

文章编号: 0258-7025(2001)07-0637-04

# 基于双频激光干涉技术的高精度 直线度基准装置

赵 辉<sup>1</sup> 浦昭邦<sup>2</sup> 刘国栋<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>上海交通大学电子信息学院仪器系 上海 200030; <sup>2</sup>哈尔滨工业大学自动化测试及控制系 哈尔滨 150001)

**提要** 提出一种高精度直线度基准装置,它以激光波长作为测量基准,采用双频激光干涉技术和直尺反转误差分离技术,在一般实验室条件下实现了优于  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$  的测量不确定度。目前该装置已应用于航天质量保证体系国防校准实验室。

**关键词** 直线度 测量 双频激光 直尺 反转

中图分类号 TH 744.3 文献标识码 A

## High Precision Straightness Device Based on Double-frequency Laser Interference Technique

ZHAO Hui<sup>1</sup> PU Zhao-bang<sup>2</sup> LIU Guo-dong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Information Detection and Instrument, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)  
(<sup>2</sup>Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** A high precision straightness standard device based on double-frequency laser interference and edge reverse techniques was presented in this paper, in which the laser wave length was taken as the measuring datum. This device which could get the accuracy over  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$  under common lab-condition was applied in astronautics calibration laboratory.

**Key words** straightness, measurement, double-frequency laser, reverse

直线度是几何量计量中的一个重要项目,它与圆度、平行度并称为三大基本计量项目。目前国内外在圆度、平行度以及粗糙度等计量领域均已达到亚微米级甚至纳米级测量精度水平,然而直线度的测量精度却不高,特别是在大长度范围的直线度测量领域,其精度水平更远远落后于其他计量项目。国际上只有美国 NIST,德国 PTB,原苏联国家标准局,美国劳伦斯国家实验室,日本 Osaka 大学,美国 Lockheed 火箭和空间公司等达到了  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$  或更高的精度水平。我国目前仍采用长平晶组分段互检方法作为直线度检定基准,测量精度不高(特别是在测量大尺寸零件时尤为明显)。这种状况严重制约着我国精密计量测试领域的发展步伐<sup>[1]</sup>。

目前,国内外测量直线度误差的方法主要有激光准直法<sup>[2~5]</sup>、刀口尺法<sup>[6]</sup>、反转误差分离法<sup>[1]</sup>、多测头误差分离法<sup>[7]</sup>等。这些方法在小尺寸零件的直

线度误差测量时,一般能够达到较高精度水平( $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$  以上)。但在测量大尺寸零件的直线度误差时,精度却不高。鉴于目前国内对于  $1 \text{ m}$  长直尺缺乏高精度的直线度测量装置这一现状,我们成功地研制出一种高精度的直线度测量基准装置,它采用直尺反转误差分离技术和双频激光干涉测量技术检定表面光滑直尺或研磨直尺的直线度误差,不确定度优于  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$ 。对于长度小于  $360 \text{ mm}$  的研磨直尺,其测量不确定度与现有国家基准的长平晶分段互检法相当。对于长度大于  $360 \text{ mm}$  的研磨平尺,该装置的测量不确定度可优于国家基准。同时,用该装置检定的直尺可直接用于测量精密机床和精密仪器导轨的直线度误差。

### 1 高精度直线度基准装置的测量原理

该测量系统如图 1 所示,被测直尺安装在工作台(滑板)上,工作台在电机驱动下沿直线导轨移动。

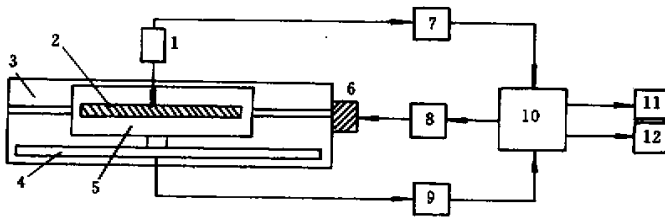


图1 直线度基准装置系统构成

1 激光器 2 直尺 3 基座 4 光栅 5 工作台 6 减速器;  
7 激光测量电路 8 电机控制器 9 光栅测量电路 10 计算机 11 显示器 12 打印机

Fig.1 Straightness standard device

1 : laser ; 2 : edge ; 3 : base ; 4 : grating ; 5 : work table ; 6 : decelerator ;

7 : laser circuit ; 8 : motor controller ; 9 : grating circuit ; 10 : PC ; 11 : CRT ; 12 : printer

由双频激光干涉测量系统对直尺表面进行采样,采样点的位置由光栅测量系统检出。这个系统由计算机统一控制,自动完成全部测量过程。

由于双频激光干涉仪测量系统的读数反映的是被检直尺表面的直线度误差及滑板移动的直线度误差的综合值,为了分离这两种误差,我们采用单尺反转法进行测量。

首先利用激光器对直尺的一面进行采样,如图2(a)所示。假设在任一采样点处直尺表面的直线度误差为  $E_i$ ,此处滑板移动的直线性误差为  $T_i$ ,此时激光器的采样值为  $S_{1i}$ ,则下式成立

$$S_{1i} = E_i + T_i$$

然后将激光器移到直尺的另一侧,同时直尺的安装位置也随之反转  $180^\circ$ 。此时进行第二次采样,如图2(b)所示。假设在各个采样点位置上,激光器的采样值为  $S_{2i}$ ,则同样有下式成立

$$S_{2i} = E_i - T_i$$

将相同采样点位置上反转前后两次采样值相加,可得该采样点处直尺表面的直线度误差值为

$$E_i = (S_{1i} + S_{2i})/2 \quad (1)$$

将反转前后两次采样值相减,可得该采样点处滑板运动直线误差为

$$T_i = (S_{1i} - S_{2i})/2 \quad (2)$$

将各个采样点位置上的直线度误差值进行最小

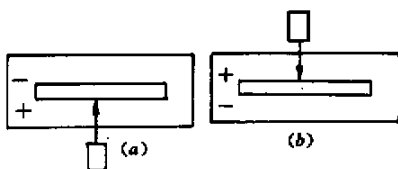


图2 单尺反转误差分离原理

(a) 反转前 (b) 反转后

Fig.2 Principle of single edge reverse

(a) before reverse ; (b) after reverse

二乘处理,最后可以得到直尺的总的直线度误差  $E$

$$E = E_{\max} - E_{\min} \quad (3)$$

## 2 双频激光采样系统

该直线度基准装置采用双频激光干涉测量系统对直尺表面进行采样,其长度测量基准为直接溯源至激光波长,因而可以获得很高的测量精度。

该系统采用外差干涉法原理测量,假设激光波长为  $\lambda$ ,测量脉冲计数值为  $N$ ,则测量结果为

$$L = N\lambda/2 \quad (4)$$

由于被测目标为直尺表面,为了便于利用双频激光干涉测量系统进行采样,装置采用了图3所示的测量光路。由激光器发出的双频激光束经偏振分光镜后分为两束  $f_1$  和  $f_2$ ,  $f_2$  被反射并投向角锥棱镜,返回的光束经偏振分光镜再次反射后由双频激光器的光电元件接收。 $f_1$  经过  $1/4$  波片后照射到直尺表面,由直尺表面反射后再次经过  $1/4$  波片,此时其偏转方向旋转  $90^\circ$  而变为反射光,被偏振分光镜反射而投向另一角锥棱镜,反射后的光束再次经过  $1/4$  波片并投向被测表面。当光束从工件表面反射后再次经过  $1/4$  波片时,其偏振方向又一次旋转  $90^\circ$  而变为透射光,返回激光器并与另一束光汇合,从而发生外差干涉。由于激光光束两次投向被测表面,因此该测量光路在实现测量的同时,可实现光学二倍频,即可以使原有激光器的分辨率和精度提高一倍。同时,在光路布局上可以通过调整角锥棱镜的位置使参考光路与测量光路的光程相等,以消除环境温度、气压等参数波动引起激光波长变化时对测量结果的影响。 $1/4$  波片镀有增透膜,透射率达到  $90\%$  以上,保证了测量光路的光强。通过以上措施,保证了激光测量系统工作稳定可靠。

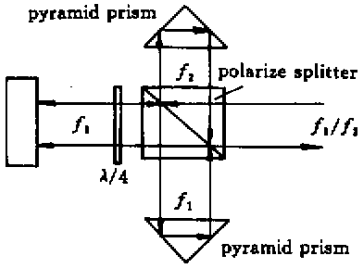


图3 测量光路示意图

Fig.3 Measuring light path

### 3 精度分析

#### 3.1 双频激光测量误差 Δ<sub>1</sub>

在本直线度测量装置中，激光波长是测量基准，因此激光测量系统的精度直接影响测量结果的准确性。激光测量系统的精度可由下面公式表示<sup>[8]</sup>

$$\Delta_L = L \sqrt{(\Delta_N/N)^2 + (\Delta_\lambda/\lambda)^2 + (5 \times 10^{-8})^2} \quad (5)$$

式中，Δ<sub>L</sub> 为激光测量误差；L 为激光测量范围，主要

$$\Delta_L = L \sqrt{(0.93\Delta_T)^2 + (0.36\Delta_P)^2 + (0.056\Delta_F)^2 + (\alpha\Delta_{T1})^2 + (T_1 - 20)^2\Delta_\alpha^2 + (0.05)^2} \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中，Δ<sub>T</sub> 为环境温度波动误差，最大为 1℃；Δ<sub>P</sub> 为空气压力波动误差，最大为 1330 Pa；Δ<sub>F</sub> 为环境湿度波动误差，最大为 665 Pa；α 为工件热胀系数，按照金属零件计算，为 11.5 × 10<sup>-6</sup>；Δ<sub>T1</sub> 为工件温度波动误差，最大为 1℃；T<sub>1</sub> 为工件温度，按极限情况考虑，T<sub>1</sub> - 20 = 10℃；Δ<sub>α</sub> 为工件热胀系数测量误差，最大为 1 × 10<sup>-6</sup>。则激光测量误差为

$$\Delta_L = 500 \sqrt{0.93^2 + 3.6^2 + 0.28^2 + 11.5^2 + 10^2 + 0.05^2} \times 10^{-6} = 0.008 (\mu\text{m})$$

由此引起直线度测量误差 Δ<sub>2</sub> 为

$$\Delta_2 = (\sqrt{2}/2)\Delta_L = 0.006 (\mu\text{m})$$

#### 3.3 采样点位置误差 Δ<sub>3</sub>

此项误差与采样点的定位误差以及安装时直尺的方向有关。如图 4 所示，如果直尺表面与滑板运动方向不平行，则采样点位置误差将产生测量误差。假设直尺长度为 L<sub>0</sub> = 1000 mm，安装引起的直尺两端高度差（调整误差）最大为 h = 1 mm，采样点位置误差（即光栅测量误差）最大为 Δ<sub>x</sub> = 0.02 mm，则由此引起直线度测量误差 Δ<sub>3</sub> 为

$$\Delta_3 = \frac{h}{L_0} \Delta_x = \frac{1000}{1000} \times 0.02 = 0.02 (\mu\text{m})$$

是直尺调整误差造成的两端高度差，经过仔细调整，L < 0.2 mm；Δ<sub>N</sub> 为计数误差，一般可取 Δ<sub>N</sub> = 2；N 为激光器计数值，激光测量系统的分辨率为 0.008 μm，则最大计数值 N = 1.25 × 10<sup>5</sup>；Δ<sub>λ</sub>/λ 为激光器波长复现性，基准中采用的双频激光波长的不确定度为 5 × 10<sup>-6</sup>。

根据公式 (1)，由激光测量误差引起的直线度测量误差 Δ<sub>1</sub> 最大为

$$\Delta_1 = (\sqrt{2}/2)\Delta_L = 0.707 \times 500 \times \sqrt{(8 \times 10^{-6})^2 + (5 \times 10^{-6})^2 + (5 \times 10^{-8})^2} = 0.033 (\mu\text{m})$$

#### 3.2 环境误差 Δ<sub>2</sub>

测量过程中环境参数的改变将影响空气折射率，进而影响激光干涉测量系统的测量结果，从而产生测量误差。另一方面，环境温度的变化也会导致直尺的尺寸及安装位置变化，从而带来测量误差。可将这两方面因素一并考虑，所引起的激光测量误差为



图4 采样点位置误差

Fig.4 Position error of sample point

#### 3.4 空程误差 Δ<sub>4</sub>

空程误差是双频激光特有的一项误差。它是指当激光干涉系统的两臂光程不等时，如果环境参数发生变化，将对测量结果产生影响。两臂光程差的大小由安装与调整精度决定，假设最大光程差为 2 mm，根据公式 (6)，由空程引起的激光测量误差为

$$\Delta_L = 2000 \sqrt{0.93^2 + 3.6^2 + 0.28^2 + 11.5^2 + 10^2 + 0.05^2} \times 10^{-6} = 0.032 (\mu\text{m})$$

则由空程引起的直线度测量误差 Δ<sub>4</sub> 为

$$\Delta_4 = (\sqrt{2}/2)\Delta_L = 0.023 (\mu\text{m})$$

#### 3.5 滑板绕垂直轴偏摆引起的误差 Δ<sub>5</sub>

在测量过程中滑板如果绕垂直轴偏摆，一方面使得激光器测量线与直尺表面不垂直，在测量方向上产生偏差；另一方面导致实际采样点位置产生变动，从而产生测量误差。由于被测量的是直尺表面的直线度误差，因此测量方向偏差引起的测量误差可以忽略不计。设在测量过程中滑板绕垂直轴偏摆

最大  $\theta = 10'$  (通过机械加工保证), 偏振分光镜距直尺表面距离为 100 mm, 则由此引起的采样点位置误差为

$$\Delta_x = L' \tan \theta = 100 \times \tan(10/3600) = 0.005 \text{ (mm)}$$

根据采样点误差分析结果, 由此引起的直线度测量误差为

$$\Delta_5 = \frac{h}{L_0} \Delta_x = \frac{1000}{1000} \times 0.005 = 0.005 \text{ (}\mu\text{m)}$$

### 3.6 滑板运动随机误差 $\Delta_6$

根据测量原理分析可知, 通过直尺反转法可以消除滑板运动误差。但由于滑板运动存在随机性, 从而影响反转过程中导轨运动误差的一致性, 从而带来测量误差, 即单尺反转法只能消除导轨运动的系统误差, 不能消除随机误差。本直线度基准采用高精度滑动直线运动导轨(2 m 长), 其随机误差实测为  $\Delta_T = 0.1 \mu\text{m}$ , 则由此引起直线度测量误差为

$$\Delta_6 = \Delta_T / 2 = 0.05 \text{ (}\mu\text{m)}$$

将上述各项误差分量合成, 则单尺反转法时每

个采样点位置上的直线度误差为

$$\begin{aligned} \Delta_i &= \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2} = \\ &= \sqrt{0.033^2 + 0.006^2 + 0.02^2 + 0.023^2 + 0.005^2 + 0.05^2} \\ &= 0.068 \mu\text{m} \end{aligned}$$

则直尺直线度测量不确定度为

$$\Delta = \Delta_i \sqrt{2} = 0.095 \mu\text{m}$$

由此可见, 对直尺直线度测量不确定度优于  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$ , 而且对环境条件后安装要求不高, 特别适合一般场合下大长度直尺直线度误差的测量。

## 4 测试结果

为验证该基准装置的测量精度, 对 4 种不同长度的直尺进行了实际测试。4 种直尺分别为 100 mm, 200 mm, 300 mm 光学直尺和 400 mm 金属研磨直尺, 每种直尺分别测量 5 次, 取平均值作为测量结果, 取极限误差和相对误差作为测量精度的评定依据, 结果见表 1。

表 1 不同长度直尺直线度测量结果(单位  $\mu\text{m}$ )

Table 1 Results of straightness measurement of four edges (unit:  $\mu\text{m}$ )

Measured edge	1st	2nd	3rd	4th	5th	Average	Limit error
100 mm	0.449	0.456	0.467	0.469	0.480	0.464	0.036
200 mm	0.830	0.850	0.837	0.835	0.849	0.838	0.027
300 mm	1.051	1.030	1.006	1.030	1.010	1.025	0.054
400 mm	9.482	9.467	9.487	9.496	9.446	9.476	0.059

实际测试结果表明, 测量精度优于  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$ , 与精度分析结果基本吻合, 但实测结果小于计算值, 这是因为理论分析中单项误差取值偏大的缘故。

## 5 结 论

本文提出的基于双频激光干涉技术和直尺反转误差分离技术的高精度直线度基准装置, 可在一般条件下实现优于  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$  的测量不确定度, 可用于大尺寸直尺直线度误差的高精度检测。该装置已通过部级鉴定, 目前正在通过建标, 并应用于航天质量保证体系国防校准实验室。

### 参 考 文 献

- Zhang Shanzhong, Zhao Hui, Pu Zhaobang. Research on high accurate standard device of straightness by means of double-frequency laser. *Chinese J. Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1994, 25(2): 1~5 (in Chinese)
- Cheng Xiangyin, Yin Cunyong. Long distance coaxially

- measurement system and experiment. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报), 1997, 18(2): 85~89 (in Chinese)
- Liu Xingzhan, Liang Jinwen. Compensate collimation system with double light beam. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报), 1999, (1): 23~25 (in Chinese)
- Zhao Jianlin, Li Yulin, Liu Jifang. Two methods for collimating extended laser beam and determining its parallelism. *Optoelectronics · Lasers* (光电子·激光), 1998, 9(3): 232~234 (in Chinese)
- Zhang Qing, Zhao Bin, Fan Guangzhao et al.. Application of non-diffraction beam in a straightness error measurement system. *Journal of Huazhong Institute of Technology* (华中理工大学学报), 1997, 25(9): 1~3 (in Chinese)
- Zhang Guoyu, An Zhiyong, Jiang Huili et al.. Opto-electronic non-contact measuring method for straightness error. *Optical Technique* (光学技术), 1999, 1(1): 41~43 (in Chinese)
- Hong Maisheng, Zhong Zhifeng. A new measurement method of on-line separation of straightness. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement* (宇航计测技术), 1998, (4): 11~14 (in Chinese)
- Xian Yimin. Analysis of veracity of laser interference measurement. *Measurement Technique* (计量技术), 1990, 1(1): 7~9 (in Chinese)