



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 661—2004

平面等倾干涉仪

Flatness Interferometer with Isoclinic Circle Fringe

2004 - 09 - 21 发布

2005 - 03 - 21 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

平面等倾干涉仪检定规程

**Verification Regulation of Flatness
Interferometer with Isoclinic Circle Fringe**

JJG 661—2004
代替 JJG 661—1990

本规程经国家质量监督检验检疫总局于 2004 年 09 月 21 日批准，并自 2005 年 03 月 21 日施行。

归口单位：全国几何量工程参量计量技术委员会

起草单位：中国测试技术研究院

本规程委托全国几何量工程参量计量技术委员会负责解释

本规程起草人：

冉 庆 （中国测试技术研究院）

陈永康 （中国测试技术研究院）

张成梯 （中国测试技术研究院）

曹 箭 （中国测试技术研究院）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 概述	(1)
4 计量性能要求	(1)
4.1 测微目镜的示值误差极差及回程误差	(1)
4.2 工作台移动的直线度	(2)
4.3 工作台移动的示值误差及回程误差	(2)
4.4 钢球支架的工作性能	(2)
4.5 标准干涉环直径测量的标准偏差	(2)
4.6 干涉环小数干涉级测量的重复性	(2)
5 通用技术要求	(3)
5.1 外观	(3)
5.2 各部分相互作用	(3)
6 计量器具控制	(3)
6.1 检定条件	(3)
6.2 检定项目	(4)
6.3 检定方法	(4)
6.4 检定结果的处理	(6)
附录 A 等倾干涉仪测量平面度测量结果的不确定度评定	(7)
附录 B 检定证书和检定结果通知书内页格式	(10)

平面等倾干涉仪检定规程

1 范围

本规程适用于平面等倾干涉仪的首次检定、后续检定和使用中的检验。

2 引用文献

JJF 1001—1998 通用计量术语及定义

JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示

JJF 1094—2002 测量仪器特性评定

使用本规程时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 概述

平面等倾干涉仪是一种用于平面量值传递的标准计量器具，主要用于检定尺寸较大的平晶、各种尺寸的长平晶和标准平尺等的平面度。

仪器工作原理如图 1 所示。

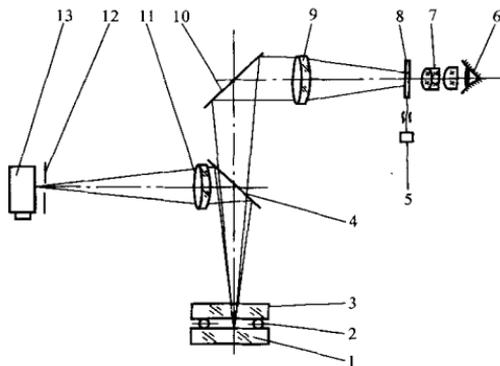


图 1 工作原理图

1—平晶；2—球支承；3—平晶；4—（半）反射镜；5—测微鼓轮；6—观察者；7—目镜组；
8—分划板；9—成像物镜；10—（半）反光镜；11—聚光物镜；12—光圈；13—钠灯

4 计量性能要求

4.1 测微目镜的示值误差极差及回程误差

不大于表 1 的规定。

表 1 测微目镜示值误差极差及回程误差

检定类别	任意 1mm 内的示值误差	全程 8mm 内的示值误差	回程误差
首次检定 后续检定	0.005mm	0.010mm	0.005mm

4.2 工作台移动的直线度

4.2.1 在水平面内直线度在任意 300mm 内应不超过 0.02mm；使用中和修理后的允许达到 0.04mm。

4.2.2 工作台移动时的扭摆及旋转时的摆动在目镜内观察，干涉环中心不得有目力可见的偏移。

4.3 工作台移动的示值误差及回程误差

不超过表 2 的规定。

表 2 工作台移动的示值误差及回程误差

检定类别	工作台纵向移动 在 200mm 内的示 值误差	工作台纵向移动 在 300mm 内的示 值误差	工作台纵向移动 在 500mm 内的示 值误差	回程误差
首次检定	± 0.10mm	± 0.15mm	± 0.20mm	0.10mm
后续检定、 使用中检验	± 0.15mm	± 0.20mm	± 0.25mm	0.15mm

4.4 钢球支架的工作性能

每个形成平行空气层的支架在放上相应的平晶或长平晶时，在目镜视场内应有清晰的干涉环图像。当移动工作台时，从一端至另一端，其干涉环直径变化应不超过 1 个干涉级数。

对于平晶支架，至少应有一个直径方向满足上述要求，在另外两个直径方向允许达到 5 个干涉级数。

对于长平晶支架，用转台回转时，其干涉直径变化应不超过 0.5 个干涉级数。

4.5 标准干涉环直径测量的标准偏差

仪器应对每种支承间隙的支架给出标准干涉环直径的值，其三倍标准偏差应不超过 0.01mm。

4.6 干涉环小数干涉级测量的重复性

根据干涉直径测量的结果按式 (1) 求出其干涉级数。

$$\Delta K_i = \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^2 + N_i \quad (1)$$

式中： ΔK_i —— i 点的干涉级数；

D_i —— i 点所测干涉环直径；

D_0 ——标准干涉环直径，当干涉环级数为整数时最里环的直径；

N_i —— i 点被测干涉环的级序，在0级环内为正，在0级环外为负。

干涉环测量的重复性应小于0.025个干涉级数。

5 通用技术要求

5.1 外观

5.1.1 仪器工作面不应有划痕、碰伤、斑点、锈蚀。非工作面不应有毛刺、脱漆或镀层脱落等外观缺陷。

5.1.2 仪器上应有制造厂名或厂标、出厂编号及CMC标志。

5.1.3 后续检定的仪器允许有不影响测量准确度的外观缺陷。

5.2 各部分相互作用

5.2.1 测微目镜的鼓轮转动应平稳，无卡住和擦碰现象，其移动范围应不小于8mm。

5.2.2 目镜调焦时应平稳可靠，其视场内的干涉环数应不少于3个整环（包括透射照明在内），且应无其他杂乱干涉花样，不得有影响测量的灰尘、污物及霉点等。

5.2.3 通过目镜应容易地看清楚分划板上的十字刻线，当移动分划板时，其十字刻线的清晰程度不得有目力可见的变化，十字刻线不得有明显的弯曲。

5.2.4 工作台的纵向运动和回转运动应平稳，无卡住和爬行现象。纵向行程应大于500mm。

5.2.5 手轮的刻度盘应能平稳地调节，且无卡住和松动现象。

6 计量器具控制

包括首次检定、后续检定和使用中检验。

6.1 检定条件

6.1.1 放置平面等倾干涉仪的仪器室温应为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 在检定4.5、4.6两项时，室温在24h内的变化量应小于 1°C ；在1h内的变化量应小于 0.1°C 。

6.1.3 检定 $\phi 150\text{mm}$ 平晶及210mm长平晶时，在室内放置时间应不少于24h及10h，并在检定前将平晶及长平晶放在仪器箱内安装调整后等温1h。

6.1.4 检定用标准器及其他检定设备见表3。

表3 检定用标准器及其他检定设备

检定用设备	测量范围	技术要求
百分表	(0~5) mm	0级 MPE: 0.012mm
研磨平尺	300mm	平面度: 0.0004mm
平晶	$\phi 150$ 或210mm长平晶	一级
标准玻璃刻尺	(0~300) mm或(0~500) mm	示值误差: 0.03mm
万能工具显微镜	(0~200) mm	MPE: $(1 + L/100) \mu\text{m}$

6.2 检定项目

平面等倾干涉仪首次检定、后续检定和使用中的检定项目列于表4。

表4 检定项目

序号	检定项目	主要检定设备	首次检定	后续检定	使用中检验
1	外观	——	+	+	+
2	各部分相互作用	——	+	+	+
3	测微目镜的示值误差及回程误差	工具显微镜	+	+	-
4	工作台移动的直线度	研磨平尺	+	-	-
5	工作台移动的示值误差及回程误差	标准玻璃刻尺	+	-	-
6	钢球支架的工作性能	平晶或长平晶	+	+	-
7	标准干涉环直径测量的标准偏差	平晶或长平晶	+	+	+
8	干涉环小数级测量的重复性	平晶或长平晶	+	+	+

注：表中“+”表示应检项目，“-”表示可不检项目。

6.3 检定方法

6.3.1 外观

目力观察。

6.3.2 各部分相互作用

观察和试验。

6.3.3 测微目镜的示值误差及回程误差

6.3.3.1 测微目镜的示值误差在万能工具显微镜上进行检定。先将测微目镜从仪器上取下，旋下目镜头，然后安装在万能工具显微镜的玻璃台上。调整工作台使分划板上十字刻线的运动方向与万能工具显微镜工作台移动方向平行，然后将测微鼓轮对零，再移动万能工具显微镜的工作台，使十字刻线的中心与显微镜的米字刻线中心重合，并在万能工具显微镜相应的读数机构读出零位读数。然后将测微鼓轮依次在1, 2, 3, 3.5, 3.75, 4, 4.25, 4.5, 5, 6, 7, 8mm等点上，用米字刻线对准并读数。每个读数减去零位读数即为该点的实际值，测微鼓轮上的测得值与实际值之差即为该点的示值误差。所有各点应在同一行程方向进行检定。全程（8mm）内或任意1mm内的示值误差应以该范围内的最大误差与最小误差之差确定。其大小应不超过表1的规定。

6.3.3.2 测微目镜的回程误差在示值误差检定后仍在万能工具显微镜上检定，只在测微鼓轮的两端和中间3个位置检定。在同一点上正、反两个方向各转动测微鼓轮5次，取5次读数平均值之差即为该点的回程误差。最大回程误差应不超过表1的规定。

6.3.4 工作台移动的直线度

在工作台上放一尺寸300mm的研磨平尺，且与工作台运动方向平行，用磁性表架上的百分表与工作面接触，对好零位，工作台从一端移至另一端，在百分表读出最大示值与最小示值，最大示值与最小示值之差为直线度。在全行程范围内检定。上述检定结

果应不大于 4.2 中的要求。

工作台移动的扭摆和回转运动的摆动是通过目镜观察干涉环中心的位置变化来确定的,干涉环中心的位置不允许有目力可见的变化。

6.3.5 工作台移动的示值误差及回程误差

6.3.5.1 将尺寸等于 500mm 的钢直尺或 300mm 的玻璃标尺放在工作台上,取下测微目镜,接上接长管,调整测微目镜的位置,在视场内能清晰看到刻度尺上的刻线;调整刻度尺使其刻线末端连线与工作台运动方向平行;调整工作台位置和测微目镜分划板,使刻度尺零刻线与目镜分划板上的十字线重合,再将手轮的 10mm 指示盘及 0.1mm 指示盘的零线都与指标线对准,然后每隔 50mm 用测微目镜对准,从手轮上读数,读数与实际值之差即为该点的示值误差。对于 300mm 的玻璃标尺在检完 300mm 后,可在 300mm 位置上把刻度尺移 300mm,并使零刻线与分划板上的十字对准,依次再检 200mm。

6.3.5.2 回程误差是在工作台的中间及距两边各 150mm 处的三个位置上进行检定。正反两个方向转动手轮,对准同一刻线时手轮上的读数差即为回程误差。

6.3.6 钢球支承架的工作性能

6.3.6.1 按检定平皿和长平皿的要求放置平皿或长平皿及其支架,分别移动和转动工作台,并观察干级数的变化。干涉环的清晰度不得有目力可见的变化。

6.3.7 标准干涉环直径测量的标准偏差

每一种钢球尺寸的支承架按 6.3.6 条安装,在 10 个不同干涉级数的情况下进行 D_0 的测量,并以 10 次测量结果平均值 \bar{D}_0 作为它的直径。

D_0 值的计算如下:在视场内测量离中心最近相邻两环的直径 D_1 和 D_2 ,并按式 (2) 求 D_0 值。

$$D_{0i} = \sqrt{D_{2i}^2 - D_{1i}^2} \quad (2)$$

式中: D_{0i} ——第 i 次测出的干涉环直径;

D_{1i} ——第 i 次测出的内圈干涉环直径;

D_{2i} ——第 i 次测出的外圈干涉环直径。

$$\bar{D}_{0i} = \sum_{i=1}^{10} D_{0i} / 10 \quad (3)$$

式中: \bar{D}_{0i} ——10 次测量 D_0 的平均值。

10 次测量平均值 \bar{D}_0 的标准偏差 s 按 (4) 计算:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_{0i} - \bar{D}_0)^2 / n(n-1)} \quad (4)$$

式中: n ——测量次数,此处 $n=10$ 。

标准偏差的 3 倍应不超过 0.01mm,否则应重测。

6.3.8 干涉环小数干涉级测量的重复性

在上述安装情况下,对 3 种不同干涉级数进行测量,其干涉级应分别在 0.2~0.3, 0.5~0.7 及 0.9~1.1 区间内,各重复测量 10 次,并按式 (1) 求出干涉级数。其标准偏差 s 由式 (5) 求得。

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2 / (n - 1)} \quad (5)$$

式中： K_i ——第 i 次干涉级的测量值；

\bar{K} ——10 次干涉级的平均值；

n ——测量次数，此处 $n = 10$ 。

在 3 组中求出的最大 s 的 3 倍即为干涉环干涉级测量的重复性。

6.4 检定结果的处理

6.4.1 经检定符合本规程要求的平面等倾干涉仪发给检定证书；不符合要求的发给检定结果通知书，并注明不合格项目。

6.4.2 检定周期可根据使用的具体情况确定，一般不超过 2 年。

附录 A

等倾干涉仪测量平面度测量结果的不确定度评定

A.1 测量方法

标准平晶和长平晶的平面度是通过 4 件规格相同的平晶在平面等倾干涉仪上以 4 面互检法测得。对标准平晶每块平晶应测量相互垂直的 2 个截面，每个截面测量 5 个点。对每个测量点由被测平晶两两组合测量获得 6 组数据。而每组数据都是先测得规定干涉环的直径 D_i ，通过标准干涉环直径 D_0 ，计算级 $K_i = (D_i/D_0)^2$ ，再乘钠光灯半波长计算得 $a_i = (\lambda/2) \cdot a_i$ ， a_i 为测量点两平晶分界面至两平晶测量面之间的距离之和。

A.2 数学模型

设 4 块平晶各测量点分界面至测量面的距离分别为 x, y, z, w 。4 块平晶测量组合获得 6 个方程：

$$\begin{aligned} x + y &= a_1 & x + z &= a_2 & x + w &= a_3 \\ y + z &= a_4 & y + w &= a_5 & z + w &= a_6 \end{aligned}$$

解方程得 $x = [2(a_1 + a_2 + a_3) - (a_4 + a_5 + a_6)]/6$ (其余 y, z, w 同样)

对每块被测平晶测量面任一截面的直线度 (平面度)，只要按上式计算出 5 个测量点 x 值，通过坐标转换就得到该截面各点的直线度。

A.3 方差和灵敏系数

由 $x = [2(a_1 + a_2 + a_3) - (a_4 + a_5 + a_6)]/6$ ，可知 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 的不确定度是相同的，其影响方差分别为

$$u^2(a) = u^2(a_1) = u^2(a_2) = u^2(a_3) = u^2(a_4) = u^2(a_5) = u^2(a_6)$$

$$\text{由方程 } u_c^2(y) = \sum [\partial f / \partial x_i]^2 u^2(x_i)$$

$$\text{可得 } u^2(x) = \{4[u^2(a) + u^2(a) + u^2(a)] + u^2(a) + u^2(a) + u^2(a)\} / 36$$

$$u(x) = 0.65u(a)$$

由平面度测量计算方法分析，平面度的不确定度为各测量点不确定度的 $2^{1/2}$ 倍，故计算为

$$u_c(x) = 0.92u(a), c(x) = (5/6)^{1/2} \quad u_c^2 = 5/6 \quad u^2(a)$$

A.4 计算分量标准不确定度

A.4.1 测量点位置引入的不确定度 u_1

A.4.1.1 纵向手轮示值误差 $\pm 0.15\text{mm}$ ，估计其相对不确定度为 25%，即

$$\nu_{1,1} = (1/2) \times [\Delta u_i(x_i) / u_i(x_i)]^{-2} = (1/2) \times [25/100]^{-2} = 8$$

A.4.1.2 上、下平晶对准测量点不确定度为 0.1mm，估计其相对不确定度为 50%，即

$$\nu_{1,2} = (1/2) \times [\Delta u_i(x_i) / u_i(x_i)]^{-2} = (1/2) \times (50/100)^{-2} = 2$$

A.4.1.3 纵向手轮回程误差 $\pm 0.15\text{mm}$ ，估计其相对不确定度为 25%，即

$$\nu_{1,3} = (1/2) \times [\Delta u_i(x_i) / u_i(x_i)]^{-2} = (1/2) \times (25/100)^{-2} = 8$$

A.4.1.4 以上三合成：

$$u_{1.00}^2 = (0.15^2 + 0.1^2 + 0.15^2)^{1/2} = 0.055 \text{ (mm}^2\text{)}, \text{ 即 } u_{1.00} = 0.235\text{mm}$$

$$\nu_1 = 0.055^2 / (0.15^4/8 + 0.1^4/2 + 0.15^4/8) = 17$$

$u_{1.0}$ 可视为半宽度为 0.235mm 的区间以等概率分布, $u_{1.0} = 0.235/3^{1/2} = 0.136\text{mm}$

测量时空气层纵向平行度调至一个干涉级之内, 考虑到平晶平面度影响最大斜率可按每 50mm 变化一个干涉级, 则 $u_1 = (1/50) \times (\lambda/2) \times u_{1.0}$

$$u_1 = (1/50) \times (0.5893/2) \times 0.136 = 0.00080\mu\text{m}$$

A.4.2 工作台横向定位引入的不确定度 u_2

工作台横向直线度为 0.04mm, 估计其相对不确定度为 25%。分量在半宽为 0.04mm 的区间内以等概率分布, 即

$$\nu_2 = (1/2) \times [\Delta u_i(x_i)/u_i(x_i)]^{-2} = (1/2) \times (25/100)^{-2} = 8$$

空气层在横向平行度为每 20mm 变化一个干涉级, 即

$$u_2 = (0.04/20) \times (0.5893/2) \times 1/3^{1/2} = 0.00034\mu\text{m}$$

A.4.3 标准干涉环直径 D_0 引入的不确定度 u_3

实验测量次数 $n = 10$ $\nu_3 = 9$ 时, 标准干涉环直径的不确定度 dD_0 大约为 0.01mm, 则

$$K = (D/D_0)^2$$

$$\Delta_K = 2D^2 \times dD_0/D_0^3 = 2 \times K \times dD_0/D_0$$

当 $D_0 \approx 4\text{mm}$, $dD_0 = 0.01\text{mm}$, $K = 1$, $\Delta_K = 0.005$ 个干涉级别。

$$u_3 = (\Delta_K/3) \times (0.5893/2) = 0.00049\mu\text{m}$$

A.4.4 干涉环数级测量引入的不确定度 u_4

实验测量得, 干涉环数级测量的重复性不大于 0.025 个干涉级别, 一般测量次数 $n = 10$, 即 $\nu_4 = 9$ 。则

$$u_4 = (0.025/3) \times (0.5893/2) = 0.0025\mu\text{m}$$

A.4.5 测量目镜示值误差、回程误差引入的不确定度 u_5

测微目镜示值误差全程为 0.015mm, 回程误差为 0.010mm, 两项合并后为 0.018mm, 估计其相对不确定度为 25%。

$$\text{则: } \nu_5 = (1/2) \times [\Delta u_i(x_i)/u_i(x_i)]^{-2} = (1/2) \times (25/100)^{-2} = 8$$

测微目镜示值误差以灵敏系数 $c = 1$ 直接传递为干涉环直径误差, 该分量在半宽为 0.018mm 的区间内以等概率分布, 则

$$K = (D/D_0)^2$$

$$dK = 2D^2 \times dD/D_0^2 = 2K^{1/2} \times dD/D_0$$

当 $D_0 \approx 4\text{mm}$, $dD_0 = 0.01\text{mm}$, $K = 1$, $\Delta_K = 0.005$ 个干涉级别。

$$u_5 = (0.5893/2) \times (dK/3^{1/2}) = 0.00152\mu\text{m}$$

A.4.6 自重变形——支承位置引入的不确定度 u_6

对圆平晶, 因支承位置成等边三角形均匀分布在 $0.7D$ 上, 自重变形可忽略不计, 即 $u_6 = 0$ 。

对长平晶, $L = 200\text{mm}$ 平晶支承位置变化的不确定度为 $\Delta L = 0.5\text{mm}$ 。自重变形 $F = 0.1\mu\text{m}$, 即 $\Delta = 4\Delta F \times \Delta L / L = 4 \times 0.1 \times (0.5/200) = 0.001\mu\text{m}$ 。 Δ 在半宽为 $0.001\mu\text{m}$ 的区间以等概率分布, 则

$$u_6 = \Delta/3^{1/2} = 0.001/3^{1/2} = 0.00058\mu\text{m}$$

估计其相对不确定度为 25%, 即 $\nu_6 = (1/2) \times (25/100)^{-2} = 8$ 。

A.4.7 环境温度引入的不确定度 u_7

在恒温箱内, 一般圆平晶中心与外表的温度差为 0.05°C , 它引起的变形误差一般不超过 $0.005\mu\text{m}$; 对长平晶, 因其导热性比圆平晶好, 误差可忽略。

$dT = 0.05^\circ\text{C}$, 估计其相对不确定度为 40%, 即 $\nu_7 = (1/2) \times (40/100)^{-2} = 3$

按均匀分布计算, $u_7 = dT/3^{1/2} = 0.005/3^{1/2} = 0.0029\mu\text{m}$ 。

A.5 合成标准不确定度

$$\begin{aligned} u_o^2 &= u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 \\ &= 0.0008^2 + 0.00034^2 + 0.00049^2 + 0.0025^2 + 0.00152^2 + 0.00058^2 + 0.0029^2 \\ u(a) &= 0.0043\mu\text{m} \\ u_c &= (5/6)^{1/2} u(a) = (5/6)^{1/2} \times 0.0043\text{m} = 0.00393\mu\text{m} \end{aligned}$$

A.6 有效自由度

$$\begin{aligned} \nu_{\text{eff}} &= 0.0043^4 / (0.0008^4/17 + 0.00049^4/9 + 0.00034^4/8 + 0.0025^4/9 + 0.00152^4/8 \\ &\quad + 0.00058^4/8 + 0.0029^4/3) \\ &\approx 12 \end{aligned}$$

查

$$t_{0.95}(12) = 2.18$$

A.7 扩展不确定度

$$U = t_{0.95}(12) \times u_c = 2.18 \times 0.00393 = 0.0009(\mu\text{m})$$

A.8 测量结果不确定度报告与表示

平面等倾干涉仪在 $(20 \pm 0.05)^\circ\text{C}$ 条件下测量平面度结果的扩展不确定度为

$$U_{95} = 0.0009\mu\text{m} \quad k = 2$$

扩展不确定度 U_{95} 与最大允许误差之比不大于 $1/3$, 检定方法可行。

附录 B

检定证书和检定结果通知书内页格式

B.1 检定证书内页格式

检定结果

温度： ℃

相对湿度： %

序号	主要检定项目	检定结果
1	测微目镜的示值误差及回程误差	
2	工作台移动的直线度	
3	工作台移动的示值误差及回程误差	
4	钢球支架的工作性能	
5	标准干涉环直径的标准偏差	
6	干涉环小数级测量的重复性	
检定依据：JJG 661—2004 平面等倾干涉仪		

B.2 检定结果通知书内页格式

具体要求同 B.1，并指出不合格项目。

检定结果：应给出量化的值（不要简单给“不合格”三字）。