



西南交通大学学报

Journal of Southwest Jiaotong University

ISSN 0258-2724, CN 51-1277/U

《西南交通大学学报》网络首发论文

题目：航空发动机面式空气滑油散热器性能分析
作者：蔡惠坤，苏丽君，廖亦戴，翁泽钜，徐晨
网络首发日期：2019-03-15
引用格式：蔡惠坤，苏丽君，廖亦戴，翁泽钜，徐晨. 航空发动机面式空气滑油散热器性能分析[J/OL]. 西南交通大学学报.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20190313.1722.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20180964

航空发动机面式空气滑油散热器性能分析

蔡惠坤*，苏丽君，廖亦戴，翁泽钜，徐晨

(厦门大学航空航天学院机电工程系，福建 厦门 361102)

摘要：面式散热器位于航空发动机进气道段，可将进气道壁面作为传热表面，传热效率高，轻量化程度高；同时，与发动机工作同步，具有独立散热能力，更适用于地面停机、起飞滑跑等散热条件差的工况下。但目前针对航空发动机面式空气-滑油散热器的研究仍然较少。因此，本文基于分区模拟的方法开展了其传热特性分析，研究在不同分块模式下散热性能的等效性。数值分析的结果表明，采用4分块、7分块以及直平面代替弧面等条件下散热器和滑油温度分布及变化趋势都基本相似，且温度差都在1 K以内，通过滑油侧与空气侧计算出的单元散热器散热量偏差也都在5%以内。由此可知，采用分区模拟进行大型面式散热器的散热特性分析，针对弧长与直径的比在0.203以下的弧面模拟采用“以直代曲”等方法具有可行性和可靠性。

关键词：航空发动机；面式空气-滑油散热器；散热；分区模拟

中图分类号：TK124

文献标识码：A

Heat Dissipation Characteristics of Surface Air-Oil Heat Exchanger Applied in Aircraft Engine

CAI Huikun*，SU Lijun，LIAO Yidai，WENG Zeju，XU Chen

(Department of Mechanical and Electronic Engineering of Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Since it can be equipped in air inlet passage and utilize internal passage surface as heat transfer area, surface heat exchanger can benefit a lightweight for aero plane but still owns a high efficiency. In addition, it is more applicable in the conditions of ground idle speed or low flying speed as it works once the aero engine works. However, there are still few research on this kind of heat exchanger. Therefore, this paper investigates the heat dissipation characteristics of an aero engine surface air-oil heat exchanger based on districted simulation. The numerical results demonstrate that, temperature distributions in air side are almost the same in the cases of Mode 4, Mode 7 and the mode of using flat surface to replace arc surface in the simulations. All of their temperature differences are smaller than 1 K, and the discrepancies of calculated heat dissipation power are below 5%. The phenomena of heat transfer in oil side are also the same in the three cases. This research validates the feasibility and reliability of the methods of using districted simulation and using flat surface instead of arc surface where the ratio of arc length to diameter is below 0.203, when analyzing thermal characteristics of a large surface heat exchanger.

Key words: aircraft engine; surface air-oil heat exchanger; heat transfer; districted simulation

*基金项目：福建省自然科学面上基金项目（No. 2018D0018），Natural Science Foundation of Fujian Province of China (No. 2018D0018)

作者简介：蔡惠坤（通讯作者，1984-），男，讲师，研究方向为热物理，机械设计研究，Email: caihuikun@xmu.edu.cn

1 引言

由于大功率飞机的发展以及机载大功率设备的增加^[1-3],飞机的散热要求越来越高,对散热器换热特性的研究也成为了航空发动机热管理系统设计中的重要内容。应用于飞机的换热器种类很多,环形散热器就是其中一种^[4-5]。这种热交换器位于进气道段,把进气道壁面的一部分作为热交换器的传热表面,能够充分利用飞机空间,占地空间小;同时,只要发动机工作,就有散热能力,更适用于在地面停机、起飞滑跑等缺乏冲压空气、甚至没有冲压空气的工况条件下。因此,环形散热器经常被作为初级散热器应用于环控系统中或者在简单式环控系统中单独作为换热器使用,也可以置于燃油-滑油散热器后,作为后置散热器对滑油进一步冷却。

由国内外对换热器的研究分析可知,数值模拟越来越多的被应用于散热器的换热特性和流动阻力分析^[6-8]。一方面,飞机上的散热器尺寸都比较大,采用实验研发手段成本高、周期长、条件限制多;另一方面,CFD 技术在近 20 年的长足进步,可以方便模拟复杂工况下的流动现象和传热规律,得到流体速度场和温度场的详细信息,经过实验验证后也证明了其准确性和可靠性均能达到良好的程度,满足设计需求和工程应用的标准。英国学者

S.V.Patankar 和 D.B.Spalding 最先将 CFD 方法应用到实际管壳式换热器上进行数值模拟研究^[9]。之后的学者针对翅片结构设计^[10-11]、特性参数优化^[12-14]、计算模型构建^[15-17]等方面,开展了大量的数值模拟分析,得到了大量的成果。但总体来看,由于国外的技术封锁,对环形散热器的研究报道非常缺乏,而国内的探索分析也是相当有限。因此,本文将开展环形散热器的数值分析,以期能够推进其在航空发动机上的发展和应用。

2 面式散热器模型

本文研究的环形散热器是作为某型航空发动机的滑油散热补充用的,作为第二散热器置于管壳式换热器后。该散热器同样置于进气道段,但并未环绕整个进气涵道,其圆周长度所形成的角度为 81.5° ,故而称之为面式散热器。散热器采用 Solidworks 建模^[18],结构类型采用的是带内流道的板翅式换热器,如图 1 所示。换热器上半部分为翅片部分,空气在散热器外部顺着翅片形成的通道沿轴向方向流动;下半部分为基板部分,内部嵌有流道,滑油顺着内流道沿着圆周方向流动。因此空气与滑油形成交叉流,能够进行高效换热。整个散热器的结构尺寸及其工作条件如表 1 所示。同时,其对应的材料物性参数如表 2 所示。

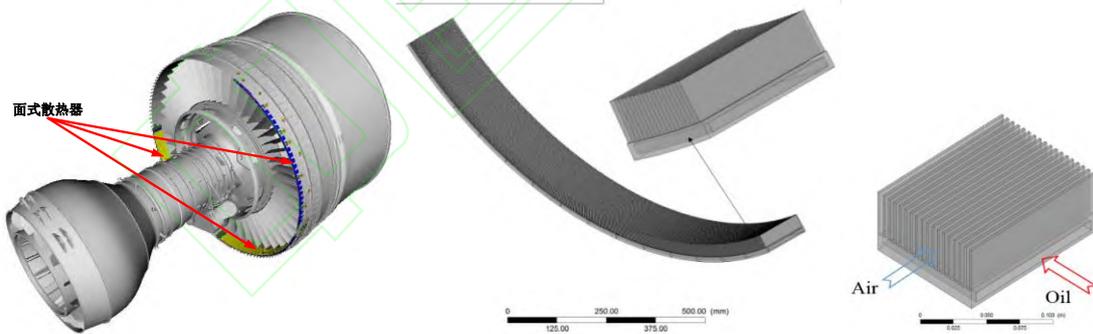


图 1 面式散热器示意图

Fig.1 Illustration of surface heat exchanger model

表 1 散热器尺寸大小及其工作条件

Table. 1 Dimensions and working conditions of surface heat exchanger

参数	数值或说明
散热器外径 / mm	2000
扇形角度 / °	81.5
散热器宽度 / mm	132 (沿空气流动方向为宽度)
散热器高度 / mm	49
散热器处于流场部分的高度 / mm	35 (翅片高度)

散热器材质	铝合金 6061
外部工质 (冷流体)	空气
内部工质 (热流体)	滑油
滑油流量 / (L min ⁻¹)	50
滑油进口压力 / MPa	0.6
滑油进口温度 / K	413
空气流速 / (m s ⁻¹)	50
空气进口温度 / K	327

表 2 材料物性参数表

	密度 ρ_o / (kg m ⁻³)	比热容 c_{po} / (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	导热系数 k_o / (W m ⁻¹ K ⁻¹)	动力粘度 μ_o / (kg m ⁻¹ s ⁻¹)
空气 (327 K)	1.11	1005	0.028	1.896×10^{-5}
滑油 (413 K)	9.68×10^2	2194	0.104	2.065×10^{-3}
铝合金 6061	2.69×10^3	896	1.801×10^2	-

3 数值模拟

由于散热器外形尺寸大, 如果将其作为一个整体进行建模和网格划分, 网格数量庞大, 可达到几千万的级别 (可见后面的网格划分数量), 对后续的数值求解和计算机硬件将造成极大的负担。因此, 为了提高计算效率和准确性, 节省计算时间, 本文将基于分区模拟的方法进行面式空气滑油散热器的仿真分析。

首先, 如图 2 所示将整个散热器均匀的分成 14 个子单元, 每个单元内的翅片厚度为 2 mm, 翅片数目为 18 个。在 ICEM^[19] 中采用六面体网格对散热器的本体域、冷空气域和滑油热流体域进行网格独立划分后再组合装配。网格划分原则及网格独立性分析如文献[20]所示, 最终可得空气、散热器、滑油对应的网格数分别为 359.328 万、27.4968 万、11.1264 万。因此, 整个散热器总体的计算区域网格数高达 5571.3168 万。

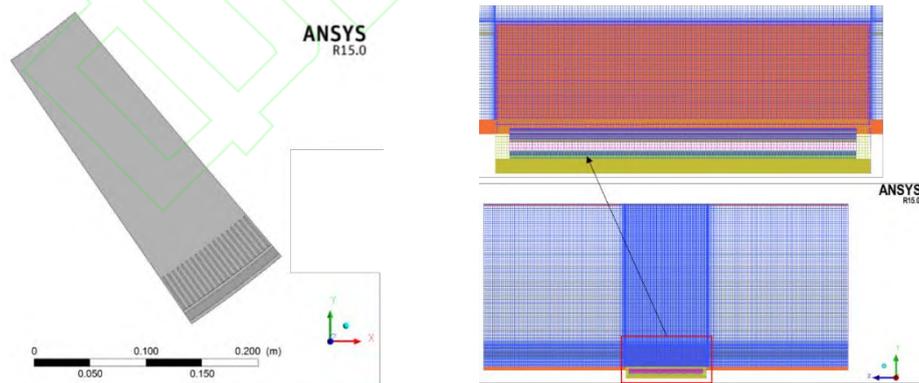


图 2 散热器子单元模型示意图 (左图) 及其网格划分图 (右图)

Fig.2 Illustration of heat exchanger element (left) and its mesh generation (right)

其次, 如图 3 所示对散热器子单元进行两种不同方式的分区组合。其中 7 块模式为每两个散热器子单元作为一个仿真模块, 4 块模式为 4/3/3/4 的组合方式。每个模块的顺序为顺着滑油的流动方向 (图中为从右到左) 进行标号。仿真分析时, 首先

对第一个模块进行计算, 然后将上一个模块的计算结果作为下一个模块的边界条件, 即将上一个模块的滑油出口温度和压力分布情况作为下一个模块的滑油入口温度和压力边界条件, 进而完成整个散热器的仿真分析。

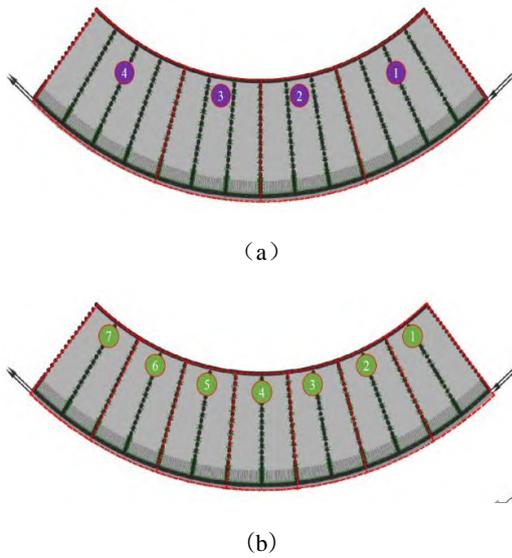


图3 散热器单元组合方式：图 a 为 4 块模式；图 b 为 7 块模式

Fig.3 Composite mode of heat exchanger element: Figure a is Mode 4; Figure b is Mode 7.

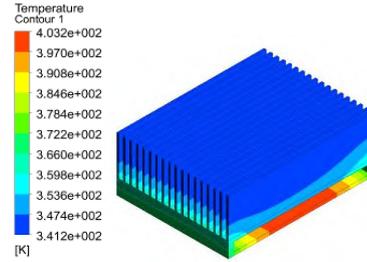
最后，基于同样的仿真条件和边界设置，开展两种不同分块组合下散热器最终的温度场、压力场以及总散热量等参数的数值模拟及其对比分析，以验证对大型散热器采用分区模拟方法的可行性和可靠性。

数值模拟采用的是 ANSYS WorkBench 中的 CFX 模块^[19]。流体流动遵循 N-S 控制方程，空气侧的雷诺数为 481.5，采用层流模型；滑油侧的雷诺数为 5580，采用 k-ε 湍流模型。求解器选择隐式格式、SIMPLE 算法、二阶迎风进行耦合分析，设置最大迭代步数为 500 步，认为能量、质量及速度残差值小于 10^{-5} 达到收敛标准。交界面设为耦合传热面，其他面设为绝热壁面。入口选择质量流量入口，出口选择压力出口。

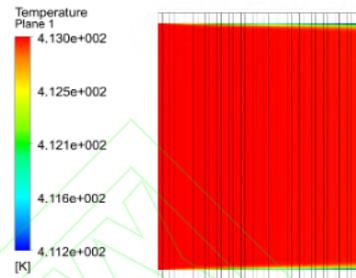
4 仿真结果分析

4.1 单个散热器单元仿真结果

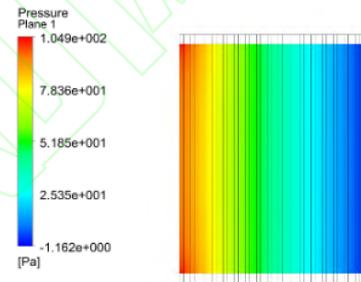
单个散热器单元的仿真结果如图 4 所示。对于翅片而言，温度沿着空气流动的方向逐渐升高，也随着翅片从基板到翅高方向逐渐降低。对于滑油而言，中间部分散热较差，流体温度较高；靠近散热器边界部分的流体散热条件较好，温度较低。由于整个内流道采用空腔的结构，滑油压力在内流道的沿程损失较小，进出口的压力差自然也小，与此同时滑油在内流道的散热效果也变差，滑油降低的温度自然也减小。



(a)散热器表面温度云图



(b)滑油温度云图



(c)滑油压力云图

图4 单个散热器单元仿真结果图

Fig. 4 Numerical results of heat exchanger element

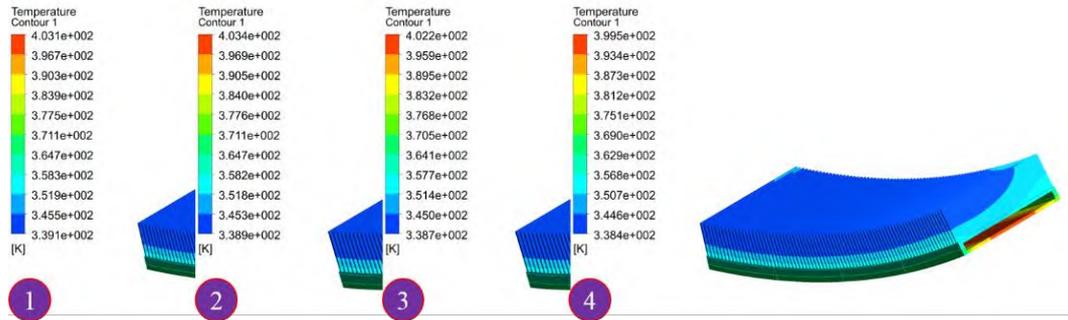
4.2 分区模拟仿真结果

图 5 和图 6 分别展示了采用 4 分块和 7 分块进行整个散热器仿真分析的结果。散热器和滑油的温度分布图与单个散热器子单元的分布图类似，这里不再赘述。值得注意的是，当整个滑油冷却完成后，散热器的最高温度（流道中间内壁面温度）低于滑油入口温度和出口温度（如图 5 的第 4 模块和图 6 的第 7 模块所示）。其主要原因是滑油流量高达 50 L/min，即使空气流速为 50 m/s，因滑油流量较大故而仍未能进行充分换热。

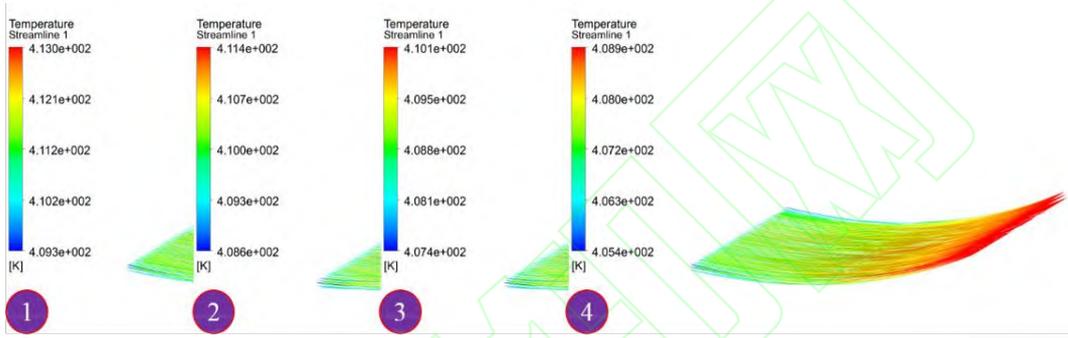
对比图 5a 的第 4 模块和图 6a 的第 7 模块后发现，散热器的温度分布和变化趋势基本相似，且二者的最高温度相差 0.8 K，最低温度相差 0.1 K，温度差别在 1 K 以内。对于滑油的温度分布情况也是类似（图 5b 的第 4 模块和图 6b 的第 7 模块），温

度差别也在 1 K 以内。由此可知，采用 4 分块和 7 分块进行同一个散热器的模拟分析结果基本一致，

对大型换热器采用分区模拟的方法具有可行性和可靠性。



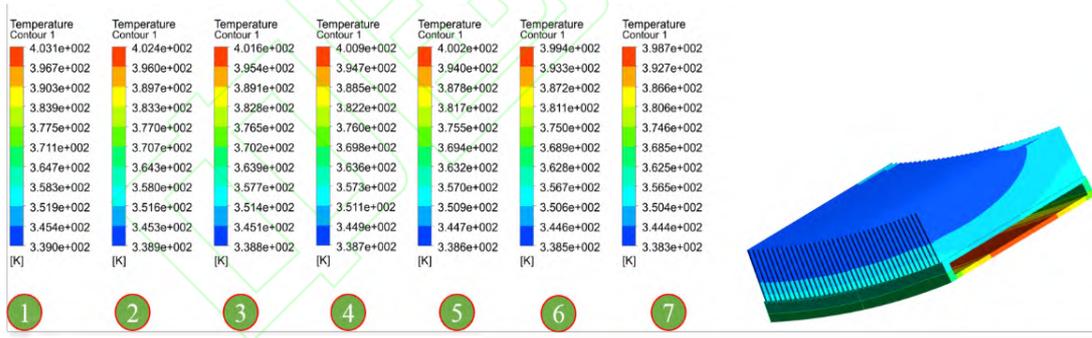
(a) 散热器表面温度分布图



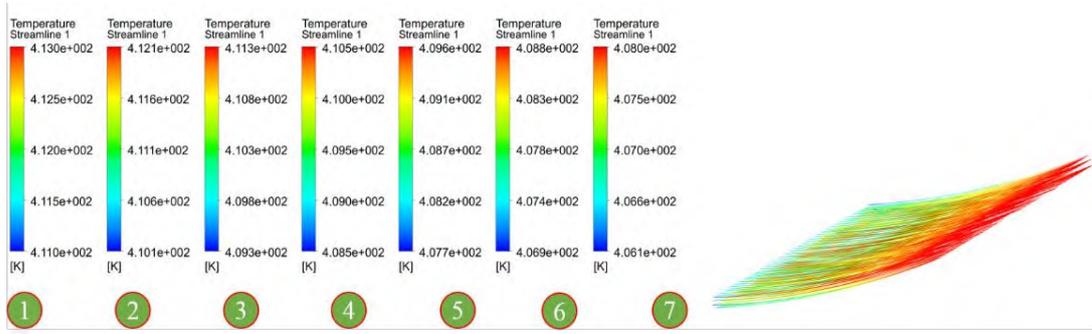
(b) 滑油温度分布图

图 5 4 分块散热器仿真结果

Fig.5 Numerical results of heat exchanger for Mode 4



(a) 散热器表面温度分布图



(b) 滑油温度分布图

图 6 7 分块散热器仿真结果

Fig.6 Numerical results of heat exchanger for Mode 7

进一步比较分区模拟下散热器的散热量。由图 7 可知，两种不同分区方法下，通过空气侧计算出的散热器子单元平均散热量分别为 678W（4 分块下）、670W（7 分块下），二者相对误差为 1.19%。通过滑油侧计算出的散热器子单元平均散热量均为 732W，与空气侧计算出的散热量误差分别为 7.96% 和 9.25%。由此可知，两种不同分区方法下计算出的散热量也是基本一致的，再次验证了分区模拟方法的可行性。

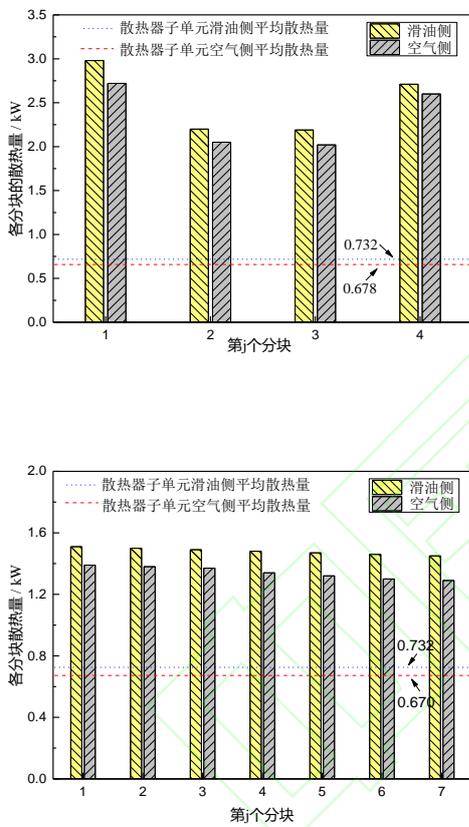


图 7 4 分块与 7 分块下的散热器散热量图

Fig.7 Heat dissipation power of heat exchanger for Mode 4 and Mode 7

4.3 采用直平面替代弧面的仿真结果

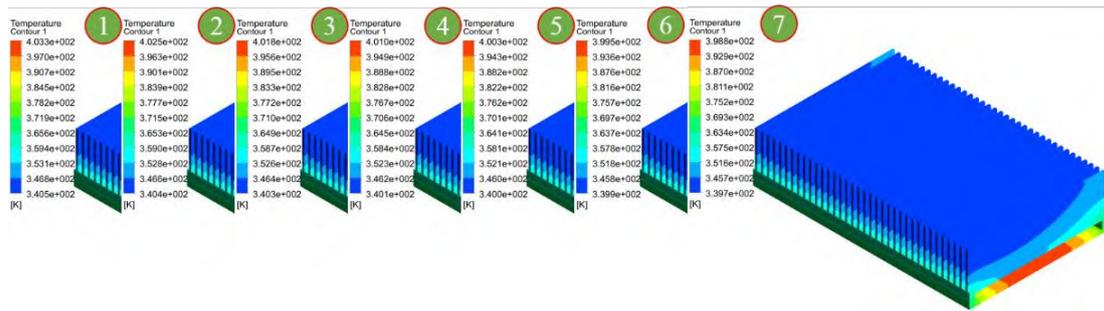
基于上述分区模拟的可行性与可靠性，进一步探讨采用平面替代弧面进行数值仿真的可行性与可靠性。这主要是因为当散热器被划分为 14 个子单元后，子单元的弧长相对于直径是比较小的。另外，在散热器肋片厚度、肋片间距又都较小即肋片

密度较高时，由于显示精度要求较高，导入到 ICEM 中的模型，会出现模型的弧面无法显示的现象，从而导致模型失效。因此，考虑将散热器的弧面变成平面进行仿真模拟，分析的方法和流程与弧面条件下的一致，基于 7 分块模式下相应的仿真结果如图 8 所示。详细对比图 6 与图 8 的散热器表面温度分布，可以发现每个模块下采用平面模拟的结果与弧面条件下的温度分布情况和变化趋势基本一致，而且相对应的温度差均在 0.5 K 以下。滑油的温度分布也是一样的。另外，对于散热量而言，采用平面模拟条件下通过滑油侧计算出的单元散热器散热量为 766W，通过空气侧计算出的单元散热器散热量为 678W，与弧面条件下的散热量偏差分别为 4.6%、1.2%，误差在可接受的范围内。由此可知，采用直平面代替弧面的模型简化方法对于整个散热器性能的仿真分析影响不到。由于在前面的分析中验证了采用 7 分块和 4 分块的仿真分析结果基本一致，因此采用“以直代曲”的仿真分析可以扩展到 4 分块的仿真中，即弧长与直径的比在 0.203 以下的弧面模拟可以采用“以直代曲”的分析方法以减小建模和仿真时的困难。

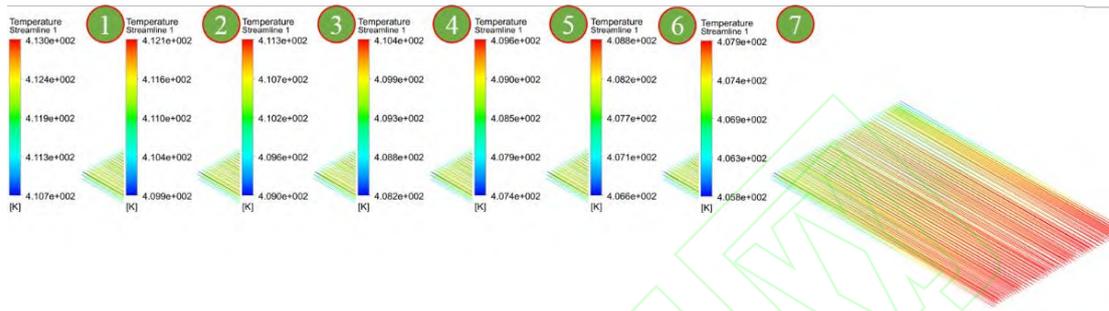
4.4 讨论

首先，本文的空气和滑油的物性参数参考温度均为其入口温度，且被当成是定物性参数。虽然实际条件下二者的物性参数都是随温度的变化而变化的，但由仿真分析结果可知，空气和滑油的出口温度与其入口温度均相差不大。同时，由于本文的重点是验证分区模拟的可行性和可靠性，故而由物性参数造成的误差在可接受的范围内。

此外，虽然采用 4 分块、7 分块以及直平面代替弧面等条件下仿真所得的数值结果分布情况和变化趋势都基本一致，且相对误差都较小，但仍需要通过实验来验证数值计算结果的准确性与可靠性。目前小型实验系统已接近完成，后续可开展相关实验进行验证。但本文仍然可为大型散热器采用分区模拟进行数值分析提供相应的基础和支持。



(a) 散热器表面温度分布图



(b) 滑油温度分布图

图 8 采用平面模拟的散热器仿真结果

Fig.8 Numerical results of heat exchanger using flat surface

5 结论

(1) 本文基于分区模拟的方法开展了航空发动机面式空气-滑油散热器的散热特性分析,并验证了不同分区模块下的等效性。

(2) 数值分析结果表明,采用 4 分块和 7 分块模式下,二者的散热器和滑油温度分布及变化趋势都基本相似,且温度差都在 1 K 以内。由此可知,不同分区组合条件下对同一个散热器的模拟分析结果基本一致,对大型换热器采用分区模拟的方法具有可行性和可靠性。

(3) 论文还开展了采用平面模拟代替弧面的仿真分析,二者相对应的温度差均在 0.5 K 以下,滑油侧与空气侧的散热量偏差分别为 4.6%、1.2%。综合分析结果可知,当弧长与直径的比在 0.203 以下的弧面模拟可以采用“以直代曲”的分析方法,相应的计算结果具有可行性和可靠性。

参考文献:

[1] HUANG H, SPADACCINI LJ, SOBEL DR. Fuel-cooled thermal management for advanced aeroengines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126: 284-293.

[2] 寿荣中, 何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
SHOU Rongzhong, HE Huishan. Aircraft environment control [M]. Beijing: BUAA Press, 2004.

[3] 朱春玲, 宁献文. 用于机载大功率电子设备的新型液冷环控系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 203-207.
ZHU Chunling, NING Xianwen. Liquid cooling system for high-powered avionics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(2): 203-207.

[4] 陈德雄, 李敏. 飞机座舱制冷附件[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
CHEN Dexiong, LI Min. Refrigerated attachment of aviation cockpit [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981.

[5] 丁顺利. 飞机环形散热器的性能研究[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2012.
DING Shunli. Research on performances of annular radiator in airplane [D]. Thesis of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012.

[6] S.V.帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算(张郑译)[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

- Suhas V. Patankar. Numerical calculation on heat transfer and fluid flow (translated by Zhang Yi) [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- TAO Wenquan. Numerical heat transfer [M]. Xi'an: XJU Press, 1995.
- [8] WU HH, HSIAO YY, HUANG HS, et al. A practical plate-fin heat sink model[J]. Applied Thermal Engineering,2011,31(5): 984-992.
- [9] PATANKAR SV, SPALDING DB. A calculation procedure for transient and steady state behavior of shell and tube heat exchanger[M]. Washington DC:Scripta Book Company,1974.
- [10] LI HY, CHAO SM. Measurement of performance of plate-fin heat sinks with cross flow cooling[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2009,52(13-14):2949-2955.
- [11] 蔡惠坤, 张银亮, 廖亦戴等. 多海拔下不同散热器翅片的性能分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(2):91-98.
- CAI Huikun, ZHANG Yinliang, LIAO Yidai, et al. Performance Analysis of Different Radiator Fins at Various Altitudes[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2017,45(2):91-98.
- [12] LI HY, CHAO SM, CHEN JW, et al. Thermal performance of plate-fin heat sinks with piezoelectric cooling fan[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2013,57(2):722-732.
- [13] 李学康. 串联通道水冷散热器的建模与优化[D], 电子科技大学,2013.
- LI Xuekang. Modeling and Optimization of Serpentine Channel Water-cooling Heat Sink[D], University of Electronic Science and Technology of China,2013.
- [14] YUAN W, ZHAO J, TSO CP, et al. Numerical simulation of the thermal hydraulic performance of a plate pin fin heat sink [J]. Applied Thermal Engineering,2012,48(48):81-88.
- [15] CHEN CT, CHEN HI. Multi-objective optimization design of plate-fin heat sinks using a direction-based genetic algorithm, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2013,44:257-265
- [16] FENG SS, KUANG JJ, WEN T, et al. An experimental and numerical study of finned metal foam heat sinks under impinging air jet cooling[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2014,77:1063-1074.
- [17] CHEN HT, TSENG HC, JHU SW. Numerical and experimental study of mixed convection heat transfer and fluid flow characteristics of plate-fin heat sinks[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2017,111:1050-1062.
- [18] <https://www.solidworks.com.cn> [EB]
- [19] <https://www.ansys.com/> [EB]
- [20] 廖亦戴. 面式空气-滑油散热器设计及性能研究[D], 厦门大学, 2018.
- LIAO Yidai. Design and performance study of surface air-oil heat exchanger[D], Xiamen University,2018.