

# 试验机同轴度测试仪校准技术的研究

□周晗琼<sup>1</sup> 李冰莹<sup>1</sup> 殷勇<sup>2</sup>

1. 江苏省计量科学研究所 2. 江苏丰仪同创互联科技有限公司

**【摘要】**为满足精密机械制造领域对同轴度准确测量的需求，解决当前试验机同轴度测试仪因缺乏统一校准装置与规范方法，导致的测量结果一致性差、量值传递不精准的问题，提出一种同轴度测试仪校准装置及校准方法。首先介绍了试验机同轴度测试仪的分类，结合其实际应用场景，分析了校准装置的结构设计与工作原理，明确同轴度测试仪的校准项目与校准流程。为统一试验机同轴度测试仪的测量标准及规范试验机同轴度测试仪的测量方法提供参考。

**【关键词】**同轴度测试仪；同轴度测试仪校准装置；同轴度误差；测量标准

文献标识码：A 文章编号：1003-1870（2026）03-0039-06

## Research on Calibration Technology for Testing Machine Coaxiality Tester

**【Abstract】** To meet the requirement for accurate coaxiality measurement in the precision machinery manufacturing field and to address the issues of poor consistency in measurement results and inaccurate value transmission caused by the lack of unified calibration devices and standardized methods for testing machine coaxiality testers currently, this paper proposes a coaxiality tester calibration device and a calibration method. First, it introduces the classification of testing machine coaxiality testers, analyzes the structural design and working principle of the calibration device, taking into account its actual application scenarios, and specifies the calibration items and calibration process for the coaxiality testers. This provides a reference for unifying the measurement standard for testing machine coaxiality testers and standardizing their measurement methods.

**【Keywords】** coaxiality tester; coaxiality tester calibration device; coaxiality error; measurement standard

### 引言

随着材料力学性能测试向高精度、标准化方向发展，试验机作为核心检测设备，其加载系统的同轴度直接影响拉伸、压缩等试验数据的准确性。同轴度偏差会导致试样受力不均，进而引发试验结果失真，严重时甚至造成试样异常断裂，干扰对材料真实力学性能的判断<sup>[1]</sup>。试验机同轴度测试仪（以下简称“同轴度测试仪”）作为检测试验机同轴度的校准装置，广泛应用于环保、化工、能源和电子领

域，是各级计量部门对拉力、压力和万能材料试验机同轴度进行检测的理想设备。

同轴度测试仪主要分为两类：引伸计式同轴度测试仪（见图1）和应变计式同轴度测试仪（见图2）。作为规程、规范中规定的标准器之一，试验机同轴度测试仪尚无明确的技术指标要求和校准方法。目前，对于引伸计式同轴度测试仪，主要采用引伸计标定仪对其施加给定轴向位移进行示值误差的校准，但二者核心测量维度不匹配，引伸计标定

仪侧重轴向位移/变形精度，而同轴度测试仪则需重点考虑轴向载荷下的径向偏差，导致其校准结果关联性弱、针对性不足。技术要求主要根据JIG 139-2014《拉力、压力和万能试验机》、JJG 475-2008《电子式万能试验机》对同轴度测试仪的要求<sup>[2-3]</sup>，JJG 762-2007《引伸计检定规程》也只是对引伸计变量、标准检测试样尺寸等方面进行规范化的要求<sup>[4]</sup>。对于应变计式同轴度测试仪，相应的技术规范主要为ASTM E1012-19《在拉伸和压缩轴向载荷下试验机和试样同轴度校验的标准方法》（Standard

Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application），但是此规范主要对应变计式同轴度测试仪的设计原则、加工质量和标准试样尺寸等进行了相关要求<sup>[5]</sup>，国内外暂未提出明确的校准方法与校准装置。国内目前主要通过实验室间比对对其进行装置可靠性的判断，但该方法比对成本高、周期长，且受参比实验室资质与操作规范性的影响，结果重复性易波动，不具备量值传递的法定校准属性。



图1 引伸计式同轴度测试仪



图2 应变计式同轴度测试仪

综上所述，针对同轴度测试仪的计量性能，目前国内外尚无明确的校准装置与校准方法，导致同轴度测试仪的产品计量性能是否达到设计和使用要求无法得到正确完整的验证，制约了同轴度测试仪产品和试验机行业的高质量发展。参考上述规范，对同轴度测试仪的校准技术进行相关研究，本文设计了一种校准装置，研究几何同轴度与受力同轴度的换算关系，提出同轴度测试仪的校准项目，为提升同轴度测试仪的准确度、支撑试验机校准工作有效落地提供了技术依据。

## 1 同轴度测试仪校准装置

### 1.1 结构设计

同轴度测试仪校准主要与变形量、应变量和力值相关，同轴度测试仪校准装置如图3所示，主要由高刚度主体框架、位移控制系统、位移测量系统和定位检测机构等组成，并配套相关数据处理系统<sup>[6]</sup>。

附图3说明：1.上基座；2.下基座；3.连接杆；4.X轴滑台；5.Y轴滑台；6.上吊臂；7.上夹爪；8.下夹爪；9.负荷传感器；10.安装架；11.连接套；12.丝杆螺母；13.丝杆；14.传动轴；15.电机；16.皮带轮；17.伺服电机

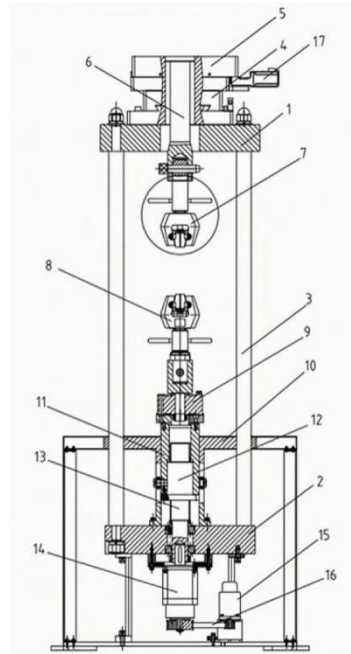


图3 同轴度测试仪校准装置示意图

### 1.2 校准装置的计量特性要求

试验力误差： $\pm 0.5\%$ ；

位移控制误差： $\pm 0.5 \mu\text{m}$ （位移 $\leq 1/3\text{mm}$ ）；  
 $\pm 0.15\%$ （位移 $> 1/3\text{mm}$ ）。

### 1.3 工作原理

同轴度测试仪校准装置实现同轴度检测的工作原理为：

(1) 装置上下夹具对被检同轴度测试仪的检测试样端部进行同步稳定装夹，借助限位部件的位置调节实现夹臂位置的精准可调，既能确保装夹稳固性，又能最大限度降低装夹间隙。

(2) 可对被校准同轴度测试仪在X、Y、Z 三轴方向开展稳定线性控制，进而得到稳定且精度可控的位移变量。

(3) 上夹头可在X 轴滑台与Y 轴滑台进行位移运动，定位检测机构接收到触发信号后，识别被检同轴度测试仪的精确位置偏移并输出标准同轴度值，将该偏移状态下同轴度测试仪的实测示值与施加的标准同轴度值进行比对，以此评定被检同轴度测试仪的同轴度示值误差。

## 2 标准同轴度的理论分析

### 2.1 标准同轴度的类型

对于同轴度，分为几何同轴度和受力同轴度。

几何同轴度为设备/装置上下夹具的几何中心重合度（静态），单位为mm。受力同轴度则是加载力线与试件轴线重合度（动态），单位为%。同轴度测试仪的校准对象为受力同轴度。

本文研究的同轴度测试仪校准装置，其施加的标准几何同轴度为纯偏移型同轴度偏差：通过在X 方向或者Y 方向给出确定的偏移量，上下夹头中心线平行但不重合，存在径向位移（无角度偏差），仅沿垂直于轴线方向产生相对偏移。同轴度测试仪，在校准装置对其施加固定载荷和固定偏移量后，得到的同轴度示值为受力同轴度。因此，为了将校准装置的标准受力同轴度与同轴度测试仪的受力同轴度进行对比，得到同轴度测试仪的同轴度误差，需要将校准装置的标准几何同轴度推导得到校准装置的标准受力同轴度。同轴度测试仪与同轴度测试仪校准装置的同轴度对比见表1。由于本文主要研究受力同轴度的示值误差，下文的标准受力同轴度简称为标准同轴度。

表1 同轴度测试仪与同轴度测试仪校准装置的同轴度对比

名称	同轴度测试仪	同轴度测试仪校准装置	
	受力同轴度	标准几何同轴度	标准（受力）同轴度
概念	加载后，同轴度测试仪测力作用线与理论轴线偏差	校准装置上下夹具的几何中心偏移量	加载后，校准装置测力作用线与理论轴线偏差
单位	%	mm	%
数据来源	同轴度测试仪的输出示值	校准装置施加的固定几何偏移量	根据校准装置几何偏移量推导得到的受力同轴度
应用场景	用于受力同轴度的检测	对同轴度测试仪施加标准几何偏移量	评估同轴度测试仪的受力同轴度误差

### 2.2 标准同轴度推导前提与假设

为了简化推导过程，确保换算公式的工程实用性，本次推导提出如下假设：

(1) 同轴度试样棒始终处于弹性变形阶段，应力-应变关系遵循胡克定律，试验过程未产生塑性变形。

(2) 同轴度试样棒、上下夹具及滑台构件均为理想刚性体，受力后无弹性形变、塑性变形及几何形状改变，仅发生整体纯位移偏移，排除形变对同

轴度计算的干扰。

(3) 轴向力F 沿加载轴线均匀施加（载荷施加大小与施加速率稳定）。

(4) 同轴度试样棒材质均匀，横截面几何尺寸一致，没有初始缺陷和残余应力。

### 2.3 基础力学公式与试样棒截面参数

拉伸试验过程中，应力计算基于两类基础力学公式：

(1) 拉伸应力关系：轴向拉力作用下，应力与

拉力、横截面积的关系为：

$$\sigma_t = \frac{P}{A}$$

式中：P 为施加的拉力，A 为试样横截面积。

(2) 弯曲应力关系：弯矩作用下，应力与弯矩、抗弯截面系数的关系为：

$$\sigma_b = \frac{M}{W}$$

式中：M 为试样承受的弯矩，W 为试样的抗弯截面系数。

对于圆柱形拉伸试样棒，其抗弯截面参数为：

$$W = \frac{\pi d^3}{32}$$

式中：d 为同轴度试样棒直径。

## 2.4 纯位移偏差下几何同轴度与受力同轴度的换算推导

纯位移偏差下，上下夹具轴线严格平行（角度偏差 $\alpha=0$ ），仅存在径向平移偏移。

(1) 拉伸应力：在纯位移偏移下，拉伸应力是轴向加载力P在试样横截面上的均匀分布应力，与径向位移偏移量 $\delta$ 无关，公式为：

$$\sigma_t = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi d^2}$$

(2) 弯曲应力：纯位移偏移量 $\delta$ 使试样轴线相对加载轴线产生偏心，引发附加弯曲应力，公式为：

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{32P\delta}{\pi d^3}$$

式中： $\delta$  为径向位移偏移量（几何同轴度）。

因此，试样棒的实际应力为：

$$\sigma = \sigma_t \pm \sigma_b = \frac{4P}{\pi d^2} \pm \frac{32P\delta}{\pi d^3}$$

同轴度误差为：

$$e = \frac{\sigma_b}{\sigma_t} = \frac{8\delta}{d} \times 100\%$$

## 3 校准项目与校准方法

### 3.1 校准项目

校准项目：主要为同轴度示值误差、示值重复性和同轴度方位误差。

夹持对象：应变计式同轴度测试仪的夹持对象为同轴度传感器，引伸计式同轴度测试仪的夹持对象为标准检测试样，下文统称为同轴度试样棒。

载荷校准点：一般选取同轴度测试仪量程范围的

10%、20% 和40%（注：也可以根据用户校准需求选取载荷校准点）。

同轴度校准点：同轴度测试仪校准装置的标准同轴度选取5%、8% 和10%。

校准方位：方位+X 与方位+Y，校准方位示意图如图4 所示。

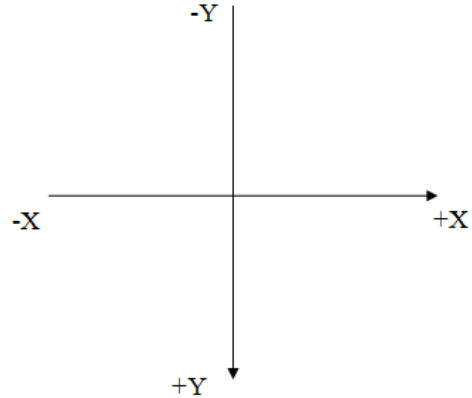


图4 校准方位示意图

### 3.2 校准方法

#### 3.2.1 校准前准备

(1) 将同轴度测试仪的导线连接至设备，接入电源，预热至少30min。

(2) 将同轴度试样棒上端用同轴度测试仪校准装置夹具夹持，调整其上下端的夹持位置，使得垂直度、同心度（圆柱形试样棒）或平行度（矩形试样棒）的偏差为最小。

(3) 将同轴度试样棒上下端均用夹具夹持，此时同轴度测试仪校准装置对同轴度试样棒施加微小力值，确保传感器各路信号均有反应，然后将力卸载。加卸载荷应缓慢平稳，且加载力不得超出同轴度测试仪的弹性极限（下同）。

#### 3.2.2 校准流程

(1) 根据选取载荷校准点，平稳驱动同轴度测试仪校准装置，在方位+X 对同轴度测试仪施加1% 的标准同轴度，然后将同轴度测试仪校准装置和同轴度测试仪的同轴度同时清零。

(2) 在相应的载荷校准点，根据同轴度校准点，对同轴度测试仪施加相应标准同轴度，利用配套的分析软件，测量记录同轴度测试仪在相应标准同轴度下的数据（应变计式同轴度测试仪为应变数

据，引伸计式同轴度测试仪为长度数据），重复测量3次。

(3) 完成全部校准方位和载荷校准点的同轴度测量后，将同轴度测试仪完全卸载。

#### 4 校准结果的数据与处理

##### 4.1 应变计式同轴度测试仪

以圆柱形应变计式同轴度测试仪（四个应变计绕传感器圆周均匀分布）为例。圆柱形应变计式同轴度传感器的应变计粘贴方位见图5。

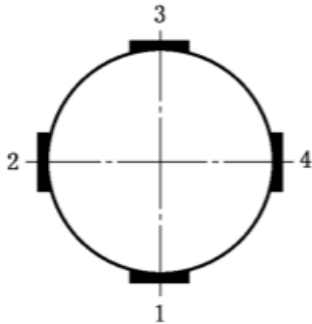


图5 圆柱形应变计式同轴度测试仪应变计粘贴方位

平均轴向应变：

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{4}$$

式中： $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_4$ 为同一横截面上四个应变计分别测得的表面应变，下标表示应变计在应变计式同轴度测试仪圆周的顺序。

各位置的局部弯曲应变为：

$$\begin{aligned} b_1 &= \varepsilon_1 - \varepsilon_a \\ b_2 &= \varepsilon_2 - \varepsilon_a \\ b_3 &= \varepsilon_3 - \varepsilon_a \\ b_4 &= \varepsilon_4 - \varepsilon_a \end{aligned}$$

最大弯曲应变为：

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{(b_1 - b_3)^2 + (b_2 - b_4)^2}$$

则弯曲百分比为：

$$PB = \frac{B}{\varepsilon_a} \times 100\%$$

##### 4.1.1 同轴度测试仪的示值误差

同轴度测试仪示值误差为：

$$e_\delta = e_{\max} - e_s$$

式中：

$e_\delta$ ——同轴度测试仪示值误差；

$e_{\max}$ ——同轴度测试仪在不同截面上相应标准同轴度的平面同轴度 $e_1$ 、 $e_2$ 和 $e_3$ 中的最大值；

$e_s$ ——同轴度测试仪校准装置输出的标准同轴度。

##### 4.1.2 同轴度测试仪的示值重复性

在相应截面上，同轴度测试仪在每个方位重复3次试验，3次试验中弯曲百分比最大值与最小值的差值即为同轴度测试仪在相应方位的重复性，同轴度测试仪的重复性 $R$ 为3个截面上不同方位重复性的最大值。

##### 4.1.3 同轴度测试仪的方位误差

在相应截面上，同轴度测试仪的平面方位误差为两个不同方位弯曲百分比平均值 $\overline{PB}_1$ 、 $\overline{PB}_2$ 中的最大值与最小值的差值。

同轴度示值方位误差 $E_p$ 为不同截面上平面方位误差的最大值。

#### 4.2 引伸计式同轴度测试仪

##### 4.2.1 同轴度测试仪的示值误差

同轴度测试仪的同轴度测量结果由双侧引伸计测得的变形值计算而来，测试同轴度为：

$$e = \frac{l_{\max} - \bar{l}}{\bar{l}} \times 100\%$$

式中：

$e$ ——同轴度，%；

$l_{\max}$ ——同一测量点，同一次测量中，两侧引伸计位移示值的较大值，mm；

$\bar{l}$ ——同一测量点，同一次测量中，两侧引伸计位移示值的平均值，mm。

同轴度误差按下式计算：

$$e_\delta = e_{\max} - e_s$$

式中：

$e_\delta$ ——同轴度测试仪示值误差；

$e_{\max}$ ——同轴度测试仪在每次试验中测试同轴度最大值；

$e_s$ ——同轴度测试仪校准装置输出的标准同轴度。

##### 4.2.2 同轴度测试仪的重复性

同轴度测试仪在每个方位重复3次试验，3次试验中测试同轴度最大值与最小值的差值即为同轴度测试仪在相应方位的重复性，同轴度测试仪的重复性为不同方位重复性的最大值。

#### 4.2.3 同轴度测试仪的方位误差

同轴度测试仪的方位误差为不同方位3次测试同轴度平均值中的最大值与最小值的差值。

### 5 结语

目前，同轴度测试仪的校准仍然缺少有效的技术手段，且技术指标尚未明确，导致同轴度测试仪的测量结果一致性差、量值传递不精准。本文通过调研同轴度测试仪的应用场景、原理结构及主要技术参数，结合现有校准技术存在的问题，提出一种同轴度测试仪校准装置，并对校准装置的标准同轴度进行理论推导，明确了同轴度测试仪的校准项目与校准方法，为推动同轴度测试仪行业的规范化与标准化发展提供了理论依据，后续将针对校准装置和校准方法开展系统性试验，从而对同轴度测试仪的校准技术进行进一步改进与完善。

### 参考文献

[1] 秦海峰,王晶露,刘思博,等.材料试验机同轴度检测方法及其影响因素分析[J].测控技术,2020,39(03):65-70.DOI:10.19708/j.ckjs.2020.03.011.

[2] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 139-2014 拉力、压力和万能试验机[S]. 中国标准出版社,2014.

[3] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 475-2008 电子式万能试验机[S]. 中国标准出版社,2008.

[4] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 762-2007 引伸计检定规程[S], 中国标准出版社,2007.

[5] American Society for Testing and Materials. ASTM E1012-19 Standard Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application[S], ASTM International,2019

[6] 无锡市检验检测认证研究院. 202323011506.6 一种新型同轴度标准装置[P].2024-06-14.

### 作者简介

周晗琼（1996—），女，中级工程师，硕士研究生，主要从事力值、硬度方向的研究工作。