

# 关节类坐标测量机关键技术及进展\*

于连栋, 赵会宁

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

**摘要:**关节类坐标测量机具有便携性好、质量轻、测量范围大等优点,广泛应用于汽车工业、航空航天、模具制造、大型装备装配等领域的质检工作。关节类坐标测量机由6或者7个旋转关节串联而成,靠近基座的关节一般装有力平衡机构,提高了关节类坐标测量机的易操作性;其测角系统由安装在各旋转关节上的高精度角度编码器实现;光学扫描测头应用于关节类坐标测量机上实现了复杂曲面的非接触快速测量;为得到精确的测量模型,研究了多种建模和参数辨识方法并由不同国际组织提出了关节类坐标测量机的性能评价标准。最后介绍了关节类坐标测量机的关键技术和未来发展趋势。

**关键词:** 关节类坐标测量机;测量模型;标准件;参数标定算法;性能评价标准

**中图分类号:** TH712 TH721 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Key technologies and advances of articulated coordinate measuring machines

Yu Liandong, Zhao Huining

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

**Abstract:** Articulated coordinate measuring machines (ACMMs) have the advantages of portability, light weight, large measurement range, etc., and are widely applied in the quality inspection fields of automotive industry, aeronautics and astronautics, mold manufacturing, assembly of large-scale equipment and etc. ACMMs consist of 6 or 7 rotation joints in series. Force balance mechanism is installed on the joint near the base, which improves the operation capability of ACMMs greatly. The angle measuring systems are achieved with high precision angle encoders installed on the rotation joints. Optical scanning probe is applied on ACMMs to achieve the non-contact and rapid measurement of complicated surface. In order to obtain the more accurate measurement model, several methods for modelling and parameter identification are studied, and the performance evaluation standards of ACMMs are proposed by different international organizations. This paper introduces the key technologies and future development trends of ACMMs.

**Keywords:** articulated coordinate measuring machine; measurement model; gauge; parameter calibration algorithm; performance evaluation standard

## 0 引言

关节类坐标测量机自20世纪80年代出现以来,已广泛应用于大型部件(如机翼、造船等)的制造和装配、汽车装配过程中工装夹具的检测、大科学装置内部关键部件的制造和装配等领域。与传统正交式坐标测量机相比,关节类坐标测量机通常由6或者7个旋转关节串联而成,具有灵活性好、便携性好、测量范围大和适于在位

测量等优点。一般在靠近基座的关节上装有平衡机构,以提高关节类坐标测量机的易操作性;其测角系统由安装在各旋转关节上的高精度角度编码器实现;光学扫描测头应用于关节类坐标测量机上实现了复杂结构被测对象的非接触快速测量;为得到精确的测量模型,研究了多种建模和参数辨识方法以及由不同国际组织制定的关节类坐标测量机的性能评价标准。针对上述关键技术,本文介绍了关节类坐标测量机的研究现状和技术进展,并对其未来发展趋势进行了展望。

## 1 仪器结构及其误差分析

### 1.1 仪器结构

目前世界上关节类坐标测量机结构形式如图1所示。主流结构分为两种:一种为单臂支撑结构,如图1(c)所示;另一种为双臂支撑结构,如图1(d)所示。为了提高关节类坐标测量机的易操作性,在靠近基座的关节处安装有平衡机构,其形式分为内置和外置两种。目前,美国 FARO 公司、法国 KERON 公司、日本小阪研究所等生产的关节类坐标测量机和由合肥工业大学自主研制的新一代关节式类坐标测量机<sup>[1]</sup>(见图2)上均安装有内置平衡机构,而瑞典海克斯康公司和意大利 TOMELLERI ENGINEERING 公司生产的同类仪器安装有外置平衡机构。



图1 仪器结构类型

Fig. 1 Instrument structural types

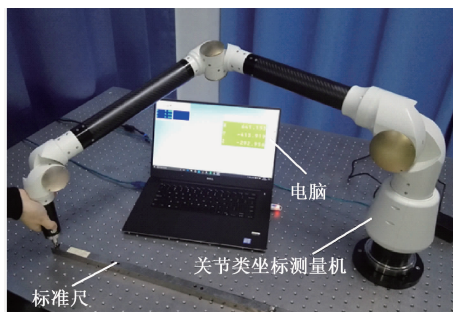


图2 新一代关节类坐标测量机

(由合肥工业大学研制)

Fig. 2 New generation articulated coordinate measuring machines (developed by Hefei University of Technology)

此外,为了扩大其测量范围,相关研究机构提出了一种可变臂长的关节类坐标测量机<sup>[2-4]</sup>。为了提高其局部测量空间的测量精度,有研究者提出了一款变自由度关节类坐标测量机<sup>[5]</sup>。

### 1.2 误差分析

从关节类坐标测量机的结构、零部件加工、整机装配、使用等角度进行分析,主要存在的误差源如下。

1) 角度编码器误差<sup>[6]</sup>:圆光栅安装偏心误差和圆光栅物理零位与运动学建模基准位置不一致;

2) 垂直度误差:在理想状态下,相邻两个旋转轴的轴线应相互垂直,而由于加工和装配等误差因素的存在,相邻两个旋转轴的轴线之间出现不垂直现象,即存在垂直度误差;

3) 杆件长度和偏置量误差:由加工装配产生;

4) 测头探测误差<sup>[7-8]</sup>:使用硬测头时,测量人员的测量力不同而产生的探测误差;

5) 热变形误差:由关节类坐标测量机外部温度、工作环境温度、内部热源等引起的误差;

6) 杆件弹性变形误差<sup>[9-11]</sup>:由杆件的自重、操作力、测量力、加速度产生的力等引起的杆件变形误差;

7) 关节误差<sup>[12]</sup>:关节的径向跳动、轴向跳动、摩擦、变形等以及回转误差;

8) 人员误差<sup>[13]</sup>:由测量人员引起的误差;

9) 校准误差:由标准件引起的误差。

上述关节类坐标测量机的误差源<sup>[14-15]</sup>可以分为两类:系统和随机误差源。系统误差源可以通过修正方法将其误差值尽量减小或者消除,比如圆光栅安装偏心误差、垂直度误差、有效杆长误差和偏置量误差等。

## 2 关键技术

为了尽量减少或者消除关节类坐标测量机自身存在的系统误差,需要关节类坐标测量机的测量模型、圆光栅安装偏心误差修正、误差标定算法以及适用于关节类坐标测量机的误差标定数据采集的标准件等关键技术进行实现。另外,为了提高关节类坐标测量机的测量速度,实现复杂结构物体的三维重构,在关节类坐标测量机的末端安装由光学扫描测头。

### 2.1 测量模型

建立关节类坐标测量机测量模型的目的是获取其测头球心坐标在基坐标系下的函数关系。D-H 模型<sup>[14]</sup>于1955年由 Denavit J 等人为研究机器人运动问题提出的一种使用矩阵表示相邻两部件之间相对位置关系的数学方法,被广泛应用于机器人运动学建模。当关节轴线处于相互平行时,D-H 模型的4个参数不能完整地描述其

运动姿态。为了克服 D-H 模型的缺点, 提出了改进 D-H 模型<sup>[15-16]</sup>、CPC 模型<sup>[17]</sup>、MCPC 模型<sup>[18]</sup>、POE 模型<sup>[19]</sup>、Local POE 模型<sup>[20-21]</sup>、泛函网络<sup>[22]</sup>、广义误差模型<sup>[23]</sup>和四元数法<sup>[24]</sup>以建立关节类坐标测量机的测量模型。

以 D-H 模型为例, 分析关节类坐标测量机的坐标系转换关系(见图 3), 并建立关节类坐标测量机的测量模型。

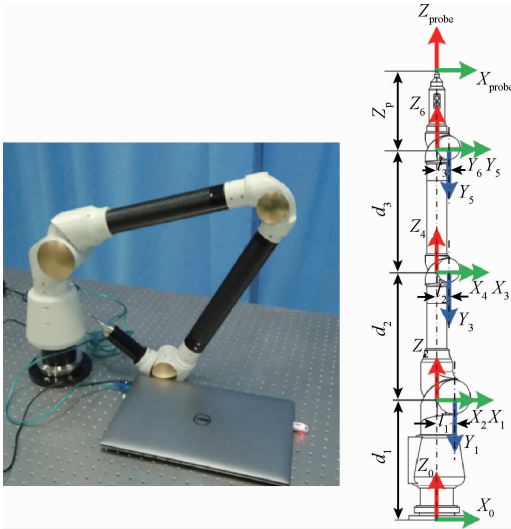


图 3 关节类坐标测量机的坐标系转换关系

Fig. 3 Coordinate system transformation relationships of ACMMs

根据 D-H 建模原理可知, 关节类坐标测量机的任意相邻坐标转换关系可由式(1)表示。

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & d_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & d_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & l_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\theta_i$  表示关节变量, 即杆件  $i$  绕关节  $i$  的轴转动的量;  $l_i$  表示偏置量, 即相邻两个杆件在关节  $i$  的轴线上交点之间的距离;  $d_i$  表示杆件长度, 即杆件  $i$  在关节  $i$  及关节  $i+1$  之间的长度;  $\alpha_i$  表示扭转角, 即表示关节  $i+1$  与关节  $i$  之间的夹角。

则关节类坐标测量机的测量模型为:

$$P = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_5^4 A_6^5 A_{probe}^6 \quad (2)$$

式中:  $P = [x, y, z, 1]^T$ ,  $A_{probe}^6 = [0, 0, Z_p, 1]^T$

由于安装在关节上的光栅物理零位与运动学建模的基准位置不一致, 则式(1)应改写为:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\Theta_i & -\sin\Theta_i \cos\alpha_i & \sin\Theta_i \sin\alpha_i & d_i \cos\Theta_i \\ \sin\Theta_i & \cos\Theta_i \cos\alpha_i & -\cos\Theta_i \sin\alpha_i & d_i \sin\Theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & l_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\Theta_i = \theta_i + \Delta\theta_i$ ,  $\Delta\theta_i$  表示各节光栅安装导致光栅物理零位与运动学建模的基准位置之间角度差值。

此外, 为了进一步提高其测量精度, Santorila J 等人<sup>[25]</sup>建立了基于多项式法的残余误差修正模型, 后来 Santorila J 等人<sup>[26]</sup>又分析了温度对关节类坐标测量机的测量精度影响, 建立了 D-H 模型中各参数与工作温度之间的函数关系。Zheng D. T. 等人<sup>[27]</sup>对关节类坐标测量机的误差特性进行了分析, 开展了关节类坐标测量机的最佳测量区域研究; 后来吴霞等人<sup>[28]</sup>将对关节类坐标测量机进行划分, 采用每个子空间内具有一组 D-H 修正参数(被称为一机多模)。由上述建模方法可知, 建立同时含有其结构参数、工作温度等多种参量的关节类坐标测量机的测量模型, 进一步提高其测量精度。

### 2.2 圆光栅安装偏心误差修正

通常情况下, 关节类坐标测量机拥有 6 或 7 自由度, 且每个自由度均安装有圆光栅用于测量旋转轴的旋转角度。由于加工装配等因素导致圆光栅的回转中心和旋转轴的回转中心不重合即存在着偏心(见图 4), 大大影响了圆光栅的测角精度, 必须予以消除。

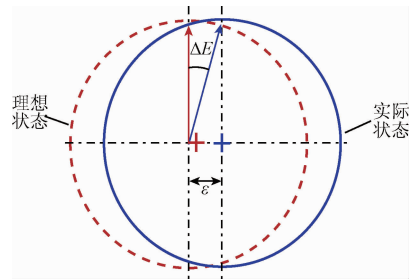


图 4 圆光栅安装偏心误差

Fig. 4 Eccentric error caused by the installation of the circle grating

圆光栅偏心误差通常采用光电自准直仪和多面棱体结合搭建检测系统, 实现测量误差检测, 再利用傅里叶级数<sup>[29]</sup>、多项式法<sup>[30]</sup>、谐波分析法<sup>[31]</sup>、径向基函数网络<sup>[32]</sup>等方法建立测角误差与圆光栅读数之间的函数关系。为了克服光电自准直仪和多面棱体搭建检测系统在装调条件困难的情况下, 艾晨光等人<sup>[33]</sup>采用双读数头对比接收正弦信号相位差的方法, 实现偏心参数的检测, 使其测角精度由修正前的 28.3" 提高到 5.8"。后来, 冯超鹏等人<sup>[34]</sup>建立了基于双读数头的圆光栅安装偏心误差参数自校准模型, 实现偏心误差参数标定。利用单数头的数据进行修正, 使圆光栅的平均误差从补偿前的 0.046 4° 提高了 0.003 7°。但该精度仍不能满足关节类坐标测量机的旋转关节的测角精度。结合关节类测量机旋转轴系圆光栅安装偏心修正情况, 对基于双读数头的圆光栅安装偏心误差参数自校准方法进行优化, 修正之后的测角误差最

大最小值达到  $\pm 1.0''$ ，大大提高了关节类坐标测量机的测量精度。

### 2.3 标准件

关节类坐标测量机的参数标定或者性能评定最初主要沿用正交式三坐标测量机所采用的标准件,如量块组、步距规、球杆、正四面体等,如图5所示。由于关节类坐标测量机为手动式测量仪器,沿用正交式坐标测量机的标准件存在许多问题,如采样点的随机分布、每点测量力变化的不可重复性等。



图5 通用标准件  
Fig. 5 General gauges

许多学者开展了标准件的研究工作。汪平平等人<sup>[35]</sup>采用锥孔对关节类坐标测量机的结构参数进行了标定。于连栋等人<sup>[36]</sup>和 Santolaria J 等人<sup>[37]</sup>分别提出了采用激光跟踪仪提供长度标准量对关节类坐标测量机的结构参数进行标定;尚平等人<sup>[38]</sup>开发了一种具有低温度膨胀系数石英材质的标准件;Brau A 等人<sup>[39]</sup>采用一维球阵列作为标准件,关节类坐标测量机采用专用测头实现其结构参数标定数据的采集;Kovač I 等人<sup>[40]</sup>采用激光干涉仪结合一维位移台作为标准件实现关节类坐标测量机的结构参数的标定;Shimajima K 等人<sup>[41]</sup>提出了一种3D球板实现关节式坐标测量机的性能评价;Piratelli-filho A 等人<sup>[42]</sup>设计一种虚拟球杆用于关节式坐标测量机的性能评价;Piratelli-filho A 等人<sup>[43]</sup>又提出了一种由16组4个锥孔的虚拟球板实现关节式坐标测量机的性能评价;Gonzalez-madruga D 等人<sup>[44]</sup>提出了一种用于4组3个锥孔长度为1 000 mm 虚拟圆标准件,用于关节式坐标测量机的性能评价;Cuesta E 等人<sup>[45]</sup>设计了一款具有多种几何特征的标准件用于关节类坐标测量机性能评价;于连栋等人<sup>[46-47]</sup>分别提出了一种基于虚拟球的空间标定体和一种常见虚拟几何特征标准件用于关节式坐标测量机的性能评价;于连栋等人<sup>[48]</sup>分析了现有标准件在使用过程

中会出现拟合误差且存在变形等问题,结合关节类坐标测量机的性能评价标准,提出了一种基于关节类坐标测量机测量空间的3D标定场,如图6所示,该标定场大大提高了关节类坐标测量机的参数标定或者性能评价的效率。

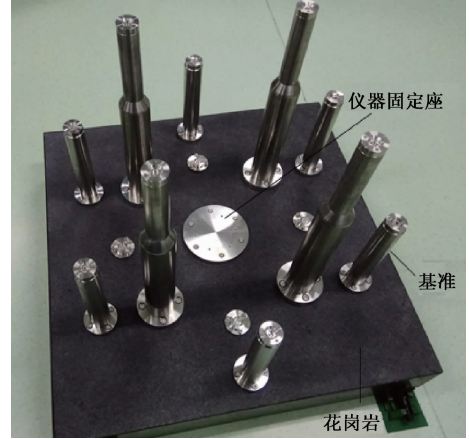


图6 基于关节类坐标测量机测量空间的3D标定场  
Fig. 6 3D calibration field based on the measuring volume of ACMMs

综上所述,在获取标准量过程中尽量减少拟合误差的引入,误差标定数据采集更高效,基于关节类坐标测量机测量空间的标准件结构设计,成为了用于关节类坐标测量机的误差标定标准件的发展方向。

### 2.4 参数标定算法

关节类坐标测量机参数标定的目的是实现关节类坐标测量机结构参数优化。关节类坐标测量机的参数标定常用的优化算法有粒子群算法<sup>[49]</sup>、遗传算法<sup>[50]</sup>、改进的粒子群算法<sup>[51]</sup>、改进模拟退火算法<sup>[52]</sup>、卡尔曼滤波算法<sup>[53]</sup>、同步随机逼近算法<sup>[54]</sup>、L-M 算法<sup>[55]</sup>等。现以L-M 算法为例,详细介绍了关节类坐标测量机参数标定的过程。

采用尚平等人<sup>[38]</sup>提出的长度标准件作为关节类坐标测量机参数标定的标准量。设在锥孔杆一端采集数据记为  $P_1$ , 另一端采集数据记为  $P_2$ , 则建立基于空间距离的关节类坐标测量机的误差模型如式(4)所示。假设标准件长度为  $L_{i2}$ 。

$$\Delta L_i = L_{i2} - \|P_1^i - P_2^i\| \quad (4)$$

式中:  $\Delta L_i$  为标准长度与测量长度之间的差值,  $i$  为测量次数,  $\|\cdot\|$  为范数。

根据最小二乘原理,关节类坐标测量机参数标定的目标函数  $F(b)$  如式(5)所示。

$$F(b) = \sum_{i=1}^n \Delta L_i^2 = \sum_{i=1}^n (L_{i2} - \|P_1^i - P_2^i\|)^2 \quad (5)$$

式中:  $b$  表示关节类坐标测量机的结构参数。

采用 L-M 算法即可获取准确地其结构参数  $b$ , 实现关节类坐标测量机的测量模型中误差参数的修正, 进而大大提高了其测量精度。

### 2.5 光学扫描测头

关节类坐标测量机拥有两类测头: 一种为硬测头(使用时直接接触被测物体表面); 另一种为非接触式测头—光学扫描测头。光学扫描测头是基于激光三角法原理实现对被测物体表面特征测量, 具体原理如图 7 所示。

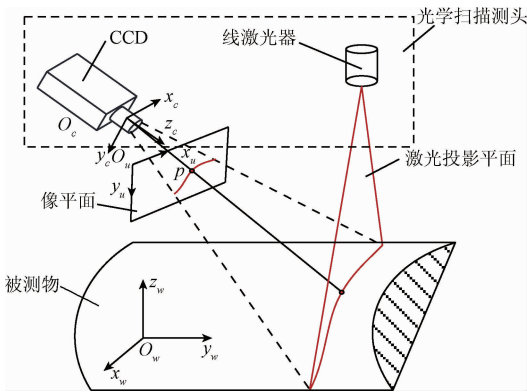


图 7 基于激光三角法的光学扫描测头原理  
Fig.7 Principle of optical scanning probe based on laser triangulation method

目前, 商业化的光学扫描测头主要由国外技术垄断, 如日本 Nikon 公司 MMDx 系列光学扫描测头、美国 Faro 公司 ScanArm HD/ES/V3 系列光学扫描测头、法国 Kreon 公司 Skyline/Zephyr II Blue/Solano Blue 等系列光学扫描测头, 其中 Zephyr II Blue 系列可以实现反光表面测量、瑞典 Hexagon 公司 HP-L 系列光学扫描测头、美国普赛公司 Helix 系列光学扫描测头等。

## 3 关节类坐标测量机的性能评价标准

关节类坐标测量机的性能评价标准主要由 ASME B89.4.22; 2004<sup>[56]</sup>、VDI/VDE 2617-9:2009<sup>[57]</sup> 和 ISO DS 10360-12<sup>[58]</sup> 等。上述关节类坐标测量机性能评价标准采用不同方法评价探测系统误差, 将不同标准件放置在关节类坐标测量机的测量空间中进行长度测量误差评价。

### 3.1 ASME B89.4.22: 2004 标准

在 AMSE B89.4.22: 2004 标准中包含 3 种测试: 有效直径测试、单点重复性测试和空间性能测试。

1) 有效直径测试: 为了评价关节类坐标测量机测头的精度, 所采用标准球直径为 10 ~ 50 mm。将标准球放置在关节类坐标测量机臂长的 1/2 附近, 有效直径测试过程中需要在被测标准球的上半球均匀采样 9 个点, 用于拟合标准球的直径, 按照规定重复测量 3 次。球直径

的测量值和名义值之间的差值称为直径偏差, 其最大直径偏差为有效直径测试值。

2) 单点重复性测试: 为了检测关节类坐标测量机在不同姿态下探测同一点的测量性能。通常情况下, 在关节类坐标测量机的测量空间放置在 3 个不同的位置, 即臂长的 0% ~ 20%、20% ~ 80% 和 80% ~ 100% 区域内, 尽量涵盖关节类坐标测量机的整个测量空间。关节类坐标测量机以不同姿态测量每个点 10 次。单点重复性测试主要由两个评价指标, 最大位置偏差  $\delta_{max}$  和 2 倍测量标准差  $2S_{SPAT}$ 。

3) 空间性能测试: 以球杆为长度标准量, 将短球杆和长球杆按如图 8 所示方式放置在关节类坐标测量机的测量空间内 20 个不同的位置, 以涵盖其整个测量空间, 短球杆为关节类坐标测量机臂长的 50% ~ 75%, 长球杆为臂长的 120% ~ 150%, 每个位置仅测量一次。这个测试的目的是获取  $|D_i|_{max}$ 、 $D_{max}$  与  $D_{min}$  之间的差值和 20 个被测值的 2 倍标准差。

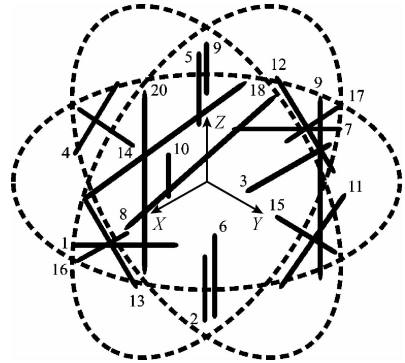


图 8 球杆在关节类坐标测量机测量空间中分布位置  
Fig.8 Distributions of ball bars in the measuring volume of ACMMs

### 3.2 VDI/VDE 2617-9: 2009 标准

根据 VDI/VDE 2617-9: 2009 标准, 关节类坐标测量机的精度评价有 4 个技术指标: 球位置探测误差  $P_L$ 、尺寸探测误差  $P_S$  和形状探测误差  $P_F$ 、尺寸测量示值误差  $E$ 。

探测误差测试是为了评价固定在关节类坐标测量机上探头的精度。应选直径为 10 ~ 50 mm 和形状误差小于最大允许误差的 20% 的标准球作为测试对象。将球位置放置在其测量空间内 3 个不同位置, 在每个位置标准球按照如图 9 所示的方式进行测量。和 ASME B89.4.22: 2004 标准相比, 将球位置以不同高度放置在其测量空间内, 即高度近似为臂长的 -20%、0% 和 50% 位置。

1) 球位置探测误差  $P_L$ : 在每个位置获取 5 个球心坐标值, 计算任意两个球心之间的距离。标准球在 3 个位置的最大球心距为球位置探测误差。

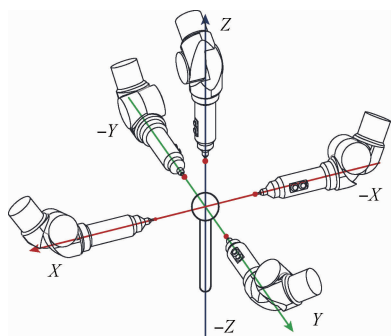


图9 五个测量点的分布

Fig. 9 Distributions of five measuring points

2) 尺寸探测误差  $P_s$ : 对于每个位置标准球采集 25 个测量点, 获取标准球的测量值, 3 个位置标准球的直径名义值和测量值之间的最大偏差值为尺寸探测误差。

3) 形状探测误差  $P_f$ : 计算每个位置 25 个测量点到球心的距离以获取半径的范围, 标准球在 3 个位置半径范围的最大值为形状探测误差。

4) 尺寸测量示值误差  $E$ : 按照 VDI/VDE 2167-9: 2009 标准, 关节类坐标测量机的指示误差测试需要其测量空间相隔为  $120^\circ$  的 3 个均分区域。需要 5 个不同长度的标准件, 如量块组、步距规、球杆、球阵列、锥窝阵列等, 其中最长的标准件的长度应为关节类坐标测量机测量范围的 66%。5 种不同长度的标准件在关节类坐标测量机的测量空间内分别被放置 7 个不同的位置, 以涵盖关节类坐标测量机的整个测量空间。在其中一个区域内, 标准件被放置在 3 个不同的位置, 一个位置竖直放置, 剩余两个位置倾斜  $45^\circ$  相对放置。在剩余两个区域内, 标准件被放置在两个不同的位置, 其中一个位置竖直放置, 另一个位置呈一定角度放置。标准件在最后两个位置倾斜  $45^\circ$  相对放置。

每 5 个不同长度的标准件被重复测量 3 次, 共 105 个测量值, 通过 105 个测量值计算测量误差  $\Delta L$  即为测量值  $L_z$  和名义值  $L_n$  之间的绝对差值。

### 3.3 ISO DS 10360-12 标准

ISO DS 10360-12 标准作为 ISO 10360 标准的一部分, 详细介绍了关节类坐标测量机的性能测试要求。关节类坐标测量机的精度验证需要以下技术指标: 长度测量误差  $E$ , 尺寸探测误差  $P_{\text{Size, Sph. } 1 \times 25}$ 、形状探测误差  $P_{\text{Form, Sph. } 1 \times 25}$  和位置探测误差  $L_{\text{Dia}5 \times 5; \text{Art}}$ 。

对于探测误差测试采用标准球直径介于 10 ~ 51 mm 之间。标准球被放置两个位置: 一个放置在靠近关节类坐标测量机底座的位置, 另一个放置在远离关节类坐标测量机底座的位置。25 个采样点必须均匀分布在标准球的上半球表面, 且探头方向保持一致。

1) 尺寸探测误差  $P_{\text{Size, Sph. } 1 \times 25}$ : 对于放置在位置 1 和 2

的标准球进行测量, 利用 25 个测量点计算标准球直径即为测量值  $D_{\text{MEAS}}$ , 测量值  $D_{\text{MEAS}}$  和名义值  $D_{\text{REF}}$  之间的差值即为尺寸探测误差  $P_{\text{Size, Sph. } 1 \times 25} = D_{\text{MEAS}} - D_{\text{REF}}$ 。在每个位置的尺寸探测误差的绝对值应与最大允许误差或者生产厂商提供的参考值进行比较。

2) 形状探测误差  $P_{\text{Form, Sph. } 1 \times 25}$ : 对于放置在位置 1 和 2 的标准球进行测量, 利用 25 个测量值进行计算标准球的球心坐标; 对于每 25 个测量值而言, 求出测量点到标准球的球心之间半径, 标准球测量半径的最大值  $R_{\text{max}}$  和最小值  $R_{\text{min}}$  之间的差值即为  $P_{\text{Form, Sph. } 1 \times 25} = R_{\text{max}} - R_{\text{min}}$ 。在每个位置的形状探测误差应与最大允许误差或者生产厂商提供的参考值进行比较。

3) 位置探测误差  $L_{\text{Dia}5 \times 5; \text{Art}}$ : 将标准球放置在关节类坐标测量机的测量空间内两个不同的位置, 按照如图 9 所示的方式进行采样。每个方位测量 5 次, 以获取每次测量标准球的球心坐标。探测位置误差  $L_{\text{Dia}5 \times 5; \text{Art}}$  是最小外接圆的直径。

4) 长度测量误差  $E$ : 需要提供 5 个不同长度的标准件如量块组、步距规、球杆、激光干涉仪等, 其中最长的标准件的长度应为关节类坐标测量机测量范围的 66%。将 5 种不同长度的标准件分别在关节类坐标测量机的测量空间内放置 7 个不同的位置, 以涵盖关节类坐标测量机的整个测量空间。在  $0^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $240^\circ$  区域内, 5 个不同长度的标准件首先水平放置, 然后倾斜  $45^\circ$  角度放置。仅在  $0^\circ$  区域内, 5 个不同长度的标准件竖直放置。每个位置重复测量 3 次, 共有 105 个测量值。对于每组 105 个测量值而言, 长度测量误差  $E$  是测量值和名义值之间的绝对差值。105 个测量误差应小于最大允许误差  $E_{\text{MPE}}$ 。按照如图 10 所示的方式测量每个长度标准件。

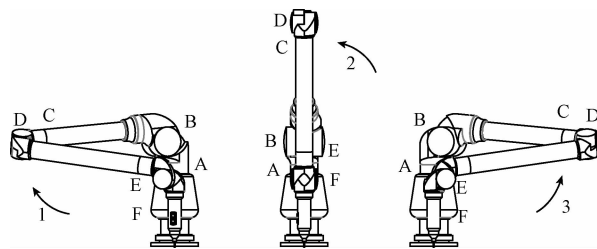


图10 关节类坐标测量机的关节 D 位置

Fig. 10 Joint D positions of ACMMs

## 4 关节类坐标测量机的未来发展趋势

### 1) 关节类坐标测量机测量范围的扩展

随着现代制造业快速发展, 越来越多大装置应运而生, 如国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experiment Reactor, ITER)、中国 500 米口径球面射电望远镜 (five hundred meters aperture spherical telescope,

FAST)大型望远镜、先进超导托卡马克(experimental advanced superconducting Tokamak, EAST)装置等。大科学装置具有结构复杂,体积庞大等特点,在生产制造过程中,需要不同测量仪器组合完成其质量的检测任务。如当被测物体的尺寸大于关节类坐标测量机的测量范围时,需要通过“接力式”测量方法,即蛙跳<sup>[59]</sup>;当单一仪器无法实现整体质量检测任务,需采用多种不同仪器组合实现测量任务<sup>[60]</sup>。

## 2) 新颖机械结构

根据关节类坐标测量机具有便携性、质量轻、适用于在位测量等特点,借鉴Klobucar R等人<sup>[61]</sup>超高热稳定性球杆标准件思想和热胀冷缩理论,设计出一款具有超高热稳定性结构的精密回转轴系,保证关节类坐标测量机在工厂条件下具有较高测量精度。另外,根据被测对象尺寸和检测精度要求,开发具有自适应功能(即变自由度变臂长)的关节类坐标测量机。

## 3) 智能故障诊断系统

随着互联网技术快速发展,关节类坐标测量机生产厂家开发一款基于“互联网+”的关节类坐标测量机运行状态实时监测系统,实现对其运行状态评估,针对已出现故障和潜在故障给出具体解决方案。

4) 具有多种几何特征的关节类坐标测量机性能评价方法

根据现行关节类坐标测量机性能评价标准如ASME B89.4.22:2004、VDI/VDE 2617-9:2009和ISO DS 10360-12, Ostrowska K等人<sup>[62]</sup>分析了关节类坐标测量机的空间精度评价,所采用的标准件类型均为长度标准量如量块组、步距规、球杆、球阵列、激光干涉仪、锥孔阵列等。结合关节类坐标测量机的使用情况,开发一种采用常见几何特征作为标准量实现关节类坐标测量机的性能评价方法,更加符合关节类坐标测量机的实际使用场景。

## 5) 关节类坐标测量机的测量精度溯源

相比于激光干涉仪、激光跟踪仪、正交式坐标测量机等测量仪器而言,关节类坐标测量机高达几十项误差源,借鉴正交式坐标测量机的测量精度溯源研究成果,以开展关节类坐标测量机的测量精度溯源方面研究,为其在工程应用中提供指导意义。

## 5 结 论

本文主要针对关节类坐标测量机关键技术-仪器结构、误差分析、测量模型、圆光栅安装偏心误差修正、用于关节类坐标测量机参数标定或者性能评价的标准件研制、参数标定算法优化、光学扫描测头等研究现状进行了分析,并介绍了现行关节类坐标测量机性能评价标准如ASME B89.4.22:2004、VDI/VDE 2617-9:2009和ISO

DS 10360-12。最后对关节类坐标测量机的未来发展进行了展望。

## 参考文献

- [1] 刘宁宁,赵会宁,刘芳芳,等.压簧在关节式坐标测量机平衡机构中的应用研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(10):1575-1581.  
LIU N N, ZHAO H N, LIU F F, et al. Application research on the compression spring for the balancing mechanism of articulated coordinate measuring machine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(10): 1575-1581.
- [2] 王文,张选高,卢科青,等.一种可变杆长关节臂式坐标测量机:中国,CN101871774A[P].2010.  
WANG W, ZHANG X G, LU K Q, et al. An variable length articulated arm coordinate measuring machine: CN, CN101871774A[P]. 2010.
- [3] LIPPUNER H, SIERCKS K. Measuring method for an articulated-arm coordinate measuring machine: US, US9080867[P]. 2015.
- [4] 于连栋,赵会宁,刘宁宁,等.变臂长关节式坐标测量机:中国,CN 105157638 A[P]. 2015.  
YU L D, ZHAO H N, LIU N N, et al. Variable length articulated coordinate measuring machine: CN, CN 105157638 A[P]. 2015.
- [5] 祝连庆,李伟仙,潘志康,等.变臂关节式坐标测量机的参数自标定方法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(3):572-579.  
ZHU L Q, LI W X, PAN ZH K, et al. Research on parameter self-calibration method for partly-bonded articulated arm coordinate measuring machine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 572-579.
- [6] 汪平平.柔性坐标测量机精度理论及应用技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2006.  
WANG P P. Precision Theory and its Application Technology of Flexible Coordinate Measuring Machine[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2006.
- [7] BOSCH J A. Coordinate measuring machines and systems[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 2011.
- [8] 郑大腾,谢世坤,罗志扬,等.关节臂坐标测量机圆光栅偏心误差建模及修正研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(10):1568-1574.  
ZHENG D T, XIE SH K, LUO ZH Y, et al. Circular grating eccentricity error modeling and correction of articulated arm CMMs [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(10): 1568-1574.
- [9] DANIEL G M, GONZÁLEZ E C, JOAQUÍN B, et al.

- Application of a force sensor to improve the reliability of measurement with articulated arm coordinate measuring machines[J]. *Sensors*, 2013, 13(8):10430.
- [10] 罗哉, 刘晖, 田焜, 等. 关节臂式坐标测量机测量力误差分析及补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(5): 1159-1167.  
LUO Z, LIU H, TIAN K, et al. Error analyses and compensation for measuring force of articulated arm coordinate measuring machines[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(5):1159-1167.
- [11] VRHOVEC M, MUNIH M. Improvement of coordinate measuring arm accuracy[C]. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007:697-702.
- [12] RAAB S, SAJEDI S A, HASLOECHER K J, et al. Method for improving measurement accuracy of a portable coordinate measurement machine: WO, US 6957496 B2[P]. 2005.
- [13] DANIELI G M, JOAQUÍN B, EDUARDO C, et al. Influence of human factor in the AACMM performance: a new evaluation methodology[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(7): 1283-1291.
- [14] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices [J]. *Transaction of the ASME Journal of Applied Mechanics*, 1955, 22:215-221.
- [15] HAYATI S A. Robot arm geometric link parameter estimation [C]. *IEEE Conference on Decision and Control*, 1983:1477-1483.
- [16] JUDD R P, KNASINSKI A B. A technique to calibrate industrial robots with experimental verification[J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 1990, 6(1): 20-30.
- [17] ZHUANG H, ROTH Z S, HAMANO F. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators [J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2002, 8(4):451-463.
- [18] LU J, GAO G. Kinematic modeling and simulation of articulated arm coordinate measuring machines based on MCPC method[C]. *International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, 2013:182-185.
- [19] HUANG K, LIU R G, WU J S, et al. Parameter calibration method based on screw theory for articulated coordinate measuring arm [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 189-193(2):4049-4052.
- [20] CHEN I M, YANG G, TAN C T, et al. Local POE model for robot kinematic calibration[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2001, 36(11-12):1215-1239.
- [21] 黄奎, 莫健华, 余立华, 等. 柔性测量臂运动学建模及参数标定方法[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(8):122-126.  
HUANG K, MO J H, YU L H, et al. Kinematic model and parameter calibration for flexible articulated coordinate measuring arm[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(8):122-126.
- [22] 郑大腾, 费业泰, 张梅. 柔性坐标测量机建模的泛函网络研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(4): 33-37.  
ZHENG D T, FEI Y T, ZHANG M. Research on functional networks of flexible coordinate measuring machine modeling [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2009, 23(4):33-37.
- [23] ZHAO H N, YU L D, JIA H K, et al. A new kinematic model of portable articulated coordinate measuring machine[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(7):181.
- [24] BENCIOLINI B, VITTI A. A new quaternion based kinematic model for the operation and the identification of an articulated arm coordinate measuring machine inspired by the geodetic methodology[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2017:192-204.
- [25] SANTOLARIA J, AGUILAR J J, YACÜE J A, et al. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines [J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(4):251-268.
- [26] SANTOLARIA J, YACÜE J A, JIMÉNEZ R, et al. Calibration-based thermal error model for articulated arm coordinate measuring machines [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4):476-485.
- [27] ZHENG D T, DU C, HU Y. Research on optimal measurement area of flexible coordinate measuring machines[J]. *Measurement*, 2012, 45(3):250-254.
- [28] 吴霞, 郑大腾. 基于 D-H 矩阵的柔性坐标测量机多测量模型研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(5): 760-765.  
WU X, ZHENG D T. Research on multiple measurement models based on D-H matrix in flexible coordinate measuring machine [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(5): 760-765.
- [29] 于连栋, 丁洋, 程文涛, 等. 平行双关节坐标测量机圆光栅测角误差补偿技术[J]. *南京理工大学学报:自然科学版*, 2009, 33(5):659-662.  
YU L D, DING Y, CHENG W T, et al. Compensation of angle measurement error of circular gratings for parallel dual-joint coordinate measuring machine[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Nature*



- Science Edition, 2009, 33(5):659-662.
- [30] 王显军. 大型望远镜测角系统误差的修正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9):2446-2451.  
WANG X J. Correction of angle measuring errors for large telescopes[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(9):2446-2451.
- [31] 劳达宝, 周维虎, 李万红, 等. 基于遗传算法的柱面光栅测角技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7):2182-2188.  
LAO D B, ZHOU W H, LI W H, et al. Cylindrical grating angle measurement technology based on genetic algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7):2182-2188.
- [32] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4):598-604.  
HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network [J] Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4):598-604.
- [33] 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]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11):2479-2484.
- [34] 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11):2459-2464.  
FENG CH P, ZHU L Q, PAN ZH K, et al. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument., 2016, 37(11):2459-2464.
- [35] 汪平平, 费业泰, 尚平, 等. 柔性坐标测量机参数辨识方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7):129-132.  
WANG P P, FEI Y T, SHANG P, et al. Parameters identification of a flexible coordinate measuring machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7):129-132.
- [36] 于连栋, 程文涛, 费业泰. 基于激光跟踪仪的关节式坐标测量机参数标定[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(12):1329-1332.  
YU L D, CHENG W T, FEI Y T. Parameter calibration method for an articulated coordinate measuring machine with laser tracker[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(12):1329-1332.
- [37] SANTOLARIA J, MAJARENA A C, SAMPER D, et al. Articulated arm coordinate measuring machine calibration by laser tracker multilateration[J]. The Scientific World Journal, 2014(2):681853.
- [38] 尚平, 杨睿嫦, 王晨晨, 等. 低热膨胀石英量棒、其标定方法及其应用: 中国, CN101701786B[P]. 2012.  
SHANG P, YANG R E, WANG CH CH, et al. Application and calibration of low-heat expansion quartz gauge rod: CN, CN 101701786 B[P]. 2012
- [39] BRAU A, VALENZUELA M, SANTOLARIA J, et al. Evaluation of different probing systems used in articulated arm coordinate measuring machines [J]. Metrology and Measurement Systems, 2014, 21(2):233-246.
- [40] KOVAČ I, FRANK A. Testing and calibration of coordinate measuring arms [J]. Precision Engineering, 2001, 25(2):90-99.
- [41] SHIMOJIMA K, FURUTANI R, TAKAMASU K, et al. The estimation method of uncertainty of articulated coordinate measuring machine [C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2002:411-415.
- [42] PIRATELLI-FILHO A, LESNAU G R. Virtual spheres gauge for coordinate measuring arms performance test[J]. Measurement, 2010, 43(2):236-244.
- [43] PIRATELLI-FILHO A, ARENCIBIA R V. Application of virtual spheres plate for AACMMs evaluation [J]. Precision Engineering, 2012, 36(2):349-355.
- [44] GONZÁLEZ-MADRUGA D, CUESTA E, PATINO H, et al. Evaluation of AACMM using the virtual circles method [J]. Procedia Engineering, 2013, 63:243-251.
- [45] CUESTA E, GONZÁLEZ-MADRUGA D, ALVAREZ B J, et al. A new concept of feature-based gauge for coordinate measuring arm evaluation [J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(6):065004.
- [46] 于连栋, 赵会宁, 董钊, 等. 一种基于虚拟球的空间标定体及其标定方法: 中国, CN103791868B[P]. 2016.  
YU L D, ZHAO H N, DONG ZH, et al. A spatial gauge based on the virtual sphere and its calibration method: CN, CN103791868B[P]. 2016.
- [47] 于连栋, 赵会宁, 鲁思颖, 等. 用于关节类坐标测量机标定的常见虚拟几何特征标准件: 中国, CN104457640A[P]. 2014.  
YU L D, ZHAO H N, LU S Y, et al. General virtual geometrical feature gauges for articulated coordinate measuring machine: CN, CN104457640A[P]. 2014.
- [48] 于连栋, 赵会宁, 李维诗, 等. 用于便携关节式坐标测量机误差标定的3D标定场: 中国, CN201710230882.4[P]. 2017.  
YU L D, ZHAO H N, LI W SH, et al. 3D calibration field for error calibration of Portable articulated coordinate measuring machine: CN, CN201710230882.4 [P]. 2017.

- [49] 董钊, 张伟, 赵会宁, 等. 平行双关节坐标测量机的结构参数标定[J]. 纳米技术与精密工程, 2015(4): 287-292.  
DONG ZH, ZHANG W, ZHAO H N, et al. Structural parameter calibration for parallel dual-joint coordinate measuring machine [J]. Nanotechnology & Precision Engineering, 2015, 13(4):287-292.
- [50] LIGHT T V, GORLACH I A, NBERG A, et al. Measuring arm calibration [C]. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2011:.
- [51] 黄奎, 莫健华, 付泽民, 等. 基于旋量理论的关节臂坐标测量机建模及标定[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2010,38(4):94-97.  
HUANG K, MO J H, FU Z M, et al. Screw theory based on mathematical model and parameter calibration for articulated arm coordinate measuring machine [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(4): 94-97.
- [52] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 应用改进模拟退火算法实现关节臂式坐标测量机的参数辨识[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10):2499-2505.  
GAO G B, WANG W, LIN K, et al. Parameter identification based on modified annealing algorithm for articulated arm CMMs [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10):2499-2505.
- [53] NGUYEN H N, ZHOU J, KANG H J. A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network [J]. Neurocomputing, 2015, 151(3): 996-1005.
- [54] SULTAN I A, PUTHIYAVEETIL P. Calibration of an articulated CMM using stochastic approximations [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1):201-207.
- [55] 程文涛, 于连栋, 费业泰. 关节式坐标测量机参数识别算法研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, 41(1):45-49.  
CHENG W T, YU L D, FEI Y T. Study on parameter identification algorithms for articulated arm coordinate measuring machine [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2011, 41(1):45-49.
- [56] ASME B89. 4. 22-2004. Methods for performance evaluation of articulated arm coordinate measuring machines [S].
- [57] VDL/VDE 2617-9. Acceptance and reverification test for articulated arm coordinate measuring machines [S]. 2009: 120.
- [58] ISO/CD 10360-12. Geometrical product specifications (GPS) acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) Part 12: Articulated Arm Coordinate Measurement Machines (CMM), 2014: 1-42.
- [59] 王凌云, 张国玉, 徐熙平. 基于蛙跳式柔性三坐标测量系统误差理论分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4):304-308.  
WANG L Y, ZHANG G Y, XU X P. Theoretical Analysis on the Error of Three Coordinate Measuring System Based on the Leapfrog Type [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4):304-308.
- [60] YU L D, ZHAO H N, ZHANG W. Development of precision measurement network of experimental advanced superconducting tokamak [J]. Optical Engineering, 2014, 53(12):122406.
- [61] KLOBUCAR R, ACKO B. Experimental evaluation of ball bar standard thermal properties by simulating real shop floor conditions [J]. International Journal of Simulation Modeling, 2016,15(3): 511-521.
- [62] OSTROWSKA K, GASKA A, KUPIEC R, et al. Verification of articulated arm coordinate measuring machines accuracy using laser tracer system as standard of length [J]. Mapan-Journal of Metrology Society of India, 2016, 31(4):241-256.

## 作者简介



于连栋(通讯作者), 分别在1993年、1999年和2003年于合肥工业大学获得学士、硕士和博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为坐标测量技术、现代测试精度理论研究、微纳测量技术。

E-mail: liandongyu@hfut.edu.cn

**Yu Liandong** (Corresponding author) received his B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees all from Hefei University of Technology in 1993, 1999 and 2003, respectively. Now, he is a professor in Hefei University of Technology. His main research interest includes coordinate measurement technology, modern measurement precision theory, and micro/nano-measurement technology.



赵会宁, 2011年于中原工学院获得学士学位, 2014年于合肥工业大学获得硕士学位, 现为合肥工业大学博士研究生, 主要研究方向为坐标测量技术。

E-mail: hnzhaoh@mail.hfut.edu.cn

**Zhao Huining** received his B.Sc. degree from Zhongyuan University of Technology in 2011 and M.Sc. degree from Hefei University of Technology in 2014. Now, he is a Ph.D. candidate in Hefei University of Technology. His main research interest includes coordinate measurement technology.