

文章编号: 2095-4980(2019)05-0892-06

# 精密离心机动态半径的测试与数据分析

牛宝良, 宁 菲

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 精密离心机动态半径是影响其输出加速度精确度的主要因素。为获得精密离心机的动态半径变化规律及影响因素, 基于外基准法采用高精度电容测微仪测试不同转速下的动态半径。基于转速不变时动态半径是直流分量的假定, 对测试的数据进行分析, 获得该离心机的动态半径随加速度变化规律为  $0.011\ 482\ \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$  和精密离心机转盘形状误差。分析数据可为精密离心机工作半径的修正及补偿提供依据。

**关键词:** 精密离心机; 动态半径; 形状误差

**中图分类号:** TN911.7; TH824.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201905.0892

## Dynamic radius measurement and data analysis of precision centrifuge

NIU Baoliang, NING Fei

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** The dynamic radius is one of the main factors contributing to the uncertainty of the precision centrifuge. To study the dynamic radius relation with the acceleration and the influence factors, a measurement system using capacitance detectors, which is mounted off-board, is utilized to measure the dynamic radius at different rotation speeds. Based on an assumption that dynamic radius is Direct Current(DC) component in measured data at a fixed rotation speed, the measured data is analyzed and a change rate of  $0.011\ 482\ \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$  for dynamic radius with acceleration is obtained, as well as the turntable shape error. These results could help to modify and compensate the dynamic radius of the precision centrifuge.

**Keywords:** precision centrifuge; dynamic radius; shape error

精密离心机主要用于标定高精度加速度计、高精度陀螺仪等惯性器件, 其输出加速度精确度直接影响标定精确度。目前, 国内外精密离心机输出加速度相对标准不确定度可达  $10^{-6}$  量级<sup>[1]</sup>。影响精密离心机不确定度的因素较多<sup>[2]</sup>, 包括工作半径<sup>[3-14]</sup>、回转误差<sup>[7]</sup>、转速稳定度<sup>[8]</sup>等, 工作半径的精确测量及补偿是研制高精度精密离心机的难点。通常将工作半径分为静态半径和动态半径, 静态半径为固定量, 动态半径则为与转速有关的变化量。当精密离心机转速变化时, 转臂或转盘将发生变形并导致工作半径变化, 理论分析<sup>[1]</sup>与实测数据<sup>[3]</sup>表明不同转速下工作半径变化可达  $10\ \mu\text{m}$  量级。以半径约为  $1\ \text{m}$  的精密离心机为例, 动态半径改变  $10\ \mu\text{m}$  将导致加速度相对变化  $10\ \text{ppm}$ , 这对于  $10^{-6}$  等级的精密离心机而言不可忽略。

动态半径多采用外基准测量法<sup>[3]</sup>。为获取转盘式精密离心机动态半径变化规律, 本文采用外基准测量法, 利用高精度电容测微仪对不同转速下的精密离心机动态半径开展测试, 利用 Matlab 对测试数据进行整周期采样, 结合频域分析法和线性拟合法获取动态半径的变化规律, 为精密离心机工作半径修正及补偿提供依据。

## 1 测试方法

### 1.1 测量系统

动态半径测量系统如图 1 所示, 高精度电容测微仪安装在转盘外侧, 输出信号经调理后送到数据采集系统。为了获得精密测量, 选择米铱小量程的电容测微仪 CS02, 其分辨力为  $10\ \text{nm}$ , 频响为  $8.5\ \text{kHz}$ , 量程达

收稿日期: 2016-03-16; 修回日期: 2018-05-11

基金项目: 国家重大科学仪器专项基金资助项目(2011YQ130047)

250  $\mu\text{m}$ 。安装电容测微仪的探头时，应仔细调整，既要防止太远超量程又要防止传感器碰上转盘导致传感器的损坏。

## 1.2 测量原理

电容位移传感器获得的数据是前端探头到转盘外圆的距离。理想的情况是在转速稳定时，测量的数据是一个直流信号，转速提高，转盘胀大，直流信号的值变小。实际获得的数据远不是这样，呈现出复杂的波形。初步分析可知，电容位移计得到的信号包含：转盘

胀大(动态半径)、外圆的形状误差+表面粗糙度、转盘径向晃动。温度也会导致转盘胀大，但是精密离心机的温度得到很好的控制，忽略温度影响。基于经验，做出如下的假定：

- 盘胀大(动态半径)，是直流分量，理论上，其大小随着离心加速度线性增加；
- 转盘外圆的形状误差+表面粗糙度，可以产生宽频的信号；不随离心机转速而变；
- 转盘径向晃动、离心机轴回转误差，因转盘自身的质量较大，在没有强的高频作用力存在的条件下，应该是低频信号。

根据实测数据及以上假定，分析关转速下的动态半径，以及动态半径随转速的变化规律。

## 2 数据分析

### 2.1 动态半径

共测量了从 6~280 rpm 范围内的 9 个转速下的动态半径数据。210 rpm 及以下用 5 000 Hz 采样，225 rpm 及以上是用 8 000 Hz 采样。每种转速下都采集 2 圈以上的数据。

通过观察，电容测微仪测试数据呈现明确的周期性。对于周期性数据，计算其均值，分析其频谱，截取 1 个或几个整周期进行分析是最准确的，为简便，这里都是截取 1 个整周期。

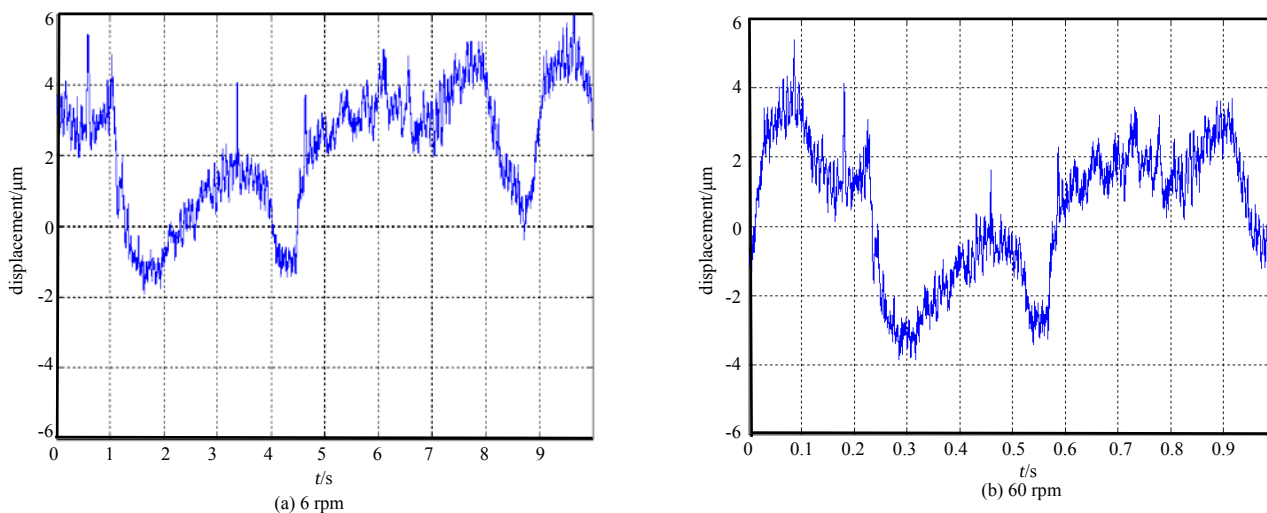


Fig.2 Displacement at 6rpm and 60 rpm

图 2 6 rpm 和 60 rpm 下的位移

6 rpm, 60 rpm 时的位移测量原始数据的波形如图 2 所示。6 rpm 一个周期的均值即 DC 分量为 426.862  $\mu\text{m}$ 。6 rpm 时，加速度仅为 0.394 78  $\text{m/s}^2$ ，可以近似认为此时的转盘胀大量为 0。由于测量位移与半径增长是相反的(传感器探头在转盘外，转盘半径越大，测得的位移越小)，所以转盘半径增量的 DC 分量=426.862-各转速下的位移传感器位移 DC 分量。计算的各转速下的位移 DC 分量见表 1 第 3 列。对应的曲线见图 3。

表 1 动态半径数据  
Table1 Dynamic radius data

| speed/rpm | acceleration/(m·s <sup>-2</sup> ) | DC component/ $\mu\text{m}$ | fitted dynamic radius/ $\mu\text{m}$ |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 6         | 0.394 78                          | 0                           | 0.004 533                            |
| 60        | 39.478 00                         | -1.689 00                   | 0.453 270                            |
| 120       | 157.910 00                        | -0.166 55                   | 1.813 000                            |
| 150       | 246.740 00                        | 0.926 92                    | 2.833 000                            |
| 180       | 355.310 00                        | 2.026 50                    | 4.079 500                            |
| 210       | 483.610 00                        | 3.452 50                    | 5.552 600                            |
| 225       | 555.170 00                        | 23.254 00                   | 6.374 200                            |
| 253       | 701.940 00                        | 25.201 00                   | 8.059 300                            |
| 280       | 859.750 00                        | 26.974 00                   | 9.871 200                            |

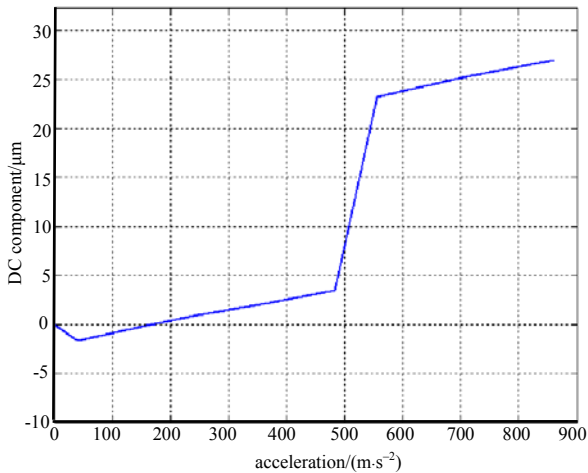


Fig.3 DC component varying with acceleration  
图 3 DC 分量随加速度变化曲线

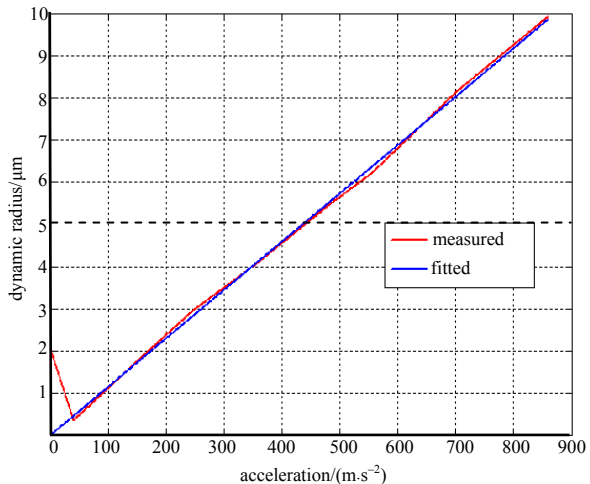


Fig.4 Dynamic radius varying with acceleration  
图 4 拟合后动态半径随加速度的变化曲线

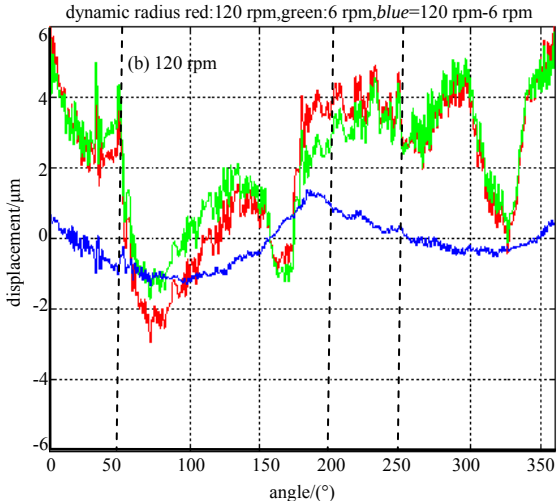
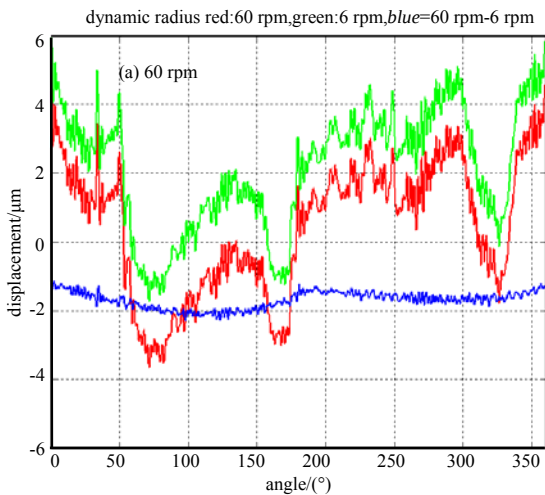
图 3 有两个问题：一是 60 rpm 时，动态半径为负，相比 6 rpm 变小，不符合物理规律(随着离心加速度增加，转盘半径不可能减小，只可能增加)，应予修正；二是 225 rpm 以上的 3 个数据，相比 180 rpm 以下 5 个数据，成量级增加，也不符合物理规律(随着离心加速度增加，转盘半径不可能跳变式增加)。

但是 225 rpm 以上的 3 个点的斜率与 180 rpm 以下 5 个数据斜率基本相同。拟合 180 rpm 以下除 6 rpm 以外的各点数据，得到斜率为  $0.011\,482\,\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 。考虑到理论上 0 加速度动态半径应该为 0，得到动态半径公式：

$$\Delta R = 0.011\,482a$$

式中： $a$  为圆盘外圆处的离心加速度，单位为  $\text{m}/\text{s}^2$ ； $\Delta R$  为动态半径，单位为  $\mu\text{m}$ 。

根据动态半径公式计算的动态半径见表 1 第 4 列，相应的曲线见图 4 的粗线。把图 3 中的前半部分抬高，把后半部分降低，绘于图 4(红线)，基本与图 4 中的粗线(蓝线)(拟合的动态半径曲线)一致。但是，6 rpm 时的动态半径为  $2.1\,\mu\text{m}$ ，这个数据应引起注意。



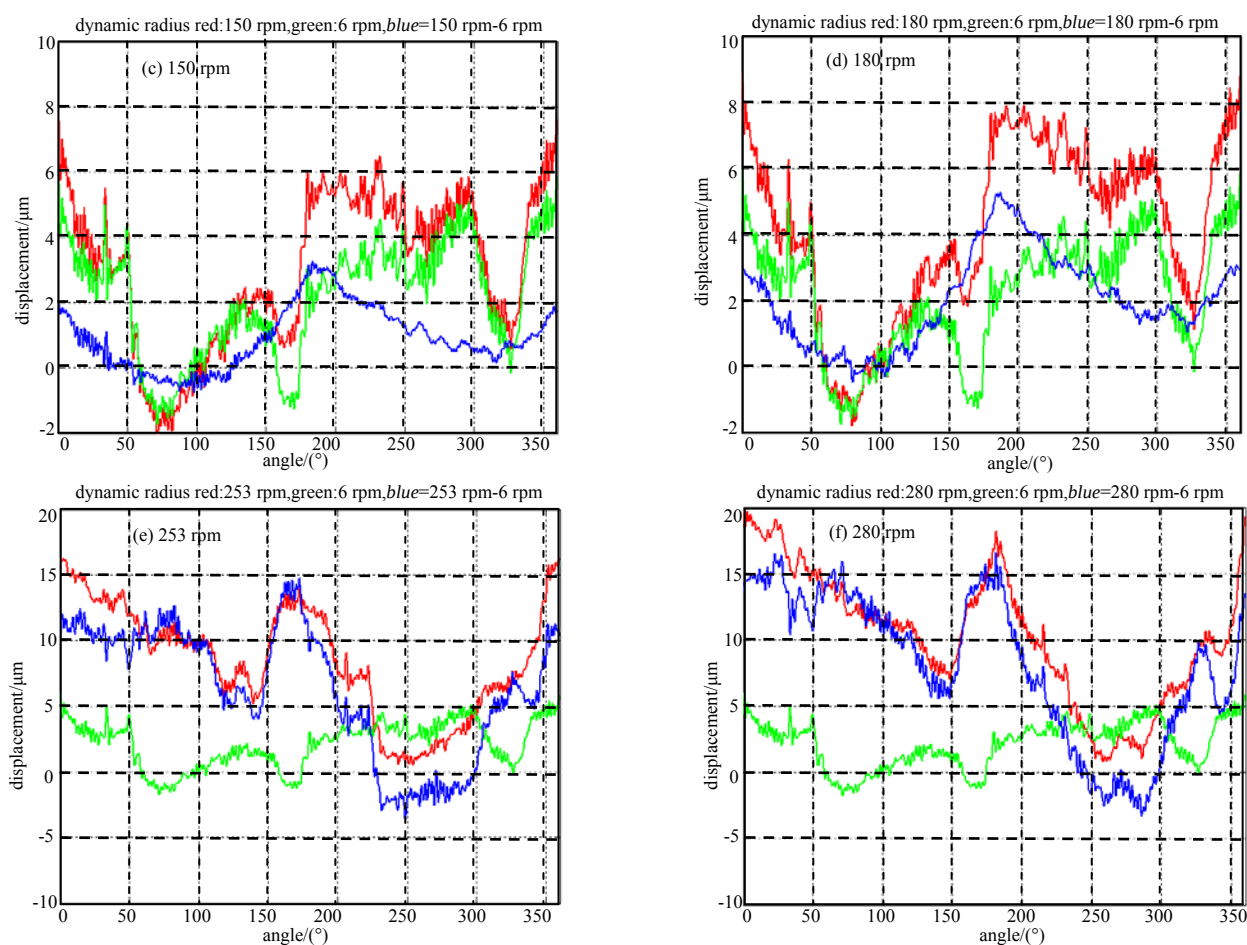


Fig.5 Dynamic radius and the difference of dynamic radius subtracting 6 rpm

图 5 动态半径波形及减去 6 rpm 波形的波形

## 2.2 转盘形状

从位移波形看, 180 rpm 以下不同转速下的位移波形有很高的相似性, 图 5(a)给出了 6 rpm 和 60 rpm 下动态半径波形及两者的差, 图 5(b)~(d)给出了 120 rpm, 150 rpm, 180 rpm 下动态半径波形及它们与 6 rpm 位移波形的差。转盘的形状不随转速变化。可以把不随转速变化的部分看作转盘的形状。6 rpm 以下其他误差的影响小, 如图 6 所示。不妨把 6 rpm 以下的波形交流分量看作转盘形状误差。以极坐标绘制, 如图 7 所示。为显示效果, 转盘半径不按比例绘制。

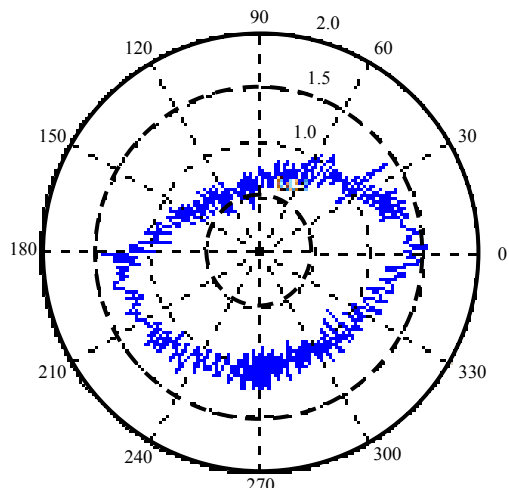


Fig.6 Other error

图 6 其他误差

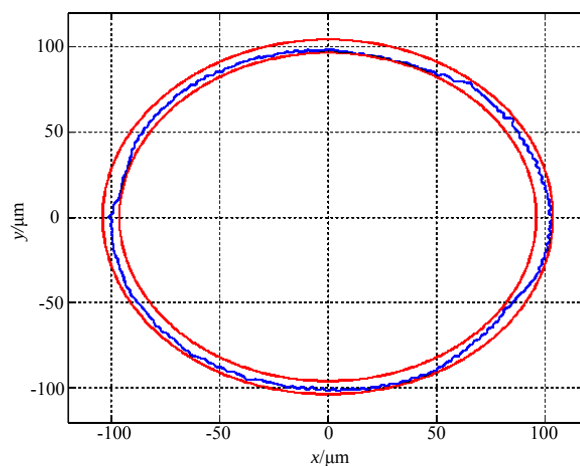


Fig.7 Shape error of disc

图 7 转盘的形状误差

### 2.3 其他误差

把 6 rpm 下的位移波形当作转盘的形状误差,那么位移波形减去形状误差,即其他误差,其主要成分可能是轴的晃动。从图 5 的前 4 个波形看,其他误差呈现“W”形,而且随着转速增加,幅度加大,这是偏心引起的。但是到 240 rpm 以上,其他误差有明显的变化。图 5(e)和图 5(f)给出了 253 rpm、280 rpm 以下的其他误差波形,逐渐偏离“W”形,幅度明显增大。考虑到此时转速大,振动增加,是振动引起其他误差的增加,具体是轴的晃动还是传感器支架的振动引起,无法判断,但这是一个值得关注和分析的现象。

### 3 结果与讨论

通过整周期重采样、DC 分量计算、反向,得到了 DC 分量随加速度变化的曲线,这条曲线并非理想的一条直线,选取其中的一段直线,拟合动态半径与加速度的关系,得到适用于 60~210 rpm( $39.478\sim 483.61\text{ m/s}^2$ )的动态半径公式。在更高转速下,实测的 DC 分量高出很多,动态半径不真实,由于没有更多信息支持,只能给出可能的原因:传感器位置变动、数采系统直流偏置(后面这 3 个转速是用 8 000 Hz 采样频率,见 2.1 节)。

### 4 结论

对测量的精密离心机动态半径数据进行了分析,获得了动态半径随加速度变化的规律,可用于精密离心机半径修正。获得了转盘的形状误差。还对去除转盘形状误差的其他误差项进行了初步分析。在 210 rpm 以下,其他误差呈现“W”形,幅度也比较小,在更高转速下,其他误差幅值不再呈现“W”形,提示有其他因素进入,需进一步研究。实测的动态半径数据成分复杂,本文基于经验和对物理规律的认识,采取了合适的分析方法对数据进行分析,获得了动态半径、转盘形状误差等。分析方法可供相关测量参考。

#### 参考文献:

- [1] IEEE Std 836TM-2009. IEEE recommended practice for precision centrifuge testing of linear accelerometers[S]. 2009.
- [2] 吴付岗,王军. 精密离心机加速度载荷模型研究[J]. 机械工程学报, 2010,46(18):36-40. (WU Fugang,WANG Jun. Research on acceleration load model of precision centrifuge[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(18):36-40.)
- [3] 刘健. 线加速度模拟转台—离心机动态半径测试的研究[D]. 天津:天津大学, 2007. (LIU Jian. Study on test method of dynamic radius of linear acceleration analogue revolving table—precision centrifuge[D]. Tianjin,China:Tianjin University, 2007.)
- [4] 凌明祥,李明海,杨新,等. 高精度精密离心机静态半径测量方法与应用[J]. 仪器仪表学报, 2014,35(5):1072-1078. (LING Mingxiang,LI Minghai,YANG Xin,et al. Measurement method for static radius of high precision centrifuge and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014,35(5):1072-1078.)
- [5] 陈希军,孙群学,任顺清. 离心机大臂动态半径长度的测量[J]. 宇航计测技术, 2002,22(2):10-13. (CHEN Xijun,SUN Qunxue,REN Shunqing. Measurement of centrifuge arm's dynamic radius length[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2002,22(2):10-13.)
- [6] 贺忠江,贺忠海,孙浩. 基于Labview的加速度计离心试验动态半径测量方法[J]. 计测技术, 2010,30(2):27-31. (HE Zhongjiang,HE Zhonghai,SUN Hao. Dynamic radius measuring system in centrifuge test of accelerometer based on Labview[J]. Journal of Metrology and Measurement, 2010,30(2):27-31.)
- [7] 周继昆,张荣,张毅,等. 基于PXI的空气主轴回转及倾角误差测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2015,23(8):2662-2664. (ZHOU Jikun,ZHANG Rong,ZHANG Yi,et al. Design of air spindle rotary and tilt error test system based on PXI[J]. Computer Measurement & Control, 2015,23(8):2662-2664.)
- [8] 龚俊亮,葛文奇,李晗. 采用线加速度计的转速测量新方法[J]. 仪表技术与传感器, 2010(10):75-76. (GONG Junliang,GE Wenqi,LI Han. New method for rotating speed measurement using linear accelerometer[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(10):75-76.)
- [9] 国家质量监督检验检疫总局 JJG1066-2011. 精密离心机检定规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2011. (State Administration for Market Regulation. JJG1066-2011 Verification regular of precision centrifuge[S]. Beijing:Standards Press of China, 2011.)
- [10] 王世明,任顺清. 精密离心机误差对石英加速度计误差标定精度分析[J]. 宇航学报, 2012,33(4):520-526. (WANG Shiming,REN Shunqing. Relationship between calibration accuracy of error model coefficients of accelerometer and errors of precision centrifuge[J]. Journal of Astronautics, 2012,33(4):520-526.)
- [11] 张荣,王珏,周继昆,等. 精密离心机动态半径的定位测量技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2016,24(7):49-51,55.

- (ZHANG Rong,WANG Jue,ZHOU Jikun,et al. Research on positioning measurement technique of dynamic radius of precision centrifuge[J]. Computer Measurement & Control, 2016,24(7):49-51,55.)
- [12] 熊磊,何懿才,龙祖洪,等. 精密离心机不确定度分析与应用[J]. 航空计测技术, 2003,23(6):36-37. (XIONG Lei,HE Yicai, LONG Zuhong,et al. Uncertainty analysis and application of precise centrifuge[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2003,23(6):36-37.)
- [13] 陈希军,任顺清,李巍. 加速度计高阶误差模型系数的标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2010(4):508-512. (CHEN Xijun,REN Shunqing,LI Wei. Calibrating method for high-order coefficients in accelerometer error model[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010(4):508-512.)
- [14] 尹小恰. 精密离心机工作半径的测试方法与误差分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013. (YIN Xiaoqia. The measurement method and error analysis for the working radius of precision centrifuge[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2013.)

#### 作者简介:

牛宝良(1963-), 男, 陕西省眉县人, 研究员, 主要从事环境试验与相关设备研发.email:niubaoliang@163.com.

宁菲(1985-), 女, 南昌市人, 硕士, 工程师, 主要从事传感器测试研究.

(上接第 891 页)

- [17] DRAKE J,HAMERLY G. Accelerated  $k$ -means with adaptive distance bounds[C]// Proceedings of the Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI). Melbourne,Australia:IEEE, 2017:42-53.
- [18] DING Y,ZHAO Y,SHEN X,et al. Yinyang  $k$ -means: a drop-in replacement of the classic  $k$ -means with consistent speedup[C]// Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning. Sydney,NSW,Australia:IEEE, 2017:579-587.
- [19] GÓMEZ-TOSTÓN C,BARRENA M,CORTÉS Á. Characterizing the optimal pivots for efficient similarity searches in vector space databases with Minkowski distances[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018(328):203-223.
- [20] XU M,NIU J,LIN Y. An efficient method for fractional nonlinear differential equations by quasi-Newton's method and simplified reproducing kernel method[J]. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2018,41(1):5-14.
- [21] ZHENG L,YANG Y,TIAN Q. SIFT meets CNN: a decade survey of instance retrieval[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018,40(5):1224-1244.
- [22] TORRALBA A,FERGUS R,FREEMAN W T. 80 million tiny images: a large data set for nonparametric object and scene recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008,30(11):1958-1970.
- [23] 赵小强,岳宗达. 基于局部二进制模式和图变换的快速匹配算法[J]. 电子学报, 2017,45(9):2156-2161. (ZHAO Xiaoqiang,YUE Zongda. A fast matching algorithm based on local binary patterns and graph transformation[J]. Acta Electronica Sinica, 2017,45(9):2156-2161.)
- [24] LU X,ZHENG X,LI X. Latent semantic minimal hashing for image retrieval[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017,26(1):355-368.

#### 作者简介:



马俊宏(1979-), 男, 山西省平陆县人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为数据挖掘、大数据处理.email:1642698856@qq.com.

武丽芬(1978-), 女, 太原市人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为数据挖掘、云计算.