

文章编号 1004-924X(2016)04-0681-09

## 在机测量激光测头位姿的线性标定

张丽艳\*, 夷宏明, 刘胜兰

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**针对在机激光扫描测量中激光测头安装位置和姿态引起的测量误差,提出了一种适用于在机激光测量的测头标定方法。构造了在机激光扫描测量原型系统,建立了激光测头随机床运动的测量模型;通过多角度扫描标准球球面拟合球心,给出了一种线性求解测头安装位姿参数的算法,避免了非线性优化求解中的大量计算和不稳定问题。分析了测量过程中机床各个轴的运动误差对测量结果的影响,建立了误差模型,并给出补偿机床系统误差的方法。实验显示,对直径已知的标准球进行测量时,测头在不同摆角测得的标准球直径误差小于 0.05 mm,误差补偿后球心位置误差减小了 83%。实验结果验证了该标定方法的可行性,以及机床误差对测量精度影响的模型及补偿方法的正确性。

**关键词:**在机测量;激光扫描测量;测头标定;线性标定;误差补偿

**中图分类号:**TN247;TP391.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162404.0681

## Linear calibration for on-machine measurement of laser probe pose

ZHANG Li-yan\*, YI Hong-ming, LIU Sheng-lan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn

**Abstract:** A calibration method suitable for a laser probe in on-machine laser scanning measurement was proposed to eliminate the measuring errors from installation pose. A prototype system for the on-machine laser scanning measurement was built and a model of the laser probe moved with a machine tool was established. The center of a standard ball was fitted by scanning the ball surface with multi-perspective, and a linear algorithm to solve the installation pose parameters of the laser probe was given to overcome the heavy computation and un-robustness of the existing nonlinear algorithms. The influence of the machine tool movement error on the measurement was also analyzed and an error model was established and a compensation method for the machine tool error was proposed. The experimental results show when the standard ball with a known diameter was measured, its diameter error measured by the laser probe at different angles is less than 0.05 mm, and the position error of the standard ball center is reduced by 83% with the compensation method. The results illustrate the feasibility of the calibration method as well as the validity of the error model and the compensation method.

**Key words:** on-machine measurement; laser scanning measurement; probe calibration; linear calibration; error compensation

收稿日期:2015-09-10;修订日期:2015-12-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51575276);航空科学基金资助项目(No. 20131625, No. 20141652015)

## 1 引言

以激光测量为代表的非接触式测量方法,具有速度快、无磨损、不需要进行测头半径补偿等优点,能够在满足测量精度的前提下,大幅提高测量效率,并且可以获得更详细的曲面信息<sup>[1-4]</sup>。在机测量可以及时发现制造工程中的问题,进而可以引入误差补偿等措施及时修正这些问题<sup>[5-6]</sup>。在机测量的一种重要形式是将一维测距式激光测头装夹在数控机床的主轴末端,通过机床运动带动激光测头发出的激光线扫描被测工件表面,结合激光测头获得的距离测量值和机床各轴的运动参数计算出各采样时刻激光线与工件表面交点的三维坐标。

激光测头通过机械装夹机构安装在机床的运动主轴上,但测头的安装位姿很难精确调整。为了补偿安装位置和偏角引起的测量误差,文献[7]提出利用位置敏感探测器和特别设计的夹具机构,手动调整激光测头光束轴线使轴线通过测头回转体的回转中心的方法。文献[8]用平面方向可调的标定块进行测头姿态的标定,再使用标准球进行测头安装位置标定,标定过程比较繁琐。文献[9]使用标准球作为标定靶标,通过测头分别沿 X、Y、Z 轴向等距离移动,实现了测头的方向标定,但无法确定激光测头的安装位置。文献[10]针对三坐标测量机上安装的激光测头,提出了 PH10 回转体上测头安装位姿的标定方法,建立了非线性目标函数,给出了一种并行组合模拟退火算法求解未知参数。文献[11]建立了一种五坐标测量机激光测头安装位姿的数学模型,将标定问题表达为带约束的非线性优化问题,通过罚函数建立待标定参数的无约束最优化目标函数,进而采用改进的遗传算法进行非线性搜索寻优。

本文针对五轴数控机床建立了在机激光测量的数学模型,提出一种测距式激光测头安装位姿参数的线性求解方法,有效地避免了非线性优化求解中的大量计算和不稳定问题。该方法通过离线生成机床运动程序,使机床带动测头对标准球进行多角度扫描测量,根据测量数据拟合标准球球心可同时求解出测头安装的位置和姿态参数。该方法不仅能够有效标定测头位姿,而且标定过程简单,易于操作。

## 2 在机激光测量模型

本文以龙门式五轴数控机床为例阐述本文方法的测量模型和标定原理,对于其他形式的五轴机床可参照本文方法类推得出。如图 1 所示,机床是一种双摆头机床,工作台相对机床静止。通过设计的装夹机构将一维测距式激光测头安装在主轴上,并将主轴锁死。在理想情况下,光学测头光束方向与机床 Z 轴轴线方向一致,测头的光学零点位置在 Z 轴轴线上。但由于激光测头在安装时的定位基准不精确,必然会产生偏心和倾角。这些安装误差将降低测量精度,因此需要一种可靠的测头位姿标定方法。

首先建立激光测头测量模型中的各坐标系,如图 1 所示:

(1) 机床世界坐标系  $C_{mw}$ :坐标系的原点为机床回零时旋转轴 A、C 轴线的交点。X、Y、Z 轴分别与机床 3 个运动导轨的方向一致。机床世界坐标系不受机床运动的影响,是一个固定坐标系。

(2) 机床主轴平移坐标系  $C_t$ :此坐标系的原点为旋转轴 A、C 轴线的交点,并随着主轴一起移动,3 个坐标轴方向与机床世界坐标系 3 轴方向一致。当机床回到零点时,机床主轴平移坐标系与机床世界坐标系重合。

(3) 机床主轴旋转坐标系  $C_r$ :转动机床 A、C 轴时,坐标系  $C_r$  随 A、C 轴一起转动。机床旋转轴 A、C 的转角为  $0^\circ$  时,坐标系  $C_r$  与坐标系  $C_t$  重合。

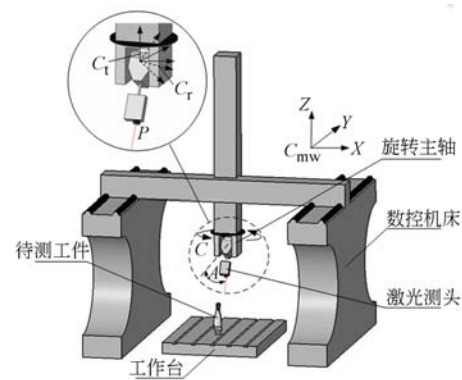


图 1 在机激光测量机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanism for on-machine laser measurement

根据机床运动可知,机床主轴平移坐标系  $C_t$  与机床世界坐标系  $C_{mw}$  之间只有平移关系,表征机床的平移运动,可表示为  $\mathbf{T}_t^{mw} = \mathbf{Q} = [x_t^{mw} \quad y_t^{mw} \quad z_t^{mw}]$ 。其中,  $\mathbf{Q}$  为机床坐标读数,可以从机床直接读取。当机床主轴旋转到任意角度时,机床主轴旋转坐标系  $C_r$  与机床主轴平移坐标系  $C_t$  只有旋转关系,记旋转轴 A、C 的转角分别为  $\theta_A$  和  $\theta_C$  ( $\theta_A, \theta_C$  方向满足右手坐标系),则旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{tC} = \mathbf{R}_C \mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} \cos \theta_C & -\cos \theta_A \sin \theta_C & \sin \theta_A \sin \theta_C \\ \sin \theta_C & \cos \theta_A \cos \theta_C & -\sin \theta_A \cos \theta_C \\ 0 & \sin \theta_A & \cos \theta_A \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:

$$\mathbf{R}_C = \begin{bmatrix} \cos \theta_C & -\sin \theta_C & 0 \\ \sin \theta_C & \cos \theta_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_A & -\sin \theta_A \\ 0 & \sin \theta_A & \cos \theta_A \end{bmatrix}.$$

当激光测头装夹在主轴上时,激光测头的光学零点  $P$  点在机床主轴旋转坐标系  $C_r$  下存在安装偏心,表示为  $\mathbf{T}_p = [x_p^r \quad y_p^r \quad z_p^r]^T$ ,激光测头在光束方向的安装偏角表示为  $\mathbf{R}_p^r = [l \quad m \quad n]^T$ 。测头装夹好后这些参数即为定值。当测量一点  $q$  时,若一维测距式激光测头读数记为  $d$ ,则  $q$  点在机床主轴旋转坐标系  $C_r$  下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_q^r \\ y_q^r \\ z_q^r \end{bmatrix} = d\mathbf{R}_p^r + \mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} dl + x_p^r \\ dm + y_p^r \\ dn + z_p^r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

设点  $q$  在世界坐标系下的坐标为  $[x_q^{mw} \quad y_q^{mw} \quad z_q^{mw}]^T$ ,由式(1)和式(2)可得:

$$\begin{bmatrix} x_q^{mw} \\ y_q^{mw} \\ z_q^{mw} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_C \mathbf{R}_A (d\mathbf{R}_p^r + \mathbf{T}_p) + \mathbf{T}_t^{mw}. \quad (3)$$

式(3)即为在机激光测量的数学模型,其中  $\mathbf{R}_A, \mathbf{R}_C$  由机床旋转轴 A、C 的转角计算得到,  $\mathbf{T}_t^{mw}$  为机床 X、Y、Z 3 轴读数,  $d$  为激光测头测量值,这些参数都可以在测量过程中实时获得;而  $\mathbf{R}_p^r, \mathbf{T}_p$  则是需要事先标定的结构参数。

### 3 测头安装位姿标定

这里将激光测头安装模型简化,如图 2 所示,用简单的直线段替代测头实物。激光测头的光学零点  $P$  的安装偏心  $\mathbf{T}_p$  在 X、Y、Z 3 轴方向的平移

量分别用线段 MN、NP、O<sub>r</sub>M 表示,3 条线段两两垂直。激光光束在主轴旋转坐标系  $C_r$  下的方向用虚线表示。

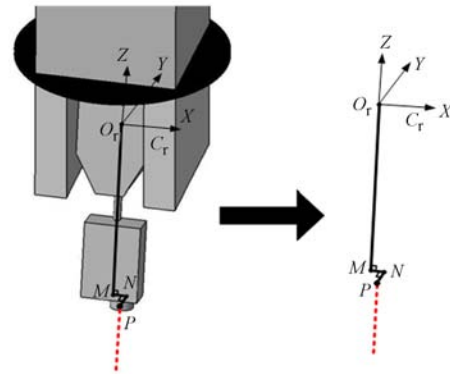


图 2 激光测头安装模型简化图  
Fig. 2 Simplification of installation model of laser probe

由式(3)可知,只要控制机床以不同转角 ( $\theta_A$  和  $\theta_C$ ) 和平移向量 ( $\mathbf{T}_t^{mw}$ ) 对同一点  $q$  进行多次测量,即可有足够多的方程求解未知参数  $\mathbf{R}_p^r, \mathbf{T}_p$ 。但当改变机床的主轴转角后,很难保证激光束再次对准同一点进行测量。为此本文采用测量标准球的球心  $S_0$  来替代测量空间一点  $q$ 。

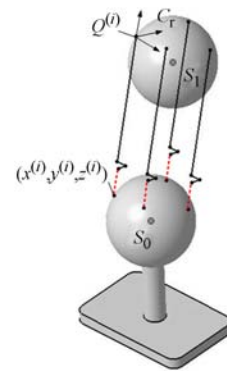


图 3 激光测头标定过程  
Fig. 3 Calibration of laser probe

当机床主轴在某个转角对标准球测量时,控制主轴位置  $\mathbf{T}_t^{mw}$ ,从而保持激光测头返回的测量值  $d$  不变,这样  $\mathbf{R}_C \mathbf{R}_A (d\mathbf{R}_p^r + \mathbf{T}_p)$  即为一固定值,设为  $\Delta \mathbf{T}$ 。不改变旋转轴角度时,每测量标准球球面上一点  $[x^{(i)} \quad y^{(i)} \quad z^{(i)}]$ ,就对应着机床一组坐标读数  $\mathbf{Q}^{(i)}$ ,如图 3 所示。每一组线段表示测头平移到一个测量位置,且有如下关系:

$$\begin{bmatrix} x^{(i)} \\ y^{(i)} \\ z^{(i)} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{(i)} + \Delta \mathbf{T}. \quad (4)$$

因此标准球球心可表示为:

$$\mathbf{S}_0 = \mathbf{S}_1 + \Delta \mathbf{T} = f(\mathbf{Q}^{(1)}, \mathbf{Q}^{(2)}, \dots, \mathbf{Q}^{(n)}) + \mathbf{R}_C \mathbf{R}_A (d \mathbf{R}_p^r + \mathbf{T}_p), \quad (5)$$

式中:  $f(\mathbf{Q}^{(1)}, \mathbf{Q}^{(2)}, \dots, \mathbf{Q}^{(n)})$  表示对机床坐标  $\mathbf{Q}^{(i)}$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d \cos \theta_C & d \cos \theta_A \sin \theta_C & -d \sin \theta_A \sin \theta_C & -\cos \theta_C & \cos \theta_A \sin \theta_C & -\sin \theta_A \sin \theta_C \\ 0 & 1 & 0 & -d \sin \theta_C & -d \cos \theta_A \cos \theta_C & d \sin \theta_A \cos \theta_C & -\sin \theta_C & -\cos \theta_A \cos \theta_C & \sin \theta_A \cos \theta_C \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -d \sin \theta_A & -d \cos \theta_A & 0 & -\sin \theta_A & -\cos \theta_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s_1} \\ y_{s_1} \\ z_{s_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s_0} \\ y_{s_0} \\ z_{s_0} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{z} = [x_{s_0} \ y_{s_0} \ z_{s_0} \ l \ m \ n \ x_p^r \ y_p^r \ z_p^r]^T$ ,  $[x_{s_0} \ y_{s_0} \ z_{s_0}]^T$  为标准球球心  $\mathbf{S}_0$  的坐标,  $[x_{s_1} \ y_{s_1} \ z_{s_1}]^T$  为拟合球心  $\mathbf{S}_1$  的坐标。

保持机床转角  $\theta_A, \theta_C$  及测头测量值  $d$  不变, 在标准球球面上测量足够多的点, 用这些点对应的机床读数拟合球心, 就可以得到一组线性方程。式(7)中共有 3 个方程 9 个未知量, 改变机床转角  $\theta_A, \theta_C$  及测头测量值  $d$  测量 3 组数据, 即可建立含有 9 个线性方程的方程组, 从而求解出待标定参数。增加测量次数建立超定方程组, 求解方程的最小二乘解, 有助于减小随机误差的影响, 提高标定精度。

值得注意的是, 在拟合球心时, 虽然使用的点越多拟合精度越好, 但实际上几百个点就足以保证拟合结果的精度, 点过多反而增加了采集数据的时间。此外, 虽然增加测量次数可减小随机误差的影响, 但 10 次左右的测量次数即可得到较好

最小二乘拟合的球心, 用符号  $\mathbf{S}_1$  表示。整理式(5)为方程组  $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}$  的形式得:

$$[\mathbf{I} \ -d \mathbf{R}_C \mathbf{R}_A \ -\mathbf{R}_C \mathbf{R}_A][\mathbf{S}_0 \ \mathbf{R}_p^r \ \mathbf{T}_p]^T = \mathbf{S}_1, \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为  $3 \times 3$  的单位矩阵,  $[\mathbf{I} \ -d \mathbf{R}_C \mathbf{R}_A \ -\mathbf{R}_C \mathbf{R}_A]$  为方程系数项, 由机床转角  $\theta_A, \theta_C$  和测头测量值  $d$  计算得到。将式(1)带入式(6)中得:

的标定结果, 过多的测量次数反而浪费时间。

#### 4 机床精度对测量的影响

在机激光测量的精度不可避免地受到数控机床运动误差、激光测头自身的测量误差、坐标系匹配误差、系统延迟等因素的影响。在实验中发现机床运动误差是主要的影响因素, 因此本文注重讨论机床精度对测量精度的影响及其补偿方法。而机床误差也受到多种复杂因素的影响, 但由于在机测量时机床近似于空载, 所以本文主要分析机床导轨与转轴的运动误差对激光测量的影响。又考虑到机床旋转轴 A, C 的转角误差通常处于同一个量级, 为了便于分析, 设机床转角  $\theta_A, \theta_C$  具有相同的偏差  $\Delta\theta$ 。机床 X, Y, Z 3 轴坐标误差为  $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$ 。由式(1)可知, 此时的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{C+\Delta} \cdot \mathbf{R}_{A+\Delta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_C + \Delta\theta) & -\cos(\theta_A + \Delta\theta) \sin(\theta_C + \Delta\theta) & \sin(\theta_A + \Delta\theta) \sin(\theta_C + \Delta\theta) \\ \sin(\theta_C + \Delta\theta) & \cos(\theta_A + \Delta\theta) \cos(\theta_C + \Delta\theta) & -\sin(\theta_A + \Delta\theta) \cos(\theta_C + \Delta\theta) \\ 0 & \sin(\theta_A + \Delta\theta) & \cos(\theta_A + \Delta\theta) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

此时, 空间一点  $q$  的实际求解位置为  $q'$  点, 如图 4 所示。由式(3)可知  $q'$  坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_q^{mw} \\ y_q^{mw} \\ z_q^{mw} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{C+\Delta} \mathbf{R}_{A+\Delta} (d \mathbf{R}_p^r + \mathbf{T}_p) + \mathbf{T}_t^{mw} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (9)$$

即对空间一点的测量误差为:

$$\begin{bmatrix} x_q^{mw} \\ y_q^{mw} \\ z_q^{mw} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_{C+\Delta} \mathbf{R}_{A+\Delta} - \mathbf{R}_C \mathbf{R}_A) g(d \mathbf{R}_p^r + \mathbf{T}_p) + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (10)$$

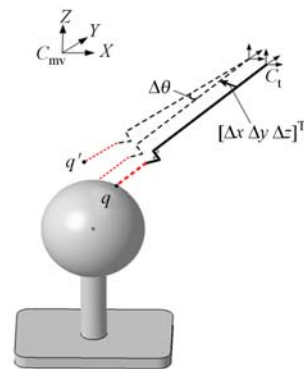


图 4 标准球计算误差

Fig. 4 Calculation error of standard ball

将式(1)、式(2)和式(8)代入式(10)。当  $\Delta\theta$  很小时,有  $\cos \Delta\theta \approx 1, \sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ ,且  $\Delta\theta$  高阶项

远小于  $\Delta\theta$  本身,即可忽略含有  $\Delta\theta$  的高阶项,整理得:

$$\begin{bmatrix} x_q^{mw} \\ y_q^{mw} \\ z_q^{mw} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_q^{mw} \\ y_q^{mw} \\ z_q^{mw} \end{bmatrix} = \Delta\theta(dl+x_p^r) \begin{bmatrix} -\sin \theta_c \\ \cos \theta_c \\ 0 \end{bmatrix} + \Delta\theta(dm+y_p^r) \begin{bmatrix} \sin(\theta_c+\theta_A) \\ \sin(\theta_c+\theta_A) \\ \cos \theta_A \end{bmatrix} + \Delta\theta(dn+z_p^r) \begin{bmatrix} \sin(\theta_c+\theta_A) \\ \cos(\theta_c+\theta_A) \\ \sin \theta_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由于在实际测量中,激光测头安装后光学零点在 X,Y 轴向的偏距要远小于在 Z 轴向的偏距(即  $x_p^r, y_p^r$  远小于  $z_p^r$ ),可忽略式(11)中含有  $dl+x_p^r$  和  $dm+y_p^r$  的项,得:

$$\begin{bmatrix} x_q^{mw} \\ y_q^{mw} \\ z_q^{mw} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_q^{mw} \\ y_q^{mw} \\ z_q^{mw} \end{bmatrix} \approx \Delta\theta(dn+z_p^r) \begin{bmatrix} \sin(\theta_c+\theta_A) \\ -\cos(\theta_c+\theta_A) \\ \sin \theta_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由式(12)可知,空间一点位置误差一部分与机床转角误差  $\Delta\theta$  有关,另一部分与 X,Y,Z 3 轴的坐标精度有关。当机床在某个不变的角度扫描测量时,此时转角  $\theta_A, \theta_c$  和转角误差  $\Delta\theta$  均为定值,且由于激光测头的测量距离必须保持在景深范围内,测头测量值  $d$  的变化范围相对于  $(dn+z_p^r)$  的值较小,可近似认为  $(dn+z_p^r)$  为定值,即由转角误差  $\Delta\theta$  引起的位置误差为定值。因此,相同机床摆角下测量获得的各点之间的误差主要来源于机床 X,Y,Z 3 轴的运动误差  $[\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T$ ,而所有数据与理论位置基本上是差一个刚性位移。

改变  $\theta_A, \theta_c$  以另一个角度测量,由转角误差  $\Delta\theta$  引起的位置误差发生变化,使得整体数据与理论位置产生不同的刚性偏移。这将导致以不同的角度扫描测量同一个工件的同一个表面时,测量数据之间产生的偏移不同。为了减小偏移误差,需要对偏移量进行补偿。

### 5 误差补偿

由上一节的分析可知,在不同机床摆角下测量所引起的误差都是不同的,因此很难对主轴任意摆角做补偿。不过,目前激光测头的可测方向范围较大,即激光光束与被测量点法线之间的夹角在  $0 \sim 60^\circ$  通常都会获得良好的一维测距结果。

这样可将机床主轴旋转到的所有角度离散成  $k$  组角度,记为  $(\theta_A^{(1)}, \theta_c^{(1)}), (\theta_A^{(2)}, \theta_c^{(2)}), \dots, (\theta_A^{(k)}, \theta_c^{(k)})$ 。只需要在这些有限的机床摆角下进行测量,就能够有效地补偿这些角度下的测量结果。

根据标定原理,需要转动机床主轴在多角度测量标准球来建立方程组。本文将离散出的  $k$  组角度作为标定中使用的测量角度。设标准球球心、光束方向和光束零点偏心的标定结果分别为:

$$\mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} l_{p0} \\ m_{p0} \\ n_{p0} \end{bmatrix}, \mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} x_{p0} \\ y_{p0} \\ z_{p0} \end{bmatrix}.$$

将标定出的光束方向和光束零点偏心带入式(5),分别求得在转角为  $(\theta_A^{(1)}, \theta_c^{(1)}), (\theta_A^{(2)}, \theta_c^{(2)}), \dots, (\theta_A^{(k)}, \theta_c^{(k)})$  时的标准球球心,记为  $\mathbf{S}_0^{(1)}, \mathbf{S}_0^{(2)}, \dots, \mathbf{S}_0^{(k)}$ 。由此可知以转角  $(\theta_A^{(1)}, \theta_c^{(1)})$  测量时的误差为:

$$\delta(\theta_A^{(1)}, \theta_c^{(1)}) = \mathbf{S}_0 - \mathbf{S}_0^{(1)} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} - \left\{ \mathbf{S}_1^{(1)} + \mathbf{R}_C^{(1)} \mathbf{R}_A^{(1)} \left( d \begin{bmatrix} l_{p0} \\ m_{p0} \\ n_{p0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{p0} \\ y_{p0} \\ z_{p0} \end{bmatrix} \right) \right\}, \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{S}_1^{(1)}, \mathbf{R}_A^{(1)}, \mathbf{R}_C^{(1)}$  分别为以转角  $(\theta_A^{(1)}, \theta_c^{(1)})$  测量时机床读数拟合的球心和 A、C 轴的旋转矩阵。同理可以求得其他角度的测量误差,此误差即为测量时的补偿值。

需要注意的是,标准球球心  $\mathbf{S}_0$  为标定过程中的计算值,它与标准球球心的真实空间位置也可能存在一定的误差。另外,该补偿方法只能补偿由主轴摆角误差导致的系统误差,且要求机床主轴转角的重复精度较高。

### 6 实验

根据本文提出的测头位姿标定原理,设计了

适合在机测量的标定实验。实验在一台双摆头龙门式五轴数控机床上进行,该机床 A 轴的运动范围为  $\pm 105^\circ$ , C 轴为  $\pm 180^\circ$ 。标定所使用的标准球为  $\phi 20$  mm 的陶瓷标准球,其球度误差小于  $1 \mu\text{m}$ 。激光测头采用以色列的 ConoProbe 测头,测头技术参数见表 1。

表 1 激光测头的技术参数

Tab. 1 Parameters of laser probe

分辨率	测距精度	重复定位精度	测量角度	景深范围
$0.1 \mu\text{m}$	$15 \mu\text{m}$	$4 \mu\text{m}$	$0 \sim 85^\circ$	$35 \text{ mm}$

### 6.1 标定实验

详细的实验步骤如下:

第一步:在标准球表面均匀地喷一层显像剂,厚度小于测头的测量精度。

第二步:规划标准球测量路径,并生成数控机床 NC 程序。

第三步:将机床 A、C 轴转到设定值,同时移动机床使激光光斑粗略照射到标准球的正上方。

第四步:在机床上运行 NC 程序,通过自主开发的在机激光测量软件读取测头的距离测量值,分别保存测头测量值为 90, 100 mm (不能超出测头景深范围) 时的机床坐标值,即  $Q_{90}^{(1)}, Q_{90}^{(2)}, \dots, Q_{90}^{(k)}, Q_{100}^{(1)}, Q_{100}^{(2)}, \dots, Q_{100}^{(k)}$ 。

第五步:针对保存的两组机床坐标点云,用最小二乘算法拟合测头测量值分别为 90, 100 mm 时的球心。再根据式(7)分别建立一组方程。

第六步:改变机床 A、C 轴转角,重复第三、四、五步,分别建立  $(\theta_A, \theta_C)$  为  $(60^\circ, 45^\circ)$ 、 $(60^\circ, -45^\circ)$ 、 $(-60^\circ, 45^\circ)$  和  $(-60^\circ, -45^\circ)$  时的方程,并求解超定方程组的最优解。

第一步中,由于精密加工的标准球表面反光,需要喷涂显像剂来提高激光传感器的测量精度。根据标定原理,需要保持测头测量值  $d$  不变,如果手动调节机床位置使得测量值为某一特定值会非常繁琐,不便于实际应用。因此需要规划标准球测量路径(第二步),并生成数控机床 NC 程序,通过运行 NC 程序,实现对标准球的自动扫描测量。第四步中,将测量值为 90, 100 mm 时的数据测量结合在一起保存,有利于缩短标定时间。扫描测量路径和保存的机床坐标数据如图 5 所示。

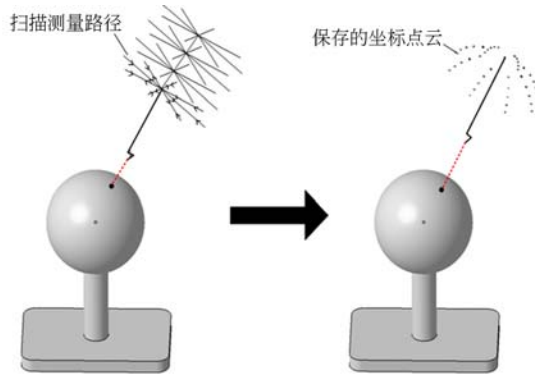


图 5 标准球扫描测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of scanning measurement with standard ball

### 6.2 标定结果

改变机床转角,分别在 5 个机床摆角下测量标准球,保留测头测量值为 90 mm 和 100 mm 的机床坐标点集并拟合球心,球心坐标见表 2。

表 2 拟合的球心  $S_i$  坐标

Tab. 2 Ball center  $S_i$  fitted by least squares method (mm)

$(\theta_A, \theta_C) / (^\circ, ^\circ)$	$d$	$x_{s_i}$	$y_{s_i}$	$z_{s_i}$
(0, 0)	90	-387.469 4	-374.645 3	-322.590 1
	100	-387.479 1	-374.823 2	-312.562 8
(60, 45)	90	-46.993 0	-678.189 4	-623.540 3
	100	-40.820 4	-684.399 3	-618.653 2
(60, -45)	90	-735.369 4	-693.307 8	-623.071 8
	100	-741.537 5	-699.457 6	-618.213 2
(-60, 45)	90	-710.802 0	-12.433 6	-562.976 8
	100	-716.823 6	-6.391 2	-557.814 0
(-60, -45)	90	-71.242 2	-27.854 9	-563.481 8
	100	-65.226 7	-21.823 9	-558.310 4

将表中的数据带入式(7),求解方程组的最优解。解得的标准球球心、光束方向和光束零点的安装偏心分别为:

$$S_0 = \begin{bmatrix} -398.677 734 \\ -340.665 187 \\ -864.734 844 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} 0.000 907 \\ 0.017 933 \\ -0.999 839 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} -10.927 967 \\ 32.981 423 \\ -452.704 314 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

再由式(13)分别求得 5 个转角下测头测量值分别为 90 mm 和 100 mm 时的补偿值。由式(12)分析可知,同一转角的测量误差近似为定值。

所以转角相同时测量值为 90 mm 和 100 mm 的补偿值都可以作为此转角的补偿值。这里以它们的平均值作为最终的补偿值,结果如表 3 所示。

表 3 测量误差补偿表

Tab. 3 Data for error compensation (mm)

$(\theta_A, \theta_C)/(^{\circ}, ^{\circ})$	X 轴补偿	Y 轴补偿	Z 轴补偿
(0, 0)	-0.361 7	-0.720 4	0.530 6
(60, 45)	0.621 8	0.568 9	0.168 3
(60, -45)	-0.284 5	0.324 7	-0.286 0
(-60, 45)	-0.251 4	-0.533 7	-0.456 8
(-60, -45)	0.275 8	-0.439 3	0.043 9

### 6.3 测量结果

为了验证激光测头标定后的测量精度,分别在 5 个转角姿态下再次测量标准球,测量现场如图 6 所示。在每个角度下实验测量得到标准球表面近 3 万个数据点,如图 7 所示。

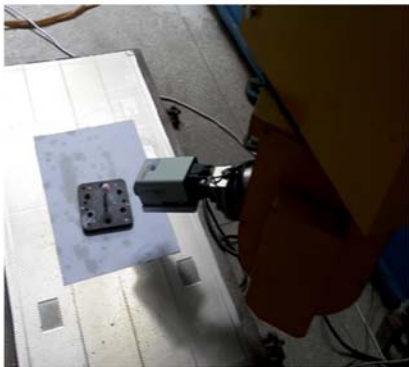


图 6 标准球测量现场图

Fig. 6 Experiment photo of standard ball measurement

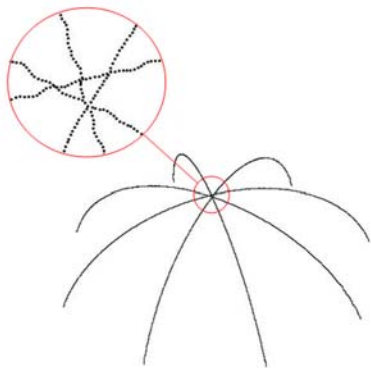


图 7 标准球扫描测量数据

Fig. 7 Scanning data for standard ball measurement

使用最小二乘法对 5 个机床摆角下扫描测量的数据拟合球体,得到 5 个转角姿态下测量出的标准球直径和补偿前后的球心与标定理论球心  $S_0$  的偏距,结果如表 4 所示。

表 4 标准球拟合结果

Tab. 4 Fitting results of standard ball center

$(\theta_A, \theta_C)/(^{\circ}, ^{\circ})$	球心偏距		直径	直径误差
	补偿前	补偿后		
(0, 0)	0.746 0	0.105 5	19.981 3	-0.018 7
(60, 45)	0.863 7	0.115 2	20.021 4	0.021 4
(60, -45)	0.905 2	0.134 1	19.956 0	-0.044 0
(-60, 45)	0.520 7	0.096 1	20.030 9	0.030 9
(-60, -45)	0.549 7	0.108 7	20.029 8	0.029 8

从表 4 可知,5 个转角姿态下测得的标准球直径误差小于 0.05 mm,即标准球外形轮廓的测量精度较好。补偿前球心偏距平均为 0.711 9 mm,补偿后的均值为 0.111 9 mm,提升了 83% 左右。由于实验所用龙门机床自身的误差较大,补偿后的测量位置偏差近似等于龙门机床的空间定位精度。

为了进一步说明本文方法的标定效果,分别使用本文测量系统和商用视觉测量系统 A-TOS 对同一航空叶片进行扫描测量,测量结果如图 8 所示。将两系统的测量结果与叶片的理论 CAD 模型进行对比,结果分别如图 9、图 10 所示。两个系统测量结果的统计数据见表 5。

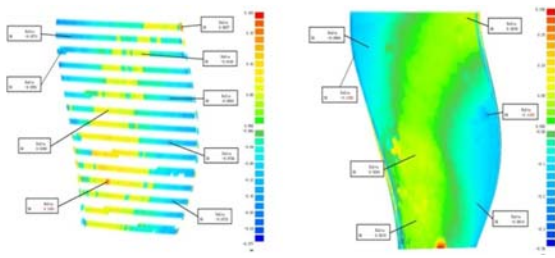


(a) 本文系统测量数据 (b) A-TOS 系统测量数据

(a) Data of proposed method (b) Data of A-TOS

图 8 航空叶片测量结果

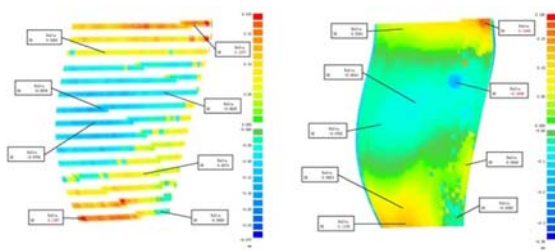
Fig. 8 Scanning data of blade measurement



(a) 本文系统测量数据 (b) A-TOS 测量数据  
(a) Data of proposed method (b) Data of A-TOS

图 9 航空叶片叶盆误差对比

Fig. 9 Error comparison of pressure surface data



(a) 本文系统测量数据 (b) A-TOS 测量数据  
(a) Data of proposed method (b) Data of A-TOS

图 10 航空叶片叶背误差对比

Fig. 10 Error comparison of suction surface data

从图中可知,在机测量系统的测量数据与叶片 CAD 数据的误差分布,和 A-TOS 测量系统的测量数据与叶片 CAD 数模的误差分布基本相同。表 5 中的数据结果也说明本文提出的标定方法取得了良好的标定效果。

## 参考文献:

- [1] 罗胜彬,宋春华,韦兴平,等.非接触测量技术发展研究综述[J].机床与液压,2013,41(23):150-153. LUO SH B, SONG CH H, WEI X P, *et al.*. Review for the development and research of non-contact measurement technology [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2013, 41(23): 150-153. (in Chinese)
- [2] 袁祖荣,石照耀,李岩.机械制造领域测量技术的发展研究[J].机械工程学报,2010,46(14):1-11. QIU Z R, SHI ZH Y, LI Y. Research on the development of measurement technology mechanical manufacture [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14):1-11. (in Chinese)
- [3] CHUN B S, KIM K, GWEON D. Three-dimen-

表 5 两测量系统的数据统计

Tab. 5 Statistics of proposed and A-TOS vision measurement systems

	本文激光测量系统	A-TOS 视觉测量系统
点云数量	49 万	115 万
最大值/mm	0.277 1	0.360 6
平均值/mm	0.035 3	0.039 8
标准差/mm	0.028 2	0.034 2

## 7 结 论

本文针对双摆头一类的五轴数控机床,构建了在机激光扫描测量原型系统,研究了测头在机床上安装位姿的数学模型,给出了一种线性化标定方法。不同于传统的测头标定算法将问题建模为一个带约束的非线性优化问题,本文提出的线性化方法只需要多角度拟合标准球球心,建立并求解一个超定线性方程组。该方法稳定高效,避免了非线性优化求解中的大量计算和不稳定问题。分析了机床各个轴的运动误差对测量精度的影响,并且建立了误差模型,最后提出了补偿机床系统误差的方法。实验结果表明:本文的标定方法测得的标准球直径误差小于 0.05 mm,通过补偿使球心位置误差减小了 83%。最后通过与商用 A-TOS 系统做对比测量,进一步验证了本文方法的可行性。

sional surface profile measurement using a beam scanning chromatic confocal microscope [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(7):30-34.

- [4] ONG W H, CHIU W K. Non-contact measurement techniques for structural health monitoring [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 75: 45-50.
- [5] 王龙君,王亚平.基于五轴数控机床的激光在线检测方法研究[J].计算机测量与控制,2008,16(3):297-298,326. WANG L J, WANG Y P. Study on laser on-line detection based on 5-axis CNC machine tools [J]. *Computer Measurement & Control*, 2008, 16(3): 297-298,326. (in Chinese)
- [6] 孙玉文,郭东明,贾振元.复杂曲面的测量加工一体

- 化[J]. 科学通报, 2015, 60(9): 781-791.
- SUN Y W, GUO D M, JIA ZH Y. Integrated measurement and machining technology of complex surfaces [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(9): 781-791. (in Chinese)
- [7] 房佳威, 张国雄, 袁祖荣. 非接触激光测头测量轴线标定系统[J]. 电子测量技术, 2006, 29(3): 160-161.
- FANG J W, ZHANG G X, QIU Z R. Calibration system for surveying axis of non-contact laser probe [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2006, 29(3): 160-161. (in Chinese)
- [8] 卢科青, 王文, 陈子辰. 点激光测头激光束方向标定[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 880-886.
- LU K Q, WANG W, CHEN Z CH. Calibration of laser beam-direction for point laser sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 880-886. (in Chinese)
- [9] BI C, LIU Y, FANG J G, *et al.*. Calibration of laser beam direction for optical coordinate measuring system [J]. *Journal of the International Measurement Confederation*, 2015, 73: 191-199.
- [10] 刘书桂, 陈超. 基于改进遗传算法的三坐标测量机光学测头的标定[J]. 天津大学学报, 2005, 38(8): 695-700.
- LIU SH G, CHEN CH. Calibration of CMM optical probe based on improved genetic algorithm [J]. *Journal of Tianjin University*, 2005, 38(8): 695-700. (in Chinese)
- [11] 费致根, 郭俊杰, 马小军, 等. 微型五坐标测量机激光测头安装误差的标定[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 64-68.
- FEI ZH G, GUO J J, MA X J, *et al.*. Installation error calibration of laser probe for miniature five-coordinate measuring machine [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(5): 64-68. (in Chinese)

#### 作者简介:



夷宏明(1990—),男,江苏扬州人,硕士研究生,2013年于南京林业大学获得学士学位,主要从事逆向工程和非接触式三维几何测量等方面的研究。E-mail: yihongming23@163.com

#### 导师简介:



张丽艳(1967—),女,辽宁丹东人,教授,博士生导师,1988年于南京航空航天大学获得学士学位,1991年于西安交通大学获得硕士学位,2001年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事基于数字图像的快速柔性三维测量、产品逆向建模与复杂曲面产品质量检验、高效数控加工与仿真、设计过程集成与优化等方面的研究。E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn