

转镜式光谱仪端反射镜误差容限分析

高晓峰^{1,2} 崔 燕^{1,2} 相里斌¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 系统分析了当转镜式干涉光谱仪端反射镜发生倾斜, 致使反射光束偏转时对干涉图的影响. 发现光束偏转带来的误差分为三部分: 1) 光束偏转导致整体增加的恒定光程差; 2) 垂直光轴方向因不同光线而引入的偏移光程差; 3) 光束中心相对于光轴的偏移量. 干涉强度中的有效信号减小, 同时直流分量不变, 因此信噪比降低. 最后从调制度和相位误差角度给出了端反射镜倾斜误差容限并讨论了减小干涉图受光束偏转影响的方法.

关键词 干涉光谱仪; 调制度; 相位误差; 端反射镜

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

0 引言

相对于动镜扫描型干涉光谱仪, 转镜式干涉光谱仪由于采用转镜代替直线运动的动镜, 因而提高了稳定性和可靠性, 并且具有许多动镜扫描型干涉光谱仪所没有的优点. 转镜是此类光谱仪的核心部件, 然而端反射镜和折转反射镜也相当重要, 其安装精确与否也对光谱仪性能产生重大影响. 杨晓许等^[1]对转镜式干涉光谱仪中的转镜和反射镜的误差容限进行过分析, 其中对反射镜的分析采用了针对于动镜扫描型干涉光谱仪平动镜误差容限的分析方法^[2]. 相里斌等^[2]在考虑到平动镜倾斜导致垂直光轴方向因不同光线而引入的偏移光程差时, 假定光束沿原路返回, 而实际上反射镜倾斜会导致光束偏转. 本文首先简要回顾转镜式干涉光谱仪的基本原理, 而后深入分析倾斜导致光束偏转时光程差的变化, 详细计算和讨论端反射镜的倾斜误差容限. 折转反射镜倾斜误差容限分析与端反射镜类似, 本文不再赘述. 此外本文分析方法亦可用于动镜扫描型干涉光谱仪中的平动镜误差容限分析.

1 基本原理

转镜式干涉光谱仪结构如图 1. 图中 FS 代表视场光阑 (Field Stop), LC 代表会聚镜 (Collimating Lens), LF 代表收集镜 (Focusing Lens), BS 代表分束镜 (Beamsplitter), M 代表折转反射镜 (Fold Mirror), ME 代表端反射镜 (End Mirror), D 代表探测器 (Detector), R 代表转镜 (Rotor).

目标光束经前置望远光学系统变成平行光束, 然后投射到分束器 BS 上分为反射和透射两路光

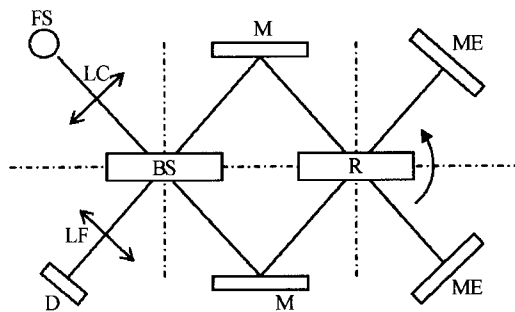


图 1 转镜式干涉光谱仪结构

Fig. 1 Scheme of rotary interference spectrometer

束, 反射光束和透射光束分别经折转反射镜 M、穿过转镜 R 到达端反射镜 ME 后, 再返回穿过转镜 R, 经折转反射镜 M 后回到分束器 BS. 再次透射和反射形成两路光束, 一路返回目标, 另一路穿过收集镜 LF 被探测器 D 接受. 当反射光束和透射光束通过转镜时, 由于相对于转镜的人射角不同, 两路光束的光程不同, 从而形成了光程差. 随着转镜的转动, 光程差的大小逐渐变化, 干涉强度也随着逐渐变化. 选择在线性度较好的区域内等时间间隔地测量即可得到一系列干涉强度值.

2 端反射镜 ME 倾斜误差容限分析

2.1 理论分析

如果端反射镜 ME 装校不好, 与人射平行光不能严格垂直, 将会出现如图 2 的情况. D 为光束孔径, θ 为倾斜角, C 点为倾斜点, d 为倾斜点与光束中心的距离.

可以看出, 由倾斜导致光束偏转带来的误差分为三部分: 1) 光束偏转导致整体增加的恒定光程差 x_c ; 2) 沿 ξ 轴因不同光线而引入的偏移光程差 δ_x ; 3) 光束中心相对于光轴的偏移量 m ; 以光轴处的光程差 x_0 为基准, 设从端反射镜 ME 到探测器 D 的光路路径长度为 L , 则可得

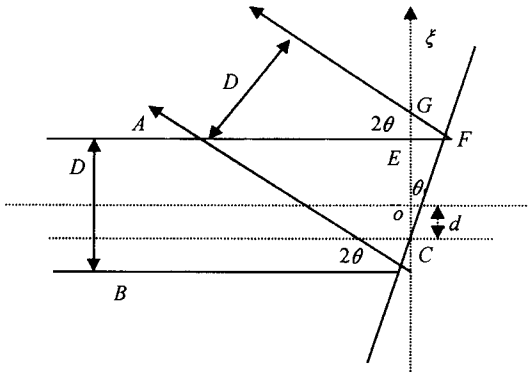


图 2 端反射镜 ME 倾斜

Fig. 2 The tilting of the end mirror

恒定光程差

$$x_c = L \left[\frac{1}{\cos 2\theta} - 1 \right] = \frac{2L \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} \quad (1)$$

偏移光程差

$$\delta x = (\xi - d) \tan \theta \left[\frac{1}{\cos 2\theta} + 1 \right] = (\xi - d) \tan 2\theta \quad \xi \in \left[-\frac{D}{2}, \frac{D}{2} \right] \quad (2)$$

此处 d 为坐标上的代数符号, 可正可负.

光束中心偏移量

$$m = L \tan \theta \quad (3)$$

对波数为 ν 的单色光来说, 在无倾斜的理想情况下, 探测器接收到的干涉图

$$I(x) = B(\nu) [1 + \cos(2\pi\nu x)] \quad (4)$$

当端反射镜倾斜时, 对于圆形孔径情况

假设偏转光束经光路到达探测器平面上时仍为圆形(实际上由于光束横截面与探测器平面有一夹角 2θ , 光束孔径沿 ξ 轴拉伸为一椭圆, 其长短轴分别为 $[D/\cos 2\theta, D]$. 因 θ 角很小, 可简化视为圆形), 则: 干涉强度由三部分面积积构成(图 3), 分别是弓形 ADB 为 S_1 , 弓形 ACB 为 S_2 , 新月形 $AEBCA$ 为 S_3 . 其中 S_1, S_2 与 S_3 三者之和为圆 O 的面积 S ,

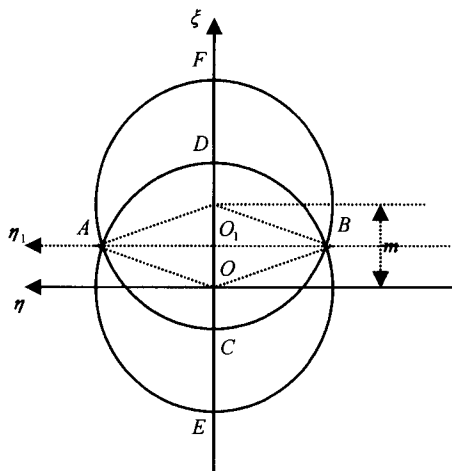


图 3 光束偏转的干涉强度积分图

Fig. 3 Integral of interference intensity

圆心 O 位于光轴上. 显然孔径面积 $S = \pi D^2/4$. 弓形 ADB 和弓形 ACB 是正常光束和偏转光束的相交部分. 会聚镜将圆 O 上的光线会聚到探测器上(为简化分析, 可假设会聚镜与光束孔径面积相同且中心位于光轴上), 因此 S_1, S_2 可看作信号, S_3 可看作系统噪音. 以在光轴上的点 O 为坐标原点, 建立 (ξ, η) 坐标系, 得到如下计算公式

$$I(x_0) = \frac{1}{S} \iint_{S_1} B(\nu) \{1 + \cos \{2\pi\nu [x_0 + x_c + \delta x']\}\} \cdot dS_1 + \frac{1}{S} \iint_{S_2} B(\nu) \{1 + \cos \{2\pi\nu [x_0 + x_c + \delta x']\}\} dS_2 + \frac{1}{S} \iint_{S_3} B(\nu) dS_3 \quad (5)$$

此时考虑到光束中心偏移, 积分中心上移量为 m , 则 $\delta x' = (\xi - m - d) \tan 2\theta$

$$I(x_0) = \frac{1}{S} \iint_{S_1} B(\nu) \{1 + \cos \{2\pi\nu [x_0 + x_c + (\xi - m - d) \tan 2\theta]\}\} dS_1 + \frac{1}{S} \iint_{S_2} B(\nu) \{1 + \cos \{2\pi\nu [x_0 + x_c + (\xi - m - d) \tan 2\theta]\}\} dS_2 + \frac{1}{S} \iint_{S_3} B(\nu) dS_3 \quad (6)$$

已知 $S_1 + S_2 + S_3 = S$, 所以

$$I(x_0) = B(\nu) + \frac{1}{S} \iint_{S_1} B(\nu) \cos \{2\pi\nu [x_0 + x_c + (\xi - m - d) \tan 2\theta]\} dS_1 + \frac{1}{S} \iint_{S_2} B(\nu) \cos \{2\pi\nu [x_0 + x_c + (\xi - m - d) \tan 2\theta]\} dS_2 \quad (7)$$

由积分式可以看出, 第一项 $B(\nu)$ 相当于是背景的直流分量, 后两项是干涉信号. 显然, 干涉强度中的有效信号减小, 而直流分量不变, 因此信噪比降低. 经过计算, 整理得到

$$I(x_0) = B(\nu) \left[1 + \frac{4}{\pi D^2} I' \right] \quad (8)$$

式中

$$I' = \left\{ \left[\frac{D}{2} - \frac{m}{2} \right] \frac{J_1 \left[2\pi\nu \left[\frac{D}{2} - \frac{m}{2} \right] \tan 2\theta \right]}{\nu \tan 2\theta} - \pi m \left[\frac{D}{2} - \frac{m}{2} \right] J_0 \left[2\pi\nu \left[\frac{D}{2} - \frac{m}{2} \right] \tan 2\theta \right] + 4m \left[\frac{D}{2} - \frac{m}{2} \right] \sin \left[2\pi\nu \left[\frac{D}{2} - \frac{m}{2} \right] \tan 2\theta \right] + \frac{1}{(2\pi\nu \tan 2\theta)^2} \left\{ \cos \left[2\pi\nu \left[\frac{D}{2} - \frac{m}{2} \right] \tan 2\theta \right] - 1 \right\} \right\} \cdot \cos \left[2\pi\nu \left[x_0 + x_c - \left[d + \frac{m}{2} \right] \tan 2\theta \right] \right]$$

式中 $J_0(z), J_1(z)$ 分别为第一类零阶和一阶 Bessel 函数.

在式(8)中令 $x_c = 0, m = 0$ (即为不考虑光束偏转时的简化情况), 且近似取 $\tan 2\theta \approx 2\theta$ 可得

$$I(x_0) = B(\nu) \left\{ 1 + \frac{J_1(2\pi\nu D\theta)}{\pi\nu D\theta} \cos [2\pi\nu(x_0 - 2d\theta)] \right\} \quad (9)$$

式(9)与不考虑光束偏转而直接计算得出的式(2)相同。

将式(1)和式(3)代入式(8),得到

$$I(x_0) = B(\nu) \left[1 + \frac{4}{\pi D^2} I' \right] \quad (10)$$

式中

$$I' = \left\{ \frac{(D - L \tan 2\theta) J_1 [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta]}{2\nu \tan 2\theta} - \frac{\pi(D - L \tan 2\theta) L \tan 2\theta}{2} J_0 [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] + \frac{1}{\pi\nu} \{ (D - L \tan 2\theta) \sin [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] + \frac{1}{\pi\nu \tan 2\theta} \{ \cos [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] - 1 \} \} \cdot \cos \left[2\pi\nu \left[x_0 + \frac{2L \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} - \left[d + \frac{L \tan 2\theta}{2} \right] \tan 2\theta \right] \right\}$$

由式(10)可得

干涉图调制度

$$M(D, L, \theta) = \frac{4}{\pi D^2} \cdot$$

$$\left\{ \frac{(D - L \tan 2\theta) J_1 [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta]}{2\nu \tan 2\theta} - \frac{\pi(D - L \tan 2\theta) L \tan 2\theta}{2} J_0 [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] + \frac{1}{\pi\nu} \{ (D - L \tan 2\theta) \sin [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] + \frac{1}{\pi\nu \tan 2\theta} \{ \cos [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] - 1 \} \} \right\} \quad (11)$$

干涉图初相位

$$\varphi(d, L, \theta) = 2\pi\nu \left[\frac{2L \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} - \left[d + \frac{L \tan 2\theta}{2} \right] \tan 2\theta \right] \quad (12)$$

2.2 倾斜容限分析

从调制度和相位两方面进行分析,可知:

1) 调制度判据: 当达到倾斜最大容许角度 θ_{\max} 时, 调制度下降到无倾斜时的 90%

$$M(D, L, \theta) = \frac{4}{\pi D^2} \cdot$$

$$\left\{ \frac{(D - L \tan 2\theta) J_1 [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta]}{2\nu \tan 2\theta} - \frac{\pi(D - L \tan 2\theta) L \tan 2\theta}{2} J_0 [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] + \frac{1}{\pi\nu} \{ (D - L \tan 2\theta) \sin [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] + \frac{1}{\pi\nu \tan 2\theta} \{ \cos [\pi\nu(D - L \tan 2\theta) \tan 2\theta] - 1 \} \} \right\} = 0.9$$

取 Bessel 函数和三角函数的级数近似表达式

$$J_1(z) \approx \frac{z}{2} \left[1 - \frac{z^2}{8} \right], J_0(z) \approx 1 - \frac{z^2}{4},$$

$$\sin x \approx x - \frac{x^3}{3!}, \cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2!}$$

近似计算只取到 $\tan 2\theta$ 的二次幂, 可得

$$\theta_{\max} \approx \frac{8D(D - 2\pi L - \pi^2 L)}{8(\pi L + 2\pi^2 D - 8D)L^2 + 16D^3\lambda - \pi^3 D^4} \quad (13)$$

2) 相位误差判据: 由余弦因子引起的干涉图采样抖动量小于 $\frac{\lambda}{\text{SNR}}$.

在单色光情况下, 干涉图的交流分量应是一个余弦函数, 当存在变化的初相位时, 干涉图的频率会发生变化. 假设当干涉强度值降为零时, 理想状态下的光程差是 x_k , 相应的存在动镜倾斜时计算得到的光程差是 $x_{\#}$, 则根据判据有

$$|\delta x| = |x_k - x_{\#}| \leq \frac{\lambda}{\text{SNR}} \quad (14)$$

$$\text{由 } 2\pi\nu x_k = 2k\pi + \frac{\pi}{2}$$

$$2\pi\nu \left[x_{\#} + \frac{2L \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} - \left[d + \frac{L \tan 2\theta}{2} \right] \tan 2\theta \right] = 2k\pi + \frac{\pi}{2}$$

$$\text{得 } x_k = \frac{4k+1}{4} \lambda$$

$$x_{\#} = \frac{4k+1}{4} \lambda - \left[\frac{2L \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} - \left[d + \frac{L \tan 2\theta}{2} \right] \tan 2\theta \right]$$

式中 $k=0, 1, 2, \dots$

有

$$\left| \frac{2L \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} - \left[d + \frac{L \tan 2\theta}{2} \right] \tan 2\theta \right| \leq \frac{\lambda}{\text{SNR}}, \text{ 取}$$

近似 $\sin \theta = \theta, \cos \theta = 1$

得

$$2|d\theta| \leq \frac{\lambda}{\text{SNR}}$$

最后得到

$$\theta_{\max} = \frac{\lambda}{2|d|\text{SNR}} \quad (15)$$

3 讨论

从上述分析可知, 端反射镜的倾斜对转镜式光谱仪的性能影响很大, 应当尽可能在装调时减小倾斜角 θ .

1) 从调制度的角度考虑, 在设计转镜式光谱仪时应尽量减小光束孔径和仪器整体尺寸即使光谱仪结构紧凑, 来降低调制度对倾斜角的敏感程度.

2) 从相位误差的角度考虑, 应尽量使光束中心与端反射镜的中心重合以减小干涉强度余弦分量中初相位的影响.

参考文献

1 杨晓许, 周泗忠, 相里斌. 转镜式干涉光谱仪中的误差容

- 限研究. 光子学报, 2004, **33**(3): 338~341
 Yang X X, Zhou S Z, Xiangli B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 338~341
- 2 相里斌, 杨建峰, 高瞻, 等. 干涉光谱仪动镜倾斜误差容限分析. 光子学报, 1997, **26**(2): 132~135
 Xiangli B, Yang J F, Gao Z, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(2): 132~135
- 3 Kevin S, Schildkraut E R. Imaging fourier transform spectroscopy for remote chemical sensing. *SPIE*, 1996, **2763**: 169~177
- 4 Winthrop W, Jens P D. Ultra high speed chemical imaging spectrometer. *SPIE*, 1997, **3082**: 148~154
- 5 苏星, 黄惠民, 相里斌. 基于高速转镜的高分辨率干涉光谱仪非线性理论研究. 光子学报, 2001, **30**(12): 1474~1480
 Su X, Huang H M, Xiangli B. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(12): 1474~1480
- 6 相里斌. 干涉成像光谱技术研究. 西北大学现代物理研究所博士后出站报告, 1997. 8~12
 Xiangli B. The Research of Imaging spectroscopy. Xi'an: Northwest University of China, 1997. 8~12

The Tolerance of the End Mirror tilting in High Speed Rotary Spectrometer

Gao Xiaofeng^{1,2}, Cui Yan^{1,2}, Xiangli Bin¹

1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710068

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-10-13

Abstract In this paper, the tolerance of the end mirror (plane mirror) tilting in high speed rotary spectrometer is analyzed systematically by means of modulation depth and phase error. It is found that the changes resulted from the tilting of the end mirror was made up of three parts: 1) the constant OPD that reflective light increases; 2) the increased OPD concerning different ray along the perpendicular direction to light axis; 3) the moving distance of the light beam center to light axis. The SNR of the output is reduced by these changes. The formula of changed interferogram intensity is given. Methods to avoid the problems resulted from the tilting of the end mirror are also discussed.

Keywords Interferometer; Modulation depth; Phase error; End mirror



Gao Xiaofeng was born in Baoji, Shannxi, China, on May 24, 1976. He received the B. S. degree in applied physics from the Northwest Polytechnical University, Xi'an, China, in 1998. He is presently pursuing the Ph. D. degree in optical engineering at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. He is currently engaged in research on imaging spectroscopy and digital signal processing techniques.