

第四届国际多相流数值方法会议 暨美国 ASME 流体工程分会 2000 年夏季年会介绍

周力行

清华大学工程力学系, 北京 100084

1 一般情况

第四届国际多相流数值方法会议暨美国 ASME 流体工程分会 2000 年夏季年会于 2000 年 6 月 11 日~15 日在美国 Boston 召开. 参加 ASME2000 年流体工程分会夏季年会的代表有 500 人左右, 其中大部分来自美国, 一部分来自欧洲和日本、韩国等国, 中国大陆有清华大学工程力学系周力行和水利系梅祖彦参加. 中国台湾也有代表参加. 夏季年会主席为美国华盛顿州立大学 Stock 教授, 发表论文 300 篇左右. 第四届国际多相流数值方法会议的组织者美国 Michigan 大学 Tryggvason 教授, 发表论文 30 篇. 国际多相流数值方法会议是专门性的系列国际会议, 第一、二、三届会议分别于 1994 年、1996 年、1998 年在美国 Nevada 州的 Lake Tahoe, 加州的 San Diego 和 Washington, D.C. 召开.

2 会议主要内容

本次多相流数值方法会议主要交流的内容和过去几次会议接近, 包括气体-颗粒(气固), 气泡-液体(气液), 液体-颗粒(液固)多相流动的基础研究, 数学模型, 实验验证和工程应用方面的最新研究成果. 整个流体工程夏季年会则还包括湍流流动, 流体流动测量, 有自由面和交界面的流动, 多相流研究进展, 计算流体力学进展, 流场显示和激光多普勒测量, 多相流非接触测量, 叶轮机械空气动力学和水动力学数值模拟等部分.

3 主要学术进展

3.1 总体性问题

夏季年会全体大会上比利时 Hirsch 做了关于工业计算流体力学的报告, 对我们很有启发. 报告人认为, 工业 CFD 面临下列问题: (1) 处理复杂几何形状; (2) 合理的网格生成; (3) 高精度的可靠的数值解法; (4) 有效的后处理法; (5) 严格检验有关物理模型. 为此应当: (1) 分析模拟结果误差的来源; (2) 确定物理模型适用范围; (3) 了解实验数据的不确定性; (4) 研究时间推进法和压力修正法两大类数值方

法各自的优缺点; (5) 用标准数据检验数学模型, 例如欧洲湍流和燃烧研究会 (ERCOFTAC) 召开系列的会议的方法; (6) 建立有关工业 CFD 的网站, 以便更好地交流结果.

3.2 具体学术问题

在多相流动非接触测量方面, 加拿大 Hiscock 等用高速摄像及热膜法测量不同尺寸的气泡速度. 法国 Augier 等用 PIV 测量液体和气泡两相的时平均速度, 体积分数, 雷诺应力等. 德国 Lindken 等用高速摄像 PIV 技术测量了三维鼓泡床内气泡和液体速度. 这都反映了多相流测量方面的最近进展.

气泡-液体两相湍流流动的研究成为目前国际上越来越受到重视的新方向. 首先是直接模拟 (DNS). 美国 Michigan 大学 Tryggvason 和日本东京大学 Matsumoto 等分别用直接模拟法研究含有几个或几十个气泡的气液两相流动, 其中对液体在耗散尺度网格内直接求解三维瞬态 N-S 方程, 对气泡用追踪气液交界面形状而不求解气泡内部气相流场的 Front Tracking 方法. 模拟结果揭示了气泡尾迹的形成和湍流的产生过程. 日本神户大学 Takada 等用 Lattice-Boltzmann 法模拟气泡-液体两相流动, 给出了类似的结果. 但是这些研究仅仅处于给出定性描述的阶段, 尚未给出统计平均量的定量结果以便于用来检验和发展对模拟工程装置有用的统观气液两相湍流模型. 美国 FLUENT 软件公司 Vasquez 等提出一种所谓多相 $k-\epsilon$ 模型, 但是对其中两相湍能间相互作用项采取的是半经验公式, 缺乏理论依据, 模拟结果也缺乏实验检验. 德国马丁路德大学 Sommerfeld 报道了用 $k-\epsilon$ 液相湍流模型和气泡轨道的拉氏模型 (气泡作为点源处理) 模拟气泡液体两相流动的结果, 并且和 PDPA 测量结果对照, 所得到的液体速度和湍流速度在有些工况下和实验不符合, 而气泡速度和湍流速度的结果尚未公布. 美国 Ohio 大学 L.S. Fan 报告了用 PIV, CARPT, CT 等实验技术测量气液固三相流动各相速度, 体积分数和雷诺应力的结果, 也报道了

用 VOF 方法模拟气泡 - 颗粒 - 液体三相流动的结果。事实上, 美国华盛顿大学 Dudukovic 等以及欧洲的荷兰 Delft 大学, 德国斯徒加特大学的研究者们都用 $k-\varepsilon$ 液相湍流模型和双流体模型模拟了气泡 - 液体两相流动, 但是除了所得到的液体速度和实验符合尚好外, 模拟的气相体积分数和两相雷诺应力都和实验差距较大。清华大学力学系周力行和美国 Ohio 大学 L.S. Fan 合作, 用二阶矩两相湍流模型也就是两相雷诺应力方程模型模拟了气泡 - 液体两相流动, 所得到的气泡和液体的速度, 体积分数和雷诺应力都和 PIV 测量结果符合较好, 反映了气泡和液体的湍流的产生机理, 用此成果参加了讨论, 但是未来得及在会议上发表论文。从单相湍流流动的研究来看, 目前大涡模拟 (LES) 已经渐渐进入可以模拟工程复杂湍流的阶段, 因此今后应当把 LES 引入气泡 - 液体两相湍流流动的模拟中, 和传统的 EAFMS 模拟 (以平均雷诺应力方程为基础的湍流模型方法) 结合起来。最近在周力行的倡议下, 美国 Ohio 大学已经开始了用 LES 模拟气液固三相流动的研究, 并且已经取得初步结果。二阶矩两相湍流模型的模拟结果和 LES 模拟气液固三相流动的结果发表于后来 8 月 7 日 ~ 11 日在加拿大 Quebec 由美国 Engineering Foundation 组织召开的计算流体力学会议上。

气固 (气体 - 颗粒) 两相流动仍然是会议交流的重点问题。

在基础研究方面, 美国伊里诺大学 Balachandrar 等用精确的直接模拟数值方法求解了单个球形颗粒 (气泡) 在非定常和非均匀流动中的运动和受力, 给出了阻力、升力、附加质量力、Basset 力等的规律, 指出在颗粒和流体或流体和气泡的材料密度之比大于 5 的情况下, 附加质量力可以忽略。美国华盛顿州立大学 Crowe 从理论上分析了两相流动的流体湍流问题, 认为两相流中流体湍流尺度取决于颗粒直径, 而不是单相流动的湍流尺度。

大涡模拟和直接模拟也被用来研究气体 - 颗粒两相湍流流动。日本大阪大学 Tanaka 等用 LES 模拟了旋转管道内气粒两相流动。对流体用过滤的大涡 N-S 方程求解, 对小涡粘性用未考虑颗粒影响的单相流动的 Smogorinsky 亚网格尺度模型。对颗粒用拉氏轨道模型, 并且用刚球模型考虑颗粒之间碰撞。模拟结果表明, 颗粒和柯氏力都削弱气体湍流强度, 颗粒间碰撞甚至在颗粒浓度很低时都对浓度分布有显著影响。美国伊里诺大学 Vanka 等用 LES 模拟了管内气粒两相湍流流动。管道长度为直径的 5 倍, 基于

管道直径和摩擦速度的雷诺数为 360。对流体用没有亚网格尺度模型的 LES, 解大涡的三维瞬态 N-S 方程, 相当于较粗糙的 DNS, 加入轴向和切向的周期性边界条件。用 $64 \times 64 \times 128$ 个网格。对颗粒运动方程只考虑阻力。追踪 100 000 个颗粒。对比了单向耦合和双向耦合的模拟结果。结果表明, 双向耦合降低了壁附近周边的颗粒浓度。颗粒开始降低而后来增强了气体轴向脉动速度, 但是始终降低了气体径向脉动速度。美国伊里诺大学 Balachandrar 等用 DNS 研究了基于管道直径和摩擦速度的雷诺数为 180, 128^3 个网格, 时间步长为 0.054 s, 300 000 个颗粒, 60 000 个时间步长的管内气粒两相湍流流动, 探讨了颗粒在不同剪切率的速度场内受力的规律。

在双流体模型方面, 清华大学周力行报告了基于拉氏分析的二阶矩两相湍流模型, 其中对两相速度关联的封闭提出了更合理的模型, 在应用于突扩和旋流两相流动中产生了更好的效果。德国马丁路德大学 Lain 报告了双流体模型的颗粒基本方程组, 但是没有看到和现有其他研究者提出的有何明显差别。

在欧拉 - 拉氏模型方面, 德国马丁路德大学的 Sommerfeld 等报道了搅拌器内气粒两相流动的模拟结果, 没有看出在模型和算法上有何新发展。

在应用方面, 引起与会者注意的是, 日本 AJST 公司的 Someya 等用双流体模型和 LES 模拟液态 CO_2 排放和溶解于海洋之中的过程, 探讨了不同排放深度的效果。这是在环保问题中的应用。可以看到, LES 不仅已经用于研究多相湍流流动的基本问题, 而且已经开始用于工程实际的多相流动问题。

4 收获和体会

(1) 国际上气液两相湍流流动的研究正在方兴未艾地成为多相流动的研究热点。国内开展这方面的研究还不够, 需要更广泛地展开这方面的研究, 在深度上还需要追上国际步伐。

(2) 从国际上看, 直接模拟和大涡模拟不仅已经用来研究单相湍流流动, 气粒两相流动, 而且已经开始用来研究现象更为复杂的气液两相流动, 不仅用于研究简单流动的基本现象, 而且已经开始用于研究工程中的复杂两相流动。国内则仅仅限于研究单相流动, 少数的研究也限于简单的气粒两相流动, 如射流流动, 需要急起直追。

(3) 我们在双流体模型方面的研究可以认为是已经处于国际前沿, 但是在其他方面还落后于国外各单位, 因此需要在今后努力赶上去。