评述

多尺度复杂系统物理建模与模拟专辑

湍流基于 EMMS 原理的介尺度建模

王利民*

中国科学院过程工程研究所, 多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190

* 联系人, E-mail: lmwang@ipe.ac.cn

收稿日期: 2016-04-26; 接受日期: 2016-05-27; 网络出版日期: 2017-03-29

国家自然科学基金 (编号: 91434113, 21106155)、国家重点基础研究发展计划 (编号: 2015CB251402)、中国科学院战略先导科技专项 (编号: XDA07080303) 和国防科技创新基金 (编号: CXJJ-14-Z72) 资助项目

摘要 工程湍流问题中往往存在湍动和非湍动 (即层流) 区域共存的特点, 而传统湍流模型假定计算网格内流体总是处于充分湍流状态, 忽视了流动中的层流部分, 导致模拟的准确性不足. 本文介绍基于能量最小多尺度 (Energy Minimization Multi-Scale, EMMS) 原理发展介尺度湍流模型, 用于提升工程湍流模拟的预测性能; 探索湍流中黏性和惯性控制机制通过竞争中的协调形成多尺度结构及稳定性条件; 分析模型拓展的物理基础、数学表达及其验证与应用. 文章初步认为, 水力学中的最小和最大能耗率争论已久, EMMS 湍流模型分析两者的基本假设, 进而做出统一解释. 最后, 展望 EMMS 湍流模型仍需解决的问题以及湍流介尺度方法.

关键词 湍流, 介尺度建模, 竞争中协调, EMMS 湍流模型

PACS: 47.27.Ak, 47.27.E-, 05.70.Ln

1 引言

湍流是包括化工等工程科学中急需解决的基础科学问题. 在物质和能源加工生产过程中, 诸如流化床、搅拌槽、换热器、窑炉、冶炼炉、燃烧室、输送管道等设备和反应器中遇到的流动几乎全部都是湍流过程, 并常与传热传质过程以及化学反应紧密耦合^[1]. 相对于层流, 湍流会显著影响流动、传递和化学反应过程. 涉及液液、气液、气固、液固等多相体系中, 湍流与液滴、气泡和颗粒的相互作用也起着关键性作用. 对湍流流动与传递状况的定性认识和定

量计算, 往往是提高设备生产效率或开发新的工艺和设备中的难点和关键.

能量最小多尺度 (EMMS) 模型^[2-4]是针对气固流态化系统发展的基于结构分解和稳定性条件封闭的多尺度方法. 它较早关注了介于系统整体与其组成单元间的介尺度结构对系统行为的影响, 并由此逐步发展形成了介尺度科学研究思路. 该思路从对复杂系统的尺度和控制机制的分解入手, 将不同控制机制分别表达为一种极值趋势, 并通过分析它们之间在竞争中的协调获得系统的稳定性条件, 从而在数学上可表达为这些控制机制极值的多目标变分

引用格式: 王利民. 湍流基于 EMMS 原理的介尺度建模. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 070008

Wang L M. Mesoscale modeling for turbulence based on EMMS principle (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 070008, doi: 10.1360/SSPMA2016-00222

问题. 由此可以把不同尺度上的动力学方程关联起来, 形成封闭的模型. 这一思路已在气固系统^[3,4]和气流系统^[5,6]中获得成功, 并在湍流中做了初步的探索^[7].

本文首先分析湍流流动中的控制机制和从 EMMS 模型的思想出发提出湍流稳定性条件; 然后以此阐释一些典型流动问题, 包括管流和水力学过程等; 最后, 分析了基于稳定性条件的 EMMS 湍流模型及其初步应用, 并讨论了其今后需要深入分析解决的问题.

2 黏性/惯性竞争中协调及湍流稳定性条件

惯性和黏性作用在湍流中起着非常重要的作用, 决定了流动的结构. 雷诺数 Re 表示惯性力 ($\rho U^2/L$) 与黏性力 ($\mu U/L^2$) 量级的比, 表征了惯性与黏性作用的相对强弱. Re 很大时, 惯性起主导作用, 流体处于充分湍流状态; Re 较小时, 黏性起主导作用, 流动为层流. 随着惯性影响的增大, 层流在一定阶段开始失稳, 并转捩成湍流.

在牛顿流体中切应力张量与剪切应变速率张量为线性关系. 流体微元在圆管内的运动, 其黏性应力可表示为^[8]

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy}. \quad (1)$$

流体的惯性力^[8]是假想作用在具有加速度流体质点的虚拟力, 使流体有保持原有运动状态的倾向. 惯性力的大小等于质点质量与加速度乘积, 方向与加速度矢量相反, 可表示为^[8]

$$f = -\rho \frac{du}{dt}, \quad (2)$$

湍流中黏性应力表现为流体微团速度场在空间上的非均匀性, 而惯性力表现为流体微团速度场在时间上的非均匀性, 惯性力和黏性应力都是同时作用在流体微团上, 以流体微团为载体, 发生彼此间竞争中的协调作用.

另一方面, 黏性流动中, 黏性导致流体的能量耗散, 产生不可逆的摩擦热 (耗散功). 在层流中, 能量耗散是流体层之间的内摩擦将流体动能转化成热能,

由于平均速度分量梯度引起的耗散为平均剪切耗散, 又叫“直接耗散”. 在湍流中, 除了这种类似于层流的平均剪切耗散外, 还存在湍流涡团的耗散, 即由于脉动引起的耗散, 又叫“湍流耗散”. 总能量耗散可分解成平均剪切耗散和湍流脉动耗散, 以二维流动为例, 可得到^[9]

$$\begin{aligned} \bar{D} = & \mu \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 \right] \\ & + \mu \left[2 \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2 \right] \\ & + \left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial v'}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial y} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

其中, (3) 式右边第一项是平均运动的能量耗散, 即为平均剪切耗散率 $\bar{W}_v$, 而 (3) 式右边第二项是脉动运动的能量耗散, 即湍流脉动耗散率 $\bar{W}_e$.

热力学系统可以被分为平衡系统或非平衡系统^[10], 对于热力学平衡系统, 其稳定性条件是熵最大; 热力学非平衡系统, 可以进一步分为线性非平衡系统和非线性非平衡系统. 其中, 对于线性非平衡系统, Onsager^[11]在 1931 年提出系统中的不可逆过程是在热力学力推动下产生热力学流的结果, 例如, 在热传导过程中, 驱动导热过程的热力学力是温度梯度, 而热力学流是热流量; 在扩散过程中, 驱动物质扩散的热力学力是浓度梯度, 而热力学流是质量通量. 热力学力与热力学流的乘积即为熵产率, 在线性非平衡体系, Onsager 认为热力学力与流之间满足线性本构关系^[11], 热力学稳定性条件要求本构关系系数矩阵正定, 自然得到 Prigogine 最小熵产率原理^[12]. 非线性非平衡热力学系统的稳定性判据, 形式多样, 缺乏普适原理.

在黏性流动中, 剪切应力在物理意义上可以解释为动量通量. 从热力学角度, 速度梯度是动量通量的“推动力”, 因此, 速度梯度是热力学力, 而剪切应力是热力学流. 在层流中, 由 (1) 式可知这种“力”和“流”的关系是线性关系, 因此层流具有线性非平衡的特征, 其稳定性条件是满足最小熵产率原理. 而在湍管流中

$$\tau = -\mu \frac{d\bar{u}}{dy} + \rho \overline{u'v'} = -(\mu + \mu_e) \frac{d\bar{u}}{dy}. \quad (4)$$

由于存在湍流脉动运动所形成的雷诺应力, 导致这种“力”和“流”的关系不再是简单的线性关系, 流动系统具有非线性非平衡的特征, 属于典型的复杂流动, 暂没普适的稳定性判据。

Helmholtz^[13] 于 1868 年率先提出适用于缓慢黏性流动的“最小能耗率原理”。1883 年, Korteweg^[14] 发现对于惯性项在控制方程可以被忽略的情况下, 流体速度分布满足黏性导致的能量损失趋于最小。1913 年, Rayleigh^[15] 将最小能耗率原理推广并应用更多的流动系统。根据非平衡热力学耗散理论, 层流满足熵产率最小原理, 这和 Helmholtz 的最小能耗率原理是一致的。

在层流中, 黏性剪切作用控制流动系统, 其速度分布受黏性耗散率最小的条件的控制。而单相湍流中黏性和惯性共同发挥作用, 比层流中黏性作用主导的情况要复杂很多, Helmholtz 的最小能耗率原理不再成立^[7,12]。1956 年 Malkus^[16] 提出了总黏性耗散 D 趋于最大的变分准则预测湍管轴向速度分布。1989 年 Malkus 和 Smith^[17] 修正了该准则, 发现众多的平均场中, 只有“效率”函数 $E = DD_f/D_m$ 最大化的速度分布才满足对数分布律和速度亏损律 (其中 D_f 和 D_m 分布是脉动速度和平均速度产生的耗散), 且改进的最大“效率” E 变分准则预测得到的速度分布比最大总黏性耗散 D 得到的速度分布更接近实际流动。最近, Bertram^[18] 提出最小湍动能的变分准则, 试图阐明不同约束方式导致不同变分准则。自从 Malkus 提出的最大总黏性耗散 D 变分准则后, 出现了许多不同最大化流动量的变分准则, 但这些都不能解释为什么有一些变分准则能产生与实际相符的结果, 而另一些却不能。此外, 对于给定最大化的任何特定流动量也缺乏明确的物理基础。

与湍流复杂系统相似, 气固体系是典型非线性非平衡的复杂系统。虽然复杂系统中还没有普适的稳定性判据, 但针对特定的体系, 可以提出相应的稳定性条件^[11]。如李静海^[2] 提出: 在气固两相流态化体系中, 流体和颗粒各自的独立运动趋势是决定性控制机制, 流体以阻力最小的方式通过反应器, 而固体颗粒总是尽可能处于最小势能的位置, 两种机制的共同作用形成气固体系中稀密相非均匀结构, 体系稳定性条件表示为^[2]

$$\min \begin{bmatrix} W_{st} \\ \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (5)$$

即流体单位时间流过单位体积床层消耗于悬浮和输送颗粒的能量 W_{st} 趋于最小, 同时空隙率 ε 趋于最小。

Li 等人^[7] 研究发现湍流中惯性和黏性机制竞争中协调和气固体系中两种机制竞争中协调相类似, 在湍管流动中, 将湍流中的流体看成是多个涡团组成, 并将任何涡团与周围流体之间的相互作用近似等价于气固体系中气体和颗粒之间的作用, 认为单相湍流和气固系统的能量耗散具有相似的趋势, 提出^[7]: 如果一个流动系统由黏性控制, 则它满足单位体积的平均剪切耗散率最小即 $\bar{W}_v = \min$, 反之, 如果由惯性控制, 则它满足单位体积的总耗散率最大即 $\bar{W}_T = \max$ 。然而, 湍流流动既不是由黏性控制, 也不是由惯性控制, 而是这两种机制在竞争中协调, 即 $\bar{W}_v = \min$ 和 $\bar{W}_T = \max$ 都不可能完全实现, 只能在时空上交替实现各自的极值趋势, 即在竞争 (极值) 协调的过程中达到一对相对极值。数学上可表达为^[7]

$$\begin{bmatrix} \bar{W}_v = \min \\ \bar{W}_T = \max \end{bmatrix}, \quad (6)$$

即黏性作用使黏性平均剪切耗散率趋于最小, 同时惯性作用使总耗散率趋于最大。Li 等人^[7] 分析了湍管流中黏性和惯性的协调机制, 并验证了湍管流中速度径向分布是由控制机制竞争中的协调所形成的。

在稳态湍管流中, 流体微元受到的惯性力为

$$\begin{aligned} f &= -\rho \frac{du}{dt} = -\rho \frac{d(\bar{u}+u')}{dt} \\ &= -\rho \left(\frac{d\bar{u}}{dt} + \frac{du'}{dt} \right) \approx -\rho \frac{du'}{dt}, \end{aligned} \quad (7)$$

表明湍流的惯性作用依赖于流体脉动运动, 湍流小尺度的脉动越剧烈, 惯性作用越强。王利民^[19] 认为惯性作用越强, 湍流小尺度的脉动作用越显著, 即湍流惯性作用机制和湍流脉动耗散紧密相联, 对湍流的时空多尺度结构和能量耗散过程进行了进一步分析, 将湍流的总能量耗散率 $\bar{W}_T$ 分解成时均速度梯度导致的平均剪切耗散率 $\bar{W}_v$ 和脉动速度梯度导致的脉动耗散率 $\bar{W}_{te}$, 提出时均速度产生的耗散由黏性作用机制导致, 而脉动速度产生的耗散由惯性作用机

制导致. 对于一般剪切湍流, 惯性作用使脉动耗散率趋于最大, 黏性和惯性之间竞争中的协调产生湍流稳定性条件为^[19]

$$\begin{bmatrix} \bar{W}_v = \min \\ \bar{W}_{te} = \max \end{bmatrix}, \quad (8)$$

即黏性作用使黏性平均剪切耗散率趋于最小, 同时惯性作用使湍流脉动耗散率趋于最大.

上述的湍流稳定性条件的合理性在对单圆柱绕流的失稳过程的直接数值模拟中得到检验^[20]. 如图1所示, 在较小尺度的空间范围内, 如图系统局部某一点A或B, $\bar{W}_v = \min$ 和 $\bar{W}_{te} = \max$ 两种极值趋势总是交替出现. 针对某一特定的时刻, 两种极值趋势分别在不同的空间位置上实现, 即惯性作用在A点占主导时, $\bar{W}_{te} = \max$ 在A点实现, 而B点是黏性作用占主导, 控制机制为 $\bar{W}_v = \min$. 对于空间一点, 或非常小尺度的空间范围内, 黏性作用和惯性作用只能在瞬时、间歇地实现其各自的极值趋势, 不存在湍

流稳定性条件; 随着尺度的增大, 局部时空协调导致介观结构的产生, 此结构表现出某种程度的双极值控制趋势, 即黏性作用使平均剪切耗散率 $\bar{W}_v$ 趋于最小, 而惯性作用使脉动耗散率 $\bar{W}_{te}$ 趋于最大; 随考察尺度的增大, 这种双极值趋势越来越明显.

3 能耗率极值原理讨论

在圆管湍流中惯性权重因子 α 一般都大于0.5(文献[7]中 α 分别为0.533, 0.595和0.621), 因此, 总能量耗散率的趋势由脉动耗散率的趋势决定, 在圆管湍流中总能量耗散率也趋于最大, Li等人^[7]在圆管湍流中提出的极值条件(6)式对速度分布也能进行较好的预测. 在槽道湍流中, Malkus和Smith^[17]提出的最大“效率” $E = DD_f/D_m$, 事实上是由于 $\frac{\bar{W}_v = \min}{\bar{W}_{te} = \max}$ ^[20], 而 $\bar{W}_T = \bar{W}_v + \bar{W}_{te} = \max$ 所致. 总黏性耗散 D 是脉动速度和平均速度产生的两种耗散之和, 仅用一个最大总黏性耗散 D 作为变分准则, 本质

图1 (网络版彩图) 单相湍流中惯性作用和黏性作用控制机制的时空协调^[19]

Figure 1 (Color online) Spatial-temporal compromise in competition between viscosity and inertia in flow around a cylinder^[19].

上抹平了两种耗散率极值间的协调作用. 改进的最大“效率” $E = DD_f/D_m$ 中体现了湍流受黏性和惯性作用的两种耗散率极值之间竞争中的协调, 因此, 此变分能预测到更接近实际流动的速度分布. 另一方面, 不同的极值理论和假设被用来解决流体力学、水力学和河流动力学问题. Yang 等人^[21,22] 将 Helmholtz 于 1868 年提出的适用于缓慢黏性流动的“最小能耗率原理”应用到河流动力学研究领域, 试图用这个原理解释河床过程现象. 而与之相反的“最大能耗率理论”^[23], 认为凡是在运动中消失的机械能都转化成热能, 能量的消散使熵产率增加, 从而能耗率达到最大. 但这些极值理论无法同时解释壅水过程的能耗率呈现极大, 而降水过程的能耗率呈现极小这两个过程的不同水力学特征^[24]. 根据流动中对黏性和惯性作用机制在竞争中协调的分析, 总能耗率 (即平均运动的黏性耗散率和脉动耗散率之和) 既可以趋于极小也可以趋于极大. 壅水过程是水流受阻而产生的水位升高现象, 类似突缩流, 水流流速逐渐加大, 惯性作用权重逐渐加大, 直至惯性作用占优, 最终表现出惯性作用大于黏性作用, 总能耗率趋势和湍流脉动能耗率极大值的趋势一致, 壅水过程能耗率呈极大; 而降水过程, 类似突扩流, 水流流速逐渐减小, 惯性作用权重逐渐减小, 直至黏性作用占优, 最终表现出黏性作用大于惯性作用, 总能耗率趋势和平均运动的剪切能耗率极小值的趋势一致, 降水过程能耗率呈极小. 需要强调的是, 水力学中观察的壅水过程的能耗率呈现极大, 而降水过程的能耗率呈现极小, 这只是从某些特定的水工试验中观察得到水力学特征^[24], 壅水过程的能耗率未必一定呈现极大, 降水过程的能耗率未必一定呈现极小, 能耗最终呈现极大还是极小, 要看具体过程中是黏性占优还是惯性占优. 利用黏性和惯性之间竞争中的协调提出的双极值趋势可解释水力学中壅水曲线和降水曲线过程中能耗率的极大和极小正好矛盾的问题, 调和了水力学中的最小和最大能耗率假设.

4 EMMS 湍流模型

数值模拟是当前研究湍流的一个重要手段之一^[25]. 湍流的直接数值模拟 (Direct Numerical Sim-

ulation, DNS)^[26] 和大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES)^[27–29], 对于解决工程中出现的复杂湍流问题而言其计算量非常大^[30], 难以真正应用于预测工业反应器流动, 因此, 以目前的计算机计算能力, 湍流模型仍是解决工程湍流问题的一个主要途径^[31–33]. 由于湍流过程的复杂性, 目前还没有一个公认的具有较好普适性的湍流模型. 当前湍流模型大都是基于实验数据或经验关联式封闭湍流, 对物理模型的内部机理缺乏进一步探索, 特别是对复杂流动的控制机制以及模型方程中代表各种相互作用的项的相对协调机制缺乏深入的研究, 是当前湍流模型普遍存在的不足.

传统湍流模型, 其有效黏度系数 μ_{eff} 是涡流黏性系数 μ_e 和流体分子黏性系数 μ_{lam} 的简单加和, 如 $(\mu_{\text{lam}} + \mu_e)$ 取代 Navier-Stokes 方程中的 μ_{lam} .

基于 EMMS 模型发展了介尺度科学思想构建湍流模型^[4,34,35]. 具体来讲, 受湍流中存在间歇性结构的启发, 即湍流大尺度涡在时间上的运动不连续, 存在层流及湍流交替出现的现象, 利用两相流分相的思想, 视复杂单相流动为湍流流体相和非湍流流体相 (层流相) 组成的两相流问题 (如图 2), 在任意一个空间微元内两相互相渗透, 湍流成分流体的体积分数为 f , 非湍流流体相的体积分数为 $1-f$, 则基于 EMMS 原理的湍流有效黏度系数为

$$\mu_{\text{eff}} = f\mu_e + (1-f)\mu_{\text{lam}}. \quad (9)$$

与传统湍流模型的有效黏度系数计算不一样. 在基于 EMMS 原理的湍流有效黏度系数中, 通过调节 f , 该模型既可计算充分湍流状态 ($f=1$), 也可计算层流状态 ($f=0$), 还可计算层、湍共存的流动状态 ($0 < f < 1$).

图 2 (网络版彩图) 复杂流动两相流分相的示意图

Figure 2 (Color online) Schematic illustration of two-phase concept regarded single-phase complex flow as a mixture of turbulent and laminar fluids.

借鉴两相流分相的思想, 将湍流的介尺度结构分离出来, 分析了两相之间的相互作用及协调机制, 并进行湍流的介尺度结构研究, 初步建立起湍流涡团与湍流中各种能量耗散之间的联系, 量化了湍流中的能量耗散, 并利用湍流稳定性条件封闭湍流, 将湍流介尺度结构参数与湍流黏性系数进行关联, 建立了基于 EMMS 原理的介尺度湍流模型 (如图 3).

湍流系统中存在介尺度的流体涡团, 宏尺度的流动设备尺度以及黏性完全主导的微元尺度. EMMS 湍流模型中共有 7 个变量, 分别是湍流成分流体的体积分数 f 、湍流涡团的等效直径 d_e 、湍流成分流体的表观速度 U_e 、层流成分流体的表观速度 U_{lam} 、湍流成分流体的密度 ρ_e 、层流成分流体的密度 ρ_{lam} 和湍流涡团的表面张力 σ , 可建立的湍流约束方程^[34]如下:

(1) 湍流涡团约束方程

$$\frac{\pi}{6} d_e^3 (\rho_{lam} - \rho_e) g = C_{D, eddy} \frac{\pi}{4} d_e^3 \frac{\rho_{lam}}{2} u_s^2. \quad (10)$$

(2) 湍流总能量

$$\bar{W}_T = U_e g. \quad (11)$$

(3) 湍流能量分解

$$\bar{W}_T = \bar{W}_v + \bar{W}_{e_inertia} + \bar{W}_{e_Kolmogorov} + \bar{W}_{st}. \quad (12)$$

(4) 单位体积内惯性子区的能量耗散

$$\bar{W}_{e_inertia} = \int_{\lambda_{min}}^{d_e} \int_0^{0.5} \frac{1}{(1-f)\rho_{lam} + f\rho_e} \times \omega_{e,\lambda}(d_e, \lambda) P_e(d_e | f_{BV}, \lambda) E_{DIS} d f_{BV} d \lambda. \quad (13)$$

(5) 单位体积内 Kolmogorov 尺度上的能量耗散

$$\bar{W}_{e_Kolmogorov} = \int_{\eta}^{\lambda_{min}} \frac{\pi \beta}{12} \rho_{lam} \varepsilon^{2/3} \times \lambda^{11/3} 0.1 \frac{(2\pi)^3}{\lambda^4} \frac{f}{(1-f)\rho_{lam} + f\rho_e} d \lambda, \quad (14)$$

显然, 5 个方程不能求解 7 个变量, 结合湍流稳定性条件, 即 (8) 式使方程组封闭, 实现模型的求解. 值得注意的是 (8) 式中的 $\bar{W}_{te} = \bar{W}_{e_inertia} + \bar{W}_{e_Kolmogorov}$, 上述方程的推导、相关辅助关系以及各符号的物理意义等详细介绍, 请参考文献 [34, 35].

对于一个给定的湍流体系, 其流动状态的非均匀结构参数可以通过遍历的方法由基于 EMMS 原理的介尺度湍流模型优先计算. 通过对大量不同工况的计算, 预先建立起一个相应的宏观流动状态与介尺度结构参数的对应表, 通过其方便地与当前湍流的

图 3 (网络版彩图) 介尺度湍流模型示意图^[34]

Figure 3 (Color online) Conceptual framework of meso-scale turbulence model^[34].

计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模拟耦合起来 (如图 4), 在每一个计算网格内考虑涡团介尺度结构和湍流稳定性条件, 以改进湍流模拟的精度.

研究发现^[34,35], 基于 EMMS 原理的介尺度湍流模型改进了雷诺平均方法 (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS) 模拟湍流的精度. 图 5 是 DNS, EMMS 湍流模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型计算 $Re=10000$ 方腔流的流线图比较. 从图 5 可以看出, EMMS 湍流模型计算得到的结果与 DNS 结果更加接近; 标准 $k-\varepsilon$ 模型只能预测主涡、次涡, 不能预测出在方腔左下角及右下

角存在三级涡的现象, 而基于我们改进的湍流有效黏性系数则可以捕捉到主涡、次涡和三级角涡. 究其原因, 传统湍流模型视整个复杂流体流动为充分湍流态, 然而在靠近壁面处由于黏性作用占优, 在这些子区域内流体的流动更接近于层流态而非湍流态, 此时, 传统湍流模型仍视整个复杂流体流动为充分湍流态是不合理的; 相比之下, EMMS 湍流模型视整个复杂流体流动为层流流体和湍流流体的混合, 既可以描述层流流动, 也可以描述湍流流动, 所以能较好地预测壁面附近处流体的复杂流态. 这也表明, 利用稳定性条件封闭湍流, 在湍流有效黏性系数中引入

图 4 (网络版彩图) 介尺度湍流模型耦合 CFD 计算^[35]

Figure 4 (Color online) Schematic illustration of CFD coupled with EMMS-based turbulence model^[35].

图 5 $Re=10000$ 时 DNS, EMMS 湍流模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型计算得到的流线图比较

Figure 5 Comparison of the streamline patterns predicted by DNS, EMMS-based turbulence model and $k-\varepsilon$ model for lid-driven cavity flow at $Re=10000$.

湍流的介尺度结构,提高了湍流模型的计算精度.

此外,通过对空房间内强制对流^[34]、锥形扩散管中强涡流^[35]和NACA0012翼型绕流^[35]等算例的模拟,并与实验数据对比,也都验证了基于EMMS原理的介尺度湍流模型提高了湍流模拟的精度.

传统的涡黏性模型均是唯象型的,需要经验参数的输入来封闭,而且在计算网格内平均和粗粒化的处理方法难以反映结构(涡团)的影响.面对计算网格内的非均匀性,要么采取基于RANS的平均化处理,要么是通过LES甚至DNS努力了解所有的涡结构,而忽视了湍流介尺度上存在的最为重要的主导机制,即黏性和惯性之间竞争中的协调产生介尺度涡团,因而难以准确、大规模地描述湍流复杂系统.利用介尺度涡团结构的湍流稳定性条件封闭湍流,建立基于EMMS原理的介尺度湍流模型.在理论上,考虑介尺度结构和湍流稳定条件的新湍流模型,解决了工程湍流模拟“准”的问题;在技术上,实现粗网格计算,减少计算量,解决工程湍流模拟“快”的问题;因此,EMMS湍流模型有望解决非均匀湍流系统定量模拟的问题,并提升工程湍流模拟的预测性能和解决实际问题的能力.

5 结论

鉴于EMMS模型在颗粒流体复杂系统中的应

用,将气固系统中两种极值趋势协调的研究思路扩展到湍流,并发现湍流中控制机制可表达为黏性作用和惯性作用,阐明了介尺度涡团的形成来源于流体惯性和黏性两种控制机制的各自运动趋势在竞争中的协调.为了探索湍流形成的物理机制,运用离散模拟分析了湍流中的多尺度结构和能量耗散过程,提出了双极值趋势的湍流稳定性条件:黏性作用使黏性平均剪切耗散率趋于最小,而惯性作用使湍流脉动耗散率趋于最大.直接数值模拟检验了上述稳定性条件的合理性和扩展到其他流动现象的可能性.湍流稳定性条件调和了最小和最大能耗率假设.利用湍流稳定性条件封闭湍流,建立了基于EMMS原理的介尺度湍流模型,系统地认识介尺度涡团结构对湍流传递性能的影响,提高了改进湍流模式理论模拟湍流的精度.进一步验证了湍流稳定性条件是合理的,湍流是黏性和惯性之间竞争中的协调产生介尺度涡团.

湍流问题的研究长期以来一直是科技工作者非常关心的一个难题,迄今为止,尚未有一个令人完全满意的湍流理论^[36].基于EMMS模型原理发展的介尺度科学思想,为湍流问题的研究提供了一种新的审视角度^[37].限于当前认识的局限性,也许两种耗散的表达和定义还有待进一步探讨,但黏性和惯性这两种耗散率极值的“竞争中协调”对于湍流的重要性无疑是值得深入探讨的.

致谢 感谢中国科学院过程工程研究所李静海研究员对本研究给予长期的指导和鼓励,感谢中国科学院过程工程研究所介尺度科学部同事在湍流介尺度建模方面给予的有益讨论.

参考文献

- 1 Li J H, Hu Y, Yuan Q, et al. Chemical Engineering in 21st Century (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2004 [李静海, 胡英, 袁权, 等. 展望 21 世纪的化学工程. 北京: 化学工业出版社, 2004]
- 2 Li J H. Multiscale-modeling and Method of Energy Minimization for Particle-fluid Two-phase Flow (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Institute of Chemical Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, 1987 [李静海. 两相流多尺度作用模型和能量最小方法. 博士学位论文. 北京: 中国科学院化工冶金研究所, 1987]
- 3 Li J H, Kwauk M. Particle-Fluid Two-Phase Flow: The Energy-Minimization Multi-Scale Method. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994
- 4 Li J H, Ge W, Wang W, et al. From Multiscale Modeling to Meso-Science: A Chemical Engineering Perspective-Principles, Modeling, Simulation, and Application. London: Springer, 2013
- 5 Zhao H. Multi-scale Modeling of Gas-liquid (slurry) Reactors (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2006 [赵辉. 气液(浆)反应器的多尺度模拟. 博士学位论文. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2006]

- 6 Yang N, Wu Z, Chen J, et al. Multi-scale analysis of gas-liquid interaction and CFD simulation of gas-liquid flow in bubble columns. *Chem Eng Sci*, 2011, 66: 3212–3222
- 7 Li J H, Zhang Z D, Ge W, et al. A simple variational criterion for turbulent flow in pipe. *Chem Eng Sci*, 1999, 54: 1151–1154
- 8 Batchelor G K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1967
- 9 White F M. *Viscous Fluid Flow*. New York: McGraw Hill International, 1991
- 10 Li J H, Kwauk M. Exploring complex systems in chemical engineering—the multi-scale methodology. *Chem Eng Sci*, 2003, 58: 521–535
- 11 Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. I. *Phys Rev*, 1931, 37: 405–426
- 12 Nicolis G, Prigogine I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*. New York: Wiley, 1977
- 13 Helmholtz H. Zur theorie der stationären ströme in reibenden flüssigkeiten. In: *Verh Des Nathrhst-Med Vereinszu Heidelberg Bd VS (1–7)*. Charleston: Nabu Press, 1868. 1: 223–224
- 14 Korteweg D J. On a general theorem of the stability of the motion of a viscous fluid. *Philos Mag Ser 5*, 1883, 16: 112–118
- 15 Rayleigh L. On the motion of a viscous fluid. *Philos Mag Ser 6*, 1913, 26: 776–786
- 16 Malkus W V R. Outline of a theory of turbulent shear flow. *J Fluid Mech*, 1956, 1: 521–539
- 17 Malkus W V R, Smith L M. Upper bounds on functions of the dissipation rate in turbulent shear flow. *J Fluid Mech*, 1989, 208: 479–507
- 18 Bertram J. Maximum kinetic energy dissipation and the stability of turbulent Poiseuille flow. *J Fluid Mech*, 2015, 767: 342–363
- 19 Wang L M. *Discrete Simulation for Single-phase Complex Flows (in Chinese)*. Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2008 [王利民. 单相复杂流动的离散模拟. 博士学位论文. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2008]
- 20 Ge W, Chen F, Gao J, et al. Analytical multi-scale method for multi-phase complex systems in process engineering—Bridging reductionism and holism. *Chem Eng Sci*, 2007, 62: 3346–3377
- 21 Yang C T, Song C S. Theory of minimum rate of energy dissipation. *J Hydraul Div*, 1979, 105: 769–784
- 22 Yang C T, Song C S. Theory of minimum energy and energy dissipation rate. *Encyclopedia Fluid Mech*, 1986, 1: 353–399
- 23 Huang W L. The law of maximum rate of energy dissipation on continuum dynamics (in Chinese). *J Tsinghua Univ*, 1981, 1: 87–96 [黄万里. 连续介质动力学最大能量消散定律. 清华大学学报, 1981, 1: 87–96]
- 24 Ni J, Zhang R. Extremal hypotheses and their applications on river geometry studies (in Chinese). *Hydrol-Sci Eng*, 1991: 307–318 [倪晋仁, 张仁. 河相关系中的极值假说及其应用. 水利水运科学研究, 1991: 307–318]
- 25 Pope S B. *Turbulent Flows*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 26 Moin P, Mahesh K. Direct numerical simulation: A tool in turbulence research. *Annu Rev Fluid Mech*, 1998, 30: 539–578
- 27 Lesieur M, Metais O, Comte P. *Large-Eddy Simulations of Turbulence*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- 28 He G W, Rubinstein R, Wang L P. Effects of subgrid-scale modeling on time correlations in large eddy simulation. *Phys Fluids*, 2002, 14: 2186–2193
- 29 Fox R O. Large-eddy-simulation tools for multiphase flows. *Annu Rev Fluid Mech*, 2012, 44: 47–76
- 30 Spalart P R. Strategies for turbulence modelling and simulations. *Int J Heat Fluid Flow*, 2000, 21: 252–263
- 31 Wilcox D C. *Turbulence Modeling for CFD*. Birmingham: DCW Industries Press, 2006
- 32 Fu S. Progress in the study of nonlinear turbulence modelling (in Chinese). *Adv Mech*, 1995, 25: 318–327 [符松. 非线性湍流模式研究及进展. 力学进展, 1995, 25: 318–327]
- 33 Zhou H, Zhang H X. What is the essence of the so-called century lasting difficult problem in classic physics, the “problem of turbulence”? (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 445–447 [周恒, 张涵信. 号称经典物理留下的世纪难题“湍流问题”的实质是什么? 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 445–447]
- 34 Zhang L, Qiu X P, Wang L M, et al. A stability condition for turbulence model: From EMMS model to EMMS-based turbulence model. *Partic-uology*, 2014, 16: 142–154
- 35 Wang L M, Qiu X P, Zhang L, et al. Turbulence originating from the compromise-in-competition between viscosity and inertia. *Chem Eng J*, 2016, 300: 83–97
- 36 Huang Y N, Chen Y S. On the discussion about the “What is essence of so-called century lasting difficult problem in classic physics, the “problem of turbulence”?” (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 445–447 [黄永念, 陈耀松. 对《号称经典物理留下的世纪难题“湍流问题”的实质是什么?》一文的讨论. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 445–447]
- 37 Li J H, Hu Y, Yuan Q. Mesoscience: Exploring old problems from a new angle (in Chinese). *Sci Sin-Chem*, 2014, 44: 277–281 [李静海, 胡英, 袁权. 探索介尺度科学: 从新角度审视老问题. 中国科学: 化学, 2014, 44: 277–281]

Mesoscale modeling for turbulence based on EMMS principle

WANG LiMin*

*State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China*

Turbulent flows in engineering are characterized by the coexistence of turbulent and non-turbulent fluids. Nonetheless, in traditional turbulence models, the laminar portion of the fluid flow is often neglected and constitutive laws are expressed to describe fully turbulent states within computational grids. This situation is perceived as a source of inaccuracies in modeling practical engineering flows. In this paper, a meso-scale turbulence model based on the principle of energy-minimization multi-scale model (EMMS) for improving the accuracy of turbulence modeling is presented. Then, the multi-scale structure and stability criterion originated from the compromise in competition between viscous and inertial control coordination mechanisms in turbulent flows are explored, and the physical basis of the model's extension, the mathematical expression, the verification and the application are also analyzed. Furthermore, the contradiction between the hypothesis of minimum energy dissipation rate and that of maximum energy dissipation rate in hydraulics can be interpreted in a unified framework of the EMMS-based turbulence model. Finally, some problems and challenges in the EMMS-based turbulence model and the development of the turbulence-based meso-sciences are also discussed.

turbulence, mesoscale modeling, the principle of compromise in competition, EMMS-based turbulence model

PACS: 47.27.Ak, 47.27.E-, 05.70.Ln

doi: 10.1360/SSPMA2016-00222