

激光多自由度测量方法综述

冯其波, 徐旻

(北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要: 激光干涉仪具有测量范围大、精度高等优点, 在计量和工业等许多领域得到广泛应用。然而这一最有代表性的测量仪器却受到了来自数控机床等许多需要多参数测量的领域的挑战。使用传统的激光干涉仪逐一进行单参数测量, 然后实现多参数测量, 既费时、费力, 测量精度也因每次人工调整而受影响。因此发展同时测量多参数的激光系统是这些领域普遍提出并有待发展的技术问题。本文介绍了现有激光多自由度测量系统, 分析了其优缺点, 给出了其发展趋势。

关键词: 激光干涉测量技术, 六自由度几何量误差, 数控机床。

0 前言

数控机床和加工中心精度的检测是机床工具行业和机械加工行业的关键环节, 也是保证机床加工精度和产品质量的重要手段。对数控机床进行检测与校正时, 需要数控机床停机并使用熟练的技术劳动力, 故对检测与校正的一个基本要求是要省时省力。现在最常用的数控机床检测方法是采用激光干涉仪, 比如 HP5529A 动态校正装置和 Renishaw、Zygo 的激光测量系统。这些激光干涉仪采用先进的光学技术, 简化了安装过程, 加强了数据采集和处理等功能, 使得测量较为简单, 但其基本的测量过程并没有改变, 还是单参数测量。一般三轴数控类加工设备总共需要检测 21 项误差分量, 安装一次仅测量一项误差分量, 其检测过程烦琐与漫长。因此, 发展同时测量 6 自由度几何误差的激光系统是机床工具行业普遍提出的技术问题。与此同时, 其它许多行业, 如空气动力中天平的校正问题, 需要同时测量六个自由度的变形来获得天平各方向所受力与力矩大小, 使用传统的激光干涉仪单参数分时测量显然不能满足要求。

国内外相关领域对以上问题进行了研究, 出现了应用激光同时测量多自由度的几种方法, 国际市场上也有 API 公司的五自由度、六自由度激光测量系统销售^[1]。下面对这些方法分别进行概述。

1 基于全反射原理的五自由度测量

如图 1 所示为基于全反射原理的五自由度测量原理图^[2], 双频激光器发出的激光经偏光分光镜分为两束, 由固定角隅棱镜 RR1 反射回来为参考光束, 由运动的角隅棱镜 RR2 反射回来为测量光束。在这两束光路中插入两个完全相同的无极性半透半反镜 (BS1, BS2) 和一个干涉滤光器。RR2 反射回来的光束经 BS2 分为两束, 透射光用来测距, 反射光用来测量其它四个误差项。采用带通干涉滤光器是为了消除外界光线对光接收器的干扰。由 BS2 反射的光束在半透半反镜 BS3 处再一次分成两束。反射光由一个二维位置传感器 (PSD) 检测, 根据 PSD 接收到的信号由以下公式可以得到水平和垂直方向的直线度误差:

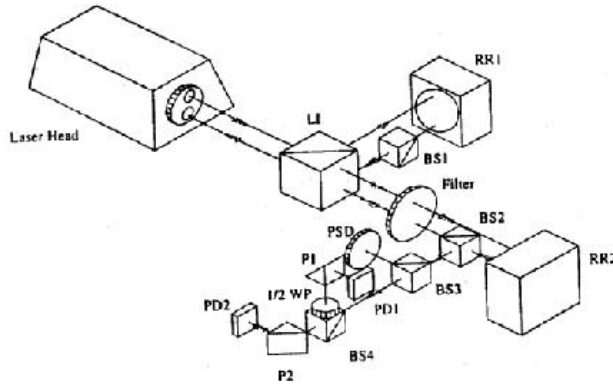


图 1 基于全反射原理的五自由度误差测量原理

$$S_x = K_1(x_1 - x_2)/(x_1 + x_2) \quad (1)$$

$$S_y = K_2(y_1 - y_2)/(y_1 + y_2) \quad (2)$$

其中 x_1 , x_2 , y_1 和 y_2 是PSD的四个输出信号, 注意 (x_1+x_2) 和 (y_1+y_2) 均为测量时激光束光强的测量值。

BS3 的透射光束在BS4 再一次进行分束, 根据全反射的角度测量原理^[3], 两束光分别用于俯仰角和偏转角的测量。俯仰角测量部分包括直角棱镜P1 和光电二极管PD1, 偏转角测量部分包括另一个直角棱镜P2 和光电二极管PD2。俯仰角误差和偏转角误差可根据下式计算得到:

$$\theta_p = K_3(y_1 + y_2)/I_1 \quad (3)$$

$$\theta_y = K_4(y_1 + y_2)/I_2 \quad (4)$$

其中 I_1 和 I_2 分别是光电二极管PD1 和 PD2 的输出信号。

俯仰角测量部分中半波片的作用是使激光束的极性发生旋转, 从而使反射到 P1 上的光束为 P 偏振光, 偏转角测量部分中半波片有类似的作用。整个装置只能测量五自由度误差, 并且采用了过多的光学元件, 使得系统复杂, 在实际中应用不多。

2 多光束六自由度测量

图 2 所示为一激光同时测量数控机床或三坐标测量机的六自由度误差系统^[4]。光源可采用线偏振氦氖激光器或激光二极管。由于测量系统把光源发出的激光束作为测量基准来测量角度误差和直线度误差, 光源的稳定性直接影响最终的测量精度。本系统采用了单模光纤器件, 使得激光束的瞄准稳定性大大提高。俯仰角和偏转角误差由棱镜 L3 和L4 组成的自准直望远镜测得, 两项直线度误差由两角隅棱镜RR1、RR2 以及相应的位敏元件PSD1、PDS2 同时测得, 通过对位敏元件PSD1、PDS2 的读数进行处理可以得到滚转角误差。文献^[5]介绍了一种类似的测量原理。为克服位敏元件测量范围小, 背景噪声大等缺陷, 可用CCD代替位敏元件^[6], 然而这并没有改变该测量方法测量体积大、实际应用中安装与调整困难等缺点。

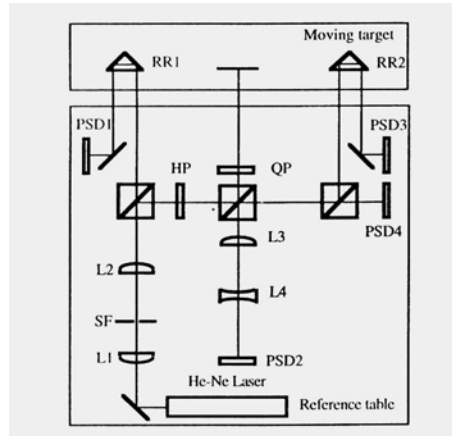


图 2 基于三光束的六自由度误差测量系统

图 3 所示为另一种同时测量数控机床 6 自由度误差的光学系统^[7]。直线位置误差 ΔX 由传统激光干涉测长系统测得。通过两平行光束 A 和 B，其它五项误差可由三个四象限光电电池的输出得出：

$$\Delta y = h_1 \quad \text{水平直线度} \quad (5)$$

$$\Delta z = v_1 \quad \text{垂直到线度} \quad (6)$$

$$\theta_x = (v_3 - v_1)/L_1 \quad \text{滚转角} \quad (7)$$

$$\theta_y = (v_2 - v_1)/L_2 \quad \text{俯仰角} \quad (8)$$

$$\theta_z = (h_3 - h_1)/L_2 \quad \text{偏转角} \quad (9)$$

h_1 和 v_1 是传感器接收到的激光束在水平方向和垂直方向的位移偏移量，下标 1 是传感器的编号。这种 6 自由度误差测量系统具有结构简单、三个角度误差测量精度高等优点，但由于其测量头体积大，且需放置于活动平台上，其应用范围受到限制，不能用于高速加工中心的动态测量。同时光线 A、B 的平行性误差给测量转滚角带来误差，且不易修正。

图 4 为使用两套激光多普勒测长仪构成的六自由度误差测量系统^[8]。测量系统包括活动部分和固定部分。活动部分固定在运动的工作台上，由三个反射镜组合而成。固定部分安装在一个参考平台上，包括一个能够发出三束平行光的激光头单元、一个分光镜和两个四象限探测器。激光头单元由一个双光束多普勒激光位移计和一个单光束多普勒激光位移计组合而成，它所发出的三束激光在测量前经精确的调整以达到平行。三束激光经反射镜反射回激光头的接收器，通过比较三反射镜相应的线性位移，可以得到定位误差、俯仰角误差和偏转角误差。分光镜反射的两束光分别由两个四象限光电探测器接收，通过比较两个四象限光电探测器在水平和垂直方向上的信号，可以得到两个方向上的直线度误差和运动工作台的滚转角误差。然而该方法使用三条平行光线，其平行性误差给角度测量带来一定的误差，且两套干涉仪增加了系统的成本和复杂性。

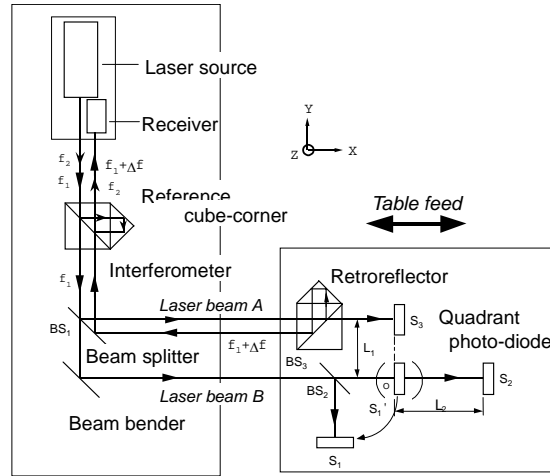


图 3 基于两光束的六自由度误差测量系统

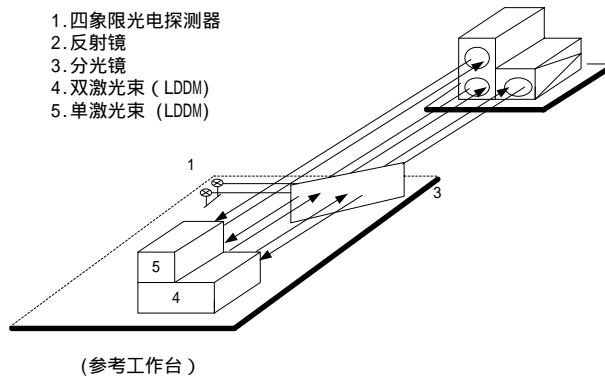


图 4 基于两个激光测长仪的六自由度测量系统

3 基于全息透镜的六自由度测量

图 5 所示为一个基于全息透镜分光特性的六自由度测量系统^[9]。全息透镜在这里实际上是一个正弦平面光栅，激光束经全息透镜后分为三路。方向没有改变的一束光为非衍射光束，可用来测量两个方向上的直线度误差。另外两束分别是会聚光束和发散光束，会聚光束可以测量俯仰角和偏转角误差，发散光束用来检测滚转角误差。文献^[10]介绍了与之类似的测量方法。为了得到高精度的角度误差，它采用了一些补偿技术来提高激光束的稳定性。基于全息透镜的 6 自由度测量方法具有使用元件少、成本便宜等优点，但由于滚转角是通过测量能量大小变化得到的，因此测量精度较低。

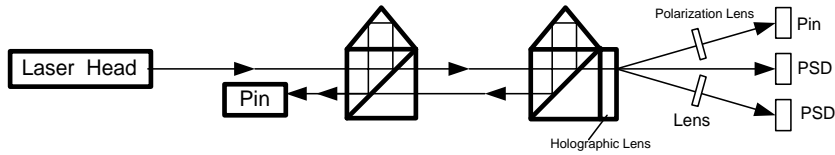


图 5 基于全息透镜的激光六自由度误差测量系统

4 发展趋势

除了以上几种激光多自由度误差测量方法外，近年来也出现了其它一些方法，如采用动态目标全姿态激光跟踪测量^[11]或使用共焦点的光学系统^[12]等。前者测量系统过于复杂，测量精度不高，后者测量的光学系统复杂，测量头体积大。尽管这些方法各有优点，但它们都受到测量带宽和测量头体积的限制，不能广泛应用。此外，几乎所有这些系统都需用电缆连接运动的测量头和测量仪器的其余部分，很难实现快速、方便的测量。现在国内外研究激光多自由度误差测量的一个趋势是朝着体积小、高速度、无电缆连接的方向发展。系统的主要参数包括在测量速度高达 1.8m/秒和加速度为 3g条件下达到上千赫兹的带宽。此外，作者认为，使用频率稳定的激光二极管替代传统的双频激光干涉仪可以减小仪器体积并且易于操作，这也将是本领域发展的一个趋势。

参考文献

1. Herbert Kaplan. Lasers quickly calibrate machine tools. *Photonics Spectra*, 1998, 32(5): 72.
2. P.S.Huang and Y.Li, Laser Measurement Instrument for Fast Calibration of Machine Tools, *Proceedings of ASPE Annual Meeting*, 1996, 14:644-647.
3. Huang, P.S. and Ni, J., Angle Measurement based on the internal-reflection effect and its application in the measurement of geometric errors of machine tools, *Proceedings of ASPE Annual Meeting*, 1993, 11:149-152.
4. Ni, J., Huang, P.S. and Wu, S.M., "A multi-degree-of-freedom Measuring system for CMM geometric errors", *ASME Journal of Engineering For Industry*, 1992, 14:362-389.
5. Sung-Chong Chung, Six Degrees of Freedom Error Measuring Device for Linear Motion of Slides, *Proceedings of ASPE Annual Meeting*, 1998, 18:445-449.
6. CHIEN CHOU, et al. CCD-Based CMM Geometrical Error Measurement Using Fourier Phase Shift Algorithm, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 1997, 37(5):579-590.
7. Shiji Shimizu, et al. Simultaneous measurement method of table motion errors in six degrees of freedom. *International Journal of Japan Society for Precision Engineering*, 1994: 28(8):273-274.
8. K.C.Fan. et al. A six-degree-of-freedom measurement system for the motion accuracy of linear stages, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 1998, 38(3):155-164.
9. 房丰洲等, 空间物体六自由度定位术, *航空精密制造技术*, 1998, 34(2):37-38.
10. 周富强等, 同时测量物体五维几何偏差的新方法, *计量学报*, 1999, 20(4):247-251.
11. 刘永东等, 动态目标全姿态激光跟踪测量, *激光与红外*, 1999, 29(3):148-150.
12. K. Matsud et al. Using a reflection confocal optical system to measurement straightness, *ISATA*

magazine, 1998:16-18

冯其波，1962年生，工学博士，副教授。主要从事精密计量、仪器仪表及铁路安全检测技术等方面的研究。获得5项国家专利，发表论文40余篇。1998至1999年在美国北卡大学夏洛特分校从事数控机床动态测量及激光测量等方面的研究。

Survey of laser methods for simultaneously measuring multiple parameters of CNC machines

Feng Qibo Xu yang

(Department of Physics, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Laser interferometry has been widely used for a long time for precision metrology and industry application, it has advantages of large measurement range and high accuracy. However, laser interferometry now faces some challenges from machine tool metrology and other fields where six degree of freedom geometric error measurements are required. Traditional laser interferometry for such 6 DOF error measurements can only measure one error component at a time, which is very tedious and time-consuming. Development of laser systems for simultaneous measurement of 6 DOF errors is a trend in the above fields. Several methods for measuring simultaneously 6 DOF errors are surveyed and discussed in this paper, some ideas about its trend are given in the end.

Key Words: Laser interferometry, six degree of freedom geometric error, CNC machines.