

doi:10.3788/gzxb20154404.0430002

傅里叶变换红外光谱仪中动镜系统的设计

石磊¹, 刘佳², 郜武¹, 张倩暄¹, 王巍¹

(1 北京雪迪龙科技股份有限公司, 北京 102206)

(2 北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

摘 要:为提升傅里叶变换红外光谱仪的整体性能,基于立体角镜与平面镜组合的光学结构,设计了一种柔性支撑机构的摆动型动镜机构.建立和分析该机构控制模型,设计了相适应的反馈控制算法.结果表明:该结构具有无摩擦、抗震性好等优点;光学结构能够很好地补偿动镜摆动造成的倾斜与横移误差,保证仪器的重复性与稳定性;通过对控制算法参量的调整,动镜机构的扫描准确度优于 98.4%.在 4 cm^{-1} 的光谱分辨率条件下,使用该动镜机构所测得的红外光谱信噪比优于 80000:1,能够满足高精度定量分析的要求.

关键词:傅里叶变换红外光谱仪;动镜;柔性机构;PID

中图分类号:TH744

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)04-0430002-6

Design of a Moving Mirror Scanning System in Fourier Transform Infrared Spectrometer

SHI Lei¹, LIU Jia², GAO Wu¹, ZHANG Qian-xuan¹, WANG Wei¹

(1 Beijing SDL Technology Co., Ltd. Beijing 102206 China)

(2 Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854 China)

Abstract: In order to improve the performance of Fourier Transform Infrared Spectrometer, the optical structure was based on the combination of cube corner mirror and fixed plane mirror, a swing mechanism moving mirror scanning system was designed. The system transfer function was established and the characteristics of control model was analysed, a feedback algorithm was designed to fit the system. It indicates that the system was friction free and insensitive to vibration; the optical structure can compensate the tilt and shift caused by the swing of the moving mirror, ensure the repeatability and stability of instrument; the algorithm parameters was adjusted to improve scanning accuracy, and the precision is better than 98.4%. The SNR of spectral is better than 80000:1 by using the system, under 4 cm^{-1} , which can meet the requirements of high precision quantitative analysis.

Key words: Fourier Transform Infrared Spectrometer; Moving mirror scanning system; Swing mechanism; PID

OCIS Codes: 300.6190; 300.6300; 300.6340

0 引言

傅里叶变换红外光谱仪(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTS)被广泛地应用在生物医药、石油化工、大气监测等行业,能够快速准确地对物质的成分与含量进行分析^[1].在傅里叶变换红外光谱仪中,动镜是唯一不断运动的部件,其运动的准确度直

接决定仪器的性能:1)动镜的行程是仪器分辨率的决定因素,增加动镜运动的行程有利于提高仪器的分辨率;2)动镜速度的匀速性决定干涉图的采样间距,速度不稳定会造成光谱图的信噪比下降;3)动镜在扫描中会存在倾斜与横移的情况,会造成干涉信号的调制度下降,并引入相位误差,影响复原光谱的质量^[2-3].

在迈克尔逊干涉仪的基础之上,对动镜机构及其

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ060615)资助

第一作者:石磊(1986—),男,博士,主要研究方向为光谱仪器. Email:998sl@sina.com

收稿日期:2014-09-28;录用日期:2014-11-17

<http://www.photon.ac.cn>

驱动方式的改进,是利用机械设计与系统分析等技术,结合具有鲁棒性、抗干扰的控制算法,保证动镜扫描的稳定与可靠^[4-6].

为提高仪器的分辨率以及减小动镜因倾斜与横移对光谱质量的影响,需要在增大干涉仪最大光程差的基础之上,保证动镜机构运动的准直性与稳定性.本文利用一种基于立体角镜与固定平面镜组合的光学结构^[7-8],设计了一种基于柔性铰链机构的摆动型动镜扫描系统,通过分析其力学与电磁学特性,得到动镜机构的控制模型,设计了一种改进的 PID 控制机构,使动镜的扫描误差控制在±1.6%的范围之内.

1 摆动型动镜扫描系统

利用折返镜与立体角镜组合的光学结构所设计的干涉仪如图 1,本文讨论的动镜扫描系统是在此基础上进行实现的^[8-9].

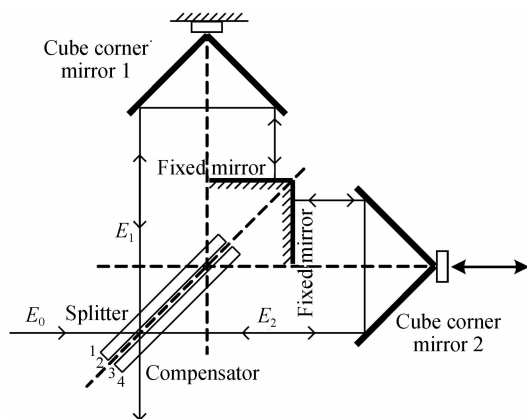


图 1 干涉仪的光学结构
Fig. 1 Diagram of interferometer

1.1 柔性铰链机构

柔性铰链支撑机构是一种利用材料的弹性形变而产生位移的新型机构,其柔性节常见的开口形式有:直角、椭圆与圆角等形式.柔性铰链支撑机构具有准确度高、体积小、无摩擦、加工方便、响应快、高效率、无需润滑等优势,在各类微位移的精密仪器当中有着广泛的应用^[10-12].

图 2 为柔性铰链支撑机构的一种基本形式,其中 R 为开口半径, t 为开口处最小厚度, b 为总厚度, h 为

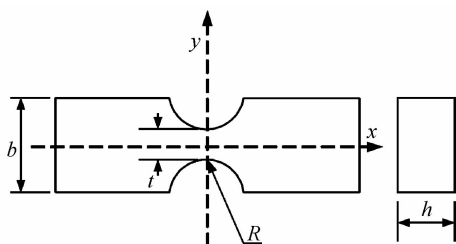


图 2 柔性铰链支撑机构的一种形式
Fig. 2 A form of flexible hinge support mechanism

宽度.其开口处为具有良好弹性的材料,当柔性铰链的一端固定,另外一端受到一定力矩作用时,开口处会发生弹性形变产生小角度的偏转而使铰链的一端产生位移,开口处的最小厚度、弹性系数、开口宽度等因素都会对其运动产生影响^[9-10].利用力学的基本公式可以建立其数学模型,其转动副刚度为

$$k_R = \frac{2}{3} \times [EbR^2(2e+e^2)] / \left\{ \frac{1+e}{f^2} + \frac{3+2e+e^2}{f(2e+e^2)} + \frac{6(1+e)}{2(e+e^2)^{2/3}} \arctan \left[\sqrt{\frac{2+e}{e} \times (f-e)} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, $e=t/2R$, $f=1+e$, E 为材料的弹性模量.当 $e \ll 1$, $e \ll f$ 时,得到

$$k_R \approx \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (2)$$

1.2 动镜的机械结构

图 3 为平行四边形柔性铰链支撑机构的示意图,平行四边形的四个边为刚性连接杆,四个顶点为柔性节.受到一定作用力时,柔性节发生形变使整个机构产生一个角位移,使四边形在两个方向产生导向位移 S 与耦合位移 d,其大小为

$$\begin{cases} S = \frac{F}{k_P} = \frac{Fa^2}{4k_R} \\ d = \frac{S^2}{2a} = \frac{F^2a^3}{32k_R^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k_P = 4k_R/a^2$ 为平行四边形柔性铰链支撑机构的刚度.

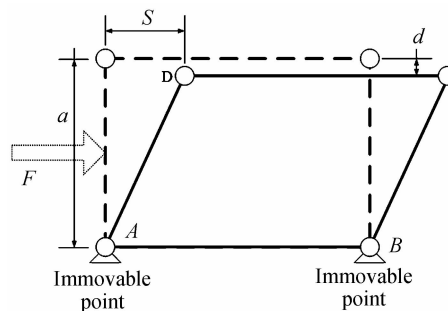


图 3 平行两杆机构等效图

Fig. 3 Equivalent diagram parallel binary link mechanism

若假设 $|AD| = |BC| = 75 \text{ mm}$, 转动角度为 $\pm 1^\circ$, 则两个方向的位移 $s \in [-1.3 \text{ mm}, 1.3 \text{ mm}]$, $d \in [-11.3 \mu\text{m}, 11.3 \mu\text{m}]$, 可见耦合位移 d 远小于导向位移 s. 于是,根据文献[8]与文献[9]中的讨论可知,动立体角镜的横移与倾斜不会对干涉信号造成额外的光程差.

于是,利用平行四边形柔性铰链支撑机构所设计的动镜的结构如图 4,摆动型动镜机构主要由固定座、夹片、弹簧片、刚性连杆、定子、线圈、立体角镜及其连接块等部件组成.

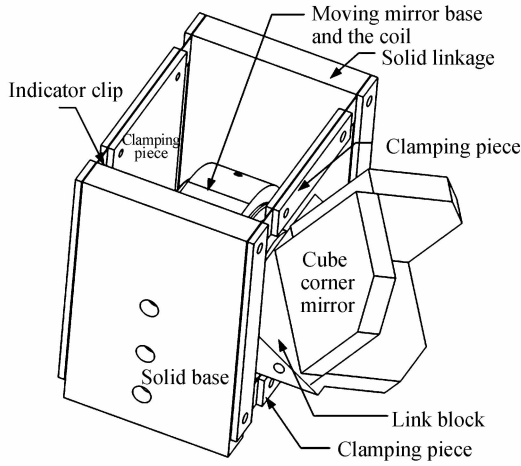


图4 摆动型动镜机构的三维结构图

Fig.4 3-D structure of single pivot scanning mechanism

1.3 动镜机构的模型分析

为了便于分析,可以将摆动型动镜机构与一体化分束器的关系简化为图5所示的模型,点O为摆动型动镜机构的固定点,点A为摆动端的初始位置,也即为零光程差位置,当柔性铰链支撑机构摆动 θ 角后到达点B,近似的有 $|AB| \approx R\sin\theta$,R为转动的半径^[5].

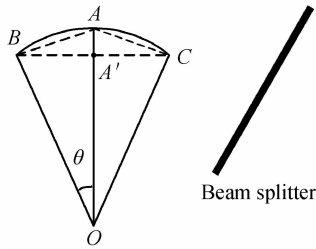


图5 摆动型动镜机构产生光程差的示意图

Fig.5 OPD produced by pivot scanning system

而对于干涉仪系统的光程差有

$$\begin{cases} x=4R\sin\theta \\ \theta=\int_0^t \omega d\tau \end{cases} \quad (4)$$

式中,x表示光程差, ω 为柔性铰链支撑机构摆动的瞬时速度,t为摆动 θ 所需的时间,可以得到光程差的变化速度为

$$v=4R\omega\cos\theta \quad (5)$$

于是,可以转化为柔性铰链支撑机构摆动的瞬时速度为

$$\begin{cases} \omega=\frac{v}{4R\cos\theta} \\ \omega=\frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

对 $\cos\theta$ 函数进行级数展开,并近似处理可得

$$\omega \approx \frac{v}{4R} \left(1 + \frac{\theta^2}{2}\right) \quad (7)$$

解微分方程可得

$$\omega = \frac{v}{4R} \sec^2 \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{v}{4R} t \right) \quad (8)$$

可知,当光程差的速度恒定时,柔性铰链支撑机构摆动的瞬时角速度 ω 为一个与时间t相关的变量.

同时,可以将柔性铰链支撑机构的动镜系统的力学与电磁学平衡方程描述为^[13-14]

$$\begin{cases} F(t) = m \frac{dv}{dt} + \beta v + Kx = m \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + Kx = B_s i(t) l \\ u(t) = Ri(t) + E_a + L \frac{di(t)}{dt} = Ri(t) + B_s l \frac{dx}{dt} + L \frac{di(t)}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

式中,m为动镜机构所有部件的总质量;v为动镜机构运动的瞬时速度;x为动镜机构的位移量; β 为导轨的动摩擦系数;K为柔性铰链支撑机构的等效刚度; B_s 为永磁铁在动镜运动范围内所提供的磁感应强度大小;l为线圈导体在磁场中的有效长度;L为线圈回路的等效电感.于是可以得到系统的传递函数为

$$G(s) = X(s)/U(s) = B_s l / [Lms^3 + (L\beta + Rm)s^2 + (K + B_s^2 l^2 + \beta R)s + RK] \quad (10)$$

2 动镜的控制策略

FTS常采用单向双边扫描的方式来采集光谱图,不仅有利于提高光谱的信噪比,同时能够消除干涉信号的相位误差等影响.双边采集方式,即在零光程差点两侧都采集数据,并且两侧采集的数据点数相同,在零光程差点位置的两侧均需要提供一段速度稳定的位移,并且需要考虑动镜的加速与减速的过程,为了保证光谱质量与采集速度,要在对动镜机构的速度进行控制时,不仅要保证速度的稳定度,还要尽量减少动镜机构加速与减速的时间.由前文讨论可知,控制系统的负载为一时变量,为保证光程差速率的稳定,动镜扫描机构的角速度则为一时变量,其随时间变化的关系如图6^[6,15].

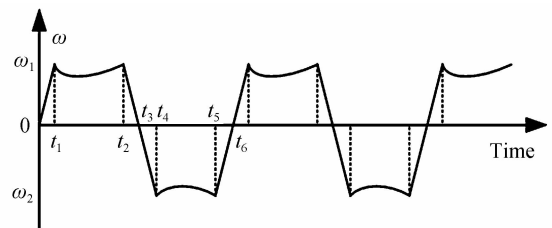


图6 动镜机构角速度的变化

Fig.6 Diagram of angular velocity changes

干涉仪采用波长为 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 的氦氖激光作为参考,其干涉的频率与光程差速率存在关系 $f=4v/\lambda$.在激光频率非常稳定的情况下(优于 0.01 cm^{-1}),光程差变化速率与参考激光的干涉频率直接相关,于是可以利用此干涉信号来构成动镜扫描系统的闭环控制回路.

根据前文 1.3 中对摆动式动镜机构的分析与所建立的系统传递函数,考虑采用 PID 算法对动镜扫描机构进行控制.文献[9]中描述了一种往复直线扫描式动镜机构的控制,采用增量式 PID 进行控制的方式.结合本系统的特点,采用了一种基于规则的 PID 参量自学习控制系统,其基本的原理框图如图 7,在 PID 控制算法的基础之上,加入了性能评价规则,即在控制的不同过程中,根据速率误差项 $e(t)$ 与性能评价项 Δy 的大小来适应不同的规则,从而采用不同的 PID 参量,实现动镜机构的匀速控制.

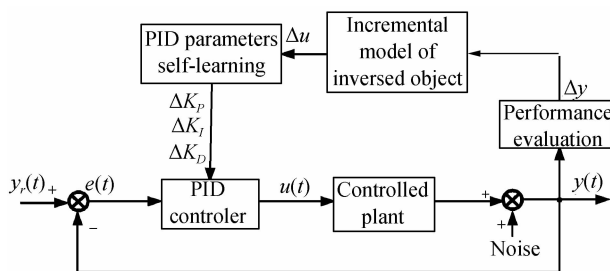


图 7 改进的 PID 控制原理图
Fig. 7 Block diagram of the control system based on improved PID controller

在 PID 控制参量中,比例系数 K_p 的大小影响系统的响应速度,积分时间常量 T_i 影响系统的控制准确度,微分时间 T_d 影响系统的动态特性.依据 Ziegler-Nichols 法对控制系统的 PID 参量进行整定,按照比例控制器构成一个闭环的控制系统,并逐渐加大比例系数 K_p .当系统发生连续的等幅振荡时,得到此时的比例系数为 K_s ,相应的振荡周期为 T_s .当控制度为 1.05 时,认为数字控制与模拟控制效果相当,即可以初始确定数字 PID 的控制参量为

$$\begin{cases} K_p = 0.63 K_s \\ T_i = 0.49 T_s \\ T_d = 0.14 T_s \end{cases} \quad (11)$$

利用以上参量即可以对直线往复扫描型动镜机构进行实时控制,再采用 PID 参量的自动整定算法即可以完成对动镜机构的匀速控制.

3 实验结果

3.1 动镜扫描的稳定性

动镜机构受到一个与动镜机构导向位移成正比的“弹簧力”的作用,其大小为 $F_b = K \cdot x$,这一导向位移成正比的力可以通过补偿弹簧系数 K 的方式对其消除,即可以简化控制模型.如图 8 所示为光程差速率(实线所示)与控制器输出电压(虚线所示)之间的实际效果图,动镜机构所受的力是与其扫描位移成正比的,当速度趋于稳定之后,其实际误差(极大值)约为 $\pm 1.6\%$,能够很好的满足干涉仪的工作要求.

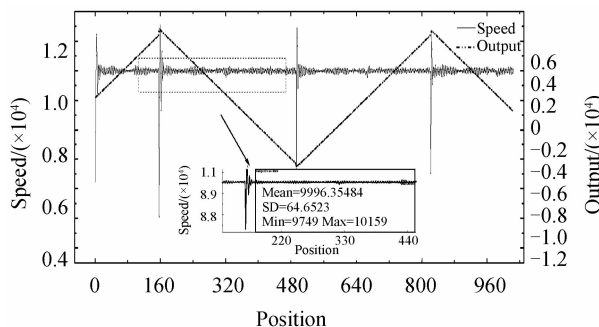


图 8 光程差速率控制实际效果
Fig. 8 Results of velocity stability

3.2 分辨率指标

为了测试 FTS 的光谱仪范围,按照光谱分辨率 4 cm^{-1} ,参考激光干涉频率设定值为 10 kHz ,采用液氮制冷 MCT 探测器与,对空气进行连续 64 次的光谱采集,得到空气的光谱图(如图 9 所示).计算单光谱的最高能量与截止区的能量比值,其有效的光谱范围优于 $650 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$,且在高频波段仍然具有较高的能量.

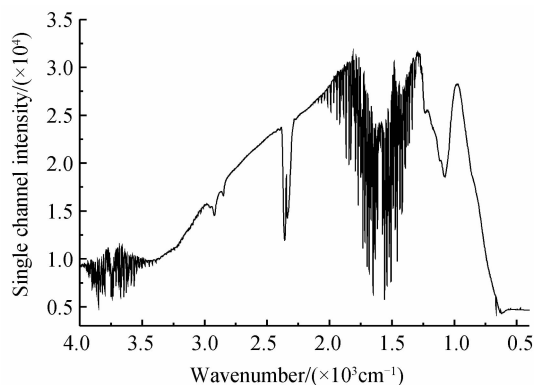
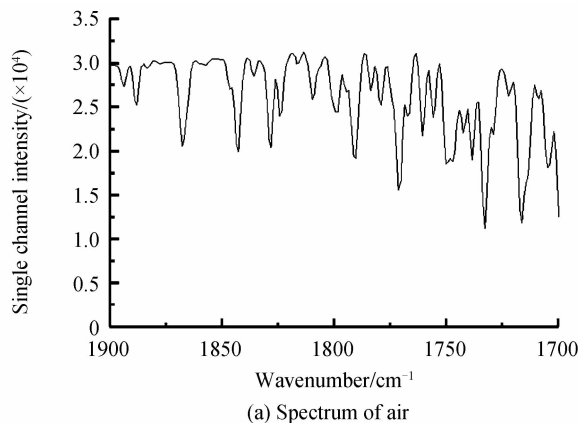


图 9 空气背景光谱图
Fig. 9 Spectrum of air background

如图 10 所示的光谱图是使用液氮制冷的 MCT 探测器,以 4 cm^{-1} 的分辨率,进行 32 次采集,得到的空气中水蒸气、一氧化碳、二氧化碳等在 $1300 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰.为了测试光谱图的实际分辨率,需选取一处不受其它吸收峰干扰的位置测试吸收峰的半高宽,



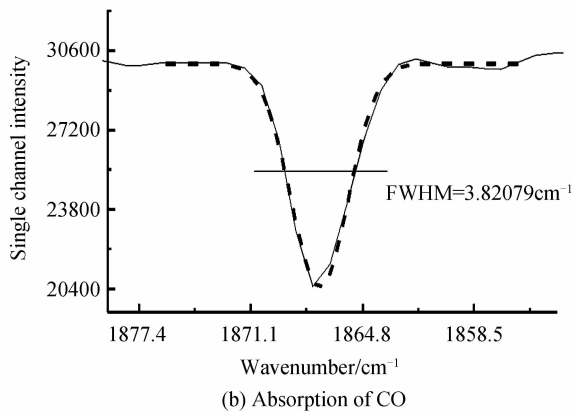


图 10 使用 MCT 探测器测得的一氧化碳的吸收峰
Fig. 10 Absorption of CO measured by MCT

即可大致得到光谱图的实际分辨率. 选取位于 1670 cm^{-1} 的一氧化碳的吸收峰作为参考, 利用高斯曲线拟合测得吸收峰的实际半高峰宽约为 3.82 cm^{-1} (如虚线所示), 即为光谱图的实测分辨率.

3.3 信噪比指标

为了测试仪器的信噪比, 对以透射率表示的 100% 基线进行测试. 在 100% 基线上, 选取不受二氧化碳和空气水汽光谱影响的区间 $2100\sim 2000\text{ cm}^{-1}$ 对仪器光谱信噪比的计算.

在 4 cm^{-1} 的分辨率的条件下, 使用液氮制冷型 MCT 探测器, 将光源能量完全输出, 需调整前置放大电路的放大倍数, 使干涉信号的幅度处在 AD 芯片的有效输入范围内, 连续 16 次采集得到的实验结果如图 11 所示, 通过 Origin 9.0 计算可得, 噪音的 RMS 值为 0.00117%, 得到使用 MCT 探测器时, 仪器的信噪比约为 85470:1, 表明仪器具有很好的信噪比.

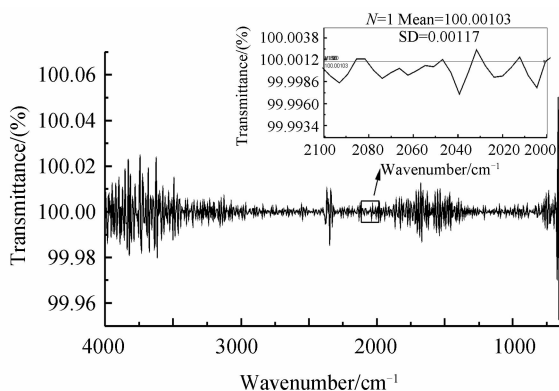


图 11 液氮制冷型 MCT 探测器测得的光谱信噪比
Fig. 11 SNR test measured by MCT

4 结论

利用一种基于双立体角镜与固定平面镜组合的干涉仪结构, 研制了一种采用平行四边形柔性铰链支撑机构的摆动式动镜扫描系统, 通过对动镜机构模型的分析, 以及动镜控制策略的讨论, 设计了一种基于 PID

的控制算法, 通过充分的实际测试与实验分析表明, 动镜机构的运动平稳、可靠, 能够确保傅里叶变换红外光谱仪具有较高的性能指标.

参考文献

- [1] MARCANDRE S, FRANCIOS C, CHISTOPHE D, *et al.* ACE-FTS instrument detailed design [J]. *Earth Observing Systems*, 2002, **4814**(7): 70-81.
- [2] XIANGLI Bin, YANG Jian-feng, GAO Zhan, *et al.* On the tolerance of the mirror tilting in Fourier transform interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(2): 132-135.
相里斌, 杨建峰, 高瞻, 等. 干涉光谱仪动镜倾斜误差容限分析 [J]. *光子学报*, 1997, **26**(2): 132-135.
- [3] LIU Bo, ZHU Yong, CHEN Jian-jun, *et al.* Analysis of tolerance of tilting mirror and experiment in novel fourier transform spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 315-319.
刘波, 朱永, 陈建君, 等. 新型傅里叶变换光谱仪反射镜倾斜容限分析及实验 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(3): 315-319.
- [4] XIANGLI Bin. The key design issues in Fourier transform spectrometers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 550-554.
相里斌. 傅里叶变换光谱仪中的主要技术环节 [J]. *光子学报*, 1997, **26**(6): 550-554.
- [5] YANG Qing-hua, ZHOU Ren-kui, ZHAO Bao-chang. Tilt tolerance of the moving mirror in Michelson interferometric spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 677-680.
杨庆华, 周仁魁, 赵葆常. 迈克尔逊干涉光谱仪倾斜镜倾斜误差容限分析 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 677-680.
- [6] SHI Yu-feng. Research on the control technology for the interferometer subsystem in space-borne infrared spectrometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
施宇峰. 星载红外光谱仪干涉分系统的控制技术. 武汉: 华中科技大学 [D], 2012.
- [7] LI Sheng, Zhang Yu-jun, GAO Min-guang *et al.* Design of the moving mirror scanning system for a FT-IR spectrometer [J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(1): 48-52.
李胜, 张玉钧, 高闾光, 等. 一种傅里叶变换红外光谱仪动镜扫描系统的设计 [J]. *红外技术*, 2012, **34**(1): 48-52.
- [8] SHI Lei, LIU Jia, ZHENG Xin-wen *et al.* An interferometer design for Fourier transform infrared spectrometer [J]. *Spectroscopy And Spectral Analysis*, 2012, **32**(6): 1712-1716.
石磊, 刘佳, 郑信文, 等. 傅里叶变换红外光谱仪干涉仪系统的设计 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(6): 1712-1716.
- [9] SHI Lei, LI Kai, GAO Zhi-fan *et al.* Design of a compact structure interferometer [J]. *Spectroscopy And Spectral Analysis*, 2013, **33**(8): 2294-2298.
石磊, 李凯, 高志帆, 等. 一种紧凑结构型干涉仪的设计 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(8): 2294-2298.
- [10] WANG Ji-wu, CHEN Ken, LI Jia *et al.* Precision of typical flexible hinges [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2001, **41**(11): 49-52.
王纪武, 陈恳, 李嘉, 等. 典型柔性铰链准确度性能的研究 [J]. *清华大学学报*, 2001, **41**(11): 49-52.
- [11] LIU Hua, LIU Wei-qi, FENG Rui *et al.* Design of flexible supporting mechanism with double compensation rods for moving mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1313-1319.

- 柳华, 刘伟奇, 冯睿, 等. 柔性双补偿杆式动镜支撑机构的设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(6): 1313-1319.
- [12] ZONG Guang-hua, YU Zhi-wei, BI Shu-sheng, *et al.* Buckling analysis of serial chain composed of the right-angle-notch flexure hinges. Chinese [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(6): 8-13.
宗光华, 余志伟, 毕树生, 等. 直角切口柔性铰链串联支链的屈曲分析[J]. 机械工程学报, 2007, **43**(6): 8-13.
- [13] ALEXANDER S. Drive nonlinearities: their effects in Fourier spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 1977, **16**(5): 1412-1424.
- [14] SADOWSKI N, CARLSON R, BECKERT A. *et al.* Dynamic modeling of a newly designed linear actuator using 3D edge elements analysis [J]. *IEEE Transactions On Magnetics*, 1996, **32**(3): 1633-1636.
- [15] REN Li-bing, YANG Hong-lei, WEI Hao-yun, *et al.* The realization of moving mirror scanning in FTIR spectrometer using completely digital control method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(8): 2263-2266.
任利兵, 杨宏雷, 尉昊贇, 等. 实现 FTIR 光谱仪动镜扫描的全数字控制研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(8): 2263-2266.