

枪管导气槽检测方法研究与应用*

柏林, 甄杰, 徐冠基

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆, 400044)

摘要 某型手枪枪管导气槽尺寸检测是枪管质量检测的重要指标。从枪管的结构和导气槽的形状、位置出发, 针对现有导气槽尺寸检测方法的局限性, 提出了一种新型的导气槽缺陷无损检测方案。分析了基于线性可变差动变压器(linear variable differential transformer, 简称 LVDT)线性位移传感器和杠杆原理的检测原理, 并阐述了小波去噪、离散小波变换法去趋势、非降采样小波变换法峰值检测等信号分析方法。经过现场测试, 检测精度可达到 $1\ \mu\text{m}$ 。相对于其他检测方法, 该检测方法检测精度高、效率高。

关键词 枪管导气槽; 无损检测; 小波去噪; 离散小波变换; 非降采样小波变换

中图分类号 TB533⁺.1; TJ06; TH822

1 问题的引出

手枪贴膛是不抽壳故障中一种最严重的现象, 引起贴膛故障的原因很多, 主要有枪弹装药量、弹壳材料、枪机运动部件不灵活及枪管加工质量等影响因素, 其中枪管的加工质量是主要因素。为了平衡弹壳内外火药的压力, 避免不抽壳问题, 在设计中枪管弹膛部位轴线方向开有 8 条均布的导气槽, 如图 1 所示。它是在枪管轴向有一定长度延伸的凹槽, 长为 $8 \pm 0.5\ \text{mm}$, 要求宽为 $0.3 \sim 0.5\ \text{mm}$, 深为 $0.15 \sim 0.3\ \text{mm}$ ^[1]。如果导气槽不合格, 就起不到相应的作用, 认为此导气槽有缺陷。由于该枪管为小口径枪管, 测量工具受到空间限制, 一般测头无法深入到枪管内部进行测量, 属于小内尺度测量的问题。国内外学者对此进行了大量研究, 提出了一些测量方法^[2], 如气动测量法、光束端面扫描测量法、衍射测量法等, 从一定程度上满足了某些场合的要求。但纵观这些测量方法, 气动测量法成本高, 光束端面扫描测量法精度低, 衍射测量法效率低。枪管导气槽的深度检测要求精度达到 $1\ \mu\text{m}$, 且要高效率、低成本检测, 以上方法不能满足检测要求。目前, 工厂里采用的解剖式检测方法是一种破坏性的检测, 效率低, 只能进行抽检, 不能达到全检的要求。针对这种情况和其他的检测要求, 笔者提出了一种基于 LVDT 线性位移传感器和杠杆原理的无损检测方

法, 具有结构简单、操作简便、精度高、成本低等特点, 满足了对枪管导气槽检测的要求。

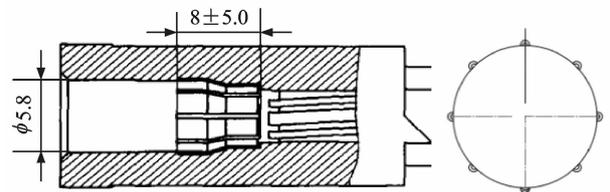


图 1 枪管导气槽解剖图(单位: mm)

Fig. 1 Anatomical map of gas groove (unit: mm)

2 系统总体设计

本检测系统的工作流程如图 2 所示: a. 首次运行系统先给系统上电; b. 系统复位, 此时传感器探针回到原点位置; c. 放松卡盘以安装工件; d. 夹紧卡盘以固定工件; e. 启动检测, 杠杆上的探针在丝杠的传动下运动到指定的待检测面后主轴转动, 带动工件旋转一周。采样完成后系统自动进行如下分析处理: 信号预处理(小波去噪、移位处理、去趋势等); 特征提取(槽宽检测、槽深检测)及记录、显示。至此一个工件检测结束, 重复以上步骤检测下一个工件。在整个检测过程中, 系统可自动对采集到的槽曲线信号分析处理得出检测结果, 并将采集到的数据保存至数据库, 方便后期调用查看。用户根据检测结果判断枪管的合格性并进行标记。

* 国家自然科学基金资助项目(51475052); 机械传动国家重点实验室资助项目(SKLM-T-ZZKT-2015Z14)
收稿日期: 2014-05-07; 修回日期: 2014-06-24

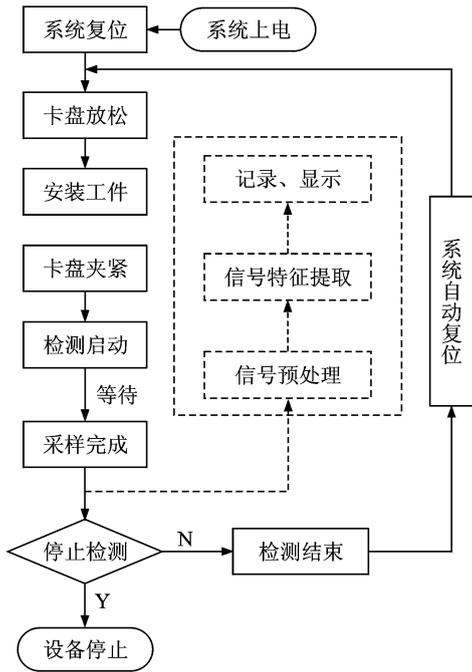


图 2 系统工作流程

Fig. 2 System workflow

检测系统由上位机和下位机组成,上位机通过指令控制下位机可编程逻辑控制器(programmable logic controller,简称 PLC)的主轴转速及转向、水平丝杠转速及进给方向、采样数据的存储及状态检测等,用到 20 多个寄存器。为了实现对多变量的操作,选用比较成熟的过程控制的对象连接与嵌入(object linking and embedding for process control,简称 OPC)技术^[3]来实现高效可靠的上位机与下位机通讯。

3 检测原理及信号分析

3.1 检测原理

图 3(a)为枪管导气槽的某一截面示意图,图 3(b)为杠杆原理示意图。探针的顶点、探头的顶点与支点在一条直线上。当探针从图中的 a 点绕支点 O 运动到 b 点时的弧长为 l_{ab} ,探头运动的弧长为 l_{cd} ,显然由三角形性质及圆的性质可得

$$l_{ab} = \theta l_{OE} / \cos(\theta) \quad (1)$$

$$l_{cd} = \theta l_{OF} / \cos(\theta) \quad (2)$$

所以 $l_{ab} / l_{cd} = l_{OE} / l_{OF}$,这就是利用杠杆原理把探针所测得的枪管槽形状数据转化为 F 处 LVDT 位移传感器位移的原理。

枪管槽深最大值为 0.3 mm,所设计长 l_{OE} 为 300 mm,当探针到达最深处时 $l_{ab} = 0.3$ mm,且

$$l_{ab} = \theta l_{OE} / \cos(\theta) = \theta / \cos(\theta) l_{OE} \quad (3)$$

得到 $\theta / \cos(\theta) = 0.001$ 。由于 θ 微小,可认为探针几乎在同一个竖直面内随枪管转动而沿槽微弱上下移动,所测得的数据视为枪管某个截面的形状数据。

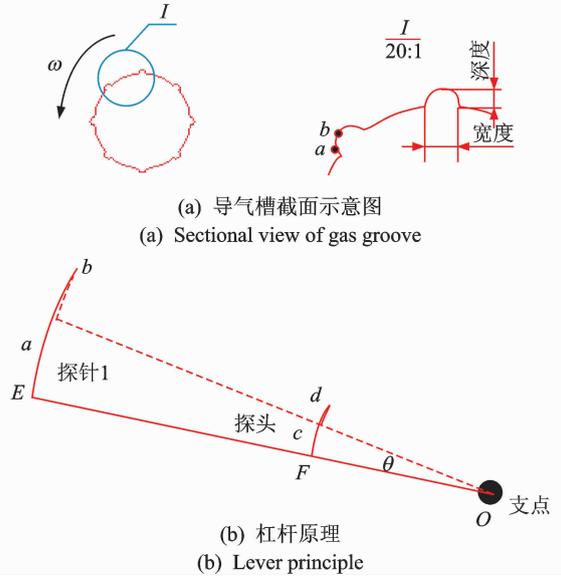


图 3 检测的杠杆原理简图

Fig. 3 Lever principle diagram of detection

图 4 为本系统的检测原理图,杠杆、LVDT 位移传感器及电磁铁固定在壳体内部,壳体在水平方向的导轨上滑动。当探针随壳体运动到待检测平面时,电磁铁通电,铁质杠杆绕支点 O 顺时针转到使探针与枪管内壁接触,此时 LVDT 位移传感器下的可伸缩探头与杠杆上的特制点接触(保证传感器的探头与杠杆良好接触)。LVDT 位移传感器位移 d_2 与探针位移 d_1 的关系为

$$d_1 / d_2 = l_{OE} / l_{OF} \quad (4)$$

其中: d_1 为图 3 中的 l_{ab} ; d_2 为图 3 中的 l_{cd} 。

经 LVDT 位移传感器^[4]转换为可读取的电压信号,经线性换算即可得出导气槽在该截面处的形

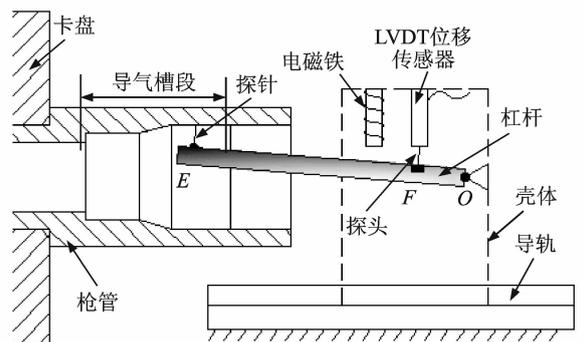


图 4 检测原理简图

Fig. 4 Diagram of detection principle

状曲线。

3.2 信号分析方法

采集到的槽曲线信号会夹杂有人为或设备原因带来的信号干扰,最终要获得导气槽的深度及宽度就需要对原始信号进行处理。从功能上看,槽曲线信号的处理大致分为两个阶段:预处理和特征提取。信号预处理主要包括信号小波去噪、移位处理及去除趋势项;特征提取主要包括槽深特征提取和槽宽特征提取。

1) 小波去噪。笔者采用软阈值去噪方法,并对其进行了改进^[5-7]。假定噪声幅值分布符合正态分布,选用式(5)估计噪声在第一尺度上的小波变换系数模极大值 λ_1 。由于噪声的小波变换系数随尺度的增大而缓慢变小,用式(6)的经验公式估计噪声在尺度 $j \geq 2$ 上的小波变换系数模极大值 λ_j 。然后用式(7)计算保留信号的小波变换系数估计值 $\hat{d}_j(n)$,再根据 $\hat{d}_j(n)$ 重构保留信号

$$\lambda_1 = k \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_1^2(n)} \quad (5)$$

$$\lambda_j = \lambda_1 / \ln(1 + j) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \hat{d}_j(n) = \text{sign}(d_j(n)) (|d_j(n)| - \lambda_j) & (|d_j(n)| \geq \lambda_j) \\ \hat{d}_j(n) = 0 & (|d_j(n)| \leq \lambda_j) \end{cases} \quad (7)$$

这种方法在原有软阈值去噪法的基础上作了改进,保留了原有信号的尺度信息,减小了检测误差。

2) 采样序列移位处理方法。由于采集数据时,枪管的安装位置与传感器探针的相对位置是随机的,所以需要将采样所得的数据在合适位置拆分重组,使第1个槽的位置移动到理想位置。

3) 去除趋势项。在枪管安装时,主轴与枪管轴线不可避免地会存在不同轴现象,因此必须进行去除趋势项处理。本系统的趋势通过硬件设备是很难消除或抑制的,可以通过离散小波变换法来消除或抑制^[8]。

这里的离散小波变换法去趋势,选用“sym6”小波,小波变换级数 N 由式(8)定义

$$N = \text{floor}(\log_2 \frac{A}{2B}) \quad (8)$$

其中:函数 $\text{floor}(x)$ 即对 x 向负方向舍入; A 为采样率; B 为阈值频率,可由用户灵活变动。

小波去除趋势项的步骤如下:首先,对原始信号通过离散小波变换法分解;然后,将分解得到的各层信号的低频逼近成分设定为0;最后,在所有高频逼近成分的基础上进行信号的重构。

4) 槽深检测。首先要检测到8个槽的位置及其峰值,信号的峰值用基于非降采样小波变换的方法求取。流程如下:首先,分别根据设定的检测宽度和频率阈值计算出非降采样小波变换的层数,并选择其中的较大结果作为分解层数;其次,使用双正交小波**bior3_1**和前面计算得出的较大分解层数对输入信号执行非降采样小波变换;搜索每层分解信号高频成分的零交叉点,并选择最大的零交叉点作为真实峰值的粗略估计;最后,为每个检测点找到相应的更精细的零交叉点。

5) 槽宽检测。文献[9]提出了一种哈尔提升小波分析法,用以检测突变信号的起点和终点。但由于检测到的槽的形状在出现槽的位置不是突变的,而是渐变的,并没有一个确定的位置来确定槽的起点和终点,因此这种方法对导气槽的检测不适用,比较之下选择曲线拟合的方法,求取起点和终点时分别在槽的左侧和右侧截取距峰值点100点处向左和向右400点的一段数据进行曲线拟合,来确定槽的起点和终点。目前较为常用的方法是采用最小二乘原理实现的曲线拟合方法^[10]。

4 现场测试

4.1 数据处理分析

在线检测系统主界面如图5所示,包括PLC状态指示、检测结果显示、探针位置信息、采集进程信息、工件信息及用户操作按钮等,用户操作面板上包括PLC状态指示灯及控制按钮(卡盘夹紧、检测启动等)。

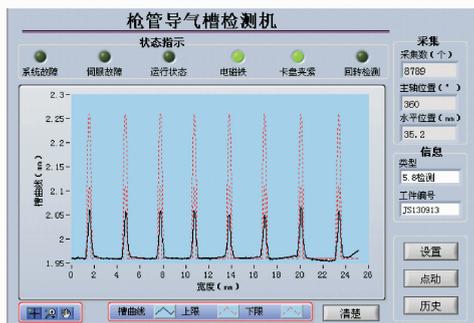


图5 主界面

Fig. 5 Main interface

1) 软阈值去噪。计算过程中选用“db2”小波,由于信噪比较大,信号占主要成分,小波分解级数选择4。软阈值降噪前后的效果对比如图6所示。

2) 信号移位处理。原始信号可能出现以下几种情况:a. 探针在两槽之间的平滑位置,如图7(a)所

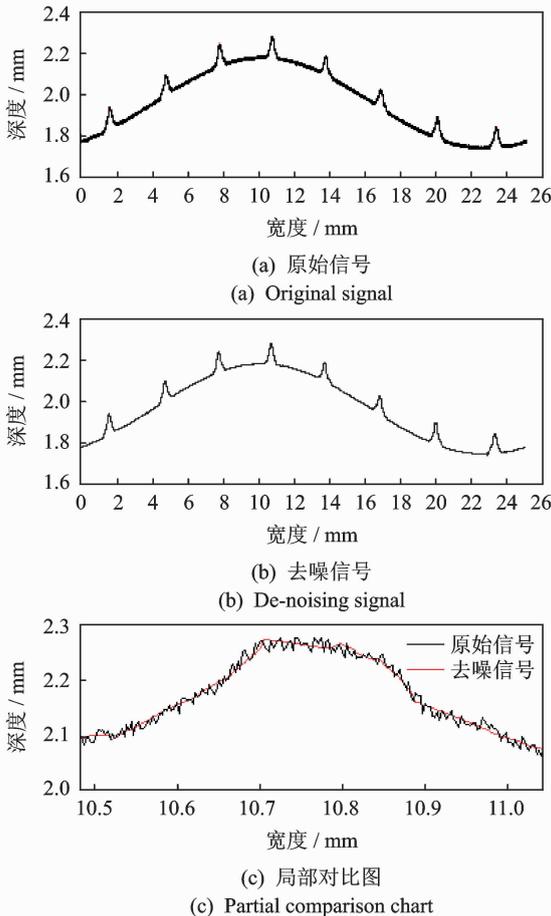


图 6 软阈值去噪
Fig. 6 Soft threshold de-noising

示; b. 也可能出现在接近某个槽的位置, 不利于槽宽检测, 如图 7(b) 所示; c. 探针在某个槽的位置, 这样会导致第 1 个峰值位置不好确定, 因此不利于槽深及槽宽检测, 如图 7(c) 所示。从图中可以看出, 经过移位处理后的曲线中没有槽出现在曲线开始的位置, 这就给后续处理带来很大方便, 也呈现出较好的视觉效果。

3) 去除趋势项。图 8 为高通滤波法去除趋势项后的槽曲线信号, 从图中可以看出, 该方法存在以下缺陷: a. 并没完全去除趋势项; b. 去趋势后的曲线较原始信号在槽出现的位置幅值衰减很多; c. 在信号开始的部分有明显的大幅震颤。图 9 为基于离散小波变换去除趋势项的效果图, 从中可以看出, 该方法去除趋势项效果明显, 且不存在上述缺陷。所以与高通滤波法去趋势相比, 基于离散小波变换法去趋势的方法更容易去除出现的正弦规律趋势项, 且保留了原始信号的尺度信息。

4) 气槽宽度与深度特征提取。图 10 为枪管导气槽的截面图。图 11 为实际检测到的预处理后槽

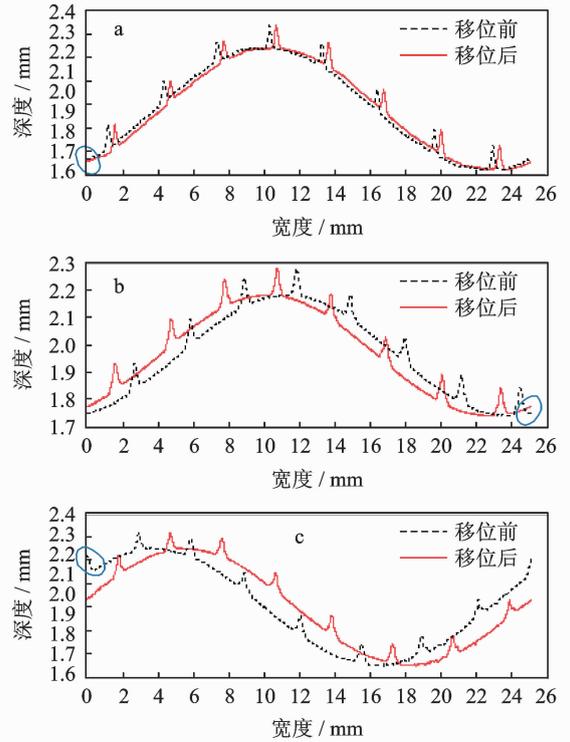


图 7 探针与工件的几种相对安装位置
Fig. 7 Kinds of relative mounting position between needle and workpiece

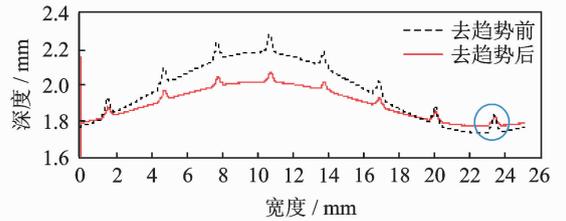


图 8 高通滤波法去趋势
Fig. 8 High-pass filter detrending

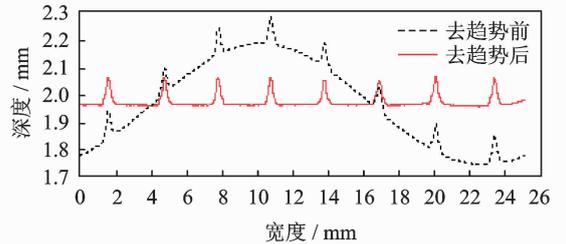


图 9 小波变换法去趋势
Fig. 9 Wavelet transform detrending

曲线的一部分, 图中的基线是传感器所测得的内径的平均值, 所需测量的槽的深度和宽度如图中所示。

基于非降采样小波变换法进行峰值检测的流程, 得出结果如图 12 所示。当得到各个槽的各位置的幅值 A_i 后, 其与图 11 中基线的平均值 avg 即为第 i 个导气槽的槽深 d_{pi} , 即 $d_{pi} = A_i - avg$, 其中基

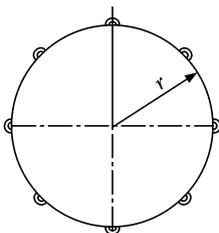


图 10 枪管导气槽形状截面图
Fig. 10 Sectional view of gas groove

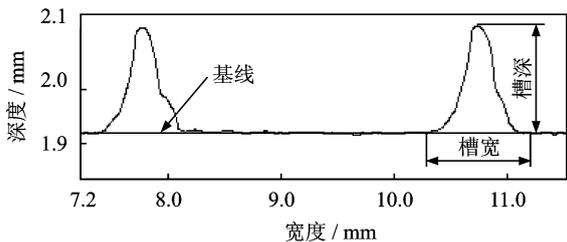


图 11 导气槽检测曲线局部示意图
Fig. 11 Partial schematic of detected gas groove

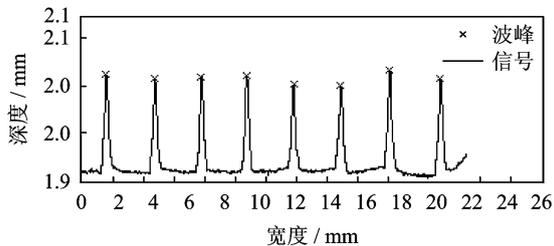


图 12 峰值检测结果示意图
Fig. 12 Sketch map of peak detection

线的平均值 avg 是通过求取每相邻两槽中间位置的幅值,相加然后取平均值得到的。

槽宽检测方法采用了二次函数进行拟合,即

$$F(T) = aT^2 + bT + c \quad (9)$$

其中: t 为采样点序号; $F(T)$ 为 T 所对应的采样点幅值。

本研究所得数据应满足

$$aT^2 + bT + c = d \quad (10)$$

用式(10)求得的 T 即为槽起点或终点,其中 d 为图 12 中基线的幅值。利用最小二乘法对数据进行曲线拟合后,求出 a, b, c 的值,然后可以得出

$$\begin{cases} T_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4a(c-d)}}{2a} \\ T_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c-d)}}{2a} \end{cases} \quad (11)$$

再根据实际情况选取合适的 T 。

槽的起点与终点拟合示意图分别如图 13、图 14 所示。由图可以看出,拟合的二次函数与选取的原始数据段非常吻合。槽宽度计算方法为

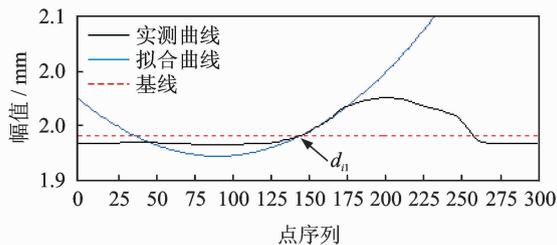


图 13 槽起点拟合示意图
Fig. 13 Sketch map of the fitting curve at the starting point

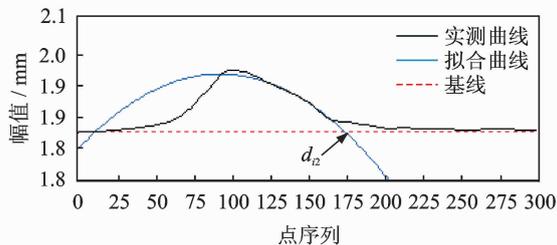


图 14 槽终点拟合示意图
Fig. 14 Sketch map of the fitting curve at the ending point

$$\omega_i = d_{i2} - d_{i1} \quad (12)$$

其中: d_{i2} 为第 i 个槽的结束点; d_{i1} 为第 i 个槽的起始点。

当 $\begin{cases} 0.15 < d_{pi} < 0.3 \\ 0.3 < \omega_i < 0.5 \end{cases}$ 时,视此导气槽合格。

4.2 结果分析

笔者选取了 5 支枪管,先用本方法进行检测,再用解剖法检测,分别记录检测结果,如表 1 所示。从表中可以看出,较之解剖法,本检测方法也可准确地检测出枪管导气槽的宽度和深度,而且检测精度更高。为了更直观地判断导气槽的合格性,做出了导气槽曲线的上极限标准曲线及下极限标准曲线,如图 15 所示的局部图。当所测曲线落在两条标准曲线之间时,即可认定所测导气槽合格。图中检测到的槽曲线不合格。

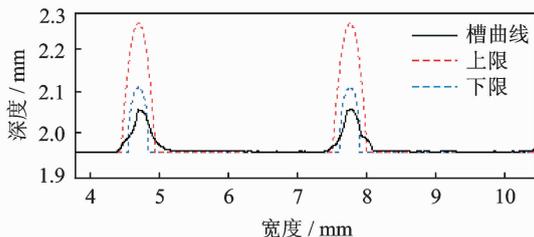


图 15 导气槽标准曲线上下限
Fig. 15 Upper and lower standard curve of gas groove

表1 检测结果对比

Tab.1 Test results comparison mm

序号	解剖法		本研究方法	
	深度	宽度	深度	宽度
1	0.23	0.38	0.233	0.38
2	0.25	0.30	0.259	0.31
3	0.26	0.35	0.263	0.35
4	0.20	0.28	0.202	0.29
5	0.29	0.44	0.290	0.43

从图15可以看出,导气槽在枪管内部有8 mm的延伸,导气槽某个截面的合格性并不能代表导气槽整个长度上的合格性,所以为了检测的准确性应至少检测3个截面,结合3个截面的数据分析得出导气槽的合格性。

5 结束语

通过分析枪管的结构和导气槽的形状、位置,找出了一种区别于以往导气槽检测方法的方案。首先,使用LVDT位移测量传感器采集导气槽的形状数据;然后,用信号预处理(依次用到信号小波降噪、信号移位处理及去除趋势项等方法)和特征提取(深度检测、宽度检测)检测枪管导气槽的深度和宽度合格性。所提到的检测方法相对于以往的解剖式导气槽检测方法,最大的优点就是对枪管完全没有损坏,可以满足部队对枪管全检的要求。该法效率高、检测精度高、经济效益好、结构简单以及操作方便,现已投入工程应用,反响良好。

参 考 文 献

- [1] 张光沛. 某新型手枪贴膛故障的原因分析及处理[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(3): 48-53.
Zhang Guangpei. Analysis and processing of cause of jamming fault about a new kind of pistol[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2008, 29(3): 48-53. (in Chinese)
- [2] 崔继文, 谭久彬, 宋传曦. 精密微小内尺度测量技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2010, 21(1): 120-125.
Cui Jiwen, Tan Jiubin, Song Chuanxi. Research progresses of precision measurement technique for micro-cauity[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(1): 120-125. (in Chinese)
- [3] 郭志刚, 王文浩. OPC技术及其在工业控制系统中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2012, 170(1): 192-194.
Guo Zhigang, Wang Wenhao. OPC technology and its application in industrial automation control system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012, 170(1):

- 192-194. (in Chinese)
- [4] 郭敏, 李月贞. 基于LVDT的微小位置测量系统设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(7): 151-153.
Guo Min, Li Yuezheng. Design of micro-displacement measurement system based on LVDT [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(7): 151-153. (in Chinese)
- [5] 秦毅, 王家序, 毛永芳. 基于软阈值和小波模极大值重构的信号降噪[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(5): 543-547.
Qin Yi, Wang Jiayu, Mao Yongfang. Signal denoising based on soft thresholding and reconstruction from dyadic wavelet transform modulus maxima [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(5): 543-547. (in Chinese)
- [6] 侯新国, 刘开培, 魏建华. 最佳小波包基改进软阈值的消噪方法及应用[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(4): 366-368.
Hou Xinguo, Liu Kaipei, Wei Jianhua. Application of improved soft threshold noise eliminating method based on optimal wavelet packet [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(4): 366-368. (in Chinese)
- [7] 张炳达, 瞿敏, 陈伟乐. 软阈值消噪法在电缆故障测距中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 506-507.
Zhang Bingda, Qu Min, Chen Weile. The application of soft-threshold de-noising in cable fault location [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 506-507. (in Chinese)
- [8] Sun Jingling, Sheng Huanye. A hybrid detrending method for fractional Gaussian noise [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2011, 390(17): 2995-3001.
- [9] Bo Lin, Peng Chang, Liu Xiaofeng. A novel redundant haar lifting wavelet analysis based fault detection and location technique for telephone transmission lines [J]. Measurement, 2014, 5: 42-52.
- [10] 陈良波, 郑亚青. 基于最小二乘法的曲线拟合研究[J]. 无锡职业技术学院学报, 2012, 11(5): 52-55.
Chen Liangbo, Zheng Yaqing. Study on curve fitting based on least square method [J]. Journal of Wuxi Institute of Technology, 2012, 11(5): 52-55. (in Chinese)



第一作者简介: 柏林,男,1972年11月生,教授、博士生导师。主要研究方向为虚拟仪器与信号处理。曾发表《Measurement system for wind turbines noises assessment based on LabVIEW》(《Measurement》2011, Vol. 44, No. 2)等论文。
E-mail: bolin0001@aliyun.com