

功率超声换能器电声效率及辐射声功率的测量

林书玉, 张福成

(陕西师范大学应用声学研究所, 西安 710062)

摘要: 在高频电功率计方法的基础上, 本文提出了一种能够直接测量大功率压电超声换能器在实用状态下的辐射超声功率以及电声效率的新方法。与传统的高频电功率计法相比, 本方法避免了介电以及机械损耗功率的测试, 简化了测试步骤。

关键词: 超声换能器; 电声效率; 测试

中图分类号: T B552, T B52 文献标识码: A

Measurement for ultrasonic power and electro-acoustical efficiency of high power transducers

LIN Shu-yu, ZHANG Fu-cheng

(Applied Acoustics Institute, Shaanxi Teachers University, Xian 710062)

Abstract: Based on the high frequency electrical power meter method, a new method is presented in this paper that can measure the radiated ultrasonic power and the electro-acoustical efficiency of high power transducers under practical conditions. Compared with the traditional method, the dielectric and mechanical loss powers in the transducer are not needed to measure in this method. The new method has the advantages of saving measurement time, high measurement precision, and simple measurement instruments.

Keywords: ultrasonic transducer; electro-acoustical efficiency; measurement

1 引言

功率超声是超声学的一个重要分支。在传统的功率超声应用技术中, 如超声清洗, 超声焊接以及其他技术中, 超声换能器是振动系统中的一个关键部分, 其性能如何直接影响到超声处理的效果。关于超声换能器性能的测试, 目前基本上限于在小信号状态下的测试, 常用的方法包括导纳和阻抗圆法, 传输线法以及功率曲线法等。然而, 功率超声换能器大都工作在比较大的输入信号下, 而且换能器在大信号状态下的性能参数与小信号下的参数是有很大的差别的。因此, 为了客观真实地评价换能器在实用状态下的振动性能, 必

须研究换能器的大功率参数测试。

关于超声换能器的大功率性能测试, IEC 1088 技术报告中全面介绍了功率超声压电能器的特性和测量方法, 其中包括了辐射声功率和电声效率的测量方法。然而, 这种方法测试过程比较复杂, 并且需要一对性能完全一致的压电换能器。另外, 由于换能器的非线性以及振动系统的复杂性, 如波形畸变以及负载变化等, 对于实用状态下大功率压电超声换能器的定量测试及评价仍然是一个比较棘手的问题, 国内外至今也没有一种能够广泛应用的通用测试方法。因此, 对于一些实用超声技术的评价缺乏统一的标准, 也无法衡量大功率超声设备, 如超声清洗机以及

收稿日期: 99-06-04; 修订日期: 99-08-17

第一作者: 林书玉(1963-), 男, 博士生导师, 教授

焊接机等性能。

日本学者 70 年代提出一种测量大功率超声换能器振动性能的高频电功率计法^[1]。该法可测量换能器在大功率状态下的辐射声功率及电声效率。然而这方法存在一些致命的缺点,限制了其在实际中的应用。第一,为了测量换能器的介电损耗功率,需要两个性能完全一致的换能器,这一点在实际中是很难做到的。第二,为了得到换能器的介电及机械损耗功率,事先必须测出换能器的介电及机械损耗功率与换能器端电压和振动速度之间的依赖关系。鉴于上述原因,这方法至今仍未有在实际中得到广泛的应用。

本文在高频电功率计法的基础上,提出了一种能够测量超声换能器在实际状态下振动性能的新方法。由于不需要测量换能器的介电及机械损耗功率,因此,测量过程简单,节约时间。

2 高频电功率计法的基本测试原理

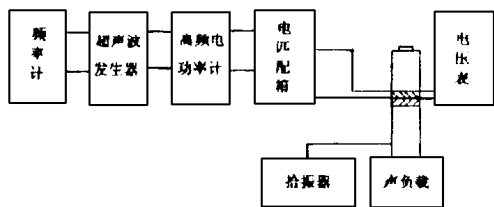


图 1 大功率超声换能器辐射声功率的测试框图

图 1 是利用高频电功率计方法测量换能器辐射声功率及电声效率的实验框图。其中高频电功率计可测量输入换能器的高频电功率,电压表及拾振器用于测量换能器的端电压和振动速度。高频电功率计法是基于换能器的空载及负载两次测试,以及换能器的机械及介电损耗功率分别依赖于换能器的端电压和振动速度。如下所述,此法必须首先得到换能器的介电以及机械损耗功率与换能器的端电压和机械振动速度之间的依赖关系。

当超声换能器空载时,辐射声功率可以声学技术

忽略不计,输入到换能器的电功率 W_{in} 仅由两部分组成,即机械损耗功率 W_{m1} 和介电损耗功率 W_{e1} ,

$$W_{in} = W_{m1} + W_{e1} \quad (1)$$

当超声换能器有负载时,其输入电功率由三部分组成,

$$W_{it} = W_{m1} + W_{e1} + W_a \quad (2)$$

式中 W_a 是换能器的辐射声功率。在实验过程中,调整换能器的输入电功率,使换能器在空载及负载两种情况下的振动速度相同。此时,换能器的机械损耗功率也相同,即 $W_{m1} = W_{m2}$ 。由(1)和(2)两式可得,

$$W_a = (W_{it} - W_{in}) - (W_{e1} - W_{e2}) \quad (3)$$

式中 W_{it} 和 W_{in} 是由电功率计测量的换能器在负载和空载情况下的输入电功率,因此根据事先得到的换能器介电损耗功率与端电压之间的关系,就可以获得换能器的介电损耗功率,这样就可以间接获得换能器的辐射声功率。在此基础上也可以得到其电声效率,

$$\eta_{ea} = W_a / W_{it} \quad (4)$$

总结上述方法,我们可以看出,当利用电功率计法测量换能器的辐射声功率时,必须首先得到换能器的介电及机械损耗功率与其端电压和振动速度间的关系,而这一关系的测量是非常复杂的。同时,对于不同的换能器,其介电损耗功率与端电压之间的关系是不相同的。因此,为了对不同的换能器进行测量,就必须测量许多这种关系曲线,对于实际操作是极为不利的。

3 谐振-失谐法

针对上述问题,本文提出一种测量大功率超声换能器振动性能的新方法,由于该方法需要测量换能器的两种振动状态,即谐振及失谐状态,因此,将这种方法称为谐振-失谐法。本方法基本思想是:第一,在谐振状态下,用高频电功率计分别测量换能器在有载和空载工作条件下的输入电功率。第二,在稍微失谐的情况下,测量待测换能器在负载和

空载情况下的输入电功率。第三,根据传统的结论,即当换能器的端电压相同时,其介电损耗功率相同;而当换能器的振动速度相同时,其机械损耗功率也相同,分别消去换能器在负载和空载时的介电和机械损耗功率,就可以得到换能器的辐射声功率和电声效率。由于不需测量换能器的机械和介电损耗功率,因此克服了高频电功率计法的缺点。其测量原理如下所述,测量电路框图如图1所示。

3.1 谐振状态测试

3.1.1 谐振负载实验

当超声换能器向负载介质(如水等)中辐射超声波时,用高频电功率计测量换能器的输入电功率 W_{il} , 换能器的端电压 V_1 以及振动速度 i , 可得以下公式。

$$W_{il} = W_a + W_{el} + W_{ml} \quad (5)$$

式中 W_{il} , W_a , W_{el} 和 W_{ml} 分别是换能器有载时的输入电功率, 辐射声功率, 介电损耗功率和机械损耗功率。

3.1.2 谐振空载实验

当换能器空载时(换能器向空气中辐射时可近似看成空载情况), 调节换能器的输入电压 V_2 , 使此时换能器的振动速度与负载情况时相同, 此时可得以下功率关系式。

$$W_{in} = W_{en} + W_{mn} \quad (6)$$

式中 W_{in} , W_{en} , W_{mn} 分别是换能器空载时的输入电功率, 介电损耗功率和机械损耗功率。由于负载和空载两种情况下换能器的振动速度相同, 因此换能器的机械损耗功率也相同, 即, $W_{ml} = W_{mn}$ 。利用(5)和(6)式, 可得下式;

$$W_a = (W_{il} - W_{in}) - (W_{el} - W_{en}) \quad (7)$$

3.2 失谐状态测试

3.2.1 失谐负载实验

在这种情况下, 改变超声波发生器的频率, 使换能器的工作频率稍微偏离其共振频率。同时, 用高频电功率计测量换能器的输入电功率 W_{il} , 同时, 调节换能器的输入电压, 使其与负载谐振状态时的值相同, 即等于 V_1 , 此时, 测量换能器的振动速度为 i 。换能

器的功率关系为:

$$W_{il} = W_{el} + W_{ml} + W_a \quad (8)$$

式中 W_{il} , W_{el} , W_{ml} 和 W_a 分别是换能器在负载失谐状态时的输入电功率, 介电损耗功率, 机械损耗功率和辐射声功率。根据测试条件, 即换能器谐振和失谐状态时的端电压相同, 换能器的介电损耗功率应相同, 即 $W_{el} = W_{el}$ 。

3.2.2 失谐空载实验

当换能器处于失谐空载情况时, 调节换能器的输入电压, 使其与换能器谐振空载情况时的值相同, 即也等于 V_2 , 因此换能器在这两种情况下的介电损耗功率相同, 即 $W_{en} = W_{en}$ 。同时调节换能器的工作频率, 使换能器的振动速度与失谐负载情况下的振动速度相同, 即等于 i , 此时换能器的输入功率可表示为:

$$W_{in} = W_{en} + W_{mn} \quad (9)$$

由于换能器在失谐负载和失谐空载情况下的振动速度相同, 因此其机械损耗功率相同, 即 $W_{ml} = W_{mn}$, 由(8)和(9)二式可得:

$$W_a = (W_{il} - W_{in}) - (W_{el} - W_{en}) \quad (10)$$

利用(7)和(10)二式, 可得,

$$W_a - W_a = (W_{il} - W_{in}) - (W_{il} - W_{in}) \quad (11)$$

在(11)式中, 等式右边皆为实验中的测试量, 而等式左边的两个量为待测量。根据换能器的辐射原理, 辐射声功率可由下式表示,

$$W_a = R_a i^2 \quad (12)$$

$$W_a = R_a (i)^2 \quad (13)$$

式中 R_a 和 R_a 是换能器在谐振和失谐时的负载阻抗。把(12)和(13)式代入(11)式可得,

$$W_a = \frac{(W_{il} - W_{in}) - (W_{il} - W_{in})}{1 - R_a(i)^2 / R_a i^2} \quad (14)$$

从(14)式可以看出, 只要测出了换能器在谐振和失谐时的振动速度之比, 通过对换能器辐射阻抗的研究, 就可以得到换能器的辐射声功率。由于式中出现的是振动速度之比, 因此不要求速度的绝对测量, 而振动速度的相对测量是非常简单的。

关于换能器的辐射阻抗, 则是一个非常

复杂的问题。然而,值得庆幸的是,式中出现
的也是两种情况下的辐射阻抗之比,这样,将
给问题的分析和处理带来极大的简化。下面
将对这一问题进行分析。

4 关于换能器辐射阻抗的| 些 考虑

一般情况下,超声应用技术中换能器的
负载介质包括气体、液体、固体及其混和物。
由于处理对象以及负载状态的不同,换能器
的负载是极为复杂的。为简化分析,下面仅对
一些比较简单情况进行分析。

4.1 液体负载

对于超声清洗、超声雾化及其他液体处
理应用,换能器的负载为液体或混和物。对于
液体介质,当超声强度达到一定程度时将出
现空化现象。许多超声应用技术都是利用空
化来达到一定的处理效果的。然而当空化出
现时,液体介质中将出现许多现象及效应。与
此相应的是,换能器的辐射阻抗将发生变化。

4.1.1 空化以前

当液体中未发生空化对,换能器的辐射
阻抗基本上是一个常数。此时,换能器谐振及
失谐状态时的辐射阻抗可以近似看成常数,
即 R_a 和 R_s 基本相同,由(14)式可得,

$$W_a = \frac{(W_{il} - W_{in}) - (W_{il} - W_{in})}{1 - (i)^2 / i^2} \quad (15)$$

很显然,当换能器的辐射阻抗基本保持不
变时,换能器的辐射声功率可由(15)式计算得
到。此时,只要用高频电功率计测出换能器在
谐振和失谐两种状态时的输入电功率,同时
用速度传感器测出换能器的相对振动速度,
就可以简单而快捷地得出换能器的辐射声功
率以及换能器的电声效率。

4.1.2 空化以后

当液体中出现空化时,换能器的辐射阻
抗变得极为复杂。根据液体介质的空化理
论^[2],当换能器的振动速度大于某一临界速
度时,介质中开始出现空化,辐射阻迅速下

降。然而随着振动速度的增大,辐射阻抗的变
化逐渐趋于平缓。也就是说,换能器的辐射阻
抗是振动速度的函数。当换能器的振动速度
不同时,换能器的辐射阻抗也不同。然而,如
果换能器振动速度的变化较小,辐射阻抗的
变化可以忽略不计,因此,在负载失谐实验
时,如果换能器的激发频率改变很小,其振动
速度变化不大,因而辐射阻抗可近似看成常
数。因此,当液体介质中出现空化时,通过测
量换能器的输入电功率和相对振动速度之
比,换能器辐射声功率和电声效率的计算仍
可近似用上述公式。

4.2 气体介质

对于在气体中应用的大功率超声换能
器,如超声除尘及超声干燥等,换能器的负
载就是气体。此时,为了测量换能器的空气
中辐射声功率和电声效率,空载实验必须在
真空中进行。即分别对换能器在真空和空
气中的辐射进行实验。在这种情况下,换能
器的负载介质,即空气,可近似认为不随换
能器的振动状态变化,因此可把换能器的辐
射阻抗看成常数,而换能器的辐射声功率
和电声效率可由(15)式计算得出。

4.3 固体以及混和介质

在这种情况下,由于负载介质的复杂性,
换能器的辐射声功率测试比较复杂。然而,
如果在测试过程中,负载介质的变化不大;
或者,尽管换能器的负载变化很大,如超声
焊接,但如果能基本保证换能器在谐振和
失谐两种状态时的辐射阻抗基本保持不变,
例如失谐换能器的频率偏移较小或者测试
过程很快,在这种情况下,可近似认为换能
器的辐射阻抗基本不变而利用上述公式(15)
来计算换能器的辐射声功率和电声效率,
而不会带来很大的测试误差。

通过上述分析,我们可以看出,与日本学
者提出的高频电功率计法相比,本文提出
的测试方法具有以下优点。第一,不需要测
量换能器的介电和机械损耗功率,因此不
必测量

换能器的介电与机械损耗功率和换能器的端电压与机械振动速度之间的依赖关系,从而也不需要事先加工两个性能完全相同的换能器。第二,计算换能器辐射声功率的公式中仅包含输入电功率的差值,因此可以消除测试电路中其他损耗功率对最终测试结果的影响,如换能器的电匹配电路将消耗一部分电功率;同时,换能器的振动速度是以相当比值的形式的,因此不需要绝对测量,从而提高了测量精度,简化了测量步骤。

5 实验

为了对上述方法进行验证,我们对一个功率超声换能器在不同输入功率的情况下进行了实验测试。测试框图如图 1 所示。结果见表 1 和表 2。其中 $f_{ol}, W_{il}, V_{il}, m_l, f_{ot}, W_{ot}, V_{ot}, m_t, f_{on}, W_{in}, V_{in}, m_n$ 以及 $f_{oa}, W_{ia}, V_{ia}, m_a, f_{oa}, W_{ia}, V_{ia}, m_a$

分别是待测换能器在负载谐振、负载失谐、空载谐振以及空载失谐状态下的测试频率,输入电功率,端电压以及正比于振动速度的拾振器输出电压值的测量结果。 W_a 和 e_a 分别是待测换能器在负载谐振情况下的辐射声功率和电声效率。从表中结果可以看出,换能器在不同的输入电功率情况下,其电声效率有所不同,这是因为当换能器的输入电功率不同时,其机械和介电损耗功率不同,因而造成换能器的电声效率不同。关于测量的误差来源,主要可能有以下三点:第一,由于换能器频率以及振动速度的变化,其辐射阻抗也随着发生变化,而在测试理论中则忽略了这种变化。第二,当换能器的输入电功率较小时,高频电功率计的读数误差增大,从而导致整个测量结果出现误差。第三,当振动速度拾振器的输出较小时,其读数误差将增大。

表 1 大功率超声换能器的负载实验测试结果

f_{ol} (kHz)	W_{il} (W)	V_{il} (V)	m_l (V)	f_{ot} (kHz)	W_{ot} (W)	V_{ot} (V)	m_t (V)	W_a (W)
20.219	100	305	1.82	20.295	89	305	1.71	76.8
20.305	80	275	1.6	20.358	68	275	1.48	62.3
20.347	59	250	1.21	20.268	50	250	1.13	46.9
20.289	78	280	1.53	20.192	67	280	1.41	59.7

表 2 大功率超声换能器的空载实验测试结果

f_{on} (kHz)	W_{in} (W)	V_{in} (V)	m_n (V)	f_{oa} (kHz)	W_{ia} (W)	V_{ia} (V)	m_a (V)	e_a (%)
20.376	10	145	1.82	20.202	8	145	1.71	76.8
20.353	8	137	1.6	20.182	5	137	1.48	77.9
20.403	6	112	1.21	20.315	3	112	1.13	79.5
20.314	10	139	1.53	20.233	8	139	1.41	76.6

6 讨论及结论

在上面的分析中,我们对超声换能器的大功率性能测试进行了研究。由于避免了对介电以及机械损耗功率的测试,因此,与传统的高频电功率计方法相比,本文的方法具有测试方法简单,测量精度提高以及缩短测试时间等优点。然而,由于本方法需要测量换能器在失谐状态下的性能,因此,需要对换能器在不同状态下的辐射阻抗进行研究。同时,由于换能器的频率及振动状态对换能器的辐射

阻抗有影响,因此,为了提高本方法的测试精度,在进行换能器的失谐测量时,应尽量不要偏离换能器的共振频率太远,以便尽量减少辐射阻抗变化造成的误差。

对于传统的商用超声清洗设备,本文进行了一些初步的实验。然而,由于一般的超声清洗槽中有许多超声换能器,因此,振动速度的测量出现了一些问题,即在功率计算式中采用那一个换能器的振动速度。另外,关于大功率状态下谐振频率及输入功率的不稳定问题,实验中发现,这种变化是很小的。若能保

证测试过程很快,这一因素引起的测试误差是可以保证降低到最小程度。关于商用超声清洗设备的实际测量问题以及上面提到的振动速度的测量及选择问题,将在以后的工作中加以更加详细的研究。

总结上述内容,可得出以下结论:

(1) 本方法不需测量换能器的介电和机械损耗功率,因而也不需要两个性能相同的超声换能器,因此,可提高测量精度。

(2) 换能器的振动速度以比值的形式出现,因此,实验中只需测量其相对值,不需要振动速度的绝对测量,因而不需对测振用的拾振器进行校准。

(3) 换能器输入电功率的测试值以差值的形式出现,因此可以消除匹配电路等仪器带来的系统误差。

(4) 本方法可用于大功率超声换能器实用状态下辐射声功率及电声效率的测量。

本文对大功率超声换能器的性能测试进行了一些初步的探讨,可用于一些大功率超声技术中换能器辐射声功率的快速测量,如超声清洗,超声处理以及超声加工等,以便对超声技术的实际效果进行定量的评价。至于该方法的测试精度以及影响声功率测量精度的因素,在以后的工作中将加以详细的探讨。

参考文献:

- [1] Mori, E. and Ito, K, Measurement of the acoustical output power of ultrasonic high power transducer using electrical high frequency wattmeter [C]. Proc. Ultrasonics Intern. 81, Brighton, 1981: 307 ~ 312.
- [2] Kikuchi, Y, Ultrasonic transducers [M]. Corona Publishing Company, Ltd, Tokyo, 1969: 369 ~ 381.

上接 148 页

参考文献:

- [1] A. Selamet and V. Easwaran. Wave propagation and attenuation in Herschel-Venturi tubes [J]. J. A. S. A. 1997; 101(2): 936 ~ 942.
- [2] 戴根华等. 带旁通的管道中的声能流及传声损失(理论分析). 声学学报, 1995; 20(4): 244 ~ 249.
- [3] A. Selamet and V. Easwaran. Modified Herschel-Quincke tube; Attenuation and resonance for n - duct Configuration [J]. J. A. S. A. 1997; 102(1): 164 ~ 169.

- [4] N. B. Miller, Reflections from gradual transition sound absorbers [J]. J. A. S. A. 1958; 30(10).
- [5] E. G. 里查孙. 声学技术概要 [M]. 科学出版社, 1965: 220 ~ 298.
- [6] 尚尔昌. 渐变吸收层反射率的近似式 [J]. 声学学报, 1965: 3(4).
- [7] 赵松龄. 劈形吸声结构的研究 [J]. 同济大学学报, 1979: 1.
- [8] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础(下册) [M]. 上海科学技术出版社, 1982: 24 ~ 30.

简讯 1999 年全国功率超声学术会议在无锡市召开

由中国声学学会功率超声分会主办的(陕西师范大学声学所筹办)全国功率超声学术交流会于 99 年 10 月 19 日至 21 日在无锡市召开,全国近 40 个单位、团体约 60 多名代表出席了会议。代表们来自从事功率超声研究和生产的大专院校、科研院所、生产企业。许多民营企业也派代表参加这次会议。会议开得较活跃。除了论文报告交流外,会议还组织专题讨论会。会议期间还召开了功率超声分会全体委员会会议。中国声学学会名誉理事长,中科院资深院士应崇福先生参加了本次会议。

会议共收到论文 32 篇并出了论文集,内容涉及功率超声的应用研究、作用机理研究和相关设备与元器件研究等方面,会议还报导了国内外功率超声的成就和当前发展的评述;对已经成为国内外研究热点的超声空化研究的评述;对新兴的超声应用——超声治疗肿瘤技术;超声马达技术的评述;对已经产业化的超声清洗等行业的发展,市场分析以及向这些技术的深度和广度开拓,会议报告还介绍许多新技术,例如铝塑复合管的超声焊接技术、超声马达、超声悬浮、超声清洗新技术和新用途等技术;本次会议有许多较为深入的超声作用机理报告,如:超声加工流变性,超声减摩、超声空化、声致发光,声化学等方面。在声场参数测量的新仪器、新器件、换能器、变幅杆、激励电路的设计和研究等方面亦有很好的报告和交流。与会代表进行很好交流和热烈探讨,会议学术气氛浓厚、安排得紧凑使与会者得益匪浅。

沈建中