

一种船用超声液位传感器的优化设计模型

贺国¹, 王豪^{1,2}, 史日安²

(1. 海军工程大学船舶与动力学院, 430033, 武汉; 2. 92196 部队, 266011, 山东青岛)

摘要: 针对一种船用超声液位传感器数学建模和多目标优化设计的问题, 提出了一种基于等效电路和遗传算法的优化设计方法. 将电-力-声类比的方法应用到建模中, 由此建立了传感器的等效电路模型, 并推导出传感器频率和输出特性参数的相关方程. 在等效电路模型的基础上, 以压电陶瓷尺寸、保护膜厚度和工作间隙为设计变量, 以输出电压的峰-峰值和信号特征值为优化目标, 建立了超声液位传感器的多目标优化模型. 采用遗传算法(GA)进行优化计算, 并利用 MATLAB 和 GA 优化工具箱进行求解. 实例分析表明, 优化后传感器性能得到了显著提高, 数值计算结果和实测结果吻合良好, 从而证明了等效电路模型的准确性.

关键词: 超声液位传感器; 等效电路; 遗传算法; 优化设计

中图分类号: TH702 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0044-06

An Optimal Design Method of Ultrasonic Liquid Level Transducer

HE Guo¹, WANG Hao^{1,2}, SHI Ri'an²

(1. College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Unit 92196, Qingdao, Shandong 266011, China)

Abstract: An equivalent circuit-genetic algorithm based modelling and optimal design approach was proposed to solve the problem of modeling and multi-objective optimal design for ultrasonic liquid level transducers. The equivalent circuit for an ultrasonic liquid level transducer was established by applying the electro-mechanical-acoustic analogy method, and the frequency response function and the output response function of the transducer were derived. In the multi-objective optimal design for the ultrasonic liquid level transducer, the dimensions of piezoelectric ceramics, the protection film thickness, and the gap between the transmitting probe and the receiving probe were chosen as the design variables; the peak-to-peak and the eigenvalue of output voltage were defined as the objective functions; two optimization tools, MATLAB and GA, were employed. The simulation results are in reasonable good agreement with the experimental data and the transducer performance increases significantly. It seems that the equivalent circuit approach can provide a useful tool for modeling ultrasonic liquid level transducers.

Keywords: ultrasonic liquid level transducer; equivalent circuit; genetic algorithm; optimization design

液位监测关系到船舶的安全运行, 也是船舶自动化技术研究的一项重要内容. 常用的液位监测装置主要有浮子式、差压式、微波和激光雷达式及光导

等液位计, 但其各自都有一些缺点, 如精度低、可维护性差、安装不便、结构复杂和价格昂贵等^[1]. 超声液位监测装置不仅能够定点或连续进行监测, 而且

结构简单、安装维护方便、可靠性较高,若采用耐腐蚀材料或进行耐高温设计,则在海水和高温环境中的耐腐蚀性更强。

影响超声液位传感器性能的主要因素是各组成部分的结构尺寸和材料的内在属性^[2]。传感器设计往往要兼顾多个性能指标,采用传统经验设计方法和单目标优化方法无法使其最佳性能得以发挥。特性计算数学建模和优化设计方法已应用于超声液位传感器的工程设计之中,可将经验的、感性的传统设计方法转变为科学的、理性的设计方法,对提高超声液位传感器的性能有重要意义。

对于声学传感器,电-力-声类比方法是一种较好的建模方法^[2-3]。声学、力学和电学振动系统都具有相似的微分方程形式,若将力类比为电压、振速类比为电流、力阻抗和声阻抗类比为电阻抗,则超声液位传感器可以等效成一种电路,再应用快速傅里叶变换和逆变换进行数值求解,便可获得频率响应和瞬态响应等相关参数。

遗传算法是一种模拟生物在自然环境中遗传进化的具有自适应、全局化概率搜索的算法,求解时不依赖于问题的具体领域和种类,是一种鲁棒性、隐含并行性、自适用性和全局优化性较好的优化算法,适用于解决多变量、多区域、多目标且连通性较差的优化问题^[4]。因此,本文借助于遗传算法对超声液位传感器的多目标优化模型进行了高效、准确的求解。

1 超声液位传感器等效电路模型

1.1 结构设计特点

超声液位传感器主要用于船舶的水舱、油舱、油水混合污水舱和发动机进排气系统管道等液态介质的液位监测^[5],图 1 是该传感器结构。

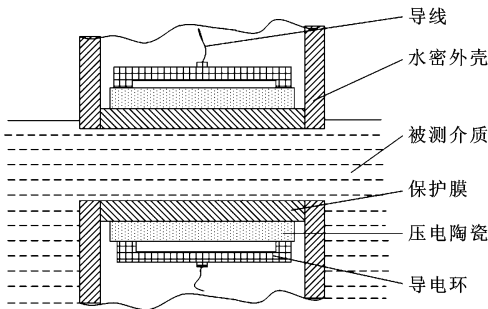


图 1 超声液位传感器结构

传感器为发射、接收分离式结构。压电陶瓷前端与金属保护膜粘接采用高温粘结剂,背衬为空气,这样可以提高传感器工作频率的稳定性和灵敏度。压

电元件用后盖板、弹簧和弹簧座进行固定,弹簧座为绝缘性材料,与导电环直接压接。通过控制弹簧的形变(施加一定的预应力)可增大压电振子的阻抗,以提高传感器的发射功率。弹簧座的材料为绝缘材料,结构为预应力弹簧承载结构。为了适用海水腐蚀性的工作环境,传感器的壳体需选用耐腐蚀的不锈钢材料。

1.2 模型

超声液位传感器是一种典型的能量转化和传递的系统,其能量转化过程十分复杂,所以在建立计算模型前应做如下简化假设:①压电陶瓷的横向尺寸应足够大,横向位移为 0;②压电陶瓷为实心圆薄片,且不考虑预应力的影响;③压电陶瓷的电学损耗为 0;④各组成部件连接面两侧的位移和受力保持连续。

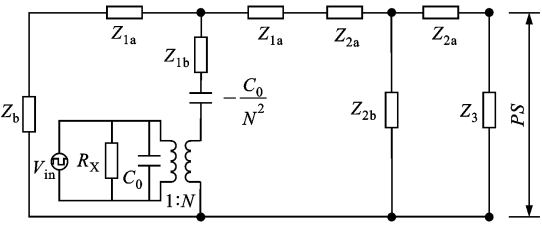
在上述假设的前提下,综合文献[6-8],本文建立了超声液位传感器等效电路模型,基本方法可以概括为:运用电-力-声类比法,根据边界方程和振动方程、利用四端网络理论,将传感器各附属部分等效为四端 T 形网络;结合压电方程,将压电陶瓷等效为一个六端网络,并以此为核心,根据边界上速度连续性条件,将各个部分的等效电路连接在一起,由此构成整个传感器的等效电路。

1.3 单侧探头的等效电路模型

传感器单侧探头的等效电路模型如下:沿厚度方向振动的压电陶瓷等效为六端网络;保护膜等效为不考虑压电效应的厚度振动的四端 T 形网络;内阻的方波脉冲电压作为激励电源。各部分的等效电路依次连接,即可得到传感器单侧探头的等效电路模型。图 2 是发射探头的等效电路模型,接收探头的等效电路模型与此相似。

文献[9]等效模型中各电学参量计算式如下

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \epsilon_{33} \frac{S}{d_1} \\ N &= C_0 h_{33} \\ Z_b &= \rho_4 v_4 S \\ Z_3 &= \rho_3 v_3 S \\ k_i &= \frac{\omega}{v_i} \left(1 + \frac{1}{2Q_{mi}} \right) \\ Z_{ia} &= \rho_i v_i S \tanh \left(\frac{k_i d_i}{2} \right) \\ Z_{ib} &= \frac{\rho_i v_i S}{\sinh \left(\frac{k_i d_i}{2} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



C_0 :静态电容; N :机电转换系数; Z_{1a} 、 Z_{1b} :压电陶瓷等效阻抗;
 Z_{2a} 、 Z_{2b} :保护膜等效阻抗; Z_b :空气背衬阻抗; Z_3 :负载阻抗; R_X :
电源内阻; V_{in} :激励电源; P_r :辐射声压; S :压电陶瓷有效面积

图 2 发射探头的等效电路模型

式中: S 为压电陶瓷的有效面积; ϵ_{33}^S 为夹持介电常数; d_i 为第*i*层的厚度; h_{33} 为压电应力常数; ρ_i 为第*i*层的密度; v_i 为第*i*层的声速; ω 为角频率; Q_{mi} 为第*i*层的机械品质因数; k_i 为第*i*层的有效波数.

1.4 阻抗、导纳及频率方程

阻抗与导纳特性分析是研究超声探头频率特性的一种有效方法.根据图 2 探头的等效电路模型,可

推导出探头的阻抗

$$Z = [(Z_{1a} + Z_b)((Z_{1a} + Z_{2a})(Z_{2a} + Z_{2b} + Z_3) + Z_{2b}(Z_3 + Z_{2a}))]/[Z_{2b}(Z_3 + Z_{2a}) + (Z_{2a} + 2Z_{1a} + Z_b)(Z_{2b} + Z_{2b} + Z_3)] + N^2 R_X/[1 + j \omega C_0 R_X] - N^2/[j \omega C_0] + Z_{1b} \tag{2}$$

设 Y 、 G_e 和 B_e 分别表示探头的导纳、电导和电纳,则 $Y=1/Z=G_e+jB_e$,探头的谐振频率 f_r 与反谐振频率 f_a 如下

$$\left. \begin{aligned} G_e \Big|_{f=f_r} &= \max(G_e) \\ G_e \Big|_{f=f_a} &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

1.5 传感器等效电路模型及其相关方程

传感器发射探头和接收探头的结构相同,若将监测介质等效为一个四端 T 型网络,则通过传声介质可将发射探头和接收探头连接起来.图 3 是超声液位传感器的等效电路.

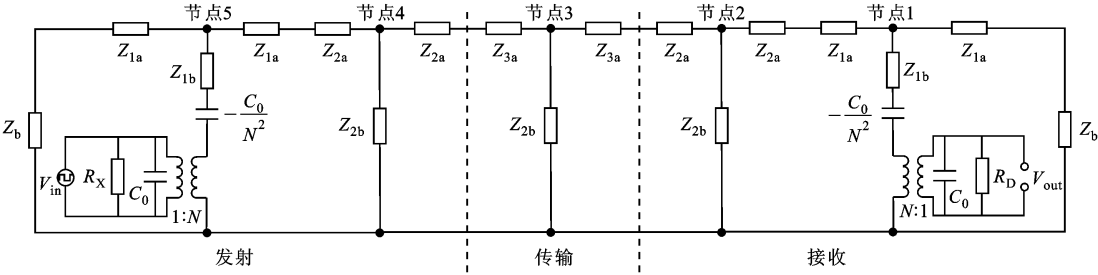


图 3 超声液位传感器的等效电路

电路中的阻抗应做如下等效变换

$$\left. \begin{aligned} Z_{in} &= \frac{N^2 R_X}{1 + j \omega C_0 R_X} - \frac{N^2}{j \omega C_0} + Z_{1b} \\ Z_{out} &= \frac{N^2 Z_D}{1 + j \omega C_0 R_D} \\ Z_{11} &= \frac{(Z_{1a} + Z_b)(Z_{1b} - (N^2/j \omega C_0) + Z_{out})}{Z_{1a} + Z_b + Z_{1b} - (N^2/j \omega C_0) + Z_{out}} \\ Z_{22} &= \frac{Z_{2b}(Z_{2a} + Z_{1b} + Z_{11})}{Z_{2b} + Z_{2a} + Z_{1b} + Z_{11}} \\ Z_{33} &= \frac{Z_{3b}(Z_{3a} + Z_{2a} + Z_{22})}{Z_{3b} + Z_{3a} + Z_{2a} + Z_{22}} \\ Z_{44} &= \frac{Z_{2b}(Z_{3a} + Z_{2a} + Z_{33})}{Z_{2b} + Z_{3a} + Z_{2a} + Z_{33}} \\ Z_{55} &= \frac{(Z_{1a} + Z_b)(Z_{1a} + Z_{2a} + Z_{44})}{2Z_{1a} + Z_b + Z_{2a} + Z_{44}} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

$$\left. \begin{aligned} V_5 &= \frac{Z_{55}}{Z_{55} + Z_{in}} F(V_{in}) \\ V_4 &= \frac{Z_{44}}{Z_{44} + Z_{1a} + Z_{2a}} V_5 \\ V_3 &= \frac{Z_{33}}{Z_{33} + Z_{2a} + Z_{3a}} V_4 \\ V_2 &= \frac{Z_{22}}{Z_{22} + Z_{2a} + Z_{3a}} V_3 \\ V_1 &= \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_3} V_2 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

因此,传感器的输出电压频响 $V_{out}(\omega)$ 和瞬态响应 $V_{out}(t)$ 如下

$$\left. \begin{aligned} V_{out}(\omega) &= \frac{Z_{out}}{Z_{out} + Z_{1b} - (N^2/j \omega C_0)} V_1 \\ V_{out}(t) &= F^{-1}(V_{out}(\omega)) \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

根据电路理论可以推导出各个节点的电压,即

2 优化设计方法

2.1 优化模型

2.1.1 设计变量及约束条件 超声液位传感器的主要结构参数为压电元件厚度 d_1 及半径 r 、保护膜厚度 d_2 和工作间隙 d_3 (发射探头和接收探头之间的空间距离),因此优化模型的设计变量为 $x=(d_1, r, d_2, d_3)$. 令换能器中心谐振频率为 f ,考虑到如下要求,如容器安装空间的约束、液态介质中杂质沉积附着造成的堵塞以及能够在 9.8 MPa 压力条件下可靠工作,则约束条件设置如下

$$\left. \begin{aligned} \frac{|f_r-f_0|}{f_0} &\leq 5\% \\ 0.005\text{ m} &\leq r \leq 0.01\text{ m} \\ 0.001\text{ m} &\leq d_1 \leq 0.010\text{ m} \\ 0.001\text{ 5 m} &\leq d_2 \leq 0.100\text{ 0 m} \\ 0.010\text{ m} &\leq d_3 \leq 0.035\text{ m} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2.1.2 优化目标函数 该目标函数如下.

(1)输出电压峰-峰值. 超声液位传感器的输出信号是一串电脉冲信号,因此可以用电压信号的峰-峰值作为输出信号的性能指标. 长期工作在环境恶劣的船舶液舱中的超声液位传感器,其表面会沉积一层油污,油污对声的吸收和散射作用会导致输出的电压信号衰减. 为了保证液位监测的准确性和可靠性,设计传感器时应尽可能提高输出信号的峰-峰值. 超声液位传感器的输出电压峰-峰值

$$V_f = \max(V_{out}) - \min(V_{out}) \quad (8)$$

(2)输出电压信号特征值. 由于发射的超声波受多次反射及边缘波的影响,其到达接收端的超声信号余振时间比较长,幅值也比较大,输出的总体信号特征比较差,所以不利于信号的采集和处理. 为了定量分析余振对总体信号特征的影响程度,本文定义一种信号特征值 E 来表征信号特征的性能

$$E = \sum_{n=n_1}^{n_2} \frac{|V_n|(n-n_1)}{V_{peak}^2} \quad (9)$$

式中: $n-n_1$ 为第 n 个峰值的权重; $|V_n|$ 为输出电压中第 n 个峰值的绝对值; $V_{peak} = \max\{|V_{out}(t)|\}$ 为输出电压的最大峰值.

(3)优化目标函数. V_f 和 E 是衡量超声换能器性能的 2 个最重要的性能指标,在一定的激励电压下, V_f 应最大, E 为最小. 因此,优化目标函数

$$\left. \begin{aligned} \min f_1 &= \frac{1}{V_f} \\ \min f_2 &= E \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

据此,超声液位传感器的多目标优化问题可以描述为:在约束条件下,寻找最佳设计参数,使目标函数达到最小值. 这样,超声液位传感器的多目标优化将转换为一个包含多变量、多约束条件的多目标优化模型的求解.

2.2 优化过程

利用遗传算法对超声液位传感器进行优化设计的过程^[10]如下.

(1)编码. 计算中由设计变量 x 作为基因串组成一个染色体 (d_1, r, d_2, d_3) ,并且采用二进制进行编码.

(2)获取适应度比例参数. 在计算中,将目标函数 f_1 、 f_2 进行加权求和,由此获取适应度函数 $f(a_1 f_1 + a_2 f_2)$. 由于计算结果具有多样性,所以采用排列(ranking)法将计算结果按照个体的目标值由小到大进行排序,从而获得一个包含对应个体适应度值的列向量.

(3)选择算子. 计算时采用随机遍历法抽取选择算子. 该算子可使得当前群体中适应度最高的个体不参与交叉运算和变异运算,同时基于适应度的重插入算子(reins),用下一代群体中的个体替换本代群体中经过交叉、变异等操作后产生的适应度最低的个体,以保证适应度最好的超声液位传感器的结构参数值保留到下一代群体中.

(4)优化计算. 采用单点交叉算子和离散变异算子进行优化计算,当适应度函数值连续几代没有明显改善时,可以通过改变交叉概率、增大变异概率来增加群体中个体的多样性,使得个体串上具有更多基因位的基因值发生变化,以防止未成熟收敛发生.

图 4 是利用遗传算法对超声液位传感器进行优

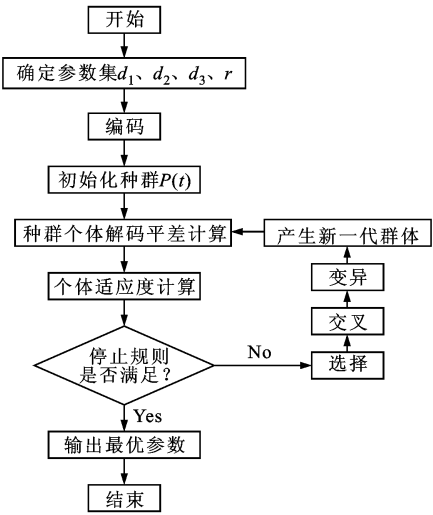


图 4 优化设计求解流程图

化设计的流程图.

3 实验分析

实验中,超声液位传感器的激励源是周期为 1 ms、占空比为 50% 的方波脉冲,其高电平和低电平分别为 5 V 和 0 V.

3.1 优化过程及结果

利用 MATLAB 和遗传算法对超声液位传感器参数变量进行了优化计算. 遗传算法的相关参数包括:种群个数 200,遗传代数 100,选择概率 0.9,交叉概率 0.85,变异概率 0.01. 在参数范围内先初始化种群,再经重组、交叉、变异不断优化参数,最终搜索出优化结果: $d_{11}=1.14d_{10}$, $d_{21}=1.93d_{20}$, $d_{31}=0.52d_{30}$, $r_{11}=1.04r_{10}$,其中 d_{10} 、 d_{20} 、 d_{30} 、 r_{10} 为优化前超声液位传感器结构参数. 图 5 是当前最优解适应度随代数的变化.

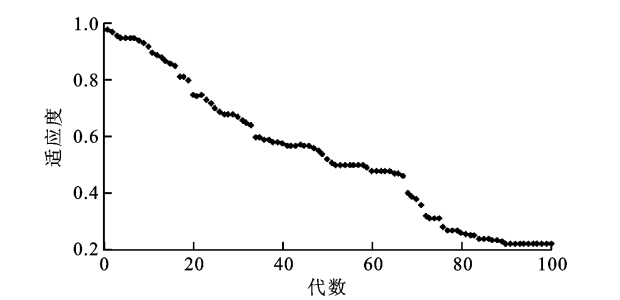


图 5 当前最优解适应度随代数的变化

3.2 实验验证

实验平台主要包括超声液位传感器探头安装平台、ATG3021B 信号发生器、水槽、待测传感器、拓普 PCI-50614 数据采集卡和计算机. 超声发射和接收的探头分别安装在平台的两端,并通过夹具来固定. 传感器探头安装平台为丝杠机构,通过旋转手轮可以调节探头间的距离,调节精度为 0.01 mm. 图 6 是传感器探头的性能测试平台.

3.2.1 仿真与实验波形比较 图 7 是超声液位传感器的输出电压波形和峰-峰值的仿真和实验结果,由图 7 可见,仿真与实验结果的一致性较好.

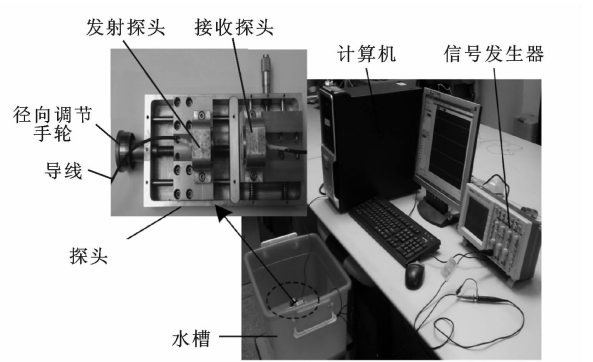


图 6 传感器探头的性能测试平台

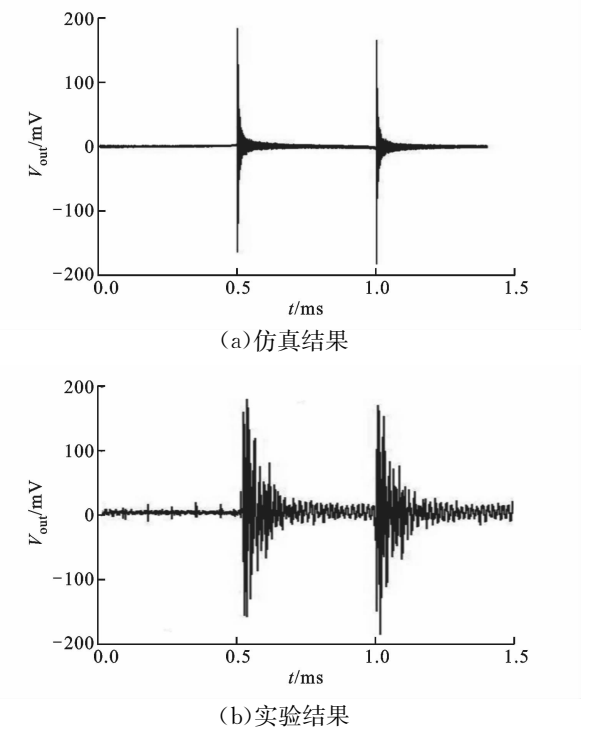


图 7 超声液位传感器的输出电压波形和峰-峰值的仿真与实验结果

3.2.2 仿真与实测电压峰-峰值比较 表 1 是优化后超声液位传感器电压峰-峰值的仿真和实验结果. 由表 1 可知,等效电路模型可以对超声液位传感器进行较为准确的模拟,可应用于超声液位传感器的仿真计算.

表 1 超声液位传感器输出电压峰-峰值的仿真与实测结果

d_3-d_{31}/mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
计算值/mV	376.7	348.0	330.9	345.2	338.7	332.3	329.7	297.1	338.8	332.6	326.2	298.2	285.9
实验值/mV	388.2	357.5	349.3	358.5	330.9	332.7	333.9	297.4	324.4	328.2	322.2	294.2	289.1
误差/%	3.000	2.650	5.268	3.706	2.360	0.127	1.258	0.096	4.447	1.336	1.240	1.463	1.110
d_3-d_{31}/mm	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
计算值/mV	310.3	321.0	307.2	308.2	311.0	330.3	321.7	307.2	321.7	339.0	314.4	322.2	326.0
实验值/mV	320.9	310.2	317.9	307.4	329.1	324.2	330.1	306.1	328.1	344.1	316.2	330.1	319.0
误差/%	3.280	3.480	3.350	0.258	5.503	1.899	2.547	0.371	1.940	1.396	0.560	2.380	2.172

3.2.3 优化前后输出电压波形比较 图 8 是优化前后超声液位传感器的输出电压实测波形,表 2 是优化前、后该传感器输出电压的特征值及峰-峰值的比较.由图 8 和表 2 可见,由于优化后探头的超声发射效率和能量透射率得以提高,使得超声液位传感器的输出电压峰-峰值显著提高;优化后,超声液位传感器的输出电压特征值有所降低,信号质量得到改善.

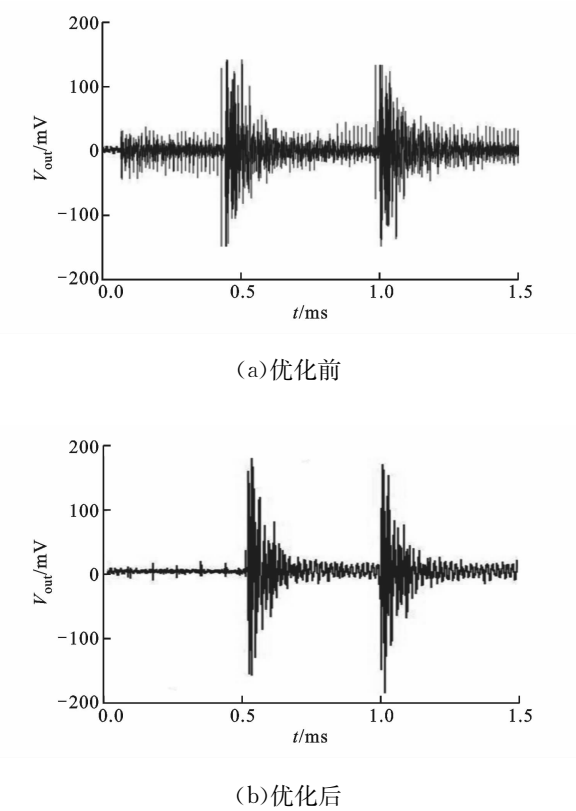


图 8 优化前后超声液位传感器的输出电压实测波形

表 2 优化前后超声液位传感器的输出电压特征值及峰-峰值比较

状态	$E/10^3$	V_f/mV
优化前	11.677 0	342.8
优化后	5.918 2	388.2

4 结束语

本文利用电-力-声类比方法建立了一种超声液位传感器的等效电路模型,并针对该传感器的多设计变量、多目标优化特点,依据等效电路模型,提出了一种基于遗传算法的多目标优化方法.实例分析表明,本文模型可以准确预报超声液位传感器的输

出电压特性,计算模型可信,经优化设计的传感器性能显著提高.

参考文献:

[1] 温淑慧. 一种高精度超声液位测量系统的研究[J]. 压电与声光, 2002, 124 (6):494-496.
WEN Shuhui. A study of high precision ultrasonic level measurement system[J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2002, 124(6):494-496.

[2] PORTO D. Methodology and numerical optimization of ultrasonic transducers for spinal surgery[M]. Lausanne, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2009.

[3] TAKAHASHI S, OHIGASHI H. Ultrasonic imaging using air-coupled P(VDF/TrFE) transducer at 2 MHz[J]. Ultrasonics, 2009, 49(4):495-498.

[4] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. Matlab 遗传工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005:62-64.

[5] 明廷锋, 贺国, 王豪. 船用超声液位传感器的分析与设计[J]. 应用声学, 2011, 30(1):53-57.
MING Tingfeng, HE Guo, WANG Hao. Transducer analysis and design for ultrasonic liquid level test used on ship[J]. Applied Acoustics, 2011, 30(1):53-57.

[6] VOLOSENCU C. Methods for parameter estimation and frequency control of piezoelectric transducer[J]. Automation Control Theory and Practice, 2009, 30 (8):115-136.

[7] AOYAGI T, KOYAMA D, NAKAMURA K. Equivalent circuit analysis and design of multilayered polyurea ultrasonic transducers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49(7):1-4.

[8] PARK K. Development and analysis of ultrasonic assisted friction stir welding process[D]. Michigan, USA: University of Michigan, 2009.

[9] 应崇福, 李明轩, 钟高琦. 用梅森等效电路对厚度模压电换能器暂态特性的一些分析[J]. 声学学报, 1980 (4):249-257.
YING Chongfu, LI Mingxuan, ZHONG Gaoqi. Some analysis of transient characteristics of thickness mode piezoelectric transducers by using Mason's equivalent circuit[J]. Acta Acustica, 1980(4):249-257.

[10] 谢金鑫. 基于参数化有限元的潜水器结构优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.

(编辑 苗凌)