

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2014—2022

金属振子式速率陀螺校准规范

Calibration Specification for Metal Shell Vibratory Rate Gyroscopes

2022-12-27 发布


2023-06-27 实施

国家市场监督管理总局 发布

金属振子式速率陀螺校准规范

Calibration Specification for Metal Shell

Vibratory Rate Gyroscopes



JJF 2014—2022

归口单位：全国惯性技术计量技术委员会

主要起草单位：北京信息科技大学

南京理工大学

参加起草单位：国防科技大学

上海航天控制技术研究所

中国航天电子技术研究院 772 所

西安建筑科技大学

本规范由全国惯性技术计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

苏 中（北京信息科技大学）

付梦印（南京理工大学）

刘 宁（北京信息科技大学）

参加起草人：

吴学忠（国防科技大学）

赵万良（上海航天控制技术研究所）

权海洋（中国航天电子技术研究院 772 所）

宋丽君（西安建筑科技大学）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
4.1 原理	(1)
4.2 轴系定义	(2)
5 计量特性	(3)
6 校准条件	(4)
6.1 环境条件	(4)
6.2 校准用设备	(4)
7 校准项目和校准方法	(5)
7.1 校准项目	(5)
7.2 校准方法	(6)
8 校准结果表达	(18)
9 复校时间间隔	(19)
附录 A 校准证书内页格式	(20)
附录 B 金属振子式速率陀螺主要参数不确定度评定示例	(21)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列文件。

本规范编写时参考了 IEEE Std 1431TM—2004《科里奥利原理振动陀螺仪的 IEEE 标准技术规范格式指南和试验方法》、JJF 1535—2015《微机电（MEMS）陀螺仪校准规范》、JJF 1537—2015《陀螺仪动态特性校准规范》和 GJB 2426A—2004《光纤陀螺仪测试方法》。

本规范为首次发布。

金属振子式速率陀螺校准规范

1 范围

本规范适用于单自由度金属振子式速率陀螺。多自由度金属振子式速率陀螺可以参照执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1535—2015 微机电（MEMS）陀螺仪校准规范

JJF 1537—2015 陀螺仪动态特性校准规范

GB/T 321—2005 优先数和优先数系

GJB 585A—1998 惯性技术术语

GJB 2426A—2004 光纤陀螺仪测试方法

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修订单）适用于本规范。

3 术语

JJF 1535—2015、JJF 1537—2015、GJB 585A—1998、GJB 2426A—2004 界定的以及下列术语、定义适用于本规范。

3.1 金属谐振子 metal shell resonator

多曲面融合而成的轴对称合金筒形结构，是金属振子式速率陀螺的核心敏感构件，用于敏感输入角速率。

3.2 金属振子式速率陀螺 metal shell vibratory rate gyroscopes

利用多曲面融合的金属谐振子表面的驻波进动效应来敏感输入角速率的陀螺。

3.3 固有刚性轴 inherent rigidity axis

敏感构件在固有频率下振动，振动幅值能达到极值的轴。

4 概述

4.1 原理

金属振子式速率陀螺的金属谐振子分布有相差 45° 的固有刚性轴系 p 轴和 q 轴，这两个轴系电相位相互正交，金属谐振子上的振动可沿着这两个轴系进行正交分解与合成。在这几个轴系关键点上对称均匀布有压电电极，用于对振型进行测量与控制。金属振子式速率陀螺的工作原理是敏感两个正交振动，再进行合成。金属振子式速率陀螺可等效为一个经典的哥氏振动陀螺，如图 1 所示。金属谐振子的 p 轴包括 p_p 和 p_n ，其中 p_p 为激励电极所在轴向， p_n 为反馈电极所在轴向，金属谐振子的 q 轴也采用这种布置方式。在每个作用轴向上，均存在阻尼力和弹性力。

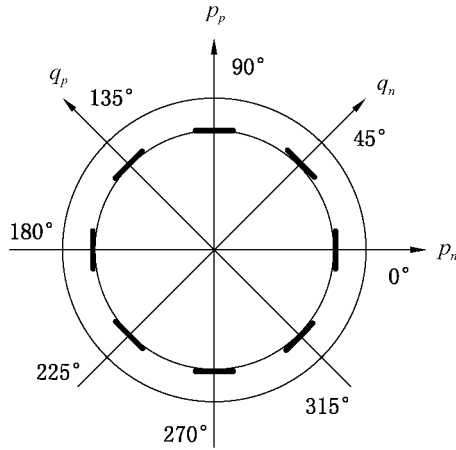


图 1 金属振子式速率陀螺等效示意图

金属振子式速率陀螺的理想物理模型为：

$$\begin{cases} p'' + 4\Omega K q' + (d_{p_p} + d_{p_n}) p' + (k_{p_p} + k_{p_n}) p + k_{p_q} q = f_p \\ q'' - 4\Omega K p' + (d_{q_p} + d_{q_n}) q' + (k_{q_p} + k_{q_n}) q + k_{q_p} p = f_q \end{cases} \quad (1)$$

式中：

p' —— p 轴上的运动速度；

q' —— q 轴上的运动速度；

p'' —— p 轴上的运动加速度；

q'' —— q 轴上的运动加速度；

p —— p 轴上的运动位移，m；

q —— q 轴上的运动位移，m；

Ω ——输入角速率，($^\circ$) /s, ($^\circ$) /h；

K ——进动因子；

d_{p_p} 、 d_{p_n} 、 d_{q_p} 、 d_{q_n} ——对应轴系的阻尼系数；

k_{p_p} 、 k_{p_n} 、 k_{q_p} 、 k_{q_n} ——对应轴系的弹性系数；

k_{p_q} 、 k_{q_p} ——轴系间扰动系数；

f_p 、 f_q ——对应轴系施加的外力，N。

4.2 轴系定义

金属振子式速率陀螺轴向与基准轴的关系如图 2 所示，其中， OX 、 OY 与陀螺输入轴 IA （即 OZ ）垂直，且两两正交，三个轴的正向满足右手法则。输入基准轴 IRA （即 $o'z'$ ）、 $o'x'$ 和 $o'y'$ 是由安装确定的基准轴，这三个轴名义上分别与 IA 、 OX 、 OY 平行，且三个轴的正向满足右手法则。

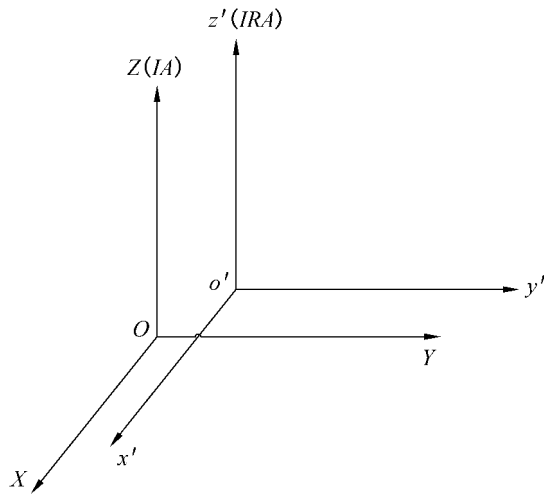


图 2 基准轴与金属振子式速率陀螺轴向的关系图

5 计量特性

金属振子式速率陀螺的主要计量特性见表 1。

表 1 金属振子式速率陀螺的主要计量特性

序号	计量特性	单位
1	标度因数	$\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$
2	标度因数非线性度	
3	量程	$(\text{°})/\text{s}$, $(\text{°})/\text{h}$
4	标度因数不对称度	
5	标度因数重复性	
6	标度因数温度灵敏度	$1/^\circ\text{C}$
7	标度因数轴向加速度敏感度	$\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1} \text{g}^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1} \text{g}^{-1}$
8	标度因数冲击前后变化量	$\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$
9	标度因数振动前后变化量	$\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$
10	阈值	$(\text{°})/\text{s}$, $(\text{°})/\text{h}$
11	分辨率	$(\text{°})/\text{s}$, $(\text{°})/\text{h}$
12	输入轴失准角	'
13	输入轴失准角重复性	'
14	零偏	$(\text{°})/\text{s}$, $(\text{°})/\text{h}$
15	零偏稳定性	$(\text{°})/\text{s}$, $(\text{°})/\text{h}$
16	零偏重复性	$(\text{°})/\text{s}$, $(\text{°})/\text{h}$
17	零偏温度灵敏度	$[(\text{°})/\text{s}] \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $[(\text{°})/\text{h}] \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

表 1 (续)

序号	计量特性	单位
18	零偏加速度灵敏度	$[(^{\circ})/s] \cdot g^{-1}$, $[(^{\circ})/h] \cdot g^{-1}$
19	零偏冲击前后变化量	$(^{\circ})/s$, $(^{\circ})/h$
20	零偏振动前后变化量	$(^{\circ})/s$, $(^{\circ})/h$
21	角度随机游走系数	$(^{\circ})/s^{1/2}$, $(^{\circ})/h^{1/2}$
22	带宽	Hz
23	输出延迟时间	s
24	启动时间	s

6 校准条件

6.1 环境条件

- 1) 温度： $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ ，校准过程中温度波动量不超过 2°C 。
- 2) 相对湿度： $\leq 85\%$ 。
- 3) 周围无强电磁场，无腐蚀性气体或液体，无强震源。

6.2 校准用设备

校准用设备及推荐技术指标见表 2。

表 2 校准用设备及推荐技术指标

序号	校准用设备	技术指标	用途
1	速率转台	速率精度及平稳性： 10^{-2} (速率 $0.01^{\circ}/s \sim 1^{\circ}/s$)； 10^{-3} (速率 $1^{\circ}/s \sim 10^{\circ}/s$)； 10^{-4} (速率 $\geq 10^{\circ}/s$)	标度因数、标度因数非线性度、量程、标度因数不对称度、标度因数重复性、标度因数温度灵敏度、阈值、分辨率、输入轴失准角、输入轴失准角重复性、启动时间
2	温箱	温度偏差： $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 温度波动度： 1°C 温度均匀度： 2°C	标度因数温度灵敏度、零偏温度灵敏度
3	双轴位置转台	角位置精度： $\pm 3''$ 角位置测量重复性： $\pm 3''$	标度因数轴向加速度敏感度、零偏加速度灵敏度
4	角振动台	波形失真度： $\leq 2\%$ 频率范围： $10\text{ Hz} \sim 2\ 000\text{ Hz}$ 角速率范围： $\leq 30^{\circ}/s$ 角加速度范围： $\leq 3\ 000\text{ rad}/s^2$	带宽、输出延迟时间

表 2 (续)

序号	校准用设备	技术指标	用途
5	线振动台	频率范围： $\leq 4\ 500\ \text{Hz}$ 加速度范围： $\leq 200\ \text{g}$ 加速度谱密度误差： $-1.0\ \text{dB} \sim 2.0\ \text{dB}$ 正弦峰值偏差的绝对值： $\leq 5\%$ 频率误差的绝对值： $\leq 1.0\%$	标度因数振动前后变化量、零偏振动前后变化量
6	冲击台	峰值加速度误差的绝对值： $\leq 5\%$ 脉冲持续时间与速度变化量误差的绝对值： $\leq 10\%$	标度因数冲击前后变化量、零偏冲击前后变化量

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 3。

表 3 校准项目一览表

序号	项目名称	校准方法
1	标度因数	7.2.1
2	标度因数非线性度	7.2.2
3	量程	7.2.2
4	标度因数不对称度	7.2.3
5	标度因数重复性	7.2.4
6	标度因数温度灵敏度	7.2.5
7	标度因数轴向加速度敏感度	7.2.6
8	标度因数冲击前后变化量	7.2.7
9	标度因数振动前后变化量	7.2.8
10	阈值	7.2.9
11	分辨率	7.2.10
12	输入轴失准角	7.2.11
13	输入轴失准角重复性	7.2.12
14	零偏	7.2.13
15	零偏稳定性	7.2.14
16	零偏重复性	7.2.15
17	零偏温度灵敏度	7.2.16
18	零偏加速度灵敏度	7.2.17

表 3 (续)

序号	项目名称	校准方法
19	零偏冲击前后变化量	7.2.18
20	零偏振动前后变化量	7.2.19
21	角度随机游走系数	7.2.20
22	带宽	7.2.21
23	输出延迟时间	7.2.22
24	启动时间	7.2.23

7.2 校准方法

7.2.1 标度因数

7.2.1.1 校准程序

a) 将陀螺固定在速率转台上，使 *IRA* 平行于速率转台轴；

b) 在输入角速率范围内，按 GB/T 321—2005 规定的 R5 系列，适当圆整、均匀删除后，选取角速率测量点，在正转、反转方向输入角速率范围内，分别不能少于 11 个角速率挡，包括最大输入角速率；

c) 每个角速率测量点的陀螺输出数据采样次数不少于 10 次，采样间隔为 1 s；

d) 转台加电，设定转台的转动角速率和转动方向，先设正转，启动转台，角速度平稳后，接通陀螺电源，记录陀螺输出，完成采样次数后，陀螺断电，转台停转；

e) 设定同样的角速率，使转台反转，方法与 d) 相同，得到反转输入角速度下陀螺输出；

f) 转台输入角速率顺次改变，重复上述步骤。

注：采样数据点数、每次校准间隔时间及重复次数可根据用户具体要求设定。

7.2.1.2 计算方法

设 \bar{F}_i 为第 i 个输入角速率 Ω_i 时陀螺输出的平均值，如公式 (2)：

$$\bar{F}_i = \frac{1}{N} \sum_{P=1}^N F_{iP} \quad (2)$$

式中：

F_{iP} ——陀螺第 P 个输出值，mV；

N ——采样次数。

建立陀螺输入输出关系的线性模型：

$$F_i = K\Omega_i + F_0 + v_i \quad (3)$$

式中：

K ——标度因数， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$ ， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$ ；

Ω_i ——输入角速率， $(\text{°})/\text{s}$ ， $(\text{°})/\text{h}$ ；

F_0 ——拟合零位，mV；

v_i ——拟合误差，mV。

用最小二乘法求 K 和 F_0 ：

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n \Omega_i F_i - \sum_{i=1}^n \Omega_i \sum_{i=1}^n F_i}{n \sum_{i=1}^n \Omega_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Omega_i \right)^2} \quad (4)$$

$$F_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i - \frac{K}{n} \sum_{i=1}^n \Omega_i \quad (5)$$

式中：

n ——输入角速率个数。

7.2.2 标度因数非线性度和量程

7.2.2.1 校准程序

校准程序同 7.2.1.1。

7.2.2.2 计算方法

用公式 (6) 表示陀螺输入输出关系：

$$\hat{F}_i = K\Omega_i + F_0 \quad (6)$$

式中：

\hat{F}_i ——第 i 个输入角速率 Ω_i 所对应拟合直线上计算的陀螺输出值，mV。

按公式 (7) 计算陀螺输出特性的逐点非线性偏差：

$$a_i = \frac{\hat{F}_i - F_i}{K |\Omega_{\max+} - \Omega_{\max-}|} \quad (7)$$

式中：

a_i ——第 i 个输入角速率 Ω_i 时陀螺输出值的非线性偏差；

$\Omega_{\max+}$ 、 $\Omega_{\max-}$ ——分别对应正转和反转时的最大输入角速率，(°) /s，(°) /h。

按公式 (8) 计算标度因数非线性度：

$$K_n = |a_i|_{\max} \quad (8)$$

式中：

K_n ——标度因数非线性度。

陀螺输入/输出特性满足标度因数非线性度性能要求时，最大输入转台角速率即为该陀螺的量程。

7.2.3 标度因数不对称度

7.2.3.1 校准程序

校准程序同 7.2.1.1。

7.2.3.2 计算方法

分别求出正转、反转输入角速率范围内陀螺的标度因数，按公式 (9) 计算标度因数不对称度：

$$K_a = \frac{|K_+ - K_-|}{K} \quad (9)$$

式中：

K_a ——标度因数不对称度；

K_+ ——正转输入角速率范围内陀螺标度因数， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$ ， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$ ；

K_- ——反转输入角速率范围内陀螺标度因数， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$ ， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$ 。

7.2.4 标度因数重复性

7.2.4.1 校准程序

按 7.2.1.1 的方法，重复 Q 次校准陀螺标度因数，两次校准之间陀螺及其辅助设备关机一定时间冷却至室温。

7.2.4.2 计算方法

按公式 (10) 计算标度因数重复性：

$$K_r = \left[\frac{1}{Q-1} \sum_{i=1}^Q \left(K_i - \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q K_i \right)^2 \right]^{1/2} \left(\frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q K_i \right)^{-1} \quad (10)$$

式中：

K_r ——标度因数重复性；

Q ——校准次数；

K_i ——第 i 次校准的标度因数， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$ ， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$ 。

7.2.5 标度因数温度灵敏度

7.2.5.1 校准程序

a) 将陀螺放置于带温箱的速率转台上，使 IRA 平行于速率转台轴；

b) 根据陀螺实际应用所需要的温度范围，按 GB/T 321—2005 的 R5 系列适当均匀选取温度校准点，其中包括室温；

c) 陀螺处于室温条件下，温箱处于非工作状态，接通陀螺电源，预热一定时间，在陀螺温度达到稳定状态后，按 7.2.1 的方法校准陀螺标度因数；

d) 设置温度校准点，当温箱达到规定温度，保温至陀螺输出稳定，使陀螺达到热平衡，按 7.2.1 的方法校准陀螺标度因数，在校准过程中，陀螺始终处于工作状态。

7.2.5.2 计算方法

按公式 (11) 计算标度因数温度灵敏度：

$$K_t = \max \left(\left| \frac{(K_i - K_m)}{K_m (T_i - T_m)} \right| \right) \quad (11)$$

式中：

K_t ——陀螺标度因数温度灵敏度， $1/^\circ\text{C}$ ；

K_i ——第 i 个温度校准点的陀螺标度因数， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$ ， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$ ；

K_m ——室温下的陀螺标度因数， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$ ， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$ ；

T_i ——第 i 个温度校准点时的温度， $^\circ\text{C}$ ；

T_m ——室温， $^\circ\text{C}$ 。

7.2.6 标度因数轴向加速度敏感度

7.2.6.1 校准程序

a) 将陀螺固定在双轴位置转台上；

- b) 接通陀螺电源, 预热一定时间, 一般不超过 30 min;
- c) 翻转位置转台, 使陀螺 IRA 轴正反向分别指天, 按 7.2.1 的方法校准陀螺标度因数。

7.2.6.2 计算方法

将 IRA 轴正反向分别指天时的标度因数差值作为对应轴正负 1 g 的输出之差, 将该差值除以 2 g 作为陀螺的标度因数轴向加速度敏感度。

7.2.7 标度因数冲击前后变化量

7.2.7.1 校准程序

- a) 将陀螺固定在冲击台, 使其某一轴平行于冲击台的轴;
- b) 冲击台通电, 根据冲击条件设置冲击波形、幅值和时间;
- c) 根据冲击条件, 启动冲击台;
- d) 冲击结束后, 按 7.2.1 的方法校准陀螺标度因数;
- e) 重复 a) ~d), 进行其他两个轴向的冲击试验。

7.2.7.2 计算方法

陀螺的每个轴向分别按公式 (12) 计算各轴向标度因数冲击前后变化量:

$$\Delta K_{ij} = |K_{ij2} - K_{ij1}| \quad (j = X, Y, Z) \quad (12)$$

式中:

ΔK_{ij} —— j 轴向标度因数冲击前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

K_{ij2} —— j 轴向冲击结束后的标度因数值, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

K_{ij1} —— j 轴向冲击开始前的标度因数值, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$ 。

按公式 (13) 计算标度因数冲击前后变化量:

$$\Delta K_i = \max(\Delta K_{iX}, \Delta K_{iY}, \Delta K_{iZ}) \quad (13)$$

式中:

ΔK_i ——标度因数冲击前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

ΔK_{iX} —— X 轴向标度因数冲击前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

ΔK_{iY} —— Y 轴向标度因数冲击前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

ΔK_{iZ} —— Z 轴向标度因数冲击前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$ 。

7.2.8 标度因数振动前后变化量

7.2.8.1 校准程序

- a) 校准前先对夹具进行扫频振动测试, 其一阶共振频率应高于试验频率, 且幅值误差的绝对值不大于 5%;
- b) 将陀螺通过夹具固定在线振动台上, 使其某一轴与线振动台的轴平行;
- c) 线振动台通电, 根据正弦扫频振动条件设置频率范围、振动幅值和振动时间, 或根据随机振动条件设置功率谱密度曲线和振动时间;
- d) 根据振动条件, 启动线振动台;
- e) 振动结束后, 按 7.2.1 的方法校准陀螺标度因数;
- f) 重复 b) ~e), 进行陀螺其他两个轴的振动试验。

7.2.8.2 计算方法

陀螺的每个轴向分别按公式 (14) 计算各轴向标度因数振动前后变化量:

$$\Delta K_{vj} = |K_{vj2} - K_{vj1}| \quad (j = X, Y, Z) \quad (14)$$

式中:

ΔK_{vj} —— j 轴向标度因数振动前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

K_{vj2} —— j 轴向振动结束后的标度因数值, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

K_{vj1} —— j 轴向振动开始前的标度因数值, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$ 。

按公式 (15) 计算标度因数振动前后变化量:

$$\Delta K_v = \max(\Delta K_{vX}, \Delta K_{vY}, \Delta K_{vZ}) \quad (15)$$

式中:

ΔK_v ——标度因数振动前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

ΔK_{vX} —— X 轴向标度因数振动前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

ΔK_{vY} —— Y 轴向标度因数振动前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$;

ΔK_{vZ} —— Z 轴向标度因数振动前后变化量, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{s}]^{-1}$, $\text{mV} \cdot [(\circ) / \text{h}]^{-1}$ 。

7.2.9 阈值

7.2.9.1 校准程序

a) 将陀螺固定在速率转台上, 使其 IRA 平行于速率转台轴;

b) 按 7.2.1 的方法校准陀螺标度因数 K ;

c) 速率转台以一个较大输入角速率 Ω_i 为起点正转, 当输入角速率稳定后, 按 7.2.1 的方法校准陀螺输出值 F_i ;

d) 按依次递减方式改变速率转台角速率 Ω_i , 并重复 c), 校准正转待定阈值;

e) 按照相同的方法, 校准反转待定阈值;

f) 将测得的正、反转待定阈值取绝对值, 其最大值即为陀螺阈值。

7.2.9.2 计算方法

按公式 (16) 计算陀螺理论输出值 \hat{F}_i :

$$\hat{F}_i = K\Omega_i \quad (16)$$

当满足公式 (17) 时, 相应转台输入角速率为待定阈值:

$$\left| \frac{\hat{F}_i - F_i}{\hat{F}_i} \right| \leq 50\% \quad (17)$$

式中:

\hat{F}_i ——按拟合直线计算的陀螺理论输出, mV ;

F_i ——经校准后的陀螺输出值, 即陀螺实际输出减去零输入时的陀螺输出均值, mV 。

7.2.10 分辨率

7.2.10.1 校准程序

a) 将陀螺固定在速率转台上, 使 IRA 平行于速率转台轴;

- b) 按 7.2.1 的方法校准陀螺标度因数；
- c) 速率转台以大于陀螺估计阈值 20~50 倍的某一个速率正转；
- d) 按 7.2.1.1 的方法测量陀螺输出值；
- e) 按依次递减方式改变输入角速率增量值，初始增量值选择比估计分辨率大一些，并测量陀螺输出增量，重复 d)，校准正转待定分辨率；
- f) 按照相同方法，校准反转待定分辨率；
- g) 将测得的正、反转待定分辨率取绝对值，其最大值为陀螺分辨率。

7.2.10.2 计算方法

按公式 (6) 表达的拟合曲线，由转台输入角速率增量计算出相应的陀螺输出增量，当满足公式 (18) 时，相应的输入角速率增量即为待定分辨率：

$$\left| \frac{\Delta \hat{F}_i - \Delta F_i}{\Delta \hat{F}_i} \right| \leq 50\% \quad (18)$$

式中：

$\Delta \hat{F}_i$ ——按拟合直线计算的陀螺输出增量，mV；

ΔF_i ——陀螺输出增量，mV。

7.2.11 输入轴失准角

7.2.11.1 校准程序

- a) 陀螺通过夹具固定在速率转台上，使 OY 轴正向朝上，平行于速率转台轴，记为第一安装位置；
- b) 速率转台以给定角速率（转台允许较大角速率，建议 360°/s）正转，开始记录 1 min 内的陀螺输出；
- c) 速率转台以相同角速率反转，并记录 1 min 内的陀螺输出；
- d) 为了消除夹具误差，将陀螺相对夹具绕 IRA 旋转 180°，记为第二安装位置，重复步骤 b) 和 c)；
- e) 使陀螺 OX 轴正向朝上，平行于速率转台轴，记为第三安装位置，重复步骤 b) 和 c)；
- f) 为了消除夹具误差，将陀螺相对夹具绕 IRA 旋转 180°，记为第四安装位置，重复步骤 b) 和 c)。

7.2.11.2 计算方法

按公式 (19) ~ 公式 (21) 计算 IA 在 yoz 平面与 IRA 的夹角 α_m ：

$$\delta_1 = \frac{F_{(1+)} - F_{(1-)}}{2\Omega_{(+)} \cdot K} \quad (19)$$

$$\delta_2 = \frac{F_{(2+)} - F_{(2-)}}{2\Omega_{(+)} \cdot K} \quad (20)$$

$$\alpha_m = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \quad (21)$$

式中：

δ_1 、 δ_2 ——在第一、二安装位置，陀螺 IA 轴在 yoz 平面的投影与 IRA 的偏差角，rad；

$F_{(1+)}$ 、 $F_{(2+)}$ ——在第一、二安装位置，转台正转陀螺输出量的平均值，mV；

$F_{(1-)}$ 、 $F_{(2-)}$ ——在第一、二安装位置，转台反转陀螺输出量的平均值，mV；

$\Omega_{(+)}$ ——速率转台转速，(°) /s，(°) /h；

α_m ——IA 轴在 yoz 平面内投影与 IRA 的夹角，rad。

按公式 (22) ~ 公式 (24) 计算 IA 在 xoz 平面上投影与 IRA 的夹角 β_m ：

$$\delta_3 = \frac{F_{(3+)} - F_{(3-)}}{2\Omega_{(+)} \cdot K} \quad (22)$$

$$\delta_4 = \frac{F_{(4+)} - F_{(4-)}}{2\Omega_{(+)} \cdot K} \quad (23)$$

$$\beta_m = \frac{\delta_3 - \delta_4}{2} \quad (24)$$

式中：

δ_3 、 δ_4 ——在第三、四安装位置，陀螺 IA 轴在 xoz 平面的投影与 IRA 的偏差角，rad；

$F_{(3+)}$ 、 $F_{(4+)}$ ——在第三、四安装位置，转台正转陀螺输出量的平均值；

$F_{(3-)}$ 、 $F_{(4-)}$ ——在第三、四安装位置，转台反转陀螺输出量的平均值；

$\Omega_{(+)}$ ——速率转台转速；

β_m ——IA 轴在 xoz 平面内投影与 IRA 的夹角，rad。

按公式 (25) 计算输入轴失准角：

$$\gamma_m = \frac{10\,800 \times (\alpha_m^2 + \beta_m^2)^{1/2}}{\pi} \quad (25)$$

式中：

γ_m ——输入轴失准角，(′)。

7.2.12 输入轴失准角重复性

7.2.12.1 校准程序

按 7.2.11.1 的方法，重复校准陀螺输入轴失准角 Q ($Q \geq 7$) 次。

7.2.12.2 计算方法

按公式 (26) 计算输入轴失准角重复性：

$$\gamma_{mr} = \left[\frac{1}{(Q-1)} \sum_{i=1}^Q (\gamma_{mi} - \overline{\gamma_m})^2 \right]^{1/2} \quad (26)$$

式中：

γ_{mr} ——输入轴失准角重复性，(′)；

γ_{mi} ——陀螺第 i 次校准得到的输入轴失准角，(′)；

$\overline{\gamma_m}$ ——陀螺校准 Q 次得到的输入轴失准角平均值，(′)；

Q ——校准次数。

7.2.13 零偏

7.2.13.1 校准程序

a) 陀螺通过工装固定在校准地基上，使 IRA 垂直于校准基准；

b) 接通陀螺电源，预热时间一般不超过 30 min，对陀螺输出量进行采样，记录陀螺输出量；

c) 设定陀螺输出测量的采样间隔及采样时间，一般情况下采样时间应在 1 h 以上。

注：采样间隔时间和采样时间可根据用户要求设定。

7.2.13.2 计算方法

按公式 (27) 和公式 (28) 计算零偏：

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum F_i \quad (27)$$

$$B_0 = \frac{\bar{F}}{K} \quad (28)$$

式中：

F_i ——每次采样的陀螺输出，mV；

N ——校准次数；

\bar{F} —— N 次校准得到的陀螺输出平均值，mV；

B_0 ——零偏，(°) /s, (°) /h。

7.2.14 零偏稳定性

7.2.14.1 校准程序

校准程序同 7.2.13.1。

7.2.14.2 计算方法

按公式 (29) 计算零偏稳定性：

$$B_s = \frac{1}{K} \cdot \left[\frac{1}{(N/P - 1)} \sum_{i=1}^{N/P} (F_i - \bar{F})^2 \right]^{1/2} \quad (29)$$

式中：

P ——数据平均周期；

F_i ——按周期 P 求取平均值得到的新的数据样本；

B_s ——零偏稳定性，(°) /s, (°) /h。

7.2.15 零偏重复性

7.2.15.1 校准程序

按 7.2.13.1 的方法，重复校准 Q 次，在规定间隔时间内陀螺处于断电状态。

7.2.15.2 计算方法

按公式 (30) 计算零偏重复性：

$$B_r = \left[\frac{1}{(Q - 1)} \sum_{i=1}^Q (B_{0i} - \bar{B}_0)^2 \right]^{1/2} \quad (30)$$

式中：

B_r ——零偏重复性，(°) /s, (°) /h；

B_{0i} ——陀螺第 i 次校准得到的零偏，(°) /s, (°) /h；

$\overline{B_0}$ ——陀螺校准 Q 次得到的零偏平均值, ($^\circ$) /s, ($^\circ$) /h;

Q ——校准次数。

7.2.16 零偏温度灵敏度

7.2.16.1 校准程序

a) 将陀螺置于温箱里, 根据陀螺实际应用需满足的温度范围, 按 GB/T 321—2005 的 R5 系列适当均匀选取温度校准点, 其中包括室温;

b) 陀螺处于室温条件下, 温箱处于非工作状态, 接通陀螺电源, 预热一定时间, 在陀螺温度达到稳定状态后, 按 7.2.13 的方法校准陀螺零偏;

c) 设置温度校准点, 当温箱达到规定温度, 陀螺输出保持稳定, 使陀螺达到热平衡, 按 7.2.13 的方法校准陀螺零偏, 在校准过程中, 陀螺始终处于工作状态。

7.2.16.2 计算方法

按公式 (31) 计算零偏温度灵敏度:

$$B_t = \max\left(\left|\frac{B_{0i} - B_{0m}}{T_i - T_m}\right|\right) \quad (31)$$

式中:

B_t ——陀螺零偏温度灵敏度, [$^\circ$) /s] \cdot $^\circ\text{C}^{-1}$, [$^\circ$) /h] \cdot $^\circ\text{C}^{-1}$;

B_{0i} ——第 i 个温度校准点的陀螺零偏, ($^\circ$) /s, ($^\circ$) /h;

B_{0m} ——室温下的陀螺零偏, ($^\circ$) /s, ($^\circ$) /h;

T_i ——第 i 个温度校准点时的温度, $^\circ\text{C}$;

T_m ——室温, $^\circ\text{C}$ 。

7.2.17 零偏加速度灵敏度

7.2.17.1 校准程序

a) 将陀螺通过工装固定在双轴位置转台上;

b) 接通陀螺电源, 预热一定时间, 一般不超过 30 min;

c) 翻转位置转台, 使陀螺 X 、 Y 、 Z 轴正反向分别指天, 启动采样程序后进行零偏采样。

7.2.17.2 计算方法

将 X 、 Y 、 Z 轴正反向分别指天时的输出均值之差作为对应轴正负 1 g 的输出之差, 将该差值除以 2 g 作为该轴的零偏加速度敏感度, 将 X 、 Y 、 Z 轴零偏加速度敏感度的最大值作为陀螺的零偏加速度敏感度。

7.2.18 零偏冲击前后变化量

7.2.18.1 校准程序

a) 将陀螺通过夹具固定在冲击台, 使其某一轴平行于冲击台的轴;

b) 冲击台通电, 根据冲击条件设置冲击波形、幅值和时间;

c) 陀螺通电, 按 7.2.13 的方法计算陀螺零偏;

d) 根据冲击条件, 启动冲击台;

e) 冲击结束后, 按 7.2.13 的方法计算陀螺零偏;

f) 重复 a) ~e), 进行陀螺其他两个轴向的冲击试验。

7.2.18.2 计算方法

陀螺的每个轴向分别按公式 (32) 计算零偏冲击前后变化量：

$$\Delta B_i = |B_{i2} - B_{i1}| \quad (32)$$

式中：

ΔB_i ——零偏冲击前后变化量，(°) /s，(°) /h；

B_{i2} ——冲击结束后的零偏，(°) /s，(°) /h；

B_{i1} ——冲击开始前的零偏，(°) /s，(°) /h。

取陀螺 3 个轴向的最大零偏冲击前后变化量为该陀螺的零偏冲击前后变化量。

7.2.19 零偏振动前后变化量

7.2.19.1 校准程序

a) 校准前先对夹具进行扫频振动测试，要求在振动试验频率范围内无峰值，且幅值误差的绝对值不大于 5%；

b) 将陀螺通过夹具固定在线振动台上，使其某一轴与线振动台的轴平行；

c) 线振动台通电，根据正弦扫频振动条件设置频率范围、振动幅值和振动时间，或根据随机振动条件设置功率谱密度曲线和振动时间；

d) 陀螺通电，按 7.2.13 的方法计算陀螺零偏；

e) 根据振动条件，启动线振动台；

f) 振动结束后，按 7.2.13 的方法计算陀螺零偏；

g) 重复 b) ~f)，进行陀螺其他两个轴向的振动试验。

7.2.19.2 计算方法

陀螺的每个轴向分别按公式 (33) 计算零偏振动前后变化量：

$$\Delta B_v = |B_{v2} - B_{v1}| \quad (33)$$

式中：

ΔB_v ——零偏振动前后变化量，(°) /s，(°) /h；

B_{v2} ——振动结束后的零偏，(°) /s，(°) /h；

B_{v1} ——振动开始前的零偏，(°) /s，(°) /h。

取陀螺 3 个轴向的最大零偏振动前后变化量为该陀螺的零偏振动前后变化量。

7.2.20 角度随机游走系数

7.2.20.1 校准程序

校准程序同 7.2.13.1。

7.2.20.2 计算方法

对校准的数据采用 Allan 方差法计算：

a) 设有 n 个陀螺输出样本，按公式 (34) 计算出对应的角速率，得到角速率的初始样本：

$$\Omega_j(t_0) = \frac{1}{K} F_j(t_0) \quad (34)$$

其中， $j=1, \dots, n$ 。

b) 按 n 个数据中 k 个数据作为一个数组，其时间长度为 $\tau=kt_0$ 。分别取 $\tau=t_0, 2t_0,$

…, kt_0 ($k < n/2$), 按公式 (35) 求出每个时间长度 τ 的数据平均值, 共有 $n-k+1$ 个数值。

$$\bar{\Omega}_p(\tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=p}^{p+k} \Omega_i(t_0) \quad (35)$$

其中, $p=1, \dots, n-k+1$ 。

c) 按公式 (36) 计算相邻两个数值平均的差值:

$$\xi_{p+1,p} = \bar{\Omega}_{p+1}(\tau) - \bar{\Omega}_p(\tau) \quad (36)$$

得到随机变量集合 $\{\xi_{p+1,p} = 1, \dots, n-k+1\}$, 共有 $n-k$ 个差。

d) 对 c) 求方差如公式 (37):

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2n(n-k-1)} \sum_{p=1}^{n-k-1} [\bar{\Omega}_{p+2}(\tau) - 2\bar{\Omega}_{p+1}(\tau) + \bar{\Omega}_p(\tau)]^2 \quad (37)$$

e) 取不同的 τ 值, 重复上述过程, 在双对数坐标系中得到一个与 τ 对应的曲线, 即 Allan 方差曲线。采用 Allan 方差模型进行最小二乘拟合, 如公式 (38):

$$\sigma^2(\tau) = \sum_{m=-2}^2 A_m \tau^m \quad (38)$$

式中:

A_m (包括 $A_{-2}, A_{-1}, A_0, A_1, A_2$) ——分别为陀螺输出数据中与量化噪声、角度随机游走、零偏不稳定性、角速率随机游走、速率斜坡各项噪声相关的拟合多项式的系数。

f) 角度随机游走系数按公式 (39) 计算:

$$\text{ARW} = \sqrt{A_{-1}} \quad (39)$$

式中:

ARW——角度随机游走系数, $(^\circ) / \text{s}^{1/2}$, $(^\circ) / \text{h}^{1/2}$ 。

7.2.21 带宽

7.2.21.1 校准程序

a) 将陀螺和振动标准传感器通过夹具固定在角振动台上, 使 IRA 平行于角振动台的振动方向;

b) 选取角振动台振动频率和幅值。频率在 10 Hz 到 2 倍带宽之间按对数间隔选取 N ($N \geq 10$) 个点;

c) 将角振动台频率调到事先预定的最低频率上, 设定幅值点 (推荐选取被校陀螺量程的 10%~30%), 启动角振动台并稳定, 启动陀螺并稳定, 设置采样率和采样时间, 其中采样率大于 20 倍带宽, 采样 n 次 ($n \geq 10$), 角振动台的角运动由振动标准传感器测出, 同时记录角振动台的输出正弦信号和陀螺输出量;

d) 逐次提高振动频率值, 重复上述试验。

7.2.21.2 计算方法

以角频率 $\omega_i = 2\pi f_i$ 对每组采样数据进行两参数的正弦拟合, 按公式 (40) 计算拟合结果:

$$y_{ij}^* = E_{ij}^* \cos(\omega_i t + \varphi_{ij}^*) \quad (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, n) \quad (40)$$

式中：

y_{ij}^* ——第 i 个频率点、第 j 次采样的陀螺输出拟合值，mV；

E_{ij}^* ——第 i 个频率点、第 j 次采样拟合得到的陀螺输出信号峰值，mV；

ω_i ——第 i 个频率点 f_i 对应的角频率，rad/s；

φ_{ij}^* ——第 i 个频率点、第 j 次采样拟合得到的相位，rad。

按公式 (41) 计算平均值 \overline{E}_i ：

$$\overline{E}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij}^* \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (41)$$

按公式 (42) 计算灵敏度 S_i ：

$$S_i = \frac{\overline{E}_i}{A} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (42)$$

式中：

S_i ——陀螺在频率点 f_i 的灵敏度，mV · [(°) /s]⁻¹；

\overline{E}_i ——陀螺在频率点 f_i 输出信号正弦分量峰值的平均值，mV；

A ——角速率信号正弦分量峰值，(°) /s。

按公式 (43) 计算灵敏度的比值：

$$K_i = \frac{S_i}{S_0} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (43)$$

式中：

K_i ——陀螺在频率点 f_i 的灵敏度与零频灵敏度的比值；

S_i ——陀螺在频率点 f_i 的灵敏度，mV · [(°) /s]⁻¹；

S_0 ——陀螺在零频时的灵敏度，mV · [(°) /s]⁻¹。

在测量频率范围内，对 $(N+1)$ 个灵敏度比值进行曲线拟合，获得被较陀螺的幅频特性曲线，曲线上 $K_i=0.707$ 点对应的频率为 f_c ，则带宽为 $B_w=f_c$ 。

7.2.22 输出延迟时间

7.2.22.1 校准程序

校准程序同 7.2.21.1。

7.2.22.2 计算方法

在每个频率点 f_i ，按公式 (44) 计算其相位平均值：

$$\overline{\varphi}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varphi_{ij}^* \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (44)$$

按公式 (45) 计算每个频率点的相位延迟：

$$P_i = \overline{\varphi}_i - \varphi_0 \quad (45)$$

式中：

P_i ——第 i 个频率点 f_i 的相位延迟，rad；

$\overline{\varphi}_i$ ——第 i 个频率点 f_i 陀螺输出信号相位的平均值，rad；

φ_0 ——角振动台输出信号的相位，rad。

陀螺的传递函数模型可表示为一阶惯性环节和延迟环节的串联，见公式（46）和公式（47）：

$$G(s) = \frac{K_D}{Ts + 1} e^{-T_d \cdot s} \quad (46)$$

$$T = \frac{1}{2\pi B_w} \quad (47)$$

式中：

- s ——拉普拉斯（Laplace）算子；
- K_D ——直流增益；
- T ——时间常数，s；
- B_w ——带宽，Hz；
- T_d ——延迟时间，s。

采用最小二乘法，由公式（48）～公式（50）可得到延迟时间 T_d ：

$$-P_i - \tan^{-1}(\omega_i T) = \omega_i T_d \quad (48)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \cdots \quad \omega_N] \quad (49)$$

$$T_d = (\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\Omega}^T)^{-1} \boldsymbol{\Omega} \begin{bmatrix} -P_1 - \tan^{-1}(\omega_1 T) \\ -P_2 - \tan^{-1}(\omega_2 T) \\ \vdots \\ -P_N - \tan^{-1}(\omega_N T) \end{bmatrix} \quad (50)$$

式中：

$\boldsymbol{\Omega}$ ——输入角速率向量。

7.2.23 启动时间

7.2.23.1 校准程序

a) 陀螺通过夹具固定在校准地基上，使 IRA 垂直于校准地基，陀螺通电，记录时间和对应的陀螺输出；

b) 陀螺通过夹具固定在速率转台上，陀螺 IRA 平行于速率转台轴；

c) 启动转台，建议将速率分别设置在全量程、0.1 倍全量程、0.01 倍全量程或其他合适值上。逐次给陀螺通电，记录经过的时间和对应的陀螺输出。

7.2.23.2 计算方法

位置试验中，确定每次从加电到陀螺输出达到要求零偏值的时间 $t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}, \dots, t_{pm}$ 。

速率试验中，将陀螺输出扣除零输入时的陀螺输出均值作为经校准后的陀螺输出，确定每次从加电到经校准后的陀螺输出满足速率误差要求为止的时间 $t_{r1}, t_{r2}, t_{r3}, \dots, t_{rn}$ 。

取 $t_{pi}(i=1, 2, \dots, m)$ 、 $t_{ri}(i=1, 2, \dots, n)$ 的最大值为启动时间。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性或应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性或应用相关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性标识；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不准部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。送校单位可根据实际使用情况自主决定。

附录 A

校准证书内页格式

证书编号：_____

校准环境条件	温 度：_____	地 点：_____
	相对湿度：_____	其 他：_____
序号	校准项目	校准结果
1	标度因数	
2	标度因数非线性度	
3	量程	
4	标度因数不对称度	
5	标度因数重复性	
6	标度因数温度灵敏度	
7	标度因数轴向加速度敏感度	
8	标度因数冲击前后变化量	
9	标度因数振动前后变化量	
10	阈值	
11	分辨率	
12	输入轴失准角	
13	输入轴失准角重复性	
14	零偏	
15	零偏稳定性	
16	零偏重复性	
17	零偏温度灵敏度	
18	零偏加速度灵敏度	
19	零偏冲击前后变化量	
20	零偏振动前后变化量	
21	角度随机游走系数	
22	带宽	
23	输出延迟时间	
24	启动时间	

校准员：_____

核检员：_____

附录 B

金属振子式速率陀螺主要参数不确定度评定示例

B.1 标度因数不确定度

B.1.1 标度因数测量模型

标度因数的数学表达式为公式 (B.1)：

$$K = \frac{F - F_0 - \nu}{\Omega} \quad (\text{B.1})$$

式中：

K ——标度因数， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{s}]^{-1}$ ， $\text{mV} \cdot [(\text{°})/\text{h}]^{-1}$ ；

F ——陀螺输出；

F_0 ——拟合零位；

ν ——拟合误差；

Ω ——输入角速率。

标度因数的测量不确定度传播模型为公式 (B.2)：

$$u_c^2(K) = c^2(F)u^2(F) + c^2(F_0)u^2(F_0) + c^2(\Omega)u^2(\Omega) \quad (\text{B.2})$$

式中：

$$c(F) = \frac{1}{\Omega}；$$

$$c(F_0) = -\frac{1}{\Omega}；$$

$$c(\Omega) = -\frac{F - F_0}{\Omega^2}。$$

B.1.2 不确定度评定

B.1.2.1 标度因数测量不确定度的来源

- 1) 速率转台引入的不确定度分量；
- 2) 数据采集系统引入的不确定度分量；
- 3) 测量重复性引入的不确定度分量。

B.1.2.2 标度因数测量不确定度分量

1) 速率转台引入的不确定度分量

速率转台测量不确定度为 $U_{\text{rel}} = 1 \times 10^{-4}$ ， $k = 2$ ，则 $u_{1r} = \frac{1 \times 10^{-4}}{2} = 0.5 \times 10^{-4}$ 。

2) 数据采集系统引入的不确定度分量

数据采集系统采用 6 位半数字电压表， $U_{\text{rel}} = 6 \times 10^{-5}$ ， $k = 2$ ，则：

$$u_{2r} = \frac{6 \times 10^{-5}}{2} = 3 \times 10^{-5}$$

3) 测量重复性引入的不确定度分量

以某型金属振子式速率陀螺为例, 由实验数据得到: $u_{3r} = 1.54 \times 10^{-4}$ 。

B.1.3 合成标准不确定度

合成标准不确定度为:

$$u_{cr}(K) = \sqrt{u_{1r}^2 + u_{2r}^2 + u_{3r}^2} = 1.65 \times 10^{-4}$$

B.1.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度 $U_{rel} = ku_{cr}(K) = 3.3 \times 10^{-4}$ 。

B.2 零偏不确定度

B.2.1 零偏测量模型

零偏的数学表达式为公式 (B.3):

$$B_0 = \frac{F}{K} \quad (\text{B.3})$$

式中:

B_0 ——零偏, ($^\circ$) /s, ($^\circ$) /h;

F ——陀螺输出;

K ——标度因数。

零偏的测量不确定度传播模型为公式 (B.4):

$$u_c^2(B_0) = c^2(F)u^2(F) + c^2(K)u^2(K) \quad (\text{B.4})$$

式中:

$$c(F) = \frac{1}{K};$$

$$c(K) = -\frac{F}{K^2}。$$

B.2.2 不确定度评定

B.2.2.1 零偏测量不确定度的来源

- 1) 数据采集系统引入的不确定度分量;
- 2) 标度因数引入的不确定度分量。

B.2.2.2 零偏测量不确定度分量

- 1) 数据采集系统引入的不确定度分量

数据采集系统采用 6 位半数字电压表, $U_{rel} = 6 \times 10^{-5}$, $k=2$, 则:

$$u_{1r} = \frac{6 \times 10^{-5}}{2} = 3 \times 10^{-5}$$

- 2) 标度因数引入的不确定度分量

以某型金属振子式速率陀螺为例, 标度因数测量引入的不确定度由 B.1.3 得到:

$$u_{2r} = 1.65 \times 10^{-4}。$$

B.2.3 合成标准不确定度

合成标准不确定度为:

$$u_{\text{cr}}(B_0) = \sqrt{u_{1r}^2 + u_{2r}^2} = 1.68 \times 10^{-4}$$

B.2.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度 $U_{\text{rel}} = k u_{\text{cr}}(B_0) = 3.36 \times 10^{-4}$ 。
