JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—202X

便携式跟踪测量系统动态性能校准规范

Calibration Specification for Dynamic Performance of Portable Tracking Measurement Systems

（征求意见稿）

202X－XX－XX 发布　　202X－XX－XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

便携式跟踪测量系统动态性能校准规范

Calibration Specification for Dynamic Performance of Portable Tracking Measurement Systems

JJF ××××—202X

归 口 单 位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：中国测试技术研究院

参加起草单位：

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目　　录

引　　言 II
1 范围 1
2 引用文件 1
3 术语 1
4 概述 1
5 计量特性 1
5.1 偏航角动态误差 1
5.2 俯仰角动态误差 1
5.3 滚转角动态误差 1
5.4 标准轨迹测量动态误差 2
6 校准条件 2
6.1 环境条件 2
6.2 测量标准及其他设备 2
7 校准项目和校准方法 2
7.1 偏航角动态误差 2
7.2 俯仰角动态误差 3
7.3 滚转角动态误差 4
7.4 标准轨迹测量动态误差 5
8 校准结果表达 7
9 复校时间间隔 7
附录 A 8
附录 B 9
附录 C 12

引　　言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成本规范制定的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

便携式跟踪测量系统动态性能校准规范

1 范围

本规范适用于采用激光跟踪和视觉跟踪原理进行便携式跟踪测量仪器的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1406-2013 地面激光扫描仪校准规范

JJG（军工） 283-2021 球坐标式大尺寸激光扫描仪校准规范

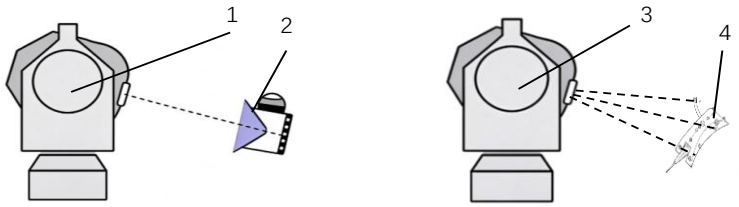
凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语

引用文件中的术语和定义适用于本规范。

4 概述

便携式跟踪测量系统（以下简“测量系统”）分激光跟踪型和视觉跟踪型，主要由测量主机、靶镜或视觉点、倾角仪、IMU 惯性测量单元等构成，用于运动位姿的高精度跟踪测量。测量系统典型外形、测量组件示意如图 1 所示。



a.激光跟踪型　　b.视觉跟踪型

1、3-测量主机；2、4-合作目标

图 1 便携式跟踪测量系统示意图

5 计量特性

5.1 偏航角动态误差

5.2 俯仰角动态误差

5.3 滚转角动态误差

5.4 标准轨迹测量动态误差

（注：校准工作不判断合格与否，上述计量特性指标仅供参考）

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：（20±2）℃；温度变化量：1℃/h；相对湿度：不大于75%。无影响校准结果的振动、空气扰动和尘埃，被校设备和标准器放置在实验室内平衡时间不小于4 h。

6.2 测量标准及其他设备

表1标准器及其他设备

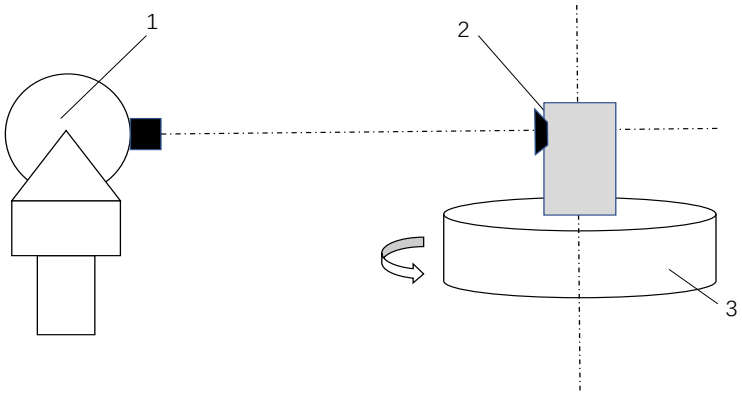
序号	名称	技术要求
1	标准转台	MPE：±5″；正交偏差优于2″；立卧两用。
2	标准轨迹生成装置	线性定位MPE：±（5+1×$10^{-6}L$）μm（L:m）；圆轨迹径向MPE：±3 μm；正交偏差优于2″

注：也可使用满足技术要求的其他标准器进行校准。

7 校准项目和校准方法

7.1 偏航角动态误差

将合作目标安装于标准转台台面中心，调整测量主机，使其测量轴线通过合作目标中心，且与转台回转轴线相交。安装方式如图 2 所示。



1—测量主机；2—合作目标；3—标准转台

图 2 偏航角动态误差校准方法示意图

在被校仪器标称测角范围内选取包含最大测量点的 3 个测量点。控制立式转台由零位转动至规定角度后返回零位，此往复运动记为 1 个测回。在每个测量点，分别沿正向、负向各进行 5 个测回（共计 10 个测回）的测量。分别取各测回中转台和被校仪器的最大示

值，作为转台角度参考值$\varphi_{\mathrm{CAL},\,ji}$和被校仪器的角度测量值$\varphi_{ji}$。

偏航角动态误差$\Delta\varphi$取全部测量结果示值误差的平均值，按式（1）计算：

$$\Delta\varphi=\frac{\sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{10}(\varphi_{ji}-\varphi_{\mathrm{CAL},\,ji})}{3\times10} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（1）$$

式中：

$\Delta\varphi$——偏航角动态误差；

$\varphi_{\mathrm{CAL},\,ji}$——第$j$测量点，第$i$测回的转台角度参考值，单位为角秒（″）；

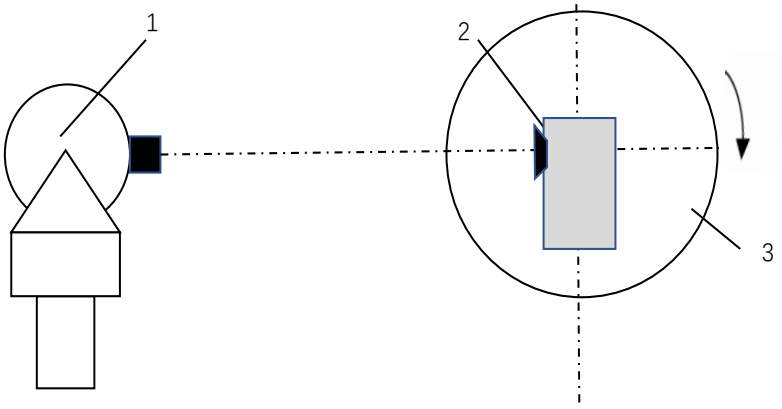
φ_{ji}——第j测量点，第i测回的被校仪器测量值，单位为角位秒（″）；

i——测回序号，i=1，2，…，10；

j——测量序号，j=1，2，3。

7.2 俯仰角动态误差

将合作目标安装于标准转台台面中心，调整测量主机，使其测量轴线通过合作目标中心，且与标准转台回转轴线相交。安装方式如图 3 所示。



1—测量主机；2—合作目标；3—标准转台

图 3 俯仰角动态误差校准方法示意图

测量方法同 7.1。分别取各测回中转台和被校仪器的最大示值，作为转台角度参考值 $\theta_{\mathrm{CAL},\,ji}$ 和被校仪器的角度测量值θ_{ji}。

俯仰角动态误差$\Delta\theta$取全部测量结果示值误差的平均值，按式（2）计算：

$$\Delta\theta=\frac{\sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{10}(\theta_{ji}-\theta_{\mathrm{CAL},\,ji})}{3\times10} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（2）$$

式中：

$\Delta\theta$——俯仰角动态误差；

$\theta_{\mathrm{CAL},\,ji}$——第 j 测量点，第 i 测回的转台角度参考值，单位为角秒（″）；

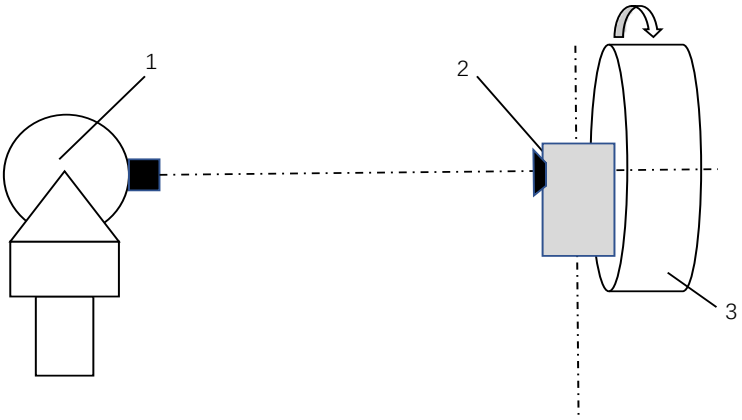
θ_{ji}——第 j 测量点，第 i 测回的被校仪器测量值，单位为角秒（″）；

i——测回序号，i=1，2，…，10；

j——测量点序号，j=1，2，3。

7.3 滚转角动态误差

将合作目标安装于标准转台台面中心，调整测量主机，使其测量轴线通过合作目标中心，且与转台回转轴线重合。安装方式如图 4 所示。



1—测量主机；2—合作目标；3—标准转台

图 4 滚转角动态误差校准方法示意图

测量方法同 7.1。分别取各测回中转台和被校仪器的最大示值，作为转台角度参考值 $\gamma_{\mathrm{CAL},\,ji}$ 和被校仪器的角度测量值 γ_{ji}。

滚转角动态误差 $\Delta\gamma$ 取全部测量结果示值误差的平均值，按式（3）计算：

$$\Delta\gamma=\frac{\sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{10}(\gamma_{ji}-\gamma_{\mathrm{CAL},\,ji})}{3\times10} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（3）$$

式中：

$\Delta\gamma$——滚转角动态误差；

$\gamma_{\mathrm{CAL},\,ji}$——第 j 测量点，第 i 测回的转台角度参考值，单位为角秒（″）；

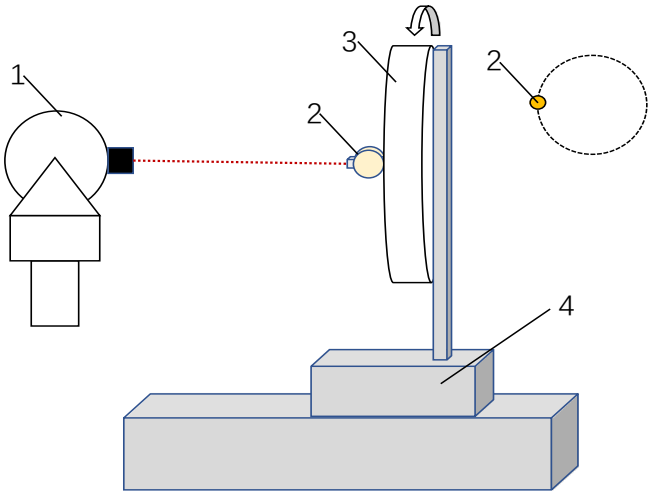
γ_{ji}——第 j 测量点，第 i 测回的被校仪器测量值，单位为角秒（″）；

i——测回序号，i=1，2，…，10；

j——测量点序号，j=1，2，3。

7.4 标准轨迹测量动态误差

将合作目标安装到标准螺旋轨迹生成装置上，如图5所示。启动标准转台和位移装置产生标准螺旋运动，生成标准螺旋轨迹曲线。



1—测量主机，2—合作目标，3—标准转台，4—位移台

图 5 标准轨迹误差校准方法示意图

被校跟踪测量系统以固定频率进行采样测量，获取空间轨迹点(x_i, y_i, z_i)，将数据进行最小二乘拟合，建立空间圆柱及轴线模型。并按公式（4）建立圆柱螺旋线参数方程：

$$\begin{cases} x_i = x_0 + R\cos(a_i + \phi_0)\cdot u_x + R\sin(a_i + \phi_0)\cdot u_x + \dfrac{h}{2\pi} a_i \cdot w_x \\ y_i = y_0 + R\cos(a_i + \phi_0)\cdot u_y + R\sin(a_i + \phi_0)\cdot u_y + \dfrac{h}{2\pi} a_i \cdot w_y \\ z_i = z_0 + R\cos(a_i + \phi_0)\cdot u_z + R\sin(a_i + \phi_0)\cdot u_z + \dfrac{h}{2\pi} a_i \cdot w_z \end{cases} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

式中：

(x_i, y_i, z_i)——第i个采样点的坐标测量值；

(x_0, y_0, z_0)——拟合螺旋轴线上的一点；

w—— 拟合螺旋轴线的单位方向向量，$w = (w_x, w_y, w_z)$；

u, v—— 垂直于轴线的平面内相互正交的单位向量；

R—— 拟合圆柱体的半径，单位为微米（μm）；

h——拟合螺旋线的螺距，单位为微米（μm）。

a_i——第i个采样点对应的旋转角度（拟合参数）；

ϕ_0——初始相位角。

以整个点云在空间垂直方向的最低点作为对齐基准，将点云向拟合出的圆柱轴线投影。将螺旋轨迹起始圈的最低点作为相位零点，将终止圈的最低点作为相位终点。按公式（5）计算拟合圆柱体长度L:

$$L = L_{\max} - L_{\min} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

式中：

L——拟合圆柱体**长度测量值**，单位为微米（μm）；

$L_{\max}$——相位终点在拟合轴线上投影的坐标值，单位为微米（μm）；

$L_{\min}$——相位零点在拟合轴线上投影的坐标值，单位为微米（μm）。

按公式（6）计算轨迹动态误差ΔS：

$$\begin{cases} \Delta R = R - R_{\mathrm{CAL}} \\ \Delta L = L - L_{\mathrm{CAL}} \\ \Delta S = \sqrt{\Delta R^2 + \Delta L^2} \end{cases} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

式中：

ΔR——螺旋轨迹径向测量误差，单位为微米（μm）；

R_{CAL}——拟合圆柱体半径参考值，单位为微米（μm）；

ΔL——拟合圆柱体长度测量误差，单位为微米（μm）；

L_{CAL}——拟合圆柱体长度参考值，单位为微米（μm）；

ΔS——标准轨迹动态测量误差，单位为微米（μm）。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书或校准报告上反映，校准证书数据页格式见附录 A。校准证书或校准报告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和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；

h)如果与校准结果的有效性和应用有关时，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说明；

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)校准证书签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；

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，不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议为 1 年。若使用较为频繁，或发现测量结果异常时，应随时进行校准。使用者可根据实际的使用情况，自主决定复校时间间隔。

附录 A

校准证书（内页）格式

证书编号：××××——××××

校 准 结 果

参数名称	测量结果	测量结果不确定度(k=2)
偏航角动态误差$\Delta\varphi$（″）		
俯仰角动误差$\Delta\theta$（″）		
滚转角动误差$\Delta\gamma$（″）		
标准轨迹测量动态误差Δs（μm）		

附录 B

B1. 姿态角测量误差校准结果不确定度评定（示例）

B1.1 姿态校准不确定度分析

B1.1.1 姿态校准不确定度分析模型

角度标准器为双轴复合的二维高精度转台，在设计制造中已保证了合理的正交性、环境变动性和轴心偏置引入的误差，则在测量过程中主要考虑转台误差和安装被校仪器时的安置误差。

根据方差和传播系数：

$$u_c^2(\Delta a_I') = \sum \left(\frac{\partial a_I'}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$
$$= c_1^2 u^2(a_1) + c_2^2 u^2(a_2)$$

公式中：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta a)}{\partial(a_1)} = 1$$
$$c_2 = \frac{\partial(\Delta a)}{\partial(a_2)} = -1$$

B1.1.2 姿态校准不确定度分量分析

（1）标准器引入的测量不确定度 u_1

在考虑正交性和轴性偏差的因素下，双轴复合的二维高精度转台的双轴复合角度误差为 5″，服从正态分布，取 k=2

则：

$$u_1 = \frac{5}{2} \approx 2.5''$$

（1）被校仪器分辨率引入的测量不确定度 u_2

被校仪器的角度分辨率一般为 0.001°，即 3.6″，根据半宽原则：

$$u_2 = \frac{3.6}{2} \approx 1.8''$$

（3）被测仪器安置误差引入的测量不确定度 u_3

被测仪器的姿态感受部件安装在二维高精度转台的上转台上，通过强制对中螺母进行安装，安装后清零进行测量，安置位置复合性误差，主要有安置面与仪器基面的面形误差和结合力产生，估计为 10μm，安装点距离坐标原点大于 0.5m，按 0.5m 计算，则产生姿态偏差估计为：

$$A = arctan(\frac{0.01}{500}) \approx 0.41''$$

考虑为三角分布，取 $k=\sqrt{6}$：

$$u_1 = \frac{0.41}{\sqrt{6}} \approx 0.16''$$

B1.2 姿态校准不确定合成

由于各标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{2.5^2 + 1.6^2 + 0.16^2} \approx 3''$$

B1.3 扩展不确定

取包含因子 k=2，则扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 3 \ = 6''，\ k=2$$

B2. 标准轨迹测量动态误差校准结果不确定度评定（示例）

B2.1 测量方法

依据本规范采用直接测量法对激光跟踪装置进行校准。

B2.1.1 测量模型

$$\Delta L = L_i - L_{ref} \qquad (1)$$

式中：

L_i——激光跟踪装置测得值，mm；

L_{ref}——虚拟基线标准长度，mm；

B2.1.2 方差和灵敏系数

方差：$u_c{}^2(e) = c_1{}^2 \cdot u^2(l) + c_2{}^2 \cdot u^2(l_s)$

灵敏系数：$c_1 = \frac{\partial e}{\partial l} = 1$；$c_2 = \frac{\partial e}{\partial l_s} = -1$

B2.2 标准不确定度来源分析

B2.2.1 标准轨迹测量动态误差校准不确定分析

（1）标准器线性定位误差引入的不确定度分量 u_1

标准器线性定位 MPE：±（1μm+1×10^{-6}L）（L:m），按正态分布，取 $k=2$，则：

$$u_1=\frac{1+1\times10^{-6}L}{2}=0.5\mu\text{m}+0.5\times10^{-6}L$$

（2）标准器径向误差引入的不确定度分量 u_2

标准器径向误差 MPE：±3μm，按正态分布，取 $k=2$，则：

$$u_2=\frac{3}{2}=1.5\mu\text{m}$$

（3）环境参数补偿引入不确定度分量 u_4

对测温系统 18℃、20℃、22℃三个温度点进行标定，标定系统的不确定度为 0.1K 根据 Edlén 公式，有空气温度引入折射率 n 修正不确定度：

$$u_3=0.1\times92.98\times10^{-8}L=0.93\times10^{-6}L$$

空气压力和水蒸气分压引入的折射率 n 修正不确定度均在 10nm 量级，可忽略；

（4）被校仪器分辨率引入的不确定度分量 u_5

被校仪器分辨率可达 1μm，按半宽原则：，

$$u_5=\frac{1}{2}=0.5\mu\text{m}$$

B2.3 标准不确定度合成

由于各标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2+u_5^2}=\sqrt{0.5^2+1.5^2+0.5^2}+\sqrt{0.5^2++0.93^2}\times10^{-6}L\approx2\mu\text{m}+1\times10^{-6}L$$

B2.4 扩展不确定

取包含因子 k=2，则扩展不确定度为：

$$U=k\cdot u_c=4\mu\text{m}+2\times10^{-6}L\quad，k=2，（\text{L:m}）$$

附录 C

校准记录格式

表 C.1 姿态角测量误差

测量点序号		标称值（° ′ ″）	测量值（″）					测量平均值（″）	参考值（″）	测量误差（″）
偏摆角校准点1	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
偏摆角校准点2	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
偏摆角校准点3	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
俯仰角校准点1	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
俯仰角校准点2	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
俯仰角校准点3	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
滚转角校准点1	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
滚转角校准点2	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
滚转角校准点3	正向		1	2	3	4	5			
	负向		6	7	8	8	10			
测量结果（″）			偏摆角动态误 $\Delta\varphi$		俯仰角动态误差 $\Delta\theta$		滚转角动态误差 $\Delta\gamma$		测量结果不确定度：（$k=2$）	

表 B.2 标准轨迹测量动态误差

被校螺旋轨迹参数	拟合值 （mm）	参考值 （mm）	测量误差 （μm）
圆柱体的半径			
圆柱体的长度			
轨迹动态误差： $\Delta S=\sqrt{\Delta R^2+\Delta L^2}$			
测量结果不确定度 （$k=2$）			

中华人民共和国

国家计量技术规范

便携式跟踪测量系统动态性能校准规范

JJF××××—202×

国家市场监督管理总局发布