

五分量激光测量装置的试验研究

赵耀军

(淮南矿业学院机械系, 淮南, 232001)

A NEW LASER SYSTEM FOR MEASURING FIVE MOVING ERROR COMPONENTS

Zhao Yao-jun

(Department of Mechanics of Huainan Mining Institute, Huainan, 232001)

摘要 所讨论的激光测量装置, 可以同时测量一个移动轴的5个移动误差分量, 即两个直线度分量和3个角位移分量。该装置测量线性误差和角位移误差的精度可分别达到 $1.5\mu\text{m}$ 和 $0.5''$ 以内。

关键词 机床, 激光测量系统, 移动误差, 控制设备

Abstract A new laser measurement system has been developed for identifying geometrical error of a machine tool. Five moving error components in a motional direction can be measured by using this system simultaneously, such as yawing, Pitching rolling, and two straightness errors.

The system integrates a linear displacement measuring system using the unique property of retro-reflector and an angular displacement measuring system using the principle of auto-collimator. The basic system consists of twoparts: a reference part mounted on a reference base; a measuring part fixed on the moving table to be measured. The measuring portion contains a flat mirror to detect the yaw and pitch angular errors, and two separate retroreflectors to measure the linedr errors. The rolling error component is calculated by the distance between the two retroreflectors and their two vertical linear error components. The reference portion contains a He-Ne Laser tube, a beam expander, a beam splitter, two polarized beam splitters, a combined auto-collimator, a half wave plate and a quarter wave plate, four two-dimensional position sensing devices, and three reflection mirrors.

The accuracy of the system is within $1.5\mu\text{m}$ and $0.5''$ for linear and angular displacement respectively.

Key words machine tools, laser measurement system, moving error, control equipment

机床移动轴的移动误差, 是造成工件加工误差的主要来源之一。按照机床移动轴部件是刚体的假设, 移动误差造成的加工误差, 可以由一个包含机床所有移动轴的移动误差分量的模型来描述^[1,2]。因此, 测量这些误差分量, 实现误差的控制补偿, 是提高加工质量有效的途径^[3]。

本文着重讨论测量装置的工作原理和提高测量系统工作稳定性应注意的若干问题。

1 测量系统工作原理

测量系统由两部分组成, (见图1)。氦氛激光管、二维光点位置传感器、组合准直镜

和分光镜、反光镜等组成测量参考基准部分，安装在测量基准处；空心三面直角棱镜和平面反射镜等为可移动部分，安装在被测移动轴部件上。

图 1 中 He-Ne Laser 为极化氦氖激光器；M1~M4 为反射镜；L1、SP、L2 组成光过滤器；PBS1~PBS3 为偏振光分光镜；RR1、RR2 为空心三面直角棱镜；PSD1~PSD4 为二维光点位置传感器；QP 为 $1/4$ 波板；HP 为 $1/2$ 波板；L3、L4 为组合准直镜。

系统工作原理如图 2 所示。当被测移动件从位置 1 移动到位置 2 时，传感器 PSD1 和 PSD2 分别都测得直线度误差的两个分量；安装在组合准直镜焦平面处的传感器 PSD3，测得摇摆角误差和俯仰角误差；转动角误差则由传感器 PSD1 和 PSD2 的垂直分量经运算得到。

设被测移动件沿 Z 方向移动，则 5 个误差分量可分别由下列关系式确定。

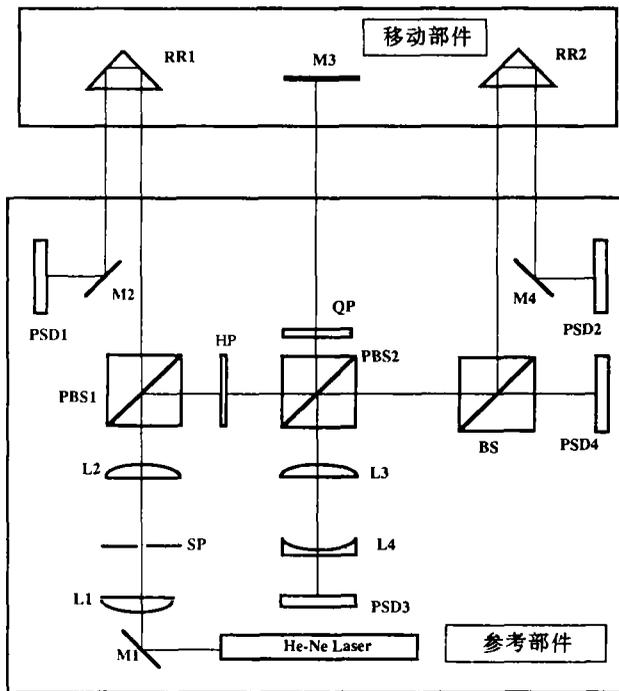


图 1 测量系统示意图

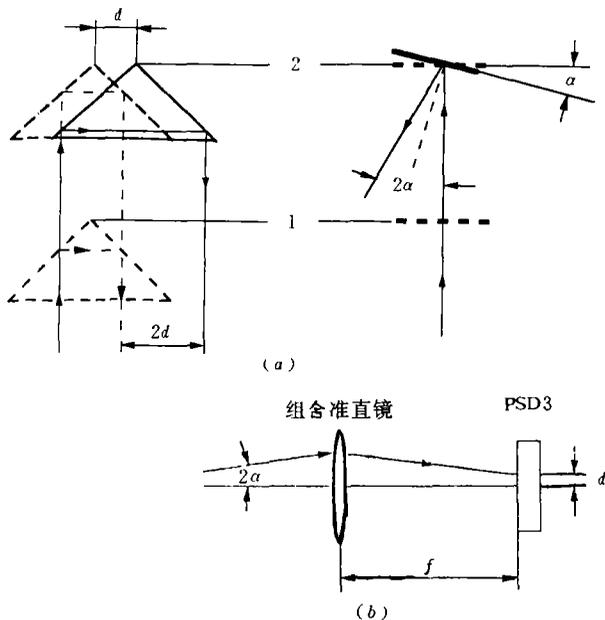


图 2 测量原理图

$$\begin{aligned}
 S_{x_i} &= \frac{1}{2} d_{x_i} \\
 S_{y_i} &= \frac{1}{2} d_{y_i} \quad (i = 1, 2) \\
 \alpha_x &= \frac{1}{2f} d_{x3} \\
 \alpha_y &= \frac{1}{2f} d_{y3} \\
 \alpha_z &= \frac{1}{2L} (d_{y1} - d_{y2})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中 d_{x_i} 、 d_{y_i} —传感器 X、Y 方向数据； S_{x_i} 、 S_{y_i} —直线度误差 X、Y 分量。需用最小二乘法去除线性校准误差； α_x 、 α_y 、 α_z —摇摆角误差、俯仰角误差、转动角误差； f —组合准直镜等效焦距； L —传感器 PSD1 和 PSD2 几何中心线之间的距离。

采用组合准直镜，是为了增大等效焦距 f ，提高测量精度。同时，不至于增大装置的结构尺寸^[4]，这对于安装空间狭小的应用场合尤其重要。采用光过滤器，是为了减小激光束的发散角和角漂移，从而减小由于测量距离变动带来的附加误差。另外，光过滤器减少了光噪声，有利于获得高质量的激光束。

对于要求更高线性位移灵敏度的场合，可以采用图 3 所示的布置。

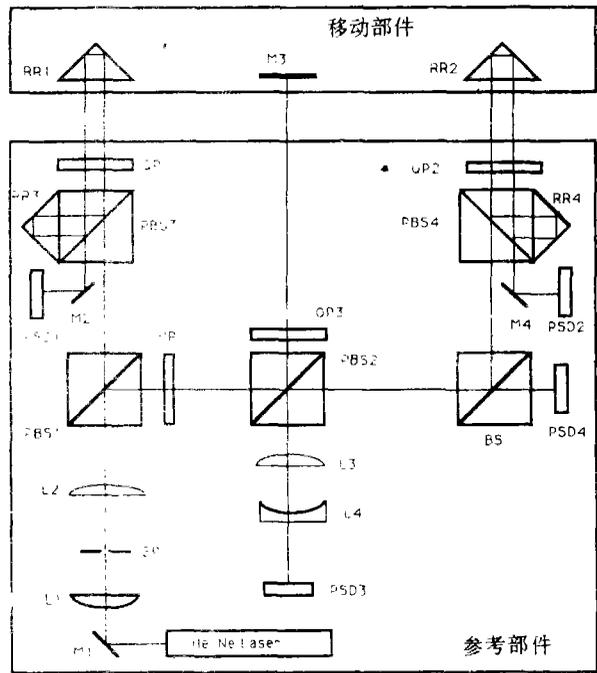


图 3 高灵敏度系统示意图

与图 1 比较，图 3 增加了两块偏振分光镜 PBS3、PBS4 和两块三面直角棱镜 RR3、RR4，以及两块 1/4 波板 QP1 和 QP2。其工作原理为：入射偏振光经 1/4 波板一个来回后，成为与入射光垂直的分量，故被折回，再次穿越 1/4 波板，经第 2 个来回后还原为入射光的相位，该返回光经反光镜折入光传感器。这样，被测移动件有一微小线性位移，传感器上就获得了 4 倍于测量位移的信号，从而大大提高了测量灵敏度。但系统的费用也将增加。需要指出，由于射入棱镜 RR1 和 RR2 的两束激光在空间上一般不平行，需用精密电子水平仪确定两条光束在 Y 方向上的夹角，把夹角引入的线性校准误差计算扣除后，才使用式(1)求得转动角误差。

2 减小测量误差的措施

由于本装置利用激光束的直线性作为整个测量系统的参考基准, 因此, 保证系统测量精度的关键是如何消除或补偿激光束的漂移。这种漂移一般具有 4 个自由度, 即两个线性自由度和两个角漂移自由度。产生漂移的原因主要是

- (1) 激光发生器产生的平行漂移和角漂移;
- (2) 激光管固定支撑件的热变形和机械变形;
- (3) 光路上光学元件的固定支撑件的热变形和机械变形;
- (4) 低频的空气扰动。

解决上述问题的主要办法为

- (1) 使用具有相同热膨胀系数的材料制作固定支撑元件, 并且尽可能使它们有接近的形状和尺寸;
- (2) 选择定位方式, 消除固定支撑分光 and 折光镜的元件的转动自由度;
- (3) 尽量采用磁吸、胶粘等连接和固定方式;
- (4) 附加光传感器, 用计算的方法补偿激光束漂移产生的误差。

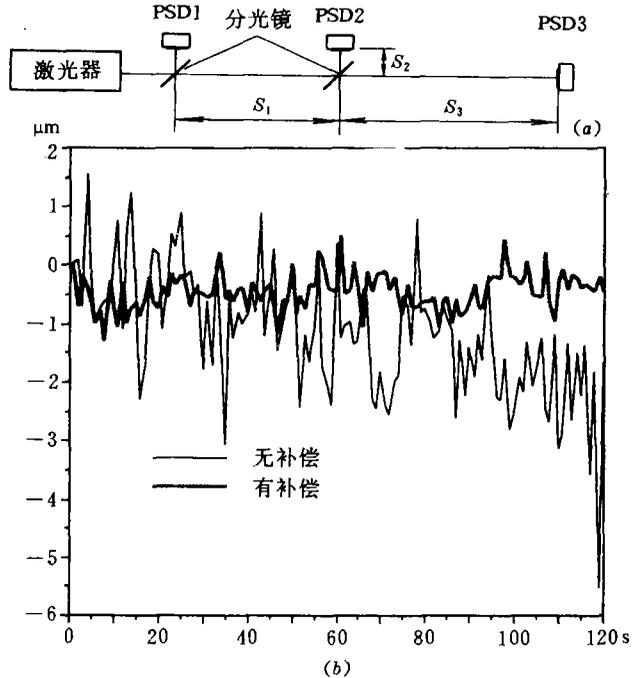


图 4 传感器补偿效果试验

(a) 补偿原理示意图 (b) 一小时对比试验结果

补偿原理如图 4(a)所示。由于激光束的角漂移, 3 个传感器的输出为距光源越远的输出越大, 也即光路越长的传感器受的影响越大。用两个光路固定的传感器 PSD1 和 PSD2 的数据 d_1 、 d_2 , 可以修正传感器 PSD3 的数据 d_3 , 修正量 $(d_2 - d_1)(S_1 + S_3 - S_2) / S_1$ 。图 4(b)所示解果, 是把激光管、分光镜和 3 只传感器固定在气浮悬平台上, 取 $S_1 = S_2 = 500\text{mm}$, $S_3 = 1\ 500\text{mm}$, 1h 试验结果。图中细实线为传感器 PSD3 的数据, 理想输出应为零, 即没有任何漂移; 粗实线是减去修正量后的数据, 数据在零线附近变化, 补偿效果十分明显。本装置上采用的光过滤器, 使过滤后的激光束的发散角和角漂移减小到原来的 1/3, 线性位移放大了 3 倍, 角漂移的影响很小, 故只装 1 只传感器 PSD4 补偿激光束的平行漂移。

3 试验结果

为了检验测量系统的精度, 使用一套美国 Hewlett Packard 公司的 HP-5528A 激光干涉系统, 与本装置作对比试验。在三坐标测量机的测量头上并列安装上述两套系统的反射镜。数据采集系统同时记录。图 5 (a)、5(b) 分别为三坐标测量机沿 Z 方向移动, 同时分

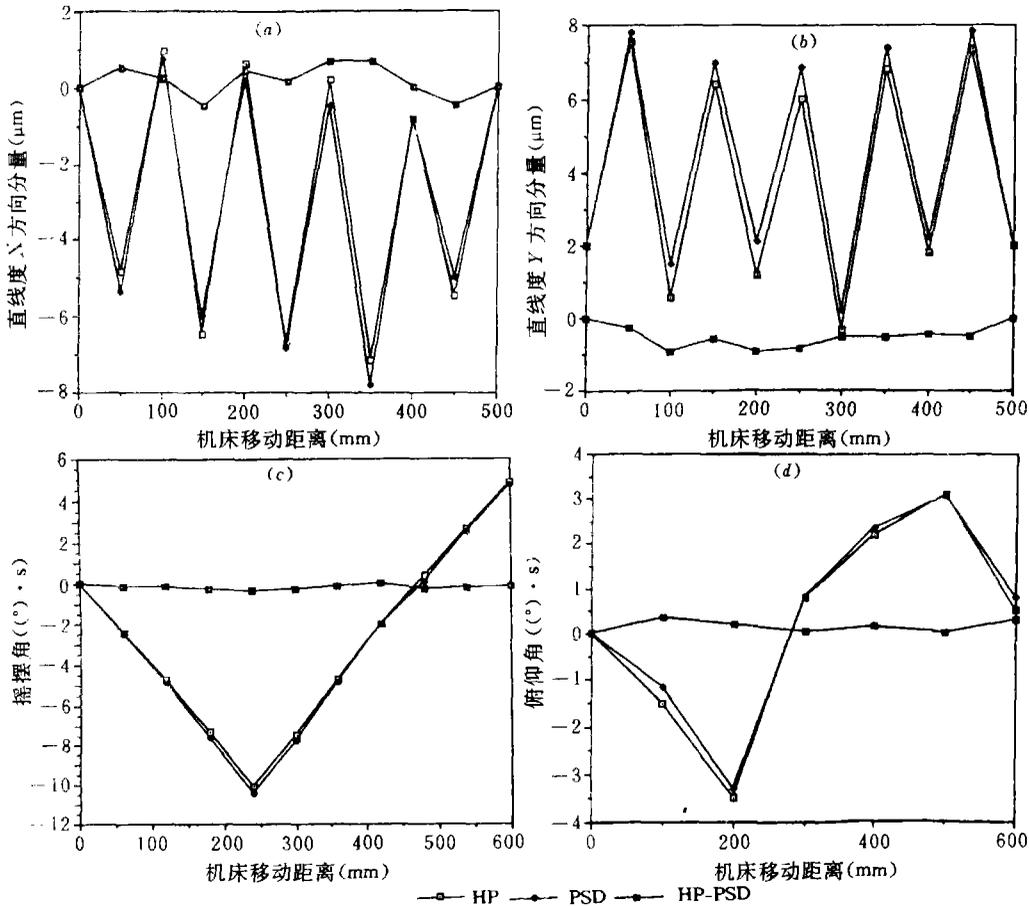


图 5 与 HP-5528A 对比试验

(a) 直线度 X 向分量对比; (b) 直线度 Y 向分量对比; (c) 摇摆角对比; (d) 俯仰角对比
 别给出 X 方向和 Y 方向的微小线性位移的结果。图 5(c)、5(d) 分别为测量机沿 Z 向移动, 测量头上附加装置产生微小转角的试验结果。图中 HP 为 HP-5528A 的数据, PSD 为本测量装置数据, HP-PSD 为这两套系统数据的差值。图中本测量装置的数据均为图 1 所示系统的结果。所研制的测量装置线性测量精度在 $1.5\mu\text{m}$ 内, 角位移测量精度在 $0.5''$ 内。与一般的激光干涉系统相比, 它具有同时可以测量 5 个移动误差分量的特点, 不存在激光干涉测量系统测量光路偶然被遮的现象及系统不能自动恢复工作必须重新测量的弱点。

参 考 文 献

- 1 Schultschik R. Geometrische Fehler in Werkzeugmaschinen. Strukturen. Annals of the International Institution for production Engineering Research (CIRP), 1975, 24(1): 361~366
- 2 Schultschik R. The Components of the Volumetric Accuracy. Annals of the CIRP, 1977, 26(1): 223~228
- 3 Ni J, Wu S M. A New On-Line Measurement System for Machine Tool Geometric Error. NAMRC, XV, 1987. 573~577
- 4 Hutcheson LD. Practical Electro-Optic Deflection Measurement System. January-February Optical Engineering, 1976, 15(1): 61~63