

均流与非均流中螺旋桨空泡噪声的研究

魏以迈

(中国船舶工业总公司船舶研究中心)

本文对螺旋桨产生的不同类型空泡的噪声特性作了详细描述。分析比较了螺旋桨在均流与非均流中空泡起始、发展过程中噪声量级的变化关系,提出了非均流中抑制梢涡空泡和毂涡空泡出现的螺旋桨叶梢、叶根螺距的近似估算公式,最后对侧斜不同的螺旋桨在非均流中对空泡噪声的影响作了比较。

前 言

关于螺旋桨空泡噪声研究的历史,文献(1)已作了较详细的回顾与评论,近年来,各国研究工作者利用空泡水筒试验设备。对螺旋桨空泡噪声作了不少有成效的研究工作(2)(3)(4),不过这些试验研究着重于解决水筒内螺旋桨空泡噪声的测试方法与噪声模拟。

本文的目的在于通过水筒试验。对螺旋桨产生的不同空泡类型的噪声特性作一详细的描述。对螺旋桨在均匀及非均匀流场中空泡起始、发展与产生的噪声谱级进行深入的分析比较,并结合螺旋桨的设计参数,求得抑制空泡产生的某些定量关系。供螺旋桨设计时作为降低空泡噪声的依据。

一、研究概述

根据单个空泡理论,螺旋桨空泡噪声谱可由两部分组成:一是汽化空泡体积变化并受到桨叶旋转频率的调制而产生的,它构成空泡噪声谱中较低的频率成份;二是汽化空泡在崩溃的最后瞬间形成激波而产生的,它主要对频谱的高频部分作出贡献。因此,螺旋桨空泡噪声谱是一种频率范围相当宽广的连续谱。实际上,螺旋桨在船后非均匀伴流

场中工作,空泡的起始、发展与均匀流场中工作的螺旋桨不同,两者相应的噪声谱级也有差异。并且螺旋桨运转时还会产生诸如旋涡、片状、泡状等不同类型的空泡,它们辐射的噪声谱级以及螺旋桨设计参数对空泡起始、发展的影响等,这些目前都未作过研究比较,还没有定量概念。关于空泡水筒内的噪声测试方法,这里不作介绍,可见参考文献(5)。

试验研究的螺旋桨模型共有5个,都在相同负荷条件下设计:

模型桨PA——叶梢与叶根螺距都作降低,以抑制涡空泡的出现。

模型桨PB——叶梢无载,叶根加载,叶剖面厚度较大,以期产生泡状空泡。

模型桨PC——根据最佳螺旋桨效率设计。

另外,为了研究螺旋桨侧斜对噪声的影响,以侧斜 36° 的PA桨为母型,取无侧斜的 PA_1 桨和侧斜 54° 的 PA_2 桨。

水筒中的非均匀流场是用螺旋桨前置放金属丝网格模拟某双桨实船的船后轴向伴流场而成的。

在水筒模拟伴流场中进行空泡试验,取相当船速 V_s 作为进速,根据伴流模拟的结果, $V_s=3.5$ 米/秒。因此水筒中以相当船速表示的进速系数及空泡数分别为:

$$J_s = \frac{V_s}{n \cdot D}; \quad \sigma_s = \frac{P_0 - P_v}{(1/2) \cdot \rho \cdot V_s}$$

其中 D ——桨模直径;
 n ——桨模转速;
 P_0 ——桨轴中心静压;
 P_v ——水的饱和蒸汽压
 ρ ——水的密度。

水筒中均匀流场的空泡试验,按常规取工作段内的水速 V_p 作为进速,则:

$$J_p = \frac{V_p}{n \cdot D}, \quad \sigma_p = \frac{P_0 - P_v}{(1/2) \cdot \rho \cdot V_p}$$

测量噪声的水听器置于桨盘面位置水筒右侧壁面的注水腔室内,腔室的接收面与水筒内壁表面齐平,上面开有小孔。测量系统的仪器配置如图1所示。整个试验过程中,噪声测量的频率范围,定为800赫~40千赫。

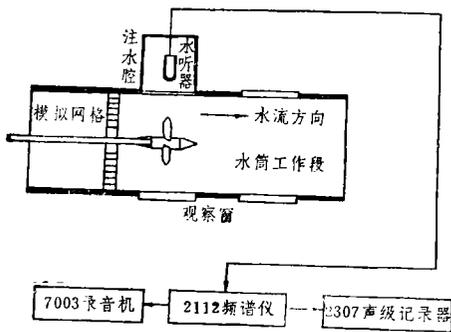


图1 水筒测试示意图

为了使噪声测量的数据较为稳定可靠,在测试前先对筒内的水质进行除气处理,测试过程中筒内的相对空气含量基本保持在0.7左右。

为了提取螺旋桨的空泡噪声讯号,还卸去螺旋桨,重复空泡数与进速系数,测量水筒内的固有噪声,根据声压的迭加原理。最后得到螺旋桨的空泡噪声声压级。

二、不同空泡类型辐射的噪声

螺旋桨在水中空化时,通常在桨叶上会

出现不同类型的空泡,这往往与螺旋桨的设计参数有关。对它们辐射的噪声作一机理性的描述并进行比较,这对要求降低空泡噪声的螺旋桨设计,具有一定的实际意义。

1. 旋涡空泡

借助于频率同步闪光仪。我们可在空泡水筒中观察到螺旋桨形成这种旋涡空泡大致有这样的过程:首先是在叶梢或桨毂稍后处看到很细的间断亮线,在桨后稍远处即刻消失,这是由于溶解在水中的空气在涡核中的某一临界压力下开始析出成了很小的气泡之故。这时压力和速度都不稳定,因而形成很细、时有时无的间断亮线。随着桨转速的提高,涡核中的压力进一步降低。这些小气泡不断增长而且变得较为稳定,在叶梢或桨毂稍后处逐渐形成一条可见的连续亮线。转速再进一步提高,涡核中的压力降到水的饱和蒸汽压,这时可见的连续亮线前移与叶梢或桨毂相接,形成涡空泡线。实际上在作声学测量时,观察到间断亮线前的某个时刻,记录的噪声讯号已开始出现不稳定性跳跃与波动,这是由于水中的自由气核进入涡核中心而开始增长所致。综上所述,螺旋桨旋涡空泡噪声形成的机理可假设成这样三部分:

- (1) 水中自由气核进入涡核中心,在涡核压力场降低时,它们迅速增长,产生噪声。
- (2) 涡核中心的压力降低到某一临界压力,水中溶解的空气开始析出形成小的气泡,产生噪声。
- (3) 当涡核中心的压力进一步降到水的饱和蒸汽压时,就完全形成旋涡空泡。

空气从水中析出的临界压力是与水中的相对空气含量及水温密切相关,而且在淡水与海水中的情况也不一样。例如在海水中,当水温 $t=15^\circ\text{C}$ 和相对空气含量 $a/a_s=1.0$ 时,空气从水中析出的临界压力为:

$$P_c = 3250 \text{ 公斤/米}^2$$

在同样条件的淡水情况下,空气从水中

析出的临界压力为：

$$P_c = 2650 \text{ 公斤/米}^2$$

由此可以推断，海水中空气析出的时间早于空气从淡水中析出的时间。因此在淡水中作螺旋桨模型噪声试验时，除了要满足流体力学相似准则外，为了能更准确地从模型试验结果判断空泡起始的工作点，必须将模型置于较高的空气含量中进行试验。但从噪声强度而言，空气含量对噪声的测量影响也是非常显著的，因此在模型的噪声测试中，除了在确定空泡起始工作点时需要采用较海水为高的空气含量外，在测量模型的噪声强度时，必须采用与海水相当的空气含量，这一点对预报螺旋桨噪声特别重要。

在试验观察同时，测量了各桨旋涡空泡起始过程的噪声级，发现趋势都基本相似。图2、图3分别表示了均流与非均流中梢涡空泡和毂涡空泡起始过程的噪声级的变化。从

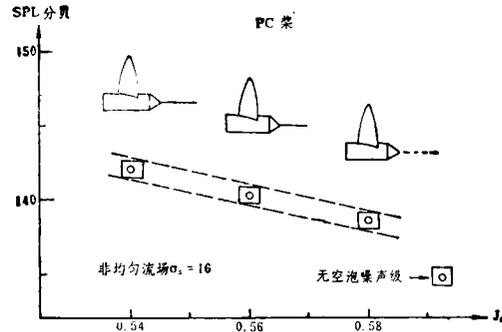
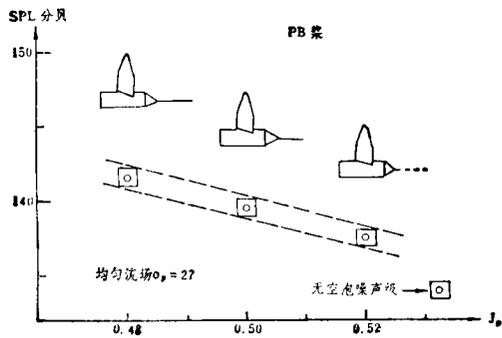


图3 毂涡空泡起始过程的噪声级变化

图中看出。梢涡或毂涡空泡起始发展的噪声级随进速系数的降低或转速的提高而增加。从间断亮线开始到涡空泡线与叶梢或桨毂相接止，在这一起始过程中转速约提高8%。(梢涡空泡噪声级约增加7分贝；毂涡空泡噪声级约增加4分贝。)由此可以得出，梢涡空泡的起始，噪声级上升的速率比毂涡空泡的快，这是由于毂涡空泡处于较稳定的低压场之故。

试验还得出，与无空泡噪声级相比，梢涡空泡刚起始成间断亮线时，噪声级约上升6分贝左右，而毂涡空泡约上升4分贝左右。因此从无空泡到空泡起始，噪声级有一个突跃，这往往可以用来判断螺旋桨是否产生空泡。从而确定出螺旋桨空泡起始的临界工作点。

图4还表示了相同空泡数条件下，梢涡空泡噪声频谱与毂涡空泡噪声频谱之比较，

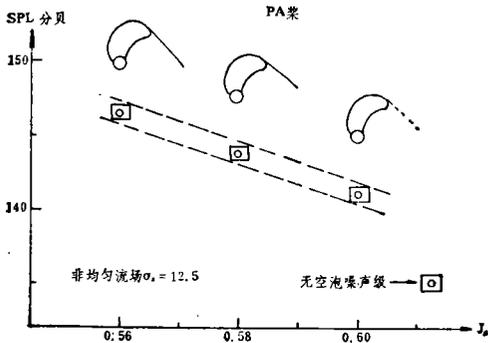
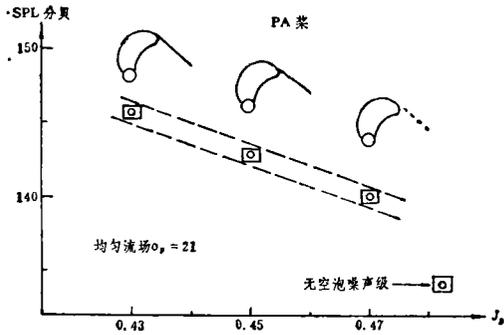


图2 梢涡空泡起始过程的噪声级变化

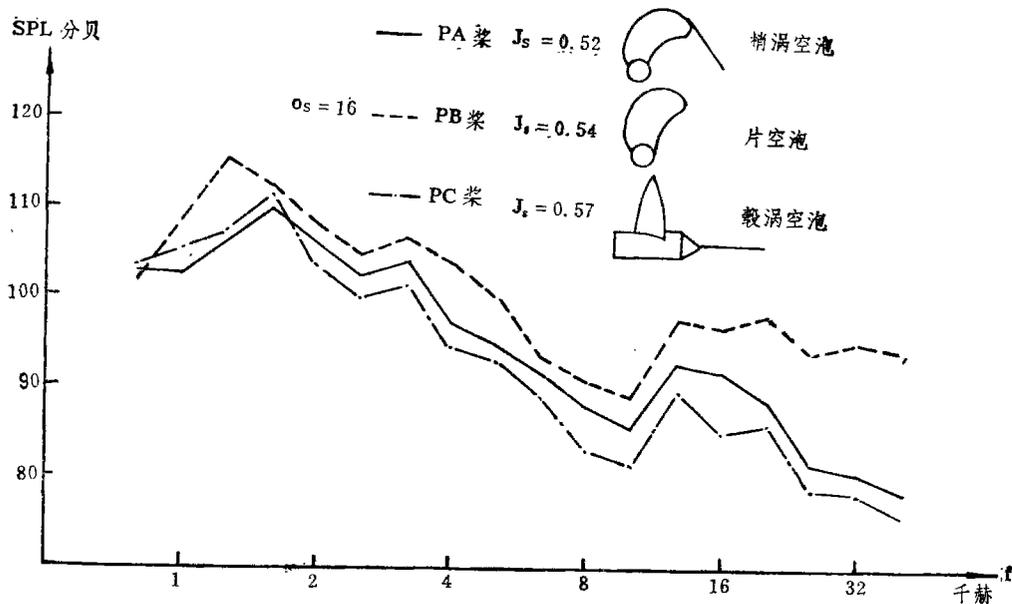


图4 不同类型空泡起始的噪声频谱比较

两者谱形基本相似，只是频率在4千赫以上较高频段中，梢涡空泡噪声的谱级高于毂涡空泡噪声的谱级。

2. 片状空泡

这是螺旋桨中最常见的一种空泡类型。根据水筒试验的观察。它往往可由梢涡空泡逐渐向近叶梢剖面的导边附近发展而成或在某半径位置的导边附近起始产生。随着桨转速的提高，它向桨叶导边及内半径剖面延伸，连成透明的膜片状，桨叶上看不到单个空泡的存在。因为当剖面攻角增大时，桨叶叶背导边附近的负压很高，压力梯度很大，空泡陡然发生已见不到其成长的过程。片空泡不仅会在叶背产生，当负攻角时也会在叶面导边附近产生，即所谓面空泡。图4表示了这种空泡起始时的噪声频谱，它与涡空泡起始（涡空泡成线）比较，其噪声谱级来得大，尤其是高频部分，相差特别显著。总噪声级大约可高出2~4分贝。这可能是由于片空泡到达正的崩溃压力区时间短，空泡崩溃迅速，而旋涡空泡在负压区的时间比较长，并有气体渗入，因此崩溃释放的能量小。

当片空泡发展到导边时，由于该处相当

于后驻点，局部压力升高，从而使空泡尺度迅速收缩并崩溃分裂成许多微小的空泡，这时导边附近可观察到一片泡沫雾状似的空泡曳向桨的下游，其噪声级随之急骤升高，因此所设计的桨应尽量避免在这种情况下工作。

3. 泡状空泡

当桨叶剖面导边附近未出现负压峰时，压力最低处大致在叶背最大叶厚附近，此处产生的空泡由于前后压力变化比较缓和，单个空泡的成长清晰可见，有时可以成长到相当尺度成一球形，然后迅速崩溃。因此泡状空泡一般在叶背上叶剖面最大厚度处产生。水筒试验观察到泡状空泡往往与片状空泡共同生成，在导边附近产生片状空泡，而在叶背中部区域形成大小不一的球形泡状空泡，它们在频闪仪的照射下，在不断地闪烁、破灭、再生。由于这种大大小小的泡状空泡单个存在，不成片，且球泡的尺寸可成长得较大，因此它们一旦闭合破灭，释放的能量也特别大，所以这种泡状空泡产生的噪声级也很高，对桨叶的剥蚀也非常严重。

图5，表示了泡状空泡和片状空泡在相同

空泡面积与相同进速系数条件下噪声谱级的比较。从图中可得出，无论是空泡面积相等或进速系数相同，泡状空泡的噪声谱级在低频与高频中均比片状空泡噪声谱级强，总声级约可高出4~6分贝。在螺旋桨设计中，总是要使设计的桨尽量避免出现这种泡状空泡。

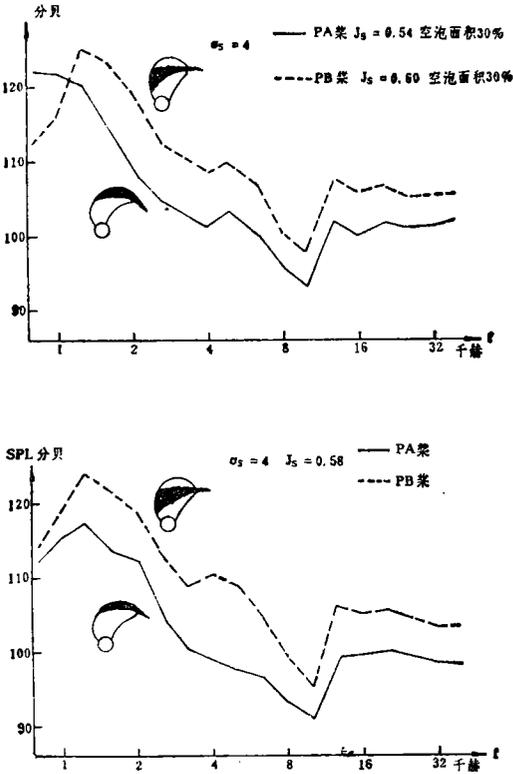


图5 泡状空泡与片状空泡噪声频谱的比较

三、均匀与非均匀流场中空泡噪声的比较

船后螺旋桨一般是在非均匀伴流场中工作，它与敞水螺旋桨在均匀流场中工作完全不同，这时桨盘平面上的伴流分布变化非常大，使得桨叶剖面在不同半径及周向位置上的进速差别十分悬殊。伴流大，则进速低；伴流小，则进速高。在本文描述的模拟伴流场试验中，桨叶旋转一周，桨盘平面上的进速可从船速的85%变化到船速的50%左右。一般

来说，船后是一个不均匀的三向伴流场。即包括轴向伴流、切向伴流和径向伴流。但对螺旋桨空泡噪声特性影响最大的是轴向伴流沿周向的变化，这种影响主要表现为以下两个方面：

1. 空泡起始提前。因为一般螺旋桨设计是以平均轴向伴流为依据，试验也往往在均匀流场中进行，因此在试验中观察到，各桨叶上是同时产生空泡，同时发展空泡。而在船后工作的螺旋桨却不一样，往往在周向某一高伴流处先出现空泡，而在其他周向位置却无空泡，甚至在低伴流处出现面空泡。本文作了均匀与非均匀流场空泡起始的比较试验，图6就是以PA桨为例，根据目测得到的空泡起始曲线。图的左边部分绘制的曲线是代表PA桨在均流中的梢涡空泡起始的起始空泡数与进速系数的关系。根据常规方法，估算船后空泡起始往往是用以下步骤进行：

按均流中的空泡数 σ_p ，换算成船速表示的空泡数 σ_s ，即

$$\sigma_s = \sigma_p (1 - \bar{W})^2$$

其次把均流中起始空泡数相对应的工作点 J_p ，换算成以船速表示的 J_s ，即

$$J_s = \frac{J_p}{(1 - \bar{W})}$$

式中 \bar{W} 为平均轴向伴流分数，根据PA桨模型试验结果 $\bar{W} = 0.245$

图6，右边用虚线表示的就是根据以上换算，预估得出的非均流中的空泡起始曲线。但从模拟伴流中真正观察到的空泡起始即为图6右边的实线表示。因此从图中得出，实际的起始空泡数要比预估的提高32%左右。

由于均流试验中的工作点 J_p ，是以平均轴向伴流来确定的，与实际船后伴流分布相差甚大，因此桨盘平面上各周向位置上的局部进速系数以及相应的起始空泡数也随之会有很大的变化。若船后伴流分布非常不均匀，这时空泡起始的实际船速有时可比预估的低50%左右。这里对轴向伴流分数在桨叶外半

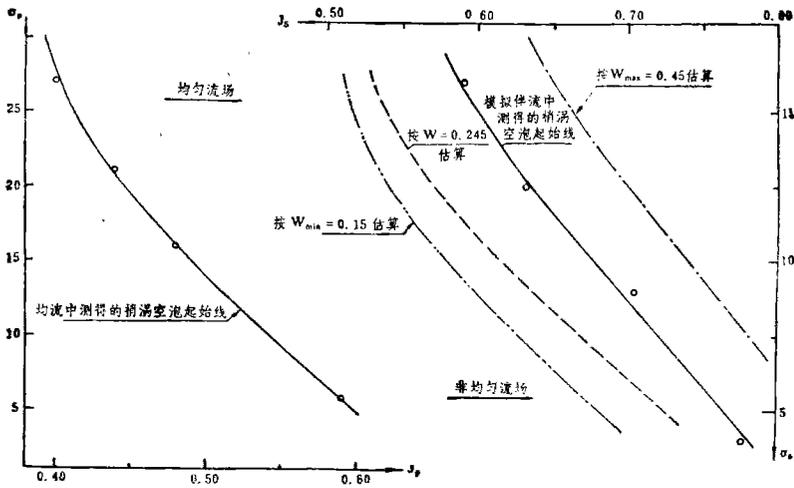


图6 PA 桨在均流与非均流中的稍湍空泡起始曲线

径的周向最大变化值作如下的假定:

$$W_{\max} - W_{\min} > 0.65$$

认为流场的不均匀性特别严重, 称强伴流场, 此时实际的空泡起始速度可能要比均流试验结果估算的低40%以上。

$$W_{\max} - W_{\min} = 0.35 \sim 0.55$$

称适中伴流场。实际的空泡起始速度可能比估算的低20%~30%左右。

$$W_{\max} - W_{\min} < 0.20$$

称弱伴流场。即流场较为均匀, 此时实际的空泡起始速度可能比估算的低10%左右。

2. 提高空泡噪声的强度。由于流场的不均匀性, 当桨叶进入高伴流区时, 叶剖面的攻角增大, 就会出现空泡或加剧空泡, 随着桨叶离开高伴流区, 叶剖面攻角减小, 空泡又消失或减少。这种时生时灭, 时大时小的非定常空泡, 辐射声能相对于均流中的定常空泡要来得大。这是因为桨叶在非均流中旋转时, 叶剖面上的压力瞬息变化加速了空泡的脉动与崩溃, 并受到桨叶叶频的强烈调制, 因此低频分量加大更为显著。图7是PB桨和PC桨在推力负荷相等条件下, 作均流与非均流中空泡噪声频谱的比较。图中看出, 高频部分的谱级, 均流比非均流的稍低。但在2.5千赫以下的较低频率部分, 非均流中的

谱形幅值比均流中的显著增大, 并且峰值较为陡峭, 而均流中的谱形峰值较为平坦。这证实了流场的不均匀性将会加强空泡噪声低频部分的辐射声能。

根据图中谱形, PB桨在非均流中工作比均流中工作的空泡噪声级约高3分贝。PC桨比较, 约高5分贝。

螺旋桨空泡噪声在均流与非均流中随转速的变化已在试验过程中作了观察与记录, 它们的比较从图8清晰可见。我们发现无论在均流或是非均流中, 只要桨叶上空泡一旦起始, 噪声级随转速的增高上升得非常迅速, 几乎成一陡峭的直线, 但当转速再继续增高, 桨叶上空泡充分发展时, 噪声级就上升得较为缓慢, 最后趋于某一极限。这可能由于空泡充分发展时, 桨叶上曳出大量的空泡, 螺旋桨周围被这无数的汽泡空泡所包围, 吸收和屏蔽了一部分声能, 改变了声传布的特性。当周围的汽泡空泡越多时, 吸收的声能也越多, 最终使辐射噪声级的上升减慢下来, 趋于某一饱和状态。

在不同空泡数情况下所作的试验都同样显示了上述特性, 见图9中描绘的一组曲线。这样就可把空泡起始到空泡充分发展过程中噪声级的增加分成二个阶段: (1)空泡起始、

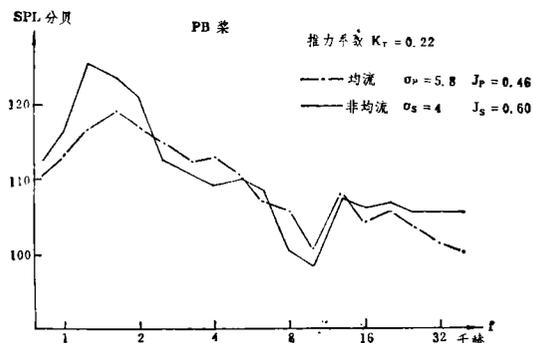
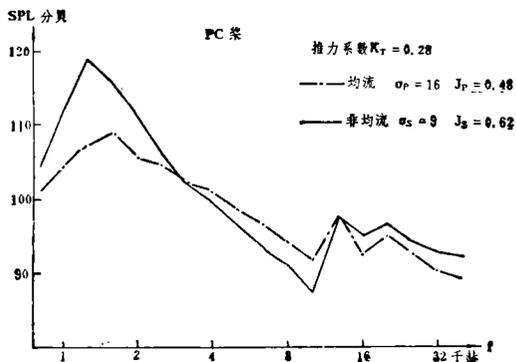


图7 均流与非均流中空泡噪声频谱比较

发展、噪声级成陡峭直线迅速上升阶段；(2)空泡充分发展噪声级缓慢上升趋于某一板限阶段。这两个阶段的过渡点可以这样确定：从空泡发展的观察中发现，当空泡从桨叶上大量曳出并绞成辫状时起，噪声级上升就开始缓慢下来，因此该时的转速可定为过渡点。另外，从试验结果分析也得到，当空泡起始的临界转速 n_c 一旦确定，则过渡点的转速 n_t 一般是临界转速的 1.38 倍左右。用公式表示即：

$$n_t \approx 1.38n_c$$

至于空泡噪声的极限值，不同螺旋桨是不相同的。但从 PA、PB、PC 桨的试验中发现，无论在均流或非均流中，不同空泡数条件下这个渐近极限值与空泡起始前一点的声级之差近似为一个不变的值（见图 8），即从空泡刚要起始到空泡充分发展时，噪声级上升的量级约在 30 分贝左右。因此可以推

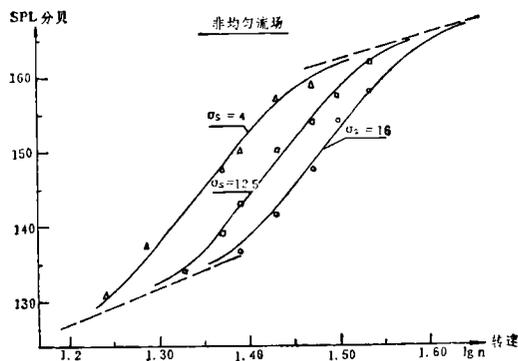
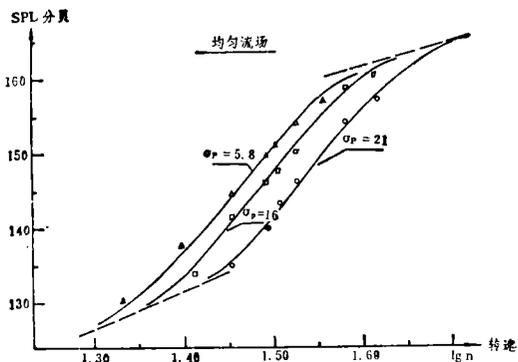


图8 螺旋桨空泡噪声级随转速的变化

断，只要空泡起始前一点的噪声级已知，若假定为 L_0 ，那末此桨在空泡充分发展时的噪声级可近似表示为：

$$L \approx L_0 + 30\text{dB}$$

或者此桨梢涡空泡的起始点的声级已知为 L_1 ，那末

$$L \approx L_1 + 24\text{dB}$$

因为从前一节得知，梢涡空泡起始的声级比空泡起始前一点的声级约高 6 分贝。

从图 8 还可以看到，各不同空泡数下，从空泡刚要起始到空泡发展阶段（过渡点之前），噪声级的增加几乎都成平行直线，因此对这一阶段的空泡发展，可假定其辐射的声压 P 与转速 n 成近似的幂次关系，即：

$$P \approx C_1 \cdot n^x \quad C_1 = \text{常数} \quad x = \text{待定幂指数}$$

根据图中的试验数据，可用下式求出幂指数 x ：

$$x = \frac{SPL_2 - SPL_1}{20 \cdot (\lg n_2 - \lg n_1)}$$

在均流中得: $x \approx 7.1$; 在非均流中得: $x \approx 7.6$

这说明在空泡初始至空泡发展阶段, 非均流中空泡噪声级随转速的变化速率要比均流中的高一些。

根据参考文献^[6], 当桨叶上一旦产生空泡, 在空间某一点上产生的声压可表示成:

$$P \approx \frac{\rho C N_0 R_0^3 P_0}{r}$$

其中: N_0 ——单位时间内桨叶上产生的空泡数目;
 R_0 ——空泡的最大尺度;
 P_0 ——空泡周围的静压;
 ρ ——水的密度;
 C ——水中声速;
 r ——观测点的距离。

从空泡理论得知, 桨叶上空泡尺度与桨叶剖面上的压力降成比例, 而剖面的压力降又与桨叶的进流速度平方或桨叶转速的平方成比例, 因此 $R_0 \sim n^2$ 。

单位时间内桨叶上产生的空泡数目 N_0 , 一般认为与转速成比例, 即 $N_0 \sim n_0 \rho \cdot C$ 是不变的常数, 测量点固定, 即 r 不变。因此当静压 P_0 (或空泡数) 一定时, 声压

$$P \sim N_0 R_0^3 = n \cdot (n^2)^3 = n^7$$

此分析的结果与上述试验结果得出的关系基本一致。

在空泡充分发展阶段, 图 8 所示的各噪声级曲线都逐渐趋向于图中上方以虚线表示的渐近极限线。这一阶段的辐射声压, 以这渐近极限线估算, 大致与转速成 1.5 次幂的关系, 即:

$$P \approx C_2 \cdot n^{1.5}, \quad C_2 = \text{常数}$$

根据此式得知, 转速每增加一倍, 噪声级约增加 9 分贝。

在螺旋桨未产生空泡阶段, 螺旋桨的噪

声主要是由于桨叶上的不稳定载荷所引起, 在声学上它完全可用声偶极子来处理。这种偶极子型声源在空间某一距离 r 上产生的辐射声压可表示成^[7]:

$$P = \frac{dF}{dt} \cdot \cos\theta \cdot e^{-ikr} / 4\pi r C$$

式中: F ——随时间而变化的作用力;
 θ ——作用力 F 与距离 r 之间的夹角。
 k ——波数。

若以螺旋桨推力 T 表示上式中的作用力, 设 $T = T_0 \cdot e^{i\omega t}$, $\omega = 2\pi f = 2\pi m \cdot B n$

B ——桨叶数 n ——桨转数

m ——谐波的阶数, 并以推力系数 $K_{T_0} =$

$\frac{T_0}{\rho n^2 D^4}$ 代入, 最终得声压

$$P = \frac{i\rho D^4 \cdot m B \cdot n^3 \cdot K_{T_0} \cdot \cos\theta}{2rC} \cdot e^{i(2\pi m B n - kr)}$$

从此式得知, 螺旋桨在无空泡阶段所辐射的声压与桨转速成三次幂的关系, 即:

$$P \sim n^3$$

也就是转速每增加一倍, 噪声级约增加 18 分贝。

以上对螺旋桨无空泡, 空泡起始发展及空泡充分发展三个阶段中声压与转速关系的分析可以推断, 对于一个新设计的螺旋桨, 只要螺旋桨临界转速空泡起始点的噪声级确定, 就有可能预报螺旋桨随转速变化的全部噪声级。

空泡噪声的频谱形状, 在均流与非均流中基本相似, 这从图 8 可以得出。两者的频谱均有明显的峰点, 不过均流中的较为平坦, 而非均流中的却比较陡峭。过了峰点后两者的谱级均随频率的增加迅速衰减, 这种变化关系可根据连续噪声频谱的表示法求得, 这时声强 I 可表示为:

$$I = \frac{b}{f^x}$$

其中 b 和 x 是待定系数, f 是频率。

上式取对数后得: $SPL = 10 \lg b - 10x \lg f$, 设相应于频率 f_1 及 f_2 的声压级 SPL 已知, 最后得到:

$$x = \frac{SPL_1 - SPL_2}{10(\lg f_2 - \lg f_1)}$$

$$\lg b = \frac{SPL_1 \cdot \lg f_2 - SPL_2 \cdot \lg f_1}{10(\lg f_2 - \lg f_1)}$$

根据试验结果的数据, 过峰点后, 频率从 2 千赫到 10 千赫范围内, 均流中求得 $x \approx 2.1$, 非均流中 $x \approx 2.6$ 。这与典型的空泡噪声谱过峰点后声强与频率成 $f^{-2.5}$ 的关系一致, 也即每倍频程, 声级衰减 7.5 分贝左右。频谱中频率过 12.5 千赫后, 均流中声强与频率大致成 f^{-1} 的关系, 即每倍频程声级衰减 3 分贝左右, 而非均流中衰减却更缓慢。

四、螺旋桨叶梢、叶根负荷对空泡噪声的影响

螺旋桨空泡噪声一般总是与空泡的起始联系在一起, 因此设计螺旋桨时, 尽量设法抑制或延迟空泡起始, 以求降低螺旋桨的噪声。按常规的设计方法, 沿桨叶径向的环量分布往往选择最佳的椭圆形式, 以获得最高的推进效率, 但这样设计出的桨在近叶梢或桨毂处负荷偏大, 很容易产生涡空泡。为了推迟涡空泡的出现, 目前采取梢部和毂部附近卸载, 降低螺距的方法。但卸载又不能过多, 否则适得其反。不仅影响桨的效率, 而且导致面空泡或桨叶其他部位产生空泡。本文中的 PA、PB、PC 桨就是按不同要求设计的, 试验结果充分证实了上述看法。PB 桨由于叶梢螺距降低过甚, 在设计工作点附近叶梢滑脱比 $S_{pt} = 1 - J_p / \left(\frac{H}{D} \right)_{\bar{r}=1.0} = 1 -$

$$\frac{0.44}{0.46} \approx 0, \text{ 桨毂附近的螺距过高, 结果它与}$$

其他两桨比较, 在低空泡数时最早出现叶面梢涡空泡, 在较高的空泡数下最先在桨叶叶背中部前缘位置上出现片空泡, 然后在叶背中部出现泡状空泡, 并且它的毂涡空泡一直比较强烈。PA 桨由于叶梢、叶根卸载合适, 因而它最迟出现梢涡空泡, 而毂涡空泡在整个试验过程中几乎不出现。

从螺旋桨效率方面来看, PB 桨由于叶梢卸载过多, 与 PC 桨比较效率损失将近 10%。PA 桨与 PC 桨比较, 效率损失约为 4%。

三桨的螺声性能, 以 PA 桨为最佳, 最差是 PB 桨, 两者在设计工作点附近螺声级可相差 10 分贝左右。

根据上述比较, 对螺旋桨设计提出这样一个问题: 如何确定设计桨的叶梢、叶根负荷或者螺距, 使其在工作点附近不出现梢涡空泡与毂涡空泡。从而降低螺旋桨的噪声, 也即兼顾噪声与效率, 使叶梢、叶根卸载合适。

一般知道, 螺旋桨梢涡空泡的起始与叶梢附近剖面的攻角或者近似地与叶梢滑脱比有关。根据以前及目前的试验结果分析, 发展梢涡空泡的起始空泡数与叶梢滑脱比一般都大致成如图 9.1 所示的线性关系:

$$\ln \sigma_p = 0.66 + 6.3 S_{pt}$$

由于 $S_{pt} = 1 - J_p / \left(\frac{H}{D} \right)_{\bar{r}=1.0}$, 所以由上式可得出梢涡空泡刚起始的叶梢螺距比:

$$\left(\frac{H}{D} \right)_{\bar{r}=1.0} = \frac{6.3 J_p}{6.96 - \ln \sigma_p}$$

但从此式估算的叶梢螺距比, 在船后伴流场中仍认为偏大, 因为上述估算式是从均流试验中得出的。根据图 6 均流中测得的梢涡空泡起始线, 若以平均伴流分数 $\bar{w} = 0.245$ 换算成船后梢涡空泡起始线与伴流中实测的起始线作一比较, 在设计工作点附近实测的起始空泡数要比按均流估算的提高 50% 左右。图中作出的以轴向伴流在周向外

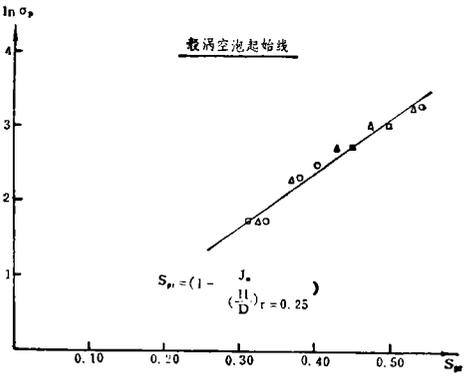
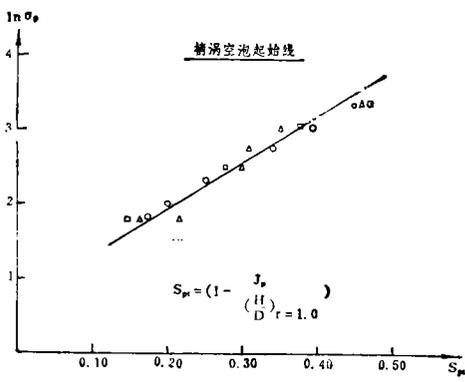


图9 均流中起始空泡数随滑脱比的变化

\bar{W} = 平均轴向伴流分数, W_{max}, W_{min} = 周向外半径处的最大、最小轴向伴流分数。

当设计螺旋桨时, 给定船速以及用船速表示的空泡数, 可根据船后伴流场的分析, 用此式估算抑制梢涡空泡出现的叶梢螺距比。反之, 当给定螺旋桨的叶梢螺距与设计进速, 可用此式估算梢涡空泡起始的空泡数。

对于抑制毂涡空泡的起始所需的叶根螺距比, 可以与上述求叶梢螺距比一样的方法得出。根据试验结果的分析, 从图9可知, 毂涡空泡的起始空泡数与叶根滑脱比大致成如下线性关系:

$$\ln \sigma_p = 7.15 S_{pr} - 0.48$$

其中 叶根滑脱比 $S_{pr} = 1 - J_p / \left(\frac{H}{D} \right)_{\bar{r}=0.25}$

代入上式, 得出均流中毂涡空泡刚起始的叶根螺距比:

$$\left(\frac{H}{D} \right)_{\bar{r}=0.25} = \frac{7.15 J_p}{6.67 - \ln \sigma_p}$$

由于螺旋桨内半径近叶根处, 轴向伴流沿周向的变化不大, 因此在船后伴流场中计算抑制毂涡空泡出现的叶根螺距时, 只要取平均伴流分数 \bar{W} 即可, 具体估算的公式为:

$$\left(\frac{H}{D} \right)_{\bar{r}=0.25} = \frac{7.15 - J_p(1 - \bar{W})}{6.67 - \ln \frac{\sigma_p}{(1 - \bar{W})^2}}$$

根据上式估算公式确定出叶梢和叶根的螺距, 然后根据负荷的要求, 再作螺距沿径向的分布, 一般最大螺距置于桨叶的 $\bar{r} = 0.6$ 至 $\bar{r} = 0.5$ 半径上。

五、螺旋桨侧斜对空泡噪声的影响

关于侧斜对噪声的影响, 过去从未讨论过。本文用了二只不同侧斜角的 PA₂ 桨 (侧斜角 54°)、PA 桨 (侧斜角 36°) 与无侧斜的 PA₁ 桨作了初步的试验研究, 比较结果得

半径上的最大伴流分数 $W_{max} = 0.450$ 及最小伴流分数 $W_{min} = 0.150$ 估算的船后梢涡空泡起始线, 可以看出, 实测的起始线落在以最大伴流分数估算的与平均伴流分数估算的之间。经分析, 实测的起始线, 相当于把均流中测得的起始线以伴流分数 $W = 0.350$ 换算而成。

从上述的分析中得到启示, 若以周向最大的轴向伴流分数来计算均流中的进速系数 J_p 和空泡数 σ_p , 这样估算出的叶梢螺距比是偏于安全的, 但往往因为叶梢螺距偏低, 在周向最小伴流分数处出现面梢涡空泡。所以要在船后伴流场中抑制梢涡空泡的出现。螺旋桨的叶梢螺距比可应用下列公式估算:

$$\frac{H}{D} \bar{r}=1.0 = \frac{6.3 J_p (1 - W_0)}{6.96 - \ln \frac{\sigma_p}{(1 - W_0)^2}}$$

式中伴流分数 $W_0 = \bar{W} + \left(\frac{W_{max} - W_{min}}{2} \right)$,

出:

1. 桨叶侧斜可推迟螺旋桨空泡的起始。图 10 作出了 PA_1 、 PA 和 PA_2 桨的空泡起始曲线。从图中看出, 侧斜 54° 的 PA_2 桨在各空泡数下均最迟出现空泡。在设计工作点 $J_s=0.60$ 附近, PA_2 桨与无侧斜的 PA_1 桨比较, 起始空泡数可降低 15% 左右。

由于桨叶的侧斜, 使得桨叶剖面上的实效进速减小到垂直于侧斜线的速度分量, 这将使剖面的实效空泡数随侧斜角的增大而提高, 也即与侧斜角余弦的负二次幂成比例。不过这种局部的提高往往被攻角的增加而部分抵销。因此, 只要对侧斜桨作精细的设计, 总能使空泡性能得到改善。

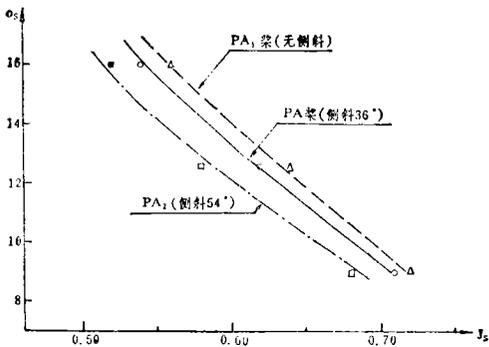


图 10 螺旋桨侧斜对空泡起始的影响

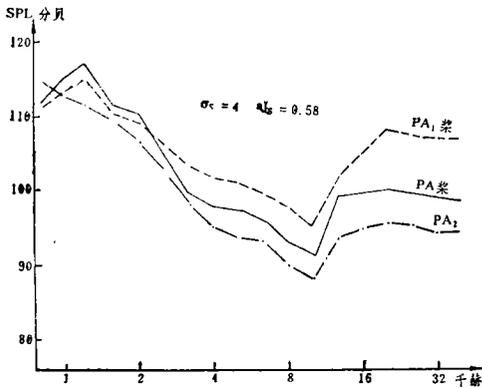


图 11 不同侧斜桨的空泡噪声频谱比较

2. 对已产生空泡而言, 侧斜桨在非均流中可明显地降低空泡噪声高频部分的声级。在空泡噪声的测试过程中发现 PA_2 桨的高频部分噪声谱级一直比其他两桨低。图 11 对

PA_1 、 PA 和 PA_2 桨在空泡数 $\sigma_s=4$, 进速系数 $J_s=0.58$ 时的空泡噪声频谱作了比较。图中频率在 4 千赫以下较低频段中, 三者的谱级基本接近, 4 千赫以上的高频部分, 三者的谱级相差就较大, 尤其是频率超过 16 千赫, PA 桨的谱级比 PA_1 桨低 8 分贝左右, 而 PA_2 桨的谱级可比 PA_1 桨低 12 分贝以上。出现这种现象可能是因为无侧斜桨在船后伴流中运转时, 它的桨叶剖面往往在同一瞬间从低伴流区进入高伴流区, 这时在桨叶剖面上突然形成很大的压差, 致使空泡崩溃的时间缩短, 产生较陡峭的压力脉冲, 辐射出较强的高频声波。侧斜桨不同, 它在伴流场中运转, 桨叶上各剖面是逐渐从低伴流区进入高伴流区的。桨叶上最后达到的压差量级虽然与无侧斜桨相同, 但它的变化过程较无侧斜桨为缓慢, 结果降低了空泡崩溃的速度, 辐射出较弱的高频声波。

至于未产生空泡时, 侧斜桨与无侧斜桨的噪声比较, 因水筒固有噪声较高未作测试。但可以这样设想, 把桨叶沿径向分成有限个剖面, 每个剖面以一个偶极子声源代替剖面上的作用力。这在声学上是合理的, 因为无空泡螺旋桨的噪声主要是作用在桨叶上的不稳定性所引起的。这样, 螺旋桨对空间某一点产生的声压是这些有限个剖面上的偶极子在这点产生的声压的总和。但侧斜桨相对于无侧斜桨而言, 每个剖面上偶极子产生的声压都有一个相位差, 它等于延迟时间与角频率的乘积。而这里的延迟时间就是由桨叶各半径上的侧斜量来确定的。因此侧斜桨上各偶极子在场点产生的合成声压要比无侧斜桨的小

根据以上分析, 螺旋桨采用侧斜, 无论对空泡噪声或无空泡噪声都有降低的作用, 因此在螺旋桨设计时可按具体情况加以考虑。

六、结 论

综合以上研究, 可得出以下结论:

1. 螺旋桨运转时, 可以产生不同类型的空泡, 它们辐射出不同的声压, 其中以泡状空泡辐射的噪声级最为强烈, 片状空泡次之, 而涡空泡最弱。

2. 与无空泡噪声级相比, 梢涡空泡起始(间断亮线)声级约增加 6 分贝, 毂涡空泡起始声级约增加 4 分贝, 而片空泡起始声级可增加 8 分贝以上。

3. 无论在均流或非均流中, 梢涡空泡从间断亮线起始到涡空泡线与叶梢相接止, 声级约上升 7 分贝, 而毂涡空泡起始过程声级约上升 4 分贝。

4. 非均流中螺旋桨的起始空泡数与均流中的比较, 一般有较大的提高。提高的量级视流场非均匀性的强弱而定。

5. 非均流中的螺旋桨空泡噪声频谱与均流中相比, 两者在低频部分都有峰值, 但前者陡峭, 后者平坦。过峰值后, 前者声强约以 $f^{-2.6}$ 律衰减, 后者却以 $f^{-2.1}$ 律衰减。高频部分两者谱形相差不大, 因此非均流场对噪声的低频部分影响更为强烈。

6. 无空泡阶段螺旋桨产生的声压大致与桨转速的 3 次幂成比例, 空泡起始与发展阶段声压随桨转速的 7 次幂而剧增, 空泡充分发展阶段声压随转速的变化趋于平缓, 大致成 1.5 次幂的关系。空泡起始发展阶段与空泡充分发展阶段之间的过渡点转速近似为空泡起始点临界转速的 1.38 倍。

7. 无论在均流或非均流中, 螺旋桨空泡起始到充分发展, 噪声级都有一个渐近极限值。该值与空泡起始前一点的噪声级之差几乎是不变的常数, 约为 30 分贝。

8. 为了抑制螺旋桨梢涡空泡的出现, 梢涡卸载不能过分, 否则对效率与空泡性能都带来不利影响, 反而使噪声大大提高。为了使卸载合适, 本文提出了抑制梢涡和毂涡空

泡起始的叶梢螺距和叶根螺距的近似估算公式。

9. 实验证明, 桨叶侧斜能延迟空泡起始与降低空泡噪声。

以上对螺旋桨空泡噪声进行了一些定性分析与定量的分析, 但这些分析还局限于模型试验的结果, 由于空泡噪声本身的复杂, 受随机因素变化的影响较大, 文中提到的许多结论还须作更多的模型与实船试验加以进一步地验证。

七、感 谢

本文研究的试验工作, 承蒙陈韵芬同志的大力协助, 作者在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Strasberg M.;
"Propeller Cavitation Noise After 35 years of Study"
Noise and Fluids Engineering 1977.
- [2] Bjoerheden O and Astrom L:
"Prediction of Propeller Noise Spectra" Symp on Hydrodynamics of ship and offshore Propulsion Systems March 1977.
- [3] Brown N. A.;
"Cavitation Noise Problem and Solution"
Intev. Symp. Shipboard Acoustics 1976.
- [4] Noordzy L. and van Qossanen;
"Radiated Noise of Cavitating Propellers"
Noise and Fluids Engineering 1977.
- [5] 陈韵芬:
"空泡水筒噪声测试方法若干问题的研究"
中国船舶科学研究中心五室
- [6] Stuurman, A. M:
"Fundamental Aspects of the Effect of propeller Cavitation on the Radiated Noise"
Proc. Symp. High Powered Propulsion on Large Ship 1972.
- [7] Ross, D.:
"Mechanics of Underwater Noise" 1976.