

双频激光测长的气象测试精度

刘永东

(清华大学精密仪器及机械系精密测量与测试国家重点实验室 北京 100084)

费业泰

(合肥工业大学精密仪器及机械系 合肥 230009)

提要 使用双频激光干涉仪测长时,必须对测量环境的气象条件进行修正,才能得到准确的测量结果。分析了由于采用不同精度的气象参数测试仪器给测量结果带来的影响。提出了根据使用的双频激光干涉仪精度,合理地选择相应精度气象参数测试仪器的原则和方法。

关键词 双频激光干涉仪,气象参数,误差修正

1 引 言

双频激光干涉仪测量长度是在标准状况下 ($p = 101325 \text{ Pa}$, $t = 20^\circ\text{C}$, $f = 1333.2 \text{ Pa}$, 海拔高度为 0 m) 进行的,稳定的激光波长值 $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$ 。但实际使用过程中,环境的气象参数不可能为标准状况,这就使激光波长发生了变化,必须用实际的气象参数对波长进行修正,才可得到准确的测量结果。实际气象参数是通过相应的仪器测得的,这时将会由于气象参数测试仪器精度达不到要求,造成实测参数与实际参数存在偏差,使波长修正结果产生较大误差,且随着测量长度增加,此测量误差也相应增大。

由此可知,使用双频激光干涉仪进行长度测量时,不对实际气象参数提出测量要求,采用统一输入标准状况的气象参数到干涉仪的分析仪中,或者不根据双频激光干涉仪的精度要求,任意地选择温度计、气压计和湿度计来测量实际气象参数,这样对波长进行修正将会带来较大误差,严重影响测量结果。

2 气象参数测试精度对测长的影响

用国产大恒公司的双频激光干涉仪进行测量时,当采用不同精度的气象测试仪时,所得结果数据也不同,见表 1。由于温度计分辨率不同,第一系列修正后的测量结果最大差值近 $1 \mu\text{m}$;由于使用的气压计分辨率不同,第二系列修正后的测量结果最大差值超过 $1 \mu\text{m}$ 。所使用的双频激光干涉仪极限误差为 $\delta_{\text{lim}} = \pm (0.2 + 5 \times 10^{-7} L) \mu\text{m}$,当测量长度 L 为 200 mm 和 1000 mm 时,其极限误差分别为 $0.3 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 。如果采用第一系列精度的气象测试仪器,当测量长度 $L = 1000 \text{ mm}$,所得结果误差达 $1 \mu\text{m}$,已经大于干涉仪的极限误差,这时使用高精度的

干涉仪来测量长度已失去意义。因此,不能任意选用气象仪器,气象参数测试仪的精度应和双频激光干涉仪的精度相匹配。

表 1 用不同精度气象仪器所得测量长度

Table 1 The measured lengths acquired by adopting the meteorological measurement instruments with different accuracies

testing series	display of meteorological instrument			testing length			
	$t / ^\circ\text{C}$	$P / \times 133 \text{ Pa}$	$f / \times 133 \text{ Pa}$	modified result/mm	errors/ μm	modified result/mm	errors/ μm
-	20	760	10	200	0	1000	0
-	20.5	760	10	199.9998	-0.2	999.999	-1
-	20.1	760	10	199.9999	-0.04	999.9995	-0.2
=	20.1	765	10	199.9996	-0.4	999.998	-2
=	20	761	10	199.99992	-0.06	999.9996	-0.3

3 气象参数测试精度的确定

双频激光干涉仪测量长度的计算公式为

$$L = N \times \frac{\lambda_n}{2n} \quad (1)$$

式中 n 为实际测量时空气的折射率; λ_n 为测量时的实际波长; N 为干涉条纹变化的周期数。

当折射率 $n = n_0 = 1$ 时,有

$$L = N \times \frac{\lambda_0}{2}$$

λ_0 为近似标准状况下的激光波长。

由于实际气象参数测试仪器存在误差,测量空气折射率也不准确,修正波长 λ_0 会带来误差。若折射率测试误差为 δ_n ,给测量长度带来的误差为 δ_L ,则有

$$\delta_L = \frac{\partial L}{\partial n} \delta_n = - \frac{N \lambda_n}{2n^2} \delta_n \quad (2)$$

近似取 $n = 1$, $\lambda_n = \lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$,得

$$\delta_L = -0.3164N \delta_n \quad (3)$$

根据微小误差取舍原则^[1],取

$$\delta_L \leq \frac{1}{5} \delta_{\text{lim}} = \pm \frac{1}{5} (0.2 + 5 \times 10^{-7} L)$$

由式(3),可得

$$\delta_n \leq \pm 0.6321 (0.2 + 5 \times 10^{-7} L) / N \quad (4)$$

这时,可以忽略气象参数测试误差对测量结果的影响。

为了确定气象参数的测试精度,必须找到气象参数与介质折射率之间的物理学关系,根据 Bebg Edlén^[2~4]推出的公式

$$(n - 1)_{\text{pf}} = \frac{P \times 2.765175 \times 10^{-4} \times (1 + 0.613 \times 10^{-8} p - 0.00998 \times 10^{-8} p t)}{96095.43 \times (1 + 0.0036610t)} \quad (5)$$

此式适用的气象条件为:温度为 15~ 30 $^\circ\text{C}$,气压值在 93324~ 106656 Pa 范围内,通常采用的测量条件都能满足这一要求。

假设气象测试仪的精度分别为 δ_t , δ_p 和 δ_f , 由式(5) 可得到^[1]

$$\delta_n = \sqrt{\left[\frac{\partial n}{\partial t}\right]^2 \delta_t^2 + \left[\frac{\partial n}{\partial p}\right]^2 \delta_p^2 + \left[\frac{\partial n}{\partial f}\right]^2 \delta_f^2} = \sqrt{D_t^2 + D_p^2 + D_f^2} \quad (6)$$

式中, $D_t = \frac{\partial n}{\partial t} \delta_t$, $D_p = \frac{\partial n}{\partial p} \delta_p$, $D_f = \frac{\partial n}{\partial f} \delta_f$ 。

令 $K_t = \frac{\partial n}{\partial t}$, $K_p = \frac{\partial n}{\partial p}$, $K_f = \frac{\partial n}{\partial f}$, 对式(5) 微分得

$$K_t = \frac{-1.01233 \times 10^{-6} p - 3.380198 \times 10^{-14} p^2}{96095.43 \times (1 + 0.0036610t)^2}$$

$$K_p = \frac{2.765175 \times 10^{-4} + 3.390105 \times 10^{-12} p - 5.51928 \times 10^{-14} p t}{96095.43 \times (1 + 0.0036610t)}$$

$$K_f = -0.42 \times 10^{-9}$$

用标准状况下的气象参数近似代入, 可得

$$K_t = -9.30 \times 10^{-7} \quad K_p = 2.68 \times 10^{-9} \quad K_f = -0.42 \times 10^{-9}$$

按照等作用原理, 令 $D_t = D_p = D_f$, 则由式(6) 可得

$$D_t = \delta n / \sqrt{3} = K_t \delta t$$

$$\delta_t = \delta n / \sqrt{3} K_t \leq \pm 0.6321(0.2 + 5 \times 10^{-7} L) / \sqrt{3} K_t N \quad (7)$$

同理, 得

$$\delta_p = \delta n / \sqrt{3} K_p \leq \pm 0.6321(0.2 + 5 \times 10^{-7} L) / \sqrt{3} K_p N \quad (8)$$

$$\delta_f = \delta n / \sqrt{3} K_f \leq \pm 0.6321(0.2 + 5 \times 10^{-7} L) / \sqrt{3} K_f N \quad (9)$$

4 结 论

双频激光干涉仪的测长范围为 0~ 30 m, 以常用的测量范围 $L = 1$ m 代入计算, 得

$$\delta_t \leq 0.08^\circ\text{C} \quad \delta_p \leq 30.2 \text{ Pa} \quad \delta_f \leq 192.5 \text{ Pa}$$

这时, 用分辨率为 0.01°C 的温度计、30 Pa 的气压计及 133.32 Pa 的湿度计就可以满足这项精度要求。但是, 当测量长度增加时, 需要采用更高精度的气象测试仪器。同时, 还可以看出, 对湿度计的精度要求较低, 对温度计、气压计的精度要求较高。因此, 需根据实际可能性首先选定气压计, 然后再确定温度计和湿度计。此外, 根据计算结果经过调整以后所选定的气象参数测试仪, 还需按式(4) 进行验算, 使气象参数测试误差不超过允许范围。

另外, 采用 Edlén 公式计算空气折射率时, 除了考虑气压、温度、湿度等参数的测量误差外, 还必须考虑到当测量环境的空气成分偏离正常空气时所产生的误差^[5]。在一般的实验室环境中, 空气成分的改变主要是 CO_2 含量的增加, O_2 的减少。空气中 CO_2 每增加 1 ppm (parts per million), 折射率增加 1.45×10^{-10} 。可根据 CO_2 的实际含量修正折射率。

参 考 文 献

- 1 Fei Yetai. Error Theory and Data Processing. Beijing: Mechanical Industrial Publishing House, 1988, 47 (in Chinese)
- 2 B. Edlén. The refractive index of air. *Metrologia*, 1966 (2): 12~ 16
- 3 K. P. Birch, M. J. Downs. An updated Edlén equation for the refractive index of air. *Metrologia*, 1993 (30): 155~ 162

- 4 Frank E. Jones. The refractivity of air. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1981, 86(1) : 27~ 32
- 5 Sun Zubao. The Design for Measuring Tool. Beijing : Mechanical Industrial Publishing House, 1988, 341 (in Chinese)

The Meteorological Testing Accuracy of a Double Frequency Laser Interferometer for Length Measurement

Liu Yongdong

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Fei Yetai

(Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract When a double frequency laser interferometer is used for length measurement, the meteorological conditions of the testing environment must be revised in order to get the accurate testing results. This paper analyses the effects on testing results caused by adopting the meteorological parameters measurement instruments with different accuracies and presents methods and ways for rationally choosing the meteorological measurement instruments with relevant accuracy.

Key words double frequency laser interferometer, meteorological parameters, error revision

轻便式全固体激光投射仪*

激光投射仪(或激光投影机)是激光表演的先进设备,目前大多数产品均以气体激光器为光源,体积大、耗电多、需水冷,不便移动。

最近我们采用半导体激光和半导体激光泵浦固体激光倍频技术,研制成功轻便式全固体激光投射仪。该仪器使用波长为 635 nm 和 530 nm 红绿两色光束,功率分别为 10 mW 和 20 mW。具有两个投射输出通道,其中一个通道装有计算机控制的振镜(检流计型),由此输出文字、图案和动画。另一个通道经旋转的全息镜,产生转动的衍射花样。控制激光电源可以对光强进行调制,从而改变红、绿光的比例,使光束混合后可以得到黄色等多种颜色。

该仪器体积小(约 $0.5 \times 0.4 \times 0.3$ (m))、耗电少(< 400 W, 220 V 供电)、不用水冷,属于当前国际上先进的激光演示装置。这种多媒体设施,可在展示会、商厦、会堂、娱乐场所内作广告和娱乐用,可作为光指示器用于加工和医疗行业,同时也是文教单位需要的高新技术演示仪器和科教用具。

(中国科学院上海光机所 梁培辉 叶 韧 雷建求 任 虹 施懿范
1998-03-18 收稿)

* 中国科学院上海分院择优支持项目。