

# 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<sup>[1]</sup>, 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  $v_\infty$ , 变换来流压力  $p_\infty$ , 随着  $p_\infty$  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。

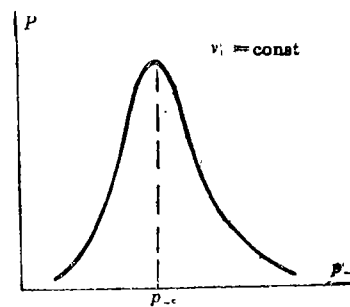


图1 空化噪声极值示意图

## 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<sup>[2]</sup>:

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

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;  $\omega_0$  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<sup>[8]</sup>,

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

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

其中  $R$  为溃灭阶段的空泡半径;  $p_\infty$  为来流压力;  $p_v = p_v(T)$  为泡内蒸汽压力;  $\gamma$  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;  $\rho$  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  $p_\infty$ 。对于既定的  $R_0$  及  $T$ ,  $p(t)$  的值与  $p_\infty$  成正变关系(参见图2), 即随着  $p_\infty$  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  $v_\infty$  而言, 随着  $p_\infty$  的下降,  $\kappa$  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  $p_\infty$  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  $p_\infty$  的逐步减小, 一方面

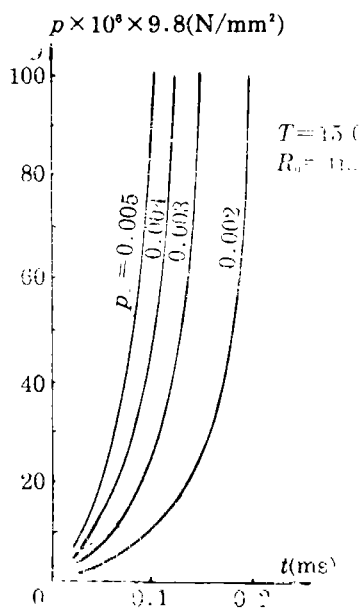


图2  $P(t) \sim p_\infty$  变化关系图

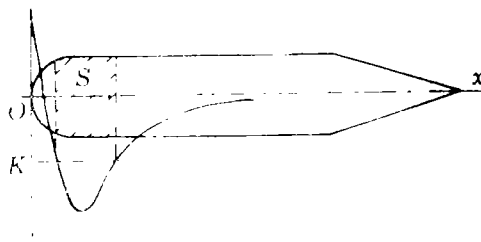


图3 空化数  $\kappa$  所应的对空化区

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  $p_\infty$  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  $p_\infty$  下的  $p(t)$  值。结果见表1。

2. 依表1计算不同  $p_\infty$  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。

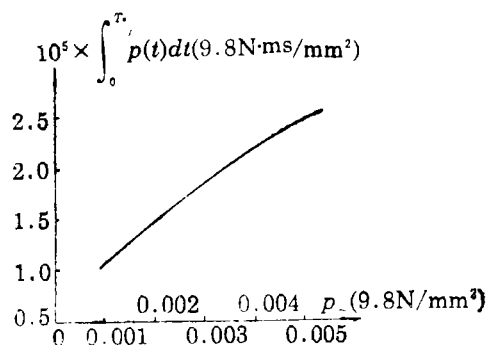


图4 不同  $p_\infty$  下的积分值

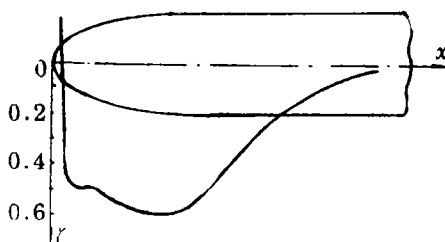


图5 迴转体减压系数曲线

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  $p_\infty$  下，即不同空化数  $\kappa$  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

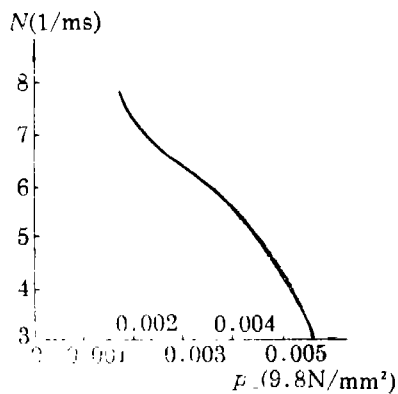


图6  $N \sim p_\infty$  曲线

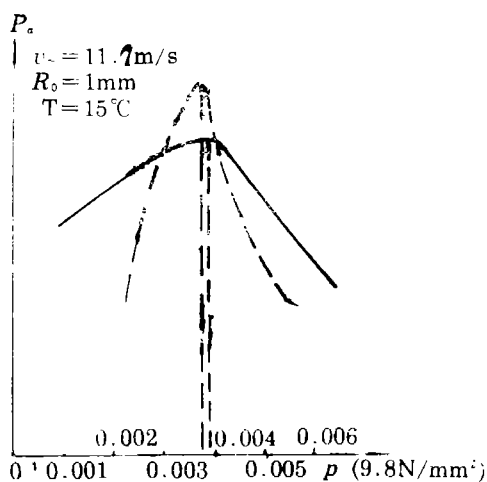


图7 某迴转体空化噪声幅值随  $p_\infty$  的变化

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

表 2

不同  $p_{\infty}$  下的积分值

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

表 3

不同  $p_{\infty}$  下不  $N$  值

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

表 4

不同  $p_{\infty}$  下的  $P_0$  值

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

$n=1$  (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  $p_{\infty}$  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