

文章编号 1004-924X(2014)05-1227-08

平行双关节坐标测量机的标定及不确定度评价

夏桂锁*, 廖 城, 伏燕军

(南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘要:借鉴国外 ScanMax 测量机所具有的优势,研发了 RRP 结构(即两个转动和一个直线运动)的平行双关节坐标测量机,并研究了该仪器的误差模型、标定方法和不确定度评定方法。首先,根据平行双关节坐标测量机的机械结构建立了仪器的数学模型和误差模型。然后,基于全误差分析技术设计了仪器的标定方案并分别介绍了对重力和扭矩变形、平行度、臂长、零位等参数的标定。最后,根据国家坐标测量机校准规范,提出了通过评价测量重复性和长度测量精度的方法来评定测量不确定度。实验结果表明:在 1 000 mm×250 mm(直径×高度)的测量范围内,平行双关节坐标测量机的测量不确定度可达到 12 μm($k=2$)。得到的结果验证了平行双关节坐标测量技术及全误差分析技术的可行性,为非正交坐标测量机的标定探索了新的方法。

关键词:平行双关节;坐标测量机;全误差分析;不确定度;标定

中图分类号:TH721.1;TP242 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1227

Calibration and uncertainty evaluation of double parallel-joint coordinate measuring machine

XIA Gui-suo*, LIAO Cheng, FU Yan-jun

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of the Ministry of Education,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

* Corresponding author, E-mail: xiaguisuo@163.com

Abstract: On the basis of advantages of ScanMax measuring machines at abroad, a double parallel-joint Coordinate Measuring Machine (CMM) with a RRP structure (two rotation movements and a line movement) was developed, and its error model, calibration method and uncertainty evaluation was investigated. Firstly, the mathematical model and error model was established according to the mechanical structure of the double parallel-joint CMM. Then, the calibration scheme was designed based on the total error analysis, and calibration methods of the parameters such as gravity, torque deformation, parallelism, arm length, null were introduced. Finally, based on the national Calibration Specification for CMM, a evaluation method by measurement repeatability and the precision of length measurement to evaluate measurement uncertainty was proposed. The experiments by proposed method show that the measurement uncertainty of double parallel-joints CMM can reach 12 μm ($k=2$) in a measurement range of 1 000 mm × 250 mm (diameter × height). It is proved that both double

收稿日期:2013-11-12;修订日期:2013-12-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51365045);南昌航空大学博士启动基金资助项目(No. EA201308039)

parallel-joint coordinate measuring technique and total error analysis technology are feasible. It explores a new way to calibrate non-orthogonal CMM.

Key words: double parallel-joints; coordinate measurement machine; total error analysis; uncertainty; calibration

1 引言

柔性坐标测量机具有体积小、造价低、便携性好等优点, 适宜于工业现场的使用, 因此发展迅速, 但精度问题依然是制约其推广的重要因素^[1]。

国内关节臂式坐标测量机的长度测量精度水平不足 $0.06 \text{ mm}(2\sigma)$, 在工业现场使用受到很大制约。本文借鉴国外 ScanMax 测量机^[2] 的移动灵活、测量功能强、成本适中、测量精度高等特点, 研发了 RRP 结构(即两个转动和一个直线运动)的平行双关节坐标测量机, 这种测量机的测量精度接近正交三坐标测量机的精度水平, 在技术与应用上可补充现有测量机的不足。这种测量机主要在以下几个方面有所创新:(1)将 Z 轴标尺线移到与测量线同轴位置, 减小了阿贝误差;(2)采用更先进、合理的轴系结构, 减小测量盲区;(3)在精度设计中, 对逐个误差进行量化分析, 并进行公差分配, 有效地减小了仪器的误差, 也有利于后续的误差修正^[3]。

仪器标定是提高仪器精度的重要手段和途径, 是测量精度保证的关键^[4]。精密测量领域广泛采用两种标定方法:一种是综合标定方法, 该方法采用最小二乘法优化标定结果并消除误差^[5], 虽然操作比较简单, 但对弱刚性悬臂系统的标定精度偏低。另一种是分离标定方法, 该方法基于全误差分析技术, 通过严格的标定程序来标定误差参数^[6]。本文利用分离标定方法标定测角精度、测长精度、重力和扭矩变形、平行度、臂长、零位等参数, 并将这些参数代入误差模型, 实现高精度标定。

国际标准化组织(ISO)和国际电工委员会(IEC)发布的《测量不确定度的表示方法指南》(GUM)指出, “一项完整的测量结果表述应当包含测量不确定度”^[7]。本文借鉴国家坐标测量机校准规范(JJF_1064-2010), 通过评价测量重复性和长度测量精度的方法进行了测量不确定度的评定。对平行双关节坐标测量机的测量质量进行

了评估, 提升了坐标测量机的应用价值。

2 数学模型及误差模型

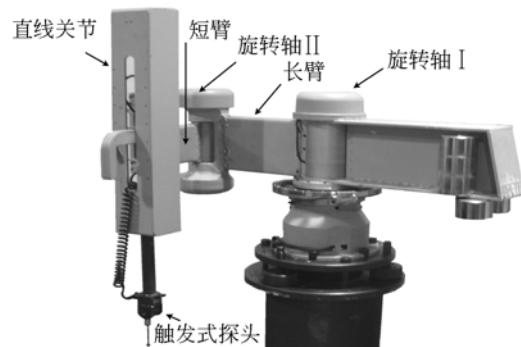


图 1 平行双关节坐标测量机

Fig. 1 Double parallel-joint CMM

对平行双关节坐标测量机进行研究, 首先建立运动学数学模型, 之后分析其误差模型。

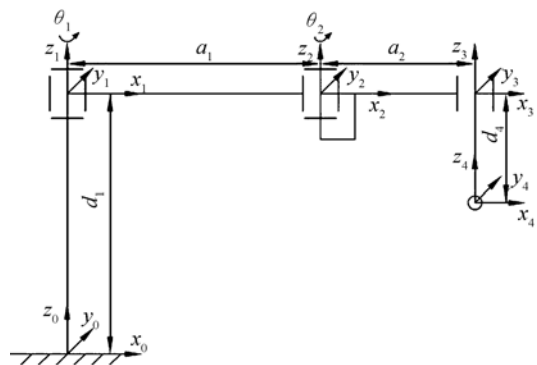


图 2 平行双关节坐标测量机的坐标系

Fig. 2 Coordinate system of double parallel-joint CMM

根据 D-H 法^[8]建立的坐标系如图 2 所示, 其中基座处建立坐标系 {0}, 轴 I 与长臂交接处建立坐标系 {1}, 长臂与轴 II 交接处建立坐标系 {2}, 短臂与直线关节交接处建立坐标系 {3}, 触发测头端点处建立坐标系 {4}。 a_1 、 a_2 分别表示仪器的长臂与短臂, θ_1 、 θ_2 为轴 I、轴 II 的旋转角度, d_1 、 d_4 为仪器基座高度与直线光栅测量长度, 由此理想的平行双关节坐标测量机的数学模

型为:

$$\mathbf{p}' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \times a_2 + \cos(\theta_1) \times a_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \times a_2 + \sin(\theta_1) \times a_1 \\ d_1 - d_4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: \mathbf{p}' 为触发探头的中心点。

平行双关节坐标测量机任意相邻两个关节间都可以用5个参数($a_{i-1}, \alpha_{i-1}, d_i, \theta_i, \beta_i$)来表示出它们的数学模型, α, β 分别为坐标系 x, y 方向的轴系平行度。平行双关节坐标测量机测头中心的坐标误差 Δp 主要由各杆件的结构参数误差($\Delta a_i, \Delta d_i$), 关节变量误差 $\Delta \theta_i$ 和坐标系 x, y 轴方向的平行度误差($\Delta \alpha_i, \Delta \beta_i$)所决定。 $\Delta \theta_i$ 包括平行双关节坐标测量机的零位误差和测角误差; ($\Delta a_i, \Delta d_i$) 反应了相邻两连杆旋转轴线的空间距离误差和相邻两连杆的偏置误差。为了准确地表示出这些误差对测量结果的影响, 需要考察由这

$$\mathbf{J}_\delta = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial a_0} \dots \frac{\partial f_x}{\partial a_3} \frac{\partial f_x}{\partial \alpha_0} \dots \frac{\partial f_x}{\partial \alpha_3} \frac{\partial f_x}{\partial d_1} \dots \frac{\partial f_x}{\partial d_4} \frac{\partial f_x}{\partial \theta_1} \dots \frac{\partial f_x}{\partial \theta_4} \frac{\partial f_x}{\partial \beta_1} \dots \frac{\partial f_x}{\partial \beta_3} \\ \frac{\partial f_y}{\partial a_0} \dots \frac{\partial f_y}{\partial a_3} \frac{\partial f_y}{\partial \alpha_0} \dots \frac{\partial f_y}{\partial \alpha_3} \frac{\partial f_y}{\partial d_1} \dots \frac{\partial f_y}{\partial d_4} \frac{\partial f_y}{\partial \theta_1} \dots \frac{\partial f_y}{\partial \theta_4} \frac{\partial f_y}{\partial \beta_1} \dots \frac{\partial f_y}{\partial \beta_3} \\ \frac{\partial f_z}{\partial a_0} \dots \frac{\partial f_z}{\partial a_3} \frac{\partial f_z}{\partial \alpha_0} \dots \frac{\partial f_z}{\partial \alpha_3} \frac{\partial f_z}{\partial d_1} \dots \frac{\partial f_z}{\partial d_4} \frac{\partial f_z}{\partial \theta_1} \dots \frac{\partial f_z}{\partial \theta_4} \frac{\partial f_z}{\partial \beta_1} \dots \frac{\partial f_z}{\partial \beta_3} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: $\Delta \delta$ 是一个 19×1 的误差参数矢量, 即:

$$\Delta \delta = [\Delta a_0 \dots \Delta a_3, \Delta \alpha_0 \dots \Delta \alpha_3, \Delta d_1 \dots \Delta d_4, \Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_4, \Delta \beta_1 \dots \Delta \beta_3]^T, \quad (6)$$

则测头中心位置矢量:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}' + \Delta \mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

3 标定方案设计

机械臂和关节式坐标测量机的运动建模和标定的目的是找到最佳的运动模型参数设计值, 其中要求测量臂的尺寸误差尽可能精确。大多处理这一问题的共同特点是采用数学方法。本文所采用的误差分析技术为全误差分析技术, 是将影响仪器测量精度的所有误差项全部提取出来, 测量其真实值, 实现对坐标测量机的误差补偿。为了完成特定误差项的检测工作, 需要设计专用的检测装置。检测装置由碳素纤维标准棒、精密测长

些误差引起的测量误差的误差模型, 这里采用全微分的方法对其进行考察, 得到各个误差项与仪器测头中心坐标之间的关系。

两个相邻的坐标系统的坐标变换矩阵的定义如下:

$${}_{i-1}^i T = \text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(x, a_{i-1}) \cdot \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(z, d_i) \text{Rot}(y, \beta_i), \quad (2)$$

$i=1 \sim 4$, 则:

$${}^0_4 T = {}^0_1 T_1 {}^1_2 T_2 {}^2_3 T_3 {}^3_4 T_4. \quad (3)$$

为方便表示, 用点 (x, y, z) 表示坐标系 $\{4\}$ 的圆点在基础坐标系下的坐标值, 并用矢量 \mathbf{P} 表示测头中心位置矢量, 记做 $\mathbf{P} = (x, y, z)^T$ 。假设平行双关节坐标测量机各误差足够小, 则对式(3)取全微分可得:

$$\Delta \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \mathbf{J}_\delta \times \Delta \delta, \quad (4)$$

其中: \mathbf{J}_δ 是一个 3×19 的误差系数矩阵, 即:

仪、23 面棱体、准直仪、激光干涉仪、水平仪、大理石方尺等多种器件组成。在仪器的标定过程中, 一些误差项不需要标定, 根据实际情况、主要实现 $\Delta \theta_2, \Delta d_4, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta \alpha_1, \Delta \alpha_2, \Delta \beta_1$ 和 $\Delta \beta_2$ 的标定。其中圆光栅测角误差和直线光栅测量误差在本文中不做讨论, 其标定方法在其它很多文献中都进行了报道^[9]。

3.1 重力与扭矩变形的标定

平行双关节坐标测量机各个部分的平行度误差同重力影响是耦合的, 将其各自的真实值分离出来比较困难, 但可以通过等效法得出。重力及扭矩影响曲线的测量方法如图3所示, 将电子水平仪(测量精度 0.001 mm/m)分别按照垂直于长臂与平行于长臂的方向放置在关节 I 的顶盖上, 固定关节 I, 转动关节 II, 记录水平仪的读数同关节 II 的角度之间的关系, 通过曲线拟合得到重

力及扭矩对关节 I 的影响。同理，将水平仪分别按照垂直于长臂与平行于长臂的方向放置在关节 II 处，水平仪不随短臂转动，用同样方法可得到重力对关节 II 的弯曲及扭转曲线。弯曲曲线及扭转曲线分别代入误差模型的坐标系 x 轴及 y 轴方向。

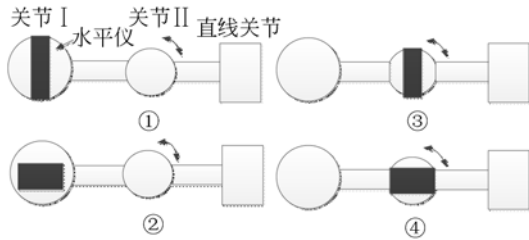


图 3 重力与扭转曲线测量方法

Fig. 3 Measuring method of gravity and torsion curve

所测得的变形曲线如图 4 所示，其中 4(a) 为轴 I 重力变形曲线，4(b) 为轴 II 重力变形曲线（已剔除轴 I 变形的影响），4(c) 为轴 I 受扭转力的变形曲线，4(d) 为轴 II 受扭转力的变形曲线（已剔除轴 I 变形的影响），横坐标为轴 II 未补偿零位时的测角值，纵坐标为变形量。

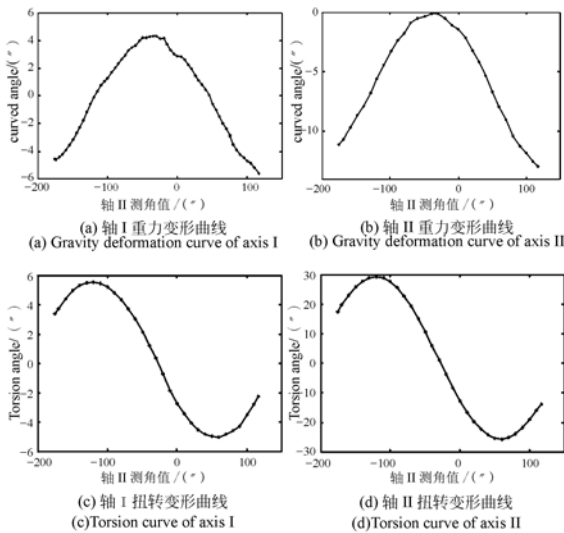


图 4 重力及扭矩变形曲线

Fig. 4 Deformation curves of gravity and torsion

3.2 平行度误差的标定

仪器在加工与装配的过程中难免会有一些偏差，直接导致坐标测量机的关节 I 轴线、关节 II 轴线以及直线关节的中心线之间存在误差。而平行度误差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 是加工装配误差与重力扭矩误

差的综合作用。由于前面已测定重力及扭矩变形曲线，此处只标定加工装配误差。

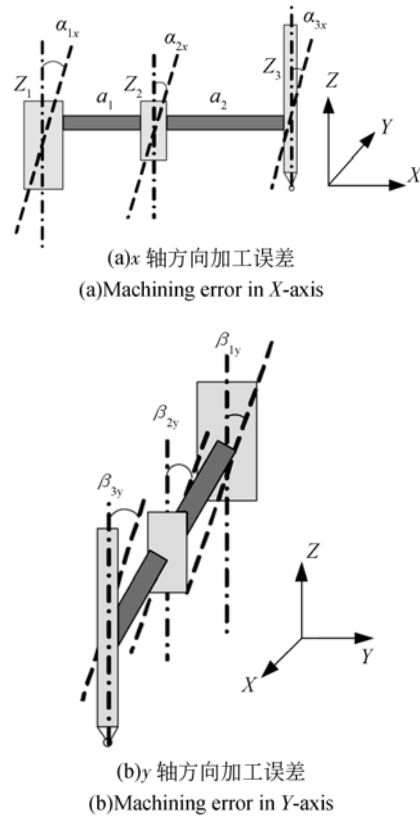


图 5 平行度误差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of parallelism error

仪器各关节在 x 、 y 方向的加工装配误差如图 5 所示。图 5(a) 中， α_{1x} 表示轴 I (Z_1) 的轴线在 x 方向同垂线的夹角； α_{2x} 表示轴 II (Z_2) 的轴线在 x 方向因加工装配误差造成的同轴 I 轴线的夹角； α_{3x} 表示直线关节的中心线在 x 方向因加工误差造成的同轴 II 轴线的夹角。图 5(b) 中， β_{1y} 表示轴 I (Z_1) 的轴线在 y 方向同垂线的夹角； β_{2y} 表示轴 II (Z_2) 的轴线在 y 方向因加工装配误差造成的同轴 I 轴线的夹角； β_{3y} 表示直线关节的中心线在 y 方向因加工装配误差造成的同轴 II 轴线的夹角。

下面以 β_{3y} 的标定为例介绍平行度的标定。

电感测微仪的探头安装在平行双关节坐标测量机直线关节的运动部件上，保证仪器长臂与短臂夹角为 90° ，使直线关节位于“方尺 A (00 级)”处，电感测微仪测头接触方尺 A 的侧面，记录直线关节运动部件上下运动过程中电感测微仪读数的变化。然后仪器短臂旋转 180° ，同样方式测量

数据, 则:

$$\alpha_{1x} + \alpha_{2x} + \beta_{3y} + \alpha_{2G-90} = \gamma_1 + \varphi_1, \quad (8)$$

$$\alpha_{1x} + \alpha_{2x} + \beta_{3y} + \alpha_{2G+90} = \gamma_2 + \varphi_2, \quad (9)$$

其中: α_{2G-90} 表示轴 II (Z_2) 在如图所示 -90° 位置, 因重力造成的其轴线在 x 方向的偏角; γ_1 表示直线关节的中心线同方尺 A 所用平面的夹角, 通过拟合直线光栅的读数同电感测头的读数间的关系获得; φ_1 表示方尺 A 所使用的平面同垂线的夹角; α_{2G+90} 表示轴 II (Z_2) 在 $+90^\circ$ 位置, 因重力造成的其轴线在 x 方向的偏角; γ_2 表示直线关节的中心线同方尺 B 所用平面的夹角; φ_2 表示方尺 B 所使用的平面同垂线的夹角。前面已经测量了轴 I 及轴 II 重力及扭转的变形, 因此 α_{2G-90} 、 α_{2G+90} 已知, 其它参数可测量。式(8)、(9)联立即可算出 β_{3y} 的值。其它 β_{2y} 、 α_{3x} 、 α_{2x} 的标定与上述过程类似。

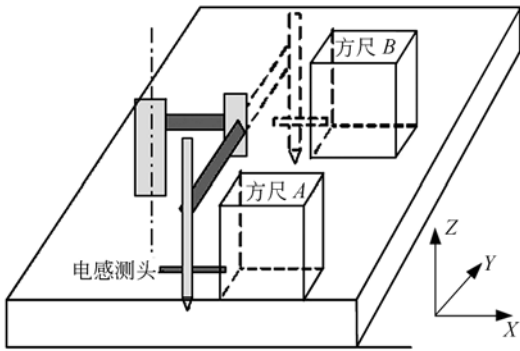


图 6 β_{3y} 的标定

Fig. 6 Schematic diagram for calibrating β_{3y}

3.3 短臂长度标定

短臂标定的基本原理如图 7 所示, 将轴 I (Z_1) 固定, 直线关节运动部件置于最高位置。转动轴 II (Z_2), 长臂与短臂夹角为 90° , 使仪器触发测头与电感测微仪测头接触, 锁定此时的接触位置 A 并记录电感测微仪读数, 电感测微仪与图 7 中 l_{AB} 方向保持一致。将轴 II 旋转 180° , 锁定位置 B 并记录另一电感测微仪读数。将一已知长度的碳纤维标准杆置于 A、B 点之间, 记录标准杆置入时两电感测微仪读数的变化, 则 A、B 位置之间的距离 l_{AB} 可通过标准杆长度和电感测微仪读数变化计算而得。考虑关节间的平行度误差及由于重力所引起的误差, 短臂长度的计算公式为:

$$a_2 = [d_4 \sin(\alpha_{3x} + \alpha_{2G-90}) + d_4 \sin(\alpha_{3x} + \alpha_{2G+90}) + l_{AB}] / 2. \quad (10)$$

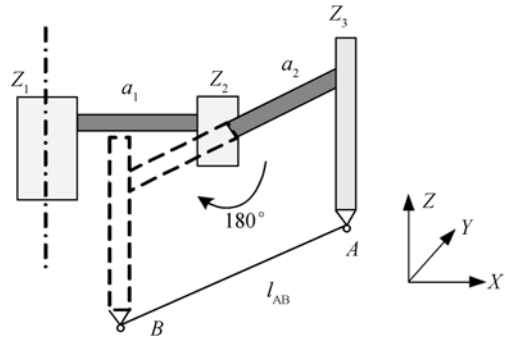


图 7 短臂标定原理

Fig. 7 Calibration of short arm length

3.4 零位标定

本项目中, 只需要标定旋转轴 II 的零位, 且零位位于长臂和短臂处于一条直线上的位置。直接标定零位比较困难, 可通过标定杆 a_1 与杆 a_2 的垂直角度来间接地标定出 0° 的位置。标定原理如图 8 所示。

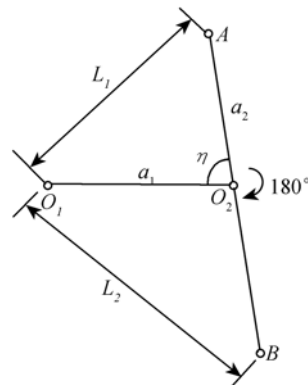


图 8 零位标定示意图

Fig. 8 Scheme of zero position calibration

因 a_2 已知, 利用几何关系计算角度 η , 则旋转轴 II 零位为:

$$\sin \eta = -L_1 \sin[\arccos((L_1^2 - L_2^2 + 4a_2^2) / 4a_2L_1)] / \sqrt{(L_1^2 + L_2^2 - 2a_2^2) / 2}. \quad (11)$$

3.5 长臂长度标定

由于旋转轴 II 的零位已经被标定, 两个臂可以排成一条直线。采用与短臂类似的方法, 可实现对长臂的标定。

3.6 仪器误差补偿

将仪器各个误差项标定完成后, 代入仪器误差数学模型, 完成仪器测量精度的补偿。完成上

述内容后,还需要对仪器进行不确定度评定,评价平行双关节坐标测量机的测量质量。

4 测量不确定度评定

坐标测量机测量不确定度的评定是一个复杂的过程。测量的多功能性、测量范围大及多种零件类型使得测量不确定度的评估受到多方面的影响^[10]。目前绝大多数的坐标测量机没有确定的不确定度计算方法。通常是由操作人员的经验得到。本文借鉴坐标测量机校准规范进行仪器的不确定度评定。

4.1 测量重复性的评价

平行双关节坐标测量机主要包含 3 个可动部件,旋转轴 I、旋转轴 II 和直线关节。需要分别检测每个移动部件的测量重复性,再进行综合计算,评价仪器测量重复性。

(1) 固定轴 I、轴 II,使得直线关节上下移动,反复测量某一点,重复测量 5 次。如图 9 所示:

求得直线关节测量重复性的标准偏差为:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (12)$$

式中: $s(x_i)$ 为任意一个测量结果 x_i 的实验标准偏差; x_i 为第 i 个测量结果; n 为对同一被测量在

规定条件下(既可以是重复条件,也可以是某给定的复现性条件)的独立观测次数; \bar{x} 为 n 个 x_i 的算术平均值,它是测量次数接近无穷大时测量结果分布期望的无偏估计。

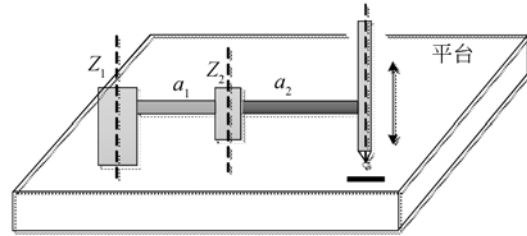


图 9 直线光栅尺的重复性评价

Fig. 9 Repeatability evaluation of linear grating ruler

其中 x_i 为直线光栅读数,与轴 I、轴 II 无关,取标准偏差,即 s_z 。

(2) 与光栅尺重复性评价类似,固定轴 I 及直线关节,转动轴 II,使得触发测头重复接触某一固定点,反复测量 5 次,计算由旋转轴 II 所引起的测量重复性,即 s_{II} 。

(3) 固定轴 II 及直线关节,使轴 I、轴 II 处于一条直线,转动轴 I,使得触发测头重复接触某一固定点,反复测量 5 次,计算由旋转轴 I 所引起的测量重复性,即 s_I 。

则平行双关节坐标测量机的测量重复性为:

$$u = \sqrt{s_z^2 + s_I^2 + s_{II}^2}. \quad (13)$$

仪器测量重复性测量结果如表 1 所示:

表 1 仪器重复性测量结果

Tab. 1 Repetitive measurement results of instrument

(mm)

测量项	测量结果	标准偏差	测量项	测量结果	标准偏差	测量项	测量结果	标准偏差
	75.586 8			90.168 2			10.418 7	
	75.584 9			90.167 8			10.418 2	
s_z	75.585 5	0.001 1	s_{II}	90.168 5	0.001 7	s_I	10.418 5	0.002 2
	75.586 2			90.167 2			10.418 3	
	75.584 0			90.167 9			10.418 8	
仪器测量重复性			u				0.003 0	

4.2 长度测量的评价

通过比较 2 个不同长度尺寸的量块的校准值和指示值,评价测量尺寸的样机是否符合规定的最大允许示值误差 MPEE。2 个尺寸的量块放在测量空间的 6 个不同的方向或位置(各个不同方向或位置要能明显影响测量结果),各测量 3 次,

共进行 18 次测量,其中在光栅尺读数值为 75 mm 处(大致值)测量 3 个位置,在光栅尺读数值为 -75 mm 处(大致值)测量 3 个位置。每次测量时,在量块的一个工作端面测量一个点,在另一个工作端面上测量 3 个点。通过软件计算得到工作端面上的一点到另一个工作端面的距离值,

即得到量块的长度。选用的量块长度尺寸分别近似为 250 mm 和 500 mm。本实验选用三等量块。

对所有 18 次测量,通过测量值与量块的约定真值之差,计算每一次测量的示值误差。

$$D_i = L_i - L_c \quad (14)$$

取每个位置处的 3 次测量偏差的平均值,即

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{3}, n = 3. \quad (15)$$

取 D 的最大值作为仪器标准不确定度的 A 类评定的数值,即 $e = D_{\max}$ 。

平行双关节坐标测量机的测量指示值与标准量块进行对比,结果如下:

表 2 测量指示值与标准量块的对比结果

Tab. 2 Comparative results of indicted value and standard gauge block (mm)

测量项目	理论值	测量位置	测量值	偏差均值
平面距离	249.998 4	位置 1	249.999 6	-0.002 8
			249.994 1	
			249.993 0	
		位置 2	249.991 0	-0.004 1
			249.998 5	
			249.993 3	
位置 3	250.003 7	0.001 3		
	250.001 5			
	249.994 0			
平面距离	499.999 2	位置 4	500.004 9	0.003 5
			499.998 0	
			500.005 3	
		位置 5	499.991 3	-0.003 8
			499.995 0	
			499.999 9	
	位置 6	499.996 7	0.003 3	
		500.007 5		
		500.003 3		

参考文献:

[1] SANTOLARIA J, AGUILAR J J, YANGÜE J A, et al. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines [J]. *Pre-*

4.3 扩展不确定度的计算

综上,平行双关节坐标测量机测量重复性为:

$$u = \sqrt{s_c^2 + s_1^2 + s_{II}^2} = 0.003 0 \text{ mm.}$$

指示值与量块的约定真值之差的最大值为:

$$e = D_{\max} = -0.004 1 \text{ mm.}$$

三等标准量块的扩展不确定度最大值为 0.000 7 mm,设检测过程中所使用量块的标准不确定度为 u_{LC} ,则 $u_{LC} = 0.000 35 \text{ mm}$ 。

在仪器测量重复性的评价中,测头的重复性已产生影响,不再重复计算。

该项目所研制样机的合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u^2 + e^2 + u_{LC}^2} = 0.005 1 \text{ mm.}$$

置信概率 $p = 95\%$,取 $k_p = 2$,故扩展不确定度为:

$$U_p = 2u_c = 10.2 \mu\text{m.}$$

此仪器为适应工业现场测量需求而设计,应对测量质量评价留有一定余量,因此平行双关节坐标测量机的扩展不确定度为 12 μm 。

5 结 论

本文根据平行双关节坐标测量机的机械结构建立了仪器的数学模型和误差模型,并根据全误差分析技术设计了仪器的标定方案。介绍了重力和扭矩变形、平行度、臂长、零位等参数的标定方法,根据国家坐标测量机校准规范,通过评价测量重复性和长度测量精度的方法进行了测量不确定度的评定。实验结果表明:在 1 000 mm \times 250 mm(直径 \times 高度)的范围内,平行双关节坐标测量机的测量不确定度可达到 12 μm ($k=2$),远高于 6 关节坐标测量机,接近传统三坐标测量机的精度水平。验证了平行双关节坐标测量技术及全误差分析技术的可行性,为非正交坐标测量机的标定提供了新的方法。

cision Engineering, 2008, 32(4):251-268.

[2] LOTZE W. ScanMax-a novel 3D coordinate measuring machine for the shopfloor environment [J]. *Measurement*, 1996, 18(1):17-25.

[3] XIA G S, FEI Y T, ZHAO J L. Accuracy design of double parallel-joints coordinate measuring machine

- [C]. *Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation International Society for Optics and Photonics*, 2010:75442-75446.
- [4] 赵磊, 刘书桂. 基于改进遗传算法实现柔性三坐标测量机参数标定[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11):2753-2758.
- ZHAO L, LIU SH G. Implementation of parameter calibration for flexible coordinate measurement machine based on improving genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2753-2758. (in Chinese)
- [5] 汪平平, 费业泰, 林慎旺. 柔性三坐标测量臂的标定技术研究[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(3):284-288.
- WANG P P, FEI Y T, LIN S W. Calibration technology of a flexible coordinate measuring arm [J]. *Xi'an Jiaotong Daxue Xuebao (Journal of Xi'an Jiaotong University)*, 2006, 40(3):284-288 (in Chinese)
- [6] 黄强先, 余夫领, 宫二敏, 等. 零阿贝误差的纳米三坐标测量机工作台及误差分析[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3):664-671.
- HUANG Q X, YU F L, GONG E M, *et al.*. Nano-CMM stage with zero Abbe error and its error analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):664-671 (in Chinese)
- [7] Guide to the expression of uncertainty in measurement(GUM)[S]. ISO/IEC Guide 98-3:2008.
- [8] ROCHA C R, TONETTO C P, DIAS A. A comparison between the Denavit-Hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(4):723-728.
- [9] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11):2479-2484.
- AI CH G, CHU M, SUN H X, *et al.*. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2479-2484. (in Chinese)
- [10] 石照耀, 张宇, 张白. 三坐标机测量齿轮齿廓的不确定度评价[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4):302-307.
- SHI Z Y, ZHANG Y, ZHANG B. Uncertainty evaluation of CMM measurement for gear profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):302-307. (in Chinese)

作者简介:



夏桂锁(1978—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 副教授, 2001年、2004年、2007年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位, 主要从事三坐标测量产品、现代传感技术及自动测量系统、无损检测技术方面的研究。E-mail: xiaguizhao@163.com



伏燕军(1974—), 男, 湖北黄梅人, 博士, 副教授, 2003年、2008年于华中科技大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事三维测量、光电测试技术、信号与信息处理、机器视觉、数字图像处理方面的研究。E-mail: fyjpkh@sina.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)