

国家自然科学基金和黄河研究联合基金项目 (50439020) 资助

固-液两相流体动力学 及其在水力机械中的应用

唐学林 余 欣 任松长 何 丽 著



黄河水利出版社

国家自然科学基金和黄河研究联合基金项目(50439020)资助

固-液两相流体动力学及其 在水力机械中的应用

唐学林 余 欣 任松长 何 丽 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书综述单相流/两相流体动力学研究进展,针对低浓度两相流,演绎推导了低浓度两相流的基本理论和控制方程,并采用单相湍流封闭方法,给出了低浓度两相湍流的一系列相关封闭模型。然后采用 Boltzmann 方程的微观动力学方法,演绎推导高浓度固-液两相流基本方程,并提出质量加权法来模拟两相流的大涡模拟控制方程,同时提出两相流的湍流模型。最后在贴体坐标和交错网格下,采用有限体积法和 SIMPLEC 算法来离散固-液两相湍流的控制方程,并针对一些湍流模型,结合一些典型算例和工程应用实例,验证模型的可靠性、准确性和实用性。

本书可作为水利、环境、化工、流体机械及流体工程等专业的研究生教材或参考书,也可供相关专业及从事两相流研究的科研人员或工程技术人员自学与参考。

图书在版编目(CIP)数据

固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用 / 唐学林, 余欣, 任松长等著. — 郑州: 黄河水利出版社, 2006.12
ISBN 7-80734-177-7

I. 固… II. ①唐… ②余… ③任… III. 液体—固体流动—
流体动力学—应用—水力机械 IV. ①O359 ②O351.2 ③TK7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 165242 号

出 版 社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940 传真: 0371-66022620

E-mail: hhslebs@126.com

承印单位: 黄河水利委员会印刷厂

开本: 890 mm × 1 240 mm 1 / 32

印张: 7.5

字数: 208 千字

印数: 1—1 000

版次: 2006 年 12 月第 1 版

印次: 2006 年 12 月第 1 次印刷

书号: ISBN 7-80734-177-7 / O · 22

定价: 20.00 元

前 言

在水利工程、工业输运和环境科学中,固体颗粒和液体组成的两相流是最为普遍的现象,由此发展起来的两相流理论及其应用受到越来越多的关注。固-液两相流理论是流体力学的重要分支和学科前沿,随着计算机技术和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的飞速发展,用数值方法模拟和研究固-液两相流的固-液两相的相互作用机理已成为可能,并有助于指导生产实践。本书运用流体力学和分子动力学等基本理论,系统性、条理性地推导和演绎了两相流的控制方程,建立了两相湍流模型及其计算方法,并结合一些典型算例,验证相关模型的可靠性、准确性。同时,本书也侧重于固-液两相湍流在水力机械中的应用,由此寻求固-液两相湍流水力机械的现代设计方法和理论,这也是基于两相湍流 CFD 技术的水力机械优化的一个重要发展方向。总之,两相流数值模拟在发展理论模型、改善科研方法和推动学科发展等方面起到了积极的、重要的作用。但由于固-液两相流问题的复杂性,作者对两相流的认知也很肤浅,仅仅把自己的一点点成果和体会写成此书,以便与学术界同仁、专家教授和广大读者相互交流。

本书内容分为 6 章。第 1 章为绪论,针对水力机械的固-液两相湍流问题,概述两相湍流理论是当前和未来水力机械的研制及其内部流动计算技术的重要基础;第 2 章为单相湍流流动模拟,给出了单相湍流的一系列相关封闭模型;第 3 章为低浓度的两相湍流模拟,采用单相湍流封闭方法,给出了低浓度两相湍流的一系列相关封闭模型;第 4 章为高浓度的两相湍流模拟,采用分子动力学方法,给出了相关控制方程,以及相应的封闭模型;第 5 章为两相流控制方程的数值模拟方法,针对水力机械内部流动的复杂的物理域,在贴体坐标下,

给出了液相的 SIMPLEC 算法和固相颗粒的迭代方法；第 6 章为数值模拟的应用，针对一些湍流模型，结合一些典型算例和工程应用实例，验证模型的可靠性、准确性和实用性。另外，为了清晰地描述固-液两相的相互作用，而没有把颗粒相分组，若要考虑到颗粒相的分组，则仅需写出各颗粒组的相关控制方程，并添加各颗粒组之间、颗粒组与液相等相互作用源项等。

参与本书编写的还有姜梅、赵哲等同志。由于学术水平有限，本书欠妥和错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2006 年 10 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 问题背景	(1)
1.2 两相流计算力学在水力机械中的应用	(4)
第 2 章 湍流流动模拟	(7)
2.1 湍流数值模拟的研究状况和发展	(7)
2.2 湍流的 Reynolds 时均方程	(15)
2.3 Reynolds 应力输运方程	(19)
2.4 湍流的平均速度场模型	(23)
2.5 标准 $k-\varepsilon$ 模型	(25)
2.6 重整化群 $k-\varepsilon$ 模型和可实现 $k-\varepsilon$ 模型	(33)
2.7 Reynolds 应力方程模型	(36)
2.8 代数应力模型	(40)
2.9 大涡模拟及亚格子应力模型	(43)
2.10 动态亚格子应力模型	(51)
第 3 章 低浓度的两相湍流模拟	(57)
3.1 两相湍流数值模拟的研究状况和发展	(57)
3.2 两相流基本特性及其描述	(64)
3.3 单颗粒动力学模型(Single Particle Dynamics, SPD)	(68)
3.4 颗粒在均匀流场中的运动分析	(76)
3.5 两相流的基本方程组	(79)
3.6 固-液两相湍流的雷诺平均控制方程	(88)
3.7 单流体模型	(90)
3.8 小滑移模型	(92)
3.9 颗粒轨道模型	(93)

3.10	固-液两相湍流的雷诺应力输运方程·····	(102)
3.11	固-液两相湍流的 $k_t - \varepsilon_t - A_p$ 模型·····	(108)
3.12	固-液两相湍流的 $k_t - \varepsilon_t - k_p$ 模型·····	(115)
3.13	固-液两相湍流的大涡模拟模型·····	(116)
第 4 章	高浓度固-液两相湍流模拟·····	(120)
4.1	高浓度固-液两相湍流的发展状况·····	(120)
4.2	高浓度固-液两相湍流的界定·····	(121)
4.3	固-液两相的微观和宏观变量及各相波尔兹曼方程·····	(122)
4.4	固-液两相湍流的统计平均量输运方程·····	(124)
4.5	两相湍流动量方程中的碰撞积分模型·····	(127)
4.6	固-液两相湍流的动量方程·····	(134)
4.7	固-液两相湍流的动态大涡模拟·····	(137)
第 5 章	两相湍流控制方程的数值模拟方法·····	(144)
5.1	两相湍流液相控制方程的数值解法·····	(144)
5.2	两相湍流控制方程的贴体坐标变换·····	(148)
5.3	贴体坐标下的固-液两相湍流控制方程离散·····	(154)
5.4	离散两相湍流控制方程的数值解法·····	(158)
5.5	两相流的计算边界条件·····	(167)
5.6	计算程序流程图·····	(169)
第 6 章	两相流数值模拟的应用·····	(171)
6.1	转轮内固-液两相湍流的数值模拟及磨损预估·····	(171)
6.2	非淹没丁坝三维绕流的试验和数值模拟研究·····	(180)
6.3	动态亚格子应力模型在弯管湍流中的应用·····	(187)
6.4	矩形管内高浓度固-液两相湍流的大涡模拟·····	(198)
6.5	离心泵叶轮内高浓度固-液两相湍流的大涡模拟·····	(205)
参考文献·····		(216)

第1章 绪论

1.1 问题背景

在自然界中,水流经常挟带着悬浮的泥沙、固体颗粒及其他杂质,这成为自然界水流运动最为普遍的现象,所以含固体颗粒的水流运动受到越来越多的关注。水力机械,包括水轮机和水泵,作为一种重要的能量转换工具,广泛应用于国民经济的各个部门,并且在国民经济中起着至关重要的作用。目前,工程应用中的水力机械,绝大多数运行在固-液两相湍流中,所以流经水力机械过流部件的流态是典型的固-液两相湍流,由此引起固体颗粒对水力机械过流部件的磨损及严重时的水力机械的性能下降、机组的空蚀、振动等一系列问题,从而造成巨大的经济损失(Duan, 2002; 段昌国, 1981; 王志高, 顾四行, 1998)。国外也有同样的沿河水轮机磨损问题(Walsh, Quests, Tucker Jr, 1995), 如印度(Mann, 2000)。作为水力机械性能研究的基础内容,流经水力机械过流部件的固-液两相湍流研究不仅是对水力机械流动理论的发展,也是现代水力机械设计的重要方法,即水力机械设计的正问题和反问题结合起来设计水力机械:根据流经水力机械内部两相湍流流动规律来优化水力机械设计。

1.1.1 水轮机的固-液两相湍流问题

我国的水力资源居世界第一位,可供开发利用的容量为 3.8 亿 kW,随着国民经济的飞速增长,电力的需求量越来越大,水电以其特有的清洁、可再生等特点,使水利电力的开发投资备受重视,如正在建设的长江三峡工程,但总开发率仍然很低,目前我国装机容量约占总发电设备装机总容量的 14%,以电量计不足 10%(何璟, 2002)。然而,我国是多泥沙河流的国家,河水中含沙量特别大。我国华北和西北地区,大多数江河流域包括了广阔的黄土高原和丘陵地区,黄土

缺乏密实结构,颗粒很细,同时汛期暴雨频繁,所以大量泥沙被地表径流带走,江河中的含泥沙量极大,世界罕见,而且泥沙中坚硬颗粒较多。尤其近几十年滥砍滥伐现象比较严重,使沿江河流域的植被被大面积破坏,水土流失现象特别严重,造成江河水中的含沙量更大(钱宁, 1989)。目前国内许多河流含沙量很大,所以安装在这些河流上的水力机械也因此遭受严重的磨损、破坏。中国几条主要含沙河流的指标如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 中国几条主要含沙河流的指标

河流	年输沙量 ($\times 10^6 \text{t}$)	年水流量 ($\times 10^9 \text{m}^3$)	平均含沙量 (kg/m^3)
黄河	1 640	43.2	37.5
金沙江	200	144.1	1.4
嘉陵江	180	65.1	2.8
汉江	60	26.8	2.2
闽江	60	96.9	0.6

水轮机工作在含沙量很小的水流中,沙粒造成很小的材料损失,而当江河水流中挟带有大量的泥沙颗粒时,沙粒会造成水轮机过流部件的严重磨损(Lyczkowski, Bouillard, 2002; Mann, 1998),如小浪底水电站水轮机(朱兴旺, 1999)和葛洲坝水电站水轮机的磨损问题及未来三峡水电站水轮机磨损问题(吴培豪, 1995)。因泥沙严重磨损而引起水轮机的效率降低、寿命短、相当严重的磨损破坏,甚至停机事故,使水电站技术经济效益大大降低,如三门峡水电站(孙绵惠, 付卫山, 许英秀等, 1998)、云南省的大寨水电站(杜同, 1995)等。总之,泥沙对水轮机过流部件的磨损将引起水轮机的性能下降、机组的空蚀、振动等一系列问题。

1.1.2 水泵的固-液两相湍流问题

水泵是三大机械产品(汽车、机床、泵)之一,其用电量占我国总发电量的 25%。渣浆泵和泥浆泵等输送高浓度固-液两相流的水泵,

是泵类中的耗能大户,其在工农业各部门得到广泛应用,主要应用行业为矿山、电力、煤炭、冶金、石化、建材、水利、环保、大洋采矿等部门(Wilson, Addie, Sellgren 等, 1997; Mark, Weir, 2002; Roco, 1990)。例如:

矿山和冶金工业上,主要用于各类矿石(金、银、铜、铁、锡、铝等矿石)选矿厂抽送精矿和尾矿。由于矿砂比重大、硬度高,对泵过流部件磨损严重(Walker, Bodkin, 2002; Walker, 2001)。用于冶炼厂抽送渣浆的水泵,如炼钢厂抽送高炉瓦泥、铝厂抽送氢氧化铝等(ITT Flygt Group, 1997; Addie, Sellgren, 1999)。

电力工业上,主要用于火力发电厂的渣浆排送。我国的发电厂主要用煤作燃料,燃烧后大量灰渣与水混成渣浆,用渣浆泵输送到远处废弃或再利用(许洪元, 卢达熔, 罗先武等, 1998)。

煤炭工业上,主要用于煤矿清仓、抽送煤泥水及用于选煤厂流程中(顾广运, 1990; 田爱民, 赵春, 田爱杰等, 1998)。

水利工程上,有清淤用泵和黄河上的灌溉用泵(黄建德, 张奎亭, 陈涟, 1999)。

渣浆泵、泥浆泵和水轮机一样,也有同样的颗粒磨损问题。总之,工作在高浓度固-液两相湍流中的水力机械效率低、磨损严重、寿命短等一系列问题亟待解决。

1.1.3 固-液两相湍流水力机械的传统设计方法面临的挑战

虽然工作在高浓度固-液两相湍流中的水力机械的磨损是客观事实而无法改变,但其磨损规律是可以改变的,由此寻求固-液两相湍流水力机械的现代设计方法和理论使水力机械的过流部件磨损均匀而不是局部严重磨损,从而解决由此引起的效率下降快、寿命短、气蚀和振动等一系列问题。

水力机械的设计理论大都以单相流一元设计理论为基础,最好的理论也是理想化假设的单相流二元理论,而含有大量固体颗粒的两相流的物理性质和流动特性发生了变化。因此,长期以来,水力机械的设计理论和设计方法的不完善使水力机械的设计条件和使用条件不

相符,从而导致水力机械的性能指标恶化。随着计算机技术的高速发展,在传统设计方法中引入数值模拟技术来全三维地研究水力机械中两相湍流的流动规律,全面预测水力机械的运行特性并反过来指导设计已成为水力机械研究发展的一个重要方向,即用全三维固-液两相湍流理论的数值模拟技术来设计和研究固-液两相流水力机械(Stephan, Graeme, 2002; Seven, Thomas, 2000; Reiner, Peter, Egon, 1999)。

1.2 两相流计算力学在水力机械中的应用

水力机械的 CFD 就是研究水力机械流动的计算流体力学。在 20 世纪 50 ~ 70 年代,水力机械中的流动计算只能更多地采用理想化假设的一元或二元理论,流动计算的目的是仅仅估算出流道中平均流动的速度和压力,用于指导流道设计(Kumar, Rao, 1977)。在这样的流动计算理论的基础上所设计的水力机械的整体能量性能较差,如效率不高、抗空蚀能力差,根据试验结果进行改型是主要的技术手段,经验起了决定性作用(曹鸥,姚志民, 1991; 查森, 1988)。

在计算机得到普遍使用以后,现代意义下的水力机械中的流动计算才开始出现。吴仲华教授所提出的 S_1 、 S_2 两类流面的通用理论首先得到了发展,基于该理论开发了理想流体的准三维流动计算方法,满足了水力机械设计工况对流速场的要求(林汝长, 1995; Schilhans, 1965; Krimmerman, Adler, 1978; Diaguji, 1983)。为考虑黏性对性能计算的影响,还发展了边界层与内部理想流动的迭代计算等方法,它们在很大程度上推动了水力机械中的流动计算大力发展。假定黏性引起的摩擦作用只在很薄的边界层范围内,忽略黏性项,直接求解 N-S 方程组,出现了全三维的欧拉法,Moore(1973)把主流区看做非黏性流动,再结合边界层的黏性流动计算,可以考查回转通道内二次流对边界层发展的影响,计算结果与试验结果相当一致。Nishi 等(1977)着重研究叶轮内部边界层和主流区的自律调整作用,多数情况下都存在尾流-射流结构,并被很多试验证实。显然,对水力机械而言,在最优工况范围运行时比较接近这种流动。计算结果也显示,欧拉方程

解实际上也很好地反映了在这些工况下的流动情况。但当在部分负荷运行,出现回流或脱流现象时,欧拉解就不正确了。进一步提高流动计算的真实性,就必须考虑黏性流动的效应。为此,考虑流体黏性的数值模拟受到人们的重视。Martelli 等(1990)以 S_2 相对流面上的二维 Reynolds 时均纳维-斯托克斯(Navier-stokes, N-S)方程和 $k-\varepsilon$ 湍流模型,用有限差分法和时间推进法计算了离心泵叶轮内部二维黏性流动,以此来指导设计。Shi 等(1992)以二维 Reynolds 时均 N-S 方程和考虑了旋转、曲率效应的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,用 SIMPLE 法计算了圆柱形叶片的离心泵叶轮内部的二维湍流流动。

计算机技术和计算流体力学的迅速发展,使水力机械过流部件的三维真实流动分析取得了巨大的进展,Manish 等(2000a)对带有叶片扩散流道蜗壳的离心泵叶轮流道中的流动做了定量的 PIV(Particle Image Velocimetry)可视化试验,研究分析叶轮流动、扩散流道流动和蜗壳流动,观察到它们的尾流、不稳定分离流和边界层及周期性变化、湍流脉动,并采用雷诺平均和大涡模拟方法来数值模拟其内部流动规律(Manish, Joseph, 2000b),从而可以得到水力机械中的引起机组效率下降和不稳定运行的脱流、回流、断面二次流等流动现象,以此指导水力机械的优化设计,使水力机械的能量特性和抗空蚀性能得到了进一步提高(Lakshminarayana, 1991),与此同时,也促进了水力机械的反问题的进展(Zangeneh, 1991; Borge, 1993)。Yang 等(1998)利用 CAD 和 CFD 联合研究三峡的 X 形水轮机叶片,研究表明, X 形叶片比传统方法设计出的转轮叶片在非设计工况下更稳定、可靠,此对流量和水头变化大的三峡水轮机尤其重要。

与水力机械内部单相流动同步,水力机械内部两相湍流也取得了长足的发展。Seven 等(2000)利用商业软件,通过离心泵内部的固-液两相湍流的三维数值模拟来优化设计高效率离心泵,最终用户的实际应用给予了证实。吴玉林等(1994)和唐学林等(2001)针对水力机械的固-液两相湍流及其颗粒磨蚀做了大量的研究,应用多种固-液两相流模型,进行两相流方程的耦合求解,对水力机械进行了颗粒磨蚀的计

算,估算了液相和固相各自的运动特征,据此,得到了泥沙磨蚀部位和程度的预估。因此,将两相流计算应用在水力机械的设计阶段,对颗粒和空蚀破坏进行预估,从而达到对水力机械的过流部件优化,这也是基于两相湍流 CFD 技术的水力机械优化的一个重要发展方向。

从水力机械流动计算技术的发展看到,湍流模型是当前和未来水力机械中流动计算技术的重要基础。为促进流动计算在水力机械应用中的发展,我们必须进一步研究和促进水力机械中两相湍流模型的发展。

第2章 湍流流动模拟

自然环境和工程装置中的流动常常是湍流流动,但由于湍流控制方程的非线性及其运动的复杂性,所以至今未能攻克科学领域中这个“古老的堡垒”。为了解决工程湍流问题,必须研究湍流对平均流场的影响,计算在各种复杂流动条件下的湍流平均流场,来满足实际工程需要。

计算机技术的飞速发展对湍流的研究起着巨大的推动作用,湍流的数值模拟方法已成为人们研究湍流运动的一条重要途经,并且,所取得的许多重要成果已广泛应用于工程实际问题。近期常用于工程实际的模拟方法是,通过各种湍流模型研究湍流的平均运动来满足工程实际需要,这是因为工程中感兴趣的往往是时均速度场、湍流脉动时均特性等,并不需要知道湍流产生及发展的细节,因此并不需要过细的模拟。总之,采用湍流模型来处理工程问题的方法,由于其经济性和实用性好,是目前处理工程问题中最有效而且最广泛的方法。

2.1 湍流数值模拟的研究状况和发展

在两相流的数值模拟研究中,连续相的处理方法和单流体的一样,同时固相主要借用或借鉴的是单相流体的数值方法,所以有必要回顾单流体湍流的发展状况。

自然界中和工程中的大多数流动都是湍流,一般来说,湍流是普遍的,而层流是个别的。湍流流动是随时间和空间都呈现出不规则的脉动,是由许多大小不同的旋涡组成的。那些大旋涡对于平均流动有比较明显的影响,而那些小旋涡通过非线性作用对大尺度运动产生影响,大量的质量、热量、动量以及能量交换是通过大涡实现的,小涡的作用表现为耗散。湍流的运动特性可用连续方程和 N-S 方程来描述,通过对连续方程和 N-S 方程的联立求解,可得计算域各处的流

动速度和压力等信息。

水力机械内的流动一般雷诺数很高,流动处于湍流状况,通过建立流动模型,计算研究流场、压力场等分布,并以此为基础预测水力机械的整体性能,提供设计的依据,从而提高水力机械的性能。

目前,湍流的数值模拟方法如图 2-1-1 所示:

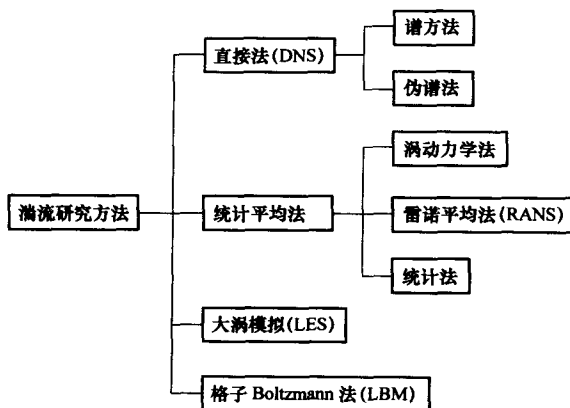


图 2-1-1 湍流数值模拟方法

2.1.1 直接数值模拟 (Direct Numerical Simulation, DNS)方法

此模型无须引入任何湍流模型,在湍流尺度内,直接求解瞬态的三维 $N-S$ 方程,可给出湍流的产生和耗散等信息,对湍流本质较为精确的描述。方程本身是精确的,仅有的误差是存在于任何数值计算中的计算误差,而这一误差可以认为被控制在所允许的误差范围内。但是,为了直接模拟湍流流动,一方面计算区域的尺寸应大到足以包含最大尺度的涡;另一方面计算网格的尺度应小到足以分辨最小涡的运动。

DNS 所用的数值方法多数是谱方法或伪谱法。DNS 可用来研究湍流的物理机制,提供详细的数据库,从而有助于构造和评价湍流模型,以及在某些特殊场合预测具有工程意义的流场。其优点是,在大量的空间点上,在相当短的时间内,可以提供所有三个速度分量和压

力的瞬时值及其变化结果, 这是目前试验测量所无法实现的。

通过数值方法求解连续方程和运动方程可模拟湍流运动, 其中必须准确求解方程组中的能量耗散项。根据各向同性湍流运动理论, 能量耗散相的长度 l_d 可由下式给出:

$$l_d = O[V^3 / \varepsilon]^{1/4} \quad (2-1-1)$$

式中: ε 表示单位质量流体能量的耗散率; V 为特征速度。

大量的试验结果表明, ε 由湍流运动的特征速度 V 和特征长度 L 决定:

$$\varepsilon = O(V^3 / L) \quad (2-1-2)$$

由此可得:

$$l_d / L = O[Re_L^{-3/4}] \quad (2-1-3)$$

式中: Re_L 为湍流的特征雷诺数, $Re_L = VL/\nu$, ν 为流体的黏性系数。

由此, 利用有限差分法求解瞬时方程组时, 我们不难得出所需的网格节点数 N 大约为:

$$N = O\left[\left(l_d / L\right)^3\right] = O\left[Re_L^{-9/4}\right] \quad (2-1-4)$$

由表 2-1-1 中可知, 目前实际计算机容量和速度所允许的可能采用的计算网格点数远远小于 DNS 所需的网格点数, 所以计算机容量和速度所允许的可能采用的计算网格尺度仍比最小涡尺度大得多。同时, 耗散尺度的小涡具有很小的时间尺度, 计算必须具有足够的时间分辨率, 这同样需要庞大的计算资源(Lesieur, 1997)。因此, 目前国际上正在做的湍流 DNS 还只限于较低雷诺数和非常简单的流动外形, Clark 等(1979)利用 DNS 法的模拟结果来评价大涡模拟中亚网格尺度(SGS)模型的准确性, Ray 等(1991)和 Kim 等(1987)利用 DNS 法研究槽道流动, Verzicco 等(1994)利用 DNS 法研究低雷诺数下的时间发展的圆湍射流。

表 2-1-1 不同雷诺数下的网格节点数 N

Re_L	10^4	10^5	10^6	10^8	10^{10}
N	10^9	10^{11}	10^{13}	10^{18}	10^{22}

2.1.2 涡动力学法

一般认为, 涡的伸展、变形、破碎和扩散是湍流能量由大尺度涡传向小尺度涡的过程。湍流本身主要由大、小涡组成。涡动力学基本方程就是对 N-S 方程取旋度而得到的。涡动力学法的离散涡或随机涡方法是在拉格朗日坐标中用涡元的随机位移来模拟湍流扩散, 可较为真实地反映湍流的产生和发展过程, 但同样由于计算机容量和速度的限制, 目前只能用于简单的研究中(Chorin, 1994)。

2.1.3 雷诺平均(Reynolds-Averaged N-S, RANS)方法

目前, 湍流的统计平均研究主要沿两个方向发展: 一个是湍流相关函数的统计理论, 另一个是雷诺平均的湍流模型理论(Shyy, Thakur, Ouyang 等, 1997)。前者主要用相关函数及谱分析的方法来研究湍流结构和湍流机理, 主要涉及小尺度运动, 而湍流状态下影响动量和热量交换的主要是大尺度运动而不是小尺度运动, 所以它不能解决工程技术方面的实际问题。

目前, 一般认为 N-S 方程可用于描写湍流, 而 N-S 方程的非线性使得用解析的方法精确描写湍流的三维时间相关的全部细节变得极端困难。而且, 即使得到这样的解, 对实际的问题也没有太大的意义, 因为人们关心的是总平均的性能。所以, 对湍流的研究主要采用平均的方法(倪浩清, 沈永明, 1996)。

雷诺平均模型是对 N-S 方程进行雷诺平均得到雷诺时均方程, 平均化的湍流方程中会含有脉动量的二阶相关量, 为了封闭湍流方程, 需引入一定的模型, 从而不同的封闭模型产生了不同的湍流模型。湍流模型就是要建立这些脉动量与平均量之间的关系, 或者说是建立高阶脉动量和低阶脉动量之间的关系, 使湍流平均方程能够封闭。湍流模型理论是在试验基础上形成的湍流半经验理论, 由于工程技术问