

3.39 μm 双波长拍波干涉仪绝对测量 大直径方法的研究*

冯其波

梁晋文

(北方交通大学物理系, 北京 100044)

(清华大学精密系, 北京 100084)

提要 在介绍了 3.39 μm 双波长拍波干涉仪测量原理的基础上, 提出了激光瞄准大型工件内外径测量点和 3.39 μm 双波长拍波干涉仪绝对测量大直径的新方法, 给出了瞄准定位的实验结果, 并对测量系统的误差进行了分析。分析表明: 测量系统测量 10 m 直径时, 其测量误差小于 0.03 mm。

关键词 拍波干涉仪, 瞄准定位, 大直径测量, 绝对测量

目前测量 2 m 以上大直径的手段依然停留在传统的机械方法上, 如 π 尺等。这些方法只能测量 7, 8 级精度的零件。对于高精度的零件, 其大直径的尺寸实际上处于无法测量的状态, 国外也无现成的仪器出售。而大型关键零件的尺寸精度是保证诸如发电机组中大轴、大孔类零件质量的一个重要因素, 因此大直径高精度测量是我国大中型企业许多重大技术装备制造中普遍提出又急需解决的共性技术测量难题。本文提出由激光准直仪、单个五角棱镜测头、定位块以及四象限光电池构成的瞄准定位系统, 使用 3.39 μm 双波长拍波干涉仪实现对大型工件内外径的高精度绝对测量。

1 3.39 μm 双波长拍波干涉仪的测量原理

图 1 所示为 3.39 μm 双波长拍波干涉仪的原理图。图中 He-Ne 激光器同时输出 $\lambda_1 = 3.3922 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 3.3912 \mu\text{m}$ 的双波长激光, 通过分光镜分为两部分, 一部分射向测量镜, 另一部分射向参考镜。经测量镜、参考镜反射后又在分光镜处重合。其干涉信号由两个红外 InAs 探测器接受。当激光器处于两波长等功率输出时, 探测器得到的信号与反射镜位置之间存在如下关系

$$i[x(t)] = D \cdot C + 2I \cos\left(\frac{x(t)2\pi}{\lambda_s}\right) \cos\left(\frac{x(t)4\pi}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中, $2I$ 为交变信号的振幅; $x = l_1 - l_2$ 为干涉仪测量臂与参考臂之间的光程差, $\lambda_s = \lambda_1 \times \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$; $\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$ 。

* 本方法及装置已获国家专利, 专利号 9222069.7

收稿日期: 1994年1月3日; 收到修改稿日期: 1994年2月28日

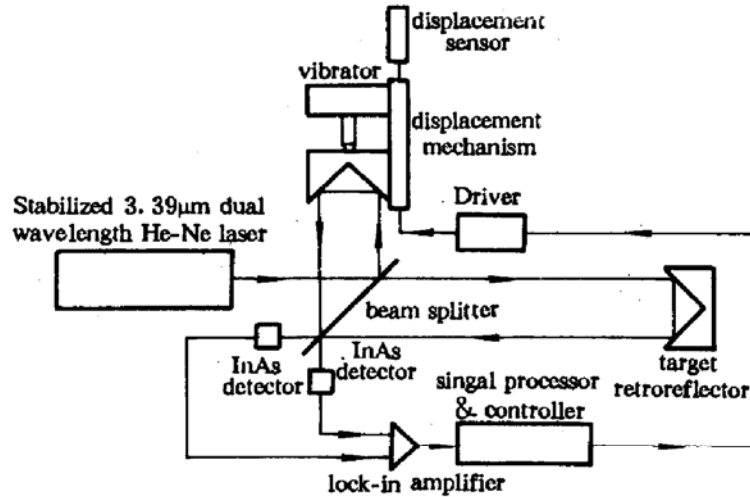


Fig. 1 Schematic diagram of a 3.39 μm dual wavelength beat wave interferometer

从式(1)可以看出:探测器得到的是拍波信号。即测量镜每移动 $\lambda_s/2$ 波长,测量信号重复一次。当测量系统满足多级合成波长逐级精化的基本方程时^[1],存在如下测量方程式

$$L = \lambda_s \times (m_s + e_s)/2 \quad (2)$$

式中, λ_s 为合成波长; m_s , e_s 分别为合成波长所对应的整数和小数, m_s 是利用被测长度 L 的粗测值 L_c 来确定的。容易证明,只要粗测值满足条件

$$\Delta L_c = |L - L_c| < \lambda_s/4 \quad (3)$$

则 m_s 就可由 L_c/λ_s 被唯一确定^[1]。 e_s 通过移动干涉仪参考镜寻找零点等方法来得到,测量系统中的振镜是为将直流信号调制成交流信号以便于寻找零点而设置的。

因此干涉仪通过测量 m_s 和 e_s , 在不需要导轨的情况下绝对测量出测量镜位移前后之间的距离 L 。

2 3.39 μm 双波长拍波干涉仪绝对测量大直径的原理

图2所示为3.39 μm 双波长拍波干涉仪绝对测量大直径的原理图。整个系统由三大部分组成:即由激光准直仪、单个五角棱镜测头、定位块及四象限光电池构成的瞄准定位系统;由3.39 μm 双波长拍波干涉仪、角隅棱镜、平台及定位机构构成的测长系统以及由测量信号处理控制电路和计算机构成的测量控制系统。

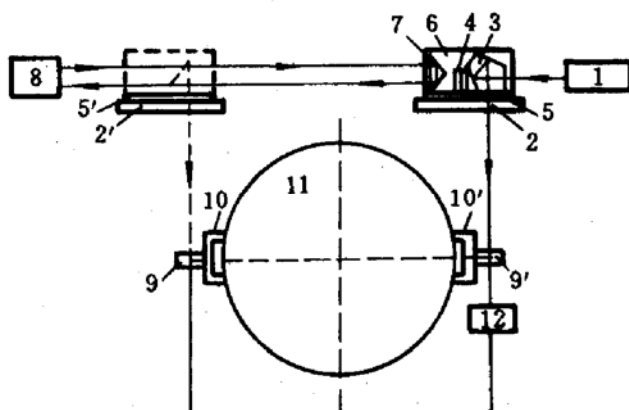


Fig. 2 Schematic diagram of absolute measurement of a large diameter by a 3.39 μm dual wavelength beat wave interferometer

- 1: Laser collimator; 2, 2': Base platform; 3: Pentagonal prism;
- 4, 9, 9': Quadrant silicon photodiode; 5, 5': Positioner;
- 6: Measurement head; 7: Corner cube prism; 8: 3.39 μm beat wave interferometer; 10, 10': Positioning chunk; 11: Workpiece;
- 12: Signal processor and controller

由激光准直仪出射的光线,经单个测量头中的五角棱镜后分为两部分。一部分光线直接射向与五角棱镜固定在一起的四象限光电接收器,用来调整测量头的位置。测量头在测量过程中,通过调节机构,使测量头在瞄准直径两测点时相对于准直光线在垂直于测量线的两个方向上的位置保持不变,从而减少测量头定位误差对测量的影响;另一部分光线经五角棱镜反射后与入射光线成 90°,测量头分别位于两测量平台时可使该反射光线依次射向位于被测工件两测量端点的两个定位块上的光电接收器。调整两个定位块在工件上的位置,使入射到定位块的光线与其反射光线重合,以保证两定位块处于正确的测量位置^[1,2]。因此激光准直仪、单个五角棱镜、定位块以及四象限光电接收器一起构成大型工件内外径的瞄准和定位系统。利用单个测量头分两次瞄准可以保证两瞄准光线的平行性,减少阿贝测量误差。

测量前,以准直光线为基准,首先调整两平台 2、2',使之大致平行且位于同一水平面上,然后再以测量头上的四象限光电接收器中心为目标,测量头分别位于两测量位置时,依次调整好定位机构 5、5' 的位置,可保证测量头在高度和左右两方向上相对于准直光线的位置正确性,利用经棱镜表面反射的光线与入射光线重合可保证测量头在两测量位置时的方向正确性。经激光准直仪和测量头出射的光线依次瞄准定位块上的四象限光电接收器中心,3.39 μm 双波长拍波干涉仪直接测量出两个四象限光电接收器中心之间的距离 L ,通过下式简单的计算,可得到被测直径的大小:

$$D = \sqrt{(L - c)^2 + s^2} \quad (4)$$

式中, L 为两个四象限光电接收器中心之间的距离, c 为两个定位块合在一起时两四象限光电接收器中心之间的距离,为一结构常数, s 为定位块的槽宽。

在实际的测量系统中,这些调整都是通过步进电机自动进行的。测量时,只需将测量头依次放在两平台上并使得光线能进入光电接收器,计算机以准直光线为基准自动控制步进电机先调整好测量头的位置,再自动瞄准位于被测工件上的四象限光电接收器中心,进行自动调零和测量。

图 3 所示为实验原理图。测量前,测量头以自身的四象限光电接收器中心为参考点,相对于准直光线在 y, z 两方向上通过调整定位机构调零后,再以测量定位块上的四象限光电接收器中心为参考点,相对准直光线在 x 方向通过调整机构调零。用两个电感测微仪可分别测量出测量头来回搬动时在两测量位置上 x 方向的位置变化量,此 x 方向的位置变化量反映了测量头瞄准被测工件直径上两测量点时产生的误差。测量 20 次为一组数据,测量结果如表 1 所示。

Table 1 Results of aiming and positioning experiment

Results	3σ (μm)			
Point 1	3.2	2.1	3.9	2.2
Point 2	3.2	2.8	5.1	3.2
Positioning and aiming error	4.5	3.5	6.4	3.9

从表 1 可以看出,激光瞄准 1.5 m 直径时产生的最大误差为 6.4 μm,相对误差为 4.3×10^{-6} ,因此激光瞄准大型工件内外径测量点的相对精度优于 5×10^{-6} ,使用 3.39 μm 双波长拍波干涉仪可实现对大直径高精度测量。

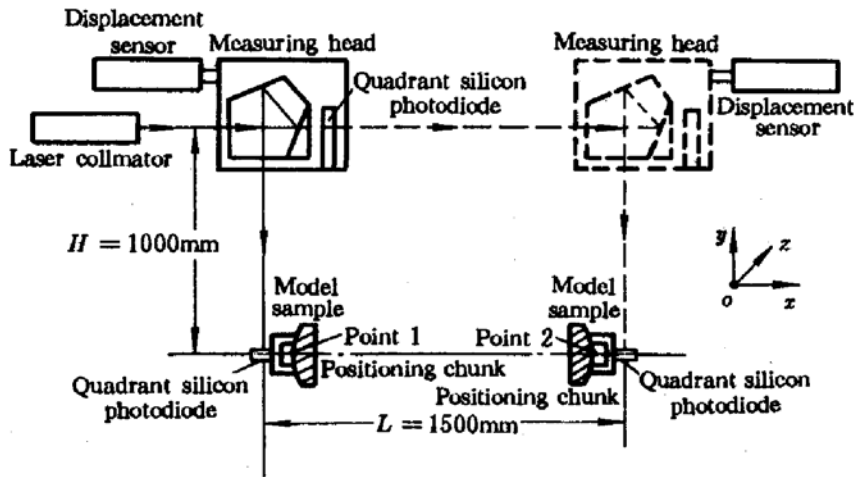


Fig. 3 Schematic diagram of aiming and positioning experiment

3 误差分析

由直径计算公式(4)两边微分并简化后得到

$$\delta D = \pm \sqrt{\delta^2 L + \delta^2 c + (s/D)^2 \delta^2 s} \quad (5)$$

式中, δL 为测量两个四象限光电池中心距离 L 时产生的误差; δc 为测量定位块结构常数 c 时产生的误差; δs 为测量两个定位块槽宽 s 时产生的误差。

测量 c 这一结构常数引起的误差 δc 很小, 因 s/D 是一个很小的系数, 测量 s 引起的误差 δs 可以忽略不计, 因此 δL 是主要的测量误差。

由图 2 所示的测量原理知: 当两瞄准线不平行时, 测量系统产生阿贝误差, 其误差大小与测量臂长及两瞄准线夹角的正弦成比例; 当测量线和被测量线不平行时, 测量系统产生余弦误差, 其误差大小与被测直径的大小及测量线与被测线夹角的平方成正比; 此外还有一部分误差既与测量臂长无关, 又与测量距离无关, 在此称为常数项误差。因此测量系统的误差可分为阿贝误差、余弦误差和常数项误差。

3.1 阿贝误差

若激光光线为一理想的几何光线, 相对于这一几何光线, 测量头在测量直径两端点时其位置保持不变, 则两瞄准线始终平行, 测量系统没有阿贝误差。实际上, 由于激光光线存在漂移, 测量头也存在一定的定位误差, 这些因素将给测量带来阿贝误差。

3.1.1 激光角漂产生的阿贝误差 δL_{11}

图 4 所示, 在测量近点时, 激光光线为实线所在的位置, 在测量远点时, 激光光线为虚线所在的位置, 由此引起的瞄准误差为

$$\delta L_{11} = H \times \sin(\delta\theta_1) + (H + D) \times \sin(\delta\theta_2) \quad (6)$$

式中, $\delta\theta_1, \delta\theta_2$ 分别为激光在近点和远点的漂移角; H, D 分别为测量臂长和被测直径。

在测量过程中测量头始终以光线定位, 即在测量远点时, 测量头在 y 方向上移动了 $D \times \delta\theta_2$ 距离, 此时激光角漂产生的瞄准误差为

$$\delta L_{11} = H \times [\sin(\delta\theta_1) + \sin(\delta\theta_2)] \quad (7)$$

考虑到激光漂移的随机性, 取漂移值为最大值 $\delta\theta$, 则上式可进一步写为

$$\delta L_{11} = \sqrt{2} \times H \times \sin(\delta\theta) \quad (8)$$

若测量 10 m 直径,测量臂长为 6 m,激光准直仪的准直精度为 2×10^{-6} ,由此产生的瞄准误差为

$$\delta L_{11} = 17.0 \mu\text{m}$$

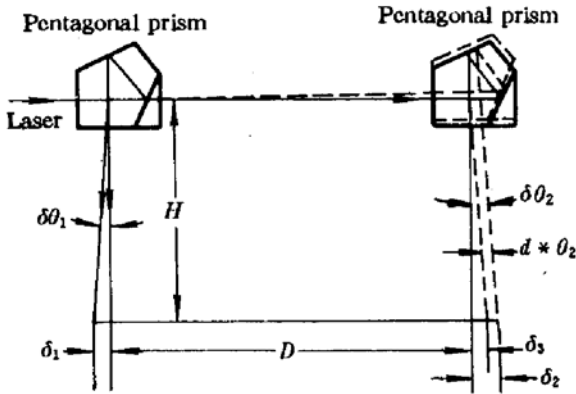


Fig. 4 Aiming error produced by laser angular drift

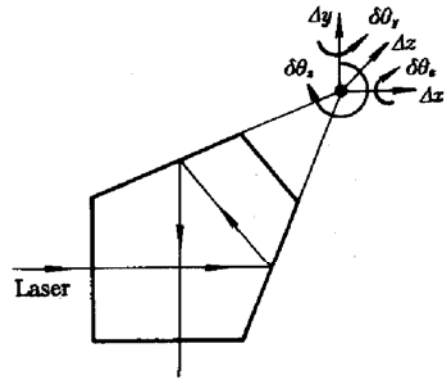


Fig. 5 Measurement error produced by position error of a pentagonal prism

3.1.2 测量头定位误差产生的测量误差 δL_{12}

测量时由于测量头在测量两 endpoint 时,其位置相对于准直光线会产生一定的误差,造成测量头中五角棱镜相对于光线位置的变化,给测量带来一定的误差。

图 5 所示,在测量截面里, Δx , Δy 会使光线产生平移,但因 Δx 在测量方向上, Δy 产生的光线平移可以通过补偿予以消除,因此 Δx , Δy 对测量无影响。在测量截面里五角棱镜的转动角 $\delta\theta_z$ 只会使光线发生平移,其平移的大小通过将棱镜展开后可由下式进行计算

$$\delta x = L \times \sin(\delta\theta_z) \times \left(1 - \frac{\cos(\delta\theta_z)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\delta\theta_z)}} \right) \quad (9)$$

式中, n 为五角棱镜的折射率, L 为五角棱镜的展开长度。

若测量 10 m 直径时,使 $|\delta\theta_z| < 2'$ 是很容易做到的,此时 $\delta x < 10 \mu\text{m}$ 。故在测量截面里五角棱镜的位置误差对测量产生的误差较小。

在非测量截面里, Δz 对测量无影响; $\delta\theta_z$ 不会改变五角棱镜的转向角,只会使出射光线偏离测量截面,它给测量带来的余弦误差很小,可以忽略; $\delta\theta_y$ 会改变五角棱镜的转向角,给测量带来一定的阿贝误差,但通过分析计算表明,即使 $\delta\theta_y$ 在 $\pm 1^\circ$ 范围内变化,给测量带来的阿贝误差相对于激光漂移产生的阿贝误差仍可忽略不计。

因此测量 10 m 直径时,测量头的位置变化给测量带来的误差 $\delta L_{12} < 10 \mu\text{m}$ 。

3.2 余弦误差 δL_2

图 6 所示,当测长系统测量方向与被测直径方向存在平行性偏差时,造成的余弦误差为

$$\Delta_1 = L - D = L[1 - \cos(\delta\theta_{21})] \quad (10)$$

因为 $\delta\theta_{21}$ 比较小,按泰勒级数展开并略去高次项后可得

$$\Delta_1 = L \times \delta^2\theta_{21}/2 \quad (11)$$

同样测量方向与被测工件轴线的垂直度偏差造成的余弦误差也可按上式计算,故系统产生的总余弦误差为

$$\delta L_2 = L \cdot \sqrt{(\delta\theta_{21})^4 + (\delta\theta_{22})^4}/2 \quad (12)$$

其中, $\delta\theta_{21}$, $\delta\theta_{22}$ 分别为平行性角度和垂直性角度偏差。

若取所有调整角度偏差为 $5'$, 测量 10 m 直径时, 其余弦误差为 $15 \mu\text{m}$ 。

但当平行性角度偏差为 $5'$ 时, 在测量 10 m 直径时, 测量线与被测线之间距离变化为

$$A_2 = L \times \delta\theta_{21} = 14.5 \text{ mm} \quad (13)$$

在实际调整时, 容易保证测量线与被测线之间距离的变化量 $< 5 \text{ mm}$, 测量 10 m 直径时按式(12)计算得到的余弦误差可以忽略不计。且被测直径越大, 其平行性角度误差越容易控制。

同样当定位块在工件存在位置误差时, 表现为入射到定位块上的光线和其反射光线在准直仪出射处不重合。测量 10 m 直径时, 调整定位块在工件上的位置使得其不重合度 $< 5 \text{ mm}$, 其误差可以忽略不计。

3.3 常数项误差 δL_0

引起测量系统常数项误差的主要因素包括: 电路部分误差、标定两定位块中心距 c 时产生的测量误差。通过计算这一部分的误差为 $5 \mu\text{m}$ 。

3.4 总误差 δL

从以上的分析可以看出, 激光准直仪角漂造成的阿贝误差是测量系统的主要误差之一, 它与测量臂长成比例, 因此必须提高激光准直仪的精度。在 10 m, 20 m 处, 研制的单模光纤激光准直仪在 1 h 内漂移的实验结果如表 2 所示。

Table 2 The results of laser drift experiment on the single mode fiber laser collimator

Group number	Distance: 10 m		Distance: 20 m	
	σ : (μm)	Relative drift	3σ : (μm)	Relative drift
1	8.6	0.9×10^{-6}	40.1	2.0×10^{-6}
2	8.4	0.8×10^{-6}	24.4	1.2×10^{-6}
3	22.8	2.3×10^{-6}	9.3	0.5×10^{-6}
4	11.3	1.1×10^{-6}	18.6	0.9×10^{-6}
5	23.1	2.3×10^{-6}	24.2	1.2×10^{-6}
6	16.1	1.6×10^{-6}	22.0	1.1×10^{-6}

从表 2 可以看出, 单模光纤激光准直仪在 20 m 范围内 1 h 的相对漂移值为 $0.5 \sim 2.5 \times 10^{-6}$ 。由此产生的阿贝误差按式(8)计算。

引起测量系统误差的另一个主要原因是测长系统产生的误差, 与测量直径成比例。3.39 μm 双波长拍波干涉仪的测量误差 δL_3 为^[3] $\pm (10 + L) \mu\text{m}$ 。

测量 10 m 直径时, 其测量误差为 $20 \mu\text{m}$ 。故测量 10 m 直径时, 其测量系统的测量总误差为

$$\delta L = \sqrt{(\delta L_0)^2 + (\delta L_{11})^2 + (\delta L_{12})^2 + (\delta L_2)^2 + (\delta L_3)^2} = 32.2 \mu\text{m} \quad (14)$$

在测量 10 m 直径时, 若调整测量线与被测线距离变化在 5 mm 以内时, 产生的余弦误差可以

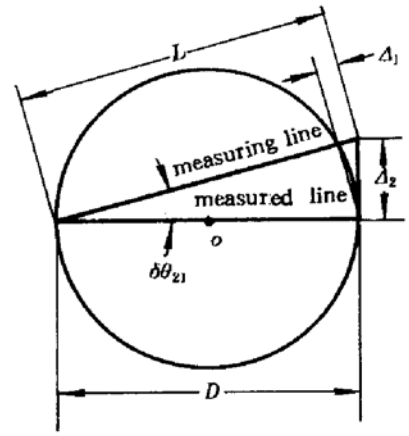


Fig. 6 The cosine error produced by the system

忽略,此时测量系统的测量总误差为

$$\delta L = \sqrt{(\delta L_0)^2 + (\delta L_{11})^2 + (\delta L_{12})^2 + (\delta L_3)^2} = 28.5 \mu\text{m} \quad (15)$$

因此 3.39 μm 双波长拍波干涉仪绝对测量 10 m 直径的误差小于 33 μm,测量系统测量的相对精度优于 5×10^{-6} 。

参 考 文 献

- 1 邓罗根,田 芊. 红外拍波锁定型绝对距离干涉仪的研究. 计量学报, 1991, 12(4): 241
- 2 冯其波,梁晋文,田 芊. 激光高测量大直径装置,中国实用新型专利,专利号:9222069.7. 1992
- 3 邹大挺,田 芊,梁晋文等. 红外双谱线 He-Ne 激光用于绝对距离合成波干涉计量的两个方案. 中国激光, 1992, 19(1): 31

Study of Absolute Measurement of Large Diameters by a 3.39 μm Dual Wavelength Beat Wave Interferometer

Feng Qibo

(Department of Physics, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Liang Jinwen

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract On the basis of a brief description of the measurement principle of a 3.39 μm dual wavelength beat wave interferometer, a new method of aiming and positioning the measuring points of a large dimension workpiece diameter is put forward. The high precise absolute measurement of a large diameter without a guide is realized by using a 3.39 μm dual wavelength beat wave interferometer. The results of aiming and positioning experiment are given. The measurement error of the system is analysed. The error analysis indicates that the uncertainty (3σ) in measuring a diameter of 10 meters is less than 0.03 mm.

Key Words beatwave interferometer, aiming and positioning, large diameter measurement, absolute measurement