

文章编号 1004-924X(2012)09-1999-07

超音速共形整流罩风洞试验及其光机特性

姜振海^{1,2}, 王超¹, 魏群¹, 贾宏光¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:研究了共形整流罩超声速飞行时气动压力对其光机特性的影响。设计了口径为203 mm,长径比为1:1的椭球型整流罩,完成了速度为2.0、2.5及3.0 Ma,攻角为0°的风洞试验,获得了共形整流罩外表面压强值。建立了整流罩有限元模型,通过流固耦合仿真计算,得到材料为热压MgF₂的共形整流罩在不同厚度时的面型变化及应力分布数据,并拟合了内、外表面变形后的轮廓曲线方程。设计了光学成像质量评价光学系统,对比了共形整流罩受气动压力前后的成像质量。结果表明,共形整流罩厚度为2 mm,速度为3.0 Ma时可产生最大应力37.5 MPa;与整流罩面型变形前成像质量比较,点斑最大相对误差为0.26%,波面PV值最大相对误差为-1.03%。在只承受气动压力的情况下,该结果满足结构强度及光学成像质量要求,可为共形光学系统设计及优化工作提供部分依据。

关键词:共形整流罩;气动压力;光机特性;风洞试验;流固耦合

中图分类号:V22;V211.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.1999

Wind tunnel experiment of supersonic conformal dome and its optical and structure characteristics

Jiang Zhen-hai^{1,2}, WANG Chao¹, Wei Qun¹, Jia Hong-guang^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn

Abstract: The impact of pneumatic pressure for a supersonic conformal dome on optical and structure characteristics was studied. The elliptical dome with a diameter of 203 mm and the ratio of length to diameter of 1:1 was designed. Wind tunnel experiments in an attack angle 0° were accomplished by speeds of 2.0, 2.5 and 3.0 Ma and the pressure was obtained on the surface of dome. The displacement distribution and the stress distribution of a hot-press MgF₂ dome were obtained by the fluid-structure coupled analysis on the finite element model based on different thicknesses. According to the data, the figure curves of these dome models were fitted renewedly. Imaging quality was compared based on the optical system designed and the results illuminate that the maximum stress is 37.5 MPa when the thickness of the dome is 2 mm and the speed is 3.0 Ma. At the same time, by contrast with the initial optics of the dome, the

收稿日期:2012-03-05;修订日期:2012-05-08.

基金项目:中国科学院“三期”创新工程资助项目

relative error of spot radius is 0.26%, and figure relative error is -1.03%, which meets the requirements of structure strength and imaging quality under the dynamic pressure.

Key words: conformal dome; pneumatic pressure; optical and structure characteristics; wind tunnel experiment; fluid-structure coupling

1 引言

与传统半球型整流罩不同,共形整流罩能够更好地满足导弹外轮廓与形状需求^[1]。美国雷声(Raytheon)公司和精密共形光学技术(Precision Conformal Optics Technology, PCOT)团队对共形整流罩的研究结果进行了总结^[1]:(1)减少导弹阻力,以至导弹获得更远射程和更快速度,缩短导弹命中目标时间;(2)提高导弹气动性能,改善整流罩附近的热流特性;(3)在未来导弹及其它制导武器中扮演重要角色。但共形整流罩的非球面特性给其设计、加工、检测带来困难^[2],且环境温度的改变和超声速运动时产生气动压力都会影响其成像质量。风洞试验测量整流罩外表面压强分布数据是研究整流罩光机特性重要数据来源。目前,国内有关共形整流罩的研究工作还只停留在理论研究阶段^[3-7],没有相关风洞试验的报道。

Aric B. S 等研究了共形整流罩的抛光技术,给国内外的研究人员提供了共形整流罩加工的可行性方案^[8];Hu Hao 等完成了口径 120 mm,长径比 1:1.2 共形整流罩的加工及检测,其面型精度误差 PV 值为 0.032 mm, RMS 值为 0.008 mm^[9],已经满足了使用精度要求;考虑到温度变化对共形整流罩的影响,文献[10]提出利用可消像散的衍射面结构的温度补偿能力来设计共形光学系统消热差结构的方案,并设计了应用于中波红外成像的共形整流罩光学系统;Raytheon 公司的 David J. K 等完成了中波红外成像共形整流罩光学系统的设计,对加工及检测过程进行了详细说明,并完成了成像试验^[11-12],但成像试验没有考虑气动压力的影响。

为了研究共形整流罩超声速飞行时气动压力对其光机特性的影响,本文完成了共形整流罩外表面测压的风洞试验,获得不同 Ma 数整流罩外表面压强值。以此作为边界条件,参考文献[13]中半球型整流罩耦合分析的计算方法,在有限元

软件 ANSYS 中建立材料为热压 MgF₂ 共形整流罩有限元模型,进行流固耦合仿真计算,得到整流罩在不同厚度,不同 Ma 数时面型变化及应力分布数据;模拟内外表面面型轮廓曲线,得到整流罩面型变化后的结构模型;设计共形整流罩光学系统,在 Zemax 软件中对比成像质量,获得光机特性的变化情况。结果验证了共形整流罩满足结构强度及光学成像质量要求,为下一步设计及优化共形光学系统提供了部分依据,为接下来不同材料、不同攻角时共形整流罩研究工作提供了参考。

2 风洞试验

2.1 风洞试验模型

依据作者研究成果:椭球型整流罩具有良好的空气动力学性能与光学性能^[14-15]。设计了口径为 203 mm,长径比为 1:1 的椭球型整流罩。依照整流罩外形尺寸,设计风洞试验模型,材料选用 30CrMnSi,外表面镀铬抛光处理,其中试验前端模型截面如图 1 所示。

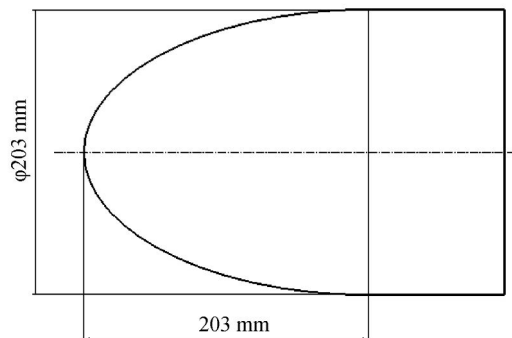


图 1 风洞试验模型

Fig. 1 Wind tunnel experiment model

风洞试验中采用尾部支撑方式,模型外表面垂直方向开设直径为 3 mm 的测压孔,依据测压模型外表面轴对称结构特性,半侧开设测压孔,通过传压导管分别与内置压力传感器相连,总计

109 个测压孔,其安装方式如图 2 所示。图 3 所示为风洞试验模型实物。

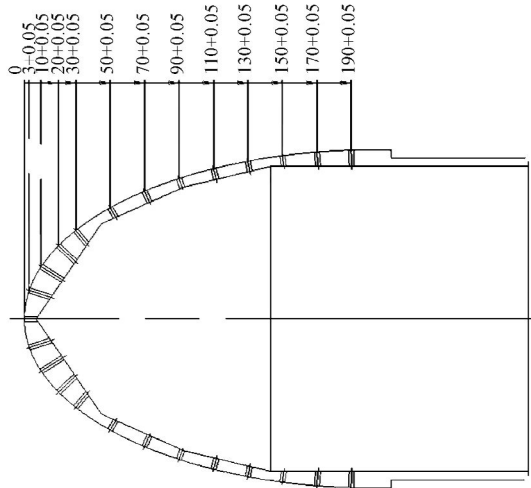


图 2 测压孔位置

Fig. 2 Positions of pressure measuring points

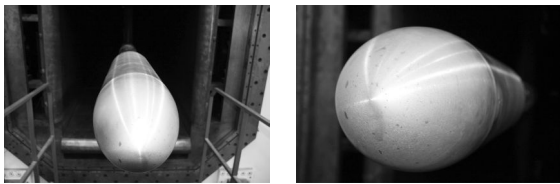


图 3 风洞试验实物

Fig. 3 Wind tunnel experiment

2.2 试验及结果

风洞试验在中国航空气动力研究中心完成,试验段截面尺寸 1.2 m × 1.2 m, Ma 数为 2.0、2.5 及 3.0,攻角为 0°。

压力传感器测量模型表面的压强值,通过式(1)求得压力系数,如图 4 所示。

$$C_{pi} = \frac{p_i - p_\infty}{Q_\infty}, \quad (1)$$

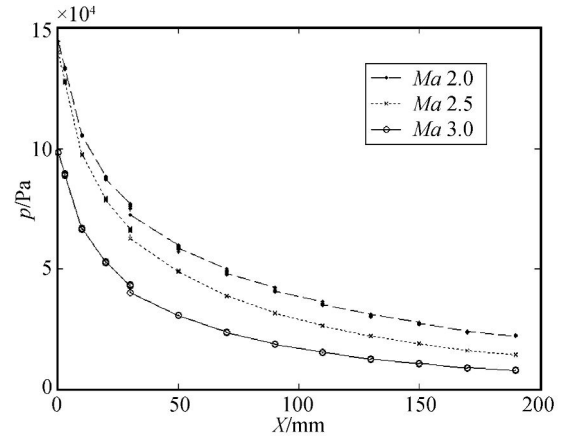
其中: C_{pi} 为模型上第 i 个点的压力系数, p_i 为模型上第 i 个点测得的静压, p_∞ 为试验段来流静压, Q_∞ 为试验段来流动压,具体风洞试验参数如表 1 所示。

表 1 风洞试验参数

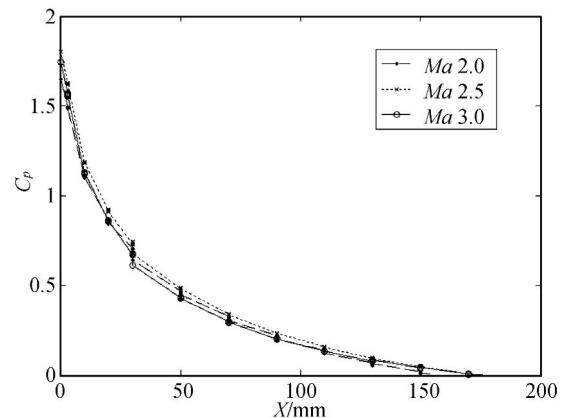
Tab. 1 Parameters of wind tunnel experiment

速度 Ma	p_∞ / Pa	Q_∞ / Pa
2.0	29 221.3	71 658.5
2.5	20 444.4	68 900.8
3.0	8 571.7	51 465.1

从图 4 风洞试验结果可以看出:越靠近整流罩顶部位置外表面压强值越高,压力系数越大,顶点位置数值明显高于其它外表面部分;随着速度提高压强数值逐渐降低。



(a)表面系数
(b)Pressure on surface



(b)压力系数
(b)Pressure coefficient

图 4 风洞试验结果

Fig. 4 Results of wind tunnel experiment

3 结构分析

3.1 流固耦合仿真计算

整流罩有效通光孔径 $\Phi 65$ mm,模型内、外表面轮廓曲线为椭圆线,式(2)、(3)分别为内、外表面椭圆线方程:

$$\frac{(x-203)^2}{(203-t)^2} + \frac{z^2}{(101.5-t)^2} = 1, \quad (2)$$

$$\frac{(x-203)^2}{203^2} + \frac{z^2}{101.5^2} = 1, \quad (3)$$

其中： t 为整流罩厚度。根据不同厚度值($t=2、3、4$ 及 5 mm)分别设计整流罩模型。

在 ANSYS 中完成仿真计算。采用六面体单元(SOLID45)进行网格划分,图 5 所示为整流罩有限元分析模型。单位制选用 N-mm-MPa。模型材料为热压 MgF_2 ,弹性模量为 110 310 MPa,泊松比 0.3。

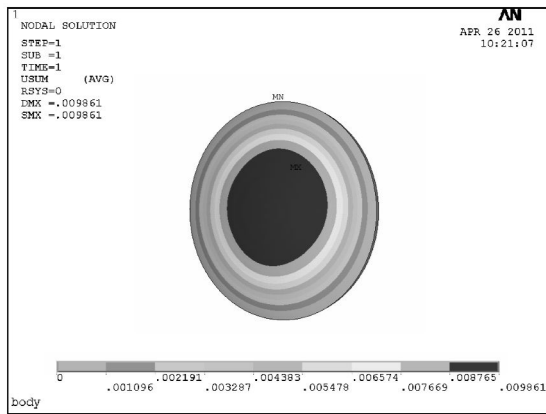


图 5 整流罩有限元模型($t=5$ mm)

Fig. 5 Finite element model of dome($t=5$ mm)

由于风洞试验采集的整流罩表面压强值为流场稳态时载荷值,所以整流罩的流固耦合分析可以简化为静力学求解的方式进行,将压强值施加于有限元模型的外表单元面上,模型端面为固定约束,根据式(4)、(5)、(6)和(7)计算整流罩单元节点位移 $\{d\}$ 及应力 σ 。

$$\{d\} = [K]^{-1} \{p\}, \quad (4)$$

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\}, \quad (5)$$

$$[K] = \iiint_v [B][D][B] d_v, \quad (6)$$

$$[B] = [H][N] \quad (7)$$

其中： $[K]$ 为刚度矩阵， $\{p\}$ 为整流罩外表面压强值， $[D]$ 为弹性矩阵， $[B]$ 为几何矩阵， $[H]$ 为微分算子矩阵， $[N]$ 为单元形函数。

整流罩表面单元节点位移直接体现为整流罩面型变化量。依据不同厚度与不同 Ma 数,分别计算整流罩的面型变化及应力分布数据。

3.2 计算结果与分析

在所有整流罩面型变化及应力分布数据中,面型变化最大位置均位于整流罩外表面顶点处,最大应力位置均位于整流罩外边缘处;越靠近顶点位置,面型变化越大,越远离顶点位置,应力值越大。计算结果表明,整流罩在厚度为 2 mm,速度

为 3.0 Ma 时,面型变化及应力均处于最大值,其中面型变化最大值为 0.009 8 mm,最大应力值为 37.5 MPa,如图 6、7 所示。应力满足材料的许用强度极限值 52 MPa。

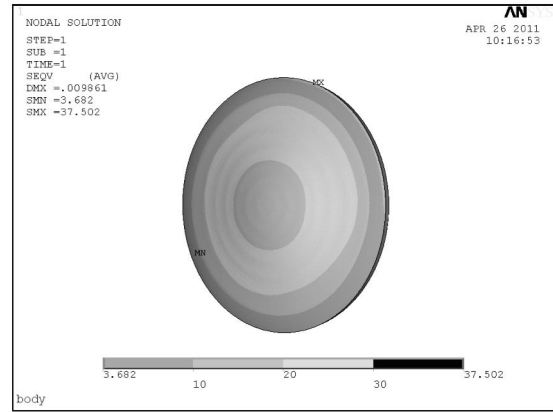


图 6 应力分布($t=2$ mm, 3.0 Ma)

Fig. 6 Stress distribution($t=2$ mm, 3.0 Ma)

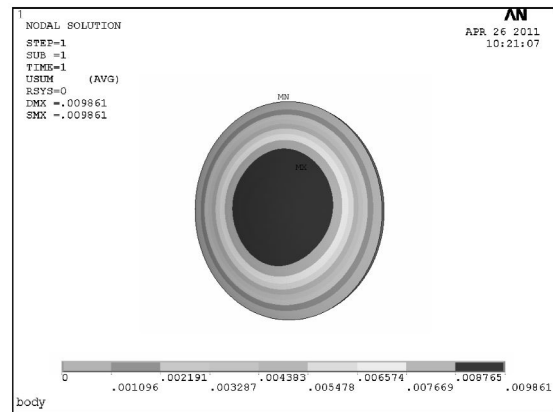


图 7 位移分布($t=2$ mm, 3.0 Ma)

Fig. 7 Displacement distribution($t=2$ mm, 3.0 Ma)

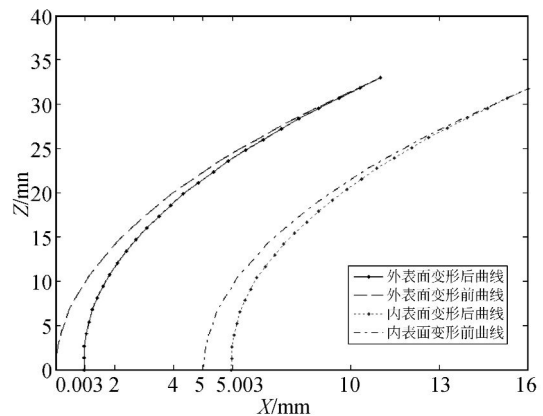


图 8 曲线拟合($t=5$ mm, 2.5 Ma)

Fig. 8 Curves of surface calculation($t=5$ mm, 2.5 Ma)

4 光学特性分析

4.1 拟合整流罩面型轮廓曲线

依流固耦合分析计算结果,将内外表面节点位移数值提取出来,计算得到截面位置处结构发生变形情况。采用最小二乘法,得到截面变形后轮廓线的拟合曲线。

如表 2 所示,给出厚度 5 mm,2.5 Ma 时模型面型变化后内外表面轮廓线方程的二项式系数,由曲线系数重新拟合内、外表面的外轮廓曲线,如图 8 所示。依据此种方法,拟合所有内外表面轮廓曲线,得到变形后的整流罩模型。

表 2 整流罩内、外表面模拟曲线系数表

Tab. 2 Curve coefficients of dome in simulation

项数	外表面	内表面
0	0.546 9	-10 801.514
1	20.056	10 245.619
2	-19.057	-4 252.097
3	12.130	1 012.892
4	-4.546	-152.542
5	1.033	15.064
6	-0.144	-0.976
7	0.012	0.040
8	0	0
9	1.067×10^{-5}	9.720×10^{-6}

4.2 光学成像质量对比

为了对比整流罩面型变化对光学成像质量影响,设计了如图 9 所示的光学系统,整流罩后放置 $\Phi 55$ mm 理想透镜,在 Zemax 中完成光学系统成像质量分析。

图 10、11 和 12 给出了整流罩在不同厚度及 Ma 数时,整流罩面型变化前后光学成像质量对比结果。结果表明:传递函数随着整流罩厚度的增加逐渐降低,点斑及波面 PV 值逐渐增大;相对于共形整流罩面型变化前的光学成像质量,传递函数、点斑及波面 PV 值变化微小,厚度为 2 mm,

速度为 3.0 Ma 时,点斑最大相对误差为 0.26%,波面 PV 值最大相对误差为 -1.03%,足以保证光学系统成像质量要求。

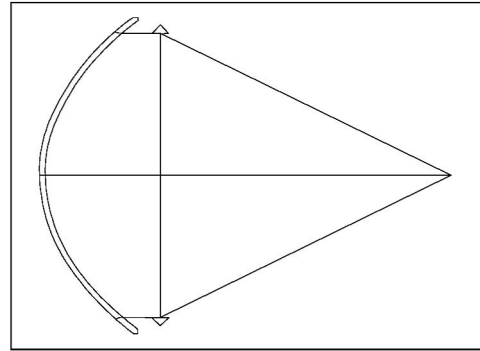


图 9 评价成像质量光路图

Fig. 9 Optical system for evaluating imaging quality

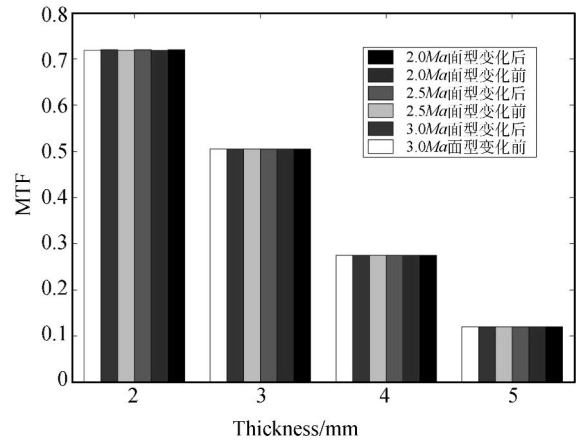


图 10 传递函数对比

Fig. 10 Comparative results of optical transfer function

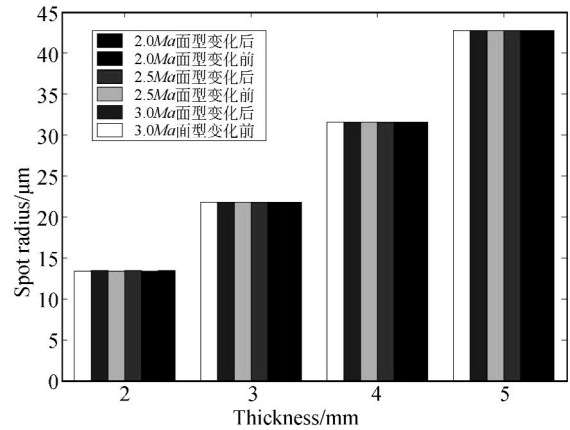


图 11 点斑对比

Fig. 11 Comparative results of spot radius error

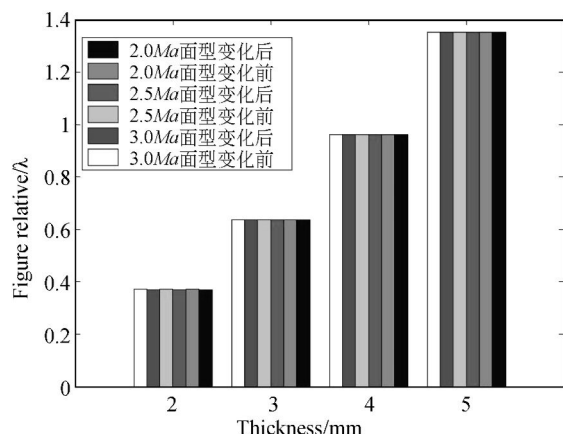


图 12 波面 PV 值对比

Fig. 12 Comparative results of figure relative error

参考文献:

- [1] PARTRIC A T. Precision conformal optics technology program [J]. *SPIE*, 2001, 4375:96-107.
- [2] JOHN P S, RICHARD A E, FLANK S. Fabrication challenges associated with conformal optics[J]. *SPIE*, 2001, 4375, 128-137.
- [3] 赵洪卫, 侯天晋, 朱斌. 军用光学整流罩技术研究的进展[J]. *激光与红外*, 2010, 40(9): 926-931. ZHAO H W, HOU T J, ZHU B. Military optical domes techniques researchful developments[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(9): 926-931. (in Chinese)
- [4] 宋辞, 戴一帆, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变抛光的后置处理[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1715-1721. SONG C, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Post processing for magnetorheological finishing of optical mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1715-1721. (in Chinese)
- [5] 孟庆超, 段萌, 张运强, 等. 红外空空导弹整流罩技术的新进展[J]. *航空兵器*, 2008, 2: 24-27. MENG Q CH, DUAN Y, ZHANG Y Q, *et al.*. New development on dome of infrared air-to-air missile[J]. *Aero Weaponry*, 2008, 2: 24-27. (in Chinese)
- [6] 黄秋, 陈亦庆, 高志峰, 等. 红外导引头整流罩技术研究[J]. *应用光学*, 2009, 30(5): 840-843. HUANG Q, CHEN Y Q, GAO ZH F, *et al.*. Consideration to radome technology for IR seeker

5 结 论

完成了口径为 203 mm, 长径比为 1:1 的椭球型共形整流罩风洞试验, 根据已掌握的公开情报, 在国内是首次完成。通过风洞试验获得的试验数据, 研究了材料为热压 MgF_2 的共形整流罩超声速飞行时的光机特性变化情况。结果表明: 厚度 2 mm, 速度 3.0 Ma 时, 共形整流罩产生最大应力 37.5 MPa, 相对于共形整流罩面型变化前的光学成像质量, 点斑最大相对误差为 0.26%, 波面 PV 值最大相对误差为 -1.03%。该结果为进一步设计及优化光学系统提供了部分依据。

- [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(5): 840-843. (in Chinese)
- [7] 张义广, 冯志高, 杨军, 等. 超声速红外长波光学整流罩设计技术研究[J]. *人工晶体学报*, 2007, 36(6): 1314-1318. ZHANG Y G, FENG ZH G, YANG J, *et al.*. Study on the designing technology of the infrared optical dome used in supersonic mode[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2007, 36(6): 1314-1318. (in Chinese)
- [8] ARIC B S, WILLIAM K, JUSTIN T, *et al.*. Developments in the finishing of domes and conformal optics[J]. *SPIE*, 2007, 6545, 65450Q.
- [9] HU H, DAI Y F, GUAN C L, *et al.*. Deterministic manufacturing technologies for polycrystalline magnesium fluoride conformal domes[J]. *SPIE*, 2010, 7655:765526.
- [10] 孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 折/衍混合消热差共形光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 792:797. SUN J X, LIU J ZH, SUN Q, *et al.*. Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 792:797. (in Chinese)
- [11] DAVID J K, JAMES P M, RONALD G H, *et al.*. Conformal optics risk reduction demonstration[J]. *SPIE*, 2001, 4375: 146-153.
- [12] DAVID J K. Fundamentals of conformal dome design[J]. *SPIE*, 2002, 4832: 394-409.
- [13] AI X Q, WEI Q, JIA H G. Dome design and coupled thermal-mechanical analysis of supersonic

- missile[J]. *SPIE*, 2009, 7506, 75061Q.
- [14] WEI Q, JIA H G, XUAN M. Equivalent lenses of supersonic seeker's outflow refractive index field obtained by simulation and experiment[J]. *SPIE*, 2009, 71561Q:1-4.
- [15] 魏群,艾兴乔,姜湖海,等. 超音速光学导引头整流罩的形状优化[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 384-389.
- WEI Q, AI X Q, JIANG H H, *et al.*. Optimizing design of dome figure for supersonic seekers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 384-389. (in Chinese)

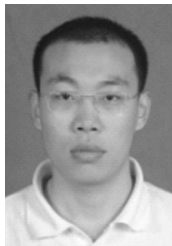
作者简介:



姜振海(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,2005年于长春工业大学获得学士学位,主要从事结构分析方面的研究。E-mail: jiangzhenhai2008@126.com

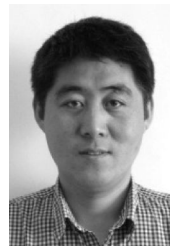


魏群(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,助理研究员,2005年于浙江大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事气动光学方面的研究。E-mail: wei.q@hotmail.com



王超(1985—),男,2010年毕业于中国地质大学(武汉)获得工学硕士学位,现工作于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,主要研究方向:电路与系统设计、数字信号处理。E-mail: wc100714@163.com

导师简介:



贾宏光(1971—),男,黑龙江五常人,研究员,博士生导师,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光机电系统小型化与精确制导技术的研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn

●下期预告

S型折叠式微悬臂梁刚度计算

刘双杰,郝永平

(沈阳理工大学 装备工程学院,辽宁 沈阳 110159)

针对目前S型折叠式悬臂梁的刚度没有成熟的设计计算公式,本文利用能量法和胡克定律推导出了S型折叠悬臂梁 x 向、 y 向和 z 向的刚度计算公式,在ANSYS中对S型折叠悬臂梁建模,应用有限元法计算S型悬臂梁的刚度,并和理论公式进行对比。和有限元法相比,公式计算值的相对误差分别为1.16%,1.09%和2.95%,均小于3%。应用图像测位移法对S型悬臂梁进行了 x 、 y 向的拉伸实验,实验结果表明实验值和理论值吻合,S型悬臂梁的计算公式推导合理,能够为该类型悬臂梁的设计和计算提供理论依据。