بسم الله الرحمن الرحيم

مدخل الى

ديناميكيات الموائع الحسابية

(بالإنجليزية: **Computational Fluid Dynamics**) (**CFD**)

سمير مراد

هذا الاصدار ليس بكامل. آخر تعديل: الاثنين، 21 حزيران، 2010

مركز الشرق الاوسط للطاقة البديلة

Middle East Institute for Alternative Energy Research (MEAE)

www.aecenar.com/institutes/meae

الفهرس

1 مدخل 3

1.1 مصطلحات 3

1.1.1 الموائع 3

1.2 مضمون الكتاب 4

1.3 Technicalities 4

2 مدخل الى التحليل العددي 6

2.1 [عدل] مقدمة عامة 6

2.1.1 [عدل] الطرق المباشرة والتكرارية 6

2.2 [عدل] مقدمة عامة 6

2.2.1 [عدل] التقطيع 6

2.2.2 [عدل] تولد وانتشار الأخطاء 6

2.3 [عدل] التقسيمات الفرعية للرياضيات العددية 7

2.4 [عدل] اقرأ أيضا 7

2.5 [عدل] وصلات خارجية 7

3 منهجية ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) 8

3.1.1 Discretization methods 8

3.1.2 [edit] Turbulence models 9

3.1.3 [edit] Vorticity Confinement method 11

3.1.4 [edit] Two phase flow 11

3.1.5 [edit] Solution algorithms 12

3.2 [edit] See also 12

3.3 [edit] Notes 12

3.4 [edit] External links 13

4 مراجع 14

1 مدخل

1.1 مصطلحات[1]

ميكانيكا الموائع (بالإنجليزية: Fluid Mechanics) هو تخصص فرعي من ميكانيكا المواد المتصلة (بالإنجليزية: Continuum Mechanics) وهو معني أساسا **بالموائع**، التي هي أساسا السوائل والغازات، ويدرس هذا التخصص السلوك الفيزيائي الظاهر الكلي لهذه المواد، ويمكن تقسيمه من ناحية إلى إستاتيكا الموائع– أو دراستها في حالة عدم الحركة، أو ديناميكا الموائع أو دراستها في حالة الحركة، ويندرج تحتها تخصصات أخرى معينة، فهناك الديناميكيات الهوائية (**أيروديناميك**) والديناميكيات المائية (**هيدروديناميك**). يسعى هذا التخصص إلى تحديد الكميات الفيزيائية الخاصة بالموائع، وذلك مثل السرعة، الضغط، الكثافة، ودرجة الحرارة، **واللزوجة** ومعدل التدفق، وقد ظهرت تطبيقات حسابية حديثة لإيجاد حلول للمسائل المتصلة بميكانيكا الموائع، ويسمى التخصص المعني بذلك ديناميكيات الموائع الحسابية (بالإنجليزية:Computational FluidDynamics) .(CFD)

1.1.1 الموائع

الموائع كجمع لكلمة مائع (بالإنجليزية: fluids) تشكل مجموعة من أطوار المادة، وهي أي مادة قابلة للانسياب تحت تأثير إجهاد القص وتأخذ شكل الإناء الحاوي لها. تتضمن الموائع كلٍ من السوائل، الغازات، البلازما وأحيانا الأصلاب اللدنة plastic solids.

تصنف الموائع عادة إلى:

- **موائع قابلة للانضغاط** (**compressible fluids**) وهي الموائع التي تتغير كثافتها بتغير الضغط الواقع عليها مثل الغازات.
- **موائع غير قابلة للانضغاط** (**incompressible fluids**) وهي الموائع التي لا تتغير كثافتها بتغير الوضع الواقع عليها مثل السوائل.
- موائع نيوتنية: **المائع النيوتني** هو مائع تكون فيه علاقة الإجهاد[2] – الانفعال (تشوه المواد نتيجة الإجهاد) علاقة خطية أي على شكل مستقيم يمر من مبدأ الإحداثيات، ويعرف اسم ثابت التناسب باللزوجة. سمي هذا المائع على اسم العالم اسحق نيوتن[3].

[1] من http://ar.wikipedia.org/wiki ولكن محقق من الكاتب

[2] engl. stress

[3] **إسحق "نيوتن"** (بالإنجليزية: Isaac Newton) وينادي **بالسير إسحق نيوتن** (4 يناير 1643– 31 مارس 1727) من رجال الجمعية الملكية كان فيزيائي إنجليزي وعالم رياضيات وعالم فلك وفيلسوف بعلم الطبيعة وكيمائي وعالم باللاهوت وواحدًا من أعظم الرجال تأثيرًا في تاريخ البشرية. ويعد كتابه *كتاب الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية* والذي

- موائع غير نيوتنية: **مائع لا نيوتوني** هو مائع لا يمكن وصف جريانه باستخدام ثابت اللزوجة. تعتبر أغلب المحاليل البوليرات والبوليمرات الذائبة من الموائع اللانيوتونية والكثير من السوائل الشائعة مثل الكتشب، ذائب النشا، الدم والشامبو.

1.2 مضمون الكتاب

في هذا الكتيب يتناول ان شاء الله التالى:

- تلخيص لميكانيكا الموائع (بالإنجليزية: Fluid Mechanics)
- مدخل ملخص للتحليل عددي (بالإنجليزية: Numerics / Numerical Computation)
- اساليب ديناميكيات الموائع الحسابية (بالإنجليزية:Computational FluidDynamics)

1.3 Technicalities

الاساس في الديناميكيات الموائع الحسابية (بالإنجليزية: Computational Fluid Dynamics)، (CFD) هو كيفية التعامل لمائع متصل (continuous fluid)

in a discretized fashion on a computer. One method is to discretize the spatial domain into small cells to form a volume mesh or grid, and then apply a suitable algorithm to solve the equations of motion (Euler equations for inviscid, and Navier–Stokes equations for viscous flow). In addition, such a mesh can be either irregular (for instance consisting of triangles in 2D, or pyramidal solids in 3D) or regular; the distinguishing characteristic of the former is that each cell must be stored separately in memory. Where shocks or discontinuities are present, high resolution schemes such as Total Variation Diminishing (TVD), Flux Corrected Transport (FCT), Essentially NonOscillatory (ENO), or MUSCL schemes are needed to avoid spurious oscillations (Gibbs phenomenon) in the solution.

If one chooses not to proceed with a mesh-based method, a number of alternatives exist, notably :

(SPH), a Lagrangian method of solving fluid problems, Smoothed particle hydrodynamics

نشر عام 1687 من أكثر الكتب تأثيرًا في تاريخ العلم واضعًا أساس لمعظم نظريات الميكانيكا الكلاسيكية. في هذا الكتاب، وصف "نيوتن" الجاذبية العامة وقوانين الحركة الثلاثة والتي سيطرت على النظرة العلمية إلى العالم المادي للقرون الثلاثة القادمة ووضح "نيوتن" أن حركة الأجسام على كوكب الأرض والتي لها أجرام سماوية تحكمها مجموعة القوانين الطبيعية نفسها عن طريق إثبات الاتساق بين قوانين "كبلر" الخاصة بالحركة الكوكبية ونظريته الخاصة بالجاذبية؛ ومن ثم إزالة الشكوك المتبقية التي ثارت حول نظرية مركزية الشمس مما أدى إلى تقديم الثورة العلمية. وفيما يتعلق بالميكانيكا، أعلن "نيوتن" مبادئ بقاء الطاقة الخاصة بكل من كمية الحركة وكمية الحركة الزاوية. وفي علم البصريات، اخترع "نيوتن" أول تلسكوب عاكس[3] عملي. وكذلك أيضًا طور نظرية الألوان (لون) معتمدًا على ملاحظة أن المنشور يحلل الضوء الأبيض إلى العديد من الألوان التي تشكل الطيف المرئي. وبالإضافة إلى ذلك، صاغ قانون نيوتن للتبريد ودرس سرعة الصوت. وبالنسبة لعلم الرياضيات، يشارك "نيوتن" "جوتفريد لايبنتز" في شرف تطوير حساب التكامل والتفاضل. وكذلك أيضًا، أثبت النظرية ذات الحدين المعممة وطور ما يسمى بـــ "طريقة نيوتن" الخاصة بتقريب الأصفار الموجودة بالدالة وساهم في دراسة متسلسلة القوى. تظل مكانة "نيوتن" الرفيعة بين العلماء في أعلى مرتبة الأمر الذي أثبته استطلاع رأي أجري عام 2005 فيما يتعلق بعلماء المجتمع الملكي البريطاني وكان السؤال الذي طرحه هذا الاستطلاع هو من كان له أعظم تأثير على تاريخ العلم "نيوتن" أم "ألبرت آينشتاين". وكانت نتيجة الاستطلاع هي أن "نيوتن" هو يعتبر الأكثر تأثيرًا.[4] علاوةً على ذلك، كان "نيوتن" تقيًا للغاية (على الرغم من أنه لم يكن متفقًا مع الأعراف الدينية القائمة) ومنتجًا للعديد من الأعمال في تفسيرات الكتاب المقدس أكثر مما أنتجه في العلوم الطبيعية التي لم ينس العالم إسهاماته به حتى الآن.

, a technique where the equations are projected onto basis functions like the Spectral methods
, Chebyshev polynomials and spherical harmonics
system on a mesoscopic (LBM), which simulate an equivalent Lattice Boltzmann methods
Cartesian grid, instead of solving the macroscopic system (or the real microscopic physics).

It is possible to directly solve the Navier–Stokes equations for laminar flows and for turbulent flows when all of the relevant length scales can be resolved by the grid (a Direct numerical simulation). In general however, the range of length scales appropriate to the problem is larger than even today's massively parallel computers can model. In these cases, turbulent flow simulations require the introduction of a turbulence model. Large eddy simulations (LES) and the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (RANS) formulation, with the *k-ε* model or the Reynolds stress model, are two techniques for dealing with these scales.

In many instances, other equations are solved simultaneously with the Navier–Stokes equations. These other equations can include those describing species concentration (mass transfer), chemical reactions, heat transfer, etc. More advanced codes allow the simulation of more complex cases involving multi-phase flows (e.g. liquid/gas, solid/gas, liquid/solid), non-Newtonian fluids (such as blood), or chemically reacting flows (such as combustion).

2 مدخل الى التحليل العددي

التحليل العددي أو الرياضيات العددية أحد فروع الرياضيات الذي يهتم بدراسة الخوارزميات لحل بعض مشاكل الرياضيات المتصلة (تمييزا لها عن الرياضيات المتقطعة) باستخدام عمليات رياضية بسيطة مثل الجمع والضرب. تنشأ بعض المشاكل التي يحلها التحليل العددي في دراسة التحليل الرياضي أو من دراسة المتغيرات الحقيقية أو المتغيرة، أو الجبر الخطي العددي ضمن حقول الأعداد الحقيقية والعقدية (المركبة)، كما تحل بعض مسائل المعادلات التفاضلية، وبعض مسائل الفيزياء والهندسة.

2.1 [عدل] مقدمة عامة

العديد من المسائل في الرياضيات المتصلة (الاستمرارية) continuous mathematics لا تمتلك حل مغلق–الشكل closed-form solution (أي بمعنى آخر لا توجد طريقة أو قاعدة لإعطائنا الحل الدقيق أو الصحيح). من أمثلة ذلك إيجاد تكامل التابع الأسي (x^2) (انظر دالة الخطأ error function)، وحل معادلة كثير الحدود العامة من الدرجة الخامسة فما فوق (مبرهنة أبيل–روفيني). في هذه الحالات يتبقى لدينا خيارين : أولا محاولة إيجاد حل تقريبي باستخدام تحليل مزالفي asymptotic analysis أو يمكن البحث عن حل عددي numerical solution. عملية إيجاد الحل العددي هي مجال بحث التحليل العددي.

2.1.1 [عدل] الطرق المباشرة والتكرارية

يمكن لبعض المسائل في التحليل العددي أن تحل بشكل دقيق عن طريق خوارزمية ما، حيث تسمى هذا النوع من الخوارزميات "طرق مباشرة" *direct methods* : مثالها الاختصار الغاوسي Gaussian elimination لحل جمل المعادلات الخطية وطريقة التبسيط (طريقة سيمبلكس) simplex method في البرمجة الخطية linear programming.

لكن بالمقابل، هناك الكثير من المسائل لا تحل بخوارزميات مباشرة، في هذه الحالة قد يكون من الممكن حلها باستخدام أسلوب تأويبي iterative method. مثل هذه الطريقة تبدأ بتخمين وإيجاد التقريب الأنجح الذي يقترب بفعالية من الحل المطلوب. حتى عندما تتواجد أحيانا خوارزميات مباشرة فقد تفضل الطرق التكرارية أحيانا لأنها أكثر فعالية (قد تتطلب زمنا أقل وقدرة حسابية أقل إضافة لتقريب جيد للحل) أو قد تكون أكثر استقرارا. التحليل العددي أو الرياضيات العددية أحد فروع الرياضيات الذي يهتم بدراسة الخوارزميات لحل بعض مشاكل الرياضيات المتصلة (تمييزا لها عن الرياضيات المتقطعة) باستخدام عمليات رياضية بسيطة مثل الجمع والضرب. تنشأ بعض المشاكل التي يحلها التحليل العددي في دراسة التحليل الرياضي أو من دراسة المتغيرات الحقيقية أو المتغيرة، أو الجبر الخطي العددي ضمن حقول الأعداد الحقيقية والعقدية (المركبة)، كما تحل بعض مسائل المعادلات التفاضلية، وبعض مسائل الفيزياء والهندسة.

2.2 [عدل] مقدمة عامة

العديد من المسائل في الرياضيات الاستمرارية continuous mathematics لا تمتلك حل مغلق–الشكل closed-form solution (أي بمعنى آخر لا توجد طريقة أو قاعدة لإعطائنا الحل الدقيق أو الصحيح). من أمثلة ذلك إيجاد تكامل التابع الأسي (x2) (انظر دالة الخطأ error function)، وحل معادلة كثير الحدود العامة من الدرجة الخامسة فما فوق (مبرهنة أبيل–روفيني). في هذه الحالات يتبقى لدينا خيارين : أولا محاولة إيجاد حل تقريبي باستخدام تحليل لا asymptotic analysis أو يمكن البحث عن حل عددي solution numerical. عملية إيجاد الحل العددي هي مجال بحث التحليل العددي.

2.2.1 [عدل] التقطيع

في حالات أخرى، المسائل التي تتصف بالاستمرارية قد تحتاج إلى استبدالها بمسائل رياضية متقطعة معروفة الحلول سلفا، هذه العملية تدعى "التقطيع" *discretization*. فمثلا، حل معادلة تفاضلية هو دالة رياضية، ينبغي تمثيلها بمقدار محدود من البيانات، مثلا عن طريق قيمة الدالة عند نقاط مختلفة من منطلق الدالة (نطاق الدالة domain)، مع أن النطاق هو عبارة عن مجال مستمر continuum.

2.2.2 [عدل] تولد وانتشار الأخطاء

دراسة شكل الأخطاء يشكل جزءا مهما جدا من التحليل العددي. هناك عدة طرق يمكن من خلالها أن يدخل الخطأ إلى حل مسألة رياضية. فأخطاء التقريب Round-off error تنشأ من استحالة تمثيل الأعداد الحقيقية بشكل دقيق في آلات محدودة الحالات finite-state machine (مثل جميع الحواسيب الرقمية المستخدمة). أخطاء البتر Truncation تحدث عندما يتم إنهاء طريقة تكرارية ويكون الحل التقريبي ما زال بعيدا عن الحل الدقيق للمسألة. أيضا عملية التقطيع discretization تحدث أخطاء تقطيع غالبا لأن حلول المسائل المقطعة لا تتوافق في الغالب مع حلول المسائل الاستمرارية.

حالما يتم تولد خطأ ما، سيتم انتشار هذا الخطأ من خلال الحسابات المتتالية. وهذا يقود إلى مصطلح الثباتية العددية numerical stability : تكون خوارزمية ثابتة عدديا إذا كان الخطأ لا يتضخم خلال الحسابات بعد ارتكابه مباشرة. طبعا هذا لا يكون ممكنا إلا إذا كانت المسألة جيدة الشروط well-conditioned، أي أن الحل يتغير بمقدار ضئيل إذا تغيرت معطيات المسألة بمقدار ضئيل. في الحالة المعاكسة وندعوها مسألة سيئة الشروط ill-conditioned : يتم تضخم الخطأ في المعطيات بشكل كبير ضمن حسابات الحل.

بجميع الأحوال، يمكن أن تكون الخوارزمية التي تحل مسألة جيدة الشروط ثابتة عدديا أو غير ثابتة عدديا فالموضوع لا يتعلق فقط بطبيعة المسألة بل بطريقة حلها بالتالي تكون مهمة التحليل العددي أيضا إيجاد خوارزميات مستقرة لحل المسائل الرياضية الجيدة الشروط إضافة لإيجاد خوارزميات مستقرة لحل المسائل السيئة الشروط.

2.3 [عدل] التقسيمات الفرعية للرياضيات العددية

- رياضيات الاستمثال
- التقريب
- حل عددي للمعادلات الخطية
- حل عددي للمعادلات التفاضلية
- جبر خطي عددي

2.4 [عدل] اقرأ أيضا

- قائمة مواضيع التحليل العددي

2.5 [عدل] وصلات خارجية

- Scientific computing FAQ
- Numerical analysis DMOZ category
- Links to Open Source Scientific Computing codes
- Numerical Recipes Homepage - with free ،complete downloadable books
- Alternatives to Numerical Recipes

3 منهجية ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD)

In all of these approaches the same basic procedure is followed.
During preprocessing the geometry (physical bounds) of the problem is defined.
The volume occupied by the fluid is divided into discrete cells (the mesh). The mesh may be uniform or non uniform.
The physical modeling is defined – for example, the equations of motions + enthalpy + radiation + species conservation
Boundary conditions are defined. This involves specifying the fluid behaviour and properties at the boundaries of the problem. For transient problems, the initial conditions are also defined.
The simulation is started and the equations are solved iteratively as a steady-state or transient.
Finally a postprocessor is used for the analysis and visualization of the resulting solution.

Discretization methods 3.1.1

The stability of the chosen discretization is generally established numerically rather than analytically as with simple linear problems. Special care must also be taken to ensure that the discretization handles discontinuous solutions gracefully. The Navier– and Euler equationsdiscretization handles discontinuous solutions gracefully. The both admit shocks, and contact surfaces.Stokes equations

Some of the discretization methods being used are:

(FVM). This is the "classical" or standard approach used most often in Finite volume method commercial software and research codes. The governing equations are solved on discrete control volumes. FVM recasts the PDE's (Partial Differential Equations) of the N-S equation in the conservative form and then discretize this equation. This guarantees the conservation of fluxes through a particular control volume. Though the overall solution will be conservative in nature there is no guarantee that it is the actual solution. Moreover this method is sensitive to distorted elements which can prevent convergence if such elements are in critical flow regions. This integration approach yields a method that is inherently]: citation neededconservative (i.e. quantities such as density remain physically meaningful)[

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint Q\,dV + \iint F\,d\mathbf{A} = 0,$$

or Euler equationswhere Q is the vector of conserved variables, F is the vector of fluxes (see is the cell surface area. $\mathbf{A}$), V is the cell volume, and Navier–Stokes equations

(FEM). This method is popular for structural analysis of solids, but is Finite element method also applicable to fluids. The FEM formulation requires, however, special care to ensure a conservative solution. The FEM formulation has been adapted for use with the Navier–Stokes equations. Although in FEM conservation has to be taken care of, it is much more Consequently it is the new direction in which CFD is [4]stable than the FVM. approach]. Generally stability/robustness of the solution is better in FEM though for citation neededmoving[[5]some cases it might take more memory than FVM methods.
In this method, a weighted residual equation is formed:

$$R_i = \iiint W_i Q \, dV^e$$

where R_i is the equation residual at an element vertex i , Q is the conservation equation expressed on an element basis, W_i is the weight factor and V^e is the volume of the element.

method. This method has historical importance and is simple to program. It Finite difference is currently only used in few specialized codes. Modern finite difference codes make use of an embedded boundary for handling complex geometries making these codes highly efficient and accurate. Other ways to handle geometries are using overlapping-grids, where the solution is interpolated across each grid.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0$$

Where Q is the vector of conserved variables, and F, G, and H are the fluxes in the x, y, and z directions respectively.

. The boundary occupied by the fluid is divided into surface mesh. Boundary element method are used where shocks or discontinuities are present. To capture High-resolution schemes sharp changes in the solution requires the use of second or higher order numerical schemes flux that do not introduce spurious oscillations. This usually necessitates the application of . total variation diminishing to ensure that the solution is limiters

] Turbulence modelsedit[3.1.2

Turbulent flow produces fluid interaction at a large range of length scales. This problem means that it is required that for a turbulent flow regime calculations must attempt to take this into account by modifying the Navier–Stokes equations. Failure to do so may result in an unsteady simulation. When solving the turbulence model there exists a trade-off between accuracy and speed of computation.

] Direct numerical simulationedit[3.1.2.1

Direct numerical simulation (DNS) captures all of the relevant scales of turbulent motion, so no model is needed for the smallest scales. This approach is extremely expensive, if not intractable, for complex problems on modern computing machines, hence the need for models to represent the smallest scales of fluid motion.

] Reynolds-averaged Navier–Stokesedit[3.1.2.2

Reynolds-averaged Navier–Stokes equationsMain article:

Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations are the oldest approach to turbulence modeling. An ensemble version of the governing equations is solved, which introduces new *apparent stresses* known as Reynolds stresses. This adds a second order tensor of unknowns for which various models can provide different levels of closure. It is a common misconception that the RANS equations do not apply to flows with a time-varying mean flow because these equations are 'time-averaged'. In fact, statistically unsteady (or non-stationary) flows can equally be treated. This is sometimes referred to as URANS. There is nothing inherent in Reynolds averaging to preclude this, but the turbulence models used to close the equations are valid only as long as the time over which these changes in the mean occur is large compared to the time scales of the turbulent motion containing most of the energy.

RANS models can be divided into two broad approaches:

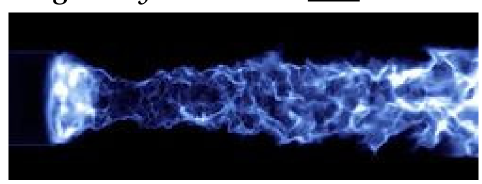
Boussinesq hypothesis

This method involves using an algebraic equation for the Reynolds stresses which include determining the turbulent viscosity, and depending on the level of sophistication of the model, solving transport equations for determining the turbulent kinetic energy and dissipation. Models include k-ε (Spalding), Mixing Length Model (Prandtl) and Zero Equation (Chen). The models available in this approach are often referred to by the number of transport equations they include, for example the Mixing Length model is a "Zero Equation" model because no transport equations are solved, and the k-ε on the other hand is a "Two Equation" model because two transport equations are solved.

(RSM) Reynolds stress model

This approach attempts to actually solve transport equations for the Reynolds stresses. This means introduction of several transport equations for all the Reynolds stresses and hence this approach is much more costly in CPU effort.

] Large eddy simulationedit[3.1.2.3



Volume rendering of a non-premixed swirl flame as simulated by LES.

Large eddy simulations (LES) is a technique in which the smaller eddies are filtered and are modeled using a sub-grid scale model, while the larger energy carrying eddies are simulated. This method generally requires a more refined mesh than a RANS model, but a far coarser mesh than a DNS solution.

] Detached eddy simulationedit[3.1.2.4

Detached eddy simulations (DES) is a modification of a RANS model in which the model switches to a subgrid scale formulation in regions fine enough for LES calculations. Regions near solid boundaries and where the turbulent length scale is less than the maximum grid dimension are assigned the RANS mode of solution. As the turbulent length scale exceeds the grid dimension, the regions are solved using the LES mode. Therefore the grid resolution for DES is not as demanding as pure LES, thereby considerably cutting down the cost of the computation. Though DES was initially formulated for the Spalart-Allmaras model (Spalart et al., 1997), it can be implemented with other RANS models (Strelets, 2001), by appropriately modifying the length scale which is explicitly or implicitly involved in the RANS model. So while Spalart-Allmaras model based DES acts as LES with a wall model, DES based on other models (like two equation models) behave as a hybrid RANS-LES model. Grid generation is more complicated than for a simple RANS or LES case due to the RANS-LES switch. DES is a non-zonal approach and provides a single smooth velocity field across the RANS and the LES regions of the solutions.

] Vortex method edit[3.1.2.5

The Vortex method is a grid-free technique for the simulation of turbulent flows. It uses vortices as the computational elements, mimicking the physical structures in turbulence. Vortex methods were developed as a grid-free methodology that would not be limited by the fundamental smoothing effects associated with grid-based methods. To be practical, however, vortex methods require means for rapidly computing velocities from the vortex elements – in other words they require the solution to a particular form of the N-body problem (in which the motion of N objects is tied to their mutual influences). A long-sought breakthrough came in the late 1980's with the development of the Fast Multipole Method (FMM), an algorithm that has been heralded as one of the top ten advances in numerical science of the 20th century. This breakthrough paved the way to practical computation of the velocities from the vortex elements and is the basis of successful algorithms.

Software based on the Vortex method offer the engineer a new means for solving tough fluid dynamics problems with minimal user intervention. All that is required is specification of problem geometry and setting of boundary and initial conditions. Among the significant advantages of this modern technology;

It is practically grid-free, thus eliminating numerous iterations associated with RANS and LES.

All problems are treated identically. No modeling or calibration inputs are required.

Time-series simulations, which are crucial for correct analysis of acoustics, are possible.

The small scale and large scale are accurately simulated at the same time.

] Vorticity Confinement method edit[3.1.3

The Vorticity Confinement method (VC) is an Eulerian technique, well known for the simulation of turbulent wakes. It uses a solitary-wave like approrach to produce stable solution with no numerical spreading. VC can capture the small scale features to over as few as 2 grid cells. Within these features, a nonlinear difference equation is solved as opposed to finite difference equation. VC is similar to shock capturing methods, where conservation laws are satisfied, so that the essential integral quantities are accurately computed.

] Two phase flow edit[3.1.4

The modeling of two-phase flow is still under development. Different methods have been proposed. The Volume of fluid method gets a lot of attention lately, but the Level set method and front tracking are also valuable approaches. Most of these methods are either good in maintaining a sharp interface or at conserving mass. This is crucial since the evaluation of the density, viscosity and surface tension in based on the values averaged over the interface.

] Solution algorithmsedit[3.1.5

Discretization in space produces a system of ordinary differential equations for unsteady problems and algebraic equations for steady problems. Implicit or semi-implicit methods are generally used to integrate the ordinary differential equations, producing a system of (usually) nonlinear algebraic equations. Applying a Newton or Picard iteration produces a system of linear equations which is nonsymmetric in the presence of advection and indefinite in the presence of incompressibility. Such systems, particularly in 3D, are frequently too large for direct solvers, so iterative methods are used, either stationary methods such as successive overrelaxation or Krylov subspace methods. Krylov methods such as GMRES, typically used with preconditioning, operate by minimizing the residual over successive subspaces generated by the preconditioned operator.

Multigrid is especially popular, both as a solver and as a preconditioner, due to its asymptotically optimal performance on many problems. Traditional solvers and preconditioners are effective at reducing high-frequency components of the residual, but low-frequency components typically require many iterations to reduce. By operating on multiple scales, multigrid reduces all components of the residual by similar factors, leading to a mesh-independent number of iterations.

For indefinite systems, preconditioners such as incomplete LU factorization, additive Schwarz, and multigrid perform poorly or fail entirely, so the problem structure must be used for effective preconditioning.[6] The traditional methods commonly used in CFD are the SIMPLE and Uzawa algorithms which exhibit mesh-dependent convergence rates, but recent advances based on block LU factorization combined with multigrid for the resulting definite systems, have led to preconditioners which deliver mesh-independent convergence rates.[7]

] See alsoedit[3.2

Blade element theory
Finite element analysis
Immersed Boundary Method
Fluid mechanics
List of finite element software packages
Visualization
Wind tunnel
Multidisciplinary design optimization
Turbulence modeling

] Notesedit[3.3

Milne-Thomson, L.M. (1973). *Theoretical Aerodynamics*. Dover Publications. ^
. 048661980X ISBN
. "Calculation of Potentiel Flow About Arbitrary Bodies" Hess, J.L.; A.M.O. Smith (1967). ^
. 10.1016/0376-0421(67)90003-6:doi*Progress in Aeronautics Sciences* **8**: 1–138.
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V3V-4811PYT-33&_user=10&_coverDate=12%2F31%2F1967&_alid=1339703692&_rdoc=1&_fmt=high&_orig

=search&_cdi=5740&_docanchor=&view=c&_ct=176&_acct=C000050221&_version=1&_urlVer
. sion=0&_userid=10&md5=2939d59a5c94a28fcc51ab6d6cec0305
. Daniel Guggenheim School of Aerospace Engineering. "NASCART" ^
. Retrieved 2007-07-28. http://www.ae.gatech.edu/people/sruffin/nascart/
http://www3.interscience.wiley.com/journal/112692130/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0 ^
Huebner, K. H., Thornton, E. A., and Byron, T. D., The Finite Element Method for ^
Engineers, 3rd ed., Wiley Interscience(1995).
Benzi, Golub, Liesen: "Numerical solution of saddle-point problems", Acta Numerica, 2005. ^
Elman et al.: "A taxonomy and comparison of parallel block multi-level preconditioners for ^
the incompressible Navier–Stokes equations", Journal of Computational Physics, vol. 227, 2008.

3.4 [edit] External links

Many examples and images, with references to robotic fish. CFD Tutorial
CFD-Wiki
Course: Introduction to CFD (Dmitri Kuzmin – Dortmund University of Technology)
Retrieved from "http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics"

•

4 مراجع

, Springer Verlag. 8J. Ferziger und M. Peric: *Numerische Strömungsmechanik*, 200

•