

热对流的稳定性和数值模拟

孙德军, 万振华

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽合肥 230027, Email: dsun@ustc.edu.cn)

摘要: 热对流是自然界和工程应用中的常见现象, 相关流动的稳定性与湍流是流体力学研究的重要问题。近年来, 我们在 Rayleigh-Bénard 对流的线性和弱非线性稳定性、湍流热对流数值模拟等方面开展了研究。针对圆筒内 Rayleigh-Bénard 对流的不稳定性, 得到了轴对称对流的稳定性边界, 发现了二次分叉之外仍存在稳定的非平凡轴对称解, 并采用能量分析方法解释了失稳特性的成因。研究了侧壁加热时圆筒内热对流不稳定性 Prandtl 数的依赖性, 揭示了小 Prandtl 数时的剪切不稳定性机制、大 Prandtl 数时的浮力不稳定性机制, 在中等 Prandtl 数时流动失稳的剪切机制与浮力机制存在相互竞争。针对非 Oberbeck-Boussinesq 假设 (NOB) 效应对二维方腔热对流线性和弱非线性不稳定性的影响, NOB 效应强度由无量纲温差 ϵ 衡量, 研究表明 NOB 效应对临界 Rayleigh 数 (Ra) 和扰动增长率的首阶修正正比于 ϵ^2 , 宽方腔中 NOB 效应会增强流动稳定性, 而窄方腔中会减弱稳定性, 并通过能量分析定量考察了可压缩性、黏性和浮力作用对扰动动能增长的贡献。通过弱非线性分析和直接数值模拟研究了 NOB 效应对分叉过程的影响, 发现了丰富的分叉过程。在快速旋转球壳中, 采用完全可压缩方程研究了热对流的首次失稳, 发现了一种新的准地转模态, 并证明了传统的滞弹模型在低 Ra 数、强可压缩条件下会失效。基于直接数值模拟研究了湍流方腔热对流的流动反转现象, 结果表明倾斜效应对反转发生具有双重作用, 在常规单涡反转中倾斜会抑制反转, 而在双涡反转中倾斜起促进作用。此外, 在具有 NOB 效应对流系统中发现了一类新的反转模式, 并从涡动力学角度解释了该反转的触发机制。最后, 基于数值模拟系统地研究了贯穿湍流 Rayleigh-Bénard 对流, 首次给出了系统中中心温度偏移量、动能输运效率等与密度倒置参数间的统一规律。

关键词: 对流; 稳定性; 数值模拟; 非 Oberbeck-Boussinesq 效应; 弱非线性

Stability and numerical simulation of thermal convection

SUN De-jun, WAN Zhen-hua

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Email:

dsun@ustc.edu.cn)