

文章编号: 1672-8785(2021)07-0026-10

光学镜片排布方式对机载光学窗口 气动特性的影响研究

杜瑞娟 鹿嵩昊 杨百剑 闯家亮

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 为了降低气动载荷对机载光学窗口的影响, 并探究光学镜片排布方式对光学窗口气动特性的影响, 设计了三种不同光学镜片排布方式的光学窗口, 并对其模型进行了动力学数值模拟分析。研究了不同光学镜片排布方式对光学窗口气动特性的影响, 得到了空气阻力最小、气动特性最优的模型。根据 0° 攻角工况下所受风阻的大小, 对其结构力学特性进行了模拟分析。结果表明, 该光学窗口模型在风阻载荷作用下不会因冲击而损坏, 满足刚度和强度要求。

关键词: 光学窗口; 计算流体动力学; 结构设计; 有限元分析法

中图分类号: TB482.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.07.004

Research on the Influence of Optical Lens Arrangement on Aerodynamic Characteristics of Airborne Optical Window

DU Rui-juan, LU Song-hao, YANG Bai-jian, CHUANG Jia-liang

(11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to reduce the impact of aerodynamic load on the airborne optical window and explore the influence of the optical lens arrangement on the aerodynamic characteristics of the optical window, three optical windows with different optical lens arrangements are designed in this paper. Through the dynamic numerical simulation analysis of these optical window models, the influence of different optical lens arrangements on the aerodynamic characteristics of the optical window is studied, and the model with the least air resistance and the best aerodynamic characteristics is obtained. According to the model's wind resistance under 0° angle of attack, the simulation analysis of model's structural mechanics characteristics is carried out. The results show that the optical window model will not be damaged by impact under the wind resistance load, and meets the requirements of rigidity and strength.

Key words: optical window; CFD; structural design; finite element method

收稿日期: 2021-04-09

作者简介: 杜瑞娟(1992-), 女, 青海人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为机载光电系统设计。

E-mail: duruijuan123@126.com

0 引言

红外光电系统因具备突出的优点而在军事和民用领域均得到了广泛的应用。由于机载红外光电设备的工作环境较为恶劣, 为保证红外光电系统正常工作, 需要给它安装光学窗口。作为光电系统的重要组成部分, 光学窗口是光机设备与外界环境的接口。它不仅起到保护光机系统内部环境、隔绝热量的作用, 还能有效承受飞行过程中的多种载荷并保护内部光机设备^[1-3]。随着对红外光电系统探测能力要求的不断提高, 光机系统的口径不断增大, 人们对光学窗口口径也提出了更高的要求^[4]。现有的光学窗口体制可分为固定和随动窗口两种。其中, 固定窗口由数片多角度镜片拼接而成。虽然拼接式固定光学窗口具有高强度、高透光率等优点^[5-10], 但是当光机系统口径较大时, 随着窗口口径的增大, 窗口质量不断提高, 所需光学镜片的数量也不断增加。由于光学窗口在飞机高速飞行时受到较为强烈的气动作用, 作为主要承载结构的光学镜片需承受较大的气动载荷, 使设计难度和加工成本显著提高。

根据本文的内包络结构大小, 若选用多角度拼接式固定窗口, 则需由两层光学镜片拼接而成, 导致光窗窗口高度超过项目高度要求。因此本文选择随动光学窗口。为了降低气动载

荷对光学窗口的影响、减少光学镜片数量、降低光学窗口的成本并提高光学窗口承载能力, 本文设计了满足项目要求的三种不同镜片排布方式的半球形光学窗口, 并分别对其动力学数值进行了模拟分析。然后研究了不同的光学镜片排布方式对光学窗口气动特性的影响, 得到了气动特性最优的光学窗口结构, 并对其进行了结构力学数值模拟分析和结构力学特性分析。

1 几何模型

根据光机结构的尺寸, 分别设计了 Model I、Model II 以及 Model III 三种不同结构的半球形光学窗口(见图 1)。三种模型均由四面不同角度的光学镜片以及金属骨架组成, 并具有相同的高度和底面直径。其中, 四面光学镜片的角度也分别对应相同。三种模型上排的两面镜片尺寸相等且对称分布; 下排两面镜片亦是如此。光学窗口包含孔位、框架、螺钉、镜片压圈等结构, 而本文仅讨论不同的光学镜片排布方式对其气动特性的影响。为了提高数值模拟计算时的精度, 通过去除镜片框架、螺钉、镜片压圈等结构来对几何模型进行进一步的简化和处理。

三种光学窗口模型具有不同的镜片排布方式。光窗结构中连接下排两面镜片的骨架结构均垂直于下表面, 即下排两面镜片均垂直于下

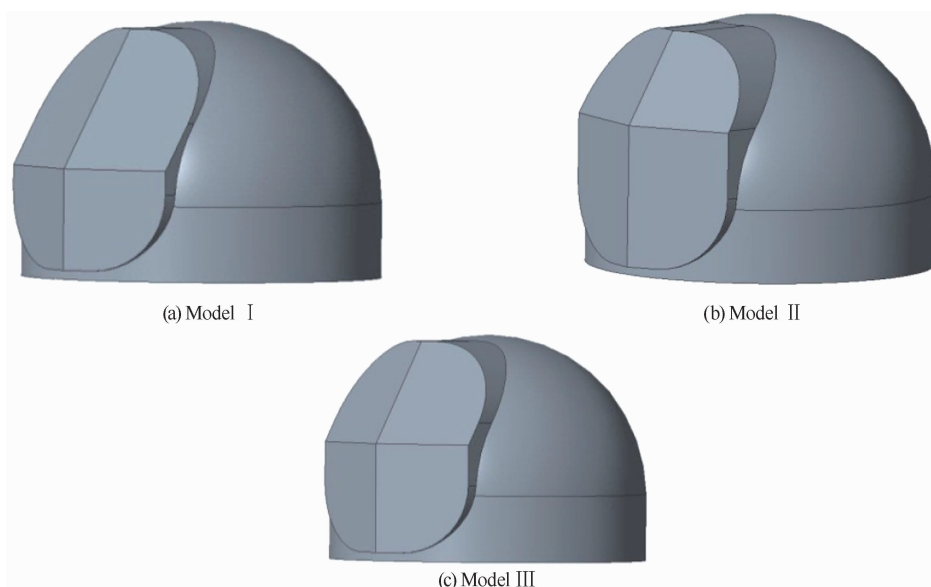


图 1 Model I、Model II 和 Model III 几何模型

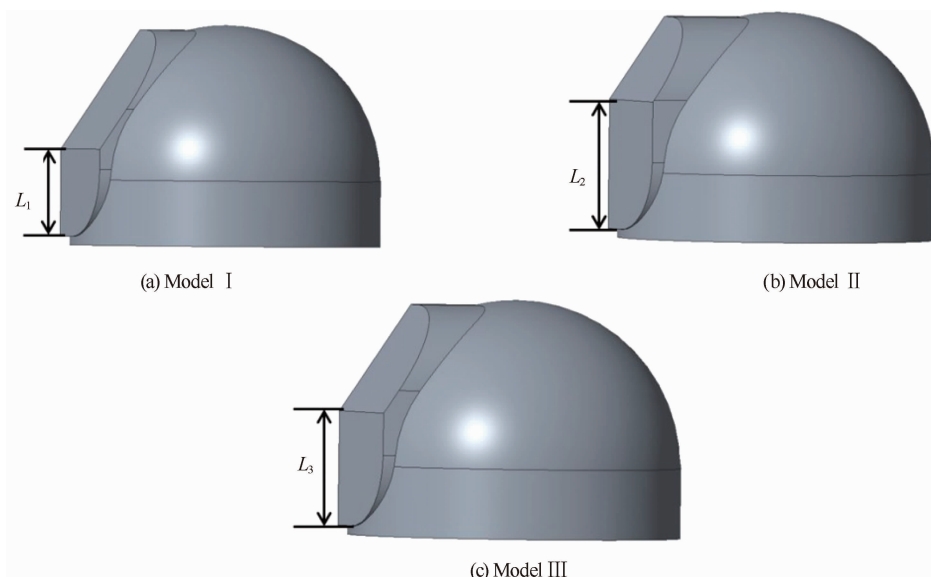


图 2 三种几何模型的下排两面镜片的骨架结构长度

表面。如图 2 所示，三种骨架结构的长度分别为 L_1 、 L_2 和 L_3 。若光学窗口的半径为 d ，则 $L_1 = \frac{1}{3}d$ ， $L_2 = \frac{2}{3}d$ ， $L_3 = \frac{1}{2}d$ 。

2 动力学数值模拟分析

为了探索光学镜片排布结构对光学窗口气动特性的影响，本文采用计算流体力学分析方法以及 ANSYS 软件对三种不同结构的光学窗口模型进行了数值模拟，并分别对它们在不同攻角情况下的气动特性进行了模拟仿真。仿真结果为设计光学窗口提供了新思路。

2.1 计算域和网格划分

从理论上来说，计算域越大，计算域的边界离光学窗口越远，那么边界对流体流动的影响就越小，计算精度也就越高。但同时网格数会更多，导致数值模拟时的计算量大。本文选择 $16\text{ m} \times 16\text{ m} \times 12\text{ m}$ 的长方体计算域，其体积是模型体积的 20 倍，入口与几何模型之间的距离为 8 m，可近似认为来流无干扰。计算域和风速方向分别如图 3 和图 4 所示。

在进行数值模拟分析前，对计算域进行了网格划分。网格划分的质量对数值模拟的计算精度和计算量有重要的影响。为了提高计算精度和稳定性，在划分网格时要满足网格的贴体性原则和疏密变化要求。网格的划分要注意贴

合计算域和几何模型的边界形状，以保证网格质量，从而提高数值模拟的计算精度。

网格划分的主要形式可分为结构化网格和非结构化网格两种。其中，结构化网格适用于几何结构简单、形状规则的模型，并且其生成速度较快。非结构化网格没有层的概念，因此可以灵活控制生成网格的大小和节点的密度，从而更好地控制边界层结构。它适用于几何结构较为复杂的模型，可生成高质量网格^[11-12]。

本文采用混合形式来划分网格：在几何形状规则的部分采用结构化网格，而在结构复杂的部分采用非结构化网格，以保证网格划分的质量，从而提高数值模拟计算精度。三种模型的体网格如图 5 所示。在光学窗口几何模型中，四片光学镜片形成尖角，镜片四周框架结构的面积与镜片及半球结构相比差异较大。在划分体网格时，其尺寸不宜过大，否则会导致镜片四周框架部分无法划分网格而破坏框架部分的边界层结构；网格尺寸也不能过小，否则会增加整体网格数量并增大计算的工作量。因此对模型进行了局部加密，并插入了 20 个边界层。最终 Model I 的体网格数为 1411105，网格节点数为 260450；Model II 的体网格数为 1585482，网格节点数为 292974；Model III 的体网格数为 1485992，网格节点数为 276110。

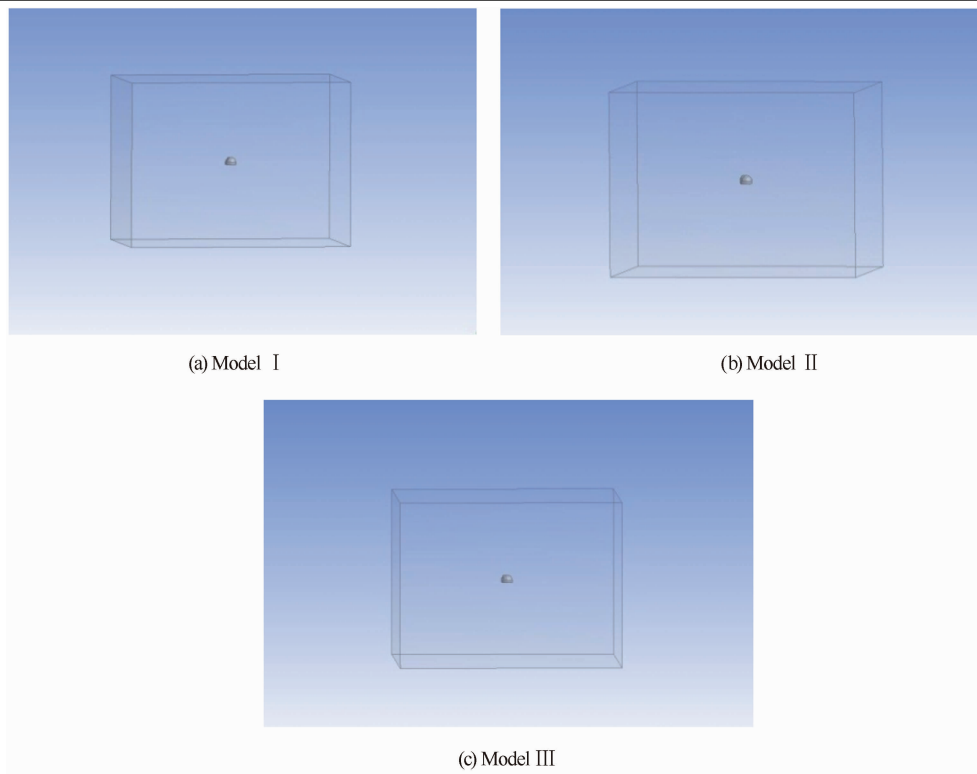


图 3 三种几何模型的计算域

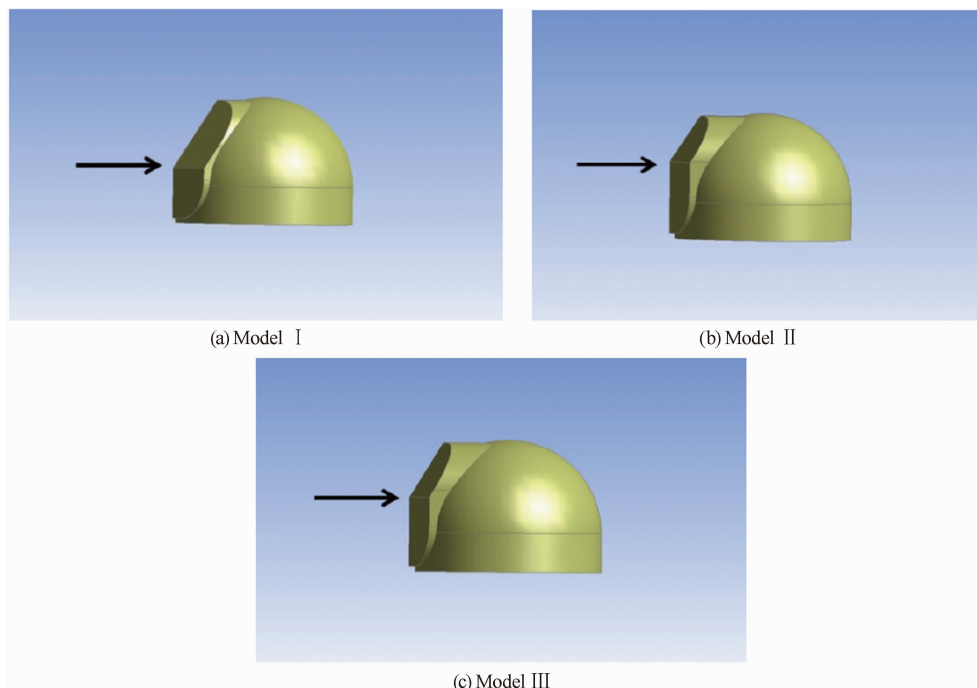


图 4 三种几何模型的风速方向

2.2 边界条件

在进行数值模拟时,需要对边界条件进行设置。将计算域左侧设置为入口边界条件,并将入口设置为 Pressure-far-field;根据光学窗口的实际飞行条件,将入口速度设置为 0.69

Ma;将出口设置为压力出口边界条件。本文设置飞行高度为 10000 m,温度为 223.3 K,大气压强为 26500 Pa,当地声速为 299.5 m/s。在飞行过程中,光学窗口的飞行姿态会进行一定的调整以保证始终跟踪和探测目标。由于光

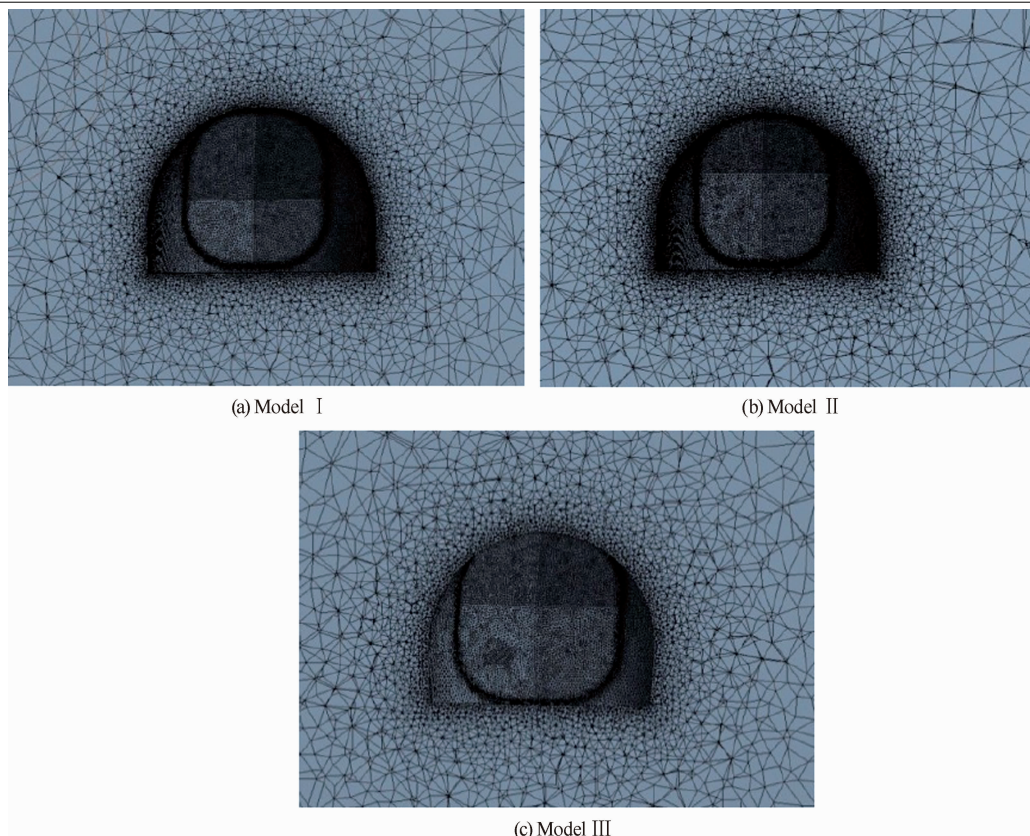


图 5 三种光学窗口模型的体网格

学窗口也会受到不同角度的风阻，因此将其攻角设置为 0° 、 4° 、 8° 、 12° 、 16° 和 20° ，然后进行气动特性分析。

2.3 计算模型的选取

Fluent 中提供了多种湍流模型种类。其中，S-A 模型一般用于有界壁面流动的航空领域，尤其是绕流过程，计算量小，对具有一定复杂程度的边界层问题有较好的效果。但它不适用于流动墙壁束缚变为自由剪切流的流动。标准的 $k-\epsilon$ 模型由于具有良好的稳定性、经济性和计算精度且计算量适中而得到了广泛应用。但是它只对高雷诺数湍流有效，而对曲率较大和压力梯度较强等复杂流动的模拟效果欠佳。标准的 $k-\epsilon$ 模型不适用于旋流等各向异性较强的流动。SST $k-\omega$ 使用混合函数将标准 $k-\epsilon$ 模型与 $k-\omega$ 模型结合起来，包含了转捩和剪切选项。SST $k-\omega$ 剪切压力传输模型与标准 $k-\omega$ 模型相似，但增加了横向耗散导数项，并合并了来自于方程的交叉扩散且考虑了湍流剪应力的传播。这些改进使得 SST $k-\omega$ 模型在流动领域的应用更为

广泛并具有更好的可信度，因此可将其用于翼型计算、跨音速带激波计算等。经过综合考虑，本文采用 SST $k-\omega$ 计算模型^[12-14]。

2.4 数值模拟计算结果与分析

升力和阻力系数是描述升力和阻力特性的重要参数。升阻比是飞行器飞行时产生的升力系数与阻力系数的比值。它是衡量空气动力学特性和描述气动效率的一个重要参数。具有相同迎风面积的 Model I、Model II、Model III 的阻力系数和升阻比随攻角的变化情况分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示。

从图 6(a) 中可以看出，三种模型的阻力系数具有相同的变化趋势，其平均阻力系数均随着攻角的增大而增大。在攻角从 0° 到 20° 的变化过程中，Model III 的阻力系数始终小于 Model I 和 Model II，而且它所受到的阻力始终较小。在攻角为 8° 时，Model III 的阻力系数比 Model I 小 9%，二者相差最大；在攻角为 20° 时，Model III 的阻力系数比 Model II 小 3.9%，二者相差最大。

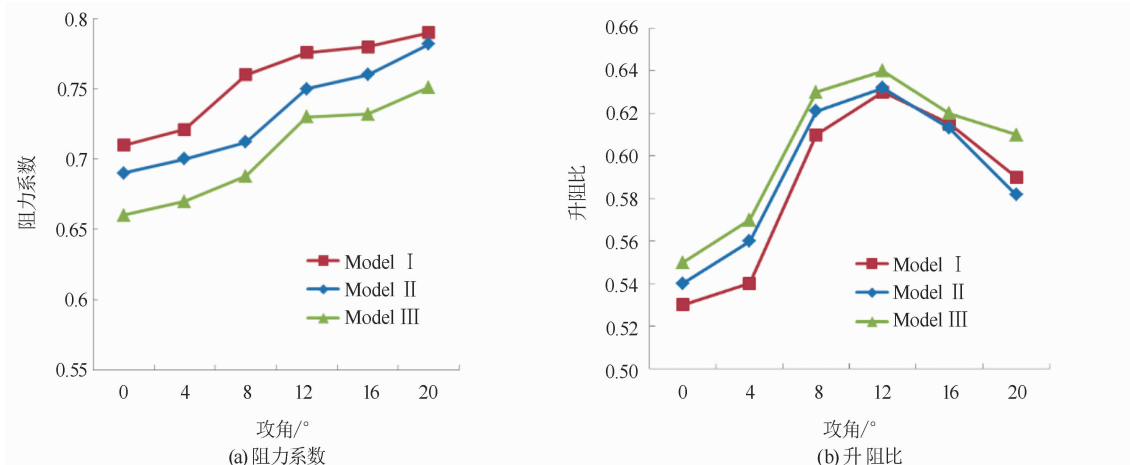


图 6 Model I、Model II 和 Model III 的阻力系数及升阻比

从图 6(b)中可以看出, 三种模型的升阻比具有相同的变化趋势。随着攻角的增大, 它们先增大到一定数值后再减小。在攻角从 0° 到 20° 的变化过程中, 虽然升阻比有一定的波动, 但 Model III 的升阻比始终大于 Model I 和 Model II。这意味着 Model III 始终具有较优秀的空气动力学特性和优异的气动效率。在攻角为 4° 时, Model III 的升阻比比 Model I 大 5.5%, 二者相差最大; 在攻角为 20° 时, Model III 的升阻比比 Model II 大 3.3%, 二者相差最大。

在不同攻角时, 三个模型的速度流线、表面压力云图以及它们在光学窗口 $1/2$ 处的压力云图变化情况分别如图 7、图 8 和图 9 所示。随着攻角的增大, 三种光学窗口模型的后缘部分都出现了后缘漩涡。在攻角为 12° 时, 三种模型的表面压力差最大, 即产生的升力最大。

综合以上分析可以得出, 虽然三种光学窗口模型具有相同的参考面积、高度和口径, 但是 Model III 比其它两种模型更容易获得较大的升力, 同时所受的阻力也更小。这一特性使得 Model III 具有更优异的气动效率。这表明光学镜片的排布方式对光学窗口的气动特性有显著的影响。Model III 的镜片排布方式可以增大升力和升阻比, 减小光学窗口受到的空气阻力, 从而提升气动效率和气动特性。

3 结构力学特性分析

为了验证 Model III 结构在一定风阻下的

力学性能能否满足设计要求, 下面利用 ANSYS 软件以及结构力学特性分析模块来对 Model III 的载荷分布和结构特点进行仿真计算。为了提高力学仿真分析的计算精度并得到更加准确的分析结果, 对 Model III 结构进行了修改, 即增加了镜框和镜片压圈结构。

3.1 网格划分和参数设置

由于后期计算分析结果的精度与网格质量息息相关, 网格划分是模拟分析过程中非常重要的一步。本文采用混合网格, 即在几何形状规则的部分采用结构化网格, 并在几何结构复杂的部分采用非结构化网格, 以保证网格划分的质量, 从而提高模拟的计算精度。

表 1 列出了光学窗口各部分的结构参数。根据动力学数值模拟分析得到空气阻力数据, 对光学窗口施加均布载荷, 并对光学窗口的底部施加约束, 然后对光窗正面施加垂直于光窗表面的均布载荷。根据动力学数值模拟分析, 在攻角为 0° 、飞行速度为 0.69 Ma、飞行高度为 10000 m 的工况下, 光学窗口所受的风阻为 1780 N, 因此对光窗表面施加 1780 N 均布载荷。

表 1 模型的材质及属性

部件名称	材质	泊松比	弹性模量/GPa
镜片	硫化锌	0.27	74.5
镜片框架	钛合金	0.34	108
窗口整体结构	铝合金	0.36	69

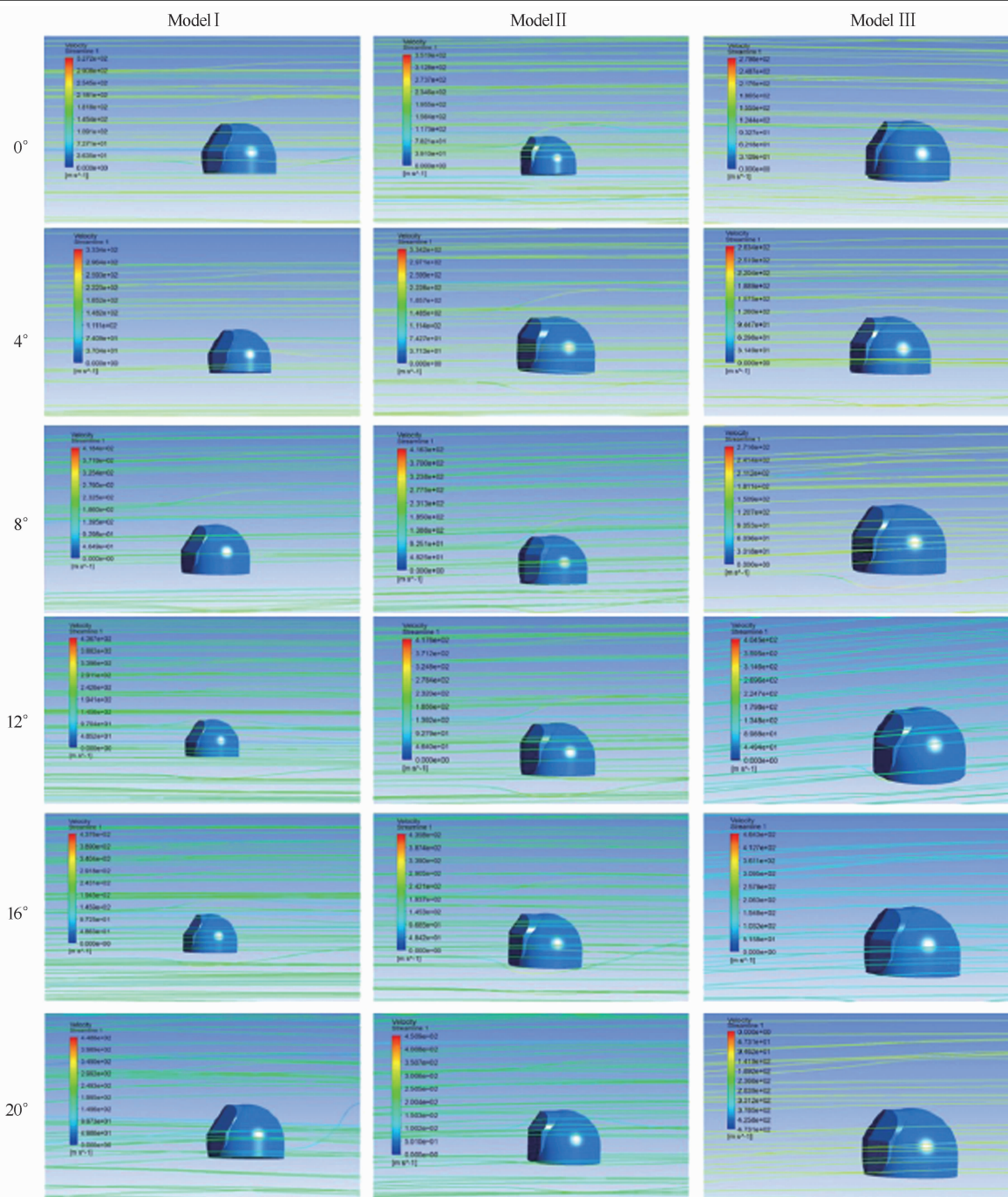


图7 Model I、Model II 和 Model III 的速度流线图

3.2 结果与分析

Model III 加载表面均布载荷后的受力情况如图 10 所示。在表面均布载荷的作用下，光学窗口发生变形。最大变形出现在光学镜片上，最大变形量为 0.014 mm，可以满足刚度要求，不会由冲击引起变形。最大应力主要集中在光学镜片框架结构上，说明镜片框架是主

要的承载结构。最大应力为 14.876 MPa，部件材料的最小屈服强度为 275 MPa。这表明正常工作条件下最大应力远低于材料的屈服强度，满足强度要求。表 2 列出了各部件的许用应力与仿真结果的对比数据。可以看出，各部件的仿真变形和应力满足允许变形和许用应力的要求。

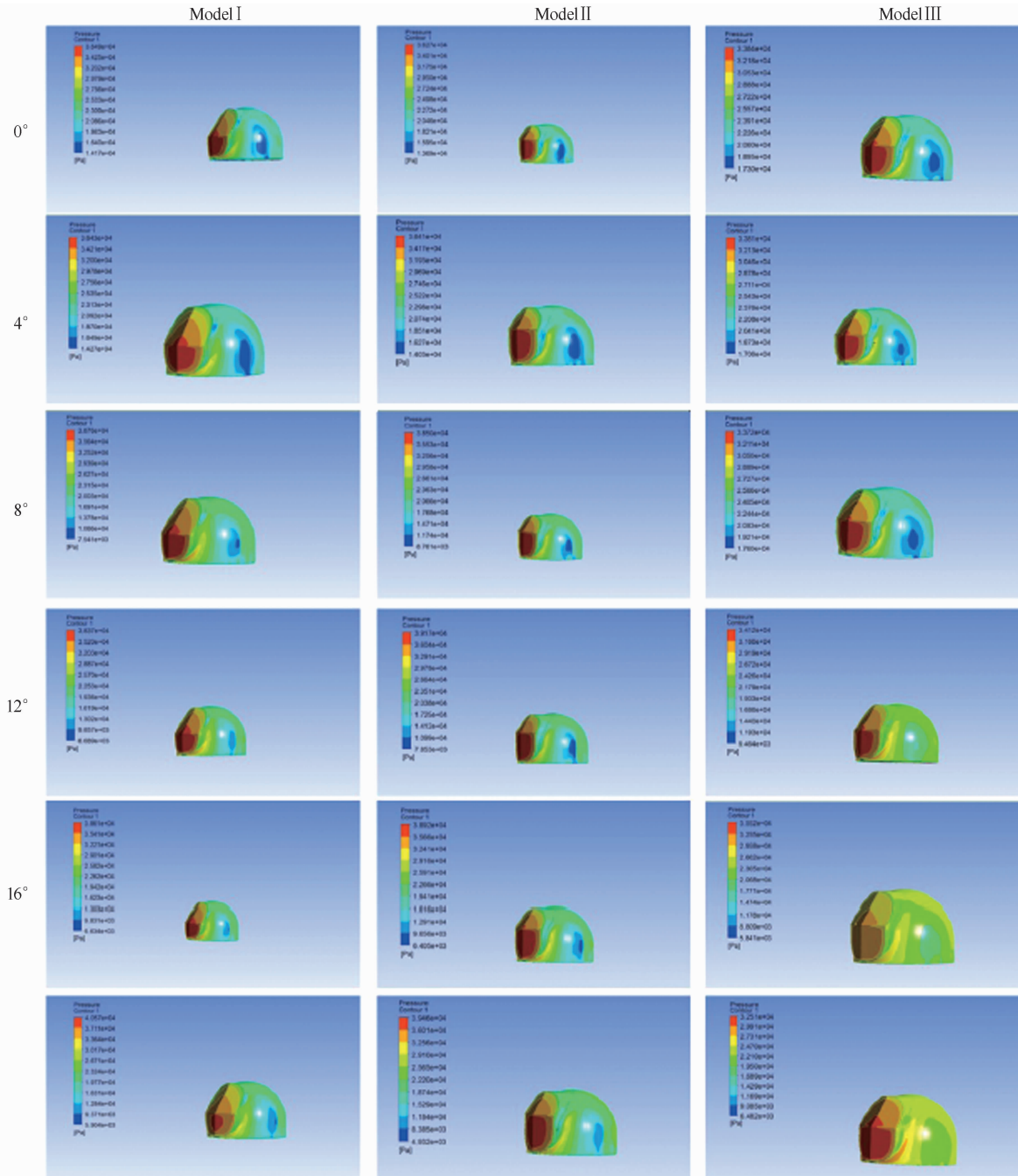


图 8 Model I、Model II 和 Model III 的表面压力图

表 2 部件许用应力与仿真结果的对比

部件名称	许用应力/MPa	仿真应力/MPa
镜片	103.4	3.321
镜片框架	825	1.6708
窗口整体结构	275	0.02

4 结论与展望

本文根据机载光机结构的需求, 设计了三种不同镜片排布方式的半球形光学窗口, 然后

分别对三种光窗模型进行了动力学数值模拟分析, 并研究了不同光学镜片排布方式对光学窗口气动特性的影响。结果表明, 虽然三种光学窗口模型具有相同的参考面积、高度和口径, 但是 Model III 更容易获得较大的升力, 同时所受的阻力也更小。这一特性可以使 Model III 具有更优异的气动效率。这表明光学镜片的排布方式对光学窗口的气动特性有显著的影响。Model III 的镜片排布方式可以增大升力和升阻

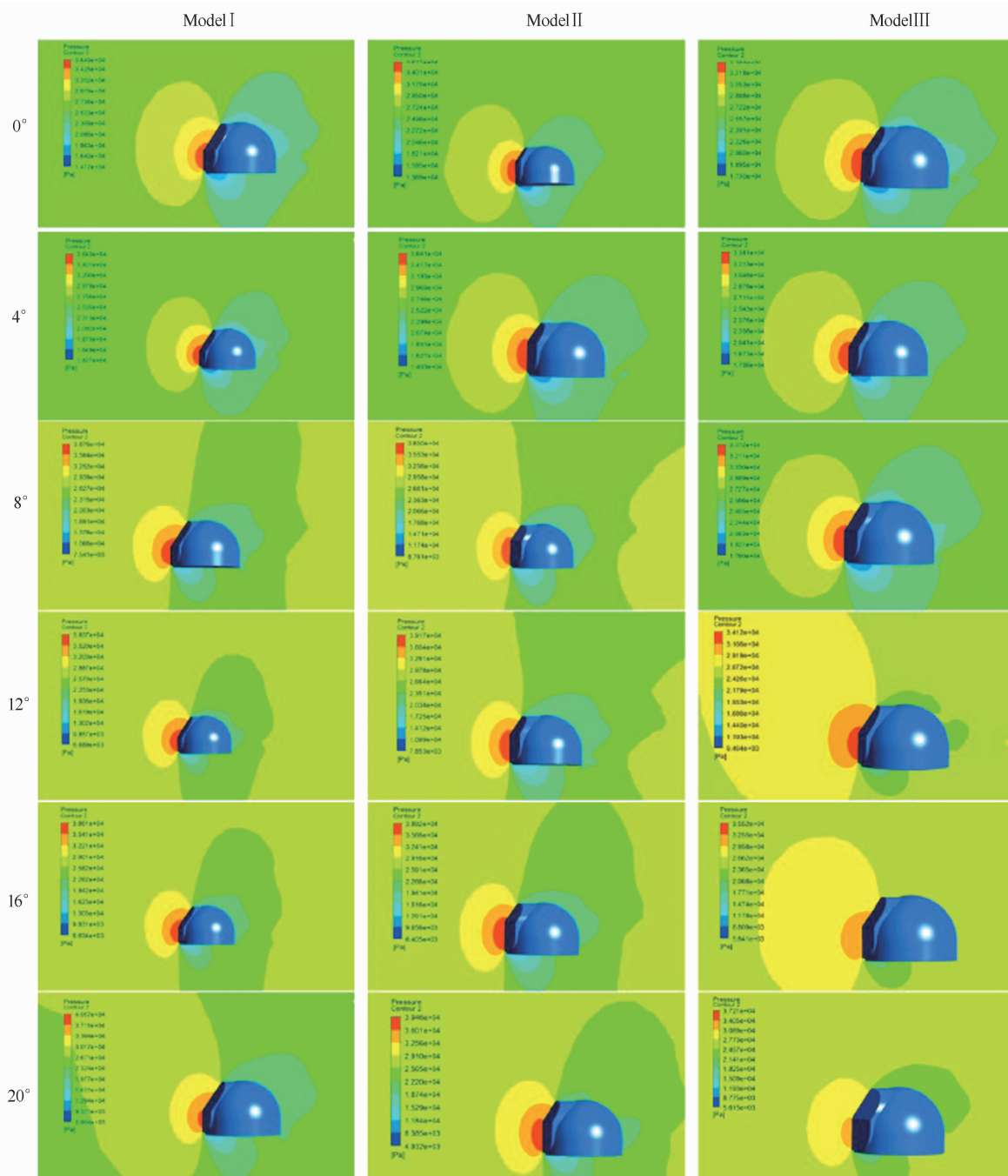


图9 Model I、Model II 和 Model III 的压力云图

比,减小光学窗口受到的空气阻力,从而提升气动效率和气动特性。另外还将数值模拟分析结果与理论计算结果进行了对比,从而验证了模拟分析的准确性。根据动力学数值模拟分析,得到了光学窗口在 0° 攻角工况下所受的风阻。最后对光学窗口进行了结构力学特性分析,并将仿真结果与材料的许用应力进行了对

比。结果表明,Model III 光学窗口在风阻载荷作用下不会因冲击而损坏,满足刚度和强度要求。在下一步的研究中,将在保持下排镜片骨架结构高度不变的情况下对光学窗口的镜片偏转角度进行优化和设计,从而进一步探究光学镜片偏转角度对机载光学窗口气动特性的影响。

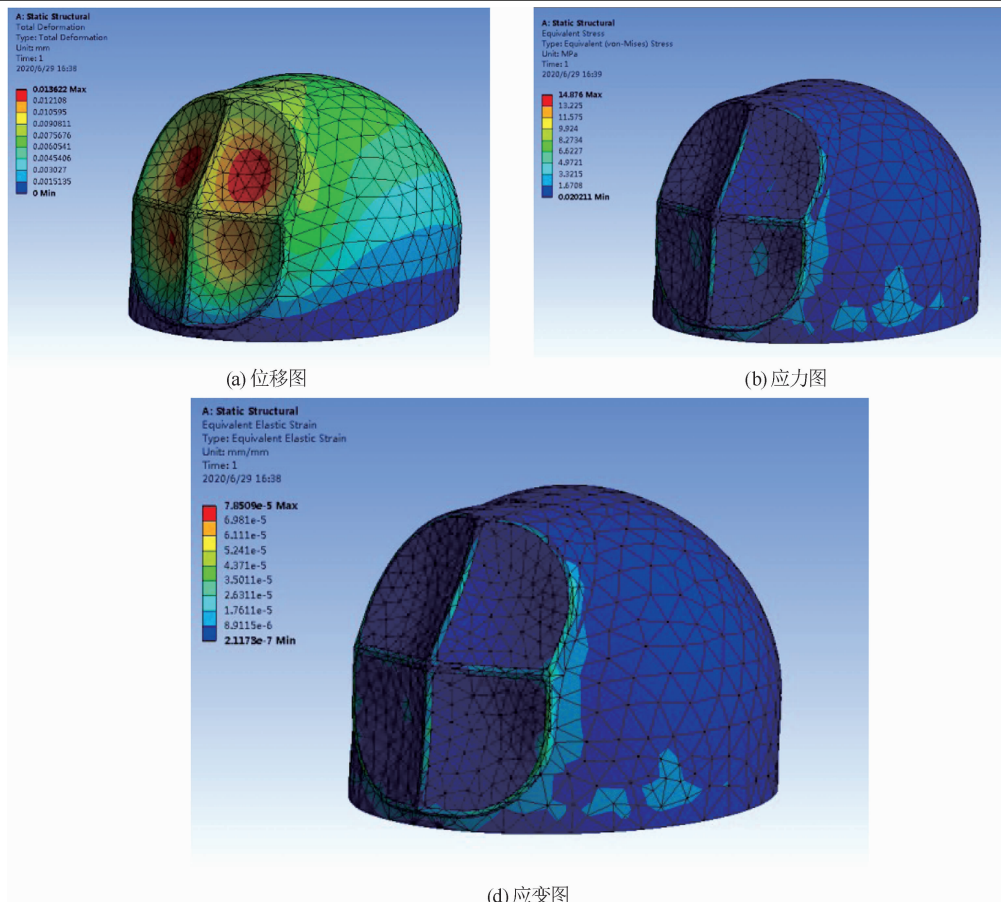


图 10 Model III 在表面均布载荷作用下的分析图

参考文献

- [1] 张庆鹏, 谭毅, 任戈, 等. 大口径光学窗口结构及支撑技术 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(12): 15-21.
- [2] 刘旭堂, 高云国. 大口径激光发射窗口拼接方法研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(10): 243-248.
- [3] 吕保斌, 杨利华, 马臻, 等. 光学窗口形变对平行光管像质影响 [J]. 光电技术应用, 2009, 24(2): 13-17.
- [4] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述 [J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
- [5] 仇振安, 边栓成, 刘先胜. 隐身飞机中光电系统及光窗无线电隐身性能分析 [J]. 电光与控制, 2013, 20(5): 94-96.
- [6] 邢振冲, 张葆, 洪永丰. 拼接式光学窗口对光学系统影响的分析方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(10): 210-219.
- [7] 赵春竹. 飞机共形光学窗口像差和瞄视误差的静态校正技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [8] 方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 212-217.
- [9] 谭玉凤, 王继红, 任戈, 等. 大口径轻量化主镜的温度场等效模型理论计算 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(6): 9-15.
- [10] 孙昌锋, 张兴德, 李荣刚, 等. 光学窗口的抗振结构优化分析 [J]. 激光与红外, 2015, 45(3): 307-310.
- [11] 陈朝君. 火炮制退机流场数值模拟 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [12] 王泓皓. 宽粒级煤泥浮选机试验研究与流场分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [13] 沈怡君. E-2C 舰载预警机的气动及雷达目标特性分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [14] 王文庆. 锌灰泵气液两相流流动特性的数值模拟与优化设计研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.