

文章编号: 1007-7294(2008)02-0211-14

阻力和流场的 CFD 不确定度分析探讨

张楠, 沈泓萃, 姚惠之

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 为了解并研究 CFD 中不确定度分析的整个过程和细节, 依照 ITTC 推荐规程, 针对 SUBOFF 潜艇阻力和流场的数值模拟结果, 进行了 CFD 中的不确定度分析和探讨。数值计算中采用了 5 套网格, 网格加细比 $r_G = \sqrt{2}$ 。在此基础上, 进行了验证分析, 评估了数值误差和数值不确定度, 验证过程全部完成。而后进行了确认分析, 评估了对比误差和确认不确定度, 确认过程全部完成。

关键词: 计算流体动力学; 潜艇; 不确定度; 阻力; 流场

中图分类号: U661.3

文献标识码: A

Uncertainty analysis in CFD for resistance and flow field

ZHANG Nan, SHEN Hong-cui, YAO Hui-zhi

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: In order to comprehend and study the whole process and details of uncertainty in CFD, according to the ITTC-Recommended Procedures, uncertainty analysis in CFD is carried out with the numerical results of the resistance and flow field of SUBOFF. Five grids are used in the numerical simulation and the grid refinement ratio $r_G = \sqrt{2}$. Based on these results, the verification analysis is performed. Numerical error and numerical uncertainty are evaluated, so the verification process is conducted completely. Subsequently, the validation analysis is performed. Comparison error and validation uncertainty are evaluated, so the validation process is conducted completely.

Key words: CFD; submarine; uncertainty; resistance; flow field

1 前言

CFD 中的不确定度分析是一项非常重要也非常复杂的工作, 它的理论基础需要严谨周密的数学推导, 它的具体实施需要耐心细致的深入研究。国际上已经在此领域开展了广泛的探讨。第 22 届 ITTC 会议在质量手册规程 7.5-03-01-01 “CFD 中的不确定度分析—验证与确认的方法和规程”^[1]和 7.5-03-02-01 “CFD 中的不确定度分析—阻力和流场的范例”^[2]中对于 CFD 不确定度分析的一般方法和过程给出了详细的描述, 并给出了针对一条裸船体阻力和兴波的 CFD 计算结果进行不确定度分析的例子。ITTC 质量手册规程是基于 Stern 等人的工作 (Coleman 和 Stern 1997^[3]; Stern 2001^[4]; Wilson 2001^[5]; Wilson 和 Stern 2002^[6])。这些规程被推荐给 2000 年在哥德堡 (Gothenburg) 召开的数值船舶水

收稿日期: 2007-08-13

作者简介: 张楠 (1977-), 男, 硕士, 中国船舶科学研究中心工程师。

动力学会议使用,并积累了宝贵的经验。中国船舶科学研究中心对于 ITTC 推荐的模型试验与 CFD 计算中的不确定度分析方法和规程进行了系统的整理和翻译^[7],并在国内加以推广。

在 ITTC 推荐规程形成之后,研究者对于 CFD 中不确定度分析进行了更广泛更深入的研究。Simonsen 和 Stern(2003)^[8]对于油轮 Esso Osaka 的绕流进行了 CFD 计算,并较为全面地利用了 ITTC 推荐规程,分析了计算中积分量和点变量的不确定度。计算中采用系列变化的三套网格,最精细的一套网格数为 200 万,计算中不考虑自由液面,而是采用重叠模处理。研究主要集中于验证(verification)过程,特别是流场的验证过程。Van 等人(2003)^[9]对于 DARPA SUBOFF 潜艇裸艇体和带四个尾翼艇体的绕流进行了数值模拟,计算中采用三套网格,然后依照 ITTC 推荐规程,针对裸艇体表面压力,分析了数值计算中的不确定度。值得注意的是,作者虽然也计算了带附体潜艇的绕流,却只在裸艇体上进行了不确定度分析。Weymouth 等人(2003)^[10]依照 ITTC 推荐规程对于 Wigley 船在规则波顶浪状态下的 CFD 计算进行了不确定度分析。验证中采用三套网格。在最精细的网格上进行时间步长的研究,网格研究中则选取中间尺度的时间步长。对于纵向力、升沉和纵摇运动的计算进行了确认(validation)。对于复杂的船体,Bull 等人(2002)^[11]选用考察船“Alliance”做了 CFD 计算中的不确定度分析。计算为全附体状态,包括桨轴、轴支架和舵。两个不同的小组采用两套不同的软件进行了计算。一个小组只用了两套网格就进行了不确定度分析,另一小组用了三套网格然后按照 ITTC 推荐规程进行了不确定度分析。

随着 CFD 中不确定度分析工作的进一步开展,ITTC 推荐规程也引起了很多争议,主要集中在验证和确认中所使用的具体方法上。Larsson 等人(2003)^[12]指出,2000 年数值船舶水动力学会议的很多与会代表都对 ITTC 推荐规程提出了异议,因而此规程还需要进一步完善。2004 年在葡萄牙里斯本召开的 CFD 不确定度分析工作会议指出,对于二维结构化网格的简单问题,国际上尚难以找出使所有研究者都信服的最佳规程,更不用说经常有非结构化网格出现的复杂实际问题了^[13]。这说明国际水动力学界对于 CFD 中的不确定度分析方法尚未达成一致。第 24 届 ITTC 阻力委员会的最终报告也承认,目前的 ITTC 推荐规程还只是一个中间阶段,鼓励研究者在实际应用中使用并完善^[14]。

毋庸讳言,CFD 中的不确定度分析已经越来越受到人们的瞩目,并为此开展了广泛而深入的研究工作,尽管人们对于 CFD 中不确定度分析的具体方法还有争议,但大家都承认这确实是一项必需而且重要的工作。2005 年在日本东京召开的 CFD 工作会议(CFD Workshop Tokyo, 2005)上,与会的绝大多数代表都认为应该对他们的计算结果进行不确定度分析,这是大势所趋,是计算中必不可少的一步,代表了一个正确的方向。

在国内,朱德祥等人^[15]参照 ITTC 临时规程对于 SUBOFF 裸艇体的粘流场进行了数值模拟,并且对表面压力系数进行了不确定度分析,进行了初步的应用实践。

本文依照 ITTC 推荐规程,对于文献[16]中 SUBOFF 潜艇阻力和流场的 CFD 计算结果进行了不确定度分析和探讨。

2 CFD 不确定度分析过程简述

本部分内容引自文献[1]。

CFD 中的不确定度分析由验证(verification)和确认(validation)两个过程组成^[1,7]。“验证”和“确认”两词的翻译参照文献[17]。误差和不确定度的定义与试验不确定度分析一样。数值模拟结果 S 与真值 T 之差即为数值模拟误差,它由模型误差 δ_{SM} 和数值误差 δ_{SN} 两部分相加而成。即:

$$\delta_S = S - T = \delta_{SM} + \delta_{SN} \quad (1)$$

对于特定的情况,数值误差 δ_{SN} 的符号和大小可以估计为:

$$\delta_{SN} = \delta_{SN}^* + \varepsilon_{SN} \quad (2)$$

其中 δ_{SN}^* 是 δ_{SN} 的估计值(包括符号和大小), ε_{SN} 是估计中的误差。修正模拟值可以得到数值基准 S_C , 其定义为:

$$S_C = S - \delta_{SN}^* \quad (3)$$

验证的定义是计算数值模拟中的数值不确定度 U_{SN} 的过程, 并且当条件允许时, 还要估计数值模拟中的数值误差自身的符号和大小 δ_{SN}^* 及此误差估计中的不确定度 $U_{S_{C,N}}$ 。对于未修正的数值模拟方法, 数值误差可以分解成来自于迭代次数、网格尺寸、时间步长及其它参数的误差 $\delta_I, \delta_G, \delta_T, \delta_{P\infty}$ 这样, 数值模拟的数值不确定度可以用下式表示:

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 + U_T^2 + U_P^2 \quad (4)$$

至于修正过的数值模拟方法, 对解进行修正, 可以得到数值基准 S_C 。数值误差的估计值 δ_{SN}^* 和修正值的不确定度 $U_{S_{C,N}}$ 可以由下式给出:

$$\delta_{SN}^* = \delta_I^* + \delta_G^* + \delta_T^* + \delta_P^* \quad (5)$$

$$U_{S_{C,N}}^2 = U_{I_C}^2 + U_{G_C}^2 + U_{T_C}^2 + U_{P_C}^2 \quad (6)$$

确认的定义是利用基准试验数据评估数值模拟的建模不确定度 U_{SM} 的过程, 并且当条件允许时, 还要估计建模误差 δ_{SM} 自身的符号和大小。对比误差 E 由试验数据 D 和模拟值 S 相减得到:

$$E = D - S = \delta_D - (\delta_{SM} + \delta_{SN}) \quad (7)$$

其中建模误差 δ_{SM} 可以分解为两部分: 由模型假定导致的误差和使用以前的试验数据(如流体特性等)产生的误差。因此对比误差 E 合成了试验和数值模拟中的误差。通过比较 E 和确认不确定度 U_V 来判断确认实现与否。其中:

$$U_V^2 = U_D^2 + U_{SN}^2 \quad (8)$$

如果 $|E| < U_V$, D 和 S 的所有误差的组合小于 U_V , 则 U_V 这一层次的确认得以实现, 如果 $U_V \ll |E|$, 可以利用 $E - \delta_{SM}$ 的符号和大小改进模型。修正过数值模拟之后, 等价方程为:

$$E_C = D - S_C = \delta_D - (\delta_{SM} + \delta_{SN}) \quad (9)$$

$$U_{V_C}^2 = U_{E_C}^2 - U_{SM}^2 = U_D^2 + U_{S_{C,N}}^2 \quad (10)$$

3 计算模型、参数与结果

针对潜艇标模 SUBOFF 阻力的 CFD 数值计算结果(总阻力系数 C_T , 积分量)和流场的 CFD 计算结果(无量纲轴向速度 u_x/u_0 , 点变量)给出了不确定度分析, 亦即验证与确认过程。计算模型几何与表面网格见图 1。网格数从 10 万增加到 500 万。雷诺数 $Re=3.5 \times 10^7$ 。选用的 CFD 代码为商用软件 FLUENT。基于求解 RANS 方程的方法进行计算, 采用离散求解器, 阻力的计算选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 流场的计算选用 $k-\omega$ 湍流模型。压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。

CFD 中的不确定度分析是一项相当复杂和繁琐的工作, 在分析过程中, 要罗列大量的计算公式和计算表格, 最终的报告篇幅很长。为了说明问题, 又不造成文章的冗长, 本文仅描述主要的分析结果, 详细的分析过程和结果参见文献[16, 18, 19]。

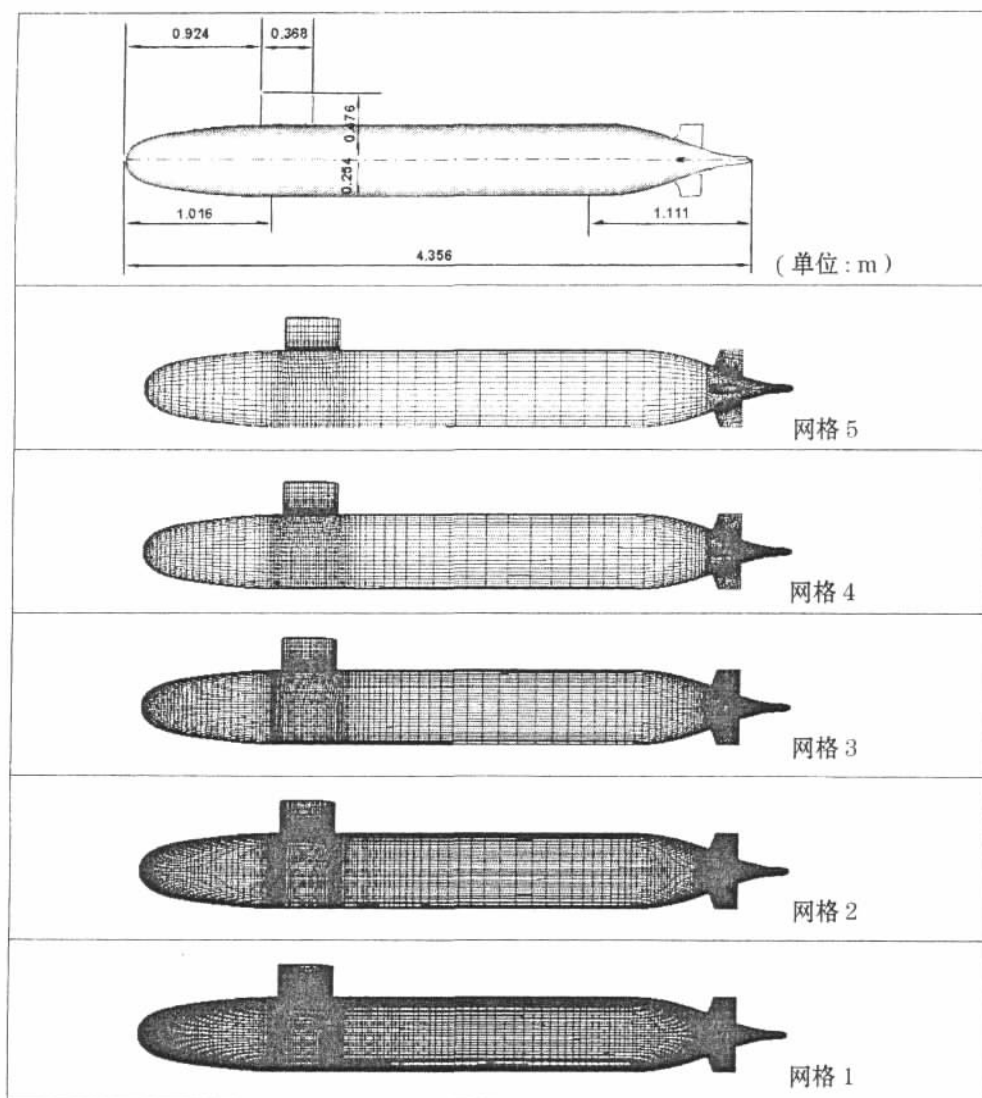


图 1 SUBOFF 潜艇模型几何与表面网格

Fig.1 Geometry and surface grid of submarine model SUBOFF

4 不确定度分析

4.1 阻力的不确定度分析

4.1.1 验证

阻力的计算结果见表 1。总阻力系数的数值计算结果用 S_G 表示。参照 ITTC 推荐规程^[1,2]进行不确定度分析。ITTC 推荐规程^[1]指出, 可以利用系统参数加细的多重解来研究迭代和参数的收敛性。规程进一步指出, 关于输入参数的收敛性研究, 至少需要三重解来评价。本文中采用五套网格来评价收敛性, 网格在三个方向上的加细比 r_G 按照 ITTC 的推荐, 选取 $r_G = \sqrt{2}$ 。由于是定常绕流计算, 而且在变化网格的过程中其它参数都保持不变, 所以 $\delta_{S_N} = \delta_I + \delta_G$, $U_{S_N}^2 = U_I^2 + U_G^2$, 即数值不确定度由迭代不确定度和网格不确定度组成, 因而我们可以根据迭代与网格收敛性研究来进行验证。

借助检查 SUBOFF 潜艇全附体受力的迭代过程, 来评估迭代收敛性。图 2 给出了网格 2 (1.89M) 的最后阶段的迭代历程。由五套网格最后阶段迭代历程最大值 S_U 与最小值 S_L 间距之半来估计迭代不

确定度, 亦即:

$$U_i = \left| \frac{1}{2} (S_U - S_L) \right| \quad (11)$$

表 1 总阻力系数计算结果

Tab.1 Computed total resistance coefficients

网格编码 (G)	网格数 (10^6 , M)	总阻力系数 S_G (10^{-3})
1	5.02	2.922
2	1.89	2.954
3	0.68	3.038
4	0.24	3.237
5	0.096	3.738

网格 1~5 的相关计算结果见表 2。由表中数据可知, 网格 1~5 的迭代不确定度量级为 $0.001\ 35\% \sim 0.009\ 02\% S_G$, 在文献[17]中作者详细论述了迭代不确定度约比网格不确定度小两个数量级, 所以可以假定五套网格的迭代误差与迭代不确定度能够忽略不计 (即 $\delta_i \ll \delta_G$, $U_i \ll U_G$; 以致于 $U_{SN} = U_G$), 这一点在文献[2]中也同样有详细说明, 在此不再赘述。

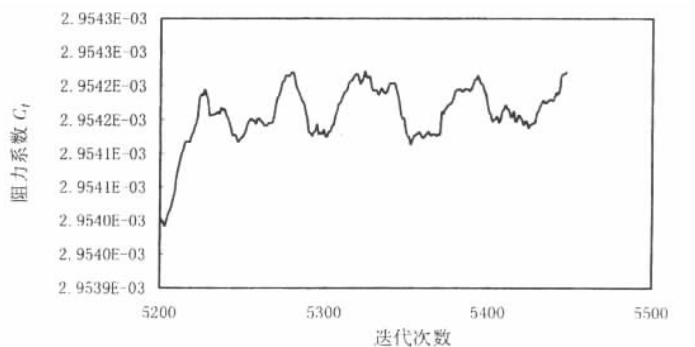


图 2 网格 2 的迭代历程

Fig.2 Iteration history of grid 2

表 2 迭代历程研究

Tab.2 Iteration history study

网 格	1	2	3	4	5
S_G (10^{-3})	2.922	2.954	3.038	3.237	3.738
$U_i = \left \frac{1}{2} (S_U - S_L) \right $ (10^{-7})	2.635	1.148	1.678	0.715	0.504
S_G %	0.009 02	0.003 87	0.005 52	0.002 21	0.001 35

相邻两套网格对应的阻力系数之差用 ε_G 表示, 则有:

$$\varepsilon_{G21} = S_{G2} - S_{G1} = (2.954 - 2.922) \times 10^{-3} = 0.032 \times 10^{-3} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{G32} = S_{G3} - S_{G2} = (3.038 - 2.954) \times 10^{-3} = 0.084 \times 10^{-3} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{G43} = S_{G4} - S_{G3} = (3.237 - 3.038) \times 10^{-3} = 0.199 \times 10^{-3} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{G54} = S_{G5} - S_{G4} = (3.738 - 3.237) \times 10^{-3} = 0.501 \times 10^{-3} \quad (15)$$

收敛率 R_G 的计算如下:

$$R_{G1} = \frac{\varepsilon_{G21}}{\varepsilon_{G32}} = 0.381 \quad (16)$$

$$R_{G2} = \frac{\varepsilon_{G32}}{\varepsilon_{G43}} = 0.422 \quad (17)$$

$$R_{G3} = \frac{\varepsilon_{G43}}{\varepsilon_{G54}} = 0.397 \quad (18)$$

按照文献[1]中所述, 可能出现的收敛状况有三种:

a. 单调收敛: $0 < R < 1$;

b. 振荡收敛: $R < 0$;

c. 发散: $R > 1$ 。

由于 $0 < R_{G1}, R_{G2}, R_{G3} < 1$, 所以五套网格为单调收敛的, 网格收敛性满足。

依照文献[1], 对于系列变化的三重解, 即可提供由广义 Richardson 外推法计算的准确度阶数和误差的单项估计值:

准确度阶数估计:

$$p_{G1} = \frac{\ln(\varepsilon_{G32}/\varepsilon_{G21})}{\ln(r_G)} = \frac{\ln(0.084/0.032)}{\ln(\sqrt{2})} = 2.784 \quad (19)$$

误差估计:

$$\delta_{RE_{G1}}^* = \frac{\delta_{G21}}{r_G^{p_{G1}} - 1} = \frac{0.032 \times 10^{-3}}{(\sqrt{2})^{2.784} - 1} = 0.0197 \times 10^{-3} \quad (20)$$

$$p_{G2} = \frac{\ln(\varepsilon_{G43}/\varepsilon_{G32})}{\ln(r_G)} = \frac{\ln(0.199/0.084)}{\ln(\sqrt{2})} = 2.489 \quad (21)$$

$$\delta_{RE_{G2}}^* = \frac{\delta_{G32}}{r_G^{p_{G2}} - 1} = \frac{0.084 \times 10^{-3}}{(\sqrt{2})^{2.489} - 1} = 0.0614 \times 10^{-3} \quad (22)$$

$$p_{G3} = \frac{\ln(\varepsilon_{G54}/\varepsilon_{G43})}{\ln(r_G)} = \frac{\ln(0.501/0.199)}{\ln(\sqrt{2})} = 2.664 \quad (23)$$

$$\delta_{RE_{G3}}^* = \frac{\delta_{G43}}{r_G^{p_{G3}} - 1} = \frac{0.199 \times 10^{-3}}{(\sqrt{2})^{2.664} - 1} = 0.131 \times 10^{-3} \quad (24)$$

修正因子 C_G 的计算如下, 其中按照文献[2]推荐, $p_{Gest}=2$ 。

$$C_{G1} = \frac{r_G^{p_{G1}} - 1}{r_G^{p_{Gest}} - 1} = \frac{(\sqrt{2})^{2.784} - 1}{(\sqrt{2})^2 - 1} = 1.625 \quad (25)$$

$$C_{G2} = \frac{r_G^{p_{G2}} - 1}{r_G^{p_{Gest}} - 1} = \frac{(\sqrt{2})^{2.489} - 1}{(\sqrt{2})^2 - 1} = 1.369 \quad (26)$$

$$C_{G3} = \frac{r_G^{p_{G3}} - 1}{r_G^{p_{Gest}} - 1} = \frac{(\sqrt{2})^{2.664} - 1}{(\sqrt{2})^2 - 1} = 1.518 \quad (27)$$

由于 $|1 - C_G| > 0.125$, 所以对于 U_G 的讨论采用修正因子法; 由于 $|1 - C_G| > 0.25$, 所以对于 U_{Gc} 的讨论也同样采用修正因子法。

若将上述 C_G 看作远小于 1 或远大于 1 的情况(缺少置信度时), 则 U_G 得到估计, 但没有估计 δ_G :

$$U_{G1} = |C_{G1} \delta_{RE_{G1}}^*| + |(1 - C_{G1}) \delta_{RE_{G1}}^*| \\ = |1.625 \times 0.0197 \times 10^{-3}| + |(1 - 1.625) \times 0.0197 \times 10^{-3}| = 0.0443 \times 10^{-3} \quad (28)$$

$$U_{G2} = |C_{G2} \delta_{RE_{G2}}^*| + |(1 - C_{G2}) \delta_{RE_{G2}}^*| \\ = |1.369 \times 0.0614 \times 10^{-3}| + |(1 - 1.369) \times 0.0614 \times 10^{-3}| = 0.107 \times 10^{-3} \quad (29)$$

$$U_{G3} = |C_{G3} \delta_{RE_{G3}}^*| + |(1 - C_{G3}) \delta_{RE_{G3}}^*| \\ = |1.518 \times 0.131 \times 10^{-3}| + |(1 - 1.518) \times 0.131 \times 10^{-3}| = 0.267 \times 10^{-3} \quad (30)$$

若将 C_G 看作接近于 1 的情况(存在置信度时), 则带修正因子的误差 δ_G^* 和不确定度 U_{Gc} 都得到了估计:

$$\delta_{G1}^* = C_{G1} \delta_{RE_{G1}}^* = 1.625 \times 0.0197 \times 10^{-3} = 0.0320 \times 10^{-3} \quad (31)$$

$$\delta_{G2}^* = C_{G2} \delta_{RE_{G2}}^* = 1.369 \times 0.0614 \times 10^{-3} = 0.0841 \times 10^{-3} \quad (32)$$

$$\delta_{G3}^* = C_{G3} \delta_{RE_{G3}}^* = 1.518 \times 0.131 \times 10^{-3} = 0.199 \times 10^{-3} \quad (33)$$

修正后的数值模拟结果基准 S_c 的计算如下:

$$S_{c1} = S_{G1} - \delta_{G1}^* = (2.922 - 0.032) \times 10^{-3} = 2.890 \times 10^{-3} \quad (34)$$

$$S_{c2} = S_{G2} - \delta_{G2}^* = (2.954 - 0.0841) \times 10^{-3} = 2.867 \times 10^{-3} \quad (35)$$

$$S_{c3} = S_{G3} - \delta_{G3}^* = (3.038 - 0.199) \times 10^{-3} = 2.839 \times 10^{-3} \quad (36)$$

修正值的不确定度 U_{Gc} 的计算如下:

$$U_{Gc1} = |(1 - C_{G1}) \delta_{RE_{G1}}^*| = |(1 - 1.625) \times 0.0197 \times 10^{-3}| = 0.0123 \times 10^{-3} \quad (37)$$

$$U_{Gc2} = |(1 - C_{G2}) \delta_{RE_{G2}}^*| = |(1 - 1.369) \times 0.0614 \times 10^{-3}| = 0.0227 \times 10^{-3} \quad (38)$$

$$U_{Gc3} = |(1 - C_{G3}) \delta_{RE_{G3}}^*| = |(1 - 1.518) \times 0.131 \times 10^{-3}| = 0.0679 \times 10^{-3} \quad (39)$$

将上述结果原始数据列于表 3 中, 并将 U_{Gc} 、 δ_G^* 、 U_{Gc} 以 % S_c 的形式列于表 4 中。

表 3 总阻力系数计算值的验证

Tab.3 Verification of computed total resistance coefficient

网格研究	R_G	p_G	C_G	$U_G (10^{-3})$	$\delta_G^* (10^{-3})$	$U_{Gc} (10^{-3})$	$S_c (10^{-3})$
1(网格 1~3)	0.381	2.784	1.625	0.0443	0.032	0.0123	2.89
2(网格 2~4)	0.422	2.489	1.369	0.107	0.0841	0.0227	2.867
3(网格 3~5)	0.397	2.664	1.518	0.267	0.199	0.0679	2.839

表 4 总阻力系数计算值的验证(% S_c)

Tab.4 Verification of computed total resistance coefficient (% S_c)

网格研究	R_G	p_G	C_G	$U_G (\%S_c)$	$\delta_G^* (\%S_c)$	$U_{Gc} (\%S_c)$	$S_c (10^{-3})$
1(网格 1~3)	0.381	2.784	1.625	1.53	1.11	0.43	2.89
2(网格 2~4)	0.422	2.489	1.369	3.73	2.93	0.79	2.867
3(网格 3~5)	0.397	2.664	1.518	9.40	7.01	2.39	2.839

4.1.2 确认

由于目前缺少 SUBOFF 全附体阻力的基准检验试验(Benchmark Test)数据, 所以本文中此过程只是一种尝试, 目的在于深入了解确认的整个过程和细节。根据大量的计算积累得到的经验, 由数值模拟结果反推出了全附体阻力的试验值为 $D=2.925 \times 10^{-3}$, 并假设 $U_D=2\%D$ 。

对比误差 E 的计算如下:

$$E_1 = D - S_1 = (2.925 - 2.922) \times 10^{-3} = 0.003 \times 10^{-3} = 0.1\%D \quad (40)$$

$$E_2 = D - S_2 = (2.925 - 2.954) \times 10^{-3} = -0.029 \times 10^{-3} = -0.99\%D \quad (41)$$

$$E_3 = D - S_3 = (2.925 - 3.038) \times 10^{-3} = -0.113 \times 10^{-3} = -3.86\%D \quad (42)$$

确认不确定度 U_v 的计算如下:

$$U_{V1} = \sqrt{U_{SN1}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G1}^2 + U_D^2} = (\sqrt{0.0443^2 + 0.0585^2}) \times 10^{-3} = 0.0734 \times 10^{-3} = 2.5\%D \quad (43)$$

$$U_{V2} = \sqrt{U_{SN2}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G2}^2 + U_D^2} = (\sqrt{0.107^2 + 0.0585^2}) \times 10^{-3} = 0.122 \times 10^{-3} = 4.2\%D \quad (44)$$

$$U_{V3} = \sqrt{U_{SN3}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G3}^2 + U_D^2} = (\sqrt{0.267^2 + 0.0585^2}) \times 10^{-3} = 0.273 \times 10^{-3} = 9.3\%D \quad (45)$$

因为 $|E_1| < U_{V1}$, 所以 U_{V1} 这一层次(网格 1~3)的确认得以实现。

因为 $|E_2| < U_{V2}$, 所以 U_{V2} 这一层次(网格 2~4)的确认得以实现。

因为 $|E_3| < U_{V3}$, 所以 U_{V3} 这一层次(网格 3~5)的确认得以实现。

修正模拟结果的对比误差 E_C 的计算如下:

$$E_{C1} = D - S_{C1} = (2.925 - 2.89) \times 10^{-3} = 0.035 \times 10^{-3} = 1.2\%D \quad (46)$$

$$E_{C2} = D - S_{C2} = (2.925 - 2.867) \times 10^{-3} = 0.058 \times 10^{-3} = 1.9\%D \quad (47)$$

$$E_{C3} = D - S_{C3} = (2.925 - 2.839) \times 10^{-3} = 0.086 \times 10^{-3} = 2.9\%D \quad (48)$$

修正模拟结果的确认不确定度 U_{Vc} 的计算如下:

$$U_{Vc1} = \sqrt{U_{ScN1}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{Gc1}^2 + U_D^2} = (\sqrt{0.0123^2 + 0.0585^2}) \times 10^{-3} = 0.0598 \times 10^{-3} = 2.0\%D \quad (49)$$

$$U_{Vc2} = \sqrt{U_{ScN2}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{Gc2}^2 + U_D^2} = (\sqrt{0.0227^2 + 0.0585^2}) \times 10^{-3} = 0.0627 \times 10^{-3} = 2.1\%D \quad (50)$$

$$U_{Vc3} = \sqrt{U_{ScN3}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{Gc3}^2 + U_D^2} = (\sqrt{0.0679^2 + 0.0585^2}) \times 10^{-3} = 0.0896 \times 10^{-3} = 3.1\%D \quad (51)$$

因为 $|E_{C1}| < U_{Vc1}$, 所以 U_{Vc1} 这一层次(网格 1~3)的确认得以实现。

因为 $|E_{C2}| < U_{Vc2}$, 所以 U_{Vc2} 这一层次(网格 2~4)的确认得以实现。

因为 $|E_{C3}| < U_{Vc3}$, 所以 U_{Vc3} 这一层次(网格 3~5)的确认得以实现。

4.2 流场的不确定度分析

潜艇尾流场轴向速度是一种空间分布的点变量,亦即在桨盘面不同半径上周向 $0 \sim 360^\circ$ 的范围内满足某种连续分布。从尾流场相位角的间距来看,某半径上的轴向速度或等间距分布或不等间距分布,这完全取决于研究者对数据的具体处理。而不管怎样处理,对这种空间分布的点变量进行的 CFD 不确定度分析都是一件非常复杂的事情,其工作量也远远大于对积分量的不确定度分析。

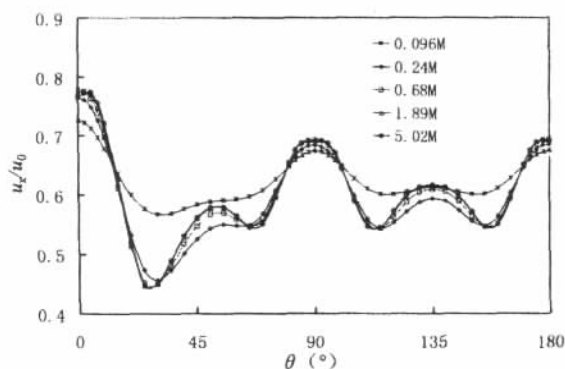
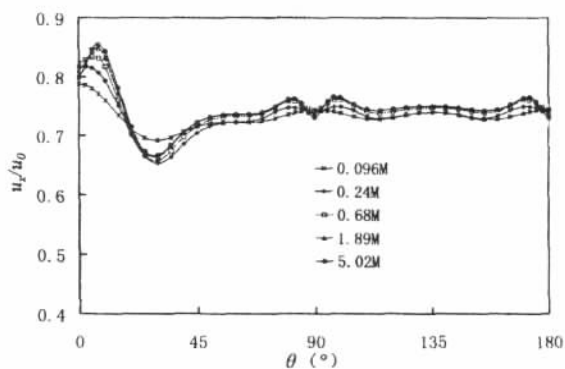
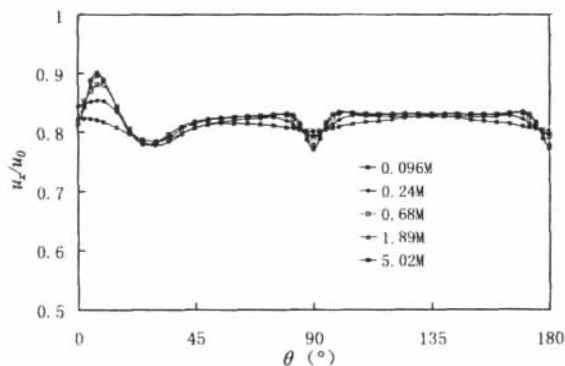
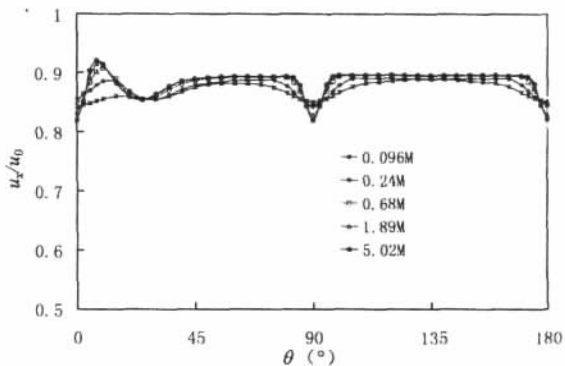
由于计算量太大,数据表格太多,为了说明尾流场不确定度分析的过程和方法,又不造成文章的冗长繁琐,所以仅对 $r/R_{\max} = 0.5$ 半径上的计算结果进行不确定度分析。其他半径上的计算结果请参看文献[19]。

4.2.1 验证

不同网格数下 SUBOFF 潜艇全附体尾流场的计算结果见图 3~6。尾流场位于 $x/L = 0.978$ 处, L 为艇长。尾流场数据中 0 表示上垂直翼, 180 表示下垂直翼, u_x 为轴向速度, u_0 为远方来流速度, R_{\max} 为艇体最大半径。计算域为对称面的一侧,所以图 3~6 只给出了 $0 \sim 180^\circ$ 之间的流场。

对于 $r/R_{\max} = 0.5$ 上的流场,采用五套网格来评价收敛性,网格在三个方向上的加细比 $r_G = \sqrt{2}$ 。由于是定常绕流计算,而且在变化网格的过程中其它参数都保持不变,所以 $\delta_{SN} = \delta_I + \delta_G$, $U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2$, 即数值不确定度由迭代不确定度和网格不确定度组成,因而我们可以根据迭代与网格收敛性研究来进行验证。

在文献[19]中作者详细论述了迭代不确定度约比网格不确定度小两个数量级,所以可以假定五套网格的迭代误差与迭代不确定度能够忽略不计(即 $\delta_I \ll \delta_G$, $U_I \ll U_G$; 以致于 $U_{SN} = U_G$),这一点在文献[2]中也同样有详细说明,在此不再赘述。

图3 轴向速度分布($r/R_{\max}=0.3$)Fig.3 Axial velocity distribution ($r/R_{\max}=0.3$)图4 轴向速度($r/R_{\max}=0.4$)Fig.4 Axial velocity distribution ($r/R_{\max}=0.4$)图5 轴向速度($r/R_{\max}=0.5$)Fig.5 Axial velocity distribution ($r/R_{\max}=0.5$)图6 轴向速度($r/R_{\max}=0.6$)Fig.6 Axial velocity distribution ($r/R_{\max}=0.6$)

相邻两套网格对应的每个相位角上的 u_x/u_0 (用 S_G 表示) 之差用 ε_G 表示, 则有:

$$\varepsilon_{G21} = S_{G2} - S_{G1} \quad (52)$$

$$\varepsilon_{G32} = S_{G3} - S_{G2} \quad (53)$$

$$\varepsilon_{G43} = S_{G4} - S_{G3} \quad (54)$$

$$\varepsilon_{G54} = S_{G5} - S_{G4} \quad (55)$$

按照上述公式计算出的 ε_G 为 0° ~ 180° 之间一系列的值, 依照 ITTC 规程, 需要对它们进行 2 范数处理, 即:

$$\|\varepsilon_G\|_2 = \left[\sum_{i=1}^N \varepsilon_{Gi}^2 \right]^{1/2} \quad (56)$$

收敛率 R_G 的计算如下:

$$R_{G1} = \frac{\|\varepsilon_{G21}\|_2}{\|\varepsilon_{G32}\|_2} = \frac{0.021\ 27}{0.038\ 15} = 0.557 \quad (57)$$

$$R_{G2} = \frac{\|\varepsilon_{G32}\|_2}{\|\varepsilon_{G43}\|_2} = \frac{0.038\ 15}{0.056\ 95} = 0.670 \quad (58)$$

$$R_{G3} = \frac{\|\varepsilon_{G43}\|_2}{\|\varepsilon_{G54}\|_2} = \frac{0.056\ 95}{0.084\ 33} = 0.675 \quad (59)$$

按照文献[1]中所述, 可能出现的收敛状况有三种:

- 单调收敛: $0 < R < 1$;
- 振荡收敛: $R < 0$;
- 发散: $R > 1$ 。

由于 $0 < R_{G1}, R_{G2}, R_{G3} < 1$, 所以五套网格为单调收敛的, 在 $r/R_{max}=0.5$ 上的网格收敛性满足。

依照文献[1], 对于系列变化的三重解, 即可提供由广义 Richardson 外推法计算的准确度阶数估计值。

准确度阶数估计:

$$p_{G1} = \frac{\ln(\|\varepsilon_{G32}\|_2 / \|\varepsilon_{G21}\|_2)}{\ln(r_G)} = \frac{\ln(3.815/2.127)}{\ln\sqrt{2}} = 1.686 \quad (60)$$

其中, $\|\cdot\|_2$ 表示基于 N 个解 2 范数的平均。

$$p_{G2} = \frac{\ln(\|\varepsilon_{G43}\|_2 / \|\varepsilon_{G32}\|_2)}{\ln(r_G)} = \frac{\ln(5.695/3.815)}{\ln\sqrt{2}} = 1.156 \quad (61)$$

$$p_{G3} = \frac{\ln(\|\varepsilon_{G54}\|_2 / \|\varepsilon_{G43}\|_2)}{\ln(r_G)} = \frac{\ln(8.433/5.695)}{\ln\sqrt{2}} = 1.132 \quad (62)$$

修正因子 C_G 的计算如下, 其中按照文献[1]推荐, $p_{Gest}=2$ 。

$$C_{G1} = \frac{r_G^{p_{G1}} - 1}{r_G^{p_{Gest}} - 1} = \frac{(\sqrt{2})^{1.686} - 1}{(\sqrt{2})^2 - 1} = 0.794 \quad (63)$$

$$C_{G2} = \frac{r_G^{p_{G2}} - 1}{r_G^{p_{Gest}} - 1} = \frac{(\sqrt{2})^{1.156} - 1}{(\sqrt{2})^2 - 1} = 0.493 \quad (64)$$

$$C_{G3} = \frac{r_G^{p_{G3}} - 1}{r_G^{p_{Gest}} - 1} = \frac{(\sqrt{2})^{1.132} - 1}{(\sqrt{2})^2 - 1} = 0.481 \quad (65)$$

误差估计 $\delta_{RE_G}^*$ 按下式计算:

$$\delta_{RE_{G1}}^* = \frac{\varepsilon_{G21}}{r_G^{p_{G1}} - 1} \quad (66)$$

$$\delta_{RE_{G2}}^* = \frac{\varepsilon_{G32}}{r_G^{p_{G2}} - 1} \quad (67)$$

$$\delta_{RE_{G3}}^* = \frac{\varepsilon_{G43}}{r_G^{p_{G3}} - 1} \quad (68)$$

若将上述 C_G 看作远小于 1 或远大于 1 的情况(缺少置信度时), 则 U_G 得到估计, 计算公式如下:

$$U_{G1} = |C_{G1} \delta_{RE_{G1}}^*| + |(1 - C_{G1}) \delta_{RE_{G1}}^*| \quad (69)$$

$$U_{G2} = |C_{G2} \delta_{RE_{G2}}^*| + |(1 - C_{G2}) \delta_{RE_{G2}}^*| \quad (70)$$

$$U_{G3} = |C_{G3} \delta_{RE_{G3}}^*| + |(1 - C_{G3}) \delta_{RE_{G3}}^*| \quad (71)$$

用 $\|U_G\|_2$ 表示在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的区域中, 对应 N 个点的 2 范数, 即:

$$\|U_G\|_2 = \left[\sum_{i=1}^N U_{Gi}^2 \right]^{1/2} \quad (72)$$

若将 C_G 看作接近于 1 的情况(存在置信度时), 则带修正因子的误差 δ_G^* 和不确定度 U_G 都得到了估计。

$$\delta_{G1}^* = C_{G1} \delta_{RE_{G1}}^* \quad (73)$$

$$\delta_{G2}^* = C_{G2} \delta_{RE_{G2}}^* \quad (74)$$

$$\delta_{G3}^* = C_{G3} \delta_{RE_{G3}}^* \quad (75)$$

修正后的数值模拟结果基准 S_c 的计算如下:

$$S_{c1} = S_{G1} - \delta_{G1}^* \quad (76)$$

$$S_{c2} = S_{G2} - \delta_{G2}^* \quad (77)$$

$$S_{c3} = S_{G3} - \delta_{G3}^* \quad (78)$$

修正值的不确定度 U_{Gc} 的计算如下:

$$U_{Gc1} = \left| (1 - C_{G1}) \delta_{RE_{G1}}^* \right| \quad (79)$$

$$U_{Gc2} = \left| (1 - C_{G2}) \delta_{RE_{G2}}^* \right| \quad (80)$$

$$U_{Gc3} = \left| (1 - C_{G3}) \delta_{RE_{G3}}^* \right| \quad (81)$$

将上述结果原始数据列于表5中,表中数据都为基于2范数的平均值。并将 U_G 、 U_{Gc} 以 $\% \zeta_{\max}$ 的形式列于表6中,其中 $\zeta_{\max} = 0.8838$ 为试验中 $r/R_{\max} = 0.5$ 上 u_x/u_0 的最大值。

表5 尾流场数值计算的验证 ($r/R_{\max} = 0.5$)

网格研究	R_G	p_G	C_G	U_G	U_{Gc}
1(网格 1~3)	0.557	1.686	0.794	0.026 79	0.005 52
2(网格 2~4)	0.670	1.156	0.493	0.077 42	0.039 25
3(网格 3~5)	0.675	1.132	0.481	0.118 55	0.061 53

表6 尾流场数值计算的验证 ($\% \zeta_{\max}$, $r/R_{\max} = 0.5$)

网格研究	R_G	p_G	C_G	$U_G (\% \zeta_{\max})$	$U_{Gc} (\% \zeta_{\max})$
1(网格 1~3)	0.557	1.686	0.794	3.03	0.62
2(网格 2~4)	0.670	1.156	0.493	8.76	4.44
3(网格 3~5)	0.675	1.132	0.481	13.41	6.96

4.2.2 确认

文献[20]中对 SUBOFF 潜艇模型裸艇体、裸艇体+围壳、裸艇体+尾翼的尾流场进行了详细的试验测量,并且绘制在图中。本文全附体尾流场的试验数据由文献[20]中三部分尾流场拼接而成,并做了雷诺数的修正。依文献[20],尾流场试验测量的不确定度为 $U_D = 2\% U_{ref}$ 。

对比误差 E 的计算如下:

$$E_1 = D - S_1 \quad (82)$$

$$E_2 = D - S_2 \quad (83)$$

$$E_3 = D - S_3 \quad (84)$$

其中, D 为试验中的 u_x/u_0 , S 为计算中的 u_x/u_0 。

确认不确定度 U_v 的计算如下:

$$U_{v1} = \sqrt{U_{Sv1}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G1}^2 + U_D^2} \quad (85)$$

$$U_{v2} = \sqrt{U_{Sv2}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G2}^2 + U_D^2} \quad (86)$$

$$U_{v3} = \sqrt{U_{Sv3}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G3}^2 + U_D^2} \quad (87)$$

表7中给出了以2范数形式表示的尾流场数值的确认过程。

表 7 尾流场数值计算的确认(E, U_v)

Tab.7 Validation of numerical computed tail flow field (E, U_v)

网 格	$ E _2$		网格研究	$ U_v _2$	
	数 值	(% r_{max})		数 值	(% r_{max})
1	0.112 5	12.73	1(网格 1~3)	0.136 8	15.48
2	0.097 8	11.07	2(网格 2~4)	0.154 9	17.53
3	0.070 1	7.93	3(网格 3~5)	0.179 0	20.26

分析表 7 中的数据可知,从基于 2 范数的平均值来看,存在 $|E| < U_v$, 亦即 $r/R_{max}=0.5$ 上尾流场的数值计算得到确认。

网格研究 1、2、3 对应的 E 和 U_v 绘于图 7、8、9 中。

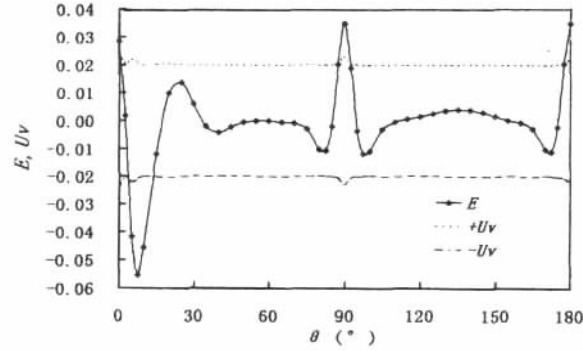


图 7 网格研究 1 对应的 E 和 U_v

Fig.7 E and U_v of grid study 1

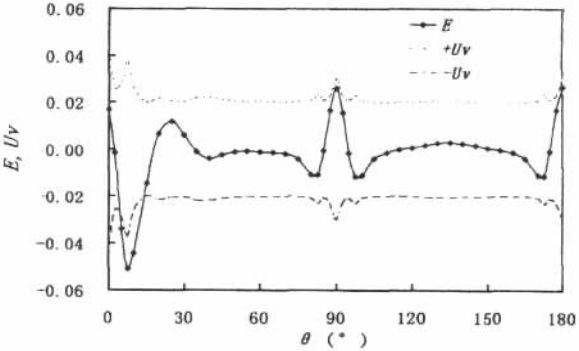


图 8 网格研究 2 对应的 E 和 U_v

Fig.8 E and U_v of grid study 2

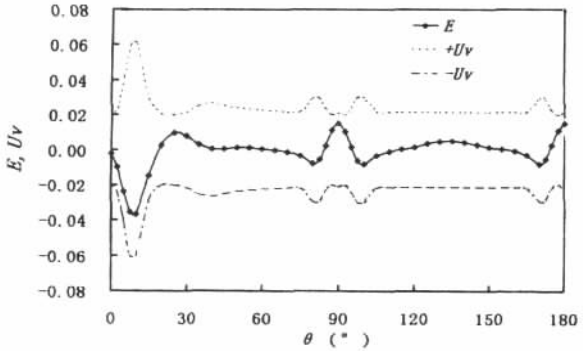


图 9 网格研究 3 对应的 E 和 U_v

Fig.9 E and U_v of grid study 3

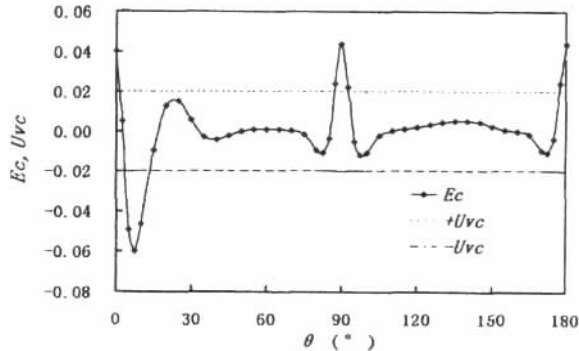


图 10 网格研究 1 对应的 E_c 和 U_{v_c}

Fig.10 E_c and U_{v_c} of grid study 1

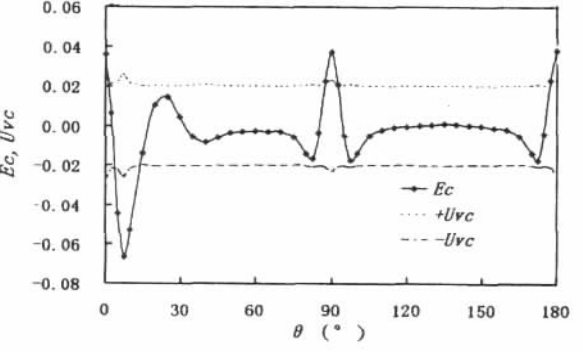


图 11 网格研究 2 对应的 E_c 和 U_{v_c}

Fig.11 E_c and U_{v_c} of grid study 2

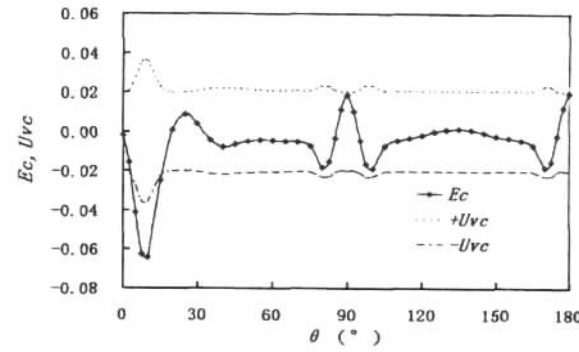


图 12 网格研究 3 对应的 E_c 和 U_{v_c}

Fig.12 E_c and U_{v_c} of grid study 3

修正模拟结果的对比误差 E_C 的计算如下:

$$E_{C1} = D - S_{C1} \quad (88)$$

$$E_{C2} = D - S_{C2} \quad (89)$$

$$E_{C3} = D - S_{C3} \quad (90)$$

修正模拟结果的确认不确定度 U_{V_C} 的计算如下:

$$U_{V_{C1}} = \sqrt{U_{S_{C1}}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G_{C1}}^2 + U_D^2} \quad (91)$$

$$U_{V_{C2}} = \sqrt{U_{S_{C2}}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G_{C2}}^2 + U_D^2} \quad (92)$$

$$U_{V_{C3}} = \sqrt{U_{S_{C3}}^2 + U_D^2} = \sqrt{U_{G_{C3}}^2 + U_D^2} \quad (93)$$

表 8 中给出了以 2 范数形式表示的尾流场数值计算修正模拟结果的确认过程。

网格研究 1、2、3 对应的 E_C 和 U_{V_C} 绘于图 10、11、12 中。

表 8 尾流场数值计算的确认(E_C, U_{V_C})

Tab.8 Validation of numerical computed tail flow field (E_C, U_{V_C})

网 格	$ E_C _2$		网格研究	$ U_{V_C} _2$	
	数 值	(% ϵ_{\max})		数 值	(% ϵ_{\max})
1	0.129	14.60	网格 1~3	0.134	15.16
2	0.131	14.81	网格 2~4	0.140	15.82
3	0.119	13.46	网格 3~5	0.148	16.70

分析表 8 中的数据可知,从基于 2 范数的平均值来看,存在 $|E_C| < U_{V_C}$, 亦即 $r/R_{\max}=0.5$ 上尾流场的数值计算得到确认。

从图 7~12 中可知,除了 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 附近少数点外,绝大多数的点态值的计算结果都得到确认。

5 结 语

本文依照 ITTC 关于 CFD 不确定度分析的推荐规程,对 SUBOFF 潜艇全附体状态阻力和尾流场的数值计算结果进行了初步的不确定度分析,完成了验证和确认过程,尝试了 CFD 不确定度分析的一般方法和途径,为今后进一步结合基准检验试验而进行的 CFD 不确定度分析打下了基础。本文中的工作对于指导 CFD 进一步发展,建立 CFD 数值模拟的可信度都是有益的。

通过本文中的研究分析,形成下列几点认识:

(1) ITTC 推荐的 CFD 不确定度分析方法与规程,理论框架清晰,具有较严格的数学基础(模拟误差方程、Richardson 外推法等),自成一个较完备的理论体系,注重实效,易于实施。其内核思想受试验流体动力学(EFD)中的不确定度分析方法影响很深,所以对 CFD 工作者来说,了解 EFD 中不确定度分析的方法和流程是有益的。

(2) 网格设计与计算参数的选定是非常重要的。CFD 工作者积累的经验和自身的素养对参数变化范围的确定是很有帮助的。在文献[16]中,作者曾系统地探讨了网格数量、计算区域大小(边界位置)、湍流模型及壁面 y^+ 对于计算结果的影响,这些工作都有助于本文中的不确定度分析。

(3) 针对某物理量的不确定度分析,应至少进行 3 重细化网格的研究,以确保网格收敛性的可信度。

(4) 研究含有非结构化网格的复杂算例以及非定常算例的不确定度分析方法和流程,是今后进一步发展的方向。

(5) ITTC 推荐规程也不是完美无瑕的, 其中具体的实施细节上也有值得商榷的地方, 比如各类误差源的分析与辨识等。

参 考 文 献:

- [1] ITTC QM Procedure 7.5- 03- 01- 01[S]. 2002.
- [2] ITTC QM Procedure 7.5- 03- 02- 01[S]. 2002.
- [3] Coleman H W, Stern F. Uncertainties in CFD code validation[J]. ASME J Fluids Eng., 1997, 119: 795- 803.
- [4] Stern F, Wilson R V, Coleman H W, Paterson E G. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations- Part I: methodology and procedures[J]. J Fluids Engineering, 2001, 123: 793- 802.
- [5] Wilson R V, Stern F, Coleman H W, Paterson E G. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations- Part II: application for RANS simulations of a cargo/container ship[J]. J Fluids Engineering, 2001, 123: 803- 810.
- [6] Wilson R, Stern F. Verification and validation for RANS simulations of a naval surface combatant[Z]. AIAA Paper 2002- 0904, 2002.
- [7] 蔡大明, 李定尊. 船舶水动力性能试验研究不确定度[M]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2004.
- [8] Simonsen C D, Stern F. Verification and validation of RANS maneuvering simulation of Esso Osaka: effects of drift and rudder angle forces and moments[J]. Computers and Fluids, 2003, 32: 1325- 1356.
- [9] Van S- H, Kim J, Park I- R, Kim W- J. Calculation of turbulence flows around a submarine for the prediction of hydrodynamic performance[C]// Proc. 8th Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics. Busan, Korea, 2003.
- [10] Weymouth G D, Wilson R V, Stern F. RANS CFD predictions of pitch and heave ship motions in head seas[C]// Proc. 8th Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics. Busan, Korea, 2003.
- [11] Bull P, Verkuyl J B, et al. Prediction of high Reynolds number flow around naval vessels[C]// Proc. 24th Symp. Naval Hydrodynamics. Fukuoka, Japan, 2002.
- [12] Larsson L, Stern F, Bertram V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flows: the Gothenburg 2000 Workshop[J]. J Ship Research, 2003, 47(1): 63- 81.
- [13] Roache P J. Overview of Workshop on CFD Uncertainty Analysis, 21- 22 October, 2004[C]// Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, 2004.
- [14] The Resistance Committee. Final report and recommendations to the 24th ITTC[C]// Proceedings of the 24th ITTC- Volume I. UK, 2005.
- [15] 朱德祥, 张志荣, 吴乘胜, 赵 峰. 船舶 CFD 不确定度分析及 ITTC 临时规程的初步应用[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2007, 22(3).
- [16] 张 楠, 姚惠之等. SUBOFF 潜艇模型粘性绕流数值模拟研究[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心科技报告, 2007.
- [17] 全国质量管理和质量保证标准化技术委员会质量体系分技术委员会编译. 质量管理和质量保证国际标准最新文件汇编[G]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [18] 张 楠, 姚惠之等. CFD 中的不确定度分析初探—SUBOFF 潜艇阻力数值模拟[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心科技报告, 2007.
- [19] 张 楠, 姚惠之等. CFD 中的不确定度分析初探—SUBOFF 潜艇流场数值模拟[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心科技报告, 2007.
- [20] Huang T, Liu H L, Groves N, Forlini T, Blanton J, Gowing S. Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel: the DARPA Suboff experimental program[C]// Proceedings of 19th Symposium on Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 1992.