



安培环路定理的实验探究

吴鹏 (06008439)

(东南大学电子科学与工程学院, 南京, 211189)

摘要: 通过霍尔元件探测线圈轴线上磁场分布, 从实验的角度验证了安培环路定理。同时作为一个基础实验拓展案例, 使我们对霍尔元件探测磁场实验以及安培环路定理有更深入的认识。

关键词: 安培环路定理; 通电线圈; 霍尔元件;

EXPERIMENTAL RESEARCH ON AMPERE'S CIRCULATION THEOREM

WuPeng

(Department of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: By using hall element to detect the distribution of the magnetic field in the power coil, the Ampere 's circulation theorem is verified in an experiment way. Meanwhile, as an example of extension to a teaching experiment, which can give us a more detailed understanding of both hall element detecting magnetic field experiment and the Ampere 's circulation theorem.

key words: Ampere 's circulation theorem; power coil; hall element

一. 引言

安培环路定理是电磁学中的一个基本定理, 然而课堂上对该定理一般只停留在理论证明之上^[1], 目前还欠缺相关的教学实验来使我们对其产生更深入直观的理解。而利用霍尔效应测磁场则是大学物理实验课程中一个经典的基础实验^[2], 通过一系列实验探究, 我们发现可以用这个基础的实验巧妙的验证安培环路定理, 从而进一步拓展我们对本实验以及安培环路定理的认识。

作者简介: 吴鹏, 1989年, 男, 本科生, shuaiweapon@sina.com.

二. 原理与方法

安培环路定理是指在稳恒磁场中, 磁感应强度 \mathbf{B} 沿闭合路径的线积分, 等于此闭合路径所围成的电流的代数和 I 与真空磁导率 μ_0 的乘积:^[1]

$$\oint \vec{B}_{\text{稳}} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (1)$$

式(1)中的积分回路原则上可以任意选取, 但在实际计算中我们往往选取积分较为方便的路径。特别的, 在做利用霍尔元件测通电线圈轴线上磁感应强度的实验时, 我们发现轴线上磁感应强度的方向始终平行于轴线, 若沿此轴取回路, 则式(1)中对矢量的环路积分便可以简化为一个无穷区间上的标量定积分, 如式(2):



$$\int_{-\infty}^{\infty} B dx = N \mu_0 I \quad (2)$$

式中 N 为线圈的匝数， I 为线圈中通有的励磁电流。如图1所示，在实验中通过测量轴线上的磁感应强度分布并计算其与位移轴所围的面积，便可得到(2)式中左边的积分值。通过研究该值与实验中所使用的励磁电流的定量关系，便可从实验上验证安培环路定理。

本实验采用 DH4501N 三维亥姆霍兹线圈磁场实验仪进行测量，仪器结构如图 2 所示。以砷化镓霍尔片作为测磁元件，灵敏度 $>140\text{mV/mA T}$ 。线圈等效半径 $R=100\text{mm}$ ，两线圈中心距离 $50\sim 200\text{mm}$ 连续可调，单个线圈匝数 $N=500$ ，电阻约为 14Ω 。

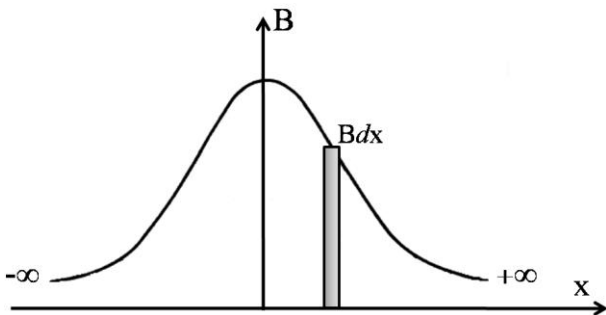


图1 磁感应强度分布与位移轴积分示意图

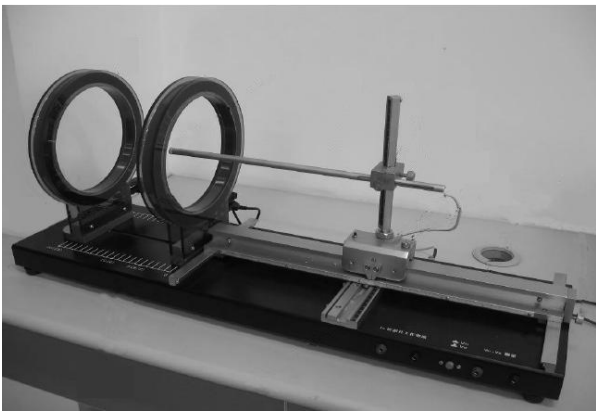


图2 亥姆霍兹线圈磁场实验仪

三. 实验结果与讨论

1 通电单线圈

首先，我们对通电单线圈轴线上的磁场分布进行了测量和分析，得到了在不同励磁电流下的磁场分布拟合曲线，如图 3 所示。从图中可以看到实验测得的轴线上的磁场分布具有很高的对称性，符合理论计算结果^[3]，反应了实验测量的准确性。通过对拟合曲线的数值积分，我们进一步求得了各条曲线和位移轴所围的面积 S ，即 $\int_{-\infty}^{\infty} B dx$ 。面积 S 随励磁电流 I 的变化表现出了很好的线性关系，如图 4 所示。若这一曲线的斜率等于线圈匝数 N 和真空磁导率 μ_0 之积，则可验证式(2)成立。

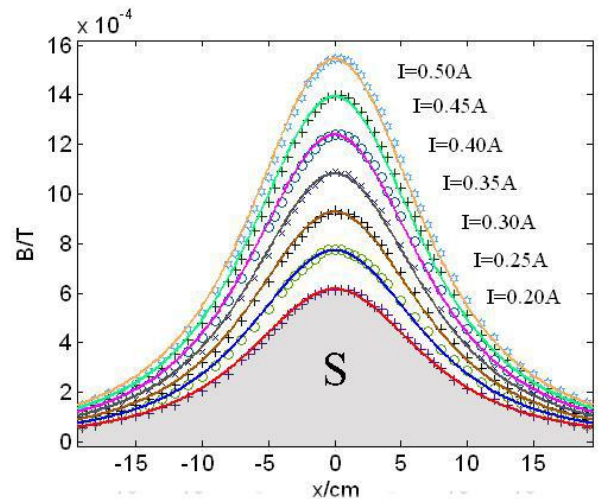


图3 单线圈轴线上的磁场分布

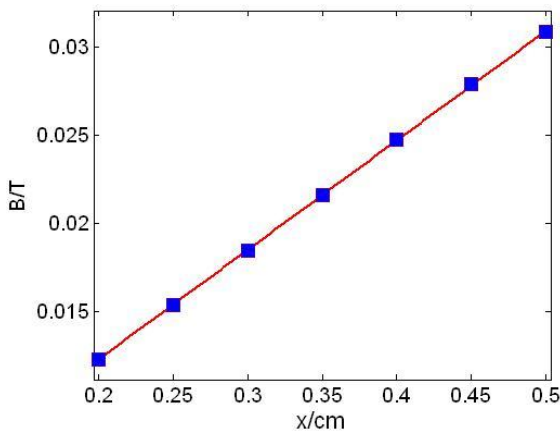


图4 单线圈轴线磁场的 S-I 曲线

通过最小二乘法,可得到 S-I 的线性拟合曲线为 $S=0.0622 \times I - 0.0001$ 。式中直线截距 -0.0001 近似为 0,符合无励磁电流时,磁感应强度为 0 的物理事实。将斜率除以单线圈匝数($N=500$),得到数值为 1.24×10^{-6} (SI 制),这与国际标准推荐的 μ_0 值, $4\pi \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$ 的误差 $<1.0\%$,满足式(2)所表示的安培环路定理。

2 通电双线圈

在单线圈的基础上,我们进一步研究了通电双线圈轴线上的磁场分布情况。首先测量了相距 $d=R$ 的亥姆霍兹线圈组在不同励磁电流下的轴线磁场分布,如图5所示。从图中可以看到各条曲线具有类似的形状,只是峰值会随励磁电流的增加而提高,且每条曲线中心 $-4 \sim +4\text{cm}$ 范围内出现了匀强磁场区域,符合之前文献的理论计算结果^{[4][5]}。类似于单线圈,我们通过最小二乘拟合得到了磁感应强度分布曲线所围面积 S 与励磁电流 I 的关系曲线,如图6所示。S-I 的线性拟合曲线为 $S=0.1252 \times I - 0.0002$,斜率除以双线圈匝数($2N=1000$),得到数

值为 1.25×10^{-6} (SI 制),与国际标准推荐 μ_0 值相比的误差 $<0.5\%$,同样满足式(2)所表示的安培环路定理。

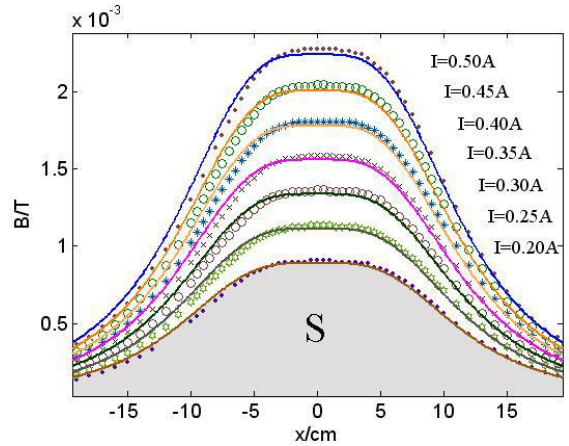


图5 亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布

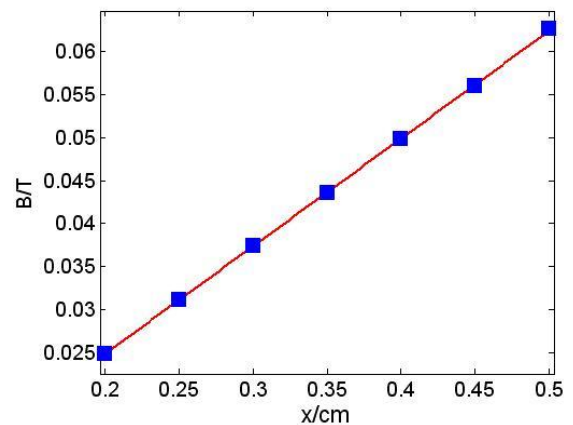


图6 亥姆霍兹线圈轴线磁场的 S-I 曲线

接着,我们又研究了励磁电流一定而两线圈距离 d 不同的情况。根据安培环路定理,只要励磁电流不变,不管两线圈距离如何变化,式(2)左边的积分 S 都应恒定。通过测量 $d=0.5R$, R , $1.5R$, 和 $2R$ 时线圈轴线上的磁场分布(如图 7),我们得到了相应的 S 分别为 $0.0622, 0.0629, 0.0619$ 和 $0.0620 \text{T} \cdot \text{cm}$,这些基本一致的 S 值也符合安培环路定理的结论。最后我们考虑了两线圈通有等值反向励磁电流的情况,其轴线上的磁场分布如图 8 所示。从图中可以看到,正负相抵的 S 值



对应了回路所包围电流的代数和为 0 的情况，再次从实验结论上体现了安培环路定理。

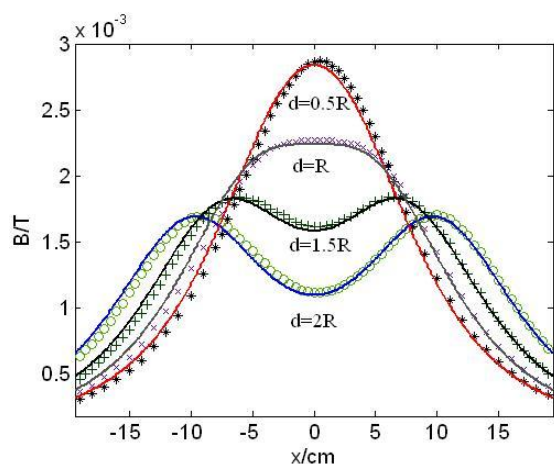


图7 不同线圈间距的轴线磁场分布

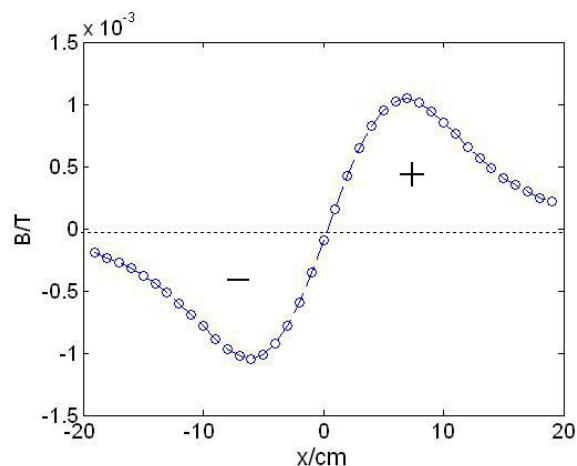


图8 通有反向电流的线圈轴线上的磁场分布

四. 结论

在利用霍尔效应测线圈磁场实验的基础上，

通过研究单线圈和双线圈在不同励磁电流以及不同间距时轴线磁场的分布曲线，从实验上验证了安培环路定理。虽然本文只在线圈轴线这一特殊积分路径上进行了相关的验证工作，但是作为基础实验和大学物理课堂内容相结合的拓展性案例，该内容加强了我们对利用霍尔效应测线圈磁场实验以及安培环路定理的深层次理解，很好的培养了我们理论结合实际的研究性学习能力。

参考文献:

- [1] 马文蔚等. 物理学(第五版). 北京: 高等教育出版社, 2006
- [2] 钱锋, 潘人培. 大学物理实验(修订版). 北京: 高等教育出版社, 2005
- [3] 孟祥国, 李丽华, 史强. 圆形载流导线的磁场. 物理与工程, 2004, 14(4): 16~17
- [4] 朱业俊, 陶小平, 孙腊珍. 亥姆霍兹线圈磁场的探究. 物理与工程, 2004, 30(3): 42~46
- [5] 曾晓英. 亥姆霍兹线圈磁场的均匀性分析及误差估算. 物理实验, 2000, 20(5): 38~39