

# 机载电子散热设备气流分布均匀性研究



范涛峰,任童,彭孝天,冯诗愚\*

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,江苏 南京 210016

**摘要:**长流程的散热设备经常会出现流量分配不均匀的问题,导致散热设备各处的冷却效果产生较大差异。利用计算流体力学(CFD)对一个采用孔板送风的机载电子散热设备进行了模拟,分析了不同孔径、开孔数及流量对出口均匀度的影响。结果显示开孔数对均匀度的影响大于孔径,流量改变对均匀度影响不大。对长流程孔板形式出口的散热设备设计具有一定的指导作用。

**关键词:**机载电子设备;均匀度;孔板;数值模拟

中图分类号:V221

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.08.007

随着民用飞行技术的发展,机载电子设备的数量和种类不断增加。高温失效是机载电子设备的主要失效形式,试验表明在70~80°C的水平上,温度每上升1°C,器件可靠性下降5%<sup>[1-2]</sup>。机载电子设备的发展出现小型化、高性能的发展趋势,电子设备对于散热的要求越来越高,常见的有液冷、风冷和蒸发循环等几种方式,其中蒸发循环大多用于对雷达等高能耗设备散热,目前使用并不普遍<sup>[3-4]</sup>。

受工作环境限制,液体冷却通常需配备复杂系统,且飞机加速度及倾斜角度改变均会影响稳定性<sup>[5]</sup>,因此并未得到广泛应用。风冷仍是机载电子设备使用最多的散热方式,其可分为自然对流和强迫对流两种,后者更为常用。随着电子设备热负荷进一步增加,可根据电子设备实际外形设计散热设备提高装置散热性能<sup>[6]</sup>。

通过试验方法来测试不同出口形式的散热设备的性能虽然直观可靠,但也会带来周期长、成本高的问题,在试验前使用计算流体力学(CFD)技术可克服上述不足。利用CFD方法对机载电子设备散热的研究很多,刘晓红等利用CFD技术分析了导冷板厚度对于密闭机箱散热性能的影响<sup>[7]</sup>;赵亮等研究了一种应用泡沫金属新材料的换热器<sup>[8]</sup>;李艳娜分析了散热器分布位置的不同对散热性能的影响<sup>[9]</sup>。这些研究涵盖了散热器结构、位置和材料,但长流程

散热设备经常会出现流量分布不均匀的问题,这会导致散热设备各处的冷却效果产生较大差异<sup>[10]</sup>。

此外,上述研究未涉及气流分布均匀程度对散热效果的影响。朱恒义等利用CFD技术分析了密闭机箱不同位置风道的流量<sup>[11]</sup>,并结合流量分配了合理的热负荷;刘巍等研究了不同通风口形状对散热性能的影响,这两者的研究对象均为风道,未考虑出口形式为孔板这种情况<sup>[12]</sup>。

本文对一个采用孔板出风口的民用飞机机载电子设施散热设备进行了CFD仿真,定义了一个均匀度参数,模拟了不同开孔数目、孔径、进口流量下各个出口流量分布的均匀性。

## 1 物理模型介绍与简化

研究对象为位于某民用飞机前部与中部设备舱内的E-E舱设备架,主要电子设备安装在设备架上,设备架内的通风系统对安装在设备架上的电子设备进行通风冷却,共有6个冷却单元。设备鼓风路径如图1所示,设备架风冷系统分为鼓风系统和排风系统两部分。每个设备架有一个鼓风接口,鼓风接口与电子设备通风系统的鼓风管道相连,冷却空气通过设备架鼓风接头进入设备架侧部的风腔,再由风腔进入设备架每一层的鼓风风道,再流过流量调节孔板冷却电子设备。冷却后的热空气通过设备顶部散热孔进入排

收稿日期:2020-02-18;退修日期:2020-03-20;录用日期:2020-04-29

基金项目: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

\*通信作者.Tel.: 025-84892153 E-mail: shiyuf@nuaa.edu.cn

引用格式: Fan Taofeng, Ren Tong, Peng Xiaotian, et al. Study on air distribution uniformity of airborne electronic cooling equipment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(08): 42-47. 范涛峰,任童,彭孝天,等. 机载电子散热设备气流分布均匀性研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(08): 42-47.

风风道,由排风管道流出。整个设备的计算量太大,本文选取图2红色框内的鼓风机进口单元为研究对象。

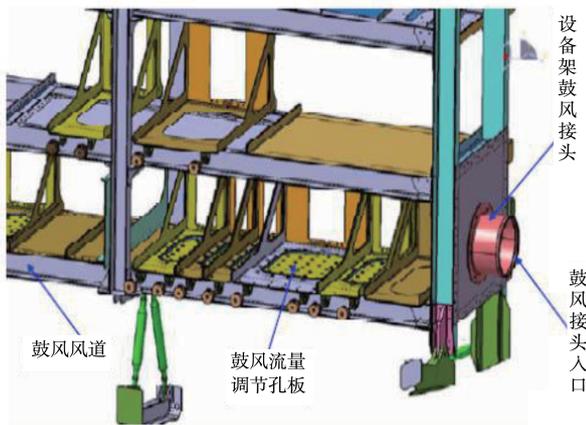


图1 电子设备冷却设备架

Fig.1 Electronic equipment cooling equipment rack

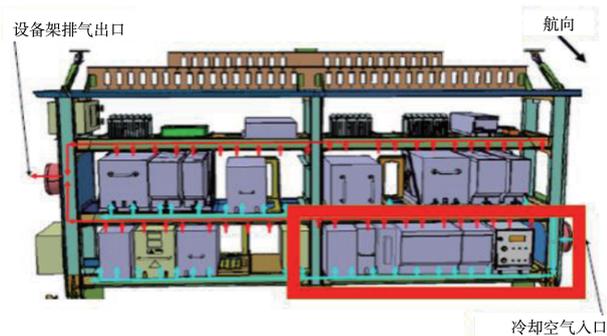


图2 鼓风机进口单元

Fig.2 Blower inlet unit

气流从左侧的矩形入口流入,经过空腔由三个多孔板流出。简化主要包括了以下三个部分的内容。

### (1) 鼓风机进口的简化

由图1可见,鼓风机进口横截面为圆形,实际工作中空气从鼓风机进口流入,经矩形通道转弯由多孔板流出,所以进口形状对于多孔板的气流分配的影响不大。通常划分网格时需利用多边形拟合几何模型,若将进口设置为圆形会增加网格数目,降低计算效率,故简化为矩形进口。

### (2) 通风路径的简化

为了缩短计算时间,未考虑上部热空气流动,仅考虑冷空气在多孔板的分布,省略了对计算影响不大的结构。腔体壁度为2mm,与实际设备保持一致。

### (3) 多孔板的简化

由于多孔板的孔的数目较多,且排列有序,样式统一。若一个个画出会增加网格数目。可将多孔板设置为多孔介质,利用FLUENT中的多孔介质模型解决。

## 2 计算方法与仿真模型的建立

多孔模型的原理为将固体区域以阻力形式添加在流动方程中,相当于在流动方程中增加一个源项<sup>[13]</sup>。流动阻力主要由黏性阻力和惯性阻力两部分组成,阻力由孔径、开孔数、开孔率这三个因素确定。惯性阻力系数、黏性阻力系数与孔隙率、开孔直径的关系由以下两个公式给出:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^2} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^2} \quad (2)$$

式中:  $1/\alpha$  为黏性阻力系数;  $C_2$  为惯性阻力系数;  $\varepsilon$  为开孔率。

求解孔板固体区域的等效半径  $R_p$  的关系式为:

$$nV_2 = V - nV_1 = \frac{4}{3}n\pi R_p^3 \quad (3)$$

式中:  $n$  为开孔数;  $R_p$  为等效半径;  $V$  为总体积;  $V_1$  为开孔体积;  $V_2$  为固体体积。

采用ICEM软件进行网格划分,各部分均采用六面体网格,如图3所示。考虑到边界层内流动变化剧烈,为能获得更好的模拟结果,在固体壁面附近及多孔区域内对网格进行了加密处理,检查网格质量在0.7以上。

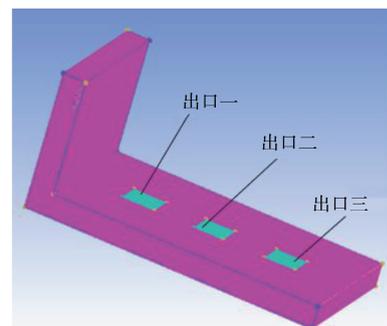


图3 网格划分

Fig.3 Meshing

采用FLUENT 15.0有限体积法求解,假设空气为不可压缩流体,选择基于压力的压力耦合方程组的半隐式算法(SIMPLE),使用交错压力格式对压力项进行离散。能量和动量采用二阶精度迎风格式离散。进口边界为速度边界,出口为自由流,其他区域为wall。将多孔区域设置为流体域, $x$ 与 $y$ 方向上的惯性与黏性阻力系数扩大为 $z$ 方向上的三个数量级,这样可认为在 $x$ 和 $y$ 方向上无流体流动<sup>[14]</sup>。动量方程残差收敛的标准设置为 $1 \times 10^{-2}$ ,其他方程收敛标准为 $1 \times 10^{-3}$ ,同时调小松弛因子直到能够收敛。

选择50万、100万和200万三套网格计算,观察不同网格数下气体流速。在孔径为2.5mm、开孔数为9的情况下,

网格数目为50万时,流体域内的最大流速为71m/s,网格数目为100万时,流体域内的最大流速为70.8m/s,与网格数目为200万保持一致。考虑到计算的准确性与计算效率,选择100万的网格进行计算。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 孔径的影响

图4为开孔数为9个,三组孔径分别为2.5mm、5mm和7.5mm时的气流速度分布云图。从图中可见,孔径为2.5mm时,流体域内流动的最大速度为73.6m/s,出口流速随着离进口距离的增加而降低。随着孔径的进一步扩大,流动的最大速度没有明显变化。

为进一步分析孔径变化对于流量分配均匀程度的影响,定义各出口的平均速度与三个出口的平均速度比值为该出口的均匀度,即:

$$\eta_i = \frac{\bar{u}_i}{\frac{\sum_{i=1}^3 \bar{u}_i}{3}} \quad (4)$$

把离进口最近的孔板出口命名为出口一,把离进口最近的孔板出口命名为出口三,如图3所示。从图5可以看出,出口三的平均程度受孔径变化的影响最大,出口一的均匀程度受孔板的影响最小,出口二的均匀度在1附近波动。当孔径为5mm时,三个出口的均匀度最接近1,孔板流量分配最均匀。当出口孔径较大,气体大量从出口一流出,则后部流出的流体较少,影响了整体均匀度。当出口孔径较小时,流体无法及时从离进口较近的出口流出,积压在后部出口,也影响了整体均匀度。

#### 3.2 孔数的影响

在孔径为2.5mm时,设置三组。图6为孔径为2.5mm时,开孔数目分别为12、16和25个时气流速度分布云图。从图中可见,在开孔数目为12个时,气流最大速度为69.6m/s,出口流速离进口距离增加而降低,且变化较为剧烈。从图7可看出,开孔数目的变化对三个出口均匀度的影响要大于开孔孔径对均匀度的影响。这是因为开孔数目相比孔径对于有效出口面积的影响更大。此外还可以发现,孔数为12个时的均匀程度最差,孔数为16个时,出口一、出口三的平均程度接近孔数为12个时,但出口二的均匀程度有所上升。孔数为25个时,出口二的均匀程度较好,但出口一、出口三的平均程度有所偏移。显然,孔数为16和25个时均匀度相近,均优于孔数为12个。

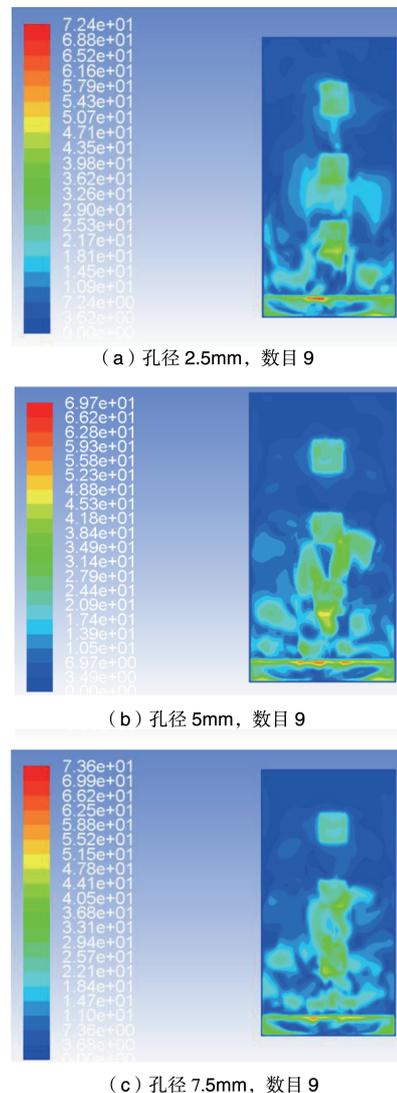


图4 不同孔径下孔板出口速度分布云图

Fig. 4 Cloud diagram of outlet velocity distribution of orifice plate with different apertures

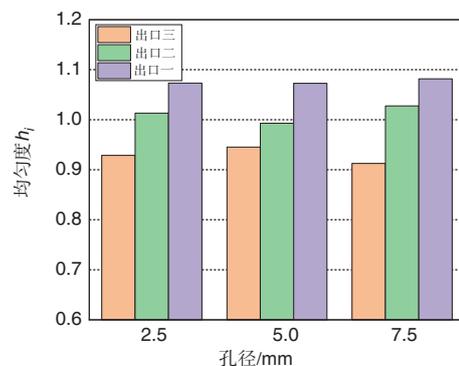


图5 孔径变化对气流均匀度的影响

Fig. 5 Effect of hole diameters on airflow uniformity

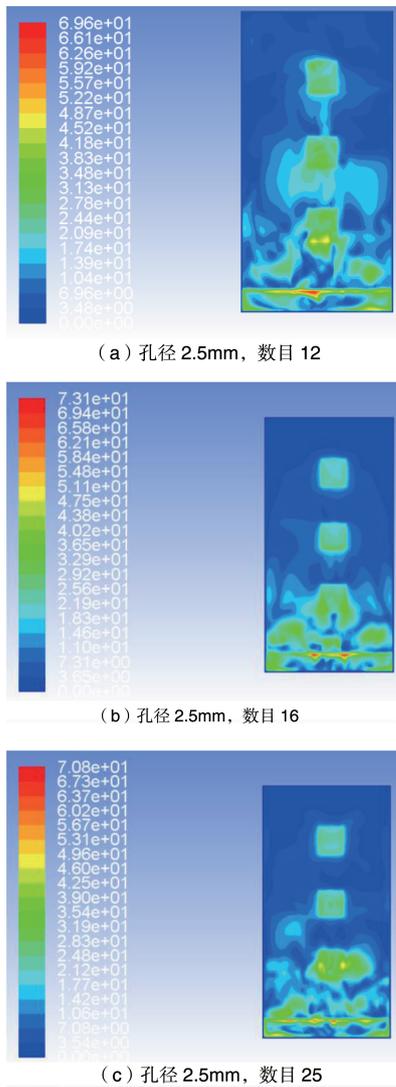


图 6 不同孔数下孔板出口速度分布云图

Fig.6 Cloud diagram of outlet velocity distribution at different orifice numbers

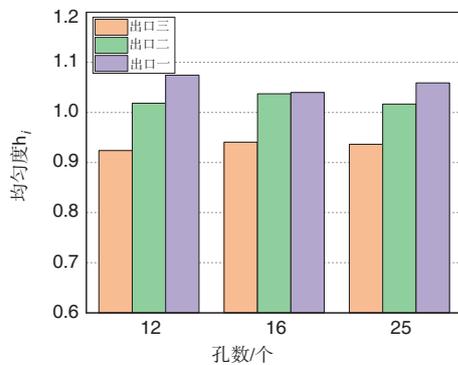


图 7 孔数变化对气流均匀度的影响

Fig.7 Effect of hole number change on airflow uniformity

### 3.3 流量的影响

图 8 给出了孔径 2.5mm、开孔数为 25 的条件下,进口流速分别为 30m/s、50m/s 和 70m/s 时的气流速度分布云图。从图 9 可以看出,相较于孔数以及孔径,流速对于三个出口均匀度的变化并不明显。进口流速为 30m/s 时,三个出口的均匀度最接近 1,其余流速下均匀度没有明显差异。

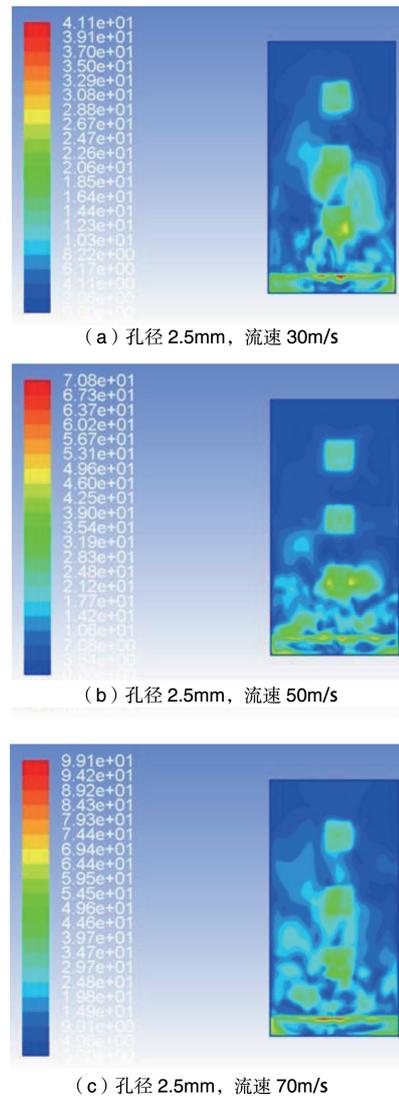


图 8 不同流速下孔板出口速度分布云图

Fig.8 Cloud diagram of outlet velocity distribution at different flow rates

### 4 结论

长流程的机载电子散热设备各个出口的均匀程度对其冷却性能有重要影响,为了提高出口的均匀程度,本文通过 CFD 方法对一个孔板出口的机载电子散热设备进行了模拟,讨论了不同开孔数目、不同开孔半径下的均匀度,可以

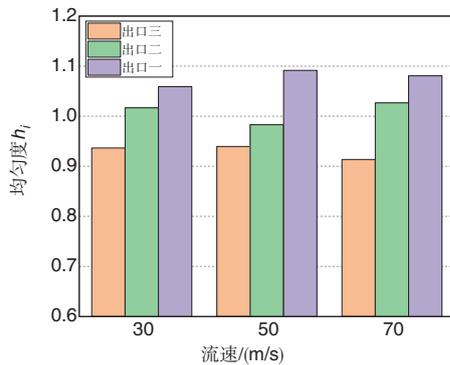


图9 流速变化对气流均匀度的影响

Fig.9 Effect of flow change on airflow uniformity

得到以下结论:

- (1) 开孔数目改变对于气流均匀度影响最大,进口流速对于气流均匀程度的影响最小。
- (2) 开孔数目会影响气流出口的均匀程度。孔径2.5mm时,开孔数目为16的出口均匀度最接近1。
- (3) 孔径与均匀度同样不是线性关系。开孔数目为9时,孔径5mm时出口均匀度最接近1。

AST

## 参考文献

- [1] 张娅妮,陈菲尔,田泮. 机载电子设备冷却散热技术的发展[J]. 航空计算技术, 2012, 42(4): 113-116.  
Zhang Yani, Chen Feier, Tian Yan. Development of cooling and cooling technology for airborne electronic equipment [J]. Aviation Computing Technology, 2012, 42 (4): 113-116. (in Chinese)
- [2] 诸葛卉. 军用直升机航空电子系统现状及发展展望[J]. 航空科学技术, 2006, 17(5): 25-28.  
Zhu Gehui. Status and expectation on aviation electronic system of military helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2006, 17(5):25-28. (in Chinese)
- [3] 殷超,罗志会. 美国远程轰炸机环境控制系统的设计要求分析[J]. 航空科学技术, 2019, 30(8): 1-6.  
Yin Chao, Luo Zhihui. Design requirements analysis of america bomber environmental control system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(8): 1-6. (in Chinese)
- [4] 周月,张鹤林. 电环控系统优化仿真分析[J]. 航空科学技术, 2019, 28(6): 56-61.  
Zhou Yue, Zhang Helin. Optimization and simulation analysis of electric environmental control system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 28(6): 56-61. (in Chinese)
- [5] 吕永超,杨双根. 电子设备热分析、热设计及热测试技术综述及最新进展[J]. 电子机械工程, 2007, 23 (1): 8-13.  
Lyu Yongchao, Yang Shuanggen. Review and latest progress of thermal analysis, thermal design and thermal testing technology for electronic equipment [J]. Electromechanical Engineering, 2007, 23 (1): 8-13. (in Chinese)
- [6] Bergles A E. Evolution of cooling technology for electrical, electronic, and microelectronic equipment[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(1): 6-15.
- [7] 刘晓红. 某机载雷达密闭式机箱的热设计[J]. 电子机械工程, 2016, 32(6): 14-17.  
Liu Xiaohong. Thermal design of a closed enclosure for an airborne radar [J]. Electromechanical Engineering, 2016, 32 (6): 14-17. (in Chinese)
- [8] 赵亮,田泮,杨明明,等. 机载电子设备泡沫金属换热器研究[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(1): 48-49.  
Zhao Liang, Tian Yan, Yang Mingming, et al. Research on foam metal heat exchanger for airborne electronic equipment [J]. Mechanical Research and Application, 2016, 29 (1): 48-49. (in Chinese)
- [9] 李艳娜. 特种飞机电子设备蒙皮散热技术仿真设计研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2014.  
Li Yanna. Simulation design of skin cooling technology for special aircraft electronics [D]. Beijing: Beihang University, 2014. (in Chinese)
- [10] Bo Chen. Thermal design, analysis and experimental verification of a satellite borne electronic equipment[J]. Advanced Materials Research, 2013, 07(23): 84-87.
- [11] 朱恒义,关学刚. 某机载密封风冷机箱散热设计[J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(2): 116-118.  
Zhu Hengyi, Guan Xuegang. Heat dissipation design of an airborne sealed air-cooled chassis [J]. Ship Electronic Countermeasures, 2019, 42 (2): 116-118. (in Chinese)
- [12] 刘巍,张先锋,关宏山. 雷达电子设备通风口结构对风机性能的影响[J]. 电子机械工程, 2015, 31(4): 9-11.  
Liu Wei, Zhang Xianfeng, Guan Hongshan. Effect of intake structure of radar electronic equipment on fan performance[J]. Electromechanical Engineering, 2015, 31(4): 9-11. (in Chinese)
- [13] 李明东. 利用CFD数值仿真技术确定电子设备风道特性[J].

安全与电磁兼容,2002(3):16-18.

Li Mingdong. Using CFD numerical simulation technology to determine the air duct characteristics of electronic equipment [J]. Safety and Electromagnetic Compatibility, 2002 (3): 16-18. (in Chinese)

- [14] Masaru I, Tomoyuki H, Risako K. A thermal design approach for natural air cooled electronic equipment casings[C]// 2013 8th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). Taipei: IEEE, 2013:325-338. (责任编辑 陈东晓)

### 作者简介

范涛峰(1980-)男,硕士,助理研究员。主要研究方向:飞行器环境控制、流体力学、传热与传质等方面的试验研究。

Tel:025-84892153

E-mail: fantaofeng@nuaa.edu.cn

冯诗愚(19740-)男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器环境控制、飞行器燃油系统、传热与传质等方面的理论与试验研究。

Tel:025-84892105

E-mail: shiyuf@nuaa.edu.cn

## Study on Air Distribution Uniformity of Airborne Electronic Cooling Equipment

Fan Taofeng\*, Ren Tong, Peng Xiaotian, Feng Shiyu

*Key Laboratory of Aircraft Environmental Control and Life Support Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

**Abstract:** Non-uniform flow distribution often occurs in long-flow cooling equipment, which causes large differences in the cooling effect of cooling equipment. A computational fluid dynamics (CFD) simulation was performed on an airborne electronic heat dissipation device using orifice air supply, and the effects of different apertures, opening numbers, and flow rates on outlet uniformity were analyzed. The results show that the number of openings has a greater effect on the uniformity than the diameter of the holes, and the change in flow rate has little effect on the uniformity. It has a certain guiding role in the design of the heat dissipation equipment of the long-flow orifice plate outlet.

**Key Words:** airborne electronic equipment; uniformity; orifice plate; numerical simulation

**Received:** 2020-02-18; **Revised:** 2020-03-20; **Accepted:** 2020-04-29

**Foundation item:** The Fundamental Research Funds for the Central Universities; The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

\*Corresponding author. Tel. : 025-84892105 E-mail: shiyuf@nuaa.edu.cn