



普通高等教育“十二五”规划教材·城市轨道交通系列
全国行业紧缺人才、关键岗位从业人员培训推荐教材
城市轨道交通创新人才培养丛书



城市轨道交通 电动列车维修基础 ——电气分册

丛书总主编 蔡国强

本册主编 蔡国强

本册副主编 于存涛 孙济安 王亚涛 张坤 甄慧
冯帅 韩宜君 刘晶 郑明明



北京交通大学出版社
<http://www.bjtp.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材·城市轨道交通系列
全国行业紧缺人才、关键岗位从业人员培训推荐教材
城市轨道交通创新人才培养丛书

城市轨道交通电动列车维修基础

——电气分册

丛书总主编 蔡国强

本册主编 蔡国强

本册副主编 于存涛 孙济安 王亚涛 张坤 甄慧
冯帅 韩宜君 刘晶 郑明明

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地阐述了城市轨道交通车辆电气系统基础知识,全书共7章,前3章节分别介绍了电动列车的主回路、控制回路、辅助回路,第4章介绍电动列车的其他系统,第5章介绍车辆的主要电器,第6章结合实际工作中常见故障,讨论故障原因及处理方法,第7章阐述常用检修工具的使用方法。本书在重点叙述专业知识的基础上,注重实际操作技能的培养,层次分明,生动形象,图文并茂,深入浅出,便于读者掌握和实际应用。

本书可作为应用型本科院校、高等职业院校的教学用书,也可作为企业在职人员的培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通电动列车维修基础. 电气分册 / 蔡国强主编. —北京:北京交通大学出版社,2014.8

ISBN 978-7-5121-2074-7

I. ①城… II. ①蔡… III. ①城市铁路-电力动车-电气设备-维修
IV. ①U266.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 200777 号

策划编辑:刘 辉

责任编辑:刘 辉

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编:100044

印 刷 者:北京艺堂印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:9.25 字数:231 千字

版 次:2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-2074-7/U·184

印 数:1~2 000 册

定价:49.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043,51686008;传真:010-62225406;E-mail:press@bjtu.edu.cn。

总 序

城市轨道交通具有用地少、运能大、污染小、效率高等特点，能全面提升和改变一个城市的经济发展格局，促进城市交通优化组合，解决地面交通压力，还可以在在一定程度上缓解国家在公共交通方面的能源和人力资源紧张状况。城市轨道交通已成为目前大城市缓解交通“两难”问题的优先乃至首选公共交通方式。随着“十二五”规划的制定，中国轨道交通行业迎来了空前的发展，当前我国城市轨道交通已进入快速发展时期。本套系列丛书作为城市轨道交通基础性教材，内容基本涵盖了城市轨道交通的主要方面，力求及时反映和概括城市轨道交通的新技术、新概念，并兼顾全面性、系统性、思想性和新颖性，可作为城市轨道交通高等教育、职业教育和关键岗位技术人员培训及学习参考使用。

北京交通大学出版社组织了“城市轨道交通创新人才培养丛书”的开发。本系列丛书首批规划出版 11 本，分别是：中国城市轨道交通发展史；低碳交通与大数据分析；城市轨道交通电动列车维修基础——电气分册；城市轨道交通电动列车维修基础——机械分册；城市轨道交通制动系统；城市轨道交通车辆安全监控技术；城市轨道交通实训与演练；城市轨道交通客运组织与服务；城市轨道交通电动列车驾驶基础理论；城市轨道交通安全管理；世界轨道交通列车运营安全。

本丛书由北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室蔡国强任主编，于存涛参编，全书各章节由蔡国强进行统稿。

本系列丛书参考了国内城市轨道交通设备、规划设计、电气安全、管理等方面的大量参考文献。在此向这些文献的作者表示深深的感谢。北京交通大学出版社刘辉编辑做了大量策划协调工作，使本丛书顺利出版。

由于编者水平有限，时间仓促，疏漏之处在所难免，敬请同行专家和读者批评指正，以不断提高本系列丛书水平，为我国轨道交通事业的发展尽绵薄之力。

编者
2014 年 6 月

前 言

随着我国国民经济的不断发展，各大城市的轨道交通建设均进入快速发展期。城市轨道交通具有运能大、能耗低、污染少、速度快、安全、准点的优点，已成为深受人们欢迎的城市交通工具。便捷的城市轨道交通在为市民带来出行便利的同时，也为轨道交通运营部门带来了新的管理课题。为此，北京交通大学出版社组织了“城市轨道交通创新人才培养丛书”的开发，本书是其中的专业基础课之一。

《城市轨道交通电动列车维修基础——电气分册》共分为七章，系统地阐述了城市轨道交通车辆电气系统基础知识，前三章节分别介绍了电动列车的主回路、控制回路、辅助回路，第4章介绍电动列车的其他系统，第5章介绍车辆的主要电器，第6章结合实际工作中常见故障，讨论故障原因及处理方法，第7章阐述常用检修工具的使用方法。

本书在重点叙述专业知识的基础上，注重实际操作技能的培养，层次分明，生动形象，图文并茂，深入浅出，便于读者掌握和实际应用。作为面向职业教育及城市轨道交通职工专业技能培养的教材，本书聚焦电气控制回路的基本组成和设备的认知，以提高解决实际故障的动手排除能力为目标，增强本书的实用性。

随着运营维护技术及管理的不断提升，本书在阐述基本原理和技术的基础上，还将在实践中不断充实、与时俱进地完善实例，从而成为技术和管理人才长期的“良师益友”。

参加本书编写的有：于存涛、甄慧、王亚涛、张坤、孙济安、刘晶、冯帅、韩宜君、郑明明等。

本书在编写过程中，直接或间接地参考了国内外有关轨道交通的论著，作者在参考文献中列出，在此向有关作者表示感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免存在疏漏和不当之处，敬请广大读者不吝赐正，以臻完善。

蔡国强

2014年8月于北京

目 录

绪论	1
复习思考题	4
第 1 章 城市轨道交通电动列车主回路	5
1.1 主回路的功能概述及构成	5
1.1.1 主回路工况	5
1.1.2 主回路系统构成	6
1.2 受流单元	9
1.2.1 受流器受流	10
1.2.2 受电弓受流	12
复习思考题	17
第 2 章 城轨电动列车牵引、制动、车门控制回路构成	18
2.1 牵引	18
2.1.1 概述	18
2.1.2 列车方向选择控制电路	18
2.1.3 列车牵引指令控制电路	19
2.2 制动	21
2.2.1 常用制动控制回路构成	21
2.2.2 紧急制动回路构成	23
2.3 城轨电动列车客室门控制电路构成	25
2.3.1 客室门开门电路	25
2.3.2 客室门关门电路	27
2.3.3 客室车门状态安全环路	27
2.3.4 门全关好继电器控制的工作点	28
2.3.5 单个客室门故障分析及解决方案	28

2.3.6 全列车门故障	30
2.4 司机室电器	31
2.4.1 操纵台	32
2.4.2 司机室控制屏柜	34
2.4.3 侧墙开关按钮	35
2.4.4 信号柜	36
2.4.5 司机室灯	37
2.4.6 前照灯	37
2.4.7 电热玻璃	38
2.4.8 右侧屏	38
2.4.9 列车控制和管理系统	39
2.4.10 列车通信设备	40
复习思考题	42
第3章 辅助回路	43
3.1 基本原理	43
3.1.1 辅助供电系统概况	43
3.1.2 辅助供电系统构成	45
3.1.3 工作原理	47
3.2 列车辅助供电系统	53
3.2.1 辅助逆变器基本参数	55
3.2.2 辅助逆变器电路选型	56
3.2.3 辅助供电系统功率确定	58
3.3 辅助回路常见故障及处理	59
3.3.1 设备检修的关键部件及注意事项	59
3.3.2 常见故障的分类	60
3.3.3 常见故障的诊断方法及处理	61
3.3.4 常见故障分析	64
复习思考题	67
第4章 其他系统	68
4.1 监控和信息系统	68
4.2 车内照明	72
4.3 客室电加热	73
4.4 旅客信息及广播系统	74
复习思考题	75

第 5 章 车辆主要电器	76
5.1 保护装置	76
5.1.1 熔断器	76
5.1.2 直流高速断路器	79
5.1.3 隔离开关	81
5.2 充电电容接触器	82
5.3 平波单元	83
5.4 VVVF 逆变单元	84
5.4.1 工作原理	84
5.4.2 牵引电机技术参数	87
5.5 电源装置	87
5.5.1 车间电源箱	87
5.5.2 蓄电池箱	88
5.6 牵引电机	90
5.6.1 牵引电机的结构及工作原理	90
5.6.2 牵引电机的功能	92
5.6.3 交流电动机的调速方式	92
5.6.4 牵引电机故障和原因	93
5.7 接地装置	93
5.8 继电器	94
5.8.1 继电器的分类	96
5.8.2 列车常用继电器	97
5.9 电磁式接触器	100
复习思考题	102
第 6 章 常见问题的处理	103
6.1 行程开关	103
6.1.1 行程开关的原理	103
6.1.2 行程开关的作用	103
6.1.3 行程开关的结构	104
6.1.4 行程开关在实际应用中的安装	104
6.1.5 行程开关的常见故障	104
6.1.6 行程开关的维修方法	105
6.2 电磁阀	105
6.3 电气布线	106

6.3.1 布线规则	106
6.3.2 布线设置	107
6.3.3 布线工艺	111
6.4 接线端子排	111
6.4.1 故障统计	111
6.4.2 原因分析	112
6.4.3 采取措施	113
6.5 电空接触器	114
复习思考题	115
第7章 电动列车检查修理常用工具	116
7.1 万用表	116
7.1.1 万用表简介	116
7.1.2 万用表的使用方法	118
7.1.3 指针万用表和数字万用表的选用	120
7.1.4 万用表使用的注意事项	121
7.1.5 数字万用表损坏危害及原因	122
7.2 兆欧表	122
7.2.1 兆欧表简介	122
7.2.2 兆欧表的特点	123
7.2.3 兆欧表的分类及选用	123
7.2.4 兆欧表的使用方法	124
7.2.5 兆欧表使用的注意事项	125
7.3 试电笔	126
7.3.1 试电笔简介	126
7.3.2 试电笔使用的注意事项	127
复习思考题	128
附录 A 相关标准	129
附录 B 部分缩略语	134
参考文献	135

绪 论

电动列车，顾名思义就是利用电能驱动的列车。列车的受电装置从供电网获取电能，经过一系列保护、控制等工作电器将电能依据驾驶指令逐步施加到牵引电机上，电能通过电动机转化为机械能，带动列车运动。

为了使列车能够依据驾驶指令达到平稳、可靠的运营要求，列车还需要有一些低压控制电路，用以接受、传递驾驶指令，并控制在牵引电机工作的高压主回路中加装的电器装备。本书将对城市轨道交通电动列车高压主回路及控制电路部分的主要环节进行介绍。

现代城市轨道交通电动列车广泛采用“交—直—交”电力传动方式的意义：为了减少远距离传输的电损耗，发电厂发出的交流电采用了高压方式传输，通常城市轨道交通系统降压变电站接受 35 千伏交流电，由降压站输出 10 千伏交流电至牵引变电站，牵引变电站经过变压、整流后，输出直流 1500 伏（或 750 伏）给牵引供电网络。

采用架空式供电网络的城市轨道交通运营线路，电动列车使用受电弓受流，网压为直流 1500 伏；有些城市轨道交通运营线路使用第三轨供电网络，电动列车使用受流器从第三轨接受电流，网压为直流 750 伏。

直流电机虽然具有调速控制方式简单的优势，电动列车曾经长期使用直流电机做牵引，但是同功率情况下交流电机与直流电机相比较，交流电机具有结构简单，成本低廉，体积小、质量轻、寿命长、维护简单等优势。随着交流电机调频调速技术成熟及广泛应用，现在城市轨道交通电动列车已使用交流电机替代直流电机作为牵引原动机。

交流异步电机的转速公式为

$$n = 60 f(1-s) / p$$

其中： n ——异步电机转速；

p ——异步电机的极对数；

s ——异步电机的转差率；

f ——供电电源的频率。

$$s = (n_1 - n) / n_1$$

式中： n_1 为同步转速， n 为电机转速。

从上述公式可以看出，有以下两种调速方式。

一种是通过改变定子磁极对数 p ，能够实现有挡的有级调速，但该类型电机通用性差，并且结构复杂、价格高、维护性差。

另一种是通过改变供电电源频率实现电机调速。当主磁极对数 p 不变时，电机转子转速 n 与定子电源频率 f 成正比，通过连续改变定子电压供电频率 f 就能平滑、无级地调节异步电动机的转速。这种调速方法称为变频调速，不仅能实现无级调速，并且能适用于各种异步电动机的调速需要。特别指出的是，能适用我国现在普遍应用的鼠笼式三相交流异步电动机的调速需要。

变频调速的优点：

- (1) 调速范围宽，可以使普通异步电动机实现无级调速；
- (2) 启动电流小，而启动转矩大；
- (3) 启动平滑，消除机械的冲击力，保护机械设备；
- (4) 对电机具有保护功能，降低电机的维修费用；
- (5) 具有显著的节电效果；
- (6) 通过调节电压和频率的关系可以方便地实现恒转矩或者恒功率调速。

在“交—直—交”电力传动方式中，第一个“交”是源于城市电网提供的高压工频交流电；“直”是指经过牵引变电站变压、整流输出给列车使用的牵引供电接触网，为电动列车提供直流电，这是为了调频调速的需要，通过控制半导体器件 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管) 的快速开通与关断，把直流电压斩波变成电压脉冲序列，并通过控制电压脉冲宽度和脉冲正、反相序列的组合，模拟成为周期、幅值可调节的交流电输出，以达到变压变频的逆变；第二个“交”就是指直流电经过逆变，转变为受牵引指令控制的频率、电压可在一定范围内调节的三相交流电，以此对交流牵引电机工况实施控制，使电动列车实现了由低速平稳启动至高速运行之间获得一个宽泛的速度可调节范围。

目前，变频调速已经成为异步电动机最主要的调速方式，在电动列车牵引领域已被公认为是近代最优越的牵引调速方式，并已得到了广泛的应用。

城市轨道交通电动列车依靠各种电气设备准确可靠的工作，其电气系统的工作贯穿于电动列车的整个操纵过程。电气系统根据特定的信号和要求，自动或手动接通或断开回路，连续或断续地改变回路参数，从而对电路或机电器件进行控制、保护、检测和调节。

电气系统可以按多种特征进行分类，按接入的电路分类有以下 3 种。

(1) 主回路。

接在电力回路中的电气设备，如受流装置、直流快速开关、熔断器等。

(2) 控制回路。

接在用于控制、操作主回路、辅助回路所设电路的电气设备。如司机控制器、接触器、继电器等。

(3) 辅助回路。

接在客室空调系统、电热器、风源系统的空气压缩机等电路中的电气设备。如电磁接触器、中间继电器等。

按电气设备的用途分类, 包括以下 3 种。

(1) 控制电气设备。

控制电气设备是用于对其他电气设备进行切换、调节, 包括各种开关电器, 如接触器、转换开关、控制继电器等。

(2) 保护电气设备。

保护电气设备是用以检测、保护电气设备不受过电压、过电流等的冲击或其他机械破坏的电器。如熔断器、快速开关、过载、欠压、接地、热继电器等。

(3) 检测电器。

检测电器是用以和其他设备配套, 监视、检测各种电压、电流等信号的电器。如速度继电器、直流互感器、压力传感器等。

按传动方式分类如下。

(1) 手动。

如隔离开关、司机控制器、旁路开关等。

(2) 电空传动。

靠压缩空气推动触头动作的电气设备, 如电空接触器。

(3) 电磁传动。

靠电磁铁带动触头动作的电气设备, 如电磁接触器。

按电流的种类分类如下。

(1) 直流电气设备。

直流电气设备是由直流供电工作的。

(2) 交流电气设备。

交流电气设备是由交流供电工作的。

按执行机构的结构分类如下。

(1) 有触点电气设备。

有触点电气设备的执行机构采用运动部件的。

(2) 无触点电气设备。

无触点电气设备由电子元件完成执行机构任务, 多指电子元件构成的具有开关特性的电气设备。

电动列车的电气设备其工作状态受以下主要因素影响。

(1) 振动的影响。

列车经过道岔、弯道产生的横向振动; 列车运行中的启动、制动产生的纵向振动及大型部件和空压机的振动冲击波及的振动和电动斥力引起振动; 列车轮对经过轨道接缝处时所产生的垂向振动等。这些振动均会影响电气设备的可靠性和使用寿命。所

以在选用、布置和安装气设备时，必须考虑振动的影响；例如：车载微机系统安装支座需要使用弹性减震装置。固定设备的螺栓、螺钉应有弹簧垫圈和锁紧螺母或滞缓装置等，防止自行松脱；对于有运动部分的电气设备，应按其安装技术要求进行安装，防止由于振动或加速度引起的惯性作用，造成工作的不可靠。

(2) 温度、湿度、灰尘的影响。

列车的电气设备一方面会受到隧道内温度和湿度的影响，另一方面，设备正常工作中、发生过载或短路时引起电流冲击，都会导致自身发热，会影响设备部件的绝缘性能，加速绝缘老化。此外，灰尘、潮湿可能会引起设备爬电现象，潮湿也会引起带电器件的化学腐蚀现象等影响电气设备寿命问题。

(3) 电压、电流波动的影响。

由于列车频繁进行启动、制动停车以及各种不同的运行工况转换，通过载流部件的电流将随着牵引电动机的工作状态而不断变化的。因此电气设备是处在电流、电压波动范围较大的情况下，经常受到电流的冲击，甚至大电弧的冲击，缩短其使用寿命。为了减小触头的磨损，在零件的机械与电气强度方面技术规格要求应更高一些。

由此可见，车上电气设备的工作环境是相当恶劣的，为了确保运输安全、正点、准确可靠、畅通，必须对其使用的电气设备有较高的要求，从而克服工作环境的各种影响，更可靠地工作。一般要求：动作准确可靠、能量消耗小、有足够的电气寿命和机械寿命，在运行中不与车辆发生共振，体积小、质量轻、安装空间合理和维修方便。

复习思考题

1. 现代城市轨道交通电动列车广泛采用“交—直—交”电力传动方式的意义是什么？
2. 交流异步电机有哪几种调速方式？
3. 变频调速一般有哪些优点？
4. 在“交—直—交”电力传动方式中，“交”、“直”、“交”分别代表什么含义？
5. 试述电动列车电气系统的分类方法和具体内容？
6. 电动列车的电气设备工作时主要受哪些因素影响？

第 1 章 城市轨道交通电动列车主回路

1.1 主回路的功能概述及构成

主回路是牵引电机的工作回路，通过指令对牵引电机进行控制，可以实现列车牵引和电制动功能，同时也可完成向前、向后的方向转换。

现代采用交流旋转电机的城市轨道交通电动列车，无论哪一款车型的主回路都是由受流单元、保护装置（熔断器、高速断路器、隔离开关）、线路接触器、电抗器、电容器、VVVF 逆变单元、牵引电机、回地装置等部分所构成。

为保证直流供电电压的品质，采用线路电抗器和电容滤波器来吸收牵引供电网中直流电压的脉动波纹，使逆变单元得到的直流成分更加平顺。

逆变单元由 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor，绝缘栅双极型晶体管）模块组成，该单元能够实现将输入的直流电逆变为交流电并变压变频输出，从而控制交流感应电机的转速，实现列车速度在很宽泛的范围内得以平稳调节。

1.1.1 主回路工况

牵引电机可以工作在牵引工况或制动工况，这两个工作状态由主逆变器来管理，当电制动时，主逆变器工作在整流状态，将牵引电机产生的交流电转换成直流电，并反馈回供电网供其他车辆使用。

列车常用制动采用电（再生）制动和空气制动混合运算的制动方式，再生制动优先，当电制动不足以完成制动指令时，再由空气制动补足。

1. 主回路牵引工况

主回路通过受流装置连接至供电网络，获得直流电能→熔断器、直流高速断路器（HB）等保护装置→线路接触器（LB）→滤波电抗器→滤波电容器→逆变单元

(VVVF 主逆变器) → 将直流电转换为三相交流电 → 驱动三相感应交流电机 → 接地装置。

2. 主回路电制动工况

主回路电制动工况时, 牵引电机转子被列车轮对带动旋转, 切割定子磁力线产生感生电动势并被导出, 此时牵引电机处于发电机工作状态, 发出的电势经逆变器模块 (此时工作在整流状态) 将交流电变为直流电 → 线路电抗器 (FL) → 线路接触器 (LB) → 高速断路器 (HB) → 主熔断器 (MF) → 主隔离开关 (MS) → 受流装置反馈回牵引供电网。

相比于电制动的建立, 空气制动建立响应时间较长 (>1 秒), 为了实现电制动和纯空气制动之间的平滑过渡, 减少冲撞、缩短空走距离, 在供电网压过高 (≥ 1.2 倍额定电压) 不再接受反馈时, 再生制动退出转为纯空气制动的瞬间, 牵引电机发出的电能将被引导在制动电阻上, 实现暂态的纯电阻制动, 即列车动能转换成电能再转变为热能耗散在大气中。

3. 列车向前、向后的换向

对三相交流电机而言, 输入的相序 U、V、W 颠倒任意一相, 电机都会发生反转, 所以使用交流旋转电动机的城市轨道交通电动列车是通过改变逆变器输出相序来实现牵引向前和向后 (即倒车) 的操作, 不需要切换主回路的构成。

1.1.2 主回路系统构成

架空式受电形式的列车主回路系统如图 1-1 所示。

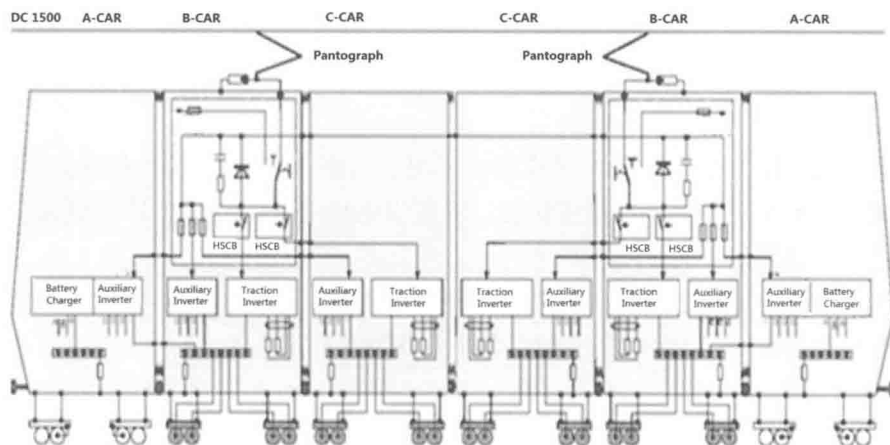


图 1-1 架空式受电形式的列车主回路系统示意图

在列车顶部安装受电弓，用于将电流从电网引入列车。

在受电弓的旁边安装避雷器，主要用于防止雷击过电压和操作过电压，保护主电系统。

电流由受电弓引入再到高压隔离开关，其中隔离开关的作用为用于车间电源转换和作为高速断路器前的隔离接地。

熔断器面板（在高压箱内）由两个 100 A、一个 160 A 和一个 250 A 的熔断器组成。两个 100 A 的分别为 B 车和 C 车辅助逆变器提供保护，而一个 160 A 的熔断器则为 A 车充电机提供电流保护、一个 250 A 的熔断器则为去 C 车的车端连接器电路提供电流保护。

在 B1 和 B2 车的底部分别安装两台高压箱，每台高压箱中安放两台高速断路器，其中一台给 B1 或 B2 车牵引逆变器供电，另一台给 C1 或 C2 车牵引逆变器供电。

每台动车（B 车和 C 车）上的牵引逆变器分别给两台转向架上的四台牵引电机供电。在牵引工况下，主回路系统通过安装在 B 车车顶的受电弓将接触网的 DC1500V 引入 B 车底架下部的高压箱（HVB）箱中，在高压箱（HVB）中受高速断路器控制后，经牵引逆变器逆送入牵引电机，并最终通过接地碳刷经由车体、转向架轴端接地装置到轨道形成电流回路。具体如图 1-2 所示。

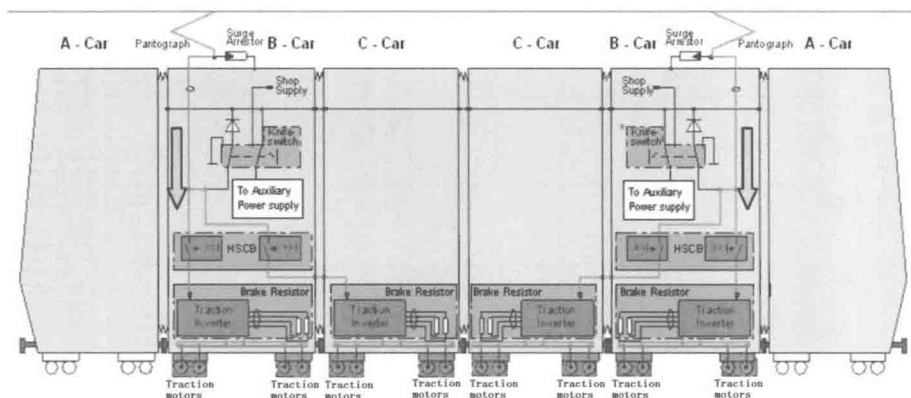


图 1-2 牵引工况

架空线（供电网）→受电弓（受流装置）→高速断路器（保护装置）→牵引箱（主逆变器 VVVF 箱）→牵引电机→接地装置

制动工况下，通过牵引电机将列车的动能转化为电能，并经牵引逆变器、制动电阻以热量的形式散发，再生制动是通过牵引电机将列车的动能转化为电能，并经牵引逆变器、高速断路器、受电弓等将电能反馈给电网，再生制动优先施加，具体如图 1-3 所示。



第三轨受电形式列车主回路图,如图 1-4 所示。



牵引电流由受流器引入，再到主隔离开关，其中主隔离开关接地位置的主要作用是检修列车使用，作为主熔断器和高速断路器之前的高压安全隔离；车间电源位置的主要作用是：在没有设置第三轨的检修车间内，通过电缆插座方式将 DC750V 只是引入列车辅助供电系统，给列车静态调试提供电源。