# 螺栓紧固型纵振换能器设计考虑

王琪山

(杭州瑞利超声器件公司 富阳 311400) 1997 年 3 月 17 日收到

摘要 本文采用网络传输法分析了螺栓紧固型纵振换能器的设计方法,并考虑了换能器结构件的内 部机械损耗和压电元件的电损耗,数值计算了换能器谐振特性及节面位置,结果与实验情况一致. 关键词 超声换能器,等效网络法,优化设计

# Designe analysis of bolt-clamped longitudinal vibration transducer

Wang Qishan

(Hangzhou RuiLi Ultrasonic Device Co., Fuyang 311400)

**Abstract** An analysis of bolt-clamped longitudinal vibration trasducer is presented, including internal mechanical loss of the transducer structure elements and the electrical loss of the piezoelectric elements. Resonant characteristics and node location of such transducer are calculated. The computed performances agree with the experimental results of the transducer assembly.

Key words Ultrasonic transducer, Equivalent network analysis, Optimum design

# 1 引言

应用声学

功率超声中以螺栓紧固型纵振换能器使用 最为广泛,它的最佳设计一直为人们所关心, 但大多数分析都集中在无螺杆简单结构的夹芯 式换能器上<sup>[1,2]</sup>:有人<sup>[3]</sup>将应力螺杆计入等效 材料参数考虑其影响,但是应力螺杆的振速分 布与被其紧固部分的振速分布并不完全相同, 这种分析并不准确;俞宏沛<sup>[4-6]</sup>曾较为详细地 分析了无螺杆复杂形状的纵振换能器特性,并 将螺杆作为一个四端网络、压电元件堆作为弹 性体考虑,分析了应力螺栓对频率的影响,但 由于把压电元件堆作为弹性体来考虑,因此未 能全面分析换能器的特性。

超声换能器使用时一般需要固定,固定的

位置通常选在节面位置上,如果偏离节面位 置,将严重影响换能器的正常工作,因此准确 确定换能器的节面位置相当重要。一般希望在 设计时能够准确计算。

本文根据网络传输模型<sup>[4.5]</sup>,把螺杆等效 为一个四端网络考虑其影响,计入结构件的内 部机械损耗和压电元件的电损耗,将螺栓紧固 夹芯型换能器等效为一端为电学量,一端为力 学量的四端网络,理论计算了这种超声换能器 的输入导纳、谐振频率、电声效率以及振速分 布等,通过改变换能器结构参数,能够分析换 能器特性的变化,对其进行优化设计。根据节 面振速为零,计算了换能器的节面位置,结果 表明换能器螺杆上的节面与被其紧固部分的节 面不重合。

 $\cdot 27 \cdot$ 

2 理论分析

#### 2.1 传输网路分析

图 1 是一种典型的塑料焊接机用紧固超声换能器,整个长度为λ/2,工作频率 20kHz, 按其形状可分为 7 段,第 6 段是螺杆,其每一 段都可以等效为一个 T 型网络,假定螺杆两端 的振速分别等于第 1 段螺帽的后端面、第 5 段 的前端面的振速(同相),而螺杆的螺帽端和螺 帽后端面所受力的总和等于换能器后端面的负 载力,螺杆的另一端和第5段的前端而所受力 的总和等于第7段质端面所受的力。





图 2 换能器 T 型网络级联图





根据力和振速的连续性将每段的 T 型网络 相互级联,如图 2 所示,为螺杆所紧固部分和 螺杆的网络是反接的,他们的公用地线成为一 个网络中有电位的接点。 $Z_{lf},Z_{lb}$ 分别是前后端 面的负载阻抗,它们都可以分离成阻和抗两部 分,对于水声换能器,必须考虑  $Z_{lb}$ 的影响,可 以将  $Z_{lb}$ 抗的部分在其位置处计入传输网络, 而将其阴的部分等效到前端面,作为损耗阻来 处理。本文只考虑一般的超声换能器,后端块 的辐射介质假设是空气,阻抗  $Z_{lb} \approx 0$ ,问题 就简单了。通过简单的分段级联计算,网络可 以简化成图 3 的形式, E 网络出压电元件机电 转换部分和  $Z_{4c}$ 计算所得; A 网络由  $Z_{4b}$ 和第 5 段计算得到: B 网络出  $Z_{4a}$ 、1-3 段和 6 段 ·28· 级联所得; C 网络由第7 段与负载  $Z_{lf}$  抗的部 分计算所得。 $V_{1a}$ ,  $V_{1b}$  分别表示压电元件堆 前后端的振速,  $R_l$  是负载  $Z_{lf}$  阻的部分。通 过计算, 虚框中的网络可以简化成图 3(b), 图 中、

$$S_{1} = \frac{A_{1}B_{1}}{B_{1} - A_{1}};$$

$$S_{2} = \frac{A_{1}B_{2} + A_{2}B_{1}}{B_{1} - A_{1}};$$

$$S_{3} = \frac{A_{1}B_{3} + A_{3}B_{1}}{B_{1} - A_{1}};$$

$$S_{4} = \frac{A_{1}B_{2} + A_{2}B_{1}}{B_{1} - A_{1}} \left(\frac{A_{3}}{A_{1}} + \frac{B_{3}}{B_{1}}\right)$$

$$+ \frac{1}{A_{1}} - \frac{1}{B_{1}}$$
(1)

17 卷 4 期 (1998)

由于 B 网络中包括了螺杆,这样 S 网络也就包 含了螺杆的影响,最后将 E, S, C 网络进一 步级联计算得到图 3(c)的形式,这是一个一端 为电学量一端为声负载的网络,反映了电声转 换的关系,通过这个网络可以计算无损耗换能 器的各种参数。但实际换能器都是有损耗的, 后面将计入机电损耗,然后再给出换能器各种 参数表达式。

#### 2.2 各分段前后端振速

根据图 3(a) 可以求出压电晶体两端的振速分别为:

$$V_{1a} = -\left(\frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1}E_4 + \frac{B_1}{B_1 - A_1}E_3\right)U + \left(\frac{A_3 + b_3}{B_1 - A_1}E_2 + \frac{B_1}{B_1 - A_1}E_1\right)I$$
(2)

$$V_{1b} = \left(\frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1}E_4 + \frac{B_1}{B_1 - A_1}E_3\right)U - \left(\frac{A_3 + b_3}{B_1 - A_1}E_2 + \frac{B_1}{B_1 - A_1}E_1\right)I$$
(3)

$$F_1 = \frac{A_1 V_{1a} + B_1 V_{1b}}{A_3 + B_3} \tag{4}$$

*F*<sub>1</sub> 是作用于图 2 中 *Z*<sub>4c</sub> 和机电转换元件上的 等效力, 由图 3(c) 得到:

$$U = D_1 F_f + D_2 V_f = (D_1 R_l + D_2) V_f$$
  

$$I = D_3 F_f + D_4 V_f = (D_3 R_l + D_4) V_f$$
(5)

式中 *F<sub>f</sub>* 是前盖板所受的力 (实部), *V<sub>f</sub>* 是换 能器前端面振速。将式 (5) 代入式 (2) 和 (3) 分 别得到:

$$V_{1a} = \left[ -\frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1} E_4 D_2 - \frac{B_1}{B_1 - A_1} E_3 D_2 + \frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1} E_2 D_4 + \frac{B_1}{B_1 - A_1} E_1 D_4 - \left( \frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1} E_4 D_1 + \frac{B_1}{B_1 - A_1} E_3 D_1 - \frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1} E_2 D_3 - \frac{B_1}{B_1 - A_1} E_1 D_3 \right) R_l \right] V_f \quad (6)$$

$$V_{1b} = \left[\frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1}E_4D_2 + \frac{A_1}{B_1 - A_1}E_3D_2 - \frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1}E_2D_4 - \frac{A_1}{B_1 - A_1}E_1D_4 + \left(\frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1}E_4D_1 + \frac{A_1}{B_1 - A_1}E_3D_1 - \frac{A_3 + B_3}{B_1 - A_1}E_2D_3 - \frac{A_1}{B_1 - A_1}E_1D_3\right)R_l\right]V_f \quad (7)$$

两式中含 *R<sub>l</sub>* 项是振速的虚部,如果超声换能器设计于谐振匹配工作时,力与振速的相位为零,也即 *V<sub>1a</sub>* 和 *V<sub>1b</sub>* 的虚部为零,则负载阻不影响换能器的振速分布。

求出 V<sub>1a</sub>, V<sub>1b</sub> 及 F<sub>1</sub> 后,根据图 2、3 和 传输网络表示式就可以求出换能器各分段的前 后端振速。

2.3 节面位置

换能器纵向振动速度为零的截面就是节面。复杂形状的换能器端块可以分成多个圆锥体 (圆柱是圆锥的特例)<sup>[5,6]</sup>,因此只要考虑圆锥体即可。已知圆锥体两端半径、振速分别为  $R_1$ 、 $V_1$ 和 $R_2$ 、 $V_2$ ,长度为L(小于 $\lambda/2$ ),则其纵向振速分布为:

$$V = \frac{L}{(R_2/R_1 - 1)x + L} \cdot \frac{1}{\sin kL}$$
$$\cdot \left( V_1 \sin k(L - x) + V_2 \frac{R_2}{R_1} \sin kx \right)$$
(8)

令 V = 0 可得:

$$\frac{\sin k(L-x)}{\sin kx} = -\frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$
(9)

可以看出只有 V<sub>1</sub> 和 V<sub>2</sub> 符号相反,也即方向相 反, x 才有合理解, x 就是其节面位置。因此只 要求出其两端的振速(上节己求出),就可以求 出任何一个圆锥的振速分布(式(8)),根据两 端振速符号是否相反来判断节面是否在其中, 若有节面,可用式(9)求出。

因为螺栓及被其紧固部分的两端振速相

· 29 ·

应用声学

同,所以如果被螺杆紧固的部分有一节面,螺 杆上则必有一个节面,由于两者的结构、材料 参数都不同,因此这两个节面并不一定在同一 位置。

# 2.4 损耗阻的计算

换能器的损耗包括介电损耗和机械损耗两 部分,机械损耗又包括材料的内部机械损耗和 接触机械损耗,接触机械损耗与装配面的状态 及装配工艺密切相关,一般不能计算得到,设计 时都不考虑,通常要求装配面尽量少一些。这 里也只考虑换能器组成分段的内部机械损耗, 它与材料的机械品质因素 *Q<sub>m</sub>*、材料内部的应 力分布及工作频率等有效,每个分段的内部机 械损耗都可以等效力辐射面的一个损耗阻,可 表示为:

$$W_{dm} = R_m V_f^2$$
  
=  $\frac{\omega}{S_{11}^E Q_m} \int_0^l \left| \frac{\partial \xi}{\partial x} \right|^2 \cdot A dx$  (10)

式中,  $R_m$  是等效到辐射端面的损耗阻: A 是 截面积, 变截面段 A 是 x 的函数;  $\xi$  是质点位 移:  $\omega$  是工作角频率,  $S_{11}^E$  是短路弹性柔顺系 数, 对于非压电体  $S_{11}^E = S_{11}$ 

. . . . . . .

换能器的介电损耗也就是组成其的压电

元件堆的介电损耗,可表示为:

$$W_{de} = \omega \epsilon_{33}^T E_3^2 t g \delta_e \cdot L \cdot A_c$$
$$= \omega C U^2 t g \delta_e \qquad (11)$$

式中 C 是压电堆的电容,  $A_c$  是截面积,  $\epsilon_{33}^T$  是介电常数,  $\delta_e$  是损耗角。实际上, 压电 陶瓷的介电常数和损耗都是电场的函数, 但当 换能器的结构和负载一定时工作电场基本上不 变, 因此可以认为介电常数和损耗是个常数, 把介电损耗等效为电端的漏电阻为:

$$R_e = \frac{U^2}{W_{de}} = \frac{1}{\omega C t g \delta_e} \tag{12}$$



图 4 考虑损耗的换能器四端网络

## 2.5 换能器各种参数的获得

计入损耗阻的网络图如图 5 所示, *R<sub>m</sub>* 是 换能器各分段等效机械损耗阻的总和, *R<sub>e</sub>* 是 压电元件解的电损耗阻,换能器各参数表达式 如下:

$$again \Lambda 导 纲: Y_m = G - jB$$
  
电导:  $G = \frac{R_l + R_m}{(R_l + R_m)^2 D_1^2 + D_2^2} + \frac{1}{R_e}$ 
  
电纳:  $B = \frac{D_2 D_4 + (R_l + R_m)^2 D_1 D_3}{(R_l + R_m)^2 D_1^2 + D_2^2}$ 
  
相位 角:  $\phi_m = \operatorname{arctg}(B/G)$ 
  
电压传输系数:  $Z_t^v = \frac{V_f}{V} = \frac{(R_l + R_m) D_1 D_2 j}{(R_l + R_m)^2 D_1^2 + D_2^2}$ 
  
电流传输系数:  $Z_t^i = \frac{V_f}{I} = \frac{(d_4 + D_1 (R_l + R_m)/R_e) + (D_3 (R_l + R_m) - D_2/R_e) j}{(D_4 + D_1 (R_l + R_m)/R_e)^2 + (D_3 (R_l + R_m) - D_2/R_e)^2}$ 
  
电声效率:  $\eta_{ea} = \frac{R_l V_f^2}{UI \cos \phi_m} = \frac{R_l \cdot Z_t^v \cdot Z_t^i}{\cos \phi_m}$ 
(13)

# 3 数值计算结果

· 30 ·

以上分析过程被编成程序,可以自动计算 螺栓紧固型纵振换能器的谐振特性及节面位 置。图 5, 6 是图 1 所示换能器的计算结 果,换能器第 1 和第 6 段是 45<sup>#</sup> 钢 (声速 5100m/s,密度 7910kg/m<sup>3</sup>),第 4 部分是压 电元件 (2990m/s, 7550kg/m<sup>3</sup>),其余部分为

#### 17 卷 4 期 (1998)

硬铝 (5130m/s, 2790kg/m<sup>3</sup>),负载为前端面 水负载。从图中可以发现除了 20kHz 振子的谐 振基频外,在 24.02kHz 处还有一个对应予螺杆 的谐振峰,实际振子在无负载下也可以测出此 峰,只不过相对较小而已,此谐振峰附近电声 效率有一个低谷,因此在设计时应该使螺杆的 谐振峰远离振子的谐振峰,避免它们耦合使换 能器的电声效率下降。从图 7 中还可以发现换 能器的电声效率最大值与谐振点并不重合,而 是略高于谐振频率。

通过变化分段块的材料、形状尺寸计算换 能器的性能变化可以对其进行优化设计。图 7 是一个例子,通过变化螺杆直径可以对其进行 优化设计(水负载),换能器的谐振频率和电声 效率开始都随着螺杆变粗增大,电声效率在直 径为 27mm 处有一场大值,在 30mm 后开始显 著下降,计算发现,由于谐振频率的上升已经 与螺杆峰发生强烈的耦合。



表1是几种不同方法计入螺杆影响的计算 结果,等效参数法和本方法计算的谐振频率接 近于 20kHz,而不考虑螺杆的计算则相差较 远,因此不考虑螺杆的计算是不正确的,等效 参数法计算的谐振频率比较接近,但节面位置 偏离较大,这是因为它把螺杆及其紧固部分的 振速分布作为完全相同来考虑。本方法计算的 谐振频率偏离不大,螺杆的节面位置与其紧固 部分是不一样的,为螺杆所紧固部分的节面接 近于实际测量值(撒粉法)。实践表明换能器在 使用中有时会出现螺杆断裂的现象,但螺杆并 不一定是在换能器的节面位置处断裂,这说明 螺杆的节面位置一与其紧固部分的节面位置是 不同的,因此本方法符合实际情况。



图 0 使能益谐振点附近电声效率  $\eta_{ea}$ 、相位用 $\phi_m$ 与频率 f的关系



与螺杆直径 D 的关系

计算方法	不考虑螺杆	等效参数法 [3]	本文方法		实验结果
	无负载	无负载	无负载	无负载	无负载
谐振频率 (Hz)	18642	20276	20460	20180	19990
节面位置 <sup>1</sup> (mm)	59.3	57.4	$60.0^2$ $50.5^3$	$60.9^2$ $51.2^3$	$60 \ 61^2$
螺杆谐振峰 (Hz)			24020	24020	23870
1 节面位置为其距换	能器后端面的距离	<b>离</b> ; 2 为螺杆所	紧固部分的节面位		的节面位置,

表 1 几种不同方法计入螺杆影响的计算结果

应用声学

 $\cdot$  31  $\cdot$ 

表1中本文方法计算表明,水负载导致换 能器谐振频率下降,节面位置前移(这与一般 规律相符),也发现负载不影响换能器螺杆对 应的谐振峰。

本文提出的方法虽然以 20kHz 的直接型振 子为例,但任何复杂的形状都可以用多个直圆 椎来近似,因此本方法具有一般性。

本文在考虑螺杆段时尚嫌粗糙,如果根据 螺杆受螺纹力的情况分析得更细一些,结果会 更准确。另外,本方法是基于一维理论,如果 横向尺寸较大,在输入材料参数时,必须考虑 横向耦合的影响,对纵问声速进行修正.

# 4 结论

本文考虑了应力螺杆、内部机械损耗及 压电元件电损耗的影响,推导了螺栓紧固型换 能器谐振特性、振速分布及节面位置的计算方 法,变换结构材料和尺寸可以对换能器进行优 化设计,计算表明换能器螺杆不仅影响其谐振 频率,而且影响电声效率,设计时应将螺杆作 为一个组成段并入网络来考虑,同时避免螺杆 的谐振峰与换能器的谐振峰发生耦合。节面位 置计算表明换能器螺杆与其紧固部分的节面不 重合。

本文提出的方法与实验结果接近,适用于 纵振超声换能器(包括复杂结构)的设计。如果 换能器横向尺寸较大,在材料参数输入时,应 适当地考虑横向耦合的影响。

## 参考文献

- 1 周光平,程存弟,鲍善惠.声学学报, 1992, 17(4): 308-312.
- 2 颜忠余,林仲茂. 声学学报, 1995, 20(1): 18-25.
- 3 袁易全.超声换能器.南京:南京大学出版杜,1992.282 293.

- 4 俞宏沛. 水声通讯, 1984, (3),(4).
- 5 俞宏沛. 水声通讯, 1987, (2): 24-26.
- 6 俞宏沛. 应用声学, 1988, 7(4): 30-36.

# 油田测液位难题招标

#### 编者按:

· 32 ·

应热心科技事业的读者要求,本刊自本期起,试增设"技术难题招标"栏目。旨在通过刊物的传媒作用, 在技术难题与技术英才之间架设一座桥梁,以促进科技的更迅速进展。欢迎招标,同时欢迎积极应标。为加快 联系,请应标者直接与招标人联系。本刊将视情况跟踪报道。

现有测石油液面深度是用回声反射法,地面放一枪(或放高压气体)使声波沿环形空间进入井下,遇 到液面反射,有回波,计算这一去一回的时间,以求 出深度 *L*(*L* 正常在 500m 至 2000m). 现在的问题是:

(A) 大于 2000 米时无法测量.

(B) 每次要放枪 (或放高压气体).

可否在地面用锤击,电敲或其它方法(振动法, 压力法等)发一信号,遇到液面,使之反射,达到测出 液面深度的目的.这样可做到自动化,又省人力,物 力和财力.上述项目,我方有兴趣投入科研经费.

> 联系人: 王志明 地址: 福建石狮市仑峰商厦 C 座 505 室 电话: 0595-8786764



单位:石油部江汉油田福建办 邮编: 362700 传真: 0595-8889248

#### 17 卷 4 期 (1998)