



研究述评

【按语: 本期发表的这篇述评论文, 作者统观湍流研究历程, 评议了不同研究方法和途径的长短异同. 学术界或也会有不同见解, 但本刊相信这篇论文能引起同行注意和深思. 倘有与之见解相左的稿件, 只要有益于同行间的交流切磋启迪思考, 本刊亦将予以发表.】

号称经典物理留下的世纪难题“湍流问题”的实质是什么?[†]

周恒^{①*}, 张涵信^②

① 天津大学机械工程学院, 天津 300072;

② 国家计算流体力学实验室, 中国空气动力研究与发展中心, 北京 100191

*联系人, E-mail: hzhou1@tju.edu.cn

†周恒院士供稿

收稿日期: 2011-12-09; 接受日期: 2011-12-10; 网络出版日期: 2011-12-22

摘要 一直以来, 湍流都被认为是经典物理留下的世纪难题, 因而也被认为是一个重大的基础科学问题. 本文简单回顾湍流研究历史, 分析了均匀各向同性湍流的研究和真实湍流的研究间为何存在鸿沟. 为何前者不能解决真实湍流问题, 而后者则是今后应重点开展的湍流基础研究, 和如何逐步解决真实的湍流问题. 在结论中提出了今后湍流研究中值得注意的几个方面.

关键词 壁湍流, 边界层湍流, 相干结构, 均匀各向同性湍流

PACS: 47.27.N-, 47.27.nb, 47.27.De, 47.27.Gs

doi: 10.1360/132011-1231

一直以来, 湍流都被认为是经典物理留下的世纪难题, 因而也被认为是一个重大的基础科学问题. 当今不少人认为, 对均匀各向同性湍流的研究是湍流基础研究, 而对真实湍流的研究, 因其理论还不够完善, 要依赖实验, 因而是应用研究. 但分析湍流研究的历史发现, 对均匀各向同性湍流的研究, 并没有解决湍流这一经典难题. 今后湍流研究的主攻方向, 无论是基础研究还是应用研究, 都应该围绕真实湍流而进行. 不弄清楚这两点, 湍流问题不仅会是“百

年难题”, 也许还会在更长的时间里困惑我们. 在本文中, 我们将试图对其进行分析说明.

1 湍流研究历史的简单回顾

我们先简单地回顾一下湍流研究的历史.

英国的雷诺于 1883 年做了有名的实验, 发现管中的流动有两种截然不同的流态, 即层流和湍流. 从此湍流正式成为一个科学问题. 从一开始, 它就包含

引用格式: 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: 1-5
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: 1-5, doi: 10.1360/132011-1231

两个基本问题: 一个是什么条件下, 层流会变成湍流; 一个是湍流的本质是什么, 或它有什么基本规律. 前者引发了流动稳定性的研究, 后者则引发了湍流研究.

湍流的系统研究开始于 20 世纪 20 年代, 一开始就有两个不同的方向. 一个以现代流体力学之父, 德国的普朗特为代表, 他始终关心的是真实的湍流, 如管道中的湍流, 以及对实际问题更重要的边界层湍流等.

另一个以英国的有名流体力学家泰勒为代表, 他提出一个湍流的理想模型, 作为湍流研究的出发点. 认为这样可以在更基本的层面上了解湍流的本质. 后者常常被认为代表了湍流基础研究的方向, 而前者则更接近于工程实际.

泰勒采用的是看起来很合理的研究方法, 即由浅入深或由简到繁, 在 1935 和 1936 年, 在 *Proceeding of Royal Society* 上, 以“Statistical Theory of Turbulence I-V”为题, 连续发表了 5 篇文章. 其中提出了湍流的理想模型, 即均匀各向同性湍流^[1]. 它假设湍流的脉动部分的统计性质在坐标系的平移和旋转下不变. 这样的模型的确是最简单的了, 立刻吸引了众多的研究者, 而且不仅是流体力学家, 还有物理学家和应用数学家. 到现在为止, 围绕这一问题所发表的论文不计其数.

普朗特则始终把注意力放在了如何解决真实湍流的问题, 在 1925 年提出了有名的混合长理论, 是现代湍流近似计算的第一个湍流模式. 他从来不把湍流问题孤立出来研究, 而总是从它对解决工程实际问题的重要性出发来考虑问题^[2]. 其研究方法的特点是, 直接针对某一类有重要意义的真实湍流, 分析其主要的流动特性, 提出便于计算的物理模型, 以解决湍流的计算问题. 沿着这一解决真实湍流问题的方向, 也形成了一个更为庞大的研究队伍. 他们在真实湍流的本质问题、实验方法、计算方法等各个方面做了大量的工作.

有意思的是, 在 20 世纪最有名的流体力学家, 如普朗特、冯·卡门、钱学森等中, 普朗特和钱学森从来没有从事过均匀各向同性湍流的研究. 冯·卡门在 1937–1938 年, 以及第二次世界大战后的短期内, 从事过这类湍流的研究, 但 1951 年后, 就转而研究其他更有实际意义的问题了^[3]. 就连泰勒本人, 在

1938 年以后, 也不再研究这一问题, 而把主要精力放在了其他流动问题上^[1]. 而客观公正地讲, 泰勒本人终其一生, 主要兴趣还都是在研究真实的流动问题, 包括与原子弹有关的爆炸波等. 他之提出均匀各向同性湍流这一模型, 可能还是受了当时认识水平的限制. 当时把湍流的随机脉动当成了流动的一种物性, 就如气体中的分子运动一样.

值得注意的是, 在第二次世界大战后不久, 这两个方向上的研究渐行渐远, 现在已令人感觉到存在很深的“鸿沟”^[4]. 而实际上, 针对均匀各向同性湍流研究所得的被认为是很重要的成果, 的确对真实湍流问题的解决, 很难起到重要作用. 北京大学的流体力学教授是勋刚(已故)曾专攻均匀各向同性湍流. 在他主编的《湍流》(1994)一书中, 撰写了“湍流统计理论”(就是均匀各向同性湍流)一章. 在该章最后, 他写到“即使各向同性湍流的统计理论得到了满意的解答, 要将有关理论、方法与结果推广到各向异性的一般湍流中去, 其困难和复杂程度, 似乎比登天还难, 使人望而生畏.”^[5] 这是为什么, 是一个必须认真思考的问题.

2 对均匀各向同性湍流的研究, 不能解决真实湍流问题的原因

所谓的真实湍流问题, 并不仅限于工程技术中的湍流, 而是指一切客观存在的湍流, 如大气、海洋、江河中的湍流等.

均匀各向同性湍流是为了研究湍流而提出的一个简化的理想模型. 但问题在于, 均匀各向同性湍流这一简化的湍流理想模型, 是保留了问题的本质部分, 还是在简化过程中, 把问题的本质部分也简化掉了.

均匀各向同性湍流的均匀和各向同性的假设, 决定了流场的平均流速不能有剪切, 流场也不能有边界. 因为有剪切就不能是各向同性, 而即使的确没有剪切, 在边界处显然也不能满足各向同性. 而没有边界, 就意味着流体与外界没有相互作用. 因此, 这种流动是一个封闭系统的演化. 而由于流体黏性的作用, 表征湍流本质的脉动必然逐步衰减而无法维持.

而一切真实的湍流都和外界有相互作用, 即它是一个开放系统. 而和外部的相互作用导致的内部剪切, 即流速的不均匀, 或温度差, 即温度的不均匀

等,正是湍流脉动,而且是大尺度脉动产生的原因.这才使得层流在一定条件下得以变成湍流,以及湍流产生后,虽然由于黏性的作用,湍流脉动能量会耗散,但同时上述的湍流生成机制会不断产生新的脉动,从而使得湍流得以维持.

均匀各向同性湍流和真实湍流要说有什么共同点的话,那只是在小尺度脉动上.而对大尺度脉动而言,均匀各向同性湍流既不能提供其生成机制,也不能提供其存在的形式,因为其存在形式取决于流动与外界的相互作用.而对真实湍流而言,大尺度脉动的形式和强度决定了湍流的性质,小尺度脉动起的作用远不如大尺度脉动重要.既然湍流脉动的形式和强度都取决于流动与外界的相互作用,湍流脉动就不是流体的物性,而是在外部条件制约下的流体运动的一种状态.而湍流的特性取决于流动和外界的相互作用这一点,也就决定了仅研究小尺度脉动的湍流问题不是一个能揭示湍流本质的问题.

由于均匀各向同性湍流这一理想模型没有保留真实湍流的本质,也就决定了对其研究不能提供对解决真实湍流问题最有用的结果.因此,两个湍流研究方向上的“鸿沟”,也就可以理解了.由此可见,对均匀各向同性湍流的研究没有解决湍流的“难题”,因此今后的湍流研究重点,应该放在对真实湍流的研究上.

我们还可以从数学家所熟悉的动力系统观点来说明为何对均匀各向同性湍流的研究,无助于解决真实湍流的问题.从现有的结果看,只要网格点足够多,用数值求解 Navier-Stokes 方程的方法计算湍流,所得结果与可靠的实验结果没有系统误差.只是对于实际问题,如计算飞机全部边界层的湍流,所需网格点可能需要千亿个甚至更多而已.因此,无论是均匀各向同性湍流还是真实湍流,都可以认为是一个有限(但数量可以很大)自由度的动力系统,而系统的变量则是各个网格点的湍流脉动速度¹⁾.若网格点数为 N ,则其相空间的维数为 $3N$.相空间中的每一个点代表系统(即流场)在某时刻的一种状态.但由于流场必须满足连续性方程,所以真正能代表一个真实流

场的点,是处于 $3N$ 维空间中的一个 $2N$ 维子空间内.再考虑到边界网格点上要满足一定的条件,如果总的边界条件数为 s ,则子空间的维数应该是 $2N-s$.每一个具体湍流的演化,则由该 $2N-s$ 维子空间中的一条曲线所代表.坐标原点则代表一个静止态,或不动点.对均匀各向同性湍流而言,相空间是无限大的.由于均匀各向同性湍流没有产生湍能的功能,但湍能却要不断衰减,因此无论从相空间的何处出发,最终都要回到原点.即相空间中有唯一的不动点,此不动点是一个吸引子,其吸引范围遍及全部相空间.而对实际湍流而言,原点也是一个不动点(实际代表的是没有脉动的层流状态),代表所有湍能都衰减了的结果.但实际湍流有湍能生成机制,因而相轨迹不会回到原点,而是围绕一个奇怪吸引子运行.我们虽然不确切知道该奇怪吸引子的全部性质,但从湍流直接数值模拟结果,不难知道它在相空间的大体位置.一般来说,真实湍流的相空间原点是一个不稳定的不动点.但对于某些问题,如雷诺数较小时,该点可能是一个稳定的点,有一个吸引区,但该吸引区很小,因此实际不起作用.由此可见,代表均匀各向同性湍流的动力系统,和代表真实湍流的动力系统,是两个本质上不相同的系统.对均匀各向同性湍流的研究,难以对真实湍流起作用,也就不足为怪了.

3 湍流研究应如何进行

湍流的研究可以分为基础研究和应用基础研究两部分.其基础研究不仅包括诸如为何其特性取决于大尺度脉动,大尺度脉动如何取决于流动和外部的相互作用,大尺度脉动和平均流的定量关系等,还可以包括诸如当运动产生多尺度脉动结构后,如何在宏观层次上出现新的涌现结构.这是当代复杂系统科学中的热点问题.如能通过对湍流的研究而有所突破,则更能体现湍流基础研究的意义.但这类湍流的基础研究,应该针对真实湍流问题来进行.过去从事这些研究的人们,已通过大量的实验(包括创造新的实验方法和相应的仪器设备)、计算(包括湍流的

1) 严格讲,对均匀各向同性湍流是无法做直接数值模拟的,因为流动充满了整个空间,需要无穷多个网格点.目前采取的简化方法是,切取空间中的一个正立方体,而在三个方向上都取周期性边界条件.显然,这样的流动,在空间上出现了周期性,也就违反了均匀性的条件,在波数空间里也不可能出现波长大于方块边长的波.而且,由于所有的均匀各向同性湍流都会衰减.为了在计算中不出现衰减,往往要假设存在某种随机的体积力.这都限制了计算结果的真实性.

直接数值模拟), 发现了很多真实湍流的基本现象. 如真实湍流中都有非完全随机的拟序结构. 不同的湍流, 如由剪切导致的管道湍流和边界层湍流, 和由温度差导致的热对流湍流, 其流动中的拟序结构的特性就很不相同. 又如在有重要实际意义的壁湍流, 即有固壁的湍流, 如管道湍流、边界层(包括大气边界层)湍流等中, 在与壁面垂直的方向, 可以分成几层, 每一层都有不同的动力学机制, 如此等等. 对这些现象, 通过多年的实验、计算和理论分析, 也都提出了相应的理论模型或解释. 这些能使我们对真实湍流有更深了解的研究, 是对真实湍流的基础研究. 而在这些研究基础上提出为解决真实湍流计算的各种模式, 则是湍流的应用基础研究.

既然用直接解 Navier-Stokes 方程的方法可以计算湍流, 包括其统计特性, 从这一最基本的层面来说, 湍流是有解的. 即经典物理的难题是有解的. 但从另一层面上来说, 人们希望能用更简便的方法, 或解简化了的方程以得到湍流的某些统计平均量, 这就出现了目前大家所理解的湍流问题. 这一“难题”仍需进一步研究. 特别是工程技术中常遇到的非平衡湍流, 还是一个目前湍流基础研究中尚未系统开展研究的更困难的问题.

在结合真实湍流研究时, 由于流动与外界的相互作用是多种多样的, 使得湍流问题看起来极为复杂, 恐怕不能指望找到一个普适的规律, 而只能根据与外界的相互作用的性质, 分门别类地建构相应的适合于某一类湍流的规律或模式. 而基础研究的进展, 会使得分类有更可靠的依据, 也可能使得同一类

中可以包括更广泛的内涵.

4 结论

综上所述, 不难得到以下结论:

(1) 对均匀各向同性湍流的研究, 不能解决经典物理留下的难题. 从物理层面上讲, 用 Navier-Stokes 方程可求得湍流的数值解, 湍流的经典难题有了解答. 但从宏观层面上来看, 真实湍流基础研究的难题依然存在.

(2) 真实湍流情况很复杂, 除了通过直接解 N-S 方程这一方法外, 不存在普适的简化计算解法. 而目前受计算机能力及计算方法的限制, 又还必须寻找湍流的简化计算方法. 这是当前湍流研究面对的主要困难.

(3) 为简化计算, 不可避免地要对复杂的问题提出简化的计算模型. 这时, 在模型中必须保留问题的本质部分. 对这一本质部分的探索, 是湍流基础研究的内容. 否则, 模型无助于解决实际问题. 而对湍流本质的研究, 主要应针对真实湍流进行.

(4) 虽然不能找到普适的简化模型, 但有可能对真实湍流分门别类, 分类提出相应的普适的简化模型. 而实现恰当的分门别类, 同样需要对湍流本质的揭示, 这一揭示无疑也必须针对具体的真实湍流来建立.

(5) 对湍流研究的成果评价, 应以它是否有助于解决真实湍流问题为标准.

(6) 本文虽然对湍流的研究提出了与传统观点不同的看法, 并不影响湍流研究的重要性.

参考文献

- 1 Sreenivasan K R. G. I. Taylor: The inspiration behind the Cambridge School. A Voyage Through Turbulence. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 127-186
- 2 Bodenschatz E, Eckert M. Prandtl and Goettingen School. A Voyage Through Turbulence. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 40-100
- 3 Leonard A, Peters N. Theodore von Karman. A Voyage Through Turbulence. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 101-126
- 4 余振苏. 庄逢甘先生与湍流世纪难题的攻关. 庄逢甘院士纪念文集. 北京: 中国宇航出版社, 2011. 143-150
- 5 是勋刚. 湍流统计理论. 湍流. 天津: 天津大学出版社, 1994. 44-83

What is the essence of the so-called century lasting difficult problem in classic physics, the “problem of turbulence”?[†]

ZHOU Heng^{1*} & ZHANG HanXin²

¹ *School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

² *National Laboratory for Computational Fluid Dynamics, China Aerodynamics Research & Development Center, Beijing 100191, China;*

Turbulence has always been viewed as a century lasting difficult problem in classic physics, hence it is also viewed as a very important basic scientific problem. In this paper, starting from a brief review of the history of turbulence research, we analyze why there seems is a gap separating researches on homogeneous isotropic turbulence and researches on real turbulence, why the former did not make substantial contribution to solving problems of real turbulence, while the latter should be the main focus of the further basic research of turbulence, and how the real turbulence problem can be solved gradually. In conclusions, we list several points worth attention in the turbulence research.

wall bounded turbulence, boundary layer turbulence, coherent structure, homogeneous isotropic turbulence

PACS: 47.27.N-, 47.27.nb, 47.27.De, 47.27.Gs

doi: 10.1360/132011-1231