

Sensor Design for 3D Pyromagnetic Field Detection in Prefabricated Defects Polymer Materials*

Jianxin Su¹, Yongzhong Zhang², Shengming Chen³, Hui Su⁴, Yingshe Luo³

¹College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan

²College of Electronic and Information Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha

³Hunan Provincial Key Laboratory of Engineering Rheology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha

⁴Department of Information Engineering, Changsha Nanfang Professional College, Changsha

Email: lys0258@sina.com

Received: Sep. 15th, 2013; revised: Sep. 23rd, 2013; accepted: Sep. 27th, 2013

Copyright © 2013 Jianxin Su et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: A sensor system suit for three-dimensional pyromagnetic field detecting is presented. That weak magnetic field concomitantly occurs with deformation heat on loading procedure of prefabricated defects polymer materials. The main technical parameters of sensors and the technical measures to improve sensor sensitivities are briefly introduced, including the treatment method for background magnetic field. The hardware structure and the software flow of data acquisition system for this three-dimensional pyromagnetic field detecting are provided. As an applied result, a sort of 3D component curves of weak magnetic field variation are obtained, which come from a PVC plate specimen under a constant tensile displacement load.

Keywords: Pyromagnetic Field; Background Magnetic Field; Two-Way Polarization; Data Acquisition; High Polymer

含缺陷高聚物板材热致磁场三维检测传感器设计*

粟建新¹, 张永忠², 陈胜铭³, 粟慧⁴, 罗迎社³

¹湘潭大学信息工程学院, 湘潭

²中南林业科技大学计算机与信息工程学院, 长沙

³中南林业科技大学工程流变学湖南省重点实验室, 长沙

⁴长沙南方职业学院, 长沙

Email: lys0258@sina.com

收稿日期: 2013年9月15日; 修回日期: 2013年9月23日; 录用日期: 2013年9月27日

摘要: 本文提出了一种对于含缺陷高聚物材料在加载过程中形成微弱热致磁场进行三维测量的传感器系统。简要介绍了传感器的主要技术参数, 提高传感器测量灵敏度的技术措施以及背景磁场的处理方法; 给出了该三维磁场测量传感器数据采集系统的硬件结构和软件流程。采用该传感器系统实验获得了聚合物 PVC 板材在恒定拉伸速率下微弱热致磁场变化规律的三维分量曲线图。

关键词: 热致磁场; 背景磁场; 双向极化; 数据采集; 高聚物

1. 引言

含缺陷高聚物材料或铁磁材料在加载过程中会形成微弱热致磁场^[1,2], 定量测量出该热致磁场的量值

*国家自然科学基金项目(10672191, 11072270)资助。

和变化规律, 对于研究材料在载荷作用下破坏机理具有重要意义。文献[1,2]主要研究材料在载荷作用下裂纹尖端的热磁效应。人们知道, 材料一旦出现裂纹并开始扩展, 表明材料即将破坏并不可逆转。显然, 理

论、实验和数值模拟相结合地研究材料受载后产生弹粘塑性损伤破坏的全过程及全域的热致磁场等流变特性，这对于建立材料在复杂服役条件下的失效准则、破坏理论和寿命预测；对合理使用材料和设计新型材料；对事故防范、安全生产和国民经济发展等均具有重要的理论和实践意义^[3-7]。由于该热致磁场十分微弱，且材料加载实验往往要在由钢铁材料所做成的材料试验机上进行，材料试验机体积庞大，钢铁部件在制造过程中可能存在剩磁，在长期加载工作过程中某些部件可能受到磁化，导致材料试验机工作区域存在磁场是一个客观的事实，这种磁场的大小，分布规律对不同的材料试验机可能存在较大差异，即使对于非铁磁材料的高聚物材料，要将实验材料和加载设备的磁致效应加以区分也并非易事。消除或分离背景磁场的影响，是实现高聚物微弱热致磁场定量测量的关键。文献[3-9]在多个国家自然科学基金的资助下，进行了长达 10 多年的探索和尝试，取得一批重要成果，但均是针对二维问题。本文介绍一种能够定量测量该微弱热致磁场的三维测量传感器系统，并给出克服背景磁场的方法，采用该传感器系统实验获得了聚合物 PVC 板材在恒定拉伸速率下微弱热致磁场变化规律的三维分量曲线图。

2. 热致磁场三维测量传感器系统组成

磁场的三维测量就是用三维传感器对测量点处磁场向量的三维量值进行测量，特点是可以显示测量点处磁场的大小和方向。热致磁场三维测量传感器系统结构框图如图 1 所示。

主要由 HMC2003 构成的三维磁场测量传感器组^[10-12]，磁滞效应外围电路，背景磁场外围电路，多路选择开关，A/D 转换器，单片机，串口通信等电路组成，所获得的数据通过串口与上位机通信，由上位机实现数据的即时显示与记录。图中传感器选用国际著名传感器制造公司 HoneyWell 生产的高灵敏度三轴磁场传感器 HMC2003 作为测量核心元件，该传感器采用近年发展起来的巨磁电阻作为敏感元件，配合低漂移仪表放大器 AMP04 作为放大元件，该仪表放大器放大倍数只与增益电阻有关，不受电源波动的影响，利用恒流源为测量桥供电，克服电源波动对检测灵敏度的影响，所以，HMC2003 是一种高灵敏度，高稳定度的三轴磁场测量传感器，其主要技术指标如表 1

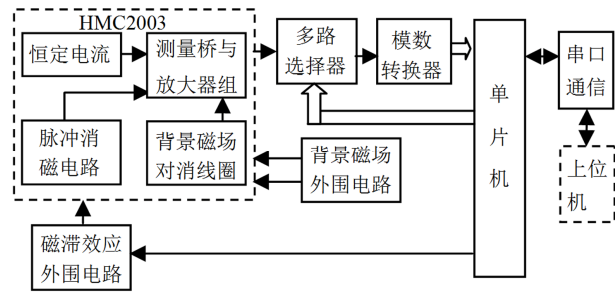


Figure 1. Acquisition system chart for pyromagnetic field
图 1. 热致磁场采集系统框图

Table 1. Main technical parameters of sensors
表 1. 传感器主要技术参数表

Characteristics	Conditions	Minimum	Type	Maximum	Units
Sensitivity	-	0.98	1	1.02	V/gauss
Null field output	-	2.3	2.5	2.7	V
Resolution	-	-	-	40	μ /gauss
Field range	Maximum magnetic flux density	-2	-	2	gauss
Output voltage	Each magnetometer axis output	0.5	-	4.5	V
Temperature	Operating; Storage	-40; -55	-	+85; +125	$^{\circ}$ C
Linearity error	± 1 gauss applied field sweep	-	0.5	2	%FS
Supply voltage	-	6	-	15	VDC
Supply current	-	-	-	20	mA

所示。

3. 传感器外围电路设计

3.1. 磁滞效应消除电路设计

该传感器测量元件由巨磁电阻构成，巨磁电阻在外部磁场的作用下，其内部磁畴会出现不规则的排列，降低测量灵敏度，为解决这一问题，厂家在传感器内部设置了沿传感器轴向的激磁线圈，只要在该线圈上施加足够的激磁电流，就可以使巨磁电阻材料磁畴实现沿测量轴向的整齐排列，其排列的方向与外加激磁电流方向一致，实现双向极化的电路称为磁开关技术^[12]，其原理如图 2 所示。

图 3 所示是对产生双向极化 Set/Reset 信号的要求，Set/Reset 信号不允许有过零反向脉冲出现，否则会降低测量灵敏度。

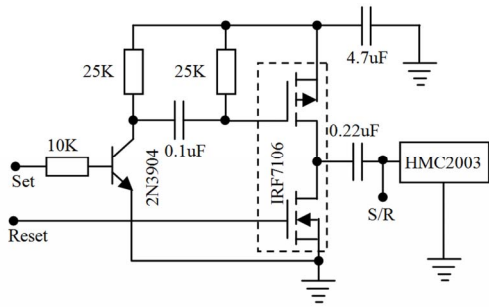


Figure 2. Magnetization circuit chart of dual polarity
图 2. 双向极化激磁电路图

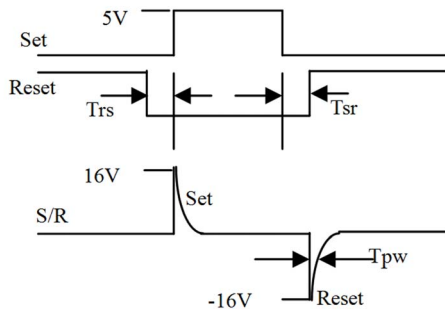


Figure 3. Magnetic impulse circuit chart of dual polarity
图 3. 双向极化激磁脉冲电路图

3.2. 背景磁场消除方法与电路设计

由于材料拉伸机为钢铁材料构成，在加工和使用过程中所有零件均未做消磁处理，其工作区域存在背景磁场是一个客观的事实，该背景磁场的大小和方向是在制造与使用过程中随机形成的。在预研实验中发现，该磁场的强弱与材料拉伸机夹头位置有关，在一定的使用条件下，其大小和方向是不变的，利用这一特点，消除背景磁场有两种方法，一是硬件消磁法，即利用传感器内部的消磁线圈，由于 HMC2003 由 HMC2001 和 HMC1001 组合而成，其芯片内部分别集成了独立的二维和一维消磁线圈^[12]，该消磁线圈的轴线分别平行于 X、Y、Z 轴方向，在线圈中通过不同大小和方向的直流电流，就可以在三个不同方向产生不同大小和方向的磁场分量，如果该磁场分量的大小与背景磁场分量的大小相等，方向相反，则可以使背景磁场得到完全消除。图 4 所示是一个消磁外围电路。

为了尽量减小电路不对称对传感器的影响，消磁线圈两端采用大小相等，极性相反的驱动电压 V_{CC} 和 V_{EE} ，调整电位器 R_p 的位置，可以实现磁场大小和方向的调节。这种消除背景磁场的方法适合于静态强背

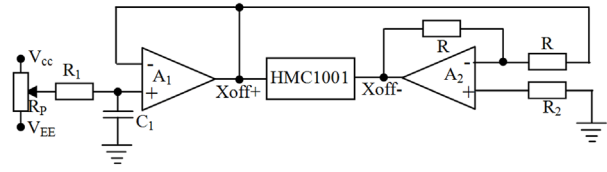


Figure 4. Elimination circuit of static background magnetic field
图 4. 静态背景磁场消除电路

景磁场。对于非恒定背景磁场，则必须采用自动调零方式，利用单片机的 D/A 转换器输出一个直流电取代 R_p 处的电压，同时启动数据采集，比较输出数据，使输出向偏差减小的方向变化。如果现场磁场比较微弱，不会使传感器输出接近饱和，则可以采用背景磁场软件消除法，即利用背景磁场的强度与位置精确对应，分别进行空载与实验两次采样，采用实验与空载两次对应坐标所测量的磁场值相减的方法消磁背景磁场。背景磁场软件消除法适合弱背景磁场，对于强背景磁场下的精确测量，需要将硬件消除法和软件消除法结合使用。

4. 数据采集系统硬件与软件设计

4.1. 数据采集电路硬件设计

该三维磁场测量传感器系统由 5 个 HMC2003 三维磁场传感器组成，每个磁场传感器有 X、Y、Z 三个模拟信号输出端，在传感器板上每个传感器的 X、Y、Z 输出端分别由一个 8 选 1 多路开关 4051 转换为一路信号^[13-16]，所以 5 个传感器各自的 X、Y、Z 输出信号经过 3 个多路开关转换为三路模拟信号 V_x 、 V_y 、 V_z ，所以选用的 A/D 转换器最好提供三路以上模拟信号输入通道，最后设计的数据采集系统硬件如图 5 所示。

图中单片机选用宏晶科技公司^[17]生产的高速、高可靠、在线编程单片机 STC89C54RD+，它具有加密性强，超强抗干扰，超低功耗等特点，5 V 电源下工作频率最高 80 M，内含程序存储器 16 K，数据存储器 1280 字节，不需要扩展程序和数据存储器，从而简化了系统结构；A/D 转换选用 BB 公司生产^[18]的高性能模数转换器件 ADS7825，它具有 4 路模拟输入通道，5 V 单电源供电，16 位并行输出等独特性能，可以满足数据采集系统对通道数、分辨率和速度的要求。该芯片的主要特点如下：1) 最大 25 μ s 的采样和转换时间，保证信号采集系统能够实现同步采样；2) 单电源 5 V 供电，内部集成 4 选 1 多路开关和采样/

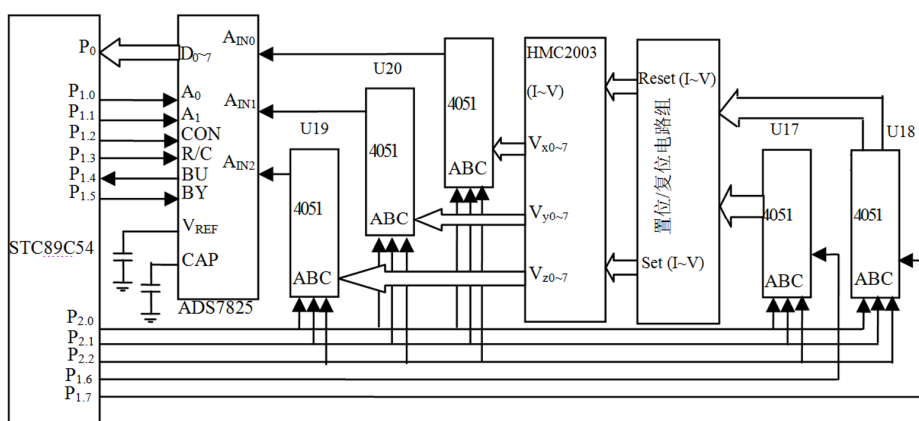


Figure 5. Hardware design of data acquisition system
图 5. 数据采集系统硬件设计

保持器，简化外围电路，使所设计电路的可靠性显著提高；3) 4 个单端模拟输入通道，支持复杂的信号采集系统，能提供大动态范围信号输入；4) 内置 2.5 V 误差 8% 参考电源；5) 内部带有信号幅度变换电路，容许正负 10 V 范围的模拟信号输入，确保大动态范围信号的正确响应，特别是在单电源 5 V 供电方式下，此项指标更显重要；6) 串行/并行数据输出方式可选，适应不同电路的设计要求。其中 16 位并行输出数据分两次读取，当 BYTE 引脚为高电平时，输出高 8 位字节；BYTE 为低电平时，输出低 8 位字节；7) 高转换率，低功耗。ADS7825 可提供 40 kHz 的采样速率，这对于 4 通道输入 16 位并行输出的模数转换来说已是很高的速度，更何况此时的最大功耗只有 50 mW，掉电模式下更只有 50 μ w 的功耗。在并行输出方式下，启动初始化过程是由 R/C (pin22) 脚变为低电平并至少保持 40 ns 开始，启动转换。BUSY (pin24) 脚变为低电平，并保持到数据转换和数据输出寄存器刷新完毕。如果 BYTE (pin21) 脚为低电平，在 BUSY 的上升沿，触发输出信号的高 8 位数字信号；相反，若 BYTE 脚为高电平，输出信号的低 8 位数字信号。最终转换的数据以 BCD 补码格式输出。 V_{REF} 是外部参考电压输入端或内部参考 2.5 V 电压输出端。此引脚应与一个 2.2 μ F 电容相连，并与 V_{REF} 脚的输出阻抗构成一个低通滤波器滤除高频噪声。CAP 为内部参考电压的缓冲输出端，也应与一个 2.2 μ F 电容相连，在 ADS7825 的转换周期内，这样连接可提供给内置 D/A 转换器最佳的转换输入电流，同时对缓冲输出也是一种补偿。另外，在 BUSY 为低电平期间，不再接受新的转换指

令。ADS7825 在并行输出模式情况下，根据通道选择方式的不同，还可以分为连续转换方式和可编程通道选择方式。在 CS、R/C 和 PWRD 同时接低电平的情况下，若 CONTC (pin25) 脚为高电平时，ADS7825 处于连续转换工作模式，CONTC 为低电平，则为可编程通道选择方式。本设计 CONTC 接 P1.2，可以根据需要灵活选择工作模式。模拟输入通道的选择是由程序控制指令完成的。控制器发出数据转换指令和要转换的通道号，通过 P1.0, P1.1 接口控制 ADS 7825 的 A0 和 A1 通道，选择控制端实现 V_x , V_y , V_z 模拟通道的切换，3 个模拟多路开关 4051 的切换控制端 A、B、C 由 P2.0、P2.1、P2.2 三根口线控制，由于传感器的 X、Y、Z 三轴要求同时切换，所以三个 4051 多路开关的选择控制端 A, B, C 是并联的。

4.2. 数据采集系统软件设计

三维磁场测量传感器系统要求完成功能包括系统初始化，输出 Set/Reset 信号，实现多通道数据采集，数字滤波和数据通信等功能，程序框图如图 6 所示，其工作过程是：在 Set 信号作用后，分别对 X, Y, Z 连续进行 50 次采样，接着加 Reset 信号，再分别对 X, Y, Z 连续进行 50 次采样，分别计算 X, Y, Z 轴在 Set 信号和 Reset 信号作用下的平均值，求出两者差值的平均值，作为该传感器在该时刻的三维磁场输出信号 V_x , V_y , V_z 这时就完成了了一个点的数据采集。当 5 个传感器全部的采样完成以后，即完成了一帧数据采集，单片机检查有无上位机的数据请求，如果有数据请求，转入数据通信，否则进入下一帧数据采集。通

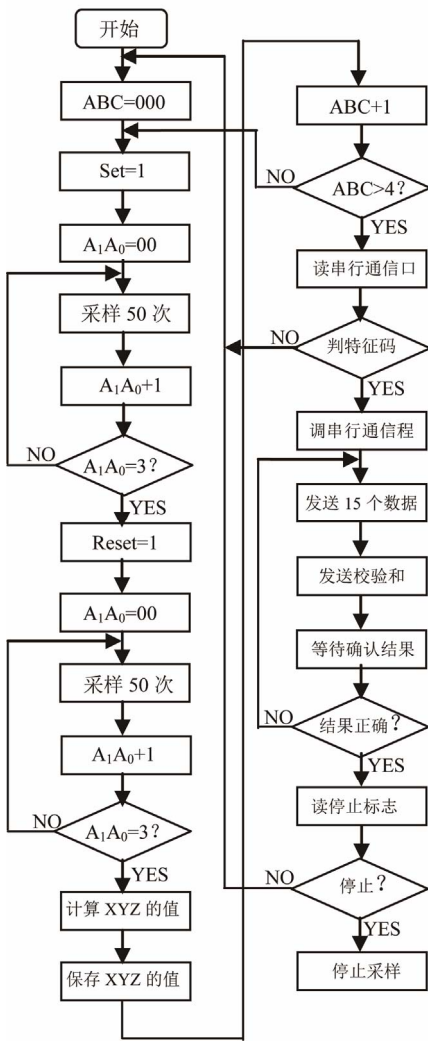


Figure 6. Flow chart of data acquisition system program
图 6. 数据采集系统程序流程图

信程序要求每次发送一帧数据和校验和，由上位机检验是否正确，返回确认码，如果确认码不正确，则重复发送数据。确认码正确，转入下一帧数据采集。

5. 传感器测试方法与实验结果

含缺陷高聚物热致磁场三维检测传感器，属于“含缺陷高聚物材料热致磁效应多场耦合集成测试仪器”的子系统，该子系统的上位机设计了一个基于 Labwindows/CVI 综合集成测控软件^[19,20]，该软件完成材料试验机控制，红外摄像机控制，以及磁场数据信息的显示，因此，对于“含缺陷高聚物热致磁场三维检测传感器”的检验，完全由该集成测控软件来完成，该集成测控软件工作界面如图 7 所示。

图 7 中控制界面分左右两大部分，左面为参数选



Figure 7. Multi-scope measuring named Labwindows/CVI
图 7. Labwindows/CVI 集成测控显示界面

取控制部分，右面为参数显示部分。图 7 中左边上部为系统操作控制部分，包括液压系统开启，控制参数设定，如：PID 参数设定，采样周期设定，位移，拉伸速度，压力设定，系统实验开始与停止控制。实验开始前，根据实验要求，设定 PID 参数，采样周期，位移，拉伸速度，压力等参数。图 7 左边中部为磁场参数显示部分。该部分又分为两个部分，靠左边部分为磁场传感器阵列，总数安排了 4×4 个传感器，点取不同的按键位置，对应选择了传感器编号，也可以直接输入传感器 ID 号来选定显示输出信号，靠右边部分用不同颜色分别显示 X, Y, Z 三个磁场分量的单位和实时数值。图 7 左边下部为红外摄像机的红外图像显示区。

图 7 右面又分三个显示区域，分别对应于载荷 - 位移曲线；磁场 - 位移曲线，温度 - 位移曲线，该三组曲线在实验时同步绘制、显示并保存，有利于适时观察和分析三者之间的对应关系。

为了方便数据的分析，设计了一个专用数据查看界面，如图 8 所示。

该查看界面有两个显示区域。一个是速度 - 位移 - 拉力 - 磁场 - 温度综合显示区，通过数据载入按键，载入实验数据，然后通过通道选择的下拉按钮展开待显示数据下拉列表，点击选中待显示的数据，则该数据以选定的颜色按时间显示其变化的曲线，另一个是红外图像专用显示区。图 8 是一次实验采集的磁场，拉力，位移和红外热像仪采集的在试件 A 点处温度随时间变化曲线图。由于数据查看是一个综合显示界面，其显示的参数由下拉列表框任意选取，所以，

其图上的坐标表示的物理量是根据显示的参数而变化的，具体显示的物理量单位在通道选择列表框中显示，具体数值对应定点击坐标点的数值栏显示。由图 8 右下部分可知，绿色矩形框窗口与热致磁感应强度的测量相关联。

图 9 显示的是第三号传感器三维磁场 3X, 3Y, 3Z 随拉力变化关系曲线，单位为 μT ，由图 9 可以看出，

随着拉力(绿色曲线)的增加，X, Y, Z 三维磁场的强度(分别用紫色、红色、蓝色表示)曲线均有明显的变化，说明传感器能够检测到聚合物 PVC 板材在恒定拉伸速率下产生的微弱热致磁场的变化规律，这些数据可以提供给力学、物理、材料等相关专业领域科技人员进行分析研究。由于传感器为国际权威传感器公司生产和标定，其灵敏度和线性得到保证，系统误

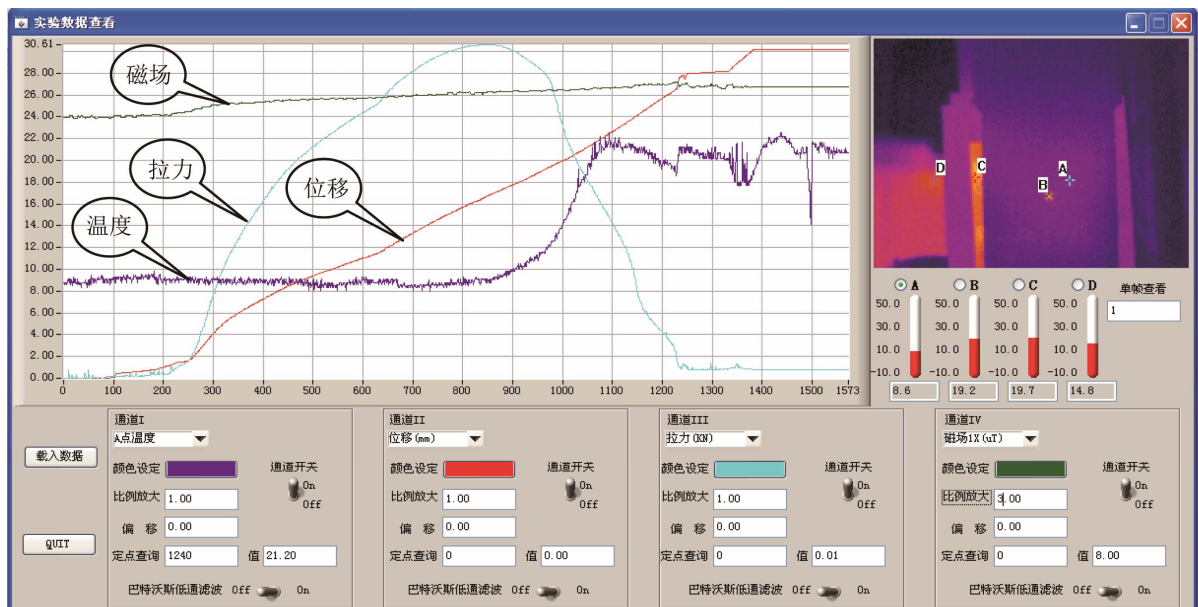


Figure 8. Multi-viewer for experimental data based on Labwindows/CVI
图 8. 基于 Labwindows/CVI 实验数据查看界面

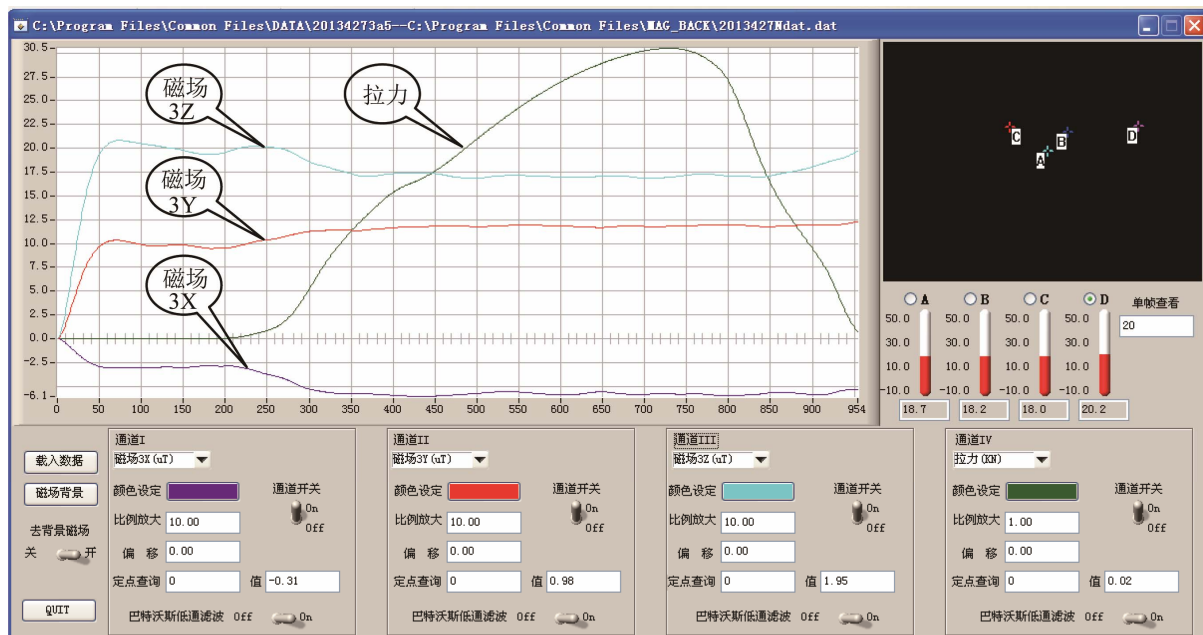


Figure 9. The curves of 3D magnetic field vs. displacement
图 9. 三维磁场随位移变化曲线图

差应该包括传感器误差, A/D 转换器误差。设 A/D 转换器为线性器件, 由于没有进一步放大, 故不存在线性误差的变化, 且采用了软件背景磁场消除, 实际上所有器件的零点误差均被消除, 最后显示的是磁场变化值, 其测量误差完全由传感器确定, 这也是本文选用国际著名传感器制造公司 HoneyWell 生产的高灵敏度三轴磁场传感器 HMC2003 作为测量核心元件的主要原因。对于某点磁场矢量的计算, 可以从曲线图读得 V_x , V_y , V_z 值, 由下式计算获得:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

$$\alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}, \beta = \arctg \frac{V_z}{V_y}, \gamma = \arctg \frac{V_x}{V_z}$$

6. 结论

(1) 对含缺陷高聚物材料热致磁效应首次实现由二维到三维检测的跨越。

(2) 对含缺陷高聚物材料热致磁效应测量传感器系统中任意一个传感器单元, 都可以在系统软件实验界面观察到三维磁场随时间的变化规律, 通过查看界面可以获取实验过程任意时刻在试件某点处磁感应强度的瞬时值。

(3) 实验表明该传感器灵敏度高, 工作可靠, 整个采集系统设计合理、运行平稳、操作简便, 在完全消除背景磁场的情况下, 能精确测量 PVC 板材在拉伸过程中所产生的微弱热致磁场, 为相关领域的科技工作者提供了全新的测试手段和方法。

7. 致谢

本文获国家自然科学基金项目(10672191, 11072270)资助; 同时得到中南林业科技大学任嘉, 邓瑞基, 罗树凌和湘潭大学邓旭华等老师及部分研究生同学提供的帮助, 在此一并表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] 袁龙蔚. 带缺陷流变性材料裂尖断裂过程区的热力学性和电磁性[J]. 湘潭大学自然科学学报, 1997, 19(3): 29-37.
- [2] 梁伟. 磁力耦合作用下的材料变形和断裂[D]. 清华大学, 2002.
- [3] Y. S. Luo, J. X. Su, X. H. Deng, et al. Exploitation and application research on surveying system of pyromagnetic effect during rupture process of PVC sheet with defects. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 2003, 8: 277-282.
- [4] Z.-Y. Yang, Y.-S. Luo, J.-X., Su, et al. Thermomechanical coupling effect of PVC sheet with defects. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(s1): 568-572.
- [5] Y. S. Luo, S. M. Chen, L. Zhang, et al. Experimental studies on elastic cooling and pyromagnetic effect of polyvinyl chloride sheets with defects. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2012, 24(3): 205-210.
- [6] Y.-Z. Zhang, Y.-S. Luo, J.-X., Su, et al. Measuring system of high polymers' pyromagnetic effect. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(s1): 229-233.
- [7] 张亮. 含缺陷 PVC 板材热致磁效应研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011: 21-23.
- [8] 粟建新, 罗迎社, 邓旭华等. 含缺陷流变物体热致磁感应强度随动跟踪测量系统的研制[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2002, 24(3): 60-63.
- [9] 粟建新, 罗迎社, 张永忠等. 基于 LabWindows_CVI 缓变磁场分布状态信息采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2010, 6(1): 81-84.
- [10] 电子工程世界. 开发巨磁电阻(GMR)磁场传感器芯片的意义 [URL]. http://www.Eeworld.com.cn/MEMS/2011/0313/article_859.html
- [11] NVE Corporation. NVE GMR sensor applications. <http://www.nve.com>
- [12] Honeywell. Linear magnetic field sensors. <http://www.magneticsensors.com>
- [13] 王毓银. 数字电路逻辑设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 136-144.
- [14] 李学礼. 基于 Proteus 的 8051 单片机实例教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 77-103.
- [15] 郭天祥. 新概念 51 单片机 C 语言教程——入门, 提高, 开发, 拓展[M]. 电子工业出版社, 2009: 08-15.
- [16] 杨恢先, 黄辉先. 单片机原理及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001: 127-149.
- [17] 宏晶科技. STC 增强型 8051 单片机中文指南 [URL]. <http://www.MCU-Memory.com>
- [18] Burr-Brown, ADS7825 4Channel, 16-Bit Sampling CMOS A/D. <http://www.alldatasheetcn.com/datasheet-pdf/pdf/56561/BURR-BROWN/ADS7825.html>
- [19] 孙晓云. 基于 Labwindows/CVI 的虚拟仪器设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 4-24.
- [20] 王建新, 隋美丽. Labwindows/CVI 虚拟仪器测试技术及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 3-30.