

电子成像均匀约束磁场的产生及测试分析*

冯文天^{1,2)†} 马新文¹⁾ 刘惠萍¹⁾ 陈兰芳^{1,2)} 李 斌^{1,2)} 曹士娉^{1,2)}

1) 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2006 年 9 月 18 日收到, 2006 年 11 月 8 日收到修改稿)

为增加离子与原子碰撞成像系统中探测电子的立体角, 设计了一约束电子的复合型亥姆霍兹线圈装置. 对复合型亥姆霍兹线圈的磁场分布进行了理论计算和分析, 并对制作的复合型亥姆赫兹线圈产生的磁场进行了实验测量, 得出磁场的均匀性好于 $\pm 0.6\%$.

关键词: 亥姆霍兹线圈, 磁场分布, 磁场均匀性

PACC: 0150P

1. 引 言

在离子与分子、原子或固体的碰撞实验中, 由于转移电离或自电离等过程会产生大量的电子^[1-3], 采用静电场引出离子和电子并投影到时间和位置灵敏探测器上, 从而获得碰撞中产生的反冲离子和电子的初始动量, 对碰撞动力学过程进行详细分析^[4,5]. 由于电子的质量远小于离子质量, 在对离子和电子施加相同引出电场强度的情况下(实际实验中必须这样), 横向能量大于 1 eV 的电子就会飞出漂移区, 而不能够到达探测器, 因此, 很大程度地减小了测量电子动量的动态范围, 也使得系统的整体探测效率降低. 为了能够把电子投影到探测器, 需要在电场方向上叠加一均匀磁场对电子的运动轨迹进行约束, 使得具有横向动量(动能)的电子被束缚在一定半径的轨道上, 沿螺旋线运动, 最终使多数电子能够到达电子探测器^[6,7]. 实验一般要求能量小于 100 eV 的电子, 在约束磁场的作用下, 探测立体角可以达到 4π ^[8]. 均匀约束磁场一般由“亥姆霍兹线圈”产生^[8,9].

我们的实验要求均匀约束磁场的有效范围较大, 沿轴向 $Z = -350\text{ mm} \sim 350\text{ mm}$ 、横截面积在 $X = -50\text{ mm} \sim 50\text{ mm}$, $Y = -50\text{ mm} \sim 50\text{ mm}$ 的范围内, 磁场精度要好于 $\pm 1\%$. 考虑到实验环境和实际可能

性, 标准的亥姆霍兹线圈无法满足上述要求, 需要针对实际情况进行新的设计. 本文从单个载流圆线圈出发, 讨论了其磁场分布特点, 并与实验结果进行对比分析, 然后对标准的双圈亥姆霍兹线圈的磁场特征进行了理论分析, 并进一步对多圈组合线圈的特征做了讨论, 发现在标准亥姆赫兹线圈两旁加一对小线圈, 能够对磁场进行补偿, 可以满足实验要求, 我们称之为复合型亥姆赫兹线圈. 对整个复合型亥姆霍兹线圈系统在单匝情况下进行了理论模拟, 磁场的变化仅为 0.6%, 对直径 1500 mm, 16 匝的主圈与直径 520 mm, 60 匝的校正圈组成的复合型亥姆霍兹线圈实物进行实验测量, 在轴向 $Z = -350\text{ mm} \sim 350\text{ mm}$, 横向 $X = -50\text{ mm} \sim 50\text{ mm}$, $Y = -50\text{ mm} \sim 50\text{ mm}$ 的范围内, 测量结果与理论模拟有差别, 实验测量值的磁场精度好于 $\pm 0.6\%$.

2. 理论计算

2.1. 单个载流圆线圈轴向磁场分布^[4]

设单个载流圆线圈半径为 R , 通过电流 I , 产生的磁场在轴向成轴对称分布, 轴线上离圆心 O , 坐标 $(0, 0, Z)$ 处的磁场只有轴向分量 B_z ,

$$B_z = \frac{\mu I R^2}{\chi (R^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (1)$$

图 1 虚线表示理论模拟单个载流线圈磁场分布, 点表示实验测量结果, 从图中可以看出, 实验测量曲

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 10434100)资助的课题.

† E-mail: fengwentian@impcas.ac.cn

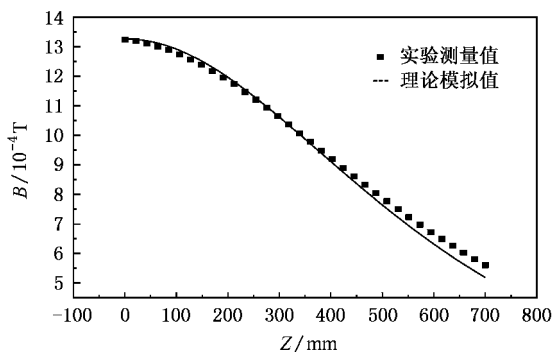


图 1 单个载流线圈理论值与实验值比较

线在远离线圈处的下降趋势与理论计算值的趋势相对比较平缓,主要原因在于线圈实物是由多匝构成,具有一定的空间分布,而理论计算只对理想的单匝线圈进行了模拟,我们认为,由于空间分布的不同导致了实际测量磁场与理想的理论计算磁场分布的差异.

2.2. 复合型亥姆霍兹线圈轴向均匀磁场的计算

在物理实验中,通常由亥姆霍兹线圈产生均匀磁场,它是由两个相同半径、通以相同电流的载流线圈组成,它们之间的距离与它们的半径相等,由单个载流圆线圈的磁场分布特征^[4]可知,亥姆霍兹线圈产生的轴向磁场在零点(两圈轴线的中点)附近非常均匀,越接近两圈,磁场变化越大,针对上述特点,我们对它进行了改进,使亥姆霍兹线圈之间的距离小于它们的半径,我们称为主线圈,在主线圈两边等距离的放置两小载流线圈,对主线圈产生的磁场进行补偿,称为“校正线圈”,整个系统,我们称为复合型亥姆霍兹线圈.在模拟计算复合型亥姆霍兹线圈磁场均匀性时,根据实验条件的要求,我们只须考虑轴向 $Z = -350 \text{ mm} \sim 350 \text{ mm}$ 磁场的变化,因为在轴向 (Z) 距离远大于垂直于轴向 (X, Y 方向) 距离的条件下, X, Y 方向磁场变化远小于 Z 方向磁场变化^[4],若轴向磁场的变化满足实验要求,则 $X = -50 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}, Y = -50 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}$ 范围内磁场的变化理论上一定也满足实验要求.

复合型亥姆霍兹线圈有两组、四个载流圆线圈组成,多个载流圆线圈产生均匀磁场,关键是要确定每个载流圆线圈的 R, I, a , 分别是载流圆线圈的半径、所通的电流以及线圈与中心点的距离.由文献^[6]均匀磁场是指磁场强度大小、方向不随空间变化而变化的磁场如 2.1,若 B_z 沿 OZ 方向是均匀的,则有

$$\left. \frac{\partial B_z}{\partial Z} \right|_{z=z_0} = \left. \frac{\partial^2 B_z}{\partial Z^2} \right|_{z=z_0} = \dots = \left. \frac{\partial^n B_z}{\partial Z^n} \right|_{z=z_0} = 0, \tag{2}$$

其中, Z_0 是 OZ 轴上的任意一点.

在实际情况下 (2) 式所表示的理想均匀轴向磁场是无法满足的,但可以利用载流圆线圈组的不同组合在一定范围内形成近似均匀磁场.以下,我们分几种情况分别进行讨论.

1) 对于单线圈,由 (1) 式,可知在圆心附近可以得到较均匀的磁场.

2) 对于偶数个载流圆线圈组成的线圈组合,若每两个线圈作成同一半径 R_i , 相对中心 O 距离为 a_i , 对称放置通以同一电流 I_i , 如图 2.

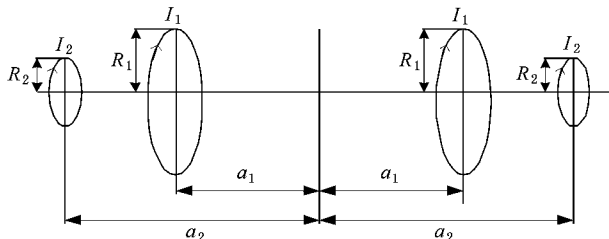


图 2 线圈组合示意图

若线圈个数为 N, N 为偶数, O 点磁场由 $\frac{N}{2}$ 个对称的线圈组产生, $\frac{N}{2}$ 个线圈组在 O 点磁场的奇次导数皆为零, 选取一定的 R_i, a_i, I_i 使其中部分偶次导数为零. $\frac{N}{2}$ 个 I_i 中独立的有 $\frac{N}{2} - 1$, 由 (1) 式可知 $\frac{N}{2}$ 个线圈组的几何结构由不同的 R_i, a_i 决定, 它们的独立函数有 $\frac{N}{2}$ 个, 则 R_i, a_i, I_i 决定的等式有 $\frac{N}{2} + (\frac{N}{2} - 1) = N - 1$ 个, 可以选取一定的 R_i, a_i, I_i 使 $N - 1$ 个磁场偶次导数为零, 不为零的第一个磁场导数是 $2N$ 阶, R_i, a_i, I_i 变量多于 $N - 1$ 个, 求解 R_i, a_i, I_i 还必须施加一定的约束条件.

3) 对于奇数个线圈组成的载流线圈组组合, 可以将其中一个线圈看作 $a = 0$ 的双线圈, 此时电流独立变量为 $\frac{N-1}{2}$ 个, R_i, a_i 的独立函数也有 $\frac{N-1}{2}$, 结论和求解 R_i, a_i 的约束条件同 2). 由以上讨论得出, 载流线圈组合产生均匀磁场的条件是, 对称放置载流线圈组使磁场奇次导数为零, 最低不为零的偶

次阶导数阶数为 $2N$ 阶。

由上述结论, 设复合型亥姆霍兹线圈中主圈参数为 I_1, R_1, a_1 , 校正线圈参数为 I_2, R_2, a_2 , 如图 2,

则由两组线圈构成的均匀磁场中心处磁场最低不为零的偶次导数为八阶、二阶、四阶、和六阶皆为零, 由此可以得到以下方程:

$$\frac{I_1(\cos^7 \alpha_1 - 4\sin^2 \alpha_1 \cos^5 \alpha_1)}{R_1^3} + \frac{I_2(\cos^7 \alpha_2 - 4\sin^2 \alpha_2 \cos^5 \alpha_2)}{R_2^3} = 0, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^2 \frac{I_i(\cos^{11} \alpha_i - 12\sin^2 \alpha_i \cos^9 \alpha_i + 8\sin^4 \alpha_i \cos^7 \alpha_i)}{R_i^5} = 0, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^2 \frac{I_i(-5\cos^{15} \alpha_i + 120\sin^2 \alpha_i \cos^{13} \alpha_i - 240\sin^4 \alpha_i \cos^{11} \alpha_i + 64\sin^6 \alpha_i \cos^9 \alpha_i)}{R_i^7} = 0. \quad (5)$$

在(3)(4)(5)式中 $\cos \alpha = \frac{R}{\sqrt{R^2 + Z^2}}$, 由(3),

(4)(5)式得

$$\begin{aligned} & (1 - 12t^2\alpha + 8t^4\alpha^2) \\ & = (1 - 4t^2\alpha^5 - 120t^2\alpha + 240t^4\alpha - 64t^6\alpha). \end{aligned} \quad (6)$$

如果 α_1, α_2 分别是满足(6)式的两个实数根, 但满足(6)式的实数根有很多组, 为得到合适的 α_1, α_2 值, 还需要对(6)式施加约束条件. 由我们实验所要求的磁场范围和精度, 解(6)式可得

$$\tan \alpha_1 = 0.45, \tan \alpha_2 = 1.677, I_2/I_1 = 0.045. \quad (7)$$

由(7)式可得出: $R_1 = 750 \text{ mm}, a_1 = 338 \text{ mm}, R_2 = 419 \text{ mm}, a_2 = 250 \text{ mm}$. 图 3 是在上述参数下, 复合型亥姆霍兹线圈与亥姆霍兹线圈在单匝情况下轴向(Z 方向) $-350 \text{ mm} \sim 350 \text{ mm}$ 范围内磁场分布的对比. 图中虚线表示亥姆霍兹线圈轴向磁场分布曲线, 实线表示复合型亥姆霍兹线圈轴向磁场分布曲线, 我们看到, 在我们感兴趣的区域内, 复合型亥姆霍兹线圈产生的磁场均匀区域比亥姆霍兹线圈更大, 磁场精度更高.

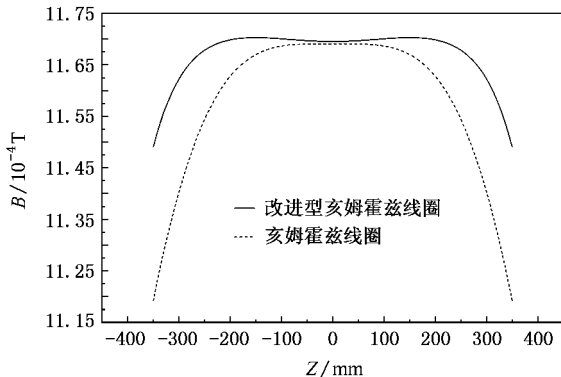


图 3 复合亥姆霍兹线圈与亥姆霍兹线圈轴向磁场对比

3. 复合型亥姆霍兹线圈磁场均匀性测试

根据以上理论模拟的参数, 我们制作了复合型亥姆霍兹线圈实物, 每个主圈平均直径约为 1500 mm , 由铝塑管组成, 能够进行水冷却; 每个校正线圈由直径约为 520 mm 的 60 匝线圈组成, 距离主线圈的距离在 $0 \text{ mm} \sim 700 \text{ mm}$ 之间可调. 我们分别对主线圈、校正线圈和复合型亥姆赫兹线圈产生的磁场进行了测试. 实验测量发现主线圈与校正线圈距离 230 mm 时, 可获得最佳的测量结果.

我们使用 Lake Shore 公司的 421 型高斯计测量磁场强度的, 探头是轴向磁场探头, 可测量范围为 $0 \sim 3 \times 10^{-2} \text{ T}$, 测量精度为 10^{-6} T (加 filter 条件). 给主线圈供电的是 $50 \text{ V}, 200 \text{ A}$ (额定电压 50 V , 额定电流 200 A) 的电流源, 给校正线圈供电的是 $15 \text{ V}, 15 \text{ A}$ 的电流源. 在对复合型亥姆霍兹线圈进行测试时, 测试的空间范围为横向 $X = -50 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}, Y = -50 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}$; 轴向 $Z = -350 \text{ mm} \sim 350 \text{ mm}$. 在 X, Y 方向每隔 10 mm 取一个点, Z 方向每隔 20 mm 取一个点, 共测量了 22 条轴向磁场分布曲线. 图 4 与图 5 是实验测量的部分结果.

图 4 是理论模拟结果与实验实际测量的对比图, 实线表示主圈与校正圈相距 $230 \text{ mm}, X, Y = 0$, 磁场随 Z 轴变化的理论模拟曲线, 虚线表示主圈与校正圈相距 $80 \text{ mm}, X, Y = 0$, 磁场随 Z 轴变化的理论模拟曲线. 由图 4 可以看出, 对于第一种情况, 在轴向 $-200 \text{ mm} \sim 200 \text{ mm}$ 范围内, 理论模拟曲线给出很均匀的磁场; 对于第二种情况, 在轴向 $-250 \text{ mm} \sim 250 \text{ mm}$ 范围内, 理论模拟曲线给出很均匀的磁场; 在此区域外, 磁场下降较快. 图 4 中符号表示实验测

量结果,不同的符号分别代表 $X = -50\text{ mm}$, 0 mm , 50 mm , $Y = -50\text{ mm}$, 0 mm , 50 mm 时,轴向磁场随 Z 轴的变化,符号意义参见图中标示.在上述范围内,实验测量结果的波动显然大于理论预期,但是,在我们感兴趣的整个范围内 (-350 mm — 350 mm),实验测量值的整体波动水平要小于理论值.为了更好地说明这一点,我们分析了各点磁场值相对于整个感兴趣范围平均磁场强度的离散情况.图 5 是对图 4 各条曲线进行离散数据分析所得到的结果.我们对图 4 每条曲线分别取它们各自的平均值,再将每条曲线的每一个值与它们各自的平均值相减后除以各自的平均值,得到各自的相对精度,然后作相对精度随 Z 轴的变化曲线,图 5 中的不同符号代表的曲线与图 4 一一对应.

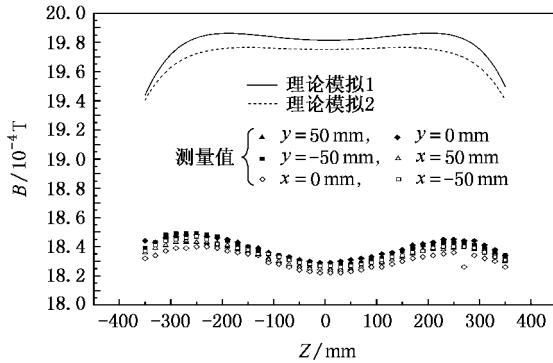


图 4 实验与理论分布曲线对比

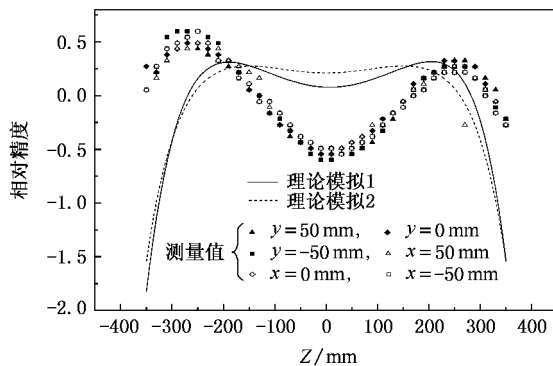


图 5 实验与理论值磁场精度对比

从图 5 可以看出,在整个测试范围内磁场相对

精度在 $\pm 0.6\%$ 以内,而在与 Z 轴平行的各点上,磁场变化的相对精度在 $\pm 0.5\%$ 以内,理论模拟的磁场变化精度在 -1.5% — 0.5% 以内,实验结果明显好于理论模拟值.理论与实验的偏差可能是,理论只是模拟单匝,而实际上,复合型亥姆霍兹线圈有多匝构成,并具有一定的空间结构和几何分布,匝数对主线圈磁场分布影响较大并最终影响了整个线圈组的磁场分布.理论模拟主线圈在单匝情况下,主线圈磁场分布拟合后呈现严格开口朝下的二次曲线,而在实验测量中,主线圈在轴向 -200 mm — 200 mm 范围内,变化几乎为 0,而校正线圈的实际磁场分布二次拟合为近似的开口朝上的二次曲线,与理论单匝模拟近似,导致叠加后实验与理论模拟相差较大.另外,每次磁场测量都有一定的本底磁场存在,变化范围为 10^{-5} — $3 \times 10^{-5}\text{ T}$,在一定程度上影响了磁场的测量精度.

针对实验测量与理论模拟的差异,我们分别对复合亥姆霍兹线圈的主圈与校正线圈分别做了 I - B 刻度曲线,在实验中,可以由刻度曲线获得所需要的均匀磁场.

4. 结 论

为了实现在离子与原子、分子碰撞实验中出射电子的大立体角收集和探测,我们设计了产生均匀磁场的复合型亥姆赫兹线圈,用均匀磁场对电子的轨迹进行约束.本文讨论了复合型亥姆赫兹线圈产生均匀磁场的特征,根据理论设计制作了线圈,并对它产生的磁场进行了实验测量,实验发现,在横向 $X = -50\text{ mm}$ — 50 mm , $Y = -50\text{ mm}$ — 50 mm , 轴向 $Z = -350\text{ mm}$ — 350 mm 范围内,磁场的相对均匀度好于 $\pm 0.6\%$.我们可以根据实验测量所得到的 I - B 刻度曲线,在给复合亥姆霍兹线圈提供电流的电流源允许的情况下,得到任意强度的均匀磁场,能够满足离子与原子分子碰撞中电子成像实验的要求.

对马力桢、何源、郭艺珍老师在磁场模拟、磁场测量及校准方面给予的帮助表示衷心地感谢.

[1] Wang Y Y, Zhao Y T, Xiao G Q et al 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 673 (in Chinese) [王喻玉、赵永涛、肖国青等 2006 物理学报 **55** 673]

[2] Cao Z R, Cai X H, Yu D Y et al 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 2943 (in Chinese) [曹柱荣、蔡晓红、于得洋等 2004 物理学报 **53** 2943]

- [3] Wang J G , Liu C L , Janev R K *et al* 2006 *Chinese Physics* **15** 2651
- [4] Ma X W , Zhu X L , Liu H P *et al* 2004 *Journal of Atomic and Molecular Physics* (supplement) **21** 197 [马新文、朱小龙、刘惠萍等 2004 原子分子物理学报 (增刊) **21** 197]
- [5] Ullrich J , Moshhammer R , Dorn A *et al* 2003 *Rep. Prog. Phys.* **66** 1463
- [6] Moshhammer , Unverzagt M , Schmitt W *et al* 1996 *Nucl. Instrum. Methods B* **108** 425
- [7] Moshhammer , Ullrich J , Unverzagt M *et al* 1996a *Nucl. Instrum. Methods B* **107** 62
- [8] Zhao K H , Chen X M 1981 *Dian Ci Xue* (Beijing : People 's Education Press) p286 (in Chinese) [赵凯华、陈熙谋 1981 电磁学 (北京 : 人民教育出版社) 286]
- [9] Mo K W 1995 *Journal of Changsha Communications Institute* **11** 3 (in Chinese) [莫克威 1995 长沙交通学院学报 **11** 3]

Test and analysis of uniform magnetic fields for imaging of electrons produced in ion-atom collisions ^{*}

Feng Wen-Tian^{1,2†} Ma Xin-Wen¹⁾ Liu Hui-Ping¹⁾ Chen Lan-Fang^{1,2)} Li Bin^{1,2)} Cao Shi-Ping^{1,2)}

1 *Institute of Modern Physics , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China*)

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China*)

(Received 18 September 2006 ; revised manuscript received 8 November 2006)

Abstract

In order to expand the solid angle for imaging of electrons in ion-atom collisions , we designed a complex Helmholtz coils composed of four single coils. Theoretical simulations were carried out to optimize the arrangement of the coils. The complex is constructed according to the theoretical analysis , and the magnetic fields were measured for interested regions. The measured results show that the relative uniformity of the magnetic fields is $\pm 0.6\%$, which satisfies the requirements of collision experiments.

Keywords : complex Helmholtz coils , magnetic field distribution , uniformity of magnetic field

PACC : 0150P

^{*} Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No. 10434100).

[†] E-mail : fengwentian@impcas.ac.cn