



普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

轨道车辆牵引与制动

主编 彭俊彬 胡准庆
主审 胡晓依



科学出版社

普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

轨道车辆牵引与制动

主编 彭俊彬 胡准庆

主审 胡晓依

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材之一,主要介绍轨道车辆制动系统的组成和工作原理,以及轨道车辆的牵引计算方法。全书主要内容共两大部分:第1~7章为第一部分,第8~12章为第二部分。第一部分以动车组为重点,并结合具体型号的制动装置,全面介绍轨道车辆中动车组、铁路机车车辆和地铁轻轨车辆制动系统的相关基本概念,制动系统的组成、工作原理和特点。第二部分在系统阐述列车牵引计算基本理论的基础上,对轨道车辆的牵引计算方法及电算进行介绍。

本书是高等学校机车车辆类和轨道交通车辆类专业的本科生教材,也可供相关专业工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

轨道车辆牵引与制动/彭俊彬,胡准庆主编. —北京:科学出版社, 2017.6

普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材
ISBN 978-7-03-051932-0

I. ①轨… II. ①彭… ②胡… III. ①轻轨车辆—牵引系统—高等学校—教材 ②轻轨车辆—车辆制动—高等学校—教材 IV. ①U270.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 040561 号

责任编辑:毛莹 朱晓颖 张丽花 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:12

字数:307 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

2010 年,教育部正式启动了“卓越工程师教育培养计划”,其宗旨是培养和造就一大批创新能力强、适应社会经济发展需要的高质量工程技术人才,为国家走新型工业化发展道路、建设创新型国家和人才强国战略服务。北京交通大学是首批“卓越工程师教育培养计划”实施的 61 所高校之一,机械工程及自动化(铁路机车车辆)专业卓越工程师培养计划作为北京交通大学“卓越工程师教育培养计划”之一,实施两年基础教育、两年轨道交通专业教育、两年工程硕士教育的“2+2+2”本、硕一体化人才培养模式,为此,北京交通大学机械与电子控制工程学院申报了面向车辆工程专业的卓越工程师教育系列特色教材。

本书是普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材之一,在原有《动车组牵引与制动》教材的基础上,新增铁路机车车辆制动和牵引计算方面的内容。本书以动车组为重点,全面介绍轨道车辆制动系统的组成和工作原理,以及轨道车辆的牵引计算方法。

本书由北京交通大学彭俊彬、胡准庆合作编写。其中,绪论、第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章和第 8~10 章由彭俊彬编写,第 3 章、第 6 章、第 7 章、第 11 章、第 12 章由胡准庆编写。彭俊彬、胡准庆担任主编,中国铁道科学研究院胡晓依担任主审。

为方便读者学习,依托北京交通大学开设的“轨道车辆牵引与制动”MOOC 课程,本书在重要知识点位置设置了 23 个二维码,通过手机、平板电脑等移动终端扫描二维码,即可链接至 MOOC 相关知识的视频讲解,从而将纸质教材与网络资源有机结合,有利于提升学习效果。扫描封底二维码,单击“多媒体素材”,可显示书中所有视频资源,读者可根据学习需要,有选择性地观看。观看本书配套视频讲解会产生较大流量,建议在 Wi-Fi 环境下访问相关资源。本书附带的所有视频文件版权所有,未经允许请勿擅自使用。

在本书编写过程中,得到了北京交通大学焦风川、济南铁路安监办驻济南车辆段验收室宗磊的宝贵支持和热心帮助,在此表示衷心的感谢。

由于水平所限,疏漏和不足之处在所难免,恳请广大读者提出批评和建议。

编 者

2016 年 10 月于北京

目 录

绪论	1
复习思考题	3
第 1 章 轨道车辆制动概述	4
1.1 制动的相关概念	4
1.1.1 基本概念	4
1.1.2 制动对轨道车辆的意义	5
1.1.3 轨道车辆的制动方式	5
1.1.4 制动作用的种类	14
1.2 高速和重载轨道车辆制动	15
1.2.1 高速轨道车辆制动	15
1.2.2 重载轨道车辆制动	17
复习思考题	18
第 2 章 电制动系统	19
2.1 电制动概述	19
2.2 电阻制动	19
2.2.1 系统组成和工作原理	19
2.2.2 制动力的产生原理	21
2.2.3 制动特性	21
2.3 再生制动	22
2.3.1 系统组成和工作过程	22
2.3.2 制动力的产生原理	23
2.3.3 制动特性	23
2.4 直流电机的电制动	24
2.4.1 凸轮变阻调速与斩波调阻调速	24
2.4.2 斩波调压调速	25
2.4.3 直流牵引电机斩波调压调速系统	27
2.5 交流电机的电制动	29
2.6 CRH2 型动车组的电制动系统	33

2.6.1 组成和工作原理	33
2.6.2 性能	33
2.6.3 电制动在低速下的有效利用	33
复习思考题	34
第3章 空气制动系统	35
3.1 压缩空气供给系统	35
3.1.1 空气压缩机	35
3.1.2 干燥装置	36
3.1.3 风缸	36
3.1.4 安全阀	36
3.1.5 管路和塞门	37
3.2 空气制动控制部分	37
3.2.1 电空转换阀	37
3.2.2 中继阀	38
3.2.3 压力调整阀	38
3.2.4 电磁阀	39
3.2.5 增压缸	39
3.2.6 制动缸	40
3.3 基础制动装置	40
3.3.1 组成	40
3.3.2 制动倍率	44
3.3.3 传动效率	44
3.4 CRH2 型动车组的空气制动系统	45
3.4.1 压缩空气供给系统	45
3.4.2 空气制动控制部分	47
3.4.3 基础制动装置	52
3.4.4 气路原理	53
3.5 CRH5 型动车组的空气制动系统	55
3.5.1 直通空气制动系统	55
3.5.2 自动空气制动系统	56
复习思考题	57
第4章 防滑装置	58
4.1 防滑装置的种类	58
4.1.1 机械式防滑器	58

4.1.2 电子式防滑器	58
4.1.3 微机控制式防滑器	59
4.2 微机控制式防滑器的组成和工作原理	59
4.2.1 组成	59
4.2.2 工作原理	61
4.3 CRH2 型动车组的防滑装置	63
4.3.1 电制动的滑行再黏着控制	63
4.3.2 空气制动的滑行再黏着控制	64
复习思考题	65
第 5 章 制动控制系统	66
5.1 制动控制系统的组成	66
5.1.1 制动信号发生装置	67
5.1.2 制动信号传输装置	67
5.1.3 制动控制单元	67
5.2 制动控制系统的操纵方式	68
5.3 制动控制系统的工作原理	68
5.3.1 制动指令控制	68
5.3.2 各种制动作用的控制	69
5.3.3 速度控制	73
5.3.4 制动系统与动车组其他系统的接口	73
5.4 CRH2 型动车组的制动控制系统	74
5.4.1 组成及功能概述	74
5.4.2 常用制动控制	75
5.4.3 非常制动控制	76
5.4.4 紧急制动控制	77
5.4.5 备用制动控制	80
5.4.6 耐雪制动控制	80
5.4.7 其他功能控制	80
复习思考题	81
第 6 章 铁路车辆制动机	82
6.1 局减与局增	82
6.1.1 局减	82
6.1.2 局增	82
6.2 二、三压力制动机	83

6.2.1 直接作用的二压力制动机	83
6.2.2 直接作用的三压力制动机	83
6.3 间接作用的制动机	85
6.3.1 间接作用制动机产生的原因	85
6.3.2 铁道车辆间接作用制动机	86
6.4 104/103 型空气制动机	86
6.4.1 104 型制动机的特点和组成	86
6.4.2 104 型制动机的作用	88
6.4.3 104C 型制动机	96
6.4.4 104 型电空制动机	96
6.4.5 103 型制动机	98
复习思考题	100
第 7 章 铁路机车制动机	102
7.1 自动制动阀对制动管空气压强的间接控制	102
7.1.1 “膜板活塞加双阀口”的中继装置	102
7.1.2 机车电空制动机的控制原理	103
7.2 EUROTROL 型电力机车制动机	103
7.2.1 特点和组成	103
7.2.2 BCU 控制的作用原理	110
7.2.3 备用模块控制的作用原理	113
7.2.4 辅助模式、救援模式和重联模式	114
复习思考题	114
第 8 章 牵引计算的力学模型	115
8.1 牵引计算概述	115
8.1.1 牵引计算的性质和内容	115
8.1.2 牵引计算的用途	115
8.1.3 《列车牵引计算规程》	116
8.2 牵引力	116
8.2.1 牵引力的产生	116
8.2.2 黏着牵引力与空转	117
8.2.3 牵引力的计算	118
8.3 运行阻力	120
8.3.1 基本阻力	120
8.3.2 附加阻力	123

8.3.3 运行阻力的计算	126
8.4 制动力	126
8.4.1 制动力的形成和分析	126
8.4.2 制动力的计算	127
复习思考题	128
第9章 合力曲线、运动方程及时分解算	129
9.1 合力曲线图	129
9.1.1 单位合力曲线图的绘制	129
9.1.2 单位合力曲线图的应用	130
9.2 列车运动方程	131
9.3 列车运行时分解算	133
9.3.1 分析法	133
9.3.2 图解法	139
9.3.3 均衡速度法	139
9.4 线路纵断面化简	140
9.4.1 化简的方法	140
9.4.2 化简坡段加算坡度的计算	140
9.4.3 实例	141
复习思考题	142
第10章 轨道车辆制动问题解算	143
10.1 制动距离及其计算	143
10.1.1 空走时间与空走距离的计算	144
10.1.2 有效制动距离的计算	146
10.2 紧急制动限速和列车必需制动能力的计算	147
10.2.1 紧急制动限速的解算	147
10.2.2 列车必需制动能力的解算	147
10.2.3 各种列车在不同制动条件下的制动限速表	147
复习思考题	155
第11章 牵引质量和牵引定数	156
11.1 牵引质量的计算	156
11.1.1 按限制坡度计算	156
11.1.2 按平直道最高运行速度下的保有加速度计算	157
11.1.3 按起动地段的坡度计算	157

11.1.4 按车站到发线有效长计算·····	158
11.1.5 按小半径曲线“黏降”计算·····	159
11.2 牵引质量的验算·····	159
11.2.1 按“动能闯坡”验算·····	159
11.2.2 按长大下坡道缓解充风时间及制动空定时间验算·····	160
11.2.3 按内燃机车隧道最低限速验算·····	161
11.3 牵引定数的确定·····	161
11.3.1 分析线路纵断面·····	161
11.3.2 绘制吨-公里图·····	163
11.3.3 统一牵引质量的措施·····	163
11.3.4 制定牵引定数的原则·····	164
复习思考题·····	164
第 12 章 轨道车辆牵引电算 ·····	165
12.1 牵引计算算法与模型概述·····	165
12.2 牵引计算的单质点模型·····	165
12.2.1 列车的单质点模型·····	165
12.2.2 牵引策略·····	166
12.2.3 基于最快速牵引策略的牵引计算模型·····	167
12.3 牵引计算的多质点模型·····	170
12.3.1 列车的多质点模型·····	170
12.3.2 基于多质点的牵引计算混合优化模型·····	172
12.4 制动电算软件简介·····	176
12.4.1 紧急制动距离的计算·····	176
12.4.2 列车制动限速表的编制·····	180
复习思考题·····	181
参考文献 ·····	182

绪 论

1. 轨道车辆牵引与制动概述

轨道车辆是一种统称，泛指在专用轨道上运行的各种交通运输工具，包括传统的铁路机车车辆、动车组、城市地铁及轻轨车辆；磁悬浮车辆也属于轨道车辆的范畴。有时为方便起见，往往也将轨道车辆简称为列车。

按动力的配置方式，轨道车辆所采用的牵引方式分为动力集中和动力分散两种。传统铁路列车的牵引动力是集中配置的：有牵引动力装置并只承担牵引任务的称为机车，它与无牵引动力并只载客或装货的客货车辆不是长期固定连挂的，机车与其后的车辆在列车运行之前才连挂在一起组成列车。

动车组是城际和市郊铁路实现小编组、大密度高效运输的工具，以编组灵活、方便、快捷、安全、可靠、舒适为特点，备受世界各国铁路运输和城市轨道交通运输的青睐(现代化的城市轻轨及地铁车辆根据其结构特点，也可归为动车组一类)。动车组中有牵引动力装置的车辆称为动车(用 M 表示)，无动力的称为拖车(用 T 表示)。动车组可以由动车与拖车组成，也可以全部由动车组成，而且长期固定编组运营，运营时不解编；但同型号的动车组可以重联运行。动车组的牵引动力配置有动力集中式或动力分散式两种。动力集中式的动车组有两种模式：一种是两端都为带司机室的动车 Mc，中间为无动力、只载客的拖车 T；另一种是只一端为带司机室的动车 Mc，另一端为带控制的拖车 Tc。动力集中式的典型代表为德国的 ICE1、ICE2 和法国的 TGV。动力分散式的动车组把牵引动力装置分散在列车的不同位置，其动力配置也有两种：一种是完全分散，即动车组中的车辆全部为动车，如日本的 0 系高速列车，16 辆编组中全部是动车；另一种是相对分散，即列车编组中不全是动车，也有一些无动力、只载客的拖车，如日本的 100 系、700 系高速列车(由 12 辆动车、4 辆拖车组成，即所谓的 12 动+4 拖)。

按动力来源的类型，现代轨道车辆所采用的牵引方式分为内燃和电动(蒸汽动力的轨道车辆早已于 20 世纪末停产)。内燃动车组按传动方式有电传动和液力传动两种，电动车组按电流制式有直流和交流两种，当今世界上运营的动车组大多为交流电动车组。2006 年以前，我国自主研发、先后投入运营的内燃动车组和电动车组有：新曙光号(NZJ1 型)、神州号(NZJ2 型)、金轮号、九江号和北亚号液力传动内燃动车组、普天号摆式内燃动车组；春城号、大白鲨号、蓝箭号、先锋号、中原之星号、中华之星号电动车组，多数为动力集中式。2006 年以来，通过引进、消化吸收、逐步国产化的方式，我国已陆续生产 200 km/h、300km/h 以及 380km/h 速度级别的 CRH 系列电动车组。

与牵引配置方式不同的是，在轨道车辆中，不管是具有牵引动力装置的机车(或动车)，还是被牵引的货车、客车(或拖车)，都具有各自的制动装置。但机车(或动车组中的头车)除了像车辆一样具有使它自己制动和缓解的设备外，还具有操纵全列车(包括机车或头车自身，以及其他各车)制动作用的设备。

牵引(或驱动)和制动是列车运行中矛盾而又统一两个方面。从作用力的观点来看：

牵引是将燃料的化学能或电厂提供的电能转变为列车动能,使列车得以起动、运行或加速;制动则反其道而行之,将列车动能从列车转移走,使列车减速或停止。

提高列车的牵引质量和运行速度,保证列车运行安全和尽量节省能耗,是扩大铁路运输能、实现铁路运输现代化和提高铁路经济效益的重要内容。为此,必须研制和装备性能良好的牵引动力和制动装置,必须提高操纵水平,讲究经济操纵。换句话说,既要有牵引和制动两方面的良好“硬件”,也要改进这两方面的“软件”,使好“硬件”能发挥出更好的作用。这就需要既研究列车的牵引计算问题(牵引质量、运行速度和能耗与哪些因素有关;如何跑得更快、拉得更多并且更加节能),也研究制动的问题(如何更好地保证列车运行安全,不使它成为进一步提高牵引质量和运行速度的严重障碍)。

2. 对轨道车辆运行有直接影响的力

由动力学的原理可知,轨道车辆运行中所受外力直接决定了轨道车辆的运动状态(如运行时分、制动距离和牵引质量等)的关系;因此,要了解轨道车辆的运动状态,首先要研究对其运行有直接影响的各种外力,这些外力共有如下三种。

1) 牵引力 F

牵引力 F 指由动力传动装置引起的与轨道车辆运行方向相同的外力,这是司机可以控制的使轨道车辆发生运动或加速的力。

2) 运行阻力 W

运行阻力 W 是轨道车辆运行中由于各种原因自然发生的与轨道车辆运行方向相反的外力,它的大小是司机无法控制的,其作用是阻止轨道车辆发生运动或使轨道车辆自然减速。

3) 制动力 B

制动力 B 是由制动装置引起的与轨道车辆运行方向相反的外力。制动力是人为的阻力,其大小是司机可以控制的,作用是使轨道车辆产生较大的减速度或者在长大下坡道防止轨道车辆超速,以及防止轨道车辆在停放时由于坡度或大风而溜逸。

根据线路情况和运行要求,轨道车辆可以有三种运行工况,每种情况下作用于轨道车辆上的合力由不同的力组合而成。

(1) 牵引运行。

作用于轨道车辆上的力有牵引力 F 和运行阻力 W , 其合力 $C=F-W$ 。

(2) 惰行。

作用于轨道车辆上的力只有运行阻力 W , 故合力 $C=-W$ 。

(3) 制动运行。

作用于轨道车辆上的力有制动力 B 和运行阻力 W , 其合力 $C=-(B+W)$ 。

当合力 $C>0$, 即合力方向与轨道车辆运行方向相同时,它是加速力,轨道车辆将加速运行;当合力 $C<0$, 即合力方向与轨道车辆运行方向相反时,它是减速力,轨道车辆将减速运行;当合力 $C=0$ 时,轨道车辆将匀速运行。

作用于轨道车辆上的合力取决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、轨道车辆情况和运行速度之间的关系。

3. 课程的主要内容

“轨道车辆牵引与制动”课程把牵引计算与制动结合在一起讲授,本书的目的是给读者提供轨道车辆制动技术与牵引计算方面的基本知识,主要内容包括:动车组(含轻轨及地铁

车辆)制动装置的组成和工作原理,包括电制动系统、空气制动系统、防滑装置和制动控制系统;铁路机车车辆制动装置的组成和工作原理;轨道车辆的牵引计算方法,包括牵引计算的力学模型、轨道车辆的运动学方程及运行时分解算、轨道车辆制动问题解算、牵引质量计算和牵引电算;等等。

复习思考题

1. 轨道车辆的牵引有哪些分类方式?每种分类方式下分别具有哪些种类?
2. 与轨道车辆运行直接相关的有哪几种力?它们的定义及在不同工况下的组合如何?

第 1 章 轨道车辆制动概述

1.1 制动的相关概念

1.1.1 基本概念

人为地制止列车运动，包括使其减速、阻止其运动或加速运动，均可称为制动。反之，对已施行制动的列车，解除或减弱其制动作用，均称为缓解。为使列车能施行制动和缓解而安装在列车上的一整套设备，总称为制动装置。

我国铁路广泛使用的空气制动装置从结构上可分为制动机和基础制动装置两个组成部分。制动机是产生制动原动力并进行操纵和控制的部分，包括制动装置中的司机制动控制器、制动缸和分配阀等；基础制动装置是传送制动原动力并产生制动力的部分，如制动装置中的制动夹钳。在轨道车辆所使用的制动装置中，有的已不存在制动机和基础制动装置的区分(如电制动的情形)。

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，它是人为的阻力，比列车运行中由于各种原因自然产生的阻力要大得多。所以，尽管在制动过程中列车运行阻力也起作用，但起主要作用的还是列车制动力。

从列车施行制动作用开始，到其完全停止所驶过的距离称为制动距离。它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。有时也采用制动(平均)减速度作为评价指标，两者的实质是一样的。但制动距离比较具体，制动减速度则较为抽象。两者的关系可用式(1-1)表示：

$$\left(\frac{v \times 1000}{60 \times 60}\right)^2 = 2 \cdot a \cdot S \quad (1-1)$$

$$a = \frac{v^2}{2 \times 3.6^2 \times S} \quad (1-2)$$

或

$$S = \frac{v^2}{2 \times 3.6^2 \times a} \quad (1-3)$$

式中， v 为施行制动时的列车初速度，简称“制动初速”， km/h ； S 为制动距离， m ； a 为列车在制动距离内的平均减速度， m/s^2 。

为确保行车安全，世界各国都要根据本国铁路情况(主要是列车速度、信号和制动技术等)制定出自己的制动距离标准——紧急情况下制动距离的最大允许值，又称计算制动距离。有时也给出减速度标准。我国《铁路技术管理规程》(简称《技规》)原来规定的紧急制动距离为 800m，但随着列车速度的提高，制动距离的标准也要相应加长(否则会使制动过程的减速度过大)。如对于国产 CRH 系列的动车组，当制动初速度为 160km/h 时，规定紧

急制动距离为 1400m；当制动初速度为 200km/h 时，紧急制动距离为 2000m；对于最高速度为 380km/h 的 CRH380 系列的动车组，其紧急制动距离超过 7000m。

1.1.2 制动对轨道车辆的意义

对于轨道车辆来说，制动的重要性不仅仅是安全问题，它还是限制轨道车辆运输现代化目标——“高速重载”的重要因素。即要做到列车速度和牵引质量的进一步提高，除了要有大的牵引功率之外，还必须有足够强的制动能力。因为从能量的角度来看，制动的本质就是要消耗列车具有的动能，设一列列车的质量为 m ，制动初速度为 v ，其制动系统需要承担的是约 $\frac{1}{2}mv^2$ 的能量转移任务；显然， m 和 v 越高，列车制动系统的性能就应越强。而

且，由动能的表达式可看出，速度 v 的提高对列车制动能力提出了尤其高的要求。从运动学的角度也可分析出制动对“高速重载”的重要意义，以提速这一目标为例：图 1-1 表示列车从甲站出发，经起动、匀速运行和制动工况在乙站停车的过程。在一定制动能力的保证下，列车从图中 A 点开始减速进站。若制动能力不足，则必须从 A' 点就开始制动，从而延长了制动距离，影响了行车效率；若想在原有的减速距离内停车，则列车运行的速度在起动阶段只能提升至 A'' 点的水平。列车的制动能量和速度呈平方关系，时速 200~300km 轨道车辆的制动能量是普通列车的 4~9 倍，可见，能力强大的制动装置对于保证轨道车辆的高速、安全运行有着至关重要的意义。

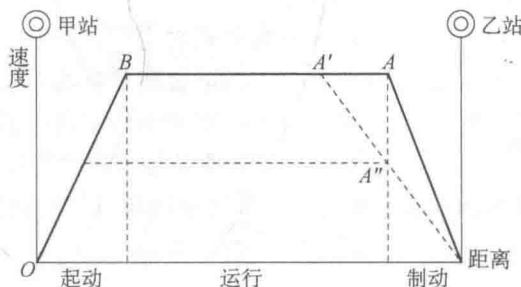


图 1-1 列车制动能力对速度的影响

城市轻轨车辆和地铁车辆虽然运行速度不高（一般不超过 100km/h），但由于其运营线路的站间距短（普遍在 1~2km），因此，其紧急制动距离比铁路列车要短得多，一般在 200m 左右。所以，它们对制动减速度的要求也较高：一般常用制动需 $0.8 \sim 1 \text{ m/s}^2$ ，紧急制动减速度在 $1.2 \sim 3.3 \text{ m/s}^2$ ，其制动能力也较强。

1.1.3 轨道车辆的制动方式

制动方式有多种分类标准，本书主要介绍如下三种。

1. 按动能的转移方式

轨道车辆制动过程中动能的转移方式包含两层含义：一是“转”的方式，即将轨道车辆动能转化为何种其他形式的能量；二是“移”，即如何将转化出的其他形式的能量消耗掉。以闸瓦制动为例，“转”就是将轨道车辆动能通过闸瓦与车轮踏面的摩擦转化为热能，“移”就是将由动能转化出的热能耗散于大气。按动能的转移方式，轨道车辆所采用的制动方式主

要有以下几种。

1) 闸瓦制动

闸瓦制动是在制动时使闸瓦与车轮踏面接触，利用闸瓦与车轮踏面的摩擦，将列车的动能转化为热能，最终散逸在大气中。其制动力的大小可以通过闸瓦与车轮踏面间的压力进行调节。这种制动方式结构比较简单、制动效果较好，在铁路机车车辆上获得了广泛的应用。但闸瓦制动增加了车轮踏面的机械磨耗及热负荷，越来越不适应列车运行速度逐渐提高的要求。

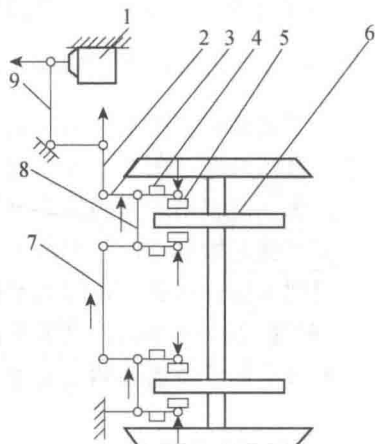


图 1-2 盘形制动装置

- 1-制动缸；2-拉杆；3-水平杠杆；4-缓冲弹簧；
5-制动闸片；6-制动盘；7-中间拉杆；
8-水平杠杆拉杆；9-转臂

2) 盘形制动

盘形制动是在车轴上或车轮辐板侧面安装制动盘，制动时用制动夹钳使两个闸片紧压制动盘侧面，通过摩擦产生制动力，将轨道车辆动能转变成热能耗散于大气，如图 1-2 所示。

与闸瓦制动相比，盘形制动有下列主要优点。

- (1) 可大大减轻车轮踏面的热负荷和机械磨耗；
- (2) 可按制动要求选择最佳摩擦副；
- (3) 制动平稳，几乎没有噪声。

因此，与闸瓦制动相比，盘形制动更适用于高速轨道车辆。



3) 电阻制动

电阻制动曾在具有动力装置的轨道车辆上(如动车组、电力机车和电传动内燃机车)大量应用。它是在制动时将原来驱动轮对的牵引电动机变为发电机，由轮对带动发电，并将电流通往专门设置的电阻器，采用强迫通风使热量耗散于大气，从而产生制动作用。

4) 再生制动

与电阻制动相似，再生制动也是将牵引电动机变为发电机。不同的是，它将电能回馈电网，使本来由电能变成的轨道车辆动能再生为电能，而不是变成热能耗散掉。

显然，再生制动比电阻制动更加经济。因此，20 世纪 90 年代后，再生制动在动车组等轨道车辆上获得了广泛的应用。

5) 磁轨制动

磁轨制动是在转向架两个侧架下面同侧的两个车轮之间各安装一个电磁铁，制动时将它放下并利用电磁吸力紧压钢轨，通过电磁铁上的磨耗板与钢轨之间的滑动摩擦产生制动力，把轨道车辆动能变为热能耗散于大气，如图 1-3 所示。

磁轨制动的制动力不是通过轮轨黏着产生(“黏着”的概念详见本节“2. 按制动力

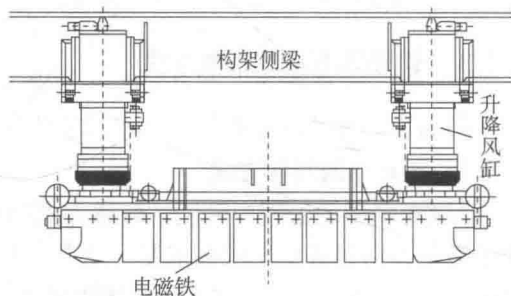


图 1-3 磁轨制动装置

的形成方式”相关内容), 不受轮轨间黏着力的限制, 因而能在黏着力以外再获得一份制动力。磁轨制动与其他制动方式配合, 可共同产生较高的制动力; 在紧急制动时使用, 可满足高速轨道车辆对制动距离的要求。

6) 轨道涡流制动

轨道涡流制动与磁轨制动相似, 也是把电磁铁悬挂在转向架侧架下面同侧的两个车轮之间。不同的是, 电磁铁在制动时只下放到离轨面几毫米处, 而不与钢轨接触。它利用电磁铁和钢轨相对运动产生的洛伦兹力作为制动力。电磁铁和钢轨的相对运动使钢轨感应出涡流, 从能量的角度来看, 轨道涡流制动是将车辆的动能转换为电能, 再转换为热能耗散于大气。

7) 旋转涡流制动

旋转涡流制动是在车轴上装有金属盘, 制动时金属盘在电磁铁形成的磁场中旋转, 盘的表面感应出涡流并产生洛伦兹力, 从而产生制动作用。旋转涡流制动的能量转换过程与轨道涡流制动类似。旋转涡流制动广泛应用于日本新干线 100 系、300 系和 700 系动车组的拖车上。

8) 翼板制动

翼板制动尚处于试验之中, 是一种从车体上伸出翼板来增加空气阻力的制动方式。若翼板的位置适当, 列车运行时的空气阻力可增加 3~4 倍。图 1-4 为日本新干线 900 系试验动车组, 车顶侧面的板状物体即为翼板制动装置。

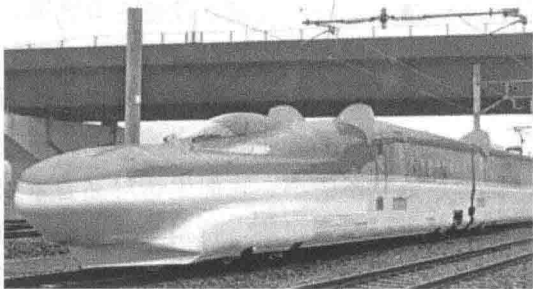


图 1-4 带有翼板制动装置的动车组

2. 按制动力的形成方式

1) 轮轨摩擦与黏着



根据刚体平面运动学的分析, 对于沿钢轨自由滚动的车轮, 车轮和钢轨的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向支持力与静摩擦系数的乘积。

轮轨间的静摩擦是一种难以实现的理想状态。首先, 车轮和钢轨在很大的压力作用下都有变形, 轮轨间是椭圆面接触(从侧面看是线接触而非点接触)。如图 1-5 所示, 由于闸片摩擦力矩的作用, 轮周上位于轮轨接触

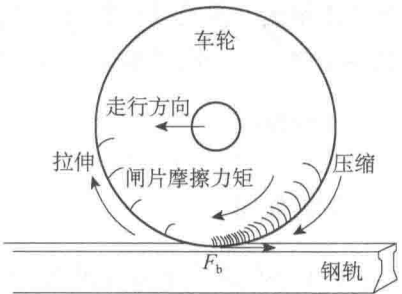


图 1-5 制动时轮轨表面的变形状态