

城市轨道交通车辆牵引逆变器的 技术发展

翁星方, 邹档兵

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 翁星方 (1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 现从事 IGBT 牵引变流器的设计开发工作。

摘 要: 简单介绍了城市轨道交通车辆牵引逆变器的发展和主电路, 对具有完全自主知识产权的简化牵引逆变器进行了分析, 对牵引逆变器的冷却方式和 IGBT 变流器模块进行了详细的介绍。通过实际装车考核, 表明该简化牵引逆变器完全满足目前城市轨道交通车辆牵引系统的需求。

关键词: 牵引逆变器; 简化; IGBT 变流器模块; 热管; 城市轨道交通车辆

中图分类号: U266.2; U264.3+72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)01-0047-05

The Technical Development of Traction Inverter for Urban Rail Transit Vehicle

WENG Xing-fang, ZOU Dang-bing

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: First of all, the development of traction inverter and power circuit were introduced simply. Secondly, the simplified traction inverter with completely independent intellectual property rights was analyzed. Finally, the radiator of traction inverter and the IGBT converter module were introduced in detail. The simplified traction inverter was proved satisfying the demand of urban rail transit vehicle traction system.

Key words: traction inverter; simplification; IGBT converter module; heat-pipe; urban rail transit vehicle

0 引言

随着城市规模及人口的迅速扩张, 城市交通问题日益突出。城市轨道交通作为城市交通的一种工具, 以其快捷、安全、便利等优点越来越受到重视。我国通过30多年的引进、消化吸收和再创新, 在城市轨道交通装备制造方面已具备了生产能力和技术基础, 牵引电气系统的交流传动装置、控制及诊断系统、辅助电源系统等重要部件都已实现了自主研发和制造。

本文首先对牵引逆变器的发展、主电路进行简单介绍, 然后对株洲南车时代电气股份有限公司(以下简称时代电气)的牵引逆变器简化平台进行分析, 最后对其IGBT变流器模块、牵引逆变器的冷却方式进行详细介绍。

1 牵引逆变器的发展概述

轨道交通车辆牵引电气系统中, 牵引变流器用于

干线电力机车通常是指交直交(AC-DC-AC)变流系统, 而用于城市地铁与轻轨则通常是直交(DC-AC)逆变系统(即牵引逆变器)。牵引逆变器是城市轨道交通车辆的“心脏”, 其性能的优劣直接影响到城市轨道交通车辆的运行性能、运输能力、耗电量等等。

上世纪90年代末期, 随着大功率电力电子技术的不断进步与发展, 车辆牵引电气系统也在不断地更新与发展。牵引逆变器中的电力电子器件经历了半控型晶闸管(SCR)、全控型晶闸管(GTO)及绝缘门极双极型晶体管(IGBT)的发展过程。IGBT元件属于电压驱动的全控型开关器件, 脉冲开关频率高、性能好、损耗小且自保护能力强。无论是对于运输部门, 还是对于制造厂商来说, IGBT变流器都有2个重要的优点: 首先, 这种变流器组装成本低并且提高了牵引系统的效率; 第二个优点在于这种牵引系统具有较高的可靠性和可用性, 这一优点有利于IGBT变流器迅速投入使用。与GTO晶闸管不同的是, IGBT晶体管由电压控制, 元件输入电容的充放电控制电流很小, 其门极控制电路大为简化。

收稿日期: 2011-11-08

因此,在牵引传动领域中,IGBT 越来越起到主导作用。从大功率的机车、动车组到地铁车辆、轻轨车辆、磁悬浮列车等应用场合,IGBT 得到最广泛的应用。牵引逆变器未来发展趋势是:①确立以 IGBT (IPM) 为开关元件;②功率密度大、轻量化、低能耗设计;③电路结构简单化设计;④模块化结构设计;⑤低噪声,良好的电磁兼容性能,产品朝着环境友好型方向发展;⑥大功率牵引逆变器冷却方式以高效环保的水冷散热器或热管散热器为发展方向。

同时,城市轨道交通车辆牵引逆变器不仅需要满足城轨车辆的动力性能、故障运行/救援能力以及实现预期的运行速度等,还需要满足城轨车辆特有的运行工况:①站间距离短;车辆后/制动频繁并且后/制动加/减速度大;后/制动力矩大;后/制动峰值功率大以及导致的直流供电电压变化范围大。②由于城轨车辆大部分是在地下隧道中运行,因此,其运行的安全性及其重要。一方面要尽量提高部件及系统乃至整个车辆运行的可靠性;另一方面,车辆要具有一定的故障运行能力,当车辆损失部分动力或丧失全部动力时,也能行驶或被牵引行驶到最近的车站或车辆维修厂。③城轨车辆由于受轴重的限制以及为了节省能源,在满足车辆动力性能的前提下,要求电传动系统装置尽可能轻量化。④有良好的过载能力。在上、下班高峰期和节假日,乘客超员的情况是经常发生的,为保证车辆按点运行,车辆的电气部件必须在一定的过载下仍具有持续运行的能力。

电力电子技术的快速发展大大促进了现代牵引电传动技术的发展。牵引逆变器的控制方式经历了凸轮调阻、斩波调压和调频调压(VVVF)三大方式。由于 VVVF 交流传动系统具有诸多优点及其在技术上已趋成熟,采用 VVVF 交流传动系统的地铁、轻轨车辆已在世界各国新建地铁、轻轨系统中广泛应用,成为现代地铁、轻轨车辆的主流。

2 主电路分析

目前,城市轨道交通车辆牵引逆变器的典型主电路主要有以下3种:一种是采用1个变流器模块驱动4台牵引电机(1C4M)的车控方式的主电路,如图1所示;一种是采用2个变流器模块驱动4台牵引电机(2C4M)的架控方式的主电路,如图2所示;一种是采用2个变流器模块驱动4台牵引电机(2C4M)的车控方式的主电路,如图3所示。

图1中左侧虚线框内为高压电器箱,包括了QS1(高速开关)、QF1(隔离开关)

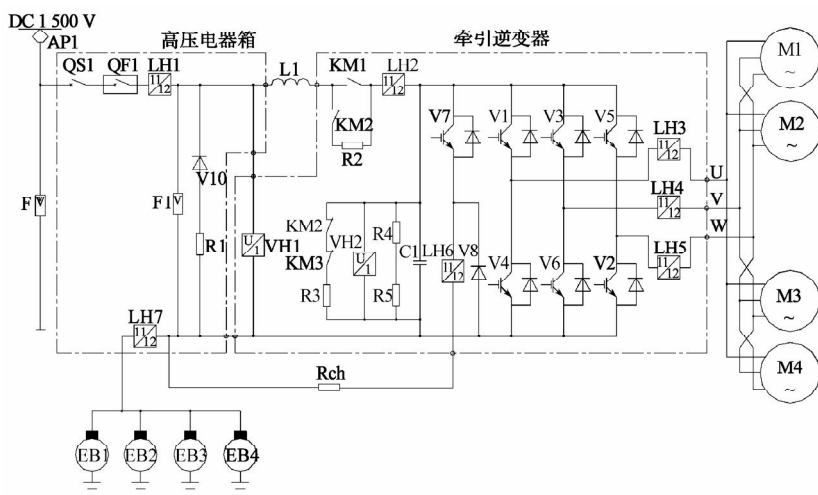


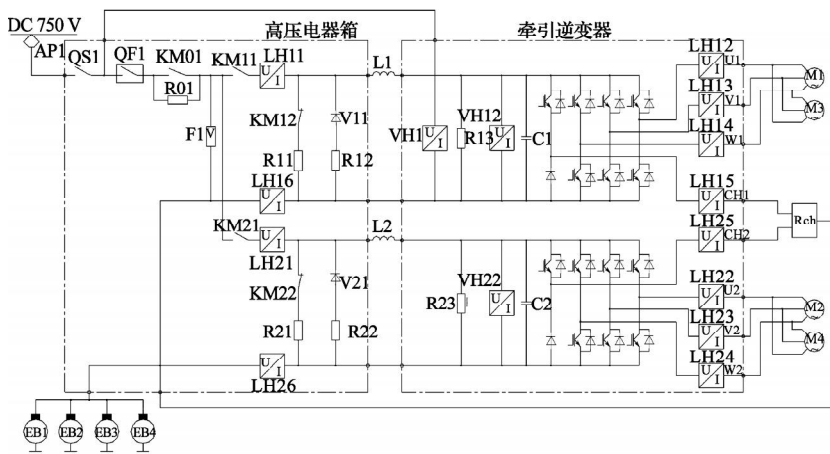
图1 单模块车控主电路

等高压电器,其中QF1用于主电路的故障保护,电流传感器LH1、LH7用于主电路接地检测,F1、V10、R1用于当主电路发生故障时,电抗器L1等储存能量的释放。

图1中右侧虚线框内为牵引逆变器,包括了充放电等高压回路,采用1个模块驱动4台牵引电机(1C4M)的车控方式,其中KM2、R2组成充电回路,KM2、KM3、R3组成快速放电回路,R4、R5组成固定放电回路,LH2用于检测中间回路电流,LH3~LH5用于检测输出电流;LH6用于检测制动电流,VH1用于检测网压,VH2用于检测支撑电容电压。

图2中左侧虚线框内为高压电器箱,包括了QS1、QF1、KM01等高压电器,其中QF1用于主电路的故障保护,KM11、KM21、R01组成充电回路,KM12、KM22、R11、R21组成快速放电回路,F1、V11、V21、R12、R22用于当主电路发生故障时,L1、L2等储存能量的释放,LH11、LH16、LH21、LH26用于主电路接地检测。

图2中右侧虚线框内为牵引逆变器,不包括充放电等高压回路,采用2个模块驱动4台牵引电机(2C4M)的架控方式,其优点是当其中一个变流器模块故障时,可以将其切除,另一个变流器模块仍可继续工作,该车动力只损失一半,并且2个牵引逆变器单元分开控制,有利于提高车辆的粘着利用;其缺点是增加了许



多部件(尤其是接触器), 导致系统可靠性降低, 体积和成本增加。

图2中R13、R23组成固定放电回路, LH11、LH16、LH21、LH26用于检测中间回路电流, LH12~LH14、LH22~LH24用于检测输出电流, LH15、LH25用于检测制动电流, VH1用于检测网压, VH12、VH22用于检测支撑电容电压。

图3中左侧虚线框内为高压电器箱, 包括了QS1、QF1、LH1、F1、KM01等高压电器, 其中QF1用于主电路的故障保护, LH1用于主电路接地检测, KM2、R2组成充电电路, KM3、R3组成快速放电电路, F1、V1、R1用于当主电路发生故障时, L等储存能量的释放。

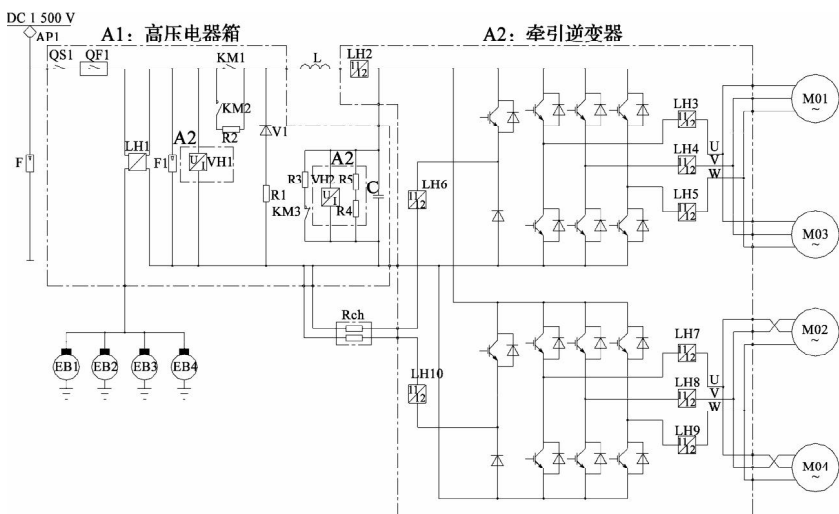


图3 双模块车控主电路

图3中右侧虚线框内为牵引逆变器, 不包括充放电等高压电路, 采用2个模块驱动4台牵引电机(2C4M)的车控方式, 其优点是电路简单, 节省成本, 由于接触器数量减少, 有利于提高系统可靠性; 缺点是不利于车辆的粘着利用, 当其中一个变流器模块故障时, 无法单独隔离, 只能将整个牵引逆变器切除, 该车动力全部损失。

图3中R4、R5组成固定放电电路; LH2用于检测中间回路电流, LH3~LH5、LH7~LH9用于检测输出电流, LH6、LH10用于检测制动电流, VH1用于检测网压, VH2用于检测支撑电容电压。

3 牵引逆变器的简统化平台

随着城市轨道交通的快速发展, 国内的城市轨道交通也由原先的地铁一种形式向多样化发展, 同时国内城市轨道交通牵引系统的供电制式也向多样化方向发展。目前供电制式主要有2种: 一种是DC 750 V供电电压制式, 另一种是DC 1 500 V供电电压制式。另外, 不同区域和不同用户对轨道交通车辆的控制方式(包括车控和架控)的要求也不同。同时, 用户可能还需要对现有已经安装的牵引逆变器的控制方式进行更改。由时代电气研制的简统化牵引逆变器, 不但能够满足城

市轨道交通车辆的特殊工作环境, 具有安装维护方便、结构强度高、内部结构紧凑、外表美观精致等特点, 而且能够在不重新设计柜体的条件下通过改变接线方式、更换变流器模块及DCU机箱就能方便实现车控和架控的互换, 同时也能够满足在不同供电制式下的应用, 极大地缩短了牵引逆变器的设计开发周期。

简统化牵引逆变器的外形如图4所示。综合以往的设计经验并采用简统化的设计思路, 其外形尺寸最终确定为2 400 mm×883 mm×600 mm(L×W×H)。牵引逆变器设有8个吊耳, 每个吊耳通过M16以上的螺栓来保证其安全吊装于车体底部。牵引逆变器柜体高度600 mm, 标准吊耳的高度60 mm, 通过调节吊

耳的高度, 可以满足车体底部不同安装空间的要求。IGBT变流器模块设计为抽屉式结构, 便于在牵引逆变器柜体上进行安装、检修及维护。

牵引逆变器主要由2个相同的IGBT变流器模块构成, 还包含有控制箱、传感器等部件。牵引逆变器所有对外控制连接器均采用密封结构; 3个隔舱采用门锁结构设计, 每个隔舱都设计一个密封门, 不仅防水防尘, 而且使得部件的安装和维护、拆卸更加方便; 主电路的输入输出电缆通过电缆夹由铜接头压接, 因此使得整柜密封完全能够满足车底设备防护等级IP54的要求。

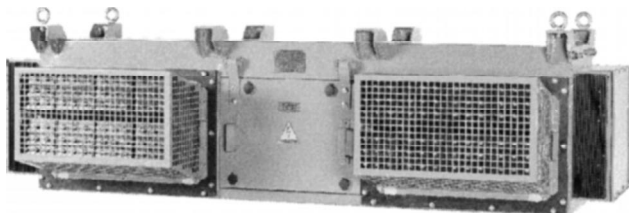


图4 牵引逆变器

时代电气的牵引逆变器简统化平台采用模块化、系列化的结构设计, 提高了产品的互换性和通用性, 降低了设计、生产及采购成本, 方便了用户的维护保养。

4 IGBT 变流器模块

由IGBT元件构成的变流器模块是城轨车辆用牵引逆变器的核心部件, 它是一个相对独立的模块单元。模块化是当前国内外变流器设计的一个主流方向。与传统设计相比较, IGBT变流器模块化具有很多优点, 如: ①集成度高、结构紧凑, 有利于节省空间, 减小设备的体积。②组装与拆卸方便, 同时最大限度地减少了外部接线; 通用性好, 相同的变流器模块, 既可以用于四象限脉冲整流器, 又可用于逆变器。③抗电磁干扰能力强, 内部元件驱动信号采用光纤连接。④极大地缩短了研发周期, 降低了研发费用, 减少了用户备

品数量,降低了产品的成本。

随着系列化IGBT变流器模块设计的日趋成熟,模块性能也日趋完善,也为国产动车、机车牵引逆变器以及城轨车辆牵引逆变器的自主研发提供了更多的技术支持。

目前由时代电气研制的城轨车辆牵引逆变器采用的是IBXM系列的IGBT变流器模块,其外形如图5所示。它包括热管散热器、IGBT元件、温度继电器、门极驱动单元、支撑电容、复合低感母排以及门极驱动电源等,是一个结构高度集成、功能相对独立的功率模块。

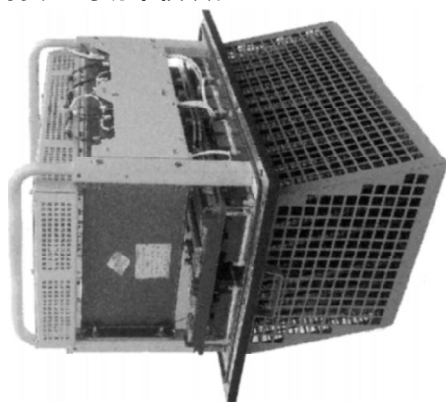


图5 IGBT变流器模块

4.1 IGBT元件的选型

IGBT元件是变流器模块中最为重要的元件,在设计变流器模块时,不仅要充分发挥其输出能力,还要保证其可靠性,所以IGBT元件的选型非常重要。在简化牵引逆变器中变流器模块里集成了逆变桥臂和斩波桥臂,每个桥臂的IGBT元件选型方法如下所述。

1) 逆变桥臂中IGBT元件选型

电压定额计算:

$$U_M = (K_1 \cdot U_{d\max} + U_{SP}) K_2 \quad (1)$$

式中: K_1 ——过压系数; K_2 ——安全系数; $U_{d\max}$ ——额定直流电压最大值, V; U_{SP} ——关断即将结束时的尖峰电压, V。

电流定额计算:

$$I_M = \sqrt{2} \cdot I_o \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \quad (2)$$

式中: I_o ——额定工作电流, A; α_1 ——电流尖峰系数; α_2 ——温度降额系数; α_3 ——过载系数。

2) 斩波桥臂中IGBT元件参数选型

承受的最大电压与逆变桥臂用IGBT相同,流过的最大电流为:

$$I_{M2} = U_{d\max} \cdot \alpha_2 / R_{c1} \quad (3)$$

式中: R_{c1} ——制动电阻, Ω 。

通过以上计算,可以基本选择确定相应电压、电流等级的IGBT元件。

4.2 脉冲分配板介绍

脉冲分配板的主要功能是将DCU(牵引控制单元)

发出的4路PWM脉冲信号分成8路,并将电信号转换为光信号,通过光纤发送给门极驱动单元从而控制相应的IGBT元件的导通和关断。当IGBT驱动板或其他相模块发生故障时,进行必要的故障处理及反馈。其功能框图如图6所示。

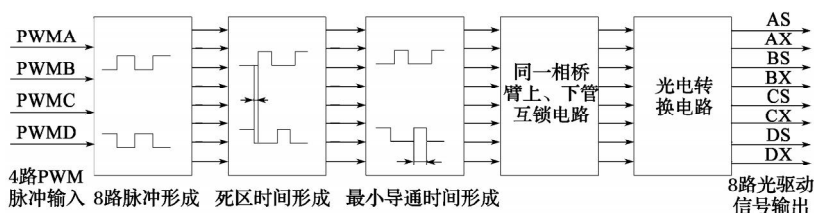


图6 脉冲分配单元功能框图

脉冲分配电路的具体功能是由可编程逻辑芯片(CPLD)及一些外围芯片来完成,它还包括开关元件的死区时间和最小导通时间的确定、同一桥臂上下管的互锁、故障封锁、故障显示等功能,一旦门极驱动单元检测到元件过电流或过压等故障,给出故障信号,脉冲分配单元便立即封锁驱动脉冲,并将故障信号反馈给DCU,同时给出故障显示。采用可编程逻辑芯片的最大优点是可以在线编程(ISP),极大方便了现场调试与系统升级,提高了系统的可测试性及可靠性。

4.3 低感母排的应用

在牵引逆变器中,由于IGBT开关元件在快速关断过程时其 di/dt 很大,若线路杂散电感值较大,会产生较大的尖峰电压,对IGBT开关元件极为不利。产生的尖峰电压可通过下式计算得出:

$$\Delta u = L_s (di/dt) \quad (4)$$

式中: L_s ——线路中的杂散电感和元器件上的分布电感的总和, H; di/dt ——电流变化率, A/s。

因此一般在牵引逆变器的主电路中会设置缓冲电路或称吸收电路,以吸收元件关断时的过电压。新一代的IGBT元件内部的分布电感已能控制在很小的范围内,所选元件其C极和E极之间的分布电感一般约为十几纳亨左右,如果能减少电路上的杂散电感,则可省去吸收电路。在牵引逆变器设计中,合理排布母线、降低分布电感对于保护IGBT元件免遭瞬时过电压击穿非常重要,因此必须将尖峰电压限制在RBSOA(反向偏置安全运行区)内。

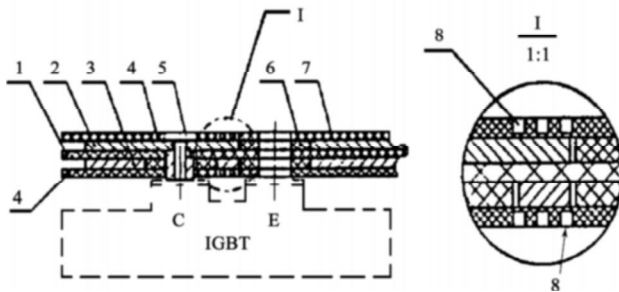


图7 低感母排示意图

低感母排的基本构造是多层结构的连接母排,使流过母排上的正负电流方向相反,抵消线路上的差模杂散电感。如图7所示,低感母排是由具有定位作用的

导电铜柱5将依序叠置的外层绝缘层4、正铜排2、中间绝缘层1、负铜排3及外层绝缘层叠置而成。并且在导电铜柱及母排之间增设绝缘塞块6,在相邻两层之间设有起粘接作用的半固化片7。低感母排安装到IGBT元件后,为了增加C、E两极间的爬电距离,在外层绝缘板上位于IGBT的两极区间内铣出一定数量的小凹槽8。这种低电感母排结构简单紧凑,外表美观而且制作方便,适用于工作电压在DC 1 500 V以上的工作场合。

变流器模块上的IGBT元件与中间直流环节支撑电容的连接采用了低感母排技术,使得主电路上的分布电感 L_s 大大降低,有效地抑制了尖峰过电压 Δu ,保证IGBT元件运行于安全区。

5 牵引逆变器的冷却方式

目前,很多大功率变流器采用水冷装置作为散热系统,但是水冷系统较为复杂,需要配置水泵、热交换器等其他辅助设备。在使用过程中对于散热系统的要求也比较高,要完全杜绝漏水、断水等情况的发生,因为一旦漏水将对系统造成很大的损失。

传统实体散热器为减少散热器的热阻,必须加大散热面积和通风量,相应必须增大基板和主干、分枝肋,既消耗金属材料,又因为金属传导率低,增大了传导热阻,在远端降温大,散热差,只好在散热面积和传导损耗之间求取折衷值。但是热管技术能使传导热阻降低到最小,并且热管组件可尽量加大散热器的表面积。由于热管两端温差很小,不需要担心传导热阻的影响,因而在给定的风量下可使散热器—空气之间的热阻尽量地减小。

因此,时代电气研制的城轨车辆牵引逆变器采用重力式热管散热。重力式热管的结构原理如图8所示,在一个密封的真空金属管中,装有某种液体介质,其传热原理是基于液体的汽化和液化所吸收和释放的能量,但由于沸腾传热的传热效率是金属的成百上千倍,所以热管的传热效果大大优于一般的金属。

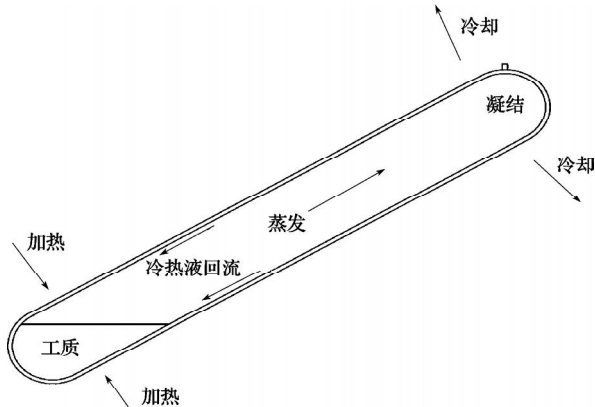


图8 重力式热管原理示意图

热管的工作过程主要如下:在蒸发段,液态介质由于吸收了热量而蒸发,同时由于管内为真空状态,沸点比大气压下的液体沸点低,蒸发更加迅速,所以向周围

环境吸热明显,蒸汽流从蒸发端经过绝热段到达热管的冷凝端,在冷凝端蒸汽液化释放热量,如果外界不断地将放出热量带走,蒸汽将不断在冷凝端表面凝结,由于热管是倾斜放置,凝结的液体在重力的作用下会自动流向蒸发端,这样形成一个液体相变循环,而热量在这个过程中被从热管的一端带到另外一端。

IBXM系列IGBT变流器模块采用的就是这种方式的热管。热管的传热过程有以下特点:①高的传热效率,一般金属热传导为分子的热运动,比热管的传热效率低很多,很多人把热管称为热的“导热体”就是由于热管能以很低的热阻进行热量的传递;②热管等温性好,热管开始工作后其蒸发端和冷凝端温度相差很小,对于铜—水热管内部蒸发端和冷凝端温差一般小于 3°C ,这样小的温差使得在整个冷凝端通过外加翅片的方式散热时热量分配均匀;③低温差启动,通过调整内部蒸汽压力,热管可以在两端环境温差不大的情况下进行热量的传递,这样环境产生的热量将被及时通过热管带出。

热管散热器不仅结构简单、维护方便,而且无噪声、无污染,保证了散热效率,并且可使牵引逆变器结构紧凑,热管散热器的热管放在车辆外侧,利用车辆运行产生的风来提高冷却效果,热管冷却的另一侧为全封闭功率组件,可免受污染。现场实测的结果表明,列车在正常运行条件下,逆变器的散热器台面最高温升为 27 K ,保证了IGBT元件工作时所产生的热量能及时带走,并留有较大的温升裕量。

6 结语

随着社会的不断进步和技术的飞速发展,对城市轨道交通车辆提出了越来越高的要求,而先进可靠的牵引逆变器技术是现代城市轨道交通车辆具有优异性能的基础。由时代电气研制的筒统化牵引逆变器现已批量应用于上海地铁1号线、沈阳地铁2号线、北京地铁房山线、深圳地铁5号线、重庆地铁6号线等国产化地铁项目,以及新加坡地铁工程维护车和土耳其轻轨等国外项目。通过实际装车应用,证明该牵引逆变器性能良好并且安全可靠,完全能够满足城市轨道交通车辆牵引电传动系统的要求,推动了我国城市轨道交通牵引装备的发展。

参考文献:

- [1] 荣智林. TGN10型地铁车辆用DC 1 500 V IGBT牵引逆变器[J]. 机车电传动, 2004 (4).
- [2] 翁星方. 北京地铁国产化列车IGBT牵引逆变器[J]. 机车电传动, 2008 (4).
- [3] 刘海涛. 地铁车辆用DC 1 500 V IGBT牵引逆变器[J]. 机车电传动, 2008 (5).
- [4] 翁星方, 忻力, 胡家喜, 陈燕平, 邹档兵. 筒统化地铁车辆IGBT牵引逆变器[J]. 机车电传动, 2011 (3).