

基于 HFSS 的 12 kV 开关柜在线监测系统电磁兼容性能研究

金晓明，邵敏艳

(浙江富阳市供电局，浙江 富阳 311400)

摘要：针对目前在线监测系统装置电磁兼容性还没有一种系统良好的优化设计方法，笔者提出了一种通过 HFSS(High Frequency Structure Simulator)电磁仿真软件优化设计装置电磁兼容性的方法，并且基于 12 kV 开关柜在线监测系统装置，对其传感器外壳和装置机箱做了相应的仿真分析及优化，通过实验验证，取得了很好的效果。

关键词：电磁兼容性；电磁仿真；优化设计

中图分类号：TM591

文献标志码：A

文章编号：1001-1609(2010)09-0015-04

Study of Electromagnetic Compatibility for 12 kV Switchgear

On-line Monitoring System Based on HFSS

JIN Xiao-ming, SHAO Min-yan

(Zhejiang Fuyang Power Supply Bureau, Fuyang 311400, China)

Abstract: There is no effective method for optimal design of the electromagnetic compatibility for on-line monitoring system. In this paper, an optimization design method for studying electromagnetic compatibility by using the simulation software HFSS (High Frequency Structure Simulator) was introduced. Based on the 12 kV switchgear on-line monitoring system device, the simulation analysis and optimization for the sensor shell and the device box of it was studied. Finally, the experiment was conducted to verify the simulation results.

Key words: electromagnetic compatibility; electromagnetic simulation; optimization

0 引言

开关柜在线监测系统在电力系统监测及控制领域应用特别广泛，其对电力系统的作用不可或缺也不容忽视。而电磁兼容性作为在线监测装置的一项指标，在一些特定场合有着严格的要求^[1]，电磁兼容性的优劣直接关乎装置系统的好坏，甚至关乎电力系统运行的安全可靠性^[2-3]。因此，对在线监测装置电磁兼容性能的优化设计具有重要的意义，而且还尤为必要^[4-5]。

HFSS 电磁仿真软件是 ANSOFT 公司推出的一款基于电磁场有限元法分析微波工程问题的全波三维电磁仿真软件。使用 HFSS 能轻松建立产品的虚拟模型，并分析模型的电磁兼容性能。近年来对在线监测装置进行电磁兼容性的研究非常多。国内对在线监测装置电磁兼容性研究主要集中于印制电路

板的研究^[6-7]，针对装置外壳电磁兼容性的研究比较少见。

为了提高在线监测系统的工作可靠性以及抗干扰性，有必要对其装置机箱也进行电磁兼容性优化设计。笔者对工作于高电磁兼容性变电站的 12 kV 开关柜在线监测系统装置进行了研究，利用 HFSS 三维电磁仿真软件对其机箱和传感器外壳进行了电磁兼容性的优化设计，通过实验验证，取得比较满意的效果。

1 红外温度传感器外壳电磁兼容性能分析

1.1 红外温度传感器外壳建模

针对 12 kV 开关柜在线监测系统装置温度检测模块，采用红外温度传感器 TPS534 作为温度的感应器，由于传感器电路部分电磁兼容性的要求，需要对其设计一个外壳，而且外壳应具有一定的抗电磁干扰性。

收稿日期：2010-08-05；修回日期：2010-08-13

作者简介：金晓明（1975—），男，工程师，主要从事中低压开关的研制。

图 1 为采用 HFSS 建立的红外温度传感器的外壳模型图, 实际中的外壳是圆柱状, 为了剖分方便, 仿真时用正 24 边的棱柱代替圆柱。

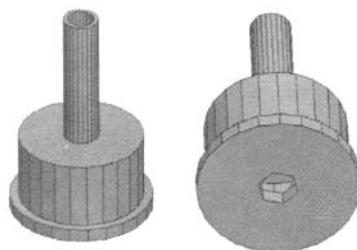


图 1 红外温度传感器外壳模型

1.2 红外温度传感器外壳电磁兼容性仿真及分析

模型建立后, 为模型的各部分设置材料特性, 并为模型建立一个真空的长方体求解区域, 长方体的边界到模型的距离为所关心频率的十分之一个波长。将长方体设置成辐射边界, 激励源设为平面波, 根据该模型的特点, 将激励的方向设为轴向。

据相关资料^[8], 在变电站环境中, 电磁干扰的频率主要集中在几千到几百 MHz。因此, 对于高频部分, 设中心频率为 100 MHz, 从 10 MHz 到 200 MHz 按步长 10 MHz 对频率做扫描。对于低频部分, 设中心频率为 1 MHz, 从 100 Hz 到 2 MHz 按步长 100 Hz 对频率进行扫描。按式(1)、(2)计算模型对外界平面电磁波的屏蔽能力

$$SE = 20 \lg \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (1)$$

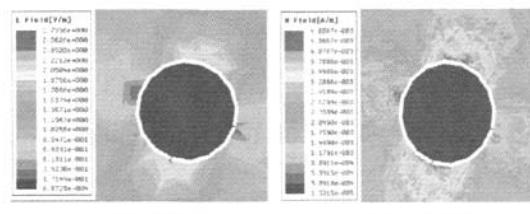
$$SH = 20 \lg \frac{H_{out}}{H_{in}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, E_{out} 和 H_{out} 为外壳外部的电场和磁场; E_{in} 和 H_{in} 为外壳内部的电场和磁场。SE、SH 分别表示电场和磁场的屏蔽能力。由于红外温度传感器的外壳几乎是封闭的, 并且厚度有 2 mm, 在经过大量的仿真实验发现, 对红外温度传感器外壳从结构上进行改进的效果不明显, 而材料属性对外壳电磁兼容性能的影响却很大, 不同材料的屏蔽特性和屏蔽效果的比较见表 1。

表 1 不同材料外壳的电磁兼容性能比较

材料	相对介电常数	相对磁导率	高频(100 MHz)		低频(50 MHz)		
			屏蔽效果/dB		屏蔽效果/dB		
			电场	磁场	电场	磁场	
不锈钢	1	1	1 100 000	47.8	46.2	5.0	10.0
alumina_96pct	9.4	1	0	2.7	0	3.1	0
纯铁	1	4 000	10 300 000	46.2	38.5	17.5	14.0

由表 1 可知, 良导体对高频电磁场的屏蔽效果都比较好, 低频电磁场的屏蔽效果较差, 但是纯铁对低频电磁场的屏蔽效果远好于不锈钢。介质材料 alumina_96pct 在任何频率段的表现都比较差, 几乎没有屏蔽能力。综合考虑变电站电磁场环境因素, 选用不锈钢作为传感器外壳的制备材料。它在 100 MHz 频率下的内外电磁场分布见图 2。由图 2 可知, 利用不锈钢材料制作的传感器外壳具有很好的电磁屏蔽效果。



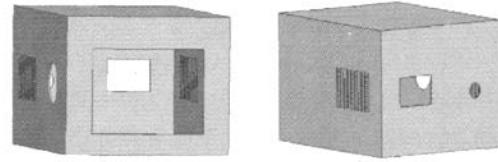
(a) 电场分布图
(b) 磁场分布图

图 2 不锈钢外壳内外的电、磁场(100 MHz)分布图

2 在线监测系统机箱电磁兼容性能的仿真分析

2.1 在线监测系统机箱的建模

在 HFSS 中按实物建立如图 3 所示的模型, 其中左边是机箱正面图, 右边是机箱背面图。机箱前面较大的开口为液晶安装位置, 机箱背面矩形开口为 220 V 电源线的接口, 小圆孔是和传感器信号线连接的接口。机箱左侧的圆孔是报警喇叭的安装位置, 机箱左右的条形窗为散热设计。



(a) 外壳模型前视图
(b) 外壳模型后视图

图 3 在线监测系统外壳模型视图

和前述红外温度传感器外壳相同, 在 HFSS 中画一个包围模型的正方体作为求解区域, 边界设为辐射边界。

2.2 屏蔽板对机箱屏蔽性能的影响及分析

机箱前部为液晶安装口, 后部为电源出口, 侧面报警系统由于安装需要, 在机箱上面开的孔比较大, 容易造成电磁泄漏; 实验仿真发现这种设计产生很大的漏磁, 对电磁屏蔽性能的影响非常的严重。为了避免这种情况发生, 在设计机箱时, 在安装口比较大的液晶口后边增加一块金属材料的屏蔽板, 并且屏蔽板和机箱相连, 见图 4。

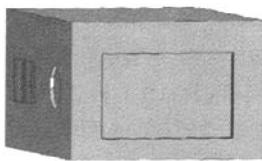


图4 增加屏蔽板后的机箱模型

通过这样设计,大大提高了机箱的密闭性,阻隔了电磁辐射干扰内部电路的途径。由于增加的屏蔽结果主要在正面,仿真时将激励的平面波的方向设置成从正面入射。

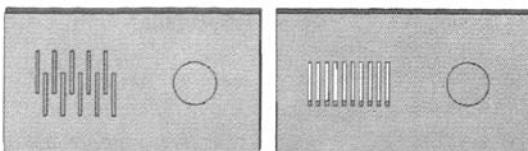
通过比较,增加屏蔽结构后,机箱的屏蔽能力大大增强。对磁场而言,相比于未加屏蔽板机箱屏蔽效果增加了14 dB左右;对电场而言,前后相比屏蔽效果增加了8 dB左右。增加了屏蔽板后对磁场的屏蔽效果改善较明显。表2为有无屏蔽板机箱在不同频率点处屏蔽效果的比较表。

表2 有无屏蔽板的机箱屏蔽效果的对比 dB

屏蔽	5 MHz	50 MHz	100 MHz	150 MHz	200 MHz					
方法	电场	磁场	电场	磁场	电场	磁场	电场	磁场		
未增 屏蔽板	54.2	33.0	53.5	32.6	52.0	31.5	47.8	30.2	42.7	29.0
增加 屏蔽板	62.0	47.2	61.5	47.2	58.5	46.4	55.0	45.0	51.5	43.4
改进的 效果	7.8	14.2	8.0	14.6	6.5	14.9	7.2	14.8	8.8	14.4

2.3 散热孔排列对屏蔽性能的影响分析

散热孔是机箱电磁泄漏的主要通道之一,同时散热孔的存在对于整个机箱而言又是必须的,因此,有必要对散热孔的电磁兼容性设计进行研究。针对该机箱,设计了两种排列类型的散热孔:散热孔错位排列和顺序排列,见图5。



(a) 错位排列模型

(b) 顺序排列模型

图5 散热孔不同排列方式模型

与屏蔽板设计仿真类似,该处假设激励平面波的人射方向为相对于散热孔为正入射,通过HFSS仿真研究散热孔的排列对机箱电磁兼容性的影响。并将两种仿真结果绘制制成表,见表3。

比较得知,散热孔顺序排列的屏蔽效果要好于错位排列,特别是在低频段效果更明显一些,因为错位排列会使磁路长度增加,降低屏蔽效果。因此实际中选用顺序排列的散热孔。

表3 散热孔顺序排列和错位排列屏蔽效果的对比 dB

屏蔽 方法	5 MHz		50 MHz		100 MHz		150 MHz		200 MHz	
	电场	磁场	电场	磁场	电场	磁场	电场	磁场	电场	磁场
错位 排列	37.3	32.8	37.2	32.9	37.1	32.9	36.7	33.0	36.2	33.0
顺序 排列	45.5	38.2	45.3	38.6	44.5	38.9	42.7	39.1	39.8	37.4

2.4 等面积散热孔的个数对屏蔽效果的影响分析

为了更好的设计散热孔的电磁兼容性,将散热孔按等面积设计成多个小孔与原来的条形窗状的设计,在保证两种设计散热孔总面积相等的条件下,对两种设计的屏蔽效果作对比分析。改进的散热孔的设计见图6。

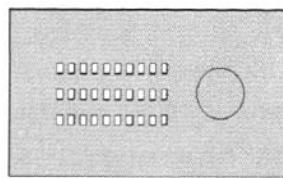


图6 等散热面积多个小孔机箱模型的设计

在相同的设定条件下利用HFSS对图6的设计进行电磁兼容性仿真分析,并与图5(b)散热孔顺序排列设计时机箱的屏蔽效果进行对比,结果见表4。

表4 散热孔等面积条形窗设计和

多个小孔设计屏蔽效果比较结果 dB

屏蔽	5 MHz		50 MHz		100 MHz		150 MHz		200 MHz	
方法	电场	磁场	电场	磁场	电场	磁场	电场	磁场	电场	磁场
多个 小孔	49.2	40.2	49.4	40.3	49.4	40.4	49.4	40.4	47.7	39.7
条形 窗	45.5	38.2	45.3	38.6	44.5	38.9	42.7	39.1	39.8	37.4

由表4的结果知,两种不同结构和个数的散热孔设计方式,虽然孔的总面积一样,但屏蔽效果的差别却很大。多个小孔的设计明显好于条形窗,电场的屏蔽效果提高了4~8 dB,磁场的屏蔽效果提高了2 dB左右。这表明,散热孔越小,电磁干扰就越不容易泄漏,而长条矩形窗型散热孔的设计容易造成电磁泄漏。

3 静电放电抗扰度试验

静电放电是一种常见的近场危害源,静电放电过程可形成高电压、强电场、瞬时大电流,其电流波形的上升时间可小于1 ns,并伴随着强电磁辐射,形成静电放电电磁脉冲(ESD)。静电放电不仅对电子设备造成严重的干扰和损伤,而且可能形成潜在的危险,引发重大的事故^[9]。ESD试验时操作人员容易

接触到机壳的前面板与机箱部位。要求被试验设备这些部位接地良好，也可以在不同的部位采用多点接地，为静电放电提供一个良好的放电通道。ESD试验标准见表5。

表5 静电放电抗扰度试验等级

接触放电		空气放电	
等级	试验电压/kV	等级	试验电压/kV
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15

笔者对经过HFSS优化设计后的机箱在接地的情况下，按照国家标准从低等级开始对系统进行空气放电和接触式放电，做了静电放电抗扰度试验，结果见表6。从表6中可以看出，机箱的这种设计可以很好并很顺利地通过静电放电抗扰度试验。

表6 静电放电抗扰度试验结果

试验内容	试验电压	依据标准	试验等级	试验结果
接触放电 静电	8 kV	CB/T 17626.2	4	系统正常工作，通过度试验
放电 空气放电 15 kV		GB/T 17626.2	4	系统正常工作，通过度试验

4 结论

笔者利用HFSS三维电磁场仿真分析软件对变电站用12 kV在线监测系统装置的传感器外壳和机箱进行了电磁兼容性的仿真分析研究，获得了在线监测系统装置机箱电磁兼容性设计优化的一般方法。

(上接第14页)

- [2] 罗运柏,余萍,宋斌,等.用灰色模型预测变压器油中溶解气体的含量[J].中国电机工程学报,2001,21(3):65-69.
- [3] 袁保奎,郭基伟,唐国庆.应用灰色理论预测变压器等充油设备的油中气体浓度[J].电力系统及其自动化学报,2001,13(3):40-42.
- [3] WANG M H, HUANG C P. Novel Grey for the Prediction of Dissolved Gases in Oil-filled Power Apparatus[J]. Electric Power System Research, 2003,67(1):53-58.
- [4] 王友元,廖瑞金,孙才新.油中变压器溶解气体浓度灰色预测模型的改进[J].高电压技术,2003,29(4):24-26.
- [5] WANG M H. Grey-extension Method for Incipient Fault Forecasting of Oil Immersed Power Transformer[J]. Electric Power Components and System,2004,32(10):959-975.
- [6] 邵军力,张景.人工智能基础[M].北京:电子工业出版社,2000.
- [7] 徐志钮,律方成.Nguyen-Widrow法用于变压器油气分析故障诊断[J].高电压技术,2006,32(8):46-48.
- [8] 李天云,应鸿,王宏哲.变压器故障的相关系数分析法[J].变压器,1996,38(8):37-39.
- [9] 董明,孟源源,徐长响,等.基于支持向量机及油中溶解气体分析的大型电力变压器故障诊断模型研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):88-92.
- [10] 贾峰,徐其惠,李辉,等.最小二乘支持向量机多分类法的变压器故障诊断[J].高电压技术,2007,33(6):110-113.
- [11] 肖燕彩,陈秀海,朱衡君.遗传支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用[J].上海交通大学学报,2007,41(11):1 878-1 886.
- [12] 邓宏贵,曹建,罗安.一种新的遗传算法及其在变压器故障诊断中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2005,36(3):481-485.
- [13] 余楠.一种改进的遗传算法及其在旅行商问题中的应用[J].电脑开发与应用,2009,22(1):35-36.
- [14] 肖燕彩,陈秀海,朱衡君.基于最小二乘支持向量机的变压器油中气体浓度预测[J].电网技术,2006,30(11):91-94.
- [15] GOLDBERG D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning[M]. Addison-Wesley, 1989.
- [16] YING Xie, HUA Zheng. Water Supply Forecasting Based on Developed LS-SVM[J]. IEEE Trans. on D & EI, 2008,12(1):2 228-2 233.

1)传感器外壳的材料属性对在线监测系统电磁兼容性的影响非常大,一般应考虑系统装置的应用电磁环境选用不同的材料作为传感器外壳的制备材料。

2)机箱安装口的存在会降低系统装置的电磁兼容性能,安装口的面积越大电磁兼容性能越差,而适当的采用一定面积的屏蔽板对电磁兼容性能提高有一定的作用。

3)机箱散热孔的不同设计对于机箱电磁兼容性有不同的影响,研究发现,顺序排列的散热孔要比错位排列散热孔的电磁兼容性能要强,而等面积多个小孔的散热孔设计要比前两者的电磁兼容性都要好。

参考文献:

HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件，易迪拓培训(www.edatop.com)是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用，易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验，曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程，专家讲解，直观易学，是您学习 HFSS 的最佳选择。



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>



更多 HFSS 视频培训课程:

● **两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程**

课程从零讲起，通过两周的课程学习，可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS，是 HFSS 初学者的最好课程，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

● **HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程**

HFSS 进阶培训课程，通过十个 HFSS 仿真设计实例，带您更深入学习 HFSS 的实际应用，掌握 HFSS 高级设置和应用技巧，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

● **HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程**

HFSS 是天线设计的王者，该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置，让 HFSS 天线设计不再难，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

● **更多 HFSS 培训课程**，敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计相关培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>