DOI: 10. 19650/j.cnki.cjsi.J1905847

板式换热器波纹板深度在线检测方法研究

李 飞^{1,2},张 平^{1,2},苑玮琦^{1,2}

(1. 沈阳工业大学 视觉检测研究所 沈阳 110870; 2. 辽宁省机器视觉重点实验室 沈阳 110870)

摘 要:目前板式换热器波纹板深度的检测方式主要是人工检测,该检测方式的检测结果难以保障,相对于传统的接触式探 针测量,研究设计了一套基于激光位移传感器的非接触式测量方式,根据不同的波纹板结构,设计出最佳的采集路径,采用 自适应迭代中值滤波算法对采集数据进行降噪处理,降噪后的数据转换为可视化图像区域以及灰度图像,可直观高效地提 取检测区域,用最小二乘法拟合波纹板垫片槽区域,利用统计学中的矩计算波纹深度参数,判断波纹板质量。软件上采用多 线程设计,解决了采集数据与处理数据相互干扰的问题,提高了检测速度。经过大量现场测试表明,单点算法检测平均时间 为40.9326s,宽波纹板片检测值与设计值比较,检测准确率达到99.3%,窄波纹板片检测准确率达到94.5%,该设计为板式 换热器波纹板深度检测提供了一种自动方式,在检测速度和检测结果上优于人工检测,能够快速有效地检测出波纹板深度 值,具有一定的实用价值。

Research on online measurement method of corrugated plate depth of plate heat exchanger

Li Fei^{1,2}, Zhang Ping^{1,2}, Yuan Weiqi^{1,2}

(1.Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2.Key Laboratory of Machine Vision, Liaoning Province, Shenyang 110870, China)

Abstract: At present, the detection method of corrugated plate depth of plate heat exchanger is mainly manual detection, this detection method can hardly guarantee its detection result. Through comparing with traditional contact probe measurement, this paper studies and designs a set of non-contact measurement method based on laser displacement sensor. According to different corrugated plate structures, the optimal acquisition path is studied and designed, the adaptive iterative median filtering algorithm is used to reduce the noise of the collected data. The de-noised data is transformed into visual image area and grayscale image to extract the detection area intuitively and efficiently. The least square method is used to fit the corrugated plate gasket groove area, and the moment in statistics is used to calculate the corrugation depth parameter and judge the corrugated plate quality. Multi-thread design is adopted in the software, which solves the problem of mutual interference between data acquisition and data processing, and improves the detection speed. A large number of field tests show that the average detection time of single point algorithm is 40.932 6 s. Through comparing the detection value with the design value, the detection accuracy of wide corrugated plate is 99. 3%, and that of the narrow corrugated plate is 94. 5%. This design provides an automatic method for the detection of corrugated plate depth of plate heat exchanger, which is superior to manual detection in detection speed and detection result, can quickly and effectively detect the depth value of corrugated plate and has a certain practical value.

Keywords: plate heat exchanger corrugated plate; corrugation depth; laser displacement sensor; non-contact measurement; moment; multi-thread

0 引 言

板式换热器是由一系列具有一定波纹形状的金属波 纹板排列而成并通过金属波纹板进行热量交换的一种高 效换热器^[1]。板式换热器波纹板^[2]作为板式换热器的核 心部件,其质量直接影响着板式换热器的正常应用。板 式换热器相较于其他换热器结构紧凑,换热效率高,是工 业生产与日常生活必不可少的换热设备^[3]。良好的板式 换热器波纹板会影响换热器的换热性能,延长换热器的 使用寿命,创造更大的经济收益,而存在缺陷的板式换热 器波纹板如果应用在换热器中必将给人的生命财产安全 造成潜在隐患。因此波纹板的缺陷检测具有重要的工程 实际应用价值。

目前板式换热器波纹板为模具配合压力机一次性冲 压成形,在冲压过程中会导致波纹板结构出现裂纹,垫片 槽深度和波纹深度会发生变化,影响换热效率,导致垫片 槽垫圈在注水加压以后存在严重的安全隐患^[4-5]。

随着非接触式测量的发展,激光位移传感器得到了 广泛的应用。检索文献发现,国内外许多学者对激光位 移传感器的应用进行了详细的研究。通过对自由曲面的 检测,董祉序等^[6]和李兵等^[7]利用建立数学模型对激光 位移传感器采集到的数据进行校正,提高了传感器数据 采集精度。Vukasinovic 等^[8]和孙彬等^[9]通过分析激光位 移传感器光路、光强等因素,建立误差补偿模型,对激光 位移传感器在倾斜检测面的采集数据进行误差补偿。解 则晓等^[10]通过对不同检测面颜色的研究发现红色对激 光位移传感器的采集精度影响最小,黑色影响最大。宋 开臣等^[11]研究不同粗糙程度的材质对激光位移传感器 采集精度造成的影响。研究发现,材质表面过于光滑会 使入射光线产生镜面反射,当材质表面过于粗糙,传感器 采集过程中光斑形状又会发生变化,二者皆会影响传感 器的采集精度。杜玉霞等^[12]在低温环境下对激光位移 传感器进行标定,根据标定结果对传感器参数进行修正。 Gerbino 等^[13] 通过实验发现环境光也是影响传感器测量 精度的重要原因之一。Hermann 等^[14]通过对黑暗环境中 采集数据产生误差的情况进行研究,提出一种基于布朗 运动的线性稳定型算法。史尧臣等^[15]和杨桂栓等^[16]将 激光位移传感器应用到工业检测中。通过检索发现还没 有板式换热器波纹板深度检测系统的相关研究报道,目 前主要的检测方式是人工检测,人工检测效率低,波纹板 质量难以得到保障。针对以上情况,本文提出了一种基 于激光位移传感器的波纹深度在线检测方式,通过激光 位移传感器采集波纹板深度数据,将深度数据转换为可 视化图像区域与灰度图像,通过处理算法进行处理,输出 波纹板深度值。

1 板式换热器波纹板深度检测硬件系统设计

1.1 波纹板板片介绍

如图 1(a) 所示, 波纹板主要由角孔区、导流区、波纹区 3 部分构成, 波纹横切面如图 1(b) 所示, 垫片槽横切面如 图 1(c) 所示。本文主要介绍垫片槽深度的检测方法。

标准 NB/T47004-2009(JB/T 4752)规定波纹板垫片 槽深度检测点应均匀分布,两端各 4 个检测点位,每侧直 线部分每米 3 个检测点位(不足 1 m 按 1 m 计算)^[17]。



Fig.1 Corrugated plate structure

1.2 系统结构以及工作原理

本文设计的板式换热器波纹板深度检测系统主要由 波纹板传送系统、运动控制系统、数据采集系统和数据处 理系统组成,系统硬件结构如图2所示。

检测系统人机交互界面由 C++类库 MFC 编写,其主要包括板号输入模块、存储模块、运动控制模块、深度检测模块、显示模块。

图 1(c)中待检板片凸台顶面宽度 W_d 在 3~15 mm 之间,垫片槽宽度 L_d 宽度最小为 5 mm,如图 3(a)所示, 采集深度数据时,板片横向至少覆盖一个凸台顶面,纵向 至少覆盖一个凸台顶面及与其相邻的垫片槽。检测路径 设计为长 40 mm、宽 2 mm 的矩形,矩形之间间隔 2 mm。



注:1.计算机;2.可编程控制器;3.伺服驱动器;4.橡胶压棍;5.限位 轮;6.待检测波纹板;7.支架;8.皮带;9.电机1;10.光电开关1;11.气 缸;12.光电开关2;13.金属保护外壳;14.输送橡胶滚筒;15.Y轴; 16.电机2;17.电机3;18.X₂运动轴;19.激光位移传感器。

- 图 2 板式换热器波纹板深度检测硬件系统
- Fig.2 Hardware system of the corrugated plate depth detection for plate heat exchanger

波纹板在输送橡胶滚筒带动下从上料工位向深度 检测工位移动,到达深度检测工位坐标原点时波纹板 停止移动。传感器在电机2与3共同控制下按照 图3(a)所示路径移动实现一个点位数据采集,然后Y 轴与X₂轴复位。依次按照设定完成所有检测点位深 度数据的采集,数据处理模块进行波纹板深度计算,显 示模块进行界面显示,存储模块进行本地存档。存档 文件如图3(b)所示,波纹板所有检测点位以及电机对 应轴移动方向如图3(c)所示,其中1-1、1-2、2-1、2-2分 别表示板片第1行第1个检测点位、第1行第2个检测 点位、第2行第1个检测点位、第2行第2个检测点位, 以此类推。



图 3 检测路径及点位介绍



1.3 激光三角法原理

由投光素子发出的激光束垂直照射在被测物体表面 发生漫反射,部分反射光经过成像透镜被受光素子接受。 如图 4 所示,设 A 点所在的平面为参考平面,入射光线 AB上的点与受光素子上的光斑投影是一一对应的,知道 入射光线上一个点在受光素子上的位置,则可以计算出 该点的高度信息^[18-19]。其中 a 为物距,d 为像距,x 为A'B' 之间的距离,y 为 AB 之间的距离,在连接 AA' 以后,三角 形 OBM 相似于三角形 O'B'M,根据几何光学关系以及三 角形相似原理可得:

OB _ OM	(1)
$\overline{O'B'} = \overline{O'M}$	(1)
用已知变量和角度表示式(1)	,可得:

$$\frac{y \sin \beta}{r \sin \alpha} = \frac{\alpha + y \cos \beta}{d - r \cos \alpha} \tag{2}$$

对式(2)整理变形可得:

v

$$=\frac{ax\sin\alpha}{d\sin\beta - x\sin(\alpha + \beta)}$$
(3)



图 4 激光三角法原理 Fig.4 Principle of laser triangulation method

经以上分析,波纹板结构复杂、种类繁多、人工检测 效率低,以及在检测方法上一维深度数据采集区域涉及 平面、斜面、曲面等多种因素,如何在众多干扰中提取有 效数据是检测方法研究的一大难点。

针对以上问题,本文设计了板片传送平台,基于激光 位移传感器的数据采集装置,又根据不同板片研究设计 最佳的采集路径。将进行降噪处理后的一维数据转换为 可视化图像区域以及灰度图像,以便提取检测区域,利用 统计学中的矩计算波纹深度参数,判断波纹板质量。在 软件上,采用多线程设计解决了采集数据与处理数据相 互干扰的问题,提高了检测速度。

2 深度检测数据预处理

由于激光位移传感器安装高度距离检测平台的垂直

距离为53 mm,所以将采集数据中大于53 mm的数据定 义为较大异常值,如图5(a)所示,箭头所指虚线以上部 分皆为较大异常值。



Fig.5 Raw data waveform

为方便处理,将采集数据按图 3(a) 所示采集路径 分割成 10 等份分别处理,由于偶数段数据采集方向与 奇数段采集方向相反,所以对偶数段数据进行取反操 作。用自适应迭代中值滤波剔除中间数据的异常值, 滤波前的数据段如图 6(a) 所示,滤波后的数据段如图 6(b) 所示。假设采集数据为 p_i ,其中 $i \in [1,L]$, a为去 尖峰噪声阈值, b 为待消除的尖峰噪声, δ 为波峰顶部数 据标准差, δ_0 为可接受最大标准差, t 为迭代次数。 尖 峰异常值如图 5(b) 箭头所指圆圈部分所示,尖峰噪声 定义为:如果 $p_i - p_{i-1} > a \perp p_{i+1} - p_i < -a(1 \le i \le P_{i-1})$, 则 $p_i \in b_0$

首先采用 1×3 滤波窗口 w_t 进行迭代中值滤波,若滤 波后波形较上一次没有发生变化,且尖峰噪声未完全消 除,增大滤波窗口尺寸,重复上述操作,直至 $\delta < \delta_0$ 。





为保证去除噪声后波形长度不发生变化,且去噪以后数据都是有效数据,去除曲线 M 首尾较大异常值的方法如下:

1)按照最大异常值定义删除曲线 M 首尾较大异常 值,求剩余曲线 N 的平均值。

2)用曲线 N 的平均值替换曲线 M 中首尾异常值。 效果如图 6(c)所示。

3 垫片槽定位提取

原始数据在经过去噪之后依然会包含一些干扰数据,如图7(a)所示,实线箭头所指区域为垫片槽区域, 虚线箭头所指区域为干扰数据,为避免干扰数据对处 理结果造成影响,在数据处理之前需先进行垫片槽区 域提取,由于从一维数据很难直接定位,本文将原始数 据转换为可视化图像区域,如图7(b)所示,波纹板一个 检测点位所有采集数据转换为可视化区域,如图7(c)所 示,再将可视化图像区域转换为灰度图像,如图7(d) 所示,通过对灰度图像进行形态学处理,筛选定位垫 片槽。











3.1 通过灰度图像提取垫片槽

由于对灰度图像处理计算量较大,为了提高检测速度,本文采用最大类方差分割法^[20]将灰度图像转换为二 值图像进行下一步处理。假设图像大小为A个像素,取 分类阈值 a 将图像分为感兴趣区域和背景区域,像素值 为0~a之间的区域看作是感兴趣区域,计算感兴趣区域 像素个数 M₀,与图像总像素个数比例为 N₀,感兴趣区域 平均灰度为 I₀, a ~ 255 之间的区域是背景区域,背景像 素个数与图像总像素个数比例为 N₁,背景区域平均灰度 为 I₁,图像全局灰度均值为 I,类间方差为 g,若方差 g 越 大,分类阈值 a 越理想。

图像整体像素个数为:

$$M_0 + M_1 = A \tag{4}$$

感兴趣区域占图像整体像素比例:

$$N_0 = \frac{M_0}{A} \tag{5}$$

背景区域所占像素点比例:

$$N_1 = 1 - N_0 \tag{6}$$

图像全局灰度均值为:

$$I = N_0 \times I_0 + N_1 \times I_1 \tag{7}$$

类间方差:

$$g = N_0 \times N_1 \times (I_0 - I_1)^2$$
(8)

如式(9)所示,二值化分类阈值 a 根据不同图像自动获取。

$$g(x,y) \begin{cases} 255, & f(x,y) \ge a\\ 0, & f(x,y) \le a \end{cases}$$

$$(9)$$

图 7(d) 所示灰度图像文本大小为 59 010 个像素点, M₀ = 26 617 个像素点, N₀ = 0.45, N₁ = 0.55, I₀ 的灰度值 为75,*I*₁的灰度值为215,类间方差*g* = 4851,此时阈值*a*的灰度值为156,二值化后的图像如图8(a)所示。对二 值图像进行阈值分割,提取灰度值为0的区域进行筛选, 得到包含垫片槽的区域,如图8(b)箭头所示,由于二值 图像最大高度为10个像素点,创建高度为10个像素点, 角度与垫片槽一致的结构元对包含垫片槽区域进行腐蚀 操作,结构元如图8(c)所示,处理结果如图8(d)所示。 再用图8(c)所示结构元对图8(d)所示区域进行膨胀操 作,结果如图8(e)所示。波纹板其他位置垫片槽也用该 方法进行提取。如图8(f)所示,以箭头所指区域像素点 列坐标为基准,求膨胀结果中每一行像素点列坐标相较 于左侧虚线偏移的像素距离*d*,进行下一步处理。





(b) 包含垫片槽的区域(b) The area containing gasket groove

(d) 腐蚀结果

(d) Corrosion result



(c) Structural element



(e) 膨胀结果 (e) Dilated result

A



(f) Offset calculation



Fig.8 Grayscale image gasket groove extraction

3.2 通过可视化图像区域提取垫片槽

由于灰度图像是由可视化图像区域绘制而成的,通 过图8(f)计算出的偏移量d,对图9(a)所示可视化区域 进行偏移量平移校正,效果如图9(b)所示。图9(b)的 像素高度为420,采用420×1的矩形结构元对图9(b)进 行闭运算操作,效果如图9(c)所示,闭运算之后垫片槽 位置最大像素高度为200,采用200×1的矩形结构元对 图9(c)进行开运算操作,用图9(c)与开运算结果做差, 通过形态学筛选,最终得到垫片槽位置,效果如图9(d) 所示。闭运算操作定义如式(10)所示,开运算操作定义 如式(11)所示。

$$\bullet B = (A \oplus B) \odot B \tag{10}$$



(d) Gasket groove area

图 9 可视化图像区域垫片槽提取

Fig.9 Visual image area gasket groove extraction

3.3 垫片槽校正

1)垫片槽水平倾斜校正

波纹板检测时必须水平且平稳的通过检测工位,如 果波纹板产生形变,必须对采集到的数据进行校正才能 进行下一步处理,波纹板水平状态部分采集数据如 图 10(a) 所示, 波 纹 板 倾 斜 状 态 部 分 采 集 数 据 如 图 10(b) 所示,本文使用最小二乘法对数据垫片槽区域 进行拟合校正,假设函数为:

f(x) = ax + b(12)在点 x_1, \dots, x_n 处的函数值为 y_1, \dots, y_n 求多项式: $Q = (ax_1 + b - y_1)^2 + (ax_2 + b - y_2)^2 + L +$ $(ax_{n} + b - y_{n})^{2}$ (13)

使得平方差之和 0 的值最小。其中 n 为拟合点个 数,即:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} (ax_i + b - y_i)^2$$
(14)

由于变量 $x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n$ 已知,只需求解函数 Q = f(a,b)上一点 P,使得 f(a,b) 存在极小值。

对式(14)中a,b分别求偏导:

$$\frac{\partial f(a,b)}{\partial a} = \frac{\partial \sum_{i=1}^{n} (ax_i + b - y_i)^2}{\partial a} = 0$$
(15)

$$\frac{\partial f(a,b)}{\partial b} = \frac{\partial \sum_{i=1}^{\infty} (ax_i + b - y_i)^2}{\partial b} = 0$$
(16)

可得:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})}$$
(17)

(18)

$$b = \overline{y} - a\overline{x}$$

式中: \bar{x} 为 x_i 的算术平均值; \bar{y} 为 y_i 的算术平均值。将a, b代入式(12)即可得到拟合直线方程。根据拟合后直线 的角度对垫片槽进行校正,如式(19)所示。

$$M_1 = M_0 \times \tan\alpha (N - O) \tag{19}$$

式中: M₁为校正后的行坐标: M₀为校正前的行坐标: α 为 拟合直线的角度; N 为校正前的列坐标; O 为拟合 直线的中心列坐标。本文图 10(c) 中一条拟合直线斜 率 a = 0.059 , b = 310, 拟合后直线的角度 $\alpha =$ 2.8075。 需要校正数据如图 11(c) 所示, 校正后数据 如图 10(d) 所示。





2) 垫片槽竖直平移校正

由于采集路径的设计存在一定的间隔,同检测点位 采集的所有数据绘制成可视化图像区域时,在列坐标方 向上会存在偏差,如图11(a)所示。做垫片槽区域垂线, 计算每条曲线相对于基准曲线的偏差像素个数,进行垫 片槽竖直方向平移校正。校正效果如图11(b)所示。



可视化图像区域异常值处理 4

如图 12(a) 所示箭头所指, 由于工业现场测试环境 复杂,采集到的数据绘制成可视化图像区域后凸台顶面 存在异常值,该值会导致测量结果出现偏差。处理过程 如下:提取图 12(a) 中每个单独区域骨骼,将其分割成小

直线段与圆弧,通过弧度筛选保留弧度值为-0.2~0.2之间的直线区域,保留含有这些直线区域的原始可视化图像区域,处理结果如图12(b)所示。







5 计算波纹板深度

将校正以后的可视化图像区域进行融合,融合原理如下:如图 13(a)所示做竖直方向垂线与曲线一交于点 A,B,C,…,M。与曲线二交与点 A',B',C',…,M'。在每 条垂线上取所有交点纵坐标最大的点,A,B,C',…,M 绘 制如图 13(b)所示曲线 3。融合前的可视化图像区域如 图 13(c)所示,融合后的可视化图像区域如图 13(d) 所示。

对融合后的可视化图像区域进行形态学处理,以垫 片槽为中心,左后各保留一个凸台宽度的距离,效果如 图 14(a)所示。由于在绘制可视化图像区域时将所有数 据扩大了 100 倍,所以在计算波纹板波纹深度时需要进 行反向变换,如式(20)所示。本文用矩来求取感兴趣区 域最小外接矩形的宽度,在统计学中,矩通常被用来描述 随机变量的分布形态^[21-22],矩的定义如果推广之(*a*×*b*) 大小的可视化图像区域中,将图 14(a)的所有像素点作 为随机变量值*f*(*x*,*y*),(*x*,*y*)为可视化图像区域中每个 随机像素点的坐标值,感兴趣区域*P*的(*m* + *n*)阶矩如 式(21)所示。

$$H_{\rm d} = L \times 0.01 \tag{20}$$

$$M_{mn} = \sum_{(x,y)\in P} x^m y^n f(x,y)$$
(21)

式中: *H*_a 为波纹板垫片槽深度;*L*, *W* 分别为感兴趣区域 最小外接矩形的长度和宽度。

当 *m* = 1,*n* = 0 或者 *m* = 0,*n* = 1 时,感兴趣区域的一阶矩如式(22)所示。



(b) **可视化图像区域最小外接矩形** (b) Minimum circumscribed rectangle of visual image area

图 14 波纹板深度计算

Fig.14 Corrugated plate depth calculation

$$\begin{cases} M_{10} = \sum_{(x,y) \in R} x^1 y^0 f(x,y) = \sum_{(x,y) \in R} x f(x,y) \\ M_{01} = \sum_{(x,y) \in R} x^0 y^1 f(x,y) = \sum_{(x,y) \in R} y f(x,y) \end{cases}$$
(22)

通过感兴趣区域的零阶矩和一阶矩可求出其质心, 零阶矩如式(23)所示。

$$M_{00} = \sum_{(x,y) \in R} x^0 y^0 f(x,y) = \sum_{(x,y) \in R} f(x,y)$$
(23)

假设感兴趣区域的质心坐标为 (\bar{x}, \bar{y}) ,则求质心如 式(24) 所示。

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}} \\ \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \end{cases}$$
(24)

对图14(a)所示的可视化图像区域,求其质心如

图 14(b) 所示。将感兴趣区域质心转移到参考坐标系原 点,求出其中心矩,中心矩如式(25) 所示。

$$\begin{cases} u_{10} = \sum_{(x,y) \in R} (x - \bar{x})^{1} (y - \bar{y})^{0} f(x,y) = \\ \sum_{(x,y) \in R} (x - \bar{x})^{1} f(x,y) \\ u_{01} = \sum_{(x,y) \in R} (x - \bar{x})^{0} (y - \bar{y})^{1} f(x,y) = \\ \sum_{(x,y) \in R} (y - \bar{y})^{1} f(x,y) \end{cases}$$
(25)

用同样的方法可以求出 *u*₀₀、*u*₂₀、*u*₀₂等。则感兴趣区 域最小外接矩形长、宽求取如式(26)所示。

$$\begin{cases} L = 2 \times \left(\frac{u_{20} + u_{02} + \left[\left(u_{20} - u_{02} \right)^2 + 4u_{11}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{u_{00}/2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ W = 2 \times \left(\frac{u_{20} + u_{02} - \left[\left(u_{20} - u_{02} \right)^2 + 4u_{11}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{u_{00}/2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases}$$
(26)

对图 14(b)求取矩形长 *M* = 1 480.87 个像素点,*L* = 378.998 个像素点,垫片槽深度 *H_d* = 3.79 mm。

6 检测结果以及误差分析

6.1 检测算法时间与准确率分析

为了验证算法的准确性,在工业现场对不同型号波 纹板波纹深度值进行随机测试,每个型号的波纹板抽取 10 张,每张波纹板 32 个检测点位,统计机检算法运行时 间,统计波纹板不合格点数,对机检值与设计值、人工检 测值进行对比,验证检测算法的可靠性。不同波纹板检 测点数以及算法运行时间统计如表1所示。分析表1中 数据可知检测一张波纹板算法最多用时41.6083s,型号 为P10B、EA10、U15B的宽波纹板片机检不合格点数与 人工检测基本一致。型号为02CG的窄波纹板片不合格 点数比人工检测多。

表 1 不同波纹板检测点数以及算法运行时间统计 Table 1 Statistics of different number of detection points of corrugated plate and algorithm operation time

型号	检测 次数	总检测 点数	机检不合 格点数	人工检测不 合格点数	单板算法 检测时间/s
P10B	10	320	20	20	37.472 9
EA10B	10	320	22	21	40.039 5
02CG	10	320	66	58	41.608 3
U15B	10	320	23	20	40.491 8

由于传统的人工检测耗时较多,检测结果也容易受 到主观因素影响,本文设计的机器检测分辨率高于传统 的百分表测量,无论是在时间还是在检测值的准确性,都 表明本文设计算法在波纹板波纹深度检测中有较好的 效果。

不同型号波纹板人工检测结果、机检结果、板片设计 值对比如图 15 所示。其中横坐标表示检测点位置,纵坐 标表示生检测点位深度值。



Fig.15 Comparison between manual detection values and machine inspection values

6.2 机检误差分析

1) 重复误差分析

在质量检测中,检测设备的测量重复精度的衡量检

测设备可靠性的指标之一。在设计过程中为了保证波纹 板每次检测都能准确进入待测位置,不发生左右偏移,在 输送橡胶滚筒两侧各设计了可调节的限位装置。规定同 一波纹板每次进入检测工位的方向一致,经过多次连续 测试对比分析检测结果。

误差理论分析中重复精度可通过贝塞尔公式计算得 到,标准差 Y(m)的大小决定了检测系统重复性精度,标 准差越小,系统重复精度越高。

$$Y(m) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$
(27)

式中: Y(m) 为测量算数标准差;n 为测量次数;m 为不同 的检测点位; x_i 为在规定检测点位第i 次测量结果; \bar{x} 为在 规定检测位置测量结果算数平均值。根据式(27) 计算 分别在 m_1 、 m_2 、 m_3 3 处检测位置各自测量 20 次的试验标 准差 $Y(m_1)$ 、 $Y(m_2)$ 、 $Y(m_3)$ 分别为 6.5、6.8、6.6 μ m。 由标准差可知,该系统的重复精度满足设计要求。02CG 5 次测量检测结果对比如图 16 所示。



图 16 检测结果对比 Fig.16 Comparison of the test results

2) 传感器采集误差分析

波纹板在冲压完成以后会产生肉眼难以观察到 的轻微形变,通过显微镜观察波纹板凸台顶面效果如 图 17(a)所示,可以看到凸台表面存在轻微压痕。用 激光位移传感器采集到的数据绘制波纹板凸台顶面 三维重建图,如图 17(b)所示,可以看到顶面并非光 滑。由于检测使用的传感器分辨率在 8 μm 以内,且 人工检测是用百分表刚性接触测量,所以该轻微形变 会使机检值与人工检测在同一位置结果产生误差。 通过实验发现机检值容易受到纹板表面大颗粒灰尘、 铁屑、杂质、板片冲压缺陷、板片轻微形变,板片波纹 的宽度等因素影响。波纹板表面铁屑显微镜效果如 图 17(c)所示。板片前端轻微形变如图 17(d)箭头 所示。



(a) 波纹板凸台顶面显微镜效果
(a) Microscope effect of the top surface of corrugated plate boss



(b) 波纹板凸台顶面三维重建效果(b) 3D reconstruction effect of the top surface of corrugated plate boss



(c) 波纹板表面铁屑显微镜效果
 (c) Microscope effect of iron
 filings on the corrugated plate surface



(d) 波纹板前端形变 (d) Front end deformation of corrugated plate

图 17 传感器采集误差分析 Fig.17 The sensor acquisition error analysis

7 结 论

本文设计的基于激光位移传感器的波纹板波纹深度 在线检测系统,克服了板式换热器波纹板复杂的板片构 造,可适用于多种型号的波纹板深度检测,采用橡胶压棍 的设计使得波纹板在传送过程中平稳移动,保证了采集 数据的准确性,软件采用多线程构架,提高了波纹板检测 速度。经过大量现场测试表明,本文设计的板式换热器 波纹板深度检测系统,单点算法检测平均时间为 40.9326s,从统计结果可知,型号为P10B、EA10、U15B 的宽波纹板片检测值与设计值比较,检测准确率达到 99.3%,型号为02CG的窄波纹板片检测准确率接近 94.5%,窄波纹板片准确率低的原因是由于波纹底部间 距较小,传感器在当前移动速度下采集到的有效数据太 少,会随机漏掉部分波峰值与波谷值,导致该检测点位检 测结果偏小。测试表明,该方法在检测速度和检测结果 上优于人工检测,本文方法为板式换热器波纹板深度检 测提供了一种自动方式,能够快速有效地检测出波纹板 深度值,具有一定的实用价值。

参考文献

 [1] 文珏,张晶,赵力,等.新型人字形组合板式换热器及导流区的数值模拟[J].机械工程学报,2016,52(2): 150-156.

WEN Y, ZHANG J, ZHAO L, et al. Numerical simulation of new combined plate heat exchangers and distribution region [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016,52(2):150-156.

 [2] 张仲彬,张浩,刘洋,等.新型板式换热器导流区特性的数值模拟及场协同分析[J].机械工程学报,2017, 53(6):145-151.

ZHANG ZH B, ZHANG H, LIU Y, et al. Numerical simulation and field synergy principle analysis on the characteristic for new distribution region of plate heat exchanger[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6):145-151.

[3] 李明春,肖刚,史和春,等.人字形波纹板相变流动及换 热特性研究[J].工程热物理学报,2016,37(3): 581-585.

> LI M CH, XIAO G, SHI H CH, et al. Study on phase change flow and heat transfer characteristics of chevron corrugated plate [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016,37(3):581-585.

- [4] 杨柳.TA1 纯钛冷轧薄板冲压过程开裂原因分析[J]. 塑性工程学报,2018,25(2):73-78.
 YANG L. Analysis on the causes of stamping cracking of TA1 pure titanium cold rolled sheet [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018,25(2):73-78.
- [5] CHAKRAVARTY A, GOYAL M, CHAKRAVARTY A, et al. Numerical and experimental investigations of transient behaviour of compact plate fin heat exchanger[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 171(1):012095.
- [6] 董祉序,孙兴伟,刘伟军,等.基于激光位移传感器的自

由曲面精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12):30-38.

DONG ZH X, SUN X W, LIU W J, et al. Precision measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(12):30-38.

- [7] 李兵,孙彬,陈磊,等.激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J].光学精密工程,2015,23(7):1939-1947.
 LI B, SUN B, CHEN L, et al. Application of laser displacement sensor to free-from surface measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1939-1947.
- [8] VUKASINOVIC N, MOZINA J, DUHOVNIK J. Correlation between incident angle, measurement distance, object colour and the number of acquired points at CNC laser scanning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 58(1):23-28.
- [9] 孙彬,李兵.一种量化的激光位移传感器倾角误差补偿 模型[J].仪器仪表学报,2015,36(5):996-1004.
 SUN B, LI B, A quantitative error compensation model of the inclination angle of the laser displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(5): 996-1004.
- [10] 解则晓,张宏君,张国雄.影响激光三角测头测量精度的因素及其补偿措施[J].现代计量测试,1999(1):23-26.
 XIE Z X, ZHANG H J, ZHANG G X. Factors affecting the measurement precision of laser triangular prob and the

compensation methods [J]. Advanced measurement and Laboratory management, 1999(1):23-26.

- [11] 宋开臣,张国雄.激光三角法扫描测头特性的研究[J]. 中国机械工程,2000(4):385-389.
 SONG K CH, ZHANG G X. Study on the characteristics of the laser triangulation scanning probe [J]. China Mechanical Engineering, 2000(4):385-389.
- [12] 杜玉霞,马巍,赵淑萍,等.负温条件下激光位移传感器的标定[J].冰川冻土 2016,38(6):1583-1591.
 DUYX, MAW, ZHAOSHP, et al. Calibrating the laser displacement sensor under the temperatures below 0℃[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6):1583-1591.
- GERBINO S, GIUDICE D M D, STAIANO G, et al. On the influence of scanning factors on the laser scannerbased 3D inspection process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84 (9-12): 1787-1799.
- [14] HERRMANN M, OTESTEANU M.A map estimator based on geometric Brownian motion for sample distances of

laser triangulation data [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2016,86(11):98-105.

[15] 史尧臣,周宏,唐武生,等.基于激光三角法的汽车同步带齿形轮廓参数测量[J].仪器仪表学报,2019,40(6):138-145.

SHI Y CH, ZHOU H, TANG W SH, et al. Profile parameters measurement of automotive synchronous belt based on laser triangulation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6):138-145.

[16] 杨桂栓,陈涛,张志峰.基于激光三角法对透明平板厚 度测量光线补偿的研究及应用[J].中国激光,2015, 42(7):219-226.

YANG G SH, CHEN T, ZHANG ZH F. Study and application on transparent plate thickness measurement based on laser triangulation with light compensation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7):219-226.

[17] 贾伟涛,马立峰,乐启炽.换热器板片波纹结构辊压成形工艺设计[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(3):379-384.

JIA W T, MA L F, LE Q CH. Roll forming process design of corrugated structure of heat exchanger plate[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(3):379-384.

- [18] 王振宇,李烨,郁丰,等.一种激光三角测量的标定方法 及误差分析[J].激光技术,2017,41(4):521-525.
 WANG ZH Y, LI Y, YU F, et al. Calibration method and error analysis of laser triangulation measurement[J]. Laser Technology 2017,41(4):521-525.
- [19] GERBINO S, DEL GIUDICE D M, STAIANO G, et al. On the influence of scanning factors on the laser scannerbased 3D inspection process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9-12):1787-1799.
- [20] 苑玮琦,薛丹.基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法 综述[J].仪器仪表学报,2017,38(12):3100-3111.
 YUAN W Q, XUE D. Review of tunnel lining crack detection algorithm based on machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (12): 3100-3111.
- [21] 苑玮琦,胡迪.利用矩实现植物叶片长宽的测量[J].计 算机工程与应用,2013,49(16):188-191. YUAN W Q, HU D. Measurement of leaf blade length

and width based on moment [J]. Computer Engineering and Applications, 2013,49(16):188-191.

[22] 丰明坤,赵生妹,施祥.视觉多通道梯度与低阶矩自适应图像评价[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (11): 2531-2537.

FENG M K, ZHAO SH M, SHI X. Adaptive image quality assessment based on visual multi-channel gradient and low order moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11):2531-2537.

作者简介



李飞,2007 年于东北大学获得博士学 位,现为沈阳工业大学讲师,主要研究方向 为视觉检测与图像处理、模式识别。 E-mail; lifeisut@163.com

Li Fei received her Ph. D. degree from Northeastern University in 2007. Now, she is a

lecturer in Shenyang University of Technology. Her main research interests include visual inspection and image processing, and pattern recognition.



张平(通信作者),2016年于大连工业 大学获得学士学位,现为沈阳工业大学视觉 检测技术研究所硕士研究生,主要研究方向 为机器视觉和生物特征识别。

E-mail: 1045439804@ qq.com

Zhang Ping (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Dalian Polytechnic University in 2016. Now, he is a M. Sc. candidate in Computer Vision Group, Shenyang University of Technology. His main research interests include machine vision and biometric identification.



苑玮琦,1982年于湖南大学获得学士学 位,分别在1988年和1997年于东北大学获 得硕士和博士学位,现为沈阳工业大学教 授、博士生导师,主要研究方向为机器视觉 和生物特征识别。

E-mail: yuan60@126.com

Yuan Weiqi received his B. Sc. degree from Hunan University in 1982, and received M. Sc. and Ph. D. degrees both from Northeastern University in 1988 and 1997, respectively. Now, he is a professor and doctoral supervisor in Shenyang University of Technology. His main research interests include machine vision and biometric identification.