

精密离心机静态半径测量不确定度的 温度特性分析

刘师辉, 陈文颖, 付兴

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 研究温度对精密离心机静态半径测量不确定度的影响。**方法** 以静态半径测量反算法为基础, 推导静态半径测量不确定度的温度特性模型, 设计精密恒温装置, 并进行试验, 获取加速度计在1g离心场下不同温度时的输出数据, 并进行分析。**结果** 基于温度特性模型, 确定了影响静态半径测量不确定度的主要因素。试验数据结果表明, 在加速度计工作范围内(50~60℃), 静态半径测量不确定度随温度递增呈现“先增后减”的分布规律, 且在50℃时进入到了 10^{-7} 量级。**结论** 加速度计的温度敏感性是影响静态半径测量不确定度的最主要因素, 精密控温能显著提高静态半径测量精度。

关键词: 精密离心机; 静态半径; 反算法; 测量不确定度; 温度

中图分类号: TH824

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)07-0115-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.015

Temperature Characteristics of Uncertainty of Static Radius Measurement of Precision Centrifuge

LIU Shi-hui, CHEN Wen-ying, FU Xing

(Institute of System Engineering, CAEP, Sichuan Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: This paper is intended to research the influence of temperature on the uncertainty of static radius measurement of precision centrifuge. Based on back calculation methods of static radius measurement, a mathematical model was deduced, a precision constant temperature device was designed, to obtain the output data of the accelerometer at different temperatures in a 1g centrifugal field. Based on the temperature characteristic model, the key factors affecting the uncertainty of static radius measurement were determined. The test data analysis results showed that, within the recommended operating range of the accelerometer (50~60℃), the uncertainty of static radius measurement showed a distribution law of “increasing first and then decreasing” with increasing temperature, and entered the order of 10^{-7} magnitude at 50℃. The temperature sensitivity of the accelerometer is the most important factor affecting the uncertainty of static radius measurement. Precision temperature control is an important means to improve the static radius measurement accuracy.

KEY WORDS: precision centrifuge; static radius; back calculation methods; measurement uncertainty; temperature

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-04-21

Received: 2021-03-31; Revised: 2021-04-21

作者简介: 刘师辉(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为精密离心机标校与控制。

Biography: LIU Shi-hui (1993-), Male, Master, Assistant engineering, Research focus: calibration and control of precision centrifuge.

引文格式: 刘师辉, 陈文颖, 付兴. 精密离心机静态半径测量不确定度的温度特性分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 115-120.

LIU Shi-hui, CHEN Wen-ying, FU Xing. Temperature Characteristics of Uncertainty of Static Radius Measurement of Precision Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 115-120.

精密离心机是用于陀螺仪等惯性器件标校的重要仪器设备^[1-2]，其静态半径测量精度直接关系到精密离心机输出加速度的准确性^[3-4]，进而影响惯性仪表的标校精度^[5]。目前在役的 0.001 准确度等级的精密离心机对静态半径测量不确定度的要求仅在 10^{-5} 量级^[6]，但对于未来更高准确度等级(0.000 1 及以上)的精密离心机，其对静态半径测量不确定度的需求已提升至 10^{-7} 或更高量级^[7]。

反算法是目前测量静态半径的最主要方法^[8]，其基本原理是以重力场下的加速度计输出值为基准，然后在离心场下使加速度计的输入值约等于基准值，最后通过修正加速度载荷公式反算出精密离心机转动状态下的实际工作半径^[9]。除精密离心机自身整体性能外，加速度计输出值的准确性是决定静态半径测量精度的最主要因素^[8]。文献[10]通过改进反算法，在室温环境下使静态半径测量不确定度达到了 3.9×10^{-6} 。文献[11-13]通过对加速度计温度模型的辨识，提出了温度补偿算法。文献[14-15]通过设计恒温装置，提高了加速度计工作的稳定性。总地来看，目前的文献资料主要集中在静态恒温环境下的加速度计特性研究，但对于动态离心场下的加速度计温度特性，以及进一步对静态半径测量不确定度的影响研究还少见公开的文献资料。

针对上述问题，文中以反算法测量精密离心机静态半径为研究对象，建立基于温度的静态半径测量不确定度模型，分析确定影响静态半径测量不确定度的主要因素。然后利用自研的高精度精密离心机构建恒温实验系统，通过变温条件下的动态离心试验，定量分析温度对静态半径测量不确定度的影响规律，为更高精度的精密离心机研制提供技术支撑。

1 静态半径测量原理

如图 1 所示，精密离心机静态半径 R 是指主轴回转轴线到加速度计有效质量中心的距离^[8]。当加速度计安装在精密离心机水平位置时，即输入轴与精密离心机半径方向重合，此时加速度计的输入值包含向心加速度，而向心加速度可通过离心机转速与静态半径求解。因此，基于加速度计在重力场下得到的一阶静态模型，即可反算出此状态下的精密离心机静态半径。

当加速度计的输入轴与精密离心机转臂半径方向一致时，保持精密离心机静止，则加速度计输入轴感知的加速度只有因静态俯仰角所形成的重力加速度分量^[16]，可表示为式(1)。

$$a_0 = g \cdot \lambda_0 \quad (1)$$

式中： a_0 为精密离心机静止时的加速度计输入值， m/s^2 ； g 为当地重力加速度， m/s^2 ； λ_0 为精密离心机转臂静态俯仰失准角，rad。

当精密离心机以恒定转速运行后，此时加速度计

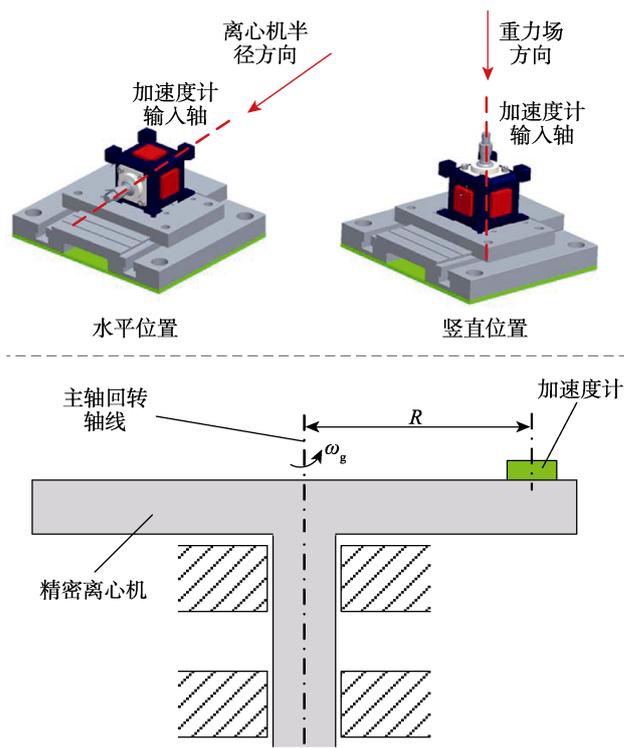


图 1 反算法测量静态半径原理

Fig.1 Schematic diagram of the static radius measurement with back calculation method

输入轴感知的加速度可表示为式(2)^[8]。

$$a_g = \omega_g^2 \cdot R + a_0 + \lambda_g \cdot g + 2\omega_g \omega_e R \sin \theta \quad (2)$$

式中： a_g 为精密离心机运行后的加速度输入值， m/s^2 ； ω_g 为精密离心机转速， rad/s ； λ_g 为精密离心机动态俯仰失准角， rad ； ω_e 为地球自转角速度， m/s^2 ； θ 为精密离心机所在地球纬度， rad 。

联立式(1)与式(3)，则可反算得到精密离心机静态半径，见式(3)。

$$R = \frac{a_g - a_0 - \lambda_g \cdot g}{(\omega_g^2 + 2\omega_g \omega_e R \sin \theta) \cos \lambda_0} \quad (3)$$

2 静态半径测量不确定度建模

式(3)中，精密离心机静态半径 R 为间接测量值，其误差主要来自精密离心机运行后的加速度计输入值 a_g 、精密离心机静止时的加速度计输入值 a_0 、动态俯仰失准角 λ_g 和精密离心机转速 ω_g 。基于测量不确定度的传递与合成方法^[17]，忽略各参数间的相关性，则精密离心机静态半径测量不确定度传递公式为：

$$u_r(R) \approx \sqrt{4u_r^2(\omega_g) + \frac{g^2}{a_g^2} u_r^2(\lambda_g) + u_r^2(a_g) + \frac{a_0^2}{a_g^2} u_r^2(a_0)} \quad (4)$$

不考虑高阶项的影响, 加速度计输出特性的一阶标定方程为:

$$a_g = U_g / k_1 - k_0 \quad (5)$$

式中: U_g 为加速度计输出电压, V; k_0 为加速度计零偏, g; k_1 为加速度计标度因子, V/g。

根据加速度计的输出温度特性^[11], 其一阶温度模型方程为:

$$u_r(R) \approx \sqrt{4u_r^2(\omega_g) + \frac{g^2}{a_g^2} u_r^2(\lambda_g) + \left(\frac{U_g^2}{k_1^4} k_{01}^4 - k_{11}^4 \right) u_r^2(T) + \frac{a_0^2}{a_g^2} u_r^2(a_0)} \quad (7)$$

式(7)中, $a_g \gg a_0$, 因此 $u_r(a_0)$ 的传递系数非常小, 同时 $a_g \approx g$, 则可将式(7)简化为:

$$\begin{cases} u_r(R) \approx \sqrt{4u_r^2(\omega_g) + u_r^2(\lambda_g) + u_r^2(a_g)} \\ u_r^2(a_g) = \left(\frac{U_g^2}{k_1^4} k_{01}^4 - k_{11}^4 \right) u_r^2(T) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中的角速度相对标准不确定度 $u_r(\omega_g)$ 与动态俯仰角相对标准不确定度 $u_r(\lambda_g)$ 为精密离心机的固有属性, 因此离心机运转后的加速度计输入值不确定

$$\begin{cases} k_0 = k_{00} + k_{01}T \\ k_1 = k_{10} + k_{11}T \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_{00} 、 k_{10} 为温度模型零偏; k_{01} 、 k_{11} 为温度模型标度因数。

由式(5)和式(6)可知, 温度主要通过影响 $u_r(a_g)$ 以最终影响静态半径测量不确定度 $u_r(R)$, 进一步推导精密离心机静态半径测量不确定度的温度特性模型为:

度 $u_r(a_g)$ 是影响静态半径测量不确定度的最主要因素。温度对 $u_r(a_g)$ 的影响主要有 2 个方面: 加速度计的自身属性系数 k_1 、 k_{01} 、 k_{11} 影响 $u_r(T)$ 的传递系数; 温控系统的温控精度和稳定性直接影响 $u_r(T)$ 。

3 实验装置设计

基于自研精密离心机平台构建静态半径测量装置如图 2 所示, 主要由石英挠性加速度计、精密恒温装置、配重平台、温控系统等共同组成。

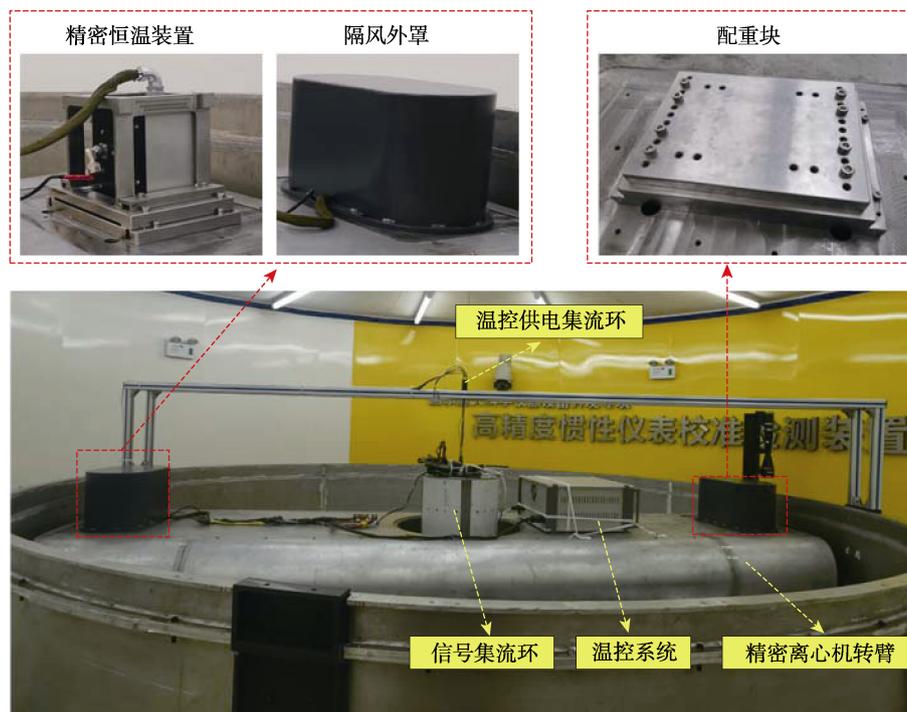


图 2 精密离心机静态测量试验装置
Fig.2 Precision centrifuge for the static radius measurement

精密恒温装置的结构如图 3 所示。精密恒温装置基于底面与圆柱侧面的 3 个正交半导体执行器实现制冷和制热, 并通过外设温控系统对半导体执行器进行温度闭环控制。加速度计安装在可翻转的六面体精密恒温装置内, 利用航空插头将电压信号通过集流环传输至精密离心机的控制间进行采集和处理。为了减

小离心机旋转风阻对装置的扰动影响^[18], 在恒温装置和配重块外部加装流线型隔风罩, 隔风罩直接安装在精密离心机转臂上。

为了降低加速度计环境温度不确定度, 精密恒温装置采用具有 PID 自整定及制冷/制热双向自动控制功能的温控系统对温度进行精确控制。精密恒温装置

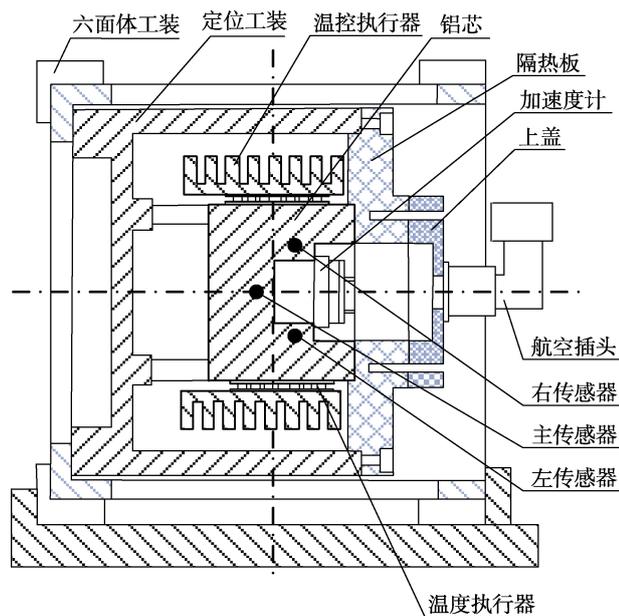


图3 精密恒温装置结构

Fig.3 Structure of temperature control system

的主要技术指标见表1。

4 试验分析

加速度计的输出电压 U_g 与加速度计输入值 a_g 相对应,通常 a_g 约为 $1g$ 。结合式(8)可知,当只关注静态半径测量不确定度而不需计算静态半径真实值时,只需获取 $1g$ 离心机场下不同温度的加速度计输出电压即可。基于上述实验装置,设计试验流程如下:

1) 翻转精密恒温装置六面体工装,并固定,使加速度计的敏感轴方向与精密离心机半径方向重合。启动温控系统,使温度升至设定值,持续采集加速度计输出电压,直到加速度计输出电压稳定。

2) 设定精密离心机转速,使加速度计输入轴的向心加速度约为 $1g$,驱动精密离心机转动。转速稳定后,连续采集加速度计输出电压,并记录精密离心机控制系统显示的动态俯仰角不确定度与转速不确定度。

试验所用石英加速度计的基本参数见表2。

表1 精密温控装置技术指标

Tab.1 Technical indicators of precision temperature control system

温控精度/ $^{\circ}\text{C}$	温度测量精度/ $^{\circ}\text{C}$	温度均匀性/ $^{\circ}\text{C}$	响应耗时/min	水平和竖直平行度/mm
± 0.02	0.01	± 0.3	20	0.02

表2 石英加速度计基本参数

Tab.2 Basic parameters of quartz accelerometer

安全工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	零偏/mg	标度因子/ $(\text{mA}\cdot\text{g}^{-1})$	零偏温度系数/ $(\mu\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	标度因子温度系数/ $(10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
50-60	-0.328	1.258	3.3	2.0

在加速度计安全工作温度范围内,分别选取 50、55、60 $^{\circ}\text{C}$ 等 3 个温控设定值,依照上述试验流程完成试验,得到 3 种温度情况下的加速度计输出电压,如图 4 所示。由于精密离心机的转盘并不完全水平,存在俯仰失准角,因此在周期性转动过程中,石英加速度计的输出电压应为如图 4b 所示的周期性正弦分布。图 4a 与图 4c 的数据在整体符合正弦分布的情况下存在局部的小幅值波动,但并未产生明显的单边漂移,主要是由于精密离心机的转速不稳定所造成。

为了消除局部小幅值波动对计算结果的影响,将图 4 中加速度计输出电压依照每 20 个采样点计算 1 组平均值,然后计算 A 类标准不确定度,如图 5 所示。计算得到不同恒定温度以及室温条件下的静态半径测量不确定度见表 3。

由图 5 和表 3 可以看出,与精密离心机固有属性相关的数据波动非常小,静态半径测量不确定的波动基本只与加速度的温漂有关,这前述的理论分析结果一致。与室温环境相比,恒温环境能明显提升精密离心机静态半径的测量精度,特别是恒温 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,静

态半径测量不确定度达到了 10^{-7} 量级。

在 $1g$ 离心场下,50 $^{\circ}\text{C}$ 时,加速度计的输出电压平均值最高,55 $^{\circ}\text{C}$ 时最低。当温度由 50 $^{\circ}\text{C}$ —55 $^{\circ}\text{C}$ —60 $^{\circ}\text{C}$ 变化时,加速度计的输出电压呈现“V”形变化,而不确定度的分布规律与平均值完全相反。通过已有研究可知,地面静止状态时,加速度的输出电压一般随温度升高会出现单边漂移^[19],而不会出现图 5 中所示的上下波动,分析可能有如下几个原因:

1) 精密恒温装置选用了半导体作为执行器,以实现快速制冷和制热,相比于纯电热方式,半导体保持相同恒定温度时会产生较大的非连续电流^[20],所造成的电磁干扰会影响加速度计的 I/V 转换^[21]。

2) 半导体载流子浓度会随温度产生较大变化^[22],导致半导体电学性能不稳定,会直接影响精密恒温装置的温度稳定性。

3) 加速度计输出电压是通过精密离心机集流环传输到地面控制进行采集,所使用集流环为贵金属材质,而未使用性能更优异的水银集流环,因而集流环可能会造成信号传输的不稳定。

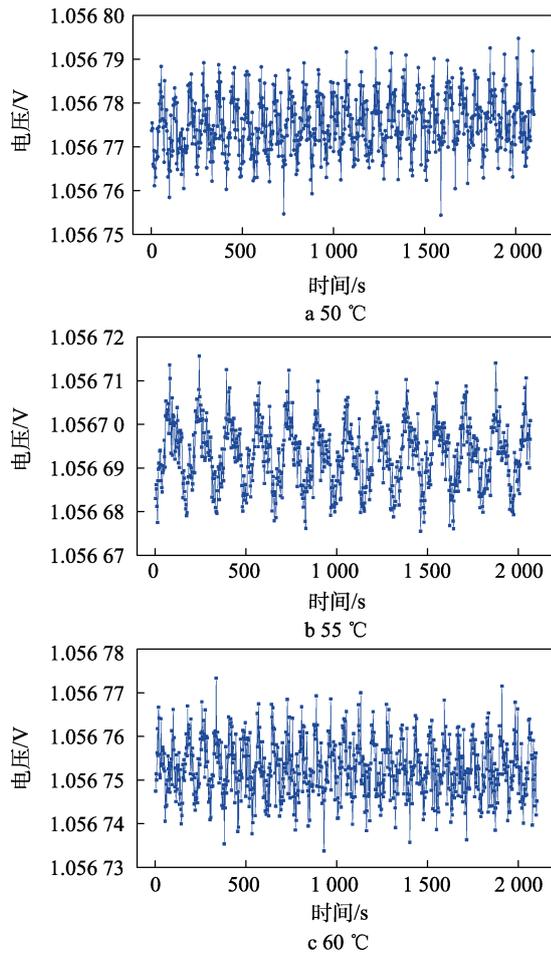


图 4 不同温度加速度计输出值
Fig.4 Accelerometer outputs at (a) 50 °C, (b) 55 °C, and (c) 60 °C

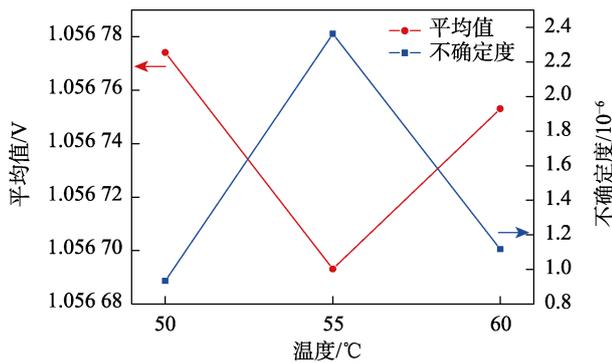


图 5 不同温度下加速度计输出平均值和不确定度
Fig.5 Average accelerometer outputs at different temperatures

表 3 不同恒定温度的静态半径测量不确定度
Tab.3 Uncertainty of static radius measurement at different temperatures

$t/^\circ\text{C}$	$u_t(a_g)$	$u_t(\lambda_g)$	$u_t(\omega_g)$	$u_t(R)$
室温	6.85×10^{-6}	2.21×10^{-7}	3.16×10^{-8}	6.86×10^{-6}
50	9.34×10^{-7}	2.16×10^{-7}	3.32×10^{-8}	9.61×10^{-7}
55	2.36×10^{-6}	2.09×10^{-7}	3.18×10^{-8}	2.37×10^{-6}
60	1.12×10^{-6}	2.12×10^{-7}	3.26×10^{-8}	1.14×10^{-6}

5 结论

文中推导了基于温度的静态半径测量不确定度模型, 确定了影响静态半径测量不确定度的关键参数。基于精密离心机设计了恒温实验系统, 对不同温度下的静态半径测量不确定度进行试验研究, 主要结论如下:

1) 加速度计的温度敏感性是影响静态半径测量不确定度的最主要因素。

2) 精密恒温装置能较为明显地提升静态半径测量精度。基于文中设计精密恒温装置, 静态半径测量不确定度由室温时的 10^{-6} 量级进入到了 10^{-7} 量级。

参考文献:

- [1] 黎启胜, 许元恒, 罗龙. 科学试验用离心机发展综述[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 1-10.
LI Qi-sheng, XU Yuan-heng, LUO Long. Review on Development of Centrifuge for Scientific Tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 1-10.
- [2] 王洪波, 张映梅, 李锋, 等. 精密离心机结构误差对其运动精度的影响研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 72-77.
WANG Hong-bo, ZHANG Ying-mei, LI Feng, et al. Influence of Structure Error on the Rotary Precision of Precision Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 72-77.
- [3] 陈爽, 鲁伟俊, 张强, 等. 基于参数估计的精密离心机回转轴线测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 76-84.
CHEN Shuang, LU Wei-jun, ZHANG Qiang, et al. Rotation Axis Measurement Method for Precision Centrifuge Based on Parameter Estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 76-84.
- [4] 凌明祥, 黎启胜, 李会敏, 等. 精密离心机加速度测量不确定度模型研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 125-130.
LING Ming-xiang, LI Qi-sheng, LI Hui-min, et al. Uncertainty Evaluation Model of Acceleration Measurement for Precision Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 125-130.
- [5] 孙闯, 任顺清, 王振桓. 加速度计在精密离心机上的标定方法与误差分析[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(1): 121-128.
SUN Chuang, REN Shun-qing, WANG Zhen-huan. Calibration Method of Accelerometer on Precision Centrifuge and Its Error Analysis[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27(1): 121-128.
- [6] JJG 1066—2011, 精密离心机[S].
JJG 1066—2011, Precision Centrifuge[S].
- [7] 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 Ming-xiang, LI Qi-sheng, 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.
- [8] 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 Fu-gang, WANG Jun. Research on Acceleration Load Model of Precision Centrifuge[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 36-40.
- [9] IEEE 836—2009, Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers[S].
- [10] 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 Ming-xiang, LI Ming-hai, 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.
- [11] 刘晨, 徐子彬, 刘宇丰. 石英挠性加速度计温度特性测试与建模[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(4): 69-74.
LIU Chen, XU Zi-bin, LIU Yu-feng. Temperature Characteristic Test and Modeling of Quartz Flexible Accelerometer[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(4): 69-74.
- [12] 陈福彬, 张科备. 石英挠性加速度计温度补偿算法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 98-102.
CHEN Fu-bin, ZHANG Ke-bei. Temperature Compensation Algorithm of Quartz Flexible Accelerometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(1): 98-102.
- [13] 俞茂超, 王新宇, 阳洪, 等. 石英挠性加速度计温度补偿方法研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 220-222.
YU Mao-chao, WANG Xin-yu, YANG Hong, et al. Study on Temperature Compensation Method of Quartz Flexible Accelerometer[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2018, 40(2): 220-222.
- [14] 马广彬. 加速度计温度控制系统研究和设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
MA Guang-bin. Research and Design on Accelerometer Temperature Control System[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [15] 程远超, 黄伟, 姚少非, 等. 一种手自一体石英挠性加速度计温控仪的设计[J]. 导航与控制, 2014, 13(6): 24-28.
CHENG Yuan-chao, HUANG Wei, YAO Shao-fei, et al. One Design of Manual/Auto Adjustable Temperature Controller Used for Flexible Quartz Accelerators[J]. Navigation and Control, 2014, 13(6): 24-28.
- [16] 张荣, 王珏, 周继昆, 等. 精密离心机动态俯仰失准角的定位测量技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(9): 2964-2967.
ZHANG Rong, WANG Jue, ZHOU Ji-kun, et al. Research on Positioning Measurement Technique for Dynamic Longitudinal Misalignment Angle of High Precision Centrifuge[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(9): 2964-2967.
- [17] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 第7版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
FEI Ye-tai. Error Theory and Data Processing[M]. 7th Edition. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [18] 黄鹏, 尹益辉, 李顺利, 等. 离心机风阻功率及启动过程分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 105-110.
HUANG Peng, YIN Yi-hui, LI Shun-li, et al. Analysis of Wind Resistance Power and Starting Process of Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 105-110.
- [19] 聂鲁燕, 刘晓东, 吴畏, 等. 高精度加速度计温度特性及补偿方法[J]. 物探与化探, 2015, 39(S1): 33-36.
NIE Lu-yan, LIU Xiao-dong, WU Wei, et al. Temperature Characteristics and Error Compensation Method for High Precision Accelerometers[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(S1): 33-36.
- [20] 吴平. 半导体热电材料的热电性能与制冷应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
WU Ping. Research on the Thermoelectric Properties and Refrigeration Applications of Semiconductor Thermoelectric Materials[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [21] 宋雪杰, 赵毅, 王晓东. 石英挠性加速度计 I/F 转换电路软件补偿研究[J]. 导航与控制, 2010, 9(2): 52-55.
SONG Xue-jie, ZHAO Yi, WANG Xiao-dong. The Compensation Research of Current-Frequency Converter of Quartz Flexible Accelerometer[J]. Navigation and Control, 2010, 9(2): 52-55.
- [22] CAO Jun-cheng, LEI Xiao-lin. Velocity -Field Characteristics of Semiconductors with Negative -Effective-Mass[J]. 功能材料与器件学报, 2001, 7(4): 331-334.
CAO Jun-cheng, LEI Xiao-lin. Velocity -Field Characteristics of Semiconductors with Negative -Effective -Mass[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2001, 7(4): 331-334.

责任编辑: 刘世忠