

水面船模阻力、兴波 CFD 不确定度分析

吴乘胜, 杨磊

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082, Email: cswu@163.com)

摘要: 为提高船舶水动力预报的可信度, 近年来, ITTC 发布了一些 CFD 推荐规程。本研究以 ITTC 水面船标模 DTMB5415 为对象, 基于 ITTC 推荐规程, 进行 CFD 不确定度分析研究。研究主要针对计算网格进行: 网格在 3 个方向上分别加密, 以研究不同方向上的网格不确定度; 在每个方向上, 至少使用 3 套网格。文中使用的基准检验试验数据来自于中国船舶科学研究中心深水拖曳水池的标模试验。本研究给出了船模阻力、兴波的不确定度分析结果。

关键词: CFD; 水面船; 不确定度分析; 阻力; 兴波

1 引言

不确定度, 是源于计量学领域的一个概念。物理试验或测量, 需要给出定量说明, 即对测量结果的质量给出定量的判定。物理试验或测量结果是否有用, 很大程度上取决于其不确定度的大小; 即试验结果必须有不确定度说明, 才是完整的、有意义的。

计算流体力学 (CFD) 作为一种极具发展潜力的预报和分析工具, 在船舶水动力学领域得到了越来越多的应用。正是由于 CFD 技术将要或者已经在船舶设计中得到大量的应用, 船舶设计人员非常关心的一个问题就凸现出来, 并且越来越受到人们的重视, 那就是 CFD 模拟结果的可信程度到底如何? 要回答这一问题, 就必须对 CFD 模拟结果进行不确定度分析。

数值结果的误差就是计算值与真值之差, 它包含两部分: 模型误差和数值误差。在一定条件下, 误差值可以估计。但由于真值往往是未知的, 因而在这个估计过程中也有误差: 不确定度 U 就是对误差 δ 的一个估计。

由于真值未知, 误差往往也是未知的, 误差的大小不会随着人们的认识程度而改变。不确定度表示了人们对误差认识不足的程度。不确定度是客观存在的, 但是不确定度的分析结果会随着人们的认知程度而改变。

事实上, 从数值方法出现之时起, 数值模拟的精度一直是人们非常关心的问题, 但是真正对数值方法和误差认识的提高起极大推动作用的是 1946 年后现代计算机技术的发展, 数值结果不确定度的概念也只是到了 1968 年左右才被提出。

一般认为, CFD 计算的数值不确定度来源于三个部分: 截断误差、迭代误差和离散误差。在船舶水动力计算中, 通常忽略前两个误差源。而离散误差是在将连续的偏微分方程转化为代数方程组的过程中产生的, 它主要是由数值模拟的网格决定的, 在实际的复杂湍流流动模

拟中,是误差源中最重要的部分。因此,离散误差的估算是数值计算研究人员最关心的。

随着 CFD 在航空领域的深入应用, AIAA CFD 标准委员会在 1998 年发布了有关 CFD 验证和确认的规程。同样, International Towing Tank Conference (ITTC) 也引领着船舶 CFD 不确定度分析发展方向。Coleman 和 Stern 进行了开创性的工作,他们结合 AIAA CFD 规程提出了船舶 CFD 验证和确认的更加全面、可操作的方法。这一方法被 22 届 ITTC 阻力委员会采纳作为临时规程,首先在 Gothenburg 2000 年数值船舶流体力学研讨会上被推荐使用。

在 ITTC 推荐规程形成之后,船舶水动力学界对 CFD 不确定度分析进行了更广泛更深入的研究。Simonsen 和 Stern 对油轮 Esso Osaka 的绕流问题进行了 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,其中最精细的一套网格单元数为 200 万;计算中不考虑自由面,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 等人对 DARPA SUBOFF 潜艇裸艇体和带四个尾翼的绕流进行了数值模拟,计算中采用三套网格,依照 ITTC 推荐规程,针对裸艇体表面压力,分析了数值计算的不确定度。

在国内,朱德祥等人参照 ITTC 推荐规程对 SUBOFF 潜艇裸艇体黏性绕流场进行了数值模拟,并对其表面压力系数进行了不确定度分析,对 ITTC 推荐的 CFD 不确定度分析临时规程进行了初步的应用实践。张楠等人对带附体 SUBOFF 潜艇阻力和尾流场的 CFD 计算结果进行了不确定度分析和探讨。然而对于水面船自由面绕流数值模拟的不确定度分析工作,国内尚无公开发表的文献。

毋庸置疑,CFD 不确定度分析已经越来越受到人们的关注,并开展了广泛而深入的研究工作,船舶水动力学界普遍承认这是一项必需而且重要的工作。2005 年在日本东京召开的 CFD 工作会议上(CFD Workshop Tokyo, 2005),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,将是数值计算中必不可少的一个组成部分。

本研究基于 ITTC 推荐规程,针对 ITTC 标模 DTMB5415 进行 CFD 不确定度分析。研究针对计算网格进行:网格在 3 个方向上分别独立变化,研究不同方向上的网格不确定度;每个方向上,至少使用 3 套网格。本标模同时也在我国船舶科学研究中心深水拖曳水池进行了阻力和波形试验及不确定度分析。文中给出了船模阻力、兴波的 CFD 计算不确定度分析结果。

2 验证和确认方法

CFD 不确定度分析过程可分为验证和确认两部分。评估数值不确定度的过程叫验证,即估计数值误差的大小和符号,以及此估计的不确定度。验证过程其实就是评估是否正确地求解了方程。评估模型不确定度的过程叫确认,即估计模型误差大小和符号,以及模型误差估计的不确定度。确认过程其实就是评估是否求解了正确的方程,即数学模型的建立是否正确。

本研究 CFD 不确定度分析的验证和确认方法及规程引自 ITTC 质量手册,文中变量的定义也参照质量手册。

误差和不确定度的定义与试验不确定度分析中的一样。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:

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

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 :

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

验证是计算数值模拟的数值不确定度 U_{SN} 的过程, 并且当条件允许时, 还要估计模拟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_cN} 。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、时间步长及其他参数的误差 δ_I 、 δ_G 、 δ_T 和 δ_P , 这样, 数值模拟的数值不确定度可以表示为:

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

对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 , 模拟数值误差的估计值 δ_{SN}^* 和 U_{S_cN} 由下式给出:

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

$$U_{S_cN}^2 = U_{I_c}^2 + U_{G_c}^2 + U_{T_c}^2 + U_{P_c}^2 \quad (6)$$

确认是利用基准试验数据评估数值模拟的建模不确定度 U_M 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。比较误差 E 由试验数据 D 和模拟值 S 之差给出:

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

其中建模误差 δ_{SM} 可以分解成两部分: 由模型假定导致的误差和使用以前的试验数据产生的误差。通过比较 E 和确认不确定度 U_V 来判定确认实现与否, 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 这一层次的确认实现。如果 $U_V < |E|$, 可以利用 $E \approx \delta_{SM}$ 的符号和大小改进模型。对于修正过的数值模拟方法, 相应的方程为:

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

$$U_{V_c}^2 = U_{E_c}^2 - U_{SM}^2 = U_D^2 + U_{S_cN}^2 \quad (10)$$

3 CFD 不确定度分析

3.1 求解器、计算对象、计算工况以及基准检验数据

数值计算使用 FLUENT 的非定常 RANS 求解器; 控制方程使用有限体积法离散, 其中对流项采用二阶迎风差分格式, 扩散项采用中心差分格式, 离散得到的差分方程组具有高度耦合性和非线性, 使用 SIMPLE 方法求解, 使用多重网格技术加速收敛; 湍流采用 RNG $k-\varepsilon$

两方程模型模拟,近壁面使用标准壁面函数处理;采用 VOF 方法处理自由面。

计算对象为水面船模 DTMB5415,这是 ITTC 制作的统一标准模型,包括世界各大知名试验水池在内的二十余家试验机构对其进行了阻力、升沉、纵倾和波形测量试验,并对结果进行不确定度分析,试验结果可作为水面舰船 CFD 计算的基准检验数据。中国船舶科学研究中心参与了这一项目,严格按照 ITTC 规程进行了数轮试验,获得了标模的阻力、升沉、纵倾及波形等较为全面的试验数据,并对试验结果进行了不确定度分析,为本研究的 CFD 计算提供了宝贵的基准检验数据。

数值计算工况为 $Fr=0.28$ 、 $Re=10.504 \times 10^6$ 和 $Fr=0.41$ 、 $Re=15.381 \times 10^6$,阻力计算结果已经考虑了船模升沉和纵倾的影响。文中对船舶总阻力(积分量)和波形(点变量)进行了验证和确认。限于篇幅,本研究仅给出 $Fr=0.41$ 时的不确定度分析结果。

3.2 计算网格

在目前发表的船舶 CFD 不确定度分析研究工作中,绝大部分都认为计算网格是“各向同性”的,即假定各个方向上网格变化产生的影响是一样的。而作者在水面船数值计算实践中,发现情况并非如此,因而本研究的 CFD 不确定度分析中,网格在各个方向分别独立变化,以研究各个方向网格变化对数值计算结果的影响。

数值计算中,使用贴体、多块 H-O 型结构化网格(纵向 H 型、横向 O 型)。网格划分的基本原则为:船模艏部和艉部网格适当加密,中部网格较为稀疏;在模型表面附近网格加密,其中第一层网格间距根据 y^+ 确定(y^+ 平均约为 50);自由面附近网格适当加密。

首先根据以前的 CFD 计算经验生成了一套基础网格,这套网格数值计算结果的精度应该能够满足工程应用要求,其他网格都在此基础上按统一加细率 $r_G = \sqrt{2}$ 通过加密或变稀生成;本研究在各个方向上都生成了 3 套网格,其中第二套网格为基础网格。图 1 则给出了基础网格船体表面网格划分;表 1 给出了各套网格在船体表面的划分情况,表中环向网格数指模型设计水线以下部分(含龙骨)。

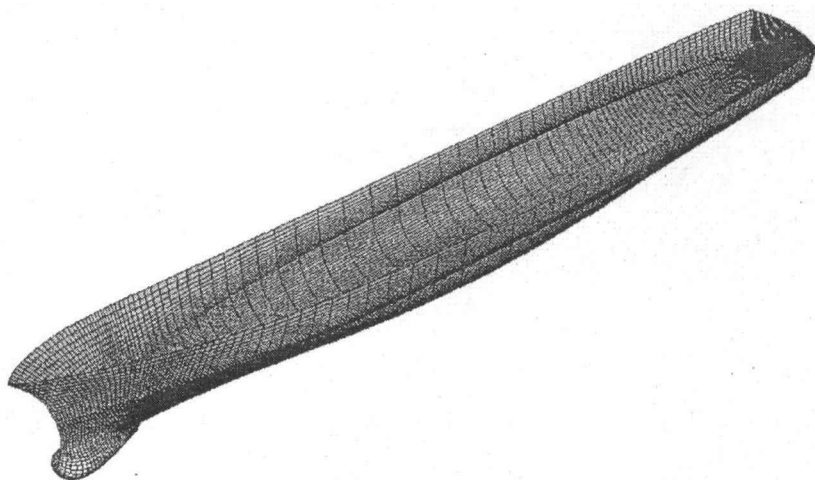


图 1 基础网格船体表面网格划分

表 1 各套网格划分情况

序号	1	2	3
纵向 (ξ -)	142×32×45	100×32×45	71×32×45
环向 (ζ -)	100×45×45	100×32×45	100×23×45
径向 (η -)	100×32×64	100×32×45	100×32×32

3.3 阻力计算结果的验证和确认

$Fr=0.41$ 时, 船模阻力的数值计算结果 (R_T) 列于表 2 中, 升沉、纵倾的影响已考虑。

表 2 船模总阻力计算结果

网格编号	纵向 (ξ -)		环向 (ζ -)		径向 (η -)	
	单元数	$R_T(N)$	单元数	$R_T(N)$	单元数	$R_T(N)$
1	142	147.4	45	148.0	64	148.1
2	100	148.4	32	148.4	45	148.4
3	71	150.9	23	150.1	32	150.0

首先进行纵向网格的不确定度分析。

相邻两套网格对应的总阻力之差用 ε_ξ 表示:

$$\varepsilon_{\xi 21} = R_{T\xi 2} - R_{T\xi 1} = 148.4 - 147.4 = 1.0 \tag{11}$$

$$\varepsilon_{\xi 32} = R_{T\xi 3} - R_{T\xi 2} = 150.9 - 148.4 = 2.5 \tag{12}$$

纵向网格收敛率通过下式计算:

$$R_{\xi 1} = \varepsilon_{\xi 21} / \varepsilon_{\xi 32} = 0.400 \tag{13}$$

根据验证规程, 由于 $0 < R_{\xi 1} < 1$, 纵向网格 1~3 是单调收敛的, 可由定义 Richardson 外推法计算准确度阶数 p_k 和误差的单项估计值 $\delta_{RE\xi 1}^*$:

$$p_\xi = \ln(\varepsilon_{\xi 32} / \varepsilon_{\xi 21}) / \ln(r_\xi) = \ln(2.5 / 1.0) / \ln \sqrt{2} = 2.644 \tag{14}$$

$$\delta_{RE\xi 1}^* = \varepsilon_{\xi 21} / (r_\xi^{p_\xi} - 1) = 1.0 / (\sqrt{2}^{2.644} - 1) = 0.667 \tag{15}$$

修正因子 C_ξ 的计算如下, 其中按照文献推荐 $p_{kest}=p_{th}=2$:

$$C_\xi = \frac{r_\xi^{p_\xi} - 1}{r_\xi^{p_{kest}} - 1} = \frac{\sqrt{2}^{2.644} - 1}{\sqrt{2}^2 - 1} = 1.500 \tag{16}$$

对于 $C_\xi=1.500$ 看作显著大于 1 (缺少置信度时), 则 U_ξ 得到估计, 但没有估计 δ_ξ :

$$U_\xi = \|C_\xi\| + \|(1 - C_\xi)\| \delta_{RE\xi 1}^* = [1.500 + 0.500] * 0.667 = 1.333 \tag{17}$$

U_ξ 为 0.886% D 。

类似地, 可以进行环向网格和径向网格的验证。船模总阻力 R_T 的验证结果列于表 3 中。

从表 3 中可以看出, 三个方向的验证水平都相当高, 小于 1%D。

表 3 船模总阻力计算结果的验证

	R	p	C	δ_{RE}^*	$\delta_{RE}^*(\%D)$	U	$U(\%D)$
纵向 (ξ -)	0.400	2.644	1.500	0.667	0.443	1.333	0.886
环向 (ζ -)	0.235	4.175	3.250	0.123	0.082	0.676	0.450
径向 (η -)	0.188	4.830	4.333	0.069	0.046	0.529	0.352

用于确认的基准检验试验数据来自于中国船舶科学研究中心深水拖曳水池的模型试验。在 $Fr=0.41$ 时, DTMB5415 船模阻力 $D=150.4N$, 其不确定度为 $U_D=1.866\%D$ 。

对于纵向网格, 比较误差 E_ξ 的计算如下:

$$E_\xi = D - R_{T\xi} = 150.4 - 147.4 = 3.0 = 2.00\%D \quad (18)$$

确认不确定度 $U_{V\xi}$ 的可由下式计算:

$$U_{V\xi} = \sqrt{U_\xi^2 + U_D^2} = \sqrt{1.333^2 + 2.806^2} = 3.107 = 2.07\%D \quad (19)$$

由于 $|E_\xi| < U_{V\xi}$, 纵向网格 $U_{V\xi}$ 水平的确认实现; 由于比较误差低于噪声水平, 试图从不确定度的观点估算 δ_{SMA} 是不可行的。

类似地, 可以进行环向网格和径向网格的确认。船模总阻力 R_T 的确认结果列于表 4 中。从表 4 中可以看出, 比较误差都小于确认不确定度, 因此各个方向上 U_V 水平的确认都得以实现。

表 4 船模总阻力计算结果的确认

	$E(\%D)$	$U_1(\%D)$	$U_D(\%D)$	$U(\%D)$
纵向 (ξ -)	2.00	2.07		0.886
环向 (ζ -)	1.60	1.92	1.866	0.450
径向 (η -)	1.53	1.90		0.352

3.4 波形模拟结果的验证和确认

本研究对于波形模拟结果, 仅进行了纵向网格的不确定度分析。图 2 给出了船模长度范围内、 $y=0.172L_{pp}$ 纵切面波形 3 套网格的数值模拟结果, 图 2 中同时给出了标模试验数据。

相邻两套网格波形模拟结果之差为:

$$\varepsilon_{\xi 21} = Z_{\xi 2} - Z_{\xi 1} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{\xi 32} = Z_{\xi 3} - Z_{\xi 2} \quad (21)$$

在所有点上, 波形模拟结果之差的 L2 范数为:

$$\|\varepsilon_\xi\|_2 = \left[\sum_{i=1}^N \varepsilon_{\xi i}^2 \right]^{1/2} \quad (22)$$

网格收敛率由下式计算:

$$R_{\xi 1}=\left\|\varepsilon_{\xi 21}\right\|_2 /\left\|\varepsilon_{\xi 32}\right\|_2=0.513 \quad(23)$$

由于 $R_{\xi 1}<1$, 网格是收敛的。准确度阶数 p_k 和误差的单项估计值 $\delta_{Re\xi 1}^*$ 计算如下:

$$\delta_{Re\xi 1}^*=\frac{\left\|\varepsilon_{\xi 21}\right\|_2 / \sqrt{N}}{r_{\xi}^{\left\langle p_{\xi}\right\rangle}-1}=\frac{1.818}{\sqrt{2}^{1.928}-1}=1.912 \quad(24)$$

$$\left\langle p_{\xi}\right\rangle=\ln \left(\left\|\varepsilon_{\xi 32}\right\|_2 /\left\|\varepsilon_{\xi 21}\right\|_2\right) / \ln \left(r_{\xi}\right)=1.928 \quad(25)$$

而修正因子由下式计算:

$$\left\langle C_{\xi}\right\rangle=\frac{r_{\xi}^{\left\langle p_{\xi}\right\rangle}-1}{r_{\xi}^{\left\langle p_{\xi}\right\rangle}-1}=\frac{\sqrt{2}^{1.928}-1}{\sqrt{2}^2-1}=0.951 \quad(26)$$

由于 $|1-\left\langle C_{\xi}\right\rangle|=1-0.951=0.049<0.125$, 使用安全因子法估算不确定度:

$$U_{\xi}=F_S\left|\delta_{Re\xi 1}^*\right|=1.25 \times 1.912=2.390 \quad(27)$$

U_{ξ} 为 $17.15 \%|Z|_{D \max}$.

$y=0.172 L_{pp}$ 纵切面波形数值模拟的波形平均验证结果列于表 5 中。

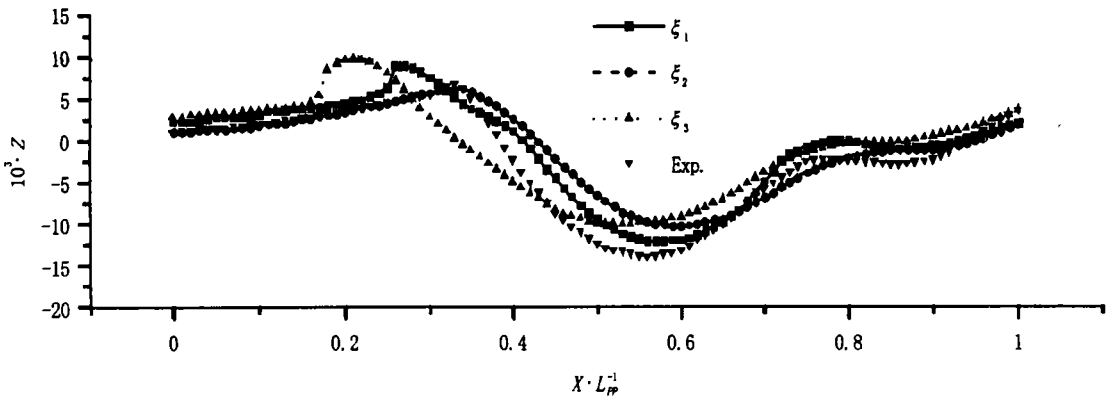


图 2 $y=0.172 L_{pp}$ 纵切面波形

表 5 $y=0.172 L_{pp}$ 纵切面波形模拟结果验证

$R_{\xi 1}$	p_{ξ}	C_{ξ}	$\delta_{Re\xi}^*$	$\delta_{Re\xi}^* (\% Z _{\rho_{\max}})$	U_{ξ}	$U_{\xi} (\% Z _{\rho_{\max}})$
0.513	1.928	0.951	1.912	13.72	2.390	17.15

波形平均比较误差可由下式计算:

$$E_{\xi}=\left\|Z_D-Z_{\xi}\right\|_2 / \sqrt{N}=1.952=14.01 \%|Z|_{D \max} \quad(28)$$

而波形平均确认不确定度为:

$$U_{V_{\xi}}=\sqrt{U_{\xi}^2+U_D^2}=\sqrt{17.15^2+4.0^2}=17.61 \%|Z|_{D \max} \quad(29)$$

这里假定波形的基准检验数据的不确定度为 $U_D=4.0\%|Z|_{D_{\max}}$ 。

$y=0.172L_{PP}$ 纵切面波形数值模拟的确认结果列于表 6 中；由于 $|E|_{\xi}<U_{V\xi}$ ， $y=0.172L_{PP}$ 纵切面波形模拟结果 $U_{V\xi}$ 水平的波形平均确认实现。

表 6 $y=0.172L_{PP}$ 纵切面波形模拟结果确认

$E_{\xi}(\% Z _{D_{\max}})$	$U_{V\xi}(\% Z _{D_{\max}})$	$U_D(\% Z _{D_{\max}})$	$U_{\xi}(\% Z _{D_{\max}})$
14.01	17.61	4.0	17.15

点态比较误差与确认不确定度的对比如图 3 所示。从图 3 中可以看出，波形曲线上绝大部分点都得到了确认；而最大误差出现在波峰和波谷区域。

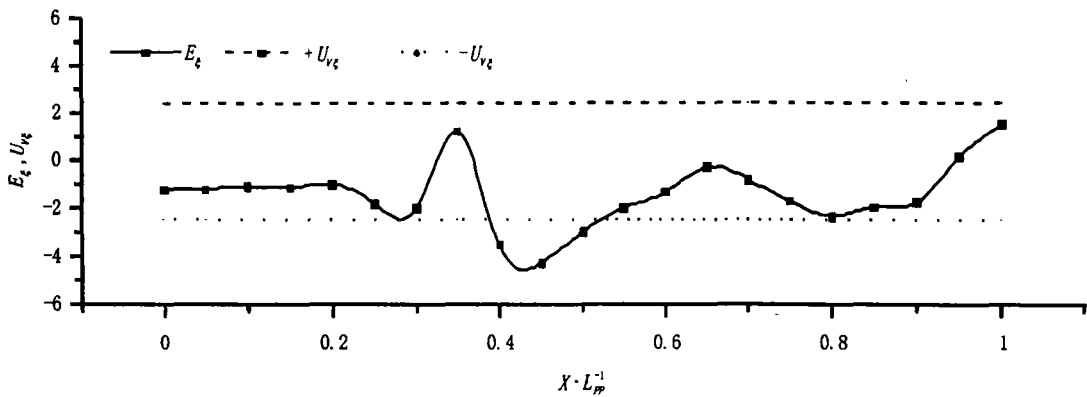


图 3 $y=0.172L_{PP}$ 纵切面波形确认

4 结语

本研究简要介绍了作者基于 ITTC 推荐规程，在水面船 CFD 不确定度分析方面的一些研究工作。研究针对主要计算网格进行：网格在 3 个方向上分别独立变化，研究不同方向上的网格不确定度；每个方向上，至少使用 3 套网格。船舶阻力的分析结果表明，3 个方向上不确定度是不同的，并且在每个方向上，计算结果都得到了确认。同时，纵向网格变化时， $y=0.172L_{PP}$ 纵切面波形的数值模拟结果也得到了确认。

参 考 文 献

1 Coleman H, Stern F. Uncertainties in CFD code Validation. ASME J Fluids Eng, 1997(119): 795-803.
2 Hoekstra M, Eca L, Windt J, et al. Viscous flow calculations for KVLCC2 and KCS models using the PARNASSOS code. Proceedings Bothenborg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden. 2000.
3 ITTC Quality Manual 7.5-03-01-01. 2002.
4 ITTC Quality Manual 7.5-03-02-01. 2002.
5 Larsson L, Stern F, Bertram V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: the Gothenburg 2000 Workshop. J Ship Research, 2003(47): 63-81.

- 6 Roache P Overview of Workshop on CFD Uncertainty Analysis. Insituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal. 2004.
- 7 Simonsen C, Stern F. Verification and validation of RANS maneuvering simulation of Esso Osaka: effects of drift and rudder angle forces and moments. *Computers and Fluids*, 2003(32): 1325-1356.
- 8 Stern F, Wilson R, Coleman H, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations-Part 1: methodology and procedures. *ASME J Fluids Eng*, 2001(123): 793-802.
- 9 The Resistance Committee. Final report and recommendations to the 24th ITTC, Proceedings of the 24th ITTC Vol. I, Edinburgh, UK. 2005
- 10 Van S, Kim J, Park I, et al. Calculation of turbulence flows around a submarine for the prediction of hydrodynamic performance. Proc. 8th Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea. 2003.
- 11 Wilson R, Paterson E, Stern F. Verification and validation for RANS simulation of a naval combatant. Proceedings Bothenburg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden. 2000.
- 12 Wilson R, Stern F, Coleman H, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations-Part 2: application for RANS simulation of a cargo/container ship. *ASME J Fluids Eng*, 2001(123): 803-810.
- 13 朱德祥,张志荣,吴乘胜,等. 船舶CFD不确定度分析及ITTC临时规程的初步应用. *水动力研究与进展*, A辑, 2007(22): 363-370.
- 14 张楠,沈泓萃,姚忠之. 阻力和流场的CFD不确定度分析探讨. *船舶力学*, 2008(12): 211-224.

Numerical uncertainty analysis for the prediction of resistance and wave profile of a surface ship model

WU Cheng-sheng, YANG Lei

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi, Jiangsu, 214082, Email: cswu@163.com)

Abstract: In recent years, the International Towing Tank Conference (ITTC) issued some recommended procedures for CFD to promote the prediction of ship hydrodynamics more credible. We shall present some of our recent study in the CFD uncertainty analysis on the prediction of resistance and wave profile of a benchmark surface ship model (DTMB5415) in this paper. The uncertainty analysis of CFD computation is mainly focused on the grids. The grids are separately refined in 3 directions to demonstrate respective influence. Three solutions are used in each direction for the uncertainty analysis. The integrated uncertainty of CFD for total resistance and wave profile of the ship model is presented. Meanwhile, the tests on resistance and wave profile of the model are carried out in CSSRC towing tank.

Key words: CFD; Surface ship; Uncertainty analysis; Resistance; Wave profile