

文章编号: 1000-8055(2023)09-2186-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220105

飞机油箱中燃油温度变化数值仿真

王立群¹, 范菊莉¹, 刘冠男¹, 刘豪正¹, 王洋洋², 冯诗愚¹

(1. 南京航空航天大学 航空学院

飞行器环境控制与生命保障工信部重点实验室, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团有限公司 南京机电液压工程研究中心

航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 211106)

摘 要: 在考虑飞行中外界空气对蒙皮气动加热的情况下, 对飞机油箱内部燃油和气体的传热过程进行了三维仿真, 得到了油箱中温度场和速度场的分布, 采用集总参数法建立了飞机油箱一维热模型, 通过 Modelica 语言编程对其进行了求解。将三维模型和一维模型计算得到的燃油、气相空间及壁面温度与飞行实验数据进行了对比, 结果显示两种模型气相和燃油平均温度均与布置在油箱中部的传感器测量结果吻合较好, 但是三维仿真结果表明油箱各处温度差异很大, 燃油各点温差最大可达 17 K, 气相空间各点温差最大可达 30 K。因此实验中传感器位置需要重点关注。此外, 三维仿真模型还可为一维模型中相关换热参数选择提供依据。

关 键 词: 油箱; 热模型; 燃油温度; 集总参数法; 惰化

中图分类号: V228.1

文献标志码: A

Numerical simulation of fuel temperature change in aircraft fuel tank

WANG Liqun¹, FAN Juli¹, LIU Guannan¹, LIU Haozheng¹,

WANG Yangyang², FENG Shiyu¹

(1. Key Laboratory of Aircraft Environmental Control and Life Support Industry and

Information Technology, College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration,

Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems,

Aviation Industry Corporation of China Limited, Nanjing 211106, China)

Abstract: Considering aerodynamic heating of the skin by the outside air during flight, a three-dimensional simulation of the heat transfer process of fuel and gas inside the aircraft fuel tank was carried out, and the distribution of the temperature field and velocity field in the fuel tank was obtained. The lumped parameter method was used. A one-dimensional thermal model of aircraft fuel tank was established, and solved by programming in Modelica language. The fuel, gas space and wall temperatures calculated by the three-dimensional model and the one-dimensional model were compared with the flight test data. The results showed that the average gas and fuel temperatures of the two models were in good

收稿日期: 2022-03-04

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民用航空局民航联合研究基金(U1933121); 中央高校基本科研业务费专项资金;

江苏高校优势学科建设工程; 南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划项目(xcxjh20210108)

作者简介: 王立群(1996—), 男, 硕士生, 主要从事冷却惰化研究。

通信作者: 冯诗愚(1974—), 男, 副教授, 博士后, 主要研究油箱惰化。E-mail: shiyuf@nuaa.edu.cn

引用格式: 王立群, 范菊莉, 刘冠男, 等. 飞机油箱中燃油温度变化数值仿真[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2186-2192. WANG Liqun, FAN Juli, LIU Guannan, et al. Numerical simulation of fuel temperature change in aircraft fuel tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2186-2192.

agreement with the measurement results of the sensors arranged in the middle of the fuel tank. The three-dimensional simulation results indicated that the temperature of the fuel tank varied greatly. The maximum temperature difference between each point of the fuel can reach 17 K, and the maximum temperature difference between each point in the gas phase space can reach 30 K, so due attention shall be paid to the sensor position in the test. In addition, the three-dimensional simulation model can also provide a basis for the selection of relevant heat transfer parameters in the one-dimensional model.

Keywords: fuel tank; thermal model; fuel temperature; lumped parameter method; inerting

飞机油箱内的燃油温度变化是评估油箱可燃特性的基础,对民机适航取证非常关键^[1-3]。FAA (Federal Aviation Administration)已多次发布适航规章和修正案,提出了严格限制飞机机队平均可燃性暴露时间、降低油箱燃爆发生概率的适航要求。研究飞机油箱内的燃油温度分布具有重要意义。

获取油箱温度的方法主要有地面/飞行实验和数学仿真两大类^[4]。实验方法相对准确,但代价大、周期长;而数学仿真则费用低、周期短,因此被更加广泛地使用。将油箱视为一个整体,采用集总参数法建立一维热模型是最普遍的方式^[5]。例如 Doman 视燃油为单一节点研究飞机热管理的最佳巡航高度^[6]。康振烨等使用 MATLAB/Simulink 软件平台搭建出了客机的油箱热仿真模型^[7]。康思昭等利用 Flowmaster 软件建立一维模型对某型航空发动机燃油系统进行建模^[8]。于磊等采用 C++语言开发出一套通用的燃油系统仿真模型^[9]。张斌将燃油作为单一节点对一种典型民用飞机油箱结构的热参数进行了工程计算研究^[10]。兰江等在 Flowmaster 平台上基于 C 语言二次开发了通用的油箱仿真模型^[11]。

一维模型所采用的集总参数法无法反映油箱中各位置存在的温度差异^[12-14],实验中传感器位置也不一定能准确得到平均温度来与一维模型进行对比。此外,在一维模型中存在很多简化和假设,特别是壁面内表面换热存在自然对流和强制对流等多种情况,且存在水平和垂直壁面,表面传热系数确定非常复杂,经常需要根据实验结果进行选择 and 调整^[15-17],存在很多经验性的因素,因此普适性较差。

三维仿真可在较少假设条件下,根据基本能量、质量和动量守恒关系,得到油箱中温度分布,例如壁面内表面的表面传热系数可根据基本的流动传热规律计算,而无需根据经验调整,因此普

适性更高。但是,目前国内外很少有采用三维仿真方法对油箱热特性进行研究的报道。有鉴于此,本文基于某飞机飞行包线,考虑了外界空气对蒙皮气动加热,通过 COMSOL 软件对油箱内部燃油及气相空间气体进行了仿真,得到了其温度场和速度场的分布。

同时,通过 Modelica 语言编写了一维油箱热模型,对比了三维模型、一维模型、飞行实验数据之间的燃油温度、气相空间温度和壁面温度的差异。

本文研究对油箱热模型实验中内部温度传感器布置、一维仿真模型表面传热系数选取具有指导意义,对未来飞机燃油系统适航的蒙特卡洛分析评估具有一定参考价值。

1 油箱热模型的建立

1.1 物理模型和飞行包线

选择某机翼油箱,图1为油箱模型半剖图,其尺寸为 $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$,燃油液面高度为 0.35 m ,油箱壁材料为铝,油箱壁厚为 0.03 m 。空气和燃油初始温度为 293.15 K 。飞机机翼油箱左右壁面与中央翼油箱、集油箱和通气油箱相接,建模时不考虑各油箱之间复杂的耦合关系,所以可以将机翼油箱的左右两个壁面当作绝热壁面来处理。

飞行包线如图2所示,飞机在地面上停靠

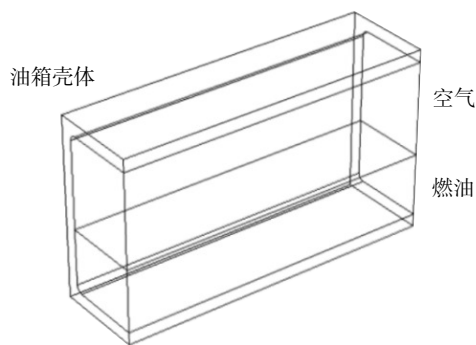


图1 油箱几何模型

Fig. 1 Geometric model of fuel tank

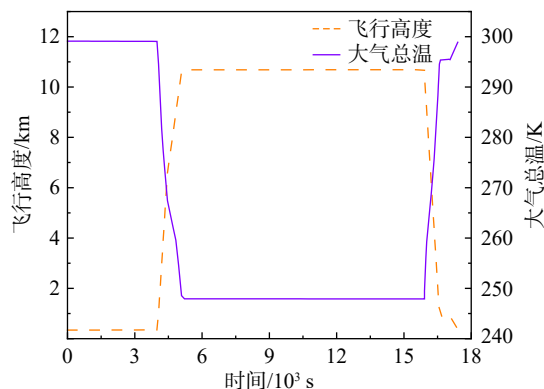


图 2 仿真及实验的飞行包线

Fig. 2 Flight envelope of simulation and test

4 000 s 后起飞, 5 500 s 开始在 10 km 高度巡航, 16 000 s 飞机飞行高度下降直至降落停机。

1.2 基本假设

为简化计算, 三维和一维模型均做如下假设:

- 1) 将燃油看作理想不可压流体并且不考虑燃油蒸发的影响;
- 2) 气相空间参数使用空气参数代替;
- 3) 忽略油箱内部的燃油、气相空间、壁面三者之间的热辐射;
- 4) 忽略油箱内隔板肋片引起的传热变化;
- 5) 忽略太阳辐射对油箱上表面蒙皮带来的热量变化;
- 6) 不考虑飞机加速飞行的影响, 只考虑水平飞行零滚转角度的飞机姿态下固定油量。

此外一维模型中用油箱中气相和液相的平均参数来表征对应物理量的信息。

1.3 三维油箱热模型

空气和燃油的流速很小, 使用层流场计算。燃油、空气、油箱壳体三者之间的热量交换使用流体传热与固体传热耦合计算。使用相场法控制油气两相流的界面; 使用两相流和非等温流动将速度场和温度场耦合。整个系统的温度变化在 50 K 以内, 且油和空气的密度变化很小, Boussinesq 假设成立, 减少了模拟计算量。采用 COMSOL5.5 版本求解器。

由于选择了机翼油箱, 因此外热源只考虑外部空气的气动加热。在飞行马赫数小于 2, 普朗特数接近 1, 气体流动为层流时, 气动加热总温^[18]如下:

$$T_e = T_{out} \{1 + 0.85 Ma^2 [(\kappa - 1)/2]\} \quad (1)$$

其中 T_e 为大气总温(K); T_{out} 为外界环境温度(K);

Ma 为飞行马赫数; κ 为空气等熵指数。

壁面与外界空气的表面传热系数为

$$h_{air} = 0.664 (\lambda_{air}/L) Re_{air}^{0.5} Pr_{air}^{0.33} \quad (2)$$

式中 h_{air} 为外界空气与外壁面的表面传热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$); λ_{air} 为空气导热系数 ($W/(m \cdot K)$); L 为特征长度(m); Re_{air} 为空气雷诺数; Pr_{air} 为空气普朗特数。

计算中使用非结构网格, 并使用对称镜像减少网格数量。模型分别划分了 50 000、70 000、100 000、150 000 四套不同数量的网格, 如表 1 所示。取油箱空间点 (0.7, 0.2, 0.2) m 在 10 000 s 时的温度为检验标准, 网格数增加至 100 000。如图 3 所示, 选取燃油平均温度探针, 100 000 网格数与 150 000 网格数的计算结果误差在 2% 以内。综合考虑后选择 100 000 数量网格计算, 油箱网格图为图 4。

表 1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence verification

网格数量/ 10^4	5	7	10	15
温度/K	237.0	247.2	254.6	253.8

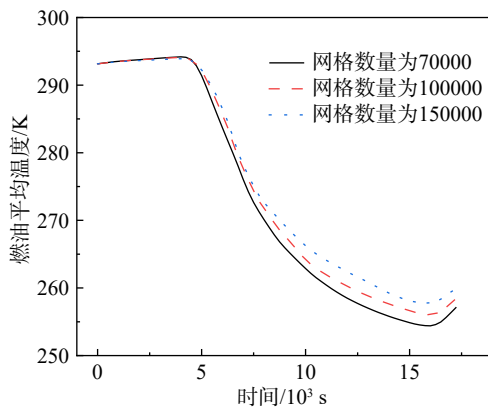


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

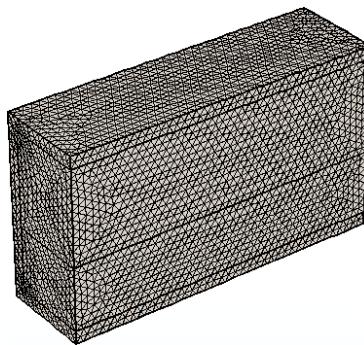


图 4 油箱网格图

Fig. 4 Fuel tank grid

因为不考虑燃油消耗, 气液界面稳定, 燃油温高于气体温度, 所以气相空间可近似成底部加热、上部及侧面冷却的封闭腔体。为验证模型正确性, 参考文献 [19] 的边界条件进行建模。以其中一个边界条件为例, 高宽长比为 1:4:4, 下表面温度为 365.15 K, 上表面温度为 299.15 K, 其他表面为绝热条件。图 5 为文献 [19] 实验得到的可视化发烟流场图, 图 6 为仿真流场, 与实验类似, 也在气相空间形成了稳定、对称的涡, 可证明模型准确性较高。

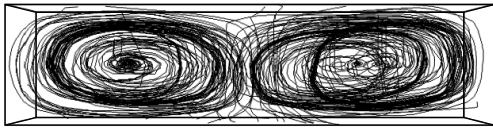
图 5 流场烟可视化图^[19]Fig. 5 Visualization of smoke flow field^[19]

图 6 仿真流线图

Fig. 6 Simulation streamline diagram

1.4 一维油箱热模型

毕渥数(Bi)表示固体内部单位导热面积上的导热热阻与单位面积上的换热热阻(即外部热阻)之比。一般在工程上, 当 $Bi \leq 0.1$ 时就可以近似认为物体内部热阻与对流换热热阻相比可以忽略不计。这种在任何时刻物体内部温度梯度小到可以忽略的导热体称为集总热容系统。而飞机油箱壁面采用铝合金, 导热系数很高, 故可把其壁面看作热薄物体系统。通过集总参数法, 忽略飞机油箱各壁面的传热变化, 在不同的节点建立非稳态能量守恒方程。通过 Modelica 软件建立油箱一维仿真模型, 但是模型中内壁面的表面传热系数需要根据不同飞行情况与实验结果对比后加以修正。

图 7 为机翼油箱基元模块示意图。飞机机翼油箱左右肋板与集油箱和通气油箱相连, 在进行建模时, 机翼油箱包括 6 个节点: 油箱上壁面节点、油箱下壁面节点、油箱前壁面节点、油箱后壁面节点、燃油节点和油气节点; 油箱左右两个壁面节点视为肋板, 与相邻油箱进行耦合计算^[20]。

对于机翼油箱壁面节点建立热量平衡方程, 即引起油箱壁面温度变化热量包括油箱壁面与外界空气对流换热、与内部燃油和油气对流换热以

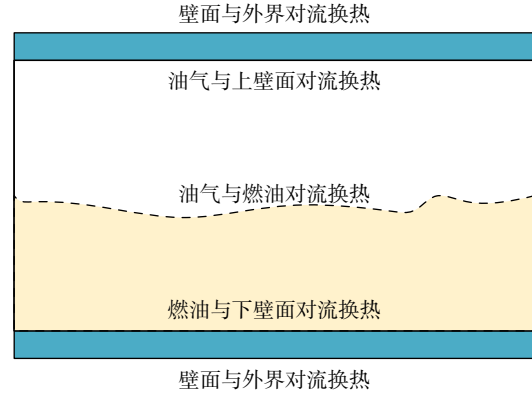


图 7 油箱对流换热关系示意图

Fig. 7 Schematic diagram of convective heat transfer relationship of fuel tank

及辐射换热。对于燃油及油气建立热量平衡方程, 即引起燃油温度变化热量包括燃油与各壁面之间对流换热, 燃油气化潜热以及流入流出带来的热量变化, 对于燃油节点还涉及内热源的变化。

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{cond}} + \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{flow}} + \dot{Q}_{\text{in}} \quad (3)$$

$$\dot{Q}(t) = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

式中 $\dot{Q}_{\text{conv}}$ 为节点之间对流换热热流率, $\dot{Q}_{\text{cond}}$ 为节点内部导热热流率, $\dot{Q}_{\text{rad}}$ 为节点辐射换热热流率, $\dot{Q}_{\text{flow}}$ 为表示节点流入流出变化热流率, $\dot{Q}_{\text{in}}$ 为内热源热流率, 单位为 W; m 为质量(kg); c_p 为比定压热容(J/(kg·K)); T 为温度(K)。

对于油箱上、下壁面节点, $\dot{Q}_{\text{up}}$ 、 $\dot{Q}_{\text{down}}$ 分别为油箱上、下壁面热量随时间变化率,

$$\dot{Q}_{\text{up}} = \dot{Q}_{\text{conv,up}} + \dot{Q}_{\text{rad,up}} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{\text{down}} = \dot{Q}_{\text{conv,down}} + \dot{Q}_{\text{rad,ground}} \quad (6)$$

对于油箱前、后、左、右壁面节点, $\dot{Q}_{\text{front}}$ 、 $\dot{Q}_{\text{rear}}$ 、 $\dot{Q}_{\text{left}}$ 、 $\dot{Q}_{\text{right}}$ 分别为油箱前、后、左、右壁面热量随时间变化率。

$$\dot{Q}_{\text{front}} = \dot{Q}_{\text{conv,front}} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{\text{rear}} = \dot{Q}_{\text{conv,rear}} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{\text{left}} = \dot{Q}_{\text{conv,left}} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{\text{right}} = \dot{Q}_{\text{conv,right}} \quad (10)$$

对于油箱内燃油和油气节点, $\dot{Q}_{\text{fuel}}$ 、 $\dot{Q}_{\text{gas}}$ 分别为油箱内燃油、气体热量随时间变化率

$$\dot{Q}_{\text{fuel}} = \dot{Q}_{\text{conv,fuel}} + \dot{Q}_{\text{cond,fuel}} + \dot{Q}_{\text{flow,fuel}} + \dot{Q}_{\text{in,fuel}} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{\text{gas}} = \dot{Q}_{\text{conv,gas}} + \dot{Q}_{\text{cond,gas}} + \dot{Q}_{\text{flow,gas}} \quad (12)$$

对流换热热量随时间变化关系如下:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (13)$$

其中 h 为该表面的表面传热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); A 为对流换热面积 (m^2); ΔT 对流换热两表面平均温差 (K)。

壁面与外界空气的表面传热系数如式(2)所示。但是如前所述,与三维模型不同,一维模型中内壁面的表面传热系数需要指定。结合油箱中气液流动特点,将油气与油箱壁面之间的换热看成是强迫对流换热,燃油与壁面之间的换热看成自然对流换热,可按照下述公式^[21]计算

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (14)$$

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (15)$$

式中 c 和 n 可参考文献^[21]。

只要确定了燃油气以及燃油的导热系数、对流换热特征长度、格拉晓夫数 Gr 、普朗特数 Pr 以及其他相关系数就可以确定传热系数。

2 计算结果及分析

2.1 三维油箱热模型仿真计算云图

如图 8 所示,在飞机巡航阶段 6 750 s 时刻,油箱整体温度降低。油箱壁材料铝的导热系数很大,导致壁面温度最低、变化最快,而壁面各点温度差别不大。空气温度低于油的温度,气相空间各点温度差别较大,近壁面处空气温度远低于中间处空气温度,两者温差可达到 20 K。

图 9 为空气流线图,气相空间中靠近燃油处空气温度高、密度小,近壁面处空气温度低、密度大,进而产生了较为明显的自然流动。油箱上部气相空间产生了三维涡,混合气体由中间靠近燃油处向上运动到油箱上壁面中心处,再向油箱侧

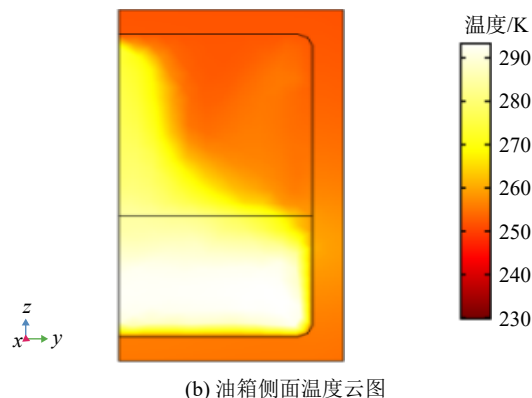


图 8 油箱温度云图($t=6750 \text{ s}$)

Fig. 8 Fuel tank temperature nephogram ($t=6750 \text{ s}$)

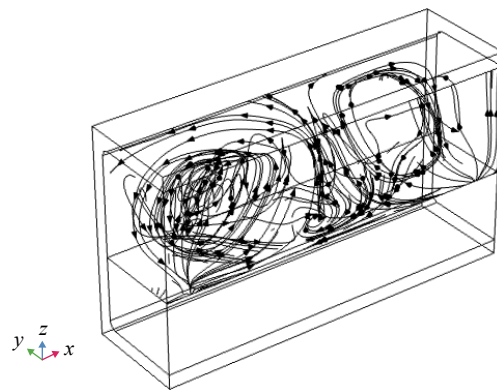
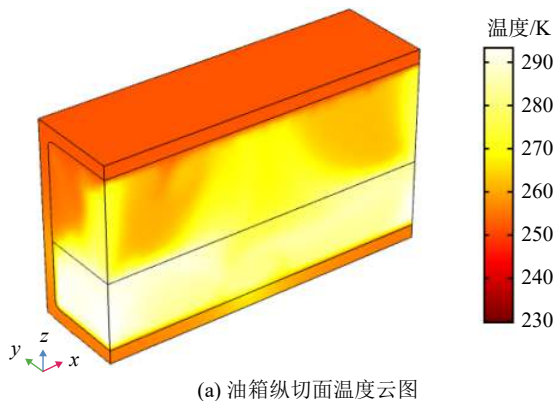


图 9 空气流线图($t=6750 \text{ s}$)

Fig. 9 Air streamline diagram ($t=6750 \text{ s}$)

壁面流动,最后混合气体流动至靠近燃油处完成流动循环。燃油的流动和混合气体流动类似,也有涡的产生。

在 14 500 s 时飞机结束巡航,壁面、空气、油三者温度趋于一致,温度云图如图 10 所示。壁面及空气温度最后稳定在 245 K 左右,燃油温度降低至 255 K 左右。在 16 000 s 时开始下降,油箱整体温度开始上升。



(a) 油箱纵切面温度云图

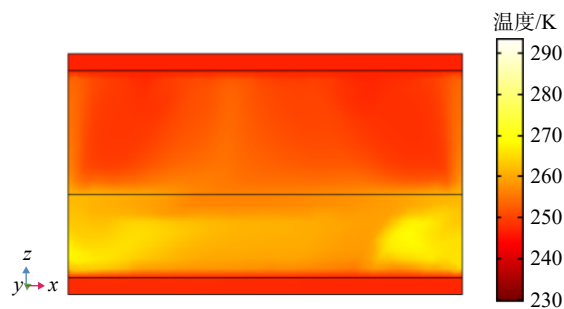


图 10 油箱温度云图($t=14500 \text{ s}$)

Fig. 10 Temperature nephogram of fuel tank ($t=14500 \text{ s}$)

2.2 两种模型计算结果与飞行实验数据对比

实验数据为标准天长航程, 其飞行实验时间长, 油箱温度数据全面, 飞行时间共计 290 min, 实验仅在燃油中布置了温度传感器。为防止温度传感器产生静电引发燃爆事故, 飞机惰化系统将富氮气体分配到油箱的每个隔间。燃油和气体温度随时间变化的仿真和实验对比如图 11 所示。在 10 000 s 前, 实验中燃油无消耗, 三维和一维仿真计算的平均油温与实验结果吻合度很高。由于燃油液位不可控地降低, 10 000 s 后, 原布置在燃油中的温度传感器逐渐露出液面, 约 12 000 s 后实际检测的为气相空间温度, 从图中可见两者吻合度也很高, 进一步证明了仿真的准确性。

图 11 中选取的温度为平均温度, 实验中温度传感器也布置在中心处, 但是显然油箱中各处的温度会有差异, 图 12 选取了燃油的燃油中心(1,

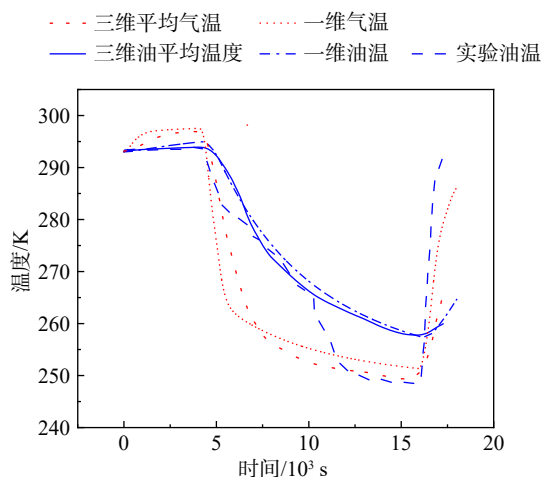


图 11 燃油温度和气相空间温度对比

Fig. 11 Comparison of fuel temperature and gas phase space temperature

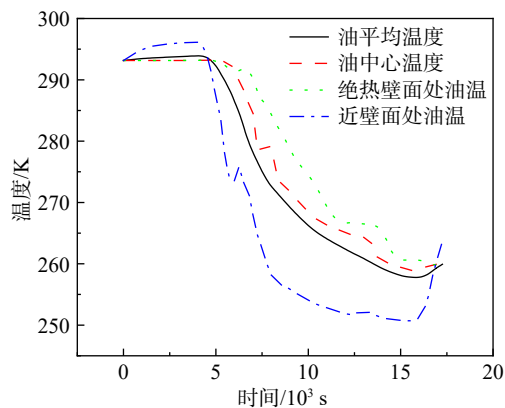


图 12 三维仿真中燃油各点温度对比

Fig. 12 Comparison of fuel temperature in three-dimensional simulation

0.2, 0.2) m、油箱内部后壁近壁面处(0.2, 0.45, 0.2) m、油箱内部绝热壁面处(0.1, 0.2, 0.2) m 三点的温度以及燃油平均温度的变化曲线。从图中可见, 中心处的油温与平均油温非常接近, 但是壁面处有很大差异, 在同一时刻, 燃油各点最大温差能达到 17 K 以上。

油箱一维热模型忽略了燃油内部各点的温度差异选取燃油平均温度进行计算, 而平均温度处低于可燃极限时, 油箱空间中心处温度高于平均温度, 因此点火源存在时油箱可能有燃爆的风险。

图 13 选取了三维仿真中油箱气相空间中心处(0.7, 0, 0.8) m、油箱内部后壁近壁面处(0.5, 0.45, 0.6) m、油箱内部绝热壁面处(0.05, 0.2, 0.6) m 三点的空气温度以及气相空间平均温度的变化曲线。各条温度曲线随时间变化趋势基本一致, 在 8 500 s, 近壁面处气温比中心处气温低 12 K, 油箱气相空间各点温度存在较大差异。

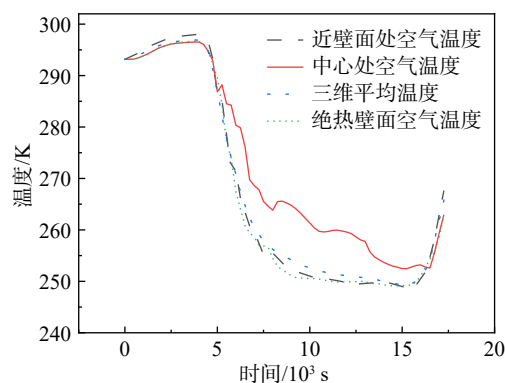


图 13 油箱气相空间温度仿真结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation results of gas phase space temperature of fuel tank

3 结 论

通过建立某飞机矩形油箱三维和一维仿真模型, 对油箱中燃油温度随飞行包线的变化进行了仿真, 并与实验数据进行了对比。研究结果显示: 两种模型的平均温度均与实验数据吻合较好, 证明了模型的准确性。三维模型无需指定和调整内壁面表面传热系数, 普适性优于一维模型。三维仿真结果显示燃油中不同位置温度有很大差异, 油箱中心处温度最高, 燃油近绝热壁面处温度最低, 两者温差近 20 K。因此, 实验中传感器位置会造成温度测量差异, 进而影响可燃性评估结果。对于形状复杂的油箱, 三维仿真可对油箱内部温

度探头位置的合理布置有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] WYCZALEK F A. TWA800 fuel tank flammability an analytical investigation[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1998, 13(1): 16-19.
- [2] HUBER, MARCIA L, YANG, et al. A thermodynamic analysis of fuel vapor characteristics in an aircraft fuel tank ullage[J]. *Fire Safety Journal*, 2002, 37(5): 517-524.
- [3] KITANIN É L, ZHEREBTSOV V L, PEGANOVA M M, et al. Experimental investigation of the process of aviation kerosene dehydration in a fuel tank[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, 94(2): 520-524.
- [4] 张瑞华, 刘卫华. 飞机燃油温度仿真及应用[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(10): 2089-2096.
ZHANG Ruihua, LIU Weihua. Simulation and application of aircraft fuel temperature[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(10): 2089-2096. (in Chinese)
- [5] 郝毓雅, 夏树丹. 机翼油箱内燃油温度场的数值模拟[J]. *现代机械*, 2020(2): 81-84.
HAO Yuya, XIA Shudan. Numerical simulation of fuel temperature field in wing tank[J]. *Modern Machinery*, 2020(2): 81-84. (in Chinese)
- [6] DOMAN D B. Optimal cruise altitude for aircraft thermal management[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 38(11): 2084-2095.
- [7] 康振烨, 刘振侠, 任国哲, 等. 基于MATLAB/Simulink的飞机燃油箱内燃油温度仿真计算[J]. *推进技术*, 2014, 35(1): 62-69.
KANG Zhenye, LIU Zhenxia, REN Guozhe, et al. Simulation and calculation of fuel temperature in aircraft fuel tank based on Matlab/Simulink[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(1): 62-69. (in Chinese)
- [8] 康思昭, 奚修智, 李波, 等. 基于Flowmaster的航空发动机燃油系统温度仿真及分析[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(4): 722-731.
KANG Sizhao, XI Xiuzhi, LI Bo, et al. Simulation and analysis of temperature of aviation engine fuel system based on Flowmaster software[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(4): 722-731. (in Chinese)
- [9] 于磊, 李国强, 梁兴壮, 等. 基于复杂工况下飞机燃油温度快速计算方法的热管理系统仿真分析[J]. *中国科技论文*, 2019, 14(6): 670-674.
YU Lei, LI Guoqiang, LIANG Xingzhuang, et al. Simulation and analysis of thermal management system based on rapid calculation method of aircraft fuel temperature under complex working conditions[J]. *China Science Paper*, 2019, 14(6): 670-674. (in Chinese)
- [10] 张斌. 民用飞机燃油箱系统热模型分析研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2013(1): 23-26, 36.
ZHANG Bin. Research on the thermal model analysis of civil aircraft fuel tank system[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2013(1): 23-26, 36. (in Chinese)
- [11] 兰江, 朱磊, 赵竞全. 通用油箱热模型的建模与仿真[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(7): 1623-1630.
LAN Jiang, ZHU Lei, ZHAO Jingquan. Modeling and simulation of general fuel tank thermal model[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(7): 1623-1630. (in Chinese)
- [12] 陈悦. 飞机燃油系统热负荷计算及热管理分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
CHEN Yue. Heat sink calculation and the analysis of thermal management for aircraft fuel system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [13] 宋彪. 飞机燃油箱防火安全性验证方法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
SONG Biao. The discussion of aircraft fuel tank fire safety performance verification methods[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013. (in Chinese)
- [14] 赵璇. 飞行器超音速巡航状态油箱热特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
ZHAO Xuan. Study on thermal characteristics of wing tank in supersonic cruise state of aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [15] 郭军亮. 民用飞机燃油箱热特性数值仿真[J]. *航空计算技术*, 2013, 43(1): 65-68.
GUO Junliang. Numerical simulation on fuel tank thermal characters for civil aircraft[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2013, 43(1): 65-68. (in Chinese)
- [16] 吕亚国, 任国哲, 刘振侠, 等. 飞机燃油箱热分析研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(1): 61-67.
LÜ Yaguo, REN Guozhe, LIU Zhenxia, et al. Thermal analysis of fuel tank for aircraft[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(1): 61-67. (in Chinese)
- [17] 郭军亮, 周宇穗, 王澍, 等. 飞机燃油箱可燃性定量分析的燃油箱热参数计算方法研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2011(3): 20-22.
GUO Junliang, ZHOU Yusui, WANG Shu, et al. Study of fuel tank thermal data calculating method for aircraft fuel tank flammability quantitative analysis[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2011(3): 20-22. (in Chinese)
- [18] 童升华, 邵垒, 古远康, 等. 外热源作用下机翼油箱边界温度变化规律研究[J]. *航空兵器*, 2014, 21(1): 48-52.
TONG Shneghua, SHAO Lei, GU Yuankang, et al. Change rule of boundary temperature in wing fuel tank affected by external heat source[J]. *Aero Weaponry*, 2014, 21(1): 48-52. (in Chinese)
- [19] 战乃岩, 高青, 白利, 等. 封闭空间内空气自然对流的非线性特性的实验研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42(1): 57-64.
ZHAN Naiyan, GAO Qing, BAI Li, et al. Experimental research on nonlinear characteristics of natural convection in a 3-D shallow cavity[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2012, 42(1): 57-64. (in Chinese)
- [20] 刘冠男, 王立群, 王宏明, 等. 飞机燃油箱冷却惰化系统地面性能分析[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(12): 2578-2585.
LIU Guannan, WANG Liqun, WANG Hongming, et al. Ground performance analysis of aircraft fuel tank cooling inerting system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(12): 2578-2585. (in Chinese)
- [21] 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.

(编辑: 陈越)