

管路内流体数值计算与仿真

何永森 舒 适 蒋光彪 肖映雄 著

湘潭大学出版社

管路内流体数值计算与仿真

何永森 舒 适 蒋光彪 肖映雄 著

湘潭大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

管路内流体数值计算与仿真 / 何永森等著. — 湘潭:
湘潭大学出版社, 2011.12

ISBN 978-7-81128-356-3

I. ①管… II. ①何… III. ①液压装置—管道流动—
数值计算 IV. ①TH137.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 279050 号

管路内流体数值计算与仿真

何永森 舒 适 蒋光彪 肖映雄 著

责任编辑: 王亚兰

封面设计: 罗志义

出版发行: 湘潭大学出版社

社 址: 湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真): 0731-58298966 邮编: 411105

网 址: <http://xtup.xtu.edu.cn>

印 刷: 长沙瑞和印务有限公司

经 销: 湖南省新华书店

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 19

字 数: 340 千字

版 次: 2011 年 12 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81128-356-3

定 价: 58.00 元

(版权所有 严禁翻印)

序

随着我国经济建设的迅速发展,科学技术化及技术科学化已成为一种发展趋势。流体机械、流体传动与控制的数值计算与仿真研究以及相关的应用软件开发乃是当今计算流体力学重要的前沿课题之一。众所周知,由于做实验周期长、耗资昂贵,目前流动的数值计算与仿真已成为流体工程设计的重要手段。在我国,外部流动的数值计算与仿真已在航空、航天、大气和海洋等诸多领域取得大量成果,然而机械等管路内部紊流的数值计算与仿真则起步较晚,发展相对较慢,但近年来有迎头赶上之势。

为了进一步促进我国在流体机械、流体传动与控制方面的数值计算与仿真研究及其应用软件的开发,长期以来,何永森教授与舒适教授、蒋光彪副教授和肖映雄教授等研究者通力合作,做了大量开拓性的工作。本书总结了他们20多年来从事该领域研究的主要成果,相信对我国内流的研究将会起到很好的借鉴作用。

综观全书,有以下主要特色:

第一,详细论述了作者对管路内部紊流与非定常流一系列数值计算与仿真的重要成果,特别针对锥形渐扩管路内紊流深入介绍了DHR型 $k-\epsilon$ 紊流模型和DLR型 $k-\epsilon$ 紊流模型及其数值求解方法,并对各种计算条件下的流动作了数值仿真,揭示了锥形渐扩管路内紊流流场的物理特性,并将数值计算结果与实验结果进行了比较,证实了方法的可靠性。

第二,由于采用了符合流场特性的网格布局,又植入了高速收敛的多重网格法,从而使计算效率大为提高。

第三,在随书赠送的光盘中,作者奉献出极具代表性的锥形渐扩管路内紊流流场数值仿真的源程序及其说明,对于从事内流研究的读者,大有裨益。

以上成果,在国内外均属首创。

王汝权
2011年9月

前言

流体流动的数值计算与仿真（数值预测）研究和应用软件开发，属于我国21世纪初期需要着重发展的工程科学技术之一，也是计算流体力学发展前沿与应用研究内容之一，它已成为流体力学研究和流体机械等工程设计的重要手段。

为了进一步在机械内部领域发展计算流体力学，在流体机械、流动传动与控制方面促进我国数值预测研究和应用软件开发，何永森和刘邵英合著了《机械管内流体数值预测》一书。该书得到国防科技图书出版基金全额资助，由国防工业出版社于1999年出版，国内外发行。国防科技图书出版基金委员会（30位成员，其中有计算流体力学、数学专家张涵信院士）在书前刊出“致读者”，即序言。该书出版发行后，作为计算数学学科硕、博士研究生及信息与计算科学专业本科生的“计算流体力学”课程教材，在湘潭大学连续使用了7届，同时在该书所述成果的基础上，继续展开了一系列研究。作者将多年来的主要研究成果等汇集成本书，供读者参考。

本书介绍了作者对流体机械的管路内紊流和非定常流之过渡流和脉动流进行的一系列研究，特别是对锥形渐扩管路（含锥形渐扩管及其小直径前接管和大直径后续管）内紊流进行了全面、系统、深入研究，其中包括研发两种数学模型，即锥形渐扩管路内高 Re 数型 $k-\varepsilon$ 紊流模型（简称 DHR 型 $k-\varepsilon$ 紊流模型）与近壁低 Re 数型 $k-\varepsilon$ 紊流模型（简称 DLR 型 $k-\varepsilon$ 紊流模型）及其5种数值方法（本书重点介绍第4、5种方法，即 DLR 型 $k-\varepsilon$ 紊流模型·BFC法和 DLR 型 $k-\varepsilon$ 紊流模型·BFC·AMG法）及其应用软件；对应用实例在各种计算条件下之算例进行的数值计算及对计算结果用实物实验结果进行的验证、诊断分析，给出各种计算条件对计算结果的影响程度和高精度、高效的数值预测结果与全流场6个流动参数分布的曲线图、等值线图 and 彩色图像及其分析，从而构成了完整的锥形渐扩管路内紊流的数值仿真诊断系统。通过这一系列研究，揭示了该种管路内部紊流的特性。这样的研究及其成果是国际计算流体力学界所期待的。

同时，本书还将求解线性代数方程组最为有效方法之一的代数多重网格（AMG）法引入并应用于管路内紊流的数值计算中。本书介绍一种常用的AMG法和作者近年来在AMG法方面取得的部分研究成果，以及将AMG法与 DLR 型 $k-\varepsilon$ 紊流模型·BFC法相结合，设计了快速求解算法及其程序模块，构成了

DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型 • BFC • AMG法。用其对流体机械的锥形渐扩管路内紊流实例进行数值计算, 显著提高了计算效率。

并且, 本书还给出了具有代表性的锥形渐扩管路内紊流 DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型 • BFC法 (及其Point-SOR法) 求解的计算源程序清单及其说明, BFC适体均匀网格与BFC适体近壁密集型径向非均匀网格的自动生成源程序清单及其说明, AMG法求解器的部分代码及其说明, DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型 • BFC • AMG法的计算源程序清单及其说明。为了使读者便于自己编写程序和理解计算结果, 本书不仅给出上述源程序清单及其说明, 还给出了应用实例的高精度、高效数值计算结果和若干计算条件影响的算例及其诊断分析, 供参考。这套源程序, 经过在5种计算机系统中, 对各种应用算例的数值计算及诊断分析表明, 它具有准确性、快速性、可靠性和实用性等性能。为方便读者, 将其收录光盘中, 随书赠送。

本书第1章由何永森、舒适、蒋光彪、肖映雄编写, 第2、3、7章由何永森、蒋光彪编写, 第4、5章由舒适和肖映雄编写, 第6章由蒋光彪、何永森、舒适、肖映雄编写, 第8章由何永森编写, 附录由蒋光彪、何永森编写。光盘中的BFC适体均匀网格与BFC适体近壁密集型径向非均匀网格的自动生成源程序和 DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型 • BFC法 (及其Point-SOR法) 的计算源程序由何永森等研究者研发, AMG法求解器的部分代码由舒适、肖映雄研发, DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型 • BFC • AMG法计算源程序由蒋光彪、何永森、舒适和肖映雄研发。全书LATEX科技排版工作主要由蒋光彪、肖映雄和周志阳等完成。

本书限于篇幅, 略去前书第2、3、6章基础内容和第7、8章部分内容, 即关于机械管内流体数值预测的数学物理基础、紊流的工程科学计算方法、管内流动的实验与理论等, 可参阅之。

刘邵英、卢小勇、周志阳、郑秋云、孙勇、肖瑞、蒋紫筠、李玉倩、杨见东和岳孝强等研究者参加了相关课题的研究工作, 对他们的辛勤劳动表示由衷的谢意。前期工作关于流体机械锥形渐扩管内紊流和液压传动与控制系统的4种管路内非定常流之过渡流与脉动流的数值计算研究, 得到了日本东京大学石原智男先生、小林敏雄先生的指导和森西洋平先生、渡边忠史先生的帮助, 以及国内许多同事与专家的支持和帮助, 特别是中国科学院数学研究院计算数学、计算流体力学专业研究员王汝权先生、国防科技大学航天与材料工程学院计算流体力学专业教授任兵先生和中南大学矿山机械专业教授张智铁先生通读了全部书稿, 对本书

的出版给予了热情帮助。王汝权先生并亲为作序，使本书蓬荜增辉，借此机会表示诚挚的感谢。

本书中融入的一些主要成果，得到了湘潭大学计算数学国家重点学科、原国家人事部留学回国人员科技活动择优（A类）资助项目“锥形扩散器内紊流数值预测应用软件包的开发研究”（主持人：何永森）、国家自然科学基金资助项目“锥形扩散器内紊流计算机仿真诊断系统的研究”（主持人：何永森）、国家自然科学基金资助项目“激光惯性约束聚变的可计算建模与算法研究”（批准号：91130002）、国家自然科学基金项目“弹性问题Locking-free有限元离散系统的快速算法研究及其数值软件”（批准号：10972191）、原中国有色金属工业总公司重点科研项目“微机在过渡流数值预测中的应用”（主持人：何永森）、“液压伺服系统分歧管路内脉动流数值预测的研究”（主持人：何永森）和“液压伺服系统异径管路内脉动流数值预测的研究”（主持人：何永森）等项目的资助。在此作者谨对教育部、原国家人事部、国家自然科学基金委员会、科学技术部和原中国有色金属工业总公司（冶金部）给予的支持表示感谢。

本书的出版得到了湘潭大学出版社龙顺潮老师和王亚兰老师的支持，在此深表感谢。

由于作者水平有限，若有不妥之处，请读者指正。

何永森
2011年8月

目 录

第1章 绪 论

1.1 流体数值计算与仿真的意义和方法	1
1.1.1 机械管路内流体数值计算与仿真的意义和计算流体力学.....	1
1.1.2 流体力学的实验研究、理论分析和数值仿真.....	3
1.1.3 计算机和数值计算.....	4
1.2 流体数值仿真的步骤.....	6
1.3 机械管路内流体数值仿真的典型问题	8
1.3.1 锥形渐扩管路内紊流的数值仿真.....	8
1.3.2 液压管路内过渡流的数值仿真.....	9
1.3.3 液压管路内脉动流的数值仿真.....	10
1.4 代数多重网格法及其在管路内流体数值计算与仿真中的应用	11
1.5 物理量的单位和量纲.....	13

第2章 管路内典型流体流动的数学模型

2.1 管路内紊流的数学模型	15
2.1.1 紊流基本方程	16
2.1.2 紊流动能 k 方程和紊流耗散率 ε 方程	16
2.1.3 “标准”型 $k - \varepsilon$ 紊流模型方程组的构成	17
2.1.4 近壁低 Re 数型 $k - \varepsilon$ 紊流模型	20
2.1.5 圆管内紊流的 $k - \varepsilon$ 模型	21
2.1.6 DHR型与 DLR型 $k - \varepsilon$ 紊流模型.....	23
2.1.7 “标准”型、DHR型与DLR型 $k - \varepsilon$ 紊流模型的关系	29
2.2 紊流基本方程与 $k - \varepsilon$ 紊流模型的导出依据	30
2.2.1 紊流连续方程	30
2.2.2 紊流运动方程	31
2.2.3 紊流能量方程	31
2.2.4 $k - \varepsilon$ 紊流模型	34

2.2.5 “标准”型 $k-\varepsilon$ 紊流模型	36
2.2.6 紊流方程组的封闭性	38
2.3 管路内非定常流的数学模型	41
2.3.1 管路内过渡流的数学模型	41
2.3.2 管路内脉动流的数学模型	43
第3章 网格生成方法	
3.1 网格生成概述	44
3.2 BFC网格自动生成方法	45
3.2.1 BFC适体均匀网格自动生成方法	45
3.2.2 BFC适体近壁密集型径向非均匀网格自动生成方法	47
3.3 BFC网格自动生成的源程序与实例	48
3.3.1 锥形渐扩管路内紊流场 BFC网格自动生成源程序及其说明	48
3.3.2 BFC网格自动生成实例	49
第4章 代数多重网格 (AMG) 法	
4.1 基本概念和术语	51
4.2 一种常用的AMG法	53
4.2.1 网格粗化算法及插值算子的构造	55
4.2.2 算法复杂度	59
4.2.3 收敛性分析	61
4.2.4 H-CAMG 法	68
4.3 基于AMG预条件子的预处理方法	70
4.4 数值实验	72
第5章 求解几种典型离散系统的GAMG 法	
5.1 求解二维九点格式的SMG 法	78
5.1.1 启动部分	78
5.1.2 求解部分	81
5.1.3 数值实验	82
5.2 求解各向异性网格问题的GAMG法	85
5.2.1 具有局部各向异性的有限元网格	85

5.2.2 求解各向异性网格问题的GAMG法	86
5.2.3 在椭圆型方程组有限元分析中的应用	89
5.3 高次有限元方程的GAMG法	93
5.3.1 2D 高次有限元方程的AMG 法	95
5.3.2 3D 高次有限元方程的AMG 法	118
5.3.3 收敛性分析	132
第 6 章 DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型的数值方法	
6.1 DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型 · BFC法	138
6.2 DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型 · BFC · AMG法	143
6.2.1 DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型的BFC变换	143
6.2.2 DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型方程组的离散化	149
6.2.3 压力泊松方程两种差分格式的构建	171
6.2.4 数值化边界条件的设置和处理	173
6.2.5 有限差分离散化线性代数系统的结构	175
6.2.6 DLR型 $k-\varepsilon$ 紊流模型方程组求解的耦合算法	181
6.3 压力泊松方程离散系统的求解方法及数值实验	188
6.3.1 Point-SOR法及数值实验	188
6.3.2 AMG法及数值实验	188
第 7 章 锥形渐扩管路内紊流的数值仿真诊断系统	
7.1 数值仿真诊断系统	191
7.1.1 数值仿真诊断系统的组成	191
7.1.2 数值计算程序系统模块设计及应用软件包	193
7.1.3 数值计算源程序	202
7.2 若干应用实例与诊断分析	203
7.2.1 锥形渐扩管路内紊流的高精度数值仿真	203
7.2.2 锥形渐扩管路内紊流的高效数值仿真	219
7.2.3 数值预测结果的等值线图和可视化彩色图像	225
7.2.4 计算条件影响的诊断分析	227

第 8 章 管路内非定常流的数值仿真	
8.1 管路内过渡流的数值仿真	244
8.1.1 管路内过渡流的数值方法与仿真模型	244
8.1.2 数值计算程序系统模块设计及应用软件	248
8.1.3 计算实例及实验验证	249
8.1.4 应用软件的数值预测功能、性能和用途	255
8.2 管路内脉动流的数值仿真	256
8.2.1 管路内脉动流的数值方法	256
8.2.2 数值计算程序系统模块设计及应用软件包	266
8.2.3 计算实例及实验验证	268
8.2.4 应用软件包的数值预测功能及用途	273
附 录 锥形渐扩管路内紊流数值计算源程序清单及其说明 (光盘)	275
参考文献	276
内容简介	288

第1章 绪 论

近年来,机械科学与计算机科学等日益密切结合。流体机械、流体传动与控制学科中的流体数值计算与仿真(又称数值模拟、数值预测或数值解析)研究以及应用软件开发,是计算流体力学发展前沿与应用研究内容之一,是诸如机械科学(流体机械、流体传动与控制、建模与仿真、计算机辅助设计等)、理论流体力学(紊流理论、非定常流理论等)、实验流体力学(测试方法、流动可视化等)、数学特别是计算数学(数值方法等)、计算机科学(程序设计语言、算法的设计与分析、软件设计方法、上机操作和计算机图形图像学)等多学科交叉的新兴边缘学科之领域。

本书针对机械管路系统内不可压缩粘性紊流和非定常流的数值计算与仿真问题系统地展开,基本内容是用差分方法,对机械管路系统内常用流体——空气和油液,数值求解纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程(以下简称为N-S方程)与 $k-\epsilon$ 紊流模型方程组,以及二维不可压缩粘性流微分方程和微压缩粘性流微分方程,研究流体运动特性和流动规律,并解决流体机械管路计算机辅助设计(CAD)的关键技术问题,重点是锥形渐扩管路内紊流和液压系统管路内非定常流之过渡流与脉动流的动态特性数值计算与仿真,其中包括应用软件(包)的研发与应用,特别是应用代数多重网格(AMG)法与 DLR型 $k-\epsilon$ 紊流模型·BFC法相结合,显著提高了锥形渐扩管路内紊流的数值计算效率。

1.1 流体数值计算与仿真的意义和方法

1.1.1 机械管路内流体数值计算与仿真的意义和计算流体力学

在自然科学和工程技术中,大量遇到的是紊流和非定常流。在各种流体机械管路系统内部普遍存在紊流和非定常流。

过去管路内紊流和非定常流的研究,仅限于实验方法和统计理论方法。描述流体运动,由于管路内紊流和非定常流的复杂性,理论性的预测非常困难,用实验测试一般费用较大。用实验方法或凭经验设计,即使成功也只能限于有某特定值的流体机械等,若进行系列设计,又得进行一系列的实验,费时耗资,况且在实验装置中正确地再现和测试紊流,特别是机械内部紊流并非容易。近年来,超

高速大容量数字计算机的发展,给紊流和非定常流的数值计算与仿真研究提供了新的强功能工具——计算机实验(在数字计算机上进行,则称为数值实验)。数值仿真是在数字计算机上实现的一个特定的数值计算,通过数值计算和图像显示实现一个虚拟的物理实验——数值实验(或称为数值试验)^[1]。流体的数值仿真指的是,对于作为研究对象的系统,在数值实验基础上,将流体流动的数学模型、数值方法和计算条件用程序在计算机上进行特定的数值计算,将计算结果与实验结果相比较,作出本质上符合实际的数值预测,为工程科学技术和其他自然科学服务^[1-3]。例如,为机械管路系统的设计和发展新技术提供理论依据、计算软件和基础数据等,解决了计算机辅助设计的关键技术问题(流体数值仿真的步骤可参见1.2节)。流体数值仿真,应当说明各流动参数如何随几何条件、边界条件和流体物性等计算条件的变更而相应改变的^[1]。设计人员可以从一系列的方案中决定最佳设计方案。该方法很快地发展成为解决工程科学实际问题的一种重要手段,经济效益显著。

在解决工程科学实际问题过程中,流体力学与计算数学和计算机技术互相交叉,形成了新的分支学科——计算流体力学(简称CFD)。其方法为描述流动现象的数学模型及数值方法由计算机求出数值解,这是对微分方程组等精解的近似。它是将某计算方案的边界条件和初始条件等计算条件固定,由对某种流动现象的数值计算与仿真,获得定量数据。这类似于实验研究方法,但又像理论分析方法那样将理论性的数学模型作为依据,这不同于实验研究方法。该方法依据可能限度的严密的数学模型,例如把复杂的紊流现象直至紊流结构详细地仿真,希望大规模超高速地进行数值计算。计算流体力学可将流动现象解明和预测,为机械与装置的管路设计等提供指南,是实践性很强的一门科学,是流体力学发展的新阶段。在理论上,它研究描述流动现象的各类方程的解,在工程应用上,其目标是用数值实验代替尽可能多的实物实验和用计算机设计流体机械与装置的管路等,设计质量可用数值实验来评价,从而可大量缩短设计时间,节省设计费用。计算流体力学在工程上的广泛应用将改变实验的布局 and 改变工程的面貌,从而将彻底改变人们对实验和设计的传统观念。总之,计算流体力学是一门独立的学科,与理论流体力学和实验流体力学既有区别又相互补充,为研究流体流动的物理过程提供了特殊的途径^[4]。计算流体力学的任务是流体力学的数值仿真。计算流体力学的目标是高精度(高准确度)和高效数值求解各种边界条件下的流体动力学方程。计算流体力学在实际应用中具有强大的生命力。数值实验是研究计算流体力学的重要手段,新数值方法的研究有着广阔的天地,在流体机械的CAD中亦会得

到广泛应用。

计算流体力学目前所面临的主要问题之一是内部紊流数学模型问题。由于紊流是自然界和工程技术中普遍遇到的一类流动,近三四十年来,随着科学技术的发展,迫切需要解决紊流运动的规律和结构特征,虽然取得一定的进展,但是,由于紊流运动极其复杂,模拟紊流是极为困难的问题^[1],至今未能彻底攻克学科领域中这个一百多年来的难题。前段时间,美国将紊流数值解析作为科学技术战略项目之一列出。日本也将该种研究列为国家重点研究领域,作为特别促进项目进行研究。处于世界先列的英国和德国也在大力促进该种研究。俄罗斯和加拿大等国也很重视,做了不少有关的研究工作。国内外紊流研究者较多地致力于外部流的数值模拟研究,例如航空、航天、气象、海洋和水利等领域。我国在机械内部紊流(以及非定常流)的数值预测研究方面,起步较晚,但发展较快。

当然,强功能数字电子计算机(以下简称计算机)的出现和发展,给复杂紊流场的研究增添了新的方法,可求出N-S方程的数值解。在这样的数值计算中,需将紊流模型与N-S方程联立求解。随着计算机的大容量化和高速化,使流体运动的数值计算范围扎实地扩大开来,对各种流场紊流模型的验证和改良也取得进展。紊流场的数值计算,大体分为积分法、微分法、大涡模拟和直接计算等方法。其中微分法用得较普遍且计算精度较高,目前成为内部紊流预测的重要方法,它包括0方程模型、1方程模型、2方程模型和雷诺应力模型等。

左右20世纪80年代紊流数值计算方法动向的重要会议,于1980年和1982年在美国斯坦福大学召开。 $k-\varepsilon$ 紊流模型在该会议上体现得最多,可用于广泛范围的预测。会议得出结论,现存的紊流模型预测精度还不理想,进行细部改良是必要的,改良 $k-\varepsilon$ 紊流模型直至壁面附近能适用是很重要的。该会议还明确指出,现存的 $k-\varepsilon$ 紊流模型对于逆压梯度流动的渐扩管内紊流的预测是最困难的。缘此,锥形渐扩管内整个紊流场数值预测的综合性研究应运而生,取得了进展。

并且,在机械液压传动与控制方面,对各种液压管路系统内油液的非定常流——过渡流和脉动流的一系列数值预测研究也取得了进展。

1.1.2 流体力学的实验研究、理论分析和数值仿真

在流体力学中,实验研究、理论分析和数值仿真(特定的数值计算)这三种研究手段相辅相成,互为补充。实验研究方法是研究一种新流动现象的唯一方法,至今仍是研究流动问题的基本方法。一个物理过程最可靠的数据资料往往是

由实验测定得到，但在一些情况下还存在测量上的困难。数值仿真所用的数学模型是对研究对象(流场等)的一种数学描述，需通过对现象的观察与测定才能正确建立，出现在描述流动现象的微分方程中的物理参数需通过实验测定获得。对任一流体问题进行数值计算所得结果的准确度(精度)，首先取决于对研究对象建立的数学模型及所采用的物理参数是否准确。理论分析解可为检验数值计算结果的准确度提供比较依据。新的计算格式，往往用于计算一个有理论分析解的问题，通过与理论分析解进行比较而对该格式的优劣作出评价。然而，在实际问题中只有相当小的一部分可以得到闭型解。与另外两种方法相比，数值仿真可以多方面揭示流体的流动规律。例如，为了研究某一物性的变化对流动产生的影响，可以保持其他条件不变而仅改变这一物性进行数值计算，它还可以再现某些流动。这些都是另外二者无法实现或难以实现的。从而，数值仿真在某种意义上，比实验研究、理论分析对流体运动过程的认识更加深刻、更为细致，不仅可以了解运动的结果，而且可以了解运动整体的与局部的细微过程。因此，数值仿真可以从理论上探索暂时还不清楚的问题。

在某些研究领域中，数值仿真已取代了实验研究，例如，对在行星间飞行的运载工具的研究，天体轨道的计算等都是靠计算机完成而不需要借助于实验。数值仿真可拓宽实验研究的范围，减少实验工作量。对耗资巨大、条件恶劣、危险、甚至是难于实施的实验(例如，原子能等工程物理实验)来说，数值仿真更是一种重要的替代或辅助手段。数值仿真的优点是成本低、速度快、数据资料完备、具有模拟真实条件和理想条件的能力。其缺点是，所用的数学模型的适用程度限制着计算的效能。计算机使用者得到的是与数学模型和数值方法两者都有关的结果。如果采用的数学模型不合适，即便是一个好的数值方法，也只能产生毫无价值的结果。为了确认计算结果的可靠性，一方面，有必要将这些计算结果与实验结果数据进行比较、验证，即了解计算结果与实验结果的接近程度(仿真准确度)。于是，最佳的数值仿真过程应当是数值计算与实验验证的恰当结合。另一方面，初步的数值仿真对于实验设备(或机械产品)的设计是有益的。若用数值仿真进行辅助研究，往往能使实验工作量显著减少。

总之，把这三种研究手段协调地结合，是研究流动问题的有效方法。

1.1.3 计算机和数值计算

在20世纪四五十年代尖端武器的研制中，工程科学计算的需要促进了计算机

的发明与发展。流体运动可以用非线性偏微分方程组等来描述。在实际的工程科学计算中，由于紊流数学模型（非线性偏微分方程组等）的复杂性，计算规模往往很大。计算机就是在工程科学计算的需求下发展起来的，随之用特定数值计算（数值仿真）的方法求解数学物理问题的范围也得到很大的扩展。用计算机可解算出所需精度的近似数值解。从而，可以利用数值计算的方法来研究各种工程科学技术中的实际问题和理论问题。工程科学技术研究的进展对计算机的性能提出越来越高的要求。虽然计算机得到迅速发展，例如，到1996年，有的紊流数值计算研究在巨型向量计算机中进行数值计算，网格点数已达600万个，但仍然满足不了需要。进一步发展计算机，需要使元件更加小型化、提高计算速度和增加容量。

近年来，计算机由巨型机向小型化发展，并且具有向量计算和并行计算等性能，用来提高计算效率；电子元件小型化的进展，使得计算机的价格下降而性能提高；计算技术与科学计算以及软件都得到了迅速发展。

另外，在现有计算机能力的条件下，暂且着重研究数学模型、数值方法和程序，发挥其在解题中的重要作用。

由于计算机的解题能力很大，可以解算出一些解的特性还不太了解的问题。随着计算技术和计算机的发展，可采用数值计算的方法直接研究非线性数学问题，包括非线性偏微分方程问题。近年来形成了多种计算学科，诸如计算力学(包括计算流体力学)、计算物理学、计算化学、计算生物学和计算天文学等，这些是数学（特别是计算数学）与流体力学等实际学科和计算机科学之间交叉的边缘学科。计算流体力学等计算学科的研究，使理论数学与计算数学有了更加丰富的新内容、新课题和新方法，为流体力学等相应的实际学科提供了数值计算这种新的研究手段，用来揭示出流动现象等新的图像和新的规律。

如上述，在流体力学等复杂物理问题的计算过程中，计算机可以自动地进行大规模计算，解算出所需精度的近似数值解。这可利用程序编制、计算机操作和结果验证分析来监控计算机按照程序正确地执行计算，并且防止可能发生的计算错误和控制误差。但是，要判断解算出的数值解是否逼近数学模型的解，是否近似于实际问题的要求以及近似程度等，就需要从数学、流体力学、算法、程序与调试等方面做深入细致的分析研究。这种需要与计算机的发展，促进了流体力学等实际学科向数学化的发展。计算流体力学等计算学科的发展，推动了机械科学等工程科学与流体力学等实际学科的发展。

在计算机中可以计算流体运动过程等许多问题。计算这些运动过程问题，实际上是要解算含有线性与非线性偏微分方程、常微分方程、积分方程及代数方程等联立方程组的各种问题。因此，数值计算可以使人们对实际流动过程的认识在广度与深度上都能得到扩展。

数值计算的发展促进流体力学等实际学科的数学化进程，也使各实际学科更为计算机化或计算数学化，能用各种现代数理方程的求解方法，定性与定量地阐明各种运动规律。随着计算机的高速化与大容量化，不仅使科学，而且还会使工程也更加计算机化或计算数学化，可显著提高社会生产力的发展。例如，在计算速度方面，一个手工计算需要100年的题目，在1950年用IBM-650型计算机，需100小时即可完成；1970年用IBM-370，则只需10分钟；到1980年用STAR型或CRAY-1型计算机，仅需1分钟即可完成。现在有了新的巨型向量计算机，其计算速度更高，所需计算时间更少。在计算费用方面，1950年需要花费1 000元计算费的作业，在1980年只需1元，现在则更低廉。将数值计算用于工程实际，带来了巨大的经济效益。

总之，利用计算机进行数值计算具有很大的社会效益和经济效益，是加速工程科学技术发展的重要手段，是我国科学技术现代化进程中的一个重要因素。这也是各工业发达国家长期对数值计算研究给予支持和资助的原因之一。

1.2 流体数值仿真的步骤

工程科学中某种流体的流动特性问题，可由偏微分方程等及所给予的边界条件决定。这样的表示，可以看作是该问题的数学模型。数学模型可以用一个近似的仿真模型(离散化模型、数值性模型)代替。为了使问题简化，需要引入一些假定，以便构成一个可以数值求解的仿真模型。仿真模型方程可以用差分方程等求得近似数值解，但计算结果往往随数值方法(又称数值求解方法或数值解法)和计算网格(节)点数的不同而有差异。为要评价数学模型的优劣，对于具体流场所采用的数值方法必须特别注意。数学模型的优劣，可将其计算结果与可靠性高的实验结果比较，由一致度的良否来判定。数值方法的优劣，可由计算精度和运算效率来判定。流体流动问题数值仿真的关键是对流动问题的数学模型进行数值计算。描述流动问题的偏微分方程组只对一些简单问题才有精确解，故对于许多工程科学的实际问题，只有用实验研究或近似解法研究。数值方法是一种有效的近似解法，能解算出求解域中一些代表性网格点上未知量的近似值。它不像理论分