

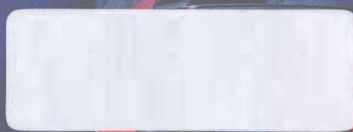


全国铁道职业教育教学指导委员会规划教材
高等职业教育城市轨道交通车辆专业系列规划教材

城市轨道交通 车辆制动系统

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG CHELIANG ZHIDONG XITONG

杨鲁会 卢桂云 主 编 ■
王学忠 王丽红 副主编 ■



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书为全国铁道职业教育教学指导委员会规划教材、高等职业教育城市轨道交通车辆专业系列规划教材。全书共分十二章,分别介绍了城市轨道交通车辆制动基本知识、防滑原理和防滑控制、城市轨道交通车辆制动控制系统、基础制动装置、供风系统、KBGM 模拟式电气指令制动系统、KBWB 模拟式电气指令制动系统、EP2002 制动系统、HRDA 数字指令式制动系统、SD 型数字式电气指令式制动系统、EPAC 制动系统、制动系统检修与调试等内容。每章节后设有复习思考题,有助于学生对重点知识的学习与巩固。

本书可作为城市轨道交通车辆专业高职教材,也可用于地铁公司的职工培训,城市轨道交通运营、检修、驾驶等领域工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通车辆制动系统/杨鲁会,卢桂云主编.

—北京:中国铁道出版社,2012.8

全国铁道职业教育教学指导委员会规划教材 高等职业教育城市轨道交通车辆专业系列规划教材

ISBN 978-7-113-14857-7

I. ①城… II. ①杨… ②卢… III. ①城市铁路—铁路车辆—车辆制动—高等职业教育—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 122463 号

书 名:城市轨道交通车辆制动系统

作 者:杨鲁会 卢桂云 主编

策 划:阚济存

责任编辑:阚济存 编辑部电话:010-51873133 电子信箱:td51873133@163.com

编辑助理:杜丽君

封面设计:崔丽芳

责任校对:孙 玫

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.51eds.com>

印 刷:三河市兴达印务有限公司

版 次:2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:13 字数:325 千

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-14857-7

定 价:28.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。

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

PREFACE

随着我国经济建设的飞速发展,城市化进程的速度明显加快。大量人口向城市聚集,城市尤其是大城市交通拥堵,给人们出行带来不便。国外城市建设的经验告诉我们,城市轨道交通是一种满足上百万居民外出安全、快捷、准点、大流量的交通工具。“没有地铁的城市,是一个不完整的城市”这一点早已成为人们的共识。发展城市轨道交通是解决大城市交通拥堵问题的最佳方案。

我国近年来大力支持发展城市轨道交通事业,截至 2011 年 8 月,全国已建成城市轨道交通线路 1568 km,建成线路 50 条,运营车站总数 995 座,我国轨道交通线网总体供给能力处于高幅增长阶段,网线供给呈现快速增加趋势。截至 2011 年 8 月,全国共有 30 个城市轨道交通近期建设规划获批。其中,20 个城市在规划期内调整、扩大了建设规模。“十二五”期间,我国各城市地铁、轻轨建设里程将达到 2600 km,建设投资规划额将达 12700 亿元。预计到 2020 年底,国内将有 40 个城市建设轨道交通,总里程约 7000 km。

作为城市轨道交通的基本运载工具,城市轨道交通车辆(以下简称城轨车辆)是集机械工程、电力电子、微电子控制、网络控制、人机工程学、空气动力学、运输学等学科于一身的高科技产品。其中,制动系统是城轨车辆核心技术之一。由于我国引进的技术来源不同,城轨车辆制动技术种类繁多,生产制造企业和运营检修企业的关键岗位职工掌握制动技术十分必要。而我国目前城轨车辆制动系统的教科书比较稀缺,还没有一本能够涵盖各个制动系统技术领域的教材。因此,我们编写了此书,旨在能够为城轨车辆专业的教学以及城轨列车运营维修和制造企业员工的培训提供技术服务。

本教材涵盖了当今德国克诺尔制动技术、日本纳博克制动技术、法国法维莱制动技术,从我国应用较早的 SD 制动系统到 EP2002 制动系统,从模拟信号指令式到数字信号指令式,每一套制动系统从系统组成、制动原理、控制技术到基础制动单元,注重了系统图、结构图、电路图、控制图的详细讲解,使教材图文并茂,更加便于学生学习理解。



根据铁道车辆专业教学指导委员会的安排,由各个院校的骨干教师组成编写团队,并聘请了企业的技术专家参与教材的编写和审核。本书由山东职业学院杨鲁会、郑州铁路职业技术学院卢桂云主编,苏州大学王学忠、郑州铁路职业技术学院王丽红副主编,北车长客股份公司齐志新担当主审。具体分工如下:卢桂云编写第一章、第二章、第三章;王学忠编写第四章、第六章、第七章;山东职业学院张伟编写第五章;西安铁路职业技术学院雷晓娟编写第八章;杨鲁会编写第四章(部分)、第九章、第十一章、第十二章;王丽红编写第十章;天津铁道职业技术学院赵连域也参加了部分章节的编写。

教材编写过程中,得到了北京、深圳、沈阳、南京、苏州地铁公司以及南车南京浦镇车辆有限公司、南车青岛四方机车车辆股份有限公司、北车集团长春轨道客车股份有限公司的大力支持。感谢南车青岛四方机车车辆股份有限公司王晓东对教材提出了宝贵意见,对娄志刚、马娜娜、杨晨晨、王明霞在资料整理和图标的绘制方面也给予的大力协助,这里一并表示感谢!

鉴于编者的水平所限,书中的错误在所难免,恳请广大读者给予批评指正。

编 者
2012 年 6 月

目录

CONTENTS

第一章 城市轨道交通车辆制动基本知识.....	1
第一节 制动的基本概念.....	1
第二节 城轨车辆制动方式.....	4
第三节 轮轨关系和制动力	11
第四节 制动计算	16
复习思考题	21
第二章 防滑原理和防滑控制	23
第一节 防滑控制技术和发展	23
第二节 防滑控制的机理分析	24
第三节 车辆防滑控制系统	27
复习思考题	33
第三章 城市轨道交通车辆制动控制系统	34
第一节 制动控制系统的组成	34
第二节 制动控制策略	36
复习思考题	38
第四章 基础制动装置	39
第一节 闸瓦制动装置	39
第二节 盘形制动装置	60
复习思考题	61
第五章 供风系统	62
第一节 概 述	62



第二节 活塞式空气压缩机	66
第三节 螺杆式空气压缩机	68
第四节 辅助设备	70
第五节 干燥器	75
复习思考题	82
第六章 KBGM 模拟式电气指令制动系统	83
第一节 列车制动参数	83
第二节 空气制动系统组成	83
第三节 空气制动系统作用原理	90
复习思考题	93
第七章 KBWB 模拟式电气指令制动系统	94
第一节 概 述	94
第二节 空气制动系统构成	95
第三节 列车制动力分配	104
第四节 制动控制过程	104
第五节 KBWB 模拟式电气指令制动系统的特点	107
复习思考题	108
第八章 EP2002 制动控制系统	109
第一节 EP2002 制动控制系统的组成	109
第二节 EP2002 制动控制系统作用原理	114
第三节 EP2002 制动系统的优缺点	119
复习思考题	120
第九章 HRDA 数字指令式制动系统	121
第一节 系统组成	121
第二节 制动电子控制单元(ECU)	124
第三节 制动控制单元(BCU)	140
复习思考题	144
第十章 SD 型数字式电气指令式制动系统	145
第一节 SD 型电空制动机的系统组成	145
第二节 SD 型电空制动机的基本原理及特点	146
第三节 SD 型电空制动机主要部件的构造及作用原理	147
第四节 SD 型电空制动机的综合作用	160
复习思考题	164

第十一章 EPAC 制动系统	165
第一节 制动模式	165
第二节 常用制动原理	168
第三节 EPAC2 制动控制原理	175
第四节 制动模块	182
复习思考题	188
第十二章 制动系统检修与调试	189
第一节 制动系统检修	189
第二节 制动系统调试	193
复习思考题	199
参考文献	200

第一章 城市轨道交通车辆制动基本知识

第一节 制动的基本概念

一、制动的概念

制动是指人为施加的外力,使运动的物体减速或阻止其加速,以及保持静止的物体静止不变的作用。制动效能的大小和制动施加的时机由人为掌控。使列车减速或阻止其加速的力称为制动力,而产生并控制这个制动力的装置叫做制动机,也称制动装置。从能量变化的角度理解,制动过程就是一个能量转移过程,是将列车运行所具有的动能人为控制地转变成其他形式能量的过程,因此列车的制动过程必须具备两个基本条件:①实现能量转换;②控制能量转换。此时,制动装置是用以实现和控制列车动能转换的一整套装置。

对城市轨道交通车辆施行制动的目的在于:①使运行中的列车能迅速地减速或停车;②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;③列车停稳后,避免停放的列车因重力作用或风力作用而溜车,这时的制动也称停放制动。反之,对已经施行了制动的列车,重新启动或再次加速,必须解除或减弱其制动作用,这种作用称为制动的缓解。

二、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客车、货车制动系统。由于城市轨道交通车辆(以下简称城轨车辆)与铁路车辆的编组形式不同,(城轨车辆一般采用动力分散型的动车组形式),一般由动车和拖车组成,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(动车组),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,因此尽管列车在制动减速的过程中会产生列车运行阻力(自然阻力),但起主要制动作用的还是列车制动力。

一套列车制动装置至少包括两个部分:制动控制部分和制动执行部分。制动控制部分主要包括制动信号的发生与传输装置;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的制动装置。过去由于列车上安装的制动装置比较简单、直观,而且是用压缩空气传递制动信号,因此称其为空气制动装置。但是随着轨道交通技术的发展,制动装置越来越多地采用了电气信号控制和电气驱动控制设备。特别是微型计算机和电子设备的出现使制动装置变得无触点化、集成化,并且使制动控制功能融入了其他系统控制而不能独立划分,因此将具有制动功能的电子线路、电气线路和空气制动控制部分总称为列车制动系统。

城市轨道交通车辆的启动、加速和定速运行需要通过对它施加牵引力才能实现。同样,为了使



运行的车辆能够迅速地减速、停车还必须对其施加制动。牵引和制动是车辆运行过程中必不可少的两种行车状态,仅有牵引而没有制动的车辆是不完善的,甚至是危险的,如果一列车突然失去制动,列车安全和乘客的生命财产也将受到严重威胁。因此,从某种意义上来说,制动装置比牵引装置更为重要。

运行的列车从司机施行制动(将司机控制手柄置“制动位”)的瞬间开始,到列车速度降为零的瞬间为止,列车在这段时间内所驶的距离,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。有些国家不用制动距离而用(平均)减速度作为其主要技术指标,两者的实质是一样的,只是制动距离较为具体、直观,而制动减速度较为抽象而已。

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停放的能力,它与列车的运行安全直接相关。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 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。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。一般的,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。而列车的最高运行速度与列车的牵引功率有关,但它更应该受到制动能力的限制。和其他轨道车辆一样,制动装置是城市轨道交通车辆的重要组成部分之一。

三、城轨车辆制动模式

城轨车辆根据运行的要求,主要采用了停放制动、常用制动、快速制动、紧急制动和保压制动等制动模式。

1. 停放制动

由于车辆断电停放时,制动缸压力会因管路漏泄在(空气压缩机停电或不工作)无压力空气补充的情况下,逐步下降为零,使车辆失去制动力。车辆停放制动不同于车辆运行中的制动作用,它采用弹簧力来产生制动作用。在正常情况下,弹簧力的大小不随时间而变化,由此获得的制动力能要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,停放制动施加;并且还需附加有手动缓解功能。

2. 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。它的特点是:制动作用比较缓和;制动力可以调节,通常只用到列车制动能力的 20%~80%,大多数情况下只用 50%左右。

在常用制动模式下,电制动和空气(摩擦)制动一般处于激活状态。一般情况下[车载 AW_2 (半重车)以下,速度 8 km/h(可调)以上],电制动能满足车辆制动要求,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,实现混合制动作用。

3. 紧急制动

紧急制动属于非常制动,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:制动作用比较迅猛,而且要把列车最大的制动能力都用上,一般情况下制动力要比常用制动力大 10%左右。目前,在城市轨道交通车辆上还采用一种快速制动,快速制动模



式下产生的制动力与紧急制动模式相当,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。

紧急制动模式下,车辆设有失电制动、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,控制该制动作用的发生,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。

紧急制动不经过电制动系统(ECU)的控制,直接使空气制动(BCU)的紧急电磁阀失电而产生。紧急制动具有如下特点:

- (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;
- (3)不受冲击率极限的限制,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)具有防滑保护和载荷修正功能。

4. 快速制动

当主控制器手柄移到“快速制动位”时,列车将实施与紧急制动相同的快速制动。快速制动具有如下特点:

- (1)电制动不起作用,仅空气制动;
- (2)受冲击率极限的限制;
- (3)主控制器手柄回“零位”可缓解;
- (4)具有防滑保护和载荷修正功能。

5. 保压制动

保压制动是防止列车在停车前的惯性冲击力,使列车平稳停车,通过 ECU 内部设定的执行程序来控制。它分两个阶段实施:

第一阶段:当列车制动到速度 <8 km/h 时,牵引控制单元 DCU 触发保压制动信号,同时输出给电制动系统 ECU,这时由 DCU 控制的电制动逐步退出,由 ECU 控制的气制动替代。

第二阶段:当列车速度 <0.5 km/h 接近停车时,一个小于最大制动指令 70% 的保压制动制动指令由 ECU 开始自动实施,即瞬时地将制动缸压力降低。

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

四、制动性能

常用制动平均减速度(从 80~0 km/h,包括响应时间 t_R)	0.95~1.15 m/s ²
接触网吸收能力	0~100%
常用制动冲击限制	0.75 m/s ²
电制动转折点(可调)	0~12 km/h
紧急制动减速度	≥ 1.2 m/s ²

五、城轨车辆制动装置的特点和要求

城市轨道交通的站距很短,一般都在 1 km 左右。例如:上海地铁一号线从虹梅南路到上海火车站长 16.67 km,有 13 座车站,平均站间距离 1.39 km。由于站间距离短,列车加速、减



速及停车都比较频繁。为了提高运行速度,增加列车密度,必须使列车启动快、制动快、制动距离短。这就要求其制动装置具有操纵灵活、动作迅速、停车平稳准确、制动率及制动功率相对较大等特点。

城市轨道交通的客流量波动较大,空载时列车质量仅为自重,而满载时列车质量却很大。例如:广州地铁的每辆动车空载质量为 380 kN,而满载(超员,载客 432 人)时总质量为 639.2 kN。由此可知,载客量对列车的质量有较大的影响,对列车制动时要保证一定的列车减速度、防止车轮滑行及减轻车辆间纵向冲动都是不利的。因此,制动装置应具备在各种载荷工况下车辆制动力自动调整的性能,使车辆制动率基本保持不变,从而实现制动的准确性和停车的平稳性。

城轨车辆在部分车辆或甚至全部车辆上具有独立的牵引电动机,这就为采用电制动提供了基本条件。电制动的功率大,尤其是在较高速度范围内,能承担大部分的制动负荷,可以满足城轨车辆轴制动功率大的要求;电制动是一种非摩擦制动,没有摩擦副零件的磨损和噪声,减少了维护保养和对环境的污染,因而比较经济;其再生制动可以节约能源,具有一定的经济效益,所以,采用电制动具有积极的意义。但电制动在低速时制动力小,而且既要保证电制动失效和紧急情况下的行车安全,又要满足停车和停放的要求,所以摩擦制动是一种必备的制动方式。在几种制动方式同时使用时,要充分发挥它们的最佳作用,需要一套完善的制动控制装置来控制,使它们能很好地协调配合。

城轨车辆一般运行在人口稠密地区承载旅客,所以行车安全是非常重要的。也因此要求其制动机:①具有紧急制动性能,遇有紧急情况时,能使列车在规定距离内安全停车。②列车在运行中发生诸如列车分离、制动装置故障等情况时,应能自动产生紧急制动作用。③紧急制动作用除可由司机操纵外,必要时还可由行车人员利用紧急按钮(紧急阀)等进行操纵。

第二节 城轨车辆制动方式

按照制动时列车动能的转移方式不同城轨车辆的制动主要可以分为摩擦制动和电制动。

一、摩擦制动

通过摩擦副的摩擦将列车的运动动能转变为热能,逸散于大气,从而产生制动作用。城轨车辆常用的摩擦制动方式主要有闸瓦制动、盘形制动和轨道电磁制动。

(一) 闸瓦制动

闸瓦制动又称为踏面制动,它是最常用的一种制动方式,如图 1-1 所示。制动时闸瓦压紧车轮,车轮与闸瓦间发生摩擦,将列车的运动动能通过车轮与闸瓦间的摩擦转变为热能,逸散于空气中。

在车轮与闸瓦这一对摩擦副中,由于车轮主要承担着车辆走行功能,因此其材料不能随意改变。要改善闸瓦制动的性能,只能通过改变闸瓦材料的方法。早期的闸瓦材料主要是铸铁,为了改善摩擦

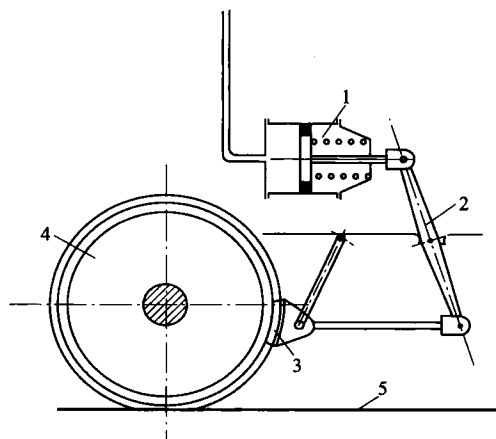


图 1-1 闸瓦制动

1—制动缸;2—基础制动装置;3—闸瓦;4—车轮;5—钢轨



性能和增加耐磨性,目前城市轨道交通车辆中大多采用合成闸瓦。但合成闸瓦的导热性较差,因此也有采用导热性能良好,且具有较好的摩擦性能的粉末冶金闸瓦。

在闸瓦制动中,当制动功率较大时,产生热量来不及逸散于大气,而在闸瓦与车轮踏面上积聚,使它们的温度升高,摩擦力下降,严重时会导致闸瓦熔化(铸铁闸瓦)和轮毂松弛等。因此,在采用闸瓦制动时,对制动功率要有限制。

(二) 盘形制动

盘形制动有轴盘式和轮盘式之分,如图 1-2 所示。一般采用轴盘式,当轮对中间由于牵引电机等设备使制动盘安装发生困难时,可采用轮盘式。制动时,制动缸通过制动夹钳使闸片夹紧制动盘,使闸片与制动盘间产生摩擦,把列车的动能转变为热能,热能通过制动盘与闸片逸散于大气。

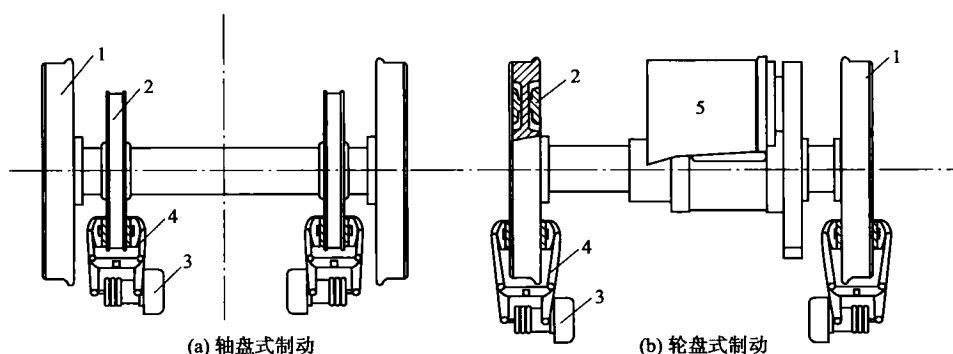


图 1-2 盘形制动

1—轮对;2—制动盘;3—单元制动缸;4—制动夹钳;5—牵引电机

盘形制动方式能选择高性能的摩擦副材料和良好的散热结构,可以获得比闸瓦制动大得多的制动功率。

(三) 轨道电磁制动

轨道电磁制动也叫磁轨制动,如图 1-3 所示。轨道电磁制动是一种传统的制动方式,这种制动方式是在转向架前后两轮对之间的侧梁下安装升降风缸,风缸顶端装有两个电磁铁,电磁铁包括电磁铁靴和磨耗板,电磁铁悬挂安装在距轨面适当高度处,制动时电磁铁落下,并接通励磁电源使之产生电磁吸力,电磁铁吸附在钢轨上,列车的动能通过磨耗板与钢轨的摩擦转化为热能,逸散于大气。轨道电磁制动可得到较大的制动力,因此常被用作紧急制动时的一种补充制动手段。这种制动不受轮轨间黏着系数的限制,能在保证旅客舒适性条件下有效地缩短制动距离。但磨耗板与轨道摩擦产生的热量很多,对钢轨的磨损也很严重。但因为其制动距离短,而结构又简单可靠,所以这

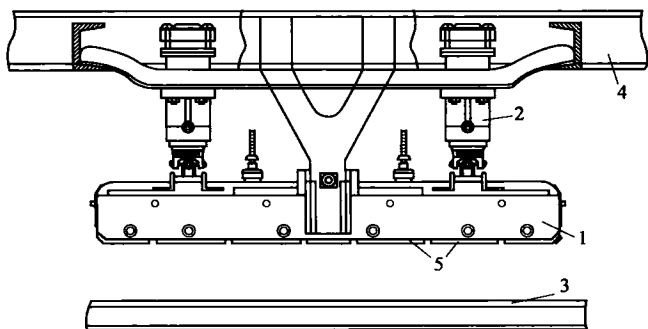


图 1-3 磁轨制动

1—电磁铁;2—升降风缸;3—钢轨;4—转向架构架侧梁;5—磨耗板



种装置在有轨电车和轻轨上使用较多。由于磁轨制动能获得较大的制动力并且与轮轨间黏着系数无关,所以在高速动车上通常也装有磁轨制动,但仅在紧急制动时使用。

二、电 制 动

从能量的观点来看,制动的本质就是将列车的动能转移成别的形式能量。制动系统转移动能的能力称为制动功率。一般的,在一定的安全制动距离下,列车的制动功率是其速度的三次函数。现代化的轨道交通车辆的速度都很高,列车质量也很大,其制动功率如果仅仅以一种机械的方式(摩擦制动)实现转移是很难达到的。

目前,采用最多的机械摩擦制动方式是闸瓦制动,又称为踏面制动,即在制动时将闸瓦紧压车轮踏面,使车轮踏面与闸瓦之间发生滑动摩擦,从而使车轮产生摩擦制动力矩。列车动能通过轮瓦与车轮踏面的摩擦变成热能,再经过车轮、闸瓦和钢轨热传递,逸散于空气中。但是热能散发的速度与动能转化热能的速度相比要慢得多,因而热量在闸瓦和车轮踏面间积聚,温度急剧升高,严重时高温可熔化闸瓦或烧灼踏面,或者由于高温也会造成闸瓦和车轮踏面的材质及机械性能地改变。因此,采用踏面摩擦制动功率是有一定限制的。

闸瓦与车轮踏面磨耗后产生的粉尘和热量对环境也会造成严重污染,特别在通风条件不好的隧道内,这些粉尘和热量将对乘客和设备产生严重影响。此外,频繁使用摩擦制动,将使闸瓦更换频繁,车轮踏面的修正镟削量增加,不仅维修成本很高,车辆修理时间也很长,车辆的使用率就会降低。与闸瓦制动方式相类似的盘形制动方式的缺点也大致如此。

为了减少机械摩擦,应尽量采用无污染的制动方式,目前最好的方法就是使用电制动。而电制动按照其制动原理的不同又可分为动力制动和电磁涡流制动。

(一)动力制动

由于现代城市轨道交通车辆一般都采用了电力牵引的电动车组,采用直流或交流电动机作为牵引动力,因此以动力制动作为主要制动方式已成为城市轨道交通车辆的发展趋势。电动车组中既有动车又有拖车,除了拖车没有电动机只能使用摩擦制动外,所有动车都可以进行动力制动,并且还可以承担部分拖车的制动力。

1. 动力制动的基本原理

在各种形式的制动中,动力制动是一种较理想的制动方式,它是建立在电动机可逆性工作的基础上。在牵引工况时,电动机从接触网吸收电能,将电能转换为机械能,产生牵引力,使列车加速或在上坡的线路上以一定的速度运行;在制动工况时,列车停止从接触网受电,电动机变为发电机工况,将列车运行的机械能转换为电能,使列车减速或在下坡线路上以一定的限速运行,此为动力制动。

在制动过程中由牵引电机转化而来的电能通过直接反馈给供电触网或消耗在电阻器上这两种方式消耗电能。通过转换电路和受流器(受电弓)将电能反馈给供电触网,提供给本车辅助电源或同一电网中相邻运行的列车使用这种方式我们称之为再生制动,也称反馈制动。如果由于触网电压太高,不能接受电能进行反馈,电能只能通过列车上的电阻器发热转变成热能散发到大气中去,这种方式我们称之为电阻制动,也称能耗制动。

对于现代新型城市轨道交通车辆来说,一般列车都设有动力制动系统,而且在正常制动过程中应优先用动力制动,尽量发挥动力制动的再生作用,以减少摩擦制动产生的热量和粉尘。从理论上讲,即使列车在高速行进时,常用制动应从动力制动开始。但实际上,动力制动在列



车最高速度时也很难完全实现。有时为了在满载情况下获得最大的轮轨黏着力,列车也需要使用部分拖车上的摩擦制动力。当列车速度降到很低时(约 10 km/h 以下)时,动力制动作用迅速减弱,这时也需要摩擦制动逐渐予以补充将列车完全停止。

车辆进行动力制动时,再生制动优先,即向供电电网反馈电能,如果接触网电压过高或同一供电区段无其他车辆吸收反馈能量,则电路转为电阻制动,把能量消耗在电阻器上。

电制动是车辆在常用制动下的优先选择,仅带驱动系统的动车具有电制动,电制动又有再生制动和电阻制动两种形式。电制动还具有独立的滑行保护和载荷校正功能。

每节动车装备有:1 个三相调频调压逆变器(VVVF)、1 个牵引控制单元(DCU)、1 个制动电阻、4 个自冷式三相交流电机(M1、M2、M3、M4,每轴一个,相互并联)。

其再生制动和电阻制动的原理如图 1-4 和图 1-5 所示。当发生常用制动时,电动机 M 变成发电机状态运行,将车辆的动能转变为电能,经 VVVF 逆变器整流成直流电反馈于接触网,供列车所在接触网供电区段上的其他车辆牵引使用或供给本车的其他系统(如辅助系统等),此即再生制动过程。再生制动取决于接触网的接收能力,即取决于接触网网压高低和负载利用能力。如果制动列车所在的接触网供电区段内无其他列车吸收该制动能量,VVVF 则将能量反馈在线路电容上,使电容电压 U_d 迅速上升,当 U_d 达到最大设定值 1800 V 时,牵引控制单元(DCU)启动能耗斩波器模块 A14 上的门极可关断晶闸管 GTO,VT7、GTO 打开制动电阻 R7 回路,制动电阻 R7 与电容并联,将电机的制动电流转变成电阻的热能消耗掉,此即电阻制动过程(也称能耗制动过程),电阻制动能单独满足常用制动的要求。

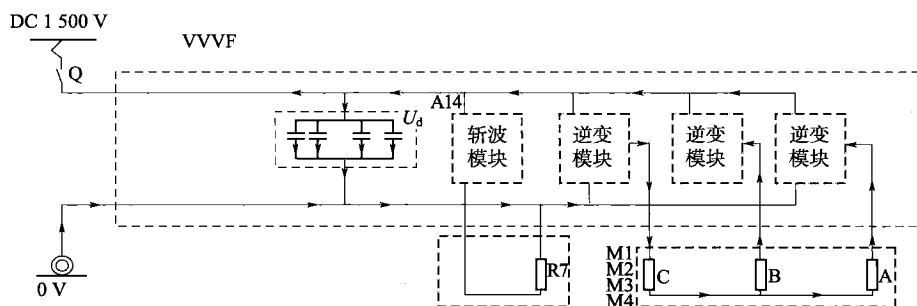


图 1-4 再生制动原理图

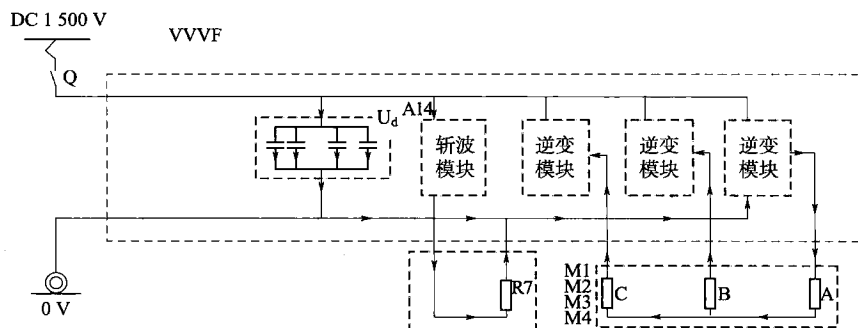


图 1-5 电阻制动原理图



电阻制动是承担电机电流中不能再生的那部分制动电流。再生制动电流加电阻制动电流等于制动控制要求的总电流,此电流受电机电压的限制。再生制动与电阻制动之间的转换由牵引控制单元(DCU)控制,能保证它们连续交替使用,转换平滑,变化率不被人体所察觉。当高速时,动车采用再生制动,将列车动能转换为电能;当再生制动无法再回收时(例如接触网网压上升到1800 V时),再生制动能够平滑地过渡到电阻制动(此处内容不详细介绍,具体内容见本系列从《城市轨道交通牵引供电系统》)。

2. 动力制动系统的基本要求

一个安全可靠的动力制动系统应满足以下基本要求:

①应具有一定的机械稳定性。即动力制动时,如果列车速度增加,制动力也应随之增加。

②应具有一定的电气稳定性。电气制动时如果发生瞬间电流波动时,系统应能自动恢复到原来的平稳状态。

③各台电机的制动力应相等。制动过程中无论外界条件有什么瞬时变化,例如电网电压瞬时波动、黏着条件突然发生变化或人为的调节等,都不应产生大电流的冲击和制动力的冲击。

④电气制动电路的设计要力求结构简单、维护方便。

上述要求应在设计、研制和生产车辆时应充分给予考虑,否则列车在制动过程中就不能实施平稳制动。

随着城市轨道交通车辆新技术的发展,车辆乘坐舒适性大大提高,列车空调系统消耗的能量也大大增加,客室内的乘客服务设备,如到站显示器、广告显示屏等的能耗也日渐增大,使得列车辅助电源用量大为增加。因此再生制动的能量被本车辅助用电器消耗吸收的比例已逐步提到80%左右,动力制动过程中反馈到电网上可供其他列车使用的能量已经很少。这样再生制动的节能效果非常明显,且由制动电阻消耗的能量也会相对减少。

由此可见,实施再生制动必须满足以下两个条件:一是再生制动电压必须大于接触网网压;另外再生制动的电能可由本列车的辅助电源吸收,也可由同一电网的其他列车吸收,这一条件不能由再生制动车辆自己创造,而取决于外界运行条件。

3. 动力制动时的电流控制

直—交控制的列车进行再生制动时,异步电机的旋转磁场如果落后于转子转速,即转差率小于零时,三相交流电动机工况就改变为三相交流发电机工况。在列车运行过程中,如果外力(如下坡)使车轮(也就是电机转子)加速,或人为控制定子频率降低,使转子频率高于定子频率,即可改变其牵引状态而处于制动状态。制动时(如图1-6中电动机为三相交流牵引电动机),牵引逆变器控制旋转磁场,定子中的感应电流经续流二极管(VD1~VD6)的整流向电容(C_d)及直流电源侧反馈。这样,牵引逆变器原来的输入端变为输出端,消耗的列车动能就转换成了电能。直流端输出的电能可以被本车的辅助电源吸收或被相邻的列车牵引使用,这就是全部的再生制动。但是如果反馈的电能不能被吸收,则被储

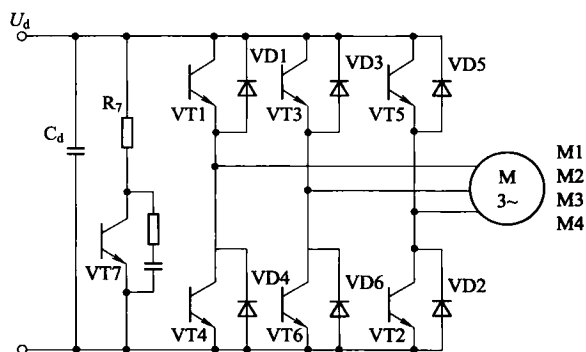


图 1-6 交流列车直—交逆变电路

但是反馈的电能不能被吸收,则被储



存在三相逆变器中间环节电容(C_d)上,电容(C_d)上不断增加的电能不能造成直流电压(U_d)急剧升高,该电压称为泵升电压。此电压有可能瞬时击穿逆变器元件。因此,必须在电容边并联一个斩波调阻电路(R_7 和 VT7),当直流侧电压高于 1800 V 时,斩波器(VT7)开通,将再生制动电流消耗在电阻器(R_7)上,这就变成电阻制动了。斩波器配合牵引逆变器,根据电机制动特性限制和调节制动电流,使电机保持恒转差率和恒转矩控制模式。这时动力制动转为部分电阻制动或全部电阻制动。

列车由运动状态逐渐减速直至停止的控制历经 3 个模式:恒转差率控制(恒电压、恒转差频率)模式;恒转矩 1(恒电压)模式和恒转矩 2(恒磁通)模式。

(1) 恒转差率控制模式

在高速时开始制动,此时三相逆变器电压保持恒定最大值,转差频率保持恒定最大值。随着列车速度的下降,减小逆变频率。电机电流与逆变频率成反比增加,制动力与逆变频率的平方成反比增加。当电机电流增大到与恒转矩相符合的值时,将进入恒转矩控制。但当电机电流增大到逆变器的最大允许值时,则从电机电流增大到该最大值的时刻起保持电机电流恒定,在一个小区段内用控制转差频率的方法进行恒流控制。在这种情况下,制动力将随逆变频率成反比增加。

(2) 恒转矩 1 模式

逆变器电压保持恒定最大值,控制转差频率与逆变频率的平方成反比,随着速度的下降,减小逆变频率,则转差频率变小至最小值。电机电流与逆变器频率成正比减小,制动力保持恒定。

(3) 恒转矩 2 模式

转差频率保持值恒定最小值,此时电机电流保持恒定。随着车辆速度的下降,逆变频率减小。同时采用 PWM 控制减小电机电压,即保持 V/f_i 恒定,则磁通恒定,制动力也恒定。

一般制动工况下,列车由高速减速至低速期间,一般处于恒电压、恒转差频率区;由 50 km/h 减速到完全停车的过程中,理论上大约处于恒转矩控制区。但实际上,在 10 km/h 以下的某个瞬间,再生制动力迅速下降,所以当列车减速至 10 km/h 以下后,为保持制动力恒定必须通过摩擦制动来补充制动力。

当列车通过长大下坡道或坡度较大的坡道时,如果由于重力作用使列车加速,这种加速会使动车上的感应电机转子转速超过转磁场转速。列车就会自动进入制动工况,阻止转速的进一步增加。

4. 制动电阻器箱

一般每个动车都安装有制动电阻箱,里面装有足够的制动电阻,如图 1-7 所示。电阻器的材料一般采用合金带钢条,因为这种材料具有稳定的电阻率和相当大的热容性。电阻带分组安装在由电磁瓶绝缘的铁架上,电阻带之间留有很大的通风空间。为了尽快地将制动时在电阻带上产生的热量散发出去(有时电阻带会烧红),制动电阻器箱的一端装有功率很大的散热风机。一般散热风机的转速都非常高,排风量相当大。虽然风冷可以使电阻带温度迅速下降,但是热量散发到隧道里去会使隧道的温度升高,对地下车站空调的工作环境造成很不利的影响,从而增加夏季通风和空调的电费支出。因此,由于有电阻制动地存在将会造成车辆能量和车站能量的双重浪费,导致地铁运营成本的大大提高。此外,由于电阻制动使得电阻带产生高温、明火还会引起列车车下其他设备和电缆线的烧损和加速老化,这将给列车运行带来潜在安



全隐患。因此,应尽量减少电阻制动次数,提高再生制动地利用率,这不仅具有经济上的意义,更重要的是还可消除可能发生的不安全因素。

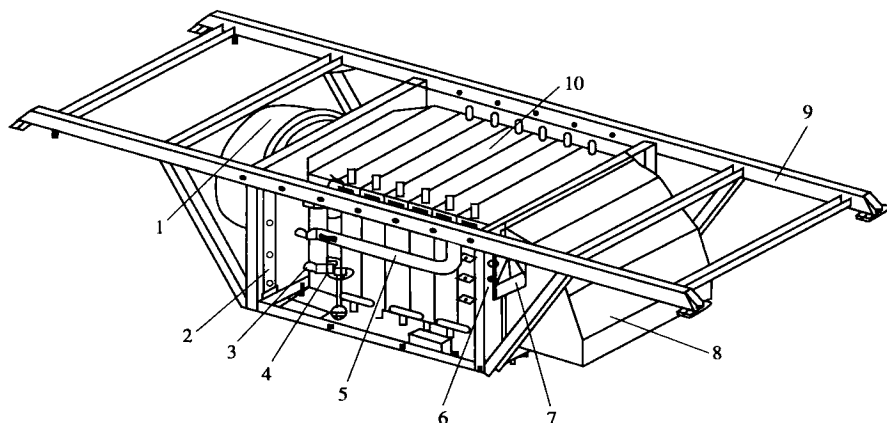


图 1-7 制动电阻箱

1—冷却通风机;2—风机连接板;3—端头;4—端头固定;5—接线排;6—端子盒;7—端盖;
8—出风口;9—安装架;10—制动电阻箱内装合金电阻带

5. 电制动滑行保护

电制动具有独立的滑行保护功能。由于四台电机是并联连接的,因此当牵引控制单元(DCU)检测出任意一根轴发生滑行时,会对4台电机进行同步控制,同时降低或切除4台电机的电制动力。

(二) 电磁涡流制动

上面提到的轨道电磁制动,其优点是制动力大且不受轮轨间黏着系数的限制,但其缺点在于钢轨的磨损很严重。为了充分发挥轨道电磁制动的优点,规避其不足,又设计出了电磁涡流制动。

电磁涡流制动就是利用电磁涡流在磁场下产生洛伦兹力,利用洛伦兹力的作用方向与物体运动的方向相反的物理原理来设计的一种电磁制动方式,这种制动方式具有无摩擦、无噪声、体积小、制动力大的优点。目前,轨道交通车辆利用电磁涡流制动的方式主要有盘形涡流制动和轨道直线涡流制动。

1. 盘形涡流制动

盘形涡流制动利用安装在车轴上的圆盘切割磁力线产生涡流和洛伦兹力,根据产生磁场的机理可分为电磁涡流盘形制动和永磁涡流盘形制动。

日本新干线的高速动车组采用的是电磁涡流盘形制动原理,如图 1-8 所示。该图中 I_F 为励磁电流,使电磁铁芯在制动工况下产生所需要的磁场; n 为轮对旋转速度; T_B 为制动力。电磁涡流盘形制动装置安装于电动车组的拖车上,利用相邻车辆的牵引电机的主电路电源作为励磁电源。

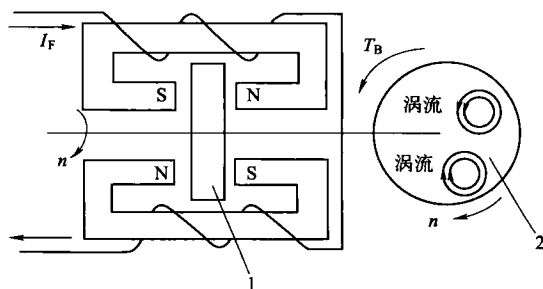


图 1-8 电磁涡流盘形制动原理

1—电磁铁芯;2—制动圆盘