、液力制动、磁轨制动、涡流制动。

磁轨制动是将电磁铁落在钢轨上,并接通激磁电流将电磁铁吸附在钢轨上,通过磨耗板与轨面摩擦产生制动力。其缺点是会使钢轨产生磨损。涡流制动则将电磁铁落至离轨面 7~10 mm 处,由电磁铁与钢轨间的相对速度引起电涡流作用形成制动力。

除上述两种制动方式外,其他几种同牵引一样是通过轮轨黏着产生的制动力,称为黏着制动。上述两种则为非黏着制动。

图 1-5 所示为一个轮对利用闸瓦制动力的示意图。

设一个轮对上有两块闸瓦,在忽略其他各种摩擦力的情况下,轮对在平直道上运行。

若每块闸瓦以力 K 压向车轮踏面,闸瓦与踏面间引起与车轮运动方向相反的滑动摩擦力 $2\mu_K K$ (μ_K 为轮、瓦间的滑动摩擦系数)。这种闸瓦制动不仅用于机车动轮对上,也可用于车辆的非动轮对上。对机车或车辆来说,这一摩擦力是内力,不能使列车减速。但作用于轮对上摩擦力形成的转矩与牵引电动机产生的转矩一样,通过轮轨间的黏着,引起与列车运动方向相反的外力,从而实现列车减速。

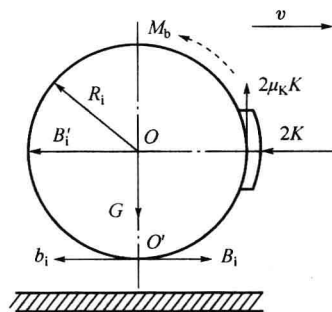


图 1-5 闸瓦制动力形成

摩擦力 $2\mu_K K$ 对车轮的作用相当于制动力矩 M_b 。 M_b 满足以下关系

$$M_b = 2\mu_K K R_i \quad (1-27)$$

用类似分析牵引力形成的方法,转矩 M_b 以用作用在轴心和轮轨接触的力偶 (B_i 、 B'_i) 代替。力偶的力臂为车轮半径 R_i ,作用力

$$B_i = B'_i = M_b / R_i = 2\mu_K K \quad (1-28)$$

轮轨接触处因轮对的正压力 G 而存在黏着,切向力 B_i 将引起钢轨对车轮的静摩擦反作用力 b_i ,则 $b_i = B_i = 2\mu_K K$ 。 b_i 作用车轮踏面的 O' 点,作用方向与列车运行方向相反,是阻止列车运行的外力,称为制动力。制动力 b_i 也是轮轨间的黏着力,因而也受到黏着条件的限制,即

$$b_i = \mu_b G_i g \quad (1-29)$$

式中 b_i ——轮对的制动力, kN;

μ_b ——制动时的黏着系数;

G ——黏着质量, t。

整个列车总的闸瓦制动力为机车、车辆所有轮对闸瓦制动力之和,即

$$B = \sum b_i \quad (1-30)$$

制动力的大小可以采用加减闸瓦压力予以调节,但不得大于黏着条件所允许的最大值。否则轮轨产生相对滑动,车轮的制动力变为滑动摩擦力,数值立即减小,车轮被闸瓦“抱死”,轮



子在钢轨上继续滑行,这种现象称为“滑行”。这时制动力大为降低,车轮与钢轨的接触面会被擦伤,因此,应尽量避免。

第二节 列车运行阻力

列车运行时,除前面分析的制动力外,还会受到与列车运行方向相反,而且是司机不能控制的外力。这种阻止列车运行的外力,称为列车阻力,简称阻力,用 W 表示。由于列车由机车和车辆组成,因而运行阻力也分别由它们产生。

阻力分为基本阻力和附加阻力两大类。

基本阻力是机车和车辆在运行中任何情况下都存在的阻力,用 W_0 表示。附加阻力只发生在个别情况下。例如,在坡道上运行时的坡道附加阻力 W_i ,在曲线上运行时的曲线附加阻力 W_c ,在隧道内运行时的空气附加阻力 W_a 等。起动阻力是指机车和车辆由静态到动态的综合性阻力。

制动力的作用方向虽然也与机车、车辆的运行方向相反,但它是根据需要通过司机有意施加的,因而不能列为附加阻力。

列车运行时,作用在列车上的阻力为基本阻力和附加阻力之和。如列车在坡道上运行时,作用在列车上的阻力为

$$W = W_0 + W_i \quad (1-31)$$

为了便于计算,将作用在列车上的阻力分为机车和车辆两部分,分别称为机车阻力 W' 和车辆阻力 W'' ,即

$$W = W' + W'' \quad (1-32)$$

试验表明,作用在机车车辆上的阻力,绝大部分都与其质量成正比。因此,牵引计算中常用单位质量的阻力,称为单位阻力(用 w 表示),来计算机车、车辆的阻力,单位为 N/kN 。

机车的单位阻力为

$$w' = \frac{W'}{m_1 g} \quad (N/kN) \quad (1-33)$$

车辆的单位阻力为

$$w'' = \frac{W''}{m_2 g} \quad (N/kN) \quad (1-34)$$

式中 m_1 ——机车质量, t ;

m_2 ——车辆总质量,又称牵引质量, t 。

列车的单位阻力为

$$w = \frac{W}{(m_1 + m_2)g} = \frac{W' + W''}{(m_1 + m_2)g} \quad (N/kN) \quad (1-35)$$

一、基本阻力

引起基本阻力的因素很多,其中最主要的因素是机车车辆部件和机车车辆表面与空气的摩擦以及车轮与钢轨间的相互摩擦和冲击。归纳起来可分为以下 5 类。

(一)轴颈与轴承之间的摩擦

列车运行时,机车车辆所有轮对的轴颈与轴承之间都将产生摩擦阻力,阻止轮对的转动。



这部分阻力与轴荷重、摩擦系数和轮对尺寸有关。轴荷重随机车车辆的质量而定,其中货车的质量变化大,因其载重不同,有空车、重车之分,故对阻力有不同的影响。摩擦系数有较大的变化范围,它的值受到轴承类型、运行速度、轴颈表面承受的单位压力和润滑油等影响。

(二) 车轮与轨面间的滚动摩擦

车轮压在轨面上,轮轨形成椭圆形接触面。当车轮滚动时,轨面因挤压而变形,引起附加阻力,即为滚动摩擦阻力。滚动摩擦阻力受轴重、轮轨材料的硬度、线路质量、车轮半径、运行速度等影响,其值一般较小。

(三) 车轮与钢轨间的滑动摩擦

车轮的圆锥形踏面、车轮直径的差异以及某些轮对组装不正确,都将使得车轮在滚动的同时存在纵向和横向的滑动,产生滑动摩擦阻力。

(四) 冲击和振动

列车运行时,由于钢轨接缝、轨道不平直以及轮轨擦伤等原因,引起轮轨间的冲击和机车车辆振动的加剧;同时,机车车辆间也存在着纵向和横向的冲击和振动。所有这些都将随运行速度增高而加大。

采用长钢轨,保护车轮踏面及做好线路养护工作,都是减少这部分阻力的有效措施。

(五) 空气阻力

列车运行时,由于与周围空气发生相对运动。列车前面的空气被压缩,尾部的空气稀薄产生涡流,形成前后两端的压力差,这部分阻力称为压差阻力。同时,列车整个外部表面与空气相摩擦,产生摩擦阻力。此外,机车、车辆突出部分及转向架等在运行时扰动空气,产生扰动阻力。这些阻碍列车运行的阻力,称为空气阻力。列车的空气阻力与列车重量无关,只决定于列车与空气的相对速度、列车外形的尺寸及外表的光滑程度。空气阻力与空气相对速度的平方成正比。因此高速列车的空气阻力成为基本阻力的主要部分。

上述引起列车基本阻力的五种因素,随着列车速度的高低而有不同的影响。低速时,轴颈与轴承间的摩擦起主要作用,速度提高后,轮轨间滑动摩擦、冲击和振动以及空气阻力的影响逐渐增大。高速时,列车基本阻力则以空气阻力为主。

产生列车基本阻力的原因较多,影响因素复杂。因此列车的基本阻力是根据多次试验所得资料,经过分析研究后确定的。在《列车牵引计算规程》中,规定了各型机车车辆单位基本阻力的计算公式。

1. 电力机车

(1) SS₁、SS₃ 及 SS₄ 型

$$w'_0 = 2.25 + 0.019\ 0v + 0.000\ 320v^2 \quad (1-36)$$

(2) SS₇ 型

$$w'_0 = 1.40 + 0.003\ 8v + 0.000\ 348v^2 \quad (1-37)$$

(3) SS₈ 型

$$w'_0 = 1.02 + 0.003\ 5v + 0.000\ 426v^2 \quad (1-38)$$

(4) 6K 型

$$w'_0 = 3.25 + 0.009\ 2v + 0.000\ 308v^2 \quad (1-39)$$

(5) 8G 型

$$w'_0 = 2.55 + 0.008\ 3v + 0.000\ 212v^2 \quad (1-40)$$