

## 防护罩气动热效应对玫瑰扫描系统的影响仿真分析

吕银环

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 针对高速飞行器气动加热效应对高速飞行器光学性能的影响,建立了防护罩热辐射模型。在此基础上,编写了仿真控制程序,利用 TracePro 软件,实现了光学自动追迹,动态模拟了防护罩热效应在整个光学系统扫描过程中产生的影响,以及在各光学运动部件单独扫描时的影响。通过对热效应引起的杂散光在玫瑰扫描过程中的传输路径分析,提出了建议改进措施,为高速飞行器光学性能分析及其环境失效研究提供了参考。

**关键词:** 高速飞行器; 防护罩; 玫瑰扫描; 气动热效应; 仿真

**中图分类号:** TN216      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20190520

## Simulation analysis of influence of aerodynamic heating effect of dome window on rosette scan system

Lv Yinhuan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of the aerodynamic heating effect of the high-speed vehicle on the optical performance of the vehicle, the heat radiation model of the dome window of the vehicle was established. On this basis, the simulation control program was programmed, and the optical automatic tracing was realized by using TracePro software, and the thermal effect of the dome window produced during the scanning of the entire optical system, as well as the effects of individual optical moving parts when scanned separately were dynamically simulated. Through the analysis of the transmission path of stray light caused by thermal effect in the process of rosette scanning, the proposed improvement measures were obtained, which provided a reference for the optical performance analysis and environmental failure research of high-speed vehicle.

**Key words:** high-speed vehicle; dome window; rosette scan; aerodynamic heating effect; simulation

收稿日期:2019-10-18; 修订日期:2019-11-15

基金项目:国家重点研发计划(2017YFA0303900)

作者简介:吕银环(1974-),女,副研究员,博士,主要从事光学系统设计方面的研究工作。Email: lyh@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

目前,采用球型防护罩的高速飞行器比较普遍,罩内红外探测系统,多采用玫瑰扫描结构以便在整个视场范围内清晰成像。当高速飞行器在大气层中高速飞行时,剧烈的气动加热效应使得防护罩的温度迅速上升<sup>[1-3]</sup>,产生的热辐射通过玫瑰扫描运动的周期性调制,不仅降低光学探测能力,还可能会导致系统误判,影响到高速飞行器对目标的捕获与跟踪<sup>[4-5]</sup>。国内外研究者均对高超音速飞行器的气动热效应开展了大量的研究工作<sup>[6-8]</sup>,旨在寻找气动热效应校正与抑制方法<sup>[9-10]</sup>,但对于实际工程应用中普遍存在的头罩热辐射与高速飞行器的光学系统之间的相互作用过程的研究相对较少<sup>[11]</sup>。

为了分析防护罩自身热辐射对红外高速飞行器造成的干扰,建立了防护罩和玫瑰扫描系统的仿真模型,编写了 Python 仿真控制程序。程序按照高速飞行器飞行速度计算防护罩的温度分布,然后调用 TracePro 软件,模拟防护罩热辐射对光学系统的影响。程序按照光学系统玫瑰扫描的运动方式,以一微小的扫描转角作为步长,逐步对防护罩辐射的杂散光进行光线追迹,直至仿真结束。为了找出杂散光的影响规律,仿真对多周期扫描仿真数据进行了采集,最后通过数据处理,获得防护罩杂散光干扰信号与玫瑰扫描角度之间的关系曲线,在此基础上,进一步模拟了严重影响光学性能的杂散光的传播路径。通过以上方法,完成了防护罩温度分布对红外飞行光学系统在动态玫瑰扫描运动过程造成的影响。

## 1 扫描系统建模

高速飞行器红外探测系统利用次反射镜和偏心透镜的反向旋转运动实现对整个视场范围内的光学扫描,在红外焦平面上的像斑,随着扫描的运动而形成玫瑰状的轨迹。像斑通过红外探测器转换成电脉冲信号,飞行控制系统对电脉冲信号进行解算、跟踪和滤波处理,形成正比于视线角速度的飞行信号,用于对高速飞行器的飞行控制。

### 1.1 玫瑰扫描

在高速飞行的精确制导武器中,普遍采用红外玫瑰扫描探测系统实现对目标的自主捕获、识别与跟

踪。飞机、导弹、战车等典型目标在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段有较强的红外线辐射,因而,通常采用制冷型处于大气窗口的  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段碲化镉元件作为点源探测器。该探测器可以避免阳光、火焰等干扰热辐射波段,提高灵敏度和抗干扰能力。为了分析防护罩气动热效应对玫瑰扫描系统的影响,建立了玫瑰扫描光学系统模型。玫瑰扫描光学系统主要由防护罩、主反射镜、次反射镜、偏心镜、滤光片和探测器组成,其中主反射镜和一同旋转的次反射镜构成卡塞格伦系统,利用次镜与偏心镜相对主光轴偏转一定角度的旋转来实现光学系统对物空间的玫瑰扫描,实现小瞬时视场对物方较大视场范围内的扫描。ZEMAX 设计光路及 Solidworks 三维模型如图 1 所示。

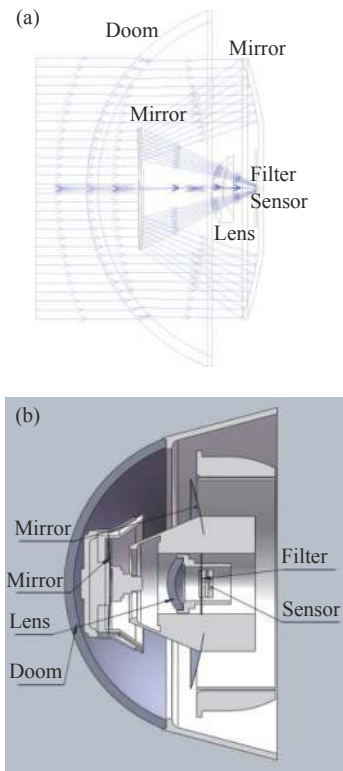


图 1 玫瑰扫描光学系统图

Fig.1 Rosette scanning optical system

无穷远处目标发出的光线,通过防护罩到达主反射镜,经主镜反射后到达次镜,次镜相对于光轴( $Z$ 轴)倾斜(倾角用  $\theta$  表示),造成次镜的反射光线偏离光轴,偏轴的反射光经过倾斜的偏心镜(倾角用  $\psi$  表示)后,再次改变其传播方向,两次光线偏转的矢量合成决定了光学焦点在焦平面上的落点位置。当同时旋转次镜(频率为  $f_1$ )及偏心镜(频率为  $f_2$ )时,光

点在像平面上的运动轨迹可用公式 (1) 表示:

$$\begin{cases} x(t) = (\rho/2)[\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)] \\ y(t) = (\rho/2)[\sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为高速飞行器最大视场扫描直径。

### 1.2 气动热效应

随着飞行器速度的提高,与防护罩接触的空气受到强烈地压缩,导致大量的空气动能转化为热能,产生气动加热现象。防护罩气动热辐射效应会部分被红外传感器所接收,形成辐射干扰<sup>[12]</sup>,使得背景亮度增加,降低了系统对目标的检测和跟踪能力。当防护罩由于自身温度过高而产生大量热辐射并掩盖目标信息时,即产生热障效应<sup>[13-15]</sup>。

哈尔滨工业大学的刘元春等通过流场分析,获得了在标准大气中海拔 15 km 时从 3~6 Ma 飞行的空气动力学热通量。然后在恒定的传热系数边界条件下研究不同马赫数的热响应。图 2 示出了最高和最低温度随时间的分布<sup>[16]</sup>。如图 2 所示,温度随着马赫数的增加而增加。在相同的马赫数下,外表面上出现的最高温度在 1 s 内急剧增加。此后,升温速率显著降低。2 s 后,温度几乎达到恒定值。同时,最高温度比起初在内表面上出现的最低温度更快地上升,然后增长率几乎保持不变,因此,外表面和内表面之间的温差先增大然后保持几乎相同。此外,3 Ma 处的内外表面之间的差异很小,约为 26 K,但对于 6 Ma,该差异增加至约 239 K。

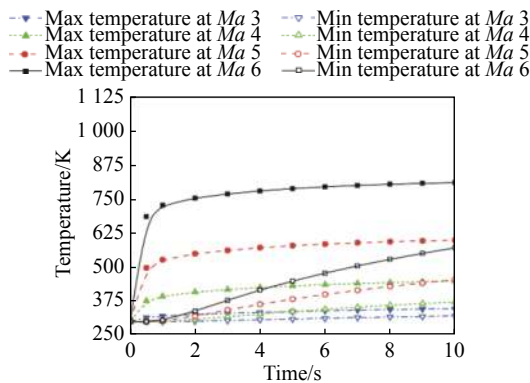


图 2 温度随时间的分布

Fig.2 Temperature variation with time

### 1.3 动态扫描仿真

为了模拟防护罩气动热辐射效应对玫瑰扫描带来的影响,将图 1 中的 Solidworks 三维模型导入到

TracePro 软件中进行杂散光分析。光学系统扫描时,次镜和偏心镜将绕着光轴,按照各自的频率反向旋转。旋转过程中,由于次镜和偏心镜相对光轴倾斜造成杂散光传播路径不断地改变。TracePro 每次只能对一种特定的扫描姿态进行光线追迹,因此,采用 TracePro 宏命令和 Python 编写了仿真程序。宏命令用于实现对 TracePro 的自动控制,如动态调整次镜和偏心镜的旋转角度,控制光线追迹并以文件的形式保存追迹的结果等等。Python 用于提取保存文件中的数据,分析杂散光对系统的动态影响。

设次镜旋转频率为  $f_1$ , 偏心镜旋转频率为  $f_2$ , 以次镜为基准, 设次镜每次旋转一个步长  $step$ , 单位为  $^\circ$ , 则偏心镜对应的旋转角度为:  $-step \cdot f_2 / f_1$ , 如果次镜总的仿真旋转角度为  $total$ , 则共仿真  $total/step$  次。仿真前,先在 TracePro 中将防护罩设为辐射源,辐射模型选定灰体,发射率设为 0.7,按仿真需要设定防护罩的模拟温度、波长等。假设防护罩工作在 3~6 Ma 之间,按图 2 的结果,仿真温度设置在常温 293~500 K 之内。防护罩热辐射属于辐度学范畴,因而,在 TracePro 光线追迹选项中,分析单位选“辐度学”,光通量门槛数设定在  $10^{-9}$  以下。防护罩辐射的场角分布为朗伯体,只有极少数光线能够通过光学设计的传播路径进入探测器,这部分光线对探测器的影响有限。绝大部分热辐射光线以杂散光的形式反复在系统内折射和反射,最终部分光线有可能进入探测器。如果光通量门槛数设定过高,这部分能量少、但数量多的杂散光就被忽略了,从而影响到仿真的效果。TracePro 每次光线追迹完成后,可以从“分析”选项中获得“辐照度分析”结果,结果中记录了每个面上的光能量强度,其中探测器感光面上的光强度代表了杂散光的强弱。在 TracePro 中选中探测器,可以观察到探测器接收光线的传播路径,如果从“报告”选项中,选取“光通量”,还可以观察到探测器感光面上接收到的光线落点位置。

仿真程序以次镜旋转角度为基准仿真玫瑰扫描过程,次镜旋转步长设为  $step$ , 仿真次数设为变量  $n$ , 从  $n=0$  开始,每完成一次光线追迹,  $n=n+1$ , 同时保存“辐照度分析”结果和“光通量”图。光线追迹全部完成之后,由 Python 程序按  $n$  的顺序读取保存的文件,提取传感器感光面上每次仿真收集的杂散光强度,绘制出杂散光变化曲线。仿真流程图如图 3 所示。

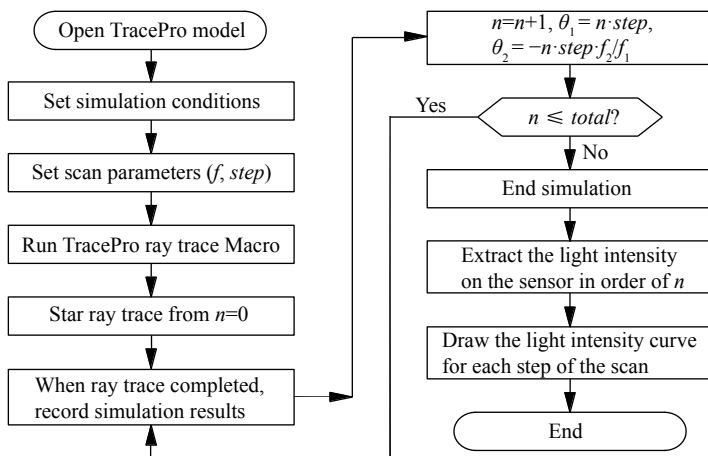


图 3 仿真流程图

Fig.3 Simulation flow chart

## 2 仿真结果

### 2.1 防护罩常温仿真

在 TracePro 中, 将防护罩设为唯一的辐射源, 温度定在常温 293 K, 为了减少仿真时间, 波长采用单一中波 3.667 μm。运行仿真程序进行动态过程进行仿真: 次镜旋转步长设为 1°, 偏心镜反向旋转步长  $(f_2/f_1)^\circ$ , 在 TracePro 中进行光线追迹, 防护罩温度 293K, 探测器接收的辐射能量仿真曲线如图 4 所示。

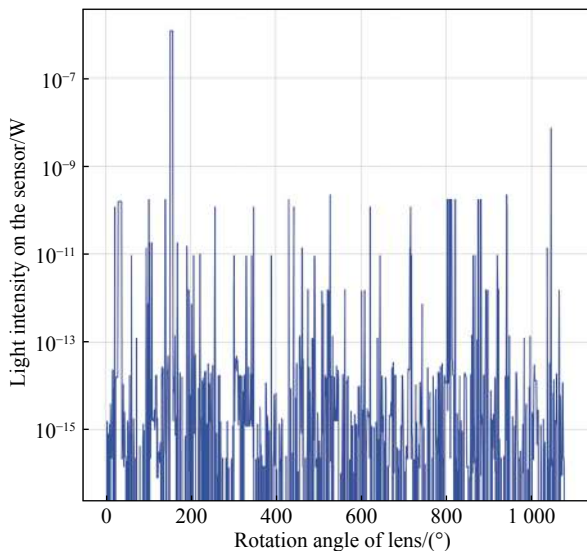


图 4 防护罩温度为 293 K, 探测器接收的辐射能量

Fig.4 Sensor received energy

(Temperature of guard is 293 K)

从仿真结果来看, 图像中的辐射能量呈现出高低分布, 如图 4 中当次镜转角为 153°时, 传感器入射光

通量达到极大值  $1.16 \times 10^{-6}$  W, 远远超出其他值。为了分析产生的原因, 重点关注了该状态下杂散光的传播路径, TracePro 仿真的结果如图 5 所示。

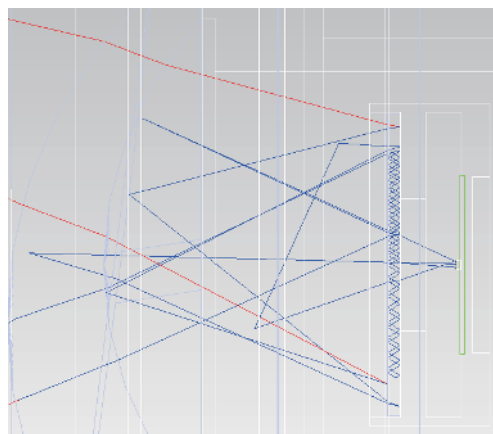


图 5 杂散光的传播路径局部放大图

Fig.5 Partial enlargement of the propagation path of stray lights

图 5 显示, 防护罩辐射出的杂散光, 经滤光片多次反射和折射后, 进入到探测器。滤光片在杂散光的传播路径中起到了媒介作用。作为验证, 修改了滤光片的模型, 将其尺寸改小并置于冷光栏之后, 然后重新按以上条件进行仿真, 杂散光能量变化曲线如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 在次镜转角为 68°时, 干扰光能量达到极大值, 数值为  $2.166 \times 10^{-7}$  W, 只有图 4 中极大值的 1/10, 可见更改滤光片大小和位置, 对抑制干扰光的传播作用明显。

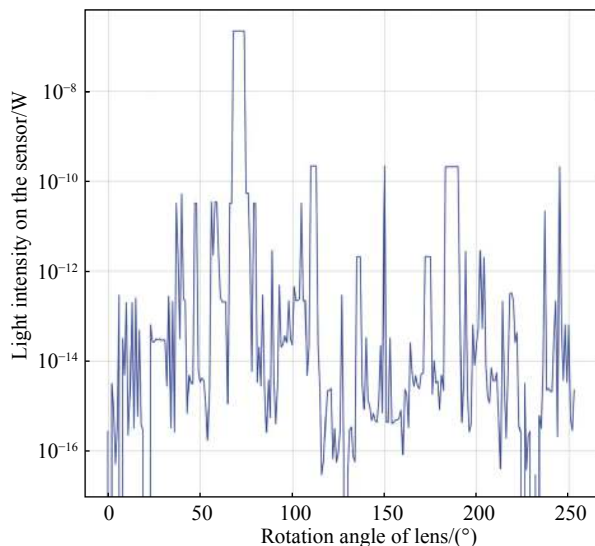


图 6 修改滤光片后,探测器接收到的辐射能量

Fig.6 Sensor received energy after revising filter

### 2.2 防护罩气动热辐射仿真

假设高速飞行器工作在 4~5 Ma,按图 2 的温度曲线,设防护罩模拟温度为 400 K 左右,由于气动作用的影响,防护罩表面温度会形成一定的温度梯度分布,高速飞行器平稳飞行时,防护罩温度一般表现为两端低中间高,且各点的温度会随高速飞行器的速度大小和仰角的不同以及气流的变化而上下波动。为了模拟防护罩温度梯度,将防护罩表面分为 15 个环带,编号从中心向外按顺序设为 0~15,如图 7 所示。

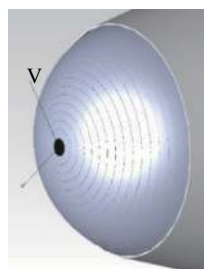


图 7 防护罩表面的温度环带

Fig.7 Temperature belts of the dome

各环带温度设定如表 1 所示。

将以上防护罩模型调入到 TracePro,按以上参数设置仿真初始条件,运行仿真程序进行仿真,得到杂散光能量的变化曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出:当防护罩温度呈梯度分布时,在玫瑰扫描过程中,探测器接收到的来自防护罩的杂散光能量也表现出阶梯分布,各不同强度的干扰信号

表 1 防护罩表面 15 个环带温度设定值

Tab.1 Temperature setting of 15 belts of dome

Item	Value				
Belt	1	2	3	4	5
T/K	400	405	410	415	418
Belt	6	7	8	9	10
T/K	420	425	430	435	430
Belt	11	12	13	14	15
T/K	425	420	415	410	405

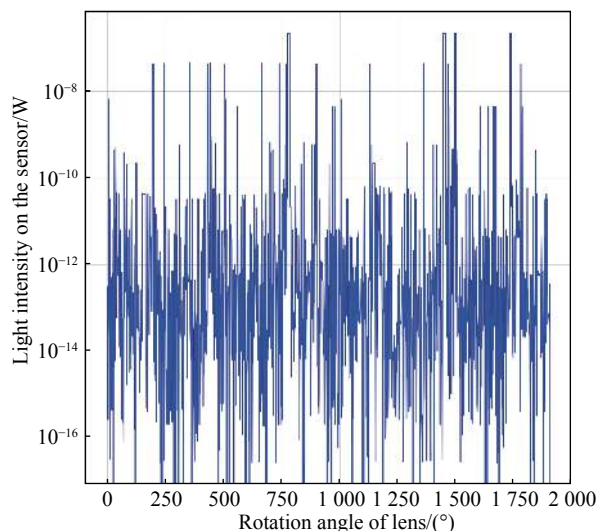


图 8 环带温度梯度分布,探测器接收的辐射能量

Fig.8 Radiation energy received by sensor when dome temperature is distributed gradiently

也呈现出周期性分布。这些周期性的不同强度的杂散光干扰信号,可能会使得高速飞行器在特定的工作条件下,造成目标的丢失或虚警,甚至有可能影响到高速飞行器的命中率。

### 2.3 玫瑰扫描拆分仿真

为了分析玫瑰扫描系统中的次镜和斜镜在扫描过程中所起的作用,先让次镜及支撑架动而斜镜不动,然后让斜镜动,次镜及支撑架不动,分开仿真玫瑰扫描过程。

(1) 次镜动,斜镜不动

头罩温度设为 500 K,次镜及支撑架绕光轴旋转,斜镜保持固定位置不动,对探测器接收到的头罩杂散光进行仿真,结果如下:

图 9 中脉冲以次镜转角 350°为间隔,周期分布更

为明显,杂散光峰值能量比次极大值高出约 1 个数量级,各峰值按能量大小呈台阶分布。

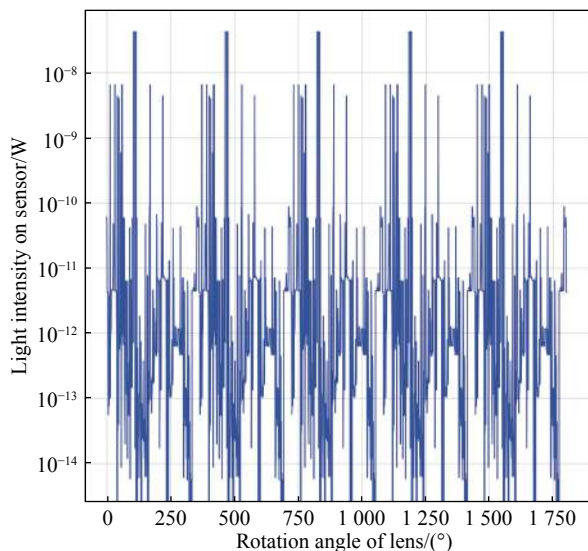


图 9 头罩 500 K,次镜旋转,斜镜固定不动,传感器表面入射光通量  
Fig.9 Dome 500 K, the incident light flux on the sensor surface when secondary mirror rotates and the tilted lens is fixed

(2) 次镜固定,斜镜转动

头罩设定温度 500 K,次镜及支撑架固定不动,斜镜绕光轴旋转,对探测器接收到的头罩杂散光进行仿真,结果如图 10 所示。

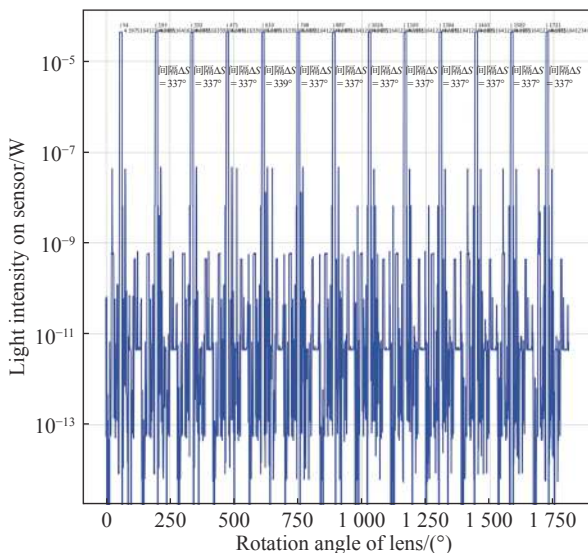


图 10 头罩 500 K,斜镜旋转,次镜固定不动,传感器表面入射光通量  
Fig.10 Dome 500 K, the incident light flux on the sensor surface when tilted lens rotates and the secondary mirror is fixed

在图 10 中,杂散光极大值能量比次极大值显剧加大,高出了 2 个数量级,比图 9 中的干扰信号极大

值增加了  $10^3$  倍。图 10 中其他各次极大值能量也比图 9 中相应的值大一个数量级。可见,斜镜在玫瑰扫描过程中对杂散光的贡献起主导作用。

2.4 仿真结果分析

综合以上仿真结果可以看出,防护罩气动热辐射效应产生的杂散光对光学系统的影响随着扫描过程呈现周期性地变化。杂散光进入探测器的路径大部分是通过多次折反射实现的。抑制杂散光的有效途径之一是遮挡杂散光进入探测器的传播路径,如上述改变滤光片前后,杂散光的影响变化显著。在玫瑰扫描过程中,斜镜对杂散光的幅度调制作用比次镜更大。

3 结 论

文中主要研究防护罩的气动热辐射效应对高速飞行器的影响。首先在光学软件中建立玫瑰扫描光机结构模型,然后将防护罩作为辐射源,对不同条件下的防护罩温度分布进行光线追迹。由于玫瑰扫描是动态变化的过程,因此编写了仿真程序,实现了玫瑰扫描过程的动态仿真。通过对仿真过程中保存的 TracePro 光线追迹产生的文件进行数据处理,最终得到了玫瑰扫描过程中,探测器接收到的杂散光能量变化曲线。仿真结果表明:防护罩气动热辐射及其温度梯度分布会让探测器产生干扰调制信号,调制效果与玫瑰扫描的光机结构、防护罩的温度高低及其梯度分布有关。

参考文献:

[1] Anderson Jr John D. Hypersonic and High-temperature Gas Dynamics[M]. 2nd ed. Virginia: AIAA Publications, 2006: 85-99.  
 [2] Ognjanović Ognjen V, Maksimović Stevan M, Vidanović Nenad D, et al. Numerical aerodynamic-thermal-structural analyses of missile fin configuration during supersonic flight conditions [J]. *Thermal Science*, 2017, 21(6B): 3037-3049.  
 [3] Firouz-Abadi R D, Alavi S M, Salarieh H, et al. Analysis of non-linear aeroelastic response of a supersonic thick fin with plunging, pinching and flapping free-plays [J]. *Fluids and Structures*, 2013(40): 163-184.  
 [4] Junqueira Mateus A F C, Gabrielli Lucas H, Beltrán-Mejía Felipe, et al. Three-dimensional quasi-conformal transformation optics through numerical optimization [J]. *Optics Express*, 2016,

- 24(15): 16465-16470.
- [5] Li Wentong, Ding Wen, Zhu Mu. Method for estimating operating distance of Rosette scan infrared detection system under complex background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1004002. (in Chinese)  
李文通, 丁雯, 朱牧. 复杂背景下玫瑰扫描红外探测系统作用距离评估方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(10): 1004002.
- [6] Arnas A, Boettner D, Tamm G, et al. On the analysis of the aerodynamic heating problem [J]. *Heat Transfer*, 2010, 132(12): 124501.
- [7] Huang Haiming, Xu Jing, Xie Weihua, et al. Numerical study on aerodynamic heat of hypersonic flight [J]. *Thermal Science*, 2016, 20(3): 939-944.
- [8] Başkut E, Akgül A. Development of a coupling procedure for static aeroelastic analyses [J]. *Scientific Technical Review*, 2011, 61(3-4): 39-48.
- [9] Cao Chunqin, Xiang Jingbo, Zhang Xiaoyang, et al. Infrared imaging missile's aerodynamic heating simulation modeling methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 1951-1955. (in Chinese)  
曹春芹, 向静波, 张晓阳, 等. 红外成像导弹气动加热仿真建模方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 1951-1955.
- [10] 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.
- [11] Fan Da, Ming Xing, Liu Xinyue, et al. Thermal optical analysis and design of optical window in highaltitude and high-speed environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0818001. (in Chinese)  
范达, 明星, 刘昕悦, 等. 高空高速环境热光学分析及光学窗口设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0818001.
- [12] Zhang Faqiang, Zhang Weiguang, Wan Wenbo. Research on stray radiation of infrared detection optical system based on ray-tracing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0904006. (in Chinese)  
张发强, 张维光, 万文博. 基于光线追迹的红外探测光学系统杂散辐射研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(9): 0904006.
- [13] Zhang Xibin. Study on modeling, analysis and validation for hypersonic vehicle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 28-36. (in Chinese)  
张希彬. 高超声速飞行器建模、分析与验证研究[D]. 天津: 天津大学, 2014: 28-36.
- [14] Gao Xilei. Modeling and simulation of influence of aerodynamic heating of dome on the imaging system[D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 50-85. (in Chinese)  
高希磊. 整流罩气动加热对成像影响建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 50-85.
- [15] Xerikos J, Rose W C, Rawlinson, et al. Measurement of mean and fluctuating flow properties in hypersonic shear layers[R]. Virginia: AIAA, 1990: 90-1409.
- [16] Liu Yuanchun, He Yurong, Zhu Jiaqi, et al. Numerical simulation of aerodynamic heating and stresses of chemical vapor deposition ZnS for hypersonic vehicles [J]. *Journal of Zhejiang University Science A (Appl Phys & Eng)*, 2014, 15(3): 185-196.