

并联机床的运动学标定*

李铁民,张京雷,李逢春

(清华大学机械工程系,北京 100084)

[摘要] 并联机床具有刚度高、动态性能好、加工效率高等特点,已在大型航空结构件的加工等领域得到了成功应用。运动学标定是并联机床重要的精度保证手段之一。本文从误差建模、位姿测量、误差辨识及误差补偿等方面介绍了并联机床的运动学标定方法,并具体介绍了一台国产并联机床的运动学标定试验及相关研究。

关键词: 并联机床; 运动学标定; 混联机床

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.041



李铁民

工学博士,毕业于清华大学精密仪器与机械学系。目前是清华大学机械工程系副研究员,博士研究生导师。清华大学青年教师教学优秀奖获得者,主要研究方向: 并联机器、数控技术、先进制造技术。主持和已经完成国家自然科学基金、国家科技攻关和国家科技重大专项课题 10 余项,在国内外学术刊物上发表论文 100 余篇,被 SCI 和 EI 收录 80 余篇,申请国家发明专利 30 余项。2008 年获“中国机械工业科学技术发明一等奖”,2011 和 2014 年分别获得“教育部自然科学二等奖”2 次。

并联机床

在 1994 年的美国芝加哥机床展览会上, Giddings & Lewis 公司和 Ingersoll 公司分别推出了基于并联机构的“六足”并联机床,引起了强烈反响^[1]。并联机床具有高刚度、高动态性能等特点,被当时的媒体誉为“机床结构的重大革命”和“21 世纪的数控加工装备”,吸引了全世界范围内各个高校和研究机构的研究兴趣^[1-2]。

在并联机床发展初期,以“六足”机床为代表的六自由度纯并联机床是研究热点,主要原因是并联机床可以解决传统串联机床所存在的运动部件质量大、误差累积效应强等缺点,而这些缺点在自由度少的情况下并不明显。但是,这种六自由度纯并联机床也存在自身的问题,如工作空间与整机的体积比小,工作空间内不同区域机床性能差异大等。这些问题使得它们难以实现实用化^[3]。

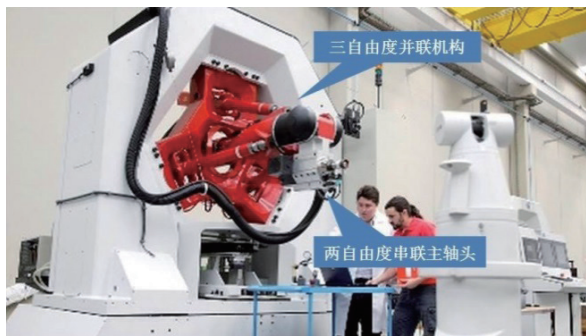
进入 21 世纪,将并联机床与传统串联机床结合的混联机床开始受到人们的重视。混联机床可以利用串联机床作业空间大、单轴精度高、技术成熟的优势和并联机床刚度

高、负载能力强的优势获得良好的综合性能^[4]。例如,瑞典 Neos 公司的 Tricept 机床^[5](图 1(a))和德国 DST 公司的 Ecospeed 机床^[6](图 1(b))均是三自由度并联机构加上两自由度串联机构的混联机床。目前,德国 DST 公司的 Ecospeed 机床已经被用于欧洲战斗机(Eurofighter)、空中客车(Airbus)等飞机的加工制造。该机床能够克服传统五轴机床难以容纳大功率电主轴等问题,而且其卧式结构具有较大作业空间和更高的上下料效率,因而适合加工大型航空结构件。此外, Tricept 机床等其他一些混联机床也在飞机零件制造等领域得到了成功应用^[7-8]。

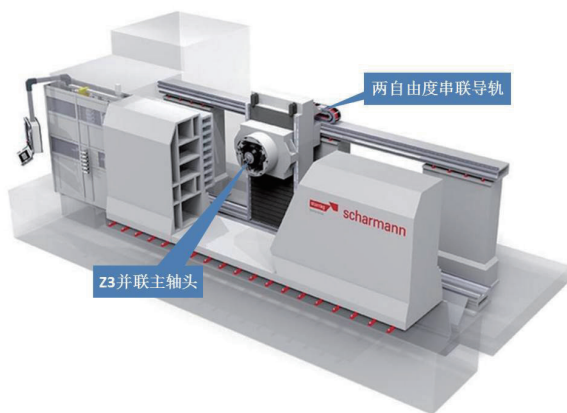
1994 年以来,国内各高校和研究机构也开始重视并联机床的研究,并研制出多台并联机床样机。但是,目前我国自主研发的并联机床还没能实现真正意义上的实用化。这其中的一个重要原因是机床的精度不足。

精度是机床实现加工功能的基础,并联机床与传统机床一样,不但存在热变形误差、负载变形误差和动态误差,而且其结构中存在的铰链和连杆等构件还导致其加工装配误差

* 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2015ZX04001002); 国家自然科学基金资助项目(51275260)。



(a) Tricept 机床



(b) Ecospeed 机床

图1 已经实现商业化的两种典型并联机床

Fig.1 Two kinds of typical parallel machine tools commercialized now

较传统机床更为显著。因此,并联机床的精度保证也更为困难。一般来说,机床精度的保证手段包括误差消除和误差补偿。对于并联机床,其加工装配误差尤其需要进行消除和补偿:误差消除主要依靠提高加工质量和装配精度;而误差补偿由并联机构的运动学标定实现。

运动学标定通过测量机构终端的运动信息,确定各构件(连杆和铰链等)的尺寸误差和装配误差,并通过机构额外的运动补偿这部分误差。实践证明,运动学标定可以在不提高加工制造成本的情况下大幅提高并联机床运动精度,是并联机床实用化的关键技术之一。

并联机床的运动学标定

从实现过程来看,并联机床的运动学标定包括4个方面:误差建模、位姿测量、误差辨识和误差补偿。

1 误差建模

并联机床的加工装配误差有很多,需要通过合理的建模加以辨识和补偿。误差建模的依据是机构的运动学方程,并联机构运动学方程可表示为:

$$f(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

式中, \mathbf{p} 表示机构终端的位姿, \mathbf{q} 是主动关节的驱动量, \mathbf{r} 是机构相关的几何参数,包括铰链安装的位置、转动副和移动副的轴线方向、连杆的杆长等。其中,几何参数 \mathbf{r} 一般被视作常量,此时该方程确定了机床主动关节驱动量 \mathbf{q} 与机床终端位姿 \mathbf{p} 之间的关系,是机床控制的依据。而在运动学标定的过程中,机床驱动量 \mathbf{q} 是已知量。由于加工装配误差的存在,理想的几何参数 \mathbf{r} 实际上存在偏差 $\Delta \mathbf{r}$,它包括铰链安装位置误差、转动副和移动副的轴线方向误差、连杆的杆长误差等;这些误差使机床终端

位姿产生了 $\Delta \mathbf{p}$ 的偏差。它们满足:

$$f(\mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) = 0, \quad (2)$$

该方程为考虑机床加工装配误差后的实际运动学模型。而由于几何误差项 $\Delta \mathbf{r}$ 相对 \mathbf{r} 一般很小,可以用式(2)在式(1)处的一阶泰勒展开来近似描述几何误差项与终端位姿误差的映射关系,表示为:

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{J}(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}) \Delta \mathbf{r}, \quad (3)$$

式中,

$$\mathbf{J}(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}) = -\left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}}\right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}},$$

为几何误差项 $\Delta \mathbf{r}$ 对终端位姿误差 $\Delta \mathbf{p}$ 的误差传递矩阵。

此外,一些学者为了获得更准确的运动学模型而考虑了铰链间隙等误差,这相当于令 $\Delta \mathbf{r}$ 中的某些项成为由更多误差因素所决定的变量。而在精度要求不高的情况下,也可以对误差模型进行简化,仅考虑 $\Delta \mathbf{r}$ 中部分误差项。这相当于令 $\Delta \mathbf{r}$ 中的某些项为0,这样的处理使误差项的计算更为简便。

2 位姿测量

通过测量机床的实际位姿可以确定误差项 $\Delta \mathbf{r}$ 。按照测量方案划分,标定方法可以分为外部标定和自标定。

外部标定通过外部测量仪器来获得不同驱动量 \mathbf{q} 下终端位姿误差 $\Delta \mathbf{p}$ 的信息,从而进行误差辨识。由于要测量多个自由度的位姿,激光跟踪仪^[9]和 CCD 成像技术^[10]等三维坐标测量技术得到了比较普遍的应用,它们的测量范围大,但是测量成本高,且测量精度有限。

为避免上述缺陷,一些设计巧妙的间接测量方法也得到应用。魏世民等^[11]采用了标准量块和千分表,通过在主轴头上固定多台千分表并同时测量已知姿态的标准量块,间接计算出并联机床主轴头位姿。商用化的 Ecospeed 机床的生产商提供的标定方案也采用了间接测量方法:用3台千分表测量主轴头的空间三

坐标;将已知姿态的标准量块固定在工作台上,通过千分表轮表的方法测量主轴头偏摆方向^[12]。这种方法成本低、效率高,具有很强的实用性。

另外,长度计、经纬仪、倾角仪和电子罗盘等仪器也都可以直接或间接实现终端位姿的测量。

除此之外,一些测量仪器无法实现多自由度测量,却能在单方向上获得很高的精度,同样可以被用于机床终端信息的获取,例如,可以利用激光干涉仪^[13]测量终端沿不同方向的定位误差,或者利用球杆仪^[14]测量机床终端运动的圆度误差。

自标定是在机构内部安装冗余传感器进行标定的方法。冗余传感器一般安装在机构的被动关节上^[15],用来获得被动关节的运动信息;也有学者在机架与终端之间安装被动杆,利用被动杆上的传感器信息计算终端的位姿^[16]。自标定的优点是测量速度快,缺点是增大了机构设计和制造的难度,且无法得到终端位姿的绝对基准。因此,目前更为常用的是外部标定方法。

3 误差辨识

误差辨识是指利用测量数据对误差模型中的误差项进行求解的过程。由于测量误差不可避免,因此该过程实际是一个最优化问题,即通过优化误差项 Δr 寻找目标函数(或目标函数的模)的最小值。目标函数的构造方法不唯一:对于外部标定来说,一种方法是利用当前几何参数估值 $r+\Delta r$ 和驱动量 q ,计算式(2)中的 Δp ,并将测量值与 Δp 中相应自由度的偏差作为目标函数,这种方法称为基于正解的误差辨识方法。该方法既适用于多自由度测量方案,也适用于单自由度测量方案,应用最为广泛。如果测量自由度数目不少于机构自由度数目,还可以利用实际测量值 Δp 与几何参数估值 $r+\Delta r$ 计算式(2)中的驱动量 q ,并将其与实际驱动量的偏差作为目标函数,这种方

法称为基于逆解的误差辨识方法。

目标函数的构造方法确定后,每一种测量方案都可以通过增加测量位姿使目标函数的维数更多,从而减小测量误差给误差项优化带来的干扰。但很多情况下,测量误差仍然会导致传统的高斯牛顿优化方法不收敛。为此,一些研究者采用了正则化方法等自适应算法^[8,12]保证了优化过程的收敛,实现了误差辨识。

另外,分步标定也可以被用来减小误差辨识的难度。分步标定是指通过一定的测量手段直接测量机构某些误差项,再通过上述辨识方法得到其他误差项^[17]。也有学者通过对机构施加附加约束,使机构的运动只体现某些误差项并加以测量,从而实现分步标定^[18]。

4 误差补偿

并联机床运动控制的一般方法是通过插补目标轨迹得到每一时刻的终端位姿 p ,再利用式(1)计算每一时刻驱动量 q 。因此,补偿 Δr 造成的终端误差的方法是:利用运动学标定辨识得到误差项 Δr 对式(1)中的几何参数 r 进行修正,并用修正后的方程计算驱动量 q 。

以上讨论的误差建模与补偿方法是基于并联机构的运动学方程进行的。此外,也有学者采用了如神经网络法等完全不同的建模和补偿方法,同样能够完成对并联机构加工装

配误差的补偿^[19]。

SMC35 并联机床的 标定试验研究

下面以一台实际并联机床为例,对运动学标定的实现过程进行具体介绍。

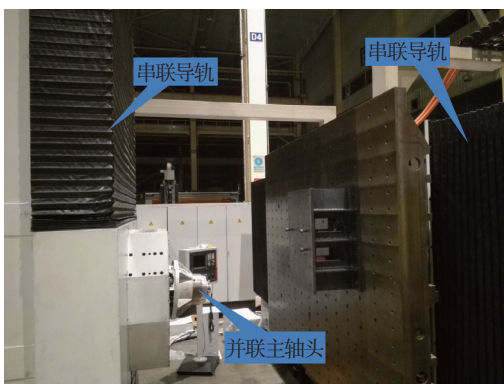
为推进国产并联机床的实用化,清华大学设计了一种3-P(Pa)S-XY构型的并联机床——SMC35。该机床将Ecospeed机床中并联主轴头的转动副和被动连杆用平行四边形机构代替。这种主轴头称为3-P(Pa)S主轴头。它具有与Ecospeed机床主轴头相同的运动学模型,可以实现单方向平动和两方向摆动。将3-P(Pa)S主轴头安装在两方向串联导轨上,即可实现机床的五轴运动。该机床利用区间分析法进行精度设计和加工制造^[8],并采用西门子840D数控系统进行单轴控制。通过运动学标定,机床实现了加工装配误差的补偿。

1 误差建模

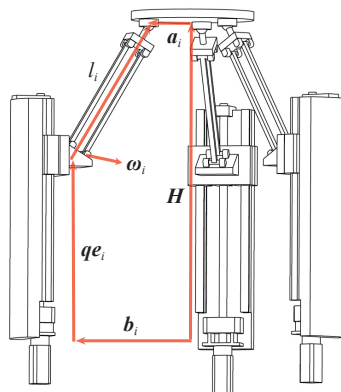
SMC35机床及其主轴头示意图如图2所示。

3-P(Pa)S主轴头具有3条运动支链,每条支链可列出两个独立的方程。这6个方程构成了机构的运动学方程组:

$$\begin{cases} \|H+Ra_i-q_i e_i-b_i\| -l_i=0 \\ (H+Ra_i-q_i e_i-b_i) \times \omega_i=0 \\ (i=1,2,3), \end{cases} \quad (4)$$



(a) SMC35 机床实物图



(b) 3-P(Pa)S 机构示意图

图2 SMC35机床及其主轴头示意图

Fig.2 SMC35 machine tool and a diagram of its spindle head

式中, H 为机床终端位置向量, R 为机床终端相对于机床坐标系的旋转矩阵, H 与 R 对应于式(1)中的终端位姿 p ; q_i 是各支链移动副的驱动量, 对应于式(1)中的 q ; 其余各项为几何参数: a_i 为各球铰在动平台上的安装位置, b_i 代表各移动副安装位置, l_i 为各被动杆长度, e_i 和 ω_i 分别为各支链移动副和转动副轴线的方向矢量。对式(4)进行一阶泰勒展开可以得到形如式(5)的误差传递公式:

$$\Delta p = \begin{pmatrix} J_{p_1} \\ J_{p_2} \\ J_{p_3} \end{pmatrix}_{6 \times 6}^{-1} \begin{pmatrix} J_{r_1} & & \\ & J_{r_2} & \\ & & J_{r_3} \end{pmatrix}_{6 \times 33} \Delta r \quad (5)$$

式中,

$$\Delta p = \begin{pmatrix} \Delta H \\ \Delta \theta \end{pmatrix}, \Delta r = \begin{pmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \end{pmatrix},$$

$$J_{p_i} = \begin{pmatrix} e_{l_i} & e_{\omega_i} \\ a_i e_{l_i} & a_i e_{\omega_i} \end{pmatrix}^T,$$

$$J_{r_i} = \begin{pmatrix} -R^T e_{l_i} & -R^T e_{\omega_i} \\ e_{l_i} & e_{\omega_i} \\ 1 & 0 \\ q_i e_{l_i}^T e_{l_i} & -e_{\omega_i}^T (q_i \omega_i + l_i e_{l_i}) \\ 0 & -l_i \omega_i^T e_{l_i} \end{pmatrix}^T$$

($i=1, 2, 3$),

式中, $\Delta \theta$ 为机床终端转动矩阵 R 的微分矢量, 满足:

$$\Delta R a_i = \Delta \theta \times R a_i, \quad (6)$$

e_{l_i} 是第 i 条支链被动杆的方向向量,

可表示为:

$$e_{l_i} = (q_i e_{l_i} + b_i - H - R a_i) / l_i \quad (7)$$

e_{ω_i} 和 ω_i 可分别用球坐标表示为:

$$e_{\omega_i} = (\cos \theta_{e_i} \sin \varphi_{e_i}, \sin \theta_{e_i} \sin \varphi_{e_i}, \cos \varphi_{e_i})^T, \quad (8)$$

$$\omega_i = (\cos \theta_{\omega_i} \sin \varphi_{\omega_i}, \sin \theta_{\omega_i} \sin \varphi_{\omega_i}, \cos \varphi_{\omega_i})^T, \quad (9)$$

综合式(8)和式(9), 可得:

$$\Delta r_i = (\Delta a_i^T \Delta b_i^T \Delta l_i \Delta \theta_{e_i} \Delta \varphi_{e_i} \Delta \theta_{\omega_i} \Delta \varphi_{\omega_i})^T, \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 模型中的误差项包含了球铰的安装位置误差 Δa_i 、移动副安装位置的误差 Δb_i 、被动杆杆长误差 Δl_i 、移动副安装方向的误差 $\Delta \theta_{e_i}$ 、 $\Delta \varphi_{e_i}$ 以及转动副轴线方向误差 $\Delta \theta_{\omega_i}$ 、 $\Delta \varphi_{\omega_i}$ 。

2 位姿测量方案

综合考虑测量精度和测量成本, 我们采用了间接测量的方案测量机床终端的五自由度位姿。机床终端回转方向的自由度没有进行测量, 因为对于五轴机床来说, 该方向是刀具的自转方向, 其精度无须保证。最终的位姿测量方案如图3所示。

图3中, 3台千分表分别沿 X 、 Y 、 Z 向布置, 用来测量位置信息。测量方法是: 在主轴头上安装球头检棒(图中未示出), 通过移动 X 、 Y 方向串联导轨使球头检棒的测头压表, 根据串联导轨的移动量和千分表读数就可以确定主轴头位置。主轴头姿

态测量采用自制的姿态量具, 测量方法是: 先通过千分表测量得到姿态量具基准面的安装角度; 通过基准面的安装角度可以得到测量平面的实际角度; 再通过改变测量平面的安装方式得到不同姿态的测量平面; 然后将千分表固定在主轴头上, 并调整主轴头使测量平面压表; 通过微调各支链驱动量, 使主轴头转动一周的过程中千分表读数不变。则此时主轴头与姿态平面垂直, 主轴头的两个偏摆角度可知。在测量中, 我们将上述位置和姿态测量方法反复进行, 就可以得到不同位姿下机床主轴头5个自由度的位姿信息^[6]。

3 基于正则化的误差辨识

得到终端位姿信息后, 将其与当前误差估计下的终端位姿 p 的偏差作为目标函数。然而在优化过程中, 传统的高斯牛顿优化方法不能收敛。这是因为, 高斯牛顿优化方法将多元非线性目标函数线性化, 通过求解线性方程组对最优解的估计值进行修正, 并通过不断迭代逼近最优解。但在误差项的求解过程中, 相应的线性方程组系数矩阵的某些特征值很小, 在这些特征值对应的特征向量方向上, 修正量对于测量误差非常敏感, 导致辨识结果不准确。

为了减小测量误差对补偿效果的影响, 采用了基于 Morozov 偏差方程的正则化方法进行误差辨识。该方法的思想是, 通过对测量误差 δ 的估计, 将这些敏感方向的修正量适当改变, 从而保证迭代向着最优解的方向进行。通过这种方法保证了求解稳定性, 并在此过程中利用遗传算法对测量误差 δ 进行搜索, 得到了对测量误差 δ 的最佳估计以及相应的几何误差项^[9]。辨识原理如图4所示。

4 基于插补代码的误差补偿

为了验证误差项求解的准确性, 修正后的运动学方程组应该被用于机床的控制。但是, 目前国内还没有这种机床的专用数控系统, 该机床只

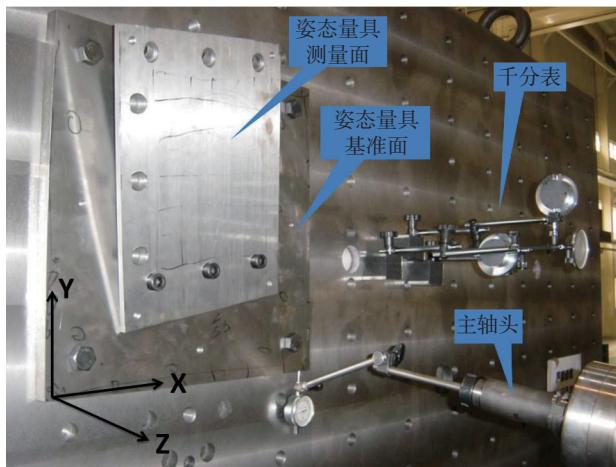


图3 3-P(Pa)S机构的标定试验

Fig.3 Calibration experiment of 3-P(Pa)S mechanism

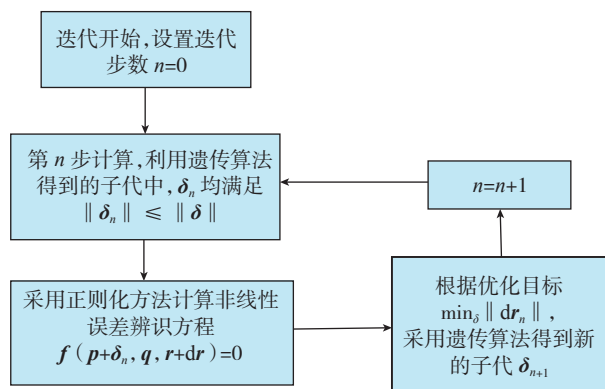


图4 利用正则化方法进行误差辨识的流程

Fig.4 Process of error identification using regularization method

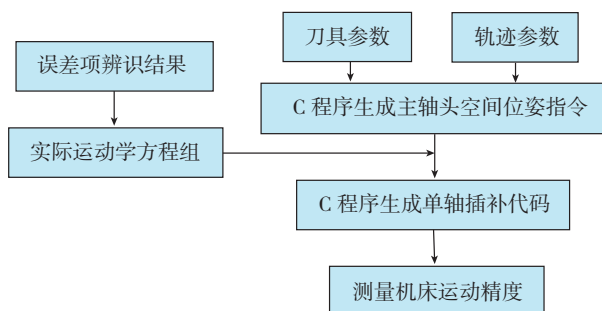


图5 SMC35并联机床的误差补偿流程

Fig.5 Process of error compensation of SMC35 parallel machine tool

能实现对各驱动的单轴控制。为了评价补偿效果,我们采用C语言编制了数控代码插补程序,该程序可利用运动学方程组将主轴头轨迹代码转化为各驱动自身的插补代码,从而可以实现加工装配误差的补偿。补偿流程如图5所示。

RTCP (Rotation Tool Center Point) 精度是五轴联动机床精度评价的重要指标。利用上述流程控制机床并对机床的 RTCP 精度进行测量,测量结果显示,机床在标定区域内的 RTCP 误差由原来的 1mm 以上减小到 0.04mm 以下^[6,12]。此外,机床两串联轴全程直线度约为 0.03mm,垂直度约为 0.3mm/m。为了保证全空间的运动精度,串联轴还需要进一步补偿。

结束语

并联机床具有刚度高、动态性能好、加工效率高等特点,某些基于串联构型的并联机床已经成功应用于

大型航空结构件的加工。

由于存在铰链、连杆等构件,并联机床的精度较一般串联机床更难保证。运动学标定技术是提高并联机床精度的重要措施。本文从误差建模、误差测量、误差辨识和误差补偿的角度介绍了并联机床运动学标定的一般思路,并讨论了运动学标定的不同实现方法。

清华大学自主设计了一台 3-P(Pa)S-XY 构型的并联机床。本文以该机床为例对运动学标定进行了具体介绍。我们通过自制量具间接测量了机床位姿,并实现了基于正则化方法的运动学标定。补偿结果表明,该机床在标定区域内 RTCP 精度由 1mm 以上减小到 0.04mm。随着研究的深入,自主生产的并联机床在我国航空制造业中必将拥有更为广阔的应用前景。

参考文献

[1] 段广洪,李铁民. 并联机器的起

源和发展[J]. 世界制造技术与装备市场, 2006(1): 41-48.

DUAN Guanghong, LI Tiemin. Origin and development of parallel kinematic machines[J]. The Manufacturing Technology and Equipment Market, 2006(1): 41-48.

[2] JIN Y, CHANAL H, PACCOT F. Parallel Robot//Nee A Y C. Handbook of manufacturing engineering and technology[M]. London: Springer Verlag, 2015:2092-2122.

[3] ABEDINNASAB M H, YOON Y J, ZOHOOR H. Exploiting higher kinematic performance—using a 4-legged redundant PM rather than gough-stewart platforms[C]//SERDAR K. Serial and parallel robot manipulators - kinematics, dynamics, control and optimization. Rijeka: Intech, 2012: 43-66.

[4] GAO Z, ZHANG D. Performance analysis, mapping and multiobjective optimization of a hybrid robotic machine tool[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 423-433.

[5] Exechon, Inc. Background[EB/OL]. 2009[2015-12-01]. <http://www.exechonworld.com/bgIntroduction.htm>.

[6] 黄鹏. 一类三自由度空间并联机器人精度保证方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.

HUANG Peng. Research on the accuracy assurance of a class of spatial parallel manipulators with 3-DOF[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

[7] Starrag Group, Inc. Ecospeed (from 2070 up to 25210)-5-axis machining center [EB/OL]. 2015[2015-12-01]. <https://www.starrag.com/en-us/machine-361?machineId=136>.

[8] PKM Tricept, Inc. Structural machining aerospace [EB/OL]. 2015[2015-12-01]. <http://www.pkptricept.com/aplicaciones/index.php?id=en&Naplica=1240239668>.

[9] NUBIOLA A, BONEV I. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013 (29): 236-245.

[10] RENAUD P, ANDREFF N, DHOME M, et al. Experimental evaluation of a vision-based measuring device for parallel machine-tool calibration[C]//2002 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems, Lausanne, 2002.

[11] 魏世民, 廖启征, 黄靖远. 采用间接测量法对 V AMTII 型虚拟轴机床运动学标定的仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2001,

20(4): 488-491.

WEI Shimin, LIAO Qizheng, HUANG Jingyuan. The simulation study on VAMT1Y virtual axis machine tool's kinematic calibration using indirect measurement[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(4): 488-491.

[12] 陈禹臻. 一种空间三自由度关节型摆角头的误差补偿研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.

CHEN Yuzhen. Research on the error compensation of a spatial manipulator with 3-DOF[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

[13] 黄田, 唐国宝, CHETWYND D G, 等. 一类少自由度并联构型装备运动学标定方法研究[J]. 中国科学(E), 2003, 33(9): 829-838.

HUANG Tian, TANG Guobao, CHETWYND

D G, et al. Study on the kinematic calibration methods of a sort of parallel kinematic machine fewer than 6-DOF[J]. Science in Chinese(E), 2003, 33(9): 829-838.

[14] IBARAKI S, YOKAWA T, KAKINO Y, et al. Kinematic calibration on a parallel kinematic machine tool of the Stewart platform by circular tests[C]. American Control Conference, Massachusetts, 2004.

[15] FENG Z R, SU C P. Self-calibration of parallel manipulators using an orientation constraint[C]. 2009 IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Xi'an, 2009.

[16] RAUF A, PERVEZ A, RYU J. Experimental results on kinematic calibration

of parallel manipulators using a partial pose measurement device[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(2):379-384.

[17] 常鹏. 平面并联机器的精度分析与运动学标定[D]. 北京: 清华大学, 2008.

CHANG Peng. Accuracy analysis and kinematic calibration of planar parallel kinematic machines[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.

[18] MERLET J P. Parallel robot(2nd)[M]. Berlin: Springer Verlag, 2006: 289-300.

[19] ZHANG D, GAO Z. Optimal kinematic calibration of parallel manipulators with pseudo-error theory and cooperative coevolutionary network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(8): 3221-3231.

Kinematic Calibration of Parallel Kinematic Machine Tool

LI Tiemin, ZHANG Jinglei, LI Fengchun

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] With the advantages of high rigidity, good dynamic characteristics and high efficiency, parallel kinematic machine tools have been applied successfully in the machining of large aviation structure. Kinematic calibration is one of the important means to guarantee the accuracy of parallel kinematic machine tool. This paper introduces kinematic calibration methods of parallel kinematic machine tool, including error modeling, pose measurement, error identification and error compensation, and additionally focuses on the calibration experiment and the relevant research of a domestic parallel kinematic machine tool.

Keywords: Parallel kinematic machine tool; Kinematic calibration; Hybrid machine tool

(责编 叶枫)

(上接第 40 页)

Industrialization Process of Ultra-Precision Machining Equipment in China

YANG Hui

(AVIC Beijing Precision Engineering Institute Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] Although machine tool manufacturing industry in our country has a place in the world at present, most of these produced are common precision machine tools. And ultra-precision machining equipment has yet to reach industrial production level. Some key components has been imported, and ultra-precision machine equipment self-developed have the characteristics of high price, long cycle, the lack of precision of stability and long-term stability of the equipment operation. So on the basis of the emphasis on ultra-precision components research and development, industrialization of ultra-precision machining equipment R&D and production base will be established by combined the domestic units which have the advantage of technology. By means of strengthening the development of industrialization of ultra-precision machining equipment, the demand of national important task will be met.

Keywords: Ultra-precision components; Modular design; Single point diamond cutting; Computer controlled optical surfacing

(责编 叶枫)