螺控湍流压缩性研究取得进展

作者：杨焱　2022-04-24 17:04

如何从最基本的统计动力学出发控制湍流是长期以来湍流和流体力学理论中的一个基础性问题，同时对于应用基础研究有重要价值，其中对称性在物理学和力学基本理论中均具有根本性意义。近日，力学所高温气体动力学国家重点实验室杨焱副研究员与南京市高淳区速诚基础与交叉科学研究中心首席科学家朱建州博士合作，从对称性原理出发，在螺度控制湍流压缩性方面取得了进展。

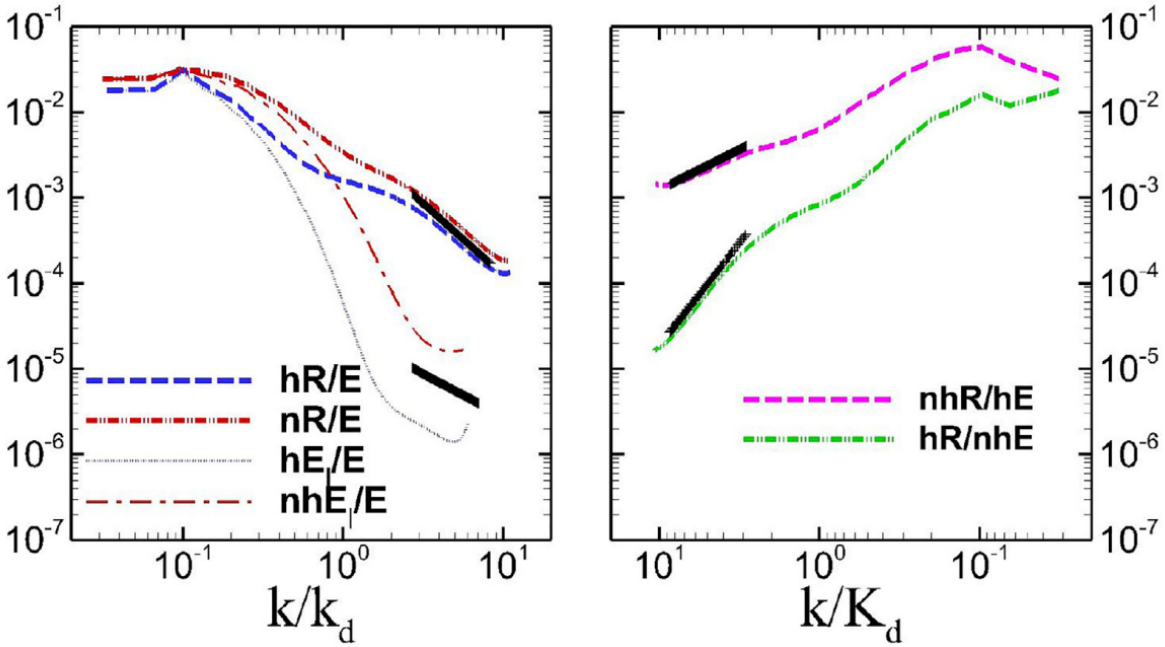
自上世纪六十年代起，R. Betchov，K. Moffatt, R. Kraichnan和U. Frisch等学者就意识到螺度是流动手性（宇称）的度量，也是理想流动的不变量，可能有潜在的重要的湍流动力学效应。但是由于湍流问题极为困难，没有精确的解析解，至今未见报道有效地将螺度应用于流动控制而产生工程系统收益。朱建州于2016年(Zhu, J. Fluid Mech., 787:440, 2016)根据统计物理计算分析，推测可压缩湍流中螺度可能会有显著的“降噪”效果，并从“手性基本流”出发，发展为“螺控湍流压缩性”（“螺控声”）或“螺度扎紧流动”的理论，且能较普遍地扩展到等离子体和其它介质，包括可能的量子流体 (Zhu, Phys. Plasmas, 28:032302, 2021)，其

形象的类比为：如同螺钉比无螺纹直钉更能起到紧固效果，或细致缠绕比随意绑缚的绳子更能紧绑物体，流动的螺度也有类似的几何学或力学效果，可能抑制湍流压缩性相关模态（包括纵模态或声模态）的涨落强度。

另一方面，虽然Kolmogorov的“湍流普适平衡区”概念常常被视为现代湍流理论的基石。这里“普适”表示“统计特征（如能谱形状）不依赖于外力形式和/或初始条件”。但是，Frisch和Morf在1981年从复奇点性质出发考虑，对湍流耗散区的普适性提出质疑(Frisch and Morf, Phys. Rev. A, 23:2673, 1981)，并在专著《湍流----Kolmogorov的遗产》（1995）中再度强调；但是此前并无明显证据支持或否定该质疑，大量发表的物理实验、数值和理论工作试图确定普适的耗散区能谱，至今亦无共识。

相关研究工作从2016年开始，经过反复研讨和分析，相关成果于近期发表在流体力学重要期刊Physics of Fluids。论文首次在充分发展湍流中对前述理论猜想和质疑给出显著性的支持性数据，并且将二者联系起来：数据分析暗示“螺度扎紧流动”是由于螺度有效地降低了复奇点的强度，从而导致耗散区能谱的前置代数因子中非普适地依赖于螺度（注入）的幂指数。该工作的结论基于进一步的理论论据、10243空间格点的直接数值模拟和新发展的数据分析方法，可启发一系列数值模拟和实验研究，以及相关流动控制的工程应用。

该研究工作得到国家自然科学基金(11672102, 11602277)支持。



图：功率谱比值--耗散区体现非普适（依赖于螺度）的幂律

论文链接: https://doi.org/10.1063/5.0089333 (https://doi.org/10.1063/5.0089333)。

中国科学院 CHINESE ACADEMY OF SCIENCES (http://www.cas.cn)
中国科学院力学研究所 版权所有　京ICP备05002803号　京公网安备110402500049
地址：北京市北四环西路15号　邮编：100190
(http://bszs.conac.cn/sitename?method=show&id=081D2D6355AD574EE053022819ACCBA7)