

# 螺旋桨三维建模方法探讨

陈彦勇<sup>1</sup>, 夏雨<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 材化学院, 杭州 310027; 2. 昆明精密机械研究所, 昆明 650118)

**摘要:** 螺旋桨的桨叶是一个含有规则曲面的零件, 其三维建模过程比较复杂. 文章提出了一种简便的螺旋桨建模方法, 根据生成的三维模型, 该方法还可以检查螺旋桨外形特征是否满足设计要求.

**关键词:** 船舶; 螺旋桨; 三维建模

**中图分类号:** U664.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6982(2006)01-0021-04

## Discussion of 3D modeling method for propellers

CHEN Yan-yong<sup>1</sup>, XIA Yu<sup>2</sup>

(1. College of Material Science and Chemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Kunming Precision Machinery Research Institute, Kunming 650118, China)

**Abstract:** Propeller blade is a part with regular camber. Its 3D modeling is a complicated process. This paper presents a simple and convenient method for 3D modeling of propeller. The 3D model generated by this method can be used to check if the characters of propeller shape meet the design requirements.

**Key words:** ship; propeller; 3D modeling

### 0 引言

在做某产品的螺旋桨时发现, 从二维图纸直接加工得到的螺旋桨不符合设计要求. 主要表现为加工后桨叶变形比较严重, 加工难度大, 很难做到一次加工成型等. 传统的螺旋桨设计方法是通过计算得到桨叶的设计参数, 然后根据设计参数在数控加工设备上加工螺旋桨的初样模型, 初样模型加工出来后再检查螺旋桨外形特征, 如果外形特征不能满足设计要求, 则修改设计参数并再次进行实物模型的加工. 由于螺旋桨属于复杂零件, 不易加工, 因此花费在模型修改和加工上的人力、物力是普通零件的许多倍. 利用三维CAD软件则可以在模型加工之前, 通过三维建模得到虚拟的螺旋桨模型, 在虚拟模型上进行反复修改和模拟加工, 并进行辅助分析, 以验证除形状特征外的其他设计参数.

本文提出的螺旋桨建模方法无需计算, 完全利用二维图来生成三维曲面, 避免了计算误差. 当螺旋桨的螺距、直径、桨叶切面等关键要素发生变化时, 只需针对发生改变的参数进行适当的调整, 就可以得到新的三维模型.

根据本文的建模方法, 可以利用CAD三维软件的二次开发工具将螺旋桨建模过程编成应用程序, 使螺旋桨的设计完全自动化.

### 1 螺旋桨设计

#### 1.1 计算螺旋桨叶片所需的伸张面积 $A_E$

螺旋桨叶片的伸张面积是指螺旋桨桨叶伸张轮廓所包含的面积, 它接近于桨叶叶面的实际面积.  $A_E$ 是单个桨叶的伸张面积乘以桨叶叶数的总伸张面积, 且:

$$A_E = R_x / 2q \quad (1)$$

其中,  $R_x$  为该产品的流体阻力,  $q$  为叶片伸张面积上的压强, 经验表明,  $q$  的最大值一般出现在桨叶的  $0.45R \sim 0.65R$  之间,  $R$  为螺旋桨半径.

#### 1.2 计算螺旋桨的盘面比

根据给定螺旋桨直径算出的螺旋桨盘面积  $A_0$  和伸张面积  $A_E$  的盘面比为:  $A_E/A_0$ .

#### 1.3 叶片数的确定

叶片数目根据盘面比进行选择, 有下列关系式<sup>[1]</sup>:

$$Z = \frac{A_E / A_0}{\tau} \quad (\tau \text{ 值取 } 0.1 \sim 0.15) \quad (2)$$

收稿日期: 2005-04-25; 修回日期: 2005-08-24

作者简介: 陈彦勇 (1962-), 男, 研究员, 主要从事 CAD/CAE 研究.

## 1.4 选择最佳螺旋桨

选择最佳螺旋桨指在螺旋桨结构尺寸满足设计要求的前提下, 确定螺旋桨的螺距, 使螺旋桨具有最大的推进效率. 试验结果表明, 一般情况下, 螺旋桨的推力系数曲线  $K_t(J)$  和有效推力系数曲线  $K_r(J)$  是相互平行的 ( $J$  为叶元推进系数). 这两条曲线和横坐标轴分别交于  $J=P_e/D$  和  $J=P_l/D$  两点 (其中  $P_e$  为螺旋桨的理想螺距;  $P_l$  为螺旋桨的实效螺距, 即螺旋桨在不发生推力时旋转一周所前进的距离.  $P_e/D$ 、 $P_l/D$  分别为螺旋桨的理想螺距比和实效螺距比), 两点间的距离为  $t_0 \cdot P/D$ .  $t_0$  为推力衰减系数;  $D$  为螺旋桨直径. 由此可以根据自由水螺旋桨的图谱来选择最佳螺旋桨<sup>[1]</sup>:

$$K_e = \frac{T_e}{\rho n^2 D^4} \quad (3)$$

$$J = \frac{V_A}{nD} = \frac{V_0(1-W)}{nD} \quad (4)$$

其中,  $V_0$  是产品的航速; 阻力  $R_x=T_e$ ;  $n$  为螺旋桨转速;  $W$  为伴流系数;  $\rho$  为流体密度.

根据以上公式求出  $K_e$  和  $J$ , 如果要另外选择一个在自由水中工作的螺旋桨, 其  $K_r$  值和  $J$  值恰好分别与上述  $K_e$  值和  $J$  值相等, 则只需从自由水中工作的螺旋桨图谱中找到新螺旋桨的  $P_l/D$  值, 即考虑到航行体外形影响的螺旋桨  $P_l/D$ . 由此可以得到零推力相对螺距是:

$$\frac{P_l}{D} = \frac{P_e/D}{(1-t_0)} \quad (5)$$

然后根据这个  $P_l/D$  值可以求得其几何螺距为:

$$P = \frac{P_l}{D} \cdot \frac{D}{1.06} \quad (6)$$

由此确定螺旋桨的螺距.

## 1.5 确定螺旋桨几何结构

在以上数据满足设计要求后, 还需要选择桨叶的剖面翼形, 给出桨叶叶元沿半径的厚度分布, 确定桨叶外形.

该产品的螺旋桨桨叶一般采用弓形和机翼形剖面, 弓形剖面翼形制造简单, 在吸力面上的压力分布比较均匀, 空泡趋向性较小; 机翼形剖面翼形的形状阻力比弓形的小, 因而功率较高. 本文讨论的螺旋桨为机翼形剖面翼形.

叶元沿半径的厚度变化一般呈直线规律. 桨叶伸张面重心半径  $r_0$  处的桨叶叶元厚度  $\delta_0$  (当  $r_0=0.7R$  时) 可近似地按下式选取<sup>[1]</sup>:

$$\delta_0 = 0.007 \frac{Z}{A_E/A_0} \sqrt{q} \quad (7)$$

从而保证桨叶必要的厚度. 叶梢处的厚度  $e$  可近似取为  $0.005D$ .

在保持所要求伸张面积的前提下, 桨叶伸张轮廓的形状可以有多种选择, 一般选用带圆角的梯形, 但有时也使叶片呈马刀形, 朝随边方向产生一定弯曲, 即侧斜, 这种螺旋桨的桨叶面积沿盘面的分布比较均匀, 可以减小因流场不均匀所引起的振动和噪声, 同时也可推迟空泡的出现; 离心力的作用会使叶根切面的弯曲应力增大. 本文讨论的便是这种螺旋桨的建模方法.

## 2 建模方法

### 2.1 定位桨叶切面

将螺旋桨从二维图转化为三维模型的过程中, 需要定义若干参考曲线和参考点, 其中最重要的曲线是二维图中的桨叶切面展开图变换到三维时的桨叶切面曲线(一条空间曲线). 本方法讨论的是变螺距的螺旋桨, 每个桨叶切面曲线都是缠绕在不同半径的圆柱面上, 并且叶面和叶背的分界线必在螺距不同、螺旋半径等于该桨叶切面所在圆柱面半径的螺旋线上. 由此可以推断, 桨叶切面的展开图必和螺旋线所在的圆柱面相切. 建模的第一步是确定每个桨叶切面展开图在与螺旋线所在圆柱面相切的平面中的位置. 通常有两种定位方法, 利用螺旋线定位或利用螺旋线的展开图定位. 本文采用的是后一种方法. 由于二维图中桨叶切面被表示为展开图, 因此确定桨叶切面展开图在切平面上的位置可以利用螺旋线展开图作为参考, 待桨叶展开图位置确定后再将其缠绕到螺旋线所在的圆柱面上, 就可以得到实际的桨叶切面曲线. 确定桨叶展开图位置的步骤:

1) 确定整个螺旋桨的中心线, 可以用任一坐标轴作为桨叶中心线.

2) 作出桨叶切面所在圆柱面, 确定圆柱面和中心线的交点.

3) 在交点处作出螺旋线的展开图. 螺旋线的展开图如图 1 所示. 图中直角三角形为螺距三角形, 其斜边就是螺旋线的展开图. 由于螺距三角形的三边和三角形的一个顶点都已知, 不需计算螺距角, 就可以直接画出螺距三角形, 减小了计算误差. 这里需要注意, 根据螺旋桨的旋向来选择三角形的方向.

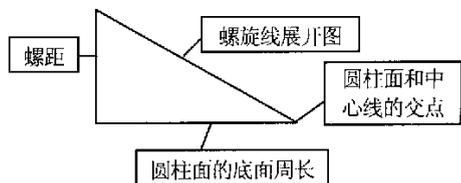


图 1 螺旋线展开图

4) 由于桨叶叶面和叶背的分界线位于螺旋线展开图上, 只要根据桨叶中心到导边的距离就可以确定分界线的顶点在螺旋线上的位置, 作出桨叶切面展开图。

桨叶切面曲线展开图是从二维图转为三维模型时的主要建模参考, 确定桨叶切面曲线展开图的位置是后继生成螺旋桨桨叶曲面的关键, 因此, 对螺旋桨进行三维建模时最关键的步骤就是确定桨叶切面展开图的位置。

## 2.2 桨叶切面展开图

确定了桨叶分界线顶点的位置, 可以根据线型画出桨叶切面展开图, 利用通过点生成曲线就可以快速生成所需的桨叶切面展开图, 一个画好的桨叶切面展开图如图 2 所示。

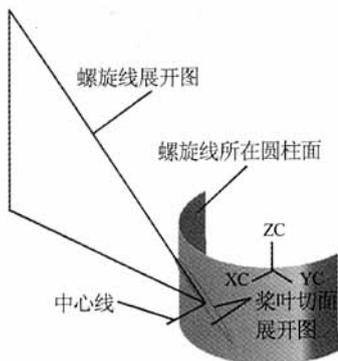


图 2 螺旋线展开图及桨叶切面展开图

## 2.3 缠绕桨叶切面曲线

把平面的曲线缠绕到一个圆柱面上形成空间曲线, 螺旋桨桨叶切面曲线就是将桨叶平面展开图缠绕到相应的圆柱面上形成一系列的桨叶切面曲线, 再根据这些曲线来生成曲面, 最后生成实体模型, 一个桨叶切面展开图缠绕后得到的桨叶切面曲线如图 3。

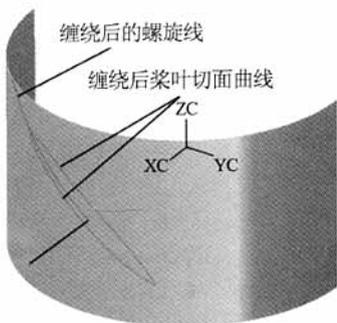


图 3 缠绕后的桨叶切面曲线

## 2.4 外轮廓线和最大厚度线

重复以上三个步骤, 直到完成所有桨叶切面曲线, 这时已经可以利用这些曲线生成桨叶曲面, 但外形误差较大, 且由于桨叶顶部没有线型值, 无法生成顶部曲面, 因此建模的第四步是在生成桨叶切面曲线后, 根据切面曲线的几个关键顶点和最大厚度点来生成桨叶的外轮廓线最大厚度线, 一个完整的桨叶线框模型如图 4 所示。

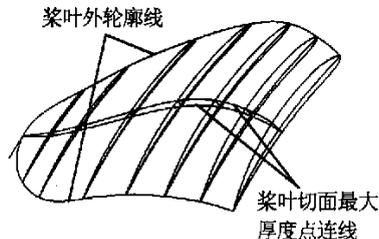


图 4 桨叶线框模型

## 2.5 生成叶面曲面和叶背曲面

利用“通过网格曲线生成曲面”来生成叶面曲面和叶背曲面, 生成曲面时需注意选择网格曲线的经线和纬线时要保证选择方向一致, 叶面和叶背曲面如图 5 所示。

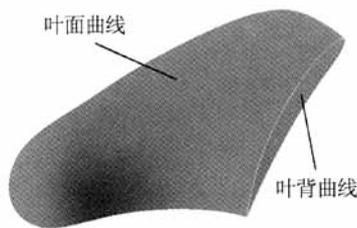


图 5 叶面曲面及叶背曲面

## 2.6 曲面处理

在生成叶面和叶背曲面后, 还需要对模型进行一些细节处理, 首先是螺旋桨的随边有一定的厚度, 叶面和叶背曲面在随边处不相交, 需要用一片又细又窄的片体来连接叶面和叶背曲面, 接着是将叶面曲面、叶背曲面和随边处的小片体缝合成为一片完整的曲面, 然后再把这个完整的曲面沿着指向桨毂的方向, 按照曲面自身的规律作一定距离的延伸, 使曲面能够和桨毂的圆锥表面相交, 从而生成根剖面, 最后是将延伸后的曲面进行封闭处理, 处理所有曲面有开口的地方, 并将所有曲面缝合为最终的螺旋桨桨叶曲面模型。

## 2.7 生成实体模型

在把桨叶曲面做成一个封闭的实体后, 就可以生成桨叶实体模型了, 生成实体模型的方法是先用一个较大的实体将整个桨叶曲面给包裹住, 然后再把该实

体分为曲面内和曲面外两部分，曲面内的部分就是螺旋桨的实体模型。将桨叶实体模型与桨毂模型合并，得到一片桨叶的螺旋桨模型。再通过圆周阵列功能得到含有所有的桨叶的螺旋桨三维模型。

### 3 结论

在常见的三维建模过程中，关键是把二维图中各种绘图参考(点、线)准确地表示为三维空间的建模参考(点、空间曲线、曲面)。一般二维图中的点、线等绘图参考都通过投影方式转换为三维坐标内的建模参考。但由于螺旋桨二维图中的绘图参考是桨叶截面的展开图，不能用简单的投影将其转换为三维坐标内的建模参考，而必须采用“缠绕”的方法将其还原为真实的

桨叶截面，才能准确地为其建模。

### 参考文献:

- [1] 王国强, 盛振邦编著. 船舶推进[M]. 北京: 国防工业出版社, 1959.
- [2] 王锦红, 邵明. 基于UG软件的参数化建模技术的应用[J]. 现代制造工程, 2003(2).
- [3] 李艳聪, 薛兆鹏. 基于UG-18的螺旋桨建模与加工[J]. 现代制造, 2002(3).
- [4] 张柏钦, 康佳琨等. Unigraphics V16 曲面与工程图应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] 林政忠, 丘协政等. Unigraphics CAD 高级篇[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.

## 服务台

## 国家质检总局国家标准委公告(2005年第146号)

### TC137 废止项目清单(共29项)

序号	国家标准号	标准中文名称	备注
1	GB/T 8243.5-1987	柴油机全流式滑油滤器试验方法滤芯端向负荷	国标废止
2	GB/T 12927-1991	船用起货设备检验规则和试验方法	国标废止
3	GB/T 13408-1992	海船机舱机械设备备件定额	国标废止
4	GB/T 14359-1993	船用应急活塞式空气压缩机	国标废止
5	GB/T 11690-1989	船用法兰铸钢止回阀(四进位)	国标废止
6	GB/T 11696-1996	船用铸钢竖形止回阀	国标废止
7	GB/T 6301-1986	船用柴油机燃油消耗率测定方法	国标废止, 转行标, 过渡期1年
8	GB/T 6302-1986	船用柴油机热工参数的测量	国标废止, 转行标, 过渡期1年
9	GB/T 6303-1986	船用油滤器检验方法	国标废止, 转行标, 过渡期1年
10	GB/T 10098-1988	船用中速柴油机齿轮箱技术条件	国标废止, 转行标, 过渡期1年
11	GB/T 11572-1989	船用齿轮箱台架试验方法	国标废止, 转行标, 过渡期1年
12	GB/T 11868-1996	救生艇用柴油机组	国标废止, 转行标, 过渡期1年
13	GB/T 13410-1992	船用柴油机涡轮增压器技术条件	国标废止, 转行标, 过渡期1年
14	GB/T 7389-1987	船用起货绞车机	国标废止, 转行标, 过渡期1年
15	GB/T 12930-1991	潜水装具用高压活塞式空气压缩机技术条件	国标废止, 转行标, 过渡期1年
16	GB/T 12934-1991	船用控制设备用无油空气压缩机技术条件	国标废止, 转行标, 过渡期1年
17	GB/T 568-1965	船用法兰类型	国标废止, 转行标, 过渡期1年
18	GB/T 569-1965	船用法兰 连接尺寸和密封面	国标废止, 转行标, 过渡期1年
19	GB/T 1854-1993	船用法兰铸铁单排吸入截止阀箱	国标废止, 转行标, 过渡期1年
20	GB/T 1855-1993	船用法兰铸铁单排吸入截止止回阀箱	国标废止, 转行标, 过渡期1年
21	GB/T 1856-1993	船用法兰铸铁单排排出截止阀箱	国标废止, 转行标, 过渡期1年
22	GB/T 2499-1993	船用法兰铸铁双排截止阀箱	国标废止, 转行标, 过渡期1年
23	GB/T 3009-1982	船用防蚀螺塞	国标废止, 转行标, 过渡期1年
24	GB/T 12921-1991	船用油水界面探测器技术条件	国标废止, 转行标, 过渡期1年
25	GB/T 12414-1992	船用废气锅炉技术要求	国标废止, 转行标, 过渡期1年
26	GB/T 14358-1993	舰船饮用水净化器	国标废止, 转行标, 过渡期1年
27	GB/T 10750-1989	船用扁圆形铸铁和铸钢法兰	国标废止, 转行标, 过渡期1年
28	GB/T 10751-1989	船用扁圆形焊接钢法兰	国标废止, 转行标, 过渡期1年
29	GB/T 12919-1991	船用控制气源净化装置	国标废止, 转行标, 过渡期1年

# 螺旋桨三维建模方法探讨

作者: [陈彦勇](#), [夏雨](#), [CHEN Yan-yong](#), [XIA Yu](#)

作者单位: [陈彦勇, CHEN Yan-yong \(浙江大学, 材化学院, 杭州, 310027\)](#), [夏雨, XIA Yu \(昆明精密机械研究所, 昆明, 650118\)](#)

刊名: [船舶工程](#) **ISTIC PKU**

英文刊名: [SHIP ENGINEERING](#)

年, 卷(期): 2006, 28(1)

被引用次数: 2次

## 参考文献(5条)

1. [王国强, 盛振邦](#) [船舶推进](#) 1959
2. [王锦红, 邵明](#) [基于U G软件的参数化建模技术的应用](#) [期刊论文]-[现代制造工程](#) 2003(02)
3. [李艳聪, 薛兆鹏](#) [基于UG-18的螺旋桨建模与加工](#) 2002(03)
4. [张柏钦, 康佳琨](#) [Unigraphics V16曲面与工程图应用](#) 2001
5. [林政忠, 丘协政](#) [Unigraphics CAD高级篇](#) 2001

## 相似文献(10条)

### 1. 会议论文 [熊焱斌](#) [全旋回“Z”轴导管螺旋桨船舶操作](#) 2008

本论文专门协助进江海船进行系泊操船的港作拖船。该船总长为33.8 m, 船宽9.8 m。对本拖船的操纵性能要求特别高, 其推进和操纵设备为“全旋回Z轴导管螺旋桨”, 设有双柄操纵杆。通过操纵杆, 可使两螺旋桨自由地在360°平面范围内转动。合理控制操纵杆可自由地改变船舶的航速, 航向, 横移运动。操纵控制大型海船进行安全靠泊作业。

### 2. 期刊论文 [余松](#), [沈忆文](#), [薛爱民](#), [YU song](#), [SHEN Yi-wen](#), [XUE Ai-min](#) [船舶螺旋桨损伤特点及成伤机制](#) -[法医学杂志](#) 2008, 24(1)

目的 总结船舶螺旋桨损伤的主要特点, 探讨螺旋桨损伤的特点及形成机制, 探索螺旋桨损伤与碎尸的鉴别方法。方法 收集浙江省湖州地区1994-2005年尸检的100余例船舶螺旋桨损伤案例, 对螺旋桨造成的损伤(擦划伤、表皮剥脱、创、骨折和全部离断创)的特点, 以及衣着特征, 进行回顾性分析, 并与常见碎尸案中使用的工具造成的断面特征进行比较。结果 船舶螺旋桨损伤是高速旋转螺旋桨的巨大劈力和机械切削所造成的损伤; 碎尸是人为使用锐器切割或敲击尸体, 两者由于形成机理、作用力及反作用力大小不同, 导致损伤断面呈现不同的特征。结论 船舶螺旋桨损伤具有独特的特征, 可与碎尸损伤进行鉴别。

### 3. 学位论文 [谢东维](#) [基于多工况船舶的螺旋桨计算机辅助设计](#) 2006

拖船、拖网渔船等多工况船舶都具有两种典型的航行状态: 自航状态和拖航状态。在这两种状态下, 螺旋桨所处的工作状态有很大的差异, 这使得多工况船舶螺旋桨设计不同于常规船舶螺旋桨的设计, 应慎重选择其设计工况。本文根据多工况船舶螺旋桨设计的特点, 以VB6.0为平台开发, Microsoft Access 2000为后台数据库开发了螺旋桨图谱设计系统, 实现了基于多工况船舶的螺旋桨计算机辅助设计。本文的主要内容如下:

(1) 简介了本文选题的意义以及国内外计算机辅助螺旋桨设计的发展状况;

(2) 概述了船用螺旋桨的设计问题、现有的设计方法和常规图谱设计流程, 进而分析了多工况船舶螺旋桨设计的特点; 结合实际情况, 选用了简易导管螺旋桨作为本课题研究的主要螺旋桨型式; 简要地分析了多工况船舶螺旋桨设计工况的选取问题, 在此基础上以螺旋桨设计航速为设计变量, 建立了两个优化模型, 用户可根据实际情况选取其中之一来优选螺旋桨的设计工况; 以33 m巡逻船螺旋桨的设计工况优选为例, 验证了优化模型的有效性。

(3) 介绍螺旋桨图谱设计系统的开发工具、运用的关键技术、主要功能、用户界面以及系统的开发过程中解决的关键问题。该系统不仅可按特殊的设计方式(给定设计航速以及给定设计航速和螺旋桨直径)设计简易导管螺旋桨, 还可按常规的设计方式设计MAU系列桨。

(4) 以33 m巡逻船的简易导管螺旋桨设计和2300t排水量沿海多用途船的MAU系列桨的设计为实例, 将程序设计的结果与手工设计的结果进行对比, 验证了系统的实用性和有效性。

### 4. 会议论文 [李大超](#) [船舶螺旋桨用高强度不锈钢的发展及应用](#) 1998

该文概述了国外船舶螺旋桨高强度不锈钢的发展, 以及不锈钢螺旋桨的实船试验和实际应用。

### 5. 期刊论文 [张利军](#), [王言英](#) [单桨船螺旋桨安装位置确定](#) -[大连理工大学学报](#) 2003, 43(1)

通过船模螺旋桨在3个不同安装位置的自航试验, 探讨了螺旋桨位置对推进效率的影响。试验结果表明, 选择合适的螺旋桨位置, 有利于提高船模的整流作用, 改善船后伴流分布, 减小推力减额, 从而提高推进效率, 达到船舶节能的目的。作为一个典型试验的结果, 在0.1D (D为螺旋桨直径) 范围内移动螺旋桨, 在航速上可获得3%~5%的增量。因此, 在船舶设计中有必要重视螺旋桨安装位置的选择。

### 6. 学位论文 [明眸](#) [梢部间隙对螺旋桨诱导激振力的影响](#) 2007

自上世纪七十年代起, 船舶螺旋桨在船体上诱导的激振力及其引起的船舶剧烈振动问题, 受到船舶研究界的广泛关注。在以后的数十年间, 研究人员致力于揭示螺旋桨诱导产生激振力的机理和规律, 发展了相关的理论和试验技术, 为减小螺旋桨在船体上诱导的激振力作了巨大努力。螺旋桨在船体上产生的激振力, 特别是螺旋桨空泡在船体表面诱导的脉动压力, 是引起船舶剧烈振动的原因之一。螺旋桨在船体上产生的激振力大小除了与桨叶的几何形状、桨叶的载荷、桨叶空泡数以及船尾流场形态有密切关系外, 还与螺旋桨叶梢与船体间隙大小有很大关系。叶梢间隙比即螺旋桨叶梢到船体表面的距离与螺旋桨直径之比是激振力在船体表面上大小的一个重要因素。一般的说法是, 增大梢隙可减小螺旋桨在船体表面的诱导脉动压力。然而, 增大梢隙将改变船体的尾部形状或减小螺旋桨的直径, 势必影响到船舶的推进性能。

本文首先从介绍螺旋桨在不均匀流场中运转时产生的激振力的基本概念出发, 对轴承力和表面力作了解释。轴承力是螺旋桨叶上的不定常载荷引起的桨轴的纵向力、垂向力、横向力和力矩, 并通过轴系传递到船体; 表面力是螺旋桨诱导的压力场经过水传递到船体表面的脉动压力。螺旋桨诱导的轴承力和表面力是船舶振动的振源。其中, 螺旋桨诱导的在船体表面上的脉动压力的集合作用即表面力是引起船体剧烈振动的最主要的诱因。

研究螺旋桨在船体上诱导的激振力有理论方法和试验方法。理论方法中, 准确估算桨叶叶片上的空泡体积及其随时间的变化是问题的关键。现代先进的CFD技术, 在计算螺旋桨空泡流方面取得了很大的进步。但在目前阶段, 由于流体粘性和空泡机理的复杂性, 有关的计算结果仍不能令人满意。用模型试验方法研究螺旋桨激振问题, 是目前公认的非非常实用而可靠的研究手段。

本文根据模型试验讨论了叶梢间隙比与螺旋桨诱导脉动压力之间大小的关系。对螺旋桨诱导脉动压力试验方法, 本文介绍了有关的试验研究方法

，其中包括：空泡水筒、伴流场模拟、脉动压力测量系统，模型与实船间的相似准则等。试验过程中，空泡水筒内的水速、压力信号和螺旋桨的推力、扭矩信号经放大器放大后送计算机进行A/D转换并处理，桨轴转速信号通过频率计同步输入。对测得的脉动压力经快速傅里叶变换(FFT)处理后，获得各阶叶频的幅值和脉动压力系数。空泡水筒中船后不均匀伴流场的模拟也是螺旋桨诱导脉动压力研究中的一项关键技术，本文介绍了船后不均匀伴流场的概念，对在水筒中为何用网格法模拟船后的流场作了叙述。

相对于其他船型，集装箱船舶螺旋桨的功率密度较高，诱导的船体激振力引起船舶剧烈振动的可能性倍增。为了降低螺旋桨的功率密度和提高推进效率，希望采用尽可能大的螺旋桨直径，但大的螺旋桨直径会减小梢隙，反过来可能增大螺旋桨在船体上的激振影响。本文以一条集装箱船舶螺旋桨为例，具体分析并探讨梢部间隙对螺旋桨诱导激振力的影响，对三个实用范围内的不同叶梢间隙比情况，即 $gt/D=0.25, 0.35$ 和 $0.45$ ，在不同的工况条件下即螺旋桨推力系数 $K_K, T >=0.10, 0.15, 0.20$ ，螺旋桨转速空泡数 $\sigma <, n >=1.5, 2.5, Atm$ ，在SSSRI空泡水筒，进行了模拟不均匀流场中螺旋桨模型的脉动压力测量。通过比较分析，找出能进一步减少螺旋桨空泡在船体表面诱导的脉动压力合适的梢间隙比。

用网格法在空泡水筒中模拟了对象集装箱船舶螺旋桨位置处的不均匀流场。通过对网格的多次调整和对流场的测量以及要求模拟结果的比较，完成了实船螺旋桨流场在空泡水筒中的模拟工作。

在脉动压力的测量试验中，通过固定螺旋桨转速、调节筒压和流速，达到空化数和推力系数方面的试验要求。测量螺旋桨脉动压力的五个传感器，布置在桨叶上方的一块平板上。可以调节平板到桨叶轴线的距离以达到叶梢间隙比的试验要求。脉动压力测量后记录的数据，由快速傅里叶变换(FFT)作出处理，得到各阶脉动压力系数，从中进行叶梢间隙大小对脉动压力影响的讨论和比较。

通过对三个不同叶梢间隙比( $\beta=0.25, 0.35, 0.45$ )、三个不同推力系数( $K_K, T >=0.10, 0.15, 0.20$ )和三个不同空泡数( $\sigma <, n >=1.5, 2.5, Atm$ )组合的共27组不同状况下五个测点上的螺旋桨诱导的脉动压力试验测量，对其测量数据处理后得到的一至五阶叶频谱调脉动压力系数

$K_K, PL > (L=1, 2, \dots, 5)$ ，以推力系数 $K_K, T >$ 、空泡数 $\sigma <, n >$ 和叶梢间隙比 $\beta$ 的函数形式 $K_K, PL >=f(K_K, T >, \sigma <, n >, \beta)$ ，用表格数据给予了表达。通过对表格数据的初步分析、研究后认为，脉动压力一阶叶频谱调脉动压力系数 $K_K, PL >$ 比较其他各阶叶频谱调脉动压力系数幅值为最大，往往可超过一个量阶以上。因此，在进一步的比较分析中，仅对一阶叶频谱调脉动压力系数 $K_K, PL >$ 与叶梢间隙比的关系进行讨论。

为了从不同的角度进行分析比较，本文分别给出了 $\sigma <, n >$ 常数时 $K_K, PL >=f(K_K, T >, \beta)$ 和 $K_K, T >$ 常数时 $K_K, PL >=f(\sigma <, n >, \beta)$ 的图示曲线。在给出的五个测点的一阶叶频谱调脉动压力系数 $K_K, PL >$ 与叶梢间隙比关系曲线中，可找出叶梢间隙比与脉动压力大小影响关系的一些共同特征。

从相同推力系数 $K_K, T >$ 不同空泡数 $\sigma <, n >$ 下的一阶叶频谱调脉动压力系数 $K_K, PL >$ 比较可以发现，桨叶空化引起的脉动压力明显高于因叶片厚度和桨叶负荷引起的脉动压力；对空泡数较大并与负荷系数组合后引起的脉动压力不太大的情况下，叶梢间隙比大小对脉动压力的影响不明显；对空泡数与负荷系数组合后主要由桨叶空化引起的脉动压力的情况下，对中等螺旋桨空化诱导的脉动压力在叶梢间隙比 $0.25\sim 0.35$ 的范围内，增加叶梢间隙比 $\beta$ 对降低脉动压力效果不佳，但对强的螺旋桨空化诱导的脉动压力，增大叶梢间隙比具有良好的降压效果。

本文还给出了叶梢间隙比在不同螺旋桨负荷和空泡条件下对脉动压力大小的影响斜率，在实际使用中具有参考价值。

本文得到有关间隙比大小对螺旋桨激振力影响的主要结论是：

- (1) 螺旋桨叶梢间隙比对脉动压力的影响主要与螺旋桨的负荷和空化水平的组合有关。
- (2) 对强的螺旋桨空化诱导的脉动压力，增加叶梢间隙比从 $0.25$ 到 $0.35$ 或者更大，可有效地降低诱导脉动压力。
- (3) 对中等的螺旋桨空化诱导的脉动压力，增加叶梢间隙比对降低脉动压力效果不佳，可应用小的 $0.25$ 左右的梢间隙比。

本论文共分五章，第一章介绍论文题目的提出及其研究的目标和范围，第二章介绍螺旋桨诱导激振力的基础概念与船舶振动的关系。第三章介绍达到本文研究目标所用的试验手段和方法，第四章给出梢间隙比对脉动压力研究的具体结果和分析，第五章给出了相关的结论。

因经费和时间的限制，本研究仅用了一个模型，未能实现同时在相同转速空化数和相同速度空化数下的不同负荷螺旋桨诱导脉动压力比较。有关负荷系数，空化数，间隙比与脉动压力系数之间进一步的定量关系尚待明确。

## 7. 期刊论文 船舶螺旋桨诱导的脉动压力和噪声的研究-船舶2001(6)

随着人们对船舶振动和噪音问题的关注，对作为引起船舶振动和噪音源之一的螺旋桨的研究也愈来愈深入。本文从螺旋桨设计及船尾流场，包括附体设计等方面，研究降低螺旋桨诱导的脉动压力及船尾噪音的途径。

## 8. 会议论文 朱锡清, 孙红星, 何凌 船舶螺旋桨噪声预报研究 2000

螺旋桨噪声是船舶三大噪声源之一，特别当船舶中高速行驶时，其噪声成为整个船舶辐射噪声中的主要分量[1]，为此对其噪声的成因、预报方法、螺旋桨参数和噪声之间的关系进行研究是具有重要工程意义的。船舶无空泡螺旋桨噪声是由离散谱器材拍(线谱噪声)和宽带噪声两部分所组成。

## 9. 学位论文 方会东 船舶螺旋桨空泡性能理论预报 2008

随着世界船舶业的发展，人们对船舶的航速以及主机的性能要求不断提高，但是由于船舶螺旋桨的尺寸受到各种限制而不能任意增加，故螺旋桨桨叶的负荷不断增大，在此情况下，螺旋桨往往无可避免的产生空泡现象。当螺旋桨出现空泡后，会对螺旋桨的性能产生不同程度的影响，或者使航速降低，或者使桨叶材料受到损害，或者使船体产生严重的振动和噪声等，因此在船舶设计阶段，对螺旋桨空泡进行理论预报是十分必要的。

论文分析了国内外进行螺旋桨性能研究的技术特点，详细介绍了各国学者对螺旋桨空泡理论的研究进展，以及在螺旋桨空泡理论预报中存在的问题和解决策略。

论文用理论的方法系统地分析了均匀流场和非均匀流场中的螺旋桨性能预报问题，包括螺旋桨定常水动力性能预报和螺旋桨非定常水动力性能预报。螺旋桨的非定常水动力性能采用时域方法求解，为了减少计算时间和降低计算机的存储量，论文采用了主桨叶方法，其它桨叶上的未知量均可由主叶片按一定相位角推算，在计算的每一时间步长的计算方法基本与定常时相同。

论文采用基于速度势的低阶面元法预报了螺旋桨的空泡性能，包括空泡韵长度和厚度等，并编制了相应的数值程序。本文以螺旋桨的每一个条带为研究对象。在预报空泡长度问题上，结合非定常性能计算压力分布，运用空泡产生条件解出空泡长度；在空泡厚度预报问题上，首先由格林公式推导出该问题的积分方程，然后在桨叶的每一个条带上离散方程，运用运动学边界条件、动力学边界条件、无穷远条件、压力库塔条件、空泡尾缘厚度为零条件等作为方程的定解条件，求解空泡区域的源汇强度和湿表面区域的偶极强度，根据空泡表面运动学条件，由求解出的空泡区域的源汇强度就能预报出空泡厚度。

论文最后采用本方法和程序对PHS01桨进行了校核计算，并与试验结果进行对比，结果比较令人满意，表明了本方法在理论上的可行性。

## 10. 期刊论文 史晓敏, SHI Xiao-min 船舶螺旋桨的偏振和抗冲击稳定性研究-机电工程2007, 24(9)

船舶螺旋桨的偏振对螺旋桨叶片的寿命和船体尾部的振动情况有着重要的影响，为了减少螺旋桨偏振、提高其抗冲击稳定性，运用理论分析和实验室模拟测试手段，研究了螺旋桨偏振发生的频段，提出了防范措施，具有广阔的推广应用前景。

## 引证文献(2条)

1. 文学栋, 王永生, 李坚波 船用螺旋桨桨叶应力数值计算[期刊论文]-船海工程 2010(1)

2. 赵宏梅, 林虎, 林海鹏, 程彬 螺旋桨桨叶交互式重心测量实验台的设计与开发[期刊论文]-组合机床与自动化加工技术 2009(3)

