

自适应双频激光准直系统的原理及实验*

成相印 方仲彦 殷纯永

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

郭继华

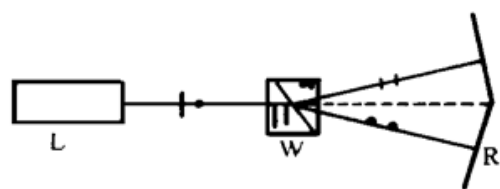
(清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

摘 要 介绍了一种新型自适应双频激光准直系统, 该系统利用了两个完全对称的渥拉斯顿棱镜, 一个作为测量元件, 另一个作为补偿元件。对测量信号的处理, 采用比相技术, 测量元件可以暂时移出光路, 因而能够进行同轴度的测量。两束干涉光基本符合共光路原则, 适应于长距离的准直测量。系统的光学设计使激光光束的平漂和角漂不影响测量结果, 对激光的漂移有自适应性。本文对其自适应性进行了理论分析并进行了实验验证, 并给出了稳定性和线性实验结果。

关键词 准直测量, 自适应。

1 引 言

自从激光出现以后, 激光在准直测量方面得到了广泛的应用。利用双频激光干涉仪的直线度附件测量直线度是其成功的典范。其光路如图 1 所示。



该方案对于激光光束的平漂和角漂有自适应作用, 测量精度高, 工作稳定, 是目前机械工业中应用最广的一种。该结构的主要问题是: 不能用于同轴度的测量。距离不能太小, 也不宜过大。易受大气湍流、空气扰动的影响。调节使用不太方便。

Fig. 1 Straightness measurement with dual-frequency laser interferometer

本文介绍一种新型双频激光准直系统, 该系统可以用于同轴度测量, 而且, 光学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。文中叙述了该系统的原理, 对其自适应性进行分析, 并进行了实验验证。

2 测量原理

该双频激光准直系统原理如图 2 所示。双频激光头出射的正交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_2 、 W_1 又变成一束光, 经探测器 D_2 接收, 形成测量信号。 D_1 输出的是参考信号。移动 W_1 (或 W_2) 可使测量信号相对参考信号相位发生变化, 通过测量二者相位,

* 国家自然科学基金资助项目。

则可得到 W_1 的移动量。

通过合理设计渥拉斯顿棱镜的楔角, 可使 W_1 移动 $1 \mu\text{m}$, 信号相位变化 0.1° , 这样, 信号一个周期 360° 就代表了 W_1 移动 3.6 mm , 这个量程对于准直测量来说是足够了。此时, 两光束分开角度 $\theta \approx 0.005^\circ$, 这么小的角度, 即使在测量距离为 50 m 处, 两光束中心才分开约 4 mm , 考虑到光斑本身尺寸的大小约为 8 mm 左右, 因而, 在 50 m 内两光束几乎是重合的。

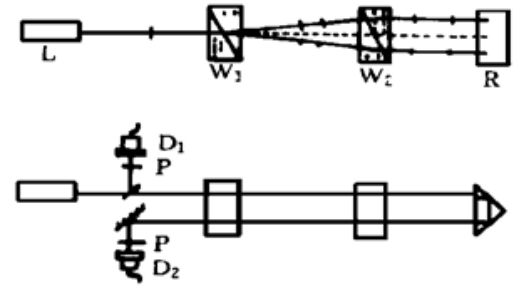


Fig. 2 Straightness measurement system with two-frequency laser
L: two-frequency laser head; W_1, W_2 : wollaston prisms; D_1, D_2 : photodetector; R: rectangular reflector; P: analyzer

3 测量方案的自适应性分析

为了分析该光学系统对激光光束平漂和角漂的自适应性, 建立如图 3 所示的坐标系。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:

$$\Phi = 4(n_o - n_e)S \text{tg}\beta$$

式中 β 为渥拉斯顿棱镜的楔角。

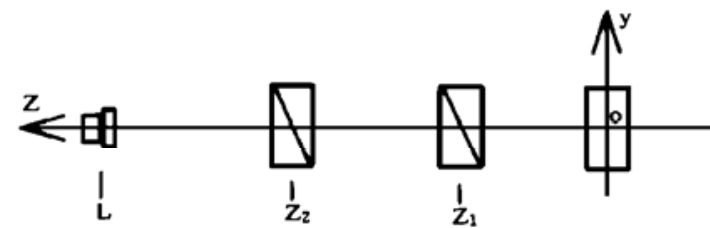


Fig. 3 Coordinate system

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 。当激光光束有平漂和角漂时, 设此时入射光的轨迹方程为:

$$Y(t) = b(t)Z + c(t) \tag{1}$$

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:

$$Y'(t) = -b(t)Z + c(t) \tag{2}$$

光线两次通过渥拉斯顿棱镜 W_1 产生的光程差为:

$$\Phi = (2)(y_1 + y_1) \cdot 4(n_o - n_e) \text{tg}\beta = 4c(t)(n_o - n_e) \text{tg}\beta \tag{3}$$

光线两次通过渥拉斯顿棱镜 W_2 产生的光程差为

$$\Phi = (2)(y_2 + y_2) 4(n_o - n_e) \text{tg}\beta = -4c(t)(n_o - n_e) \text{tg}\beta \tag{4}$$

即由于光束的平漂和角漂引起的相位测量误差为零, 也就是说该系统对光束的漂移有自适应性。可以证明, 将直角反射棱镜换成角锥棱镜时, 系统对平漂有自适应性, 但对角漂不自适应。

4 自适应效果模拟实验

为了验证上面的自适应性分析, 将激光头置于一个既可平动, 也可转动的精密工作台上, 通过在图 3 中 $Y-Z$ 平面内平动和转动激光头来模拟光束的漂移。实验中, 激光头用专门设计的稳频差双频激光头, 频差约 600 kHz , 5 个小时内频差总变动量小于 6 kHz 。相位计用丹麦的 2977 型, 每 0.1° 对应 $1 \mu\text{m}$ 。激光头距离反射镜约 1 m 。

为了便于观察和测量自适应效果, 实验中加大了激光头的移动量, 多次调整光路, 测量当激光头平动 $500 \mu\text{m}$, 转动约 0.25° 时, 相位变化情况。这个移动量远远大于实际直线度测量中激光光束的平漂和角漂量。表 1, 表 2 给出反射体分别用直角棱镜和角锥棱镜的实验结

果:

Table 1 Displacement drift and phase difference

displacement (mm)	0.30	0.20	0.10	0.0	- 0.10	- 0.20	error
reflector	phase (°)						
rectangular	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
cube corner	- 0.1	- 0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1

Table 2 Angle drift and phase difference

angle drift (°)	0.30	0.20	0.10	0.0	- 0.10	- 0.20	error
reflector	phase (°)						
rectangular	- 0.1	- 0.1	- 0.1	0.0	0.0	0.1	0.2
cube corner	3.9	4.4	1.1	0.0	- 1.3	- 3.3	7.2

从表 1 的实验结果可以看出, 不论反射体是直角棱镜还是角锥棱镜, 光束的平行漂移均不影响测量结果, 即系统对平漂具有自适应性。从表 2 的结果可以看出, 使用直角棱镜和使用角锥棱镜作为反射体, 实验结果有明显的差别: 使用直角棱镜时, 系统对光束的角漂表现出具有自适应作用; 而使用角锥棱镜时, 系统对光束的角漂表现出不具有自适应作用。

实验说明, 上面的理论分析是正确的, 该双频激光准直系统对光束的漂移有自适应性。

5 实验结果

为了检验整个系统的性能, 实验于五~ 六月份内, 在普通实验室条件下, 多次开机考查其稳定性和示值的线性。实验中反射体用直角棱镜, 反射体距离激光头 1.4 m, W_1 距激光头 0.4 m, W_2 距激光头 1.3 m。

5.1 稳定性实验结果

在稳定性实验中, 相位测量用丹麦的 2977 型相位计, 通过 IEEE488 口与计算机相连, 由计算机自动采样, 采样间隔为 1 min。图 4 是开机 30 min 后测得的结果。

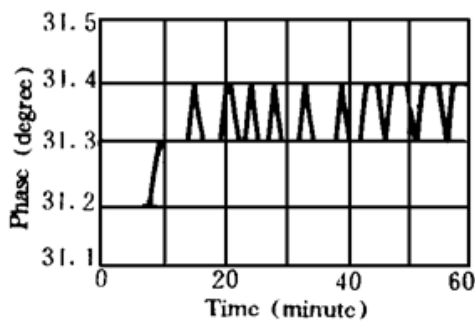


Fig. 4 Stability experimental result

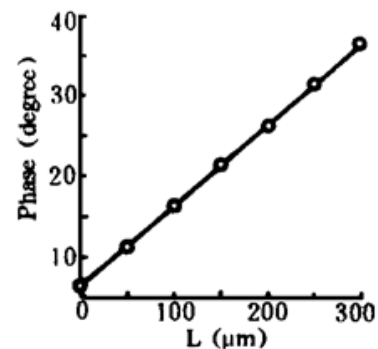


Fig. 5 Linearity measurement result

5.2 示值线性实验

在测量该系统的线性实验中, 实验在图 3 中的 $Y-Z$ 平面内移动 W_1 约 300 μm , 同时用德国生产的电感测微仪 Milltron 测量 W_1 的移动量, 测量结果如图 5 所示。横坐标为电感测微仪的读数, 纵坐标是相位计读数。

实验结果表明, 该系统的稳定性约为 $2 \mu\text{m}/\text{h}$, 示值线性相关系数优于 0.999, 斜率约为 0.0996, 多次测量斜率稳定性约为 ± 0.0003 。

结 论 从上面的分析和实验可看出, 该双频激光准直系统有下列特点:

- 1) 采用测相位方法, 测量元件可暂时移出光路, 可进行同轴度的测量。
- 2) 光路设计使光束的漂移不影响测量结果, 对光束的漂移有自适应作用。
- 3) 两干涉光束基本上符合共光路原则, 对于大气湍流、空气扰动有较强的抵抗力, 适合于长距离准直测量。
- 4) 光路结构简单, 便于测量调整。

参 考 文 献

- [1] 殷纯永, 陈计金, 方仲彦. 双光束自适应旋光准直系统. 清华大学学报, 1991, **31**(2): 55~ 60
- [2] 顾玉萍, 方仲彦, 杨有堂 等. 双光路自适应准直仪的信号处理. 航空计测技术, 1993, (5): 2~ 5
- [3] Youtang Yang, Yuping Gu, Zhongyan Fang *et al.*. Application of an adaptive noise cancelling technique to a straightness measurement system based on optical activity. *Opt. Eng.*, 1995, **134**(1): 21~ 25

Adaptive Straightness Measurement System with Dual-Frequency Laser

Cheng Xiangyin Fang Zhongyan Yin Chunyong

(*Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Guo Jihua

(*Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 20 July 1995)

Abstract A new two-frequency laser alignment system is developed which consists of two Wollaston prisms with the same structure. One is for measurement; another for compensation. Using phasemeter, the two prisms can be moved out off the beam, so the system can be used to measure coaxality. The displacement drift and angle drift of laser beam are compensated by the optical system automatically. The paper analyzes those adaptive characteristic in theory. Experimental result is in concordance with theoretical analysis.

Key words alignment measurement, adaptive