DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0030-05.

核磁共振用PMT-PN智能换能器的研制

张 腾，唐文君，郭 惟

（首都医科大学附属北京积水潭医院，北京 100035）

摘 要：目前对核磁共振的基本组成部分超声经皮能量传输换能器的研究十分重视，但是核磁共振设备寿命短、体积大，自主维修困难。为解决以上问题，研究分析了超声经皮能量传输系统的组织介质与功率传输，提出一种频率补偿的维修方案，设计和制备一种以固溶体弛豫铁电单晶铌镁酸铅-钛酸铅复合材料的超声换能器。设计实验对此进行性能验证，实验表明，发射换能器与接收换能器之间频率匹配度在8%以内，功率放大器效率最大在90%以上。系统效率大部分时间都稳定在了0.2的高效率上，整体效率保持在0.15以上。可见研究设计的超声换能器具有良好的性能。

关键词：核磁共振；UTET；换能器；复合材料

中图分类号：TP274 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)02-0030-05

Development of PMT-PN Intelligent Transducers for Nuclear Magnetic Resonance

ZHANG Teng, TANG Wen-jun, GUO Wei

(Beijing Jishuitan Hospital Affiliated to Capital Medical University, Beijing 100035 China)

Abstract: At present, great attention is paid to the research of ultrasound transdermal energy transfer transducers, which are the basic components of nuclear magnetic resonance. However, nuclear magnetic resonance equipment has short lifespan, large volume, and is difficult to maintain independently. To address the above issues, this article investigates the tissue medium and power transmission of ultrasonic transdermal energy transmission systems, proposes a frequency compensated maintenance scheme, and designs and prepares an ultrasonic transducer using solid solution relaxation ferroelectric single crystal lead niobate titanate composite material. It designs experiments to verify the performance of this. The experiments show that the frequency matching between the transmitting and receiving transducers is within 8%, and the maximum efficiency of the power amplifier is above 90%. The system efficiency has remained stable at a high efficiency of 0.2 for most of the time, while the overall efficiency remains above 0.15. It can be seen that the ultrasonic transducer designed in this article has good performance.

Keywords: nuclear magnetic resonance; UTET; transducer; composite material

0 引言

超声波换能器是一种将电能转换为机械能的装置，它能够将电信号转换为高频机械振动，从而产生超声波[1]。主要由发射端、接收端和通信模块组成，超声波发送器和超声波接收器交替安装。超声波换能器的共振是其工作原理的关键。目前对超声波换能器的无线供能技术处于研究的初步阶段，对超声波换能器的共振频率研究主要以理论分析和仿真模拟实验为主。翟国富等人提出一种耐高温双线圈结构电磁超声换能器设计方法，采用仿真与实验相结合，对高温金属进行在线检测，实现了多次回波信号采集[2]。目前对核磁共振等医疗设备的质量要求较高、生产成本昂贵，并且对核磁共振体积大、寿命短，出现故障难以在短时间内进行换修问题，研究提出了一种基于超声经皮能量传输系统(Ultrasonic.Transcutaneous Energy Transfer,UTET)的频率补偿维修方式。超声换能器是核磁共振的核心部分，为了使换能器在所需频率下达到共振状态，需要根据其结构参数进行设计和制造[3]。研究基于固溶体弛豫铁电单晶铌镁酸铅-钛酸铅($xPb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-(1-x)PbTiO_3$,PMT-PN)复合材料设计制备了一种超声换能器，以实现UTET系统的效率提高和自主维修。

1 基于超声经皮能量传输的PMT-PN压电超声换能器制备与应用

1.1 基于UTET系统的频率补偿研究

随着植入式医疗设备、物联网、可穿戴技术的出现，无线能量传输技术受到人们的关注，其中，核磁共振应用最为显著。目前对于核磁共振的系统和研究有很多，最

*基金项目：北京市属医院科研培育项目(PX2020018)

收稿日期：2023-11-29

受重视的是超声经皮能量传输系统。系统将超声发射器贴合皮肤并向其植入的超声接收器，电源将电能转化为超声波，并通过介质传送到接收器，接收器再将其转化为交流电[4]。作为一种能量转换器，UTET系统结构简单，性能稳定，转换效率高，应用场景广泛。研究将基于压电超声换能器，提出一种针对核磁共振的超声无线能量传输医疗设备的频率补偿维修方式。如图1所示。

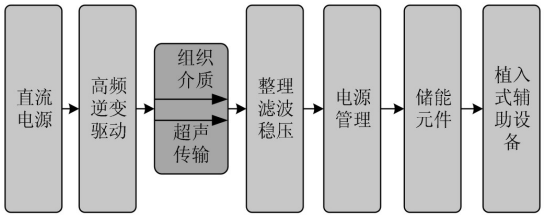


图1 UTET系统结构框图

图1为UTET系统结构框图，由两个部分组成，分别是体外发射超声能量与体内接收能量[5]。研究还在发射端和接收端设置了相应的阻抗匹配网络，以消除无效功率，提高系统效率。提高系统的传输效率是此次研究的关键，对此研究提出将电压施加到发射端，发射器由于逆压电效应的振动产生声波[6]，此时输入电功率如式(1)。

$$P_{input}=\frac{V_{rms}^2}{Z_{TX}} \tag{1}$$

式(1)中，Z_{TX}表示发射器的阻抗，V_{rms}表示施加的RMS电压。输入电功率和输出声功率之间的功率转换比如式(2)。

$$\eta_{EA}=\frac{P_{acoustic}}{P_{input}} \tag{2}$$

式(2)中，$P_{acoustic}$表示总的输出声功率。当接收器收到声波时，通过负载电阻器测量输出电压，调节负载电阻等于接收器的内阻可以获得最大功率，输出功率如式(3)。

$$P_{output}=\frac{V_{rms}^2}{R} \tag{3}$$

式(3)中，R表示负载电阻，此时可以计算出输入功率与输出功率之间的功率转换比，如式(4)。

$$\eta_{AE}=\frac{P_{output}}{P_{acoustic}} \tag{4}$$

结合式(2)、式(4)，可得输出功率与输入功率的比值，即总的无线功率传输效率[7]，如式(5)。

$$\eta=\eta_{EA}\times\eta_{AE}=\frac{P_{input}}{P_{output}} \tag{5}$$

在UTET系统中，不同距离的发射器与接收器的功率传输不同，为了找到每个距离的最佳传输效率，研究基于声辐射与空间压力分布调整系统的工作频率，采用了一种在频率调谐范围内的实施补偿频率的方法。

声波在介质中传播具有一定的特性，当声波传输到介质上时，原本静止的介质会在一定的范围振动[8]。随着声波在介质的传播，声能量也随之传输，由此获得的声能量如式(6)。

$$\begin{cases}\Delta E=\dfrac{V_0}{2}\rho_0\left(v^2+\dfrac{1}{\rho_0^2c_0^2}p^2\right)\\ \varepsilon=\dfrac{1}{2}\rho_0\left(v^2+\dfrac{1}{\rho_0^2c_0^2}p^2\right)\end{cases} \tag{6}$$

式(6)中，$\triangle E$表示总声能量，ε表示声能量密度。v表示介质质点本身的振动速度，c_0表示声振动在介质中传播的速度，V_0表示体积元的体积，ρ_0代表密度，P_0代表压强。在一段时间内穿过一个区域的声能是声功率[9]。如式(7)。

$$\bar{W}=\bar{\varepsilon}c_0S \tag{7}$$

式(7)中，S表示通过的面积，c_0表示声速，$\bar{\varepsilon}$表示平均声能量密度。通过计算单位面积的声功率获得声强，如式(8)。

$$\begin{cases}I=\dfrac{\bar{W}}{S}=\bar{\varepsilon}c_0=\dfrac{1}{2}\rho_0c_0v_a^2\\ v_a=\dfrac{p_a}{\rho_0c_0}\end{cases} \tag{8}$$

式(8)中，v_a表示质点速度的幅值，p_a表示声压幅值，声强单位为W/m^2。为了简化研究问题，只考虑纵向的能量传递，研究提出的UTET系统的发射器与接收器工作谐振频率一定。

为改善压电换能器性能，本文研究其主要组成部分：机械端口与电学端口。从而分析换能器的电学匹配与声学匹配，提高超声的作用效果。电学匹配包括三个方面，调谐匹配是通过感性器件补偿换能器容性阻抗，解决系统与机械调谐状态的接收器与发射器表现的输入输出容性以及接入电源的无功消耗。阻抗变换是保持电路的最大输出，解决压电换能器电阻抗不能达到最佳负载阻抗的问题。整形滤波是通过滤波与整形信号，解决多种形式的电路输出的非正弦波信号，不适用于工作频率单一的压电超声换能器的问题[10]。

在声学匹配中，由于声阻抗不同，声波在不同介质传播时产生反射现象，使得部分声波能够传递到另一种介质上，造成声波能量损失。针对以上，在声阻抗不同的两种介质中插入其他介质，增加声波的透射，实现声阻抗的匹配和过渡。在UTET系统中尽量使换能器阻抗与组织阻抗匹配，避免传输功率的损失[11]。

为了实现系统功率传输效率最大化以及实现补偿组织变化，研究提出了一种在UTET系统基于频率补偿理论改变发射频率的方法。为了使得UTET系统能够保持最大化功率传输效率，需要确定全局最佳频率以及频率调谐范围。具体步骤为，在通道共振与全局最佳频率不同时，系统可以调整为在最接近某一最佳频率的局部效率的最大值频率下工作，由此保持较高的功率传输效率。

为了提高超声导波的传输效率，保证在超声换能器

上得到最大功率输出，因此研究设计了频率自动跟踪法，选出系统中的最佳超声导波传输频率。目前，频率跟踪方法主要有差动变量器桥式电路、锁相环频率跟踪电路、压电换能器最大功率传输自动追踪法。由于频率跟踪算法的设计与实施需要参考电源负载的阻抗特性，选取了压电换能器最大功率传输自动追踪法，能够保证超声换能器最大限度地将电能转化为机械能。在实际应用中，为了使系统处于最大效率的工作状态，需要调整超声换能器的驱动频率。研究发现，超声波链路的功率传输效率与系统中存在的特性阻抗有关。如图2为发射端超声换能器阻抗相位测量原理图。

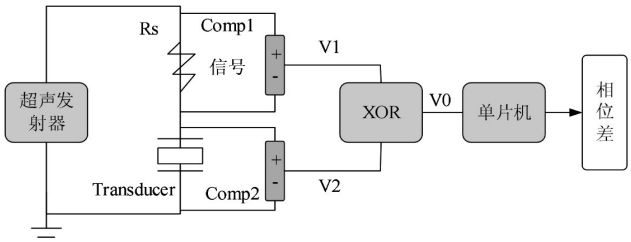


图2 发射端超声换能器阻抗相位测量原理图

1.2 基于PMN-PT的换能器设计制备及核磁共振实现

超声换能器已经在各种应用中使用了许多年，如医疗成像、无损检测、无线电力传输和传感器。在医疗应用方面，超声核磁共振是一种“电能−机械能−电能”的转换过程，制备性能良好的换能器至关重要，换能器的相关系数如发射器接收器距离、机电转换效率、声阻抗匹配度都会影响整体系统的性能。制备压电材料的种类繁多，其中PMT−PN作为制作换能器的关键压电材料，具有高介电常数、电致缩放效应的特点[12]。但是用于医疗超声以及核磁共振方面，PMT−PN的声阻抗过高，不易匹配，因此研究结合了聚合物环氧树脂材料，降低其声阻抗及电阻率，实现与人体组织协调匹配。与传统的锆钛酸铅压电陶瓷相比，PMT−PN压电复合材料具有更高的机电耦合系数、更低的声阻抗和合适的介电常数。

在超声能量无线传输系统中，输入输出电压、频率、输入功率是由功率放大器决定的，功率放大器主要驱动发射器，因此需要在超声链路中对功率放大器进行设计。输出功率与效率是选取功率放大器的关键。在完全导通与完全截止两种状态之间转换，功率放大器不会产生功耗，因此研究选用了功率较大的功率放大器作为超声链路的高频逆变器。其晶体管的工作模式为开关，不产生功耗；晶体管的导通角为π，线性度差但影响可忽略，输出功率较大，理论效率为100%，典型效率为85%。

对于超声链路的能量收集器进行设计，收集器负责将通过组织介质传输的超声波能量转化为电流。其中阻抗变换网络是与接收端换能器连接电路输入阻抗相等的电路，需要满足最大功率传输、提高系统传输效率。研究采用电感、电容构成匹配网络，以实现接收器的阻抗变换，实现随着负载阻抗变化，也能够保持输出电压的稳定。

接收器实现声能−机械能−电能的变换，但是转换的电能为交流电，无法被直流保存，因此需要整流。研究采用了一种桥式整流电路，这是一种由四个二极管连接形成的电桥式电路，克服了复杂电流的缺点，并且二极管选用低结电容，具有恢复时间短、降压快、噪声低、稳定性强的目的。通过整流，电压振幅大、电势交流的交流电被转化为简单的直流电压，然后对整流输出的信号进行滤波。

不同的核磁共振医疗设备采用的供能电压不同，这时候需要用到DC−DC转换器，研究选用的DC电源需要向不同的设备进行供电，选用了外部电路元件少的、高效的DC−DC降压升压转换器芯片，满足小型能量接收器的高效要求。对于充电接口电路设计，UTET系统通常采用可充电电池。为了实现有效控制充电电池电量，能够进行周期性充电，保障使用寿命，研究选取了具有动态电源路径管理功能的锂离子电池充电器，不仅可以为电池充电，还可以为负载电路提供稳定的电源。对于系统的软件设计，研究设计的系统包括两个部分，即功率放大器产生声波信号、发射端阻抗相位测量。综上，研究设计的UTET系统的整体设计流程如图3所示。

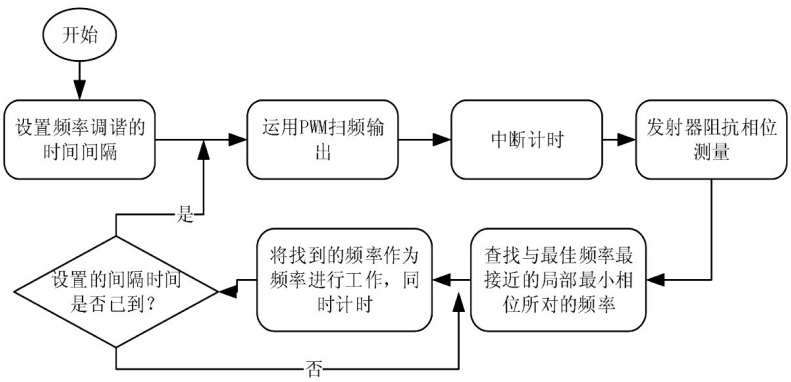


图3 系统整体工作设计流程图

2 PMT-PN压电超声换能器及核磁共振应用与实验分析

2.1 实验数据准备与整体设计

为验证研究设计的UTET系统的相关性能，特此设计了实验进行测试和分析。1−3型压电复合材料由压电相和聚合物相两种，材料按照一定的体积分数复合而成。实验以研究设计的1−3型PMT−PN压电复合材料超声换能器为基础，对各个设计部分进行测试。实验将猪肉作为组织介质，进行不同频率操作的对比实验，测试和分析UTET系统中阻抗相位测试频率调谐对系统功率传输的影响。猪肉厚度为6 mm，将其放置在两个换能器之间，过程中对猪肉挤压、触摸等操作。

2.2 整体测试与分析

对研究设计的以PMT−PN为材料制备的超声换能器测试其导纳曲线，如图4。可以看出，发射换能器与接收换能器之间频率匹配度在8%以内，在空气中测量换能器的谐振频率和反谐振频率分别为1.25 MHz和1.52 MHz。测试所得换能器的静态电容和动态电阻分别约为589 pF和998 Ω，PMT−PN压电复合材料换能器的机电耦合系数大约为0.657。因为当换能器通过不同的介质进行耦合时，此次实验测出的值并不一定，其阻抗值等参数都将可能随之改变。

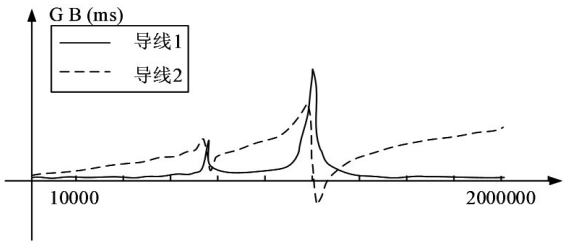
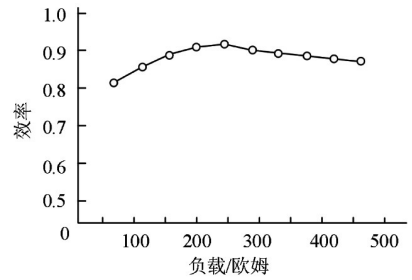


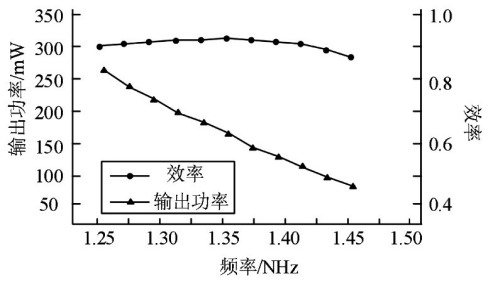
图4 PMT-PN压电复合材料制备换能器的导纳曲线

图5为研究设计的功率放大器的输出功率在各种阻抗下的效率曲线、在1.25−1.46 MHz的调谐范围下，输出功率与频率的关系曲线以及效率与频率之间的关系曲线。图5(a)可以看出，在负载电阻为250 Ω左右，功率放大器效率最大，在90%以上。在50 Ω左右，效率最低，但仍然在80%以上。在20−250 Ω范围，整体效率随着阻值增加而增加，在250 Ω之后，效率略微下降，稳定在85%以上。如图5(b)，功率放大器输出功率随着频率的增加稳定下降，最大值为268 mW，最小值为109 mW。功率放大器效率随着频率的增加一直稳定在90%左右，最大达到了92.8%，整体波动稳定在5%以内。可见研究设计的UTET系统的性能良好，符合相应的标准。

在对UTET系统进行猪肉组织介质的实验中，对系统的功率传输效率进行固定频率和调谐频率测试，两种情况下每10 s随系统效率进行测量。对测试结果进行记录，如图6为两种情况下的系统功率传输效率比较。可以看出，在调谐频率情况下，虽然在小部分有所波动，系统效率大部分时间都稳定在了0.2的高效率上，整体能够保持在0.15以上。在固定频率情况下，系统由于操作频繁，效率波动较大，由0.2左右下降到了0.05左右。



(a) 放大功率器在各负载阻抗下的效率



(b) 放大功率器输出功率与效率分别和频率的关系

图5 功率放大器相关性能分析

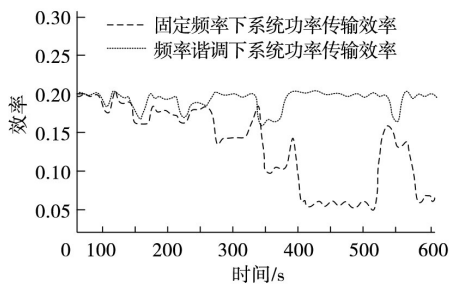


图6 两种情况下系统功率的传输效率变化比较

3 结束语

目前针对核磁共振中的超声换能器的设计和研究处于热点阶段。为了解决当前核磁共振设备寿命短、体积大问题，并能够实现核磁共振自主维修，研究对核磁共振系统UTET系统进行研究，设计了一种频率补偿方式。基于PMT−PN复合材料，设计和制备了提高系统传输功率的新型超声换能器。设计实验对其性能进行验证，实验表明，在50−250 Ω范围，整体效率随着阻值增加而增加，在250 Ω之后，效率略微下降，稳定在85%以上。功率放大器效率随着频率的增加一直稳定在90%左右，最大达到了92.8%，整体波动稳定在5%以内。系统整体效率可以维持在15%以上。可见研究设计的基于PMT−PN

(下转第43页)