

超声供能-数传一体的无线健康监测技术^{*}

郑永秋，张铭正，王政，张秉瑞，赵冬青，崔娟，闫小龙

(中北大学极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室 太原, 030051)

摘要 特种密封装备贮存过程的长期在线健康监测是评估材料寿命与装备效能的关键环节。为满足特种密封装备长时间在线健康监测过程对高效供电、高可靠数据传输与高集成度的需求,提出了一种集超声供能与无线数据回传为一体的无损、无线密封装备内部状态监测与健康评估技术。首先,建立了 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与环氧树脂多层匹配的超声换能器声-电协同阻抗匹配模型;其次,突破高效的声能-通信耦合技术;最后,实现了超声波无线供能与载波数据回传功能复用的一体化协同工作。结果表明:提出的声-电协同阻抗匹配通道可将超声能量传输效率由 29.35% 提升至 68.71%;通过某组分材料的高温加速老化实验,验证了该系统对密封装置内传感器的电能供给与数据回传的可靠性;提供了一种高效的无损、无线密封装备内部状态监测方法,为密封贮存特种材料的长期在线健康监测与评估提供了工程化解决方案。

关键词 超声供能; 无线数据回传; 阻抗匹配; 高温加速老化; 在线健康监测

中图分类号 TH86; O426

引言

航空航天、舰船等装备用于固体/液体燃料贮存的特种密封装置,通常具有一次成型、长期服役、不可拆卸等特点,对密封性和耐压性的要求较高,在长期服役或贮存过程中,其内部特种材料会逐渐老化,若无法准确评估装备的健康状况和剩余寿命,将严重影响装备效能甚至引发安全事故^[1]。特种密封装置的金属壳体或碳纤维材料均对微波信号具有强屏蔽效应,因此,基于超声波的无线能量传输与传感参量载波数据回传技术,成为特种密封装备长时间在线健康监测的迫切需求。

超声无线功率传输(ultrasonic wireless power transfer,简称 UWPT)技术具有良好的束射性、穿透性与抗电磁干扰优势,为特种密封装置内嵌式无线传感系统的供电和数据传输提供了有效途径^[2-6]。目前,UWPT 的工程化应用过程中仍存在部分瓶颈:①UWPT 系统中压电陶瓷与金属壁间的声阻抗、匹配层设计欠佳,易引发强反射及高损耗,导致供能效率低,无法有效驱动传感系统^[7-8];②UWPT 系统需要多路超声通道实现供能与通信的双重功能,导致系统体积庞大,不利于在特种装备中集成应用。因此,采用 UWPT 实现特种密封装置内部环境

的长期在线监测,仍需突破能量传输效率以及供能-通信协同工作方面的难题^[9]。

针对以上问题,本研究提出一种基于超声供能与数据传输一体化集成的密封装置内部无线监测及健康评估技术。通过分析超声换能器 PZT-5 与 304 不锈钢结构之间的声传播特性,构建 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与环氧树脂耦合的双匹配层模型。基于矢量网络分析获取的散射参数(S 参数)与阻抗参数(Z 参数),建立声-电协同共轭阻抗匹配模型,优化声学匹配层与粘接层的最优厚度设计及能量传输效率设计,搭建超声供能-数传系统。测试结果表明,在一定谐振频率下,端到端的能量传输效率显著提升,同时实现无线数据回传。通过将该技术应用于某组分材料高温加速老化实验,实现密封装置内材料老化过程的在线监测。该技术可在不破坏密封结构的前提下,实现高效供能与同步数据回传,具有良好的工程应用潜力。

1 超声无线供能与数传原理

1.1 超声无线供能与数传系统设计

研究构建的超声无线供能与数传系统框图如图 1 所示,可分为发射子系统,声学匹配层与接收子

* 国家自然科学基金重点资助项目(62131018)
收稿日期:2025-09-11;修回日期:2025-10-17

系统3部分。系统以密封装置壳体(304不锈钢)为传输介质,在其顶部内外两侧分别安装超声换能器,用于实现跨金属界面的能量耦合与信号透传。其中,超声换能器为铅基压电陶瓷换能器(piezoelectric ceramic transducer,简称PZT)元件(PZT-5),采用环氧树脂粘接层与 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层粘连。换能器与金属壳体之间同样采用环氧树脂材料实现高强度声耦合连接,以保证声波的有效入射与传输。基于上述声学匹配层,超声波信号的传输能够在金属结构内形成一条连续、稳定的声电传输通道。

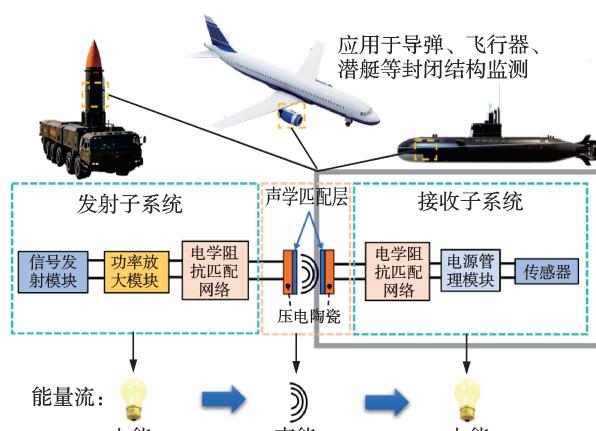


图1 超声无线供能与数传系统框图

Fig.1 Block diagram of the ultrasonic wireless power and data transmission system

发射子系统包含信号发生模块、功率放大模块、信号解调模块及阻抗匹配网络,主要用于驱动发射换能器工作,并接收和解调来自接收端传感器的反馈信号。接收子系统包括调制模块、电源管理模块、传感器模块及阻抗匹配网络,其功能为从接收换能器获取声能后完成电能变换,为嵌入式传感器供电,并将采集的传感器信号进行调制后传回发射端。

1.2 声学阻抗匹配设计

1.2.1 匹配层原理与材料选择

PZT与304不锈钢之间存在较大的声阻抗差异,会导致声波在界面处发生较强反射,并诱发驻波与界面热-黏损失等附加衰减、散射与模式转换,使入射能量在近场发生耗散且难以有效耦合,导致声能的有效透射效率降低。为提升声波的透射率,需在两者之间引入特性声阻抗居中的声学匹配层,以实现声能的高效耦合传输^[10]。

超声换能器中常用的匹配方式为1/4波长全透射匹配技术,该方法要求匹配层的特性声阻抗满足

$Z_{\text{mat}} = \sqrt{Z_1 Z_2}$,其中: Z_1 和 Z_2 分别为PZT和304不锈钢的特性声阻抗; Z_{mat} 为匹配层所需的理论声阻抗。同时,匹配层的厚度应为该材料波长的1/4或其奇数倍,以形成共振条件下的最大声波透射率^[11]。

然而,在实际工程中,难以精确获得声阻抗完全匹配的材料,且严格满足1/4波长要求的匹配层的制造难度较高。已有研究表明,匹配层的最优厚度不仅与波长相关,还与其自身的特性声阻抗密切相关^[12]。因此,采用声阻抗梯度匹配设计策略,即选择声阻抗介于PZT和304不锈钢之间的材料作为过渡,可在一定程度上有效提高声能的透射性能。

在众多材料中, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 作为一种绝缘性优良、耐高温、抗腐蚀且成本较低的陶瓷材料,其特性声阻抗恰好位于PZT-5与304不锈钢之间,该材料不仅能优化声波传输路径,还可在高温高湿等恶劣工况下有效保护压电陶瓷,避免其性能劣化。同时, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的绝缘性能还可阻止PZT表面电荷泄露至金属壳体,从而增强系统的安全性和稳定性^[13]。不同材料的声属性如表1所示。

表1 不同材料的声属性

Tab.1 Acoustic properties of different materials

| 材料 | 声速/(m·s ⁻¹) | 特性声阻抗/MRayl |
|--------------------------------|-------------------------|-------------|
| PZT-5 | 4 600 | 30.00 |
| $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ | 10 750 | 40.85 |
| 304不锈钢 | 5 740 | 45.50 |

近年来,随着超声检测、超声换能器的持续发展,声匹配层参数调节与阻抗匹配策略也不断优化,已有研究在提升声电转换效率方面取得显著进展^[14]。为实现结构粘接匹配,PZT-5、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层及不锈钢之间均需通过环氧树脂粘接。尽管环氧材料在声学上传导性能较差,但当其厚度远小于材料波长时,其对声波传播的影响可忽略不计。具体而言,当不锈钢与匹配层之间的环氧树脂厚度在0.01 mm及以下时,在谐振频率下,环氧树脂层对系统的输出电压影响可忽略不计。因此,在系统搭建过程中需严格控制粘接层的厚度,确保其处于有效的声透射条件。

1.2.2 匹配层结构建模

超声波在介质中可看作是透射波和反射波的叠加波,超声换能器的匹配层结构如图2所示。

多层不同介质中的超声波可表示为

$$P_i = P_i^{\text{ta}} e^{(-jk_i - \alpha)x} + P_i^{\text{ra}} e^{(jk_i + \alpha)x} \quad (1)$$

其中: P_i^{ta} 、 P_i^{ra} 分别为透射波与反射波的声压幅值; i

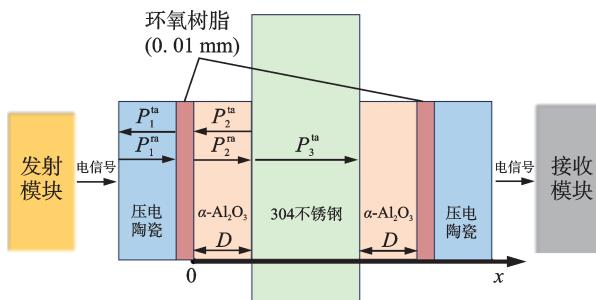


图2 超声换能器的匹配层结构

Fig.2 Matching-layer structure of the ultrasonic transducer

为第*i*层介质; $k_i = \omega/c_i$; c_i 为第*i*层介质的纵波声速^[15]; $\omega = 2\pi f$, 为超声波的角频率; f 为声波频率(不加匹配层时系统的谐振频率为 1.045 MHz)。

发射换能器的声压透射率 t_1 可表示为

$$t_1 = \frac{P_4^{\text{ta}}}{P_1^{\text{ta}}} = \frac{1}{m} \quad (2)$$

式(2)中, m 可表示为

$$\begin{aligned} m = & \left[\left(\frac{1}{8} + \frac{1}{8} \frac{Z}{Z_2} \right) \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right) e^{(jk_2 + \alpha_2)D_1} + \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{8} \frac{Z_1}{Z_2} \right) \cdot \right. \\ & \left(1 - \frac{Z_2}{Z_3} \right) e^{-(jk_2 + \alpha_2)D_1} \left(1 + \frac{Z_3}{Z_4} \right) e^{(jk_3 + \alpha_3)D_2} + \\ & \left. \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{8} \frac{Z_1}{Z_2} \right) \left(1 - \frac{Z_2}{Z_3} \right) e^{(jk_2 + \alpha_2)D_1} + \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{8} \frac{Z_1}{Z_2} \right) \cdot \right. \\ & \left. \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right) e^{-(jk_2 + \alpha_2)D_1} \right] \left(1 - \frac{Z_3}{Z_4} \right) e^{(jk_3 + \alpha_3)D_2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: Z_i 为第*i*种介质的特性声阻抗; D_1 为环氧树脂层的厚度; D_2 为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层的厚度。

根据式(2)和式(3), 同样可得接收换能器的声压透射率 t_2 。因此, 电-声-电传输通道的声压透射率 t 可表示为

$$t = \frac{P_7^{\text{ta}}}{P_1^{\text{ta}}} = t_1 t_2 \quad (4)$$

声压与 PZT-5 上的压力之间的转换关系为

$$F = PA \quad (5)$$

其中: P 为 PZT-5 上的声压振幅; A 为 PZT-5 的横截面积。

PZT-5 上的电荷和压力之间的转换关系为

$$Q = Fd_{33} \quad (6)$$

其中: d_{33} 为 PZT-5 的压电常数。

根据电压与电荷的转换关系, PZT-5 的电压和声压之间的转换关系为

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{PAD_{33}}{C} \quad (7)$$

其中: C 为 PZT-5 的等效电容。

综上, 接收换能器两端的电压与发射换能器两端的压力之比为

$$t_V = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{P_7^{\text{ta}} A g / C}{P_1^{\text{ta}} A g / C} = t \quad (8)$$

其中: V_{in} 为发射换能器两端的电压; V_{out} 为接收换能器两端的电压。

根据式(8), 发射和接收换能器两端的电压比与二者声压比相等。因此, 当已知发射换能器两端的电压时, 可根据式(8)得出接收换能器两端的电压。

1.3 电学阻抗匹配设计

为降低系统的电学反射并提高能量转换效率, 开展声电通道二端口的同时共轭阻抗匹配设计。二端口网络的同时共轭阻抗匹配技术通过调节电路元件, 可使网络的输入阻抗与输出阻抗同时满足与预定特定值匹配的需求^[16-18]。

为进行上述设计, 首先, 测量声电传输通道的 S 参数。通常采用矢量网络分析仪进行测量, 该仪器可同时测量输入端和输出端的 S 参数。其物理意义如下: S_{11} 为端口 2 匹配时, 端口 1 的反射系数; S_{22} 为端口 1 匹配时, 端口 2 的反射系数; S_{12} 为端口 1 匹配时, 端口 2 到端口 1 的反向传输系数; S_{21} 为当端口 2 匹配时, 端口 1 到端口 2 的正向传输系数。

将声电传输通道的输入和输出端口分别接入矢量网络分析仪的端口 1 和端口 2, 通过设置网络分析仪的扫频范围为 0.5~1.5 MHz, 步长为 1 kHz, 进行频率扫描。将扫描测得的 S 参数代入式(9), 进一步求得声电通道的 Z 参数为

$$\begin{cases} Z_{11} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \\ Z_{12} = 2Z_0 S_{21} / ((1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}) \\ Z_{21} = 2Z_0 S_{12} / ((1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}) \\ Z_{22} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \end{cases} \quad (9)$$

其中: $Z_0 = 50 \Omega$, 为矢量网络分析仪端口的特性阻抗。

基于此方法, 利用测量所得 S 参数并结合矢量网络分析仪的特性阻抗, 可准确计算声电传输通道的 Z 参数, 为提高后续阻抗匹配设计与能量传输效率奠定基础。根据声电通道的 Z 参数求解系统同时共轭匹配时, 所需的源阻抗和负载阻抗为

$$\begin{cases} Z_{\text{ES}} = (\alpha_1 \pm \sqrt{\Delta}) / 2\text{Re}\{Z_{22}\} \\ Z_{\text{EL}} = (\alpha_2 \pm \sqrt{\Delta}) / 2\text{Re}\{Z_{11}\} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, 各参数具体为

$$\begin{cases} \alpha_1 = -2j \operatorname{Re}\{Z_{22}\} \operatorname{Im}\{Z_{11}\} + j \operatorname{Im}\{Z_{12}Z_{21}\} \\ \alpha_2 = -2j \operatorname{Re}\{Z_{22}\} \operatorname{Im}\{Z_{11}\} + j \operatorname{Im}\{Z_{12}Z_{21}\} \\ \Delta = (2\operatorname{Re}\{Z_{11}\} \operatorname{Im}\{Z_{22}\} - \operatorname{Re}\{Z_{12}Z_{21}\})^2 - |Z_{12}Z_{21}|^2 \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\operatorname{Re}\{\cdot\}$ 、 $\operatorname{Im}\{\cdot\}$ 表示参数的实部、虚部, 应选择适当符号以确保 Z_{ES} 和 Z_{EL} 的实部为正。

然后, 推导出经过同时共轭阻抗匹配后的声电通道的 S 参数, 其计算式为

$$S_M = F(Z - Z_M^*)(Z + Z_M)^{-1}F^{-1} \quad (12)$$

其中: F 、 Z 、 Z_M 均为 2×2 矩阵; * 表示参数的共轭。

式(12)中, 各参数具体为

$$F = \begin{bmatrix} 2\sqrt{\operatorname{Re}(Z_{ES}^*)} & 0 \\ 0 & 2\sqrt{\operatorname{Re}(Z_{EL}^*)} \end{bmatrix}^{-1} \quad (13)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Z_M = \begin{bmatrix} Z_{ES}^* & 0 \\ 0 & Z_{EL}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

最后, 通过分析 S 参数, 可确定经同时共轭阻抗匹配后的声电传输通道的最佳工作频率, 该频率点对应于系统的最小反射和最大功率传输。系统的能

量传输效率可由正向传输系数 S_{21} 表示, 物理意义为输入信号从端口 1 传输到端口 2 的功率传输比例。能量传输效率 η 的表达式为

$$\eta = |S_{21}|^2 \times 100\% \quad (16)$$

其中: $|S_{21}|$ 为正向传输系数的幅值。

通过测量和优化 $|S_{21}|$, 可直观反映系统在不同频率下的能量传输性能, 并最终确定最佳工作频率, 确保系统实现高效的能量传输。在确定最佳工作频率后, 可基于该频率计算声电通道的 Z 参数矩阵。 Z 参数矩阵是描述系统在特定频率下阻抗特性的核心工具。通过矩阵计算, 可获得声电传输通道在最佳工作频率下的阻抗特性, 从而为进一步优化系统性能和实现高效能量传输提供依据。此外, 计算矩阵可获取详细的输入阻抗和输出阻抗特性信息, 设计更加精准的阻抗匹配方案。通过精确调整系统参数, 可确保在目标频率下实现最优性能, 最大化能量传输效率并最小化能量损耗, 从而提升整个系统的实际应用效果和稳定性。若后续因应用场景需要提高系统的鲁棒性(抗自干扰能力), 还可在源端与负载端采用多支路电气匹配法来扩展双频, 实现通信与供能的分工^[19]。

电-声-电传输通道的梅森等效电路模型如图 3

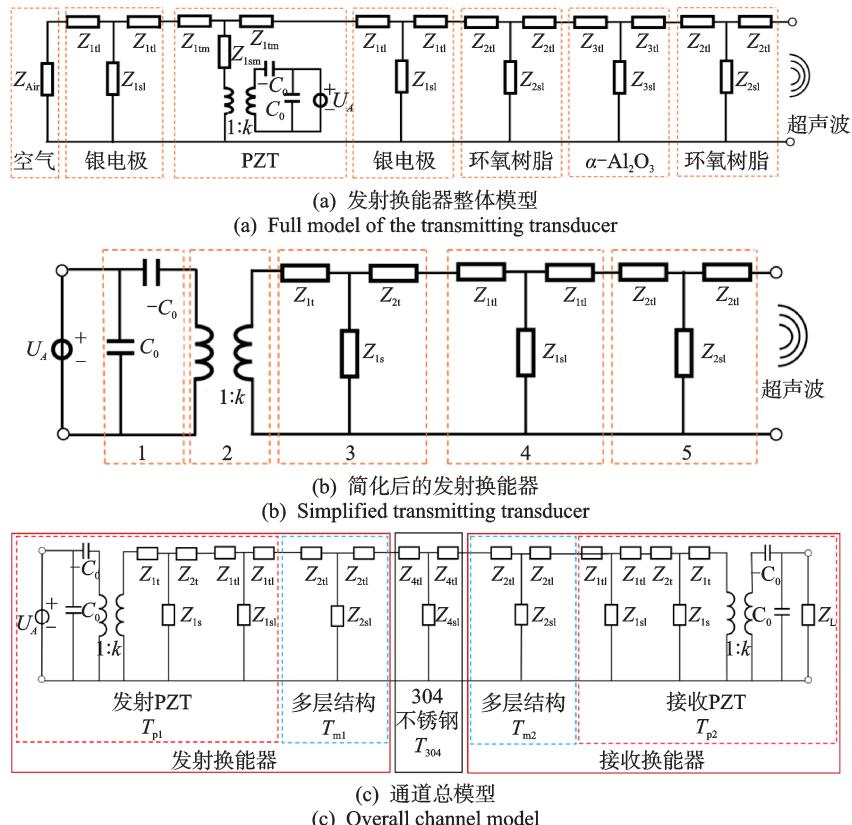


图 3 电-声-电传输通道的梅森等效电路模型

Fig.3 Mason equivalent circuit models of the electro-acoustic-electrical channel

所示。图3(a)为由PZT-5、银电极、环氧树脂层与 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层构成的发射换能器整体模型,等效简化可得如图3(b)所示的5个二端口模块级联的发射端总二端口模型,随后与304不锈钢及接收换能器模型(相似于发射端换能器模型)多层结构顺序串接,形成如图3(c)所示的整体电-声-电通道的总二端口模型。在该统一框架下,可直接由二端口参数计算并评估系统的输入与输出阻抗、接收端电压与输出功率等关键指标,从而将材料参数变化(如匹配层厚度)与端到端性能一一对应,最终确定最优工作频点。

2 仿真分析与无线监测功能测试

2.1 仿真分析

首先,采用Matlab软件开展匹配层厚度对系统声能传输性能影响的仿真分析,对输出电压和声能透射率进行参数化仿真。根据式(2)~(8)的声电压转换关系与声压透射率公式,设置环氧树脂层厚度和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层厚度范围为0~2.0 mm,得到声能传输模型仿真结果如图4所示。由图可知,当 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

厚度逐渐增加至1 mm且环氧树脂层厚度为0.01 mm时,输出电压达到最大值,之后随着 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 厚度的增加而显著降低,这表明在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 厚度为1 mm处实现了较优的声-电阻抗匹配。声压透射率则在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 厚度开始增加时呈指数级上升趋势,在其厚度为1 mm时达到峰值,随后迅速降低。因此, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层的最优设计厚度为1 mm。

使用COMSOL软件对传输介质内的声压进行有限元模拟分析,并对传统UWPT以及具有 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层的系统进行比较,有无 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层的传输介质声压仿真结果对比如图5所示。选用Piezoelectric Devices与Linear Elastic Waves接口耦合建立PZT、环氧树脂层、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层、304不锈钢分层模型,材料参数调用内置库(PZT-5、 Al_2O_3 、Epoxy、AISI-304),环氧树脂层厚度为0.01 mm, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层厚度分别取0、1.0 mm,以进行无/有匹配层对比。以固体静水压力表征声压,在统一色标下输出2种工况的声压仿真结果。

比较分析表明,当增加 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 作为超声换能器的匹配层时,304不锈钢的声压显著增加。仿真结果表明,在超声功率传输系统中使用 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层

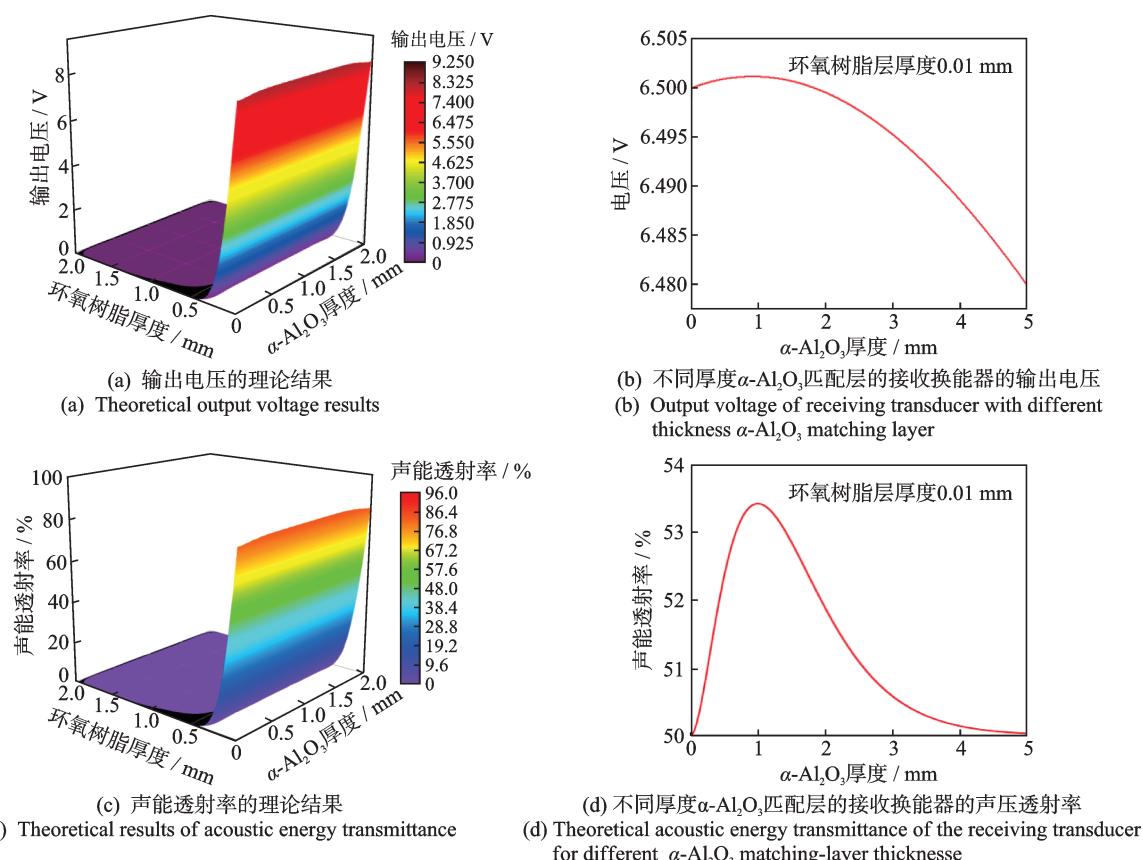


图4 声能传输模型仿真结果

Fig.4 Simulation results of the acoustic power transmission model

可有效减少超声波穿过特征声阻抗差异较大的材料时产生的反射波。因此,该方法解决了由 PZT-5 和金属介质(304 不锈钢)之间因显著阻抗失配引起的低声透射率问题,提高了 UWPT 系统的功率传输能力。

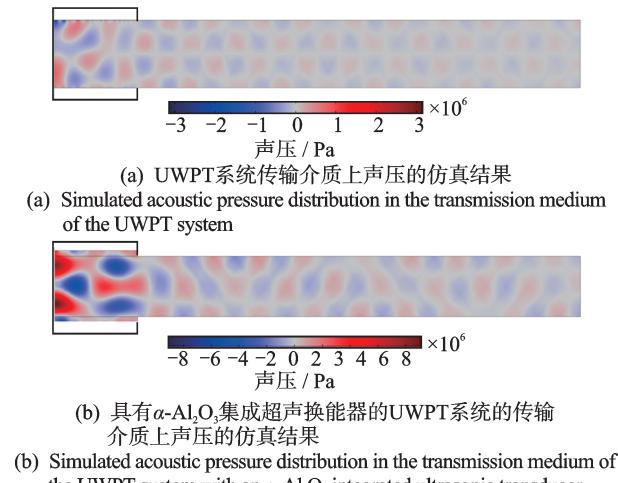


图 5 有无 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层的传输介质声压仿真结果对比
Fig.5 Comparison of simulated acoustic pressure in the transmission medium with and without an $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ matching layer

2.2 实验平台搭建

为验证系统的功能,搭建了如图 6 所示的实验测试平台,该实验平台主要包括发射子系统、接收子系统、声学匹配层和测量单元。其中:发射子系统采用信号发生器(GWINSTEK AFG-3081 型)和功率放大器驱动超声发射换能器;声学匹配层中的介质为 304 不锈钢板;接收子系统的负载电阻为 200Ω ;测量单元包括数字示波器(KEYSIGHT DSOX3024T

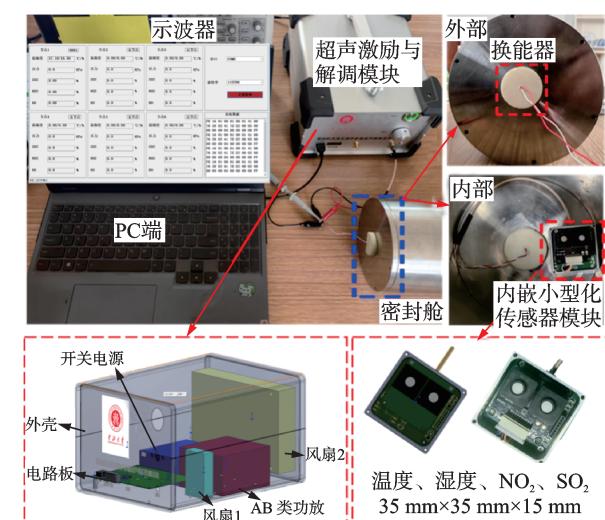


图 6 实验测试平台
Fig.6 Experimental test platform

型)和 LCR 阻抗分析仪(IM3536 型),用于测量系统输入输出阻抗以及换能器的输出电压等参数。

2.3 超声供能功能验证

为验证本研究提出的电-声-电传输通道,制作不同匹配层和粘接层厚度的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 集成超声换能器。一种是厚度为 0、0.5、1、1.5、2、2.57 mm($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 材料的 1/4 波长)的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层和厚度为 0.01 mm 的环氧树脂的组合,另一种是厚度为 0.005、0.01、0.65(环氧树脂材料的 1/4 波长)、1、1.5、2 mm 的环氧树脂和厚度为 1 mm 的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的环氧树脂层组合。

匹配层材料厚度与输出关系的测试结果如图 7 所示,图 7(a)、(b) 为不同匹配层厚度的系统输出电压的声波传输模型的测量结果。从图 7(a)可以看出, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层厚度的变化对接收换能器的输出电压影响较小,但当 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 配合层的厚度为 1 mm 时,接收换能器的输入电压达到最大值。图 7(b)表明,环氧树脂层厚度的变化对接收换能器输出电压的影响更大。环氧树脂层的厚度越薄,接收换能器的输出电压越高。实验测试和仿真计算均表明,超薄环氧树脂层在谐振频率下对超声功率传输的影响基本可以忽略。当改变匹配层厚度时,仿真与实验结果显示的接收换能器输出电压展现出相同趋势,这也验证了所提出的声波传输模型可有效指导 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 匹配层与环氧树脂层的设计。

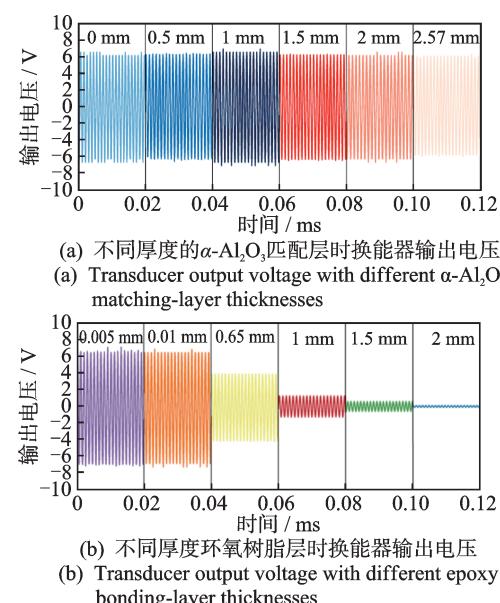


图 7 匹配层材料厚度与输出关系的测试结果
Fig.7 Experimental results for the relationship between matching-layer thickness and output voltage

虽然环氧树脂层厚度越薄越好,但对于厚度为 0.005 mm 和 0.01 mm 的环氧树脂层,换能器输出电

压几乎一致。此外,环氧树脂层的厚度减小,将显著增加超声换能器的加工难度并降低环氧树脂的粘合能力。因此,选择 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 厚度为1 mm以及环氧树脂层厚度为0.01 mm作为换能器的匹配层,此时结构的声功率透射率最佳。

阻抗匹配前后声电传输通道的能量传输效率随频率的变化曲线如图8所示。可以看出,进行声学阻抗匹配后,系统的谐振频率从1.045 MHz偏移至0.986 MHz,能量传输效率从29.35%提升至36.50%。进行电学阻抗匹配后,在0.8~1.2 MHz频率范围内的能量传输效率得到大幅度提升,谐振频率点几乎不发生偏移,能量传输效率进一步提升至68.71%。这表明声电传输通道经过声学阻抗匹配和电学阻抗匹配后,系统能量传输效率得到极大提升。

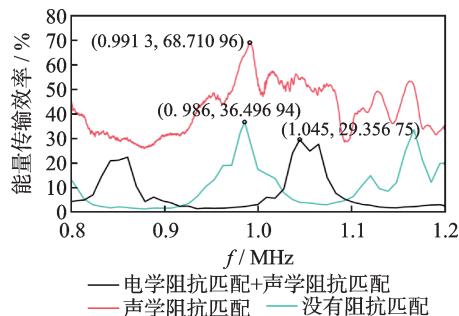


图8 阻抗匹配前后声电传输通道的能量传输效率随频率的变化曲线

Fig.8 Energy transfer efficiency vs. frequency of the acoustic-electric transmission channel before and after impedance matching

2.4 数据回传功能验证

透金属壁超声无线数据回传如图9所示,展示了系统超声数据回传功能的测试结果。其中,图9(a)为系统输入端口电压随输出负载变化的情况。通过调节输出端口负载阻抗,可实现数据由系统输出端向输入端的有效传输。图9(b)为系统数据由内部向外部传输的基本通信原理,即用高电压表示数据位“1”,用低电压表示数据位“0”。图9(c)展示了具体的数据传输过程,通过对输入端口电压波形进行解调,可将金属密封装置内部内嵌传感器采集的数据稳定地传输至外部系统。

为定量评估超声供能-数传一体系统的可靠性,在室温(25 °C)与高温(85 °C)2种工况下进行测试。去掉4位起始位与4位结束位,净荷为每帧24位,每500 ms发送1个部分,帧率为2 Hz。数据回传性能如表2所示。结果表明,系统在密封与高温条件下仍能稳定工作,并实现内嵌传感器的数据采集与无线回传。

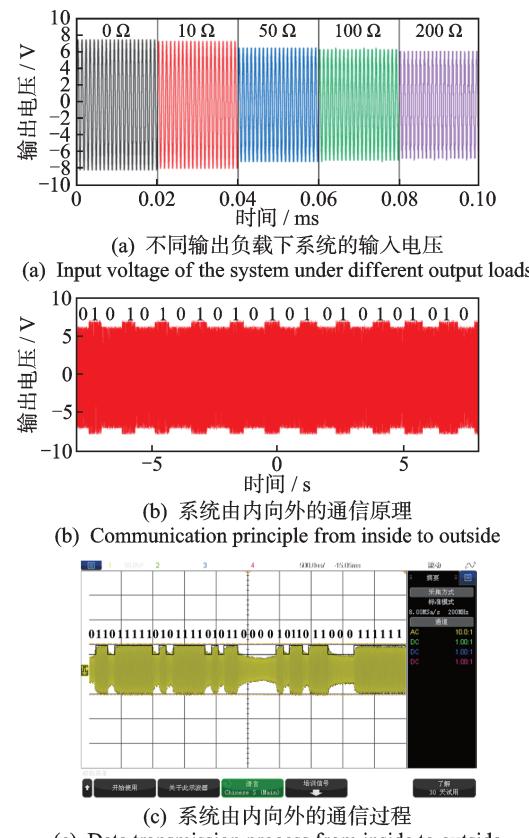


Fig.9 边金属壁通过无线数据传输

表2 数据回传性能

Tab.2 Performance of data backhaul

| 工况 | 帧率 | 可见包成功率/% | 比特误码率 | 有效吞吐率/% |
|-------|-----|----------|---------------------|---------|
| 25 °C | 2.0 | ≥99.9 | ≤1×10 ⁻⁶ | 47.95 |
| 85 °C | 2.0 | ≥99.5 | ≤5×10 ⁻⁶ | 47.70 |

3 超声供能-数传技术在贮存药高温老化实验健康评估中的应用

贮存药在长期贮存过程中易发生化学降解。例如,硝化甘油($C_3H_5(NO_3)_3$)、硝化纤维素($C_6H_7O_2N_3$)等某些主要成分化学性质不够稳定,在长期贮存过程中易受到热、氧气、湿度等环境因素影响而发生降解,产生氮氧化物(NO 、 NO_2)等气体,进而影响其性能稳定性和安全性。因此,环境温湿度、气体浓度的变化可作为贮存药老化状态的重要信号。为模拟真实环境下特种装备贮存材料的老化进程,利用高温炉搭建了高温加速老化实验系统。采用 Hallberg-Peck 模型对材料的老化行为进行建模,考虑温湿度对材料降解的影响,得到材料的化学动力学方程为

$$AF = (RH_t/RH_u)^3 e^{(E_a/k)((1-T_u)-(1/T_t))} \quad (13)$$

其中: RH_t 和 RH_u 分别为高温加速实验环境与实际贮存环境下的相对湿度。

加速因子 AF 用于描述等效不同温湿度下的老化速率, 激活能 E_a 是描述化学反应所需的最低能量阈值。在贮存药的老化实验中, E_a 值约为 1.2 eV, 根据式(13)可得温度、湿度与老化速度的关系。

高温加速老化实验系统如图 10 所示, 老化实验前, 将 20 g 贮存药及系统接收端放入金属密封装置中。设置老化温度为 85 °C, 每隔 3 h 由超声供能-数传系统采集湿度、NO 传感数据。整个实验持续 18 d, 共 432 h。高温老化测试结果如图 11 所示。图 11(a)显示密封装置内的相对湿度在经历高温加

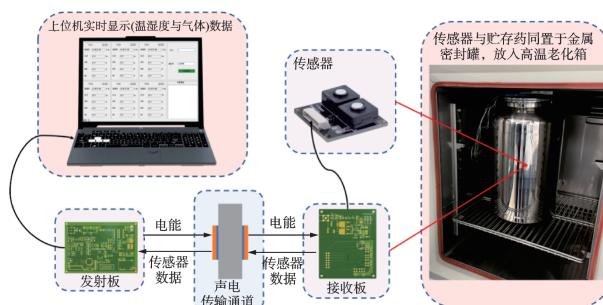


图 10 高温加速老化实验系统

Fig.10 High-temperature aging experimental system

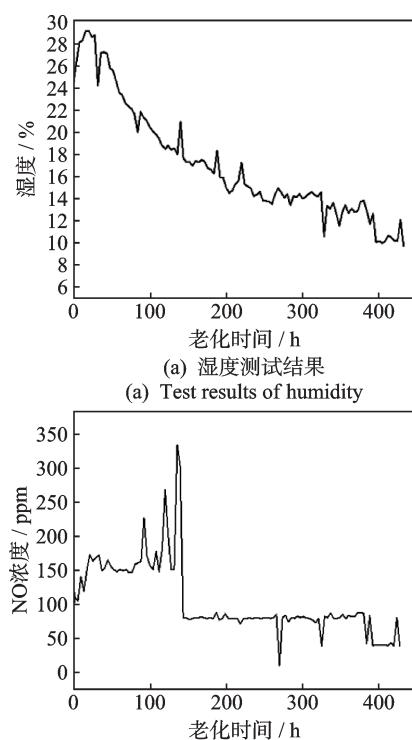


图 11 高温老化测试结果

Fig.11 Results of the high-temperature aging test

热后逐步下降并趋于平稳。图 11(b)展示了 NO 气体浓度变化趋势为先升高, 达到峰值后开始下降, 最后趋于稳定。在老化初期, 贮存药分解会释放 NO。同时, 老化实验加速了氧化反应, 过程中也会产生 NO 气体, 从而导致 NO 浓度快速升高。随着老化过程的持续, NO 会与其他产物 (N_2 和 H_2O 等) 反应生成其他氮氧化物, 进而导致 NO 浓度降低。最终, 当推进剂中的活性成分逐渐被消耗, NO 浓度趋于稳定。

在实验中, 主控单元的采样频率设置为 100 kHz, 超声供能-数传一体系统的最大超声传输功率达 113.95 mW, 接收系统输出信号的速率为 10 kbps。系统在长时间老化实验中的数据连续性较好, 证明该系统具备运行稳定、数据清晰回传、长期无线监测的能力, 为评估贮存药状态及后续寿命预测提供了可靠数据支撑。

4 结 论

1) 面向特种装备的密封金属装置内部长期监测与健康评估需求, 提出并验证了基于超声供能-数传一体的无线、无损状态监测系统, 通过声学多层阻抗匹配及电-声-电同时共轭匹配, 使声-电通道的能量传输效率最高提升至 68.71%, 并实现稳定的无线穿壁通信, 为密封结构内部的长期在役监测提供关键支撑技术。

2) 形成了多层结构的声学-电学联合匹配设计方案, 建立了声电通道的阻抗参数矩阵模型, 为实现不同厚度、不同材质密封结构的超声无线供能与数据回传等无线监测功能提供了匹配层、输入输出特性参数的理论设计依据。

3) 在高温密封条件下完成老化加速实验及多参量传感验证, 成功获取了密封装置内的多种传感数据, 验证了所构建的超声供能-数传系统在长期、高温环境下持续无线监测的可行性和可靠性, 具有面向工程应用的推广价值。

4) 当前技术仍存在局限, 声匹配层的设计须严格根据待测装备(如火箭发动机)的多层壳体材料、形状进行贴合性设计, 应用灵活性不足, 所需功耗较高。未来将进一步改进匹配层设计, 开展自适应声/电阻抗匹配与最佳工作频率跟踪研究, 实现高可靠性长期工作。在此基础上, 获取大量服役状态传感数据, 结合深度学习方法, 构建贮存装备的剩余寿命预测与健康评估体系。

参 考 文 献

- [1] SUN K, WU Y J, QIAN F, et al. Self-powered through-wall communication for dry cask storage monitoring[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 177: 109306.
- [2] YANG H, WU M, YU Z Y, et al. An ultrasonic through-metal-wall power transfer system with regulated DC output[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 692.
- [3] KIM H S, HUR S, LEE D G, et al. Ferroelectrically augmented contact electrification enables efficient acoustic energy transfer through liquid and solid media [J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(3) : 1243-1255.
- [4] 王俊, 张敏, 张碧星, 等. 超声无线输能的声电转换通道设计[J]. 声学学报, 2020, 45(1): 117-123.
WANG Jun, ZHANG Min, ZHANG Bixing, et al. Design of acoustic-electronic conversion channel of ultrasonic wireless power transmission[J]. Acta Acustica, 2020, 45(1): 117-123.(in Chinese)
- [5] JI J, HEO H, ZHONG J X, et al. Metamaterial-enabled wireless and contactless ultrasonic power transfer and data transmission through a metallic wall [J]. Physical Review Applied, 2024, 21(1): 014059.
- [6] SHOUDY D A, SAULNIER G J, SCARTON H A, et al. P3F-5 an ultrasonic through-wall communication system with power harvesting[C]//2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. New York, NY, USA: IEEE, 2007: 1848-1853.
- [7] 卢超, 郭伟, 石文泽, 等. 高温声学检测技术的发展, 应用与挑战[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(1) : 1-10.
LU Chao, GUO Wei, SHI Wenze, et al. Development, application and challenge of high temperature acoustic testing technology[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44 (1) : 1-10. (in Chinese)
- [8] QI B W, CUI J, ZHENG Y Q, et al. Optimized design of an ultrasonic-based high-efficiency wireless passive monitoring system for sealed metal compartments[J]. Micromachines, 2023, 15(1): 48.
- [9] AWAL M R, JUSOH M, SABAPATHY T, et al. State-of-the-art developments of acoustic energy transfer [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2016, 2016(1): 3072528.
- [10] LI K, LIANG B, YANG J, et al. Acoustic broadband meta couplers[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(20): 203504.
- [11] 李珺, 贺西平, 张峰, 等. 换能器双匹配层参数的计算 [J]. 传感器与微系统, 2008, 27(12): 106-108.
- [12] LI Jun, HE Xiping, ZHANG Feng, et al. Parameters calculation of acoustical matching layers of ultrasonic transducers[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(12): 106-108.(in Chinese)
- [13] JIANG Z, DICKINSON R J, HALL T L, et al. A PZT-PVDF stacked transducer for short-pulse ultrasound therapy and monitoring[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(6): 2164-2171.
- [14] IM K, PARK Q H. Omni-directional and broadband acoustic anti-reflection and universal acoustic impedance matching[J]. Nanophotonics, 2022, 11(9): 2191-2198.
- [15] CHEN D D, WANG L W, LUO X J, et al. Recent development and perspectives of optimization design methods for piezoelectric ultrasonic transducers[J]. Micromachines, 2021, 12(7): 779.
- [16] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 3版. 南京: 南京大学出版社, 2012: 140-143.
- [17] 张林森, 宁小玲, 胡平. 超声耦合无线电能传输技术研究综述[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(3): 257-264.
ZHANG Linsen, NING Xiaoling, HU Ping. A review of ultrasonic coupled contactless energy transfer technology[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(3): 257-264.(in Chinese)
- [18] LI Y, CUI J, LI G, et al. An optimal design method for improving the efficiency of ultrasonic wireless power transmission during communication[J]. Sensors, 2022, 22(3): 727.
- [19] MA Y F, JIANG Y N, LI C. A Universal model for ultrasonic energy transmission in various media[J]. Sensors, 2024, 24(19): 6230.
- [20] LI J Q, HUANG W C, SHAO W W, et al. An electrical impedance matching method of dual-frequency transducers for ultrasound internal imaging[J]. Measurement, 2023, 221: 113413.



第一作者简介: 郑永秋,男,1986年7月生,教授、博士生导师,国家自然科学基金青年科学基金项目(B类)获得者,山西省“三晋英才”青年优秀人才,山西省光学学会理事,第七届中国青年科技工作者协会会员。主要从事航天动力燃烧场测试技术研究,主持国家自然科学基金重点项目、国家重点研发计划课题、发展部领域基金、科工局基础科研重点项目专题等国家级项目。出版专著1部,获山西省技术发明二等奖1项(排名1)。

E-mail:zhengyongqiu@nuc.edu.cn