

圆环换能器故障成因评判的实验设计

李玉伟¹, 赵 慧², 王 艳²

(1. 海军驻上海地区水声导航系统军代表室, 上海 201108; 2. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 在实际工程中, 批量的圆环换能器在工作一段时间后出现侧边打火、绝缘下降的故障现象, 为摸清故障出现的原因, 设计了评判故障成因的实验。实验环境模拟换能器的实际工作条件, 实验过程中检测圆环换能器的阻抗、静态电容、绝缘电阻、外观及手感温度等变化情况, 然后测试换能器的电声性能, 并与正常性能的换能器进行对比。实验数据和结果表明: 圆环换能器出现故障的原因为其在空气中进行大功率发射。

关键词: 圆环换能器; 故障; 圆环碎裂

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-05-0511-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.05.018

Design of the experiment for judging the cause of ring transducer failure

LI Yu-wei¹, ZHAO Hui², WAN Yan²

(1. Navy's Shanghai Area Acoustic Navigation System Military Representative Office, Shanghai 201108, China;

2. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: In actual projects, the failure phenomenon of side-firing and insulation degradation occurs after a batch of ring transducers have been working for a period of time. In order to judge the cause of the failure, an experiment is designed. The experimental environment simulates the actual operating conditions of the transducer. During the experiment, changes in impedance, static capacitance, insulation resistance, appearance and feel temperature of the ring transducer are detected, then the electroacoustic performance of the transducer is tested and compared with normal performance of the transducer. The experimental data and results show that the failure of the ring transducer is due to its high power emission in the air.

Key words: ring transducer; fault; ring fracture

0 引言

圆环换能器是一种常用的水声换能器, 一般采用压电陶瓷圆环作为电声转换元件, 具有结构简单、水平无指向性的特点。圆环换能器广泛应用于声源、水声通讯系统、水下信标等领域。

圆环换能器存在多个损伤极限, 包括电极限、功率极限、机械极限等, 超过任一极限就会损坏换能器^[1]。其中电极限损伤是压电陶瓷元件作为驱动元件的主要功能障碍^[2], 它限制了压电陶瓷能够承受的最大工作电压。压电陶瓷环的功率极限除了与本身的材料、工作电压、频率等因素有关以外, 还与工作环境有关^[3-5]。当换能器在空气中发射时, 由于空气的阻抗远小于水的阻抗, 换能器的辐射负载

较小, 陶瓷环振动幅度较大, 可能超出其机械极限, 容易造成陶瓷环碎裂。同时, 由于空气中辐射阻抗小, 换能器在相同发射电压下输入电功率变大, 并且大部分输入电功率转换为热量, 容易导致陶瓷环发热而引起退极化。

在实际工程中, 批量的圆环换能器在工作一段时间后出现侧边打火、绝缘下降的故障现象, 本文为摸清故障出现的原因, 设计了评判故障成因的实验。实验环境模拟换能器的实际工作条件, 实验过程中检测圆环换能器的阻抗、静态电容、绝缘电阻、外观及手感温度等变化情况, 然后测试换能器的电声性能, 并与正常性能的换能器进行对比。用实验测得的数据分析圆环换能器出现故障的原因。本文实验的结果可以为圆环换能器的设计和应用提供参考, 也对其它类型换能器的应用有参考价值。

1 圆环换能器故障现象基本描述

某圆环换能器的功率元件为 2 个并联的径向极

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-03-18

作者简介: 李玉伟(1988—), 男, 湖北襄阳人, 工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 赵慧, E-mail: zhaohui0094@163.com

化压电陶瓷圆环。换能器静态电容约为 32 nF，正、负极与壳之间的绝缘电阻均大于 250 MΩ。换能器工作时发射宽频脉冲信号：频率范围为 20~30 kHz，脉冲宽度为 10 ms，周期为 1 s，工作电压为 1 500 V±100 V(峰峰值)。换能器在每次下水之前都会在陆地上进行自检，自检时换能器会在空气中发声 2~3 次，自检信号电压为工作电压；换能器在水下工作约 30 min 后露出水面，由于载体流程设置，某些工况下仍然对换能器继续施加工作电压的电信号，时间约几分钟。

该批次换能器在执行完几十次工作任务后，90%以上出现了故障。故障现象为：自检时，换能器侧边出现电火花，手感换能器外表发热，约 40℃~50℃。对换能器进行检测发现，静态电容降低至 1/3 左右，正负极绝缘电阻显著降低，接近于 0。检测结果见表 1。

表 1 换能器静态电容、绝缘电阻和外观
Table 1 Static capacitance, insulation resistance and exterior of the transducer

静态电容/ nF	正极与负极绝 缘电阻/MΩ	正极与壳绝 缘电阻/MΩ	负极与壳绝 缘电阻/MΩ	外观
11.1	0.06	>250	>250	完好

2 故障成因评判的实验设计

为了摸清圆环换能器出现故障的原因，设计故障成因评判的实验包括：故障换能器解剖、正常换能器水中和空气中的发射实验。

2.1 故障换能器解剖

在检测完故障换能器的技术参数后，对故障圆环换能器进行了解剖，解剖图如图 1 所示。将换能器的聚氨酯水密层剥开，发现换能器内部的压电陶瓷环碎裂，在裂缝处有聚氨酯受热变色的现象，并散发出聚氨酯的焦臭味。

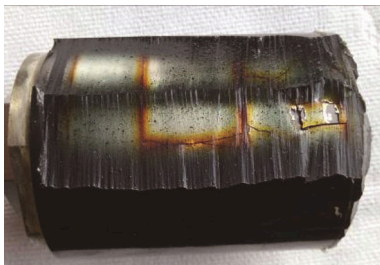


图 1 换能器解剖图
Fig.1 Dissected transducer picture

2.2 正常换能器在水中和空气中的发射实验

为了复现故障，用结构相同、性能完好的换能器进行了故障复现试验。模拟换能器工作的环境，

采用与故障换能器相同的发射机连接换能器，发射正常工作状态下的信号，先将换能器在水中连续发射 1 h，然后在空气中发射 2 h。试验过程中对换能器的阻抗、静态电容、绝缘电阻、外观及手感温度变化情况进行检测。阻抗检测变化如图 2 所示。

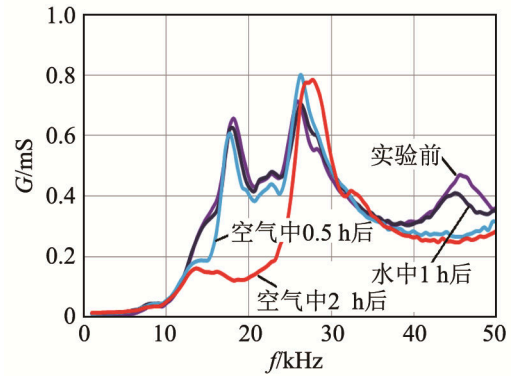


图 2 换能器水中电导曲线随测试时间的变化
Fig.2 Change of conductance curves in water with testing time of the transducer

由图 2 的阻抗检测结果可知，换能器在水中工作 1 h 后，阻抗曲线未发生明显变化。换能器在空气中发射 2 h 后，阻抗曲线变化明显，曲线上第一个谐振频率处电导降低较多。

随着换能器在空气中发射时间的增加，静态电容和正负极之间的绝缘电阻均下降，检测结果如表 2 和表 3 所示。试验还检测了换能器的外观及手感温度变化的情况，如表 4 所示。

表 2 换能器静态电容随测试时间的变化
Table 2 Static capacitance change with testing time of the transducer

时间	实验前	水中 1 h 后	空气中 5 min 后	空气中 30 min 后	空气中 2 h 后
静态电容/nF	30.2	30	28.1	27.4	21.3

表 3 换能器绝缘电阻随测试时间的变化
Table 3 Insulation resistanc change with testing time of the transducer

时间	实验前	水中 1 h 后	空气中 5 min 后	空气中 30 min 后	空气中 2 h 后
正负极电 阻/MΩ	>500	>500	88.4	37	26

表 4 换能器外观及温度随测试时间的变化
Table 4 Changes of transducer exterior and temperature with testing time

时间	空气中 5 min 后	空气中 10 min 后	空气中 2 h 后
变化 情况	侧面出现打火	表面温度升高	持续打火，表面 达到 40℃~50℃

试验过程中观察到换能器的侧边出现打火的现象，如图 3 所示。



图 3 换能器出现打火图
Fig.3 Flashing appears in the transducer



图 6 换能器解剖后情况
Fig6 Post-dissection status of the transducer

3 实验结果及与故障换能器的对比分析

性能正常的换能器在经历了水中和空气中发射实验之后，再测试该换能器的发送电压响应曲线和 25 kHz 的方向性图，并将之与正常状态下的曲线进行对比，结果如图 4 和图 5 所示。

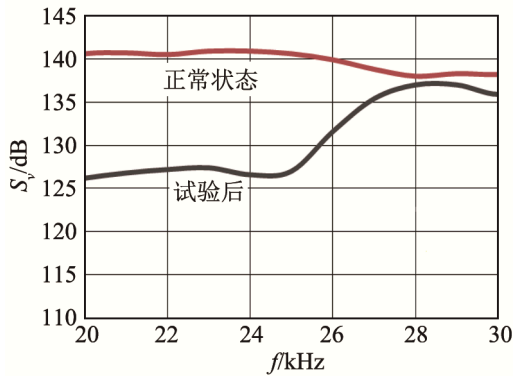


图 4 换能器试验后与正常状态下的发送电压响应曲线
Fig.4 The transmitting response curves of the transducer in normal condition and after testing

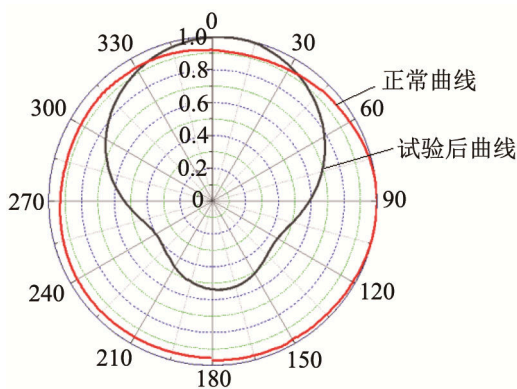


图 5 换能器试验后与正常状态下 25 kHz 的方向性曲线
Fig.5 The directivity curves at 25 kHz of the transducer in normal condition and after testing

换能器在 25 kHz 的电压响应值大大降低，方向性起伏增大，为 6.9 dB。将换能器解剖，查看换能器内部陶瓷环情况，如图 6 所示。

图 6 显示换能器内部陶瓷出现了裂缝，与故障换能器图 1 中出现的现象一致。

可以确定，换能器出现打火现象时，换能器内的陶瓷环已经裂开，并在裂缝处打火。由于试验时间不长，因此剥开后聚氨酯受热变色不明显、烧焦气味不明显。

为了验证陶瓷环退极化的现象，还测试了陶瓷环压电常数 d_{33} 的性能，测试结果如表 5 所示。

表 5 正常和受损换能器陶瓷环的 d_{33} 值
Table 5 The d_{33} values of the normal and the damaged ceramic rings

参数	正常陶瓷环	损坏陶瓷环 1	损坏陶瓷环 2
$d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	300	212	215

换能器长时间在空气中发射以后，陶瓷环的压电性能也下降，表现为压电常数 d_{33} 下降。

一般而言，造成陶瓷环碎裂的可能原因包括外力碰撞、超出额定功率发射、空气中大功率发射等因素。根据换能器的外观检测结果，可以排除外力碰撞的因素。当换能器在水下工作时，发射机输出的电能一部分通过换能器转化成声能发射出去，换能器中陶瓷环在正常范围内工作。当换能器在空气中发射时，由于空气的阻抗远小于水的阻抗，换能器的辐射负载较小，陶瓷环振动幅度较大，超出其机械极限，使陶瓷环碎裂。同时，由于空气中辐射阻抗较小，换能器在相同发射电压下输入的电功率变大，并且大部分输入电功率转换为热量，压电陶瓷环温度持续升高，直至在电场作用下，陶瓷环退极化。在碎裂处出现正负极放电，产生电火花现象，最终绝缘性能降低。陶瓷环放电发热使得换能器内部的空气温度急剧升高，使缝隙处的聚氨酯受热变色。因此换能器在空气中进行大功率发射是造成陶瓷环碎裂的主要原因。

换能器在空气中大功率发射后，造成陶瓷环发热、碎裂，无法正常工作，在指标上反映出的是换能器的电容降低，绝缘电阻降低等。电容的降低值主要由碎裂的位置和退极化情况决定，与电缆连通的陶瓷越多，退极化程度越轻，则电容降低得越少。

另外，根据换能器的工作状态，系统自检时换能器会在空气中发射 2 到 3 次，自检信号电压为工作电压，可以确定自检时换能器也处于空气中大功

率发射状态,因此系统在空气中满功率自检时也会造成陶瓷环发热、碎裂。

4 结论与讨论

通过圆环换能器故障评判实验测得的结果和数据分析表明:该批次 90%以上的换能器都出现故障的原因为水面工作和空气中满功率自检。这两种状态均属于空气中大功率发射,这是造成圆环换能器出现侧边打火、绝缘下降故障现象的主要原因。

为了避免圆环换能器出现故障,首先系统自检时换能器应放于水中,不可将换能器置于空气中进行自检;其次,换能器在工作时禁止在水面以上发射。本文实验的结果可以为圆环换能器的设计和应用提供参考,也对其它类型换能器的应用有参考价值。

参 考 文 献

- [1] 许光,吴培荣,刘振君. 高频换能器功率疲劳分析[J]. 声学技术, 2015, **34**(3): 283-286.
- XU Guang, WU Peirong, LIU Zhenjun. Research on power fatigue problem of high frequency underwater transducer[J]. Technical Acoustics, 2015, **34**(3): 283-286.
- [2] 刘海峰,田蔚,谢军. 压电陶瓷电疲劳研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2000, **30**(6): 1-56.
- LIU Haifeng, TIAN Shi, XIE Jun. Research progress on the electrical fatigue of piezoelectric ceramics[J]. Aerospace Materials and Technology, 2000, **30**(6): 1-56.
- [3] 王伟强. 压电陶瓷的场致疲劳与非线性研究[D]. 北京:清华大学, 2006.
- WANG Weiqiang. Study on field-Induced fatigue and nonlinearity of piezoelectric ceramics[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [4] 杨刚,岳振星,李龙土. 压电陶瓷场致疲劳特性与机理研究进展[J]. 无机材料学报, 2007, **22**(1): 1-6.
- YANG Gang, YUE Zhenxing, LI Longtu. Research progress on the characteristics and mechanism of applied field-Induced fatigue in piezoelectric ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, **22**(1): 1-6.
- [5] 赵春山,金亨焕,陈守六. 压电陶瓷材料在大功率高静压力下的性能的实验研究[J]. 声学学报, 1981, **6**(5): 322-327.
- ZHAO Chunshan, JIN Henghuan, CHEN Shouliu. Study on the high-power and high-pressure statics experiment of piezoelectric Ceramic[J]. Acta Acustica, 1981, **6**(5): 322-327.