

DOI:10.11784/tdxbz201606054

REVO 五轴测量系统重构与建模方法研究

张海涛^{1,2}, 刘书桂¹, 李杏华¹, 苏智琨¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘要: REVO 五轴测量系统是基于正交式坐标测量机设计 and 应用的高效率、高精度测量系统. 针对在非正交式坐标测量机环境下应用 REVO 五轴测量系统, 提出了 REVO 五轴测量系统的重构与数学模型. 建立了 REVO 五轴测量系统原始返回数据的构成模型, 从返回的合成数据中分离出光栅数据; 基于准刚体理论, 建立了 REVO 测头误差补偿模型. 通过实验验证了误差补偿模型的正确性和有效性, 经过误差补偿, 测量误差平均值从 $-0.190\ 3\ \text{mm}$ 降低到 $0.001\ 1\ \text{mm}$. 本文的研究内容对于在非正交式坐标测量机下应用 REVO 五轴测量系统具有重要意义.

关键词: 非正交式坐标测量机; REVO 测头; 数据分离; 建模; 误差补偿

中图分类号: TH721

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2017)07-0753-05

Reconfiguration and Modeling Method of REVO Five-Axis Measurement System

Zhang Haitao^{1,2}, Liu Shugui¹, Li Xinghua¹, Su Zhikun¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: REVO 5-axis measurement system, which is designed to be applied in orthogonal coordinate measuring machines (CMMs), is a revolutionary high efficiency and accuracy measurement system. The reconfiguration and mathematical model of REVO 5-axis measurement system were proposed for its application in non-orthogonal CMMs. The composition of the original data returned by the system was analyzed, and the scale values were separated out from the synthesized data. Based on the quasi-rigid body theory, the error compensation model of REVO head was established. The validity and effectiveness of the error compensation model were verified experimentally. The average measurement error decreased to $0.001\ 1\ \text{mm}$ from $-0.190\ 3\ \text{mm}$ after error compensation. The research conducted in this paper is of great significance for the application of REVO 5-axis measurement system in non-orthogonal CMMs.

Keywords: non-orthogonal CMM; REVO head; data separation; modeling; error compensation

REVO 五轴测量系统是 Renishaw 公司开发的高效率、高精度测量系统, 通过让 REVO 测座在坐标测量机做慢速线性运动的同时做要求极高的快速运动实现测量, 减小了测量机在高速测量时的动态误差, 极大地提高了测量效率^[1]. REVO 五轴系统在诸如汽车发动机、航空发动机叶盘等具有复杂特征和自由曲面的零件测量领域, 展现了其无与伦比的测量能力. REVO 五轴测量系统是基于正交式三坐标测量机

设计和使用的, 测量机各主轴必须使用直线光栅. 测量时被测点的坐标由控制器直接读取各标尺数据并在测量软件内部与其他数据合成后输出给用户, 各标尺的数值并不能直接从测量系统中获得. 对于非正交式坐标测量机来说, 被测点的坐标不能由测头和光栅尺读数直接合成得到, 须根据光栅尺读数、测量机的结构及误差等参数通过数学模型推导而出^[2-7]. 因此, 对于一些不能使用正交式坐标测量机结构却要使

收稿日期: 2016-06-24; 修回日期: 2016-11-10.

作者简介: 张海涛 (1986—), 男, 博士, zhanghaitao@tju.edu.cn.

通讯作者: 刘书桂, sgliu@tju.edu.cn.

网络出版时间: 2016-11-18. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1127.N.20161118.1453.010.html>.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51375338).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51375338).

用 REVO 五轴测量系统高效率、高精度测量性能的场合,必须对 REVO 五轴测量系统进行重构,以便在非正交式测量机结构中发挥其优良的测量性能.

笔者在由1个旋转轴和2个线性轴组成的非正交式坐标测量机环境下应用 REVO 五轴测量系统^[8-9].根据REVO测头的内部结构和测量原理,从系统返回的合成数据中分离出了各轴光栅数据;建立了REVO测头的误差补偿模型,根据测量系统返回的有限数据和 REVO 测头的结构、误差参数,重构出被测点的坐标值,使得基于正交式坐标测量机设计和应用的REVO五轴测量系统能够应用于非正交式坐标测量机.

1 光栅数据分离

1.1 测量点数据构成

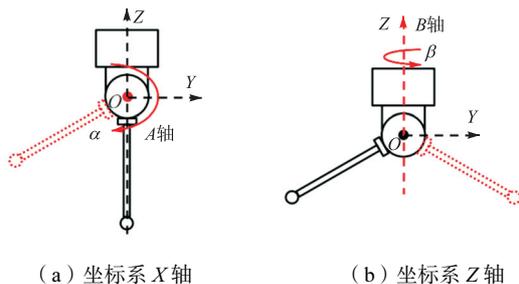
控制系统返回的测量点数据格式为 $(x, y, z, \alpha, \beta, I, J, K)$, 其中 x, y, z 为被测点的坐标值, α, β 为探测时 A 轴与 B 轴的角度, I, J, K 为探测点的探测矢量在 X, Y, Z 3 个方向上的数值. 被测点坐标由测头运动、3 个主轴运动和探针变形 3 部分在 3 个方向上的位移量合成, x, y, z 可表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_R, y_R, z_R 分别为测头运动在 3 个方向上产生的位移量; x_S, y_S, z_S 分别为测量机 3 个主轴运动所产生的位移量, 即 3 个主轴的光栅值; x_D, y_D, z_D 分别为探针变形在 3 个方向所产生的位移量.

1.2 测头运动产生的位移

测头运动产生的位移决定于探针长度、 A 轴与 B 轴转动的角度. 不考虑测头与探针误差的情况下, 建立如图 1 所示的坐标系, X 轴沿 A 轴方向, 正向垂直纸面向外; Z 轴沿 B 轴方向, 正向向上; Y 轴与 X, Z 轴垂直, X, Y, Z 轴构成右手坐标系, 原点 O 在 A 轴与 B 轴的交点处.



(a) 坐标系 X 轴 (b) 坐标系 Z 轴

图 1 REVO 测头理想模型

Fig.1 Ideal model of REVO head

当探针绕 A 轴转过角度 α , 绕 B 轴转过角度 β , 由测头运动在 3 个方向上产生的位移可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \sin \alpha \sin \beta \\ -l \sin \alpha \cos \beta \\ -l \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.3 探针变形产生的位移

REVO 测头采用空心结构的探针并用端部感应技术补偿测量时探针的变形, 在保持高精度测量的同时, 其探针长度可以达到 350 mm 甚至更长. 其补偿原理如图 2 所示.

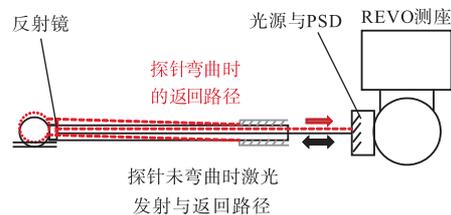


图 2 REVO 测头探针变形补偿原理

Fig.2 Compensation principle of stylus deformation of REVO head

测量时, 探针的变形量由控制器实时读取, 并与测头 A 轴、 B 轴运动产生的位移量和测量机主轴的光栅数据合成后转译成测量值输出. 探针变形在 3 个方向所产生的位移量为

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = \text{Def} \cdot \begin{bmatrix} I \\ J \\ K \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 Def 为探针受测量力作用产生的变形量, 此变形量并不能从测量系统中直接获得. 理论上, 可以将探针看作是 1 个简支梁, 探针主要受测量力的作用而产生变形, 此变形量可以通过 $\text{Def} = \frac{Fl^3}{3EI_s}$ 来确定, 但是相关参数并不能从生产商处精确获得, 因此, 也就不能计算出 Def 的精确值. 本文中, Def 的值根据实际实验结果获得.

根据式(1)~式(3), 各主轴光栅值可表示为

$$\begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} \quad (4)$$

2 REVO 测头误差补偿模型

误差补偿模型, 即数学模型或机器模型, 为在测

量空间范围内任意位置处的误差补偿提供一种切实可行的方法. 建立误差补偿模型的目的是为了确立光栅值、结构和误差等参数与被测点坐标值之间的关系. REVO 测头有 A 轴、 B 轴与测头本身 3 个相对运动部件, 因此, 误差补偿模型需要建立 3 个坐标系, 即 A 轴坐标系、 B 轴坐标系和 REVO 坐标系.

2.1 A轴坐标系

如图 3 所示, REVO 测头的 A 轴部件由转轴 A 、探针和测球组成. 测球中心 P 到 A 轴的垂线定义为探针方向, 测球中心 P 到 A 轴的垂直距离定义为探针长度 l . REVO 测头 A 轴坐标系 $O_A X_A Y_A Z_A$ 的主坐标轴 X_A 沿 A 轴方向, 正向在图 3 中向左. Z_A 沿探针方向, Z_A 正向由 P 指向 A 轴. Y_A 与 X_A 、 Z_A 垂直, X_A 、 Y_A 和 Z_A 轴构成右手坐标系. 原点 O_A 选在测球中心 P 到 A 轴的垂线与 A 轴的交点处, 即 P 到 A 轴的垂足处. 测球中心 P 在 $O_A X_A Y_A Z_A$ 中的坐标为 $(0, 0, -l)$.

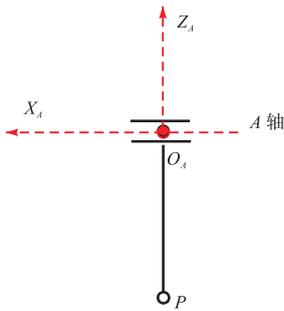


图 3 A轴坐标系

Fig.3 A-axis coordinate system

2.2 B轴坐标系

从理论上讲, REVO 测头的 A 轴与 B 轴应该互相垂直且相交, 但在加工制造时, 这是不可能实现的. 通常情况下, A 轴与 B 轴之间有一定的垂直度误差和分离, 即偏置. REVO 测头的内部 A 轴与 B 轴的关系如图 4 所示, 图中, e_1 为 A 轴与 B 轴的偏置, 即 A 轴与 B 轴公垂线的长度, e_2 为测球中心到 A 轴的垂线与 B 轴的公垂线距离, α_{AB} 为 A 轴与 B 轴的垂直度误差.

B 轴坐标系 $O_B X_B Y_B Z_B$ 的主坐标轴为测头的转轴 B 轴, 令其为 Z_B , 其正向为向上的方向; Y_B 沿 X_A 与 Z_B 的公垂线方向, 正向由 Z_B 指向 X_A ; X_B 与 Y_B 、 Z_B 垂直, 构成右手坐标系; 原点 O_B 选在 X_A 与 Z_B 的公垂线在 Z_B 的垂足处. 设 α 为 A 轴转过的角度, 定义探针与 Z_B 平行的位置为 α 的零位. 为了求得测球中心 P 在 $O_B X_B Y_B Z_B$ 坐标系中的坐标, 需要确定 X_A 、 Y_A 和 Z_A 在 $O_B X_B Y_B Z_B$ 坐标系中的方向以及 O_A 在 $O_B X_B Y_B Z_B$ 坐标系中的坐标. 从图 4(b)中可以看出, 为了让 X_A 与

X_B 平行, 需要将 X_A 绕 Y_B 转过一个角度, 此角度即为 A 轴与 B 轴的垂直度误差 α_{AB} . α_{AB} 为正表示 A 轴与 B 轴的夹角小于 90° , 即 X_A 相对于 X_B 绕 Y_B 逆时针转过 α_{AB} . 在 α 的零位, Y_A 与 Y_B 平行.

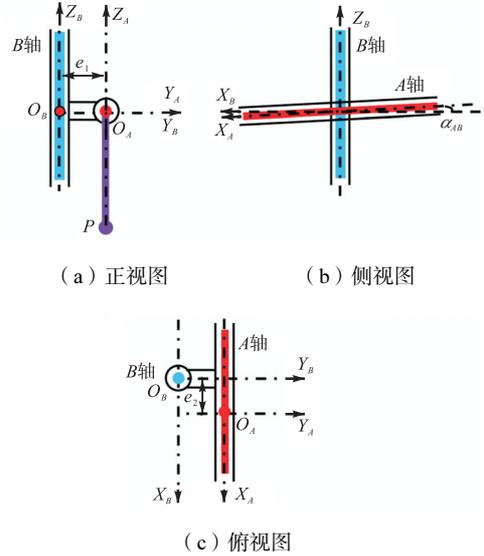


图 4 B轴坐标系

Fig.4 B-axis coordinate system

从图 4 中可以看出, O_A 在 $O_B X_B Y_B Z_B$ 坐标系中的坐标为 $(e_2, e_1, e_2 \alpha_{AB})$, 由于 e_1 、 e_2 与 α_{AB} 都是微量, 故 $e_2 \alpha_{AB}$ 可忽略不计, 则 O_A 在 $O_B X_B Y_B Z_B$ 坐标系中的坐标为 $(e_2, e_1, 0)$.

探针绕 X_A 转过 α , 测球中心 P 相对于 $\alpha = 0^\circ$ 时, 在 $O_B X_B Y_B Z_B$ 坐标系中的位置为

$$P_A(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(\alpha) & \varepsilon_y(\alpha) \\ \varepsilon_z(\alpha) & 1 & 0 \\ -\varepsilon_y(\alpha) & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha + \Delta\alpha) & -\sin(\alpha + \Delta\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha + \Delta\alpha) & \cos(\alpha + \Delta\alpha) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x(\alpha) \\ \delta_y(\alpha) \\ \delta_z(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} l \sin(\alpha + \Delta\alpha) \varepsilon_z(\alpha) - l \cos(\alpha + \Delta\alpha) \varepsilon_y(\alpha) + \delta_x(\alpha) \\ -l \sin(\alpha + \Delta\alpha) + \delta_y(\alpha) \\ -l \cos(\alpha + \Delta\alpha) + \delta_z(\alpha) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为 α 转角误差; $\delta_x(\alpha)$ 、 $\delta_y(\alpha)$ 、 $\delta_z(\alpha)$ 分别为 A 轴转动 α 时沿 X 、 Y 、 Z 方向的运动误差; $\varepsilon_y(\alpha)$ 、 $\varepsilon_z(\alpha)$ 分别为 A 轴转动 α 时绕 Y 、 Z 轴的角运动误差. 在计算中忽略了高次误差. 由于 REVO 测头内部的刚性测量平台以及超高定位精度, 在建模时上述运动误差可以忽略不计, 式(5)简化后为

$$P_A(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 \\ -l \sin \alpha \\ -l \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

将坐标系转到 $O_B X_B Y_B Z_B$ 中

$$P_B(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha_{AB} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\alpha_{AB} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -l \sin \alpha \\ -l \cos \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_2 \\ e_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l \alpha_{AB} \cos \alpha + e_2 \\ -l \sin \alpha + e_1 \\ -l \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 REVO 坐标系

β 表示 B 轴转过的角度,为了与 REVO 五轴测量系统的设置一致,定义 α 为 90° 时探针指向 Y_B 负向的位置为 β 的零位. 与 A 轴坐标系和 B 轴坐标系不同,REVO 坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 是静止不动的. 在 β 的

$$P_R = P_B(\alpha, \beta) + \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l \alpha_{AB} \cos \alpha \cos \beta + e_2 \cos \beta + l \sin \alpha \sin \beta - e_1 \sin \beta + \text{Def} \cdot I \\ -l \alpha_{AB} \cos \alpha \sin \beta + e_2 \sin \beta - l \sin \alpha \cos \beta + e_1 \cos \beta + \text{Def} \cdot J \\ -l \cos \alpha + \text{Def} \cdot K \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 实验与结果

通过实验验证所建立的 REVO 测头误差补偿模型的正确性和有效性. 将同一量块分别放置在测量空间内的不同方向上,如图 5 所示. 在位置 1、2、3,量块分别沿 X 轴、 Y 轴和 Z 轴放置;在位置 4、5、6,量块分别摆放在 XOY 、 XOZ 和 YOZ 平面内,并分别与 X 、 Y 、 Z 轴夹角 45° ;在位置 7,量块分别与 X 、 Y 、 Z 轴夹角 45° . 在每一个位置,保持测量机 3 个主轴静止,只运动测头,对量块的 2 个工作面进行探测.

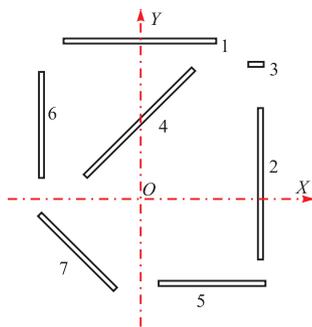


图 5 量块摆放位置

Fig.5 Placement of gauge block

测量之前,需要将测量系统文件中的相关误差参数数值置零,并对测头的结构和误差参数进行标定. REVO 测头结构和误差参数的标定方法在文献 [10] 中进行了详细的讨论.

零位, X_R 、 Y_R 和 Z_R 分别与 X_B 、 Y_B 和 Z_B 平行,原点 O_R 与 O_B 重合. 因此,原点 O_B 在坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 中的坐标为 $(0, 0, 0)$.

当探针绕 B 轴转过角度 β , 同样忽略测头 B 轴的运动误差,相对于 $\beta = 0^\circ$ 测球中心 P 在 $O_R X_R Y_R Z_R$ 中的坐标为

$$P_B(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -l \alpha_{AB} \cos \alpha + e_2 \\ -l \sin \alpha + e_1 \\ -l \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l \alpha_{AB} \cos \alpha \cos \beta + e_2 \cos \beta + l \sin \alpha \sin \beta - e_1 \sin \beta \\ -l \alpha_{AB} \cos \alpha \sin \beta + e_2 \sin \beta - l \sin \alpha \cos \beta + e_1 \cos \beta \\ -l \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于测量力的作用,测量时探针会产生一定的变形,探针变形在各个方向上产生的位移可由式 (3) 求出. 因此,测球中心 P 在 $O_R X_R Y_R Z_R$ 中的坐标可以表示为

评价结果如图 6 和表 1 所示.

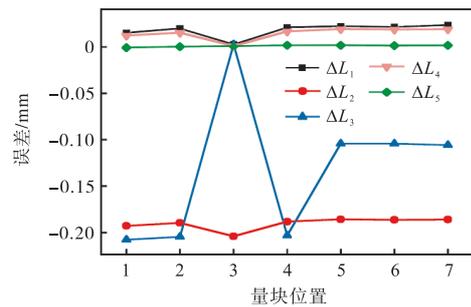


图 6 不同方法评价结果

Fig.6 Evaluation results of different methods

图 6 中, ΔL_1 为使用测量系统返回的数据评价得到的结果; ΔL_2 为不考虑测头误差和探针变形进行评价得到的结果; ΔL_3 为不考虑探针变形进行评价得到的结果; ΔL_4 为只考虑探针变形评价得到的结果; ΔL_5 为使用所提出的误差补偿模型评价得到的结果.

表 1 测量数据评价结果

Tab.1 Evaluation results of measurement data mm

位置	误差				
	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3	ΔL_4	ΔL_5
1	0.015 1	-0.192 7	-0.207 7	0.012 3	-0.000 7
2	0.019 9	-0.189 5	-0.204 6	0.015 5	0.000 4
3	0.002 8	-0.204 0	0.002 8	0.001 0	0.001 0
4	0.021 1	-0.188 2	-0.203 2	0.016 8	0.001 8
5	0.022 3	-0.185 7	-0.104 2	0.019 3	0.001 8
6	0.021 6	-0.186 2	-0.104 2	0.018 8	0.001 4
7	0.023 6	-0.185 9	-0.105 7	0.019 1	0.001 7

在测量机 3 个主轴静止的情况下测量,可以直接使用测量系统返回的数据进行评价.在不补偿测头误差和探针变形的情况下(ΔL_2),在 7 个测量位置,测量误差均超过了 0.18 mm;通过 ΔL_4 与 ΔL_2 、 ΔL_1 的结果对比可知,探针变形是影响测量精度的主要因素;经过误差补偿模型的误差补偿,在所有测量位置,评价结果与量块真值的误差值都不超过 0.002 mm,误差和探针变形补偿前后,测量误差的平均值从 -0.190 3 mm 降低到了 0.001 1 mm,验证了所提出模型的正确性和有效性.

4 结 语

在非正交式坐标测量机下应用 REVO 五轴测量系统,必须对其进行重构.所提出的 REVO 测头误差补偿模型具有良好的误差补偿效果.测头的探针变形是影响测量精度的主要因素.通过实验验证了所提出模型的正确性和有效性,误差和探针变形补偿前后,测量误差的平均值从 -0.190 3 mm 降低到了 0.001 1 mm.本文的研究内容对于高效率、高精度的 REVO 五轴测量系统在非正交式坐标测量机下的应用研究具有重要意义.

参考文献:

- [1] Renishaw. REVO Five-Axis Measurement System [EB/OL]. <http://www.renishaw.com/en/revo-five-axis-measurement-system-10438>, 2016-06-03.
- [2] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
Zhang Guoxiong. *Coordinate Measuring Machine*[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999 (in Chinese).
- [3] Li Xinghua, Chen Bo, Qiu Zurong. The calibration and error compensation techniques for an Articulated Arm CMM with two parallel rotational axes[J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 603-609.
- [4] Zhang G X, Zhang H Y, Guo J B. Error compensation of cylindrical coordinate measuring machines[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 501-504.
- [5] 裘祖荣, 陈波, 李杏华. 基于反转法的平行双关节坐标测量机的标定[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2014, 47(6): 512-517.
Qiu Zurong, Chen Bo, Li Xinghua. Calibration of articulated arm coordinate measuring machine with two parallel rotational axes based on the reversal method[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2014, 47(6): 512-517 (in Chinese).
- [6] 陈诚, 裘祖荣, 李醒飞, 等. θ FXZ 型测量机力变形误差分析[J]. 天津大学学报, 2010, 43(1): 64-70.
Chen Cheng, Qiu Zurong, Li Xingfei, et al. Analysis of force-induced errors of measuring machine with θ FXZ structure[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(1): 64-70 (in Chinese).
- [7] Zhang G X, Guo J B, Liu S G, et al. The development of cylindrical coordinate measuring machines[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(5): 54003-54009.
- [8] 刘书桂, 张海涛, 苏智琨. REVO 测头在非正交式三坐标测量机中探测矢量修正算法研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2016, 49(9): 956-960.
Liu Shugui, Zhang Haitao, Su Zhikun. Correction of detecting vector of REVO applied in non-orthogonal coordinate measuring machine[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2016, 49(9): 956-960 (in Chinese).
- [9] 裘祖荣, 苏智琨, 张国雄, 等. 整体叶盘测量机参数标定的关键技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(4): 235-241.
Qiu Zurong, Su Zhikun, Zhang Guoxiong, et al. Key technology for calibrating parameters of a bladed disk measuring machine[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2014, 12(4): 235-241 (in Chinese).
- [10] Li Xinghua, Zhang Guoxiong, Liu Shugui, et al. A study on machine calibration techniques[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 499-502.

(责任编辑: 赵艳静)