



# 黑龙江省地方计量技术规范

JJF (黑) 06-2014

---

## 标准超精密气浮主轴校准规范

Calibration Specification for Standard Ultra-precision  
Air Spindle

2014-08-12 发布

2014-09-01 实施

---

黑龙江省质量技术监督局 发布



# 标准超精密气浮主轴校准规范

Calibration Specification for  
Standard Ultra-precision Air Spindle

JJF (黑) 06—2014

归口单位：黑龙江省质量技术监督局

起草单位：哈尔滨工业大学

黑龙江省计量检定测试院

本规范由黑龙江省质量技术监督局负责解释

**本规范主要起草人：**

谭久彬（哈尔滨工业大学）

黄景志（哈尔滨工业大学）

梁玉红（黑龙江省计量检定测试院）

谷 伟（哈尔滨工业大学）

# 目 录

引 言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 概述.....	(1)
4 计量特性.....	(1)
4.1 径向回转误差.....	(1)
4.2 轴向回转误差.....	(2)
4.3 角回转误差.....	(2)
4.4 承载.....	(2)
5 校准条件.....	(2)
5.1 环境条件.....	(2)
5.2 测量标准及其他设备.....	(2)
6 校准项目和校准方法.....	(2)
6.1 径向回转误差.....	(3)
6.2 轴向回转误差.....	(3)
6.3 角回转误差.....	(3)
6.4 承载.....	(4)
7 校准结果表达.....	(4)
8 复校时间间隔.....	(4)
附录 A 标准超精密气浮主轴的径向回转误差测量不确定度评定(示例) .....	(5)
附录 B 校准证书内容及内页格式 .....	(8)
附录 C 采用“多次转位误差分离方法”进行标准超精密气浮主轴径向回转误差校准..	(10)

# 引 言

JJF1071—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》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成制定本校准规范的基础性系列规范。

本规范的附录 A、B 为规范性附录，附录 C 为资料性附录。

本规范为首次制定文件。

## 标准超精密气浮主轴校准规范

### 1 范围

本规范适用于径向回转误差不大于 $0.03\mu\text{m}$ 的标准超精密气浮主轴的校准。

### 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

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

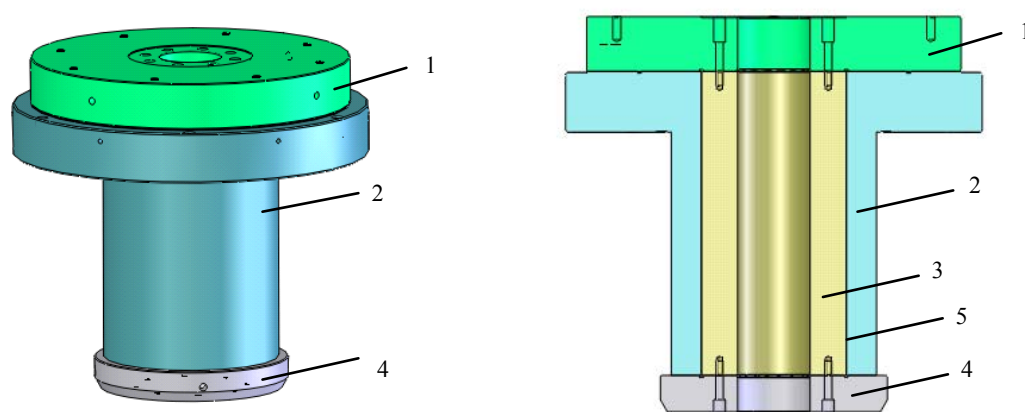
DB23/T 1545-2014 超精密气浮主轴技术要求

JJF 1130-2005 几何量测量设备校准中的不确定度评定指南

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 概述

标准超精密气浮主轴用于形成精密回转运动基准，是利用气体作为润滑剂的滑动摩擦主轴，它通过向气浮主轴的轴腔内注入压缩气体，利用气膜压力作为支承，以分离相对运动的两个表面。标准超精密气浮主轴主要包括轴、轴套、上气浮板和下气浮板几部分，轴和轴套之间为气膜间隙，其结构示意图如图1所示。



1. 上气浮板；2. 轴套；3. 轴；4. 下气浮板；5 气膜间隙

图1 标准超精密气浮主轴结构示意图

### 4 计量特性

#### 4.1 径向回转误差

径向回转误差应不大于  $0.03\mu\text{m}$ 。

#### 4.2 轴向回转误差

轴向回转误差应不大于  $0.03\mu\text{m}$ 。

#### 4.3 角回转误差

角回转误差应不大于  $0.05''$ 。

#### 4.4 承载

承载不超过  $50\text{kg}$ 。

(注：校准工作不判断合格与否，上述计量特性的指标仅供参考。)

### 5 校准条件

#### 5.1 环境条件

5.1.1 温度： $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ ，温度变化不超过  $0.5^\circ\text{C/h}$ ；

5.1.2 相对湿度： $\leq 65\%$ ；

5.1.3 气源压力： $(0.25\sim 0.6)\text{MPa}$ ；

5.1.4 校准前，将被校准的标准超精密气浮主轴与测量标准器一同放置在校准室内等温，其等温时间不少于 6 小时；

5.1.5 校准时，不应有影响校准结果的振动、漂尘。

#### 5.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 1。

表 1 测量标准及其他设备

序号	名称	计量特性
1	标准球或标准半球	圆度误差小于 $15\text{nm}$
2	电感传感器	非线性误差小于 $0.5\%$
3	平面平晶	2 级，直径 $30\text{mm}$
4	高度块	高度 $H$ 不小于 $100\text{mm}$ ，且上下两工作面的平行度小于 $1\mu\text{m}$
5	专用重块	重量 $(50\pm 0.1)\text{kg}$

注：也可采用满足测量不确定度要求的其他测量标准及设备进行校准。

### 6 校准项目和校准方法

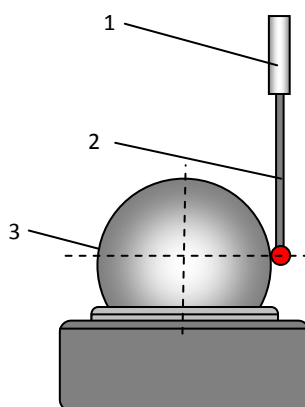
首先检查被校准的标准超精密气浮主轴外观和各部分相互作用，确定没有影响校准



计量特性的因素后再进行校准。

### 6.1 径向回转误差

采用直接测量法测量。将标准球(图2)或标准半球(图3)置于与标准超精密气浮主轴轴端相连的工作台台面上，电感传感器固定在稳固的支架上，使电感传感器测头与标准球或标准半球可靠接触，并调整标准球或标准半球与标准超精密气浮主轴回转轴线同心；待标准超精密气浮主轴旋转平稳后，记录主轴回转一周时电感传感器的测量数据，电感传感器每周均匀采样不少于1024点；对测量数据1~50 $\mu$ m高斯滤波处理后，采用最小二乘圆法(LSCI)或最小区域圆法(MZCI)进行圆度评定；取三次测量结果的算术平均值作为标准超精密气浮主轴的径向回转误差。



1. 传感器；2. 测杆；3. 标准球；4. 标准半球

图2 采用标准球校准径向回转误差

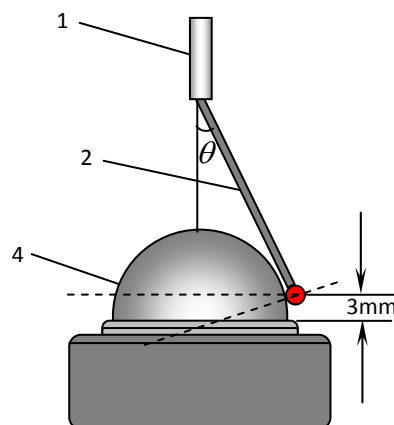


图3 采用标准半球校准径向回转误差

当对用上述直接测量法测得的结果有疑议时，可用误差分离方法分离出标准球或标准半球自身的圆度误差，得到更为精确的标准超精密气浮主轴的径向回转误差。误差分离方法参见附录C。

### 6.2 轴向回转误差

将平面平晶置于与标准超精密气浮主轴轴端相连的工作台台面中心，并将电感传感器固定在稳固的支架上，调整电感传感器的测头与平晶工作面可靠接触，同时调节传感器的径向位置，尽可能使测头运动轨迹的回转半径最小；待标准超精密气浮主轴旋转平稳后，记录主轴旋转一周时传感器测得的数据，每周采样点数不少于1024点；对测量数据1~50 $\mu$ m高斯滤波处理后，采用最小二乘圆法(LSCI)或最小区域圆法(MZCI)进行圆度评定；取三次测量结果的算术平均值作为标准超精密气浮主轴的径向回转误差。

### 6.3 角回转误差

首先将标准球或标准半球直接置于与标准超精密气浮主轴轴端相连的工作台台面

上, 并采用 6.1 所述方法测量在该位置的径向回转误差  $J_1$ ; 然后将高度为  $H$  的专用高度块置于气浮主轴的工作台台面上, 将标准球或标准半球放在专用高度块上, 测量在该位置处标准超精密气浮主轴的径向回转误差  $J_2$ , 则标准超精密气浮主轴的角回转误差  $\alpha$  为:

$$\alpha = \frac{60 \times 60 \times 180}{\pi} \arctan\left(\frac{|J_2 - J_1|/1000}{H}\right)$$

式中,  $\alpha$  的单位为",  $H$  单位为 mm,  $\delta_1$  和  $\delta_2$  的单位为  $\mu\text{m}$ 。

#### 6.4 承载

在标准超精密气浮主轴的工作台面上施加专用重块(或砝码), 检查标准超精密气浮主轴能否正常工作。

#### 7 校准结果表达

经校准的标准超精密气浮主轴, 出具校准证书, 校准证书应给出校准结果及测量不确定度。

#### 8 复校时间间隔

建议复校时间间隔为一年。送校单位可根据实际使用情况自主决定。

## 附录 A

### 标准超精密气浮主轴的径向回转误差测量不确定度评定(示例)

#### A.1 校准任务

校准标准超精密气浮主轴的径向回转误差。

#### A.2 原理、方法和条件

##### A.2.1 测量原理

接触式相对测量,利用标准半球作为圆度基准,电感传感器测头与标准半球表面可靠接触,当标准半球随标准超精密气浮主轴同步回转运动时测量标准超精密气浮主轴的径向回转误差。

##### A.2.2 测量方法

利用标准半球进行测量。首先将标准半球与被测标准超精密气浮主轴调整同心;待标准超精密气浮主轴旋转平稳后,记录主轴回转一周时电感传感器的测量数据;采用高斯滤波方法对测量数据进行滤波处理,并在1~50upr滤波挡下采用最小二乘圆法(LSCI)进行圆度评定,评定结果作为标准超精密气浮主轴的径向回转误差。

##### A.2.3 测量条件

- 环境温度(20±1)℃,温度变化每小时不应超过0.5℃/h,环境相对湿度≤65%;
- 被校准标准超精密气浮主轴在实验室内的平衡时间6h以上。

#### A.3 数学模型

标准超精密气浮主轴的径向回转误差  $J$  可表示为

$$J = J_c + \delta_q + \delta_s + \delta_a + \delta_t$$

式中:  $J_c$ —测得的径向回转误差的算术平均值;

$\delta_q$ —测量时使用的标准半球对测量结果的影响;

$\delta_s$ —测量系统的非线性误差对测量结果的影响;

$\delta_a$ —标准半球的安装误差对测量结果的影响;

$\delta_t$ —测量过程中温度变化对测量结果的影响。

#### A.4 不确定度分量

##### A.4.1 由测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(J)$

在各种条件均不改变的情况下,用14nm的标准半球进行标准超精密气浮主轴径向误差测量重复性实验,连续测量10次的实验数据为(单位:μm):0.025,0.024,0.025,

0.028, 0.025, 0.025, 0.027, 0.025, 0.026, 0.025。由贝塞尔公式计算得到实验标准差  $s_n(x)=0.0012\mu\text{m}$ ，实际测量取三次测量的算术平均值为最终测量结果，则

$$u_1(J) = u(J_c) = 0.0012 / \sqrt{3} = 0.001\mu\text{m}$$

#### A. 4. 2 由标准半球引入的标准不确定度分量 $u_2(J)$

标准半球自身的圆度误差为  $0.014\mu\text{m}$ ，半区间为  $0.007\mu\text{m}$ ，符合均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_{21}(J) = 0.007 / \sqrt{3} = 0.004\mu\text{m}$$

利用多步法误差分离技术测得的标准半球的扩展不确定度为  $0.005\mu\text{m}$ ， $k=2$ ，由此引入的标准不确定度为：

$$u_{22}(J) = 0.005 / 2 = 0.0025\mu\text{m}$$

则由标准半球引入的标准不确定度分量  $u_2(J)$

$$u_2(J) = u(\delta_q) = \sqrt{u_{21}^2(J) + u_{22}^2(J)} = 0.0047\mu\text{m}$$

#### A. 4. 3 由测量系统非线性误差引入的标准不确定度分量 $u_3(J)$

在  $-3\sim+3\mu\text{m}$  测量范围内，测量系统的非线性误差为  $0.5\%$ ，实际进行径向回转误差测量时，传感器的测量范围为  $-0.1\sim+0.1\mu\text{m}$ ，由此引入的非线性误差为  $0.1\mu\text{m} \times 0.5\% = 0.5\text{nm}$ ，按均匀分布处理， $k=\sqrt{3}$ ，则由此引入的标准不确定度分量为：

$$u_3(J) = u(\delta_s) = 0.0005 / \sqrt{3} = 0.0003\mu\text{m}$$

#### A. 4. 4 由温度变化引入的标准不确定度分量 $u_4(J)$

温度的变化会影响标准超精密气浮主轴的径向回转误差的测量结果，在测量前，标准半球已经放置在测量室内充分恒温，避免温度变化引起球体变形。形状测量中，温度在空间梯度上的变化则会使被测标准半球形状发生改变。标准半球由玻璃制作，膨胀系数取  $4.8 \times 10^{-6}$ ，尺寸为  $\phi 50\text{mm}$ ，当温度在空间梯度上变化  $0.01^\circ\text{C}$  时，标准半球产生的形状变形为  $\Delta l = 4.8 \times 10^{-6} \times 0.05 \times 0.01 = 0.0024\mu\text{m}$ 。温度效应按三角分布处理，在  $95\%$  的置信概率下  $k=1.90$ ，则由此引入的标准不确定度为：

$$u_4 = u(\delta_t) = \frac{0.0024}{1.9} = 0.0013\mu\text{m}$$

#### A. 4. 5 安装误差引入的标准不确定度分量 $u_5(J)$

测量时需要调整标准半球与标准超精密气浮主轴的回转轴同心，但是难以调整到

完全一致, 存在一定安装误差。在数据处理时由于安装误差误差带来的偏心影响可以通过数据处理进行修正, 残留误差影响在 $\pm 0.003\mu\text{m}$  以内, 符合均匀分布,  $k=\sqrt{3}$ , 则

$$u_5(J)=u(\delta_a)=0.003/\sqrt{3}=0.0017\mu\text{m}$$

#### A.5 合成标准不确定度

由于参与计算的各项标准不确定度分量之间没有值得考虑的相关性, 则合成标准不确定度为:

$$\begin{aligned} u_c(J) &= \sqrt{u_1^2(J) + u_2^2(J) + u_3^2(J) + u_4^2(J) + u_5^2(J)} = \sqrt{0.001^2 + 0.0047^2 + 0.0003^2 + 0.0013^2 + 0.0017^2} \\ &= 0.0052\mu\text{m} \end{aligned}$$

#### 5.3 扩展不确定度计算:

取包含因子  $k=2$ , 则扩展标准不确定度  $U$ :

$$U(J)=ku_c(J)=2\times 0.0052=0.010\mu\text{m}$$

## 附录 B

### 校准证书内容

- B.1 标题：“校准证书”；
- B.2 实验室名称和地址；
- B.3 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- B.4 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- B.5 客户的名称及地址；
- B.6 被校对象的描述和明确标识；
- B.7 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；
- B.8 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- B.9 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- B.10 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- B.11 校准环境的描述；
- B.12 校准结果及其测量不确定度的说明；
- B.13 对校准规范的偏离的说明；
- B.14 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- B.15 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- B.16 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

## 校准证书内页格式

证书编号：

校准所依据的技术文件（代号、名称）： JJF (黑) 06-2014 标准超精密气浮主轴校准规范				
校准环境：温度                      ℃；相对湿度：                      %；大气压：                      Pa				
校准地点：				
本次校准所用测量标准				
名称	测量范围	准确度/等级	证书编号	有效日期
校准项目与校准结果				
序号	校准项目	校准结果		
1	径向回转误差			
2	轴向回转误差			
3	角回转误差			
4	承载			
测量不确定度：				
校准员：		核验员：		

## 附录 C

## (资料性附录)

## 采用“多次转位误差分离方法”进行标准超精密气浮主轴径向回转

## 误差校准

当对用直接测量法测量的标准超精密气浮主轴径向回转误差结果有疑议时,可采用误差分离方法分离出标准球或标准半球自身的圆度误差,得到更为准确的标准超精密气浮主轴的径向回转误差。

采用连接装置将精密误差分离转台(径向回转误差小于 $0.2\mu\text{m}$ )固连在标准超精密气浮主轴工作台上,误差分离转台可随主轴同步回转;将标准球或标准半球置于误差分离转台工作台上,并精密调整标准球或标准半球与标准超精密气浮主轴回转中心线、误差分离转台回转轴线同心;驱动误差分离转台回转,带动标准球或标准半球沿逆时针方向每 $30^\circ$ 进行一次转位(见图C.1),采用电感传感器测量每一转位上的圆轮廓数据,连续进行12次转位,获得12组测量数据,对测量数据采用高斯滤波器(1-50upr挡)进行处理后,按式(C.1)计算:

$$M(\theta_i) = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} V_k(\theta_i) \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

$V_k(\theta_i)$ —第 $k$ 次转位测回的第 $i$ 个采样点的测量值,  $i=0, 1, 2, \dots, N-1$ ;

$N$ —每一测回上的采样点数,可取 50, 512, 1024 等。

对 $M(\theta_i)$ 进行数据处理,采用最小二乘圆法(LSCI)或最小区域圆(MZCI)法进行圆度评定,评定结果作为标准超精密气浮主轴的径向回转误差。

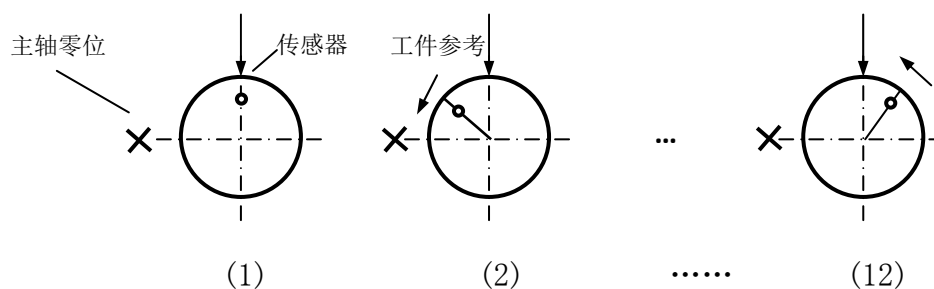


图 C.1 多次转位误差分离方法测量原理图



