

# 基于换能器等效电路参数拟合的动态阻抗匹配

蒙晨琛, 杨宇恒, 纪跃波

(集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 针对超声电源动态匹配技术的计算方法比较复杂的问题, 提出了一种基于压电换能器参数的动态 T 型匹配方法及系统。该方法从超声换能器的串联等效电路参数入手, 利用上位机实现数据拟合从而计算出等效电路参数后, 进一步得到谐振频率与 T 型匹配电路元件的参数, 并利用下位机与继电器对匹配电路进行调节。对此系统进行仿真验证, 得到的数据准确性较好, 计算速度快。

**[关键词]** 等效电路; 阻抗匹配 (电气); 动态 T 型网络; 数据拟合; 自动调节; 可调器件

**[中图分类号]** TP 272; TB 552

## Dynamic Impedance Matching Based on the Fitting of the Equivalent Circuit Parameters of the Transducer

MENG Chenchen, YANG Yuheng, JI Yuebo

(College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** This paper proposes a dynamic T-shaped matching method and system based on piezoelectric transducer parameters to address the complex calculation method of ultrasound power dynamic matching technology. The equivalent circuit parameters can be obtained by data fitting using upper computer, which crosses the equivalent circuit parameters of the ultrasonic transducer, then the parameters of the resonant frequency and T-type matching circuit elements can be determined and the matching circuit can be determined by lower computer and relays. The simulation results show that the data accuracy of this method is good, and the calculation speed is improved compared with those the existing calculation methods.

**Keywords:** equivalent circuits; impedance matching (electric); dynamic t-network; data fitting; automatic adjustment; adjustable devices

## 0 引言

近年来, 超声技术发展越来越好, 已经涉及电气、机械、化工、医学等领域。超声电源电路是将标准的 50 Hz 或 60 Hz 输入电压转换成与超声波换能器相匹配的高频交流电信号的电路。21 世纪以来, 随着 Mehmet<sup>[1]</sup>使用微控制器控制超声波电源的功率输出和频率自动追踪, 设计出一款具有自动频率控制能力的超声波电源, 超声电源开始走向自动化控制方向。2009 年, Arroyo-huerta 等<sup>[2]</sup>采用模糊控制的动态匹配方法, 模糊控制可以实现动态匹配, 但容易受到输入信号的噪声和不确定性的影响, 可能导致控制效果不稳定或波动。2015 年, Khmelev 等<sup>[3]</sup>通过对超声波电源控制算法的优化, 并

**[收稿日期]** 2024-01-22

**[基金项目]** 福建省科技计划项目“基于数字化 T 型网络和参数辨识法频率跟踪技术的超声电源”(2022H0021)

**[作者简介]** 通信作者: 纪跃波 (1969—), 博士, 教授, 硕导, 从事超声电源及应用研究。E-mail: ybji@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

考虑了功率因数,提高了超声波电源输出的稳定性。

在国内,超声电源与压电换能器之间的电路匹配有多种方法,包括利用电路反射系数来确定匹配程度的智能算法<sup>[4-6]</sup>和基于 $Q$ 值进行匹配的方法<sup>[7-8]</sup>。智能算法在理论上被认为可以获得较好的匹配,但其建模复杂、计算量大,从而增加了系统的开发成本。此外,智能算法在仿真中也存在匹配禁区的问题。基于 $Q$ 值进行匹配的方法通过确定解空间截面上的 $Q$ 值,进而计算网络参数。然而,这种方法计算得到的匹配元件值可能波动较大。综上所述,不同的方法在超声电源与换能器之间的电路匹配问题上都存在一些局限性。

因此,本文提出了一种新的动态阻抗匹配方法,通过采样得到的频率、阻抗和相位差,利用压电换能器等效电路的实部、虚部与压电换能器等效电路中等效元件的参数的关系进行数据拟合,再利用得到等效元件参数计算得到匹配电路元件参数值,实现阻抗匹配。同时,针对T型匹配电路进行设计,采用二进制数字电感阵列和二进制数字电容阵列匹配元件,使匹配电路便于控制,提高系统稳定性。

## 1 T型匹配网络的原理

换能器等效电路由动态电感、电容、电阻串联支路与静态电容并联构成。在谐振时,换能器可以等效为静态电容与动态电阻的并联,此时换能器对外呈容性负载,因此增加匹配电路进行调谐。匹配电路的目标是实现变阻匹配,即将压电换能器的阻抗值转换为超声电源所需的阻抗值,使超声电源能够以最大功率输出。压电换能器的谐振频率为 $\omega_s = 1/\sqrt{L_m C_m}$ 。其中: $L_m$ 、 $C_m$ 分别为换能器的动态电感、动态电容。压电换能器的等效阻抗为

$$Z = R + jX = |Z|e^{j\varphi} \quad (1)$$

其中: $|Z|$ 为压电换能器的阻抗模, $|Z| = U/I$ , $U$ 为换能器两端的电压有效值, $I$ 为换能器两端的电流有效值; $R$ 为换能器等效阻抗的实部; $X$ 为换能器等效阻抗的虚部; $\varphi$ 为电路中电压与电流的相位差; $j$ 为虚数单位。计算可得,压电换能器等效阻抗的实部为

$$R = R_m / (1 - \omega C_0 (\omega L_m - (1/(\omega C_m)))^2 + \omega^2 C_0^2 R_m^2) \quad (2)$$

其中: $\omega$ 为超声电源的输出频率; $R_m$ 、 $C_0$ 分别为换能器的动态电阻、静态电容。压电换能器等效阻抗的虚部为

$$X = \frac{(\omega L_m - (1/(\omega C_m))) - \omega C_0 [R_m^2 + (\omega L_m - (1/(\omega C_m)))^2]}{[1 - \omega C_0 (\omega L_m - (1/(\omega C_m)))^2 + \omega^2 C_0^2 R_m^2]} \quad (3)$$

T型电路在换能器两端先串联一个匹配电感 $L_1$ ,再并联一个匹配电容 $C_1$ ,最后串联一个匹配电感 $L_2$ 。T型电路通过调整 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C_1$ 的参数达到谐振状态并实现阻抗匹配。匹配电感 $L_1$ 、匹配电容 $C_1$ 和匹配电感 $L_2$ 的计算公式为

$$L_1 = C_0 R_m^2 / (1 + (\omega C_0 R_m)^2), \quad (4)$$

$$C_1 = \sqrt{(R_m/R_r) - 1} / (\omega_s R_m), \quad (5)$$

$$L_2 = C_1 R_m^2 / (1 + (\omega C_1 R_m)^2) \quad (6)$$

其中: $R_r$ 为超声波电源的内阻。

## 2 动态T型匹配网络设计

利用等效电路的等效元件参数的值来计算匹配元件参数会更加准确,也可以清晰地得到匹配元件的值。但是利用公式直接推导等效电路的元件参数的计算十分复杂,而利用数据拟合方法仅需采样4组不同频率 $\omega$ 的阻抗值,即可较简单地计算出换能器等效电路的元件参数。

本文设计的控制系统选用单片机。STM32F1系列单片机没有FPU,所有的浮点运算都需要由编译器转换为定点,由CPU核来进行处理,但是计算速度慢,且精度不高。为了解决这个问题,在设

计中采用上位机和下位机的结构。上位机使用 STM32F1 系列单片机, 负责数据拟合; 而下位机使用 STM32F4 系列单片机 (含有 FPU 硬件浮点运算功能, 数学计算速度相比普通 CPU 运算快上几十倍) 负责计算匹配电路元件的参数并进行调节。这样可以有效地提高系统的运行效率。

动态 T 型匹配网络的流程如下: 通过在换能器两端和超声电源两端设置采样电路, 可以获得两组电压和电流信号。这些信号经过信号处理电路和下位机计算后, 可以得到换能器端的相位差  $\varphi$ 、阻抗模  $|Z|$  和频率  $\omega$ , 以及超声电源端的相位差。如果超声电源端的相位差未超出预设值, 则匹配完成; 如果超声电源端的相位差超出预设值, 则下位机通过多次调节电压的频率来获取多组换能器的相位差  $\varphi$ 、阻抗模  $|Z|$  和频率  $\omega$ 。下位机根据这些数据利用式 (1) 计算出  $R$  和  $X$ , 并将  $R$ 、 $X$  和  $\omega$  传输到上位机内。上位机根据这些值进行拟合计算, 得到换能器的串联等效电路参数, 包括动态电感  $L_m$ 、动态电容  $C_m$ 、动态电阻  $R_m$  和静态电容  $C_0$ 。

下位机在获得上位机传输的数值后, 首先计算动态电感和动态电容的谐振频率, 判断当前频率是否为谐振频率。如果是, 则无需操作直接进入下一步; 如果不是, 则下位机会改变电路中的频率, 然后再进行下一步的流程。利用换能器的等效电路参数值, 下位机计算出在谐振状态下 T 型匹配电路的匹配元件值, 由此计算并调节各端口输出的电平高低。随后, 再次识别超声电源端的相位差, 如果超出预设值, 则对匹配电路进行重新匹配, 反之则完成匹配。

## 2.1 换能器等效电路参数拟合的设计

上位机使用最小二乘法进行数据拟合。下位机将换能器的相位差  $\varphi$ 、阻抗模  $|Z|$  和频率  $\omega$  传输到上位机内。上位机对换能器的四个参数进行估计, 即动态电感  $L_m$ 、动态电容  $C_m$ 、动态电阻  $R_m$  和静态电容  $C_0$ 。随后, 上位机将多组猜测值代入式 (2) 和式 (3) 中, 计算得到每组猜测值的误差, 并计算所有实验点误差的平方和, 得到总的误差值。在所有猜测值中选择误差值最小的一组, 并将其作为换能器的等效串联电路参数传输到下位机内, 完成数据拟合的过程。

为了提高拟合速度并同时提高数据拟合的准确性, 在对部分压电换能器的等效电路参数<sup>[9]</sup>进行研究后, 可以看出换能器等效电路参数的最大值与最小值的倍数不超过 10 倍。因此, 在匹配之前, 首先利用阻抗分析仪获取换能器的等效电路参数, 然后在拟合换能器等效电路的参数值时, 可以给定其参数范围, 这样可以确保高效且准确地完成数据拟合。

## 2.2 动态 T 型匹配网络的参数化设计

常见的匹配元件动态调整方法有可控电抗器动态匹配法、数字电感动态匹配法、阻抗无级动态匹配法等<sup>[10-12]</sup>。本文使用数字电感电容动态匹配法, 使用二进制电容阵列和二进制电感阵列, 匹配元件可变化范围大, 也可以快速达到目标值, 同时无需增加过多的辅助电路, 减少对电路的影响。下位机利用匹配电容和匹配电感的值, 对不同引脚输出高低电平来控制匹配电路。

匹配电路包括继电器、匹配电容、匹配电感, 如图 1 和图 2 所示。

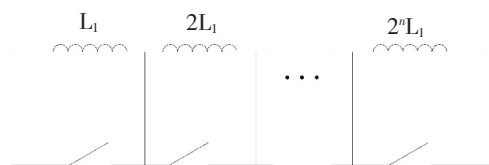


图 1 匹配电感拓扑

Fig.1 The topology of an inductor

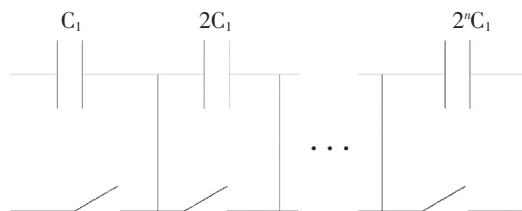


图 2 匹配电容拓扑

Fig.2 The topology of a capacitance

控制系统的引脚与继电器相连, 继电器与电容并联、与电感并联, 每个电容之间串联, 每个电感之间串联。匹配电感为多个电感串联, 每个电感的值为上一个电感值的二倍 (即二进制数字电感阵

列), 每个电感分别与继电器并联, 电感值的范围为  $0 \sim L_1 \cdot (2^n - 1)$ , 步长为  $L_1$  (共有  $n$  个电感串联)。匹配电容为多个电容串联, 每个电容的值为上一个电容值的二倍, 因此每个电容的值的倒数为上一个电容倒数的  $1/2$  (即二进制数字电容阵列), 每个电容分别与继电器并联。

### 2.3 采样及数据处理电路的设计

本文选择电流互感器和电压互感器进行采样, 这两种互感器都具有简单的采样原理, 并且能够保证采样信号的准确性。然而, 在采样信号中常常存在杂波, 因此需要对采样信号进行滤波处理。滤除杂波采用压控电压源二阶带通滤波拓扑, 如图3所示。通过这种滤波方式, 可以将电压信号频率范围内的信号放大, 而将其他频率范围的信号减弱或截断, 以实现滤波效果。

为了确保滤波后的电压信号的稳定性, 在滤波电路之后还加入了电压跟随电路。这样可以有效消除因滤波引起的波形失真和不稳定性问题, 提高滤波效果。电压跟随电路的输出信号通过过零比较器, 输出方波信号, 用于相位差检测, 如图4所示。

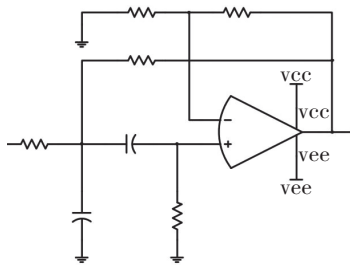


图3 带通滤波器拓扑

Fig.3 The topology of a band-pass filter

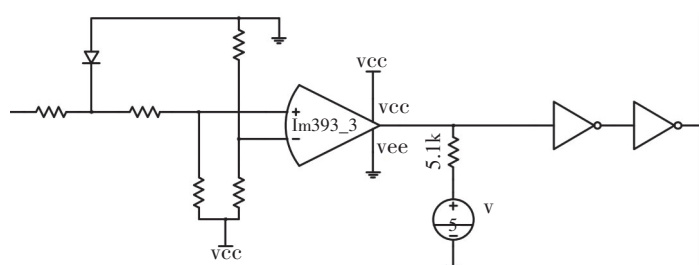
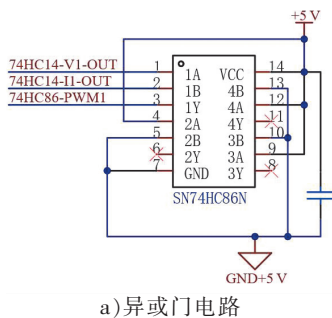


图4 过零比较器

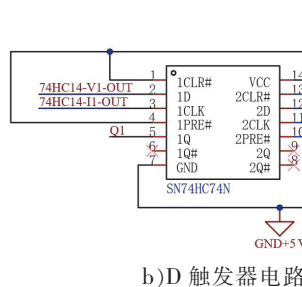
Fig.4 A zero-crossing comparator

方波信号通过异或门得到电压信号与电流信号的相位差, 通过 D 触发器得到电压信号与电流信号之间的相位关系, 由此便得到电压与电流的相位差  $\varphi$ , 如图5所示。

如图6所示, 滤波后的信号进入芯片 AD536AJD 得到其电压电流的有效值, 由此可以得到换能器阻抗模  $|Z|$ 。



a) 异或门电路



b) D 触发器电路

图5 相位差检测电路

Fig.5 A phase difference detection circuit

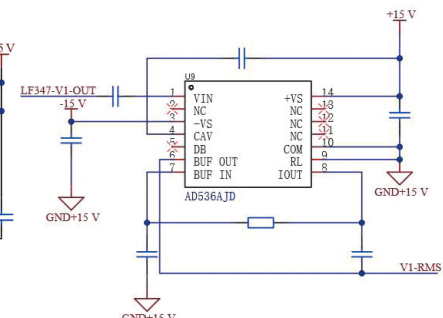


图6 有效值检测电路

Fig.6 A RMS detection circuit

## 3 动态 T 型匹配网络的仿真

### 3.1 换能器等效参数拟合的仿真

本文取一个焊接用超声换能器的数据进行试验, 其等效电路的参数为: 动态电阻  $R_m = 62 \Omega$ ; 动态电容  $C_m = 32.1 \text{ pF}$ ; 动态电感  $L_m = 1965.8 \text{ mH}$ ; 静态电容  $C_0 = 17.979 \text{ nF}$ 。由此求得  $L_m$  与  $C_m$  的谐振频率为  $20.045 \text{ kHz}$ 。

不同的频率对应的  $R$ 、 $X$  对于数据拟合的精确度影响较大。为了获得更好的拟合效果, 确定频率的取值范围尤为重要<sup>[13]</sup>。本次仿真测试了 26 组不同频率范围下的拟合效果, 采样频率段从 18.5 ~ 19.0 kHz 到 21.0 ~ 21.5 kHz, 利用拟合优度来确定其拟合效果。拟合优度是回归分析中用来评估回归方程对样本观测值的拟合程度和衡量数据点聚集在回归线周围的密集程度的指标<sup>[14]</sup>。

对于式 (4) 和式 (5) 来说, 其样本的总平方和 (TSS) 为

$$\begin{cases} \text{TSS}_R = \sum_{i=1}^m (R_i - \bar{R})^2, \\ \text{TSS}_X = \sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2. \end{cases} \quad (7)$$

样本的残差平方和 (RSS) 为

$$\begin{cases} \text{RSS}_R = \sum_{i=1}^m (\hat{R}_i - R_i)^2, \\ \text{RSS}_X = \sum_{i=1}^m (\hat{X}_i - X_i)^2. \end{cases} \quad (8)$$

拟合优度  $R^2$  为

$$\begin{cases} R_R^2 = 1 - (\text{RSS}_R / \text{TSS}_R), \\ R_X^2 = 1 - (\text{RSS}_X / \text{TSS}_X). \end{cases} \quad (9)$$

$R^2$  越大, 拟合效果越好。 $R^2$  的最优值为 1。

在图 7 中, 可观察到在不同取值下的拟合优度情况。当电压频率初始值设定为 18.5 ~ 19.5 kHz 时, 拟合优度接近于 1, 这表示拟合效果非常好。然而, 在 19.6 ~ 20.1 kHz 之间, 拟合效果变差, 直到 20.2 kHz 时, 拟合优度才逐渐上升。考虑到超声电源运行时频率大幅变化会影响电路的稳定性, 为了保持系统的稳定性, 本次仿真选择采样频率初始值为 19.5 kHz 时的数据。

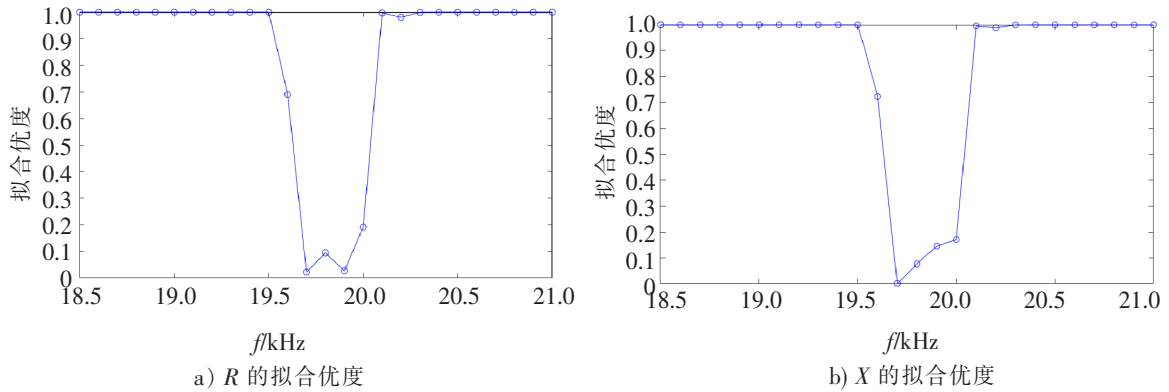
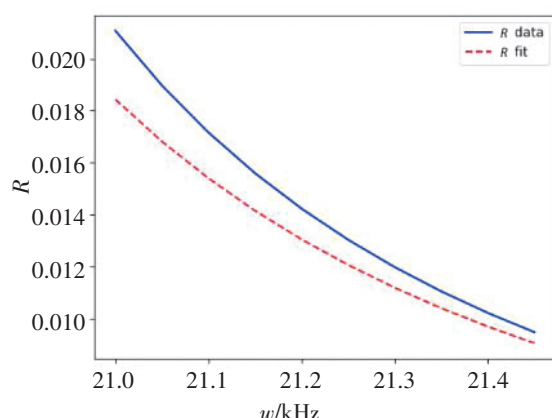
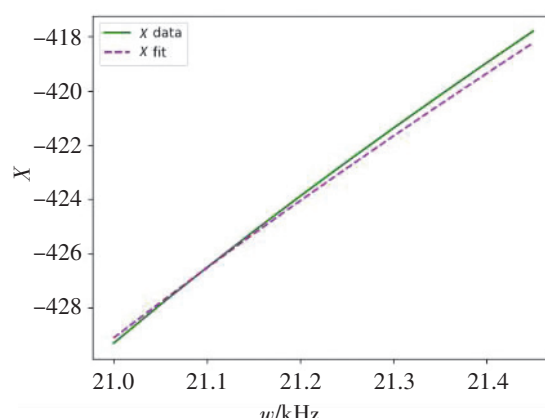


图 7 不同采样频率下的数据拟合优度

Fig.7 Goodness-of-fit of data at different sampling frequencies

下位机改变频率从 19.0 kHz 以步长 50 Hz 增长到 19.5 kHz, 获取到 100 组频率、阻抗和相位差数据。将仿真采样得到的数据传输到上位机内, 根据最小二乘法<sup>[15-16]</sup>进行数据拟合, 得到换能器的等效参数的拟合值后, 根据文献 [17-18] 编写程序验证其准确性。数据拟合效果如图 8 和图 9 所示。图中, 实线为由采样数据得到的一条光滑曲线, 虚线为数据拟合的  $R(\omega)$  和  $X(\omega)$  的函数曲线。同时利用式 (7) ~ (9) 计算出此时  $R$  的拟合优度为 0.9997,  $X$  的拟合优度为 0.9999。由此可看出, 数据拟合的效果良好。



图8  $R(\omega)$ 拟合效果对比Fig.8 Comparison of  $R(\omega)$  fitting effects图9  $X(\omega)$ 拟合效果对比Fig.9 Comparison of  $X(\omega)$  fitting effects

### 3.2 动态 T 型匹配的仿真

对于动态 T 型匹配, 使用仿真软件 Proteus 进行仿真, 单片机根据换能器参数计算匹配电路的参数值、调节各个 I/O 口的输出电平 (高电平设置为 5 V, 低电平设置为 0 V), 以此来控制继电器的开关, 进而完成改变匹配电路内匹配的参数值。

根据 STM32 计算出的匹配电感  $L_1$  的理论值, 将其除以电感模块中最小的电感值 400 nF 并四舍五入得到一个不大于 256 的整数。将此整数对 2 取余后的值与 1 比较, 若大于 1, 则控制第一个电感的 IO 口输出 1, 反之输出 0; 将此整数对 4 取余后的值与 2 比较, 若大于 2, 则控制第二个电感的 IO 口输出 1, 反之输出 0; 以此类推, 对该整数进行取余和比较操作, 依次控制不同电感的 IO 口输出电平, 最终实现匹配参数值的改变。 $L_2$  同理。

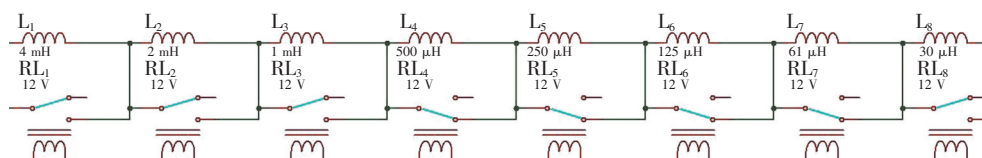
电容串联时总容值的倒数为各串联电容值的倒数之和。根据 STM32 计算出的匹配电容  $C_1$  的理论值, 计算出它的倒数, 除以电容模块中电容最大值的倒数并对小数进行舍去后得到一个不大于 256 的整数。将此整数与 128 比较, 若大于 128, 则控制第一个电容的 IO 口输出 1, 反之输出 0; 将此整数对 128 取余后的值与 64 比较, 若大于 64, 则控制第二个电容的 IO 口输出 1, 反之输出 0; 以此类推, 对该整数进行取余和比较操作, 依次控制不同电感的 IO 口输出电平, 最终实现匹配电容值的改变。

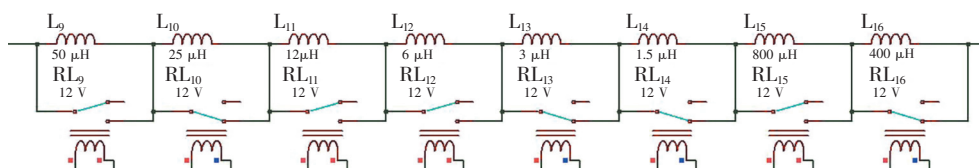
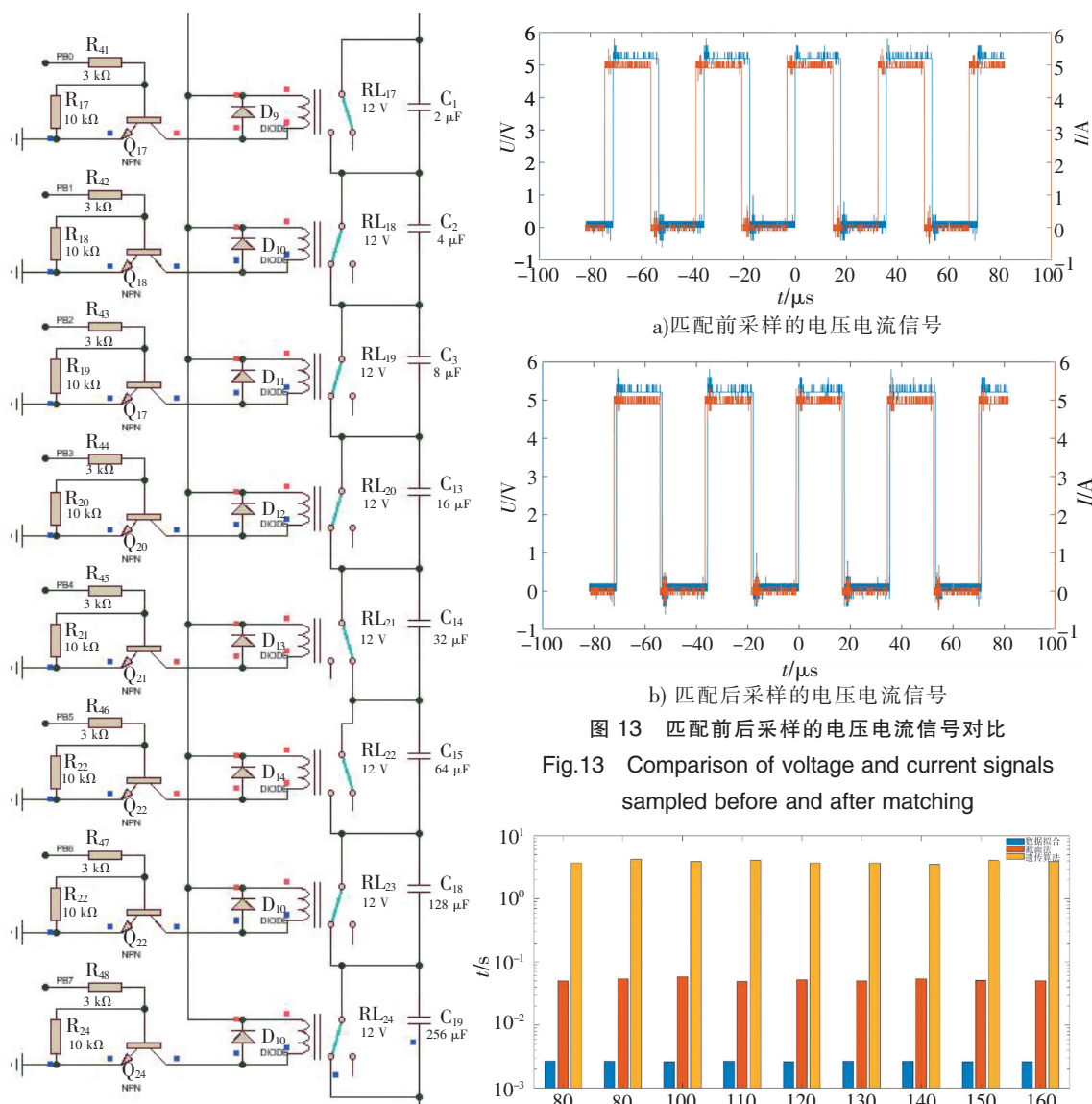
当 STM32 的 IO 口输出 0 时, 三极管的基极为 0 V, 三极管截止, 继电器线圈无电流流过, 则继电器释放 (OFF), 此时超声电源的电压流经继电器并联的匹配电容; 相反, 当 STM32 的 IO 口输出 1 时, 三极管的基极为 5 V, 三极管饱和, 继电器线圈有相当的电流流过, 则继电器吸合 (ON), 此时超声电源的电压流经继电器, 以此来对匹配电容模块  $C_1$  进行电容值调节。

将拟合的换能器等效电路的参数代入到式 (4) ~ (6) 中, 经计算可得  $L_1 = 69 \mu\text{H}$ ;  $C_1 = 1.83 \mu\text{F}$ ;  $L_2 = 7.03 \text{ mH}$ 。当仿真开始时, 继电器的开关会随之变化, 其仿真结果如图 10 ~ 12 所示。

匹配完成后的电压电流信号如图 13 所示, 电压电流信号的相位差明显减小, 证明在增加了匹配电路后, 可以保证稳定的相位关系, 减少了相位差, 提高了超声电源系统的稳定性与准确性。

如图 14 所示, 通过对数据拟合、截面法、遗传算法三种方法匹配时间的对比, 可以看出数据拟合的匹配速度更快。

图10 匹配电感  $L_2$  仿真结果Fig.10 The simulation results of matching inductor  $L_2$

图 11 匹配电感  $L_1$  仿真结果Fig.11 The simulation results of matching inductor  $L_1$ 

a) 匹配前采样的电压电流信号

b) 匹配后采样的电压电流信号

图 13 匹配前后采样的电压电流信号对比

Fig.13 Comparison of voltage and current signals sampled before and after matching

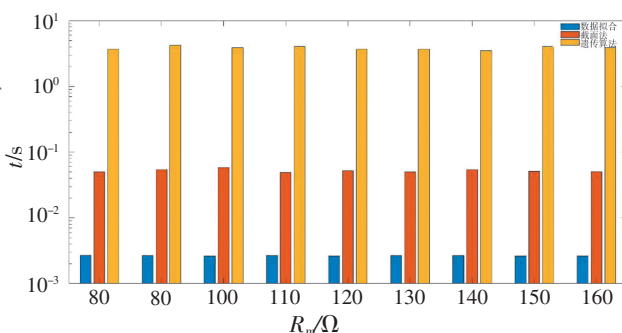
图 12 匹配电容  $C_1$  仿真结果Fig.12 The simulation results of matching capacitance  $C_1$ 

图 14 匹配时间的对比

Fig.14 Comparison of matching times

## 4 结论

本文针对以往的自动匹配准确性不佳的问题,提出了一种新的自动阻抗匹配方法;对不同频率段的数据进行拟合并利用拟合优度判断拟合效果,寻找最合适进行数据拟合的频率范围。若拟合采样的频率内含有谐振频率时,会对其拟合优度产生影响。

本文提出的动态 T 型匹配网络设计简单,匹配准确度高。在超声电源匹配中,若接收到负载阻抗侧相位差偏差过大,即可自动进入匹配中;若在逆变电路和超声换能器中增加本动态 T 型匹配网络,可针对其相位差变化进行响应,这能提高超声能源的电路效率。

### [ 参考文献 ]

- [1] MEHMET Y, ALI T, CEMILE T. A microcontroller based generator design for ultrasonic cleaning machines[J]. Istanbul University Journal of Electrical & Electronics Engineering, 2009, 9: 853-860.
- [2] ARROYO-HUERTA E, DÍAZ-MÉNDE A, RAMÍREZ-CORTÉS J M, et al. An adaptive impedance matching approach based on fuzzy control[J]. Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2009: 889-892.
- [3] KHMELEV V N, GENENE D V, ABRAMENKO D S, et al. Development of the electronic generators of the ultrasonic technological apparatuses[C]//International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM, Erlagol: IEEE Computer Society, 2015.
- [4] JIN Z Y, HUO L S, LONG T Y, et al. An online impedance analysis and matching system for ultrasonic transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2019, 66(3): 591-599.
- [5] 杨晓博, 李阳, 肖朝霞, 等. 改进粒子群算法的自动阻抗匹配技术[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2016, 39(6): 41-48.
- [6] GRZEGORZ P, SEBASTIAN B, SERAFIN B, et al. Iterative learning control for impedance matching network[C]//2022 24th International Microwave and Radar Conference. Gdansk: IEEE, 2022.
- [7] 范兴明, 苏斌华, 唐福鸿, 等. 基于 Q 值法的 T 型自动阻抗匹配网络的研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2275-2283.
- [8] WANG B T, CAO Z P, SONG F. Design and evaluation of a t-shaped adaptive impedance matching system for vehicular power Line Communication[J]. IEEE Access, 2020, 8: 73843-73854.
- [9] 王刚, 魏小源, 黄玲, 等. 钢轨检测压电超声换能器宽频阻抗匹配研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 57-64.
- [10] 莫小琴. 基于最小二乘法的线性与非线性拟合[J]. 无线互联科技, 2019, 16(4): 128-129.
- [11] 杨小岗. 面向超声加工过程的谐振频率追踪策略研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.
- [12] 葛飞. 功率超声适配电源的研究与设计[D]. 哈尔滨: 黑龙江科技大学, 2020.
- [13] YANG X. The design and implementation of Matlab-based nonlinear data fitting for infrared sensors[C]//IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms, EEBDA 2022. Changchun: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2022.
- [14] ZVYAGIN M A, SHARY S P. Curve fitting for exponential polynomials from interval data[C]//24th IEEE International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, EDM 2023. Novosibirsk: IEEE Computer Society, 2023.
- [15] XIN R, CHANG Y, LIU M, et al. Research on spectrum fitting and extraction of power grid communication based on big data[C]//International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA). Xi'an: IEEE, 2019.
- [16] 徐亚平. 实用计算方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [17] LI S, LIU Y, LIU Z. Research on stray parameter extraction method of inverter based on least square data fitting[C]//Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering. Wuhan: SPIE, 2023.
- [18] ZHENG S P, FENG R Z, HUANG A T. A modified moving least-squares suitable for scattered data fitting with outliers[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2020, 370: 112655.

(责任编辑 彭海滨 英文审校 郑青榕)