

多层圆柱形磁屏体磁屏蔽特性研究*

张晚英^{1†}, 施乐¹, 张杰峰¹, 刘东辉², 申鸿哲¹, 胡雪峰³

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 国网浙江省电力公司衢州供电局, 浙江 衢州 324000;
3. 国网湖南省电力公司衡阳供电局, 湖南 衡阳 421000)

摘要:根据高磁导率铁材料和高电导率材料的电磁屏蔽特性,将铜绕组缠绕在铁芯上,圆柱形屏蔽体壳放入由铜绕组产生的均匀磁场中,利用三维有限元法对圆柱形屏蔽体壳的磁屏蔽特性进行了研究.分析磁屏蔽体厚度、屏蔽体的层数和激励频率对磁屏蔽效能的影响,以解决采用高磁导率材料和高电导率材料等不同磁屏蔽材料磁屏蔽体的最佳磁屏蔽方案问题.探索提高磁屏蔽效率的新技术,对电磁兼容问题的解决具有重要理论和实际意义.

关键词:电磁屏蔽效能;磁屏蔽材料;圆柱形屏蔽体;高磁导率材料;高电导率材料;Ansoft 有限元

中图分类号:TM153.5

文献标志码:A

Research of Magnetic Shielding Efficiency of Multilayer Cylindrical Shield

ZHANG Wanying^{1†}, SHI Le¹, ZHANG Jiefeng¹, LIU Donghui²,
SHEN Hongzhe¹, HU Xuefeng³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Quzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Quzhou 324000, China;
3. Hengyang Power Supply Company of State Grid Hunan Electric Power Company, Hengyang 421000, China)

Abstract: Based on the electromagnetic shielding properties of high permeability ferromagnetic material and high conductivity materials, a three-dimensional finite element method analysis was performed to evaluate the magnetic characteristics of the cylindrical shield immersed in a steady uniform magnetic field generating by the copper coil on the iron core. The effects of the thickness of the magnetic shielding material, the number of layers of the cylindrical shell, and the excitation frequency on the magnetic shielding effectiveness were studied. The problem of optimal magnetic shielding method for different magnetic shielding materials such as the high permeability material and high electrical conductivity material is to be solved. The new technologies are explored to improve the efficiency of the magnetic shielding, which has important theoretical and applied significance in the electromagnetic compatibility problem.

Key words: electromagnetic shielding effectiveness; magnetic shielding materials; cylindrical shield; high magnetic permeability material; high conductivity materials; Ansoft finite element

* 收稿日期:2017-01-17

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(14jj7030), Natural Science Foundation of Hunan Province(14jj7030)

作者简介:张晚英(1967—),女,湖南长沙人,湖南大学副教授

通信联系人, E-mail: sheling_9999@163.com

随着科学技术的发展,移动通信、计算机网络、个人电脑、人造卫星、超高压输电网和其他电磁设备的大规模应用,引发了一系列电磁干扰和电磁辐射问题,电磁波污染成为威胁人类健康的又一大公害^[1].在军事、医疗和检测方面,都要求有优良的电磁屏蔽,有效防止电磁波的干扰,保障国家和个人的信息安全.本文运用 Ansoft Maxwell 3D^[2] 仿真软件,分别对铁、铜、铝单层圆柱形屏蔽体^[3-5]、铁/铝或铁/铜双层圆柱屏蔽体以及铜/铁/铝三层圆柱屏蔽体进行了仿真研究.研究了铁、铜、铝单层圆柱形屏蔽体厚度对低频磁场磁屏蔽效能的影响^[6-8];然后研究了磁场频率对铝、铜单层圆柱形屏蔽体结构的磁屏蔽效能影响;最后研究了铁/铝或铁/铜双层圆柱屏蔽体以及铜/铁/铝三层圆柱屏蔽体磁屏蔽特性,结果表明铁/铝和铁/铜组合结构的屏蔽体对低频交变磁场的磁屏蔽效能比单层铁屏蔽体高,铜/铁/铝三层圆柱屏蔽体对低频交变磁场的磁屏蔽效能比铁/铝和铁/铜组合结构的屏蔽体高,最理想磁屏蔽体结构是铜/铁/铝三层屏蔽体结构,其具有最高的磁屏蔽效能.可见组合屏蔽体屏蔽效能大大提高,为电磁屏蔽的研究开辟了一个新的研究方向.

1 磁屏蔽体的工作原理

1.1 高磁导率材料屏蔽的原理

恒定磁场和低频磁场屏蔽指利用高磁导率材料构成低磁阻通路,即将一个高磁导率屏蔽体外壳放置在干扰磁场中,则空气介质与屏蔽体外壳组成一个并联磁路,如图 1 所示.由于空气的相对磁导率接近 1,而屏蔽体外壳相对磁导率最高达到几千,所以屏蔽外壳的磁阻 R_m 比空气介质的磁阻 R_0 小很多,使得磁通密度线主要从屏蔽壳内通过,屏蔽体壳外通过的磁通密度线很少,以达到屏蔽磁场的目的.屏蔽体壳越厚,磁导率越高,屏蔽效果越好.为了达到更好的磁屏蔽效果,可以使用多层屏蔽外壳的方法,把剩余磁通量屏蔽掉,所以屏蔽性能良好的磁屏蔽体一般体积都较大.

1.2 高电导率材料屏蔽的原理

交变磁场采用高电导率的良导体进行磁场屏蔽,其屏蔽原理为利用电磁感应现象在屏蔽体表面所产生的涡流反向磁场来达到屏蔽的目的,即利用涡流反向磁场对于原骚扰磁场的排斥作用,抑制或抵消屏蔽体外的磁场.交变磁场产生的涡流会在良

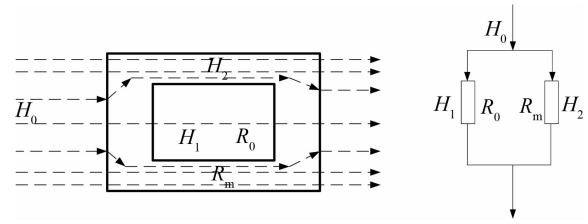


图 1 高磁导率材料的屏蔽原理
Fig.1 Shielding principle of high permeability material

导体内流动,并产生损耗从而引起导体发热,因而它还有热效应,如图 2 所示.涡流电流的大小直接影响屏蔽效果.

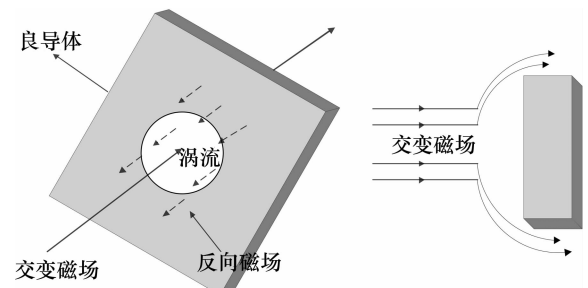


图 2 高电导率材料的屏蔽原理
Fig.2 Shielding principle of high conductivity material

2 磁屏蔽体的仿真研究

本文利用 Ansoft Maxwell 3D 建立仿真模型如图 3 所示.仿真模型求解器设置采用涡流求解器 (Eddy Current),边界条件采用软件默认的 Default Boundary Conditions,激励源频率 $f = 50$ Hz (即工频),线圈电流 $i = 100$ A.在图 3 所示的仿真模型中,中间的圆柱体为铜线圈 (深黑色),其产生激励磁场,磁场的方向沿圆柱形屏蔽体的轴向.外面圆柱体壳 (浅黑色) 是封闭磁屏蔽体,根据建立的磁屏蔽体模型,采用图 3 仿真模型图,磁屏蔽体相应地分别为铁、或铝、或铜单层结构磁屏蔽体,或铁/铜、或铁/铝双层结构磁屏蔽体,或铜/铁/铝三层结构磁屏蔽体.最外端的长方体 (浅黑色) 为有限元软件里要求设置的求解域.

2.1 单层铁屏蔽体磁屏蔽特性的仿真研究

单层铁磁屏蔽体的模型剖面图及结构尺寸如图 4 所示,铁的材料参数如表 1 所示.线圈高度为 90 mm,线圈内半径为 35 mm,线圈厚度为 1 mm.屏蔽体的内高度固定为 94 mm,外高度固定为 98.2 mm,内半径固定为 40 mm,点 O 为坐标原点.改变

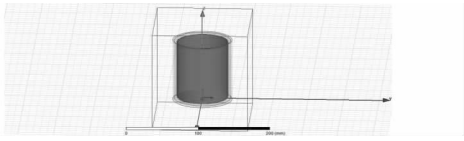


图3 Ansoft Maxwell 3D 仿真模型

Fig.3 Ansoft Maxwell 3D simulation model

屏蔽体的侧面厚度 t , 也即改变屏蔽体外半径 R_1 , 屏蔽体外半径 R_1 变化范围为 40.05~42.1 mm, 也即侧面厚度变化范围为 0.05~2.1 mm. 在工频 (50 Hz) 条件下, 单层铁屏蔽体外 $A(0, 0, 115)$ 点的磁场强度 H 与屏蔽体外半径 R_1 关系曲线如图 5 所示.

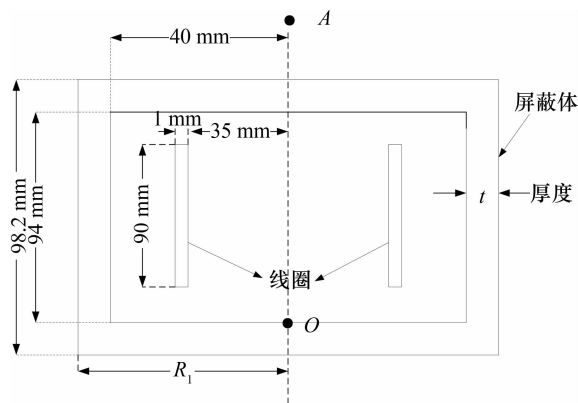
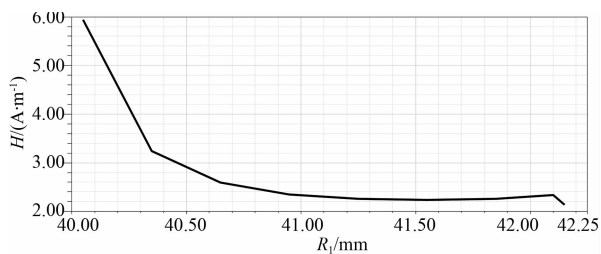


图4 模型剖面图

Fig.4 Model profile

图5 单层铁屏蔽体 A 点磁场强度 H 与屏蔽体外半径 R_1 的关系曲线Fig.5 Relationship between the A point magnetic field strength H of single layer iron shield and R_1

由图 5 可见, 随着屏蔽体厚度 t 的增加, A 点磁场强度减小. 这是因为在工频激励下, 空气的相对磁导率接近于 1, 而铁磁材料屏蔽体相对磁导率远远大于空气的相对磁导率. 根据磁阻公式: $R_m = L/(\mu S)$ (其中 R_m 为磁阻, μ 为磁导率, S 为磁路的横截面积, L 为屏蔽体长度), 屏蔽体侧面与屏蔽体外空间可以看作并联关系. 当屏蔽体侧面厚度增加时, 即横截面积 S 增加时, 铁屏蔽体侧面的磁阻减小, 大部分磁通流经磁阻小的铁屏蔽体侧面, 流经屏蔽体外的磁通密度减小, 从而达到磁屏蔽目的.

另外对于低频磁场, 屏蔽体的吸收损耗 $A = 0.131t\sqrt{f\sigma_r\mu_r}$ [9], 其中 A , t , σ_r 和 μ_r 分别为屏蔽体的吸收损耗、厚度、相对电导率和相对磁导率; f 为激励频率. 可见屏体厚度增加, 吸收损耗增大, 也即屏蔽效果越好, 所以增加屏蔽体的厚度可以提高其磁屏蔽效能.

当屏蔽体厚度 t 增加到一定值后, 再增加其侧面厚度对屏蔽效能的影响很小, 曲线趋向一个恒定值, 即曲线在 $R_1 = 40.35$ mm 的位置出现了转折. 这是因为良导体的透入深度 $d = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$ [9], 透入深度 d 与激励频率 f , 材料磁导率 μ 及电导率 σ 都有关系, 当只改变磁屏蔽体的厚度, 其它参数不变的情况下, 由于交流电流的集肤效应, 交流电流大多只在 $2d$ 深度的导体内流过. 当屏蔽层的厚度超过 $2d$, 超出透入深度位置的电流密度很小, 增加屏蔽体厚度, 磁场强度减小不明显了, 因而曲线趋向一个恒定值.

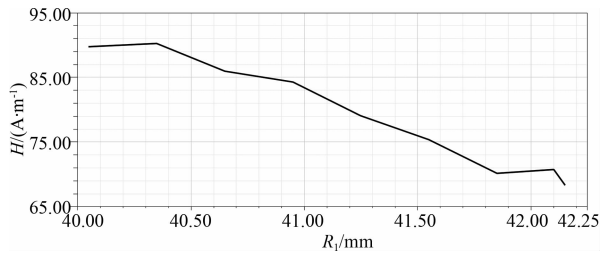
2.2 单层铜屏蔽体磁屏蔽特性的仿真研究

单层铜磁屏蔽体的结构尺寸也如图 4 所示. 选择与单层铁磁屏蔽体相同的结构尺寸, 铜的材料参数如表 1 所示. 单层铜屏蔽体外 $A(0, 0, 115)$ 点的磁场强度 H 与屏蔽体外半径 R_1 关系曲线如图 6(a) 所示; 磁场强度 H 随激励频率 f 的变化曲线如图 6(b) 所示.

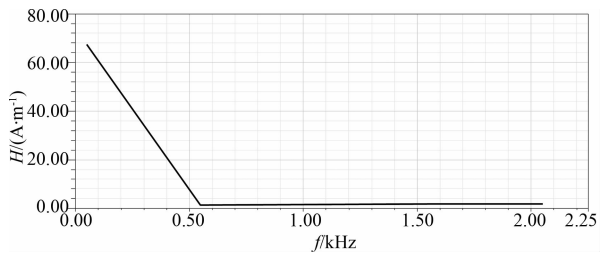
由图 6(a) 可见, 随着屏蔽体厚度 t 的增加, A 点磁场强度减小, 曲线有波动, 但没有看到明显的曲线转折点. 这是因为屏蔽体的吸收损耗随屏体厚度增加而增大, 由良导体的透入深度计算式可知, 因铜的磁导率很小, 铜在工频时的透入深度值比较大, 因为仿真所取的厚度还没有达到 $2d$, 所以没有明显的转折点, 曲线出现波动是因为仿真试验误差所至.

图 6(b) 可见, 其它参数固定, 当激励频率 f 增加时, A 点磁场强度减小. 低频时, 由屏蔽体的吸收损耗计算式可知, 激励频率 f 增加, 吸收损耗增加, 使得 A 点的磁场强度减小. 当增加激励频率到一定值, 曲线趋向一个恒定值, 即曲线在激励频率 $f = 545$ Hz 的位置出现了转折, 这是因为集肤效应, 当屏蔽体的厚度 t (即: $R_1 = 42.1$ mm), 电导率 σ 和磁导率 μ 不变时, 增加激励频率 f , 其对应的透入深度 d 相应减少, 增加激励频率到一定值, 其对应的透入深度 d 减少到一定值, 使得屏蔽体厚度 t 大于 $2d$ 时, 再增加激励频率 f , 磁场强度减小不明显, 即曲

线趋向一个恒定值。



(a) A 点磁场强度 H 与铜磁屏蔽体外半径 R_1 的关系曲线



(b) A 点磁场强度 H 与激励频率关系曲线

图 6 单层铜屏蔽体仿真结果

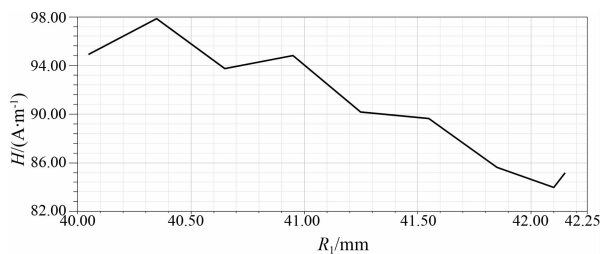
Fig.6 Simulation results of single layer copper shield

2.3 单层铝屏蔽体磁屏蔽特性的仿真研究

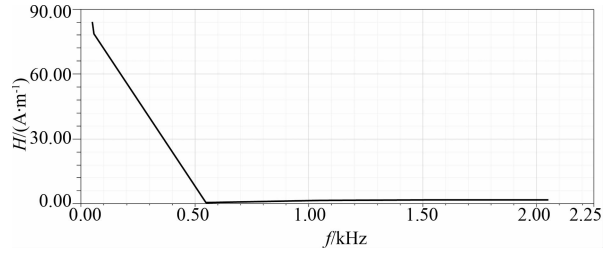
单层铝磁屏蔽体的结构尺寸也如图 4 所示.选择与单层铁磁屏蔽体相同的结构尺寸,铝的材料参数如表 1 所示.单层铝屏蔽体外 A(0,0,115)点的磁场强度 H 与屏蔽体外半径 R_1 关系曲线如图 7(a)所示;磁场强度 H 随激励频率的变化曲线如图 7(b)所示.由图 7(a)可见随着屏蔽体厚度 t 的增加, A 点磁场强度也减小,因为铝的导磁率与铜的导磁率很接近,所以其原理与铜屏蔽体类似;由图 7(b)可见当激励频率 f 增加时, A 点磁场强度减小,其原理也与铜屏蔽体类似.

2.4 双层铁/铝组合磁屏蔽体的磁屏蔽特性仿真研究

屏蔽体结构如图 4 所示,在厚度均匀的铝封闭磁屏蔽体壳外同心地套一层厚度均匀的铁封闭磁屏蔽体壳,组合成铁/铝组合屏蔽体,选用表 1 所示材料参数,其结构尺寸如表 2 所示.



(a) A 点磁场强度 H 与屏蔽体外半径 R_1 的关系曲线



(b) A 点磁场强度 H 与激励频率关系曲线

图 7 单层铝屏蔽体仿真结果

Fig.7 Simulation results of single layer aluminum shield

表 1 屏蔽体材料参数

Tab.1 Parameters of shielding material

材料	相对磁导率/($H \cdot m^{-1}$)	相对电导率($S \cdot m^{-1}$)
铁	4 000	10 300 000
铜	0.999 991	58 000 000
铝	1.000 021	38 000 000

表 2 仿真模型结构尺寸 1

Tab.2 Simulation model 1 structure size mm

结构	内径	高度	屏蔽体厚度
线圈	35	90	1
铝层	40	96.1	1.05
铁层	41.05	98.2	1.05

仿真研究 A(0,0,115)点的磁场强度 H 与激励频率关系曲线.求解设置器中将频率扫描范围设置为 0.5~2.05 kHz, A 点磁场强度 H 与激励频率关系曲线如图 8 所示,可见频率增加, A 点磁场强度减小,增加激励频率到一定值,曲线趋向一个恒定值,曲线也出现了转折,其原理与单层铜或铝相同.

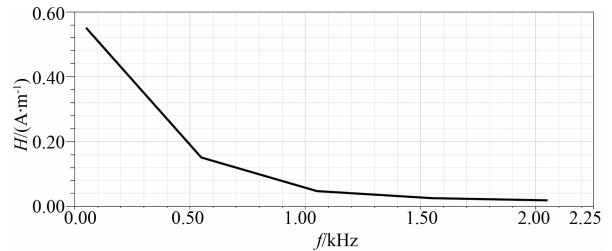


图 8 铁/铝组合磁屏蔽体 A 点磁场强度 H 与激励频率关系曲线

Fig.8 Relationship between A point magnetic field strength H and the excitation frequency of iron / aluminum composite magnetic shield body

2.5 双层铁/铜组合磁屏蔽体的磁屏蔽特性仿真研究

屏蔽体结构如图 4 所示,在厚度均匀的铜封闭磁屏蔽体壳外同心地套一层厚度均匀的铁封闭磁屏蔽体壳,组合成铁/铜组合屏蔽体,其结构尺寸如

表3所示,选用表1所示材料参数.

表3 仿真模型结构尺寸2

结构	内径	高度	屏蔽体厚度
线圈	35	90	1
铜层	40	96.1	1.05
铁层	41.05	98.2	1.05

仿真研究A(0,0,115)点的磁场强度 H 与激励频率关系曲线.求解设置器中将频率扫描范围设置为0.5~2.05 kHz,A点磁场强度 H 与激励频率关系曲线如图9所示.可见频率增加,A点磁场强度减小,增加激励频率到一定值,曲线也趋向一个恒定值,曲线也出现了转折,其原理与单层铜或铝也相同.

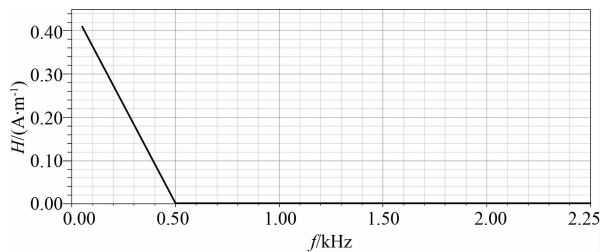


图9 铁/铜组合磁屏蔽体A点磁场强度 H 与激励频率关系曲线

Fig.9 Relationship between A point magnetic field strength H and excitation frequency of iron / copper composite magnetic shielding body

2.6 三层铜/铁/铝组合磁屏蔽体的磁屏蔽特性仿真研究

屏蔽体结构如图4所示,在厚度均匀的铜封闭磁屏蔽体壳外同心地套一层厚度均匀的铁封闭磁屏蔽体壳,然后在铁壳外再同心地套一层厚度均匀的铝壳,组合成铜/铁/铝组合屏蔽体,其结构尺寸如表4所示,铜、铁、铝层厚度均为0.7 mm,选用表1所示材料参数.

表4 仿真模型结构尺寸3

结构	内径	高度	屏蔽厚度
线圈	35	90	1
铜层	40	95.4	0.7
铁层	40.7	96.8	0.7
铝层	41.4	98.2	0.7

仿真研究A(0,0,115)点的磁场强度 H 与激励频率关系曲线.求解设置器中将频率扫描范围设置为0.5~2.05 kHz,A点磁场强度 H 与激励频率关系曲线如图10所示.可见频率增加,A点磁场强度

减小,增加激励频率到一定值,曲线趋向一个恒定值,曲线也出现了转折,其原理与单层铜或铝也相同.

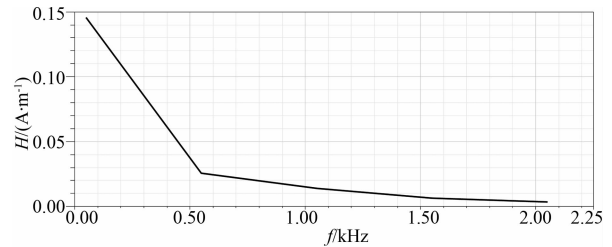


图10 铜/铁/铝三层组合磁屏蔽体A点磁场强度 H 与激励频率关系曲线

Fig.10 Relationship between A point magnetic field strength H and excitation frequency of copper / iron / aluminum three layer composite magnetic shield body

2.7 仿真结果比较

比较图6~图10可见,当激励源频率 $f=50$ Hz(工频),屏蔽体高度为98.2 mm,屏蔽体厚度为2.1 mm时,单层铁、铝、铜圆柱形屏蔽体、铁/铝及铁/铜组合双层圆柱形屏蔽体和铜/铁/铝组合三层圆柱形屏蔽体的仿真结果如表5所示.

表5 仿真结果比较

屏蔽体类型	A点磁场强度/($A \cdot m^{-1}$)
单层铁屏蔽体	2.34
单层铜屏蔽体	70.55
单层铝屏蔽体	86.14
双层铁/铝组合屏蔽体	0.55
双层铁/铜组合屏蔽体	0.41
三层铜/铁/铝组合屏蔽体	0.145

从表5可知,单层铁圆柱形屏蔽体磁场强度为2.34 A/m,单层铜圆柱形屏蔽体磁场强度为70.55 A/m,单层铝圆柱形屏蔽体磁场强度为86.14 A/m,双层铁/铝组合圆柱形屏蔽体磁场强度为0.55 A/m,双层铁/铜组合圆柱形屏蔽体磁场强度为0.41 A/m,三层铜/铁/铝组合圆柱形屏蔽体磁场强度为0.145 A/m,可见三层铜/铁/铝组合圆柱形屏蔽体比双层铁/铝组合圆柱形屏蔽体和双层铁/铜组合圆柱形屏蔽体轴向的屏蔽效能强;双层铁/铝组合圆柱形屏蔽体和双层铁/铜组合圆柱形屏蔽体的屏蔽效能比单层铁、铝、铜圆柱形屏蔽体强.这是因为双层屏蔽体除了吸收损耗,还存在反射损耗和多次反射损耗,即透射波通过内部衰减后,又碰到屏蔽层的另一侧,在这个侧面上又进行反射和透射,反

射波再次通过内部,如此反复多次的反射,使能量迅速衰减,因而双层铁/铝组合圆柱形屏蔽体和双层铁/铜组合圆柱形屏蔽体的屏蔽效果比单层铁、铝、铜圆柱形屏蔽体强很多.三层铜/铁/铝组合圆柱形屏蔽体有铁/铝及铁/铜两个分界面,三层铜/铁/铝组合圆柱形屏蔽体轴向的屏蔽效果也超过双层铁/铝组合圆柱形屏蔽体和双层铁/铜组合圆柱形屏蔽体的磁屏蔽效果.

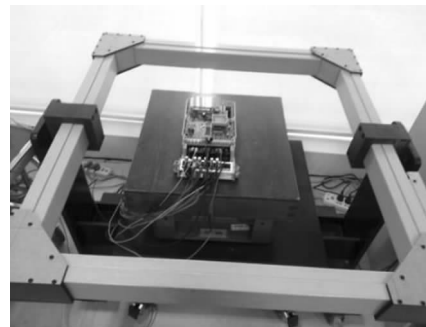
三层磁屏蔽体与双层磁屏蔽体磁屏蔽效能的差距没有双层磁屏蔽体与单层磁屏蔽体的差距大.这是因为双层磁屏蔽体的分界面存在反射损耗和多次反射损耗,因而双层磁屏蔽体的磁屏蔽效果不仅仅是单层的磁屏蔽效果的简单叠加,双层磁屏蔽体比单层磁屏蔽体的磁屏蔽效能大很多.三层磁屏蔽体存在铁/铜和铁/铝分界面,而双层磁屏蔽体也各存在一个分界面,所以三层磁屏蔽体的磁屏蔽效能近似为二个双层磁屏蔽体的磁屏蔽效能的叠加,因而三层磁屏蔽体与双层磁屏蔽体磁屏蔽效能差距没有双层磁屏蔽体与单层磁屏蔽体磁屏蔽效能的差距大.

3 试验研究

对磁屏蔽效能的研究源于一项电能表磁屏蔽研究课题,受到电能表尺寸的限制,开发的磁屏蔽体为接近半圆柱体的形状,如图 11(a)所示.为了测试屏蔽体的厚度对屏蔽体屏蔽性能的影响,采用图 11(b)的测试装置,框形体上放置施加工频干扰磁场的线圈,改变屏蔽体的厚度,分别测得不加屏蔽体,加屏蔽体且屏蔽体厚度分别为 1.2 mm, 1.5 mm, 2.0 mm 和 2.5 mm 时,罗高夫斯基三相线圈产生的干扰感应电流.三相罗高夫斯基测量线圈处于半圆柱体铁屏蔽体,线圈之间有分隔板,以防止三相之间的电磁干扰.改变屏蔽体厚度分别得到表 6 测量结果,可见铁屏蔽体厚度增加,线圈感应电流减小,也即增加铁屏蔽体厚度,磁屏蔽效果增加.但不能使屏蔽体厚度太大,这是因为电能表的尺寸有限,如果铁屏蔽体厚度太大,就会离罗高夫斯基线圈距离太近,会干扰线圈中待测量电流,反而使测量结果更加不准确.所以为了保证屏蔽体离罗高夫斯基线圈有足够的距离,以至于不干扰待测量电流,在此前提下才尽可能的增加铁屏蔽体的厚度.



(a) 电能表的屏蔽体



(b) 试验测试装置

图 11 安装实体图

Fig.11 Installation entity diagram

表 6 试验结果

Tab.6 Results of the experiments

屏蔽体厚度/mm	A 相电流/A	B 相电流/A	C 相电流/A
0	0.101	0.273	0.247
1.2	0.028	0.017	0.019
1.5	0.018	0.012	0.014
2.0	0.017	0.010	0.011
2.5	0.016	0.009	0.010

4 工程应用研究

反射系数的计算公式如下^[1]:

$$\Gamma = \frac{E^-}{E^+} = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} \quad (1)$$

可见两种导磁媒质的波阻抗相差越大,则反射系数越大.而波阻抗计算公式如下^[1]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2)$$

由于铜铝的磁导率非常接近,因而二者的波阻抗也非常接近,在铜铝的分界面上电磁波反射系数较小;而铁铜的磁导率相差很大.因而二者的波阻抗也相差很大,同理铁铝的波阻抗也相差很大,铁铜或铁铝分界面上电磁波反射系数很大,所以本文选

择铁/铝及铁/铜组合双层圆柱形屏蔽体,而不选择铜/铝组合双层圆柱形屏蔽体。

三层铜/铁/铝组合圆柱形屏蔽体的铁处于中间位置,也是因为铜铝的波阻抗相近,在铜铝的分界面上电磁波反射系数较小;而铁铜和铁铝的波阻抗相差很大,铁铜或铁铝分界面上电磁波反射系数很大,所以只有铁/铝及铁/铜两个分界面,不存在铜/铝分界面,是为了增加反射系数.铁吸收损耗大,对低频强磁场具有良好的屏蔽效果,进入铁屏蔽体内的大部分电磁波被吸收到铁屏蔽体内.所有组合磁屏蔽体均将铜或铝放在磁力线进入面,这是因为

屏蔽体的反射损耗 $R_m = 14.56 + 10 \lg \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r} r^2 f \right)^{[9]}$,

其中 σ_r 为屏蔽体相对电导率, μ_r 为屏蔽体相对磁导率, f 为激励频率,可见屏蔽体相对电导率越大,反射损耗越大;相反屏蔽体相对磁导率越大,反射损耗越小.而铜铝的相对电导率比铁大,相对磁导率比铁小很多,为了增加屏蔽磁场的反射损耗,将电导率大而磁屏率小的铜铝放在磁力线进入面,使屏蔽磁场进入屏蔽体时首先反射掉较大部分,然后进入屏蔽体.从反射损耗计算公式可见,反射损耗与屏蔽体厚度无关,所以表面的铜铝可以选择比较薄一些的,在工程实际中,可以采用电镀的方法,双面镀铜或双面镀铝,即铜/铁/铜或铝/铁/铝,效果与铜/铁/铝三层效果差不多,工艺上比较容易实现.而从吸收损耗的公式可见,吸收损耗的大小与屏蔽体厚度成正比,而铁的吸收损耗远远大于铜铝的吸收损耗,在工程实际中,铁可以选择厚度大些,以增加磁屏蔽的效能.组合屏蔽体利用铜、铁、铝材料磁屏蔽特性互补,灵活选择磁屏体材料及其厚度,并考虑工艺的实现,以达到最理想的磁屏蔽效果。

5 结 论

仿真研究表明,单层铁、铜、铝圆柱形屏蔽体厚度增加,其屏蔽性能增加;单层铝、铜屏蔽体当增加激励磁场频率,其磁屏蔽效能增加.仿真结果发现,在屏蔽体总厚度相同的情况下,在相同的外磁场作用下,铜/铁/铝三层组合结构磁屏蔽体比铁/铝和铁/铜双层组合结构屏蔽体的磁屏蔽效能强,铁/铝和铁/铜双层组合结构屏蔽体比单层铁、铜、铝圆柱形屏蔽体的磁屏蔽效能强很多,也即最理想磁屏蔽体结构是铜/铁/铝三层组合磁屏蔽体结构.综合利用高磁导率材料和高电导率材料电磁屏蔽特性互

补的特点,灵活选择磁屏体材料及其厚度,并考虑工艺的实现,以达到最理想的磁屏蔽效果,选择合适的电磁屏蔽方案,服务于社会生活、国民经济和国防工业,对电磁兼容问题的解决具有重要的理论和应用意义。

参考文献

- [1] 冯慈璋,马西奎.工程电磁场导论[M].北京:高等教育出版社,2004:1—210.
FENG Cizhang, MA Xikui. Introduction to engineering electromagnetic field [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 1—210. (In Chinese).
- [2] 王立龙,吴明赞,李竹.基于有限元方法的波导管结构电磁屏蔽屏蔽效能分析[J].电子器件,2014,37(6):1068—1071.
WANG Lilong, WU Mingzan, LI Zhu. Electromagnetic shielding effectiveness of waveguide structures based on finite element method[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(6): 1068—1071. (In Chinese).
- [3] 王婵媛,王希晰,曹茂盛.轻质石墨烯基电磁屏蔽材料的研究进展[J].材料工程,2016,44(10):109—118.
WANG Chanyuan, WANG Xixi, CAO Maosheng. Research progress of light graphee based electromagnetic shielding materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(10): 109—118. (In Chinese).
- [4] 刘琳,张东.电磁屏蔽材料的研究进展[J].功能材料,2015,46(3):3016—3019.
LIU Lin, ZHANG Dong. Research progress of electromagnetic shielding materials[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(3): 3016—3019. (In Chinese).
- [5] 吴逸汀,盛卫星,韩玉兵,等.金属材料低频磁场屏蔽效能研究[J].电波科学学报,2015,30(4):673—674.
WU Yiting, SHENG Weixing, HAN Yubing, et al. Study on shielding effectiveness of metallic materials at low frequency magnetic field[J]. Journal of Radio Science, 2015, 30(4): 673—674. (In Chinese).
- [6] NEMOTO K, KOMORI M. A study of an active magnetic shielding method for the superconductive Maglev vehicle[J]. Physica C, 2010, 470: 1777—1781.
- [7] 白保东,王禹,陈志雪,等.基于电磁屏蔽法变频电机轴承电流抑制研究[J].电工技术学报,2016,31(7):33—37.
BAI Baodong, WANG Yu, CHEN Zhixue, et al. Research on current suppression of bearing current in variable frequency motor based on electromagnetic shielding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 33—37. (In Chinese).
- [8] 李婵娥,余占清,曾嵘,等.冲击电场作用下屏蔽体屏蔽效能实验研究[J].高电压技术学报,2014,40(9):2849—2854.
LI Chanxiao, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Experimental research of shielding effectiveness against impulse electric field for shielding enclosure[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2849—2854. (In Chinese).
- [9] 姚淳,郭祥玉.电磁屏蔽技术探讨[J].电源技术应用,2005,8(6):36—37.
YAO Chun, GUO Xiangyu. Discussion on electromagnetic shielding technology[J]. Journal of Power Technology Applications, 2005, 8(6): 36—37. (In Chinese).