

巴克豪森音乐盒

——关于巴克豪森效应的研究和半定量化应用

栗
Pb16020850 李子坤

巴克豪森效应：
试样在磁化时，磁通的不连续变化的现象。

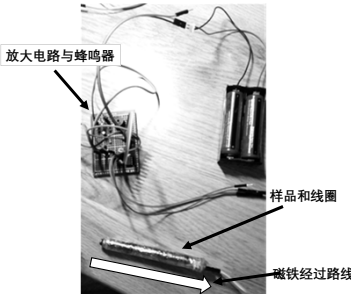
目录

- 初步猜想与实验
- 磁化与磁畴理论
- 巴克豪森效应
- 巴克豪森音乐盒(半定量化应用)
- 总结
- 致谢
- 参考文献

1 初步猜想与实验


为开始对巴克豪森现象的研究，先进行一些易见的简单实验，利用示波器进行观察，并对现象进行解释。

初步实验-装置与方法



- ① 输出端连接放大电路并连接蜂鸣器后，磁铁运动产生的样品磁化情况的变化可以感应出电压信号，经放大后驱动蜂鸣器发声。
- ② 插有碳素钢丝样品的采样线圈不经放大直接与示波器相接，磁铁在线圈外快速移动，可以在示波器上观察到电压信号。

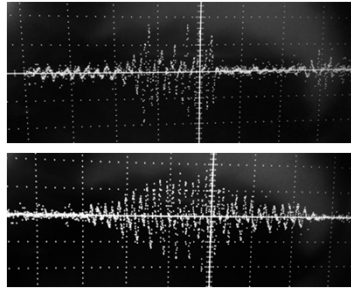
初步实验



无样品时改变磁场
无声音信号

有样品时改变磁场
有声音信号

初步实验



在线圈周围以不同的速度或方向(转动)移动磁铁，可在示波器上利用巴克豪森信号作画。(当线圈中无样品时，按同样方式使磁铁经过线圈，无明显感应信号)

初步实验

磁铁由远到近靠近采样线圈，示波器上出现小波动信号

从采样线圈附近快速晃动磁铁所能达到的最大电压信号。

初步实验结果分析

从远到近过程中产生突变信号

慢移动磁铁不会产生明显信号，存在小振幅信号

上下对照发现，振幅升高，信号时间缩短。

且有 $\epsilon = -\frac{dB}{dt}$

能量达到一定值后的突然释放
类似一道莱道弧光灯的題目
(电压达到一定值则气体击穿发光)

单个量化信号应该很小
大信号源于小信号的叠加

巴克豪森信号是由固定大小的磁通量变化形成

实验思路

- 鉴于单个跃变的值很小，只能从微观上检验猜想，故尝试测量单个跃变。
- 采用永磁体横向磁场分量制作逐渐增强的磁场。
- 丝杆作为磁铁与样品距离的控制装置。
- 利用放大电路放大信号幅度，以确保可以测量到不被噪声淹没的信号。
- 由于微观变化一般弛豫时间很短，需要较高频率和精度的A/D进行采样，已有的Arduino等自带A/D的单片计算机系统不能满足要求。而在一次剪辑音乐时，从音频信号中忽然想到可以利用声卡与Matlab软件进行采样，并很方便的对采集结果进行滤波，去除采集对应的44.1KHz信号。

实验装置

采样设备：
电脑声卡 -1.2~-1.2V, 44.1KHz
头 焊接GND和MIC端
软件

放大电路：
运算放大芯片 LM358P
定值电阻 1000.5Ω
可变电阻 0~500.3KΩ
供电(参考)电压 Ref(+)=8.36V Ref(-)=0V
Arduino 控制电路：
按下开关丝杆旋转一周

信号源：
磁场改变与检测装置

样品：
磁体磁强磁体 (片数=2 薄片厚度=4.04mm 直径 $\Phi_0 = 2.998cm$)
磁体改变 丝杆装置(丝杆一周) (单步距离 $L_0 = 0.4837/mm$)

样品化学成分
如右【1】，
含杂质总量小于1%，故在之后不考虑杂质影响。

采样线圈：
线圈直径 $\Phi = 0.253 \pm 0.0101mm$ 内径 $d = 4.397mm$
线圈总长 $L = 9.822cm$ 绕线匝数 $N = 16$
匝数(计算) $n = 6035$
(考虑到漏磁，样品长度，计算时按5000匝计算)

磁场源

Figure of B-h

利用特斯拉计测量永久磁铁轴线上的磁感应强度。
红色数据点为测量点，蓝色曲线为MatLab临近插值之后的拟合结果，并给出近似的曲线方程。

近似满足磁偶极子的r三次方反比关系。
之后的计算中，磁场保留三次方反比项，

$B = 1.75032e-7h^3 + 0.013082e-7h^4 + C(h^{-4})$

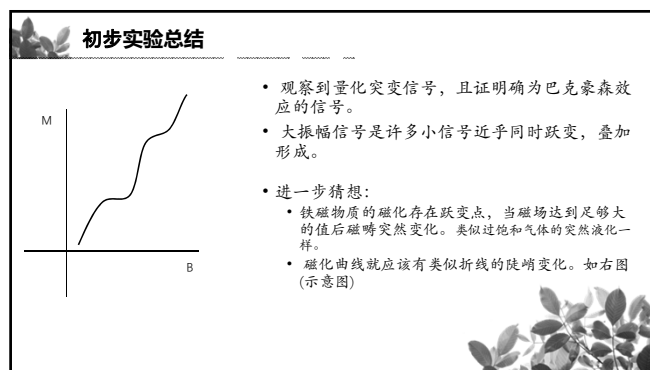
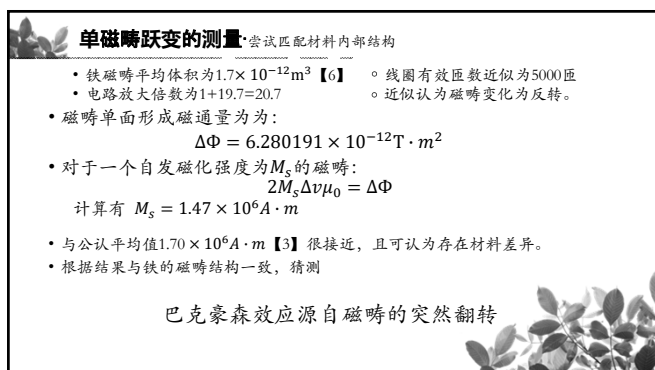
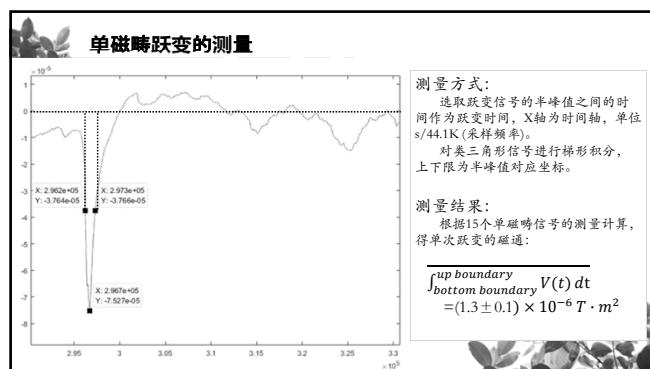
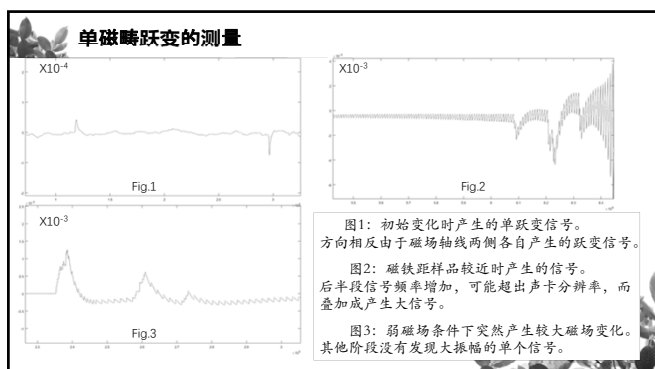
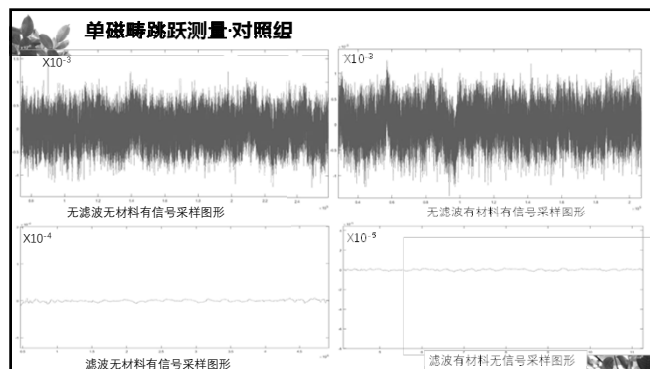
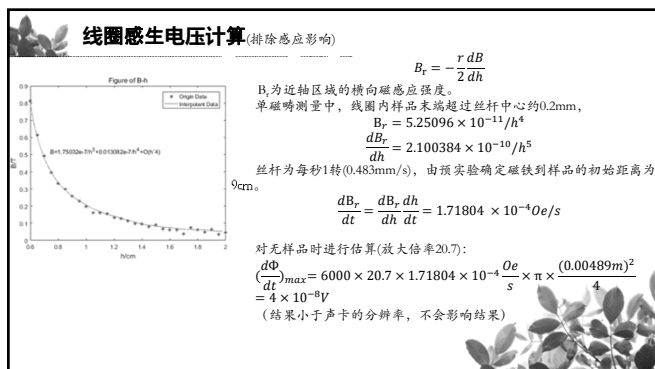
单磁畴测量-预实验

预先在不同距离处用手晃动磁铁，观察信号情况

确定恰好产生信号的大致临界距离
结果为9cm处

利用丝杆缓慢改变磁场进行精细测量

23组预实验结果中的17组(虽然没什么用，但做了好久，不放上来觉得很亏……)



2 磁化与磁畴理论【1、3】

为了更好地理解问题，在初步实验之后查阅了部分磁学书籍，从中学习磁化理论。
铁磁性材料内部磁矩产生的源为电子自旋磁矩，而非轨道磁矩【1】

铁磁性材料·内部作用

- 直接交换作用：**
 - 由于微观上电子为全同粒子，所以相邻原子的电子云(a,b)重叠部分存在交换作用。所产生的附加能量为【1】：

$$-A \vec{s}_a \cdot \vec{s}_b$$
 \vec{s}_a, \vec{s}_b 分别为电子a、b的自旋。

$$A = \int \psi_a^*(r_a) \psi_b(r_a) \psi_b^*(r_b) \psi_a(r_b) \frac{1}{r_a r_b} \left(\frac{r_a}{r_b} - \frac{r_b}{r_a} \right) d\tau_a d\tau_b$$
(库伦势能在交换波函数中的体现)
- 各向异性能(从各种不太理解的现代模型中抽象成如下解释)：**
 - 铁磁材料因为晶格结构、内力分布等各向异性，磁化后在不同方向对应不同的势能。根据固体物理中的扰动研究方法【12】，如果认为距离平衡态不远，可以对势能进行泰勒展开并保留一次项，我将这种作用效果近似等效成线性力 $\vec{F} = -\sigma \Delta x$ ，用‘等效内力’来表示。则内力造成的能量分布为

$$E_n = -K \times \cos^2(\theta)$$
 K为等效内力与自发磁化共同决定的一个常数，θ为磁化方向与内力方向的夹角。

铁磁性材料·自发磁化

交换作用： $-A \vec{s}_a \cdot \vec{s}_b$
等效内力： $E_n = -K \times \cos^2(\theta)$

- ①A的正负决定自发磁化。铁的A>0【2】，故形成自发磁化区域。
- ②等效内力使磁化趋向于平行或反平行于等效内力方向(这个方向称为易轴【2】)。

在退磁化能和以上两种能量的共同作用下，为满足整体能量最低，材料形成磁畴结构：

- 磁化交替变化的区域之间会产生过渡的磁畴壁(简称畴壁)，畴壁内原子自旋方向发生变化，不再满足局部的能量最低性，从而对体系能量有增加作用。
- 如果畴壁穿过杂质，则非磁性杂质的存在会减小畴壁体积。

3 巴克豪森效应

在理解了上述关于磁化的一般理论后，结合实验结果，开始尝试对跃变的原因进行分析。并在得出结果后查阅了相关论文，发现除了在细节方面存在差异外，大致方向还是正确的。

铁磁质磁化过程

磁化过程中由总磁化强度 $M_H = \sum_i M_s V_i \cos \varphi_i$ 可知：

$$\Delta M_H = \sum_i \Delta M_s V_i \cos \varphi_i + \sum_i M_s \Delta V_i \cos \varphi_i + \sum_i M_s V_i \Delta \cos \varphi_i$$

本身磁化强度变化
顺磁磁化

磁畴体积变化
磁畴壁位移磁化

磁畴磁化方向变化
磁畴转动磁化

由实验可知，在铁磁性物质中，磁畴壁位移和磁畴转动为最主要项，顺磁磁化可以忽略。且上升阶段主要为磁畴壁位移，饱和阶段主要为磁畴转动过程【3】。

铁磁性材料·磁畴壁能

- 交换能：**
 - 设相邻的单个原子之间自旋夹角为θ，且已知磁畴壁厚度为10⁻⁶m量级【3】，远大于原子间距，θ<<1，则交换能增量为

$$\Delta E_{ex} = |S_a||S_b|A(1 - \cos(\theta)) = \frac{1}{2}A|S|^2\theta^2$$
 单位面积磁畴壁上的交换能：

$$\omega_{ex} = \sum_i \Delta E_{ex} = \frac{1}{2}AN|S|^2\theta^2$$
 N表示单位面积上的N个原子
- 各向异性能：**
 - 同样由于方向偏离等效内力方向而增加各向异性能，类似上面计算得到：

$$\omega_f = \sum_1^N \Delta E_f = NK\theta^2$$

磁畴壁的能量密度为 $\omega_0 = \omega_f + \omega_{ex}$ 。

巴克豪森效应:理论分析

- 磁化过程:
 - 外加 \vec{B} 与大部分磁畴的自发磁化方向不同,各磁畴壁要发生相应运动,使介质总能量最低。
- 磁畴壁所受等效外力:

$$F_0 = -\nabla E_p = -\frac{d\omega_0}{dx}$$

并且在磁化分布变化较小时,对形成的磁场影响可以忽略,从而不考虑退磁化能变化。
- 磁畴壁厚度一般不会有太大变化【2】。而磁畴壁减小的自发磁化形成的磁能只与厚度有关,所以磁畴壁移动中,磁畴壁能密度的变化为主要影响。

巴克豪森效应:理论分析

- 磁畴壁移动时,从前面 $\omega_0 = \omega_f + \omega_{ex}$ 的表达式可以计算移动时的阻力:

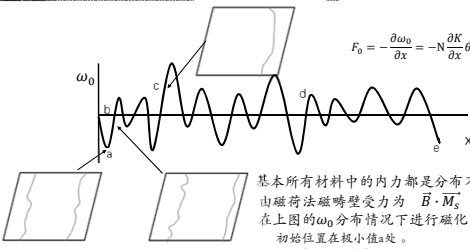
$$F_0 = -\frac{\partial \omega_0}{\partial x} = -N \frac{\partial K}{\partial x} \theta^2 - \frac{\partial N}{\partial x} \left(\frac{1}{2} A |S|^2 \theta^2 + K \theta^2 \right)$$

x为磁畴壁的移动方向

等效内力作用:
内力作用与K(x)成正比, K(x)的不均匀分布必然会影响 ω_f 项对 ω_0 的贡献,自然状态下, ω_f 处于极小值。

原子数密度变化作用:
穿过杂质的磁畴壁发生移动时,面积的变化对应原子数密度的改变。

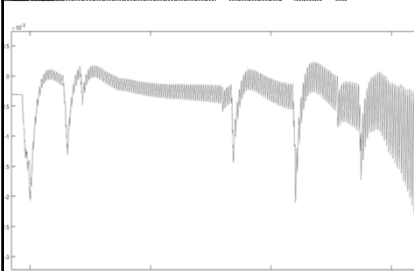
巴克豪森效应:理论分析



$$F_0 = -\frac{\partial \omega_0}{\partial x} = -N \frac{\partial K}{\partial x} \theta^2 - \frac{\partial N}{\partial x} \left(\frac{1}{2} A |S|^2 \theta^2 + K \theta^2 \right)$$

基本所有材料中的内力都是分布不均的,并且含有杂质【2】由磁符法磁畴壁受力为 $\vec{B} \cdot \vec{M}_s$ 。 \vec{B} 沿x正向。在上图的 ω_0 分布情况下进行磁化。
初始位置在极小值a处。
b点为一个斜率极大值点。
c为斜率大于b的点。

巴克豪森效应:内力影响测试



在酒精灯上加热样品约5min

镊子用力夹紧样品中部放到冷水中冷却处理

进行单磁畴跃变检测

单个振幅有不明显增大,推测可能是施加的外力不够大幅度改变内部应力分布。

巴克豪森效应:实验分析

大信号的形成是许多小跃变的叠加。

样品杂质很少
内力作用为主要项

内力影响实验结果

测量到的是样品中由等效内力不均匀导致的磁畴壁的位置跃变

磁场远小于饱和磁场

巴克豪森效应:理论解释


外磁场加强

部分阻力较小的磁畴壁达到了受力平衡的极限

一些自发磁化方向与磁场方向夹角较大或穿过某个杂质的磁畴壁,其运动受到更大阻力

更大的磁场才能使其发生跃变

发生单个较小的跃变



巴克豪森效应-磁畴壁位移过程

在查阅相关论文后，发现之前做推导的思路是正确的，只是在阻力的具体表达形式上不够细致。

利用克尔效应(磁场改变光偏振方向)从微观观察磁畴壁的不连续位移过程【5】可以看到磁畴壁的位移有一段近乎可以忽略的小增长，然后出现一个较大的跃变。

下图为观测结果，左图为不同磁化方向的磁畴面积随磁场变化情况，右图为磁场方向的磁化强度随时间的变化。

Others' research

【7】这是Richard M.Bozorth and Joy F.Dillinger的实验结果，采用了外线圈作为磁场源，同时在铁样品两端加有采样线圈，利用信号的差分提高了灵敏度。

Others' research

在【1】中给出了如右的磁滞回线的放大图，巴克豪森效应确实导致了剧烈变化的磁化曲线。同时指出这种跃变导致磁畴减小时，磁化状态无法回到原始位置，导致磁滞现象。与之前的猜测相比，这里的变化更加陡峭，说明之前的能量密度曲线应该有一些尖峰。

4 巴克豪森音乐盒-半定量应用

通过对巴克豪森现象的研究，结合初步实验中的声音实验和量测到的巴克豪森效应的检测功能，想到将之前的噪声变成改变强度决定的音乐。

巴克豪森音乐盒-原理

信号源产生不同变化速率的电压信号

线圈产生相应变化的磁场

采样线圈检测样品的巴克豪森效应强度

根据检测结果由单片机与蜂鸣器输出相应音调

没有其他合适样品作为检测对象，只能通过改变一种样品的跃变强度来模拟不同材料的不同跃变强度。跃变强度的改变通过使样品达到饱和的时间决定。

巴克豪森音乐盒-硬件电路

- 信号源：产生不同变化大小的电压
- 信号源放大电路：将信号电压利用三极管TP-127放大(约1000倍)
- 蹄形磁铁：根据信号产生变化的磁场
- 采样线圈：检测巴克豪森效应的信号
- 放大电路：放大检测到的信号到Arduino的ADC合适范围
- 蜂鸣器：输出声音
- Arduino采样：利用ADC将信号电压转换为数值，并查表输出对应音调

实验困难与解决

困难1: 没有可用的数模转换器, Arduino的PWM功能只能输出不同占空比的方波, 而使用机械对磁铁速度控制又不能及时的进行改变和量化控制。

方案: 在某晚听歌突然音量失控, 想到可以利用耳机声道来输出信号。

- ①在电脑上利用函数输出不同斜率(斜率线性变化)的数据
- ②由MatLab的sound函数将设置好的音频信息经由D/AC输出。

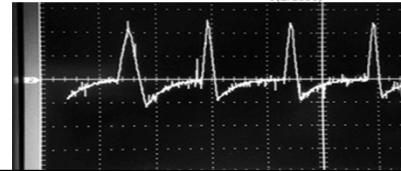
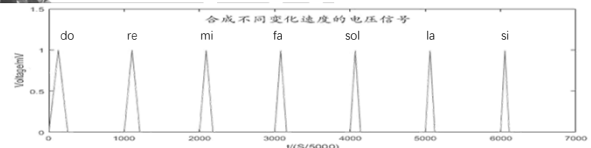
困难2: 输出电压与音频的振幅因电路和感应关系无法计算。

- 方案: ①每个音阶的信号输出到示波器上, 对示波器上信号进行测量
- ②确定每个音阶对应的电压范围作为查表依据。

困难3: 磁场源(一个蹄形磁铁)与采样线圈的摆放位置对测试结果影响较大, 每次改变相对位置后就需要重新校正。而且磁场源在样品处的磁场无法定量。

方案: 未解决……所以无法现场演示或投入使用。

巴克豪森音乐盒-信号源



右图为合成的音频信号在示波器上的动态显示, 每个信号的上升周期不同, 但是不清楚为什么会有一个负电压。

巴克豪森音乐盒-信号源

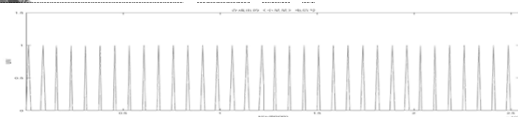


图1: 合成得到的《小星星》的对应电采样率为5000

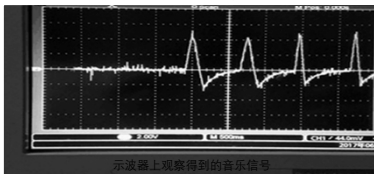
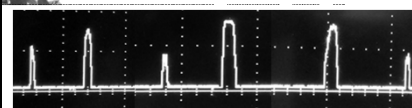
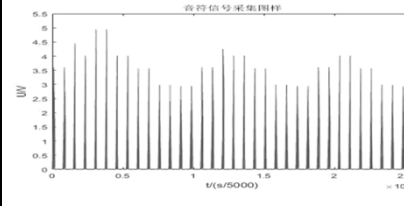


图2: 示波器上观察得到的音乐信号。仍然有莫名的负电压。

巴克豪森音乐盒-检测结果

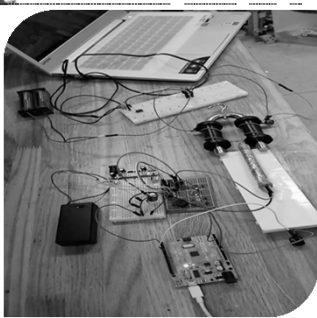


右图为检测到的信号在示波器上的显示, 放大后存在高频部分, 所以只挑选了几个图像较为清晰的音阶信号。



利用Arduino的D/AC采集量化的信号, 幅度对应原始信号的变化率。放大倍率63.1。从播放出的音乐可以发现还是存在一些差错的, 受限于蹄形磁铁摆放位置的扰动, 采样精度和速率, 测量不够精确。

巴克豪森音乐盒-检测结果



右图为音乐盒工作视频。虽然看不出什么变化, 却能够把不可见的磁化过程半量化的用声音呈现。

巴克豪森音乐盒-检测程序

```

int tone[] = {1, 294, 330, 350, 382, 441, 485, 550}; //定义音调
int sum=0;
int yin;
void reads() {
  int a;
  sum=0;
  if (sum < 1000) sum+=572; //根据平均采样结果法采样函数
  yin=1;
  else if (sum > 9930) sum-=572;
  yin=2;
  else if (sum > 9920) sum-=730;
  yin=3;
  else if (sum > 9730) sum-=730;
  yin=4;
  else if (sum > 8730) sum-=783;
  yin=5;
  else if (sum < 9570) sum+=879;
  yin=6;
  else if (sum < 10230) sum+=957;
  yin=7;
  else yin=0;
  tone(t, tone[yin]);
  Serial.println(sum/9); Serial.println(t);
  delay(1000);
  attachInterrupt(0, reads, RISING);
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(Lab, OUTPUT);
  pinMode(S, INPUT); //接扬声器
  attachInterrupt(0, reads, RISING); //上升沿中断
}

void loop() {}
    
```

图1: 采样与发声程序

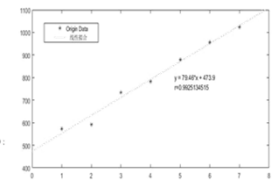


图2: 根据示波器示数设置音阶-电压对应标准基本满足线性关系, 即跃变强度与磁场变化率成正比。与之前大信号由小信号的叠加而成的猜测符合。

5 总结

这次的几个实验和对文献的阅读增加了对磁化的微理解，并收获了许多研究实验方法和解决策略，同时也受自身知识和外界设备限制，仍存在许多不足。

总结

- 测量了Q235碳素钢单磁畴跃变的平均大小。
- 查找并学习了部分铁磁理论，电路知识。
- 制作了一个灵敏度极高的磁场探测线圈。
- 先后想出了利用声卡作为快变化弱信号的采集与输出方法，充分利用了已有的器材，做出了和其他物理学家相近的数值结果。
- 试验中转换外界条件的影响，在单个样品的限制下体现出了半定量的应用。
- 仪器和样品限制，未能从微观上观察到磁畴跃变。
- 样品几何限制，无法测量其磁滞回线。
- 对样品内部信息的具体分析有待进行，用以验证理论的微观正确性。
- 对内力和掺杂的影响只能做出定性结果，希望可以定量。
- “音乐盒”条件约束较强，有待固定、量化，做成实用仪器。

致谢：

感谢格物致知社实验室提供
仪器和电子原件。

参考文献

- 【1】郭貽诚.《铁磁学》[M].北京大学出版社.2014
- 【2】近角聪裕.《铁磁性物理》[M]兰州大学出版社.2002
- 【3】宛德福, 马兴隆.《磁性物理学》[M].电子工业出版社.1999
- 【4】D. I. Gordon. An Experimental Study of Barkhausen Noise in Nickel-Iron Alloys[J]. Phys. Rev. M.1953.25
- 【5】Dong-Hyun Kim, Sug-Bong Choe, and Sung-Chul Shin. Direct Observation of Barkhausen Avalanche in Co Thin Films. [J] Phys. Rev. 10.2002.27
- 【6】E.P.T. Yundall. The Barkhausen Effect. [J] Phys. Rev. 1924
- 【7】Richard M. Bozorth and Joy F. Dillinger. BARKHAUSEN EFFECT II. Determination of the average size of the discontinuities in magnetization. [J] Phys. Rev. 1930.35
- 【8】Stefano Zapperi and Pierre Cizeau. Dynamics of a ferromagnetic domain wall: Avalanches, depinning transition, and the Barkhausen effect. [J] Phys. Rev. B. 1998.58
- 【9】Olga Perkovic, Karin Dahmen, and James P. Sethna. Avalanches, Barkhausen Noise, and Plain Old Criticality. [J]. Phys. Rev. Letters. 1995.75.24
- 【10】M. Bahiana and Belita Koeller. Domain size effects in Barkhausen noise. [J]. Phys. Rev. E. 1999.59

参考文献

- 【11】沈莲.《机械工程材料》.高等教育出版社.2011
- 【12】黄昆.《固体物理学》.高等教育出版社.1966

本文资料可从下图网站下载
(202.38.64.10/~lizi25)



