

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314880

全金属螺杆钻具定子内轮廓测量系统的设计与测试*

仝宇博 王洪喜 唐 霖 李栋栋 田慧慧

(西安工业大学机电工程学院精密与超精密加工及测量国家地方联合工程研究中心 西安 710021)

摘要: 定子复杂的内轮廓型面与狭长的空间,导致在全金属螺杆钻具定子加工与使用后对截面轮廓进行精密测量存在困难,对此研究了一种螺杆钻具定子内轮廓测量系统。其中机械系统采用了平行四边形机构实现定心功能,使用激光位移传感器和角度位移传感器获取定子截面径向位置坐标,通过 ARM 开发板采集数据并传给上位机进行数据处理,搭建了测量系统的软、硬件平台。实验结果显示设计的测量系统的测量精度为 ± 0.03 mm,测量内轮廓一个截面的时间在 60 s 以内,能适应内径为 98~180 mm 的螺杆钻具定子内轮廓的测量精度要求。

关键词: 定子内轮廓;测量系统;误差评估;偏心补偿

中图分类号: TE937 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Design and testing of a stator internal contour measurement system for all-metal screw drilling tools

Tong Yubo Wang Hongxi Tang Lin Li Dongdong Tian Huihui

(National and Local Joint Engineering Research Center for Precision and Ultra-precision Machining and Measurement, School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The intricate internal contour profile and narrow space of the stator make it difficult to accurately measure the cross-sectional profile after the stator processing and use of the all-metal screw drilling tool, and a stator internal contour measurement system of the screw drilling tool was studied. Among them, the mechanical system adopts a parallelogram mechanism to realize the centering function, uses a laser displacement sensor and angular displacement sensor to obtain the radial position coordinates of the stator section, collects data through the ARM processor, and transmits it to the host computer for data processing, and builds a software and hardware platform for the measurement system. The experimental results show that the measurement accuracy of the designed measurement system is ± 0.03 mm, and the time to measure one section of the internal contour is within the 60 s, which can adapt to the measurement accuracy requirements of the stator of the screw drilling tool with inner diameters ranging from 98 mm to 180 mm.

Keywords: stator internal contour; measurement system; error assessment; eccentricity compensation

0 引 言

定子是井下螺杆钻具的重要组成部件,其加工精度直接影响了钻具的工作效率和使用寿命。在生产使用中,被加工的定子可能会因刀具震动、运动机构定位误差等原因造成内壁有划痕、损坏^[1],且定子内轮廓的尺寸不符合理论设计值则可能会导致钻头在工作过程中受力不均匀,引起钻具的倾覆、扭曲或断裂,甚至如果尺寸偏差过大会导致马达脱出或者停顿,直接影响到螺杆钻具的性能和稳定性。因此定子内轮廓的精密检测对螺杆钻具的高效生产和质量控制都具有重要意义。

由于螺杆钻具定子内部测量空间狭小、长径比大,内轮

廓形貌复杂,目前国内在定子生产及实际应用中并没有合适的内轮廓检测仪器,而其它的内轮廓测量装置在测量定子时不能满足测量精度与测量范围的要求。比如常用于测量火炮身管的星型测径仪、电感测径仪^[2]及谭拥军等^[3]发明的螺杆钻具定子内孔直线度测量装置均采用接触式测量内轮廓技术,但因炮管和定子的内轮廓径向变化范围不同导致测量炮管的仪器无法用来测量定子。Fraignier等^[4]发明的光学检查管子或孔的内部轮廓装置、贾丙田^[5]设计的自动测量轴孔内部系统、马鹤立等^[6]设计的小口径长身管内径测量系统及朱焯等^[7-8]设计的深孔类零件内表面三维综合测量系统均采用了非接触测量内轮廓技术,虽然测量精度、速度都有所提升,但测量范围小,无法满足定子内轮廓

收稿日期:2023-10-31

* 基金项目:陕西省“智能制造”科技重大专项(2019zdx01-02-02)资助

的检测要求。随着石油钻采技术的发展,对螺杆钻具定子内轮廓测量系统的适用性、测量精度都提出了更高的要求。国内目前针对螺杆钻具定子内径的常用测量方法是用数控机床精密加工的芯棒穿过螺杆钻具定子内腔进行检测^[9],但其无法检测到大径的尺寸,且检测效率较低;逯海卿等^[10]设计的测量定子内螺旋曲面测量机通过电机驱动器旋转,编码器的脉冲触发位移传感器读数来获取内截面数据,但其使用的是吸附腔吸附定位,不易安装在较长的螺杆钻具定子身管中,并且数据采集的时间同步性也存在欠缺;2009年 Laser Technology Inc 公司与 NASA 合作开发了一种用于检测管道腐蚀缺陷的设备(Bemis),该探测器是由测量部分与驱动部分组成,检测主要采用激光位移传感器并可根据检测目标适当选择传感器数量,将其固定在电机旋转轴上,通过控制电机旋转,实现对管壁截面的测量。但其测量精度只达到了 ± 0.1 mm。最新的定子内轮廓测量仪器为美国 Quest Integrated Inc 公司研发的 Lotis QC-40 激光检测仪。三个激光发生器集成在一个探头内,检测时三个支撑臂与管道内壁接触,电机控制探头旋转,精准测量大长径比身管内轮廓的加工精度,测量精度达到了 ± 0.002 英寸(± 0.0508 mm),但其无法再满足成型精度为 ± 0.04 mm 的定子内轮廓尺寸检测需求^[11]。

通过对现有测量长身管内轮廓相关技术分析,依据定子内轮廓的几何特征以及信号同步处理方法,本文开展了对定子内轮廓测量技术研究,设计了一种全金属螺杆钻具定子内轮廓的测量装置,基于平行四边形机构设计了定心机构,采用 ARM 开发板进行数据的传输与处理,完成了定子内轮廓截面测量实验,验证了测量系统用于金属定子内轮廓测量的可行性。

1 测量装置总体设计

在综合国内外内轮廓测量常用技术的基础上^[12-13],依据全金属螺杆钻具定子的实际加工生产和使用的情况,以金属定子制造规格的合格范围为精度标准,即生产出的定子实际径长尺寸应保证与理论设计值的误差不超过 ± 0.04 mm^[14],设计了主要由机械装置单元、电路硬件单元、程序软件单元组成的测量装置,如图 1 所示。

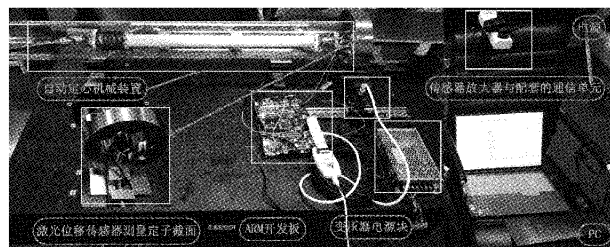
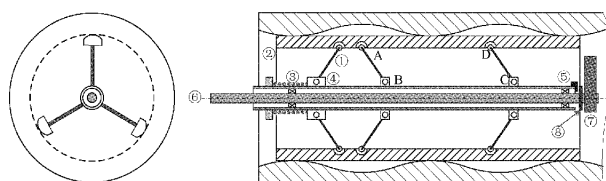


图 1 螺杆钻具定子内轮廓测量系统

1.1 测量装置的机械结构

图 2 中滑动支座④、支撑连杆①,导向引鞋②组成了支

撑结构,三组沿周向互相间隔 120° 均匀分布在机架⑤外部圆周的支撑结构构成定心机构。将滑动支座和固定支座设置在结构为管筒状的外套筒的外部完成固定,内部放置了具有旋转功能的芯轴⑥,使其与激光位移传感器⑦、角度位移传感器⑧一起转动。芯轴与外套筒是以两端支撑的方式进行连接,其两端采用阶梯轴形式,轴承安装在外套筒的内表面,而外表面左端设置螺纹便于调节压力大螺母对其轴向位移进行控制,实现压力调节,完成对弹簧③较大范围的压缩或对弹簧的位置进行调整。激光位移传感器的支架上设置了一个径向调整槽口,利用螺钉把支架与支座连接起来,实现对激光位移传感器径向距离的调整。测头轴线与定子内径轴线垂直,使得激光位移传感器只能与支架随着芯轴的转动对内轮廓进行参数测量,保证测量系统的稳定。



①:支撑连杆 ②:导向引鞋 ③:弹簧 ④:滑动支座 ⑤:机架
⑥:空心芯轴 ⑦:激光位移传感器 ⑧:角位移传感器
ABCD:平行四边形结构

图 2 自动定心机构二维剖视图

图 3 即为定心机构的完整机械单元的三维模型。当测量对象内径尺寸发生变化时,滑动支座会在弹簧预紧力作用下左右移动,三组支撑结构的水平和径向位移会发生相同的变化,实现图 2 中 ABCD 平行四边形定心机构的功能。此自主创新设计的传动定心结构除了能够确保传动结构的定心性,还可以给支撑结构中的支撑连杆提供支点,使支撑结构完成径向涨缩。当支撑结构中的导向引鞋和定子内壁相接触时,芯轴会一直固定在定子内腔的中央,也就是测量系统的转动中心,使两个传感器以定心机构构建的基准轴线为旋转中心进行测量,保证两个传感器与螺杆钻具定子内轮廓的同轴度,实现自动精准定心。其左端的十字万向节上可接加长杆,在不影响定心精度的前提下,完成测量系统的移动、芯轴的旋转,实现对距离更长的定子身管的内轮廓测量。

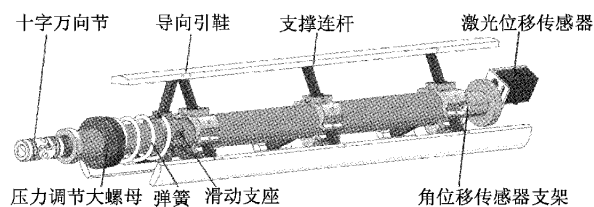


图 3 自动定心结构三维模型图

1.2 测量装置的信号采集与处理

1) 信号采集硬件设计

图 4 所示为电路硬件连接设计示意图,为满足实际功

能需求,测量系统中硬件部分基于以下器件构成:测距原理为激光三角法^[15-16]的非接触激光传感器头 IL-030,激光传感器放大器 IL-1000,支持 Ethernet(TCP/IP)的通信单元 DL-EN1,STM32F407ZGT6 单片机,分辨率为 19 位的单圈绝对值编码器。依据原理图搭建实物环境如图 5 所示。

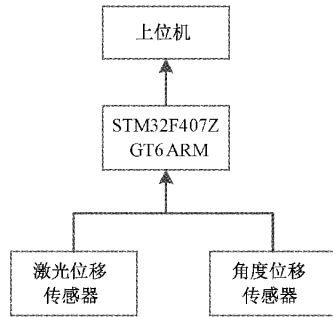


图 4 电路硬件连接原理图

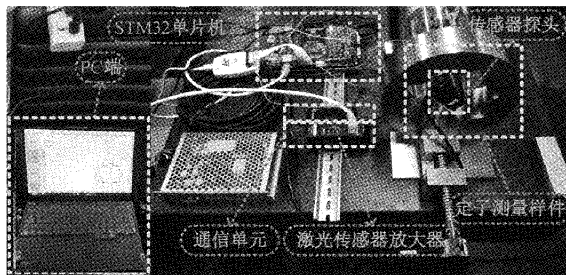


图 5 电路硬件连接实物图

2) 信号采集程序设计

角度与径长数据的同步采集处理是程序设计的关键技术,直接关系到测量径长与转过角度的匹配准确性,还会间接影响到后续定子内轮廓的误差评估效果。绝对值编码器的分辨率为 19 位;激光位移传感器的采样速率设置为 0.33 ms,平均次数为 8(平均值是动态的,若测量值发生变化,则增加平均次数,得到一个稳定测量值,将计算出来的平均值作为有效数据使用,通过均值滤波降低采集数据的误差,提高准确性),从传感器检测到目标物发生变化到输出结果的最大响应时间为 6 ms。DL 设备的数据处理时间在未使用计算功能时为 7.8 ms,编码器与开发板之间波特率为 2 500 000,开发板与个人计算机(personal computer, PC)之间波特率设置为 2 000 000,故可计算出单个径长数据经过放大器与通信单元处理到 PC 端显示的时间在 15 ms 以内,测量 3 600 个点所需时间为 54 s。

激光位移传感器的指令响应时间是略微有点长的,依据程序的先到原则以及手动旋转装置进行测量时速度不稳定的特点,若在裸机系统中采用等角度差条件(即设置旋转角度差值达到 0.1° 作为触发采样的条件)会产生较为严重的“丢包”现象,即一个截面内采集不满 3 600 个点的数据,也可能产生测量点的角度与径长数据无法准确对应的误差。故可用 ARM 开发板作为中介层,基于 C 语言设计程

序,在工程中写入支持实时性与多任务处理的实时操作系统(real time operating system, RTOS)中的 FreeRTOS 内核程序,创建两个可以并发执行的任务。Task1 基于轻量级协议栈(light weight IP, LWIP),利用其提供的传输控制协议/网际协议地址(transmission control protocol/internet protocol address, TCP/IP),通过“三次握手”与激光位移传感器的通信单元建立通讯,并进行指令的连续发送与位移数据的接收;Task2 使用推荐协议 485(recommended standard 485, RS485)与绝对值编码器进行指令的连续发送与数据的接收及解析。在转动机械装置加长杆旋转测量的时候,ARM 开发板检测到绝对值编码器转过了固定角度 0.1° ,同一时刻读取激光位移传感器的通信单元接收到测量指令传回的径长数据,完成图 6 所示的等角度触发同步采样,并在开发的上位机软件中完成数据的实时显示与保存。图 7 为程序设计流程图。

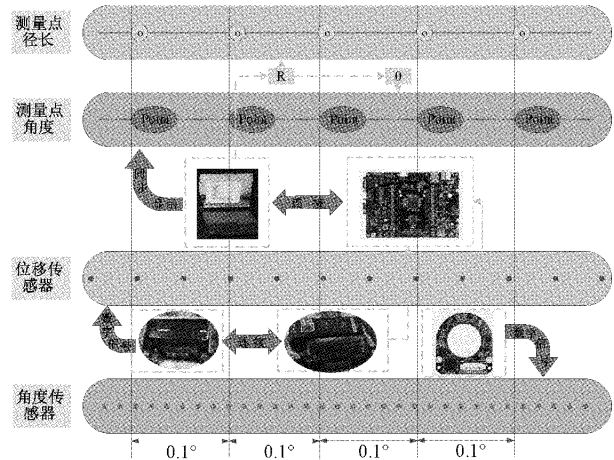


图 6 等角度触发同步采样

3) 信号处理软件设计

测量装置采样时需将数据传输给 PC 端进行实时显示并处理。在此基础上,自主开发出图 8 所示的配套软件,其基于 C++ 语言建立在支持多种操作系统的 QT 平台上。软件在与开发板通过串口成功连接后可进行角度与径长数据的实时接收、显示与保存,实现快捷的人机交互。

2 实验研究

2.1 传感器偏置量校准实验

连接好系统在测量定子时,激光位移传感器测量得到的数据为镜头到测量点的距离,而非非旋转中心到定子内轮廓的距离,所以测量定子内轮廓前应先利用直径为 110 mm 的标准环规校准传感器的偏置量 R ,图 9(a)所示为校准示意图。在测量时理论的旋转中心应该在 O 点,旋转角为 α ;实际上旋转中心在 Q 点,旋转角为 θ ,也就是产生了偏心^[17],偏心距为 e ,传感器测量的距离为 R_1 。因此在计算偏置量 R 前要对角度与径长数据进行偏心补偿^[18],再进行重复性精度实验,如图 9(b)所示。

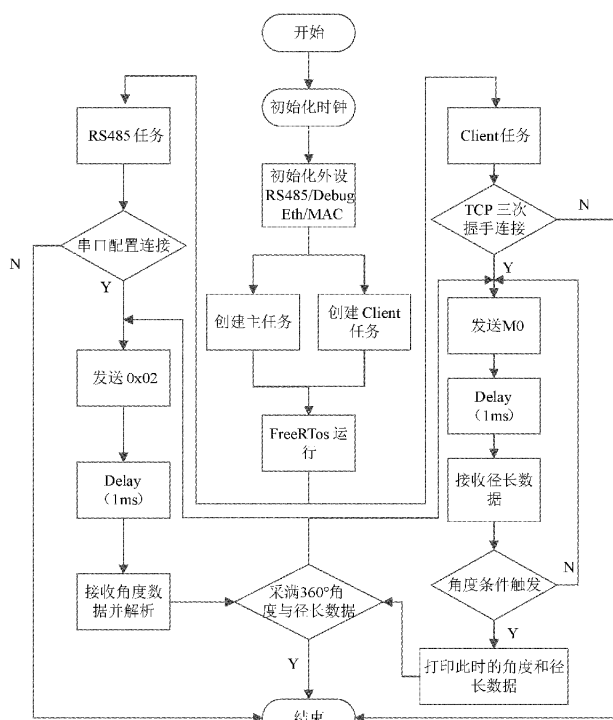


图7 程序设计流程图

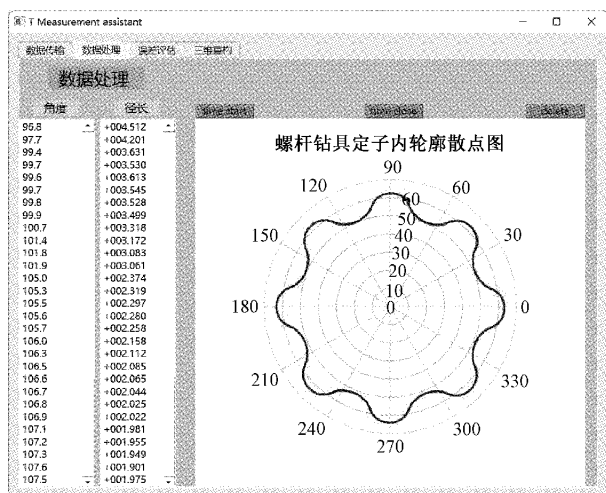


图8 上位机软件界面

使用装置对标准环规进行测试,采集十组环规内径一圈的角度与径长数据,剔除含有粗大误差的一组数据并对剩余的九组数据进行偏心处理后得到 R 的值如表1所示,最终 R 取平均值进行后续定子内轮廓的测量与重构。并在误差图10中对 R 的重复性精度实验结果进行分析,可得其均值为 27.638 mm,标准差为 0.002 51 mm。

表1 传感器偏置量 R 数据分析表

传感器偏置量 R	测量值/mm	残余误差/mm
第1组	27.634	-0.004
第2组	27.639	+0.001
第3组	27.636	-0.002
第4组	27.639	+0.001
第5组	27.638	0.000
第6组	27.643	+0.005
第7组	27.640	+0.002
第8组	27.638	0.000
第9组	27.639	+0.001
平均值	27.638	—

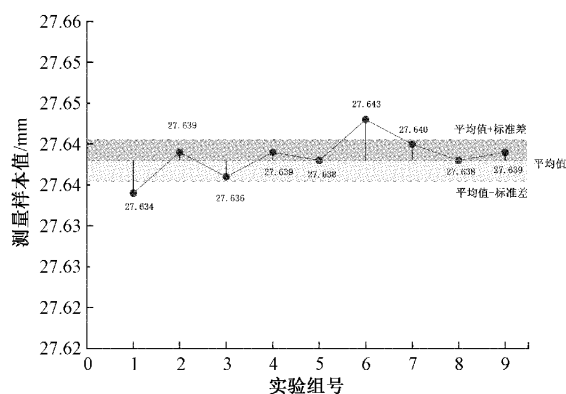


图10 传感器偏置量 R 误差棒图

2.2 定子内轮廓截面测量

图11所示为校准 R 后,用装置测量定子截面轮廓的实验。

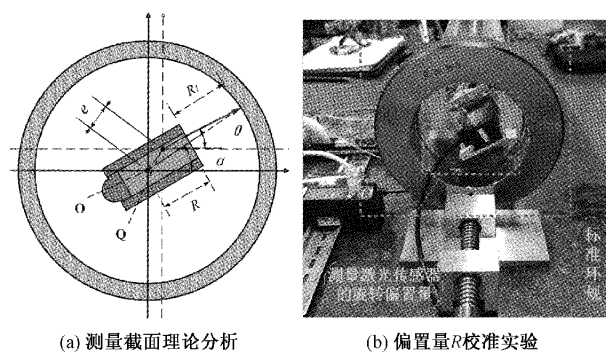


图9 偏置量 R 校准实验示意图

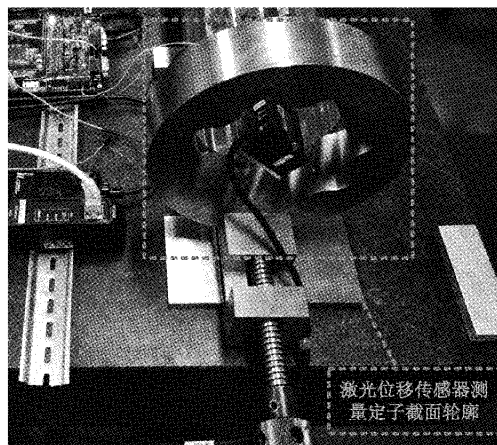
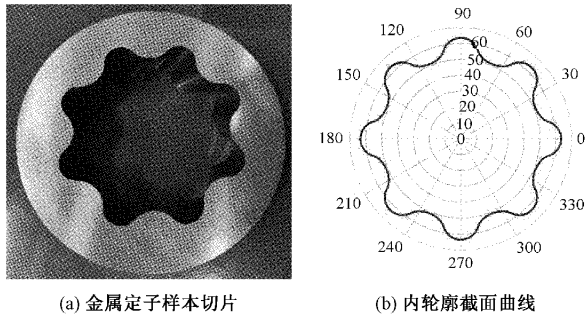


图11 测量金属定子截面轮廓示意图

实验采用的是八螺纹全金属螺杆钻具定子样本切片如图 12(a)所示,内轮廓梅花瓣的大小径理论加工生产尺寸为 126.840 mm、101.920 mm,且其内轮廓曲线方程为:

$$\begin{cases} x = 6.5 \times (7 \cos \beta + \cos 7\beta) \\ y = 6.5 \times (7 \sin \beta - \sin 7\beta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, y 为内轮廓上点的横纵坐标, β 为该点的角度且 $\beta \in [0, 2\pi]$ 。由此得出螺纹比 7 : 8 的定子样本理论内轮廓曲线如图 12(b)所示。



(a) 金属定子样本切片 (b) 内轮廓截面曲线
图 12 金属定子样本与内轮廓理论拟合曲线

将采集的测量数据进行拟合得到的轮廓图与用金属定子理论加工数据配合其几何特征^[19]得到的轮廓图进行内轮廓形状对比,再把多次测量得到的大小径长、拟合顶圆、根圆半径与其各自的均值进行误差分析,验证测量数据精度的准确性^[20]。

1) 定子大小径精度分析

由于定子加工时有加工误差以及在使用过程中会产生磨损导致与理论加工尺寸存在偏差,且实验中还存在有偏心误差,因此不能用理论数值与测量数据进行对比验证精度。故可将此测量系统测量定子后的数据进行偏心补偿得到图 13(a)、(b)中的多组 L1~L8 大小径长,再与其各自的平均值进行精度对比。其中偏心补偿算法是依据圆的一般参数方程:

$$m^2 + n^2 + am + bn + c = 0 \quad (2)$$

求出 a, b, c 即可求得圆心和半径参数:

$$\begin{cases} A = -\frac{a}{2} \\ B = -\frac{b}{2} \\ R_2 = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \end{cases} \quad (3)$$

式中: m, n 为圆上点的坐标, A, B 为圆心坐标, R_2 为圆的半径,将轮廓上的点采用最小二乘法拟合圆,通过这个拟合圆的偏心来对定子内轮廓上所有的测量点进行误差补偿^[21]。

测得 8 组定子内轮廓角度与径长的对应数据,依据罗曼诺夫斯基准则(即 t 检验准则)剔除掉两组含有粗大误差的数据,得到符合要求的六组值。再运用最小二乘法将这六组内轮廓数据每一组都拟合出对应的圆,分别得到拟合

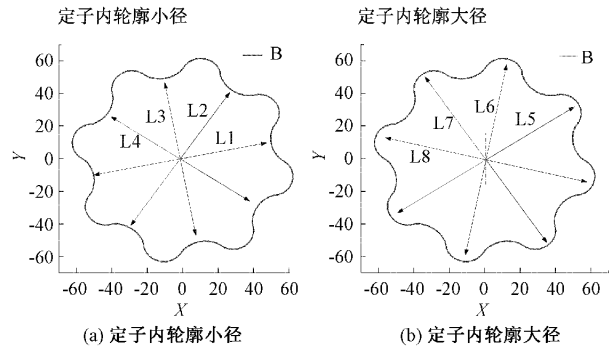


图 13 定子轮廓 L1~L8 大小径长示意图

圆的圆心坐标与半径如图 14(a)~(f)所示,也就得到了对应的定子内轮廓的偏心距与偏心角。

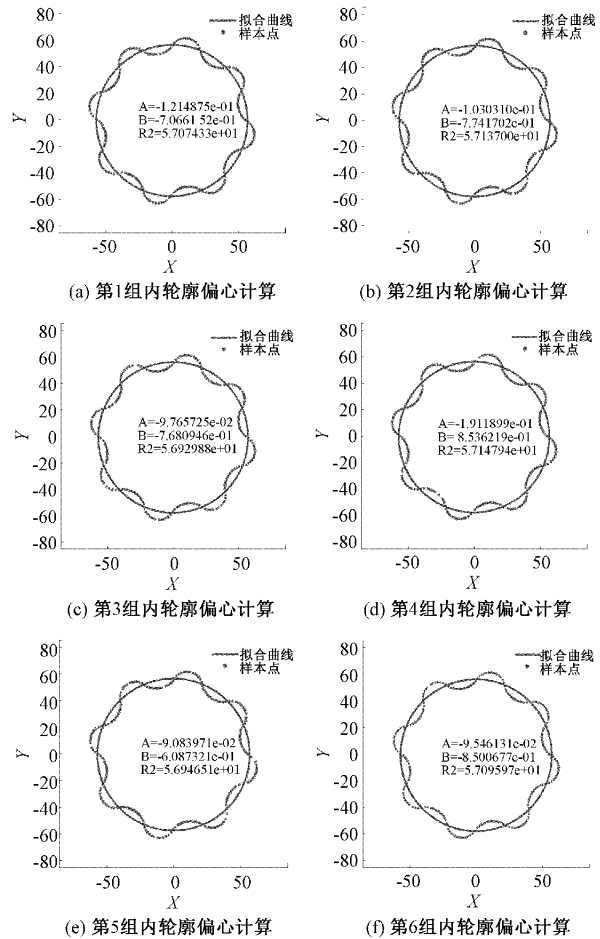


图 14 6 组定子内轮廓的最小二乘法拟合圆

将内轮廓的角度与径长测量数据进行偏心补偿得到 L1~L8 大小径长的修正值,使其与各自的平均值进行精度分析与验证。

图 15(a)~(h)所示为八条内径的六组测量值与平均值的对比误差柱状图,其直观反映出不同内径对应的测量误差,4 条小径的最大残差为 0.012 mm,4 条大径的最大残差为 0.014 mm。贝塞尔公式(4)如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中可用残余误差 v_i 代替真误差得到标准差的估计值,可知在每组测量列中,小径的最大标准差 $\sigma_1=0.0065\text{ mm}$,大径的最大标准差 $\sigma_2=0.0100\text{ mm}$,取置信系数 $t=3(P=99.73\%)$ 时,装置测量大径和小径的精度为 $\pm 0.03\text{ mm}$ 。

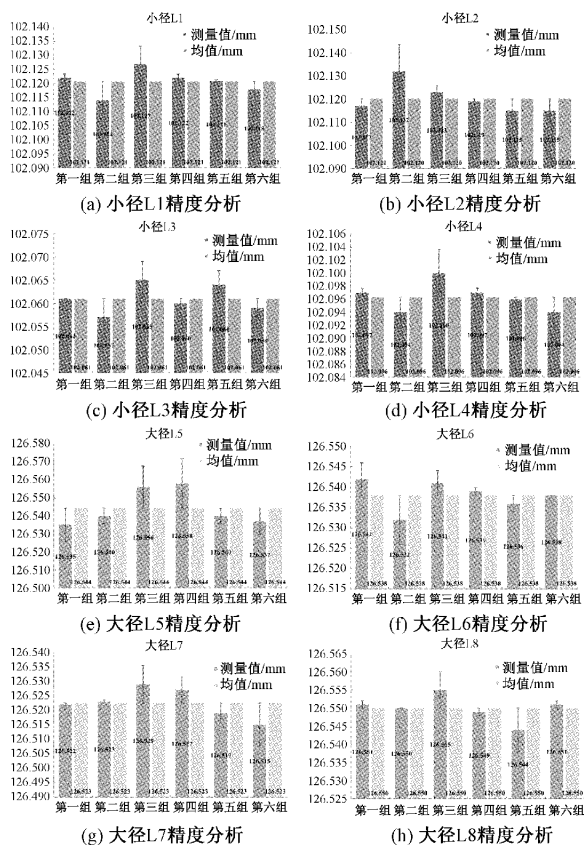


图15 八条内径的测量值与平均值的柱状对比误差图

2) 顶圆、根圆半径精度分析

如图16(a)所示为在第一组实验数据的基础上取定子内轮廓的8个外顶点,运用最小二乘法拟合为定子顶圆;同理基于第一组实验数据取内轮廓的8个内顶点,运用最小二乘法拟合为定子根圆,拟合圆的圆心坐标为 (C, D) ,半径为 R_3 ,如图16(b)所示。计算出每组实验下顶圆与根圆的半径并分析出6组实验中定子顶圆与根圆的半径重复性精度如图17(a)、(b)所示。

在重复性实验中使用最小二乘法拟合出定子的顶圆与根圆,依据极差法对内轮廓拟合顶圆与根圆的半径极差与标准差进行评价,由图17(a)、(b)可知,顶圆半径的极差为 0.006 mm ,标准差为 0.0025 mm ,根圆半径的极差为 0.004 mm ,标准差为 0.0014 mm 。表明测量系统具有良好的重复性测量精度。取置信系数 $t=3(P=99.73\%)$,测量系统测量根圆和顶圆的精度为 $\pm 0.0075\text{ mm}$ 。

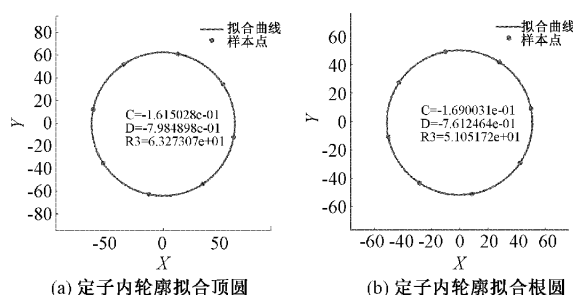


图16 最小二乘法拟合定子顶圆与根圆

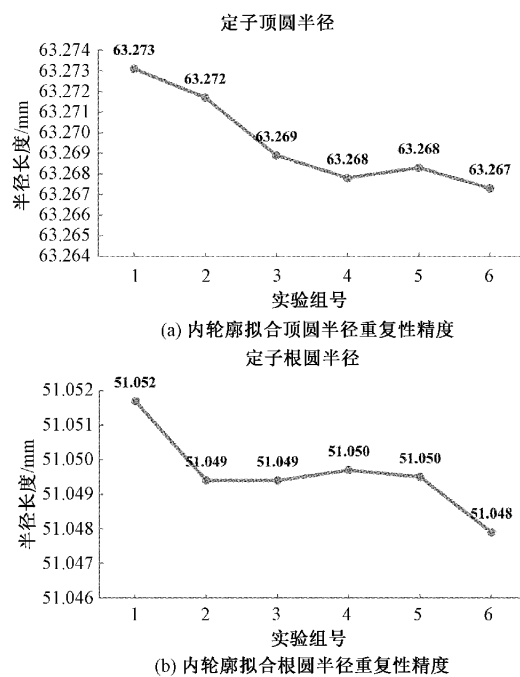


图17 定子顶圆与根圆半径重复性精度分析

3 结 论

通过对定子内轮廓的几何特征与信号同步采集处理的深入探索,设计了由机械结构、电路硬件与软件组成的螺杆钻具定子非接触式内轮廓测量系统,该系统能对内径为 $98\sim 180\text{ mm}$ 定子内轮廓进行测量。

经过对顶圆半径、根圆半径及大小径长的精度分析,取置信系数 $t=3(P=99.73\%)$,测量装置的测量精度为 $\pm 0.03\text{ mm}$,优于当前美国 Quest Integrated Inc 公司最新研发的 Lotis QC-40 定子内腔测量系统的测量精度水平 (± 0.002 英寸),为精确测量其他大长径比身管类零件的内轮廓尺寸提供了一种新的思路。

参考文献

[1] 赵永佳. 螺杆钻具马达定子失效影响因素分析及对策探讨[J]. 石化技术, 2017, 24(12): 263.
 [2] 朱建杰, 郑立评, 曹营修, 等. 火炮身管内径测量现状与发展趋势[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6):

- 62-65,84.
- [3] 谭拥军,王振东,高喜禄. 螺杆钻具定子内孔直线度测量装置:CN102589485B[P]. 2014-05-21.
- [4] FRAIGNIER B, ROGER C. Apparatus for optically checking the inner profile of a tube or bore; U. S. Patent 4,967,092[P]. 1990-10-30.
- [5] 贾丙田. 新型内径非接触测量方法研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
- [6] 马鹤立,陶天炯,刘盛刚,等. 基于频域干涉的小口径长身管内径测量系统[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 1077-1082.
- [7] 朱焯. 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.
- [8] 潘硕,邵新杰,唐香璐,等. 基于结构光的深孔零件内表面单视角三维重建[J]. 电子测量技术, 2021, 44(19): 89-94.
- [9] 陈广伟. 等壁厚定子螺杆泵加工质量控制[C]. 《采油工程文集》2017年第1辑. 大庆油田有限责任公司采油工程研究院, 2017:7.
- [10] 逯海卿,吴兴丽,张鹏,等. 一种内螺旋曲面测量机: CN113340233A[P]. 2021-09-03.
- [11] CAO J S, LI K L, LI R Q, et al. Progress in research for pipe inner diameter detection technology based on laser[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 397: 1220-1225.
- [12] HOVELL T, PETZING J, GUO W, et al. Measurement techniques for three-dimensional metrology of high aspect ratio internal features—A review[J]. Metrology, 2023, 3(2): 139-168.
- [13] JIAO F, LIU L, CHENG W, et al. Review of optical measurement techniques for measuring three-dimensional topography of inner-wall-shaped parts[J]. Measurement, 2022; 111794.
- [14] 刘世英,唐霖,郑雅泽,等. 基于内轮廓积分法的全金属螺杆钻具定子电解加工阴极设计[J]. 电加工与模具, 2023:32-37.
- [15] 邸志刚,沈萌萌,贾春荣,等. 激光测距技术研究现状及发展趋势[J/OL]. 激光杂志: 1-10 [2023-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20230106.1125.006.html>.
- [16] 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): 26-30.
- [17] 于杨,郑立评,胡备,等. 火炮身管内径激光测量系统设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(4): 81-84.
- [18] 孔盛杰,黄翔,周蒯,等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.
- [19] OEZKAYA E, FUSS M, BIERMANN D. A mathematical model to describe the inner contour of moineau stators[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2021, 143(4).
- [20] SUI W, ZHANG D. Four methods for roundness evaluation[J]. Physics Procedi 8a, 2012, 24: 2159-2164.
- [21] SONG C, JIAO L, WANG X, et al. Development and testing of a muti-sensor measurement system for roundness and axis straightness errors of deep-hole parts[J]. Measurement, 2022, 198: 111069.

作者简介

全宇博, 硕士, 主要研究方向为大长径比零件内轮廓精密测量技术。

E-mail: yubo19980520@163.com

王洪喜(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为精密、超精密测量理论与仪器设计, 智能传感器, 柔性机构设计理论与应用。

E-mail: wanghongxi@xatu.edu.cn