

城市轨道交通职业教育系列教材——城市轨道交通车辆

城市轨道交通车辆 制动技术

主 编 ◎ 史富强

副主编 ◎ 穆玉民 樊永超 袁凯敏

主 审 ◎ 王建堂

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

城市轨道交通车辆制动技术 / 史富强主编. —成都 :
西南交通大学出版社, 2021.2

ISBN 978-7-5643-7984-1

城市轨道交通 - 铁路车辆 -
车辆制动 - 高等职业教育 - 教材 . U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 031737 号

Chengshi Guidao Jiaotong Cheliang Zhidong jishu

城市轨道交通车辆制动技术

主 编 史富强

责任编辑 / 李华宇

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话 : 028-87600564 028-87600533

网址 : <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 : 四川玖艺呈现印刷有限公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 21.75 字数 542 千

版次 2021 年 2 月第 1 版 印次 2021 年 2 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-7984-1

定价 49.80 元

课件咨询电话 : 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话 : 028-87600562

前言

PREFACE

城市轨道交通以其不可替代的优越性正成为我国城市交通发展新的热点和重点。轨道交通系统设备先进、结构复杂，高新技术应用广泛，要保障这样一个庞大系统安全、高效的运行必须依靠与之相匹配的高素质员工。因此，培养一批业务过硬、技艺精湛的能工巧匠，是确保城市轨道交通安全运营的重中之重。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。我们组织编写本书的目的是试图填补这方面的空缺。

本书是全国城市轨道交通职业教育教学指导委员会规划教材，是高等职业教育城市轨道交通专业规划教材。

随着电子技术、计算机技术在城市轨道交通车辆上的普遍应用，城市轨道交通车辆制动技术也得到了很大发展。城市轨道交通车辆制动系统由最初的空气制动系统发展到了电空制动系统，由单车的制动系统发展到了动拖车协调配合的电空制动系统，甚至全列车协调配合的电空制动系统。本书以城市轨道交通车辆为对象，全面介绍了城市轨道交通车辆制动技术的基本概念、基本组成和原理，结合城市轨道交通车辆制动技术的发展对城市轨道交通车辆制动系统的维修进行了介绍，并针对实际案例进行了分析。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，其中详尽地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。

本书分为 8 个项目：城市轨道交通车辆制动基本知识、城市轨道交通

车辆基础制动与供风装置、城市轨道交通车辆电制动与制动控制、EP2002 制动系统、国产城市轨道交通车辆制动系统、HRDA 制动系统、KBGM 和 KBWB 制动系统、SD 型制动机和 EPAC 制动系统等。本书内容全面，涵盖了地铁车辆制动技术的方方面面；内容新颖，由浅入深，先建立框架，再进而深入，内容体现了最新的科技动态和成果；书中附有许多实物图，可增加可读性。本书适用范围广，既可作为高等职业教育和中等职业教育城市轨道交通专业教材，也可作为工程技术人员的参考读物。

本书配套有丰富的数字资源，如微课视频、动画、PPT 课件等。这些资源均可通过扫描书中的二维码或登录“轨道在线”超媒体数字教育平台进行学习。

本书为校企合作开发教材，由陕西交通职业技术学院史富强担任主编；陕西交通职业技术学院王建堂担任主审，西安市轨道交通集团有限公司穆玉民、樊永超和袁凯敏担任副主编，西安交通工程学院李宁宁和巨子琪参与编写与审稿工作。具体编写分工如下：巨子琪编写项目 1 的任务 1、2、3；穆玉民编写项目 1 的任务 4 和 5；李宁宁编写项目 2；樊永超编写项目 4 的任务 1、2、3 和项目 6 的任务 1；袁凯敏编写项目 4 的任务 4 和 5；王建堂编写项目 6 的任务 2；史富强编写项目 3、项目 5、项目 7、项目 8。全书由史富强统稿，王建堂和樊永超审稿。

由于编者水平有限，本书在内容和编排上有疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

2021 年 1 月



扫码获取本书配套数字资源

目录

CONTENT

项目 1	城市轨道交通车辆制动基本知识	001
任务 1	城市轨道交通车辆制动技术的基本认知	001
任务 2	城市轨道交通车辆制动方式和制动机	010
任务 3	城市轨道交通车辆轮轨关系和制动力分析	021
任务 4	城市轨道交通列车制动载荷分析与计算	028
任务 5	制动时电动车组的减速度	033
项目小结	041
思考与练习	041
项目 2	城市轨道交通车辆基础制动与供风装置	042
任务 1	城市轨道交通车辆基础制动装置概述	042
任务 2	PC7Y (F) 型单元式制动器结构与原理分析	049
任务 3	KLX-7 型踏面单元式制动机结构与原理分析	058
任务 4	闸 瓦	074
任务 5	盘形制动装置	079
任务 6	供风装置	088
任务 7	空气压缩机	096
任务 8	压缩空气处理单元	106
任务 9	风源系统辅助设备	115
项目小结	127
思考与练习	127
项目 3	城市轨道交通车辆电制动与制动控制	128
任务 1	电制动基本原理	128
任务 2	电阻制动和再生制动	133
任务 3	制动控制系统的组成	137

任务 4	城轨车辆制动控制技术	151
任务 5	城市轨道交通车辆防滑控制	156
任务 6	防滑控制的机理与判断标准的探讨	160
任务 7	防滑系统的组成及工作原理	165
项目小结		175
思考与练习		175
项目 4	EP2002 制动系统	176
任务 1	EP2002 制动系统概述及系统组成	176
任务 2	EP2002 制动系统核心部件	183
任务 3	制动系统 EP200 的网络结构	190
任务 4	EP2002 制动系统的作用原理	193
任务 5	EP2002 制动系统的特点和故障管理	197
项目小结		201
思考与练习		201
项目 5	国产城市轨道交通车辆制动系统	202
任务 1	车控式制动系统	202
任务 2	架控式制动系统	214
项目小结		223
思考与练习		223
项目 6	HRDA 制动系统	224
任务 1	HRDA 制动系统组成	225
任务 2	HRDA 制动系统作用原理	236
项目小结		240
思考与练习		240
项目 7	KBGM 和 KBWB 制动系统	241
任务 1	KBGW 制动系统基础知识	241
任务 2	KBGM 制动控制单元	248
任务 3	KBGM 空气制动系统和防滑作用原理	256
任务 4	KBWB 模拟式电气制动系统认知	264
任务 5	KBWB 制动控制系统的组成与作用	268
任务 6	KBWB 制动系统的组成和控制过程的学习	276

项目小结	282
思考与练习	282
项目 8 SD 型制动机和 EPAC 型制动系统	283
任务 1 SD 型制动机的组成、基本原理和特点	283
任务 2 SD 型制动机的构造和作用原理	288
任务 3 SD 型电空制动机工作过程分析	302
任务 4 EPAC 制动系统概述及系统组成	307
任务 5 EPAC 制动系统制动原理	312
任务 6 EPAC2 制动控制原理	321
任务 7 EPAC 制动模块综合学习	330
项目小结	337
思考与练习	337
参考文献	338



项目 1

城市轨道交通车辆制动基本知识

项目描述

制动装置是轨道交通车辆中非常重要且必不可缺的组成部分。本项目简要介绍轨道交通车辆制动的基本概念及其在城市轨道交通（简称“城轨”）运输业中的重要意义。本项目重点内容是城市轨道交通车辆的制动方式和制动模式、各种制动机以及城市轨道交通车辆制动装置产生的制动原动力的机理分析与计算；城轨列车运行时阻力的分析与计算；制动空气波、制动波的分析与计算、制动距离计算等。这些都是城市轨道交通车辆制动技术重要的基础理论和计算基础，只有更好地掌握这些基本知识，才能在实践中充分发挥城轨车辆制动系统的效能，更好地让城轨车辆为广大乘客服务。

学习目标

通过本项目的学习要求掌握以下基本知识 with 基本理论：

1. 掌握城轨制动技术相关基本概念；
2. 熟悉城市轨道交通车辆制动系统的基本功能和组成；
3. 掌握制动力的基本概念、分析与计算；
4. 掌握城轨列车载荷的分类和组成及制动距离的计算。

能力目标

1. 能叙述制动、缓解、制动装置等重要基本概念；
2. 能分析城市轨道交通车辆制动系统的组成；
3. 掌握制动力的基本概念；
4. 掌握载荷的组成。

任务 1 城市轨道交通车辆制动技术的基本认知

【活动场景】

在城市轨道交通车辆检修基地、城轨制动模型室或具有多媒体技术能展示城轨车辆制动作用的教室或现场进行教学。

【任务要求】

1. 了解城市轨道交通车辆制动的基本知识；
2. 了解城市轨道交通车辆制动装置的基本作用、基本结构与基本特点等；
3. 掌握城市轨道交通车辆制动系统的基本特点和基本要求；
4. 掌握城市轨道交通车辆制动系统的组成；
5. 熟知城轨车辆制动系统的简单发展历程和主流制动系统的特点。

【知识准备】

城市轨道交通车辆启动及以一定速度运行，需要对其施加牵引力来完成；同样，为了使运行的城市轨道交通车辆能够迅速地减速、停车或保持一定的速度匀速运行，也必须对其施加制动力的作用。牵引和制动是列车运行的两种工况，缺一不可。如果一列车突然失去制动功能，乘客的生命财产将受到严重威胁。因此，从某种意义上来说，制动系统直接影响着列车的安全运行。所以，城市轨道交通车辆的制动装置是城市轨道交通车辆重要的组成部分，决定着城市轨道交通车辆重要的性能。

一、基本概念

1. 制 动

人为地施加外力，使城市轨道交通车辆、铁路机车车辆等运动的交通工具减速或阻止其加速，以及保持静止的状态不变的作用，称为制动。制动效能的大小和制动施加的时机由人为掌控，对于城市轨道交通车辆来说，为了使运行中的城轨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，还需要对它施加制动（停放制动）。

2. 缓 解

与制动作用相反，解除或减弱城市轨道交通车辆、铁道机车车辆等制动作用的过程称为缓解。对已经施行了制动作用的列车，为了使列车重新启动或再次加速，必须解除或减弱其制动作用。

3. 制动距离

从城轨列车司机施加制动命令开始，到列车达到制动目的为止，列车所走过的距离称为制动距离。制动距离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；对制动效能的衡量，有一些国家不用制动距离而用（平均）减速度作为技术指标来进行衡量，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。

4. 制动装置与制动系统

1) 制动装置

能施行制动或缓解制动作用而安装在轨道交通车辆上的，由一整套零部件组成的完整的、主要由机械装置组成的装备，总称为“制动装置”。在传统的铁路上，它分为“机车制动装置”和“车辆（客车、货车）制动装置”。城市轨道交通车辆与传统铁路机车车辆的编组形式不同，

与动车组列车十分相似，也采用动力分散型的动车组形式，因此可分为“动车制动装置”和“拖车制动装置”。在城市轨道交通车辆中一般都设置操纵全列车制动功能的设备，一般情况下安装在列车两端带司机室的头车上，而头车既可以是动车也可以是拖车，因此城轨列车的制动装置可理解为装于列车上能够实现列车制动和缓解作用的装置。城轨列车的制动装置分为动车制动装置和拖车制动装置两种类型，各型车一般都有基础制动的装置，但动车和拖车制动控制单元有一定的区别。

2) 制动系统

一般情况下，城市轨道交通车辆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输出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，包括闸瓦制动和盘式制动等不同方式。在传统意义上，列车上安装的制动装置比较简单、直观，采用压缩空气传递信号，因此我们称其为列车制动装置。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，我们只能按现代化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，统称为轨道交通车辆制动系统。

由此可见，对城市轨道交通车辆来讲称之为制动系统比制动装置要更准确些。

5. 制动力

使运动的城轨列车、铁路机车车辆等减速或阻止其加速的力，称为制动力。而产生这个制动力的一套装置称为制动机。因此，也可以这样说，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）。

6. 制动能力

城市轨道交通车辆在设计 and 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。

列车的制动能力是指该列车的制动系统能使其在规定的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，在任何运行速度下，其紧急制动距离不得超过 180 m。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。

二、城市轨道交通车辆制动系统的组成

城轨车辆为了能施行制动或缓解制动，需要在列车上安装一整套完整可操纵并能进行控制和执行的系统，总称为列车制动系统。在普通铁路机车车辆上，它通常分成机车制动系统和车辆制动系统。城市轨道交通车辆与铁路车辆的编组形式不同，一般情况下由动车和拖车

组成，因此也可按其编组形式的不同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，各种车辆都有它自己的一套完整的制动装置，在列车运行过程中起着制动和缓解的作用。操纵全列车制动功能的设备一般安装在机车或列车两端带司机室的头车上。

现代城市轨道交通车辆的制动系统一般由动力制动系统、空气制动系统、制动指令和通信网络等三个部分组成。

1. 动力制动系统

早期的城市轨道交通车辆的牵引传动系统普遍采用直流旋转电机，并且由变阻控制发展到斩波调压控制，目前变阻控制只是在一些早期城市轨道交通车辆上少量使用，这种制动技术虽然结构简单，但由于列车频繁启动和制动，致使 20% 多的电能消耗在制动电阻上，而且制动效果差、对环境和列车电器设备影响大，因此处于逐步淘汰阶段。

目前地铁列车都采用先进的三相异步电机交流变频传动方案，使用逆变器将直流电转换成交流电，通过控制输入电机的电压和频率来控制交流电机的转速，在交流传动系统常见的逆变器-电机控制方案有两种：第一种是车控方式，即 1 台逆变器控制一节车上的 4 台电机；第二种是架控方式，即 1 台逆变器控制一个转向架上的 2 台电机。西安地铁 2 号线地铁列车逆变器-电机控制采用车控方式，广州地铁 3、4 号线地铁列车逆变器-电机控制采用架控方式。两种控制方式各有自己的优缺点，具体如下：

(1) 采用架控方式比车控方式更能充分利用轮轨之间的黏着系数，更有利于列车牵引力/制动力的发挥。

(2) 采用架控方式可以使逆变器的容量、体积减小，需要从散热器上移走的热量减少，这使得散热的处理更加容易。

(3) 对于西安地铁 2 号线三动三拖六辆编组的列车来说，如果列车上 1 台逆变器发生故障，被切除运行，如果采用车控方式，列车的牵引动力将损失 1/3，而如果采用架控方式，列车的牵引动力只损失 1/6。由此可见，采用架控方式列车故障时的运行能力优于车控方式。

(4) 采用架控方式将增加列车成本。它一般与牵引系统连在一起形成主电路，包括再生制动电路和制动电阻器，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

空气制动系统由供气部分、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；控制部分有模拟（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或盘式制动装置等。

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。

三、城市轨道交通车辆制动系统的特点与要求

城市轨道交通越来越为广大市民所接受，现已成为广大都市居民出行的首选方式。城市轨道交通系统的一般特点是安全、快捷、准时、方便。

1. 城市轨道交通系统的运营特点

(1) 有较大的运输能力。

城市轨道交通由于高密度运转，列车行车时间间隔短，行车速度快，列车编组辆数多，而具有较大的运输能力，单向高峰每小时的运输能力市郊铁道最大可达到 6 万~8 万人次，地铁达到 4 万~6 万人次，轻轨 1 万~4 万人次，有轨电车能达到 1 万人次，城市轨道交通的运输能力远远超过公共汽车。据文献统计，地下铁道每千米线路客运强度可达 100 万人次以上，最高达到 1 200 万人次，如莫斯科地铁、东京地铁、北京地铁等。城市轨道交通能在短时间内输送较大的客流，据统计，地铁在高峰时 1 h 能通过全日客流的 17%~20%，3 h 能通过全日客流的 31%。

(2) 城市轨道交通具有较高的准时性。

城市轨道交通由于在专用行车道上运行，不受其他交通工具干扰，不产生线路堵塞现象，并且不受气候影响，是全天候的交通工具，列车能按运行图运行，具有可信赖的准时性。

(3) 城市轨道交通具有较高的速达性。

与常规公共交通相比，城市轨道交通由于运行在专用行车道上、不受其他交通工具干扰，车辆具有较高的运行速度，有较高的启、制动加速度，多数采用高站台，列车停站时间短，上下车迅速方便，而且换乘方便，从而使乘客较快地到达目的地，缩短了出行时间。

(4) 城市轨道交通具有较高的舒适性。

与常规公共交通相比，城市轨道交通由于运行在不受其他交通工具干扰的线路上，城市轨道交通车辆具有较好的运行特性，车辆、车站等装有空调、引导装置、自动售票等直接为乘客服务的设备，城市轨道交通车辆具有较好的乘车条件，其舒适性优于公共电、汽车。

(5) 城市轨道交通具有较高的安全性。

城市轨道交通由于运行在专用行车道上，没有平交道口，不受其他交通工具干扰，并且有先进的通信信号设备，极少发生交通事故。

(6) 城市轨道交通能充分利用地下和地上空间。

大城市地面拥挤、土地费用昂贵。城市轨道交通由于充分利用了地下和地上空间的开发，不占用地面街道，能有效缓解由于汽车大量发展而造成道路拥挤、堵塞，有利于城市空间合理利用，特别有利于缓解大城市中心区过于拥挤的状态，提高了土地利用价值，并能改善城市景观。

(7) 城市轨道交通的系统运营费用较低。

城市轨道交通由于主要采用电气牵引，而且轮轨摩擦阻力较小，与公共电、汽车相比节省能源，运营费用较低。

(8) 城市轨道交通对环境低污染。

城市轨道交通由于采用电气牵引，与公共电、汽车相比，不产生排气污染。由于城市轨道交通的发展，还能减少公共汽车的数量，进一步减少了汽车的排气污染。由于在线路和车

辆上采用了各种降噪措施，一般不会对城市环境产生严重的噪声污染。

2. 城轨列车制动的基本要求

通过以上特点的分析，城市轨道交通车辆的制动系统应具有以下基本要求：

- (1) 操纵灵活，制动减速度大，作用灵敏可靠，车组前后车辆制动、缓解作用一致。
- (2) 制动系统应该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。
- (3) 对新型的城市轨道交通车辆，一般要求具有电（动力）制动功能，并且在正常制动过程中，应尽量充分发挥电制动能力，以减少对城市环境的污染和降低运行成本。同时还应具有电制动与摩擦制动协调配合的制动功能。
- (4) 制动系统应保证列车在长大下坡道上制动时，其制动力不会衰减。
- (5) 电动车组各车辆的制动能力应尽可能一致，制动系统应根据乘客量的变化，具有空重车调整能力，以减少制动时的纵向冲动。
- (6) 具有紧急制动能力。遇有紧急情况时，能使城轨列车在规定距离内安全停车。紧急制动作用除可由司机操纵外，必要时还可以由行车人员利用紧急按钮进行操纵。
- (7) 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上运行，也应具有足够的制动力保证列车可靠制动和停车。
- (8) 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。

四、城轨车辆制动技术的发展简介

1. 早期的制动方式

自 1881 年德国柏林有了世界上第一辆有轨电车后，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。

最早的有轨电车是人工制动的。司机绞动制动钢丝，使木制的闸瓦靠紧车轮踏面，用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，为了让车辆以一定速度安全运行，必须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重点，有时甚至比电气牵引上的发明更为引人注目。

地铁在 20 世纪初欧美地区的城市中得到迅速发展。由于地铁车辆是沿用的铁路车辆，任何火车制动新技术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。

2. 现代的制动系统

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的进步,但由于司机发出的制动指令是靠列车制动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 330 m/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变革,因为电信号的传输速度要比空气波速快得多。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。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,简称电空制动机。电磁空气制动机在每节车辆上都设有制动、缓解电磁阀,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较好,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空制动机的同时,还应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,由于电力电子变流技术和计算机技术的发展,使电气指令式制动控制系统不断改进和发展。大功率电力电子元件的出现使电气再生制动成为可能,计算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。

目前我国城轨车辆主要选用国外进口的制动系统,主要包括日本 Nabco 制动系统、德国 Knorr 制动系统、英国 Westinghouse 制动系统和 Sabwabco (Faiveley) 制动系统。以上均属于当今主型的模拟式直通电空制动系统,具有反应快速、操纵灵活,以及与牵引、TMS (列车管理系统)和 ATC (列车自动控制系统)等系统协调配合等特点。由于不同制动系统的风源和基础制动单元差别不大,下面主要对这些制动系统的控制系统或单元进行介绍。

1) 德国 Knorr 公司的城市轨道交通车辆制动系统

以上海和广州地铁 1、2 号线为代表的德国 Knorr 公司的城市轨道交通车辆制动系统,是目前国内 A 型车上运用最广的制动系统。该系统为模拟式制动系统,制动指令采用 PWM 信号或网络信号,它们被传递到每个车辆的微机制动控制单元。微机制动控制单元一般单独设置在车厢内。而气制动控制单元由 2 块气动集成板和风缸等组成,分别固定在车辆底架下,系统结构紧凑。目前深圳、南京地铁车辆和大连轻轨车辆,甚至部分国内试制的高速电动车组上也采用了该制动系统。

传统的集中式制动控制系统是以每辆车为单位设置单个制动控制单元的制动控制方式(俗称车控式),主要由微处理制动控制与车轮滑行控制电子单元 KBGM-P 以及制动控制单元

BCU 组成。分散式制动控制是以每个转向架为单位设置单个制动控制单元的制动控制方式(俗称架控式),是一种更为灵活的控制系统。EP2002 系统引入分散式制动控制概念,将制动控制和制动管理电子设备以及常用制动(SB)气动阀、紧急(EB)制动阀和车轮防滑保护装置(WSP)气动阀等多个模块集成到一个阀体中,分别组成智能阀或网关阀,并安装在其所控制的转向架上(每个转向架 1 个阀门)。组合后的智能阀、网关阀通过 1 根专用的 CAN 控制总线连接在一起构成 EP2002 制动控制系统。目前国内项目中均采用半分散式制动控制,即集中供风、分散式制动的控制方式。

EP2002 阀对各自转向架的载荷称重,并通过本地的制动控制单元、CAN 总线将数据传输至网关阀,网关阀的制动管理单元根据列车控制数据和转向架载荷信号产生本节车的空气制动力指令。上述过程已考虑到了每个转向架的黏着限制情况。为保证电空制动万无一失,每个本地制动控制单元同时通过 EP 阀和气阀单元内的传感器反馈信号进行闭环空气制动控制。

每根车轴(转向架对角线布置)端部上都安装了一个速度传感器,用于监测轴速,此信息在 CAN 总线网络内的 EP2002 阀之间共享。一旦 EP2002 阀检测到某个转向架车轮出现打滑,它将控制该转向架 EP2002 阀内所处车轴的排气电磁阀释放制动缸的压力来纠正滑动车轴的转速,并以一定的时间间隔测试地面速度,不断更新计算出来的实际列车速度,以便系统能进行速度比较,准确地控制蠕滑的深度,以改进车轮的黏着力,调整制动力最大化而不使车轮造成损伤。为确保制动延长期内不出现缓解,监视定时器电路在持续保持超过 8 s 和持续排气 4 s 后检测排气电磁阀的状态。每个车轴的轴端速度检测是独立于其他车轴的,而且车轴之间的补偿也不会影响其精确性。

一旦列车出现紧急输入的情况,紧急制动功能(EB)通过列车控制系统控制每个 EP2002 阀中的紧急制动电磁阀失电来触发,并同时切断各转向架上的常用制动回路。紧急制动功能独立地按各自转向架不同载荷调节各转向架的制动缸压力。如某一转向架的空气弹簧失效或载荷压力信号出现故障,系统将默认为该转向架的载荷量为初设状态,初设状态在 $AW_0 \sim AW_3$ 之间可调,一般设置为 AW_3 (超员载荷)。紧急制动压力调节功能始终处于有效状态,当发出紧急制动指令时,控制常用制动输出的伺服电磁阀被实施了物理隔离,使防滑阀处于车轮防滑保护控制状态下,仅允许经过载荷补偿的紧急制动压力空气进入制动缸中。

2) Nabtesco 公司 HRDA 型制动系统

以北京、天津地铁为代表的 B 型车上采用较多的 Nabtesco 公司 HRDA 型制动系统,为数字式制动系统。即常用制动指令采用 3 根指令线编码,共 7 级。微机制动控制单元与气制动控制单元集成在一起,固定于车辆底架下面。由于采用了流量比例阀进行 EP 控制,气制动控制单元较为简单。该制动系统批量采购价相对较低。在武汉轻轨和重庆独轮轨等项目上也采用了此制动系统。基础制动根据车辆的不同有所区别。

3) Westinghouse 公司的微机控制直通电空制动系统

以上海地铁 3、5 号线为代表的原英国 Westinghouse 公司(现已被 knorr 公司收购)的微机控制直通电空制动系统,按整车模块化原则设计,其集成度较高。它将微机制动控制单元、气制动控制单元、风缸、风源等除必须安置在转向架附近的部件外全在一个安装架上集成安装,方便运用维护。该系统同样采用 PWM 信号传递制动指令,为模拟式制动系统。EP 转换

采用 4 个开关电磁阀闭环控制的方法。

近几年，中国铁道科学研究院集团有限公司（以下简称“铁科院”）在城市轨道车辆制动系统国产化方面取得了长足进步，其独立研发的制动系统已在重庆轨道交通 6 号线、北京地铁 15 号线、沈阳地铁 2 号线等项目中得到应用。相比较于采用车控控制方式的 HRA 制动系统和采用架控控制方式的 EP2002 制动系统，铁科院的制动系统设计得较为灵活，可以根据用户的需要进行系统的设计，即可设计为采用车控控制方式的制动系统，也可设计为采用架控控制方式的制动系统。

【任务实施】

本次任务的实施以城市轨道交通车辆制动技术的基本概念的掌握和理解为目的，可组织学生对相关的基本概念进行详细分析与讲述，并组织学生展开对城轨列车制动技术的讨论，还可组织学生到城市轨道交通车辆的检修与运行现场对制动装置进行观察而进一步理解制动的相关概念。

【效果评价】

评价表

项目名称	项目 1 城市轨道交通车辆制动基本知识	学生姓名	
任务名称	任务 1 城市轨道交通车辆制动技术的基本认知	分数	
项 目			
		分值	考核得分
1. 制动基本概念的理解及掌握		20	
2. 轨道交通车辆制动系统构成的认知情况		30	
3. 轨道交通车辆制动系统特点的认知情况		20	
4. 轨道交通车辆制动技术发展的认知情况		15	
5. 基本素养考核情况		5	
6. 是否有小组计划		5	
7. 编制学习汇报报告情况		5	
总体得分			
教师简要评语：			
教师签名：			

任务2 城市轨道交通车辆制动方式和制动机

【活动场景】

在城市轨道交通车辆制动系统检修基地或在城轨制动模型室或具有多媒体技术能展示城轨车辆制动作用的教室或现场进行教学。

【任务要求】

1. 掌握城轨车辆制动模式和制动方式；
2. 掌握城轨车辆制动模式和制动方式之间的关系。

【知识准备】

一、城轨车辆制动模式

城市轨道交通车辆的制动模式，按操纵和用途可分为五种：常用制动、紧急制动、快速制动、保压制动和停放制动等。

1. 常用制动

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。常用制动的特点是：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%作用。在常用制动模式下，电制动和空气（摩擦）制动一般都处于激活状态。一般情况下[车载AW₂以下，速度在8 km/h（可调）以上]，电制动能满足车辆制动的要求；当电制动不能满足制动要求时，气制动能够迅速、平滑地补充，实现混合制动。

2. 紧急制动

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。车辆设计有一个“失电制动，得电缓解”的紧急空气制动系统，贯穿整个列车的DC 110 V连续电源线，控制该制动系统，线路一旦断开（如接触网停电），所有车辆立即实施紧急制动，以确保列车安全。

紧急制动不经过EBCU的控制，直接使用BCU的紧急电磁失电而实现。它具有以下特点：

- (1) 电制动不起作用，仅空气制动；
- (2) 高速断路器断开，受电弓降下（有的情况不降）；
- (3) 不受冲击率的限制，在1.7 s内即可达到最大制动力的90%；
- (4) 紧急制动实施后是不能撤除的，列车必须减速，直到完全停下来（零速封锁）；
- (5) 有防滑保护和载荷修正功能。

3. 快速制动

快速制动与紧急制动作用方式基本上一致，与紧急制动的最大区别是：紧急制动是不可自动恢复的，必须停车后人工恢复，而快速制动在制动过程中可以人工解除后自动恢复到正

常状态。当主控制器手柄移到“快速制动”位时，列车将实施减速度与紧急制动相同的快速制动。快速制动具有以下特点：

- (1) 采用电空混合制动（有的轨道交通车辆电制动不起作用，只有空气制动）；
- (2) 受冲击率的限制；
- (3) 主控制气手柄回“0”位，可缓解；
- (4) 具有防滑保护和载荷校正功能。

4. 保压制动

保压制动是为防止列车在停车前的冲动，使列车平稳停车，通过 EBCU 内部设定的执行程序来控制。它分为两个阶段实施：

第一阶段：当列车制动到速度小于 8 km/h（可调），DCU 触发保压信号，同时输出给 EBCU，这时由 DCU 控制的电制动逐步退出，由 EBCU 控制的气制动代替。

第二阶段：接近停车（列车速度小于 0.5 km/h）时，一个小于制动指令的保压制动由 EBCU 开始制动实施，即瞬时地将制动缸压力降低。

如果由于故障，EBCU 未接收到保压制动触发信号，EBCU 内部程序将在 8 km/h 的速度时自行触发。

5. 弹簧停放制动

车辆断电停放时，制动缸保压力会因管路泄漏，在无压力空气补充的情况下，逐步下降到零，使车辆失去制动力。在正常情况下，弹簧力的大小不随时间变化而变化，由此获得的制动力能满足列车较长时间断电停放的要求。弹簧停放制动缸充气时，停放制动缓解；弹簧停放制动缸排气时，停放制动产生。弹簧停放制动还附加有手动缓解的功能。

二、制动方式

制动方式指的是制动时城轨列车动能的转移方式或制动力的获取方式。从能量的角度来看，制动的实质就是将列车上运行的动能转移出去。制动系统转移动能的能力就是制动功率。在一定的制动距离的条件下，列车的制动功率是其速度的三次函数。从能量的角度理解，制动过程就是一个能量的转移过程，是将城轨列车运行所具有的动能人为地转换为其他形式能量的过程，因此城轨列车的制动过程必须具备以下两个基本条件：实现能量的转换；控制能量的转换。

1. 按城轨列车动能转移方式分类

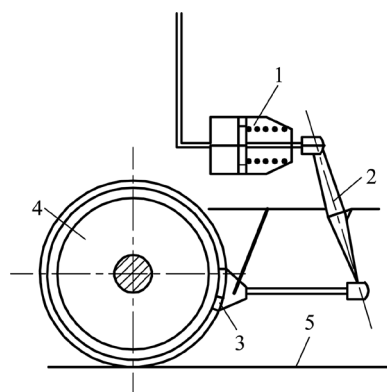
列车动能的转移方式可以分为两类：一是摩擦制动方式，即动能通过摩擦副的摩擦转变为热能，然后消散于大气；二是电（动力）制动方式，即把动能通过发电机转化为电能，然后将电能从车上转移出去。

1) 摩擦制动

列车的动能通过摩擦转变为热能。城市轨道交通车辆常用的摩擦方式有闸瓦制动和盘形制动等；编组比较长、速度比较高的城市轨道交通车辆制动系统中还有轨道电磁制动方式等其他一些非黏着制动方式。

- (1) 闸瓦制动：又称为踏面制动。图 1.1 所示为闸瓦制动示意图，它是最常用的一种制

动方式，制动时闸瓦压紧车轮，轮、瓦间发生摩擦，电动车组的动能大部分通过轮、瓦间的摩擦变成热能，经车轮与闸瓦逸散。在闸瓦与车轮这一对摩擦副中，车轮由于主要承担着车辆走行功能，其材料是不能随意改变的。要改善闸瓦的制动性能，只能通过改变闸瓦材料的方式。早先的闸瓦材料主要是铸铁。为了改善摩擦性能和增加耐磨性，目前城轨交通车辆中大多采用合成闸瓦。但合成闸瓦的导热性较差，因此目前也有采用导热性能较好且具有较好的摩擦性能和耐磨性的半金属闸瓦或粉末冶金闸瓦。

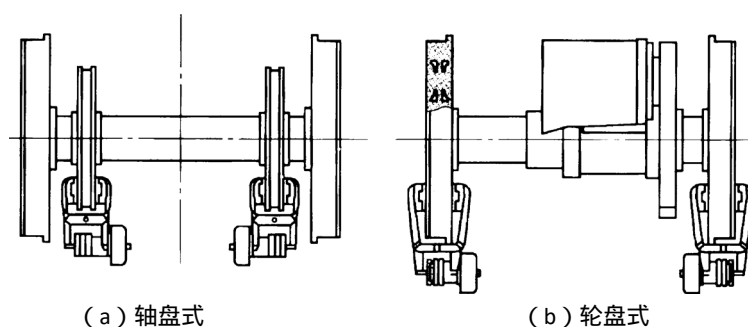


1—制动缸；2—基础制动装置；3—闸瓦；4—车轮；5—钢轨。

图 1.1 闸瓦制动示意图

在闸瓦制动方式中的停车制动时，列车的动能在很短时间内均转化为热能，但其散热能力相对较小。当要求的制动功率较大时，有可能造成发生的热能来不及散于大气，而在闸瓦与车轮踏面积聚，使它的温度升高，严重的甚至会导致闸瓦（铸铁闸瓦）熔化或车轮踏面产生裂纹等。因此，在采用闸瓦制动时，制动功率不易过大。

(2) 盘形制动：盘形制动装置如图 1.2 所示，它有轴盘式和轮盘式之分。一般拖车采用轴盘式盘形制动装置。对于动车，由于轮对中间设有牵引电机等设备使制动设备安装较困难，一般采用轮盘式盘形制动装置。制动时，制动缸通过制动夹钳使闸片夹紧制动盘，在闸片与制动盘间产生摩擦，把电动车组的动能转变为热能，热能通过制动盘和闸片散于大气。因盘形制动能双向选择摩擦副，所以可以得到比闸瓦制动大得多的制动功率。

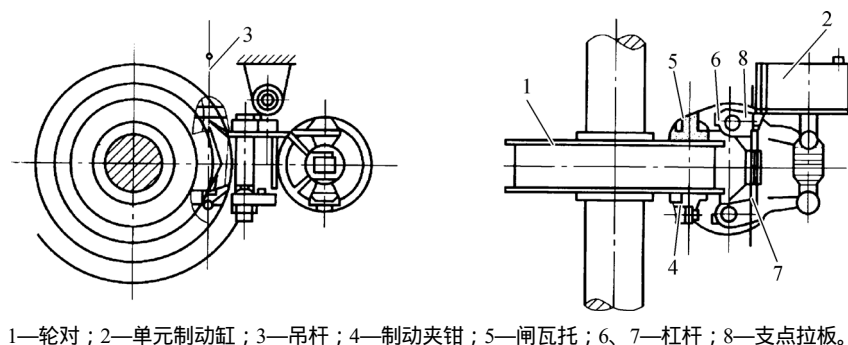


(a) 轴盘式

(b) 轮盘式

图 1.2 盘形制动的形式

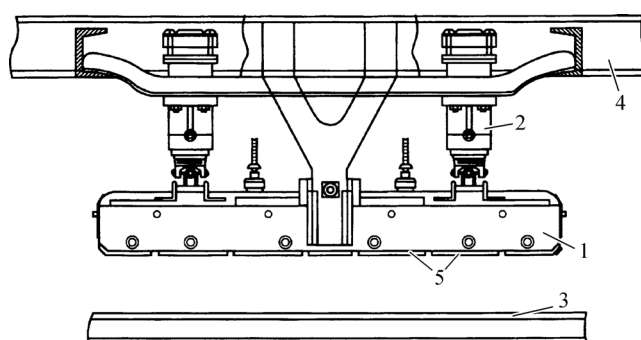
盘形制动装置的结构由单元制动缸、夹钳装置、闸片和制动盘组成，如图 1.3 所示，其中，单元制动缸中包含闸调器，夹钳装置由吊杆、闸瓦托、杠杆和支点拉板组成。夹钳的悬挂方式为制动缸浮动二点悬挂，即两闸瓦托的吊杆为两悬挂点，另一悬挂点是支点拉板。



1—轮对；2—单元制动缸；3—吊杆；4—制动夹钳；5—闸瓦托；6、7—杠杆；8—支点拉板。

图 1.3 盘形制动的结构

(3) 轨道电磁制动：轨道电磁制动也叫磁轨制动，如图 1.4 所示。在转向架侧梁 4 下通过升降风缸 2 安装有电磁铁 1，电磁铁下设有磨耗板，制动时将电磁铁放下，使磨耗板与钢轨吸住，电动车组的动能通过磨耗板与钢轨的摩擦转化为热能，然后经钢轨和磨耗板最终散于大气。轨道电磁制动能得到较大的制动力，因此常被城轨车辆用作紧急制动的一种补充制动手段。



1—电磁铁；2—升缸风缸；3—钢轨；4—转向架结构侧梁；5—磨耗板。

图 1.4 轨道电磁制动

2) 电（动力）制动

电（动力）制动是在制动时，将牵引电机变为发电机，使列车动能转化为电能。对这些电能的不同处理方式形成了不同方式的电制动。城市轨道交通车辆上采用的电制动形式主要有电阻制动和再生制动。

(1) 电阻制动：将发电机发出的电能送到电阻器中，使电阻器发热，即将电能转变为热能。电阻器上的热能靠风扇强迫通风或走行风而散于大气中。电阻制动一般能提供较稳定的制动力，但车辆底架下需要安装体积较大的电阻箱。

(2) 再生制动：在以上的各种制动方式中，列车具有的动能最终都转化为热能而消散于大气中。再生制动是把列车的动能通过电机转化为电能后，再使电能反馈回电网供给其他列车使用。显然这种方式既能节约能源，又减少制动时对环境的污染，并且基本上无磨损。因此，它是一种较为理想的制动方式。

2. 按制动力的获取方式分类

按列车制动力的获取方式分类，可分为黏着制动与非黏着制动。

1) 黏着制动

制动时，车轮与钢轨之间有 3 种可能的状态。 纯滚动状态：车轮与钢轨的接触点无相对滑动，车轮在钢轨上做纯滚动。这时车轮与钢轨之间为静摩擦，车轮与钢轨之间可能实现的最大制动力是轮轨之间的最大静摩擦力。这是一种难以实现的理想状态。 滑行状态：车轮在钢轨上滑行，这时车轮与钢轨之间的制动力为二者的滑动摩擦力。这是一种必须避免的状态，由于动摩擦系数远小于静摩擦系数，一旦发生这种工况，制动力将大大减小，制动距离延长；同时车轮在钢轨上长距离滑行，将导致车轮踏面的擦伤，危及行车安全。 黏着状态：由于车辆重力的作用，车辆与钢轨的接触处为一椭圆形的接触面。制动时车轮在钢轨上处于连滚带滑（基本上是滚动）的状态。这种状态称为黏着状态。黏着状态下，车轮与钢轨间的最大水平作用力称为黏着力。黏着力与轮轨间垂直载荷的比值，称为黏着系数。依靠黏着滚动的车轮与钢轨黏着点之间的黏着力来实现车辆的制动称为黏着制动。黏着制动时，为了能得到较大的制动力，需要具有较高的黏着系数。然而黏着系数受电动车组运行速度、气候条件、轮轨表面状态以及是否采取增黏措施等诸多因素的影响，是一个离散性很大的参数。

2) 非黏着制动

制动时，制动力大小不受黏着力限制的制动方式称为非黏着制动。即非黏着制动的制动力不从轮轨之间获取，因而它可以得到较大的制动力。

显然，在上述介绍的制动方式中，闸瓦制动、踏面制动、电阻制动和再生制动均属于黏着制动；而磁轨制动则属于非黏着制动。

3. 按制动原动力分类

在目前电动车组所采用的制动方式中，制动的原动力主要有压缩空气和电。以压缩空气为原动力的制动方式称为空气制动方式。如闸瓦制动、盘形制动等大都为空气制动方式。以电为原动力的制动方式称为电气制动方式。电制动、轨道电磁制动等均为电气制动方式。

通过前面的学习，我们知道城轨车辆制动的方式一般有再生制动、电阻制动和空气摩擦制动三种，分别为城轨车辆施行制动时第一、第二和第三优先级制动，并且还采取了程序制动的措施，其含义是：充分利用电制动、尽量减少空气制动，即在制动力未达到其指令的 75% 时，同时在黏着力允许的条件下用足电制动，也就是说电制动不仅供动车制动使用而且还要承担拖住拖车的任务，当两节动车的电制动力能满足一组车的制动要求时，则这一组车就不再使用空气制动，反之，则要使用空气制动来补足。随着列车速度的降低，其电制动力也将不断地减弱。当列车速度降低至一定的速度时，电制动力已不能再满足制动所需要的要求，这时电制动将逐步被切除，所有制动力由空气制动承担，在这同时城市列车还将进入一个停站制动的程序。所谓停站制动程序，是当列车减速进入车站时，在接近停止前略将气缸内的压力空气放去一些，然后再充空气将列车刹停。这样可以减少列车的冲动，提高列车停站过程的舒适度。

三、制动机

城轨车辆制动机是制动系统的控制核心，它可以在司机或其他控制装置（如 ATP、ATC 等）的控制下，产生各种制动作用。城轨车辆用的制动机，一般均选用电空制动机，如我国自行研制的 DK 型电空制动机、SD 数字式电空制动机及目前在国内外大量使用的数字模拟式

和模拟式电空制动机等。按制动原动力和控制方式的不同，轨道交通车辆制动机可分为：手制动机、空气制动机、电空制动机、电磁制动机和真空制动机。

1. 手制动机

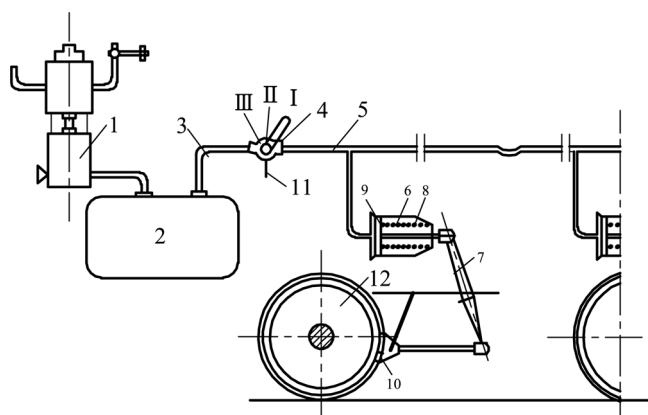
手制动机是以人力为制动原动力，以手轮的转动方向和手力大小来控制。这种制动机构造简单，费用低廉，是使用最为久远、生命力最为顽强的制动机。铁路发展初期，机车车辆上只有这种制动机，每车或几个车配备一名制动员，按司机笛声号令协同操纵。由于制动力弱，动作缓慢，不便于司机直接操纵，所以它很快就被非人力制动机取而代之，成为辅助的备用制动机，一般仅在停放制动或在调车作业中使用。

2. 空气制动机

空气制动机是以压力空气作为制动机的原动力，以改变压力空气的压强来操纵控制。空气制动机又分为直通式、自动式和直通自动式三大类。

1) 直通式空气制动机

如图 1.5 所示，空气压缩机 1 将压缩空气储入总风缸 2 内，经总风缸管 3 至制动阀 4。制动阀有三个不同位置：缓解位、保压位和制动位。当制动阀在缓解位时，制动管 5 内的压缩空气经制动阀的排气口排向大气；当制动阀在保压位时，制动阀保持总风缸管、制动管和排气口各不相通；当制动阀在制动位时，总风缸管压缩空气经制动阀流向制动管。



—缓解位； —保压位； —制动位；
1—空气压缩机；2—总风缸；3—总风缸管；4—制动阀；5—制动管；
6—制动缸；7—基础制动装置；8—缓解弹簧；9—制动缸活塞；
10—闸瓦；11—EX；12—车轮。

图 1.5 直通式空气制动机

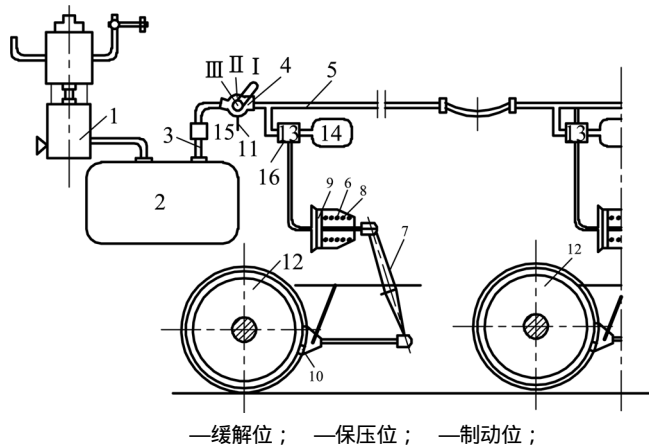
直通式空气制动机的特点：

- (1) 制动管增压制动、减压缓解，列车分离时不能自动停车；
- (2) 能实现阶段缓解和阶段制动；
- (3) 制动力大小靠司机操纵手柄在制动位置时间的长短决定，因此控制不太精确；
- (4) 前后车辆的制动一致性不好。

2) 自动式空气制动机

与直通式相比,自动式空气制动机在每辆车上多一个三通阀(或分配阀)和一个副风缸,如图 1.6 所示。所谓“三通”,即一通列车管,二通副风缸,三通制动缸。

当制动阀手柄置于制动位时,列车管经制动阀通大气(排风减压),副风缸的风压将三通阀(主)活塞推向左极端(制动位),从而打开了三通阀上通往制动缸的孔路,使副风缸压力空气进入制动缸,产生制动作用。



—缓解位； —保压位； —制动位；

- 1—空气压缩机；2—总风缸；3—总风缸管；4—制动阀；5—制动管；6—制动缸；
7—基础制动装置；8—制动缸缓解弹簧；9—制动缸活塞；10—闸瓦；
11—EX 排气口；12—车轮；13—三通阀；14—副风缸；
15—调压阀；16—排气口

图 1.6 自动式空气制动机

当制动阀手柄置于保压位时,列车管既不通总风缸也不通大气,列车管空气压强保持不变。

此时,副风缸仍继续向制动缸供风,副风缸空气压强仍在下降。当副风缸的空气压强降至列车管空气压强略低时,列车管风压会将三通阀(主)活塞向右反推至中间位置(中立位或保压位),刚好使三通阀通制动缸的孔被关闭(遮断),副风缸停止向制动缸供风,副风缸空气压强不再下降,处于保压状态;制动缸空气压强不再上升,也处于保压状态。如在制动缸升压过程中将手柄反复置于制动位和保压位,则制动缸空气压强变化可分阶段上升,即实现阶段制动。

当制动阀手柄置于缓解位时,总风缸的压力空气经制动阀进到列车管(充风增压),并进入三通阀,将其中的(主)活塞推至右极端(缓解位)并经三通阀活塞套上部的“充气沟”进入副风缸。此时,制动缸内压力空气经三通阀(缓解槽和排气孔)通大气,制动缓解。

自动式空气制动的特点:

- (1) 制动管减压制动、增压缓解,列车分离时能自动制动停车;
- (2) 制动与缓解的一致性较直通式制动机好,列车纵向冲动较小,适合于较长编组的列车;
- (3) 有阶段制动及一次缓解性能。

3) 直通自动式空气制动机

直通自动式空气制动机如图 1.7 所示。

(1) 充气缓解位。驾驶员将制动阀置于缓解位,总风缸的压缩空气经给气阀和制动阀充向制动管,再经制动管通向各车辆的三通阀主活塞上侧。

制动管压缩空气主活塞上侧—充气沟—主活塞下侧定压风缸:

制动缸的压缩空气—制动缸压力活塞上侧—排气阀口—活塞杆中心孔—制动缸压力活塞下侧—三通阀排气口。

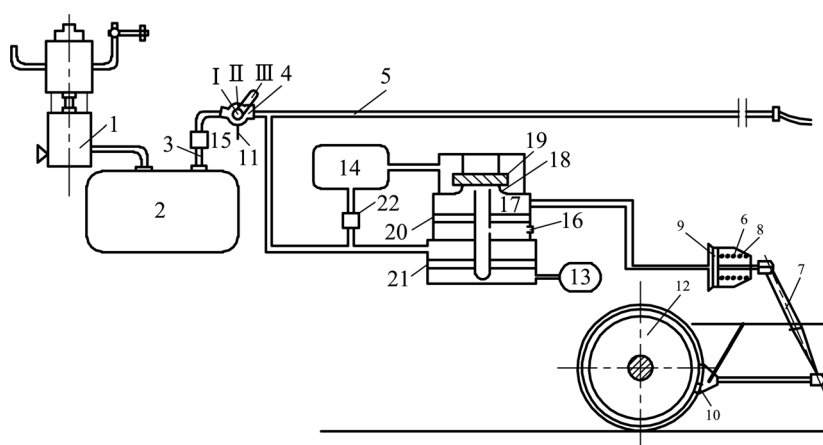
(2) 制动位。制动阀操纵手柄置于制动位，制动管以一定的速度减压，定压风缸的压缩空气来不及通过充气沟逆流，主活塞上、下两侧形成压差，主活塞上移。

(3) 制动中立位。制动阀操纵手柄置于保压位，制动管停止减压。

(4) 缓解中立位。列车制动后充气缓解，当制动管压力尚未充至定压时，驾驶员将制动阀操纵手柄置于中立位，制动管停止增压。

直通自动式空气制动机的特点：

- (1) 能阶段制动和阶段缓解。
- (2) 具有制动力不衰减性能。



1—空气压缩机；2—总风缸；3—总风缸管；4—制动阀；5—制动管；6—制动缸；7—基础制动装置；
8—制动缸缓解弹簧；9—制动缸活塞；10—闸瓦；11—制动阀 EX 口；12—车轮；13—定压风缸；
14—副风缸；15—给气阀；16—三通阀排气口；17—排气阀口；18—进气阀口；
19—进排气阀；20—制动缸压力活塞；21—主活塞；22—单向阀。

图 1.7 直通自动式空气制动机

3. 电空制动机

电空制动机是电控空气制动的简称，它是在空气制动机的基础上加装电磁阀等电气控制部件而形成的。它的特点是制动作用的控制用“电控”，但制动作用的原动力还是压力空气。而且，在制动机的电控系统因故失灵时，它仍可实行“气控”（压力空气控制），临时变成空气制动机。

列车施行电空制动时，贯通列车的制动导线使各车的制动电磁阀的排气口同时打开，将列车管的压力空气排往大气，产生制动作用；列车施行缓解时，贯通列车的缓解导线使各车的缓解电磁阀的通路同时打开，各车的加速缓解风缸同时向列车管充气（加速缓解风缸的风是在初充气或上次缓解时，列车管经过三通阀向副风缸充气的同时，经过止回阀充至定压的。由于止回阀的作用，制动时，加速缓解风缸的风没有使用）；列车施行阶段缓解时，缓解电磁阀的通路被关闭，列车管压力保持不变，保压电磁阀切断三通阀排气通路，所以三通阀（主）活塞虽然仍停留在充气缓解位，制动缸经三通阀与排气口相通。但此时不通大气，制动缸压力保持不变，即可以实现阶段缓解。在列车速度很高或编组很长，空气制动机难以满足要求时，采用电空制动机可以大大改善列车前后部制

动和缓解作用的一致性，显著减小列车纵向冲击，并缩短制动距离。世界上许多高速列车（200 km/h 以上）都采用了电空制动机。

4. 电磁制动机

电磁制动机的操纵控制盒原动力都用电，例如轨道涡流制动和旋转涡流制动这两种制动方式，其制动机就都是属于电磁制动机的范畴。

轨道涡流制动（又称为线性涡流制动或涡流式轨道磁制动）：轨道涡流制动也是把电磁铁悬挂在转向架构架下面两侧的两个车轮之间，不同的是，制动时电磁铁与钢轨不接触，利用电磁铁与钢轨相对运动使钢轨感应出涡流，产生电磁吸力作为制动力，从而把列车动能转化为热能，消散于大气实现列车制动。轨道涡流制动既不受黏着限制，也没有磨耗问题，但消耗电能太多，约为励磁制动的 10 倍，制动时电磁铁产生热量较大。所以，它也只能作为高速列车紧急制动时的一种辅助制动方式。

旋转涡流制动（又称涡流式圆盘制动）：旋转涡流制动是在车轴上装金属盘，制动时金属盘在电磁铁形成的磁场中旋转，盘的表面被感应出涡流，产生电磁吸力并发热消散于大气，从而起到制动作用，它需要通过轮轨黏着才能产生制动力，要受黏着限制，而且消耗的电能也很多。

5. 真空制动机

真空制动机的特点是以大气与真空的压强差为原动力，以改变“真空度”来操纵控制，当制动阀手柄置于制动位时，列车管与大气相通，大气进入列车管和制动缸内下方。大气不能进入活塞上方，制动活塞上方的压差推动活塞上移，活塞杆缩向缸内而发生制动作用。当制动阀手柄置于缓解位时，真空泵与列车管连通，列车管和制动缸内的空气都被抽走，列车管和制动缸内上下两方都保持高度真空（约 68 kPa），相当于绝对压强 33 kPa，活塞下移，活塞杆向下伸出而处于缓解状态。

真空制动机构造较简单，价格较便宜，维修也较方便，既能阶段制动，也能阶段缓解，但由于大气压强本身有限，“绝对真空”难以达到，需要直径较大的制动缸和较粗的列车管，随着牵引重量和运行速度的提高，已经逐渐向空气制动过渡。

【任务实施】

制动方式可按制动时动能转移方式、制动力获取方式或按制动原动力的不同进行分类。按照三种方式进行讲解，同时结合具体方式中的具体事例进行分析。

【知识拓展】

城市轨道交通车辆制动系统模块化设计的新思路

城市轨道交通车辆，特别是地铁车辆，将车内空间留给乘客之后，牵引、辅助、制动系统的主要部件均布置在车下。在有限的车下空间合理布置设备，并将整车重心保持在允许的范围之内，要求系统的集成度高、空间利用紧凑，这给车辆的设计制造提出了更高的要求。如果布置不合理，不但施工不方便，而且会造成车下管线出现抗磨现象，可接近性差，也给运用周期中的维修保养带来困难，增加了全寿命周期费用。为了改进制造环节并便于产品运用周期中的检修工作，开展模块化设计工作就显得尤为重要。

1. 城轨列车车下制动设备模块化设计的意义

每个城市对城市轨道交通车辆的要求不同，因此每个地铁项目的设备均有不同的配置，故很难实现车下制动设备及管路的整体模块化设计。但对于城轨车辆制动系统中的主要设备部件，可以进行局部的模块化设计，将系统中的各类阀件集成，以提高设计的通用性。通过模块化设计，极大地改善了施工人员的工作条件，安装工作由先前的车下仰视作业改为在类似于翻转工作台等工装上作业，提高了制造的精确性，减少了装配人员的工作强度，降低了生产成本。同时对管路零件可进行更清晰的加工、研配、组装等工序划分，便于生产组织与质量控制。

2. 制动设备模块化设计的总体思路

北京地铁4号线列车是对车下制动设备按照功能进行局部模块化设计的成功范例之一，其基本思想是将副风缸、空气弹簧风缸及相应控制阀、停放控制阀等功能元件集成为风缸模块；将总风缸及总风回路上的各类阀集成为一个总风模块。制动模块为各车通用的模块，总风模块仅在Tc车安装。这样车下制动系统除去这几大模块以及部分制动设备之外，剩余皆为较为直观的直通互联管路。

3. 制动设备模块化设计的方法

以北京地铁4号线列车为例，将制动设备按具体功能设计为3个模块：风源模块、总风模块和风缸模块，风源模块和总风模块只设置在Tc车，风缸模块在每个车都设置一个。

(1) 风源模块的设计：

将城轨车辆风源模块中的空气压缩机、干燥器、安全阀、软管等部件安装在一个支架上集成后，然后再通过4个安装座固定到车体上，这样使空间布置更为紧凑且安装方便。

(2) 风缸模块的设计：

在北京地铁4号线制动系统中，停放控制单元及空气弹簧控制管路中的各个阀都是管道装配，无法做成气路板安装的形式。故该模块需要将副风缸和空气弹簧风缸及其管路中连接的截断塞门、过滤器、单向阀、双向阀、溢流阀、测试点等元件集成在一起。该方案可以更加方便安装检修，该模块的设计要点如下：风缸采用吊带安装的方式；为了方便维护、检修，所有的阀件安装在车底外侧；脉冲阀的安装应考虑防石击，在阀体的两侧安装防护板。

(3) 总风模块的设计：

总风缸只设置在Tc车上，故将空气压缩机与至总风缸间管路中的安全阀、继电器、过滤器、测试点连同总风缸设计成一个模块。

4. 制动模块化设计的优点

(1) 通过模块化设计，将日常检修操作的阀类安装在车底外侧易接近处，保证了各个车型的制动模块安装位置的一致性，也使各车型车体横梁布置保持一致性，方便了日常的检修维护。同时，通过这样的模块化设计，也加强了设计的通用性。

(2) 通过模块化设计，将制动元件统一布置在一个模块中，集成化程度较高。

(3) 模块化设计改善了施工人员的工作条件，由车下仰视施工改为俯视工作，再通过翻转工装吊装于车体，便于生产组织与质量控制。

(4) 实际情况证明该制动模块的使用状况良好，在运营中的维护检修也非常方便。

【效果评价】

评价表

项目名称	项目 1 城市轨道交通车辆制动基本知识	学生姓名	
任务名称	任务 2 城市轨道交通车辆制动方式和制动机	分数	
项 目			
		分值	考核得分
1. 制动方式分类基本概念的理解及掌握		30	
2. 是否有小组计划		5	
3. 城轨车辆制动模式和制动方式的理解及掌握		40	
4. 城轨车辆制动机的认知情况		10	
5. 编制学习汇报报告情况		10	
6. 基本素养考核情况		5	
总体得分			
教师简要评语：			
教师签名：			

任务3 城市轨道交通车辆轮轨关系和制动力分析

【活动场景】

在有城轨列车制动模型的多媒体教室进行教学，充分利用多媒体技术展示城轨车辆制动的基本关系与基本知识。

【任务要求】

掌握城轨车辆制动的基本作用和基本概念。

【知识准备】

一、轮轨关系

目前城轨车辆中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相互关系，以及它们在运行中的各种工况。

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、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，通常引入两个十分重要的概念，即“黏着”和“蠕滑”。

1. 黏 着

图 1.8 所示为某城轨车辆的动车以速度 v 在直线路径上运行时，它的一个动车轮对的受力情况（图中忽略了其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，我们把实际上相互接触的车轮与钢轨稍稍分开画出。

在图 1.8 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

$$F_i = F_i' = \frac{M_i}{R_i} \quad (1.1)$$

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。

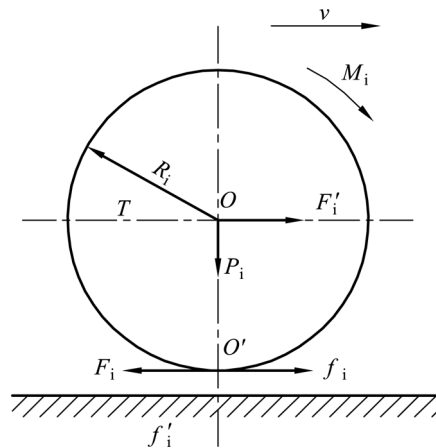


图 1.8 在平直线路上运行的轮对与钢轨受力分析

切向力 F_i 使车轮上的 O' 点具有向左运动的趋势，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

$$f_{\max} = \mu P_i \quad (1.2)$$

式 (1.2) 表明，在轴重一定的条件下，轮轨间的最大黏着力由轮轨间系数的大小决定。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，我们称其为“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，牵引运动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。加大每个轮对作用在钢轨上的压力，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，不可能无限制的增加。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，动力和黏着力比较分散，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。

2. 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_t 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“蠕滑”。

蠕滑的产生主要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。随着车轮的滚动，车轮上原来被压缩的金属陆续放松，并被拉伸；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 1.9 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”。

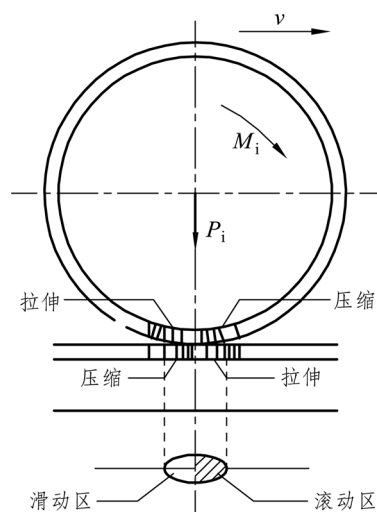


图 1.9 切向力在接触面上形成的滚动区

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

$$\sigma = \frac{\omega R_i - v}{v} \quad (1.3)$$

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。

二、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 1.10 是一个轮对利用闸瓦制动产生制动力的示意图。

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。若每块闸瓦以压力 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。

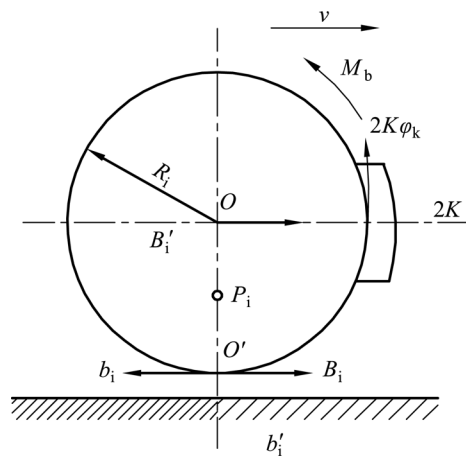


图 1.10 闸瓦制动时轮对与钢轨受力分析

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

$$M_b = 2K\varphi_k R_i \quad (1.4)$$

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 P_i ， $b_i = B_i = 2K\varphi_k$ 。 P_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 P_i 也是轮轨间的黏着力，因而也受到黏着条件的限制，即

$$b_i \leq P_i \mu_i \quad (1.5)$$

式中 P_i ——动车或拖车轮对的轴重；
 μ_i ——制动时轮对间的黏着系数。

整个列车的总闸瓦制动力为所有轮对闸瓦制动力之和，即

$$B = \sum b_i \quad (1.6)$$

制动力的大小可以采用增加或减小闸瓦的压力来调节，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钢轨的擦伤，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 7~10 mm 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。

三、影响黏着系数的因素

由于黏着系数与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。

1. 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。对于城市轨道交通来说，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

面上或小雨打湿轨面时，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。油的污染会使轨面黏着系数下降，撒砂则能使轨面黏着系数增加。

2. 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。

3. 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。特别是在车轮与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。车辆运行中有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。

4. 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。

四、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，以减轻轮轨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砂；用机械或化学方法清洗钢轨、打磨钢轨；改进闸瓦材料，如用增黏闸瓦材料；改善车辆悬挂，减小轴重转移等。

【任务实施】

以多媒体图例进行剖析，以轮轨关系的认知为入手，把制动力的形成、蠕滑、黏着等知识进行讲解。

【效果评价】

评价表

项目名称	项目 1 城市轨道交通车辆制动基本知识	学生姓名	
任务名称	任务 3 城市轨道交通车辆轮轨关系和制动力分析	分数	
项 目			
		分值	考核得分
1. 轮轨关系基本概念的理解及掌握		10	
2. 是否有小组计划		5	
3. 黏着的认知情况		20	
4. 蠕滑的认知情况		20	
5. 制动力形成的认知情况		20	
6. 黏着的改善方法		10	
7. 编制学习汇报报告情况		10	
8. 基本素养考核情况		5	
总体得分			
教师简要评语：			
教师签名：			

