

# 基于振动法的磁记忆检测系统研究与设计

王嘉明 姚恩涛

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

**摘要:** 提出基于振动法的金属磁记忆信号检测方法。设计相应的金属磁记忆检测系统,包括带有磁场屏蔽外壳的传感器探头结构、磁记忆信号预处理模块和正交矢量锁相放大模块,并基于 STM32F107VCT6 芯片设计下位机模块。利用研制的系统对经过加工的标准试件进行检测,通过测量法向磁场梯度的方法可以检测出试件应力集中区域,验证法向磁场梯度和应力集中系数的关系。

**关键词:** 金属磁记忆检测;振动法;应力集中系数

**中图分类号:** TG115.28 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Research and design of magnetic memory testing system based on vibration method

Wang Jiaming Yao Entao

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics &amp; Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** This paper proposed a method of measuring metal magnetic memory signal based on vibration method. A metal magnetic memory testing system was designed, including a sensor probe structure with a magnetic field shielding shell, a preprocessing module of magnetic memory signal and an orthogonal vector phase locked amplifying module. And the lower machine module was designed based on STM32F107VCT6 chip. The system is used to test the processed standard specimen. The stress concentration region of the specimen can be detected by the method of measuring the magnetic field gradient, and the relationship between the magnetic field gradient and the stress concentration factor is verified.

**Keywords:** metal magnetic memory measurement; vibration method; stress concentration factor

## 1 引言

本文建立了铁磁性构件表面法向磁场梯度与位置的关系,并确定以法向磁场梯度在应力集中区出现局部最大值作为磁记忆检测的判据。机械应力同铁磁材料的自磁化现象和残磁状况有直接的联系,在地磁作用下,缺陷处的导磁率减小,工件表面的漏磁场就增大,铁磁性材料的这一特性称为磁机械效应<sup>[10]</sup>。磁机械效应存在使得铁磁性金属工件的表面磁场增强,增强后的磁场“记忆”了部件的缺陷或应力集中的位置,这就是金属的“磁记忆”效应<sup>[1]</sup>。

铁磁性金属部件存在着磁机械效应,其表面上的磁场分布与部件应力载荷有一定的关系,因此可通过检测部件表面的磁场分布情况间接地对部件或应力集中位置进行诊断<sup>[4]</sup>。

磁记忆检测原理可以表述为:处于地磁激励的铁磁性工件受工作载荷的作用,其内部会发生具有磁致伸缩性质

的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向,并在应力与变形集中区形成最大的漏磁场法向分量  $H_p(Y)$ 。这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后继续保留。从而通过漏磁场法向分量  $H_p(Y)$  的测定,便可以准确地推断工件应力集中区<sup>[2]</sup>。

## 2 振动法测量磁场梯度

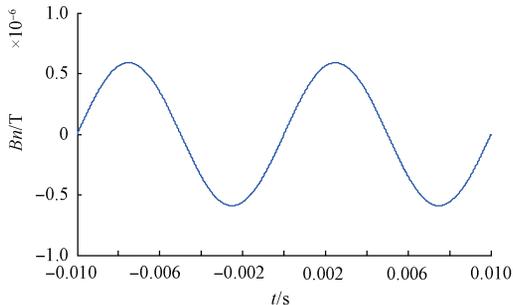
利用压电驱动器驱动霍尔传感器在靠近构件表面处振动扫描,得到交流信号,信号振幅正比于磁场梯度<sup>[7]</sup>。由于法向磁场梯度只取决于振动范围内的磁场变化量,背景磁场的影响被减小。霍尔传感器输出基频与振动同频率的交流信号,经滤波放大后作为检测信号送入正交锁相放大电路,对信号振幅进行提取。该方法与其他方法相比,具有灵敏度高,体积小,成本低的特点。

当传感器从应力集中区中心位置开始做简谐振动,运动方程如式(1)所示:

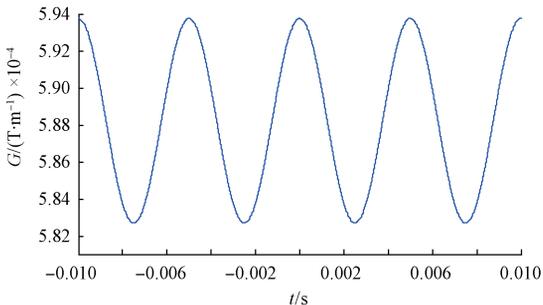
$$x = a \sin(2\pi ft) \tag{1}$$

式中： $a$  为传感器振动的振幅，经光学测量为 0.001 m，为传感器振动频率 100 Hz。经研究表明，漏磁场的物理模型为：

$$\begin{cases} B_n = \frac{3.8 \times 10^{-17} x}{(4 \times 10^{-6} + x^2)^{2.5}} \\ G = 3.8 \times 10^{-17} [(4 \times 10^{-6} + x^2)^{-2.5} - 5x^2(4 \times 10^{-6} + x^2)^{-3.5}] \end{cases} \tag{2}$$



(a) 法向磁场强度



(b) 磁场梯度

图 1 法向磁场强度和梯度随时间变化的关系

在时间域对传感器输出的信号进行采集，得到  $U(t)$ 。

将采集的信号  $U$  对时间  $t$  求导，得到

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d(kB_n)}{dt} = k \cdot \frac{dB_n}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = k \cdot G [a \cdot 2\pi f \cdot \cos(2\pi ft)] \tag{3}$$

则法向磁场梯度  $G$  为余弦信号的振幅量，且法向磁场梯度正比于余弦信号振幅值。在探头移动速度很缓慢，以及非匀速运动时，法向磁场梯度值无法直接测量，而将其加载到一个周期性信号的幅值量上，即可通过测量此周期信号的幅值量得到检测。

其中  $B_n$  和  $G$  分别为法向磁场强度和沿水平表面梯度。设传感器的输出信号为  $U, U = kB_n, k$  为传感器的灵敏系数，则传感器输出正比于法向磁场强度。把式(1)代入式(2)，则得到传感器的输出。分别画出传感器两个振动周期 0.02 s 内， $B_n$  和  $G$  随探头位置  $x$  和时间  $t$  变化的曲线。从图 1 可以看出，传感器输出为标准的正弦波，可用通过检测正弦波的幅值来检测磁场梯度。

### 3 金属磁记忆检测系统的研制

#### 3.1 系统原理框图

图 2 所示为金属磁记忆检测仪的原理框图。主要包括：传感器振动探头、正弦信号发生模块、磁记忆信号调理模块和下位机系统。信号发生模块包括正弦波产生电路和升压驱动电路。信号发生器产生正弦波，再经升压驱动电路放大驱动压电双晶片振动。设计双极性直流稳压电源给功率放大器供电。信号调理部分包括对微弱检测信号的预处理部分，两路相敏检波电路和低通滤波电路。再

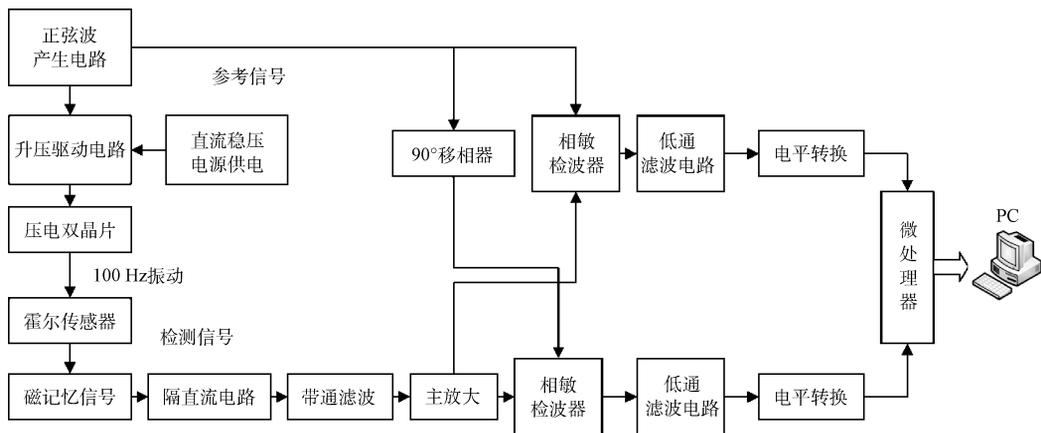


图 2 系统原理框图

通过电平转换电路将信号调理到微处理器引脚的电平范围内，送入 STM32 微控制器处理。

#### 3.2 带磁场屏蔽的探头设计

采用压电双晶片驱动探头振动，不会像传统的电磁方

法出现电磁干扰<sup>[3]</sup>。压电双晶片属于 PXE 弯曲元件，结构如图 3 所示，以中间的弹性极板为中心，将两片形状相同的陶瓷压电片分别黏贴在弹性梁的两边，一端夹持，一端自由。由于上下两片陶瓷片施加的是相反驱动电压，其中

一片压电片伸长,另一片收缩,产生弯曲的现象,当通入有规律的交流电压时,金属片就会在压电晶片的交替曲张下,产生与所加电压幅值和频率相对应的往复振动。

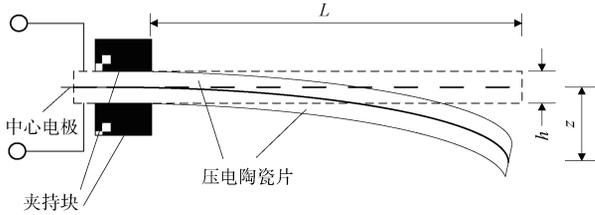


图3 压电双晶片结构

磁记忆信号是微弱的 mV 级低频信号,而且压电双晶片端承受的重量和固定的位置有限,需选用灵敏度很高,且体积较小的传感器。霍尔传感器用于检测磁场的绝对变化量,它基于霍尔效应,输出与被测磁场大小成正比的信号,低频特性较好,且体积较小,便于用作便携式仪器探头。经综合考虑,本系统选择 AN503 集成线性霍尔传感器<sup>[9]</sup>。

由于地磁场非常微弱,数量级仅为 mGs,所以磁记忆形成的自有漏磁场也相当微弱,在检测过程中周围任何磁性物质都能对测量结果产生影响,因此需要对传感器做磁场屏蔽处理。对低频磁场的干扰,一般采用高导磁率的材料(如铁)制成屏蔽体。屏蔽体的磁导率远大于空气的导磁率,能把干扰的磁力线短路。一般这样的屏蔽体应有一定的厚度,以减小磁阻。传感器探头屏蔽外壳结构设计如图4所示。

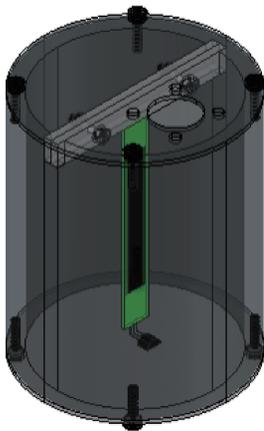


图4 传感器探头屏蔽外壳结构

### 3.3 探头振动驱动模块的设计

由高频函数发生器 MAX038 芯片产生 100 Hz,峰峰值为 2 V 的正弦波,经功率放大器 PA85 放大后峰峰值可达 150 V,用于驱动压电双晶片振动。升压驱动电路如图5所示,采用双电源供电,电压典型值为±150 V。结合桥式整流和全波整流原理设计双极性直流稳压电源给功放供电。原理是由 220 V-50 Hz 交流电压经过变压器和稳压电

路获得±150 V 直流电源。

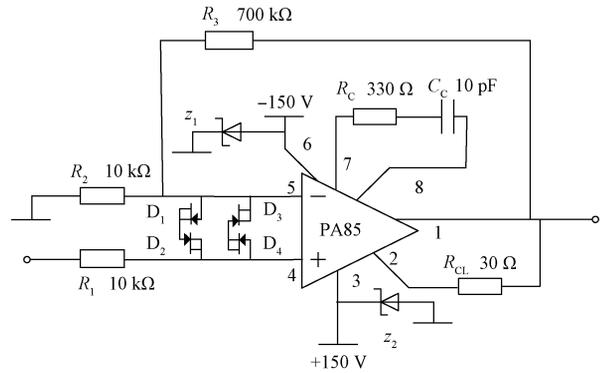


图5 升压驱动电路

### 3.4 法向梯度信号检测电路的设计

梯度信号在送入相敏检波之前需要对其进行预处理。预处理电路部分由隔直电路、带通滤波电路与仪表放大电路组成,对信号进行初步放大和滤波,使信号放大到相敏检波器可接受的电平<sup>[6]</sup>。

霍尔传感器在零输入时,存在 2.5 V 的静态直流电压,微弱的磁记忆信号在毫伏级,若不对其进行隔离,会使放大器饱和。采用电容隔直电路可消除霍尔传感器的静态直流电压。

传感器输出的信号,是毫伏级的中心频率为 100 Hz 的交流信号。因此采用两级二阶带通滤波对该频率的信号进行提取并放大。带通滤波电路如图6所示, R1 和 C2 组成低通网络, C1 和 R3 组成高通网络,两者共同组成了带通滤波器。

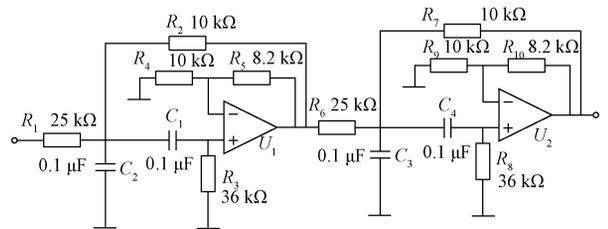


图6 两级滤波放大电路

采用 AD620 芯片组成仪表放大电路如图7所示,可对信号放大倍数实现手动调节。AD620 是一款低成本、高精度的仪表放大器,易于使用。调整外部增益电阻 R<sub>G</sub> 便可实现对增益的精确编程,增益公式  $G = 49.4 \text{ k}\Omega / R_G + 1$ 。

电容移相的原理可以描述为当电容通电瞬间,充电电流达到最大值,而由于电容两端的电压不能突变为 0,而随着充电过程电容电荷量的增加,电容两端电压逐渐增大、电流逐渐变小,当充电完成时,电容两端电压达到最大而充电电流为 0,则电容两端电压落后于电流 90° 形成移相。本课题将 RC 与运放组成有源的移相电路,完成 90° 滞后移相,如图8所示。

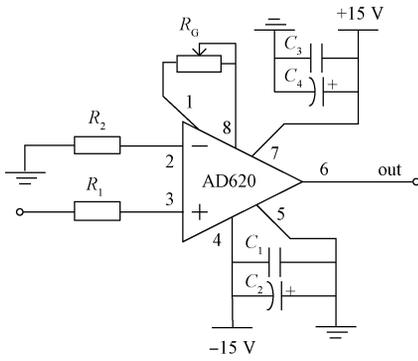


图 7 AD620 仪表放大电路

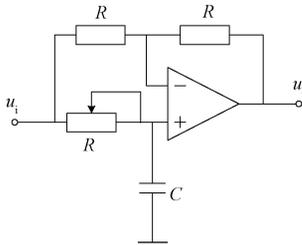


图 8 移相电路

磁记忆的法向梯度的幅值为需要提取的特征值,其为固定频率信号,通过正交锁相放大器后把与参考信号同频的信号放大,抑制了其他频率的干扰信号,输出信号正比于法向梯度分量的幅值。相敏检波电路如图 9 所示<sup>[8]</sup>。

由 OP07 构成典型的二阶有源低通滤波器,由两级 RC 滤波电路、同相比例放大器组成,如图 10 所示。放大倍数  $A_0 = 1.586$ ,截止频率  $f_n = 1014$  Hz,该滤波器能很好的滤除相敏检波中产生的高频信号,得到近直流量。

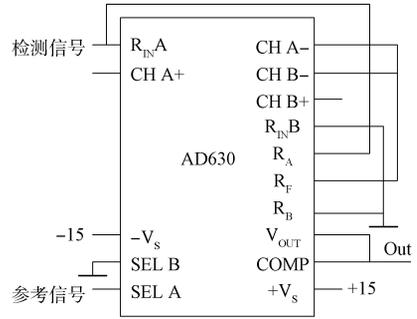


图 9 AD630 相敏检波电路

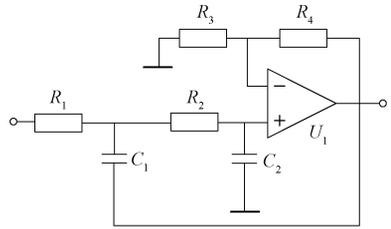


图 10 二阶低通滤波电路

经低滤波后,由于不能确定参考信号和检测信号初始相位差之间的关系,所以两路输出的信号  $\cos \varphi$  和  $\sin \varphi$  可能会有负电压值。而微处理器只能识别  $0 \sim 3.3$  V 的正电压信号,故采用电平转换的接口电路,把电压转换为正,再经适当的隔离变换送到微处理器。

电平转换电路如图 11 所示,首先经过一个高输入阻抗绝对值电路把电压转换成正值,再经一个电压跟随器进行隔离缓冲,降低了输出阻抗,增强了电路的负载驱动能力。最后在输出端接 2 个  $3.3$  V 稳压二极管 1N4728A 组成双向限幅电路,保证信号全部处于  $0 \sim 3.3$  V 的范围,防止信号过高或过低而损伤微处理器 IO 口<sup>[5]</sup>。

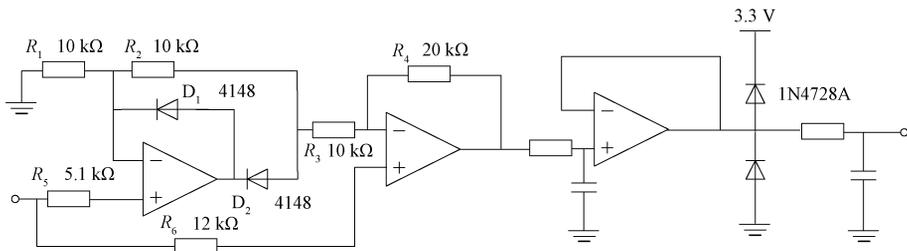


图 11 微处理器接口电路

### 3.5 基于 STM32F107VCT6 的下位机模块设计

为实现便携式金属磁记忆检测系统的研制,以便现场检测。本文选用内部带有多个 12 位的 ADC 的 ARM 芯片 STM32F107VCT6<sup>[11]</sup>。

软件部分完成对两路模拟信号采集、滤波和矢量加法的处理,实现液晶屏触屏操作功能,实时显示法向磁场梯度曲线并与 PC 串口通信,以便更进一步的离线分析。液

晶触摸屏界面如图 12 所示。

### 4 不同应力集中系数的静态试验验证

对 5 根标准 Q235 钢拉伸试样进行加工,并沿着  $x$  方向每隔  $10$  mm 标记一个测试点,共标记 10 个点,变截面的 Q235 拉伸试样加工尺寸图如图 14 所示。Q235 钢的抗拉强度  $\sigma_s$  为  $375 \sim 500$  MPa,经过加工的拉伸试样最小截面



图 12 液晶触摸屏界面

万能拉力试验机对 5 根变截面 Q235 钢试样进行拉伸试验,对 5 根试样分别以 0.05 kN/s 的拉伸速度施加 2、4、6、8、10 kN 的拉伸载荷并保持 300 s 后卸载,以固定提高高度沿拉伸方向测量已标记的 10 个点的法向磁场梯度值。由于试件是轴对称柱体,对每个检测点环绕轴线测量 3 次去平均值作为测量结果。



图 13 金属磁记忆检测系统

为直径为 6 mm 的圆。取抗拉强度  $\sigma_b$  为 375 MPa 计算最大拉力  $F_{\max} = \sigma_b \times S \approx 10.6 \text{ kN}$ 。如图 15 所示,选择远离电磁干扰的空闲场地作为实验环境,用 SANS 微机控制电子

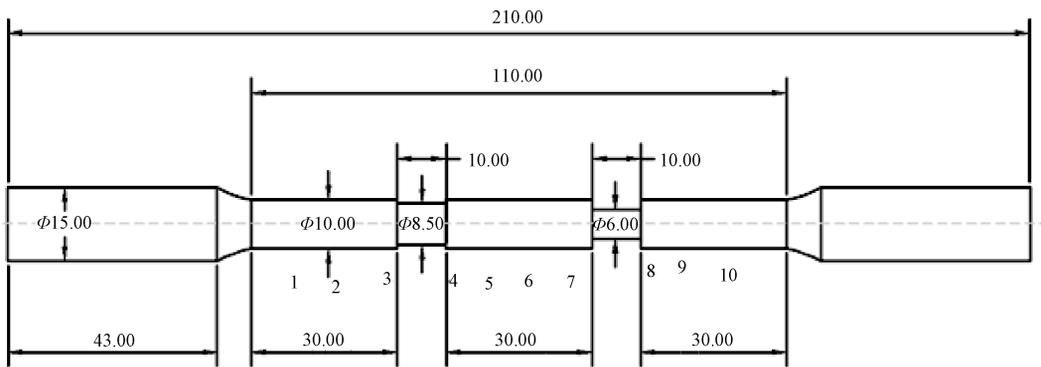


图 14 试样的形状和尺寸

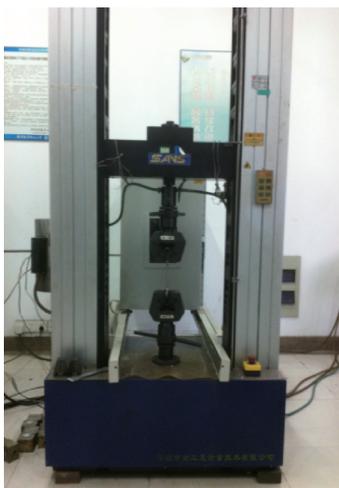


图 15 拉伸试验

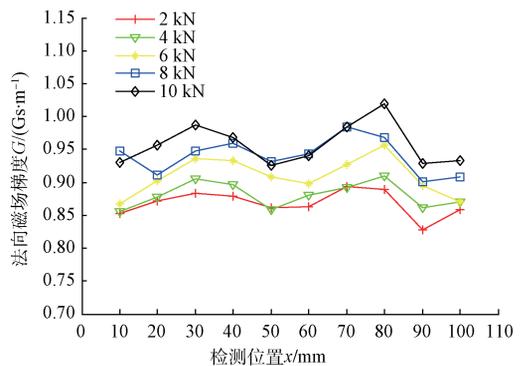


图 16 磁场梯度随不同载荷的分布

将实验数据用 MATLAB 软件绘制成曲线图,如图 16 所示。从图中可以看出拉伸载荷越大,法向磁场梯度值也越大,相应的局部应力集中程度也就越大,并且拉伸载荷越大变化越明显;沟槽处测得的法向磁场梯度值明显

大于其他位置,这一现象在拉伸载荷小的时候不明显,当拉伸载荷大于 6 kN 时,在图中可以明显区分出沟槽处,并且可以看出直径小的沟槽处应力集中程度更大。因此,可以考虑使用磁场梯度的大小来对应力集中程度进行评估。

## 5 结 论

通过基于振动法的金属磁记忆检测系统的研究和设计,得到了磁场梯度是比法向磁场分量过零值点更重要的损伤表征的物理量的结论。通过拉伸实验得到了法向磁场强度和应力集中系数的关系,应力集中系数大的部位,相应的法向磁场梯度值大。同时对于不同类型的工件材料还需大量的研究工作,只有经过长期的数据和经验的积累,才能得出有规律性的结论。

## 参考文献

- [1] DUBOV A A. Development of a metal magnetic memory method [J]. Chemical & Petroleum Engineering, 2012, 47(11-12):837-839.
- [2] DUBOV A, KOLOKOLNIKOV S. The metal magnetic memory method application for online monitoring of damage development in steel pipes and welded joints specimens[J]. Welding in the World Le Soudage Dans Le Monde, 2013, 57(1):123-136.
- [3] 范晶晶,张晓娟,王辰.基于巨磁阻传感器的无损检测系统研究与设计[J].电子测量技术,2015,38(7):97-102.
- [4] 刘斌,付英,于慧,等.基于 GGA 算法磁记忆检测模型的研究[J].仪器仪表学报,2014,35(10):2200-2207.
- [5] 胥永刚,谢志聪,崔玲丽,等.基于 ITD 的齿轮磁记忆信号特征提取方法的研究[J].仪器仪表学报,2013,34(3):671-676.
- [6] 黄海鸿,姚结艳,刘儒军,等.基于金属磁记忆技术的车桥桥壳损伤检测[J].电子测量与仪器学报,2014(7):770-776.
- [7] 张时开.钢轨应力/应力集中的电磁无损检测方法[D].南京:南京航空航天大学,2014.
- [8] 蹇兴亮,周克印.基于磁场梯度测量的磁记忆试验[J].机械工程学报,2010,46(4):15-21.
- [9] 张时开,姚恩涛,王平.基于正交锁相放大的金属磁记忆应力集中检测[J].传感器与微系统,2013,32(11):135-138.
- [10] 杨理践,刘斌,高松巍,等.基于密度泛函理论的磁记忆信号产生机理研究[J].仪器仪表学报,2013,34(4):809-816.
- [11] 彭求实,郑振耀,陈忠,等.基于 STM32 的波谱仪接收通道的设计[J].电子测量技术,2014,37(7):76-79.

## 作者简介

王嘉明,1991 年出生,男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为电磁无损检测。

E-mail:409847131@qq.com