

深孔零件轴线直线度误差的在线测量与评定 技术研究

沈文华 王西彬 钱泳豪 刘志兵* 宋慈

北京理工大学机械与车辆学院,北京,100081

摘要:为实现深孔零件轴线直线度误差的精准在线测量,融合电涡流位移传感器、电磁超声换能器、旋转编码器和激光干涉仪构建了一种多传感器集成式在线测量系统。通过分析空间样点集的排列分布状态,提出了基于正余弦分布特性的粗大误差过滤法,并利用卡尔曼滤波法降低了随机误差的影响,获得了更接近零件真实轮廓的数据信息。以逼近最小区域为原则,将轴线直线度误差评定转化为参数优化问题,并采用改进斑马优化算法对该问题进行求解。经商用激光跟踪仪的对比测量实验,开发测量系统在1500 mm的深孔零件(内径为150 mm)长度范围内的测量误差仅为0.053 mm,直线度测量误差小于0.065 mm/m,满足企业要求的直线度误差0.15 mm/m,能够有效指导深孔零件的加工过程。

关键词:深孔零件;轴线直线度误差;多传感器集成式在线测量;改进斑马优化算法

中图分类号:TH161.12

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Online Measurement and Evaluation of Axial Straightness Errors for Deep-hole Parts

SHEN Wenhua WANG Xibin QIAN Yonghao LIU Zhibing* SONG Ci

School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081

Abstract: To realize the accurate online measurement of axis straightness errors for deep-hole parts, a multi-sensor integrated measurement system was constructed by eddy current displacement sensors, electromagnetic ultrasonic transducer, rotary encoder and laser interferometer. By analyzing the arrangement and distribution of spatial sample points, a rough error filtering method was proposed based on sine and cosine distribution characteristics, and the influences of random errors were reduced by Kalman filtering method, and data information closer to the real contour of parts was obtained. Based on the principle of approaching the minimum area, the evaluation of axis straightness errors was transformed into a parameter optimization problem, and the IZOA was adopted to solve this problem. In the comparative measurement experiments of commercial laser trackers, the measurement error of the developed measurement system is only 0.053 mm in the length range of 1500 mm deep-hole parts (with an inner diameter of 150 mm), and the straightness measurement errors are less than 0.065 mm/m, which meets the requirements of enterprises (0.15 mm/m) and may effectively guide the machining processes of deep-hole parts.

Key words: deep-hole part; axis straightness error; multi-sensor integrated online measurement; improved zebra optimization algorithm (IZOA)

0 引言

随着现代装备制造业的高速发展,兵器、航空、船舶、冶金和汽车等领域对长径比大于10的高精度深孔零件提出了迫切需求^[1-2]。典型的深孔零件有火炮身管、飞机起落架、船舶曲轴、冶金辊子、发动机气缸等。相较于其他普通孔类零件,深孔零件的加工和检测过程存在明显差异性特点^[3]:①过长的切削行程使得零件内部排屑困难,

轴线极易因刀具受力不均匀而产生偏斜;②过大的长径比造成零件内腔处于封闭状态,常用的传感测量设备难以直接且稳定地观察到表面轮廓。因此,如何实现对深孔零件轴线直线度误差的精准测量成为研究重点,对判断零件质量以及加工过程中的辅助纠偏均具有重要意义。

当前,对深孔零件轴线直线度误差的测量方法主要分为接触式和非接触式。前者利用传感器测头接触深孔零件以获得对应的内表面信息^[4],典型的测量工具包括塞规、三坐标测量机、水平仪等。然而,这种模式具有测量范围小、测量精度

收稿日期:2024-09-20

基金项目:国家自然科学基金(52075042)

低、测量速度慢、灵活性差、易划伤已加工表面、需脱离生产现场等弊端,且依赖于测量人员的操作经验,难以满足高精度的测量需求。随着电磁、光学、涡流、图像处理等新兴技术的发展,非接触式测量设备开始逐渐应用于误差测量领域,能够在传感器不接触被测表面的情况下扫描获得测量点集,更保持着高灵活性、高精确性和高灵敏性。CHEN等^[5]将4个位移传感器安装在被测件两侧相对布置的滑块上,成功分离了机床导轨的运动误差,得到了被测件真实轮廓。DENKENA等^[6]基于电涡流位移传感器、旋转编码器、光纤布拉格光栅传感器、位移编码器设计了深孔轴线直线度误差测量系统,能够对加工过程中镗杆的弯曲与位置变化进行有效提示。YOKOTA等^[7]采用数字全息干涉技术,通过测量并比较多色强度图像和深孔内壁的截面轮廓图,实现了对深孔内壁轮廓的形貌采集。尽管这些现存的测量系统均获得了良好的测量精度,但仍然存在一定的应用局限性,例如:传感器的辅助装置仍不可避免地会在零件表面产生划痕、在面对较差的测量环境时难以保证测量稳定性、尺寸上的限制导致多传感器的集成难度极大。因此,对高适用性、强抗干扰能力的误差测量系统的研究仍然是有必要的。

面向相同的测量点集,使用不同的误差评定方法会得到不同的评定结果^[8]。两端连线法与最小二乘法是常用的轴线直线度误差评定方法,前者在实际应用中的稳定性较差,且在测量点集分布复杂的状态下会失去判断能力;而后者及其改进方法^[9-10]会因并不满足最小区域的设定原则而获得略大于实际值的评定结果。最小区域法能够获得最小且唯一的直线度误差,但如何获取最小区域并没有统一规范。文献[11-14]分别提出了连续逼近算法、半无限性规划算法、半定规划算法以及内定算法模型用于确定最小区域。ZHANG等^[15]则将空间中的测量点集投影至平面内,求得投影后测量点集的最小区域圆。陈晖等^[16]同样基于投影原理提出了一种旋转投影法,改善了投影法的评定效率。CHO等^[17]构建了一种线性数据包络分析的数学模型,将所有测量点集从有效边界与无效边界进行包络运算,得到了三维空间内的最小区域。HUANG^[18]通过建立测量点集的凸包,采用凸包顶点在最小区域原则下确定了三维直线度。

本文围绕深孔零件轴线直线度误差的在线测量与精准评定,分析了轴线直线度误差的测量原理,构建了一种多传感器集成式在线测量系统。

在最小区域原则的基础上设计了误差评定模型,并提出了一种改进斑马优化算法用于评定问题的求解。最后,通过实验验证了在线测量系统和误差评定方法的有效性。

1 轴线直线度误差

深孔零件的直线度误差一般指轴线直线度误差。深孔零件的轴线是一条空间直线,属于提取元素,由被测圆柱面的若干横截面的中心轨迹提取得到^[8]。轴线直线度误差属于任意方向的直线度误差(空间直线度误差),定义为包容实际轴线的最小圆柱面的直径,指被测提取直线相对于其理想直线在任意方向上存在的变动量。

如图1所示, L_m 为被测深孔提取轴线, S_m 为被测横截面, Z_s 为被测提取轴线的最小包容圆柱,其直径 f_s 即为轴线直线度误差。

在线测量旨在通过生产现场的直接测量来获取深孔零件的高精准表面轮廓数据点集,而误差评定则是利用该点集建立最小包络区域的过程。

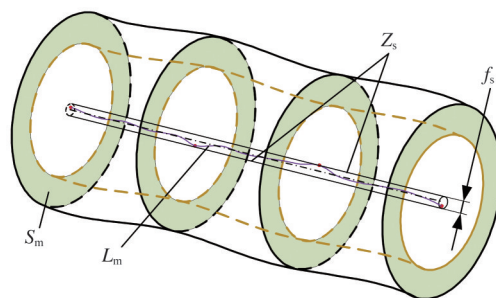


图1 轴线直线度误差示意图

Fig.1 Schematic diagram of axis straightness error

2 多传感器集成式在线测量系统

测量系统依托自身的夹持柄固定于车床刀架上,应用于数控车床经卡盘等夹具带动深孔零件做回转运动的加工现场,主要由测量单元、滑移单元和标定单元组成,如图2所示。

2.1 测量单元

测量系统中的各传感器通过有效识别被测零件的形状和位置特征,将感知信息按照一定规律转化为系统的可用物理信号,构建起系统与零件间的信息交互渠道。采用KEYENCE公司的EX-V10型电涡流位移传感器,其测量范围能够达到10 mm。固定于主壳机构上的零声公司的TG-1电磁超声换能器用于深孔零件壁厚的测量,其测量范围为0~150 mm,测量精度为0.5 mm/m。RENISHAW公司的XL-80系列激光干涉仪,测量范围为0~80 m,配合固定于车床主轴

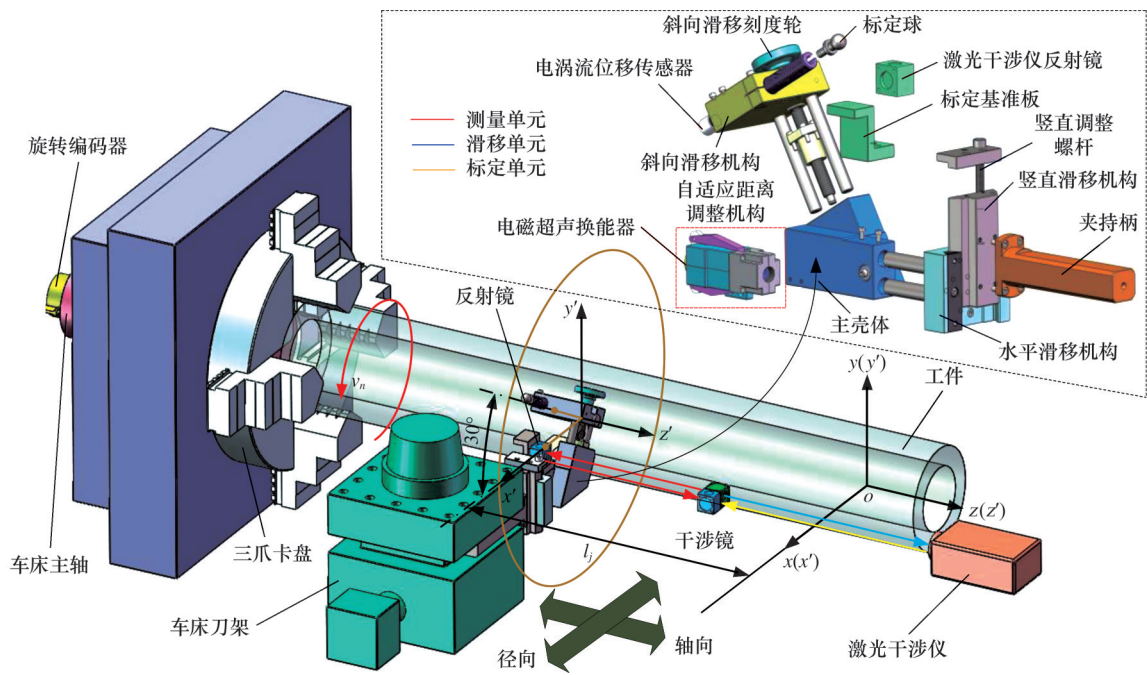


图2 多传感器集成式在线测量系统

Fig.2 Multi-sensor integrated online measurement system

末端的KEYENCE公司的增量式旋转编码器共同发挥作用,记录测量过程中的轴向位移与角位移。测量系统的测量不确定度分析与测量传感器的示值误差有关,各传感器的重复性和示值误差见表1。

表1 各传感器的重复性和示值误差

Tab.1 Repeatability and indication error of each sensor

传感器	重复性	示值误差
电涡流位移传感器	1 μm	0.015 mm
旋转编码器	1''	20''
激光干涉仪	0.01 μm	0.5 μm/m

电磁超声换能器和电涡流位移传感器两者的轴线位于同一竖直平面内,以保证整个测量过程中它们的测量对象始终一致,即为零件上某一确定的横截面。电磁超声换能器的轴线处于水平位置,而电涡流位移传感器的轴线与其间隔30°,以使它们各自适配的工作条件不发生干涉,稳定测量状态。

2.2 滑移单元

电涡流位移传感器的测量值只有位于自身的量程范围内才是有效可靠的,电磁超声换能器需要与工件间保持一定的有效距离以分离声波、稳定测量过程。因此,利用滑移单元使两个传感器的运动形式不局限于随测量系统和车床刀架在测量空间范围内的径向或轴向直线运动,还表现出了独立于测量系统的在某个确定方向上的自主滑移。其中,斜向滑移机构主要用于电涡流位移传感

器的自主调整,具有两个空间自由度,对应于沿电涡流位移传感器轴线方向和垂直于电涡流位移传感器轴线方向。同样地,竖直滑移机构和水平滑移机构被用于调整电磁超声换能器的空间位置。

2.3 自适应距离调整单元

大型深孔零件由于其极端的轴向尺寸,在加工工艺过程中的外圆跳动一般较大,需让超声探头与工件保持一段相对稳定的提高距离。因此,有必要设计一种能够针对不同尺寸的深孔零件以及同一零件不同的加工阶段均能实现提高距离的自适应调整与控制的机构,保证超声探头的测量精度。

图3所示是自适应距离调节机构的结构。其中,超声探头通过螺纹与传感器基座相连,基座上的钳形机构通过滑轮与被测深孔零件外圆贴合,不仅能够控制探头与深孔间的距离位于探头有效提高距离范围内,且可以保证测量过程中探头与所测截面对心。

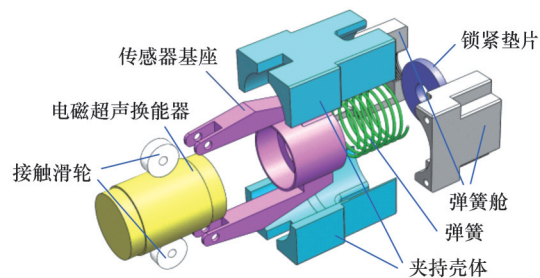


图3 自适应距离调整机构结构

Fig.3 Structure of self-adaptive distance adjustment mechanism

自适应距离调整单元的距离调整原理见图4,当探头与基座通过螺纹配合时,其端面与基座间基准距离 d_p 恒定,由此确定的基座基准面和与深孔零件接触的滑轮中心距离为 d_s ,滑轮中心与探头中心距离 d_c 恒定。若所测深孔零件外径为 R_e ,探头所测零件壁厚差为 h_d ,滑轮的半径为 r_c ,则提高距离为

$$h_L = \frac{d_c}{\tan \theta} - R_e - d_p + d_s \quad (1)$$

$$\theta = \arcsin \frac{d_c}{R_e + r_c} \quad \theta \in (0, \frac{\pi}{2})$$

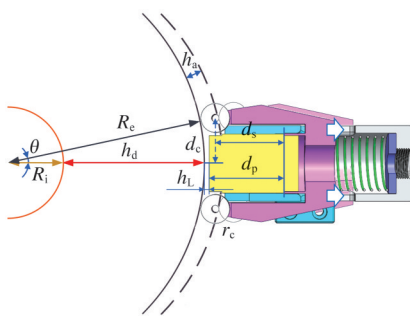


图4 自适应距离调整机构提高距离控制原理

Fig.4 Lift-off distance control principle of self-adaptive distance adjustment mechanism

式(1)表明,通过确定自适应距离单元尺寸,即当 r_c 、 d_c 、 d_p 、 d_s 均恒定时,提高距离 h_L 仅取决于被测深孔零件的外径 R_e 。同样地,当确定所测零件的尺寸范围后,通过调整自适应距离单元的尺寸即可在不更换探头的条件下稳定提高效应,实现测量范围的扩展。

2.4 标定单元

系统以电涡流位移传感器和超声探头两者轴线的交点作为测量坐标系原点 o' 。点 o' 与电涡流位移传感器发射端间的距离值 L 是获取形状误差的中间参量,有助于精准反映被测零件横截面的尺寸信息。该参数可以通过组合使用标定单元中的标定球和标定基准板实现测定。在测量系统装配完成后,分别使用三坐标测量机对标定球半径 r_1 、电涡流位移传感器发射端到标定球末端的距离值 l_1 以及标定基准板的基准平面到超声探头轴线的距离值 h_2 进行测量。 L 取决于标定基准板的基准平面到标定球下端的距离值 h_1 的变化:

$$L = 3r_1 + 2h_1 + 2h_2 - l_1 \quad (2)$$

在初始测量截面上,通过径向调整车床刀架与测量系统的滑移单元,在满足电涡流位移传感器和电磁超声换能器使用条件的前提下,使两者轴线的交点与车床的回转中心重合,并在整个测量过程中保持各传感器与刀架间的相对位置关系恒定。以点 o' 为原点建立的测量坐标系为

$o'x'y'z'$, z' 坐标轴与工件轴线平行, x' 坐标轴为测量截面的水平方向, y' 坐标轴为测量截面的竖直方向。同时,将初始测量截面上的测量坐标系作为绝对坐标系 $oxyz$ 。数控车床带动深孔零件以较低且恒定的转速做回转运动,旋转编码器通过PMAC控制卡触发电涡流位移传感器和电磁超声换能器进行等角度采样。

电涡流位移传感器测得零件外表面上对应测量点到传感器发射端的位移值 e ,以此描述零件外表面的实际轮廓;电磁超声换能器测得零件的壁厚值 h (即测量坐标系 x' 轴方向上零件外表面到对应内表面的距离值),从而根据几何关系实现对零件内表面轮廓的描述。在这种测量模式下,测量系统真正与零件间实现了无接触,且无需进入深孔零件内部即可完成测量任务。在第 j 个测量截面上,两传感器记录的第 i 个测量值分别为 e_{ji} 和 h_{ji} 。

通常来讲,电涡流位移传感器和电磁超声换能器在动态测量过程中得到的测量数据均会包含一些噪声误差。这些误差按照误差形成原因可分为两种类型,一类为由于测量人员的使用不当或外界测量条件不稳定,例如巨大的外界冲击、传感器自身电源的突变干扰,机械振动等因素造成的粗大误差,另一类为由零件各部分对应的表面质量不一致而导致的随机误差,如图5所示。这些误差的存在会降低数据的准确性,使其不足以反映零件的真实几何形貌。有效的滤波手段可以去除粗大误差以及降低随机误差影响。

对于已经完成一些加工工序的零件,其表面并不会存在较大的凸起或凹陷,因此,零件截面的几何形状视作是相对均匀且缓慢变化的。当零件上的测量样点数量足够多、分布足够密集时,两传感器记录的相邻测量数据在数值上均不会发生明显浮动。但如果存在粗大误差,相邻测量数据间的数值变化会远远超过正常情况。同时,两传感器的测量点集实际上均是在测量中心偏离理想截面圆心的情况下完成的,因而它们的排列分布遵循正余弦特性。基于这些规律,按照下式分别构建 e_{ji} 和 h_{ji} 对应的一阶差分预测值 e'_{ji} 和 h'_{ji} :

$$\left. \begin{aligned} e'_{ji} &= L - R_{out} \\ (L - e'_{ji} - h'_{ji})^2 - (R_m^2 + a^2 + b^2) &= \\ 2aR_m \cos \alpha_i - 2bR_m \sin \alpha_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: R_m 、 R_{out} 分别为内、外轮廓半径; a 、 b 为圆心偏移参数; α_i 为第 i 个样点的角度。

若物理量的测量值与预测值之差超过了对应的最大误差限(位移 e_{max} ,厚度 h_{max}),则对应数据将

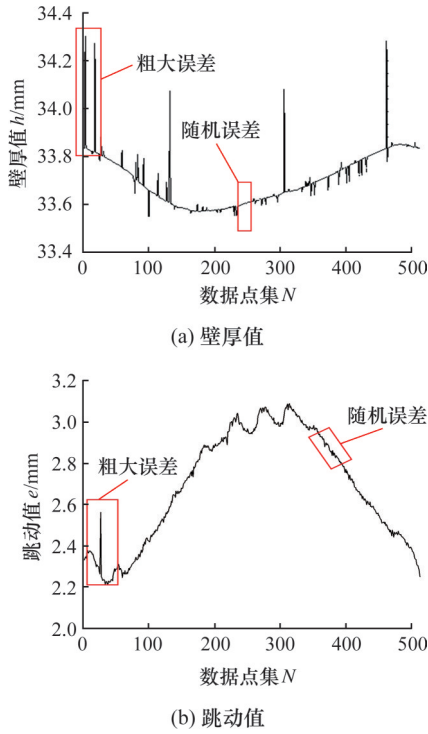


图5 粗大误差与随机误差

Fig.5 Gross error and random error

被判定为粗大误差,并以预测值取代测量值。去除粗大误差后的位移测量值 e_{ji}'' 和厚度测量值 h_{ji}'' 为

$$e_{ji}'' = \begin{cases} E_e(i) & |e_{ji} - e_{ji}'| > e_{\max} \\ e_{ji} & |e_{ji} - e_{ji}'| \leq e_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$h_{ji}'' = \begin{cases} E_h(i) & |h_{ji} - h_{ji}'| > h_{\max} \\ h_{ji} & |h_{ji} - h_{ji}'| \leq h_{\max} \end{cases}$$

卡尔曼滤波是一种高效的自回归滤波器,它能在存在诸多不确定性情况的组合信息中估计动态系统的状态,能够实现对系统真实状态的最优估计,在降低随机误差影响方面具有极大的优势。对于由 e_{ji}'' 和 h_{ji}'' 构成的两个离散线性系统,位移测量系统的预测状态 e_{ji}''' 、测量值 e_{ji}'' 与厚度测量系统的预测状态 h_{ji}''' 、测量值 h_{ji}'' 表示为

$$\left. \begin{aligned} e_{ji}''' &= \Phi_{ji,i-1}^e e_{ji}'' + W_{ji(i-1)}^e \\ e_{ji}'' &= N_{ji}^e e_{ji}''' + V_{ji}^e \\ h_{ji}''' &= \Phi_{ji,i-1}^h h_{ji}'' + W_{ji(i-1)}^h \\ h_{ji}'' &= N_{ji}^h h_{ji}''' + V_{ji}^h \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\Phi_{ji,i-1}^e$ 、 $\Phi_{ji,i-1}^h$ 分别为位移测量系统和厚度测量系统的状态转移系数; N_{ji}^e 、 N_{ji}^h 为两系统的状态变量到观测量的转移系数; $W_{ji(i-1)}^e$ 、 $W_{ji(i-1)}^h$ 为两系统的动态噪声; V_{ji}^e 、 V_{ji}^h 为两系统的测量噪声,两类噪声均服从高斯分布,且互不相关。

进一步地,应用于该系统的卡尔曼滤波算法可以表述为

$$\left. \begin{aligned} \hat{e}_{ji}''' &= \Phi_{ji,i-1}^e \hat{e}_{j(i-1)}''' \\ \hat{h}_{ji}''' &= \Phi_{ji,i-1}^h \hat{h}_{j(i-1)}''' \\ P_{ji/(i-1)}^e &= \Phi_{ji,i-1}^e P_{j(i-1)}^e (\Phi_{ji,i-1}^e)^T + Q_{ji}^{Te} \\ P_{ji/(i-1)}^h &= \Phi_{ji,i-1}^h P_{j(i-1)}^h (\Phi_{ji,i-1}^h)^T + Q_{ji}^{Th} \\ K_{ji}^e &= P_{ji/(i-1)}^e (N_{ji}^e)^T (N_{ji}^e P_{ji/(i-1)}^e (N_{ji}^e)^T + Q_{ji}^{Te})^{-1} \\ K_{ji}^h &= P_{ji/(i-1)}^h (N_{ji}^h)^T (N_{ji}^h P_{ji/(i-1)}^h (N_{ji}^h)^T + Q_{ji}^{Th})^{-1} \\ P_{ji}^e &= (I - K_{ji}^e N_{ji}^e) P_{ji/(i-1)}^e \\ P_{ji}^h &= (I - K_{ji}^h N_{ji}^h) P_{ji/(i-1)}^h \\ \hat{e}_{ji}'' &= \hat{e}_{ji}''' + K_{ji}^e (e_{ji}'' - H_{ji}^e \hat{e}_{ji}''') \\ \hat{h}_{ji}'' &= \hat{h}_{ji}''' + K_{ji}^h (h_{ji}'' - H_{ji}^h \hat{h}_{ji}''') \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: \hat{e}_{ji}''' 、 \hat{h}_{ji}''' 分别为第 i 个测量位置处位移和厚度数据的最优估计,将它们视作去除随机误差后的位移测量值和厚度测量值; $\hat{e}_{j(i-1)}'''$ 、 $\hat{h}_{j(i-1)}'''$ 分别对应位移测量系统和厚度测量系统中由第 $i-1$ 个测量位置数据的最优估计得到的第 i 个测量位置数据的预测值; $P_{ji/(i-1)}^e$ 、 $P_{ji/(i-1)}^h$ 分别为 $\hat{e}_{j(i-1)}'''$ 和 $\hat{h}_{j(i-1)}'''$ 的协方差; $P_{j(i-1)}^e$ 、 $P_{j(i-1)}^h$ 分别为预测的位移测量值与厚度测量值的误差协方差; P_{ji}^e 、 P_{ji}^h 分别为位移测量值和厚度值更新后的误差协方差; Q_{ji}^{Te} 、 Q_{ji}^{Th} 为两系统动态噪声的协方差; Q_{ji}^{Te} 、 Q_{ji}^{Th} 对应两系统测量噪声的协方差; K_{ji}^e 、 K_{ji}^h 为两系统的卡尔曼滤波增益; H_{ji}^e 、 H_{ji}^h 为两系统的观测值。

取测量系统的一组原始测量数据为样本,经误差滤波后的结果如图6所示。滤波后的数据值更贴近理想数据值,这说明经过滤波处理的样点集能够更好地反映深孔零件的真实轮廓。

由于电涡流位移传感器和电磁超声换能器间隔 30° 布置,因此在两者顺次记录的位移数据点集和厚度数据点集中,第 i 个测量值在零件空间中对的位置是不同的,也就是说,位移数据点集相对于厚度数据点集存在一定的空间滞后性。为补偿这种滞后性,将电涡流位移传感器记录的第 n_1 个测量值作为数据处理过程中第1个数据点,且与电磁超声换能器记录的第1个测量值相对应,即

$$e_{ji}^R = \begin{cases} \hat{e}_{j(n_1+i-1)}''' & i \leq n - n_1 + 1 \\ \hat{e}_{j(i-n+n_1-1)}''' & n - n_1 + 1 < i \leq n \end{cases} \quad (7)$$

$$h_{ji}^R = \hat{h}_{ji}'''$$

式中: e_{ji}^R 、 h_{ji}^R 分别为第 j 个测量截面上电涡流位移传感器和电磁超声换能器在数据处理过程中的第 i 个数据点。

由于多个测量截面是通过轴向移动刀架获得的,且整个测量过程中各传感器与刀架间不存在相对位置变化,因此测量坐标系仅相对于绝对坐标系在轴向上发生偏移。根据 e_{ji}^R 、 h_{ji}^R 、旋转编码器记录的旋转角度 θ_{ji} 和激光干涉仪记录的测量截面沿轴向的移动距离 l_j ,计算得到各数据点在绝对坐标系下的直角坐标值 (x_{ji}, y_{ji}, z_{ji}) :

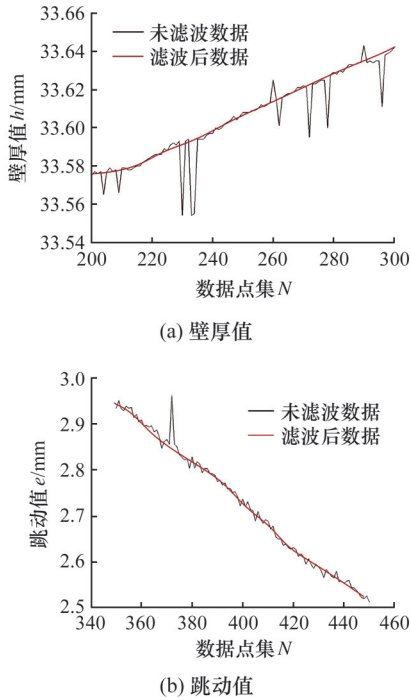


图6 数据滤波

Fig.6 Data filtering

$$\begin{cases} x_{ji} = (L - e_{ji}^R - h_{ji}^R) \cos \theta_{ji} \\ y_{ji} = (L - e_{ji}^R - h_{ji}^R) \sin \theta_{ji} \\ z_{ji} = L_j \end{cases} \quad (8)$$

3 基于改进斑马优化算法的误差评定

3.1 直线度误差评定模型

在统一的绝对坐标系下,求解出各测量截面的理想圆心 o_{j0} ,构成了被测提取轴线的离散控制点集 $\{(x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}) | j = 1, 2, \dots, N_a\}$ 。假理想基准直线 L_n 的方向向量为 (l_1, m_1, n_1) ,且经过点 (a_1, b_1, c_1) ,则按最小包容区域确定的理想基准直线方程的点向式表达为

$$\frac{x - a_1}{l_1} = \frac{y - b_1}{m_1} = \frac{z - c_1}{n_1} \quad (9)$$

式中:参数 $l_1, m_1, n_1, a_1, b_1, c_1$ 为待确定与优化的未知量。

各控制点到理想基准直线的距离为

$$d_j = \frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ x_{j0} - a & y_{j0} - b & z_{j0} - c \\ l_1 & m_1 & n_1 \end{vmatrix}}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}} \quad (10)$$

式中: d_j 是关于 $u = (x_{j0}, y_{j0}, z_{j0})$ 和 $v = (a_1, b_1, c_1, l_1, m_1, n_1)$ 的函数。

按最小区域原则评定空间直线度误差,本质上是通过寻找向量 u 和 v 使 $\max 2d_j$ 取得最小值,此时该评定过程转化为一个极大值极小化的问题,其优化函数为

$$f(a_1, b_1, c_1, l_1, m_1, n_1) = \min(\max 2d_j) \quad (11)$$

3.2 改进斑马优化算法

斑马优化算法(zebra optimization algorithm,

ZOA)是2022年提出的一种基于斑马群体行为的元启发式优化算法^[19],具有收敛速度快、寻优能力强等特点。图7展示了ZOA的具体流程。

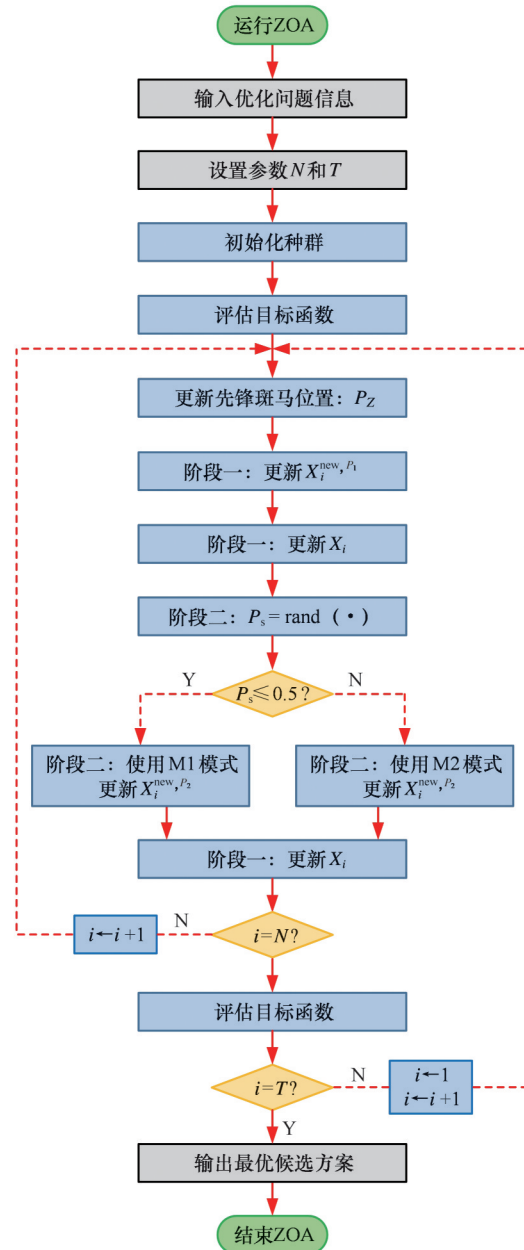


图7 ZOA流程图

Fig.7 Flow chart of ZOA

在ZOA寻优过程中,种群中的每只斑马代表优化问题的候选解,其所在的平原为优化问题的搜索空间,每只斑马在平原中的位置决定了决策变量的值。斑马种群的数学模型为

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} & \cdots & x_{1,m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,j} & \cdots & x_{i,m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,j} & \cdots & x_{N,m} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: X_i 为第 i 只斑马; $x_{i,j}$ 为第 i 只斑马针对第 j 个决策变量的值; N 为种群中斑马的数量; m 为决策变量的数量。

每只斑马的目标函数值为

$$F = \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中： F_i 为第*i*只斑马得到的目标函数值。

在每次迭代过程中，斑马的位置以及目标函数的值都会更新，因此，在迭代前需要通过比较目标函数的取值，分析相应候选方案并找出针对不同决策变量的最优候选解。

在每次迭代过程中，模拟斑马在野外的两种自然行为（觅食与防御捕食者），种群的位置更新分两个阶段开展。

1)阶段一：觅食。平原斑马(pioneer zebra, PZ)是种群中的先锋，在觅食过程中它会吞食掉植被上层或是营养较少的树冠，为种群中其他需要进食的成员提供位置引导，带领种群其他成员在搜索空间内寻找新的位置。若新位置的食物更加丰富，即目标值优于当前位置的目标值，则接受此位置更新。因此，觅食阶段斑马的位置更新可表示为

$$\left. \begin{aligned} x_{i,j}^{new,P_1} &= x_{i,j} + r(P_{z_j} - Ix_{i,j}) \\ I &= \text{round}(1 + \text{rand}) \quad \text{rand} \in [0, 1] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new,P_1} & F_i^{new,P_1} < F_i \\ X_i & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中： X_i^{new,P_1} 为第*i*只斑马在觅食阶段更新后的位置； $x_{i,j}^{new,P_1}$ 为 X_i^{new,P_1} 的第*j*维值； F_i^{new,P_1} 为 X_i^{new,P_1} 在觅食阶段更新后的目标函数值； P_{z_j} 为先锋斑马的位置； r 为在区间 $[0, 1]$ 的随机数； $\text{round}(\cdot)$ 函数表示将数值四舍五入到最接近的整数； rand 函数表示生成特定范围内的随机数； I 为表示种群位置变化快慢的调节参数， I 越大，则斑马的位置流动越快。

2)阶段二：防御捕食者。当面对大型掠食者的攻击时，斑马会根据被攻击斑马(attacked zebra, AZ)的位置，以之字形或是侧向转弯逃走；而当斑马遭遇小型捕食者时，会采取进攻策略，它们通过聚集群体进行恐吓，即种群中的大部分斑马会向被攻击斑马的方向靠拢，建立防御阵型以赶走捕食者。斑马在草原上遭遇两类不同捕食者的概率被认为是相同的。在第一种防御策略中，斑马种群会在当前环境中躲避捕食者的攻击，这种策略可采用M1模式表示；在第二种防御策略中，斑马种群会朝着被攻击的斑马的位置移动，建立防御结构来威慑捕食者，采用M2模式表示阶段二中，斑马的位置更新可表示为。

$$x_{i,j}^{new,P_2} = \begin{cases} M1: x_{i,j} + R(2r - 1)(1 - \frac{t}{T})x_{i,j} & P_s \leq 0.5 \\ M2: x_{i,j} + r(A_{z_j} - Ix_{i,j}) & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new,P_2} & F_i^{new,P_2} < F_i \\ X_i & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中： X_i^{new,P_2} 为第二阶段更新后斑马位置； $x_{i,j}^{new,P_2}$ 为 X_i^{new,P_2} 的*j*维度值； F_i^{new,P_2} 为 X_i^{new,P_2} 在防御捕食者阶段更新后的目标函数值； t 为迭代次数； T 为最大迭代次数； R 为常数； P_s 为随机生成两种防御策略的概率； A_{z_j} 为当前被攻击的斑马位置。

在更新斑马位置时，如果斑马在新位置中的目标函数值更优，则接受该位置，即使用式(17)对斑马种群的位置更新进行建模。

在ZOA中，斑马种群在觅食阶段和防御小型捕食者阶段的位置更新取决于PZ与AZ的位置，而两者的位置则主要依赖于被大型捕食者攻击时的位置更新，具体由参数 $k = 1 - t/T$ 进行控制。线性收敛的参数 k 使得算法存在早熟而陷入局部最优的风险，且斑马种群依赖于PZ与AZ进行位置调整，使搜索后期群体多样性受损，影响寻优精度。为此，将线性收敛因子 k 更改为椭圆非线性收敛因子： $k = \sqrt{1 - (t/T)^2}$ ，使得整个优化过程的前期平稳过渡，后期搜索速度提高，既强化了优化前期的全局勘探能力，也提高了优化后期的局部开发精度。

进一步地，为验证本文提出的改进斑马优化算法(improved zebra optimization algorithm, IZOA)的可实现性，采用最新的五种优化算法：能量谷优化算法(energy valley optimizer, EVO)、淘金优化算法(gold rush optimizer, GRO)、开普勒优化算法(Kepler optimization algorithm, KOA)、光谱优化算法(light spectrum optimizer, LSO)、蜘蛛蜂优化算法(spider wasp optimizer, SWO)，使用CEC2017常用的9组测试函数对算法的全局搜索和局部搜索的性能进行对比^[20]。将各个算法的种群规模设置为30，最大迭代次数均设置为100。这样设置能够避免运行过程中由于种群规模或最大迭代次数不足导致某个算法未达到收敛值，影响实验的对比结果，也使得各算法优化结果的对比更具公平合理性。仿真测试结果如图8所示。

ZOA在处理多模态和混合基准测试函数时都表现出优秀的收敛速度与寻优精度，仅在针对单模态基准测试函数时收敛速度略低于LSO算法，在处理 $F_4(x_1, x_2)$ 时，寻优精度低于EVO算法。对于IZOA，其搜索得到的最优值与测试函数的理论值展现出了更好的一致性，寻优精度与收敛速度总体优于其他算法。IZOA相较于ZOA在处理部分测试函数($F_3(x_1, x_2)$ 、 $F_4(x_1, x_2)$ 、 $F_7(x_1, x_2)$ 、 $F_9(x_1, x_2)$)上的收敛速度与寻优精度

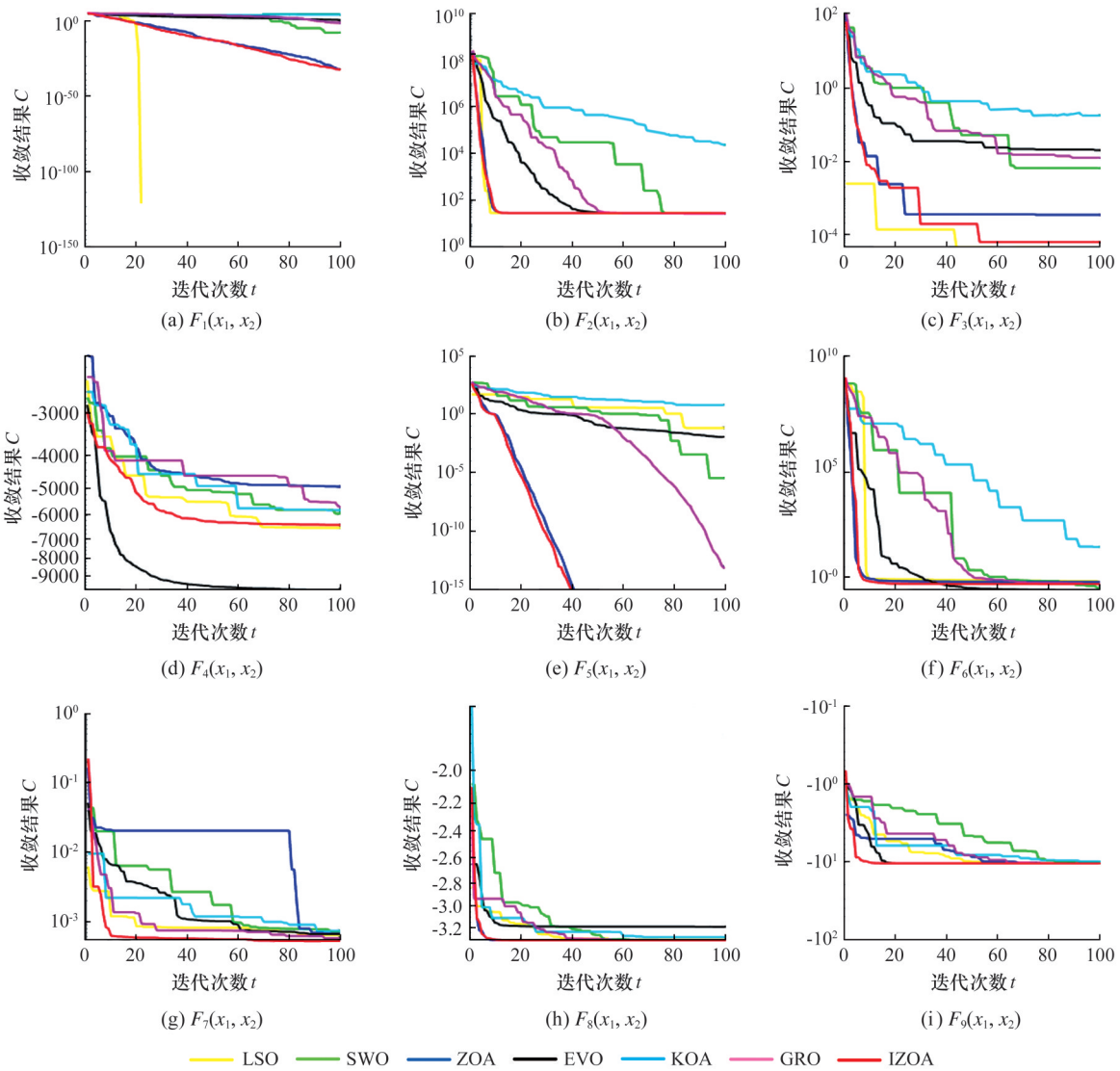


图8 仿真测试结果

Fig.8 Simulation test results

都有了显著提高。而在其他基准函数中,它表现出的寻优性能仅与ZOA间存有微小差异。虽然在实际运算过程中,IZOA相较于ZOA的寻优稳定性略微降低,但微小数量级的差异对实际优化过程中的影响较小,可以忽略。因此,IZOA可以被用于优化问题的求解。

3.3 模型有效性验证

采用IZOA评定轴线直线度误差的步骤如下:

- ①在搜索空间范围内初始化斑马种群,随机生成斑马的初始位置;
- ②按式(10)确定每个种群成员的适应度值;
- ③比较每一个种群成员的适应度值,并确立当前的最优值;
- ④根据IZOA流程更新PZ和AZ,重复步骤②和③,直至达到最大迭代次数;
- ⑤输出最优值对应的轴线直线度误差。

以内径150 mm、经粗镗后的深孔零件为测量对象,利用激光跟踪仪在轴向长度1500 mm的范围内每隔一定距离对内表面轮廓进行采样,每个

截面上的样点数量为50,并分别使用最小二乘法与IZOA对获得的测量点集进行误差评定。图9展示了两方法在不同轴向长度范围的轴线直线度误差评定结果。

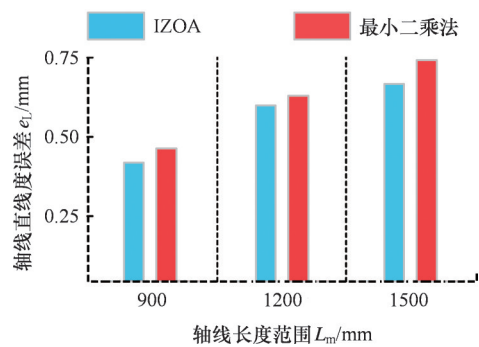


图9 误差评定算法对比

Fig.9 Comparison of error evaluation algorithms

对于一个相同的控制点集,IZOA的评定值均明显小于最小二乘法的评定值。这意味着IZOA搜索到了更符合实际的最小区域,在评定

轴线直线度误差的问题上是有效的。

4 实验研究

4.1 激光跟踪仪对照实验

为验证所开发测量系统的有效性,以内孔直径约 155 mm、外圆直径约 280 mm 的大型深孔零件为测量对象,对其半精加工后的形状误差进行在位检测,实验所用机床为企业工人进行精车工序和直线度手动测量的车床,满足测量实验所需的精度要求。由于激光跟踪仪的测量精度随靶球距激光跟踪头的距离增大而降低,为 $0.015 \text{ mm} + 0.005 \text{ mm/m}$,且靶球通过加长杆辅助进入深孔时,随着深入距离的增大,测量稳定性会降低,因此,取深孔前 2000 mm 范围进行对比实验。为激光跟踪仪靶球配置辅助加长杆,使得激光跟踪仪靶球能够进入深孔 1500 mm。将被测深孔两端放置于支撑架上,调整激光跟踪仪高度与位置,使得激光测头发出的光线能够从深孔一侧射入并从另一侧射出,使用热熔胶固定激光跟踪仪底座。

通过移动靶球测量内孔端面、端面法向量以及内孔端面圆心,得到测量坐标系 $OXYZ$,规定 Z 正方向为远离激光跟踪仪的深孔轴线方向, X 正方向为远离零件且平行于地面的深孔径向方向,并根据右手笛卡儿准则确定 Y 轴正方向。通过靶球加长杆与激光跟踪仪控制靶球移动距离,使其在激光跟踪仪可靠性测量范围内,每隔 $L_m = 300 \text{ mm}$ 确定一个内圆截面,在 1500 mm 的测量范围内获取 5 个内圆截面;并在截面附近采集若干靶点,舍弃距离截面大于 d_m 的点,获得 50 个靶点;将靶点投影至该内圆截面,使用最小二乘法拟合得到截面圆心,计算圆度误差。将这些点使用最小二乘法拟合构建截面圆柱,依此类推,在 1500 mm 的测量范围内获取 5 个拟合圆柱,提取所得各拟合圆柱的轴线,即可获得在测量范围内深孔零件的内圆轴线直线度,如图 10 所示。

4.2 测量系统测量实验

如图 11 所示,将开发的多传感器集成式在线测量系统置于数控车床上,并通过调节各组成单元使传感器处于可测量状态。深孔零件以及各测量截面均与 3.3 节中激光跟踪仪的测量对象保持一致。同时,为保证各截面样点数量相同,将触发式采集到的 1000 样点进行分组处理:每 20 个测量点分成一组,计算每组测量点的位移与厚度值平均值,得到 50 个新的测量点。

分别针对在线测量系统与激光跟踪仪测量得到的两个离散点集,采用最小二乘法拟合截面轮

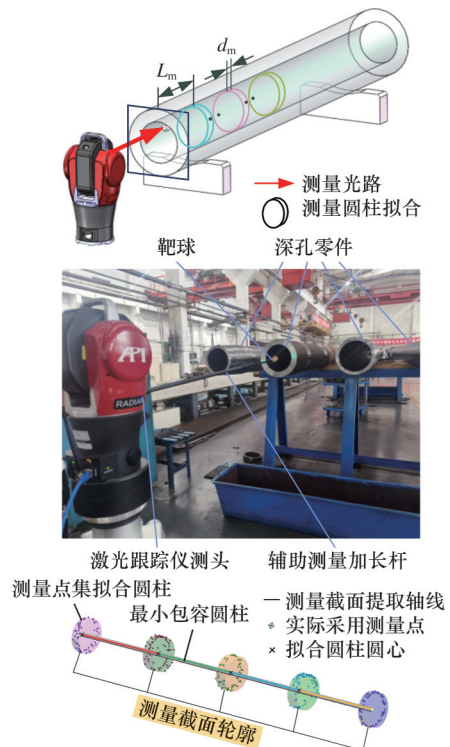


图 10 激光跟踪仪测量点采样

Fig.10 Sampling of measuring points of laser tracker

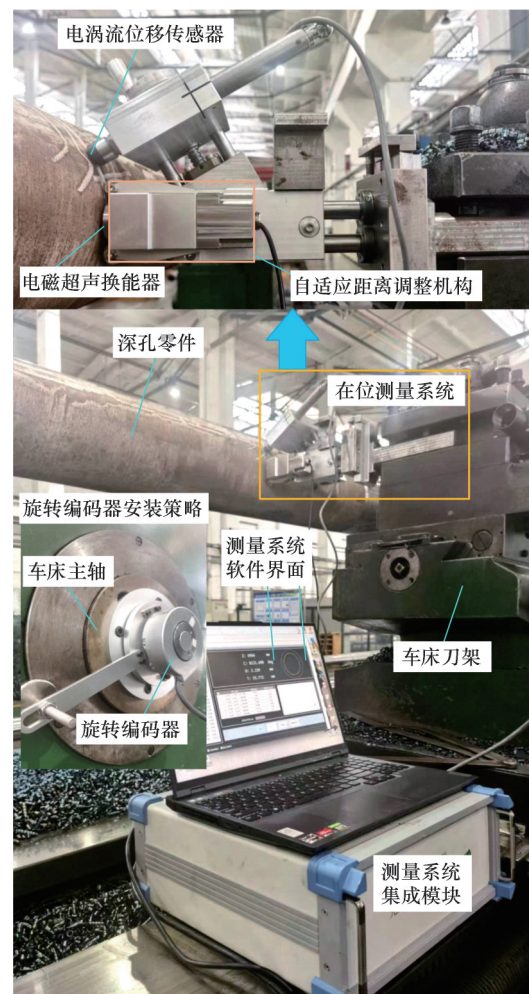


图 11 实验现场

Fig.11 Experimental site

廓以获取理想圆心,连接各截面圆心以构建提取轴线,如图12所示。两个提取轴线在空间范围内仅存在由于测量坐标系不同所导致的某方向上的位置偏差,其各向投影的趋势变化几乎相同。因此,可以判定测量系统能够准确确定各测量截面圆心所处的空间位置。

进一步地,分别在900 mm、1200 mm和1500 mm的测量长度范围内采用IZOA评定轴线直线

度误差。表2展示了两测量系统测得的轴线直线度误差与企业提供的被测件直线度误差标准值。随着测量长度的增大,两者所测量获得的轴线直线度误差均有上升的趋势。在线测量系统与商用激光跟踪仪的最大测量偏差为0.053 mm,对于150 mm内孔直径以及900 mm以上轴向长度的深孔零件是可以被接受的。

表2 两测量系统测得的轴线直线度误差

Tab.2 Axis straightness errors measured by

two measurement systems mm

测量长度	轴线直线度误差		
	在线测量系统	激光跟踪仪	标准值
900	0.452	0.419	0.430
1200	0.581	0.603	0.590
1500	0.717	0.664	0.670

综上所述,开发的测量系统能够适用于深孔零件轴线直线度误差的在线测量,且测量结果是可靠的。

5 结论

本文构建了一种全新的多传感器集成式在线测量系统,并为其配备了完整的使用模式。该系统能够在不介入深孔零件内腔的情况下对零件内表面和外表面的轮廓信息进行采集。实验表明,在线测量系统的测量精度达0.065 mm/m,针对同一深孔零件(内径150 mm)的相同测量截面,分别使用多传感器集成式在线测量系统和激光跟踪仪对其轴线直线度误差进行测量与评定,两者的被测提取轴线的投影趋势保持着良好的一致性,且在1500 mm的轴向长度范围内两者的误差仅为0.053 mm。开发的在线测量系统能够精准且可靠地完成形状误差测量任务,有助于深孔加工过程中工序间的辅助纠偏和质量判别。

参考文献:

[1] 李超,孔令飞,梁炎明,等. 基于刀具振动模式特征的深孔圆度误差预测方法[J]. 兵工学报, 2018, 39(2):364-372.
 LI Chao, KONG Lingfei, LIANG Yanming, et al. Prediction Method for Roundness Error of Machined Deep-hole Based on Vibration Behaviors of Cutting Tools [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(2): 364-372.

[2] 孔令飞,牛晗,侯晓丽,等. 锯齿内排屑刀具深孔加工中的刀具振动特性对孔圆度形貌的作用机制[J]. 兵工学报, 2016, 37(6):1066-1074.
 KONG Lingfei, NIU Han, HOU Xiaoli, et al. Influence of Tool Vibration Characteristics on the Hole

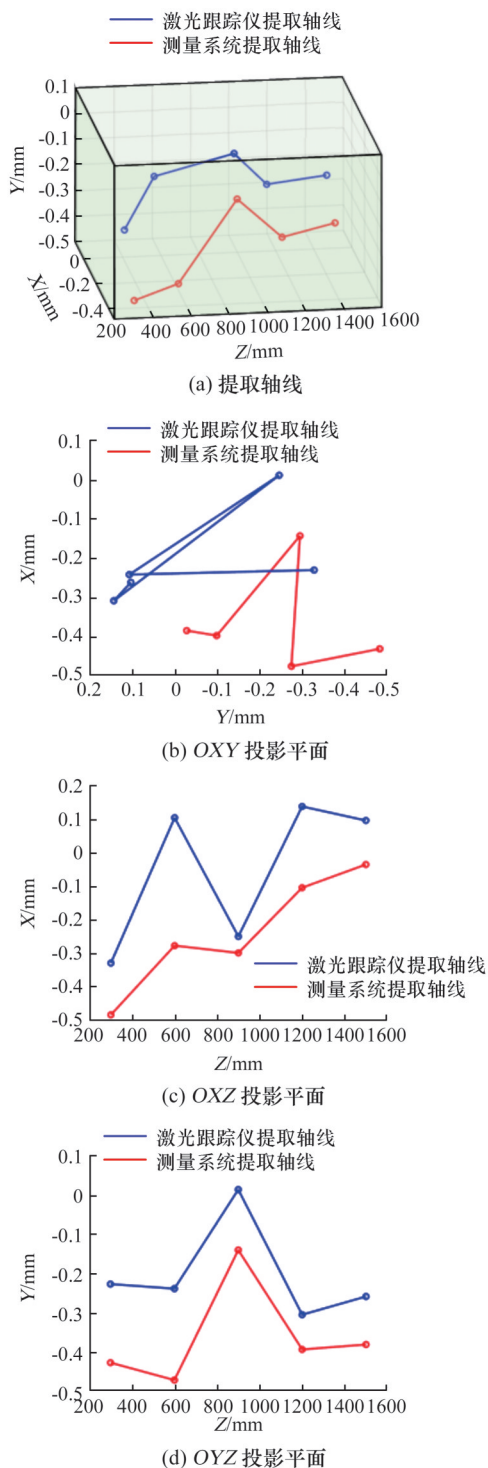


图12 两测量系统的提取轴线

Fig.12 Extraction axes of two measurement systems

- Roundness Morphology in BTA Deep-hole Drilling [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(6):1066-1074.
- [3] KONG Lingfei, CAO Shuai, CHIN J H, et al. Vibration Suppression of Drilling Tool System during Deep-hole Drilling Process Using Independence Mode Space Control[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 151:103525.
- [4] CHANG T Y, LIAO Y S, LIU W C. Development of a Micro Hole Measuring System Based on the Capacitance Principle[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(10):105104.
- [5] CHEN Yuanliu, NIU Zengyuan, MATSUURA D, et al. Implementation and Verification of a Four-probe Motion Error Measurement System for a Large-scale Roll Lathe Used in Hybrid Manufacturing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(10):105004.
- [6] DENKENA B, BERGMANN B, KAISER S, et al. Process-parallel Center Deviation Measurement of a BTA Deep-hole Drilling Tool[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 24:229-234.
- [7] YOKOTA M, KOYAMA T, TAKEDA K. Digital Holographic Inspection System for the Inner Surface of a Straight Pipe[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 97:62-70.
- [8] 倪晓骅. 形状误差评定和测量不确定度估计[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
- NI Xiaohua. Evaluation of Shape Error and Estimation of Measurement Uncertainty [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [9] LEI Xianqing, ZHANG Chunyang, XUE Yujun, et al. Roundness Error Evaluation Algorithm Based on Polar Coordinate Transform [J]. *Measurement*, 2011, 44(2):345-350.
- [10] 张春阳, 雷贤卿, 李济顺, 等. 基于几何优化的圆度误差评定算法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(12):8-12.
- ZHANG Chunyang, LEI Xianqing, LI Jishun, et al. Method for Roundness Error Evaluation Based on Geometry Optimization [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(12):8-12.
- [11] ZHU L M, DING H, XIONG Y L. Distance Function Based Algorithm for Spatial Straightness Evaluation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2003, 217(7):931-939.
- [12] ZHU L M, DING Y, DING H. Algorithm for Spatial Straightness Evaluation Using Theories of Linear Complex Chebyshev Approximation and Semi-infinite Linear Programming [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, 128(1):167-174.
- [13] DING Y, ZHU L M, DING H. A Unified Approach for Circularity and Spatial Straightness Evaluation Using Semi-definite Programming [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(10):1646-1650.
- [14] DING Y, ZHU L M, DING H. Semidefinite Programming for Chebyshev Fitting of Spatial Straight Line with Applications to Cutter Location Planning and Tolerance Evaluation [J]. *Precision Engineering*, 2007, 31(4):364-368.
- [15] ZHANG Cong, DUAN Fajie, FU Xiao, et al. Research of Intelligent Segment-fitting Algorithm for Increasing the Measurement Accuracy of Quadrant Detector in Straightness Measuring System [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 125:106062.
- [16] 陈晖, 刘志兵, 王西彬. 旋转投影法评定孔类零件轴线直线度误差 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(7):147-152.
- CHEN Hui, LIU Zhibing, WANG Xibin. Evaluation of Axis Straightness Error of Hole Parts by Rotating Projection Method [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(7):147-152.
- [17] CHO S, KIM J Y. Straightness and Flatness Evaluation Using Data Envelopment Analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(5):731-740.
- [18] HUANG J. An Exact Minimum Zone Solution for Three-dimensional Straightness Evaluation Problems [J]. *Precision Engineering*, 1999, 23(3):204-208.
- [19] TROJOVSKÁ E, DEGHANI M, TROJOVSKÝ P. Zebra Optimization Algorithm: a New Bio-inspired Optimization Algorithm for Solving Optimization Algorithm [J]. *IEEE Access*, 2022, 10:49445-49473.
- [20] SONG C, WANG X B, LIU Z B, et al. Evaluation of Axis Straightness Error of Shaft and Hole Parts Based on Improved Grey Wolf Optimization Algorithm [J]. *Measurement*, 2022, 188:110396.

(编辑 王曼玥)

作者简介:沈文华,男,1984年生,硕士研究生。主要研究方向为精密切削与测量。E-mail:7420161117@bit.edu.cn。刘志兵*(通信作者),男,1977年生,教授、博士研究生导师。主要研究方向为先进切削、精密微型制造、绿色制造、机器人加工、深孔精密测量等。E-mail:liuzhibing@bit.edu.cn。

本文引用格式:

沈文华,王西彬,钱泳豪,等. 深孔零件轴线直线度误差的在线测量与评定技术研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(9):2011-2021.

SHEN Wenhua, WANG Xibin, QIAN Yonghao, et al. Research on Online Measurement and Evaluation of Axial Straightness Errors for Deep-hole Parts [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(9):2011-2021.