

【文章编号】 1004-1540(2006)04-0261-04

机床几何精度的在线激光测量与快速校准技术

王正平

(美国光动公司,美国 加利福尼亚州 70220)

【摘 要】 为了改善机床的几何精度,达到高精度的三维空间定位,必须对它的垂直度误差与直线度误差进行测量与校正.传统的激光测量方法花费时间长,成本高.由 ISO 及 ASME 提出并由波音公司等应用的体对角线测量方法虽然速度快,成本低,但不能有效分离误差源.现介绍一种由美国光动公司发明的基于体对角线分步(或矢量)激光测量方法,该方法速度快、准确度高、成本低,可以分离误差源并对其提供补偿与校正.

【关键词】 误差补偿;位置误差;体对角线;矢量测量

【中图分类号】 TP202⁺.2 **【文献标识码】** A

Laser accuracy measurement and calibration technique for machine tools

WANG Zheng-ping

(Optodyne Co., USA, CA70220, USA)

Abstract: To improve the volumetric accuracy of machine tools, it is necessary that squareness and straightness errors of machine tools are measured, compensated and calibrated. Traditional laser measurement method takes long time and high cost. “Body-diagonal” measurement presented by ISO and ASME, that is being used by the Boeing and others which gives accurate volumetric measurements for most equipment and features rapidness and low cost, but the error roots are not separated. This paper introduces a sequential-step diagonal measurement technique, which is invented by Optodyne Co. The measurement method can separate error roots and generate a compensation table that, in turn, can be used to calibrate the machine.

Key words: Error compensation; position error; body diagonals; vector measurement

20 年前,大型机床的主要几何精度为丝杠的螺距误差及热膨胀误差,但在今天,上述的大部份误差项目已由线性编码器来减少与补偿,转而垂直度误差与直线度误差成为机床的主要几何误差.为了达到高精度的机床三维空间定位,机床上所有的 3 个位移误差、6 个直线度误差和 3 个垂直度误差都得测量与校正,以改善机床的运动性

能而提高加工精度.

激光干涉仪是机床误差测量与校正中具有测量精度高、测量方法相对完善及测量技术相对成熟的测量工具.目前,国内外学者对利用激光干涉仪测量机床的 21 项几何误差提出了多种测量方法,如 22 线法^[1]、15 线法^[2]、14 线法^[3]、9 线法^[4]等.但在实际测量时,这些方法还是比较复杂.使

用传统的激光干涉测量仪测量机床直线度和垂直度相当耗时而且成本高,通常有经验的操作者花数天停机时间才能完成这些测量。

为了便于机床空间位置精度的快速检定,ISO230-6 与美国国家标准 ASME B5.54^[5,6]中推荐了沿机床工作台 3 个进给方向上的最大行程所围成的 4 条体对角线进行快速测量的方法,该方法在一定程度上可以反映机床的几何精度,改进了机床误差的测量过程。由于这些测量相当的简便、快速和直接,又不需要增加成本和长的停机时间,所以被波音公司以及其他一些公司成功应用多年,满足了用户需求,但使用该方法不能获得用于补偿的误差信息^[7]。美国光动公司等^[8]提出的基于体对角线的位移误差多步测量(向量测量)方法,突破传统干涉仪的瓶颈,加上专利产品(美国专利 6,519,043,2/11/2003)“激光多普勒位移量尺”(Laser Doppler Displacement Meter—LDDM)可以方便而快速地获得机床 3 个运动轴的 3 项位移误差、6 项直线度与 3 项垂直度误差,准确地反映了机床的几何精度,为空间位置误差测量及补偿提供了理论指导。该方法使用一套简单、便携式的激光多普勒干涉仪,在几小时内将机床的各种误差全部测量出来,从而大大降低了测量时间与测量成本。

1 激光多普勒位移测量原理

激光多普勒位移测量是应用雷达原理、多普勒频差效应及光学外差原理,利用反射镜移动时对激光束反射所产生的激光频率的多普勒频移来进行位移测量。如图 1 所示(实际进行位移测量时使用平面镜即可,激光头射出的光束与平面镜反射的光束在同一路径上,这里用平行反射镜是便于描述),激光头射出的频率为 f_0 ,经平行反射镜反射回到探测器,当平行反射镜不动时,其反射波频率 $f_r = f_0$ 。当反射镜以 v 的速度移动时($v = dx/dt$,其值相互远离时为正,相互移近时为负),因为光程增加(减少)了 $2vt$,反射波 f_r 的数值会减小(增大) $2v/\lambda_0$ (λ_0 为激光波长),即

$$\Delta f = f_0 - f_r = \frac{2v}{\lambda_0} = \frac{2}{\lambda_0} \frac{dx}{dt}$$

由此可得在时间 t 内激光头与反射镜间的相对运动距离

$$x = \frac{\lambda_0}{2} \int_0^t \Delta f dt$$

激光多普勒位移测量仪采用了一个鉴相器,每当相位 φ 积满一个 2π ,鉴相器便输出一个增位(减位)脉冲,通过鉴相器发出的脉冲数可测知位移 x ,即

$$x = \frac{\lambda_0}{2} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right)$$

式中, N 为积分满一周期(即 2π 的周数); $\frac{\Delta\varphi}{2\pi}$ 为未满一周期的余量。

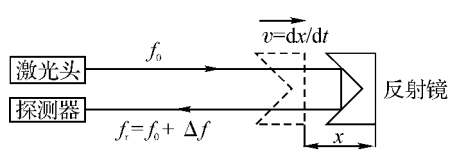


图 1 激光多普勒频差效应原理

2 机床几何精度

就三轴机床而言,每轴共有 6 项误差,或换句话说,三轴共有 18 项误差加上 3 项垂直度误差,这 21 项刚体误差可以表示如下^[9]:

直线位移误差: $D_x(x), D_y(y), D_z(z)$;

垂直直线度误差: $D_y(x), D_x(y), D_x(z)$;

水平直线度误差: $D_z(x), D_z(y), D_y(z)$;

横转度误差: $A_x(x), A_y(y), A_z(z)$;

俯仰度误差: $A_y(x), A_x(y), A_x(z)$;

偏摇度误差: $A_z(x), A_z(y), A_y(z)$;

垂直度误差: $\varphi_{xy}, \varphi_{yz}, \varphi_{zx}$ 。

其中 D 为直线误差,下标表示位移方向,位置坐标为函数中的变量; A 为角度误差,下标表示旋转方向,位置坐标为函数中的变量。

3 现有的几何精度定义

对于三轴机床而言,主要的定位误差为各轴的位移误差 $D_x(x), D_y(Y), D_z(z)$,几何误差则定义为这些位移误差和的平方根,因此可表示如下式:

$$\text{几何误差} = \sqrt{\left[\text{Max } D_x(x) - \text{Min } D_x(x) \right]^2 + \left[\text{Max } D_y(Y) - \text{Min } D_y(Y) \right]^2 + \left[\text{Max } D_z(z) - \text{Min } D_z(z) \right]^2}$$

上述定义当主要误差为三项位移误差(或丝杠螺距误差)时是正确的,但是近年来的机床,其主要误差为直线度误差与垂直度误差,远大于直线位

移误差,因此上述的定义并非绝对符合实际。

4 几何精度的新定义

各轴向的定位误差 $D_x(x, y, z)$, $D_y(x, y, z)$ 及 $D_z(x, y, z)$ 为位移误差与直线度误差的和,可表示如下式:

$$D_x(x, y, z) = D_x(x) + D_x(y) + D_x(z)$$

$$D_y(x, y, z) = D_y(x) + D_y(y) + D_y(z)$$

$$D_z(x, y, z) = D_z(x) + D_z(y) + D_z(z)$$

几何精度为这些总误差的均方根,如下式所示:

$$\begin{aligned} \text{几何精度} = & \sqrt{[\text{Max } D_x(x, y, z) - \text{Min } D_x(x, y, z)]^2 + \\ & [\text{Max } D_y(x, y, z) - \text{Min } D_y(x, y, z)]^2 + \\ & [\text{Max } D_z(x, y, z) - \text{Min } D_z(x, y, z)]^2} \end{aligned}$$

因此,使用一般的激光干涉仪来测量这些直线度与垂直度误差是相当耗时的,而在 ASME B5.54 或 ISO230—6 标准中所列的体对角线位移测量则是一种快速的几何精度检验方法。

5 体对角线位移测量

机床几何精度包含 3 项位移误差、6 项直线度误差、3 项垂直度误差与一些角度误差,将会在 4 条体位移对角线误差中解出后获得,这是一种较佳且有效的几何精度测量方法,空间误差可定义为 $[Max Dr(x, y, z) - Min Dr(x, y, z)]$, 其中 $Dr(x, y, z)$ 为对角线位移误差。

体对角线位移测量方式被建议用来作机器定位及几何准确度的快速检验。简单地说,类似于激光直线位移测量。取代了激光光束在轴向的指向,而是作体对角线方向的指向,固定反射镜在主轴上,并沿着体对角线方向移动主轴,从零点位置开始,并使三轴沿着对角线方向以单步增量运动到新的位置,则可测得位移误差,沿着对角线任一位置的准确度是依据三轴的定位准确度来决定。该准确度包含直线度误差、角度误差及垂直度误差,因此体对角线位移测量是一种机床验证的良好方法,但并没有足够的信息可以用来鉴别误差源。

ASME B5.54—1992 与 ISO 230—6 机床性能测量标准中的介绍,使得以激光对体对角线位移测量所进行的机床几何精度快速检测变得更为普及,B5.54 体对角线位移测试已经为波音飞机公司及其他公司广为使用多年并获得良好结果与成效。

6 分段对角线或向量测量

当机床本身具有较小的体对角线位移误差时,空间误差相对亦小,而当机床本身具有较大的体对角线位移误差时,并无足够的数据可用来计算出造成较大空间误差的误差组成。使用光动公司的激光多普勒位移量尺(LDDM:Laser Doppler Displacement Meter)来进行分段对角线或向量测量,可由 4 条分段对角线测量中采集到 12 组数据,因此 3 项位移误差、6 项直线度误差与 3 项垂直度误差可由此计算出,所测得的误差可用来补偿空间定位误差与改善三维定位精度或空间精度。

新的向量测量方法或分段对角线测量方法不同于传统的方法,因为各轴是分开移动的(如图 2),且定位误差是在每次 x 轴、 y 轴及 z 轴各自移动后采集,基于这个方法,可采集到 3 倍的资料;同时定位误差因为各轴各自移动,可分离出来,这些采集到的资料可当作各轴沿着对角线位移的投影来作处理。然而,一般的体对角线位移测量,标靶轨迹是直线,并且以角偶棱镜来作标靶,因此只能容许较小的侧向位移。而向量方法,则变成分别沿着 x 轴、 y 轴及 z 轴作移动,重复这些动作直到对角线的相对端点,激光干涉仪使用单光束激光,并以平面镜当作标靶,当平行移动平面镜时,激光光束不会被遮断及改变与光源的距离,不会影响测量,因此容许标靶有较大的侧向移动。

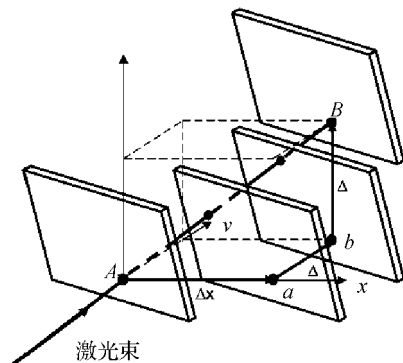


图2 分段对角线测量的主轴移动方向

7 美国光动公司及其 LDDM

美国光动公司为加利福尼亚的一家公司,通过一个世界范围的分布网,开发、制造和销售精密的激光测量设备。这些设备可应用于需精密测量的机

床校正和补偿、度量衡学、OEM 及其它工业中。

美国光动公司最近推出一种新型的空间激光校准系统。这种 MCV-5000 系列激光系统设计可用于大型五轴机床整个空间的校准和补偿。使用这个系统能测量所有的静态位置误差、转角误差、转轴误差和运动性能。空间位置误差包括 3 个定位误差、6 个直线度误差以及 3 个垂直度误差。转角误差包括每个运动轴的俯仰误差、偏摆误差和滚转误差。转轴误差包括五轴机床的 A、B 和 Z 转动轴的误差。运动性能包括圆和非圆轨迹的测量,用于评价伺服系统、进给系统、速度、加速度和机械振动等。这种新型的空间激光校准系统使用最新的矢量技术测量空间误差。该系统组装和操作简便、结构紧凑、测量效率高、耗时少。对于五轴机床,能使用一个自动转盘去校准 A、B 和 Z 转动轴。利用两个单孔激光头、两个平面靶镜和快速接口卡,圆和非圆轨迹能在一套组件中测量。实际的速度和加速度也能被确定。激光矢量技术在激光测量中是一个主要的突破。这种空间激光校准系统容易组装和操作,为高效和快速测量而设计。4~5 m³ 工作空间内的空间位置误差的测量能在 2~3 h 内完成,并且,大多数主要控制器的补偿文件能自动生成。甚至对于大型的龙门机床,大多数测量能在 1 d 内完成,而用传统的干涉仪则需几天的时间。本套设备结构紧凑,能装在两个小型的手提箱中,并有 4 种型式(mcv5002 到 mcv5005)。标准测量范围是 30 m,最大的测量范围可达到 100 m。分辨率为 0.000 1 mm。激光稳定性为 0.1 ppm,精度为 1 ppm。

8 结 语

本文介绍的一种基于激光多普勒位移测量仪,通过测量四条体对角线的位移误差求解三轴机床几何精度的新方法。基于体对角线的常规测量误差具有对所有误差源都敏感的特性,它是一种快速检验机床精度的方法。但是,它无法获得足够的信息来辨识各误差源,而且也无法获得能用于补偿的有关误差信息。基于体对角线的激光向量法,利用激光多普勒位移测量仪结合向量分析,通

过沿 4 条体对角线的多步测量可以快速方便地获得数控机床 3 个运动轴的 9 项位置误差,该 9 项位置误差不仅反映了机床的几何精度,而且为机床空间位置误差补偿实施提供了必要的基础。

根据在亚崴的立式加工中心上完成向量测量与空间补偿表明,亚崴的立式加工中心的空间定位准确度可获得超过 90% 的改善(误差减少了 90%),同时注意到如果只作螺距误差补偿,则仅改善 15%,因此只作螺距误差补偿是不足够的,能够同时补偿螺距误差及直线度误差是相当重要的。此外,激光向量测量仪仅需 2~4 h 即可完成全部测量,比传统激光干涉仪所需要的 20~40 h 要少得多,并且自动采集数据,自动进行数据处理,自动生成补偿文件,排除了手动操作并减少误差,因此无需经验丰富的工程师,机床操作者在接受训练后即可进行激光校验。

【参 考 文 献】

- [1] ZHANG G, QUANG R, LU B. A displacement method for machine geometry calibration[J]. Annals of CIRP, 1998, 37: 515—518.
- [2] CHEN G Q, YUAN J X, NI J. A displacement measurement approach for machine geometric error assessment[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(1): 149—161.
- [3] 范晋伟,田越. 基于 14 条位移线测量法的数控机床误差参数辨识技术[J]. 北京工业大学学报, 2000, 26(2): 11—15.
- [4] 赵小松,方沂. 四轴联动加工中心误差补偿技术的研究[J]. 中国机械工程, 2000, 26(6): 637—639.
- [5] ASM E. B5. 54—1992 Methods for performance evaluation of computer numerically controlled machining centers[S]. An American National Standard, 1992.
- [6] ISO 230—6:2002. Test code for machine tools-Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (Diagonal displacement tests)[S]. 2002.
- [7] 任永强,刘国良,叶飞帆,等. 基于体对角线机床位置误差的激光矢量测量分析[J]. 上海交通大学学报, 2005(9): 1413—1417.
- [8] 王正平. 用激光向量测量技术测量和补偿体积定位误差[J]. 计量技术, 2001(10): 10—13.
- [9] SCHALTSCHIK R. The components of the volumetric accuracy[J]. Annals of the CIRP, 1977, 125(1): 223—228.

(由单越康、楼洪良审读、整理)