

# 汽油超声喷嘴的设计研究

王伟强<sup>1</sup>, 束学道<sup>1,2</sup>, 汤廷孝<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 为了进一步细化汽油雾化粒径, 该文基于一维振动理论研究设计了一种汽油超声喷嘴。采用有限元法分析振动模态和谐响应, 获得其谐振频率、振动位移与工作应力分布, 理论频率 30.157 kHz 与 HP-4286A LCR 精密阻抗测试仪实测频率 30.862 kHz 接近。此外, 对超声喷嘴的汽油雾化效果进行了理论计算分析与试验研究, 理论计算粒径  $\varnothing 24.38 \mu\text{m}$ , 实测粒径  $\varnothing 27.62 \mu\text{m}$ , 两者基本一致, 比传统汽油喷嘴的雾化粒径(约  $\varnothing 50 \mu\text{m}$ ) 缩小约 2 倍。研究结果有效地改善了汽油的雾化质量, 提高了燃油利用率。

**关键词:** 超声; 喷嘴; 结构设计; 有限元分析; 雾化质量

**中图分类号:** TH122; TH113.1

**文献标识码:** A

## Design and Research of Gasoline Ultrasonic Nozzle

WANG Weiqiang<sup>1</sup>, SHU Xuedao<sup>1,2</sup>, TANG Tingxiao<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University of China, Ningbo 315211, China;

2. Key Lab. of Roll Forming Technology of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** In order to further refine the fuel atomization particle size, a gasoline nozzle was designed based on the one-dimensional vibration theory. The vibration modal and harmonic responses were analyzed with the finite element method to obtain the resonant frequency and the frequency of vibration displacement and stress distribution, the theoretic frequency of 30.157 kHz was nearly equal to the measured frequency of 30.862 kHz of the HP-4286A LCR precision impedance instrument. Furthermore, theoretical analysis and experimental research for the nozzle atomization effect of gasoline were done, theoretical calculation of particle size of  $\varnothing 24.38 \mu\text{m}$  were basically consistent with the measured particle size of  $\varnothing 27.62 \mu\text{m}$ , the size was reduced about 2 times compared with the size (about  $\varnothing 50 \mu\text{m}$ ) of traditional gasoline injector. The results show that the device can effectively improve the atomization quality and fuel efficiency of gasoline, and provide technical reference for the design of the engine fuel injector.

**Key words:** ultrasonic; nozzle; structure design; finite element analysis; atomization quality

### 0 引言

超声雾化技术<sup>[1]</sup>因具有噪声小, 无机械驱动, 稳定性好, 雾化效果极佳(雾滴分布均匀且极细)等优点, 故在生活的各个领域应用广泛。采用超声雾化技术的超声喷嘴主要由超声换能器和变幅杆两部分组成。超声换能器的功用是将电功率转换成机械功率再传递出去。换能器种类很多, 按照产生超声波源的不同, 换能器可分为电声换能型和流体动力型两大类<sup>[2-3]</sup>。变幅杆是超声波振动系统的重要组成部分, 其主要作用是聚能。按照母线形状分类, 常见的变幅杆有阶梯型<sup>[4-5]</sup>、指数型<sup>[6]</sup>、圆锥形<sup>[7]</sup>及悬

链型<sup>[8]</sup>等。

本文基于一维振动理论研究设计了一种汽油超声喷嘴。采用理论计算和 ANSYS Workbench 分析相结合的方法, 研究设计了一种能实现二次雾化的超声喷嘴, 然后通过雾化试验研究对超声喷嘴的工作性能进行了实质性验证分析。

### 1 汽油超声喷嘴的结构设计

基于装置工作的可靠性与安全性考虑, 应合理选择超声换能器与超声变幅杆。夹心式压电陶瓷换能器<sup>[9]</sup>具有工作频率大, 振动模式较纯, 辐射面振动分布较均匀的特点, 故超声换能器选用夹心式压电

收稿时间: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475247)

作者简介: 王伟强(1988-), 男, 河南周口人, 硕士生, 主要从事压电超声器械的研究, E-mail: 1210347037@qq.com。通信作者: 束学道(1968-), 教授, 博士生导师, 主要从事冷挤压成形工艺研究、机电装备设计与制造专业的研究, E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn。

陶瓷换能器。由文献[10]知,当面积系数  $N$  相同时,阶梯形变幅杆的放大系数最大,但阶梯型变幅杆截面是跃变的,存在明显的应力分布集中,工作安全性较差,故选用有悬链过渡的阶梯型复合变幅杆<sup>[11]</sup>。

### 1.1 夹心式压电陶瓷换能器的设计理论

在不考虑材料机械损耗,并假设一维平面波沿棒的轴向传播的条件下,变截面细棒在简谐振动情况下,其一维纵向振动的波动方程可写成

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \xi = 0 \quad (1)$$

式中: $k = \omega/c$  为波数, $\omega$  为振动的圆频率, $c = \sqrt{E/\rho}$  为细棒中一维纵向振动的传播速度。

令:

$$K^2 = k^2 - \frac{1}{\sqrt{S}} \cdot \frac{\partial^2 (\sqrt{S})}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\xi = S^{-1/2} y \quad (3)$$

式(1)简化为

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + K^2 y = 0 \quad (4)$$

当  $k^2 > 0$  时,其简谐解为

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{S}} [A \sin(Kx) + B \cos(Kx)] \quad (5)$$

令:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{S}} \cdot \frac{\partial^2 (\sqrt{S})}{\partial x^2} \quad (6)$$

当  $\tau = 0$  时, $\sqrt{S} = Cx + D$ ,取  $C = 0$ ,则为等截面细棒。

### 1.2 悬链过渡的阶梯型复合变幅杆的设计理论

悬链型过渡段的界面变化规律为

$$R = R_2 \operatorname{chr}(l_2 - x) \quad (7)$$

$$r l_2 = \operatorname{arcch} N \quad (8)$$

$$k_0^2 = k_1^2 - r^2 \quad (9)$$

由式(1)可求得悬链型复合变幅杆的频率方程等。

频率方程为

$$\tan(k_1 l_1) = -\frac{r}{2k} \operatorname{th}(r l_2) + \frac{k_0}{k} \cot(k_0 l_2) + \sqrt{\left[ \frac{r}{2k} \operatorname{th}(r l_2) \right]^2 + \left[ \frac{k_0}{k} \cot(k_0 l_2) \right]^2 + \left( \frac{k_0}{k} \right)^2} \quad (10)$$

式中: $k_1$  为圆波数; $l_2$  为长度; $r$  为半径。

### 1.3 超声喷嘴模型结构的建立

根据以上设计理论,设计的超声喷嘴装配结构如图 1 所示。表 1 为装置的主要尺寸参数。

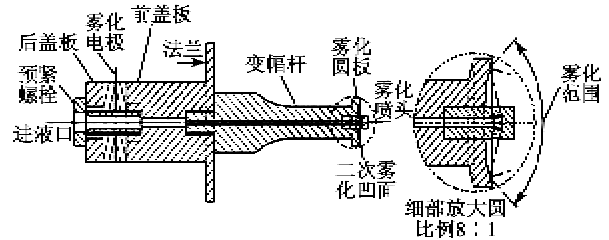


图 1 超声雾化喷嘴装配结构示意图

表 1 装置主要尺寸参数

后盖板/mm	$\varnothing 35 \times \varnothing 15 \times 8$
变幅杆大端/mm	$\varnothing 20 \times 21.4$
压电陶瓷/mm	$\varnothing 35 \times \varnothing 15 \times 6$
过渡段/mm	21.1
前盖板/mm	$\varnothing 35 \times \varnothing 15 \times 41.9$
变幅杆小端/mm	$\varnothing 10.6 \times 41.9$

超声系统的工作频率为 30 kHz,拟定其振动功率为 100 W,预紧螺栓与后盖板均采用 45 号钢,前盖板采用 7075-T651 铝,变幅杆采用 2A12 铝合金,压电陶瓷组由两片沿  $z$  方向极化且极化方向相反的强场介电损耗低的 PZT-8 压电陶瓷环组成。一次雾化喷头安装在超声喷嘴最前端,二次雾化凹面在雾化圆盘前端面,雾化面成凹形能有效控制雾化范围的大小。雾化过程分为两步:一级超声震动雾化与二级振动破碎雾化。当雾化电极接入超声波电信号后,超声喷嘴在两片压电陶瓷的激励作用下产生纵向超声振动,振动的振幅经变幅杆放大,二级雾化面产生相对较大幅值的超声振动。工作时,压强约为 0.003 MPa 的汽油由  $\varnothing 3$  mm 的进液口进入,经过  $\varnothing 2$  mm 的流道送到喷嘴前端,由雾化喷头的 6 个  $\varnothing 0.35$  mm 微孔以汽雾形式喷向二次雾化凹面,一次雾化产生的小直径雾粒在二次雾化凹面的超声高频振动作用下进行二次破碎雾化,从而使雾滴更加细化均匀,获得更好的雾化质量。

### 2 超声喷嘴的有限元仿真分析

为了确定所设计的超声喷嘴的振动特性,利用 ANSYS Workbench 13.0 对超声喷嘴模型进行模态分析,使系统的一阶共振频率为工作频率,即 30 kHz 附近,再利用 Workbench 13.0 谐响应分析,确定超声喷嘴在工作状态下的位移曲线。

### 2.1 模态分析

在三维设计软件 Unigraphics NX 8.0 (UG NX8.0)中建立夹心式压电陶瓷换能器与悬链型过渡的阶梯型复合变幅杆组成的超声喷嘴三维装配体模型,将模型导入 ANSYS Workbench13.0 进行模态分析,其一阶模态分析振型如图 2 所示。

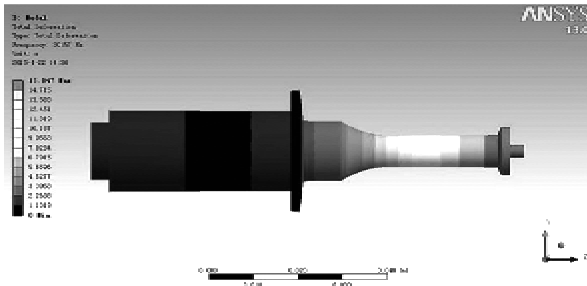


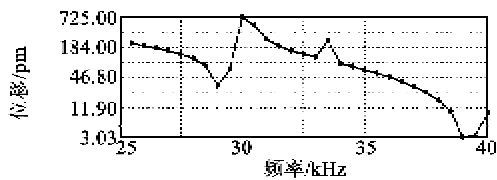
图 2 一阶模态振型

由图 2 可见,环境温度设置为 22 ℃时,其谐振频率为 30 157 Hz,法兰处振幅最小;一次雾化喷头与二次雾化面的振幅达到最大,与预期的结果一致。

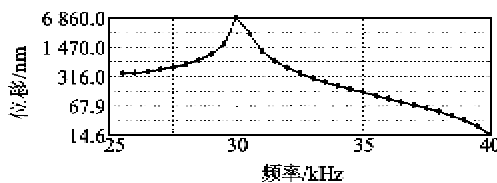
### 2.2 谐响应分析

谐响应分析是用于确定线性结构在承受一个或多个随时间按正弦(简谐)规律变化的载荷时稳态响应的一种技术。利用 Workbench 谐响应分析得到谐振频率下响应值对频率的曲线,并进一步分析考察谐振频率下对应的应力。

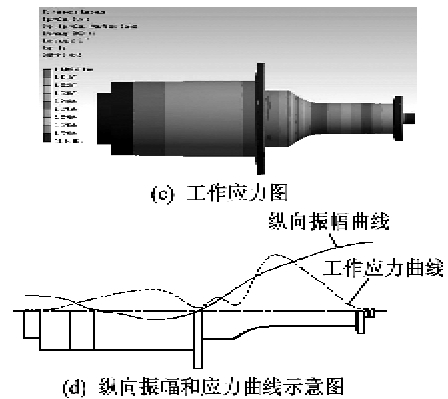
在谐分析中,设置激振频率域为 25~40 kHz ( $f_{min} \sim f_{max}$ ),步长  $\Delta\Omega$  为 30,沿 z 方向激励载荷大小为 200 N,利用 Mode Superposition 模态提取方法得到喷嘴法兰纵向振动位移曲线如图 3(a)所示,雾化圆盘与喷头处的振动位移曲线如图 3(b)所示。在振动频率 30 kHz 时,超声喷嘴的应力分布图如图 3(c)所示。



(a) 法兰纵向振动位移曲线



(b) 雾化圆盘及喷头处的振动位移曲线



(d) 纵向振幅和应力曲线示意图

图 3 25~40 kHz 范围时,超声喷嘴纵向振动位移曲线及 30 kHz 时,其纵向振幅与工作应力曲线示意图

由图 3(a)、(b)可知,法兰与雾化圆盘纵向振幅都在谐振频率 30 kHz 达到最大,此时,法兰的纵向振幅为  $7.25 \times 10^{-10}$  m,雾化圆盘及喷头的纵向振幅为  $6.86 \times 10^{-6}$  m,两者振幅对比可知,法兰纵向振幅极小。由图 3(c)可知在工作频率为 30 kHz 时,应力在变幅杆过渡段达到最大值。当受到振子的激励作用时,变幅杆处于一阶纵向振动模态,并实现振动振幅的放大。此时喷嘴工作的纵向振幅与应力分布如图 3(d)所示。

在小信号电压峰-峰值 1 V 激励下,用 HP-4286A LCR 精密阻抗测试仪测量获得了超声喷嘴振动系统的导纳和相位曲线(分析频率范围 25~35 kHz,其间仅 1 个谐振峰,有利于抑制其他振型对振动系统的干扰)如图 4(a)所示,其谐振频率为 30.862 kHz,与 Workbench 分析结果 (30.157 kHz) 仅相差 2.338%。测量获得的对数坐标图与导纳圆图如图 4(b)所示,这些数据曲线为超声喷嘴与超声电源的电路谐振匹配提供参考与指导作用。

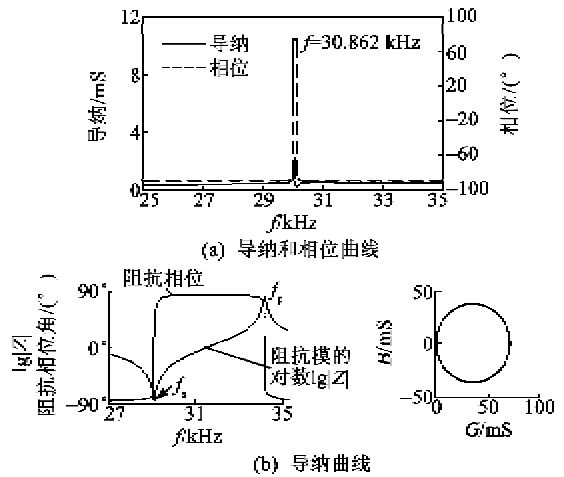


图 4 超声喷嘴的导纳与相位曲线及导纳曲线示意图

### 3 超声雾化雾粒理论直径计算

理论上,由索特直径(SMD)、Rayleigh 破碎理论计算方法得出二次雾化后的雾滴直径( $d_D$ )与超声喷嘴振动频率( $f$ )之间的关系。SMD 近似计算公式<sup>[13]</sup>为

$$SMD = \alpha \left( \frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (11)$$

式中: $\alpha=0.34$ ; $\sigma=0.025$  为汽油表面张力系数; $\rho=0.737 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  为 97 号汽油密度; $f$  为超声喷嘴振动频率。

Rayleigh 液体破碎理论公式<sup>[18]</sup>为

$$\lambda = v / f_0 \quad (12)$$

$$d_D = \left( \frac{3\lambda d_{jet}^2}{2} \right)^{1/3} \quad (13)$$

式中: $\lambda$  为波长; $v$  为液体线速度; $f_0$  为破碎频率; $d_{jet}$  为破碎前液体直径。

假设一级雾化的汽雾喷出速度等于流道内液体流速且不受空气影响,根据设计频率 30 kHz,计算出二级雾化液滴平均粒径为  $\varnothing 24.38 \mu\text{m}$  (已知喷嘴最大雾化量约为 2.94 L/h)。

### 4 汽油超声喷嘴雾化试验研究

为了获得超声喷嘴雾化质量的直接证据,需要进行喷雾试验以测量雾化液滴的直径<sup>[14]</sup>。本试验采用机械测量法研究喷嘴的雾化效果,试验设备如图 5 所示。



图 5 试验设备

#### 4.1 雾滴直径测定方法

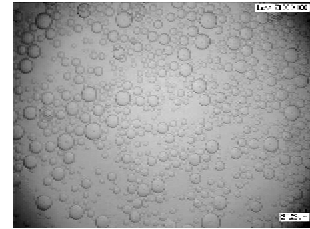
以汽油为雾化介质,采用雾滴影像反求法<sup>[15]</sup>测量雾滴直径。具体步骤如下:

1) 采样。培养皿中放入一定量的水,放置于测量点,超声喷嘴与超声波发生器相连接进行雾化,雾化的汽油在规定点进行一段时间的喷雾。

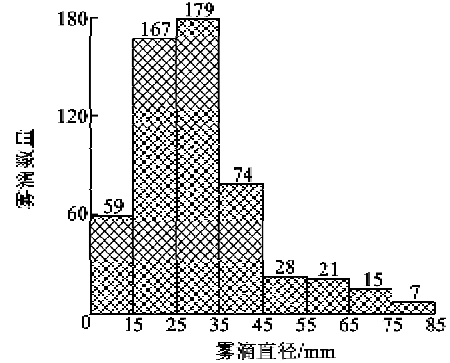
2) 显微镜观察并测量统计。将采集的雾滴样品置于 VHX-S50 超景深三维(3D)显微镜下,并放大  $100 \times 100$  倍数,呈现的雾滴图像如图 6(a) 所示。然后用超景深三维(3D)显微系统自带工具尺模块

标定测量雾滴直径,并用 Excel 记录测量尺寸,最后统计计算。

3) 结果。对计算结果进行修正,得出雾滴图像尺寸与实际尺寸的关系。



(a) 雾滴图像



(b) 粒径分布图

图 6 雾滴图像及雾滴直径分布

#### 4.2 试验结果分析

通过试验共标定测量 550 个液滴粒径,雾滴粒径分布如图 6(b) 所示。由图可见,液滴粒径主要集中在  $5 \sim 45 \mu\text{m}$ ,其中粒径在  $\varnothing 30 \mu\text{m}$  以下的占总体的 59.27%。忽略  $\varnothing 55 \mu\text{m}$  以上的大直径雾滴,则雾滴粒径的数量中径为  $25.86 \mu\text{m}$ ,体积中径为  $34.39 \mu\text{m}$ ,扩散比为 0.75。均值约为  $\varnothing 27.62 \mu\text{m}$ ,与理论计算的  $\varnothing 24.38 \mu\text{m}$  基本一致。

### 5 结论

本文通过理论计算和 ANSYS Workbench 有限元分析相结合的方法,设计了一种汽油超声喷嘴。该超声喷嘴有 3 个特点:

- 1) 实现了二次雾化。
- 2) 根据需要,通过加工改变二次雾化面的内凹程度能较好地控制喷雾范围。
- 3) 一次雾化喷出的汽雾恰好喷到二次雾化凹面的纵向振幅最大处(二次雾化面靠近边缘处的圆环面)。

加工并测试了汽油超声喷嘴,实测频率 30.862 kHz 与理论分析频率 30.157 kHz 接近。通过雾化试验知,超声喷嘴雾化平均粒径约为

$\varnothing 27.62 \mu\text{m}$ ,与理论计算的 $\varnothing 24.38 \mu\text{m}$ 基本一致,这与传统汽油喷油嘴的雾化粒径<sup>[16]</sup>(约 $\varnothing 50 \mu\text{m}$ )相比缩小约2倍,即汽油雾滴与空气的接触面积增大了约4倍,从而使汽油燃烧更加充分,这为汽车喷油嘴的设计提供了技术参考价值。但本装置在工程应用中还存在一些不足,尚需改进:

1) 高频激励下长时间工作,装置会产生一定的发热现象,这会影晌装置工作的稳定性和安全性,还需增加散热系统。

2) 喷嘴自身在满足控制定时定量喷油的要求方面存在缺陷,还需设计辅助控制装置。

#### 参考文献:

- [1] 王宝亮,孙志远,龚允怡. 液体燃料颗粒测量技术的研究[J]. 小型内燃机,1999,28(1):35-39.  
WANG Baoliang, SUN Zhiyuan, GONG Yunyi. Research of liquid fuel particles measurement technology [J]. Small internal Combustion Engine, 1999, 28(1): 35-39.
- [2] AMIT L. Micromachined silicon ultrasonic atomizer [J]. IEEE Ultrasonic Symposium, 1996(2):339-342.
- [3] 陈涛,王晓斌,章德,等. 压电换能式超声波雾化喷嘴的研究进展[J]. 声学技术,2010,29(4):449-452.  
CHEN Tao, WANG Xiaoyu, ZHANG De, et al. The research progress of piezoelectric conversion ultrasonic atomization nozzle [J]. Acoustic Technology, 2010, 29(4):449-452.
- [4] BANGVIWAT A, PONNEKANTI H K, FINCH R D. Optimizing the performance of piezoelectric drivers that use stepped horns [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90:1223.
- [5] SINDAYIHEBURA D, BOLLE L, CORNET A, et al. Theoretical and experimental study of transducers aimed at low-frequency ultrasonic atomization of liquids [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103: 1442.
- [6] EISNER E. Design of sonic amplitude transformers for high magnification [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35:1367.
- [7] CROUCH D D, DOLASH W E. Dual-window high-power conical horn antennaa; USA Patent, 6211837 [P]. 2001-4-3
- [8] GRAFF K F. Wave motion in elastic solids [M]. Mineola, N. Y. ; Courier Dover Publications, 1975.
- [9] 林书玉. 超声换能器的原理及设计 [M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [10] 黄霞春,李玉平,周里群,等. 超声波变幅杆的参量计算 [J]. 装备制造技术, 2007, 42(10):38-40.  
HUANG Xiaochun, LI Yuping, ZHOU Liqun, et al. Parameter calculation of ultrasonic horn [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2007, 42(10): 38-40.
- [11] 林仲茂. 超声变幅杆的原理与设计 [M]. 北京:科学出版社, 1987.
- [12] 应崇福. 超声学 [M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [13] RAYLEIGH L. On the instability of jets [J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1897(4): 351-371.
- [14] 曹建明. 喷雾学研究的国际进展 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1):85-86.  
CAO Jianming. The study of spray international progress [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition) 2005, 25(1):85-86.
- [15] 商庆清,张沂泉,郑建东,等. 直径反求测定法研究 [J]. 工程学学报, 2006(6):78-80.  
SHANG Qingqing, ZHANG Yiquan, ZHENG Jiandong, et al. A study on droplet diameter measurement by its image [J]. Journal of Engineering Graphics, 2006(6):78-80.
- [16] 余铭奇,谭伟,姚锡凡. 基于FPGA和DSP的喷油器雾化粒径测量系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(2):299-302.  
YU Mingqi, TAN Wei, YAO Xifan. Design of spray droplet size measurement system based on FPGA and DSP [J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(2): 299-302.