

文章编号 1004-924X(2011)11-2551-07

圆锥量规锥度的高精度光学干涉法测量

康岩辉*, 张 恒

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要:针对超精密数控机床对圆锥量规锥度高精度测量的需求,研究了一种将“大数”和“小数”相结合,准确测量圆锥量规锥度的方法。介绍了锥度测量系统的基本原理及组成,给出了实验测量结果,分析了测量系统的不确定度。该测量方法利用最大分度间隔误差为 $0.10''$ 的多齿分度台构成高准确度分度系统保证测量“大数”部分的准确性,采用激光偏振干涉装置及精密回转工作台组成小角度测量系统保证测量“小数”部分的精度,而双光束白光干涉系统实现了测量位置的精确定位。实验和分析结果表明,该方法在不确定度置信因子 k 为2时,锥度测量系统的扩展不确定度约为 $0.24''$,优于 $0.3''$,可实现圆锥量规任意锥度的高精度测量。

关键词:光学干涉法;圆锥量规;锥度测量

中图分类号:TB922;TH744.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111911.2551

High precision measurement of taper for taper gauge by optical interference method

KANG Yan-hui*, ZHANG Heng

(National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

* Corresponding author, E-mail: yanhuikang@163.com

Abstract: For ultra-precision Numerical Control (NC) machine tools in advanced manufacturing industry, a high precision measuring method for the taper of a taper gauge was proposed by combining the integral and fractional parts together. The primary principle and the composition of the system were described, and the experimental measurement of a taper gauge was implemented. Moreover, the measurement uncertainty of the system was analyzed. In this method, the high precision indexing system containing a multi-tooth indexing table with an accuracy of $0.10''$ was used to ensure the precision and reliability of the integral part, and the laser polarization interference device and a precision rotary table was combined into an angle measuring system to accurately measure the fractional part. Then, the dual-beam white light interference system was used for an accurate positioning. The experiment and analysis results indicate that the measurement uncertainty can be less than $0.3''$ when the uncertainty confidence level (k) is 2. The method can realize the high precision taper measurement for any

收稿日期:2011-03-28;修订日期:2011-05-17.

基金项目:国家重大科技专项资助项目(No. 2011ZX04014-061);中国计量科学研究院技术改造项目(No. 24-AJG1102);中国计量科学研究院长度所基本业务费资助项目(No. 24-YS1001)

taper gauges.

Key words: optical interference method; taper gauge; taper measurement

1 引言

圆锥量规又称锥度量规,是实现检验圆锥配合工件的锥角和圆锥直径的量具,在机械制造业中应用广泛,对于各种机床主轴锥孔的测量尤为重要,是机床精度的决定性因素之一。按锥度种类分,圆锥量规有公制圆锥量规和莫氏圆锥量规两种^[1-2]。近年来,随着超精密数控机床及高速切削加工的不断发 展,空心短锥刀柄(Hollow Shank Kegel, HSK)的刀具系统已经问世,且应用日趋广泛,目前国外已有 HSK 标准^[3-4]。对这些圆锥量规(包括 HSK 锥度规)的锥度进行高精度的测量已成为提高我国机械工业制造水平的重要环节之一。

国内大部分单位和企业多采用万能工具显微镜、正弦规以及卧式测长机等设备对圆锥量规的锥度进行测量。万能工具显微镜配备有测角目镜,装在上方的度盘可作为角度标准,测量时用目镜分划板上的米字刻线瞄准,并利用纵向、横向导

轨及顶针架等进行调整,实现锥度测量;正弦规法是根据三角函数中正弦的定义,利用量块、平板、测微计等测量角度的两个边长,最终求得被测角度值。这些方法测量精度较低,而且出现各企业锥度基准不统一、无法互换的现象,不能满足机械工业及国家高端装备制造的发展要求。

为实现我国锥度量规锥度的精确测量以及锥度量值的统一与溯源,本文研究了一种高精度光学式圆锥量规锥度的测量方法,利用高精度分度系统准确测量锥角的“大数”,采用偏振激光小角度干涉系统精确测量锥角的“小数”,将“大小数”有机结合,最终完整得到被测圆锥量规的锥度值^[5]。

2 测量系统原理及结构

2.1 测量系统原理

圆锥量规锥度的光学干涉式测量系统原理如图 1 所示,主要由多齿分度装置、偏振激光干涉、双光束白光干涉、精密旋转工作台、数据采集与处理系统等若干部分组成。

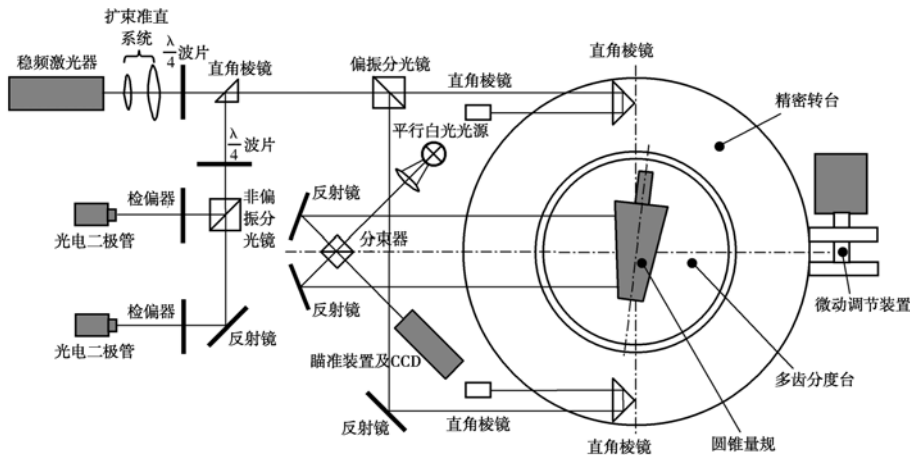


图 1 锥度测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of taper measurement system

圆锥量规以 V 型架支撑并放置于多齿分度台上。测量时,首先将量规被测母线对准两平行入射白光光束,通过微动调节机构旋转精密转台进行精确调整并用经调焦望远镜后成像在 CCD

像面上的干涉图像瞄准,使白光在圆锥量规母线上相等距离的两点反射形成的等光程干涉零级条纹对准十字分划板上的竖直刻线,将小角度干涉仪计数器清零作为测量起始位置;然后按量规锥

角标称值旋转多齿分度台,将圆锥量规的另一条母线正对两白光光束;最后再次旋转精密转台,使放置其上的多齿分度台和量规一同旋转,并通过白光干涉对准零级干涉条纹,此时激光小角度干涉仪计数器得到的就是锥角值的小数部分。将多齿分度台的转动角度和小角度干涉仪的测量角值相加减,从而准确测得圆锥量规的锥角大小。

2.2 高准确度分度系统

多齿分度台是检测角度的精密仪器,具有重复精度和自动定心精度高,结构简单等诸多优点。多齿盘是一对直径、齿数和齿形等完全相同的平面向心齿轮,它每一个齿的形状、精度、节距等几乎完全相等。在上下两齿盘的相互啮合中,由于齿的啮合平均效应作用,使其获得极高的分度精度^[6]。

系统采用的是特殊定制的 720 齿盘,分度值为 0.5° ,经检定,其最大分度间隔误差小于 $0.10''$ (不确定度置信因子 $k = 3$),测角重复性小于 $0.02''$,可在本系统中作为高精度分度装置使用。

2.3 偏振激光小角度测量系统

小角度测量法是基于正弦原理将小角度的测量转化为线度的测量,只需已知直角三角形的斜边 R ,测量出小角度的对边 H ,被测角可表示为:

$$\alpha = \arcsin \frac{H}{R}. \quad (1)$$

系统采用兰姆凹陷稳频的 He-Ne 激光器产生线偏振光,通过 $\lambda/4$ 波片后成为圆偏振光,再经偏振分光镜分光面后分解为相互正交的 P, S 两个分量;两光束分别入射至位于转台上的直角棱镜和固定在工作台上的直角棱镜后返回合为一束,返回光在竖直方向与入射光分开一定的距离,再经 $\lambda/4$ 波片成为带有干涉信息的旋转线偏振光;利用非偏振分光镜分为两束,并通过两光轴方向相差 45° 的检偏器得到相位差为 90° 的信号,最终由光电探测器接收,进行辨向细分处理^[7-9]。

2.4 白光干涉定位系统

由白炽灯作光源的光线经透镜成平行光束后,通过分光棱镜分成两束,其中一束光经全反射镜反射后投射到被测锥体母线上靠近锥柄一端的抛光曲面上并反射回去,另一束光经全反射镜反射后投射到母线上另一端的曲面上并反射回去,两束光在分光棱镜的分光面上相会后产生干涉。通过可变焦距望远镜及 CCD 相机后,可在监视屏

幕上观察到放大后的白光干涉图像^[10-11]。

由于被测物体是锥形轴,两相干光束是从具有接近相等的曲率半径圆弧面上反射,当干涉光程差接近零时,可观察到弯曲状的彩色干涉条纹。干涉条纹的弯曲程度随被测锥角的减小而降低,并直至近于直线条纹。图 2 给出了几种不同锥度情况下的干涉条纹形状,文中以干涉图像中的零级条纹作为量规的定位对准线。

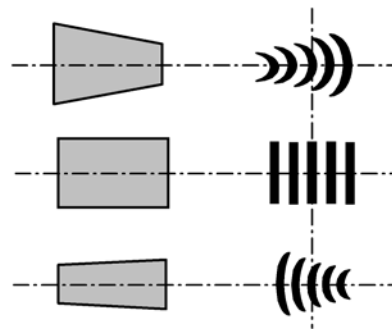


图 2 不同几何形状条纹的变化

Fig. 2 Fringes in different situations

3 测量实验

采用此方法,对某一 50 # 的 7/24 圆锥量规的锥角进行了精确测量,其被测实物如图 3 所示。

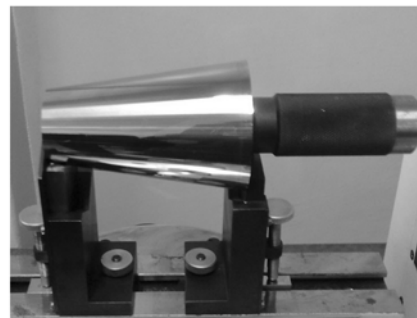


图 3 被测锥度规实物

Fig. 3 Photograph of taper gauge

根据国家标准《GB/T 111854-2003 7/24 工具圆锥量规》中的规定,7/24 圆锥量规的锥角标称值 $\alpha = 2\arctan[7/(2 \times 24)] = 16^\circ 35' 39.44''$,实际测量数据如表 1 所示,最终计算得到该 50 # 量规的实际锥角大小为 $16^\circ 35' 38.81''$,误差为 $-0.63''$ 。图 4 所示为对锥角进行 10 次测量的重复性,根据 Bessel 公式计算得到其标准差为 $0.06''$ 。

表 1 锥度测量结果
Tab. 1 Measurement results of taper gauge

测量次数	小角度 M	回零 $K/(\prime)$	$\overline{M}-\overline{R}$	多齿分度台 起止位置/ $(^\circ)$	数据处理结果
1	$5'38.71''$	-0.05	$5'38.81''$	$\beta_1=9^\circ$	$ \beta_1-\beta_2 =163.5^\circ$
2	$5'38.84''$	0.05		$\beta_2=172.5^\circ$	$180^\circ-163.5^\circ=16.5^\circ$
3	$5'38.84''$	-0.03			$16.5^\circ+5'38.81''=$
平均	$5'38.80''$	-0.01			$16^\circ35'38.81''$

注:温度 20.5°C ,相对湿度 50% 。

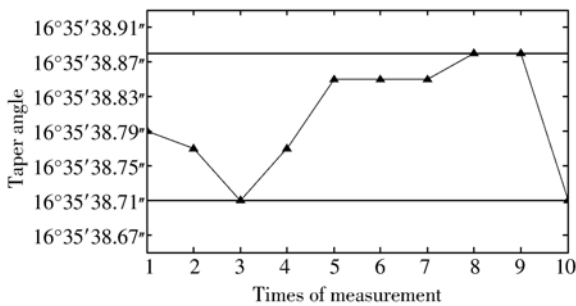


图 4 测量重复性

Fig. 4 Repeatability of measurement

4 系统不确定度分析

4.1 激光小角度测量的不确定度

将小角度测量的正弦公式 $\sin \alpha=H/R$ 写成关于激光干涉仪测量的光程差 H 和正弦臂长 R 的函数 $\alpha=f(H, R)$, 因此有:

$$u^2(\alpha)=c_1^2 u^2(H)+c_2^2 u^2(R), \quad (2)$$

其中, $u(\alpha)$ 为激光小角度测量的不确定度; $u(H)$ 为激光干涉仪测量的光程差引入的不确定度分量; $u(R)$ 为正弦臂臂长引入的不确定度分量。

由于激光干涉仪测量的光程差与正弦臂臂长不相关, 因此灵敏系数为 $c_1=1, c_2=1$ [12]。

(1) 温度变化使正弦臂长实际值与标称值存在偏差所引入的不确定度分量 $u(R_1)$

选用 GCr15 轴承钢作为正弦臂, 轴承钢材料的热膨胀系数为 $11.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 且服从均匀分布, 实验室环境温度变化量可控制在 0.5°C 以内, 正弦臂长度偏差引入的不确定度分量为:

$$u(R_1)=0.5 \times 11.5 \times 10^{-6} \times R/\sqrt{3}=4.98 \times 10^{-4} \text{ mm}. \quad (3)$$

由正弦公式两侧求导得到臂长变化量与角度

变化量的关系式, 将臂长变化量转化为对角度测量引入的不确定度为:

$$u(R_1)=\frac{\tan 0.5^\circ}{150} \times 4.98 \times 10^{-4}=0.006''. \quad (4)$$

(2) 正弦臂零位调整误差引入的不确定度分量 $u(R_2)$

经计算, 在测量范围 0.5° 内, 当初始零位角 β 为 $1'$ 时, 零位误差引起的角度测量误差最大约为 $-0.0023''$, 所以有 $u(R_2)=0.0023''$ 。

(3) 正弦臂臂长标定不准确引起的不确定度分量 $u(R_3)$

正弦臂长标定的过程引入的不确定度分量有以下几方面:

1) 标准角度块自身标定时的角度不确定度 $u_{R_{31}}=0.015''$;

2) 角度块平面度引入的不确定度分量 $u_{R_{32}}=0.062''$;

3) 自准直仪示值误差引入的不确定度分量 $u_{R_{33}}=0.082''$;

4) 精密回转台径向和轴向跳动引入的不确定度分量 $u_{R_{34}}=0$ 。

由于装置在 5° 范围内标定, 0.5° 范围内使用, 正弦臂长标定引入的不确定度分量成线性递减, 因此由公式计算得到的标准不确定度为上述分量的合成:

$$u(R_3)=\sqrt{u_{R_{31}}^2+u_{R_{32}}^2+u_{R_{33}}^2+u_{R_{34}}^2}/5=0.01''. \quad (5)$$

(4) 激光波长不稳定引入的不确定度分量 $u(H_1)$

选用频率稳定度为 5×10^{-8} , 不确定度置信因子 k 为 3 的兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器, 则激光波长不稳定引入的不确定度分量为:

$$u(\lambda_0)=\frac{5 \times 10^{-8}}{3} \lambda=1.667 \times 10^{-8} \lambda. \quad (6)$$

将波长变化转化为对角度测量引入的不确定度为:

$$u(H_1) = \tan 0.5^\circ \times 1.667 \times 10^{-8} = 0.000\ 03'' \quad (7)$$

(5) 计数器脉冲误差引入的不确定度 $u(H_2)$

根据系统参数计算得到,当计数器采用 32 细分时, $1'' \approx 294.2$ 个脉冲,而计数器的计数误差为 ± 1 个脉冲数,因此有 $u(H_2) = \frac{1}{294.2} = 0.0034''$ [13]。

(6) 直角棱镜回光角度误差引入的不确定度分量 $u(H_3)$

根据计算,该项误差可以忽略不计,有 $u(H_3) = 0$ 。

(7) 空气折射率修正引入的不确定度分量 $u(H_4)$

由 Edlen 公式,分别计算由空气温度、湿度、大气压力等测量不确定度带来的空气折射率不确定度,最终得到的标准不确定度为各分量的合成,即:

$$u(n) = \sqrt{u_t^2 + u_f^2 + u_p^2 + u_E^2} = 0.61 \times 10^{-7} \quad (8)$$

式中 u_t, u_f, u_p 分别为空气温度、空气湿度和大气压力引入的不确定度分量, u_E 为 Edlen 公式自身的不确定度。

将上式转化为对角度测量引入的不确定度为:

$$u(H_4) = \tan 0.5^\circ \times 0.61 \times 10^{-7} = 0.000\ 11'' \quad (9)$$

(8) 合成标准不确定度

$$u_L = [u^2(R_1) + u^2(R_2) + u^2(R_3) + u^2(H_1) + u^2(H_2) + u^2(H_3) + u^2(H_4)]^{1/2} = 0.012\ 4'' \quad (10)$$

4.2 白光干涉定位系统的不确定度

(1) 瞄准误差引入的不确定度分量 $u(W_1)$

双光束白光干涉的瞄准精度与两白光光束之间的距离有关。采用 CCD 相机及数字图像处理方式后,白光对准精度可达到干涉带间距的 $1/100(\lambda/200)$,约为 $0.003\ \mu\text{m}$ 。在一次测量中,需分别对两对应的母线对准两次,因此:

$$u(W_1) = 0.003 \times \sqrt{2} = 0.004\ 2\ \mu\text{m} \quad (11)$$

换算为角度:

$$u(W_1) = \left[\frac{0.0042}{L_p \cdot 10^3} \right] / 0.000005 \approx (0.84/L_p)'' \quad (12)$$

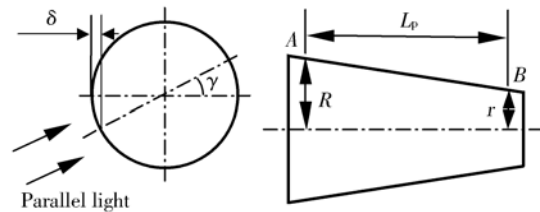
其中, L_p 为量规测量间距,单位为 mm。

对于 $L_p = 30 \sim 160\ \text{mm}$,有 $u(W_1) \leq 0.028''$ 。

(2) 光束方向调整误差引入的不确定度分量

$u(W_2)$

若两白光光束的光轴调整与多齿分度台工作台面不完全平行,如图 5(a)所示,会产生一定的误差。



(a) 光束方向误差 (b) 量规几何尺寸关系
(a) Light direction error (b) Dimension of taper gauge

图 5 白光光束方向调整误差

Fig. 5 Adjustment errors of white light

对于瞄准图 5(b)中 A 点的光束而言,根据图 5(a)所示截面,可知白光光束方向调整产生的误差为:

$$\delta = R(1 - \cos \gamma) \quad (13)$$

因同时对 A, B 两点瞄准,并换算成弧度,有:

$$\Delta = (R - r)(1 - \cos \gamma) / L_p \quad (14)$$

设 C 为量规的锥度,有 $(R - r) / L_p = C / 2$,因此上式即为:

$$\Delta = \frac{C}{2}(1 - \cos \gamma) \quad (15)$$

考虑到 2 个方向的瞄准,则有对整个锥角测量不确定度的影响为:

$$u(W_2) = 2\Delta = C(1 - \cos \gamma) \quad (16)$$

对于 $C = 1:3 \sim 1:50$,有 $u(W_2) \leq 0.01''$ 。

(3) 合成标准不确定度

$$u_W = \sqrt{u^2(W_1) + u^2(W_2)} = 0.03'' \quad (17)$$

4.3 圆锥量规形状误差引起的不确定度

干涉法测量对于被测物表面质量有较高的要求,且圆锥量规的形状误差会引起白光干涉定位与理想状态产生偏差,从而对锥角的测量精度产生直接影响。取圆锥量规形状误差为 $0.05\ \mu\text{m}$,因其置信因子 $k = 3$,因此:

$$u_S = 0.05/3 = 0.016\ 7\ \mu\text{m} \quad (18)$$

换算为角度:

$$u_s = \left(\frac{0.0167}{L_p \cdot 10^3} \right) / 0.000005 \approx (3.34/L_p)'' \quad (19)$$

对于 $L_p = 30 \sim 160$ mm, 有 $u_s \leq 0.111''$ 。

4.4 锥度测量的合成标准不确定度及扩展不确定度

根据前面分析得到的激光小角度测量不确定度 u_L 、白光干涉定位系统的不确定度 u_W 、多齿分度台的测量不确定度 u_M 、以及圆锥量规形状误差引入的不确定度 u_S , 可以计算得到锥度测量系统的合成标准不确定度为:

$$u_T = \sqrt{u_L^2 + u_W^2 + u_M^2 + u_S^2} \\ = \sqrt{0.0124^2 + 0.03^2 + 0.033^2 + 0.111^2} = 0.12'' \quad (20)$$

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 11853-2003 莫氏与公制圆锥量规[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P. R. C.. GB/T 11853-2003 Gauges of Morse tapers and metric tapers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJG 177-2003 圆锥量规[S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P. R. C.. JJG 177-2003 Taper Gauges[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [3] ISO. ISO 12164-1: 2001 Hollow taper interface with flange contact surface-Part 1: Shanks-Dimensions [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2001.
- [4] DIN. DIN 69063-1: 2008-03 Machine tools-Tool receiver for hollow taper shanks-Part 1: For Type A and Type C according to DIN 69893, connecting dimensions[S]. Berlin: German Institute for Standardization, 2008.
- [5] 殷纯永. 现代干涉测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
YIN CH Y. Modern Interferometric Measuring

当 $k=2$ 时, 锥度测量系统的扩展不确定度估算为 $U_T = 2 \times u_T \approx 0.24''$ 。

5 结 论

为解决先进制造业中大量使用的圆锥量规检测及我国锥度基准统一、溯源问题, 本文研究了基于光学干涉原理的圆锥量规锥度测量方法, 着重介绍了系统的工作原理及各个组成结构, 对某一圆锥量规进行了测量实验, 并详细分析了测量系统的测量不确定度。实验和分析结果证明, 该方法对于圆锥量规锥度的测量不确定度小于 $0.3''$ ($k=2$), 可实现圆锥量规任意锥度的高精度测量。

Technique[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)

- [6] 刘雯, 沈妮, 李天初. 用多齿分度台标定激光小角度干涉仪[J]. 计量学报, 2004, 25(4): 298-301.
LIU W, SHEN N, LI T CH. Calibration of small-angle laser interferometer by means of multi-teeth table[J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 25(4): 298-301. (in Chinese)
- [7] 熊文卓, 孔智勇, 张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1745-1748.
XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder[J]. Opt. Precision Eng, 2007, 15(11): 1745-1748. (in Chinese)
- [8] 陈洪芳, 钟志, 丁雪梅. 激光外差干涉的非线性误差补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1043-1047.
CHEN H F, ZHONG ZH, DING X M. Compensation of nonlinear errors in laser heterodyne interferometers[J]. Opt. Precision Eng, 2010, 18(5): 1043-1047. (in Chinese)
- [9] WANG L D, WANG J X, XING W L, et al.. Laser interferometer with isolator function[J]. Opt. Precision Eng., 2004, 12(5): 465-470.
- [10] WYANT J C. White light interferometry[J]. SPIE, 2002, 4737: 98-107.
- [11] 张以谟, 井文才, 张红霞等. 数字化白光扫描干涉仪的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6):

560-565.

ZHANG Y M, JING W C, ZHANG H X, *et al.* .
Computerized white light scanning interferometer
and the application [J]. *Opt. Precision Eng.* ,
2004, 12(6): 560-565. (in Chinese)

- [12] 舒阳, 邱易, 姜一民. 激光角度干涉仪测量精度的
几个影响因素[J]. 工具技术, 2008, 42(5): 72-
74.
SHU Y, QIU Y, XIAN Y M. Influence factors on
measuring precision of laser angular interferometer

[J]. *Tool Engineering*, 2008, 42(5): 72-74. (in
Chinese)

- [13] 王贵甫, 陈桂林, 陈雨良. 激光干涉仪数字测角
的新方法及其应用[J]. 光学精密工程, 2001, 9
(1): 85-88.
WANG G F, CHEN G L, CHEN Y L. A new
digital angle measurement technology by using
Malcholson interferometer and its application[J].
Opt. Precision Eng. , 2001, 9(1): 85-88. (in
Chinese)

作者简介:



康岩辉(1981—),男,山西太原人,博士
后,助理研究员,2010年于天津大学获
得博士学位,现为中国计量科学研究院
博士后,主要从事激光及光电精密测量
技术的研究。E-mail: yanhuikang@
163.com



张恒(1953—),男,北京人,高级工程
师,主要从事精密测量技术的研究。E-
mail: zhangh5053@126.com

●下期预告

流动沸腾条件下微通道壁面温度的红外特征

马虎根,涂文静,谢荣建,白健美

(上海理工大学热工程研究所,上海 200093)

设计并搭建了沸腾换热试验台,在研究混合制冷工质在微通道内的沸腾换热特性时,对微通道壁面温度采用 TH5104 红外热像仪进行测量。试件为外径 $d_o=1.22$ mm,内径 $d_i=0.86$ mm,长 200 mm 的不锈钢单圆管。本实验利用红外热像仪测量并记录下质量流量从 $1\ 726$ kg/m²·s 到 $8\ 635$ kg/m²·s 之间热流密度由 65 kW/m² 增加到 231 kW/m² 时的壁面温度变化情况。对实验结果进行了分析和讨论,得出:微通道壁面的温度分布沿着轴向变化有明显的规律性;水平微尺度通道内流动沸腾过程中,试件前后段有较大的温差效应,温差的正负与热流密度的大小有关;壁面温度变化与热流密度、管内工质的流型、换热形式有着密切的关系,流型越复杂,壁面温度变化越剧烈。