

半球形整流罩厚度对气动热辐射的影响

王 惠, 党凡阳, 张荣达, 明 月, 范志刚

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 气动加热的高温整流罩会产生强烈的红外辐射, 影响导引头对目标的探测精度。为了寻求减弱整流罩气动热辐射的方法, 建立了气动热辐射数学模型。利用有限元软件以及建立的气动热辐射数学模型对不同厚度的半球形整流罩气动热和气动热辐射进行了数值仿真, 得到了半球形整流罩厚度对气动热和气动热辐射的影响规律。研究表明, 在相同飞行工况下, 工作 10 s 时, 当半球形整流罩厚度由 3 mm 增厚到 8 mm, 整流罩驻点温度降低了 16.23%; 形变量减少了 54.2%; 探测器接收面上的最大辐照度减少了 84.43%。因此增加整流罩的厚度可以降低整流罩的温度, 有效减小整流罩的热形变和探测器上接收到的干扰辐射照度。

关键词: 气动热辐射; 半球形整流罩; 厚度

中图分类号: TN206; O435.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1204002

Influence of thickness of hemispherical dome on aerodynamic thermal radiation

Wang Hui, Dang Fanyang, Zhang Rongda, Ming Yue, Fan Zhigang

(Research Centre for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aerodynamically heated high temperature dome will produce strong infrared radiation. In some serious cases when the probe reaches saturation, the detecting precision of the seeker for target can be severely affected. In order to reduce the aerodynamic thermal radiation of the dome, a mathematical model of aerodynamic thermal radiation was developed. The aerodynamic heat and the aerodynamic thermal radiation of the hemispherical dome with different thickness were simulated numerically by software of finite element analysis and the mathematical model of aerodynamic thermal radiation. The influence of the thickness of hemispherical dome on the aerodynamic thermal response and aerodynamic heat radiation was analyzed and obtained. Research indicates that in the same flight conditions and in 10 s, when the thickness of hemispherical dome increases from 3 mm to 8 mm, the stagnation point temperature of the dome reduces by 16.41%; the thermal deformation of the dome reduces by 54.2%; the maximum irradiance of receiving surface of the detector decreases by 84.43%. Therefore increasing the thickness of the dome can not only reduce the temperature of the dome, but also effectively reduce the thermal deformation of the dome and the interference radiation illumination received on the detector.

Key words: aerodynamic thermal radiation; hemispherical dome; thickness

收稿日期: 2018-07-12; 修订日期: 2018-08-13

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(6132760102-03); 航天科技创新基金(JTBL11610)

作者简介: 王惠(1986-), 男, 博士生, 主要从事气动光学方面的研究。Email: wh1986_hit@163.com

导师简介: 范志刚(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事气动光学、光电检测方面的研究。Email: fzg@hit.edu.cn

0 引言

整流罩作为红外导引头的重要部件之一,位于导引头的前端^[1-2]。当导弹在大气层内高速飞行时,光学整流罩与来流之间相互作用,使得流场和光学头罩的温度迅速升高^[3-4]。被气动加热的高温激波和光学头罩会产生强烈的热辐射,对红外探测器上接收到的目标信号产生非均匀的热辐射干扰,降低了探测器对目标信号的信噪比。当温度过高时,热辐射干扰会使得红外探测器达到饱和,使导引头失去对红外目标的探测能力^[5-6]。同时,整流罩受到热冲击以及风沙和雨水的撞击,整流罩的机械强度、硬度会迅速下降。为了使导引头具有高的抗热冲击性能不至于破裂以及良好的光学性能等,对红外整流罩的外形、材料、尺寸和厚度等的设计都有非常高的要求^[7-8]。而整流罩的气动光学性能以及气动热辐射效应与光学整流罩的外形、厚度和材料等密切相关。通过优化整流罩结构,魏群得到了整流罩长径比与整流罩阻力系数以及成像质量的归一化关系函数并获得了具有良好空气动力和光学性能的整流罩外形^[9]。孟立新等人对光学窗口形状、厚度进行了优化设计,根据气动光学效应引起的光斑离焦,设计了焦距补偿镜,结果表明:补偿后的光学窗口可有效抑制气动光学效应^[10];张鑫对目标距离以及线性视场的变化对探测器接收功率的影响进行了研究并得到了它们的变化规律^[11];王亚辉对整流罩气动热辐射进行了仿真分析,得出随着飞行时间的增加,整流罩气动热辐射将成为整个气动热辐射的主要因素。抑制整流罩的温度上升速度和幅度成为减弱气动热辐射的关键^[12]。

在保证整流罩正常工作的情况下,为寻求降低整流罩气动热辐射的方法,文中研究了整流罩厚度与整流罩热辐射之间的变化规律。以长径比为 0.5、半径为 100 mm、不同厚度的半球形整流罩为研究对象,通过有限元数值仿真以及建立半球形整流罩的气动热辐射数学模型,得到了不同厚度半球形整流罩的气动热响应分布以及探测器接收面上的干扰辐射度分布。最终根据探测器性能参数仿真计算了半球形整流罩干扰辐射影响下探测器所成失真目标图像。

1 气动热环境下半球形整流罩热辐射建模

整流罩和流场相互作用形成了复杂非均匀分布的流场,导致光学整流罩受热不均匀^[13],整流罩的温度场分布和其自身的热辐射密切相关,为了精确地仿真计算整流罩的热干扰辐射,对光学整流罩面源进行离散,如图 1 所示,假设其中每一个小面源的温度都是均匀的。

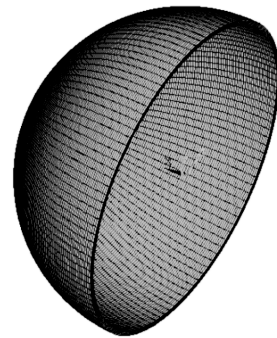


图 1 整流罩有限元模型示意图
Fig.1 Finite element model of dome

整流罩热辐射可以认为是一个半透明体的热辐射^[13],设整流罩某一面元的温度为 T_i ,根据 Planck 辐射定律,则该面元光谱辐射亮度为:

$$L_{\lambda} = \frac{2\epsilon hc^2 \lambda^{-5}}{\exp(hc/kT_i \lambda) - 1} \quad (1)$$

式中: ϵ 为整流罩外表面的发射率; h 为普朗克常数; c 为光速; k 为 Boltzmann 常数; λ 为光波波长。

根据公式(1)可以得出离散后某一微小面元的辐射功率为:

$$dW = L_{\lambda} \cos \theta d\lambda dA d\Omega \quad (2)$$

式中: θ 为面元法线方向与发出的辐射光线方向的夹角; dA 为辐射单元面积; $d\Omega$ 为辐射光线空间角; $d\lambda$ 为辐射波长间隔。

以有限能量的采样光束代表连续辐射,采用光线追迹法对每一根采样的整流罩面源出射光束进行追迹,将探测器进行网格划分,累加计算每个网格中整流罩的干扰辐射照度,最终得到探测器接收面上的整流罩的热辐射干扰分布^[8,14]。

2 半球形整流罩数值仿真结果

2.1 半球形整流罩热响应仿真结果

当半球形整流罩以 0° 攻角、速度为 3.38 Ma,在

20 km 高度飞行 10 s 时,整流罩驻点处流场的最高温度升高到 715 K 左右,所受的最大压强为 $8.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ ^[4],以此为边界条件,对半球形整流罩进行热响应仿真分析。

整流罩的材料选用蓝宝石,头罩的长径比为 0.5,外表面半径为 100 mm,为保证头罩在气动热环境下

不破裂^[15],整流罩厚度选取范围为 3~8 mm,间隔为 1 mm,进行热响应仿真计算。图 1 为厚度为 3 mm 的整流罩有限元模型。

半球形整流罩工作 10 s 的热响应特性分布如图 2~5 所示。为方便对比研究,给出了厚度分别为 3、6、8 mm 时,半球形整流罩工作 10 s 的温度场分布云

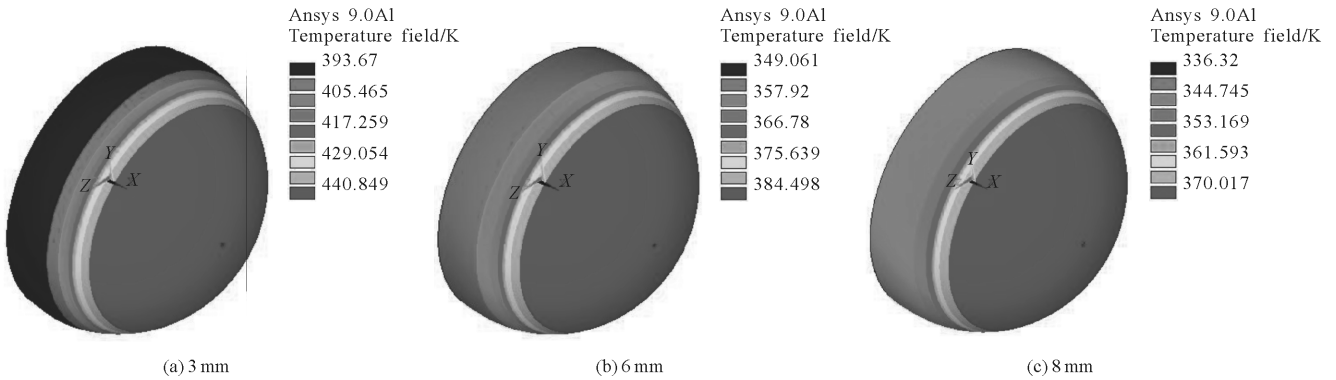


图 2 厚度为 3、6、8 mm 整流罩工作 10 s 外表面温度场分布

Fig.2 Outer surface temperature field distribution of 3, 6, 8 mm dome in 10 s

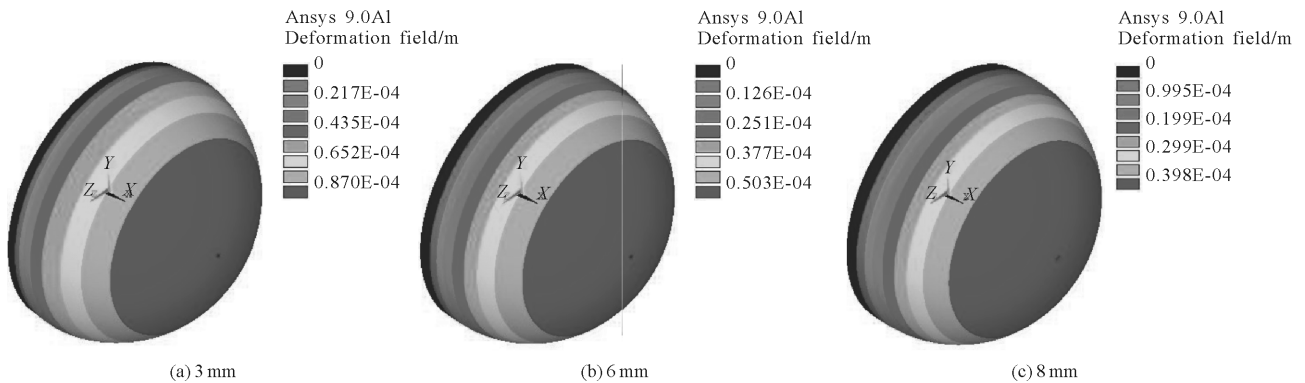


图 3 厚度为 3、6、8 mm 整流罩工作 10 s 时形变场分布

Fig.3 Deformation field distribution of 3, 6, 8 mm dome in 10 s

图以及热形变分布云图,如图 2~3 所示。其中图 2(a)~(c)分别对应 3、6、8 mm 厚度半球形整流罩工作 10 s 时温度分布云图,相应的驻点最高温度分别为 446.746、388.927、374.23 K。

图 3(a)~(c)图分别对应 3、6、8 mm 厚度半球形整流罩工作 10 s 时形变分布云图最大形变分别为 97.9、56.6、44.8 μm 。

相同厚度整流罩驻点最高温度以及热形变随时

间不断增大,为突出研究重点,文中给出了第 1、4、7、10 s 时整流罩驻点最高温度和热形变随厚度的变化情况。

随着半球形整流罩的厚度不断增厚,整流罩外表面驻点最高温度不断降低,形变不断减小。与 3 mm 厚度整流罩热响应结果相比,工作 10 s 时 8 mm 厚度整流罩外表面驻点最高温度降低了 16.23%,最大热形变减小了 54.24%。图 4 为工作时间分别为 1、4、

7、10 s 时整流罩外表面驻点最高温度随厚度的变化情况,从图中可以得到:随着工作时间的增长,整流罩驻点温度随厚度变化量越大。

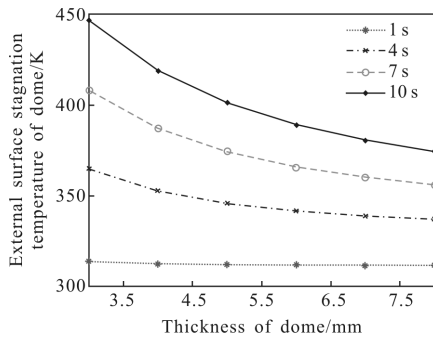


图 4 整流罩外表面驻点温度随厚度的变化

Fig.4 Outer surface stagnation temperature of dome varies with the thickness

图 5 为工作时间分别为 1、4、7、10 s 时整流罩最大形变随厚度的变化情况,从图中可以得到:随着工作时间的增长,整流罩最大热形变随厚度减小量越大。

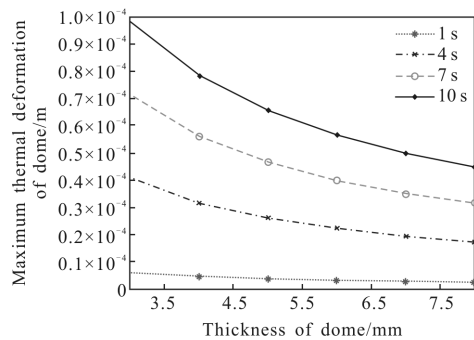


图 5 半球形整流罩最大形变随厚度的变化

Fig.5 Maximum deformation of the dome varies with thickness

2.2 半球形整流罩热辐射仿真结果

根据 2.1 小节得到的半球形整流罩热响应仿真结果以及半球形整流罩热辐射数学模型,计算得到了半球形整流罩热辐射仿真结果。仿真计算的探测器阵列规模为 128×128,工作波长范围为 3~5 μm。

飞行时间为 10 s 时,仿真得到探测器接收面上的辐射度分布如图 6 所示。其中图 6(a)、(b)、(c)分别

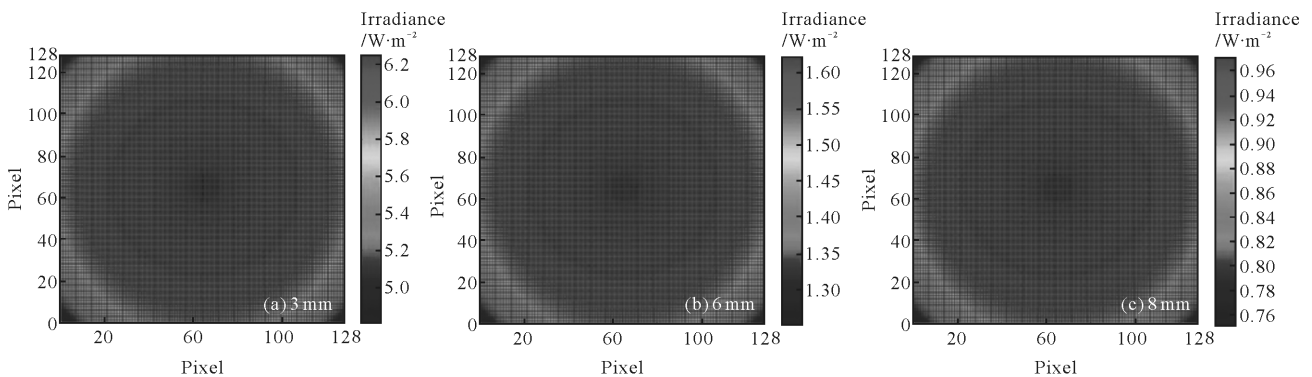


图 6 3、6、8 mm 热辐射在探测器接收面上的分布

Fig.6 Irradiance of 3, 6, 8 mm dome distributes on the receiving surface of detector

对应整流罩厚度为 3、6、8 mm 时产生的气动热辐射在探测器接收面上的分布。工作 10 s 时,3、6、8 mm 厚度整流罩产生的在探测器接收面上的最大辐照度分别为 6.241 5、1.621 5、0.971 2 W/m²。

探测器接收面上的最大辐照度随整流罩厚度的变化如图 7 所示。图中给出了工作时间分别为 1、4、7、10 s 时,探测器接收面上接收到的最大辐照度随整流罩厚度的变化情况。

从图 7 中可以得到:探测器接收面上的最大辐照度随整流罩厚度的增加而减小,在飞行时间 1 s 时,3 mm 厚度整流罩在探测器接收面上的最大辐照

度为 0.238 4 W/m²,整流罩厚度增加到 8 mm 时在探测器接收面上的最大辐照度减小到 0.176 7 W/m²。探测器接收面上的最大辐照度减少了 25.88%。而在飞行时间达到 10 s 时,3 mm 厚度的整流罩在探测器接收面上的最大辐照度为 6.241 5 W/m²,整流罩厚度增加到 8 mm 时在探测器接收面上的最大辐照度减小到 0.971 2 W/m²。探测器接收面上的最大辐照度减少了 84.43%。随着工作时间的增长,探测器接收面上接收到的最大辐照度随整流罩厚度的增加变化越大。探测器接收面上接收到的最大辐照度随厚度的变化趋势和热响应得到的结果一致。

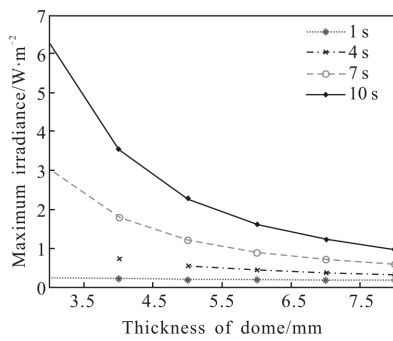


图 7 探测器接收面上的最大辐照度随整流罩厚度的变化

Fig.7 Maximum irradiance of the detector receiving surface varies with the thickness of the dome

为了直观地考察整流罩厚度变化引起的干扰辐射对目标图像的影响,仿真了飞行时间为 10 s、间隔为 1 s、3-8 mm 厚度整流罩产生的干扰辐射对目标图像的影响。以整流罩厚度分别为 3 mm 和 8 mm 时产生的失真目标图像为例进行说明,如图 8-9 所示。从图 8 可以得到:3 mm 厚度的整流罩引起的干扰辐射,使探测器在第 4 s 时达到饱和状况。当整流罩厚度增加到 8 mm 时,目标图像在第 9 s 时模糊不清,探测器达到饱和,如图 9 所示。

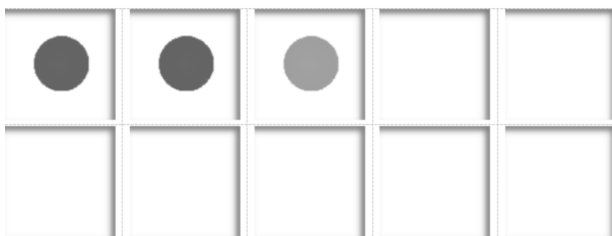


图 8 3 mm 厚整流罩产生的热辐射随时间对目标干扰所造成的失真图像

Fig.8 Distorted images are generated over time by the thermal radiation of the 3 mm dome while disturbing the target

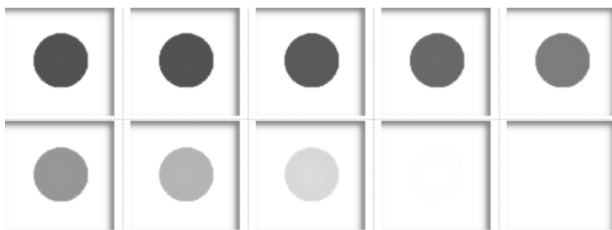


图 9 8 mm 厚整流罩产生的热辐射随时间对目标干扰所造成的失真图像

Fig.9 Distorted images are generated over time by the thermal radiation of the 8 mm dome while disturbing the target

随着整流罩厚度不断增加,整流罩产生的热辐射对探测器的探测性能影响变小,探测器达到饱和的时间不断增大,整流罩产生的干热辐射使探测器达到饱和的时间和整流罩厚度的关系如图 10 所示。

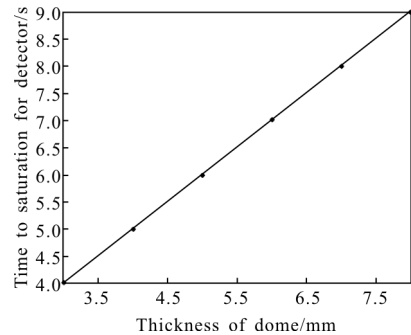


图 10 探测器达到饱和的时间随整流罩厚度的变化

Fig.10 Time of the detector reaches the saturation varies with the thickness of the dome

从图 10 中可以看出:随着整流罩厚度的不断增加,探测器达到饱和的时间逐渐变长,即探测器正常工作时间变长。

3 结 论

文中以半球形整流罩为研究对象,通过构建气动热辐射数学模型,数值仿真了半球形整流罩气动热和气动热辐射随厚度的变化规律。研究结果表明:随着整流罩厚度的不断增加,在相同飞行工况和时间内,整流罩驻点温度不断降低,整流罩厚度从 3 mm 增厚到 8 mm 时,整流罩驻点温度从 446.746 K 降低到 374.23 K,降低了 16.23%。整流罩的热形变从 97.9 μm 减小到 44.8 μm,形变量减少了 54.2%。探测器接收面上的最大辐照度随整流罩厚度的增加而减小,在工作时间为 10 s 时,随着整流罩厚度从 3 mm 增厚到 8 mm,探测器接收面上的最大辐照度从 6.2415 W/m² 减小到 0.9712 W/m²,最大辐照度减少了 84.43%。通过仿真得到的目标失真图样可知探测器达到饱和的时间从第 4 s 增加到了第 9 s,探测器正常工作时间变长。因此,相同飞行工况和时间内,增加整流罩厚度可以降低整流罩的温度,有效减小整流罩的热形变和减弱整流罩产生的红外热辐射。

参考文献:

[1] Sun Chiquan, Zhao Kan, Meng Junhe. IR optical system design

- of roll-elevation seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0204005. (in Chinese)
- 孙赤全, 赵侃, 孟军合. 滚仰式导引头红外光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0204005.
- [2] Zhao Rui, Rong Jili, Li Yuejun. Rocket fairing with different curvetypes[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(5): 1020-1026.
- 赵瑞, 荣吉利, 李跃军. 整流罩母线形状对脉动压力环境的影响研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(5): 1020-1026.
- [3] Yin Xingliang. Principle of Aero-optics [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2003. (in Chinese)
- 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [4] Fan Zhigang, Xiao Haosu, Gao Yuqiang. Characteristics analysis of high-speed aircraft optical dome in aerodynamic heating environment [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 361-365. (in Chinese)
- 范志刚, 肖浩苏, 高豫强. 气动热环境下高速飞行器光学头罩特性分析[J]. *应用光学*, 2009, 30(3): 361-365.
- [5] Hao Chenglong, Chen Shouqian, Fan Zhigang. Comprehensive analysis of imaging quality degradation of airborne optical system for aerodynamic flow field around the optical window [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(33): 7889-7898.
- [6] Hao Chenglong. Optical transmission of quadric surface optical window and aerodynamic flow field [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- 郝成龙. 二次曲面光学头罩及外流场气动光传输研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] Zhang Rongshi. Recent advances in infrared window and dome technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S2): 114-119. (in Chinese)
- 张荣实. 红外窗口/整流罩技术新进展 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S2): 114-119.
- [8] Xue Wenhui. Research on the thermal radiation characteristics of conformal dome in the aerodynamic environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- 薛文慧. 气动热环境下共形整流罩热辐射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [9] Wei Qun, Ai Xingqiao, Jiang Huhai, et al. Optimizing design of dome figure for supersonic seekers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 384-389. (in Chinese)
- 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.
- [10] Meng Lixin, Zhao Dingxuan, Zhang Lizhong, et al. Boundary layer effect and compensation in airborne laser communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3231-3238. (in Chinese)
- 孟立新, 赵丁选, 张立中, 等. 机载激光通信中气动光学的影响及补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3231-3238.
- [11] Zhang Xin, Du Zhiyuan, Qiao Yanfeng, et al. Study on linear field of strapdown semi-active laser seeker[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 415-421. (in Chinese)
- 张鑫, 杜智远, 乔彦峰, 等. 全捷联激光半主动导引头线性视场研究[J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 415-421.
- [12] Wang Yahui, Wang Qiang, Zhang Bochuan, et al. Evaluation method for aero-thermo-radiation effect of IR window [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0204001. (in Chinese)
- 王亚辉, 王强, 张伯川, 等. 红外窗口气动热辐射效应评估方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0204001.
- [13] Han Wei, Zhuo Yuejin, Hu Xinqi. Study on aero-optical effect of a hypersonic missile infrared image guide [C]// SPIE, 2009, 7513(75): 73516.
- [14] Visknata R, Anderson E E. Heat transfer smitransparent solids [J]. *Advances in Heat Trasfer*, 1975, 11: 317-441.
- [15] Zhang Yun, Wang Shuyan, Sun Yishan, et al. Determination of the dome infrared window in the supersonic mode [J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(2): 11-14. (in Chinese)
- 张云, 王淑岩, 孙益善, 等. 超音速状态下整流罩红外窗口的选型问题研究[J]. *红外技术*, 1999, 21(2): 11-14.