

球轴承接触角测量仪的动态不确定度

秦萃晟¹, 沈雪瑾¹, 郭梦媛¹, 曹崇崇²

- (1. 上海大学 机电工程与自动化学院 机械自动化工程系, 上海 200072;
2. 上海集优机械股份有限公司 上海天安轴承有限公司, 上海 200233)

摘 要: 考虑球轴承接触角测量仪的自身动态特性、轴承外圈的试验转速、试验加载力对测量仪测量精度的影响,建立了测量仪的动态不确定度计算模型。针对小样本试验测试结果,采用灰色理论的方法评价了球轴承接触角测量结果的不确定度。基于不确定度的分离原理,分离出测量仪的自身动态特性、外圈转速、试验加载力对测量不确定度的影响规律,建立了接触角测量的动态不确定度计算模型,并通过实际算例验证了模型。建立的测量仪动态不确定度计算模型可用于预测不同工况下的接触角测量不确定度,有助于及时对测量仪进行相应的校准,以提高接触角测量结果的精度。

关 键 词: 球轴承; 接触角测量; 动态不确定度; 灰色理论; 不确定度分离

中图分类号: V241.7; TB922 **文献标志码:** A

Dynamic uncertainty of the measuring instrument for ball bearings' contact angles

QIN Luosheng¹, SHEN Xuejin¹, GUO Mengyuan¹, CAO Chongchong²

- (1. Department of Mechanical Automation Engineering,
School of Machatronic Engineering and Automation,
Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Shanghai Tian An Bearing Company Limited,
Shanghai Prime Machinery Company Limited, Shanghai 200233, China)

Abstract: The influences on the precision of the measuring instrument for ball bearings' contact angle caused by the dynamic characteristic of the instrument, test speed and test load were taken into consideration, then the calculation model of the instrument's dynamic uncertainty was established. Based on the measuring results of the small sample, the grey theory was applied to calculate the uncertainty of the measurement. The principle of the influence on the uncertainty of the measurement caused by the instrument's dynamic characteristic, test speed and test load was separated based on the uncertainty separation principle, and then the calculation model of the instrument's dynamic uncertainty was established. After that, the calculation model was verified by the actual examples. The calculation model of the instrument's dynamic uncertainty established could be used to predict the uncertainty of the measurement for contact angle under different conditions. With this help, the corresponding

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家“十二五”科研项目(D. 50-0109-15-001, D. 11-0109-13-080)

作者简介: 秦萃晟(1992—), 男, 硕士生, 主要研究方向为产品可靠性分析。

通讯作者: 沈雪瑾(1963—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为摩擦与润滑以及机械设计、试验与性能评估。
E-mail: shenxj@i. shu. edu. cn

引用格式: 秦萃晟, 沈雪瑾, 郭梦媛, 等. 球轴承接触角测量仪的动态不确定度[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8): 2025-2031. QIN Luosheng, SHEN Xuejin, GUO Mengyuan, et al. Dynamic uncertainty of the measuring instrument for ball bearings' contact angles[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 2025-2031.

calibration could be done on the measuring instrument in time to raise the precision of the measurement for ball bearing's contact angle.

Key words: ball bearing; measurement for contact angle; dynamic uncertainty; grey theory; uncertainty separation

角接触球轴承是航空机械不可或缺的组成部分,角接触球轴承的性能关系到航空机械的工作性能。角接触球轴承可同时承受径向负荷和轴向负荷,其接触角是衡量其性能优劣的一个重要参数^[1],它反映了轴承承受轴向载荷和径向载荷的能力,影响着轴承的承载能力、轴承刚度及轴系刚性^[2]。在对轴承接触角的测量过程中,不可避免地存在测试仪器、人为因素等相关局限,使得球轴承接触角测量仪的测量结果与实际真值存在偏差,即测量结果存在不确定性。

近年来,随着航天、工业生产领域对精确测量及测量结果的完整性、科学性要求日益提升,对测量系统、测量结果的不确定度评定得到了越来越多的重视^[3]。1993 年,由 ISO (International Standardization Organization) 第四顾问组起草了《测量不确定度表示指南》(Guide to the Uncertainty in Measurement, GUM),不同的学者和机构也给出了多种不同的不确定度评定计算模型^[4-6]。对测量系统、测量结果的不确定度评定也被大量应用在实际测量和工程应用中。Floor 等^[7]采用 GUM 所提出的评定方法及相应的计算软件,针对全反射 X 光线荧光测量的不确定度制定了评定流程和具体计算方法。Soler 等^[8]以钛合金切削热的温度测量的不确定度评定为例,建立了具体的分析流程,为其他金属的切削热温度测量的不确定度评定提供了参考。杜福洲等^[9]提出了基于协方差矩阵的位姿测量不确定度的解析算法,并验证了算法的有效性,从而在此基础上实现了基于位姿测量不确定度的飞机对接质量评估。张华等^[10]提出了对钢水连续测温系统的静、动态不确定度评定方法,使得钢水连续测温系统分别在实验室环境下和实际工况下都能够准确地获得评定测量的不确定度。王东霞等^[11]利用蒙特卡洛方法(MCM)对零件的圆度误差的不确定度作了评估,并指出 GUM 评定方法的适应范围较窄等缺陷。毛乾晖等^[12]依据相应的国家标准对冲击式气扳机噪声测量的不确定度进行了评定。凌明祥等^[13]基于精密离心机的加速度测量的测量模型,建立了加速度测量的不确定度传递模型,并采用 MCM 对精密离心机输出加速度测量的不确定度

进行了评定。朱建雄等^[14]在 LABView 软件平台上基于不同流量下的水泵效率测试结果的不确定度拟合出了高压水泵效率的动态不确定度曲线。

航空用角接触球轴承的性能已得到越来越多的关注。倪艳光等^[15]针对某航空发动机采用的薄壁角接触球轴承的负荷分布、刚度及寿命进行了分析。黄浩等^[16]在传统分析方法的基础上,对航空发动机所使用的角接触球轴承的刚度进行了分析。角接触球轴承的接触角是反映角接触球轴承性能优劣的重要指标,其大小受轴承的安装预紧、转速、载荷形式等因素的影响^[1,17]。在角接触球轴承接触角的测量过程中,如果只考虑工作转速、载荷、仪器精度中的某一个因素对接触角测量结果不确定度的影响,很难给出准确的球轴承接触角测量仪的动态不确定度。因此有必要在综合考虑诸影响因素的基础上对球轴承接触角测量仪测量结果的动态不确定度进行评定,即可为判断在展开后续测量工作前是否存在有校准仪器的必要提供依据,又可为后续不同工况下不同接触角的测量结果的不确定度评定提供参考。

1 球轴承接触角测量仪简介

测量轴承接触角使用的接触角测量仪由加载机构、驱动机构、定位机构、测量系统和工业计算机组成,系统框图如图 1 所示。

角接触球轴承接触角的测量采用间接测量方式,被测轴承安置在轴承座上,中空旋转平台带动轴承外圈旋转,定位机构夹紧轴承内圈。此时被测轴承可作为一个行星轮系看待,钢球在外圈的带领下绕自身的轴线自转,同时也绕着轴承轴线公转,保持架与外圈的转速比即为接触角 β 的函数,球轴承运动示意图如图 2 所示。

接触角 β 可通过式(1)计算^[18]

$$\beta = \arccos \left[\frac{D_{pw}}{D_w} \left(\frac{2n_c}{n_e} - 1 \right) \right] \tag{1}$$

式中 D_{pw} 为节圆直径, D_w 为钢球直径, n_c 为保持架转速, n_e 为外圈转速。

在球轴承接触角测量仪中,外圈转速和保持架转速被输入到工业计算机中,由计算机程序实现接触角的计算,并将测得的接触角大小输出在

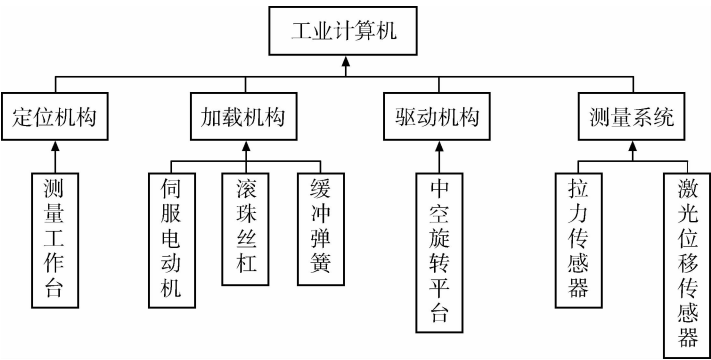


图 1 球轴承接触角测量仪系统框图

Fig. 1 System block diagram of the measuring instrument for ball bearings' contact angle

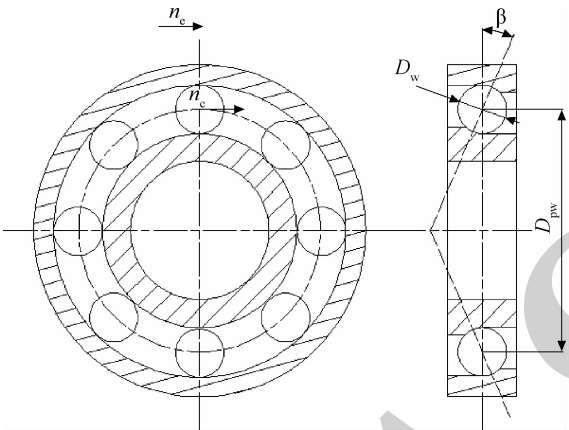


图 2 角接触球轴承运动示意图

Fig. 2 Motion sketch of angular ball bearing

显示器上。

2 动态不确定度的分离

文献[19]给出了动态测量的动态不确定度分离原理,指出动态测量结果的动态不确定度由与测量系统自身动态造成的内部不确定度和系统所处环境的外部不确定度构成,且两者对测量结果的不确定度是相互独立的,其关系式如式(2)所示。

u² = u_n² + u_w² (2)

式中 u 为测量系统的动态不确定度;u_n 为测量系统自身动态造成的内部不确定度;u_w 为系统所处环境的外部不确定度。参照上述原理,可以给出测量系统动态不确定度更具体的表达形式,如式(3)所示。

u² = u_n² + u_g² + u_s² (3)

式中 u_g 为测量工况引起的动态不确定度,u_s 为与工况、系统自身动态改变无关的不确定度,如人为因素等产生的不确定度。

在实际测量的过程中,测量结果的整体不确定度很容易得到,而它的每一个组成部分量则

很难通过测量试验直接得到。为了求取球轴承接触角测量仪的动态不确定度,可以采用先求取测量结果的不确定度,再从中分离出各动态因素分别引起的不确定度。

3 球轴承接触角测量仪动态不确定度模型的建立

3.1 测量结果的不确定度评定

GUM 所提出的方法在大样本量的情况下能够取得较准确的评价结果,但是由于试验条件等一系列因素的限制,具体的试验数据属于小样本的情况,如果仍然使用 GUM 提出的方法可能获得的评价结果的准确性就会下降。

目前,灰色理论被广泛应用于不确定的评估中。李强等[20]提出了一种用于压力传感器动态校准不确定度评价的灰色方法,并得到了精确的评估结果。文献[21]所提出的一种在小样本下基于灰色理论的评定方法可以在较小样本量的情况下得到较为准确的评估结果。设有一组测量数据序列 X = {x(k) | k = 1, 2, ..., n}, 其测量不确定度的评估步骤如下:

- 1) 将数据序列 X 按从小到大排列成序列 X₍₀₎。
- 2) 将序列 X₍₀₎ = {x₍₀₎(k) | k = 1, 2, 3..., n} 经一次累加生成后,生成新的数据序列 X₍₁₎
X₍₁₎ = {x₍₁₎(k) | k = 1, 2, ..., n} =
{x₍₀₎(1), x₍₀₎(1) + x₍₀₎(2), ...,
x₍₀₎(1) + x₍₀₎(2) + ... + x₍₀₎(n)}
3) 计算 Δ(k) = (x₍₁₎(n)/n)k - x₍₁₎(k)。
- 4) 选取 Δ = {Δ(k) | k = 1, 2, 3, ..., n} 中的最大值 Δ_{max}。
- 5) 测量结果的灰色标准差为

$$u_x = c \frac{\Delta_{\max}}{n} \tag{4}$$

式中 c 为灰色常系数。

6) 以测量均值为真值的测量不确定度为

$$u_x = c \frac{\Delta_{\max}}{n \sqrt{n}} \tag{5}$$

关于灰色常系数 c 的选取,文献[21]中已给出了参考取值,结合测量系统的测量结果的实际情况,取 $c=2.50$ 。

灰色理论通过累加生成的数据处理方法削弱了原始数据的随机性,有助于在数据样本量较小的情况下,寻求数据中的内在规律,适应范围较宽。同时,文献[21]也通过数值模拟的方法验证了在数据样本量较小的情况下,灰色理论评定的结果更接近理论值。因此,本文将采用灰色理论评定数据的不确定度。

3.2 测量结果的不确定度的分离

对测量结果的不确定度进行分离可以分为四个部分,即:测量系统自身动态造成的不确定度、轴承加载量所引起的不确定度、轴承外圈转速所引起的不确定度,以及与工况、系统自身动态改变无关的不确定度。系统的动态不确定度可以表示为

$$u^2(t,y,x) = u_n^2(t) + u_{gr}^2(y) + u_{gz}^2(x) + u_s^2 \tag{6}$$

式中 $u(t,y,x)$ 为测量系统的动态不确定度; $u_n(t)$ 为测量系统自身动态造成的不确定度,可以看成关于时间 t 的函数; $u_{gr}(y)$ 为轴承加载量所引起的不确定度,可以看成关于加载量 y 的函数; $u_{gz}(x)$ 为轴承外圈转速所引起的不确定度,可以看成关于外圈转速的设置值 x 的函数。

3.2.1 假定测量系统精度不变,只改变轴承的外圈转速

在这种情况下,由测量系统自身精度引起的不确定度以及由轴承加载量所引起的不确定度都可以被认为是常量,因此系统的动态不确定度可以表示为

$$u^2(x|y=y_{s1},t=t_{s1}) = u_n^2(t_{s1}) + u_{gr}^2(y_{s1}) + u_{gz}^2(x) + u_s^2 \tag{7}$$

式中 $u(x|y=y_{s1},t=t_{s1})$ 为测量系统在只改变外圈转速试验条件下的动态不确定度; $u_n(t_{s1})$ 为只改变外圈转速条件下的测量系统自身动态造成的不确定度,可视为定值; $u_{gr}(y_{s1})$ 为只改变外圈转速条件下由加载量所引起的不确定度,为某一定值。

令 $M = u_n^2(t_{s1}) + u_{gr}^2(y_{s1}) + u_s^2$,可以得到

$$u^2(x|y=y_{s1},t=t_{s1}) = u_{gz}^2(x) + M \tag{8}$$

由此可以看出此时测量系统的动态不确定度是关于外圈转速的函数。

3.2.2 假定测量系统精度不变,只改变轴承的加载量

同文中第 3.2.1 节,令 $N = u_n^2(t_{s2}) + u_{gz}^2(x_{s2}) + u_s^2$ 可以得到

$$u^2(y|x=x_{s2},t=t_{s2}) = u_{gr}^2(y) + N \tag{9}$$

式中 $u_n(t_{s2})$ 为只改变加载量下测量系统自身动态造成的不确定度, $u_{gz}(x_{s2})$ 为只改变加载量下轴承外圈转速所引起的不确定度。可以看出此时测量系统的动态不确定度是关于加载量 y 的函数。

3.2.3 保持轴承的加载量和外圈转速不变,测定系统精度损耗

同文中第 3.2.1 节,令 $L = u_{gr}^2(y_{s3}) + u_{gz}^2(x_{s3}) + u_s^2$,可以得到

$$u^2(t|x=x_{s3},y=y_{s3}) = u_n^2(t) + L \tag{10}$$

式中 $u_{gz}(x_{s3})$ 为测定系统精度损耗时轴承外圈转速所引起的不确定度, $u_{gr}(y_{s3})$ 为测定系统精度损耗时由加载量所引起的不确定度。

3.3 球轴承接触角测量仪的动态不确定度模型

在轴承的加载量、轴承的外圈转速均可变化的情况下,球轴承接触角测量仪的测量不确定度如式(6)所示。并且由式(8)、式(9)和式(10),知

$$u_{gz}^2(x) = u^2(x|y=y_{s1},t=t_{s1}) - M \tag{11}$$

$$u_{gr}^2(y) = u^2(y|x=x_{s2},t=t_{s2}) - N \tag{12}$$

$$u_n^2(t) = u^2(t|x=x_{s3},y=y_{s3}) - L \tag{13}$$

由于 $u^2(x|y=y_{s1},t=t_{s1})$ 是关于 x 的函数,令 $u_1^2(x) = u^2(x|y=y_{s1},t=t_{s1})$,同理,在式(12)中令 $u_2^2(y) = u^2(y|x=x_{s2},t=t_{s2})$,在式(13)中令 $u_3^2(t) = u^2(t|x=x_{s3},y=y_{s3})$ 。将式(11)、式(12)和式(13)代入式(6),得

$$u^2(t,y,x) = u_3^2(t) + u_2^2(y) + u_1^2(x) + u_s^2 - L - M - N \tag{14}$$

由于 u_s 是与工况、系统自身动态改变无关的不确定度,如人为因素等产生的不确定度,因此可视为常量,令 $E = u_s^2 - L - M - N$,代入式(14),可得

$$u^2(t,y,x) = u_3^2(t) + u_2^2(y) + u_1^2(x) + E \tag{15}$$

代入试验数据求得常量 E ,就可得球轴承接触角测量仪的动态不确定度计算模型。由于在测量过程中数据的测量结果可能会存在随机误差,因此,对每一组数据点求得的常量值 E 取平均值作为其期望值。

4 球轴承接触角测量仪的动态不确定度评定

试验所使用的球轴承接触角测量仪的采样时间保持不变,因此在测量系统自身引起的动态不确定度方面,这里只考虑测量系统随时间的精度损耗;在测量工况方面,由于该测量系统可以改变轴承外圈的转速以及轴承的加载量,因此从这两个方面来考虑测量工况的动态影响。

由于所评定的仪器的动态不确定度同时受多个动态因素的影响,因此,试验的方法采用控制变量法,即只改变一个动态因素,控制另两个动态因素在试验时保持不变进行试验。

4.1 测量试验方案

试验对象为 7000 型航空仪表用角接触球轴承,球轴承接触角测量仪的采样时间设定为 19 s。

表 1 轴承加载量改变下的接触角测量不确定度(外圈转速:60 r/min)

Table 1	Uncertainty of measurement for the contact angle under different loads on the bearing (speed: 60 r/min)					
加载量/N	10	15	20	25	30	35
测量不确定度/(°)	0.103	0.101	0.102	0.103	0.109	0.109

表 2 轴承外圈转速改变下的接触角测量不确定度(加载量:20 N)

Table 2	Uncertainty of measurement for the contact angle under different speeds of the bearing (load: 20 N)			
外圈转速/(r/min)	40	50	60	70
测量不确定度/(°)	0.154	0.156	0.102	0.123

表 3 球轴承接触角测量仪精度损耗引起的接触角测量不确定度(外圈转速:60 r/min,加载量:20 N)

Table 3 Uncertainty of measurement for the contact angle caused by the precision loss of the instrument (speed: 60 r/min, load: 20 N)											
测量组数	1	5	10	15	20	25	…	105	110	115	120
测量不确定度/(°)	0.103	0.080	0.123	0.096	0.087	0.105	…	0.198	0.158	0.162	0.146

4.3 各动态因素产生的影响分析

通过采用多项式拟合的方法分别对表 1、表 2、表 3 中的数据进行拟合,可以得到测量结果不确定度随轴承的加载量及外圈转速的关系如式(16)、式(17)、式(18)所示。

外圈转速在 40~70 r/min 之间的测量不确定度变化曲线

$$u_1^2(x) = (6.903 \times 10^{-6} x^3 - 1.124 \times 10^{-3} x^2 + 0.05913x - 0.9594)^2 \tag{16}$$

外圈轴承加载量在 10~35 N 之间的测量不确定度变化曲线

$$u_2^2(y) = (-7.027 \times 10^{-7} y^3 + 3.713 \times 10^{-5} y^2 - 1.183 \times 10^{-3} y + 0.03975)^2 \tag{17}$$

假定在测量试验开展初期,测量系统的精度保持不变,对轴承外圈的转速以及轴承的加载量这两个动态因素进行测量试验。试验采用控制变量的方法进行,通过每一次试验只改变两个因素中的一个,进行一次试验,每次试验测量 10 个数据,取其平均值作为测量真值,并进行分析。

在完成了对轴承外圈的转速以及轴承的加载量这两个动态因素的试验之后,再保持转速和加载量不变,对测量系统进行长时间的测量试验,每 10 组测量数据作为一次测量,获取试验数据,测量 120 组。

4.2 试验结果

利用文中第 4.1 节的试验方案进行试验,对所获得的试验数据使用灰色理论进行分析,求得测量结果的不确定度,获得的分析结果如表 1~表 3 所示。

球轴承接触角测量仪精度损耗对测量不确定度的影响

$$u_3^2(t) = (-4.006 \times 10^{-8} t^3 + 5.588 \times 10^{-6} t^2 + 6.198 \times 10^{-5} t + 0.03222)^2 \tag{18}$$

4.4 不确定度评定结果

将文中第 4.3 节中式(16)~式(18)代入式(15)并计算得到常量值 E ,就可得到在采样时间为 19 s 下,针对 7000 型轴承的球轴承接触角测量仪的动态不确定度计算式

$$u(t,y,x) = \sqrt{u_3^2(t) + u_2^2(y) + u_1^2(x) - 2.081 \times 10^{-3}} \tag{19}$$

4.5 测量结果的扩展不确定度

假设球轴承接触角测量仪的测量结果服从正态分布,球轴承接触角测量仪的测量结果的置信概率取95.45%时,依照文献[22]所给出的包含因子 K 与置信概率 P 的对应表, K 应取2。由此,测量结果的扩展不确定度可以表示为

$$u_K = Ku(t,y,x) = 2u(t,y,x) \tag{20}$$

表 4 第 123 组和第 132 组的接触角测量结果

Table 4 Measurement values for the contact angle of the 123rd set and 132nd set (°)										
测量组	测量次数									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
123	16.614	16.359	16.319	16.139	16.457	16.167	16.383	16.558	16.174	16.431
132	16.173	16.558	16.403	16.189	16.166	16.568	16.298	16.388	16.405	16.329

表 5 第 123 组和第 132 组接触角测量结果的不确定度
(置信概率:95.45%)

Table 5 Uncertainty measurement for the contact angle of 123rd set and 132nd set (confidence probability: 95.45%)			
不确定度	测量值	式(20)计算结果	相对误差/%
$u_K^{123}/(^{\circ})$	0.1018	0.0922	9.43
$u_K^{132}/(^{\circ})$	0.0924	0.0832	9.96

通过表 5 的结果可知,由式(20)计算的第 123 组测量结果的不确定度 u_K^{123} 和第 132 组测量结果的不确定度 u_K^{132} 相对灰色理论评定结果的误差分别为 9.43%,9.96%,说明通过计算式(20)能够较好地预测未来时间段的接触角的测量不确定度。

计算式(20)的结果与实际测量结果之间存在误差的原因可能是由于球轴承接触角测量仪精度损耗曲线的拟合误差、轴承外圈转速曲线的拟合误差、轴承加载量曲线的拟合误差等多种因素共同造成的。

5 结 论

1) 使用灰色理论对小样本测量数据的不确定度进行评定,分析影响测量结果的动态因素,并结合不确定度分离原理建立动态不确定度计算模型。

2) 采用控制变量的试验方法,综合考虑了轴承外圈转速、加载力以及仪器自身精度变化对接触角测量结果的影响规律,并结合动态不确定度计算模型给出计算公式,得到接触角测量的动态不确定度 $u(t,x,y)$ 。

4.6 动态不确定度计算公式的验证

在完成了试验方案中的试验工作后,继续使用球轴承接触角测量仪进行测量工作。第 123 组测量和第 132 组测量的接触角结果如表 4 所示,其测量工况:外圈转速为 60 r/min,相应的加载量为 20 N。不确定度评定结果如表 5 所示。

3) 模型计算公式能较好地预测后续测量结果的不确定度,从而验证了模型计算公式的可行性。在进行后续测量工作之前可以先通过模型计算公式预测后续测量结果的不确定度,进而判断在展开后续测量工作前是否存在校准仪器的必要。

参考文献:

[1] 唐云冰,高德平,罗贵火.航空发动机高速滚珠轴承力学特性分析与研究[J].航空动力学报,2006,21(2):354-360.
TANG Yunbing,GAO Geping,LUO Guihuo. Research of aero-engine high-speed ball bearing[J]. Journal of Aerospace Power,2006,21(2):354-360. (in Chinese)

[2] 吉冰旭,苏军伟,王长兴.球轴承接触角测量原理分析[J].轴承,2010(10):48-50.
JI Bingxu,SU Junwei,WANG Changxing. Analysis of measuring principle of ball bearings' contact angle[J]. Bearing,2010 (10):48-50. (in Chinese)

[3] 赵志刚.动态测量不确定度理论的拓展及其应用研究[D].北京:清华大学,2009.
ZHAO Zhigang. Extension research on the theory and application of dynamic uncertainty [D]. Beijing: Tsinghua University,2009. (in Chinese)

[4] DIECK R H. Measurement uncertainty models [J]. ISA Transactions,1997,36(1):29-35.

[5] Bureau International des Poids et Mesures, International Electrotechnical Commission, International Organization for Standardization, et al. JCGM100:2008 Guide to the expression of uncertainty in measurement[S]. Paris: Bureau International des Poids et Mesures,2008.

[6] CODEE Z. Standard uncertainty in each measurement result explicit or implicit[J]. Measurement,1997,20(2):97-101.

[7] FLOOR G H, QUERALT I, HIDALGO M, et al. Measurement uncertainty in total reflection X-ray fluorescence [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy

2015,111:30-37.

[8] SOLER D,ARISTIMUÑO P,GARAY A,et al. Uncertainty of temperature measurements in dry orthogonal cutting of titanium alloys[J]. Infrared Physics and Technology, 2015,71:208-216.

[9] 杜福洲,吴璞. 基于位姿测量不确定度的飞机对接质量评估[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(1):73-77. DU Fuzhou, WU Pu. Quality evaluation method for aircraft large components joining based on position and orientation measurement uncertainty[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2013,39(1):73-77. (in Chinese)

[10] 张华,谢植. 钢水连续测温系统的静、动态不确定度评定[J]. 计量学报,2007,28(4):329-332. ZHANG Hua,XIE Zhi. Static and dynamic uncertainty evaluation of continuous temperature measurement system for liquid steel[J]. Acta Metrologica Sinica,2007,28(4):329-332. (in Chinese)

[11] 王东霞,宋爱国. 基于三坐标测量机的圆度误差不确定度评估[J]. 东南大学学报(自然科学版),2014,44(5):952-956. WANG Dongxia,SONG Aiguo. Uncertainty assessment of circularity error based on coordinate measuring machine [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2014,44(5):952-956. (in Chinese)

[12] 毛乾晖,惠伟安,路波,等. 冲击式气扳机噪声测量不确定度研究[J]. 液压气动与密封,2014,34(3):28-31. MAO Qianhui, HUI Weian, LU Bo, et al. Study of noise measurement uncertainty for pneumatic impact wrench [J]. Hydraulics Pneumatics and Seals,2014,34(3):28-31. (in Chinese)

[13] 凌明祥,黎启胜,张容,等. 10^{-6} 量级精密离心机输出加速度测量模型及不确定度评定[J]. 光学精密工程,2015,23(8):2306-2317. LING Mingxiang, LI Qisheng, ZHANG Rong, et al. Acceleration measurement model and uncertainty evaluation of 10^{-6} order precision centrifuge[J]. Optics and Precision Engineering,2015,23(8):2306-2317. (in Chinese)

[14] 朱建雄,刘申友,涂然,等. 高压水泵效率测试系统的动态不确定度评定[J]. 仪器仪表学报,2009,30(6):77-81. ZHU Jianxiong, LIU Shenyong, TU Ran, et al. Dynamic uncertainty evaluation for efficiency of high-pressure water pump system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(6):77-81. (in Chinese)

[15] 倪艳光,刘万强,邓四二,等. 计及套圈变形的薄壁角接触球轴承性能分析[J]. 航空动力学报,2010,25(6):1432-1436. NI Yanguang, LIU Wanqiang, DENG Sier, et al. Performance analysis of thin-wall angular contact ball bearings considering the ferrule deformation[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(6):1432-1436. (in Chinese)

[16] 黄浩,张鹏顺,温建民. 航空发动机角接触球轴承刚度的一种使用分析方法[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(4):422-427. HUANG Hao, ZHANG Pengshun, WEN Jianmin. An analytical method of stiffness for angular contact ball bearing of aero engine[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000,32(4):422-427. (in Chinese)

[17] HARRIS T A, KOTZALAS M N. 滚动轴承分析[M]. 5版. 罗继伟,马伟,译. 北京:机械工业出版社,2010.

[18] 顾大强,马家驹. 轴承接触角测量仪[J]. 机电工程,1996(3):16-17. GU Daqiang, MA Jiaju. The measurement instrument for the ball bearing contact angle[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering,1996(3):16-17. (in Chinese)

[19] 蓝鲲鹏,陆寿茂,闫俊武,等. 动态测量的不确定度分离原理[J]. 遥测遥控,2001,22(5):49-53. LAN Kun, LU Shoumao, YAN Junwu, et al. Uncertainty separation of dynamic measurement[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command,2001,22(5):49-53. (in Chinese)

[20] 李强,王中宇,王卓然. 压力传感器动态校准不确定度评定[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(5):847-856. LI Qiang, WANG Zhongyu, WANG Zhuoran. Uncertainty evaluation for the dynamic calibration of pressure transducer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2015,41(5):847-856. (in Chinese)

[21] 王中宇,夏新涛,朱坚民. 非统计原理及其工程应用[M]. 北京:科学出版社,2005.

[22] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059. 1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京:中国质检出版社,2013.

(编辑:陈 越)