

# A 超声换能振动系统研究

## A1 超声塑焊变幅器的有限元分析

林仲茂 陆建华

(中国科学院声学研究所, 北京·100080)

本文根据有限元原理自编了 MVUH 程序,可以在微机上运行,并对超声塑料焊接用的变幅器(焊头)进行分析计算。比较了平板变幅器开槽前后以及槽宽对固有频率及变幅器工作端面位移振幅分布的影响,表明开槽后变幅器的固有频率下降,位移分布较均匀,而槽加宽时固有频率略有下降。为检验程序的正确性,曾用 ADINA 程序包进行计算比较,得到较满意的结果,并对固有频率进行实验验证,理论计算和测量结果符合较好。

关键词: 有限元素法 超声变幅器

## Analysis of ultrasonic horn for plastic welding by finite element method

LIN Zhongmao LU Jianhua

(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing · 100080)

A special and simple FEM program MVUH has been made for calculating the frequencies and distribution of displacement on the working surface of horn, it can be operated on personal computer. Some theoretical results are compared with measured ones, the two agree well.

Keywords: FEM, ultrasonic horn

### 1 引言

超声焊接塑料的优点是质量好,速度快和不需要粘结因而无污染,所以在工业生产中应用越来越广泛,并且常常需要焊接较大尺寸的塑料制品。因此需要制备相应大小的超声变幅器(焊头),其尺寸有时接近或超过一个波长。这时一维理论已不适用。有时变幅器还具有不规则的形状,一般没有解析解。此时借助有限元分析能得到满意的结果。

目前国外已有适用范围较广泛有限元程序包,如美国的 ADINA 程序包。虽然这种现成的大型程序包通用性强,但程序庞大,准备数据复杂,不灵活,需要在大型或小型机上运行。能否编制针对性强而能在微机上的有限元法(FEM)程序,本文作了初步尝试。自编了 MVUH 程序,并运用它分析了大型板状变幅器的振动模式,得到较满意的结果,在一定程度上能满足工程计算要求。

### 2 有限元 MVUH 程序

用于超声塑料焊接的变幅器(焊头)的性能主要是固有振动频率和工作端面上的振幅分布。它们直接影响焊接设备能否正常工作及焊接质量问题。FEM 方法适合解决此类问题。根据变分原理可以推导出变幅器的平面振动方程。推导时设变幅器自由振动,无外力作用和忽略阻尼,在作正弦振动条件下得到振动方程为。

$$K\{X\} = \omega^2 M\{X\} \quad (1)$$

其中 $\{X\}$ 为位移矢量, $K$ 为刚度矩阵, $M$ 为质量矩阵, $\omega$ 为振动的固有圆频率。

有限元单位选用高次单元,这样用少数单元能给出较高精度。分析平面问题采用 8 节点单元,而三维问题用空间 16 节点的 6 面体单元。计算二维单元刚度和质量矩阵,然后用子空间迭代法求解广义特征值方程(1)。

如前述,为使用简便并能在微机上运行的目的,编制了 MVUH 专用程序。用 Fortran 语言编写,它由 6 个部分组成:

(1) 初始数据的输入:包括画出有限元网格图,然后按次序将单元及节点加以编号。输入节点总数、单元总数以及材料特性参数( $E$ 、等)。

(2) 单元刚度和质量矩阵的形成:包括节点坐标、节点位移、方程编号和单元数组的计算等。

(3) 总刚度和质量矩阵的形成和约束消除。

(4) 零频问题的预处理。

(5) 子空间迭代法求解广义特征值。

(6) 计算结果的整理和输出:计算出各振动模式的频率并由低到高依次排列。计算振动位移,并按节点编号依次给出  $X$  和  $Y$  方向的位移。程序的特点是:数据准备简便,存储量少,运算速度快,可以在微机上运行,并可通过微机和 VAX 机通信而在 VAX 机上运行,移植性强。

### 3. 计算例子及结果

#### 3.1. 用自编 MVUH 程序在微机上计算。

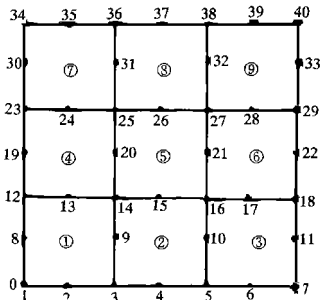


图 1 板状变幅器,划分 9 个单元 40 个节点网格图

表 1 两种单元划分时固有频率计算结果

振动模式	固有频率 [kHz]	
	9 单元	28 单元
1	$0.192 \times 10^{-5}$	$0.159 \times 10^{-6}$
2	7.178	7.443
3	10.390	10.480
4	12.880	14.05
5	15.67	16.04
6	17.93	18.64
7	17.95	19.89
8	19.02	20.54
9	23.22	24.98
10	24.80	26.27
11	25.44	27.32
12	25.82	27.74

计算一长宽厚为  $232\text{mm} \times 142\text{mm} \times 40\text{mm}$  的平板。板材是硬铝合金,由于板左右对称,只需要计算一半即可。如图 1 划分 9 个单元在 286 微机上即可计算,而划分为 28 单元时可用 386 机计算。其计算结果列于表 1。可见 9 个单元和 28 个单元的计算结果接近,尤其在低次模态上更接近。

在相同 28 单元划分时用 MVUH 和美国的 ADINA 程序包计算结果见表(2)。两者计算结果很接近。

表 2 用两种程序的计算结果

振动模式	固有频率 [kHz]	
	MVUH 程序	ADINA 程序
1	$0.160 \times 10^{-6}$	$0.159 \times 10^{-6}$
2	7.44	7.44
3	10.48	10.48
4	14.05	14.06
5	16.04	16.08
6	18.64	18.61
7	19.89	20.07
8	20.54	20.64
9	24.98	25.21
10	26.27	26.69
11	27.32	27.52
12	27.74	28.92

#### 3.2. 用 ADINA 程序计算

计算不同结构板形变幅器的固有频率。平板尺寸为  $232\text{mm} \times 142\text{mm} \times 40\text{mm}$ 。

(1) 开槽前后频率的变化 在同样疏密划分单元开槽(8mm 宽)与不开槽的计算结果列于表 3,可见开槽后使各振模的固有频率下降。开槽后工作端面的位移振幅分布较均匀。

表 3 开槽前后的固有频率

振动模式		1	2	3	4	5	6
频率 [kHz]	未开槽	$0.89 \times 10^{-5}$	7.69	10.57	15.40	16.14	18.77
	开槽后	$0.106 \times 10^{-5}$	6.45	7.44	11.48	11.70	14.91
振动模式		7	8	9	10	11	12
频率 [kHz]	未开槽	21.79	22.51	28.05	28.84	29.48	33.52
	开槽后	17.12	17.49	22.20	24.17	26.28	27.20

(2) 槽宽对固有频率的影响。在相同单元划分时计算槽宽分别为 8 和 16mm 时的固有频率。结果列于表 4。可见槽加宽使频率降低。

表 4 不同槽宽的频率

振动模式	固有频率 [kHz]	
	槽宽 8mm	槽宽 16mm
1	$0.106 \times 10^{-6}$	$0.159 \times 10^{-6}$
2	6.45	5.86
3	7.44	6.95
4	11.48	9.85
5	11.70	10.54
6	14.91	14.33
7	17.12	15.79
8	17.44	16.16
9	20.20	20.47
10	24.17	21.83
11	26.28	25.43
12	27.20	26.63

(3) 局部变薄后频率的变化 设图 2 最右上角的单元(编号 31)的厚度由 40 减少到 20mm 时,其结果列于表 5。变薄后频率略为升高。

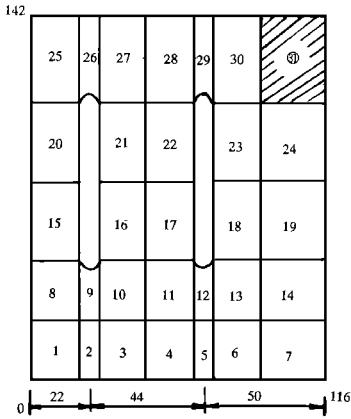


图 2 开槽平板形变幅器局部变薄  
表 5 变薄前后的固有频率

振动模式	固有频率 [kHz]	
	变薄前	变薄后
1	$0.106 \times 10^{-6}$	$0.159 \times 10^{-6}$
2	6.45	6.62
3	7.44	7.53
4	11.48	11.62
5	11.70	11.89
6	14.91	15.53
7	17.12	17.36
8	17.44	17.72
9	22.20	22.55
10	24.17	24.23
11	26.28	26.61
12	27.20	27.99

### 3.3. 三维振动分析

自编程序 MVUH 只能作平面分析或轴对称三维分析。对于如图 3 所示变厚度变幅器则必须进行三维分析。用 ADINA 程序进行计算可以得到各阶振型及工作端面的位移分布。

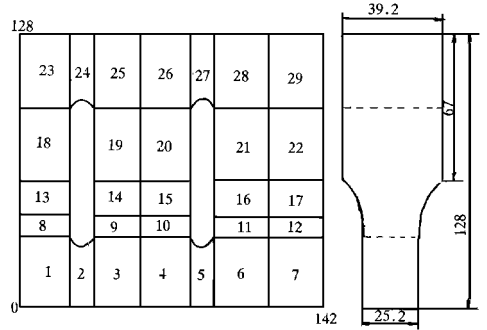


图 3 变厚度变幅器

曾对没有开槽的平板型变幅器(232mm × 142mm × 40mm)进行二维及三维分析,比较其固有频率的计算结果,列于表 6。可见在板厚小于纵向波动波长的 1/4 时,可以按平面计算,其误差很小。

表 6 二、三维分析板型变幅器频率  
(平板,没有开槽)

振动模式	固有频率 [kHz]	
	二维分析(平面)	三维振动分析
1	$0.159 \times 10^{-6}$	$0.159 \times 10^{-6}$
2	7.69	7.43
3	10.57	10.46
4	15.42	15.37
5	16.14	16.01
6	18.77	18.38
7	21.76	20.86
8	22.51	21.48
9	28.05	27.92
10	29.02	28.94
11	29.61	29.50
12	33.51	33.22

### 4 实验验证

用静电激振和压电拾振方法测量变幅器的固有频率并与计算结果比较。

(1) 开槽平板 平板尺寸为 232mm × 142mm × 40mm 开 4 个槽,槽宽 8mm 均匀分布。测量和计算结果列于表 7。

表 7 固有频率的计算结果和实验值比较  
(平板型开槽)

振模动态	$f_{\text{理论值}}$ (kHz)	$f_{\text{实验值}}$ (kHz)	误差 %
1	$0.159 \times 10^{-6}$		
2	6.45	6.43	0.23
3	7.64	7.69	0.61
4	11.48		
5	11.70	11.62	0.68
6	14.91		
7	17.12		
8	17.49	17.46	0.18
9	22.20	22.40	0.90
10	24.19	24.50	1.28
11	26.28	25.81	1.80
12	27.20	26.76	1.61

2. 变厚度变幅器 尺寸如图 3 所示, 测量及三维分析结果列于表 8。

由上面两个例子可见固有频率的计算和测量结果很接近。

## 5 结语

有限元分析方法能够解决复杂形状变幅器的振

动问题。为计算简便和能在微机上运行, 自编了平面分析的 M V U H 程序。对于一个线度尺寸小于对应主振频率的湍波长时可以按平面问题计算, 能够满足工程设计需要。自编程序在微机上运行只需 10 分钟。

表 8 变厚度变幅器三维计算和实验结果

振动模态	$f_{\text{理论}}$ [kHz]	$f_{\text{实验}}$ [kHz]	误差 %
1	$4.34 \times 10^{-5}$		
2	4.68	4.66	0.43
3	6.20	6.24	0.73
4	10.42	10.15	2.60
5	11.23	11.34	0.98
6	13.78	13.62	1.16
7	16.70	16.52	1.31
8	19.34	19.92	2.99
9	22.00	22.21	0.55
10	22.41	22.50	0.40
11	24.56	24.50	0.16
12	25.48	25.80	1.25

## A2 弯曲振动变幅杆的设计

韩庆帮 林书玉

(陕西师范大学应用声学研究所 西安·710062)

按照一般的变幅杆设计理论, 超声弯曲振动变幅杆的设计将会非常复杂, 为满足工程上的需要, 我们在本文中给出一种简单的近似有效的弯曲振动变幅杆的设计方法, 并以纯弯曲理论来分析其放大倍数, 在考虑了转动惯性及剪切形变的影响后, 还阐述了更精确的设计理论, 通过实验发现实测的变幅杆谐振频率很接近于理论设计值。

关键词: 弯曲振动 变幅杆 换能器

### Design on stepped horn of flexural vibration

HAN Qingbang LIN Shuyu

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

It seems very complex to design flexural vibration horn with general methods, in order to satisfy needs of projects, based on the characteristics of flexural vibration, a facile effective method on designing stepped horn of flexural vibration was discussed. Amplification of stepped horn was approximately analyzed by using primary theory. Considered torsion inertia and shearing deformation the more accurate method was given. Checked by experiment the resonant frequency is in good agreement with theoretical results.