

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.02.03

同轴度测量方法综述

赵莹, 乔仁晓, 郭鑫鑫, 周坚俊

(广电计量检测集团股份有限公司, 广东广州 510630)

摘要: 阐述了机械结构间同轴度、光轴间同轴度、光轴与机械轴间同轴度的定义, 介绍了引伸计同轴度测量方法、应变计同轴度测量方法、百分表同轴度测量方法、三坐标测量机同轴度测量方法、激光对中仪法等机械结构间同轴度测量方法的原理和优缺点; 分析了干涉比较测量法、反射式定心测量法、透射直接测量法等光轴间同轴度测量方法的特点; 介绍了基于图像处理和机器视觉技术的光轴与机械轴之间同轴度测量方法的原理及应用。指出机械结构间同轴度的测量方法较为传统, 存在测量效率低、需要人为判断等缺点; 同轴度测量技术将向高精度、自动化、非接触的方向发展。

关键词: 同轴度; 测量方法; 光学; 机器视觉

中图分类号: TB9; TB22; TH124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 02-0025-07

Overview of coaxiality measurement methods

ZHAO Ying, QIAO Renxiao, GUO Xinxin, ZHOU Jianjun

(GRG Metrology & Test Group Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

Abstract: Elaborating on the definitions of coaxiality between mechanical structures, coaxiality between optical axes, and coaxiality between optical axes and mechanical axes. It introduces the principles and advantages and disadvantages of coaxiality measurement methods for mechanical structures, such as extensometer coaxiality measurement method, strain gauge coaxiality measurement method, dial gauge coaxiality measurement method, coordinate measuring machine coaxiality measurement method, laser alignment instrument method, etc; Analyzed the characteristics of optical axis coaxiality measurement methods such as interference comparison measurement, reflective centering measurement, and direct transmission measurement; This article introduces the principle and application of a coaxiality measurement method between optical and mechanical axes based on image processing and machine vision technology. It is pointed out that the measurement method for coaxiality between mechanical structures is relatively traditional, which has disadvantages such as low measurement efficiency and the need for human judgment; Coaxiality measurement technology will develop towards high precision, automation, and non-contact.

Key words: coaxiality; measurement methods; optics; machine vision

0 引言

根据 GB/T 1182-1996《形状和位置公差》可知, 同轴度是指被测圆柱面轴线相对基准线不共

轴的程度^[1]。同轴度是被测实际轴线相对于基准轴线所允许的变动量, 被测对象的轴线相对于基准轴线的偏差可能分布在空间各个方向上, 因此被测对象的同轴度公差带是一个以基准轴线为中心

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2024-02-29

基金项目: 国家计划技术基金项目(JZX7J202303JL008800)

引用格式: 赵莹, 乔仁晓, 郭鑫鑫, 等. 同轴度测量方法综述[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 25-31.

Citation: ZHAO Y, QIAO R X, GUO X X, et al. Overview of coaxiality measurement methods[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 25-31.



轴线、以公差带大小为直径的圆柱体^[2]。同轴度是一个非常复杂的特征，根据应用场景的不同，同轴度可分为三类：机械结构间同轴度、光轴间同轴度、光轴与机械轴间同轴度。

机械结构之间的同轴度通常用于描述机器部件之间的相对位置精度(例如描述车轮与车轴之间的配合是否准确)，它对机器的性能和寿命有重要影响。光轴同轴度，也称为光学轴同轴度，是指光学元件的光学轴与基准轴的偏离程度，在光学制造领域是一个十分重要的指标，一个优质的光学元件必须具备较高的同轴度，以保证其成像清晰、准确度高、使用寿命长。光轴与机械轴之间的同轴度是指在光机系统中，光学元件的光学轴与机械结构件的机械轴之间的偏离程度，这一指标关系到光学系统和机械系统之间的连接和配合精度(例如在激光加工或测量中需要将激光束准确地照射至机械轴上的加工头或探测器)，对于保证光学与机械系统的正常工作至关重要。

本文阐述机械结构间同轴度、光轴间同轴度、光轴与机械轴间同轴度的具体测量方法，介绍不同类型同轴度测量方法的原理及适用场景，并展望同轴度测量领域未来的发展趋势，旨在为相关领域的科研工作者提供借鉴和参考。

1 机械结构间的同轴度测量方法

1.1 引伸计同轴度测量方法

在材料试验机的性能参数中，同轴度是表征试验机上下夹头之间加载荷载的连线与试样中心线的偏离程度的形位公差参数^[3]，若同轴度指标不符合标准，会导致材料弹性模量、塑性延伸长度等相关试验参数产生严重偏差^[4]。JJG 139-2014《拉力、压力和万能试验机检定规程》中规定，试验机同轴度的测量采用引伸计法。

引伸计法同轴度检验试样示意图如图1所示，

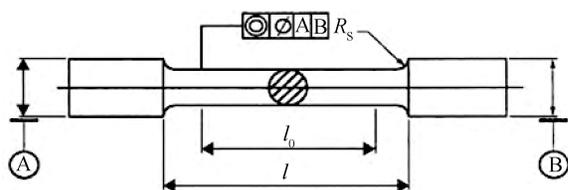


图1 同轴度检验试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of coaxiality test sample

其中， l 为夹头间距离， l_0 为试样原始标距， R_s 为倒角半径， \textcircled{A} 、 \textcircled{B} 分别为试样两端的轴线。为测量试样两端轴线的同轴度，将检验试样夹持在夹头上并施加力，通过引伸计测量得到被测试样相对两侧的弹性变形量 ΔL ，在试样相互垂直的方向上各测量3次。被检试验机的同轴度 e 为^[5]

$$e = \frac{\Delta L_{\max} - \overline{\Delta L}}{\overline{\Delta L}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\overline{\Delta L}$ 为检验试样的同一测量点在同一次测量中，两侧变形量的算术平均值； ΔL_{\max} 为检验试样的同一测量点在同一次测量中，变形较大一侧的变形量。分别测量检测试样前后和左右截面相对位置的变形量，并计算前后和左右两个方向的受力同轴度，以其中数值最大者作为同轴度测量的最终结果^[6]。

1.2 应变计同轴度测量方法

JJG 556-2011《轴向加力疲劳试验机检定规程》中规定了采用应变计法对试验机进行同轴度测量的检定程序。应变计法的测量使用同轴度检定仪实现，同轴度检定仪包括同轴度试验棒、多组电阻应变片和主机。测量时，在同轴度试验棒上粘贴多组电阻应变片并将同轴度试验棒安装于试验机的上下夹头进行测量^[7]，同轴度试验棒贴电阻应变片示意图如图2所示。

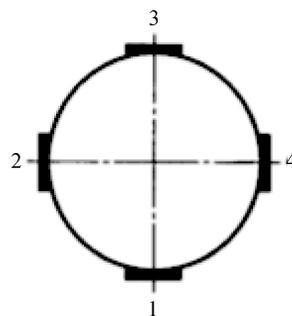


图2 同轴度试验棒贴电阻应变片示意图

Fig.2 Schematic diagram of coaxial test rod with resistance strain gauge attached

读取同轴度检定仪主机上显示的4个方向的弹性变形量，根据式(2)计算得出平均轴向应变，再根据式(3)计算得出同轴度。

$$\varepsilon_a = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) / 4 \quad (2)$$

$$e = \frac{1}{2\varepsilon_a} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_4)^2} \quad (3)$$

式中： ε_a 为平均轴向应变， ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 分别为4个位置测得的应变变量， e 为同轴度。

美国材料实验协会标准 ASTM E1012-14 对试验机的同轴度测量技术要求、如何选择应变标准试样以及影响同轴度测量的关键因素进行了详细说明^[8]。与采用引伸计开展同轴度测量的方法相比，采用应变片法对试验机同轴度开展测量的方式更符合试验过程的实际情况^[9]。

1.3 百分表法

百分表法以两块刃口状V形块模拟基准轴线实现轴类零件同轴度测量，原理示意图如图3所示，将两个相同的刃口状V形块放置在平板上，以平板作为测量的基准面，在两块刃口状V形块上放置被测零件，安装好百分表及表座，转动工件1周，读取百分表在被测零件旋转过程中的变动值，取最大与最小读数之间的差值作为该截面的同轴度。采用同样的方法测量若干个截面的同轴度，取绝对值最大者作为被测零件的同轴度。

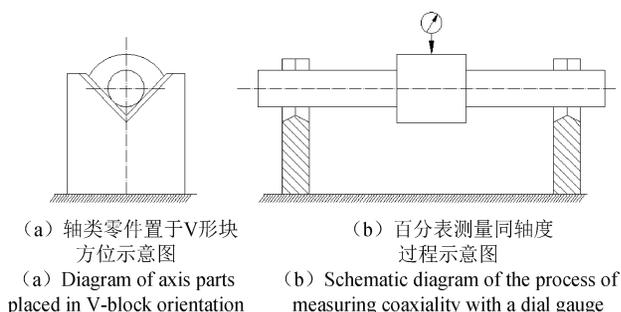


图3 百分表法测量轴类零件同轴度原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of measuring coaxiality of shaft parts using a dial gauge method

百分表法的优点是操作简单、成本较低，但百分表的精度较低（误差为百分之几），导致同轴度测量结果准确性较低，且该方法的测量效果依赖操作人员的经验和分析能力，适用于测量精度要求不高的场合。

1.4 三坐标测量机测量同轴度法

利用三坐标测量机 (Coordinate Measuring Machine, CMM) 测量同轴度不需要对工件进行旋转，也不需要利用专用芯轴或专用支架^[10]，只需用CMM的测头对工件表面取点采样，然后计算得出工件同轴度。

利用CMM测量同轴度的方法中，公共轴线法

最为常用，采用被测元素和基准元素上多个横截面的圆的圆心构造3D直线作为公共轴线，分别计算基准圆柱对公共轴线以及被测圆柱对公共轴线的同轴度，取其中最大值作为该零件的同轴度^[11]。

利用CMM测量同轴度时，软件中构造的圆柱面是最佳拟合圆柱面，而非实际圆柱面，拟合结果会受到产品圆柱度和锥度的影响，引入测量误差；CMM采集数据的方式为非同步式，重新定位及探针的运动均会引入测量误差^[12]；且该方法测量速度较慢，成本也较高。

1.5 准直法

准直法采用准直望远镜对大、中规格孔类零件进行同轴度测量，原理如图4所示，以仪器的光轴作为基准轴线，瞄准定心于被测孔内的靶标，通过仪器的测微读数机构显示同轴度误差的大小^[13]。准直法的测量精度主要取决于仪器精度和靶标的定心精度，图像模糊、手动聚焦准确性低等因素均会引入测量误差^[14]。

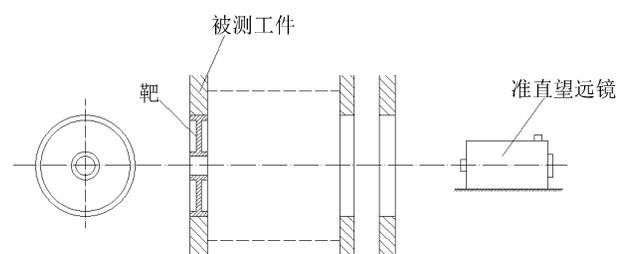


图4 准直法测量孔类同轴度原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of measuring coaxiality of holes using collimation method

1.6 激光对中法测量同轴度

激光对中法测量同轴度的原理为：激光发射器固定在参考轴线上，然后将接收器移动到待测物体轴线上，当激光束与接收器对准后，接收器会接收到激光束的反射信号，并将其转换为电信号传输至仪器控制系统，经过数据处理和分析计算，得出被测物体轴线相对于参考轴线的精确位置和角度信息，从而得到同轴度信息。

激光对中法测量同轴度精度较高，可达微米级别，但温度变化、机械补偿不足、电磁干扰等因素会影响其测量精度。另外，激光对中仪的操作较为复杂，需要经验丰富的工程师或技术人员操作设备进行测量才能得到较为准确的结果^[15]。

2 光轴之间的同轴度测量方法

在光学系统中，光轴之间的同轴度对于保证光学系统高质量成像至关重要。光轴间同轴度需依靠光学镜片同轴度保证，光学镜片光轴同轴度也称为透镜中心偏差^[16]。目前透镜中心偏差的测量方法主要包括：干涉比较测量法、反射式定心

测量法、透射式直接测量法。

2.1 干涉比较测量法

干涉比较测量法主要用于大口径光学系统分立元件的中心偏差检测，该方法根据干涉条纹移动量计算被检镜相对精密转轴的偏心量^[17]。干涉比较测量法测量光学镜片同轴度示意图如图5所示。

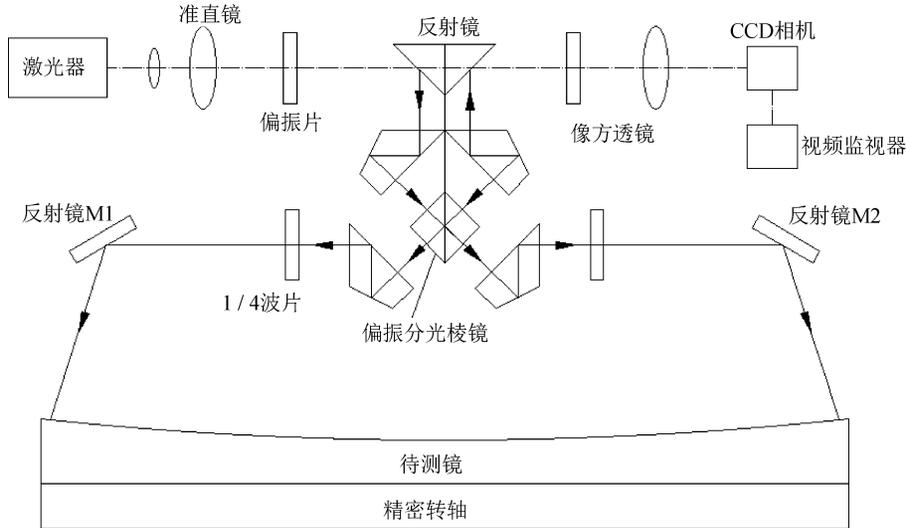


图5 干涉比较测量法测量光学镜片同轴度示意图

Fig.5 Schematic diagram for measuring the coaxiality of optical lenses using interference comparison method

图5中激光器发出的光经准直镜、偏振片、反射镜及半五棱镜入射到偏振分光棱镜(Polarizing Beam Splitter, PSB)上，在PSB的分束面上形成两束光，两束光在经过半五棱镜及1/4波片后入射到反射镜M1和M2上，调整反射镜使光线垂直入射到被检镜的表面，反射光束按原路返回。反射回来的两束光经偏振分光棱镜后合为一束光，经检偏器发生干涉，用CCD(Charge-coupled Device)相机接收干涉条纹。根据式(4)计算被检镜的偏心量 x 。

$$x = \frac{NR\lambda}{2L} \tag{4}$$

式中： λ 为波长， N 为干涉条纹移动数量， R 为被检镜的曲率半径， L 为被检镜上两光点之间的距离。

2.2 反射式定心测量法

反射式定心测量法同轴度测量光路图^[18]如图6所示，旋转台带动被检镜旋转，光源发出的光与经过被检镜光学面反射回的光线会聚，利用CCD

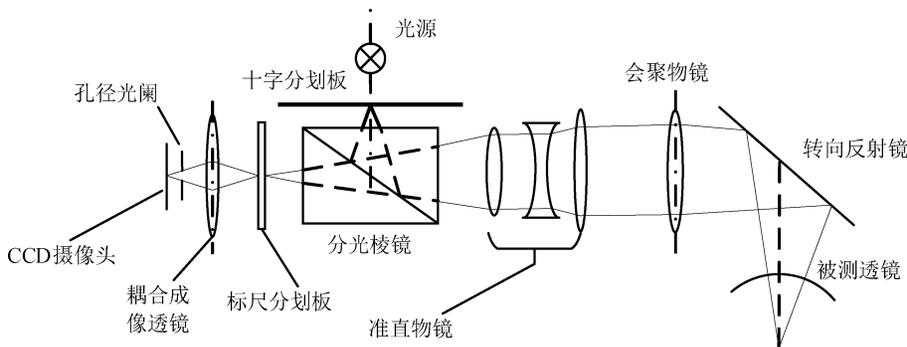


图6 反射式定心测量法同轴度测量光路图

Fig.6 Principle diagram of reflective centering coaxiality measurement method

摄像头测量成像情况，然后将测量结果传输至计算机，计算机进行运算处理，得到被检镜的中心偏差^[19]。

2.3 透射式直接测量法

透射式直接测量法的原理：平行光照射到被检镜上，由于一般透镜偏心差量值比较小，需要对其显微放大，用一个显微物镜来放大透射像偏

离光轴的程度^[20]，如图7所示。通过测量可求出，即被检镜的中心偏差。与干涉比较法类似，将被检镜以其几何中心为轴线进行旋转，受中心偏差的影响，放大后的焦点像 B' 在像面内作划圆运动，通过面阵CCD接收焦点像的轨迹 Y' ，再由计算机进行图像处理，根据相似三角形几何关系计算出被检镜的中心偏差 Y ^[21]。

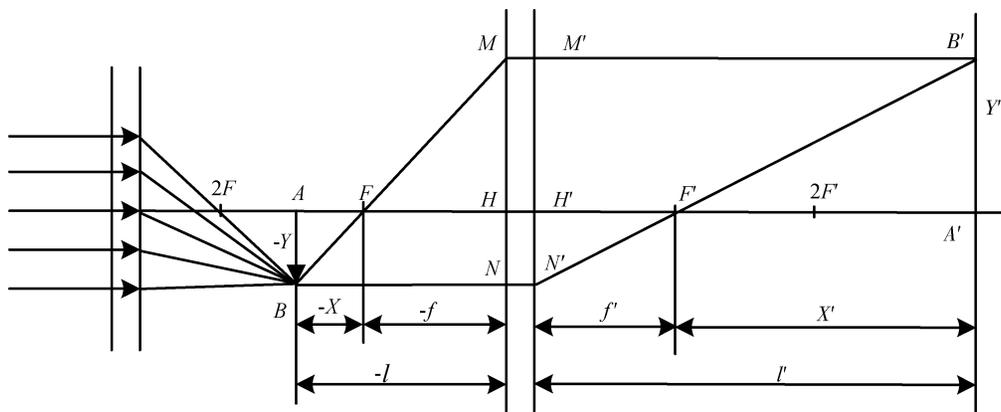


图7 透射式直接测量法原理图

Fig.7 Principle diagram of transmission direct measurement method for coaxiality

3 光轴与机械轴间的同轴度测量方法

一般情况下，在具备瞄准或定位的光机电系统中(例如激光跟踪仪、校炮镜等)，光源出射光轴与机械运动轴需要保持高同轴度，从而保证测量的精度。下面以校炮镜的光轴与机械轴之间的同轴度测量方法为例进行说明。

炮口轴线偏差会影响坦克的射击精度，在集成组装系统时，电子校炮镜的光轴与外部套筒的机械轴之间难免存在偏差^[22]，为了保证该光电系统的精度，需要对电子校炮镜的同轴度进行精确检测。采用图像处理和机器视觉相结合的方法进行检测，原理如图8所示。

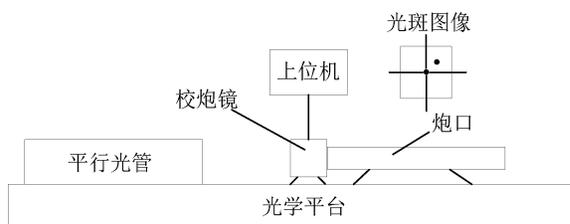


图8 校炮镜光轴与火炮套筒机械轴之间同轴度测量原理图

Fig.8 Block diagram for coaxiality measurement between the optical axis of calibration mirror and the mechanical axis of artillery sleeve

首先使标准炮口的机械轴与平行光的光轴重合，然后将校炮镜放于标准炮口内，利用CCD采集平行光轴的光斑。将光斑位置与成像界面的中心位置进行比较，若标准炮口的机械轴与校炮镜的光轴重合，则光斑成像于中心位置，否则光斑成像于非中心位置。通过光轴与机械轴三维空间特性得到旋转模型，如式(5)所示。

$$\alpha = 3600 \times \arctan \left[\frac{\mu_y (B'_y - V/2)}{f} \right] \quad (5)$$

$$\beta = 3600 \times \arctan \left[\frac{\mu_x (B'_x - H/2) \cos \alpha}{f} \right]$$

式中： α 、 β 分别为光轴相对于机械轴的俯仰方向角度偏差和水平方向角度偏差， μ_x 、 μ_y 分别为相机的像元尺寸， B'_x 、 B'_y 分别为图像中光斑质心坐标， H 、 V 分别为图像的宽和高， f 为相机焦距。

通过图像处理和圆轨迹拟合得到光斑成像点的坐标，代入式(5)可计算出光轴与机械轴在水平及俯仰方向上的同轴度。

4 总结与展望

同轴度是工程测量领域中的重要参数，本文详细介绍了同轴度的概念及分类，分析了机械结

构间同轴度、光轴间同轴度、光轴与机械轴间同轴度测量方法的原理及特点。机械结构间同轴度最早被研究者们所关注,应用范围最广、测量方法最多;光轴间同轴度主要应用于光学领域,是保证光学系统成像质量的基本参量;光轴与机械轴间同轴度应用场景较为综合,一般应用于需要瞄准或定位跟踪的光机电系统领域。在实际工作中,需要根据具体应用场景选择合适的同轴度测量方法,实现准确、高效测量。

除了本文介绍的方法之外,还有顶尖法、模拟法、量规检验法等同轴度测量方法,这些方法虽然能够较为方便地进行同轴度的测量,但是也存在主观干扰因素较多、依赖操作人员经验等不足。为实现高精度同轴度测量,需要研究更加客观、高效、准确的同轴度测量方法。

实现非接触式快速测量是同轴度测量领域未来的重要发展趋势,随着CCD、CMOS等光学传感器与计算机硬件性能的不断提升^[24]以及激光测量技术的不断发展,高精度机器视觉测量技术、精密激光测量技术将有力推动同轴度测量领域发展。图像处理技术和机器视觉技术的结合改变了以往的检测模式,使测量过程和结果更为客观,弥补了人眼识别分辨力较低、识别结果准确性较低等不足,将图像处理、机器视觉等技术应用于同轴度测量领域有望使检测过程更加智能化、自动化,并显著提升测量准确性。精密激光测量技术具备高精度、高空间分辨力、非接触、检测范围广等优势,将精密激光测量技术应用于同轴度测量领域将极大提升测量准确性。综上所述,应用图像处理及机器视觉或激光测量技术是一种发展趋势。

参考文献

- [1] 国家技术监督局. 形状和位置公差: GB/T 1182-1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
State Bureau of Quality Supervision. Geometrical tolerancing: GB/T 1182-1996 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1996. (in Chinese)
- [2] 尚自河, 吴立杰, 刘耀东. 浅析活塞销孔同轴度测量方法[J]. 内燃机与配件, 2012(12): 15-16.
SHANG Z H, WU L J, LIU Y D. Analysis of measurement methods for coaxiality of piston pin holes [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2012(12): 15-16. (in Chinese)
- [3] 曾利民, 杨莹. 轴向拉伸试验机同轴度检测技术研究[J]. 计测技术, 2011, 31(5): 27-40.
ZENG L M, YANG Y. Research on coaxiality detection technology for axial tensile testing machines [J]. Metrology & Measurement Technology, 2011, 31(5): 27-40. (in Chinese)
- [4] 薛文瑞, 艾兆春, 刘玉波, 等. 国标和美标同轴度检测方法的对比分析[J]. 计测技术, 2015, 35(增刊1): 155-156.
XUE W R, AI Z C, LIU Y B, et al. Comparative analysis of coaxiality testing methods between national and American standards [J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(supplement 1): 155-156. (in Chinese)
- [5] 全国力值硬度计量技术委员会. 拉力、压力和万能试验机检定规程: JJG 139-2014 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.
National Technical Committee for Force and Hardness Measurement. Verification regulation of tension, compression and universal testing machines: JJG 139-2014 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2014. (in Chinese)
- [6] 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(3): 65-70.
QIN H F, WANG J L, LIU S B, et al. Analysis of coaxiality detection methods and influencing factors for material testing machines [J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(3): 65-70. (in Chinese)
- [7] 全国力值硬度计量技术委员会. 轴向加力疲劳试验机检定规程: JJG 556-2011 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
National Technical Committee for Force and Hardness Measurement. Verification regulation of axial force fatigue testing machines: JJG 556-2011 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2011. (in Chinese)
- [8] ASTM International. Standard practice for verification of testing frame and specimen alignment under tensile and compressive axial force application: ASTM E1012-14 [S]. West Conshohocken.
- [9] 袁强. 试样同轴度校准技术的应用[J]. 计测技术, 2018, 38(增刊1): 125-129.
YUAN Q. Application of sample coaxiality calibration technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(supplement 1): 125-129. (in Chinese)
- [10] 王文书. 三坐标对同轴度误差测量方法的实践[J]. 上海计量测试, 2011, 38(1): 41-43.

- WANG W S. Practice of three coordinate measurement method for coaxiality error [J]. Shanghai Measurement and Testing, 2011, 38(1): 41-43. (in Chinese)
- [11] 刘晓红, 牛永娟, 代桂霞, 等. 长距离加工零件同轴度的检测方法及其误差分析[J]. 甘肃科技, 2018, 47(10): 42-45.
- LIU X H, NIU Y J, DAI G X, et al. Detection method and error analysis of coaxiality for long-distance machining parts[J]. Gansu Science and Technology, 2018, 47(10): 42-45. (in Chinese)
- [12] ZHANG Y J, GE L L. A novel geometry error measurement methodology for coaxiality evaluation[J]. Engineering Manufacture, 2021, 235(4): 627-639.
- [13] 中华人民共和国机械工业部. 同轴度误差检测: JB/T 7557-1994[S]. 北京: 机械科学研究院, 1994.
- Ministry of Machine-Building Industry of the PRC. Coaxiality error detection: JB/T 7557-1994[S]. Beijing: Academy of Machinery Science & Technology, 1994. (in Chinese)
- [14] CHAI Z, LU Y H, LI X Y, et al. Non-contact measurement method of coaxiality for the compound gear shaft composed of bevel gear and spline[J]. Measurement, 2021, 168: 1-10.
- [15] ANISIMOV A G, et al. The main errors in monitoring coaxial alignment by means of an auto reflection optoelectronic system[J]. Optical Technology, 2009, 76(1): 1-5.
- [16] 陈燕春, 何文翰, 区仲荣. 满足光学镜片较高光轴同轴度要求的模具结构设计[J]. 机床与液压, 2012, 40(7): 120-122.
- CHEN Y C, HE W H, OU Z R. Design of mold structure to meet the high axis coaxiality requirements of optical lenses [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(7): 120-122. (in Chinese)
- [17] 叶露, 韩昌元. 总装调心干涉仪的设计与测量精度分析[J]. 光学技术, 2001, 27(4): 328-333.
- YE L, HAN C Y. Design and measurement accuracy analysis of the center of gravity interferometer for final assembly [J]. Optical Technique, 2001, 27(4): 328-333. (in Chinese)
- [18] 段学霆. 共轴光学系统计算机辅助光轴一致性装调研究[D]. 西安: 西安光学精密机械研究所, 2006.
- DUAN X T. Research on computer-aided alignment of optical axes in coaxial optical systems[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Machinery, 2006. (in Chinese)
- [19] 王彦石. 反射式光学中心偏自动测量方法[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2006, 6(2): 30-32.
- WANG Y S. Automatic measurement method for reflective optical center deviation [J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic, 2006, 6(2): 30-32. (in Chinese)
- [20] 董桂梅, 林玉池, 黄银国, 等. 影像法测量透镜中心误差的研究[J]. 光学仪器, 2007, 29(2): 6-11.
- DONG G M, LIN Y C, HUANG Y G, et al. Research on measuring lens center error using image method[J]. Optical Instruments, 2007, 29(2): 6-11. (in Chinese)
- [21] 董桂梅. 透镜中心误差影像法测量系统的设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- DONG G M. Design and research of image measurement system for lens center error[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [22] 高洋洋, 景文博, 尹超平, 等. 光电系统光轴与机械轴同轴度测试方法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 89-97.
- GAO Y Y, JING W B, YIN C P, et al. Test method for coaxiality of optical and mechanical axes in optoelectronic systems [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 40(1): 89-97. (in Chinese)
- [23] 王震. 基于图像处理的测角精度和同轴度测量方法[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- WANG Z. Angle measurement accuracy and coaxiality measurement method based on image processing [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [24] 董芳凯, 郑智贞, 袁少飞, 等. 基于机器视觉的阀门零件同轴度测量系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(11): 81-87.
- DONG F K, ZHENG Z Z, YUAN S F, et al. Research on the coaxiality measurement system of valve parts based on machine vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(11): 81-87. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 赵莹(1988—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为振动声学计量。