

矩形阵列霍尔电流传感器设计及平行导线磁场干扰分析

沈 兵, 张 超, 陈 亮, 许进宝

(海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033)

摘要: 针对某型号直流断路器入口铜排的大电流测试需求, 构建了矩形阵列霍尔电流传感器(RA-HCT)的基本模型; 从机理角度剖析外部磁场对传感器测量准确度的影响, 并构建外部平行导线对霍尔电流传感器的影响模型, 得出测量误差计算方法, 设计实现额定电流 10 kA 的 12 点阵 RA-HCT。通过设计对比试验, 得出 x 轴方向理论误差与实际误差最大为 10% 左右, y 轴方向理论误差与实际误差最大为 2% 左右, 小于设计误差 3%, 满足装备的测试需求, 并验证了算法的正确性, 为提高传感器的测量准确度提供了理论依据。

关键词: 霍尔传感器; 电流测量; 平行导线磁场; 测量误差

中图分类号: TM561 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)08-0057-05

Design of Rectangle Array Hall Current Transducer and Analysis of Parallel Wire Magnetic Interference

SHEN Bing, ZHANG Chao, CHEN Liang, XU Jinbao

(Department of Electrical Engineering of Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming to meet the high current test requirements of a certain type of DC circuit breaker entrance copper, the basic model of RA-HCT was built. Meanwhile, from the perspective of mechanism, the influence of external magnetic field on the measurement accuracy of the sensor was analyzed. Then, the influence model of external parallel wires on the RA-HCT was built, the measurement error calculation method was achieved. In addition, 12 dot matrix RA-HCT was designed and implemented. Furthermore, compared to standard experiment, the maximum difference of theoretical error and actual error of x-axis was about 10%, and the maximum difference of y-axis was about 2%, which meet the requirements of equipment, verified the correctness of the algorithm and provided a theoretical basis of improving the measurement accuracy of the sensor.

Key words: hall sensor; current measurement; parallel wire magnetic; measurement error

0 引言

随着舰船电力推进方式和高能武器的出现, 舰船电力系统容量将以几何曲线上升, 直流断路器所需分断的短路电流随之提高, 各种状态下直流大电流测控成为电力系统安全可靠运行的基本保证^[1-5]。

目前常用的直流大电流检测方法主要有分流器、霍尔电流传感器^[6-10]。然而, 分流器用于舰船直流大电流检测与控制时, 存在体积大、功耗高、缺少电气隔离等问题, 与舰船有限空间、节约能量等要求存

在矛盾。传统霍尔电流传感器以铁磁材料作为导磁体, 将霍尔元件放置在导磁体的气隙, 然而存在磁滞损耗, 测量大范围变化的电流时, 线性度差等问题; 加入补偿电路后, 体积大、功耗大等问题又会凸显。因此必须研制新的大电流传感器, 满足舰船断路器对电流测控的要求^[11]。

文中设计的矩形阵列霍尔电流传感器不采用气隙铁心聚磁, 利用多个磁敏感元件直接测量被测电流在空气中产生的磁感应强度, 动态范围和测量准确度仅取决于磁敏感元件霍尔片的性能, 具有体积小、测量范围大、功耗小、响应快、一、二次回路隔离

收稿日期: 2014-05-28; 修回日期: 2014-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(51207166)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51207166)。

等优点^[12-15],能够满足断路器对电流测控的要求。

1 RA-HCT 模型

1.1 模型假设

为了达到精确测量直流电流并尽量节约空间的目的,RA-HCT 需要根据特定的铜排尺寸进行定制设计。其基本假设为:

1) 载流铜排截面均匀,被测电流可视为无限长电流;

2) 单个霍尔器件可视为点磁场检测单元,霍尔器件磁敏感区域所在位置的磁感应强度均匀;

3) 霍尔器件为理想的单轴线性器件,且霍尔系数一致;

4) 霍尔器件的半导体薄膜所在平面与载流铜排的表面垂直。

矩形阵列霍尔电流传感器模型见图 1,将多个线性霍尔器件按一定间距分布构成矩形,即 RA-HCT 的模型。

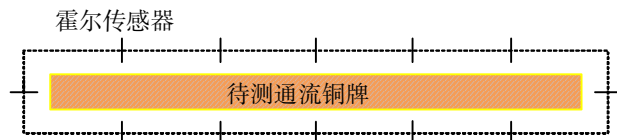


图 1 矩形阵列霍尔电流传感器模型

Fig. 1 RA-HCT model

1.2 模型原理

对于霍尔线性元件^[16-19],霍尔电压为

$$E_H = R_H I_C B = K \frac{\mu_0 I_p}{2\pi R} \quad (1)$$

式(1)中: R_H 为霍尔常数; I_C 为传感器驱动电流; B 为传感器的垂向磁通密度; μ_0 为真空磁导率; I_p 为待测电流; R 为被测点到载流导线中心的距离;常数 $K = R_H I_C$ 。

为了减少外界磁场对传感器的影响,提高测量精度,取 n 个霍尔传感器组成测试方阵,总霍尔电势为

$$E_s = \sum_{i=1}^n E_i = K \sum_{i=1}^n B_i = \bar{K} I_p \quad (2)$$

式(2)中, $\bar{K}$ 为矩形阵列霍尔电流传感器的输出霍尔电势与被测电流 I_p 之间的比例系数。

1.3 比例系数

考虑到 RA-HCT 各器件分布特点,通过各霍尔器件的磁通密度不同,各传感器的输出电势不相等,因此分析铜排的磁场分布十分重要。

由于铜排体积较大,电流均匀通过,在横截面上各点的电流密度相等,因此可以将铜排看作是由截面是矩形的铜丝微元组合在一起,在分析铜排的磁场时可以对每个分量做投影,然后再将这些投影后的分量相加,就可以得到铜排在某个霍尔器件上产

生的磁场。

以铜排的中心为原点,建立图 2 的坐标系,设第 i 个器件坐标为 (a_i, b_i) ,第 p 个器件分别布置在垂直边上,则可得铜排在第 i 个器件处的磁密。

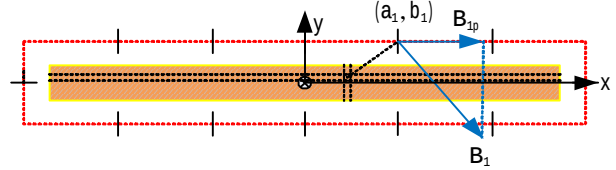


图 2 通流铜排磁力线分布图

Fig. 2 Magnetic-curve scattergram of copper conductor x 轴方向上(即水平边)的霍尔器件感应的磁密为

$$B_{ip} = \iint_S \frac{(b_i - y) \mu_0 I_p dx dy}{[(a_i - x)^2 + (b_i - y)^2] 2\pi S} \quad (i=1, 2, \dots, N; i \neq p, q) \quad (3)$$

y 轴方向上(即垂直边)的两个霍尔器件感应的磁密为

$$B_{jp} = \iint_S \frac{(a_i - x) \mu_0 I_p dx dy}{[(a_i - x)^2 + (b_i - y)^2] 2\pi S} \quad (j=p, q) \quad (4)$$

结合式(1)可得

$$\bar{K} = K(B_{ip} + B_{jp}) \quad (5)$$

由式(5)可得, $\bar{K}$ 与霍尔器件的霍尔系数、分布、个数以及铜排的尺寸有关。

通过示波器测得霍尔电压后根据式(2)即可得到待测电流。

2 平行导线磁场干扰模型

由于 RA-HCT 没有气隙铁心聚磁,外部磁场很容易进入传感器的霍尔元件,从而对测量准确度造成影响,从机理上解析分析磁场干扰特别重要^[20]。

平行导线磁场对传感器测量准确度影响模型见图 3,以 200 mm×20 mm 铜排电流的测试需求为对象,根据干扰电流在不同位置对传感器的影响不同,分别考虑干扰电流在 x 轴方向和 y 轴方向上。被测电流为 I_p ,干扰电流为 I_d ,两电流方向相同,在图 3 中均为垂直流进纸面。

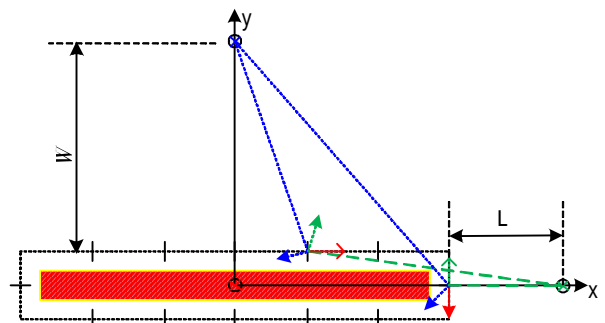


图 3 平行导线磁场对传感器测量准确度影响模型

Fig. 3 Accuracy model of transducer in parallel conductor magnetic fields

平行干扰导线磁场引起的绝对磁场测量误差为霍尔器件感应到的平行干扰导线电流产生的磁通密度之和, 因此定义测量误差为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^N B_d}{\sum_{i=1}^N B_p} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中: B_d 为霍尔器件感应到的干扰磁密; B_p 为霍尔器件感应到的待测电流磁密。

2.1 干扰电流在 x 轴上时的分析

图 3 中被测电流产生的磁场方向为正方向, 则干扰电流磁场在被测电流磁场方向的投影只有最接近干扰电流导体的霍尔器件是负的, 且负值较大, 其他的均为正, 考虑到尺寸要求和干扰影响, 矩形宽度方向只布置一个霍尔器件。

假设在 x 轴方向上布置 N 个霍尔器件, 可以得到霍尔器件感应到的干扰电流产生的磁场总和为

$$\sum B_d = \frac{\mu_0 I_p \times 10^3}{2\pi(234+L)} - \frac{\mu_0 I_p \times 10^3}{2\pi L} + 2 \sum_{k=1}^N \frac{27\mu_0 I_p \times 10^3}{2\pi[27^2 + (\frac{234K}{N+1} + L)^2]} \quad (7)$$

若额定电流 $I_p=10$ kA, 干扰源距离 $L=117$ mm (霍尔阵列长度的 1/2), 考虑到霍尔器件数量的限制, 可分别得到对应的 $\sum B_{dx}$ 值, 见表 1。

表 1 $\sum B_{dx}$ 与器件个数的关系

Tab. 1 Relationship between $\sum B_{dx}$ and N						
N	1	2	3	4	5	6
$\sum B_{dx}/Gs$	-94.4	-71.7	-51.7	-24.0	-2.0	7.4

考虑到尺寸要求, 霍尔器件数量不宜过多。由表 1 中数据可知, 要使霍尔器件感应到的干扰电流磁场最小, 应在阵列矩形的长度边上均匀地布置 5 个霍尔器件, 此时理论干扰误差最小。额定电流为 10 kA 时, 所有霍尔器件感应到的磁密总和为 $\sum B_{dp}=2899.22$ Gs, 可得干扰误差为 $e=6.9 \times 10^{-4}$ 。

2.2 干扰电流在 y 轴上的分析

考虑到干扰源, 可能在铜排的左侧, 也可能在铜排的右侧, 所以阵列矩形边上的霍尔器件布置应保持一致, 由 x 轴方向的抗干性能分析得到 5 个霍尔器件时, 在 x 轴方向上的抗干性能最好, 现在分析长度方向 5 个霍尔器件时在 y 轴方向上的抗干扰能力。

假设额定电流 $I_p=10$ kA, 干扰源距离 $W=117$ mm (霍尔阵列长度的 1/2), 各霍尔器件感应到的干扰磁密见表 2。

将各器件感应的磁密相加得到 $\sum B_{dy}=-46.4$ Gs。额

表 2 各霍尔器件感应到的干扰磁密

Tab. 2 Interfering magnetic flux density induced by Hall elements						
N	1	2	3	4	5	6
B_d/Gs	-171.0	-154.0	118.0	8.0	96.8	11.0
N	7	8	9	10	11	12
B_d/Gs	117.0	111.0	6.8	8.0	-118.0	-154.0

定电流为 10 kA 时, 此时干扰误差为 $e=6.9 \times 10^{-2}$ 。

2.3 考虑干扰后的 RA-HCT 设计

针对尺寸为 200 mm×20 mm 铜排的直流测量需求, 选用磁感应范围为 ± 670 Gs 的 Honeywell-SS495A。考虑到耐受电压以及安装的方便性并尽量减小传感器体积的原则, 霍尔阵列分布在 234 mm×54 mm 的矩形上, 即矩形阵列离铜排边缘均为 17 mm。其中, 10 mm 用于耐热环氧板 (工作温度约 100 ℃, 耐压要求 >10 kV/mm) 以提高绝缘, 从而耐受 27 kV 的电压; 2 mm 留予铜排过孔, 方便将 RA-HCT 套在铜排上安装; 5 mm 为霍尔集成电路的中点到环形 PCB 内边缘的距离。该传感器额定电流值为 10 kA, 最大可测量约 30 kA 的电流, 实物见图 4。



图 4 矩形阵列霍尔电流传感器实物图

Fig. 4 Physical map of RA-HCT

3 RA-HCT 抗干扰性能实验

3.1 实验设计

试验电路见图 5, 采用电容作为试验电源, 充电至 1 200 V (获得峰值电流约为 10 kA 的电流), 控制 F_1 导通使 C 放电, 根据外部平行干扰通导线 (将被测电流导线弯转作为干扰电流, 所以 $I_p=I_d$) 处于 x 轴方向, 和 y 轴方向分别设计实验。取分流器为标准电流, 传感器为自制的 12 器件 RA-HCT。

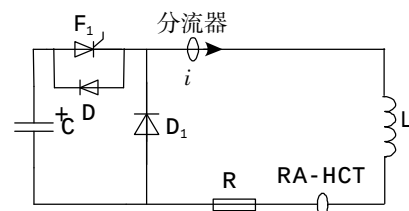


图 5 试验电路

Fig. 5 Experiment circuit

3.2 x 轴上的抗干扰试验

x 轴方向上, 考虑到在额定工况下, 矩形阵列宽度方向上的霍尔器件感应到的磁密为 250 Gs, 霍尔

器件的量程为 670 Gs,考虑到霍尔器件饱和特性干扰电流与阵列矩形上离干扰电流导线最近的霍尔器件的距离 L 不能小于 50 mm,分别进行 $L=50$ 、80、117 mm (矩形阵列的长度)3 种情况下的抗干扰实验,实验波形见图 6。

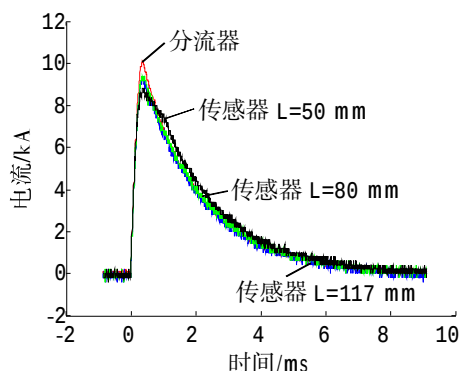


图 6 x 轴抗干扰波形图

Fig. 6 Anti-interference oscillogram of x axis

可求得 $L=50$ 、80、117 mm 时的实验测量误差,见表 3,x 轴方向理论误差与实际误差最大为 10%左右,且随着干扰源距离增大误差差距变小。

表 3 实验结果

Tab. 3 Experiment results

间距	$L=50$ mm	$L=80$ mm	$L=117$ mm
理论误差/%	2.000	0.380	0.069
实验误差/%	12.700	7.800	1.580

3.3 y 轴上的抗干扰试验

y 轴抗干扰波形图见图 7,实验结果见表 4。可求得 $W=50$ 、80、117 mm 时的测量误差,y 轴方向理论误差与实际误差最大为 2%左右。

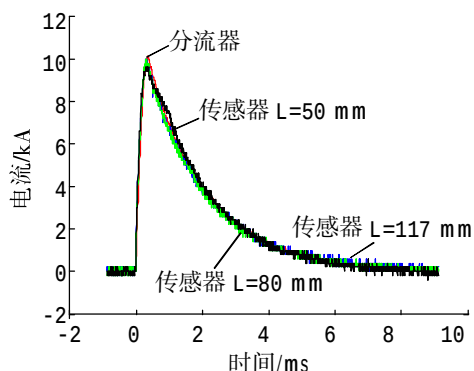


图 7 y 轴抗干扰波形图

Fig. 7 Anti-interference oscillogram of y axis

表 4 实验结果

Tab. 4 Experiment results

间距	$L=50$ mm	$L=80$ mm	$L=117$ mm
理论误差/%	4.00	2.64	1.60
实验误差/%	5.88	3.93	1.97

4 结语

笔者分析了 RA-HCT 的基本原理,重点计算了比例系数,进而构建了 RA-HCT 模型;考虑实际工作环境和设计特点,外部磁场很容易影响 RA-HCT 的准确度,文中从机理上解析分析磁场影响,据此构建外部平行导线对霍尔电流传感器的影响模型,解析得出测量误差计算方法;根据某型号直流断路器的具体要求,以最小误差为目的,设计实现 12 点阵 RA-HCT。

通过设计对比试验,以分流器测量值为基准,得出 x 轴方向理论误差与实际误差最大为 10%左右,y 轴方向理论误差与实际误差最大为 2%左右,能够较好满足装备需求,并为 RA-HCT 的安装、使用提供了指导。

参考文献:

- [1] 马伟明.舰船动力发展的方向-综合电力系统[J]. 海军工程大学学报,2002,14(6):1-5.
MA Weiming.Integrated power systems-trend of ship power development [J]. Journal of Naval University of Engineering,2002,14(6):1-5.
- [2] 陈虹.基于直流配电系统的船舶综合电力系统[J]. 舰船科学技术,2005,27(S):31-37.
CHEN Hong. DC-ZEDS based shipboard integrated power system[J]. Ship Science and Technology,2005,27(S):31-37.
- [3] DOERRY H, FIREMAN H.Designing all electric ships [C]//Proceedings of the Ninth International Marine Design Conference.[S.l.]:IEEE,2006:475-498.
- [4] 庄劲武.舰艇直流电网故障电流限制技术研究[D]. 武汉:海军工程大学,2005.
ZHUANG Jinwu.Research on fault current-limiting technology for vessel DC power system[D]. Wuhan:Naval University of Engineering,2005.
- [5] 刘路辉,庄劲武,江壮贤,等.混合型中压直流真空断路器的研制[J]. 高压电器,2014,50(5):18-23.
LIU Luhui,ZHUANG Jinwu,JIANG Zhuangxian,et al.Study of hybrid medium voltage DC vacuum breaker[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(5):18-23.
- [6] SCHWAB A.Low-resistance shunts for impulse currents [J]. Eltekink,1971,90(5):2251.
- [7] JOHN H P.Shunt and inductors for surge-current measurements[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1947(39):191-200.
- [8] KRAMAR W.Development of the DC instrument transformer for the precision measurement of highest direct current[J]. IEEE Trans. on Communication & Electronics, 1964(71):382-390.

- [9] THOMAS J. High-impulse current and voltage measurement techniques[M]. Germany: Springer, 1970.
- [10] 鲁光辉. 霍尔电流传感器的性能及应用[J]. 四川文理学院学报(自然科学), 2007, 17(2): 40-42.
LU Guanghui. The hall electric current sensor performance and its application[J]. Sichuan University of Arts and Science Journal(Natural Science Edition), 2007, 17(2): 40-42.
- [11] 许进宝. 大额定电流高过载倍数的直流电流传感器的设计[D]. 武汉: 海军工程大学, 2012.
XU Jinbao. Design on DC current transducer of heavy rated current and high overload multiple[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2012.
- [12] 李 前. 新型直流电流传感器原理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
LI Qian. Study of the principle of a novel sensor for DC measurement application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004.
- [13] 陈 庆. 基于霍尔效应和空芯线圈的电流检测技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
CHEN Qing. New current measuring technology based on hall effect and Rogowski coil[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- [14] 陈 庆, 李红斌, 黄本雄. 点阵式霍尔电流传感器的模型及实现[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 9-11.
CHEN Qing, LI Hongbin, HUANG Benxiong. The hall electric current sensor model and its realisation [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(3): 9-11.
- [15] 王晓蔚. 直流大电流传感器屏蔽问题的分析与研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
WANG Xiaowei. Study on magnetic shielding effectiveness of heavy direct current sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007.
- [16] SCHOTT C. Modern integrated silicon hall sensors [J]. Sensor Review, 1998, 18(4): 252-257.
- [17] BLANCHARD H. Compensation of the temperature dependent offset drift of a hall sensor [J]. Sensors and Actuators, 1997(60): 10-13.
- [18] 白韶红. 集成霍尔传感器的发展[J]. 自动化仪表, 2003 (3): 1-9.
BAI Shaohong. Development of integrated hall transducer [J]. Process Automation Instrumentation, 2003(3): 1-9.
- [19] RIPKA P, KEJIK P, KASPAR P, et al. Precise DC current sensors[C]//Proceedings of IEEE Instrument and Measures Technique Conference. [S.l.]: IEEE, 1996: 1479-1483.
- [20] BAZZOCCHI R, RIENZO L D. Interference rejection algorithm for current measurement using magnetic sensor arrays [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2000(85): 38-41.
- 沈 兵(1961—), 男, 教授, 从事舰船电力系统继电保护方面的研究。

(上接第 56 页)

- ZHANG Yongbin, YUAN Haiwen. A control device for synchronized switch based on DSP and vacuum circuit-breakers with magnetic drive[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 116-119.
- [18] 李天辉, 方春恩. 同步真空断路器高精度位置控制研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 37-40.
LI Tianhui, FANG Chun'en. Research on high accurate position control of synchronous vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 37-40.
- [19] 陈 刚, 孙 波, 王尔智. 真空断路器弹簧操动机构中连杆机构的容差优化[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 241-247.
CHEN Gang, SUN Bo, WANG Erzhi. Tolerances optimization for linking member of spring mechanism in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 241-247.
- [20] 席世友. 真空断路器电容器回路故障原因分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 65-69.
XI Shiyou. Cause analysis of capacitor circuit of vacuum circuit breaker fault[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 65-69.
- 游一民(1963—), 女, 教高, 博士, 研究方向为智能电器、永磁机构、电器产品仿真及设计等。