

附 录 A (规范性) 陀螺仪常用性能参数试验方法

A.1 范围

本附录提供了陀螺仪常用性能参数的试验方法。

A.2 陀螺仪试验方法

A.2.1 标度因数系列测试（角度法）

A.2.1.1 标度因数

A.2.1.1.1 测试设备

除另有规定外，测试设备及其要求如下：

- a) 具有角度输出的速率转台，转台的角位置精度、速率平稳度、转台速率范围满足产品性能要求；
- b) 陀螺仪测试系统；
- c) 计时器（计时精度优于 10^{-3} s，可选）；
- d) 周脉冲发生器（精度优于 $2''$ ，可选）。

A.2.1.1.2 测试程序

除另有规定外，测试程序如下：

- a) 使速率转台转轴与地垂线平行，对准精度在若干角分之内；
- b) 将陀螺仪通过夹具固定到速率转台上，使 IRA 轴平行于转台转轴，对准精度在若干角分之内；
- c) 将陀螺仪与测试系统相连接；
- d) 转台每转 360° ，周脉冲发生器发出一个启动或停止计数的脉冲；
- e) 按 GB/T 321-2005 的 R5 系列，适当圆整、均匀删除后，选角速率测试点，测试点点数不小于 11 个（或与使用方协商确定），必须包括最大输入角速率点；
- f) 接通陀螺仪电源，预热 30 分钟；
- g) 每个角速率测试点，转台连续正转 m 整圈，接着连续反转 m 整圈，记录正、反转陀螺仪的输出脉冲数；
- h) 对于能同时给定旋转角速率和转动角度的转台，可以采用定角测试方法，即陀螺仪以某一个给定的角速率正、反方向各转一定的角度，其转过的角度大小根据转台的定角精度决定，记录转动过程中陀螺仪输出总的脉冲数 $N'_{\pm i}$ 和转台转过的角度 $\theta_{\pm i}$ ；
- i) 断开陀螺仪电源。

A.2.1.1.3 计算方法

- a) 第 i 个角速率测试点正、反方向各转 m 圈的平均脉冲数

$$N_{\pm i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m N_{\pm ij} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

$N_{\pm ij}$ —第 i 个角速率测试点、第 j 圈正、反转 360° 时的累积脉冲数。

b) 各角速率测试点标度因数

$$K_i = \frac{N_{+i} - N_{-i}}{2 \times 360 \times 3600} \dots\dots\dots (A. 2)$$

式中:

K_i —第 i 个角速率测试点的标度因数, P/($''$)。

c) 当采用定角测试方法时, 各角速率测试点标度因数为:

$$K_i = \frac{N'_{+i} - N'_{-i}}{(|\theta_+| + |\theta_-|) \times 3600} \dots\dots\dots (A. 3)$$

式中:

K_i —第 i 个角速率测试点的标度因数, P/($''$);

$N'_{\pm i}$ —第 i 个角速率测试点正、反转输出的总的脉冲数;

$\theta_{\pm i}$ —第 i 个角速率测试点正、反转转台转过的角度, ($^\circ$)。

d) 标度因数非线性模型方程:

$$K_i = K + W\Omega_i \dots\dots\dots (A. 4)$$

用最小二乘法求得:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \sum_{i=1}^n \Omega_i^2 - \sum_{i=1}^n K_i \Omega_i \sum_{i=1}^n \Omega_i}{n \sum_{i=1}^n \Omega_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Omega_i \right)^2} \dots\dots\dots (A. 5)$$

$$W = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n K_i \Omega_i - \sum_{i=1}^n \Omega_i \sum_{i=1}^n K_i}{n \sum_{i=1}^n \Omega_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Omega_i \right)^2} \dots\dots\dots (A. 6)$$

式中:

K —标度因数, P/($''$);

W —标度因数变化最佳估计, P/($''$);

Ω_i —第 i 个角速率测试点的输入角速率, ($^\circ$)/s;

n —角速率测试点点数, $n \geq 11$ 。

A. 2. 1. 2 标度因数非线性度

A. 2. 1. 2. 1 测试设备

除另有规定外, 测试设备同A. 2. 1. 1. 1条。

A. 2. 1. 2. 2 测试程序

除另有规定外, 测试程序同A. 2. 1. 1. 2条。

A. 2. 1. 2. 3 计算方法

标度因数非线性度

$$K_m = \frac{|K_i - K|_{\max}}{K} \dots\dots\dots (A. 7)$$

式中：

K_m —标度因数非线性度。

A. 2. 1. 3 标度因数不对称度

A. 2. 1. 3. 1 测试设备

除另有规定外，测试设备同A. 2. 1. 1. 1条。

A. 2. 1. 3. 2 测试程序

除另有规定外，测试程序如下：

测试开始和结束时，在转台多个对称位置上分别测试陀螺仪在转台转速为零时输出脉冲数（取采样间隔时间 $\tau=100s$ ，采样点数 $n=3$ ），求其平均值 $\bar{N}_0$ ，以便在各角速率点的陀螺仪输出脉冲数中扣除。

同时，测量转台在各角速率正、反转一周所经历的时间 $T_{\pm i}$ 。其余同A. 2. 1. 1. 2条。

A. 2. 1. 3. 3 计算方法

分别求出扣除 $\bar{N}_0$ 后正、反转情况下第 i 个速率测试点的标度因数 K_{+i} 、 K_{-i}

$$K_{+i} = \frac{N_{+i} - \bar{N}_0 \times T_{+i}}{360 \times 3600} \dots\dots\dots (A. 8)$$

式中：

N_{+i} —第 i 个速率测试点正转一圈的平均脉冲数；

T_{+i} —第 i 个速率测试点正转一圈的时间，s；

$\bar{N}_0$ —转台转速为零时多个对称位置上1s时间间隔内陀螺仪的平均输出脉冲数。

$$K_{-i} = \frac{N_{-i} + \bar{N}_0 \times T_{-i}}{360 \times 3600} \dots\dots\dots (A. 9)$$

式中：

N_{-i} —第 i 个速率测试点反转一圈的平均脉冲数；

T_{-i} —第 i 个速率测试点反转一圈的时间，s；

$\bar{N}_0$ —转台转速为零时多个对称位置上1s时间间隔内陀螺仪的平均输出脉冲数。

根据(A. 4)、(A. 5)求得正、反转情况下的标度因数 K_+ 、 K_- ，从而求得标度因数不对称度

$$K_a = \frac{|K_+ - K_-|}{(K_+ + K_-)/2} \dots\dots\dots (A. 10)$$

式中：

K_a —标度因数不对称度。

A. 2. 1. 4 标度因数重复性

A. 2. 1. 4. 1 测试设备

除另有规定外，测试设备同A. 2. 1. 1. 1条。

A. 2. 1. 4. 2 测试程序

除另有规定外，按照A. 2. 1. 1. 2条在30(°)/s条件下，重复测试7次，相邻两次测试陀螺仪关机断电间隔时间不小于10分钟，得到每次测试的标度因数。

A. 2. 1. 4. 3 计算方法

$$K_r = \left[\frac{\sum_{j=1}^7 \left(K_j - \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 K_j \right)^2}{6} \right]^{1/2} \bigg/ \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 K_j \dots\dots\dots (A. 11)$$

式中：

K_r —标度因数重复性；

K_j —按式(A. 2)或(A. 3)求得的第j次测试的标度因数，P/(°)。

A. 2. 1. 5 标度因数温度灵敏度

A. 2. 1. 5. 1测试设备

a)～d) 同 A. 2. 1. 1. 1 条的 a)～d)；

e) 温度试验箱，要求隔磁、隔振，温控精度优于±2℃。

A. 2. 1. 5. 2测试程序

除另有规定外，测试程序如下：

a)～i) 同 A. 2. 1. 1. 2 条的 a)～i)；

j) 根据陀螺仪实际应用所需要的温度范围，温度点至少包括两个极限温度点和室温；

k) 在温度变化过程中，陀螺仪断电，在每个测试点保温不小于2小时，陀螺仪温度达到稳定状态后，按A. 2. 1. 1. 2条通电测试。

A. 2. 1. 5. 3计算方法

$$K_t = \left| \frac{K_i - K_{00}}{(T_i - T_0) \times K_{00}|_{\max}} \right| \dots\dots\dots (A. 12)$$

式中：

K_t —标度因数温度灵敏度，1/℃；

K_i —第*i*个温度测试点的标度因数, P/(°);

T_i —第*i*个温度测试点的温度值, °C;

K_{00} —室温标度因数, P/(°);

T_0 —室温温度值, °C。

A. 2. 1. 6 输入轴失准角

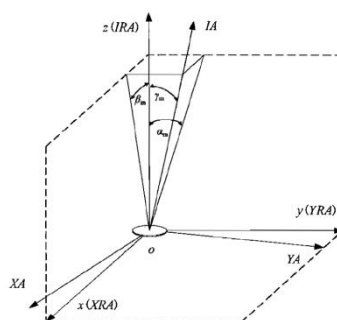
A. 2. 1. 6. 1 陀螺仪轴向定义

除另有规定外, 陀螺仪轴向定义如图A1, IA为陀螺仪输入轴方向, IRA为输入基准轴方向, XRA和YRA为垂直IRA的两个正交方向。

角 α 为 IA 在 IRA 与 XRA 所在平面内的投影与 IRA 的夹角;

角 β 为 IA 在 IRA 与 YRA 所在平面内的投影与 IRA 的夹角;

角 γ 为 IA 与 IRA 的夹角。



图A1 陀螺轴向定义

A. 2. 1. 6. 2 测试设备

a)~d) 同 A. 2. 1. 1. 1 条的 a)~d)。

A. 2. 1. 6. 3 测试程序

除另有规定外, 角 α 测试程序如下:

- 调整速率转轴向与地垂线平行, 误差小于若干角分;
- 将陀螺仪用夹具安装在转台上, 并使 XRA 与转台转轴平行, 平行度满足规定要求;
- 将陀螺仪与测试系统相连接, 陀螺仪通电预热规定时间;
- 转台以给定的角速率正、反方向各转 m 圈, 并记录每圈的累计输出脉冲数;
- 为消除测试夹具误差, 将陀螺仪相对夹具绕 IRA 旋转 180° , 重复上述测试。

除另有规定外, 角 β 测试程序如下:

- 将 YRA 平行于转台转轴, 平行度满足规定要求;
- 其余同前。

A. 2. 1. 6. 4 计算方法

按公式 (A. 13) 求出陀螺仪绕IRA翻转前、后, 正反向各转 m 圈, 平均每圈累计输出脉冲数:

$$N_{\pm 1,2} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m N_{(\pm 1,2)i} \dots\dots\dots (A. 13)$$

式中 $N_{(\pm 1,2)i}$ 绕IRA翻转前、后，第*i*圈正、反方向各转360°的累积输出脉冲数。

按公式 (A. 14) 求出 $\alpha_{1,2}$ ：

$$\alpha_{1,2} = \frac{N_{+1,2} - N_{-1,2}}{2 \times 360 \times 3600 \cdot K} \times \frac{180}{\pi} \dots\dots\dots (A. 14)$$

式中：

K—标度因数，P/(°)；

$\alpha_{1,2}$ —绕IRA翻转前、后，IA在IRA与XRA所在平面内的投影与IRA的夹角。

按公式 (A. 15) 求出 α ：

$$\alpha = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \dots\dots\dots (A. 15)$$

按计算方法，求出IA在IRA和YRA所确定平面内的投影与IRA的夹角 β 。

按公式 (A. 16) 求出 γ ：

$$\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \dots\dots\dots (A. 16)$$

A. 2. 2 标度因数系列测试（速率法）

A. 2. 2. 1 标度因数

A. 2. 2. 1. 1 测试设备

除另有规定外，测试设备及其要求如下：

- a) 具有角度或速率输出的速率转台，转台的角位置精度、速率平稳度、转台速率范围指标满足产品性能要求；
- b) 陀螺仪测试系统。

A. 2. 2. 1. 2 测试程序

除另有规定外，测试程序如下：

- a) 使速率转台转轴与地垂线平行，对准精度在若干角分之内；
- b) 将陀螺仪通过夹具固定到速率转台上，使IRA轴平行于转台转轴，对准精度在若干角分之内；
- c) 将陀螺仪与测试系统相连接；
- d) 按规定设置采样间隔时间及采样次数*n*，预热时间后开始测试；
- e) 按GB/T 321-2005的R5系列，适当圆整、均匀删除后，选角速率测试点，测试点点数不小于11个(或与使用方协商确定)，必须包括最大输入角速率点；
- f) 转台正转，待转台平稳后测试陀螺仪输出，停转；转台反转，待转台平稳后测试陀螺仪输出，停转；
- g) 在每个角速度下分别记录陀螺仪输出 F_{jp} ，按公式 (A. 17) 求得该输入角速度下陀螺仪输出的

平均值 $\overline{F}_j$;

- h) 在测试开始和结束时,按相同方法分别测试当转台静止时,陀螺仪输出的平均值,并从测试输入角速度点的陀螺仪输出平均值中扣除,作为各给定角速度下的陀螺仪输出值;
- i) 测试结束后,断开陀螺仪电源。

A.2.2.1.3 计算方法

每个输入角速度下陀螺仪输出的平均值 $\overline{F}_j$

$$\overline{F}_j = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n F_{jp} \dots\dots\dots (A.17)$$

式中:

$\overline{F}_j$ —第j个输入角速度时陀螺仪的输出平均值, LSB;

F_{jp} —第j个输入角速度时陀螺仪第p次采样值, LSB;

n—采样次数。

$$\overline{F}_r = \frac{1}{2}(\overline{F}_s + \overline{F}_e) \dots\dots\dots (A.18)$$

式中:

$\overline{F}_r$ —转台静止时,陀螺仪的输出平均值, LSB;

$\overline{F}_s$ —测试开始,转台静止时按公式求得的陀螺仪输出平均值, LSB;

$\overline{F}_e$ —测试结束,转台静止时按公式求得的陀螺仪输出平均值, LSB。

去零偏与地速分量后,转台第j个给定角速率 Ω_{ij} 下陀螺仪输出值按公式(A.19)计算

$$F_{kj} = \overline{F}_j - \overline{F}_r \dots\dots\dots (A.19)$$

陀螺仪输入输出线性模型用公式(A.20)表示

$$F_{kj} = K \cdot \Omega_{ij} + F_0 + \nu_j \dots\dots\dots (A.20)$$

式中:

F_{kj} —去零偏和地速分量后,转台第j个给定角速度下陀螺仪输出值, LSB;

K—标度因数, LSB/(°)/s;

Ω_{ij} —转台第j个给定角速度, (°)/s;

F_0 —拟合零位, LSB;

ν_j —拟合残差。

$$K = \frac{\sum_{j=1}^M \Omega_{ij} \cdot \bar{F}_{kj} - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Omega_{ij} \cdot \sum_{j=1}^M \bar{F}_{kj}}{\sum_{j=1}^M \Omega_{ij}^2 - \frac{1}{M} \left(\sum_{j=1}^M \Omega_{ij} \right)^2} \dots\dots\dots (A. 21)$$

$$F_0 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M F_{kj} - \frac{K}{M} \cdot \sum_{j=1}^M \Omega_{ij} \dots\dots\dots (A. 22)$$

A. 2. 2. 2 标度因数非线性度

A. 2. 2. 2. 1 测试设备

除另有规定外，测试设备同A. 2. 2. 1. 1条。

A. 2. 2. 2. 2 测试程序

除另有规定外，测试程序同A. 2. 2. 1. 2条。

A. 2. 2. 2. 3 计算方法

输入角速度范围按规定设置，除另有规定外，非线性度测试在最大角速率范围内进行。计算方法如下：

陀螺仪的输入输出关系用公式（A. 23）表示

$$\hat{F}_j = K \cdot \Omega_{ij} + F_0 \dots\dots\dots (A. 23)$$

式中：

$\hat{F}_j$ —转台第j个给定角速度所对应拟合直线上计算的陀螺仪输出值，Hz或LSB；

K—标度因数，LSB/(°)/s；

Ω_{ij} —转台第j个给定角速度，(°)/s；

F_0 —拟合零位，LSB；

陀螺仪的逐点非线性偏差 a_j 按公式（A. 24）计算

$$a_j = \frac{\hat{F}_j - F_{kj}}{|F_m|} \dots\dots\dots (A. 24)$$

式中：

a_j —转台第j个给定角速度下陀螺仪输出值的非线性偏差；

F_{kj} —去零偏和地速后，转台第j个给定角速度下陀螺仪输出值；

F_m —陀螺仪规定角速率下输出值（除另有规定外，为最大输入角速率下的输出值）。

陀螺仪非线性度 K_n 按公式（A. 25）计算

$$K_n = |a_j|_{\max} \dots\dots\dots (A. 25)$$

式中：

K_n —标度因数非线性度。

A. 2. 2. 3 标度因数不对称度

A. 2. 2. 3. 1 测试设备

除另有规定外，测试设备同A. 2. 2. 1. 1条。

A. 2. 2. 3. 2 测试程序

除另有规定外，测试程序同A. 2. 2. 1. 2条。

A. 2. 2. 3. 3 计算方法

对方法（A. 2. 2. 1）中计算得到的陀螺仪输出平均值按正向输入和反向输入重新分组，分别求出正向、反向输入角速度范围内陀螺仪标度因数及其平均值，陀螺仪标度因数不对称性 K_a 按公式（A. 26）和公式（A. 27）计算：

$$K_a = \frac{|K_{(+)} - K_{(-)}|}{\overline{K}_{(+,-)}} \dots\dots\dots (A. 26)$$

$$\overline{K}_{(+,-)} = \frac{K_{(+)} + K_{(-)}}{2} \dots\dots\dots (A. 27)$$

式中：

K_a —标度因数不对称性；

$K_{(+)}$ —正向输入角速度范围内标度因数，LSB/(°)/s；

$K_{(-)}$ —反向输入角速度范围内标度因数，LSB/(°)/s；

$\overline{K}_{(+,-)}$ —正、反向标度因数平均值，LSB/(°)/s。

A. 2. 2. 4 标度因数重复性

A. 2. 2. 4. 1 测试设备

除另有规定外，测试设备同A. 2. 2. 1. 1条。

A. 2. 2. 4. 2 测试程序

除另有规定外，按照A. 2. 2. 1. 2条，重复测试7次，相邻两次测试陀螺仪关机断电间隔时间不小于10分钟，得到每次测试的标度因数。

A. 2. 2. 4. 3 计算方法

$$K_r = \left[\frac{\sum_{j=1}^7 \left(K_j - \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 K_j \right)^2}{6} \right]^{1/2} \bigg/ \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 K_j \dots\dots\dots (A. 28)$$

式中：

K_r —标度因数重复性；

K_j —按式（A. 2. 2. 1）得到的第j次测试的标度因数，LSB/(°)/s。

A. 2. 2. 5 标度因数温度灵敏度

A. 2. 2. 5. 1 测试设备

a)～b) 同A. 2. 2. 1. 1条的a)～b)；

c) 除另有规定外，温度试验箱，要求隔磁、隔振，温控精度优于±2℃。

A. 2. 2. 5. 2 测试程序

除另有规定外，测试程序如下：

- a)～i) 同 A.2.2.1.2 条的 a)～i)；
- j) 根据陀螺仪实际应用所需要的温度范围，按 GB/T 321-2005 的 R5 系列适当均匀选取不少于 5 个测试温度点，其中包括室温；
- k) 在温度变化过程中，陀螺仪断电，在每个测试点保温不小于 2 小时，陀螺仪温度达到稳定状态后，按 A.2.2.1 条通电测试。

A.2.2.5.3 计算方法

$$K_i = \left| \frac{K_i - K_{00}}{(T_i - T_0) \times K_{00}} \right|_{\max} \dots\dots\dots (A.29)$$

式中：

K_i —标度因数温度灵敏度，1/°C；

K_i —第*i*个温度测试点的标度因数，LSB/(°)/s；

T_i —第*i*个温度测试点的温度值，°C；

K_{00} —室温标度因数，LSB/(°)/s；

T_0 —室温温度值，°C。

A.2.2.6 输入轴失准角

A.2.2.6.1 陀螺仪轴向定义

见图A1。

A.2.2.6.2 测试设备

- a)～b) 同 A.2.2.1.1 条的 a)～b)。

A.2.2.6.3 测试程序

除另有规定外，角 α 测试程序如下：

- a) 调整速率转台轴向与地垂线平行，误差小于若干角分；
- b) 将陀螺仪用夹具安装在转台上，并使 XRA 与转台轴平行，平行度满足规定要求；
- c) 将陀螺仪与输出装置相连接，陀螺仪通电预热规定时间；
- d) 转台以给定的角速率 Ω 正方向旋转，并记录每个速率点的平均输出脉冲数 $F_{(1+)}$ ；
- e) 转台以给定的角速率 Ω 反方向旋转，并记录每个速率点的平均输出脉冲数 $F_{(1-)}$ ；
- f) 为消除测试夹具误差，将陀螺仪相对夹具绕 IRA 旋转 180°，重复上述测试，得到 $F_{(2+)}$ 和 $F_{(2-)}$ 。

除另有规定外，角 β 测试程序如下：

- a) 将 YRA 平行于转台轴，平行度满足规定要求；
- b) 按照相同方法，得到 $F_{(3+)}$ 和 $F_{(3-)}$ ；
- c) 为消除测试夹具误差，将陀螺仪相对夹具绕 IRA 旋转 180°，重复上述测试，得到 $F_{(4+)}$ 和 $F_{(4-)}$ 。

A. 2. 2. 6. 4 计算方法

IA在yoz平面内投影与IRA的夹角 α ，按公式（A. 30）、公式（A. 31）和公式（A. 32）计算：

$$\delta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{F_{(1+)} - F_{(1-)}}{2K\Omega} \right) \dots\dots\dots (A. 30)$$

式中：

δ_1 —在第一个安装位置上，陀螺仪IA与水平面的偏差角；

$F_{(1+)}$ —在第一安装位置上，速率转台正转时陀螺仪的输出平均值；

$F_{(1-)}$ —在第一安装位置上，速率转台负转时陀螺仪的输出平均值；

K —标度因数；

Ω —速率转台转速。

$$\delta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{F_{(2+)} - F_{(2-)}}{2K\Omega} \right) \dots\dots\dots (A. 31)$$

式中：

δ_2 —在第一个安装位置上，陀螺仪IA与水平面的偏差角；

$F_{(2+)}$ —在第二安装位置上，速率转台正转时陀螺仪的输出平均值；

$F_{(2-)}$ —在第二安装位置上，速率转台负转时陀螺仪的输出平均值；

K —标度因数；

Ω —速率转台转速。

$$\alpha = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \dots\dots\dots (A. 32)$$

按相同计算方法，求出IA在IRA和YRA所确定平面内的投影与IRA的夹角 β 。

$$\delta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{F_{(3+)} - F_{(3-)}}{2K\Omega} \right) \dots\dots\dots (A. 33)$$

式中：

δ_3 —在第一个安装位置上，陀螺仪IA与水平面的偏差角；

$F_{(3+)}$ —在第一安装位置上，速率转台正转时陀螺仪的输出平均值；

$F_{(3-)}$ —在第一安装位置上，速率转台负转时陀螺仪的输出平均值；

K —标度因数；

Ω —速率转台转速。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/358071014040006106>