

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.06.011

疲劳裂纹扩展试验裂纹图像采集系统

郑欢斌¹, 刘 辉¹, 刘 欢¹, 朱亚伦¹, 齐子诚^{1,2}

(1. 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014;
2. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘 要:针对目前金属疲劳裂纹扩展检测方法存在效率低、操作繁琐、精度不高,不能实现实时性等缺点,文章提出了基于机器视觉的裂纹检测方法。根据金属疲劳裂纹扩展试验过程中裂纹图像的采集要求,设计了摄像头位置可自动调整的疲劳裂纹图像采集系统,包括摄像头安装运动装置,裂纹图像采集装置以及摄像头运动控制系统。图像采集装置由高分辨率黑白面阵 CCD 摄像头、光学镜头、光源照明装置和图像采集卡组成,前 3 者安装在摄像头支架上,与摄像头运动装置相连。摄像头运动装置中的 X, Y, Z 轴运动机构由步进电机带动滚珠导轨机构。在基于 ARM 技术的运动控制系统的控制下摄像头可沿 X, Y, Z 轴作高精度直线运动,实现和试件之间精确位置的调整。实验结果表明,所设计的系统可采集到疲劳裂纹扩展试验过程中高清晰度、高分辨率的试件裂纹图像,满足下一步裂纹尺寸计算的要求;摄像头运动定位精度可达到 0.02 mm,满足精确的系统聚焦、位置调整、跟踪采集的要求。

关 键 词:裂纹图像采集;疲劳裂纹扩展试验;摄像头;运动控制;ARM 技术

中图分类号:TP391.41

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)06-0046-07

Crack Image Acquisition System in Fatigue Crack Propagation Test

ZHENG Huanbin¹, LIU Hui¹, LIU Huan¹, ZHU Yalun¹, QI Zicheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China;
2. Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo, Zhejiang 315103, China)

Abstract: At present metal fatigue crack growth detection methods have the shortcomings of low efficiency and accuracy, complicated operation, and not real-time achievement, so the new crack detection method was given based on machine vision. A crack image acquisition system with auto-adjusting camera in the fatigue crack propagation test was designed, in order to meet the crack image acquiring requirement for the machine vision fatigue crack propagation test. The designed system included image acquisition device composed of black white area CCD camera with high resolution, optical lens, lighting device, and image acquisition card. The camera movement and installation device composed of X, Y, Z axis moving mechanism which was the ball screw and LM guide rail structure with the high movement precision was driven by a highly-subdivided stepper motor and the installation mechanism, and the camera moving control system has been designed based on the ARM technology. The CCD could perform the high precision straight movement along X, Y, Z axis direction controlled by the camera moving control system, accurate position adjustment between the sample and CCD could be achieved. The experiment results show that this design system can capture the crack images which are very clear and with high resolution in the fatigue crack propagation test, and can satisfy the requirement for the precise crack length measurement. The camera movement accuracy reaches 0.02 mm, and can meet the requirements of accurate focusing, position adjustment and image tracking acquisition.

Key words: crack image acquisition; fatigue crack propagation test; camera; movement control; ARM technology (advanced RISC machines technology)

收稿日期:2015-03-11;修回日期:2015-05-21

作者简介:郑欢斌(1989),男,浙江湖州人,硕士研究生,主要研究方向为计算机控制及机器视觉技术。E-mail: huanbinstrong@126.com

金属材料疲劳裂纹扩展试验通过测量在所施加交变试验载荷的作用下若干个载荷循环数及其对应的裂纹长度,求出裂纹扩展速率,据此来研究金属材料疲劳断裂特性^[1]。疲劳裂纹的萌生和扩展是一个非常缓慢而复杂的非线性演化过程^[2-3]。传统的裂纹尺寸在线检测方法有柔度法、声发射法、涡流法及交直流电位法等,但都不同程度地存在一些问题,比如操作繁琐、精度不高、抗干扰性差和不易实现自动记录等^[4-7]。通过采用机器视觉技术的疲劳裂纹在线检测方法,可以更加直观、精确、实时地对裂纹进行检测,从而进一步去分析处理^[8-10]。众所周知,机器视觉技术采用摄像头作为疲劳裂纹的实时检测装置,最基本的要求是采集到完整、清晰、分辨率高的图像^[11-12],为使所采集的裂纹试件图像不失真,从而保证裂纹长度计算的准确性,首先对摄像头的位置具有严格的要求,摄像头中心线应严格垂直于裂纹试件表面,除此之外,摄像头还应能沿 X, Y, Z 方向作精确定位的直线运动,实现试验过程中摄像头和试件之间的相对位置调整,使图像采集系统具有自动聚焦,图像位置调整,裂纹扩展过程中图像跟踪采集的功能^[13-15]。另外,金属疲劳裂纹扩展试验可在各种型号的高频和低频疲劳试验机上进行,为匹配各种机型,摄像头应可在 X, Y, Z 轴方向上进行大范围的精确调整。本文所设计的裂纹扩展试验图像采集系统在运动控制系统的控制下摄像头可沿 X, Y, Z 轴做高精度直线运动,实现和试件之间位置的精确调整。所设计的系统可采集到疲劳裂纹扩展试验过程中高清晰度、高分辨率的试件裂纹图像,很好地满足下一步裂纹尺寸精确计算的要求。

1 总体设计

金属疲劳裂纹扩展试验裂纹图像采集系统总体组成原理框图如图1所示。图2所示为总体装置系统,包括摄像头安装运动装置、裂纹图像采集装置和摄像头运动控制系统。裂纹图像采集装置包括高分辨率黑白面阵 CCD 摄像头、光学镜头,光源照明装置和图像采集卡,图像采集卡通过 PCI 扩展槽与计算机相连。CCD 摄像头、镜头、光源安装在摄像头安装支架上,支架与摄像头运动装置相连,摄像头运动机构由 X, Y, Z 轴位置调整机构组成,均由高度细分的步进电机和高精度的滚珠导轨机构组成。在基于 ARM 技术的运动控制系统的控制下摄像头可沿 X, Y, Z 轴作高精度直线运动,实现摄像头和试件之间位置的精确调整,尤其是疲劳裂纹扩展试验过程中摄像头和试件之间位置的调整,达到裂纹图像跟踪采集的目的。计算机和 ARM

摄像头运动控制器之间通过 RS232 串口通信相连,ARM 运动控制器接收到计算机的相关命令控制步进电机转动,从而带动摄像头实现相应运动,采集到所要求图像。除此之外, X, Y, Z 摄像头运动机构上均安装有行程开关,每个驱动轴上安装 2 对行程开关,来实现摄像头左、右、上、下、前、后移动位置的限制,行程开关与 ARM 运动控制器相应接口相连,控制器收到行程开关发来的信号后控制步进电机停止运动。

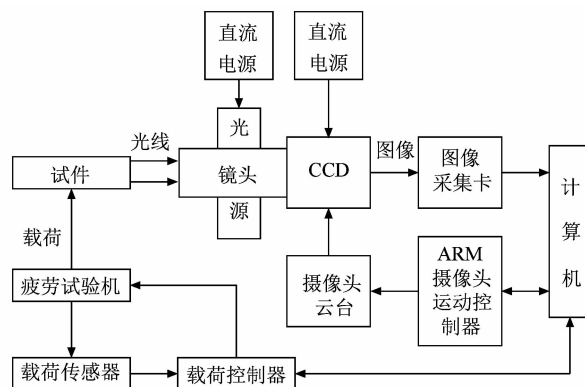
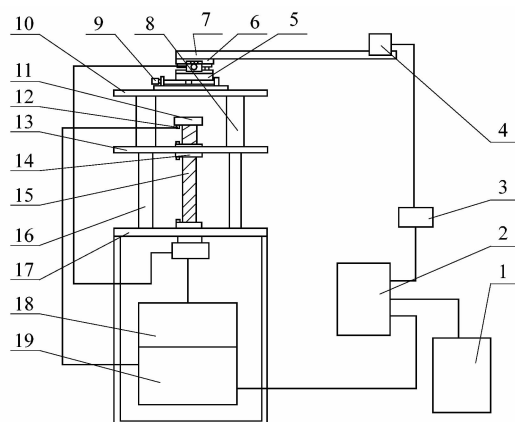


图1 系统总体组成原理框图

Figure 1 Schematic diagram of overall system structure



1-计算机显示屏;2-计算机主机;3-图像采集卡;4-摄像头组件;5-X轴运动机构;6-Y轴运动机构;7-摄像头支架;8-套筒;9-X, Y, Z轴步进电机;10-工作台;11-顶端定位盘;12-Z轴行程开关;13-滑块连接板;14-滑块;15-Z轴丝杠;16-导杆;17-底座箱;18-步进电机驱动器;19-摄像头运动控制器

图2 图像采集系统示意图

Figure 2 Schematic diagram of image acquisition device

系统工作原理为:首先将带有预制裂纹的 CT 紧凑试件安装在疲劳试验机上,在设定的交变载荷作用下裂纹不断向外扩展,通过照明系统使照射在试件上的光线通过镜头反射到 CCD 摄像头上,再由图像采集卡转换为数字图像,最终存储到安装有图像处理软件的计算机内,在疲劳试验图像采集过程中系统将自

动进行摄像头位置的调整。

2 硬件系统设计

2.1 裂纹图像采集装置

裂纹图像采集系统包括 CCD 摄像机、镜头,光源照明装置、图像采集卡,前3者安装在摄像头安装支架上组成裂纹图像成像单元,示意图见图3。根据采样要求,摄像头安装支架可安装在试件的一侧或两侧来采集试件表面的图像。图像采集卡为至少2个通道的高分辨率图像采集卡,通过 PCI 扩展槽与计算机相连;镜头是与 CCD 摄像头相匹配的显微变焦放大镜头或微距镜头(在裂纹测量精度要求不是很高的情况下也可采用定焦镜头);光源采用环形光源或矩形光源。

2.2 摄像头安装运动装置

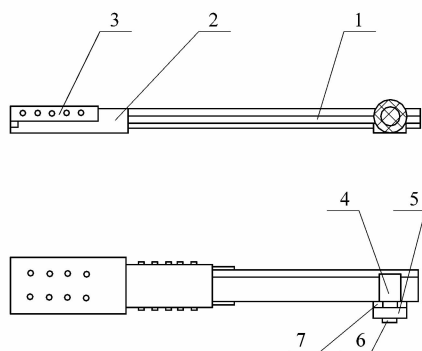
摄像头 X, Y, Z 方向的运动均由步进电机驱动滚珠丝杠导轨机构来实现,摄像头 X, Y 轴方向的移动采用高度细分的步进电机驱动高精度的滚珠丝杠导轨机构来实现, X 轴可实现试验过程中裂纹扩展的高精度自动跟踪,摄像头 Y 轴方向的移动可实现摄像头的手动和自动聚焦,步进电机具有开环高精度位置控制的功能,而且疲劳裂纹扩展试验环境稳定,工作负载低,因裂纹扩展过程是比较缓慢的,对运动的快速性也没有较高要求,所以系统采用开环控制工作方式。摄像头 Z 轴方向实现裂纹摄像头和试件之间高度位置的调整,没有特别高的位置精度要求。

2.2.1 摄像头安装机构

疲劳裂纹扩展试验摄像头安装调整机构结构示意图如图3所示,由摄像头镜头光源安装机构、水平连接架及连接机构组成。摄像头镜头光源安装机构的主体是 PVC 塑钢门窗型材,在此型材上加工出定位槽,将摄像头安装定位,并通过光源支撑架和定位螺钉将环形光源安装定位。摄像头光源安装机构的一端和水平连接架相连,水平连接架和连接机构一端相连,连接机构的另一端插在摄像头运动驱动机构的导向槽内,通过螺栓定位。

2.2.2 Z 轴摄像头运动机构

Z 轴摄像头运动机构如图2所示,步进电机9通过连轴节与滚珠丝杠15相连安装在底座箱17上,步进电机驱动滚珠丝杠转动,滑块14及滑块连接板13随着滚珠丝杠的转动沿导杆16的方向实现垂直方向的运动,从而带动和滑块连接板13固连的套筒8和工作台10一起进行垂直方向的运动,工作台10上安装有 X 轴、 Y 轴摄像头运动机构及安装在其上的摄像头安装支架7,这样摄像头可实现 Z 轴垂直方向的位置



1—摄像头安装机构;2—水平连接架;3—连接机构;4—摄像头;5—镜头;6—光源支撑架;7—环形光源

图3 摄像头安装机构结构示意图

Figure 3 Structure schematic diagram of camera mounting mechanism

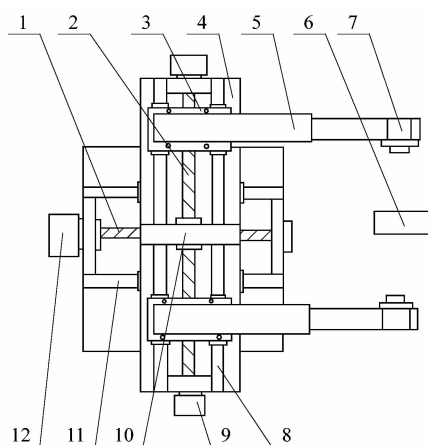
调整。

2.2.3 X, Y 轴摄像头运动机构

摄像头云台 X, Y 轴运动机构可以是单摄像头或双摄像头运动机构。单摄像头运动机构主要由 Y 轴步进电机、直线导轨、滑块机构组件和 X 轴步进电机、直线导轨、滑块机构组件及摄像头组件组成。运动实现形式可为:① Y 轴运动机构安装在 X 轴滑块机构组件上,此时摄像头组件安装在 Y 轴滑块机构上;② X 轴运动机构安装在 Y 轴滑块机构组件上,此时摄像头组件安装在 X 轴滑块机构上。双摄像头 X, Y 轴运动机构结构示意图如图4所示,双摄像头运动机构在单摄像头运动机构的基础上,主要结构形式为2个 Y 轴运动机构安装在 X 轴滑块机构组件上。

2.3 ARM 摄像头运动控制器

运动控制器主要由 ARM 微处理器、电源电路、复位和时钟电路、存储器电路、JTAG 仿真调试接口电路、按键输入电路、限位开关接口电路、串口通信电路以及电机控制接口电路组成,如图5所示。实线矩形框代表运动控制器组成模块,虚线矩形框代表与 ARM 摄像头运动控制器相连接的装置。ARM 微处理器选用32位微处理器 ARM7TDMI 芯片,电机控制接口电路与 X 轴、 Y 轴、 Z 轴步进电机驱动器相连,步进电机驱动器与所控制的步进电机相连,电机控制接口电路设计为5路,即最多可控制5个步进电机。系统采用单摄像头,电机控制接口电路连接3个步进电机;系统采用双摄像头,电机控制接口电路连接4个步进电机。串口通信电路接受上位机传来的控制命令。限位开关接口电路接受各路限位开关发来的信号,以控制步进电机的运动行程。



1—X轴丝杠;2—Y轴丝杠;3—Y轴滑块机构组件;4—X轴滑块机构组件;5—摄像头安装机构;6—试件;7—摄像头组件;8—Y轴运动机构直线导轨;9—Y轴步进电机;10—双摄像头机构丝杠安装组件;11—X轴运动机构直线导轨;12—X轴步进电机底座箱

图4 摄像头云台X、Y轴运动机构示意图

Figure 4 Schematic diagram of X, Y axis motion mechanism of camera support

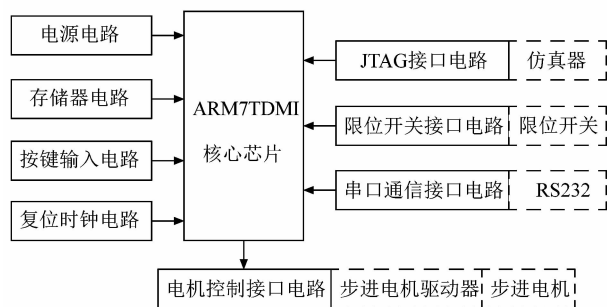


图5 ARM摄像头运动控制器硬件原理框图

Figure 5 Schematic diagram of ARM camera motion controller hardware

3 疲劳裂纹图像采集

3.1 摄像头运动控制

疲劳裂纹扩展试验过程中,由于裂纹的不断扩展,摄像头需根据裂纹位置的变化自动调整。摄像头运动系统主要是对驱动摄像头运动的步进电机进行控制,是一个高精度位置运动控制系统,以实现摄像头运动的精确性、稳定性和实时性。运动速度是一个“加速—恒速—减速—停止”的过程,系统对摄像头跟踪速度要求不高,但其必须运动平稳,抖动小,能在运动中实现点到点的精确定位^[12]。摄像头运动控制系统包括计算机和ARM运动控制器内相关程序软件模块及系统运行所需要的相关硬件装置,如图6所示。计算机内相关程序软件模块包括系统图像采集与显示,图像处理裂纹扩展长度计算,摄像头运动参数设置及

操作,摄像头运动参数通信传输模块;ARM运动控制器中主要包括控制参数接受通信模块、电机驱动控制模块,行程开关信号采集模块。相关硬件装置包括计算机、ARM运动控制器、步进电机驱动器、步进电机、CCD运动云台、摄像头和图像采集卡。

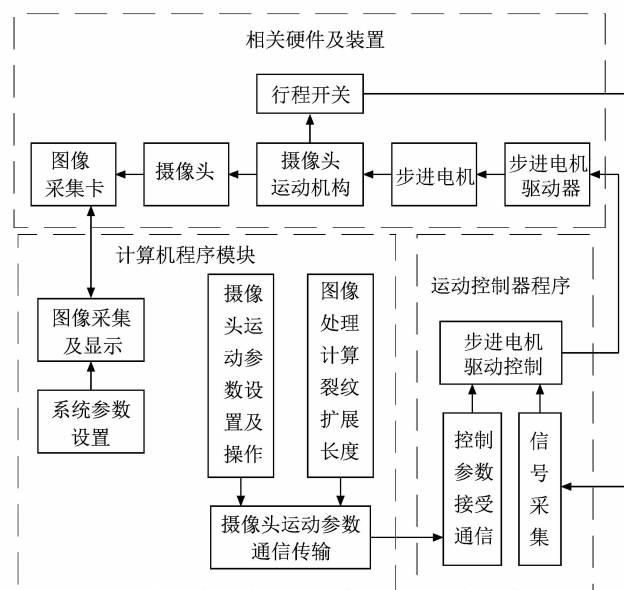


图6 摄像头运动控制原理框图

Figure 6 Structure diagram of camera motion control

摄像头运动控制原理为:由上位计算机运动参数通信传输模块通过RS232串口通信发送摄像头运动参数(运动轴、运动方向、移动位移)给ARM运动控制器,控制器的控制参数接受通信模块接受此数据包并解包,并将相关数据传输给电机驱动控制模块,控制步进电机驱动器驱动步进电机,步进电机驱动CCD运动机构运动带动摄像头完成相应位置调整。摄像头运动参数的生成有2种方式:一种是疲劳扩展试验开始前的聚焦和图像位置调整,由操作者通过点击运动参数设置及操作模块界面相应动作按钮形成,另一种方式是疲劳扩展试验过程中疲劳裂纹扩展达到所设定长度时,摄像头针对裂纹扩展区域进行相应位置调整而形成。

3.2 疲劳裂纹扩展试验裂纹图像采集过程

疲劳裂纹扩展试验图像采集过程如图7所示。系统安装调试后,计算机进行图像采集并显示在屏幕上,试验者先观测图像位置是否满足要求,如不满足要求,则进行摄像头X、Z方向位置调整。操作者通过点击运动参数设置及操作模块界面相应动作按钮,将摄像头运动参数发送给ARM摄像头运动控制器,控制步进电机驱动器驱动步进电机完成相应运动至图像位置

满足要求,再观察所采集图像是否清晰,如图像不清晰,则需调整摄像头到试件表面的距离使系统聚焦,过程同 X, Z 方向位置调整。所采集图像满足位置和清晰度要求后,启动试验载荷加载控制系统进行疲劳裂纹扩展试验,并按所设置好的图像采集与显示参数对疲劳试验过程中不断扩展的裂纹图像进行实时采集,通过图像处理软件进行疲劳裂纹扩展长度计算,当疲劳裂纹扩展到所设定长度,将此数据传输给摄像头运动控制器,控制摄像头精确跟踪裂纹扩展区域,进行图像采集、处理、计算裂纹扩展长度等处理直到扩展试验完成。

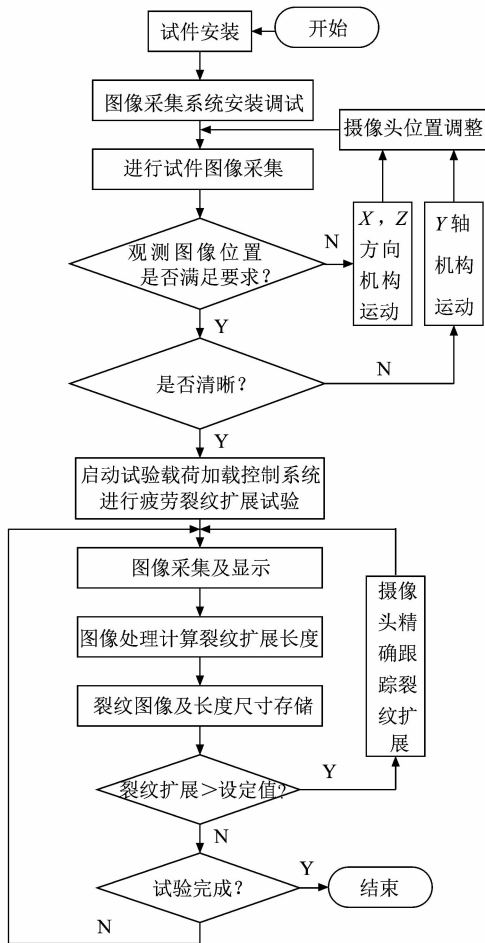


图7 图像采集工作流程图

Figure 7 Fluid-structure of image acquisition

4 实验

为验证所提出的疲劳裂纹扩展试验图像采集方法,本文建立了实验平台,实验装置实物如图8所示。硬件设备主要有:PLG-100 谐振式高频疲劳试验机、美国某公司的 PCI-1014 图像采集卡、自主设计的基于 ARM 技术的摄像头运动控制器、3 个 42BYG250FC 步

进电机(步距角为 1.8°)、最高可进行 64 细分的 HB202M 步进电机驱动器、黑白 CCD 摄像头 XC-XT50CE(具有高清晰度、高帧速率顺序扫描的特性,其分辨率为 724×568) 和 SONY 35 mm 的定焦镜头。试块为 CT 紧凑标准试块,材料为 45 号钢。软件开发平台为 IMAQ-VISION。



图8 实验装置

Figure 8 Experimental set-up

4.1 X, Y 轴摄像头运动精度实验

为测量摄像头的运动精度,在图2的图像采集系统上增加摄像头运动位移的测量装置,即在摄像头运动机构 X, Y 轴上分别将2根测量杆安装在电机支架上和摄像头的连接板上,随摄像头一起运动,电机运动后定杆和动杆之间的距离会发生变化,摄像头的实际位移测量可通过使用精度为 0.001 mm 的千分表测量2个测量杆之间的距离得到。首先进行相同速度下摄像头运动定位精度及重复定位精度实验,在计算机界面输入6种移动距离,每种运动定位重复5次。实验结果如表1所示。通过对表中的数据分析可以得出:摄像头的定位精度在 0.02 mm 以内。另外,还进行了不同的运动速度时摄像头运动精度实验,实验结果表明,运动速度对定位精度有一定的影响,但其精度仍在 0.02 mm 以内,系统满足摄像头在裂纹图像采集中的设计要求。

4.2 疲劳裂纹扩展试验图像采集实验

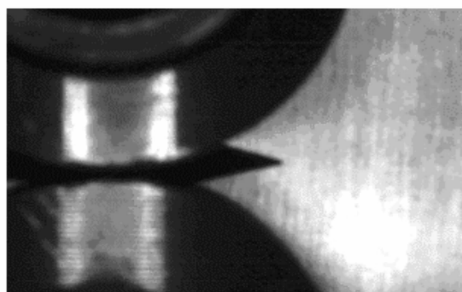
采用图8所示实验装置,根据图7所示疲劳裂纹扩展试验图像采集过程,进行了疲劳裂纹扩展试验前系统聚焦图像采集和裂纹扩展过程中跟踪裂纹图像采集。所采集图像如图9和图10所示。图9为聚焦效

表1 摄像头运动精度实验数据分析

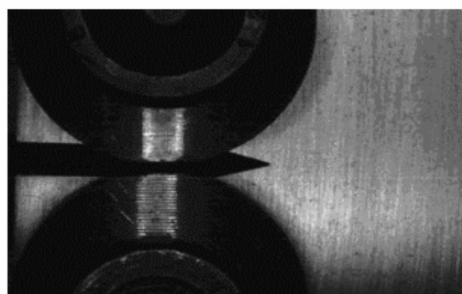
Table 1 Data analysis of precision in camera motion experiment

指令距离/ mm	位置偏差 $X/\mu\text{m}$					平均偏差 $\bar{X}/\mu\text{m}$
	1	2	3	4	5	
2	12.0	14.0	12.0	11.0	16.0	12.8
5	-5.0	-8.0	-6.0	-6.0	-9.0	-6.8
10	10.0	12.0	12.0	14.0	8.0	11.2
20	-4.0	-5.0	-8.0	-6.0	-8.0	-6.2
50	11.0	14.0	10.0	10.0	15.0	12.0
100	8.0	10.0	8.0	6.0	7.0	7.8

果图,可见聚焦后的图像非常清晰,满足试验要求。图 10(a)为摄像头不进行跟踪时所采集图像,裂纹尖端已超出图像采集范围,严重影响裂纹长度测量精度;图 10(b)为跟踪过程中所采集图像,由于裂纹尖端区域光线较暗,和周围区域灰度差值不够大不宜识别;图 10(c)为跟踪完成后所采集裂纹图像,裂纹所处区域照明比较均匀,非常清晰易于识别,所采集图像清晰、分辨率高满足疲劳裂纹扩展试验要求裂纹测量的要求。



(a) 聚焦前的图像



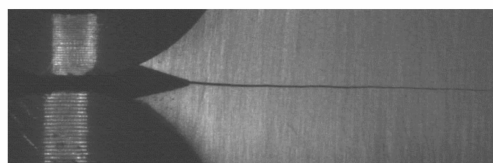
(b) 聚焦后的图像

图9 聚焦效果图

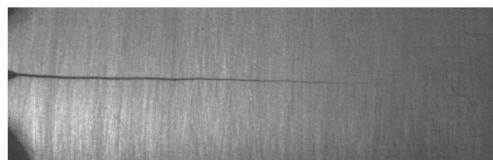
Figure 9 Diagram of focusing effect

5 结语

根据机器视觉金属疲劳裂纹扩展试验中裂纹图像的采集要求,提出了一种摄像头位置自动精确调整的裂纹图像采集系统。系统包括裂纹图像采集装置,摄像头运动安装装置及摄像头运动控制器。所设计系统在基于 ARM 技术的运动控制系统的控制下摄像头可



(a) 不进行裂纹跟踪所采集图像



(b) 跟踪过程中所采集图像



(c) 跟踪完成所采集图像

图10 裂纹扩展过程中所采集图像

Figure 10 Image in process of crack growth

沿 X, Y, Z 轴做高精度直线运动,实现和试件之间位置的精确调整。实验结果表明:所设计系统可采集到疲劳裂纹扩展试验过程中高清晰度、高分辨率的试件裂纹图像,满足下一步裂纹尺寸测量的要求;摄像头运动定位精度可达到 0.02 mm,满足精确的系统聚焦、位置调整、跟踪采集的要求,所设计的基于 PVC 塑钢型材的摄像头安装机构结构简单、定位精度高,绝缘性好、调整方便,适合不同型号的疲劳试验设备。所设计系统已应用在电磁谐振式金属疲劳裂纹扩展试验产品中,长期运行结果表明:系统响应快,实时性好,稳定可靠,所采集裂纹图像质量高,裂纹测量精度高。

参考文献:

- [1] 高红俐,张立彬,姜伟,等.电磁谐振式疲劳裂纹扩展试验固有频率跟踪系统[J].兵工学报,2013,34(7):896-903.
- [2] NISHIJIMA S, MATSUOKA S, OHTSUBO S. An improved method for threshold fatigue crack propagation testing on an eletromagnetic resonance type machine[J]. Journal of Testing & Evaluation, 1983, 11(3):193-201.
- [3] 代鹏,冯森林. CT 试样三维疲劳裂纹扩展数值模拟[J]. 计算力学学报, 2011, 28(S1):33-36.
- [4] 李光海,刘正义. 基于声发射技术的金属高频疲劳检测[J]. 中国机械工程, 2004, 18(7):1205-1209.
- [5] PAVELKO V, OZOLINSH E. Detection of a fatigue crack by method of an acoustic emission[J]. Transport and Telecommunication, 2002, 13(1):75-84.
- [6] 王亮,黄新跃,郭广平. 直流电位法检测高温合金的疲劳裂纹扩展性能[J]. 理化检验(物理分册), 2011, 19(8):480-483.

(下转第 55 页)