

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.005

基于样条函数的磁滞回线光顺处理研究^{*}

孙菲菲¹, 万 熠^{1*}, 宋明大², 王桂森¹

(1. 山东大学 机械工程学院, 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 山东省特种设备检验研究院, 山东 济南 250101)

摘要:针对脉冲法在测量铁磁性材料应力状态时,磁滞回线存在奇异点的问题,提出了一种基于样条函数的磁滞回线光顺处理的方法。首先,通过分析脉冲法测量磁特性装置的组成和原理,建立了磁滞回线光顺处理的样条插值理论模型;然后,以LabVIEW软件为平台,编写了光顺处理程序模块,并嵌入了上位机后台程序;最后,对不同铁磁性材料的工件进行了对比试验,根据采集的数据,在上位机中绘制了相应的磁滞回线。试验及分析结果表明,经过样条插值处理后,该研发装置获得的磁滞回线可以在正、反向放电间隔区平滑过渡,实现了磁滞回线的光顺处理,从而为进一步研究铁磁性材料的磁特性参数奠定基础。

关键词:磁滞回线;LabVIEW;样条插值;光顺处理

中图分类号:TH140.7

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1062-05

Fairing reasearch of magnetic hysteresis loop based on spline function

SUN Fei-fei¹, WAN Yi¹, SONG Ming-da², WANG Gui-sen¹

(1. Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Special Equipment Inspection Institute, Jinan 250101, China)

Abstract: Aiming at the problem of the hysteresis loop appearing singularity when stress status of ferromagnetic materials is measured by using pulse method, a fairing method of magnetic hysteresis loop based on spline function was proposed. Firstly, by analyzing the principle and method of pulse measurement of magnetic properties, a hysteresis loop smoothing spline interpolation theory model was established. Then, the smoothing processing program module was written in LabVIEW and added to the computer in the whole daemon. Finally, different ferromagnetic workpieces were tested and the corresponding hysteresis loop was acquired. The results indicate that the smooth transition is realized of the hysteresis loop in the discharge area.

Key words: hysteresis loop; LabVIEW; spline interpolation; fairing

0 引 言

因具有良好的机械特性和力学性能,铁磁性材料被广泛应用于油气输送管道、储罐压力容器等多种在役设备^[1]。但是铁磁性材料构件在使用过程中,会因腐蚀、疲劳、应力变形等原因而失效,若不能及时发现存在问题的部件并将其更换,可能会造成巨大的经济损失,甚至灾难性的后果。因此,对正在服役的铁磁性材料部件进行无损检测和评估至关重要。

大量的研究表明,铁磁性材料的早期损伤与其磁性参数之间存在着密切的关系^[2-3],因而磁无损检测方法在损伤检测方面具有很大的潜力。目前,常用的磁无损检测方法主要有磁滞回线法^[4]、巴克豪森效应法^[5]、金属磁记忆法^[6]和磁力效应法^[7]等。由于磁滞回线是铁磁性材料磁特性的基本反映,可灵敏地反映铁磁性材料内部属性的变化,磁滞回线法在检测铁磁性材料早期损伤方面具有巨大的应用前景。铁磁性材料磁滞回线绘制方法有很多,其中强脉冲法具有定量

收稿日期:2016-04-12

基金项目:国家质检总局公益基金项目(201410026)

作者简介:孙菲菲(1992-),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事铁磁性材料早期损伤无损检测方面的研究。E-mail:17862993901@163.com

通信联系人:万熠,男,副教授,博士生导师。E-mail:wanyi@sdu.edu.cn

检测、穿透力强、功耗小、测量时间短的优点,所以得到学者的广泛研究^[8]。强脉冲法是通过采用放电电容进行正反向放电的方法绘制磁滞回线,本研究组在开发铁磁性材料磁性参数测量系统时发现,由于正、反向放电转换的过程中需要一定的时间间隔,导致获得的磁滞回线在时间间隔区不能光滑过渡,需要对其做进一步的数据处理。

样条插值是解决曲线出现奇异点的一种有效方法。本研究以 LabVIEW 为平台,运用其自带的样条插值模块对所采集的数据进行处理,最终通过实验研究证明在绘制不同材料磁滞回线时,样条插值处理后的曲线没有奇异点,在放电间隔区实现平滑过渡。

1 测量磁特性的装置组成与原理

本研究基于法拉第电磁感应定律,设计了一种脉冲法测量磁性材料早期损伤的装置。

该装置主要包括脉冲发射装置、U 型探头、数据采集装置和数据处理和显示 4 个模块,其基本组成如图 1 所示。

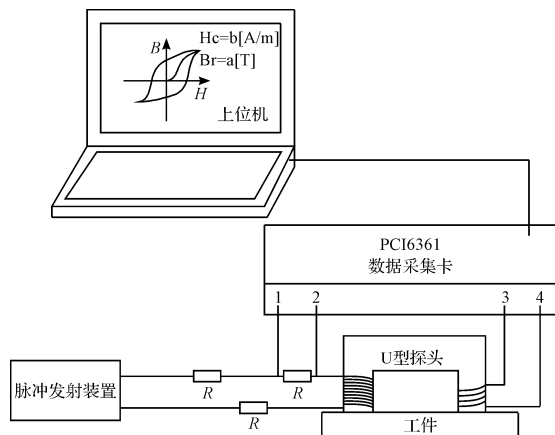


图 1 测量磁特性装置的硬件示意图
其工作原理为：

脉冲发射装置发射的脉冲电压使 U 型探头上的激励线圈产生变化的磁场,磁力线通过工件和 U 型探头组成的闭合回路,其中 U 型探头一端缠绕一定圈数的感应线圈,磁力线经过感应线圈时使得感应线圈产生感应电压,数据采集装置采集感应电压信号并传递到数据处理和显示模块,该模块将采集到的激励线圈和感应线圈电压信号分别转换为磁场强度 B 和磁感应强度 H 。

以 H 作为横坐标, B 作为纵坐标作图,便可以在显示面板上绘制出被测材料的磁滞回线。在测量过程中,探头与工件之间粘合导磁胶,忽略整个磁路的漏磁。

根据电场与磁场之间的转换关系,可以得到线圈中电压与磁场之间的关系。其中,激励线圈中产生的磁场强度可由下式计算得到:

$$H(t) = \frac{UN_1}{RL} \quad (1)$$

式中: $H(t)$ —产生的磁场强度, U —电路总电压, N_1 —激励线圈匝数, R —回路总电阻, L —平均磁路长度。

磁路中的磁感应强度可由下式计算得:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \int u dt \quad (2)$$

式中: $B(t)$ —磁感应强度, N_2 —感应线圈匝数, S —感应线圈包围面积, u —激励线圈产生的感应电动势。

该系统的脉冲发射装置采用两个电容依次对回路瞬时正反向放电,从而在激励线圈中其产生大小和方向变化的磁场,其中,磁场的变化是根据电容放电过程中电流的变化而实现的。

在放电回路中,根据基尔霍夫定律,有:

$$U_C + U_L + U_R = 0 \quad (3)$$

其中:

$$U_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad (4)$$

$$U_L = L \frac{di}{dt} \quad (5)$$

$$U_R = iR \quad (6)$$

为简化公式,令: $\delta = R/2L$, $\omega = \sqrt{1/LC}$,并将式(4 ~ 6)代入式(3),整理可以得到:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\delta \frac{di}{dt} + \omega^2 i = 0 \quad (7)$$

为在回路中产生脉冲电流,必须使: $R > 2\sqrt{L/C}$ 。

令 $\kappa = \sqrt{\delta^2 - \omega^2}$,则方程(7)的解为:

$$i = \frac{U}{2\kappa L} e^{-\delta t} \sinh \kappa t \quad (8)$$

经过上述计算,可以在放电回路中产生脉冲电流,电流峰值与电容的充电电压成正比。然后笔者利用上述公式(1,2),将采集到的两路电压信号经过 LabVIEW 进行数据处理,并在显示界面上绘制生成磁滞回线。

由于第一个电容放电与第二个电容放电之间会存在无可避免的时间间隔,所得到的曲线会在放电间隔区产生突变,导致磁滞回线出现奇异点。因此,必须对所采集的数据进行处理。

2 磁滞回线光顺处理的理论模型

在数据分析中常用的函数类型有线性(linear)插值、三次样条(spline)插值和立方(cubic)插值等^[9]。其中样条法是用一平滑曲线来对各主干点进行拟合的方法,既能克服拉格朗日插值的不收敛性,又能提高分段线性差值函数在节点处的光滑性,具有优良的数学特征^[10]。

由于本研究获得的曲线不允许有拐点或者曲率突变,所构造的插值函数 $y = f(x)$ 必须满足二次连续可微且不变号,需要通过构造三次样条插值函数来解决磁滞回线的奇异点问题。

通常,以 $x_i (i = 1, 2, 3 \dots n)$ 为节点的三次插值样条函数定义如下:给定区间 $[a, b]$ 上的一个函数 $f(x)$, 若函数 $S(x)$ 满足下列条件:

(1) 一致通过 $n + 1$ 个插值点 (x_i, y_i) , 即:

$$S(x) = f(x_i) = y_i (i = 0, 1, 2, \dots, n);$$

(2) 二阶连续, 即 $S(x) \in C^2[a, b]$;

(3) 三次分段, 即在每一个小区间 $[x_{i-1}, x_i] (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 上均为三次多项式。

则称 $S(x)$ 为函数 $f(x)$ 的三次插值样条函数^[11]。该曲线实际上是由分段三次曲线连接而成:在连接点(即样点)上不仅函数是连续的,且一阶和二阶导数也是连续的。

三次样条插值函数 $S(x)$ 是用分段多项式逼近函数 $y = f(x)$, 解法简要介绍如下:

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_1 & & & \\ \mu_2 & 2 & \lambda_2 & & \\ & \vdots & \vdots & \ddots & \\ & & \mu_{n-2} & 2 & \lambda_{n-2} \\ & & & \mu_{n-1} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6f[x_0, x_1, x_2] - \mu_1 M_0 \\ 6f[x_1, x_2, x_3] \\ \vdots \\ 6f[x_{n-3}, x_{n-2}, x_{n-1}] \\ 6f[x_{n-2}, x_{n-1}, x_n] - \lambda_{n-1} M_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

方程(13)的系数矩阵为严格对角占优矩阵,所以必有唯一解,可用追赶法解方程组,将求得的解代入样条函数的表达式中,得三次样条插值函数。

根据上述原理,本研究以 LabVIEW 为平台,利用 LabVIEW 中的三次样条插值模块,对曲线的奇异点部分数据进行插值处理,以便获得满足要求的磁滞回线。其数据处理过程如图 2 所示。

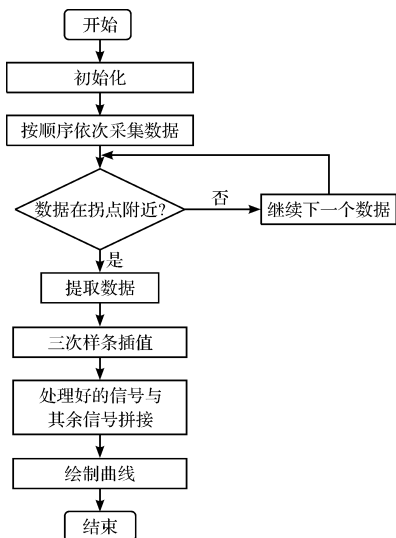


图 2 磁滞回线光滑处理流程图

$S(x)$ 在 $[x_i, x_{i+1}]$ 上是三次多项式,令:

$$S(x) = f(x_i) + S'(x_i)(x - x_i) + \frac{1}{2!}S''(x_i)(x - x_i)^2 + \frac{1}{3!}S'''(x_i)(x - x_i)^3 \quad (9)$$

由于采集得到的曲线是连续而光滑的曲线,可用三次样条插值函数 $S(x)$ 求解各个插值点的函数值及其一阶导数 $S'(x)$ 和二阶导数 $S''(x)$ 。

令 $M_i = S'''(x_i), i = 1, 2, \dots, n$, 整理得到:

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = 6f[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}] \quad (10)$$

其中:

$$\mu_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}}, \lambda_i = 1 - \mu_i \quad (11)$$

$f[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}]$ 为二阶差商,有:

$$f[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}] = \frac{f[x_{i+1}, x_i] - f[x_i, x_{i-1}]}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (12)$$

本研究曲线要求绝对光滑,增加边界条件: $M_0 = f''(x_0), M_n = f''(x_n)$, 得到矩阵方程:

3 实验准备及结果

为了验证在测量不同材料时,经过样条插值处理后得到的磁滞回线比未处理的磁滞回线光滑完整,本研究在自主开发的铁磁性材料磁性参数测量系统上进行了实验测试和验证。

上位机界面如图 3 所示。

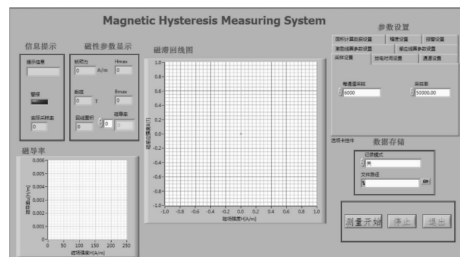


图 3 上位机界面

3.1 实验材料

该实验中所用的测试件材料是 45 钢和低碳钢 (Q235), 它们的强度较高,具有一定的塑性和耐磨性,综合性能良好,因此其广泛用于油气输送管道、储罐压力容器等多种在役设备。

其化学成分如表 1 所示。

表1 试验样块的化学成分(质量分数%)

成分	45 钢含量	Q235 含量
C	0.42 ~ 0.50	0.14 ~ 0.19
Si	0.17 ~ 0.37	0.12 ~ 0.3
Mn	0.50 ~ 0.80	0.3 ~ 0.65
P	<0.035	<0.045
S	<0.035	<0.05
Cr	<0.025	0.3
Ni	<0.25	0.3
Cu	<0.25	0
Fe	余量	余量

3.2 实验参数设置

该设备在进行测量铁磁性材料磁滞回线之前,需要对一些参数进行设置。开机后,脉冲发射装置的放电时间设置为 50 ms。虽然差分接线模式会使通道数量减半,但其具有非常好的共模电压和共模噪声抑制能力,所以采样模式采用该接线模式。

根据检测装置的硬件连线,本研究设置软件程序中的数据采集通道为 AI0:1。根据采样要求,本研究设置采样频率为 50 KHz。

3.3 实验结果及分析

测量得到两种不同的铁磁性材料在进行插值前和插值后的磁滞回线如图 4、图 5 所示。

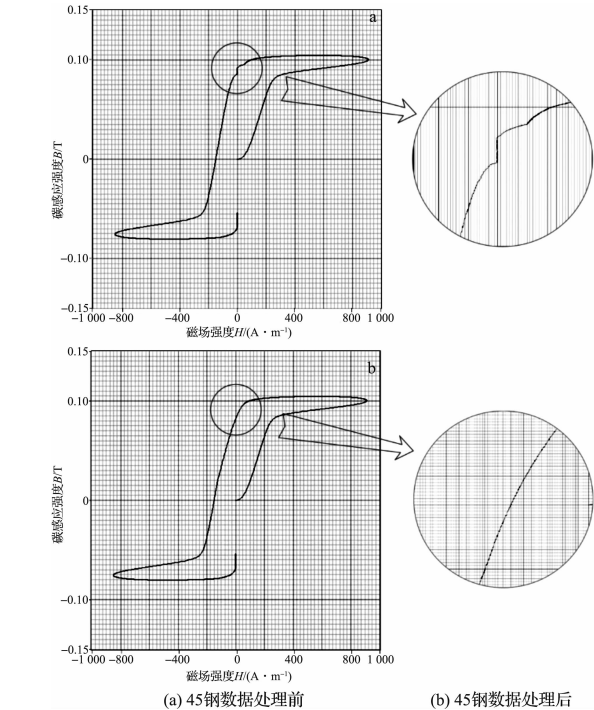


图4 45 钢数据处理前后对比图

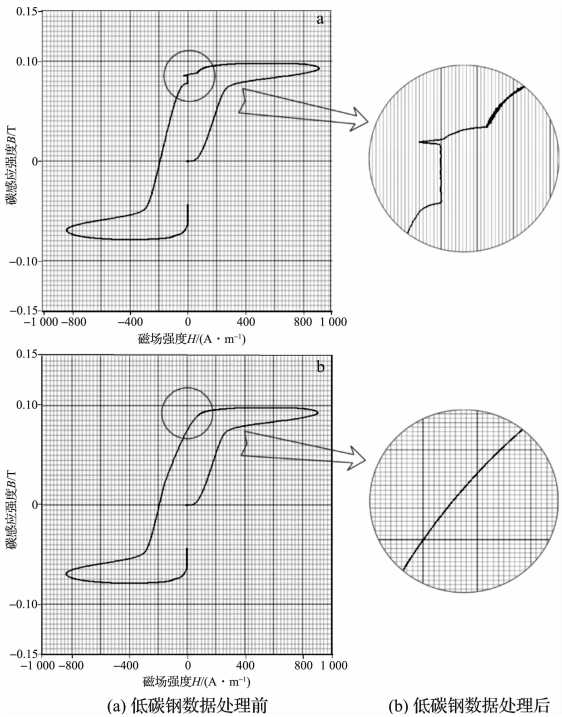


图5 低碳钢数据处理前后对比图

两种材料未进行处理前采集数据生成的磁滞回线如图 4(a)、5(a)所示。显然未进行样条插值处理之前的磁滞回线存在奇异点,并且奇异点出现在两个电容进行正、反向放电之间的间隔区。

两种材料处理之后得到的磁滞回线如图 4(b)、5(b)所示。对比可以发现,插值后的整条磁滞回线是连续光顺的,在正、反向放电间隔区内的奇异点已经被消除。这是由于样条插值保证了曲线在连接点处的曲线一阶导数连续,实现了曲线未处理部分的数据与放电间隔区内的数据平滑过渡连接。

对比图 4(b)和图 5(b)可以发现,两者磁滞回线的形状并不能完全吻合,这是因为不同铁磁性材料具有不同的磁特性,反映到磁滞回线上就是形状的差别。针对不同材料,经过样条插值处理后的磁滞回线依然可以保持光顺,说明该插值方法处理具有通用性,可以实现集数据采集、实时信号分析和数据拟合功能于一体,构成完整的磁探针测试系统,并完成被测试样磁滞回线的准确绘制和相关磁性参数的实时显示。

(下转第 1075 页)