0254-6124/2026/46(2)-0371-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

SUN Yiran, WANG Houmao, LI Pengda, LIU Jiu, WANG Yongmei, FU Liping, HUANG Cong, ZONG Weiguo. Design and Simulation Results Analysis of a Spaceborne Fabry-Perot Interferometer for the Near-space Atmospheric Wind Field (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 371–379. CSTR:32142.14.cjss.2025–0041. DOI:10.11728/cjss2026.02.2025–0041

临近空间大气风场星载 Fabry-Perot 干涉仪设计及仿真结果分析*

孙翼然[1,2] 王后茂[1] 李鹏达[1] 刘 玖[1]
王咏梅[1] 付利平[1] 黄 聪[3,4,5] 宗位国[3,4,5]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(国家卫星气象中心 北京 100081)

4(许健民气象卫星创新中心 北京 100081)

5(中国气象局空间天气重点实验室 北京 100081)

摘 要 Fabry-Perot 干涉仪 (FPI) 是较为重要、广泛应用的临近空间风场探测手段, 为弥补中国在天基 FPI 测风方面的空白, 中国科学院国家空间中心研发了一种星载 FPI 测风仪. 对此星载 FPI 测风仪的光学、结构与温控设计、光学仿真及结果进行分析. 根据宽波段的探测需求, 分析光学设计, 并对其成像系统进行像质评估. 基于光学仿真数据, 对星载 FPI 仪器进行风速反演与精度分析, 在 557.7 nm 和 762.0 nm 两个波段的风速误差分别为 –1.722 m·s^{-1} 和–2.3672 m·s^{-1}, 表明该星载仪器设计符合测风要求. 根据仪器的结构设计特点和成像部分温控方案, 提出一种平移式滤光片切换装置, 采用梯形螺杆加微型减速步进电机或微型直线电机驱动. 进而探讨了仪器核心组件标准具的控温精度与测风误差的关系, 采用了主被动相结合的设计, 降低温度变化对结果的影响, 并进行了仿真验证.

关键词 Fabry-Perot 干涉仪 (FPI), 临近空间, 风速反演, 星载仪器

中图分类号 P356

Design and Simulation Results Analysis of a Spaceborne Fabry-Perot Interferometer for the Near-space Atmospheric Wind Field

SUN Yiran[1,2] WANG Houmao[1] LI Pengda[1] LIU Jiu[1]
WANG Yongmei[1] FU Liping[1] HUANG Cong[3,4,5] ZONG Weiguo[3,4,5]

* 国家重点研发计划项目资助 (2022YFB3901800, 2022YFB3901802)

2025-03-18 收到原稿, 2025-04-14 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

1(*National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

3(*National Satellite Meteorological Center*, *Beijing* 100081)

4(*Xu Jianmin Meteorological Satellite Innovation Center*, *Beijing* 100081)

5(*Key Laboratory of Space Weather*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081)

Abstract Currently, there are relatively few spaceborne methods for detecting near-space atmospheric wind fields, and the Fabry-Perot Interferometer (FPI) is one of the more important and widely used detection techniques. To address the gap in China's space-based FPI wind sensing capabilities, the National Space Science Center developed a spaceborne FPI wind interferometer. This paper mainly introduces this instrument's optical design, structural design, thermal control design, optical simulation, and result analysis. First, the optical design is discussed based on the wideband detection requirements, and the imaging system's image quality is evaluated. Then, based on optical simulation data, wind speed inversion and accuracy analysis of the spaceborne FPI instrument are conducted. The wind speed errors at the 557.7 nm and 762.0 nm bands are –1.722 $m\cdot s^{-1}$ and –2.3672 $m\cdot s^{-1}$, respectively, indicating that the spaceborne instrument design meets the wind measurement requirements. Then, the key points of the instrument's structural design and the thermal control solution for the imaging part are presented, along with a translational filter switching device driven by a trapezoidal lead screw and a micro gear stepping motor or micro linear motor. The paper also explores the relationship between the temperature control accuracy of the instrument's core components (the etalon) and wind measurement errors. A combined active and passive design is adopted to minimize the impact of temperature fluctuations on the results, which is verified with simulation results.

Key words Fabry-Perot Interferometer (FPI), Near space, Wind velocity retrieval, Spaceborne instrument

0 引言

临近空间高度覆盖平流层、中间层和热层, 且卫星、飞船、航天飞机等航天器的发射和返回均穿越该高度, 此外高超音速飞行器、高空气球、飞艇和一些导弹等均在该高度飞行, 故临近空间的大气风场会对这些飞行器的运行安全和飞行轨迹产生影响. 因此, 临近空间大气风场的探测尤为重要[1].

针对临近空间大气风场的探测研发有多种探测仪器, 这些仪器一般基于多普勒原理, 利用可见光、红外或无线电波等进行风场探测. 根据探测方式, 测风仪器主要分为主动与被动两大类. 前者依靠主动发射光波或电磁波, 对目标进行观测, 后者则不具备发射功能, 仅通过接收目标自身的辐射即能实现探测. 主动探测仪器主要包括激光雷达、VHF 雷达、流星雷达等; 被动探测仪器则主要是各种干涉仪, 包括气辉法布里–珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer, FPI)、迈克尔逊干涉仪和非对称空间外差干涉仪等, 这些仪器均是通过检测大气中的气辉辐射而反演风速的, 例如可见光的氧原子绿线 557.7 nm、氧原子红线 630 nm [2]、近红外波段的氧气 A 带和短波红外的 1.27 μm 气辉辐射带[3,4]. 其中法布里–珀罗干涉仪具有高灵敏度、高光谱分辨率等优点, 且辐射能量的利用率较高.

基于 FPI 干涉仪的地基高空风场探测出现得较早. 自 20 世纪 60 年代以来, 分别研制有多种不同样式的 FPI 用于中高层大气风场测量. 由美国国家海洋和大气管理局、密歇根大学等机构研制的地基 FPI, 测风精度达到 6 $m\cdot s^{-1}$ (OH 892 nm, 峰值高度约 87 km). 1990 年开始, 日本使用广角镜头收集气辉辐射, 并使用定制的窄带滤光片同时对三个不同波段气辉进行测量[5]. 2011 年有研究通过多标准具的方式, 突破了以往地基 FPI 仅能在夜间探测的限制, 实现了昼夜连续探测.

自 20 世纪 80 年代起, 美国等国家开始将 FPI 测风仪器搭载在卫星上, 对大气风场开展星基探测研究[6]. 1982 年世界上第一台星载 FPI 测风干涉仪搭载在动力学探索者 2 号卫星 (Dynamics Explorer 2, DE-2) 上, 对中高层大气风场进行了探测[7], 该干涉仪采用具有 12 个同心圆阳极的光电倍增管 (Imager Plane Detector, IPD) 作为探测器. 1991 年美国国家航空航天局 (NASA) 的高层大气研究卫星 (Upper Atmospheric Research Satellite, UARS) 发射升空, 这种卫星搭载了 HRDI (High-Resolution Doppler Imager) 仪器, 其利用 3 个串联的标准具进行临近空间高度 (10～120 km) 的大气风场探测, 这种仪器的夜间中层 (约 95 km) 风速反演精度为 5 m·s^{-1}[8]. 2001 年由约翰·霍普金斯大学为 NASA 研发的 TIMED 卫星发射升空, 其搭载了 TIDI (TIMED Doppler Interferometer) 多普勒成像仪, 可以对中高层大气风场 (60～300 km) 进行全天时快速观测, 风速反演误差最高可达到 3 m·s^{-1}[9]. 其采用了单 FPI 标准具的光学设计, 除了可以探测风场, 还能同时测量大气的温度和微量成分. NASA 于 2021 年确定了一项由 4 种立方星构成的空间天气探测项目, 其中包括了被称为 WindCube 的热层风探测卫星. 该卫星基于 FPI 测风原理, 目标观测波段为 630 nm, 风速精度 5 m·s^{-1}, 其采用紧凑的光路设计和 34 mm×60 mm 规格的方形 FPI 标准具, 工作间隔 20 mm, 温控精度±0.1℃. 但目前该卫星仍处于开发阶段, 尚未发射升空[10].

中国借助地基 FPI 进行中高层大气风场观测始于 2010 年. 当年借助美国国家大气研究中心研发的地基 FPI 测风仪, 中国科学院国家空间科学中心完成了中国首次基于地基光学干涉仪的中高层大气风场探测[11]. 随后, 国家卫星气象中心及中国科学院地质与地球物理研究所等单位也陆续引进了地基 FPI 仪器[1,12]. 在仪器研制方面, 中国科学院国家空间科学中心等单位自 2014 年开始开展了相关研究, 先后研制了单波段 (630 nm 气辉) 和三波段 (557.7, 630, 892.0 nm 气辉) 的地基 FPI 仪器, 并在岢岚等地进行了实地探测与数据对比[13]. 目前, 中国投入使用的 FPI 测风干涉仪均为地基型号, 尚未有星载 FPI 测风干涉仪发射. 为填补该方面的研究空白, 计划基于此前开发多型地基同类设备的经验, 开展星载 FPI 测风干涉仪的研发.

本文对星载 FPI 测风仪进行设计与仿真, 从探测原理、光学设计、结构设计、标准具温控和仿真数据等方面对该仪器进行分析.

1 仪器探测原理与主要组成

1.1 探测原理

FPI 测风设备的核心部分是 F-P 标准具. 其具有两块平行的熔融石英玻璃板, 内表面均镀有高反射膜, 两板之间用厚度精确的间隔块隔开, 构成干涉腔, 实现多光束等倾干涉. 其原理如下.

F-P 标准具透射出的平行光线相邻光束的光程差为

$$\varDelta = 2nd\cos\theta. \tag{1}$$

其中, n 为平行平板间介质的折射率; d 为两块平行平板间距, 即标准具的腔长; θ 为入射角 (入射光与平行板轴线的夹角). 由光程差 $\varDelta$ 引起的相位差

$$\delta = \frac{4\pi nd}{\lambda}\cos\theta. \tag{2}$$

其中, λ 为入射光的波长.

根据波的干涉原理, 当光程差为波长的整数倍时光波叠加, 即会出现干涉极大. 此时, 形成干涉的光线入射角相同, 因此这种干涉被称为等倾干涉. 又由于各入射角相同的光线均绕光轴中心对称分布, 各条干涉光通过透镜聚焦在焦平面上, 机会形成明暗相间的干涉圆环图样. 设 m 为干涉环的级数, 根据干涉发生的条件有如下关系:

$$m\lambda = 2nd\cos\theta. \tag{3}$$

根据式 (3), 若某入射光的入射角为 θ, 可以得到如下相应干涉环级数 m 的表达式:

$$m = \frac{2nd\cos\theta}{\lambda_0} = \frac{2nd}{\lambda_0}\left(1 - \frac{r_0^2}{2f^2}\right). \tag{4}$$

其中, λ_0 为无多普勒频移的原始光波长, r_0 为相应的第 m 级干涉条纹的半径, f 为成像镜组的等效焦距[14]. 当入射角 θ 较小时, 式 (4) 可近似为

$$\theta \approx \tan\theta = r_0/f. \tag{5}$$

根据泰勒级数, 略去高次量, 可得

$$\cos\theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} = 1 - \frac{r_0^2}{2f^2}. \tag{6}$$

当观察方向的视线风速为 v 时, 由于多普勒频移, 波长 λ 变化为

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right). \tag{7}$$

其中, c 为光速, 此时条纹的各干涉级次满足

$$m = \frac{2nd\cos\theta}{\lambda} = \frac{2nd}{\lambda_0\left(1-\dfrac{v}{c}\right)}\left(1 - \frac{r_1^2}{2f^2}\right). \tag{8}$$

其中, r_1 为与视线风速 v 对应的 m 级干涉条纹的半径. 由式 (4) 和式 (8) 可推出

$$v = \frac{c\left(r_1^2 - r_0^2\right)}{2f^2 - r_0^2}. \tag{9}$$

根据文献 [15], 对风速表达式求偏导, 则视线风速的精度 Δv 可表示为

$$\Delta v = -\frac{r_0 \Delta r}{f^2} c = -\theta \frac{\Delta r}{f} c. \tag{10}$$

其中, Δr 为干涉条纹半径变化量, 有

$$\Delta r = \frac{f}{\theta d}\Delta d. \tag{11}$$

其中, Δd 为标准具平板间距变化量, 将式 (11) 代入式 (10), 则有

$$\Delta v = -c\frac{\Delta d}{d}. \tag{12}$$

1.2 仪器组成

星基 FPI 测风仪的光学系统结构如图 1 所示, 由外置的扫描望远镜系统、光纤系统和干涉成像系统 (主机) 构成, 其中主机部分又包括准直系统、滤光片系统、标准具系统和成像系统. 大气中的气辉由外置望远镜接收, 通过光纤引入干涉和成像部分. 这些光线经过准直系统 (内部具有滤光片) 后转变为平行光束, 通过标准具产生 1.1 节中所述的等倾干涉. 最后, 成像系统将所形成的干涉圆环图样在光路末端的 CCD 探测器上成像, 所得的图像经计算机预处理、反演后即可获得观测数据.

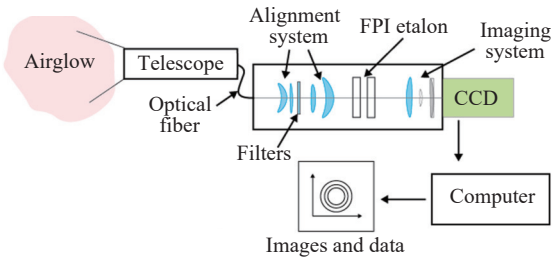

图 1 FPI 系统测风原理

Fig. 1 FPI system configuration

2 仪器光学设计与光学仿真

2.1 仪器光学设计

根据式 (10), 增大成像系统焦距 f 有利于提高精度, 但在通光孔径一定时, 单方面增大焦距也会导致相对通光孔径减小, 进而导致探测器进光能量减小, 信噪比下降, 最终影响探测精度. 因此, 焦距需要和标准具口径、传感器灵敏度和目标测风精度相匹配. 此外, 增大标准具间距 d 有利于提高条纹锐利度, 从而提高测风精度, 但同时容易引起较大的系统误差和随机噪声, 因此 d 一般在 10～25 mm 范围内选取[16].

本文 FPI 的探测波段为 557.7 nm 和 762.0 nm, 望远系统选用透射式结构以便矫正像差, 共用 4 片镜片完成设计, 其 MTF 在 40 lp·mm^{-1} 处大于 0.6, 点列图 RMS 最大为 6.128 μm. 如图 2 所示, 光路从光纤引入的光束依次通过准直系统、滤光片、标准具和成像系统, 最终到达 CCD 探测器上.

成像系统采用卡塞格林结构, 实现物方远心. 成像系统主要对轴上像差进行矫正, MTF 图、点列图分别如图 3 和图 4 所示, 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 40 lp·mm^{-1} 处大于 0.5, 点列图均方根最大为 0.012 μm.

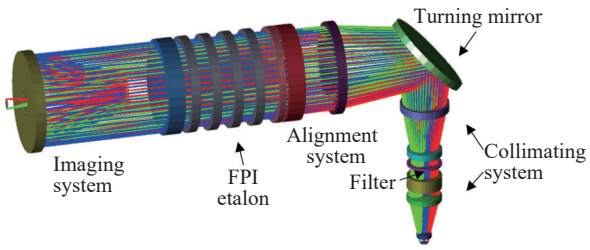

图 2 FPI 系统光路

Fig. 2 Optical path of the FPI system

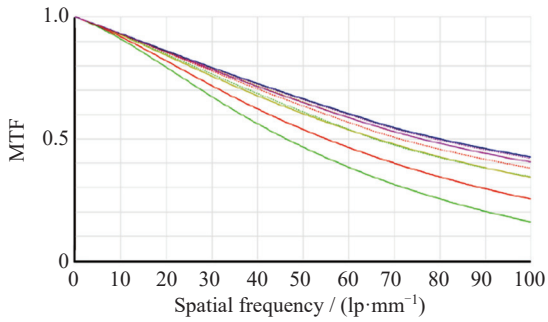

图 3 成像系统 MTF 图

Fig. 3 Imaging system MTF diagram

2.2 成像和反演仿真

仪器工作时, 会在 CCD 上形成环状干涉图样. 为提高反演精度, 需要先采用均值滤波、中值滤波、圆心确定及圆周积分等方法对 CCD 获得的图像进行预处理, 从而得到 FPI 干涉圆环一维干涉曲线.

在实际观测前, 还要利用激光器对仪器进行定标. 通过激光模拟数据与实测数据的对比从而确定 FPI 的仪器函数, 包括标准具间距、反射率、点扩散函数等. 然后, 根据这些仪器函数, 模拟气辉辐射数据, 从而反演得到风速信息. 基于 FPI 干涉仪光学设计和正演算法[1], 本研究将风速真值作为输入条件, 在两个观测波段上对 CCD 上的成像进行仿真, 获得仿真图像, 具体如图 5 所示[6].

基于以上仿真数据, 利用 FPI 反演算法[1], 获得风速结果, 并将结果与预设真值进行比较, 反演结果具体如表 1 所示.

由表 1 可知, 两个波段的测风偏差均低于 5 m·s^{-1}, 说明本文 FPI 干涉仪的光学系统设计满足风速探测的要求.

3 仪器结构与热设计与仿真

3.1 仪器结构设计

仪器的机械结构主要包括各段镜筒、折返镜盒、标准具筒和滤光片切换器等部分, 如图 6 所示, 这些组成部分起到支撑和定位光学部件、传导热量、切换

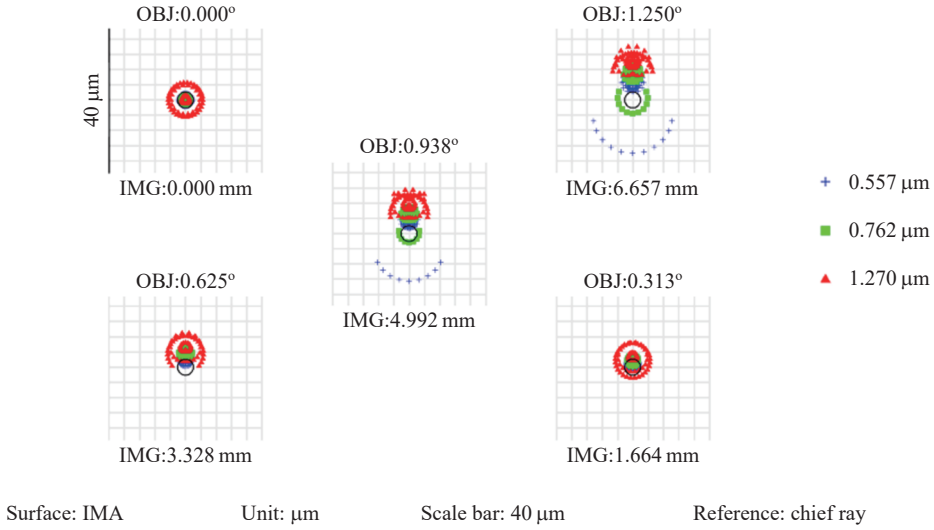

图 4 成像系统点列图

Fig. 4 Imaging system spot diagrams

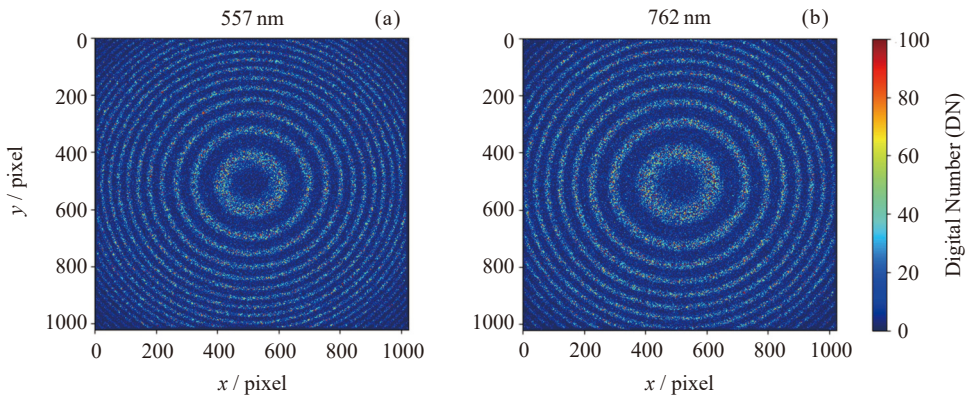

图 5 FPI 成像仿真结果

Fig. 5 FPI imaging simulation results

表 1 风速反演结果

Table 1 Wind speed inversion results

序号	波段λ/nm	风速真值v_0/(m·s^{-1})	风速反演值v_1/(m·s^{-1})	偏差Δv/(m·s^{-1})
1	557.7	50	48.2780	–1.722
2	762.0	40	37.6328	–2.3672

滤光片、遮挡杂散光等作用. 为减轻设备重量, 主机部分镜筒采用兼顾强度、易加工性和密度较低的6061-T6 铝合金制造, 其具有 260 MPa 的抗拉强度和240 MPa 以上的 0.2% 屈服强度, 且热导率较高, 硬度较低, 机加工性能优于殷瓦钢 (Invar) 和钛合金[17]. 此外, 为消除杂光, 镜筒内设计有数圈光阑和消光螺纹. 为消除镜筒内壁反光, 并提高镜筒内各处辐射换热能力, 提高镜筒温度均匀性, 镜筒采用了黑色阳极氧化处理.

成像系统的镜筒温控采用粘贴聚酰亚胺加热膜的方式, 并在镜筒上粘贴一枚三线制 PT100 热敏电阻. 后者连接 12 bit 精度温度变送器, 将温度信号转化为数字信号, 再以 RS485 协议传送至控制器, 控制器再通过光耦合 MOS 管模块控制加热膜开始/停止加热, 以实现温度反馈和开关式控制.

为减小滤光片切换器的体积和重量, 采用梯形螺杆和微型减速步进电机设计了一种平移式滤光片切换装置, 结构如图 7 所示. 必要时可将多个该装置叠放入准直模块后, 以增加可切换的滤光片数量. 此外, 该切换器还可以换用微型线性电机来进一步缩小体积, 通过消除旋转传动部件, 进一步提高系统可靠性.

图 6 镜筒结构

Fig. 6 Structure of the lens tube

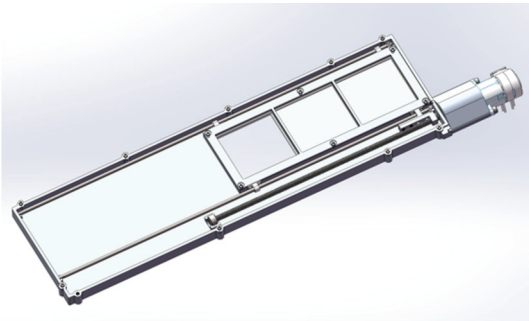

图 7 滤光片切换器结构

Fig. 7 Structure diagram of the filter switcher

3.2 标准具温控设计

F-P 标准具的腔长对温度敏感, 进而影响测风精度, 因此需要对标准具进行精密的温控设计. 目前, 地基 F-P 标准具的温控精度可达±0.01 K, 而星载标准具的温控精度一般为±0.1 K[8,18–20].

对于仪器, 根据式 (12), 若要实现 5 m·s^{-1} 的测风精度, 则腔长变化量Δd=0.25 nm, 约为最长探测波长 (762 nm) 的 1/3000. 为了兼顾温控方案的可行性和测风精度需求, 参考文献 [21,22] 等的研究, 最终确定目标温控精度至少需达到±0.05 K 量级.

温控设计采用主动温控和被动温控相结合的方式. 其中, 被动温控措施可降低主动温控的加热功率和控制精度要求, 提高温度分布均匀性和对温度变化的适应能力, 是对主动温控的有效补充. 具体在设计上, 可采用能抵抗温度变化的弹性固定结构、应用超低热膨胀系数的材料等方式, 而在标准具配套温控结构上, 则可设置铜制均热环和热管并做好隔热[23,24].

为实现腔长变化量Δd≤0.25 nm 目标, 选用低膨胀的殷瓦 32-5 合金作为标准具筒体和压扣材料, 间隔材料则选择肖特公司的 ZERODUR 超低膨胀微晶玻璃. 三种材料具体物性参数可见表 2.

将上述物性参数和结构导入仿真软件, 各处接触配置完成后, 施加 0.05 K 的温度载荷, 得到其光轴方向上的形变结果如图 8 所示.

在标准具前后镜片的工作表面, 从中心 (r=0 mm) 到通光口径边缘 (r=50 mm) 处各提取 5 个点位的光轴方向位移, 并求其差值, 即腔长变化量Δd,

其结果列于表 3. 可见各点腔长变化量均在设计要求范围内.

为使标准具筒体各处温度分布均匀, 还在标准具内筒体外侧设计了铜制均热套, 其外壁开槽嵌入四根环形热管, 以进一步提高周向导热能力, 加热膜粘贴在均热套的外壁和端面上. 均热套和恒温 23℃ 的底板 (由卫星环控系统提供) 通过铝制外筒、支架和热管形成热连接.

为减少接触热阻, 同时减少可凝挥发物对光学系统的污染, 在各传热表面上均涂有等效导热系数 1500 $W\cdot K^{-1}\cdot m^{-2}$ 的导热硅橡胶. 为避免辐射传热, 在加热膜外层包裹多层绝热材料 (MLI); 为减少标准具部分和前后镜筒之间的导热, 在连接法兰处也增设了聚酰亚胺隔热垫片, 并采用热导率较低的钛合金螺丝和聚酰亚胺隔热垫片连接.

主动温控系统则主要起到电加热/制冷的作用, 在航天中通常使用电加热膜或半导体制冷元件 (Thermoelectric Cooler, TEC) 作为执行器. 但在研究中 TEC 元件具有三点不足. 其一, 其为平板形式, 和圆筒形的标准具不容易贴合; 其二, TEC 元件的制冷/热量会随着电流、冷热端温差改变而发生非线性变化, 对控制器要求较高; 其三, TEC 元件的背面必须有导热结构, 增加了布置难度. 因此, 在研究中选用电加热膜作为执行器对标准具进行加热, 使后者的温度始终高于底板和前后镜筒的温度. 这种单向加热的设计有利于简化设计, 提高可靠性.

为适应不同方向的导热条件差异, 将均热套外圈的环形加热膜根据所处位置不同, 等分为 8 个区域,

表 2　标准具相关材料物性

Table 2　Etalon related material properties

材料	密度ρ/($kg\cdot m^{-3}$)	热膨胀率α/K^{-1}	泊松比ν	弹性模量E/GPa	热导率λ/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)
殷瓦32-5合金	8150	6.3×10^{-7}	0.23	144	13.9
康宁熔石英玻璃	2200	5.2×10^{-7}	0.16	73	1.38
ZERODUR玻璃	2530	7×10^{-9}	0.24	90.3	1.46

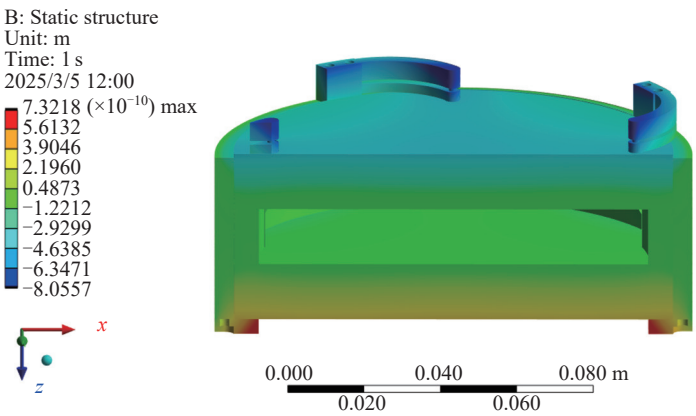

图 8　0.05 K 温度变化下的形变仿真结果

Fig. 8　Deformation simulation results at 0.05 K temperature change

表 3　标准具工作表面的位移值

Table 3　Displacement values for the etalon's work surface

	r =0 mm	r=10 mm	r=20 mm	r=30 mm	r=40 mm	r=50 mm
前镜片工作表面位移/nm	–0.0298	–0.0274	–0.0220	–0.0172	–0.0182	–0.0262
后镜片工作表面位移/nm	–0.0273	–0.0344	–0.0344	–0.0385	–0.0369	–0.0273
腔长变化量Δd/nm	–0.0025	0.0069	0.0124	0.0214	0.0187	0.0011

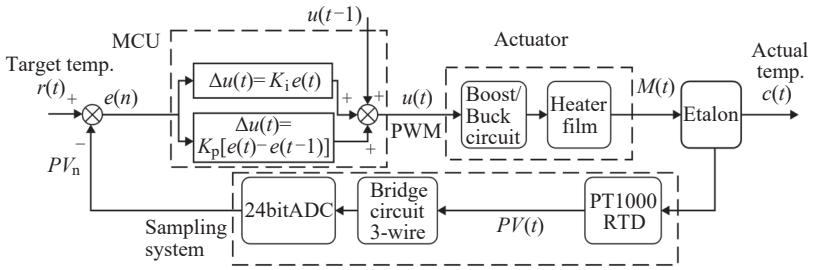

图 9 温控流程

Fig. 9 Temperature control flow chart

分别设置加热功率 (左右对称, 因此实际共有上、左上和右上、正侧、左下和右下、下五个功率分区). 又将端面的加热膜分为前上、后上、前下、后下 4 个分区, 分别设置功率. 仿真结果表明, 此种设置方式可满足标准具筒体温差不超过 25℃±0.05℃ 的设计要求.

温控算法上, 本研究采用占用计算资源低、抗干扰能力强的增量式 PID 算法, 其表达式为

$$u(t) = \Delta u_t + u(t-1), \tag{13}$$

$$\Delta u_t = K_{\rm p}[e(t) - e(t-1)] + K_{\rm i}e(t) + K_{\rm d}[e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)]. \tag{14}$$

比例部分的意义在于根据偏差量控制输出量, 偏差越大, 输出越高, 起到主要的控制作用; 积分部分则可起到消除稳态误差, 提高被控量准 $\rm lp{\cdot}mm^{-1}$ 确度的作用; 微分部分可以消除超调, 加快响应速度, 提高系统稳定性, 但对高频干扰敏感, 调参时需要慎重考虑.

针对 F-P 标准具温控, 其特点为对温控精准度要求高, 但允许有较长的温度稳定时间, 因此通常不加入微分环节, 仅采用 PI 控制即可获得满意的稳态精度 (可达±0.004 K) 与收敛速度[25]. 因此, 本仪器采用 PI 控制以简化参数整定工作, 其温控流程如图 9 所示.

电路硬件上, 温控系统采用 PT100 铂电阻温度计作为温度传感器, 其采用三线制接入惠斯通电桥的一个桥臂, 以消除线阻对测量的干扰. 处理电路方面, 可使用国产 24 bitADC 芯片 (芯海 CS1259 B) 对电桥输出电压进行采样, 并传送至 STM32 单片机 (MCU) 或可编程控制器 PLC, 再由其输出 PWM 波来控制 TPS63802, LM5176 等降压/升压转换器, 或由 DAC 输出至 MAX8521 等 TEC 驱动芯片, 再由后者负责驱动电阻加热膜对标准具进行加热.

4 结论

对星载 FPI 测风干涉仪进行了设计与分析, 包括星载 FPI 光学设计、结构设计、温控设计与仿真、光学仿真及结果分析等. 在 FPI 干涉仪光学设计以及对其成像系统进行像质评估的基础上, 进行了光学仿真成像, 并利用风速的正演模型和反演方法, 进行了风速反演, 得到 557.7 nm 和 762.0 nm 两个波段的误差均位于 5 $\rm m{\cdot}s^{-1}$ 以内, 表明设计达到了探测目标要求. 另外, 对干涉仪镜筒结构与选用材料进行了分析, 设计了一种平移式滤光片切换装置. 作为仪器的核心部分, 讨论了标准具的温度变化对测风精度的影响, 设计了主被动相结合的温控方案, 并通过有限元热仿真, 对标准具核心模块的热敏感性进行了验证.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] WANG Houmao. Retrieval of Wind and Temperature for Middle and Upper Atmosphere Based on Full-Closed and Non-Full Circular Fringes of Fabry-Perot Interferometer (FPI)[D]. Beijing: University of China Academy of Science, 2017

[2] HAN Weihua. Processing of Fringe Image from Spaceborne Fabry-Perot Interferometer Prototype[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2010

[3] WANG Daoqi, WANG Houmao, HE Weiwei, *et al.* Radiative transfer characteristics of the 1.27 μm $O_2(a^1\Delta_g)$ airglow in limb-viewing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, **44**(4): 1088-1097

[4] WANG Daoqi, WANG Houmao, HU Xiangrui, *et al.* A new method for retrieving the near-space temperature profile based on the 1.27 μm O_2 airglow[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, **43**(2): 215-225

[5] SHIOKAWA K, KADOTA T, EJIRI M K, *et al.* Three-channel imaging Fabry-Perot interferometer for measure-

ment of mid-latitude airglow[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(24): 4286-4296

[6] WANG Houmao, WANG Yongmei, WANG Yingjian. Data processing of the middle and upper atmospheric wind field retrieval based on the Fabry-Perot Interferometer[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(4): 1095-1101

[7] FENG Yutao, FU Di, ZHAO Zengliang, *et al.* An overview of spaceborne atmospheric wind field measurement with passive optical remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, **43**(6): 0601011

[8] HAYS P B, ABREU V J, DOBBS M E, *et al.* The high-resolution Doppler imager on the upper Atmosphere Research Satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, **98**(D6): 10713-10723

[9] HANG S P, SHEPHERD G G. On the response of the O(^{1}S) dayglow emission rate to the Sun's energy input: an empirical model deduced from WINDII/UARS global measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A3): A03304

[10] SEWELL S, WU Q, ZMARZLY P, *et al.* WindCube: a CubeSat thermospheric wind instrument utilizing Fabry-Perot interferometry[C]//Small Satellite Conference. Logan: Utah State University, 2022: SSC22-WKIII-08

[11] YUAN W, XU J Y, MA R P, *et al.* First observation of mesospheric and thermospheric winds by a Fabry-Perot interferometer in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(35): 4046-4051

[12] YANG C J, ZHAO B Q, JIN Y Y, *et al.* Climatology of nighttime upper thermospheric winds from Fabry-Perot Interferometer 2011–2019 measurements over Kelan (38.7°N, 111.6°E), China: local time, seasonal, solar cycle, and geomagnetic activity dependence[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(9): e2020JA027892

[13] WANG Houmao, WANG Yongmei, FU Jianguo, ZHANG Zhongmou. A new ground-based Fabry-Perot interferometer for measurement of the thermospheric wind[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, **36**(3): 352-357 (王后茂, 王咏梅, 付建国, 等. 一种用于测量高层大气风场的新型地基 Fabry-Perot 干涉仪 [J]. 空间科学学报, 2016, **36**(3): 352-357)

[14] QIN Minghui, ZHANG Yange, AI Yong. Response of lower thermospheric neutral wind at Yellow River Station in Arctic to auroral substorm[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2019, **31**(2): 191-197

[15] HU Guoyuan, AI Yong, ZHANG Yange, *et al.* Thermospheric wind observation by a scanning Fabry-Perot interferometer during MERINO campaign[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3688-3694

[16] ZHANG Yange, AI Yong, He Pingan, *et al.* A FPI (Fabry-Perot Interferometer) design method[P]. CN: 102749476A. 2012-10-24

[17] WANG Shang, ZHANG Xingxiang, ZHU Junqing. Design and analysis of all aluminum alloy optical mechanical structure of space cameras[J]. *Infrared Technology*, 2022, **44**(4): 364-370

[18] LÜ Zuokun, QI Jun, LI Yan, *et al.* Design and implementation of efficient temperature control algorithm for Fabry-Perot etalon of spaceborne lidar[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, **39**(1): 130-134

[19] SHANGGUAN Mingjia, XIA Haiyun, SHU Zhifeng, *et al.* Scanning F-P etalon based high spectral resolution lidar for low-stratosphere temperature measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(12): 121003

[20] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BROWN C M, *et al.* Michelson Interferometer for Global High-Resolution Thermospheric Imaging (MIGHTI): instrument design and calibration[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1): 553-584

[21] ZHANG Wei. Research on Pulse Frequency-locking Method of Doppler Lidar Based on Fabry-Perot Etalon[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013

[22] KRAINAK M A, STEPHEN M A, MARTINO A J, *et al.* Tunable solid-etalon filter for the ICESat/GLAS 532 nm channel lidar receiver[C]//2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Toulouse: IEEE, 2003, 5: 3020-3022. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1294667

[23] ZHAO R J, ZHAO Y K, QIN M, *et al.* Influence of process parameters on properties of super invar alloy fabricated by laser powder bed fusion for semiconductor equipment[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, **92**: 104404

[24] SUN Jian, FENG Yutao, BAI Qinglan, *et al.* Design of thermal stable Fabry-Perot etalon for wind measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(5): 1167-1173

[25] WANG Qiaoyun, MAO Bangning, QIU Yanqing, *et al.* The design of a thermostatic structure for fiber F-P etalons and the temperature control algorith[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2020, **31**(7): 682-687 (汪巧云, 毛邦宁, 裘燕青, 等. F-P 光纤标准具高精度温控系统设计与算法研究 [J]. 光电子·激光, 2020, **31**(7): 682-687)

作者简介

孙翼然 男, 2000 年出生, 中国科学院国家空间科学中心硕士研究生, 主要研究方向为空间光学遥感技术.

E-mail: sunyiran22@mails.ucas.ac.cn

王后茂（通信作者） 男, 1986 年出生, 现为国家空间科学中心副研究员, 主要研究方向为大气气溶胶和风场反演及交叉定标等.

E-mail: hmwang@nssc.ac.cn