

引用格式: SU Guo-ying, ZHANG Fu-min, HAN Yong, *et al.* Coaxiality Error Measurement Technology for GNSS Antenna Connector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2): 0215002

苏国营,张福民,韩勇,等.GNSS 天线连接器同轴度误差测量技术[J].光子学报,2020,49(2):0215002

# GNSS 天线连接器同轴度误差测量技术

苏国营<sup>1</sup>,张福民<sup>2</sup>,韩勇<sup>1</sup>,李文一<sup>1</sup>

(1 中国地震局第一监测中心,天津 300180)

(2 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

**摘 要:**为测量 GNSS 天线连接器同轴度误差,构建了连接器分段旋转数学模型,提出了一种水平转台和机器视觉结合的非接触式测量方法,搭建测量装置并进行了测量实验.分析连接器运动方式和同轴度误差测量方法,确定各轴线之间的偏移关系,建立同轴度误差数学模型和测量模型.搭建测量装置,相机安装在水平转台上方,光轴平行于水平转台轴线.旋转水平转台,使用相机捕捉转接螺杆端面圆心位置并拟合轨迹,完成测量装置同轴度误差自标定.将连接器安置在水平转台上,旋转水平转台,测量连接器顶部螺纹杆轴线相对水平转台轴线的偏移.旋转连接器的承载器,测量连接器顶部螺纹杆轴线相对承载器轴线的偏移.最终,综合各轴线的偏移关系得到连接器同轴度误差的最大值.实验结果表明,测量装置对 GNSS 天线连接器同轴度误差的测量标准差为  $9\ \mu\text{m}$ ,单次测量结果的扩展不确定度  $U=30\ \mu\text{m}$  ( $k=2$ ),满足 GNSS 天线连接器  $0.1\ \text{mm}$  至  $1\ \text{mm}$  量级的同轴度误差的测量需求,使用连接器同轴度误差修正 GNSS 超短基线测量结果,可以显著提升基线测量精度.

**关键词:**GNSS;天线连接器;误差模型;轴线偏移;轨迹拟合;同轴度误差;机器视觉测量

中图分类号:TH711

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204902.0215002

## Coaxiality Error Measurement Technology for GNSS Antenna Connector

SU Guo-ying<sup>1</sup>, ZHANG Fu-min<sup>2</sup>, HAN Yong<sup>1</sup>, LI Wen-yi<sup>1</sup>

(1 *The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

(2 *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

**Abstract:** In order to measure the coaxiality error of GNSS antenna connector, a mathematical model of segment rotation of connector is constructed, and a non-contact measurement method combining horizontal turntable and machine vision is proposed. Then the measuring device is built and the measuring experiment is carried out. Based on the analysis of the motion mode of the connector and the measurement method of coaxiality error, the deviation relationship between the axes is determined, and the mathematical model and measurement model of coaxiality error are established. In the measuring device, the camera is mounted above the horizontal turntable with the optical axis parallel to the horizontal turntable axis. Rotate the horizontal turntable, use the camera to capture the center position of the end face of the transfer screw and fit the orbit, and complete the self calibration of the coaxiality error of the measuring device. Place the connector on the horizontal turntable, rotate the horizontal turntable, and measure the deviation of the thread axis at the top of the connector from the axis of the horizontal

**基金项目:**国家重点研发计划(No.2018YFF0212702),中国地震局监测、预测、科研三结合课题(No.CEA-JC/3JH-173708),中国地震局第一监测中心科技创新主任基金(No.FMC2017005)

**第一作者:**苏国营(1986-),男,工程师,硕士,主要研究方向为机器视觉测量和地震监测专用设备计量. Email:suying913824@163.com

**通讯作者:**张福民(1982-),男,副教授,博士,主要研究方向为激光及光电测试技术. Email:zhangfumin@tju.edu.cn

**收稿日期:**2019-10-29; **录用日期:**2019-12-16

<http://www.photon.ac.cn>

turntable. Rotate the carrier of the connector, and measure the deviation of the thread axis at the top of the connector from the axis of the carrier. Finally, the maximum coaxiality error of the connector is obtained by synthesizing the deviation relations of the axes. The standard deviation of measurement device for coaxiality error of GNSS antenna connector is  $9 \mu\text{m}$ , and the expanded uncertainty of single measurement result is  $U=30 \mu\text{m}$  ( $k=2$ ), which meets the measurement demand of coaxiality error of GNSS antenna connector in the level of 0.1mm to 1mm. Using connector coaxiality error to correct GNSS ultra short baseline measurement results can significantly improve the baseline measurement accuracy.

**Key words:** GNSS; Antenna connector; Error model; Axis deviation; Orbit fitting; Coaxiality error; Machine vision measurement

**OCIS Codes:** 150.3040; 100.2000; 120.6650; 330.7325

## 0 引言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)接收机广泛应用于地壳形变监测、大气探测、建筑物形变测量、地质灾害预防等领域,其超短基线和短基线的测量重复性精度达到 0.1 mm 量级.实际工作中发现,天线连接器的同轴度误差在 0.1 mm 到 1 mm 量级,已经影响了测量结果的准确性.但是,测绘行业的 GNSS 规程规范均未对连接器的同轴度误差提出要求,更缺失相关测量方法<sup>[1-3]</sup>.研究连接器的同轴度误差测量技术,可以厘清连接器对 GNSS 测量的影响机制,有助于提高 GNSS 测量的准确性.

GNSS 天线连接器主要由基座(Tribrach)、承载器(Carrier)等构成,拥有三段轴线,上段外轮廓为螺杆,下段外轮廓为螺纹孔,中段外轮廓不规则,传统方法难以直接测量其同轴度误差.GB/T 1958-2017 中主要使用了圆柱度仪、坐标测量机、偏摆仪、圆度仪等测量方法<sup>[4]</sup>,以及李静等<sup>[5]</sup>设计的 V 型光栅高度尺测量法均为接触式测量技术.郭媛等<sup>[6]</sup>使用线阵 CCD 和激光光源对轧辊磨损度进行在线测量,补偿轧辊轴线偏移.佟金等<sup>[7]</sup>使用面阵 CCD 采集大型台阶轴锻件侧面图像,实现同轴度在线测量.激光位移传感器与旋转测量臂结合,可解决大尺寸内径的同轴度检测问题<sup>[8-10]</sup>;机器视觉测量技术与测量机器人结合,实现汽车曲轴圆柱度的检测<sup>[11]</sup>.上述各种方法均通过测量侧面轮廓求取同轴度误差,要求测量对象为圆柱形,不适用于外轮廓不规则的 GNSS 天线连接器.

吕乃光、易亚星、吕植勇、仓玉萍等<sup>[12-15]</sup>将激光准直技术应用于孔-孔或轴-轴同轴度测量,解析准直激光在接收器上的椭圆投影曲线,实现双轴线结构的同轴度误差测量.陈涛等<sup>[16]</sup>把显微视觉测量技术用于精密同轴测量,通过测量轴孔端面圆心的相对位置,能够获得优于  $8 \mu\text{m}$  的精度.激光准直技术关注双轴线结构的运动特征,显微视觉技术关注轴孔端面的相对位置,这两种技术均对被测对象的侧面轮廓不敏感,对本研究具有借鉴意义.

本文在分析运动特征基础上建立了 GNSS 天线连接器的同轴度误差数学模型,设计了基于机器视觉和水平转台的测量方案并搭建了测量装置,通过测量水平转台转接螺杆端面和天线连接器端面旋转轨迹,解算天线连接器各轴线间的偏移向量以及天线连接轴线相对水平转台轴线的偏移向量,最终得到天线连接器的同轴度误差.

## 1 连接器同轴度误差数学模型

### 1.1 同轴度数学模型

GB/T 1958-2017 中使用最小区域判别法定义同轴度误差,如图 1 所示,以基准轴线  $A_1$  为轴线的圆柱面  $C_2$  包含了被测圆柱面  $C_1$  的提取中心线  $A_2$ ,提取中心线  $A_2$  与该圆柱面  $C_2$  至少有一点接触,则圆柱面  $C_2$  内的区域即为同轴度误差的最小包容区域<sup>[4]</sup>.

### 1.2 连接器的同轴度误差模型

GNSS 天线连接器具有调平和旋转功能,其机械结构如图 2(a)所示,基座底部的螺纹孔用于连接

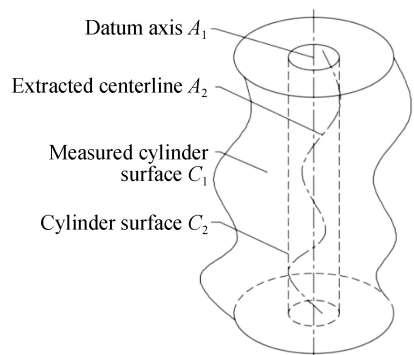


图 1 同轴度误差模型

Fig.1 Coaxiality error model

观测墩,基座中部的三个脚螺旋用于连接器的调平,承载器使用三爪结构固定在基座上,承载器内部使用轴孔配合实现旋转功能,承载器顶部是安置 GNSS 天线的螺纹杆。

为定量分析连接器的同轴度误差构成,建立数学模型<sup>[17-19]</sup>,如图 2(b)所示.中心轴线主要分三段:基座底部螺纹孔的中心线  $a_1$ 、承载器旋转轴的轴线  $a_2$  和承载器顶部螺纹杆中心线  $a_3$ .以轴线  $a_1$  为基准轴线,连接器同轴度误差主要包括:轴线  $a_2$  相对于轴线  $a_1$  的误差表现为倾斜和偏移,倾斜误差使用绕  $x$  轴和  $y$  轴的旋转量  $\delta x_1$  和  $\delta y_1$  表示,偏移误差使用沿  $x$  轴和  $y$  轴的偏移量  $\Delta x_1$  和  $\Delta y_1$  表示;轴线  $a_3$  相对于轴线  $a_2$  的误差表现为偏移,用  $\Delta x_2$  和  $\Delta y_2$  表示。

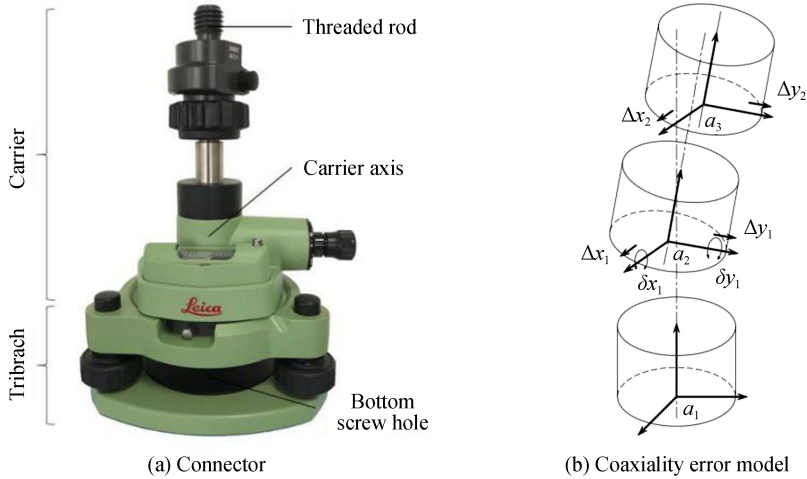


图 2 连接器及其同轴度误差模型

Fig.2 Connector and coaxiality error model

### 1.3 连接器的同轴度误差简化模型

连接器同轴度的各项误差,最终体现在承载器顶部螺纹杆端面处轴线  $a_3$  相对轴线  $a_1$  的偏移.轴线  $a_2$  的倾斜误差也包含在  $a_3$  相对  $a_1$  的偏移误差测量结果里,而倾斜误差  $\delta x_1$  和  $\delta y_1$  的调整精度是测量结果的不确定度来源之一.因此,在空间坐标系内可建立同轴度误差的简化模型,用向量描述轴线  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  的几何偏移关系.如图 3 所示, $O_1x_1y_1z_1$  是轴线  $a_1$  所在的坐标系, $O_2x_2y_2z_2$  是轴线  $a_2$  所在的坐标系, $O_3x_3y_3z_3$  是轴线  $a_3$  所在的坐标系, $z_1$ 、 $z_2$  和  $z_3$  轴分别表示轴线  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$ 。

轴线  $a_1$  和  $a_2$  的空间关系可以用向量  $\vec{O_1'O_2}$  表示,轴线  $a_2$  和  $a_3$  的空间关系可以用向量  $\vec{O_2'O_3}$  表示.轴线  $a_3$  与轴线  $a_1$  的最大偏差即为同轴度误差最小包容区域的半径.由于轴线  $a_3$  可绕轴线  $a_2$  旋转,轴线  $a_3$  与轴线  $a_1$  的最大偏差

$$E = |\vec{O_1'A}| = |\vec{O_1'O_2}| + |\vec{O_2'A}| = |\vec{O_1'O_2}| + |\vec{O_2'O_3}| \quad (1)$$

事实上,承载器的旋转轴在连接器内部,无法直接测量,轴线  $a_2$  与基座底部螺纹孔的轴线  $a_1$  的相对位置难以确定,即向量  $\vec{O_1'O_2}$  无法直接测得.为了解决上述难题,本文提出了水平转台和机器视觉结合的测量方法,并研制了测量装置。

## 2 同轴度误差测量技术

### 2.1 测量装置设计

测量装置的结构如图 4 所示,主要包括水平转台、工业相机和环形光源等.水平转台中心有转接螺杆,水

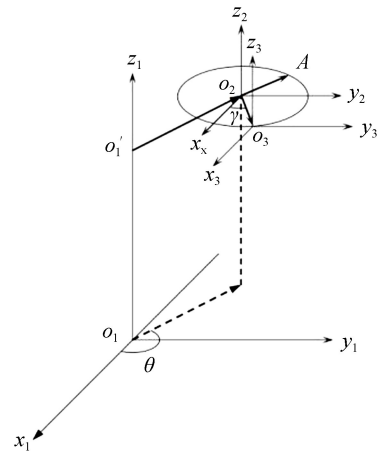


图 3 简化模型

Fig.3 Simplified model

平转台通过轴承安装在底座上,底座下方的脚螺旋用于调平水平转台,视觉测量系统和环形光源通过直线导轨安装在底座上.以精密管水准器为基准,调节脚螺旋精确调平水平转台.调节纵向直线导轨的手轮控制视觉测量系统上下移动,控制相机的成像清晰度;调节横向直线导轨的手轮控制视觉测量系统横向移动,调节相机光轴与转接螺杆大致同轴.

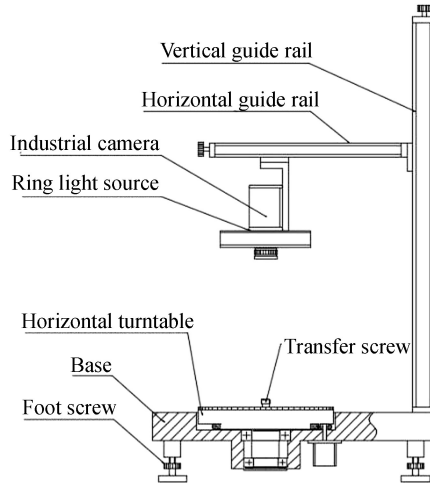


图 4 装置结构图  
Fig.4 Device structure drawing

## 2.2 测量方案

测量前,使用 Thorlab 的同心正方形测试靶标定相机的像素值.测量时,被测连接器安置在水平转台上,水平转台中心的转接螺杆和被测连接器底部的螺纹孔配合.转接螺杆轴线相对水平转台轴线的偏移是测量装置的一项系统误差,可以通过测量实现修正,而水平转台的旋转稳定性是测量结果不确定度的来源之一.为解析测量过程,构建了连接器同轴度误差测量模型,如图 5 所示.

考虑到水平转台中心转接螺杆与水平转台旋转轴之间存在同轴度误差,便于数据计算时对该误差进行修正,模型中建立了水平转台轴线的坐标系  $Oxyz$ ,并作为基准坐标系.以下为测量天线连接器同轴度误差的实施过程:

1)使用分度值为  $60''$ 的管水准泡精确调平水平转台.

2)测量转接螺杆轴线相对水平转台轴线的偏移,即向量  $\overrightarrow{OO_1}$ :调节视觉测量系统成像清晰度,使用 THORLABS 同心正方形靶标定相机,从 0 刻度开始旋转水平转台一周,每间隔一定角度(为保证圆心轨迹拟合精度,间隔角度应不大于  $60^\circ$ ),采集转接螺杆端面图像一幅,提取图像中端面圆心坐标,拟合得到转接螺杆轴线的旋转轨迹;该轨迹的圆心就是水平转台的轴心在  $xOy$  面的投影,即坐标系  $Oxy$  的原点  $O$ ;轨迹半径  $r_1$  作为向量  $\overrightarrow{OO_1}$  的模, $O$  点到第一幅图像中转接螺杆端面的圆心  $O_1$  的连线可确定向量  $\overrightarrow{OO_1}$  的方向  $\alpha$ ;向量  $\overrightarrow{OO_1}$  可得.

3)测量连接器顶部螺纹杆轴线相对水平转台轴线的偏移,即向量  $\overrightarrow{O'O_3}$ :把连接器安置在水平转台上并精确调平;调节视觉测量系统对连接器螺杆端面清晰成像,从 0 刻度开始旋转水平转台一周,采集螺纹杆端面图像一组,提取图像中圆心坐标,拟合得到螺纹杆轴线的旋转轨迹,该轨迹的半径  $r_2$  作为向量  $\overrightarrow{O'O_3}$  的模;0 刻度时螺纹杆端面的圆心为  $O_3, x_3, y_3, z_3$  的原点  $O_3$ ,  $O_3$  到  $z$  轴的垂线可确定向量  $\overrightarrow{O'O_3}$  的方向  $\beta$ ;向量  $\overrightarrow{O'O_3}$  可

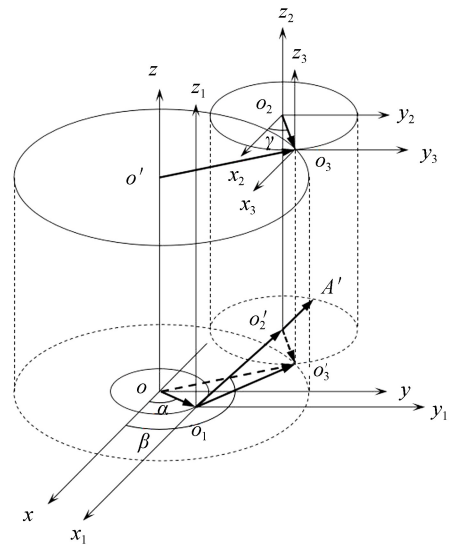


图 5 同轴度误差测量模型  
Fig.5 Measurement model of coaxiality error

得,向量 $\overrightarrow{O'O_3}$ 在 $xOy$ 面的投影为向量 $\overrightarrow{OO_3}$ .

4)修正水平转台的误差向量 $\overrightarrow{OO_1}$ 后,可得连接器顶部螺纹杆轴线相对于基座底部螺纹孔轴线的偏移,即向量 $\overrightarrow{O_1O_3}$ .

5)测量连接器顶部螺纹杆轴线相对中部承载器轴线的偏移,即向量 $\overrightarrow{O_2O_3}$ :水平转台旋转至0刻度后锁止;旋转连接器的承载器一周,采集连接器顶部螺纹杆的端面图像一组;提取图像中端面的圆心坐标,拟合得到螺纹杆轴线的旋转轨迹,该轨迹的圆心 $O_2$ 就是承载器的轴线在 $x_3O_3y_3$ 面的投影,轨迹的半径 $r_3$ 作为向量 $\overrightarrow{O_2O_3}$ 的模; $O_2$ 与第一幅图像中螺纹杆端面的圆心的连线可确定向量 $\overrightarrow{O_2O_3}$ 的方向 $\gamma$ ;向量 $\overrightarrow{O_2O_3}$ 可得,向量 $\overrightarrow{O_2O_3}$ 在 $xOy$ 面的投影为向量 $\overrightarrow{O_2'O_3}$ .

6)计算承载器轴线相对于基座底部螺纹孔轴线的偏移向量 $\overrightarrow{O_1O_2} = \overrightarrow{O_1O_3} - \overrightarrow{O_2'O_3}$ ,则偏移量 $l$ 计算为

$$l = |\overrightarrow{O_1O_2}| = |\overrightarrow{O_1O_3} - \overrightarrow{O_2'O_3}| = [(\sin \beta \times r_2 - \sin \alpha \times r_1 - \sin \gamma \times r_3)^2 + (\cos \beta \times r_2 - \cos \alpha \times r_1 - \cos \gamma \times r_3)^2]^{1/2} \quad (2)$$

偏移角度 $\theta$ 计算为

$$\theta = \arctan \frac{\sin \beta \times r_2 - \sin \alpha \times r_1 - \sin \gamma \times r_3}{\cos \beta \times r_2 - \cos \alpha \times r_1 - \cos \gamma \times r_3} \quad (3)$$

7)连接器的同轴度误差的最大值 $E$ 为

$$E = |\overrightarrow{O_1A}| = |\overrightarrow{O_1O_2}| + |\overrightarrow{O_2'A}| = d + r_3 = [(\sin \beta \times r_2 - \sin \alpha \times r_1 - \sin \gamma \times r_3)^2 + (\cos \beta \times r_2 - \cos \alpha \times r_1 - \cos \gamma \times r_3)^2]^{1/2} + r_3 \quad (4)$$

### 3 测量实验与结果

测量实验现场图如图6所示.为了提高测量装置的测量准确性,增强测量装置对不同型号GNSS连接器的适应性,设计了一种环形背景特征.测量时安装在被测螺杆菌上,用于辅助定位被测螺杆菌端面的圆心.

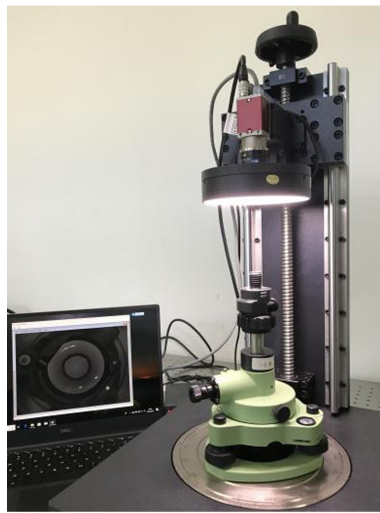


图6 实验现场图  
Fig.6 Image of experiment site

#### 3.1 图像处理算法

考虑相机获取的图像有明显对称性,图像二值化后提取重心粗略估计各端面圆心;用Canny算法提取圆形边缘;设置大的半径值和阈值,使用高斯-牛顿迭代法拟合背景特征大圆的轮廓,解算大圆圆心坐标;在大圆圆心基础上设置被测端面的半径值和阈值,粗提取端面圆心坐标;在粗提取的圆心基础上设置新阈值再次过滤干扰边缘,得到精确的圆心坐标,图像的处理过程如图7所示.



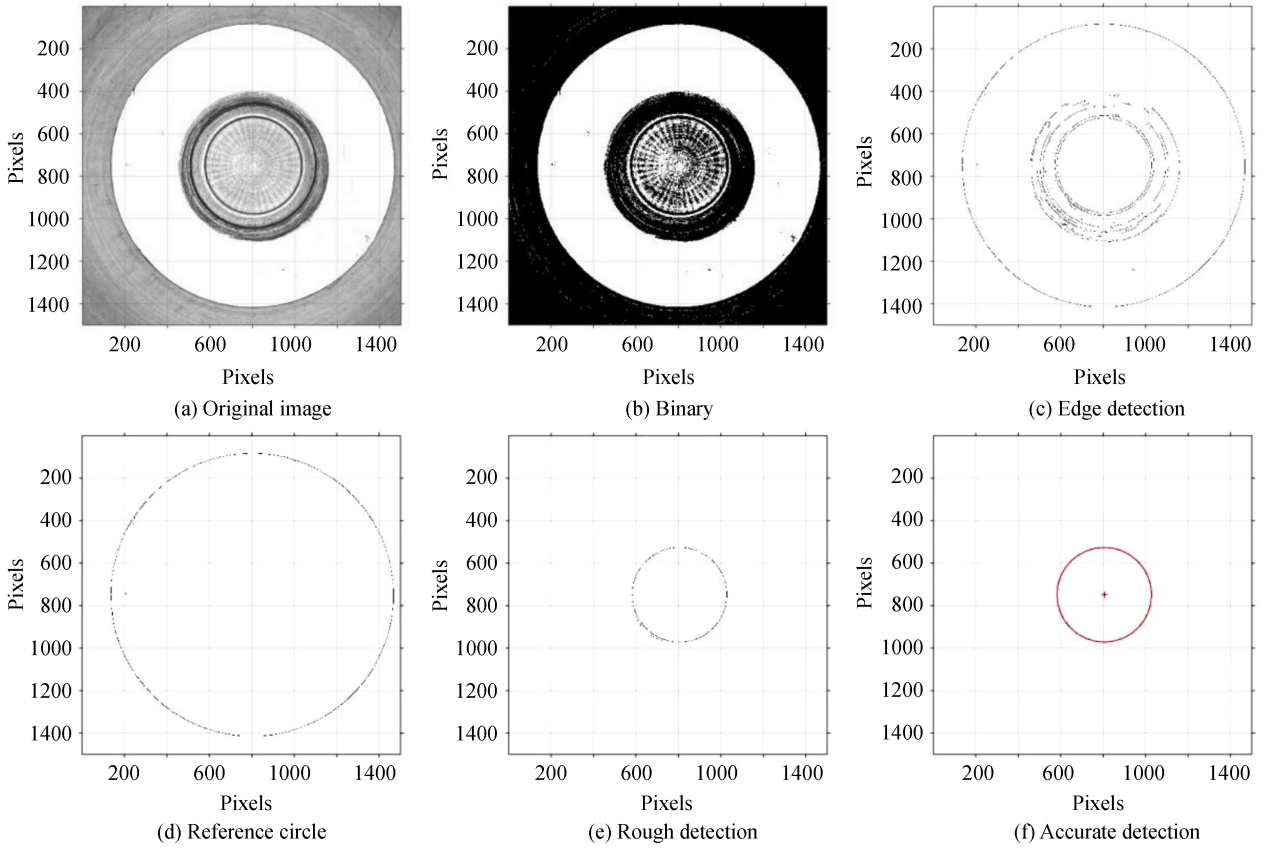


图 7 转接螺杆端面圆心提取过程

Fig.7 Extraction process of the center of the transfer screw end face

### 3.2 GNSS 天线连接器同轴度误差测量实验

测量水平转台上的转接螺杆轴线相对水平转台轴线的偏移 $\overrightarrow{OO_1}$ 时,逆时针旋转水平转台一周,每间隔 $20^\circ$ 采集一张水平转台转接螺杆的端面图像,图像组如图 8 所示.按照 3.1 所述算法检测各图像中端面圆心坐标,拟合圆心轨迹如图 9 所示.计算转接螺杆轴线相对水平转台轴线的偏移角度 $\alpha$ 为 3.58 rad,相对偏移量 $r_1$ 为 6.00 pixels,本次实验相机的标定结果为 0.022 mm/pixel,则 $r_1$ 等于 0.132 mm.

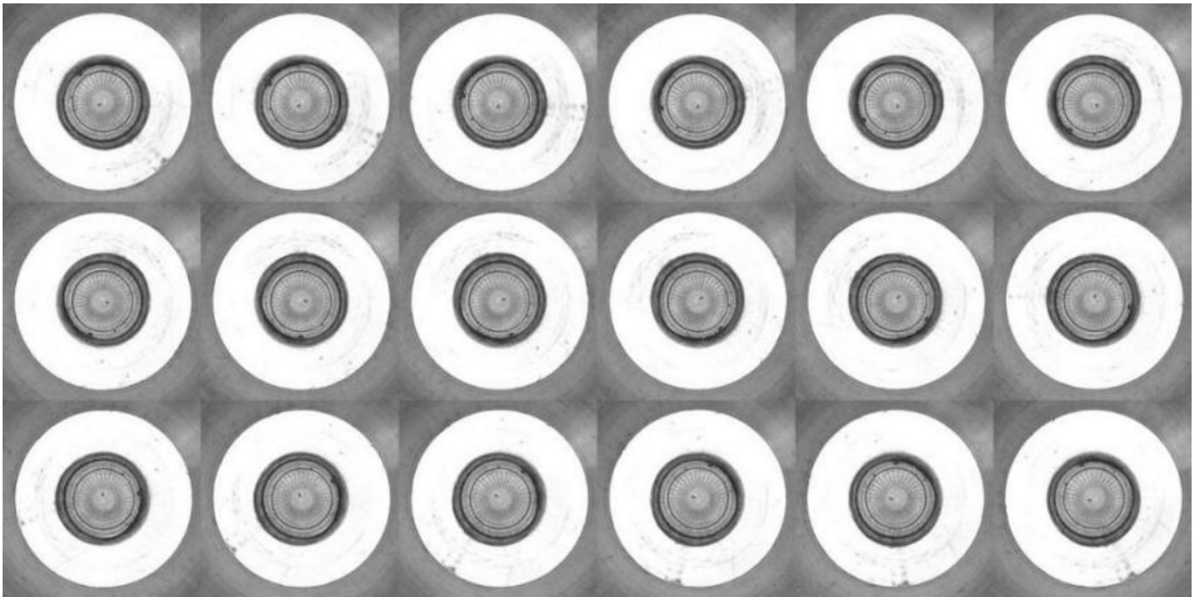


图 8 转接螺杆端面图像

Fig.8 Face images of the transfer screw

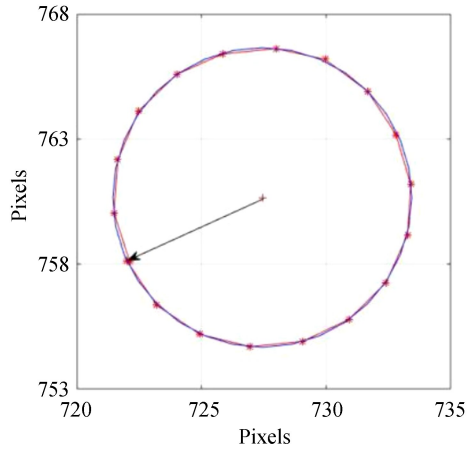


图9 转接螺杆端面圆心轨迹  
Fig.9 Center orbit of the transfer screw end face

测量连接器顶部螺纹杆轴线相对水平转台轴线的偏移 $\overrightarrow{O'O_3}$ 时,把被测天线连接器安置在测量装置的转接螺杆上.旋转水平转台采集天线连接器顶部螺纹杆的端面图像,提取螺纹杆端面的圆心坐标,拟合圆心旋转轨迹如图 10(a)所示.计算  $\beta$  为 3.31 rad,  $r_2$  为 9.61 pixels, 合 0.211 mm.

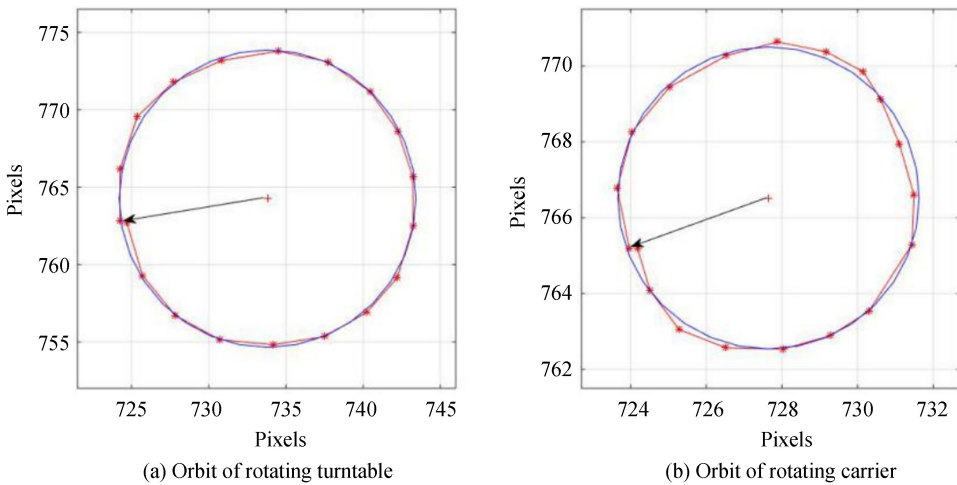


图 10 螺纹杆端面圆心轨迹  
Fig.10 Center orbits of the threaded rod end face

测量天线连接器顶部螺纹杆轴线相对承载器旋转轴轴线的偏移 $\overrightarrow{O_2O_3}$ 时,锁止水平转台,旋转承载器采集天线连接器顶部螺纹杆的端面图像,测量螺纹杆端面圆心的轨迹如图 10(b)所示.计算  $\gamma$  为 3.47 rad,  $r_3$  为 3.99 pixels, 合 0.088 mm.根据式(4)计算连接器同轴度最大误差  $E$  为 0.138 mm.

使用本测量装置对一套天线连接器重复测量 10 次,测量数据见表 1.结果显示,同轴度误差的测量标准差为 0.009 mm.

表 1 重复测量实验数据

No.	$\alpha/\text{rad}$	$r_1/\text{mm}$	$\beta/\text{rad}$	$r_2/\text{mm}$	$\gamma/\text{rad}$	$r_3/\text{mm}$	$E/\text{mm}$
1			3.44	0.220	3.46	0.086	0.105
2			3.47	0.217	3.43	0.085	0.096
3			3.47	0.220	3.42	0.084	0.096
4			3.48	0.221	3.49	0.085	0.099
5			3.51	0.221	3.45	0.083	0.090
6	3.58	0.132	3.48	0.212	3.52	0.083	0.098
7			3.54	0.217	3.43	0.078	0.087
8			3.51	0.212	3.60	0.086	0.103
9			3.37	0.204	3.01	0.079	0.080
10			3.56	0.202	3.71	0.087	0.109
$\sigma$			0.05	0.007	0.18	0.003	0.009

### 3.3 测量结果不确定度评定

同轴度误差测量结果的不确定度来源主要有水平转台的整平精度、水平转台的旋转稳定性、连接器底部螺纹孔与水平转台转接螺杆的配合间隙、被测连接器的整平精度、视觉测量系统的测量精度等。

#### 1) 水平转台整平引入的不确定度 $u_1$

使用格值  $d$  为  $60''$  的管水准器调节水平转台至水平状态,管水准器采用双端瞄准法,可使管水准器的分辨力提高一倍,达到  $0.5d$ 。根据“测量不确定度评定与表示”规范<sup>[20]</sup>,精确调平管水准器后,水平转台整平角度的标准不确定度计算公式为

$$u_a = \frac{0.5d}{2\sqrt{3}} \approx 9''$$

被测连接器的高度  $h$  约 200 mm,则由水平转台整平引起的,轴线  $a_3$  相对轴线  $a_1$  的偏移量的不确定度为

$$u_1 = h \times \sin u_a = 8.7 \mu\text{m}$$

#### 2) 水平转台旋转稳定性引入的不确定度 $u_2$

旋转水平转台,测量水平转台中心转接螺杆轴线的旋转半径,重复测量 10 次,分别为 0.131 mm, 0.132 mm, 0.131 mm, 0.131 mm, 0.132 mm, 0.131 mm, 0.132 mm, 0.131 mm, 0.131 mm, 0.131 mm, 标准偏差为  $0.4 \mu\text{m}$ 。水平转台中心转接螺杆的偏差已经修正,但水平转台旋转稳定性引入的不确定度  $u_2 = 0.4 \mu\text{m}$ 。

#### 3) 连接器底部螺纹孔与水平转台转接螺杆配合间隙引入的不确定度 $u_3$

把连接器的基座部分安置在水平转台上,测量基座螺纹孔轴线的旋转半径,取下基座重新安置再次测量旋转半径,重复上述过程共测量 10 次,分别为 0.121 mm, 0.120 mm, 0.120 mm, 0.123 mm, 0.121 mm, 0.120 mm, 0.120 mm, 0.121 mm, 0.118 mm, 0.121 mm, 标准偏差为  $1.1 \mu\text{m}$ 。连接器底部螺纹孔与水平转台转接螺杆配合间隙引入的不确定度  $u_3 = 1.1 \mu\text{m}$ 。

#### 4) 被测连接器整平引入的不确定度 $u_4$ 和 $u_5$

连接器自带格值  $d$  为  $60''$  的管水准器,可调节轴线  $a_2$  至铅垂状态,精确调平管水准器后,由轴线  $a_2$  的倾斜量  $\delta x_1$  和  $\delta y_1$  引起的,轴线  $a_3$  相对轴线  $a_1$  的偏移量的不确定度与  $u_1$  一致,则  $u_4 = u_5 = 8.7 \mu\text{m}$ 。

#### 5) 视觉测量系统分辨力引入的不确定度 $u_6$

使用 Thorlab 的同心正方形测试靶标定视觉测试系统,标定目标选择边长为 35 mm、边长为 25 mm 和边长为 12.5 mm 的正方形,标定结果分别为  $0.02218 \text{ mm/pixel}$ 、 $0.02210 \text{ mm/pixel}$  和  $0.02212 \text{ mm/pixel}$ ,使用三次标定最大差值估算视觉测量系统标定的不确定度,标定误差服从均匀分布,则视觉系统标定的不确定度为  $0.00003 \text{ mm/pixel}$ 。“3.2 GNSS 天线连接器同轴度误差测量实验”中,连接器同轴度误差偏移量不超过 10 pixels,视觉测量系统分辨力引入的不确定度  $u_6 = 0.00003 \text{ mm/pixel} \times 10 \text{ pixels} = 0.0003 \text{ mm} = 0.3 \mu\text{m}$ 。

综上所述,同轴度误差测量结果的标准不确定度为



$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} \approx 15 \mu\text{m}$$

取包含因子  $k=2$ ,则同轴度误差单次测量结果的扩展不确定度  $U=30 \mu\text{m}(k=2)$ .

### 3.4 GNSS 超短基线测量结果修正实验

在一条超短基线两端分别架设参考 GNSS 接收机和测试 GNSS 接收机,连续观测 10 天,解算基线值如表 2 所示.基线北南分量的标准差为 0.13 mm,东西分量的标准差为 0.10 mm,基线长度的标准差为 0.13 mm.

表 2 GNSS 超短基线重复测量实验  
Table 2 Repeated measurement experiment of GNSS ultra short baseline

Date	NS/mm	EW/mm	D/mm
Nov.26	10 584.87	-6 621.96	12 485.94
Nov.27	10 584.97	-6 622.04	12 486.07
Nov.28	10 584.86	-6 621.89	12 485.90
Nov.29	10 584.98	-6 622.12	12 486.12
Nov.30	10 584.97	-6 622.16	12 486.14
Dec.1	10 584.94	-6 622.17	12 486.11
Dec.2	10 585.03	-6 622.04	12 486.12
Dec.3	10 585.12	-6 622.00	12 486.18
Dec.4	10 584.67	-6 622.08	12 485.84
Dec.5	10 584.75	-6 621.92	12 485.82
$\sigma$	0.13	0.10	0.13

每天更换一次测试 GNSS 接收机的天线连接器,同时记录基座和承载器的安置角度,进行 6 天的基线测量实验.6 只连接器的同轴度误差测量结果如表 3 所示,其中角  $\varphi$  是测量连接器同轴度误差时安置基座和连接器的初始角度.修正前后的基线测量结果如表 4 所示,其中角  $\varphi_2$  是测量基线时基座的安置角度, $\varphi_3$  是承载器的安置角度.综合连接器的同轴度误差测量结果以及测量基线时基座和承载器的安置角度,可以得到测量基线时每个连接器同轴度误差的北南分量和东西分量分别为  $NS_c$  和  $EW_c$ .

表 3 连接器同轴度误差测量结果  
Table 3 Measurement results of coaxiality error of the connectors

No.	$\varphi/\text{rad}$	$\alpha/\text{rad}$	$r_1/\text{mm}$	$\beta/\text{rad}$	$r_2/\text{mm}$	$\gamma/\text{rad}$	$r_3/\text{mm}$	$\theta/\text{rad}$	$l/\text{mm}$	$E/\text{mm}$
1	2.47		0.00	0.35	0.54	0.63	1.50	0.03	0.66	
2	-0.92		4.35	0.73	5.17	0.27	-2.70	0.21	0.48	
3	2.58	4.22	5.14	0.21	0.20	0.27	1.40	0.10	0.37	
4	-1.59	0.40	4.07	0.88	4.32	0.33	-2.90	0.22	0.55	
5	-2.20		5.04	0.39	5.97	0.44	2.29	0.15	0.59	
6	0.05		4.26	1.69	4.24	1.12	-1.79	0.18	1.30	

表 4 修正前后的基线测量结果  
Table 4 Baseline measurement results before and after correction

No.	$\varphi_2/\text{rad}$	$\varphi_3/\text{rad}$	$NS_c/\text{mm}$	$EW_c/\text{mm}$	NS/mm	EW/mm	D/mm	$NS'/\text{mm}$	$EW'/\text{mm}$	$D'/\text{mm}$
1	0.79	3.05	0.56	0.30	10 585.61	-6 622.66	12 486.58	10 585.05	-6 622.96	12 486.26
2	3.32	1.57	0.48	0.06	10 585.54	-6 623.41	12 486.92	10 585.06	-6 623.47	12 486.55
3	0.79	1.13	-0.29	0.18	10 584.79	-6 623.09	12 486.12	10 585.08	-6 623.27	12 486.46
4	2.88	2.44	0.51	-0.16	10 585.55	-6 623.56	12 487.01	10 585.04	-6 623.40	12 486.50
5	2.09	0.52	0.34	-0.18	10 585.72	-6 623.48	12 487.11	10 585.38	-6 623.30	12 486.73
6	4.19	1.92	-0.07	0.98	10 585.14	-6 622.24	12 485.96	10 585.21	-6 623.22	12 486.54
$\sigma$					0.35	0.53	0.48	0.14	0.18	0.15

修正前,基线北南分量的标准差为 0.35 mm,东西分量的标准差为 0.53 mm,基线长度的标准差为 0.48 mm.修正后,基线北南分量的标准差为 0.14 mm,东西分量的标准差为 0.18 mm,基线长度的标准差为 0.15 mm.修正后基线长度及各分量的标准差略低于基线的重复测量精度,比修正前有明显提升.

## 4 结论

建立了连接器同轴度误差的数学模型,提出了测量技术方案并研制了测量装置.测量装置主要使用水平转台和机器视觉测量技术,通过测量各轴线间的偏移向量,得到同轴度误差的最大值.同轴度误差测量实验显示,测量装置对 GNSS 天线连接器的测量标准差为  $9\ \mu\text{m}$ .综合考虑各项不确定度来源,评定同轴度误差单次测量的扩展不确定度  $U=30\ \mu\text{m}(k=2)$ .溯源链下级与上级间应保持  $1/3\sim 1/10$  倍的等级级差,测量装置满足 GNSS 天线连接器  $0.1\ \text{mm}$  至  $1\ \text{mm}$  量级的同轴度误差的测量需求.使用连接器同轴度误差修正 GNSS 超短基线测量结果,可以显著提升基线测量精度.

## 参考文献

- [1] JJF 1118-2004 Calibration specification for global positioning system (GPS) receiver[S]. Beijing: China Metrology Press, 2004.  
JJF 1118-2004 全球定位系统(GPS)接收机(测地型和导航型)校准规范[S].北京:中国计量出版社,2004.
- [2] GJB 6564-2008 Verification regulation for Global Positioning System (GPS) receiver[S]. Beijing: Chinese PLA General Armament Department, 2008.  
GJB 6564-2008 全球定位系统(GPS)接收机检定规程[S].北京:中国人民解放军总装备部,2008.
- [3] JJG(测绘) 2301-2013 GNSS receivers in Real Time Kinematic( RTK ) [S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2013.  
JJG(测绘) 2301-2013 全球导航卫星系统(GNSS)测量型接收机 RTK[S].北京:测绘出版社,2013.
- [4] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of China. GB/T 1958-2017 Geometrical product specifications( GPS ) - Geometrical tolerance - Verification[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 1958-2017 产品几何技术规范(GPS)几何公差 检测与验证[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [5] LI Jing, SHEN Nan-yan, FANG Ming-lun, *et al.* Research on automatic alignment system for the crankshaft of marine diesel engine in tangential point tracing grinding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, **51**(23): 196-204.  
李静,沈南燕,方明伦,等. 随动磨削中船用曲轴自动校直系统研究[J]. 机械工程学报, 2015, **51**(23): 196-204.
- [6] GUO Yuan, WANG Yu-tian. Compensation for axes shifting during detection of roller shape by CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1186-1190.  
郭媛,王玉田. 辊型 CCD 检测法中轧辊轴线偏移的补偿[J]. 光子学报, 2011, **40**(8): 1186-1190.
- [7] TONG Jin, WANG Ya-hui, LU Ji-sheng, *et al.* Coaxiality measurement of large-size forged component based on CCD [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, **43**(4): 945-950.  
佟金,王亚辉,卢纪生,等. 基于 CCD 的大型台阶轴锻件同轴度测量[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, **43**(4): 945-950.
- [8] ZHAO Shi-lei, QU Xing-hua, XING Shu-jian, *et al.* Large-scale diameter automatic measuring system based on laser non-contact measuring principle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(8): 2185-2191.  
赵士磊,曲兴华,邢书剑,等. 激光非接触式大尺寸内径自动测量装置[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(8): 2185-2191.
- [9] ZHANG Ying-wei, ZHU Wan-bin, ZHANG Xin-dong, *et al.* Research on coaxiality measuring method based on the two-dimensional laser displacement sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(12): 1335-1338.  
张瑛玮,朱万彬,张歆东,等. 基于二维激光位移传感器同轴度测量方法研究[J]. 激光与红外, 2014, **44**(12): 1335-1338.
- [10] YAN Min-wei, ZHANG Ying-jie, DAI Bo-chao, *et al.* Research on coaxiality detection technology based on laser sensor [J]. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2017, **51**(10): 27-32.  
颜敏伟,张英杰,代博超,等. 采用激光传感器的同轴度检测技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, **51**(10): 27-32.
- [11] ZHANG Xue-chang, LIANG Tao, ZHANG Xu, *et al.* Research on automobile crankshaft roundness and cylindricity errors evaluation mathematical model based on the error conversion[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, **52**(2): 91-98.  
张学昌,梁涛,张旭,等. 基于误差转换的汽车曲轴圆度及圆柱度误差评价数学模型构建研究[J]. 机械工程学报, 2016, **52**(2): 91-98.
- [12] LV Nai-guang, DENG Wen-yi, YAN Bi-xi, *et al.* The study of coaxiality measurement of holes of large scale mechanical parts[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(7): 694-696.  
吕乃光,邓文怡,燕必希,等. 大型机械零部件孔同轴度测量技术研究[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(7): 694-696.
- [13] YI Ya-xing, AN Yu-hong, LI Zhong-ke, *et al.* Principle of coaxiality measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, **23**(3)S1: 39-41.  
易亚星,安郁虹,李忠科,等. 同轴度测量的原理与方法[J]. 仪器仪表学报, 2002, **23**(3)S1: 39-41.

- [14] LV Zhi-yong, YAN Xin-ping. Solid geometry projection analysis of coaxiality error measurement based on in-phase circum rotation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, **42**(4): 69-75.  
吕植勇, 严新平. 同轴度同步旋转测量的空间投影解析[J]. 机械工程学报, 2006, **42**(4): 69-75.
- [15] CANG Yu-ping, WU Guo-jun, WANG Wei-jin, *et al.* Improvement coaxiality measurement method for transmission shaft[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2932-2936.  
仓玉萍, 吴国俊, 王渭晋, 等. 传动系统同轴度测量方法的改进[J]. 光子学报, 2009, **38**(11): 2932-2936.
- [16] CHEN Tao, CHEN Li-guo, PAN Ming-qiang, *et al.* Coaxial positioning system based on flexible decoupling beams and micro-vision[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(11): 2685-2692.  
陈涛, 陈立国, 潘明强, 等. 基于柔性解耦梁和显微视觉的精密同轴定位系统[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(11): 2685-2692.
- [17] ZHANG Zhi-xiong, JIANG Zhi-xin, YANG Yong-min, *et al.* Joint clearance effects on robot manipulators positional error[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, **36**(6): 185-190.  
张志雄, 江志新, 杨拥民, 等. 关节对中误差对机械臂末端定位精度影响[J]. 国防科技大学学报, 2014, **36**(6): 185-190.
- [18] DING Si-yi, JIN Sun, LI Zhi-min, *et al.* Deviation propagation model and optimization of concentricity for aero-engine rotor assembly[J]. *Journal of Shang Hai Jiao Tong University*, 2018, **52**(1): 54-62.  
丁司懿, 金隼, 李志敏, 等. 航空发动机转子装配同心度的偏差传递模型与优化[J]. 上海交通大学学报, 2018, **52**(1): 54-62.
- [19] GUO Shi-jie, JIANG Ge-dong, MEI Xue-song, *et al.* Measurement and identification of geometric errors for turntable-tilting head type five-axis machine tools[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(11): 2684-2694.  
郭世杰, 姜歌东, 梅雪松, 等. 转台-摆头式五轴机床几何误差测量及辨识[J]. 光学精密工程, 2018, **26**(11): 2684-2694.
- [20] JJF 1059.1-2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S]. Beijing: China Metrology Press, 2004.  
JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国计量出版社, 2012.