

第十二届全国水动力学 研讨会文集

主 办

《水动力学研究与进展》编委会
中国造船工程学会
上 海 大 学
中国力学学会水动力学专业组

主 编

周连第 邵维文 戴世强



海洋出版社

第十二届全国水动力学 研讨会文集

主 办

《水动力学研究与进展》编委会
中国造船工程学会
上 海 大 学
中国力学学会水动力学专业组

周连第 邵维文 戴世强

海洋出版社

1998年·北京

内容简介

本书是《水动力学研究与进展》编委会、中国造船工程学会、上海大学、中国力学学会联合召开的第十二届全国水动力学研讨会文集,共选收论文1百多篇,主要反映船舶与海洋工程水动力学、水工水力学、工业与环境流体力学、计算流体力学、现代测试技术等方面的新进展、新水平、新面貌,可供有关专业科研和教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

第十二届全国水动力学研讨会文集

周连第 邵维文 戴世强主编. —北京:海洋出版社,1998.9

ISBN 7-5027-4603-X/P·486

I. 第… II. ①周…②邵…③戴… III. 水动力学-学术会议-

中国-文集 IV. TV131.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 19949 号

海洋出版社 出版发行

(100081 北京市海淀区大慧寺路8号)

上海交通大学印刷厂印刷 新华书店发行所经销

1998年9月第1版 1998年9月北京第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:43

字数:900千字 印数:1—250册

定价:96.00元

海洋版图书印、装错误可随时退换

目次

实效伴流雷诺数影响的数值模拟.....	许晶 高秋新 周连第(1)
2D—PIV 速度诊断数值方法研究与应用	张军 徐洁 何漠钦等(9)
应用计算机图形技术划分单元网格	王伟 游亚戈(18)
二阶精度的 VOF 自由面追踪方法	李谊乐 刘应中 缪国平(24)
二阶无振荡特征格式在对流扩散方程中的应用	于恒 忻孝康 沈一帆(30)
用 Lattice Boltzmann 方法求解对流扩散方法	程永光 张师华 陈鉴治等(36)
再谈差分格式的改造、改进和优化.....	方燕 孙红兵 刘儒勋(42)
一个简单的方程组实验模型及其应用	孙红兵 方燕 刘儒勋(48)
求解线接触弹流润滑完全数值解的多重网格复合直接迭代法	林晓辉 林晓道 吴京等(54)
解决流体、动力学某些问题的积分变换.....	陈振诚(62)
双板滑行激起的流场	陈振诚 刘慧敏 张红缨(68)
射孔水平管流场数值研究	周生田 张琪(74)
非淹没群丁坝绕流流场数值模拟	蒋昌波 陈永宽 胡旭跃等(79)
圆管实扩流场的紊流特性	齐清兰 张力霆(85)
环境湍流的若干探索性研究	余常昭 李玉梁 陈朝泉(91)
非均匀含水层污染物输送和生物降解数学模型的检验.....	李家伦 洪钟祥 孙菽芬(102)
利用藻类净化水源水质的实践与探讨.....	陈汉辉(111)
淹没射流流动的自由面形状与流场涡旋结构的数值研究.....	詹德新 王献孚(116)
水(磨料)射流切割技术及应用.....	刘丽萍 杜广生 王祝炜(122)
湍流基本定理及其应用.....	廖铭声(128)
渗流对井壁稳定性的影响研究.....	李治平 赵必荣 李仕伦(137)
低表面能涂层对流体边界层的影响.....	田军 薛群基(143)
冲蚀对管线受力特性影响的实验研究.....	浦群 李坤(146)
河工模型试验中表面流速测量的示踪粒子及跟随性修正.....	浦群 李坤(151)
垂直方柱局部波浪力.....	呼和敖德 李玉成 李广伟(156)
波高的长期极值统计分布.....	王运洪 董胜(162)
波浪、潮流相互作用的二维数学模型	朱志夏 白玉川 李大鸣(171)
轴对称物体上的三阶波浪力.....	滕斌 李玉成 董国海(178)
Boussinesq 方程波浪数学模型的原理及其验证	陈阳 张福然 赵军等(185)

波流共同作用下流场的数值模拟	李瑞杰	魏守林	张茂辉(192)
近岸海域波浪变形的一种数值模型	李瑞杰	张茂辉	王春胜(197)
多腿型重力式平台二阶绕射波浪力的积分解形式	黄 华	张水营	孙明光 吴建华等(202)
二层海中垂直复合圆柱二阶散射波作用算法探讨	黄 华	张水营	吴建华 罗志高(208)
浅水方桩柱对波浪的绕射及反射数值研究	徐梅坤	张永刚	李玉成(213)
浅水垂直圆桩柱对波浪作用产生的绕射现象数值模型	徐梅坤	张永刚	李玉成(219)
多向不规则波对双突堤的绕射试验研究	俞聿修	柳淑学	李毓湘(226)
横向挖槽内水平轴环流的模拟	夏军强	谈广鸣	吴卫民(234)
慢扩张旋涡的不稳定和破裂			夏 南(241)
二维水翼多工况点反命题的通用变分理论:人工振荡法			刘高联(247)
二维地效翼气动特性的粘性修正研究	张 亮	陈萌萌	吴德铭(251)
天然河流横向扩散系数计算的理论与实践		张蕴华	张玉清(257)
螺旋浆水动力的噪声相似关系研究	周心一	魏以迈	吴有生(262)
4.6万吨大型多功能化学品船船型研究	胡 平	周占群	刘世威(269)
船队钢缆测试系统			丁生奇(277)
超高速掺气水流中的激波现象可压缩及不可压缩流动理论		赵建福	李 炜(282)
掺气挑坎后下游掺气浓度变化过程		罗 铭	高旭东(287)
多孔介质中的热—水—盐动态迁移模型	杨荣贵	杜建华	雷树业(293)
多孔介质中双浮升力自然对流传热传质			陈宝明(299)
关于血细胞清洗问题的讨论			钱民全(306)
平面动力系统极限集的某些性质			盛平兴(312)
太阳系的运动连续否?			盛平兴(319)
尾墩型式引起挑跌水流动力学特性随机分析	崔 莉	王庆国	梁胜发等(323)
导流明渠施工的通航水力学计算与设计			杨光照(330)
长江三峡工程导流明渠通航水力学原型观测	陈元清	唐祥甫	汪世鹏(342)
大源渡航迈枢纽引航道布置的试验研究			刘晓平(351)
三峡电站至葛洲坝电站两坝间河段河道非恒定流特性的探讨	郭红民	董红燕	(356)
嘉陵江上游水能资源的开发与利用	韩 瑜	田嘉宁	李 惠(366)
潮汐河口悬浮物通量分解方法探讨			周华君(371)
沿岸流与沿岸输沙率计算	陈 虹		林建华(377)
推移质输沙率公式初探	王严平		张红武(383)

黄河高含沙浑水脉动压力和紊动特征讨论·····	王德昌 祝 杰 张厚军等(388)
蓄水水库的泥沙淤积·····	庞东明 王桂仙(395)
引黄灌区泥沙处理技术探讨·····	姜秀芳 刘国富 王普庆(399)
黄河下游不同粒径泥沙的输沙特性和来水来沙对下游河道冲淤影响 ·····	程秀文 尚红霞 田治安(405)
防波堤护堤块体的稳定性·····	毛昶熙 段祥宝 毛佩郁(410)
有压淹没泄水洞增大泄流能力的试验研究·····	许雨新 秦云香 梁跃平(417)
堤防决口过流能力计算方法的探讨·····	屈孟浩 潘贤娣 李 勇(424)
游荡性河道排洪宽度的选定·····	王普庆 黄鸿海 江恩惠(430)
浅析新时期黄河下游游荡性河道整治设计河宽的确定·····	张林忠 李宝玉(436)
黄河下游黑岗口至柳园口河段河势演变规律分析·····	尚红霞 罗华梁(442)
黄河下游河道整治设计流量浅析·····	张 清 江恩惠 张原锋(448)
悬移质泥沙级配的计算方法·····	赵连军 吴香菊 王原(455)
渭河口拦门沙疏浚河可行性分析·····	焦恩泽(461)
李家河水库双曲拱坝的水力设计·····	罗国杰 邵力群 杨维九等(468)
李家河拱坝消能与冲刷的试验研究·····	张连合 姚振华(473)
非恒定流桥墩局部冲刷试验研究·····	董年虎 段文忠 张红武等(481)
三门峡双层孔底孔工作闸门启闭力观场观测研究·····	勾兆莉 柴炳钦(487)
水力排淤管水力特性和体型设计探讨·····	黄智敏 丘宜平 卜水发(495)
低水头大流量拦河闸坝枢纽中船闸布置·····	陈灿辉(502)
马滩三期抽水站引水防淤措施的试验研究·····	赖翼峰 陈树容 潘载雄(506)
大型泵站拍门原型观测研究·····	陈先朴 梁 斌 武 锋(511)
怀洪新河河道整治及控制枢纽布置试验研究·····	虞邦义 王学功 左敦厚等(517)
水闸大孔口淹没堰流泄流能力的探讨·····	王学功 左敦厚 冯曙光等(522)
船闸输水廊道单支孔阻力系数研究·····	刘平昌 刘亚辉 王云莉(528)
河滩种树对行洪影响试验研究·····	黄本胜 赖冠文 邱 静(537)
西江河口磨刀门治理的工程效益·····	邢福磷 王淑玲 车文彩(544)
大河电站溢洪道水力试验研究·····	卜水发(549)
白石水库截流工程试验研究·····	闫功双 石凤君 姚静芬(553)
沟畦灌溉最优设计法探讨·····	袁辅恩 于兰发 董存仁(557)
牛顿流体、驱替 Bingham 流体过程的机理研究 ·····	邢义良 高 珉(565)
多孔介质中表面活性剂—碱—聚合物溶液的有效粘度·····	康满钧 王尤富(571)
用变流量生产测试资料确定井底静止压力的方法·····	廖锐全(576)
碱复合物驱段塞在油藏岩石中的运移·····	鲜成钢 郎兆新 张丽华(580)

控制棒水力驱动系统.....	金海龙	吴元强	(586)
多自由率下水力驱动控制棒的运动特性.....	迟宗波	吴元强	(593)
低比转速叶轮几何参数的优化计算.....	严 敬		(601)
扭曲叶片设计新方法.....	严 敬		(608)
亥姆霍兹谐振腔的实验研究.....	陈小榆	陈 平	施太和(614)
循环水管道振动原因分析及减振设计.....	王松岭	陈海平	张树芳等(618)
冷却塔填料及淋水分布的数值优化设计.....	黄东涛	陈允文	杜成琪(623)
离心风机长短片开缝技术的数值及应用研究.....	边晓东	唐旭东	黄东涛(629)
船舶空调系统动态热负荷数值计算和变频特性研究.....	韩厚德	郑青榕	(635)
铁路特长隧道运营后的温湿度预测.....	麦继婷	陈春光	(643)
壁湍流传热机理的研究.....	张 哲		(648)
二元翼栅中贴体面元奇点法空化流场分析的主要影响因素	任 静	常近时	(653)
一般密度分层流体中的高阶浅水内孤立波.....	程友良	戴世强	侯建军(660)
宽尾墩消减溢流坝下游波浪的试验验证.....	罗 铭	戴光清	(665)
小型水电站压力钢管加劲环.....		安龙生	(669)
山区小型水电站增大装机容量的可能性探讨.....		宋怀春	(675)
Numerical Simulation on Oil Spread on Water Surface	Liu Yingzhong	Liu Hedong	Zhang Huaixing et al(680)
A Study on Optimal Operational Control of Interception Sewer System	王林锁	A. B. 坦普尔曼	(686)

实效伴流雷诺数影响的数值模拟

许 晶 高秋新 周连第

(中国船舶科学研究中心, 上海 200011)

摘要: 本文用数值计算的方法模拟三维船舶尾流与螺旋桨之间的相互作用, 计算在四个不同量级雷诺数情况下(包括实船雷诺数 1.67×10^9 和模型雷诺数 1.67×10^6) 的水动力性能。船桨干扰采用三维不可压RANS 方程、K- ϵ 湍流模型和升力面理论作为基本研究工具进行相互干扰和迭代来预报此复杂流场及其螺旋桨的水动力性能。比较四个不同量级雷诺数情况下实效伴流分布及实效伴流分数的计算值, 初步探索实效伴流的雷诺数影响。

关键词: 桨-船干扰, 雷诺数, 实效伴流。

0 引言

船后伴流的速度场是很复杂的。由螺旋桨驱动的船舶尾部流动比没有螺旋桨工作时复杂得多。船后螺旋桨在不均匀尾流中引起空泡、脉动压力, 这些都是水动力噪声的重要来源, 因此实效伴流的准确预报对螺旋桨的设计不但有重要的理论价值, 而且有重大的实用意义。

有螺旋桨驱动的船舶尾部流动, 桨前部的轴向速度会由于螺旋桨的抽吸作用而逐渐加速, 越接近桨盘面, 螺旋桨的影响越大。而在螺旋桨作用区域, 由于螺旋桨的作用或诱导, 流体轴向速度有突然、显著的增大, 其量级有的高达 30%。这充分反映了螺旋桨对船尾流动具有不可忽视的影响。除了螺旋桨对船尾流动的作用外, 船尾流动对螺旋桨也产生了反作用, 直接影响着螺旋桨的性能。

另外, 除了 CFD 计算, 传统的方法一般认为获取伴流分数比较可靠的办法是进行专门的模型试验。但随着实船建造经验的积累和人们认识的深化, 发现船模的伴流分数与实船的伴流分数有很大的差别。船模和实船的伴流分数存在差别的原因是由尺度作用引起的, 即实船与船模的雷诺数相差很大(一般万吨船的雷诺数量级为 10^9 , 船模雷诺数的量级为 10^6), 长期以来人们都是通过经验换算的办法来解决这个问题的。

本文基于以上这些因素, 分析研究不同量级雷诺数(从模型雷诺数 1.67×10^6 至实船雷诺数 1.67×10^9) 船尾流场与螺旋桨周围流场相互作用, 包括周向伴流的变化, 螺旋桨的性能计算及平均化实效伴流的变化。

1 三维船尾流动的计算

三维船尾流场的控制方程包括不可压RANS 方程, 再加上K- ε 两方程湍流模式。矢量形式的控制方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\frac{\nu_{eff} (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T)}{2} \right] + \mathbf{fb} \quad (2)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla K = \nabla \cdot (\Gamma_K \nabla K) + G_e - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot (\Gamma_\varepsilon \nabla \varepsilon) + C_1 G_e \varepsilon - C_2 \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{V}, p, K, \varepsilon$ 分别表示速度矢量、压力湍动能和耗散率

$G_e = 0.5 \cdot \nu_i \cdot (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) : (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T)$, 为湍动能生成项

$\nu_i = C_u \cdot K^2 / \varepsilon$, 为湍流粘性系数

ν_{eff} 为有效粘性系数

$\Gamma_K, \Gamma_\varepsilon, C_1, C_2$ 和 C_u 为常数

$\mathbf{fb}$ 为引入的体力源项

控制方程用差分方法进行数值离散。采用了椭圆型贴体网格坐标变换, 将控制方程从柱坐标系转换到计算坐标系, 在计算坐标系中用隐式、指数格式进行数值离散, 得到的差分方程用 ADI、TDMA 和 SIMPLEC 进行求解。

对于高雷诺数 (如: 雷诺数高达 1.67×10^9) 情况下的船尾流动, 由于边界层非常薄, 若在壁面附近采用太密的网格, 对边界层解的稳定性和精确都有一定的影响。为克服这些缺陷, 本文引入二点壁函数, 参见 [2]。

2 螺旋桨的导入形式

本文采用螺旋桨性能计算程序[4], 用升力面理论预报作用在螺旋桨上的载荷分布。螺旋桨的作用以体积力 $\mathbf{fb}(\mathbf{fb}_x, 0, \mathbf{fb}_\theta)$ 来代替, 由升力面理论获得的载荷分布, 代入流场控制方程作为源项, 考虑螺旋桨对流体的作用。

体积力的大小取决于螺旋桨的推力系数 C_T 、扭矩系数 K_Q 和进速系数 J , 其表达式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{fb}_x &= A_x r^* \sqrt{1 - r^*} \\ \mathbf{fb}_\theta &= A_\theta \frac{r^* \sqrt{1 - r^*}}{(1 - Y_h) r^* + Y_h} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$A_x = \frac{C_T}{\Delta x} \frac{105}{16(4+3Y_h)(1-Y_h)} \quad (6)$$

$$A_\theta = \frac{K_Q}{\Delta x j^2} \frac{105}{\pi(4+3Y_h)(1-Y_h)}$$

$r^* = (Y - Y_h)/(1 - Y_h)$, $Y_h = r_h/r_p$, r_h 和 r_p 分别为桨毂半径和螺旋桨半径。

3 船尾流动与螺旋桨的相互干扰

在螺旋桨性能计算的时候, 在桨盘面位置须输入实效伴流分布, 由于在第一轮计算时实效速度分布是未知的, 那就需要相互迭代。当然 C_T 和 K_Q 以及 fb_x 和 fb_θ 的计算也需要一个迭代过程, 也就是说船舶尾流场的计算和螺旋桨的性能计算需反复迭代。

迭代次序如下:

- (1) 计算不带桨的光体尾部流场, 得到桨盘面的标称伴流分布, 即螺旋桨的进流条件;
- (2) 由螺旋桨进流条件计算螺旋桨所受到的载荷 C_T , K_Q 以及螺旋桨的诱导速度, 这样体积力 fb_x 和 fb_θ 便可求得;
- (3) 将体积力加到流场计算程序中作为源项, 求得总速度, 减去螺旋桨的诱导速度所得的是螺旋桨新的进流条件, 即实效伴流;
- (4) 以实效伴流输入螺旋桨的性能计算程序得到新的螺旋桨载荷分布和诱导速度;
- (5) 回到 (2), 进行新一轮的迭代, 如此反复直至计算达到收敛。

4 计算实例

选用航母线型SM-8503作为算例, 螺旋桨是B系列的, 船尾共有两对螺旋桨。并选择了四个不同量级的雷诺数 ($Re=1.67 \times 10^6$, $Re=1.67 \times 10^7$, $Re=1.67 \times 10^8$, $Re=1.67 \times 10^9$) 进行计算。

由于在船尾有桨作用, 研究高雷诺数桨、船相互作用时, 轴向网格 (特别在螺旋桨附近) 应该比较密集。本文选用的网格分布为 $90 \times 20 \times 30$, 分别为沿轴向、周向和径向。典型的网格布置如图1所示, 在物面及船尾和螺旋桨周围区域网格相对集中。

5 计算结果及分析

首先, 为验证计算程序的可靠性, 计算了螺旋桨在三种不同的进速系数下的推力系数 K_T 和扭矩系数 K_Q 。

表1 和图 2 给出了螺旋桨水动力系数的计算值与试验值的对比

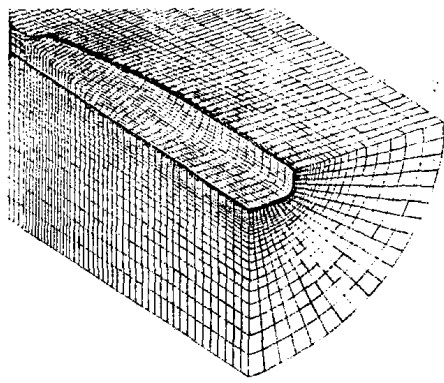


图 1 网格示意图

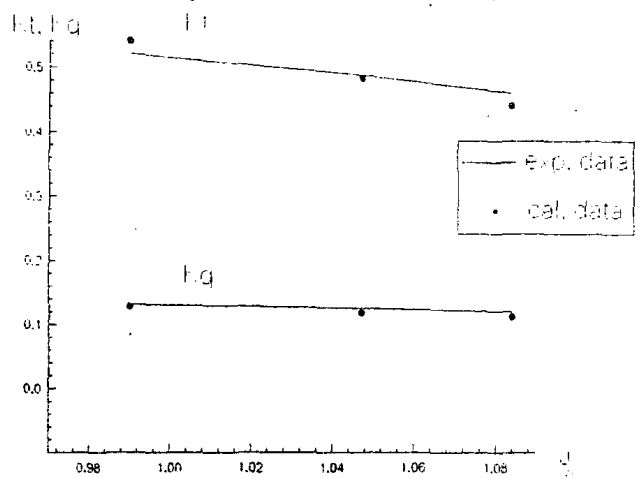


图 2 K_t 和 K_q

表 1

	$J=1.0839$		$J=1.047$		$J=0.9901$	
	K_T	K_Q	K_T	K_Q	K_T	K_Q
前桨计算值	0.284	0.0611	0.299	0.0635	0.320	0.0665
后桨计算值	0.271	0.0594	0.285	0.0615	0.305	0.0648
总 值	0.555	0.120	0.584	0.125	0.625	0.131
修正值	0.46	0.120	0.487	0.125	0.52	0.131
试验值	0.44	0.112	0.483	0.118	0.54	0.128

试验和计算的条件有些差异，试验中带有顺流段和桨毂等，而计算中没有考虑这些附件，根据经验，可以认为其影响主要表现为阻力，占总阻力约20%，因此带附体时的推力系数可认为从计算值中扣去附体的阻力。从图表中的计算修正结果与试验结果比较，吻合还是比较好的。同时也证明了该方法的可行性。

此外，分析四个不同量级雷诺数船尾流场与螺旋桨周围流场相互作用，包括周向伴流的变化，螺旋桨的性能计算及平均化实效伴流的变化 ($J=1.0893$)。

轴向速度直接影响螺旋桨的进速，同时也反映了边界层的厚度以及轴向动量的变化。图3 和图4给出的是光体轴向速度等值图 ($x=0.878$ 和 $x=0.939$ 剖面)，雷诺数从 1.67×10^6 到 1.67×10^9 。图5 和图6 分别给出的是这两个剖面在不同量级雷诺数下带桨运行的轴向速度等值图。如果和光体的轴向速度相比较，可以看出在螺旋桨后方（螺旋桨轴向位置分别为 $x=0.872$ 和 0.932 ），局部轴向速度显著增加，边界层明显变薄。由于螺旋桨的加速作用

使得螺旋桨附近及下游区域的速度急剧增加，轴向速度最大值达到1.2。也就是说螺旋桨附近的流体受到螺旋桨水动力性能的影响，而螺旋桨的性能反过来又取决于桨盘面的进流速度，这种相互影响的关系表明实效伴流场对螺旋桨的设计以及准确捕捉桨一船干扰的流场形态有重大意义。

从图3 ~图6 看出随着雷诺数从 1.67×10^6 到 1.67×10^9 增长，边界层变得越来越薄，这和理论是相符的。从这四张图中我们发现雷诺数对伴流的分布有较大影响，尤其是模型雷诺数和实船雷诺数，两者的伴流分布相差甚远。但对于雷诺数 1.67×10^8 和 1.67×10^9 ，差别就不是很大，这意味 10^9 已是临界雷诺数。

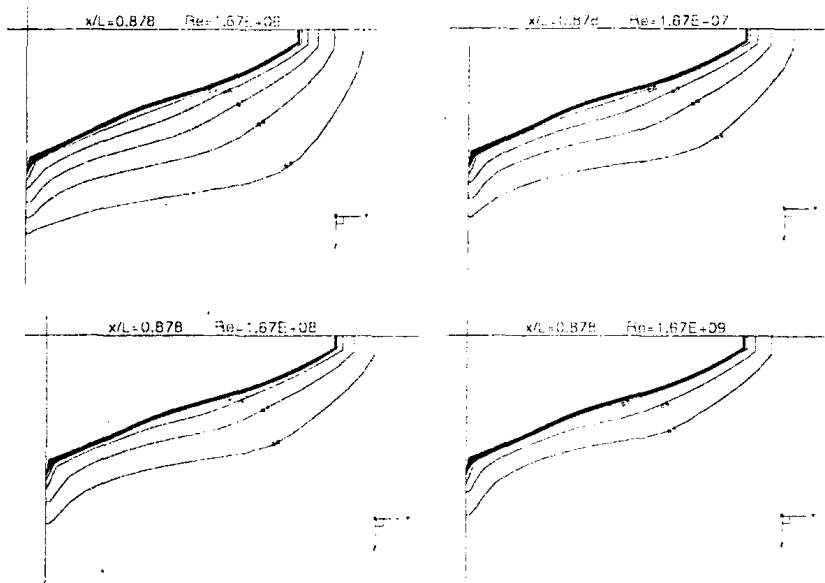


图 3 轴向速度等值图（ $x=0.878$ ，光体，四个不同雷诺数）

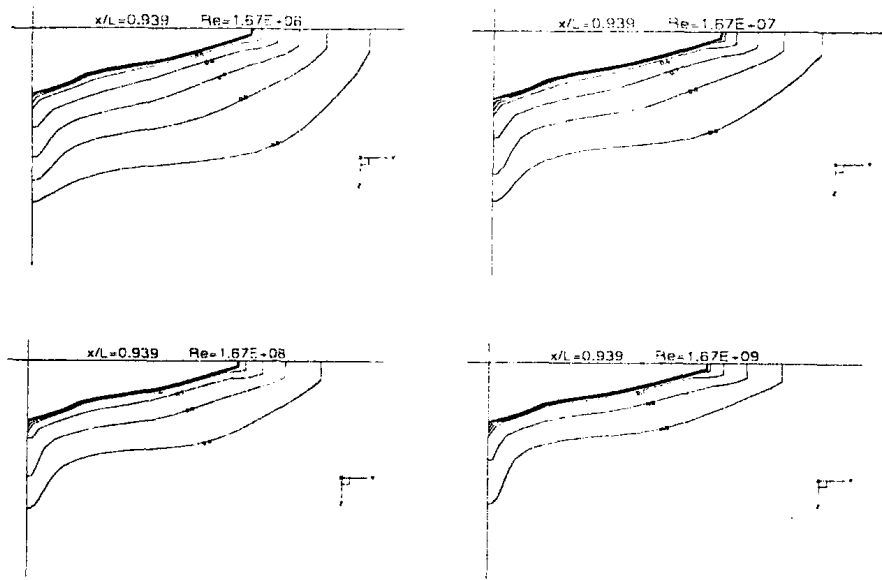


图 4 轴向速度等值图（ $x=0.939$ ，光体，四个不同雷诺数）

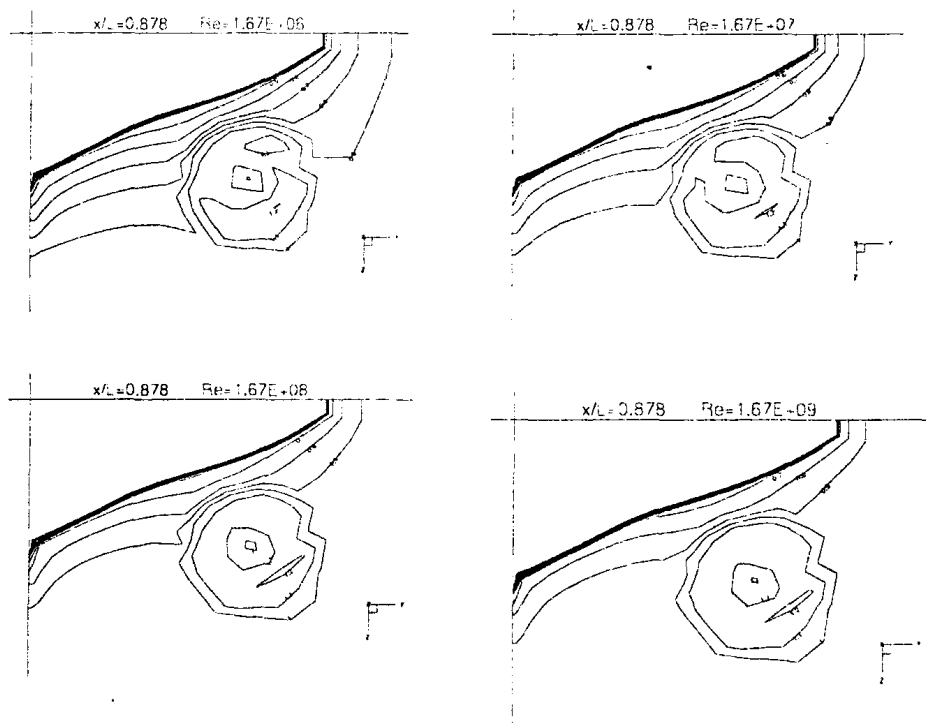


图 5 轴向速度等值图 ($x=0.878$, 带桨, 四个不同雷诺数)

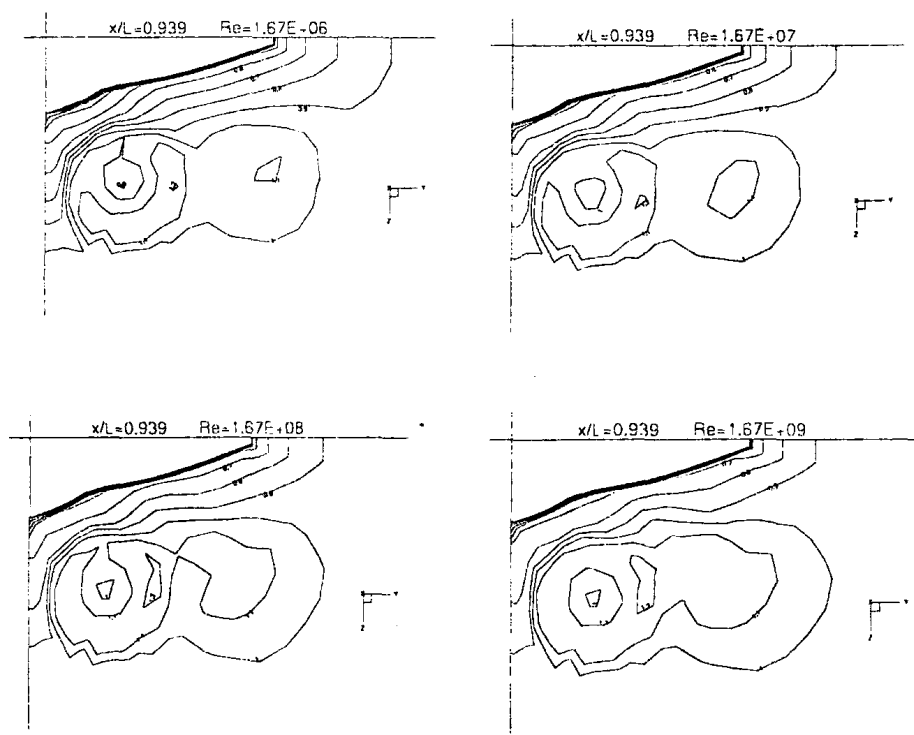


图 6 轴向速度等值图 ($x=0.939$, 带桨, 四个不同雷诺数)

本文还计算了实效伴流分数以及周向平均伴流的径向分布。

图 7 分别给出两个桨盘面在不同量级雷诺数下实效伴流周向平均值的径向分布, 随着雷诺数量级的增大, 在同一半径处值越来越小, 与图 5 和图 6 相符合。

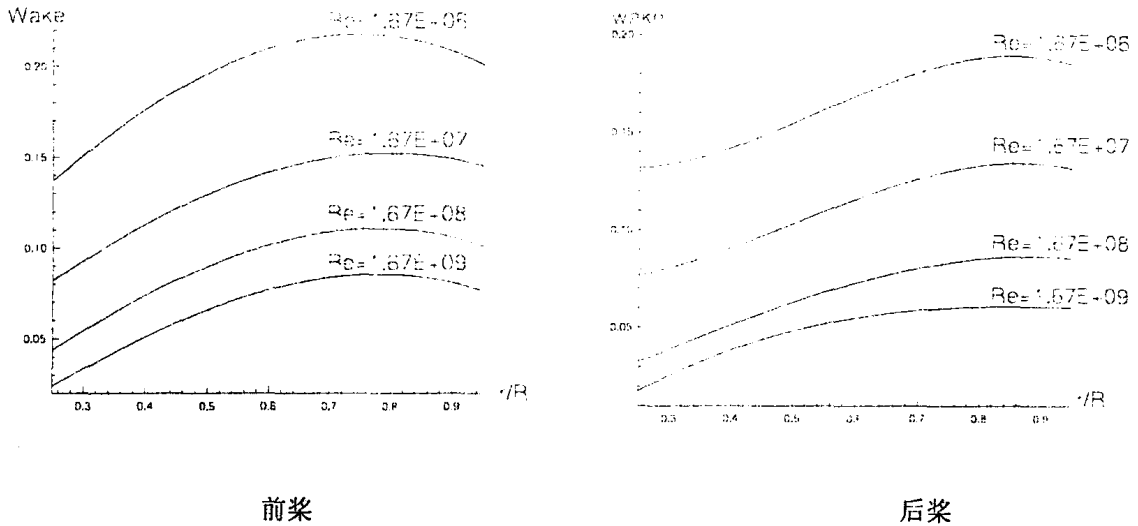


图 7 实效伴流的径向分布

表 2 伴流分数

	前 奖				后 奖			
Re=1.67×	×10 ⁶	×10 ⁷	×10 ⁸	×10 ⁹	×10 ⁶	×10 ⁷	×10 ⁸	×10 ⁹
标称伴流	0.16	0.11	0.09	0.07	0.17	0.11	0.09	0.07
合成伴流	0.12	0.07	0.03	0.01	0.10	0.05	0.02	0.00
实效伴流	0.18	0.13	0.09	0.07	0.16	0.11	0.07	0.05

表 2 列出了前桨和后桨的伴流分数。标称伴流分数是光体的计算结果, 合成伴流分数和实效伴流分数是桨一船干扰后的计算结果, 实效伴流即合成伴流减去螺旋桨诱导速度。从表 2 中可得出相同的结论, 即随着雷诺数从 1.67×10^6 增大至 1.67×10^9 , 伴流分数 (标称伴流、合成伴流及实效伴流) 逐渐减小。合成伴流分数与标称伴流分数的差别表明螺旋桨的加速作用十分明显。

前桨和后桨的水动力系数列于表 3。从该表中亦能找到一些规律：水动力系数 K_T 和 K_Q 随雷诺数量级增大而逐渐减小。

表3 螺旋桨水动力系数

	Re= 1.67×10^6		Re= 1.67×10^7		Re= 1.67×10^8		Re= 1.67×10^9	
	K_T	K_Q	K_T	K_Q	K_T	K_Q	K_T	K_Q
前 桨	0.313	0.0654	0.284	0.0611	0.259	0.0589	0.249	0.0573
后 桨	0.298	0.0635	0.271	0.0594	0.249	0.0571	0.239	0.0556
总 计	0.611	0.129	0.555	0.120	0.508	0.116	0.488	0.113

6 结 论

本文用数值计算的方法模拟了由螺旋桨驱动的船舶尾部流动的复杂结构和形态,给出了部分计算结果并作了定性和定量的分析,计算值和试验值的吻合比较满意。并初步探索了雷诺数对实效伴流及螺旋桨水动力性能的影响。从定性上正确预报了雷诺数对伴流带来的影响,为如何获得实船雷诺数下的伴流分布及其伴流分数提供了一条除了经验换算以外的新途径。

另外,试验验证也是一个必不可少的部分。为了能使计算流体动力学的研究成果迅速向工程实用化转移,就必须作大量的试验来验证计算方法的可靠性。因此,对高雷诺数下的计算结果从定量上的确认,还有待于作进一步的试验。

以后的工作还应考虑轴系和附件的影响,使方法的实用性更强。

参考文献

- 1 Gao,Q.X. and Zhou,L.D. (1994). Ship stern flow solver by 3-D unsteady RANS equation. proc. International Conference on Hydrodynamics, Wuxi, pp179-183.
- 2 Gao,Q.X. and Zhou,L.D. (1995). Numerical simulation of scale effect on ship stern flow and hydrodynamic performance. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 3(1995), 56-64.
- 3 Zhou, L. D. and Gao,Q.X. (1996). Numerical simulation of the interaction between the ship stern flow and multi-propellers. Proc. of the Second International Conference on Hydrodynamics, Hong Kong, pp253-258.
- 4 杨昌培 (1987). 一种预测螺旋桨性能(定常)的算法及程序. 中国船舶科学研究中心, 研究报告 87134.

2D-PIV 速度诊断数值方法研究与应用

张军 徐洁 何漠钦 倪兵

(中国船舶科学研究中心, 无锡 214082)

摘 要 本文介绍了 2D-PIV 技术中一种基于自相关的速度诊断数值方法, 采用 FFT 方法进行自相关计算及空间频域的低通滤波。对粒子、诊断窗口等因素对诊断精度的影响进行了有益的探讨。并应用本方法, 对称机翼绕流场 PIV 图像进行位移诊断。

关键词 测速, 自相关, 粒子图像, 傅里叶变换, 机翼

1 2D-PIV 速度诊断方法的发展及研究意义

作为现代流场测试技术, PIV 技术以其非接触式、全场、瞬时及定量测速等优点而倍受人们关注。目前, 无论国内外, PIV 技术正从机理性试验研究走向工程应用研究。速度诊断是 PIV 技术的一个重要环节。其手段及效率, 直接关系到 PIV 技术的测量精度及其实用性。

采用胶片记录的 PIV, 两次曝光成像于同一胶片, 其速度诊断主要有两种方法, 即杨氏条纹方法和粒子图像方式。粒子图像方式又可分为图像自相关方法、傅里叶变换方法和条纹细化方法等。在 PIV 发展初期, 大多采用杨氏条纹方法诊断。该方法先应用光学方法, 对粒子图像作一次傅里叶变换, 因而计算量较小。当时与 AST386 微机相结合, 取 51×51 诊断点, 处理这样一幅 $35\text{mm} \times 24\text{mm}$ 的底片, 往往需要一个工作日。随着计算机技术的迅速发展, 杨氏条纹诊断方法逐渐被遗弃, 粒子图像方式取而代之。在 90 年代初, 还要将一幅底片划分成数十幅子图像分别处理后, 再合成整幅速度场, 处理起来还是比较麻烦。现在, 已具备了一次性处理整幅底片的能力。

2D-PIV 速度诊断, 涉及到粒子浓度、粒子尺寸、Peak 阈值、诊断窗口的移动与否、诊断窗口的尺寸和速度梯度等的影响。探究这些因素, 对于参数的正确选择以及实验的合理设置, 具有指导意义。这是本文的研究目的之一。另外, 为加快运算速度, 本文将快速傅里叶变换方法 FFT 引入自相关计算。并利用 FFT 方法进行空间频域的低通滤波, 以抑制高频图像噪声。最后, 将本方法应用于对称机翼绕流场 PIV 粒子图像的速度诊断。

2 方 法

2.1 自相关速度诊断

对于两次曝光于同一幅底片的粒子图像, 假定每一诊断区域内粒子位移是基本均匀的, 对此区域内粒子位移的进行统计平均, 可得到该区域内粒子平均位移。具体地经过以下三步:

(1) 首先, 对该区域粒子图像作自相关计算, 即可得到自相关函数:

$$h(m,n) = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^N f(I,J)f(I+m, J+n) \quad (1)$$

其中 $f(I,J)$ 是粒子图像的灰度函数。

该相关过程可采用 FFT 方法完成, 即对(1)式两边同时进行 FFT 变换, 得到:

$$H(u,v) = F(u,v) * \bar{F}(u,v) \quad (2)$$

其中,

$$F(u,v) = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^N f(I,J) \text{EXP}(2 \times \Pi(-\frac{uI}{N} - \frac{vJ}{N})) \quad (3)$$

$\bar{F}(u,v)$ 是 $F(u,v)$ 的共轭。 $H(u,v)$ 是 $h(m,n)$ 的傅里叶变换, 对 $H(u,v)$ 进行傅里叶逆变换, 即可得到相关函数 $h(m,n)$ 。

(2) 搜索相关函数的次大峰

对于相关函数 $h(m,n)$, 其最大峰在(0,0), 次大峰在 $(\Delta X, \Delta Y)$ 和 $(-\Delta X, -\Delta Y)$ 对称地分布在最大峰的两侧。在得到相关函数后, 采用优化方法搜索得到次大峰位置。

由于不能判别位移到底是 $(\Delta X, \Delta Y)$, 还是 $(-\Delta X, -\Delta Y)$, 因此自相关方法中存在所谓粒子位移方向的二义性问题。

对于方向二义性问题, 可应用流体力学理论知识判别、或借助于流态显示判别、或采用预偏置位移方法。

(3) 在搜索出次大峰后, 利用其相邻两点的相关值, 作抛物线拟合, 得到子像素精度的位移值。

再将粒子平均位移除以两次曝光的时间间隔, 即得到该区域的流场速度。

2.2 空间频域的低通滤波

如果将以灰度为函数的粒子图像作为时域, 那么, 对灰度函数的傅里叶变换则得到了空间频域。灰度函数可表示为

$$f(m,n) = f_o(m,n) + d_o(m,n) \quad (4)$$

其中 $f_o(m,n)$ 是粒子图像的真实信号, 而 $d_o(m,n)$ 是图像噪声, 来自于流场中的细小杂