

计算流体力学基本概念与方法（1）

宁波水表股份有限公司 姚 灵编

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，简称 CFD）是建立在经典流体力学与数值方法基础之上的一门新型学科，通过计算机数值计算和图像显示等方法，在时间和空间上定量描述流场的数值解，从而达到对物理问题研究的目的。它兼有理论性和实践性的双重特点，建立起了许多自身的理论和方法，可以为现代科学技术中很多复杂流动与传热问题等的解决提供非常有效的技术和方法。

CFD 的应用与计算机技术的发展密切相关。随着计算机技术的不断进步，计算机的运算速度和软件功能有了跨越式变化，这为 CFD 的广泛应用提供了很好的物质平台。目前 CFD 软件已经得到了广泛应用，特别是商业软件的成功开发与应用，为解决各种流体流动与传热等问题提供了强有力的工具。过去只能靠实验手段才能得到的某些结果，现在已完全可以借助 CFD 模拟来准确获取。

一. 研究方法

CFD 是通过计算机数值计算和图像显示对流体流动和热传导等相关物理现象所做的系统分析。CFD 的基本思想可以归纳为：把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场，如速度和压力场，用一系列有限个离散点上的变量集合来代替，通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解这些方程组获得场变量的近似值。

CFD 可以看作是在流动基本方程（质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程）控制下对流动的数值模拟。通过这种数值模拟，可以得到极其复杂问题流场内的各个位置上的基本物理量，如速度、压力、温度、浓度等的分布，以及这些物理量随时间的变化情况，确定旋涡分布特性、空化特性及脱流区。还可据此算出相关的其他物理量，如叶轮式流体机械的转矩、水力损失和效率等。此外，与 CAD 的结合还可开展结构优化设计等工作。

CFD 方法与传统的理论分析方法、实验测量方法组成了研究流体流动问题的完整体系，图 1 给出了表征三者之间关系的示意图。

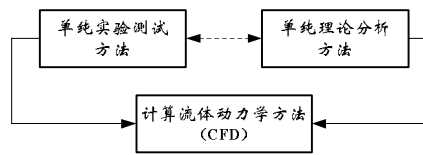


图 1 研究流体流动方法的示意图

理论分析方法的优点在于所得结果具有普遍性，各种影响因素清晰可见，是指导实验研究和验证新的数值计算方法的理论基础。但是它往往要求对计算对象进行抽象和简化后才有可能得出理论解。对于非线性情况，只有少数流动才能给出解析结果。

实验测试方法所得到的实验结果真实可信，它是理论分析和数值方法的基础，其重要性不容低估。然而实验往往受到模型尺寸、流场扰动、人身安全和测量准确度等的限制，因此有时很难通过试验方法得到结果。此外，实验还会遇到经费投入、人力和物力的耗费及周期长等许多问题。

CFD 方法恰恰可以克服前两种方法的弱点，在计算机上实现一个特定的计算，就好象在计算机上做一次物理实验。例如，叶轮的绕流，通过计算并将结果在屏幕上显示出来，就可以看到流场的各种细节：如激波的运动、强度、涡的生成与传播，流动的分流，表面的压力分布，受力大小及其随时间的变化等。数值模拟可以形象地再现流动情景，与做实验没什么区别。

二. 工作流程

采用 CFD 的方法对流体流动进行数值模拟，通常包括如下工作流程：

1) 建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型。具体地说就是要建立反映问题各个量之间关系的微分方程及相应的定解条件，这是数值模拟的出发点。没有正确完善的数学模型，数值模拟就毫无意义。流体的基本控制方程通常包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程，以及这些方程相应的定解条件。

2) 寻求高效率、高准确度的计算方法，即建立针对控制方程的数值离散化方法，如有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)、有限元法 (Finite Element Method, FEM)、有限体积法 (Finite Volume Method, FVM) 等。这些的计算方法不仅包括微分方程的离散化方法及求解方法，还包括贴体坐标的建立，边界条件的处理等。这些内容是 CFD 的核心。

3) 编制程序和进行计算。这部分工作包括计算网格划分、初始条件和边界条件的输入、控制参数的设定等。这是整个工作中花时间最多的部分。由于求解的问题比较复杂，比如

Navier - Stokes 方程就是一个十分复杂的非线性方程，数值求解方法在理论上不是绝对完善的，所以需要通过实验加以验证。正是从这个意义上讲，数值模拟又叫数值试验。应该指出，这部分工作不是轻而易举就可以完成的。

4) 显示计算结果。计算结果一般通过图表等方式显示，这对检查和判断分析质量和结果有重要参考意义。

三. 基本特点

CFD 的长处是适应性强、应用面广。首先，流动问题的控制方程一般是非线性的，自变量多，计算域的几何形状和边界条件复杂，很难求得解析解，而用 CFD 方法则有可能找出满足工程需要的数值解；其次，可利用计算机进行各种数值试验，例如选择不同流动参数进行物理方程中各项有效性和敏感性试验，从而进行方案比较；再者，它不受物理模型和实验模型的限制，省钱省时，有较多的灵活性，能给出详细和完整的资料，很容易模拟特殊尺寸、高温、有毒、易燃等真实条件和实验中只有能接近而无法达到的理想条件。

CFD 也存在一定的局限性。首先，数值解法是一种离散近似的计算方法，依赖于物理上合理、数学上适用、适合于在计算机上进行计算的离散的有限数学模型，且最终结果不能提供任何形式的解析表达式，只是有限个离散点上的数值解，并有一定的计算误差；第二，它不像物理模型试验一开始就能给出流动现象并定性地描述，往往需要有原体观测或物理模型试验提供某些流动参数，并需要对建立的数学模型进行验证；第三，程序的编制及资料的收集、整理与正确利用，在很大程度上依赖与经验与技巧。此外，因数值处理方法不妥等原因有可能导致计算结果的不真实，例如产生数值粘性和频散等伪物理效应。当然，某些缺点或局限性可以通过一定的方式加以克服或弥补。再则，CFD 因涉及大量的数值计算，因此通常需要有较高软硬件配置的计算机。

CFD 有自己的原理、方法和特点。数值计算与理论分析、实验观测相互联系、相互促进，但不能完全替代，三者各有各的适用场合。在实际工作中，需要注意三者的有机结合，做到取长补短。

四. 数值解法

经过数十年的发展，CFD 出现了多种数值解法。这些方法之间的主要区别在于对控制方程的离散方式。根据离散的原理不同，CFD 大体上可以分为三种解法：有限差分法(FDM)，有限元法(FEM)，有限体积法(FVM)。

1. 有限差分法

是应用最早、最经典的 CFD 方法。它将求解域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解域，然后将偏微分方程的导数用差商代替，推导出含有离散点上有限个未知的差分方程组。求出差分方程组的解，就是微分方程定解的数值近似解。它是一种直接将微分方程问题变为代数问题的近似数值解。

2. 有限元法

是 20 世纪 80 年代开始应用的一种数值解法，它吸收了有限差分法中离散处理的内核，又采用了变分计算中选择逼近函数对区域进行积分的合理方法。有限元法因求解速度较有限差分法和有限体积法慢，因此应用不是特别广泛。

3. 有限体积法

是将计算区域划分为一系列控制体积，将待解微分方程对每一个控制体积积分得出离散方程。有限体积法的关键是在导出离散方程过程中，需要对界面上的被求函数本身及其导数的分布作出某种形式的假定。用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒特征，而且离散方程系数的物理意义明确，计算量相对较少。有限体积法是目前 CFD 应用最为广泛的一种方法。

五. 求解过程

为了进行 CFD 计算，既可以借助于商用软件来完成所需要的任务，也可以直接编写计算机程序来实现。两种方法的基本过程是相同的。

1. 计算流程简述

无论是流动问题，还是传热、污染物运移等问题，无论是稳态问题还是瞬态问题，其求解过程都可用图 2 来表示。

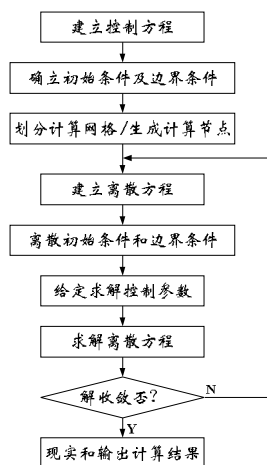


图 2 CFD 计算流程框图

如果所求问题是瞬态问题，则可将图 2 的过程理解为一个时间步的计算过程，循环这一过程求解下一个时间步的解。

2. 建立控制方程

建立控制方程是求解任何问题前都必须首先进行的步骤。对于一般流体来讲，可根据分析直接写出其控制方程。例如，对于水流在水轮机内的流动分析问题，若假定没有热交换发生，则可直接将连续方程与动量方程作为控制方程使用。当然，由于水轮机内的流动大多是处于湍流范围，因此一般情况下需要增加湍流方程。

3. 确定边界条件与初始条件

初始条件与边界条件是控制方程有确定解的前提，控制方程与相应的初始条件、边界条件的组合构成了对一个物理过程完整的数学描述。

初始条件是所有研究对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况。对于瞬态问题，必须给定初始条件。对于稳态问题，不需要初始条件。

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其导数随地点和时间的变化规律。对于任何问题，都需要给定边界条件。例如，在椎管内的流动，在椎管进口断面上，可以给定速度、压力沿半径方向的分布，而在管壁上，对速度取无滑移边界条件。

对于初始条件和边界条件的处理，会直接影响到计算结果的精度。

4. 划分计算网格

采用数值方法求解控制方程时，都是想办法将控制方程在空间区域上进行离散，然后求解得到的离散方程组。要想在空间域上离散控制方程，必须使用网格。先已发展出多种对各种区域进行离散以生成网格的方法，统称为网格生成技术。

不同的问题采用不同数值解法时，所需要的网格形式是有一定区别的，但生成网格的方法基本是一致的。目前，网格分结构网格和非结构网格两大类。简单地讲，结构网格在空间上比较规范，如对一个四边形区域，网格往往是成行成列分布的，行线和列线比较明显。而对非结构网格在空间分布上没有明显的行线和列线。

对于二维问题，常用的网格单元有三角形和四边形等形式；对于三维问题，常用的网格单元有四面体、六面体、三棱体等形式。在整个计算域上，网格通过节点联系在一起。

目前各种 CFD 软件都配有专用的网格生成工具，如 FLUENT 使用 GAMBIT 作为前处理软件。多数 CFD 软件可接受采用其他 CFD 或 CFD/FEM 软件产生的网格模型。如 FLUENT 可以接受 ANSYS 所生成的网格。

5. 建立离散方程

对于在求解域内所建立的偏微分方程，理论上是有真解（或称精确解及解析解）的。但由于所处理的问题自身的复杂性，一般很难获得方程的真解。因此就需要通过数值方法把计算域内有限数量位置（网格节点或网格中心点）上的因变量值当作基本未知量来处理，从而建立一组关于这些未知量的代数方程组，然后通过求解代数方程组来得到这些节点值，而计算域内其他位置上的值则根据节点位置上的值来确定。

由于所引入的因变量在节点之间的分布假设及推导离散化方程的方法不同，就形成了有限差分法、有限元法、有限元体积法等不同类型的离散化方法。

在同一离散化方法中，如在有限体积法中，对式（）中的对流项所采用的离散格式不同，也将导致最终有不同形式的离散方程。

对于瞬态问题，除了在空间域上的离散外，还要涉及在时间域上的离散。离散后，将要涉及使用何种时间积分方案的问题。

6. 离散初始条件和边界条件

前面提到的初始条件和边界条件是连续性。现在需要针对所生成的网格，将连续性的初始条件和边界条件转换成特定节点上的值。这样连同在各节点处所建立的离散方程，才能对方程组进行求解。

7. 给定求解控制参数

在离散空间上建立了离散化的方程组，并施加离散化的初始条件和边界条件后，还需要给定流体的物理参数和湍流模型的经验系数等。此外，还要给定迭代计算的控制精度、瞬态问题的时间步长和输出频率等。

在 CFD 的理论中，这些参数并不值得去探讨和研究，但在实际计算时，它们对计算的精度和效率有着重要的影响。

8. 求解离散方程

在进行了上述设置后，生成了具有定解条件的代数方程组。对于这些方程组，数学上已有相应的解法，如线性方程组可采用 Gauss 消去法或 Gauss-Seidel 迭代法求解，而非线性方程组，可采用 Newton-Raphson 方法。在商用 CFD 软件中，往往提供多种不同的解法，以适应不同类型的问题。

9. 判断解的收敛性

对于稳态问题的求解，或是瞬态问题在某个特定时间步上的解，往往要通过多次迭代才能得到。有时，因网格形式或网格大小、对流项的离散插值格式等原因，可能导致解的发散。

对于瞬态问题，若采用显式格式进行时间域上的积分，当时间步长过大时，也可能造成解的振荡或发散。因此，在迭代过程中，要对解的收敛性随时进行监视，并在系统达到指定精度后，结束迭代过程。

10. 现实和输出计算结果

通过上述求解过程得出了各计算节点上的解后，需要通过适当的手段将整个计算域上的结果表示出来。这时，可采用线值图、矢量图、等值线图、流线图、云图等方式对计算结果进行表示。

所谓线值图，是指在二维或三维空间上将横坐标取为空间长度或时间历程，将纵坐标取为某一物理量，然后用光滑曲线或曲面在坐标系绘制出某一物理量沿空间或时间的变化情况。矢量图是直接给出二维或三维空间里矢量的方向及大小，一般用不同颜色和长度的箭头表示速度矢量。矢量图可以比较容易地让用户发现其中存在的漩涡区。等值线图是用不同颜色的线条表示相等物理量（如温度）的一条线。流线图是用不同颜色线条表示质点运动轨迹。云图是使用渲染的方式将流程某个界面上的物理量（如压力或温度）用连续变化的颜色块表示其分布。

现在的商用 CFD 软件均提供了上述各表示方式。用户也可自己编写后处理程序进行结果显示。

六. 应用领域

当前所有涉及流体流动、热交换、分子输运等现象的问题几乎都可以通过计算流体动力学的方法进行分析和模拟。CFD 不仅作为一个研究工具，而且还可作为设计工具在水利工程、土木工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程、工业制造等领域发挥作用。典型应用场合及相关工程问题包括：水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动，飞机和航天飞机等飞行器的设计，汽车流线外形对性能的影响，洪水波及河口潮流计算，换热器性能分析及换热器片形状的选取，注塑模具流道及流场的分析与设计等等。这些问题的处理，过去主要借助于基本理论分析和大量的物理模型实验，而现在大多采用 CFD 的方式加以分析和解决，CFD 技术现已发展到完全可以分析三维粘性湍流及旋涡运动等复杂问题的程度。

七. 商业软件

在实际工程中，广泛采用成熟的商业软件对流体流动特性进行数值模拟和对流体机械性能开展数值预测等工作。目前比较常用且功能非常强大的商业软件主要包括有：NUMECA/FINETM、Fluent、CFX、ANSYS 等几种。

NUMECA/FINE™ 系列软件是由 NUMECA 国际公司开发的面向叶片式流体机械的 CFD 计算和优化设计软件，是典型的基于流场数值模拟的叶片式流体机械优化设计软件，可用于各种压缩机、水轮机、泵、风机等叶片式流体机械，以及管道、阀门、内燃机等内部流体流动的数值模拟和流道设计。作为囊括了 CFD 最新技术进展的多用途计算程序，EURANUS（该系列软件中的数值求解器）可以用于任何几何区域内（二维、轴对称、以及三维）的定常/非定常、无粘/粘性流动的数值模拟。该数值求解器的数学模型可以采用欧拉方程组、层流 N-S（Navier - Stokes）方程组或者是雷诺平均的湍流 N-S 方程组。对于非牛顿流体，默认模型为层流 N-S 方程组。

Fluent 软件是目前国际上最流行的 CFD 软件包，它采用了基于“CFD 计算机软件群概念”的设计思想和基于有限体积法的算法。它将不同领域的计算机软件组合起来，成为 CFD 计算机软件群，同时在软件之间可以方便地交换数据，并具有强大统一的前处理和后处理功能。Fluent 软件推出了多种优化的物理模型，如定常和非定常流动、层流（包括各种非牛顿流模型）、紊流（包括最先进的紊流模型）、不可压缩和可压缩流动、传热、化学反应等等。对每一种流动的物理问题的特点，均有适合于它的数值解法。在计算速度、稳定性和精度等方面，Fluent 软件都达到了很高的水平。

CFX 软件主要应用于流体机械、能源、机械制造、石油化工、水处理、环保等领域。与大多数 CFD 软件不同的是，CFX 除了可以使用有限体积法之外，还采用了基于有限元的有限体积法。该算法保证了在有限体积法的守恒特性基础上，吸收了有限元法的数值精确性。CFX 可计算的物理问题包括可压与不可压流动、耦合传热、热辐射、多相流、粒子输送过程、化学反应和燃烧等问题，还拥有诸如空化、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿、动静干涉、真实气体等大批复杂现象的使用模型。在其湍流模型中，纳入了 $k-\varepsilon$ 模型、低 Reynolds 数 $k-\varepsilon$ 模型、低 Reynolds 数 Wilcox 模型、代数 Reynolds 应力模型、微分 Reynolds 应力模型、微分 Reynolds 通量模型、SST 模型和大涡模型等。

ANSYS 软件是融合结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件，由当今最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 公司开发，该软件目前已广泛用于机械制造、航空航天、石油化工、能源、国防、水力等一般工业及科学研究领域。在产品设计中，用户可以使用 ANSYS 有限元软件对产品性能进行仿真分析，发现产品问题，降低设计成本，缩短周期，提高设计成功率。同时 ANSYS 软件可与许多先进的 CAD 软件共享数据，还可利用 C 语言的数据接口，将 CAD 系统下的数据精确地传入 ANSYS。该软件提供了不断改进的功能，主要包括：结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体力学分析、设计优化

与接触分析、自适应网格划分及利用 ANSYS 软件参数设计语言扩展宏命令等功能。特别是 ANSYS 公司收购了 CFX、Fluent 后，将其强大的 CFD 功能进行了集成，使其在流体机械的“流-固”耦合方面的分析功能更为突出和富有成效。当 CFX - Bladegen、CFX - TascFlow 功能集成后，ANSYS 已成为一个较为完善的叶片式流体机械数字化优化设计的软件平台。

参考资料

王福军. 计算流体动力学分析. 北京: 清华大学出版社, 2004

2012 年 5 月 20 日