

高等学校城市轨道交通系列教材 ●●●

城市轨道交通卓越工程师教育培养计划系列教材

城市轨道交通车辆工程“卓越工程师”培养平台建设项目资助(11XK10)

城市轨道



车辆电气

■ 主 编：陈晓丽

■ 副主编：黄立新 师 蔚 廖爱华

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校城市轨道交通系列教材

城市轨道交通卓越工程师

教育培养计划系列教材

城市轨道交通车辆工程“卓越工程师”

培养平台建设项目资助(11XK10)

城市轨道交通 车辆电气

主 编 陈晓丽

副主编 黄立新 师 蔚 廖爱华

中 国 铁 道 出 版 社

2013年·北 京

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通车辆电气/陈晓丽主编. —北京:中国铁道出版社, 2013. 8

高等学校城市轨道交通系列教材 城市轨道交通卓越工程师教育培养计划系列教材

ISBN 978-7-113-16299-3

I. ①城… II. ①陈… III. ①城市铁路—铁路车辆—电气设备—高等学校—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 062277 号

书 名: 高等学校城市轨道交通系列教材
城市轨道交通车辆电气
作 者: 陈晓丽 黄立新 师蔚 廖爱华

策划编辑: 殷小燕
责任编辑: 殷小燕 电话: (010)51873147
封面设计: 陈东山 崔丽芳
责任校对: 张玉华
责任印制: 陆 宁

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.tdpress.com>

印 刷: 三河市兴达印务有限公司

版 次: 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm×960 mm 1/16 印张: 20.5 字数: 386 千

印 数: 1~3 000 册

书 号: ISBN 978-7-113-16299-3

定 价: 35.00 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

作为我国新兴的城市公共交通——城市轨道交通建设进入了快速发展阶段，尤其是在北京、上海这样的城市，但是快速发展伴随而来的是相关专业人才的短缺，需要培养具有一定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。基于该培养目标，上海工程技术大学城市轨道交通学院车辆工程系在学院、学校支持下和上海申通地铁集团有限公司的帮助下，组织专业教师编写了《城市轨道交通车辆电气》一书。

该书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、工作原理进行深入解析。据统计车辆运营过程中所出现故障的大部分问题为车辆电气方面的故障，如何快速定位故障，排除故障，保证运行安全、可靠显得尤为重要，因此开设城市轨道交通车辆电气这门课程对于城市轨道交通车辆工程专业的学生培养具有重要意义。但目前该门课程尚缺乏一本适用的规范教材，教师授课内容来自于多方收集的相关资料，因此无论是教师授课还是学生学习都面临很大困难，效果大打折扣，因此组织编写一本适用的规范教材，满足学生培养及城市轨道交通车辆电气技术人员的技术需求，已成为迫在眉睫的重要任务。

本书特点为致力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、工作原理进行较深入解析，深浅适宜，图文并茂，通过辅以车辆综合电气线路图的识读以及常见故障实例分析增加实践操作内容，强调了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器系统的理论知识，还能够对其进行分析、实验和综合，掌握实用维护、维修等知识与操作技能。

本书共分六章，较为全面的介绍了城市轨道交通车辆电气设备、电气控制线路及常见故障诊断和分析。本书的编者为从事电气专业教学的专业教师组成，紧密结合当前轨道交通的实际状况编写，内容不仅适用于城市轨道交通车辆工程专业的“卓越工程师培养计划”学生培养，而且可以作为城市轨道交通车辆电气技术人员的参考指导书。

本书由上海申通地铁集团轨道交通维护保障中心车辆公司余强经理(高级工程师)，上海交通大学机械与动力工程学院殷承良研究员(博士生导师)，东华大学徐洋副教授，以及上海工程技术大学城市轨道交通学院杨俭教授四位专家审阅，四位专家对本书给予了很多中肯意见，在此致以诚挚的谢意。

鉴于编者技术水平及实践经验的局限性,收集资料欠全面,书中难免有纰漏和不妥之处,恳请各位读者批评指正,盼赐教至 chenxiaoli@sues.edu.cn,以期再版时修改。

编者
2012年12月

目 录

第 1 章 城市轨道交通车辆电气概述	1
1.1 车辆电气基本概念	1
1.2 车辆运营过程中主要故障.....	13
1.3 运营过程中常见电气故障.....	15
1.4 本书主要内容.....	15
思考与习题	16
第 2 章 城市轨道交通车辆电器	17
2.1 高压电器的结构与工作原理.....	17
2.2 低压电器的结构与工作原理.....	32
2.3 车辆电器设备的故障处理.....	50
思考与习题	59
第 3 章 牵引电机及牵引变流器	61
3.1 城市轨道交通车辆用牵引电机.....	61
3.2 牵引变流器.....	76
3.3 基于 MATLAB/SIMULINK 的城市轨道交通牵引系统仿真	116
思考与习题.....	123
第 4 章 车辆辅助系统	125
4.1 认识辅助系统	125
4.2 辅助逆变器电路结构与工作原理	130
4.3 上海地铁 AC01/AC02 型电动列车辅助逆变器介绍	161
4.4 AC01/AC02 型电动列车辅助逆变器的监控与保护	170
4.5 列车照明系统	178
4.6 空调系统	181
4.7 辅助逆变器控制器的诊断功能与维修技巧	184

思考与习题	185
第 5 章 综合线路图	186
5.1 列车主回路电路的识读	186
5.2 车辆控制线路的识读	201
5.3 辅助系统线路的识读	239
思考与习题	251
第 6 章 电气故障案例	252
6.1 牵引系统常见故障案例分析	254
6.2 辅助回路常见故障案例分析	293
6.3 CCU 常见故障案例分析	303
参考文献	322

第 1 章 城市轨道交通车辆电气概述

1.1 车辆电气基本概念

城市轨道交通车辆电气包括车辆上的各种电气设备及其控制电路。按其作用和功能可分为主电路系统、辅助电路系统和电子与控制电路系统 3 个部分。城市轨道交通车辆为电传动机车的一种,在电传动机车上,将外部(接触网等)输入的电能传递给机车动轮,是通过一整套与电能有关的能量变换、传递及控制装置,才得以实现的。这套机车电力牵引装置包含了各种实现电—机能量变换的电机、电器等电气设备,构成一个综合的电气系统。根据牵引电机种类,如果为交流电机牵引则该系统称为交流传动系统,如果车辆采用直流电机牵引,则该系统称为直流传动系统。另外,城市轨道交通车辆用辅助电源系统为车辆上除牵引用电外的其他用电设备供电,包括直流用电设备和交流用电设备等,因此辅助电源装置包含了各种实现电能变换的逆变器、整流器、变压器等电气设备,也构成一个复杂的电气系统。城市轨道交通车辆电气这本书将对各种车辆电器设备进行介绍,重点对牵引变流器、辅助逆变器的内部组成、工作原理、控制方法、维护维修等进行分析。

1.1.1 车辆电气系统结构

城市轨道交通车辆电气系统的主电路由受电弓、高压部分、中间直流环节、牵引变流器、牵引电机组成。牵引变流器通常采用 IGBT 元件,每台牵引电机功率高达 200 kW 左右,具有大转矩、恒功率、速度范围宽的特点,使机车具有起动牵引力大、粘着性能好、功率因数高等特点,能够实现再生制动的功能。

辅助系统生成 380 V 交流电和 110 V 直流控制电源,为车辆上的其他用电设备供电。辅助系统要求具有冗余性,一组辅助变流器故障之后,可由另一组辅助变流器对全部辅助设备供电。

控制电路由 110 V 直流控制电源(来自于辅助变流器)供电,控制系统由各种控制用电器元件组成,如接触器、继电器等,根据功能可分为主回路、控制回路、辅助回路 3 部分。

城市轨道交通车辆电气系统的结构框图如下所示。

车辆电气系统:

车辆电器: 车辆电器中的高压电器(受电弓、高速断路器、接触器、制动电阻、熔断器、避雷器)

车辆电器中的低压电器(继电器、电流传感器、电压传感器、速度传感器、温度传感器、蓄电池)

牵引系统: 牵引电机

牵引变流器

辅助系统: 辅助逆变器

控制回路: 主回路

控制回路

辅助回路

车辆电气系统的布线,按照电压等级和功能划分为 3 部分。

(1)主电路布线,主要指车顶高压设备、牵引变流器、牵引电机、车间电源插座之间的布线。车顶高压设备之间采用导电杆和软连线连接。

(2)辅助电路布线,主要指辅助变流器、制冷及采暖装置、辅助电路插座之间的布线。

(3)控制电路布线,主要指操纵台、控制电器柜、变流器、电源柜、空气管路柜、风道继电器等控制电器之间以及网络连接的布线。

1.1.2 车辆上的主要电气设备

车辆上的主要电气设备包括:受流装置、牵引控制箱(包括高压电气设备,牵引逆变器、辅助逆变器等),牵引电机,加热、通风、空调装置,制动电控单元,车辆控制装置(牵引控制、逆变器控制、中央控制单元、多功能车辆总线),以及车门控制,照明和通风控制等,图 1.1 为西门子公司生产的,上海轨道交通明珠线列车控制系统结构图,其中罗列了主要的轨道车辆的电气设备。该列车单元为三节编组,分别为 A、B、C 车,A 车为拖车,包括车辆主控制器(Master Controller),司机操控台(Driver's Desk),AI(辅助逆变器),多车总线 MVB,MVB 紧促型输入输出(I/O),人机接口(HMI),公共广播系统(PA),乘客信息系统(PIS)以及 SIBAS KLIP 分站(SKS)等;B、C 车为动车,与 A 车相比,不同处在于带有动力系统牵引控制单元(TCF)、逆变器控制单元(ICU)和牵引电机;同时 A、B、C 每节车都配有加热、通

风、空调设备(HVAC)、车门控制单元(DCU)、制动电控单元(BECU)和 SIBAS KLIP 分站(SKS),车辆之间通过多车总线 MVB 进行通信。

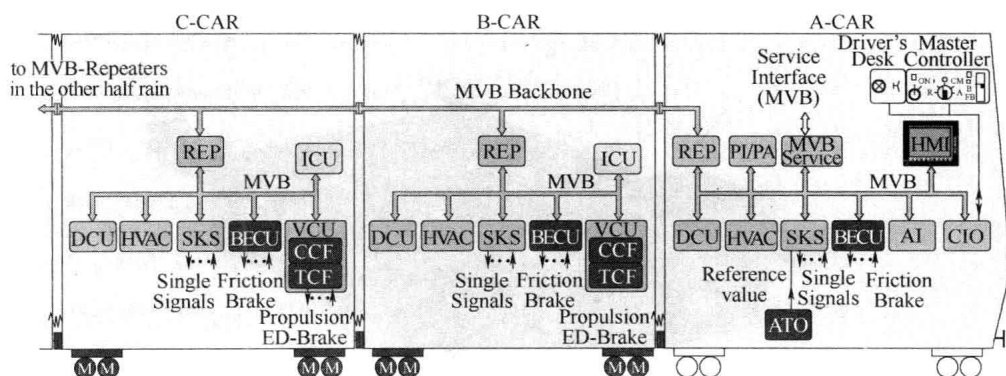


图 1.1 上海轨道交通明珠线列车控制系统结构图

图注:AI—辅助逆变器;M—牵引电机;SKS—SIBAS KLIP 分站;BECU—制动电控单元;CIO—MVB 紧促型 I/O;TCF—牵引控制功能;DCU—门控单元;HMI—人机接口;CCF—中央控制功能;HVAC—加热、通风、空调;MVB—多车总线;VCU—车辆控制单元;PA—公共广播系统;REP—MVB 转接器;ICU—逆变器控制单元;PI—乘客信息系统

1. 高压电气设备

从接触导线(接触网)或导电轨(第 3 轨)将电流引入动车的装置称为受流装置或受流器,也就是我们通常所说的受电弓(见图 1.3 所示)。接触网 1 500 V 的供电电源通过受电弓引入列车中。受电弓安装于列车车顶,不同的列车受电弓的数量和安装位置会不同。本书以长春长客—庞巴迪轨道车辆有限公司生产的上海地铁一号线增购车辆为例,该列车的受电弓是安装在 B 车车顶上的。图 1.2 所示为受电弓与车辆空调在车顶的安装示意图。

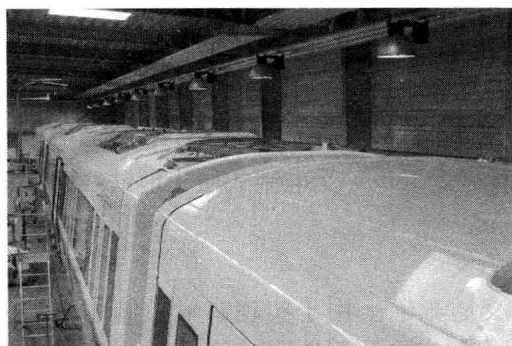


图 1.2 受电弓与车辆空调在车顶的安装位置



图 1.3 受电弓示意图

上海地铁 1 号线增购车辆的电流从受电弓终端流到位于 B 车底架下部的高压设备箱中,该设备箱称为 PH 逆变器箱(牵引逆变器—高压箱)。PH 箱的结构示意图见图 1.4 所示,包括高压部分、MCM 部分、散热的中间部分以及其他一些附件。

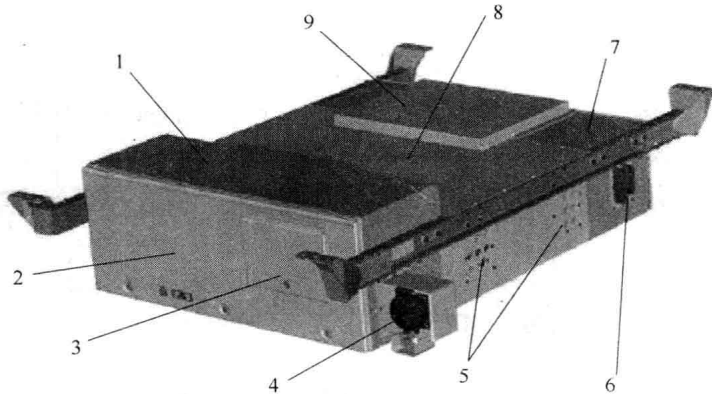


图 1.4 PH 箱的结构示意图

图注:1—HV 部分;2—HV 部分前盖门;3—隔离和接地开关盖门;4—车间供电电源插座;
5—电缆密封;6—信号电缆连接件;7—MCM 部分;8—中间部分;9—外部空气进气箱

高压部分(见图 1.5 打开状态的高压部分,无顶板俯视图)包括大部分用于高压分配的元件。每半列车主要的元件是:隔离和接地开关、两个高速断路器(线路断路器)、车间电源插座、车间电源接触器、高压保险、解耦二极管、测量和控制设备等。B 车和 C 车的牵引逆变器从高速断路器处获得供电。辅助逆变器(输出 3N/AC 380 V)和蓄电池充电器(输出 DC 110 V)也由 PH 箱供电,并带有保险保护。电流回路通过接地刷闭合。避雷器安装在每个受电弓的旁边,用来保护所有的电气设备,防止来自供电系统不允许的雷电过电压及操作过电压。PH 箱通过强迫通风冷却,顶部的风扇入口由一个网状结构覆盖,自由空间在前部且在箱体之上,也需打开前盖,通过前盖和箱下部进行保养及维护,质量约为 950 kg。

在受电制式上,目前世界上地铁发展较早的城市大都采用直流 750 V,个别有采用 600 V 的,北京地铁为直流 750 V。上海地铁采用直流 1 500 V,它与直流 750 V 比较有以下优点:可提高牵引电网供电质量,降低迷流数值,增加牵引供电距离,从而可减少牵引变电所数量;另外直流 1 500 V 受电制式便于地铁线路实现地下、地面和高架联动。

2. 车辆电器

本书中的车辆电器指的是城市轨道交通车辆上用于实现车辆控制的电器元件,可以分为有触点电器和无触点电器。有触点电器元件广泛用于主电路、辅助回路和控制回路中,其种类较多,其中典型的电器有高速断路器、交直流电磁接触器、

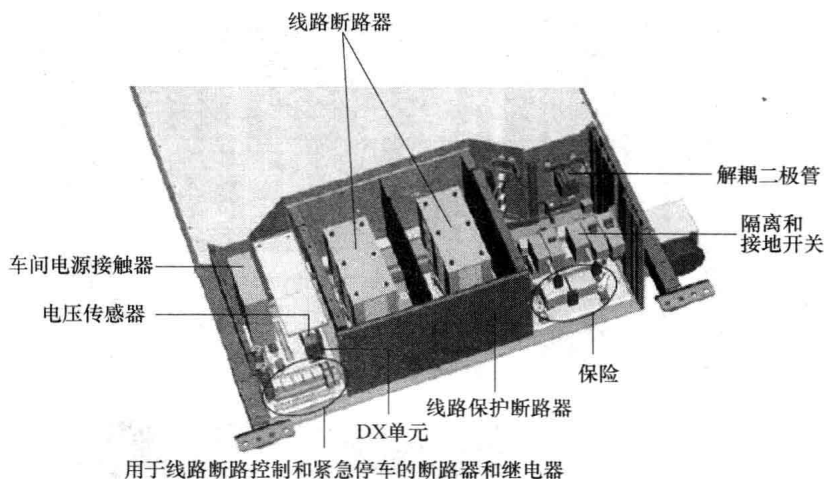


图 1.5 PH 箱的高压部分,无顶板俯视图

继电器及司机控制器(组合传动电器)等。车辆上其他电器元件还有电动列车从接触网获取电能的受流器(受电弓)、用于地铁车辆主回路电阻制动的制动电阻器、用于保护主回路过电压的避雷器、用于保护电气设备和电气线路发生短路故障时,免遭过热和过大电力破坏的熔断器、用于车辆照明系统的荧光灯电子镇流器和用于控制信号采集传输的各种传感器(速度传感器、温度传感器、电流传感器、电压传感器等)。图 1.6 举例了一些常用地铁车辆电器设备。图(a)为高速断路器,为有触点高压电器,用来接通和断开主回路;图(b)为高速断路器的控制继电器,为有触点低压控制用电器;图(c)为 A 车控制柜,有大量有触点接触器、继电器、空开等构成逻辑控制线路;图(d)为制动电阻箱,内放置制动电阻组件,制动电阻位于列车车厢底部,体积庞大,电阻制动时会散发大量热量,需要散热设备进行散热处理。当然还有大量其他电气设备,我们会在后续章节进行介绍。

3. 牵引电机

牵引电机用来将电能转化成机械能,并将能量通过传动装置传递给车轮,因此牵引电机是轨道车辆的动力来源。牵引电机有直流电机、直线电机、交流异步电机以及永磁同步电机,其中三相鼠笼式异步电机是目前应用最广泛的轨道车辆牵引用电机。图 1.7 为长春长客—庞巴迪轨道车辆有限公司生产的,上海地铁一号线增购车辆采用的 4EBA 4040 牵引电机,4EBA 4040 是地铁及类似的牵引车辆驱动系统的一部分,它是自通风 4 极 3 相制异步鼠笼式旋转电机,其技术参数如表 1.1 所示。图 1.8 为上海地铁六号线车辆(阿尔斯通生产)采用的牵引电机,该电机为 3 相 AC 感应电机,每轴一个电机安装于转向架中部,自冷,全封闭设计,电机上安

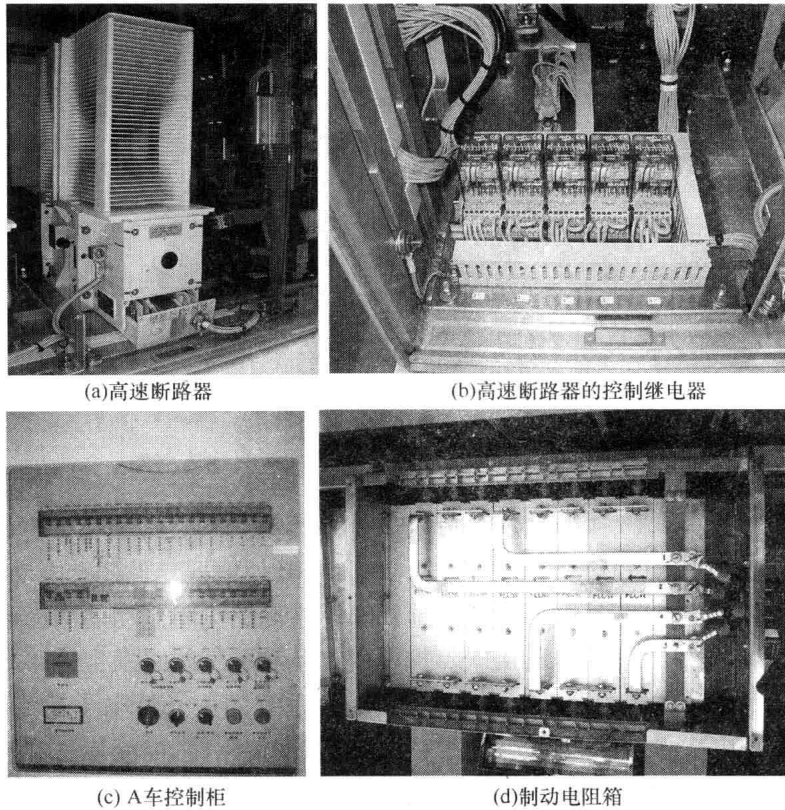


图 1.6 地铁车辆常用电器

装有速度传感器。

上海地铁 1 号线车辆中 4EBA 4040 牵引电机安装在动车转向架上,每辆动车前后两个转向架,每个转向架上安装有 2 台牵引电机,因此一辆动车装配有 4 台牵引电机,见图 1.9 与图 1.10 所示。转向架上的电机支座由 3 个压入电机支座的弹性支撑组成,电机采用自通风并配有空气过滤器和消音器,牵引电机平行于轮对轴,并通过一个冠状齿型连轴节链接到传动装置上,牵引电机转矩是通过冠状齿型连轴节,从电机转子上直接传送到小齿轮上。牵引电机由 3 相 IGBT 频率逆变器控制,每

表 1.1 4EBA 4040 牵引电机的技术数据

电机型号	4EBA 4040
额定功率	220 kW
额定电压	1 150 V
额定电流	130 A
额定频率	58 Hz
额定转速	1 708 r/min
最大转速	3 690 r/min
质量	685 kg

辆动车上的4个牵引电机均由一个电源逆变器供电。

4. 牵引变流器

牵引变流器是列车关键部件之一,其主要功能是转换直流制和交流制间的电能量,并对各种牵引电动机起控制和调节作用,从而控制机车的运行。

牵引变流器可分为:交流—直流变流器;直流—直流变流器;直流—交流变流器;交流—交流变流器4类。由于城市轨道交通采用直流接触网供电,因此本书中将重点讨论直流—交流变流器。直流—

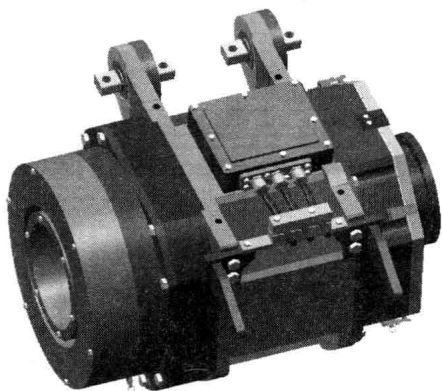


图 1.7 长春长客—庞巴迪轨道车辆有限公司生产的4EBA 4040牵引电机

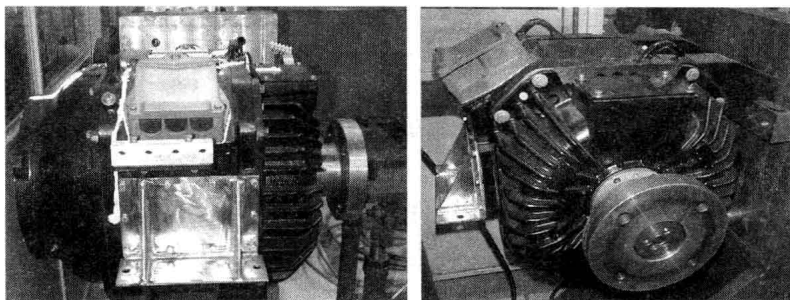


图 1.8 上海地铁六号线的牵引电机

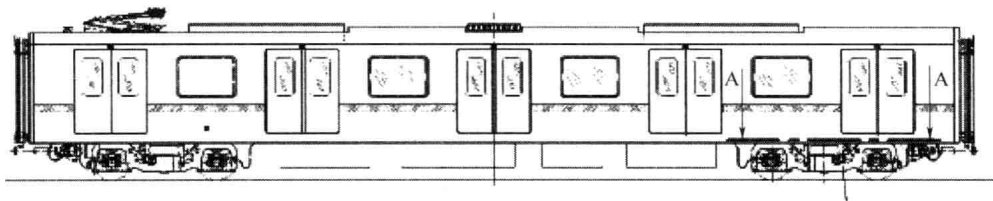


图 1.9 4EBA 4040 牵引电机安装位置

直流变流器驱动控制直流牵引电机,直流—交流变流器驱动控制交流牵引电机。

变流器的发展情况是:随着变流器的控制由不控整流器向可控变流器的发展,变流器的电子控制系统也发生变化。20世纪60年代的变流器普遍采用分立元件的开环控制系统,70年代过渡到线性集成元件(运算放大器等)的闭环控制系统,20世纪70年代末则应用大集成度的数字集成器件和微处理机的闭环控制系统。这些电子控制技术的应用提升了变流器的性能,进而使整个机车的性能和自动化

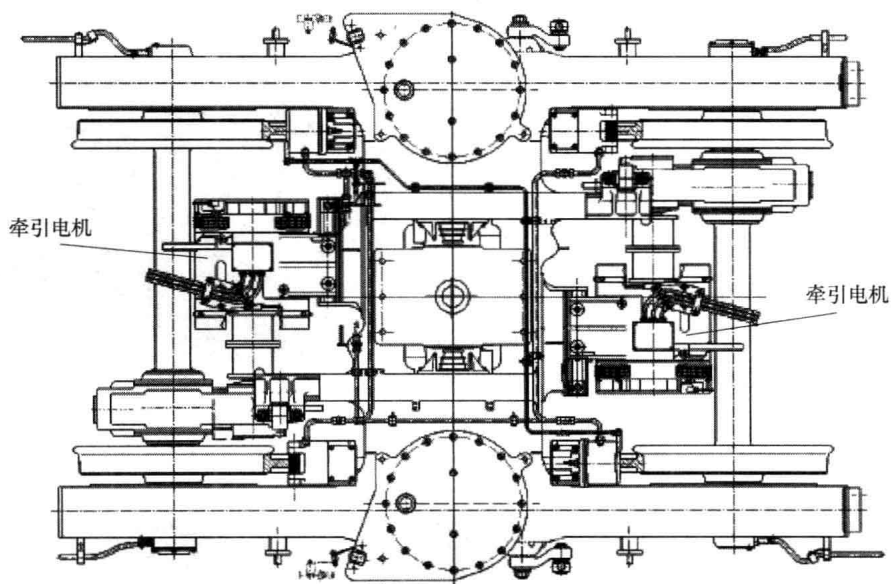


图 1.10 转向架上的电机安装位置

程度显著提高。

牵引变流器主要由大功率开关器件(IGBT, GTO 等), 二极管以及晶闸管、电容器和电抗器等构成。这些器件目前主要发展方向可以总结为: 一是向大功率发展, 使单个元件开关峰值功率由 $100 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 增加到 $1\,000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 以上; 二是增加品种。联邦德国、日本等国已实现变流器元件产品系列化、专用化。电容器分为支撑电容器、滤波电容器和换流电容器。电抗器有滤波、换流和饱和电抗器之分。各类器件都有其独自特点, 牵引变流器正在朝大功率、调节控制性能齐全和对通信、电网无干扰的方向发展。80 年代初在牵引变流器中得到推广应用的是二极管整流、晶闸管相控和直流斩波, 而以应用交流牵引电动机为目标的直—交、交—交逆变技术虽然性能优越, 并已有小批量生产应用, 但因价格昂贵、技术复杂以及操作、维修要求高等还未得到普遍推广。提高功率半导体器件的性能, 特别是提高自关断类的 GTO 和大功率三极管的功率和性能, 应用氟冷却和大规模集成数字电路技术等推进牵引变流技术的发展。事实上, 随着电力电子技术、微电子技术以及计算机技术的飞速发展, 牵引变流器体积越来越小, 质量越来越轻, 而功能却越来越完善。下图所示为庞巴迪公司生产的鼠笼式三相交流异步牵引电机供电的直流—交流变流器 MITRAC 1110, 图 1.11 为变流器的外形, 图 1.12 为变流器的内部结构示意图。

上海地铁 2 号线增购车辆为 6 节编组列车, 一个 6 节编组的列车由两个相同

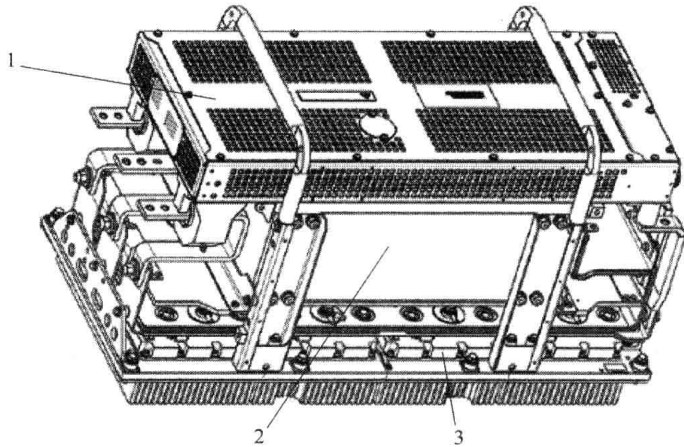


图 1.11 庞巴迪公司生产 MITRAC 1110 直-交变流器(型号为 ICON-M)
图注:1—电子箱组成;2—DC—链接电容器;3—相斩波器单元

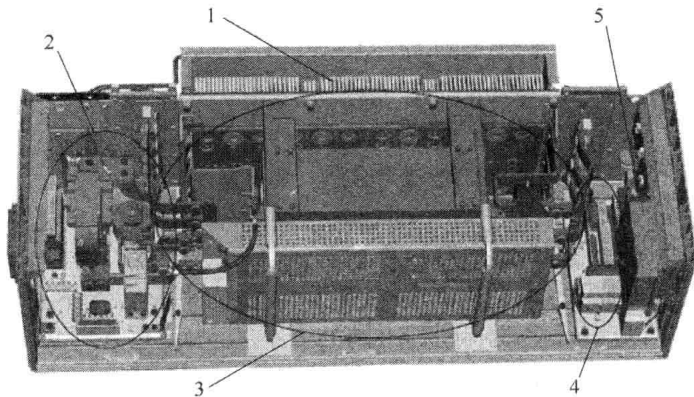


图 1.12 变流器的内部结构示意图

图注:1—朝向中间部分的冷却器;2—DC 接触器单元;
3—逆变器模块(MCM);4—风扇接触器单元;5—内部风扇

的 3 辆车单元组成,见图 1.13 所示,其中高压、牵引和辅助设备分布在车底部,注意图中设备标记位置并非各设备在车底部的确切位置。

5. 辅助逆变器

辅助系统(又称为静止变换器)主要完成下述几种功能:

- (1)DC / AC 逆变部分,负责将 1 500 V 接触网引入的直流电变换为三相 50 Hz , 380 V / 220 V 的恒压恒频的交流电,为地铁或轻轨车辆上的交流用电设备提供电源;
- (2)变压器隔离部分,主要起电气隔离作用,为了安全必须将电网上的高压与低压用电设备,尤其是常需人工操作的控制电源的设备,在电气电位上实现隔离。通常

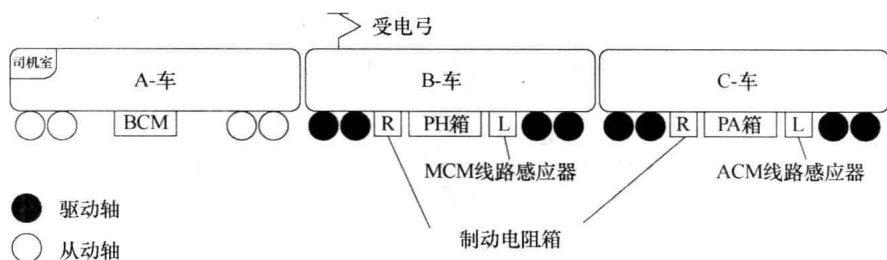


图 1.13 3 辆车单元车顶与车底的电气设备布置图

采用变压器进行电气隔离,同时也可通过设计不同的匝比以满足电压值的需要;

(3)DC / DC 直流电源(兼作蓄电池充电器):车辆上各控制电器都由 DC 110 V / DC 直流电源供电(包括主牵引逆变器和辅助逆变器中的电源模块的供电)。车辆上蓄电池为紧急用电所需,在辅助逆变器未开启或不能启动时为各种控制器暂时供电,所以蓄电池必须保证储有足够的电能,故 DC 110 V / DC 直流电源同时也是蓄电池的充电器。

随着电力电子器件发展,静止辅助系统也经历着不同方案的发展过程。由于新一代性能优良的 IGBT 器件迅速发展,20 世纪 90 年代中后期,欧洲与日本等国的车辆辅助系统大都采用 IGBT 来构成,其实现方案大致有:斩波稳压后再逆变,加变压器降压隔离;三点式逆变器加变压器降压隔离;电容分压两路逆变,加隔离变压器构成 12 脉冲方案;两点式逆变器加滤波器与变压器降压隔离;直一直变换与高频变压器隔离加逆变的方案。

这些方案各有其特点,而目都能满足地铁或轻轨车辆的要求,在目前的方案中,对 DC 110 V 直流电源主要有两种不同的方案实现:通过 50 Hz 隔离降压变压器来实现;独立的直一直变换器直接接于供电网压,通过高频变压器隔离后再整流并滤波得到 DC 110 V 控制电源。从两者比较看,后者是独立的,与静止辅助逆变器无关,也就不受逆变器故障的影响,在供电功能方面有一定的好处;但是因为需要独立的直流电源,也就增加了成本。

地铁车辆大都采用两动一拖(3 节车辆)构成 1 个单元,由 2 个单元(所谓 6 节编组)构成一列车,每节车辆均配备 1 台静止辅助逆变器,每单元共用 1 台 DC 110 V 的控制电源。每节车辆的辅助逆变器的容量为 75~80 kV · A,DC 110 V 控制电源(兼作蓄电池充电器)功率约为 25 kW。后来法国 Alston 生产的地铁车辆,改为 1 个单元中配 2 台静止辅助逆变器,每台容量为 120 kV · A,且每台含 DC 110 V 控制电源,功率为 12 kW。最近国外生产的地铁车辆,在 6 节编组中,每单元只配 1 台静止辅助逆变器,容量约为 250 kV · A,直流 110 V 控制电源为 1 台,约 25 kW,即所谓的“集中供电”。这两种供电方式各有优缺点。分散供电其