

## 6-TPS 并联平台型数控铣床结构参数的标定方法

王 瑞

(哈尔滨工业大学(威海)船舶工程学院, 威海, 264209)

**摘要:** 介绍了6-TPS 并联平台型数控铣床的一种结构参数标定方法。借助于工作台上的辅助工艺孔及标准量块, 采用加权分类隔离的标定方法, 将结构参数分为若干类进行标定, 在并联工作台的机构参数标定过程中, 采用了改进后的共轭梯度法, 提高了标定效率。主要分析了刀具位姿参数及并联机构结构参数的标定方法, 通过标定实例验证了标定方法的有效性。

**关键词:** 参数标定; 共轭梯度法; 并联机床

**中图分类号:** TG659

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2009)06-0720-07

### Calibration Method of Structural Parameters for 6-TPS Parallel Platform Milling

Wang Rui

(School of Ship Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, 264209, China)

**Abstract:** A method for adopting classifiable verification is presented for 6-TPS parallel platform milling. By using a process hole with certain radius on the upper platform and gauge blocks, the cutter position parameters and structural parameters of the parallel mechanism are verified through assigning different weight values. The amended Fletcher-Reeves algorithm is used to improve the verification efficiency. The method is proved to be effective by the calibration test. Thus it is used for the design control system of the parallel machine tool.

**Key words:** parameter calibration; conjugate gradient method; parallel machine

针对复杂曲面的加工需要, 目前主要存在两大问题: (1) 多轴数控铣床虽然已经取得了较大进步, 但其技术含量高、成本高, 超出了中小型企业经济承受能力; (2) 大量的传统铣床加工能力有限, 不能加工较为复杂的曲面。为了解决存在的问题, 充分利用大量传统立式铣床的资源, 哈尔滨工业大学对传统立式铣床进行改造, 加装6自由度并联工作台, 形成6-TPS 并联平台型数控铣床, 扩展了传统立式铣床的加工能力。

工件的加工精度很大程度上取决于铣床的各类结构参数的标定, 本文的平台型铣床的结构参数达到50个, 而且存在较强的耦合性。目前, 国内外

采用的并联机床的标定方法主要有<sup>[1-9]</sup>: (1) 直接法, (2) 开环法, (3) 闭环法, (4) 任意性能评估检验法, (5) 序列法, (6) 样件法。这些标定方法主要针对于刀具装卡在并联机构的某一运动平台上的一类铣床, 而本文的铣切头安装在一活动悬臂梁上, 独立于并联机构, 主轴悬臂梁可能处于不同的位置, 因而需要对该型铣床结构参数的标定及刀具的定位进行深入研究。

### 1 6-TPS 并联平台型数控铣床结构参数及标定方法

图1为6-TPS 并联平台型数控铣床, 铣床由传

**基金项目:** 哈尔滨工业大学校基金(HIT(WH)200716)资助项目。

**收稿日期:** 2008-11-17; **修订日期:** 2009-03-30

**作者简介:** 王瑞, 男, 讲师, 1978年10月生, Email: wrhit@163.com。

统立铣和 6 自由度并联工作台组成。改变铣切头的位置, 即可实现传统立铣加工和复杂曲面的加工。图 2 是铣床的简化结构示意图。以一支路为例介绍



图 1 6-TPS 并联平台型数控机床

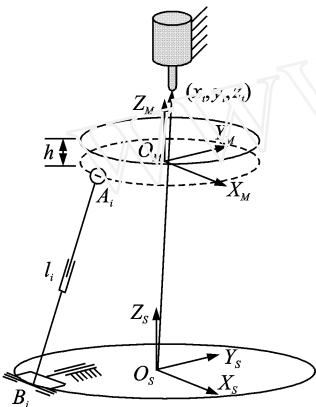


图 2 6-TPS 并联平台型铣床结构简图

如下: 下平台虎克铰在基座坐标系  $O_s X_s Y_s Z_s$  中的坐标为  $(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ), 上平台 3 自由度虎克铰在上平台坐标系  $O_M X_M Y_M Z_M$  中的坐标为  $(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai})$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ), 杆长参数为  $l_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ), 工作台表面在上平台坐标系中的倾斜姿态角度参数为  $(\alpha, \beta)$ , 上平台坐标系原点到工作台表面的高度参数 (即上平台的厚度参数) 为  $h$ , 铣床刀头点在基座坐标系中的坐标为  $(x_t, y_t, z_t)$ , 刀具相对于该系的姿态参数为  $(\alpha, \beta)$ , 共有 50 个结构参数。

在文献[10]中, 对并联机床的结构参数进行标定时, 构建各种误差模型, 引入所有的误差源。对于 6-TPS 并联平台型铣床来说, 误差模型引入所有的误差源, 存在以下问题:

- (1) 各参数精确度不同;
- (2) 并联机构的铰点位置参数同刀具的位姿参数、工作台的厚度参数、夹刀点的高度参数之间存在耦合;

(3) 工作台面的倾斜角度参数同刀具轴线的倾斜角度参数存在耦合;

(4) 参数的确定需要考虑多个坐标系。

由于这些问题的存在, 本文采用了加权分类隔离的标定方法, 具体方法如下:

(1) 首先降低耦合性, 将这些参数分类隔离成 5 类, 依次分为: 工作台面的水平度参数; 工作台的厚度参数及刀具水平位置参数; 刀头点的高度参数; 并联机构的结构参数; 刀具轴线方向的倾斜角度参数。

(2) 分离后, 对各类参数给以不同的权值 (1 或 0): 1 表示该类参数存在误差, 需要修正; 0 表示该类参数不存在误差, 暂定为真实值, 不对标定结果产生影响。

(3) 分别设定并联机构结构参数的权值为 0, 刀具的位姿参数权值为 1, 控制工作台作程序化运动, 标定出刀具的位姿参数, 然后互换其权值, 借助刀具的位姿参数标定并联机构的结构参数, 经过数轮标定即可完成铣床各类参数的确定。

限于篇幅, 本文主要介绍工作台的厚度参数、刀具位置参数, 及并联机构的铰点位置参数的标定工作。其他各类参数的标定方法可见参考文献[11]。

## 2 工作台厚度参数和刀具水平位置参数标定

工件的装夹定位, 需要知道工作台的厚度参数  $h$ 。若该参数不精确, 将会导致加工点的坐标整体上下平移, 而且带姿态加工时, 会引入不确定的误差。

利用三点定面的方法可以求出工作台面的法线矢量, 进而获取工作台面的倾斜角度参数  $(\alpha, \beta)$ <sup>[11]</sup>, 利用修正后的结构参数刷新数控系统, 使工作台能够处于精确水平状态, 继而进行厚度参数和刀具水平位置参数的标定。在工作台面上加工一个辅助工艺孔, 如图 3(a) 所示。通过手控模块控制测头在工艺孔内腔壁, 等高度依次相对平动 3 个位置, 使测头与工艺孔内壁接触, 触发并计算出上平台坐标系原点在基座坐标系中的位置  $A_1, A_2, A_3$ 。测头中心到工艺孔中心的距离恒定为  $d = R - r$ ,  $r$  和  $R$  依次为测头和工艺孔的半径, 如图 3(b) 所示。利用三点定圆的原理,  $A_1, A_2, A_3$  三个位置矢量可以确定该圆的圆心矢量  $c = [c_x, c_y]^T$ , 该矢量的  $X$  和  $Y$  向分量是测头的名义水平位置。由于加工误差的存在, 工艺孔圆心坐标  $A_1, A_2, A_3$  与上平台坐标系原点坐标  $A_1, A_2, A_3$  存在一个误差  $\Delta c$ 。故测头

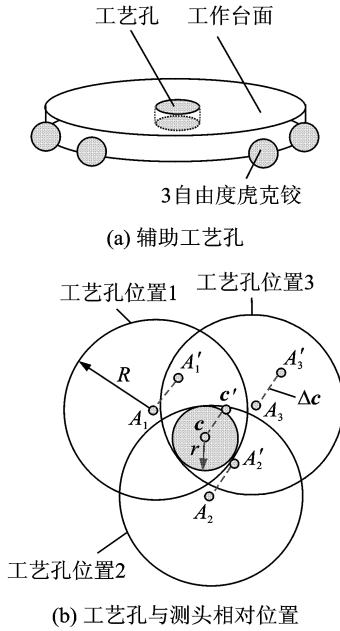


图3 刀具水平位置标定

中心点(即刀头点)在基座坐标系中的位置矢量满足

$$\mathbf{c} = \mathbf{c} + \Delta \mathbf{c} \quad (1)$$

$\Delta \mathbf{c}$  是上平台坐标系原点到工艺孔圆心的水平矢量,也是实际刀头点与名义刀头点在水平方向上的距离,该距离对刀具的平动加工不存在误差。但当工作台带姿态加工时,将产生误差。因此需要进行标定。

上平台厚度的标定如图4所示,虚线测头是名义测头位置,以虚线测头的轴线在基座坐标系中的投影点为圆心,  $R_M$  为半径的圆周是上平台坐标系原点运动轨迹在基座坐标系中的投影圆;  $(P_{Mx}, P_{My})$  为上平台坐标系原点在投影圆上的坐标;  $d$  为实际测头与上平台坐标系原点的水平距离;  $H$  为上平台的厚度  $h$  与测头半径  $r$  的和;  $\Delta z$  为上平台水平触发测头和带姿态触发测头的高度差;  $\Delta z_d$  为由距离  $d$  产生的高度差;  $\alpha$  和  $\beta$  为上平台的倾斜方向角和倾斜角;  $\beta$  为工作台上沿  $(P_{Mx}, P_{My})$  到  $(c_x, c_y)$  方向上的倾斜角。参数  $d, R_M, \Delta c$  和  $\theta$  之间的关系如图5所示。

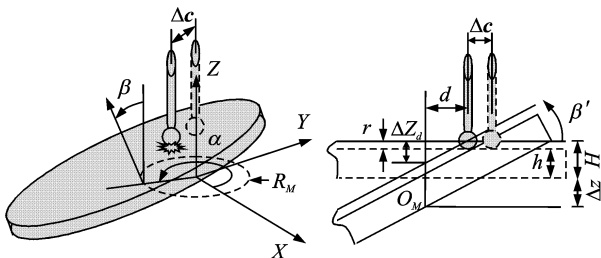


图4 上平台厚度标定

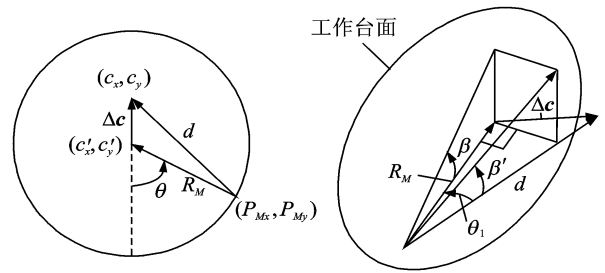


图5 位姿参数示意图

$$d = \sqrt{(R_M \sin \theta)^2 + (R_M \cos \theta + |\Delta c|)^2} \quad (2)$$

式中  $\theta$  表示矢量  $\Delta \mathbf{c}$  与  $R_M$  间的夹角, 范围为  $0 \sim 360^\circ$ 。

$$\cos \theta = (d^2 + R_M^2 - |\Delta c|^2) / (2dR_M) \quad (3)$$

$$\tan \beta = (R_M \tan \beta) / (R_M / \cos \theta) \quad (4)$$

由图4可知

$$(H + \Delta z - \Delta z_d) \cos \beta = H \quad (5)$$

$$h = \frac{((\Delta z - d \cdot \tan \beta) \cos \beta)}{(1 - \cos \beta)} - r \quad (6)$$

$$\Delta z = \frac{H}{\cos \beta} + d \tan \beta - H \quad (7)$$

厚度参数标定过程如下:

(1) 控制上平台水平状态平动触发测头, 获取当前上平台坐标系原点的高度  $z_1$  (见图4);

(2) 控制上平台离开测头, 注意保证上平台坐标系原点在基座坐标系的投影落在投影圆上, 在任一位置, 使上平台带姿态运动, 倾斜角度为  $\beta$ , 倾斜方向角  $\alpha$  由上平台坐标系原点的水平位置参数  $(P_{Mx}, P_{My})$  和名义测头的水平位置  $(c_x, c_y)$  确定

$$\cos \alpha = \frac{(P_{Mx} - c_x)}{R_M} \quad (8)$$

$$\sin \alpha = \frac{(P_{My} - c_y)}{R_M} \quad (9)$$

(3) 姿态运动完成后, 控制上平台向上作平动, 触发测头获取当前上平台坐标系原点的高度  $z_2$ , 从而获取上平台的下降量  $\Delta z = z_1 - z_2$ ; 上平台的下降量  $\Delta z$  与角度  $\theta$  之间的关系如图6所示, (+ 型

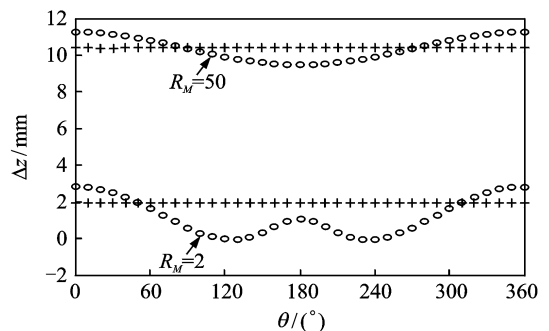


图6 上平台下降量与角度间的曲线

线)是实际测头与名义测头间距为0时,上平台的下降量,由图可知当间距为0时,下降量为一定值;(O型线)是两者间距不为0时,上平台的下降量;同时可以发现若 $R_M$ 取合适的参数,上平台下降量呈类似余弦曲线分布,下降量存在最大值

$$\theta=0 \text{ 时有 } \beta=\beta, \Delta z_{\max}=H/\cos\beta+\tan\beta(R_M+|\Delta c|)-H;$$

$$\theta=\pi \text{ 时有 } \beta=\beta, \Delta z_{\min}=H/\cos\beta+\tan\beta(R_M-|\Delta c|)-H;$$

(4) 上述两式相减得

$$\Delta z_{\max}-\Delta z_{\min}=2|\Delta c|\tan\beta \quad (10)$$

从而获取实际测头与名义测头之间的距离 $|\Delta c|$

$$|\Delta c|=(\Delta z_{\max}-\Delta z_{\min})/2\tan\beta \quad (11)$$

利用 $\Delta z_{\max}$ 和 $|\Delta c|$ ,可得上平台的厚度参数 $h$

$$h=[(\Delta z_{\max}-(R_M+|\Delta c|)\cdot\tan\beta)\cos\beta]/(1-\cos\beta)-r \quad (12)$$

利用 $|\Delta c|$ ,名义测头的水平位置参数 $(c_x, c_y)$

以及上平台下降量最大时对应的上平台坐标系原点的位置坐标 $p_{\max}=[P_{Mx}, P_{My}]^T$ ,可以求出铣床刀头标定后的水平位置坐标 $[c_x, c_y]^T$

$$\begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} + |\Delta c| \cdot \frac{[c_x, c_y]^T - p_{\max}^T}{[c_x, c_y]^T - p_{\max}^T} \quad (13)$$

当上平台的工作台面倾斜角度参数、工作台的厚度参数 $h$ 标定完成后,修正数控系统。装夹刀长为 $L_t$ 的刀具,借助手控模块控制上平台水平向上运动,触发刀头点,从而可以获取刀头点的高度 $H_t$

$$H_t = H_M + h + h_d \quad (14)$$

式中 $H_M$ 为触发刀头点时上平台坐标系原点的高度; $h$ 为上平台的厚度参数; $h_d$ 为对刀器的高度。

刀具更换后,需要重新确定刀头点的高度。如更换后的刀具长度为 $L_t$ ,设新的刀头点的高度为 $H_t$ ,则

$$H_t = H_t - (L_t - L_t) \quad (15)$$

### 3 并联机构参数标定

当前3类参数标定完成后,可以对并联工作台的机构参数进行标定,设置前3类参数的权值为0,视这些参数为准确值,用来修正并联机构的结构误差。由于6根杆的杆长参数经过高精度3坐标测量仪的测量,精度要远高于所有铰点的36个位置参数,故设6个杆长参数的权值为0。铰点36个位置参数分别是上平台6个三自由度虎克铰18个位置参数 $(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai})$ ,下平台6个虎克铰18个位置参数 $(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})$ ,这些参数的权值设为1。参数标定的结果需满足下列要求:

(1) 确保标定后的结构参数输入数控系统后,

控制上平台处于水平状态时,测头在工作台面随意采集不共线的3个点,三点确定的平面法线应该垂直于基座坐标系水平面;

(2) 确保水平状态的上平台平动触发测头,获取此时测头中心点的高度依旧等于标定前的测头中心点高度;

(3) 确保在工件坐标系中可加工的工作空间范围内,坐标系 $X, Y, Z$ 三个方向上距离误差均处于允许误差范围内;

(4) 确保测头中心点在工件坐标系中的聚点性,即控制测头相对于工件坐标系位置固定,测杆相对工件坐标系带姿态运动,要求测头位置跳动误差在允许误差范围内。

#### 3.1 误差建模

由结构误差造成的刀具(或测头)实际位姿与名义位姿之间的误差与并联机构36个结构参数的误差之间的关系可以表示为

$$\Delta E = M_{ES} \Delta S \quad (16)$$

式中: $\Delta E$ 为各种测量方式下,所得的实际值与测量值之间的误差向量, $\Delta E=(\Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_j, \dots, \Delta e_n)^T$ ,不同元素代表不同的测量方式获取的相应误差, $n$ 可以根据需要随意确定,理论上越多越好; $\Delta S$ 为并联机构的结构参数误差构成的 $m$ 维误差向量, $\Delta S=(\Delta s_1, \Delta s_2, \dots, \Delta s_m)^T$ , $1 \leq m \leq 42$ ,不考虑杆长因素,则 $m=36$ ,故 $\Delta S$ 为并联机构36个铰点位置误差参数构成的结构误差向量; $M_{ES}$ 为误差传递矩阵,该矩阵中的每一元素 $M_{ES}(i, j)$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ )表示并联机构的第 $j$ 个结构参数对第 $i$ 种测量方式的误差传递系数,误差传递矩阵各元素的确定可参考文献[10]。

#### 3.2 结构误差向量的数值求解

有了误差传递矩阵 $M_{ES}$ ,使用标准量块进行标定,利用名义测量值和量块的真实值之间的误差,通过数值算法可以获取结构参数的误差向量。

重新整理式(16),把各种测量方式的测量误差结果分成两类:位置误差 $\Delta e_p$ 和姿态误差 $\Delta e_o$ 。同时误差传递矩阵也分为位置误差传递矩阵 $M_p$ 和姿态误差传递矩阵 $M_o$ 。考虑到两者精度要求的不同,需要对两类误差进行加权处理,协调两者之间的比例。建立控制残余误差的目标函数为

$$D_e = \begin{bmatrix} \omega_p \Delta e_p \\ \omega_o \Delta e_o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_p M_p \\ \omega_o M_o \end{bmatrix} \Delta S \quad (17)$$

式中 $\omega_p$ 和 $\omega_o$ 分别为位置误差和姿态误差的权值矩阵。

采用结构参数优化目标函数 $C$ 为

$C = D_e^T D_e$  (18)

以式(18)为目标的优化公式,采用改进后的共轭梯度法,该方法的第一个搜索方向取负梯度方向,也就是最速下降法。其余各步的搜索方向是将负梯度偏转一个角度进行修正。该方法具有最速下降法的优点,而且收敛速度比最速下降法快,克服了最速下降法的锯齿现象,并且具有二次收敛性<sup>[12]</sup>。优化函数是36元的二次函数,优化过程中需要频繁进行求导、方程求解,数值计算非常繁琐,本文采用了Matlab工具中的符号运算。优化过程原理图如图7所示。图中 $g_k$ 为第 $k$ 次迭代点处的梯度;

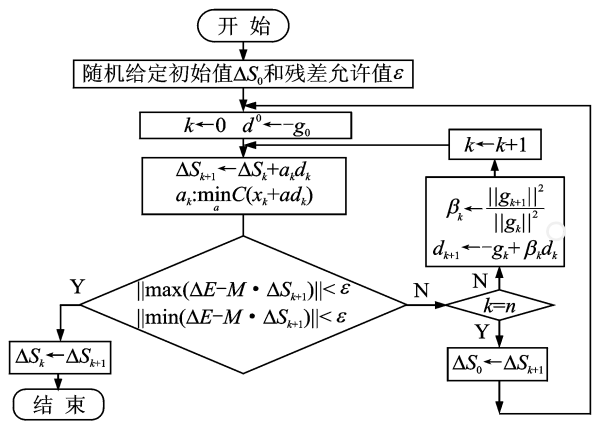


图7 优化过程原理图

$d_k$ 为第 $k$ 次迭代点处的共轭方向;  $a_k$ 为第 $k$ 次迭代时的步长;  $g_k$ 和 $d_k$ 之间满足如下三个关系等式

$C(\Delta S) = D_e^T D_e = (1/2)(\Delta S)^T G(\Delta S) + b^T(\Delta S) + c$  (19)

$d_j^T(g_{k+1} - g_k) = 0$  (20)

$d_j^T G d_k = 0$  (21)

式中 $G$ 为海赛(Hessian)矩阵;  $b^T$ 为一梯度向量;  $c$ 为标量。

共轭梯度法判断程序是否结束的条件是最后迭代点处梯度的模是否小于给定允许值。但当该模

非常小,变量多达36个,优化时间非常长,甚至无法获取最终优化结果。为了解决该问题,根据实际应用需要,修改条件为标定误差的残差是否小于给定允许值。试验表明,该方法优化速度较快,经过多次优化,可以获取最优结果。

4 标定试验

经过上平台水平度标定后的上下平台铰点的位置参数如表1所示,标定过程略。在上平台的中心位置加工一个具有一定深度的工艺孔,利用三点定圆的原理确定测头点(也是刀头点)中心水平位置,计算结果为(0.300和70.343 mm),以该位置为名义圆心,确定一个半径 $R_M = 60$  mm的圆周,在该圆周上,让上平台带一姿态角 $\beta = 12^\circ$ 运动,倾斜方向角 $\alpha$ 由测头名义位置和上平台坐标系原点在圆周上的位置确定。

上平台在圆周上倾斜方向角以1为步长,带姿态依次运动并触发测头,采集一系列上平台坐标系原点在基座坐标系中的位置坐标,见表2。利用极值的高度差和章动角 $\beta$ 可以获取测头实际水平位置与名义水平位置之间的水平距离为19.889 mm。利用位置序号270处的上平台水平位置坐标,以及名义测头位置、测头实际与名义位置值间的数学关系,可以计算出测头的实际水平位置(0.300和90.232 mm)以及上平台的厚度参数96.525 mm,借助对刀器可以确定铣床刀具装卡位置相对于基座坐标系的坐标为(0.300, 90.232和961.694 mm)。

完成刀具参数的标定工作后,互换权值标定并联机构的36个位置参数,采集一系列位姿点,各位姿点均相对于上平台坐标系,数据见表3。

第I类数据用于标定上平台的水平度以及测头中心点的高度,具体方法是采集水平工作台上表面的若干个测量点,获取测头中心点在工作台表面的高度与实际高度值的误差。

表1 上下平台铰点位置参数

铰点坐标	1	2	3	4	5	6
$X_{Ai}$	- 192.518 5	192.338 9	243.398 7	51.000 4	- 50.999 6	- 243.330 7
$Y_{Ai}$	- 170.039 0	- 169.935 2	- 81.635 8	251.482 6	251.512 0	- 81.597 1
$Z_{Ai}$	- 0.572 6	- 0.796 2	- 0.477 9	1.051 0	1.115 0	- 0.134 4
$X_{Bi}$	- 128.500 0	128.500 0	417.423 0	288.826 8	- 291.663 9	- 420.456 7
$Y_{Bi}$	- 407.577 3	- 407.615 9	92.620 3	315.133 3	316.771 2	94.371 7
$Z_{Bi}$	0.000 0	0.010 4	0.062 1	0.032 4	0.974 5	1.065 1

表2 上平台带姿态圆周运动采集的数据点 mm

位置序号	X	Y	Z
⋮	⋮	⋮	⋮
89	1.347	130.334	706.759
90	0.300	130.343	706.763
91	- 0.747	130.334	706.763
⋮	⋮	⋮	⋮
269	- 0.747	10.352	698.315
270	0.300	10.343	698.308
271	1.437	10.352	698.316
⋮	⋮	⋮	⋮

第 IIX 类, IIV 类, IIZ 类数据分别用于标定测头中心点在上平台坐标系中  $X$  轴,  $Y$  轴,  $Z$  轴方向

上的误差,具体方法是在水平工作台上装卡各种长度的量块,利用测头测量各方向上的长度值,获取与真实值之间的误差。

第 III 类数据用于标定测杆的聚点性,具体作法是首先获取一倾斜工作台面的法向矢量,然后让测头中心点在上平台坐标系中的位置固定,测杆在进动角  $360^\circ$  范围内相对倾斜  $10^\circ$ ;控制测头在上平台坐标系  $Z$  轴方向运动触发倾斜平面,最后获取测头的相对位置坐标在法向矢量上的投影位置的误差。

获取各种误差,利用改进的共轭梯度修正法,对误差源进行修正,修正后的残余误差见表 3 的最后一列,从表中可以看出该方法一次性即可把最大误差- 0.707 降至 0.027。表明该方法快速有效。

表3 并联机构标定采集的数据点

类型	$X/mm$	$Y/mm$	$Z/mm$	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	准确值	误差	残差
I(1)	- 79.900	61.232	98.527	0	0	98.525	- 0.002	0.008
I(2)	1.300	- 100.768	98.525	0	0	98.525	0.000	0.004
I(3)	73.300	61.232	98.519	0	0	98.525	0.006	0.017
IIX(1)	38.950	- 5.768	101.829	0	0	104		
IIX(2)	38.339	- 31.768	101.829	0	0	104	0.236	0.045
IIX(3)	- 65.054	- 14.768	101.829	0	0	104		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
IIZ(1)	- 92.204	26.232	107.299	0	0	35	0.019	0.019
IIZ(2)	- 92.204	26.232	142.280	0	0	35		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
III(1)	- 22.700	26.232	136.503	0	0	0	↘	↘
III(2)	- 43.700	6.232	138.150	0	0	0	↘	↘
III(3)	- 15.700	- 1.768	123.420	0	0	0	↘	↘
III(4)	- 15.700	- 1.768	123.022	0	10	0	0.348	0.031
III(5)	- 15.700	- 1.768	123.649	60	10	0	- 0.200	0.033
III(6)	- 15.700	- 1.768	124.229	120	10	0	- 0.707	0.027
III(7)	- 15.700	- 1.768	124.098	180	10	0	- 0.592	0.010
III(8)	- 15.700	- 1.768	123.374	240	10	0	0.040	0.038
III(9)	- 15.700	- 1.768	122.871	300	10	0	0.480	0.015
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

5 结束语

针对 6-TPS 并联平台型数控铣床铣切头和并联工作台分离,且存在较强耦合性的特点,借助于

一辅助工艺孔,利用加权分类隔离的方法对铣床大部分的结构参数进行了标定推导。利用该方法对铣床参数进行标定,标定后的铣床刀具相对于工件坐标系的位置精度明显提高,表明该方法有效。目

前已运用于哈尔滨工业大学6-TPS 并联平台型数控铣床的标定。

### 参考文献:

- [1] Gao Meng, Li Tiemin, Yin Wensheng Calibration method and experiment of stewart platform using a laser tracker[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics China: Tsinghua University, 2003: 2797-2802
- [2] 唐国宝, 黄田 Delta 并联机构精度标定方法研究[J] 机械工程学报, 2003, 39(8): 55-60
- [3] Wang Hai, Chao Kuang Fan Identification of structural and assembly errors a 3-PRS serial-parallel machine tool[J] International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(11): 1171-1178
- [4] Bai Shaoping, Ming Yeong Teo Kinematic calibration and pose measurement of a medical parallel manipulator by optical position sensors[J] Journal of Robotics System, 2003, 20(4): 201-109
- [5] 黄田, 唐国宝 一类少自由度并联构性装备运动学标定方法研究[J] 中国科学, 2003, 33(9): 830-838
- [6] 高锰, 李铁民 少自由度并联机床标定试验研究[J] 中国机械工程学报, 2003, 39(9): 118-122
- [7] Yu Dayong, Han Junwei Kinematic calibration of parallel robots[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, Canada: Institute of Electrical and Electronics computer Society, 2005: 521-525
- [8] Renaud P, Andreff N, Marinnet P, et al Kinematic calibration of parallel mechanisms: a novel approach using legs observation [J] IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(4): 529-538
- [9] Renaud P, Andreff N, Lavest J M, et al Simplifying the kinematic calibration of parallel mechanisms using vision-based metrology[J] IEEE Transaction on Robotics, 2006, 22(1): 12-22
- [10] 钟诗胜, 杨晓钧, 王知行 基于6-TPS 型并联机床的标定方法研究[J] 计算机集成制造系统-CMS, 2005, 11(10): 1469-1474
- [11] 王瑞, 王知行 一种数控铣床刀具位姿参数的标定方法[J] 机械设计, 2007, 24(5): 52-54
- [12] 孙靖民 机械优化设计[M] 北京: 机械工业出版社, 1998: 66-73