

文章编号: 0258-7025(2002)07-0625-06

# 双频激光远程直线度/同轴度测量系统

陈强华, 吴 健, 殷纯永

(清华大学精密仪器与机械学系 精密测量技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**提要** 介绍了一种基于横向塞曼双频激光的直线度/同轴度测量系统, 与纵向塞曼系统相比, 舍去了  $1/4$  波片, 减小了仪器尺寸, 从原理上消除了由于  $1/4$  波片相位延迟不是严格  $90^\circ$  造成的非线性误差, 符合共路原则, 对空气扰动有较强的抑制力, 具有自适应性, 信号处理采用比相技术, 测量精度可以达到  $0.1^\circ$ , 测量元件可以暂时移出光路, 挡光后数据能够自动恢复, 8098 单片机系统智能化稳定的频差在 10 h 内变化量小于  $0.5$  kHz, 系统稳定性为  $2 \mu\text{m}/\text{h}$ ; 示值线性相关系数优于  $0.9999$ , 适于远程准直和同轴度测量。

**关键词** 直线度/同轴度测量 横向塞曼 双频 自适应 长距离测量

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

## Long Range Straightness/Coaxiality Measurement System Using Dual-frequency Laser

CHEN Qiang-hua, WU Jian, YIN Chun-yong

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology & Instrumentation,  
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** In this paper, a novel straightness/coaxiality measurement system using transversal Zeeman dual-frequency laser is introduced. In contrast to longitudinal Zeeman system, the size of instrument is shortened and the non-linearity error generated from quarter wave plate is avoided. The system is self-adaptive and quite resistant to air turbulence. Phase measurement can reach  $0.1$  degree equivalent to  $1 \mu\text{m}$ . Measuring component can be removed from light path during measuring process. Using 8098 singlechip computer to stabilize the beat frequency intelligently, experiment has shown that the change of beat frequency is less than  $0.5$  kHz in 10 hours. The measuring stability is about  $2 \mu\text{m}/\text{h}$ . Correlation coefficient of linearity of indicating value is better than  $0.9999$ . It realizes the straightness/coaxiality measurement of long range.

**Key words** straightness/coaxiality measurement, transversal Zeeman, dual-frequency, self-adaptive, long range measurement

## 1 引 言

直线度/同轴度测量是几何量计量领域里最基本的计量项目之一, 因而历来受到各国学者的重视, 并做了许多研究工作<sup>[1~3]</sup>, 在精密仪器制造与检测、大尺寸测量、大型仪器的安装与定位、军工产品制造等领域中有着广泛的应用<sup>[4,5]</sup>。

自 60 年代激光问世以来, 由于激光具有强度高

而集中、频率单一、发散小等卓越性能, 因此很快被用作准直光源。成功的范例是利用双频激光干涉仪及其直线度附件测量直线度<sup>[6]</sup>, 其光路如图 1 所示。该方案对于激光光束的平漂和角漂具有自适应, 测量精度高, 工作稳定。HP5528 等传统的双频激光干涉仪在信号处理上采用锁相倍频技术, 不允许光路信号中断, 否则记数无效, 因而不能用于同轴度测

收稿日期 2001-04-23; 收到修改稿日期 2001-07-10

基金项目 国家自然科学基金(批准号: 59735120)资助项目。

作者简介 陈强华(1978.4—), 男, 江西省上饶地区玉山县人, 清华大学精仪系博士生, 主要从事激光干涉纳米测量、空气折射率测量、表面等离子体波测量的研究工作。E-mail: cqh99@mails.tsinghua.edu.cn

量。

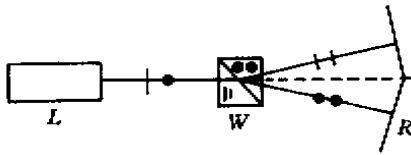


图 1 双频激光测量直线度原理图

L : 双频激光头 ; W : 渥拉斯顿棱镜 ; R : 双面反射棱镜

Fig.1 Straightness measurement using the dual-frequency laser interferometer

L : dual-frequency laser head ; W : Wollaston prism ; R : reflector

文献 [7, 8] 中曾报道了采用纵向塞曼双频激光干涉仪的直线度测量系统 SJD-3T, 该系统利用两个完全对称的渥拉斯顿棱镜, 一个作为测量元件, 一个作为补偿元件。系统的光学设计使激光器的平漂和角漂不影响测量结果, 具有对激光漂移的自适应性。信号处理采用比相技术, 测量元件可以暂时移出光路, 能进行同轴度测量, 得到了实际应用。两束干涉光基本符合共路原则, 对空气扰动的影响具有更强的适应性。为了克服 1/4 波片受热引起的漂移, SJD-3T 特地把 1/4 波片和热稳频系统进行热隔离, 增加了仪器尺寸, 其结构如图 2 所示。

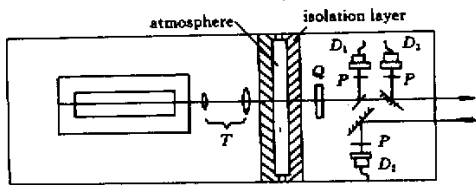


图 2 SJD-3T 激光头结构示意图

Q : 1/4 波片 ; D<sub>1</sub> ~ D<sub>3</sub> : 光电探测器 ; P : 检偏器

Fig.2 Layer of laser head of SJD-3T

Q : 1/4 wave plate ; D<sub>1</sub> ~ D<sub>3</sub> : photodetectors ; P : analyzers

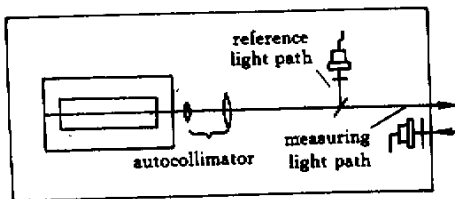


图 3 SJD-5T 激光头结构示意图

Fig.3 Layer of laser head of SJD-5T

本文介绍了一种新的基于横向塞曼双频激光的直线度/同轴度测量系统 SJD-5T, 吸收了 SJD-3T 系

统的所有优点。激光头输出的是一对严格正交的线偏振光, 不需要 1/4 波片, 因而也不需增加仪器的尺寸, 从原理上消除了由于 1/4 波片位相延迟不是严格 90° 造成的非线性误差。对测量信号接收部分作了独特设计, 使得同一接收电路能根据需要来接收水平方向或垂直方向的测量信号, 简化了激光头结构, 也方便使用, 其结构如图 3 所示。

## 2 测量原理

测量系统原理如图 4 所示。双频激光器出射的两个相互正交的线偏振光通过第一个渥拉斯顿棱镜后, 分开一小角度, 再通过第二个渥拉斯顿棱镜后, 变成两束平行光, 经直角棱镜反射后, 再依次通过 W<sub>2</sub>, W<sub>1</sub> 又变成一束光, 经探测器 D<sub>2</sub> 接收, 形成测量信号。D<sub>1</sub> 输出参考信号。W<sub>1</sub> (或 W<sub>2</sub>) 的移动会使测量信号相对于参考信号间的相位发生变化, 通过测量二者相位的变化, 就可得到 W<sub>1</sub> (或 W<sub>2</sub>) 的移动量。若将 W<sub>2</sub> 和直角反射镜 R 放于导轨一端, 激光器放于另一端, 调整光路使之平行与导轨, 使 W<sub>1</sub> 沿导轨移动, 即可测得导轨的水平 and 垂直方向上的直线度偏差, 合成起来即得到同轴度偏差。

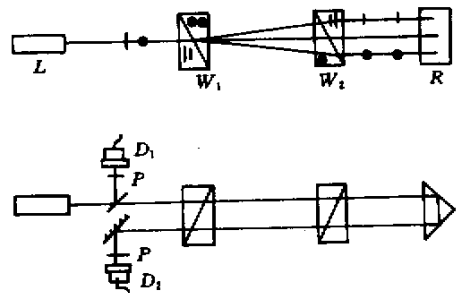


图 4 同轴度测量原理图

L : 双频激光头 ; W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub> : 渥拉斯顿棱镜 ;

D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> : 光电探测器 ; R : 直角反射棱镜 ; P : 检偏器

Fig.4 Schematic diagram of coaxiality measurement system

L : dual-frequency laser head ; W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub> : Wollaston prism ;

D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> : photodetectors ; R : rectangular reflector ; P : analyzers

为了实现同轴度的测量, 信号相位的变化必须在 ±180° 内, 这样就必须对测量范围和分辨率作统一考虑。取测量信号和参考信号相位变化 0.1° 对应 W<sub>1</sub> 横向移动 1 μm, 这样对渥拉斯顿棱镜 W<sub>1</sub> 来说

$$S = \frac{\lambda/N}{4\sin(\theta/2)}C \quad (1)$$

式中, λ 为激光波长, θ 为渥拉斯顿棱镜的两出射光

之间的夹角,  $N$  为计数电路的倍频数;  $C$  为计数器的累加数。

根据设计, 有  $S = 1 \mu\text{m}$ ,  $N = 3600$ ,  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ,  $C = 1$ , 得

$$\theta/2 = 0.0025^\circ$$

再根据  $\sin(\theta/2) = (n_o - n_e) \tan\beta$  (2)

得渥拉斯顿棱镜的楔角

$$\beta = 0.28^\circ$$

信号相位每变化  $0.1^\circ$  对应  $W_1$  (或  $W_2$ ) 横向移动  $1 \mu\text{m}$ , 信号一个周期  $\pm 180^\circ$  就代表  $W_1$  移动  $\pm 1.8 \text{ mm}$  这个测量范围在通常的直线度/同轴度测量中是足够的。在测量相位时, 由于信号不会跨越一个周期, 保证了读数的单值性, 而且相位测量是状态测量, 渥拉斯顿棱镜移出光路, 再放回光路中, 测量还能继续进行, 因而可用于同轴度的测量。

按上述参数, 两光束分开角度  $\theta \approx 0.005^\circ$ , 可计算得在  $30 \text{ m}$  处两光束中心分开约  $2.6 \text{ mm}$ , 光斑本身直径约为  $8 \text{ mm}$  左右, 因而在  $30 \text{ m}$  内两光束中心间距小于光斑半径, 此时两光束波前倾斜相关性大于  $0.9$ , 对空气扰动有较强的抵抗力<sup>[9]</sup>。对于更长距离的测量要求, 可以重新设计渥拉斯顿棱镜的楔角, 减小两光束的分开角度, 这样增大了位移当量, 降低了灵敏度, 可获得更好的测量效果。

### 3 自适应性分析

SJD-5T 反射体采用直角反射镜, 系统本身能够自动抵消激光光束的平漂和角漂带来的误差。

建立如图 5 的坐标系。

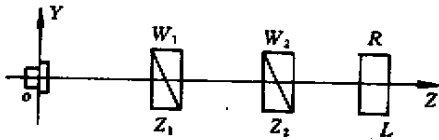


图 5 坐标系

Fig. 5 Coordinate system

显然, 激光光束在  $X-Z$  平面内存在角漂和平漂并不影响测量结果。当任一渥拉斯顿棱镜在  $Y-Z$  平面内上下移动  $S$  时, 引起光程差为

$$\Delta l = 4(n_o - n_e)S \cdot \tan\beta \quad (3)$$

设理想情况下的光束为  $Y = 0$ , 测量信号和参考信号的相位差为  $0^\circ$ 。当激光光束有平漂和角漂时, 设此时入射光的轨迹方程为

$$Y(t) = b(t)Z + c(t) \quad (4)$$

式中,  $b(t)$  的变化表示光束的角漂,  $c(t)$  的变化表示光束的平漂。在  $Y-Z$  平面内, 直角棱镜的功能相当于平面反射镜, 则返回光束的轨迹方程是

$$Y'(t) = -b(t)Z + 2b(t)L + c(t) \quad (5)$$

光线来回两次通过渥拉斯顿棱镜  $W_1$ , 产生的光程差为

$$\Delta l_1 = (Y_1 + Y_1) \cdot 4(n_o - n_e) \tan\beta = 4[b(t)L + c(t)] \cdot (n_o - n_e) \tan\beta \quad (6)$$

光线来回两次通过渥拉斯顿棱镜  $W_2$  产生的光程差为

$$\Delta l_2 = -(Y_2 + Y_2) \cdot 4(n_o - n_e) \tan\beta = -4[b(t)L + c(t)] \cdot (n_o - n_e) \tan\beta \quad (7)$$

这样光束漂移对整个测量系统的影响为

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 = 0 \quad (8)$$

即由于光束的平漂和角漂引起的光程变化为零, 也就是说该系统对光束的漂移有自适应性。实际的光束经过第一个渥拉斯顿棱镜后两偏振光束分开了一小角度  $\theta \approx 0.005^\circ$ , 但这个角度不会对上面的分析带来影响。

### 4 实验结果

为了检验整个系统的性能, 在普通物理实验室条件下, 多次进行了稳定性实验和示值线性实验。

#### 4.1 频差稳定性实验

实验在普通实验室进行, 温度范围为  $25.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

图 6 的实验结果表明, 横向塞曼激光器稳频结果的频差在长时间内小于  $0.5 \text{ kHz}$ 。

激光频差变化引起的测量误差与频差变化的大

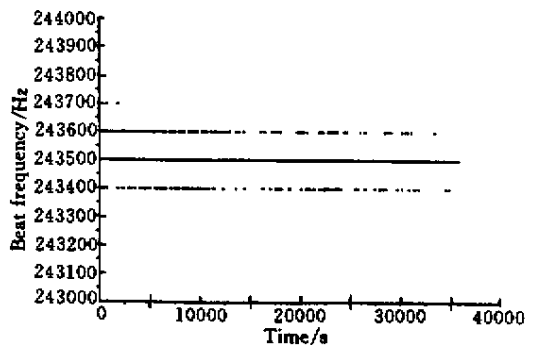


图 6 频差稳定性实验结果

Fig. 6 Experimental result of stability of beat frequency

小以及基线长度的乘积成正比

$$\Delta = 2.4 \times \Delta f \times L \times 10^{-5} (\mu\text{m}) \quad (9)$$

式中  $L$  单位为  $\text{m}$ ,  $\Delta f$  单位为  $\text{Hz}$ 。取频差变化量为  $0.5 \text{ kHz}$  则有

$$\Delta < 0.012 \times L (\mu\text{m}) \quad (10)$$

当  $L = 60 \text{ m}$ ,  $\Delta < 0.8 \mu\text{m}$ ; 当  $L = 30 \text{ m}$ ,  $\Delta < 0.4 \mu\text{m}$ 。适于进行直线度/同轴度测量。

### 4.2 偏振特性实验

因为偏振特性的偏差是外差干涉测量中非线性误差的主要来源,所以还需要对横向塞曼激光器输出光的偏振特性进行检测。

一对频率分别为  $f_1$  和  $f_2$  的不理想的正交线偏振光可以看作两个主轴互不垂直的椭偏光,如图 7 所示。其偏振特性可以用椭偏度  $\eta_{1,2}$  和偏离角  $\alpha$  来衡量。前者表示了每个频率分量本身的椭偏程度,定义:  $\eta_1 = E_{1y}/E_{1x}$ ,  $\eta_2 = E_{2x}/E_{2y}$ ;  $\eta_{1,2} = 0$  代表理想的线偏振光;后者表示了两个分量的正交程度,  $\alpha = 0$  时二者完全正交。

测量实验装置如图 8 所示,激光器输出的激光

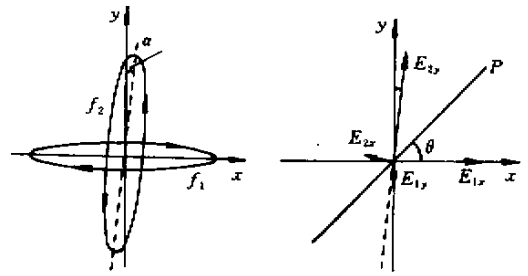


图 7 不理想的正交线偏振光

Fig. 7 A pair of imperfectly linear polarized light orthogonally to each other

经过一格兰-傅科偏振棱镜(检偏度达  $1 \times 10^{-5}$ )后,在 PD 上形成拍频信号,旋转偏振棱镜,当检偏器的通光方向分别和两个偏振分量的主轴方向垂直时,得到光电二极管的输出电压幅值最小值  $S_{\min}$  和  $S_{\min}'$ ;当检偏器  $45^\circ$  放置时,得到输出电压最大值  $S_{\max}$ 。计算出出现最小值的角度可以直接得出偏离角  $\alpha$ , 椭偏度则可以通过下式计算获得

$$\eta_1 = \frac{E_{1y}}{E_{1x}} = \frac{S_{\min}}{2S_{\max}} \quad \eta_2 = \frac{E_{2x}}{E_{2y}} = \frac{S_{\min}'}{2S_{\max}} \quad (11)$$

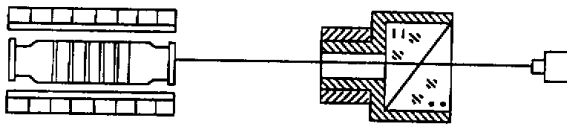


图 8 用于横向塞曼激光器偏振特性分析的实验装置

Fig. 8 Schematic diagram of experiment setup for polarized orthogonally property of transversal Zeeman laser

测量结果列于表 1,表明该激光器的输出具有相当好的偏振正交性。

表 1 SJD-5T 激光器偏振特性测量结果

Table 1 Experimental result of polarized property of SJD-5T

	$S_{\min}, S_{\min}' / \text{V}$	$S_{\max} / \text{V}$	$\eta_{1,2}$	$\alpha (^{\circ})$
X	0.40	5.8	0.034	0.4
Y	0.24	5.8	0.021	

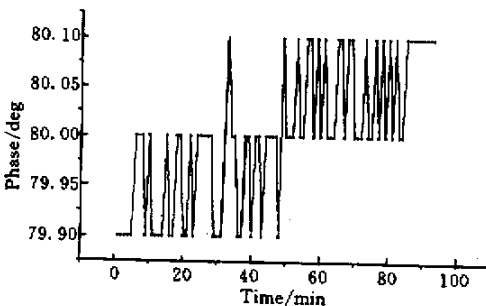


图 9 短距离测量稳定性实验结果

Fig. 9 Experimental result of short range stability

### 4.3 短距离测量稳定性实验

激光头与反射镜之间的距离为  $1.1 \text{ m}$ ,  $W_1$  和  $W_2$  之间距离为  $0.4 \text{ m}$ 。实验在普通实验室进行,温度为  $21.4^\circ\text{C}$ ,无实验装置单独隔离措施。

结果如图 9 所示,实验是在近距离的情况下进行的,空气扰动、温度梯度的影响比较小,实验结果基本上表示了仪器本身的稳定性。从实验结果可以看出,一个半小时内相位变化不超过  $0.2^\circ$  (对应位移

2  $\mu\text{m}$ ), 还包括了相位计漂移以及外界环境变化引起被测量本身的变化(所用相位计的分辨率为  $0.1^\circ$ )。在  $0.1^\circ$  的相位分辨率下, SJD-5T 本身引起仪器示值的漂移非常小。

#### 4.4 长距离测量稳定性实验

在测量距离分别为 0 m, 4 m, 8 m 时, 对仪器采样 4 min, 采样频率为 1 Hz, 求得仪器示值稳定性的标准偏差, 如表 2 所示。

表 2 仪器 4 min 示值稳定性的标准偏差(单位  $\mu\text{m}$ )

Table 2 Standard deviation of measurement stability in 4 minutes (division:  $\mu\text{m}$ )

Measuring distance	0 m	4 m	8 m
Standard deviation	1	3	3

测量距离为 10 m 时, 普通实验室对仪器长时间的稳定性进行了实验, 温度为  $22.4^\circ\text{C}$ , 无实验装置单独隔离措施。开机预热 1 h 后开始测量。

测量结果如图 10 所示, 40 min 内相位变化的标准偏差为 0.3(对应位移  $3 \mu\text{m}$ )。

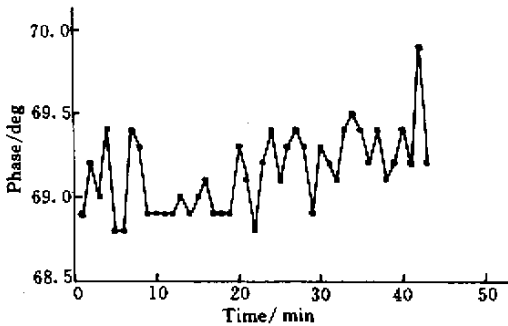


图 10 长距离(10 m)测量稳定性结果

Fig. 10 Experimental result of measurement stability in 10 m range

#### 4.5 示值线性实验

实验装置示意图如图 11 所示, SJD-5T 放于工作台上, 渥拉斯顿棱镜  $W_1$  和双频激光测长干涉仪的测量角锥棱镜  $M_2$  固定在微动工作平台 MP 上, 调节微动工作台, 使  $W_1$  和  $M_2$  在垂直光路方向上移动, 位移量由双频激光测长干涉仪测量, 相位测量使用丹麦 2977 相位计, 测量数据由 PC486 微机采集。

激光头与反射镜之间的距离为 1.1 m,  $W_1$  和  $W_2$  之间距离为 0.4 m。实验在普通实验室进行, 温度为  $15.4^\circ\text{C}$ , 无实验装置单独隔离措施。

图 12 的实验结果表明, 在  $3000 \mu\text{m}$  的测量范围

内, 示值线性相关系数优于 0.9999, 斜率约为  $0.1008^\circ/\mu\text{m}$ , 多次测量斜率稳定性为  $\pm 0.0003^\circ/\mu\text{m}$ 。

#### 4.6 直线度比对实验

在航空部 304 所长度实验室进行了直线度测量实验, 并与 304 所的测量结果进行了比对。测试环境温度  $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 相对湿度 60%, 气压 99798 Pa。

航空部 304 所直线度测量采用测角的方式用角差法得到直线度偏差, 其装置示意图如图 13 所示。从激光头发出的双频激光先后经过反射率为 30% 的反射镜  $R_1$ , 反射率为 50% 的反射镜  $R_3$  和全反射镜  $R_2, R_4$  后, 在平行的  $x, y, z$  三个方向上分别形成三个测长干涉仪, 当测量小车沿导轨移动到某一个位置时, 小车上  $x, y, z$  三点离初始位置的距离被三路干涉仪测出,  $x, y$  干涉仪的间隔和  $x, z$  干涉仪的间隔是已知的, 因而可计算出每个运动步长的偏转角, 经计算机按角差法处理数据后可得到导轨此位置的水平和垂直方向上的直线度偏差。测量时将 SJD-5T 的直角反射镜  $R$  和渥拉斯顿棱镜  $W_2$  放置在导轨的另一端,  $W_1$  放于测量小车之上, 由计算机控制小车移动, 测量间距为小车前后两个气浮支座之间的距离, 为 420 mm, 将二者测得的直线度进行比对。

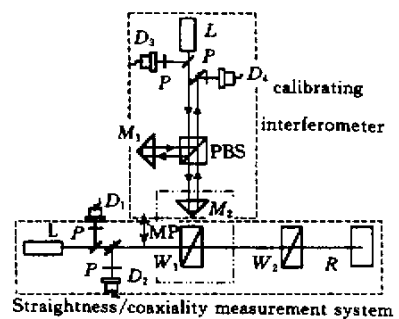


图 11 示值线性实验装置示意图

$L$ : 双频激光头;  $W_1, W_2$ : 渥拉斯顿棱镜;  $P$ : 检偏器;  $D_1 \sim D_4$ : 光电探测器;  $R$ : 直角反射棱镜;  $M_1$ : 基准角锥棱镜;  $M_2$ : 测量角锥棱镜;  $PBS$ : 偏振分光棱镜

Fig. 11 Schematic diagram of experiment setup for linearity of indicating value

$L$ : dual-frequency laser head;  $W_1, W_2$ : Wollaston prism;  $D_1 \sim D_4$ : photodetectors;  $R$ : rectangular reflector;  $P$ : analyzers;  $M_1$ : reference retroreflector;  $M_2$ : measuring retroreflector;  $PBS$ : polarized beam splitter

小车正向行走和反向行走的测量结果比对如图 14(a)(b)所示。

由测量结果可以看出, 两种方法的测量结果吻合得很好。因 304 所采用的是角差法间接测量直线度, 其测得每点直线度偏差与前一点测量结果及小

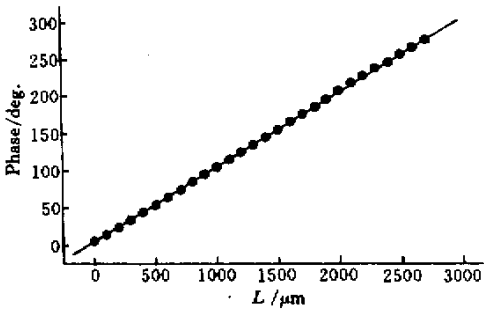


图 12 示值线性实验结果

Fig. 12 Experimental result of linearity of indicating value

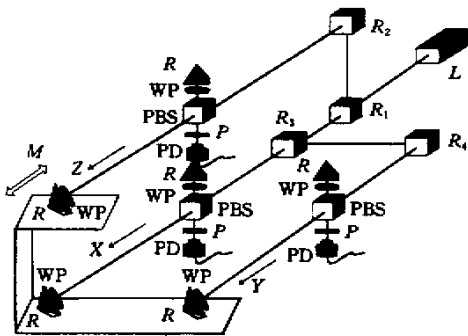


图 13 直线度测量装置示意图

L 激光器;  $R_1$  反射率为 30% 的反射镜;  $R_2, R_4$  全反射镜;  $R_3$  反射率为 50% 的反射镜; WP 1/4 波片; R 角锥棱镜; PBS 偏振分光棱镜; P 检偏器; PD 光电接收器; M 测量小车

Fig. 13 Schematic diagram of experimental setup for straightness measurement

L : laser ;  $R_1$  : reflector ( reflectance value is 30% );  $R_2, R_4$  : reflector ( reflectance value is 100% );  $R_3$  : reflector ( reflectance value is 50% ); WP : quarter wave plate ; R : retroreflector ; PBS : polarized beam splitter ; P : analyzer ; PD : photodetector ; M : carriage

车每步所走距离有关 而 SJD-5T 是直接反映导轨的直线度变化 因此随测量距离的增大 两个测量结果有一定的偏差是完全正常的。

### 5 结论

从上面的分析和实验结果可以看出,该横向塞曼双频激光直线度/同轴度干涉测量系统对光束的平漂和角漂具有自适应性,符合共路原则,对大气湍流、空气扰动的影响的抵抗力强,系统稳定性好,适合长距离的直线度/同轴度测量。与以前的系统相比,仪器内部结构更简单,尺寸更小。

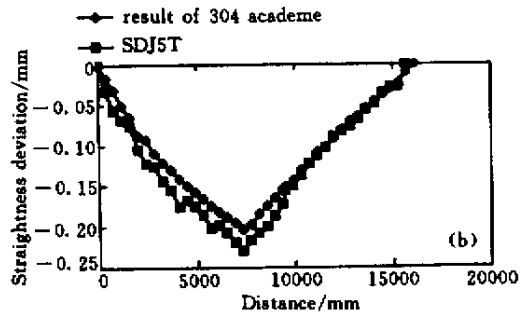
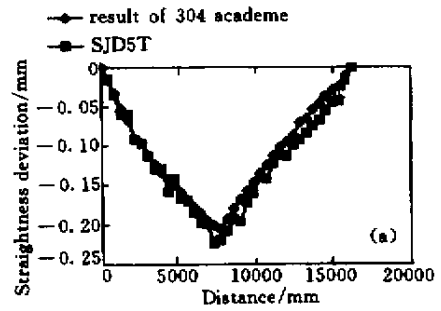


图 14 直线度比对实验结果 (a)正向 (b)逆向

Fig. 14 Experimental result of straightness measurement (a) positive direction ;(b) opposite direction

### 参考文献

- 1 H. J. Pakh , J. S. Park , I. Yeo. Development of straightness measurement technique using the profile matching method [ J ]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* ,1997 , 37( 2 ) :135 ~ 147
- 2 G. X. Zhang , X. H. Cho , W. Tang. Distance-distance method for straightness measurement [ J ]. *CIRP Annals* ,1992 , 41( 1 ) 581 ~ 584
- 3 K. Matsuda , T. Eiju , M. Roy. Straightness measurements using a reflection confocal optical system [ C ]. *SPIE* ,1999 , 3749 589 ~ 590
- 4 Horst Friedsam. The Alignment of the Advanced Photon Source at Argonne National Laboratory [ C ]. *Proceedings of the Third International Workshop on Accelerator Alignment*. 1993 , 11 ~ 18
- 5 T. Mimashi , S. Kuroda. Position Monitor Using Stretched Wire Technique [ C ]. *Proceeding of the IEEE Particle Accelerator Conference* ,1993 , 3 2340 ~ 2342
- 6 Hewlett Packard. Laser Measurement System [ R ]. 5526A July 1980 ,U.S.A P17
- 7 Cheng Xiangyin , Fang Zhongyan , Yin Chunyong. Long distance coaxiality measurement system and experiments [ J ]. *Acta Metrologica Sinica* ( 计量学报 ) ,1997 , 18( 2 ) :85 ~ 89 ( in Chinese )
- 8 Cheng Xiangyin , Guo Jihua , Yin Chunyong. A co-axiality measuring system using dual-frequency laser [ J ]. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers* ,1997 , 18( 3 ) 209 ~ 213
- 9 Yin Chunyong , Guo Jihua , Mao Wenwei. Adaptive principle on optical instrument design [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* ( 仪器仪表学报 ) ,1995 , 16( 1 ) :62 ~ 66 ( in Chinese )