

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.04.013

# 铣磨车变频器主电路的损耗分析 及其冷却装置的设计

周喜明, 邓木生, 谭 兮

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 采用近似法对铣磨车变频器主电路器件功率损耗进行分析, 计算出主要器件的损耗, 在此基础上设计铣磨车牵引变频器的冷却装置, 保证功率器件在结温范围内工作。实验证明, 该冷却装置能实现其散热功能, 使主要功率器件降温, 从而保护功率器件, 并确保机车稳定运行。

**关键词:** 铣磨车; 功率损耗; 变频器; 绝缘栅双极型晶体管

**中图分类号:** TN773

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2015)04-0061-06

## Main Circuit Loss Analysis and Cooling Device Design of Milling Machine Converter

Zhou Ximing, Deng Musheng, Tan Xi

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract :** By approximation method analyzed the main circuit device power losses of milling machine converter, calculated the main components' loss, and on this basis, designed cooling device of milling machine traction converter for ensuring the power device operating in the junction temperature range. The experiments proved that the cooling device realized the heat dissipation function, the main power device achieved the cooling effect, thereby protecting the power device, and ensured the stable operation of the locomotive.

**Keywords:** milling machine; power loss; converter; insulated gate bipolar transistor

## 0 引言

高压大功率变频器是电力电子行业的一个重要器件, 它以其优越的调速性能被广泛应用于电控设备, 特别是在电力、冶金、轨道交通、石化、水泥及煤炭行业。但是, 目前国内生产变频器的技术还不够成熟, 器件的散热问题是技术革新的瓶颈。变频器的故障率随温度的升高呈指数曲线上升, 而使用寿命随温度升高呈指数曲线下降<sup>[1]</sup>。经实验证明, 环境温度平均每升高 10 °C, 变频器平均使用寿命减少一半。因此, 在变频器的研制过程中, 必须考虑其散热问

题。变频器工作时阻值较小, 流过变频器的电流很大, 导致其产生的热量也非常大, 因此, 不能忽视其发热所产生的影响。

本文采用近似法, 对铣磨车变频器主电路的损耗进行分析; 通过计算铣磨车变频器主要器件的实际损耗值, 来设计水冷板的内部布局; 并通过实验来检验该方法的可行性。

## 1 变频器主电路损耗分析

大功率变频器按其输出电压可分为高-高型

收稿日期: 2015-06-07

作者简介: 周喜明(1990-), 女, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术及系统,

E-mail: 1055002668@qq.com

和高-低-高型2种<sup>[2]</sup>。高-高型是直接输出高电压，其效率和可靠性高，并且大电流可启动恒转矩负载。高-低-高型是使用低压输出，再通过升压变压器升压，其可靠性较差，效率不高，不适合于恒转矩控制。因此高-高型变频器得到了广泛应用。

高压变频器根据中间直流滤波环节的不同，可分为2种类型：电流源型和电压源型。电流源型是在变频器中间直流环节串联一个大电感，使输出电流脉动小，输出的电流为矩形波。电压源型是在变频器中间直流环节并联一个大电容，使输出电压脉动小，输出的电压为矩形波。目前，使用较多的是电压源型变频器。

铣磨车变频器采用的是高-高电压源型。变频器通常由3部分组成：整流电路、中间直流环节和逆变电路。铣磨车变频器主要的发热功率器件是整流模块、中间放电电阻、逆变模块、充电电阻和线路。铣磨车变频器采用不可控整流方式，包括6个二极管。逆变电路其中包括3个逆变模块，每个模块上集成2个二极管和2个绝缘栅双极型晶体管（insulated gate bipolar transistor, IGBT）。每个IGBT的关断与导通，采用空间矢量脉宽调制（space vector pulse width modulation, SVPWM）脉冲控制。二极管与放电电阻的损耗相对比较容易计算，而逆变模块中的IGBT涉及到高频率的导通与关断，给其损耗计算带来了难度。铣磨车变频器的主电路如图1所示。

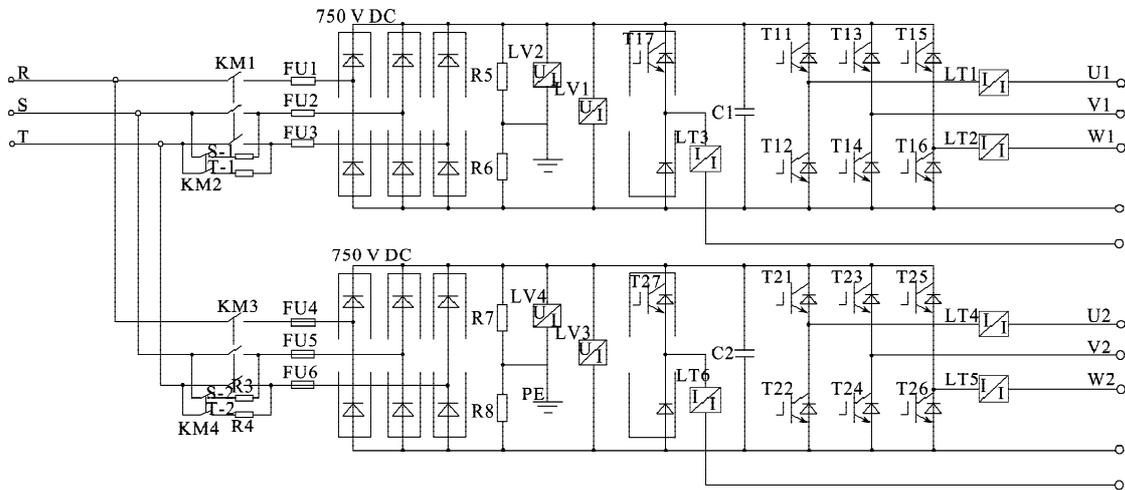


图1 铣磨车变频器的主电路  
Fig. 1 The main circuit of milling machine converter

整流模块与逆变模块的结构都是对称的，因此只需对2个模块中的一相进行功耗分析。整流模块只需对1个二极管进行分析，然后乘以其二极管的个数，就可以得到整流模块的功率损耗。逆变模块只需对1个IGBT和1个续流二极管进行分析，再乘以其逆变模块中对应的二极管和IGBT的数量，就能得到变频器主电路的功率损耗。在铣磨车电路中要求输入电压为AC 550 V，额定输出电流为400 A。

1.1 逆变电路中单个IGBT功率损耗

铣磨车牵引变频器主电路损耗的核心部分是IGBT的损耗，其包括通态损耗和开关损耗。由于变频器的工作频率很高，因此需考虑其开关损耗。

铣磨车变频器采取SVPWM控制策略，选用英飞凌公司BSM300GA1700DLC的IGBT模块。由于IGBT的占空比和负载电流不是常数，而是随交流输出的基波频率变化，这使得功率损耗分析变得相当复杂，因此，利用英飞凌IGBT软件进行仿真计算。实验表

明，仿真计算的结果与实际值较吻合。该仿真软件可用来测量IGBT模块的损耗，包括IGBT的通态损耗和开关损耗，二极管的通态损耗和开关损耗<sup>[3]</sup>。IGBT的功率损耗仿真图如图2所示。

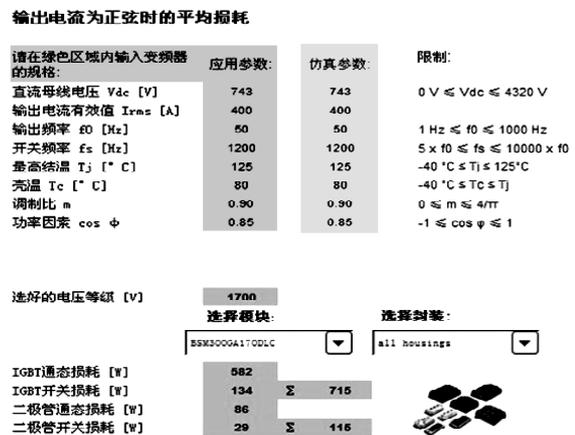


图2 IGBT的功率损耗仿真图  
Fig. 2 Simulation diagram of IGBT power loss

## 1) IGBT 的通态损耗

$$P_{I_{W/V}} = \left( \frac{1}{8} + \frac{m \cos \varphi}{3\pi} \right) \frac{V_{CEN} - V_{CEO}}{I_{CN}} I_{CM}^2 + \left( \frac{1}{2\pi} + \frac{m}{8} \cos \varphi \right) V_{CEO} I_{CM}. \quad (1)$$

式中:  $m$  是调制比;  $\cos \varphi$  是功率因素;  $V_{CEN}$  是 IGBT 的额定电压;  $V_{CEO}$  是 IGBT 的实际通态压降;  $I_{CN}$  是 IGBT 的额定电流;  $I_{CM}$  是有效电流。

## 2) 续流二极管通态损耗

$$P_{I_{W/D}} = \left( \frac{1}{8} - \frac{m \cos \varphi}{3\pi} \right) \frac{V_{CEN} - V_{FO}}{I_{CN}} I_{CM}^2 + \left( \frac{1}{2\pi} - \frac{m \cos \varphi}{8} \right) \times V_{FO} I_{CM}, \quad (2)$$

式中  $V_{FO}$  是二极管的实际通态压降。

## 3) 开通损耗

$$P_{on} = \frac{1}{8} V_{CC} t_{rN} \frac{I_{CM}^2}{I_{CN}} f_s, \quad (3)$$

式中:  $V_{CC}$  是电源电压;  $t_{rN}$  是开通电流上升时间;  $f_s$  是开关频率。

## 4) 关断损耗

$$P_{off} = V_{CC} t_{fN} I_{CM} \left( \frac{1}{3\pi} + \frac{1}{24} \cdot \frac{I_{CM}}{I_{CN}} \right) f_s, \quad (4)$$

式中  $t_{fN}$  是关断电流下降时间。

由式 (1) ~ (4) 可得, 单个 IGBT 的功率损耗

$$P_{IGBT} = P_{I_{W/V}} + P_{I_{W/D}} + P_{on} + P_{off}. \quad (5)$$

利用英飞凌 IGBT 软件进行仿真计算, 相关参数取值如下:

直流母线电压  $V_{dc} = 2.34(550/\sqrt{3}) = 743 \text{ V}$ ;

输出电流有效值  $I_{rms} = 400 \text{ A}$ ;

输出频率  $f_o = 50 \text{ Hz}$ ;

开关频率  $f_s = 1200 \text{ Hz}$ ;

调制指数  $m = 0.90$ ;

功率因数  $\cos \varphi = 0.85$ 。

通过仿真计算可得 IGBT 的功率损耗为

$$P_{IGBT} = 830 \text{ W}.$$

## 1.2 整流电路中单个二极管和放电电阻功率损耗

整流二极管的损耗也包括通态损耗和开关损耗。由于开通时间很短, 则开通损耗可以忽略; 截止漏电流很小, 关断损耗也接近于零。因此, 开关损耗不考虑, 在工程计算中只考虑通态损耗。二极管选择的是英飞凌的 DD600N16K, 则整流二极管的通态损耗

$$P_D = f W_p = f I_D V_D t_D, \quad (6)$$

式中:  $f$  是工作频率;  $W_p$  是单次功率损耗;  $V_D$  是二极管通态压降;  $t_D$  是二极管的通态时间;  $I_D$  是二极管的

通态平均电流, 且

$$I_D = \frac{P_2}{\sqrt{3} U \cos \varphi \eta}, \quad (7)$$

其中  $P_2$  是输出功率,  $U$  是输入电压,  $\eta$  是功率因数。

把  $P_2 = 200 \text{ kW}$ ,  $U = 550 \text{ V}$ ,  $\cos \varphi = 0.85$ ,  $\eta = 0.9$  代入式 (7) 中, 可得  $I_D = 274.45 \text{ A}$ 。

再把  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $I_D = 274.45 \text{ A}$ ,  $V_D = 0.75 \text{ V}$ ,  $t_D = 0.02 \text{ s}$  代入式 (6), 可得  $P_D = 205.84 \text{ W}$ 。

由于放电电阻的阻值较大 (通常为千瓦级), 变频器正常工作时, 通过放电电阻的电流较小, 可忽略不计。当变频器停止工作时, 电流从放电电阻流过, 会产生功率损耗。选取咸阳亚华电子电器有限公司生产的 RX24-100W-5KRJ 型阻值为  $5 \text{ k}\Omega$  的电阻, 则放电电阻的功率损耗为

$$P_R = \frac{V_{dc}^2}{R_5 + R_6}, \quad (8)$$

式中  $R_5$ ,  $R_6$  是放电电阻阻值。

把  $V_{dc} = 743 \text{ V}$ ,  $R_5 = R_6 = 5 \text{ k}\Omega$  的值代入式 (8) 中, 可得  $P_R = 55.21 \text{ W}$ 。

主电路的逆变电路中包含 6 个 IGBT, 整流电路中包含 6 个二极管, 则变频器主电路损耗为

$$P = 6P_{IGBT} + 6P_D + P_R. \quad (9)$$

把  $P_{IGBT} = 830 \text{ W}$ ,  $P_D = 205.84 \text{ W}$ ,  $P_R = 55.21 \text{ W}$  代入式 (9), 可得  $P = 6270.25 \text{ W}$ 。

## 2 冷却装置的设计

为了减少设备在使用过程中产生的热量, 保证系统的稳定运行, 每一个用电设备必须配备冷却装置。在铣磨车牵引变频器中, 必须考虑开关管的温度, 因此, 需对开关管进行过热保护。

## 2.1 冷却方式

变频器的冷却方式主要有水冷、风冷和热管冷却<sup>[3]</sup>。

水冷方式包括直接水冷和间接水冷。直接水冷是发热器件直接与水进行热交换, 间接水冷是通过水冷板进行热交换。

风冷方式是通过风机给发热源送风带走热量, 这种方式的效率比较低, 并且它无法在密闭空间内使用。因此, 目前这种方式使用较少。

热管冷却方式由 3 部分组成, 即蒸发段、冷凝段和绝热段<sup>[4]</sup>。热源的热量经蒸发段的管壁和浸满工质吸液芯的导热, 使液体工质的温度上升, 进而使液体蒸发, 达到饱和蒸汽压, 此时热量以潜热方式传给蒸汽。但是, 蒸汽对重力敏感, 液体低温时易凝结, 温度瞬变可能使热管爆炸。

考虑工程的实际情况，对铣磨车变频器采用间接水冷。这种方式易于实现，并且散热效率高。将发热器件通过硅胶与金属水冷板接触，其中硅胶的作用是增加发热器件到水冷板的导热性。水冷板中布有管道，便于液体的循环流通。

### 2.2 水冷板的设计思路

铣磨车牵引变频器散热设计的主要目的是，确保开关管在正常工作时其结温不超过其额定值。在已知器件损耗和结温额定值的情况下，可以根据器件内部热阻求出壳温的极限值<sup>[5]</sup>，即

$$T_{C\max} = T_{vj\max} - T_{tot\max} Z_{thjc}$$

式中： $T_{C\max}$  是开关管壳温的最大值；

$T_{vj\max}$  是器件结温的最大值；

$T_{tot\max}$  是器件损耗的最大值；

$Z_{thjc}$  是器件内部热阻。

水冷板设计思路主要是，根据开关管的热量来确定水冷板内孔径和冷却液流量等参数，确保开关管的壳温不超过  $T_{C\max}$ 。开关管热量通过冷却液与外界环境进行交换，其包括 4 个部分：开关管壳体到散热器接触面上的温升  $\Delta T_1$ ；从开关管到冷却液管道间的铝板上的温升  $\Delta T_2$ ；管壁到冷却液间的冷却液对流薄膜的温升  $\Delta T_3$ ；当冷却液流经水冷板吸收开关管的热量时，冷却液的温升  $\Delta T_4$ 。因此，开关管外壳的温度为

$$T_C = T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 \tag{10}$$

式中  $T_0$  是开关管的初始温度。

$\Delta T_1$  和  $\Delta T_2$  属于热传导部分，由傅立叶定律可知，在稳态导热的情况下，单位时间内通过的导热热量与温度的变化率及传热面积成正比，即

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \tag{11}$$

式中： $Q$  为导热热量<sup>[6]</sup>；

$\lambda$  为导热系数；

$A$  为传热面积；

$\frac{dT}{dx}$  为温度的变化率。

通过变量分离积分能求得导热热量所引起的温升。

$\Delta T_3$  属于对流换热，根据雷诺数确定冷却液是层流还是紊流来求得对流换热系数  $h$ ，并有冷却公式

$$\phi = Ah\Delta t \tag{12}$$

式中： $\Delta t$  为变化时间； $\phi$  为传热功率。

通过式 (12) 可确定对流换热引起的温度变化。

$\Delta T_4$  与冷却液体的比热和流量有关，并有重量流量方程

$$W = \frac{q}{C_p \Delta T_4} \tag{13}$$

式中： $W$  为重量流量； $q$  为流量系数<sup>[7]</sup>； $C_p$  为冷却液比热。

先通过计算得出开关管的壳温<sup>[8]</sup>，再设计水冷板的一些相关参数，即液体的流量、管道的长度、管道的孔径和硅胶的厚度等。

### 2.3 水冷板的结构

采用温度差法，即以进水温度为基准点，测量水冷板板面温度与进水温度差值。为了便于测量水冷板板面温度，在 IGBT 模块下的板面对角线上布置 3 个热偶，共 24 个；在二极管下的板面埋设 2 个热偶，共 6 个；两端 2 个二极管的旁边埋设 2 个热偶。因此，在水冷板上共埋设了 32 个热偶。通过在开关管发热块底部开槽，水冷板主板上埋设热偶，开关管发热模块与水冷板的接触处涂上导热硅胶来测量板面温度。水冷板热偶分布如图 3 所示。

通过对铣磨车主电路损耗的分析，为铣磨车变频器设计了水冷板，水冷板实物如图 4 所示。

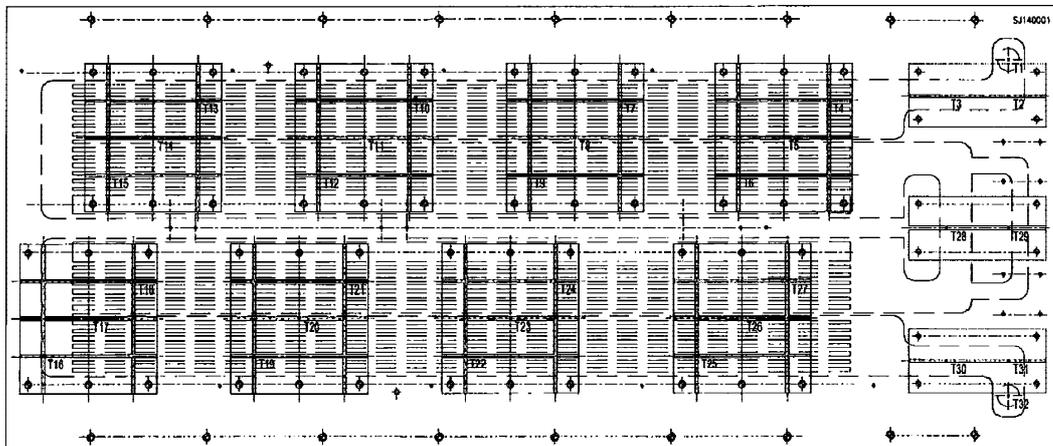


图3 水冷板热偶分布图  
Fig. 3 Water-cooled panel thermocouple diagram

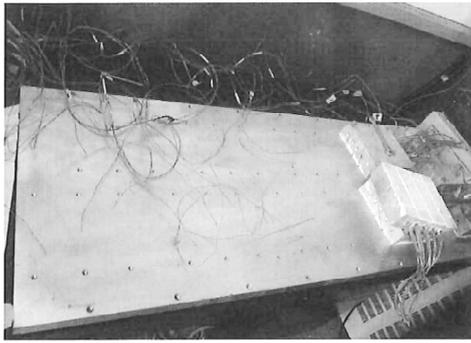


图4 水冷板的实物图

Fig. 4 Water-cooled panel physical photo

### 3 水冷板的仿真分析

#### 3.1 实验方法

先埋好热电偶,装好发热模块,把整个散热器组件安装在实验台上,组装好试验管道。启动水泵,调节流量至 20 L/min。流速调好后,打开直流智能电源,将功率调节至 6 000 W 进行测试,待温升不再增

大时停止检测,采集数据。进口温度为 32 ℃,冷却流量为 20 L/min,热负荷为 6 000 W 时,散热器各热偶的变化曲线如图 5 所示。

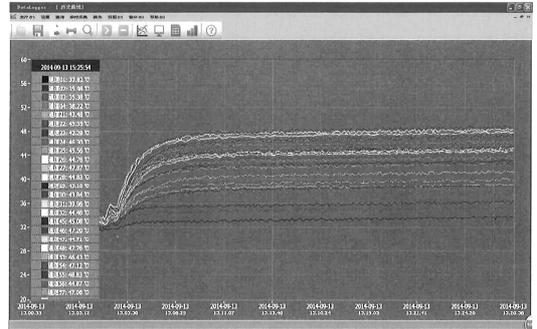


图5 热偶的变化曲线

Fig. 5 The thermocouple variation curve

从热偶的变化曲线图可以看出,经过一段时间,热偶的温度趋于稳定。这表明散热系统工作稳定,进一步证明了本设计的水冷板能达到预期的效果,并保证了整个水冷板的散热均匀,体现了其合理性。其对应热偶的温度如图 6 所示。

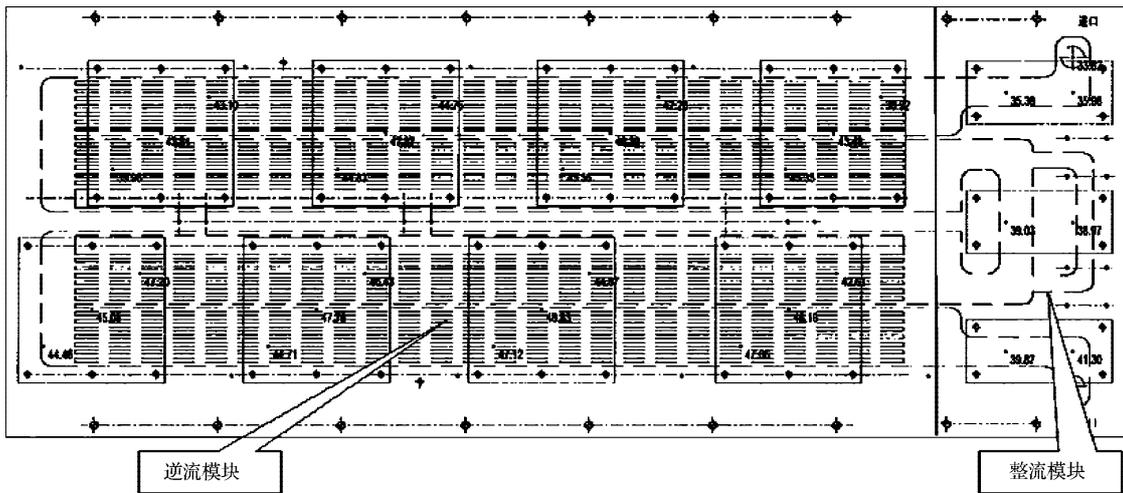


图6 对应热偶的温度

Fig. 6 The temperature corresponding to the thermocouple

从图 6 中可以看出,水冷板上的最高温度为 48.83 ℃,最低温度为 33.82 ℃,其最高温度与最低温度差为 15.01 ℃,温差低于 20 ℃,能满足现行技术的要求。铣磨车变频器中采用的是英飞凌公司的 BSM300GA1700DLC 模块,它的最高结温为 125 ℃,其温度远远大于 48.83 ℃,有很大的裕度,能确保开关管在其结温范围内工作。从数据中可以得出,逆变模块的产热明显高于整流模块,这证实了 IGBT 的开关损耗不容忽视。数据表明,每个模块下电偶的温度差不多,这说明水冷比较均匀,不会导致局部高温,从而证明了强迫水冷可以起到很好的均匀冷却作用。

#### 3.2 实验结论

该散热器采用的是强制水冷模式,整个实验测试过程所用的时间较长,测试数据准确、稳定。实验数据如表 1 所示。

表1 实验数据

Table1 Experimental data

输入功率 / W	冷却流量 / (L · min <sup>-1</sup> )	水冷板板面最高温度 / ℃	进口水温 / ℃
6 000	20	48.83	33.82

散热器热阻值

$$Z_{thjc} = \frac{T_{max} - T_{min}}{P_N}, \quad (14)$$

式中:  $T_{\max}$  是水冷板板面最高温度;

$T_{\min}$  是水冷板板面最低温度;

$P_N$  是 IGBT 的额定输入功率。

将  $T_{\max}=48.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\min}=33.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_N=6\ 000\ \text{W}$  代入式 (14) 中, 可得

$$Z_{\text{thjc}}=0.002\ 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}.$$

从计算数据可知, 热阻值很小, 表明散热效果很好, 这也进一步证实了此冷却装置设计的合理性和可行性。

## 4 结语

本文在分析和计算变频器主电路功率损耗的基础上, 设计了冷却装置, 并把它应用于实际开发的铣磨车牵引变频器中。实验证明, 其具有较好的精确性和可行性, 能够达到预期的效果。这也证明了水冷方式的优越性, 它能保证整块水冷板上开关管散热均匀, 不会出现局部高温。

### 参考文献:

- [1] 代续续, 刘奇, 宋昊明. 变频器冷却系统改造[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(1): 109-111.  
Dai Xuxu, Liu Qi, Song Haoming. The Transformation of Frequency Converter Cooling Systems[J]. Mechanical Research and Application, 2013, 26(1): 109-111.
- [2] 宁珍. 高速列车牵引变流器相变冷却系统性能实验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.  
Ning Zhen. Experimental Study of Phase Change Cooling System's Performance of Traction Converter for High Speed Train[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.
- [3] 董赫伦. 高压变频器的散热器选择与性能研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.  
Dong Helun. Selection and Performance Research of Heat Sink of High-Pressure Frequency Transformers[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012.
- [4] 刘清, 周健健, 冯剑超. 数据机房分布式热管冷却系统及其应用研究[J]. 智能建筑, 2013(10): 44-46.  
Liu Qing, Zhou Jianjian, Feng Jianchao. Research and Application of Distributed Heat Pipe Cooling System in Date Center[J]. Intelligent Building, 2013(10): 44-46.
- [5] 李文顶, 莫锦秋, 曹家勇. 中压矿用变频器主电路损耗分析及散热设计[J]. 机电工程技术, 2009, 38(7): 85-87.  
Li Wending, Mo Jinqiu, Cao Jiayong. Loss Analysis and Thermal Design of Mid Voltage & Mine-Used Inverter Main Circuit[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2009, 38(7): 85-87.
- [6] 丛日永, 张宁, 庄德胜. 变频器冷却系统计算及元部件选用[J]. 煤矿机械, 2012, 33(1): 27-28.  
Cong Riyong, Zhang Ning, Zhuang Desheng. Cooling System Calculation and Components Selection of VFD[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(1): 27-28.
- [7] 韩松. 车用发动机智能冷却系统基础问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
Han Song. Fundamental Research on Intelligent Cooling System for Vehicle Engines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [8] 毛文力. 钢轨铣磨车性能及应用探讨[J]. 上海铁道科技, 2009(3): 20-22.  
Mao Wenli. Discussion on the Performance and Application of Rail Milling Machine[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2009(3): 20-22.

(责任编辑: 邓光辉)