

稀薄气体/湍流的多尺度非平衡输运机理

江中正^{1,2,3}, 陈伟芳^{1,3*}

1. 浙江大学航空航天学院, 杭州 310027
 2. 浙江大学先进技术研究院, 杭州 310027
 3. 浣江实验室先进飞行器研究中心, 诸暨 311800
- * 联系人, E-mail: chenwfndt@163.com

2024年7月2日, 中国科学技术协会在第二十六届中国科协年会主论坛上发布了10个前沿科学问题、10个工程技术难题和10个产业技术问题, 其中由中国力学学会推荐的“多尺度非平衡流动的输运机理”成功入选2024年十大前沿科学问题。这个问题聚焦自然界两类经典的气体流动物理现象——“稀薄气体流动”和“湍流”(如真空宇宙的气态星云演化、人类航天器高空再入的燃气喷流等), 两者均存在强烈的多尺度效应和非平衡输运特性。这两个特性既有各自流动的特殊性, 亦有其共性问题。为了清晰了解这两类流动, 本文将介绍其基本特性以及它们的异同点。

1 稀薄气体流动的多尺度非平衡输运

气体稀薄, 但仍然包含大量气体分子, 每个分子都在做永无休止的随机热运动, 分子间频繁而无序地迁移与碰撞, 并产生动量与能量的交换。正是由于气体输运的这些微观动力学过程, 由气体分子集合而成的宏观流动状态与特性发生改变。若分子间充分碰撞, 气体分子将服从Maxwell平衡态分布统计; 当分子数密度变小而碰撞不足时, 气体分子分布统计将明显偏离Maxwell, 具有双峰特性与非对称性, 表征出稀薄非平衡效应。因为流动熵增的存在, 气体流动总会从非平衡态向平衡态演化, 所消耗的时间可用弛豫时间 τ 来表征。而分子间两次碰撞作为微观过程, 其所消耗时间的统计平均值可用分子平均碰撞时间 τ_c 来表征。一般地, 分子平均碰撞时间尺度会比弛豫时间短一些, 但基本保证处于同一个量级范围。可通过它们与流场特征时间 t 之比, 来建立气体非平衡演化输运过程的微/介观与宏观联系。对于航天领域高速跨域飞行流动问题, 一方面由于来流稀薄, 分子间碰撞频率较低, 流动弛豫时间较长; 另一方面, 由于流动速度快, 流场特征时间较短。两方面共同导致气体弛豫时间远远大于流动特征时间, 气体分子缺乏足够的时间和数量完成充分碰撞, 在短暂的流动特征时间内难以实现由非平衡态到平衡态的过渡, 因此在航天



陈伟芳 浙江大学求是特聘教授, 博士生导师, 浙江大学飞行器设计和空气动力学学科学术带头人。主要研究方向为高超声速空气动力学、飞行器设计与气动布局优化等。

高速飞行流动中稀薄非平衡效应是显著而重要的。

传统流体动力学作为研究流体宏观运动的一种手段, 并非着眼于这些离散的气体分子, 而是将流体抽象成一种具有连续介质属性(微观上充分大, 宏观上充分小, 且在空间上无间隙分布)的微团进行研究。以图1中控制立方体内的气体密度统计为例, 解释连续介质流体微团涉及统计平均的建模尺度问题。显而易见, 当统计视角尺度 a 过大时, 平均气体密度 $\bar{\rho}$ 统计会受到控制体周围气体密度宏观分布变化的影响; 当 a 取过小值时, 又会因控制体内分子数太少以及随机运动导致统计波动。若研究比分子尺度大很多的宏观流动现象, 边长 a 取 $\lambda \ll a \ll L$ 作为气体宏观量的统计平均尺度是合理的, 这也是连续介质假设成立的前提。然而, 当微观分子尺度 λ 与宏观流场尺度 L 为同量级时, 气体的粒子效应显著增强。图1曲线中统计稳定的中间段的尺度范围变窄, 难以获得一个合理的宏观统计平均尺度 a , 流体微团将失去连续介质尺度建模的根基, 而基于连续介质假设的传统流体动力学方法不再适用。

为了有效划分失效区间, 一般会引入分子平均自由程 λ (分子在两次碰撞间迁移距离的统计平均值)与流动特征长度 L 的比值来衡量气体流动的稀薄多尺度的程度, 即克努森数 $Kn = \lambda/L$ 。我国航天之父钱学森先生在1946年首先提出根据 Kn

引用格式: 江中正, 陈伟芳. 稀薄气体/湍流的多尺度非平衡输运机理. 科学通报, 2025, 70: 534–543

Jiang Z, Chen W. The multiscale nonequilibrium transport mechanism of rarefied gas and turbulence (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 534–543, doi: 10.1360/TB-2024-0876

数将气体流动分为4种流域, 包括连续流域($Kn < 0.01$)、滑移流域($0.01 < Kn < 0.1$)、过渡流域($0.1 < Kn < 10$)和自由分子流域($Kn > 10$), 稀薄流域主要包括后3种流域. 如图2(a)所示, 从连续流域到稀薄流域的变化, 流动基本特征逐渐由宏观波动输运尺度到介观动理学尺度再到微观粒子输运尺度过渡. 图2(b-d)中的高空羽流、大钝头飞行器绕流、高空侧喷等都是稀薄气体多尺度流域并存的典型流动, 譬如大钝头迎面面由于气体压缩, 气体密度升高形成稠密连续流域, 而当气流绕过大钝头发生膨胀时, 气体密度变小并逐渐形成滑移-过渡流的多尺度稀薄流域. 通常认为, Navier-Stokes (NS)方程能有效地模拟连续流域的各类黏性流动问题. 非连续介质效应在

稀薄流域显著增强, NS方程表征的黏性逐渐失效, 此时需要稀薄气体动力学的方法才能较好地求解稀薄多尺度非平衡流动.

稀薄气体动力学作为空气动力学的重要分支, 主要研究连续介质假设失效后气体的非平衡输运行为及多尺度流动规律, 在航天飞行器的气动设计问题中具有基础性、指导性的地位. 为了不受连续性介质假设的限制, 需从分子运动和分子碰撞的物理角度进行建模. 1872年, 由Ludwig Boltzmann基于分子的运动与碰撞理论以及分子混沌与气体稀疏假设建立的Boltzmann方程^[1], 能够对全流域流动与传热问题作出统一描述, 是整个稀薄气体动力学的基本方程, 也是解

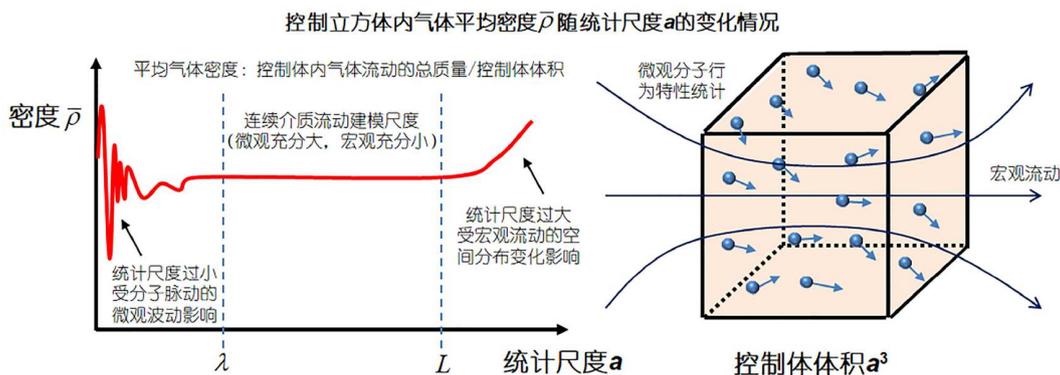


图 1 (网络版彩色)连续介质假设与统计尺度示意图
Figure 1 (Color online) Schematic of continuum hypothesis and statistical scale

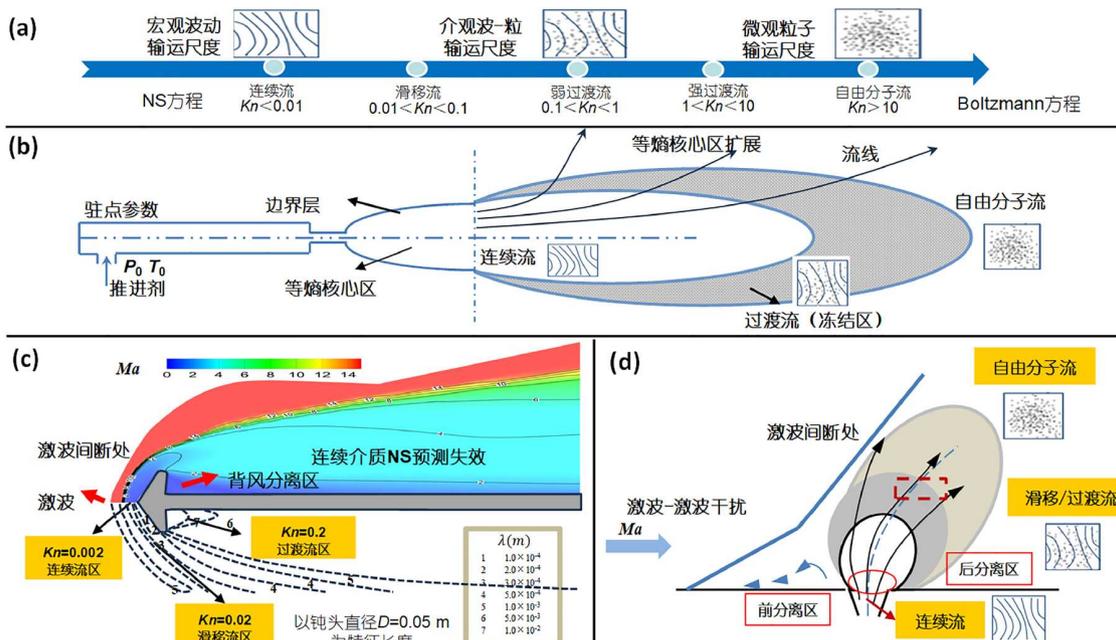


图 2 (网络版彩色)稀薄气体多尺度流动示意图. (a) 钱学森先生的多尺度流域划分; (b) 高空羽流; (c) 大钝头返回舱绕流; (d) 高空侧向喷流
Figure 2 (Color online) Schematic of multi-scale flows in rarefied gases. (a) Multi-scale flow domain classification by Tsien Hsue-shen; (b) high-altitude plume; (c) flow around a large blunt reentry capsule; (d) high-altitude lateral jet

决多尺度非平衡输运和NS失效问题最重要的支撑理论. 为了有效地求解Boltzmann方程, 许多模型算法被相继提出, 大致可以分为三类, 包括基于微观粒子运动的求解方法^[2]、基于介观分布函数的动理学求解方法^[3,4]以及基于宏观变量演化规律的矩方法^[5]. 然而, 无论是学术界还是工业界, 目前为止仍然缺乏一种能够同时兼顾计算精度和工程效率的Boltzmann求解算法. 总的来说, 发展一种高精度、高效率且强鲁棒性的跨流域稀薄动力学理论模型和方法仍然是长期研究的重点.

2 湍流的多尺度非平衡输运

湍流是一种自然界中广泛存在的复杂流动现象, 如宇宙星系、大气云团、湍急河流, 甚至是汽车、轮船和飞行器均会遇到湍流问题. 1883年, Reynolds圆管实验拉开了人类对湍流研究的序幕^[6]. 1904年, Ludwig Prandtl在海德堡举办的国际数学大会上提出著名的边界层理论^[7], 让学术界迅速认识到湍流研究的重要性, 之后吸引了国内外大批卓越的力学家加入, 包括英国Geoffrey Ingram Taylor、苏联Andrey Kolmogorov、美国Von Karman和我国周培源先生等^[8-11]. 人类对湍流的研究已经持续了100多年, 然而时至今日, 学术界对湍流的物理机理尚未取得清晰、完整且统一的认识, 甚至对其仍无法给出公认的准确定义. 普遍认为, 湍流是由不同频率、不同尺度、不同能量的旋涡体构成的复杂流动现象, 其主要特征包括不规则性(随机性)、三维有旋性、扩散性、耗散性、间歇性、多尺度和拟序性^[12]. 大量实验观察表明, 湍流中的旋涡存在一种层次结构: 大尺度旋涡包裹着较小尺度旋涡, 而较小尺度旋涡又进一步包裹着更小的旋涡, 形成了一个层层嵌套的复杂流动系统. 大尺度旋涡受流动环境和边界

条件影响, 从宏观流动中吸收能量, 并将这些能量传递给中间尺度涡; 中间尺度涡在吸收能量后, 继续将能量传递给小尺度涡; 最终, 最小尺度涡能量在流体黏性的作用下完全被耗散. 如图3这一过程便是在1922年由英国气象学家Lewis Richardson提出的湍流能量串级理论^[13], 在一定程度上描述了湍流的多尺度和平衡输运特性.

湍流的最大尺度涡与流场的特征尺度相当, 对湍动能产生起重要作用, 而最小尺度涡与气体分子黏性尺度同量级, 对湍动能起耗散作用. 前者的尺度被称为含能尺度 D , 后者则表示为耗散尺度 η . 在湍流充分发展过程中湍流尺度范围宽, 且随时间发生大-小尺度涡的相互作用与演变. Kolmogorov认为不同尺度涡携带的能量不同, 为了有效分析湍流能量谱与湍流尺度 l 的关系, 将湍流全部尺度涡划分为3个区域, 分别为含能区($l \geq D$)、耗散区($l \leq \eta$)以及介于两者之间的惯性区($\eta < l < D$), 同时提出了著名的K41理论, 也称为湍流局部相似性理论. Kolmogorov基于最小尺度涡的两个关键特征假设(①只依赖于流体的分子黏度; ②上一级涡传递的动能必须被完全耗散), 确定了湍流最小涡的空间尺度 η 、时间尺度 τ_η 、速度尺度 μ_η 与耗散率 ε 、分子运动黏性 ν 的关系($\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$, $\tau_\eta = (\nu/\varepsilon)^{1/2}$, $\mu_\eta = (\nu/\varepsilon)^{1/4}$), 这些尺度也称Kolmogorov微尺度^[14]. 在K41理论基础上, 进一步得到了湍流结构函数能谱密度分布的-5/3定律: $E(\kappa) = C_\kappa \varepsilon^{2/3} \kappa^{-5/3}$ ^[15]. 这是能量串级理论在惯性区(中间波数 κ 范围)的定量表达, 主要结论也得到大量数值与实验结果的广泛证实^[16], 成为截至今日湍流研究所取得的最重要的理论成果.

然而, K41理论和-5/3定律尽管是唯一被湍流学术界大多数学者认可的重要理论成果, 但并不是湍流百年难题的最终答案, 依然受到来自苏联物理学家、诺贝尔物理学奖得主

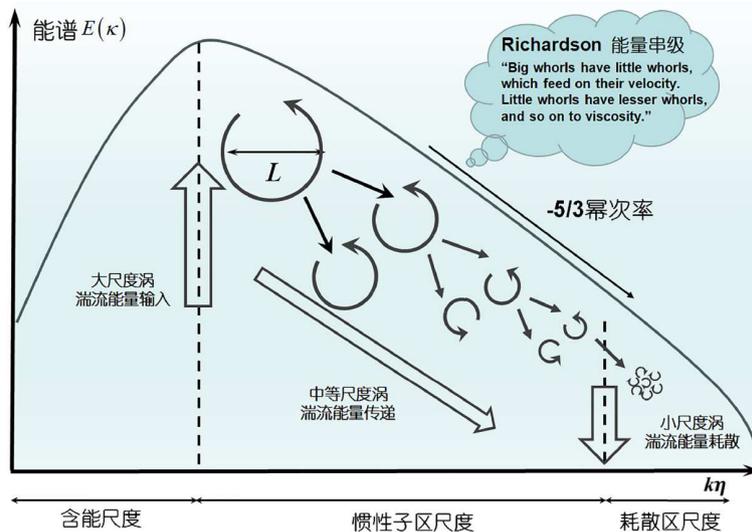


图3 (网络版彩色)Richardson的能量串级理论示意图
Figure 3 (Color online) Schematic of Richardson's energy cascade theory

Lev Landau, 国际湍流大师Robert H. Kraichann、K. R. Sreenivasan等专家学者的质疑。不管是能量串级理论还是K41理论, 都是立足于平衡(均衡)湍流运输假设: (1) 在惯性区内, 高雷诺数湍流处于局部各向同性的平衡状态, 其能谱 $E(\kappa)$ 由耗散率 ϵ 决定, 与气体黏性无关, 并保证在惯性区内能量的传输与耗散的平衡关系; (2) 由于小尺度湍流运动比全尺度湍流总体演化快, 小尺度湍流处于统计平衡状态。由此得到平衡湍流的湍动能 μ^2 耗散标度律 $\epsilon=C_\mu^3/D$ 以及耗散系数 C_ϵ 为常数的基本推论, 并以此作为根基引导了湍流模型的湍流黏性系数模化、大涡模拟的亚格子应力建模、自由剪切湍流自相似解推导以及DNS网格分辨率预估等一系列重要研究。

然而, 由于近年来技术的发展, 实验和数值模拟也发现了耗散系数不为常数的新耗散规律, 这些耗散标度律并不满足原来的平衡能量串级等输运理论, 引起了“非平衡湍流”与“非线性标度律”的研究^[17-19]。湍流的非平衡性(也被称为“非均衡”^[20])正是描述湍动能输运与能量耗散之间的平衡关系。湍流运输由“非平衡”向“平衡”状态转变的特征时间很短, 因此非平衡湍流运输机制可能存在于那些特征时间极短的流动, 比如超高马赫数航天跨域飞行器边界层流动或者航空发动机压气机叶栅高速流动。在非平衡湍流惯性区范围内, 湍流耗散标度律不再满足平衡能量传输规律, 此时耗散系数 C_ϵ 与气体黏性和雷诺数的相关性凸显。能量输运紧跟湍动能变化, 而耗散率变化则相对滞后, 这意味着大尺度的湍动能需要一定时间才能传输到小尺度被耗散, 这就导致了大尺度能量输入仅与经历一段弛豫时间后的小尺度能量耗散保持平衡, 湍流运输表现出明显的非平衡特征。此外, 关于湍流尺度效应研究, 之前学术界更多关注空间上的多尺度, 往往忽略了时间尺度效应。我国学者提出, 需要从时空耦合角度研究湍流的多尺度结构演化, 建立时空多尺度湍流理论和方法^[21], 才能更加全面地认识湍流这复杂流动的基本特性。

湍流特性的研究大致可分为以Taylor、Kolmogorov和周培源等学者领衔的湍流统计理论与以Helmholtz、Lighthill和Landau等学者为代表的湍流结构理论两大学派。前者从概率统计学和完全随机过程出发, 利用统计平均方法、场论等研究湍流, 更多关注小尺度湍流的定量化统计特征; 后者则从完全确定性方程出发, 利用漩涡动力学与涡面场理论^[22-24]、分形理论与分叉理论^[25]等研究湍流, 偏重于湍流结构的定性描述。两个学派的方法论取得了丰硕的研究成果, 但也存在各自难以避免的问题。确定性方法研究有序流动, 统计方法分析随机问题, 但“混沌论”的提出^[26]让人类意识到湍流实际是确定和随机相伴、有序和无序共存。目前, 学术界缺乏结构湍流与统计湍流相结合的理论体系, 以描述湍流这种特殊的输运机理。人类对自然界流动的探索总是从“各向同性”“平衡”“定常”等一般现象到“各向异性”“非平衡”“非定常”等特殊复杂现象不断深入。湍流的“多尺度非平衡输运”这一特

殊存在的能量传输机理, 由于研究对象的复杂度以及研究工具的缺乏所带来的困难, 迄今为止仍是学术界比较前沿新颖的方向。通过何种研究手段更加准确且合理地认识多尺度非平衡湍流运输机制和规律, 将是之后重要的发展方向与热点。

3 跨流域湍流的多尺度非平衡输运

以一个宏观固定尺度的视角观察, 湍流由大大小小同时存在的漩涡构成, 而湍流的最小特征尺度仍属宏观尺度范围, 这是目前湍流研究普遍的空间尺度观点; 而稀薄气体流动的多尺度则与观察视角和气体稀疏程度相关: 随着观察视角由大尺度到小尺度变化, 稀疏气体会逐渐呈现出由宏观波动流动到微观粒子运动两种行为效应的变化。目前, 湍流学界普遍认为, 湍流流动的最小时间和空间尺度都远远大于分子热运动的时间与空间尺度。也就是说, 湍流是在连续介质范畴内宏观流体微团的不规则运动, 湍流运动产生的质量与能量输运远大于分子热运动带来的宏观输运, 这与分子不规则运动存在明显区别^[12,27]。因此, 在经典湍流研究中, 所有尺度的湍流运动完全由基于连续介质假设的NS方程描述。

在湍流统计学中, 往往将湍流的瞬时速度表征为统计平均速度与脉动速度的叠加, 而稀薄气体分子速度则由气体宏观平均速度与分子热运动速度的叠加获得。类比湍流脉动输运, 分子随机热运动也可看作平均运动的脉动输运行为。分子随机脉动作为衡量能量和温度的微观表征, 一定程度上反映着气体内能大小; 湍流脉动衡量瞬时与统计平均量的差异程度, 亦反映着紊流强度和湍动能大小。由湍流脉动产生的平均输运过程和由分子运动产生的稀薄气体输运过程, 表面上是两种不同的物理机制, 具有鲜明的各自特征。尽管如此, 仍不禁思考两者是否存在共性的问题? 是否应该通过变化观察湍流的视角尺寸去追寻湍流更加本质的普适规律?

为了回答这些问题, 自然而然将分子平均自由程 λ 与Kolmogorov空间尺度 η 、分子平均碰撞时间 τ_c 与Kolmogorov时间尺度 τ_η 作比较^[28], 分别引进两个无量纲湍流克努森数 Kn_η 和 Kn_τ , 即 $Kn_\eta=\lambda/\eta\sim Ma/Re_i^{1/4}$ 和 $Kn_\tau=\tau_c/\tau_\eta\sim Ma_i^2/Re_i^{1/2}$, 前参数描述湍流的空间尺度效应, 后者则从时间尺度上表征湍流输运的非平衡效应。这两个参数实际建立了湍流最小涡运动与分子运动的时空比拟桥梁, 用以衡量湍流涡运动的非连续介质粒子效应程度, 与湍流马赫数 Ma_i 和湍流雷诺数 Re_i 相关。对于低 Ma_i 和大 Re_i 的情况, Kolmogorov尺度的确要远远大于微观分子运动的尺度, 这也是绝大多数湍流研究认为分子热运动对湍流脉动带来的影响可以忽略的原因。然而, 当高 Ma_i 和小 Re_i 时, 比如 $Ma_i\sim 10$ 和 $Re_i\sim 10^7$ 范围的流动(这对于空天跨域可重复往返运输的高速飞行器来说是常见的飞行状态), 计算出 $Kn_\eta\sim 0.178$ 和 $Kn_\tau=0.032$ 的大概量级, 若按照钱学森先生的多尺度流域划分, 此时非平衡气体分子输运效应与湍流脉动输运之间的影响就不得不考虑了。早在20世纪五六十年代就有美国学者Betchov意识到分子热运动涨落带来的非平衡输

运会影响到湍流耗散尺度的能谱输运过程^[29]，最近也逐渐得到国内外学者的研究证实^[30-33]。

以大空域(0~100 km)、宽速域(0~25Ma)为主要特征的跨域空天飞行环境从气体分子非连续性效应明显的高空流域大范围跨越到低空稠密大气的连续流域，飞行器局部流动可能呈现连续与非连续多尺度并存、平衡与非平衡相伴的复杂情况，相比航空低速湍流研究，这可能会引发湍流的新问题——跨流域湍流的存在性和特殊性。正如图4所示，美国NASA的飞行试验观测发现飞行器在40 km以上仍可能发生流动失稳转捩^[34]，这超出了边界层转捩高度的传统工程认知。钱学森先生曾以边界层厚度 δ 为观测特征长度，提出考量跨流域边界层演化的克努森数 Kn_δ ，即 $Kn_\delta = \lambda/\delta \sim Ma/Re^{1/2}$ ，也称Tsien参数。Tsien参数能够表征来流非连续介质效应对跨流域边界层厚度演化的影响，为分析跨域空天飞行器边界层演变问题提供了一把尺子。我国周恒院士和张涵信院士曾在2015和2017年发表相关论文^[35,36]，专门就该问题展开讨论，引发深层次的思考。他们在文中指出“分子自由程大到一定程度，

很可能就不再有连续介质中的湍流和转捩问题，而目前我们并不知道其临界值是什么。或即使仍有湍流问题，但湍流的性质和连续介质的湍流性质是否会有明显的不同”，“事实上，也许在一般的湍流和完全没有湍流之间存在一个过渡区，就像从层流到湍流存在一个转捩过程那样。在那个范围内，可能存在既非层流又非充分发展的湍流”。

其实，这里就牵涉到跨流域多尺度非平衡湍流的内涵与内核是什么的问题。跨流域湍流可能是随着跨流域变化时受气体流动的非连续介质效应影响，处于层流与湍流之间的一种中间演变形态，不能简单等同于边界层流动发展过程中由层流到湍流的转捩状态。它可能会表现出既没有连续性湍流一般强的湍流强度和平衡输运机制，同时又展现出层流状态不一样的紊流特性。针对该问题的研究，本质上可以归结为对湍流性质的跨流域演化规律与特殊性的研究，体现在两个方面。第一，随着空域的提升，分子脉动对流动输运的相对贡献增强，湍流脉动的输运贡献则逐渐减弱，但增强的部分与减弱的部分对流动能量输运过程的贡献可能并不平衡。当分

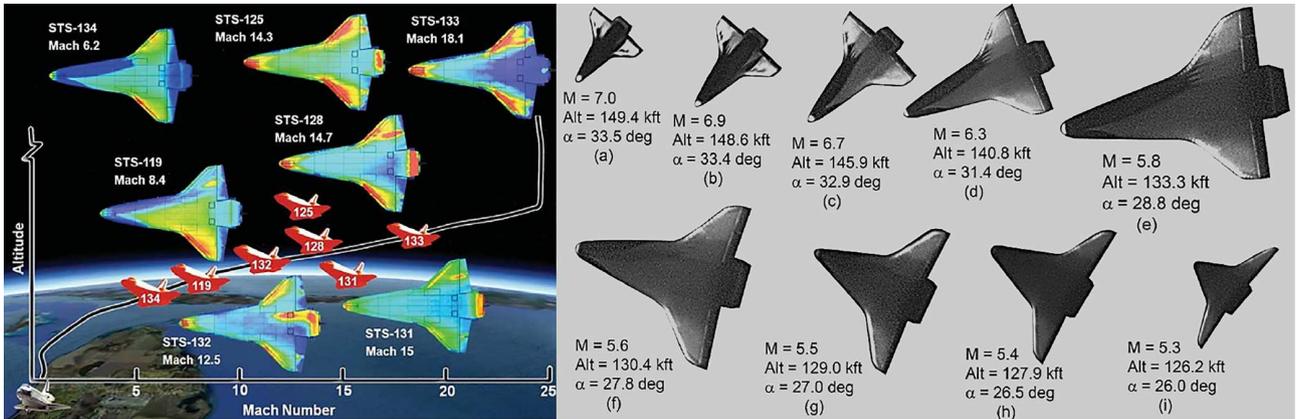


图4 (网络版彩色)跨域空天飞行器不同高空飞行环境下的壁面转捩阵面^[34]

Figure 4 (Color online) The wall boundary transition of a cross-domain aerospace vehicle under different high-altitude flight environments^[34]

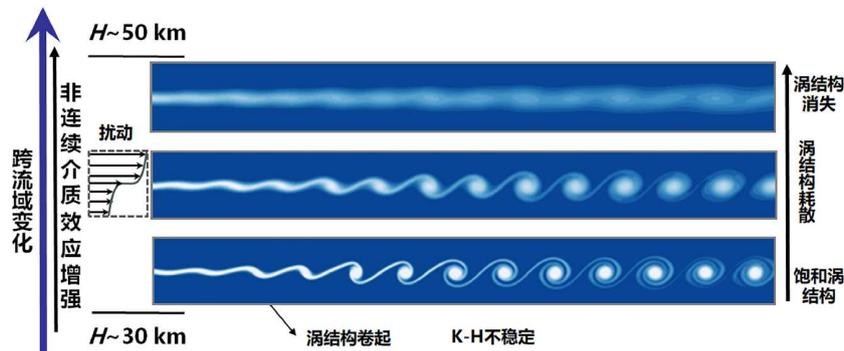


图5 (网络版彩色)跨流域非连续介质效应影响的高低空剪切层流动涡结构演化

Figure 5 (Color online) Evolution of vortex structures in high and low altitude shear layers affected by discontinuous medium effects across flow regimes

子气体输运效率与湍流脉动导致的尺度输运效率处于可比量级时, 其对湍流流动和流涡结构带来的具体影响尚不可知. 由图5不同空域的剪切层流动DNS计算发现, 低空湍流涡结构饱和而丰富, 高空涡结构逐渐耗散并消失. 但由跨空域气体密度变稀疏引起的非连续介质效应, 对边界层、剪切层等流动涡结构演变的定量影响机制仍需进一步探索. 第二, 同一空域下典型小尺度局部流动, 譬如各类非正常强激波干扰、高空边界层黏性底层壁面滑移效应、主动热防护调控的湍流溢气效应、飞行器粗糙凹坑表面效应等, 亦会引起流体连续介质特性失效, 目前这些局部流动结构引发的非平衡效应对湍流统计特征以及涡结构几何形态变化的影响机制是不明确的. 图6展示了最近分别采用基于不同流体输运方程建立的两套直接数值模拟方法, 对激波/湍流边界层干扰问题开展的一些研究工作. 研究发现, $2.25Ma$ 来流状态的激波干扰强度引起的局部非连续效应, 并不足以影响宏观守恒量(譬如速度场)的统计平均场分布, 却会影响一些高阶量(譬如湍动能生成等)的统计平均情况. 这些结果表明, 局部流动的非连续介质效应确实会对湍流的生成与演化产生一定的影响, 采用NS方程以外的非连续介质方法开展跨流域湍流研

究是有必要的.

对于连续介质假设失效的跨流域湍流问题的探索, 既然Boltzmann方程能够实现从非连续介质气体流动到连续介质流动全流域统一描述, 有没有可能借鉴Boltzmann统计学方法及其非连续介质研究手段, 从气体分子或者流体微团相互作用的层面建立其与湍流宏观流动黏性特性的联系, 从而发现更加客观普适的湍流规律^[37-41]? DSMC (direct simulation Monte Carlo)方法作为求解稀薄气体高速流动最为成功的随机粒子方法, 就曾因统计噪声作为扰动源能有效猝发湍流的本身优势而被研究学者用来模拟湍流流动^[32]. 格子Boltzmann方法也因其易于处理复杂边界和并行高效等优点, 在低速不可压流动模拟和湍流统计理论方面的研究中发挥重要作用^[42,43]. 而作为Boltzmann方程的一种渐近求解方法, 宏观矩方法相比前述方法, 可充分利用近几十年来连续介质流体力学现代计算格式的研究成果, 并能够在连续-非连续混合的跨流域中展现出高效的大规模计算效率. 宏观矩方法直接求解Boltzmann方程在粗粒化建模中得到的宏观输运方程, 以此获得分子运动等微观尺度信息在宏观尺度的统计物理量及相应的表征规律. 该方法求解得到与分布函数及分子脉动

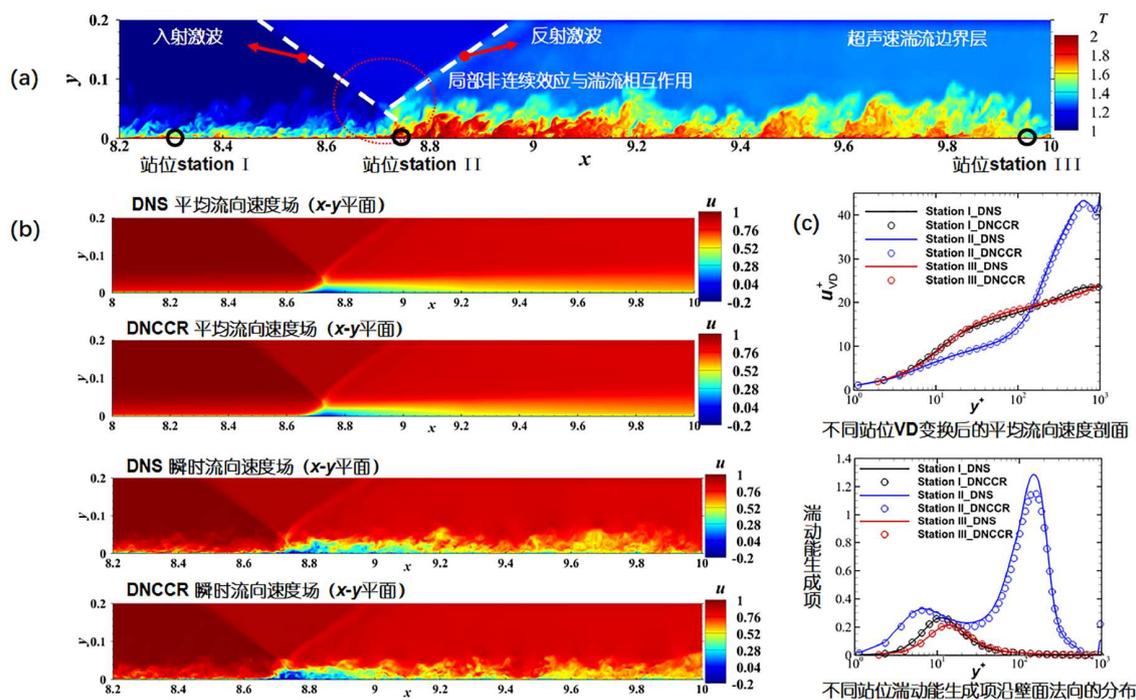


图6 强激波干扰诱发的局部非连续介质效应与 $2.25 Ma$ 超声速湍流边界层相互作用机制. (a) $2.25 Ma$ 超声速激波/湍流边界层流动示意图; (b) DNS/DNCCR预示湍流平均场、瞬时场的直观对比; (c) 局部非连续介质效应影响下不同阶数湍流统计平均量(速度和湍动能生成)的定量分析(DNS代表NS方程的直接数值模拟方法, DNCCR代表基于Boltzmann矩方法建立的直接数值模拟手段)

Figure 6 Mechanisms of interactions between local discontinuous medium effects and the supersonic turbulent boundary layer induced by strong shock interference under Mach 2.25. (a) Schematic of Mach 2.25 supersonic shockwave/turbulent boundary layer flow; (b) visual comparison of turbulent mean and instantaneous fields predicted by DNS/DNCCR; (c) quantitative analysis of turbulence statistical averages of different orders (velocity and turbulent kinetic energy production) affected by local non-continuum effects (DNS represents the direct numerical simulation method based on the Navier-Stokes equations, and DNCCR represents the direct numerical simulation approach based on the Boltzmann moment method)

相关的统计各阶矩,而不是直接得到分布函数本身。实际上,常用的流体力学NS方程组就是Boltzmann方程的一组以流体力学量表示的宏观矩渐近解方程组,而NCCR (nonlinear coupled constitutive relation)模型作为Boltzmann矩方法的另一种高阶渐近解模型,在连续流域有效回归NS本构模型^[44]。NCCR与连续介质NS本构模型的主要区别在于对跨流域非连续性效应引起的物理黏性表征的精度不同,而跨流域湍流统计规律、漩涡结构演化等又与真实气体黏性紧密相关。因此,考虑到理论精度和计算成本以及跨流域湍流的非连续性程度,采用NCCR模型开展跨流域湍流输运机理问题的高精度直接数值模拟研究或许会是一个“较优解”。

另外,对于工程湍流问题的研究,我国周培源先生在1940年就曾基于流体力学NS方程通过统计平均的方法,推导出描述湍流脉动的二/三阶矩方程,后来便逐渐演化成著名的湍流雷诺应力输运方程,开启了现代湍流模式理论的研究工作。类似稀薄气体矩方法,湍流统计理论也存在与湍流脉动相关的各阶矩的概念。在统计方法论上,描述稀薄气体输运的宏观矩方法和刻画湍流输运的雷诺应力方程都是在描述三大物理守恒律的前5个方程基础上,分别增加与(分子、湍流)脉动相关的更高阶量的输运方程,因此自然而然都会遇到方程封闭问题。为了解决封闭问题,宏观矩方法对分布函数形式进行构造建模以建立高阶矩与低阶矩的联系,其中最为著名的两类方法有Chapman-Enskog展开法和Grad矩方法;而湍流模式理论则依靠半理论和半经验相结合,引进一系列模型假设来建立湍流平均量的封闭方程,其中最为著名的方法有普朗特混合长理论、基于Boussinesq线性涡黏性假设的各类湍流模型以及二/三阶矩模式^[45,46]。Boussinesq线性涡黏模式实际上是借鉴了由宏观唯象论建立起来的牛顿黏性定律和傅里叶热传导定律的线性NS本构建模过程,而二/三阶矩模式则与高阶矩方程构造类似。因此,是否可以结合Boltzmann宏观矩方法和湍流模式理论的思想,发展出一套研究跨流域非连续介质湍流输运性质与漩涡结构形态演化的新方法,这启发大家进一步的思考和探索。

4 未来挑战

稀薄气体流动和湍流都是典型的远离平衡态的非线性复杂流动系统,它们的多尺度流动和非平衡输运机制具有鲜明的个性特征,也可能存在交叉的共性联系。对于稀薄气体流动的描述,自从Boltzmann方程的建立就已经为稀薄气体动力学发展指明了方向,然而现阶段的最大困难和问题是缺

乏一种工程可用的同时兼顾计算成本和精度的稀薄流模型和算法,以及如何将这些模型和算法更加可靠有效地应用到航空航天领域,解决实际复杂工程遇到的气动关键技术问题。相比较而言,正如美国物理学家费曼所说,湍流仍是经典物理学历经百年仍未解决的流体力学难题,人类对其的认知仍不足以从根本上认清湍流底层流动物理的本质。尽管最近对湍流研究取得了丰硕的成果,但是描述湍流动力学的理论体系仍不够完备。

目前,湍流理论大部分是在连续介质体系成立的NS本构方程理论上,研究湍流的多尺度涡结构形态与演化、时空输运物理规律或者统计特性。然而,当所研究的流体连续性失效时,三大守恒方程中的剪切应力和热流不再由宏观唯象论建立起来的线性牛顿黏性定律和线性傅里叶热传导定律(即线性NS本构关系)表征。在这种情况下,以往发现的湍流耗散标度律和能谱-5/3定律是否失效、壁湍流对数律是否仍能满足、湍流漩涡结构是否产生差异性变化等,这些都给研究提出了新的科学问题^[33]。受限于连续介质流动的理论框架和现代计算资源规模,目前大部分研究往往不会考虑跨流域变化(包括空域、速域的变化)以及局部流动连续性失效对湍流输运及漩涡结构形态演变的影响。对于跨流域非连续介质效应影响下湍流非平衡输运机制及漩涡形态演变等新问题的认知匮乏,无助于之后对跨流域湍流的模型构建和高精确预示。

中国科协2024年这个前沿科学问题的提出会引起“跨流域湍流的多尺度非平衡输运问题”的研究热潮,其中可能会孕育三大类未来潜在发展方向:一是基于Boltzmann各类求解算法大规模高精度模拟跨流域湍流,发掘新的湍流物理规律和流动本质,回答以往发现的湍流统计规律在跨流域非连续介质影响下的适用性问题;另一类则借鉴诸如Chapman-Enskog展开等各类Boltzmann方法论,建立多种常用湍流模型的数学关联,从分子运动的微/介观物理底层出发,推导并统一宏观湍流模型的经验系数,期待解决半经验半理论Boussinesq线性涡黏模式的普适性问题;最后一类结合Boltzmann宏观矩方法和湍流雷诺应力输运方程的共同点,构建出适用于跨流域湍流的高阶脉动矩模式方程,提升工程湍流高效模型的预示精度。这三类方向分别瞄准跨流域湍流研究过程中“是什么”(发现新规律)、“为什么”(明确内在联系)和“怎么样”(预示湍流)三个方面,关于这些问题的探讨需要集思广益,期待发挥广大流体力学人和航天航空领域工程师们的集体智慧,共同思考并携手解决。

致谢 感谢香港科技大学徐昆教授(中国科协2024年“多尺度非平衡流动的输运机理”前沿科学问题提出者)的讨论以及中国航天空气动力技术研究院沈清研究员(中国科协2023年“如何实现飞行器在上层大气层机动飞行”前沿科学问题提出者)的交流。感谢张伦与褚凯佟两位博士生的研究工作和供图。感谢国家自然科学基金(92471109, 92271204, 92271114)和漓江专项的资助。

推荐阅读文献

- 1 Boltzmann L. Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. *Sitzungsberichte Akademie Der Wissenschaften*, 1872, 66: 275–370
- 2 Bird G A. *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*. Oxford: Clarendon Press, 1994
- 3 Liu C, Xu K. Direct modeling methodology and its applications in multiscale transport process (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2020, 38: 197–216 [刘畅, 徐昆. 离散时空直接建模思想及其在模拟多尺度运输中的应用. *空气动力学学报*, 2020, 38: 197–216]
- 4 Li Z H, Zhang H X. Study on gas kinetic unified algorithm for flows from rarefied transition to continuum (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2003, (3): 255–266 [李志辉, 张涵信. 稀薄流到连续流的气体运动论统一算法研究. *空气动力学学报*, 2003, (3): 255–266]
- 5 Chen W F, Zhao W W, Jiang Z Z, et al. A review of moment equations for rarefied gas dynamics (in Chinese). *Phys Gases*, 2016, 1: 9–24 [陈伟芳, 赵文文, 江中正, 等. 稀薄气体动力学矩方法研究综述. *气体物理*, 2016, 1: 9–24]
- 6 Reynolds O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Proc R Soc Lond*, 1883, 35: 84–99
- 7 Prandtl L. Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung. In: *Third International Congress of Mathematicians, Heidelberg, 1904*. 484–491
- 8 Chou P Y, Chou R L. 50 Years of turbulence research in China. *Annu Rev Fluid Mech*, 1995, 27: 1–16
- 9 Chou P Y. Modern developments in the theory of turbulence (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 1957, 13: 220–244 [周培源. 湍流理论的近代发展. *物理学报*, 1957, 13: 220–244]
- 10 Yang W. *Basic Issues in Mechanics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2024 [杨卫. 力学基本问题. 北京: 科学出版社, 2024]
- 11 Huang Y N. History of turbulence research in China: Part I - A review of early turbulence research by Chinese scientists (in Chinese). In: *Second National Symposium on the History and Methodology of Mechanics*, 2005. 15–21 [黄永念. 中国湍流研究的发展史: I中国科学家早期湍流研究的回顾. 见: 第二届全国力学史与方法论学术研讨会, 2005. 15–21]
- 12 Tennekes H, Lumley J L. *A First Course in Turbulence*. Cambridge: The MIT Press, 1972
- 13 Richardson L F. *Weather Prediction by Numerical Process*. Bracknell, Cambridge: Cambridge University Press, 1922. 282–284
- 14 Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *C R Acad Sci URSS*, 1941, (30): 301–305
- 15 Onsager L. The distribution of energy in turbulence. *Phys Rev*, 1945: 68–286
- 16 Pope S B. *Turbulent Flows*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 17 Vassilicos J C. Dissipation in turbulent flows. *Annu Rev Fluid Mech*, 2015, 47: 95–114
- 18 Devenport W J, Lowe K T. Equilibrium and non-equilibrium turbulent boundary layers. *Prog Aerospace Sci*, 2022, 131: 100807
- 19 Rubinstein R, Clark T T. “Equilibrium” and “non-equilibrium” turbulence. *Theor Appl Mech Lett*, 2017, 7: 301–305
- 20 Zhao H K, Fang L, Lu L P. Advances in non-equilibrium turbulence research (in Chinese). *Phys Gases*, 2018, 3: 13–26 [赵宏凯, 方乐, 陆利蓬. 非均衡湍流研究进展. *气体物理*, 2018, 3: 13–26]
- 21 He G, Jin G, Yang Y. Space-time correlations and dynamic coupling in turbulent flows. *Annu Rev Fluid Mech*, 2017, 49: 51–70
- 22 Wu J, Ma H, Zhou M. *Vorticity and Vortex Dynamics*. Berlin: Springer, 2006
- 23 Pullin D I, Saffman P G. Vortex dynamics in turbulence. *Annu Rev Fluid Mech*, 1998, 30: 31–51
- 24 Yang Y. Theory and applications of the vortex-surface field (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 483–495 [杨越. 涡面场理论与应用. *科学通报*, 2020, 65: 483–495]
- 25 Landau L D. Stability of tangential discontinuities in compressible fluid. *Doklady Akademil Nauk SSSR*, 1944, (44): 139–142
- 26 Ruelle D, Takens F. On the nature of turbulence. *Communmath Phys*, 1971, 20: 167–192
- 27 Zhang Z S, Cui G X, Xu C X. *Theory and Modeling of Turbulence* (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2005 [张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流理论与模拟-张兆顺. 北京: 清华大学出版社, 2005]
- 28 Corrsin S. Outline of some topics in homogeneous turbulent flow. *J Geophys Res*, 1959, 64: 2134–2150
- 29 Betchov R. On the fine structure of turbulent flows. *J Fluid Mech*, 1957, 3: 205–216
- 30 Ma Q, Yang C, Chen S, et al. Effect of thermal fluctuations on spectra and predictability in compressible decaying isotropic turbulence. *J Fluid Mech*, 2024, 987: A29
- 31 Bell J B, Nonaka A, Garcia A L, et al. Thermal fluctuations in the dissipation range of homogeneous isotropic turbulence. *J Fluid Mech*, 2022, 939: A12
- 32 Gallis M A, Bitter N P, Koehler T P, et al. Molecular-level simulations of turbulence and its decay. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 64501
- 33 McMullen R M, Krygier M C, Torczynski J R, et al. Navier-Stokes equations do not describe the smallest scales of turbulence in gases. *Phys Rev*

- Lett, 2022, 128: 114501
- 34 Horvath T J, Zalameda J N, Wood W A, et al. Global infrared observations of roughness induced transition on the space shuttle orbiter. In: Meeting on Hypersonic Laminar-Turbulent Transition, 2012. No. NF1676L-13455
- 35 Zhou H, Zhang H X. New problems of aerodynamics (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 109–113 [周恒, 张涵信. 空气动力学的新问题. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45: 109–113]
- 36 Zhou H, Zhang H X. Two problems in the transition and turbulence for near space hypersonic flying vehicles (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2017, 35: 151–155 [周恒, 张涵信. 有关近空间高超声速飞行器边界层转捩和湍流的两个问题. *空气动力学学报*, 2017, 35: 151–155]
- 37 Chen H, Kandasamy S, Orszag S, et al. Extended Boltzmann kinetic equation for turbulent flows. *Science*, 2003, 301: 633–636
- 38 Chen H, Orszag S A, Staroselsky I, et al. Expanded analogy between Boltzmann kinetic theory of fluids and turbulence. *J Fluid Mech*, 2004, 519: 301–314
- 39 She Z S. Modified Chapman-Enskog expansion: A new way to treat divergent series. *Chin Phys B*, 2017, 26: 080501
- 40 Chen T Q. On the Hilbert-Enskog-Chapman expansion in kinetic theory of turbulence (in Chinese). *J Inner Mongolia Univ (Nat Sci Ed)*, 1979, (2): 145–146 [陈天权. 湍流运动论中的Hilbert-Enskog-Chapman展开(I). *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 1979, (2): 145–146]
- 41 Aaqilatu. Hilbert-Enskog-Chapman expansion in the turbulent kinetic theory of mixture of gases (in Chinese). *J Inner Mongolia Univ (Nat Sci Ed)*, 1982, (4): 379–404 [阿其拉图. 混合气体湍流运动论中的Hilbert-Enskog-Chapman展开. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 1982, (4): 379–404]
- 42 Chen S, Doolen G D. Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annu Rev Fluid Mech*, 1998, 30: 329–364
- 43 He Y L, Wang Y, Li Q. Lattice Boltzmann Method: Theory and Applications (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [何雅玲, 王勇, 李庆. 格子Boltzmann方法的理论及应用. 北京: 科学出版社, 2009]
- 44 Yuan Z Y, Chen W F, Jiang Z Z, et al. Advance in nonlinear coupled constitutive relations for rarefied gas flows (in Chinese). *Phys Gases*, 2022, 7: 1–15 [袁震宇, 陈伟芳, 江中正, 等. 稀薄气体流动非线性耦合本构关系研究进展. *气体物理*, 2022, 7: 1–15]
- 45 Fu S, Wang L. Theory of Turbulence Modelling (in Chinese). Beijing: Science Press, 2023 [符松, 王亮. 湍流模式理论. 北京: 科学出版社, 2023]
- 46 Liu P Q. Turbulent Model Theory (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [刘沛清. 湍流模式理论. 北京: 科学出版社, 2020]

Summary for “稀薄气体/湍流的多尺度非平衡输运机理”

The multiscale nonequilibrium transport mechanism of rarefied gas and turbulence

Zhongzheng Jiang^{1,2,3} & Weifang Chen^{1,3*}

¹ School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

² Advanced Technology Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

³ Advanced Aircraft Research Center, Huanjiang Laboratory, Zhuji 311800, China

* Corresponding author, E-mail: chenwfnudt@163.com

At the main forum of the 26th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology (CAST), the association released the “Top Ten Frontier Scientific Questions of 2024”. Among them, the “Transport Mechanism of Multiscale Nonequilibrium Flows” recommended by the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, was successfully selected. This issue focuses on two classical gas flow phenomena—“rarefied gas flow” and “turbulence,” both of which exhibit distinct multiscale effects and nonequilibrium transport characteristics. Rarefied gas flows primarily occur in high-altitude environments with sparse gas density, where the classical continuum hypothesis gradually fails, leading to the coexistence of continuous and rarefied multi-domain gas flow features. This phenomenon reflects the multiscale transport effects ranging from macroscopic waves to microscopic particles. Insufficient molecular collisions in rarefied gases hinder the flow’s transition from nonequilibrium to equilibrium states, resulting in intense nonequilibrium transport processes. Turbulence, in contrast, is composed of vortices of various frequencies, scales, and energies, forming a complex nonlinear nonequilibrium flow system with distinct hierarchical vortex structures and energy cascade transport characteristics, which are widely observed in nature and engineering.

This paper interprets CAST’s recently proposed frontier scientific question by exploring the fundamental characteristics of multiscale nonequilibrium transport mechanisms in rarefied gas flows and turbulence, examining relevant research methodologies, and analyzing the key challenges and focal issues in each area. The main content of the paper is organized into four sections. The first three sections delve into the topics of “Multiscale Nonequilibrium Transport in Rarefied Gas Flows”, “Multiscale Nonequilibrium Transport in Turbulence”, and “Cross-Domain Turbulence with Multiscale Nonequilibrium Transport”, respectively, with the final section addressing future challenges and potential research directions. The first section begins by discussing the “nonequilibrium” and “multiscale” characteristics of molecular motion in gas flows, highlighting the failure of the continuum hypothesis in rarefied environments and the limitations of the traditional Navier-Stokes (NS) equations, leading to the introduction of the Boltzmann equation as a core approach for rarefied gas dynamics and its three main solution methods. The second section reviews key findings, the development history, and schools of thought in turbulence research, from “multiscale transport”, “energy cascade and dissipation”, to “nonequilibrium turbulence”. The third section focuses on the emerging topic of “cross-domain turbulence” in aerospace, resulting from the interaction between rarefied gas and turbulence effects. By examining the similarities and differences between molecular and turbulent pulsations, as well as their cross-domain multiscale evolution and interaction, this section explores potential commonalities between these distinct physical transport mechanisms and provides insights into potential solutions for cross-domain non-continuum turbulence. Finally, the paper addresses the challenges posed by the cross-domain turbulence research in situations where the continuum hypothesis does not hold. Building on the commonalities of rarefied gas/turbulence and their statistical methodologies, it proposes three potential future research directions in cross-domain turbulence, aiming to answer the questions of “What?” (discover new laws), “Why?” (clarify intrinsic connections), and “How?” (predict turbulence). This raises the question of whether the Boltzmann methods and techniques for non-continuum media research could be applied to model the cross-domain turbulence and discover more general turbulence laws.

nonequilibrium turbulence, rarefied gas, continuum hypothesis breakdown, multiscale effect, Boltzmann methods

doi: [10.1360/TB-2024-0876](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0876)