

尾流中气泡的主动声特性模型及有限元分析

张 群,王英民

(西北工业大学 航海学院,陕西 西安 710072)

摘 要:尾流中气泡的主动声学特性是主动声探测和声波在尾流中传播的理论基础。分析入射声波在空气与水的分界面的反射/折射特性和气泡在受迫振动条件下的散射,建立尾流中气泡的主动声学特性的弹性薄球壳模型。对气泡模型运用有限元分析得到气泡的谐振频率,与理论值比较验证了模型的正确性。

关键词:舰船尾流;气泡;谐振频率;主动声特性模型;有限元分析

中图分类号:O427.4 **文献标识码:**A

The Active Acoustic Characteristic Model of the Bubble in the Ship Wake and Finite-Element Analysis

ZHANG Qun, WANG Yingmin

(College of Marine, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: It is primary important to obtain the active acoustic characteristic of the bubble before studying the active acoustic detection and the sound wave transmits in the ship wake. The reflection and the refraction of the sound wave at the boundary of the air and the water together with the scattering characteristic of the bubble under the forced vibration were studied, and the active acoustic characteristic model of the bubble in the ship wake was created then. The finite-element analysis was applied to the model of the bubble to obtain the accurate resonant frequency of it, the result of which was used to prove the correction of the model of the bubble when compared to the theoretical frequency of it.

Key words: ship wake; bubble; resonant frequency; active acoustic characteristic model; finite-element analysis

0 引言

舰船尾流具有独特的声学特性,不同频率入射声波在尾流中传播时存在衰减作用,原因是气泡对入射声波的反射和散射。气泡对声波的反射/散射作用与气泡的谐振频率有关,气泡的谐振频率^[1]由气泡的半径及气泡所处水中的深度决定。分析舰船尾流^[2]中气泡半径的大小、气泡在时间和空间上的分布^[3]及对气泡尾流噪声谱等的测量,并经试验模拟产生气泡,运用光学或声学的方法得到气泡的被动声源特性^[4]等,为尾流的被动声探测奠定了基础。若从气泡的主动声反射/散射特性入手,分析气泡在入射声波作用下的主动声学特性,可为主动声探测提供理论依据。

分析入射声波在气泡的空气与水的分界面处的

反射/折射作用^[5],得到气泡的主动反射/折射特性;气泡在受迫振动条件下与谐振腔类似,由振动原理类比电路得到气泡的主动散射特性。在此基础上结合气泡被动声源特性,建立气泡的主动声学特性模型。引入有限元模态分析和响应分析^[6],结合耦合场^[7]条件下的声学有限元分析^[8],在给出有限元分析所需相关材料属性的基础上,得到气泡的谐振频率,与水中气泡谐振频率的理论值相比较以验证模型的正确性。

1 气泡的主动声学特性模型

1.1 气泡分界面处的反射/折射

分析两种水与空气分界面处入射声波的反射与折射得到水中气泡的主动声反射特性。声波垂直入射如图1所示。

收稿日期:2011-05-27

作者简介:张群(1981-),男,江苏连云港人,博士生,主要从事水下通信与信号处理的研究。

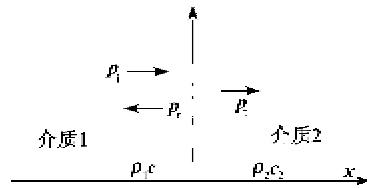


图 1 声波在两种物质分界面处垂直入射

由图 1 可见,根据界面上声压连续和界面法向振速连续的条件,得到满足条件的反射波 p_r 、入射波 p_i 及透射波 p_t 的声压振幅。令界面的声压反射系数 R 为反射波与入射波声压振幅之比,透射波与入射波声压振幅之比为声压透射系数 D ,得

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (1)$$

$$D = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \quad (2)$$

在气泡与水的分界面处,水与空气的特性阻抗分别为:

$$z_1 = \rho_1 c_1 = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \times 1500 \text{ m/s} \quad (3)$$

$$z_2 = \rho_2 c_2 = 1.293 \text{ kg/m}^3 \times 340 \text{ m/s} \quad (4)$$

式中: $R \approx -1$; $D \approx 5.86 \times 10^{-4}$; ρ_1, ρ_2 分别为水和空气的密度; c_1, c_2 分别为水和空气中的声速。

入射声波在水中气泡空气与水的分界面处发生全反射,在介质 1 即水中形成驻波,只是此时分界面处是质点速度波腹和声压波节。

声波斜入射如图 2 所示。对于波阵面与 y 轴平行的平面波,波矢量方向与 y 轴垂直,声压 p 与 y 坐标无关:

$$p(x, z, t) = p_0 \exp[j(\omega t - kx \cos \alpha - kz \cos \gamma)] \quad (5)$$

式中 p_0 为入射声波在介质分界面处的声压。

平面波入射角 θ_i 与入射波矢量的方向角 α_i, γ_i 间满足:

$$\alpha_i = \pi/2 - \theta_i \quad (6)$$

$$\gamma_i = \pi - \theta_i \quad (7)$$

由式(5)~(7)可得斜入射平面波声压、反射波声压和折射波声压。声波斜入射时分界面的边界条件与垂直入射一样,根据界面上声压连续和界面法向振速连续的条件,令法向声阻抗率为界面上声压与法向振速之比,分别为

$$Z_{1n} = \rho_1 c_1 / \cos \theta_i \quad (8)$$

$$Z_{2n} = \rho_2 c_2 / \cos \theta_t \quad (9)$$

由此可得声波斜入射于界面时的声压反射系数和声压折射系数:

$$R = (Z_{2n} - Z_{1n}) / (Z_{2n} + Z_{1n}) \quad (10)$$

$$D = 2Z_{2n} / (Z_{2n} + Z_{1n}) \quad (11)$$

若取 $m = \rho_2 / \rho_1, n = c_1 / c_2$,由折射定律可得

$$n \cos \theta_t = \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)、(11)得

$$R = \frac{m \cos \theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{m \cos \theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (13)$$

$$D = \frac{2m \cos \theta_i}{m \cos \theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (14)$$

由式(10)、(11)、(13)、(14)可知,无论介质 1、2 的特性阻抗如何,也不管由介质 1 向介质 2 入射或反射,都有 $|D| \approx 1$,即都会全反射;当 $c_2 < c_1$ 时,无论 θ_i 取何值,均有 $\theta_t < \theta_i$,即恒有正常意义下的折射波;当 $c_2 \ll c_1$ 时,对于任意的入射角 θ_i ,均有 $\theta_t \approx 0^\circ$,即折射波总是垂直于分界面。水中气泡空气与水的分界面属于 $c_2 < c_1 (n > 1)$ 情况,即只有在 $\theta_i = 90^\circ$ 时才会发生全反射。

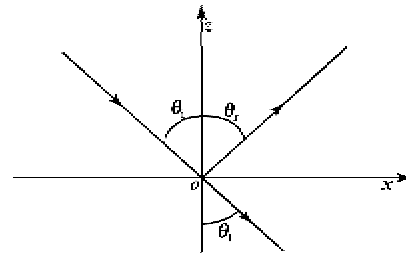


图 2 斜入射平面波的反射与折射

1.2 水中气泡的主动声散射

水中气泡对不同频率入射声波在水与空气的分界面产生反射和散射作用,且散射作用的大小与气泡的谐振频率有关,当入射声波的频率等于气泡谐振频率时,散射作用最强,气泡的散射截面最大。气泡与谐振腔类似,在主动入射声波的作用下作近似的均匀形变,可看作一个弹性元件。由振动原理类比电路得气泡受迫振动时小气泡的谐振频率:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho}} \quad (15)$$

式中: a 为气泡半径; ρ 为周围介质的密度; p_0 为作用于气泡的压力; γ 为气体等压比热和等容比热的比值,标准状态下的空气,取 $\gamma = 1.41, \rho = 1 \text{ g/cm}^3$ 。将 p_0 与气泡所处的海水深度联系起来,则深度 d 处气泡的谐振频率

$$f_0 = \frac{0.33}{a} \sqrt{1 + 0.1d} \quad (16)$$

式中 a 和 d 的单位分别是 cm 和 m 。

若定义散射面积,则可得单个气泡的散射面积

$$\sigma_s = \frac{4\pi a^2}{(ka)^2(1-f_0^2/f^2)^2} \quad (17)$$

当入射声波的频率等于气泡的谐振频率时,根据界面声波反射/散射定理,声波可穿透气泡壁,在气泡内形成多阶谐振^[9],对入射波有较大吸收,此时气泡壁的振动位移最大;远离气泡谐振频率时,可把气泡看成是弹性球体的声散射。

1.3 水中气泡的主动声特性模型

气泡在入射声波的作用下作受迫振动时,将一部分声能转变成热能,造成对声波能量的衰减。声波衰减后剩余的能量分为两部分:一部分垂直入射后反射的能量,可在水介质中继续传输;另一部分进入气泡内部引起多阶谐振,使气泡作为次级声源向外辐射能量。以此得尾流中气泡的主动声反射/散射模型为:

1) 单个水中气泡的主动声反射,可看作是一个球壳。斜入射的声波都会垂直透射,并在透射后的气泡与水的分界面处发生全反射,声波在气泡内往复,气泡在入射声波的作用下作受迫振动,并作为次级源向周围介质中辐射声能;声波垂直入射时,则在水与气泡的分界面发生全反射,声波沿原路返回,在水中继续传播,由此建立水中气泡的主动声反射的薄弹性球壳模型。

2) 水中气泡的主动声散射,根据振动原理的电声类比电路得到其相应的散射截面的大小,入射声波频率等于气泡谐振频率时,声波穿透气泡壁,引起气泡内气体的多阶谐振;远离气泡谐振频率,可将气泡看成是弹性球壳的声散射,即水中气泡的主动声散射模型为弹性球壳。

2 水中气泡主动声学特性模型的有限元验证

分析建立的水中气泡在主动入射声波作用下的弹性球壳模型,若其谐振频率与理论值相等,则可验证模型的正确性。有限元分析中的模态分析和谐响应分析都可在获得结构相关材料属性的前提下得到模型结构的谐振频率。水中气泡处于流体水介质中,应考虑流体-结构的相互作用,耦合场与非耦合场分析来计算气泡弹性球壳的谐振频率,与理论值比较以分析两种条件下气泡相关参数的变化。

2.1 确定材料参数

为在 ANSYS 中符合单位推导的封闭性,各物

理量单位均采用国际标准。分析 3 个半径的气泡,所处水下深度为 $d=5\text{ m}$,水下气泡中空气的密度取 $\rho_a=1.293\times 1.5\text{ kg/m}^3$,水的密度为 $\rho_w=1\ 030\text{ kg/m}^3$ 。

根据弹性模量^[10]与体积的关系,气泡在水下 $d=5\text{ m}$ 处,半径 $a_3=10^{-3}\text{ m}$,取弹性模量 $EX_3=1.519\ 5\times 10^5\text{ Pa}$ 。为使球壳的厚度不影响半径的取值,厚度与半径的比值为 1/100。

2.2 建立有限元模型

由球壳半径确立 3 个关键点,转换坐标由关键点生成弧线;扫描弧线生成圆弧球壳面;对生成的 1/8 球壳进行映射方式的有限元划分;球壳分别关于 x 、 y 和 z 轴映射,得到整个气泡球壳模型如图 3 所示。

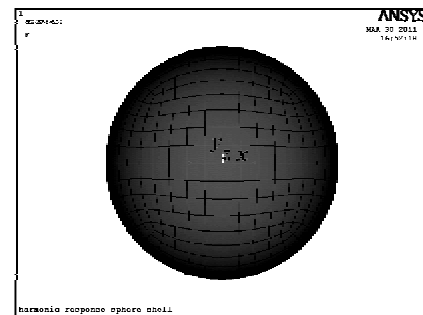


图 3 气泡弹性球壳模型及有限元网格的划分

2.3 加载求解

在模型对称的位置加载大小相等径向相反的两个力来激发,通过监视球壳外边界在 $y=0$ 处的位移来检测共振频率。对建立的模型先进行模态运算,再进行谐响应分析。

2.4 查看结果

3 个半径气泡的弹性球壳模型的模态分析和谐响应分析,与理论值相比较,得到对应的各个材料属性的参量如表 1、2 所示。

表 1 气泡弹性球壳模型模态分析结果

球壳半径/mm	球壳厚度/ μm	弹性模量/MPa	
0.1	1.0	1.126 0	
0.3	3.0	1.126 0	
1.0	27.7	0.151 9	
起始频率/kHz	截止频率/kHz	谐振频率/kHz	频率理论值/kHz
1	100	40.410	40.400
1	100	13.470	13.472
1	100	4.033	4.040

表2 气泡弹性球壳模型的谐响应分析结果

球壳半径/mm	球壳厚度/ μm	弹性模量/MPa
0.1	1.0	1.126 0
0.3	3.0	1.126 0
1.0	27.7	0.151 9

起始频率/kHz	截止频率/kHz	谐振频率/kHz	频率理论值/kHz
40	50	40.400	40.400
10	20	13.472	13.500
4	5	4.040	4.040

由模态分析和谐响应分析结果可得:

1) 不同半径气泡的弹性模量和气泡壁的厚度不同。气泡半径越大,弹性模量越小,且接近压缩空气的体积弹性模量;随着气泡在水中深度的增加及气泡半径的减小,弹性模量增大;半径较小气泡的弹性模量较压缩空气弹性模量大,大于压缩空气的体积弹性模量,小于水的弹性模量。气泡壁厚度随气泡半径的增大而变厚。半径较小的气泡,气泡壁厚度为半径1/100时可满足有限元分析的条件;半径较大的气泡,其计算结果比预设的1/100半径大,随着气泡半径的增大,分界面处形成水膜的厚度增加。

2) 气泡谐振频率由弹性模量和气泡壁厚度共同决定。气泡半径较小时,由于弹性模量变化很大,对谐振频率的影响较大,而气泡壁的厚度对谐振频率的影响较小;气泡半径增大后,由于弹性模量的减小,气泡壁的厚度对谐振频率起主要作用。气泡半径 $a_3=10^{-3}$ m时,气泡谐振频率主要由气泡壁的厚度决定,气泡壁厚度微小变化会引起谐振频率的剧烈波动;气泡半径 $a_1=10^{-4}$ m时,气泡壁变薄,弹性模量增大,气泡的谐振频率主要由弹性模量决定,弹性模量的变化会引起谐振频率的剧烈变化。

3) 谐响应分析要给定分析的起止频率,且范围越小,用时越短,结果越精确;模态分析的频率范围很大,但结果没有谐响应分析精确,综合两种分析方法可缩短分析的时间。

4) 给定结构模型相关材料属性参数和分析的起止频率,模态分析谐响应分析都可得到气泡弹性球壳模型的谐振频率,验证了模型的正确性。

2.5 耦合场中的谐响应分析

耦合场分析考虑流体-结构的相互作用。定义3种材料属性:与球壳结构相接触部分的材料单元为FLUID30,第一级有限声吸收边界材料单元FLUID130和第二级无限声吸收边界材料单元FLU-

ID30。水的材料属性定义: $EX_w=2.22 \times 10^{12}$ Pa, $DENS_w=1\ 030$ kg/m³, $PRXY_w=0.5$, $SONC_w=1\ 460$ m/s。在耦合场条件下气泡球壳模型谐响应分析结果相关参数如表3所示。

表3 气泡弹性球壳耦合场谐响应分析结果

球壳半径/mm	球壳厚度/ μm	弹性模量/MPa
0.1	1.0	0.886 0
0.3	3.0	0.887 0
1.0	24.7	0.151 9

起始频率/kHz	截止频率/kHz	谐振频率/kHz	频率理论值/kHz
40	50	40.400	40.400
10	20	13.472	13.500
4	5	4.040	4.040

比较表3、2可得,耦合场中有限元谐响应分析时考虑了流体-结构的相互作用,即处于流体介质的水中,施加的载荷通过流体介质作用于结构,而结构在载荷作用下的变形将同样影响周围流体介质的载荷。气泡处于水介质流体中,考虑耦合场条件下谐响应分析,在结构模型外加有限吸声边界和无限吸声边界;保证测量精度的前提下,所得气泡的弹性模量相较于非耦合场条件下的谐响应分析结果有所减小;气泡壁的厚度在气泡半径为 1.0×10^{-3} m时有所减小,其他2个半径的情况未变。

3 结束语

分析尾流中气泡的声学特性,建立气泡主动声特性模型,在此基础上建立气泡的弹性球壳或薄膜球壳模型。分析求解3个半径气泡的谐振频率,比较非耦合场和耦合场条件下的谐响应分析,与理论值比较可准确得到气泡弹性球壳的谐振频率,验证了水中气泡主动声特性的弹性球壳模型的正确性。

参考文献:

- [1] 刘伯胜,雷家焯.水声学原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2002:196-199.
- [2] 高江,张静远,杨力.舰船气泡尾流特性研究现状[J].舰船科学技术,2008,30(4):27-32.
GAO Jiang,ZHANG Jingyuan,YANG Li.The present situation of research on ship wake characteristic[J].Ship Science and Technology,2008,30(4):27-32.
- [3] 朱江江,陈伯义.水面舰船尾流气泡半径变化规律研究[J].热科学与技术,2005,4(2):146-149.
ZHU Jiangjiang,CHEN Boyi.Study of variation law of bubble radius in surface ship wake[J].Journal of Thermal Science and Technology,2005,4(2):146-149.

(下转第399页)