

空化噪声极值的确定*

黄景泉

(西北工业大学, 1992年11月16日收到)

摘 要

本文从理论上探讨了空化噪声极值出现的原因, 并给出确定物体空化噪声极值的初步方法

关键词 空化噪声 空化噪声极值

一、空化噪声的极值

实际测量结果表明^[1], 空化噪声存在着极值。对于确定的被绕流物体, 固定来流速度 v_∞ , 变换来流压力 p_∞ , 随着 p_∞ 的逐步减小, 空化噪声声压值 P , 由逐步增强继而转为逐步减小, 并在某一来流压力 $p_{\infty 0}$ 处成极值, 形如图1所示。

本文的目的在于从理论上探讨极值出现的原因, 并给出确定物体空化噪声极值的初步方法。

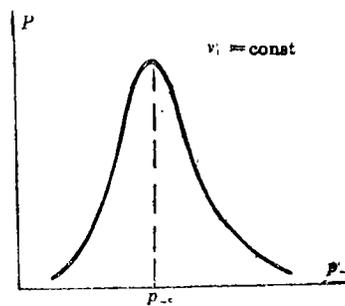


图1 空化噪声极值示意图

二、空化噪声的数学模型

流场中任意点 Q 处 (Q 与空泡群中心距离为 r), 由群体空泡溃灭所引起的噪声声压可以表示为^[2]:

$$P(t) = P_a \exp[i\omega_0 t] \quad (2.1)$$

其中 P_a 为群体空泡噪声声压幅值, 且有

$$P_a = \int_0^{T_0} N p(t) dt \quad (2.2)$$

N 为单位时间内被绕流物体表面所产生的空泡个数; $p(t)$ 为单个空泡溃灭噪声声压幅值随时间的变化函数; T_0 为空泡溃灭时间; ω_0 为 Q 点处噪声声压的中心角频率; t 为时间。

* 钱伟长推荐。

单个空泡溃灭阶段的泡壁速度和径向距离 r 处的噪声声压幅值可以表示为^[8],

$$\frac{dR}{dt} = \left\{ \frac{2}{3\rho} (p_\infty - p_v) \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right] - \frac{2p_1}{3(1-\gamma)\rho} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^8 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \frac{2\sigma}{\rho R} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$p(R, r) = \frac{\sigma}{r} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^8 - 3 \right] + \frac{(p_\infty - p_v)}{r} \left\{ \frac{4R}{3} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^8 - 1 \right] - \frac{R_0^3}{R^2} \right\} - \frac{p_1}{(1-\gamma)r} \left\{ \frac{4R}{3} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^8 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] - \frac{R_0^3}{R^2} + \frac{\gamma R_0^{3\gamma}}{R^{3\gamma-1}} \right\} \quad (2.4)$$

其中 R 为溃灭阶段的空泡半径; p_∞ 为来流压力; $p_v = p_v(T)$ 为泡内蒸汽压力; γ 为空气绝热系数; p_1 为溃灭起始时刻的泡内空气压力; R_0 为溃灭起始时刻的空泡半径; T 为液体温度; ρ 为液体密度; r 为由空泡中心计起的径向距离; $\sigma = \sigma(T)$ 为液体的表面张力。

联立求解式(2.3)及式(2.4), 即可得出给定距离处, 单个空泡溃灭阶段所产生的噪声声压幅值 $p(t)$ 。

由式(2.3)及(2.4)可见, 幅值 $p(t)$ 取决于 R_0 , T 及 p_∞ 。对于既定的 R_0 及 T , $p(t)$ 的值与 p_∞ 成正变关系(参见图2), 即随着 p_∞ 的逐步减小, 声压幅值 $p(t)$ 的值也随之逐步减小。

单位时间内被绕流物体表面所产生的空泡个数 N , 取决于液体的气核密度函数 $N(R)$ 和空化区的面积。对于确定的被绕流物体, 其减压系数 $\xi(x) = (p_\infty - p(x)) / \frac{1}{2} \rho v_\infty^2$ ($p(x)$ 为纵向坐标 x 处物体表面压力) 是恒定不变的。流动空化数 $\kappa = (p_\infty - p_v) / \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 \leq \xi(x)$ 的区

域即为空化区域 S (参见图3)。

对于确定的被绕流物体和恒定的来流速度 v_∞ 而言, 随着 p_∞ 的下降, κ 值逐步减小, 由图3可见, 空化区的面积将逐步增大, 从而 N 值将逐步增大。即值 N 与 p_∞ 成反变关系。

这样, 对于确定的被绕流物体和来流速度而言, 随着来流压力 p_∞ 的逐步减小, 一方面

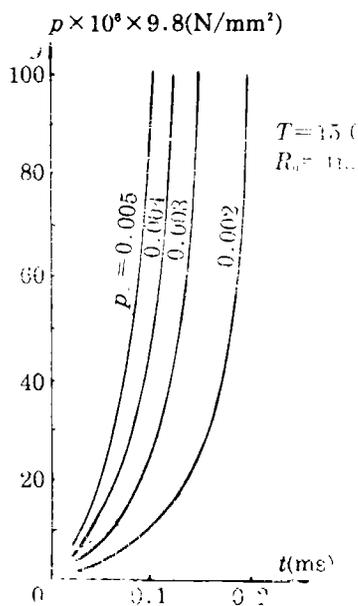


图2 $P(t) \sim p_\infty$ 变化关系图

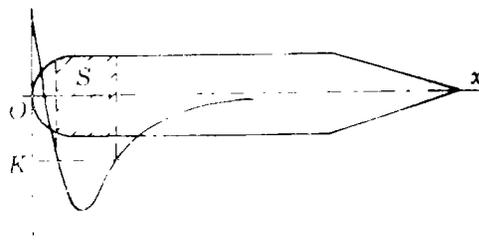


图3 空化数 κ 所应的对空化区

单个空泡的溃灭噪声声压 $p(t)$ 值将逐步减小，另一方面，被绕流物体所产生的空泡数目 N 值却又逐步增大。在某一恰当的 p_∞ 处，被积函数 $Np(t)$ ，从而群体空泡噪声声压幅值 P_a 达到极值(参见式(2.2))。这便是空化噪声极值出现的物理原因。

三、空化噪声极值的确定

为了方便，以某一迴转体的实际计算为例，给出确定极值的具体方法。

1. 设水温 $T=15^\circ\text{C}$ ，溃灭初始半径 $R_0=1\text{mm}$ ，来流速度 $v_\infty=11.7\text{ m/s}$ 。联立求解式(2.3)及式(2.4)，计算不同 p_∞ 下的 $p(t)$ 值。结果见表1。

2. 依表1计算不同 p_∞ 下的积分值 $\int_0^{T_0} p(t)dt$ ，其中 T_0 取空泡溃灭至 $R=0.1\text{mm}$ 时所对应的时间(即认为溃灭最小半径为初始半径 R_0 的10%)。其结果见表2及图4。

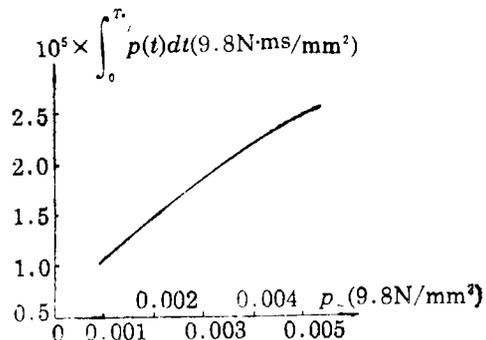


图4 不同 p_∞ 下的积分值

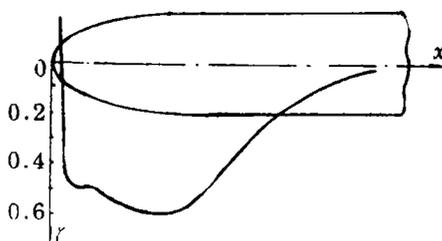


图5 迴转体减压系数曲线

3. 根据实测数值给出该迴转体的减压系数曲线(参见图5)，并依此求出不同 p_∞ 下，即不同空化数 κ 值所对应的物体空化区面积 S 。

设单位时间内(这里取ms)，空化区单位面积上所产生的空泡个数为一定值，并以 n 来表示，则有

$$N = ns = s \tag{3.1}$$

由于我们的目的是确定空化噪声的极值，而不考虑噪声强度的具体数值，因而可以取定

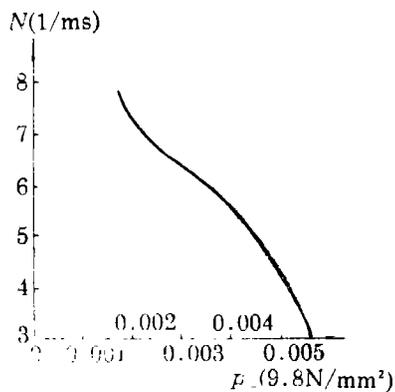


图6 $N \sim p_\infty$ 曲线

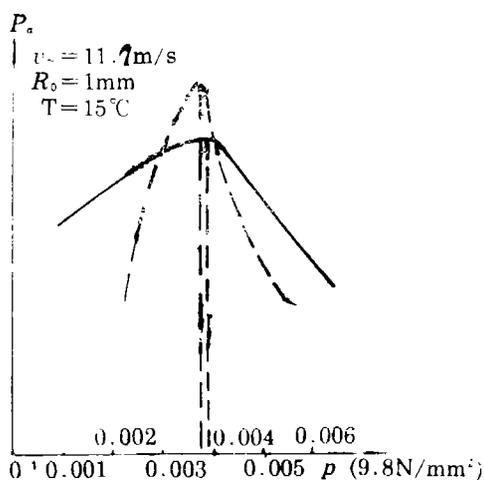


图7 某迴转体空化噪声幅值随 p_∞ 的变化

表 1

 $p(t) \sim p_{\infty}$ 值 ($T=15^{\circ}\text{C}$, $R_0=1\text{mm}$, $r=500\text{mm}$)

$R(\text{mm})$	$p_{\infty}=0.002$ ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)		$p_{\infty}=0.003$ ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)		$p_{\infty}=0.004$ ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)		$p_{\infty}=0.005$ ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)	
	p ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)	t (ms)						
0.95	8.23×10^{-7}	0.0138	1.27×10^{-6}	0.0111	1.72×10^{-6}	0.0096	2.17×10^{-6}	0.0085
0.90	1.75×10^{-6}	0.0278	2.71×10^{-6}	0.0224	3.66×10^{-6}	0.0193	4.62×10^{-6}	0.0172
0.85	2.82×10^{-6}	0.0417	4.36×10^{-6}	0.0336	5.89×10^{-6}	0.0289	7.43×10^{-6}	0.0258
0.80	4.07×10^{-6}	0.0556	6.28×10^{-6}	0.0448	8.49×10^{-6}	0.0386	1.07×10^{-5}	0.0344
0.75	5.55×10^{-6}	0.0696	8.56×10^{-6}	0.0561	1.16×10^{-5}	0.0483	1.46×10^{-5}	0.0430
0.70	7.33×10^{-6}	0.0835	1.13×10^{-5}	0.0673	1.53×10^{-5}	0.0579	1.93×10^{-5}	0.0516
0.65	9.53×10^{-6}	0.0974	1.47×10^{-5}	0.0785	1.99×10^{-5}	0.0676	2.51×10^{-5}	0.0602
0.60	1.23×10^{-5}	0.1113	1.90×10^{-5}	0.0898	2.57×10^{-5}	0.0772	3.24×10^{-5}	0.0688
0.55	1.59×10^{-5}	0.1252	2.46×10^{-5}	0.1010	3.32×10^{-5}	0.0869	4.19×10^{-5}	0.0774
0.50	2.08×10^{-5}	0.1391	3.21×10^{-5}	0.1122	4.34×10^{-5}	0.0966	5.46×10^{-5}	0.0860
0.45	2.75×10^{-5}	0.1530	4.25×10^{-5}	0.1234	5.75×10^{-5}	0.1062	7.24×10^{-5}	0.0946
0.40	3.74×10^{-5}	0.1668	5.78×10^{-5}	0.1346	7.81×10^{-5}	0.1158	9.84×10^{-5}	0.1032
0.35	5.28×10^{-5}	0.1806	8.14×10^{-5}	0.1457	1.10×10^{-4}	0.1255	1.39×10^{-4}	0.1118
0.30	7.83×10^{-5}	0.1944	1.21×10^{-4}	0.1569	1.63×10^{-4}	0.1351	2.06×10^{-4}	0.1204
0.25	1.25×10^{-4}	0.2082	1.94×10^{-4}	0.1680	2.62×10^{-4}	0.1447	3.30×10^{-4}	0.1290
0.20	2.26×10^{-4}	0.2219	3.48×10^{-4}	0.1791	4.71×10^{-4}	0.1543	5.94×10^{-4}	0.1375
0.15	4.93×10^{-4}	0.2355	7.61×10^{-4}	0.1902	1.03×10^{-3}	0.1639	1.30×10^{-3}	0.1461
0.10	1.55×10^{-3}	0.2490	2.40×10^{-3}	0.2012	3.24×10^{-3}	0.1734	4.08×10^{-3}	0.1546

表 2

不同 p_{∞} 下的积分值

p_{∞} ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)	0.002	0.003	0.004	0.005
$\int_0^{T_0} p(t) dt$ ($9.8\text{N}, \text{ms}/\text{mm}^2$)	1.5266×10^{-3}	1.9143×10^{-5}	2.2351×10^{-5}	2.5150×10^{-5}

表 3

不同 p_{∞} 下不 N 值

p_{∞} ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)	0.002	0.003	0.004	0.005
N (1/ms)	7.357	6.296	5.564	3.957

表 4

不同 p_{∞} 下的 P_0 值

p_{∞} ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)	0.002	0.003	0.004	0.005
P_0 ($9.8\text{N}/\text{mm}^2$)	11.2312×10^{-5}	12.0524×10^{-5}	12.436×10^{-5}	9.9519×10^{-5}

$n=1$ (因此文中表 3、表 4 所列数值均为相对值, 不表示真实数值)。具体计算结果见表 3 及图 6。

4. 在确定的 p_{∞} 下, N 为常值。因而群体空泡噪声声压幅值 $P_a = \int_0^{T_0} N p(t) dt = N \int_0^{T_0} p(t) dt$, 并可由表 2 及表 3 求得。其结果见表 4 及图 7。

应用图 7 即可确定该迴转体的空化噪声极值为 $p_{\infty} = 0.0039 \times 9.8 \text{N/mm}^2$, 而实测极值为 $p_{\infty} = 0.0038 \times 9.8 \text{N/mm}^2$ 。二者基本相符。

参 考 文 献

- [1] 黄景泉等, 空化噪声的实验研究, 水动力学研究与进展, 3(4)(1988), 8.
- [2] 黄景泉, 空化噪声极值的探讨, 全国水动力学研讨会文集, 第一卷(1992), 354.
- [3] 黄景泉, 空泡起始和溃灭阶段的噪声, 应用数学和力学, 11(8)(1990), 725.

Determination of Cavitation Noise Limiting Value

Huang Jing-chuan

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an)

Abstract

In this paper the cause of cavitation noise limiting value is analyzed, and the determining method of cavitation noise limiting value of body is given.

Key words cavitation noise, cavitation noise limiting value