

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.12

基于色散共焦原理的内径测量技术研究

刘汉戈¹, 闫钰锋^{1*}, 唐卫², 韩佳昊¹, 潘国涛¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137000)

摘要: 为了满足小口径深孔类零件的高精度非接触测量需求, 研制了一套适用于较大测量范围的高分辨力光学测量系统。利用色散共焦测量原理, 建立了微位移量系统, 结合光谱分析技术, 形成了高分辨力光学测量系统。首先, 基于色散共焦原理, 设计了色散物镜结构; 其次设计爬行结构, 利用电机带动反射镜旋转, 完成深管不同截面的径向几何尺寸测量; 再次, 通过最小二乘法以及误差分析与补偿, 对系统误差进行分析; 最后通过搭建实验平台验证。结果表明: 该测量系统可实现小测量范围达到 5 mm, 测量误差优于 3.3 μm , 具有测量精度高、测量范围较大、结构紧凑等优点, 对解决小尺寸深孔类零件内径测量难题具有重要实用意义。

关键词: 内径测量; 非接触测量; 色散共聚焦; 测量系统

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0128-09

Inner diameter measurement based on dispersive confocal principle

LIU Hange¹, YAN Yufeng^{1*}, TANG Wei², HAN Jiahao¹, PAN Guotao¹

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. China Baicheng Weapons Test Center, Baicheng 137000, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high-precision and non-contact measurement of small diameter deep hole parts, a set of high-precision optical measurement system suitable for large measurement range was developed. Based on the principle of dispersion confocal measurement, a micro displacement system is established, and a high-resolution optical measurement system is formed by combining the spectral analysis technology. Firstly, based on the dispersion confocal principle, the structure of dispersion objective lens is designed by using Zemax software. Secondly, the creeping structure is designed, and the motor is used to drive the reflector rotating to complete the radial geometric dimension measurements of different sections of the deep holes. Thirdly, the system error is analyzed by least square method and is compensated. Finally, an experimental platform was built to verify that the measurement range reached 5 mm and the measurement accuracy was better than 3.3 μm . It has the advantages of high measurement accuracy, large measurement range and compact structure, which is of great significance to solve the problem of the measurement of the inner diameter of small size deep hole parts.

Key words: inner diameter measurement; non-contact measurement; dispersion confocal; measurement system

收稿日期: 2022-12-02; 修回日期: 2022-12-12

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20220201097GX)

引用格式: 刘汉戈, 闫钰锋, 唐卫, 等. 基于色散共焦原理的内径测量技术研究[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 128-136.

Citation: LIU H G, YAN Y F, TANG W, et al. Inner diameter measurement based on dispersive confocal principle[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1): 128-136.



0 引言

深孔类零件广泛应用于国防工业、航空航天、汽车工业等领域,典型的深孔类零件以火炮身管、发动机气缸和特殊轴承等为代表^[1],在现代加工技术支持下,零件的制造精度不断提高,针对深孔类零件的高精度测量技术随之迎来挑战。深孔类零件一般具有较大的长径比,内部空间封闭狭小的特征给高精度测量带来难度。深孔内径测量因同时具有重要性和高难度,一直被作为仪器科学领域的研究热点方向。多年来,国内外研究者开发了多种内径测量技术,大体可分为接触式测量和非接触式测量两大类^[2]。

接触式测量方法中的传统工具(如游标卡尺和内径千分尺)适用于一些长径比较小的内径测量场合,影响测量精度和测量效率^[3]的因素有测量工具本身及操作者掌握测量位置的准确程度。为适用某些特殊需求(如火炮身管)研制了一些专用的测量仪器。20世纪60年代,我国从苏联进口的机械星型测径仪测量原理较简单,理论测量误差不高于 $10\text{ }\mu\text{m}$,但是测量结果由目视读取,人为因素影响较大^[4];2001年,南开大学的张文伟等人研制了基于环形光图像法的管内壁测量系统,将环形光带投射于被测管内壁上并成像于CCD进行内径测量,分辨力可达 $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[5];2005年长春理工大学的苏丽梅等人利用光栅传感器对管道内径进行测量,针对 $250\sim 300\text{ mm}$ 直径管道,测量误差小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[6];对于一些体积不是特别庞大的工件,三坐标测量机也被用于内径测量,其测量精度高、测量范围大,能够完成深度小于测量臂升降行程,直径大于测量臂的内孔测量,测量误差最高不高于 $1\text{ }\mu\text{m}$,但由于三坐标测量需要在机测量,并且需要针对被测件编程,同时高精度的三坐标测量机价格昂贵,对测量场地和环境都有较高要求,限制了该方法的普及。无论哪种接触式测量方法,在测量过程中测头均要与被测件表面接触,存在划伤表面的风险^[7]。相较于接触式测量,非接触式测量因其精度高、效率高、测量稳定等优点,已经成为当下的研究热点^[8]。

非接触式测量方法随着光电技术、电磁技术

的发展体现出很多优势,以电涡流法、激光三角法、结构光法最具代表性^[9]。2013年,Goldshstein等人利用电涡流来测量可导材料管道内径,绝对误差不高于 $15\text{ }\mu\text{m}$ ^[10],但这种测量技术对被测材料有一定要求,限制了应用的场合;基于激光三角法的位移传感器是目前较成熟的测量技术之一,传感器自身的测量精度可达亚微米级^[11],但因传感器体积较大,难以兼容小口径零件;2018年,朱焯等人使用基于双目视觉的结构光测量方法,建立数学模型,改进了内径图像不完全的缺点,针对 $60\sim 100\text{ mm}$ 不同的内尺寸进行了测量,测量误差不高于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[12]。该方法提高了测量效率,但是测量精度受环境变化影响较大。2020年,陆军工程大学的邵新杰等人提出一种基于结构光的身管内径测量装置^[13],该装置通过观察结构光条纹的偏移量来计算出身管膛线的磨损量,对 155 mm 口径的内径进行测量,测量误差小于 $13\text{ }\mu\text{m}$ 。

与其他测量技术相比,利用色散共焦测量技术进行高精度测量时,被测对象即使存在倾斜或者翘曲的现象,其测量点也不会随之发生改变^[14],且在体积上存在优势,该技术多应用在微小位移和形貌测量等场合^[15]。2005年,Miks等人详细推导了线性轴向色散的理论公式^[16],但未实际设计色散物镜;2010年,朱万彬等人采用一个单透镜和一个双胶合透镜的结构设计了色散物镜^[17],其测量范围为 1.17 mm ,轴向色散与波长之间的线性判定系数 R^2 为 0.986 ,理论分辨力仅为 $3\text{ }\mu\text{m}$;2018年,南京理工大学的蒲涛等人基于色散共焦原理针对镜片厚度进行测量,系统测量范围达到 5 mm ,测量误差小于 $4\text{ }\mu\text{m}$;2019年,马敬等人采用3个单透镜和2个双胶合透镜的结构,设计了色散物镜且提升了一定性能,其测量范围为 1.05 mm ,轴向色散与波长之间的线性判定系数 R^2 为 0.997 ,理论分辨力为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ^[18],虽然提升了线性判定系数以及理论分辨力,但测量范围过小;2020年,中科院王思沫等人在色散共焦中引入二元光学透镜,实现了 13.95 mm 的测量量程,测量误差不高于 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ ^[19],虽然利用二元光学透镜实现了大量程测量,但二元光学透镜的低衍射效率和高加工要求会限制其在工业检测中的应用。

虽然色散物镜在设计方面取得了明显的进展,理论分辨力与线性度日益增进,但量程多集中在1 mm,在工程应用中受限,因此,平衡测量范围与测量精度,以适用于更多应用场合,是在实际工程应用中尚需解决的问题。

为了解决小口径深孔类零件内径测量问题,文章以色散共焦技术为基础,并建立相适配的机械系统,在测量过程中通过反射镜折转共聚焦光路,使沿轴光路指向被测内壁,再结合精密位移系统改变折转点位置,建立适用于较大范围的内径测量系统,实现基于色散共焦技术的小口径轴类零件内径的精密测量。

1 测量原理及系统模型

1.1 测量原理

色散共焦测量的本质是物像共轭^[20],在共焦光学系统中具体表现为光源所处的位置与被测物点所处位置共轭,其基本原理如图1所示。

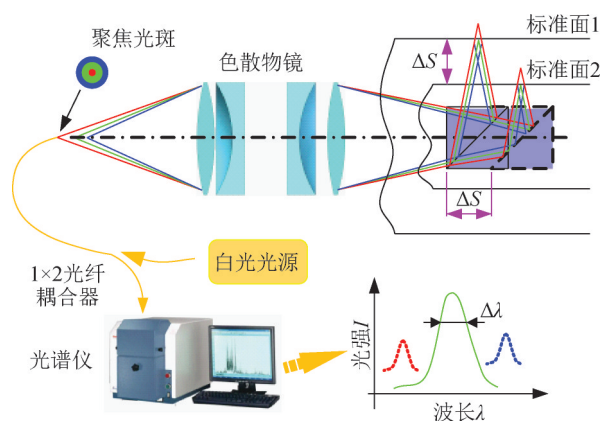


图1 色散共焦测量原理

Fig.1 Principle of dispersion confocal measurement

图1中,白光光源发出的宽光谱光束通过1×2光纤耦合器进入色散物镜,由于轴向色散的作用,波长 λ 不同的光在色散物镜光轴的不同位置处依次会聚,会聚光经被测面反射后,被色散物镜聚焦在1×2光纤耦合器端面,波长为 λ_i 的聚焦光斑最小,耦合入光纤耦合器的光能量最大,在光谱仪上峰值最强,因此光谱仪上光谱的峰值波长与被测面的位置间建立了一一对应关系。色散物镜决定了不同波长的分开程度,即轴向色散的大小和测量范围的大小;而轴向色散与波长之间的线性

度对测量系统的分辨力和精度将产生较大影响。对于确定的色散物镜系统,其轴向色散位置一定,但在延轴方向上加入折转棱镜,通过改变棱镜与色散物镜的位置,即可改变适配口径。

理想情况下,波长和聚焦位置呈现线性关系,其关系可以表示为

$$f(\lambda_i) = z + k\lambda_i \quad (1)$$

式中: $f(\lambda_i)$ 为光点在光轴上的位置; λ_i 为光点对应的波长,mm; z 为线性关系的截距,mm; k 为线性关系的斜率。

在共焦位置处探测到的光强 I (非归一化)与归一化的轴向光学坐标 u 之间的关系为

$$I(u) = \left[\frac{\sin\left(\frac{u}{4}\right)}{\frac{u}{4}} \right]^4 \quad (2)$$

如图2所示,探测器探测到的光强 I 与尺寸变化量 Δl_v 的关系为

$$I(\Delta r) = \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi a^2}{2\pi f^2} \Delta l_v\right)}{\frac{\pi a^2}{2\pi f^2} \Delta l_v} \right]^4 \quad (3)$$

式中: a 为成像透镜的孔径; f 为成像透镜的焦距。

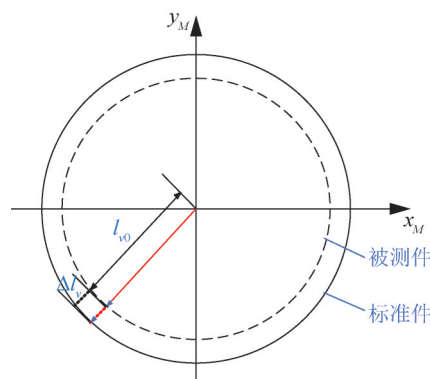


图2 标准件与待测件测量对比

Fig.2 Comparison of standard and DUT measurements

则DCS上的示值可以描述为

$$l_v = l_{v0} + \Delta l_v \quad (4)$$

式中: l_v 为最终测得尺寸; l_{v0} 为测量系统通过标准件标定获得的尺寸; Δl_v 为测量系统测量过程中测得的尺寸变化量。

1.2 测量模型

测量系统结构示意图如图3所示,利用该测量系统结构对小口径深孔类零件进行内径测量。

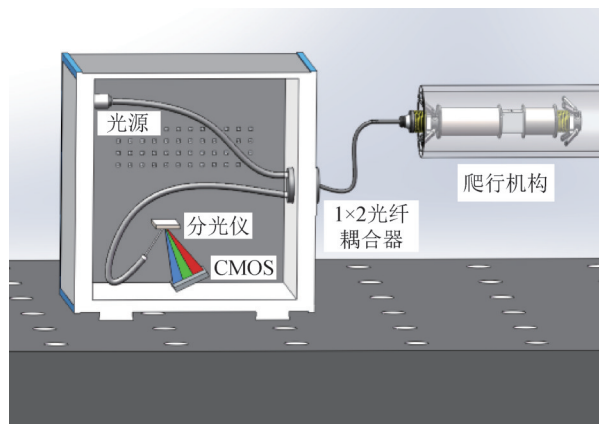


图3 测量系统结构示意图

Fig.3 Measurement equipment structure diagram

白光光源发出的宽光谱光束经过1×2光纤耦合器进入色散物镜,并通过反射垂直射入被侧面,光束经过被侧面、反射镜后被光谱仪接收。爬行机构电机可以携带反射镜旋转360°,旋转一周后,上位机可采集到被测深管当前截面信息扫描不同轴向位置的圆截面后,通过拼接拟合可得到当前圆柱体工件的点云模型。

基于色散共焦原理的内径测量中,采用相对测

量方法,实现较大范围口径的内径测量。测量被测件之前,需要通过测量标准件进行标定工作,用测头扫描标准件截面,光谱仪接收最大光强的光波长为 λ ;随后换为待测件,此时光谱仪接收最大光强的光波长为 λ_i ,经过对比计算得到 ΔL_i ,再以标准件内径作为基础值,最终得到待测件实际内径。

2 光学系统设计

2.1 光学系统结构参数确定

一般的成像镜头需要严格校正色差,而色散物镜需要尽可能产生大的轴向色差以保证测量范围^[21]。根据色散共焦位移测量的工作原理及线性轴向色散条件,进行色散物镜的设计,色散物镜的工作波长 λ 为450~650 nm;测量范围为5 mm;中心波长处像方的数值孔径NA为0.25;横向放大倍率 m 为-1。为此,需要先进行色散物镜玻璃材料的选择,寻找相应初始结构并进行优化。

2.2 Zemax光学系统模拟

结合像差理论设计及Zemax像质对初始结构进行优化,通过使用AXCL, LONA操作数分别控制轴向色差、线性度以及球差,在450~650 nm范围内等间隔设置多个波长进行优化,优化后的色散物镜的镜片参数如表1所示。

表1 色散物镜的镜头参数

Tab.1 Lens parameters for each dispersive objective

镜头编号	玻璃材质	前曲率半径/mm	后曲率半径/mm	厚度/mm	直径/mm
1	H-ZF62	2436.9	82.50	2.0	14
2	D-FK61	-52.8	36.57	2.0	15
3	H-TF3L	66.5	-27.60	4.6	18
4	H-ZF62	95.2	238.50	2.0	19
5	H-TF3L	238.5	-43.10	2.0	20
6	H-TF3L	34.5	-22.10	7.0	19
7	D-FK61	-22.1	61.10	2.2	18

2.3 Zemax光学系统像质分析

对Zemax进行分析后,得到波长分别在450, 550, 650 nm处的点列图,如图4所示。各波长在

其相应聚焦位置处光斑的均方根(RMS)半径分别为0.129, 0.138, 0.119 μm ;艾里斑半径分别为2.306, 2.846, 3.3385 μm ;艾里斑及光斑直径均

不大于 $8\ \mu\text{m}$ 。其中, $450\ \text{nm}$ 波长像距为 $37\ \text{mm}$; $550\ \text{nm}$ 波长像距为 $39.55\ \text{mm}$; $650\ \text{nm}$ 波长像距为 $42\ \text{mm}$ 。色散镜头组结构图及 MTF 曲线分别如图 5 及图 6 所示。采用最小二乘法对轴向色散和波长进行线性拟合, 结果如图 7 所示。色散物镜的轴向色散为 $5\ \text{mm}$, 线性判定系数 R^2 为 0.997 , 满足实际测量要求。

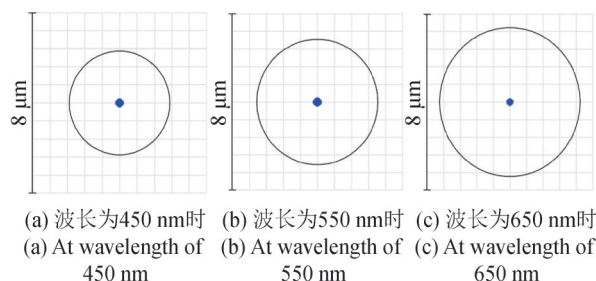


图4 各波长点列图

Fig.4 Spot diagram at each wavelength

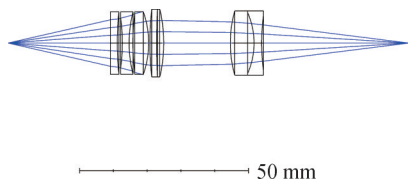


图5 色散镜头组结构图

Fig.5 Structure of dispersive objective

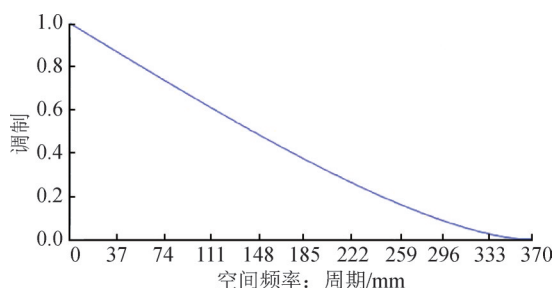


图6 MTF 曲线图

Fig.6 MTF diagram

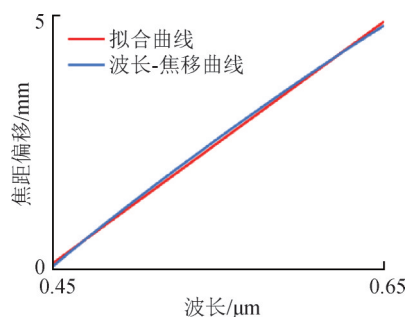


图7 波长-焦移拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of wavelength-focus shift

3 误差分析及补偿

3.1 测量系统数学模型

内径的测量模型如图 8 所示。图 8 中, O_M 为被测物以及光源理想轴心; O'_M 光源实际轴心, 在测量坐标系下的坐标为 $(\Delta x, \Delta y)$; P_{ij} 为第 i 个测量面的第 j 个理想测量点, φ_{ij} 为第 i 个测量面第 j 个测量点相对该平面第一个测量点所转过的角度。则实际测量点 P'_{ij} 在测量坐标系中的坐标表示为

$$\begin{cases} x_{ij} = S \cos \varphi_{ij} + \Delta x \\ y_{ij} = S \sin \varphi_{ij} + \Delta y \\ z_{ij} = h_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

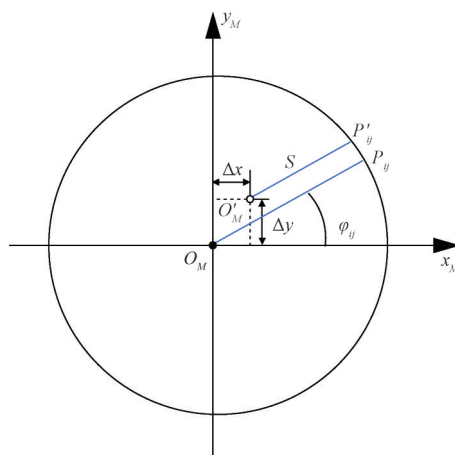


图8 理想数学模型

Fig.8 Ideal mathematical model

3.2 测量系统误差分析

测量系统主要误差源包括坐标系偏移误差、反射镜安装误差、光谱信号峰值提取误差。

3.2.1 坐标系偏移误差

被测件与爬行机构的轴线偏移会导致实际测量光线相对于理想测量光线发生倾斜, 回转轴线不严格垂直于实际测量光线。测量装置的制造误差导致的光线产生的倾斜角为 β , 如图 9 所示, 其中角 α 为实际测量光线相对于理想测量光线的倾斜角, 角 β 为测量光线相对于理想测量平面 $O_M-x_M y_M$ 的倾斜角。因此, 在同时考虑被测件圆度误差以及直线度误差后, 实际测量点 P'_{ij} 的坐标应表述为

$$\begin{cases} x_{ij} = S \cos(\varphi_{ij} + \alpha) \cos \beta + \Delta x \\ y_{ij} = S \sin(\varphi_{ij} + \alpha) \cos \beta + \Delta y \\ z_{ij} = h_{ij} + l_{ij} \sin \beta \end{cases} \quad (6)$$

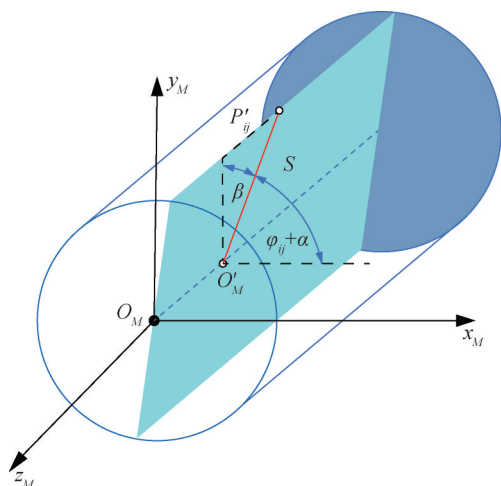


图9 实际测量模型

Fig.9 Actual measurement model

在6级精度的加工条件下,测量坐标系偏移要求能满足: $\Delta x < 0.07 \text{ mm}$, $\Delta y < 0.07 \text{ mm}$; 配合孔轴线直线度误差要求能满足: $\beta < 0.16^\circ$; 因此可以得到,当 $r < 50 \text{ mm}$ 时,被测件形状误差以及坐标系偏移误差导致的测量半径误差为

$$\Delta r_M = \sqrt{[S \cos \beta]^2 + [(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]} - S \quad (7)$$

当 $r < 50 \text{ mm}$ 时,由被测件形状误差等因素导致坐标基准变化引起的测量误差 $\Delta r_M < 1.3 \mu\text{m}$ 。

3.2.2 反射镜的安装误差

该设备的测量光会受到光路的折叠影响,如图10所示,反射镜的安装误差导致的实际测量光线不能严格垂直测量设备的回转轴线,实际测量光线 $P_0 P_{ij}$ 与理想测量面 $O_M - x_M y_M$ 的倾斜角在表示为 γ , 实际测量光线与理想测量光线倾斜角为 δ 。

在公式(5)中加入倾斜角 γ 与 δ , 得到实际测

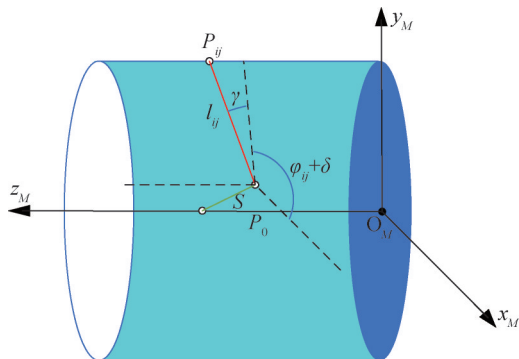


图10 反射镜安装误差导致的光线偏移

Fig.10 Light deviation caused by reflector installation error

量点在理想测量坐标系下的坐标为

$$\begin{cases} x_{ij} = (l + s) \cos(\varphi_{ij} + \delta) \cos(\gamma) \\ y_{ij} = (l + s) \sin(\varphi_{ij} + \delta) \cos(\gamma) \\ z_{ij} = h_{ij} + l_{ij} \sin(\gamma) \end{cases} \quad (8)$$

可以得到反射镜的安装误差 Δr_I 为

$$\Delta r_I \approx \sqrt{[S + l_{ij} \cos(\gamma) \cos(\delta)]^2} - (S + l_{ij}) \quad (9)$$

在安装反射镜时,偏移保证在 $\gamma < 0.5^\circ$, $\delta < 0.5^\circ$ 的情况下,测量系统的回转轴线与被测对象的中心轴线接近。被测对象的半径 $r < 50 \text{ mm}$ 时,反射镜安装误差 $\Delta r_I < 1.6 \mu\text{m}$ 。

3.2.3 光谱信号峰值提取误差

色散共焦位移测量主要通过反射光的信息获得数据,想得到精准的数据就必须精确提取峰值波长。因此,光谱峰值波长提取精度也是误差来源之一^[22]。假定本系统中所使用的光谱仪分辨力为 0.2 nm/pix , 光谱仪的采集误差为 0.02 nm , 镜头在 $450 \sim 650 \text{ nm}$ 波长的工作范围为 5 mm , 光谱仪在 $450 \sim 650 \text{ nm}$ 波长下像素为 1000 pix , 镜头分辨力计算为 $(5 \text{ mm} / 1000 \text{ pix}) = 2 \mu\text{m}$, 采集误差为 $0.2 \mu\text{m}$ 。光谱峰值半宽度平均为 10 pix , 可区分最小量程为 $5 \text{ mm} \times (10 / 1000 \text{ pix}) = 0.05 \text{ mm}$, 因此,由光谱仪造成的测量误差项估算为 $1.5 \mu\text{m}$ 。

3.2.4 测量系统的总体系统误差

测量系统的主要误差源于上述因素,测量系统总误差 Δr_{sum} 为

$$\Delta r_{\text{sum}} = \sqrt{(\Delta r_M)^2 + (\Delta r_I)^2 + (\Delta r_s)^2} \quad (10)$$

当 $r < 50 \text{ mm}$ 时,同轴度误差 $\Delta x < 0.03 \text{ mm}$, $\Delta y < 0.03 \text{ mm}$; 测量光线直线度偏移 $\beta < 0.16^\circ$; 反射镜的安装误差能保证 $\gamma < 0.5^\circ$, $\delta < 0.5^\circ$ 的情况下,测量系统的整体误差 $\Delta r_{\text{sum}} < 2.42 \mu\text{m}$ 。

4 测量实验及结果

实验装置如图11所示,该实验台由色散共焦位移测量系统、反射镜、电机、直线位移台、环规、V型块组成。利用该装置对直径为 50 mm 的环规的不同截面进行测量试验,得到10组测量数据,以高精度三坐标测量机(蔡司PRISMO)测得的数值作为参考值进行对比,结果如表2所示。

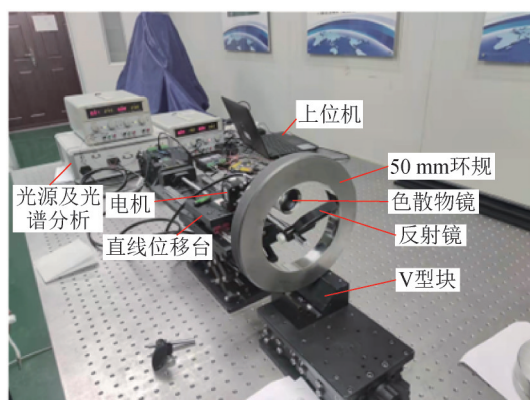


图11 实验装置

Fig.11 Diagram of experimental setup

表2 环规内径测量结果

Tab.2 Measuring results of ring gauge inner diameter

截面编号	参考值/mm	测量值/mm	误差/mm
1	49.9998	49.9973	-0.0025
2	50.0001	49.9972	-0.0029
3	49.9997	50.0024	0.0027
4	49.9995	49.9962	-0.0033
5	50.0000	50.0024	0.0024
6	50.0010	50.0035	0.0015
7	50.0008	50.0032	0.0024
8	49.9997	49.9982	-0.0015
9	49.9994	50.0013	0.0017
10	50.0003	49.9988	-0.0015

针对50 mm环规,色差共焦测量系统测量结果与参考值对比如图12所示,最大误差为3.3 μm ,与误差分析中2.24 μm 相比,测量结果符合性较

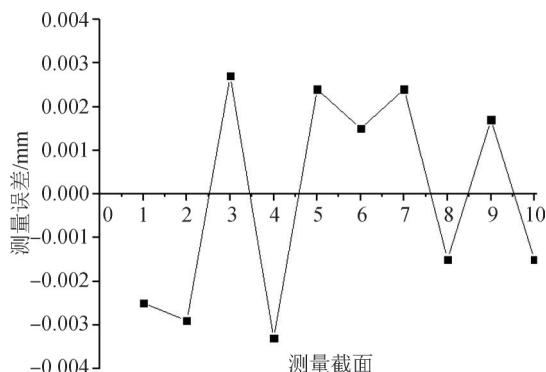


图12 环规测量误差图

Fig.12 Measurement error diagram of ring gauge

好,其微小偏差反映了由测量时温度变化,色散共焦测量非线性和人为误差等因素引入的测量误差。实验结果也证明:色散共焦测量系统具有扫描速度快、测量范围较大、测量精度高等优点,适用于小口径深孔类零件内径的非接触测量。

5 结论

针对小口径深孔类零件现有测量方法缺陷,研究了基于色散共焦原理的测量技术。利用Zemax光学设计软件对色散物镜进行结构设计,确定色散物镜为3个单透镜以及2个双胶合透镜组合,经过Zemax仿真分析后,结果表明在450~650 nm波长范围内,各波长光斑均小于艾里斑;轴向色散于波长之间的线性判定系数 R^2 可达0.9997,测量范围可达5 mm。该测量系统结构设计合理,功能模块集成度高,内径测量范围较大,能实现小尺寸轴类零件内径的全自动快速精密测量。对测量系统进行精度分析和测量试验,结果表明该测量系统精度较高,测量误差控制在3 μm 以内,并能实时显示出测量结果,弥补了目前针对小口径深管内径测量的不足。

参考文献

- [1] 王涛,文海,张健.炮管内径测量仪校准装置研究及不确定度分析[J].光学技术,2022,48(2):210.
WANG T, WEN H, ZHANG J. Research on calibration device of gun barrel inner diameter measuring instrument and uncertainty analysis [J]. Optical technology, 2022, 48(2): 210. (in Chinese)
- [2] 屈杰,陈本永,严利平,等.基于激光干涉法的大型工件内径测量系统设计[J].浙江理工大学学报:自然科学版,2022,47(5):9.
QU J, CHEN B Y, YAN L P, et al. Design of large work-piece inner diameter measurement system based on laser interferometry [J]. Journal of Zhejiang University of Technology: Natural science edition, 2022, 47(5): 9. (in Chinese)
- [3] 徐晓东,杨斌.内径千分尺示值误差测量结果的不确定度分析[J].品牌与标准化,2021(2):60-62.
XU X D, YANG B. Uncertainty analysis of measurement results of internal micrometer indication error [J]. Branding and standardization, 2021(2): 60-62. (in Chinese)

- [4] 崔永俊, 张强. 基于激光三角法的火炮身管内径测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44 (9): 5.
CUI Y J, ZHANG Q. Design of gun barrel inner diameter measurement system based on laser triangulation[J]. Electronic measurement technology, 2021, 44 (9): 5. (in Chinese)
- [5] 张文伟, 张延忻. 基于环形光切图像法的管内壁激光测量系统[J]. 计量学报, 2001, 22 (4): 5.
ZHANG W W, ZHANG Y X. Laser measurement system for pipe inner wall based on annular light section image method[J]. Journal of metrology, 2001, 22 (4): 5. (in Chinese)
- [6] 马宏, 白素平, 王也. 火炮膛线尺寸光电检测技术研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2002, 25(2): 2.
MA H, BAI S P, WANG Y. Research on photoelectric detection technology for rifle size of artillery[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural science edition, 2002, 25(2): 2. (in Chinese)
- [7] 杨咪. 火炮身管内膛几何参数非接触检测系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2017.
YANG M. Design of non-contact measurement system for geometrical parameters of gun barrel bore[D]. Taiyuan: Central North University, 2017. (in Chinese)
- [8] 云鹏, 周彩红, 梁雅军, 等. 深微孔内径测量技术研究[J]. 宇航计测技术, 2012, 32 (4): 4.
YUN P, ZHOU C H, LIANG Y J, et al. Research on measuring technology of deep and microporous inner diameter[J]. Aerospace measurement technology, 2012, 32 (4): 4. (in Chinese)
- [9] 陈浩. 光学式轴孔内径测量方法及关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
CHEN H. Research on optical measurement method and key technology of bore diameter[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [10] GOLDSHTEIN A E, BULGAKOV V F. Testing the inner diameter of pipes using the eddy-current method[J]. Russian journal of nondestructive testing, 2013, 49 (11): 650 - 656.
- [11] 樊鹏辉, 杨光永, 晏婷, 等. 激光三角法测距传感器结构设计与参数优化的研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50 (9): 5.
FAN P H, YANG G Y, YAN T, et al. Research on structural design and parameter optimization of laser triangulation range sensor[J]. Computer and digital engineering, 2022, 50(9): 5. (in Chinese)
- [12] 朱烨. 深孔类零件内表面三维综合测量技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
ZHU Y. Research on 3D comprehensive measurement technology for the inner surface of deep hole parts[D]. Heifei: China University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 丁超, 唐力伟, 曹立军, 等. 基于结构光的身管膛线高度差检测[J]. 光学精密工程, 2017, 25 (4): 9.
DING C, TANG L W, CAO L J, et al. Detection of rifling height difference of barrel based on structured light[J]. Optical precision engineering, 2017, 25 (4): 9. (in Chinese)
- [14] 蒲涛. 基于色差共焦技术的测量系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
PU T. Research on measurement system based on color difference confocal technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [15] XIAO Y, QIU L R, ZHAO W Q, et al. Laser reflection differential confocal large-radius measurement for concave surfaces[J]. Applied optics, 2018, 57(23): 6693-6698.
- [16] MIKS A, NOVAK J, NOVÁK P. Theory of hyperchromats with linear longitudinal chromatic aberration [C]// Slovak-czech-polish Optical Conference on Wave & Quantum Aspects of Contemporary Optics. 14 th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, 2005.
- [17] 朱万彬, 钟俊, 莫仁芸, 等. 光谱共焦位移传感器物镜设计[J]. 光电工程, 2010.
ZHU W B, ZHONG J, MO R Y, et al. Objective lens design of spectral confocal displacement sensor[J]. Optoelectronic engineering, 2010. (in Chinese)
- [18] 马敬, 齐月静, 卢增雄, 等. 光谱共焦位移传感器线性色散物镜设计[J]. 中国激光, 2019, 46 (7): 7.
MA J, QI Y J, LU Z X, et al. Design of linear dispersion objective lens for spectral confocal displacement sensor[J]. China laser, 2019, 46(7): 7. (in Chinese)
- [19] 王思沫, 李凡星, 彭伏平, 等. 基于二元光学透镜光谱聚焦特性的微间距测量[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 7.

WANG S M, LI F X, PENG F P, et al. Microspacing measurement based on spectral focusing characteristics of binary optical lens [J]. Journal of optics, 2020, 40 (2) : 7. (in Chinese)

- [20] 李强,任冬梅,兰一兵,等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 91 - 96.

LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microscope probe for nano scale surface topography measurement [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (2) : 91 - 96. (in Chinese)

- [21] 王梓, 石俊凯, 陈晓梅, 等. 光谱共焦测量技术综述 [J]. 半导体光电, 2022, 43 (4): 8.

WANG Z, SHI J K, CHEN X M, et al Overview of spectral confocal measurement technology [J]. Semiconductor optoelectronics, 2022, 43(4): 8. (in Chinese)

- [22] 邵谭彬, 郭文平, 席英皓, 等. 大量程光谱共焦位移传感器设计及性能评估[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 8.

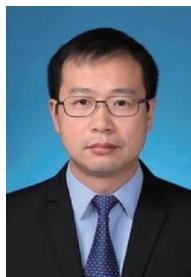
SHAO T B, GUO W P, XI Y H, et al. Design and performance evaluation of large range spectral confocal displacement sensor [J]. China laser, 2022, 49 (18) : 8. (in Chinese)

nese)

(本文编辑:朱俊真)



第一作者: 刘汉戈 (1997—), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 2019年于长春理工大学机电工程学院获得学士学位, 现就读于长春理工大学光电工程学院, 主要研究方向为光机结构设计、光电检测技术、误差分析、光学设计。



通讯作者: 闫钰锋 (1978—), 男, 吉林长春人, 教授, 工学博士, 博士生导师, 2010于长春理工大学测试计量技术与仪器专业获得博士学位, 主要研究方向为光机结构设计、光电检测技术、仪器精度分析、光学测量、光电仪器设计、精密光电测量技术等。