

Resumo

O objectivo principal deste trabalho foi desenvolver um programa de computador para a simulação de escoamentos em geometrias complexas, baseado no método da simulação das grandes escalas da turbulência (LES - Large Eddy Simulation) e num sistema de coordenadas genérico. O programa de trabalhos efectuado incluiu a simulação de vários escoamentos, nos quais se compararam dois métodos de modelação da turbulência, se estudou o efeito da estratificação do fluido e se analisou o efeito da utilização do sistema de coordenadas genérico.

Usando uma malha Cartesiana, procedeu-se à comparação entre os resultados obtidos com o método das grandes escalas da turbulência e o modelo de Smagorinsky e os apurados com o método das médias de Reynolds (RaNS - Reynolds averaged Navier-Stokes) e o modelo $k - \epsilon$ na simulação do escoamento em torno de um prisma de secção quadrada, com número de Reynolds $Re = 21400$. No caso do modelo $k - \epsilon$, usaram-se, além do modelo original, três variantes, para tentar eliminar a produção excessiva de energia cinética da turbulência junto da face frontal do prisma prevista pelo modelo original. Relativamente aos resultados obtidos com o método das médias de Reynolds, os do método das grandes escalas da turbulência previram com mais exactidão o coeficiente de arrasto, o comprimento da zona de recirculação e as tensões de Reynolds. No entanto, verificaram-se algumas deficiências na previsão da componente longitudinal da velocidade junto das faces horizontais do prisma e uma recuperação excessiva da velocidade na esteira, que julgamos deverem-se a uma resolução insuficiente da malha.

Usando uma malha não-ortogonal, simulou-se também o escoamento bidimensional, laminar e estavelmente estratificado em torno de um cilindro, com números de Reynolds entre 20 e 500 e números de Froude interno (Fi) iguais ou superiores a quatro. O objectivo foi avaliar o efeito da estratificação em alguns perfis da velocidade e em parâmetros como o número de Strouhal (St) ou os coeficientes de arrasto e de sustentação (C_d e C_l). O efeito da estratificação só se fez sentir para números de Froude interno inferiores a 100. Nesses casos, o aumento da estratificação provocou sempre a diminuição do número de Strouhal e das oscilações dos coeficientes de arrasto e de sustentação dos escoamentos que ocorriam em regime periódico. As evoluções temporais dos ângulos de estagnação e de separação α_s e α_d foram pouco afectadas pela estratificação, tal como o comprimento médio da zona de recirculação, que nunca se alterou em mais de 5%. Contudo, a máxima velocidade negativa chegou a reduzir-se de 36% no caso do escoamento com $Re = 500$. O efeito da não-ortogonalidade da malha foi estudado através da simulação numérica directa (DNS - Direct Numerical Simulation) do decaimento da turbulência isotrópica (com $Re_\lambda \approx 40$) em malhas regularmente espaçadas com 64^3 e 128^3 nós; os domínios físicos tinham a forma de paralelepípedos rectos periódicos, com apenas duas faces não paralelas a um dos planos Cartesianos. As simulações foram iniciadas com campos de velocidade com o mesmo espectro de energia e de correlações; porém, devido ao modo como eram calculadas as derivadas nas malhas não-ortogonais, as

distribuições estatísticas de algumas componentes da vorticidade e do tensor das taxas de deformação eram diferentes. No entanto, após cerca de metade do eddy turno ver time as diferenças não eram maiores do que as observadas entre simulações iniciadas com campos de velocidade diferentes num domínio Cartesiano e o alinhamento da vorticidade com as taxas de deformação principais, relevante para a transferência de energia, nunca foi influenciado pela não-ortogonalidade da malha. Por isso, concluímos que era possível utilizar malhas não-ortogonais com os métodos da simulação numérica directa e das grandes escalas da turbulência.

Por último, simulámos o escoamento sobre o monte de Askervein, para verificar as capacidades do programa na simulação de escoamentos atmosféricos reais. Os parâmetros que mais influenciaram os resultados, particularmente na esteira do monte, foram a resolução da malha e o tempo de desenvolvimento (tempo simulado antes do cálculo das estatísticas). O aumento da resolução da malha no plano horizontal acentuava os valores extremos das tensões de Reynolds, enquanto a influência do tempo de desenvolvimento era maior próximo de uma zona de recirculação junto ao solo, devido à menor velocidade. A modelação do escoamento próximo do solo foi deficiente; cremos que este aspecto poderá ser melhorado utilizando um modelo de tensões residuais mais preciso do que o modelo de Smagorinsky.

Abstract

The main purpose of this work was the development of a computer program for flow simulation on complex geometries based on the large eddy simulation (LES) method and on a generic coordinate system. The work plan carried out included the simulation of several flows, in which two methods of turbulence modelling were compared, the effect of fluid stratification was studied and the effect of the use of a generic coordinate system was analysed.

Using a Cartesian grid, a comparison was established between results obtained with the large eddy simulation method and the Smagorinsky model and the ones reached with the Reynolds averaged Navier-Stokes (RaNS) method and the $k-e$ model in the simulation of the flow around a square cylinder, with Reynolds number $Re = 21400$. In case of the $k-e$ model, apart from the original model, three variants were used, to try to eliminate the excessive production of turbulence kinetic energy close to the front face of the square cylinder predicted by the original model. As for the results obtained with the Reynolds averaged method, the ones from the large eddy simulation method predicted with higher accuracy the drag coefficient, the recirculation zone length and the Reynolds stresses. However, some deficiencies were reported in the prediction of the longitudinal velocity component next to the horizontal faces of the square cylinder and an excessive velocity recovery in the wake, which we think might be due to insufficient grid resolution.

Using a non-orthogonal mesh, we have also simulated the two-dimensional, laminar and stably stratified flow around a circular cylinder, with Reynolds numbers (Re) between 20 and 500 and internal

Froude numbers (Fi) equal or above four. The purpose was the assessment of the effect of stratification on some velocity profiles and on parameters such as the Strouhal number (St) or the drag and lift coefficients (C_d and C_l). The stratification effect was only reported on the internal Froude numbers below 100. In such cases, the stratification increase always caused the reduction of the Strouhal number and of the drag and lift coefficients oscillations of the flows that occurred in periodic regime. The temporal evolutions of the stagnation and detachment angles q_s and q_d were little affected by the stratification, like the average length of the recirculation zone that never changed more than 5%. However, the maximum negative velocity was reduced as much as 36% in the case of the flow with $Re = 500$.

The effect of the non-orthogonality of the grid was studied using the direct numerical simulation (DNS) of the decay of isotropic turbulence (with $Re_\lambda \approx 40$) in regularly spaced grids with 64^3 and 128^3 nodes; the physical domains were shaped as periodic straight parallelepipeds with only two faces non parallel to one of the Cartesian planes. The simulations were started with velocity fields with the same energy and correlation spectra; nevertheless, due to the way the derivatives were calculated in the non-orthogonal grids, the statistical distributions of some components of the vorticity and the rate of strain tensor were different. However, about half of the eddy turnover time the differences were not greater than the ones registered between simulations started with different velocity fields in a Cartesian domain and the alignment between the vorticity and the principal rates of strain, relevant to the energy transfer, was never influenced by the non-orthogonality of the grid. Because of that, we concluded that it was possible to use non-orthogonal grids with the methods of direct numerical simulation and of large eddy simulation.

Finally, we have simulated the flow over Askervein hill, to check the program abilities in the simulation of real atmospheric flows. The main parameters to influence results, particularly on the wake of the hill, were the grid resolution and the development time (time simulated before the statistics calculation). The higher grid resolution on the horizontal plane accentuated the extreme values of Reynolds stresses, while the influence of the development time was greater close to a recirculation zone near the ground, due to the lower velocity. The flow modelling close to the ground was deficient; we believe that this aspect can be improved by using a residual stress model more accurate than the Smagorinsky model.