

研
究
开
发

轨道车辆制动电阻的 CFD 模拟

丁 杰, 唐玉兔

(南车电气技术与材料工程研究院 基础与平台研发中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 丁 杰 (1979-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事变流器结构仿真和热仿真的科研工作。

摘 要: 为准确分析轨道车辆电制动过程中, 制动电阻片表面温度场、流场和压力场, 考虑了温度对冷却空气热物理性能的影响, 建立了制动电阻片的分析模型。分析结果表明, CFD 仿真可为制动电阻设计提供指导。

关键词: 轨道车辆; 制动电阻; 计算流体力学; 模拟分析; 流场分布; 温度场分布

中图分类号: TP391.9; U260.355 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)04-0037-03

CFD Simulation for Brake Resistor of Rail Vehicle

DING Jie, TANG Yu-tu

(Base & Platform Development Center, CSR Research of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to analyze the distribution of surface temperature, velocity and pressure field on the brake resistance chip in the process of rail vehicle's resistance brake, simulation model of brake resistance chips was established by considering the influence of the temperature on thermal physical property parameters of the air. The results showed that CFD simulation was useful for the design of brake resistor.

Key words: rail vehicle; brake resistor; CFD; simulation analysis; flow field distribution; temperature field distribution

0 引言

轨道车辆在运行中既要频繁地启动加速, 又要频繁地制动减速, 直至靠站停车。当列车制动时, 其短时制动功耗不能被其他列车或者辅助设备吸收的部分将会向电网反馈, 如果不加以处理, 将造成电网电压升高, 进而影响系统供电设备的稳定运行, 危害电网安全。为维持电网电压的稳定, 目前采用了 4 种制动能量吸收装置将制动能量吸收消耗掉, 分别是: 电阻耗能型、电容储能型、飞轮储能型和逆变回馈型再生制动能量吸收装置^[1]。电阻耗能型的制动电阻由于技术较为成熟, 因而在世界各国得到了广泛应用。

制动电阻在工作时, 电阻片表面温度可达 600 °C 左右, 往往导致其过热、变形或变色, 工作效率降低甚至不能正常运行。为保持良好冷却效果, 电阻片表面冲有加强筋或百叶窗, 以增加冷却空气的紊流度和通风量, 提高换热系数, 增加换热量。然而在采用上述措施强化换热时, 电阻片的压力损失急剧增大, 难以使压

力损失与风机的特性曲线相匹配。因此, 在设计制动电阻时, 需要综合考虑通风量、最高温度、压力损失、电阻片结构、电阻片布局、电阻片材料、空气热物性参数等因素。

CFD (计算流体力学) 是近年来随着计算机技术和数值方法的发展而得到更加广泛应用的一种分析方法, 能简便、快速、直观地得到计算结果。本文利用 CFD 方法对某轨道车辆用制动电阻进行了模拟, 分析了电阻片的温度分布和冷却空气的流场分布, 为制动电阻的设计提供依据。

1 制动电阻的结构

图 1 是某轨道车辆

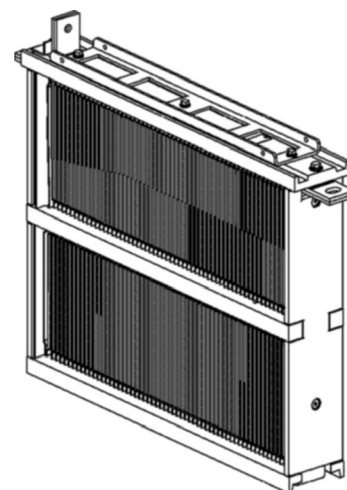


图 1 制动电阻结构外形

收稿日期: 2011-10-14

用制动电阻单元的结构外形图,由232个不锈钢电阻片(图2)串联组合。在实际应用时,将6个制动电阻单元重叠放置,总功耗为1 800 kW,轴流风机提供14 000 SCFM(6.6072 m³/s)的风量。技术要求总的压力损失不超过5.4英寸水柱(1 345 Pa)。

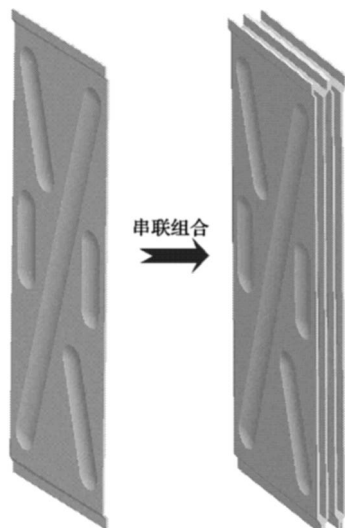


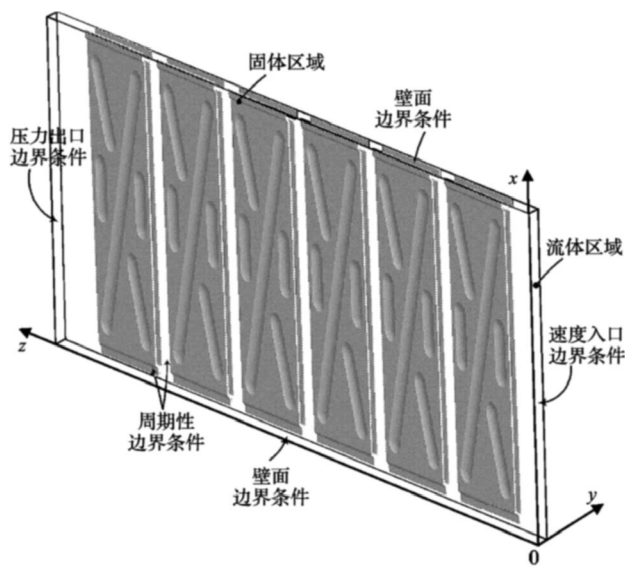
图2 电阻片

2 计算模型

制动电阻单元是多个电阻片串联组合而成,除两侧的电阻片外,流动的几何边界、流动和换热是周期性重复的。因此,可以采用周期性边界条件,这样可以只用考虑2个电阻片的组合。制动电阻单元上下两部分的几何结构,流动和换热条件一样,可以视为对称结构。6个制动电阻单元重叠放置时,尽管每个制动电阻单元的几何边界相同,但流动和换热条件不一样,空气的温度会逐渐升高,空气的流速会不均匀,所以,需要将6个制动电阻单元一起考虑,并重点分析第6个制动电阻单元的温升。

厚度1.143 mm的电阻片上冲压了加强筋,可以增加换热系数,提高结构强度。同时,加强筋给网格划分和CFD计算带来了一些困难。周期对称面采用与加强筋轮廓一致的面,有助于将流体区域划分为高质量的六面体网格,与四面体网格相比,可以有效减小数值耗散,更为准确地模拟加强筋对流场的影响。网格尺寸为1 mm,网格数目为834万。

图3是计算区域示意图,其中 $x=0$ 面和 $x=0.25$ m面设



置为绝热无滑移的壁面边界条件; $y=0$ 面和 $y=0.0112$ m面设置为平移的周期性边界条件; z 方向为冷却空气流动方向, $z=0$ 面设置为入口边界条件,流速为20 m/s, $z=0.75$ m面设置为压力出口边界条件。

入口的冷却空气温度为40 °C,经过炙热的制动电阻后温度会迅速升高,密度、动力粘度、导热系数等热物性参数有较大的变化。利用matlab对文献[2]给出的40~600 °C干空气的热物性参数进行曲线拟合,可得:

$$\rho(t) = -1.3e^{-3t} + 1.0816 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda(t) = 6.4e^{-5t} + 2.5765e^{-2} \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

$$\mu(t) = 3.61e^{-8t} + 1.832e^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$$

将热物性参数设置为与温度相关的多项式后,迭代计算很容易发散,需要设置合理的亚松弛因子。考虑到不锈钢的热物性参数变化不太大,设置为常数,以利于迭代计算较为顺利地收敛。

在计算时,假设流动状态为标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,且不考虑对外辐射的影响。

3 计算结果及分析

3.1 流场分布

图4是 $y=0.0056$ m面流速分布,可以看出,空气在电阻片中间部位的流速较为均匀,加强筋的凸起部分为弧形,流线型好。空气流速在电阻片的端部最大,是由于此处的阻力最小,空气易于从此处流动。

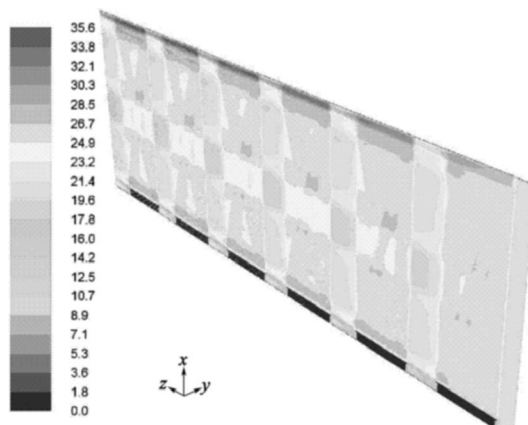


图4 $y=0.0056$ m面流速分布

图5为 $z=0.07$ m面流速分布, y 方向是周期性边界条件,因此可以在 y 方向进行周期性镜像显示。可以看

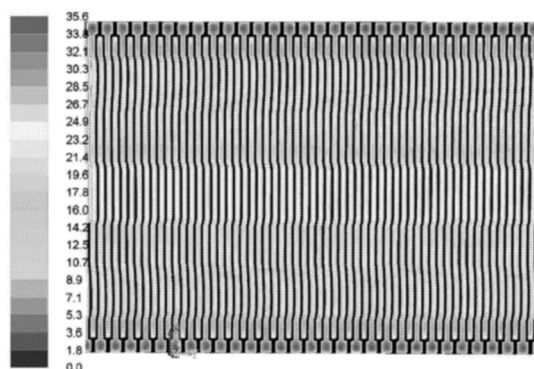


图5 $z=0.07$ m面流速分布

出, 空气在电阻片中间部位的流速均匀, 说明加强筋的设计合理。电阻片端部的空气流速大, 在电阻片端部设置小的弧形加强筋, 改变流动截面积, 将使此处的流速有所降低, 改进流场分布。

图6是 $y=0.0056\text{ m}$ 面压力分布, 压力梯度基本上沿 z 方向(空气流动方向)平行分布, 说明了电阻片中间部位的阻力较为均匀。6个制动电阻单元重叠放置的压降为 1407.4 Pa , 稍大于设计要求的 1345 Pa , 满足设计要求。轴流风机可以根据流量和计算得到的压降进行选择, 保证风机与系统阻力特性的良好匹配。

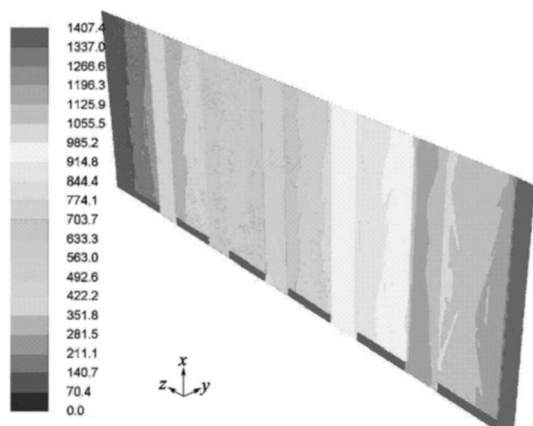


图6 $y=0.0056\text{ m}$ 面压力分布

3.2 温度场分布

图7为 $y=0.0056\text{ m}$ 面温度分布, 空气温度沿 z 方向逐渐升高, 电阻片下端部在该剖面的温度高于空气温度。

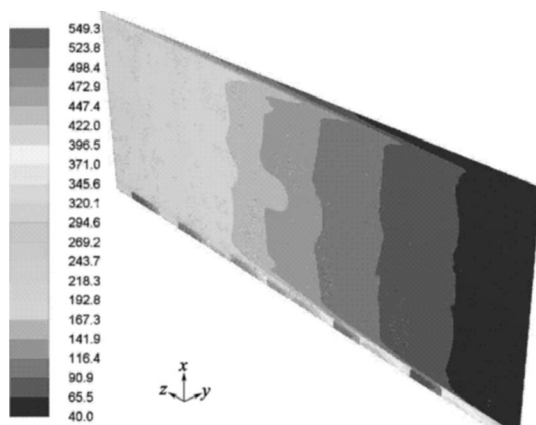


图7 $y=0.0056\text{ m}$ 面温度分布

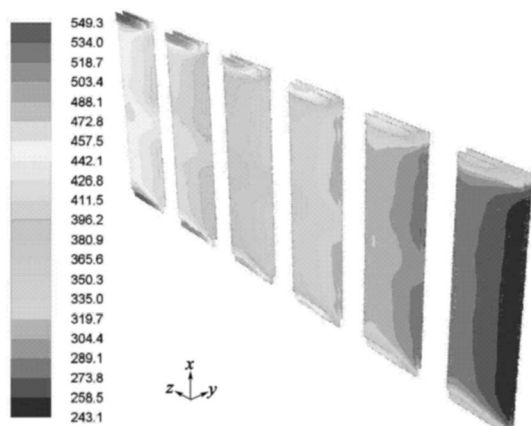


图8 电阻片温度分布

图8为电阻片温度分布, 靠近入口端的电阻片温度最低, 局部区域为 243.1 °C , 靠近出口端的电阻片温度最高, 局部区域为 549.3 °C 。从这6个电阻片的温度分布来看, 中间部位的温度分布较为均匀, 没有明显的局部热点, 散热效果良好。每个电阻片的最高温度均在端部, 高出中间部位约 30 °C , 尽管该区域的流速最大, 但没有弧形加强筋进行扰流和强化换热, 相当于平直翅片, 散热效果不佳。因此, 在电阻片的端部增加小段弧形加强筋, 还可以进一步降低电阻片上的温度, 使整体温度更加均匀, 而流动阻力不会有明显增加。

3.3 后续改进

该制动电阻在使用过程中出现过数起烧损事故, 主要由于电阻片的不锈钢材料在 450 °C 左右出现热脆, 材料的力学性能发生了较大变化。另一方面, 通风机出风不均匀, 流速不均匀的冷却空气流经电阻片时, 可能会适当降低散热性能。

制动电阻的加强筋有效地增加了空气的紊流度, 具有较高的换热系数, 中间部位的温度分布较为均匀。在此基础上, 通过增加加强筋或百叶窗的方法, 很容易导致电阻片的压力损失急剧增大, 难以使压力损失与风机的特性曲线相匹配, 温升也难以有效改善。由于电阻片的温度高于材料的热脆温度点, 较好的解决方案是更换电阻片材料, 如Cr25Ni20和Cr20Ni35等可以工作在 600 °C 以下^[3]。其中, Cr25Ni20温度系数较大, Cr20Ni35温度系数较小, 设计时可根据需要进行选取。

仿真结果表明, 仿真模型与实际存在一定的偏差, 仿真结果与实际的温度值有所不同, 但仿真手段可以为设计提供参考。由于材料的热物理性能(诸如线膨胀系数、比热、导热系数等)和力学性能(弹性模量、泊松比等)都与温度有很强的依赖关系^[4], 在完成制动电阻片的CFD仿真后, 考虑制动电阻片的材料非线性特性, 进行热—结构仿真, 分析热应力和变形, 将更加有利于制动电阻的产品设计工作。

4 结语

轨道车辆制动电阻耗散的热量很大, 要保证制动电阻的可靠工作需要良好的热设计。CFD方法能够较为准确地模拟结构复杂的模型, 考虑与温度相关的非线性热物性参数。将CFD方法应用在轨道车辆制动电阻的设计中, 可以提高产品可靠性, 缩短研发周期, 大大提升设计水平和能力。

参考文献:

- [1] 陈贵荣, 刘少克. 唐山中低速磁悬浮列车试验线地面再生制动能量吸收装置的设计[J]. 机车电传动, 2008(2): 38-40.
- [2] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [3] 陈义正, 袁炳祥, 谭福德. LQ36型内燃机车制动电阻装置[J]. 机车电传动, 2009(4): 33-35.
- [4] 于建国, 叶庆泰, 吕晨亮. 地铁用制动电阻的弹性热力耦合仿真分析[J]. 计算机仿真, 2004, 21(10): 167-169.