

直流圆形线圈径向磁感应强度研究*

左志航 陈凯文 黄俊伟 蒙高庆

[华北电力大学(保定)数理系 河北保定 071003]

(收稿日期:2022-06-20)

摘要:基于毕奥-萨伐尔定律,分别考虑及不考虑直流通电圆形线圈的径向宽度和纵向厚度,推导出两种情况下该线圈沿径向方向的磁感应强度分布公式,然后,利用 Matlab 软件对获得的分布公式进行数值积分,得到理论上的磁感应强度分布数据.为了考察理论值的正确性,通过设计自制圆形线圈,进行实际测量.结果表明,考虑径向宽度和纵向厚度的影响时,磁感应强度实际测量值与理论值的相对误差较小.通过理论计算与实验研究相结合考察直流通电圆形线圈沿径向方向的磁感应强度分布,既能消除电磁感应法测交变磁场实验中磁场分布的系统误差,还可加强学生对电磁理论的理解与认识,提高电磁学课程的教学效果.

关键词:直流圆形线圈;磁场;数值积分;椭圆函数

载流圆形线圈是大学物理电磁学学习中重要的模型之一,也是在电工电路中的基本元件^[1-3].研究清楚载流线圈磁场的分布,对于本科生加深毕奥-萨伐尔定律的理解,掌握载流线圈磁场分布的模型起到了至关重要的作用^[4-6].现在大部分研究载流线圈磁场分布的工作多是利用仿真软件 Ansys、Comsol 等进行数值仿真^[1-2],或者通过级数计算出线圈在全空间的解析解,但大多数都没有进行实验的验证,模型的准确性无法得知,所以本实验旨在通过理论与实验相结合的方式找到载流线圈在径向磁场的分布模型^[7-8].

在电磁学和电动力学教材上,对载流线圈磁场分布公式基本的理论推导中,编者仅考虑单匝且在二维平面的线圈产生的磁场^[9-10].在实验教学过程中,如电磁感应法测交变磁场实验,仅将线圈匝数乘以电流,进而从理论上推算出多匝线圈产生的磁场分布作为实验的理论值^[11].当对测量结果进行误差分析时,就会发现问题:实验结果仅在载流线圈几何圆心处与理论值符合较好;而越往线圈靠近,理论值与实验值相差越大.即便实验者排除

偶然误差,提高高斯计的精度,以及保证高斯计探头与磁感应线方向垂直的情况下,此情况依旧存在.

针对此问题,我们分别考虑及不考虑直流通电圆形线圈的径向宽度 w 和纵向厚度 h (图 1),分别推导出两种情况下该线圈沿径向方向的磁感应强度分布公式,并利用计算软件将其可视化.然后,设计自制圆形线圈,进行实际测量.

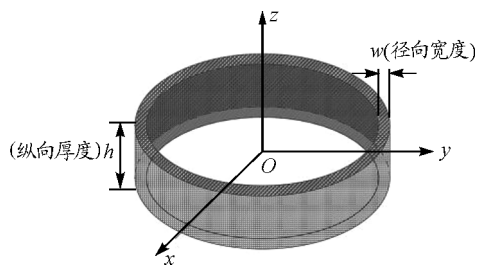


图 1 直流通电圆形线圈

结果表明,考虑径向宽度和纵向厚度的影响时,磁感应强度实际测量值与理论值基本吻合.因此,可以确定电磁感应法测交变磁场实验中磁场分布误差是系统误差,该误差与载流线圈的空间分布有关.

* 河北省自然科学基金资助项目,项目编号:A2021502004;中央高校基本科研业务费,项目编号:2021MS071;河北省高等教育教学改革研究项目,项目编号:2021GJJG416,2019GJJG414.

作者简介:左志航(2001-),男,在读本科生.

通讯作者:蒙高庆(1979-),男,博士,讲师,主要从事电磁学、电动力学教学及其在电力系统中的应用研究.

由此,得出以下结论:载流线圈磁场分布与其径向宽度和纵向厚度有关,必须要将其考虑进去才能消除系统误差.

考虑因载流线圈的空间分布,导致多匝载流线圈磁场的空间分布关系式的修正,也就是灵活运用毕奥-萨伐尔定律,把常见表达式

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 n}{4\pi} \int \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (1)$$

式(1)中匝数 n 乘以电流 I 的表达式,替换成电流密度的体积分,则

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{r}}{r^3} dV \quad (2)$$

式(1)适用于线圈匝数较少时,线圈的径向宽度和纵向厚度对磁场分布影响较小;式(2)适用于多匝线圈,此时线圈的径向宽度和纵向厚度对磁场分布造成较大的影响.

因此,考虑因载流线圈的空间分布,对于多匝载流线圈磁场的空间分布关系式的修正,对于电磁感应法测交变磁场实验这一大学物理实验项目的改进以及有效规避系统误差起到了重要作用.同时,也加强学生对于电流密度和毕奥-萨伐尔定律的理解与运用.利用计算机软件,将修正前后的关系式绘制图像,让学生直观体会在载流线圈径向方向上磁感应强度的分布,构建出磁场分布的物理图像.由此,不但能消除电磁感应法测交变磁场实验中磁场分布的系统误差,解答学生实验时出现的困惑,还可加强学生对电磁理论的理解与认识,提高电磁学课程的教学效果.

1 磁感应强度的计算

根据毕奥-萨伐尔定律,电流密度为 \mathbf{J} 的载流体在真空中某个地方产生的磁感应强度 \mathbf{B} 其公式表示为^[9-10]

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{r}}{r^3} dV \quad (3)$$

其中 \mathbf{r} 为源点到场点的径矢,这为我们计算通电导线周围的磁场提供了理论依据.

为了考察因载流线圈的空间分布,导致多匝载流线圈磁场的空间分布关系式的修正,我们采

用两种计算方法来计算径向磁感应强度:式(1)不考虑线圈的空间分布,仅将其当作通电线圈然后乘以匝数求出磁感应强度;式(3)考虑线圈本身的空间结构,用空间积分的方法给出其积分表达式.

方法一:如图2所示,一个半径为 R 的线圈通有大小为 I 的电流,研究其径向上距中心为 b 处的磁感应强度大小.

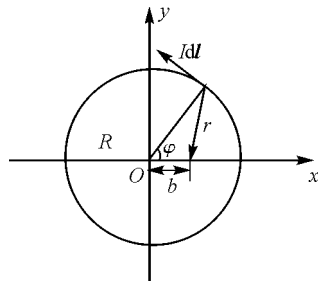


图2 载流圆环模型

由式(3)可知解决该问题首先要将 $d\mathbf{l}$ 、 \mathbf{r} 和 $|\mathbf{r}|$ 在直角坐标系中表示出来,不难得出在直角坐标系中以上量的表示形式

$$d\mathbf{l} = R d\varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (4)$$

$$\mathbf{r} = -R \mathbf{e}_\rho + b \mathbf{e}_x \quad (5)$$

$$|\mathbf{r}| = \sqrt{R^2 + b^2 - 2Rb \cos \varphi} \quad (6)$$

对于式(4),根据极坐标与直角坐标系的转换关系

$$\mathbf{e}_x = \cos \varphi \mathbf{e}_\rho - \sin \varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (7)$$

代入式(5)得到

$$\mathbf{r} = -R \mathbf{e}_\rho + b \cos \varphi \mathbf{e}_\rho - b \sin \varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (8)$$

将式(4)、(6)、(8)代入式(3)并化简,得出磁感应强度 \mathbf{B} 的表达式

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(R^2 - Rb \cos \varphi) I}{(R^2 + b^2 - 2Rb \cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} d\varphi \mathbf{e}_z \quad (9)$$

根据式(9),磁感应强度大小 B 可用椭圆积分函数表示

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi(R^2 - b^2)} \left\{ (R - b) E \left[\frac{-4Rb}{(R - b)^2} \right] + (R + b) K \left[\frac{-4Rb}{(R - b)^2} \right] \right\} \quad (10)$$

其中 $K(\lambda)$ 为第一类完全椭圆积分函数

$$K(\lambda) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \lambda \sin^2 \theta}} d\theta \quad (11)$$

$E(\lambda)$ 为第二类完全椭圆积分函数

$$E(\lambda) = \int_0^1 \sqrt{1 - \lambda \sin^2 \theta} d\theta \quad (12)$$

其中 λ 表示各类椭圆积分的积分参数.

从式(10)可看出,在不考虑圆形线圈径向宽度 w 和纵向厚度 h 时,径向方向的磁感应强度大小 B 仅与线圈半径 R 、径向距离 b 、线圈电流 I 相关.

方法二:如图3所示,内外半径分别为 R_1 和 R_2 ,高度为 h 的环形圆柱体通有电流密度为 \mathbf{J} 的电流,研究其中心位置径向上距中心为 b 的磁感应强度大小.

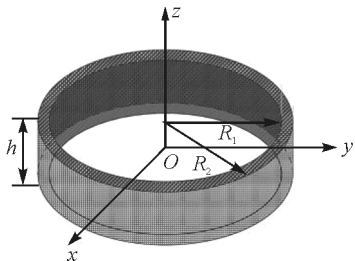


图3 载流环形圆柱模型

以环形圆柱的中心为原点建立柱坐标系,在柱坐标系中

$$\mathbf{J} = J \mathbf{e}_\varphi \quad (13)$$

$$\mathbf{r} = -\rho \mathbf{e}_\rho + b \mathbf{e}_x - z \mathbf{e}_z \quad (14)$$

$$dV = \rho d\rho d\varphi dz \quad (15)$$

对于式(12)根据柱坐标系与直角坐标系的转换关系

$$\mathbf{e}_x = \cos \varphi \mathbf{e}_\rho - \sin \varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (16)$$

可以得到

$$\mathbf{r} = (-\rho + b \cos \varphi) \mathbf{e}_\rho - b \sin \varphi \mathbf{e}_\varphi - z \mathbf{e}_z \quad (17)$$

所以 r 可以表示为

$$r = [(-\rho + b \cos \varphi)^2 + (b \sin \varphi)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

将式(13)、(15)、(17)、(18)代入式(3)并化简得

$$\mathbf{B} =$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{J(-\rho + b \cos \varphi) \rho d\rho d\varphi dz \mathbf{e}_z}{[(-\rho + b \cos \varphi)^2 + (b \sin \varphi)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (19)$$

从式(19)可以看出,在考虑圆形线圈的径向宽度 w (即线圈内外半径差值) 和纵向厚度 h 的影响

时,沿径向方向的磁感应强度大小 B 与线圈内外半径 R_1 、 R_2 、纵向厚度 h 、径向距离 b 、电流密度大小 J 相关.具体计算时,线圈内外半径 R_1 、 R_2 、纵向厚度 h 决定了积分的上下限.

对两种模型采用 Matlab 软件进行数值积分模拟,比较两种模型理论值与实验值的符合程度.

2 实验设计与数据测量

用有机玻璃板制成内径 30 cm、高度 1.2 cm 的空心线盘,将 0.8 mm 内径的导线均匀、紧密地缠绕于凹槽内,一共缠绕 200 匝并预留接线柱接线头.通以直流电流后,以此来近似代替电流密度均匀的环形圆柱体.使用 2 级精度 VICTORVC862 数显高斯计进行测量,并且为提高测量准确度,在通过圆柱中心位置再固定上一根以圆环中心为原点,1 cm 为步长带均匀刻度的标尺,为高斯计测量磁场提供一个较为精确的位置.



图4 实验装置实物图

导线内电流如果过大,将会导致导线的烧毁;电流过小,则会导致中心位置处磁场变化不明显,给结果测量带来困难.经过查阅导线相关信息,铜导线的安全载流量为 $5 \sim 8 \text{ A/mm}^2$,内径 0.8 mm 的铜线最大工作电流在 $2.5 \sim 4 \text{ A}$ 之间,在保证磁场变化足够明显并且不会烧毁铜线的情况下,我们最终选定了 1 A、1.25 A 和 1.5 A 共 3 组电流进行 x 、 y 、 z 3 个方向磁场测量.测量时,将高斯计的探头分别垂直 x 、 y 、 z 方向放置在预先安装的刻度标尺上测量磁场.经测量得 x 、 y 方向磁场近乎为零,可以忽略. z 方向磁感应强度大小 B 的测量结果如表 1 ~ 表 3 所示.

表1 通有1 A 电流的环形圆柱体磁感应强度大小 B 测量结果

距离 /m	-0.14	-0.13	-0.12	-0.11	-0.10	-0.09	-0.08	-0.07	-0.06	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0
B /mT	2.33	1.70	1.41	1.20	1.08	0.99	0.92	0.86	0.82	0.80	0.78	0.76	0.75	0.74	0.73
距离 /m	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	
B /mT	0.75	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.91	0.95	1.01	1.10	1.22	1.43	1.78	2.58	

表2 通有1.25 A 电流的环形圆柱体磁感应强度大小 B 测量结果

距离 /m	-0.14	-0.13	-0.12	-0.11	-0.10	-0.09	-0.08	-0.07	-0.06	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0
B /mT	2.92	2.20	1.77	1.53	1.37	1.26	1.17	1.10	1.06	1.01	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92
距离 /m	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	
B /mT	0.93	0.93	0.95	0.97	1.01	1.04	1.09	1.15	1.22	1.37	1.55	1.81	2.20	2.92	

表3 通有1.5 A 电流的环形圆柱体磁感应强度大小 B 测量结果

距离 /m	-0.14	-0.13	-0.12	-0.11	-0.10	-0.09	-0.08	-0.07	-0.06	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0
B /mT	3.54	2.63	2.14	1.87	1.76	1.54	1.43	1.36	1.29	1.23	1.20	1.18	1.15	1.14	1.13
距离 /m	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	
B /mT	1.14	1.16	1.18	1.19	1.24	1.28	1.34	1.41	1.53	1.68	1.86	2.17	2.63	3.74	

3 Matlab 仿真计算

3.1 没有修正情况下(不考虑线圈空间分布)

进行数值仿真时,以“ V_p ”代表真空磁导率 μ_0 , I 为电流大小, R 为圆环半径, b 代表点与圆心距离,磁感应强度大小 B 为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi(R^2 - b^2)} \left\{ (R - b)E\left[\frac{-4Rb}{(R - b)^2}\right] + (R + b)K\left[\frac{-4Rb}{(R - b)^2}\right] \right\} \quad (20)$$

代码如下:

$$V_p = 4 * \pi * 10^{-7};$$

$I = 200$; % 以电流 1A, 匝数 $n = 200$ 为例

$$R = 0.15;$$

$$r = -0.15:0.001:0.15;$$

$$B = 200 * V_p * I * ((R - b) * \text{ellipticE}((-4 * R * b) ./ (R - b).^2) + (R + b) * \text{ellipticK}((-4 * R * b) ./ (R - b).^2)) ./ (2 * \pi * (R.^2 - b.^2));$$

仿真结果如表4所示。

表4 通电圆环磁感应强度仿真结果(未修正)

电流 /A	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0
$B_{b_1=1\text{m}}$ /mT	4.66	2.59	1.89	1.54	1.32	1.18	1.08	1.01	0.96	0.92	0.89	0.86	0.85	0.84	0.84
$B_{b_1=1.25\text{m}}$ /mT	5.83	3.24	2.36	1.92	1.65	1.48	1.35	1.26	1.19	1.14	1.11	1.08	1.06	1.05	1.05
$B_{b_1=1.5\text{m}}$ /mT	7.00	3.89	2.84	2.30	1.98	1.77	1.62	1.52	1.43	1.37	1.33	1.30	1.27	1.26	1.26

3.2 加入修正情况下仿真(考虑线圈空间分布)

进行数值仿真时,以 μ_0 代表真空磁导率,以 I 为电流大小, R_1 、 R_2 为线圈内外径,分别为0.15 m和0.175 m, h 为线圈高度0.012 m, b 为测量点距线圈中心位置, B 为磁感应强度大小

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{I(-b \sin \varphi) \rho d\rho d\varphi dz e_z}{s [(-\rho + b \cos \varphi)^2 + b^2 \sin^2 \varphi + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (21)$$

对电流 1 A、1.25 A 和 1.5 A 进行 3 次数值积分计算,以 1.5 A 为例代码如下:

```
i=200; % 电流为 1A,匝数 n=200 为例
s=0.025*0.012;% 截面积
y0=10.^(-7);
B=linspace(-0.14,0.01,0.14);
n=1;
b0=-0.14:0.01:0.14;
for b=-0.14:0.01:0.14
    f=@(p,y,z)(y0.*p.*i.*(-p+b.*
    cos(y))./(s.*((-p+b.*cos(y)).^2+b.*
```

```
b.*sin(y).^2+z.^2).^3/2));
pmin=0.15;pmax=0.175;
ymin=0;yymax=2*pi;
zmin=-0.006;zmax=0.006;
result=integral3(f,pmin,pmax,ymin,ymax,
zmin,zmax);
B(n)=abs(result);
disp(B(n));
n=n+1;
end
仿真结果如表 5 所示。
```

表 5 通电环形圆柱体磁场仿真结果(修正后)

电流 /A	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14
$B_{b_1=1\text{ m}}/\text{mT}$	0.774	0.777	0.783	0.795	0.812	0.835	0.866	0.906	0.959	1.029	1.124	1.258	1.459	1.795	2.472
$B_{b_1=1.25\text{ m}}/\text{mT}$	0.968	0.971	0.979	0.994	1.015	1.044	1.083	1.133	1.199	1.286	1.405	1.573	1.824	2.243	3.089
$B_{b_1=1.5\text{ m}}/\text{mT}$	1.162	1.165	1.175	1.192	1.218	1.253	1.299	1.359	1.439	1.544	1.686	1.887	2.189	2.692	3.707

因为线圈半径 R 有限,我们使用 Matlab 进行多项式拟合修正后的数据,其中 x 表示沿着径向与线圈中心的距离且 $x < R$,得到沿着径向方向的磁场分布表达式分别如下。

电流为 1 A 时

$$B = 3.58 \times 10^5 x^6 + 28.63 x^5 - 5185 x^4 - 0.5 x^3 + 49.96 x^2 + 0.002x + 0.76 \quad (22)$$

电流为 1.25 A 时

$$B = 4.48 \times 10^5 x^6 - 2.045 x^5 - 6484 x^4 + 0.14 x^3 + 62.49 x^2 - 0.001x + 0.9453 \quad (23)$$

电流为 1.5 A 时

$$B = 5.38 \times 10^5 x^6 + 5.92 x^5 - 7.79 x^4 - 0.226 x^3 + 75.07 x^2 + 0.002x + 1.134 \quad (24)$$

4 数据分析及处理

通过将实际与计算所得数据进行绘图比较,得到如图 5 ~ 图 7 所示曲线。

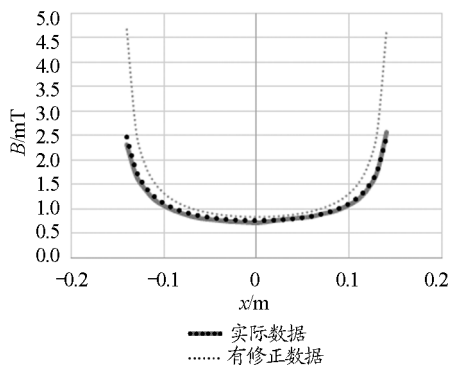


图 5 通 1 A 电流时,有修正数据、无修正数据、实际数据对比图

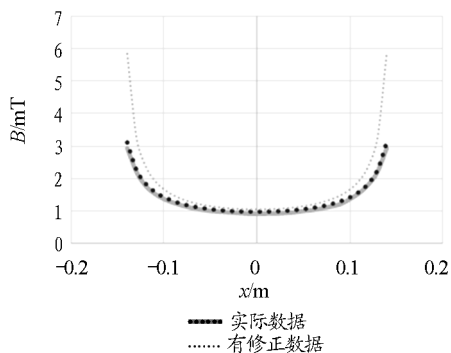


图 6 通 1.25 A 电流时,有修正数据、无修正数据、实际数据对比图

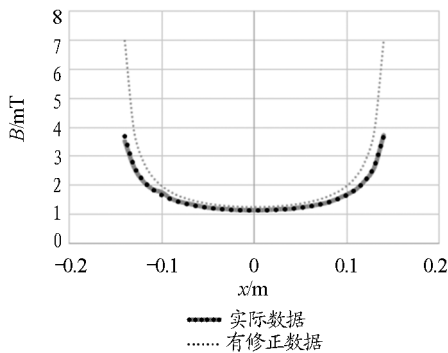


图7 通1.5 A电流时,有修正数据、
无修正数据、实际数据对比图

由相对误差计算公式

$$\Delta = \frac{|B_{\text{实验值}} - B_{\text{理论值}}|}{B_{\text{实验值}}} \times 100\% \quad (25)$$

将每组电流中对应的理论值和实验值代入式(25),即可得到沿径向方向各处的相对误差。经计算得未修正和修正后的相对误差如下:距离为零处为6.02%;0.05 m处为5.95%;0.1 m处为2.18%。此外,从图5~图7中可以发现,在距离中心位置较近处,有无修正条件下的磁场分布较为接近;距离中心位置变远后,有无修正条件下的磁场大小相差较大。

通过对比图5~7可知,线圈产生的磁感应强度在线圈圆心处最小,越靠近线圈边缘,磁感应强度就越大,在线圈径向相同的位置上,电流越大,其磁感应强度也越大。环形圆柱体与通电圆环两种模型产生的径向磁场随着测量位置和电流的变化趋势相同,在中间部分两种模型的理论值都与实验测量值符合较好。但在靠近线圈时,使用通电圆环模型计算得到的磁感应强度大小与实际值有很大的误差,而环形圆柱体模型所得到的理论值曲线向实验值方向收敛,理论值和实验值之间的差值明显减小。

由式(3)可知,电流在空间中产生的磁感应强度与电流分布有关。如果使用通电圆环模型来计算理论值,计算时使用的距离 x 值会比实际值小,在远离线圈时,径向测量点与线圈上任意一点的距离和通电圆环模型中所使用的半径差值可以忽略,即电流的空间分布尺寸对 x 的影响较小,但在靠近线圈时,其影响不可忽略,所以通电圆环模型会产生较大

的误差。考虑线圈的三维空间分布后,使用电流密度代入式(3)进行计算,这样保证理论值与实验值更符合,从而达到修正理论式(1)的目的。

5 结论

本工作使用两种模型分析了载流环形圆柱的磁感应强度与电流的关系,并进行数值仿真得到可视化图形,有助于学生更直观地了解对比结果。将修正前与修正后结果对比,可知修正后的理论值与实验测量结果符合较好。利用载流线圈电流的空间分布对式(1)进行修正,其中应用到电流密度的概念,有助于学生理解毕奥-萨伐尔定律的概念。修正过程中用到的方法,直接利用电流密度的表达式代入式(3)进行积分计算,是毕奥-萨伐尔定律解决实际问题的实例。在实验教学过程中,修正后的公式有效地规避了系统误差,保证了实验的准确性。

本研究还利用数值积分的方法求出理论值,且理论值与实际测量值符合较好,不需要拘泥于直接求出解析表达式,是数值积分解决实际问题的例证。学生通过Matlab求解数值积分,理解数值积分的现实意义,可加深他们对于物理计算相关知识的理解。总之,采用理论计算与实验研究相结合的方法,考察直流通电圆形线圈沿径向方向的磁感应强度分布,既能消除电磁感应法测交变磁场实验中磁场分布的系统误差,还可加强学生对电磁理论的理解与认识,提高电磁学课程的教学效果。

参考文献

- [1] 朱起源,陈学文. 环形电流产生磁场的数理方程求解及COMSOL仿真[J]. 广西物理,2021,42(3):36-40.
- [2] 高昕悦,赵宇鸿,李达. 基于ANSYS的亥姆霍兹线圈磁场分布研究实验[J]. 实验技术与管理,2021,38(5):175-179,186.
- [3] 陈学文,吴莲,张家伟. 载流线圈和有限长直螺线管磁场的理论分析与讨论[J]. 大学物理,2019,38(10):23-27.
- [4] 朱力奥. 匀强磁场产生装置的设计[J]. 大学物理,2014,33(4):49-52.
- [5] 刘虹让,刘景岩,马全喜. 通电圆线圈轴线上磁场分布分析[J]. 物理通报,2012(3):19-20.

- [6] 关志成, 苏华锋, 贾志东. 通电空心线圈系统产生的磁场分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2 735 - 2 740.
- [8] 孙晓洁, 丁昊, 董鹏. 梯度场麦克斯韦线圈磁场及磁场梯度分析[J]. 磁性材料及器件, 2020, 51(2): 16 - 19.
- [8] 梁燕. 任意形状带电平面小线圈的磁场分析[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2001(4): 366 - 367.
- [9] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 8 - 14.
- [10] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 244 - 251.
- [11] 张晓宏, 阎占元. 大学物理实验[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 223 - 229.

Study on Radial Magnetic Induction Intensity of Direct-Current Circular Coil

ZUO Zhihang CHEN Kaiwen HUANG Junwei MENG Gaoqing

(Department of Mathematics, North China Electric Power University (Baoding), Baoding, Hebei 071003)

Abstract: Based on the Biot-Savart law, the distribution formula of the magnetic induction intensity along the radial direction of the coil is deduced with and without considering the spatial distribution of the circular coil of DC current. Then, use Matlab software to numerically integrate the formula to obtain the theoretical magnetic induction intensity distribution data, and design a self-made circular coil to carry out actual measurement to verify the theory. The results show that when the spatial distribution of the coil is considered, the actual measured value of the magnetic induction intensity is more in line with the theoretical value.

Key words: direct-current circular coil; magnetic field; numerical integration; elliptic function

(上接第9页)

Realizing the “Active Classroom” of University Physics by Diversified Teaching Schemes

DU Huijing ZHANG Suhong WANG Xiaoying WANG Mingli ZHAO Yuanyuan

(College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004)

Abstract: University physics is an important public compulsory course for students of science and technology, which can equip students with necessary physical theory and scientific thinking for the further study. Comparing with the traditional teaching mode, teachers' guidance and students' autonomy should be highlighted in the online and offline teaching mode. Through diversified teaching programs, the “Active Classroom” with “experiments + theories”, “homework + outcomes” and “the first classroom + the second classroom” is built, which makes teachers and students active, knowledge alive, minds smart, and “movement continuous” after class. The “Active Classroom” plays a positive role in cultivating students' thinking, stimulating their learning motivation and promoting teaching output, and finally achieves the goal of “lifelong initiative” with the joint cultivation of knowledge, skills, thinking and values.

Key words: active classroom; online and offline teaching mode; diversified teaching programs