



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 429—2000

圆度、圆柱度测量仪

Measurement Standard Instrument of Roundness and Cylindricity

2000-08-28 发布

2000-12-01 实施

国家质量技术监督局 发布

圆度、圆柱度测量仪

检定规程

Verification regulation of
Measurement Standard Instrument
of Roundness and Cylindricity

JJG 429—2000
代替 JJG 429—1986

本规程经国家质量技术监督局于 2000 年 08 月 28 日批准，并自 2000 年 12 月 01 日起施行。

归口单位：全国几何量工程参量计量技术委员会

主要起草单位：哈尔滨工业大学

中国计量科学研究院

北京市计量科学研究所

陕西省计量测试研究所

参加起草单位：航天工业总公司 102 所

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

本规程主要起草人：

谭久彬（哈尔滨工业大学）

赵维谦（哈尔滨工业大学）

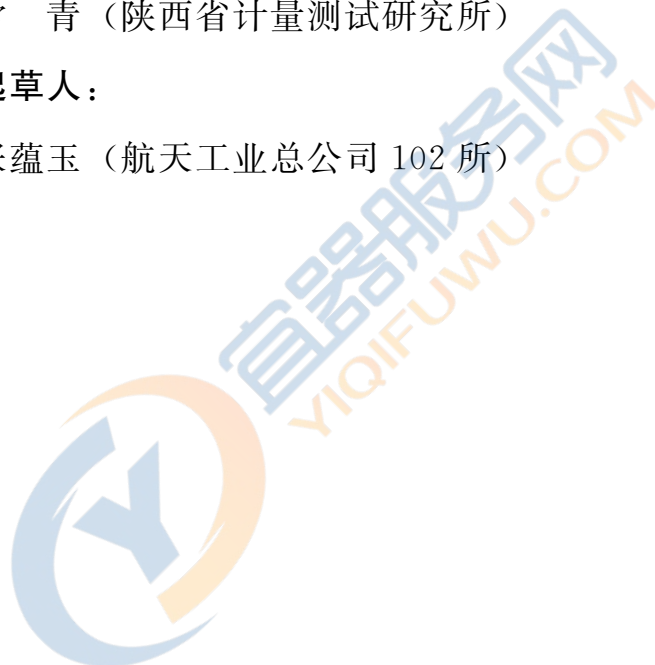
张 恒（中国计量科学研究院）

吴 迅（北京市计量科学研究所）

常 青（陕西省计量测试研究所）

参加起草人：

张蕴玉（航天工业总公司 102 所）



目 录

引言	(1)
1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
5 计量性能要求	(3)
5.1 主要计量性能要求	(3)
5.2 其他计量性能要求	(4)
6 通用技术要求	(4)
6.1 外观	(4)
6.2 各部分的相互作用和相互位置	(4)
7 计量器具控制	(5)
7.1 检定项目及主要检定工具	(5)
7.2 检定条件	(5)
7.3 检定方法	(6)
8 检定结果的处理	(13)
9 检定周期	(13)
附录 A 模拟式仪器检定项目	(14)
附录 B 基准回转轴线与 Z 轴导轨的平行度检定原理说明	(17)
附录 C 主要检定工具及其技术要求	(20)

圆度、圆柱度测量仪检定规程

引言

本规程在确保满足被检定仪器主要性能要求的前提下，精简了部分检定项目，增加了检定圆柱度仪的有关部分。对模拟式仪器，除按本规程中规定内容检定外，还须按附录 A 中有关内容进行补充检定。

1 范围

本规程适用于圆度、圆柱度测量仪的首次检定、后续检定和使用中的检验。

2 引用文献

本规程引用下列文献：

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

GB/T 1182—1996 形状和位置公差 通则、定义、符号和图样表示法

GB 7234—1987 圆度测量 术语、定义及参数

GB 7235—1987 评定圆度误差的方法 半径变化量测量

JB/T 10028—1999 圆度仪（代替 ZBJ 42030—1988）

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 术语

测量系统：由传感器、放大器检测电路、滤波器、计算处理、显示输出系统构成。

4 概述

圆度测量仪（以下简称圆度仪）是以精密回转中心为回转测量基准，通过传感器测量被测件不同转角位置上的实际轮廓到回转中心半径的变化量，来定量评价被测件某一横截面圆度的测量仪器。按基准回转轴线形成方式分为传感器回转式（见图 1）和工作台回转式（见图 2）两类。按信号处理形式分为模拟输出式（记录仪显示、输出）和数字输出式（计算机处理评定、显示、输出）两类。可用于测量内、外回转表面各截面轮廓的圆度、同心度和端面跳动等参数。

圆柱度测量仪（以下简称圆柱度仪）是以精密回转中心线为回转测量基准，精密直线运动导轨为直线测量基准，通过位于直线运动导轨上的位移传感器，测量圆柱体表面若干截面在不同转角位置上的实际轮廓到回转中心线半径的变化量，来定量评价圆柱体表面圆柱度的测量仪器。按基准回转轴线形成方式也分为传感器回转式（见图 3）和工作台回转式（见图 4）两类。按信号处理形式分为模拟输出式（记录仪显示、输出）和数字输出式（计算机处理评定、显示、输出）两类。可用于测量圆柱面工件表面轮廓的

形状误差（圆度、圆柱度、直线度和平面度）、位置误差（同轴度和垂直度）等。

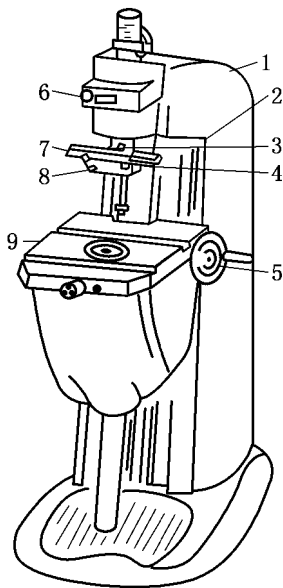


图1 传感器回转式圆度仪

1—基体；2—立柱；3—滑动导轨；
4—测力控制旋钮；5—升降旋钮；6—方向微调器；
7—滑动导轨；8—传感器；9—工作台

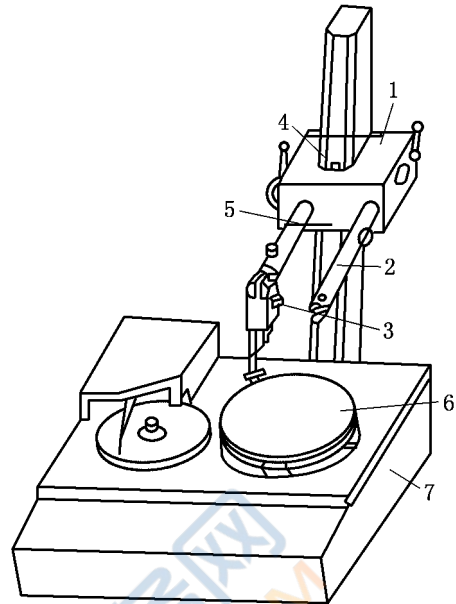


图2 工作台回转式圆度仪

1—滑座；2—支臂；3—传感器；4—立柱；
5—支臂；6—转台台面；7—基座

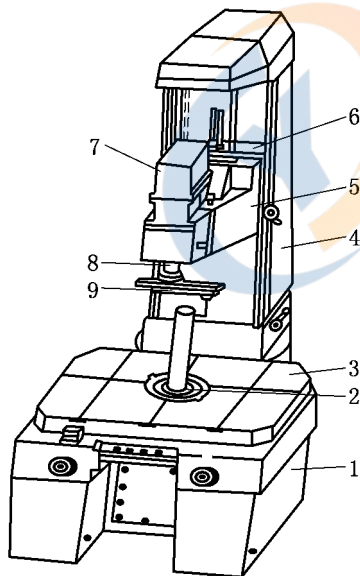


图3 传感器回转式圆柱度仪

1—基座；2—仪器工作台；3—仪器台面；
4—立柱；5—滑架；6—拖板；7—主轴上罩；
8—回转主轴；9—传感器

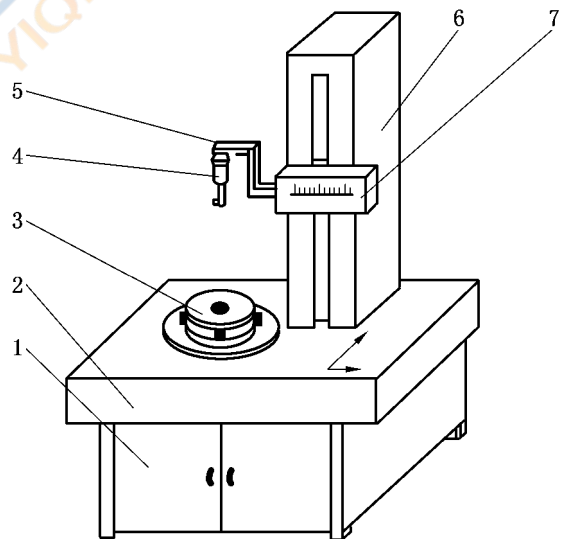


图4 工作台回转式圆柱度仪

1—基座；2—仪器台面；3—回转主轴；4—传感器；
5—传感器支架；6—立柱；7—传感器头架

5 计量性能要求

5.1 主要计量性能要求

圆度仪准确度级别按测量系统分辨力、仪器重复性、仪器示值误差、仪器径向误差和仪器轴向误差等仪器的主要性能指标分为一、二、三和四级（见表1）。

圆柱度仪准确度级别按测量系统分辨力、仪器重复性、仪器示值误差、仪器径向误差、仪器轴向误差、传感器沿Z轴导轨移动时直线度和基准回转轴线与Z轴导轨的平行度等仪器主要性能指标分为一、二、三和四级（见表1）。

表 1

要求 项目	一级	二级	三级	四级
测量系统分辨力/ μm	0.002	0.010	0.020	0.030
圆度仪示值误差	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$	$\pm 6\%$	$\pm 7\%$
圆柱度仪示值误差	$\pm 3\%$	$\pm 6\%$	$\pm 7\%$	$\pm 8\%$
仪器径向误差/ μm	$0.025 + 0.000\ 2H$	$0.05 + 0.000\ 3H$	$0.10 + 0.000\ 5H$	$0.15 + 0.001H$
仪器轴向误差/ μm	0.025	0.05	0.10	0.15
传感器沿Z轴导轨移动时的直线度	$0.10\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$	$0.20\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$	$0.40\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$	$0.70\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$
基准回转轴线与Z轴导轨的平行度	$0.15\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$	$0.30\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$	$0.60\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$	$1.00\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$
圆度仪重复性	1.0%	2.5%	3.0%	3.5%
圆柱度仪重复性	1.5% (100 mm 内)	3.0% (100 mm 内)	3.5% (100 mm 内)	4.0% (100 mm 内)
注：H—对工作台回转式的仪器，被测截面距离工作台面的高度；对传感器回转式仪器， $H=0$ （单位：mm）。				

5.1.1 测量系统分辨力

按仪器准确度级别，测量系统分辨力不大于表1的规定。

5.1.2 仪器示值误差

按仪器准确度级别，圆度仪、圆柱度仪示值误差均不大于表1的规定。

5.1.3 仪器径向误差

按仪器准确度级别，仪器径向误差不大于表1的规定。

5.1.4 仪器轴向误差

按仪器准确度级别，仪器轴向误差不大于表1的规定。

5.1.5 传感器沿 Z 轴导轨移动时的直线度

按仪器准确度级别，传感器沿 Z 轴导轨移动时的直线度不大于表 1 的规定。

5.1.6 基准回转轴线与 Z 轴导轨的平行度

按仪器准确度级别，基准回转轴线与 Z 轴导轨的平行度不大于表 1 的规定。

5.1.7 仪器的重复性

按仪器准确度级别，仪器的重复性不大于表 1 的规定。

5.1.8 示值稳定性

示值稳定性不大于 2%。

5.1.9 工作台最大负载和偏载时的仪器径向误差

给工作台加上最大负载和偏载后，不影响仪器径向误差。

5.2 其他计量性能要求

5.2.1 主工作台台面的平面度

在主工作台台面全范围内任意 $(100 \times 100) \text{ mm}^2$ 平面度不大于 0.003 mm。其中部不应呈凸形，边缘 5 mm 范围不计。

5.2.2 记录范围与对心表指针的一致性

记录纸满量程与对心表指针对准表盘左、右两边刻线时，所记录图像的径向间距之差不得大于 2 mm。

5.2.3 记录图像首尾衔接

记录轮廓应首尾衔接，径向无明显错位，周向间隙（或重迭）不大于 0.8 mm。

5.2.4 主工作台面对基准回转轴线的垂直度

对不可调工作台台面不大于 0.01 mm/100 mm，对可调工作台不大于 0.002 5 mm/100 mm。

5.2.5 头架或工作台沿 Z 向移动时对主工作台台面的垂直度

在任意 100 mm 内，纵、横向均不大于 0.01 mm。

6 通用技术要求

6.1 外观

6.1.1 仪器和附件的涂镀面应平整、均匀、色调一致，不应有斑点、皱纹、脱漆等现象；外部零件结合处应整齐。

6.1.2 有刻线和刻字的零件，文字和线纹应清晰、均匀。

6.1.3 不得有漏油现象。

6.1.4 仪器标牌上应标有名称、型号、规格、编号、制造厂名、出厂日期及  标志。

6.1.5 使用中的仪器不应有影响计量性能的缺陷。

6.2 各部分的相互作用和相互位置

6.2.1 仪器可动部分在规定范围内均应平稳地运动。

6.2.2 各种按钮操作键和限位装置应动作灵活、作用可靠、功能正常。

6.2.3 仪器测量方向应通过主轴回转中心。

7 计量器具控制

计量器具控制包括：首次检定、后续检定和使用中检验。

7.1 检定项目及主要检定工具

检定项目及主要检定工具见表 2。

表 2 检定项目及主要检定工具

序号	检定项目	主要检定工具	检定类型		
			首次检定	后续检定	使用中检验
1	外观	—	+	+	+
2	各部分相互作用和相对位置	—	+	+	+
3	工作台台面的平面度	水平仪、自准直仪、刀口尺	+	—	+
4	记录范围与对心表指针的一致性	—	+	+	+
5	记录图像首尾衔接	—	+	+	+
6	测量系统的分辨力	超精密微动台	+	+	+
7	工作台对基准回转轴线的垂直度	—	+	+	+
8	头架或工作台沿 Z 向移动时对工作台面的垂直度	圆柱角尺、测微表	+	+	+
9	基准回转轴线与 Z 轴导轨的平行度	圆柱角尺	+	+	+
10	传感器沿 Z 轴导轨移动时的直线度	圆柱角尺、测微表	+	+	+
11	仪器径向误差	标准球或标准半球	+	+	+
12	仪器轴向误差	一级平晶或标准半球	+	+	+
13	仪器示值误差	椭圆标准器组、圆柱度标准器组	+	+	+
14	仪器的重复性	标准球或标准半球	+	+	+
15	示值稳定性	椭圆标准器组	+	+	+
16	工作台最大负载和偏载时径向误差	标准半球、专用重块（或砝码）	+	—	+
注：					
1 表中“+”号表示该项应检定；“—”号表示该项可不检定；					
2 由于仪器结构特点，某些仪器不具备某一检定项目所涉及的功能时，该项可不检定。					

7.2 检定条件

7.2.1 检定时环境条件

7.2.1.1 温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ （每小时温度变化量不超过表 3 规定值）。

表 3℃

仪器准确度级别	一级	二级	三级	四级
每小时温度变化量	0.3	0.5	0.8	1.0

- 7.2.1.2 湿度 $\leq 65\%$ RH。
- 7.2.1.3 室内周围应无影响测量的灰尘、振动、噪音、气流、腐蚀性气体和较强磁场。
- 7.2.2 电源电压、气源气压、流量及主轴润滑油应符合仪器使用要求。
- 7.2.3 受检仪器在室内连续平衡温度的时间应不少于 24 h，标准器具在室内平衡温度的时间应不少于 4 h。

7.3 检定方法

7.3.1 外观

目力观察。

7.3.2 各部分相互作用和相对位置

目力观察和手动试验。

7.3.3 工作台台面的平面度

用水平仪，刀口尺进行检定。

7.3.4 记录范围与对心表指示的一致性

滤波器旋钮置 1~50 波/转，放大倍数旋钮置 200 倍，测杆长度开关置标准短测杆位置。在传感器上装好测杆限位架（有的仪器取下匹配器或将传感器插头脱开；有的用微动台限定标准短测杆，并使其长测头贴住传感器底部）。计算机作用开关置轮廓圆位置。调节测杆限位架的微调螺钉，使对心表指零时限定标准短测杆。装好记录纸，按顺时针和逆时针方向分别旋转笔移旋钮，当对心表指针分别与表盘左右两边刻线精确重合时，在同一张记录纸上，分别开机记录图像（见图 5）。取下记录图。测出两圈记录图像的径向间距，计算记录纸满量程和该间距之差作为检定结果。

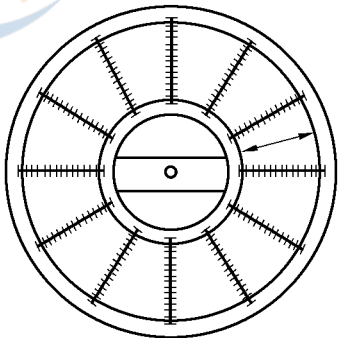


图 5 记录范围与对心表指示的一致性记录图像

有直线记录器的仪器，用相同的方法，滤波器旋钮置 1~50 波/转。使用直线记录器，分别记录两条不小于 30 mm 的曲线，取下记录图，测出两条曲线之间的距离，计算记录纸满量程和该距离之差作为检定结果。

7.3.5 记录图像的首尾衔接

滤波器旋钮置 1~50 波/转，测杆长度开关置标准短测杆位置，测力旋钮置外侧中

等测力位置，放大倍数旋钮置 200 倍，将标准球或半球置于可调工作台中间（见图 6 或图 7），装好记录纸，使标准半球与主轴回转轴线准确对心，逐挡增大放大倍数，直到仪器正常使用的最高倍数，在每挡位置调节笔移旋钮，使对心表指零。当主轴回转三圈之后，记录轮廓图像。取下记录图纸，测量其首尾衔接外的径向错位和周向间隙。

7.3.6 测量系统分辨力

准确度级别为一级的仪器应检定此项。二级、三级、四级仪器视具体情况而定。

采用超精密微动台进行检定（见图 8），滤波器旋钮置全通挡，测杆长度开关置标准短测杆位置。

圆度仪或圆柱度仪的传感器测头与超精密微动台的工作面接触时，使传感器指示值位于零附近（逐挡增加放大倍数直到最高放大倍数挡）。标准仪器采用纳米分辨力传感器。在超精密微动台上两传感器布置在同一测量线上。用驱动器驱动工作台产生位移运动，给出最小位移量 2 nm 左右，观察传感器指示值，应有相应的变化值。重复 5 次，取 5 次的平均值作为检定结果。

7.3.7 工作台台面对基准回转轴线的垂直度

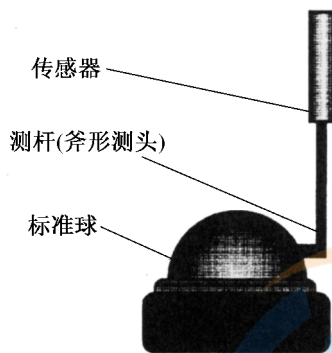


图 6 标准球

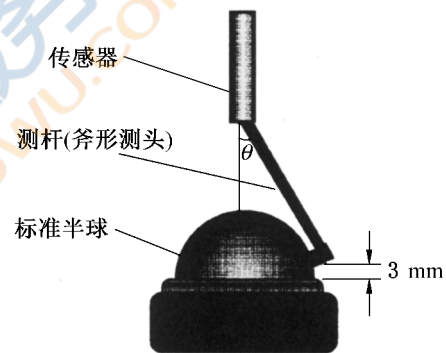


图 7 标准半球

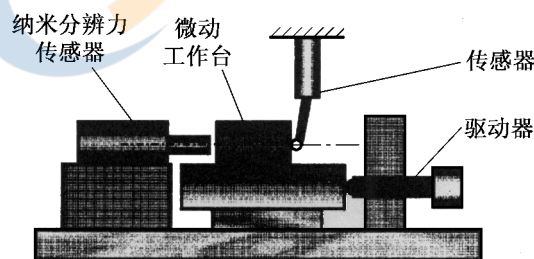


图 8 超精密微动台

滤波器旋钮置 1~15 波/转，测杆长度开关置标准短测杆位置，放大倍数旋钮置 1 000 倍（中等挡位），横向装卡传感器（或将带有球形测头的肩形架安装在传感器上），使传感器测头与工作台台面接触时，传感器示值指零附近。调节传感器的径向位置，使测头回转轨迹的直径为 100 mm（用尺量）。开机测量，画出轮廓后，按最小二乘圆评定，分别读出 X 、 Y 值，其偏心量按 $e_{\text{偏心}} = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 计算，将计算结果作为检定结果。

对于模拟输出式仪器, 开机记录图像, 以记录图像中心对记录纸回转中心的偏心量作为检定结果。

用肩形架相当于用标准中测杆的放大倍数时, 放大倍数旋钮置 2 000 倍, 测杆长度开关置标准中测杆位置, 进行检定。

7.3.8 头架(或工作台)沿 Z 向移动时对工作台台面的垂直度

用锁紧装置将头架固紧, 将分度值为 0.001 mm 的测微表安装在传感器的滑架侧面。将圆柱角尺置于工作台中间, 使测微表和圆柱角尺在通过轴线的截面内接触, 调整圆柱角尺和基准回转轴线同轴。升(降)头架或工作台 100 mm 进行检定, 读取测微表的最大变化量作为测得值。这一检定, 应在纵、横向分别进行, 以最大测得值作为检定结果。

7.3.9 基准回转轴线与 Z 轴导轨的平行度

在第一位置上, 圆柱角尺正向放置(见图 9 位置 1), 分别测量上、下二截面的圆轮廓, 信号中含导轨倾斜分量, 得测量序列 $\{V_{Vi}\}$ 和 $\{V_{Di}\}$ 。其中 S_V 、 S_D 分别为导轨在上、下测量截面的倾斜量; r_V 、 r_D 分别为圆柱角尺上、下两测量截面上轮廓到回转轴线的半径; E_V 、 E_D 分别为上、下两测量截面相对回转轴线的偏心量。

在第二位置上, 圆柱角尺倒向放置(见图 9 位置 2), 分别在原上、下二截面上测量圆轮廓, 信号中仍含导轨倾斜分量, 得测量序列 $\{V'_{Vi}\}$ 和 $\{V'_{Di}\}$ 。其中 S'_V 、 S'_D 分别为导轨在上、下测量截面的倾斜量; r'_V 、 r'_D 分别为圆柱角尺上、下两测量截面上轮廓到回转轴线的极径; E'_V 、 E'_D 分别为上、下两测量截面相对回转轴线的偏心量。

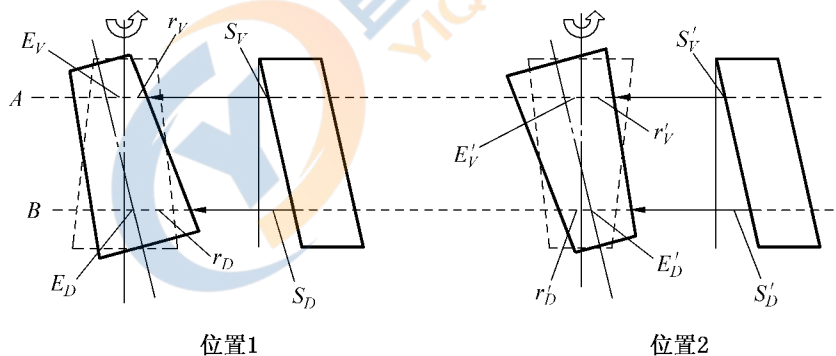


图 9 倒置分离法原理示意图

导轨倾斜量 ΔS 、圆柱角尺上、下两截面的半径差 Δr 按式 (1) 和式 (2) 计算:

$$\Delta S = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Vi} \right) + \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Vi} \right) \right] \quad (1)$$

$$\Delta r = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Vi} \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Vi} \right) \right] \quad (2)$$

式中, N 为圆轮廓采样点数; ΔS (导轨在 H 范围内相对主轴回转轴线的倾斜量) 可作为导轨相对主轴回转轴线的平行度的检定结果。

倾斜判别方法:

(1) 正向测量时, 形状为倒锥; 倒向测量时, 形状仍为倒锥: 表明 Z 向导轨相对

于主轴回转轴线正向有较大倾斜量。

(2) 正向测量时, 形状为正锥; 倒向测量时, 形状仍为正锥: 表明 Z 向导轨相对于主轴回转轴线负向有较大倾斜量。

(3) 形状跟随正置和倒置变化: 表明 Z 向导轨相对于主轴回转轴线无倾斜分量 (或倾斜量较小)。

7.3.10 传感器沿 Z 轴导轨移动时的直线度

滤波器旋钮置 1~50 波/转, 测杆长度开关置标准短测杆位置, 选择中等测力位置, 放大倍数旋钮置 100 倍。将专用角尺置于工作台左侧载荷偏置线上, 偏离可调工作台中心约 10 mm 处 (见图 10 中 A 位置)。水平装置传感器, 旋转工作台, 使测头与角尺的后表面接触于最高素线上 (见图 10)。该截面距工作台面约 20 mm, 将传感器指示值调整到零附近。再将传感器上升到角尺顶部, 并接触于最高素线上, 观察传感器指示值对起始位置的位移量。然后调整工作台, 使传感器指示值位移量减少一半, 重复上述调整过程, 直到最高放大倍数, 使圆柱角尺和传感器在精密导轨上移动的轨迹平行。

重新将放大倍数旋钮置 100 倍, 移动传感器导杆, 使测头与圆柱角尺的右侧素线接触 (见图 10 中的 S 面), 该截面距工作台面约 20 mm, 旋转工作台, 并前后方向 (Y 向) 移动传感器导杆, 使测头与 S 面接触于最高素线上; 将传感器指示值调整到零附近, 固紧工作台, 使传感器自下向上移动; 观察传感器指示值, 找出最大位移量。调整立柱倾斜钮, 使圆柱角尺与精密导轨平行。重复调整, 直到最高放大倍数时, 机动升 (降) 传感器 100 mm, 在最高放大倍数时读取测量值。

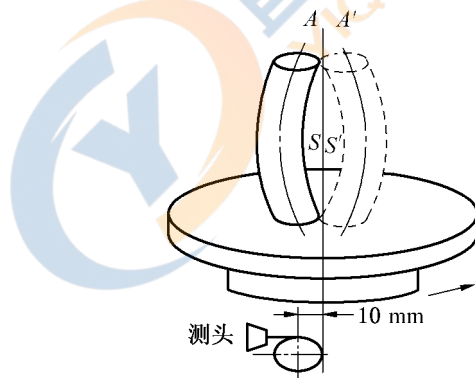


图 10 直线度检定安装示意图

将工作台旋转 180° , 使圆柱角尺转到工作台右侧位置 (见图 10 中的 A' 位置)。改变测力方向, 使传感器测头与 S' 面接触, 并旋转工作台, 使测头与 S' 面接触于最高素线上。固紧工作台, 用上述方法, 自 100 倍到最高放大倍数调整到传感器移动轨迹和圆柱角尺平行, 在最高放大倍数时, 机动降 (升) 传感器 100 mm, 靠近第一根曲线, 再读取测量值。从两组测量数据中各取 10 个以上的均匀分布点 (应包括最大变动量), 做相应点的连线, 将各连线的中点连接起来得到曲线图, 按最小条件评定该曲线的直线度, 作为检定结果。

用相同的方法和相应的圆柱角尺, 检定全长范围的直线度。条件具备的, 建议采用

相应准确度等级的平面标准器进行此项检定。

7.3.11 仪器径向误差

7.3.11.1 直接测量法

滤波器旋钮置 1~50 波/转，测杆长度开关置标准短测杆位置，测力旋钮置外侧较小测力位置，放大倍数旋钮置 200 倍；将标准球置于可调工作台中心，调整标准短测杆的斧形测头中部与标准球直径处接触（见图 6），使标准球与主轴回转轴准确对心，且使传感器指示值指零附近。逐挡增加放大倍数并进行调心，直到仪器正常使用的最高倍数。待主轴回转 3 圈后进行测量，以最小区域法评定其圆度值，作为检定结果。

对工作台回转式的仪器，此项检定还应将标准球放置在距工作台台面不低于 200 mm 位置进行。

此项检定也可采用标准半球。此时，标准短测杆的斧形测头中部应在距离托座肩约 3 mm~5 mm 处与标准半球接触（见图 7），但测得值应换算成主轴径向误差，即：

$$\Delta E = \Delta R \cos \theta \approx \Delta R (\mu\text{m})$$

式中：

ΔE —— 仪器径向误差；

ΔR —— 测得值。

7.3.11.2 误差分离法

对仪器径向误差要求高时，需将标准球的误差从测量结果中分离出去。将误差分离转台放在工作台上，标准球装卡在误差分离转台上，使仪器主轴回转中心线、误差分离转台回转轴线和标准球中心线同轴。此时，滤波器旋钮置 1~50 波/转，测杆长度开关置标准短测杆位置，测力旋钮置较小测力位置，预热 30 min 后，在最高放大倍数下进行。

转动误差分离转台，将标准球沿顺时针方向每 30° 进行一次转位（见图 11），测量每一转位上的圆轮廓数据，连续进行 12 次转位，则轴系误差的估计值 $\hat{M}$ 按式（3）计算：

$$\hat{M}(\theta_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{N-1} V_k(\theta_i) \quad (3)$$

式中：

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

m —— 转位次数， $m=12$ ；

N —— 每一测回上的采样点数，可取 50，512，1 024。

取 $M(\theta_i)$ 的最大、最小值之差作为检定结果。

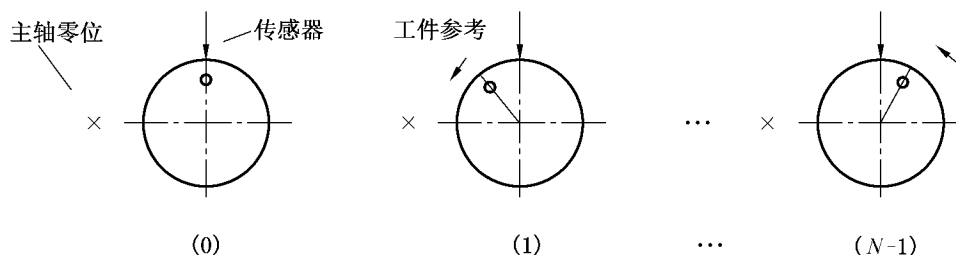


图 11 测量原理图

7.3.12 仪器轴向误差

滤波器旋钮置 1~15 波/转，放大倍数旋钮置 1 000 倍，测力旋钮置外侧的中等测力位置。将带有球形测头的肩形架安装在传感器上（允许的情况下，也可将传感器横向装卡，使测头直接与平晶接触），将平晶或标准半球置于可调工作台中间，使球形测头和平晶工作面（或标准半球顶部）接触，并使传感器指示值在零值附近摆幅为最小。调整工作台，使平晶工作面（或标准半球顶部）和主轴回转轴线精确垂直。逐挡增加放大倍数，直到 10 000 倍，再调节传感器的径向位置，使测头运动轨迹的回转半径为最小。当主轴回转 3 圈后，开机测量，以最小区域法评定其圆度，作为检定结果。

用肩形架相当于用标准测杆的放大倍数时，测杆长度开关置标准中测杆位置，按上述方法进行检定。

7.3.13 仪器示值误差

7.3.13.1 圆度仪示值误差

a) 超精密微动台法

采用超精密微动台进行检定（见图 8）。滤波器旋钮置全通挡，测杆长度开关置标准短测杆位置。测头与微动台上的垂直工作面接触时，使传感器指示值指零附近。逐挡增加放大倍数到最高挡。用驱动器驱动工作台使传感器在量程范围内等间距（见表 4）移动十个位置，分别读取每个位置的标准值和测得值。按式（4）计算示值误差 $\Delta_{\text{示值}}$ 。

$$\Delta_{\text{示值}} = \frac{\text{测得值} - \text{标准值}}{\text{标准值}} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

测得值——仪器示值；

标准值——由纳米分辨力传感器给出（见图 8）。

用同样的方法，检定其他规定挡的示值误差。取各挡示值误差中绝对值最大的作为检定结果。

表 4

放大倍数	1 000	2 000	4 000	5 000	10 000
微动工作台进给量 (μm)	约 20	约 10	约 5	约 4	约 2

b) 椭圆标准器法

滤波器旋钮置 1~50 波/转，测杆长度开关置标准短测杆位置，测力旋钮置外测中等测力位置。标准器采用椭圆标准器组，其圆度标称值分别为 0.5 μm ，1 μm ，2 μm ，4 μm ，5 μm ，10 μm 。将椭圆标准器置于工作台中间，调整标准器和主轴回转轴线准确对心，使标准短测杆的测头和标准器的环带工作面中接触时，传感器指示值在零值附近变化量最小，逐挡增加放大倍数，直到待检挡位。待主轴回转稳定后，按最小区域法测量椭圆标准器圆度，作为仪器测得值，则示值误差按式（5）计算：

$$\Delta_{\text{示值}} = \frac{\text{测得值} - \text{标准值}}{\text{标准值}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

标准值——椭圆标准器的圆度检定值。

中等挡位（相当于 1 000 倍）以上的每一量程范围都应逐挡检定，取各挡示值误差中绝对值最大的作为检定结果。

目前，不具备椭圆标准器法条件的，也可采用弦高法（定标块法）进行，滤波器必须选用全通挡，标准器的选择应与相应量程一致。

此方法适用于二、三、四级仪器。

7.3.13.2 圆柱度仪示值误差

将圆柱度标准器组的标准圆柱体（ $\Phi 75\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ）分别安装在工作台上，调整传感器支架使测头与标准圆柱体的下端接触，并调整好标准圆柱体与旋转轴线的同心度，然后上移测头至测量行程范围内，再调整标准圆柱体与旋转轴线的同轴度，在此两个截面上反复调整标准圆柱体与旋转轴线的同轴度。然后用截面法在 100 mm 高度内取不少于 5 个截面进行圆柱度测量，重复测量 5 次取其平均值作为测得值，按式（6）计算：

$$\Delta_{\text{示值}} = \frac{\text{测得值} - \text{标准值}}{\text{标准值}} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

标准值——标准圆柱体的圆柱度检定值。

其结果作为该次测量的示值误差。依次获取各圆柱度标准器对应的仪器示值误差，取其中绝对值最大的作为检定结果。

对行程长度较大的圆柱度仪还应采用截面法在 300 mm 高度范围内，取不少于 10 个截面进行圆柱度测量，重复测量 5 次，取其平均值与圆柱度标准值之差作为该次测量的示值误差。依次获取各圆柱度标准器对应的仪器示值误差，取全部示值误差中绝对值最大的作为检定结果。

7.3.14 仪器重复性

7.3.14.1 圆度仪测量重复性

滤波器旋钮置 1~50 波/转，测杆长度开关置标准短测杆位置，测力旋钮置外侧中等测力位置，放大倍数旋钮置 200 倍，将椭圆标准器（10 μm 左右）置于可调工作台中心，调整标准短测杆的斧形（或球形）测头中部与椭圆标准器接触，使椭圆标准器与主轴回转轴准确对心且使传感器指示值指零附近。逐挡增大放大倍数并进行调心，直到仪器正常使用的放大倍数（ $\times 2\ 000$ ）。待主轴回转 3 圈后，在椭圆标准器的同一被测截面，连续测量 5 次。分别按最小区域法评定其圆度得到 5 个测量结果，测量重复性按式（7）计算：

$$\Delta_{\text{重复性}} = \frac{\text{最大值} - \text{最小值}}{\text{平均值}} \times 100\% \quad (7)$$

其计算值作为圆度仪测量重复性的检定结果。

7.3.14.2 圆柱度仪测量重复性（在距工作台台面 100 mm 高度范围内）

将 $\Phi 75\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的标准圆柱体安装在旋转工作台上，调整传感器支架使测头

与标准圆柱体的下端接触，并调整好标准圆柱体与旋转工作台的同心度，然后上移测头距上端 10 mm 处，再调整标准圆柱体与旋转工作台的同轴度，在此两个截面上反复调整标准圆柱体与旋转工作台的同轴度。然后用截面法在 100 mm 高度内取不少于 5 个截面进行圆柱度测量，取 5 次测量结果，测量重复性按式 (8) 计算：

$$\Delta_{\text{重复性}} = \frac{\text{最大值} - \text{最小值}}{\text{平均值}} \times 100\% \quad (8)$$

其计算值作为圆柱度仪测量重复性的检定结果。

7.3.15 示值稳定性

滤波器旋钮置全通挡，测杆长度开关置标准短测杆位置，放大倍数旋钮置 200 倍，测力旋钮置处侧的中等测力位置。将标准椭圆柱（圆度值约为 5 μm ）置于可调工作台中间，使传感器的测头和标准椭圆柱的环带工作面接触并相对转动时，传感器指示表在零附近振幅为最小。调整工作台使标准椭圆柱和主轴回转轴线同心，逐挡增加放大倍数，直到相应放大倍数挡。开机半小时，待主轴回转稳定后进行测量，测量数据用最小区域法评定，以 5 次测量值的平均值作为第一次测得值 H 。连续开机 4 h，每隔 1 h 重复测量 5 次。以 5 个测量值的平均值作为第二次测得值 H_1 ，同理依次测得 H_2 、 H_3 、 H_4 ，示值稳定性按式 (9) 计算：

$$\Delta_{\text{稳}i} = \left| \frac{H_i - H}{H} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中： $i=1, 2, 3, 4$ 。

取其最大值作为检定结果。

7.3.16 工作台最大负载和偏载时仪器径向误差

用专用重块（或砝码）给转台式圆度仪的工作台加载到最大值后，按 7.3.11 检定仪器径向误差，作为检定结果。

在工作台上，沿载荷偏置线将偏置载荷加到最大值后，按 7.3.11 检定仪器径向误差，作为检定结果。

8 检定结果的处理

按照本规程的规定和要求，检定合格的圆度、圆柱度测量仪发给检定证书；检定不合格的，发给检定结果通知书，并注明不合格项目。

9 检定周期

圆度、圆柱度测量仪的检定周期一般不超过 1 年。

附录 A

模拟式仪器检定项目

A.1 模拟式仪器检定项目的技术要求及检定工具

A.1.1 模拟式仪器检定项目的技术要求

A.1.1.1 传感器测头测量力可调，最小测力不大于 0.02 N，最大测力为 0.07 N～0.24 N。

A.1.1.2 各挡放大倍数的转换误差：相邻挡放大比误差不大于 3%；任意挡相对定度挡放大比误差不大于 5%。

A.1.1.3 肩形架的放大倍数误差不大于 5%。

A.1.1.4 主轴在头架内移动时对工作台（圆板面）垂直度在纵、横向均不大于 0.01 mm/100 mm。

A.1.1.5 主轴在头架内移动时的直线度不大于 0.002 mm/100 mm。

A.1.2 模拟式仪器检定项目和主要检定工具见表 A.1。

表 A.1 模拟式仪器检定项目及检定工具

序号	检定项目	主要检定工具	检定类型		
			首次检定	后续检定	使用中检验
1	传感器测头测量力	测力计、自准直仪	+	—	—
2	各挡放大倍数的转换误差	—	+	+	+
3	肩形架的放大倍数误差	三等量块、一级平晶	+	+	+
4	主轴在头架内移动时对工作台（圆板面）垂直度	圆柱角尺、专用装表夹具 0.001 mm 测微表	+	+	+
5	主轴在头架内移动时的直线度	圆柱角尺、专用装表夹具 0.001 mm 测微表	+	+	+

注：表中“+”号表示该项应检定；“—”号表示该项可不检定。

A.2 检定方法

A.2.1 传感器的测量力

使用标准短测杆，将测力旋钮分别置于两极限位置，使测力计与传感器测头接触（或在传感器测端悬吊砝码），在对心表指零时，读取两测力值作为检定结果。

A.2.2 各挡放大倍数的转换误差

以 10 000 倍与 5 000 倍为例。滤波器旋钮置 1～50 波/转挡，放大器旋钮置 10 000

倍,测杆长度开关置标准短测杆位置。在传感器上装好测杆限位架,并调节其上的微调螺钉,使对心表指零时限定标准短测杆。装好记录纸,旋转笔移旋钮,使对心表指针与表盘左边刻线重合。开机回转 3 圈后,记录第一圈图像,再将放大倍数旋钮旋回到 5 000 倍(不得旋转笔移旋钮),开机记录第二圈图像。将放大倍数旋钮回到 10 000 倍,旋转笔移旋钮,使对心表指针与表盘在右边刻线重合,开机记录第三圈图像,再将放大倍数旋转到 5 000 倍(不得旋转笔移旋钮),开机记录第四圈图像(见图 A.1)。取下记录图,分别测量 1~3 和 2~4 圈图像的径向间距,其转换误差按下式计算:

$$\Delta_{\text{转}} = \frac{\text{径向间距之比} - \text{放大倍数之比}}{\text{放大倍数之比}} \times 100\%$$

用相同的方法,检定其他各相邻挡,取各挡转换误差中的最大值作为检定结果。

任意挡相对定度挡放大倍数比的误差,由相邻挡的放大倍数比的实际误差求代数和得到。

A.2.3 肩形架的放大倍数误差

滤波器旋钮置全通挡,测杆长度开关置标准短测杆位置,放大倍数旋钮置 1 000 倍,将带有球形测头的肩形架安装在传感器上,在平面平晶的工作面中间,并排研合两块实际尺寸差为 0.020 mm 的三等量块(见图 A.2),并放置到可调工作台中间,使测头接触平面平晶工作面时,传感器调零。精调工作台,使平面平晶工作面和主轴回转轴线垂直。升头架或降工作台并调节传感器的径向位置,使测头接触量块表面,其回转轨迹通过两量块的中心。调节传感器使指示值在零附近振幅为最小,待主轴回转稳定后进行测量。将测得的数据用最小区域法评定出圆度值,其圆度值即为测得值,则肩形架的放大倍数误差为:

$$\Delta_{\text{肩}} = \frac{\text{测得值} - \text{实际尺寸差}}{\text{实际尺寸差}} \times 100\%$$

式中:

实际尺寸差——量块检定证书上给出的两块量块实际尺寸的差值。

A.2.4 主轴在头架内移动时对工作台(圆板面)的垂直度

用锁紧装置将头架固紧,用装表夹具将刻度值为 0.001 mm 的测微仪安装在传感器滑架侧面。将圆柱角尺置于工作台(圆板面)中间,使测微表和圆柱角尺在通过轴线的截面内接触,调整圆柱角尺和主轴回转轴线同心。移动主轴 100 mm,应读取测微表的最大变化量作为测得值。

此检定应在纵、横向分别进行,以最大误差值作为检定结果。

A.2.5 主轴在头架内移动时的直线度

用锁紧装置将头架固紧,用装表夹具将刻度值为 0.001 mm 的测微仪安装在传感器滑架侧面。将圆柱角尺置于工作台的适当位置,使测微表和圆柱角尺在通过轴线的截面内接触。调整圆柱角尺和主轴回转轴线同心,再调整工作台,使圆柱角尺的素线与主轴升(降)运动在两垂直方向(即正面、侧面)平行(移动主轴 100 mm 范围),在 100 mm 范围内均匀分布不少于 10 点进行测量。根据测微表的读数做曲线图,按最小条件评定误差。

此检定应在纵、横向分别进行，以最大误差值作为检定结果。

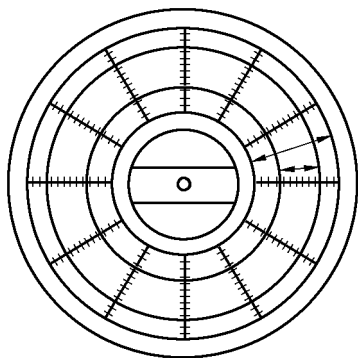


图 A.1 放大倍数转换误差记录图像

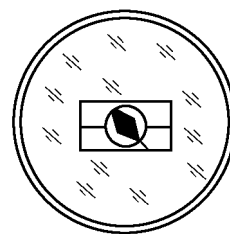


图 A.2 放大倍数转换误差检定原理图

附录 B

基准回转轴线与 Z 轴导轨的平行度检定原理说明

B.1 倒置法测量导轨倾斜量原理

采用倒置法测量倾斜量的原理如下：轴线的空间位置只有在主轴回转时才能体现出来，并需通过对中介物（标准圆柱）的圆轮廓测量，间接地获取导轨相对主轴回转轴线的倾斜量（平行度误差）。在超精测量时，标准圆柱的形状误差（锥度）与导轨相对主轴回转轴线的倾斜量处于同一数量级，二者混叠在一起，无法区分。倒向分离法可以实现二者的分离，其基本原理见图 B.1。

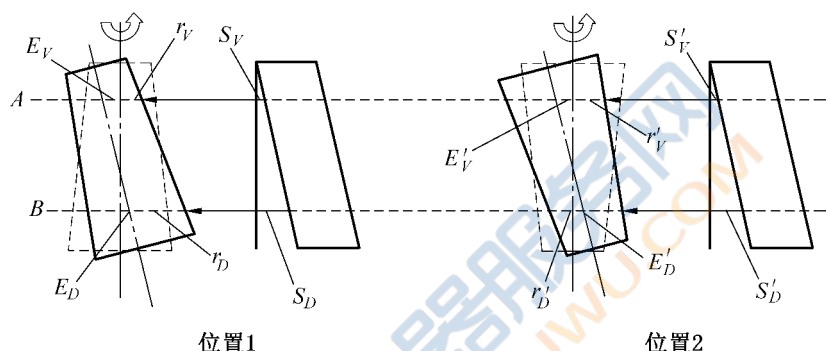


图 B.1 倒置分离法原理示意图

在第一位置标准圆柱正向放置，如图 B.1 所示。分别测量上、下二截面的圆轮廓，信号中含导轨倾斜分量，得测量序列 $\{V_{Vi}\}$ 和 $\{V_{Di}\}$ ，并有如下关系式：

$$V_{Vi} = S_V + r_{Vi} + E_V \cos(\theta_i - \alpha_V) \quad (\text{B.1})$$

$$V_{Di} = S_D + r_{Di} + E_D \cos(\theta_i - \alpha_D) \quad (\text{B.2})$$

式中：

S_V, S_D ——分别为导轨在上、下测量截面的倾斜量；

r_{Vi}, r_{Di} ——分别为试件上、下两测量截面上轮廓到回转轴线的极径；

E_V, E_D ——分别为上、下两测量截面相对回转轴线的偏心率。

当采样间隔满足 $\theta_{i+1} - \theta_i = 360^\circ/N$ 时，可对以上二式做均值处理，有

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Vi} = S_V + \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_{Vi} + E_V \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \cos(\theta_i - \alpha_V) \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Di} = S_D + \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_{Di} + E_D \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \cos(\theta_i - \alpha_D) \quad (\text{B.4})$$

考虑到如下关系：

$$r_V = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_{Vi}$$

$$r_D = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_{Di}$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \cos(\theta_i - \alpha_V) = 0$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \cos(\theta_i - \alpha_D) = 0$$

有

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Vi} = S_V + r_V \quad (\text{B. 5})$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Di} = S_D + r_D \quad (\text{B. 6})$$

在第二位置, 标准圆柱倒向放置。分别在原上下二截面上测量圆轮廓, 信号中仍含导轨倾斜分量, 得测量序列 $\{V_{Vi}\}$ 和 $\{V_{Di}\}$, 并有如下关系式:

$$V'_{Vi} = S'_V + r'_{Vi} + E'_V \cos(\theta_i - \alpha'_V) \quad (\text{B. 7})$$

$$V'_{Di} = S'_D + r'_{Di} + E'_D \cos(\theta_i - \alpha'_D) \quad (\text{B. 8})$$

式中

S'_V 、 S'_D ——分别为试件倒置后导轨在上、下两测量截面的倾斜量;

r'_{Vi} 、 r'_{Di} ——分别为试件倒置后, 上、下两测量截面上轮廓回转轴线的极径;

E'_V 、 E'_D ——分别为试件倒置后, 上、下两截面相对回转轴线的偏心量。

同理可得:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Vi} = S'_V + r'_V \quad (\text{B. 9})$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Di} = S'_D + r'_D \quad (\text{B. 10})$$

做叠加处理, 式 (B. 6) 减式 (B. 5), 式 (B. 10) 减式 (B. 9), 有

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Vi} = (S_D - S_V) + (r_D - r_V) \quad (\text{B. 11})$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Vi} = (S'_D - S'_V) + (r'_D - r'_V) \quad (\text{B. 12})$$

$$\begin{cases} \Delta S = S_D - S_V \\ \Delta r = r_D - r_V \\ \Delta S' = S'_D - S'_V \\ \Delta r' = r'_D - r'_V \end{cases}$$

有

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Vi} = \Delta S + \Delta r \quad (\text{B. 13})$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Vi} = \Delta S'_D + \Delta r'_D \quad (\text{B. 14})$$

利用关系:

$$\Delta S' = \Delta S$$

$$\Delta r' = -\Delta r$$

由式 (B. 14) 可得

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Vi} = \Delta S - \Delta r \quad (\text{B. 15})$$

式 (B.13) 加式 (B.15) 有

$$\Delta S = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Vi} \right) + \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Vi} \right) \right] \quad (\text{B.16})$$

式 (B.13) 减式 (B.15) 有

$$\Delta r = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{Vi} \right) + \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Di} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'_{Vi} \right) \right] \quad (\text{B.17})$$

式中, ΔS 为导轨在 H 范围内相对主轴回转轴线的倾斜量, 可作为导轨相对主轴回转轴线的平行度误差; Δr 为标准圆柱上、下两截面的半径差。这样, 标准圆柱形状误差 (锥度) 与导轨相对主轴回转轴线的倾斜量就可以得到。

B.2 回转基准与传感器直线运动基准间的位置关系判别原则

用一标准圆柱角尺, 正置放于所选仪器工作台上, 测量该位置上的圆柱度误差值, 并考察轮廓形状; 然后将标准圆柱角尺倒置在同一工作台上, 按原方法测量圆柱度误差值, 并考察轮廓形状。形状应跟随正置和倒置变化, 从而使回转基准与传感器直线运动基准间的位置倾斜关系限定在一定的倾斜范围内。

倾斜判别:

(1) 正向测量时, 形状为倒锥; 倒向测量时, 形状仍为倒锥: 表明 Z 向导轨相对于主轴回转轴线正向有较大倾斜量。

(2) 正向测量时, 形状为正锥; 倒向测量时, 形状仍为正锥: 表明 Z 向导轨相对于主轴回转轴线负向有较大倾斜量。

(3) 形状跟随正置和倒置变化: 表明 Z 向导轨相对于主轴回转轴线无倾斜分量 (或倾斜量小于圆柱度误差) 加入。

附录 C

主要检定工具及其技术要求

C.1 标准球、标准半球（见图 C.1、图 C.2）

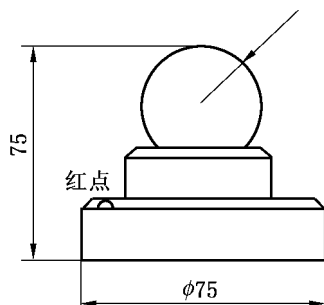


图 C.1 标准球

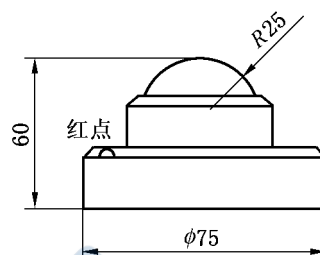


图 C.2 标准半球

C.1.1 工作圆截面圆度不大于 $0.05\ \mu\text{m}$ 。

C.1.2 标准球或标准半球装入球座，不应松动、变形。

C.1.3 球座应有编号和标记点。

C.2 标准椭圆柱（应为正椭圆柱）（见图 C.3）

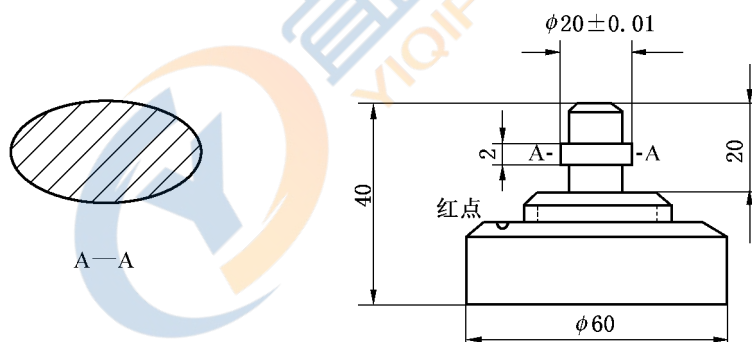


图 C.3 标准椭圆柱

C.2.1 椭圆柱上的长轴 D 应与座上的标记点对准。

C.2.2 长轴、短轴之差公称尺寸为 $1\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$, $4\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ 。

C.2.3 热处理 HRC 60~64，冷处理，时效，尺寸稳定。

C.2.4 椭圆柱工作面表面粗糙度 $R_a < 0.04\ \mu\text{m}$ 。

C.3 圆柱度标准器 (见图 C.4)

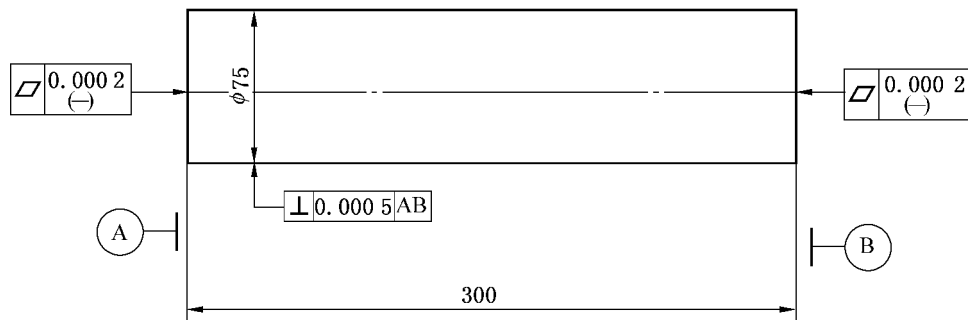


图 C.4 圆柱度标准器

C.3.1 规格 $\phi 75 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$; $\phi 75 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。C.3.2 表面粗糙度 $R_a < 0.02 \text{ } \mu\text{m}$ 。C.3.3 圆柱度分别为 $0.5 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $1 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $2 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $5 \text{ } \mu\text{m}$ 。

C.4 定标块 (见图 C.5)

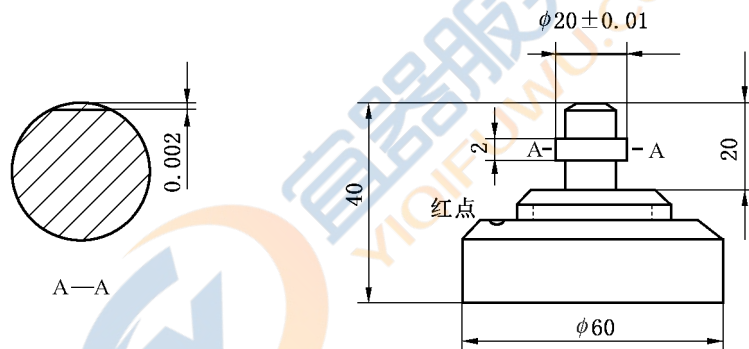


图 C.5 定标块

C.4.1 定标块上的小平面弦高的名义尺寸为 $1 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $2 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $4 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $5 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $10 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $20 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $50 \text{ } \mu\text{m}$ 。C.4.2 定标块小平面表面粗糙度 $R_a < 0.04 \text{ } \mu\text{m}$ 。

C.4.3 热处理 HRC 60~64, 冷处理, 时效, 尺寸稳定。

C.4.4 定标块上的小平面应与座上的标记点对准, 座上应有编号。

C.5 超精密微动台 (见图 C.6)

C.5.1 示值误差不大于 $0.006 \text{ } \mu\text{m}$ 。C.5.2 示值变动性小于 $0.004 \text{ } \mu\text{m}$ 。

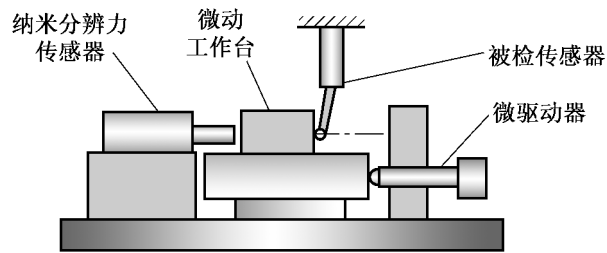


图 C. 6 超精密微动台

C. 5. 3 灵敏阈不大于 $0.001\ \mu\text{m}$ 。

C. 6 误差分离转台 (见图 C. 7)

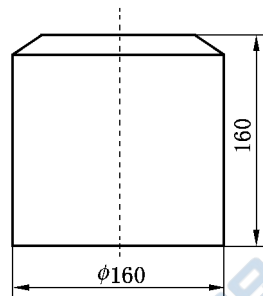


图 C. 7 误差分离转台

C. 6. 1 仪器径向误差 $\leq 0.2\ \mu\text{m}$ 。

C. 6. 2 仪器轴向误差 $\leq 0.2\ \mu\text{m}$ 。

C. 6. 3 角定位误差 $\leq 1'$ 。