

文章编号: 1005-0523(2008)06-0041-05

基于图像分析的滚动轴承表面缺陷识别技术研究

杨 阳¹, 蒋先刚²

(华东交通大学 1. 机电工程学院; 2. 基础科学学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 系统介绍了滚动轴承表面缺陷视觉检测系统的检测原理及流程, 着重分析了表面缺陷二值图像的几何特征和形状矩特征、BP 神经网络的各参数选择以及实验结果. 实验证明本系统用于滚动轴承表面缺陷检测具有可行性, 采用神经网络识别可使表面缺陷分类正确率达到 88%.

关键词: 几何特征; 形状矩特征; BP 神经网络

中图分类号: TP183

文献标识码: A

滚动轴承质量的好坏对机械设备的安全运转有着很重要的影响. 因为轴承在机械设备中起着承受、传递载荷的作用, 而工作条件却最为恶劣, 表面缺陷的产生是不可避免的. 通常有下列几种常见缺陷^[1]: 麻点、烧附、擦伤和磕碰伤. 其中麻点指零件表面呈分散或群集状的细小坑点, 呈黑色针孔状凹坑, 有一定深度. 烧附指零件表面热熔性金属粘着现象. 擦伤是零件表面因滑动摩擦而产生的金属迁移现象. 磕碰伤是轴承零件间或轴承零件与其他硬物间相互碰击产生的零件表面机械性损伤.

由于表面缺陷检测的现场条件和综合标准比较复杂, 而人工目视抽检方式工作量大、可靠性差, 不能适应大规模检测的需要, 因此, 运用图像处理技术在离线状态识别缺陷种类可以有效地提高检测效率与准确性, 由于轴承在工作状态时处于机械内部难以全面拍摄, 所以本系统在轴承进行一般检修时采集图像进行实时检测. 主要程序界面见图 1. 图 1 左侧为图像显示区, 上半部分为某缺陷经预处理后的二值图像, 下半部为其轮廓提取图. 右侧分别为特征显示区、样本学习区、缺陷识别区和事件处理区.

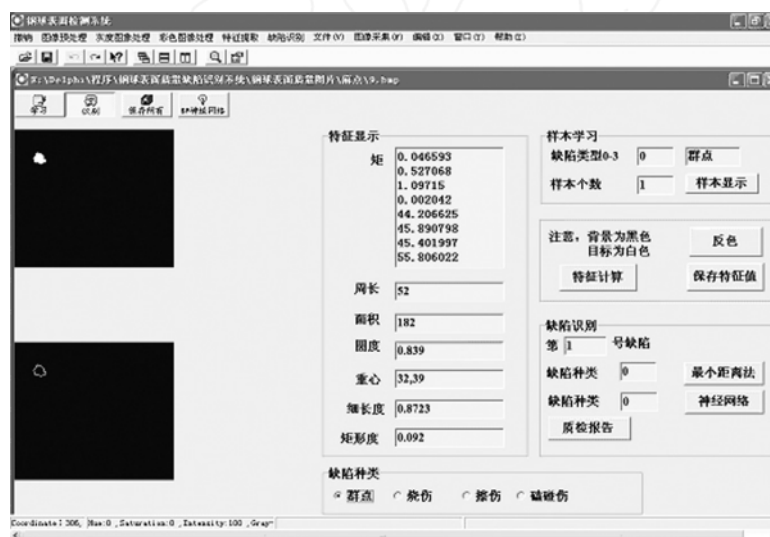


图 1 软件主界面

收稿日期: 2008-10-18

作者简介: 杨 阳(1984-), 女, 河南郑州人, 在读硕士, 研究方向为模式识别与图像处理.

1 滚动轴承表面缺陷检测系统的软件构架

视觉检测系统软件主要由图像捕捉采集模块、图像预处理模块、特征提取模块、缺陷自动识别模块组成。图像采集模块得到轴承表面清晰的数字图像。图像预处理模块包括图像平滑去噪声、图像锐化增强和阈值分割。特征提取模块主要选取两大类特征: 形状矩特征和几何特征, 缺陷识别模块主要采用神经网络分类进行缺陷识别。

2 缺陷图像的采集及预处理过程

本文选用大恒公司的 HV2002UC 型数字摄像机, 它自带的 HVDevice 控件是摄像机应用接口库开发包的一部分, 可以通过设置控件的属性和调用库函数实现对摄像机的完全控制和功能应用。在程序启动后直接进入图像采集界面, 摄像机采集图像的流程为: 首先初始化设备, 申请资源, 然后进行参数设置, 可手动设置分辨率、曝光、增益、白平衡等, 也可采用默认的参数值, 下一步采集图像到内存中, 可以执行采集、停止、读取、存储的功能, 最后结束操作, 释放之前占用的资源。在采集完图像后点击“进入识别界面”按钮, 就进入程序的主界面。

为得到缺陷的二值化图像, 对采集到的灰度图像进行图像的预处理。首先采集的图像常由于成像、复制、扫描、传输、显示处理以及周围环境的影响被噪声所污染, 引起图像质量降低。因此, 必须对降质图像进行平滑去噪处理。本文采用中值滤波和八向各向异性扩散滤波方法相结合的组合滤波器实现去噪, 若图像存在椒盐噪声(明显的黑、白像素)时, 采用中值滤波基本可完全滤除, 否则图像可能存在随机的高斯白噪声, 采用八向各向异性扩散滤波方法进行滤波。

图像在传输和变换过程中会受到各种干扰而退化, 平滑处理也不可避免的使图像出现一定的模糊, 因此需要进行图像锐化处理。它的主要目的是补偿图像的轮廓, 突出图像中景物的边缘或纹理, 使边缘更陡峭。本文采用一种改进的梯度运算, 即当梯度值超过某一个阈值 Δ 后, 该点的灰度值就用梯度模值表示, 否则仍保持原灰度值^[4]。这里的阈值 Δ 是通过多次试验所得, 选取的阈值要可以基本保证边缘的连续, 噪声点的消除, 以达到增强边缘锐化图像的效果。

阈值分割法是一种基于区域的图像分割技术, 其基本原理是通过设定不同的特征阈值, 把图像像素点分为背景和目标类。本文采用迭代法^[5]选取阈值得到二值化的图像。

- (1) 求出图像中的最小和最大灰度值 $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$, 令阈值初值为 $T^0 = (f_{\max} + f_{\min}) / 2$ 。
- (2) 根据阈值将图像分割成目标和背景两部分, 分别求出它们的平均灰度值 f_o 和 f_B 。
- (3) 求出新的阈值 $T^k + 1 = (f_o + f_B) / 2$
- (4) 如果 $T^{k+1} = T^k$ 则结束; 否则转到步骤(2)

3 缺陷图像的特征分析

3.1 几何特征

滚动轴承表面缺陷特征提取部分涉及到各特征量的计算和这些特征量的综合分析, 而实际计算的就是二值化的缺陷图像连通区域的特征。

(1) 连通区域的圆度

对于面积一定的图形, 一般周长越小, 图形表面越光滑, 越接近圆, 一般采用圆度来衡量图形的复杂程度, 其最常用的计算公式为

$$c = \frac{4\pi A}{P^2}$$

其中: P 为图形周长; A 为周长所围的缺陷面积。

(2) 连通区域的细长度及矩形拟和因子

细长度是区域外接矩形的长宽比. 区域外接矩形是一个包围缺陷连通域的最小面积的矩形,它是通过离散步幅旋转直到达到最小值来确定的^[3]. 计算最小外接矩形的方法是将物体在 90° 范围内等间隔的旋转(程序中每次旋转 5°), 每次记录其坐标系方向上的最左边、最右边、最上边和最下边的点的坐标,取面积最小的矩形的参数为主轴方向上的长度和宽度^[4].

当图像给定后,即可求出物体的最小外接矩形,而反映物体矩形度的一个参数是矩形拟合因子 R :

$$R = A_r / A_0$$

其中: A_0 是物体的面积; A_r 是物体最小外接矩形的面积; R 反映了一个物体对其最小外接矩形的充满程度.

以滚动轴承表面缺陷中的麻点、烧附、擦伤、磕碰伤为例,各选取 30 幅图像提取几何特征. 由表 1 可见,麻点的圆度和细长度最大,最接近 1; 擦伤的矩形拟合因子最小.

表 1 缺陷的一般特征范围

一般特征 表面故障	圆 度	矩形拟合因子	细长度
麻 点	0.55 ~ 0.95	0.491 2 ~ 0.654 4	0.571 4 ~ 0.928 6
烧 附	0.22 ~ 0.34	0.459 1 ~ 0.512 5	0.198 8 ~ 0.245 3
擦 伤	0.04 ~ 0.12	0.097 6 ~ 0.347 2	0.116 2 ~ 0.523 2
磕碰伤	0.15 ~ 0.28	0.204 5 ~ 0.599 3	0.235 9 ~ 0.587 5

3.2 基于矩的特征提取

给定二维连续函数 $f(x, y)$, 下式定义了其 $p+q$ 阶矩:

$$M_{pq} = \iint_{\xi} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad p, q = 0, 1, 2, \dots$$

对于一般二值化图像 $f(i, j)$ 来说, M_{pq} 可唯一确定 $f(i, j)$. 一幅 $M \times N$ 的数字图像 $f(x, y)$, 其 $p+q$ 阶几何矩和中心矩分别为

$$M_{pq} = \sum \sum x^p y^q f(x, y)$$

$$\mu_{pq} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y)$$

其中: $\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}}$, 表示区域重心的坐标.

各阶矩具有一定的物理几何意义: μ_{20} 表示图像水平方向上的伸展度; μ_{02} 表示垂直方向上的伸展度; μ_{11} 表示图像的倾斜度; μ_{30} 表示图像在水平方向上的重心偏移度; μ_{03} 表示图像在垂直方向上的重心偏移度; μ_{21} 表示图像水平伸展的均衡程度; μ_{12} 表示图像垂直伸展度的均衡程度.

那么,由上面计算出的各阶矩可以导出以下一些归一化的形状特征^[5].

(1) 长宽比:

$$f_1 = \left(\frac{\mu_{20} - \mu_{02}}{\mu_{20} + \mu_{02}} \right) / 2$$

(2) 字型倾斜度:

$$f_2 = \frac{\theta}{\pi/2}$$

其中:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\mu_{20} - \mu_{02} + \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}}{2\mu_{11}}$$

(3) 拉长度:

$$f_3 = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

其中: λ_1, λ_2 的计算公式如下:

$$\lambda_1 = \frac{\mu_{20} + \mu_{02} + \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}}{2} \quad \lambda_2 = \frac{\mu_{20} + \mu_{02} - \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}}{2}$$

(4) 伸展度:

$$f_4 = \frac{\sqrt{(\mu_{20} + \mu_{02}) / m_{00}}}{\text{size}}$$

其中:

$$\text{size} = \sqrt{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}$$

三阶中心矩由于其值可能为正或负,实际上,它们都是由基函数为正和为负的两部分所组成的.

$$\mu_{pq} = \mu_{pq}^{+} - \mu_{pq}^{-} \quad p + q = 3$$

通过三阶中心矩提取的归一化特征如下:

$$(5) \text{ 水平偏移度: } f_5 = \left(\frac{\mu_{30}^{+} - \mu_{30}^{-}}{\mu_{30}^{+} + \mu_{30}^{-}} + 1 \right) / 2$$

$$(6) \text{ 垂直偏移度: } f_6 = \left(\frac{\mu_{03}^{+} - \mu_{03}^{-}}{\mu_{03}^{+} + \mu_{03}^{-}} + 1 \right) / 2$$

$$(7) \text{ 水平伸展均衡度: } f_7 = \left(\frac{\mu_{21}^{+} - \mu_{21}^{-}}{\mu_{21}^{+} + \mu_{21}^{-}} + 1 \right) / 2$$

$$(8) \text{ 垂直伸展均衡度: } f_8 = \left(\frac{\mu_{12}^{+} - \mu_{12}^{-}}{\mu_{12}^{+} + \mu_{12}^{-}} + 1 \right) / 2$$

以某缺陷的二值化图像为例,将原图分别放大 1 倍、缩小为一半、旋转 90°、旋转 270°,共得到如图 2 所示的 5 幅图像. 分别对它们提取 8 个形状矩特征得到表 2. 从表 2 可以看出,矩特征对于图像的尺寸变化和不同角度旋转基本具有不变性. 但是注意到前 4 个矩特征的变化较小,而后 4 个特征变化比较大,与原图矩特征的差值基本上都大于 0.1,不能很好地反映矩值在旋转和缩放时的不变性,因此本文采取形状矩特征的前 4 个特征值作为后续神经网络识别的输入.

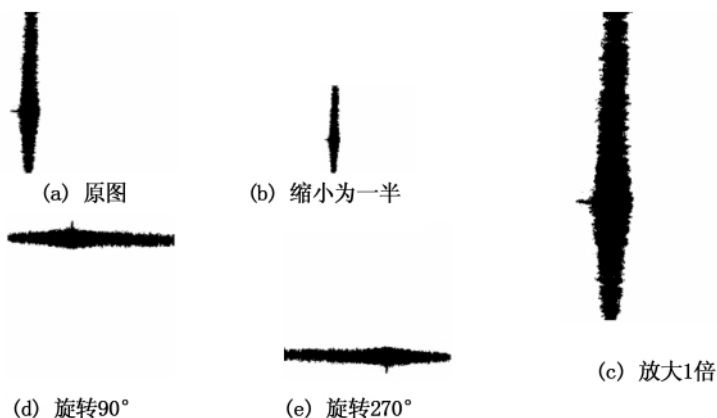


图 2 某缺陷图像的几何变换

表 2 某缺陷几何变换的 8 个矩特征

几何变换矩特征	原 图	缩小为一半	放大一倍	旋转 90°	旋转 270°
f_1	0.023 952	0.023 432	0.023 097	-0.023 944	-0.022 973
f_2	0.514 541	0.514 24	0.514 045	0.484 003	0.484 683
f_3	1.048 997	1.047 913	1.047 212	0.953 315	0.955 16
f_4	0.002 675	0.005 381	0.001 333	0.002 675	0.002 672
f_5	2.989 649	3.026 181	2.826 755	2.259 986	2.192 428
f_6	2.192 428	2.224 609	2.096 51	2.989 649	1.835 678
f_7	3.997 917	4.071 505	3.781 196	4.155 511	3.478 668
f_8	4.117 644	4.226 204	3.846 454	3.833 249	4.053 477

4 神经网络方法的分类识别

神经网络可以说是从输入空间到输出空间的一个非线性映射,它通过调整权重和阈值来学习或发现变量之间的关系,实现对事物的分类. 在进行 BP 神经网络的设计时,一般应从网络的层数、每层中神经元个数和激活函数、初始值以及学习速率等几个方面进行考虑. BP 神经网络的基本结构如图 3 所示.

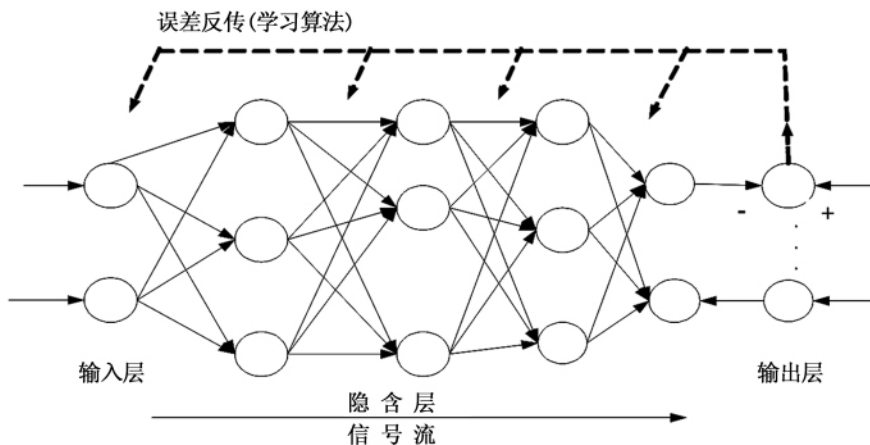


图3 BP神经网络结构

本文采用BP神经网络的三层拓扑结构,选择缺陷图像的3个几何特征和形状矩特征的前4个特征,共7个特征值作为输入层神经元,对于隐含层的结点数,本程序根据多次试验设为15,输出层采用4个节点,表示4种缺陷类型。BP神经网络的训练是根据输出值与标准值之间的误差来调整权值的,因此必须对目标期望输出进行合理的编码,本文采用了二进制码来进行编码,例如,对于输出“麻点”采用(1,0,0,0)这样的目标输出向量。因为神经元的激励函数是S型函数,所以激励函数的输出永远不可能达到0或1,可能会导致网络不收敛,因此采用接近值0.001代表0,0.999代表1。

为了提高网络的识别率,这里将学习速率设为0.035,动量系数设为0.5,学习步长取0.8,实验中在训练时选取4种缺陷各100幅图像提取特征值,训练291次后,发现权值渐渐稳定,迭代次数在不断地变小,网络趋于收敛。

5 实验与总结

选取麻点、烧附、擦伤、磕碰伤的缺陷图像各100幅未训练图像,将实际测量的缺陷结果与用神经网络法判断的结果作比较,见表3。实验结果表明采用BP神经网络识别的方法可使表面缺陷分类正确率达到88%,神经网络法对所有样本特征值进行多次训练后确定权重再进行分类识别,因此具有很高的稳定性和容错性。可能造成误判的原因分析如下:烧伤误判为磕碰伤可能是因为某些烧附缺陷连为一体,二值化后连成一个大的连通域,其几何特征相似度较大导致误判。磕碰伤误判为划伤可能是因为某些磕碰伤缺陷为多条细长的擦痕组成,易判断为多个划伤缺陷。

表3 实测结果与神经网络结果对比

神经网络 实测	麻点	烧附	擦伤	磕碰伤
麻点	91	2	3	4
烧附	5	85	6	4
擦伤	1	5	87	7
磕碰伤	2	4	5	89

参考文献:

- [1] 谈大同. 铁路货车滚动轴承外观缺陷图谱 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [2] 夏良正. 数字图像处理 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
- [3] Milan Sonka, 等. 图象处理、分析与机器视觉(第2版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [4] 蒋先刚. 数字图像模式识别工程软件设计 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [5] 李小泉. 自动检测系统关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

The Research on Recognition of Rolling Bearing Surface Defects Based on Image Analysis

YANG Yang¹,JIANG Xian_gang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering; 2. School of Basic Science,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China)

Abstract: The paper introduces the principle and flow concerning the automatic detection system of rolling bearing surface defects,and analyzes that the general geometry features,moment features and the parameter choices in the BP neural network. Experiment shows its feasibility and the accuracy rate of the surface defect categories amounts to 88 percent.

Key words: geometry features; moment features; BP neural network

(责任编辑: 刘棉玲)

(上接第 27 页)

- [1] TRB. Highway Capacity Manual 2000 [M]. Washington D. C. ,USA: National Research Council,2000
[2] 王 炜,高海龙,李文权. 公路交叉口通行能力分析 [M]. 科学出版社,2001.

A Study on Vehicle_Waiting Area at Skew Intersection

ZHANG Yan_ni,DONG De_cun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education,Tongji University,Shanghai 201804,China)

Abstract: Aiming at traffic disorder and safety problems at skew intersections,the paper puts forward a new idea setting vehicle_waiting area for entry vehicles from an acute angle,which can make spur track vehicles across the intersection by two phases. Take the arterial road for example,with the methods of probability and queue theory,it e-duced the appropriate traffic range for vehicle_waiting area,presented the formulae of capacities. On different traffic conditions,it compared the delays of three kinds of intersection control types: yield,signalized and intersection with vehicle_waiting area.

Key words: intersection; traffic safety; vehicle_waiting area; capacity; delay

(责任编辑: 李 萍)