

# 基于负载变化的超声振子电学性能试验研究\*

刘礼平<sup>1</sup>, 张朋朋<sup>1</sup>, 朱学明<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;  
2. 天津职业技术师范大学机械学院, 天津 300222)

**[摘要]** 针对超声波加工中振幅衰减和振幅不稳定现象, 通过超声振子的静态加载试验, 分析了轴向与径向加工负载力对超声振子电学特性的影响规律, 以及超声振子电学参数的变化对超声振幅的影响机制。结果表明, 超声振子的电学参数在径向负载力与轴向负载力的影响下有相似的变化趋势, 即超声振子谐振频率与动态电阻随着负载力的增加而单向增大, 动态电感与动态电容有相反的变化趋势, 二者的综合效果使谐振频率随着负载力的增加而增大, 静态电容在一定范围内波动, 当超声振子所受的负载力增大到一定值时, 超声振子的低频谐振点会消失。依据理论分析与试验研究结果, 提出了改善振幅衰减和振幅不稳定现象的措施。

**关键词:** 超声波加工; 振幅衰减; 超声振子; 静态加载试验; 电学参数

## Experimental Study on Electrical Performance of Ultrasound Vibrator Based on Load Change

LIU Liping<sup>1</sup>, ZHANG Pengpeng<sup>1</sup>, ZHU Xueming<sup>2</sup>

(1. Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
2. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the phenomenon of amplitude attenuation and amplitude instability in ultrasonic machining, studying the influence rule of the axial and radial processing load force on the electrical characteristics of the ultrasonic vibrator was analyzed, and studying the mechanism of the influence of the change of the electrical parameters of the ultrasonic vibrator on the ultrasonic amplitude, through the static loading experiment of the ultrasonic vibrator. The results showed that, the electric parameters of the ultrasonic vibrator have similar changing trend under the radial load force and the axial load force. The dynamic resistance increases unidirectionally with the increase of load force. Dynamic inductance and dynamic capacitance have opposite changing trend, and they cause the resonant frequency increases with the increase of load force together. The static capacitance fluctuates within a certain range. The low-frequency resonance point of the ultrasonic vibrator will disappear, when the cutting force of the ultrasonic vibrator increases to a certain value. According to the theoretical analysis and experimental results, the measures to improve amplitude attenuation and amplitude instability are proposed.

**Keywords:** Ultrasonic machining; Amplitude attenuation; Ultrasonic vibrator; Static loading experiment; Electrical Parameter

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.01/02.073

因其独特的材料性能, 陶瓷材料被广泛应用于航空航天领域, 但脆性大、硬度高的材料特点使传统的加工方法不再适用。旋转超声加工是加工陶瓷等脆硬材料的有效方法, 拥有更高的加工精度与加工效率<sup>[1]</sup>。超声振子是超声波加工中把电能转换为机械能的器件, 由超声波换能器、超声波变幅杆、加工工具头 3 个部分组成<sup>[2]</sup>。其中, 夹心式压电超声换能器因结构简单、效率高等优点,

在超声波加工中被广泛应用<sup>[3]</sup>。因此, 本文试验中超声振子采用的是夹心式压电换能器, 但其在超声加工中存在的振幅衰减和振幅不稳定现象严重影响了超声波加工的效果<sup>[4]</sup>。

超声振子电学特性的改变, 尤其是谐振频率的变化, 是导致超声加工中出现振幅衰减与振幅不稳定的重要原因。很多学者通过建立等效电路来研究负载对超声换能器的影响。林仲茂<sup>[5]</sup>探讨了在有力、电负载和损耗时, 换能器的谐振频率及效率; 林书玉<sup>[6]</sup>基于等效电路理论研

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51605331, 51405491)。

究了液体负载与固体负载对换能器谐振频率的影响,得出了换能器谐振频率在不同负载液面高度及不同超声加工工具长度下的变化规律;杨日福等<sup>[7]</sup>研究了不同液体负载、液体负载温度和液体负载体积等因素对超声换能器谐振频率的影响以及在不同因素下如何匹配。他们都通过建立等效电路来研究负载对超声换能器谐振频率的影响,但并没有涉及等效电路中的其他电学参数的变化规律,即使在频率跟踪良好的状态下,仍然会出现振幅衰减和振幅不稳定现象。现在普遍认为,振幅衰减的主要原因是能量的重新分配<sup>[8]</sup>,即空载时能量全部用来产生振动,带载时一些能量会用于克服负载做功,用于产生振动的能量减少,导致出现振幅衰减现象<sup>[9]</sup>。超声加工过程中切削力的变化是导致振幅变化的主要原因,因此,研究超声波加工中负载力如何影响超声振子电学参数的变化并引起振幅衰减,具有非常重要的意义。

本文通过建立超声振子在负载力作用下的等效电路模型,理论分析加工负载力对超声振子电学特性的影响。超声加工过程中,超声振子所受的切削力主要为轴向与径向,且切削力会因材料的各向异性发生变化<sup>[10]</sup>,可通过对超声振子工具前端施加静态的轴向和径向负载力,来代替加工过程中所受的切削力,并根据实际加工试验中测量到的负载力值,来设置静态加载试验的力值范围。通过静态加载试验,研究负载力对超声振子电学参数的影响规律,分析超声振子电学参数的变化如何影响超声振幅,探讨消减振幅不稳定现象的方法。

### 1 负载力作用下的超声振子等效电路模型

超声振子的 Mason 等效电路如图 1 所示。 $C_0$  为静态电容,是一个值与频率无关的真实电学量; $R_0$  为压电陶瓷振子的介电损耗阻抗,通常不予考虑。机械振动系统由表示惯性质量、刚度和机械阻的  $L_M-C_M-R_M$  串联谐振电路构成;机械负荷,即超声加工过程中的机械负载力,对超声振子等效电路的影响,可近似由等效机械电感  $L_L$ 、电容  $C_L$  和电阻  $R_L$  组成的串联模型来代表<sup>[11]</sup>。

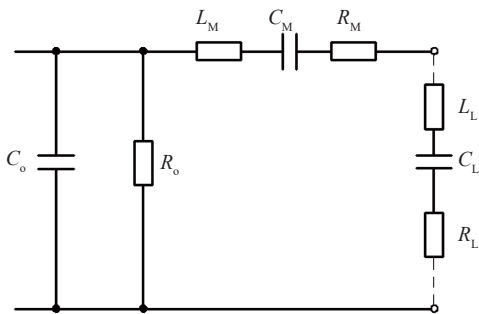


图1 负载力作用下的超声振子等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of ultrasonic vibrator under loading

用参数  $L_m$ 、 $C_m$  和  $R_m$  表示负载力作用下超声振子的动态电感、动态电容和动态电阻。

$$\begin{aligned} L_m &= L_M + L_L \\ R_m &= R_M + R_L \\ C_m &= \frac{C_L C_M}{C_L + C_M} \end{aligned} \quad (1)$$

当超声振子串联等效电路的机械谐振电路(动态电路)处于串联谐振时,信号的频率  $\omega_s$  为串联谐振。

$$\omega_s = 1/\sqrt{L_m C_m} \quad (2)$$

当超声振子在谐振频率  $\omega_s$  下工作时,超声振子的等效电阻  $R_s$  与等效电抗  $X_s$  的关系如式(3)、(4)所示:

$$R_s = \frac{R_m}{\omega_s^2 C_0^2 R_m^2 + 1} \quad (3)$$

$$X_s = \frac{\omega_s C_0 R_m^2}{\omega_s^2 C_0^2 R_m^2 + 1} \quad (4)$$

超声振子工作在谐振状态时,因静态电容的存在,超声振子呈现出容性状态。超声振子在工作时,要根据谐振频率与静态电容进行匹配,如不匹配,则超声振子的容性状态使无功功率增大,超声振子就很难振起来<sup>[12]</sup>。通过图 1 可以看出,加工负载力的变化会导致电感  $L_L$ 、电容  $C_L$  和电阻  $R_L$  的变化,由式(1)可知,这会导致超声振子动态支路整体  $L_m$ 、 $C_m$  和  $R_m$  改变<sup>[13]</sup>。从式(2)~(4)可以看出,超声振子的电学参数变化会导致其谐振频率、等效电阻  $R_s$  与等效电抗  $X_s$  发生改变,从而使超声振子工作在失谐状态下。

### 2 超声振子的静态加载试验

用超声振子静态加载试验来探究超声振子电学参数随机械负载变化的规律。用阻抗分析仪 PV70A 来测量超声振子的谐振频率  $F_s$ 、反谐振频率  $F_p$  等电学参数,试验中阻抗分析仪与电脑的连接如图 2 所示。

#### 2.1 轴向负载力试验

如图 3 所示,超声振子固定连接在机床主轴上,二

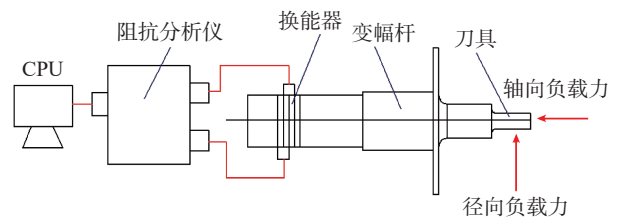


图2 阻抗分析仪连接图

Fig.2 Connection diagram for impedance analyser

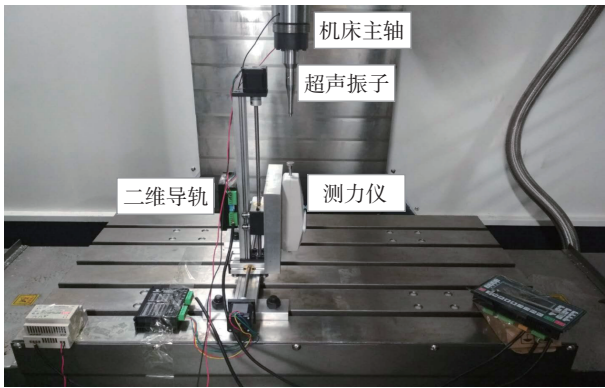


图3 轴向负载力试验  
Fig.3 Axial loading experiment

维导轨固定在机床的工作台上,而测力仪垂直固定在二维导轨上。移动主轴让测力仪与超声振子的轴线在一条线上,通过导轨带动测力仪上下移动来给超声振子施加轴向负载力。负载力从0逐渐加载到120N,再逐渐卸载到0,每次加载与卸载的步长均为5N。每次负载改变,测出超声振子各个电学参数的数值。经过3次加载、卸载试验共得到6组试验数据,对试验数据取平均值得到表1轴向负载力下的电学参数,通过表1得到的超声振子电学参数随轴向负载力变化曲线如图4所示。

阻抗分析仪通过向超声振子发出一个微小的电信号来进行测量,试验中加载装置的稳定性、静电、温度等因素都会使试验结果产生偏差,甚至严重影响试验结果。试验中用二维导轨来给超声振子加载,避免了因开

表1 轴向负载力下的电学参数

Table 1 Electrical parameters under axial loads

负载力 /N	谐振频率 $F_r$ /Hz	反向谐振频率 $F_p$ /Hz	静态电容 $C_0$ /nF	动态电容 $C_m$ /nF	动态电阻 $R_m$ /Ω	动态电感 $L_m$ /mH
0	29107.30	29593.25	10.3913	0.26455	22.14	113.47
5	29215.20	29735.78	12.0981	0.28706	19.00	103.89
10	29238.73	29754.57	11.4913	0.27656	21.79	107.28
15	29313.00	29850.38	11.9867	0.27829	24.70	106.48
20	29347.17	29884.67	11.5935	0.27653	26.17	109.02
25	29353.82	29886.83	12.0420	0.27729	31.63	106.76
30	29435.20	30042.98	11.8715	0.26727	42.81	106.05
35	29495.07	30094.97	11.6388	0.26165	57.37	114.17
40	29486.02	30247.20	12.1955	0.27812	62.11	105.43
45	29518.57	30015.82	11.6178	0.24486	69.17	115.09
50	29537.75	30385.88	11.9969	0.28115	69.58	103.70
55	29543.53	30032.23	11.3965	0.25089	68.47	112.95
60	29609.78	30178.08	11.1968	0.26863	73.51	108.28
65	29626.27	30451.45	12.2713	0.27394	69.52	112.28
70	29632.78	30391.85	11.9734	0.30075	76.02	106.50
75	29642.68	30247.13	11.5093	0.22975	73.52	128.86
80	29754.52	30332.45	11.1723	0.23652	80.38	128.36
85	29751.25	30371.10	11.1461	0.22772	103.18	121.47
90	29836.65	30757.80	12.0640	0.28086	109.04	103.71
95	29860.85	30827.90	11.4443	0.24324	115.12	111.25
100	29873.47	31278.88	12.3320	0.25675	111.45	115.66
105	29861.42	31091.12	12.3017	0.22466	112.53	130.96
110	29895.32	30913.33	12.0688	0.29302	119.31	109.50
115	29894.83	31057.78	12.3374	0.24640	116.64	116.58
120	29912.93	31013.33	12.2523	0.26208	126.09	107.87

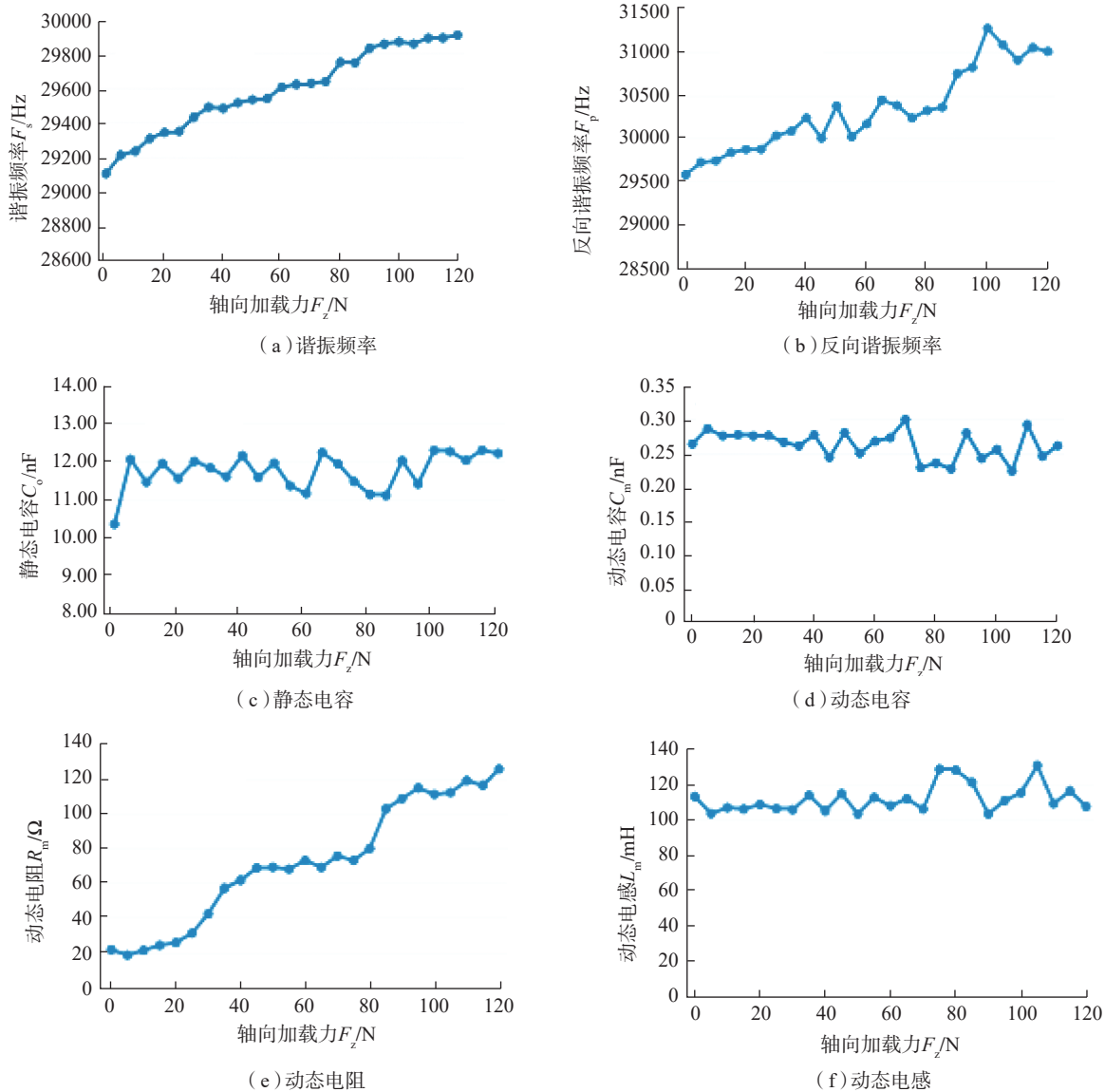


图4 超声振子电学参数在不同轴向负载力下的变化曲线

Fig.4 Variation curves of electrical parameters of ultrasonic vibrator under different axial loads

机床使超声振子带有大量静电,同时通过用多个螺钉连接二维导轨与机床来增大试验装置的稳定性,排除了因试验装置不稳定而产生较大的偏差。试验都是在室温 25℃ 进行,可避免因温度不同而产生偏差。

从图 4 (a)、(b) 可看出,谐振频率随着轴向负载力的增加而增大。从图 4 (d) (f) 中可得出,动态电容  $C_m$  与动态电感  $L_m$  在轴向力 60N 以下的时候波动较小,在 60N 以上的时候波动较大,它们两个变化的方向相反。图 4 (c) 中,静态电容  $C_0$  在 11.5nF 附近波动时,轴向负载力对它的影响不明显,与图 1 的等效电路相一致。动态电阻  $R_m$  随着负载力的增大而增大,如图 4 (e) 所示。

轴向负载力的改变导致等效机械电感  $L_L$ 、等效机械电容  $C_L$  与等效机械电阻  $R_L$  改变。由式(1)可知,动态

电容  $C_m$ 、动态电感  $L_m$  与动态电阻  $R_m$  也会跟着负载力改变。依据公式  $\omega_s=1/\sqrt{L_m C_m}$ ,动态电容与动态电感改变使谐振频率增大,与图 4 (a) 结果相符。为避免因失谐而造成振幅衰减,超声电源要在负载改变时能够自动调节电压频率。负载力增大导致动态电阻增大会使更多的电源能量用于克服加工负载力做功,使用于克服材料摩擦力产生振动的能量减少,造成振幅衰减。要解决振幅衰减现象,就要超声电源的功率能够随着负载阻抗的变化而变化,电源功率大小始终要为振幅恒定保持所需的功率值。

## 2.2 径向负载力试验

如图 5 所示,超声振子固定连接在机床主轴上,二

维导轨固定在机床的工作台上,测力仪水平固定在二维导轨上。测力仪轴线与超声振子轴线垂直,通过导轨带动测力仪前后运动,给超声振子的工具头前端施加径向负载力。负载力从 0 逐渐加载到 60N,再逐渐卸载到 0,步长为 2.5N。经过 3 次加载、卸载试验得到 6 组试验数据,取平均值得到表 2 径向负载力下的电学参数。由表 2 可得电学参数随径向负载力变化的曲线如图 6 所示。径向加载试验也考虑并采取相同措施避免装置不稳定性、静电与温度的影响。

同轴向负载力结果相似如图 6 所示,动态电容与动态电感随着径向负载力的增大呈现相反的变化趋势,当径向负载力小于 40N 时,二者的浮动量较小,大于 40N 时出现较大波动。它们两个共同作用使谐振频率随径

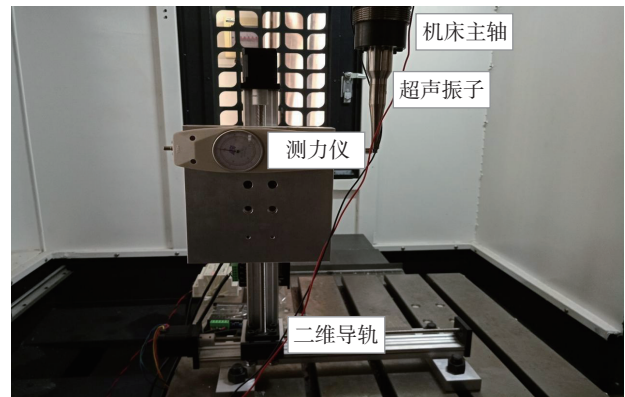


图5 径向力加载试验

Fig.5 Radial force loading experiment

表2 径向负载力下的电学参数

Table 2 Electrical parameters under radial loads

负载力 /N	谐振频率 $F_s$ /Hz	反向谐振频率 $F_p$ /Hz	静态电容 $C_0$ /nF	动态电容 $C_m$ /nF	动态电阻 $R_m$ / $\Omega$	动态电感 $L_m$ /mH
0	29112.90	29608.70	8.5704	0.24829	24.16	120.38
2.5	29139.30	29644.87	10.4025	0.27836	17.87	107.26
5	29157.33	29691.33	10.1384	0.27776	20.30	107.47
7.5	29155.37	29658.70	10.3041	0.27743	19.54	107.52
10	29155.83	29665.37	10.1071	0.26597	17.02	112.29
12.5	29187.93	29761.97	11.6016	0.28370	25.56	106.05
15	29205.07	29757.53	9.0064	0.26132	24.87	113.67
17.5	29213.60	29814.00	9.3064	0.27364	29.61	108.73
20	29248.77	29833.90	10.1799	0.28142	34.03	105.28
22.5	29259.83	29858.60	9.7612	0.29057	39.60	102.04
25	29267.50	29848.00	9.9006	0.27748	38.57	106.60
27.5	29276.73	30062.40	11.9536	0.28436	41.51	106.68
30	29303.37	30030.13	11.8592	0.26446	40.03	111.59
32.5	29322.93	29897.07	10.0010	0.24926	37.07	119.09
35	29322.97	30128.67	10.0178	0.26037	46.32	113.28
37.5	29327.97	30091.10	11.5151	0.27798	45.96	105.95
40	29365.40	29948.50	9.9783	0.24779	55.29	118.90
42.5	29366.83	31041.10	12.1997	0.29560	54.00	99.59
45	29363.33	30388.90	10.2744	0.22328	62.07	118.47
47.5	29387.67	30912.33	11.8083	0.28249	62.45	104.26
50	29402.37	31123.33	11.7497	0.30378	71.34	96.77
52.5	29410.90	30565.00	10.0607	0.24255	90.35	132.74
55	29411.00	30675.00	10.0209	0.26831	101.79	132.13
57.5	29439.00	31050.00	12.2441	0.37100	105.43	78.84
60	29415.00	30775.00	11.4605	0.25524	108.88	136.27

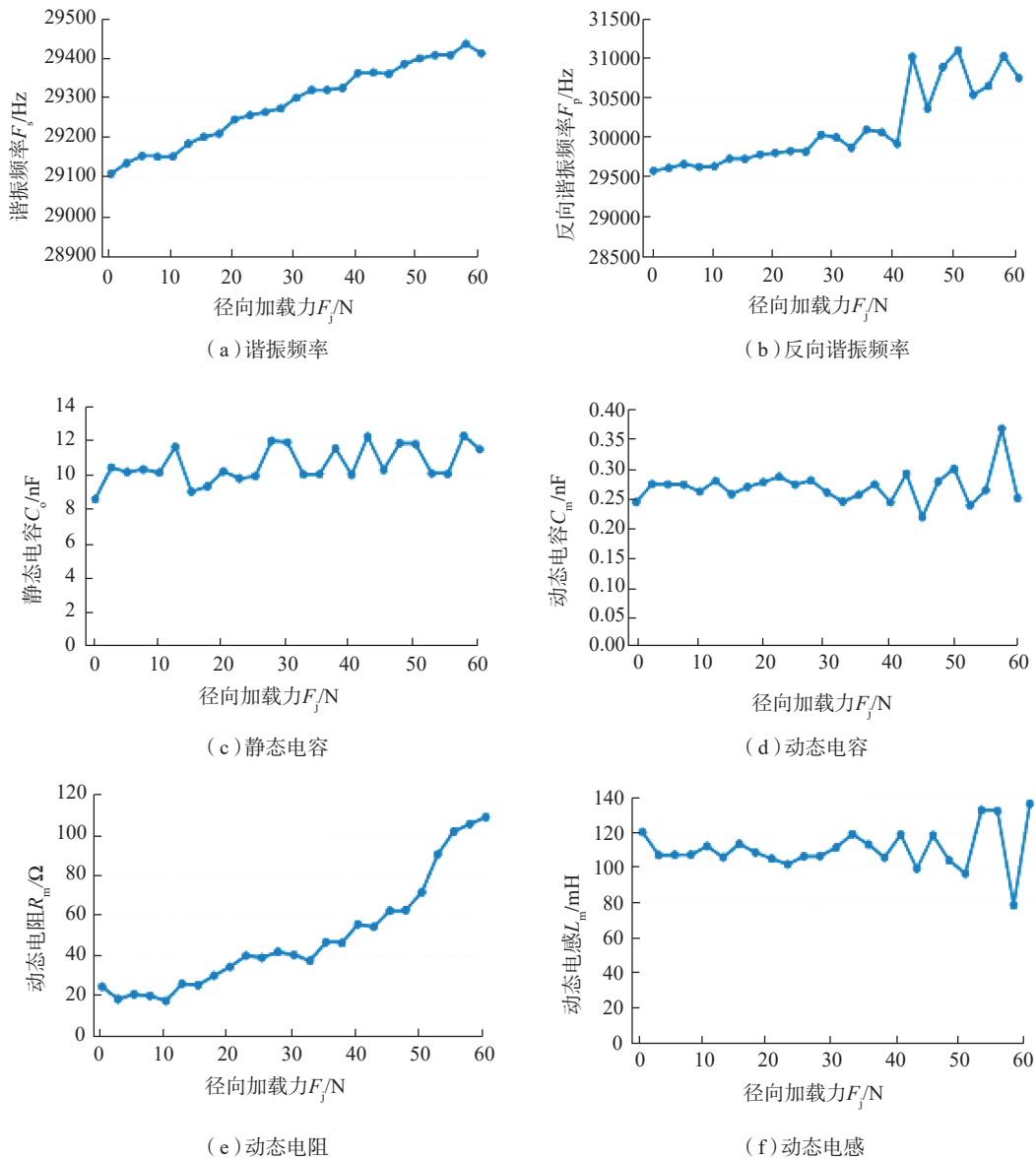


图6 超声振子电学参数在不同径向负载力下的变化曲线  
Fig.6 Variation curves of electrical parameters of ultrasonic vibrator under different radial loads

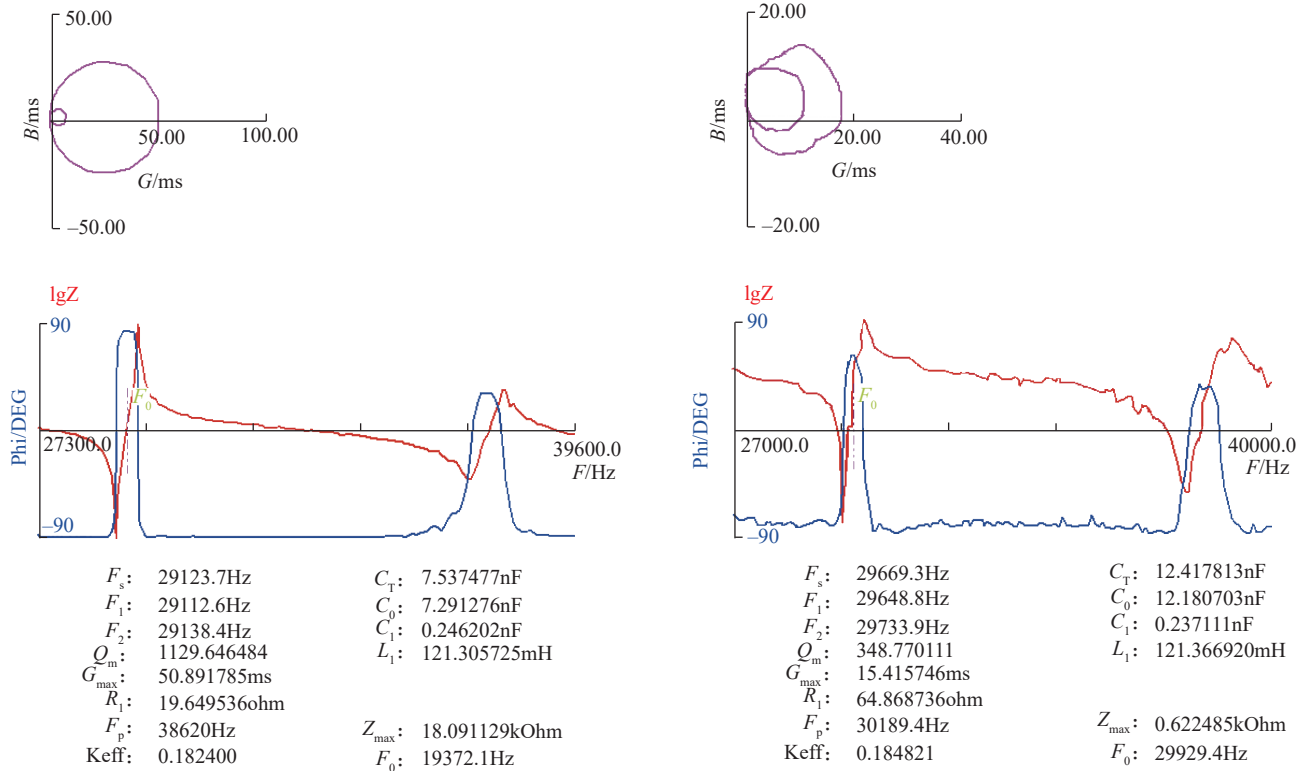
向负载力的变化近似呈现线性增大现象,与图6(a)曲线相符。超声电源的工作频率需要随着超声振子谐振频率的改变而改变,避免出现因超声振子失谐而造成的振幅衰减现象。静态电容在径向负载力的作用下一直在11nF附近上下浮动,径向负载力的增加对静态电容影响不明显,与图1的等效电路相符。动态电阻随径向负载力增加时而单向增大,因为增大负载力导致等效机械电阻  $R_L$  增大,依据式(1),动态电阻  $R_m$  也会随之增大。动态电阻中负载等效电阻的增大会使超声电源的能量重新分配,进而导致超声振子的振幅衰减。超声电源应能随着负载等效电阻的增大而增大输出功率,使产生振动所需的能量保持不变,从而避免因能量重新分配

而导致的振幅衰减。

### 2.3 负载力作用下的超声振子阻抗特性曲线图分析

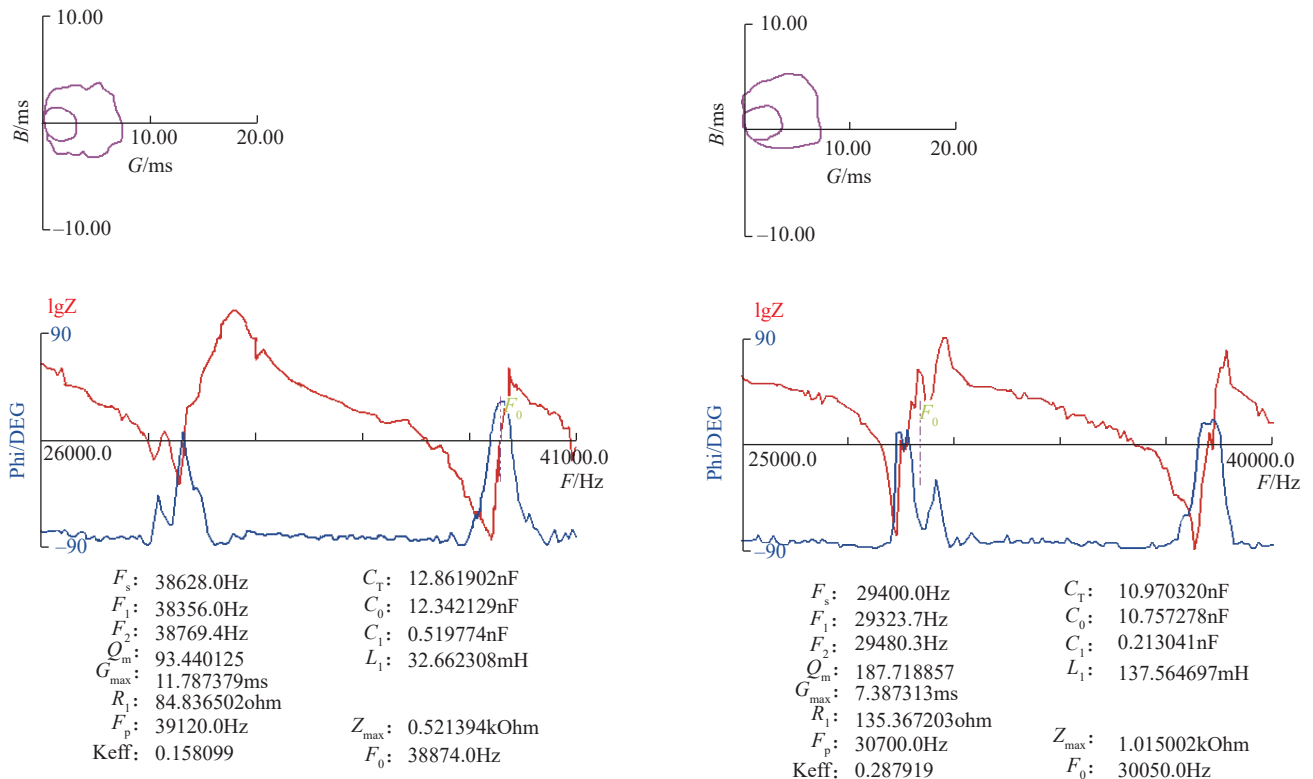
图7(a)~(d)分别是超声振子在空载、60N、120N轴向负载力和60N径向负载下的超声振子阻抗特性曲线图。安装在机床上的空载状态下,超声振子的导纳圆光滑平整,内部有一个寄生小圆,阻抗图上显示有两个谐振频率点分别是低频谐振频率点29123Hz与高频谐振频率点38620Hz。加在超声振子上的轴向力从空载到120N过程中,阻抗图上的低频谐振频率点导纳圆半径一直在减小,说明动态电阻一直在增大。

如图7阻抗特性曲线图所示,相对于空载,超声振子在60N与120N轴向力下,阻抗角频率曲线的低频谐



(a) 空载

(b) 轴向负载力 60N



(c) 轴向负载力 120N

(d) 径向负载力 60N

图7 超声振子等效特性曲线

Fig.7 Equivalent characteristic curve of ultrasonic vibrator

振波峰出现分叉,并呈现减弱消失的趋势。超声振子性能开始变得不稳定,与上文中得出的动态电容与动态电感在轴向力下达到 60N 时波动开始增大相对应。如果负载力持续增大,低频谐振点终会消失<sup>[14]</sup>。图 7(d)中显示超声振子在径向负载力下的阻抗特性曲线也有相似的变化趋势,超声振子在所受径向力超过 40N 时,性能开始变得不稳定。当阻抗角在低频谐振频率与低频反谐振频率之间不能从负值到达正值,且超声振子的对外表现特性不能从容性变为感性时,根据低频谐振频率点设计的匹配电路将会失效<sup>[15]</sup>。在超声波加工中,随着切削力的增大,超声振子的低频谐振点匹配性能将大大减弱甚至消失。为避免加工中出现低频谐振点消失的情况,超声振子轴向与径向所受的切削力各自都应该有一个极限值。在超声波加工过程中,超声振子所受的切削力不得大于各自方向的极限值。

### 3 结论

建立超声振子在负载力作用下的等效电路模型,将力负载转化为电负载参数,理论分析电负载参数对超声振子电学特性和振动特性的影响,即在轴向负载力下,随着负载力的增大,超声振子的谐振频率与动态电阻单调增大;静态电容会在一个小范围内无规则上下浮动,与轴向负载力关系并不明显;动态电容与动态电感变化方向相反并在 60N 之前波动较小,在 60N 之后波动变大。

在径向负载力作用下,与轴向力相似,随着负载力的增大,超声振子的谐振频率及动态电阻单调增加。静态电容也是在一个数值附近上下波动,动态电容与动态电阻变化方向相反并在 40N 之前变化较小,在 40N 之后波动变化较大。而且径向负载力对超声振子的影响比轴向负载力对其的影响更为显著。

超声振子的阻抗特性曲线图表明,超声振子所受的轴向负载力或者径向负载力增大到一定数值时,超声振子的低频谐振频率点会消失。

### 参考文献

[1] THOE T B, ASPINWALL D K, WISE M L H. Review on ultrasonic machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(4): 239-255.

[2] 李旭. 超声加工中振幅衰减的控制[J]. 电加工与模具, 2004(6): 21-26.

LI Xu. Control of amplitude attenuation in ultrasound machining[J]. Electromachining & Mould, 2004(6): 21-26.

[3] 程学艳, 郭文娟, 林彬, 等. 超声波加工机床及其发展[J]. 新技术新工艺, 2004(10): 40-42.

CHENG Xueyan, GUO Wenjuan, LIN Bin, et al. Ultrasonic

machining tool and its development[J]. New Technology & New Process, 2004(10): 40-42.

[4] 王天圣, 吴志军, 冯平法, 等. 压电超声换能器电负载调频特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 45-51.

WANG Tiansheng, WU Zhijun, FENG Pingfa, et al. Characteristics of piezoelectric ultrasonic transducer with electric load modifying frequency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 45-51.

[5] 林仲茂. 有力、电负载和损耗时夹心式压电换能器的共振频率及效率[J]. 应用声学, 1983, 2(1): 24-29.

LIN Zhongmao. The resonant frequency and efficiency of sandwich piezoelectric transducer with impedance, electrical load and loss[J]. Journal of Applied Acoustics, 1983, 2(1): 24-29.

[6] 林书玉. 夹心式功率超声压电换能器负载特性研究[J]. 陕西师范大学学报, 2002, 30(2): 29-34.

LIN Shuyu. Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasonic transducers[J]. Journal of Shaanxi Normal University, 2002, 30(2): 29-34.

[7] 杨日福, 闵志玲, 张凡. 负载对超声换能器共振频率影响及其匹配分析[J]. 计算机与应用化学, 2015, 32(2): 179-182.

YANG Rifu, MIN Zhiling, ZHANG Fan. Load effects on ultrasound transducer resonance frequency and its matching analysis[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, 32(2): 179-182.

[8] 秦军, 刘传绍, 赵波, 等. 在频率跟踪后引起振动切削过程中振幅衰减的主要原因分析[J]. 河南理工大学学报, 2006, 25(6): 484-488.

QIN Jun, LIU Chuanshao, ZHAO Bo, et al. Analysis of the main causes of amplitude attenuation in vibration cutting after frequency tracking[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2006, 25(6): 484-488.

[9] ZHU X M, LIN B, LIU L P. Power transfer performance and cutting force effects of contactless energy transfer system for rotary ultrasonic grinding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2785-2795.

[10] 徐佳成. 超声加工压电式三向测力仪关键技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.

XU Jiacheng. Research on key techniques of ultrasonic piezoelectric three-dimensional force gauge[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018.

[11] LI R Y, FRÖHLEKE N, BÖCKER J. LLC-PWM inverter for driving high-power piezoelectric actuators[C]//2008 IEEE 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poland: Poznan University of Technology & Polish Society for Theoretical and Applied Electrical Engineering, 2008: 159-164.

[12] 张俊伟, 张永俊, 梁远标, 等. 旋转超声加工非接触供电模型研究[J]. 电加工与模具, 2016(2): 45-49.

ZHANG Junwei, ZHANG Yongjun, LIANG Yuanbiao, et al. Research on contactless power supply model for rotary ultrasound machining[J]. Electromachining & Mould, 2016(2): 45-49.

(下转第86页)



图10 充液拉深未切割整流罩零件  
Fig.10 Part of hydroforming

## 4 结论

(1) 基于充液形成工艺的航天火箭整流罩零件,通过数值模拟分析与试验结果进行对比,证明了数值模拟可以给试验提供正确方向,说明了数值模拟的准确性。

(2) 根据现场的试验情况,基于实际制件过程出现的一些缺陷,通过调整液室压力与压边力加载曲线,根据零件的拉深高度进行合理匹配,最后达到能够控制整个冲液成形过程的起皱和破裂问题。

(3) 实现了充液拉深工艺在大尺寸薄壁整流罩构件上的工艺升级,大大提升了零件的表面质量,从而可以解决传统落压工艺的多道拉深工序、多道次退火及多道次敲修导致的零件变形与表面质量差等问题,从而保证零件在生产过程中表面质量和成形精度的控制。

## 参考文献

- [1] SIEGERT K, HÄUSSERMANN M, LÖSCH B, et al. Recent developments in hydroforming technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(2): 251-258.
- [2] BUERK E. Hydro-mechanical drawing[J]. Sheet Metal Industries, 1967, 44(479): 182-188.
- [3] ZHANG S H, WANG Z R, XU Y, et al. Recent developments in sheet hydroforming technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1-3): 238-241.
- [4] 李涛, 郎利辉, 周贤宾. 先进板材液压成形技术及其进展[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(3): 30-34.
- LI Tao, LANG Lihui, ZHOU Xianbin. Advanced sheet metal forming technology and its development[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(3): 30-34.
- [5] 苑世剑. 现代液压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- YUAN Shijian. Modern hydraulic forming technology[M]. Beijing:

National Defence Industry Press, 2009.

[6] 郎利辉, 张文尚, 刘康宁, 等. 液室压力对异形长法兰盒形件充液成形过程的影响[J]. 锻压技术, 2016, 41(9): 41-45.

LANG Lihui, ZHANG Wenshang, LIU Kangning, et al. Influence of cavity pressure on box-shaped part with special-shaped long flanges in hydroforming process[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(9): 41-45.

[7] 徐龙, 束飞, 龚甘霖, 等. 复杂钣金零件充液拉深工艺分析与试验研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(6): 49-53.

XU Long, SHU Fei, GONG Ganlin, et al. Process analysis and experimental research of hydroforming for complex sheet metal parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(6): 49-53.

[8] 刘欣, 徐永超, 苑世剑, 等. 铝合金复杂曲面薄壁件液压成形技术[J]. 精密成形工程, 2010, 2(1): 42-46.

LIU Xin, XU Yongchao, YUAN Shijian, et al. Hydraulic forming technology for aluminum alloy complex-shaped components[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(1): 42-46.

[9] 郎利辉, 许诺, 王永铭, 等. 321 不锈钢 V 形件充液成形失稳控制研究[J]. 锻压技术, 2012, 37(5): 51-55.

LANG Lihui, XU Nuo, WANG Yongming, et al. Research on failure control of hydroforming for 321 stainless steel V-shaped components[J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(5): 51-55.

[10] 孙志莹, 郎利辉, 孔德帅. 铝合金马鞍形件充液成形工艺模拟分析[J]. 精密成形工程, 2015, 7(1): 46-50.

SUN Zhiying, LANG Lihui, KONG Deshuai. Simulation analysis of hydroforming process for aluminum alloy saddle parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(1): 46-50.

通讯作者: 杨声伟, 工程师, 硕士, 研究方向为钣金成形, E-mail: 28401315@qq.com.

( 责编 思齐 )

( 上接第80页 )

[13] ZHU X M, LIN B, LIU L P. Efficiency-based compensations and the mechanical load dependencies of rotary transformer for rotary ultrasonic machining applications[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(6): 986-993.

[14] 朱学明. 基于非接触能量传输的旋转超声波加工关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.

ZHU Xueming. Study on the key technologies of rotary ultrasonic machining based on contactless energy transfer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.

[15] 卢斌. 超声波换能器谐振频率跟踪方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

LU Bin. The research on the algorithm of automatic tracking resonant frequency for ultrasonic transducer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

通讯作者: 刘礼平, 讲师, 博士, 研究方向为航空复合材料先进加工技术和超声波特种加工, E-mail: liuliping\_tj@163.com.

( 责编 思齐 )