

文章编号: 1000-4874(2007)03-0363-08

# 船舶 CFD 不确定度分析及 ITTC 临时规程的初步应用<sup>\*</sup>

朱德祥, 张志荣, 吴乘胜, 赵峰

(中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082)

**摘 要:** 该文在学习和消化国际船模水池会议(ITTC)的 CFD(计算流体力学)不确定度分析临时规程的基础上, 对潜艇标模 SUBOFF 光体的黏性绕流场进行了数值计算, 应用 ITTC 临时规程对数值结果的不确定度进行了分析实践。通过实践, 作者体会到: ITTC 方法提供了一种比较直接、可靠的途径, 不需更改求解器, 相对容易实施; 但是, 目前 ITTC 的临时规程还只适合于简单对象, 对复杂对象, 实施上有较大的难度; 为了更好地进行 CFD 不确定度分析, 较多的实践经验是必不可少的。

**关 键 词:** 计算流体力学(CFD); 不确定度分析; ITTC 规程

**中图分类号:** U661.2      **文献标识码:** A

## Uncertainty analysis in ship CFD and the primary application of ITTC procedures

ZHU De-xiang,      ZHANG Zhi-rong,

WU Cheng-sheng,      ZHAO Feng

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

**Abstract:** The ITTC (International Towing Tank Conference) temporary procedure for the CFD (computational fluid dynamics) uncertainty analysis is reviewed in this paper. Aiming at the numerical results of the viscous flow around a benchmark submarine model (SUBOFF body), the CFD uncertainties are analyzed by using the ITTC procedure. With the primary practice of the procedure, we may realize that: the ITTC procedure is quite direct and reliable, need not any modification to the solver and is easy to practise. But the current procedure is only appropriate for the objects with simpler configuration but is very difficult to be used for the complicated configurations. More experiences are needed for better performing CFD uncertainty analysis.

**Key words:** Computational Fluid Dynamics (CFD); uncertainty analysis; ITTC procedures

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-04-09(2007-04-23 修改稿)

作者简介: 朱德祥(1960—), 男, 上海市人, 研究员, 博士。

## 1 引言

不确定度,是源于计量学领域中的一个较新的概念。物理试验(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。测量(试验)结果是否有用,很大程度上取决于其不确定度的大小;也就是说试验结果必须有不确定度说明,才是完整的和有意义的。这就是测量(试验)不确定度的概念。

人们所感性熟知的误差理论,与不确定度的概念是有区别的。误差的定义是测量结果减去被测量的真值。由于真值还是个未知数,因此测量误差其实是一个客观存在的理想概念。而测量不确定度,是试验对被测量物理量认识不足的程度,是可以定量评定的量。

测量不确定度可以采用统一约定的方法,可以使不同的测量和测量得到的结果进行相互比对,取得相互评估和认同。因此,测量不确定度表达和分析方法的统一、推广应用受到了国际上的广泛重视。

在船舶领域,ITTC(国际船模拖曳水池会议)十分重视不确定度研究工作。1999~2002年ITTC形成了一套推荐的标准试验规程,对船舶基准试验,特别是水动力性能模型试验提出了标准的试验程序、试验数据表达方法和试验结果不确定度分析方法。并在推行试用中,不断完善。

计算流体力学(CFD)作为一项极具发展潜力的分析工具,已越来越在不同的工程领域得到广泛的应用。伴随着过去三十年中计算机技术和CFD技术的飞跃发展,计算船舶流体力学技术已日趋成熟,在舰船水动力分析的诸多关键性技术上取得了标志性的突破,舰船CFD实用化技术正得到突飞猛进的发展,人们一直期待的用数值试验来补充并终极替代拖曳水池的物理模型试验已逐渐成为可能。

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,一个船舶设计者非常关心的问题就凸现出来,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结果进行不确定度的分析。

比拟物理水池的船模试验,用CFD方法进行纯粹的数值计算工作,实际上也是在进一场虚拟的“测量”。不确定度的概念自然地延伸到了CFD领域。

所谓数值结果的误差就是计算值和真值的差。

它包含两部分,即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。而不确定度 $U$ 是对误差 $\delta$ 的一个估计,使得误差 $\delta$ 包含在区间 $\pm U$ 中的概率为95%。

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知程度而改变。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。

其实,从数值方法出现的那一刻起,数值模拟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。在数值计算不确定度分析方法的建立上,Roache是极其关键的学者之一。1986年,在Roache, Ghia及White等人的倡导下,美国机械工程师协会的流体工程刊物对刊登的数值计算的论文提出了误差分析的要求<sup>[1]</sup>。AIAA Journal和International Journal of Numerical Methods in Fluids等期刊在1994年也相继提出了类似的录用方针<sup>[2]</sup>。这推动了对数值计算精度评估方法的研究。Roache(1998)出版了有关CFD验证和确认方法的著名论著<sup>[3]</sup>,该书系统地介绍了数值计算中不确定度分析的方法和过程。

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<sup>[4]</sup>。同样地,作为国际权威学术组织的ITTC也引领着船舶CFD不确定度分析发展方向。Coleman和Stern(1997)<sup>[5]</sup>进行了开创性工作,他们结合AIAA CFD规程提出了船舶CFD验证和确认的更加全面、更加可操作的方法<sup>[6]</sup>(Stern、Wilson、Coleman和Paterson,1999年)。这一方法被22nd 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<sup>[7]</sup>(Larsson等2000)上被推荐使用<sup>[8~11]</sup>。也在近年常常应用在船舶CFD领域不确定度评估的实践中,如Simonsen和Stern<sup>[12~13]</sup>(2003a,2003b)用于油轮Esso Osaka的流场数值研究。Van等<sup>[14]</sup>(2003)用于潜艇标模SUB-OFF流场模拟的验证。对该规程ITTC在向各成员单位推荐试用的同时,也在征询意见,以图扩充和修改完善。从最新的ITTC大会所反映的情况来看,该临时规程实际应用面还比较有限,急需广大船舶CFD人员积累试用经验。

应该承认CFD不确定度研究,还是一项处于技

术探索阶段的前沿性工作。但是其重要性是不言而喻的。目前,从了解的信息来看,国内 CFD 在空气流体应用领域和水流体应用领域,都处于 CFD 不确定度分析方法研究的起步阶段。尽管 ITTC 的 CFD 不确定度分析的临时规程还需要完善,但毕竟给我们提供了一个可临摹操作的试用模板,通过试用可以使我们增加对 CFD 不确定度分析的概念理解深化、为发展实用的 CFD 不确定度分析方法积累经验。

## 2 ITTC 推荐规程介绍

CFD 的不确定度分析过程又可以分为验证和确认。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,以及这种估计的不确定度。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。

### 2.1 验证和确认方法

定义数值模拟结果  $S$  与真值  $T$  之差为数值模拟误差,它由模型误差  $\delta_M$  和数值误差  $\delta_{SN}$  两部分组成,即:

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

对于特定的情况,数值误差  $\delta_{SN}$  可以由下式估算:

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

其中  $\delta_{SN}^*$  是  $\delta_{SN}$  的估计值,  $\varepsilon_{SN}$  是估计中的误差。

对数值模拟结果进行修正,可以得到数值基准  $S_C$ :

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

验证就是计算数值模拟的数值不确定度  $U_{SN}$  的过程,当条件允许时,还要估计模拟的数值误差  $\delta_{SN}^*$  及此误差估计中的不确定度  $U_{S_{C,N}}$ 。对于未经修正的数值模拟方法,数值误差可以分解成来自迭代次数、网格尺寸、时间步长以及其它参数的误差  $\delta_I$ 、 $\delta_C$ 、 $\delta_T$  和  $\delta_P$ ,这样,数值模拟的数值不确定度可以表示为:

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

对于修正过的数值模拟方法,修正数值模拟结果可以得到数值基准  $S_C$ 。数值误差的估计值  $\delta_{SN}^*$  和修正值的不确定度  $U_{S_{C,N}}$  可以由下式给出:

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

$$U_{S_{C,N}}^2 = U_I^2 + U_C^2 + U_T^2 + U_P^2 \quad (6)$$

确认则是利用基准试验数据评估数值模拟的模型不确定度  $U_{SM}$  的过程,当条件允许时,还要估计模型误差  $\delta_M$ 。比较误差  $E$  由试验数据  $D$  和模拟结果  $S$  之差给出:

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

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  $U_V \ll |E|$ , 可以利用  $E \approx \delta_{SN}$  改进模型。

对于修正过的数值模拟结果:

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

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

### 2.3 验证规程

#### 2.3.1 收敛性研究

目前通常使用参数系列加细的多重解研究迭代和参数的收敛性,即:保持所有其它参数不变,而将第  $k$  个输入参数改变  $\Delta x_k$ 。为方便起见,可以使用统一参数加细比:

$$r_k = \frac{\Delta x_{k_2}}{\Delta x_{k_1}} = \frac{\Delta x_{k_3}}{\Delta x_{k_2}} = \frac{\Delta x_{k_m}}{\Delta x_{k_{m-1}}} \quad (11)$$

但这并非是必需的。在进行精确的收敛性研究之前,必须准确估算出迭代误差,或是与输入参数导致的误差相比,迭代误差可以忽略不计。

统一参数加细比的选择必须慎重, 其值过大或过小都不合适,  $r = \sqrt{2}$  左右可能是一个较好的选择; 对于实际 CFD, 要根据情况确定。

进行输入参数的收敛性研究时, 需要  $m \geq 3$  重解来评价收敛性。定义收敛因子:

$$R_k = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \tag{12}$$

其中  $\varepsilon_{21} = \hat{S}_{k_2} - \hat{S}_{k_1}$  为“中”-“细”解之差,  $\varepsilon_{32} = \hat{S}_{k_3} - \hat{S}_{k_2}$  为“粗”-“中”解之差; 对应于“细”、“中”、“粗”输入参数的  $\hat{S}_{k_1}$ 、 $\hat{S}_{k_2}$ 、 $\hat{S}_{k_3}$  都分别作了迭代误差修正。

可能出现的收敛状况有三种:

- (a) 单调收敛:  $0 < R_k < 1$ ;
- (b) 波动收敛:  $R_k < 0$ ;
- (c) 发散:  $R_k > 1$ 。

对于单调收敛(a), 使用 Richardson 外推法估计  $U_k$  或  $\delta_k^*$  与  $U_{k_c}$ 。对于波动收敛(b), 不确定度可以简单估计为波动最大值  $S_U$  和最小值  $S_L$  限定的误差, 即  $U_k = (S_U - S_L)/2$ ; 由于波动收敛有可能被错误地看作单调收敛或发散, 这时需要多于 3 重解。对于发散状况, 误差和不确定度都不能估算。

### 2.3.2 广义 Richardson 外推法

对于单调收敛状况, 由第  $k$  个输入参数和量阶  $p_k$  的选取导致的误差  $\delta_k^*$ , 用广义 Richardson 外推法估算。误差可用  $\Delta x^k$  的幂级数形式展开。估算的准确性依赖于展开式中保留的项数、高阶项的大小以及 Richardson 外推理论中假设的有效性。

对于仅能估算首项的三重解, 可以提供误差和准确度阶数的一项估计值:

$$\delta_{RE_{k_1}}^{*(1)} = \frac{\varepsilon_{21}}{r_k^{p_k} - 1}, \quad p_k = \frac{\ln(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21})}{\ln(r_k)} \tag{13}$$

对于可以估算两项的五重解, 可以提供误差和准确度阶数的二项估计值:

$$\delta_{RE_{k_1}}^{*(2)} = \frac{r_k^{q_k} \varepsilon_{21_k} - \varepsilon_{32_k}}{(r_k^{p_k} - r_k^{q_k})(r_k^{p_k} - 1)} - \frac{r_k^{q_k} \varepsilon_{21_k} - \varepsilon_{32_k}}{(r_k^{q_k} - r_k^{p_k})(r_k^{q_k} - 1)}$$

$$p^k = \frac{\ln\{(a^k + \sqrt{b^k})/[2(\varepsilon_{1_k} \varepsilon_{43_k} - \varepsilon_{32_k}^2)]\}}{\ln(r_k)},$$

$$q^k = \frac{\ln\{(a_k - \sqrt{b_k})/[2(\varepsilon_{1_k} \varepsilon_{43_k} - \varepsilon_{32_k}^2)]\}}{\ln(r_k)} \tag{14}$$

其中:

$$a_k = \varepsilon_{1_k} \varepsilon_{54_k} - \varepsilon_{32_k} \varepsilon_{43_k}$$

$$b_k = -3\varepsilon_{2_k}^2 \varepsilon_{43_k}^2 + 4(\varepsilon_{1_k} \varepsilon_{43_k}^3 + \varepsilon_{32_k}^3 \varepsilon_{54_k}) -$$

$$6\varepsilon_{1_k} \varepsilon_{32_k} \varepsilon_{43_k} \varepsilon_{54_k} + \varepsilon_{1_k}^2 \varepsilon_{54_k}^2$$

估算误差和准确度阶数的二项估计值的公式应用范围要严格得多, 所有的五重解都必须是单调收敛并且在渐近线范围附近。通常, 要估算误差展开式的前  $n$  项, 需要  $m = 2n + 1$  重解。

### 2.3.3 带修正因子的误差和不确定度估计

修正因子的概念是建立在一维波动方程、二维 Laplace 方程及 Blasius 边界层解析基准解的检验研究上。研究表明, 修正因子对于衡量解与渐近线范围的接近度、考虑高阶项影响以及误差和不确定度的估算都是很有用的。误差的定义如下:

$$\delta_{k_1}^* = C_k \delta_{RE_{k_1}}^* = C_k \left[ \frac{\varepsilon_{21}}{r_k^{p_k} - 1} \right] \tag{15}$$

由此引入了修正因子  $C_k$  的两个表达式。第一个表达式是用于估算误差的一项估计值:

$$C_k = \frac{r_k^{p_k} - 1}{r_k^{p_{k_{est}}} - 1} \tag{16}$$

$p_{k_{est}}$  是当空间步长趋于 0、渐近线范围  $C_k \rightarrow 1$  时首项准确度极限阶数的估算值。类似的, 用于估算误差的二项估计值的表达式为:

$$C_k = \frac{(\varepsilon_{23}/\varepsilon_{12} - r_k^{q_{k_{est}}})(r_k^{p_k} - 1)}{(r_k^{p_{best}} - r_k^{q_{best}})(r_k^{p_{best}} - 1)} + \frac{(\varepsilon_{23}/\varepsilon_{12} - r_k^{q_{best}})(r_k^{p_k} - 1)}{(r_k^{p_{est}} - r_k^{q_{est}})(r_k^{q_{est}} - 1)} \tag{17}$$

第一个表达式大致给出了高阶项的影响,第二个表达式可以更严格地给出高阶项的影响。

不确定度的表达式可由误差估计式得到。当解远离渐近线范围、 $C_k$  远小于或大于 1 时,仅通过不确定度  $U_k$  估计误差的大小。Richardson 外推法得到的修正估算值的绝对值与修正量的绝对值之和,限制了误差  $\delta_{RE_{k_1}}^*$ , 这样:

$$U_k = [ |C_k| + (1 - |C_k|) ] | \delta_{RE_{k_1}}^* | \quad (18)$$

当  $C_k < 1$  时:

$$U_k = [ 2 |1 - C_k| + 1 ] | \delta_{RE_{k_1}}^* | \quad (19)$$

当解接近渐近线范围、 $C_k$  在 1 附近时:

$$U_{k_C} = | (1 - C_k) | | \delta_{RE_{k_1}}^* | \quad (20)$$

上式的缺点是:当  $C_k = 1$  时,  $U_{k_C} = 0$ , 而这是不现实的;因而对于  $C_k = 1$ , 建议使用安全因子法。

#### 2.3.4 使用安全因子估算不确定度

除了上面提到的修正因子外,还可以用安全因子估算不确定度,用 Richardson 外推法估算的误差乘以安全因子  $F_s$  来包含模拟的误差:

$$U_k = F_s | \delta_{RE_{k_1}}^* | \quad (21)$$

其中,基于单项或两项估计的  $\delta_{RE_{k_1}}^*$  前面相关的式子给出,分别具有假定的或估计的量阶。

安全因子法可以在用 Richardson 外推法估算的误差修正过的解中使用:

$$U_{k_C} = (F_s - 1) | \delta_{RE_{k_1}}^* | \quad (22)$$

安全因子的准确值是模糊的,对于细致的网格研究,建议  $F_s$  取 1.25;对于只使用两种网格且准确度的阶数是根据理论值  $P_h$  得到的情况,建议  $F_s$  取 3。

### 2.4 确认规程

#### 2.4.1 确认结果的解释

首先考虑模拟的数值误差随机分布时其不确定度  $U_{SN}$  的估算方法。一般说来,如果考虑三个变量  $U_V$ 、 $|E|$  及  $U_{reqd}$ , 则有六种组合(假设三个变量各不相等):

$$1) |E| < U_V < U_{reqd}$$

$$2) |E| < U_{reqd} < U_V$$

$$3) U_{reqd} < |E| < U_V$$

$$4) U_V < |E| < U_{reqd}$$

$$5) U_V < U_{reqd} < |E|$$

$$6) U_{reqd} < U_V < |E|$$

在情形 1、2 和 3 中,  $|E| < U_V$ ;  $U_V$  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  $\delta_{SMA}$  是不可行的。在情形 1 中,低于  $U_{reqd}$  水平的确认实现,从程序的角度看,确认是成功的。

在情形 4、5 和 6 中,  $U_V < |E|$ , 比较误差高于噪声水平,因而从不确定度的观点看,用  $E$  的符号和大小估计  $\delta_{SMA}$  是可行的。如果  $U_V \ll |E|$ , 则  $E$  相当于  $\delta_{SMA}$ , 因而建模假定的误差可以明确地确定。在情形 4 中,从程序的角度看,  $|E|$  水平的确认成功实现。

现在考虑模拟的数值误差确定的情况下,估计  $\delta_{SN}^*$  和不确定度  $U_{V_C}$  的方法。用  $|E_C|$ 、 $U_{V_C}$  及  $U_{reqd}$  可以构造类似于上式的比较组合。由于  $E_C$  可能比  $E$  大或小,但  $U_{V_C}$  应该总是小于  $U_V$ , 因而对于给定的修正情况下的解,不一定与相应的未修正情况下的解相似。换言之,在修正情况下得到确认的变量在未修正情况下未必能得到确认,反之亦然。对于  $U_{V_C} < |E_C|$  的 4、5、6 三种情形,如果估计  $\delta_{SN}^*$  值是正确的,可以认为  $E_C$  能更好地反映  $\delta_{SMA}$  而非  $E$ 。

#### 2.4.2 修正与未修正模拟结果的使用

对解进行修正要求修正系数在 1 附近,且要确信解是存在的。由于根据三重网格的解无法确定准确度阶的可变性,因而在这种情况下,无法确信解的存在。因此,仅使用三重网格的信息对解进行修正时,要谨慎行事。

如果在某组合条件下使用修正法的验证是成功的,那么如果选择将不确定度验证水平与相近条件下的数值预报相联系,此预报也要进行修正。这意味着要在新条件下承认数值误差和不确定度的估计值必须进行足够的计算。如果没有做到这一点,则和未修正的  $S$  及相应的  $U_{SN}$  (更大的) 的使用对应的比较误差  $E$  和不确定度  $U_V$ , 应该是与新条件下的预报相联系的验证中所涉及的比较误差  $E$  和不确定度  $U_V$ 。

3 SUBOFF 光体 FLUENT 计算结果的不确定度分析

3.1 计算结果

本文采用 FLUENT 软件,对 SUBOFF 光体流场进行数值计算。计算用轴对称模型, SUBOFF 长度为  $L = 4.356\text{ m}$ ,模型直径为  $D = 0.508\text{ m}$ 。来流速度  $V = 2.755\text{ m/s}$ ,雷诺数  $Re = 1.2 \times 10^7$ 。

网格生成采用 Gridgen 软件,生成了三种不同密度的网格,网格细化的比例取 $\sqrt{2}$ 。三种网格的网格数分别  $60 \times 200$ ,  $42 \times 141$ ,  $30 \times 100$ 。三种网格如图 1、图 2 和图 3 所示。湍流模型采用 SST  $k-\omega$  模型。

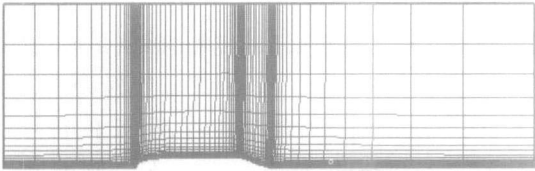


图 1 粗网格

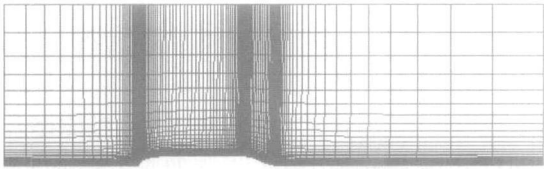


图 2 中网格

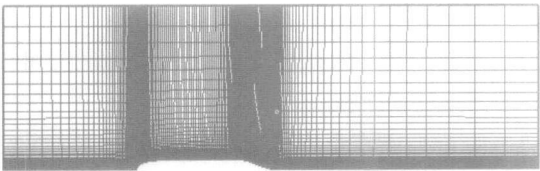


图 3 细网格

沿壁面的压力系数定义为  $C_p = \frac{2p}{\rho U_\infty^2}$ ,压力系数的网格收敛如图 4 所示,其中包括了试验数据,试验数据中对阻塞效应已经进行了修正,试验数据的不确定度为 1.5% 驻点压力。试验数据主要来源于 Huang, T. T<sup>[15]</sup>(1994)。

3.2 验证

我们将采用 ITTC 推荐规程对压力系数分布的计算结果进行验证,三种网格的计算解需要全部插值到和试验数据相同的点上。随后使用平均范数  $L_2$  作为全局变量进行不确定度分析。平均范数定义如下:

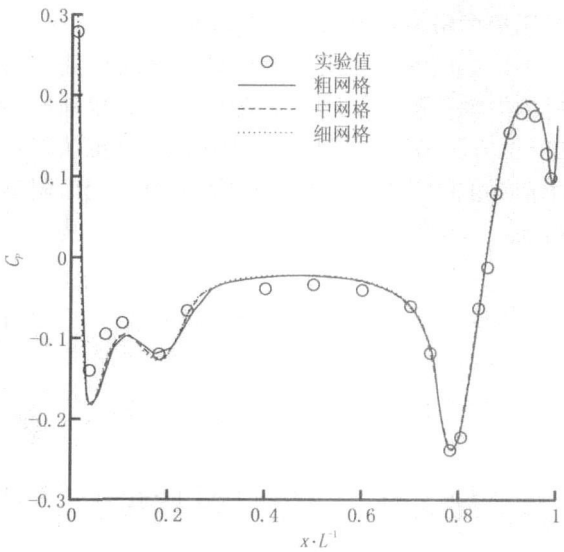


图 4 沿艇体表面压力系数的网格收敛情况

$$\|x - y\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 / N} \tag{23}$$

收敛因子  $R_G$ 、解的精度阶数  $P_G$ 、修正因子  $C_G$  和网格不确定度  $U_G$  等的计算皆采用解变化的平均范数计算,给出如下:

$$\langle R_G \rangle = \frac{\|\mathfrak{E}_1\|_2}{\|\mathfrak{E}_2\|_2} \tag{24}$$

$$\langle P_G \rangle = \frac{\ln(\|\mathfrak{E}_2\|_2 / \|\mathfrak{E}_1\|_2)}{\ln(r_G)} \tag{25}$$

$$\langle C_G \rangle = \frac{r_G^{\langle P_G \rangle} - 1}{r_G^{\langle P_G \rangle_{EST}} - 1} \tag{26}$$

$$\langle U_G \rangle = [2 | 1 - \langle C_G \rangle | + 1] | \frac{\|\mathfrak{E}_1\|_2}{r_G^{\langle P_G \rangle} - 1} | \tag{27}$$

基于以上公式,计算得到:  $\|\mathfrak{E}_1\|_2 = 0.000387082$ ,  $\|\mathfrak{E}_2\|_2 = 0.000752612$ ,  $\langle R_G \rangle = 0.5143$ ,  $\langle P_G \rangle = 1.9185$ ,  $\langle C_G \rangle = 0.9443$ 。

由于,  $0 < \langle R_G \rangle < 1$ ,上述 RANS 解是单调收敛的,并且得到验证。网格不确定度估计如下:  $\langle U_G \rangle = 0.0004556 = 0.04556\%$ ,它小于试验不确定度  $\langle U_D \rangle = 1.5\%$ 。数值模拟不确定度计算结果为  $U_{SN} = \sqrt{U_G^2 + U_I^2} \approx U_G = 0.04556\%$ ,其中  $U_I$  为迭代不确定度,当解完全收敛时,迭代不确定度往往可以忽

略。上述验证结果列于表 1 所下。

表 1 壁面压力系数验证结果

$R_G$	$P_G$	$C_G$	$U_G$
0.514 3	1.92	0.94	0.046%

3.3 确认

根据 ITTC 规程确认不确定度的定义, 得到  $U_V$   
= $\sqrt{U_{SN}^2 + U_D^2} = 1.501\%$ 。 $\|E_2\| = 0.003\ 802 = 0.380\ 2\%$  是细网格解和试验值之差的平均范数  $L_2$ , 由于  $|E| < U_V$ , 该解整体得到确认, 不确定度为 1.501% 驻点压力。确认分析列于表 2 所下。

表 2 壁面压力系数确认结果

$E\%$	$U_V\%$	$U_D\%$	$U_{SN}\%$
0.38	1.501	1.5	0.046

3.4 局部误差和不确定度的分布

基于试验数据点处每一点局部解的变化  $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_1$ , 可以同样计算出误差和不确定度的分布( $E, \pm U_V$ )。图 5 是得到的( $E, \pm U_V$ ) 分布情况, 当  $E$  处在  $\pm U_V$  之间时, 表明解在不确定度  $U_V$  的水平上得到确认。由图可见, 除了艏部有少量点外, 细网格的模拟误差绝大部分介与确认不确定度区间中。而局部的压力系数无法得到确认是由于艏部压力预报偏低造成的。

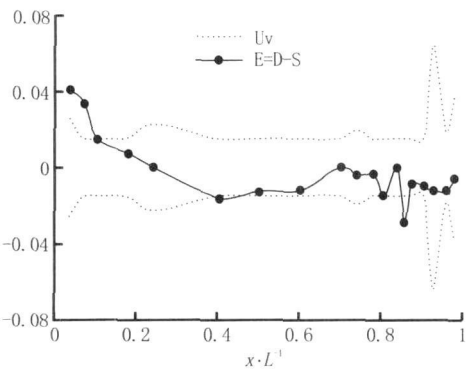


图 5 压力系数计算值误差和不确定度的分布

4 结论

本文在学习和消化 ITTC 的 CFD 不确定度分析临时规程的基础上, 对潜艇标模 SU BOFF 光体的黏流场进行了数值计算, 并利用 ITTC 规程对数值结果不确定度分析进行了实践。通过学习和实践明确了 CFD 不确定度的分析的基本概念, 熟悉了 CFD 不确定度的分析方法, 积累了 CFD 不确定度分析的实践经验。

通过实践, 作者体会到: (1) ITTC 方法提供了比较直接、可靠的方法, 不需更改求解器, 相对容易实施; (2) ITTC 规程比较适合简单对象, 对复杂对象, 操作上还有较大的难度; (3) 为了更好地进行 CFD 不确定度分析, 较多的实践经验是必不可少的。

参 考 文 献:

[1] ROACHE P J, GHIA K, WHITE F. Editorial policy statement on the control of numerical accuracy [ J ]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1986, 108( 1 ): 2.

[2] AIAA. Editorial policy statement on numerical accuracy and experimental uncertainty[ J ]. AIAA Journal, 1994, 32: 3.

[3] ROACHE P J. Verification and validation in computational science and engineering[ M ]. Albuquerque, New Mexico: Hermosa publishers, 1998.

[4] AIAA. Guide for verification and validation of computational fluid dynamics simulations [ S ]. G-077 1998, 1998.

[5] COLEMAN H W, STERN F. Uncertainties in CFD code validation[ J ]. ASME J. Fluids Eng. , 1997, 119: 795-803.

[6] STERN F, WILSON R, COLEMAN H, PATERSON E. Verification and validation of CFD simulations[ R ]. Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, IIHR Report No. 407, 1999.

[7] LARS Larsson, FREDERICK Stern, VOLKER Bertram. Proceedings of Gothenburg 2000- A Workshop of Numerical Ship Hydrodynamics[ C ]. Gothenburg, Sweden, 2000.

- [ 8 ] ABDEL-MAKSOU D M, MENTER F, RIECK K. Unsteady numerical investigation of the turbulent flow around the container ship model ( KCS) with and without Propeller[ C]. Proc. of Gothenburg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Chalmers U. of Technology, Gothenburg, Sweden, 2000.
- [ 9 ] ROBERT Wilson, ERIC Paterson, and FRED Stern. Verification and validation for RANS simulation of a naval combatant[ C]. Proc. of Gothenburg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics. Chalmers U. of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [ 10 ] RHEE S H, HINO T. Unstructured grid flow solver for practical ship hulls[ C]. Proc. of Gothenburg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Chalmers U. of Technology, Gothenburg, Sweden, 2000.
- [ 11 ] HIRATA NOBUYUKI, HINO TAKANORI. Flow computation around a tanker hull using modified spatallmaras model[ C]. Proc. of Gothenburg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics Chalmers U. of Technology, Gothenburg, Sweden, 2000.
- [ 12 ] 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, 2003a, 32: 1325-1356.
- [ 13 ] SIMONSEN C D, STERN F. Flow pattern around an appended tanker hull form in simple maneuvering conditions[ C]. Proc. 8th Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea, 2003b.
- [ 14 ] SUAKHO VAN, JIN KIM, PARK IL-RYONG, KIM WU-JOAN. Calculation of turbulent flows around a submarine for the prediction of hydrodynamic performance[ C]. The 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea, 2003. 22-25.
- [ 15 ] HUANG T T, LIU H-L, GROVES N, FORLINI T, BLANTON J, GROWING S. Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel: the DARPA SUBOFF experimental program[ C]. 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, D. C., USA, 1994.