

目录

1	背景知识	2
1.1	背景相关	2
1.2	课题概述	2
2	原理	2
2.1	基本原理	2
2.2	实验原理	2
2.2.1	饱和性	2
2.2.2	二倍频性	3
3	仪器系统	3
3.1	实验器件	3
3.2	实验仪器	4
3.3	实验硬件或软件架构	4
4	实验	4
4.1	实验方法	4
4.2	实验步骤	5
4.2.1	预实验	5
4.2.2	课题实验	5
4.3	实验数据	6
4.4	实验结果	9
5	分析与讨论	10
5.1	误差分析	10
5.2	实验分析	10
6	实验总结	11
7	课题总结	12
7.1	仪器系统照片	12
7.2	课题所用器件清单	12
7.3	花絮和留言	14
8	参考文献	14

1 背景知识

1.1 背景相关

铁氧体是一种陶瓷材料，以氧化铁为其主要成分。大部分的铁氧体是磁性材料，用来制作永久磁铁、变压器的铁芯及其他相关的应用。

铁氧体常用在制作电感器、变压器及电磁铁中的铁芯，铁氧体的高电阻可以减少其涡电流损失。铁氧体的铁芯也常放在电脑的电源线及信号线上，称为磁珠，可以避免高频的电磁噪声（电磁干扰）进入设备或从设备中传出。

1.2 课题概述

铁氧体棒放置在垂直管的底端。将频率与铁氧体棒固有频率同阶的交流电压加到细线圈上（包裹在棒下端）。当一个球放在铁氧体棒顶部时，球就会开始反弹。研究并解释这一现象。

2 原理

2.1 基本原理

磁致伸缩是指物体在磁场中磁化时，在磁化方向会发生伸长或缩短，当通过线圈的电流变化或者是改变与磁体的距离时其尺寸即发生显著变化的铁磁性材料，通常称为铁磁致伸缩材料。在微观上磁致伸缩效应表现为材料内部畴壁位移和磁畴转动与交变磁场共振带来材料晶体长度的变化。在交变磁场的影响下，磁致伸缩材料会发生有规律的振动，进而在特定频率下发出响亮而尖锐的声音，同时也能带动小质量物体的运动。当外加磁场频率和磁致伸缩材料自身固有力学振动频率接近的时候，二者会产生谐振，使得磁致伸缩材料机械振动的振幅加大。

2.2 实验原理

磁致伸缩现象的两大特征为**饱和性**和**二倍频性**。这两个特征在我们的实验中均有所体现。

2.2.1 饱和性

随磁场增大，应变 $\lambda = \frac{\Delta L}{L}$ 先线性变化，后趋于常数，该常数称为饱和磁致伸缩系数。感应磁场的大小取决于外加交流电流的频率，而铁氧体棒磁致伸缩应力又正相关于交流电流的大小。故在一定频率范围内（特别在向纵向振动频率的附近），铁氧体棒的磁致伸缩现象较为明显，但在较大和较小频率时，棒的振动可能将无法带动小球的振动。故随着频率的

增大，小球的振动会存在着先变强，后减弱的规律。同时交变的强度也要维持在一定大小，若太小，磁致伸缩应力不足导致振动较弱；若太大，线圈发热导致能量不能尽量地传达到磁场能之中。

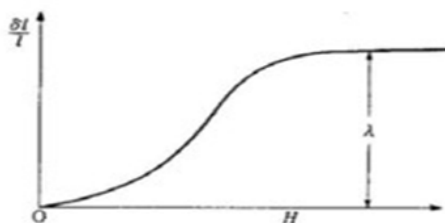


图 1: 磁致伸缩现象的饱和性

2.2.2 二倍频性

在周期磁场中，材料的振动频率约为磁场变化频率的二倍。如图，磁场从反向变化到正向的过程中，材料的形变经历了“最大-最小-最大”的过程。即磁场变化半个周期的过程中，材料中磁畴振动了整个周期，从而材料振动频率约为交变磁场频率的二倍。又因为感应磁场的频率和交变励磁电流的频率相当，故铁氧体棒和小球振动频率均会约为外加电流频率的二倍。我们将通过铁氧体棒发声的性质和小球振动的情况验证二倍频的性质。若二倍频较大，则观测到的小球振动周期可能为二倍频周期的整数倍，即小球振动频率为二倍频的整数倍分之一。

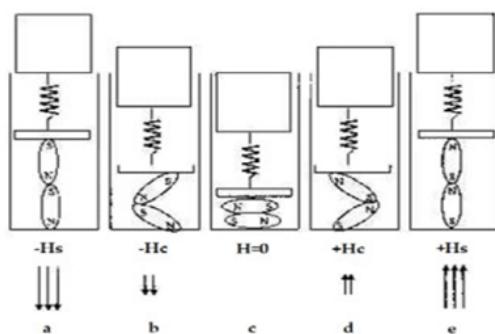


图 2: 磁致伸缩现象的二倍频性

3 仪器系统

3.1 实验器件

铁氧体棒、线圈、小球、功率放大器、信号发生器、电流表、电压表

器件具体参数可见 7.2 课题所用器件清单。

3.2 实验仪器

一台安装有 Windows 10 系统的计算机

3.3 实验硬件或软件架构

软件: Tracker 6.0.10(用于描绘运动轨迹), Python 3.10.9(用于绘制).

4 实验

4.1 实验方法

我们将该题目拆解为解释和研究两个方面。解释,即搞清楚小球为什么会在铁氧体棒上反弹,也就是理论分析部分。研究,即探索铁氧体棒上球振动是否有规律,其频率、振幅又与哪些因素有关等等,也就是实验部分。

通过阅读题面我们发现该问题与 2020 年中国大学生物理学术竞赛第四题“唱歌的铁氧体”类似,均为铁氧体在交变磁场中振动而引发的现象研究。通过查阅相关资料我们把铁氧体棒上球振动的原理归结于磁致伸缩效应,即由磁致伸缩材料构成的铁氧体棒在交变电流激发的交变磁场中会产生磁致伸缩振动,从而带动了球的振动。(详见原理部分)

要研究铁氧体棒上球振动的规律及影响因素,首先需要呈现出题面所描述的实验现象。故我们需要准备铁氧体棒、线圈、小球等实验主体部分,信号发生器、功率放大器作为信号发生部分,亚克力管、海绵垫、导线等作为连接部分搭构起整个实验装置,还有电流表、电压表、磁场测量仪等来辅助实验安全成功进行。搭完实验装置后还需要通过尝试来确定能使小球稳定跳动的交变电流频率范围和电流大小,以便于后期的控制变量分析。

在成功复刻出实验现象之后,我们就可以通过定性及定量的方法来探究振动有关的各种性质。定性方面,通过改变小球的材质来确定小球的振动是单纯的由棒振动而引起的还是和其产生的磁场相互作用引起的。若是与磁场相互作用引起球振动,那么应该只有金属小球会有振动现象发生而其他诸如塑料、泡沫等材质的小球不会发生振动现象,也可以从侧面印证理论分析的正确性;若是单纯由棒振动而引起球振动,那么各种材质的小球应该都会有振动现象,在体积相同的条件下质量越轻的小球应该振动的越剧烈,即振幅越大。在定量方面,可以通过改变球质量大小、铁氧体棒的长短和粗细、线圈的匝数和半径、交变电流的频率和大小等因素,测量相应小球的振动频率和幅度,最后获得他们之间的对应关系。

在呈现振幅和频率方面,我们通过固定手机来拍摄一段时间下的小球振动视频,将其导入软件 tracker 中作图分析,同时也可以根据其做出的 $x-t$ 图来探究小球振动是否符合正弦弦或其他规律振动,尝试写出其振动方程。

我们对整个实验的预期是在能复刻出实验现象的基础上，搞清楚铁氧体棒上球振动的原理，确定能使小球振动的交变电流频率和大小范围，探究出小球的振动规律以及各种因素对小球振动振幅和频率方面的影响。

4.2 实验步骤

4.2.1 预实验

在真正实验前，我们查阅相关资料并发现有关“唱歌铁氧体”振动规律的研究，2020 年中国大学生物理学术竞赛 (2020CUPT) 第四题为“唱歌的铁氧体”：“铁氧体棒插入信号发生器供电的线圈中。在某些频率下，铁氧体棒开始发出声音，试研究这一现象。”我们使用信号发生器输入频率为 $100 - 2000\text{Hz}$ 的交流电压 (间隔为 100Hz)，发现铁氧体棒随输入频率的变化而产生不同频率的声音，并对其进行了研究 (详见数据处理与分析)。

4.2.2 课题实验

所查资料显示铁氧体棒的固有频率为 220Hz ，故我们决定先在 $100 - 500\text{Hz}$ 频率下进行实验。将线圈与电流表、信号发生器连接，亚克力管插入线圈中心，并将铁氧体棒套入亚克力管中，小球放置在铁氧体棒上端 (可见仪器系统照片部分)，结果发现铁氧体棒开始振动但无法带动小球跳动，且电流计显示环路电流仅有几微安。

故在电路中接入功率放大器以放大电流到几安。结果发现铁氧体棒振动幅度变大，试验期间发现线圈跳动，但小球仅能在铁氧体棒端表面晃动，仍无法跳动。

分析猜测与小球质量有关，于是换用质量较轻的泡沫小球进行实验，但仍无法达到良好效果。但是当。并与相关实验视频装置相对比，猜测是需要更小内径的线圈来更好的固定铁氧体棒，另外第一批购入的线圈质量较差，使用一段时间便出现线圈发烫现象。因此换用带有绝缘层的内径更小的线圈，但小球依旧无法跳动。

进一步排除装置的漏洞并咨询老师后，我们最终决定尝试降低交流电压的频率，结果在 $15 - 40\text{Hz}$ 之间观察到了小球跳动的现象，但小球跳动现象不够明显，结合前期实验时发现用手将铁氧体棒抬起时铁氧体棒振动明显变强的现象，我们猜测铁氧体棒与桌面接触使得其振动产生的部分能量通过桌面损耗，因此在铁氧体棒和桌面中间使用海绵垫，小球跳动现象明显加强。

我们使用了不同材质的小球在不同输入频率下进行实验，发现小球跳动剧烈程度从 15 到 40Hz 呈现由弱变强后变弱的规律，跳动高度也有一定的规律 (详见数据处理与分析) 且跳动高度与小球材质有关，玻璃球跳动最为剧烈，但所有的跳动都极为不稳定。

考虑到实验现象——磁致伸缩的本质，本实验小球振动的幅度应该与先求本身能否被带动起来的难度有关。因此我们最后选择重力较小且空气阻力不大的玻璃球作为研究对象。

4.3 实验数据

1. 在研究铁氧体棒发声频率与输入频率的关系中，我们利用 phyphox 软件分段测量了不同的输入频率下铁氧体棒的发声频率。Phyphox 可以测量声音，并得到声音的频率、振幅等参数。对每个输入频率，我们可以看到铁氧体发声基本是保持一个或者多个频率，利用 Python 及其聚类算法，我们可以较好地去掉测量时的杂音，并对测得的发声频率进行分类，取分类后每个类内的频率均值作为这个类的频率。

最后得到信号发生器的输入频率与铁氧体棒发声频率的对应如下

输入频率 (Hz)	发声频率 (Hz)
100	222.43104484
200	395.75236970
300	598.20851943
400	800.48337964
500	507.55675186, 954.275714720
600	639.07495881, 1165.72115999
700	748.93625790, 1383.98832289
800	818.14041487, 1572.73327100
900	1777.17880844
1000	1048.44409283, 1988.25139665
1100	2176.67978808
1200	399.84985101, 1192.78174419, 2290.53238095
1300	346.84863364, 652.96242073, 1282.38455066
1400	452.13645584, 703.23842208, 1406.28236143, 2672.03222374
1500	694.81896221, 1530.79376568
1600	1603.2843976
1700	1711.43428331, 3213.31735735
1800	3627.65400303
1900	355.50472167, 791.66364328, 1951.18969298
2000	607.74703041, 1996.07107405, 3993.61683613

2. 在研究**固定输入频率 (22 Hz)** 下球在铁氧体棒上的运动中，我们录制了一分钟的视频，并通过 tracker 描绘出其轨迹（因为拍摄、器材等原因，tracker 自带的识别轨迹功能未能取得较好的效果，于是我们采用了人工的绘制方法，即逐帧描点），得到每个离散时间点下球的位置。基于此数据，我们分别绘制出散点连线图。

结合实际实验情况以及数据处理结果，我们发现在测量最开始时小球非常不稳定，这是因为我们可能是从某个周期中间开始录制视频，因此在最后研究的图像中，我们去

掉了最开始的一部分轨迹。

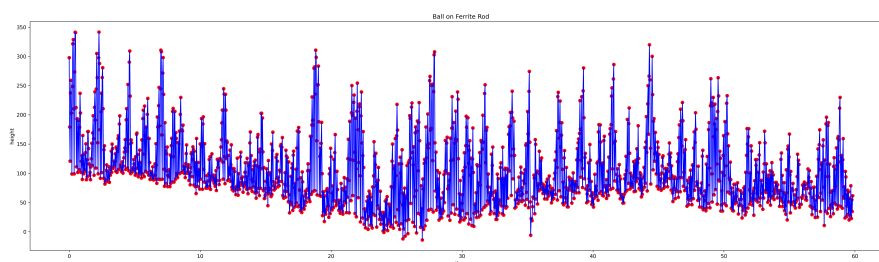
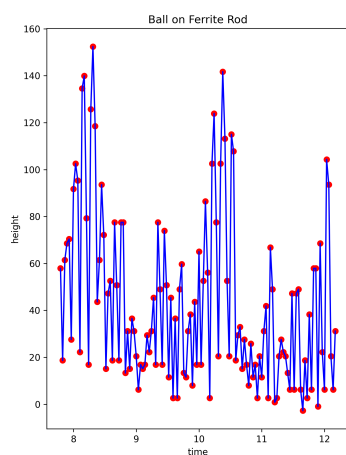


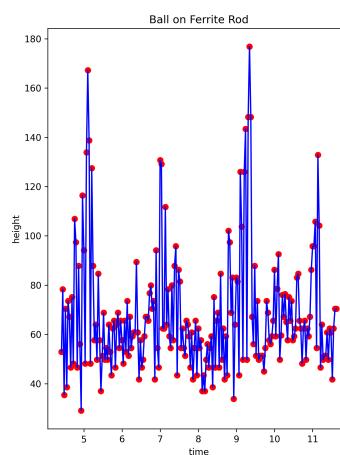
图 3: 固定输入频率 (22 Hz) 下球在铁氧体棒上的运动轨迹

3. 在研究输入频率与铁氧体棒运动的关系中，我们改变信号发生器的输入频率，并录制此频率下小球的运动视频，随后用第二部分实验处理的方法，测量周期和最高点的高度。为了更好地研究周期，我们仅描出每次运动的最高点，通过最高点之间的时间间隔、以及最高点的高度来对比不同频率下铁氧体棒的震动。

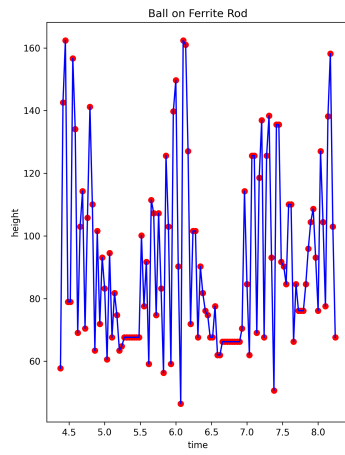
我们测量的频率区间为 $24Hz$ 到 $33Hz$ ，分别得到 $24Hz$ 到 $28Hz$ 轨迹如图（只列出球稳定后的轨迹，这也是我们进行后续分析的依据）



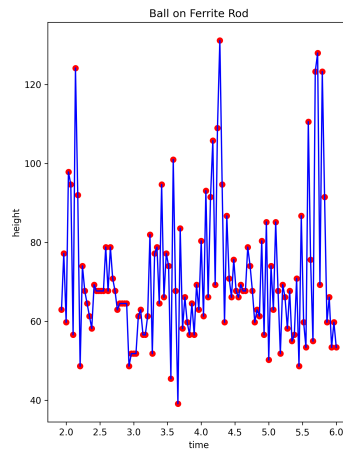
(a) $24Hz$



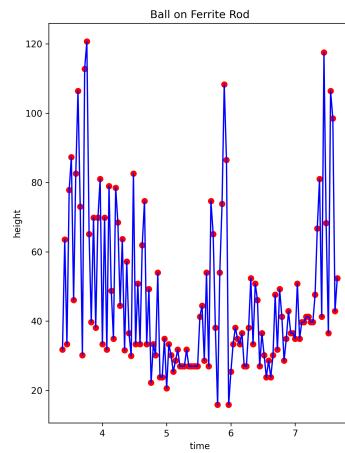
(b) $25Hz$



(c) $26Hz$



(d) $27Hz$



(e) $28Hz$

图 2: 输入频率与铁氧体棒运动的关系

当我们开始研究 $29Hz$ 下球的震动时, 我们发现这时球几乎没有往高处弹跳, 而是一直与铁氧体棒碰撞。当频率继续增大时现象也是如此, 很难从中观察到和之前类似的周期运动以及球明显的跳动, 因此后续的运动图像这里不再进行分析。

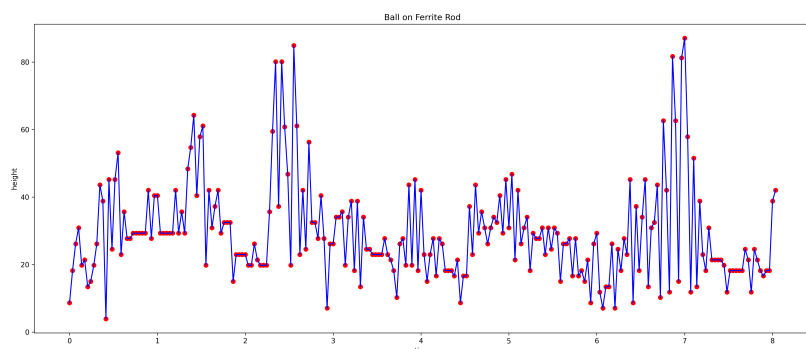


图 3: $29Hz$

对于 $24 - 28Hz$ 的情况，我们取其中的最高点和达到最高点的时间

输入频率 (Hz)	最高点高度 (mm)	达到时间 (s)			平均周期 (s)
24	152.4	8.312	10.241	12.034	1.861
25	167.2	5.103	7.000	9.345	2.121
26	162.4	4.448	6.103	8.172	1.862
27	131.2	2.138	4.276	5.889	1.876
28	120.7	3.758	5.896	7.448	1.845

4.4 实验结果

1. 在研究铁氧体棒发声频率与输入频率的关系中，可以看到，有的时候一个输入频率会同时观测到多个发生频率，我们推测这时是出现了“泛音”的现象。同时在测到的声音频率中明显有二倍频，与理论分析吻合。

不过我们本次实验的重点并非研究铁氧体棒的发声，因此在这一方面并未深入研究，仅作参考。

2. 在研究固定输入频率 (22 Hz) 下球在铁氧体棒上的运动中，我们观察到在不同时间下，小球的水平位置并不相同，因为小球相较于铁氧体棒和塑料管内径较小，因此震动并非是严格的竖直方向。结合视频我们可以看到有时小球与铁氧体棒碰撞后呈明显的斜抛趋势，部分能量用于水平移动，最高点并非保持在同一高度上。排除这些误差的基础上，我们可以认为最高点的高度近似。

综合来看，我们认为小球大体保持着周期性的运动，最高点的高度基本相同，而两个高点的时间间隔基本相同。结合原理部分的分析，我们可以认为球在铁氧体棒上的震动是周期运动，呈三角函数关系。

3. 在研究输入频率与铁氧体棒运动的关系中，对于 $24 - 28\text{Hz}$ 的情况，我们取其中的最高点和达到最高点的时间，我们可以发现其中的规律：对不同的频率，球运动的周期基本相同 ($T \approx 2s$)；而最高点的高度则是随着频率的增大而先增大后减小，最后出现上一段中所描述的难以观察到明显运动的情况。

5 分析与讨论

5.1 误差分析

1. 人员操作误差
 - (a) 在预实验中，改变频率并连续测定铁氧体棒发声频率，会导致数据杂乱且不宜整理，且铁氧体棒从改变输入频率到稳定发声需要一定的缓冲时间，难以从中提取出真正发声的频率。
 - (b) 拍摄小球跳动的视频时由于手持相机，拍摄的视频出现模糊、晃动等问题，无法很好地测定其跳动高度。
2. 环境条件误差
 - (a) 在预实验中，功率放大器本身工作时会发出声音，影响铁氧体棒发声的频率测定。
3. 仪器误差
 - (a) 环路电流较小，铁氧体棒振动幅度小，观察到的小球跳动现象不明显。
 - (b) 小球颜色要与背景板颜色不易区分，不方便之后在 tracker 中的取点，难以获得更精确的球跳动轨迹。
 - (c) 小球的直径与亚克力管的直径不匹配导致小球会有水平方向的移动而非完全是竖直跳动。同时棒的纵向振动会被线圈约束，如果线圈孔径和棒的直径太接近的话。同时其振动强度也会被削弱，如果棒与桌面接触过于紧密。
 - (d) 线圈的匝数太少磁场强度不够且容易发热不利于实验的持续进行

5.2 实验分析

关于我们在 5.1 中提到的问题，我们也想到了一些改进方案，限于时间问题只在部分方面实现了这些改进。其他方面我们也一并列出，供参考。

1. 人员操作方面
 - (a) 在预实验中，我们采用分段测定，每次改变频率待铁氧体棒发声稳定后再进行测定。

(b) 拍摄小球跳动的视频时尽量使用拍摄支架稳定。

2. 环境条件方面

(a) 在预实验中，功率放大器本身工作时会发出声音，故先在未插入铁氧体棒时测定功率放大器发声频率，后在铁氧体棒发声频率的收集数据内删除相同频率的数据，以排除影响。

3. 仪器方面

- (a) 环路电流较小，因此我们接入功率放大器以放大电流。
- (b) 小球直径、亚克力管内径、线圈内径和铁氧体棒直径四者要匹配，使整个装置不会左右摇晃，尽量使小球只有竖直方向的跳动。
- (c) 在线圈和桌面接触面以及线圈和亚克力管接触面贴上海绵胶或垫上海绵垫，稳固整个装置的同时为小球提供更多竖直方向的力。
- (d) 连线较多会出现连线损坏难以检查、电路连接易搞混、实验台面杂乱无章等问题。因此我们的线路尽量连的简单清晰，不要连上过多的表头，减少线路出现问题时的检索纠正时间。比如在最后的测量中我们就舍弃了电压表，仅使用电流表控制环路电路在 $3 - 4A$ 左右。
- (e) 小球颜色要与背景板颜色容易区分，会方便之后在 tracker 中的取点，便于获取更精确的球跳动轨迹。
- (f) 条件允许的情况下使用匝数更多的线圈，加大磁场，增加小球跳动的振幅，使实验现象更加明显，也减少处理实验数据的误差。
- (g) 使用更高质量的线圈，提高其电流的耐受程度，减少发烫，提高实验装置持续工作的时间，提高实验效率。

6 实验总结

通过七周的实验探究，我们最后完成了对铁氧体棒上球的理论分析，得到了能使小球振动的交变电流的频率和电流大小范围，并成功地复刻了实验现象。得知了小球振动完全由铁氧体棒振动所引起而非与磁场作用，得到了小球振动的 $x - t$ 图像，研究了交变电流的频率对小球振动频率的影响，还拓展研究了铁氧体振动发声的频率与交变电流频率之间的关系。但对其他的一些变量分析囿于时间因素并没有来得及展开。

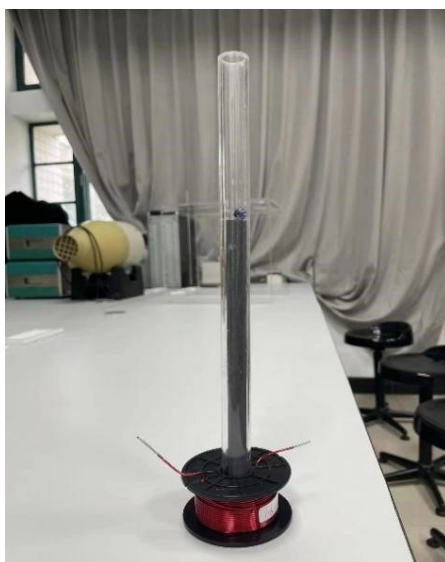
实验最后得到的有效结论与预期有一定的差距，究其原因主要是我们在呈现这个小球在铁氧体棒上跳动的实验现象用了过多的时间，导致后续的定量分析无法按期进行。而为什么久久不能复刻实验现象，我们认为包括但不限于以下几个主要原因：最开始选用的实验器材不合适；对线路问题的检索和解决过于频繁且浪费很多时间；误判了交变电流频率区间。

7 课题总结

7.1 仪器系统照片



(a) 实验装置图



(b) 实验装置铁氧体棒部分图

7.2 课题所用器件清单

1. 不同尺寸和磁导率的铁氧体棒

- 直径 $12mm$, 长度 $200mm$, 磁导率 $1K$
- 直径 $10mm$, 长度 $200mm$, 磁导率 400
- 直径 $10mm$, 长度 $200mm$, 磁导率 $1K$
- 直径 $10mm$, 长度 $140mm$, 磁导率 800

2. 不同尺寸和电感的线圈

- 内径 10mm , 线径 0.35mm , 电感 3.0mH
- 内径 10mm , 线径 0.35mm , 电感 0.8mH
- 内径 20mm , 线径 1.2mm , 电感 1.6mH
- 内径 20mm , 线径 1.2mm , 电感 2.0mH

3. 各种材质的小球，分别有金属球、木制球、橡胶球、玻璃球若干 (直径 8mm) 和泡沫小球 (直径 5mm)

4. 功率放大器

5. 信号发生器

6. 电流表

7. 电压表



(c) 各类小球



(d) 前期使用线圈



(e) 改进后线圈与铁氧体棒



(f) 功率放大器、信号发生器、电流表、电压表各类仪器图

7.3 花絮和留言

回顾 7 周的实验过程，在实验第一天我们团队就确定了研究方案，罗列了需要购置的实验仪器与器材，实验过程中也分工明确。在实验中途久久没有进展的时候大家也没有放弃，而是将思路转向对当时现有的实验现象铁氧体棒的振动声音的研究。在老师的帮助下也是克服了一个个的困难，在有限时间里的实验效率还是不错的。我们也多次主动牺牲实验课外的时间，到实验室继续完成我们的实验，也因此我们最后成功复现了现象，但很遗憾由于时间关系、疫情等原因我们后续无法开展进一步的实验研究与分析。经过一个学期的研究探索，也使得我们对此方向的问题有很大的兴趣，希望今后有机会可以继续深入研究，探索电与磁中蕴含的更为深刻的道理。

8 参考文献

- [1] 磁致伸缩铁氧体材料的声学磁力谐振效应研究王天阳，王宇健，翁雨燕，汤如俊 (1. 苏州大学物理科学与技术学院，江苏苏州 215000; 2. 苏州大学纳米科学技术学院，江苏苏州 215000)
- [2] 铁氧体的磁致伸缩 MAGNETOSTRICTION, 知乎
- [3] “唱歌铁氧体” 振动规律的研究买子桐，贺西平，陈一凡，汤衍鹏，李增明，张晨，解邦鑫 (陕西师范大学物理学与信息技术学院，陕西西安 710119)