

文章编号 1004-924X(2013)05-1167-07

# 高热稳定性测风 Fabry-Perot 干涉仪标准具的设计

孙 剑<sup>1\*</sup>, 冯玉涛<sup>1</sup>, 白清兰<sup>1</sup>, 王咏梅<sup>2</sup>, 汶德胜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100039)

**摘要:**针对星载测风 Fabry-Perot(F-P)干涉仪的核心部件 F-P 标准具的热稳定性对测风精度的影响,从标准具结构设计角度(材料、形状和固定方式)分析了标准具的热稳定性,并给出最优设计方案。通过对光学元件结构尺寸的优化设计,得出了 F-P 标准具光学元件的最佳形状尺寸,即平板厚度为 25 mm,间隔元件的角度为 40°。采用柔性结构固定方式,计算了 F-P 标准具机械结构的形状尺寸。最后基于有限元法,分析了光学组件和整个标准具的热变形。分析结果显示,当环境温度变化 0.1℃时,光学组件平板中心间隔变化量为 0.64 nm,整个标准具平板中心间隔变化量为 0.28 nm,通光口径边缘处间隔变化量为 0.2 nm,相对于波长  $\lambda$  为 630 nm 的气辉光谱线约为  $\lambda/2$  250 和  $\lambda/3$  150,并且平板间隔变化量沿着径向向外逐渐减小。得到的结果显示,优化设计后的结构参数满足风速为 5 m/s 时测量精度对热稳定性的要求,同时满足力学性能要求。

**关键词:** F-P 干涉仪; 标准具; 测风; 热稳定性; 优化设计; 结构设计

**中图分类号:** P414.7; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1167

## Design of thermal stable Fabry-Perot etalon for wind measurement

SUN Jian<sup>1\*</sup>, FENG Yu-tao<sup>1</sup>, BAI Qing-lan<sup>1</sup>, WANG Yong-mei<sup>2</sup>, WEN De-sheng<sup>1</sup>

(1. *Xi'an institute of Optics and Precision Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;*

2. *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: sunjian@opt.ac.cn*

**Abstract:** In consideration of the effect of thermal stability of a Fabry-Perot(F-P) etalon in the satellite-borne F-P interferometer on wind measurement, this paper analyzes the thermal stability of the F-P etalon from its construction design including materials, shapes and fixed forms, then, it optimizes the design. With optimization design, the optical elements in the etalon are constructed, which shows that the two plates are all 25 mm thick, and the spacers are all 40° in angles. Then, the dimensions of mechanical structure of the etalon are calculated using flexible structure. Finally, the thermal distortions of optical elements and the etalon are discussed. It shows that the gap dimension changes in the centers of the optical elements and the etalon are 0.64 nm and 0.28 nm and the gap dimension change of the etalon is 0.2 nm when the temperature changes 0.1℃. Furthermore, the airglow spectral lines

**收稿日期:** 2012-11-12; **修订日期:** 2013-02-11.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 41005109); 中科院西部之光人才基金资助项目(No. Y129281213); 中科院光谱成像技术实验室创新基金资助项目(No. Y255C61ZZ0)

are  $\sim\lambda/2$  250 and  $\sim\lambda/3$  150 at 630 nm respectively, and the gap dimension changes of the etalon fall along the radius from the center to the verge. These results demonstrate that optimized structure parameters meet the requirements of measuring accuracy for thermal stability and mechanical stability at a wind velocity of 5 m/s.

**Key words:** F-P interferometer; etalon; wind measurement; thermal stability; optimization design; structure design

## 1 引言

近年来,随着航天活动的不断增加,研究中高层区域的大气风场信息,为航天器的发射、在轨运行以及精准回落提供可靠的参考数据尤为重要。Fabry-Perot(F-P)干涉仪作为典型的多光束干涉仪,能被动探测到中高层大气气辉光谱线的多普勒频移,该谱线频率的变化包含大气的运动速度,通过反演计算可以得到该区域的大气风场参数<sup>[1]</sup>。

随着仪器光谱分辨率的不断提高,环境尤其是温度的影响越来越明显,国内外学者开始专注于各种仪器及干涉仪的热稳定性研究<sup>[2-4]</sup>。F-P干涉仪由于光谱分辨率和灵敏度极高,因此对热稳定性要求也很高。目前国外文献中有记载的F-P干涉仪,比如20世纪90年代,成功搭载在URAS卫星上的高分辨率多普勒成像仪(HRDI)以及本世纪初成功搭载在TIMED卫星上的多普勒干涉仪(TIDI),其温度漂移均超过了测风精度对热稳定性的要求。他们通过前期大量的实验数据,利用热控系统将温度控制在很小的范围内,从而满足了测风精度对热稳定性的要求<sup>[5-7]</sup>。国内研究机构则依据理论分析,通过采用特殊的晶体材料(将晶体材料的热膨胀系数和折射率的温度效应在某些方向引起的光程变化相抵消)来制作温度稳定的F-P标准具<sup>[8]</sup>。

本文首次基于有限元分析,从结构设计角度,考虑标准具的材料、形状和固定方式等几个方面来分析标准具的热稳定性,并给出最优设计方案。该标准具的测量要求为:探测中层顶区波长 $\lambda = 630$  nm,OI630气辉光谱线,测风精度达到5 m/s,光学件的外径 $D$ 为105 mm,通光口径 $D'$ 为75 mm。

## 2 标准具的测风原理和热稳定性要求

### 2.1 标准具的测风原理

F-P标准具的光学元件主要包括2块外侧带有楔角,内反射面镀有反射率大约为90%的反射膜的平板和3个完全相同的间隔元件。间隔元件和平板采用无应力的环氧胶来粘接,如图1所示。

当波长为 $\lambda$ 的入射光以入射角 $i$ 进入F-P标准具,对于 $m$ 级干涉条纹,由多光束干涉条件得:

$$m = \frac{2nd}{\lambda} \left( 1 - \frac{r_\lambda^2}{2f^2} \right), \quad (1)$$

其中: $n$ 为空气介质折射率, $d$ 为平板间隔, $f$ 为条纹成像系统焦距, $r_\lambda$ 为对应条纹峰值到条纹中心的距离。

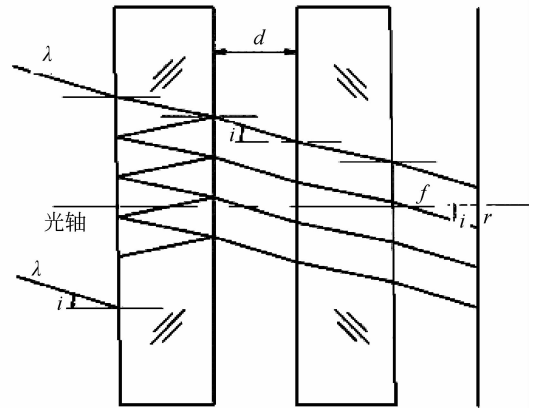


图1 F-P标准具原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of F-P etalon configuration

当波长受风速影响产生多普勒频移时,对应条纹峰值到条纹中心的距离变为 $r_{\lambda+\Delta\lambda}$ ,此时:

$$m = \frac{2nd}{\lambda + \Delta\lambda} \left( 1 - \frac{r_{\lambda+\Delta\lambda}^2}{2f^2} \right). \quad (2)$$

根据多普勒公式:

$$\frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} = \frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{v}{c} \right), \quad (3)$$

其中: $c$  为光速, $v$  为风速。

式(2)变为:

$$m = \frac{2nd}{\lambda} \left(1 + \frac{v}{c}\right) \left(1 - \frac{r_{\lambda+\Delta}^2}{2f^2}\right). \quad (4)$$

由式(1)、(4)得出风速表达式:

$$v = \frac{c(r_{\lambda+\Delta}^2 - r_{\lambda}^2)}{2f^2 - r_{\lambda+\Delta}^2}. \quad (5)$$

### 2.2 标准具的热稳定性要求

标准具对温度敏感,由式(1)可以看出,光学材料热膨胀的温度效应使得平板间隔  $d$  随着温度的变化而变化,使得透射峰的波长产生漂移,从而使条纹峰值到条纹中心的距离发生变化,这种漂移掺杂在多普勒频移里,可以影响到仪器的测风精度。因此能够通过减小平板间隔  $d$  由于温度变化而引起的变化量来增加其热稳定性。

该 F-P 干涉仪要求风速测量精度为 5 m/s,由式(6)可得出两平板间隔变化量<sup>[9]</sup>:

$$\Delta d = \frac{d \times v}{c}. \quad (6)$$

由式(6)得出,两平板间隔变化量  $\Delta d = 0.34$  nm,约为  $\lambda/2\ 000$ 。

## 3 标准具的结构设计

元件材料、形状尺寸以及光学件的固定方式都会影响元件的热膨胀性<sup>[10]</sup>,也就会影响两平板间隔  $d$ ,因此可以从这几个方面来研究标准具的热稳定性。为了更深一步了解温度对 F-P 标准具的影响,分析时不施加重力条件。

### 3.1 平板间隔变化量

假设光学元件的约束方式为约束固定下平板

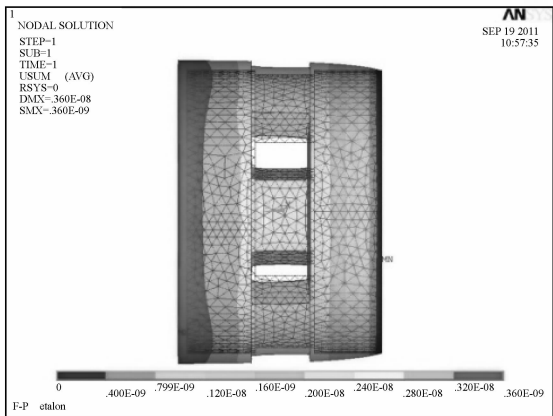


图 2 光学组件的热变形云图

Fig. 2 Thermal distortion of optical elements

底面,计算整个光学组件的热变形,如图 2 所示。分别在上、下平板内反射面取点  $A(X_{up}, Y_{up}, Z_{up})$  和点  $B(X_{down}, Y_{down}, Z_{down})$ ,令  $X_{up} = X_{down}, Y_{up} = Y_{down}$ ,热变形后, $A$  点的变形量为  $d_{up}$ , $B$  点的变形量为  $d_{down}$ ,则平板间隔变化量  $\Delta d$  可由式(7)得出:

$$\Delta d = d_{up} - d_{down}. \quad (7)$$

### 3.2 光学结构设计

#### 3.2.1 平板

平板采用线膨胀系数很小的熔石英玻璃,由于通光口径决定了平板的直径,因此通过优化设计平板厚度,得到最佳形状尺寸。改变平板厚度  $t$ ,计算平板间隔变化量,然后对数据进行回归分析,如图 3 所示,可建立平板中心间隔变化量  $\Delta d$  与平板厚度  $t$  的关系:

$$\Delta d = 7 \times 10^{-7} t - 1.07 \times 10^{-5}. \quad (8)$$

由图 3 可以看出,随着平板厚度  $t$  的不断变大,平板中心间隔变化量  $\Delta d$  逐渐变大,但是组件除了要满足热稳定性之外,还得满足力学特性,因此取平板厚度  $t = 25$  mm。

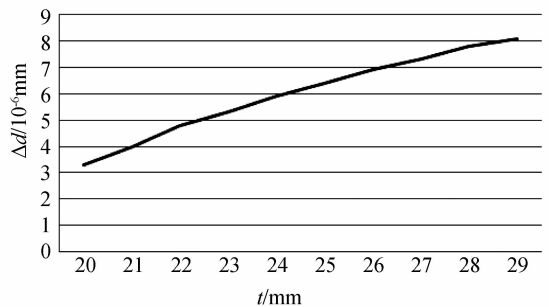


图 3  $\Delta d$  随平板厚度  $t$  的变化曲线图

Fig. 3  $\Delta d$  vs. thickness  $t$  of plate

#### 3.2.2 间隔元件

间隔元件的二维模型如图 4 所示,材料采用零膨胀系数的微晶玻璃。由于间隔元件的长度决定了 F-P 标准具的分辨率,也就决定了测风精度<sup>[11]</sup>,因此通过优化设计间隔元件与平板之间的接触面积,即优化设计间隔元件的角度  $\alpha$ ,得到最佳外形尺寸。改变间隔元件的角度  $\alpha$  大小,计算平板间隔变化量,然后对数据进行回归分析,可建立平板中心间隔变化量  $\Delta d$  与角度  $\alpha$  的关系:

$$\Delta d = -5 \times 10^{-7} \alpha + 8.2 \times 10^{-6}. \quad (9)$$

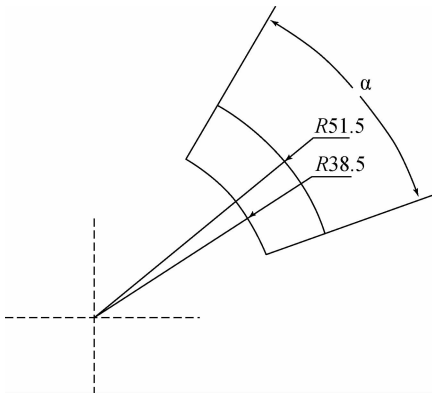
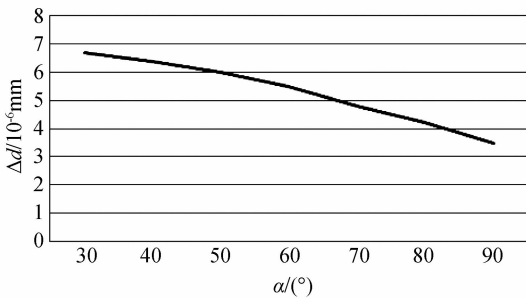


图 4 间隔元件的二维模型

Fig. 4 Two-dimension model of spacer

图 5  $\Delta d$  随间隔元件角度  $\alpha$  的变化曲线图Fig. 5  $\Delta d$  vs. angle  $\alpha$  of spacer

由图 5 可以看出,平板中心间隔变化量  $\Delta d$  与间隔元件角度  $\alpha$  成反比,但是平板与间隔元件接触面积越大,其加工和装配难度也越大,因此综合考虑装配的工艺性,取间隔元件的角度  $\alpha=40^\circ$ 。

### 3.3 光学件的固定

平板外侧有个楔角,如图 1 所示,因此平板的固定既要考虑对光学件的固定保护,又要避免装夹带来的应力影响。本文采用镜筒外圆保护,上下压板对光学件进行端面约束固定方式,其中下压板起约束定位作用,上压板起缓冲保护作用,因此下压板的弹性系数必须大于上压板的弹性系数。

由于光学件均采用线膨胀系数较小的光学材料,因此,机械结构件的材料也采用较低线膨胀系数的殷钢材料。

#### 3.3.1 压板

##### (a) 下压板

下压板用于对光学元件约束定位,因此采用刚性较大的结构形式。其弹性系数  $K_{\text{down}}$  为<sup>[9]</sup>:

$$K_{\text{down}} = \frac{Yy\omega^3}{4x^3}, \quad (10)$$

其中:  $Y$  为材料殷钢的杨氏模量,其余参数为外形尺寸,如图 6 所示。

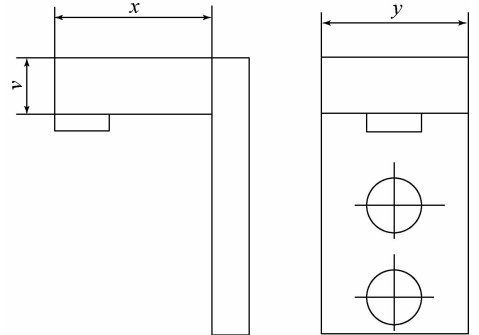


图 6 下压板二维图

Fig. 6 Two-dimension model of lower beam

##### (b) 上压板

为了减小装夹的应力影响,上压板结构采用刚性小、弹性大的柔性结构,在某种程度上对光学组件起到缓冲保护作用。其弹性系数  $K_{\text{up}}$  由式 (11)<sup>[9]</sup>、(12) 求得:

$$K_{\text{up}}^{1,2} = \frac{bh^3Y}{12R^3} \left\{ \sin \theta - \theta \cos \theta + \frac{Y}{G} \left( 1 + \frac{h^2}{b^2} \right) \times \left[ \frac{3}{2}\theta + \left( \frac{1}{2} \cos \theta - 2 \right) \sin \theta \right] \right\}, \quad (11)$$

$$K_{\text{up}} = \frac{K_{\text{up}}^1 K_{\text{up}}^2}{K_{\text{up}}^1 + K_{\text{up}}^2}, \quad (12)$$

其中:  $Y$  为材料殷钢的杨氏模量,其余参数为外形尺寸,如图 7 所示。

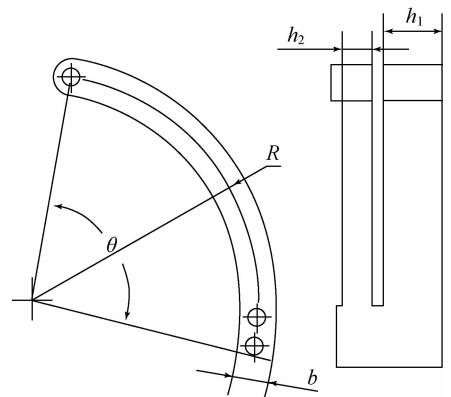


图 7 上压板二维图

Fig. 7 Two-dimension model of upper beam

由式(10)、(11)、(12)计算得出,上压板的弹性系数  $K_{up}$  要远远小于下压板的弹性系数  $K_{down}$ , 因此由 3 个上压板和 3 个下压板可构成一个柔性系统。

### 3.3.2 镜筒

镜筒的设计需要考虑当环境温度发生变化时,镜筒的热变形不会对光学元件带来影响。仪器的工作温度为  $-30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 即环境温度变化  $\Delta\theta = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ , 由式(13)可以计算出各元件在径向上的热变形:

$$\Delta r = \Delta\theta \times r \times f, \quad (13)$$

其中:  $r$  为元件直径;  $f$  为材料的线膨胀系数。

平板的外径变化量  $\Delta r_f = 3.4 \text{ } \mu\text{m}$ , 镜筒内径变化量  $\Delta r_i = 0.34 \text{ } \mu\text{m}$  时, 则两者间隙减小量  $\Delta r = \Delta r_f + \Delta r_i = 3.74 \text{ } \mu\text{m}$ 。考虑到机械加工能力以及装配工艺, 取镜筒与平板的间隙  $\Delta r = 10 \text{ } \mu\text{m}$ 。另外, 镜筒上下底面均要留有上下压板的安装接口, 并且能满足力学性能要求, 因此镜筒的壁厚选择为 6 mm。

图 8 为整个标准具的三维模型图。

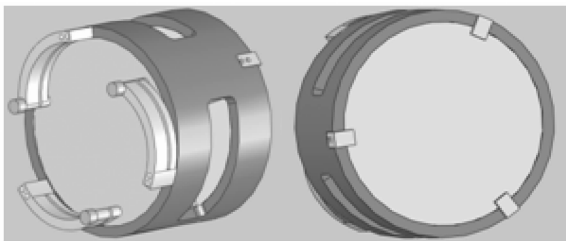


图 8 标准具三维图

Fig. 8 Three-dimension model of etalon

## 4 标准具的热稳定性分析

### 4.1 光学组件的热稳定性分析

对光学组件进行热分析, 由于环氧胶为非线性材料, 且微量使用, 分析时可作简化处理, 即平板与间隔元件之间的接触采用 MPC 约束。组件的约束方式采用固定下平板的底面, 所用的光学材料属性如表 1 所示。

表 1 材料属性

Tab. 1 Material properties

	微晶玻璃	融石英	殷钢
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 530	2 230	8 130
弹性模量/GPa	9.29	64	145
泊松比	0.24	0.2	0.25
线膨胀系数/ $^\circ\text{C}$	$2 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-7}$
导热率/( $\text{W} \cdot \text{mK}^{-1}$ )	1.64	1.13	13.9

当环境温度变化  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 计算光学组件的热变形, 如图 9 所示, 平板间隔变化量沿径向向外逐渐减小。取上下平板中心点  $O_{up}(0, 0, 0.011)$ ,  $O_{down}(0, 0, -0.011)$ , 则其间隔变化量  $\Delta d_0 = 0.64 \text{ nm}$ , 近似为  $\lambda/1\ 000$ 。

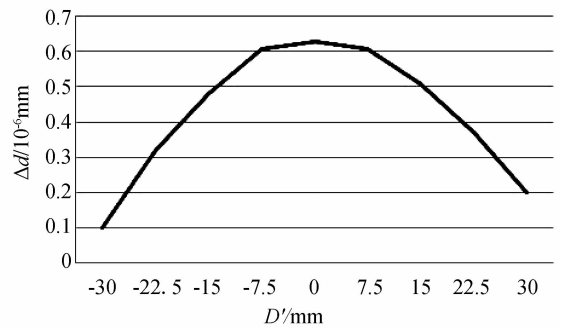


图 9 光学组件平板间隔变化图

Fig. 9 Gap dimension changes of optical elements

### 4.2 标准具的热稳定性分析

增加结构外框后, 对整个标准具进行热分析。标准具采用镜筒外圆固定, 结构件所用的殷钢材料特性如表 1 所示。当环境温度变化

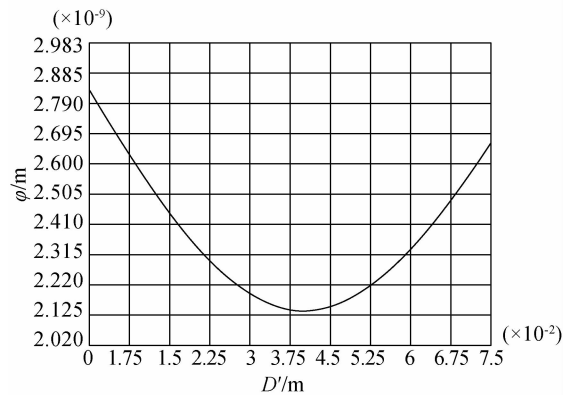


图 10 标准具上平板通光口径区变形曲线图

Fig. 10 Distortion of upper plate

0.1 °C 时,计算标准具的变形,上下平板内反射面变形( $\varphi$ )曲线图如图 10、11 所示。其间隔变化量与图 9 类似,即平板间隔变化量沿着径向外逐渐减小。

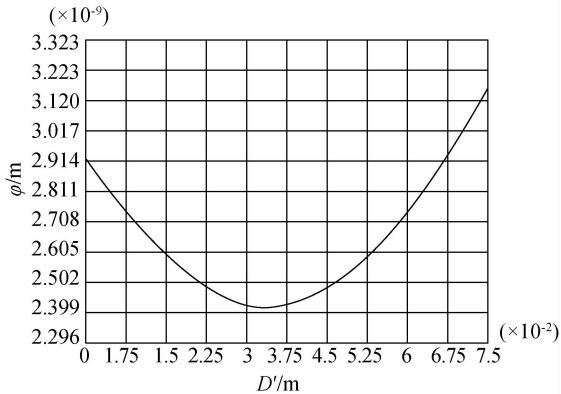


图 11 标准具下平板通光口径区变形曲线图

Fig. 11 Distortion of lower plate

其中平板中心间隔变化量  $\Delta d'_0 = 0.28$  nm, 近似为  $\lambda/2\ 250$ , 与  $\Delta d_0$  相比, 标准具的热稳定性有明显提高。 $\Phi 75$  mm 处平板间隔变化量  $\Delta d'_{75} = 0.2$  nm, 近似为  $\lambda/3\ 150$ , 且平板间隔变化量沿着径向外逐渐减小, 因此满足标准具 5 m/s 的测风精度对热稳定性的要求。

## 5 标准具的力学分析

对标准具进行力学分析, 计算标准具在满足了测风精度对热稳定性要求时, 其力学特性是否满足要求。

### 5.1 加速度过载分析

对该结构施加静力载荷, 分析该结构的力学

性能。对于回转体来说, 承受来自 X 向和 Y 向载荷, 其结果相同, 因此, 在此仅计算 X 向和轴向 Z 向的力学分析结果。

当承受来自 X 向  $140\ \text{m/s}^2$  加速度过载时, 最大应力为 28.7 MPa, 位于上压板处, 而平板最大应力为 1.64 MPa; 当承受来自轴向 Z 向  $130\ \text{m/s}^2$  加速度过载时, 最大应力为 28.5 MPa, 位于上压板处, 而平板最大应力为 1.76 MPa。材料殷钢的屈服强度为 343 GPa, 按照安全裕度 0.7, 其许用应力为 202 GPa, 压板的最大应力小于该材料殷钢的许用应力, 同时平板的最大应力也小于材料融石英的许用应力 70 MPa。因此能满足力学性能要求。

## 6 结 论

针对 F-P 标准具热稳定性要求比较高的特点, 从结构设计角度分析了 F-P 标准具的热稳定性, 主要包括光学元件的材料、形状以及固定方式等几个方面。通过优化设计, 得出了标准具光学元件的最佳外形尺寸; 采用两组压板端面固定的柔性结构形式, 减小装夹带来的应力影响, 且镜筒和平板之间也留有热变形余量分析显示, 在环境温度变化 0.1 °C 时, 光学元件平板的中心间隔变化量  $\Delta d_0 = 0.64$  nm, 增加结构外框后, 平板的中心间隔变化量  $\Delta d'_0 = 0.28$  nm, 近似为  $\lambda/2\ 250$ , 通光口径边缘处间隔变化量  $\Delta d'_{75} = 0.2$  nm, 近似为  $\lambda/3\ 150$ , 且由于标准具间隔变化量沿着径向外逐渐减小。得到的数据满足了标准具 5 m/s 的测风精度对热稳定性的要求, 同时也能满足力学性能要求。

## 参考文献:

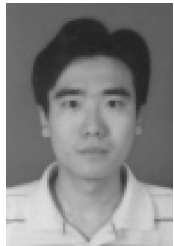
- [1] HIDEAKI N, SHOICHI O, HIROSHI F, et al.. Observation of thermospheric wind velocities and temperatures by the use of Fabry-Perot Doppler imaging system at Syowa Station, Antarctica [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(36): 8382-8395.
- [2] 卢铨, 牛晓明, 孙同和, 等. 基于 CAD/CAE/CAT 技术的空间遥感相机热设计研究 [J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 21-32.
- LU E, NIU X M, SUN T H, et al.. Study on ther-

mal control design of space camera based on CAD/CAE/CAT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 21-32. (in Chinese)

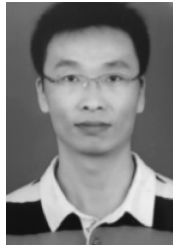
- [3] 王平, 王汝冬, 田伟, 等. Fizeau 干涉仪主机的热稳定性设计与分析 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2100-2107.
- WANG P, WANG R D, TIAN W, et al.. Design and analysis of thermal stability for main frame in Fizeau interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2100-2107. (in Chinese)
- [4] 赵鹏, 卢铨, 王家骥. 空间光学仪器光、机、热一体化总

- 体设计光学[J]. 光学 精密工程,1996,4(6):17-21.
- ZHAO P, LU E, WANG J Q. Integrated design for space optical instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996,4(6):17-21. (in Chinese)
- [5] PAUL B H, VINCENT J A, MICHAEL E D, *et al.*. The high-resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite[J]. *Journal of Geophysical*, 1993,98(D6):10,713-723.
- [6] WILBER R S, PAUL B H, HEINZ J G, *et al.*. The high resolution doppler imager: instrument performance in orbit since late 1991[J]. *SPIE*, 2830: 202-214.
- [7] WILBERT R S, RICK J N, TIMOTHY L K, *et al.*. Operational performance of the TIMED doppler interferometer (TIDI)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003,5175:47-57.
- [8] 朱益清,王小力,朱拓. 具有温度稳定的法布里-珀罗标准具设计[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2007,6(4):438-441.
- ZHU Y Q, WANG X L, ZHU T. The thermally stable Fabry-Perot etalon devices made of crystals [J]. *Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition)*, 2007,6(4):438-441. (in Chinese)
- [9] REES D, FULLER R, LYONS A, *et al.*. Stable and rugged etalon for the dynamics explorer fabry-perot interferometer [J]. *Applied Optics*, 1982,21(21): 3896-3912.
- [10] 苗恩铭. 材料热膨胀系数影响因素概述[J]. 工具技术, 2005,39(5):26-29.
- MIAO E M. Applicability analysis and extension choice of using thermal expansion character Parameter [J]. *Tool Engineering*, 2005,39(5):26-29. (in Chinese)
- [11] 刘盛举,曹俊卿. 关于法布里-珀罗标准具的研究[J]. 大学物理, 2003,22(6):26-28.
- LIU SH J, CAO J Q. Research on Fabry-Perot etalon [J]. *College Physics*, 2003,22(6):26-28. (in Chinese)

#### 作者简介:



孙 剑(1981—),男,河南新乡人,工程师,2007年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事成像光谱仪结构设计和热力学分析方面的研究。E-mail: sunjian@opt.ac.cn



冯玉涛(1980—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: fytciom@126.com



白清兰(1963—),女,陕西清涧人,研究员,主要从事干涉成像光谱技术方面的研究。E-mail: baiqinglan@opt.ac.cn



王咏梅(1967—),女,贵州人,博士,研究员,主要从事中高层大气、电离层光学遥感仪器研制和数据应用方面的研究。E-mail: wym@cssar.ac.cn



汶德胜(1965—),男,陕西眉县人,研究员,博士生导师,主要从事空间光学载荷技术等方面的研究。E-mail: wen@opt.ac.cn