

浅谈流体力学发展——从Batchelor百年诞辰纪念大会谈起

朱 伟, 王国华

PAST AND FUTURE EVOLUTIONS OF FLUID MECHANICS: THINKING TRIGGERED BY THE BATCHELOR CENTENNIAL EVENT

Zhu Wei and Wang Guohua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-22-531>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

第十届全国流体力学青年研讨会简介

REVIEW OF THE TENTH NATIONAL SYMPOSIUM ON FLUID MECHANICS FOR YOUNG SCHOLARS

力学学报. 2017, 49(6): 1428-1434

“2018流固耦合力学在船舶与海洋新能源中的应用研究领域科学家论坛”学术综述

REVIEW OF THE 2018 SYMPOSIUM ON APPLICATION OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION IN NAVAL ARCHITECTURE AND OFFSHORE RENEWABLE ENERGY

力学学报. 2019, 51(1): 292-297

均匀电场中气泡上升特性的实验研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON RISING BEHAVIOR OF SINGLE BUBBLE UNDER THE EFFECT OF UNIFORM DC ELECTRIC FIELD

力学学报. 2021, 53(10): 2736-2744

第八届全国固体力学青年学者学术研讨会报告综述

A REVIEW OF THE EIGHTH NATIONAL SYMPOSIUM ON SOLID MECHANICS FOR YOUNG SCHOLARS

力学学报. 2019, 51(2): 630-634

第七届全国固体力学青年学者学术研讨会报告综述

REVIEW OF THE SEVENTH NATIONAL SYMPOSIUM ON SOLID MECHANICS FOR YOUNG SCHOLARS

力学学报. 2017, 49(1): 223-230

河渠冰水力学研究进展和趋势

PROGRESS AND TREND IN THE STUDY OF RIVER ICE HYDRAULICS

力学学报. 2021, 53(3): 655-671



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

研究综述

浅谈流体力学发展——从 Batchelor 百年诞辰纪念
大会谈起¹⁾朱 伟 王国华²⁾

(兰州大学湍流-颗粒研究中心, 兰州 730000)

摘要 G.K. Batchelor 是 20 世纪国际流体力学大师, 在均匀湍流理论和低雷诺数微流体力学领域做出了开创性的贡献, 他对流动追求物理和定量性理解的思想影响了近百年流体力学的发展, 是流体力学顶级期刊 *Journal of Fluid Mechanics* 的创刊人, 也是剑桥大学应用数学与理论物理系 (DAMTP) 的创建者, 培养并影响了一大批在流体动力学理论、实验流体力学、湍流及稳定性、环境流体力学、多相流体力学、磁流体力学、微纳米尺度流体动力学等诸多领域建树卓越的学者. 本文以 G.K. Batchelor 诞辰 100 周年纪念活动为契机, 简要回顾了流体力学近 300 年的发展历程. 概述了流体力学发展历经的以数学和物理为基础建立理论框架的经典流体力学、以应用需求为导向促使自身跨越发展的近代流体力学和以学科融合为特点外延丰富的现代流体力学三个重要阶段; 以师承关系、代表性学者及其主要学术贡献为线索, 总结了现代流体力学四大学派的形成及其近百年的传承沿革; 以历史和发展的视角浅谈当代流体力学发展的动力和趋势, 并以风沙环境力学为例, 简述流体力学为分支学科发展提供的支撑和引领作用, 分支学科的需求为流体力学内生发展提供驱动力的螺旋生长关系; 最后是对未来流体力学发展进步和创新的展望.

关键词 Batchelor, 流体力学, 发展历史, 学派, 趋势

中图分类号: O35 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-22-531

PAST AND FUTURE EVOLUTIONS OF FLUID MECHANICS: THINKING TRIGGERED
BY THE BATCHELOR CENTENNIAL EVENT¹⁾Zhu Wei Wang Guohua²⁾

(Center for Particle-Laden Turbulence, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract G.K. Batchelor is one of the giants of fluid mechanics in the in the twentieth century. He had made pioneering contributions in the field of homogeneous turbulence theory and low Reynolds number micro-fluid mechanics. He is the founder of *Journal of Fluid Mechanics*, one of the top journal in the field of fluid mechanics, and the department of applied mathematics and theoretical physics (DAMTP), whose spirit of pursuing physical and quantitative understanding of fluid flows has impressed the development of fluid mechanics in recent 100 years. He has cultivated and influenced a large number of scholars who have made outstanding achievements in numerous subjects of fluid mechanics, including turbulence theory, experimental fluid mechanics, turbulence stability, environmental fluid mechanics, multiphase fluid mechanics, magneto-hydrodynamics, micro- and nano-scale fluid mechanics, etc. Taking the G.K. Batchelor centennial event as an opportunity, this paper briefly reviews the evolution history of fluid mechanics in

2022-11-08 收稿, 2022-12-17 录用, 2022-12-18 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (92052202).

2) 通讯作者: 王国华, 副教授, 主要研究方向为环境流体力学、高雷诺数气固两相流. E-mail: ghwang@lzu.edu.cn

引用格式: 朱伟, 王国华. 浅谈流体力学发展——从 Batchelor 百年诞辰纪念大会谈起. 力学学报, 2023, 55(1): 24-37

Zhu Wei, Wang Guohua. Past and future evolutions of fluid mechanics: Thinking triggered by the Batchelor Centennial event. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(1): 24-37

the past 300 years, including the three important stages of fluid mechanics: classical stage based on solid mathematics and physics foundation, the modern stage driven by application demands, and the contemporary stage characterized by discipline intersection and integration. Special concerns are concentrated on the formation, merging and inheritance of the distinct styles of the four schools in the modern stage of fluid mechanics in the past hundred years from the perspective of outstanding scholars and their key contributions to the discipline. The driving force and trend of the development of contemporary fluid mechanics are discussed taking wind-blown sand environmental mechanics as an example. It shows that fluid mechanics provides the basis for the development of branch disciplines, while the demands of branch disciplines drives the endogenous development of fluid mechanics which forms a spiral growth relationship. Finally, the progress spectrum and innovation trends of fluid mechanics in the future are revealed and discussed.

Key words Batchelor, fluid mechanics, evolution history, schools, trends

引言

为了纪念流体力学界极具传奇色彩的大师 George Keith Batchelor 诞辰 100 周年, 剑桥大学应用数学与理论物理系 (DAMTP) 举办了主题为“Batchelor 精神下的流体力学”的纪念大会. 会议从 2019 年开始筹备, 2021 年 3 月 29—31 日举行, 受到国际理论与应用力学联盟 (IUTAM) 和欧洲力学学会 (EUROMECH) 的资助和高度重视, 邀请了包括 3 位

Batchelor 奖获得者在内的共 6 位在当代流体力学研究非常活跃的前沿领域学者各自介绍其所在领域的研究成果和进展, 中国的郑晓静教授是亚太地区唯一一位受邀的大会报告人. 作为大会的组织者之一, IUTAM 前主席、Batchelor 的学生、流体力学家 Keith Moffatt 教授为大会手册设计了一张封面 (图 1), 列出了近 300 年为流体力学发展做出杰出贡献的 150 位学者. 这 150 位学者中有 115 位男性、35 位女性, 已故学者 34 位, 仍在世的学者 116 位; 从国籍

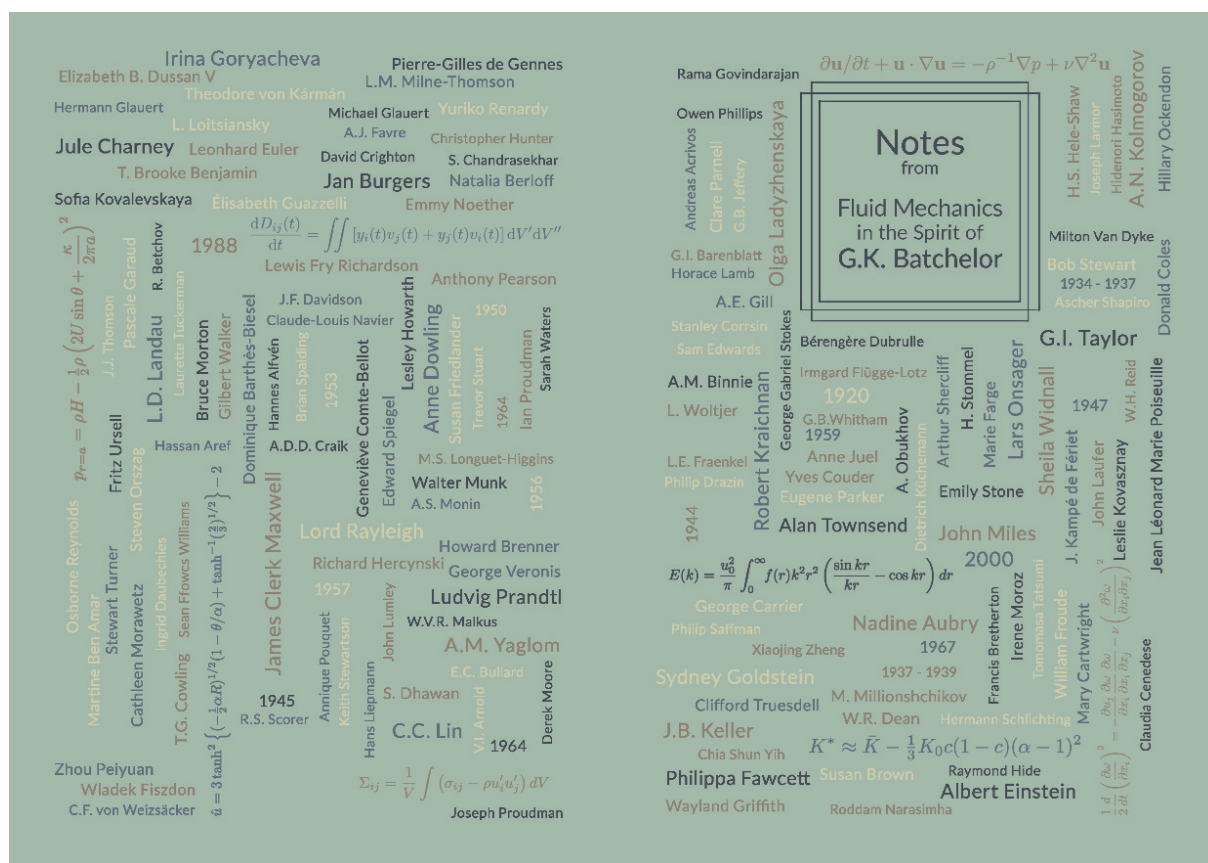


图 1 “Batchelor 精神下的流体力学”纪念大会手册封面 (由 Keith Moffatt 教授设计并提供)

Fig. 1 The notebook cover of the Batchelor's Centennial Symposium “Fluid Mechanics in the Spirit of G.K. Batchelor” (designed and provided by Prof. Keith Moffatt)

看包括英国及英联邦国家学者 58 位, 北美 (美国、加拿大) 学者 45 位, 欧盟国家学者 27 位, 俄罗斯学者 13 位, 亚洲学者 7 位分别是 3 位印度学者、2 位日本学者和 2 位中国学者. 其中包括理论流体动力学的奠基人欧拉 (Leonhard Euler), 首次导出黏性流体运动基本方程的纳维 (Claude-Louis Navier) 和斯托克斯 (George Gabriel Stokes); 在流体力学理论体系中开宗立派的大师普朗特 (Ludvig Prandtl)、泰勒 (Geoffrey Ingram Taylor)、冯·卡门 (Theodore von Karman)、柯尔莫哥洛夫 (Andrey Nikolaevich Kolmogorov), 来自中国的世界流体力学巨人周培源先生, 以及在当代流体力学诸多分支的代表性学者, 如地球环境流体动力学的先驱 Stewart Turner, 计算流体力学的奠基人 Brain Spalding 等等. 整个封面可谓“群星璀璨”, 每一位学者的代表性工作都是流体力学发展长河中的一颗珍珠, 它们一起勾勒出从经典到近现代流体力学的发展谱线.

本文将围绕 Batchelor 诞辰 100 周年纪念大会封面对流体力学近 300 年的发展进行简要回顾. 第 1 部分将简要介绍 Batchelor 生平及学术贡献; 第 2 部分将回顾经典流体力学到近代流体力学阶段标志性的学术成就及其影响; 第 3 部分介绍现代流体力学流派特点及其传承; 第 4 部分以环境流体力学的发展为例, 浅谈流体动力学理论发展与应用需求的结合, 研究手段的更替以及发展趋势; 最后是对未来的思考和展望.

1 Batchelor 生平及学术贡献概要

1.1 Batchelor 生平简介

1920 年 3 月 8 日, Batchelor (图 2) 出生于澳大利亚墨尔本, 17 岁时以高分被墨尔本大学录取, 并于 1941 年获得了数学和物理双学士学位. 由于二战的原因, 从大学毕业的 Batchelor 加入墨尔本 (Commonwealth Scientific and Industrial Research, CSIR) 航空部从事与战争有关的航空课题研究, 期间对湍流研究特别是当时流体力学大师泰勒 (G.I. Taylor) 在 1930 年代提出的湍流统计理论产生了浓厚的兴趣. 1945 年 1 月, Batchelor 前往英国剑桥大学卡文迪许实验室跟随泰勒从事湍流问题的研究, 1947 年他便当选为剑桥三一学院研究员 (Fellow), 后历任剑桥大学流体力学副教授 (1948—1959), 应



图 2 流体力学家 Batchelor (1920—2000)^[1]

Fig. 2 Fluid dynamicist Batchelor (1920—2000) ^[1]

用数学理论物理系主任 (1959—1983), 应用数学教授 (1964—1983), 荣誉教授 (1984—2000). 1956 年, Batchelor 创办了流体力学顶级期刊 *Journal of Fluid Mechanics* (JFM) 并担任其首任主编 40 余年; 1959 年创建了剑桥大学应用数学与理论物理系 (Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, DAMTP) 并担任系主任至 1986 年; 倡导成立了欧洲力学联盟 (EUROMECH) 并担任第一任主席. 他是英国剑桥大学 Adams 奖 (1951)、意大利 Agostinelli 奖 (1986)、英国皇家学会奖章 (1988)、美国机械工程师协会 Timoshenko 奖章 (1988) 等奖项的获得者. 此外, Batchelor 还先后当选为伦敦皇家学会 (1959)、美国艺术与科学院 (1959)、波兰科学院 (1974)、法国科学院 (1984) 和澳大利亚科学院 (1989) 等众多学会与国家科学院院士.

1.2 Batchelor 学术贡献概要

Batchelor 的研究工作主要集中在 1945—1960 年间, 其学术贡献主要涉及到两个领域: 湍流和低 Reynolds 数的微流体力学 (也被称为悬浮力学).

在湍流研究领域 Batchelor 的贡献包括: 对 Kolmogorov 局部各向同性湍流理论 (又称 K41 理论) 的解释和推广、均匀湍流衰减、快速畸变和湍流扩散理论. 在 K41 理论的解释和推广方面, Batchelor 最早发现并意识到 K41 理论的重要科学意义, 对其中的假设和猜想进行严格论证, 并赋予清

晰的物理解释. 1947 年, Batchelor^[2] 发表长文向西方世界介绍 Kolmogorov, Sedov 等苏联学者的湍流研究工作, 重新推导了各向同性湍流 3 阶结构函数, 被 Uriel Frisch 评价为湍流动力理论中唯一精确且非平凡的结果^[3]. 此外, 他还进一步挖掘 Kolmogorov 随机场理论的内涵以及推广, 包括将其应用于非对称湍流、时滞相关、湍流扩散等问题中. 在均匀湍流衰减问题方面, Batchelor 和 Alan Townsend 一起对均匀湍流衰减率进行了研究, 指出各向同性湍流中均方涡度的变化率与平均涡度立方成正比, 而平均涡度的立方与湍流速度导数的偏度因子有关, 并发现均匀湍流衰减过程中, 黏性耗散衰减占主导, 非线性效应占次要地位, 随着雷诺数增加二者的贡献能达到相当; 在“衰减的最后阶段”非线性效应变得可以忽略, 此时所有尺度的涡通过直接黏性耗散衰减^[4-6]. 在快速畸变理论方面, Batchelor 继承了他的导师泰勒对此问题的思考, 通过对湍流场的所有傅里叶分量进行积分, 确定了在初始各向同性湍流场中诱导各向异性的方式, 指出如果畸变尺度远大于湍流漩涡的时间尺度, 线性处理是合理的^[7]. 这一认识以及线性处理明显优于完全不处理的事实促进了快速畸变理论的许多后续发展和在广泛环境中的应用. 在湍流扩散理论方面, Batchelor 推导了有限体积内颗粒的平均浓度满足的扩散方程, 建立了两个粒子的相对扩散与 Richardson 扩散定律的理论联系, 提出了 Batchelor 尺度, 奠定了被动标量输运问题的研究基础^[8].

在低 Reynolds 数的微流体力学领域, Batchelor 发现了爱因斯坦在推导小颗粒扩散的有效黏度时的漏洞, 即, 没有计算由于一个粒子的存在而产生的总附加耗散的体积积分, 而是使用了另一个类似的非绝对收敛积分. 在 1972 年的文章“Sedimentation in a dilute dispersion of spheres”^[9] 中 Batchelor 借用湍流理论的思想, 通过更严谨的方式给出了小颗粒在黏性流体中的扩散以及扩散的有效黏度的数学推导. 由于小颗粒扩散与气溶胶、沉降、布朗运动、流变学和复合材料等学科都有密切关联, Batchelor 在这一领域的开创性工作引领了后续许多学者一起参与到这个领域的研究中.

在 Batchelor 的学术研究过程中, 他形成了以物理的洞察力为基础, 将物理思想注入数学之中, 根据问题的特点建立模型并提出或者引入简化、近似方

案的方法论与研究风格. 1953 年, Batchelor 独立完成了湍流专著 *The Theory of Homogenous Turbulence*^[10], 系统地总结了他和在他之前湍流理论的主要进展, 是湍流领域影响深远的著作. 而由他编写的流体力学的理论专著 *An Introduction to Fluid Dynamics*^[11] 也将这种思想和方法论贯穿始终, 成为流体力学的传世佳作. 期间许多研究成果被后人以 Batchelor 的名字命名, 例如 Batchelor 涡、Prandtl-Batchelor 定理、Batchelor-Chandrasekhar 公式、Batchelor 尺度等, 至今仍是湍流研究领域热议的话题.

2000 年 3 月 30 日, Batchelor 逝世. 为了纪念他, 2007 年国际理论与应用力学联盟 (IUTAM) 设立了 The Batchelor Prize in Fluid Mechanics. 该奖项被誉为流体力学界的“诺贝尔奖”, 每 4 年评选一次, 是流体力学的最高荣誉之一.

2 流体力学发展回顾

图 1 列举的 150 位流体力学家横跨了近 300 年, 历经流体力学发展的 3 个阶段: 经典流体力学 (17 世纪中叶至 19 世纪末)、近代流体力学 (19 世纪末至 20 世纪中叶) 和现代流体力学 (20 世纪中叶至今), 所涉及的领域包括流体动力学理论、实验流体力学、计算流体力学、湍流及稳定性、空气动力学、环境流体力学、多相流体力学、生物流体力学、磁流体力学、微纳米尺度流体动力学等. 以下将结合学者与他们对流体力学的主要贡献, 回顾流体力学的发展历程.

2.1 经典流体力学阶段

经典流体力学阶段始于力、速度、加速度、流场等经典力学概念的建立以及质量、动量、能量三大守恒定律的诞生, 时间上大致处于 17 世纪中叶至 19 世纪末之间. 150 人的名单中有 8 位处于经典流体力学阶段的学者, 他们分别是欧拉 (L. Euler)、纳维 (C.L. Navier)、泊肃叶 (Jean-Louis-Marie Poiseuille)、弗劳德 (William Froude)、斯托克斯 (G. G. Stokes)、麦克斯韦尔 (James Clerk Maxwell)、瑞利 (Lord Rayleigh) 和索菲·柯瓦列夫斯卡娅 (Sofia Kovalevskaya), 他们在流体力学领域作出的主要成就见表 1. Kelvin 勋爵 (William Thomson) 评价这一时期的流体力学是“所有物理科学的根本, 并且具有

表 1 图 1 中处于经典流体力学阶段的学者信息^[13]

Table 1 Information and contributions of the fluid dynamicists in the stage of classical fluid mechanics listed in Fig. 1 ^[13]			
人名	生卒年	国籍	主要学术贡献(仅限流体力学领域)
Euler	1707—1783	瑞士	理想流体运动方程; 欧拉法
Navier	1785—1839	法国	流体平衡和运动的基本方程; 黏性流体力学创始人之一
Poiseuille	1797—1869	法国	泊肃叶公式; 泊肃叶定律
Froude	1810—1879	英国	Froude数; 相似理论
Stokes	1819—1903	爱尔兰	黏性流体运动基本方程; 表面波; 非线性波; 黏性流体力学的创始人之一
Maxwell	1831—1879	苏格兰	麦克斯韦-玻耳兹曼气体分子运动论; 黏滞系数公式; 向量场旋度
Rayleigh	1842—1919	英国	瑞利数; 瑞利-伯纳德对流; 瑞利波; 瑞利-泰勒不稳定性
Kovalevskaya	1850—1891	俄罗斯	柯西-Kovalevskaya定理

首屈一指的数学之美”^[12]. 一方面这一时期数学分析方法包括微积分、微分方程等的建立和应用为流体力学基本理论框架奠定了牢固的基础, 另一方面当时科学和技术的前沿研究对象大都绕不开流体力学的基本问题, 而后者在数学描述上的成功也使得这一学科首先得到了蓬勃的发展.

1665 年, 牛顿 (Isaac Newton) 发现了微积分, 在他的著作《数学原理》中研究了流体中运动物体受到的阻力, 认为黏性切应力是流体黏度与速度梯度的乘积, 提出了牛顿黏性定律. 1738 年伯努利 (Daniel Bernaulli) 证明了“压力梯度与流体的加速度成正比”提出了“伯努利方程 (原理)”. 1752 年, 欧拉提出理想流体概念, 并基于连续介质 (流体微团) 假设和牛顿第二定律给出了描述理想流体运动的基本方程——欧拉方程. 这是第一个将微分方程应用到流体力学领域的方程, 同时也奠定了流体力学流场描述的标准形式. 欧拉方程与牛顿黏性定律、伯努利原理一起构成了经典流体动力学大厦的 3 块基石. 从这 3 位奠基人都兼具数学家身份这一点可以看出, 经典流体动力学对现象的研究和理解都是建立在严谨的数学基础之上的, 而对物理现象的数学处理也通过经典流体动力学的发展达到了登峰造极的地步.

同样是基于严格的数学推导, 1752 年达朗贝尔 (Jean le Rond d'Alembert) 从欧拉方程出发得到了“达朗贝尔佯谬”, 即: 不可压缩、无黏势流中匀速运动的物体不受力. 这一结论意味着以相对于流体以恒定速度运动的物体受到的拖曳力为 0. 这与实验观测和工程实际中观察到的相对于流体 (空气和水) 匀速

移动的物体受到阻力作用的现象有着尖锐的矛盾.

为了寻求达朗贝尔悖论的解答, 19 世纪众多流体力学家和应用数学家针对物体在黏性流体中运动受到的阻力进行建模, 并将其引入流体动力学基本方程. 当时流体力学界的普遍观点认为造成达朗贝尔悖论的主要原因是欧拉方程不考虑流体的内摩擦, 即黏性对流体运动的影响, 只要在欧拉方程中增加一个摩擦项便能弥补理论与实践的不符. 1822 年, 法国工程师纳维基于分子机制的摩擦在欧拉方程的基础上加入一个额外项, 建立了黏性不可压缩流体动量守恒的运动方程; 随后柯西 (1828)、泊松 (1829) 和圣维南 (1943) 等也对黏性机制进行了研究; 1840 年, 泊肃叶发表《小管径内液体流动的实验研究》, 通过实验得到了圆管中黏性流体的流量公式——泊肃叶公式 (定律), 后世将也黏性流体在管道中的流动称为泊肃叶流动^[14]. 在此基础上, 1845 年, 剑桥学者斯托克斯以更合理严谨的方式导出了黏性流体运动方程, 开启了黏性流体运动理论. 这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程 (简称 N-S 方程). N-S 方程一经建立便被公认为是黏性流体运动理论的第一原理, 它与描述电磁场的麦克斯韦尔方程、弹性介质的柯西方程一同成为 19 世纪三大最著名的偏微分方程 (组), 是当时数学、物理、力学理论研究的前沿课题. 1870 年, 俄罗斯女数学家柯瓦列夫斯卡娅完成了柯西-柯瓦列夫斯卡娅定理的证明, 该定理作为偏微分方程理论中第一个普遍性解的存在定理, 保证了上述几类偏微分方程解的存在性. 此后, 诸多科学和工程问题得以建立在 N-S 方程的基础上进行定量揭示和描述. 然而, 基于

力学观点增加的对流项却成为 N-S 方程的非线性项, 处理非线性问题数学上的困难一定程度上也限制了黏性流体力学的全面发展.

除了黏性流体力学的发展, 19 世纪流体力学的主要进展还包括非线性波动、旋涡运动和流动不稳定性方面的研究. 非线性水波方面, 1834 年罗素观察到了孤立波的存在, 1847 年斯托克斯建立了非线性水波理论. 1869 年, 兰金给出了激波前后的关系式, 这是对流动可压缩性的初步研究结果^[15]; 旋涡运动方面, 1857 年亥姆霍兹发表了“论描述涡旋运动的流体动力学方程之积分”, 纠正了流动只能是势流的错误观点, 首次研究了有旋流动并建立了 3 个涡定理, 开创了涡旋动力学的研究; 流动不稳定性方面, 1880 年瑞利 (Lord Rayleigh) 对平行剪切流的不稳定性 (瑞利-泰勒不稳定性) 进行了开创性研究, 提出了“瑞利方程”. 他在研究上下温差引起的对流 (瑞利-伯纳德对流) 时引入了一个描述浮力驱动对流的无量纲数 (瑞利数), 一直被沿用于解释由于地面-大气对流引起的现象. 此外, 他对超声速气流的双曲型方程数学理论方面也做出了奠基性的贡献.

2.2 近代流体力学阶段

近代流体力学时间轴上位于 19 世纪末到 20 世纪中叶. 受到第二次工业革命的影响, 这一时期实验技术手段有了巨大的进步, 诞生了风洞、水槽实验以及热线等实验装置和测量仪器, 因此流体力学的发展呈现出鲜明的理论与实验相互促进的特点, 同时工业生产的实际需求也成为这一时期流体力学发展的“催化剂”. 近代流体力学的主要研究对象是湍流和空气动力学, 在这两个领域中, 诸多新概念的提出极具想象力, 结合数学推导建立模型并将其应用于解释或揭示新现象及其规律, 是这一时期的流体力学研究的风格. 多位流体力学开宗立派的大师均诞生于这两个领域, 各具风格和特色鲜明的学派也于这一时期开始形成. 图 1 列举的处于这一时期的学者对流体力学发展的贡献见表 2 (摘自文献 [16]).

1883 年, 雷诺 (Osborne Reynolds) 通过圆管内水流实验向人们展示了管道中黏性流体从平滑流线型流动 (层流) 向不规则带旋涡的流动 (湍流) 的过渡, 这是流动从层流向湍流转捩的首次实验展示, 此外, 雷诺还引入了表征流动中流体惯性力和黏性力之比的一个无量纲数, 即雷诺数, 作为判别两种流态的标准. 此后, 流动的雷诺数成为描述流体流动状态的关键参数.

表 2 图 1 中处于近代流体力学阶段的学者贡献^[16]
Table 2 Major contributions of the fluid dynamicists in the stage of modern fluid mechanics listed in Fig. 1^[16]

作者(时间)	学术贡献
Reynolds (1883)	雷诺实验; 雷诺数
Reynolds (1895)	雷诺分解; 雷诺应力
Prandtl (1904)	边界层概念、分离与控制
Orr (1907), Sommerfeld (1908)	黏性流动稳定性
Blasius (1913)	管道流动中摩擦阻的 1/4 幂律
Taylor (1915)	涡旋运动; 涡量输运理论
Taylor (1921)	连续运动引起的扩散; 拉格朗日自相关函数
Richardson (1922)	级串概念; 数值天气预报
Taylor (1923)	Couette 流稳定性
Prandtl (1925)	混合长度理论
von Karman (1930)	壁面流动的对数律和外律
Prandtl (1932)	对数律的重新推导
Nikuradse (1932, 1933)	高雷诺数管道流动实验测量
Taylor (1935)	各向同性湍流; 湍流统计理论
Taylor (1938)	湍流的谱分析方法
Karman & Howarth (1938)	自相似理论; K-H 方程
Millionschikov (1939), Proudman & Reid (1956), Tatsumi (1957), Orszag (1970)	准正规封闭, 各向同性湍流相关方程的 EDQNM 理论
Kolmogorov (1941)	局部各向同性; 小尺度统计普适律; 结构函数的惯性域标度
Obukhov (1941)	惯性域内的功率谱标度
Kolmogorov (1942), Prandtl (1945)	计算湍流流动的模型输运方程
Landau (1944)	导致湍流的无限次分叉理论; 小尺度普适律的判定条件
Peiyuan Zhou (1945)	相关函数的微分方程; 湍流高阶矩模式理论
Burgers (1948)	一维模型方程
Obukhov (1948), Yaglom (1949), Corrsin (1951)	Kolmogorov 思想推广到被动标量
Onsager (1949)	二维点涡的统计平衡

可以说, 雷诺的工作开启了长达一个多世纪湍流研究的序幕.

1904 年, 在海德堡举行的第 3 届国际数学家大会上, 德国流体力学家路德维希·普朗特 (Ludvig Prandtl) 作了一个有划时代意义的演讲“关于非常小摩擦下的流动”^[17], 从物理直觉出发提出了边界层概

念,这样就可以将整个流动分成两部分来处理,即“满足壁面附近黏附条件的黏性流动解和远离壁面处理理想流动解”.边界层理论是突破性的,沿着这一思路,达朗贝尔悖论从实际应用的角度上得到了解决.同时,在边界层理论框架下,无黏流的理论找到了应用范围,而黏性计算限制在很薄的边界层内,使得 N-S 方程得以大大的简化,很多实际问题能够得到解答,黏性理论也得到了一条新的发展道路.边界层理论适用于匹配渐近展开推导近似解,为流体力学中物面摩擦阻力、热传导、流动分离的计算奠定了基础,由此开创的奇异摄动理论也是 20 世纪应用数学的重要成就之一.在航空领域,该理论可以直接应用于计算翼型的阻力,为航空工程也里程碑式的贡献.由此,普朗特被认为是空气动力学之父和近代流体力学奠基人.

1925 年,普朗特仿照气体分子运动论提出混合长度理论,用湍流的混合长度代替分子自由路径,将湍流的无规则脉动速度就和平均流场的平均速度梯度联系起来,化解了未知的雷诺应力,使雷诺方程封闭.虽然混合长度理论将雷诺应力化解掉了,但又多出一个混合长未知数需要确定.1930 年普朗特的学生冯·卡门(Theodore von Karman)提出一种相似理论来解决混合长度计算问题,然而这个方法比较复杂.1933 年,普朗特本人又提出一种简单直观的方法,即直接假定湍流的混合长和距离壁面的距离成正比,而该比例系数只能由实验确定.因此,普朗特的混合长度理论前面加上了“半经验”二字,被称为“半经验混合长度理论”.将半经验混合长度理论应用到一种最简单的平面平板流动中,就可以推导出著名的平均流场的对数分布律,而后来的大量实验也证实了这种对数律的存在.随后,前苏联学者莫宁(Andrei Sergeevich Monin)和奥本霍夫(Alexander Mikhailovich Obukhov)将混合长度理论成功推广到大气边界层的中风速的分布问题中,为解决大气物理中大气扩散等问题开辟了道路.

同在 1920 年代,Batchelor 的老师、剑桥大学数学、力学家泰勒致力于通过建立能与实验数据直接和定量比较的数学理论来描述湍流.在研究湍流扩散问题时,泰勒引入了流场中同一点在不同时刻脉动速度的相关(又称拉格朗日相关) $\overline{u(0)u(\tau)}$ 描述流动的扩散能力,得到了在时间间隔小于相关时间时湍流扩散的弥散度与时间的平方成正比,而在时间

间隔远大于相关时间时,弥散度与时间的一次方成正比的规律.1935 年,泰勒又引进同一时刻不同点上速度分量的相关(又称欧拉相关) $\overline{u_i u_j'}$,并提出一种数学上容易处理的理想湍流——均匀各向同性湍流,用于简化脉动速度相关矩方程,以解决雷诺方程的封闭性问题.尽管最终泰勒没有完成这个理论,但他利用相关矩和谱分析等统计方法处理湍流问题的模式奠定了湍流统计理论发展的基础.不仅限于湍流领域,泰勒在低雷诺数流动、流动不稳定性、涡旋流动领域中也作出了诸多开创性的工作,包括阐明了激波内部结构;得出同轴两转动圆轴间流动失稳条件,在研究原子弹爆炸中提出强爆炸的自模拟理论;指出在液滴中起主要作用的是表面张力而不是黏性力等.在 IUTAM“世纪之交的力学”报告中由 IUTAM 大会委员会成员及诸位主席推荐的 24 篇 20 世纪的“力学学科里程碑式论文”中,泰勒的论文就占了 4 篇之多.

1938 年,冯·卡门和霍沃思(Leslie Howarth)在泰勒的均匀各向同性概念的基础上,从 N-S 方程出发得到了空间两点纵向二阶相关矩方程,即 Karman-Howarth (K-H) 方程.虽然 K-H 方程仍不闭合,但它证明了 N-S 方程不仅是支配层流运动的基本方程,也是支配湍流运动的基本方程,早期的均匀各向同性相关理论就是研究这一方程的各种封闭方法和解的形式.在近似条件下, K-H 方程能直接导出湍动能衰变的规律:前苏联学者 Mikhail Dimitrievich Millionshchikov (A.N. Kolmogorov 的博士生)导出了湍流发展末期的 $-5/2$ 次方律;湍流衰减的初期,忽略黏性项的 K-H 方程可直接导出 $-10/7$ 次方律.结合泰勒由实验总结出的 -2 次方衰减律,一起完整的刻画了湍动能衰减规律.

作为 20 世纪最伟大的航天工程学家,冯·卡门还是钝体阻力理论、亚声速和跨声速流空气动力学、超声速流细长体理论等的建立者.不得不提的还有他在 1943 年《美国应用数学季刊》创刊号卷首发表的“用数学武装工程科学”一文中号召工程师为非线性问题拼搏,预见到非线性力学在今后科学发展中的重要地位^[18],开创了数学和基础科学在航空航天和其他技术领域的应用.

同在 1940 年代,图 1 中的两位中国籍力学家之一、中国近代力学奠基人周培源先生从另一途径出发,先对 N-S 方程求解,再对所得的基元涡进行统计

平均来研究均匀各向同性湍流,也得到了相关量的衰减律.此外,他还引进了湍流脉动的二阶和三阶矩方程,首先得到了相关函数的微分方程,为现代湍流高阶矩模式理论奠定了基础,之后还提出了湍流的旋涡结构模型,其建立的湍流模式理论是 CFD 模拟湍流的关键.1995 年,周培源先生在《流体力学年鉴》(*Annual Review of Fluid Mechanics*)上发表了题为“中国湍流研究 50 年 (50 years of turbulence research in China)”的文章^[19],回顾了上述成果.康奈尔大学教授约翰·拉姆利 (John Lumley) 为这篇文章作序称:“在湍流领域,他 (周培源) 被认为是计算模式之父.在其发表于《中国物理杂志》一篇原创文章及以后发表在国际期刊上更为详细的 3 篇论文中,他引进了湍流脉动二阶和三阶矩的方程……,遗憾的是,周的建议是在计算机发明之前,要靠手来进行大量的计算是很难的.尽管如此,毫无疑问的是,今天全世界数以百计正在从事发展湍流计算模式,使之可用于 CFD 设计和规范的人们,追本溯源都可以算作周 1940 年文章的后继……在这一代人中,在流体力学中至少有来自不同国家的 4 位巨人,他们以自己的方法在国内外都产生了很大的影响.既是由于他们对流体力学的贡献,也是由于他们提供的智慧和指引.在每一个国家,那些非凡的后继者,在流体力学中的出色的工作者,都可以追踪为这些巨人的学术继承人.我所说的 4 位巨人是:美国的冯·卡门、前苏联的柯尔莫哥洛夫、英国的泰勒和中国的周培源.”

3 现代流体力学学派与传承

从 20 世纪中叶开始,流体力学进入到现代流体力学阶段.图 1 列举的这一时期流体力学学者主要的学术贡献见表 3(摘选自文献 [16]).这一时期流体力学发展形成了风格独特、特色鲜明的学派,包括德国的普朗特为代表的“哥廷根学派”、英国的泰勒为代表的“剑桥学派”、前苏联的柯尔莫哥洛夫为代表的“莫斯科学派”以及美国的冯·卡门为代表的“加州理工学派”.其中“哥廷根学派”的研究受到当时德国工业需求影响,关注工业、工程应用中的流体力学问题,提出了混合长度模式,建立了边界层理论,将理论与航空需求相结合创立了空气动力学;“剑桥学派”的研究风格是通过小型室内实验了解机理,挖掘物理本质,再用应用数学方法求解问题,研究对象

表 3 图 1 中处于现代流体力学阶段的学者贡献^[16]
Table 3 Major contributions of the fluid dynamicists in the stage of contemporary fluid mechanics listed in Fig. 1^[16]

作者(时间)	学术贡献
Batchelor & Townsend (1951)	耗散尺度间歇性
Dhawan (1953)	表面摩擦阻力的直接测量
Kolmogorov (1954), Arnold (1963), Moser (1962)	KAM 理论
Corrsin & Kistler (1955)	外区间歇性
Batchelor & Proudman (1956), Saffman (1967), Townsend (1956)	低波数谱 Structure of Turbulent Shear Flows
Batchelor (1959)	高 Schmidt 数被动标量理论
Kraichnan (1959, 1965)	场论方法(DIA 及 LHDIA)
Obukhov (1962), Kolmogorov (1962)	间歇性; 局部平均; 对数正态性; 精细相似性假设
Smagorinsky (1962)	LES 模型
Favre (1965)	变密度平均方法
Kraichnan (1967), Batchelor (1969)	二维湍流
Kovaszny (1971)	条件抽样
Monin & Yaglom (1971, 1975)	Statistical Fluid Mechanics, 卷 1、2
Barenblatt, Zeldovich (1970s)	中间渐近与不完全相似性

更侧重于自然界中的湍流 (如大气、海洋) 问题;“莫斯科学派”的特点是将纯数学领域的工作拓展到实际应用中;而冯·卡门离开哥廷根加入美国加州理工大学后,沿袭了应用力学研究范式,以航空航天工程中的力学问题为对象,将现代力学中的数学理论和工程实际紧密结合,奠定了现代力学的基本方向,形成了“加州理工学派”.

3.1 流体力学的四大学派

流体力学“哥廷根学派”的创始人普朗特一生培养了 90 名博士,图 1 中列出了其中 3 位对流体力学作出了突出贡献的学者,他们分别是: Theodore von Karman (1881—1963), Hermann Schlichting (1907—1982), Dietrich Küchemann (1911—1976). H. Schlichting 因其对边界层转捩状态的 Tollmien-Schlichting 波的研究而闻名,此外,他在黏性效应的流体流动和翼型空气动力学方面也有突出贡献,著有《边界层理论》^[20]; D. Küchemann 的工作集中在高速飞行、后掠翼理论方面,第一款商用超音速飞机“协和飞机”采用的就是由他设计的“Küchemann

Coke Bottle”外形,此外,他设计的飞机后缘防震体被称为“Küchemann Carrot”。

“剑桥学派”的创始人泰勒培养了 15 名博士,除了第 1 节中介绍过的 Batchelor 外,图 1 中还列出了 5 位,他们分别是: Alan Townsend (1917—2010), Stewart Turner (1930—), Owen Phillips (1930—2010), Philip Drazin (1934—2002), Francis Bretherton (1935—2021)。Townsend 除了通过实验测量与 Batchelor 一起揭示了湍流大尺度涡的间歇性外,他还是湍流拟序结构研究早期的开创者, Townsend 附着涡、Batchelor-Howell-Townsend 谱以及 Townsend-Perry 常数均以他的名字命名,代表性著作 *The Structure of Turbulent Shear Flow*^[21]。S. Turner 是地球物理流体动力学的奠基人,在分层流和重力流中的湍流输运、海洋中的混合层动力学、浮力羽流和热气流、室内通风流动动力学、双扩散对流等领域均作出了开创性的研究工作,1969 年和 1974 年分别就浮力羽流和热气流、双扩散对流问题在《流体力学年鉴》上发表了 2 篇综述^[22-23]。O. Phillips 的代表性工作是大涡旋引发的海浪,即 Phillips-Miles 过程,以及海浪能量传输模型,著有 *The Dynamics of the Upper Ocean*^[24]。P. Drazin 致力于水动力稳定性问题的研究,提出 N-S 方程全局模态解的概念,将非线性动力系统概念引入流体力学研究。F. Bretherton 则是弱非线性波扩散方程的建立者,波-平均流相互作用和大气锋生研究的开创性先驱,此外还领导了美国气象学会的全球气候变化研究项目。

此外,150 人中还包括 4 位 Batchelor 培养的博士: Brue Morton (1926—2012), Ian Proudman (1927—1999), Phillip Saffman (1931—2008) 以及 Adrian Gill (1937—1986)。B. Morton 在烟囱、火焰流动,桥梁与飞机周围的气流以及涡度等方面作出了诸多成就; I. Proudman 致力于剪切流动稳定性以及各向同性湍流统计理论的深入研究; P. Saffman 的研究生涯成果丰硕,包括 Saffman-Taylor 不稳定性、船舶与飞机在水和空气中运动产生的涡度理论、尾流湍流、流体中球形颗粒的运动等方面均有卓越建树,著有涡动力学经典著作 *Vortex Dynamics*^[25]; A. Gill 则是气象学和海洋学的著名学者,在管道流动稳定性、热对流、南大洋环流、海洋的季节变化、旋转流体中的波浪、风引起的上升流以及海岸流和海平面变化

等领域均作出了理论贡献,著有教材 *Atmosphere-Ocean Dynamics*^[26]。此外,图 1 的设计者 K. Moffatt 也是 Batchelor 的学生,他是当代湍流理论和磁流体动力学领域公认的大家。

“莫斯科学派”创始人柯尔莫哥洛夫一生培养了 82 名学生,图 1 列举了其中 6 位投身于流体力学领域的学者: M. Millionshchikov (1913—1973), A. Obukhov (1918—1989), Akiva Yaglom (1921—2007), A.S. Monin (1921—2007), Grigory Isaakovich Barenblatt (1927—2018) 以及 Vladimir Igorevich Arnold (1937—2010)。M. Millionshchikov 在湍流理论方面提出了准正规封闭模式,在应用方面建立了应用气体动力学理论,提出了油气开采的新方法,并为前苏联军事工业包括气体喷射器和核工业的发展作出了奠基性工作; A. Obukhov 是大气物理学和现代边界层气象学的奠基人之一, M-O 相似理论的提出者; A. Yaglom 建立了均匀各向同性、黏性可压缩湍流理论,导出了湍流温度场的动力学方程,是继柯尔莫哥洛夫速度场动力学方程之后湍流理论中的第二个精确结果; A.S. Monin 是 M-O 相似理论的另一位作者,领导了前苏联在海洋湍流方面的研究, A.S. Monin 和 A. Yaglom 合著的 *Statistical Fluid Mechanics* 卷 1 和卷 2^[27] 是湍流统计理论的经典著作; G.I. Barenblatt 建立了湍流中重颗粒传输的数学模型,中间渐近与不完全相似性方法,稳定分层湍流中湍斑动力学、非稳态传热和传质、温度阶跃形成的数学模型,层间湍流演化的数学模型,湍流切变的比例定律以及沙尘暴、热带飓风的数学模型等; V. I. Arnold 是可积系统稳定性 KAM 定理的 3 位作者之一,在流体动力学领域提出奇点理论和 ADE 分类问题。

“加州理工学派”创始人冯·卡门共培养了 38 名博士,图 1 只列举了其中 2 位: Hans Liepmann (1914—2009) 和林家翘 (1916—2013)。林家翘先生在流体稳定性理论方面用渐近方法获得了 Orr-Sommerfeld 方程的解,发展了平行流动稳定性理论,确认流动失稳是引发湍流的机理,所得结果为实验所证实。他和冯·卡门一起提出了各向同性湍流的湍谱理论,发展了冯·卡门的相似性理论; H. Liepmann 在流动不稳定性、湍流剪切流、跨音速流动、稀薄气体流动、冲击波-边界层相互作用、湍流超音速摩擦、飞机抖振、磁流体动力学、等离子体物理、液氮流体动

力学等领域均有建树, 他的著作《可压缩流的空气动力学》^[28] 和 *Elements of Gas Dynamics*^[29] 对现代空气动力学发展影响深远。

H. Liepmann 一生任职于加州理工学院, 培养了 55 名博士, 图 1 中有 5 位师承于他的学者, 分别是: Stanley Corrsin (1920—1986), John Laufer (1921—1983), Donald Coles (1924—2013), Satish Dhawan (1920—2002), Roddam Narasimha (1933—2020)。S. Corrsin 因其在被动标量湍流统计理论和外区间歇性方面的工作而闻名, 此外他在湍流混合、湍流-非湍流界面以及生物流体力学方面也都作出了杰出的贡献; J. Laufer 在槽道湍流、湍流混合层以及各向同性湍流方面的工作至今仍被频繁引用; D. Coles 因其在流动实验装置设计与制造方面而闻名, 是壁湍流尾流律的发现者, 也是最早将群论用于流体力学研究的学者之一; S. Dhawan 是最早获得表面摩擦阻力直接测量结果的学者, 他是印度实验流体力学研究之父, 建立了印度首个高速空气动力学和边界层实验室, 领导了印度空间计划; R. Narasimha 在湍流降噪、激波结构、湍流尾流和混合流方面成绩斐然, 他还领导了印度的并行计算流体力学研究计划、开发了印度第一套天气预报代码, 参与设计了印度轻型战斗机等。此外, 图 1 中还有几位冯·卡门第 3 代甚至第 4 代的学生, 包括师承于 S. Corrsin 的 John Lumley (1930—2015) 及 J. Lumley 的学生 Nadine Aubry 和 Emily Stone; 师承于 R. Narasimha 的 Rama Govindarajan 等。可以说, “加州理工学派”为战后流体力学研究在美国的发展源源不断的输送着养分, 使之迅速成为引领流体力学研究发展的中心之一。

3.2 其他分支

开放交流的发展模式才能让学科青春永驻, 现代流体力学的发展亦是如此。除了有清晰师承关系的学者外, 图 1 列举的现代流体力学者还呈现出百花齐放之势, 他们为现代流体力学发展作出的贡献同样值得铭记。

首先是现代流体力学圣地之一的剑桥大学。图 1 中的 Harold Jefferys (1891—1989) 是一位统计学家, 在与其同时期的泰勒交流中他对海浪的生成、海啸的形成产生兴趣, 并进行了大量深入的研究, 他培养的学生 Longuet-Higgins (1925—2016) 在海浪、洋流和自然现象的数学模型上做出了杰出的贡献; 他

的另一位学生 Sydney Goldstein (1903—1989) 则因在稳定层流边界层方程和流体中圆盘旋转的湍流阻力方面的工作被誉为“20 世纪对流体动力学的进步影响最大的人之一”^[30]。此外, 与 Batchelor 同时代的 Fritz Ursell (1923—2012) 和 Milton Van Dyke (1922—2010) 经常参加泰勒和巴切勒的流体力学讨论班, 前者建立了当代波动预测理论的数学基础, 是波-结构作用研究领域的先驱, 后者则是空气动力学中扰动分析法的创建者以及 *Annual Review of Fluid Mechanics* 的创刊人。此外, 建立椭圆粒子在黏性流体中的运动方程的 George Jeffery (1891—1957)、气动声学奠基人 James Lighthill (1924—1998)、磁流体力学及应用领域的 Arthur Shercliff (1927—1983)、波浪理论和气动声学领域的 David Crighton (1942—2000) 也均是这一时期剑桥大学流体力学学派浓郁学术交流氛围的参与者和受益者。他们的学生中也不乏享誉世界的流体力学大家, 例如 A. Shercliff 的学生 Julian Hunt 便是当代环境流体力学领域的翘楚, 培养了包括目前湍流多相流领域的著名学者 S. Balachandar 在内的一大批流体力学家; J. Lighthill 则培养了超音速推进器、动力波、非线性扩散波理论和连续介质振动理论方面的著名学者 Gerald B. Whitham (1927—2014), 后者是目前湍流边界层和壁湍流领域著名学者 Javier Jimenez 的导师。此外, 环境和工业流动领域的著名学者 Paul Linden、高雷诺数壁湍流领域的著名学者 Ivan Marusic、湍流动力系统理论方面著名学者 Rich Kerswell 也都可追根溯源到剑桥大学的师承关系。

其次是现代流体力学的另一处圣地美国。约翰霍普金斯大学的著名学者 Charles Meneveau 师承于纽约大学的流体力学家 Katepalli R. Sreenivasa, 后者的导师则是上文提到的加州理工学派的 R. Narasimha; 图 1 中的 Robert Kraichnan (1928—2008) 是爱因斯坦的最后一任助手, 也是湍流统计理论近现代方法的建立者, 他培养了目前湍流动力系统理论领域的著名学者 U. Frisch。计算流体力学领域, 大涡模拟 (LES) 方法的先驱 William Craig Reynolds (1933—2004) 是斯坦福湍流研究中心的创始人, 他培养了涡动力学、湍流小尺度结构动力学领域的著名学者 Fazle Hussain 和 DNS 方法的奠基人 Parviz Moin, 后者是目前 DNS 应用数值计算领域著名学者 Robert Moser 的导师。

近现代流体力学发展史中还有一支不得不提的分支——中国学派。图 1 中只列出了两位中国籍的流体力学家：周培源和郑晓静，事实上陆士嘉、钱学森、郭永怀、罗时钧、庄逢甘等均是“哥廷根学派”和“加州理工学派”在中国的传承者。其中陆士嘉先生是普朗特的唯一女弟子，是我国第一个空气动力学专业的创始人；钱学森（1911—2009）先生同冯·卡门一起建立了高亚声速流气动力的卡门—钱公式，提出跨声速流动相似律、上下临界马赫数等概念，开创了高超声速流和稀薄气体动力学新领域^[31]；郭永怀先生在跨声速流的稳定性、激波边界层相互作用及高超声速流等领域均作出了突出的贡献，为解决边界层的奇异性，他改进了庞加莱、莱特希尔的变形参数和变形坐标法，发展了奇异摄动理论，后被钱学森命名为 PLK 方法^[32]；罗时钧先生是我国最早使用有限差分法计算飞机空气动力的学者，主持完成了我国跨音速—机身—平尾—垂尾组合体纵向空气动力差分计算程序，首次解决大迎角非线性气动力计算收敛问题，系国际上首次得到非对称气动力计算结果，并取得计算方法上的突破，具有很高的理论和应用价值^[33]；庄逢甘先生在旋涡、激波和非平衡起主导作用的复杂流动方面取得了当时国际领先水平的成果，长期从事导弹、火箭、再入飞行器的空气动力学研究，在大型风洞设计与建造、运载工具的气动研究试验、非定常旋涡主导的空气动力学、计算流体学研究等方面均做出了重要贡献，在湍流统计理论方面，在 Heisenberg 谱传输项的假设下，首次得到了准确的湍流谱解，给出了 Burger 方程的初值问题的准确解，对有随机边界条件的 N-S 方程进行了长期的研究，提出了双尺度湍流概念^[34]。此外，我国在科技发展和应用需求的大背景下涌现出了一批杰出的流体力学学者，并对现代流体力学发展做出了重要贡献。文献 [19, 35] 对流体力学在中国的发展及中国学者的贡献进行了系统的论述，受篇幅所限，本文不再详述。

4 流体力学理论发展与应用需求的结合

现代流体力学的活力源于不同学科中流体力学应用需求的强力驱动。随着研究对象一步一步的拓展细化，从 20 世纪中后期开始流体力学发生了与多个学科的交叉融合，流体力学自身也从对普适流动机理、模型的孜孜追求拓展变得更加务实。针对环

境流动问题，通过应用流体力学的基本原理解释自然界，特别是大气和海洋中流动现象的动力学性质，逐渐形成了环境流体力学，派生出海岸/海洋工程流体力学、大气环境流体力学、水环境流体力学和地球流体力学等分支学科，主要研究地球表层（土壤上层，海洋表层与大气近地层）的流动与输运；针对生物医学等领域的流动现象机理，发展演变出了生物流体力学，主要研究动物和人体内循环、呼吸系统的生理流体（如血液、气体、尿液、淋巴液和其他体液等）的流体力学问题；针对核物理、天体物理中的等离子体流动，发展了磁流体力学，主要研究导电流体与磁场相互作用的动力学或运动规律，包括磁流体力学波与稳定性问题等；针对工业中的界面和摩擦问题，发展了浸润与界面力学；针对物理化学过程中与燃烧、扩散、渗析、电泳、聚并、流态化、毛细流等现象，发展了物理化学流体力学等等。根据我国力学学会流体力学专委会下设的专业组的划分，也可以看出学科分支发展的不断衍生。目前下设的专业组有相对传统的分支，如湍流与稳定性，非牛顿流体力学等，也有包含了显著应用背景和学科交叉特征的分支，如工业流体力学、高温气体动力学等。

新兴的分支为流体力学发展注入了新的发展动能，成为了流体力学研究活跃的前沿领域，新兴分支的重要代表性研究成果也引起了学术界的积极评价和鼓励。以 Batchelor 奖为例，自 2007 年该奖项设立以来每四年评选一次，至今共评出了 4 位获奖者，分别是：Howard Stone (2008)，Detlef Lohse (2012)，Raymond E. Goldstein (2016) 和 Alexander J. Smits (2020)。这些获奖者从事的研究及其获奖的代表性工作均来自新兴的学科分支，其中 H. Stone 从事的是生物流体动力学、胶体动力学方面的研究，包括建立了新的广义泡沫排水方程，提出和检验了表面张力和表面活性剂效应；D. Lohse 从事的是多相流、气泡声致发光、湍流对流和微流体动力学方面的研究；R.E. Goldstein 从事的是自然界中的非平衡现象，特别是生物物理学方面的研究，贡献包括对活性物质的实验研究、多细胞物理学等；A.J. Smits 从事的是高雷诺数和高马赫数下壁面湍流结构的实验研究，以及仿生推进和减阻方面的工作。随着流体力学与其他学科交叉融合的深入，来自应用流体力学分支的学者获得 Batchelor 奖将成为趋势。

流体力学的新兴学科分支的产生并非突然，而

是伴随着流体力学基本理论、计算模拟和实验研究方法的不断发展更替以及实际应用需求的不断萌生而逐渐衍生出来的. 诸多流体力学分支学科的发展都验证了此规律, 如文献 [36] 介绍的等离子体流体力学、文献 [37] 介绍的爆炸气动力学、文献 [38] 介绍的小型器件中的工程流体力学、文献 [39] 介绍的化学流体动力学等等. 此处仅以环境流体力学的研究为例, 图 1 列举的流体力学家中, 环境力学领域的学者占了 20 席, 其中 5 位处于 20 世纪中叶前, 有 15 位处于现代流体力学阶段. 最早的环境力学研究可追溯到 1904 年挪威物理学家 Vilhelm Bjerknes (1862—1951) 开始的从动力学和热力学角度研究大尺度大气和海洋运动, 以及他在 *Meteorologische Zeitschrift* 杂志上发表的文章“Das problem der wettervorhersage, betrachtet von standpunkt der mechanik und physik (从力学和物理学的角度研究天气预报问题)”^[40]. 20 世纪初近代流体力学的 4 大学派创始人也都不约而同的将理论研究的成果应用到环境流动规律的揭示和理解中. 1915 年, 泰勒在 *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 上发表的“Eddy motion in the atmosphere”^[41] 可视为大气湍流研究的最早文献; 1932 年, 普朗特在德文期刊上发表过题为“Meteorologische anwendung der strömungslehre (流动理论的气象应用)”^[42] 的论文, 将边界层理论应用于气象学的研究; 1940 年代, 柯尔莫哥洛夫最得意的两位学生 A. Obukhov 和 A.S. Monin 将 K41 理论成功应用于大气和海洋湍流的研究, 建立了至今仍是大气边界层研究的理论基础 O-M 相似理论; 即使是身为航空航天大师的冯·卡门, 在 1947 年也发表过题为“Sand ripples in the desert”^[43] 的论文, 试图通过风剪切的涡旋结构对风成沙波纹的形成进行建模.

时至今日, 环境流体力学的研究内容已经发展得十分丰富, 根据李家春先生在《力学进展》上的综述^[44], 大致可以分为: 大气海洋环流, 大气海洋中的旋涡运动, 大气海洋中的湍流运动, 污染物、溶质的输运与湍流扩散, 沉积物异重流, 风沙、泥沙运动, 海气相互作用, 陆气相互作用 8 个方面, 虽然各个方向针对的问题不同, 但其共性特征是流动过程中的多相多组分、多场多过程耦合、多尺度和跨尺度、高度非线性和多自由度等.

以环境流体力学中的重要分支风沙环境力学为

例, 简要回顾其研究历程可以清楚地看出在应用需求明显的分支发展过程中, 流体力学基本理论、方法的发展在其中起到的重要作用. 从流体力学的角度, 风沙运动被定义为高雷诺数气-固两相稀疏流动. R.A. Bagnold (1941) 在最初建立经典风沙物理学体系时就用到了流体力学的剪切应力、摩阻速度、粗糙度等概念, 并利用边界层理论对风沙边界层的流场进行简化^[45], 当时边界层理论由普朗特建立不久, 并由冯·卡门等逐渐发展完善. 1964 年, P.R. Owen 在 *Journal of Fluid Mechanics* 上发表了“Saltation of uniform grains in air”^[46], 首次对风沙运动进行了流体力学角度的建模, 其中的风场模型仍是采用边界层理论中的平均流廓线基本解. 随着计算机技术的发展, 雷诺平均方程封闭模式的数值求解成为可能, 风沙流的研究很快也跟上数值模拟的步伐. Anderson 等^[47] 利用 RANS 对一维风沙流开展了模拟研究, 获得与实验上量级可比的输沙通量模拟结果. 此后, 数值模拟研究成为了风沙流问题研究的重要手段, 计算流体技术上的每一次进步都推动着风沙环境力学的跃变. 例如 1960 年代, J. Smagorinsky 发展了流动的大涡模拟 (LES) 技术^[48], 这种方法可以解析大尺度涡, 弥补了 RANS 模拟对全尺度湍流进行平均导致的完全忽略湍流脉动的不足. I. Vinkovic 等^[49] 首先基于 Smagorinsky-Germano 亚格子模型 (SGS) 的大涡模拟研究颗粒在湍流边界层的扩散问题, 获得了与风洞实验在跃移高度、冲击速度等方面定量上较 RANS 模拟吻合更好的结果; 上世纪 70 年代初, J.W. Deardorff^[50] 发展了大雷诺数流动的壁解析大涡模拟 (WRLES) 技术, 考虑到床面颗粒运动的随机性及其对壁面湍流结构的影响, Zheng 等^[51] 将 WRLES 方法运用到可侵蚀床面风沙流的模拟, 并第一次将该方法两相壁湍流模拟的摩擦雷诺数 (Re_τ) 扩展到 4200 以上, 获得了与自然界真实风沙流情况一致的比较结果, 同时刻画了实验上难以获得的沙粒对壁面湍流结构调制影响的规律.

流体力学应用学科中产生的需求也反过来促进着流体力学的内生发展. 仍以风沙环境力学为例, 沙尘暴的形成和发展是一项重要的研究内容. 作为大气边界层内发生的一类极端流动过程, Re_τ 高达 $1.0 \times (10^6 \sim 10^7)$, 湍流结构的最大尺度与其携带的颗粒特征尺度相差 9 个量级, 且存在多结构层次、多物理场、多过程、多演化速率的强非线性耦合.

1990 年代末,高雷诺数壁湍流中超大尺度结构在管道流动中被发现,随后被大气表面层的实验观测证实^[52].这一壁湍流外区的典型湍流结构已经被证实对质量、动量、能量的输运具有重要的影响.郑晓静教授领导兰州大学风沙研究团队在巴丹吉林沙漠边缘的青土湖地区设计建设了广受关注和好评并被认为全球范围内“独一无二”的青土湖观测列阵,用于对大气表面层净风和沙尘暴流动进行观测研究,并围绕高雷诺数壁湍流和两相流问题取得了一系列成果,她在其有关高雷诺数壁湍流研究的综述论文中系统回顾了该领域的研究脉络和重要研究进展^[53],同时也指出目前的高雷诺数壁湍流研究仍面临着许多困难和挑战,尤其是对沙尘暴这一类极端流动的深入研究需要流体力学发展新的理论、新的计算模型甚至模式,并需要针对这一类流动全面系统的实验观测以及新的数据分析手段作为基础,这种需求无疑将对湍流及其稳定性、多相流体力学、计算流体力学、实验流体力学等的内生发展提供驱动力.

5 总结与展望

以 Batchelor 诞辰 100 周年纪念大会封面为据,本文简要回顾了流体力学近 300 年的发展历程,发现流体力学历经了 3 个重要阶段:第 1 个阶段是与应用数学、物理学伴生的阶段,得益于严谨的数学基础,流体力学很早便建立了完美的方程,成为数学“皇冠”上最闪耀的宝石,但此阶段建立的理论在描述广泛的真实流动现象时还存在挑战;第 2 阶段是由工程和自然环境背景的应用需求驱动的发展阶段,这一阶段流体力学的核心进步集中在湍流和空气动力学领域,逐渐形成了通过对实际问题的观察、分析,提炼力学模型,并利用数学方法计算和求解模型,最终获得规律或方案的研究范式,这一时期诞生了 4 位对流体力学发展产生深远影响的“大师”以及诸多“丰碑式”的成就,形成了特色鲜明的学派;第 3 阶段是 4 大学派的传承和多样性拓展的阶段,流体力学的发展呈现百花齐放的势态,与多个学科的交叉融合一方面拓宽了流体力学的外延,另一方面也为流体力学的内生发展注入了新鲜活力和驱动力.

此外,通过对近 300 年来流体力学重要进展的回顾,可以发现未来流体力学的进一步突破会更依赖于理论方法和技术的持续进步和创新,包括但不限于以下领域:理论方面,非线性方程普适理论与数

值方法、统计理论现代方法、群论在流体力学研究中的更广泛运用、湍流的动力系统理论、湍流结构的数学理论等;数值计算方面,RANS,LES,DNS,Lattice-Boltzmann 法、小波等数值算法在更广泛流动应用范围上的拓展以及计算效率、分辨率、紧致性、网格自适应性等方面的大幅提升等;实验方面,面向极端(极高雷诺数、马赫数或微纳米尺度)流动的实验装置与测量显示技术、面向非平稳数据的处理分析方法、面向大数据的同化与人工智能方法等.

参考文献

- Moffatt HK. George Keith Batchelor 8 March 1920-30 March 2000. *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 2002, 48: 25-41
- Batchelor GK. Kolmogoroff's theory of locally isotropic turbulence. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1947, 43: 533-559
- Frisch U. Turbulence, the Legacy of A. N. Kolmogorov. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995
- Batchelor GK, Townsend AA. Decay of vorticity in isotropic turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1947, 190: 534-550
- Batchelor GK, Townsend AA. Decay of isotropic turbulence in the initial period. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1948, 193: 539-558
- Batchelor GK, Townsend AA. Decay of turbulence in the final period. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1948, 194: 527-543
- Batchelor GK, Proudman I. The effect of rapid distortion of a fluid in turbulent motion. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1954, 7: 83-103
- Batchelor GK. Diffusion in a field of homogeneous turbulence. II. The relative motion of particles. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1952, 48: 345-362
- Batchelor GK. Sedimentation in a dilute of spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 52(2): 245-268
- Batchelor GK. The Theory of Homogeneous Turbulence. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1953
- Batchelor GK. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1967
- Gad-el-hak M. Fluid Mechanics from the beginning to the third millennium. *International Journal of Engineering Science*, 1998, 14(3): 177-185
- 武际可. 1920 年以前力学发展史上的 100 篇重要文献. *力学与实践*, 2006, 28(3): 85-91 (Wu Jike. 100 important pieces of literature in the history of mechanics before 1920. *Mechanics in Engineering*, 2006, 28(3): 85-91 (in Chinese))
- Sutera SP, Skalak R. The history of Poiseuille's law. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1993, 25 (1): 1-20
- 李家春. 现代流体力学发展的回顾与展望. *力学进展*, 1995, 25(4): 442-450 (Li Jiachun. Retrospect and prospects of fluid mechanics. *Advances in Mechanics*, 1995, 25(4): 442-450 (in Chinese))
- Davidson P, Kaneda Y, Moffatt K. Epilogue: A Turbulence

- Timeline. In: Davidson P, et al. ed. *A Voyage Through Turbulence*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011: 426-434
- 17 Prandtl L. über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. Verhandl III, Intern. Math. Kongr. Heidelberg, Auch: Gesammelte Abhandlungen, 1904, 2: 484-491
- 18 von Karman. Tooling up mathematics for engineering. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1943, 1: 2-6
- 19 Chou PY, Chou RL. 50 years of turbulence research in China. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1995, 27: 1-15
- 20 Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. 7th ed. New York: McGraw Hill Company, 1978
- 21 Townsend AA. *The Structure of Turbulent Shear Flow*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1956
- 22 Turner JS. Buoyant plumes and thermals. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1969, 1: 29-44
- 23 Turner JS. Double-diffusive phenomena. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1974, 6: 37-54
- 24 Phillips OM. *The Dynamics of the Upper Ocean*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1977
- 25 Saffman PG. *Vortex Dynamics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992
- 26 Gill AE. *Atmosphere-ocean Dynamics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982
- 27 Monin AS, Yaglom A. *Statistical Fluid Mechanics*, vol. I. & II. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1971
- 28 Liepmann HW, Puckett AE. *Introduction to Aerodynamics of A Compressible Fluid*. New York: John Wiley & Sons, 1947
- 29 Liepmann HW, Roshko A. *Elements of Gas Dynamics*. New York, US: John Wiley & Sons, 1957
- 30 Lighthill J. Sydney Goldstein. 3 December 1903-22 January 1989. *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 1990, 36: 174
- 31 谈庆明. 钱学森对近代力学的发展所做的贡献. *力学进展*, 2001, 4: 500-508 (Tan Qingming. Contributions to development of modern mechanics by H. S. Tsien. *Advances In Mechanics*, 2001, 4: 500-508 (in Chinese))
- 32 黄虎. 由《郭永怀文集》识郭永怀. *应用数学和力学*, 2018, 12: 1323-1330 (Huang Hu. Understanding of Guo Yonghuai from the collected works of Guo Yonghuai. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, 12: 1323-1330 (in Chinese))
- 33 西北工业大学学术委员会. 罗时钧先生学术生涯及辉煌成就. *西北工业大学学报*, 2013, 4: 668-675 (Academic Committee of Northwestern Polytechnical University. Luo Shijun's academic career and brilliant scientific achievements. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2013, 4: 668-675 (in Chinese))
- 34 崔尔杰. 空天技术发展与现代空气动力学. *力学进展*, 2005, 2: 145-152 (Cui Erjie. The development of aero-astronautic technology and modern aerodynamics. *Advances in Mechanics*, 2005, 2: 145-152 (in Chinese))
- 35 Sun BH. Thirty years of turbulence study in China. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2019, 40(2): 193-214
- 36 Similon PL, Sudan RN. Plasma turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1990, 22: 317-347
- 37 Korobeinikov VP. Gas dynamics of explosions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1971, 3: 317-346
- 38 Stone HA, Stroock AD, Ajdari A. Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 381-411
- 39 De Wit A. Chemo-hydrodynamic patterns and instabilities. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2020, 52: 531-555
- 40 Bjerknes V. Das problem der wettervorhersage, betrachtet vom standpunkte der mechanik und der physik. *Meteorologische Zeitschrift*, 1904, 21: 1-7
- 41 Taylor GI. Eddy motion in the atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1915, 215: 1-26
- 42 Prandtl L. Meteorologische anwendung der strömungslehre. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre*, 1932, 19: 188-202
- 43 von Karman T. Sand Ripples in the Desert. *Technion Yearbook*, 1943, 52-54: CW98
- 44 李家春. 环境流体力学——它的意义、内容和方法. *力学与实践*, 1991, 13(2): 1-12 (Li Jiachun. Environmental fluid dynamics: its significance, contents and methods. *Mechanics in Engineering*, 1991, 13(2): 1-12 (in Chinese))
- 45 Bagnold RA. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen, 1941
- 46 Owen PR. Saltation of uniform grains in air. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 20(2): 225-242
- 47 Anderson RS, Haff PK. Simulation of eolian saltation. *Science*, 1988, 241(4867): 820-823
- 48 Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 1963, 91: 99-164
- 49 Vinkovic I, Aguirre C, Ayrault M, et al. Large-eddy simulation of the dispersion of solid particles in a turbulent boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 121: 283-311
- 50 Deardorff JW. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 41(2): 453-480
- 51 Zheng XJ, Feng SJ, Wang P. Modulation of turbulence by saltating particles on erodible bed surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 918: A16
- 52 Wang GH, Zheng XJ. Very large scale motions in the atmospheric surface layer: A field investigation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 802: 464-489
- 53 郑晓静, 王国华. 高雷诺数壁湍流的研究进展及挑战. *力学进展*, 2020, 50(1): 202001 (Zheng Xiaojing, Wang Guohua. Progresses and challenges of high Reynolds number wall-bounded turbulence. *Advances in Mechanics*, 2020, 50(1): 202001 (in Chinese))