

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.05.003

# 复合绝缘子伞裙老化状态检测的单边核磁共振传感器

杨挺<sup>1</sup>,余登洁<sup>2</sup>,夏云峰<sup>1</sup>,尹创荣<sup>1</sup>,尹成<sup>1</sup>,徐征<sup>2</sup>,何为<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司 东莞供电局,广东 东莞 523000;2. 重庆大学 输配电装备及系统  
安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**对复合绝缘子伞裙老化状态的评估,关系到电力系统的安全稳定运行。为了实现在工程现场对复合绝缘子伞裙的无损检测,提出了一种便携式单边核磁共振传感器的设计方案。对静态磁场的均匀度和射频线圈进行了优化,以获得较高的信噪比。以110 kV等级下不同运行年份的绝缘子为样品进行测量,使用CPMG序列对样品进行激励;采用单指数拟合和反拉普拉斯变换对核磁共振横向弛豫回波信号进行处理。结果表明,随着复合绝缘子运行时间的增加,其等效横向弛豫时间减小。因此,这种便携式单边核磁共振传感器有望用于复合绝缘子伞裙老化程度的定量分析。

**关键词:**复合绝缘子伞裙;老化状态;核磁共振;无损检测

中图分类号:TM930

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)05-019-10

## Unilateral NMR sensor for assessing the aging status of composite insulator sheds

YANG Ting<sup>1</sup>, YU Dengjie<sup>2</sup>, XIA Yunfeng<sup>1</sup>, YIN Chuangrong<sup>1</sup>, YIN Cheng<sup>1</sup>, XU Zheng<sup>2</sup>, HE Wei<sup>2</sup>

(1. Guangdong Grid Dongguan Power Supply Bureau, Dongguan 523000, Guangdong P.R.China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

**Abstract:** Assessing the aging status of composite insulator sheds concerns the security and stability of power system. In order to realize nondestructive examination of the sheds of composite insulators at project site, the design of a portable unilateral NMR (nuclear magnetic resonance) sensor was proposed. We optimized the homogeneity of the static magnetic field and the RF (radio-frequency) coil to obtain high SNR (signal to noise ratio). The tested samples were the sheds of three composite insulators from 110 kV lines serviced for different years in the same area, and the standard CPMG sequence was employed. The measurement data was processed by both single exponential fitting and inverse Laplace transform. It shows that an increase of the service time of the composite insulators results in a decrease of the equivalent transverse relaxation time. Therefore, the portable unilateral NMR sensor has the potential to assess the aging status of composite insulator sheds.

**Keywords:** composite insulator sheds; aging status; nuclear magnetic resonance; nondestructive examination

收稿日期:2016-12-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51377186)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51377186).

作者简介:杨挺(1977-),男,高级工程师,主要从事输电设备的运维与检修,(E-mail)13829287766@139.com。

徐征(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电磁场理论及应用研究,(E-mail) xuzheng@cqu.edu.cn。

复合绝缘子<sup>[1-2]</sup>由于其质量轻、防污闪性能好、机械强度高优点已广泛应用于高压输电线路中。复合绝缘子由芯棒、伞裙护套构成。其中,伞裙护套由高温硫化硅橡胶制成,用来保护芯棒不受大气中水分的侵蚀,同时提供必要的爬电距离。复合绝缘子在挂网使用<sup>[3-4]</sup>过程中,由于受到强电场以及恶劣的气候环境等因素(污秽、酸雨、高温等)的影响,使得绝缘子伞裙表面出现硬化、粉化、脆化以及憎水性退化等现象。这些现象导致复合绝缘子伞裙的绝缘性能下降,沿面闪络事故频发,严重威胁电力系统的安全运行。因此,正确评估复合绝缘子伞裙的老化状态,及时发现并更换严重老化的绝缘子,对保障电力系统的安全稳定运行至关重要。

目前,国内外针对复合绝缘子伞裙老化状态<sup>[5]</sup>的检测方法主要有直接观察法<sup>[6-7]</sup>、HC 喷水分级法<sup>[8-10]</sup>、泄漏电流法<sup>[10-12]</sup>、接触角法<sup>[13]</sup>、热刺激电流法<sup>[14-16]</sup>等。直接观察法和 HC 喷水分级法易受到检修人员主观影响,稳定性差;泄漏电流法中影响电流大小的因素复杂,随机性大,结果也不可靠;接触角法和热刺激电流法对测试环境的要求都很高,一般用于实验室条件下的离线测量,操作复杂,为有损的检测方法。迄今为止,尚未有一种方便现场对复合绝缘子伞裙进行无损检测方法能够对复合绝缘子伞裙的老化状态进行准确的评估。

传统的核磁共振技术是实验室检测高分子材料的重要手段<sup>[17]</sup>,而低场核磁共振技术由于其便携性和无损性,已成功用于现场检测橡胶材料的老化状态<sup>[18]</sup>。在之前的研究中,提出用便携式的低场核磁共振技术在工程现场对复合绝缘子伞裙的老化状态进行无损检测<sup>[19]</sup>。测量结果表明,这种传感器能成功的区别出不同使用年限的复合绝缘子伞裙的老化状态。但是该文献中的 NMR 传感器为 2 块永磁体相对的 U 型结构,静态磁场  $B_0$  位于 2 块磁体中间,需要根据被测绝缘子的厚度调节 2 块永磁体的间距,这改变了  $B_0$  场的分布,需要及时调整射频匹配电路,加大了现场操作难度。此外,由于该传感器的  $B_0$  场不均匀,为了获得信噪比较高的核磁共振信号,需要增加扫描次数从而加长了测量时间,另外,  $B_0$  场的不均匀使信噪比较低。

复合绝缘子伞裙的上表面比下表面的老化程度更加严重,因此,上表面更加适用于测量。为了弥补便携式低场核磁共振传感器的不足,提出使用单边核磁共振(unilateral nuclear magnetic resonance, UMR)传感器检测复合绝缘子的老化程度。这种 UMR 传感器的  $B_0$  场平行于传感器上表面,而且在测量过程中不需要调节传感器的结构。为了提高信噪比,同时对射频线圈的结构进行了优化。

## 1 单边核磁共振传感器

针对复合绝缘子伞裙的结构特点,设计如图 1 所示的单边核磁共振传感器。该传感器主要包括长方形永磁体、铝壳、射频线圈及其调谐匹配电路。永磁体用来产生静态磁场  $B_0$ ,铝壳用来组装磁体,射频线圈用来发射激励脉冲和接收样品的核磁共振回波信号,调谐匹配电路可以使电路达到阻抗匹配,使电路在共振频率点达到谐振,传感器测量复合绝缘子伞裙示意如图 2 所示。

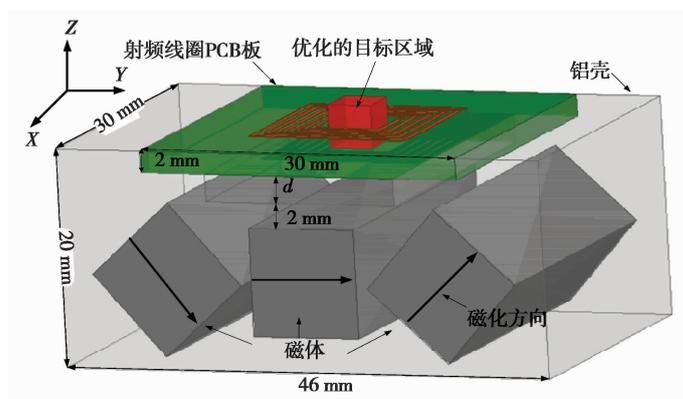


图 1 单边核磁共振传感器结构图

Fig.1 Structure of the UMR sensor

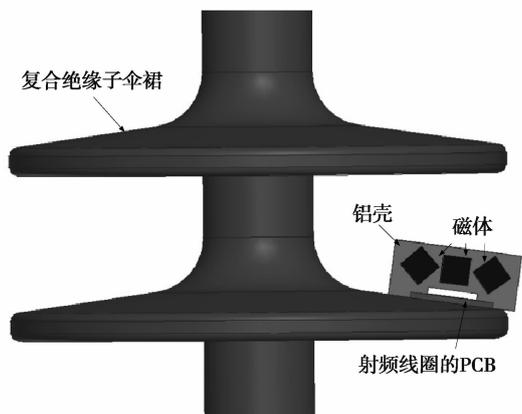


图 2 单边核磁共振传感器测量复合绝缘子伞裙示意图

Fig.2 The schematic diagram of composite insulator shed tested by the UMR sensor

1.1 磁体结构

静态磁场  $B_0$  越均匀,被激励的氢原子越多,可以获得更高的信噪比。为了产生 1 个相对均匀的磁场  $B_0$ , 实现工程现场检测,在优化设计磁体结构时,还需要考虑传感器的便携性。如图 1 所示,设计的传感器磁体结构由尺寸相同的 3 个长方体永磁块(SmCo YXG-32L,上海磁建实业有限公司)组成,考虑到 2 片相邻绝缘子伞裙的间距以及伞裙的实际大小,将 3 个永磁块尺寸确定为  $10\text{ mm}(y) \times 10\text{ mm}(z) \times 30\text{ mm}(x)$ 。

如图 1 所示,3 个磁块的磁化方向固定,通过调节中间磁块与 2 边磁块的相对位置来优化磁体上方目标区域内(距中间磁体上表面  $5\text{ mm}$  处,  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  区域内)静态磁场的均匀度,从而确定最优磁体结构。文献[20]描述了具体的优化的过程。图 3 为在 Maxwell(Ansoft, Pittsburgh, PA, USA)中仿真所得的最优磁体结构在距离中间磁体表面不同高度处,分别在  $yo z$  面沿  $y$  轴方向  $(-2, 2)\text{ mm}$  范围内直线上均匀的取 11 个点,将这些直线上的每一点的  $B_0$  减去中心点的  $B_0$  再除以中心点的  $B_0$  的值代表磁场的均匀度,即  $\frac{B_0 - B_{0\text{中心点}}}{B_{0\text{中心点}}} \times 100\%$ 。结果表明,在距离中间磁体上表面为  $z = 7.3\text{ mm}$  的沿  $y$  轴方向的磁场最为均匀。选择  $z = 7.3\text{ mm}$  的  $xy$  平面作为最优平面用于检测绝缘子伞裙的上表面,在此平面的  $B_0$  场的方向沿  $y$  轴方向。最优面仿真的  $B_0$  分布如图 4(a)所示,  $xoz$  平面的  $B_0$  的分布如图 4(b)所示,且其磁场均匀度为  $0.5\%$ 。

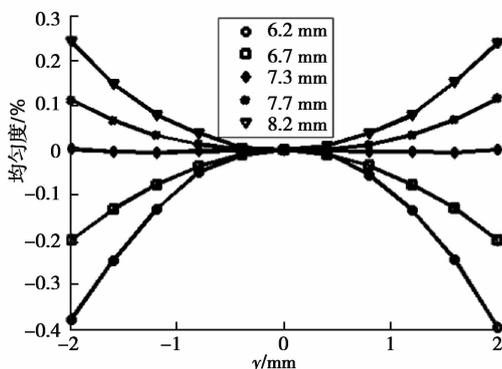
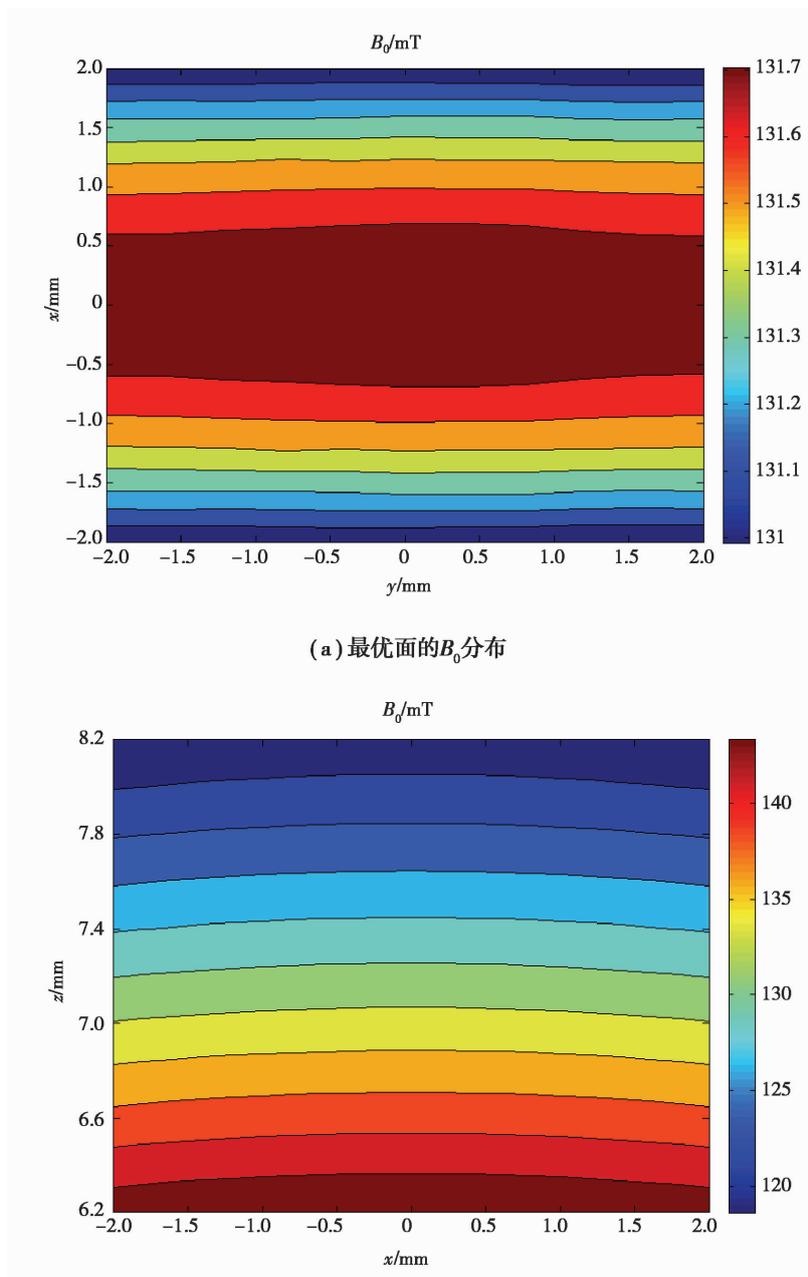


图 3 距离磁体不同高度处的磁场均匀度

Fig.3 Homogeneity of  $B_0$  of different distance above the magnet

1.2 射频线圈的设计

静态磁场的最优层面距离中间磁体的上表面为  $7.3\text{ mm}$ 。由于射频磁场  $B_1$  随着距离线圈表面距离的增加衰减的非常快,选定线圈上方  $0.5\text{ mm}$  处的平面为射频脉冲的最优平面,射频线圈被放置在离中间磁体表

图 4 不同表面的  $B_0$  的分布Fig.4 The distribution of  $B_0$  in the plane

面 6.8 mm 处。文中使用平面矩形螺线线圈产生垂直于  $B_0$  的  $B_1$  场。

在单边核磁共振中,当样品被激励的体积、射频电流以及静态磁场相同时,线圈的信噪比可由式(1)表示<sup>[21]</sup>,其中  $B_1$  为射频磁场,  $R$  为射频线圈的交流电阻。因此,线圈的性能直接决定了核磁共振的信号质量。

$$SNR \propto \frac{B_1}{\sqrt{R}} \quad (1)$$

射频线圈使用双层线圈,双层线圈结构如图 5 所示,相对于单层线圈的优点是上下层线圈产生的射频磁场叠加能够产生更强的射频磁场  $B_1$ 。

采用 Maxwell 仿真计算了不同结构的射频线圈。图 6 给出了 3 种不同尺寸的射频线圈在测量平面上的射频磁场分布,三线圈均为相同匝数的双层线圈,1<sup>#</sup> 的布线面积为 11 mm × 11 mm, 2<sup>#</sup> 的布线面积为 12.5 mm × 12.5 mm, 3<sup>#</sup> 的布线面积为 14 mm × 14 mm。因为  $B_1$  是对称分布,图 7 绘出了 3 个线圈沿  $x$  轴方向的相对信噪比曲线。结果显示:图 6(b) 对应的线圈最优,不仅能保证有效选择主磁场最均匀的区域,而且

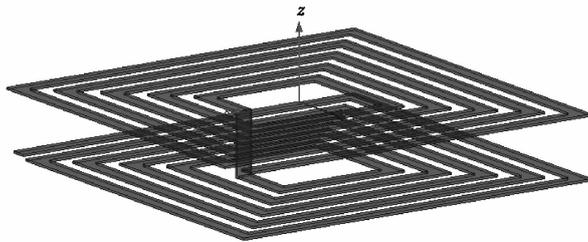


图 5 双层线圈结构

Fig.5 The structure of the double-layer coil

具备相对较好的 SNR。最优线圈的参数如下:布线面积为 12.5 mm×12.5 mm,单层匝数为 5 匝,PCB 厚度为 2 mm 的双层线圈。

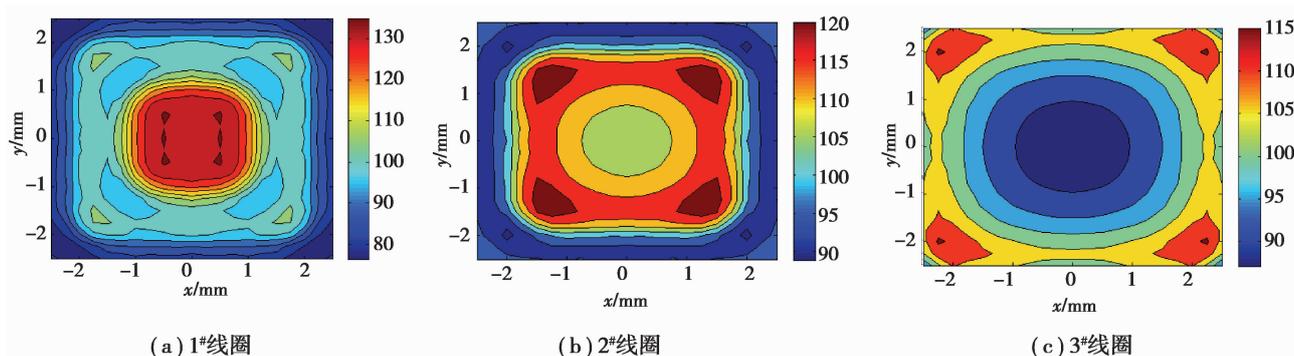


图 6 不同尺寸的 3 个线圈在最优层面的射频磁场的分布

Fig.6 Magnetic field distribution on the optimal plane of the three different RF coils

其静态磁场  $B_0$  和射频磁场  $B_1$  在最优层面上的正交情况如图 8 所示,  $B_0$  与  $B_1$  正交的部分较多表明  $B_1$  得到了有效利用。

图 9 给出了传感器的实际测量图。整个传感器折叠之后(包括夹钳)的尺寸为 6 cm×9 cm×15 cm,质量为 0.615 kg,结构小巧,方便携带。

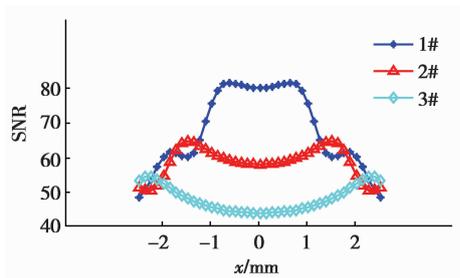


图 7 图 5 所示的 3 种线圈仿真计算出的相对信噪比比

Fig.7 SNR comparison of simulation of the three RF coils in figure 5

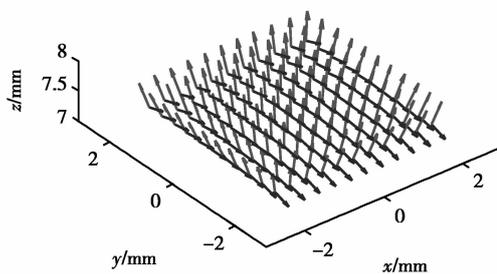


图 8  $B_0$  和  $B_1$  在最优层面的正交情况

Fig.8 Orthogonal condition of RF and static magnetic field in the optimal plane

## 2 实验结果与讨论

所有的实验测量均在室温下进行,传感器经射频功率放大器(TOMCO Technologies, Stepney, Australia)与核磁共振谱仪 Kea2(Magritek, Wellington, New Zealand)相连。

测量的样品是某 110 kV 输电线路分别使用 2 年、8 年和 11 年的绝缘子伞裙样品,实验前用清水将复合绝缘子表面清洗干净并自然风干。使用 CPMG 脉冲序列<sup>[22]</sup>测量样品的横向弛豫衰减波形,即图 10 中所

示的虚线。其中,  $d$  为脉冲宽度,  $TE$  为回波时间,  $A_{180}^\circ$  和  $A_{90}^\circ$  分别为  $180^\circ$  脉冲幅值和  $90^\circ$  脉冲幅值。

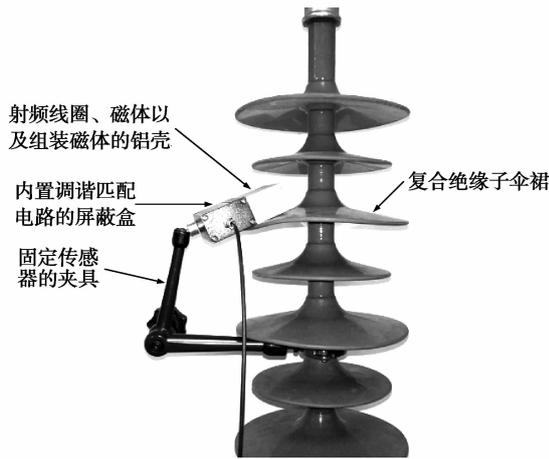


图 9 传感器(包含夹具)测量绝缘子伞裙样品示意图

Fig.9 The schematic diagram of composite insulator shed tested by NMR sensor(including the fixture)

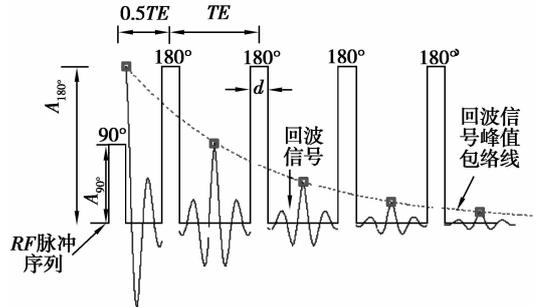


图 10 测量所用的 CPMG 序列

Fig.10 CPMG pulse sequences used by tested

在所有的测量中,CPMG 序列的参数保持如下: $d$  为  $6 \mu\text{s}$ ,  $TE$  为  $140 \mu\text{s}$ , 回波数为 3 000, 重复时间为 1.5 s,  $A_{90^\circ}$  为  $-20 \text{ dB}$ ,  $A_{180^\circ}$  为  $-14 \text{ dB}$ 。在单边核磁共振实验中,由于  $B_0$  的不均匀性,CPMG 的峰值包络线随着等效横向弛豫时间  $T_{2\text{eff}}$  按指数衰减而不是随着横向弛豫时间  $T_2$  衰减。

由于单边核磁共振的磁场强度  $B_0$  通常比较小,能够被激励的氢原子很少,为了获得理想的信噪比,扫描次数要比传统的核磁共振更多。理论上重复扫描次数越多,信噪比越好,但是实验的时间就越长,这不适用于工程现场测量。为了尽量缩短测量的时间,同时得到具有较好信噪比的信号,需要合理设定重复扫描次数。图 11 是以使用 11 年的绝缘子伞裙为样品绘出的扫描次数与信噪比的关系图。从图 11 可知当重复扫描次数达到 128 次时,信噪比增加的幅度变小,因此,可以将扫描次数设定为 128 次,使信噪比较好,不至于使测量时间过长。

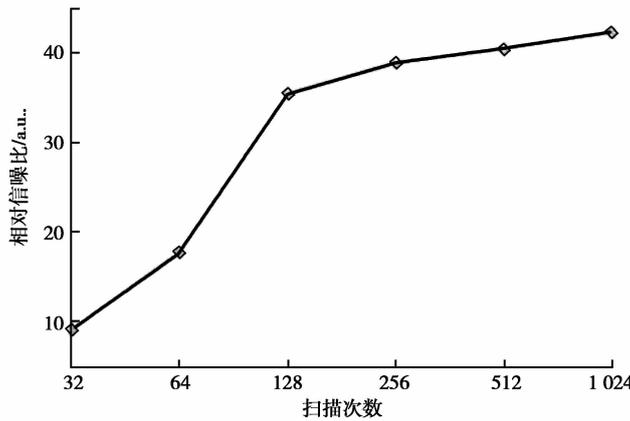


图 11 信噪比与扫描次数的关系

Fig.11 The relationship of SNR and the number of scans

每个复合绝缘子样品分别被测量了 3 次,图 12 是对使用了 11 年的复合绝缘子样品测量后作出的 CPMG 回波峰值包络线。

将所有的测量数据按式(2)进行单指数拟合,其中  $y$  是拟合曲线的幅值,  $t$  是  $n \times TE$ ,  $n$  是回波数。拟合结果如表 1 所示。

$$y = Ae^{-t/T_{2\text{eff}}} \tag{2}$$

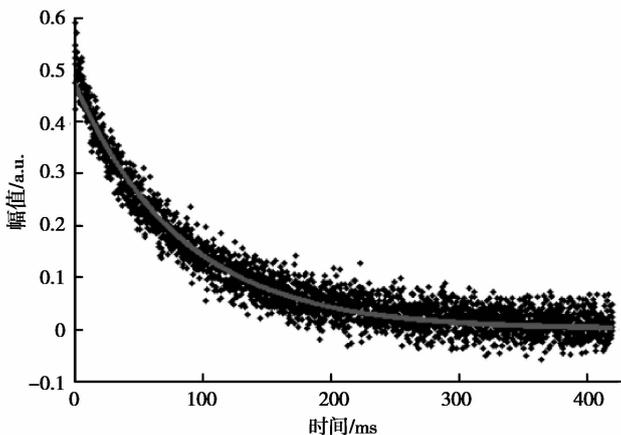


图 12 CPMG 回波信号的峰值和峰值进行单指数拟合的结果

Fig.12 The CPMG echo signal peaks and the result of single exponential fitting of the peaks

表 1 3 个样品测量数据的单指数拟合结果

Table 1 The results of single exponential fitting of the three samples tested data ms

使用年限	平均 $T_{2\text{eff}}$	$T_{2\text{eff}}$ 误差
2	90.1	$\pm 0.98$
8	83.8	$\pm 1.49$
11	82.5	$\pm 0.67$

由单指数拟合的结果可见,随着使用时间的增加其等效横向弛豫时间  $T_{2\text{eff}}$  逐渐减小。

多种导致复合绝缘子老化的含 H 基团的存在,对使用了 11 年的复合绝缘子样品的测量数据进行反拉普拉斯变换处理,可以得到由 3 个波峰组成的横向弛豫时间谱曲线如图 13 所示,其中长  $T_2$  ( $T_{2\text{long}}$ ) 成分所占的比例最大,比短  $T_2$  成分更加能够体现复合绝缘子的老化程度。因此,只截取长  $T_2$  成分作为判断复合绝缘子伞裙老化程度的指标。

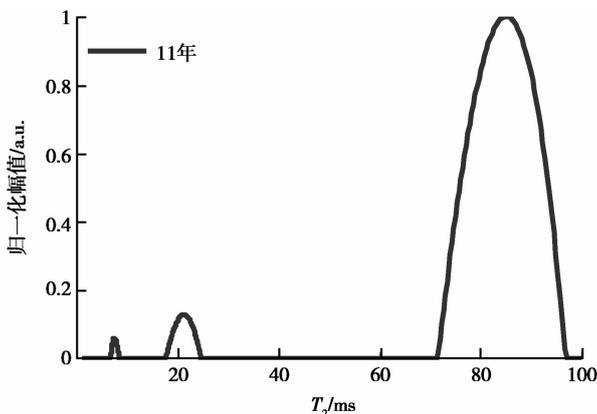
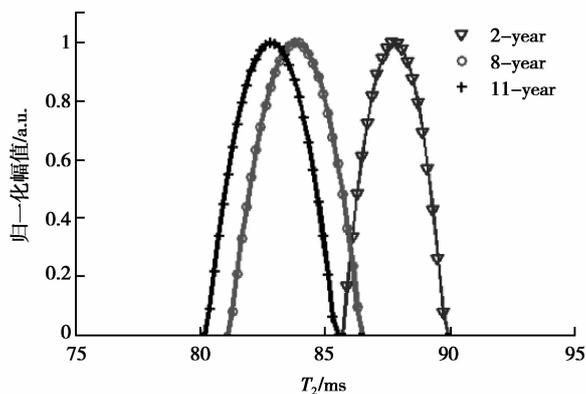


图 13 使用 11 年的复合绝缘子伞裙样品的  $T_2$  分布

Fig.13 Distributions of  $T_2$  for composite insulator sheds sample used for 11 years

为了得到绝缘子伞裙样品的  $T_2$  一维谱分布,对得到的 CPMG 回波数据进行反拉普拉斯变换处理<sup>[23-25]</sup>, 3 个样品的  $T_{2\text{long}}$  分布如图 14 所示。实验结果通过单指数拟合和反拉普拉斯变换处理的结果均有这个趋势:随着使用年限的增加,对应的等效横向弛豫时间  $T_2$  逐渐减小。

对应于表 1 的测量数据用反拉普拉斯变换处理的结果如表 2 所示。

图 14 3 个样品测量结果进行反拉普拉斯变换的  $T_{2\text{long}}$  分布Fig.14 Distributions of  $T_{2\text{long}}$  of inverse

Laplace transform of the three samples tested data

表 2 3 个样品测量数据的反拉普拉斯变换的结果

Table 2 The results of inverse Laplace transform of the three samples tested data ms

使用年限	平均 $T_{2\text{long}}$	$T_{2\text{long}}$ 误差
2	88.0	$\pm 0.43$
8	84.6	$\pm 0.11$
11	82.1	$\pm 0.75$

通过对比两种处理结果可知,不同样品之间通过  $T_2$  一维谱分布得到的  $T_{2\text{long}}$  参数之间的差别比通过单指数拟合处理得到的  $T_2$  参数之间的差别要明显,误差更小,基于此,选择由反拉普拉斯变换处理的  $T_2$  一维谱分布得到的  $T_{2\text{long}}$  参数来表征复合绝缘子伞裙的老化程度。

### 3 结 语

便携式单边核磁共振传感器体积小质量轻,能够产生可靠的可重复的实验结果。由于其便携性,实验在几分钟以内可以实现现场测量。结果表明,复合绝缘子使用年限越长对应的  $T_{2\text{long}}$  越小。下一步工作将专注于检测不同地区不同电压下的复合绝缘子伞裙的老化状态从而建立一个数据库。实验结果易受环境温度影响,为确保实验温度变化时实验结果的稳定性,有必要提高传感器的温度稳定性。由于对复合绝缘子老化程度的检测研究还处于初级阶段,有很多需要改进的地方,譬如磁场的均匀度以及传感器的抗噪声干扰的能力等。

#### 参考文献:

- [1] Looms J S T. Insulators for high voltages[M]. [S.l.]:The Institution of Engineering and Technology, 1988.
- [2] Haekam R. Outdoor HV composite polymeric insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5):557-585.
- [3] 崔江流, 宿志一. 我国硅橡胶合成绝缘子的应用与展望[J]. 中国电力, 1999, 32(1):38-41.  
CUI Jiangliu, SU Zhiyi. The application and its prospect of silicon rubber composite insulators in China[J]. Electric Power, 1999, 32(1):38-41. (in Chinese)

- [4] 雍军,沈庆河,赵富强,等. 我国硅橡胶绝缘子的应用与展望[J]. 中国电力, 1990, 32(1):38-41.  
YONG Jun, SHEN Qinghe, ZHAO Fuqiang, et al. The application and prospect of silicone rubber composite insulators in China[J]. Electric Power, 1990, 32(1):38-41. (in Chinese)
- [5] Amin M, Akbar M, Salman M. Composite insulators and their aging: an overview[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 50(6): 697-713.
- [6] 宋伟,赵林杰,李成榕,等. 复合绝缘子在线检测技术的发展[J]. 高电压技术, 2005, 31(5):28-30.  
SONG Wei, ZHAO Linjie, LI Chengrong, et al. On line detection methods of composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5):28-30. (in Chinese)
- [7] 惠华,王森,杨博,等. 复合绝缘子运行状态和老化性能评估方法研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(1):64-66.  
HUI Hua, WANG Sen, YANG Bo, et al. Research on operational status and evaluation method for aging characteristics of composite insulators[J]. Shanxi Electric Power, 2012, 40(1):64-66. (in Chinese)
- [8] 屠幼萍,陈聪慧,佟宇梁,等. 现场运行复合绝缘子伞裙材料的老化判断方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(10):2522-2527.  
TU Youping, CHEN Conghui, TONG Yuliang, et al. Aging characteristics of shed materials of silicone rubber composite insulators in service[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10):2522-2527. (in Chinese)
- [9] 闫斌,王志惠. 复合绝缘子硅橡胶材料老化性能分析[J]. 绝缘材料, 2009, 42(4):57-59.  
YAN Bin, WANG Zhihui. Inspection and analysis on the aging of silicone rubber for composite insulators[J]. Insulating Materials, 2009, 42(4):57-59. (in Chinese)
- [10] 杨照光,王胜辉,律方成,等. 污秽绝缘子泄漏电流测量系统的设计及应用[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(1):14-18.  
YANG Zhaoguang, WANG Shenghui, LV Fangcheng, et al. Design and application of leakage current measurement system for polluted insulator[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(1):14-18. (in Chinese)
- [11] 陈伟根,汪万平,夏青. 绝缘子污秽放电泄漏电流的多重分形特征研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1):50-56.  
CHEN Weigen, WANG Wanping, XIA Qing. Research on multi-fractal characteristics of leakage current for contamination discharge of insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1):50-56. (in Chinese)
- [12] Kumagai S, Yoshimura N. Leakage current characterization for estimating the conditions of ceramic and polymeric insulating surfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(4):681-690.
- [13] 白欢,胡建林,李剑,等. 应用动态接触角评判复合绝缘子憎水性等级的研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(12):3021-3027.  
BAI Huan, HU Jianlin, LI Jian, et al. Hydrophobicity evaluation of composite insulators using the dynamic contact angle [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12):3021-3027. (in Chinese)
- [14] 佟宇梁. 基于热刺激电流的复合绝缘子老化特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2011.  
TONG Yuliang. Study on the aging characteristic of composite insulator based on TSC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011. (in Chinese)
- [15] 梁英,丁立健,李成榕,等. 基于热刺激电流的硅橡胶合成绝缘子老化诊断方法初探[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21):7-12.  
LIANG Ying, DING Lijian, LI Chengrong, et al. Primary research on the diagnosis of aging silicone rubber insulators using thermally stimulation current[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21):7-12. (in Chinese)
- [16] 张辉,屠幼萍,佟宇梁,等. 基于 TSC 测试的硅橡胶复合绝缘子伞裙材料老化特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19):169-174.  
ZHANG Hui, TU Youping, TONG Yuliang, et al. Study on aging characteristics of silicone rubber shades of composite insulators based on TSC test[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19):169-174. (in Chinese)
- [17] Blümich B, Anferova S, Casanova F, et al. NMR: principles and application to quality control of elastomer products[J]. Kgs Kautschuk Gummi Kunststoffe, 2004, 57(7/8):346-349.
- [18] Blümich B, Perlo J, Casanova F. Mobile single-sided NMR[J]. Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy,

- 2008,52(4):197-269.
- [19] Xu Z, Zhao S J, Guo P. A portable NMR sensor used for assessing the aging status of silicone rubber insulator[J]. Applied Magnetic Resonance, 2013,44(12):1405-1417.
- [20] Xu Z, Meng K K, Cheng J Y. Highly uniform single-sided portable NMR sensor and its application in assessing the aging level of silicone rubber insulators[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 47(3): 777-790.
- [21] Hoult D I, Richards R E. The signal-to-noise ratio of the nuclear magnetic resonance experiment[J]. Journal of Magnetic Resonance, 1976,24(1):71-85.
- [22] Haache E M, Brown R W, Thompson M R, et al. Magnetic resonance imaging: physical principles and sequence design [M]. New York:John Wiley and Sons, 1999.
- [23] Provencher S W. A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations[J]. Computer Physics Communications, 1982, 27(3):213-227.
- [24] 郑荣. 线性积分方程反演软件-CONTIN 的求解方法与使用[J]. 计算机与应用化学, 2000, 17(4):363-366.  
ZHENG Rong. The solution method and usage of the inversion software-CONTIN of linear integral equations[J]. Computers and Applied Chemistry, 2000,17(4):363-366. (in Chinese)
- [26] Mao R, Tang J, Swanson B G. Relaxation time spectrum of hydrogels by CONTIN analysis[J]. Journal of food science, 2000, 65(3):374-381.

(编辑 陈移峰)