

车载雷达工作室三维空气流动与传热数值模拟

李志刚, 刘淑振

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要:应用计算流体力学和计算传热学方法对某车载雷达工作室内的三维空气流动和传热进行了模拟与数值计算。建立了车载雷达工作室三维空气流动与传热计算的物理模型和数学模型,应用 $k-\varepsilon$ 紊流方程模型、非结构化网格和有限容积法对某车载雷达工作室内的空气流场与温度场进行了三维数值仿真计算与分析,为该车载雷达工作室生存环境的改善与优化提供了理论依据和技术指导。

关键词:车载雷达;紊流流动;传热;三维流场;温度场

中图分类号: TN955 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)06-0062-04

Numerical Simulation of 3D Air Flow and Heat Transfer in Car Radar Chamber

LI Zhi-gang, LIU Shu-zhen

(School of Mechanical Engineering of NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: Simulation and numerical computation of three-dimensional air flow and heat transfer in car radar chamber were carried out using computational fluid dynamics and heat transfer method. Three-dimensional physical model and mathematical model for air flow and heat transfer calculation was established. Three-dimensional simulation and numerical computation of air flow field and temperature field in certain car radar chamber was carried out using the turbulence model equations, unstructured grids and finite volume method. The purpose was to provide theoretical basis and technical guidance to improve the living environment of automotive radar.

Key words: car radar; turbulent flow; heat transfer; three-dimensional flow field; temperature field

车载雷达工作室内的三维空气流场、温度场研究是其工作环境气流组织设计及其舒适环境评价与研究的基础,属于军用车辆人机环境研究的重要内容。工作室设备乃至人的心理变化及外界环境直接影响工作室内的温度场与空气速度场分布,这种分布对工作室环境产生影响。20世纪80年代初

期,国外已经开始进行有关的研究工作^[1],例如美国曾对M3A2, M3A3 Bradley战车的乘员舱甚至乘员服装内气流的微循环进行对比实验研究,以改善乘员的生存环境^[2]。

笔者建立了车载雷达工作室三维空气流动与传热计算的物理模型与数学模型,应用 $k-\varepsilon$ 紊流方

收稿日期: 2011-05-29

作者简介: 李志刚(1962—),男,北京人,副教授,主要从事机电一体化技术研究。

程模型,采用非结构化网格,应用有限容积法对某车载雷达工作室内的三维空气流场与温度场进行了数值仿真计算与分析。

1 雷达工作室的数理模型

1.1 物理模型

某车载雷达工作室,箱体为钢结构、铝合金板,易吸收阳光辐射;雷达工作室内部电子设备箱柜有发射机柜、综合机柜、备份机柜,各电子设备功率较大,产生大量的热,工作室内有2名工作人员,上述因素直接影响工作室内部空气的速度场与温度场分布。

文中以某型车载雷达的工作室为研究对象,该工作室为钢结构框架、铝合金板构成,室内壁面裸露;乘员总数2人,乘员座椅成90°夹角;由于雷达经常在恶劣的气候条件下工作,工作室内部电子设备机柜采用下送上排的通风形式,通风机采用轴流风扇,各机柜的热量直接排入工作室内部。车载雷达系统及其工作室布局如图1所示。



图1 车载雷达系统及车载雷达工作室布局

Fig. 1 Car radar system and automotive radar studio layout

1.2 数学模型

为了建立工作室内部空气流动与传热数学模型,对工作室进行如下假设:

1) 工作室内部空气不可压缩,密度随温度变化;

- 2) 工作室内部空气流动为稳态紊流;
- 3) 不考虑空气与工作室固壁间的热辐射;
- 4) 工作室内部气密性良好;
- 5) 不考虑耦合换热,认为工作室壁面温度恒定且平均。

车载雷达工作室内部空气流动与传热数学模型可描述如下。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3$$

式中: u 为舱内空气流动速度, m/s。

运动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(P + \frac{2}{3} \rho k \right)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m³; μ 为动力黏性, Pa·s; μ_t 为紊流黏性系数, Pa·s; p 为空气压力, Pa; k 为紊流脉动动能, m/s²。

紊流脉动动能方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon$$

式中: ε 为紊流脉动动能耗散率; G 为紊流脉动动能产生项。

紊流脉动动能耗散率方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + (c_1 G - c_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$$

紊流流动能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t}) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + \frac{q}{c_p}$$

式中: c_p 为定压比热容, kJ/(kg·K); T 为舱内空气热力学温度, K; q 为热流密度, W/m²; c_1, c_2 为常数。

紊流脉动动能产生项:

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$$

考虑工作室固壁区域分子的黏性影响,在计算空气与固壁的传热时,应用避免函数法^[3]。车载雷达工作室内部各表面引起的附加热流变化作为能量方程的附加源项。对于工作室固壁附近的单位面积上的

传热率处理为:

$$q=h(T_w-T_i)$$

当层流普朗特常数 $Pr=1$ 时, $Nu=\frac{c_f}{2} Re$, Re 为雷

诺数, 从而有: $\frac{hl}{\lambda} = \frac{c_f}{2} \frac{\rho u_i l}{\mu}$, $\frac{h}{u_i \rho} = \frac{c_f}{2} c_p$, 其中: l 为微元体边界层长度; h 为边界层厚度; λ 为空气层流黏性系数。

所以, 工作室固壁附近的传热方程为:

$$q = c_p \frac{c_f}{2} |u_i| \rho (T_w - T_i)$$

式中: T_w 为工作室固壁温度; T_i 为离开工作室固壁的第一节点处温度; c_f 为空气流动与固壁间的摩擦阻力系数。

经验系数 $c_\mu, c_1, c_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_t$ 的取值见表1。

表1 经验参数取值

Table 1 The values of empirical parameters

c_μ	c_1	c_2	σ_k	σ_ε	σ_t
0.1	1.45	1.90	1.0	1.33	1.0

对于工作室内气固交界面空气流动符合无滑移条件 $\mu=0$, 认为工作室各电子设备箱柜表面温度均匀。

2 边界条件设置及数值求解方法

2.1 边界条件设置及初值

环境温度为 330 K, 环境压力为 101 325 Pa, 空气由工作室通风系统进行外部环境与工作室内部的空气循环, 进气口进气速度为 10 m/s, 进风口温度为 330 K, 工作室内部空气流速为 0.3 m/s, 空气出口设置为 Outlet 类型, 取工作室内部壁面温度为 335 K, 各电子设备机柜壁面温度为 355 K。

2.2 数值求解方法

车载雷达工作室内部安装各类电子设备机柜, 内部结构复杂造成计算区域边界形状较为复杂。笔者采用非结构化网格, 有效解决了复杂结构造成的计算区域边界形状复杂的问题。非结构网格生成方法是在其生成过程中采用一定的准则进行优化判断,

因而能够生成高质量的网格, 较容易控制网格的大小和节点的密度, 它采用随机的数据结构有利于进行网格自适应。一旦在边界上指定网格的分布, 在边界之间可以自动生成网格, 无需分块或用户的干预, 而且不需要在子域之间传递信息。在工作室进气口和排气口区域对网格进行加密处理。整体计算域网格划分如图2所示。



图2 计算域网格

Fig. 2 Grid computing domain

笔者只对工作室内部空气流动空间进行网格划分, 有效减少了计算区域的大小, 得到网格总数为 739 643 个, 单元最大体积与最小体积分别为: 6.55×10^{-4} , $1.54 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。相对于计算域的整体, 网格质量较好。

控制微分方程离散时采用有限容积法, 应用 SIMPLEC 算法^[4], 求解离散控制方程。应用 SIMPLEC 算法时, 压力项采用二阶精度, 动量项采用二阶迎风格式, 能量项、 k 和 ε 项用一阶迎风格式^[5]。

3 有限体积法仿真技术分析

文中所采用的有限体积是目前一种较新的数值计算方法。它的优点是: 1) 积分守恒对任一控制子区域以及整个计算区域都能得到满足, 因而即使在粗网格情况下, 也显示出准确的积分守恒, 计算结果较为精确; 2) 积分网格单元划分较为灵活, 不单是四边形单元; 3) 有限体积法在边界条件的处理上也较为方便。

对工作室壁面区域的边界条件进行了处理, 考虑了空气流动与固壁间的摩擦阻力, 提高了壁面传热的仿真精度。

在划分网格中, 采用了非结构化网格, 非结构网格生成方法是在其生成过程中采用一定的准则进行

优化判断,因而能够生成高质量的网格,较容易控制网格的大小和节点的密度,它采用随机的数据结构有利于进行网格自适应。一旦在边界上指定网格的分布,在边界之间可以自动生成网格,无需分块或使用用户的干预,不需要在子域之间传递信息。

4 计算结果分析

通过以上模型对某车载雷达工作室内的三维气流场与温度场进行数值计算,图3—图6显示了计算结果的部分特征参数。分别选取垂直于坐标轴的3个平面 $x=1.1\text{ m}$, $y=1.1\text{ m}$, $z=0.9\text{ m}$ 处作为工作室内部温度场的特征量表示计算结果。

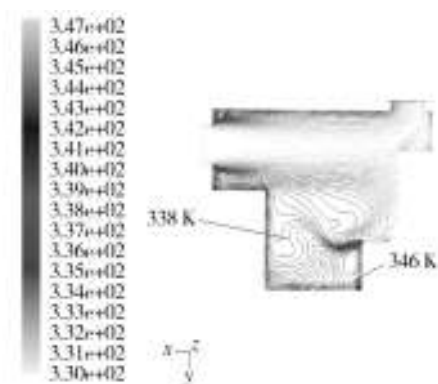


图3 平行于xy平面, $z=0.9\text{ m}$ 处温度场

Fig. 3 Parallel to the xy plane, temperature at $z=0.9\text{ m}$

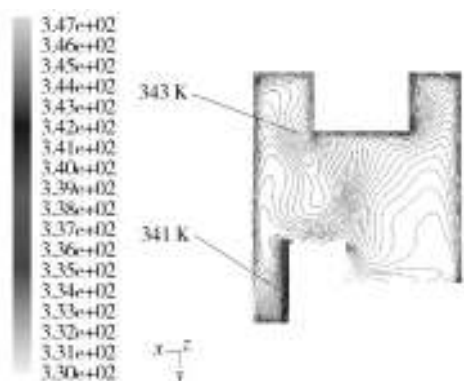


图4 平行于xz平面, $y=1.1\text{ m}$ 处温度场

Fig. 4 Parallel to the xz plane, temperature at $y=1.1\text{ m}$

从以上计算结果可以看出:1)工作室内部靠近进气口的温度与靠近电子机柜的温度相差较大,平均值分别为338 K和345 K,工作室上部温度与下部温度有一定差距,平均值分别为344 K和339 K,并且

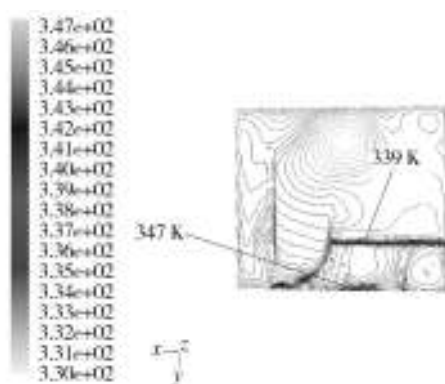


图5 平行于yz平面, $x=1.1\text{ m}$ 处温度场

Fig. 5 Parallel to the yz plane, temperature at $x=1.1\text{ m}$

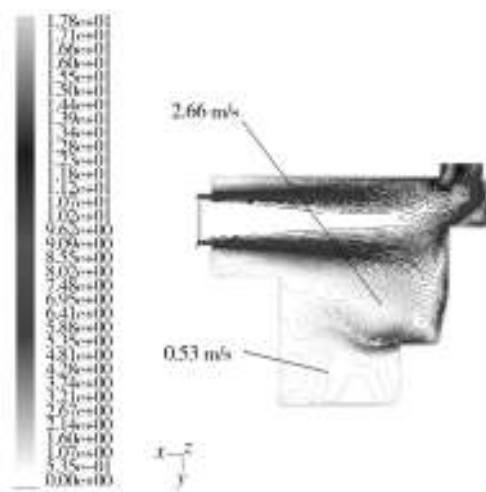


图6 平行于xy平面, $z=0.9\text{ m}$ 处速度场

Fig. 6 Parallel to the xy plane, speed at $z=0.9\text{ m}$

可以看出,在工作台附近温度较高;2)工作室内部速度场在其上部与下部相差较大,在工作台附近空气流动速度为2.66 m/s,工作室底部空气流动速度约为0.53 m/s。与数值计算相同的工况下工作室内部温度的实测值约为347 K,证明文中的数值计算结果是正确的。

在工作室的实际使用中,经常出现车载雷达工作人员容易发生眩晕、头昏等不舒适现象。工作环境的恶化严重时会导致乘员植物神经失调,判断与控制机能迟钝,不仅会使乘员失去战斗能力,而且对人身安全也极为不利。因此,必须改进该工作室内的通风状况。改进应从提高工作室靠近电子机柜的空气流动着手,通过调整进气口和排气口的位置、改

(下转第75页)

了对试验报告的要求,并在各试验项目的第8节针对试验项目的结果分析进行了补充。这些规定都是GJB 150所没有的,不仅保证了试验结果的说服力,更大大提高了对试验参与方在试件和检测设备的专业领域了解程度的要求。

4 结语

GJB 150A顺应了技术发展的需求,充实、扩展了专业领域覆盖范围,作为剪裁标准的灵活性可以更

为精准地满足试验需要,但剪裁也对参与方的专业素质提出了更高的要求,增加了执行难度。另一方面,提供了丰富的试验方法指南,重视收集信息、中断处理和结果分析,对某些实际问题有更明确的处理办法。

参考文献:

- [1] GJB 150A,军用装备实验室环境试验方法[S].
- [2] 祝耀昌,GJB 150A 和环境试验技术 [R].2010.1(余不详)
- [3] MIL-STD-810F, Enviromental Engineering Considerations and Laboratory Test, Department of Defence [S].

(上接第65页)

变空气流道、增加排气风扇的功率或采取其他通风降温措施,以改善工作室内部环境的舒适性。

5 结论

采用数学模型对某车载雷达工作室内的三维空气流场和温度场进行了数值模拟计算,获得了工作室内部热流场分布,得到了合理结果。工作环境恶化严重时会导致乘员植物神经失调,判断与控制机能迟钝,不仅会使乘员失去战斗能力,对人身安全也极为不利。因此,必须改进该工作室内的通风状况。

对工作室工作环境的改进应从以下2个方面进行:1)提高工作室靠近电子机柜的空气流动以及及时带走设备工作产生的热量;2)通过调整进气口和排气口的位置、改变空气流道、增加排气风扇的功率,

改善工作室内部的空气流动以改善工作室内部环境的舒适性。

参考文献:

- [1] BERRY Jr Crain, VINCENT D Iacono. Development of a Microclimate Cooling System for Combat Vehicles[J]. System Sciences, 1982(1):7—28.
- [2] ANNE E Allan, STEPHEN R Muza. Microclimate Cooling for Combat Vehicles Crewmen[J]. System Sciences, 1982(1):1—14.
- [3] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [4] 陶文铨. 计算传热学的近代发展[M]. 北京:科学技术出版社,2000.
- [5] 刘西侠,毕小平,赵以贤. 装甲输送车乘员舱内三维空气流动与传热的数值计算[J]. 兵工学报,2003,24(1):26—30.

(上接第70页)

交文件供客户进行审查和批准。

4 结语

DoD最新防务采办政策 DoD5000.2指出“所有项目的项目主任都应制定一个切实可行的可靠性、可用性与可维修性(RAM)策略,其中应包括一个可靠性增长计划,把它作为系统设计和开发的不可或缺的组成部分。”GEIA-STD-0009包含一个健壮的、强制性的可靠性增长计划,在DoD采办中使用该标准

将确保该要求的实现。为了促进该标准在DoD采办合同中的使用,DoD成立了可靠性改进工作组(RIWG),该组将为提高DoD武器系统的可靠性、可用性和维修性(RAM)提供技术支持。

参考文献:

- [1] GEIA-STD-0009, Reliability Program Standard for Systems Design, Development, and Manufacturing [S].
- [2] SAE JA-1000, Reliability Program Standard[S].
- [3] IEEE1332, Standard Reliability Program for the Development and Production of Electronic Systems and Equipment [S].