

高频电磁涡流检测系统及实验研究*

郭太平 裘进浩 程军 季宏丽 彭俊华

南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室

摘要: 针对碳纤维复合材料电磁涡流检测的特点, 自主设计研制了一套高频电磁涡流检测系统, 其最高检测频率可以达到10 MHz以上。该系统下位机以高速ARM微控制器STM32F407VGT6芯片为控制核心, 上位机以虚拟仪器软件LabVIEW设计用户界面。系统集成信号发生模块、功率放大模块、可调增益放大模块、锁相放大模块、USB传输模块以及数据采集模块, 集成度高、体积小、使用简单方便。利用制作的高频电磁涡流检测系统对碳纤维复合材料的常见损伤形式进行了检测, 包括冲击以及分层等, 证明了系统的可行性以及实用性。

关键词: 碳纤维复合材料; 高频电磁涡流检测; 10 MHz; 冲击; 分层

中图分类号: TG115.28 TN711.71 TN711.72

文献标识码: A

国家标准学科分类与代码: 430.55

1 引言

碳纤维复合材料因为其优异的性能, 如高强度、质量轻、抗腐蚀能力强等, 得到越来越广泛的使用, 尤其是航空航天领域^[1]。因此, 针对碳纤维复合材料的损伤检测显得十分重要。然而, 由于碳纤维复合材料复杂的各向异性, 给碳纤维复合材料的损伤检测带来很多的困难。

电涡流检测技术是基于法拉第电磁感应定律工作的, 这种方法可以实现非接触性的测量。目前, 电涡流检测技术已经在很多领域得到了广泛的使用, 常见的有金属材料的厚度检测、表面光滑度检测、损伤检测等^[2-3]。由于碳纤维复合材料内部含有导电的碳纤维和绝缘的基体, 使得碳纤维

复合材料呈现弱导电性, 并且沿着碳纤维方向的电导率远大于垂直于纤维方向的电导率, 而在板厚方向, 其导电性更弱, 即电导率: 沿着纤维方向 > 垂直纤维方向 > 板厚方向^[4]。正因为这种特性, 使得碳纤维复合材料的电涡流检测成为可能。

近些年来, 国外越来越多的学者和研究所开始使用电涡流检测技术来对碳纤维复合材料进行损伤检测, 包括对碳纤维复合材料中的裂纹损伤、冲击损伤、分层损伤以及纤维方向分布等进行检测, 取得了很大的突破, 大大推进了碳纤维复合材料的电涡流检测的发展。然而在国内, 对于碳纤维复合材料的电涡流检测方法却研究很少。

基于上述背景, 本文作者所在实验室自主研发了一套针对碳纤维复合材料的检测频率高达10 MHz以上的高频电磁涡流检测系统, 检测系统具有集成度高、体积小、质量轻、检测灵敏度高等特点, 利用该系统对碳纤维复合材料的常见损伤形式(冲击以及分层损伤)进行了检测, 检测结果良好。

2 电涡流检测原理与高频电磁涡流检测

2.1 电涡流检测原理

电涡流检测一般包含激励线圈和检测线圈, 原理基于法拉第电磁感应定律, 当通有交流电流的激励线圈靠近导体时, 导体内部会产生电涡流, 产生的电涡流会反过来形成一个磁场作用于原来的磁场, 当导体中存在损

*基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(NE2015001&NE2015101)、机械结构力学及控制国家重点实验室(南京航空航天大学)自主研究课题资助(0515Y02)、333工程(BRA2015310)、江苏省产学研联合创新基金(BY2014003-01)、江苏高校优势学科建设工程资助

伤时，内部的电涡流会发生变化，因此形成的磁场也会发生变化，反应在检测线圈上就是检测线圈感应电压的变化，根据检测线圈上电压的变化就可以检测出损伤的存在，并且可以检测出损伤的大小和位置等信息^[5]。

2.2 高频电磁涡流检测

常规的对金属材料的电涡流检测，通常检测频率在几十kHz到几百

kHz，然而对于碳纤维复合材料，由于其本身导电性能比较弱，在低频条件下，往往检测灵敏度很低，很难检测出碳纤维复合材料中的微弱损伤。

如表1所示对不同频率电磁涡流检测的适用对象进行了概括（碳纤维复合材料属于弱导电材料一类），可见对于碳纤维复合材料的电涡流检测，很有必要提高检测频率。

表 1 不同频率电涡流检测适用对象

	频率范围	适用对象
超低频VLF	3~30 KHz	金属/深部损伤检测
低频LF	30~300 KHz	金属/表面损伤检测
中频MF	300 KHz~3 MHz	薄壁金属
高频HF	3~30 MHz	弱导电材料
超高频VHF	30~300 MHz	半导体、介电谱测量
特高频UHF	300 MHz~3 GHz	绝缘体、涂层测量

然而，对于碳纤维复合材料的检测并不是频率越高检测效果越好，还在很大程度上取决于探头的幅频特性。HUGHES R等人^[6]提出在探头的共振频率处检测灵敏度大大提高，信噪比也得到了大大提高，称这种现象为NERSE(near electrical resonance signal enhancement)现象。本文第4章对电涡流探头进行了相关扫频实验，并且得到了和HUGHES R等人一样的结论，具体的讨论和研究在第4章详细叙述。

3 高频电磁涡流检测系统

整个高频电磁涡流检测系统分为硬件和软件两部分，而硬件又分为模拟电路和数字电路两部分，软件则分为上位机软件和下位机软件两部分。

3.1 高频电磁涡流检测系统硬件

整个高频电磁涡流检测系统的硬件包含电源模块、模拟电路和数字电路3部分，模拟电路和数字电路由两块PCB板分别实现，组成整个高频电磁涡流检测系统的核心部分，电源模块用来给整个系统供电。

1) 模拟电路

模拟电路主要由激励信号处理电

路、自动平衡电路以及锁相放大电路等3部分组成，模拟电路结构如图1所示。

从图1中可以看出，激励信号处理模块包括去偏置电路和功率放大电路，其中去偏置用来对数字电路输出两路正交正弦信号进行去偏置运算，这主要是因为数字电路中没有负电源的存在，所以在数字电路中给输出的正弦信号加了一个2.5 V的直流偏置，使得正弦信号显示在X轴的上方，然后在模拟电路中将这个2.5 V的直流偏置去偏置化，即可显示完整的正负半轴的正弦信号；而功率放大电路则用来对其中一路正弦信号进行功率放大，数字电路中输出的正弦信号是由DDS（直接数字频率合成）芯片AD9958产生的，DDS输出的正弦信号输出电流只有10 mA左右，无法驱动激励线圈在碳纤维复合材料中产生足够大的电涡流，本系统采用TI的高速运放THS3091来同时对电流和电压进行放大，其最大输出电流可以达到250 mA。功率放大后的正弦信号直接驱动激励线圈在碳纤维复合材料中产生电涡流。

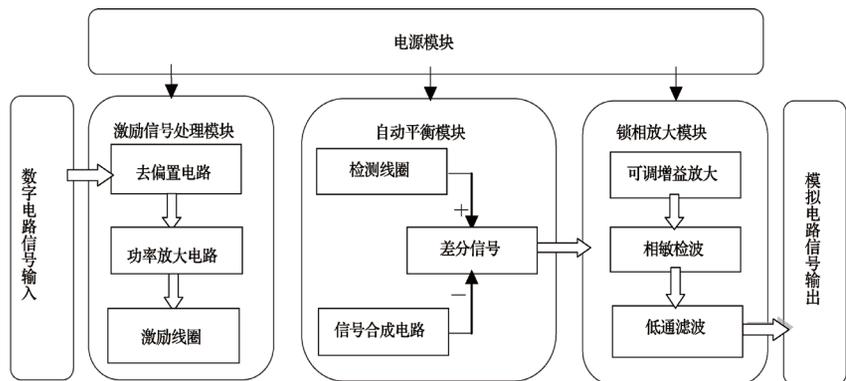


图1 模拟电路结构

自动平衡模块主要是将检测线圈输出的信号和通过合成电路合成的信号进行差分运算,从而使得检测系统开始检测前输出近似为0,达到平衡状态。电涡流检测系统的检测线圈即使在待测试样中没有损伤时其输出也不为0,在检测时这个信号会使放大器过早的达到饱和从而影响损伤信号的放大,因此必须加以抑制。本系统采用的平衡方案是采用乘法器芯片AD835和去偏置后的两路正交正弦信号进行乘法运算后再通过加法器进行加法运算后从而合成探头的信号,进行差分运算后抵消掉检测线圈的不平衡信号。假设检测线圈的不平衡信号如公式(1)所示, $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 可从去偏置后的两路正交正弦信号中合成,则只需合成系数即可实现平衡,这个系数可以通过数字电路中由DA转换芯片DAC8563得到。

$$\begin{aligned}
 A \sin(\omega t + \varphi) &= A \sin \omega t \cos \varphi + \\
 A \cos \omega t \sin \varphi \\
 \lambda_1 &= A \cos \varphi \\
 \lambda_2 &= A \sin \varphi
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

锁相放大模块由可调增益放大电路、相敏检波电路以及低通滤波电路组成。其中,可调增益放大电路用来对损伤信号进行程控放大,由AD8336可调增益放大芯片来完成;相敏检波电路主要用来在含有噪声的信号中提取微弱有用信号,提取的信号频率和参考信号频率相同,这里采用AD835乘法器芯片来实现相敏检波的功能;低通滤波电路用来对相敏检波后的信号进行低通滤波,相敏检波电路输出

直流信号和倍频信号,直流信号中包含了损伤信息,需要保留,而倍频信号则需要滤除,这里采用AD8038组成的二阶低通滤波器来实现低通滤波,其截至频率为50 Hz。

2)数字电路

数字电路主要由5部分电路组成,包括STM32核心模块、由DDS(直接数字频率合成)芯片AD9958组成的正弦信号发生模块、由AD转换芯片AD7606组成的数据采集模块、由DA转换芯片DAC8563组成的自动平衡电路控制模块以及由USB接口组成的上位机和下位机通信和数据传输模块。其中,STM32是整个数字电路的核心控制部分,其基于ARM Cortex-M3内核,是一款为嵌入式应用而研发的内核^[7],STM32需要控制AD9958产生两路正交正弦信号,控制DAC8563

芯片完成整个系统的平衡工作,控制AD7606完成信号的采集工作以及与上位机之间通过USB接口进行通信和数据的传输;AD9958组成的正弦信号发生模块用来产生两路正交正弦信号^[8-9];AD7606组成的数据采集模块主要完成涡流检测信号的采集,采集到的数据通过USB接口传输到上位机供显示保存;DAC8563芯片组成的自动平衡电路控制模块主要通过调节输出的两通道的模拟量来控制信号合成的过程从而完成检测系统检测前的平衡工作;USB组成的上位机和下位机通信和数据传输模块主要用来实现上位机和下位机之间的通信和数据的传输,上位机通过USB发送指令给下位机,下位机通过USB接口将采集数据发送给上位机进行保存显示。整个数字电路的结构组成如图2所示。

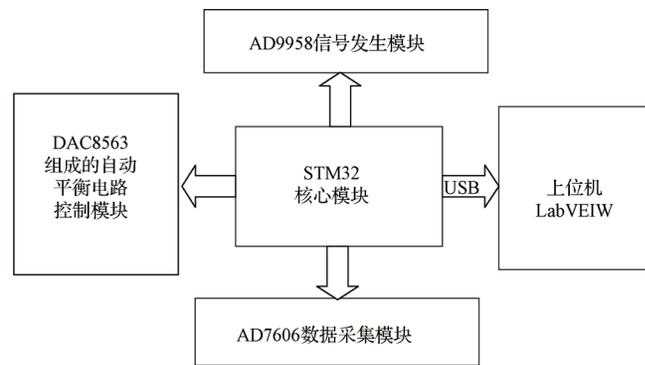


图2 数字电路结构

3.2 高频电磁涡流检测系统软件

整个高频电磁涡流检测系统的软件由上位机软件和下位机软件组成,上位机软件基于NI LabVIEW进行编程,使用图形化编程语言G语言进行开发^[10-11],而下位机则是基于Keil

uVision4集成开发环境进行编程,使用C语言进行开发。

1)上位机软件

上位机实现的主要功能为控制下位机工作,包括系统检测频率和放大倍数的设置,自动平衡过程的控制以

及涡流检测的数据采集等，另外还完成检测数据的显示和存储以及控制位移平台的运动等多项功能，程序流程如图3所示。

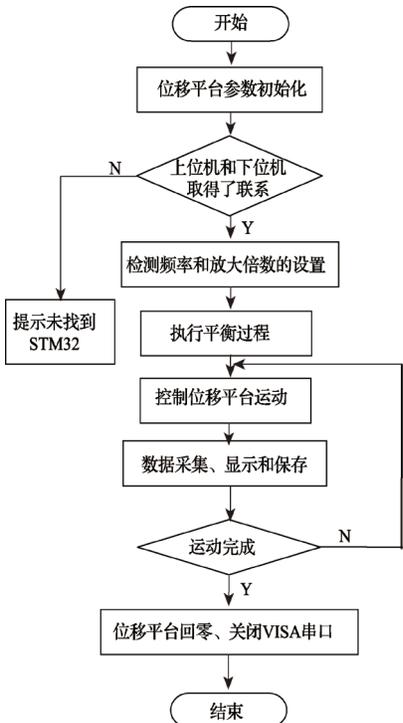


图3 上位机程序流程

整个上位机的流程主要包含以下过程：①程序开始运行后，进行位移平台参数的初始化工作，主要包括运动X轴和Y轴运动的起始位置和终止位置、步长、运行速度和加速度等；②通过串口查找子VI判断是否找到了上位机和下位机通信的串口从而判断上位机和下位机是否建立了联系，如果建立了联系，那么接下来就进行检测频率和放大倍数的设置，若未建立联系，则提示用户未找到STM32；③进行平衡操作，开始执行平衡过程；④平衡过程结束后，紧接着开始控制位移平台进行步进运动，每次步进操作完成后向下位机发送数据采集指令并且将采集到的数据通过USB接口上传后进行显示以及保存；⑤判断运动是否完成，若未完成，继续操作④，否则位移平台回零，并且关闭VISA串口，整个程序结束。

2)下位机软件

下位机实现的主要功能为接收上位机的命令执行不同的操作，整个下位机的程序流程如图4所示，主要包含以下过程：①程序开始运行后进行一系列的初始化操作，包括STM32内部GPIO、RCC、DAC、USB等的初始化，以及相关芯片（AD7606、AD9958、DAC8563）等的初始化；②系统进入while循环中等待上位机发送指令，并根据不同的指令进行不同的操作；③若为频率控制指令，则向AD9958写入频率，若为放大增益设置指令，则控制STM32内部DAC调节放大器的放大倍数，若为平衡指令，则控制DAC8563完成平衡操作，若为数据采集指令，则控制AD7606完成一次数据采集，并将采集到的数据实时上传给上位机进行显示和处理。

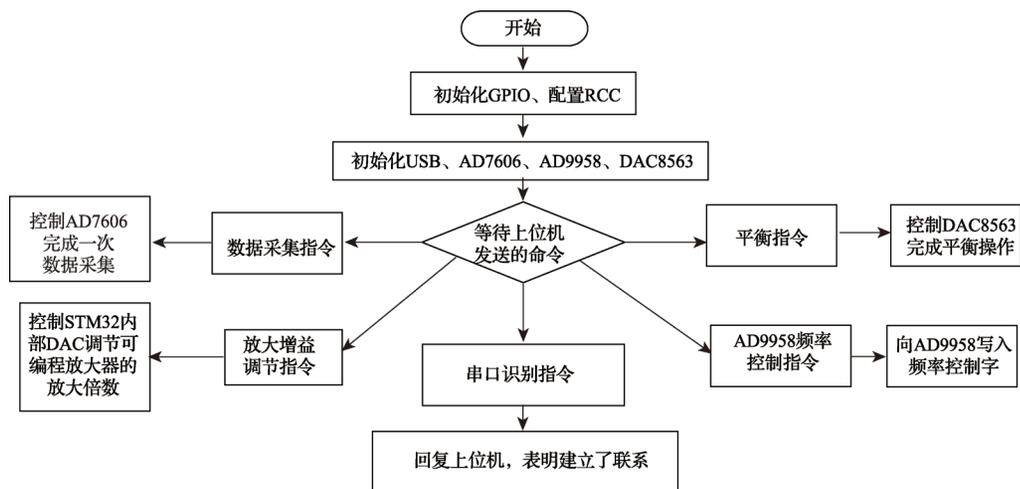


图4 下位机程序流程

3.3 高频电磁涡流检测系统

整个高频电磁涡流检测系统的检测示意如图5所示。除了上述的硬件

和软件部分外,还包含电涡流探头、位移平台、位移平台控制器、待测试样、PC机等。

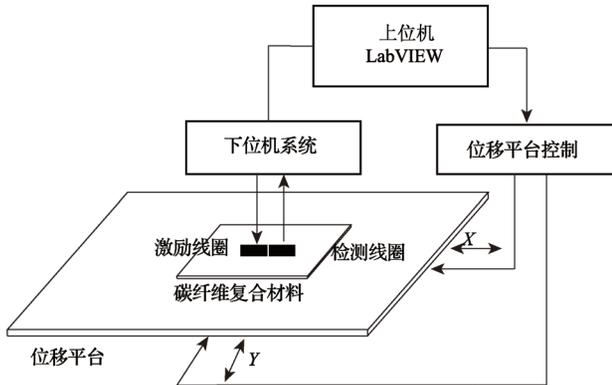


图5 高频电磁涡流检测系统检测示意

如图6所示为高频电磁涡流检测系统所采用的电涡流探头的结构,探头由激励线圈和检测线圈两部分组成,高频电磁涡流检测系统检测时将待测试样(碳纤维复合材料板)放置

在位移平台上,位移平台由上位机LabVIEW通过串口控制位移平台控制器从而控制其运动,探头保持不动,从而探头和待测试样之间形成了相对运动,对整个待测试样进行扫描。

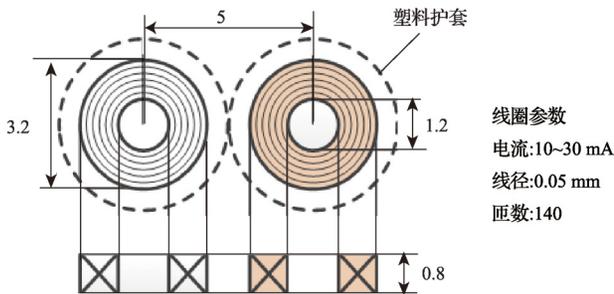


图6 TR探头

4 高频电磁涡流检测系统实验结果

4.1 待测试样

本文设计的高频电磁涡流检测系统主要用来对碳纤维复合材料常见损伤如冲击以及分层等损伤用来检测。如图7所示为实验所采用的有损伤的待测碳纤维复合材料板,主要有分层板和冲击裂

纹板。其中冲击裂纹板厚度为2 mm,长度为250 mm,宽度为200 mm;分层板其厚度同样为2 mm,长度和宽度为170 mm。

图7中分层板中有4块分层区域,其大小以及分层深度均不一样,本文所述结果是对分层大小10 mm×10 mm,深度为0.25 mm的分层区域进行检

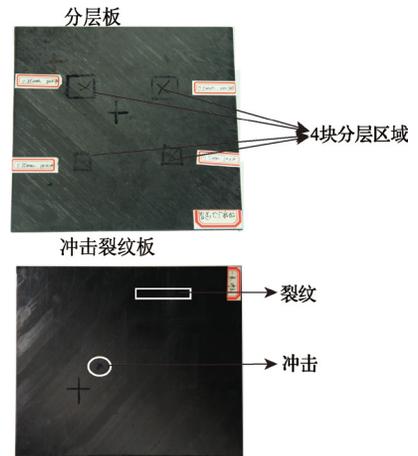


图7 待测试样

测;而冲击裂纹板中有两处损伤区域,图中矩形区域为裂纹损伤,而圆形区域为冲击损伤。

4.2 检测系统工作频率范围

整个检测系统的激励信号由AD9958组成的正弦信号发生模块产生,通过向AD9958写入相应的频率控制字即可控制激励信号的频率,本系统的工作频率范围为0~10 MHz(理论上AD9958产生的信号频率可以达到上百兆赫兹,然而由于模拟电路中运算放大器带宽和压摆率等因素的限制,本系统的最大工作频率只能达到10 MHz左右),可任意调节,可以满足大多数场合对不同检测频率的需求。

4.3 TR型探头的频响特性

由于碳纤维复合材料的导电性很弱,因此在检测微弱损伤时其检测灵敏度很低,为了提高其微弱损伤的检测能力,首先研究电涡流探头的频响特性,研究电涡流探头最佳检测频率(即此时检测灵敏度最高)。

如图8所示为实验所用的TR型探头的频率特性，扫频范围为100 KHz~10 MHz，扫描间隔为100 KHz。

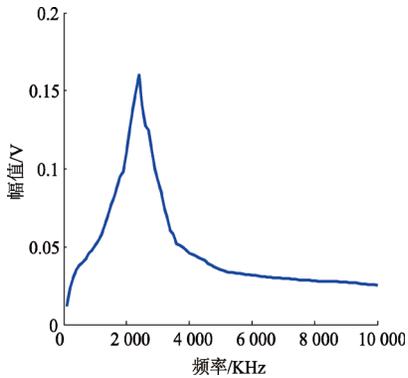


图8 TR探头频响特性

从图中可以清晰的看出在2 MHz左右其响应最大，即此时对损伤的检测灵敏度最高。为了充分说明在2 MHz时其检测灵敏度高，对图7中冲击裂纹板的裂纹使用TR探头沿着裂纹方向扫描，保持其他条件不变，仅改变检测频率，观察不同频率下信号的强弱，检测结果如图9所示。从图9中可以明显看出2 MHz时检测效果优于其他检测频率，灵敏度最高。因此，本文所述实验均在2 MHz的检测频率下进行检测。

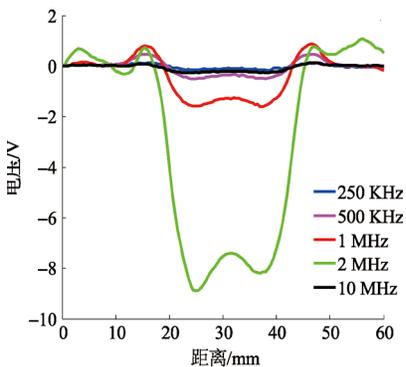


图9 不同频率下裂纹检测信号

从上面的分析可知，在利用电涡流法检测损伤时，首先需要知道扫描探头的频响特性，获得探头的共振频率点，检测时在该共振频率处检测灵敏度最高，对微弱损伤越敏感。

4.4 碳纤维复合材料检测结果

为了验证系统的可行性，使用制作的高频电磁涡流检测系统对图7中的待测试样进行损伤检测，检测频率均为2 MHz，检测结果分别如图10和图11所示。其中图10为冲击检测结果，当碳纤维复合材料受到冲击时，根据冲击能量的不同内部可能发生不同程度的损伤，如分层、纤维断裂等，这些损伤会影响内部电涡流的分布，从而使得可以使用电涡流检测方法对冲击引起的损伤区域，可以明显看出冲击区域的能量要高于健康区域；图11为分层扫描结果，当碳纤维复合材料中存在分层时，会使得分层所在区域的相邻铺层之间纤维分开，降低了碳纤维复合材料整体的导电性，进一步会影响碳纤维复合材料内部电涡流的分布，从图11中可清晰看出分层所在

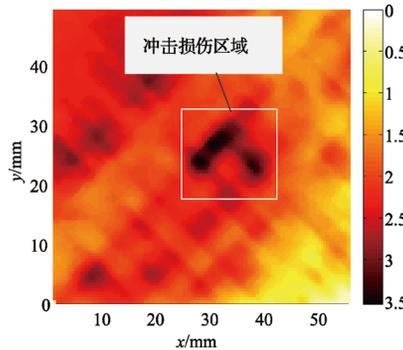


图10 冲击检测结果

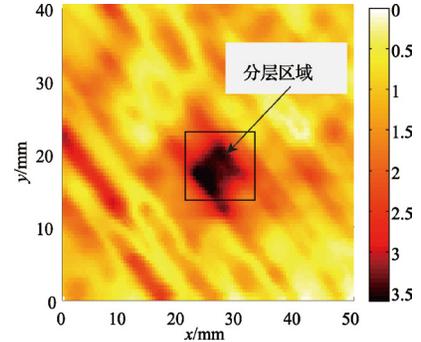


图11 分层检测结果

的位置和大小等重要信息，然而由于分层通常处于碳纤维复合材料内部，对电涡流的影响很微弱，所以很容易受到干扰因素的影响。

5 结论

本文针对碳纤维复合材料的损伤检测研制了一套高频电磁涡流检测系统，其最高检测频率可以达到10 MHz，具有体积小、重量轻、集成度高以及检测灵敏度高等特点。利用研制的高频电磁涡流检测系统可以实现对碳纤维复合材料中的冲击以及分层等损伤形式进行检测，同时还可以对碳纤维复合材料中的纤维方向进行检测，检测效果良好。

另外，通过对探头的频响特性进行分析发现在探头频响共振点附近进行检测灵敏度远高于其他频率。

参考文献

[1] ROBERTS T. Rapid growth forecast for carbon fibre market[J]. Reinforced Plastics, 2007, 51(2): 10-13.

(下转第13页)

高密度封装的可编程芯片和SRAM、SDRAM、FLASH等存储器件,平台嵌入边界扫描IEEE1149.1技术,可实现数字信号元器件级的测试及故障诊断功能。系统提供50 MHz的边界扫描测试时钟,扫描链数量为4条。

针对电路板的多品种、小批量测试需求,系统设计通用测试机柜加测试适配器的形式,之间采用海量互接口。

8 结束语

泛华电路板测试平台经大量实践

证明能够适用于电路板诊断测试方面的应用,在实现功能与性能测试的基础上,基于边界扫描技术能够提升测试覆盖率与测试效率,实现故障定位与诊断,符合当前电路板测试的需求。

(上接第9页)

[2] 曾亮,张丽攀,宋凯,等.碳纤维复合材料涂层厚度涡流法测量的研究[J].仪器仪表学报,2011,32(12):2662-2668.

[3] 周德强,田贵云,尤丽华,等.基于频谱分析的脉冲涡流缺陷检测研究[J].仪器仪表学报,2011,32(9):1948-1953.

[4] MENANA H, F LIACHI M. Electromagnetic characterization of the CFRPs anisotropic conductivity: modeling and measurements[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2011, 53(2): 21101.

[5] 薛英娟,郝利华.基于阻抗分析法的电桥式涡流检测系统研究[J].电子设计工程,2011,19(3):96-99.

[6] HUGHES R, FAN Y, DIXON S. Near electrical resonance signal enhancement (NERSE) in eddy-current crack detection[J]. NDT&E International, 2014 (66): 82-89.

[7] 雷卫延,敖振浪,周钦强.基于STM32的在应用编程(IAP)开发[J].电子测量技术,2015,38(5):62-66.

[8] 詹俊鹏,张鹏恺,李鹏.基于AD9958多波形雷达信号源软硬件的设计[J].电子设计工程,2009(17):69-71.

[9] 杜占龙,谭业双,姚振亚.基于AD9954的信号源设计与实现[J].国外电子测量技术,2011,30(2):53-56.

[10] 田雪,郑敏信.基于LabVIEW的光

伏储能控制系统设计[J].国外电子测量技术,2014,33(12):53-56.

[11] 刘正琼,胡丽莉,唐璇,等.基于虚拟仪器的肢体姿态检测系统研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(6):907-913.

作者简介

郭太平,1991年5月出生,工学硕士,主要研究方向为智能传感技术及系统。

E-mail: gtp@nuaa.edu.cn

裘进浩,1963年10月出生,教授,主要研究方向为智能材料与结构,包括压电材料与器件的制备、振动与噪声控制、流动控制、健康监测、能量回收、自适应结构、压电器件的精密传感与驱动技术等。

E-mail: qiu@nuaa.edu.cn