



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

中文核心期刊 中国科技核心期刊

无人机电子设备舱热环境仿真分析

周忆梦 梁世哲 赵创新 史金辉

Thermal environment simulation analysis of UAV electronic equipment cabin

ZHOU Yimeng, LIANG Shizhe, ZHAO Chuangxin, SHI Jinhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

火星稀薄大气环境下的四旋翼无人机动力系统初步研究

Preliminary research of the power system for Mars UAV with four rotors in thin atmosphere

航天器环境工程. 2017, 34(5): 478–481 <https://doi.org/10.12126/see.2017.05.004>

基于旋翼无人机技术的近地磁测系统

A near-Earth magnetic surveying system based on rotor UAV technology

航天器环境工程. 2021, 38(5): 563–568 <https://doi.org/10.12126/see.2021.05.011>

复合相变热沉在电子设备热管理中的应用

Application of composite PCM in thermal management of electronic equipment

航天器环境工程. 2017, 34(2): 150–155 <https://doi.org/10.12126/see.2017.02.007>

海洋环境下载人航天器电子设备防护技术

Protection technology for electronic equipment used on manned spacecraft in coastal areas

航天器环境工程. 2017, 34(3): 330–335 <https://doi.org/10.12126/see.2017.03.018>

用于航天电子设备的PMI泡沫夹层结构力学性能试验验证

Experimental verification of mechanical properties for PMI foam sandwich structure on aerospace electronic equipment

航天器环境工程. 2020, 37(1): 95–101 <https://doi.org/10.12126/see.2020.01.015>

密封舱常压热试验环境模拟技术

Environmental simulation technology for ambient pressure thermal test of sealed cabin

航天器环境工程. 2018, 35(4): 388–393 <https://doi.org/10.12126/see.2018.04.014>

无人机电子设备舱热环境仿真分析

周忆梦, 梁世哲, 赵创新, 史金辉
(成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 为满足无人机电子设备舱对舱内热环境的严苛要求, 文章采用了有限体积法求解温度场的控制方程。根据无人机电子设备舱的材料结构特点和边界条件, 应用 FLUENT 软件进行了设备舱的数值仿真分析; 在此基础上提出了搭建支架的散热方案并对舱内热环境进行了模拟。结果显示, 采用搭建支架的措施可使电子设备的表面温度降低 5 °C, 较好地改善了电子设备舱的散热情况。该研究可为航空航天领域电子设备舱的热设计提供参考。

关键词: 无人机; 电子设备舱; 数值模拟; 热仿真; 计算流体力学

中图分类号: V272

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)02-0144-07

DOI: [10.12126/see.2023049](https://doi.org/10.12126/see.2023049)

Thermal environment simulation analysis of UAV electronic equipment cabin

ZHOU Yimeng, LIANG Shizhe, ZHAO Chuangxin, SHI Jinhui
(Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: With a view to the strict thermal environmental requirements for electronic equipment cabin of unmanned aerial vehicle (UAV), the finite volume method was applied for solving the temperature governing equations in this paper. Considering the specific features of material structure and the boundary conditions for the UAV electronic equipment cabin, the numerical simulation analysis was conducted via FLUENT software. On this basis, a heat dissipation scheme of building a bracket as the support was proposed, and then the thermal environment inside the electronic equipment cabin was simulated. The results indicate that the surface temperature of the electronic equipment can be reduced by 4 °C with the use of the bracket. The proposed research may provide a reference for the thermal design of electronic equipment cabin in aerospace field.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); electronic equipment cabin; numerical simulation; thermal simulation; computational fluid dynamics

收稿日期: 2023-04-16; 修回日期: 2024-03-24

引用格式: 周忆梦, 梁世哲, 赵创新, 等. 无人机电子设备舱热环境仿真分析[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(2): 144-150
ZHOU Y M, LIANG S Z, ZHAO C X, et al. Thermal environment simulation analysis of UAV electronic equipment cabin[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(2): 144-150

0 引言

目前电子设备呈现微型化和集成化的发展趋势。在有限空间内, 电子设备集成度越高, 功耗越大, 导致空间内的热流密度也随之增大。而电子设备的工作可靠性受热环境影响很大。有研究表明, 电子元器件的温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其可靠性就会降低 50%, 这被称为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 法则^[1-3]。电子设备失效有 55% 是由于温度超过额定值引起的, 因此降低其工作温度, 即使是降低几 $^{\circ}\text{C}$ 也会使电子设备的可靠性有很大提升^[4-6]。

电子设备热失效问题在航空航天领域显得尤为突出, 因为其特殊的环境条件和苛刻的工作要求, 使得电子设备散热变得更加困难, 给电子设备舱的热环境设计带来挑战^[7-9]。对电子设备的热仿真和热分析能够比较真实地反映出设备工作时的热环境, 从而模拟自然对流换热, 确定特定工况下的电子设备温度分布^[10-12], 为工程设计提供理论支撑, 减少设计所耗费的成本, 提高产品设计的成功率^[13-15]。

目前对于电子设备的热分析、热设计及热测试方面的研究, 国外已经取得了许多理论和工程应用上的成果^[16-19], 而我国电子行业起步较晚, 相关研究比国外滞后, 大多集中在单一热源和密闭空间内的热分析, 对于多个复杂热源的热分析、热设计及热测试方面的技术需求重要且迫切^[20-23]。

本文针对某无人机高温天气地面滑跑阶段电子设备舱内环境超温问题, 在多个电子设备发热功率一定的条件下, 分析设备舱内部的热环境。利用 ICEM 软件生成计算网格, 采用 FLUENT 软件进行数值模拟计算, 通过对计算结果的分析, 探讨改善热环境的方法, 以期为用于航空航天领域的电子设备舱热设计提供参考。

1 计算模型

1.1 几何模型及边界条件

本文针对一种典型的无人机电子设备舱的热环境进行模拟。该设备舱舱体为复合材料, 舱内 8 个发热电子设备(编号分别为元件 1~8)的功率分别为 10、11、130、15、3、45、60 及 631 W。首先使用 CATIA 软件建立包含 8 个电子设备的设备舱三维模型, 然后输出、读入到 ICEM 软件中生成几

何模型, 如图 1 所示。其边界条件设置如下: 内部电子元件壁面为固壁边界条件, 同时每个元件内部根据发热量设置为体积内热源; 设备舱前后部取对称边界条件; 认为电子设备壳体涂黑漆, 为不透明体, 表面向内的发射率(internal emissivity)取 0.9; 根据无人机在地面滑跑阶段的速度, 计算出舱壁与外界空气对流换热系数在 $160\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 量级, 将其作为舱体外壁的对流换热条件。

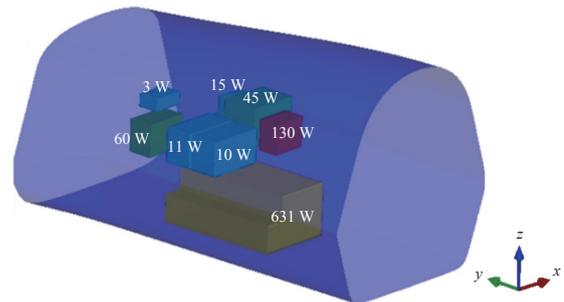


图 1 无人机电子设备舱几何模型

Fig. 1 Geometric model of the UAV electronic equipment cabin

1.2 计算网格及求解器设置

网格的类型、质量和数量对于计算结果的准确性有很大的影响。结构网格在附面层控制方面具有优势, 非常适用于流动和传热方的计算, 针对本文研究的构型, 其网格质量高于非结构网格, 对于提升计算精度有很大的帮助, 因此本文采用结构网格进行网格生成。应用 ICEM 软件对模型进行 BLOCK 划分、映射、节点调整和节点个数类型设置, 网格分区如图 2 所示; 同时, 对舱壁面、电子设备机箱壁面的边界层网格作加密化处理, 通过试算来控制壁面附近第一层节点的无量纲距离符合湍流模型需求。无人机电子舱的网格划分如图 3 所示, 网格独立性验证在下节阐述。

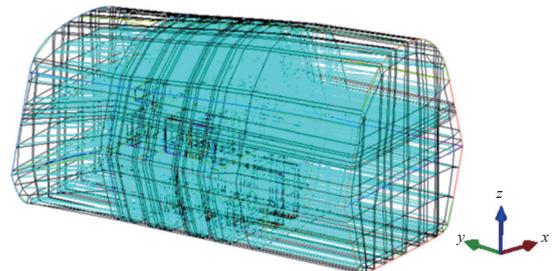


图 2 无人机电子设备舱的内部网格分区示意

Fig. 2 Schematic of the internal grid partition for the UAV electronic equipment cabin

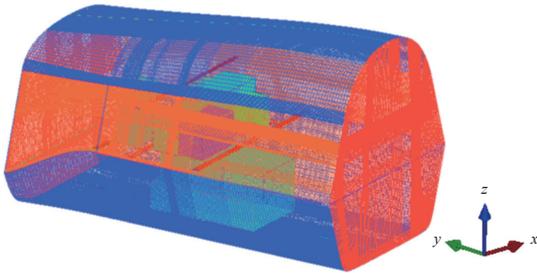


图 3 人机电子设备舱壁面网格示意

Fig. 3 Schematic of the grid for the UAV electronic equipment cabin wall

FLUENT 软件采用有限体积法对流体控制方程进行离散, 这种方法对于网格和复杂构型的适应性更强, 计算中采用 **Reliable $k-\varepsilon$** 湍流模型, 近壁区处理采用增强型壁面函数, 可以更好地适应近壁第一个节点无量纲距离的变化, 离散格式采用三阶 MUSCL 格式, 辐射采用 DO 方法。

流体介质是空气, 由于需要考虑自然对流, 故设置空气密度为 **incompressible-ideal-gas**, 空气的其他材料参数使用缺省值; 同时压力速度耦合采用 SIMPLE 算法, 并对压力选择 **Body Force Weighted** 方法, 湍流模型中激活 **Full Buoyancy Effects**。计算过程中首先采用一阶格式加快收敛速度, 然后换为三阶格式提高精度。

1.3 网格独立性验证

为了保证计算精度, 开展了网格独立性验证。采用 520 万、720 万和 960 万 3 种量级的网格数量, 计算条件为环境温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工况。

图 4 为不同数量网格下的 y 切面速度场分布, 可见, 3 种网格数量条件下的流场结构基本相似, 网格数量 720 万和 960 万的更为接近。

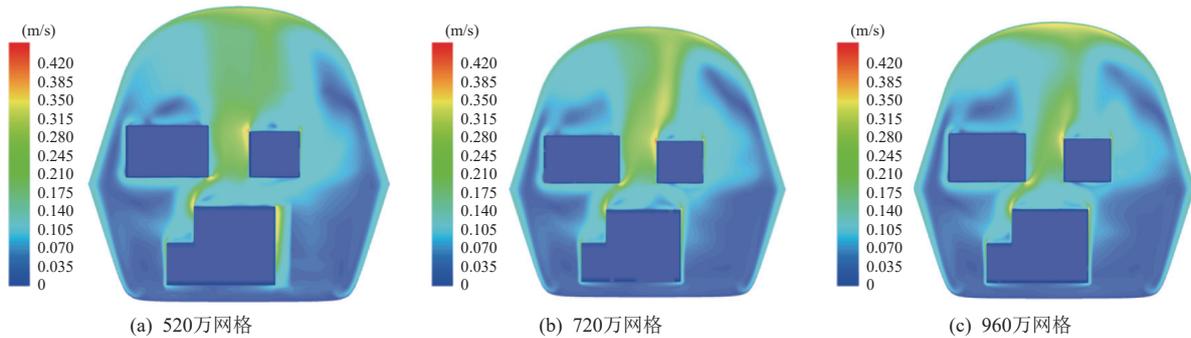
图 4 不同网格数量下无人机 y 切面速度场分布Fig. 4 Velocity field distributions on y -section of UAV with different numbers of grids

图 5 为 3 种网格数量格下 8 个电子元件的表面平均温度对比, 可见其差异非常小, 说明网格已经达到独立。由于后续需要进行热环境改善的研究, 为了更好地捕捉流场特征, 在加密边界层网格的前提下, 将网格节点数控制在 1000 万量级(其中原始构型网格数量 960 万, 考虑支架结构导热的构型网格数量 1200 万)。

2 计算结果和讨论

针对无人机高温天气地面滑跑阶段的环境温度, 仿真分析了设备舱外部空气温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下电子设备舱内空气流场分布, 以及舱内温度和电子设备表面温度分布。

2.1 外部温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况

2.1.1 速度场分布

外部温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时无人机电子设备舱内空气流速分布如图 6 所示, 可见: 舱内空气形成了明显的自然对流, 靠近 130 W 和 630 W 等发热功率较大的电子设备的舱壁面附近的气体流动速度较快, 最高接近 0.5 m/s , 而在远离发热设备的区域则流动速度较慢。这与温差导致空气密度变化、在重力作用下形成自然对流的物理成因比较符合。

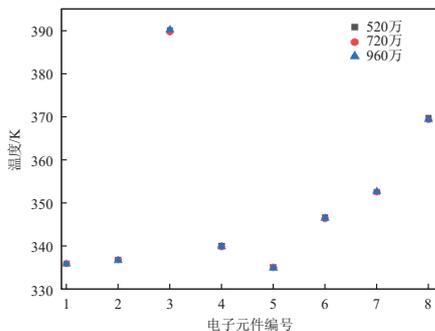


图 5 不同数量网格下电子元件表面平均温度对比

Fig. 5 Comparison of average temperatures of electronic component surfaces with different numbers of grids

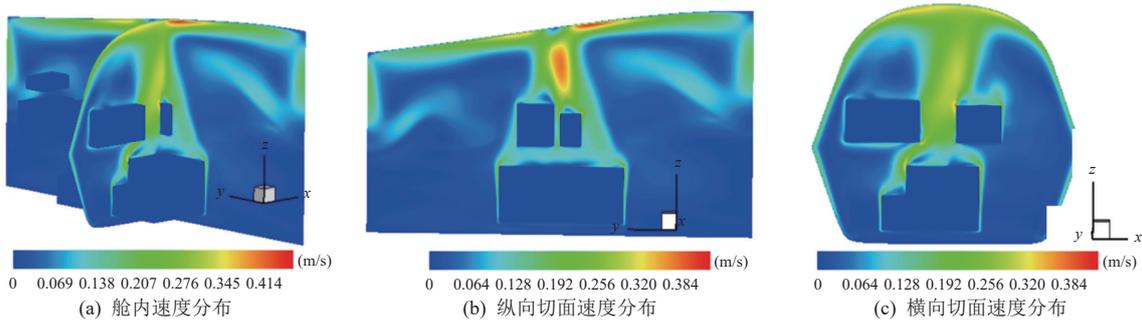


图 6 外部温度为 40 °C 时的电子设备舱内空气流速分布

Fig. 6 Air velocity distributions in the UAV electronic equipment cabin at an external temperature of 40 °C

2.1.2 温度场分布

在外部环境温度为 40 °C 的工况下,当舱内只存在自然对流和辐射换热时,舱内温度及电子设备表面温度分布如图 7 所示,可见:舱内温度在 60 °C 量级;电子设备的表面温度,最高的是元件 3(功率 130 W)的 118 °C 量级,其次是元件 8(功率 631 W)

的 100~103 °C,元件 7(功率 60 W)的约为 80 °C,其他的约为 60 °C。其中元件 8 虽然功率最大,但其散热面积也最大,因此其表面温度并非最高;同时,由于自然对流的作用,热空气上浮,使得上半部电子设备所处的热环境更为恶劣,因此后续分析中重点关注元件 3 的温度情况。

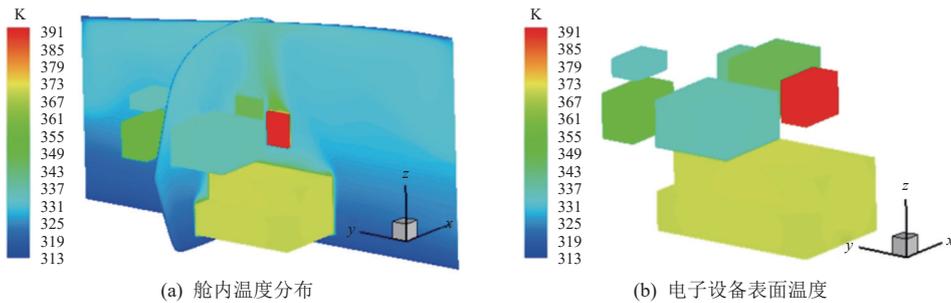


图 7 外部温度为 40 °C 时舱内温度及电子设备表面温度分布

Fig. 7 Temperature distributions inside the cabin and on the surfaces of electronic equipment at an external temperature of 40 °C

2.2 外部温度为 20 °C 和 30 °C 工况

2.2.1 速度场分布

外部温度为 20 °C 和 30 °C 时无人机电子设备舱内的空气流速分布如图 8 所示。对比图 6(a) 可

见,两者的速度场分布基本相同,但是 20 °C 和 30 °C 工况下的空气流速稍大。这是因为舱壁温度与电子设备的温差增大,所以形成的自然对流更强,比较符合实际情况。

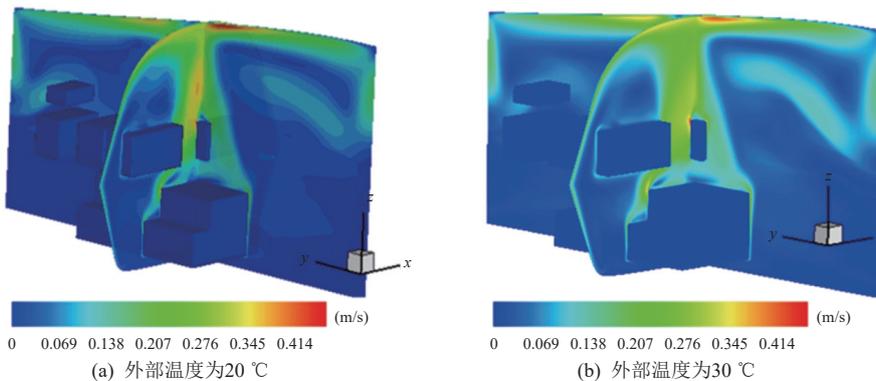


图 8 外部温度为 20 °C 和 30 °C 时电子设备舱内的空气流速分布

Fig. 8 Air velocity distributions in the UAV electronic equipment cabin at external temperatures of 20 °C and 30 °C

2.2.2 温度场分布

外部温度为 20 °C 和 30 °C 时舱内温度分布如

图 9 所示。外界自由温度的降低促进电子设备的散热,各个电子设备的表面温度都有所下降,其中温

度最高的依然是功率为 130 W 的元件 3。外部温度为 20 °C 时舱内温度在 40 °C 量级,元件 3 的表面

温度达到 102 °C;外部温度为 30 °C 时舱内温度在 52 °C 量级,元件 3 的表面温度达到 110 °C。

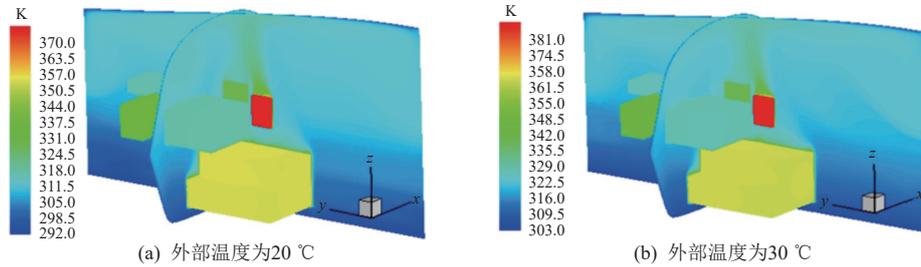


图 9 外部温度为 20 °C 和 30 °C 时电子设备舱内温度分布

Fig. 9 Temperature distributions in the UAV electronic equipment cabin at external temperatures of 20 °C and 30 °C

从以上 2 种工况下的仿真结果来看,舱内电子设备的温度过高,这会对其正常工作造成不利影响,而且也增大了电子设备的失效率,因此需要采取散热措施来改善热环境。在接下来的散热方案中,将研究在 40 °C 工况下电子设备舱的散热情况,用最恶劣的环境状况来验证方案的可行性。

2.3 增加支架结构且外部温度为 40 °C 工况

目前无人机上配备的支架结构主要起固定和支撑作用,并未进行支架导热相关设计,连接面处的接触热阻较大,但是考虑到支架结构也可以起到热桥作用,因此在不增加主动冷却设备的原则下,进行了一种简化支架条件的计算,来评估支架的热桥作用对热环境改善的影响:如图 10 所示,主支架宽度为 50 mm,与电子设备接触的支架宽度为 15 mm,支架厚度为 2 mm,支架材料为钢,支架与蒙皮相连,计算中考虑忽略连接面热阻的理想情况。

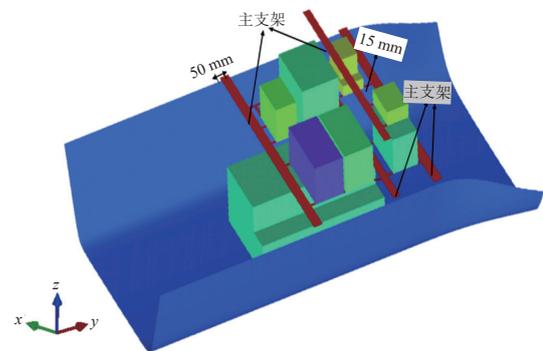


图 10 考虑简化支架的中部电子设备舱几何图

Fig. 10 Geometry diagram of the central electronic equipment cabin with the simplified bracket

2.3.1 速度场分布

增加支架结构,外部温度为 40 °C 时电子设备舱内空气速度场分布如图 11 所示。与图 6 的不加支架时的速度场相比较,二者基本相同;增加支架后电子设备舱内形成了自然对流,空气最大流速在 0.3~0.5 m/s 量级。

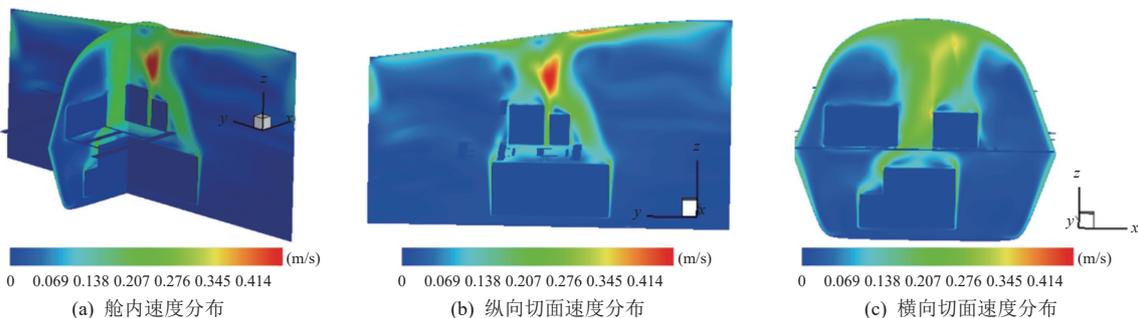


图 11 外部温度为 40 °C 时的电子设备舱内空气流速分布(增加支架)

Fig. 11 Air velocity distributions in the UAV electronic equipment cabin at an external temperature of 40 °C with the bracket

2.3.2 温度场分布

考虑支架结构的热桥作用后,外部温度为 40 °C 时电子设备舱内温度场分布如图 12 所示。与不增加支架的温度场(图 7)相比,增加支架结构后舱内

温度为 58 °C,元件 3(130 W)的表面温度为 113 °C,较无支架情况下的温度下降了 5 °C,舱内温度在 60 °C,说明增加支架结构的导热通路取得了一定的强化散热作用。

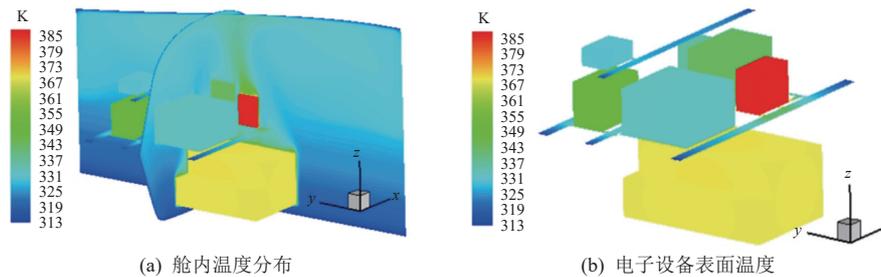


图 12 外部温度为 40 °C 时的舱内温度分布及电子设备表面温度分布(增加支架)

Fig. 12 Temperature distribution inside the cabin and on the surfaces of electronic equipment at an external temperature of 40 °C with the bracket

支架的热桥作用虽然不能使得舱内空气温度量级明显降低,但是电子设备支架一方面增加了设备表面的散热面积,另一方面起到了热量重新分配的作用,降低高温电子设备的温度。一般来说,若配备主动冷却热备对于舱内热环境改善会有更为明显的效果,但是由于超温现象主要出现在无人机地面滑跑阶段,增加相关设备将提升系统复杂度,而在原电子设备支架结构设计中充分引入热桥作用可以简化系统组成。

3 结论

本文针对某无人机地面滑跑阶段电子设备超温问题,建立了电子设备舱热环境分析计算模型,采用数值模拟方法评估了电子设备舱在不同外界温度下的热环境特性,结论如下:

1)不考虑支架结构时,在 40 °C 高温工况下,电子设备舱内环境温度较高,达到了 60 °C,而电子设备壳体表面温度最高可达 118 °C。

2)不考虑支架结构时,外界环境温度的降低能够增加舱内空气的自然对流,使舱内温度降低。

3)目前的支架结构配置主要起到支撑和固定作用,设备表面与支架的接触面较小,同时支架的热通路也较为复杂。对简化后支架结构的计算结果表明,支架结构的存可在使电子设备表面温度降低 5 °C 左右,起到了强化散热的作用。实际工程设计中,通过减小连接面接触热阻、增加设备表面与支架接触面积以及缩短导热通路等方式,预期能够进一步降低电子设备表面的温度,可为航空航天领域电子设备热设计提供一种新的思路和方法。

参考文献 (References)

[1] 于慈远,于湘珍,杨为民. 电子设备热分析/热设计/热测试技术初步研究[J]. 微电子学, 2000, 5: 12-38

YU C Y, YU X Z, YANG W M. Preliminary study of heat analysis/thermal design/thermal testing technology of electronic equipment[J]. *Microelectronics*, 2000, 5: 12-38

[2] POOLEY A, GAO M, SHARMA A, et al. Analysis of UAV thermal soaring via hawk-inspired swarm interaction[J]. *Biomimetics*, 2023, 8: 124

[3] 彭扬林, 马爱军, 刘洪英, 等. 某航天电子设备热分析及改进电子设计工程[J]. 电子设计工程, 2022, 30(18): 52-57

PENG Y L, MA A J, LIU H Y, et al. Thermal analysis and improvement of a certain aerospace electronic equipment[J]. *Electronic Design Engineering*, 2022, 30(18): 52-57

[4] TUNCA E, KOKSAL E, ÇETIN T. Calibrating UAV thermal sensors using machine learning methods for improved accuracy in agricultural applications[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2023, 133: 104804

[5] 刘卫明, 刘梦恒. 电力电子器件的热失效及其管理研究[J]. 电子技术, 2018, 47(12): 30-33

LIU W M, LIU M H. Thermal failure and management of power electronic devices[J]. *Electronic Technology*, 2018, 47(12): 30-33

[6] 王辉, 赵兴杰, 藺虎相, 等. 电子设备封闭腔内自然对流冷却效果数值分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 214-221

WANG Y, ZHAO X J, LIN H X, et al. Numerical analysis of natural convection cooling effect in closed cavity of electronic equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 214-221

[7] 孙宇. 大型无人机整体热环境三维动态仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 11-15

[8] 曾声奎, 赵廷弟, 张建国, 等. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 183-185

[9] 范含林. 空间环境对航天器热设计影响分析[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(3): 220-223

FAN H L. Influence of space environment on the thermal design of spacecraft[J]. *Spacecraft Environment*

- Engineering, 2008, 25(3): 220-223
- [10] 朱红钧. FLUENT15.0 流场分析实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 4-11; 110-112
- [11] 刘应中, 缪国平. 高等流体力学[M]. 2版. 上海: 上海交通大学出版社, 2001: 58-67
- [12] 特里顿 D J. 物理流体力学[M]. 董务民, 张志新, 李钦庆, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 41-53
- [13] 张皓, 曹志松, 陈金明, 等. 航天器真空热试验数据可视化系统设计与实现[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(5): 499-503
ZHANG H, CAO Z S, CHEN J M, et al. Design and implementation of data visual system in spacecraft vacuum thermal test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(5): 499-503
- [14] WATARU N. Thermal analysis of electronic equipment: from systems to components[J]. [Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging](#), 2001, 4(5): 392-397
- [15] CHEN Q G, XU Z, ZHANG Y J. Application of two versions of a RNG based $k-\varepsilon$ model to numerical simulation of turbulent imping jet flow[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B. 2), 2003, 2: 71-76
- [16] KOREI Z, BENISSAAD S, CHAMKHA A, et al. Thermohydraulic and second law analyses during the cooling of an electronic device mounted in an open cavity equipped with magnetic nanofluid, magnetic field inducer, and porous media: a two-phase numerical investigation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022(139): 106497
- [17] RAGHUPATHY A P. Boundary-condition-independent reduced-order modeling for thermal analysis of complex electronics packages[D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2009
- [18] ZHOU L, PARHIZI M, JAIN A. Analytical solution for temperature distribution in a multilayer body with spatially varying convective heat transfer boundary conditions on both ends[J]. Journal of Heat Transfer: Transactions of the ASME, 2021(3): 143
- [19] FUNK J, MENGUC M, TAGAVE K, et al. A semi-analytical method to predict printed circuit board package temperatures[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufact Technology, 1992, 15(5): 675-684
- [20] WANG Y, LI J W, ZHONG S. Analysis on the innovation efficiency of China's electronic and communication equipment industry[J]. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2022(15): 111-121
- [21] LIU D G, PHANILATHA V, ZHANG Q J, et al. Asymptotic thermal analysis of electronic packages and printed-circuit boards[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology: Part A, 1995, 18(4): 781-787
- [22] 南江红, 师雪丽, 石同武, 等. 空间站空空支架天线热设计与仿真分析[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(6): 625-631
NAN J H, SHI X L, SHI T W, et al. Thermal design and simulation analysis of space frame antenna used on China's space station[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(6): 625-631
- [23] 王晨阳, 赵铭. 基于热分析技术的通航典型飞机电子设备维修方法研究[J]. 科技创新与应用, 2019(4): 132-133
WANG C Y, ZHAO M. Research on maintenance methods of typical aviation electronic equipment based on thermal analysis technology[J]. Technology Innovation and Application, 2019(4): 132-133

(编辑: 王 洋)