

城市轨道交通 车辆制动技术

上海工程技术大学 吕企平 编著

Higher Education

知识产权出版社

www.cnipr.com

中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn



城市轨道交通 车辆制动技术

上海工程技术大学 戈企平 编著

知识产权出版社
www.cnipr.com

中国水利水电出版社
www.waterpub.com



内容提要

本书以城市轨道交通车辆为对象,从基本概念和基础理论入手,由浅入深地介绍了城市轨道交通车辆制动系统的历史沿革、主要功能和组成部分以及主要零部件的功能和结构,特别是当前我国各大城市地铁车辆正在使用的各种制动系统;完整地介绍了城市轨道交通车辆的动力制动系统、空气制动系统等,其中详尽介绍了空气制动系统的供气系统、中央控制单元和基础制动装置等;并对车辆制动系统的维修工艺和设备作了简单介绍,力求理论联系实际,使读者能够掌握城市轨道交通车辆制动技术的基础理论和实践精髓。

本书可作为高等院校城市轨道交通车辆专业课程的教学用书,也可作为从事城市轨道交通车辆运营和维修的工程技术人员参考书。

选题策划:阳 森 张宝林

责任编辑:阳 森 张宝林

文字编辑:张 冰

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通车辆制动技术 / 殳企平编著. —北京:知识产权出版社, 2011. 8
ISBN 978 - 7 - 5130 - 0658 - 3

I. ①城… II. ①殳… III. ①城市铁路 - 铁路车辆 - 车辆制动
IV. ①U239. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 128283 号

城市轨道交通车辆制动技术

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG CHELIANG ZHIDONG JISHU

上海工程技术大学 殳企平 编著

出版发行: 知识产权出版社

中国水利水电出版社

社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号

邮 编: 100088

网 址: <http://www.ipph.cn>

邮 箱: bjb@cnipr.com

发行电话: 010 - 82000860 转 8101/8102

传 真: 010 - 82005070/82000893

印 刷: 北京富生印刷厂

经 销: 新华书店及相关销售网点

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 8.25

版 次: 2011 年 7 月第 1 版

印 次: 2011 年 7 月第 2 次印刷

字 数: 196 千字

定 价: 18.00 元

印 数: 4001 ~ 7000 册

ISBN 978 - 7 - 5130 - 0658 - 3/U · 013 (3557)

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

前 言

当前我国城市轨道交通正处于飞速发展的大好时机，地铁、轻轨、单轨和磁悬浮等各种城市轨道交通系统如雨后春笋般在全国各大城市出现，因此急需建设、运营和维修方面的人才。由于城市轨道交通在我国还是个新生事物，经验积累较少，目前关于城市轨道交通车辆技术方面的专门教材甚少，不能满足教育和培训的需求。本书的编写目的就是试图填补这方面的空缺。

本书稿曾作为教材和培训讲义在上海工程技术大学轨道交通学院和上海地铁运营有限公司培训中心试用，此次作了较大幅度的修改，并增加了大量有关制动领域的最新技术，如EP2002制动系统等。本书以城市轨道交通车辆为研究对象，从基本概念和基础理论入手，讲述了轨道车辆制动技术发展的历史沿革、制动系统的组成及主要零部件的功能和结构，以及当前我国各大城市轨道交通车辆正在使用的各种制动系统；此外，还对车辆制动系统的维修工艺和设备作了简单介绍。本书力求理论联系实际，使读者能掌握制动技术的基础理论和实践精髓。

本书可作为高等院校城市轨道交通车辆专业课程的教学用书，也可作为从事城市轨道交通车辆运营和维修的工程技术人员参考书。

本书在编写过程中，得到了上海地铁运营有限公司车辆分公司技术部和资料室等单位在技术资料方面的支持，在此表示衷心的感谢。

作 者

2009年3月

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 制动的基本概念	1
第二节 城市轨道交通车辆制动系统的历史沿革	2
第三节 现代城市轨道交通车辆制动系统的主要功能和组成部分	4
第二章 制动的基础理论	5
第一节 轮轨关系和制动力	5
第二节 制动载荷分析	9
第三章 动力制动和电磁制动	12
第一节 动力制动的必要性、基本原理及其基本要求	12
第二节 再生制动电路	13
第三节 电阻制动电路	16
第四节 电磁制动	17
第四章 供气系统	20
第一节 空气压缩机组	20
第二节 空气干燥器	22
第三节 风缸及其他空气管路部件	24
第五章 制动控制系统	29
第一节 制动控制系统的组成	29
第二节 制动控制策略	33
第六章 基础制动装置	36
第一节 单元制动机	36
第二节 闸瓦	39
第三节 盘式制动	43
第七章 防滑原理和防滑控制	45
第一节 防滑控制的必要性	45

第二节	防滑控制技术的发展	46
第三节	防滑控制的机理分析	46
第四节	防滑控制系统	50
第八章	轨道车辆的制动计算	58
第一节	制动时电动车组的减速度	58
第二节	制动距离计算	63
第九章	SD 型数字式电气指令制动控制系统	66
第一节	基本原理和特点	66
第二节	系统组成	67
第三节	制动原理和过程	78
第十章	KBCM 模拟式电气指令制动系统	82
第一节	列车制动参数	82
第二节	空气制动系统组成	82
第三节	空气制动系统作用原理	87
第十一章	KBWB 模拟式电气指令制动系统	89
第一节	概述	89
第二节	空气制动系统构成	90
第三节	列车制动力分配	98
第四节	制动控制过程	99
第五节	KBWB 模拟式电气指令制动系统的特点	102
第十二章	EP2002 制动系统	103
第一节	概述	103
第二节	EP2002 阀	104
第三节	EP2002 制动系统网络结构	108
第四节	EP2002 制动系统的控制过程和作用原理	110
第五节	EP2002 制动系统的优缺点	112
第十三章	制动系统检修工艺和设备	114
第一节	制动系统检修工艺	114
第二节	制动系统维修设备	119
参考文献		123

第一章 概 论

第一节 制动的基本概念

人为地使运动物体减速或阻止其加速称为制动。对于城市轨道交通车辆来说，为了使运行中的列车能迅速地减速或停车，必须对它施行制动；为了防止列车在下坡道时由于列车的重力作用导致列车速度增加，也需要对它施行制动；即使列车已经停车，为避免停放的列车因重力作用或风力吹动而溜车，还需要对它施行制动（又称为停放制动）。反之，对已经施行了制动的列车，为了重新启动或再次加速，必须解除或减弱其制动作用，这种做法称为制动的缓解。

一、列车制动系统

为了能施行制动或缓解制动，需要在列车上安装由一整套零部件组成的一个完整的制动装置，总称为“列车制动装置”。在铁路上，它分成“机车制动装置”和“车辆（客车、货车）制动装置”。由于城市轨道交通车辆与铁路车辆的编组形式不同，一般都采用动力分散型的动车组形式，所以它分为“动车制动装置”和“拖车制动装置”。无论机车、客车、货车还是动车、拖车，各种车都有它自己的制动装置，起着制动和缓解的作用。只有机车不同，它还具有操纵全列车的制动的功能。城市轨道车辆也有操纵全列车制动功能的设备，它一般安装在列车两端的带司机室的头车上，而头车既可以是拖车也可以是动车。

由制动装置产生的，与列车运行方向相反的外力，称为“制动力”。这是人为的阻力，它比列车在运行中由于各种自然原因产生的阻力要大得多。因此，尽管在列车制动减速的过程中，列车运行阻力（自然阻力）也在起作用，但起主要作用的还是列车制动力（人为阻力）。

一套列车制动装置至少包括两个部分，即制动控制部分和制动执行部分。制动控制部分由制动信号发生与传输装置以及制动控制装置组成；制动执行部分通常称为基础制动装置，包括闸瓦制动与盘式制动等不同方式。

过去由于列车上安装的制动装置比较简单、直观，而且用压缩空气传递制动信号，因此我们称其为一套列车制动装置。但是随着轨道交通技术的发展，制动装置中越来越多地采用了电气信号和电气驱动设备。微机和电子设备的出现使制动装置变得无触点化和集成化，并且使制动控制功能融入了其他电路而不能独立划分。因此，我们只能按现代方法将具有制动功能的电子线路、电气线路和气动控制部分归结为一个系统，统称为列车制动系统。

二、常用制动和紧急制动

列车制动在操纵上按用途可分为两种，即常用制动和紧急制动。常用制动是指在正常

情况下为调节或控制列车速度，包括进站停车所施行的制动。它的特点是：作用比较缓和，制动力可以调节，通常只用列车制动能力的 20%~80%，多数情况下只用 50% 左右。而紧急制动是一种“非常制动”，是在紧急情况下为使列车尽可能快地停车而施行的一种制动。它的特点是：作用比较迅猛，而且要把列车全部制动能力都用上。目前，在城市轨道交通车辆上还采用一种快速制动，它基本上与紧急制动相当，但是紧急制动是不可自动恢复的，必须停车后人工恢复，而快速制动是可以恢复的。

从司机施行制动（将司机控制手柄推拉至制动位）的瞬间起，到列车速度降为零的瞬间止，列车在这段时间内所驶过的距离，称为列车“制动距离”。这是综合反映列车制动装置性能和实际制动效果的主要技术指标。有的国家不用制动距离而用（平均）减速度作为其主要技术指标，其实两者的实质是一样的，只是制动距离较为具体，而减速度较为抽象而已。

城市轨道交通车辆的启动和以一定速度运行，要通过对其施加牵引。同样，为了使运行的车辆能够迅速地减速、停车，也必须对其施加制动。牵引和制动是车辆运行的一对矛盾的两个方面，缺一不可。仅有牵引而没有制动的车辆是不完善的，甚至是危险的。试想一下，如果一列车突然失去制动，乘客的生命财产将受到严重威胁，这是何等地危险。因此，从某种意义上来说，制动是一个比牵引更为重要的问题。

三、制动能力

在设计和制造过程中，列车的最高运行速度和牵引功率需要得到充分考虑和计算，而制动能力更是需要认真计算和校核。列车的最大速度与牵引功率有关，但它更应该受到制动能力的限制，这是更重要的大事。

列车的制动能力是指该列车的制动系统能使其在规定的安全范围内或规定的安全制动距离内可靠地把车停下来的能力。一般来说，城市轨道交通系统都有明确的车辆运行规程，特别对列车制动能力有严格的要求和规定。例如，要求列车在紧急情况下的制动距离（紧急制动距离）不得超过某一规定值。上海地铁规定：列车在满载乘客的条件下，在任何运行初速度下，其紧急制动距离不得超过 180m。这个距离要比启动加速距离短得多。因此，从安全的目的出发，一般列车的制动功率要比驱动功率大 5~10 倍。

从能量的角度看，制动的实质就是将列车上的动能转移出去。制动系统转移动能的能力就是制动功率。在一定的制动距离条件下，列车的制动功率是其速度的三次函数。

第二节 城市轨道交通车辆制动系统的历史沿革

一、早期的制动方式

自 1881 年德国柏林有了世界第一辆有轨电车后，世界各大城市相继开始了大规模的城市轨道交通的建设。对于城市轨道交通车辆来说，除了要承载更多的乘客外，还有一项重要任务，那就是要使运动中的车辆能够安全地减速和停车，也就是必须要对车辆施行制动。最早的有轨电车是以人工制动的。司机绞动刹车钢丝，使木制的闸瓦靠紧车轮踏面，用摩

摩擦力使车轮或车轴的转动减慢直至停止，以达到车辆减速和停车的目的。当然，这种原始的制动方法既费力又不安全，时常会发生钢丝断裂和车辆失控事故。人们逐渐认识到，为了能让车辆以一定速度安全运行，必需使其具有同样的减速和停车能力，必须重视对车辆制动的改进。忽视车辆制动将会发生危险，甚至造成旅客生命和财产的损失。因此，对制动机的研制成为近代铁路和城市轨道交通的一个大热门，有时甚至比电气牵引上的发明更为引人注目。

1863年，伦敦在市中心环路下面修建隧道，拟让火车在市中心的地下通行。但是火车的烟雾在隧道中弥漫，尽管有通风井，但排放烟雾问题仍然难以解决。直到1890年，伦敦才建成电力牵引的地下铁路，这就是真正意义上的第一条地铁。

地铁在20世纪初的欧美地区的城市得到迅速发展。由于地铁车辆是沿用铁路车辆的，因此任何火车制动新技术出现都会立即被应用于地铁列车。当时火车一般使用人工机械制动，例如杠杆拨动式闸瓦制动装置、手轮式棘盘链条制动机等。这种人工机械制动机，有的甚至现在还在被铁路车辆使用，当然它只是在空气制动机发生故障、调车作业或就地停放时使用。

二、现代化的制动系统

随着20世纪初科学技术的发展，铁路车辆上出现了空气制动机。所谓空气制动机，就是用压力空气作为制动的动力来源，并用压力空气的压力变化来实现列车的制动和缓解作用的制动装置。这种空气制动机被广泛应用于铁路、地铁、城市高架铁路以及其他轨道交通车辆。至今，空气制动机还在我国和世界各国铁路机车和货车上使用。虽然空气制动机与人工机械制动相比，安全性和可靠性都有了很大进步，但由于司机发出的制动指令是靠列车管内的压力变化来传递的，它的指令传递速度受空气波速的限制，也就是说其极限速度在330m/s左右。因此，对一列几百米长的列车来说，仍有可能造成前后车辆制动和缓解动作在时间上的不一致。在多数情况下，由此造成的列车纵向冲动和对车钩的损伤已达到非常严重的程度。

20世纪30年代，在欧美地区和日本出现了采用电信号来传递制动和缓解指令的制动控制系统，这是制动系统的一次革命，因为电信号的传输速度比空气波速快得多。采用电信号的制动控制系统被称为电气指令式制动控制系统。当时人们将制动的动力来源仍采用压力空气，但控制方式采用了电气指令式制动控制系统的列车制动机称为电磁空气制动机。电磁空气制动机在每节车辆都设有制动、缓解电磁阀。它们通过司机制动控制器进行励磁和消磁，从而控制列车制动或缓解。相对于空气制动机来说，电气指令式制动控制的主要优点是：全列车制动和缓解的一致性良好，因此，制动和缓解时的纵向冲动小，制动距离短，车钩受力小，乘客乘坐舒适性好。

20世纪50年代，国外城市轨道交通车辆在大规模采用电磁空气制动机的同时，还采用电气指令式制动控制系统协调动力制动和空气制动，使制动控制技术达到了一个新的水平。最近几十年来，由于电力电子变流技术和微机技术的加入，使电气指令式制动控制系统不断改进、发展。大功率电力电子元件的出现使电气再生制动成为可能，微机技术的应用使制动防滑系统更加精确完善，城市轨道交通车辆制动技术正朝着安全、可靠、人性化和环保的目标不断前进。

第三节 现代城市轨道交通车辆制动系统的主要功能和组成部分

一、对城市轨道交通车辆的制动系统的要求

城市轨道交通越来越为广大市民所接受，现已成为大都市居民出行的首选方式。

城市轨道交通的特点是安全、快捷、准时、方便。但是它的站距相对于城市之间运营的一般火车来说就显得较短，只有 1km 左右。它的行车速度快、乘客上下数量波动大、发车频率高，因此，对车辆启动、加速和制动都有很高的要求。特别是对制动，出于安全的考虑，必须做到万无一失。

综合起来，对城市轨道交通车辆的制动系统应满足以下要求：

(1) 制动系统应具有足够的制动能力，能保证车辆在规定的制动距离内停车。制动系统应操作灵活、反应迅速、停车平稳。

(2) 制动系统应包括动力制动（电气制动）和空气制动（机械制动）两种制动方式，并且在正常制动过程中，尽量首先使用动力制动，以减少空气制动对城市的环境污染并降低车辆维修成本。

(3) 制动系统应具有可靠的安全保障系数，即使个别车辆发生故障或在较长距离和较大坡度的坡道上运行，也应有足够的制动力保证列车可靠制动和停车。

(4) 车辆应具有载荷校正能力，能根据乘客载荷的变化自动调节制动力，使车辆制动力保持恒定，限制冲动力，保证乘客乘坐的舒适性。

(5) 制动系统必须具有紧急制动功能。紧急制动装置除由司机操作外，还可由其他行车人员操作。

二、现代城市轨道交通车辆的制动系统的组成

根据以上特点和要求，现代城市轨道交通车辆的制动系统一般包括以下几个组成部分：

(1) 动力制动系统。它一般与牵引系统连在一起形成主电路，包括再生反馈电路和制动电阻器，将动力制动产生的电能反馈给供电接触网或消耗在制动电阻器上。

(2) 空气制动系统。它由供气部分、控制部分和执行部分（基础制动装置）等组成。供气部分有空气压缩机组、空气干燥机和风缸等；控制部分有电-空（EP）转换阀、紧急阀、称重阀和中继阀等；执行部分就是闸瓦制动装置和盘式制动装置等。

(3) 指令和通信网络系统。它既是传送司机指令的通道，同时也是制动系统内部数据交换及制动系统与列车控制系统进行数据通信的总线。

第二章 制动的基础理论

第一节 轮轨关系和制动力

除了橡胶车轮列车和磁悬浮列车等特殊交通系统外，目前绝大部分城市轨道交通车辆采用的是钢轨钢轮的走行方式。因此，我们首先要来研究钢轨与钢轮之间的互相关系，以及它们在运行时的各种工况。

轮对（由一根车轴与两个车轮组成）在钢轨上运行时，一般承受垂直载荷及纵、横切向载荷。垂直载荷来自车辆对轮对的正压力，纵向载荷主要来自牵引及制动，横向载荷来自车辆的蛇行运动。牵引时，牵引电机通过传动机构，将牵引动力传递给动车的动力轮对（动轮），由车轮和钢轨的相互作用，产生使车辆运动的反作用力。根据物理学中有关机械摩擦的理论，轮轨间的切向作用力就是静摩擦力。而最大静摩擦力就是钢轨对车轮的反作用力的法向分力与静摩擦系数的乘积。稳态前进的非动力轮的车轮在不制动时，其纵向切向力平衡轴承阻力和蛇行时的惯性力。因此，无论是动力轮对或从动轮对都存在着纵向切向力，它导致了轮轨之间的纵向相对运动。但实际上，事情并非那么简单，动轮与钢轨间切向作用力的最大值与物理学上的最大静摩擦力相比要小一些，情况也更复杂一些。

在分析轨道车辆的轮轨关系时，通常必须引入两个十分重要的概念，即“黏着”和“蠕滑”。

一、黏着

图 2-1 所示为某个动车以速度 v 在平直线路上运行时，它的一个动车轮对的受力情况（我们暂且忽略它内部的各种摩擦阻力）。为了更清楚地表示该图中的各种关系，我们把实际上互相接触的车轮与钢轨稍稍分开画出。

在图 2-1 中， P_i 为一个动轮对作用在钢轨上的正压力，又称为轮对的轴重。牵引电机作用在动轮对上的驱动转矩 M_i ，可以用一对力形成的力偶代替。力 F'_i 和 F_i 分别作用在轮轴中心的 O 点和轮轨接触处的 O' 点，其大小为

$$F_i = F'_i = M_i / R_i$$

式中 R_i ——动轮半径。

在正压力 P_i 的作用下，车轮与钢轨的接触部分紧紧压在一起。

切向力 F_i 使车轮上的 O' 点具有向左运动的趋

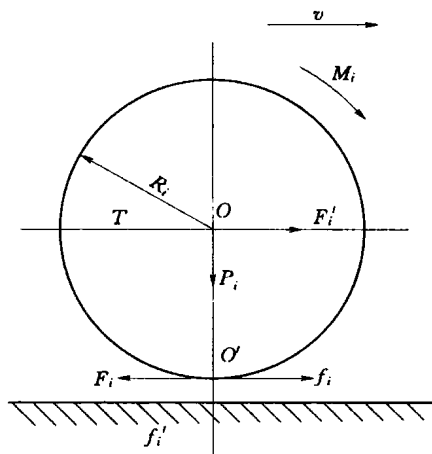


图 2-1 在平直线路上运行的轮对与钢轨受力分析

势,并通过 O' 点作用在钢轨上。 f'_i 表示车轮作用在钢轨上的力,其值 $f'_i = F_i$ 。由于轮轨接触处存在着摩擦,车轮上 O' 点向左运动的趋势将引起向右的静摩擦力 f_i ,即钢轨对车轮的反作用力,其值 $f_i = f'_i$, f_i 称为轮周牵引力。因此,车轮上的 O' 点受到两个相反方向的力 F_i 和 f_i 的作用,而且 $f_i = F_i$ 。所以, O' 点保持相对静止,轮轨之间没有相对滑动,在力 F'_i 的作用下,车轮对做纯滚动运动。

由于正压力而保持车轮与钢轨接触处相对静止的现象称为“黏着”。黏着状态下的静摩擦力 f_i 称为黏着力。

轮轨间的黏着与静力学中的静摩擦的物理性质十分相似。驱动转矩 M_i 产生的切向力 F_i 增大时,黏着力 f_i 也随之增大,并保持与 F_i 相等。当切向力 F_i 增大到某个数值时,黏着力 f_i 达到最大值。此后,切向力 F_i 如果再增大, f_i 反而迅速减小。试验证明,黏着力 f_i 的最大值 $f_{\max}$ 与动轮对的正压力 P_i 成正比,其比例常数称为黏着系数,用 μ 表示,即

$$f_{\max} = \mu P_i$$

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时,若继续加大驱动转矩,一旦切向力 F_i 大于最大黏着力,车轮上的 O' 点将向左移动,轮轨间出现相对滑动,黏着状态被破坏。这时,车轮与钢轨的相对运动由纯滚动变为既有滚动也有滑动。此时,钢轨对车轮的反作用力 f_i 由静摩擦力变为滑动摩擦力,其值迅速减小,并使车轮的转速上升。这种因驱动转矩过大,破坏黏着关系,使轮轨间出现相对滑动的现象,我们将其称为“空转”。当车轮出现空转时,轮轨间只能依靠滑动摩擦力传递切向力,因而传递切向力的能力大大减小,并且会造成车轮踏面和轨面的擦伤。因此,牵引运行应尽量防止出现车轮的空转。

黏着系数是由轮轨间的物理状态确定的。加大每个动轮对作用在钢轨上的正压力,即增加轴重,可以提高每个动轮对的黏着力和牵引力。但是,轴重也受到钢轨、路基和桥梁等各种条件的限制,不可能无限制地增加。城市轨道交通车辆由于采用动车组形式,动轮对数量比一般铁路列车多,动力和黏着力较分散,牵引力总量又很容易达到,与铁路列车的动轮对和牵引力都集中在机车头的情况相比,城市轨道交通车辆利用黏着条件就相对好得多,因而对保护轮轨间的正常作用是很有利的。

二、蠕滑

传统理论认为:钢轮相对钢轨滚动时,接触面是一种干摩擦的黏着状态,除非制动力或牵引力大于黏着力时才会转入滑动摩擦状态。但是现代研究表明,由于车轮和钢轨都是弹性体,滚动时轮轨接触处会产生弹性变形,这种新的弹性变形会使接触面间发生微量滑动,称之为“蠕滑”(CREEP)。对“蠕滑”的研究和分析,可以进一步深化我们对黏着的认识。

在车轮上正压力的作用下,轮轨接触处产生弹性变形,形成椭圆形的接触面。从微观上仔细观察,两个接触面是粗糙不平的。由于切向力 F_i 的作用,车轮在钢轨上滚动时,车轮和钢轨的粗糙接触面间产生新的弹性变形,接触面间出现微量滑动,即所谓的“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。随着动轮的滚动,车轮上原来被压缩的金属陆续放松,并

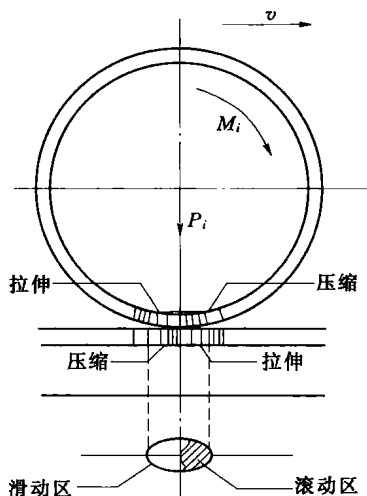


图 2-2 切向力在接触面上形成的滚动区和滑动区

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。

如图 2-2 所示，切向力在接触面上形成两个性质不同的状态和区域：接触面的前部，轮轨间没有相对滑动，称为滚动区，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。当切向力超过某一极限值时，滚动区面积为零，只剩下滑动区，整个接触面间出现相对滑动，轮轨间黏着被破坏，车轮在钢轨上开始明显打滑，即出现“空转”。

蠕滑是滚动体的正常滑动。车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，牵引时车轮的滚动圆周速度将比其轮心前进速度要大。这两种速度之间的差值称为蠕滑速度，并以一个无量纲比值蠕滑率 σ 来表示蠕滑的大小，即

$$\sigma = \frac{\omega R_i - v}{v}$$

式中 v ——车轮轮心前进速度；

ω ——车轮转动的角速度。

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，发展成为真滑动；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，一直持续到重新在驱动机构中建立起稳定的弹性应力为止。

三、制动力的形成

与牵引运行类似，制动力的形成也是通过轮轨间的黏着产生的。

为了降低列车运行速度或者为了停车，我们必须用外力将列车动能移走。这个移走列车动能的过程称为制动。一般城市轨道交通车辆的制动方式有三类，即摩擦制动（包括闸瓦制动和盘式制动）、动力制动（包括再生制动和电阻制动）和电磁制动（包括磁轨制动和涡流制动）。其中摩擦制动和动力制动都是通过轮轨黏着产生制动力的。下面以闸瓦制动为例，说明通过轮轨黏着产生制动力的过程。

图 2-3 是一个轮对利用闸瓦制动产生制动力的示意图。

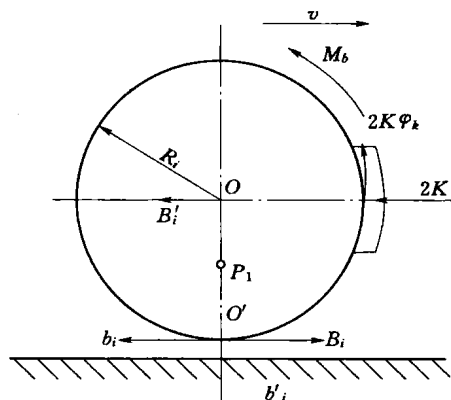


图 2-3 闸瓦制动时轮对与钢轨受力分析

假设一个轮对上有两块闸瓦，在忽略其他各种摩擦阻力的情况下，轮对在平、直道上滚动前行。若每块闸瓦以力 K 压向车轮踏面，闸瓦和踏面间引起与车轮转动方向相反的滑动摩擦力 $2K\varphi_k$ (φ_k 为车轮踏面与闸瓦间的滑动摩擦系数)。对于列车来说，该摩擦力是内力，不能使列车减速，可是它通过轮轨间的黏着，引起与列车运动方向相反的外力，以此来实现列车的减速或停车。

摩擦力 $2K\varphi_k$ 对车轮的作用效果，相当于制动转矩 M_b ，即

$$M_b = 2K\varphi_k R_i$$

用类似牵引力形成的分析方法，转矩 M_b 可以用轴心和轮轨接触处的力偶 (B_i 、 B'_i) 代替。力偶的力臂为车轮 R_i ，作用力 $B_i = B'_i = M_b/R_i = 2K\varphi_k$ 。轮轨接触处因轮对的正压力 P_i 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 ， $b_i = B_i = 2K\varphi_k$ 。 b_i 作用在车轮踏面的 O' ，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

$$b_i \leq P_i \mu_i$$

式中 P_i ——动车或拖车轮对的轴重；

μ_i ——制动时轮轨间的黏着系数。

整个列车的总闸瓦制动力为所有轮对闸瓦制动力之和，即

$$B = \sum b_i$$

制动力的大小可以采用增加或减小闸瓦压力来调节，但不得大于黏着条件所允许的最大值。否则，车轮被闸瓦“抱死”，车轮与钢轨间产生相对滑动，车轮的制动力变为滑动摩擦力，数值立即减小，这种现象称为“滑行”，是与牵引时的“空转”相对应的一种黏着状态被破坏的现象。滑行时，制动力大大下降，制动距离增加，还会造成车轮踏面与轨面的擦伤，因此也必须尽量避免。

动力制动产生制动力的过程与摩擦制动基本类似，只是制动转矩是由电机（这时电机处于发电机状态）产生的，而不是由闸瓦产生的。但它们都是通过轮轨黏着产生的。因此，牵引力、摩擦制动力和动力（电气）制动力都是黏着力，它们与黏着关系密切。充分利用好黏着条件，不仅是牵引必须注意的，对于制动来说也同样重要。“滑行”和“空转”都是必须避免的。

唯一不受黏着条件限制的制动力是电磁制动力。电磁制动有两种形式，即磁轨制动和涡流制动。磁轨制动是将带有磨耗板的电磁铁落在钢轨上，接通励磁电流，使电磁铁紧紧吸附在钢轨上，并通过磨耗板与轨面摩擦产生制动力。涡流制动的电磁铁没有磨耗板，它将电磁铁落在距轨面 7~10mm 处，电磁铁与钢轨间的相对运动引起电涡流作用形成制动力。磁轨制动在欧洲的轻轨车辆或有轨电车上经常能看见，主要用于紧急制动。但磁轨制动应用最多的是高速列车，还有磁悬浮列车。

四、影响黏着系数的因素

由于黏着系数与牵引和制动有相当重要的关系，所以长期以来，影响黏着系数的主要因素就成为世界上众多科技专家研究的方向。对轨道黏着系数的研究主要依靠试验。不同轨道的黏着系数不同，需要经过大量试验和对试验数据的计算分析才能得到。通过专家们的试验分析表明，影响黏着系数的主要因素有以下几项。

（一）车轮踏面与钢轨表面状态

干燥、清洁的车轮踏面与钢轨表面，它们的黏着系数高，如果踏面或轨面受到污染，则黏着系数有很大下降。有试验结果表明，干燥、清洁的轨面，其黏着系数可达 0.3；而受到雨雪浸湿的轨面，其黏着系数仅为 0.12。对城市轨道交通来说，地铁、轻轨和有轨电车的轨面由于所处环境的不同，其黏着系数有着巨大的差别。晴天里，地面的轨面要比潮湿隧洞里的轨面黏着系数高；但雨雪天气里，隧洞里的轨面黏着系数反比地面的要高。冰霜凝结在轨面上或毛毛雨打湿轨面时，黏着系数非常低，但大雨冲刷、雨后生成的薄锈却使黏着系数大大增加。油的污染最会使轨面黏着系数下降，撒沙则能使轨面黏着系数增加。

（二）线路质量

钢轨越软或道床下沉越大，轨面的黏着系数越小；钢轨不平或直线地段两侧钢轨顶不在同一水平，以及动轮所处位置的轨面状态不同，都会使黏着系数减小。

（三）车辆运行速度和状态

车辆运行速度增高加剧了动轮对钢轨的纵向滑动和横向滑动及车辆振动，使黏着系数减小。特别是在车轮和钢轨表面被水污染的情况下，黏着系数随速度增加而急剧下降。车辆运行中由各种因素导致轴重转移，也会影响黏着系数。例如，车辆过弯道时，造成车辆车轮一侧加载，另一侧减载，使黏着系数大幅度下降，如果曲线半径越小，黏着系数下降就越多。牵引和制动工况对黏着系数也有一定影响，牵引时的黏着系数要比制动时大一些。

（四）动车有关部件的状态

牵引电机特性不完全相同，牵引力大的容易空转或打滑，导致黏着系数下降；各个动轮的轮径不同，轮径小的容易空转，但不容易打滑；各个动轮的动负载不同，动负载轻的容易空转和打滑。一旦发生空转或打滑，黏着系数就急剧下降。

五、改善黏着的方法

改善黏着的方法主要有两大类：一大类是修正轮轨表面接触条件，改善轮轨表面不清洁状态；另一大类是设法改善轨道车辆的悬挂系统，以减轻轮对减载带来的不利影响。通常采用以下改善黏着的措施：从车辆上往钢轨上撒沙；用机械或化学方法清洗钢轨、打磨钢轨；改进闸瓦材料，如用增黏闸瓦；改善车辆悬挂，减小轴重转移等。

第二节 制动载荷分析

一、与制动有关的车辆载荷

（一）垂直载荷

作用在车体上的垂直静载荷 $P_{\text{静}}$ 包括车体自重和车辆载重。车体自重包括车体钢（铝合金）结构、木（塑铝）结构，以及安装在车体上的其他零部件和设备的重量。车辆载重包括乘客和行李的重量。地铁和轻轨车辆的载重按所载乘客的重量计算。载客人数按客室的坐席数，再考虑站立人数。额定站立人数按每平方米地板面积站立 6 人，超员可按每平方米地板面积站立 9 人计算，人均重量一般取 60kg。

(二) 垂直接载荷

垂直接载荷 P_d 是由于轨面不平、钢轨接缝等原因以及车辆本身状态不良（例如车轮滚动圆偏心、呈椭圆形状和踏面擦伤等）引起轮轨间冲击和车辆簧上振动而产生的。

(三) 纵向力

纵向力是当列车启动、变速、制动和调车作业时，在动车之间或调车机车与列车之间所产生的牵引或压缩冲击力。纵向力通过牵引缓冲装置作用于车底架的牵引梁上，使车体承受偏心的拉伸或压缩作用。纵向力的大小与动车的功率、列车重量、运行速度、制动系统性能、缓冲器的特性、车体的纵向刚度、调车时碰撞速度以及司机的操纵技术等因素有关。

(四) 侧向力

作用在车体上的侧向力包括风力和曲线运行时的离心力。

(五) 扭转载荷

当车辆通过线路的缓和曲线区段，前位转向架已进入缓和曲线，而后位转向架仍处于平直道时，车体将承受扭转变形。

二、制动时的载荷分析

列车在运行中实施制动时，在车辆上有以下两种纵向力的作用：

(1) 在只采用空气制动机的情况下，列车开始制动时，由于列车前、后车辆不是同时发生制动作用，这样必然要引起车辆间的纵向冲击，其纵向力以集中力的形式和大小相等、方向相反地作用在车体底架两端。这种纵向力对转向架的受力没有影响。

(2) 当全列车的所有车辆同时发生制动作用时，车辆间的纵向冲击消失，制动力却逐渐增大至最大值，由于车辆在制动力作用下做减速运动，就将引起车体和转向架质量的纵向惯性力。这种纵向惯性力对车体的作用远不及上述纵向力严重，故可以不计；但它对转向架有一定影响。在图 2-4 上，制动时钢轨给予车辆的最大制动力 F (kN)（其方向与车辆运动方向相反）由下式决定：

$$F = P_{st}\mu g$$

式中 P_{st} ——车辆垂直静载荷，又称为车辆黏着重量，它等于车体和转向架的自重及车辆载重之和；

μ ——轮轨间的黏着系数；

g ——重力加速度。

在制动力 F 的作用下，车辆的最大减速度为

$$a = F/P_{st} = \mu g$$

这时，车体的纵向惯性力 Q 将引起前、后（按制动前车辆运行方向）转向架的垂直增减载荷 P_a 以及作用在转向架心盘处的水平载荷 T_a ，如图 2-4 所示。根据车体受力平衡，可

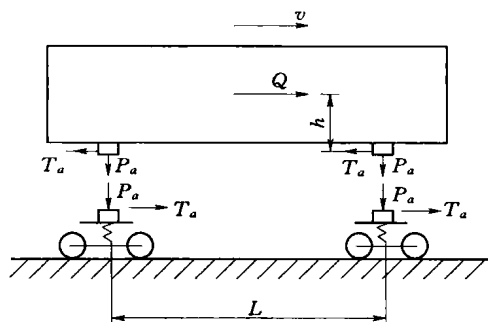


图 2-4 制动时的载荷分析

以得到：

$$P_a = \frac{Qh}{L}$$

$$T_a = \frac{Q}{2}$$

其中

$$Q = P_{st}a$$

式中 h ——重载车体的重心至心盘面的垂直距离，m；

L ——车辆定距，m。