

文章编号 1004-924X(2015)08-2306-12

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

凌明祥, 黎启胜*, 张容, 李明海, 宁菲, 卢永刚
(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要:为了给高精度惯性仪表校准试验提供高精度的加速度输入值,研究了精密离心机输出加速度的建模、测量及不确定度评定方法。建立了适用于10⁻⁶量级高精度精密离心机的加速度测量模型及不确定度传递模型。基于本课题组提出的高精度测量方法,完成了10⁻⁶量级精密离心机的静动态半径、静动态俯仰失准角等重要分量的高精度测量。分析、归纳了测量不确定度源,分别基于建立的加速度测量不确定度传递模型和蒙特卡洛方法完成了该精密离心机输出加速度的测量不确定度评定。最后,讨论和总结了高精度精密离心机输出加速度建模和精度评定的相关问题。结果表明:该精密离心机对1g~100g输出加速度的相对标准不确定度均小于3×10⁻⁶,其精度与目前国际上公开的最高精度离心机处于同一数量级;建立的测量模型及测量不确定度评定方法可以为相关精度等级的精密离心机研制和评价提供参考。

关键词:精密离心机;加速度测量;位移测量;测量不确定度;蒙特卡洛法

中图分类号: TB934; TH824.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2306

Acceleration measurement model and uncertainty evaluation of 10⁻⁶ order precision centrifuge

LING Ming-xiang, LI Qi-sheng*, ZHANG Rong, LI Ming-hai, NING Fei, LU Yong-gang

(Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

* Corresponding author, E-mail: liqs@caep.ac.cn

Abstract: To obtain the high accuracy acceleration inputs for calibration of inertial instruments, the mathematical modeling, measurement and associated uncertainty evaluation of the acceleration produced by a precision centrifuge were investigated. An acceleration measurement model and an associated uncertainty propagation model were established for the 10⁻⁶ order high precision centrifuge. Then, major components, static and dynamic diameters and static and dynamic longitudinal misalignment angles, in the acceleration measurement model were measured precisely by using our proposed methods. Based on identification and quantization of measurement uncertainty sources, the uncertainty evaluation of acceleration measurement was implemented respectively by employing the uncertainty evaluation mathematical model of acceleration and Monte Carlo Method (MCM). Finally, some issues were discussed and summarized on the mathematical model and uncertainty evaluation. Test results indicate that the acceleration relative standard uncertainty of the developed precise centrifuge is less than 3

收稿日期: 2014-12-30; 修订日期: 2015-02-12.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2011YQ130047)

$\times 10^{-6}$ under the spectrum of $1g-100g$. The precision of the developed precise centrifuge reaches the international advanced level and the proposed measuring model and associated uncertainty evaluation method can provide some references for other precise centrifuges.

Key words: precision centrifuge; acceleration measurement; displacement measurement; measurement uncertainty; Monte Carlo method

1 引言

精密离心机可为惯性开关、惯性加速度计等惯性仪表提供大于 $1g$ 的恒加速度输入值,常用于实现惯性仪表的静态参数校准和性能检测^[1]。精密离心机输出加速度的准确度和稳定度直接影响惯性仪表的校准精度,进而制约导航和制导精度。采用精密离心机输出的加速度测量不确定度可以定量且较为全面地衡量精密离心机的精度,目前世界公开报道的精密离心机最高精度等级为输出加速度相对标准不确定度在 10^{-6} 量级^[2]。

为了保证精密离心机输出加速度的准确度,除了保证电气拖动、回转主轴、机械台面等的超精密研制外,还要考虑并补偿地球自转、离心机自身位姿误差等因素的影响,建立准确的精密离心机输出加速度数学模型以及找到模型中重要分量的高精度测量方法。目前国内外学者已建立了多个精密离心机输出加速度数学模型:文献[3-5]考虑精密离心机的主轴铅垂度、失准角、半径动态伸长量等因素,建立了包含数十个测量分量的加速度数学模型;文献[6-7]建立的加速度数学模型测量分量少,但没有明确说明是否需要考虑天体作用力等因素,故仅适用于一般精度的精密离心机;而美国航天宇航局建立的加速度数学模型虽然详尽,但主要用于影响因素的分析^[2],模型中的分量不完全可测量,因此也无法直接为惯性仪表标校提供恒加速度输入值。可以看出目前建立的这些加速度数学模型要么包含数十个测量分量,要么模型中分量不可测,而且多适用于一般精度等级的精密离心机,对于 10^{-6} 量级的高精度精密离心机均存在一定局限性。

考虑到惯性仪表校准时,其输入的恒加速度值是通过高精度测量精密离心机加速度数学模型中的分量并补偿计算得到,因此精密离心机输出加速度数学模型不仅要尽量包含影响标校试验精

度的各种因素,还要兼顾模型中分量的高精度测量问题。在众多测量分量中,决定精密离心机精度的最重要因素是工作半径,其测量不确定度将按 1:1 的比例传递到加速度计各项待标校模型系数中,而由于加速度计质心和主轴回转中心未知等原因,极大地增加了工作半径的测量难度和误差。文献[8-9]给出了精密离心机静态半径测量方法,文献[10-12]分别采用激光测长仪、电容测微仪等进行精密离心机动态半径测量。但这些测量方法精度有限,主要针对 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 量级精度的精密离心机,而且尚缺少必要的、客观的测量不确定度评定标准。

高精度精密离心机本身即可作为惯性仪表的标校装置,故很难采用更高精度的仪器设备来检定其精度。虽然目前国内外已报道有数台 10^{-6} 量级精密离心机,但精度评定方法没有公开资料可参考,缺少对精密离心机精度的客观评价,而且可能导致错误的惯性仪表标校精度。文献[7,13]针对一般精度的精密离心机初步给出了输出加速度测量不确定度评定模型,但针对 10^{-6} 量级的高精度精密离心机的精度评定需要考虑的因素更多而且对评定方法的合理性要求更严格,因此需要进一步优化和深化已有评定方法,给出高精度精密离心机系统、科学的评定模型和评定方法。近年来,国内外基于不确定度传播律和蒙特卡洛法的测量不确定度评定在理论和应用方面都取得了较大进展^[14-15],为精密离心机输出加速度的测量不确定度评定奠定了良好基础。

本文将在前期研究基础上,建立适用于 10^{-6} 量级高精度精密离心机的加速度测量模型,并建立相应的测量不确定度评定模型,结合在研 10^{-6} 量级精密离心机,重点给出加速度测量模型中工作半径和失准角等重要分量的高精度测量及不确定度评定结果,并系统地开展精密离心机输出加速度测量不确定度评定的研究。

2 10^{-6} 量级精密离心机输出加速度建模及测量不确定度传递模型

2.1 加速度测量模型建立

盘式精密离心机可简化为图 1 所示形式,由电机驱动空气主轴带动转盘转动。待标校加速度计安装于精密离心机转盘边沿定位平台的精密六面体上,精密离心机产生的向心加速度(图中 F_2 为离心力)为:

$$a = \omega^2 r, \quad (1)$$

式中: ω 为主轴旋转角速率, rad/s; r 为工作半径,即加速度计质心到精密离心机主轴回转中心的距离。

对于高精度精密离心机,实际传递到加速度计输入轴的加速度还包括重力(图中 F_1)、地球自转产生的科里奥利力(F_3)、天体作用力以及环境振动(合为 F_4)等产生的加速度。而且这些加速度受俯仰失准角(图中 α_0 、 α)以及方位失准角(图中 β)的影响。其中 α_0 定义为加速度计输入轴与工作半径在垂直面内的夹角; α 定义为加速度计输入轴与地表在垂直面内的夹角; β 定义为加速度计输入轴与工作半径在水平面内的夹角。

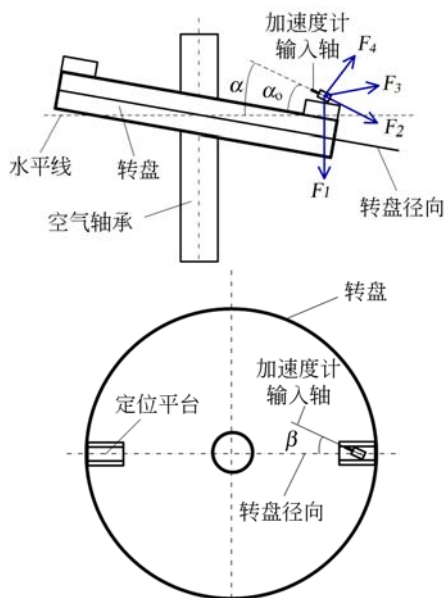


图 1 精密离心机结构正视图和俯视图

Fig. 1 Front and vertical views of precision centrifuge

为了能为加速度计标校试验提供更为准确的

加速度值,精密离心机输出的加速度数学模型考虑的影响因素应尽量全面。然而,加速度数学模型中包含的分量越多,测量系统的复杂度越大而且会增加最终的加速度测量不确定度。因此,建立的加速度数学模型既要能够包含这些影响因素,又要使测量分量最少,而且不同精度等级的精密离心机对加速度数学模型准确度的要求不同。笔者于文献[16]定量研究了地球自转及天体作用力对 10^{-6} 量级精密离心机的影响规律,考虑图 1 中各种影响因素,采用齐次变换对其进行定量计算(忽略推导过程),得到了 10^{-6} 量级精密离心机输出的加速度数学模型为:

$$a = \omega^2 (r + \Delta r) \cos \alpha_0 \cos \beta + (\alpha + \Delta \alpha) g \pm 2\omega \omega_e r \sin \theta, \quad (2)$$

式中: r 是静态半径, Δr 是动态半径,即工作状态下由于温度变化、离心载荷等导致的静态半径伸长量; $\Delta \alpha$ 是动态俯仰失准角, rad; ω_e 是地球自转角速率, rad/s; θ 是精密离心机所在地的纬度。

式(2)表明,对于 10^{-6} 量级的精密离心机,输入到加速度计输入轴的加速度由向心加速度、重力加速度、科氏加速度组成,且受失准角的影响,而天体作用力可以不予考虑;环境振动可通过精度隔震系统控制在 10^{-6} 量级以下,且在各分量的测量结果中得以反映,因此不用单独在模型中考虑。精密离心机逆时针方向旋转时,式(2)中科氏加速度项取正。容易看出失准角 α_0 和 β 以余弦函数的形式影响输入到加速度计输入轴的向心加速度,对于角秒级的失准角变化,其余弦函数变化并不明显,粗略计算可知即使 α_0 和 β 在几十角秒以内变化,均不影响 10^{-6} 量级精密离心机输出加速度的准确度。对于 10^{-6} 量级精密离心机,其实际俯仰和方位失准角一般不大于 $10''$,因此完全可忽略 α_0 和 β 的影响,得到更简洁的加速度数学模型:

$$a = \omega^2 (r + \Delta r) + (\alpha + \Delta \alpha) g \pm 2\omega \omega_e r \sin \theta, \quad (3)$$

测量出式(3)中的分量 ω 、 r 、 Δr 、 α 和 $\Delta \alpha$ 即可计算得到 10^{-6} 量级精密离心机为加速度计校准提供的加速度值。然而,由于加速度计质心、离心机主轴回转中心的不确定性等因素,直接采用精密量块等测量静态半径很难满足高精度精密离心机的精度要求。结合笔者于文献[17]提出的静态半径高精度反算方法,可进一步推导出 10^{-6} 量级精密离心机输出加速度测量模型为:

$$a = \omega^2 \left(\frac{a_g - a_0 - \Delta\alpha_g \cdot g}{\omega_g^2 \pm 2\omega_g\omega_\epsilon \sin\theta} + \Delta r \right) + g \cdot (\alpha + \Delta\alpha) \pm 2\omega\omega_\epsilon \frac{a_g}{\omega_g} \sin\theta = \omega^2 \left(\frac{\Delta a_g - \Delta\alpha_g \cdot g}{\omega_g^2 + 2\omega_g\omega_\epsilon \sin\theta} + \Delta r \right) + g \cdot (\alpha + \Delta\alpha) \pm 2\omega\omega_\epsilon \frac{\Delta a_g}{\omega_g} \sin\theta, \quad (4)$$

其中:

$$a_g = U_g/k_1 - k_0, \quad a_0 = U_0/k_1 - k_0, \quad (5)$$

式中: k_0 、 k_1 分别为重力场下加速度计的偏值和标度因素,单位分别为 g 、 V/g 或 A/g ; a_g 为离心场下加速度计感受到的加速度, a_g 取值小于或等于 $1g$; a_0 为精密离心机静止时加速度计输入, $\Delta a_g = a_g - a_0$; ω_g 为加速度计输入 a_g 对应的角速度, rad/s ; $\Delta\alpha_g$ 为 ω_g 转速下的动态俯仰失准角, rad ; U_g 为状态 ω_g 时加速度计的输出电压或电流, V 或 A ; U_0 为精密离心机静止时加速度计的输出电压或电流, V 或 A 。

式(4)可为高精度加速度计标校试验提供高准确度的加速度输入值。相比以往加速度模型^[2-7], 本文提出的加速度数学模型具有以下三个特点:

第一,通过定量计算,将各种影响因素进行数

$$u_r(a) = \sqrt{4u_r^2(\omega) + u_r^2(r) + \left[\frac{u(\Delta r)}{r} \right]^2 + \left[\frac{g}{R\omega^2} \cdot u(\alpha) \right]^2 + \left[\frac{g}{r\omega^2} \cdot u(\Delta\alpha) \right]^2 + u^2(\delta)}, \quad (5)$$

$$u_r(a) = \sqrt{4u_r^2(\omega) + 4u_r^2(\omega_g) + \left[\frac{g}{r\omega^2} u(\alpha) \right]^2 + \left[\frac{g}{r\omega^2} u(\Delta\alpha) \right]^2 + u^2(\Delta\alpha_g) + u_r^2(\Delta a_g) + \left[\frac{u(\Delta r)}{r} \right]^2 - 8r_1 u_r'(\omega) u_r'(\omega_g) - 2r_2 \frac{g}{r\omega^2} u'(\Delta\alpha) u'(\Delta\alpha_g) + u^2(\delta)}, \quad (6)$$

式中: $u_r(a)$ 为精密离心机输出加速度相对标准不确定度,无量纲; $u_r(\omega)$ 、 $u_r(r)$ 、 $u_r(\Delta a_g)$ 、 $u_r(\omega_g)$ 分别为 ω 、 r 、 Δa_g 、 ω_g 的相对标准不确定度,无量纲; $u(\Delta r)$ 为 Δr 的标准不确定度, m ; $u(\alpha)$ 、 $u(\Delta\alpha)$ 、 $u(\Delta\alpha_g)$ 分别为 α 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\alpha_g$ 的标准不确定度, rad ; 以上各不确定度分量均包括随机效应和系统效应引入的不确定度。 $u_r'(\omega)$ 、 $u_r'(\omega_g)$ 、 $u'(\Delta\alpha)$ 、 $u'(\Delta\alpha_g)$ 分别为 ω 、 ω_g 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\alpha_g$ 由系统效应引入的标准不确定度; $u(\delta)$ 为其他因素引入的相对标准不确定度,无量纲。 r_1 为角速率 ω 与 ω_g 之间的相关系数; r_2 为动态俯仰失准角 $\Delta\alpha_g$ 与 $\Delta\alpha$ 之间的相关系数。

模型(5)、(6)具有以下五个特点:

第一,建立的加速度测量不确定度评定模型只包含 5 个测量分量。模型并不包含方位失准

学建模与简化,明确需要保留的影响因素,最终得到了 10^{-6} 量级精密离心机的加速度数学模型;

第二,模型中各分量均可测量且测量分量少;

第三,模型中静态半径采用高准确度的改进反算方法,而且测量过程简单。

2.2 加速度测量不确定度传递模型

精密离心机通过对加速度数学模型(3)或(4)中的各分量进行高精度测量,进而为惯性仪表标校试验提供恒加速度输入值。惯性仪表的校准精度严重依赖于精密离心机精度,而精密离心机精度又由其输出加速度的测量不确定度定量描述。为了评定精密离心机的精度,首先需要建立加速度与各测量分量之间的测量不确定度传递关系。基于前文建立的加速度测量模型(3)或(4),通过求偏导数,基于不确定度传播律,推导得到加速度相对标准不确定度与各测量分量的测量不确定度之间的传递关系,如式(5)、(6)所示。其中式(5)是采用精密量块等仪器直接测量静态半径时的加速度测量不确定度评定模型;式(6)是反算静态半径时对应的加速度测量不确定度评定模型。

角,这与文献[2,4,5]的技术思路不同,大大降低了高精度测量方位失准角的代价和难度。

第二,传递给加速度的静、动态半径及角速率测量不确定度与精密离心机输出加速度 g 值无关;而随着精密离心机输出 g 值增大,传递给加速度的静、动俯仰失准角测量不确定度不断减小,当输出加速度 g 值大于一定值时,对静、动态失准角的测量要求可适当降低;同时也从不不确定度传递的角度说明了工作半径高精度测量的必要性。

第三,增加精密离心机的静态半径,可减小动态半径对加速度测量不确定度的影响。当然,增加转盘半径会带来动不平衡、失准角增大等问题。

第四,建立的加速度测量不确定度评定模型同时包含无量纲和有量纲两种测量不确定度分量,其优点是能突显规律性和简洁性,而且在实际

测量过程中更容易操作。

第五, ω 与 ω_g 、 $\Delta\alpha_g$ 与 $\Delta\alpha$ 由同一仪器测量, 明显相关, 由加速度测量模型可知, 其相关性有利于减小加速度测量不确定度, 需要注意的是这些分

量之间的相关性只是部分系统效应相关。在测量不确定度评定时, 如果为了降低评定复杂度, 可不考虑相关性, 加速度测量不确定度评定模型可简化为:

$$u_r(a) = \sqrt{4u_r^2(\omega) + 4u_r^2(\omega_g) + \left[\frac{g}{r\omega^2}u(\alpha)\right]^2 + \left[\frac{g}{r\omega^2}u(\Delta\alpha)\right]^2 + u^2(\Delta\alpha_g) + \left[\frac{u(\Delta r)}{r}\right]^2 + u_r^2(a_g) + u^2(\delta)}, \quad (7)$$

式(7)中, 部分系统效应引入的角速率和动态俯仰失准角测量不确定度因相关性得到了抵消, 因此在评定 ω 、 ω_g 、 $\Delta\alpha_g$ 、 $\Delta\alpha$ 的测量不确定度时不用太多考虑系统效应的影响, 而应重点考虑由随机效应引入的测量不确定度。

3 各分量高精度测量及不确定度评定

3.1 动态半径高精度测量及不确定度评定

对于 10^{-6} 量级的高精度精密离心机, 采用电容测微仪对转盘边沿的动态伸长量进行非接触测量, 原理如图 2 所示。

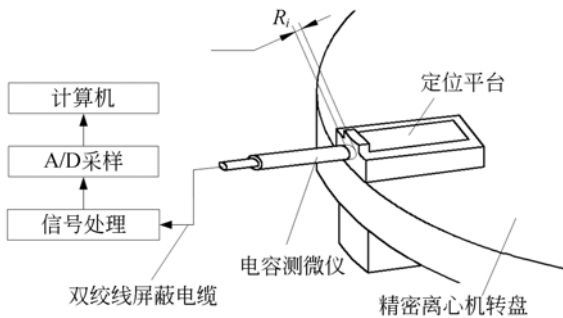


图 2 精密离心机动态半径高精度测量原理

Fig. 2 Precision measurement principle of dynamic radius for precision centrifuge

电容测微仪测头对准精密离心机的定位平台外边缘, 当精密离心机转速稳定后, 定位平台转过电容测微仪时, 电容测微仪的输出为定位平台外边缘与传感器测头之间的间距。精密离心机静止状态与工作状态下, 定位平台外边缘与传感器测头间的距值之差即为精密离心机的动态半径值, 即:

$$\Delta r = r_1 - r_2, \quad (8)$$

式中: r_1 为精密离心机静止状态下电容测微仪测头与定位平台外边缘的间距, r_2 为精密离心机工作状态下电容测微仪测头与定位平台外边缘的间距。

为了达到亚微米测量精度, 需要严格控制定

位平台的加工精度和测量噪声。定位平台外表面经研磨, 表面粗糙度达到微米量级, 采用主轴光栅编码器的 Z 信号作为触发, 通过“点对点相减”消除定位平台形状误差以及其它测量误差, 为了精确定位以消除转盘形状误差的影响, 设计了特殊的 Z 信号展宽电路和数据处理算法。针对不同转速的工作状态, 采用变采样速率在定位区域内采集 n 个位移数据, 取其平均值作为电容测微仪测头到转盘边沿测量面之间的距离, 此外对电容测微仪示值误差、安装误差以及数采卡示值误差 3 个主要系统误差进行修正, 则误差修正后的动态半径测量模型为:

$$\Delta r = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (r_{1k} - r_{2k}) + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = \Delta r_n + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (9)$$

式中: r_{1k} 为精密离心机超低速工作时在定位区域内采集的第 k 个间距值, r_{2k} 为工作状态定位区域内采集的第 k 个间距值, n 为定位测量区域内电容测微仪连续采样总数, δ_1 为电容测微仪示值误差修正值, 由于不知电容测微仪示值误差, 认为其期望值为零; δ_2 为电容测微仪安装误差, 经过精密安装、调整, 可认为其期望值为零; δ_3 为数据采集卡、LabView 等测量仪器的示值误差, 可认为其期望值为零。

考虑测量仪器的分辨率, 基于不确定度传播律可推导出动态半径的测量不确定度评定模型为:

$$u(\Delta r) = \sqrt{\max[u_0^2, u^2(\Delta r_n)] + u^2(\delta_1) + u^2(\delta_2) + u^2(\delta_3)}, \quad (10)$$

式中: $u(\Delta r_n)$ 为 n 个采集点的距离之差的测量不确定度, μm ; u_0 为测量仪器的分辨率引入的不确定度, μm ; $u(\delta_1)$ 为电容测微仪示值误差修正引入的不确定度, μm ; $u(\delta_2)$ 为电容测微仪安装误差修正引入的不确定度, μm ; $u(\delta_3)$ 为数据采集卡、LabView 等测量仪器测量误差修正引入的不确定度, μm 。

很明显,当转速稳定后,精密离心机动态半径的期望应为恒值。但实际上受电气噪声、机械结构不稳定以及测量面粗糙度等随机因素影响,动态半径为波动量。定位测量区域内采集的 n 个微位移数据 $\Delta r_k (k=1,2,\dots,n)$ 分散性越大,则动态半径的波动也越大,动态半径的不确定度就越高。因此采用定位区域内动态半径的分散性来作为由电气噪声、离心机结构不稳定、定位平台表面粗糙度等随机效应引入的不确定度分量 $u(\Delta r_n)$,更能反映精密离心机的真实精度,即:

$$u(\Delta r_n) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\Delta r_k - \Delta \bar{r})^2}{n(n-1)}}, \Delta \bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta r_k. \quad (11)$$

以上测量过程重复 N 次,计算其标准偏差,该标准偏差与 $u(\Delta r_n)$ 中的较大者作为 Δr 的由随机效应引入的测量不确定度。对于在研的 10⁻⁶ 量级的精密离心机,分别在超低转速(6 r/min)和 120 r/min 的转速下,于定位平台区域内采集 29 个点作差取平均得到如图 3 所示的动态半径测量结果(图为其中 4 圈的数据)。重复测量 10 次其标准差不到 0.1 μm ,而 $u(\Delta r_n)$ 最大为 0.33 μm ,则取 $u(\Delta r_n)$ 作为由随机效应引入动态半径的测量不确定度。

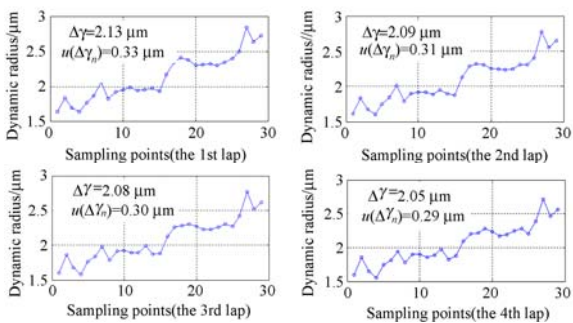


图 3 精密离心机动态半径 Δr 实测结果

Fig. 3 Measuring results of arm stretch of precision centrifuge

系统效应引入的不确定度分量计算如表 1 所示。综合以上各不确定度分量,代入式(10),可计算得到在研的 10⁻⁶ 量级精密离心机动态半径测量不确定度为 0.367 μm 。经实际测试可知:随着转速增加,电气噪声对测量不确定度的影响增大,但动态半径测量不确定度不超过 0.5 μm ,说明该精密离心机的动态半径测量不确定度达到亚微米量级。

表 1 系统效应引入的不确定度计算

Tab. 1 Uncertainty calculating inducted by systematic effects

| 分量 | 计算公式 | 计算结果/ μm | 计算参数: |
|---------------|-----------------------------------|----------------------|---|
| u_0 | $\frac{0.29M_1\eta}{2^i-1}$ | 8.6×10^{-6} | 电容测微仪为米铱 CS05,分辨率为 10 nm,量程 $M_2 = 500 \mu\text{m}$,灵敏度系数 $\eta = 500 \mu\text{m}/10 \text{V}$,最大示值误差 $\sigma = 0.21 \mu\text{m}$,测微仪安装最大偏角 $\theta = 0.5^\circ$ |
| $u(\delta_1)$ | $\sigma/\sqrt{3}$ | 0.121 | 引入的误差 $f(\theta) \approx 4$; 数采卡 NI PXI-4462, A/D 转换位数 $t = 24$,量程 $M_1 = 10 \text{V}$,最大示值误差 $\tau = 300 \mu\text{V}$;离心机机室温度 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ |
| $u(\delta_2)$ | $\frac{f(\theta)M_2\%}{\sqrt{3}}$ | 0.115 | |
| $u(\delta_3)$ | $\tau\eta/\sqrt{3}$ | 0.015 | |

3.2 动态俯仰失准角测量及不确定度评定

精密离心机的动态俯仰失准角 $\Delta\alpha$ 采用电容测微仪测量,测量原理如图 4 所示。精密离心机旋转过程中,转盘将偏离静止状态的姿态,产生俯仰失准角,该动态变化量可由三角形正切函数得到,即:

$$\Delta\alpha = \arctan \left\{ \frac{L_2 - L_1}{L} \right\} \approx \frac{\Delta L}{L}, \quad (12)$$

式中: L 为电容测微仪轴的位置到主轴回转中心的距离; L 为电容测微仪质心到主轴回转中心的距离; m ; L_1 、 L_2 分别为精密离心机静止状态和工作状态电容测微仪读数, m ; ΔL 为转盘底部定位区域动态位移变化量, m ,采用 ΔL 作为模型输入量消除系统误差的同时可以避免 $\Delta\alpha$ 测量不确定度评定时的相关性问题。

基于测量模型(12),采用不确定度传播律,可推导得到相应的测量不确定度评定模型。由于 ΔL 和 L 的数量级分别为微米和米,由式(12)可知,静态半径 L 的不确定度分量对动态俯仰失准角的不确定度贡献极小,即使工作半径的测量不确定度在毫米量级也可忽略不计。因此,动态俯仰失准角 $\Delta\alpha$ 的不确定度评定模型可近似为:

$$u(\Delta\alpha) = \sqrt{\left[\frac{u(\Delta L)}{L} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L}{L^2} u(L) \right]^2} \approx \frac{u(\Delta L)}{L}, \quad (13)$$

式中: $u(\Delta\alpha)$ 为动态俯仰失准角 $\Delta\alpha$ 的标准不确定度,rad; $u(\Delta L)$ 为转盘底部定位区域动态变化位

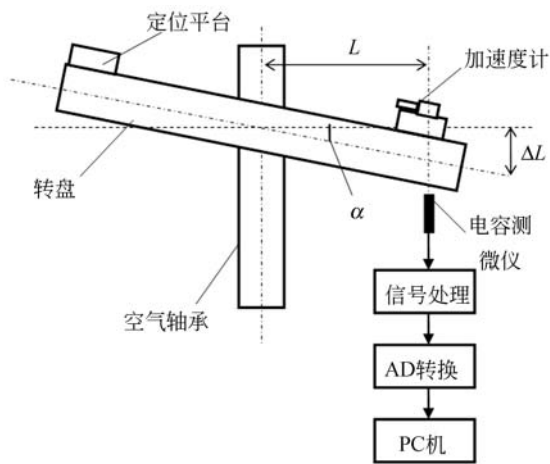


图 4 动态俯仰失准角 $\Delta\alpha$ 测量原理

Fig. 4 Measuring schematic of dynamic misalignment angle

移量 ΔL 的标准不确定度, μm 。

ΔL 的高精度测量及不确定度评定方法与上文中动态半径一致。针对在研的 10^{-6} 量级精密离心机, 当精密离心机转速为 6 r/min (近似为静止状态) 和工作状态为 120 r/min 时, 电容测微仪输出位移间距如图 5 所示。由图 5 可知, 两状态下的定位平台区域内除离群值以外的输出位移间距“点对点”之差的平均值即为 ΔL 。将 ΔL 代入测量模型(5), 可得到精密离心机在工作状态 120 r/min 时的动态俯仰失准角为: $\Delta\alpha = 5.129 \times 10^{-6} \text{ rad} \approx 1.058''$; 按动态半径测量不确定度计算方法以及式(7)的不确定度传递公式可知, 动态俯仰失准角的测量不确定度评定结果 $u(\Delta\alpha) \approx 0.29 \times 10^{-6} \text{ rad}$ 。

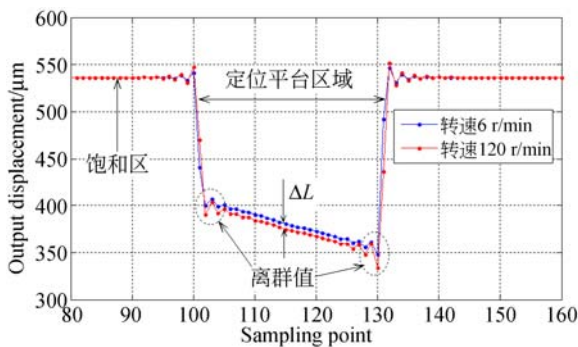


图 5 精密离心机动态俯仰失准角 $\Delta\alpha$ 的测量结果

Fig. 5 Measurement results of $\Delta\alpha$

3.3 静态半径高精度测量及不确定度评定

若采用组合量块和测微仪等精密仪器测量精密离心机静态半径, 测量仪器本身可以保证 10^{-7}

量级以上的精度等级, 但测量过程以及机械加工精度将引入极大的不确定度源: (1) 主轴形状误差和基准环安装偏心引入的主轴半径测量误差; (2) 量块接触不垂直和间隙引入的误差; (3) 加速度计质心不确定; (4) 通过测微仪确定最短距离引入的随机误差, 实践发现该误差非常大可达数十微米。因此, 对于高精度精密离心机一般采用重力场高精度校准过的加速度计来反算静态半径, 具体的反算流程见文献[17]。本文进一步给出静态半径的改进测量数学模型如式(14)所示:

$$r = \frac{\Delta a_g - \Delta\alpha_g \cdot g}{\omega_g^2 \pm 2\omega_g \omega_e \sin \theta} = \frac{\Delta U_g / k_1 - \Delta\alpha_g \cdot g}{\omega_g^2 \pm 2\omega_g \omega_e \sin \theta}, \quad (14)$$

式中: r 是静态半径, 即“基准半径”, m ; Δa_g 为 a_g 与 a_0 之差, 其中 a_g 可取为 $1g, m/s^2$; a_0 为精密离心机静止时加速度计输入值; ω_g 为加速度计输入值为 a_g 时的精密离心机旋转角速度, rad/s ; ω_e 为地球自转角速度; $\Delta\alpha_g$ 为主轴转速 ω_g 下的动态俯仰失准角, rad ; ΔU_g 为加速度计输出电压或电流之差, V 或 A ; θ 为精密离心机所在之地的地球纬度, $(^\circ)$; k_1 为重力场下加速度计的标度因素, V/g 或 A/g 。

基于不确定度传播律, 针对式(14)的测量模型可推导出静态半径测量不确定度评定模型为:

$$u_r(r) \approx \sqrt{4u_r^2(\omega_g) + \left(\frac{g}{\Delta a_g}\right)^2 u^2(\Delta\alpha_g) + u_r^2(\Delta a_g)}, \quad (15)$$

式中: $u_r(r)$ 是静态半径的相对标准不确定度; $u_r(\omega_g)$ 是 ω_g 的相对标准不确定度; $u_r(\Delta a_g)$ 是 Δa_g 的相对标准不确定度; $u(\Delta\alpha_g)$ 是 $\Delta\alpha_g$ 的标准不确定度, rad 。

若 a_g 取 $1g$, 则静态半径的测量不确定度评定模型简化为:

$$u_r(r) \approx \sqrt{4u_r^2(\omega_g) + u^2(\Delta\alpha_g) + u_r^2(\Delta a_g)}, \quad (16)$$

根据式(14), Δa_g 的相对标准不确定度如式(17)所示, Δa_g 为同一加速度计的输入值 a_g 与 a_0 之差, 由于二者之间的相关性, 部分系统效应引入的测量不确定度得到衰减, 因此以 Δa_g 为测量输入量时, 主要考虑由随机效应引入的测量不确定度。

$$u_r(\Delta a_g) = \sqrt{\max(u_1^2, u_r^2(\Delta U_g)) + u_r^2(k_1)}, \quad (17)$$

式中: $u_r(k_1)$ 为重力场下加速度计标度因素所引

起的相对标准不确定度; u_1 为加速度计分辨率引入的不确定度,按均匀分布处理; $u_r(\Delta U_g)$ 为 ΔU_g 重直测量 6 次以上的标准偏差,按式(18)计算:

$$u_r(\Delta U_g) = \frac{1}{\Delta U_g} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta U_{gi} - \Delta \bar{U}_g)^2}{n(n-1)}}. \quad (18)$$

精密离心机静态半径反算时的加速度计输入轴安装方向为沿离心机转盘径向,各分量的测量结果及不确定度计算如表 2 所示,代入测量模型(14)和不确定度传递模型(16)和(17),计算可得静态半径测量结果为 $r=1.065\ 832\ 2\ \text{m}$,测量不确定度 $u_r(r)=1.37 \times 10^{-6}$ 。结果表明高精度精密离心机的静态半径反算主要受精密离心机自身稳定度,加速度计自身精度以及线缆电气噪声的影响。

表 2 静态半径测量不确定度计算

Tab.2 Calculation of measurement uncertainty of static radius

| 分量 | 测量结果 | 测量不确定度 |
|--|----------------------|--|
| $k_1/(\text{mA} \cdot \text{g}^{-1})$ | 1.023 582 4 | 重力场下校准, $u_r(k_1)=0.74 \times 10^{-6}$ |
| δ/g | 2.9×10^{-6} | $u_1=0.5\delta/\Delta a_g \sqrt{3}=0.84 \times 10^{-6}$ |
| $\Delta U_g/\text{mA}$ | 1.029 462 9 | 按式(12)计算, $u_r(\Delta U_g)=1.04 \times 10^{-6}$ |
| $\omega_g(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ | 3.039 726 0 | 主要考虑随机效应, $u_r(\omega_g)=0.13 \times 10^{-6}$ |
| $\Delta a_g/\text{rad}$ | 2.6×10^{-6} | 按上文 2.2 节方法, $u(\Delta a_g) \approx 0.25 \times 10^{-6}\ \text{rad}$ |

3.4 静态俯仰失准角测量及不确定度评定

文献[7-8]提供了采用电子水平仪测量静态俯仰失准角的方法,但只能测量定位平台相对于地表的失准角,无法测量加速度计及夹具安装俯仰失准角。本文提供采用重力场已高精度校准的待测加速度计来测量静态俯仰失准角,其优点是可以定量获得加速度计相对于地表的俯仰失准角。测量时待测加速度计安装到精密离心机上,加速度计输入轴与转盘共面,姿态调整就绪后,不启动精密离心机直接读出加速度计输出电压(或电流)。由精密离心机输出的加速度数学模型可知,此时加速度计感受到的加速度只有俯仰失准角作用下的重力分量,因此可得到静态俯仰失准角 α 为:

$$\alpha = \frac{a_0}{g} = \frac{1}{g} \cdot \left(\frac{U_0}{k_1} - k_0 \right), \quad (19)$$

式中: k_0 为重力场下加速度计的偏值, V 或 A。

根据测量不确定度传播律,基于式(19)可推导出静态俯仰失准角的测量不确定度评定模型为:

$$u(\alpha) = \frac{\sqrt{u^2(U_0) + U_0^2 u_r^2(k_1) + k_1^2 u^2(k_0)}}{g k_1} \approx \frac{\sqrt{u^2(U_0) + k_1^2 u^2(k_0)}}{g k_1}. \quad (20)$$

式(20)中,加速度计输出电压 U_0 为考虑了由于随机效应引入的不确定度分量,故按 A 类计算。 k_0 、 k_1 的标准不确定度从重力场下的加速度计校准证书或说明书获取,单位分别为 V 或 A、V/g 或 A/g,按 B 类计算。由于 U_0 为趋于零的小量,因此标度因素 k_1 的测量不确定度可忽略。

4 精密离心机精度评定结果及讨论

在研的 10⁻⁶量级精密离心机及测量传感器安装位置实物如图 6 所示,基于以上各分量的测量结果,精密离心机输出的加速度测量不确定度按评定模型(6)进行计算,式中各测量不确定度分量按上文第三章给出的测量方法和不确定度传递模型进行计算。考虑到精密离心机输出加速度的测量模型为典型的非线性模型,且加速度输出值没有服从正态分布或学生 t 分布的充足理由和证据,而且模型中众多测量分量的不确定度源的复杂性加剧了精密离心机输出加速度值的概率分布复杂性。因此,下文采用另一种方法——蒙特卡洛法进行在研精密离心机输出加速度的测量不确定度评定。

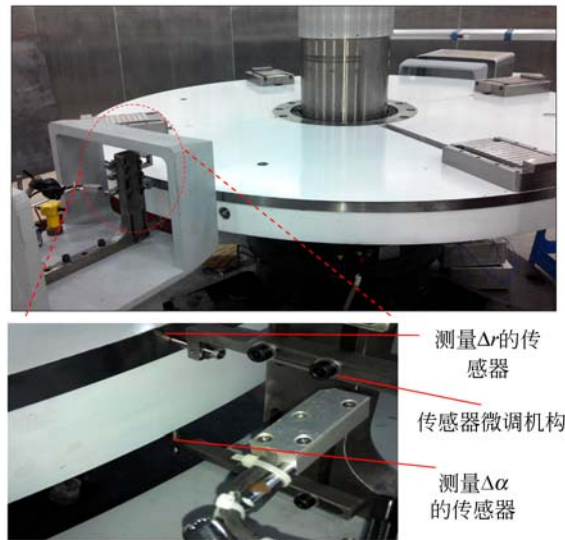


图 6 精密离心机及传感器安装位置实物图

Fig. 6 Physical map of precision centrifuge and sensor mounting position

4.1 基于 MCM 的精密离心机精度评定

基于蒙特卡洛法的精密离心机输出加速度测量不确定度评定过程如下:

(1) 确定测量模型:考虑主要的系统效应和随机效应引入的不确定度源,修正后的加速度数学模型及其中各分量的测量模型为下列模型组:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \omega^2 \left(\frac{\Delta a_g - \Delta \alpha_g \cdot g}{\omega_g^2 \pm 2\omega_g \omega_g \sin \theta} + \Delta R \right) + g(\alpha + \Delta \alpha) \pm \\ 2\omega \omega_g \frac{\Delta a_g}{\omega_g^2} \sin \theta \\ \Delta R = \Delta R_n + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \\ \Delta \alpha = (\Delta L_n + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) / R_0 \\ \Delta \alpha_g = (\Delta L_{ng} + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3) / R_0 \\ \alpha = (U_0 / k_1 - k_0) / g \\ \Delta a_g = \Delta U_g / k_1 + \delta \end{array} \right. , \quad (21)$$

(2) 确定输入量的最佳估计值及相应的测量不确定度:通过实测、校准证书及经验估计,确定

加速度测量模型组各输入量的最佳估计值及分布类型等信息,在研精密离心机测量结果如表 3 所示。

(3) 随机数序列生成及被测量概率分布计算:生成长度 M 为 10^6 的服从表 3 中各测量分量分布类型的拟随机数系列,并代入加速度测量模型组计算,得到 M 个加速度概率分布值。

(4) 加速度测量不确定度计算:

将 M 个加速度概率分布值绘成直方图得到加速度的近似概率密度函数并分别用平均值和标准偏差作为加速度的最佳估计值和标准不确定度:

$$a = \bar{a} = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M a_r, \quad (22)$$

$$u(a) = u(\bar{a}) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (a_r - \bar{a})^2}, \quad (23)$$

被测量包含区间的确定按 JJF1059.2-2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》提供的方法进行。

表 3 加速度测量模型输入量实测信息

Tab. 3 Information of input variables of acceleration measurement model

| 分量 | 含义及单位 | 估计值 | 分布类型 | 分布因子 | 标准不确定度 | 计算类型 | 相关性 |
|-----------------|--|------------------------|------|------------|-----------------------------|------|-------------|
| ω | 工作状态时的旋转角速率, rad/s | 12.566 370 | 正态分布 | 1 | 2.02×10^{-6} rad/s | A | 相关 |
| ω_g | 加速度计输入加速度约 1 g 时的离心机旋转角速率, rad/s | 3.039 726 | 正态分布 | 1 | 0.39×10^{-6} rad/s | A | $r_1 = 0.5$ |
| ΔU_g | 精密离心机转速为 ω_g 和静止状态时加速度计输出电流之差, mA | 1.029 463 | 正态分布 | 1 | 0.76×10^{-6} mA | A | 独立 |
| U_0 | 离心机静止状态时加速度计输出电流, mA | 1.023×10^{-4} | 正态分布 | 1 | 0.65×10^{-6} mA | A | 独立 |
| k_0 | 重力场下标校得到的加速度计偏置, m/s^2 | -0.000 244 g | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 2.02×10^{-6} g | B | 独立 |
| k_1 | 重力场下标校得到的加速度计标度因数, mA/(m/s^2) | 1.148 427/g | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 1.19×10^{-6} mA/g | B | 独立 |
| δ | 加速度计分辨率修正量, m/s^2 | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.84×10^{-6} g | B | 独立 |
| ΔL_{ng} | 加速度计输入加速度约 1 g 时的转盘上下跳动量, m | 2.771×10^{-6} | 正态分布 | 1 | 0.20 μ m | A | 独立 |
| ΔL_n | 工作状态时的转盘上下跳动量, m | 5.467×10^{-6} | 正态分布 | 1 | 0.25 μ m | A | 独立 |
| α_1 | 测量动态俯仰失准角的电容测微仪示值误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.12 μ m | B | 相关 |
| β_1 | 测量动态俯仰失准角的电容测微仪安装偏角误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.12 μ m | B | $r_2 = 0.8$ |
| α_2 | 测量动态俯仰失准角的采样和显示仪器示值误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.02 μ m | B | 相关 |
| β_2 | 测量动态俯仰失准角的电容测微仪示值误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.12 μ m | B | $r_3 = 0.8$ |
| α_3 | 测量动态俯仰失准角的电容测微仪安装偏角误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.12 μ m | B | 相关 |
| β_3 | 测量动态俯仰失准角的采样和显示仪器示值误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.02 μ m | B | $r_4 = 0.8$ |
| ΔR_n | 工作状态时转盘半径伸长量, m | 2.086×10^{-6} | 正态分布 | 1 | 0.33 μ m | A | 独立 |
| δ_1 | 测量动态半径的电容测微仪示值误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.12 μ m | B | 独立 |
| δ_2 | 测量动态半径的电容测微仪安装误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.12 μ m | B | 独立 |
| δ_3 | 测量动态半径的数据采集和显示仪器示值误差修正值, m | 0 | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ | 0.02 μ m | B | 独立 |
| R_0 | 精密离心机工作半径近似值, m (测量不确定度只需毫米量级) | 1.066 | 正态分布 | 1 | 0.001 m | A | 独立 |

4.2 加速度测量结果及讨论

基于以上两种评定方法,在研的精密离心机在转速为 $12.566\ 370\ \text{rad/s}$ 时的输出加速度值及测量不确定度评定结果如图 7 所示,基于所建立的加速度测量不确定度评定模型(图 7 中 GUM)和蒙特卡洛法(图 7 中 MCM)计算得到的在研精密离心机输出加速度相对标准不确定度分别为 1.63×10^{-6} 和 1.69×10^{-6} ,二者存在细微差别,但该微小计算误差可忽略不计。实际测试中,随着精密离心机转速提高,电气噪声的影响将加大,精密离心机输出加速度精度受到一定影响。当精密离心机输出加速度为 $1\text{g} \sim 100\text{g}$ 时,按上文测量方法及不确定度评定模型对输出加速度测量不确定度进行评定,结果如表 4 所示。

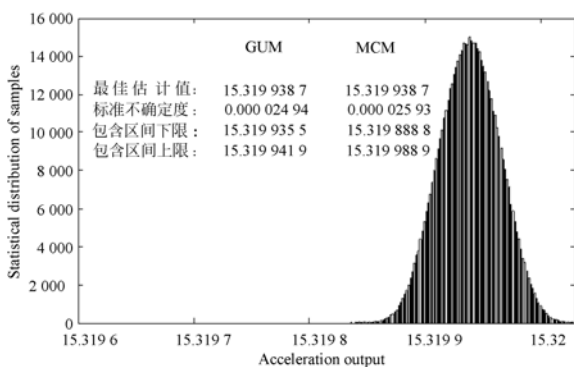


图 7 精密离心机输出加速度测量不确定度评定结果
Fig. 7 Results of acceleration measurement uncertainty for precision centrifuge

表 4 不同 G 值下精密离心机的精度评定结果

Tab. 4 Results of measurement uncertainty for precision centrifuge under different outputs

| 输出加速度范围 | 输出加速度测量不确定度 |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| $1\text{g} \leq a < 20\text{g}$ | $u_r(a) < 2 \times 10^{-6}$ |
| $20\text{g} \leq a < 60\text{g}$ | $u_r(a) < 3 \times 10^{-6}$ |
| $60\text{g} \leq a < 100\text{g}$ | $u_r(a) < 3 \times 10^{-6}$ |

测试结果表明:采用本文提出的测量不确定度评定模型和方法可以测得在研的精密离心机输出加速度相对标准不确定度为 10^{-6} 量级,其与目前国际上公开报道的最高精度的精密离心机处于同一精度量级。鉴于这些精密离心机的精度评定过程和结果没有公开报道的资料可参考,本文提

供的测量模型和精度评定方法可同时用于这些精密离心机的精度评定,以验证其精度。

通过以上分析,针对高精度的精密离心机加速度测试和精度评定,需要注意以下三方面问题:

第一,外界因素对精密离心机精度的影响。实际测试发现,不同的时间段、不同的地基振动会不同程度地影响精密离心机输出加速度的精度;而且测试时所有加速度计信号线必须严格屏蔽,以减小电磁噪声带来的不确定度。

第二,工作半径是影响精密离心机输出加速度准确度和不确定度的最主要因素。如何减小动态半径的波动是精密离心机高精度测试的重要问题。测量时通过多点平均或多圈平均可以降低动态半径的波动量,表面上测量不确定度极小,实际上输入到加速度计的加速度却严重不为恒值,因此动态半径测量及其不确定度评定应该真实地反映转盘的动态伸长量。至于静态半径,直接测量时应该重点考虑测量过程、量块接触、机械加工误差、加速度计质心和回转中心不确定引入的不确定度分量,而不只是测量仪器引入的不确定度。

第三,可采用本文提供的评定模型或蒙特卡洛两种方法计算精密离心机输出的加速度相对标准不确定度;但若需要确定精密离心机输出加速度在一定置信概率下的置信区间,建议优先考虑本文给出的测量模型,采用蒙特卡洛方法进行计算,原因是精密离心机输出加速度不一定严格服从正态分布或学生 t 分布。

5 结 论

针对高精度精密离心机输出高精度的加速度值及精度评定问题,系统地建立了 10^{-6} 量级精密离心机输出加速度的测量模型及其中重要分量的高精度测量模型以及测量不确定度评定模型。结合实际高精度测量,分别基于不确定度传播律和蒙特卡洛方法完成了在研的精密离心机输出加速度测量不确定度评定。基于本文提供的测量模型和评定方法,在研精密离心机在输出加速度为 $1 \sim 100\text{g}$ 的测量不确定度均小于 3×10^{-6} ,与国际上公开报道的最高精度同量级。控制离心机机室温度、优化转盘动平衡等因素,还可以进一步提高

该精密离心机的精度。所建立的一系列测量模型和不确定度评定方法可以为精密离心机输出高精

准、高置信度的加速度值提供参考和技术支撑,为提高惯性仪表的校准和测试精度奠定了基础。

参考文献:

- [1] 陈光炎, 吴嘉丽, 赵龙, 等. 基于阿基米德螺旋线的低 g 值微惯性开关[J]. 光学精密工程, 2009, 17(6): 1257-1261.
CHEN G Y, WU J L, ZHAO L, *et al.*. Low- g micro inertial switch based on Archimedes' spiral[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1257-1261.
- [2] IEEE Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers[S]. 2009.
- [3] 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 SH M, REN SH Q. Relationship between calibration accuracy of error model coefficients of accelerometer and error of precision centrifuge[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(4): 520-526. (in Chinese)
- [4] 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, 18(4): 508-512.
CHEN X J, REN SH Q, LI W. Calibrating method for high-order coefficients in accelerometer error model[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(4): 508-512. (in Chinese)
- [5] CHEN X J, REN SH Q. Two algorithms of working acceleration generated by a precision centrifuge with two rotating axes[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology(New Series)*, 2006, 13(1): 1-3.
- [6] 乔仁晓, 孟晓风, 季宏. 加速度计非线性项系数校准误差分析与建模[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6): 1633-1635.
QIAO R X, MENG X F, JI H. Error analysis and modeling in calibration of accelerometer's nonlinear terms' coefficients[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(6): 1633-1635. (in Chinese)
- [7] JJG1066-2011. 精密离心机检定规程[S]. 2011.
JJG1066-2011. Verification Regulation of Precision Centrifuge[S]. 2011. (in Chinese)
- [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 F G, WANG J. Research on acceleration load model of precision centrifuge[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 36-40. (in Chinese)
- [9] JJF 1116-2004. 线加速度计的精密离心机校准规范[S]. 2004.
JJF 1116-2004. Calibration Specification for Linear Accelerometer Used Precision Centrifuge[S]. 2004. (in Chinese)
- [10] 杨巨宝. 精密离心机半径值动态测试系统[J]. 宇航计测技术, 1994, 13(2): 5-10.
YANG J B. Dynamic measurement system for the radius of precision centrifuge[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 1994, 13(2): 5-10. (in Chinese)
- [11] 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 X J, SUN Q X, REN SH Q. Measurement of centrifuge arm's dynamic radius length[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2002, 22(2): 10-13. (in Chinese)
- [12] 刘健, 王光宝, 刘宇, 等. 转台离心机动态半径测试方法的研究[J]. 宇航计测技术, 2006, 26(6): 1-3.
LIU J, WANG G B, LIU Y, *et al.*. Revolving table centrifugal machine dynamic radius measuring method [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2006, 26(6): 1-3. (in Chinese)
- [13] 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 L, HE Y C, LONG Z H, *et al.*. Uncertainty analysis and application of precise centrifuge [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2003, 23(6): 36-37. (in Chinese)
- [14] Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement [S]. ISO/IEC GUIDE 98-3.
- [15] MOSCHIONI G, SAGGIN B, TARABINI, *et al.*. Use of design of experiments and Monte Carlo method for instruments optimal design[J]. *Meas-*

urement, 2013, (46): 976-984.

- [16] 凌明祥,王珏,宁菲,等. 地球自转及天体作用力对精密离心机的影响[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 97-99.

LING M X, WANG J, NING F, *et al.*. Influence of Earth's rotation and Celestial forces on precision centrifuge[J]. *Equipment Environment Engineering*, 2014, 11(1): 97-99. (in Chinese)

- [17] 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 M X, LI M H, YANG X, *et al.*. A measurement method and application for static radius of high precision centrifuge [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1072-1078. (in Chinese)

作者简介:



凌明祥(1986-),男,云南昭通人,博士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,现为中国工程物理研究院总体工程研究所工程师,研究方向为压电智能结构与振动控制。E-mail: ling_mx@163.com

通信作者:



黎启胜(1965-),男,湖北黄冈人,研究员,1992年于国防科学技术大学获得硕士学位,主要研究方向为离心机及大型环境试验装备关键技术。E-mail: liqisheng@caep.ac.cn.com

(版权所有 未经许可 不得转载)