

压电换能器 T 型匹配电路的优化

王磊,王时英

(太原理工大学 机械工程学院,山西 太原 030024)

摘要:超声振动系统中,匹配电路的设计是根据换能器自身参数来确定的,通常并未考虑换能器与振动系统中其他设备连接时所引起的问题。实际上,压电换能器与整个超声振动系统连接后将引起动态电阻 R_1 的变化,最初确定的匹配电路的匹配效果不佳。因此,利用动态电阻 R_1 与 T 型网络电参数间的影响关系及匹配电路的 2 个匹配条件,重新优化调整 T 型匹配电路中的 3 个电参量,并用 Multisim 软件对优化后的电路进行仿真。结果表明,静态匹配条件下,优化后的 T 型匹配电路起到了更好的调谐作用,超声振动系统的输出功率和振动效率较优化前的匹配状态有较大提升,实现了最佳匹配效果。

关键词:压电换能器;匹配电路;调谐;动态电阻;电参数

中图分类号:TB552;TM553

文献标识码:A

Optimization of T-type Matching Circuits in Piezoelectric Transducer

WANG Lei, WANG Shiyang

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In the ultrasonic vibration system, matching circuit is often determined by parameters of the transducer, but it does not take into account the connection problems between the transducer and other equipment in the vibration system. In fact, dynamic resistor R_1 will be changed when piezoelectric transducer is connected with the ultrasonic vibration system, the initial matching circuit can not make a good effect. Therefore, by using the two matching circuit condition and the relationship between R_1 and the parameters, three electrical parameters of T-type matching circuits are re-optimized, and use Multisim software to simulate the optimized T matching circuit. The results indicate that the optimized T matching circuit makes the whole efficiency and active power of ultrasonic vibration system better than initial matching status under the condition of static matching.

Key words: piezoelectric transducer; matching circuit; tuning; dynamic resistance; electrical parameter

0 引言

在大功率超声应用中,匹配电路的好坏对超声换能器的输出功率和超声振动系统的效率都有着重要的作用。匹配电路的形式多样,其中,T型匹配电路因具有调节方便,可调电参数多而得到重视^[1-2]。目前关于 T 型网络的研究仅停留在其结构的调节方式及其作用层面上,并未对各个电参量数值的确选取做过说明。一般 T 型匹配电路中电参数由换能器自身参数确定,然后通过分析发现,换能器与整个超声振动系统连接后,由于传振杆、变幅器、支撑架等器件及其连接问题的存在,换能器的动态电阻 R_1 将有较大幅度的变动,而 R_1 是确定 T 型匹配电路最重要的因素。因此,仅考虑换能器自身而忽视振动系统其他器件所设计的匹配电路不能很好地起到调谐匹配的作用,这将会使振动系统在施加动

态负载前就处于失谐的状态。根据这一特点,重新优化调整 T 型匹配电路,使动态电阻 R_1 在一定范围内变化,调节后的电路都起到了良好的匹配效果。

1 T 型网络匹配原理及匹配条件

1.1 匹配原理

T 型匹配电路与换能器连接后,等效电路如图 1 所示^[3]。图中,A 部分为压电换能器谐振时的等效电路, C_0 为换能器静态电容, L_1 、 C_1 、 R_1 分别为动态电感、动态电容及动态电阻。B 部分为 T 型匹配电路, L_2 、 L_3 为匹配电感, C_3 为匹配电容。在图 1 中, L_2 与换能器等效电路组成第一级匹配网络,当换能器处于谐振状态时,此部分电路等效为一纯阻 R_2 。 L_3 、 C_3 及 R_2 组成第二级匹配电路,在换能器原有谐振频率上,合理选择 L_3 、 C_3 ,使第二级电路继续处于谐振状态,电路最终等效为纯阻 R_3 。

收稿日期:2013-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975191)

作者简介:王磊(1987-),男,山西太原人,硕士生,主要从事超声振动加工的研究。王时英(1964-),男,山西太原人,教授,博士,主要从事功率超声加工技术的研究。

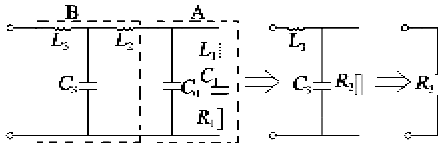


图1 T型匹配电路等效图

第一级匹配电路的阻抗为

$$Z_2 = R_2 + jX_2 = \frac{R_1}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2} + j \left[\omega_0 L_2 - \frac{\omega_0 C_0 R_1^2}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2} \right] \quad (1)$$

当 $L_2 = \frac{C_0 R_1^2}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2}$ 时,第一级匹配电路为纯电阻

电路,此时, $Z_2 = R_2 = \frac{R_1}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2}$ 。

第二级匹配电路的阻抗为

$$Z_3 = R_3 + jX_3 = \frac{R_2}{1 + (\omega_0 C_3 R_2)^2} + j \left[\omega_0 L_3 - \frac{\omega_0 C_3 R_2^2}{1 + (\omega_0 C_3 R_2)^2} \right] \quad (2)$$

代入 $R_2 = \frac{R_1}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2}$ 并化简,可知,当 $L_3 =$

$\frac{C_3 R_1^2}{[1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2]^2 + (\omega_0 C_3 R_1)^2}$ 时,第二级匹配电路为纯电阻电路,此时 $R_3 = \frac{[1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2] R_1}{[1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2]^2 + (\omega_0 C_3 R_1)^2}$ 。

1.2 匹配条件

匹配电路要满足2个匹配条件:

1) 调谐: 调节电路电抗部分使其为0,以减少电路中的无功分量,达到电路电流和电压同相的目的。

2) 变阻: 调整电路输出电阻使其和电源内阻相接近,实现最大功率输出,从而提高整个振动系统的输出效率^[5]。

结合图1,为满足以上2个条件,必须满足:

$$L_2 = \frac{C_0 R_1^2}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2} \quad (3)$$

$$L_3 = \frac{C_3 R_1^2}{[1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2]^2 + (\omega_0 C_3 R_1)^2} \quad (4)$$

$$R_3 = \frac{[1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2] R_1}{[1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2]^2 + (\omega_0 C_3 R_1)^2} = R_s \quad (5)$$

式中 R_s 为超声电源内阻。

由于一般功率超声换能器的串联谐振频率为 10^4 Hz 量级, C_0 一般为 10^{-9} F 量级, R_1 为 $10^2 \Omega$ 量级,故式(4)、(5)中 $(\omega_0 C_0 R_1)^2$ 为 10^{-6} 量级,对计算

结果影响不大^[4],故将式(4)、(5)近似为

$$L_2 \approx \frac{C_0 R_1^2}{1 + (\omega_0 C_0 R_1)^2} \quad (6)$$

$$R_3 \approx \frac{R_1}{1 + (\omega_0 C_3 R_1)^2} \approx R_s \quad (7)$$

整个超声振动系统加工时的动态负载损耗可用一个与 R_1 串联的负载电阻 R_L 表示,由于 R_1 与 R_L 性质相同,故用动态电阻 R_1 代替 $(R_1 + R_L)$ 。

2 R_1 变化对匹配网络参数的影响

满足匹配条件式(3)、(6)、(7),理论上可计算出T型匹配网络在无载荷施加的条件下,3个匹配电参量的数值。但实际上,由于压电换能器需要安装在一定结构的支撑界面上,再加上换能器、传振杆、变幅杆、支撑架间连接问题等原因,连接后的换能器即使在没有施加任何负载的条件下,换能器与振动系统的连接也必然会引起 R_1 的变化。选取一个换能器,在没有与超声振动系统连接前, $R_1 = 200 \Omega$, $C_0 = 8$ nF, 谐振频率 $f_s = 27$ kHz, $R_s = 70 \Omega$ 。由文献[5-6]可知,换能器与振动系统连接前后,其等效动态电阻 R_1 在50%范围内变动。根据式(3)、(6)、(7)可绘制换能器接入匹配电路后,T型匹配电路中相关参数随 R_1 变化的函数图像,如图2所示。

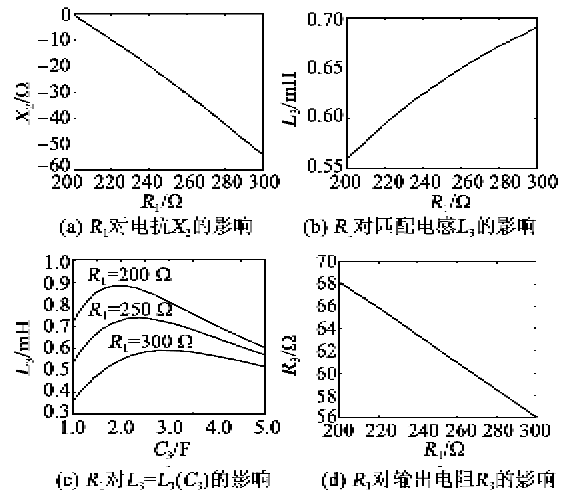


图2 R_1 变化对T型匹配电路各参数的影响

由图2(a)、(b)可知, R_1 增大时,为起到调谐作用, L_2 、 L_3 应随之相应增大,但实际由于匹配电感数值不能及时调节,电抗部分将随 R_1 的变化由电中性变为电容性,且变化幅度较大,不能满足匹配的第一个条件。由图2(c)可知, R_1 的变化使3条曲线在数值上差别很大,严重影响了 L_3 和 C_3 的取值,这是造成T型网络匹配不得当的重要原因。由图

2(d)可知, R_1 与 R_3 呈反比关系, R_1 的增加而 R_3 减少, 不能达到 R_3 与 R_S 相等的目的, 即不满足匹配的第二个条件。

因此, 当 R_1 变化时, T 型网络参数 L_2, L_3, C_3 理论计算匹配值与实际所需匹配数值差别很大。这样, 换能器仅在与支撑架等器件连接而没有施加负载的情况下, 振动系统就已偏离了谐振状态。同时, 电抗成分的存在, 会分走一部分电压, 使有功电阻得到的电压减小, 输出功率减小, 且功率因数的降低, 加重了电源发生器的负担^[7]。因此, 应当对 T 型网络中的 3 个参数重新优化调整。

3 参数的优化

3.1 L_2 的选取

由式(1)可知, 当换能器与振动系统连接后, X_2 随 R_1 的增加显著降低, 电路将不再近似保持纯阻状态。分析函数 $X_2 = X_2(R_1)$, 函数曲线的斜率由 C_0 和固有频率 ω_0 决定, 换能器选定后, C_0 和 ω_0 值不变, 即曲线的斜率不变, 因此, 为了最大限度地降低电抗部分的数值, 只能通过改变 L_2 。根据所选换能器, L_2 的初始计算值为 0.298 mH, 将 L_2 的数值分别提高 50% 和 100%, 并绘制函数 $X_2 = X_2(R_1)$ 的图像, 如图 3 所示。

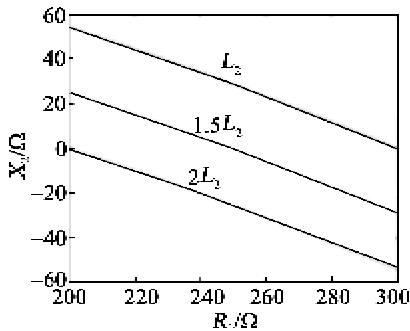


图 3 匹配电感 L_2 的选取

通过分析可知, 当 L_2 提高 50% 时, 无论 R_1 在 R_{1min} 或 R_{1max} 处, X_2 都将控制在 25 Ω 以下, 相比原先电抗部分的最大值减少了近 60%, 且电抗部分仅占总阻抗 Z_2 部分的 10% 左右, 可近似看作为纯电阻电路, 便于第二级电路的匹配。

3.2 L_3 及 C_3 的选取

第二级匹配电路要与输出端直接相连, 因此 L_3 与 C_3 的选取要考虑电路调谐和电路效率这 2 个条件。由式(2)可知, 电抗 X_3 由 3 个变量决定, 绘制函数 $X_3 = X_3(L_3, R_1)$ 的投影图和 $X_3 = X_3(C_3, R_1)$ 的三维图, 如图 4 所示。

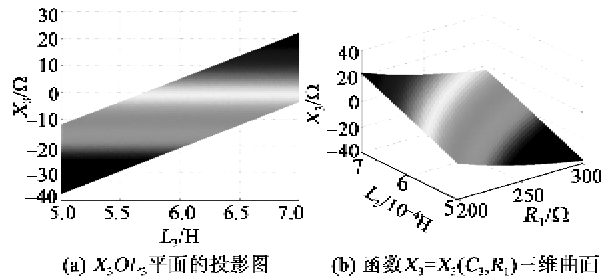


图 4 匹配电感的选取

由图 4(a)可知, 当 R_1 在 50% 范围内变化时, 为使电路呈纯阻状态, 选取 $L_3 = 0.56 \sim 0.70$ mH。当 $L_3 = 0.56$ mH 时, $R_1 = 200 \Omega$ 处的电抗 $X_3 = 0$; 而当 $R_1 = 300 \Omega$ 时, $X_3 = -25 \Omega$, 此时电路已严重失谐。因此, 在静态匹配条件下, 应增大初始计算的匹配电感 L_3 , 重新选取的 L_3 应在 R_1 变化到 2 个极值条件下, 电路 X_3 均能保持在电中性附近。通过分析, 将 L_3 值提高 15%, 取 $L_3 = 0.644$ mH, 此时当 R_1 在 50% 范围变化时, 电抗均小于 10 Ω , 即使 R_1 在两极值处时, 电路仍可近似看成谐振状态。

由图 4(b)可知, C_3 虽对电路总阻抗有一定影响, 但并不是决定电路电性的关键因素, C_3 的确定要考虑 $R_3 = R_S$ 这一条件, 为使 $R_3 = R_S$ 这一条件成立, C_3 应随 R_1 的增加而减少。

为此, 取 4 组 C_3 值, 并绘制式(7)的函数图像, 如图 5 所示。由图可知, R_3 随 C_3 的变化明显, C_3 值稍作调整, R_3 都会有很大变化; 当 R_1 在 50% 范围内变化时, C_3 值取为初始计算值的 95% 时, 此时 R_3 值无论为最大值或最小值, 都可使 R_3 与 R_S 基本相等。

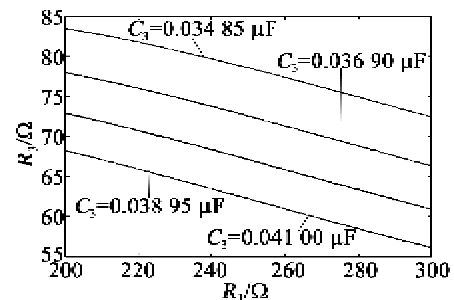


图 5 不同 C_3 值对函数 $R_3 = R_3(R_1)$ 的影响

4 电路仿真

通过上面分析可知, 当 R_1 在 50% 范围内变化时, 将 L_2, L_3 分别提高 50% 和 15%, 此时电路可近似为谐振状态。同时, 为提高振动系统的输出效率, 匹配电容 C_3 则应随 R_1 的增大而减小, 最终 C_3 值

调整为初始计算值的95%为宜。

用 Multisim 软件对优化后的 T 型网络进行仿真。为便于分析,将电路最终等效为串联形式的匹配电路(见图 6)。

其中 $C_1 \approx C_3 \left[1 + \frac{1}{(\omega_0 C_3 R_1)^2} \right]$ 。

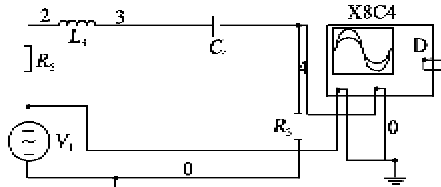


图 6 最终等效串联电路

用示波器测量等效电路波形,测量结果如图 7 所示。图中曲线 1 为初始相位为 0 的电源波形。曲线 2 为匹配电路优化前, $R_1 = 300 \Omega$ 时的电路波形。曲线 3、4 为匹配电路优化后, R_1 在 50% 范围内变化,并分别为 $R_1 = 200 \Omega$ 与 $R_1 = 300 \Omega$ 时的电路波形。通过对比可知,优化前的 T 型匹配电路仅在 R_1 取最小值时匹配效果较好,但当 R_1 变化到最大值时,电路将远偏离谐振状态,电路电流超前电源电压 36.57° 。而对于优化后的电路, R_1 在两极值处波形分别超前和滞后电源波形 5.86° 和 7.97° ,与电源波形基本保持同步。在输出功率方面,波形 3、4 的电压值明显高于波形 2 的电压值,为 R_3 提供更高的输出电压,从而提高电路输出功率。

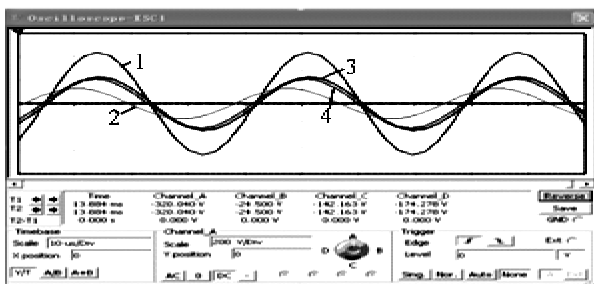


图 7 仿真结果

5 结束语

经计算,与优化前电路相比,优化后的电路输出功率提高了 4%,超声振动系统的效率由 37% 提高到 48%。同时,当动态电阻 R_1 在一定范围内变化时,电路电压与电流的相位能基本保持同步,电路始

终处于谐振状态,且仿真结果与理论计算结果一致。

综上所述,优化后的 T 型匹配电路降低了换能器动态电阻 R_1 变化所引起的失谐现象,提高了电路的输出功率和振动系统的效率,实现了静态匹配条件下的最佳匹配效果,为后续振动系统施加动态负载 R_L 前提供了良好的初始匹配状态。

参考文献:

- [1] 郭林伟,林书玉,许龙. 压电换能器静态匹配电路的研究[J]. 纺织高校基础科学学报, 2008, 21(3): 361-363.
GUO Linwei, LIN Shuyu, XU Long. Study on matching circuit of ultrasonic transducers[J]. Basic Sciences Journal of Textile University, 2008, 21(3): 361-363.
- [2] 鲍善惠. 压电换能器的动态匹配[J]. 应用声学, 1998, 17(2): 16-20.
BAO Shanhui. Dynamic matching for a piezoelectric transducer[J]. Application of Acoustic, 1998, 17(2): 16-20.
- [3] 韩庆帮,林书玉,鲍善惠. 一种简易的 T 型匹配网络的设计[J]. 压电与声光, 1996, 18(5): 319-321.
HAN Qingbang, LIN Shuyu, BAO Shanhui. Design of a simple T-type matching network[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 1996, 18(5): 319-321.
- [4] 郭建中,林书玉,郭勇亮. 压电换能器电端匹配电路的优化[J]. 测控技术, 2004, 23(8): 73-75.
GUO Jianzhong, LIN Shuyu, GUO Yongliang. Optimization of electricity parameters on its matching circuit in piezoelectricity transduce[J]. Measurement and Control Technology, 2004, 23(8): 73-75.
- [5] 王爱玲,祝锡昇,吴秀玲. 功率超声振动[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [6] 程存弟. 超声技术[M]. 西安: 陕西师范大学出版社, 1993.
- [7] 郭伟林,林书玉,许龙. 压电陶瓷换能器电感与电容匹配特性研究[J]. 陕西师范大学学报, 2010, 38(2): 39-42.
GUO Linwei, LIN Shuyu, XU Long. Study on inductance capacitance matching features of piezoelectric ceramic transducer[J]. Journal of Shanxi Normal University, 2010, 38(2): 39-42.