



# 铁氧体的磁致伸缩 MAGNETOSTRICTION

建模模拟 & 实验探究



## 背景知识

BACKGROUND KNOWLEDGE

磁致伸缩：铁磁体在外磁场中被磁化时，长度和体积发生微小的变化，而去掉外磁场后，又恢复原来长度和体积

本次研究的磁致伸缩特性：

### I. 饱和

随磁场增大，应变  $\lambda = \Delta L/L$  先线性变化，后趋于常数，称为饱和磁致伸缩系数。

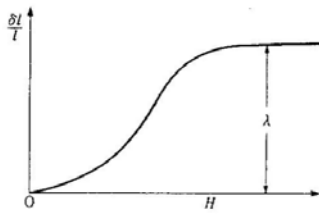


Fig 1.2 磁致伸长与外加磁场的关系

### II. 二倍频效应

在周期磁场中，材料的振动频率约为磁场变化频率的二倍。

磁致伸缩：铁磁体在外磁场中被磁化时，长度和体积发生微小的变化，而去掉外磁场后，又恢复原来长度和体积



本次研究的载体：**铁氧体**

一种具有磁致伸缩效应的磁性材料，其中Ni-Zn铁氧体最广泛应用。

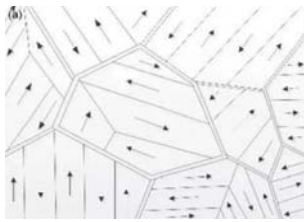
(实验用的是Mn-Zn)

## 磁致伸缩的微观解释：

**磁畴：** 自旋磁矩排列整齐、饱和磁化的小区域

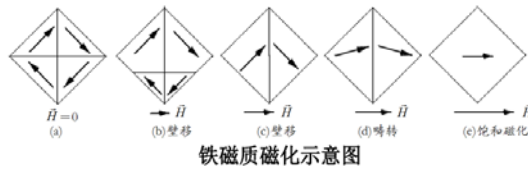
### ①无磁场：

磁畴杂乱分布，铁氧体整体磁矩为零



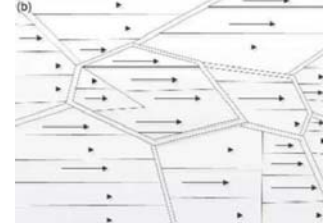
### ②加磁场：

磁畴间产生畴壁位移与转动，磁畴取向趋于一致。



### ③达稳态：

磁畴取向基本一致，总能量最低，宏观上观察，产生了磁致伸缩



## 磁致伸缩 倍频特性的微观解释：

倍频效应的简单解释：

如右图，磁场从反向(-Hs)变化到正向(+Hs)的过程（磁场变化半个周期）中，材料的形变经历了“最大->最小->最大”的过程（材料振动一个周期）。

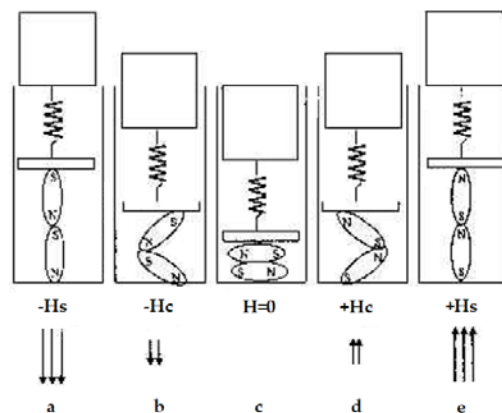


Fig 1.4 90度畴壁位移的微观示意图

# 深入理论和建模

## THEORY & MODELING

### 磁致伸缩建模的理论基础:

维拉里效应:

材料形变对磁场的逆作用

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H} + \frac{3\lambda_S}{\mu_0 M_S^2} S_{\text{ed}} \mathbf{M}$$

$\mathbf{H}$ : 磁场;  
 $\lambda_S$ : 饱和磁致伸缩系数  
 $M_S$ : 饱和磁化强度;  
 $S_{\text{ed}}$ : 弹性应力偏张量

铁磁质非线性磁化

$$\mathbf{M} = M_S \mathbf{L}\left(\frac{|\mathbf{H}_{\text{eff}}|}{H_{\text{eff}}}\right) \frac{\mathbf{H}_{\text{eff}}}{|\mathbf{H}_{\text{eff}}|}$$

应变模拟

$$\varepsilon_{me} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_S}{M_S^2} \text{dev}(\mathbf{M} \otimes \mathbf{M})$$

矢量张量积:  $(\mathbf{M} \otimes \mathbf{M})_{ij} = M_i M_j$

Langevine 顺磁性理论:

顺磁 (含铁磁) 质的磁化规律

$$\mathbf{L}\left(\frac{|\mathbf{H}_{\text{eff}}|}{H_{\text{eff}}}\right) = \coth\left(\frac{3\chi_m |\mathbf{H}_{\text{eff}}|}{M_S}\right) - \frac{M_S}{3\chi_m |\mathbf{H}_{\text{eff}}|}$$

$\chi_m$ : 初始磁化率

应力模拟

$$\mathbf{S} = \mathbf{C}_H [\varepsilon_{el} - \varepsilon_{me}(\mathbf{M})]$$

$\mathbf{C}_H$ : 刚度矩阵  
 $\varepsilon_{el}$ : 初始应变



## 磁致伸缩建模的目的和内容：

根据实际实验中的相关参数，设计出如图所示模型→给线圈通电，产生磁场，铁氧体棒产生纵向的磁致伸缩。

### I. 稳态模拟实验：

通直流电，稳定后绘“磁致伸缩量-磁场”图，目的：

1. 探究铁氧体磁致伸缩的 **应力分布** 和 **磁场分布** 情况。
2. 验证 **饱和磁致伸缩** 现象，求饱和磁致伸缩系数。

### II. 瞬态模拟实验：

通正弦交流电，绘“端面位移-时间”图，目的：

1. 分析铁氧体的 **振动情况**、及其和电流频率之间的关系，验证 **倍频效应**。
2. 将模拟实验的结果与之后 **实际实验的结果** 相对比。

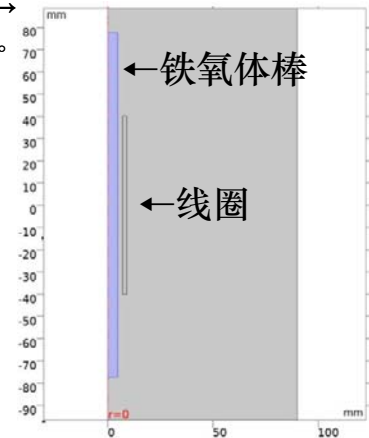
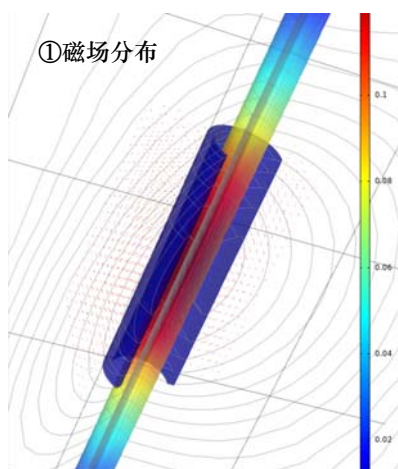


Fig 2.3(a) 铁氧体棒和线圈模型的轴对称投影图

## 磁致伸缩 稳态下 磁场分布 和 应力分布：



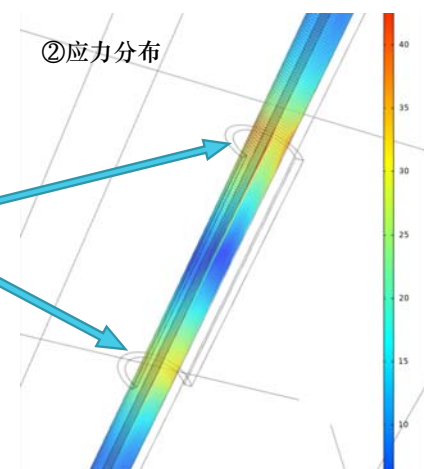
由图看出：

- ①线圈产生磁场集中于铁氧体棒内部。
- ②应力分布主要集中于铁氧体棒中靠近螺线管管口处。

而由

$$\varepsilon_{me} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_S}{M_S^2} \text{dev}(\mathbf{M} \otimes \mathbf{M})$$

可知在铁氧体磁化强度梯度较大的区域的应力较大（模拟实验结果与应力理论一致）。



## 稳态下饱和磁致伸缩曲线：

改变磁场大小，得“磁致伸缩量-磁场”曲线，如右图。

- ①在  $H < 10^4 \text{ A/m}$  ( $B < 4\pi \times 10^{-3} \text{ T}$ ) 时，磁致伸缩量与磁场基本呈线性关系；
- ②当  $H > 3 \times 10^4 \text{ A/m}$  时，磁致伸缩量变化逐渐平缓，趋于饱和系数( $\lambda_S = 26 \text{ ppm}$ )。

由此验证了饱和磁致伸缩现象。

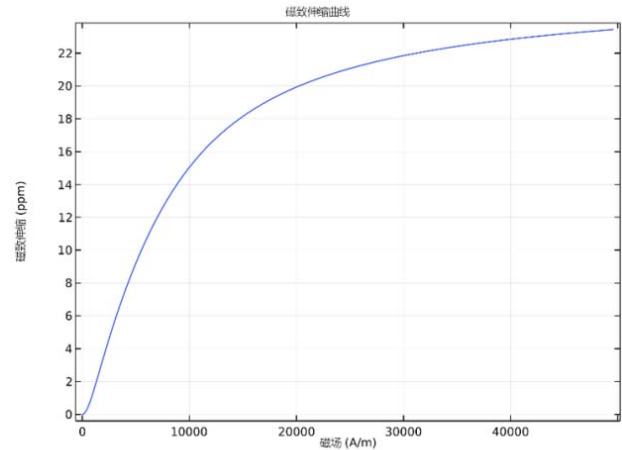
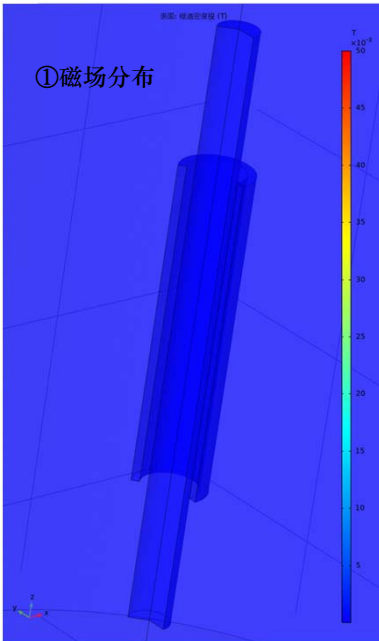


Fig 2.6 COMSOL模拟实验得到的磁致伸缩曲线

①磁场分布

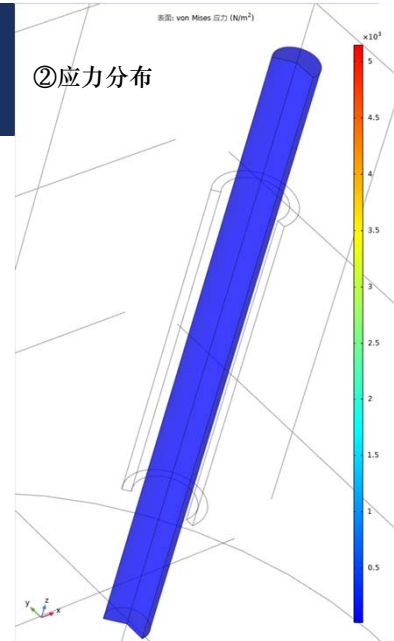


## 磁致伸缩瞬态下建模：

由图看出：

- ①磁场和应力均呈周期性的变化。
- ②磁场绝对值的变化频率（即磁场变化频率的二倍）大致等于应力的变化频率，可以定性验证倍频效应。

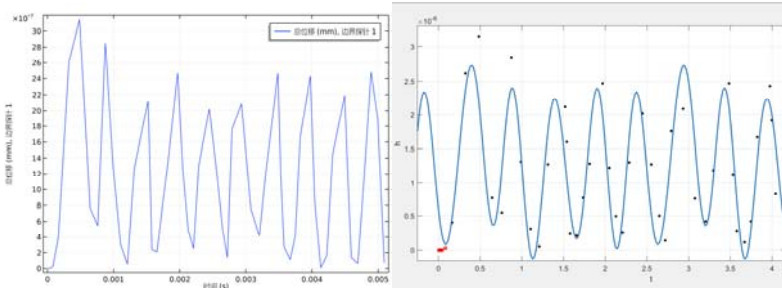
②应力分布



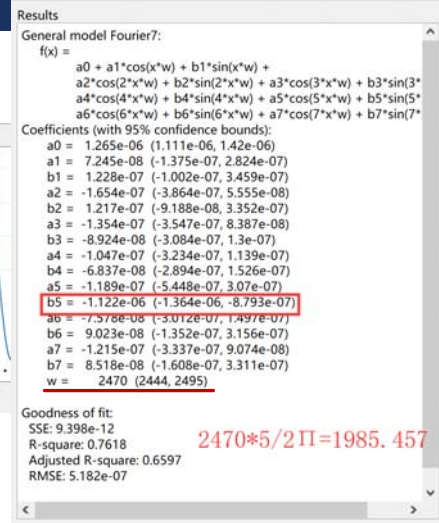
## 瞬态下 振动频率和电流频率 的关系：

①通入 $f=1000\text{Hz}$ 正弦电流，得振动图像如左。

②Matlab傅里叶拟合，得拟合图像如中。



③找到拟合函数中占比最大的一项（除常数项），计算其所对应的频率，如右图为 $1985.46\text{Hz}$ ，与电流频率的两倍接近（误差 $<1\%$ ）。



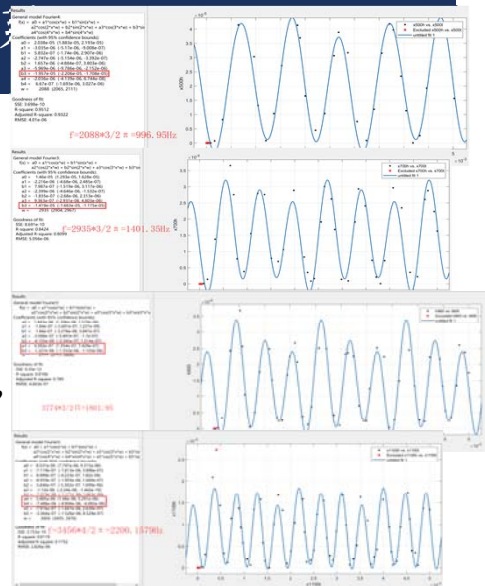
## 瞬态下 振动频率和电流频率 的关系

电流频率 /Hz	振动频率 /Hz	平均振幅 / $10^{-6}\text{mm}$
400	788.13	35.62
500	996.95	25.53
600	1185.70	19.98
700	1401.35	15.12
800	1599.38	14.26
900	1801.95	13.27
1000	1985.46	13.22
1100	2200.16	10.96

为减小偶然误差的影响，保持电流强度不变，改变频率（400~1100Hz）

记录不同频率下的平均振幅，得表如左。

由表，在多个电流频率下，振动频率都较严格的保持在电流频率的两倍，定量验证了倍频效应。



# 实验和结果

EXPERIMENT & RESULTS

## 实验的目的和内容：

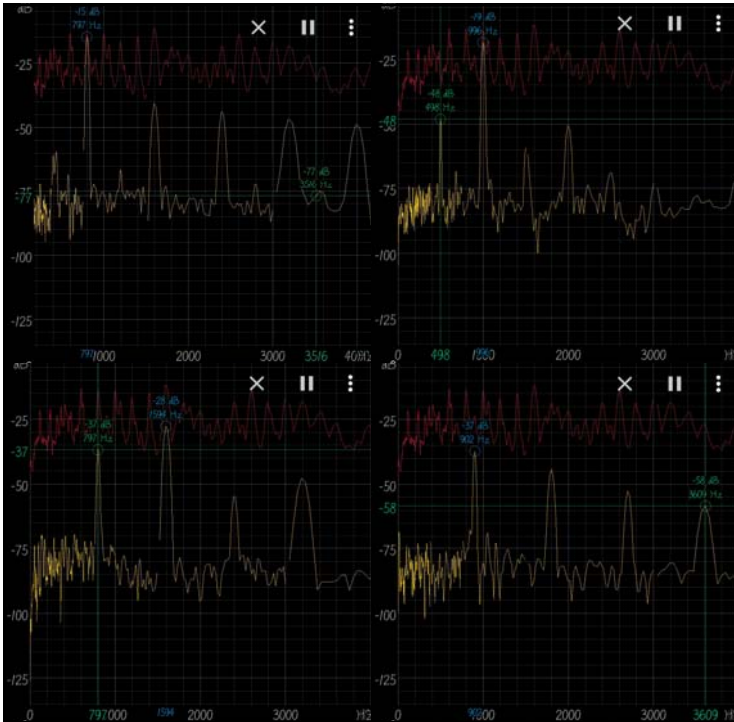
如右图，与之前瞬态模型类似，在线圈中通入正弦交流电，观察、记录铁氧体的振动情况，其中铁盘起扩音的作用。

实验主要分为两个部分：

- ①保持电流强度不变，改变电流频率，用软件记录、分析铁氧体棒倍频效应
- ②保持电流频率不变，改变电流强度，测不同强度下的振幅。绘图并拟合，探究饱和磁致伸缩现象。







## 倍频效应的实验验证

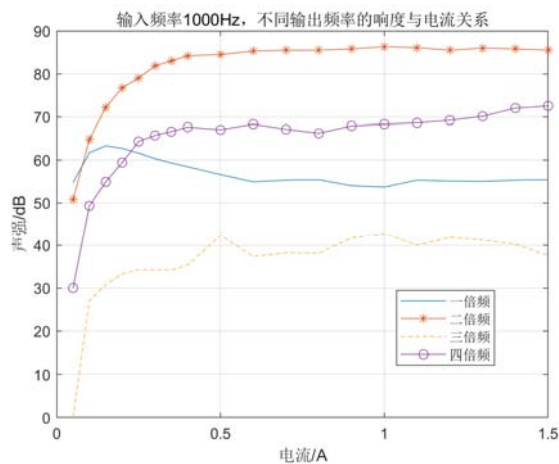
电流大小为0.8A，在400Hz~1500Hz之间改变电流频率，记录、分析铁氧体棒的振动情况。

如左图，为在几个特定频率下用波形软件记录的铁氧体发声波形，从中可看出：

①波形图中不止存在二倍频，也存在一倍频以及更高倍频。

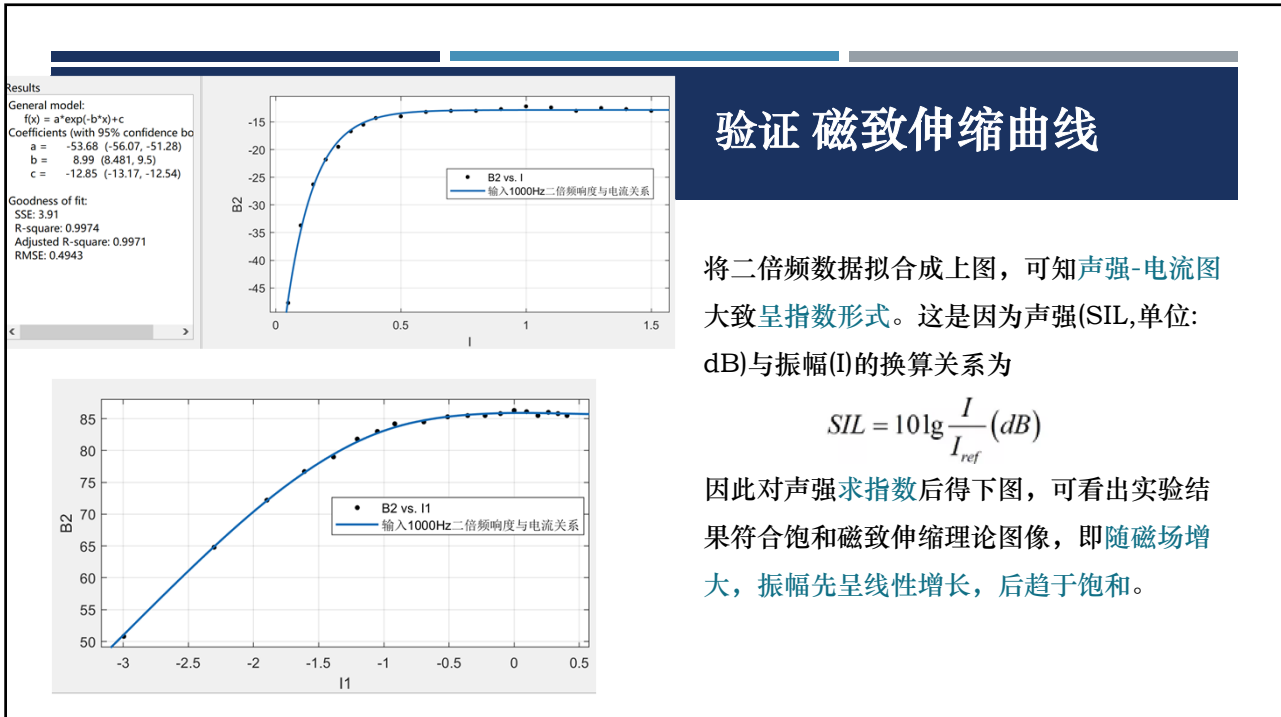
②在频率较低时，二倍频为主，而当频率逐渐升高，一倍频所占比重增加。

## 验证磁致伸缩曲线



固定交变电流频率为1000Hz，在0~1.5A的范围内改变电流强度大小，测得各倍频的声强-电流关系如图所示。

由图可知，各倍频的声强均有随电流先增大后趋于不变的情况，符合饱和磁致伸缩效应。其中二倍频为主要倍频，图像最理想，故取二倍频数据进一步定量分析。



## 实验总结:

主要对磁致伸缩的**倍频效应**及**饱和磁致伸缩效应**进行了调查研究,结果如下:

- ①**理论、建模、实验**中均验证了磁致伸缩的**二倍频效应**,但实验中出现了**其他倍频**的现象无法找到合适解释。
- ②**理论、建模、实验**中均验证了**饱和磁致伸缩效应**,即磁致伸缩长度先随磁场增大线性增大,之后趋于饱和。

通过理论学习、模拟实验和实际实验等研究方法,了解了磁致伸缩的基本原理、微观解释,从多方面验证了磁致伸缩的两个重要特性,锻炼了调研能力、建模能力、数据处理能力、及动手能力。



谢谢聆听

尚音彤

SHAYITO@MAIL.USTC.EDU.COM