

声疲劳试验装置对试件低频 振动响应的影响

田 静

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

1990年6月20日

摘要 本文利用边界钳定矩形薄板试件的声致振动实验结果和对该结果的理论分析,说明了在声疲劳试验中,试件的低频振动响应一般不仅仅取决于试件本身的性质及其边界条件,还要决定于使试件与声场耦合起来的试验装置,而且有时后者比前者更具有决定性的意义。文章在声疲劳试验系统的分析中,引入了电-力-声类比电路方法,这一应用可以半定量地估算系统中的各种因素对试件低频振动方式的影响,为指导声疲劳试验的合理设计提供了一种理论依据和手段。

Effects of installations on the low frequency vibration response of specimens in acoustic fatigue tests

TIAN Jing

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

Received June 20, 1990

Abstract In acoustic fatigue tests, it is often considered that the vibration response of a specimen in a progressive tube or in a reverberation room depends only on the dynamic characteristics and the boundary condition of the specimen, and has nothing to do with the test setup which couples the specimen to the corresponding sound field. By using the experimental results and the analysis of the acoustic-induced vibration of a boundary clamped rectangular thin plate with a currently used test setup in a progressive tube and in a reverberation room, this paper stresses that the effects of the setup on the low frequency vibration modes must not be neglected in some cases. In the theoretical explanation of the experimental results, the Rayleigh-Ritz method is firstly used to give several natural frequencies of low order; then an approach of electro-mechano-acoustical analogous circuit is introduced to yield the other resonant and anti-resonant frequencies in the response spectra. This approach can be applied to estimate the attribution of various parameters of a given test setup to the vibration response quantitatively, and it supplies a rational layout of acoustic fatigue tests with a theoretical basis and means.

一、引 言

早在 60 年代, D. J. Mead 就曾明确指出^[1]: “通常认为周围和腔内的介质不会影响到(试件)本征方式的位移分布, 然而这些方式的机械阻抗可能会因此而产生严重的变化。”但是直到今天, 人们仍没有很好地理解(或是没有重视)他的这个提示。在声疲劳试验中, 人们往往把安装在行波管或混响室中的试件的振动响应, 看作是由试件本身的动力学性质与其边界条件所唯一决定的, 而不考虑 Mead 所谓的“周围和腔内的介质”, 即声场与试件的耦合条件的影响。

本文利用边界钳定的矩形薄板试件和通常所用的声疲劳试验装置, 分别在掠入射和无规入射两种声场条件下, 进行了声致振动实验。实验结果及其理论分析, 很好地说明了试验装置对试件低频振动响应的影响是不容忽视的。文章在对试件振动方式的分析中, 先由 Rayleigh-Ritz 方法给出试件的低阶本征频率, 然后引入试件与试验装置所构成的系统的电-力-声类比电路, 半定量地估算了各种因素对低频段共振、反共振频率的作用。这一方法为指导声疲劳试验的合理设计提供了一种理论依据和手段。

二、声疲劳试验装置

声疲劳试验一般有声波垂直入射、掠入射和无规入射三种方法, 分别相应于不同的高噪声环境条件(见图 1)。通常前两种方法用于飞机或火箭的外部轻结构材料疲劳特性的测试, 最

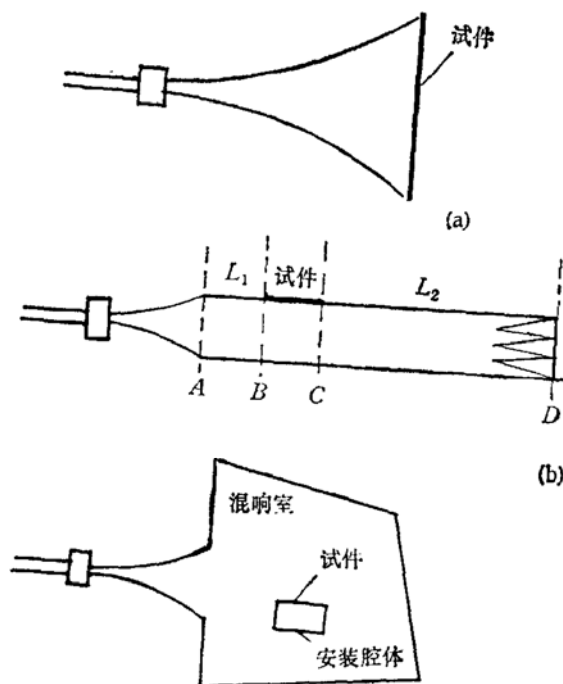


图 1 声疲劳试验装置示意图

(a) 声波垂直入射 (b) 声波掠入射 (c) 声波无规入射

后一种用于机舱内部电子仪器或设备材料的试验^[1]。

图 1(a) 所示的声波垂直入射试验装置, 由于声波在试件表面的反射, 可以得到较高的声级; 但是在频率较高时, 作用在试件上的声级难于准确测定, 声场在试件上的声压相关方式也不能很好地模拟实际情况, 所以目前已很少使用, 我们在本文中也不再讨论。

实际中较为常用的掠入射试验装置如图 1(b) 所示, 其主体为一行波管, 声波由气动声源产生, 经过一段距离 L_1 传播到 B 点, 进入试验段 BC。在这里, 声能量将会有一部分损失在试件的振动激发, 另一部分损失则是由于试验段的漏声等实际存在的非理想安装因素上, 剩下的才向行波管的下游 L_2 传播并被消声端 D 所吸收。试验段 BC 一般是行波管的一部分, 但有时因试件或模拟实际条件的需要, 也可能与行波管的截面形状及大小有所不同。

在混响室中, 一般是将试件作为一个表面, 安装在特定的封闭腔体上, 腔体的大小、形状和腔体内部有无吸声材料, 均取决于所模拟的实际情况。

三、低频声致振动实验及其结果

在声疲劳试验中, 试件的低频振动响应常常是决定其结果的主要因素。为了探讨边界钳定的试件本身和试件的环境耦合条件各自对振动响应的影响, 我们在图 2 所示的两种实验条件下, 进行了 20—2000Hz 频率范围内的扫频声致振动实验。

在图 2 所示的实验装置中, 扫频声场信号由 B&K 2010 频率分析仪产生, 经气流扬声器辐

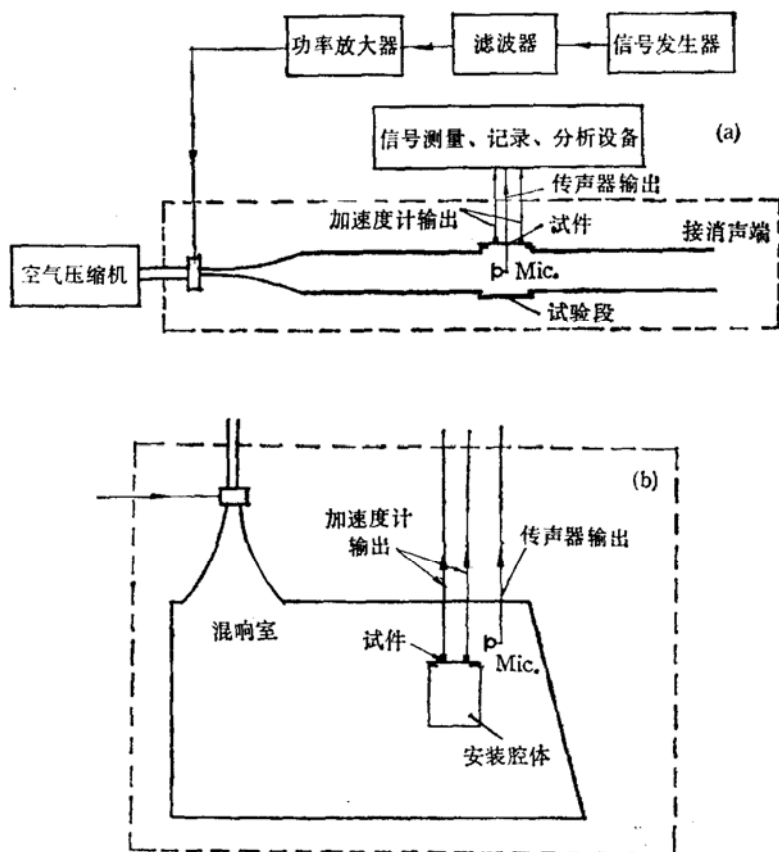


图 2 声致振动实验装置示意图

射到行波管或混响室中,用 $K = 34\text{dB}$ 的 1/4 英寸 CH16 型电容传声器通过 2010 监测,同时输出到 TEAC XR-30 型磁带记录仪录音。试件振动信号由重量为 2 克的 B&K 4344 型加速度计拾取,经 B&K 2651 型电荷放大器输出到 XR-30。录下的声场和振动信号均送到 B&K 2033 频谱分析仪和计算机进行分析和处理。

行波管为内经 14.0cm 的圆管,试验段上游长约 180cm,下游约 120cm;混响室呈非平行六面体结构,内体积约 27m^3 。试件为边界胶铆的矩形合金铝板,型号 Ly12-CZ,厚度 1.8mm,面积 $38.0 \times 18.0\text{cm}^2$ 。为了使实验结果具有普遍性,特取与行波管截面不同的矩形试验段,内体积为 $34.0 \times 17.0 \times 14.5\text{cm}^3$ 。

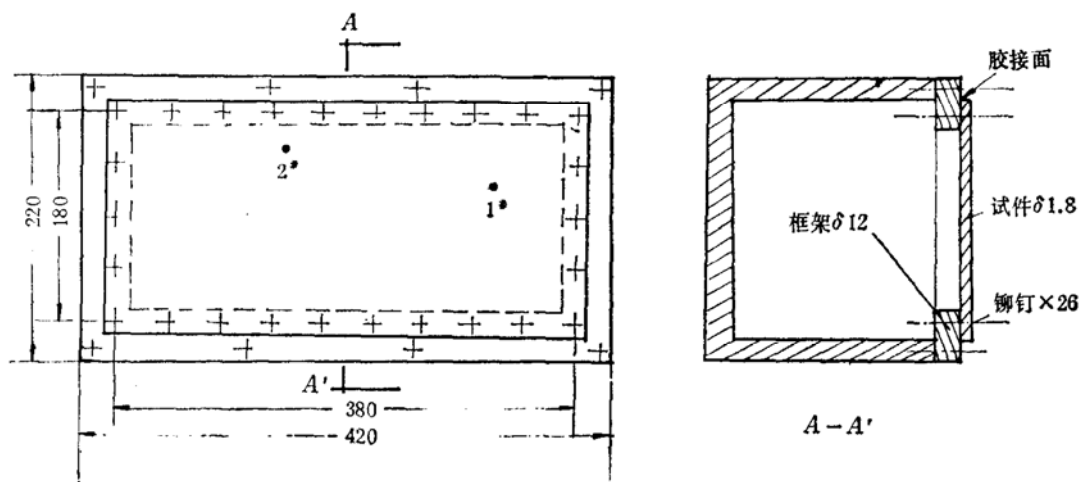


图 3 试件的安装与测点位置

为了使振动测量能够反映试件的所有振动方式,同时在试件上布置了两个测点(见图 3)。实验结果见图 4、图 5,其中分别给出了行波管与混响室中 20—1000Hz 的扫频声场频谱分布和相应的试件振动速度响应谱。结果表明:

(1) 试件的低频振动响应的能量主要集中在少数的几个共振峰上;这些峰值一般高出连续谱 10—40dB,峰值的半功率宽度约在 10—30Hz 之间。因而这些共振峰的产生是声疲劳试验中试件低频响应的关键。

(2) 行波管中的声场声压谱和试件的振动响应谱的峰值和谷点基本上是互补的,即试件响应的极大值点对应于声场声压的极小值点,反之亦然;但混响室中试件的能量吸收对声场就没有这么明显的影响。这说明在行波管中,试件与试验段的插入,也会对人射声场(甚至声源辐射)产生较明显的反作用,这一点可以用声波导管的转移阻抗理论来解释^[5,7],在此我们不再详细讨论。不过在声疲劳试验中,也应对此有充分的了解,因为试验所模拟的实际强噪声场中的构件,通常对声场不会产生如此强烈的反作用。

四、理论分析与讨论

1. 试件本征频率的计算

根据 Rayleigh-Ritz 方法解出的近似结果,边界钳定矩形板的本征频率仍可以表示成

$$\omega_{mn} = (K_{mn}/a^2)\sqrt{D/(\rho h)} \quad (1)$$

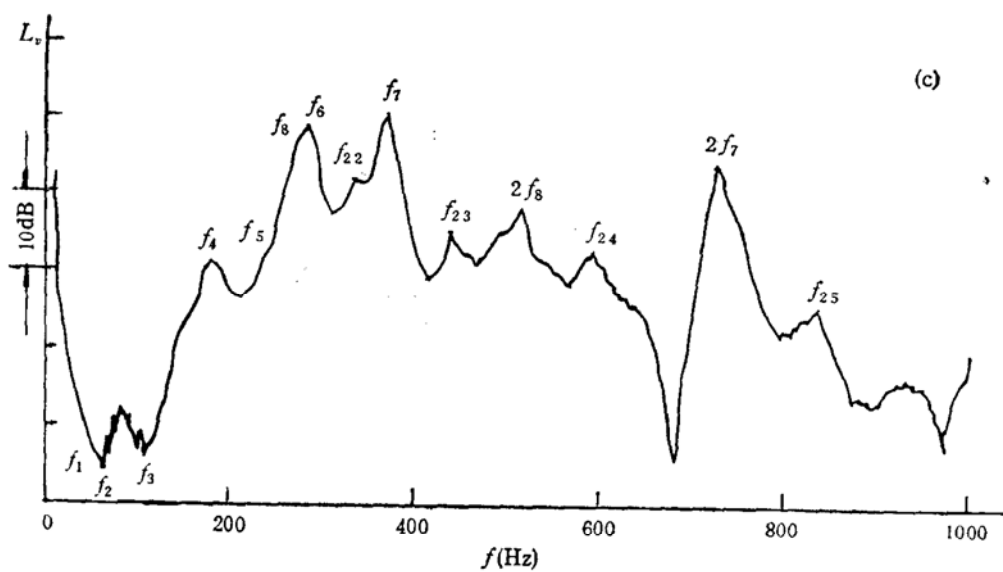
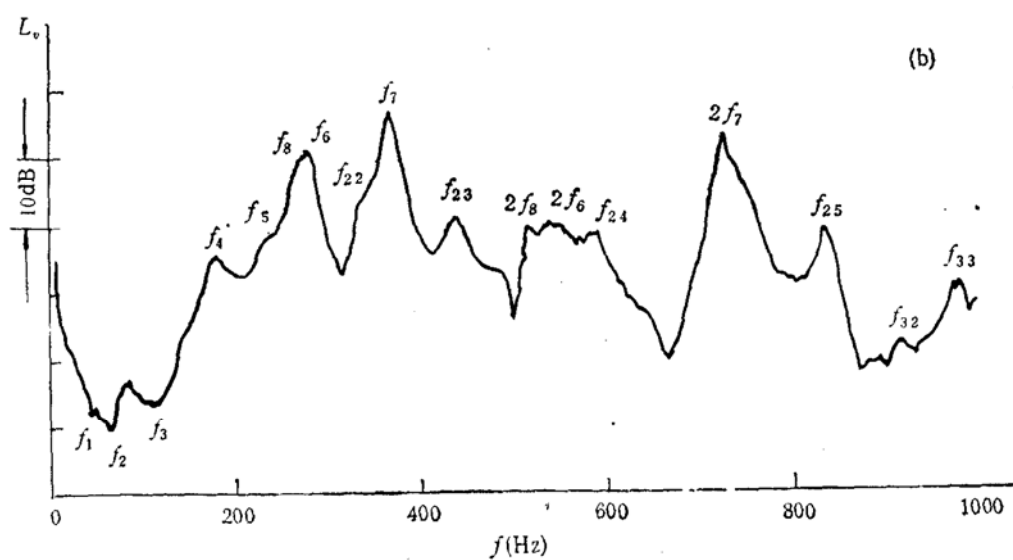
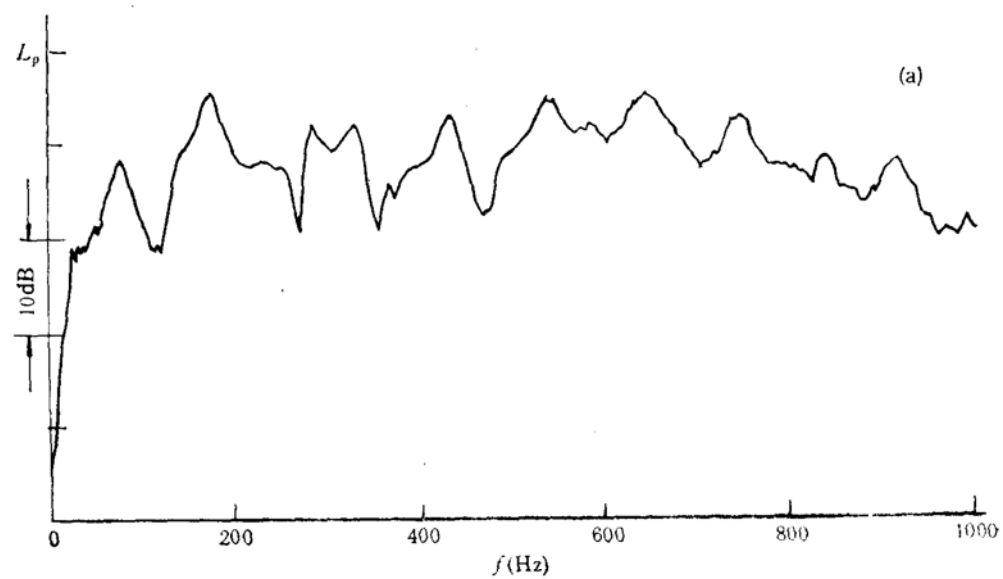


图 4 行波管中的声场频谱与试件响应谱

(a) 声场频谱分布; (b) 试件测点 1# 的速度响应谱; (c) 试件测点 2# 的速度响应谱

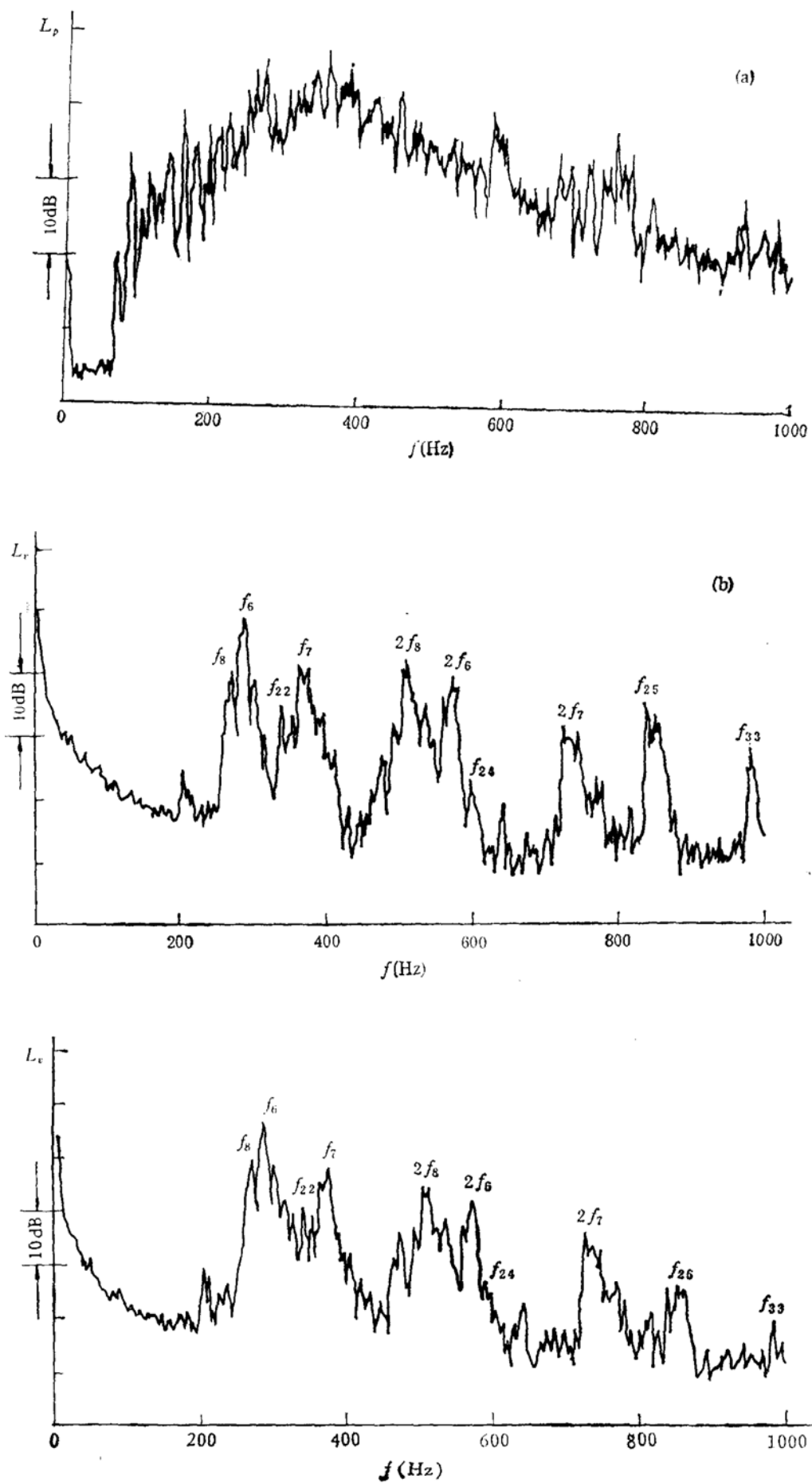


图 5 混响室中的声场频谱与试件响应谱

(a) 声场频谱分布; (b) 试件测点 1# 的速度响应谱; (c) 试件测点 2# 的速度响应谱

的形式,只是这里与振型有关的本征值 K_{mn} 不再可以解析地表示为板的长边 a 和短边 b 的函数,只能通过近似计算,给出相应各阶振动方式的数值解^[2,4]。上式中, ρ 为材料密度 (kg/m^3); h 为板的厚度 (m); $D = Eh^3/12(1 - \sigma^2)$, 这里 E 为杨氏模量, (N/m^2), σ 为泊松比。

在上述的实验中,试件的各个参数如下: $a = 0.38\text{m}$, $b = 0.18\text{m}$, $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$, $\sigma = 0.34$, $h = 1.8 \times 10^{-3}\text{m}$, $E = 6.96 \times 10^{10} \text{N}/\text{m}^2$ 。将其代入(1)式,并取 $b/a \approx 0.5$, 查表给出最低几阶的本征值 K_{mn} ^[3], 就可以得到最低几阶的本征频率如表 1。

表 1 试件的低频本征频率

m	n	K_{mn}	$f_{mn}(\text{Hz})$
2	2	24.64	339
2	3	31.95	440
2	4	44.90	619
2	5	63.75	878
3	2	64.20	885
3	3	71.45	985

表 1 所给的本征频率分别近似地标在了图 4(b)、(c) 中和图 5(b)、(c) 中, 这里的计算值与实验值的误差源于两点:(1) b/a 的值应为 0.474, 但为了计算的方便, 近似取为 0.5; (2) 假设掠入射条件下试件受迫振动的共振频率等于试件的本征频率, 这一假设仅在 $\lambda \gg a, b$ 时才能近似成立, 所以在频率较高时, 会带来较大的误差。

由图中可以立刻看出, 这些本征频率不仅没能包括所有的低频共振响应点, 而且几乎没有一个是主要的共振峰。那么, 剩下的那些比本征振动方式的响应更为强烈的峰值是什么原因造成的呢?

2. 试验装置对试件低频响应的影响

在对试验装置进行更为深入的分析之前, 先让我们讨论几个前提:

(1) 假设行波管试验段的阻抗通过上游管道对声源辐射阻抗的反作用, 不足以影响到声源的辐射, 使入射声场产生明显的变化; 或即使有变化, 我们也将之归结为声源本身的固有辐射特性, 从而可以单纯地考虑声场对试件的振动激发。从实验结果来看, 声场的频谱确实呈峰谷涨落分布(图 4(a)), 但同时试件振动响应的主要峰值又不是由声场的峰值声压造成的, 所以在讨论试件的振动响应时, 这一假设应该是合理的。

(2) 试验段的上、下游管道一般地应该作为分布参数的声传输线处理^[7], 但考虑到行波管直径远远小于声波长, 计算表明其分布声容对试件低频振动共振频率的影响很小, 所以为了简化运算, 在下面的讨论中, 可以略去其声容(并联容抗开路); 这样上下游管道的串联分布声阻和声质量, 就可以近似以集总参数形式的声阻和声质量来类比了, 其大小就是用管道分布参数中单位长度的值(为常数), 乘以管子长度, 并加上管端修正^[8]。

(3) 讨论限于 $\lambda \gg a, b$ 的低频范围, 从而试件和试验段都可以近似作为集总参数系统处理。

在上述前提下, 可以得到如图 6、图 7 所示的声疲劳试验装置的电-力-声类比电路。图中,

R_{A1} 、 M_{A1} 和 R_{A2} 、 M_{A2} 分别为行波管上下游的等效声阻和声质量； R_l 、 M_l 为试件安装的缝隙漏声等效声阻和声质量； Z_A 为试件内外两个表面的辐射阻抗； C_A 为试验段体积的等效声容，其值为 $C_A = V_0/\rho_0 C_0^2$ (V_0 为试验段腔体体积， ρ_0 为空气密度， C_0 为声速)； Z_M 为试件的等效机械阻抗，可以表示为力阻 R_M 、质量 M_M 和力顺 C_M 的串联。混响室中的试验腔体，是由行波管中的试验段两端密封后做成的，所以相应的各参数假设相等。

略去试件的辐射阻抗，即可给出如下的几个共振频率和反共振频率(带星号者)：

$$\omega_0 = 1/\sqrt{M_M C_M} \quad (2)$$

$$\omega_1^* = 1/\sqrt{M_{A1} C_A} \quad (3)$$

$$\omega_2^* = 1/\sqrt{M_{A2} C_A} \quad (4)$$

$$\omega_3^* = 1/\sqrt{M_l C_A} \quad (5)$$

$$\omega_4 = \omega_0/\sqrt{1 + M_{A1} S^2/M_M} \quad (6)$$

$$\omega_5 = \omega_0/\sqrt{1 + M_{A2} S^2/M_M} \quad (7)$$

$$\omega_6 = \omega_0/\sqrt{1 + M_l S^2/M_M} \quad (8)$$

$$\omega_7 = \omega_0\sqrt{1 + S^2/(\omega_0^2 M_M C_A)} \quad (9)$$

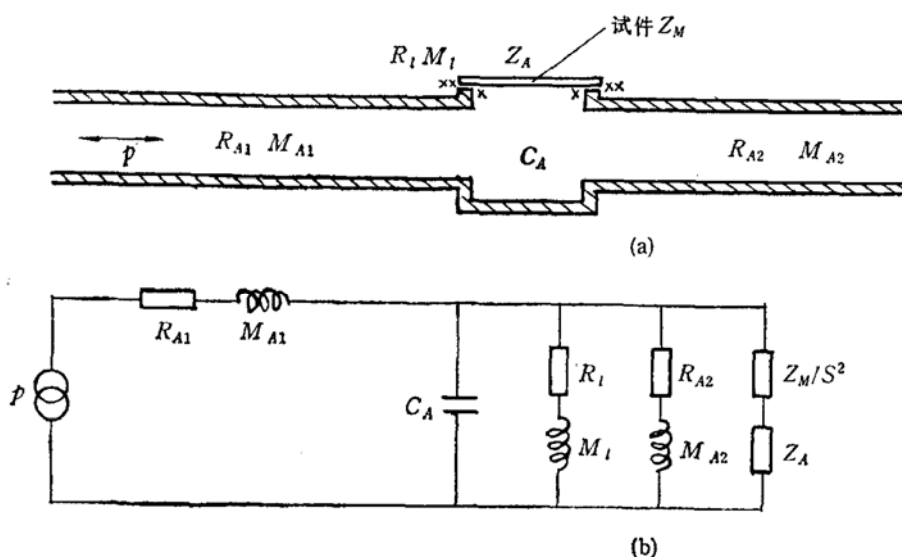


图 6 行波管声疲劳试验装置类比电路图

除了这些单回路共振、反共振点之外，它们之间通过声阻、力阻的耦合，还将产生一系列的共振、反共振频率；但是由于这些阻尼都很小，绝大部分的耦合效应都表现在对原有频率的微小修正。计算结果与图 4(b)、(c) 的对比表明，只有漏声声阻 R_l 和试件力阻 R_M 导致的共振方式 ω_7 与 ω_3 的耦合，所产生的频率为 ω_8 的新的共振峰及其二次谐波方式，在试件的振动响应谱中的贡献比较突出，这里

$$\omega_8 = \left[\frac{\omega_7^2 + \omega_3^2 (M_l/M_M)(R_M/R_l)}{1 + (M_l/M_M)(R_M/R_l)} \right]^{1/2} \quad (10)$$

近似令 $\omega_0 = \omega_{22}$ ，并将如下的实验参数 $S = 0.0684 \text{ m}^2$ ； $M_M = 0.332 \text{ kg}$ ； $M_{A1} = 143 \text{ kg/m}^4$ ； $M_{A2} = 95.1 \text{ kg/m}^4$ ； $C_A = 5.94 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \text{ s}^2/\text{kg}$ 代入表示式 (3)–(10) 中，可得

$$f_1 = 55 \text{ Hz}$$

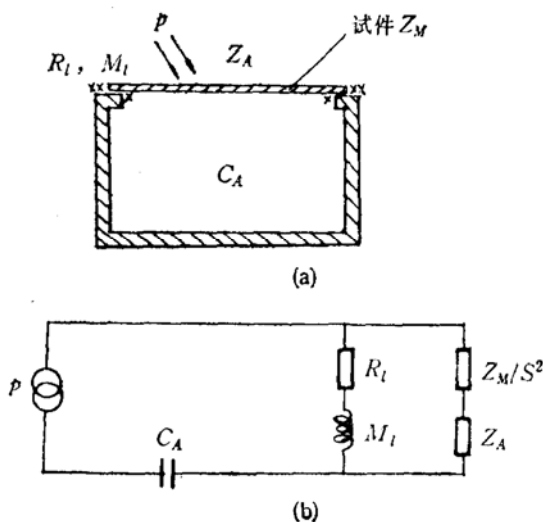


图 7 混响室声疲劳试验装置类比电路图

$$f_2 = 67\text{Hz}$$

$$f_4 = 195\text{Hz}$$

$$f_5 = 222\text{Hz}$$

$$f_7 = 348\text{Hz}$$

但是(5)、(8)、(10)式中的参数 M_l , R_l 和 R_M 都只能从实验结果中反推出来。由图 4(b)、(c), 低频谷点 f_1 、 f_2 之上存在另一谷点 115Hz, 不妨先假设它即为 f_3 , 导出 f_6 后再来看其合理性。

令 $f_3 = 115\text{Hz}$ 代入(4)式, 得到 $M_l = 31.2\text{kg/m}^2$, 代入(8)式可得

$$f_6 = 281\text{Hz}$$

从图 4(b)、(c) 均可看到, 在 280Hz 处确实存在一个很强烈的共振峰。

再根据共振峰半功率宽度 Δf 与振动阻尼 R 之间的关系(设 M 为相应的质量抗)

$$R = 2\pi M \Delta f \quad (11)$$

可以将(10)式改写为

$$f_8 = \left[\frac{f_7^2 + f_3^2(\Delta f_M / \Delta f_l)}{1 + (\Delta f_M / \Delta f_l)} \right] \quad (12)$$

由图 4(c) 可以量得 $\Delta f_M \approx \Delta f_l \approx 20\text{Hz}$, 从而有

$$f_8 = 259\text{Hz}$$

这一峰值由于距离 f_6 太近, 几乎被 f_6 的共振峰完全掩盖了(在该峰值的顶端附近的上升沿处仍可看出些许端倪), 但是在其倍频 518Hz 处, 却表现出了一个独立的强烈共振峰。

至此, 我们利用 f_4 — f_8 及其二次谐波共振方式, 标出了试件的低频响应谱上除了本征频率以外的几乎所有的共振峰(见图 4(b)、(c))。

同样地, 由图 7 可以得到混响室中的试件与试验装置的耦合共振频率 ω_6 , ω_7 和 ω_8 , 其表式与(8)、(9)、(10)式相同。实验结果表明, 这几个共振峰的位置也基本同于行波管中的情况(但是对低频振动能量的相对贡献明显不同, 见图 5(b)、(c)), 这就是由于所用试件安装腔体

与行波管中的试验段完全相同的缘故。

从上面的讨论可见,在所用的试验条件下,试验装置对试件低频振动响应的影响,确实是非常明显的,它甚至比试件本身的本征振动方式更具有决定性的意义。

五、结 论

1. 在声疲劳试验中,试件的安装条件与试验系统均将对试件的振动响应产生影响,其结果是通过一系列的共振、反共振方式,改变试件的低频振动响应谱,影响的程度取决于试验装置引入的各种声阻抗与试件的耦合情况。

2. 在声疲劳试验设计中,应该掌握试验装置对试件响应的影响情况,但是其目的并不是要消除这些影响,而是尽可能地使之接近试件的实际使用条件。

3. 电-力-声类比电路的理论分析方法,用于声疲劳试验中试件的低频振动响应,可以很好地解释和理解试验装置的影响,但应注意其适用条件。

本文的内容是沈壕先生领导的“声疲劳试验方法研究”工作中的一部分,实验是在魏文和祝光明同志协助下完成的,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] Richards, E. J. and Mead, D.J., *"Noise and Acoustic Fatigue in Aeronautics"*, John Wiley & Sons (1968), Chap. 15,19.
- [2] 谷口修,“振动工程大全”,上册,机械工业出版社(1983),126,217.
- [3] “振动与冲击手册”,国防工业出版社(1988),84.
- [4] Klee, B. J. 等,“振动冲击试验类具设计”,“强度与环境”编辑组(1979),102.
- [5] 杜功焕等,“声学基础”,上海科技出版社(1981),5章.
- [6] 沈壕,陈定楚,茅宏迪,“金属薄板的声致疲劳和断裂”,声学学报 4(1979), No. 2, 126.
- [7] 莫尔斯, P. M. 英格特, K. U., “理论声学”,下册,杨训仁等译,科学出版社(1986),551—561.