



中华人民共和国工业和信息化部
机械计量技术规范

JJFZ(机械)017—2022

滚动轴承 圆锥滚子标准器校准规范

Calibration Specification for

Rolling Bearing Tapered Roller Rstandard

(报批稿)

2024—**—**发布

2024—**—**实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

滚动轴承 圆锥滚子标准器 校准规范

Calibration Specification for

Rolling Bearing Tapered Roller Standard

JJFZ(机械)017—2022

归口单位：全国机械汽车专业计量技术委员会

主要起草单位：洛阳轴承研究所检验检测有限公司

斯凯孚（上海）汽车技术有限公司

本规范参加起草单位：斯凯孚（大连）轴承与精密技术产品有限公司 委托全

国机械

汽车专

业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

赵 铭（洛阳轴承研究所检验检测有限公司）

郭媛媛（斯凯孚（上海）汽车技术有限公司）

付丽霞（斯凯孚（上海）汽车技术有限公司）

沈 强（斯凯孚（上海）汽车技术有限公司）

参加起草人：

万 雷（斯凯孚（大连）轴承与精密技术产品有限公司）

张 瑜（洛阳轴承研究所检验检测有限公司）

目 录

引言.....	(III)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和符号.....	(1)
3.1 术语.....	(1)
3.2 符号.....	(1)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(2)
5.1 表面粗糙度.....	(2)
5.2 素线直线度.....	(3)
5.3 圆度误差.....	(3)
5.4 基准端面的轴向跳动.....	(3)
5.5 圆锥角偏差.....	(3)
5.6 直径偏差.....	(4)
6 校准条件.....	(4)
6.1 环境条件.....	(4)
6.2 校准用标准器具.....	(4)
7 校准项目和校准方法.....	(5)
7.1 校准前检查.....	(5)
7.2 表面粗糙度.....	(5)
7.3 素线直线度.....	(5)
7.4 圆度误差.....	(5)
7.5 基准端面的轴向跳动.....	(5)
7.6 圆锥角偏差.....	(6)
7.7 直径偏差.....	(8)
8 校准结果表达.....	(11)
9 复校时间间隔.....	(11)
附录 A 正弦仪垫入侧挡板的量块尺寸计算.....	(12)
附录 B 圆锥滚子标准器圆锥角偏差测量不确定度评定示例.....	(13)
附录 C 校准证书内容.....	(18)

引 言

本规范按照 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写原则》、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》的要求,参考 JB/T 6637《滚动轴承 标准器技术条件》、GB/T 25767《滚动轴承 圆锥滚子》、JJG 343《光滑极限量规检定规程》、JJG 887《圆锥滚子标准件测量仪检定规程》、GB/T 6930《滚动轴承 词汇》、GB/T 297《滚动轴承 圆锥滚子轴承 外形尺寸》编写。

本规范为首次发布。

滚动轴承 圆锥滚子标准器校准规范

1. 范围

本规范适用于公称直径在 Φ （5~200）mm范围内的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级滚动轴承圆锥滚子标准器的校准。

2. 引用文件

本规范引用了下列文件：

JB/T 6637《滚动轴承 标准器技术条件》

GB/T 25767《滚动轴承 圆锥滚子》

JJG 343《光滑极限量规检定规程》

JJG 887《圆锥滚子标准件测量仪检定规程》

GB/T 6930《滚动轴承 词汇》

GB/T 297《滚动轴承 圆锥滚子轴承 外形尺寸》

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. 术语和符号

3.1 术语

GB/T 25767界定的术语和定义适用于本规范。

3.2 符号

符号	术语	符号	术语
D_w	圆锥滚子公称直径	2α	圆锥角
D_{ws}	圆锥滚子单一直径	$\Delta_{2\alpha}$	圆锥角偏差
Δ_{Dws}	圆锥滚子单一直径偏差	S_{Dw}	基准端面的轴向跳动

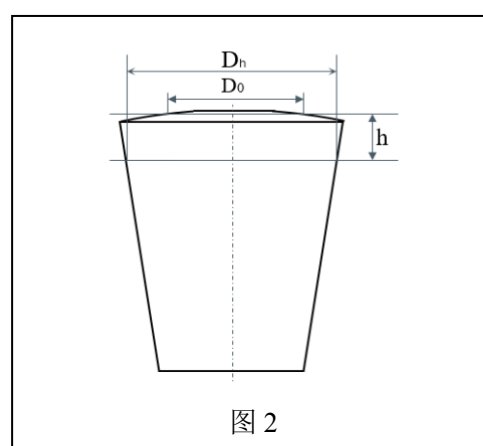
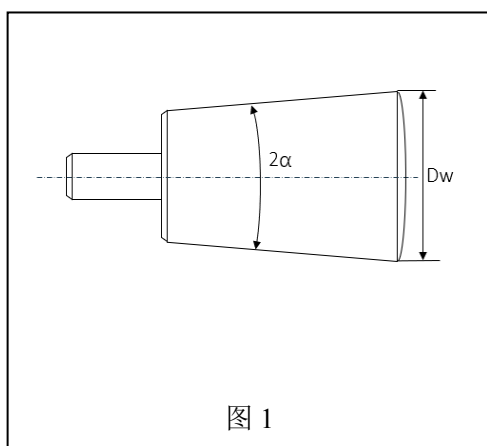
4. 概述

滚动轴承圆锥滚子标准器是测量圆锥滚子的基准，用于以比较测量法测量圆锥滚子的直径和圆锥角，同时也用于校准圆锥滚子直径、角度、直线测量仪的示值误差。

滚子标准器按等级分为 I、II 和 III 级，精度依次由高到低。

I 级标准器用于公差等级为 2 级和 4 级的轴承圆锥滚子直径的比较测量；II 级标准器用于公差等级为 5 级的轴承圆锥滚子直径的比较测量；III 级标准器用于公差等级为 6 级、6X 级和普通级的轴承圆锥滚子直径的比较测量。

圆锥滚子标准器的外形如图 1 和图 2 所示。



5. 计量特性

标准器的计量特性包括表面粗糙度、素线直线度、圆度误差、基准端面的轴向跳动、圆锥角偏差、直径偏差。

5.1 表面粗糙度

标准器各部位的表面粗糙度 Ra 不应超过表 1 的规定。

表 1 标准器各部位的表面粗糙度

μm

部位	圆锥表面			基准端面	其他表面
等级	I	II	III		
表面粗糙度 Ra	0.04	0.05	0.08	0.125	0.63

5.2 素线直线度

标准器的素线直线度不应超过表 2 的规定，并且只允许凸出。

表 2 标准器的直线度 μm

公称直径 D_w /mm		$D_w \leq 18$	$18 < D_w \leq 30$	$30 < D_w \leq 50$	$50 < D_w \leq 80$	$80 < D_w \leq 120$	$120 < D_w \leq 200$
等级	I	0.4	0.5	—	—	—	—
	II	0.8	1.0	1.2	—	—	—
	III	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0

5.3 圆度误差

标准器任一径向平面内的圆度误差不应超过表 3 的规定。

表 3 标准器的圆度误差 μm

公称直径 D_w /mm		$D_w \leq 18$	$18 < D_w \leq 30$	$30 < D_w \leq 50$	$50 < D_w \leq 80$	$80 < D_w \leq 120$	$120 < D_w \leq 200$
等级	I	0.5	0.6	—	—	—	—
	II	0.8	1.0	1.0	—	—	—
	III	1.2	1.5	1.5	2.0	2.5	2.5

5.4 基准端面的轴向跳动

滚子标准器基准端面的轴向跳动不应超过表 4 的规定。

表 4 基准端面的轴向跳动 μm

公称直径 D_w /mm		$D_w \leq 18$	$18 < D_w \leq 30$	$30 < D_w \leq 50$	$50 < D_w \leq 80$	$80 < D_w \leq 120$	$120 < D_w \leq 200$
等级	I	1.0	1.5	—	—	—	—
	II	1.5	2.0	2.5	—	—	—
	III	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5

5.5 圆锥角偏差

在滚子标准器有效长度范围内，以径向尺寸的变化来表示其圆锥角的线值偏差，圆锥角偏差 ($\Delta_{2\alpha}$) 不应超过表 4 的规定。

表 4 标准器圆锥角偏差 μm

公称直径 D_w /mm		$D_w \leq 18$	$18 < D_w \leq 30$	$30 < D_w \leq 50$	$50 < D_w \leq 80$	$80 < D_w \leq 120$	$120 < D_w \leq 200$
等级	I	± 1.0	± 1.5	—	—	—	—

	II	± 2.0	± 2.5	± 3.0	—	—	—
	III	± 2.0	± 2.5	± 3.0	± 3.5	± 4.5	± 5.0

5.6 直径偏差

滚子的大端直径与其公称直径之差，即标准器的直径偏差不应超过表 5 的规定。

表 5 标准器直径偏差 μm

公称直径 D_w /mm		$D_w \leq 18$	$18 < D_w \leq 30$	$30 < D_w \leq 50$	$50 < D_w \leq 80$	$80 < D_w \leq 120$	$120 < D_w \leq 200$
等级	I	± 2	± 3	—	—	—	—
	II	± 3	± 4	± 5	—	—	—
	III	± 4	± 5	± 10	± 12	± 15	± 18

6. 校准条件

6.1 环境条件

校准室的温度和温度变化率以及标准器的等温时间均应满足表 6 的要求。校准室内应无影响测量准确度的灰尘、噪音和振动。

表 6 环境条件及标准器等温时间

公称直径 D_w		$D_w \leq 30$	$30 < D_w \leq 80$	$80 < D_w \leq 120$	$120 < D_w \leq 200$
等温时间(h)		≥ 4	≥ 6	≥ 10	≥ 12
温度变化率		0.5°C/h			
温度	I、II	$(20 \pm 1)^\circ\text{C}$			
	III	$(20 \pm 2)^\circ\text{C}$			

6.2 校准用标准器具

表 7 校准项目及校准用标准器

序号	校准项目	校准器具
1	外观	—
2	表面粗糙度	表面粗糙度测量仪 MPE: $\pm 10\%$ 表面粗糙度比较样块 MPE: $+12\% \sim -17\%$
3	直线度	轮廓测量仪 MPE: $\pm 10\%$

4	圆度误差	圆度测量仪 MPE: $\pm 8\%$
5	基准端面的轴向跳动	圆锥滚子端面跳动测量仪 或三坐标测量机 MPE: $\leq \pm (1\mu\text{m} + 3 \times 10^{-6}L)$
6	圆锥角偏差	正弦仪、四等量块 或三坐标测量机 MPE: $\leq \pm (1\mu\text{m} + 3 \times 10^{-6}L)$ 或测长仪 MPE: $\leq \pm (0.5\mu\text{m} + 5 \times 10^{-6}L)$
7	直径偏差	正弦仪、四等量块、0 级圆柱滚子 或三坐标测量机 MPE: $\leq \pm (1\mu\text{m} + 3 \times 10^{-6}L)$ 或测长仪 MPE: $\leq \pm (0.5\mu\text{m} + 5 \times 10^{-6}L)$
MPE: 最大允许误差; L: 被校准长度		

7. 校准项目和校准方法

7.1 校准前检查

校准前应先检查仪器外观, 确认没有影响计量特性的缺陷后再进行其他项目校准。

在标准器的非工作表面或标牌上应标有型号、精度等级、编号、厂名或厂标、公称直径、圆锥角, 字迹应清晰。

7.2 表面粗糙度

圆锥表面和基准端面的表面粗糙度用表面粗糙度测量仪校准。校准时在被测面均匀分布的三个位置上沿标准器素线方向测量, 取其平均值作为校准结果; 其他表面用表面粗糙度比较样块以比较法校准。

7.3 直线度

标准器的直线度可用轮廓测量仪进行校准, 轮廓仪有传感器移动和工作台移动两种类型。校准时把标准器放置于 V 型工作台上, 调整轮廓仪使其素线平行于传感器 (或工作台) 运行方向, 在离开 2 倍倒角区域内测量, 对称校准两条素线, 取其最大值作为校准结果。

7.4 圆度误差

标准器的圆度误差用圆度仪校准。在圆锥滚子全长范围内均匀校准三个截面, 取其最大值作为校准结果。

7.5 基准端面的轴向跳动

7.5.1 标准器基准端面的轴向跳动用“圆锥滚子端面跳动测量仪”(如 C742)进行校准,

将圆锥滚子标准器放置于装有端挡板的三角台（V 型槽）上，三角台可根据被测滚子的大小选取。指示表安装在高度可调整的支架上，调整测头对准基准端面并位于距最大倒角尺寸 2 倍处，使标准器转动一周以上，指示表的最大差值即为轴向跳动。

7.5.2 对公称直径 D_w 大于 $\Phi 50\text{mm}$ 的标准器可用三坐标测量机进行校准，测量时以圆锥轴线建立测量基准，测量其基准端面对圆锥外表面的轴向跳动。

7.6 圆锥角偏差

7.6.1 正弦仪法

a) 标准器圆锥角偏差用正弦仪（如 J743）进行校准，首选垫入正弦仪侧挡板所需量块，侧挡板量块尺寸计算见附录 A；然后垫入圆柱滚棒下面所需量块，如图 3 所示，通过式（1）计算得到所用量块的理论尺寸 H_0 。

$$H_0 = L \cdot \sin 2\alpha \quad (1)$$

式（1）中：

H_0 —量块的理论尺寸，mm；

L —正弦仪两滚棒圆柱中心距，mm；

2α —圆锥滚子标准器公称圆锥角，°。

采用尽可能少的量块研合成与 H_0 最接近的尺寸，设 H 为量块实际研合尺寸。

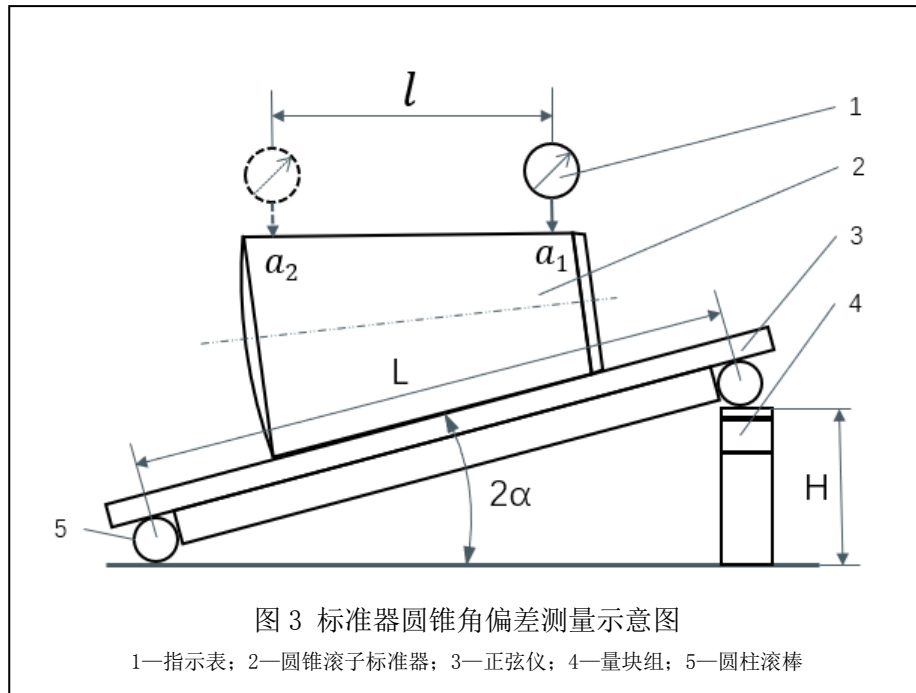
当 $H \neq H_0$ 时，由此引入的角度偏差为 Δ_H 。

$$\Delta_H = l \times \text{tg} \left(\arcsin \frac{H}{L} - \arcsin \frac{H_0}{L} \right) \quad (2)$$

式（2）中：

l —圆锥滚子标准器有效长度，mm；

H —量块实际研合尺寸，mm。



b) 将标准器置于平台上使仪器完全处于测量状态，如图 3 所示，升降表座使指示表与标准器接触，并在标准器小端（右端）调整指示表的示值于零位附近，记取读数 a_1 ；移动平台至标准器大端（左端），记取读数 a_2 ，按标准器有效长度来确定 a_1 至 a_2 的移动长度，反复测量三次分别取两端的平均值 \bar{a}_1 和 \bar{a}_2 ，标准器圆锥角偏差 $\Delta_{2\alpha}$ 按式（3）计算，应用时需注意 Δ_H 与 a_1 和 a_2 的单位一致。

$$\Delta_{2\alpha} = \bar{a}_2 - \bar{a}_1 + \Delta_H \quad (3)$$

7.6.2 三坐标法

对公称直径 D_w 大于 $\Phi 50\text{mm}$ 的标准器，可使用三坐标测量机进行校准。将标准器置于三坐标工作台上，选用球测针采集圆锥滚子的锥面元素，建立圆锥滚子中心轴；以中心轴线为基准，在圆锥滚子指定轴向平面内，采集两条圆锥表面素线，评价两条素线的夹角，该夹角即为标准器的圆锥角实测值 2α ，重复测量三次以平均值为测量结果。标准器圆锥角偏差 $\Delta_{2\alpha}$ 按式（4）计算。

$$\Delta_{2\alpha} = 2 \times l \times (\text{tg } \alpha - \text{tg } \alpha_0) \quad (4)$$

式（4）中：

l —圆锥滚子标准器有效长度，mm；

α_0 —圆锥滚子标准器公称圆锥半角, ° ;

α —圆锥滚子标准器实测圆锥半角, ° 。

7.6.3 测长仪法

对大端面为平面的圆锥滚子标准器, 也可使用测长仪分别测量滚子上下两个截面的直径, 通过式(5)计算其圆锥半角, 圆锥角偏差 $\Delta_{2\alpha}$ 仍按式(4)计算。

$$\alpha = \arctan \frac{|D_1 - D_2|}{2H_{12}} \quad (5)$$

式(5)中:

D_1 或 D_2 —滚子上或下截面的直径, mm;

H_{12} — D_1 和 D_2 的截面间高度, mm;

α —圆锥滚子标准器实测圆锥半角, ° 。

7.7 直径偏差

7.7.1 正弦仪法

标准器的大端直径在正弦仪上校准, 如4所示。在校准圆锥角之后保持状态不变, 在正弦仪的前挡板与标准器的大端之间放一直径为 d 的0级圆柱滚子, 然后组合量块尺寸 H_1 , 以比较法测得高度为 H_2 , 则圆锥滚子实测大端直径按式(6)计算。

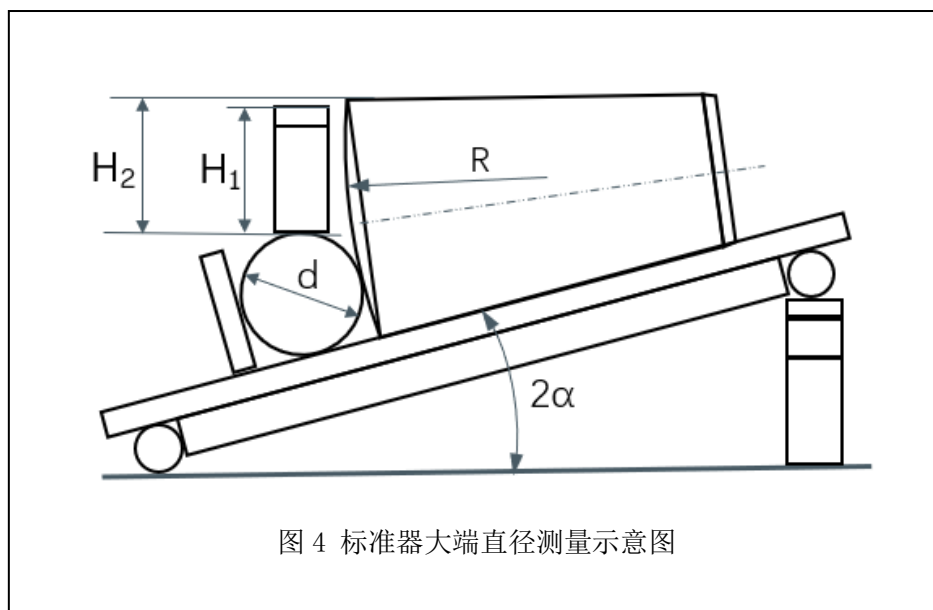


图4 标准器大端直径测量示意图

$$D_{ws} = H_2 \sec \alpha + d \cos \alpha - 2[\sqrt{R(R+d)} - R] \sin \alpha \quad (6)$$

式(6)中:

H_2 —滚棒圆柱滚子上素线距标准器上素线的高度测得值, mm;

d —滚棒圆柱滚子直径, mm;

R —圆锥滚子标准器基准端面的圆弧公称半径, mm;

α —圆锥滚子标准器圆锥半角, °。

7.7.2 两球法

a) 用三坐标测量机

对公称直径 D_0 大于 $\Phi 50\text{mm}$ 的标准器, 可使用三坐标测量机进行校准, 将标准器大端面朝上置于三坐标工作台上。选用球测针采集圆锥滚子的锥面元素, 建立圆锥滚子中心轴; 以该中心轴线为Z基准, 在大端基面上按照设计要求采集直径为 D_0 的圆, 如图5所示, 以直径为 D_0 的圆建立平面并将该平面设为基准 Z_0 ; 将指定轴向平面设定为 Y_0 平面, 完成坐标系的建立。然后将球测针下移至距基准平面 Z_0 为 h 的测量位置, 如图5所示。在指定轴向 Y_0 平面内将球测头沿X轴正负两方向分别在标准器圆锥面上采点, 记录测针球心坐标 x_1 和 x_2 。距离大端基准 Z_0 平面 h 高度处的直径按式(7)计算。

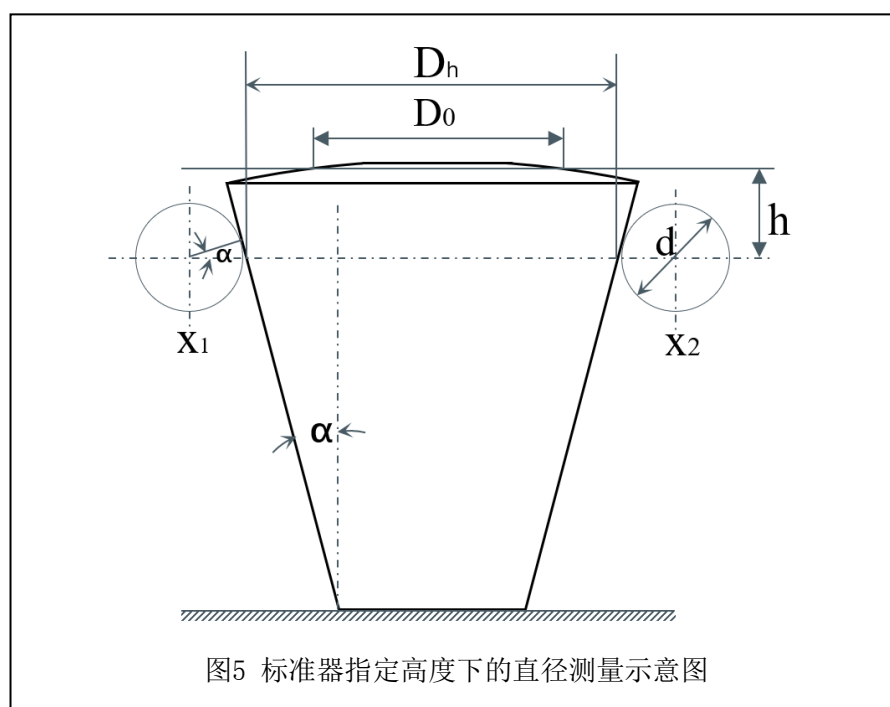


图5 标准器指定高度下的直径测量示意图

$$D_h = |x_2 - x_1| - \frac{d}{\cos \alpha}$$

设 $x = |x_2 - x_1|$

$$\text{则} \quad D_h = x - \frac{d}{\cos \alpha} \quad (7)$$

式(7)中:

x —测针球心在如图5所示 h 高度处的球心距, mm;

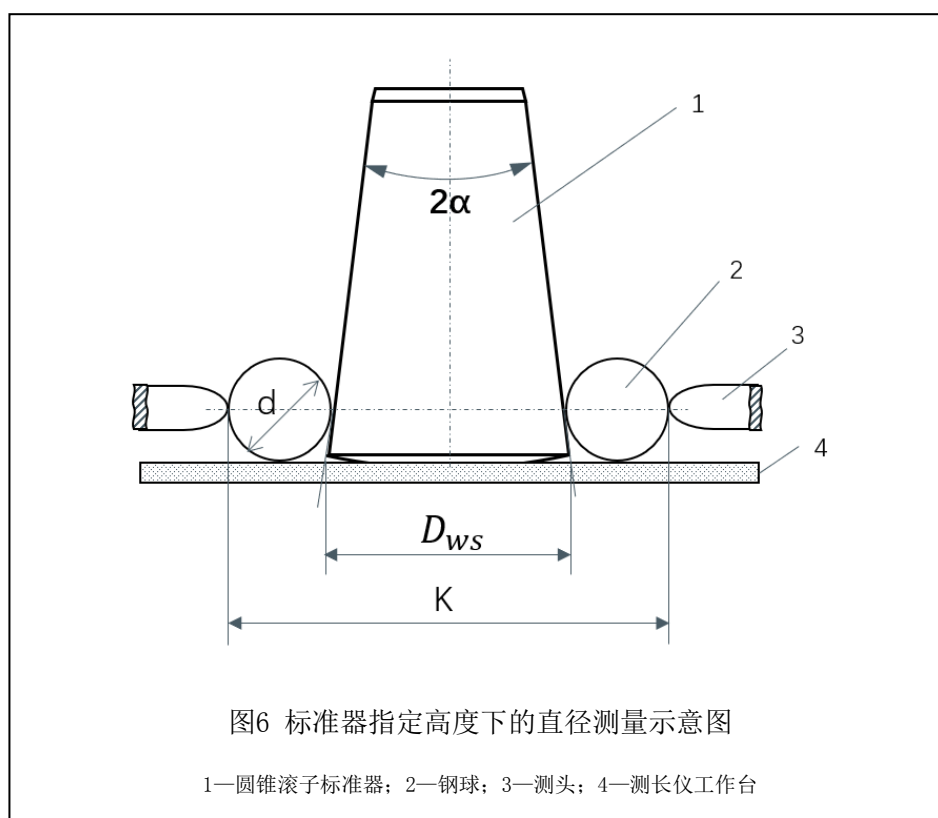
α —圆锥滚子标准器实测圆锥半角, °;

d —三坐标球测针直径, mm。

通过 D_h 和对应高度计算得到大端直径 D_{ws} 。

b) 用测长仪

对大端面为平面的圆锥滚子标准器, 也可使用测长仪采用两球法校准其大端直径, 如图6所示, 两粒钢球精度等级不低于 G10, 滚子大端直径按式(8)计算。



$$D_{ws} = K - d \left[1 + \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (8)$$

式(8)中:

D_{ws} —圆锥滚子标准器的大端直径, mm;

K —测长仪测得值, mm;

d —钢球直径, mm。

α —圆锥滚子标准器实测圆锥半角, ° ;

7.7.3 圆锥滚子标准器直径偏差为:

$$\Delta_{DWS} = D_{ws} - D_w \quad (9)$$

式(9)中:

D_{ws} —圆柱滚子实测大端直径, mm;

D_w —圆锥滚子公称直径, mm。

8. 校准结果表达

校准结果应给出主要计量特性的测量不确定度, 圆锥角偏差的测量不确定度评定见附录 B; 经校准的标准器出具校准证书, 校准证书内容至少包括附录 C 所列信息。

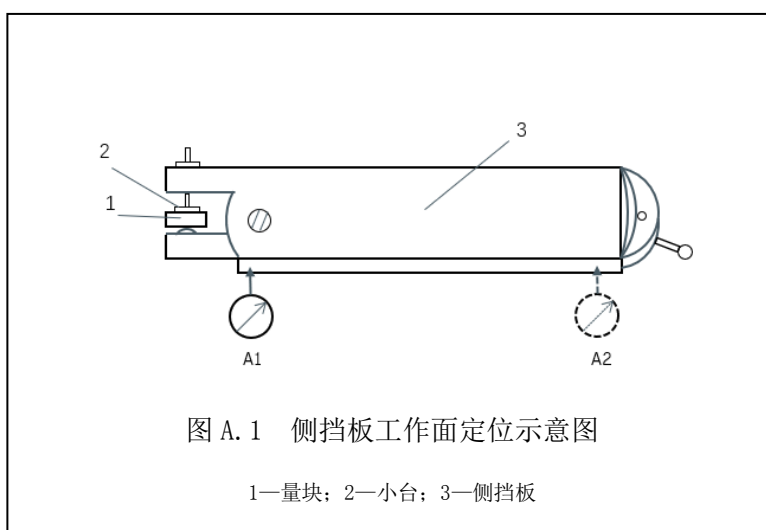
9. 复校时间间隔

标准器应定期进行校准。由于复校时间间隔的长短影响测量数据的质量风险, 因此送校单位应根据标准器的使用情况、标准器本身质量等诸因素, 自主决定复校时间间隔, 一般情况下不超过 1 年。

附录 A

正弦仪垫入侧挡板的量块尺寸计算

圆锥滚子标准器的圆锥角使用正弦仪校准,首先需要垫入侧挡板所需量块,如图 A. 1 所示为侧挡板工作面定位示意图。



在钢球与小台之间放置一量块,量块尺寸按下式计算:

$$h = [20 \cdot \sin(7^\circ 26' + \beta)] - 1.587 \quad (\text{A. 1})$$

$$\sin \beta = 2 \sin \alpha$$

式 (A. 1) 中:

h —所用量块的实际尺寸, mm;

α —圆锥滚子标准器圆锥半角, $^\circ$ 。

附录 B

圆锥滚子标准器圆锥角偏差测量不确定度评定示例

B.1 测量方法

圆锥滚子标准器圆锥角偏差用正弦仪（如 J743）进行校准，如正文图 3 所示，按照本规范 7.6.1 条款对型号为 30.143×56mm ×2°10'12"的圆锥滚子标准件进行校准。

B.2 测量模型

标准器圆锥角偏差 $\Delta_{2\alpha}$ 计算公式（B.1）为：

$$\Delta_{2\alpha} = a_2 - a_1 + \Delta_H \quad (\text{B.1})$$

$$\text{其中：} \quad \Delta_H = l \times \text{tg} \left(\arcsin \frac{H}{L} - \arcsin \frac{H_0}{L} \right) \quad (\text{B.2})$$

设 $\Delta_{2\alpha} = e$ ，所以圆锥角偏差的测量模型为：

$$e = a_2 - a_1 + l \times \text{tg} \left(\arcsin \frac{H}{L} - \arcsin \frac{H_0}{L} \right) \quad (\text{B.3})$$

式（A.3）中：

a_1 和 a_2 分别为标准器小端和大端的指示表读数，mm；

H — 滚棒下面垫入量块的实际研合尺寸，mm；

H_0 — 计算得到（垫入）所用量块的理论尺寸，mm；

Δ_H — 当 $H \neq H_0$ 时引入的圆锥角度偏差，mm；

L — 正弦仪两滚棒圆柱中心距，mm；

l — 圆锥滚子标准器测量有效长度，mm。

因 $|H - H_0| \ll L$ ，则 $\text{tg} \left(\arcsin \frac{H}{L} - \arcsin \frac{H_0}{L} \right) \approx \text{tg} \left(\arcsin \frac{H-H_0}{L} \right)$ ，对（B.3）进行转换得：

$$e \approx a_2 - a_1 + l \times \text{tg} \left(\arcsin \frac{H-H_0}{L} \right) \quad (\text{B.4})$$

$$\text{令 } x = \frac{H-H_0}{L} \quad \text{则 } \text{tg}(\arcsin x) = \frac{\sin(\arcsin x)}{\cos(\arcsin x)} = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$$

因 $|H - H_0| \ll L$ 所以 $x^2 \ll 1$

$$\text{故 } \operatorname{tg}(\arcsin x) = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} \approx x \quad \text{即} \quad \operatorname{tg}\left(\arcsin \frac{H-H_0}{L}\right) \approx \frac{H-H_0}{L}$$

对 (B.4) 进行转换, 得圆锥角偏差测量模型为:

$$e \approx a_2 - a_1 + l \times \frac{H-H_0}{L} \quad (\text{B.5})$$

B.3 方差与灵敏系数

因温度对角度的影响可忽略不计, 所以这里不考虑材料的线膨胀系数差和温度差的影响, 且各分量均无明显相关性。

$$u_c^2 = c_1^2 \cdot u^2(a_1) + c_2^2 \cdot u^2(a_2) + c_3^2 \cdot u^2(H) + c_4^2 \cdot u^2(L) + c_5^2 \cdot u^2(l) \quad (\text{B.6})$$

对式 (B.5) 求导得各分量灵敏系数:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\partial e}{\partial a_1} = -1; & C_2 &= \frac{\partial e}{\partial a_2} = 1; & C_3 &= \frac{\partial e}{\partial H} = l \times \frac{1}{L}; \\ C_4 &= \frac{\partial e}{\partial L} = l \times \frac{H-H_0}{L^2}; & C_5 &= \frac{\partial e}{\partial l} = \frac{H-H_0}{L}. \end{aligned}$$

B.4 各输入量的标准不确定度

B.4.1 输入量 a_1 的标准不确定度分量 $u(a_1)$

a_1 和 a_2 的标准不确定度来源于测量重复性、测量设备的分辨力和最大允许误差 (MPE), 以圆锥角等于 $2^\circ 10' 12''$ 的滚子标准件为例, 指示表用分度值为 $0.2 \mu\text{m}$ 的扭簧比较仪, 从 a_1 到 a_2 的测量有效长度 $l = 48 \text{mm}$ 。

a) 测量重复性引入的不确定度 u_{11}

在标准器小端 (右端) 使指示表示值 a_1 置零, 移动正弦仪滑块使指针至标准器大端 (左端) 读取 a_2 值, a_2 与 a_1 之差为测量结果, 如此反复操作。重复测量 10 次得观测列见表 B.1。

由表 B.1 知: 三次读数 a_1 的标准偏差为: $s(a_1) = 0.082 \mu\text{m}$, 又 $s(a_1) < s(\bar{x})$

所以取 $u_{11} = s(\bar{x}) = 0.086 \mu\text{m}$

B.1 标准器测量重复性

单位: μm

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	3 次平均值的标准差 $s(a)$
a_1 读数	0	0.1	0	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.4	0.2	0.082
a_2 读数	3.0	3.2	3.3	3.3	3.2	3.5	3.2	3.2	3.5	3.3	0.082
测量结果 $x_i = (a_2 - a_1)$	3	3.1	3.3	3.4	3.1	3.3	2.9	3	3.1	3.1	0.086
平均值 \bar{x}	$\bar{x} = \Sigma x_i / 10 = 3.13$										
单次测量的标准偏差	$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.15$										
平均值的标准偏差	$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{m}} = 0.086$ $(m = 3 \text{ 为实际测量次数})$										

b) 扭簧比较仪分辨力引入的不确定度 u_{12}

扭簧比较仪分度值为 $0.2\mu\text{m}$, 按半格 $0.1\mu\text{m}$ 估读, 区间半宽为 $0.1\mu\text{m}/2$ 并认为其等概率分布。

$$u_{12} = \frac{0.1\mu\text{m}}{2 \times \sqrt{3}} = 0.029 \mu\text{m}$$

由于 $u_{12} < s(a_1) < u_{11}$, 所以分辨力引起的不确定度已包含在重复性不确定度分量中。

c) 扭簧比较仪示值误差引入的不确定度 u_{13}

分度值为 $0.2\mu\text{m}$ 的扭簧比较仪 MPE 为 $\pm 0.15\mu\text{m}$, 区间半宽为 0.15 并认为其等概率分布。

$$u_{13} = \frac{0.15}{\sqrt{3}} = 0.087 \mu\text{m}$$

综上输入量 a_1 的标准不确定度分量为:

$$u(a_1) = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2}$$

由于 u_{11} 和 u_{12} 二者之间取其较大者, 即 u_{11} 包含了 u_{12} 。

故

$$u(a_1) = \sqrt{u_{11}^2 + u_{13}^2} = \sqrt{0.086^2 + 0.087^2} \mu\text{m} = 0.12 \mu\text{m}$$

B.4.2 输入量 a_2 的标准不确定度分量 $u(a_2)$

a_2 的标准不确定度来源于测量重复性、测量设备的分辨力和最大允许误差。

由表 B.1 知：三次读数 a_2 的标准偏差为： $s(a_2)=0.082 \mu m$ ，又 $s(a_2) < s(\bar{x})$

所以取 $u_{21} = s(\bar{x}) = 0.086 \mu m$

如同 $u(a_1)$ 评估过程，同理可得 a_2 的标准不确定度分量为：

$$u(a_2) = \sqrt{u_{21}^2 + u_{23}^2} = \sqrt{0.086^2 + 0.087^2} \mu m = 0.12 \mu m$$

B.4.3 输入量 H 的标准不确定度分量 $u(H)$

四等量块中心长度的最大允许值为 $\pm(0.20 \mu m + 2 \times 10^{-6} \times H)$ ， $k=2$ 。

圆锥角： $2\alpha = 2^\circ 10' 12'' = 2.17^\circ$ ； 正弦仪两圆柱中心距离 $L=200mm$ 。

滚棒下面垫入量块的理论值为：

$$H_0 = L \cdot \sin 2\alpha = 200mm \times \sin 2.17^\circ = 7.573mm$$

实际垫入量块尺寸 $H=7.57mm$ ，由 $(6.5+1.07) mm$ 两块量块研合而成，且属于强相关。所以输入量 H 的标准不确定度分量为：

$$u(H) = \frac{0.2\mu m + 2 \times 10^{-6} \times 6.5mm}{2} + \frac{0.2\mu m + 2 \times 10^{-6} \times 1.07mm}{2} = 0.21 \mu m$$

故

$$u(H) = 0.21 \mu m$$

B.4.4 输入量 L 的标准不确定度分量 $u(L)$

正弦仪两滚棒圆柱中心距的偏差约为 $\pm 0.05mm$ ，按等概率分布。

故

$$u(l) = \frac{50\mu m}{\sqrt{3}} = 38 \mu m$$

B.4.5 输入量 l 的标准不确定度分量 $u(l)$

从 a_1 到 a_2 的测量有效长度 $l=50mm$ ，实际偏差约 $\pm 0.5mm$ ，按等概率分布。

故

$$u(l) = \frac{0.5 \times 10^3 \mu m}{\sqrt{3}} = 0.29 \times 10^3 \mu m$$

B.5 合成标准不确定度

将各灵敏系数和各输入量的标准不确定分量带入式 (B.6) 中可得：

$$u_c^2 = 0.12^2 + 0.12^2 + \left(\frac{l}{L}\right)^2 \times 0.21^2 + \left(l \times \frac{H - H_0}{L^2}\right)^2 \times 38^2 + \left(\frac{H - H_0}{L}\right)^2 \times 290^2$$

$$u_c^2 = 0.12^2 + 0.12^2 + \left(\frac{50}{200}\right)^2 \times 0.21^2 + \left(50 \times \frac{7.57 - 7.573}{200^2}\right)^2 \times 38^2 + \left(\frac{7.57 - 7.573}{200}\right)^2 \times 290^2$$

$$u_c = \sqrt{0.12^2 + 0.12^2 + \left(\frac{50}{200}\right)^2 \times 0.21^2 + \left(50 \times \frac{7.57 - 7.573}{200^2}\right)^2 \times 38^2 + \left(\frac{7.57 - 7.573}{200}\right)^2 \times 290^2}$$

所以 $u_c = 0.18 \mu\text{m}$

表 B.2 列出了各分量的标准不确定度和灵敏系数，以及合成标准不确定等。

表 B.2 标准不确定度、灵敏系数和合成标准不确定

标准不确定度分量 (符号)	不确定度来源	$u(x_i)$ μm	灵敏系数 $C_i = \frac{\partial e}{\partial x_i}$	$[C_i \times u(x_i)]$ μm
$u(a_1)$	测量重复性	0.082	-1	0.12
	仪器分辨力	0.029		
	仪器示值误差	0.087		
$u(a_2)$	同上	0.12	1	0.12
$u(H)$	量块中心长度	0.21	0.25	0.053
$u(L)$	正弦仪两滚棒圆柱中心距	38	0.37×10^{-5}	0.00014
$u(l)$	测量有效长度	0.29×10^3	0.15×10^{-4}	0.0044
合成标准不确定度 u_c :			0.18 μm	

B.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 0.18 \mu\text{m} = 0.36 \mu\text{m}$$

故 $U = 0.4 \mu\text{m}$

B.7 不确定度结果报告

使用 J743 正弦仪对圆锥滚子标准器的圆锥角偏差 $\Delta_{2\alpha}$ 进行校准，其测量结果为：

$$\Delta_{2\alpha} = 3.1 \mu\text{m}$$

$$U = 0.4 \mu\text{m}, k=2$$

附录 C

校准证书内容

- a) 标题，如“校准证书”；
- b) 实验室的名称和地址；
- c) 进行校准的具体地点；
- d) 校准证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，校准证书的发布日期；如果与校准结果的有效性应用有关时，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) 对校准规范偏离的说明（若有）；
- m) 校准结果及测量不确定度的说明；
- n) 校准证书签发人（批准人）的签名及签发日期；
- o) 校准结果仅与被校对象有关的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。