

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2003—2022

微惯性测量组合 (MIMU) 校准规范

Calibration Specification for Micro Inertial Measurement Units (MIMU)

2022-12-07 发布

2023-06-07 实施

国家市场监督管理总局 发布

微惯性测量组合
(MIMU) 校准规范

Calibration Specification for Micro
Inertial Measurement Units (MIMU)

JJF 2003—2022

归口单位：全国惯性技术计量技术委员会

起草单位：中国电子科技集团公司第十三研究所

航空工业北京长城计量测试技术研究所

北京三驰惯性科技股份有限公司

本规范主要起草人：

杨拥军（中国电子科技集团公司第十三研究所）

董雪明（航空工业北京长城计量测试技术研究所）

刘小利（中国电子科技集团公司第十三研究所）

刘海涛（北京三驰惯性科技股份有限公司）

参加起草人：

齐海锋（中国电子科技集团公司第十三研究所）

张宪龙（北京三驰惯性科技股份有限公司）

刘静雅（航空工业北京长城计量测试技术研究所）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语及定义	(1)
4 概述	(1)
4.1 原理	(1)
4.2 用途	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 MIMU 三轴陀螺仪校准模型	(2)
5.2 MIMU 三轴加速度计校准模型	(3)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 校准安装条件	(3)
6.3 测试标准及设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(4)
7.2.1 陀螺标度因数	(4)
7.2.2 陀螺零偏、加速度敏感系数	(5)
7.2.3 陀螺交叉耦合	(6)
7.2.4 加速度计偏值、标度因数、交叉耦合	(6)
7.2.5 加速度计角速度灵敏系数	(7)
8 校准结果表达	(7)
9 复校时间间隔	(8)
附录 A MIMU 测量不确定度评定示例	(9)
附录 B 校准证书内页格式	(13)
附录 C 安装工位坐标示意图	(15)

引 言

微惯性测量组合（Micro Inertial Measurement Unit, MIMU）广泛应用于国民经济领域的运动或姿态测量。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。本规范制定中参考了JJF 1427—2013《微机电（MEMS）线加速度计校准规范》和GJB 7952—2012《振动陀螺仪测试方法》。

本规范为首次发布。

微惯性测量组合（MIMU）校准规范

1 范围

本规范适用于由微机电（Micro Electro Mechanical System, MEMS）陀螺和加速度计组成的三维六自由度 MIMU，在角速度 $\pm 14\ 000^\circ/\text{s}$ 、线加速度 $\pm 10\ 000\ \text{m}/\text{s}^2$ 范围的校准。其他微惯性测量组合的校准可参照本规范。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1071—2010 国家计量校准规范编写规则

JJF 1427—2013 微机电（MEMS）线加速度计校准规范

JJF 1675—2017 惯性技术计量术语及定义

GJB 7952—2012 振动陀螺仪测试方法

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（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语及定义

3.1 微惯性测量组合 Micro Inertial Measurement Unit; MIMU

由 MEMS 陀螺和加速度计组成的用来测量载体在三维空间中的角速度和加速度信息的组件。

注：一般至少包含三个 MEMS 陀螺和三个 MEMS 加速度计。

3.2 陀螺交叉耦合系数 cross coupling coefficient for MEMS gyroscopes

MIMU 陀螺仪的非敏感轴向输入引起的输出误差系数。

3.3 加速度计交叉耦合系数 cross coupling coefficient for MEMS accelerometers

MIMU 加速度计的非敏感轴向输入引起的输出误差系数。

3.4 加速度计角速度灵敏系数 angular rate sensitivity coefficient of accelerometers

MIMU 加速度计中绕某规定轴由于每单位角速度输入产生的输出。

4 概述

4.1 原理

MIMU 由三个正交配置的陀螺、三个正交配置的加速度计、数字电路、处理软件组成。MIMU 系统原理框图如图 1 所示。角速度测量采用 MEMS 陀螺，分别用于 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向的角速度信号检测；加速度测量采用 MEMS 加速度计，分别用于 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向的加速度信号检测。MIMU 轴向示意图如图 2 所示， ω'_X 、 ω'_Y 、 ω'_Z 是 MEMS 陀螺仪输出， a'_X 、 a'_Y 、 a'_Z 为 MEMS 加速度计的输出。

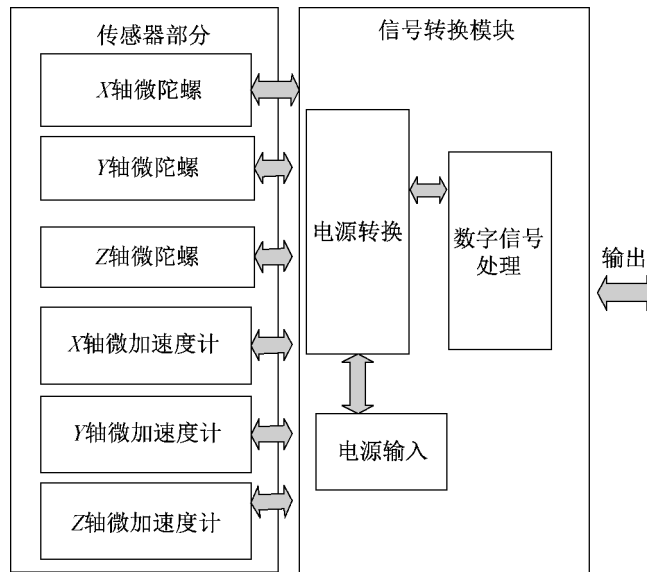


图 1 MIMU 系统原理框图

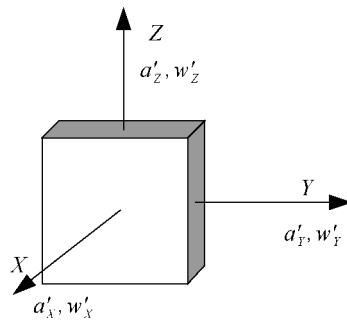


图 2 MIMU 轴向示意图

4.2 用途

MIMU 广泛应用于各种运动参数测量，为载体提供三轴角速度信息和加速度信息。

5 计量特性

5.1 MIMU 三轴陀螺仪校准模型

陀螺各轴输出的数字量模型见式 (1)：

$$\begin{bmatrix} \omega'_X \\ \omega'_Y \\ \omega'_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{gxx} & K_{gxy} & K_{gxz} \\ K_{gyx} & K_{gyy} & K_{gyz} \\ K_{gzx} & K_{gzy} & K_{gzz} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{gx} \\ B_{gy} \\ B_{gz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中：

$B_{gx}、B_{gy}、B_{gz}$ ——MIMU 陀螺仪敏感轴 X、Y、Z 的零偏；

$\omega'_X、\omega'_Y、\omega'_Z$ ——MIMU 陀螺仪敏感轴 X、Y、Z 的输出角速度值；

$\omega_X、\omega_Y、\omega_Z$ ——MIMU 陀螺仪输入基准轴 X、Y、Z 的输入角速度值；

$K_{gxx}、K_{gyy}、K_{gzz}$ ——MIMU 陀螺仪敏感轴 X、Y、Z 的标度因数；

$K_{gyx}、K_{gzx}、K_{gxy}、K_{gzy}、K_{gxz}、K_{gyz}$ ——MIMU 陀螺仪的交叉耦合系数；

$g_{xx}、g_{yy}、g_{zz}、g_{yx}、g_{zx}、g_{xy}、g_{zy}、g_{xz}、g_{yz}$ ——MIMU 陀螺仪零偏加速度灵敏度系数；

a_X, a_Y, a_Z ——MIMU 加速度计输入基准轴 X、Y、Z 的输入加速度值。

5.2 MIMU 三轴加速度计校准模型

加速度计各轴输出的数字量模型见式 (2)：

$$\begin{bmatrix} a'_X \\ a'_Y \\ a'_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{axx} & K_{axy} & K_{axz} \\ K_{ayx} & K_{ayy} & K_{ayz} \\ K_{azx} & K_{azy} & K_{azz} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{ax} \\ B_{ay} \\ B_{az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & 0 & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_X^2 \\ \omega_Y^2 \\ \omega_Z^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中：

B_{ax}, B_{ay}, B_{az} ——MIMU 加速度计敏感轴 X、Y、Z 的偏值；

$\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ ——MIMU 加速度计敏感轴 X、Y、Z 的输入角速度值；

a'_X, a'_Y, a'_Z ——MIMU 加速度计敏感轴 X、Y、Z 的输出加速度值；

a_X, a_Y, a_Z ——MIMU 加速度计敏感轴 X、Y、Z 的输入加速度值；

$K_{axx}, K_{ayy}, K_{azz}$ ——MIMU 加速度计敏感轴 X、Y、Z 的标度因数；

$K_{ayx}, K_{axz}, K_{axy}, K_{azy}, K_{axz}, K_{ayz}$ ——MIMU 加速度计的交叉耦合系数；

$p_{yx}, p_{zx}, p_{xy}, p_{zy}, p_{xz}, p_{yz}$ ——MIMU 加速度计的角速度灵敏系数。

校准过程就是利用辅助校准设备，在给定的校准条件下，完成待校准参数的计算。

6 校准条件

6.1 环境条件

- 环境温度：(20±5)℃；
- 相对湿度 (RH)：20%~85%；
- 周围无强电磁场，无腐蚀性气体或液体，无强震源；
- 实验室应有接地装置。

6.2 校准安装条件

安装的夹具各垂直面相互垂直度 10"，平面度不大于 0.02 mm。

6.3 测试标准及设备

校准用标准装置及配套设备如表 1 所示。

表 1 校准用标准装置及推荐技术指标

校准用标准装置 及配套设备		技术指标	用途
MIMU 校准装置	三轴位置 速率转台	转角范围：连续无限； 台面平面度：0.02 mm； 角速率相对误差及平稳性： 1×10 ⁻⁵ (360°平均)； 角位置定位精度：±10"； 角位置测量重复性：±5"； 角速率平稳性：0.05%； 轴线垂直度：±10"	陀螺零偏 陀螺标度因数 陀螺交叉耦合系数 陀螺零偏加速度灵敏度 加速度计交叉耦合 加速度计标度因数 加速度计偏值
	速率转台	角速率平稳性：0.05% (速率>10°/s)	

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 2。

表 2 校准项目一览表

序号	项目名称	校准方法
1	陀螺标度因数	7.2.1
2	陀螺零偏	7.2.2
3	陀螺零偏加速度敏感系数	7.2.2
4	陀螺交叉耦合系数	7.2.3
5	加速度计偏值	7.2.4
6	加速度计标度因数	7.2.4
7	加速度计交叉耦合系数	7.2.4
8	加速度计角速度灵敏系数	7.2.5

7.2 校准方法

7.2.1 陀螺标度因数

7.2.1.1 标度因数校准方法

a) 将 MIMU 通过夹具固定在速率转台上，使得 X 轴陀螺敏感轴与转台旋转轴一致；

b) 接通电源，待电源电流稳定后，开始计数；

c) 在 MIMU 角速度测量范围内选择 7~11 个校准角速率点，包括最大输入角速率，启动速率转台；

d) 每个角速率输入后，待速率转台角速率输出平稳后，采集不少于 30 s 的数据 ω_{ki} ，计算得到 X 轴陀螺的标度因数 K_{gxx} ；

e) 将 MIMU 通过夹具固定在速率转台上，使得 Y 轴陀螺敏感轴与转台旋转轴一致，重新进行 b) ~d) 校准步骤，得到 Y 轴陀螺的标度因数 K_{gyy} ；

f) 将 MIMU 通过夹具固定在速率转台上，使得 Z 轴陀螺敏感轴与转台旋转轴一致，重新进行 b) ~d) 校准步骤，得到 Z 轴陀螺的标度因数 K_{gzz} 。

7.2.1.2 标度因数计算

陀螺输出的平均值 U_k 按式 (3) 计算：

$$U_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{ki} \quad (3)$$

式中：

U_k ——第 k 个角速率校准点陀螺仪输出平均值；

U_{ki} ——第 k 个角速率校准点的陀螺仪输出的第 i 个采样点值；

N —— 采样样本数。

建立陀螺输入输出线性模型，见式 (4)：

$$U = KX + b + \epsilon \quad (4)$$

式中：

U —— 多个角速率校准点陀螺仪输出均值构成的向量；

K —— 陀螺仪标度因数；

X —— 多个角速率校准点陀螺仪输入值构成的向量；

b —— 陀螺拟合零偏；

ϵ —— 拟合误差。

利用最小二乘法求解标度因数 K ，计算公式见式 (5)：

$$\begin{bmatrix} K \\ b \end{bmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T U \quad (5)$$

$$\text{式中： } U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} X_1 & 1 \\ X_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ X_n & 1 \end{bmatrix}。$$

7.2.2 陀螺零偏、加速度敏感系数

7.2.2.1 陀螺零偏、加速度敏感系数校准方法

a) 将 MIMU 通过专用工装安装在三轴位置速率转台上，按照附录 C 所示的 12 种位置对 MIMU 进行翻转，每个位置保持 30 s 以上，即将 MIMU 的 X 、 Y 、 Z 轴依次朝天和朝地，每一次朝天和朝地各测量 2 次，2 次区别是 MIMU 绕天向旋转 180° ，求这 2 次 MIMU 输出的平均值 U_i ，测得各轴加速度计以及陀螺分别朝天和朝地共 6 组数据；

b) 利用 6 组数据，通过最小二乘法可求出 MIMU 加速度的零偏和角速度零偏。

7.2.2.2 陀螺零偏、零偏加速度敏感系数计算

陀螺零偏、加速度敏感系数的计算方法如下：

$$\text{各轴输入加速度向量： } \bar{\mathbf{A}}_a = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{角速度输出 } \mathbf{U}_g = \begin{bmatrix} U_{gx1} & U_{gx2} & U_{gx3} & U_{gx4} & U_{gx5} & U_{gx6} \\ U_{gy1} & U_{gy2} & U_{gy3} & U_{gy4} & U_{gy5} & U_{gy6} \\ U_{gz1} & U_{gz2} & U_{gz3} & U_{gz4} & U_{gz5} & U_{gz6} \end{bmatrix}$$

则有：

$$\mathbf{U}_g = \bar{\mathbf{G}}_g \cdot \bar{\mathbf{A}}_g \quad (6)$$

根据最小二乘公式，得到：

$$\bar{\mathbf{G}}_g = \mathbf{U}_g \cdot \bar{\mathbf{A}}_g^T \cdot (\bar{\mathbf{A}}_g \cdot \bar{\mathbf{A}}_g^T)^{-1} \quad (7)$$

如此，即可根据角速度 6 组测量的数据得到包含陀螺的 g 值敏感系数和角速度零偏的 \mathbf{G}_g 的最小二乘估计，具体公式见式 (8)。

$$\overline{\mathbf{G}}_g = \begin{bmatrix} g_{gxx} & g_{gxy} & g_{gxz} & B_{gx} \\ g_{gyx} & g_{gyy} & g_{gyz} & B_{gy} \\ g_{gzx} & g_{gzy} & g_{gzz} & B_{gz} \end{bmatrix} = [\mathbf{G}_g | B_g] \quad (8)$$

其中, B_g 是陀螺的零偏, \mathbf{G}_g 为陀螺的零偏加速度灵敏度系数。

7.2.3 陀螺交叉耦合

7.2.3.1 交叉耦合校准方法

方法同 7.2.1.1。

7.2.3.2 交叉耦合计算

利用 7.2.1.1 的测试数据, 可得到陀螺的标度因数矩阵为:

$$\overline{\mathbf{K}}_g = \begin{bmatrix} k_{gxx} & k_{gxy} & k_{gxz} \\ k_{gyx} & k_{gyy} & k_{gyz} \\ k_{gzx} & k_{gzy} & k_{gzz} \end{bmatrix}$$

式中:

k_{gxx} 、 k_{gyx} 、 k_{gzx} ——X 轴转动时, 三个轴陀螺的标度因数;

k_{gxy} 、 k_{gyy} 、 k_{gyz} ——Y 轴转动时, 三个轴陀螺的标度因数;

k_{gxz} 、 k_{gzy} 、 k_{gzz} ——Z 轴转动时, 三个轴陀螺的标度因数。

$\overline{\mathbf{K}}_g$ 的非对角线元素为角速度的交叉耦合系数。

7.2.4 加速度计偏值、标度因数、交叉耦合

7.2.4.1 加速度计偏值、标度因数、交叉耦合校准方法

方法同 7.2.2.1。

7.2.4.2 加速度偏值、标度因数、交叉耦合计算

加速度零偏的计算方法如下:

各轴输入加速度向量:

$$\overline{\mathbf{A}}_a = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

加速度输出:

$$\mathbf{U}_a = \begin{bmatrix} U_{ax1} & U_{ax2} & U_{ax3} & U_{ax4} & U_{ax5} & U_{ax6} \\ U_{ay1} & U_{ay2} & U_{ay3} & U_{ay4} & U_{ay5} & U_{ay6} \\ U_{az1} & U_{az2} & U_{az3} & U_{az4} & U_{az5} & U_{az6} \end{bmatrix}$$

则有:

$$\mathbf{U}_a = \overline{\mathbf{K}}_a \cdot \overline{\mathbf{A}}_a \quad (9)$$

根据最小二乘公式, 得到:

$$\overline{\mathbf{K}}_a = \mathbf{U}_a \cdot \overline{\mathbf{A}}_a^T \cdot (\overline{\mathbf{A}}_a \cdot \overline{\mathbf{A}}_a^T)^{-1} \quad (10)$$

如此, 即可根据加速度 6 组测量的数据得到加速度标度因数阵 $\overline{\mathbf{K}}_a$ 的最小二乘估计, 其中包含了 3 轴加速度的零偏、标度因数和交叉耦合系数。具体公式见式 (11):

$$\bar{\mathbf{K}}_a = \begin{bmatrix} k_{axx} & k_{axy} & k_{axz} & B_{ax} \\ k_{ayx} & k_{ayy} & k_{ayz} & B_{ay} \\ k_{azx} & k_{azy} & k_{azz} & B_{az} \end{bmatrix} = [\mathbf{K}_a | \mathbf{B}_a] \quad (11)$$

其中, $\mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} B_{ax} \\ B_{ay} \\ B_{az} \end{bmatrix}$ 是加速度偏值; \mathbf{K}_a 的对角线元素为加速度标度因数 \mathbf{S}_j , 即

$$\mathbf{S}_j = [k_{axx} \quad k_{ayy} \quad k_{azz}]。$$

\mathbf{K}_a 的非对角线元素为加速度的交叉耦合系数。

7.2.5 加速度计角速度灵敏系数

7.2.5.1 加速度计角速度灵敏系数校准方法

a) 将 MIMU 通过专用工装安装在三轴位置速率转台上, 使得 X 轴加速度计敏感轴垂直于转台向上, MIMU 上电采集 30 s, 输出均值记为 U_7 。

b) 转台输入角速率 ω , 待转台输出稳定后, 采集 MIMU 输出 30 s, 输出均值记为 U_8 。

c) 转换转台轴向, 使得 Y 轴加速度计敏感轴垂直于转台向上, 重复步骤 a) ~ b)。

d) 转换转台轴向, 使得 Z 轴加速度计敏感轴垂直于转台向上, 重复步骤 a) ~ b)。

7.2.5.2 加速度计角速度灵敏系数计算

加速度计角速度灵敏系数按式 (12)、式 (13) 计算。

$$p_{yx} = (U_{ay7} - U_{ay8}) / \omega^2 \quad (12)$$

$$p_{zx} = (U_{az7} - U_{az8}) / \omega^2 \quad (13)$$

U_{ay7} 、 U_{az7} ——当转台静止时, Y 轴加速度计和 Z 轴加速度计的输出均值;

U_{ay8} 、 U_{az8} ——当转台静止时, Y 轴加速度计和 Z 轴加速度计的输出均值;

ω ——转台输入角速率。

同理可计算 p_{xy} 、 p_{zy} 、 p_{xz} 、 p_{yz} 。

8 校准结果表达

校准结果应在校准书或校准报告上反映。校准证书或校准报告至少应包括以下信息:

- 标题, “校准证书”或“校准报告”;
- 实验室名称和地址;
- 证书或报告的编号, 每页及总页数的标识;
- 校准单位校准专用章;
- 送校单位的名称和地址;
- 被校对象的名称、制造厂、型号规格、编号;
- 被校对象的接收日期和进行校准的日期;
- 本次校准所用测量标准的名称、出厂编号、准确度/等级、证书编号;
- 校准环境条件的描述, 包括: 温度、湿度等;
- 校准结果及测量不确定度的说明;

- k) 校准证书或校准报告的签发人的签名、职务，以及签发日期；
- l) 校准试验的操作人和核验人签名。

9 复校时间间隔

在一般情况下建议复校的时间间隔为 1 年，送校单位也可根据实际使用情况自行确定。

附录 A

MIMU 测量不确定度评定示例

A.1 标度因数不确定度评定

A.1.1 测量模型

根据 7.2.1.2 中式 (4)，标度因数测量可表示为：

$$U = KX + b + \varepsilon \quad (\text{A.1})$$

式中：

U —— 多个角速率校准点陀螺仪输出均值构成的向量；

K —— 陀螺仪标度因数；

X —— 多个角速率校准点陀螺仪输入值构成的向量；

b —— 陀螺拟合零偏；

ε —— 拟合误差。

标度因数的合成标准不确定度由式 (A.2) 求得：

$$u_c^2(K) = c^2(U)u^2(U) + c^2(b)u^2(b) + c^2(X)u^2(X) \quad (\text{A.2})$$

式中：

$$c(U) = \frac{1}{X};$$

$$c(b) = -\frac{1}{X};$$

$$c(X) = -\frac{U-b}{X^2}。$$

式 (A.2) 可以转化为： $u_c^2(K) = \frac{1}{X^2}u^2(U) + \frac{1}{X^2}u^2(b) + \frac{(U-b)^2}{X^4}u^2(X)$

A.1.2 不确定度分量

A.1.2.1 位置速率转台引入的不确定度分量 u_1

位置速率转台测量不确定度为 $U = 2 \times 10^{-4}$ ， $k = 2$ ，则 $u_1 = \frac{2 \times 10^{-4}}{2} = 1.0 \times 10^{-4}$ 。

A.1.2.2 数据采集系统引入的不确定度分量 u_2

数据采集系统量化误差为式 (A.3)：

$$\delta = \frac{1}{2^N} \quad (\text{A.3})$$

式中：

δ —— 数据采集系统的量化误差；

N —— 数据采集系统的有效位数。

按 B 类评定，取 $N = 12$ ，假设服从均匀分布，不确定度分量为：

$$u_2 = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 1.41 \times 10^{-4}$$

A. 1. 2. 3 测量重复性引入的不确定度分量 u_3

以某型 MIMU 为例, 由大量实验数据得到, $u_3 = 1.22 \times 10^{-4}$ 。

A. 1. 3 合成标准不确定度

合成标准不确定度为:

$$u_c(K) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 2.12 \times 10^{-4}$$

A. 1. 4 扩展不确定度

取 $k=2$, 则扩展不确定度 $U = k \cdot u_c(K) = 4.3 \times 10^{-4}$ 。

A. 2 零偏不确定度评定

A. 2. 1 测量模型

根据 7. 2. 2. 2 中式 (7), 简化后零偏的测量模型为:

$$B = (U_{gx1} + U_{gx2} + U_{gx3} + U_{gx4} + U_{gx5} + U_{gx6}) / 6 \quad (\text{A. 4})$$

式中:

B ——零偏;

U_{gx1} 、 U_{gx2} 、 U_{gx3} 、 U_{gx4} 、 U_{gx5} 和 U_{gx6} ——MIMU 在 6 个位置的输出。

零偏的合成标准不确定度由式 (A. 5) 求得:

$$u_c^2(B) = c^2(U_{gx1})u^2(U_{gx1}) + c^2(U_{gx2})u^2(U_{gx2}) + c^2(U_{gx3})u^2(U_{gx3}) + c^2(U_{gx4})u^2(U_{gx4}) + c^2(U_{gx5})u^2(U_{gx5}) + c^2(U_{gx6})u^2(U_{gx6}) \quad (\text{A. 5})$$

A. 2. 2 不确定度分量

A. 2. 2. 1 位置速率转台引入的不确定度分量 u_1

位置速率转台引入的不确定度分量为 $u_1 = 1.0 \times 10^{-4}$ 。

A. 2. 2. 2 数据采集系统引入的不确定度分量 u_2

数据采集系统引入的不确定度分量 $u_2 = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 1.41 \times 10^{-4}$ 。

A. 2. 2. 3 $u(U_{gx1})$ 、 $u(U_{gx2})$ 、 $u(U_{gx3})$ 、 $u(U_{gx4})$ 、 $u(U_{gx5})$ 及 $u(U_{gx6})$ 的不确定度是一样的, 由实验数据得到:

$$u(U_{gx1}) = u(U_{gx2}) = u(U_{gx3}) = u(U_{gx4}) = u(U_{gx5}) = u(U_{gx6}) = 3.41 \times 10^{-5}$$

则:

$$u_3 = u(U_{gx1}) + u(U_{gx2}) + u(U_{gx3}) + u(U_{gx4}) + u(U_{gx5}) + u(U_{gx6}) = 2.046 \times 10^{-4}$$

A. 2. 3 合成标准不确定度

$$u_c(B) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 2.68 \times 10^{-4}$$

A. 2. 4 扩展不确定度

取 $k=2$, 则扩展不确定度 $U = k \cdot u_c(B) = 5.36 \times 10^{-4}$ 。

A. 3 零偏加速度灵敏度系数不确定度评定

A. 3. 1 测量模型

根据 7. 2. 2. 2 中式 (7), 简化后 MIMU 的陀螺零偏加速度灵敏度可表示为:

$$g_{gxx} = (U_{gx1} - U_{gx2}) / 2 \quad (\text{A. 6})$$

$$g_{gxy} = (U_{gx3} - U_{gx4}) / 2 \quad (\text{A. 7})$$

式中：

B ——零偏；

U_{gx1} 、 U_{gx2} 、 U_{gx3} 、 U_{gx4} ——MIMU 在 6 个位置的输出。

这里以 g_{gxx} 为例， g_{gxy} 等其他加速度灵敏度系数类似。加速度灵敏度的测量不确定度传播模型为式 (A.8)：

$$u_c^2(g_{gxx}) = c^2(U_{gx1})u^2(U_{gx1}) + c^2(U_{gx2})u^2(U_{gx2}) \quad (\text{A.8})$$

A.3.2 不确定度分量

A.3.2.1 位置速率转台引入的不确定度分量 u_1

位置速率转台引入的不确定度分量为 $u_1 = 1.0 \times 10^{-4}$ 。

A.3.2.2 数据采集系统引入的不确定度分量 u_2

数据采集系统引入的不确定度分量 $u_2 = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 1.41 \times 10^{-4}$ 。

A.3.2.3 测量重复性引入的不确定度分量 u_3

$u(U_{gx1})$ 与 $u(U_{gx2})$ 的不确定度是一样的，由实验数据得到： $u(U_{gx1}) = u(U_{gx2}) = 2.51 \times 10^{-3}$ ，则： $u_3 = u(N_{gx1}) + u(N_{gx2}) = 5.02 \times 10^{-3}$ 。

A.3.3 合成标准不确定度

$$u_c(g_{gxx}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 5.02 \times 10^{-3}$$

A.3.4 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度 $U = k \cdot u_c(g_{gxx}) = 1.1 \times 10^{-2}$ 。

A.4 交叉耦合系数不确定度评定

A.4.1 测量模型

根据 7.2.3.2 中 MIMU 的交叉耦合可表示为：

$$\mathbf{K}_g = \begin{bmatrix} k_{gxx} & k_{gxy} & k_{gxz} \\ k_{gyx} & k_{gyy} & k_{gyz} \\ k_{gzx} & k_{gzy} & k_{gzz} \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

式中：

k_{gxx} 、 k_{gyx} 、 k_{gzx} ——X 轴转动时，三个轴陀螺的标度因数；

k_{gxy} 、 k_{gyy} 、 k_{gyz} ——Y 轴转动时，三个轴陀螺的标度因数；

k_{gxz} 、 k_{gyz} 、 k_{gzz} ——Z 轴转动时，三个轴陀螺的标度因数。

\mathbf{K}_g 的非对角线元素为角速度的交叉耦合系数。

这里以 k_{gxy} 为例， k_{gzx} 等其他加速度灵敏度系数类似。交叉耦合的测量不确定度传播模型与标度因数的传播模型一致。

A.4.2 不确定度分量

A.4.2.1 位置速率转台引入的不确定度分量 u_1

位置速率转台测量不确定度为 $U = 2 \times 10^{-4}$ ， $k=2$ ，则 $u_1 = \frac{2 \times 10^{-4}}{2} = 1.0 \times 10^{-4}$ 。

A.4.2.2 数据采集系统引入的不确定度分量 u_2

数据采集系统量化误差为式 (A.3)。

按 B 类评定, 取 $N=12$, 假设服从均匀分布, 不确定度分量为:

$$u_2 = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 1.41 \times 10^{-4}$$

A. 4. 2. 3 测量重复性引入的不确定度分量 u_3

以某型 MIMU 为例, 由大量实验数据得到, $u_3 = 1.22 \times 10^{-4}$ 。

A. 4. 3 合成标准不确定度

$$u_c(K) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 2.12 \times 10^{-4}$$

A. 4. 4 扩展不确定度

取 $k=2$, 则扩展不确定度 $U = k \cdot u_c(K) = 4.3 \times 10^{-4}$ 。

A. 5 加速度计角速度灵敏度系数不确定度评定

A. 5. 1 测量模型

根据 7. 2. 5. 2 中式 (12) 和式 (13), 加速度计角速度灵敏度系数可表示为:

$$p_{yx} = (U_{ay7} - U_{ay8}) / \omega^2 \quad (\text{A. 10})$$

$$p_{zx} = (U_{az7} - U_{az8}) / \omega^2 \quad (\text{A. 11})$$

式中:

U_{ay7} 、 U_{az7} ——当转台静止时, Y 轴加速度计和 Z 轴加速度计的输出均值;

U_{ay8} 、 U_{az8} ——当转台静止时, Y 轴加速度计和 Z 轴加速度计的输出均值;

ω ——转台输入角速率。

这里以 p_{yx} 为例, p_{zx} 等其他加速度计角速度灵敏度系数类似。加速度计角速度灵敏度系数的测量不确定度传播模型为式 (A. 12):

$$u_c^2(p_{yx}) = c^2(U_{ay7})u^2(U_{ay7}) + c^2(U_{ay8})u^2(U_{ay8}) + c^2(\omega)u^2(\omega) \quad (\text{A. 12})$$

A. 5. 2 不确定度分量

A. 5. 2. 1 位置速率转台引入的不确定度分量 u_1

位置速率转台测量不确定度为 $U = 2 \times 10^{-4}$, $k=2$, 则 $u_1 = \frac{2 \times 10^{-4}}{2} = 1.0 \times 10^{-4}$ 。

A. 5. 2. 2 数据采集系统引入的不确定度分量 u_2

数据采集系统量化误差为式 (A. 3)。

按 B 类评定, 取 $N=12$, 假设服从均匀分布, 不确定度分量为:

$$u_2 = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 1.41 \times 10^{-4}$$

A. 5. 2. 3 测量重复性引入的不确定度分量 u_3

$u(U_{ay7})$ 与 $u(U_{ay8})$ 的不确定度是一样的, 由实验数据得到: $u(U_{ay7}) = u(U_{ay8}) = 2.51 \times 10^{-3}$, 则: $u_3 = u(U_{ay7}) + u(U_{ay8}) = 5.02 \times 10^{-3}$ 。

A. 5. 3 合成标准不确定度

$$u_c(P_{yx}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 5.02 \times 10^{-3}$$

A. 5. 4 扩展不确定度

取 $k=2$, 则扩展不确定度 $U = k \cdot u_c(P_{yx}) = 1.1 \times 10^{-2}$ 。

附录 B

校准证书内页格式

MIMU 校准结果

1. 标度因数

X 轴陀螺标度因数 (K_{gxx}):Y 轴陀螺标度因数 (K_{gyy}):Z 轴陀螺标度因数 (K_{gzz}):X 轴加速度计标度因数 (K_{axx}):Y 轴加速度计标度因数 (K_{ayy}):Z 轴加速度计标度因数 (K_{azz}):

测量不确定度:

2. 零偏

X 轴陀螺零偏 (B_{gx}):Y 轴陀螺零偏 (B_{gy}):Z 轴陀螺零偏 (B_{gz}):X 轴加速度计偏值 (B_{ax}):Y 轴加速度计偏值 (B_{ay}):Z 轴加速度计偏值 (B_{az}):

测量不确定度:

3. 陀螺交叉耦合系数

X 轴对 Y 轴交叉耦合系数 (K_{gyx}):X 轴对 Z 轴交叉耦合系数 (K_{gzx}):Y 轴对 X 轴交叉耦合系数 (K_{gxy}):Z 轴对 X 轴交叉耦合系数 (K_{gxz}):Z 轴对 Y 轴交叉耦合系数 (K_{gyz}):

测量不确定度:

4. 加速度计交叉耦合系数

X 轴对 Y 轴交叉耦合系数 (K_{ayx}):X 轴对 Z 轴交叉耦合系数 (K_{azx}):Y 轴对 X 轴交叉耦合系数 (K_{axy}):Y 轴对 Z 轴交叉耦合系数 (K_{azy}):Z 轴对 X 轴交叉耦合系数 (K_{axz}):Z 轴对 Y 轴交叉耦合系数 (K_{ayz}):

测量不确定度:

5. 陀螺加速度敏感系数 (g)

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} :$$

测量不确定度：

6. 加速度计角速度灵敏系数 (\mathbf{p})

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 0 & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & 0 & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & 0 \end{bmatrix} :$$

测量不确定度：

附录 C

安装工位坐标示意图

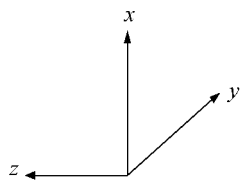


图 C.1 位置 1

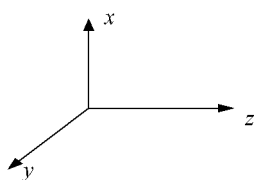


图 C.2 位置 2

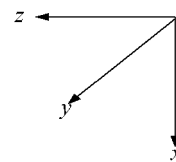


图 C.3 位置 3

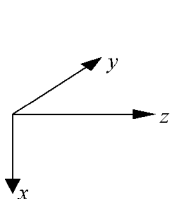


图 C.4 位置 4

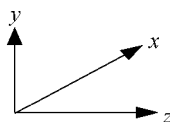


图 C.5 位置 5

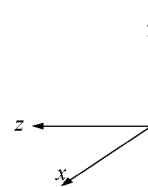


图 C.6 位置 6

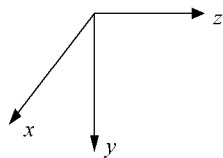


图 C.7 位置 7

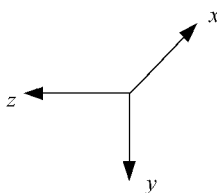


图 C.8 位置 8

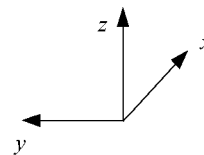


图 C.9 位置 9

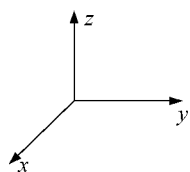


图 C.10 位置 10

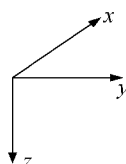


图 C.11 位置 11

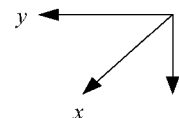


图 C.12 位置 12