

标定光学劈尖厚度的波长数目研究

张铁军 陈 方

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

提 要

菲佐(Fizeau)激光波长计中光学劈尖厚度的标定是准确测量激光波长的先决条件。本文详细研究了进行光学劈尖厚度标定所需要的标定波长数目, 分析结果表明: 标定波长数目主要与标定波长的选择方式及光学劈尖厚度的误差范围有关。

关键词: 光学劈尖厚度, 菲佐激光波长计, 标定波长数目。

一、引 言

在菲佐激光波长计中, 光学劈尖的厚度是一个标定参数, 需要用已知的准确激光波长予以标定。文献[1~4]中分别介绍了多波长标定法、双波长标定法和双波长标定的剩余小数法, 但是对于标定波长的数目却均未予以详细地说明。本文利用文献[4]提出的改进的剩余小数法详细研究了标定光学劈尖厚度所需要的标定波长数目及其有关的一些问题, 具有实际指导意义。

二、标定波长的数目

按照文献[4], 由剩余小数法确定光学劈尖厚度 X_0 。实际上就是要寻找使误差函数

$$E(x) = \sum_{i=2}^M \varphi_i(x) / (M-1) = (M-1)^{-1} \sum_{i=2}^M |\Delta N_i - (I + \Delta N'_i - \Delta P_i)|, \quad (1)$$

具有最小值的修正整数 x , 其中有关量的含义同文献[4]。对于特定的光学劈尖而言, 总存在一个 x 使所有的 $\varphi_i(x)$ 均取极小值, 从而使 $E(x)$ 取最小值。如上所述, 误差函数 $E(x)$ 的极小值具有周期性, 其原因在于函数 $\varphi_i(x)$ 是一周期函数, 对于单一的 $\varphi_i(x)$ 而言, 具有使 $\varphi_i(x)$ 取极小值的 x 并不唯一, 采用多个标定波长所产生的函数 $\varphi_i(x)$ 的求和, 目的为了抑制或消除 $\varphi_i(x)$ 函数自身的周期性, 直接的结果就是 $E(x)$ 扩展了周期, 极小值的幅值变大。文献[6]中指出, 通常三个标定波长足够确定准确的干涉序数, 但实际情形下, 这一结论的成立是有条件的。标定波长的数目与许多因素有关。

$\varphi_i(x)$ 的周期 P_i 由参数 ΔP_i 决定, 当满足

$$x \frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i / n(\lambda_i)} = m, \quad (m \text{ 为整数}) \quad (2)$$

时, 可以求得 P_i 为

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \frac{\lambda_i/n(\lambda_i)}{|\Delta\lambda_i|}, \\ \Delta\lambda_i &= \frac{\lambda_i}{n(\lambda_i)} - \frac{\lambda_1}{n(\lambda_1)}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $n(\lambda_i)$ 为对应于标定波长 λ_i 的光学劈尖折射率。

当 $i=1$ 时, $P_1=\infty$, $\varphi_1(x)$ 为与 x 无关的常数, 不能够确定具有最小值的某一修正整数 x , 因而单波长不能确定光学劈尖的厚度。只有当准确的干涉序数已知, 且光学劈尖厚度误差范围被限制在一个干涉序数的变化范围之内时, 才能用单波长对光学劈尖的厚度予以修正。

当 $i=2$ 时, $\varphi_2(x)$ 近似为一周期性的锯齿波函数, 其周期 $P_2 = [\lambda_2/n(\lambda_2)] / |[\lambda_1/n(\lambda_1)] - [\lambda_2/n(\lambda_2)]|$ 。显然, 可以由双波长标定光学劈尖的厚度, 但是由于 $\varphi_2(x)$ 的周期性, 导致了不能在大范围内确定唯一的干涉序数, 只有在光学劈尖厚度的误差范围被限定在一个周期之内时, 才能由双波长标定出准确的光学劈尖厚度^[4]。

当 $i>2$ 时, 情形比较复杂。假设函数 $\varphi_i(x)$ 中最接近光学劈尖厚度 X_0 的极小值为 0 序数, 考虑波长 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$, 以 λ_1 为起始波长, 当 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ 满足下列关系时

$$K_2 P_2 = K_3 P_3 \dots = K_M P_M, \quad (4)$$

便找到了与 0 序数极小值幅值相近的另一个极小值点(称之为 1 序数)它与光学劈尖厚度 X_0 对应的干涉序数间隔, 对 λ_i , λ_1 为 $K_i P_i$ ($i=2, 3, \dots, M$)。通过寻找 K_2, K_3, \dots, K_M 就可以确定由 M 个标定波长唯一地求出 X_0 的条件。

假设 $P_2 > P_3$, 由(4)式得

$$K_3 = K_2 (P_2/P_3) = K_{30} + \Delta K_{30}, \quad (5)$$

式中 $K_{30}, \Delta K_{30}$ 分别为 K_3 的整数部分和小数部分, 且有

$$K_{30} = K_2 \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_3}\right) + \text{Int}\left\{K_2 \left[\frac{P_2}{P_3} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_3}\right)\right]\right\} + I, \quad (6)$$

$$\Delta K_{30} = K_2 \left[\frac{P_2}{P_3} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_3}\right)\right] - \text{Int}\left\{K_2 \left[\frac{P_2}{P_3} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_3}\right)\right]\right\} - I, \quad (7)$$

式中 I 为中间调整参量, 其取值规则如表 1 所列。

Table 1 Selection of I

I	Conditions
0	$K_2 \left[\frac{P_2}{P_3} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_3}\right)\right] - \text{Int}\left\{K_2 \left[\frac{P_2}{P_3} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_3}\right)\right]\right\} \leq \frac{1}{2}$
1	$K_2 \left[\frac{P_2}{P_3} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_3}\right)\right] - \text{Int}\left\{K_2 \left[\frac{P_2}{P_3} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_3}\right)\right]\right\} > \frac{1}{2}$

在一般情况下, $[(P_2/P_3) - \text{Int}(P_2/P_3)] \neq 0$, 即 (P_2/P_3) 不为整数, 因而 ΔK_{30} 一般不为零。为了确定 K_2, K_3 , 引入误差函数 $E_0(K_2)$, 且满足

$$E_0(K_2) = |\Delta K_{30}|,$$

更一般地说, 对于 $i>3$ 的情形有

$$\left. \begin{aligned} E_0(K_2) &= \sum_{i=3}^M \frac{|\Delta K_{i0}|}{M-2}, \\ \Delta K_{i0} &= K_{i-1} \left[\frac{P_2}{P_i} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_i}\right)\right] - \text{Int}\left\{K_{i-1} \left[\frac{P_2}{P_i} - \text{Int}\left(\frac{P_2}{P_i}\right)\right]\right\} - I, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

且满足 $P_2 > P_i (i=3, 4, \dots, M)$ 。使误差函数 $E_0(K_2)$ 具有极小值的 K_2 即为所求的值, 它可能多于一个。

由 $P_i = [\lambda_i/n(\lambda_i)] / |[\lambda_i/n(\lambda_i)] - [\lambda_1/n(\lambda_1)]|$ 知, 起始波长 λ_1 的选择对 P_i 有很大的影响, 不同的选择方式得出的 P_i 也不同, 因而误差函数中与 0 序数极小值最邻近的 1 序数极小值的位置也不同。光学劈尖初始厚度的误差范围愈大, 那么 K_2 的可取值也就愈多, 取值范围愈大, 1 序数极小值有可能进入到初始厚度允许的误差范围之内。可见, 波长的选择方式和初始厚度的误差范围是影响标定波长数目的主要因素。但是, 在实际标定光学劈尖厚度时, 初始厚度的误差范围 ΔX_0 , 由于加工工艺和测量手段的限制, 具有确定的下限, 是一个固有因素, 因而标定波长的数目在给定的 ΔX_0 下主要地由标定波长的选择方式来决定。此外, 标定过程中的检测参数的误差^[4] 也影响标定波长的数目。

三、计算和实验结果

实验装置原理图与文献[4]相同。实验测得的标定波长值 λ_i 和相应的剩余小数序数值 ΔN_i 列于表 2。

Table 2 Values of calibrating wavelengths λ_i and excess fractional orders ΔN_i

i	λ_i (nm)	ΔN_i
1	575.3030	0.55078
2	578.7895	0.65999
3	586.1815	0.32615
4	591.7585	0.10724
5	596.6137	0.863174

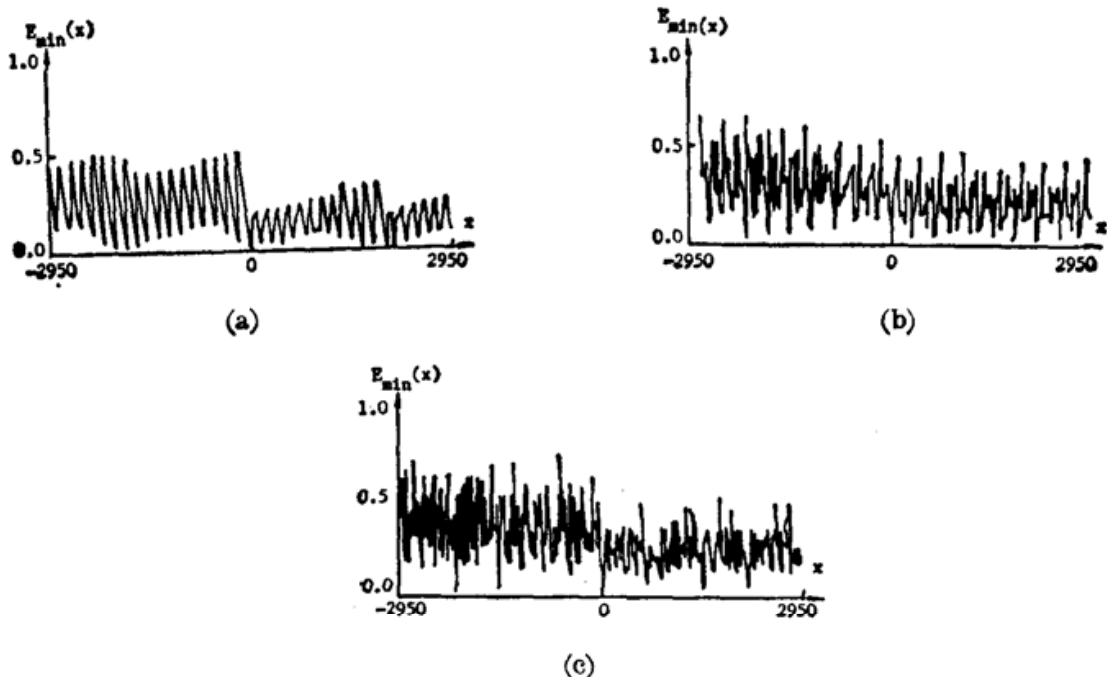


Fig. 1 The curve of $E_{\min}(x)$ Vs. X at different wavelengths

- (a) 3 calibrating wavelengths $\lambda_1\lambda_2\lambda_3$, $X'_0=585000\text{nm}$, $\Delta X=585000\text{nm}$; (b) 4 calibrating wavelengths $\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4$, X_0 and ΔX_0 : same to (a); (c) 5 calibrating wavelengths $\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_5$, X_0 and ΔX_0 : same to (a)

图 1 给出了误差函数 $E(x)$ 的极小值 $E_{\min}(x)$ 与 x 的关系曲线, 数据处理中光学劈尖的折射率 $n(\lambda_i)$ 引自文献[5], 初始厚度 X'_0 的误差范围 ΔX_0 取值很大是为了展示 $E_{\min}(x)$ 的周期性, 实际中 ΔX_0 的确定主要地由光学加工中光学劈尖厚度的测量精度决定。本文中, ΔX_0 光学加工中的测量精度 $\Delta X_0/X'_0$ 约为 10^{-3} , 标定过程中 $\Delta X_0/X'_0$ 的取值约为 10^{-2} 。图 2 给出了误差函数 $E(x)$ 在实际误差范围 ΔX_0 下与 x 的关系曲线。实验结果表明, $E_{\min}(x)$ 和 $E(x)$ 随 x 之变化均呈现出明显的周期性, 标定波长数目愈多周期性愈差。

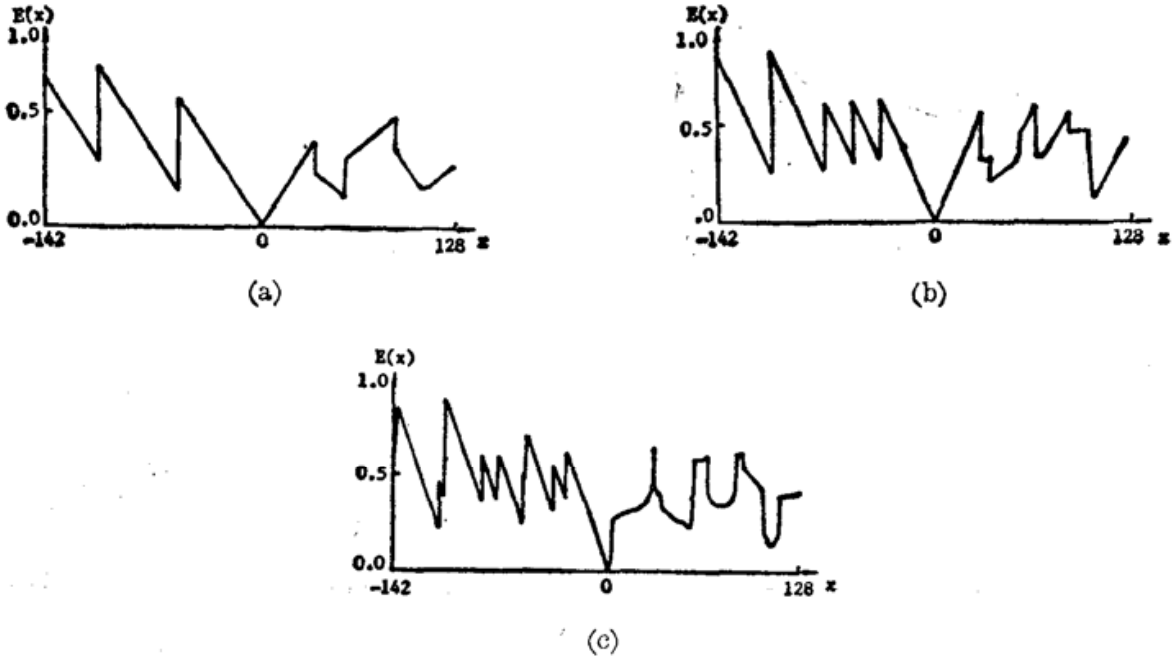


Fig. 2 The curve of $E(x)$ Vs. X at different wavelengths

(a) 3 calibrating wavelengths $\lambda_1\lambda_2\lambda_3$, $X'_0=585000$ nm, $\Delta X_0=28000$ nm; (b) 4 calibrating wavelengths $\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4$, X'_0 and ΔX_0 : same to (a); (c) 5 calibrating wavelengths $\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_5$, X'_0 and ΔX_0 : same to (a)

表 3 中给出了三个标定波长条件下误差函数 $E_0(K_2)$ 的 1, 2 序数极值与 K_2 等参数关系的计算结果; 表 4 中给出了与表 3 相同标定波长下误差函数 $E(x)$ 具有极小值所对应的修正整数 x 及相应的 $E(x)$ 值的实验结果。比较表 3 和表 4 的结果, 显然可见理论计算同实验结果是完全一致的, 计算得到的 1, 2 序数极小值之间的间隔分别为 107.31 和

Table 3 The first and second order minimum values at the three calibrating wavelengths

$\lambda_1=575.303$ nm $\lambda_2=586.1815$ nm $\lambda_3=591.7585$ nm $P_2=53.659$ $P_3=35.654$					$\lambda_1=575.303$ nm $\lambda_2=578.7895$ nm $\lambda_3=586.1815$ nm $P_2=163.867$ $P_3=53.192$				
K_2	K_2P_2	K_3	K_3P_3	$E_0(K_2)$	K_2	K_2P_2	K_3	K_3P_3	$E_0(K_2)$
2	107.31	3	106.96	0.0098	12	1966.40	37	1968.10	0.0321
4	214.63	6	213.62	0.01997	24	3932.80	74	3936.21	0.0641

Table 4 x corresponding with the minimum values of $E(x)$

$\lambda_1=575.603$ nm $\lambda_2=586.1815$ nm $\lambda_3=591.7585$ nm		$\lambda_1=575.303$ nm $\lambda_2=578.7895$ nm $\lambda_3=586.1815$ nm	
x	$E(x)$	x	$E(x)$
-106	0.0143	-1968	0.0229
1	0.0052	1	0.0062
+108	0.0112	+1969	0.0057

1966.40, 而实验得到的值分别为 107 和 1968。由计算结果和理论结果可得以下几点结论:

(1) 0 序数极小值与 1 序数极小值之间的间隔大于或等于所有周期 $P_i (i=2, 3, \dots, M)$ 中的最大值。因此, 对每个周期 P_i 而言, 应使其尽可能地大, 亦即确定该周期的两个标定波长 λ_1, λ_i 之间的差别要小(但又不能完全相同), 从而增大 0 序数极小值与 1 序数极小值之间的位置差别, 进而在初始厚度的给定误差范围内唯一地确定准确的光学劈尖厚度。另一方面, 对不同的周期 $P_i (i=2, 3, \dots, M)$ 而言, 当它们之间的差别小时, 0 序数极小值与 1 序数极小值的位置差别也小, 因而不利于唯一地确定光学劈尖的厚度, 所以 P_i 之间的差别应尽可能地大。总之, 对标定波长 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_M$, 为使 P_i 之间的差别大且其自身值也大, 初始波长 λ_{10} 应选择在不等式的两端值 λ_1 或 λ_M ; 而在 λ_1 和 λ_M 之中应选择 $|\lambda_2 - \lambda_1|$ 或 $|\lambda_M - \lambda_{M-1}|$ 小的那个波长, 譬如 $|\lambda_2 - \lambda_1| > |\lambda_M - \lambda_{M-1}|$, 则应选择 λ_M 为初始波长。

(2) 光学劈尖初始厚度的误差范围 ΔX_0 决定了 K_2 (包括其它的 K_i 值) 的可取值范围。显然, K_2 的可取值愈少愈有利于将 1 序数极小值限定在误差范围之外, 从而唯一地确定光学劈尖的厚度 X_0 。对于给定的误差范围 ΔX_0 , 为了确定唯一的修正整数 α , 应该使标定波长中至少有两个标定波长 λ_1, λ_i 满足

$$[4n(\lambda_i) \Delta X_0 / \lambda_i] < [(\lambda_i / n(\lambda_i))] | [(\lambda_i / n(\lambda_i))] - [(\lambda_1 / n(\lambda_1))] |, \quad (10)$$

亦即

$$|\lambda_i - [\lambda_1 n(\lambda_i) / n(\lambda_1)]| < [\lambda_i^2 / 4n(\lambda_i) \Delta X_0]. \quad (11)$$

上述讨论说明在给定的初始厚度的误差范围下, 标定波长的选择方式主要地决定了误差函数 $E_0(K_2)$ 的 0 序数极小值与 1 序数极小值的位置差别, 对标定波长选择方式的要求就是选择标定波长数目所应满足的一些约束条件。

考虑三个标定波长 λ_1, λ_2 和 λ_3 , 且满足 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 及 $|\lambda_1 - \lambda_2| < |\lambda_3 - \lambda_2|$, 那么应该以标定波长 λ_1 为初始波长, 从而周期 $P_2 = [(\lambda_2 / n(\lambda_2))] / |[(\lambda_2 / n(\lambda_2))] - [(\lambda_1 / n(\lambda_1))] |$, $P_3 = [(\lambda_3 / n(\lambda_3))] / |[(\lambda_3 / n(\lambda_3))] - [(\lambda_1 / n(\lambda_1))] |$ 。另外对给定的 ΔX_0 , 应该满足 $|\lambda_2 - [\lambda_1 n(\lambda_2) / n(\lambda_1)]| < [\lambda_2^2 / 4n(\lambda_2) \Delta X_0]$, 这样选择的三个标定波长能够在给定的初始厚度的误差范围内唯一地确定准确的光学劈尖厚度。实际情形下, 由不满足以上所述约束条件的三个标定波长确定准确的干涉序数及光学劈尖厚度是困难的。

本文讨论的标定波长数目与标定波长的选择方式以及给定的光学劈尖初始厚度的误差范围之间的关系发展了文献[4]中提出的改进的剩余小数法, 同时完善了文献[6]中提出的标定波长数目的有关论点成立所应具备的条件, 尤其是对于采用菲佐光学劈尖或法布里-珀罗标准具测量激光波长具有实际的指导意义。

感谢刘旭、李斌同志在使用连续波染料激光器时所提供的方便。

参 考 文 献

- [1] M. B. Morris *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, 23, No. 21 (Nov), 3862.
- [2] 沃敏政等;《中国激光》, 1989, 16, No. 11 (Nov), 651.
- [3] P. Lu *et al.*; *Opt. and Laser Tech.*, 1984, No. 8 (Aug), 206.
- [4] 张铁军;《光学学报》, 1991, 11, No. 2 (Feb), 176.
- [5] 天津大学等;《物理光学》, (国防工业出版社, 1980), 299.
- [6] M. 玻恩等;《光学原理》, (科学出版社, 1978), § 7.6.4.

Study on the number of calibrating wavelengths for calibration of optical wedge space

ZHANG TIEJUN [CHEN FANG]

(Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica Changchun 130022)

(Received 3 October 1990; revised 12 December 1990)

Abstract

The calibration of optical wedge space in Fizeau laser wavemeter is the precondition for the measuring laser wavelegth accurately. The number of calibrating wavelengths for the calibration of optical wedge space is studied in this paper. The analysing results show that the number of the calibrating wavelengths mainly depends on the selection style for the calibrating wavelengths and the error range of the optical wedge space.

Key words: optical wedge space, Fizeau laser wavemeter, the number of the calibrating wavelengths.