

换流站屏蔽材料对5G辐射干扰的抑制能力分析

尹琦云,杨晨,陆洪建,赵欣洋,安燕杰,陈昊阳

(国网宁夏电力有限公司 超高压公司,宁夏 银川 750000)

摘要:以明晰5G电磁辐射对换流站内继电保护通信控制设备的干扰影响为目标,建立了中心频率3.5 GHz的微带天线仿真模型。首先分析了微带天线的电磁辐射传播衰减规律,发现由于微带贴片的非对称性,其贴片法线方向正上方或正下方方位的增益显著高于其他方位。其次,以空气为对照组,分别分析了PVC塑料、混凝土、不锈钢板等材料的干扰抑制能力,发现不锈钢板相较于其他2种材料有更好的电磁干扰屏蔽能力。最后,为保证屏蔽盒内单极子天线的正常通信需求,对不锈钢屏蔽盒的布置方式进行优化,通过在盒体上均匀开挖5 mm通孔的方式,将外部电磁干扰由66.5 dB降至30 dB。研究结果对于明确微带天线的5G辐射的空间传播规律以及屏蔽措施的合理选择提供了有益借鉴。

关键词:5G通信技术;电磁辐射;增益;屏蔽材料;干扰抑制

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24438

Analysis of Suppression Ability of Converter Station Shielding Materials to 5G Radiation Interference

YIN Qiyun, YANG Chen, LU Hongjian, ZHAO Xinyang, AN Yanjie, CHEN Haoyang

(Ultra-high Voltage Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd.,
Yinchuan 750000, Ningxia, China)

Abstract: Aiming at clarifying the interference effect of 5G electromagnetic radiation on relay protection and communication control equipment in converter station, a microstrip antenna simulation model with a center frequency of 3.5 GHz was established. Firstly, the propagation and attenuation law of electromagnetic radiation of microstrip antenna was analyzed. It is found that due to the asymmetry of microstrip patch, the gain of the direction directly above or below the normal direction of the patch is significantly higher than that of other directions. Secondly, taking air as the control group, the interference suppression ability of PVC plastic, concrete and stainless steel plate was analyzed respectively. It is found that stainless steel plate had better electromagnetic interference shielding ability than the other two materials. Finally, in order to ensure the normal communication needs of the monopole antenna in the shielding box, the layout of stainless steel shielding box was optimized, and the external electromagnetic interference was reduced from 66.5 dB to 30 dB by uniformly excavating 5 mm through holes on the box. The research results provide a useful reference for clarifying the spatial propagation law of 5G radiation of microstrip antenna and the reasonable selection of shielding measures.

Key words: 5G communication technology; electromagnetic radiation (EMR); gain; shielding material; interference suppression

5G通信技术是新一代无线通信技术,其具有高速率、广连接、低时延等优越特性。在实际应用中,5G网络的速率是4G网络的10倍以上,并且可以为同一地点的数百甚至数千台设备同时提供上网服务。由于其所使用的频率几乎都处于3 400 MHz以上的频段,杂波少,干扰小,5G网络的时延不大于15 ms。随着5G通信技术的发展和应用,其技术优势在电力工业领域也逐步受

到重视。电网智能化改造过程中,断路器、互感器、智能电表等设备均可以通过5G无线通信技术构建电力物联网,实现海量电网节点数据的快速上传、通信及远程控制等功能^[1-3]。

随着5G通信技术在电网中的应用和普及,5G设备与继电保护二次通信设备之间的电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC)问题逐步引起业内的重视^[4-5]。5G通信设备在工作过程

基金项目:国网宁夏电力有限公司检修公司2021年群众性科技创新项目(5229CG21000C)

作者简介:尹琦云(1994—),男,本科,助理工程师,Email:yinqq321@163.com

中,其通信频段与继电保护设备的无线通信模块的通信频段临近,甚至重叠,其对继电保护、断路器等设备的二次控制设备的电磁辐射(electromagnetic radiation, EMR)若超过标准限度值,则可能在继电保护装置的电压、电流等上行信号或触发、控制等下行信号中引入超限干扰,从而可能导致继电保护装置的拒动误动、断路器的误开合等问题。另一方面,电力输配现场电磁环境恶劣,变压器内部局部放电、输电线路电晕放电、断路器开断电弧等电磁辐射众多,其辐射频段和幅值随机性强、波动幅度大,当其与5G通信天线耦合时,也会反过来威胁5G通信设备的正常运行。因此,有必要分析5G通信设备与继电保护设备的电磁辐射信号在通信频段、辐射增益等方面的异同。其中,明确5G电磁辐射信号的发生、传播、衰减规律,量化分析其在临近继电保护天线中的耦合信号增益强度规律,最终明确两者正常运行的电磁兼容限度,是优化配置5G通信设备与继电保护设备的无线通信参数、实现两者良好电磁兼容的关键。

目前,业内在5G电磁辐射对继电保护二次控制设备的干扰与抑制方面研究较少,主要关注于5G通信设备在电力系统各环节的应用。因此,本研究拟分析常用5G通信天线——微带天线的电磁辐射规律及不同屏蔽材料对天线干扰的抑制效果,以期为5G通信设备与继电保护设备的电磁兼容优化配置提供理论基础。

1 电磁干扰器件选型

1.1 常见的5G通信天线类型

常见的通信天线主要有单极/偶极天线、环形天线、八木天线、喇叭天线、微带天线、抛物面天线、偏馈半波天线等8类^[6-7]。微带天线一般由具有一定厚度的介质、较薄的金属接地板及电磁辐射贴片组成,因为其成本低、外形小而且可以直接印刷到电路板上,所以被广泛应用于各类无线通信设备。因此,本文以微带天线作为5G电磁辐射的产生元件。

1.2 微带天线结构布置

微带天线是在一块介质基板两面分别布置辐射贴片和接地板的贴片形天线,辐射贴片前端伸出一金属窄带,称之为微带线,整体结构如图1所示。金属辐射贴片以矩形贴片最为常见,也有圆形、三角形、长条形等多种形状,根据辐射贴片

及微带线尺寸参数的不同及极化方式的区别,可以调整贴片天线的中心工作频率^[8-9]。

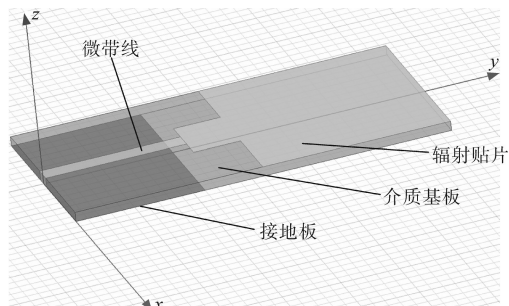


图1 微带天线整体结构

Fig.1 Overall structure of microstrip antenna

1.3 受干扰器件的选择

随着光伏、风电等新能源的广泛接入,配电网快速发展,网络结构也越来越复杂,其智能化程度快速提高。采用物联网技术的智能型空气开关是配电网的常用设备。本文以智能型空气开关(ZMB9-125, 智尔美)为受干扰器件,如图2所示,其采用Taoglas TG.55单极子天线接受远程遥控信号。



图2 智能断路器及其单极子天线

Fig.2 Intelligent circuit breaker and its monopole antenna

2 电磁干扰模型构建

2.1 微带贴片模型构建

在HFSS仿真环境下,以微带天线为主体,构建包含微带天线、单极子天线、空气腔体、屏蔽盒等部分构成的电磁干扰模型,其整体布局如图3所示。通过分析微带贴片在空气腔体内的电磁辐射传播规律,进一步模拟电力设备紧凑布置场景下微带天线的辐射信号对上方150 mm处屏蔽盒内单极子天线的干扰水平。

微带天线是电磁干扰模型的核心部件,本文设计了一种中心工作频率为3.5 GHz的全向天

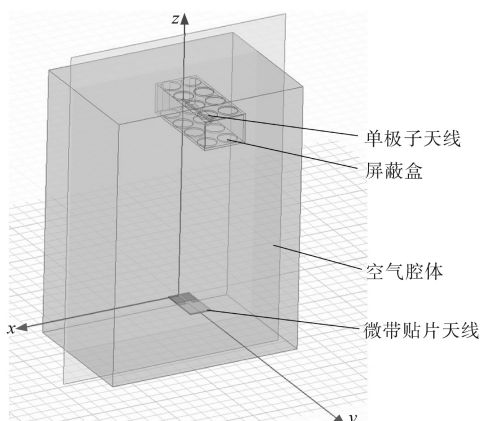


图3 微带天线的电磁干扰模型

Fig.3 Electromagnetic interference model of microstrip antenna
线,采用 $50\ \Omega$ 微带线进行馈电,选择介电常数 4.4、耐燃系数为 FR4 的环氧树脂作为基板材料(介质基板厚度 H 为 $0.8\ \text{mm}$),其结构尺寸如图 4 所示,相应尺寸参数如表 1 所示。选择 $3.5\ \text{GHz}$ 作为天线的中心工作频率,求解类型为模式驱动求解类型(driven modal),馈电激励方式设为波端口(wave-port),阻抗设置为 $50\ \Omega$ 。

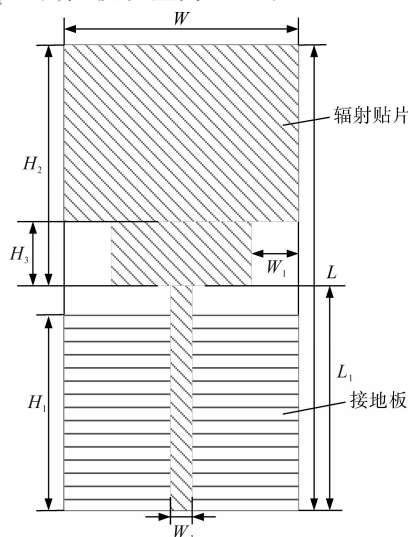


图4 微带天线结构尺寸

Fig.4 Structural dimensions of microstrip antenna

表1 微带天线尺寸参数

Tab.1 Dimension parameters of microstrip antenna

变量	长度/mm
W	16
W_d	1.5
W_1	3
L	32
L_1	12
H	0.8
H_1	11
H_2	20
H_3	4

2.2 天线布置及边界条件设定

用长度 $40\ \text{mm}$,半径 $1\ \text{mm}$ 的铜棒,外敷绝缘橡胶,模拟 Taoglas TG.55 型单极子天线,考虑到为节省电气设备占用空间所采用的紧凑型布置方式,仿真模型中将单极子天线置于微带天线正上方 $150\ \text{mm}$ 处。与此同时,为模拟分析电磁信号在空气中的传播和衰减规律,并减小仿真计算工作量,在微带天线和单极子天线外建立一包裹域,简称空气腔体,其三维尺寸为 $146\ \text{mm} \times 102\ \text{mm} \times 200.8\ \text{mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。边界条件设置中,将辐射贴片及 $1/4$ 导线都设为理想金属导体(perfect E),将空气腔设为 Radiation 1。

2.3 屏蔽盒设置

为分析屏蔽材料属性及布置对电磁辐射干扰的抑制能力,在单极子天线外建立尺寸为 $34\ \text{mm} \times 74\ \text{mm} \times 24\ \text{mm}$,厚度均为 $2\ \text{mm}$ 的屏蔽盒模拟实际的配电箱或建筑墙体,如图 5 所示,并设置不同的材料属性(聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)塑料、混凝土、不锈钢)和盒体开孔等方式,量化分析其对电磁信号的衰减抑制效果。

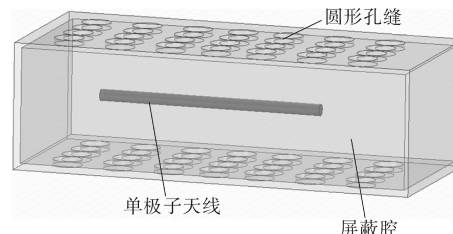


图5 电磁屏蔽盒

Fig.5 Electromagnetic shielding box

3 微带天线参数优化

3.1 微带天线原始状态分析

以表 1 中微带天线的初始尺寸参数为基础,以 $3.5\ \text{GHz}$ 为贴片天线的中心工作频率,采用 Sweep 指令在 $2 \sim 6\ \text{GHz}$ 频率区间内以 $0.01\ \text{GHz}$ 为步进频率仿真贴片天线的信息增益,可以得到微带天线的增益曲线如图 6 所示。

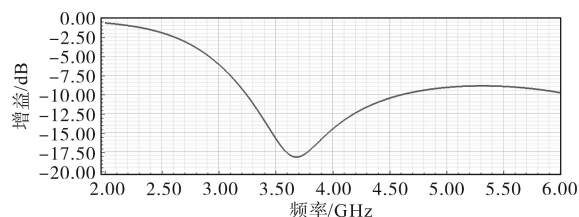


图6 微带天线的增益曲线

Fig.6 Gain curve of microstrip antenna

由图 6 可知,当 W_1 值为 $3\ \text{mm}$ 时,贴片天线的增益在工作频率 $3.7\ \text{GHz}$ 时达到最大值,为 $18.4\ \text{dB}$,

中心工作频率已经偏离预期的3.5 GHz;同时,在3.7 GHz左右两侧,天线增益均呈下降趋势,在3.4~3.5 GHz区间内增益值在13 dB上下浮动,说明微带天线的增益不够理想,有必要通过改变贴片矩形缺口的宽度 W_1 ,对微带天线的中心工作频率及增益进行优化。

3.2 微带天线中心频率的优化

使用Optimetrics指令优化选取 W_1 的取值范围,分布不同取值下微带天线的中心工作频率及增益。选取 W_1 的参数取值范围为3~7 mm,以0.5 mm为步进长度,分析不同取值下天线的增益曲线,如图7所示。由图7可知,随着 W_1 长度的增加,天线的中心工作频率逐步下降,当 $W_1=5.5$ mm时,其中心工作频率位于3.4~3.5 GHz区间,处于预期的中心工作频率区间。将微带天线尺寸参数优化前后的增益曲线进行对比分析,如图8所示。由图8可知,当贴片矩形缺口 W_1 取值从3 mm优化为5.5 mm后,其中心工作频率从3.7 GHz降为3.4 GHz,并且其最大增益从18 dB提升至50 dB,改善效果较好。

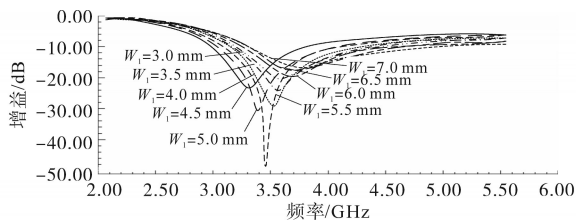


图7 W_1 不同取值下微带天线增益曲线

Fig.7 Gain curves of microstrip antenna under different values of W_1

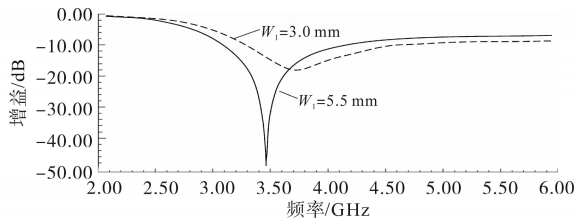


图8 参数优化前、后微带天线的增益曲线对比

Fig.8 Comparison of gain curves of microstrip antenna before and after parameter optimization

3.3 优化后微带天线的增益曲线分析

在辐射边界条件下,获取微带天线的3D增益图,如图9a所示。由于微带天线的空间非对称性,可知其在空间不同方位的增益强度是有明显区别的,在 XOY 平面即天线所在平面上,增益强度随方位角(φ)变化显著,在天线轴线方位增益最弱,而在天线轴线垂直方位增益最强;与之类似,在 XOZ 平面即天线法向平面内增益强度随俯仰角(θ)呈现类似的变化规律。

由于微带天线的辐射增益呈现明显的空间不

均匀性,为进一步分析其不同方位的增益变化规律,提取微带天线的辐射增益随俯仰角(θ)的空间变化云图,如图9b所示。当俯仰角(θ)为 0° 时,其方向为微带天线正上方方位,其辐射增益较高;同时,当俯仰角(θ)为 180° 时,其方向为微带天线正下方方位,其辐射增益也较高;而当俯仰角(θ)为 90° 或 -90° 时,不论方位角(φ)在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围内取何值,其辐射增益均较低。上述分析表明,考虑微带天线的辐射增益的空间不对称性,应重点考察微带天线正上方或正下方方位的电磁辐射的分布规律及其对相邻继电保护设备的干扰影响。

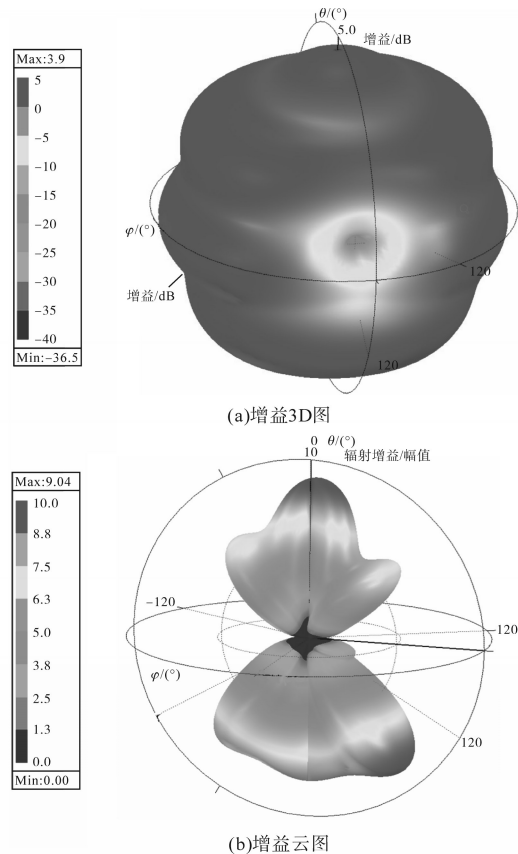


图9 微带天线增益图

Fig.9 Gain contours of microstrip antenna

4 屏蔽盒的干扰抑制能力分析

根据3.3节分析可知,微带天线正上方方位的辐射增益较强,应予以重点关注。为此,在微带天线正上方150 mm处放置一个Taoglas TG.55单极子天线,外部包裹一个34 mm×74 mm×24 mm,厚度均为2 mm的屏蔽盒。分别设置屏蔽盒的材质为空气(对照组)、PVC塑料、混凝土、不锈钢等4种材质,分析材料属性对电磁辐射的屏蔽效果。

4.1 屏蔽材料为空气(对照组)

设置屏蔽盒的材料属性为空气,分析屏蔽盒内外的电场强度分布规律,如图10所示。由于屏蔽盒内外均为空气介质,其电场强度没有发生明显变化,提取单极子天线沿轴线方向的最大信号强度为66.5 dB。

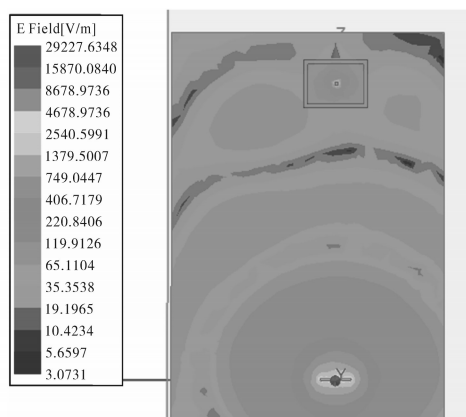


图10 屏蔽材料为空气时屏蔽盒内外的电场强度云图

Fig.10 Contour of electric field strength inside and outside shielding box when the shielding material is air

4.2 屏蔽材料为PVC塑料

设置屏蔽盒的材料属性为PVC塑料,可得屏蔽盒内外的电场强度分布云图,如图11所示。由于PVC塑料对电磁波的屏蔽和吸附能力微弱,电磁辐射信号进入屏蔽盒内部时,其电场强度值并没有明显衰减,其单极子天线的最大信号强度为63.9 dB,相较于空气介质下的最大信号强度66.5 dB衰减量较小。

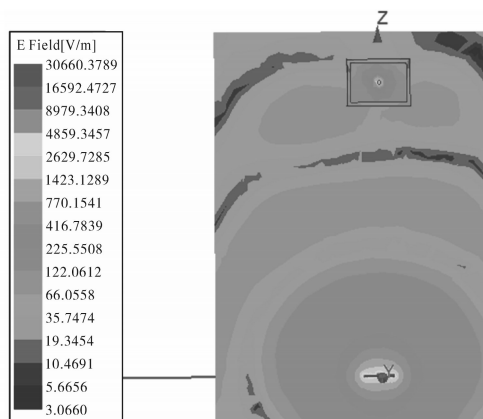


图11 屏蔽材料为PVC塑料时屏蔽盒内外的电场强度云图

Fig.11 Contour of electric field strength inside and outside shielding box when the shielding material is PVC plastic

4.3 屏蔽材料为混凝土

设置屏蔽盒的材料属性为混凝土,可得屏蔽盒周边的电场强度分布云图,如图12所示。由图12可知,虽然混凝土材料对电磁信号具有较高的屏蔽能力,然而由于屏蔽盒的厚度较小,仅为2 mm,

因此,混凝土材质的屏蔽盒对电磁辐射的抑制能力仍较弱,其对应的单极子天线的最大信号强度为61.2 dB。

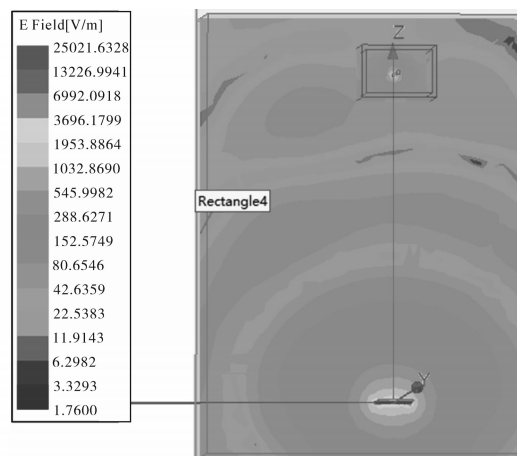
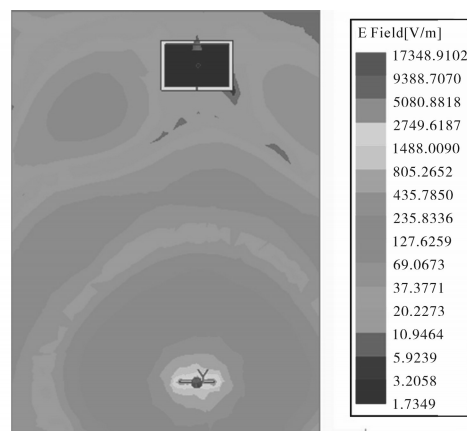


图12 屏蔽材料为混凝土时屏蔽盒内外的电场强度云图

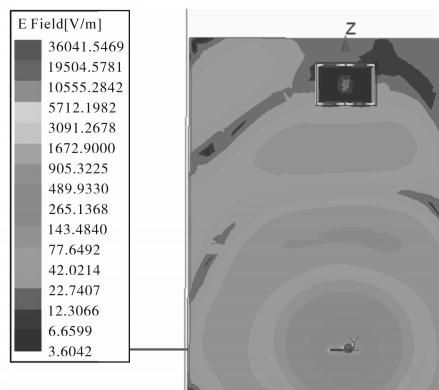
Fig.12 Contour of electric field strength inside and outside shielding box when the shielding material is concrete

4.4 屏蔽材料为不锈钢

设置屏蔽盒的材料属性为不锈钢,得到屏蔽盒内外的电场强度分布云图如图13所示。分析



(a)全封闭不锈钢屏蔽盒



(b)开有大量孔洞的不锈钢屏蔽盒

图13 屏蔽材料为不锈钢时屏蔽盒内外的电场强度云图

Fig.13 Contour of electric field strength inside and outside shielding box when the shielding material is stainless steel

发现,被不锈钢屏蔽盒完全包裹的单极子天线的信号强度趋近于0 dB,电场强度分布云图也表明,屏蔽盒内部电场强度衰减明显,趋近于零,如图13a所示,体现了不锈钢金属材料对电磁辐射的良好屏蔽效果。但是,全封闭的不锈钢屏蔽盒也阻碍了内部单极子天线与外界的信号传递。因此,设计开有大量孔洞的不锈钢壳体布置方式,进一步根据Baum-Liu-Tesche(BLT)方程^[10],屏蔽体缝隙的开孔孔径应避免与电磁波的波长相接近,因为当缝隙孔径与电磁波波长相近时,电磁波的孔隙衍射会增强,显著降低屏蔽体的屏蔽效能,最终优化选取孔洞孔径为5 mm。仿真分析发现,上述屏蔽材料布置方式的优化改进,屏蔽盒内单极子天线的最大信号强度为30 dB,盒体内部的电场强度明显降低,如图13b所示;同时,盒体内部的电场强度并没有趋近于零,在单极子天线附近仍有可观的电场强度信号。上述分析表明,可以在减弱外部电磁辐射干扰的同时,保证屏蔽盒内的单极子天线与外部进行信号传递。

5 结论

为明晰5G电磁辐射对继电保护通信控制设备的干扰影响,选择业内应用广泛的微带天线形式,建立了中心工作频率为3.5 GHz的微带天线仿真模型,分析了微带天线的电磁辐射传播衰减规律,发现由于微带贴片的非对称性,其空间电磁辐射的增益也呈现明显的不对称性,贴片法线方向正上方或正下方方位的增益显著高于其他方位。进一步,为分析不同屏蔽材料对电磁辐射的屏蔽效果,以空气为对照组,分别分析了PVC塑料、混凝土、不锈钢板等常用建材的干扰抑制能力,发现不锈钢板相较于其他2种材料有更好的电磁干扰屏蔽能力。最后,为保证屏蔽盒内部的单极子天线的正常通信需求,对不锈钢屏蔽盒的布置方式进行优化,通过在盒体上均匀开挖5 mm通孔的方式,将外部电磁干扰由66.5 dB降至30 dB,并避免内部电场强度趋近于零,实现了在显著降低外电磁干扰的同时,保证了单极子天线的正常通信需求。

参考文献

- [1] 祝恩国,邹和平,巫钟兴.一种应用NB-IoT的智能电能计量装置设计[J].电气传动,2019,49(3):92-96.
ZHU Enguo, ZOU Heping, WU Zhongxing. A design of smart electric energy metering device applying NB-IoT[J]. Electric Drive, 2019, 49(3): 92-96.
- [2] 李腾,闫菲,于志强,等.基于ARM的远程监控数据采集系统的设计与应用[J].电气传动,2020,50(7):103-107.
LI Teng, YAN Fei, YU Zhiqiang, et al. The design and application of remote monitor data acquisition system based on ARM[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 103-107.
- [3] 郁家麟,肖龙海,胡舟,等.面向微电网集群的多端口能量路由器及其分布式控制策略[J].电气传动,2021,51(13):46-51.
YU Jialin, XIAO Longhai, HU Zhou, et al. Multi-terminal energy router and its distributed control strategy for micro-grid clusters[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 46-51.
- [4] 徐振宇,李帅,陈勇,等.对电动汽车无线充电过程中降低辐射方法的研究[J].电气传动,2022,52(10):51-56.
XU Zhenyu, LI Shuai, CHEN Yong, et al. Research on reducing radiation method in electric vehicle charging process[J]. Electric Drive, 2022, 52(10): 51-56.
- [5] 李刚,盖文,韩杰.风洞变频调速系统电磁兼容仿真研究[J].电气传动,2021,51(17):75-80.
LI Gang, GAI Wen, HAN Jie. Electromagnetic compatibility simulation research of variable frequency speed[J]. Electric Drive, 2021, 51(17): 75-80.
- [6] HOSSEINI Ehsan, SABET Nasser, ARJMAND Mohammad, et al. Multilayer polymeric nanocomposite thin film heater and electromagnetic interference shield[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 435P2: 134598, 2-15.
- [7] 曹海洋,侯峰,刘帅,等.基于联合仿真的变频调速系统传导EMI预测研究[J].电气传动,2019,49(7):90-93.
CAO Haiyang, HOU Feng, LIU Shuai, et al. Conducted EMI prediction of variable frequency speed regulation system based on co-simulation[J]. Electric Drive, 2019, 49(7): 90-93.
- [8] 杨慧春,王丽霞,唐胜春,等.一种微型WLAN贴片天线的设计[J].北京邮电大学学报,2021,44(6):129-133.
YANG Huichun, WANG Lixia, TANG Shengchun, et al. Design of a miniaturized patch antenna for WLAN[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(6): 129-133.
- [9] 田春明,杨安,叶乐,等.基于贝叶斯算法的天线端到端优化[J].系统工程与电子技术,2021,43(12):3413-3419.
TIAN Chunming, YANG An, YE Le, et al. End to end optimization of antenna based on Bayesian algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(12): 3413-3419.
- [10] 张岩,田铮,王川川,等.双层腔体屏蔽效能随孔缝位置与数量变化规律研究[J].电工技术学报,2022,37(13):3350-3360.
ZHANG Yan, TIAN Zheng, WANG Chuanchuan, et al. Research on the variation of shielding effectiveness of double-layer shielding-enclosure with the position and number of apertures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3350-3360.

收稿日期:2022-06-23

修改稿日期:2022-07-22