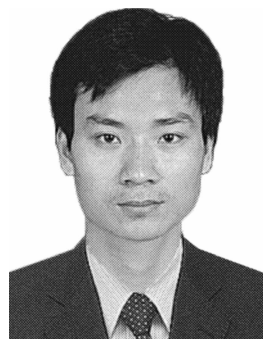


研
究
开
发HXD1C 电力机车辅助变流器
风道数值模拟及试验研究

张 晓, 周文勇, 刘长清

(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: 张 晓 (1981-), 男, 硕士, 主要从事电力电子设备散热、计算流体力学和机车辅助变流器的研发工作。

摘 要: 对HXD1C电力机车辅助变流器用理论计算确定散热器尺寸, 通过经验公式计算散热系统所需风量, 用CFD软件FLUENT对风道散热系统进行了三维数值模拟分析, 求解散热系统的温度场分布。通过与试验结果进行对比研究, 表明计算结果满足工程运用所需的精度要求, 可应用于类似系统的热分析中。

关键词: 强迫风冷; 散热设计; 风量; 数值模拟; 辅助变流器; HXD1C电力机车

中图分类号: U264.3⁺.7; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)02-0018-04

Numerical Simulation and Experimental Study on Auxiliary Converter
Cooling System of HXD1C Electric Locomotives

ZHANG Xiao, ZHOU Wen-yong, LIU Chang-qing

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

Abstract: This paper determined the size of the heat sink of auxiliary converter of HXD1C locomotive. The required cooling air volume was calculated through experience formula. Three-dimensional calculation model for duct cooling systems numerical simulation had been set up by using CFD software FLUENT, which was used to solve the temperature distribution in the cooling system. Test results compared with the study results show that the required accuracy meets the requirements of engineering application and the heat analysis can be applied to similar systems.

Key words: forced air cooling; thermal design; wind volume; numerical simulation; auxiliary converter; HXD1C electric locomotive

0 引言

随着辅助变流器容量的增大, 对散热的要求随之增高, 风量风机的选择及风道的设计直接关系到机车能否正常运行。过去通常利用试验和理论计算的方法来确定风量、风道系统送风口的尺寸对换热性能的影响, 耗时耗费人力物力, 也无法详尽描述内部流场和温度分布状况, 计算不够准确。

随着计算机技术的迅猛发展, CFD在很多行业得到广泛的应用。本文对辅助变流器的风道模型进行适当简化, 基于CFD软件FLUENT模拟计算, 求解其散热系统的温度场、流场分布, 通过与试验结果进行对比研究, 表明满足工程运用所需的精度要求, 可应用于

类似系统的热分析中。

1 物理模型及给定几何参数

1.1 散热器设计

图1(a)为散热器外形, 基板上安装肋片并布置有IGBT。图1(b)为逆变模块散热器基板IGBT布置方式, 散热器材料为铝合金。

肋化系数 $\frac{A_2}{A_1}$, (其中 A_1 为基板的面积; A_2 为肋片的面积)是散热器散热能力大小的标准之一。

肋化系数增加, 肋壁的热阻降低, 耗散功率有所增加, 肋片数增加, 肋间距将减小, 由于流体黏滞作用, 热效果将变差, 肋片之间相互吸收了一部分能量, 会降低换热效果。因此肋化系数存在一个最佳值的问题, 这个值通常反映在肋片高度和肋片间距的比值上,

收稿日期: 2010-07-16; 收修稿日期: 2010-11-30

在图中 $(Gr \cdot Pr) \frac{b}{H} \sim 50$ 时, 较为有利^[1], 即

$$b = 1.54 \sqrt{\frac{H\nu}{\beta \Delta t Pr}}$$

式中: Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; H 为肋片高度; ν 为空气的运动黏度; β 为空气膨胀系数; Δt 为肋壁温度与环境温度之差; b 为肋片间距。

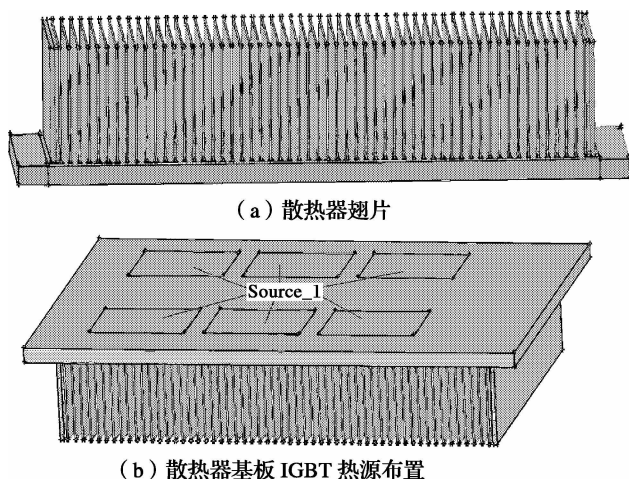


图1 散热器形状

1.2 建模与器件布置

辅助变流器散热主要取决于散热风扇的流量以及风扇、通风孔和风道的布局, 所以散热分析的主要目的是选择合适的风量以及合理安排机柜布局。机柜内部发热元器件主要为逆变模块、整流模块、电抗器和滤波器, 风道的三维模型由 fluent 前处理软件 Gambit 建立, 机柜主要结构如图2所示。

肋片表面涂有特殊的黑色涂料, 增加黑度, 从而增加肋片间的辐射和对流换热过程中的散热。

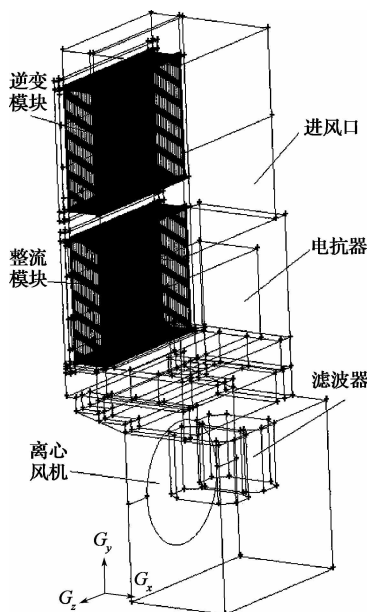


图2 机柜模型及模块布置方式

2 网格划分及边界条件设置

2.1 网格划分

一般情况下, 对微分方程的求解给出的都是近似解。为使解更接近于实际, 网格节点的数目要求适当, 随着网格数目的增加, 计算结果不再有显著的变化。计算网格按网格点之间的邻近关系可分为结构网格、非结构网格和混合网格。结构网格的优点是处理边界

条件较好, 计算精度高, 并且可以采用多高效隐式算法和多重网格法, 同样的区域在保证计算精度的前提下, 非结构网格需要更多的网格数量, 计算所需内存更大, 计算周期更长。

网格由 FLUENT 的前处理软件 Gambit 生成, 在保证网格足够细密的基础上, 尽量减少网格数量以减少计算量, 因此模型主要采用六面体结构性网格, 提高收敛的稳定性。在梯度大的地方 (温度梯度, 速度梯度等), 网格必须保证足够细密; 尽量减小网格单元的倾斜度与梯度小的地方的网格数^[2]。风扇出口面采用非结构性网格, 通过采用不同的网格数目进行模拟计算从而优化网格数量, 网格独立性的网格单元数为 230 万个, 整体网格质量良好。

2.2 边界条件设置

模型涉及到入口边界、出口边界、壁面和热源面等的设置。

模型内热源: 逆变模块共 6 个 IGBT 设置 6 个热源面, 整流模块共 8 个 IGBT 设置 8 个热源面, 滤波、电抗器为体热源, 总热功耗约为 10 kW。

入口则需计算所需风量。根据散热功率 10 kW, 按以往经验, 在充分换热情况下, 空气温升为 8°C, 风量应等于各个单元发热元件所需风量之和, 根据热平衡方程, 则整机所需的通风风量为^[1]

$$q = \frac{Q}{C_p \rho \Delta t}$$

式中: ρ 为空气的密度; C_p 为空气的质量定压热容, J/(kg · °C); Δt 为冷却空气的出口与进口温差, °C; Q 为总损耗功率, W。

代入数据得所需通风风量为 1.06 m³/s。这种风量计算方法比较保守, 因为忽略了机柜四周对大气的辐射和自然对流所散去的热量, 所得风量偏大。在精确计算时, 应把两项散去的热量从总热量中减去再求所需的风量。通常在强迫风冷时, 辐射与自然对流散热量约占总散热量的 10% 左右^[1]。

如风量分别取 $q_1=0.8$ m³/s、 $q_2=0.9$ m³/s 和 $q_3=1.0$ m³/s, 风道进口面积为 $A_{inlet}=0.22$ m², 对应入口风速为 $V_2=3.636$ m/s、 $V_3=4.091$ m/s 和 $V_3=4.545$ m/s, 分别进行计算, 入口温度取 300 K。

其他: 壁面边界条件。

计算中, 分别控制动量方程、k 方程、e 方程的迭代余量小于 $1.0 \cdot 10^{-3}$, 能量方程的迭代余量小于 $1.0 \cdot 10^{-6}$ 。

3 湍流模型

目前对湍流的计算方法主要分为三大类, 完全模拟、大涡旋模拟与雷诺时均方程方法。工程上的湍流计算一般采用第 3 种方法, 即雷诺时均方程法。在目前湍流的工程计算中, 以 k-e 双方程模型应用最广, 本文即采用这种模型求解。采用 k-e 双方程模型求解湍流

对流换热问题时,控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程及k-e方程,具体方程见文献[3]。

k-e方程是针对湍流为充分发展的湍流建立的。本模型为肋片近壁面的流动,Re数较低,小于 10^4 ,湍流发展并不完全充分,k-e模型不能在这个区域内使用。必须采用壁面函数法或低Re数k-e模型和k-e模型配合,解决近壁区的流动计算问题,本文模型采用标准壁面函数法。

4 计算结果与试验结果

4.1 计算模型假设

在建模过程中,本文做了相应的简化与假设,与模型计算密切相关的有以下几项:

- ①热源所产生的能量损失均匀传热到基板并通过翅片导热到风道内,翅片在风道内为纯流体的加热与热流换热;
- ②流场内空气密度不随温度差异而变化,不考虑浮力驱动流影响和湍流中心区,忽略能量方程中由于粘性作用而引起的能量耗散;
- ③流体不可压缩,风道内气体满足牛顿内摩擦定律,为牛顿流体,流体为稳态定常流,气体在风道内壁上满足无滑移边界条件。

4.2 计算结果分析

风道内部的空气流速对温度的影响是空气流速大。流量越大,冷却效果好,热量散失越快,流速低则效果相反。列车在行进的过程中,由于速度变化引起机柜负压的变化,进入机柜的流量也发生相应变化,表1是流量分别为 $0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.9\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.0\text{ m}^3/\text{s}$ 情况下的模块基板上的温度。

从温度场、速度场2方面对风道和基板的温度的影响进行分析。图3和图4分别为空气流量 $0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 、环境温度为 27°C 时逆变器和整流器基板的温度梯度分布情况。

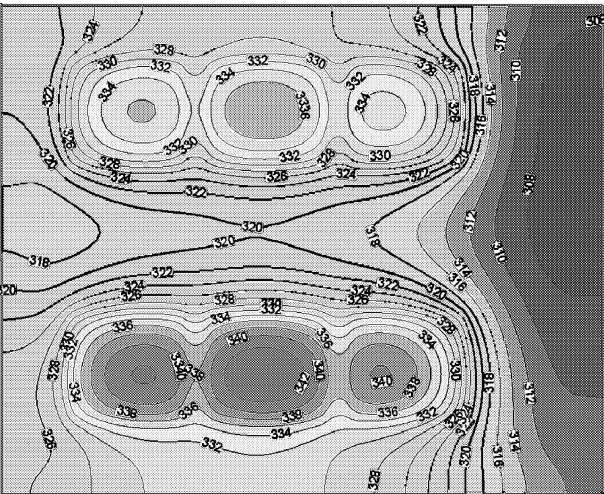


图3 逆变器基板温度梯度分布

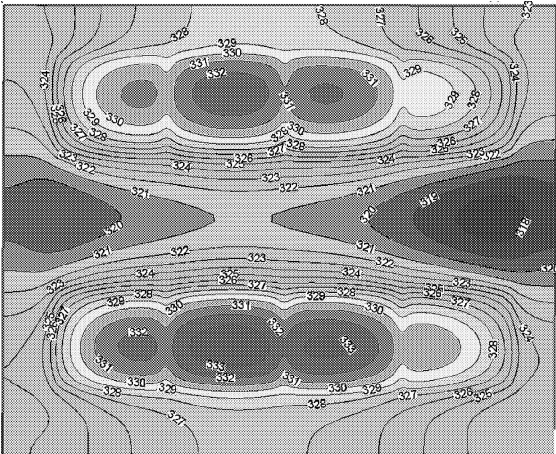


图4 整流器基板温度梯度分布

表1 计算结果

入口速度 $V/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	整流最高 温度/ $^\circ\text{C}$	逆变最高 温度/ $^\circ\text{C}$	进出口压差 /Pa
3.636	0.8	71.64	61.08	540.09
4.091	0.9	69.95	59.43	679.28
4.545	1.0	68.47	58	831.24

资料表明,保证工作稳定性和延长使用寿命芯片的最高温度不得超过 85°C ^[4],由表1可得模块最高温度小于 85°C ,满足设计的要求。

5 试验测试方法

试验设置了7个测温点,逆变模块2个,整流模块3个,滤波器和电抗器各1个。

Hydra系列数据采集器共有21路模拟输入通道,可直接测量电压(交直流至 300 V)、电流、温度(9种热电偶)。本试验采用Hydra系列数据采集器。试验时,将热电偶粘贴到上述7个测试点上,并接入Hydra系数,应用Hydra Logger软件对仪器进行设置,完成数据记录的操作,实现显示数据或曲线的绘制。

表2为流量在 $0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 时,被测点计算结果与试验温升结果的比较。

表2 温升计算结果与试验结果的对比

K

被测点标号	计算点	被测点
标号1	36.28	35.13
标号2	35.33	32.36
标号3	29.65	26.85
标号4	30.52	27.65
标号5	27.34	26.32
标号6	22.63	19.10
标号7	48.51	44.70

由图3、图4及表1和表2可见,计算结果与试验结果吻合较好,相对误差都在10%以内。上述结果也表明,用CFD软件FLUENT对风道进行数值模拟研究其在室温、强迫对流条件下的温度分布是可行的,具有指导意义。

6 结论

本文用 3 种方法理论计算、数值模拟和试验研究,通过公式确定散热器尺寸的最佳肋间距尺寸,通过经验公式确定HX_{D1C}交流传动电力机车辅助变流器所需风量;使用CFD软件FLUENT对辅助变流器风道进行了三维数值模拟,计算风道内部流场和温度梯度分布,计算结果与试验结果吻合较好,相对误差都在10%以内,验证了用数值模拟在前期对散热系统进行预测的可行性。

计算流体力学(CFD)在机车散热系统中的应用,

使得研究者可以利用计算机仿真技术,结合数学模型,代替真实系统进行研究,可以明确研究方向,缩短研制周期,减少反复试验造成的浪费。

参考文献:

[1] 赵悼爰. 电子设备热设计 [M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
[2] 王福军. 计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
[3] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
[4] Chein, Reiyu. Thermoelectric cooler application in electronic cooling [J].Applied thermal engineering, 2004,24(14-15).

(上接第17页)

ARCNET在列车通信网络中应用的研究具有参考意义。

参考文献:

[1] ATA878.1-1999, Local Area Network:Token Bus [S]. 1999.
[2] IEC.IEC61375-1-1999, part1 :Train Communication Network [S].
[3] 况长虹, 李家武, 王玉松, 王利锋, 宋红霞. 基于OPNET的ARCNET列车通信网络的建模与仿真 [J].铁路计算机应用, 2008, 17(5): 49-51.
[4] Aziz M, Raouf B, Riad N. The Use of Ethernet for Single

On-board Train Network [C].

[5] 王利锋, 何鸿云, 王玉松, 宋红霞. 基于ARCnet的高速列车分级控制系统 [J]. 工业控制计算机, 2007, 20(10): 11-12.
[6] 杨子亮. 列车控制网络的实时性与可靠性研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2008.
[7] Bartram, Colin. Arcnet System Links Multivendor Robots [J]. Control Engineering, 1987, 34(11), 37-38.
[8] 左 峰, 王立德, 聂晓波, 李成钢.基于ARCNET的轻轨列车通信网络 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2009, 32(6): 27-30.
[9] 左 锋. 基于ARCNET的列车控制网络的开发 [D]. 北京:北京交通大学, 2009.