叉车散热器后方热场分析数值模拟研究

撰文／杭叉集团股份有限公司　李元松　何立恒
西北工业大学航空学院　刘 军

为了优化叉车配重后方的热场，本文首先对某型叉车水箱后方的三维数模，包括车架后部、风扇、配重、散热片等，进行了合理简化，然后进行流体网格划分，设置常见的边界条件及求解参数，最后得到叉车后方的热场分布。并将计算结果与试验结果进行了对比，二者误差为 14.1%，在控制误差 15% 以内，满足计算要求，表明本文计算模型合理，可以此计算模型为依据，进行后续的配重后方散热的优化。

一、引言

叉车车速低、负荷大，作业范围小，使用条件恶劣，在夏季高温季节容易出现水散热器“开锅”现象，为此，需要对叉车散热系统进行优化设计。叉车冷却系统散热优化分析涉及到热－流－固的耦合，目前散热问题的计算分析基本采用计算流体动力学类的商业软件。

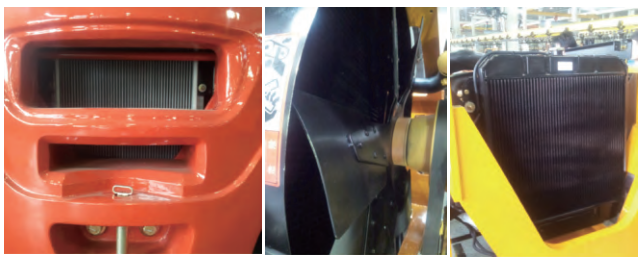
通过对 CPU 热柱散热器的散热性能进行实验研究，测试了加热功率、风速等主要工况不同时发热电子元件表面的温度，并比较分析了测试结果。运用有限元分析软件 ANSYS 对该散热器进行了温度场数值模拟分析。研究在风冷条件下，同等尺寸的普通铜柱 CPU 散热器和热柱散热器的温度分布。结果表明，热柱散热器具有良好的散热性能，在较低风速下也能有效地降低 CPU 的温度。此外，有研究认为变流器采用“热管散热器＋走行风冷”方式可简化柜体结构，为分析热管散热器的散热性能，利用 Fluent 软件分析了其流速和温度的分布特点，结果表明热管散热器在较低的车辆运行速度下仍具有较好的散热效果。实际的现场应用情况验证了仿真结果的准确性。在对汽车散热器的物理模型单元进行的合理的简化处理实验中，利用 Fluent 软件，采用 SIMPLE 算法和标准 k−e 湍流模型，通过求解三维 N−S 方程和能量方程模拟了空气在散热器空气侧流动，水在散热器的水侧流动的双侧传热过程。在建立发动机舱模型的过程中，考虑到散热器和高温元件的散热量以及空气的对流传热和辐射等因素，利用 CFD 软件对汽车发动机舱流场进行了数值仿真，得到了发动机舱内部气流的速度与温度分布和重要元件的表面温度等参数，最后对存在的问题提出改进方案。为考查某型直升机附件舱的热控制能力，采用有限元软件分析了其在强制冷却和自然冷却情况下的温度场分布。应用非结构化网格和有限体积法进行计算区域和控制方程的离散，采用标准 k－ε 模型封闭湍流控制方程。以 ATX 机箱为研究对象，利用实验和数值计算两种手段对机箱的散热情况进行了研究。在对 Fluent 软件进行二次开发的基础上，对机箱的风冷散热过程进行了数值模拟，且对不同通风孔位置和风扇安装情况下机箱的散热性能进行了研究，找到了有机箱散热的最佳风道结构。

二、热场实验测试

进行叉车散热的优化，需要对用于优化的计算模型进

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

行验证，为此，对与计算模型一致的叉车配重后方的温度场及流场进行了测试，实际测试的叉车配重及风扇感和散热器内部结构如图 1 所示，测试时使用温度计测量温度，采用风速仪测量配重后方的流速。



(a) 叉车配重　(b) 冷却风扇及聚风罩　(c) 散热器

图 1 叉车配重后方及内部结构

测量方法是，按配重孔大小将平面平分成三块，左，中，右三个测试点，每个测试点为这一块的平均温度，然后从外表面开始向后 100mm，200mm 共三个平面九个测试点，测试结果如表 1 所示。通常情况下，越靠近配重孔，则空气的流速越高，同时温度也越高，这符合流速与温度在空气中传播的特点，然而，本项目的测试结果与此特点相反，越远离配重孔，流速与温度反而越高，可能是由于测试误差引起。

表 1 配重后方温度及流速测试结果

位置	0mm		100mm		200mm	
项目	温度 /°C	风速 /ms^{-1}	温度 /°C	风速 /ms^{-1}	温度 /°C	风速 /ms^{-1}
左	36.1	4.95	36.5	5.95	35.5	6.40
中	36.4	7.70	37.9	8.25	39.4	8.05
右	33.2	6.10	35.3	6.15	46.4	6.25

三、散热器后方温度场数值模拟

1. 数模简化及网格划分

需计算在风扇通风作用下散热器后方的流场及热场分布情况，故忽略掉风扇前方的复杂发动机部件和支撑框，保留叉车配重、车架、车轮、通风筒和底盘配件。因流场域要求连续，所以，必须对叉车三维模型进行几何修复，以保证几何封闭和拓扑封闭，故将对流场分布影响不大的结构部分如车架进行填孔、补缝操作，将对流场分布有明显影响的部分如叉车配重等仅进行补缝操作而保留其通风孔。由于车轮结构稍显复杂，按照原始尺寸重新建立简化后的简单结构，由于车轮远离散热片，对计算结果影响不大。CFX 散热分析以叉车周围的空气作为研究对象，因此需要建立叉车周围的空气模型。简化后的叉车后方配重模型及周围空气模型如图 2 所示。

由于本文涉及到叉车后方的流场域非常复杂，划分结构化网格优势不大，且费时费力，故采用非结构化网格划分。叉车整体结构是大量复杂曲面的集合，配重和通风筒更是传热分析的关键。根据上述分析，充分考虑问题的特点，本文采用 Hyper−mesh 商业软件进行叉车后方计算模型流场域非结构网格划分，网格划分后局部切面显示如图 3 所示。

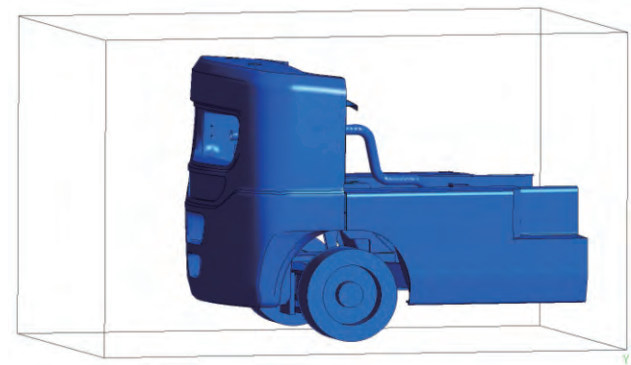


图 2 叉车后方简化模型及空气域的创建

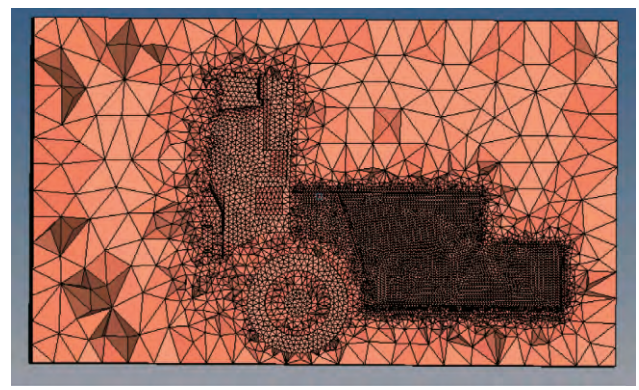


图 3 局部网格切面显示

2. 计算域设置

计算域是指一些空间的区域，流动控制方程或热传递方程在这个区域内进行求解。单击软件任务栏中的域按钮生成计算域。计算域的设置主要是（1）设置计算域所在的体、类型及所在的坐标系；（2）定义流体材料为理想气体；（3）设参考压力为 1 个标准大气压，浮力、域运动、网格变形三者保持默认。

热传递模型中，无热量传递不考虑热量传输；Isothermal（等温模型）需给出特定温度值，作为复杂模型的初始条件，不计算热量传输；Thermal Energy（热焓模型）只计算对流换热及热传导，不考虑流体动能带来的变化，

适用于低速流动及不可压缩流；Total Energy（全热模型）在热焓模型基础上考虑流体动能带来的热量变化，适合高速流动及可压缩流。本文设置热传递模型为 Thermal Energy 模型。

湍流模型中，$k-\varepsilon$ 为最简单的两方程完整湍流模型；Laminar 为层流模型，其控制方程为非稳态 Navier–Stokes 方程，适用雷诺数较小的情况；Shear Stress Transport 综合了 $k-\omega$ 模型在近壁区计算的优点和标准 $k-\varepsilon$ 模型在远场计算的优点，其适用范围较广，可用于带逆压梯度的流动计算、翼型计算、跨音速激波计算等；SSG 是雷诺应力模型的一种，在计算漩涡流体时特别精确；BSL 是基于 ω 方程的雷诺应力模型。本文设置湍流模型为 Shear Stress Transport 模型。

3. 边界条件

本文计算时设置流体流动性质为亚音速模式，设置流体流入计算域的方式为标准速度，方向垂直于入口面。湍流动能系数设为默认值 Medium（Intensity=5%），适合于大部分的计算。设置边界处温度为静态温度，指定热力学温度值。

根据散热器后方风速与风温的分块测量结果，将散热器边界分为 15 块设置不同的入口边界条件，如表 2 所示，试验测量结果如表 3 所示。

表 2 散热器区域划分

1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
13	14	15

表 3 散热器各区域温度及风速测量平均值

温度 /℃	风速 m/s	温度 /℃	风速 m/s	温度 /℃	风速 m/s
18.6	6.3	21.6	11.8	24.4	11.2
17	10.6	21.6	10.4	27.2	12.5
25.4	10.2	41.6	0.4	36.4	11.7
29	6	31.4	7.4	28.4	9.6
28	5.1	37	8	41	3.1

根据测试结果，设定尾喷管入口流速 30m/s，温度 45℃。设置自由流出口边界条件以模拟无限大气，设为亚音速流动，参考压强 0Pa。

4. 计算结果

计算得到配重前后方的温度分布如图 4 所示，可以看出，最高温度为 47℃，最低温度为 17℃，温度分布梯度较高，同时可见配重前方有温度分布，这些温度分布是由于散热器的热量由风速带出配重孔的同时，部分遇到配重壁面才生了热空气的回流，导致热量难以散出，从散热的角度考虑这是极为不利的。图 5 表明配重后方的空气流速最高可以达到 31m/s，同时在配重前方有回流现象，与温度的分布一致。

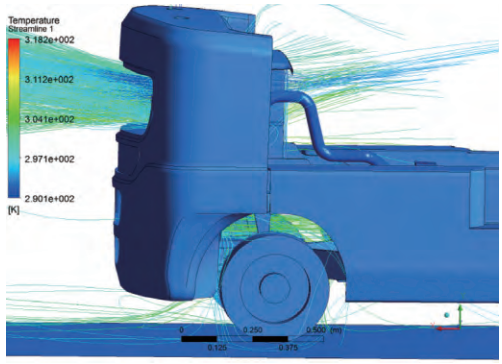


图 4 配重后方空气温度分布流线图

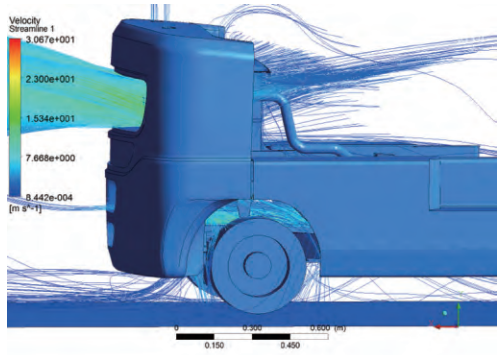


图 5 配重后方空气流速分布流线图

从计算结果中取出配重后方散热孔处的平面，计算平面的温度分布如图 6 ~ 8 所示，将平面大致均分为左、中、右三块，计算每一块的平均温度，以便与试验结果进行对比。

计算得到左中右三块的温度分布，每一块的平均温度

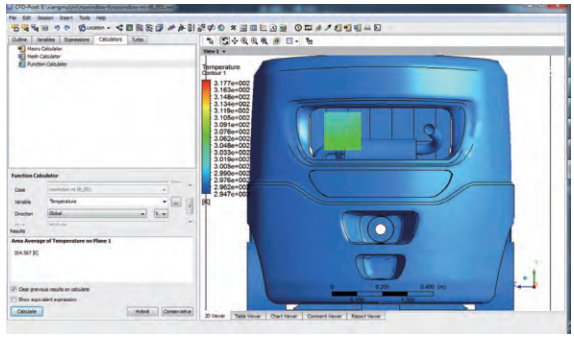


图 6 计算目标面左侧的温度分布

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

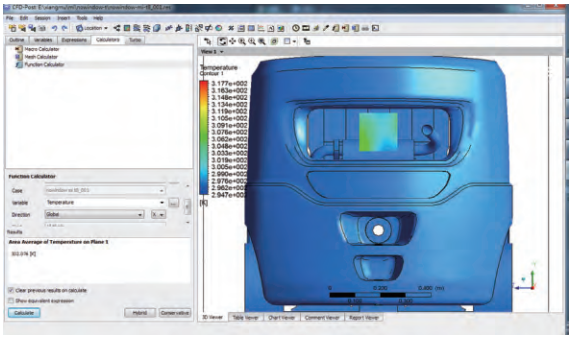


图 7　计算目标面中间的温度分布

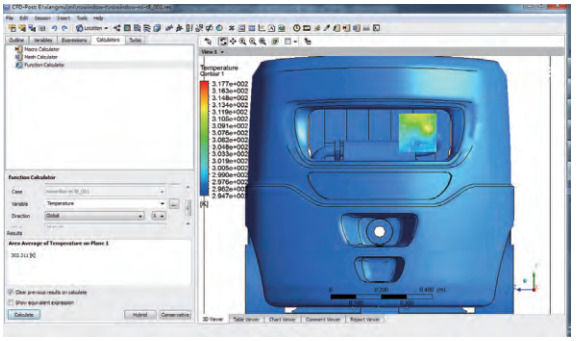


图 8　计算目标面右侧的温度分布

如表 4 所示，可见，左边平均温度最高，中间平均温度最低。

表 4　计算目标面温度分度

位置	左边	中间	右边
温度	31.6	29	30.2

四、计算结果与试验结果对比及误差分析

鉴于上述分析认为试验测试时可能存在误差，所以这里拟采用误差最小的配重外表面的温度分布作为依据，验证数值计算模型的合理性。同时，计算得到配重孔表面左中右三块的温度分布，于是，得到配重孔外表面的实验温度和计算温度分布如表 5 所示。实验温度测量总和为 105.7℃，计算温度总和为 90.8℃，二者相对误差为 14.1%，在项目要求的误差 15% 以内。

表 5 目标面实验温度和计算温度分布

目标位置	左边	中间	右边
实验温度 /℃	36.1	36.4	33.2
计算温度 /℃	31.6	29	30.2

首先，本项目计算结果与试验结果的误差为 8%，在工程中要求的 15% 以内，表明本文的计算模型是合理的，为了更进一步认识本文流体计算过程，对计算中的误差进行深入的分析。实际的物理过程是，高温的水和油通入散热器，后面的风扇转动使空气流动，将散热器上的热量从配重孔带出去，然而，散热器的几何模型相当复杂，将其划分网格考虑进计算模型是不现实的。所以，本项目对散热器进行了简化，直接将散热器后方的温度场及流场作为边界条件加入到模型中，这种简化所引起的误差在工程允许的范围内，是合理的。计算中加在散热器上的温度和流速及尾喷管的温度和流速是试验测试得到的，试验测量存在一定的误差，所以，以此作为边界输入条件得到的计算结果必然存在误差。

五、结语

本文针对某型叉车水箱后方的三维数模，进行了合理简化，进行流体网格划分，设置常见的边界条件及求解参数，最后得到叉车后方的热场分布。并将计算结果与试验结果进行了对比，二者吻合较好，表明本文计算模型的合理性。

本文将散热器出口的空气温度及流场直接加在模型上，计算时不考虑散热器本身的热传递及风扇的旋转，这样的简化更能反映配重后方的温度场分布，既减少了计算误差，又增加了计算效率，为后面配重的优化奠定了基础。