

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.03.11

基于精密离心机的线加速度计交叉耦合系数的校准

何懿才, 尹晓丽

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了精密离心机上进行加速度计交叉耦合系数的校准方法。分析了试验半径反算法、回归迭代法的测量步骤及处理方法并根据加速度计的试验半径, 对交叉轴、横向轴安装状态下, 安装标称位置对准误差产生的原因进行了分析, 并研究了对准误差对二次项系数测量的影响。最终确定了建模方法, 并对校准结果作了不确定度分析。

关键词: 精密离心机; 线加速度计; 交叉耦合系数; 不确定度; 校准

中图分类号: TB934

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)03-0051-05

Calibration for the Cross-coupling Coefficients of Linear Accelerometers Base on Precision Centrifuge

HE Yicai, YIN Xiaoli

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A calibration method for the cross-coupling coefficients of linear accelerometers was researched in this paper. The calibration test was conducted on a precision centrifuge. The calculation of radius and the procedure of iterative regression method were analyzed in this paper. According to the principle of measurement, the sources of alignment error were analyzed in the installation condition of both the crossed-axis and the transverse axis. The calibration accuracy was verified by the calculation of radius, the definition of alignment error for nominal installation angle and the research of influence on the second-order coefficients by alignment error. The modeling method was established and the uncertainty of calibration result was analyzed.

Key words: precision centrifuge; linear accelerometer; cross-coupling coefficient; uncertainty; calibration

0 引言

为了精确应用线加速度计, 通常需要建立一个含有各基准轴的高阶非线性项和基准轴之间交叉耦合项的模型方程, 以描述在精密离心机上确定被测加速度计计量特性的过程。如今, 随着全加速度计惯性测量组合的应用, 交叉耦合系数的校准愈发显得重要^[1]。

目前, 国内自行研制、生产并投入使用的加速度计, 主要是对其输入轴的性能参数进行离心机测试, 校准输入轴的二、三次非线性系数, 对离心机的工作原理及产生的向心加速度的不确定度进行分析, 对加速度计输入轴高次项的离心机校准技术也作了很多研究, 但对交叉耦合系数的离心机测试研究很少。交叉

耦合系数的静态测试目前仅限于重力场的静态多点(8点及以上)翻滚测试法, 文献[2]对此进行了正交多位置标定研究, 由于测量范围限制在 $-1 \sim 1 g$ 之间, 因此测量结果存在很大的局限性。文献[3]主要针对加速度计数学方程的高次项系数的测试作了介绍, 其中包括加速度计交叉耦合系数的测试, 但对该系数的测试方法仅给出了原理示意。由于离心机加速度是非均匀场, 加速度计安装位置的确定会影响最终的测试结果, 对加速度计交叉耦合系数的测试缺乏可操作性, 而且对测试结果没有相应的分析、评定。从查到的资料看, 这反映了当时国外的技术水平, 同时也表明, 在精密离心机上进行(包括交叉耦合系数在内的)全量程模型测试是加速度计测试的发展趋势。

加速度计交叉耦合系数的测定难点在于其基准轴相对加速度矢量的交叉位置安装对准, 本文介绍了如何根据加速度计输入轴方向的试验半径来确定交叉轴、横向轴的标称角度的对准误差, 并研究了对准误差对二次项系数测量的影响, 为保证交叉系数的校准准确

收稿日期: 2017-03-31

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2015205A005); 航空科学基金资助项目(20110844001)

作者简介: 何懿才(1964-), 男, 江西南昌人, 高级工程师, 研究方向为惯性计量。

度提供了依据。

1 测量原理

离心机的向心加速度 a_c 作用于加速度计输入轴 IA、摆轴 PA、输出轴 OA 的加速度分别为 a_i 、 a_p 和 a_o ，其二阶项的误差模型为

$$a_s = \frac{E}{K_1} = \dots + K_2 a_i^2 + K_{pp} a_p^2 + K_{oo} a_o^2 + K_{ip} a_i a_p + K_{io} a_i a_o + K_{op} a_o a_p + \dots \quad (1)$$

式中： K_1 为标度因数； K_2 为二阶非线性系数； K_{pp} 、 K_{oo} 为交叉轴非线性系数； K_{ip} 、 K_{io} 、 K_{op} 为交叉耦合系数。

为了分离各二阶项，需要进行多方位的测试。本文研究的交叉耦合系数校准，其前提是各基准轴的二阶项已经单值测定，如向心加速度沿某一基准轴输入，而与另两基准轴垂直，则可测定该基准轴的二次非线性系数，由于没有其它项的混叠，因此具有最好的测量准确度。

以 K_{ip} 为例，按图 1 所示的成对位置进行。加速度计输入轴相对于向心加速度矢量的标称角度为 φ_0 ，输出轴为非敏感轴，各基准轴所受加速度分别为 $a_i = a_c \cdot \cos \varphi_0$ ， $a_p = a_c \cdot \sin \varphi_0$ ， $a_o = g_L$ ，其中 g_L 为重力加速度，那么 a_c 的二阶项系数可表示为

$$c_2 = K_2 \cos^2 \varphi_0 + K_{pp} \sin^2 \varphi_0 + K_{ip} \cos \varphi_0 \sin \varphi_0 \quad (2)$$

式中：当 $\varphi_0 = 45^\circ$ 时，则满足正负极性条件， $c_2 = 0.5 (K_2 + K_{pp} + K_{ip})$ ，从而测定

$$K_{ip} = 2c_2 - (K_2 + K_{pp}) \quad (3)$$

采用类似方法，同样可以测定其它交叉耦合系数。

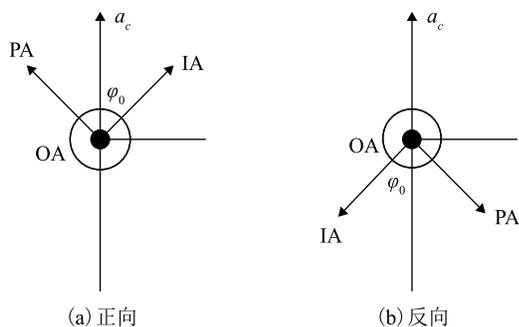


图 1 交叉耦合系数 K_{ip} 的测量位置对(顶视)

2 安装对准

精密离心机的安装平台提供向心加速度矢量的安装基准面，加速度计的安装夹具则保证其输入轴与加速度矢量的标称角度，并完成测量极性的换向，通常

是绕安装夹具的回转中心线旋转完成。由于待测加速度计的有效质量中心 (ECM) 的位置在一定范围内是未知的，更无法保证 ECM 在夹具的回转线上。对输入轴的测量，极性的改变只是造成正负向的试验半径不同，不影响安装的标称角度。但对其它基准轴和基准轴之间交叉耦合项的的测量则会带来明显的标称角度的误差，严重影响偶次项的测量结果。

为了分析加速度计的安装对准误差，首先需要确定校准试验的工作半径。因此，线加速度计的精密离心机试验首先是从输入轴方向开始的，在测量其高次非线性系数的同时，测量出试验半径，这是测量其它基准轴高次非线性系数和基准轴之间交叉耦合系数的基础。

2.1 加速度计试验半径

在离心机校准试验中，加速度计的真实半径值，难以准确的知道，即使精确的知道 ECM，也无法通过直接手段进行测量并保证在实用的误差范围内。必须通过重力场单独测定加速度计的标度因数 K_1 、零偏 K_0 和非线性度等，再由离心机上的输出来估算，这种间接测量的半径值，既有离心机的误差影响，又有加速度计自身误差的影响。试验半径只是代表加速度计进行离心机试验的安装位置估值，它与非线性的估值存在一定的耦合。

2.1.1 静态半径反算法

反算法的测量，通常参照加速度计在重力加速度的输出信号进行估算。文献[4]对此进行了分析研究，考虑了动态失准角的补偿等。为了提高测量准确度，应确定加速度计输入轴相对水平面的安装失准角，它包括加速度计自身的 IA 轴失准角、夹具安装面误差、离心机安装基准面误差和离心机主轴铅锤度，其中离心机主轴铅锤度产生的误差是每转周期性的，其输出影响可以通过离心机整数转时间的采样来减少，而其它几项产生的误差则会伴随试验过程的始终，需要前期测试，确定其大小，用于数据补偿。例如 $1'$ 的安装失准角就将导致 3×10^{-4} 的半径测量误差，而 IA 轴的失准角通常都在角分级。

在台面的两点(及以上)等间隔位置测量加速度计输出，其均值 E_0 即消除了主轴铅锤度的影响，再借助重力场的测定结果。被测加速度计的总安装失准角 λ_c 为

$$\lambda_c = \frac{\frac{E_0}{K_1} - K_0}{g_L} \quad (4)$$

则测量不确定度结果

$$u(\lambda_c) = \frac{\sqrt{u^2(K_0) + \left[\frac{u(E_0)}{K_1}\right]^2 + \left[\frac{E_0}{K_1^2}u(K_1)\right]^2}}{g_L}$$

根据加速度计的试验极性, 在 $1g_L$ (或 $-1g_L$) 状态测量其参考量 E_g , 测量平台应保证一定的水平度, 如 $5'$ 的水平偏角将导致 1×10^{-6} 的测量误差。启动离心机以角速率 ω_g 工作, 使被测加速度计的输出 E_a 为参考量。对于非线性误差为 δ_a 的被测加速度计, 此时的影响为 $\left|\frac{E_a - E_g}{K_1}\right| \times \delta_a$, 如果 $\delta_a = 1 \times 10^{-4}$, 为使其影响不大于 1×10^{-6} , 则输出相对参考量的偏差应小于 1% (或 $0.01g_L$), 对目前的精密离心机, 通过调整其 ω_g 可以达到。

沿被测加速度计测量轴作用的加速度值

$$a_g = \frac{E_a}{K_1 - K_0} \quad (5)$$

测量不确定度

$$u(a_g) = \sqrt{u^2(K_0) + \left[\frac{u(E_a)}{K_1}\right]^2 + \left[\frac{E_a}{K_1^2}u(K_1)\right]^2}$$

假定离心机安放地的纬度(北)为 Φ , 工作转速 ω_g 与地球转速 ω_e 同向, 忽略半径、失准角在 $1g_L$ 过载的变化以及方位失准角的影响, 则加速度计在 a_g 的试验半径 R_g 为

$$R_g = \frac{a_g - \lambda_c g_L}{(\omega_g^2 + 2\omega_g \omega_e \sin\Phi) \cos \lambda_c} \quad (6)$$

测量不确定度

$$u(R_g) = \frac{\sqrt{u^2(a_g) + [g_L u(\lambda_c)]^2 + [2R_g \omega_g u(\omega_g)]^2}}{\omega_g^2}$$

参照重力加速度的反算法只在零位和 $1g_L$ 参考加速度点进行了测量, 可认为是基于双点基线的拟合, 试验方法简单, 但对测量噪声敏感。静态输出 E_0 采用了平均测量法, 通常是可靠的, 主要误差源是参考加速度点的输出 E_a 的测量误差。加速度计自身误差的影响, 可以用加速度计的非线性度作为误差包络线给予控制。

2.1.2 回归迭代法

根据多个加速度试验点的采集数据, 通过选定的模型方程进行回归分析, 采用迭代程序算法得到试验半径, 该评估方法是建立在精确统计的基础上。

假设加速度计 ECM 的估算半径 R_0 存在测量误差 ΔR , 则真实半径可表示为 $R = R_0(1 + \frac{\Delta R}{R_0})$, 据此, 输

入加速度也须相应乘以因子 $(1 + \frac{\Delta R}{R_0})$ 。在输入轴方向, 对准误差的影响为余弦因子, 其微小变化通常可忽略。令 $c = \frac{\Delta R}{R_0}$, 估算半径对应的输入加速度为 a_i , 则真实加速度可表示为 $a'_i = a_i(1 + c)$, 因此, 模型方程为

$$a_s = \frac{E}{K_1} = K_{0+} + K_{0-} + (1 + c_+)a_{i+} + (1 + c_-)a_{i-} + K_2(a_{i+}^2 + a_{i-}^2) + \dots \quad (7)$$

式中: 带下标“+”和“-”用于区分加速度计试验极性。从模型方程的回归结果 c_+ 和 c_- 将输入加速度修正为 $(1 + c_+)a_{i+}$ 和 $(1 + c_-)a_{i-}$, 并带入公式(7)进行回归运算, 重复此迭代过程, 直到 c_+ , c_- 减小到接近于 0 的预设值为止。由每一步迭代运算的 c_{i+} , c_{i-} , 最终确定试验半径为 $R_+ = R_{0+} \prod_{i=1}^N (1 + c_{i+})$, $R_- = R_{0-} \prod_{i=1}^N (1 + c_{i-})$ 。该方法对于单方向的试验, 也同样适用。

回归样本取自试验全量程范围, 模型方程的高阶非线性项则减小了非线性的影响, 同反算法相比, 提高了噪声抑制能力。

2.1.3 试验半径测量结果及分析

利用加速度计(SNJ-1 03#)在 IA 轴的离心机试验数据, 反算法三次重复测量的结果如表 1 所示。由表 1 可得出, 正、负向最大分别相差 $19 \mu\text{m}$ 和 $22 \mu\text{m}$ 。

表 1 反算法半径 m

序号	正向	负向
1	0.714771	0.705790
2	0.714767	0.705785
3	0.714786	0.705807
平均	0.714775	0.705794

分别对 7, 14, 25 g 量程段数据点用回归迭代法计算半径, 结果如表 2 所示。采用一阶模型时, 随着加速度量程的加大, 呈明显的非线性偏离, 各量程段的正、负向最大分别相差 $55 \mu\text{m}$ 和 $37 \mu\text{m}$, 与反算法 1 g 的正、负向最大分别相差 $89 \mu\text{m}$ 和 $48 \mu\text{m}$; 采用二阶模型时, 各量程段的正、负向最大分别相差 $20 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$, 与反算法 1 g 的正、负向最大分别相差 $11 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$; 采用三阶模型时, 各量程段的正、负向最大分别相差 $10 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$, 与反算法 1 g 的正、负向最大分别相差 $10 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 。因此, 回归迭代法应采用二阶或三阶的模型方程, 且数据点都要通过模型适

当性的检验。

表2 回归迭代法半径 m

模型	7g段		14g段		25g段	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
一阶	0.714809	0.705783	0.714828	0.705767	0.714864	0.705746
二阶	0.714766	0.705795	0.714786	0.705800	0.714778	0.705795
三阶	0.714775	0.705804	0.714779	0.705793	0.714785	0.705802

2.2 对准误差分析

2.2.1 交叉轴安装极性变化的对准不对称性

对图2所示的交叉轴安装位置,假设试验极性的改变是绕夹具的O'点翻转,则可以确定离心机回转轴O点到夹具翻转中心O'点的距离 $R = \frac{R_+ + R_-}{2}$, ECM

到O'点的距离 $r = \frac{|R_+ - R_-|}{2}$ 。理想的试验安装应使

ECM在O'点,事实上这难以做到。由于ECM的偏距r的存在,加速度计随夹具转动标称角度 φ_0 时,会产生对准误差。试验极性为正时 $R_1 = \sqrt{(R-r \cdot \cos \varphi_0)^2 + (r \cdot \sin \varphi_0)^2}$, $a_{c1} = R_1 \cdot \omega^2$, 对准误差 $\Delta\varphi_1 = \arctg \frac{r \cdot \sin \varphi_0}{R-r \cdot \cos \varphi_0}$ 。试验极性为负时 $R_2 = \sqrt{(R+r \cdot \cos \varphi_0)^2 + (r \cdot \sin \varphi_0)^2}$, $a_{c2} = R_2 \cdot \omega^2$, 对准误差 $\Delta\varphi_2 = \arctg \frac{r \cdot \sin \varphi_0}{R+r \cdot \cos \varphi_0}$ 。当 $R > r$ 时, 则 $\Delta\varphi_1 \approx \Delta\varphi_2$ 。

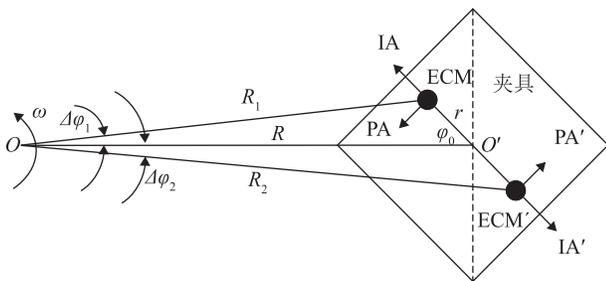


图2 交叉轴对准误差示意图(顶视)

对单极性的测量,方位对准误差是指加速度计的IA轴与向心加速度相对于垂线的静态偏角,它影响 a_c 在IA轴的分量,仅产生标度因数的误差。在加速度计试验极性变化时,其对准误差的极性也将变化,造成IA轴的对准产生不对称性,如果不予修正,则导致标度因数的不对称,会严重影响偶次项系数。若R为500 mm, r为0.5 mm时,则对准不对称性误差是 7.1×10^{-4} rad, 在 200 m/s^2 加速度时,相当于二次项系数的

误差为 $2.5 \times 10^{-6} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2$ 。为消除对准不对称性的影响,通常在数据处理算法中,采用正负标度因数分别列项的方法。

同时,标称角度 φ_0 的对准误差也会带来二阶项系数的测量误差 Δc_2 ,由式(2)可得

$$\Delta c_2 = [(K_{pp} - K_2) \sin 2\varphi_0 + K_{ip} \cos 2\varphi_0] \Delta\varphi_0 \quad (8)$$

当 $\varphi_0 = 45^\circ$ 或 -135° 时, $\Delta c_2 = (K_{pp} - K_2) \cdot \Delta\varphi_0$ 。

经测量,加速度计(SNJ-1 03#)的 K_2 为 $3.94 \times 10^{-7} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2$, K_{pp} 为 $4.7 \times 10^{-8} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2$ 。用多齿分度盘改变标称角度,分别在 44° , 45° 和 46° 的情况下进行了测试,得到 c_2 的结果如表3所示。

表3 交叉轴对准误差的影响

二阶项系数	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^{-2}$		
	交叉 44°	交叉 45°	交叉 46°
c_2	5.84×10^{-7}	5.76×10^{-7}	5.68×10^{-7}

对准误差为 1° 的 Δc_2 为 $-6.1 \times 10^{-9} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2$,从表3的结果看,与理论值是基本吻合的。

2.2.2 横向轴安装对准

对图3所示的横向轴安装位置,由于ECM的偏距r的存在,同样产生标称角度的对准误差。在忽略夹具的初始方位角时 $R_3 = \sqrt{R^2 + r^2}$, $a_{c3} = R_3 \cdot \omega^2$, 对准误差 $\Delta\varphi = \arctg \frac{r}{R}$ 。

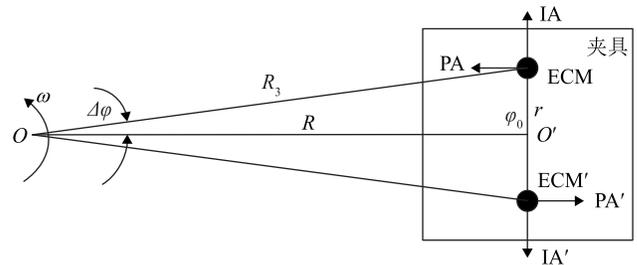


图3 横向轴对准误差示意图(顶视)

横向轴安装的对准偏角仅产生标度因数的误差,即使试验极性变化,也不会出现加速度计标度因数的不对称问题。只是带来二阶项系数的测量误差,当 $\varphi_0 = 90^\circ$ 或 -90° 时,由式(2)和式(8)得 $\Delta c_2 = \Delta K_{pp} = -K_{ip} \cdot \Delta\varphi$ 。

经测量,加速度计(SNJ-1 03#)的 K_{ip} 为 $7.1 \times 10^{-7} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2$ 。用多齿分度盘改变标称角度,分别在 89° , 90° , 91° 的情况下进行了测试,得到 c_2 的结果如表4所示。

表4 交叉轴对准误差的影响

(m · s ⁻²)/(m · s ⁻²) ²			
二阶项系数	横向 89°	横向 90°	横向 91°
C ₂	6.01×10 ⁻⁸	4.72×10 ⁻⁸	4.26×10 ⁻⁸

对准误差为 91° 的 Δc₂ 为 -1.24×10⁻⁸(m · s⁻²)/(m · s⁻²)², 从表 4 的结果看, 对准误差的影响趋势是明显的。

2.2.3 安装对准的控制

从上述分析可知, 加速度计在交叉轴和横向轴安装状态下, 由对准误差带来的二阶项系数测量的影响, 与其大小成正比, 交叉轴的因子为相关两个基准轴的二阶非线性系数差, 横向轴的因子为相关的交叉耦合系数。与同阶高次项系数相比太小, 则可不予考虑。对现代加速度计, 通常二阶项的测量不确定度比其结果要小一个量级(10⁻¹)。据此, 如将对准误差控制在 0.01 rad(0.573°), 那么二阶项测量的误差就不会超过 2%, 对测量结果的影响就可忽略。

对于加速度计的安装, 夹具的设计也容易实现, 如半径为 500 mm, 要满足对准误差 0.01 rad 的要求, ECM 的偏距只须小于 5 mm 即可。夹具的设计依据的是离心机台面的安装基准面, 保证了初始方位的对准, 加速度计一次安装后, 只须通过夹具的翻转, 就可以测量三个基准轴输入、任意两个轴之间交叉耦合输入的情形。为此, 加速度计安装夹具设计成正六方体, 被测加速度计安装在六方体中, 容易将 ECM 调整到六方体的几何中心附近。

3 数据处理

3.1 模型方程的确定

加速度计误差模型的所有二阶项、三阶项, 都可以归结为向心加速度的二阶项 c₂, 三阶项 c₃。伴随测量极性改变的半径、对准的不对称性, 要求正负标度因数分别评定, 为使其对二阶项的影响降到最低, 对输入加速度引入一个迭代修正项(1 + c)。在离心机试验过程中, 半径的过载伸长、半径的弯曲、ECM 的偏移、旋转轴的偏移、热膨胀、动态对准误差、角速度误差等, 使施加的加速度值增加了任意极性的变化, 其中有的项可以通过测量给予修正补偿, 但有些是由待测加速度计和离心机试验台特性的相互作用产生的, 且不能以离心机试验台误差的途径来描述, 无法修正补偿, 这些误差在加速度计输出数据中是以奇异二次项 K_{oq} 的形式存在的, 它可通过正负极性的测试

数据分离出来。采用迭代运算程序的交叉耦合模型方程为

$$a_s = \frac{E}{K_1} = K_{0+} + K_{0-} + (1 + c_+)a_{i+} + (1 + c_-)a_{i-} + c_2(a_{c+}^2 + a_{c-}^2) + K_{oq}(a_{i+}^2 - a_{i-}^2) + c_3(a_{c+}^3 + a_{c-}^3) \quad (9)$$

根据测定的加速度计各基准轴的二阶项, 结合 c₂ 的代数合并, 就可以得到相应的交叉耦合系数的结果。

3.2 测量不确定度

对单值测定的模型方程系数, 同时也得到它的测量不确定度, 但交叉耦合系数的测量不确定度还须进一步评定。以 K_{ip} 为例, 式(3)中测量不确定度的来源有: 1) 二阶项 c₂ 的不确定度 u(c₂); 2) 二阶项 c₂ 的测量误差 Δc₂ 引入的不确定度 u(Δc₂), 按 B 类均匀分布评定; 3) 输入轴二阶项 K₂ 的不确定度 u(K₂); 4) 摆轴二阶项 K_{pp} 的不确定度 u(K_{pp}); 5) 摆轴二阶项 K_{pp} 的测量误差 ΔK_{pp} 引入的不确定度 u(ΔK_{pp}), 按 B 类均匀分布评定。以上不确定度分量相互独立, 则合成不确定度为

$$u(K_{ip}) = \sqrt{2(u^2(c_2) + u^2(\Delta c_2)) + u^2(K_2) + u^2(K_{pp}) + u^2(\Delta K_{pp})} \quad (10)$$

3.3 实测结果

加速度计(SNJ-1 03#)分别在 LXJ-100 和 LXJ-200 两台精密离心机上进行了比对测量, 离心机准确度等级相同, 测量结果如表 5 所示。比对参考值用算术平均法, 归一化偏差评价分别为 0.84 和 0.85, 在合理的预期之内。

表5 比对结果(m · s⁻²)/(m · s⁻²)²

	LXJ-100	LXJ-200
K ₂	3.94×10 ⁻⁷	4.13×10 ⁻⁷
K _{pp}	0.47×10 ⁻⁷	-0.15×10 ⁻⁷
c ₂	5.76×10 ⁻⁷	5.33×10 ⁻⁷
K _{ip}	7.10×10 ⁻⁷	6.67×10 ⁻⁷
u(K _{ip})	0.11×10 ⁻⁷	0.10×10 ⁻⁷

4 结论

由加速度计输入轴方向的试验半径, 结合工装夹具的翻转, 就可以确定交叉轴、横向轴安装的对准误差, 从而确定由此带来的二次项系数测量的影响, 通准误差的

(下转第 50 页)

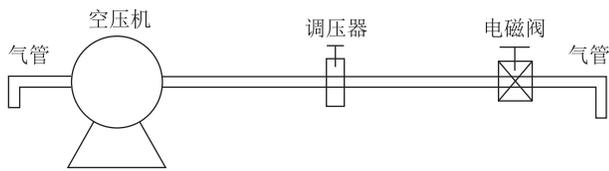


图5 喷雾系统示意图

2 运行效果

2.1 测试验证

依据 JJF 1101-2003 环境试验设备温度、湿度校准规范, 选用多路温湿度巡显仪对该装置进行校准, 校准结果及中国计量科学研究院专家对该装置进行现场校准结果的数据表明, 该装置的检测结果完全满足我们设计的技术指标要求。^[7] 其高温温度最大误差: $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$; 低温温度最大误差: $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$; 湿度最大误差: $-0.9\% \text{RH}$ 。

2.2 运行结果

目前, 该装置已投入到我院实际的现场在线检测试验工作中, 试验表明, 由于有了该装置的开发, 真正实现了流量计量仪表在温湿度环境条件变化的条件下, 进行在线检测, 满足了规程、规范的技术要求。

3 结语

目前“流量计量仪表环境试验在线检测装置”已通过了国家质检总局科技司委托天津市市场和质量监督管

理委员会在天津组织专家对该装置的验收。该装置完全能够满足对 $\phi 65$, $\phi 80$, $\phi 100$, $\phi 125$, $\phi 150$, $\phi 200$ 不同口径流量仪表, 在不同温湿度环境条件下的在线检测工作, 该装置最大的亮点是突破传统的设计理念, 把试验箱体分割成两半, 实现前后对接, 良好的密封。把管路及被测仪表直接接入到环境试验装置内, 实现真正意义上的环境试验的在线检测。同时, 通过更换试验箱体的法兰, 实现对不同口径流量仪表的检测。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 1033-2007, 电磁流量计检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [2] 郭辉. DN(15~200)mm 水流量标准装置的研制[D]. 保定: 河北大学, 2014.
- [3] 王池. 我国流量计量发展现状[J]. 现代计量测试, 2000, 8(02): 8-11.
- [4] 王海. 流量计量及配套仪表质量检测体系的设计与实现[J]. 科技与创新, 2016, 16(03): 135.
- [5] 刘鑫, 安永利. 环境试验设备空载和满载检测有关问题的探讨[J]. 计测技术, 2012, 32(02): 58-59.
- [6] 李红燕. 温度试验箱温度过冲问题探讨[J]. 计测技术, 2009, 29(04): 60-61.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1101-2003, 环境试验设备温度、湿度校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.



(上接第55页)

通过对控制, 保证交叉耦合系数的校准准确度, 为在精密离心机上进行交叉耦合系数的全量程测试提供了依据。

加速度计交叉耦合系数的校准需要通过多方位的测试才能完成, 应进一步研究安装状态对二次项的混叠影响, 以完善线加速度计精密离心机校准规范。

参考文献

- [1] 王劲松, 王祁, 孙圣和. 加速度计的交叉耦合对无陀螺惯性测量组合影响的研究[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(1): 29-33.
- [2] 徐仕会. 加速度计交叉耦合系数高精度标定[J]. 指挥控制

与仿真, 2016, 38(3): 136-139.

- [3] IEEE Std 836-2009 IEEE Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers[S].
- [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.
- [5] 王世明. 基于离心机的惯性仪表测试方法研究与误差分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [6] D H Titterton, J L Weston. 捷联惯性导航技术: 第2版[M]. 张天光, 王秀萍, 王丽霞, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2010.