

文章编号: 2095-2163(2020)12-0056-06

中图分类号: TP399

文献标志码: A

基于 Canvas 的图像裂缝在线识别系统

张琪¹, 卿粼波¹, 熊淑华¹, 张余强²

(1 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2 成都西图科技有限公司, 成都 610065)

摘要: 岩石的节理裂隙广泛存在于各类岩土工程和地质形态中,对岩石图像进行裂缝分析是地质勘探中的重要环节,对工程安全、地质勘探、油气开采等方面都具有重要意义。传统的岩石图像裂缝分析系统绝大部分都是基于 C/S 模式的应用程序,这种模式分布受限,兼容性较差,难以共享。针对上述问题,本文设计了一种基于 B/S 架构下,应用 HTML5 中 Canvas 技术的图像裂缝在线识别系统,充分发挥 B/S 无插件、性能稳定等优势,同时采用 Canvas 技术,提供了丰富的交互功能,并结合回溯思想实现了图像裂缝在线识别功能。

关键词: Canvas; 裂缝识别; 回溯算法; 边缘检测

Image Crack Online Recognition System Based on Canvas

ZHANG Qi¹, QING Linbo¹, XIONG Shuhua¹, ZHANG Yuqiang²

(1 College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2 Chengdu Xitu Technology Co. Ltd, Chengdu 610065, China)

[Abstract] The joint and fracture of rock widely exist in all kinds of geotechnical engineering and geological forms. The fracture analysis of rock image is an important part in geological exploration, which is of great significance in engineering safety, geological exploration, oil and gas exploitation and so on. Most of the traditional rock image fracture analysis related systems are based on C/S mode applications, this mode has limited distribution, poor compatibility and is difficult to share. In view of the above problems, an image crack recognition system based on the canvas technology in HTML5 is designed, which makes full use of the advantages of B/S architecture, which doesn't need plug-ins and has stable performance. At the same time, canvas technology is used to provide rich interactive functions, and the image crack online recognition function is realized with the idea of backtracking.

[Key words] Canvas; Crack identification; Backtracking algorithm; Edge detection

0 引言

岩石裂缝是一种断裂构造,是岩石在各种应力作用下破裂变形而产生的,广泛存在于各类岩土工程和地质形态中,对岩石进行裂缝识别分析在油气勘探中占有重要地位^[1-2]。目前,各种岩心库管理系统已经得到广泛应用,实现了从人工文件记录转变为利用浏览器进行数字化管理,解决了重复劳动、保密性差和管理效率低等缺点^[3]。岩心库管理系统可以实现录入指定类型的文本数据和图像,实现简单的在线浏览图像功能。随着 Web 技术的进步以及油气勘探工作人员对岩心图像的重视,仅仅在线浏览图像是不够的,对图像直接进行在线识别处理是岩心库管理系统中缺乏的功能。而传统的图像识别功能大多都基于 C/S 架构或采用 Flash 技术实现。在互联网飞速发展、各领域对移动在线办公更加需求的今天,这些技术的兼容性和维护性问题也

越发严重^[4]。而 B/S 架构建立在广域网上,对于硬件环境具有较强的适应性,系统维护升级快捷方便,它有更高的跨平台表现和更加丰富生动的表达^[5]。因此,将图形图像处理技术与 Web 技术紧密结合具有很大的发展前景。

本文针对现有岩心库管理系统、传统的图像识别功能在实现上的特点和不足,设计了一种 B/S 架构下,基于 HTML5 的 Canvas 技术的图像裂缝在线识别系统,为用户提供了丰富的交互功能。本系统可操作性强、无需安装额外插件,为了提高访问速度和识别精确度,在用户查看图像列表时提供缩略图,进行图像裂缝识别时则提供高清图像。

1 系统需求分析及方案设计

现有的岩心库在线管理系统只能对图像进行浏览,无法更深一步对图像进行识别操作,大大降低了系统的实用性。用户如果想进行图像裂缝识别,一

作者简介: 张琪(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:多媒体通信与信息系统;卿粼波(1980-),男,博士,副教授,主要研究方向:图像处理、图像/视频编码通信、嵌入式系统;熊淑华(1969-),女,博士,副教授,主要研究方向:多媒体通信与信息系统;张余强(1985-),男,硕士,软件工程师,主要研究方向:软件工程。

通讯作者: 熊淑华 Email: xiongsh@scu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-21

般要安装专门的图像处理软件(C/S 架构)或在浏览器安装额外插件,不仅操作复杂还影响工作效率。考虑到系统的实用性和稳定性,以及用户的体验度,本系统采用 B/S 架构进行设计,基于此架构下的图像裂缝在线识别系统,在实现图像处理功能上,采用的核心技术是 HTML5 提供的 Canvas 元素。该元素可利用浏览器脚本语言进行其自带函数的调用,简化图形和网页元素的交互过程^[6]。与传统的 SVG 和 Flash 相比,更适合像素处理、动态渲染和大数据量绘制,且能跨平台使用,丰富了信息操作的方式,给用户带来了更高效的操作体验^[7-8]。

根据以上需求,本系统前端展示分为三大模块,如图 1 所示。其中,信息入库模块实现对岩心基本信息和图像的录入及编辑功能;信息浏览模块实现对岩心基本信息和图像的展示;裂缝识别模块,是系统的主要模块,可在线识别岩心图像中的裂缝,包括自动识别和手动识别两种方式,同时提供在线保存图像等其它交互功能。

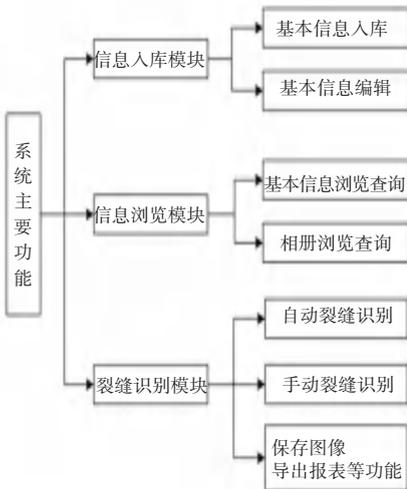


图 1 系统主要功能模块图

Fig. 1 Main function module diagram of system

2 系统功能模块设计

2.1 岩心图像裂缝识别功能设计

2.1.1 自动识别图像裂缝

自动识别裂缝功能采用 OpenCV.js 提供的基本图像处理操作 API 和 Canvas 的 CanvasRenderingContext2D 对象提供的像素级操作方法和属性实现,可以极大地提升开发速度,降低开发难度。

本文系统实现自动裂缝识别的思路是:

(1) 对读取的原始图像进行预处理。其中包括图像灰度化、灰度线性变换以及使用中值滤波预先抑制部分椒盐噪声。

(2) 对预处理后的图像进行 Canny 边缘检测,

提取岩心图像上的裂缝,并使用形态学方法处理边缘检测后的图像,连接临近裂缝。

(3) 通过基于回溯的裂缝提取算法,滤除噪点区域,提取裂缝目标。

(4) 将裂缝提取图像与原图叠加展示。

本文系统中自动裂缝识别功能的流程如图 2 所示。

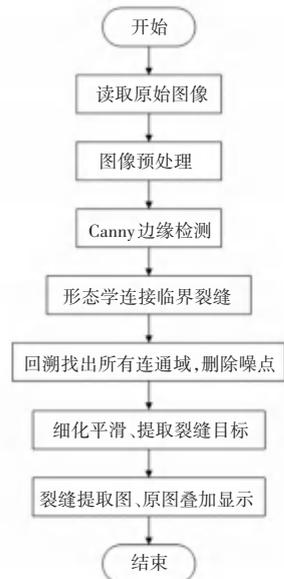


图 2 自动裂缝识别流程图

Fig. 2 Flow chart of automatic crack identification

2.1.2 基于回溯的裂缝提取算法

由于受到图像采集环境和传输信道等影响,数字图像在获取、采样和传输过程中,会随机掺入各种噪声,导致图像质量退化。在边缘提取的处理上,噪声的存在将对图像处理的效果产生严重的影响^[1]。Canny 算法虽然采用了高斯平滑滤波器,但该滤波器并不能有效地抑制脉冲噪声,容易将脉冲噪声误检测为边缘^[9],这将影响裂缝识别的最终效果。因此,本文结合岩心裂缝图像的实际情况(裂缝大多是细长的连通域,与噪声和岩石上附着的颗粒有着明显的差异),采用回溯算法思想,将边缘检测后的图像中所有存在的连通域面积计算出来,滤除噪声等区域,实现对裂缝目标的识别功能。

基于回溯的裂缝提取算法,实际上类似枚举的搜索尝试过程,主要是在搜索尝试过程中寻找问题的解,当发现不满足求解条件时,就“回溯”返回,尝试别的路径。在包含问题所有解的解空间树中,按照深度优先(DFS)的策略,以左上角的根结点作为目前的扩展结点搜索解空间树,若是在目前的扩展结点中无法继续深入探究,那么就说明这一扩展结点是死结点,应寻找其它结点作为扩展结点继续搜索^[10]。

对图像进行连通域搜索时,要求对图像的每一个像素点进行处理。因此,使用 Canvas 内部提供的 `getImageData()` 方法,可以获取一个 `ImageData` 对象,该对象描述了 `<canvas>` 元素的一个隐含像素数据区域,由给定的类型化数组和指定的宽度与高度组成。其中 `ImageData.data` 是一个一维数组,包含以 `RGBA` 顺序的数据。数据使用 0 至 255 (包含 255) 的整数表示,数据格式如图 3 所示。使用 `ImageData.data[(x * width + y) + j]` 获取第 x 行第 y 列的像素, $j = 0, 1, 2, 3$ 时分别对应该像素点上 `RGBA` 4 个分量的数值。

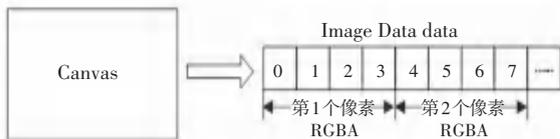


图 3 `ImageData.data` 数据格式

Fig. 3 Data format of `ImageData.data`

由于 `ImageData.data` 是一维数组,只存放了像素信息,并不能看出图像中连通域分布情况。鉴于经过 Canny 边缘检测和形态学处理之后的裂缝图像,只有背景(黑色)和目标(白色)两部分,且为了减少后续操作的数据量,先将图像背景部分,即像素 `RGBA` 值(0,0,0,255)用数值 0 代替,目标部分像素 `RGBA` 值为(255,255,255,255)用数值 1 代替,用仅包含 0 和 1 的二维数组 `ImgData[w][h]` (w 为当前图像的宽度, h 为当前图像的高度),存储图像像素信息,类似如图 4 所示的二维数组结构。之后,线性扫描整个二维数组,当搜索的结点值为 1 时,便以当前结点为根结点启动深度优先搜索,对结点的 4 个邻域结点进行搜索,检查其值是否也为 1。如果为 1,则再以此结点为新的活动结点继续向其四邻域扩散搜索 1 值,直到无法满足条件时就完成了对一个完整连通域的搜索。在深度优先搜索过程中,每个访问过的结点被标记为 0,避免重复搜索。

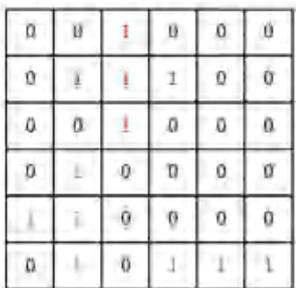


图 4 二维数组样式

Fig. 4 Two-dimensional array style

本文中基于回溯的裂缝提取算法部分伪代码如下所示:

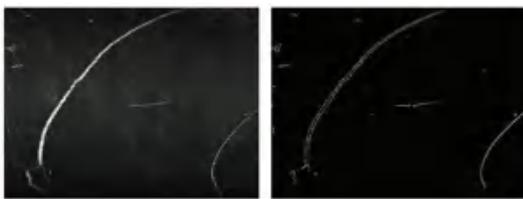
Algorithm 1 Area calculation of connected domain

```

Input: imgData[i][j] is current search node
Output: size is area of connected domain
function COUNT(imgData[i][j], size)
    //mark the current node of image array as 0
    imgData[i][j] = 0;
    size++;
    if adjacent above-node is 1 then
        COUNT(imgData[i][j - 1], size);
    end if
    if adjacent below-node is 1 then
        COUNT(imgData[i][j + 1], size);
    end if
    if adjacent left-node is 1 then
        COUNT(imgData[i - 1][j], size);
    end if
    if adjacent right-node is 1 then
        COUNT(imgData[i + 1][j], size);
    end if
    return size;

```

通过上述回溯过程,可以得到每个完整连通域的像素面积大小,对小面积的连通域(多次测试噪声区域像素面积一般为 100px 以下)可视为噪点,再次采用回溯法对边缘检测后的图像进行处理,将噪点区域清除(即置为黑色)。使用基于回溯的裂缝提取算法删除非裂缝区域后的结果如图 5(d) 所示。对比图 5(c)、(d) 可以清楚地看出:经过回溯算法处理后的裂缝图像基本消除了复杂背景和噪声的干扰,最终提取的裂缝目标清晰可见。

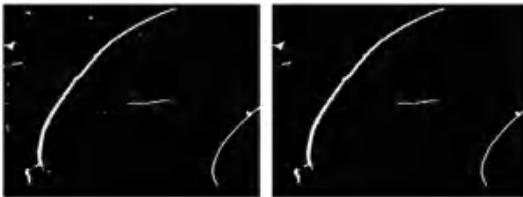


(a) 原图

(b) 边缘检测后

(a) Original image

(b) After edge detection



(c) 连接临近裂缝

(d) 裂缝提取算法后

(c) After connecting adjacent cracks (d) After crack extraction algorithm

图 5 岩石图像裂缝检测效果

Fig. 5 Crack detection effect of rock image

2.1.3 图像裂缝手动识别设计

由于图片背景和裂缝信息的复杂程度不同,自

动识别之后还可能存在部分裂缝目标识别不够准确的问题。结合实际需求和 Canvas 对象拥有的多种绘制方法,增加了辅助的裂缝手动识别功能,用户可以实现手动绘制和擦除裂缝,增加系统的实用性,用户体验更友好。

在 Canvas 画布上实现手动绘制功能,需要监听 3 种鼠标事件:按下鼠标左键、滑动鼠标和松开鼠标。首先,监听鼠标左键按下(mouseDown)事件,拿到当前鼠标的 x, y 轴对应视口的坐标点,记为点 1;再监听鼠标滑动(mouseMove)事件,记录鼠标滑动到的第一个坐标点记为点 2,再通过 Canvas 中的 `lineTo()`、`moveTo()` 和 `stroke()` 方法,将点 1 与点 2 连接起来绘制成线。然后将点 2 赋值给点 1,继续滑动鼠标,记录鼠标滑动过程中的下一个点为点 2,依次连线。最后监听松开(mouseLeave 或 mouseUp)鼠标事件,停止赋值,一段连续的线段绘制完成。整个流程如图 6 所示。

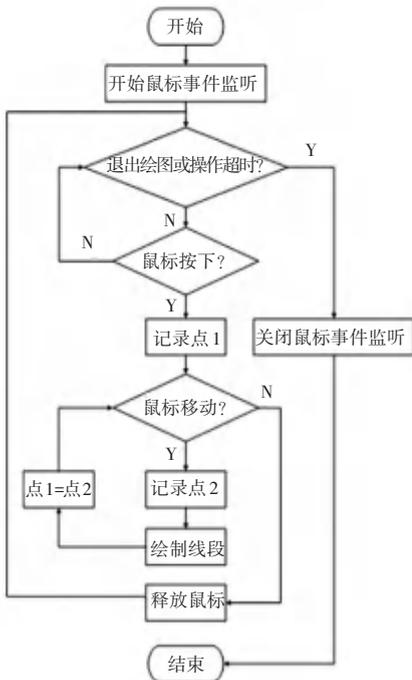


图 6 手动绘制裂缝流程图

Fig. 6 Flow chart of Manually drawing the fracture

擦除功能的实现与上面类似,即不断监听鼠标事件执行相应代码。但是与一般的 Canvas 实现画布擦除功能不同的是,本文系统实现的是在一张已有的图像上绘制,擦除时不能直接清除鼠标滑动过的区域,否则会将原图也一并擦除。因此本文系统在实现擦除功能上使用 `CanvasRenderingContext2D` 对象,取原图画布对应区域的像素,直接覆盖到待擦除区域,以实现擦除标记的裂缝。

2.1.4 其它交互功能设计

为了丰富系统的交互性,提高系统实用性和用户工作效率,在裂缝识别模块中还实现了在线保存图片 and 导出报表的功能。系统识别到裂缝目标之后,会在原图上叠加显示裂缝目标的提取结果,并将裂缝识别的结果以文字形式在文本框中显示。将图片的 `ImageData` 数据转换成 `blob` 对象,通过 `URL.createObjectURL()` 方法,转换成 `blob` 地址,保存在 `<a>` 标签的 `href` 属性中,用户点击后即可保存图片到本地。导出报表则采用 `jquery.wordexport.js` 插件实现,此插件完美兼容各大主流浏览器,性能优良,可以将网页指定标签容器中的文本内容生成并直接导出 `word` 文档,方便用户后续分析使用。

2.2 岩心信息入库和浏览查询功能设计

岩心信息入库模块和信息浏览模块的主要功能包括:对岩心数据和图像的录入、修改、删除和浏览查询。其中录入、修改、删除只能由系统管理员操作,其它用户只有浏览查询的权限。所有文本数据均以字段的形式存储在 `SQL Server 2008 R2` 数据库中,该数据库具有易用性、适合分布式组织的可伸缩性,为数据管理与分析带来了灵活性。其中,数据库提供的大部分数据服务封装在存储过程中,可以防止 `SQL` 注入式攻击^[11],为系统安全稳定运行提供了保障。

岩心基本信息以 `ASP.NET` 提供的 `GridView` 网格视图控件进行展示,该控件通过 `DataBind` 方法将对应 `SQL` 语句从数据库中查询出的数据源绑定到控件上,以网格格式显示数据源的值。排序和分页功能直接通过脚本回调实现,而不用往返于服务器并改变整个页面渲染,大大减缓服务器压力。

相册浏览查询模块以 `ASP.NET` 提供的 `DataList` 容器控件实现。该控件是以模板为基础的数据绑定控件,使用 `ItemTemplate` 项模板确定需要显示的数据项及布局^[12],在模板中采用 `<%# Eval("字段名称") %>` 方法,将从数据库中查询的数据集合进行单向绑定,实现相册页面的渲染。在实际应用中,考虑到岩心图像不止一张,为了避免同时加载高分辨率岩心原图增加网络负担,在对图像数据入库时,应用服务器会对图像进行等比例压缩,生成保留特征点的缩略图。相册展示的是缩略图,在用户点击查看原图或进行裂缝识别操作时,再动态加载对应的高分辨率原图,一定程度上提高了网站的流畅度。

3 系统测试

为了保证整体系统的稳定性和可靠性,需要对

整体系统进行测试,测试其入库模块、浏览查询模块和图像裂缝识别的最终效果。

3.1 系统功能模块测试

系统实现了对岩心基本数据信息和图像信息在线入库、编辑删除和浏览的功能,用户对数据进行增删改操作后会实时刷新,展示最新的数据。测试结果表明,各项指标均达到了预期效果。岩心信息编辑和浏览查询展示如图7(a)所示。

岩心图像以相册形式展现给用户,效果如图7(b)所示。用户单击图像出现菜单栏,可根据需求选择查看原图或进行在线裂缝识别操作。

在线裂缝识别效果如图7(c)所示。裂缝识别完成后,裂缝目标以红色标记,且标注出裂缝条数,对应裂缝区域的像素面积在文本框对应显示。用户可将初步识别结论保存到数据库的图像描述字段中,在岩心相册展示页面,通过鼠标悬浮在图片上可读取到识别结论,或直接导出包含图像和识别结论的报表供后续分析。

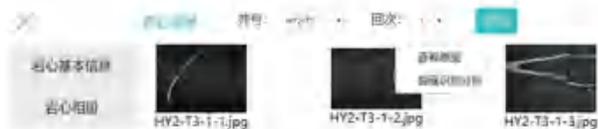
3.2 系统响应速度测试

在高并发的环境下,本实验采用 Apache JMeter 对系统响应时间进行测试^[13]。服务器处理器为 Inter(R) Core(TM) i7-7700K CPU @ 4.20GHz,内存为 16GB DDR3,操作系统为 Windows Server2012,客户端浏览器为 Google Chrome。



(a) 数据浏览编辑展示页面

(a) Data browsing and editing display page



(b) 岩心相册浏览查询展示页面

(b) Core album browsing query display page



(c) 岩心图像裂缝识别展示页面

(c) Core image crack identification display page

图7 系统各模块界面展示

Fig. 7 Interface display of each module of the system

对不同的功能页面,分别发送了 HTTP 请求,测试结果见表1。共发送7 000个请求,每种请求为随机顺序。总体来看,系统平均响应速度为700 ms左右,可以满足用户对性能的要求。

表1 系统压力测试表

Tab. 1 System stress test form

Label	#Sample	Average	Error	Throughput
基本信息数据请求	3 500	723	0.00%	890.1/sec
图像数据请求	3 500	825	0.00%	595.9/sec
总体	7 000	774	0.00%	1 107.6/sec

对岩心相册页面使用谷歌浏览器自带的开发者工具进行调试,从图8(a)、(b)两张图中可见,当查看岩心相册页面加载图像分辨率为400 dpi原图时,完全加载完一张图像需要耗时几百毫秒到几秒钟不等,严重影响网页流畅度和用户体验。但是,当加载分辨率为96 dpi缩略图时,浏览器加载资源的耗时大大减少,一定程度上提高了网站的响应速度。

Name	Status	Type	Size	Time
原 1-26-14-11.jpg	200	jpeg	3.4 MB	2.40 s
原 1-26-14-11.jpg	200	jpeg	3.5 MB	3.54 s
原 1-26-14-15.jpg	200	jpeg	4.5 MB	1.72 s

(a) 加载原图时

(a) When loading the original image

Name	Status	Type	Size	Time
缩 1-26-14-11.jpg	200	jpeg	5.6 KB	5.53 ms
缩 1-26-14-15.jpg	200	jpeg	5.8 KB	6.00 ms
缩 1-26-14-15.jpg	200	jpeg	3.3 KB	2.94 ms

(b) 加载缩略图时

(b) When loading the thumbnail

图8 加载图像请求时间

Fig. 8 Load image request time

4 结束语

本系统结合岩心图像的在线浏览的实际需求和 Web 技术的发展,设计并实现了基于 Canvas 的图像

裂缝在线识别系统, 系统具有优越的跨平台性和可操作性。用户选择相应的井号和回次之后, 可查看对应岩心基本信息和图像, 并可查看图像原图或进行裂缝识别操作。测试结果表明, 本系统运行较为流畅, 可在线自动标记图像中的完整裂缝。为了提高系统的实用性和交互性, 用户还可以手动标记和擦除裂缝。整个系统为勘探工作者查阅和管理岩心资料提供了便捷的途径, 极大地提升了工作效率。

参考文献

- [1] 郭亮. 岩石裂隙检测及形变测量算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学; 计算机应用技术, 2014.
- [2] 夏晨木, 滕奇志, 卿粼波, 等. 岩石三维图像裂缝提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(17): 186-191.
- [3] 张里南. 基于 B/S 的测绘仪器信息管理系统的设计与实现[J]. 地理空间信息, 2019, 17(10): 106-108, 12.
- [4] 朱文. 基于 HTML5 Canvas 技术的在线图像处理方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [5] GAO Yonghui. Construction of Network Class Information Management System Based on B/S Architecture [C]//

- Proceedings of 2019 International Conference on Computer Information Analytics and Intelligent Systems (CIAIS 2019). Institute of Management Science and Industrial Engineering; 计算机科学与电子技术国际学会 (Computer Science and Electronic Technology International Society), 2019; 16-19.
- [6] 周恒, 余丹. 基于 HTML5 的图形图像协同处理技术分析[J]. 无线互联科技, 2016 (18): 69-70.
- [7] 吴海燕. 基于 HTML5 Canvas 绘图技术应用[J]. 电子测试, 2018 (4): 116, 118.
- [8] 王青. 基于 HTML5_Canvas 的 3D 粒子图形动画的设计[J]. 中国科技信息, 2019 (5): 79-80.
- [9] 赵芳, 周旺辉, 陈岳涛, 等. 改进的 Canny 算子在裂缝检测中的应用[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20): 107-111.
- [10] 王文东, 武海妮. 求解 0-1 背包问题的算法分析[J]. 信息与电脑(理论版), 2018 (9): 68-70.
- [11] 安莎丽, 杨尧, 张余强, 等. 地质实物档案动态管理实践[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(2): 275-280.
- [12] 张正礼, 王坚宁. ASP.NET 4.0 从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [13] 余青. 利用 Apache Jmeter 进行 Web 性能测试的研究[J]. 智能计算机与应用, 2012, 2(2): 55-57.

(上接第 55 页)

白噪声作为时间载荷, 得到“蝶形”损斑星云图, 如图 4 所示。为了更清晰地观察到钢丝裂纹处的损伤, 将“蝶形”损斑进行局部放大。从中可以观察到裂纹上前缘节点处 (49885) 与下前缘节点处 (55033) 有严重的损斑, 并且损斑还有继续扩展的趋势。



图 4 裂纹处“蝶形”损斑星云图

Fig. 4 "Butterfly-shaped" damage pattern at the crack

为了从数据角度精准地揭示裂纹前缘的损伤-寿命关系, 选取裂纹处的 10 个节点, 绘制出表 1。

表 1 裂纹处的损伤-寿命表

Tab. 1 Damage-life table at crack

Node	Material	Damage	Life
49885	AusteniticStainlessn Steel	3.28E-01	3.048
49727	AusteniticStainlessn Steel	1.53E-03	653
49734	AusteniticStainlessn Steel	1.02E-03	984.8
49764	AusteniticStainlessn Steel	7.18E-04	1393
49711	AusteniticStainlessn Steel	4.84E-04	2068
49725	AusteniticStainlessn Steel	4.52E-04	2214
49737	AusteniticStainlessn Steel	6.72E-04	1488
49703	AusteniticStainlessn Steel	9.75E-04	1026
49726	AusteniticStainlessn Steel	1.63E-03	614
55033	AusteniticStainlessn Steel	3.15E-01	3.176

显而易见, 上前缘节点处 (49885) 与下前缘节点处 (55033) 的损伤分别为 $3.28E-01$ 和 $3.15E-01$, 其寿命分别为 3.048 和 3.176。由此, 得出裂纹前缘处的损伤最大, 且寿命最短。

4 结束语

本文模拟现实工况下缺陷钢丝的受力状态及其损伤-寿命关系, 得到以下结论: 钢丝裂纹在受力情况下, 在宽度及深度这两个自由度拓宽加深; 裂纹前缘处, 会出现应力集中现象; 应力集中的前缘处会出现“蝶形”损斑, 且裂纹有继续扩展的趋势; 等效应力越大, 其损伤越大, 寿命越短。本研究的应力特征可为服役钢丝的疲劳寿命评估提供理论支持, 也可作为电磁缺陷无损检测领域的补充发展。

参考文献

- [1] 朱安行. 提升钢丝绳丝间应力分析及疲劳寿命预测[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [2] 杜文正, 马保珠, 曹大志, 等. 钢丝绳应力分析与疲劳寿命研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(8): 134-137.
- [3] 吕晶, 闫萍, 曹恩铭, 等. 基于弱磁效应的管道应力检测技术[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(1): 72-77.
- [4] 李晓懂, 李岳, 陶俊勇, 等. 线接触钢丝绳股内钢丝接触应力计算及仿真分析[C]// 2015 年全国机械行业可靠性技术学术交流会暨第五届可靠性工程分会第二次全体委员大会, 2015.
- [5] 褚文敏, 郑刚, 刘志才, et al. Ansys Workbench stress and fatigue analysis for steel rope%基于 Ansys Workbench 的钢丝绳应力和疲劳分析[J]. 起重运输机械, 2016 (2): 34-38.
- [6] 罗宁, 刘斌, 何璐瑶, 等. 基于弱磁法的管道裂纹内检测技术探索[J]. 石油规划设计, 2019, 30(2): 11-15.