

文章编号 1004-924X(2015)09-2613-07

重力对星载傅里叶光谱仪动镜系统的影响

段 娟^{1,2*}, 华建文^{1,2}, 王战虎^{1,2}, 王海英^{1,2}

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要:分析了太空失重对星载傅里叶光谱仪动镜系统的影响。针对动镜系统受重力影响的两个关键因素, 提出了解决措施, 并设计了实验室验证方法。考虑空间和地面重力环境的不同, 分析了动镜未被驱动时重力对初始定位的影响和动镜被驱动后重力对运动机构回复力矩的影响。设计了精密初始机械限位使动镜从固定起始点开始运动控制, 并且采用闭环 PID 控制与在轨可调整期望运动规律相结合的控制方法来校正动镜机构等效扭转刚度的变化。最后, 提出了将整个动镜机构倒置的方式进行地面验证, 并设计了动镜正、负位移不对称性偏差以及匀速区速度波动的性能测量方法。实验结果表明, 正置和倒置时动镜正、负位移的不对称性偏差可以控制在 $6\ \mu\text{m}$ 以内, 其匀速区的速度波动均方根值分别为 1.4% 和 1.1%。实验显示提出的解决方法简单可靠, 性能指标满足傅里叶光谱仪的要求, 为动镜系统的空间应用提供了技术途径。

关键词:傅里叶光谱仪; 动镜系统; 失重; 零光程差位置; 机械限位; 闭环控制

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2613

Influence of gravitation on moving mirror system in Fourier transform spectrometer

DUAN Juan^{1,2*}, HUA Jian-wen^{1,2}, WANG Zhan-hu^{1,2}, WANG Hai-ying^{1,2}

(1. Shanghai Institutes of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

* Corresponding author, E-mail: dj_wwl@126.com

Abstract: The effect of space weightlessness on the moving mirror system in a Fourier transform spectrometer (FTS) was analyzed. Aiming at two critical factors of gravitation influence on the moving mirror system, solution schemes were put forward, and a validation method in the laboratory was designed. By taking different ground and space environments into account, the influences of gravitation on the moving mirror initial position without a driver and the restoring moment of moving mirror frame with the driver were analyzed. The initial accurate mechanical limit that allows moving mirror motion on a fixed starting point was designed. Then, a control strategy in combination with closed loop PID control and adjustable expected motion law was used to reduce the influence of restoring moment of moving mirror frame. Finally, the moving mirror mechanism of FTS was placed

收稿日期: 2015-02-20; 修订日期: 2015-03-21.

基金项目: 民用航天“十二五”预研基金资助项目 (No. Y1K13003G0)

in up-down mode for ground validation. To obtain the bias of positive displacement and negative displacement of the moving mirror and the speed vibration in the uniform area, a test system was established. Experiments show that the bias of positive displacement and negative displacement for the moving mirror motion is less than $6\ \mu\text{m}$, and the speed vibration (RMS values) tested on upright and up-down frames are respectively 1.4% and 1.1%. The design satisfies the performance of FTS in simpleness and reliability, and provides a application technology for moving mirror systems in space.

Key words: Fourier transform spectrometer; moving mirror system; weightlessness; position of zero optical path difference; mechanical limit; closed loop control

1 引言

傅里叶光谱仪 (Fourier Transform Spectrometer, FTS) 作为一种重要的星载红外遥感仪器, 可以从星上获得高灵敏度、高光谱分辨率及多通道的大气辐射光谱, 反演出有关大气温度、湿度沿高度方向的分布情况^[1-3]。其工作时入射红外辐射经分束器后分别到达定镜和动镜的两束光路。动镜在动镜电机的驱动下往复直线运动, 产生位相调制。定镜和动镜分别反射后的平行光经分束器后产生相干光束, 相干光束被会聚到红外探测器上, 经光电转换后获得时域干涉信号, 最后由傅里叶反演得到光谱图。

动镜运动对傅里叶光谱仪的功能和性能有着重要影响。动镜的支承装置用于对动镜的支承和精密导向, 并且保证其在太空环境中长时间连续运动时不降低性能。国际上星载傅里叶光谱仪的动镜运动机构主要采用了 3 种支承类型: 直线轴承、弹性机构和电磁轴承^[4-8]。直线轴承能产生较大的光程差, 但运动直线性得不到保证, 随磨损加重其性能会迅速恶化, 在空间维持润滑也很困难。电磁轴承的刚度和阻尼可调, 无摩擦, 运动直线性取决于气隙传感器和控制系统性能, 理论上寿命和可靠性高, 但实际工程中由于机械和控制系统复杂, 可靠性反而降低。弹性支承具有无摩擦、不需润滑, 寿命长, 控制系统容易实现等优点, 且运动倾斜和行程范围可以满足目前傅里叶光谱仪的技术要求。

国际上星载傅里叶光谱仪 GHIS、CrIS、GIFTS 等的动镜系统均采用弹性平动支承机构, 本文的 FTS 实验样机中的动镜机构也采用了弹性支承设计。动镜平动, 运动架和固定架之间由铍青铜材料的面弹簧相连。然而星载傅里叶光谱仪处于太空环境, 其动镜系统的设计必须考虑太

空失重对系统性能的影响^[9]。本文针对重力对动镜系统初始定位和运动时回复力矩的影响因素, 采用精密机械初始定位与闭环 PID 控制、在轨可调期望运动规律相结合的控制方法, 解决了采用弹性支承装置的傅里叶光谱仪动镜系统的空间失重带来的问题。数据表明, 提出的设计方法简单可靠, 能够满足傅里叶光谱仪的性能要求。

2 重力对动镜系统的影响

2.1 重力对动镜定位的影响

动镜架及其力学等效如图 1 所示, 动镜架由动镜、运动框簧片、固定架和驱动电机 (未画出) 等组成, 驱动电机的动线圈安装在运动框架上。固定架、运动框和动镜以及动镜与运动框的联接部分都是刚度较大的部件, 唯有簧片抗弯刚度小。在地面上, 由于动镜具有重力 W , 使得簧片产生微微的倾斜 θ 角度。动镜架力学等效图如图 1(b) 所示。

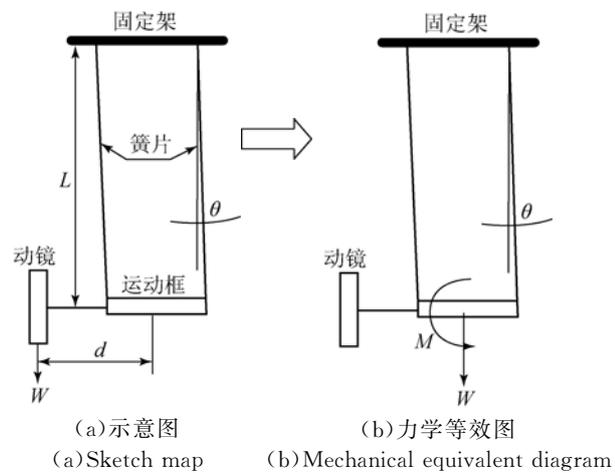


图 1 动镜架示意图和其力学等效图
Fig. 1 Sketch map and mechanical equivalent diagram of moving mirror frame

动镜重力 W 从动镜处移到运动框中央,同时在运动框上加上力矩 M :

$$M=W \times d, \quad (1)$$

式中 d 为动镜质心到运动框中央的距离。力矩 M 会使簧片产生角度变形 θ 。

在太空没有重力作用,和地面情况相比,动镜电机在线圈未通电时的起始位置存在微小差异。由于动镜是平面镜,从光学方面考虑,动镜在 L 方向上的微位移对其没有影响。但动镜在 d 方向上的位移直接影响到动镜运动的起始位置。从理论上讲,太空和地面的动镜起始位置的微位移量为:

$$\theta=\frac{M}{k}, \quad (2)$$

$$x=L \times \theta, \quad (3)$$

式中: x 为微位移量, L 为簧片长度, k 为扭转刚度(经实测为 3.2 Nm/rad)。在太空时失重, W 为零, M 为零, θ 为零, x 为零,而地面上有重力作用时, x 不为零。动镜的运动控制使得动镜围绕其起始点做往复对称运动。太空和地面动镜运动的差别如图 2 所示。地面时若动镜围绕起始点 B 往复对称运动,则在太空中动镜围绕起始点 A 往复对称运动, A 至 B 的距离为微位移量 x 。

若地面上已调好的零光程差位置在 B ,由于失重的作用,当干涉仪入轨后如果没有任何规避措施,也必将导致太空获得的干涉图和地面不一致,如图 3 所示,其中纵轴表示采样干涉信号的电压,横轴表示等光程采样的个数。

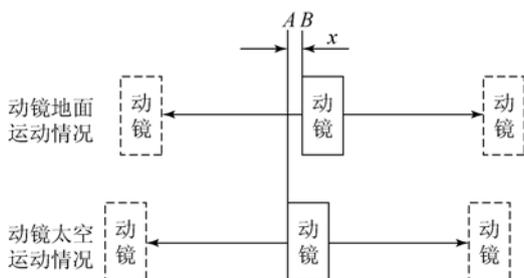
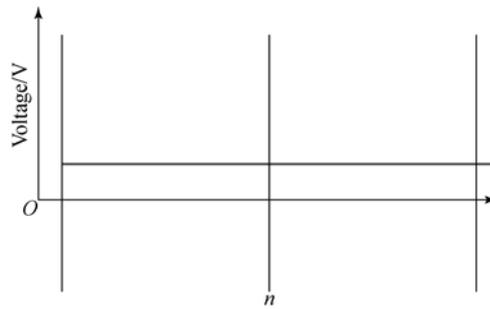


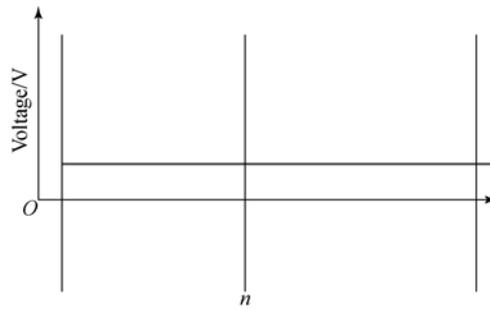
图 2 太空和地面环境下动镜运动的差别

Fig. 2 Difference of moving mirror motions in space and ground environment



(a) 在地面

(a) In ground environment



(b) 在太空

(b) In space environment

图 3 不采取规避措施时地面和太空等光程差采样干涉图对比

Fig. 3 Comparison of aplanatic sampling interferograms in ground and space environments without taking measures

图 3 充分说明由于太空失重的影响,如果继续采用以往的从动镜电机线圈未通电时的起始位置作为起始点开始运动控制,动镜实际并没有围绕已调好的零光程差位置作对称运动,浪费了有限的动镜有效行程,进而使设备的光谱分辨率降低。

2.2 重力对运动机构回复力矩的影响

通常动镜运动是有电机驱动的。动镜电机线圈通电,在驱动电流力作用下带动运动框和动镜平动时,簧片也会产生变形量。令簧片的变形角度为 φ ,整个运动框架平动的位移为 s 。由于 s 远小于簧片长度 L ,可近似认为整个运动框架的平动位移 s 是以 L 为等效摆臂长,扫出 φ 角度经过的弧长。 φ 很小,则 $\sin \varphi \approx \varphi \approx s/L$ 。动镜架在地面正置有重力时,运动受力如图 4 所示, G 为整个动镜运动机构的重力,因此动镜运动框架平动时的回复力矩为 $M=k\varphi+G\sin\varphi L \approx (k+GL)\varphi$,等

等效扭转刚度为 $k + GL$ 。干涉仪在太空环境无重力, G 为零, 等效扭转刚度为 k 。由此可见, 当动镜往复直线运动时, 由于重力影响, 太空中动镜运动机构的扭转刚度也和地面不同。

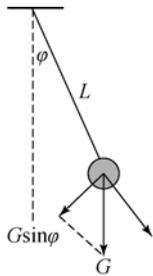


图 4 动镜架正置时动镜运动机构等效受力图

Fig. 4 Mechanical equivalent diagram of moving mirror motion on upright placed frame

3 重力影响的解决方法

一个基本的运动控制系统会由以下基本环节组成: 运动期望、位置或速度测量环节、校正环节、运动执行器和被控对象。动镜运动控制系统的被控对象为直线电机、弹性支承与导向机构、动镜组成的动镜机构^[10]。

采用动镜的位置环控制来达到位置和速度的控制。位置测量模块采用激光参考干涉仪提供的两路正交的激光干涉信号 A 和 B 构成的可逆计数器来计数。可逆计数器根据激光干涉信号 A 和 B 相对相位的超前和滞后判断方向, 从而实时加或减计数, 测得实际位置量。系统控制目标是动镜在有效行程范围内围绕零光程差位置作对称的往复直线运动, 且在规定的匀速区内速度波动均方根值应小于 2%。

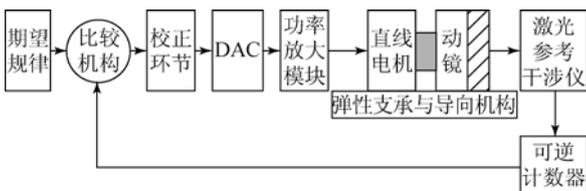


图 5 动镜运动控制系统组成框图

Fig. 5 Block diagram of moving mirror control system

为了解决重力对动镜定位的影响, 采用精密

的机械定位^[11]设置运动固定起始点, 从固定起始点开始运动控制的方法。机械限位采用 0.8 mm 厚度的铝合金挡头固定在固定架底板上动镜运动行程的一端。

动镜期望运动规律如图 6 所示, 初始 $0 \sim t_0$ 段, 以开环方式给出足够大的电流力, 使动镜无论位于任何起始位置都可以被推动至机械限位的位置 S_{limit} 。 S_{limit} 的值可以通过精密的机械式测量方法获得, 也可以先设置初值, 然后根据 3 幅等光程差采样干涉图中的 3 个干涉信号最大值处的位置, 计算动镜围绕零光程差位置运动的不对称性偏差, 从而修正 S_{limit} 值。动镜从位置 S_{limit} 返回时可逆计数器即开始减计数。当动镜运动至期望围绕的中心点 0 位置附近时, 受到的回复力矩最小, 开始闭环运动控制。期望运动的最小位置 S_{min} 和最大位置 S_{max} 围绕中心点 0 基本对称。

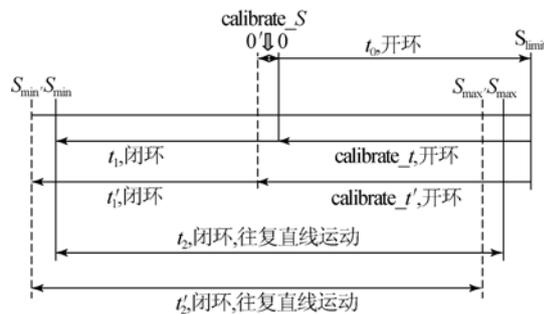


图 6 动镜期望运动规律图

Fig. 6 Expected motion law diagram of moving mirror

为了解决重力对运动机构回复力矩的影响, 采用闭环 PID 控制的方法来校正动镜机构等效扭转刚度的变化, 通过 P、I、D 参数的整定使闭环系统获得最佳性能^[12-13]。

为减小由于发射冲击等因素使得在轨后的零光程差位置相对地面发生的变化, 控制软件中配置有实时注数接口, 可以在轨调整期望运动规律。根据地面接收到的 3 幅连续干涉图获得零光程差位置的偏差量, 通过软件重置偏移量 $\text{calibrate}_s'$ 和 $\text{calibrate}_t'$, 实时调整动镜期望运动规律, 使围绕实际的零光程差位置 $0'$ 作对称运动, 如图 6 所示, 由此充分利用了动镜的运动行程, 提高了探测的光谱分辨率。

4 实验验证

为了模拟空间失重环境,从而进一步验证方法的有效性,提出在地面将整个动镜架倒置的方法来进行实验。

将动镜架倒置,对初始定位的影响是产生了与正置时方向相反的微位移量。而对动镜运动框架平时时回复力矩的影响简化为减去了重力的 $\sin\varphi$ 分量,等效扭转刚度为 kGL ,如图 7 所示。

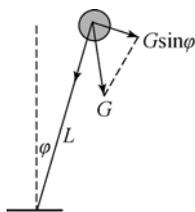


图 7 动镜架倒置时动镜运动机构等效受力图

Fig. 7 Mechanical equivalent diagram of moving mirror motion on up-down placed frame

由此说明,倒置时等效扭转刚度最小。设想倒置时,用地面正置时已设置好的起始段电流力足以将倒置时的动镜推至已定位的机械限位,且动镜系统的闭环校正足以克服等效刚度的影响,达到位移和速度性能指标,则初始微位移量为 0 和等效扭转刚度为 k 的太空无重力情况下,运动性能指标也能满足需要。若倒置试验能通过,说明正置时的控制方法, P 、 I 、 D 参数和初始电流力可以满足空间应用的需要。

图 8 所示为实验室环境中动镜架正置和倒置时等光程差采样的 3 幅连续干涉图。干涉图的横坐标为等光程差采样的个数,从一个采样点到相邻采样点,动镜运动的距离为 $\lambda/2$ (其中 λ 为激光的波长 $0.8523 \mu\text{m}$)。动镜运动到零光程差位置时,干涉信号产生峰值,从一个干涉信号峰值位置到相邻干涉信号峰值位置,动镜运动的距离是围绕零光程差位置运动正(或负)位移的两倍。从图 8(a)、(b)可以看出,动镜架正置,动镜运动围绕零光差位置的正和负位移基本相等。动镜架倒置,动镜运动围绕零光程差位置的正和负位移也基本相等。以实际数据说明,图 8(a)中设正置时 3 幅

干涉图信号峰值处的横坐标分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 , $a_1 = 10\,770$, $a_2 = 32\,928$, $a_3 = 54\,477$, 因此动镜围绕零光程差位置运动产生的采样个数差为 $|(a_3 - a_2) - (a_2 - a_1)|/2$, 正负位移的偏差为 $\frac{|(a_3 - a_2) - (a_2 - a_1)|}{2} \times \frac{\lambda}{2} = 129.763 \mu\text{m}$ 。设

图 8(b)倒置时 3 幅干涉图信号峰值处的横坐标分别为 b_1 、 b_2 、 b_3 , 则 $b_1 = 10\,842$, $b_2 = 33\,185$, $b_3 = 54\,895$, 动镜围绕零光程差位置运动正负位移的偏差为 $\frac{|(b_3 - b_2) - (b_2 - b_1)|}{2} \times \frac{\lambda}{2} = 134.876$ 。

正置和倒置时动镜实际正负位移的偏差控制可达到 $6 \mu\text{m}$ 以内(还包含了控制引起的误差),这充分表明采用机械限位和闭环控制相结合的设计方法对解决太空失重对动镜初始定位的影响有显著效果。

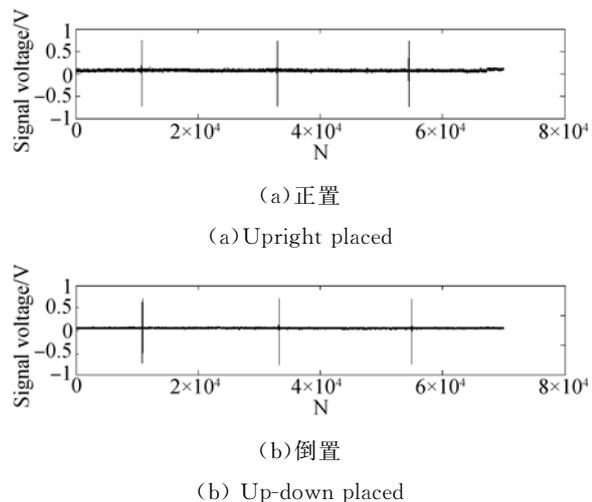
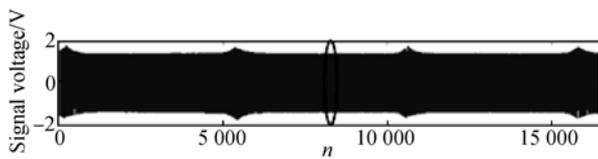


图 8 动镜架正置和倒置时等光程差采样干涉图

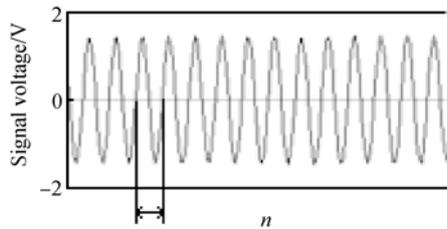
Fig. 8 Aplanatic sampling interferograms on upright and up-down placed frames

采用位置环控制使得测速的精度不高,因此设计以下方法来精密测量动镜的运动速度。利用凌华高速数据采集卡型号 DAQ2010,等时间采样动镜位置可逆计数器所用的激光干涉信号(信号频率平均 18 kHz)。图 9 所示为 2 MHz 时钟高速采样的含 3 个运动单程的激光干涉信号原始数据图(每个运动单程 1.3 s),其中图 9(a)是将原始数据 $50:1$ 抽取显示的激光干涉信号,图 9(b)是图 9(a)圈内局部放大的激光干涉信号图。



(a) 高速采样的激光干涉信号

(a) High-speed sampling laser interference signal



(b) 局部放大图

(b) Partial enlargement of the upper diagram

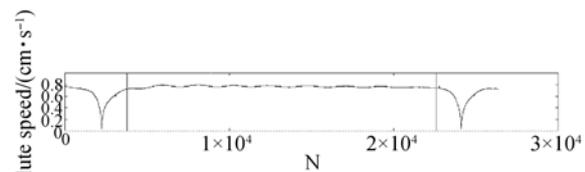
图 9 高速采样的激光干涉信号和其局部放大图

Fig. 9 Original diagram and partial enlargement of high-speed sampling laser interference signal

通过计算每一个完整激光干涉信号周期(即图 9(b)所示信号一个过零点和下一个过零点之间)包含的高速采样点个数 n , 求出激光干涉信号的频率 $f=2 \times 10^6/n(\text{Hz})$ 。根据动镜绝对值速度和激光干涉信号频率、波长的关系式 $v=f\lambda/2=2 \times 10^6 \times \lambda/2n(\text{cm/s})$, 可以推导出动镜绝对值速度, 图 10 所示为以完整激光干涉信号周期的个数 N (和动镜实际位置的关系 $S=N\lambda/2$) 为横坐标的动镜架正置和倒置时动镜绝对值速度曲线。经统计, 正置时匀速区(图示两竖线间光程差 $\pm 8 \text{ mm}$ 区域)速度波动的均方根值为 1.4%, 速度波动的峰峰值相对平均速度的比值为 8.8%。倒置时匀速区速度波动的均方根值为 1.1%, 速度波动的峰峰值相对平均速度的比值为 7.6%。

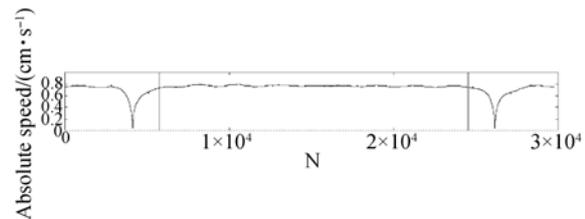
参考文献:

- [1] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
WENG SH F. *Fourier Translation infrared spectroscopy* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 李相贤, 徐亮, 高闯光, 等. 分析温室气体及 CO_2 碳同位素比值的傅里叶变换红外光谱仪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2359-2368.



(a) 正置

(a) Upright placed frame



(b) 倒置

(b) Inverted placed frame

图 10 动镜架正置和倒置时的动镜绝对值速度曲线

Fig. 10 Moving mirror speed curves in absolute value tested on upright and up-down placed frames

5 结 论

有些傅里叶光谱仪采用白光给出零光程差位置^[14]来解决动镜初始定位问题, 在干涉光路中还需开辟一个白光通道, 还要增加探测器和电路。使用本文所采用的精密机械限位和闭环控制方法, 简单可靠, 动镜架正置和倒置时动镜实际正负位移的偏差控制可达到 $6 \mu\text{m}$ 以内, 完全满足傅里叶光谱仪的要求。另外, 通过带有在轨可期望运动规律的闭环校正, 不但控制动镜在匀速区速度波动的均方根值不大于 1.4%, 更使得系统具有较强的空间适应性和可靠性。

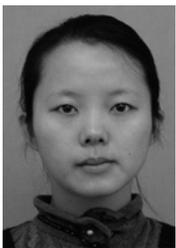
LI X X, XU L, GAO M G, *et al.*. Fourier transform infrared greenhouse analyzer for gases and carbon isotope ratio [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2359-2368. (in Chinese)

[3] ANTONIA G, CHRISTOPHER B, WALTER W, *et al.*. An experiment using high spectral resolution CrIS measurements for atmospheric trace gases: carbon monoxide retrieval impact study [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1639-1643.

[4] BLUMSTEIN D, CHALON G, CARLIER T, *et*

- al. . IASI instrument; technical overview and measured performances [J]. *Infrared Spaceborne Remote Sensing XII, Proceedings of SPIE*, 2004, 5543:196-207.
- [5] MARC-ANDRE S, FRANCOIS C, CHRISTOPHE D, et al. . ACE-FTS instrument detailed design [J]. *Earth Observing Systems VII, Proceedings of SPIE*, 2002, 4814:70-81.
- [6] RONALD J G, FREDERICK L W, NATHAN F. Cross-track Infrared Sounder (CrIS) development status [J]. *Infrared Spaceborne Remote Sensing XI, Proceedings of SPIE*, 2003, 5152:1-8.
- [7] BICKNELL W E. Overview of GOES High-resolution interferometer sounder (GHIS) brassboard development and test program [J]. *GOES-8 and Beyond, Proceedings of SPIE*, 1996, 2812:389-395.
- [8] RICHARD J K, SCOTT D L. Mechanical design of the crosstrack infrared sounder (CrIS) [J]. *Infrared Spaceborne Remote Sensing IX, Proceedings of SPIE*, 2002, 4486:445-455.
- [9] 齐乃明, 张文辉, 高九州, 等. 空间微重力环境地面模拟试验方法综述 [J]. *航天控制*, 2011, 29(3): 95-100.
- QI N M, ZHANG W H, GAO J ZH, et al. . The primary discussion for the ground simulation system of spatial microgravity [J]. *Aerospace Control*, 2011, 29(3):95-100. (in Chinese)
- [10] 夏翔. 干涉光谱仪多速度模式扫描技术研究[D]. 上海:中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- XIA X. *Research on technology of multi-speed mode scanning of interference spectrometer* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [11] 孙麟治, 李鸣鸣, 程维明. 精密定位技术研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1):69-75.
- SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):69-75. (in Chinese)
- [12] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- HU SH S. *The Principle of Automatic Control* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [13] 许忠仁, 姜丽, 穆克, 等. 基于FPGA的数字PID控制器研究[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2012, 32(3):74-79.
- XU ZH R, JIANG L, MU K, et al. . Digital PID controller based on FPGA [J]. *Journal of Liaoning Shihua University*, 2012, 32(3): 74-79. (in Chinese)
- [14] 谢元安, 韩志刚. 基于白光干涉的空间频域算法研究[J]. *光电工程*, 2011, 38(7):81-85.
- XIE Y A, HAN ZH G. Study of spatial frequency domain analysis method based on white light interferometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(7):81-85. (in Chinese)

作者简介:



段娟(1982—),女,河南驻马店人,博士研究生,2005年于河南大学获得学士学位,2008年于中国科学院等离子体物理研究所获得硕士学位,主要从事星载傅里叶光谱仪动镜运动系统的研究。E-mail:dj_wwl@126.com

导师简介:



华建文(1957—),男,江苏无锡人,研究员,博士生导师,1982年于上海交通大学获学士学位,1986年于上海科技大学获得硕士学位,1998年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事星载傅里叶光谱仪光、机、电集成技术的研究。E-mail:jwhua@mail.sitp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)