

# 常规螺旋桨设计要点分析

张 平 杨 辉

**摘 要** 综合分析了在螺旋桨设计过程中需要考虑的一些重点问题及解决方法。螺旋桨的设计是一个系统工程,须结合船、机、桨三者匹配关系,结合船的功能需求,抓住主要矛盾,力求设计出较为满意的螺旋桨。

**关键词** 船用螺旋桨 匹配 船体振动

螺旋桨设计一般有图谱设计和环流理论设计两种。运用图谱方法设计螺旋桨时,桨叶外形和叶切面形状按所选用的螺旋桨系列资料来确定;运用环流理论设计螺旋桨时,往往结合螺旋桨模型敞水试验数据和船后伴流的情况来确定桨叶外形和叶切面形状。用这两种方法设计螺旋桨时,其敞水效率并没有很大区别,环流理论设计法能兼顾到桨的空泡和振动性能,图谱设计法因其计算简单、使用方便而得到广泛应用。本文就螺旋桨图谱设计中,需要注意的一些问题展开分析讨论。

## 1 船、机、桨三者匹配

船、机、桨系统中,船体是能量的需求者,主机是能量的发生器,螺旋桨是能量转换装置,三者之间是相互紧密联系的,但同时又要遵从各自的变化特性。

### 1.1 螺旋桨

民用船使用的图谱桨,一般以荷兰的B型桨和日本的AU桨为主。AU桨为等螺距桨、叶切面为机翼型;B型桨根部叶切面为机翼型、梢部为弓形,除四叶桨 $0.6R$ 至叶根处为线性变螺距外,其余均为等螺距,桨叶有 $15^\circ$ 的后倾。为便于设计方便,由 $K_T$ 、 $K_Q$ —— $J$ 敞水性征曲线图转换为 $B_p$ — $\delta$ 图谱。

桨与船体各自在水中运动时,都会形成一个水流场。水流场与桨的敞水工作性能和船的阻力性能密切相关。当桨在船后运动时,2个原本独立的水流场必然会相互作用、相互影响。船体对螺旋桨的影响体现在2个方面:(1)伴流。由于船尾部螺旋桨桨盘处因水的粘性等因素作用,形成一股向前

方向的伴流,使得螺旋桨的进速小于船速。(2)伴流的不均匀性。船后桨在整个桨盘面上的进速不等(在实用上可取相对旋转效率为1)。

### 1.2 螺旋桨对船体的影响

由于螺旋桨对水流的抽吸作用,造成桨盘处的水流加速,由伯努利定律可知,同一根流线上,水质点速度加快,必然会导致压力下降,从而造成船的粘压阻力增加。也就是桨产生的推力一部分用于克服船体产生的附加阻力。

如果用伴流分数 $\omega$ 表征伴流与船速的比值,用推力减额 $t$ 表征船体附加阻力与船体自身阻力的比值。那么,敞水桨与船后桨的差别就在于一个船身效率 $(1-t)/(1-\omega)$ ,从中可以看出,伴流分数 $\omega$ 越大、推力减额 $t$ 越小,则船身效率越高。

从螺旋桨图谱可以看出,横坐标的参数为 $\sqrt{B_p}$ 或 $B_p$ 。 $B_p$ 称为收到功率系数(或称为载荷系数),其值为:

$$B_p = NP_D^{0.5}/V_A^{2.5}$$

式中: $N$ 为螺旋桨转速; $P_D$ 为螺旋桨敞水收到功率; $V_A$ 为螺旋桨进速。

$B_p$ 值越小,对应的螺旋桨敞水效率越高;反之,则螺旋桨效率越低。从个体因素来讲, $N$ 值和 $P_D^{0.5}/V_A^{2.5}$ 值越小, $B_p$ 值就越小。 $P_D$ 和 $V_A$ 参数有联动关系,在相对低速的范围内, $P_D$ 值变大、 $B_p$ 值变小;在相对高速的范围内, $P_D$ 值变大、 $B_p$ 值也变大。这取决于船的阻力特性。

实船螺旋桨设计时,还要考虑以下的先决条件:螺旋桨直径有无限制、船舶航速的具体要求。

一般情况下,螺旋桨设计工况都对应船舶满载航行的状态,在该航行状态下,主机发出预定功率、螺旋桨效率达到最佳,船、机、桨匹配理想。但如果设计参数选择不当,就会造成螺旋桨产生“轻载”或“重载”的现象,“轻载”是指螺旋桨达到设计转速后,不能充分吸收主机的转矩,主机发不出预定功

作者介绍:张平1988年毕业于江苏科技大学,现工作于江苏省船舶设计研究所有限公司,室主任,高级工程师;杨辉1998年毕业于江苏科技大学,现工作于江苏省船舶设计研究所有限公司,工程师。

率;“重载”是指螺旋桨还未达到设计转速时,主机转矩已达到最大值,主机同样发不出预定功率。

螺旋桨设计产生“轻载”还是“重载”现象,主要取决于2个方面:(1)伴流分数 $\omega$ 、推力减额 $t$ 取值是否正确。(2)船舶阻力计算的误差。

如选取的伴流分数 $\omega$ 大于船后实际值,则螺旋桨不能吸收预定的功率和发出要求的推力,从而无法达到预定的航速,螺旋桨处于“轻载”状态;反之,螺旋桨处于“重载”状态。

如选取的推力减额 $t$ 大于实际值,该情况类似于船舶轻载航行,螺旋桨达到额定转速后,不能吸收主机额定转矩,螺旋桨处于“轻载”状态;反之,螺旋桨处于“重载”状态。

船舶的阻力大小,与船舶的尺度、线型等因素关系很大,同样一艘船,采用不同公式计算,阻力值可能有很大的区别。如阻力计算值大于实船阻力,则实船试航时,航速会大于预估速度,螺旋桨却处于“轻载”状态;反之,螺旋桨处于“重载”状态。

以上各参数取值大小与螺旋桨“轻载”、“重载”关系分别如图1、图2所示。

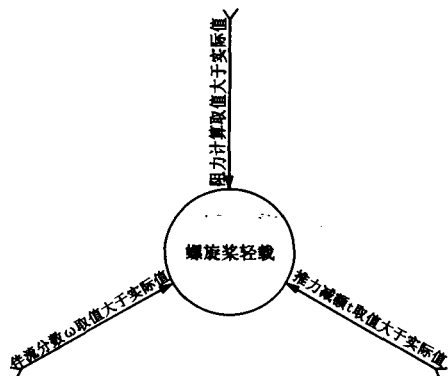


图1 螺旋桨“轻载”与各参数关系

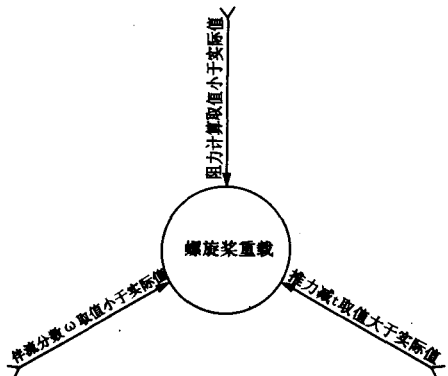


图2 螺旋桨“重载”与各参数关系

在桨的设计中,由于各参数的理论取值与实际值必然会有综合性的误差,螺旋桨不可避免地会产生“轻载”、“重载”现象。不论螺旋桨是“轻载”还是“重载”,都不能充分利用主机功率。相比较而

言,螺旋桨“重载”时,主机工作在超负荷恶劣环境下,影响其使用寿命。

一般船舶在使用中都会有压载(空载)航行、满载航行、超载(船底积污或风浪原因)航行状态。对应船舶满载航行工况设计的螺旋桨,在超载航行时,就会“重载”。同时考虑到主机因老化、磨损等原因,发出的额定功率也会逐渐降低。为了保证有一定的避免“重载”的安全裕度,需要有一个功率储备。作者根据自己的设计经验体会,在100%额定转速时,考虑功率储备后的设计功率推荐如下值:对于海船,85%~90%主机功率;对于内河船,90%~95%主机功率。

如主机为高增压、大功率机型,功率储备取下限值,相对而言,该种机型的外特性曲线与推进特性曲线之间的间隙(潜在功率)小于常规机型。

## 2 桨与船体振动

船体振动会带来以下几个方面的不利影响:

(1)对人体的影响。人体长期处在振动环境中,会产生头痛、浑身乏力、食欲不振、易于发怒等症状,影响身体健康和工作效率。(2)对船体结构的影响。振动、尤其是高频振动容易导致结构疲劳、焊缝损伤,严重时会引起结构破坏,产生事故。(3)对机电设备、精密仪器的影响。振动对机电设备、精密仪器的正常工作形成了一个不利环境,会影响设备的使用寿命和工作精度。

螺旋桨在制造过程中不可避免地会产生不平衡,桨的重心会有径向和轴向的误差(螺旋桨制造完工后,须做静平衡及动平衡试验,将不平衡缺陷控制在精度范围内),螺旋桨在船尾工作时,所处的水流场总体上是一个紊流环境。有制造精度误差的螺旋桨工作在不均匀的流场中,不可避免地会产生振动。

既然振动是不可避免的,船体振动的控制就应该包含2个方面的内容:(1)采取减振措施,将振动控制在可接受的程度。(2)避免螺旋桨与船体产生共振现象,包括全船共振和局部共振。

### 2.1 减振措施

减振措施如采用得当,可以取得显著的减振效果。根据螺旋桨的工作特性,以下一些措施是行之有效的方法:

(1)增大螺旋桨与船体的安装间隙。资料介绍该间隙要在 $0.12D \sim 0.2D$ 以上,桨径越大、间隙越大,这样可以降低传递到船体上的表面激振力,考虑到船舶的实际情况,如间隙无法增大时,可以设置船

体减振穴,即在桨对应的船体上方,凹入一个“口子”,“口子”的大小及凹入尺寸与桨径大小相对应,相当于利用水质点的弹簧效应,来降低传递到船体上的表面激振力。

(2)设置阻尼材料。在船体内部螺旋桨上方足够大的范围内敷设钢质或橡胶质的阻尼材料,敷设时,一定要注意钢结构表面的清洁工作,以保证阻尼材料与钢结构的贴合效果,利用阻尼材料在其内部产生拉伸、弯曲、剪切等变形,吸收大量的入射能量,将振动能变成热能消耗掉。

(3)增加桨叶数。一般而言,桨叶数的增加可以提高桨的均衡性,从而降低桨对主船体产生的表面力。

(4)改良船体尾部的线型。可以改善船尾伴流分布,提高尾流场的均匀性。当然,考虑到尾流场的复杂性,需要结合船模试验,才能更好地做到这一点。从定性来讲,采用双尾线型、加设尾鳍,都能很好地改善尾部伴流。

(5)避免产生空泡现象。空泡现象的根本原因是桨叶切面上的水流速过快,压力下降明显,以及桨单位面积上承受压力过大引起的,空泡除了会产生桨的剥蚀外,同时会诱导桨产生激振。改善螺旋桨的空泡现象,可以通过增加桨的盘面比、减小螺旋桨的转速来缓解。

(6)安装导流管。对于负荷较大的螺旋桨,可采用导管螺旋桨。导流管一方面可以改善螺旋桨的效率,另一方面可以改善伴流的分布情况,同时承担原本作用在桨上的相当一部分载荷,从而避免桨产生空泡及振动。

## 2.2 避免共振

螺旋桨振动一般有两种情况,一种是桨制造不平衡(主要是重心偏离和制造精度不良)产生振动,其振动频率数值等于螺旋桨转速 $N$ ;另一种是螺旋桨工作在不均匀流场中产生振动,其振动频率数值等于螺旋桨转速 $N$ 与桨叶数 $Z$ 的乘积 $NZ$ 。船体振动也分为全船振动和局部振动两种情况。全船垂向振动的频率主要与船舶的长度、宽度和高度以及船舶的质量密切相关。在“钢质内河船舶入级与建造规范”(2002)第四章中,提出了60m以上客船全船振动的第一谐调固有频率、第二谐调固有频率以及局部振动第一谐调固有频率的计算公式。其中全船振动的第一谐调固有频率是所有振动频率中最低

者。实际上船舶是一种弹性结构,在低频振动时阻尼很低而动力扩大因素很大。在这种情况下,即使很小的干扰力在共振时也会引起很大的振幅。高频振动时阻尼增大,共振峰较低,且分布于较大的频率范围内,动力扩大因素很小,共振影响较缓和。故对一般船舶来说,避免最低频的振动是很重要的。按照规范的要求,在避免全船共振时,螺旋桨振动的2个频率 $N$ 和 $NZ$ 应与第一谐调固有频率相差 $\pm 15\%$ 以上,与第二谐调固有频率相差 $\pm 20\%$ 以上,在避免局部共振时,螺旋桨区域上方的船底板格第一谐调固有频率要大于 $1.5NZ$ 。

从共振发生几率来讲,大型船舶更易发生全船共振,因桨的振动频率 $N$ 与全船振动频率较易接近;小型船舶更易发生局部共振,因桨的振动频率 $NZ$ 与局部振动频率较易接近。前者是危险状态,应尽可能避免,后者可以采取一些局部措施,如增设扶强材、支柱及改变板格长宽尺度等措施改变振动频率来消除。

除了与船体发生共振外,还要避免桨与轴系、与主机发生共振。亦即避免叶频 $NZ$ 与轴系转动频率相等或相近、避免主机气缸数、冲程数与桨叶数相等或恰为其整数倍。

## 3 其他

在螺旋桨设计中,结合船舶的操纵性能要求、结合选定主机的类型,还要考虑其它方面的一些情况:例如,螺旋桨数目的选择,单纯从推进效率来讲,由于伴流的特性,单桨船的效率最高、三桨船的效率次之、双桨船的效率最低。当船的吃水受到较大限制时,或者采用单桨造成桨的负荷较大时,采用双桨设计的推进效率会高于单桨;如果是设计内河船,特别是内河客船时,考虑到船舶操纵性的特别要求,就必须牺牲一些推进效率来保证操纵性能。例如,螺旋桨直径的选择,一般而言,直径越大,转速越低,则效率越高。有时,直径过大时桨盘处的平均伴流减小,使船身效率下降,总推进效率未必有利。

## 4 结语

总之,螺旋桨的设计是一个系统工程,考虑问题的出发点不可能是单向的、唯一的,必须结合船的类型、用途,结合主机的类型,结合船东的要求等,突出重点要素,最终设计出船、机、桨匹配良好的螺旋桨。