

普通高等院校轨道交通类专业“十四五”系列教材

城市轨道交通车辆电气控制

主 编 ◎ 王茹玉 张治国

副主编 ◎ 李晋武 任小文

参 编 ◎ 王月太 王 科 王一凡

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

城市轨道交通车辆电气控制 / 王茹玉, 张治国主编
—成都: 西南交通大学出版社, 2023.2
ISBN 978-7-5643-9068-6

I. ①城… II. ①王… ②张… III. ①城市铁路—铁路车辆—电气控制 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 246445 号

Chengshi Guidao Jiaotong Cheliang Dianqi Kongzhi

城市轨道交通车辆电气控制

主 编 王茹玉 张治国

责任编辑 / 梁志敏
封面设计 / GT 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: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm
印张 12.75 字数 319 千
版次 2023 年 2 月第 1 版
印次 2023 年 2 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-9068-6
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

城市轨道交通作为我国新兴的城市公共交通方式进入了快速发展阶段，尤其是在北京、上海这样的城市。快速发展伴随而来的是相关专业人才的短缺，这就需要培养大量具有工程实践能力和创新能力的卓越工程师类人才，为轨道交通安全、高效、可靠运营提供保障。

本书立足于理论和实践相结合，以当前国内地铁列车的主流车型为主体，对车辆电气设备的结构、工作原理进行了图文并茂的解析，强调理论在实践过程中的应用，使学生不仅掌握城市轨道交通电气系统的理论知识，还能够对其进行分析、实验和综合，掌握实用的维护、维修知识与操作技能。

本书为校企合作编写，内容贴合实践，语言通俗易懂。全书共分为六个章节：第一章，城市轨道交通车辆电气控制系统，主要介绍了城市轨道交通车辆电气控制系统主要部件及其功能，并对车辆运行中工况和受力情况进行了分析；第二章，城市轨道交通车辆牵引与传动系统，主要介绍了城市轨道交通车辆各种牵引传动系统的组成及控制原理；第三章，城市轨道交通车辆牵引与制动控制系统，对车辆牵引与制动系统的电路及控制原理进行了分析；第四章，城市轨道交通车辆车门电气控制系统，介绍了车门的类型、编号、车门控制系统及屏蔽门；第五章，城市轨道交通车辆空调系统，介绍了城市轨道交通车辆空调系统的特点、工作原理及布置情况；第六章，城市轨道交通车辆辅助供电系统，分析了车辆辅助供电系统电路、蓄电池的工作原理等。

本书由西安交通工程学院的王茹玉、张治国担任主编并负责全书的统稿工作；由兰州交通大学的李晋武和西安交通工程学院的任小文担任副主编；西安交通工程学院的王月太和部分企业人员参编。编写分工具体如下：第一章由王茹玉编写；第二章由张治国编写；第三章由王茹玉编写；第四章由李晋武和任小文编写；第五章由张治国编写；第六章由王茹玉、张治国、王月太共同编写。本书编写过程中得到了杭港地铁有限公司王科、王一凡的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！书中引用了部分文献和图片，谨向文献的作者表示诚挚的敬意和感谢！

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免存在疏漏和不妥之处，恭请广大读者批评指正。

编 者

2022年7月

目录

第一章	城市轨道交通车辆电气控制系统	1
第一节	城市轨道交通车辆电气控制系统基础	1
第二节	城市轨道交通车辆电气控制系统主要部件功能	4
第三节	城市轨道交通车辆运行工况与受力分析	24
第二章	城市轨道交通车辆牵引传动系统	33
第一节	车辆电气牵引系统	33
第二节	直流牵引传动系统	36
第三节	交流牵引传动系统	53
第四节	直线电动机牵引传动系统	76
第三章	城市轨道交通车辆牵引与制动控制系统	86
第一节	电动列车电气控制系统电路识读	86
第二节	电动列车的激活控制	96
第三节	电动列车的初始条件设置控制	102
第四节	电动列车的牵引和制动控制	109
第四章	城市轨道交通车辆车门电气控制系统	125
第一节	车门类型	125
第二节	车门编号及结构	127
第三节	车门控制系统及操作	132
第四节	屏蔽门系统	141
第五章	城市轨道交通车辆空调系统	145
第一节	车辆空调系统基本功能和特点	145
第二节	空调制冷基本原理及系统布置	146

第三节	车辆空调系统部件	150
第四节	通风系统	155
第五节	车辆空调系统控制	159
第六节	车辆空调系统操作	161
第六章	城市轨道交通车辆辅助供电系统	167
第一节	城市轨道交通车辆辅助供电系统及供电电路	167
第二节	城市轨道交通车辆辅助供电系统电路分析	173
第三节	城市轨道交通车辆蓄电池电源及其控制	187
参考文献	198



第一章 城市轨道交通车辆电气控制系统

城市轨道交通系统是指在城市中使用车辆在固定导轨上运行并主要用于城市客运的交通系统。城市轨道交通的定义为：以电能为动力，采取轮轨运输方式的快速大运量公共交通的总称。城市轨道交通车辆作为一种便捷的交通工具，最根本的任务是承载旅客完成由甲地往乙地的运输任务。车辆运行的速度及其控制是城市轨道交通车辆完成运输任务的关键。

城市轨道交通车辆的运行速度受各方面因素约束，如列车运行图、区间及车站信号线路状况、列车上各功能设备的状态、乘客舒适度、行车安全性等。因此，对城市轨道交通车辆的控制就是根据这些约束条件进行综合处理并形成最终的结果，即列车应该以何种方式或何种速度运行，并将这个决策贯彻至车辆控制系统的每一个控制单元。

第一节 城市轨道交通车辆电气控制系统基础

一、城市轨道交通车辆电气控制系统概述

城市轨道交通车辆控制系统根据运营系统给出的命令对各功能子系统进行调控，并在各个功能级上（如牵引控制、制动控制等）保证列车运行要求的实现。其主要特征是控制，即控制策略和控制手段的实现。数学模型化的控制方法和传统的 PID（乘客导向系统）调节在城市轨道交通车辆控制中已经取得了重要的成果，但是由于控制参数的多变性和离散性，以及系统的非线性和子系统结构的可变性，加大了 PID 调节的复杂性和困难程度。因此，利用人工智能原理的各种控制方法，特别是在网络环境下的控制方法，也逐步应用于车辆控制系统中。

城市轨道交通车辆控制系统或者列车和外围系统的接口，都是通过无线方式与地面联网，以满足整个运营系统调控和旅客信息服务的要求。因此，城市轨道交通车辆需要提供一个良好的人机界面，使驾驶员能随时了解整个列车的运行状态和各主要单元部件的工作状态，以便在必要时进行人工干预。城市轨道交通电动列车驾驶员在操作时，只需发出一些简单的命令，而不必知道命令由谁来执行。

城市轨道交通车辆需要有系统操作软件和大容量存储器的高级控制机（微机控制系统）来作为控制核心，并选择传送信息量大且具有实时性的网络（总线控制）来连接它们，以保证网络连接和实时响应。在车辆控制系统中，还需要直接面向现场完成 I/O（输入/输出）处

理，并能实现直接数字控制的智能化装置，将现场的各种实时过程变量转换为数字量，并将这些变量送往功能层的相应控制子系统。可以这样说，城市轨道交通车辆上的各个设备，通过机械、电气、电磁、网络等，形成一个统一的整体，通过驾驶员操纵实现列车运行的控制。而对于装置有列车自动控制系统（ATC）的电动列车，还可实现城市轨道交通系统的列车自动驾驶系统（ATO）、列车自动保护系统（ATP）、列车自动监控系统（ATS）、列车通信控制系统（TCC）等全自动控制。城市轨道交通车辆电气控制系统主要由主牵引传动系统、牵引制动控制系统、辅助供电系统和列车控制系统组成。

城市轨道交通车辆控制原理如图 1-1 所示。首先，动力电源电流由变电所送到接触网经受流器（受电弓）引流到车辆；然后，经过车辆牵引传动控制系统将电流送入牵引电动机，牵引电动机驱动车辆运行，驾驶员通过操纵驾驶室控制装置改变牵引电动机的运行速度和运行方式，此时电流经过车辆轮对、钢轨（或回流装置）回到变电所，形成闭合回路。

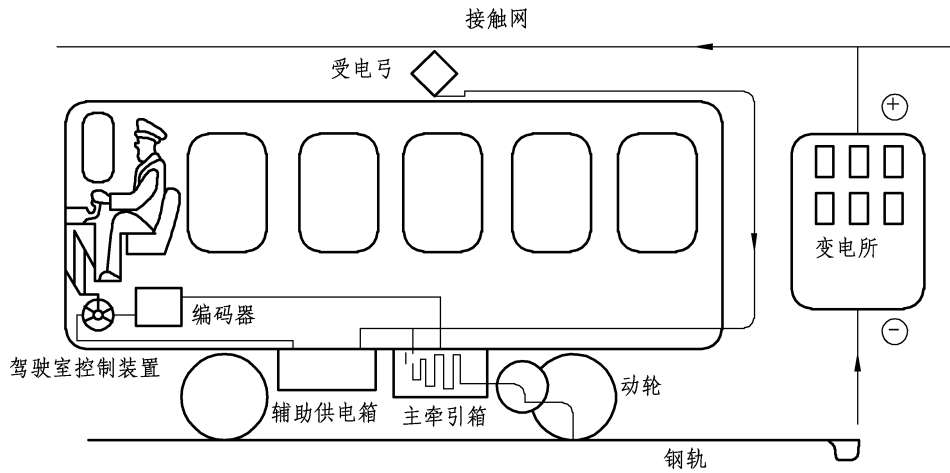


图 1-1 城市轨道交通车辆控制原理示意图

图 1-2 所示为城市轨道交通车辆电气控制系统组成框图。城市轨道交通车辆的主牵引传动系统（主电路系统）是列车牵引动力和电制动力得以实现的载体。辅助供电系统为城市轨道交通车辆提供辅助供电，主要为下列系统提供电源：为主传动系统提供通风冷却中压电源和控制通信低压电源；为制动系统的空气压缩机提供中压电源和控制通信低压电源；为全车提供客室正常照明、应急照明；为空调系统提供中压电源和控制通信低压电源；为列车的自动控制系统、通信及列车综合管理系统提供低压电源。

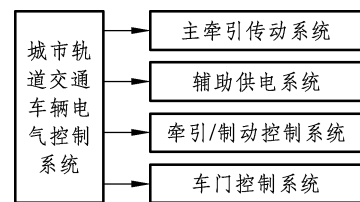


图 1-2 城市轨道交通车辆电气控制系统组成框图

牵引/制动控制系统是列车实现牵引和制动控制相关功能的控制电路系统，通过电气、器件的组合实现一定的逻辑功能，通过单元模块的控制程序运算，再经列车通信控制系统的实时响应，最终实现对列车的有效控制。

车门控制系统关系到城市轨道交通车辆的运营安全及乘客的人身安全，因此，在城市轨道交通车辆中，将客室车的状态直接与列车的运行状态相关联，通过列车信息显示系统，告知和提醒驾驶员所有车门的状态，从而保证行车的安全。图 1-3 所示为驾驶员驾驶城轨车辆。



图 1-3 驾驶员驾驶城轨车辆

二、城市轨道交通车辆总体控制

城市轨道交通车辆的控制实际上是对牵引电机的控制。在轨道交通运输中，采用电动机机械传动来满足车辆牵引的电气部分，称为电力牵引传动控制系统。它是以牵引电动机为控制对象，通过控制系统对电动机的速度和牵引力进行调节，以满足车辆牵引和制动特性的要求。根据电动机形式的不同，控制系统可分为两大类，即采用直流牵引电动机的直传动控制系统和采用交流牵引电动机的交流传动控制系统。

城市轨道交通车辆的控制实际上是对牵引电机的控制。利用电机的可逆性原理可以完成车辆牵引和电制动工况的控制。在牵引工况时，牵引电机用作电动机运行，城市轨道交通车辆通过受电弓将接触网的 DC 1 500 V (DC 750 V) 电能引入车底架下部高压箱中，在高压箱中受高速断路器控制后，经牵引逆变器送入牵引电动机，牵引电动机驱动车辆轮对从而牵引列车。在电制动工况时，牵引电机用作发电机运行，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。如果电能不能反馈给电网，则通过牵引逆变器和制动电阻以热能的形式散发掉。图 1-4 所示为城市轨道交通车辆单元车的总体控制。

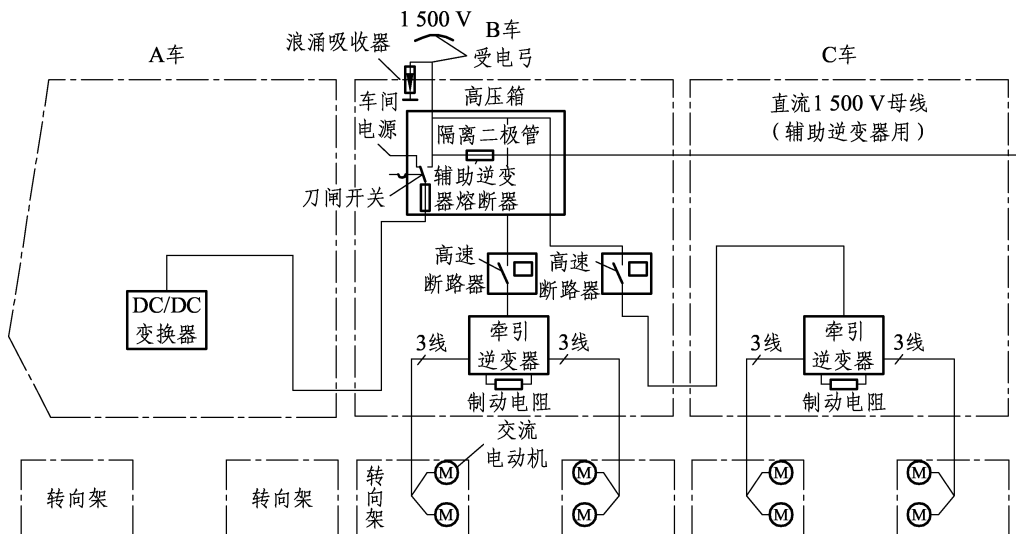


图 1-4 城市轨道交通车辆单元车的总体控制

三、城市轨道交通车辆电气部件与设备

城市轨道交通车辆电气控制系统由车辆上的各种电气部件、设备及其控制电路组成。城市轨道交通车辆内部设备包括:服务于乘客的车体内固定附属装置和服务于车辆运行的设备。服务于乘客的设备有客室照明、通风、空调、座椅、扶手等;服务于车辆运行的设备有蓄电池箱、继电器箱、主控制箱、电动空气压缩机组、总风缸、电源变压器、各种电气开关和接触器等。除此之外,还有保证列车安全、正常、舒适运行的其他系统,如列车诊断系统、列车自动控制系统(ATC)、通信系统等。

以庞巴迪公司与长春客车厂生产的地铁车辆为例,其主要设备配置如图 1-5 所示。在城市轨道交通电动列车中,动车和拖车通过车钩连接成的一个相对固定的编组,称为一个(动力)单元。一列车可以由一个或几个单元编组组成。图示列车为两单元六节编组,记为 $-A*B*C=C*B*A-$, B 为带受电弓的动车, C 为动车(分别记作 M' 、 M), A 为带驾驶室的拖车(记作 T_c), 图示列车也称为 4M2T 编组列车。PH 箱(高压箱)位于 B 车底架下部的牵引高压箱内,高速断路器位于 PH 箱(高压箱)的高压区内,与 B、C 车的逆变器箱相连接。PA 箱位于 C 车底架下部,主要由 C 车的逆变器和辅助逆变器组成。

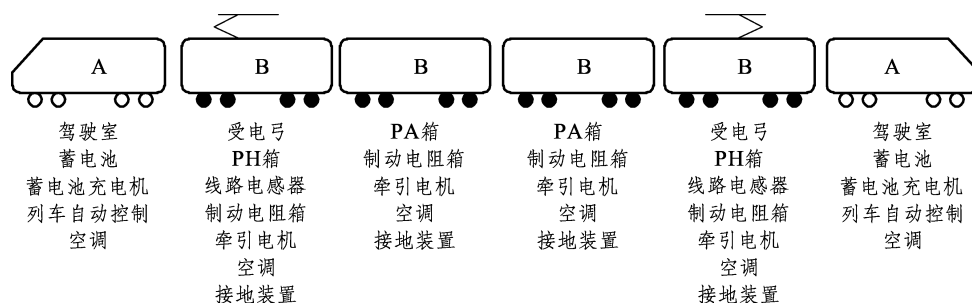


图 1-5 地铁车辆的主要设备配置

列车的车辆间各电气设备靠密接式车钩实现机械、电气气路的整体连接。其中每一节车的两端(A车驾驶端)装有全自动车钩,B车通过半永久牵引杆与A车和C车连接,C车之间通过半自动车钩连接。

第二节 城市轨道交通车辆电气控制系统主要部件功能

城市轨道交通车辆电气控制系统部件是用来对城市轨道交通车辆以及其他的牵引设备进行切换检测、控制、保护和调节的电器及装置,称为牵引电器。牵引电器的工作条件和环境较为恶劣,如长时间受振动干扰、受灰尘侵蚀、工作环境温度和温度变化范围大、工作电压和电流变化范围大,并且受安装位置和空间的限制。为有效利用空间、便于检修、电器外形多呈平整的箱状且宽度小,以便将电器尽可能成列布置。电器结构方面要便于更换触头、弹簧和其他易磨损的零件。在零件的机械与电气强度方面,要求在电器操作次数频繁时仍有较大的安全因数,同时必须保证有最大的可靠性。

牵引电器一般分为主电路电器、控制电路电器和辅助电路电器三大部分。

一、主电路电器

城市轨道交通车辆主电路电器主要包括受电弓、高速断路器、主接触器、线路滤波器、制动电阻器、平波电抗器、浪涌电压吸收器和接地装置等。

(一) 受电弓

1. 城市轨道交通车辆的供电与受流

因地铁和轻轨交通运输对速度的要求不高，所以常采用直流供电。直流供电的电压制式较多，其发展趋势是采用 EC(国际电工委员会)标准中的 DC 600 V、DC 750 V 和 DC 1 500 V 三种，我国国家标准《城市轨道交通直流牵引供电系统》中规定采用 DC 750 V(波动范围 500~900 V)和 DC 1 500 V(波动范围 1 000~1 800 V)两种。

我国常用的供电方式有接触网供电和接触轨供电两种形式。电动列车的受流方式依据供电方式的不同分为接触网受流和第三轨受流。接触网供电是指通过沿轨道线路上空架设的特殊输电线向行走在线路上的电动列车不间断地供应电能。电动列车利用顶部的受电弓与接触网滑动摩擦而获得电能。接触轨供电是指在列车行走的两条路轨以外，再加上带电的钢轨(一般使用钢铝复合轨)供电。带电钢轨设于两轨之间或其中一轨的外侧。列车受流器(集电装置，也叫集电靴或取流靴)在带电轨上接触滑行取流。

通常城市轨道交通车辆在电网电压为 1 500 V 时多采用架空接触网形式，由安装在车辆顶部的受电弓集电。当电网电压为 750V 及以下时，较多由第三轨受电。例如，北京地铁、天津轻轨均采用 DC 750 V 电压、第三轨供电方式；上海地铁、广州地铁的大部分线路采用 DC 1 500 V 电压、高架接触网供电方式。

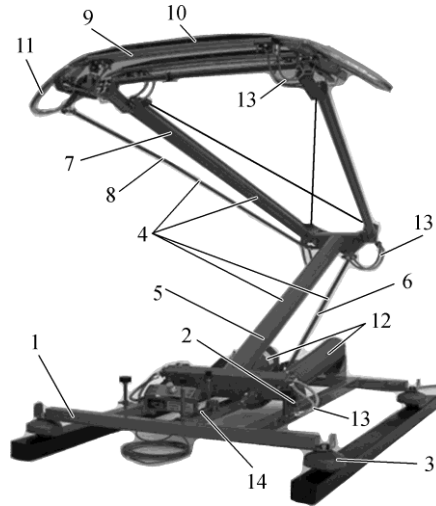
2. 受电弓的结构组成

受电弓是城市轨道交通车辆的受流装置，安装在与车体几何中心点最近的车顶上。当受电弓升起时，弓与网接触滑行，从接触网受取电流、通过车顶母线传送到车辆内部，供车辆设备使用。受电弓根据驱动动力的不同分为气动弓和电动弓两类。气动弓使用较普遍，故本书以气动受电弓为例进行分析。

城市轨道交通车辆的受电弓为单臂、轻型结构。在 4M2T 编组的列车中，受电弓一般安装于 B 车车顶；在 2M2T 编组的列车中，受电弓一般安装于 A 车车顶。

单臂受电弓的结构组成如图 1-6 所示。基础框架(1)由方形的中空钢管、角钢及钢板的焊接构件组成，通过支持绝缘子(3)固定安装在车顶，作为框架(4)、轴承、下部导杆的轴承滑轮、拉伸弹簧的悬挂及气压升弓传动装置的支承和安装部分。框架包括下部支杆(5)、下部导杆(6)、上部支杆(7)和上部导杆(8)，框架采用高强度冷拔无缝管制作。高度止挡(2)安装在下部导杆侧下方的基础框架上，用以限制受电弓的最大升弓高度不超过 2 050 mm(从绝缘子的下部边缘测量起)，保证受电弓垂向不产生位移。高度止挡(2)可通过受电弓两侧的两个螺栓及沉头螺母加以调节，最高位时两个螺栓同时与底架接触。弓头是弓与网相接触的部分，主要由集流头(9)、接触带(10)、转轴、端角(11)和弹簧盒组成。集流头(9)为轻型钢结构，接触滑块共两对，为人工石墨材料，每对两条，总计 4 条碳滑块。端角(11)是为了防止在接触网分叉处接触导线进入集流头底部而造成刮弓事故。弹簧盒的作用是为了保证弓头的垂向

自由度。整个受电弓安装在4个绝缘子上。绝缘子由环脂充填树脂制成，通过M20的不锈钢螺母安装在车顶。升降弓装置（12）由传动风缸、拉伸弹簧及气路电磁阀组成。组件（13）是由软编织铜线制成的电流传送装置。组件（14）是保证降弓后车辆稳定运行的吊钩闭锁器。



1—基础框架；2—高度止挡；3—绝缘子；4—框架；5—下部支杆；6—下部导杆；7—上部支杆；
8—上部导；9—集流头；10—接触带；11—端角；12—升降弓装置；
13—电流传送装置；14—吊钩闭锁器。

图 1-6 受电弓结构组成

3. 受电弓的工作原理

受电弓靠滑动接触受流，是移动设备与固定供电装置之间的连接环节，其性能的优劣直接影响城市轨道交通车辆工作的可靠性。对受电弓受流性能的基本要求是：集流头与接触网接触可靠、磨损小；升降弓时对车顶设备不产生有害冲击；运行中受电弓动作轻巧，动态稳定性好。为此，在接触导线高度允许变化的范围内，要求受电弓滑板对接触导线有一定的接触压力，且升降弓的过程应具有先快后慢的特点，即升弓时集流头离开基础框架要快，贴近接触导线要慢，以防止弹跳；降弓时，弓与网的脱离要快，落在基础框架上要慢，以防止拉弧及对车顶产生有害的机械冲击。

受电弓的提升依靠升弓弹簧完成，降弓是通过传动风缸内部的降弓弹簧来实现的，其中压缩空气在传动风缸的充气及排气决定了受电弓的升与降。

1) 升弓过程

在列车及驾驶控制台激活的情况下，按下副驾驶控制台受电弓升弓按钮，相应的升弓电路工作，升弓电磁阀得电动作，打开风源至传动风缸的通路，传动风缸充气后压缩其内部的降弓弹簧，在升弓弹簧的作用下克服自身重力升起。

风路系统的工作过程：压缩空气经升弓电磁阀进入空气过滤器，由过滤器除水、除尘并净化，通过空气管路进入升弓节流阀。升弓节流阀调节压缩空气的流速，以确保受电弓的升弓速度，再经精密调压阀对压缩空气进行调节，以保证弓对网的工作压力。此压缩空气再经降弓节流阀后的安全阀，以保证工作压力不超过规定压力。最后，压缩空气到达车顶受电弓风缸。升弓风路示意图如图 1-7 所示。

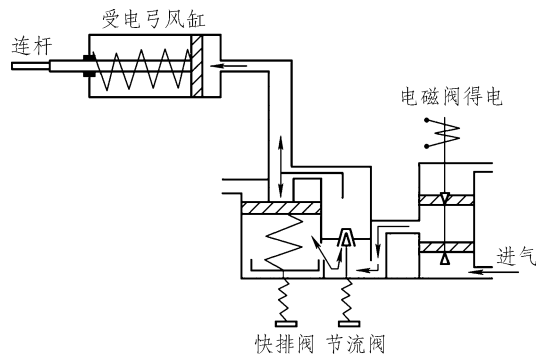


图 1-7 升弓风路示意图

压缩空气经过空气管路和气动元件进入升弓风缸后，推动活塞动作，将压缩空气能量转化为气缸活塞的直线位移。驱动转臂将活塞直线位移转化成转臂的旋转运动，转臂带动下部分导杆向上旋转，上部框架在导杆的作用下作逆转运动，使集流头升起。弓头上的集电装置在上框架导杆的作用下保持水平上升，以确保与接触网的接触良好。

升弓初始时，降弓弹簧的压力最小，因此克服该力所需的风压较小，此时节流阀进出风压差最大，所以此时传动风缸的活塞杆左移较快。随着弓不断升起，降弓弹簧的压力不断增大，克服该力所需的风压也不断增大，而且此时节流阀口的风压差不断减小，所以活塞杆左移渐慢，升弓速度也渐慢，这样就避免升弓时弓对网造成过分冲击。可以通过改变节流阀口的大小来初步调整升弓时间。

2) 降弓过程

在列车及驾驶控制台激活的情况下，按下副驾驶控制台受电弓降弓按钮，电磁阀失电复位，风源停止向传动风缸供风，同时将压缩空气排向大气，受电弓在降弓弹簧及自身重力的作用下降到最低位置。

降弓风路示意图如图 1-8 所示。降弓过程分为两个阶段，即先快后慢。降弓时，当电磁阀失电，传动风缸内的压缩空气经快排阀口排出，如图 1-8 (a) 所示。随着传动风缸内压缩空气压力骤然下降，压力差不足以克服快排弹簧的作用，快排活塞上移，使快排阀口关闭。此时传动风缸内的残余风在节流阀口徐徐排出，如图 1-8 (b) 所示。降弓初期弓与网快速分离，可以避免降弓过程中产生电弧，灼伤接触滑块接近车顶时速度变缓，可保证降落到落弓位时不会对车顶产生过大冲击。通过改变节流阀口的大小，调节快排阀弹簧的压缩量，可以控制快排时间的长短，从而调整降弓时间。

3) 紧急操作

当车辆有压缩空气，但气压不足（低于 3 bar，1 bar = 10^5 Pa）时，受电弓也可以手动升弓。此时使用 B 车车厢设备柜中的脚踏泵，同时手动或电动控制电磁阀开通风路，人工踩压脚踏泵打风，至风压足以升起受电弓为止。

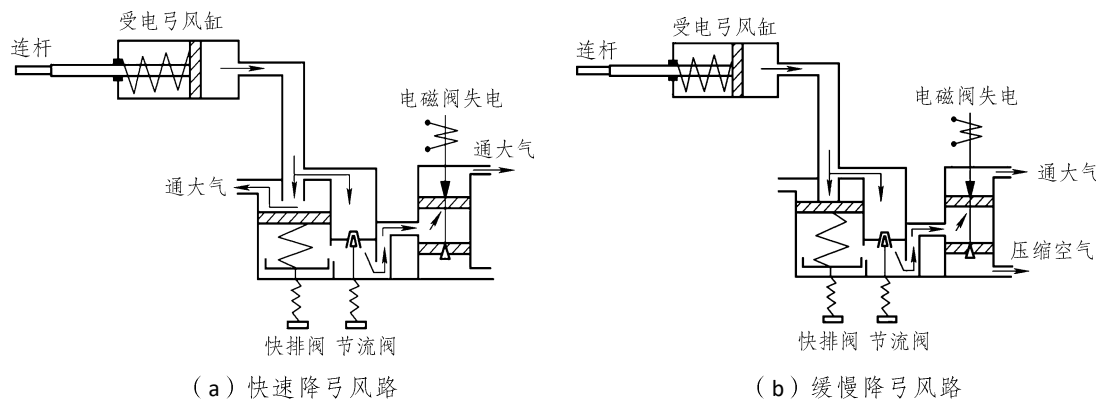


图 1-8 降弓风路示意图

4. 受电弓的主要技术参数

受电弓的主要技术参数有电气参数、机械参数及几何尺寸参数。受电弓的主要技术参数如表 1-1 所示。

表 1-1 受电弓的主要技术参数

额定电压/V	DC 1 500
电压范围/V	DC 1 000 ~ 1 800
额定电流/A	DC 1 050
最大启动电流 (30 s) /A	DC 1 600
最大停车电流/A	DC 460
标准静接触压力/N	120 ± 10
静压力调节范围/N	100 ~ 140
滑板单向运动在工作高度范围内压力差/N	不大于 10
滑板在工作高度范围内同一高度上, 升与降压力差/N	不大于 15
运行速度/(km/h)	≤ 90
传动装置压力/kPa	额定 550, 最小 300, 最大 800
主要尺寸 (带绝缘子的高度) /mm	300 (折叠高度 300 + 10)
最小/大工作高度/mm	175 (463) / (1 600)
最大升起高度/mm	1 700
碳滑板长度/mm	800 (1 050)
弓头宽度/mm	1 550
升/降弓时间/s	升弓 ≤ 8, 降弓 ≤ 7
绝缘性能	交流 50 Hz, 5.75 kV 干闪络电压 1 min; 交流 50 Hz, 4.75 kV 湿闪络电压 1 min
机械寿命	15 × 10 ³ 次
受电弓总质量 (绝缘子除外) /kg	200

(二) 高速断路器 (HSCB)

HSCB 安装在含有受流装置车辆的底部高压箱内。以庞巴迪公司生产的 A 型车为例, 其 HSCB 安装在 B 车的 PH 箱内, 每辆动车配置一个, 正常状态下通、断车辆主电路(DC 1 500 V 电路), 在车辆发生故障时执行保护指令, 切断动力电源。因此, HSCB 既是主电路的总电源开关, 也是总保护开关。

1. HSCB 的主要性能指标

衡量 HSCB 性能的主要指标有两个: 机械响应时间和分断能力。

(1) 机械响应时间是指从通过断路器的电流达到动作值, 到主触头打开的时间, 用 T_m 表示。机械响应时间 (T_m) 是电流增长率 (di/dt) 的函数, 如图 1-9 所示。例如, 当 $di/dt = 2 \times 10^7$ A/s 时, 机械响应时间为 3 ms。显然电流增长率越大, 机械响应时间越短。

(2) 分断能力可用图 1-10 所示的高速断路器开断过程的电流、电压波形来说明。在相同的短路稳态电流情况下, 开断电压 \dot{U}_d 越高, 电流增长率 di/dt 越大, 则开断电流 i_d 越大, 限制时间 T_L 越短, 总开断时间 T_{tot} 越短。

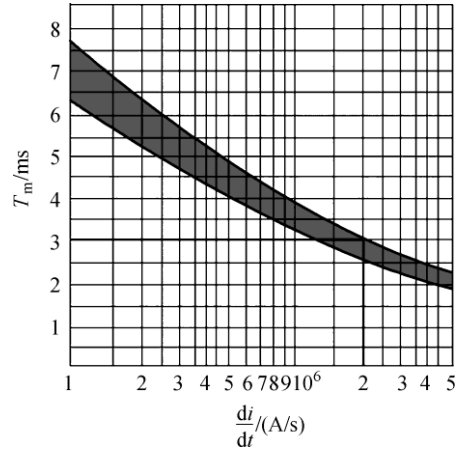
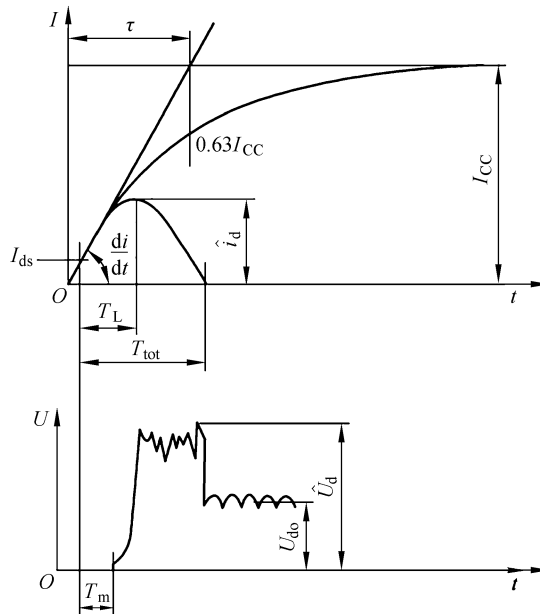


图 1-9 高速断路器机械响应时间与电流增长率关系



τ —短路时间常数; I_{cc} —稳态短路电流; I_{ds} —过电流动作电流设定值; di/dt —电流上升初始率;
 i_d —开断电流; T_L —限制时间; T_{tot} —总开断时间; T_m —机械相应时间;
 \dot{U}_d —最大拉弧电压; U_{do} —恢复电压。

图 1-10 高速断路器开断过程的电流、电压波形

2. HSCB 的主要特点

- (1) 对地有很高的绝缘等级。由于高速断路器正常接在车辆的牵引主电路上，电压高、电流大，因此其绝缘结构应选取有很高绝缘等级的材料。
- (2) 分断能力强，响应时间短。高速断路器既是电路的总电源开关也是总保护开关。为有效、可靠地保护其他用电设备，高速断路器必须动作迅速、可靠，并具有足够的断流容量。它的限流特性和高速切断能力能防止由于短路或过载而引起的用电设备毁坏。
- (3) 不受气候条件的影响。高速断路器集成安装于箱中的主要优点是可以节省车下空间，并且使 HSCB 与外界环境隔离。
- (4) 使用寿命长。
- (5) 易于维护。

3. HSCB 的结构

现以上海地铁 1 号线地铁车辆用高速断路器为例进行结构与工作原理分析。上海地铁 1 号线使用的是 TSE1250-B-I 型高速断路器，它是一种电磁控制自然冷却的单极直流断路器，安装在 B 车上。

TSE1250-B-I 型高速断路器包括基架、短路快速跳闸装置 (KS)、过载跳闸装置 (S 型)、合闸装置和灭弧栅。

高速断路器的主要构件有：触头系统、灭弧机构、传动机构、自由脱扣机构、最大电流释入器、最小电压释入器和辅助开关。

- (1) 触头系统：动、静触头采用双极串联形式，触头的接触形式采用线接触，接触面大，磨损较小，制造方便。触头制成单独零件，便于更换。
- (2) 灭弧机构：采用串封闭式导弧角。
- (3) 传动机构：用来操纵主触头闭合。传动形式有手动传动和电磁机构传动。
- (4) 自由脱扣机构：位于传动机构与主触头之间，用来保证当电路发生短路时，传动机构还能起作用，高速开关能够可靠地开断电路。
- (5) 最大电流释入器：即过载时通过拉杆作用于自由脱扣机构而开断，短路时直接撞击锁钩开断电路。
- (6) 最小电压释入器：通过电磁机构作用，衔铁直接作用在锁钩上，使锁钩释放，主触头在开断弹簧作用下开断电路。最低电压为 DC 77 V。
- (7) 辅助开关：用于联锁、指示、控制。

4. HSCB 的工作原理

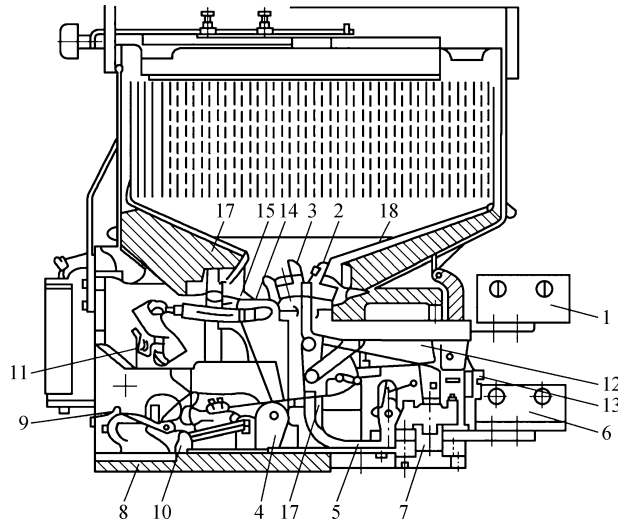
高速断路器的通断由高速断路器按钮控制。按下高速断路器按钮，列车控制线路工作，断路器线圈得电工作，带动机械锁位装置动作，高速断路器置“合”位并保持不变。分断时，欠电压脱扣装置动作，高速断路器分断。高速断路器每极有一个带有固定脱扣整定机构的短路快速跳闸“KS”。另外，每设置一个过载跳闸“S”，其跳闸值均可通过刻度盘来调整。

如图 1-11 所示，当高速断路器合上以后，电流从上接线端 (1) → 静触头 (2) → 动触头 (3) → 动触头臂 (4) → 弹性连接板 (5) → 下接线端 (6)。产生过载跳闸 (S) 装置 (7) 的磁场。当电流值超过其整定值时，该装置动作。通过拉杆 (8) 释放锁件 (9) 转换机构 (10)，

转换轴（11）转至“分”位，同时带动动触头臂（4），使触头分断。

在短路故障情况下，过载跳闸系统动作慢。短路快速跳闸（KS）衔铁（12）首先动作、通过撞击螺钉（13），直接撞击动触头臂（4），由转换杆（14）和滚轴（15）之间的专用压紧装置迫使动触头快速分断。由于KS跳闸装置的作用，操纵短路快速跳闸拉杆（16）转换机构解锁，转换轴（11）转至“分”位，同时带动动触头臂（4）。

触头分断产生的电弧由电磁系统吸入灭弧室内进行分割、冷却。此外高速断路器合闸线圈设计为短时工作制，其线圈只能短时通电（到合闸位靠机械连锁），断路器触头闭合后线圈不再通电，断路器分断之后再次合闸要求时隔2 min以上。



1—上接线端；2—静触头；3—动触头；4—动触头臂；5—弹性连接板；6—下界限端；7—过载跳闸（S）装置；8—拉杆；9—释放锁件；10—转换机构；11—转换轴；12—短路快速跳闸（KS）衔铁；13—撞击螺钉；14—转换杆；15—滚轴；17—短路快速跳闸拉杆；18、19—灭弧板。

图 1-11 TSK1250-B-I 型高速断路器的结构

5. HSCB 的主要技术参数

高速断路器的主要技术参数如表 1-2 所示。

表 1-2 高速断路器的主要技术参数

类型	电磁控制自然冷却的单极直流断路器
额定电压/V	1 500 × (1 + 20%)
额定电流/A	1 250
短时允许电流	1 400 A, 2 h; 2 000 A, 2 min; 3 000 A, 20 s;
额定分断能力/kA	35
KS—释放的分断时间	$di/dt \geq 3 \text{ kA/ms}$ 5 ms
机械反应时间/ms	2
机械寿命	20 000 次
控制电压/V	DC 110
电寿命	1 000 次
分断频率 (1 h)	30 次

(三) 主接触器

接触器按通断电路电流的种类可分为直流接触器和交流接触器；按主触头数目可分为单极接触器（只有一对主触头）和多极接触器（有两对以上主触头）；按传动方式可分为电空接触器和电磁接触器等。城市轨道交通车辆的主接触器是一种用来频繁地接通和切断主电路的自动切换电器，它的特点是能进行远距离自动控制，操作频率较高，通断电流较大。

现以上海地铁 1 号线电动车辆 BMS.15.06 型单极直流电磁接触器为例，说明其工作原理及结构。

1. 电磁接触器的结构组成

电磁接触器一般由电磁机构、主触头、灭弧装置、辅助触头、支架和固定装置等组成。电磁机构包括铁芯、带驱动杆的螺旋纹圈和盖板。主触头用来通断电路，触头为镀银球面。灭弧装置包括吹弧线圈和带电离子栅的灭弧罩，离子栅将进入的电弧分割成一系列短弧，然后使电弧加速冷却，吹弧线圈确保快速且有效地灭弧。直流接触器设计为模块结构，外壳材料阻燃、无毒、无环境污染。

2. 电磁接触器的工作原理

接触器的电磁线圈未通电时，衔铁在弹簧力作用下保持在释放位置。当电磁线圈得电后，铁芯在电磁力作用下带动驱动杆克服弹簧力而运动。动触头在驱动杆带动下，触头上部与静触头点接触。随着驱动杆继续运动，动静触头间的压力不断增加，动触头在静触头上边滚动边滑动，进行研磨，一直到电磁力与弹簧力平衡为止。此时动静触头的接触点移到触头下部，完成触头闭合，主接触器进入工作状态。同时辅助触头依靠驱动凹轮，实现同步打开或闭合。

触头断开的过程则相反，失电后，电磁力减小，反力弹簧起作用，主触头分断，同时辅助触头的状态也相应变化。

主触头闭合时的研磨过程是将其表面的氧化物或脏物擦掉，以减小接触电阻。触头断开的弹簧力可使触头分断时所产生的电弧不致损坏正常接触点。通常弹簧采用圆柱螺旋弹簧。圆柱螺旋弹簧分为拉伸弹簧和压缩弹簧两种，BMS.15.06 型直流电磁接触器采用的是压缩弹簧。

3. BMS.15.06 型直流电磁接触器的技术参数

BMS.15.06 型直流电磁接触器的主要技术参数如表 1-3 所示。

表 1-3 BMS.15.06 型直流电磁接触器的主要技术参数

额定电压/V	DC 1 500	闭合时间/ms	约 100
最大工作电压/V	DC 1 800	开断时间/ms	约 75
额定绝缘电压/V	DC 1 500	机械寿命	3×10^6 次
额定电流/A	600	电寿命	10^4 次
小时电流/A	630	触头压力/N	54 ~ 72
短时电流 (5s) /A	800	控制电源/V	DC 110
最大分断电流 (15 ms) /A	2 400	控制功率/W	30

(四) 线路滤波器

线路滤波器包括线路滤波电抗器和线路滤波电容器，安装于主电路牵引变流器中。

1. 线路滤波器的作用

- (1) 滤平输入电压。
- (2) 抑制电网侧发生的过电压，减少其对逆变器的影响，如变电所操作过电压、大气雷击过电压等。
- (3) 抑制逆变器因换流引起的尖峰过电压。
- (4) 抑制电网侧传输到逆变器直流环节的谐波电流，抑制逆变器产生的谐波电流对电网的影响。
- (5) 限制变流器的故障电流。

2. 线路滤波电抗器

线路滤波电抗器与线路滤波电容器构成谐振电路，用于变流器直流环节。

为保证在任何电流值时电感均恒定，电抗器采用空心线圈结构。不同生产厂家电抗器的电感量选值不同，需与线路电容器的电容量相匹配。

对于网压为 DC 1 500 V，逆变器容量在 1 000 kV·A 以上的系统来说，电感量一般为 5 ~ 8 mH。

3. 线路滤波电容器

线路滤波电容器是一种非常特殊的直流电容器。从功能上看，由于它用于逆变系统的直流环节，因此称作“支撑电容器”；从性质上看，由于要求它能承受很大的谐波电流，因此称作“直流脉冲电容器”。

支撑电容器系列产品的主要技术参数如表 1-4 所示。

表 1-4 支撑电容器系列产品的主要技术参数

最大电流 I_{\max}/A	最高达 600
额定电压 U_N/kV	最高达 6
自感 $L_{\text{self}}/\text{nH}$	≤ 40
额定能量 W_N/kJ	最高达 18
介质损耗因数 $\tan\delta_0$	2×10^{-4}
最大峰值电流/ kA	最高达 10
最大浪涌电流/ kA	最高达 100
端子间直流试验电压 U_{TT}	$1.5U_N, 10 \text{ s}$
端子对外壳 交流试验电压 U_{TC}	$2U_i + 1\,000 \text{ V}, 50 \text{ Hz},$ $10 \text{ s} (U_i \text{ 为绝缘电压})$
自放电时间常数 $R_{\text{is}} C$	$\geq 10\,000 \text{ s}$

单台电容器的电容量与额定电压 U_N 有关， U_N 越低，电容量可以做得越大。对应于不同的额定电压，电容量可达数百微法甚至上万微法。