

非线性驻波场平板热穿透层中的热声分析

郭庆¹, 朱之墀¹, 黄东涛¹, 刘克²

(1. 清华大学工程力学系, 北京 100084 2. 中国科学院声学所, 北京 100080)

摘要: 文章利用数值计算的方法进行了非线性空气驻波场中平板热穿透层的热声分析。通过计算发现在非线性范围内温度振荡的高次谐波存在成倍增长的规律。

关键词: 热声振荡; 非线性; 驻波
中图分类号: O422.7 文献标识码: A

Analysis of thermoacoustic oscillation around a plate in a non-linear standing wave field

GUO Qing¹, ZHU Zhi-chi¹, HUANG Dong-tao¹, LIU Ke²

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Analysis of thermoacoustic oscillation around a plate is obtained by numerical simulation. The law of multiplying growth of high-order harmonics of oscillation temperature is discovered.

Keywords: thermoacoustic oscillation; nonlinear; standing wave

1 前言

近年来, 热声振荡的现象被用来设计热声发动机和热声冰箱。因热声现象的复杂性, 现在的理论研究远不能满足实际工程应用的需要, 其中一个问题就是在热声现象中常常伴随着非线性现象。在热声发动机和热声冰箱的设计过程中, 需要了解其组件(stack)结构中的热声现象。本文在对组件结构做了简化后, 分析了其在非线性驻波场中的热声现象, 发现随着声源强度的增加热能和声能相互转换的效率都会增加。并发现了热声振荡中高次谐波

成倍增长的规律, 这个规律和刘克^[1]、黄东涛等人发现的高次谐波声压级成倍增长的规律类似^[2]。

2 物理问题及计算方法

由于热声发动机或热声冰箱组件结构的复杂性, 本文把它简化为一个平行于驻波振动方向的小的固体平板如图 1 所示。

本文从热传导方程出发来计算振荡流体的温度^[3], 从而计算声场中的热流和声能流。其中假设流体是完全气体, 并且驻波场中的压力和速度的值是通过文献[2]中的方法得到的。在声源强度为

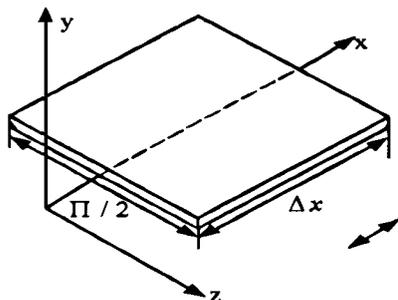


图 1 物理问题示意图

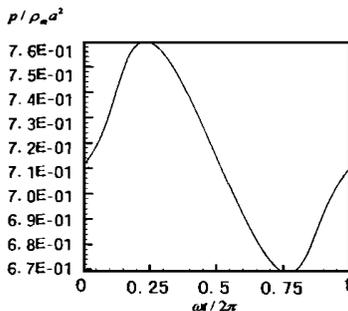


图 2 声源强度 170dB 时声压变化

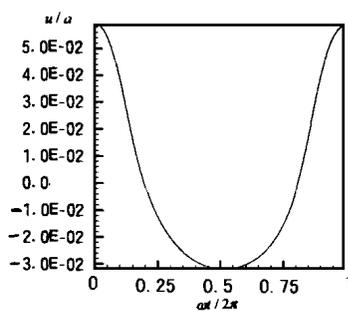


图 3 声源强度 170dB 时声速变化

170dB 时, 距离封闭端 $\lambda/8$ 处的速度和压力随时间变化的曲线如图 2, 3 所示。数值方法采用的是隐式

收稿日期: 2000-01-10; 修回日期: 2000-12-01
作者简介: 郭庆(1974), 男, 上海人, 博士生, 现从事热声学的理论研究。

3 计算结果及分析

在这里定义温度振荡级, 简称温振级, 用 STL (Sound Temperature Level) 表示, 定义表达式如下:

$$STL = 20 \lg \frac{T'}{T'_{ref}} \quad (1)$$

其中 T' 是温度振荡幅值的有效值, T'_{ref} 是一个参考值。参考值可以根据(2)式, 并且取其近似值得到:

$$\frac{T'_{ref}}{T_m} = \frac{\gamma - 1 p'_{ref}}{\gamma p_m} \quad (2)$$

其中 p'_{ref} 为声压级的比较参考值, 对于空气 $\gamma = 1.4$, $p'_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$, $T'_{ref} = 2 \times 10^{-8} \text{K}$ 。

本文计算了温度梯度时, 不同声源下基频、倍频、三倍频及四倍频的温振级随着声源强度增长的曲线(见图4), 图4中所示为距离平板两倍温度穿透层处的温振级。从图中可见基频、倍频、三倍频及四倍频的温振级随着声源强度的增加而线性增长。在图5中, 纵坐标为声源声压级升高1dB温振级的增量。由图可见声源声压级每增长1dB, 基频的温振级增长1dB, 倍频的温振级增长2dB, 三倍频的温振级增长3dB, 四倍频的温振级增长4dB, 呈现出高次谐波成倍增长的规律。在强非线性驻波管的研究中高次谐波的声压级也有成倍增长的规律^[1,2], 这和本文中高次谐波温振级的成倍增长的规律类似。通过图5, 还可以看出当声源强度高于100dB时, 温度振荡就出现了倍频。当声源强度高于125dB时, 温度振荡开始出现三倍频, 声源强度高于140dB时, 温度振荡出现四倍频。

4 结束语

本文对热声发动机和热声冰箱中的重要构件进行了简化, 然后利用数值计算的方法进行了非线性

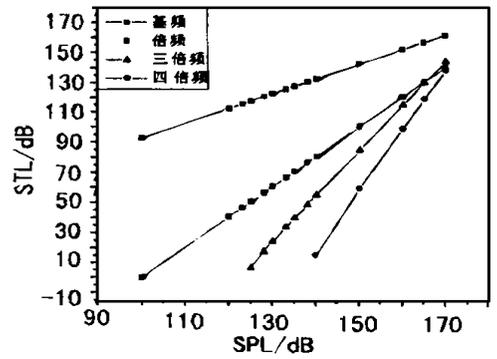


图4 温振级随着声源强度增长的曲线

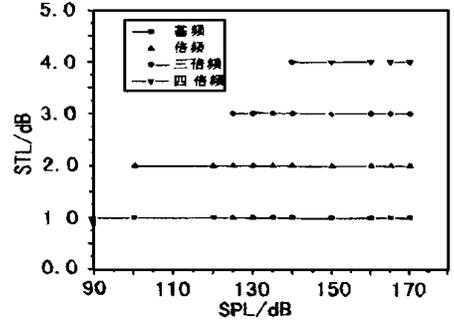


图5 温振级增量随着声源强度增长的曲线

驻波场中平板热穿透层中的热声分析。通过计算发现在非线性范围内温度振荡的高次谐波存在成倍增长的规律, 同时关于热声相互转换的效率研究也在进行中, 详细的内容将另文发表。

参考文献:

- [1] 刘克. 大振幅驻波的实验研究 II: 驻波场谐波的饱和 [J], 声学学报, 1995, 20(3): 170-176
- [2] 黄东涛, 边晓东, 刘克, 江先金, 朱之耀. 非线性驻波现象的数值模拟与实验结果比较 [J]. 声学学报, 1999, 24(3): 295-299.
- [3] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Fluid Mechanis [M], Pergamon, Oxford, 1982, 129.
- [4] 苏铭德, 黄素逸. 计算流体力学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 59.

(上接第17页)

参考文献:

- [1] R. Hickling and S. Martin, The use of ultrasonics for gauging and proximity in air [J], J. Acoust. Soc. Am., 1986, 79(4): 1151-1159.
- [2] T. Yano, M. Tone and A. Fukumoto, Range finding and surface characterization using high frequency air transducers [J], IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 1987, 34(1): 232-239.
- [3] D. A. Hutchins, D. W. Schindel, A. G. Bashford, W. M. D. Wright, Advances in ultrasonic electrostatic transduction [J], Ultrasonics, 1998, 36(1-7): 1-6.
- [4] I. Ladabaum, X. C. Jin, B. T. Khuri-Yakub, Miniature drumheads microfabricated ultrasonic transducers [J]. Ultrasonics, 1998, 36(1-7): 25-29.
- [5] Hoffmann, T. L., Chen, W., Koopmann, G. H., Scaroni, A. W. and Song, L., Experimental and numerical analysis of bimodal acoustic agglomeration [J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 1993, 115(3): 232-240.
- [6] Gallego-Juarez, J. A., Rodriguez-Corral, G. And Gaete-Garreton, L., An ultrasonic transducer for high power applications in gases [J]. Ultrasonics, 1978, 16(5): 267-271.
- [7] Barone, A. and Gallego-Juarez, J. A., Flexural vibrating free-edge plates with stepped thickness for generating high directivity ultrasonic radiation [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1972, 51(3): 953-959.