

利用 Phyphox 的磁传感器测量通电线圈的磁场分布 及其他磁场分布

物理系 郭寅洁 16307110343

摘要: 本实验利用手机 Phyphox 软件的磁传感器测量了通电圆线圈轴线上的磁场分布、亥姆霍兹线圈轴线上的磁场与其两线圈分别产生的磁场、通电圆线圈一侧垂直平面上的磁场分布以及扁圆柱体小磁铁和耳机轴线上的磁场分布。验证了毕奥萨伐尔定律和磁场叠加原理，定性描述了不同磁感应分量在线圈周围的分布变化。验证了扁圆柱体磁铁在轴线上的磁感应强度可以近似为 $B = (\mu_0 m x^n)/(2\pi)$ ，通过拟合得到 $n = -3.001 \pm 0.201$ ，与理论值-3 基本符合。

一、引言:

手机自身具有许多传感器。随着手机功能的日益提升，德国的几位教授和学生开发出了一款 Phyphox 软件，来方便人们利用手机的传感器进行一些生活所需的测量或简易的物理实验。其中磁传感器给人们提供了做磁感应强度相关实验的可能性，丰富拓展了家中简易物理实验的可做内容。

磁场的产生既可以通过电流也可以通过永磁铁。而电流周围的磁场分布不仅取决于电流大小，也取决于电线的几何形状。传统的物理实验往往只研究了圆线圈轴线上的磁场分布，而没有研究到其周围空间中其他位置的不同磁感应强度分量的分布。永磁铁周围的磁场也取决于其自身几何形状和磁矩大小。

本实验测量了通电圆线圈周围的磁场分布以及扁圆柱体磁铁轴线上的磁场分布，定量计算比较了磁场的实际分布与理论公式推导的分布，定性描述了不同磁感应分量在线圈周围的分布变化。

二、实验原理:

1. 通电圆线圈周围的磁场分布

根据毕奥萨伐尔定律，如图（1）所示，通有电流 I ，匝数为 N ，线圈半径为 R 的圆线圈在轴线上的磁感应强度分布为

$$B(x) = \frac{N\mu_0 R^2 I}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1)$$

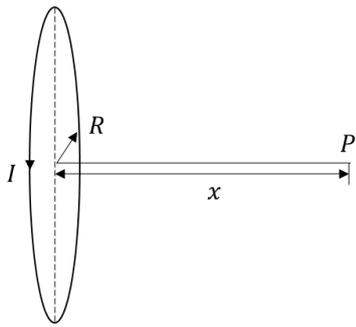


图 (1) 通电圆线圈

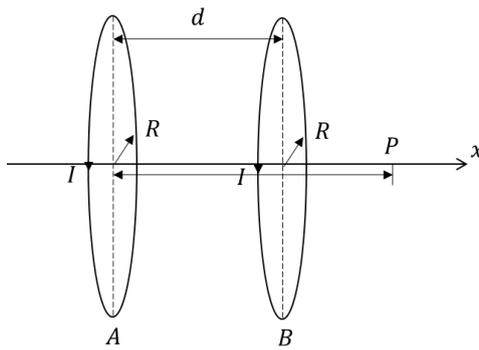


图 (2) 亥姆霍兹线圈

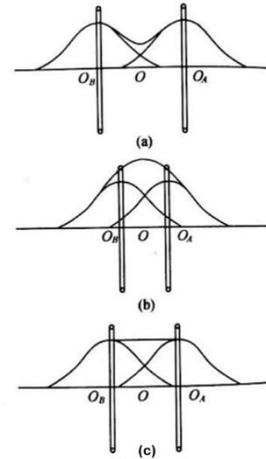


图 (3) [1] 改变亥姆霍兹线圈间距, 轴线磁场分布变化

若两个线圈处在同一轴线上, 半径同为 R , 匝数同为 N , 电流大小及方向相同, 则可组成亥姆霍兹线圈。

两线圈摆放位置如图 (2) 所示, 分别处于 A、B 处, 中心间隔距离为 d , 半径均为 R , 轴线上的磁感应强度分布则可以由两线圈分别在该处产生的磁感应强度叠加得到, 符合磁场叠加原理,

$$B(x) = B_A(x) + B_B(x) \quad (2)$$

如图 3[1] 所示当两线圈的间距发生改变时, 轴线上的磁感应强度也会发生相应的变化。当间距等于线圈半径 R 时, 两线圈形成亥姆霍兹线圈, 中间部分磁场最均匀。线圈间距较大时, 中心附近磁场较弱; 线圈间距较小时, 中心附近磁场较强。

除了轴线上的磁场分布, 毕奥萨伐尔定律也适用通电圆线圈周围其他位置上的磁感应强度分布。

2. 小磁铁 (扁圆柱体永磁体) 与耳机轴线上的磁场分布

小磁铁与耳机的磁铁均可近似等效成圆柱体。如图 (4) [2] 所示, 一个长度为 d , 磁矩为 m 的磁铁在其轴线上 P 处产生的磁感应强度

$$B = \frac{\mu_0 m x}{2\pi(x^2 - d^2/4)^2}$$

若磁铁的长度较小 $d \ll x$, 则磁感应强度则可以近似为

$$B = \frac{\mu_0 m}{2\pi x^3}$$

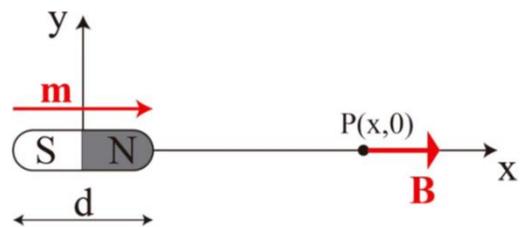


图 (4) [2] 长度为 d , 磁矩为 m 的磁铁在其轴线上 P 处产生的磁感应强度

三、实验装置:

手机 (传感器), 线圈, 刻度线, 限流电阻, 可调电源, 电流表 (万用表), 永磁铁, 耳机等等

通电圆线圈轴线上的磁场分布测量实验装置简易示意图及实验装置图如图(5)所示。

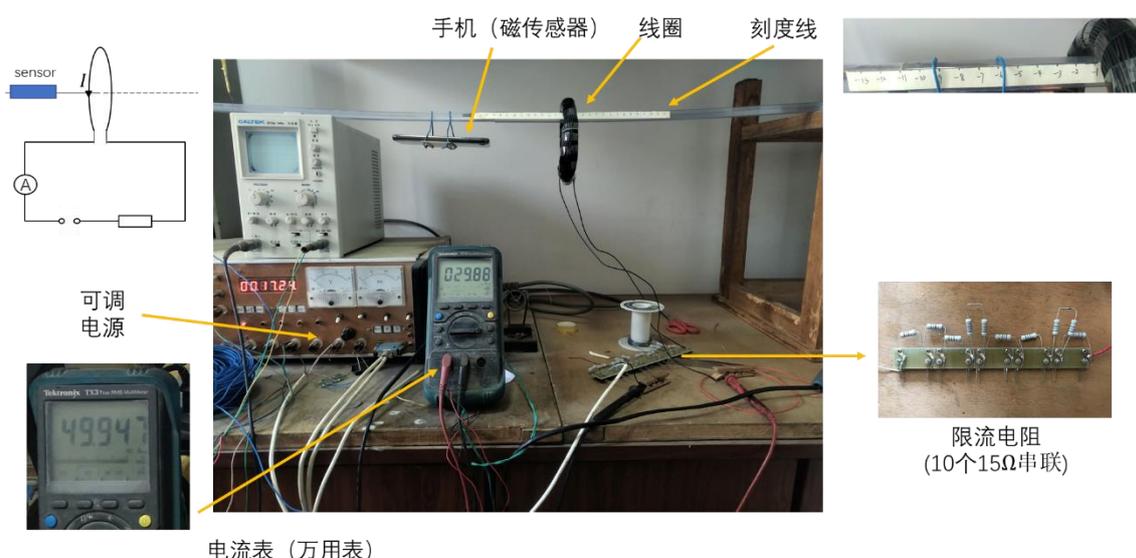


图 (5) 通电圆线圈轴线上的磁场分布测量实验装置简易示意图及实验装置图

四、实验过程:

1. 判断手机传感器位置

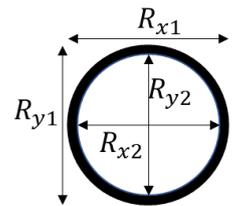
- (1) 打开 app, 观察 absolute 值, 判断地磁场在 30-50uT
- (2) 用钕铁硼磁钢在手机表面来回移动探索 观察 absolute 一栏的值, 在手机左上角时达到最大值, 将近 1×10^3 uT, 然后 app 出现死机。立刻关机重启, 重新下载 app 依然无法显示数据, 猜测是磁场过强原因。
- (3) 换手机, 用耳机产生的磁场测量, 示意图见附录图 (i)。在手机左上角处测得最大值, 近 200-300uT, 在手机该处做标记, 示意图见附录图 (ii)。长时间尝试后拿开耳机, 发现测量值只能恢复到 100-150uT。
- (4) 长时间放置手机后, 两部手机均恢复正常的磁场测量值, 由此判断: 手机传感器在长时间处于强磁场下可能会有磁化现象, 也可能是手机内部的软磁金属材料被磁化对传感器测量产生影响, 放在无磁场环境中一段时间后可恢复。但是必须谨慎, 会损坏手机!
- (5) 旋转手机, 判断手机磁感应器的坐标轴, 示意图见附录图 (iii)

2. 测量通电圆线圈轴线上的磁感应强度分布

- (1) 起始位置不加电流, 测环境磁场 B_{01}
- (2) 打开电源, 每隔一段距离测量磁场, 记录磁感应强度大小, 示意图见附录图 (iv)
- (3) 终点位置关闭电源, 测环境磁场 B_{02}

(4) 测量圆线圈半径，由于线圈半径较大（如图（6）所示），测量相互垂直的两条直径上的内径与外径，示意图见附录图（v），通过求和平均进行近似：

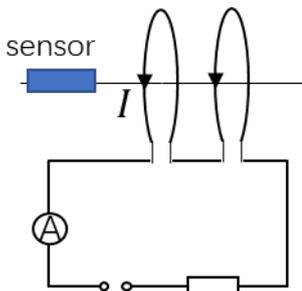
$$R = (R_{x1} + R_{x2} + R_{y1} + R_{y2})/4 \quad (3)$$



图（6）圆线圈半径的测量计算

3. 测量双线圈轴线上的磁感应强度分布

如图（7）所示，将两个线圈串联，电流同向。如图（8）所示，改变线圈间距，测量轴线上的磁感应强度分布。



图（7）亥姆霍兹线圈测量装置



$d = 15\text{cm} > 2R$



$d = 10\text{cm} = 2R$

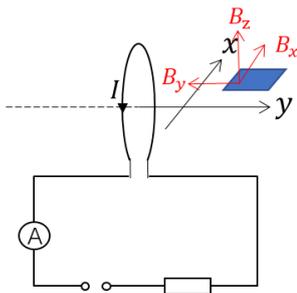


$d = 5\text{cm} = R$

图（8）改变线圈间距，测量轴线上的磁感应强度分布。

4. 通电圆线圈一侧垂直平面上的磁感应强度分布

如图（9）所示，设定位置与磁感应强度的坐标系。如图（10）所示，用两叠书把线圈固定在竖直状态，在一侧标记刻度线，测量磁感应强度分布。



图（9）位置与磁感应强度的坐标系



图（10）通电圆线圈一侧垂直平面上的磁感应强度分布测量

5. 小磁铁与耳机轴线上的磁场分布

- (1) 用手机的磁传感器测量地磁方向，做好记录
- (2) 将小磁铁与耳机固定在纸上，并将其轴线方向与地磁方向平行，方便扣除。用手机的磁传感器测量小磁铁与耳机轴线上的磁场分布，示意图见附录图（vi）
- (3) 初次测量发现磁感应强度与位置的幂次关系与理论值区别较大。因此再次测量小

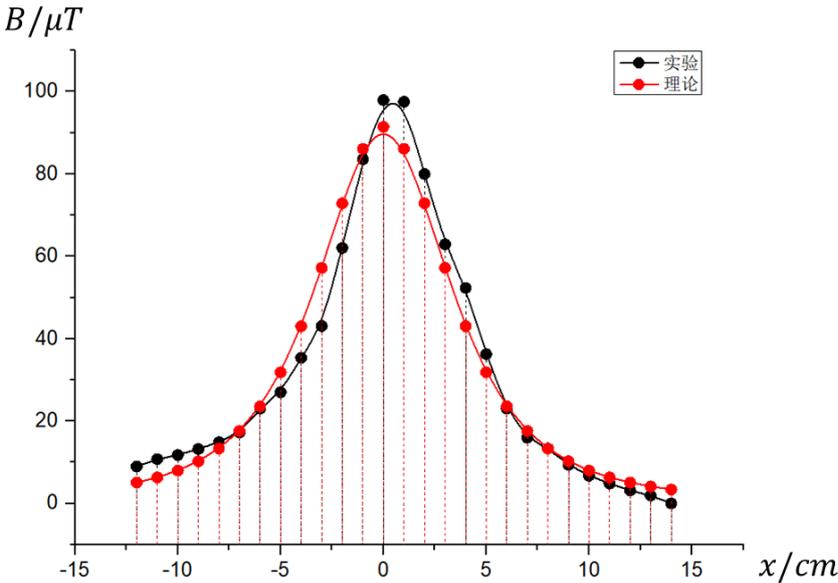
磁铁轴线上的磁场分布，并记录了磁场 x, y, z 轴的三个分量，发现 x, z 分量随距离的靠近呈明显增大趋势，可见之前测量的误差是由于传感器位置没有对准。因此采用了一下方法改进实验：

- i. 首先在无磁铁的情况下调整手机方向，使背景磁场中 $B_x \sim 0$ 。
- ii. 加入小磁铁，使其轴线与上一步中手机方向一致，并固定住小磁铁此时的位置。
- iii. 平移手机（不转动其方向）在离小磁铁较近的一个位置来回移动，使 $B_x \sim 0$ ，此时手机的传感器就正对小磁铁轴线了。
- iv. 在轴线上不同位置测量磁场。

五、实验结果及分析：

1. 通电圆线圈轴线上的磁感应强度分布

如图（11）所示，实验测得的通电圆线圈轴线上的磁感应强度分布呈中心强两边弱，基本符合毕奥萨伐尔定律。

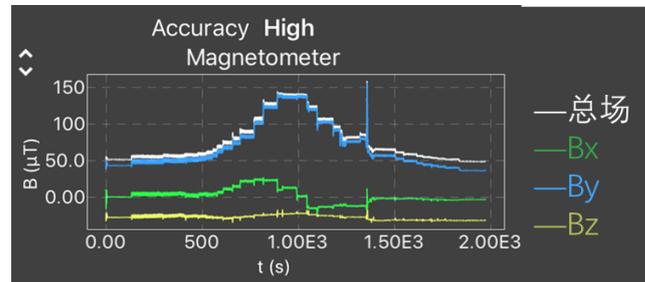


图(11) 通电圆线圈轴线上的磁感应强度分布

结果分析：

- (1) 实验值与理论值基本重合，验证了毕奥萨伐尔定律。
- (2) 实验值的中间最大值处范围较大，是由于线圈的纵截面半径较大。
- (3) 实验测得的曲线斜率比理论值更大一些，可能的原因有：环境磁场分布不均匀，环境中可能有交变磁场的存在；线圈不规则，半径的测量值偏大。

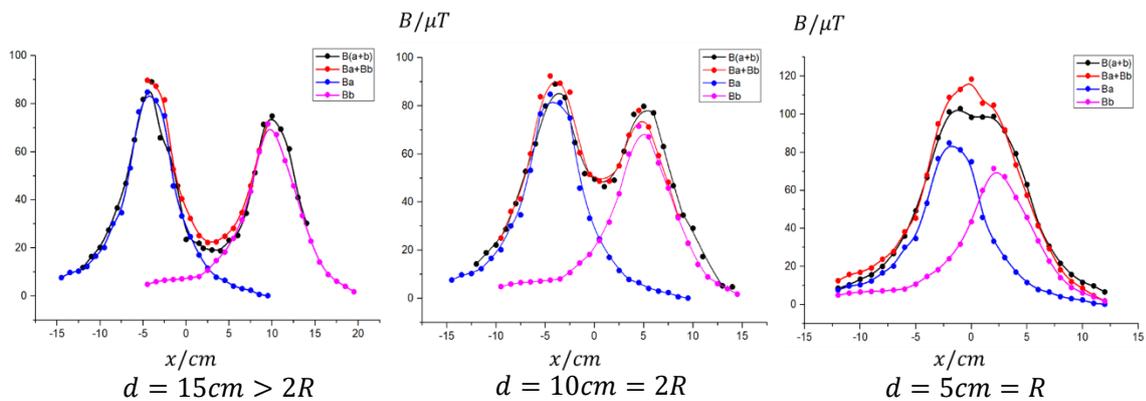
(4) 如图(12)所示手机 app 的实时实验记录, 从 B_x 的分布曲线可看出传感器运动轨迹与轴线有较小偏差, 因为手机的传感器在左上角, 而手机的宽度导致传感器无法保持在线圈轴线上。



图(12) 手机 app 的实时实验记录

2. 双线圈轴线上的磁感应强度分布

如图(13)所示, 双线圈轴线上的磁感应强度分布符合磁场叠加原理。



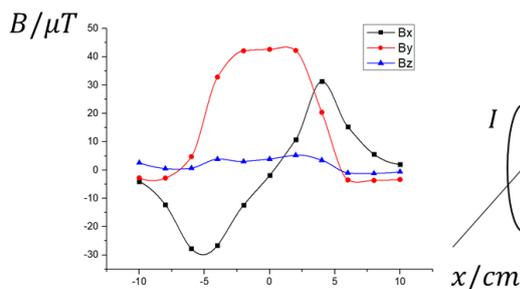
图(13) 不同间距的亥姆霍兹线圈轴线上的磁感应强度分布

当两线圈间距较大时, 线圈中心附近的磁场较弱; 间距越小, 中心附近的磁场强度越强。

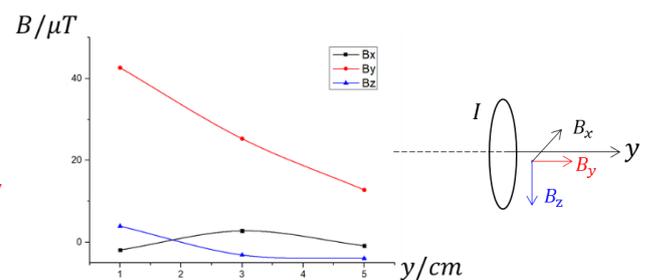
由于测量时手机不便穿过两个线圈而中途反转了手机的 y 轴, 导致了测量误差, 所以 $d=R$ 时的合成值与测量值有些误差。

3. 通电圆线圈一侧垂直平面上的磁感应强度分布

图(14)(15)分别展示了通电圆线圈 x 轴、 y 轴(坐标轴的设置见图中的示意)上磁感应强度 3 个分量 (B_x, B_y, B_z) 的分布, 符合通电圆线圈周围磁场分布的理论预计。



图(14) x 轴上的 3 轴磁感应强度分量分布



图(15) y 轴上的 3 轴磁感应强度分量分布

图 (16) (17) 为到圆平面不同距离处的 x 轴上的磁感应强度 x 分量 B_x 与磁感应强度 y 分量 B_y 分布。离线圈越近处, B_x, B_y 在轴线附近 (即 $x = 0\text{cm}$) 的变化曲率越大。图 (18) 计算了总磁感应强度的分布, 说明了磁场在线圈附近是最强的。

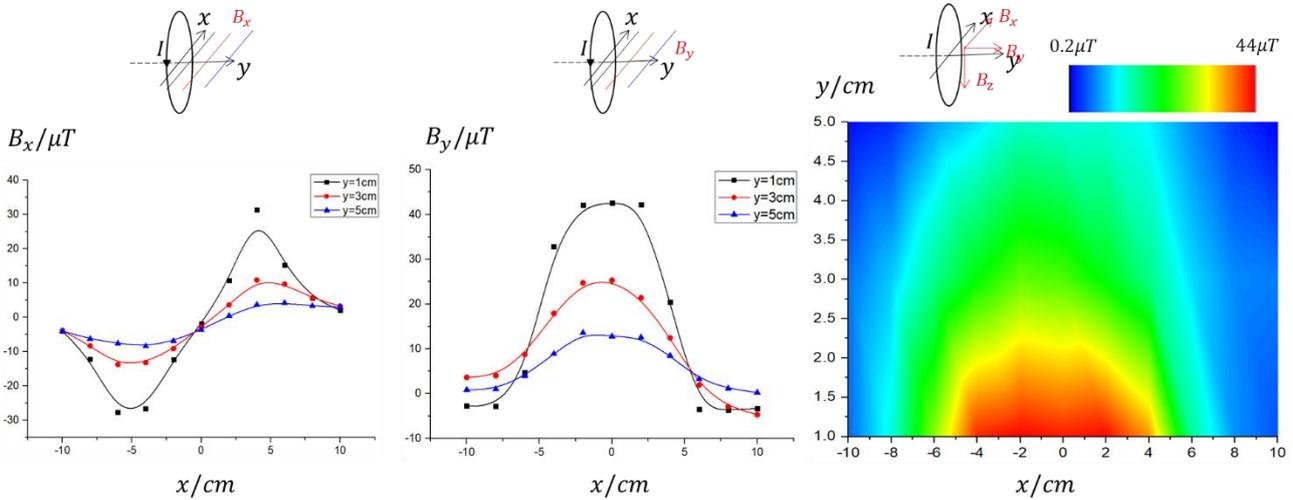


图 (16) 与圆平面不同距离处的 x 轴上的磁场 x 分量分布

图 (17) 与圆平面不同距离处的 x 轴上的磁场 y 分量分布

图 (18) 与圆平面不同距离处的 x 轴上的总磁场分布

4. 小磁铁与耳机轴线上的磁场分布

利用方程 (4) 对实验数据进行拟合, 得到图 (19) (20)

$$B = \mu_0 m(x + \Delta x)^n / 2\pi \quad (4)$$

由图 (19) (20) 所示, 小磁铁的磁矩约为 $0.104\text{A} \cdot \text{m}^2$;耳机的磁矩约为 $0.0123\text{A} \cdot \text{m}^2$;显然耳机产生的磁场较弱。

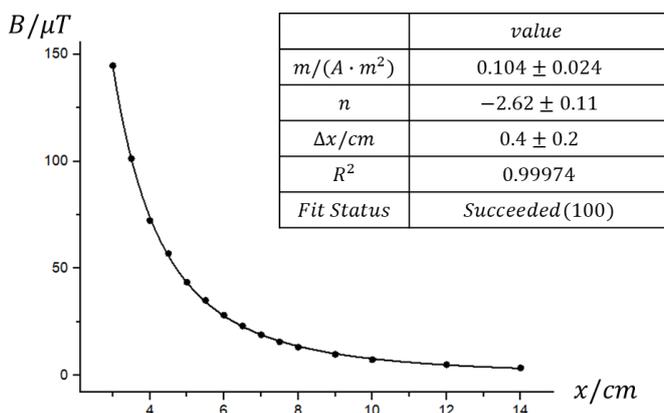


图 (19) 小磁铁轴线上的磁场分布

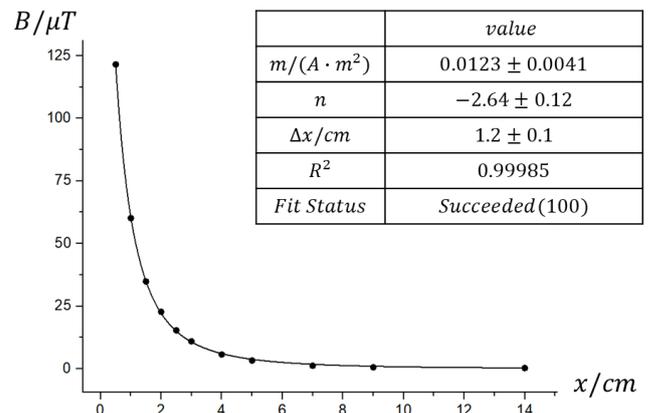
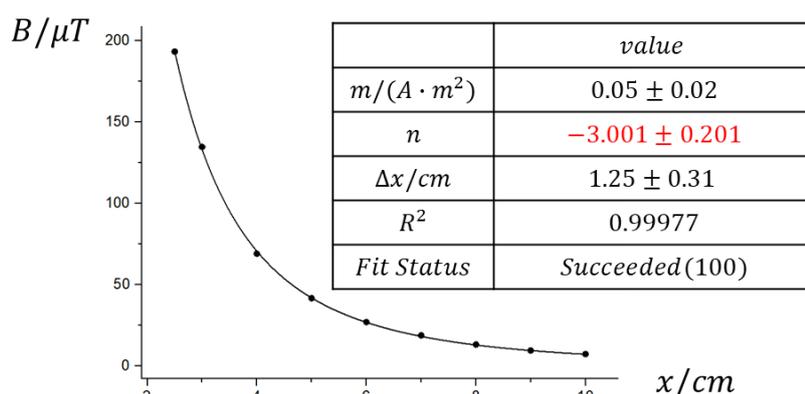


图 (20) 耳机轴线上的磁场分布

结合两个实验, n 的拟合结果约为-2.63;与理论值-3 有一定偏差。推测是手机传感器位置没对准或手机金属原件被磁化导致。因此改进实验步骤 (详细过程见 四、实验过程), 再次测量, 得到图 (21)。改进以后实验模拟得到 $n = -3.001 \pm 0.201$, 相比之前距离理论值-3 接近了很多。但仍存在的误差: z 方向的磁场仍然随距离变化有较小的变化。而

目前来看，比较难以调节手机传感器在 z 方向对准磁铁的轴线。



图(21)小磁铁轴线上的磁场分布

五、实验结论：

本实验测量了通电圆线圈轴线上的磁场分布，基本验证了毕奥萨伐尔定律，线圈中心附近的磁感应强度略有偏差，主要是由于环境磁场分布不均匀和线圈不规则所导致。本实验通过测量亥姆霍兹线圈轴线上的磁场与两线圈分别产生的磁场，验证了磁场叠加原理。本实验也测量了通电圆线圈一侧垂直平面上的磁场分布，定性地描述了不同磁感应分量在线圈周围的分布变化。通过测量扁圆柱体小磁铁和耳机轴线上的磁场分布，验证了扁圆柱体磁铁在轴线上的磁感应强度可以近似为 $B = (\mu_0 m x^n)/(2\pi)$ ，通过拟合得到 $n = -3.001 \pm 0.201$ ，与理论值-3 基本符合。

六、参考文献：

- [1] 全国中学生物理竞赛常委会，全国中学生物理竞赛实验指导书.北京：北京大学出版社. 2006.1(110).
- [2] Arribas, E., et al., *Measurement of the magnetic field of small magnets with a smartphone: a very economical laboratory practice for introductory physics courses*. European Journal of Physics, 2015. **36**(6).

七、附录：

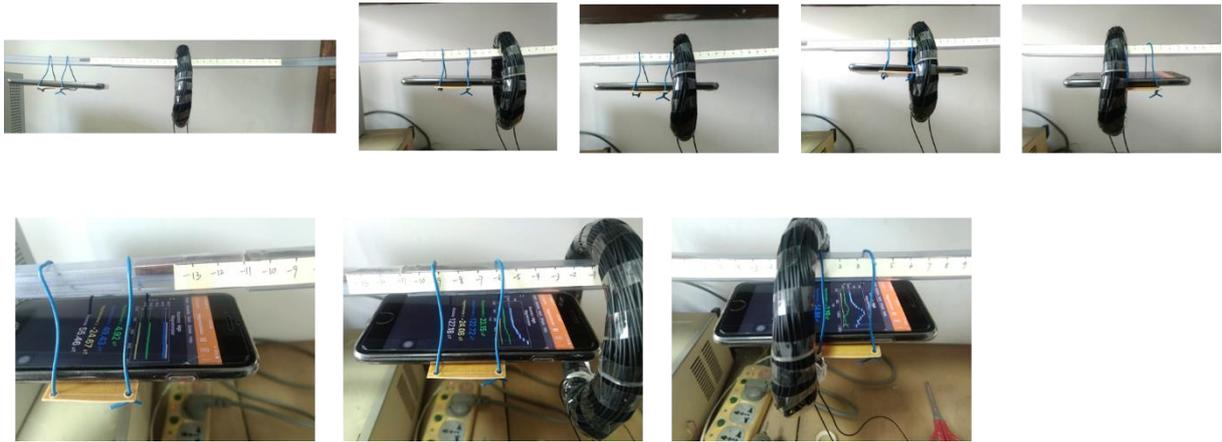
图(i,ii) 用耳机产生的磁场判断手机传感器位置;在手机传感器位置处做标记



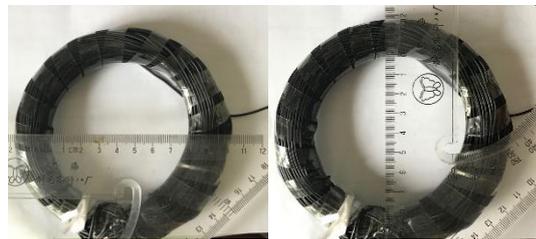
图(iii) 旋转手机，判断手机磁感应器的坐标轴



图(iv) 打开电源，每隔一段距离测量磁场，记录磁感应强度大小



图(v) 圆线圈半径的测量



图(vi) 用手机的磁传感器测量小磁铁与耳机轴线上的磁场分布

