

冯霞, 石超, 丁文波, 等. 基于傅里叶变换的频谱分析法在 X 射线轮胎检测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(3): 453-458  
Feng X, Shi C, Ding WB, et al. The complication of spectral analysis based on Fourier transform in the tire X-ray detection[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(3): 453-458.

## 基于傅里叶变换的频谱分析法在 X 射线轮胎检测中的应用

冯霞<sup>1</sup>, 石超<sup>2</sup>, 丁文波<sup>1</sup>, 冯燕<sup>2</sup>, 郝振平<sup>3</sup>✉

1. 山东德州科技职业学院, 山东 禹城 251200
2. 禹城市水务局, 山东 禹城 251200
3. 禹城市广播电视局, 山东 禹城 251200

**摘要:** 子午线轮胎的缺陷检测方法比较多, 频谱分析法是基于频域的图像分析方法, 其主要功能是获取图像在频域中的纹理特征。傅里叶变换能够将时域的信号分解为频域各频率分量下之和, 即分解为各个频率下的谱。然后通过对得到的频谱进行图像处理, 判断轮胎有无缺陷。实验证明使用基于傅里叶变换的频谱分析法进行子午线轮胎缺陷检测可以大幅降低工作量, 提高轮胎检测效率。

**关键词:** X 射线轮胎检测; 傅里叶变换; 频谱分析法

**文章编号:** 1004-4140 (2014) 03-0453-06      **中图分类号:** TP 391.41      **文献标志码:** A

子午线轮胎的缺陷检测方法比较多, 目前国内的轮胎制造商主要还是利用人工观察轮胎的 X 射线图像, 通过视觉及经验判断轮胎缺陷, 因此检测效率低, 存在误检漏检等情况。如何快速有效地进行缺陷检测, 实现实时操作, 是现今研究的重点。利用数字图像处理技术进行轮胎缺陷检测有非常多的优点, 如成本低、使用方便快捷、不破坏轮胎的原始结构等。而且数字图像处理技术对轮胎缺陷位置的定位准确快速, 理论与实践证明利用数字图像处理技术进行轮胎缺陷检测效果较好。

本文使用图像分析软件 MATLAB, 并利用傅里叶变换对轮胎 X 射线图像进行缺陷检测。傅里叶变换能够分析时域信号的频率组成并分离出需要的信号, 按图像频率顺序展开信号强度, 使图像成为频率的函数, 傅里叶变换使我们能通过信号的频率成分来分析一个函数, 从而获取图像的频谱<sup>[1]</sup>。因子午线轮胎图像具有周期性空间分布特征, 在频域中其图像频谱也表现出相应的规则性, 可以利用傅里叶变换方法进行轮胎 X 射线图像的缺陷检测。通过观察图像的频谱幅度与频谱相位来考察图像的频率变化规律就是频谱分析, 频谱分析可以对图像进行定量或定性的分析描述, 从而可以更加有效地分析图像, 通过频谱分析检测轮胎 X 射线图像的频谱来判断轮胎是否合格<sup>[2]</sup>。

本文根据基于傅里叶变换的频谱分析算法及快速傅里叶变换算法, 使用傅里叶变换的频谱分析法对轮胎 X 射线图像进行缺陷检测。

## 1 X 射线轮胎检测系统

使用德国 YXLON 公司的 LX1500 轮胎检测系统获得轮胎 X 射线图像, 并进一步进行轮胎出厂检测。该系统的图像检测具有较高图像分辨率, 当轮胎传送到该检测系统时可以得到轮胎的帘布、侧壁等多部位的 X 射线图像, 研究图像主要来自轮胎厂的 LX1500 轮胎检测系统。图 1 是 LX1500 轮胎检测系统的实物图。

LX1500 轮胎检测系统的主要部件是周向 X 射线管 LX-1500, 它能够达到  $270^\circ$  的射线覆盖范围, 并且其图像系统可进行上下移动对被测轮胎进行整体扫描, 在整个检测过程中可以提供稳定且全面的轮胎各部位清晰图像<sup>[3-4]</sup>。该轮胎检测系统还配备有 X 射线控制单元、高分辨率显示器、计算机控制器及供电单元等设备, 通过监视器对轮胎检测系统进行实时监控。

为了获取高质量的图像便于定性分析, 对图像的亮度、对比度范围做了设定, 并通过设计的傅里叶变换的频谱分析法对扫描到的轮胎 X 射线图像进行缺陷检测, 从而判断通过 LX1500 轮胎检测系统获取的图像有无缺陷。



图 1 LX1500 轮胎检测系统

Fig.1 LX1500 tire detect system

## 2 算法设计

在图像处理中图像灰度分布的变化速度, 即图像灰度变化的剧烈程度可以在其图像频域变化上反映出来。本文主要利用二维快速傅里叶变换将图像从灰度变化的研究转化到频率分布上来分析图像<sup>[5]</sup>。

### 2.1 基于傅里叶变换的频谱分析原理

由于轮胎图像具有一定的周期性特点, 可以利用傅里叶原理进行分析。周期函数可以展开成一系列不同频率正弦波的叠加, 即用简单的周期函数表示复杂函数, 在此基础上进行推广研究, 对非周期函数也可以实现时域到频域的变换。

在图像处理中, 傅里叶变换可以将图像的灰度分布函数变换为图像的频率分布函数, 即傅里叶变换将图像从空间域转换到频率域, 傅里叶变换提供了分析图像特征的另一种表达方式, 这就是图像的频谱变换。傅里叶变换对于分析轮胎图像纹理非常方便, 轮胎图像的频谱变换可以看做多个频率分量函数的线性组合<sup>[6-7]</sup>。

以下为傅里叶变换的频谱变换公式, 即傅里叶变换特征参数:

$$F(u, v) = R(u, v) + jI(u, v) \quad (1)$$

频谱/模:

$$|F(u, v)| = \left( R^2(u, v) + I^2(u, v) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

能量谱/功率谱：

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v) \quad (3)$$

相位角：

$$\varphi(u, v) = \arctan \left( \frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right) \quad (4)$$

其中： $F(u, v)$  为时域信号的频域信号，即信号的频谱； $R(u, v)$  为信号变换后频谱的实部； $I(u, v)$  为信号变换后频谱的虚部。

傅里叶变换包括连续傅里叶变换和离散傅里叶变换，因为计算机只能处理离散的数值信号，故此主要研究离散傅里叶变换，每隔一段时间采集一次时域信号即采样，离散傅里叶变换将时域信号的采样变换为在离散傅里叶变换频域的采样，从而获得离散周期的图像纹理频谱<sup>[8]</sup>。通过傅里叶变换获得轮胎图像频谱能够定性定量分析轮胎图像，以判断轮胎图像是否合格。

## 2.2 快速傅里叶变换 (FFT)

本文在 X 射线轮胎图像处理中采用二维快速傅里叶变换算法，快速傅里叶变换是离散傅里叶变换的高效快速算法，理论上没什么本质区别，都是对图像进行频域分析研究的工具。

在轮胎图像处理中，由于在运算过程中傅里叶变换的指数部分是周期重复的，充分利用这一特性可减少计算步骤，以加快运算速度<sup>[9]</sup>。实验证明使用快速傅里叶变换的频谱分析法可以更加高效地获取轮胎图像频谱，从而提高轮胎检测效率。

## 3 实验结果及分析

利用基于傅里叶变换的频谱分析法进行 X 射线轮胎缺陷检测，研究如何提高出厂轮胎自动化检测的效率。通过检测轮胎 X 射线图像的频谱，使用一定的图像处理技术处理判断轮胎是否合格。该检测过程为：

(1) 由轮胎图像的直方图灰度分布找到适合的阈值，对采集到的轮胎 X 射线图像进行分割，并从采集到的轮胎图像中分割出轮胎的研究图像区域。

(2) 对分割出的轮胎研究图像区域进行中心定位，即对轮胎图像进行边缘检测及图像中心检测的过程，为下一步的傅里叶变换做准备。

(3) 对所研究轮胎 X 射线图像进行二维快速傅里叶变换，生成轮胎图像的纹理频谱，然后选择合适的阈值对所生成的轮胎纹理频谱进行二值化处理，便于下一步的定向研究<sup>[10]</sup>。

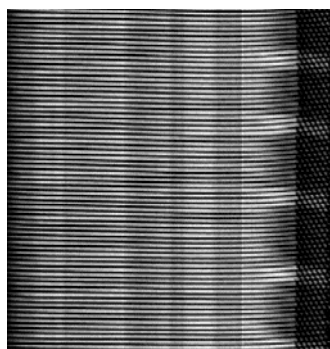
(4) 通过实验可看出合格轮胎图像的频谱是过频域原点的直线，使用 Hough 变换进行直线的检测。

Hough 变换利用点与线的对偶性，把研究图像整体特征转化为研究图像局部特征。只要给定曲线的方程，无论是直线、圆或弧线，Hough 变换都可以进行检测。Hough 变换不容易受图像旋转影响，即使图像有一点污渍或缺损也可以正确识别<sup>[11]</sup>。

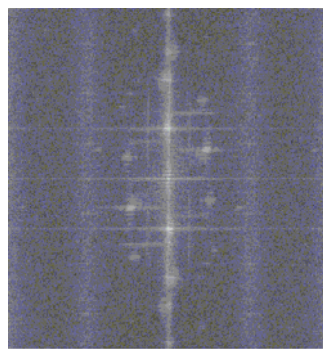
(5) 快速傅里叶变换后，通过对合格轮胎与检测轮胎频谱图的比较，分析判断频谱图

间的差异。判断得到的轮胎图像频谱是否是直线，这也是判断轮胎是否合格的依据，若轮胎图像频谱含有许多无规则线或倾斜线就可以判断轮胎是不合格的。

图 2 为合格轮胎 X 射线图像频谱分析前后对比图。图 3 为成型开根 X 射线缺陷轮胎图像频谱分析前后对比图。



(a) 合格轮胎 X 射线图像



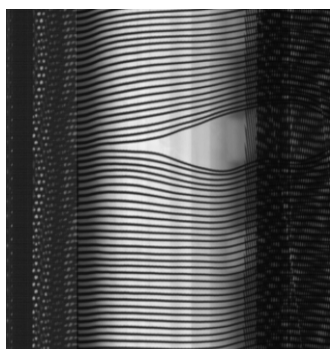
(b) 合格轮胎 X 射线图像二维快速傅里叶变换 (FFT2) 图像

图 2 合格轮胎 X 射线图像频谱分析前后对比

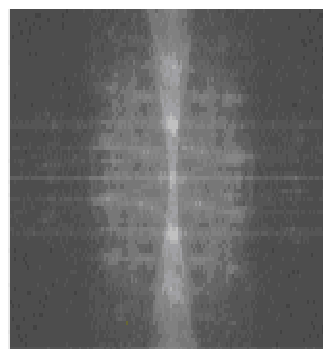
Fig.2 Qualified tire X-ray image compared spectral analysis before and after

在轮胎图像的频谱图中，有明暗不同的亮点，通过其亮度不同，可以看出轮胎图像灰度变化剧烈程度。因为这些亮度不同的点具有不同的梯度，也即频率不同，反映了点与点之间频谱的差异，梯度大的点的亮度比较强，梯度小的点亮度相对弱些，图像梯度的大小也反应出图像频率的大小。

通过研究傅里叶变换后的频谱图，首先就可以看出图像的能量分布，如轮胎频谱图中暗的点数比较多，那么实际轮胎图像较柔和；如轮胎频谱图中的点亮的比较多，那么轮胎图像明暗变化比较快，即图像边界处两边的像素梯度变化大<sup>[12-13]</sup>。



(a) 轮胎成型开根 X 射线缺陷图像



(b) 成型开根缺陷图像二维快速傅里叶变换 (FFT2) 图像

图 3 轮胎成型开根 X 射线缺陷图像频谱分析前后对比

Fig.3 Unqualified tire X-ray image compared spectral analysis before and after

通过对多组轮胎频谱图的研究可以看出，轮胎图像是有规律的纹理图像，其帘线方向是横向的，合格轮胎 X 射线图像的纹理主要为有规律的横向条纹。经过二维快速傅里叶变

换以后, 图 2 中合格轮胎 X 射线图像频谱图, 主要由一条垂直的亮线及部分水平的亮线组成。而图 3 中轮胎成型开根 X 射线缺陷图像的频谱图, 则比合格轮胎频谱图多一些倾斜的亮线并出现不规则亮线区域。

由上述分析总结出: 合格轮胎 X 射线图像的频谱主要为直线, 这条直线与图像空间纹理的方向相互垂直; 当轮胎图像中有缺陷时, 由于缺陷的随机性, 频谱图中出现了放射状的倾斜亮线。通过研究合格轮胎 X 射线图像的频谱特征及典型缺陷轮胎 X 射线图像的频谱特征, 对各种轮胎频谱图的差异进行比较, 然后根据图像频率比值, 频率和相位的变化等因素及其关系来判定轮胎是否存在缺陷。通过比较轮胎图像的频谱图, 逐步建立合格及缺陷轮胎图像频谱特征库, 这样可进一步对轮胎缺陷情况进行综合判断, 分析缺陷情况, 进而提高轮胎生产质量及合格率。

## 4 结论

实验证明, 在 X 射线轮胎检测中利用基于傅里叶变换的频谱分析法进行轮胎图像频谱检测, 在初步判断轮胎是否含有缺陷时非常有效。因轮胎在出厂检测时, 自动化流水线上生产出来的轮胎不合格产品只占少数, 利用该算法可以最大限度地简化程序、降低工作量。

利用基于傅里叶变换的频谱分析法首先筛选出合格的轮胎, 对于不合格轮胎可以根据需要返厂处理, 如需确定缺陷种类可以根据其频谱特征在轮胎图像频谱特征库中对比判断, 具体确定轮胎的缺陷情况。这种方法节约了劳动力资源, 提高了轮胎缺陷检测效率及其实用性和可靠性, 并应用于轮胎工业生产中。

## 参考文献

- [1] 马莉, 范影乐. 纹理图像分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 78-99.  
Ma L, Fan YY. Image texture analysis[M]. Beijing: Science Press, 2009: 78-99.
- [2] 金向宁. 子午线轮胎 X 射线检测设备的开发与研制[J]. 橡胶技术与设备, 1998, 24(6): 47-49.  
Jin XN. Radial tire X-ray inspection equipment development and research[J]. Rubber Technology and Equipment, 1998, 24(6): 47-49.
- [3] 冯霞. 基于数字图像处理的轮胎缺陷检测[D]. 济南: 山东大学, 2011.  
Feng X. Tire defects inspection based on digital image processing[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [4] 高鹏. 基于 X 光图像的轮胎内部缺陷检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
Gao P. Technology of tire internal defects detection based on X-ray image[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [5] 原培新, 张晓慧. 数字图像处理在汽车轮胎 X 射线检测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2007, 16(2): 48-51.  
Yuan PX, Zhang XH. Digital image processing in the automotive tire X-ray detection[J]. CT Theory and Applications, 2007, 16(2): 48-51.
- [6] 刘传才. 图像理解与计算机视觉[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2002: 33-44.  
Liu CC. Image understanding and computer vision[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2002: 33-44.
- [7] 张军勇, 卢兴强, 林尊琪. 变形分数傅里叶变换系统的结构参数分析[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1717-1720.  
Zhang JY, Lu XQ, Lin ZQ. Analysis of structure parameters for anamorphic fractional fourier transforms system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1717-1720.

- [8] Martone M. A multicarrier system based on the fractional Fourier transform for time-frequency-selective channels[J]. IEEE Trans on Communications, 2001, 49(6): 1011-1020.
- [9] 朱自强, 王仕璠, 苏显渝. 现代光学教程[M]. 成都: 四川大学出版社, 1990: 76-80.  
Zhu ZQ, Wang SF, Su XY. Modern optics[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1990: 76-80.
- [10] Takeda Mitsuo, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Applied Optics (S0003-6935), 1983, 22(24): 3977-3982.
- [11] Chang CC, Liu CY, Tai WK. Feature alignment approach for hand posture recognition based on curvature scale space[J]. Neurocomputing, 2008, 71(10/12): 1947-1953.
- [12] Degrieck J, Verleysen P, Waele W. Optical measurement of target displacement and velocity in bird strike simulation experiments[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14: 1-6.
- [13] 刘萍萍, 高宝建. 基于傅里叶系数映射的 OFDM 系统性能分析[J]. 计算机工程, 2011, 37(4): 87-89.  
Liu PP, Gao BJ. Performance analysis of OFDM system based on Fourier coefficient mapping[J]. Computer Engineering, 2011, 37(4): 87-89.

## The Complication of Spectral Analysis Based on Fourier Transform in the Tire X-ray Detection

FENG Xia<sup>1</sup>, SHI Chao<sup>2</sup>, DING Wen-bo<sup>1</sup>, FENG Yan<sup>2</sup>, HAO Zhen-ping<sup>3</sup>✉

1.De-zhou Science and Technology Vocational College of Shandong, Yucheng 251200, China

2.Yucheng water authorities, Yucheng 251200, China

3.Yucheng Municipal Radio and Television Bureau, Yucheng 251200, China

**Abstract:** There are many ways to have the quality inspection of the meridian tires, spectrum analysis is the Image analysis method in frequency domain, the primary function is to obtain the textural features of images in frequency domain. Fourier transform can change signals from time domain to frequency domain and get each frequency component, that is decomposed signals into different frequency spectrum. Then we can have image processing and evaluate whether the tires have defects or not. The experimental result shows that the spectral analysis based on Fourier transform of the tire X-ray detection can greatly reduce the workload, and improve the efficiency of the tire X-ray detection.

**Key words:** tire X-ray detection; Fourier transform; spectral analysis



**作者简介:** 冯霞 (1974—), 女, 德州科技职业学院讲师, 主要从事自动控制、模式识别等方面的研究, Tel: 0534-7448975, E-mail: anecdotefei@aliyun.com; 郝振平✉ (1974—), 禹城市广播电视局高级工程师, 主要从事广播电视信号传输、数字图像处理等方面的研究, Tel: 0534-7421494, E-mail: thejungle@126.com。