

GIS局部放电检测用圆盘型UHF内置传感器的参数影响特性仿真分析

局部放电超高频（UHF）检测法是检测GIS内部绝缘缺陷的重要手段。传感器技术是UHF法的关键，相比于外置传感器，UHF内置传感器具有更好的局部放电检测灵敏度。以等效高度作为评判传感器局部放电检测性能的关键指标，构建对应的性能评估仿真模型；在此基础上，对圆盘型UHF内置传感器进行性能仿真分析，重点仿真圆盘贴片大小、金属底板大小、馈电杆位置、介质层材料及其高度等参数对其灵敏度的影响，获得传感器典型参数的选取原则，为传感器的性能评估及圆盘型内置传感器的优化设计提供了一定的参考依据。

贾勇勇 杨景刚 赵科/江苏省电力公司电力科学研究院 戎琳/国电南瑞科技股份有限公司 黄成军/上海交通大学电子信息与电气工程学院

自20世纪80年代初英国中央电力局（CECB）实验室提出局部放电超高频（UHF）检测法^[1]，设计并研制基于该方法的GIS局部放电带电检测或在线监测系统就成为了国内外科研机构的研究热点^[2-5]。

传感器技术是UHF法的关键，UHF传感器根据安装方式可分为外置式和内置式两种。内置式传感器安装在GIS腔体内，由于腔体内电磁波衰减较小，加上GIS筒体可有效屏蔽外界电磁干扰，使内置式传感器可以获得更高的检测灵敏度。近年来多数GIS制造厂家均采用了带金属法兰的盆式绝缘子，使电磁波难以传播到GIS外部，因而在GIS外部用外置式传感器很难检测到信号，这就更加凸显了内置式传感器的必要性。

根据内置传感器的结构、原理不同，目前在研制或应用的传感器类型多

种多样^[6-10]，其中基于微带天线原理的圆盘型UHF内置传感器由于结构简单、表面光滑以及对GIS内部场强影响较小等特点，已经成为应用最为广泛的UHF内置传感器之一。然而，该技术多为国外局部放电在线监测公司所掌握，其产品需和检测系统捆绑销售，成本较高。且目前已商用的内置式传感器的性能同样存在不足，其局部放电检测性能及其性能评估方式难以满足GIS局部放电检测的要求。本文针对这一现象，介绍了一种评价内置传感器性能的关键参数，并以此为基础设计了传感器性能评估仿真模型，从仿真角度对传感器的参数影响特性进行了深入分析，以期传感器性能评估及传感器优化设计提供一定的参考依据。

圆盘型UHF内置传感器的典型结构

通常圆盘型UHF内置传感器由圆盘贴片、介质层、金属底板及馈电杆组成^[11-13]，图1为圆盘型UHF内置传感器的典型结构。其中圆盘贴片、介质层和金属底板构成典型的微带天线结构。馈电杆与传感器信号连接线（高频同轴线）的

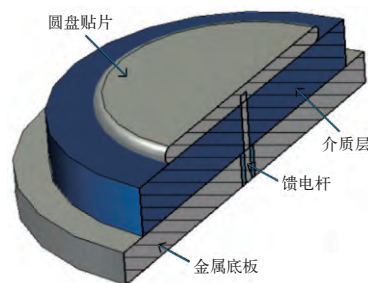


图1 圆盘型UHF内置传感器典型结构



贾勇勇/工程师

关键词/Keywords

GIS ·
局部放电 ·
UHF ·
内置传感器 ·
灵敏度 ·

江苏省电力公司2013年科技项目（J2013012）。

内芯相接，作为传感器信号输出的正极；信号连接线的屏蔽层与金属底板相接，作为信号输出的接地端。当应用于GIS局部放电检测时，通常使用GIS中的SF₆气体作为介质层，而金属底板又可兼做GIS盖板。

传感器性能评估仿真模型

超高频传感器可理解为用于接收局部放电所产生电磁波的天线。因此，作为传统天线的性能评价指标，驻波比、方向图及增益等对于评估内置传感器的性能具有重要意义。然而，使用传感器检测局部放电时，最关心的是在同样的场强环境下传感器输出电压的幅值，即传感器的输出特性。因此，本文将传感器输出电压与传感器中心点场强幅频特性的比值（定义为灵敏度 He ，单位为m）作为评估传感器检测性能的关键指标，表达式为

$$He_f = \frac{U_f}{E_f} \quad (1)$$

为获得式（1）所示的传感器灵敏度，本文构建了图2所示的仿真模型，通过在一个矩形TEM波导系统的内壁上开一个直径与金属底板直径相同的测试窗口，并将传感器安装在其中来实现。

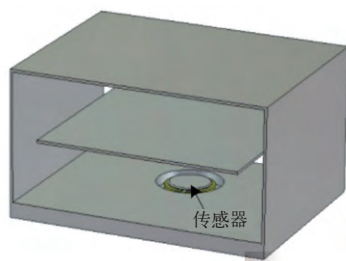


图2 UHF传感器灵敏度仿真模型

该模型与圆形同轴波导系统类似，中间加入金属隔板后可使其中传导TEM波。由于TEM波为横电磁波，其电场方向垂直于传播路径，且由于仿真模型中间金属隔板及波导壁均为光滑平面，根据电磁学理论可知，金属隔板与波导下壁之间的电场近似呈均匀分布，因此在测量传感器灵敏度时可以得到更为准确的评估结果。通过在该波导系统的外壁上开一个直径与金属底板直径相同的测试窗口，并将传感器安装在其中，检测传感

器输出电压及传感器中心位置场强的时域波形，计算对应的幅频特性曲线，即可获得传感器的灵敏度特性曲线。

圆盘型UHF内置传感器的性能分析

圆盘型传感器中电磁波各主要模式TM_{mn}的谐振频率由式（2）确定

$$f_{mn} = \frac{c\chi'_{mn}}{2\pi a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中， χ'_{mn} 为第一类 m 阶Bessel函数导数 $J'_m(x)$ 的第 n 个零点； c 为光速； a 为计入边缘效应后圆盘贴片的等效半径； ϵ_r 为介质层的相对介电常数。

$J'_m(\chi'_{mn})$ 的前几个根 χ'_{mn} 如下表所示。

表 $J'_m(\chi'_{mn})=0$ 的前几个根

m	n	χ'_{mn}
0	1	0
1	1	1.841
2	1	3.054
0	2	3.831

圆盘贴片的物理半径 a' 与等效半径 a 的关系为

$$a' = \frac{a}{[1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} (\ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726)]^{1/2}} \quad (3)$$

式中， h 为介质层的高度。

由式（2）可知，传感器中电磁波各模式分量的谐振频率主要由圆盘贴片半径和介质层材料的相对介电常数决定，圆盘贴片半径、介质材料的介电常数越大，各模式电磁波的谐振频率越小。同时由式（3）可知，介质层的高度越大，传感器的有效尺寸就越大，因而此时各模式的谐振频率越小。此外，金属底板的半径及馈电点的位置也可能对包括谐振频率在内的传感器性能产生一定影响。

忽略介质层高度 h 的影响，当介质基片选择相对介电常数为3.1的聚脂类材料、圆盘贴片的半径为83 mm时，由式（2）可计算出传感器中主模式TM₁₁的谐振频率大约为600 MHz。分别选取传感器介质层高度为30 mm，金属底板半径为130 mm，馈电杆位于传感器中心点。建立图2所示的仿真模

型,使用时域有限积分法进行仿真分析,可得传感器中心场强 E 及其输出电压 U 的时域波形,如图3所示。

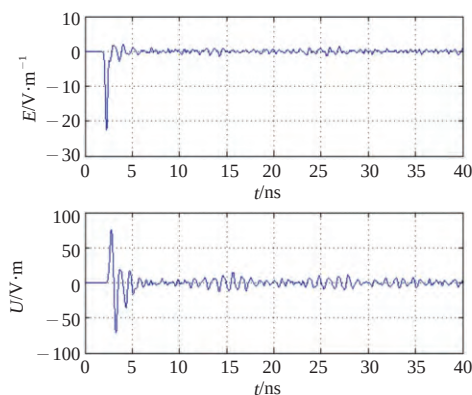


图3 传感器中心场强及其输出电压的时域波形

分别对电压 U 及场强 E 进行频谱分析,并计算各频率下两者的比值,即可获得传感器的灵敏度曲线,如图4所示。可以发现,该传感器的中心频率约为585 MHz,接近设计目标600 MHz,且在0.3~1.5 GHz的频率范围内,传感器灵敏度大于10 mm的占比达到了79.1%,说明传感器具有较高的局部放电检测灵敏度。

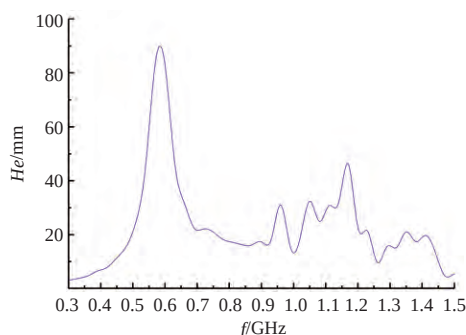


图4 传感器灵敏度特性曲线

结构参数对传感器灵敏度的影响

如前文所述,传感器圆盘贴片大小、介质层高度、介质层材料、金属底板大小及馈电点位置等因素均可能对传感器的局部放电检测性能产生影响,本节将就上述结构参数对圆盘型UHF内置传感器灵敏度的影响进行仿真分析,以期为该类型传感器结构参数的选取提供参考依据。为突出重点,同时考虑到现场检测频段的需要,主要针

对1.5 GHz以下的灵敏度特性进行分析。

1. 传感器圆盘贴片大小的影响

为分析传感器圆盘贴片大小对传感器性能的影响,分别选取传感器圆盘贴片半径为70 mm、80 mm、90 mm、100 mm和110 mm进行仿真计算。传感器灵敏度 He 特性的变化曲线如图5所示。

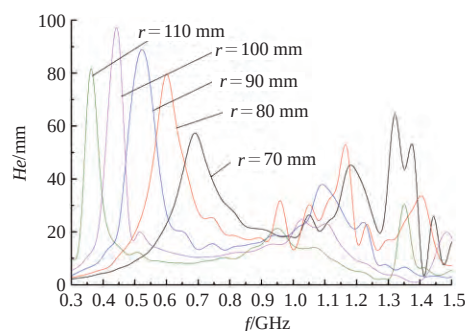


图5 圆盘贴片大小对传感器灵敏度的影响

仿真结果表明,随着传感器的圆盘贴片尺寸逐渐增大,传感器中心频率逐渐降低,与上节的分析结果相符,即圆盘贴片尺寸的增大会引起传感器中电磁波主模式的谐振频率下降。同时需要注意的是,圆盘贴片半径在70~100 mm之间变化时,传感器灵敏度峰值呈增大趋势;但是圆盘贴片半径继续增大到110 mm时,传感器灵敏度峰值将下降。因此,传感器圆盘贴片的大小应根据检测需要所确定的频带要求进行选择。

2. 传感器介质层高度的影响

为分析传感器介质层高度对传感器性能的影响,分别选取传感器介质层高度为10 mm、20 mm、30 mm、40 mm和50 mm进行仿真计算。传感器灵敏度 He 特性的变化曲线如图6所示。

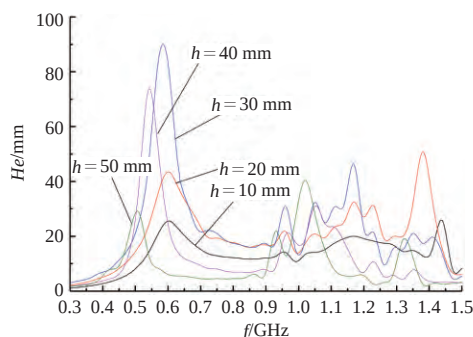


图6 介质层高度对传感器灵敏度的影响

仿真结果表明,随着传感器的介质层高度逐渐增大,传感器中心频率缓慢下降,与上节的分析结果相符,即介质层高度的增大会引起传感器中电磁波主模式的谐振频率下降。同时,介质层高度在10~30 mm之间变化时,传感器灵敏度峰值呈增大趋势;但是介质层高度继续增大时,传感器灵敏度峰值将下降。各频率点所对应的灵敏度的变化规律与灵敏度峰值相似。因此,针对上节所设计的圆盘型传感器,介质层的高度选择为30 mm时将会获得较好的检测性能。

3. 传感器介质层材料的影响

为分析圆盘传感器介质层材料对传感器性能的影响,分别选取介质层材料的相对介电常数 ϵ_r 为3、4、5、6和7进行仿真计算。传感器灵敏度 He 特性的变化曲线如图7所示。

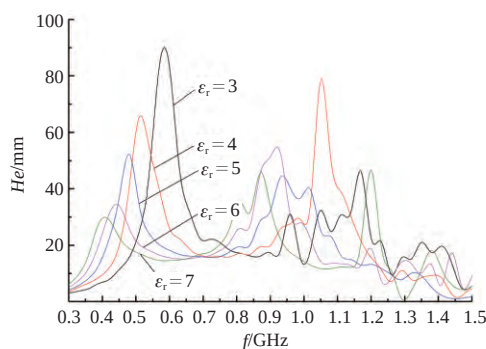


图7 介质层材料对传感器灵敏度的影响

仿真结果表明,随着介质层材料的介电常数逐渐增大,传感器中心频率逐渐下降,与上节的分析结果相符,即介质层材料的介电常数增大会引起传感器中电磁波主模式的谐振频率下降。同时,随着介质材料的介电常数增大,传感器灵敏度峰值呈下降趋势。因此,在满足检测频带要求的基础上,应选用相对介电常数较小的介质材料,如上节所使用的相对介电常数为3.1的聚酯类材料。

4. 传感器金属底板大小的影响

为分析传感器安装窗口(即金属底板)对传感器性能的影响,分别选取传感器金属底板的半径为110 mm、120 mm、130 mm、140 mm和150 mm进行仿真计算。传感器灵敏度 He 特性的变化曲线如图8所示。

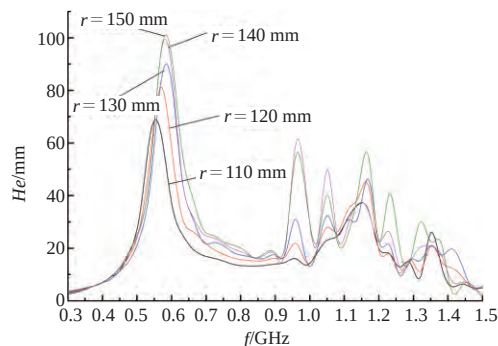


图8 金属底板大小对传感器灵敏度的影响

仿真结果表明,随着传感器金属底板半径逐渐增大,传感器中心频率缓慢上升。同时,传感器灵敏度曲线整体都得到提高。但是随着金属底板的尺寸越来越大,传感器灵敏度的增大程度越来越小,即当安装窗口增大到一定尺寸时,再继续增大金属底板的尺寸对传感器灵敏度的增强效果基本可以忽略,且金属底板尺寸的会增加提升传感器制造及安装成本,且受GIS尺寸的限制。因此,针对上节所设计的带直接接地的圆盘传感器,金属底板半径选择130 mm比较合适。

5. 馈电杆位置的影响

为分析馈电杆位置对传感器性能的影响,分别将馈电杆设置在距离圆盘中心点0 mm、10 mm、20 mm、30 mm和40 mm的位置进行仿真计算。传感器灵敏度 He 特性的变化曲线如图9所示。

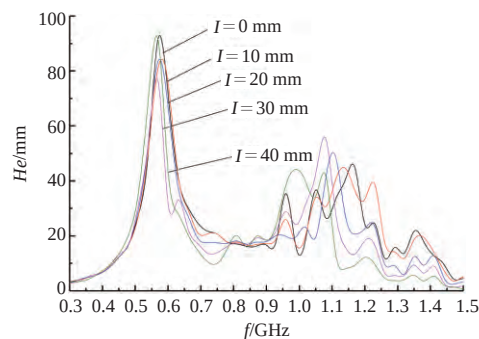


图9 馈电杆位置对传感器灵敏度的影响

将图9中0.5~0.7 GHz的灵敏度曲线放大显示,如图10所示。

仿真结果表明,尽管传感器馈电杆位置与圆盘中心点的距离变化,但是传感器中心频率及灵敏度峰值几乎不变,且在中心频率以下的频率

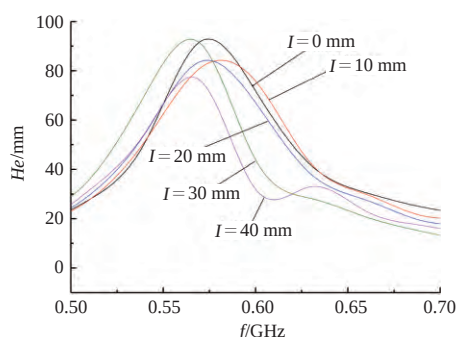


图10 馈电杆位置对传感器灵敏度的影响(局部放大)

范围内,灵敏度曲线几乎重合,即馈电杆的位置变化对低频信号的检测灵敏度无明显影响。但是在中心频率以上,灵敏度随着馈电杆与圆盘中心点的距离减小而呈增大趋势,表明在高频部分,馈电杆靠近中心点将有助于提高传感器检测灵敏度。因此,针对上节所设计的带直接接地的圆盘传感器,应当将馈电杆设置在传感器圆盘中心位置附近。

结束语

1) 传感器中心频率主要由圆盘贴片半径、介质层高度及介质层材料的相对介电常数决定,并与上述参数均成反比。

2) 传感器灵敏度幅值与金属底板半径成正比,与介质层材料的相对介电常数成反比。

3) 圆盘贴片半径、介质层高度对传感器灵敏度幅值的影响呈抛物线特性,即参数过大或过小均会降低传感器灵敏度,可根据本文所述仿真模型进行综合分析。

4) 馈电杆位置对传感器灵敏度幅值的影响较小,但其靠近传感器中心位置时有助于提升传感器高频响应特性。

本文的研究成果为圆盘型UHF内置传感器性能评估及传感器优化设计提供了重要的参考依据。

参考文献

[1] Hampton B F, Meats R J. Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and

Distribution, IEE Proceedings C, 1988, 135 (2): 137-145.

[2] Pearson J S, Hampton B F, Sellars A G. A continuous UHF monitor for gas-insulated substations [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1991, 26 (3): 469-478.

[3] 唐炬, 廖华, 张晓星, 等. GIS局放超高频在线监测系统研制 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008, 31 (1): 29-33.

[4] 李忠, 陈华杰, 胡迪军, 等. 基于超高频检测技术研究GIS中的局部放电 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (1): 41-44.

[5] 崔在玉, 江昌元, 杜基俊, 等. 预防气体绝缘开关装置故障的超高频局部放电在线实时监控系統 [J]. 电网技术, 2007, 31 (7): 51-54.

[6] 唐炬, 侍海军, 许高峰, 等. GIS局部放电两种内置传感器响应特性分析 [J]. 高电压技术, 2003, 29 (2): 29-31.

[7] 钱勇, 黄成军, 江秀臣, 等. 基于超高频法的GIS局部放电在线监测研究现状及展望 [J]. 电网技术, 2005, 29 (1): 40-43, 55.

[8] 张鸣超, 王建生, 邱毓昌. GIS中局部放电测量用超高频传感器 [J]. 电网技术, 1998, 22 (8): 42-53.

[9] 唐炬, 朱伟, 孙才新, 等. 检测GIS局部放电的超高频屏蔽谐振式环天线传感器研究 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (7): 705-709, 737.

[10] 康行健. 天线原理与设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.

[11] 顾乐, 陈隽, 刘文浩, 等. GIS局部放电圆板型内置传感器性能影响因素的研究 [J]. 高压电器, 2012, 48 (2): 55-59.

[12] 程序, 唐志国, 李成榕. 特高频传感器结构参数对其幅频特性的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30 (15): 25-29.

[13] 张钧, 刘克诚, 张贤铎, 等. 微带天线理论与工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.

(收稿日期: 2014-09-15) **EA**