

基于机器视觉技术的疲劳裂纹 自动检测实验系统*

云 艳, 高红俐, 沈姗姗

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为解决现有传统的金属疲劳裂纹检测方法存在的精度不高、操作繁琐、抗干扰性差和不易实现自动记录等问题,将虚拟仪器和图像处理技术应用到金属疲劳裂纹检测系统中,进行了疲劳裂纹长度在线测量和疲劳扩展速率计算。通过系统的整体设计和原理介绍,提出了疲劳裂纹在线非接触式的机器视觉检测方案;并基于 LabVIEW 的实验平台,进行了疲劳裂纹扩展试验,通过使用 NI 的 IMAQ Vision 实现了图像处理功能。研究结果表明,由该方案建立的基于图像处理技术的裂纹检测系统在线测量得到的最大裂纹长度测量误差为 0.148 mm,且由拟合裂纹长度-时间曲线的导函数可得到裂纹扩展速率,是一种较理想的疲劳裂纹在线检测方法。

关键词: 虚拟仪器;图像处理;疲劳裂纹;在线检测

中图分类号: TH878; TP391.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)02-0183-05

Development of fatigue crack detection system based on machine vision technology

YUN Yan, GAO Hong-li, SHEN Shan-shan

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems of low precision, cumbersome operation, poor anti-jamming, hard to be automatically record etc., existed in traditional metal fatigue crack detection methods, a non-contact online fatigue crack detection system based on virtual instrument and image processing technology was investigated. This method was presented to be used for online measuring the length of the metal fatigue crack and calculating the growth rate of the crack. Through the hardware selection and modular software design, the development platform based on LabVIEW was established, the fatigue crack propagation experiment was tested, the image processing was realized via NI IMAQ Vision. The maximum crack length measuring error is 0.148 mm based on this online detecting method. And the growth rate of the crack can be gotten via the derivation of crack length-time plot. The results show that this is a relatively ideal fatigue crack measuring approach.

Key words: virtual instrument; image processing; fatigue crack; online detection

0 引言

针对机械产品中经常出现的破坏—疲劳断裂^[1],以及传统的实验室用于金属疲劳和断裂性能的疲劳裂纹检测方法精度不高、操作繁琐、抗干扰性差和不

易实现自动记录等问题,提出基于机器视觉的裂纹检测方案。机器视觉检测技术是近年来工业在线检测应用中的研究热点之一,因其可以大幅降低检测成本及提高产品质量、生产速度和效率,在工业检测和控制领域得到了广泛的应用。此外作为非接触测量方法,

收稿日期:2011-08-12

基金项目:浙江省级科技计划一般(面上)科研资助项目(2007C21080)

作者简介:云 艳(1986-),女,浙江杭州人,主要从事机电一体化系统检测与控制方面的研究。E-mail:852956322@qq.com

机器视觉检测技术也成为当前精密测量技术的重要发展方向之一。

市面上现有的机器视觉系统大多采用昂贵的设备,这些设备从硬件到软件都是专门开发生产的,具有很强的针对性,整个系统的开发成本高、开发周期长^[2],并不适合实验室使用。近几年来,日新月异的计算机技术促进了机器视觉技术的发展,现在的机器视觉系统可以通过计算机直接对图像采集卡采集的信号进行快速的处理分析,并且利用计算机的宽大显示屏显示测量结果,在速度和功能上能满足大多数工程上的应用要求。

本研究中基于机器视觉的裂纹检测系统的软件部分以 NI 公司易学易用的图形化编程软件 LabVIEW 为开发平台,利用其模块化和递归方式,用户可以在很短的时间内构建、设计和更改自己的视觉检测系统。与传统的编程方式相比,采用 LabVIEW 开发视觉系统可以使效率提高许多。以具有高度集成的图像处理功能模块的 IMAQ Vision^[3]实现图像处理功能,能大大地加快系统的开发速度,并且具有很大的灵活性和易扩展性,可解决传统机器视觉系统的一大障碍。

1 系统的整体设计

1.1 系统的功能及结构设计

本研究中金属疲劳裂纹检测系统主要包括 4 部分:高频疲劳试验系统、CCD 视觉传感器、图像采集卡和 PC 机虚拟仪器,系统总体结构如图 1 所示。

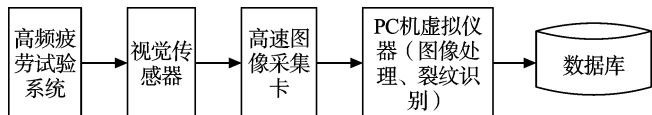


图 1 系统总体结构

高频疲劳试验系统: 本研究选用 PLG-100C 型高频疲劳试验机,基于共振振动原理进行工作,主要由两个并联弹簧、测力传感器、试样和主振系统的质量构成机械振动系统,振动时由激振器来激励和保持,当激振器产生的激振力和频率与振动系统的固有频率基本一致时,这个系统便发生共振,这时主质量在共振状态所产生的惯性力,往返地作用于试样,从而完成对试样的拉压疲劳试验。此外,试验试样主要采用标准 C(T)试样^[4],随着试验的进行,试样上的疲劳裂纹将会产生、扩展。

视觉传感器: 将自然图像信号转换为电压图像信号。该系统选用 SONY XC-HR70 黑白 CCD。为了防止 CCD 在摄取图像时产生透视误差,必须保证图像系统中的摄像机轴线与试样始终保持垂直。

图像采集卡: 接收 CCD 传感器输出的模拟电压图像信号,转化为对应的数字图像信号。该系统选用 NI 公司的 PCI 1410 图像采集卡。

PC 机虚拟仪器: 构成系统的软件主体部分,主要包括了 3 个部分:真实实验、模拟实验和查看历史实验。最为关键的实验功能是完成对图像采集卡输入的数字图像进行适当处理,获取疲劳裂纹数据并完成存储操作。

数据库: 用于存储及查询实验相关数据,其中包括用户信息、裂纹尺寸实时数据。裂纹图像存储放在文件系统中,通过裂纹图片文件名和裂纹图像采集时间点(数据库字段)保持一致从而建立关联。

1.2 软件模块化设计说明

该系统主要包括 5 部分:图像采集模块、图像处理模块、用户信息管理模块、实验数据处理模块和实验数据管理模块,系统软件结构如图 2 所示。

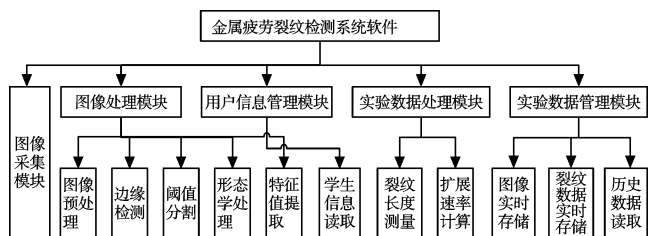


图 2 软件模块化设计结构图

(1) 图像采集模块^[5]: 主要完成对图像采集卡获取的视频信息截取单张图像,根据预设的时间延时,进行图像的自动获取。由以往对疲劳实验裂纹扩展趋势的经验,考虑疲劳裂纹的扩展长度时间的非线性关系,需要进行非等间隔图像获取,每次采集(或获取)一张图像,需要将图像保存至实验设置指定的文件系统中,将文件名及图像获取时间点记入数据库中从而形成关联。

(2) 图像处理模块: 包括图像预处理、边缘检测、阈值分割、形态学处理、特征值提取等操作,由于对于图像质量^[6]至今没有一个非常系统的评价体系,图像处理效果评价基本上由主观决定。因而本研究通过尝试并综合考虑单张图像处理时间和图像采集最短时间关系,确定图像处理模块的具体步骤。

(3) 用户信息管理模块: 主要完成学生信息读取的功能,以便于实验结果按学生来管理。

(4) 实验数据处理模块: 主要完成从图像处理模块得到的像素特征值与实际裂纹长度的转换,以及裂纹扩展速率计算的功能。

(5) 实验数据管理模块: 主要是实现在查看历史实验模块进行的相关的查询操作和删除操作。

2 系统的工作原理

2.1 系统相关流程

系统软件部分开始运行后可分为3个流程分支:真实实验、模拟实验、历史实验信息查询。

(1) 真实实验。即采集正式金属疲劳实验的试样的裂纹图片,进行相关处理后获得一系列裂纹长度信息和计算获得疲劳裂纹扩展趋势。其流程如图3所示。

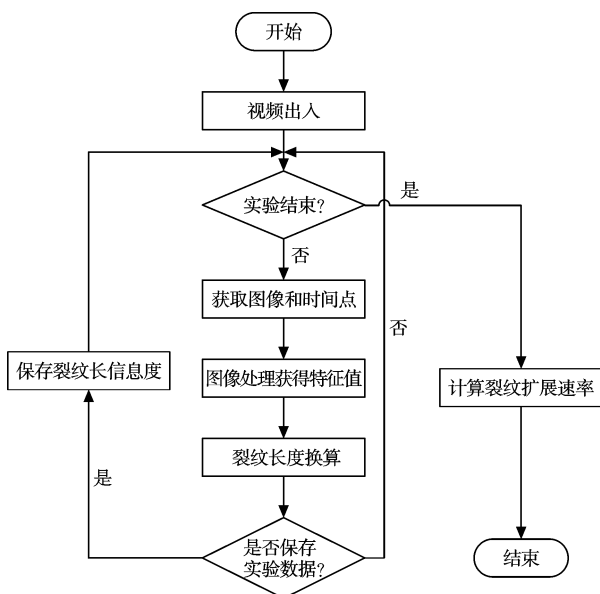


图3 真实实验总体流程图

(2) 模拟实验。对文件系统中存储的裂纹图片组进行实验的模拟过程,主要是逐次读取图片文件,进行相关处理获取裂纹长度,并计算疲劳裂纹扩展趋势。其流程如图4所示。设置模拟实验模块的好处是:在真实实验中一旦选取了可配置的图像处理方法之

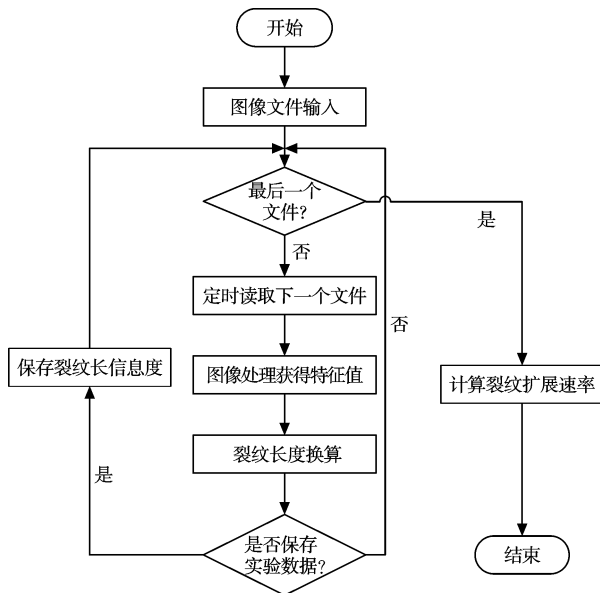


图4 模拟实验总体流程图

后就不能再做更改,而一次实验具有不可重复性,设置模拟实验的模块,可以重复对已经截取的图片进行不同图像处理策略(见后文图6中所示的图像处理获得特征值的子流程说明)的处理,从而可以进一步比较各图像处理的效果,以便后续实验选取更好的图像处理策略。

(3) 历史实验信息查询。主要是用来查看学生的已做实验的数据,提供根据实验编号方便浏览实验数据的功能,并且在该模块也加上了疲劳裂纹扩展曲线拟合的功能和删除一次实验历史记录的功能。该部分流程图如图5所示。

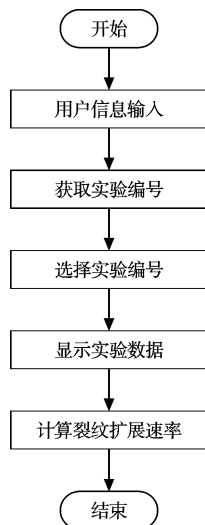


图5 历史实验信息查询流程图

(4) 图像处理获得特征值的子流程。该部分流程图如图6所示,其中图像预处理包含图像平滑、增强的处理过程,在软件设计时考虑到多种图像平滑、增强和边缘锐化的方法,在程序中将这3种基本图像处理方法设置为可配置的图像处理策略模块,实验用户可以选取本人认为适合的方法进行实验。

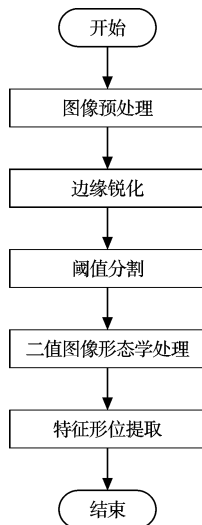


图6 图像处理获得特征值子流程

2.2 图像处理相关原理

(1) 卷积^[7]。图像处理中均值滤波(平滑)、高通滤波(增强)、边缘检测算子 Prewitt、Sobel 等都是线性滤波器,可以采用卷积的方法实现。因图像是二维空间,其卷积的运算为:把其中一个矩阵 M (如二维高斯函数得到的矩阵) 旋转 180° , 然后逐渐和另外一个矩阵 N 边缘进行对齐, 对应元素相乘并求和就得到了二维卷积。

(2) 图像二值化。本研究对灰度图的所有不同灰度值分为两个子集合, 然后分别赋给 0 值和 1 值, 从而得到只有两个灰度值的图像。划分子集合的方法主要是阈值分割方法^[8], 按门限阈值来划分灰度子集。

(3) 形态学基本运算。主要包括膨胀和腐蚀运算^[9], 分别由结构元素 B 对原图 X 进行交集运算和包含运算得到, 运算图示如图 7 所示, 左为膨胀, 右为腐蚀。

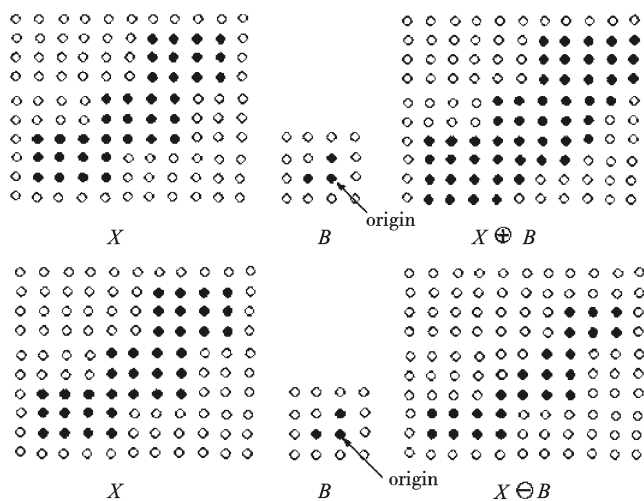


图 7 膨胀和腐蚀

(4) 特征形位提取。通常是先确定一个边界起始点, 如图 8 中的 B 点, 然后对 4 个(或 8 个)相邻的像素点进行扫描, 获得下一个像素点, 这里是向左扫描 3 个或 5 个点, 以确定下一个边界点, 直至 A 点, 由此获得特征形位。

2.3 实验数据存储实现

该系统数据存储方案为“LabSQL+ODBC+MySQL”, 即:

(1) LabSQL^[10-11]: LabVIEW 下数据库操作处理包, 它基于 ADO 原理。

(2) ODBC (Open Database Connectivity, 开放数据库互连): Windows 2000/XP 系统的 ODBC 管理器, 管理安装的 ODBC 驱动程序和管理数据源。

(3) MySQL: Sun 公司的免费关系型数据库。

该实验系统根据系统中需要存储的相关信息, 按

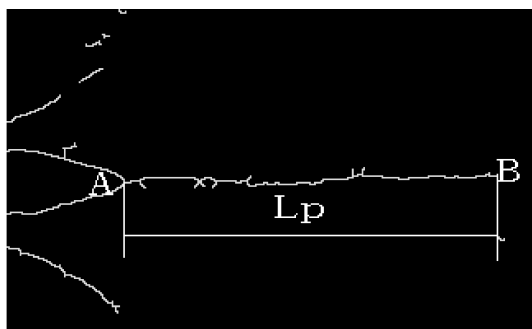
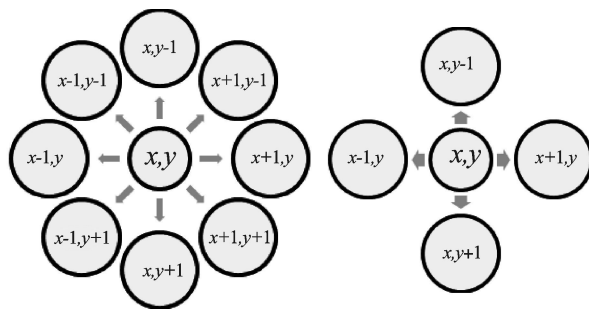


图 8 4 连接和 8 连接的边缘搜索示例

照数据库原理进行数据表设计。对实验数据表进行适当拆分: ①实验主表, 用于记录一次实验只有一份的数据; ②实验数据表, 用于记录裂纹数据。

3 系统的运行结果

图像处理的效果如图 9 所示, 系统运行结果如图 10 所示, 裂纹长度在线测量数据及分析结果如表 1 所

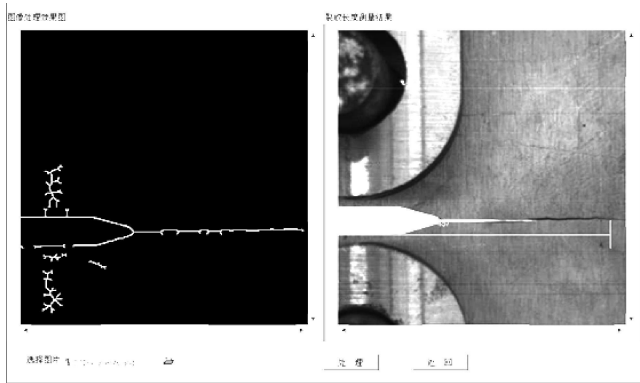


图 9 图像处理效果

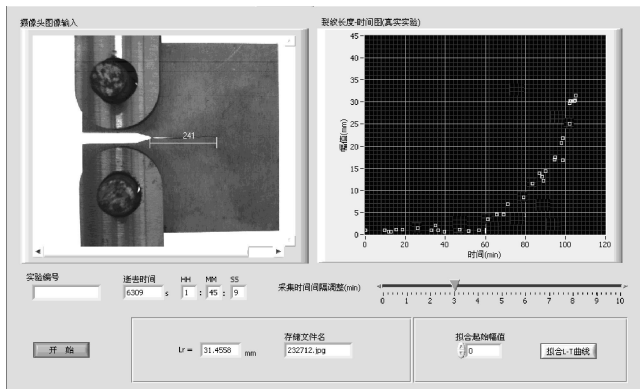


图 10 系统运行结果

表1 裂纹长度在线测量数据及分析结果

次数	显微镜读数/mm	摄像头测量值/mm	偏差/mm
1	12.726	12.584	-0.142
2	14.962	14.841	-0.121
3	17.584	17.465	-0.128
4	20.108	19.970	-0.138
5	24.362	24.257	-0.105
6	28.742	28.594	-0.148
7	30.586	30.444	-0.142
8	32.184	32.058	-0.126

示。为了减少运算量,提高图像处理速度,该系统设计为一次标定,以标准 C(T)试样为例,选取缺口长度作为标定对象。则实际裂纹长度由图像的像素坐标与实物坐标之间的转换关系得:

$$L_r = L_p \cdot k = L_p \frac{0.25W + a_n}{L_{pb}} \quad (1)$$

式中: L_p —裂纹的像素长度, k —实际检测系统的分辨率, L_{pb} —标定像素长度,“ $0.25W + a_n$ ”—缺口实际长度。

裂纹长度-时间关系图如图12所示,对这些离散点进行拟合可以得到裂纹长度-时间曲线 $f(l, t)$,取拟合曲线的导函数,就能够得到裂纹的扩展速率,即:

$$V = \dot{f}(l, t) \quad (2)$$

裂纹长度测量误差的来源主要有成像畸变以及图像数字化导致的误差、标定误差、图像处理产生的误差;而裂纹扩展速率的误差主要是裂纹长度误差及拟合不当所致。

4 结束语

本研究从实际应用的角度,选用了合适的硬件设备和软件模块化设计方案,搭建了基于虚拟仪器及图像处理技术的疲劳裂纹检测系统。通过NI的IMAQ

Vision 图像处理软件包,笔者对金属疲劳裂纹检测的机器视觉技术的实现进行了比较系统的研究,实现了裂纹长度的自动化在线测量且获得了较准确的测量结果。实验数据的读取和分析验证了该方法的可行性,但系统的测量精度、数据管理功能及容错能力仍有待提高。

参考文献(References):

- [1] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 尚绪强. 基于虚拟仪器和机器视觉的零件测量技术[D]. 青岛:山东大学机械工程学院,2008.
- [3] 张 念,温兆麟,章 沛. 基于虚拟仪器的在线机器视觉检测系统[J]. 机床与液压,2008,36(5):137-139.
- [4] GB/T 6398-2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S]. 北京:国家质量技术监督局,2001.
- [5] KANCHANOMAIA C, MIYASHITA Y, MUTOHA Y, et al. Low cycle fatigue test for solders using non-contact digital image measurement system [J]. **International Journal of Fatigue**, 2002, 17(24):57-67.
- [6] 刘文耀. 数字图像采集与处理 [M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [7] RELF C G. Image Acquisition and Processing with LabVIEW [M]. Florida: CRC Press, 2004.
- [8] 陈书海,傅录祥. 实用数字图像处理[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [9] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine Vision Algorithms and Application [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2008.
- [10] 徐洪安,费仁元,王 民. 用ADO构建LabVIEW中的数据库访问接口[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(2):138-140.
- [11] 李婷婷,赵登峰,高 旭. 虚拟仪器的信号生成与模入模出系统[J]. 机电工程技术, 2010, 39(1)26-27.

[编辑:李 辉]

(上接第173页)

- [2] 王祖温,詹长书,杨庆俊,等. 气压伺服系统高性能鲁棒控制器的设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11):15-17.
- [3] 钱 宁,阮 健,李 伟. 双面抛光机气动伺服加载系统分析[J]. 机床与液压, 2006, 34(8):72-74.
- [4] HAN Guang-xian, WANG Zong-pei, CHENG Zhi. A precise non-linear simulation model for hybrid stepping motor [C] //Proceeding of the 5th international Conference on Electrical Machines and Systems. Shenyang, China: [s.n.], 2001:986-990.
- [5] HU B G, IMANN G K, GOSINE R G. A systematic study of fuzzy PID controllers-function-based evaluation approach[J]. **Submitted to IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, 2001, 9(5):699-712.
- [6] KENJO T. Stepping Motors Control of Linearizable Systems [M]. Oxford. V. K: Clarendon, 1984.
- [7] 王鉴光. 电机控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.
- [8] 孙冠群, 于少娟. 控制电机与特种电机及其控制系统[M]. 北京:北京大学出版社, 2011.
- [9] 王积伟. 控制理论与控制工程 [M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [10] 刘慧英,范宝山. 基于STM32的多步进电机控制系统研究 [J]. 测控技术, 2010, 29(6):54-57.
- [11] 梁文祯. 基于STM32的TFT-LCD检测系统的设计与实现 [J]. 机电工程技术, 2011, 40(6):36-37.

[编辑:张 翔]