

文章编号 1004-924X(2012)04-0782-07

## 3-PSS 并联机构正解及其在坐标测量机中的应用

胡鹏浩, 李松原\*

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**针对传统坐标测量机和关节臂测量机存在的技术局限,基于 3-PSS 并联机构原理,提出了只需一只长光栅、一条精密导轨即可实现三维空间精密测量的坐标测量机,并研究了测量系统的测量模型、测量误差模型及并联机构误差平均效应。根据并联机构基本理论建立了测量机的六杆测量模型,在此基础上进行了杆长制造、装配误差和光栅读数误差的理论分析。然后,从理论上展示和说明了并联机构存在误差平均效应的数学本质和依据。最后,介绍了样机的设计及制造,并给出初步的实验结果。在没有进行误差修正和系统标定的前提下,该样机在 X、Y、Z 3 个坐标方向上的测量误差分别为 0.029 mm, 0.045 mm 和 0.058 mm。得到的结果可指导新样机的优化设计。

**关键词:**并联机构;坐标测量机;测量模型;误差平均效应

**中图分类号:**TH721 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0782

## Kinematic solution of 3-PSS parallel mechanism and its application in parallel CMM

HU Peng-hao, LI Song-yuan\*

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

\* Corresponding author, E-mail: lishimin1988@163.com

**Abstract:** A new style coordinate measuring system based on 3-PSS parallel mechanism was proposed to overcome the drawbacks and weaknesses of traditional Coordinate Measurement Machines (CMMs) and articulated arm CMMs and to realize 3D measurement with only one linear grating and one precision guide. A measurement model, a measuring error model as well as the error averaging effort of the parallel mechanism were investigated. Firstly, a 6-bar measurement model was achieved based on the theory of parallel kinematic mechanism. Then, the influence of bar length error and reading error from the linear grating were analyzed in detail and the hypothesis why parallel structure possesses error averaging effort was revealed mathematically. Finally, the prototype CMM was introduced to its design, manufacturing and assemble and the experiment result was provided too. Results indicate that the measuring errors before compensation and instrument calibration in three dimensions are about 0.029 mm in  $x$  direction, 0.045 mm in  $y$  direction and 0.058 mm in  $z$  direction. Obtained results can provide the direction for the design of new CMM prototypes.

收稿日期:2011-12-05;修订日期:2012-01-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175140)

**Key words:** parallel mechanism; Coordinate Measurement Machine(CMM); measurement model; error averaging effort

## 1 引言

并联机构具有刚度好、运动惯量轻、误差平均效应等优点,近二十年来其应用得到了飞速的发展,在机床、机器人、微纳米微动工作台等领域均得到了广泛的应用,但并联机构在测试技术领域的应用相对比较少,发展相对滞后<sup>[1-5]</sup>。国内外学者看重并联机构的优点,但将其应用到精密测试中的并不多,其中研究成果相对丰富并成功制作出样机的主要来自日本和中国学者<sup>[6-12]</sup>。这些成果充分展示和运用了前述并联结构的优点,但总体上测量空间相对较小,精度相对较低;同时,这些样机均需要多副驱动系统和多副位移传感器才能实现测量,成本与正交坐标测量机接近;测量模型求解比较复杂,运动模型复杂增加了在驱动控制上的难度。因此寻找或设计更加简约的并联机构,消除或减小上述缺陷是发展并联坐标测试技术的第一步。

本文根据传统坐标测量机存在的问题,提出了可实现三维空间精密测量的坐标测量机。建立了3-PSS 并联坐标测量机的六杆测量模型,从理论上解释了并联坐标机构具有误差平均效应的数学本质和依据。对坐标测量机进行了误差分析,并给出了实验和分析结果。

## 2 测量机工作原理

本测量机采用的3-PSS 构型源于德国 REICHENBACHER 公司的一款数控机床<sup>[5]</sup>,其动平台在三维空间内为平动,具有部分解耦性,有利于测量模型的建立,误差源减少和结构简化。测量原理如图1所示,3个动滑块通过万向铰链与3对连杆相连,连杆再通过球铰链与测量动平台相连,构成测量平台,在平台上安装测头。3个滑块共面,其上均有光栅读数头,它们共用一副精密导轨。标尺光栅布置在导轨上方,3个光栅读数头共用一条标尺光栅。动平台与3个滑块的万向铰链所在平面相互平行且与工作台呈45°。当测头由测量者牵引在三维空间内运动时,将带动

滑块沿精密导轨在水平方向上分别自由运动,由3个读数头的读数即可获知测头的空间三维坐标。该并联测量系统优势在于:(1)只需要布置1副精密导轨,1只长光栅和3个读数头即可实现三维精密测量;(2)结构简单、制造方便,3面敞开便于放置被测件,且X方向可根据需要接长;(3)该并联构型部分解耦,有显性正反解。

## 3 测量机六杆正解模型的建立

对于并联机构测量机而言,测量模型本质上就是并联机构的正解问题,即依据并联机构运动学基本理论,由3个光栅头读数来推算测头的空间坐标。

### 3.1 三杆简化模型

从图1可以看出,每个滑块上均布置2根等长连杆,用来保证测头平动同时也增加系统刚度,在测量机运动过程中,动平台与3个滑块始终保持平行。为了便于分析基本问题,在此先将其简化为单杆,且 $l_1 = l_3$ ,以3个滑块所运动的平面建立坐标系, $x_1, x_2, x_3$ 为光栅读数,测头位置在动平台上P点 $(x_p, y_p, z_p)$ ,动平台JKM平行于OXY平面,如图2所示。

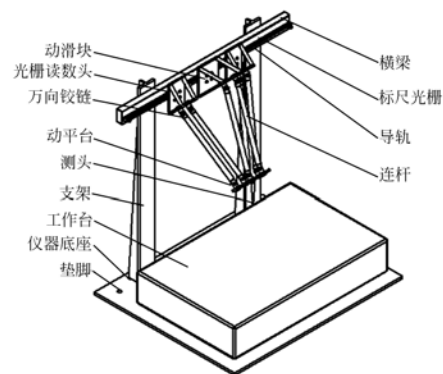


图1 测量机原理

Fig. 1 Sketch of parallel mechanism CMM

根据解析几何有:

$$\begin{cases} (x_p - b - x_1)^2 + y_p^2 + z_p^2 = l_1^2 \\ (x_p - b - x_3)^2 + y_p^2 + z_p^2 = l_1^2 \\ (x_p - x_2)^2 + (y_p + c - a)^2 + z_p^2 = l_2^2 \end{cases} \quad (1)$$

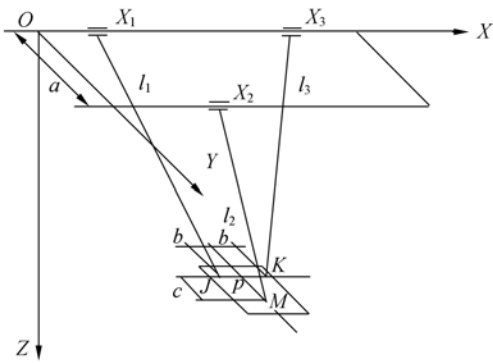


图 2 三杆测量模型图

Fig. 2 Three-bar measuring principle

解之:

$$\begin{cases} x_p = \frac{1}{2}(x_1 + x_3) \\ y_p = k - q[(x_1 - x_2)(x_2 - x_3) - (x_1 - x_3)b] \\ z_p = \sqrt{l_1^2 - \left(\frac{x_1 + x_3}{2} - b\right)^2 - y_p^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $k, q$  是与  $l_1, l_2, a, b, c$  相关的常数, 在这个显性正解中,  $x_p = (x_1 + x_3)/2$ 。即测头的  $x_p$  是 2 个光栅读数头的平均值, 这就体现了并联机构在运动输入误差上具有误差平均效应。德国的数控机床就是采用上述模型进行运动控制的, 该机床主要用于木材加工, 对精度要求很低。在本测量机上采用上述模型则精度不够, 因为在制造和装配过程中, 连杆长度, 零部件装配位置, 球铰链间隙等误差将会导致测头在不同位置时, 其运动不再是平动而是在 3 个坐标轴上产生扭摆、俯仰和摇摆, 继而带来测量误差。建立六杆测量模型将能更加真实地反映测量机的误差特点, 适应仪器高精度的要求。

### 3.2 六杆模型

六杆模型简图如图 3 所示。取光栅导轨起点为原点  $O$ , 球面副  $B_1, B_6$  球心所在直线为  $x$  轴, 竖直方向为  $z$  轴建立直角坐标系  $X-Y-Z$ 。取动平台球面副  $e_1$  球心为原点  $N$ , 球面副  $e_1, e_6$  球心所在直线为  $x'$  轴, 竖直方向为  $z'$  轴建立动平台坐标系  $X'-Y'-Z'$ 。则坐标系  $X'-Y'-Z'$  下向量  $R'$  通过坐标变换到  $X-Y-Z$  坐标系下向量  $R$  的变换矩阵<sup>[1]</sup>为:

$$R = [T]R' + P, \quad (3)$$

其中,  $P = [x, y, z]^T$ , 为坐标系  $X'-Y'-Z'$  原点  $N$  位于  $X-Y-Z$  中的位置向量;  $[T]$  为动平台姿态的余弦矩阵。由于坐标测量机的自由度为 3, 则令:

$$[T] = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

定平台上每个球面副在  $X-Y-Z$  坐标系中标记如图 3, 设定平台上每个球面副坐标为:

$$\begin{cases} B_1 = (x_1, 0, 0) \\ B_2 = (x_1, a, -a) \\ B_3 = (x_2, b, -b) \\ B_4 = (x_2 + c, b, -b) \\ B_5 = (x_3, a, -a) \\ B_6 = (x_3, 0, 0) \end{cases}, \quad (5)$$

其中,  $x_1, x_2, x_3$  分别为在  $x$  轴方向上球面副  $B_1, B_3, B_6$  球心到原点  $O$  的距离;  $a$  为在  $y, z$  轴方向上球面副  $B_2, B_5$  球心到原点  $O$  的距离;  $b$  为在  $y, z$  轴方向上球面副  $B_3, B_4$  球心到原点  $O$  的距离;  $c$  为在  $x$  轴方向上球面副  $B_3$  到  $B_4$  球心之间的距离。

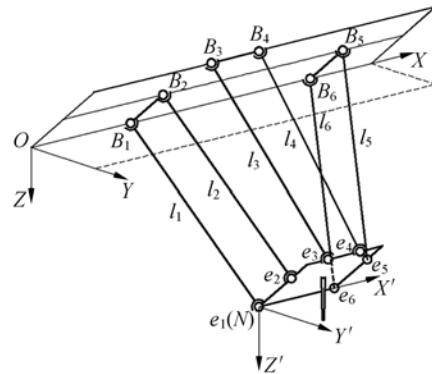


图 3 六杆测量模型图

Fig. 3 Six-bar measuring principle

动平台上每个球面副  $e_i$  为对称布置, 设其在  $X'-Y'-Z'$  坐标系中的坐标为  $(x_{e_i}, y_{e_i}, z_{e_i}), i=1, 2, \dots, 6$ , 则  $e_i$  坐标表示为:

$$\begin{cases} e_1 = (0, 0, 0) \\ e_2 = (0, e, -e) \\ e_3 = (f, g, -g) \\ e_4 = (f+h, g, -g) \\ e_5 = (2f+h, e, -e) \\ e_6 = (2f+h, 0, 0) \end{cases}, \quad (6)$$

其中,  $e$  为在  $y, z$  轴方向上球面副  $e_2, e_5$  球心到原点  $N$  的距离;  $f$  为在  $x$  轴方向上球面副  $e_3$  球心到原点  $N$ , 球面副  $e_4$  到  $e_5$  球心之间的距离;  $g$  为在  $y, z$  轴方向上球面副  $e_3, e_4$  球心到原点  $N$  的距离;  $h$  为在  $x$  轴方向上球面副  $e_3$  到  $e_4$  球心之间的距离。

因此, 坐标系  $X'-Y'-Z'$  中动平台上球面副  $e_i$  的坐标值在  $X-Y-Z$  中可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{e_i} \\ y_{e_i} \\ z_{e_i} \end{bmatrix}_{X-Y-Z} = \begin{bmatrix} p_i l_x + q_i m_x + r_i n_x + x \\ p_i l_y + q_i m_y + r_i n_y + y \\ p_i l_z + q_i m_z + r_i n_z + z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_i + x \\ q_i + y \\ r_i + z \end{bmatrix}, i=1, 2, \dots, 6. \quad (7)$$

由:

$$l_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 = (p_i + x - x_{B_i})^2 + (q_i + y - y_{B_i})^2 + (r_i + z - z_{B_i})^2, i=1, 2, \dots, 6, \quad (8)$$

可以得到各个定长杆  $l_i$  的表达式:

$$\begin{cases} l_1^2 = (x - x_1)^2 + y^2 + z^2 \\ l_2^2 = (x - x_1)^2 + (y + e - a)^2 + (z - e + a)^2 \\ l_3^2 = (x + f - x_2)^2 + (y + g - b)^2 + (z - g + b)^2 \\ l_4^2 = (x + f + h - x_2 - c)^2 + (y + g - b)^2 + (z - g + b)^2 \\ l_5^2 = (x + 2f + h - x_3)^2 + (y + e - a)^2 + (z - e + a)^2 \\ l_6^2 = (x + 2f + h - x_3)^2 + y^2 + z^2 \end{cases}, \quad (9)$$

由方程组(9)可解得  $x$ , 并通过  $x$  解出  $y$  和  $z$ 。令:

$$\begin{cases} k_1 = (x + f - x_2)^2 \\ k_2 = (x + 2f + h - x_3)^2 \\ d_1 = g - b \\ d_2 = e - a \\ k_3 = \frac{l_3^2 - l_5^2 - k_1 + k_2}{2(d_1 - d_2)} - (d_1 + d_2) \end{cases},$$

则测量模型的显性表达式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1^2 + l_2^2 - l_5^2 - l_6^2}{4(x_3 - x_1 - 2f - h)} + \frac{x_1 + x_3 - 2f - h}{2} \\ \sqrt{\frac{l_3^2 - k_1 - (k_3 + d_1)^2 - d_1^2}{2} + \frac{k_3^2}{4} + \frac{k_3}{2}} \\ \sqrt{\frac{l_3^2 - k_1 - (k_3 + d_1)^2 - d_1^2}{2} + \frac{k_3^2}{4} - \frac{k_3}{2}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

### 4 坐标测量机精度分析

并联坐标测量机误差因素主要有两类:一类误差是仪器普遍具有的误差,如导轨直线度误差、受力变形误差、热变形误差、测头触发误差和长光栅制造误差等,这将通过误差分离和修正技术来建模和实现修正。另一类误差来源于并联结构本身,主要包括运动误差和并联结构参数误差,装配误差以及球铰链误差等。在此采用直接微分法<sup>[8]</sup>来讨论运动误差和并联结构参数误差。

#### 4.1 输入参数误差分析

对于测量机而言,并联机构的运动误差即表现为 3 个光栅头的读数误差,将式(10)简写为:

$$\begin{cases} x = f_1(x_1, x_2, x_3, l_1, l_2, l_3, l_5, l_6) \\ y = f_2(x_1, x_2, x_3, l_1, l_2, l_3, l_5, l_6) \\ z = f_3(x_1, x_2, x_3, l_1, l_2, l_3, l_5, l_6) \end{cases}, \quad (11)$$

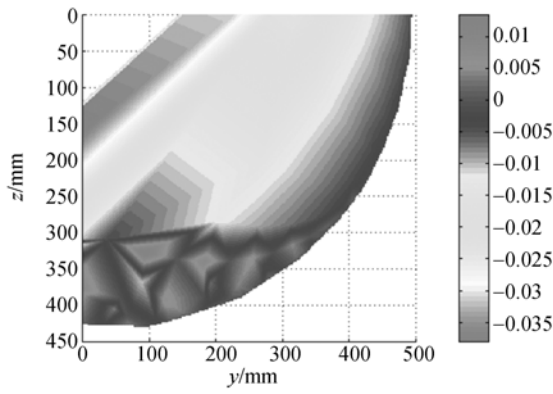
则 3 个光栅头读数误差所产生的仪器测量误差可表示为:

$$\begin{bmatrix} \delta_1 x \\ \delta_1 y \\ \delta_1 z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

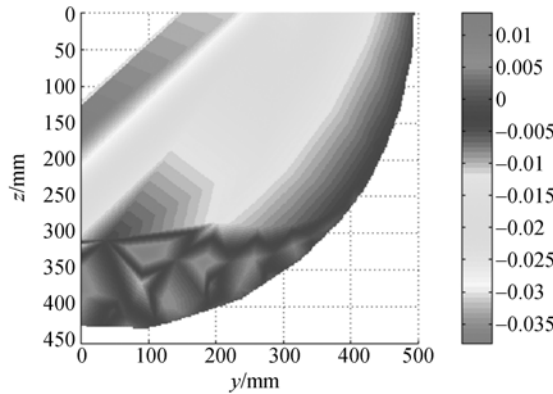
将样机的各尺寸参数代入到式(12)中,取  $x=500$  mm 的单个测量截面,若 3 个光栅头的读数误差暂定为 0.01 mm,则测头在此截面内各处,由 3 个光栅读数误差所产生的测量误差分量  $\delta_1 y, \delta_1 z$  分布如图 4 所示。

由图 4 可知,  $\delta_1 y, \delta_1 z$  在  $0 \text{ mm} \leq z \leq 300 \text{ mm}$  范围内平滑且随着  $y$  的减小而增大,测量精度比较高。 $z \geq 300 \text{ mm}$  时  $\delta_1 y, \delta_1 z$  为不规则分布,测量精度下降。总体上两轴的误差分量在  $-0.015 \sim 0.01 \text{ mm}$  波动。换言之,在整个测量空间内,仪器测量精度是不均匀的,光栅读数误差对最终测量结果的影响呈现出一定的规律,这对于进一步研究该仪器的最佳测量空间具有指导意义。

据式(12)代入样机实际设计参数,还可计算出误差传递系数的变化范围及每个坐标对应的 9 个误差传递系数<sup>[2]</sup>,如表 1 和表 2 所示。从中可



(a) 误差分量  $\delta_1 y$  分布  
(a) Distribution of  $\delta_1 y$



(b) 误差分量  $\delta_1 z$  分布  
(b) Distribution of  $\delta_1 z$

图 4  $x$  为 500 mm 时  $y, z$  轴测量误差分布

Fig. 4 Distribution of  $\delta_1 y$  and  $\delta_1 z$  as  $x=500$  mm

可以看出,  $x$  轴坐标由第一、三滑块决定, 第二个光栅读数头误差对  $\delta_1 x$  的误差传递系数为 0, 第一、三光栅读数误差  $\delta_1 x$  的误差传递系数均为 0.5.  $y$  轴和  $z$  轴各自的误差传递系数呈现正负交替的现象, 传递系数之和有趋近于 0 的态势, 平均了各个输入参数误差分量的误差。这反映了并联机构在运动输入误差上所表现出来的误差平均效应, 和前述三杆模型的结论是一致的。

表 1  $x$  为 500 mm 时输入参数的误差传递系数

Tab. 1 Error transfer coefficients of inputs as  $x=500$  mm

	$(\partial f_i / \partial x_1) / \text{mm}$	$(\partial f_i / \partial x_2) / \text{mm}$	$(\partial f_i / \partial x_3) / \text{mm}$
$i=1$	0.5	0	0.5
$i=2$	1.20~3.30	-15.10~3.50	-11.50~7.56
$i=3$	-1.07~4.45	-12.42~3.88	-10.93~6.34

表 2 特定坐标点处输入参数的误差传递系数

Tab. 2 Error transfer coefficients of inputs of appointed points

	$(\partial f_i / \partial x_1) / \text{mm}$	$(\partial f_i / \partial x_2) / \text{mm}$	$(\partial f_i / \partial x_3) / \text{mm}$
$(x, y, z) = (500, 417, 240)$			
$i=1$	0.5	0	0.5
$i=2$	0.116	0.158	-0.442
$i=3$	-0.140	-1.252	1.225
$(x, y, z) = (500, 365, 290)$			
$i=1$	0.5	0	0.5
$i=2$	-1.635	1.784	0.141
$i=3$	1.186	-0.652	-0.244

### 4.3 结构参数误差分析

并联机构的结构参数误差主要表现为零部件制造尺寸误差、零部件装配所产生的位置偏离以及球铰链间隙误差等。在此, 着重分析连杆制造误差对测量结果的影响。依据上述同样的直接微分法, 杆长制造误差  $dl_i$  对测量结果的影响可表示为:

$$\begin{bmatrix} \delta_2 x \\ \delta_2 y \\ \delta_2 z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial l_1} & \frac{\partial f_1}{\partial l_2} & \frac{\partial f_1}{\partial l_3} & \frac{\partial f_1}{\partial l_5} & \frac{\partial f_1}{\partial l_6} \\ \frac{\partial f_2}{\partial l_1} & \frac{\partial f_2}{\partial l_2} & \frac{\partial f_2}{\partial l_3} & \frac{\partial f_2}{\partial l_5} & \frac{\partial f_2}{\partial l_6} \\ \frac{\partial f_3}{\partial l_1} & \frac{\partial f_3}{\partial l_2} & \frac{\partial f_3}{\partial l_3} & \frac{\partial f_3}{\partial l_5} & \frac{\partial f_3}{\partial l_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dl_1 \\ dl_2 \\ dl_3 \\ dl_5 \\ dl_6 \end{bmatrix} \quad (13)$$

在  $x=500$  mm 的测量截面中, 若杆长制造误差暂定为 0.05 mm, 代入式 (13), 则测头在此截面内各处的测量误差分量  $\delta_2 y$  分布如图 5 所示。对比结构参数误差和光栅头读数误差对测量精度的影响, 可以发现结构参数误差的影响更加突出, 在设计和制造时对零部件应该给予更严格的公差来尽量减少其影响。通过后续的标定和误差修

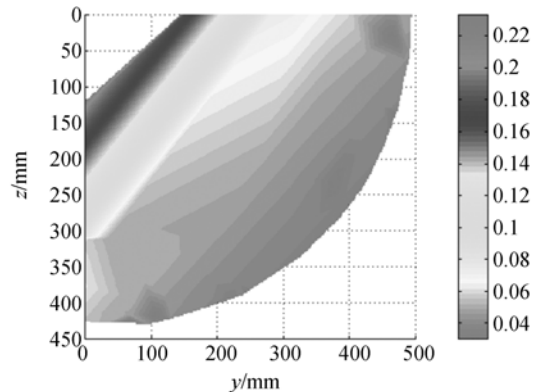


图 5  $x$  为 500 mm 时杆长误差对  $y$  轴测量误差的影响

Fig. 5 Distribution of  $\delta_2 y$  and  $\delta_1 z$  as  $x=500$  mm

正,杆长误差之影响可以予以进一步减小甚至消除。Z轴误差分量规律与Y轴很相似。

由式(13)代入样机实际设计参数,可得出误差传递系数的变化范围及每个坐标对应的9个误差传递系数,如表3和表4所示。

表 3 x 为 500 mm 时结构参数的误差传递系数

Tab. 3 Error transfer coefficients of structural parameters as  $x=500$  mm

	$(\partial f_i/\partial l_1)/\text{mm}$	$(\partial f_i/\partial l_2)/\text{mm}$	$(\partial f_i/\partial l_3)/\text{mm}$
$i=1$	0.34~2.40	0.34~2.40	0
$i=2$	0.01~1.83	0.01~1.83	-7.64~-6.16
$i=3$	-0.15~1.06	-0.15~1.06	-8.51~-7.44
	$(\partial f_i/\partial l_4)/\text{mm}$	$(\partial f_i/\partial l_5)/\text{mm}$	$(\partial f_i/\partial l_6)/\text{mm}$
$i=1$	0	-0.34~-2.40	-0.34~-2.40
$i=2$	0	-7.32~12.34	-0.38~-0.01
$i=3$	0	-6.74~14.37	-0.11~-0.17

表 4 特定坐标点处结构参数的误差传递系数

Tab. 4 Error transfer coefficients of structural parameters of appointed points

$(x, y, z) = (500, 417, 240)$			
	$(\partial f_i/\partial l_1)/\text{mm}$	$(\partial f_i/\partial l_2)/\text{mm}$	$(\partial f_i/\partial l_3)/\text{mm}$
$i=1$	1.6	1.6	0
$i=2$	0.018 6	0.018 6	-2.181
$i=3$	-0.022 4	-0.022 4	-3.263 4
	$(\partial f_i/\partial l_4)/\text{mm}$	$(\partial f_i/\partial l_5)/\text{mm}$	$(\partial f_i/\partial l_6)/\text{mm}$
$i=1$	0	-1.6	-1.6
$i=2$	0	2.464	-0.036
$i=3$	0	3.532	0.024

观察表3、表4可以发现,  $f_1$  中的  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_5$ 、 $l_6$  四杆误差的传递系数正负相抵,平均了杆件的制造误差对仪器测量误差的影响。 $f_2$  和  $f_3$  中5个结构参数误差传递系数之和分别为0.284 2和0.241 8,平均了各个参数误差分量,使其趋近于0。这从结构参数的角度显示出并联结构具有误差平均效应的数学内涵。

参考文献:

[1] 郝继贵,郭磊,刘常杰,等. 基于机器人的柔性电子检具测量系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1787-1792.  
ZHU J G, GUO L, LIU CH J, et al.. Measurement

5 样机及实验

测量机拟定的测量范围是 800 mm×400 mm×300mm,第一台样机已设计并制造完成,如图6所示。所用长光栅是在贵阳新天光学仪器公司 JCXFS 系列产品的基础上订做的,单读数头精度为±0.01 mm。采用自制的石英棒标准器,已对其进行了初步的比对测试,在样机没有进行误差修正和标定的前提下,该样机在 X、Y、Z 3 个坐标方向上的测量误差分别为: 0.029 mm, 0.045 mm, 0.058 mm。这台粗糙的样机主要用来进行理论研究和实验数据分析,待技术成熟后,我们将重新设计和制造新的仪器。

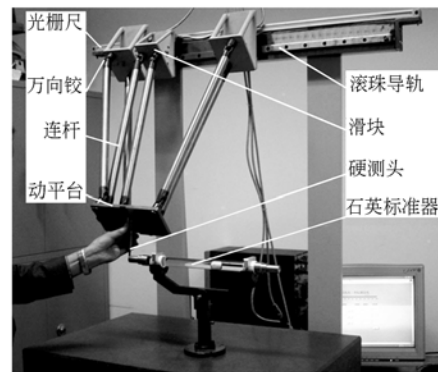


图 6 样机

Fig. 6 Prototype of parallel CMM

6 结 论

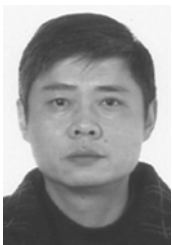
本文建立了3-PSS 并联坐标测量机的六杆测量模型。从理论上验证和解释了并联结构具有误差平均效应的数学本质和依据。通过对坐标测量机的主要误差进行分析发现,杆长制造误差对仪器误差比光栅读数误差大,这将指导新样机的优化设计。样机经过初步的测试,在 X、Y、Z 3 个方向上的测量误差分别为: 0.029 , 0.045 和 0.058 mm。

system of flexible electronic checking fixture on robot[J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19(8): 1787-1792. (in Chinese)

[2] 刘大炜,王立平,关立文. 一个特殊3自由度并联机构的精度分析及标定[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 46-51.

- LIU D W, WANG L P, GUAN L W. Accuracy analysis and calibration of a special 3-DOF parallel mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(9):46-51. (in Chinese)
- [3] 梅凡, 赵新华. 三自由度并联机器人的精度分析 [J]. 天津理工大学学报, 2010, 26(4):15-17.  
MEI F, ZHAO X H. Accuracy analysis of 3-DOF parallel manipulator [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2010, 26(4):15-17. (in Chinese)
- [4] 关学锋, 郭成, 胡明. 3-PTT 型滑块式并联机床的 PLC 控制 [J]. 机械设计与制造, 2009, 5(5):200-201.  
GUAN X F, GUO C H, HU M. PLC control to 3-PTT parallel machine tool with slider [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, 5(5):200-201. (in Chinese)
- [5] WOLFGANG Z, NEUSTADT C. *Device for the translatory positioning of a platform* [P]. United States; US 6976821 B2, 2005.
- [6] 朱小蓉, 沈惠平, 余竹青, 等. 三自由度并联机构坐标测量机的样机研制 [J]. 制造技术与机床, 2010(1):67-71.  
ZHU X R, SHEN H P, YU ZH Q, *et al.*. Study and development of a coordinate measuring with 3-DOF parallel link [J]. *Manufacturing Technology and Machine Tool*, 2010(1):67-71. (in Chinese)
- [7] SHEN H P, ZHU X R, MA L ZH, *et al.*. Structural conceptual optimization and kinematics of a 3-dof novel parallel mechanism used for virtual axes coordinate measure machine [J]. *Reconfigurable Mechanisms and Robots*, 2009:118-122.
- [8] 魏振忠, 张博, 张广军. 双机器人系统的快速手眼标定方法 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(8):1895-1902.  
WEI ZH ZH, ZHANG B, ZHANG G J. Rapid hand-eye calibration of dual robot system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1895-1902. (in Chinese)
- [9] 刘得军, 车仁生, 罗小川, 等. 坐标测量机的新发展——并联运动机构坐标测量机 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(5):497-502.  
LIU D J, CHE R SH, LUO X CH, *et al.*. New type of CMM-Parallel mechanism coordinate measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(5):497-502. (in Chinese)
- [10] TAKA AKI O. Accuracy improvement of parallel kinematic machine-error compensation system for joints, links and machine frame [C]. *6th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2002)*, JAPAN, 2002:433-438.
- [11] SATO O, HIRAKI M, TAKAMASU K. The calibration of parallel-CMM: parallel-coordinate measuring machine [C]. *3rd euspen International Conference, Eindhoven, The Netherlands*, 2002, 2:573-576.
- [12] 刘博, 叶东, 陈刚, 等. 火箭喷管运动视觉测试精度的校准与实验 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(11):2513-2520.  
LIU B, YE D, CHEN G, *et al.*. Calibration and experiment of vision measurement accuracy for motion of rocket nozzle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11):2513-2520. (in Chinese)

#### 作者简介:



胡鹏浩(1968—),男,安徽肥西人,教授,1989年、1992年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,2000年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事坐标测量技术、精密机械热变形、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: hupenghao@yahoo.com.cn



李松原(1988—),男,广西柳州人,硕士研究生,2007年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事现代精度理论及其应用方面的研究。E-mail: lishimin1988@163.com