

某电子方舱舱内热环境的模拟研究

张梦龙，蒋敏，黄永

(中国人民解放军 91913 部队，辽宁 大连 116041)

摘要：目的 以某电子方舱为研究对象，分析在现有结构条件下，空调所提供的冷量能否满足舱内电子设备正常工作要求和人员舒适要求。**方法** 分析和研究舱内的传热问题，采用 FLUENT 软件，并结合 $\kappa-\varepsilon$ 两方程紊流模型与 SIMPLE 算法对方舱内的热环境进行三维数值模拟。**结果** 在保证空调送风温度和速度不变的前提下，送风角度分别为 30° 和 0° 时，都能基本保证电子设备正常工作要求和舒适性要求。当送风角度为 30° 时，方舱降温效果较好。**结论** 通过分析得到方舱制冷系统设计的不足之处，并提出了改进制冷系统冷气通路的方法，对今后方舱的制冷系统设计改进具有指导意义。

关键词：电子方舱；传热；送风角度；数值模拟

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2018.04.002

中图分类号：TJ85；V216 **文献标识码：**A

文章编号：1672-9242(2018)04-0005-05

Simulation Study of Thermal Environment in an Electronic Shelter

ZHANG Meng-long, JIANG Min, HUANG Yong
(The 91913 Unit of PLA, Dalian 116041, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze whether the cooling capacity provided by air conditioner under existing structure conditions meet requirements on normal working of electronic equipment and personnel comfort in the shelter. **Methods** Heat transfer in the shelter was analyzed and researched. Based on FLUENT software, and in combination with $\kappa-\varepsilon$ two equation turbulence model and SIMPLE algorithm, a simulation of thermal environment in the shelter was established. **Results** If the temperature and speed of supply air were kept unchanged, the thermal environment in the shelter could meet the heat dissipation requirements of electronic devices and the comfort for operators with the blow angle 30° and 0° , but the effect is better with the blow angle 30° . **Conclusion** Shortages in design of refrigerating system for shelter can be obtained by analysis and the methods for improvement of the refrigerating system are proposed. It is important for the design and improvement of the shelter in the future.

KEY WORDS: electronic shelter; heat transfer; blow angle; numerical simulation

随着电子科技的不断发展，车载雷达方舱已经成为战场上指挥控制的关键。雷达方舱一直处于露天环境中，夏天高温暴晒下，通过对流传热，热辐射等方式，使方舱有限的空间内迅速升温。另外方舱内集成了大量高功率的电子设备，工作中也会产生较高的热量。一方面电子设备在高温工作环境下工作，会使电子设备的温度急剧上升，从而直接导致电子设备故障或者系统崩溃；另一方面高温环境影响操作人员的舒

适性，从而影响任务的执行效率^[1-2]。为了保证方舱内设备的正常工作和操作人员的战斗力，必须对方舱内进行必要的降温措施，但是对于集聚大量高功率电子设备的方舱却存在着解决散热困难的问题^[3-4]。随着计算机技术的发展，数值模拟技术被广泛应用于工程实际中^[5]。文中结合 CFD 软件 FLUENT 对某雷达方舱内进行了建模及数值模拟^[6]，分析舱内的速度场及温度场，以及舱内环境是否满足电子设备的散热条

件及人员舒适度要求,为以后方舱制冷系统的改进提供有力依据。

1 数学模型

1.1 传热分析

传热模型主要有热传导、对流换热以及辐射换热三种类型^[7]。方舱受到太阳辐射等影响通过舱壁使舱内温度升高,而工作的电子设备、灯等设备通过对流换热,散热到舱内,也导致舱内温度升高,大大降低了设备的可靠性和人员舒适性。因此采用空调的制冷给方舱降温,通过冷气和热流的有效交换,达到调节舱内温度的目的,从而使电子设备和操作人员处于一个良好的工作环境中,提高工作效率。

电子器件之间传热、机柜壁面内外部之间传热、方舱内外部温差引起的热量传递以及其他物体直接接触的热传递均是通过热传导形式实现。热传导方程为:

$$q = \frac{\phi}{A} = -\lambda \frac{\delta_t}{\delta_n} \bar{n} \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数, W/(m·K); A 为垂直于导热方形的截面面积, m²; δ_t / δ_n 为温度梯度矢量, W/m; ϕ 为热流量, W; q 为热流密度, W/m²。

方舱电子设备的强制风冷、机柜内外部的对流换热、以及其他由于空气流过固定表面因温度不同所产生的热量交换均是通过对流换热方式实现的。对流换热可根据牛顿冷却公式计算:

$$q = \frac{\phi}{A} h \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中: h 为对流换热系数; A 为对流换热面积, m²; ΔT 为固体壁面温度与流体温度差的绝对值, K。

方舱内部辐射换热包括各设备之间由于温度不同引起的辐射换热。辐射热量可采用斯蒂芬-玻尔兹曼定律的修正形式:

$$q = \frac{\phi}{A} = \varepsilon \sigma_b T^4 \quad (3)$$

式中: ε 为辐射黑度或发射率, 指物体的辐射能力与同温度黑体的辐射能力之比, 其值小于 1, 且与物体的种类、温度及表面状况等有关^[8-9]; σ_b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 通常取 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴); T 为物体绝对温度, K。

1.2 假设

文中结合 FLUENT 软件对某型雷达方舱进行数值模拟,由于该次仿真的重点是舱内整体热环境的控制,主要是通过软件分析得到方舱人员活动区以及电子操作柜的热环境,因此对模型以及流场作出如下假设。

1) 空调简化为风扇。由于空调降温属于舱内气体内循环过程,况且空调本身就是很复杂的气体降温过程,因此将空调简化为风扇,将出风口设置为进口、空调吸气口为出口。通过给定进口温度和流量进行调节,从而实现舱内外循环降温的过程。

2) 电子设备简化成规则的长方体。可以给定电子设备的恒定功率,将其转化成均匀的平面热流量。

3) 舱内空气为不可压缩,流动为稳态湍流。

4) 舱内办公桌、沙发、书柜仅作为障碍物对待。

5) 不考虑舱内各传热表面的辐射影响及操作人员的散热影响。

2 计算模型

2.1 计算区域和网格

文中以某型雷达电子方舱为研究对象。如图 1 所示, 雷达方舱外形尺寸为: 5800 mm × 2100 mm × 1930 mm。方舱分为前后舱, 舱内主要结构为: 前舱包含指挥桌、材料柜、沙发表电源开关、三盏 LED 灯、两台壁挂空调以及四台机柜; 后舱包含两台机柜、两盏 LED 灯。其中舱内结构均根据实际情况布置, 电子设备均安装在机柜内。舱壁内外层为 1.2 mm 的防锈铝板, 中间为阻燃性的聚胺酯泡沫芯材, 密度为 60 ± 5 kg/m³, 舱壁的传热系数为 1.5 W/(m²·K)^[10]。

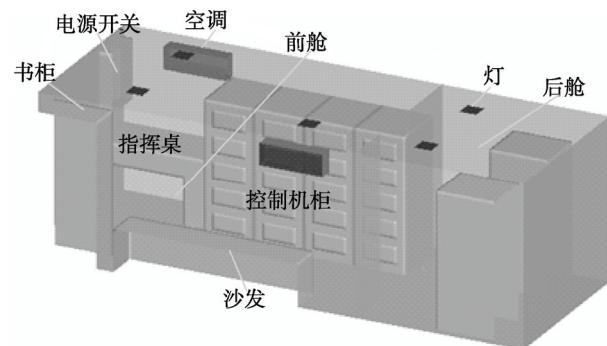


图 1 方舱几何模型

总的计算区域网格数目为 40 万个, 均为结构化六面体网格。如图 2 所示, 截取前后舱人员活动区域的网格截面分别为: $x=0.9$ m, $y=0.9$ m, $z=4.3$ m。

2.2 数值方法

文中模拟采用湍流模型为 $\kappa-\varepsilon$ 两方程模型, 近壁面处采用壁面函数法进行处理; 差分格式采用混合格式; 求解方法采用不可压缩流的 SIMPLE 算法; 控制方程采用有限体积法离散, 动量方程和能量方程的对流项均采用一阶迎风差分格式。

2.3 边界条件

入口边界: 方舱进口采用速度入口, 其中每台空

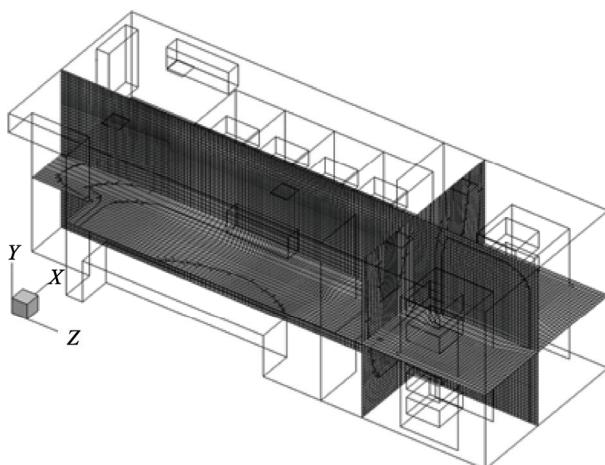


图 2 计算区域简图及网格

调的入口循环风量为 $600 \text{ m}^3/\text{h}$, 入口温度为 20°C , 入口角度分别为 30° 、 0° (入口速度方向与房顶夹角)。

出口边界: 方舱出口采用压力出口, 其中出口压力为大气压, 温度为大气环境温度。

壁面边界: 舱壁的边界条件采用第三类边界条件。假设夏天阳光下某一时刻温度为 35°C , 则方舱三面舱壁受到太阳直射, 表面温度假设固定为 40°C , 其余三面未受到太阳直射, 温度稍低固定为 30°C 。当电子设备工作时, 电子设备为舱内主要热源, 其中 6 台机柜按照每台耗散热量 600 W 计算, 其中每台机柜均按 5 个模块组成, 设置成热流边界。当电子设备不工作时, 电子模块边界均按照第一类边界条件处理。每盏日光灯散热量为 10 W , 均匀分布在灯的表面, 设置成热流边界。电源开关散热量为 100 W , 舱内给定初始温度为 80°C 。

3 计算结果分析

方舱内的制冷系统主要是为了满足操作人员舒适性和电子设备可靠性要求。

温度和速度是影响人员舒适性的重要因素, 根据文献手册及规范^[11-12]规定: 人体舒适温度范围为 $23\sim28^\circ\text{C}$, 通过人体周围的气流速度不大于 0.3 m/s 。

方舱内电子设备安装面的工作温度一般要求低于 85°C , 而电子设备均集中在电子机柜内。工作时, 设备同时产生大量热量, 如果不能及时降低器件周围耗散的热量, 就会导致电子器件的工作温度急剧升高。电子器件在高温环境下不仅会导致设备失效, 系统崩溃, 而且会降低电子设备的可靠性和使用寿命。

文中截取了 $x=0.9 \text{ m}$, $z=4.3 \text{ m}$ 处横截面, 即前舱、后舱操作人员活动区域截面, 便于分析活动区域的速度和温度分布。截取 $x=1.6 \text{ m}$, $z=4.9 \text{ m}$ 处横截面, 便于分析前、后舱电子设备周围的流场分布。

3.1 电子设备工作、两台空调同时工作

在保持送风速度和温度不变的情况下, 分别对送风角度为 30° 、 0° 进行数值模拟及对比分析。

3.1.1 人员舒适性分析

图 3 和图 4 分别给出了不同送风角度情况下前、后舱人员活动区域处横截面的温度场及等值线分布情况。当送风角度为 30° 时, 垂直方向上的最大温差为 12°C 。由于人员工作中活动区域的高度为 $0\sim1.75 \text{ m}$ 左右, 活动区域的温度基本保持在 26°C 左右。其中空调吹风处的低温区域比较集中, 温度达到 23°C , 因此在低温区域的人员会感觉到稍冷。后舱温度相比前舱温度较高, 因此后舱工作人员会感觉到较热。送风角度为 0° 时, 垂直方向上的最大温差也为 12°C 左右, 但是前舱和后舱人员活动区域的温度却达到了 29°C 左右, 空调吹风处的低温区域集中在方舱上部, 因此, 操作人员整体感觉到较热, 舒适性较差, 不能满足人员舒适性要求。因此在考虑节能的基础上, 选择送风角度为 30° , 方舱内可以达到较好的制冷效果, 并保证了人员舒适性要求。

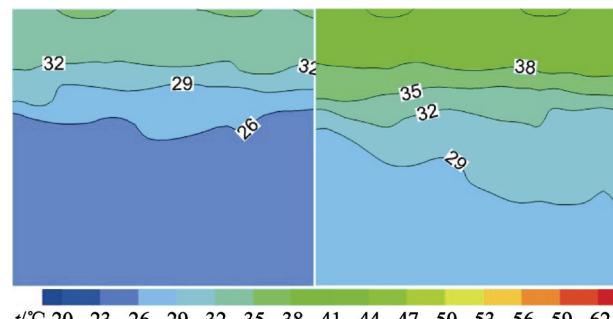
图 3 $x=0.9 \text{ m}$ 处温度分布图 4 $z=4.3 \text{ m}$ 处温度分布

图 5 和图 6 分别给出不同送风角度情况下前、后舱人员活动区域处横截面的速度场及等值线分布情况。当送风角度为 30° 时, 在前舱人员活动区域除了送风方向的风速达到 0.4 m/s 以上, 其余大部分区域的风速均小于 0.3 m/s , 后舱的大部分活动区域风速

为 0.1 m/s , 满足舒适性要求。由于空调安装高度受限, 所以空调送风方向区域的人员会有明显的吹风感。当送风角度为 0° 时, 前后舱人员活动区域风速达到 0.3 m/s 以下, 由于空调水平方向送风, 高出了人员活动的最高区域, 风速的大小对工作区域的人员基本没有影响。

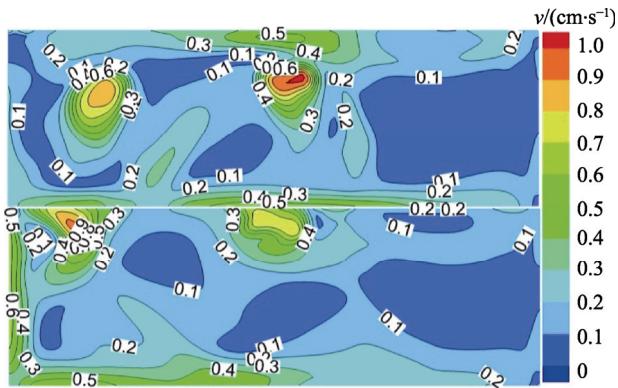


图 5 $x=0.9\text{ m}$ 处速度分布

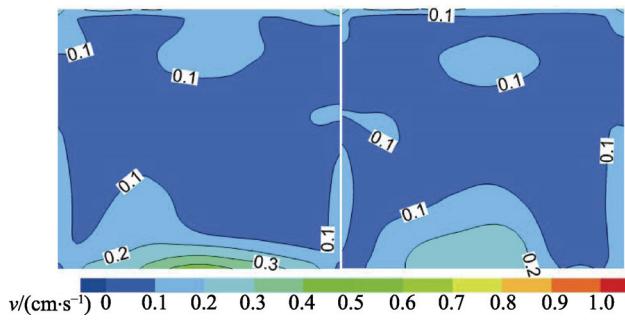


图 6 $z=4.3\text{ m}$ 处速度分布

3.1.2 电子设备热可靠性分析

图 7 和图 8 分别给出了不同送风角度情况下方舱内控制机柜内部的截面温度分布。两种送风角度情况下, 电子设备周围温度均低于 $60\text{ }^\circ\text{C}$, 都能够达到电子设备热可靠性的要求。

比较发现, 送风角度为 30° 时, 前后舱电子设备周围的降温效果明显较好, 高温区域明显较少。由于方舱内垂直方向上的温度本身就存在梯度关系, 所以

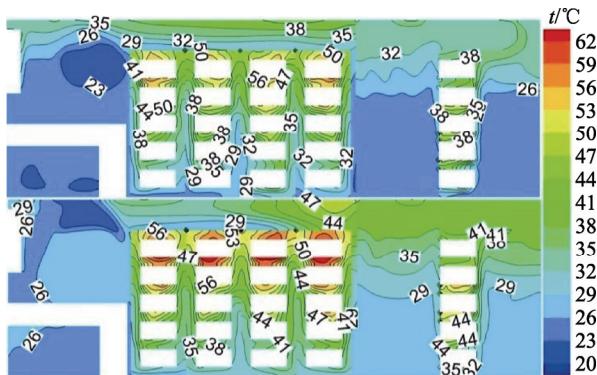


图 7 $x=1.6\text{ m}$ 处温度分布

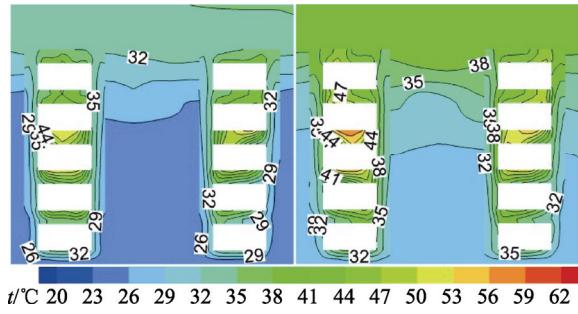


图 8 $z=4.9\text{ m}$ 处温度分布

方舱内高温区均分布在中上方的电子设备周围。由于电子设备工作中耗散很多热量, 而电子设备附近空气循环较弱, 从而导致在电子设备周围形成较大的温差。

图 9 给出了不同送风角度情况下方舱内控制机柜内部的截面速度分布。通过对比发现, 不同的送风角度对方舱内部的气体速度基本没有影响。这是由于机柜内部的气体与机柜外气体循环较少, 况且方舱内人员活动区域气体速度也较小, 机柜外部气体速度对机柜内部速度影响不大。机柜内某些电子设备周围气体的速度达到了 0.6 m/s 以上, 而且局部速度差较大。主要是由于电子设备耗散了大量热量, 导致局部空气温度升高, 造成了局部温差较大, 导致强制对流, 从而形成较高的局部速度。

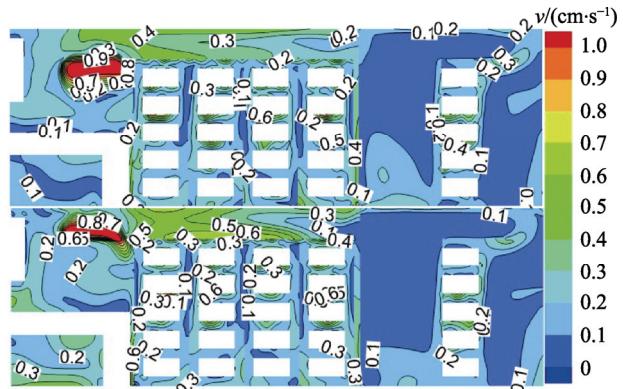


图 9 $x=1.6$ 处速度分布

综合以上分析, 此方舱制冷系统可以有效调节舱内工作环境, 舱内热环境基本可以满足人员舒适性和电子设备正常工作的要求, 但是制冷系统对电子设备的降温效率不高。

3.2 电子设备不工作、前后单台空调工作

通过分析和观察发现, 由于两台空调均设置在前舱, 电子设备均布置在机柜内, 机柜五个面是封闭的, 只有机柜后面与方舱内外区域相通。前舱由于机柜较多, 空间却较小, 导致机柜贴近舱壁, 造成了机柜内气体与机柜外气体的循环减弱, 达不到良好的循环对流降温效果。机柜内气体一部分通过机柜与舱壁之间

的空隙循环对流达到降温效果, 另一部分只能通过机柜壁面进行热传导相互换热。后舱机柜后面与舱壁距离较大, 即使后舱整体温度较高, 但电子设备也可以达到良好的循环对流换热效果, 并且高温集中区域比前舱少。整个方舱的高温区域均集中在机柜内部, 而空调对机柜却没有进行重点降温, 造成机柜内部温度较高。

在保持电子设备不工作的同时, 分别对前后单台空调工作进行数值仿真计算, 分析其能否满足方舱内人员舒适性要求。

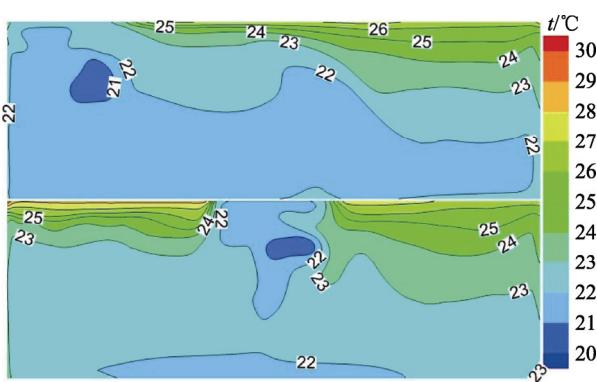


图 10 $x=0.9\text{ m}$ 处温度分布

图 10 分别给出了在电子设备不工作前提下, 前后单台空调工作时, 人员活动区域处横截面的温度场及等值线对比分布情况。通过对比发现, 两台空调分别单独工作时, 方舱前、后舱人员活动区域处的温度基本可以控制在 24°C 以下, 完全满足人员舒适性要求。

综上所述, 当电子设备不工作时, 单台空调完全可以满足方舱内制冷降温的要求。当电子设备工作, 两台空调同时降温, 由于方舱的局限性, 电子设备不仅设置在机柜内, 而且与人员活动区域的对流较弱, 导致电子设备的降温效果不好。由于电子设备是方舱内的主要热源, 需要重点降温, 因此在单台空调满足人员舒适性要求的前提下, 通过改进另一台空调的冷气流通通路, 从而将冷气直接送入电子机柜内部, 加强对机柜内部的对流换热, 从而对电子机柜内部和后舱进行重点降温。

4 结论与建议

文中通过对某电子雷达方舱工作环境的数值模拟, 在现有方舱制冷系统条件下, 可以满足舱内操作人员的舒适性和电子设备正常工作的温度要求。通过分析得到以下结论。

1) 在保持送风速度和温度不变的情况下, 送风角度为 30° 时, 方舱整体的降温效果比送风角度为 0° 时效果要好, 但是在送风方向区域的人员会有明显的吹风感。

2) 由于单台空调可以满足电子设备不工作时方舱内的降温效果, 因此, 可以通过改进另一台空调的冷气流路设计, 着重加强对电子设备周围区域的降温, 从而达到冷气流量的合理分配, 提高电子设备温度分布的均匀性, 提高系统工作的可靠性。

参考文献:

- [1] 杨会越. 雷达方舱的布局设计探讨[J]. 电子机械工程, 2008, 24(6): 14-17.
- [2] 余建祖. 电子设备热设计及分析技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [3] 冯树兴, 王朔, 岳巍强, 等. 方舱传热试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 109-111.
- [4] 李冬梅, 严代彪. 方舱制冷制热功率计算研究[J]. 机电产品开发与创新, 2013, 26(5): 34-39.
- [5] 薛军, 孙宝玉, 刘巨, 等. 热分析技术在热设计中的应用 [J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 176-199.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [7] 袁东升, 田慧玲, 高建成. 气流组织对空调房间空气环境的数值模拟[J]. 建筑节能, 2008(9): 9-13.
- [8] 吴业正. 制冷原理与设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1997: 180-181.
- [9] 梅源. 高频箱环境控制方法研究[J]. 电子机械工程, 2010, 26(2): 30-32.
- [10] 李卫洲. 基于 ICEPAK 软件的电子方舱热设计[J]. 无线工程施工, 2011, 41(8): 55-57.
- [11] GB 50019—2003, 采暖通风与空气调节设计规范[S].
- [12] 赵荣义. 空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 123-127.