

超声换能器过固有谐振区匹配理论*

姜兴刚 张德远

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

摘要: 超声压电换能器是一个能量转换系统, 在超声波振动加工中将超声波电源输出的电能转换为机械振动, 由于超声压电换能器是一个容性负载, 为保证超声电源输出的电能有效地转换为超声压电换能器的机械振动, 需要在超声电源和超声压电换能器之间加一个适当大小的电感进行匹配, 但超声压电换能器又是一个强非线性时变系统, 在不同的工作频率下其阻抗特性以及机械振动特性差别显著, 因此如何将超声压电换能器匹配在一个恰当的工作频率, 是提高振动加工质量的关键。通过正确选取超声压电换能器的等效电路模型, 并对由此推导出的阻抗圆进行深入分析、研究, 可以得出: 如将换能器工作频率匹配在大于其内部固有谐振频率的某一频段, 可以使换能器振幅最大, 振动波形质量也最好, 是换能器的最佳工作频段, 从而提出超声压电换能器“过固有谐振区”匹配理论。试验结果证明该理论正确。

关键词: 超声换能器 过固有谐振区 匹配

中图分类号: TM332

0 前言

超声换能器在超声焊接、超声清洗、超声振动切削以及超声生化领域有着广泛应用, 其作用是将超声电源输出的电能转换为机械振动。超声换能器是一个强非线性时变系统, 在不同的工作频率下, 其阻抗特性以及机械振动特性差别显著。如何合理地选择换能器的工作频率, 是超声振动加工领域一个重要的研究课题。多数人认为, 当超声换能器的工作频率等于其内部固有谐振频率时, 换能器功耗最小, 振幅最大, 是最佳工作频率。因此, 选择适当的匹配电路参数, 将超声换能器工作频率匹配在其内部固有谐振点工作^[1]。但笔者通过对超声换能器等效电路模型及由此推导出的阻抗圆的深入分析研究, 认为超声换能器的最佳工作频率并不在其内部固有谐振区, 而是在大于固有谐振区的某个频段, 并且这个最佳工作频率并非一个“点”, 而是一个“区”, 从而提出了超声换能器“过固有谐振区”匹配理论。

1 超声换能器的等效电路模型及阻抗圆

1.1 等效电路模型的选择

当压电换能器的工作频率远低于其内部固有谐

振频率时, 压电换能器的电学特性等效于一个电容器, 通常称为静态电容 C_0 , 它是受夹持压电振子两极板之间的电容, 可以通过电容表直接测得, 在换能器工作过程中近似为常数; 但当压电换能器在其内部固有谐振频率附近工作时, 则表现出很强的非线性和时变性, 工作频率的稍许变化将引起换能器电阻抗特性及机械特性的显著变化。可见, 压电换能器在其固有谐振频率附近, 除了静态电容 C_0 外, 还有一个等效的动态支路。这个动态支路并不是真实的电学量, 而是换能器的机械特性在电学上的反映。根据静态电容 C_0 与动态支路的连接关系, 可以将压电换能器等效成两种数学模型: ① 静态电容 C_0 与动态支路并联, 其等效导纳 $G+jB$ 在固有频率附近随频率变化表现为一个圆, 称之为导纳圆, 称此电路为 $G-B$ 等效电路模型^[2]。② 静态电容 C_0 与动态支路串联, 其等效阻抗 $R+jX$ 在固有频率附近随频率变化也表现为一个圆, 称之为阻抗圆, 称此电路为 $R-X$ 等效电路模型^[3]。两种电路模型是同一物理实体的不同表达方式, 因而二者之间可以相互转化。至于采取何种形式来分析问题, 与换能器匹配电路的结构形式有关。超声电源的输出通常为方波信号, 且电压较低, 而换能器又是一个容性负载, 为了能将换能器的等效虚部匹配为零, 并在换能器两端产生所要求的高压正弦波, 通常在换能器回路中串联一个适当大小的电感 L , 使电感 L 与换能器回路中的等效虚部发生串联谐振, 见图 1, 图 1 中变压器的作用是阻抗变换和电气隔离。为了分析问题方便, 换能器对外应表现为 $R+jX$ 的形式, 所以应采用 $R-X$ 等效电路模型, 见图 2。

* “十五”航天支撑技术资助项目。20060406 收到初稿, 20061018 收到修改稿

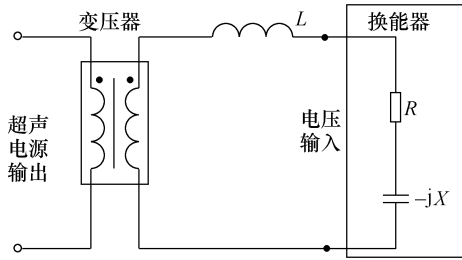


图1 换能器匹配电路

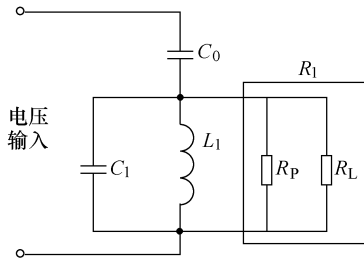


图2 换能器 R-X 等效电路模型

1.2 R-X 等效电路模型及阻抗圆分析

由图2可见， C_0 构成换能器的静态支路； C_1 、 L_1 、 R_1 并联构成换能器的动态支路。 R_1 是换能器的动态电阻，由两部分组成：一部分表示换能器本身的动态电阻 R_p ，它是换能器的机械内耗力阻在电系统的等效电参量，另一部分表示换能器对外做功的动态电阻 R_L ，是一个与负载有关的量； L_1 表示换能器的动态电感，它是换能器压电振子的质量在电系统的等效电参量； C_1 表示换能器的动态电容，它是换能器压电振子的柔量在电系统的等效电参量。

当 $\omega L_1 - 1/(\omega C_1) = 0$ 时，换能器的动态支路发生并联谐振，并联谐振频率

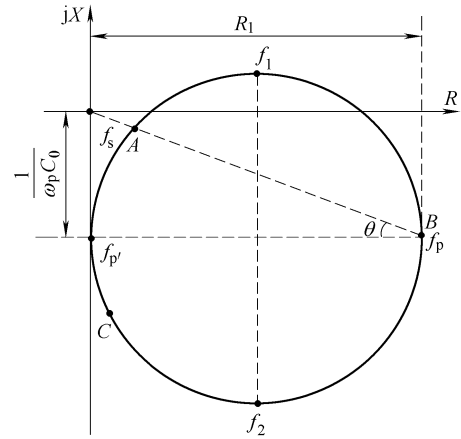
$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

式中 f_p 即为换能器内部的固有谐振频率。在 f_p 附近，换能器的等效电阻 R 和等效电抗 X 随频率变化具有以下的关系^[4]

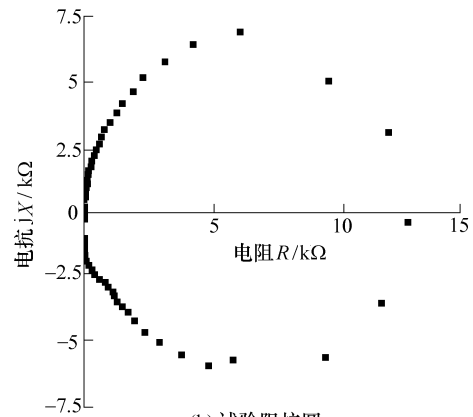
$$\left(R - \frac{R_1}{2}\right)^2 + \left(X + \frac{1}{\omega C_0}\right)^2 = \left(\frac{R_1}{2}\right)^2 \quad (2)$$

可见，在换能器固有谐振频率 f_p 附近，换能器的阻抗随频率变化为一个圆，圆心为 $(R_1/2, -1/(\omega_p C_0))$ ，半径为 $R_1/2$ ，如图3a所示，称此图为阻抗圆。其中， $f_p' > f_2 > f_p > f_1 > f_s$ 。

用阻抗分析仪对某一 20 kHz 换能器在空载条件下进行扫频，起始频率 20.7 kHz，终止频率 21.1 kHz，共测 800 点，将测得的电阻 $R(\omega)$ 和电抗 $X(\omega)$ 绘制于 R - X 复平面上，如图3b所示。可见，它是一个圆，这就从试验上证明了 R - X 等效电路模型及由此推得的阻抗圆的正确性。



(a) 理论阻抗圆



(b) 试验阻抗圆

图3 超声压电换能器阻抗圆图

根据阻抗圆，可以将频率划分为三个频段：串联谐振区、并联谐振区和“过固有谐振区”。其中，频段 $[f_1, f_2]$ 即为换能器的并联谐振区， $[f_2, f_p]$ 即为换能器的“过固有谐振区”。图3a中的 f_p' 称为反并联谐振频率，它只是阻抗圆上的一个假定频率，实际不存在。这是因为 $f_p' \gg f_p$ ，换能器在 f_p' 附近的频率特性已不符合图2的要求，阻抗圆也就不再成立。另外，当 $f = f_s$ 时，可以求得换能器动态支路的电纳 $B_d = 0$ ，此时，换能器的动态支路发生串联谐振，称 f_s 为换能器的串联谐振频率， f_s 也是换能器内部的固有谐振频率，在 f_s 附近的频段即为换能器的串联谐振区^[5]。

2 换能器“过固有谐振区”匹配理论

阻抗圆上的每一点都代表与一定频率相对应的一个阻抗状态。当驱动频率改变时， $R(\omega)$ 和 $X(\omega)$ 将沿着阻抗圆变化。阻抗圆上代表换能器工作时阻抗的那个点就称作压电换能器的工作点。对某一特定换能器的阻抗圆进行分析研究，一方面可以求出该换能器的一些特征参数，如静态电容 C_0 、动态电容 C_1 、动态电感 L_1 、动态电阻 R_1 、并联谐振频率 f_p 、

品质因数 Q 等, 从而对该换能器的性能做出正确评价; 另一方面, 可以找出一个适合于超声振动加工的工作频率区域, 作为换能器匹配研究的根据, 并为匹配电路参数的选择提供了依据。现对阻抗圆不同区段的串联电感匹配特性进行分析。

2.1 “串联谐振区”匹配——在阻抗圆左上方 1/4 区内 ($f < f_1$)

由图 3a 的 A 点可看出, 换能器在串联谐振区工作时, 等效电阻 $R(\omega)$ 很小(通常只有几十欧姆), 则换能器内部消耗功率小, 且换能器振幅大, 机电转换效率高。因而不少专家学者对换能器在串联谐振区的匹配问题进行过研究。

由图 3a 可知, 换能器匹配系统在串联谐振区的电品质因数

$$Q_e = \frac{|X(\omega)|}{R(\omega)} = \tan \theta < 1$$

由于匹配系统在换能器串联谐振区的电品质因数很小, 滤波效果差, 使最终加到换能器上的电压含有大量的高次谐波。

电品质因数小, 也造成换能器两端的谐振电压低。为了提高换能器两端的工作电压, 需在超声电源和换能器之间接升压变压器来升压。升压变压器在提高其副边输出电压的同时, 也增大了其原边的输入电流, 即超声电源的输出电流。由于超声电源属于开关型电源, 输出电压中含有丰富的噪声成份, 且输出电流越大, 噪声成份也越大, 这将最终影响到换能器电压波形质量。

2.2 “并联谐振区”匹配——在阻抗圆右半圆内 ($f_1 < f < f_2$)

由图 3a 的 B 点可看出, 并联谐振区属于高阻区, 换能器等效电阻 $R(\omega)$ 很大, 由试验阻抗圆图 3b 可看出, 空载时 $R(\omega)$ 可达 10 k Ω 以上, 因而换能器在并联谐振区工作时, 换能器振幅很小, 机电转换效率低。

为了驱动大电阻 $R(\omega)$, 需在超声电源和换能器之间接升压变压器来进行阻抗变换。升压变压器在降低超声电源负载阻抗的同时, 也增大了超声电源的输出电流。输出电流越大, 噪声成分也越大。

由图 3a 可看出, 换能器匹配系统在并联谐振区的电品质因数很小 ($Q_e = \tan \theta < 1$), 滤波效果差, 使最终加到换能器上的电压含有较多的高次谐波。

2.3 “过固有谐振区”匹配——在阻抗圆左下方 1/4 区内 ($f_2 < f < f_p$)

换能器在“过固有谐振区”工作时(如图 3a 的 C 点), 电阻 $R(\omega)$ 很小, 同串联谐振区一样, 换能器内部消耗功率小, 且换能器振幅大, 机电转换效率高。

在“过固有谐振区”工作时, 换能器的电压、电流波形质量较好, 原因如下。

(1) 当系统在该区域谐振时, 电品质因数较大 ($Q_e > 1$), 可以有效地滤除开关电源中的高次谐波。

(2) 因 $R(\omega)$ 很小, 电源输出功率较大。由于降压变压器具有增大电源负载电阻的作用, 为了调节超声电源的输出功率, 可在超声电源和换能器之间接一降压变压器来进行功率匹配。降压变压器同时会降低超声电源输出电流, 从而有效抑制了超声电源输出电压中的高频噪声。

因为降压变压器在调节电源输出功率的同时, 也降低了超声电源的输出电压, 与换能器要求的高压信号相背, 但通过高品质因数的匹配谐振, 就能很好地解决这一矛盾。

由试验阻抗圆图 3b 可看出, 该区域的点很密集。这表明换能器在“过固有谐振区”工作时, 其阻抗特性随频率变化较小, 因而超声电源负载特性相对稳定, 这对精密加工很重要。

通过以上分析可知, 换能器在串联谐振区工作时, 虽然其振幅较强, 机电转换效率高, 但换能器两端电压波形较差, 因而不适合精密超声振动加工。换能器在并联谐振区工作时, 不仅机电转换效率低, 而且两端电压的波形质量也较差, 同样不适合精密超声振动加工。换能器在“过固有谐振区”工作时, 不仅振幅强, 机电转换效率高, 而且在换能器两端能够得到比较纯净的正弦波电压, 因而是超声振动加工比较理想的频率区域。

3 换能器各频段工作电压试验效果比较

换能器的参数: 额定功率 200 W, 串联谐振频率 $f_s=20.857$ Hz, 并联谐振频率 $f_p=20.884$ kHz。试验条件: 空载; 传输媒质是空气。试验中, 分别对换能器在串联谐振区、并联谐振区和“过固有谐振区”匹配时的电压波形进行测量。

3.1 串联谐振区工作

利用示波器测得换能器两端电压波形如图 4 a。由于换能器匹配系统的电品质因数很小, 超声电源输出的方波电压几乎全部加到换能器两端, 因而换能器两端电压基本是一个方波。由于换能器在串联谐振区的阻抗很小, 超声电源的输出电流比较大, 电源中含有大量的高频噪声, 造成换能器电压波形的畸变。

3.2 并联谐振区工作

图 4b 是换能器在并联谐振区工作时的电压波

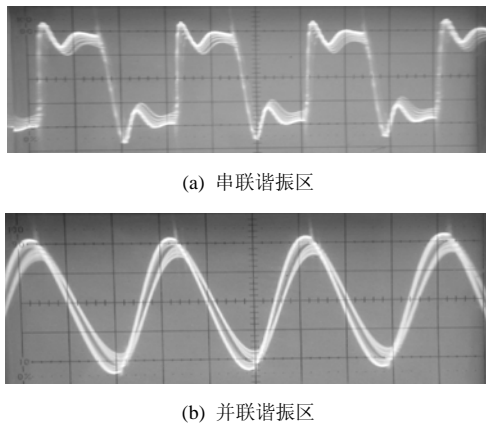


图4 换能器在谐振区内电压波形

形。由于换能器在并联谐振区工作时的品质因数 Q_p 很小，所以换能器两端电压波形不纯，基波中含有较多的高次谐波，造成正弦信号质量下降。试验中还发现，虽然换能器两端电压比较高，但因换能器等效电阻 $R(f_p)$ 很大，所以换能器的振幅很弱。

3.3 “过固有谐振区”工作

图 5a、5b 分别显示了换能器在“过固有谐振区”工作时的电压、电流波形。由于品质因数 Q 很高，电源输出方波中的高次谐波得以有效滤除，所以换能器电压、电流基本上是标准的正弦波，且换能器与匹配电感 L 的谐振电压很高。由于换能器在该区域中采用降压变压器来调节电源的输出功率，因而有效抑制了超声电源输出中的噪声成分，进一步提高了换能器电压、电流的波形质量。由于换能器在该区域的等效电阻 $R(f)$ 很小、特性稳定，所以换能器在“过固有谐振区”工作时的机电转换效率高、振幅也相对稳定。

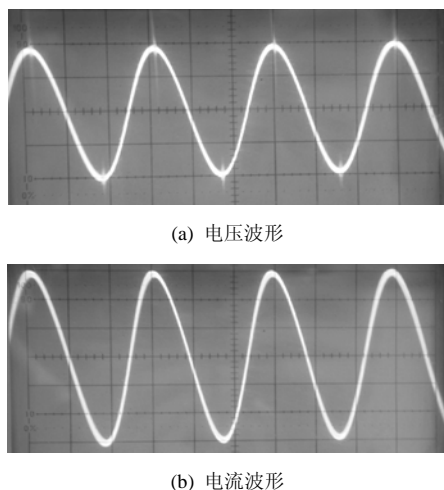


图5 换能器“过固有谐振区”电压、电流波形

4 结论

采用阻抗圆将超声压电换能器的阻抗—频率特

性划分为三个区域：串联谐振区、并联谐振区和“过固有谐振区”。通过对阻抗圆上这三个频率区域的阻抗特性进行比较、分析，得出以下结论：将超声压电换能器匹配在“过固有谐振区”工作时，电压波形几乎是纯净的正弦波，且换能器在该区段工作时机电转换效率高、振幅稳定，比较适用于精密超声振动加工。试验也证明了该理论的正确性。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Deyuan, ZHANG Bo. Study on the resonance control in ultrasonic vibration internal-grooving[C]// 5th International Conference on Progress of Machining Technology(ICPMT 2000). Beijing, Sep. 16-20, 2000: 564-568.
- [2] 上羽贞行, 富川义郎. 超声波马达理论与应用[M]. 杨志刚, 郑学伦, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
- [3] GORDON S K. Acoustic waves—devices, imaging, and analog signal processing[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1987: 37-41.
- [4] 姜兴刚. 超声/低频振动切削电源及振动控制的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
- [5] 孙波. 功率超声换能器导纳特性检测及电端匹配研究[J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22(4): 287-291.

MATCHING THEORY OF ULTRASONIC TRANSDUCER AT IT'S PASSED INHERENT RESONANCE ZONE

JIANG Xinggang ZHANG Deyuan
(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: Ultrasonic transducer is an energy transducing system, which can transduce electricity from ultrasonic power to machine vibration in ultrasonic vibration machining. Because ultrasonic transducer is a capacitive load, in order to transduce the electricity energy from ultrasonic power to ultrasonic transducer's machine vibration, it's necessary to add an appropriate inductor between them. On the other hand, ultrasonic transducer is a powerful nonlinear time-varying system, and it's characteristics of impedance and machine vibration differ distinguishingly at different frequency. So, the key of enhancing vibration machining quality is how to match ultrasonic transducer at an appropriate frequency point. By means of rightly selecting ultrasonic transducer's equivalent circuit model and deeply analyzing and researching on the

impedance circle induced by it's model, it can be concluded that ultrasonic transducer's vibration amplitude is maximal and it's vibration wave quality is the best when it is matched at it's passed inherent resonance zone. So, the passed inherent resonance zone is the optimal working frequency zone. Consequently, the theory on ultrasonic transducer's matching at it's passed inherent resonance zone is provided. The experiment

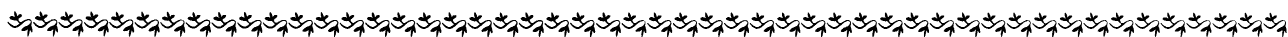
results show that this theory is true.

Key words: Ultrasonic transducer

Passed inherent resonance zone Matching

作者简介: 姜兴刚, 男, 1970 年出生, 博士后, 副教授。主要从事振动切削控制方面的研究。

E-mail: sdjxg@163.com



《机械工程学报》英文版投稿须知

(一) 简介

《机械工程学报》英文版(以下简称《学报》英文版)创刊于1988年,在十几年的办刊实践中,始终坚持严谨、严肃、求真、唯实、理论联系实际的学风与文风,及时报道机械工程领域在基础理论、工程技术应用方面所取得的重大科研成果,着重报道具有综合性、基础性、开发性和边缘性的科技成果和先进经验,紧密地随着中国和世界机械科学技术的发展而发展,赢得了国内外机械行业专家的赞誉,成为中国机械工程领域最具权威性的学术期刊之一。《学报》英文版面向国内外发行,并与20多个国家及我国香港、台湾地区的多家单位建立了交换关系。

《学报》英文版建立了由世界各国机械工程领域知名专家、学者组成的国际编委会,有越来越多的国际机械工程领域专家、学者关注刊物的发展。《学报》英文版得到我国高等院校、国家重点实验室及科研院所的大力资助,获得中国科协择优支持基础性和高科技学术期刊专项资助经费的资助,获得国家自然科学基金委员会的资助。《学报》英文版被EI、CA、SA、CSA及AJ等多家国际检索系统收录,从1998年起至今发表的论文全部被EI收录。《学报》英文版刊登的论文属于国家和省部级基金项目资助的约占80%,不少论文在理论和技术上取得了突破性进展,已转化为先进生产力,产生了较好经济效益和社会效益。《学报》英文版已成为评定博士点、评估国家重点实验室、申请国家自然科学基金、申报科研成果和晋升职称等的重要依据,得到了国内外机械行业专家的好评,在历年各级期刊评比中获得了好名次。

(二) 特别指出

由于《学报》中文版的英文译名正好与《学报》英文版同名,使得一些作者误以为它们是同一种期刊以不同的文种形式出版。因此这里特别指出:《学报》英文版与《学报》中文版是两种不同的期刊,《学报》英文版从2007年第1期起为双月刊,160页/期;《学报》中文版为月刊,240页/期,其内容是完全不重复的。

为进一步发挥《学报》英文版在世界范围内的“高水平学术阵地”和“重要窗口作用”,扩大我国机械工程领域的优秀科研成果在世界范围内的影响,加强科研工作者与国外同行的交流,欢迎广大国内外学者积极踊跃地将优秀科研论文投到《学报》英文版。大家共同努力将《学报》英文版办成具有国际品牌的大刊、名刊,使其成为中国机械工程界走向世界的桥梁!

(三) 投稿要求

1. 投稿应遵循本刊《作者须知》、《投稿式样》和《投稿要求》(可从《机械工程学报》网站<http://www.cjme.com.cn>下载)。
2. 论文字数不受限制,一般为4页以上(正文字号小5号, A4纸),其中摘要300~500字左右。
3. 来稿请用A4纸打印,两份英文稿,两份中文译稿(中文译稿应与英文稿的内容一致),需同时提供论文的电子文档(*.doc文件)。
4. 编辑部对来稿有修改权,重大删改时会与作者协商,排版后的清样将邮给作者进行核对。
5. 稿件文责自负,勿一稿多投。未被采用的稿件,编辑部将给作者发退稿通知,但原稿恕不退还。
6. 作者可随时到编辑部的网站查询稿件的处理情况。

(四) 联系方式

通信地址: 北京市百万庄大街22号《机械工程学报》编辑部, 100037

电话: 010-88379907; 传真: 010-68994557

E-mail: cjme@mail.machineinfo.gov.cn