

激光与光电子学进展

迈克耳孙干涉仪中的动镜倾斜分析和仿真

冯明春^{1*}, 徐亮², 王玉杰¹¹滁州学院机械与电气工程学院, 安徽 滁州 239000;²中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 针对迈克耳孙干涉仪中的动镜倾斜问题,通过干涉理论分析了矩形和圆形通光孔径下干涉调制度的影响因素。仿真结果表明,干涉调制度与通光孔径 r 、波数 $\bar{\nu}$ 和倾斜角度 θ 有关。为了确保干涉仪的性能,干涉调制度应不低于90%。当波长为 λ 时,矩形和圆形孔径的动镜倾斜角度 θ_{\max} 应分别小于等于 $\lambda/(16r)$ 、 $\lambda/(14r)$ 。在动镜倾斜角度控制范围内,用Matlab仿真了单色光对正弦倾斜误差和随机倾斜误差的影响,结果表明,动镜倾斜角度应控制在 $1''$ 左右,这对光谱仪的结构设计和研制具有一定的参考价值。

关键词 光学设计; 迈克耳孙干涉仪; 动镜倾斜; 误差; 调制度

中图分类号 TN29 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP202158.0122001

Analysis and Simulation of Moving Mirror Tilt in Michelson Interferometer

Feng Mingchun^{1*}, Xu Liang², Wang Yujie¹¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China;²Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Aiming at the moving mirror tilt in the Michelson interferometer, the influence factors of interference modulation degree under the rectangular and circular clear apertures are analyzed by the interference theory. Simulation results show that the interference modulation degree is related with the clear aperture r , wavenumber $\bar{\nu}$, and tilt angle θ . In order to ensure the performance of the interferometer, the degree of interference modulation should not be less than 90%. When the wavelength is λ , the tilt angle θ_{\max} of the moving mirror for the rectangular and circular apertures should be less than or equal to $\lambda/(16r)$ and $\lambda/(14r)$, respectively. Within the control range of the tilt angle of the moving mirror, Matlab is used to simulate the influence of monochromatic light on the sinusoidal tilt error and random tilt error. The results show that the tilt angle of the moving mirror should be controlled at about $1''$, which has certain reference value for the structural design and development of the spectrometer.

Key words optical design; Michelson interferometer; moving mirror tilt; error; modulation depth

OCIS codes 220.1140; 220.4840; 300.6300

1 引言

傅里叶变换红外光谱仪(FTS)是一种基于傅

里叶变换技术的光谱分辨仪器,其核心部件是迈克耳孙干涉仪。迈克耳孙干涉仪中的动镜以直线形式运动,可获得较大的光程差,从而获取高分辨率

收稿日期: 2020-04-10; 修回日期: 2020-05-14; 录用日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(11605019)、安徽省高校优秀青年骨干教师国内访学研修项目(gxgnfx2020104)、滁州学院科研项目(2016qd06,HX2018143)

*E-mail: fmc714@163.com

的光谱,广泛应用于多种领域^[1-3]。

动镜是迈克耳孙干涉仪中唯一不断运动的部件,动镜的运动速度不稳定以及动镜倾斜都会直接影响干涉调制度。相里斌等^[4-5]从调制度和相位误差角度出发,分析了矩形和圆形通光孔径在动镜运动过程的动镜倾斜误差容限和减小动镜倾斜误差的方法,并讨论了仪器函数、光谱分辨率、扩展光源、动镜运动误差、噪声等效功率、信噪比等主要技术环节。曾立波等^[6]通过建立傅里叶变换光谱仪中动镜、定镜和干涉面的坐标对应关系,对动镜存在多个方向倾斜时的干涉光路进行了详细的分析,并提出了两种动态准直校正的思路。杨庆华等^[7]系统分析了迈克耳孙干涉光谱仪中平面动镜在运动过程中发生倾斜时反射光束偏转对干涉图的影响,从调制度和相位误差角度给出了平面动镜倾斜误差容限。本文重点分析了干涉调制度与动镜倾斜偏移量、倾斜角度的变化关系,并对动镜的倾斜误差进行了仿真分析,可为研究干涉仪的结构和性能提供参考。

2 实验原理

迈克耳孙干涉仪的原理如图 1 所示,其中, θ 为动镜在移动过程中的倾斜角度,分束器是 FTS 的重要部件,分束器的反射率和透射率分别为 R 和 T ,对于没有辐射吸收的分束器, $R + T = 1$ 。一个理想的分束器, R 和 T 都为 0.5。分束器处于定镜和动镜的角平分线上,如果入射准直辐射光束的光强为 $2I_0$,被分束器反射到定镜上的光强为 I_1 ,透射到动镜上的光强为 I_2 。对于理想的分束器, $I_1 = I_2 = I_0$ 。

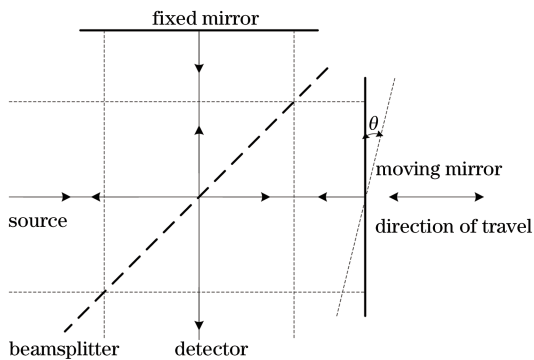


图 1 迈克耳孙干涉仪的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the Michelson interferometer

由光的干涉理论可知,双光束干涉产生的干涉信号强度分布可表示为^[8]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi = (I_1 + I_2) \times \left(1 + \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \right) \cos \varphi, \quad (1)$$

式中, φ 为两相干光束的相位差。干涉信号的调制度 M 可表示为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

式中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为干涉强度的最大值和最小值。由(1)式可知

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}, \quad (3)$$

$$I = (I_1 + I_2)(1 + M \cos \varphi). \quad (4)$$

如果 $I_1 = I_2 = I_0$, 即两束相干光的强度相等且干涉调制度取最大值 $M = 100\%$ 时, $I = 2I_0(1 + \cos \varphi)$ 。

3 理论分析

3.1 矩形孔径

假设迈克耳孙干涉仪中的光学元件都是理想的,如果通光孔径为矩形,则动镜倾斜服从矩形分布,最大偏移量为 Δ_{\max} ,如图 2 所示,其中, r 为通光孔径。

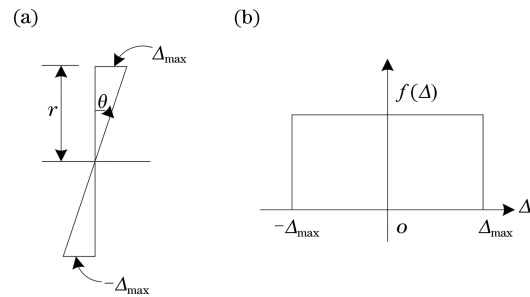


图 2 矩形孔径。(a)动镜倾斜;(b)矩形分布

Fig. 2 Rectangular aperture. (a) Tilt of the moving mirror; (b) rectangular distribution

当动镜出现倾斜时,两束相干光经过平面镜反射时会产生额外的附加光程差,两相干光束的相位差 φ 也会发生变化。若动镜的倾斜量为 Δ ,则相干光束相位差 φ 的变化量可表示为

$$\delta\varphi = 2\pi\bar{\nu}(2\Delta), \quad (5)$$

式中, $\bar{\nu}$ 为入射光的波数。设 $f(\Delta)$ 为动镜倾斜的概率密度函数,当 $\Delta \in (\Delta, \Delta + d\Delta)$ 时,存在面元 $dS = f(\Delta)d\Delta$ 。动镜发生倾斜后,干涉信号强度分布可表示为^[9]

$$I = \frac{\int I'(\varphi) dS}{\int dS}, \quad (6)$$

式中, $I(\varphi)$ 为干涉强度。受动镜的倾斜影响, 干涉信号的强度分布为

$$I = \frac{2I_0}{2\Delta_{\max}} \int_{-\Delta_{\max}}^{+\Delta_{\max}} \{1 + \cos[\varphi + 2\pi\bar{\nu}(2\Delta)]\} d\Delta = 2I_0 \left\{ 1 + \left[\frac{\sin(4\pi\bar{\nu}\Delta_{\max})}{4\pi\bar{\nu}\Delta_{\max}} \right] \right\}, \quad (7)$$

干涉信号调制度为

$$M_1 = \frac{\sin(4\pi\bar{\nu}\Delta_{\max})}{4\pi\bar{\nu}\Delta_{\max}} = \frac{\sin(4\pi\bar{\nu}r\theta_{\max})}{4\pi\bar{\nu}r\theta_{\max}} = \text{sinc}(4\pi\bar{\nu}r\theta_{\max}), \quad (8)$$

式中, 调制度 M_1 为 sinc 函数。如果要求干涉调制度 M_1 不小于 90%, 则

$$\Delta_{\max} \leq \lambda/16. \quad (9)$$

根据最大偏移量 Δ_{\max} , 得到最大倾斜角为

$$\theta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{r} \leq \frac{\lambda}{16r}. \quad (10)$$

3.2 圆形孔径

如果通光孔径为圆形孔径, 如图 3 所示, 根据 (6) 式可得到

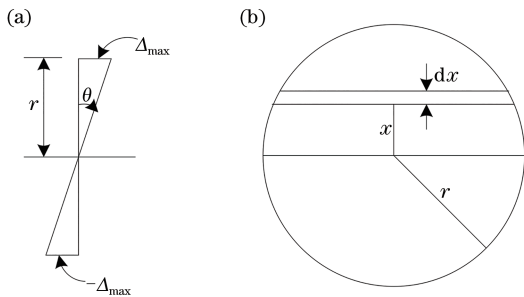


图 3 圆形孔径。(a) 动镜倾斜; (b) 孔径截面

Fig. 3 Circular aperture. (a) Tilt of the moving mirror; (b) aperture section

$$I = \frac{2I_0}{\pi r^2} \int_{-r}^{+r} 2(r^2 - x^2)^{1/2} \{1 + \cos[\varphi + 2\pi\bar{\nu}(2\Delta)]\} dx. \quad (11)$$

令 $x = r \cos \alpha$, $\Delta = x\theta$, 可得到

$$I = 2I_0 \left[1 + 2 \frac{J_1(4\pi\bar{\nu}r\theta)}{4\pi\bar{\nu}r\theta} \cos \varphi \right], \quad (12)$$

式中, J_1 为一阶第一类贝塞尔函数。干涉信号的调制度可表示为

$$M_2 = \frac{2J_1(4\pi\bar{\nu}r\theta)}{4\pi\bar{\nu}r\theta} = \frac{2J_1(4\pi\bar{\nu}\Delta_{\max})}{4\pi\bar{\nu}\Delta_{\max}}. \quad (13)$$

当干涉调制度 M_2 不小于 90% 时

$$\Delta_{\max} \leq \lambda/14. \quad (14)$$

根据最大偏移量 Δ_{\max} , 计算出的最大倾斜角为

$$\theta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{r} \leq \frac{\lambda}{14r}. \quad (15)$$

根据 (7) 式和 (12) 式绘制了光强随动镜倾斜的变化关系, 如图 4 所示。其中, 圆形和矩形通光孔径的强度分布为 $\Delta_{\max} = \lambda/10$ 情况下的曲线。

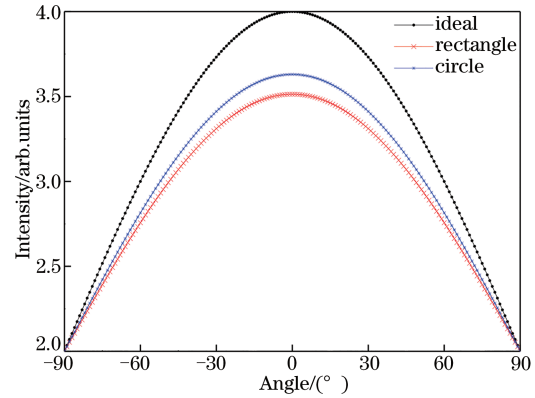


图 4 光强与动镜倾斜量的关系

Fig. 4 Relationship between the light intensity and the tilt of the moving mirror

根据 (8) 式和 (13) 式得到干涉调制度随动镜倾斜偏移量和倾斜角度的变化关系, 如图 5 所示。可以看出, 干涉调制度 M_1 和 M_2 均随偏移量 Δ_{\max} 的增加而减小。当 $\Delta/\lambda = 0.05$, 即 $\Delta = 0.05\lambda$ 时, 干涉调制度 M_1 和 M_2 分别为 94%、95%, 满足动镜倾斜产生的附加光程差小于 0.1λ ^[10] 的要求。波数 $\bar{\nu} = 4500 \text{ cm}^{-1}$ 、孔径 $r = 20 \text{ mm}$ 时干涉调制度与倾斜角度的变化关系如图 5(b) 所示。

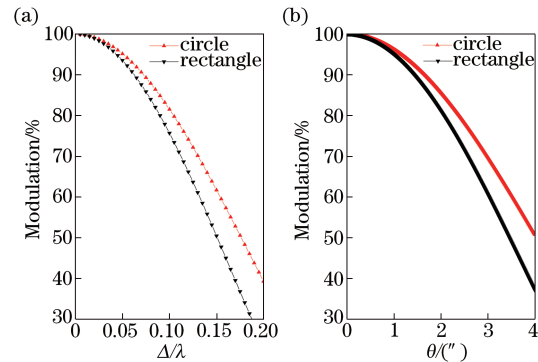


图 5 调制度的变化曲线。(a) 调制度随偏移量的变化曲线; (b) 调制度随倾斜角度的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of the modulation degree. (a) Variation curve of the modulation degree with offset; (b) variation curve of the modulation degree with tilt angle

4 动镜倾斜误差

迈克耳孙干涉仪在工作过程中,动镜和定镜会出现多种准直性误差,主要分为静态倾斜误差和动态倾斜误差^[11]。静态倾斜误差包括静态单向失调、由系统加工设计及安装产生的准直性失调;动态倾斜误差包括线性倾斜误差、正弦型倾斜误差和随机倾斜误差,如图 6 所示。其中,曲线(a)为动镜运动过程中保持不变的误差量,属于静态倾斜误差,主要由器件的加工误差或安装误差造成,如电机轴与反射镜不垂直、电机轴与光轴不垂直。曲线(b)为一种随电机位置变化而变化的误差量,与电机位置基本成线性关系,主要由运动部件结构缺陷或加工缺陷造成,如电机轴弯曲或支撑力随电机位置的变化。曲线(c)是由某些低频振动或外加信号产生的误差曲线。曲线(d)是典型的随机误差曲线,倾斜误差变化不规则且频率较高,但误差的幅度基本在确定的范围内,来源比较复杂。在干涉仪实际工作中,各种误差叠加在一起对系统准直性产生影响。

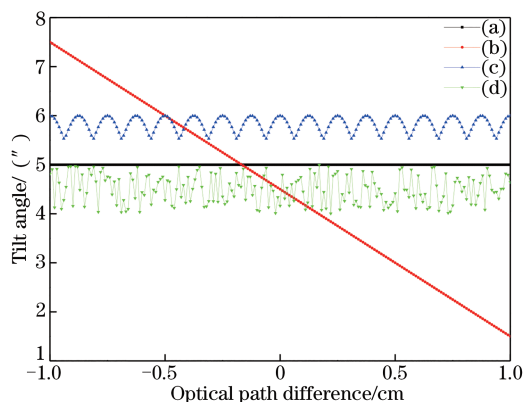


图 6 倾斜角度的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of the tilt angle

4.1 正弦型倾斜误差

正弦型倾斜误差比较复杂,为了简化分析过程,假定叠加一个 100 cm^{-1} 的抖动频率,在正弦型倾斜误差影响下的干涉图如图 7 所示。可以看出,正弦倾斜误差会导致干涉光强度降低,随着动镜移动距离的增大,干涉光强度降低的速度更快。

对图 7 中的干涉图分别进行傅里叶变换,得到的光谱如图 8 所示。可以看出,正弦型倾斜误差不仅会造成光谱能量的下降,动镜的机械抖动还会使光谱产生额外的吸收峰(鬼线),有 100 cm^{-1} 左右的频移,这是由叠加的抖动频率(100 cm^{-1})引起的。

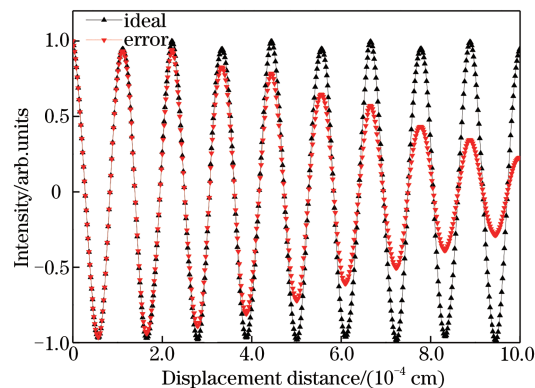


图 7 无误差和正弦倾斜误差的干涉图

Fig. 7 Interferograms with no error and sinusoidal tilt error

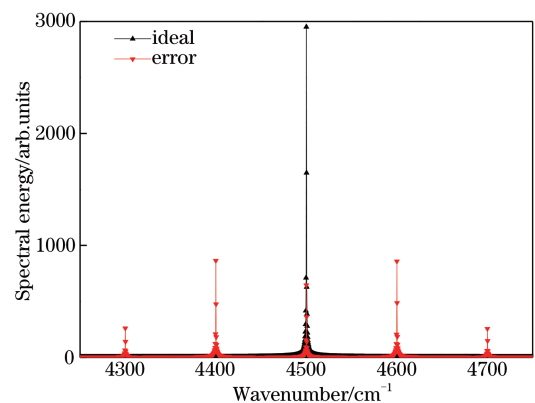


图 8 无误差和正弦倾斜误差的光谱图

Fig. 8 Spectra with no error and sinusoidal tilt error

4.2 随机倾斜误差

图 9 为无误差和随机倾斜误差的干涉图,可以看出,随机倾斜误差不仅会导致干涉光强度降低,还会导致干涉图的形状发生变化。对图 9 中的干涉图分别进行傅里叶变换,得到各自的光谱如图 10 所示。可以看出,随机倾斜误差会导致光谱能量下降。

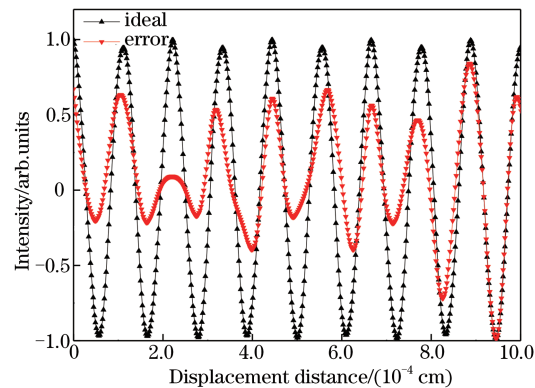


图 9 无误差和随机倾斜误差的干涉图

Fig. 9 Interferograms with no error and random tilt error

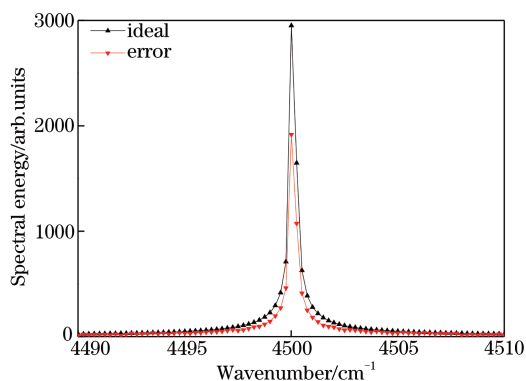


图 10 无误差和随机倾斜误差的光谱图

Fig. 10 Spectra with no error and random tilt error

综上所述,动镜倾斜误差会使干涉图发生畸变,造成光谱图的能量、信噪比下降,即干涉图的质量直接影响了反演光谱图的质量,进一步影响对物质成分的分析准确度。因此,光谱仪在工作过程中应尽可能地避免动镜倾斜误差的影响。如果改善机械性能和优化结构也不能满足一定倾斜角度的要求,可采用动态校正系统^[12-16]校正动镜和定镜之间的夹角,使动镜倾斜角度满足容限要求。

5 结 论

为了使迈克耳孙干涉仪的干涉调制度大于 90%,对应的动镜和定镜之间的倾斜角度应控制在 1°以内,对动镜的机械性能提出了更高的要求。单色光的仿真结果表明,对于圆形和矩形通光孔径,动镜倾斜误差对干涉信号调制度都会造成一定的影响。如果傅里叶变换红外光谱仪在实际中测量复色光,受动镜倾斜或机械振动影响,干涉图强度会发生下降或变形,导致反演的光谱图质量较差。因此,在干涉仪的设计和研制过程中,应采用定镜动态校正技术减小或消除这方面的误差。

参 考 文 献

- [1] Chang Y, Cui Q F, Piao M X. Optical design of Michelson interferometer based line-field swept source optical coherence tomography system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0608002.
常颖, 崔庆丰, 朴明旭. 迈克耳孙扫频线聚焦光学相干层析系统的光学设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0608002.
- [2] He W, Cui M H, Song D D, et al. Collinear autocorrelation measurement of ultrashort laser pulse based on Michelson interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1204001.
何伟, 崔明焕, 宋迪迪, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的共线自相关超短光脉冲测量[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1204001.
- [3] Han L, Shao M, Sun H N, et al. Sensing characteristics of in-fiber Michelson interferometer based on multimode interference [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170628.
韩亮, 邵敏, 孙浩男, 等. 基于多模干涉的在线型光纤迈克耳孙干涉仪的传感特性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170628.
- [4] Xiang L B, Yang J F, Gao Z, 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.
- [5] Xiang L B. 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.
- [6] Zeng L B, Yin B S, He B, et al. Error analysis of moving mirror in Fourier transform interferometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 191-196.
曾立波, 邦胜, 何冰, 等. 傅里叶变换红外光谱仪动镜倾斜误差分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 191-191.
- [7] Yang Q H, Zhou R K, Zhao B C. 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动镜倾斜误差容限分析[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 677-680.
- [8] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] Katti P K, Singh K. A note on the surface accuracy and alignment of the end mirrors in a Michelson interferometer [J]. Applied Optics, 1966, 5(12): 1962-1964.
- [10] Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier transform infrared spectrometry [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [11] Macoy N H, Broberg H, Giroux J, et al. Dynamic alignment design and assessment for scanning

- interferometers [J]. Proceedings of IEEE, 1996, 2832: 126-154.
- [12] Yu L M. Adaptive alignment system research of Fourier transform spectrometer [J]. Infrared, 2001, 22(12): 1-11.
于立民. 傅里叶变换光谱仪自适应校正系统的研究 [J]. 红外, 2001, 22(12): 1-11.
- [13] Yu L M, Dai Z X, Wang M C, et al. Adaptive alignment of fixed mirror by phase detection [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(5): 448-452.
于立民, 代作晓, 王模昌, 等. 相位检测法定镜自适应校正技术 [J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 448-452.
- [14] Kuang C F, Feng Q B, Feng J Y, et al. Analyzing characteristic of the four-quadrant detector applied to laser alignment [J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 387-389.
匡萃方, 冯其波, 冯俊艳, 等. 四象限探测器用作激光准直的特性分析 [J]. 光学技术, 2004, 30(4): 387-389.
- [15] Yang K, Zeng L B, Lei J F, et al. Collimation of fixed mirrors and its dynamical alignment in FTIR spectrometer [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2009, 37(3): 5-8.
杨琨, 曾立波, 雷俊锋, 等. FTIR 光谱仪定镜准直误差分析及动态校正 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 5-8.
- [16] Feng M C, Xu L, Jin L, et al. Tilt and dynamic alignment for the moving mirror in the Fourier transform infrared spectrometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(4): 0412005.
冯明春, 徐亮, 金岭, 等. 傅里叶变换红外光谱仪动镜倾斜和动态校准研究 [J]. 光子学报, 2016, 45(4): 0412005.