

# 二轴磁体的设计计算方法研究

陈浩,林春生,贾文抖

(海军工程大学 兵器工程学院,湖北 武汉 430033)

**摘要** 为进一步提高磁体模拟舰船磁场的相似度,提出了一种二轴磁体的模拟方案。该两轴磁体是一种同铁芯、二绕组、同轴线、又正交的磁体新方案。对铁芯的形状、螺线管绕组和马鞍形绕组的形式进行了设计,通过计算确定了铁芯的材料、尺寸参数、绕组的通电电流及绕组的匝数。结果表明:该两轴磁体的设计方案保证了两轴磁体的体积和重量没有超标,且性能指标均达到或超过了预期目标,该设计方案可为新结构磁体的设计计算提供参考依据。

**关键词** 二轴磁体;设计计算;方法研究

中图分类号 TJ61+7:P318.6+2 文献标识码 A

## Research on Design and Calculation Method of Biaxial Magnet

CHEN Hao, LIN Chunsheng, JIA Wendou

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract** In order to further improve the similarity of the magnetic field of the simulated ship, a biaxial magnet simulation scheme is proposed. This biaxial magnet is a new magnetic scheme with the same iron core, two windings, coaxial line and orthogonality. The shape of the iron core, the forms of the solenoid winding and the saddle-shaped winding are designed, and the material of the iron core, the size parameters, the current flowing through the winding and the number of turns are determined by calculation. It is showed in the results that the design scheme of the biaxial magnet ensures that the volume and weight of the biaxial magnet do not exceed standard, and the performance indexes meet or exceed the expected goals. The design scheme can provide a reference for the design and calculation of the new structure magnet.

**Key words** biaxial magnet; design calculation; research method

## 0 引言

在水下磁场测控与反测控的对抗中,历来磁场反测控的常用方法是在水下模拟舰船磁场以诱导水下磁场测控系统的触发工作。随着技术的发展,水下磁场测控分析系统越来越先进,对于单轴磁体模拟产生的磁场,测控系统用分轴磁场独立分析的方法就可分辨出其是否为真正的舰船磁场。这就给水下模拟舰船磁场的反测控系统提出了更高的要求。

通过大量的分析研究和论证,仿真分析与试验验证均表明二轴磁体是目前水下模拟舰船磁场的最佳方案<sup>[1]</sup>。按现有设计条件要求,二轴磁体的体积和重量必须严格控制在指定的指标要求以内。通过设计计算和实验研究,确定了采用同铁芯、二绕组、同轴线、又正交的特殊绕制方法进行两轴磁体的设计,并进行了可行性研究。

## 1 两轴磁体的设计

两轴磁体的原理结构图如图1所示。把同一圆筒形铁芯做成中间段壁薄,两端壁厚;再把螺线管绕组绕在中间段壁槽内,设计壁槽内空间正好绕满螺线管绕组所要求的线圈匝数;然后在两端壁厚段按图1所示位置绕制马鞍形绕组。这样螺线管绕组产生纵向磁场,而马鞍形绕组产生垂直磁场,只要马鞍形绕组绕制时定位准确,那么二者所产生的磁场正好正交,保证了二轴相互垂直磁场的产生。绕线中的电流走向如图中 $I_z$ 所示。

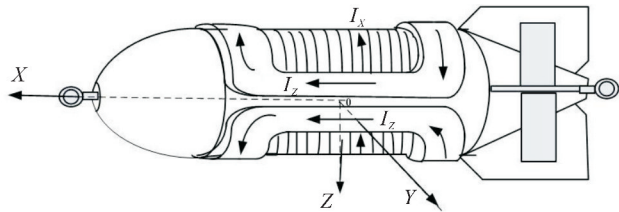


图1 磁体原理结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle structure of magnet

本方案设计需要对以下3个方面进行设计计算:一是铁芯的形式设计、材料选取和磁矩的计算;二是螺线管绕组的设计与计算;三是马鞍形绕组的设计与计算。

## 2 铁芯的设计计算

根据原单轴磁体论证指标要求,两轴磁体总磁矩应该等于大于 $M_z$ 。

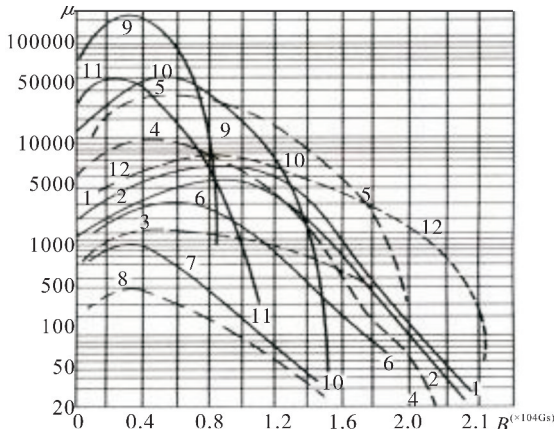


图2 部分材料的磁导率与磁感应强度的关系曲线

Fig. 2 Relation curve of permeability and magnetic flux density of partial materials

### 2.1 铁芯材料选择

为了尽量减小体积和重量,应优先选用磁导率高而矫顽力又小的磁性材料做铁芯。图2是部分材料的导磁率与磁感应强度 $B$ 的关系曲线图。图中曲线标号对应的材质如表1所示。通过对比分析,综合考虑后选取冷轧电工钢做本方案铁芯的材料,其最大磁导率可达38 000<sup>[2]</sup>。

表1 图2中标号对应的材质

Table 1 Corresponding material to labels in Fig. 2

标号	1	2	3	4	5	6
材质	低碳钢	10号钢	20号钢	低碳电工钢	冷轧电工钢	可锻铸铁
标号	7	8	9	10	11	12
材质	灰口铸铁(a)	灰口铸铁(b)	坡莫合金(1J79)	坡莫合金(1J50)	坡莫合金(1J54)	钴钢

下面利用5-冷轧电工钢的磁导率与磁感应强度的关系曲线来估算铁芯的磁化强度 $M$ 和磁化率 $X$ 。为了充分发挥铁芯的电磁效率,一般电磁铁芯的工作点都是选在最大磁导率附近。本设计考虑两轴不同类型的线圈共用一个铁芯,为留有一定余量,选取工作点 $B = 1.3 \text{ T}$ ,则铁芯的磁化强度 $M_5$ 及磁化率 $X$ 分别为

$$M_5 \approx \frac{B}{\mu_0} \quad (1)$$

$$X = \mu_r - 1 \approx \mu_r \quad (2)$$

### 2.2 铁芯尺寸的初步估算

#### 2.2.1 圆筒形铁芯磁矩计算公式的确定

设圆筒形铁芯外径为 $2R$ ,内径为 $2r$ ,长为 $L$ ,则其体积 $V$ 和磁矩 $M$ 分别为

$$V = SL = \pi(R^2 - r^2)L \quad (3)$$

$$M = M_5 V \quad (4)$$

#### 2.2.2 圆筒形铁芯长细比计算公式的确定

按理论假设条件要求,圆筒形铁芯的长细比 $\lambda$ 等于铁芯的长度 $L$ 与横向尺寸 $2R_2$ 之比,这里的横向尺寸是电磁铁芯最大横截面积的圆的直径 $2R_2$ 。

因为

$$\pi R_2^2 = \pi R^2 - \pi r^2 \quad (5)$$

则

$$\lambda = \frac{L}{2R_2} = \frac{L}{2\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (6)$$

2.2.3 铁芯的磁矩估算

铁芯的外形为中部凹槽的圆筒形,圆筒中间段的厚度为两头的一半,则两头厚的圆筒长度之和等于中间段长度,铁芯圆筒的总体半径为它们的平均半径。设圆筒形铁芯平均外径  $2R'$ , 内径  $2r'$ , 长  $L'$ , 代入上式计算得磁体铁芯磁矩为

$$M = M_5 \pi (R^2 - r^2) L \quad (7)$$

总磁矩应是铁芯磁矩和线圈磁矩的总和,只是线圈磁矩较小,主要是铁芯磁矩,这里设计铁芯磁矩为  $M_z$ , 计算结果表明总磁矩大于设定数值,完全满足设计要求。

2.2.4 铁芯的长细比计算

铁芯的长细比

$$\lambda = \frac{L}{2R_2} = \frac{L}{2\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (8)$$

2.2.5 磁化场强度的确定

因为在长细比计算公式中已经考虑了圆筒形结构的因素,所以在圆筒形去磁系数计算公式中,可以用等效圆柱体去磁系数近似计算公式替代,其误差将在允许范围之内。其去磁系数近似计算公式有

$$N = \frac{1}{\lambda^2} [\ln(1.2\lambda) - 1] \quad (9)$$

则物理磁化率

$$X_b = \frac{1}{N + \frac{1}{X}} \quad (10)$$

因此,铁芯所需磁化强度为

$$H = \frac{M}{X_b} \quad (11)$$

按设计计算分析可知,两端部磁场会逐渐减小,为保障工作区段磁场分布的均匀度,采用端部增加绕组匝数或增加端部铁芯厚度的方法。铁芯用一定厚度的冷轧电工钢的薄板叠成,并通过 2 个压环和 8 根符合要求的螺栓固紧。每个片层之间涂有绝缘粘合剂,使整个铁芯固化为一个整体。铁芯结构如图 3 所示<sup>[3]</sup>。

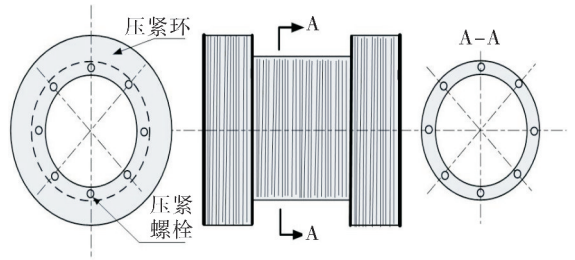


图 3 铁芯结构图

Fig. 3 Structure diagram of iron core

为了保证铁芯凹槽内正好绕下螺线管线圈所要求的匝数,必须按线径大小经过严格的设计计算。在绕组间隙内填充密度符合要求的聚胺脂材料,可提供一定浮力。用同一铁芯被 2 个正交磁场所磁化,其二绕组的设计计算方法按下述方法进行。

3 螺线管绕组的设计计算

首先分析螺线管绕组所产生的磁场与之对应的尺寸关系图如图 4 所示<sup>[4]</sup>。

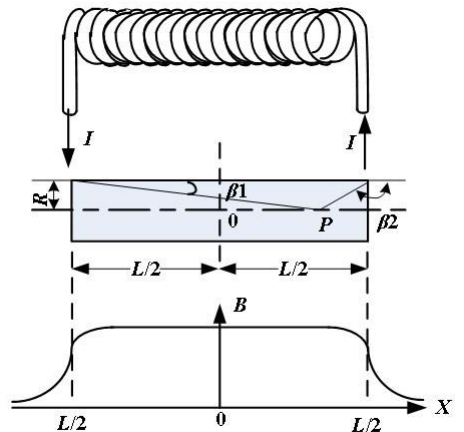


图 4 有限长螺线管磁场与尺寸关系图

Fig. 4 Relational graph between magnetic field and size of limited solenoid

按有限长通电螺线管轴上的磁场计算公式有:

$$H_p = \frac{\eta I}{2} (\cos\beta_1 - \cos\beta_2) \quad (12)$$

式中:  $H_p$  是线圈轴线上某点  $P$  处的磁场;  $n$  是线圈单位长度上的匝数;  $I$  是线圈的通电电流; 夹角  $\beta_1$  和  $\beta_2$  与线圈的尺寸关系如图 4 所示。

如线圈长度为  $L$ , 平均半径为  $R$ , 则中点处磁场为

$$H_0 = \frac{\eta I}{2} (\cos\beta_1 - \cos\beta_2) \quad (13)$$

根据图3的三角函数关系有

$$\cos\beta_1 - \cos\beta_2 = \cos\beta_1 - \cos(180^\circ - \beta_1) =$$

$$\cos\beta_1 - \cos 180^\circ \cos\beta_1 - \sin 180^\circ \sin\beta_1 = 2 \cos\beta_1$$

将上述三角函数关系代入则有

$$H_0 = nI \cos\beta_1 = \frac{nI \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + (\frac{L}{2})^2}} \quad (14)$$

$$\text{又因为 } n = \frac{W}{L}, \text{ 所以 } H_0 \approx 0.91978 \frac{IW}{L}.$$

因为  $H = CH_0 = 0.91978C \frac{IW}{L}$ , 其中  $C$  为系数,

可选值 0.7~0.8, 这里选 0.7, 可以根据以上计算推算出线圈匝数  $N_0$ 。

#### 4 马鞍形绕组的设计计算

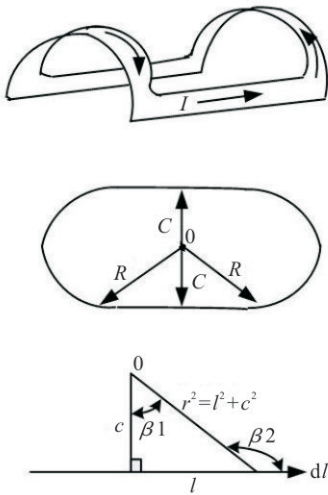


图5 单匝马鞍形线圈磁场与尺寸等效关系图

Fig. 5 Equivalent relation diagram of magnetic field and size of single-turn saddle-shaped coil

马鞍形线圈分上下二层,每层的几何形状和安匝数等参数都是一样的,只是因为两绕组合围环抱铁芯,其弯曲方向相反,但这不影响其产生磁场特征分析。按一层绕组中的一匝线圈,其所产生的磁场与之对应的尺寸关系等效图如图5所示。

把一匝马鞍形线圈可看成是两对边相距为  $2C$  的平行直线,另外两对边是以  $O$  为中心,以  $R$  为半

径的两段圆弧,只是圆弧段部分与直线段部分旋转了  $90^\circ$ 。在求  $H_0$  时,分别计算直线部分和圆弧部分,然后将二者按矢量和相加便是一匝线圈的模量值。

先按图5一匝马鞍形线圈磁场与尺寸等效关系图,对单匝线圈通过函数积分运算求  $H_0$ ,然后再求二层整绕组的安匝数。单匝线圈通过函数积分运算如下。根据“分子电流”模型建立的观点,有直线上  $dl$  段电流在  $O$  点处产生的磁感应强度的大小为

$$dB_1 = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \sin\beta_2 \quad (15)$$

以  $\beta_1$  为积分变数,因  $r = \sqrt{l^2 + c^2} = c \sec\beta_1$ , 又  $l = c \tan\beta_1$ , 所以  $dl = c \sec^2\beta_1 d\beta_1$ , 又因为

$$\sin\beta_2 = \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta_1\right) = \cos\beta_1$$

将上述关系式代入式(15)得

$$dB_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(c \sec^2\beta_1 d\beta_1) \cos\beta_1}{(c \sec\beta_1)^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi c} \cos\beta_1 d\beta_1 \quad (16)$$

故两直线段电流在  $O$  点处产生的磁感应强度的大小为

$$B_1 = 2 \frac{\mu_0 I}{4\pi C} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos\beta_1 d\beta_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi C} (\sin\beta_2 - \sin\beta_1) = \frac{\mu_0 I}{2\pi C} \left[ \frac{\sqrt{R^2 - C^2}}{R} - \left( -\frac{\sqrt{R^2 - C^2}}{R} \right) \right] \quad (17)$$

所以  $B_1 = \frac{\mu_0 I \sqrt{R^2 - C^2}}{\pi C R}$ , 根据近距离作用的场观点以及磁现象的本质是电流的观点,电流元所产生磁场的规律也遵循毕-萨-拉定律,但在 MKSA 有理化制中,磁感应强度  $B$  的单位是特拉斯(T),  $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 10^4$  高斯。在考虑介质影响的情况下有  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ , 而这里  $\mu_r = 10^4$ , 所以统一单位高斯制下有

$$H_1 = \frac{I \sqrt{R^2 - C^2}}{\pi C R} \quad (18)$$

同样,对每层单匝线圈两圆弧段通过函数积分运算如下

$$B_2 = 2 \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{R\varphi} \frac{dl}{R^2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} R\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} 2 \arcsin \frac{C}{R} \quad (19)$$

所以得两圆弧段电流在 0 点处产生的磁感应强度的大小为

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{\pi R} \arcsin \frac{C}{R}$$

同样通过上述单位制关系的换算,即可得:

$$H_2 = \frac{I}{\pi R} \arcsin \frac{C}{R} \quad (20)$$

因为每层单匝马鞍形线圈在 0 点处磁场应为

$$H'_0 = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} = \frac{I}{\pi R} \sqrt{\frac{R^2 - C^2}{C^2} + \left( \arcsin \frac{C}{R} \right)^2} \quad (21)$$

所以整个两层马鞍形线圈在 0 点处磁场应为

$$H_0 = \frac{IW}{\pi R} \sqrt{\frac{R^2 - C^2}{C^2} + \left( \arcsin \frac{C}{R} \right)^2} \quad (22)$$

因为  $H = C_0 H_0 = 0.86405 C_0 IW$ , 其中  $C_0$  为调节系数, 这与上下 2 个绕组之间的间隙大小有关, 可选值在 0.5~0.6 之间, 这里选 0.5, 根据  $H$  要求可得马鞍形绕组总安匝数。

如选通电电流为  $I$  时, 则马鞍形绕组总安匝数为  $N_2$  匝, 为保证磁体磁场的对称性和叠加效果, 上下 2 个线圈绕组必须绕制方向一致, 且串联连接, 设计每个线圈匝数为  $N_1$  匝<sup>[5-8]</sup>。

## 5 结束语

采用同铁芯、二绕组、同轴线、又正交的新方案

设计了两轴磁体用来模拟舰船磁场, 相比于以往的单轴磁体, 两轴磁体提高了模拟舰船磁场的相似度。计算确定了铁芯的材料、尺寸参数、绕组的通电电流及绕组的匝数。该两轴磁体的设计方案既保证了两轴磁体的体积和重量没有超标, 又使得磁体性能指标均达到或超过了预期目标。

## 参考文献

- [1] 温正雄. 电极型磁扫雷具几种方案比较[J]. 海军工程学院学报, 1986(1): 60-70.
- [2] 田民波. 磁性材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [3] 吴宗泽. 机械设计师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 张景鑫, 许亚峰, 刘民非. 磁场空间技术概论[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [5] 陈国华, 吴葆仁. 海水电导[M]. 北京: 海洋出版社, 1981.
- [6] 焦其祥. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 王以真. 实用磁路设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [8] 田民波. 磁性材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.