

doi: 10.3788/gzxb20164504.0412005

傅里叶变换红外光谱仪动镜倾斜和动态校准研究

冯明春, 徐亮, 金岭, 刘文清, 高闽光, 李胜, 李相贤, 童晶晶, 刘建国

(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, 合肥 230031)

摘 要: 分析了迈克尔逊干涉仪中动镜和定镜在圆形通光孔径情况下动镜在扫描过程中倾斜对干涉调制制度的影响. 为满足干涉调制制度要求, 理论计算发现动镜倾斜角度需控制在 $1''$ 以内, 对应的相位误差为 $\pm 6.6^\circ$ 以内. 为了解决此问题, 使动镜和定镜保持准直, 采用定镜动态校准系统对动镜倾斜误差进行校准. 实验结果表明, 校准后的 X_R 和 Y_R 相位误差的均方根分别为 1.02° 和 1.25° , 满足系统要求. 动态校准系统能够有效地校准动镜长距离运动过程中发生的倾斜误差, 对高分辨光谱仪的设计和研制具有一定的指导意义.

关键词: 迈克尔逊干涉仪; 动镜倾斜; 调制制度; 相位差; 动态校准

中图分类号: TH89; O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0412005-5

Tilt and Dynamic Alignment for the Moving Mirror in the Fourier Transform Infrared Spectrometer

FENG Ming-chun, XU Liang, JIN Ling, LIU Wen-qing, GAO Min-guang,
LI Sheng, LI Xiang-xian, TONG Jing-jing, LIU Jian-guo

(Key Lab of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The effect of the moving mirror tilt errors on the modulation depth was analyzed for the circular aperture in Michelson interferometer. To meet the requirements of interference modulation, the tilt angle of the moving mirror is best controlled within $1''$ under the theoretical calculation, corresponding to the phase error within $\pm 6.6^\circ$. In order to solve the key problem, the dynamic alignment system was used to align the tilt error of the moving mirror, and make alignment between the moving mirror and the fixed mirror. The experimental results show that the root mean square of phase errors X_R and Y_R is 1.02° and 1.25° respectively by dynamic alignment system to satisfy the systems requirements. It is shown that the dynamic system can effectively align the tilt error of the moving mirror in the longer distance movement process. It is a certain guiding significance to design and develop for the spectrometer with higher resolution.

Key words: Michelson interferometer; Tilting of the moving mirror; Modulation depth; Phase error; Dynamic alignment

OCIS Codes: 120.6200; 000.3110; 010.1080; 040.3060; 060.4080; 120.1680

0 引言

迈克尔逊干涉仪是一种基于傅里叶变换技术的光谱分辨率仪器, 可获得较高的光谱分辨率. 傅里叶变换光

谱仪既可以用于实验室样品测试(如药品分析), 也可以用于室外探测(如气体探测), 通过更换分束器、光源和光源等器件, 可以实现通用.

在迈克尔逊干涉仪中, 动镜是唯一不断运动的部

基金项目: 国家重大科学仪器设备专项(No. 2013YQ22064302)、中国科学院战略性先导科技专项(No. XDB05050302)、国家自然科学基金(No. 41405029)和安徽省科技攻关计划(No. 1301041024)资助

第一作者: 冯明春(1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为红外光谱仪的性能分析. Email: mcfeng@aiofm.ac.cn

导师: 刘文清(1954—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为环境光学与光谱学监测技术. Email: wqliu@qiofm.ac.cn

通讯作者: 金岭(1981—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为电子学的信号处理. Email: ljin@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2015-09-21; **录用日期:** 2015-12-10

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

件.同时,动镜在运动过程中,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^[1]分析了矩形通光孔径和圆形通光孔径下动镜倾斜误差容限;曾立波等^[2]分析了动镜倾斜误差.如果不采用动态校准方法,那么要求动镜驱动电机只产生角秒量级的倾斜误差,这对驱动电机性能要求苛刻,几乎很难做到.

定镜动态校准系统可以保证光谱仪的工作性能在一定范围内得到改善,也可以使动镜运行要求放宽到几分,对电机机械系统的准确度要求从零点几微米放宽到几十微米,减轻了驱动电机压力,也容易实现.同时还有助于克服机械震动、大气扰动和温度变化等带来的影响,为光谱仪在一定的不良条件下工作提供了可能性.

本文分析圆形通光孔径下干涉调制度与动镜倾斜偏移量、倾斜角度的变化关系,在干涉调制度要求下,采用定镜动态校准法对动镜在运动过程发生的倾斜误差进行校准,使动镜和定镜保持准直.

1 理论分析

依据光的干涉理论,由双光束干涉产生的干涉信号强度分布为^[3]

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

干涉信号的调制度 M 定义为

$$M = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{\sqrt{I_1 + I_2}} \quad (2)$$

对于圆形通光孔,如图1,同时,假定光谱仪中的光学元件都是理想的,当动镜出现倾斜时,两束相干光经过平面镜反射时将会产生额外的附加光程差,从而使两相干光束的相位差 φ 也随之变化.对于动镜倾斜一个小的改变量 Δ ,则相干光束相位差 φ 的改变量为

$$\delta\varphi = 2\pi\bar{\nu}(2\Delta) \quad (3)$$

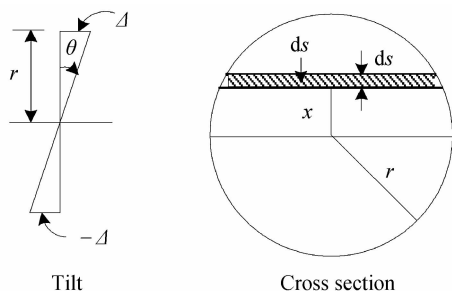


图1 动镜倾斜及其通光孔径截面

Fig. 1 The tilt of the moving mirror and associated cross section of aperture

假定定镜和动镜虚像(关于分束器)的距离为 δ ,在 δ 中小的变化 Δ ,如果 $f(\Delta)$ 代表倾斜误差分布,并且服

从均匀分布,镜子面元 ds 在 $\delta + \Delta$ 和 $\delta + \Delta + d\Delta$ 可以表示为 $ds = f(\Delta)d\Delta$. 由于动镜倾斜的作用,这时干涉信号强度分布^[4]为

$$I = \frac{\int I'(\varphi) ds}{\int ds} \quad (4)$$

由式(4)可得干涉信号强度分布为

$$I = \frac{2I_0}{\pi r^2} \int_{-r}^{+r} 2(r^2 - x^2)^{1/2} [1 + \cos(\varphi 2\pi\bar{\nu}(2\Delta))] dx \quad (5)$$

令 $x = r \cos \alpha$, 其中 $\Delta = x\theta$, 代入式(5)可得

$$I = 2I_0 \left[1 + 2 \frac{J_1(4\pi\bar{\nu}r\theta)}{4\pi\bar{\nu}r\theta} \cos \varphi \right] \quad (6)$$

在圆形通光孔径下,干涉信号调制度为

$$M_{\text{circle}} = \frac{2J_1(4\pi\bar{\nu}r\theta)}{4\pi\bar{\nu}r\theta} = \frac{2J_1(4\pi\bar{\nu}\Delta)}{4\pi\bar{\nu}\Delta} \quad (7)$$

式中, J_1 为一阶第一类贝塞尔函数,如果要求干涉调制度 M_{circle} 不小于 90%^[5], 则偏移量 Δ 应满足

$$\Delta \leq \frac{\lambda}{14} \quad (8)$$

根据偏移量 Δ , 计算出最大倾斜角为

$$\theta_{\text{circle}} = \frac{\Delta}{r} \leq \frac{\lambda}{14r} \quad (9)$$

根据式(7),可得干涉调制度随动镜倾斜偏移量 $\frac{\Delta}{\lambda}$

的变化关系,如图2.

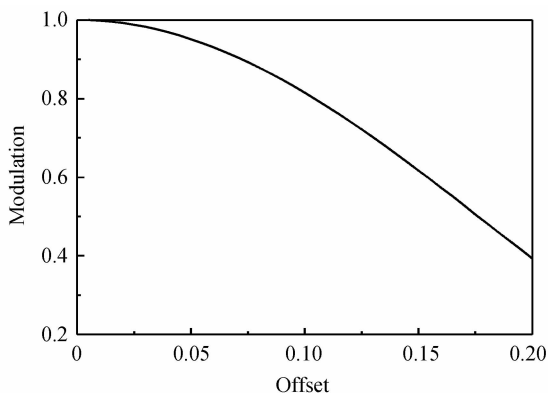


图2 调制度随偏移量的变化

Fig. 2 The variation of modulation depth with deviation

从图2可以看出,随着偏移量 Δ 的增加,干涉调制度 M_{circle} 随之减小.当 $\frac{\Delta}{\lambda} = 0.05$, 即 $\Delta = 0.05\lambda$ 时,对应的干涉调制度 M_{circle} 为 95%, 满足动镜倾斜产生的附加光程差必须小于 0.1λ ^[6] 的要求.

干涉调制度与倾斜角度的变化关系见图3,其中波长 $\lambda = 2.5 \mu\text{m}$, $r = 25 \text{ mm}$. 从图3中可以看出,干涉调制度为 90% 时所对应的倾斜角度在 1" 左右,对于这样的角秒量级的倾斜角度要求,对系统机械性能提出了苛刻的要求.

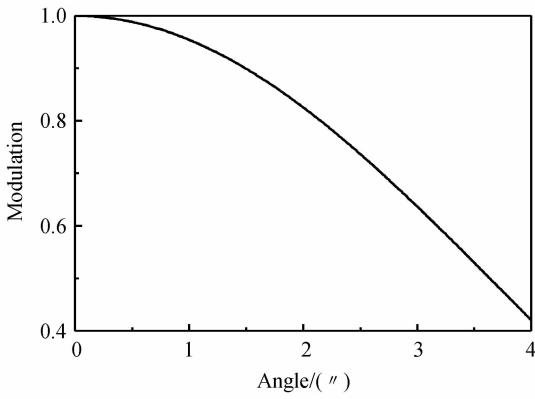


图3 调制度随倾斜角度的变化图

Fig. 3 The variation of modulation depth with the tilt angle

2 动态校准原理

为了解决动镜在扫描过程中发生的倾斜问题,干涉仪采用定镜动态校准系统,来弥补动镜运动过程中

产生的倾斜误差. 动态校准系统可以使定镜的倾斜角度随着动镜倾斜角度的变化而实时变化,达到准直的目的. 动态校准系统原理见图4,建立参考激光干涉光路(与信号光束干涉光路平行或同路),在参考光束的干涉面上放置多个探测单元,本文采用动态校准四象限激光探测器. 激光经扩束系统进入干涉仪产生干涉后照射到四象限激光探测器,由于动镜发生倾斜,不同的探测单元输出的干涉图之间有相位差,如图5.

根据相位探测原理^[7-10],两探测器间测得的相位差与两探测器的间距及准直误差角度的关系^[11-12]为 $\Delta\varphi_{XR} = 4\pi \frac{X_X - X_R}{\lambda} \alpha_X$,其中 X_X, X_R 分别表示两探测器的位置坐标, α_X 为 X 方向误差倾斜角(绕 Y 轴旋转); 同样,对于 $\Delta\varphi_{YR} = 4\pi \frac{X_Y - X_R}{\lambda} \alpha_Y$, α_Y 为 Y 方向误差倾斜角(绕 X

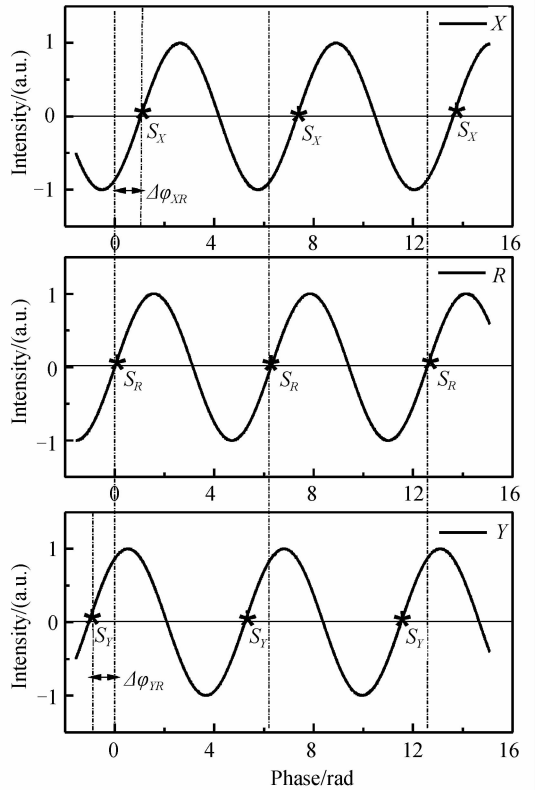


图5 探测器的模拟信号

Fig. 5 The analog signal from the three detectors

轴旋转). 根据探测器测得的相位差和位置坐标,求得倾斜角的大小和倾斜方向.

动态校准系统实现一次校准过程的时间是 0.2 ms,动镜在扫描运动过程时,激光干涉条纹在激光探测器上快速变化. 通过比较每个激光探测器相位、频率和调制度等信息,准确得到两反射镜相对倾斜误差大小和方向,将倾斜误差值转化为控制电信号值转化给定镜控制系统,分别产生推力和拉力对定镜驱动,使之旋转来校正动镜在运动过程中产生的倾斜误差角,保证定镜和动镜位置相互垂直,以实现定镜动态校正.

电磁驱动运动尺度应于动镜倾斜量相等,才能有效补偿动镜倾斜误差,使动镜和定镜间倾斜误差保持在容限范围内. 将定镜作为动态校准对象,把定镜固定在电磁驱动器的四个驱动单元上,如图6,对角的两个电磁驱动单元位于同一轴线上,分别为 X 和 Y 轴. 当动镜在运动过程中产生 XR 倾斜误差时, X 轴上的驱动单元 1 和 3 产生推力和拉力以 Y 轴旋转,来校准 XR 倾斜误差. 同样,当动镜在运动过程中产生 YR 倾斜误差时, Y 轴上的驱动单元 2 和 4 产生推力和拉力以 X 轴旋转,来校准 YR 倾斜误差. 于是,四象限探测器检测到的相位差和电磁驱动单元 1~4 产生的倾斜一致对应,所以,只要通过调整电磁驱动器对应的驱动单元,就可以使定镜产生抵消动镜在运动过程中的倾斜,使四象限探测器中的 X, Y 和 R 探测的相位一致,从而实现动态自校准. 即,相位探测器探测到的相位差和电

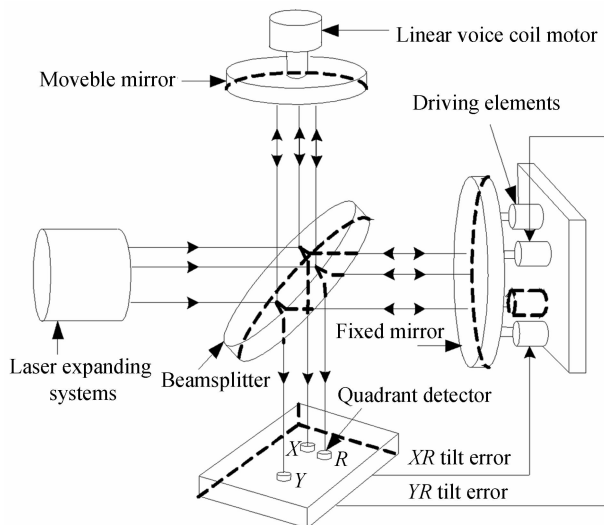


图4 动态校准系统

Fig. 4 The schematic diagram of dynamic alignment system

磁驱动器调整的运动尺度是一致的。

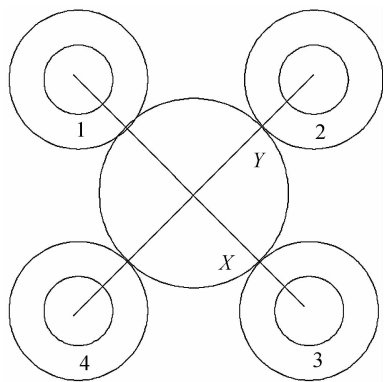


图6 电磁驱动器
Fig. 6 The electromagnetic actuator

3 实验分析和讨论

实验中 He-Ne 激光的波长是 632.8 nm,三个通道中每个通道采样点数为 4 000 k,在动镜行程 5 cm(光程差 10 cm,对应分辨率 0.1 cm^{-1})过程中采集 He-Ne 单色光的 R, X 和 Y 三路干涉图. 图 7 和图 8 是任意选取部分数据点之间的校准前和校准后的干涉图. 从图 7 和图 8 可以看出,由于探测器的几何尺寸和光

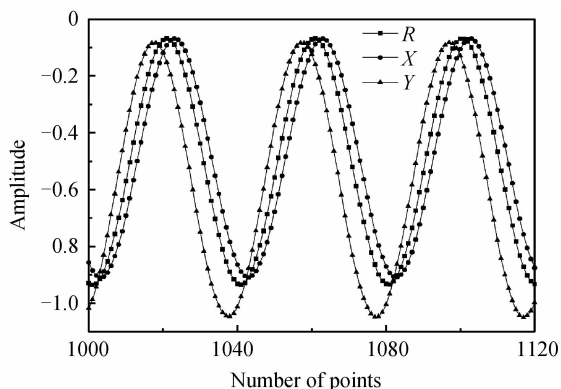


图7 校准前的干涉图

Fig. 7 The interferogram of before alignment

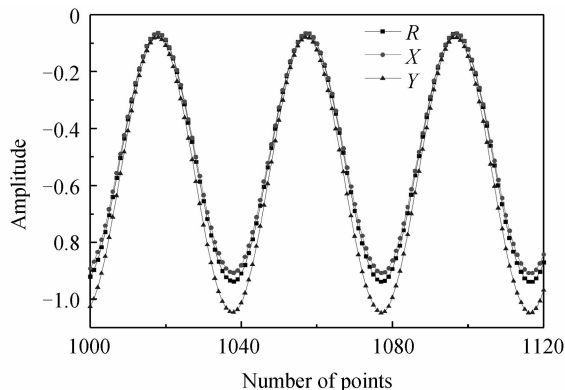


图8 校准后的干涉图

Fig. 8 The interferogram of afteralignment

强空间分布不同,R,X,Y 三路输出的正弦信号的强度不完全相同,但是不影响它们之间的相位差的计算。

在满足干涉调制度要求下,动镜倾斜角度应控制在 $1''$ 以内,根据相位探测原理 $\Delta\varphi_{XR} = 4\pi \frac{X_X - X_R}{\lambda} \alpha_X$,其中 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,两探测器间距 $X_X - X_R = 1.2 \text{ mm}$, $\alpha_X = 1''$,代入公式可计算 $\Delta\varphi_{XR} = 6.6^\circ$,即相位误差应控制在 6.6° 以内。

从图 9 可以看出,校准前的相位误差 $\Delta\varphi_{XR}$ 和 $\Delta\varphi_{YR}$ 已经超过 6.6° ,无法满足干涉仪系统性能分析的要求;而采用动态校准系统,校准后的相位误差 $\Delta\varphi_{XR}$ 和 $\Delta\varphi_{YR}$ 可以控制在 $\pm 6.6^\circ$ 以内,如图 10,能够满足干涉仪系统性能分析的要求,具体分析数据如表 1。

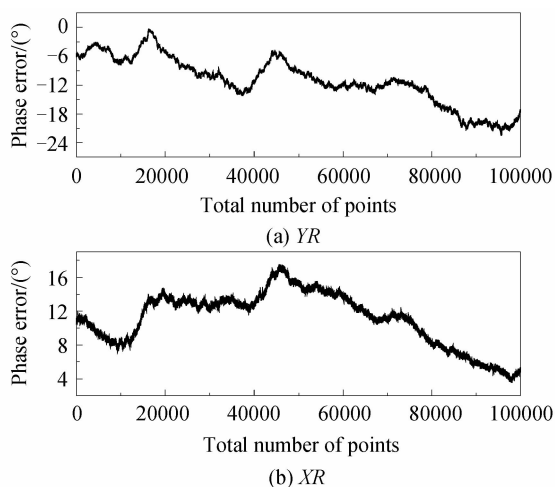


图9 校准前的相位差

Fig. 9 The phase difference of before alignment

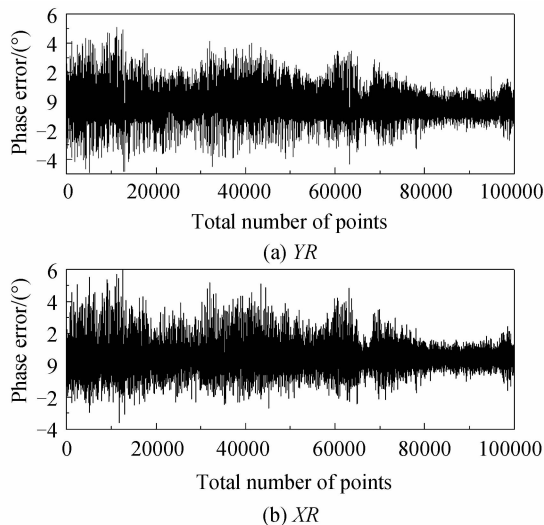


图10 校准后的相位差

Fig. 10 The phase difference of afteralignment

表 1 校准前后的相位差

Table 1 The phase error before and after alignment

	Phase error/(°)	Mean	Min	Max	Std Dev	RMS
XR	Before	11.71	3.56	17.50	3.30	11.49
	After	0.38	-3.59	6.19	0.94	1.02
YR	Before	-11.22	-22.57	-0.31	5.07	12.32
	After	-0.47	-4.92	5.09	1.16	1.25

在校准过程中,参考激光光源不稳定对激光束强度产生的影响,杂散光噪声产生的误差,探测器的间距和灵敏度产生的不同误差,以及电子噪声带来的噪声等问题会对测量准确性和真实性产生影响。

4 结论

动镜倾斜影响干涉信号调制度,为了获取较好的干涉调制度,倾斜角度必须满足一定的容限要求。圆形通光孔径的干涉调制度为 90% 时对应的倾斜角度在 1 (以内(动镜的倾斜量允差 $\Delta \leq \lambda/14$),对于这样的倾斜角度要求,本文采用动态校准系统校准动镜和定镜之间的倾斜误差,使动镜倾斜误差放宽到角分内,相应的倾斜量允差提高一个数量级。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ZENG Li-bo, YIN Bang-sheng, HE Bing, *et al.* Error analysis of moving mirror in Fourier transform interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 191-196.
曾立波,尹邦胜,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):191-196.
- [3] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [4] KATTI P K, SINGTH 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.
- [5] KAUPPINEN J K, SALOMAA I K, PARTANEN J O. Carouselinterferometer[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(27): 6081-6085.
- [6] GRIFFITHS P R, HASETH J A. Fourier transform infrared spectrometry, Second Edition[M]. New York: Wiley&Sons, 2007.
- [7] YU Li-min, DAI Zuo-xiao, WANG Mo-chang, *et al.* Adapative aligement 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.
- [8] KUANG Cui-fang, FENG Qi-bo, FENG Jun-yan, *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.
- [9] AN Kai, WANG Hong-man. A new angle-measurement algorithm of the detector with four quadrants[J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(6): 328-329.
安凯,汪红曼.四象限探测仪测角新算法[J].激光与红外,2001,**31**(6):328-329.
- [10] FENG Long-ling, DENG Ren-liang. Studyon optical tracking with four-quadrant photodetector [J]. *Infrared and Laser Engeneering*, 1996, **25**(1): 16-21.
冯龙龄,邓仁亮.四象限光电跟踪技术中若干问题的探讨[J].红外与激光工程,1996,**25**(1):16-21.
- [11] NORMAN H M, BROBERG H, GIROUXJ, *et al.* Dynamic alignment design and assessment for scanning interferometers [C]. SPIE, 1996, **2832**: 126-154.
- [12] YU Li-ming. Adaptive alignment system research of Fourier transform spectrometer[J]. *Infrared*, 2001, **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,**12**:1-11.