

转镜式干涉光谱仪中的误差容限研究

杨晓许^{1,2} 周泗忠¹ 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 通过分析可知,转镜的晃动不影响干涉图的调制度,但会带来干涉图周期的变化.通过研究晃动带来干涉图的周期变化,可找到晃动的容限.结果表明:转镜式干涉光谱仪对转镜的晃动不敏感.用同样的方法可以确定转镜转速误差的容限,转镜对转速稳定性有着较高的要求.转镜式干涉光谱仪中的反射镜不是动件,安装时的倾斜对干涉图的调制度和相位都有影响,通过计算,这种影响可得到反射镜的倾斜容限.结果表明,转镜式干涉光谱仪对反射镜的安装准确度有很高的要求.

关键词 干涉光谱仪;动镜;调制度;容限

中图分类号 TH744.1 **文献标识码** A

0 引言

基于迈克尔逊干涉仪的直线型动镜扫描系统,具有准确度要求高,结构复杂、稳定性差等不足,尤其不适宜于快速变化的光谱测量.转镜式高速干涉光谱仪,用转镜代替直线移动的精密动镜,可以适应高速光谱测量的需要^[1].

转镜式光谱干涉仪中转镜用于产生光程差,而且是系统中的唯一动件,是整个干涉光谱仪的关键部分,转镜的误差主要来自转动时的晃动,和转速的不稳定.研究它的误差对系统的影响及误差的容限,对工程设计具有指导意义.系统中的垂直反射镜和平行反射镜安装时的倾斜,将对光谱仪的性能有较大的影响.倾斜不但会降低干涉图的调制度,而且会带来相位误差,所以,必须保证反射镜安装的准确度,才能得到理想的干涉图.

1 基本原理

转镜式干涉光谱仪的原理如图1所示,LC为前置望远系统,BS为半透半反的分束镜,M为平行反射镜,ME为垂直反射镜,D为探测器,LF为后置光

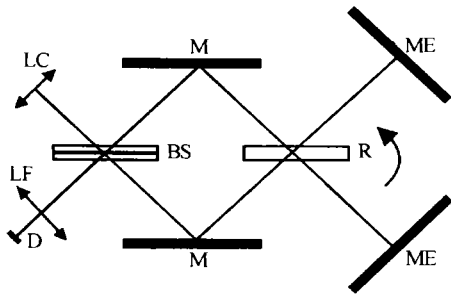


图1 转镜式干涉光谱仪
Fig. 1 Rotary interference spectrometer

学系统,R为全透光的转镜.

工作时,来自目标的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,BS使其分为反射光束和透射光束,反射光束和透射光束分别经反射镜M、穿过转镜R、反射镜ME、反射镜M后回到分束器BS.当反射光束和透射光束经过转镜时,对转镜的入射角不同,使两束光的光程不同,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.变化的光程差在BS处形成相干光束,其中一束经后置镜LF被探测器D接受.干涉点的光强随转镜的转动而变化,等间隔地测量一系列干涉强度值 $I(OPD)$,然后进行傅氏变换就可得到所需要的复原光谱图.

2 转镜晃动的容限

转镜是用于产生光程差的关键部分,是干涉光谱仪的核心,它带来的光程差大小为^[2]

$$OPD = 2t(L_1 - L_2 + \sqrt{2}\sin\theta)$$
$$L_1 = \sqrt{n^2 - 2^{-1} - 2^{-1}\sin\theta}$$
$$L_2 = \sqrt{n^2 - 2^{-1} + 2^{-1}\sin\theta}$$
(1)

式中, t 为转镜厚度, n 为折射率, θ 为转镜转过的角度.

实际系统中,转镜总会有一定的晃动.可建立如图2所示的坐标系, O 为无晃动时转轴的位置,

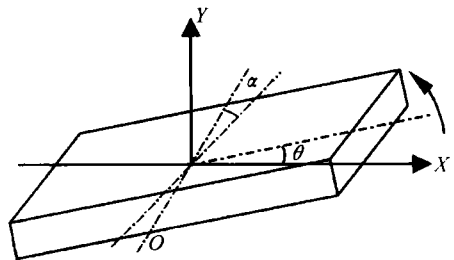


图2 转镜坐标系
Fig. 2 Coordinaters of rotating refractor

X 轴在子午面内,垂直于无晃动时的转轴方向, Y 轴在弧矢面内,垂直于平行反射镜.转镜晃动时,可将其转轴的偏离分解为在子午面内(X 轴方向)和弧矢面内(Y 轴方向)的偏离.下面分别讨论.

2.1 子午面内的晃动

当转轴的晃动在子午面内时,光程差表达式为^[2]:

$$OPD_x = 2t[L_{1x} - L_{2x} + \sqrt{2} \sin \theta \tan \Psi] \quad (2)$$

式中

$$L_{1x} = \sqrt{n^2 - 1 + 2^{-1} \cos^2(\Psi + \theta) / \cos^2 \Psi}$$

$$L_{2x} = \sqrt{n^2 - 1 + 2^{-1} \cos^2(\Psi - \theta) / \cos^2 \Psi}$$

$$\Psi = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \cos^2 \alpha}}, \alpha \text{ 为转轴偏离理想位置}$$

的晃动量.

可得到此时晃动带来的光程差误差

$$\Delta OPD = 2t[L_{1x} - L_{2x} - L_1 + L_2 + \sqrt{2} \sin \theta (\tan \Psi - 1)] \quad (3)$$

对于给定的 n , 可把上式写为 $\Delta OPD = \delta(\theta, \alpha)$, 其图象如图 3 所示, 图中 $n = 3$.

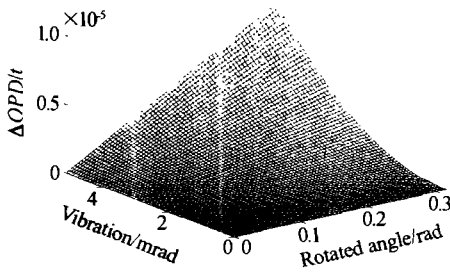


图 3 光程差误差与晃动和转角的关系
Fig. 3 Relation between OPD error and vibration and rotated angle

从图 3 中可看出:1) 晃动量 α 越大, 晃动带来的光程差误差越大;2) 工作角越大, 晃动带来的光程差误差越大.

转镜其实是一个平行透光板, 当转镜晃动时, 单色光 $B(\nu_0)$ 的干涉图表达式如式(4).

$$I(x) = B(\nu_0) \{1 + \cos [2\pi\nu_0(x + \Delta x)]\} \quad (4)$$

当理想的光程差 x 为某个值时, 所有轴上光线对转镜有相同的入射角, 因而它们的光程差有着相同的误差 Δx . 所以, 当转镜晃动时, 从式(4)可看出, 干涉图的调制度不会发生变化. 但光程差误差带来了干涉图的相位误差, 从而引起了干涉图周期的变化. 这种周期变化应小于 λ/SNR ^[3].

当折射率 n 和工作角 θ_{max} 确定后, 可找到晃动的容限.

$$|\Delta OPD|_{max} \leq \lambda/SNR \quad (5)$$

设 $n = 3, t = 1.0 \text{ cm}, \theta_{max} = 10^\circ, \lambda = 2.5 \mu\text{m}, SNR = 100$, 光程差误差随晃动的变化规律如图 4 所

示, 根据式(3)和式(5)可求得 $\alpha \leq 10.3'$.

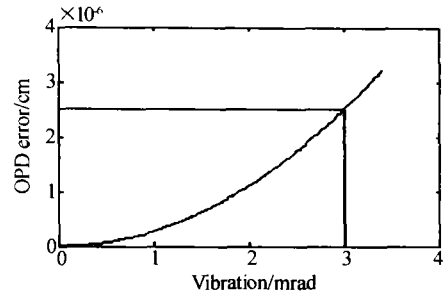


图 4 晃动带来的光程差误差
Fig. 4 OPD error caused by vibration

2.2 弧矢面内的晃动

当转轴的晃动在弧矢面内时, 光程差表达式为^[2]:

$$OPD_y = 2t[L_{1y} - L_{2y} + \sqrt{2} \sin \theta] \quad (6)$$

式中

$$L_{1y} = \sqrt{n^2 - 1 + 2^{-1} \sin^2(\Psi - \theta) / \cos^2 \Psi}$$

$$L_{2y} = \sqrt{n^2 - 1 + 2^{-1} \sin^2(\Psi + \theta) / \cos^2 \Psi}$$

则晃动引起的光程差误差为

$$\Delta OPD_y = 2t[L_{1y} - L_{2y} - L_1 + L_2] \quad (7)$$

对于 Y 轴方向和 X 轴方向的晃动, 除光程差误差大小不同外, 有着相同的结论, 即都不会影响干涉图调制度. 用同样的方法可得到 Y 轴方向晃动的容限.

设 $n = 3, t = 1.0 \text{ cm}, \theta_{max} = 10^\circ, \lambda = 2.5 \mu\text{m}, SNR = 100$, 有 $\alpha \leq 19.1'$.

2.3 转速稳定性

选取合适的转镜材料和工作角, 可使光程差的非线性足够小^[2]. 所以, 可以不考虑光程差的非线性, 近似地把式(1)写为

$$OPD = 2tf(\theta) \approx k\theta \quad (8)$$

式中 $k = 2tf'(\theta)|_{\theta=0}$.

在一个干涉周期 T 中, 光程差误差应满足

$$|\Delta OPD_T| = k\omega_{err}T \leq \lambda/SNR \quad (9)$$

式中, ω_{err} 为转速误差.

则转速的稳定性要求为

$$v = \omega_{err}/\omega \leq 1/SNR \quad (10)$$

式(10)表明, 要求信噪比越高, 则对转速的稳定性要求越严格.

设 $SNR = 100$, 则转镜转速的稳定性 $v \leq 1\%$.

2.4 结果讨论

1) 转镜式干涉光谱仪对转镜的晃动的要求不高, 而且, 在工作时转镜是高速转动的, 由于惯性, 使它的转速能保持相对的稳定. 这也正是这种干涉光谱仪的优点之一;

2) 相比而言, 系统对沿 X 轴方向的晃动比对 Y 轴方向的晃动要求更高;

3) 转镜式干涉光谱仪对转速稳定性要求有较高的要求。

3 反射镜的倾斜容限

3.1 垂直反射镜

转镜式干涉光谱仪等效光路图如图5, 可以发现它其实是从直线动镜式干涉光谱仪演化而来。直线型的是通过动镜的直线移动产生变化的光程差, 而且动镜还反射光线; 在转镜型中是通过转镜的转动形成变化的光程差, 但转镜不反射光线, 反射光线由垂直反射镜来完成。由于这种相似性, 对转镜型干涉仪的理论分析可以参考直线动镜型干涉仪。所以, 可以参考直线型中的动镜倾斜分析, 对垂直反射镜的倾斜进行分析。

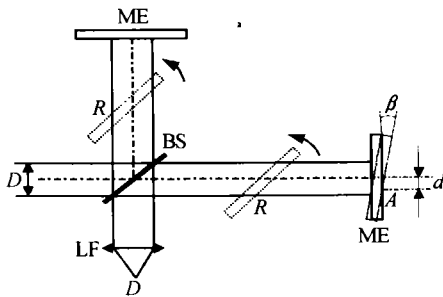


图5 转镜式干涉仪等效光路及倾斜的垂直反射镜
Fig.5 Equivalent light pathway of rotary interferometer with a tilted vertical reflective mirror

图5中, D 为光束口径, A 为垂直反射镜倾斜的中心, d 为 A 到入射光束中心的距离, β 为垂直反射镜的倾斜角度。

垂直反射镜倾斜时, 光束边缘两侧的额外光程差为

$$\Delta x \approx 2\beta D \quad (11)$$

设孔径是矩形, 此时的干涉图为^[2]

$$I(x_0) = \frac{1}{D} \int_{-D/2-d}^{D/2+d} B(\nu) \cos [2\pi\nu(x_0 + 2\beta\zeta)] d\zeta = B(\nu) \sin c(2\nu D\beta) \cos [2\pi\nu(x_0 + 2d\beta)] \quad (12)$$

干涉图的调制度 $M = \sin c(2\pi\nu D\beta)$, 初相位 $\varphi = 4\pi\nu d\beta$ 。

垂直反射镜的倾斜带来了调制度的下降和干涉图周期的变化, 可以从调制度和相位误差两个方面计算倾斜的容限^[4]: ①要保证 $M > 90\%$; ②干涉图周期变化小于 λ/SNR 。

设波长 $\lambda = 2.5 \mu\text{m}$, 正方形光束口径为 3 cm , 可得 $\beta < 2''$ 。

可见, 转镜式干涉光谱仪对垂直反射镜的倾斜很敏感。然而, 由于垂直反射镜不是动件, 只要在安

装时保证准确度就可以了。这也正是转镜式干涉光谱仪的又一优点。

3.2 平行反射镜的倾斜容限

平行反射镜倾斜时, 光束两侧的额外光程差为

$$\Delta x \approx 4\sqrt{2}\beta D \quad (13)$$

式中, β 为倾斜角度。

设孔径是矩形, 此时的干涉图为

$$I(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2}D} \int_{-\sqrt{2}D+d}^{\sqrt{2}D+d} B(\nu) \cos [2\pi\nu(x_0 + 4\sqrt{2}\beta\zeta)] d\zeta = B(\nu) \sin c(16\pi\nu D\beta) \cos [2\pi\nu(x_0 + 4\sqrt{2}d\beta)] \quad (14)$$

调制度 $M = \sin c(16\pi\nu D\beta)$, 初相位 $\varphi = 8\sqrt{2}\pi\nu d\beta$ 。

设波长 $\lambda = 2.5 \mu\text{m}$, 正方形光束口径为 3 cm , 可得 $\beta < 0.27''$ 。

结果表明: 平行反射镜的倾斜会更快降低干涉图调制度。所以, 转镜式干涉仪中对平行反射镜的安装准确度要求更高。

4 结论

通过计算表明, 系统对转镜的晃动不敏感, 尤其是沿 Y 轴方向的晃动。这说明了该型干涉光谱仪的抗干扰能力很强。转镜对转速的稳定性有着较高的要求, 然而, 转镜在高速转动时, 由于“飞轮”效应, 其转速能保持相对稳定, 这也是转镜式干涉仪的稳定性好的表现。转镜式干涉光谱仪对反射镜有很高的准确度要求, 干涉图的调制度和周期对平行反射镜的倾斜更敏感。但由于反射镜不是动件, 只要在安装时要保证很高的准确度就可以了。而直线动镜型中的动镜必须在工作期间保证同样的准确度。这是转镜式干涉光谱仪的稳定性好的另一表现。

参考文献

- 1 Wadsworth W, Dybwad J P. Ultra high speed chemical imaging spectrometer. *Proc of SPIE*, 1997, **3082**: 148 ~ 194
- 2 黄惠明, 周荫清, 周泗忠, 等. 转镜式光谱仪光程差和非线性的研究. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1239 ~ 1243
Huang H M, Zhou Y Q, Zhou S Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1239 ~ 1243.
- 3 Vaughan A H. Imaging Michelson spectrometer for Hubble Space Telescope. *Proc of SPIE*, 1988, **1036**: 2 ~ 14
- 4 相里斌, 杨建峰, 高瞻, 等. 干涉光谱仪倾斜误差容限分析. *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

Studies of Error Limited of High Speed Rotary Spectrometer

Yang Xiaoxu, Zhou Sizhong, XiangLi Bin

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

Received date: 2003-05-06

Abstract The rotating refractor is an only movable object in high speed rotary spectrometer. Vibration always exists when spectrometer works. Analyzed results show that modulation depth is not affected by vibration, which can cause phase error. And the system is not sensitive to the vibration of rotating refractor. But rotary speed stability has to act perfectly. The reflecting mirrors are unmovable, which are very sensitive to tilting because tilting of mirrors can affect modulation and phase of interferogram. As a result, the reflective mirrors are requested precision fitting.

Keywords Interferometer; Vibration; Modulation depth; Tolerance



Yang Xiaoxu was born in 1972. He received his B. S. degree from the Henan Normal University in 1996. Now he is working for his Ph. D. degree in the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His interesting fields include Fourier transform interferometer and image processing.