



普通高等教育动车组系列规划教材

动车组牵引与制动

彭俊彬 编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

责任编辑 金 锋

封面设计 冯龙彬

01011010101010101

DONGCHEZU QIANYIN YU ZHIDONG

0101101010101

普通高等教育动车组系列规划教材

- 动车组设计
- 动车组工程
- 动车组装备
- 动车组传动与控制
- 动车组牵引与制动
- 动车组制造工艺
- 动车组运用与维修
- 车辆系统动力学
- 有限元方法及软件应用



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

地址：北京市宣武区右安门西街8号

邮编：100054

网址：<http://www.tdpress.com>

ISBN 978-7-113-08238-3



9 787113 082383 >

ISBN 978-7-113-08238-3/U · 2099

定 价：19.00 元

普通高等教育动车组系列规划教材

动车组牵引与制动

彭俊彬 编
柳拥军 审

中国铁道出版社

2007年·北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育动车组系列规划教材之一,全面介绍动车组制动装置和动车组牵引计算理论。

全书共分三篇。第一篇为动车组制动系统总论,介绍动车组制动的相关基本概念和动车组制动系统的组成和基本工作原理;第二篇为国产动车组制动系统,以CRH₁、CRH₂和CRH₅动车组为例,详细介绍了具体型号动车组制动系统的组成、工作原理及特点;第三篇为动车组牵引计算,在系统阐述列车牵引计算基本理论的基础上,对动车组列车的牵引计算方法进行了介绍。

本书是高等学校机车车辆专业本科生的教材,也可供相关专业的技术人员作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

动车组牵引与制动/彭俊彬编. —北京:中国铁道出版社,2007.8

(普通高等教育动车组系列规划教材)

ISBN 978-7-113-08238-3

I. 动… II. 彭… III. ①动车—牵引—高等学校—教材②动车—制动—高等学校—教材 IV. U266

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第133376号

书 名: 动车组牵引与制动

作 者: 彭俊彬 编

责任编辑: 金 锋 电话: 010-51873134 电子信箱: jinfeng88428@163.com

封面设计: 冯龙彬

责任校对: 张玉华

责任印制: 金洪洋

出版发行: 中国铁道出版社

地 址: 北京市宣武区右安门西街8号

邮政编码: 100054

网 址: www.tdpress.com

电子信箱: 发行部 ywk@tdpress.com

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

总编办 zbb@tdpress.com

版 次: 2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

开 本: 787mm×960mm 1/16 印张: 8.5 字数: 174千

印 数: 1~3000册

书 号: ISBN 978-7-113-08238-3/U·2099

定 价: 19.00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

铁路运输作为我国中长距离、大运量、快捷、安全、低耗、环保的运输形式，已成为交通运输体系的重要组成部分，在国民经济中占有非常重要的地位。尤其是铁路客运，每年要承担数以亿计的旅客运输，旅行高峰期更是达到日均数百万人的运量，使本来繁忙的铁路旅客运输不堪重负，运能不足的矛盾已非常突出，铁路旅客运输现状已成为制约国民经济快速发展的瓶颈。

1964年日本首次成功开行高速动车组以来，世界各国争相规划和建设高速铁路。如今，法国、德国、瑞典、意大利、西班牙、英国、韩国已成功开行了高速列车，为经济发展做出了贡献。2007年4月，随着我国实施铁路第六次大提速，我国研制的高速动车组也已正式投入运营，铁路客运速度已经达到200 km/h，今后的客运速度还将进一步提高，这标志着我国已经进入高速铁路国家的行列。

高速铁路涉及很多高新技术问题，作为铁路运输装备的高速动车组就是这些高新技术的综合和具体体现。它涉及系统集成技术、车体技术、转向架技术、制动技术、牵引传动技术、自动控制技术、网络与信息技术等。北京交通大学作为铁道部高速动车组理论培训基地，从2005年开始编写动车组培训教材并对从事动车组运用的在职技术人员进行培训。目前，在通过对动车组技术消化、吸收和再创新，打造中国品牌高速列车的过程中，铁路行业还迫切需要大量的动车组设计与制造高级人才。然而，国内高等学校在培养上述人才方面，缺少一套系统、完整讲述高速动车组设计与制造技术的系列教材。在铁道部和北京交通大学的大力支持下，以高速动车组理论培训基地教师为主，组织编写了9本适合铁道机车车辆专业本科生使用的动车组系列教材。

本教材作为系列教材之一，介绍动车组制动装置和动车组牵引计算方面的内容。

牵引和制动是动车组运行中矛盾而又统一的两个方面，要实现动车组的高

速运行，不仅需要大功率的牵引装置，还需要性能优良的制动装置，使其不能成为列车速度提高的障碍；除了牵引和制动方面的“硬件”，同时还必须改进“软件”，即通过牵引计算提高操纵水平，实现动车组运行的高速、安全和节能等，使“硬件”更好地发挥作用。动车组的制动系统与传统列车有很大的不同，由于运输设备技术水平的全面提高和新的牵引制动方式的应用，动车组的牵引计算方法和标准与传统列车相比也有重大的变化。本书就是为适应上述情况，而对动车组制动装置的组成、功能和特点以及动车组列车的牵引计算方法进行系统介绍。

本书共十章，主要内容包括动车组制动的相关基本概念和动车组制动系统的组成和基本工作原理、国产动车组（CRH₁、CRH₂和CRH₅型动车组）制动系统的组成、工作原理及特点以及动车组列车的牵引计算方法。

本书由北京交通大学彭俊彬编写。北京交通大学柳拥军审阅了全稿，并提出了许多宝贵意见。

由于水平所限，时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2007年6月于北京

目 录

第一篇 动车组制动系统总论

第一章 动车组制动系统概述	1
第一节 制动的相关概念	1
第二节 动车组制动系统的组成和特点	8
复习思考题	10
第二章 动车组制动系统的工作原理	11
第一节 电制动系统	11
第二节 空气制动系统	13
第三节 防滑装置	23
第四节 制动控制系统	26
复习思考题	34

第二篇 国产动车组制动系统

第三章 CRH ₂ 动车组制动系统	35
第一节 概 述	35
第二节 电制动系统	37
第三节 空气制动系统	38
第四节 防滑装置	49
第五节 制动控制系统	51
复习思考题	58
第四章 CRH ₅ 动车组制动系统	59
第一节 概 述	59
第二节 电制动系统	61
第三节 空气制动系统	62

第四节 防滑装置	67
第五节 制动控制系统	68
复习思考题	70
第五章 CRH₁ 动车组制动系统	71
第一节 概 述	71
第二节 电制动系统	75
第三节 空气制动系统	76
第四节 防滑装置	80
第五节 制动控制系统	81
复习思考题	83

第三篇 动车组牵引计算

第六章 牵引计算概述	84
第一节 列车牵引计算的内容和用途	84
第二节 对列车运行有直接影响的力	85
复习思考题	86
第七章 动车组牵引计算的力学模型	87
第一节 牵 引 力	87
第二节 运行阻力	90
第三节 制 动 力	97
复习思考题	100
第八章 合力曲线、运动方程及时分解算	101
第一节 合力曲线图	101
第二节 列车运动方程	102
第三节 列车运行时分解算	105
第四节 线路纵断面化简	107
复习思考题	109
第九章 动车组制动问题解算	110
第一节 制动距离的计算	110
第二节 紧急制动限速和列车必需制动能力的计算	113

复习思考题	114
第十章 动车组牵引电算	115
第一节 牵引计算算法与模型概述	115
第二节 牵引计算的单质点模型	116
第三节 牵引计算的多质点模型	121
复习思考题	127
参考文献	128

第一篇 动车组制动系统总论

第一章

动车组制动系统概述

第一节 制动的相关概念

一、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，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，如盘形制动装置中的制动缸、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，如盘形制动装置中的制动夹钳。在动车组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，到其完全停住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。两者的关系可用下式表示：

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

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

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

式中 v ——施行制动时的列车初速度，简称“制动初速”，km/h；

S ——制动距离，m；

a ——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的情况（主要是列车速度、信号和制动技术等）制订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。有时也给出制动减速度标准。我国《铁路技术管理规程》（以下简称《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。对于国产时速200km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。

二、制动对动车组的意义

对于动车组来说，制动的重要性早已不仅仅是安全问题了，它已成为限制列车速度进一步提高的重要因素；要想做到列车的“离速”，除了要有大的牵引功率之外，还必须有足够强的制动能力。

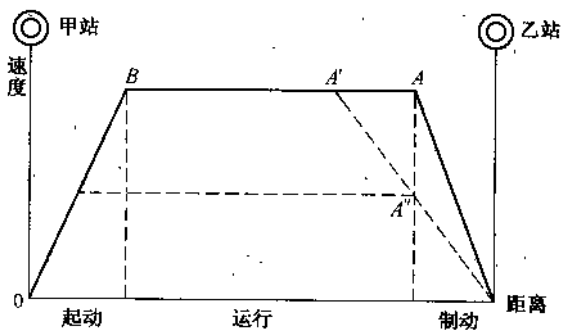


图 1-1 列车制动能力对速度的影响

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率的过程。在一定制动能力的保证下，动车组从图中 A 点开始减速进站。如制动能力不足，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；若想在原来的减速距离内停车，则列车运行的速度在起动阶段只能提升至 A'' 点的水平。从能量的角度来看，列车的制动能量和速度的平方成正比关系，时速 200~300 km 动车组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动车组的高速、安全运行有着至关重要的意义。

三、制动方式的分类

制动方式有多种分类标准，本书主要介绍如下三种：

(一) 按动能的转移方式分

列车制动过程中动能的转移方式包含两层含义：一是“转”的方式，即将列车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”就是将列车动能通过闸瓦与车轮踏面的摩擦转化为热能，“移”就是将由动能转化成的热能耗散于大气。按动能的转移方式，动车组所采用的制动方式主要有以下几种：

1. 盘形制动

盘形制动是在车轴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，将列车动能转变成热能消散于大气，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损。
- (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，盘形制动更适合于高速动车组。

2. 电阻制动

电阻制动曾在动车组上大量应用。它是在制动时将原来驱动轮对的自励牵引电动机变为他励发电机，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消散于大气，从而产生制动作用。

3. 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，它将电能反馈回电网，使本来由电能变成的列车动能再生为电能，而不是变成热能消散掉。

显然，再生制动比电阻制动更加经济。因此，20 世纪 90 年代后再生制动在各国的动车组上获得了广泛应用。

4. 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，把列车动能变为热能消散于大气，如图 1-3 所示。

磁轨制动的制动力不是通过轮轨黏着产生，自然不受轮轨间黏着力限制，因而能在黏

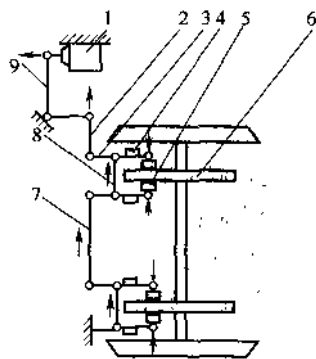


图 1-2 盘形制动装置

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

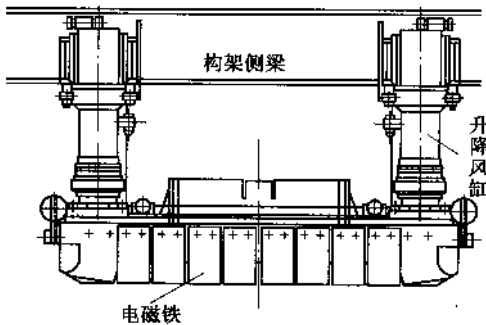


图 1-3 磁轨制动装置

着力以外再获得一份制动力。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，可满足高速动车组对制动距离的要求。

5. 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电磁吸力作为制动力。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，轨道涡流制动是将列车的动能转换为电

能，再转换为热能消散于大气。

6. 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电磁吸力，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。

7. 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，动车组运行时的空气阻力可增加 3~4 倍。

(二) 制动力的形成方式分

按照制动力的形成方式，制动方式又可分为黏着制动和非黏着制动。前者是通过轮轨间的黏着作用产生制动力，且制动力的最大值受黏着力限制；一旦轮轨间的作用力超过了轮轨黏着的限制，就会打滑。而非黏着制动方式则无需通过轮轨黏着产生制动力，其制动力的大小不受黏着力的限制。

在各国高速动车组所采用的制动方式当中，除磁轨制动和轨道涡流制动外，其他方式一般说来都属于黏着制动。

(三) 制动力的操纵控制方式分

制动力的操纵控制方式，动车组所采用的制动方式可分为空气制动、电空制动和电制动三类。

1. 空气制动

空气制动又分为直通式空气制动和自动式空气制动两种。直通式空气制动是较早出现的空气制动方式，直通式空气制动机的结构如图 1-4 所示。

空气压缩机（风泵）1 产生压缩空气并送入总风缸 2 储存，通过将制动控制阀 4 置于不

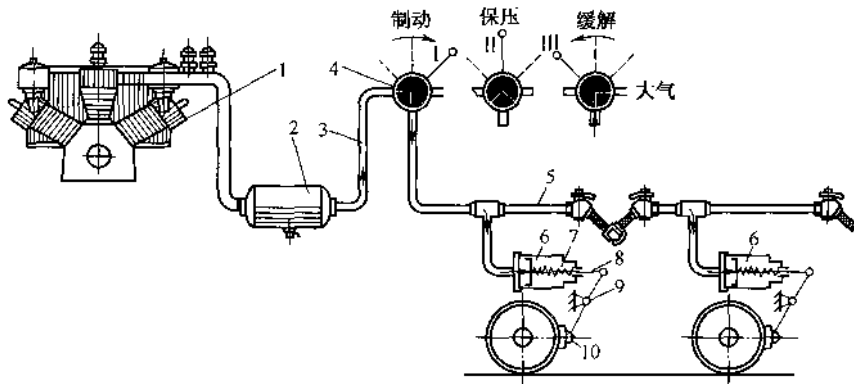


图 1-4 直通式空气制动机

- 1—空气压缩机（风泵）；2—总风缸；3—总风缸管；4—制动阀；5—制动管；6—制动缸；
7—缓解弹簧；8—活塞杆；9—制动缸杆及其支点；10—闸瓦及瓦托。

同的位置，可使总风缸内的压缩空气由制动管充入各车的制动缸，或将制动缸内的空气通过制动管由制动控制阀排向大气，以实现全列车的制动、保压和缓解。

直通式空气制动机的特点是制动管直接通向制动缸，制动管增压制动，减压缓解。其优点是构造简单，且既有阶段制动，又有阶段缓解，操纵灵活方便。缺点是当列车发生分离事故制动软管被拉断时，将彻底丧失制动能力；而且，列车前后部制动和缓解发生的时间差大，会造成较强的纵向冲击，不适于编组较长的列车。因此，列车的制动操纵后来就改用了自动式空气制动装置，如图 1-5 所示。

与直通式空气制动机相比，自动式空气制动机在每辆车上多了三通阀 6（或称分配阀）和副风缸 8。制动阀 4 通过控制制动管 5 的增减压使三通阀动作，实现全列车的缓解和制动，即制动缸的压缩空气由三通阀排向大气（同时，制动管的压缩空气充入副风缸），以及副风缸内的压缩空气由三通阀充入制动缸。

自动式空气制动机的特点与直通式的恰好相反，它是制动管增压缓解，减压制动。其优点是当制动软管被拉断时，列车可自动地产生制动作用；且由于各制动缸都是由本车的副风缸供气，缓解时各制动缸的压缩空气也都是从本车的三通阀处排出，使得全列车制动和缓解的一致性较好，大大缓解了列车的纵向冲击。

在我国制造的时速 200 km 的动车组中，只有 CRH1 和 CRH5 动车组将自动式空气制动作为备用的制动方式，所有车型正常情况下的空气制动都采用直通方式；但需要注意的是，动车组所使用的直通式空气制动机与前面介绍的最早出现的直通式空气制动机是有所不同的，其结构和功能详见后续章节。

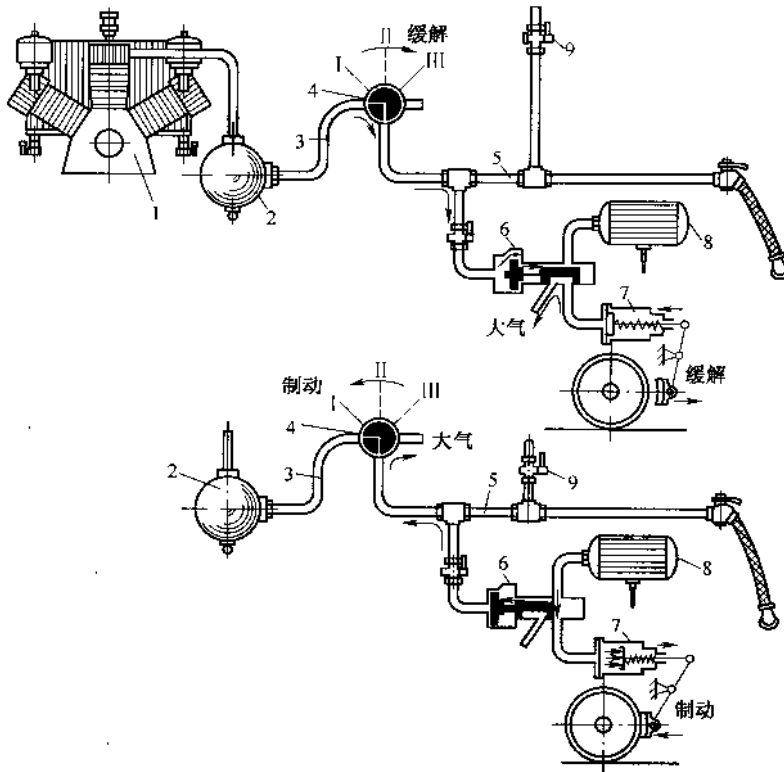


图 1-5 自动式空气制动机

1—空气压缩机；2—总风缸；3—总风缸管；4—制动阀；5—制动管；
6—三通阀；7—制动缸；8—副风缸；9—紧急制动阀（车长阀）。

2. 电空制动

电空制动是电控空气制动的简称，它是在空气制动机的基础上，每辆车加装电磁阀等电气控制部件而形成的。电空制动的特点是制动作用的操纵控制用电，制动作用的原动力还是压缩空气；当制动机的电控失灵时，仍可实行空气压强控制，临时变成空气制动机。

电空制动机通过电气指令控制每辆车电磁阀的开闭，来控制制动管的充/排风（增/减压），进而使三通阀动作，实现全列车的制动和缓解。因此，与空气制动机相比，它大大改善了列车前后制动和缓解的一致性，从而显著减轻了列车的纵向冲击，缩短了制动距离。电空制动本质上也是空气制动。

3. 电制动

操纵控制和原动力都用电的制动方式称为电磁制动，简称电制动，如前边讲到的电阻制动和再生制动。因电制动具有能够提供强大的制动力和其他诸多优点，已成为各种型号的高

速动车组的主要制动方式。

四、制动作用的种类

动车组的制动作用按用途可分为如下四大类：

(一) 常用制动

常用制动是正常情况下为调节、控制列车速度或进站停车所施行的制动。其特点是作用比较缓和，且制动力可以调节，通常只用列车制动能力的 20%~80%，多数情况下只用 50% 左右。

(二) 非常制动

非常制动是紧急情况下为使列车尽快停住而施行的制动。其特点是把列车制动能力全部用上，且作用迅猛，制动力为最大常用制动力的 1.4~1.5 倍。非常制动有时也称快速制动。

(三) 紧急制动

紧急制动也是在紧急情况下产生作用的制动方式，特点与非常制动类似。它与非常制动的区别在于：非常制动一般为电、空联合制动，也可以是空气制动；而紧急制动则只有空气制动作用。

(四) 辅助制动

辅助制动又包括备用制动、救援/回送制动、停放制动和保持制动等。

1. 备用制动

当运营中的动车组的电子制动控制装置或常用制动电路发生故障，无法实施正常的制动控制时，可启用备用制动设备进行制动。备用制动设备有两种控制方式：一种是利用备用制动指令线传递备用制动控制装置发出的电气制动指令，直接控制各车的电空转换阀产生制动作用；另一种则是启用动车组内备用的自动空气制动装置进行制动，即通过制动管的增减压来控制全列车的制动和缓解。

2. 救援/回送制动

救援/回送制动是通过救援机车的制动管来控制动车组的制动作用。当救援机车制动管的增减压信号传递至动车组时，又可采取两种控制方式：一种是将机车制动管与动车组的制动管直接相连，由救援机车控制动车组制动管内的压强；另一种则是在救援机车和动车组之间加装一个空电转换装置（制动指令转控器），由它将机车制动管内的空气压力信号转换为电气指令信号来控制动车组的电空转换阀，实现各车的制动和缓解，如图 1-6 所示。

3. 停放制动

停放制动是为使动车组能够存放在一定坡度的坡道上不溜车而施行的制动作用。停放制动可利用专门的弹簧停放装置使机械制动装置动作，也可将铁鞋放入车轮踏面下面阻止列车运动。停放制动有时也称驻车制动。

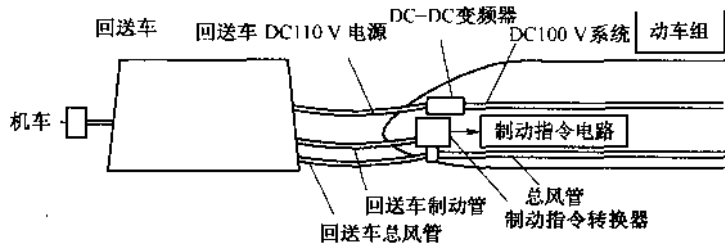


图 1-6 动车组的回送连挂示意图

4. 保持制动

保持制动是常用制动的一项辅助功能，当列车速度降至接近停车时自动减小列车的制动力以平稳停车；待列车停止后，再将制动力升高并保持一定的水平，以避免列车在坡道上溜逸。

第二节 动车组制动系统的组成和特点

一、动车组制动系统的组成

动车组运行速度高，给列车的制动能力、运行平稳性等方面提出一系列问题。因此，高速动车组必须装备高效率和高安全性的制动系统，为列车正常运行提供调速和停车的保障，并保证在意外故障或其他必要情况下，有尽可能短的制动距离。此外，高速运行的动车组对制动系统的可靠性和制动时的舒适度也提出了更高的要求。

所以，动车组制动系统的性能和组成与普通的旅客列车完全不同，它是一个能提供强大制动力并能更好利用黏着的复合制动系统，包含多个子系统，主要由电制动系统、空气制动系统、防滑装置和制动控制系统等组成，如图 1-7 所示。制动时采用电制动与空气制动联合作用的方式，且以电制动为主。

二、动车组制动系统的特点

制动是发展动车组所必需解决的关键技术之一，动车组的制动系统必须具有如下四个方面的特点：

（一）制动能力强、响应速度快

动车组的制动作用包括调速制动和停车制动，其制动能力首先表现为停车制动作用时对制动距离的控制。根据列车制动系统的结构特点和操纵作用（自动或人工控制），停车制动有不同的方式，在同样的制动装置、操纵方式和统路条件下，其制动距离基本上与列车制动初速度的平方成正比。所以，随着列车速度的提高，必须相应改进其制动装置和制动控制方式，使其制动能力强，反应速度快，才能满足缩短制动距离的要求，具体表现在以下两个方面：