

学术引领系列



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION



国家科学思想库

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国学科发展战略

流体动力学

中国科学院



科学出版社

学术引领系列



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT



国家科学思想库

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国学科发展战略

流体动力学

中国科学院

科学出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国学科发展战略·流体动力学/中国科学院编. —北京: 科学出版社,
2014. 8

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-041535-6

I. ①流… II. ①中… III. ①流体动力学—学科发展—发展战略—中
国 IV. ①0351.2—12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 177443 号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 侯俊琳 牛 玲 程 凤 / 责任校对: 桂伟利 邹慧卿

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail. sciencep. com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 9 月第一次印刷 印张: 42 3/4 插页: 14

字数: 745 000

定价: 180.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中国学科发展战略

指 导 组

组 长：白春礼

副组长：李静海 秦大河

成 员：詹文龙 朱道本 陈 颢

陈宜瑜 李 未 顾秉林

工 作 组

组 长：周德进

副组长：王敬泽 刘春杰

成 员：林宏侠 马新勇 张 恒

申倚敏 薛 淮 张家元

钱莹洁 傅 敏 刘伟伟

中国学科发展战略·流体动力学

专 家 组

组 长：李家春

成 员：（以拼音为序）

白以龙	樊 菁	郭尚平	胡文瑞
马晖扬	童秉纲	王道增	王光谦
吴承康	俞鸿儒	张涵信	郑晓静
周 恒			

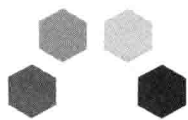
工 作 组

组 长：刘青泉

成 员：（以拼音为序）

陈义良	邓学鋆	符 松	何国威
胡国庆	黄 宁	姜宗林	林建忠
刘 桦	鲁传敬	陆利蓬	陆夕云
罗纪生	倪明玖	潘文霞	任玉新
沈 清	孙 茂	孙其诚	孙晓峰
谭文长	王晋军	叶友达	俞 刚
周济福	朱克勤		

项目秘书：孙相人



总 序

九层之台，起于累土^①

白春礼

近代科学诞生以来，科学的光辉引领和促进了人类文明的进步，在人类不断深化对自然和社会认识的过程中，形成了以学科为重要标志的、丰富的科学知识体系。学科不但是科学知识的基本的单元，同时也是科学活动的基本单元：每一学科都有其特定的问题域、研究方法、学术传统乃至学术共同体，都有其独特的历史发展轨迹；学科内和学科间的思想互动，为科学创新提供了原动力。因此，发展科技，必须研究并把握学科内部运作及其与社会相互作用的机制及规律。

中国科学院学部作为我国自然科学的最高学术机构和国家在科学技术方面的最高咨询机构，历来十分重视研究学科发展战略。2009年4月与国家自然科学基金委员会联合启动了“2011~2020年我国学科发展战略研究”19个专题咨询研究，并组建了总体报告研究组。在此工作基础上，为持续深入开展有关研究，学部于2010年年底，在一些特定的领域和方向上重点部署了学科发展战略研究项目，研究成果现以“中国学科发展战略”丛书形式系列出版，供大家交流讨论，希望起到引导之效。

根据学科发展战略研究总体研究工作成果，我们特别注意到学

^① 题注：李耳《老子》第64章：“合抱之木，生于毫末；九层之台，起于累土；千里之行，始于足下。”

科发展的以下几方面的特征和趋势。

一是学科发展已越出单一学科的范围，呈现出集群化发展的态势，呈现出多学科互动共同导致学科分化整合的机制。学科间交叉和融合、重点突破和“整体统一”，成为许多相关学科得以实现集群式发展的重要方式，一些学科边界更加模糊。

二是学科发展体现了一定的周期性，一般要经历源头创新期、创新密集区、完善与扩散期，并在科学革命性突破的基础上螺旋上升式发展，进入新一轮发展周期。根据不同阶段的学科发展特点，实现学科均衡与协调发展成为了学科整体发展的必然要求。

三是学科发展的驱动因素、研究方式和表征方式发生了相应的变化。学科的发展以好奇心牵引下的问题驱动为主，逐渐向社会需求牵引下的问题驱动转变；计算成为了理论、实验之外的第三种研究方式；基于动态模拟和图像显示等信息技术，为各学科纯粹的抽象数学语言提供了更加生动、直观的辅助表征手段。

四是科学方法和工具的突破与学科发展互相促进作用更加显著。技术科学的进步为激发新现象并揭示物质多尺度、极端条件下的本质和规律提供了积极有效手段。同时，学科的进步也为技术科学的发展和催生战略新兴产业奠定了重要基础。

五是文化、制度成为了促进学科发展的重要前提。崇尚科学精神的文化环境、避免过多行政干预和利益博弈的制度建设、追求可持续发展的目标和思想，将不仅极大促进传统学科和当代新兴学科快速发展，而且也为人 才成长并进而促进学科创新提供了必要条件。

我国学科体系系由西方移植而来，学科制度的跨文化移植及其在中国文化中的本土化进程，延续已达百年之久，至今仍未结束。

鸦片战争之后，代数学、微积分、三角学、概率论、解析几何、力学、声学、光学、电学、化学、生物学和工程科学等的近代科学知识被介绍到中国，其中有些知识成为一些学堂和书院的教学内容。1904年清政府颁布“癸卯学制”，该学制将科学技术分为格致科（自然科学）、农业科、工艺科和医术科，各科又分为诸多学

科。1905 年清朝废除科举，此后中国传统学科体系逐步被来自西方的新学科体系取代。

民国时期现代教育发展较快，科学社团与科研机构纷纷创建，现代学科体系的框架基础成型，一些重要学科实现了制度化。大学引进欧美的通才教育模式，培育各学科的人才。1912 年詹天佑发起成立中华工程师会，该会后来与类似团体合为中国工程师学会。1914 年留学美国的学者创办中国科学社。1922 年中国地质学会成立，此后，生理、地理、气象、天文、植物、动物、物理、化学、机械、水利、统计、航空、药学、医学、农学、数学等学科的学会相继创建。这些学会及其创办的《科学》、《工程》等期刊加速了现代学科体系在中国的构建和本土化。1928 年国民政府创建中央研究院，这标志着现代科学技术研究在中国的制度化。中央研究院主要开展数学、天文学与气象学、物理学、化学、地质与地理学、生物科学、人类学与考古学、社会科学、工程科学、农林学、医学等学科的研究，将现代学科在中国的建设提升到了研究层次。

中华人民共和国建立之后，学科建设进入了一个新阶段，逐步形成了比较完整的体系。1949 年 11 月新中国组建了中国科学院，建设以学科为基础的各类研究所。1952 年，教育部对全国高等学校进行院系调整，推行苏联式的专业教育模式，学科体系不断细化。1956 年，国家制定出《十二年科学技术发展远景规划纲要》，该规划包括 57 项任务和 12 个重点项目。规划制定过程中形成的“以任务带学科”的理念主导了以后全国科技发展的模式。1978 年召开全国科学大会之后，科学技术事业从国防动力向经济动力的转变，推进了科学技术转化为生产力的进程。

科技规划和“任务带学科”模式都加速了我国科研的尖端研究，有力带动了核技术、航天技术、电子学、半导体、计算技术、自动化等前沿学科建设与新方向的开辟，填补了学科和领域的空白，不断奠定工业化建设与国防建设的科学技术基础。不过，这种模式在某些时期或多或少地弱化了学科的基础建设、前瞻发展与创新活力。比如，发展尖端技术的任务直接带动了计算机技术的兴起

与计算机的研制，但科研力量长期跟着任务走，而对学科建设着力不够，已成为制约我国计算机科学技术发展的“短板”。面对建设创新型国家的历史使命，我国亟待夯实学科基础，为科学技术的持续发展与创新能力的提升而开辟知识源泉。

反思现代科学学科制度在我国移植与本土化的进程，应该看到，20 世纪上半叶，由于西方列强和日本入侵，再加上频繁的内战，科学与救亡结下了不解之缘，新中国建立以来，更是长期面临着经济建设和国家安全的紧迫任务。中国科学家、政治家、思想家乃至一般民众均不得不以实用的心态考虑科学及学科发展问题，我国科学体制缺乏应有的学科独立发展空间和学术自主意识。改革开放以来，中国取得了卓越的经济建设成就，今天我们可以也应该静下心来思考“任务”与学科的相互关系，重审学科发展战略。

现代科学不仅表现为其最终成果的科学知识，还包括这些知识背后的科学方法、科学思想和科学精神，以及让科学得以运行的科学体制，科学家的行为规范和科学价值观。相对于我国的传统文化，现代科学是一个“陌生的”、“移植的”东西。尽管西方科学传入我国已有一百多年的历史，但我们更多地还是关注器物层面，强调科学之实用价值，而较少触及科学的文化层面，未能有效而普遍地触及到整个科学文化的移植和本土化问题。中国传统文化以及当今的社会文化仍在深刻地影响着中国科学的灵魂。可以说，迄 20 世纪结束，我国移植了现代科学及其学科体制，却在很大程度上拒斥与之相关的科学文化及相应制度安排。

科学是一项探索真理的事业，学科发展也有其内在的目标，探索真理的目标。在科技政策制定过程中，以外在的目标替代学科发展的内在目标，或是只看到外在目标而未能看到内在目标，均是不适当的。现代科学制度化进程的含义就在于：探索真理对于人类发展来说是必要的和有至上价值的，因而现代社会和国家须为探索真理的事业和人们提供制度性的支持和保护，须为之提供稳定的经费支持，更须为之提供基本的学术自由。

20 世纪以来，科学与国家的目的不可分割地联系在一起，科

学事业的发展不可避免地要接受来自政府的直接或间接的支持、监督或干预，但这并不意味着，从此便不再谈科学自主和自由。事实上，在现当代条件下，在制定国家科技政策时充分考虑“任务”和学科的平衡，不但是最大限度实现学术自由、提升科学创造活力的有效路径，同时也是让科学服务于国家和社会需要的最有效的做法。这里存在着这样一种辩证法：科学技术系统只有在具有高度创造活力的情形下，才能在创新型国家建设过程中发挥最大作用。

在全社会范围内创造一种允许失败、自由探讨的科研氛围；尊重学科发展的内在规律，让科研人员充分发挥自己的创造潜能；充分尊重科学家的个人自由，不以“任务”作为学科发展的目标，让科学共同体自主地来决定学科的发展方向。这样做的结果往往比事先规划要更加激动人心。比如，19世纪末德国化学学科的发展史就充分说明了这一点。从内部条件上讲，首先是由于洪堡兄弟所创办的新型大学模式，主张教与学的自由、教学与研究相结合，使得自由创新成为德国的主流学术生态。从外部环境来看，德国是一个后发国家，不像英、法等国拥有大量的海外殖民地，只有依赖技术创新弥补资源的稀缺。在强大爱国热情的感召下，德国化学家的创新激情迸发，与市场开发相结合，在染料工业、化学制药工业方面进步神速，十余年间便领先于世界。

中国科学院作为国家科技事业“火车头”，有责任提升我国原始创新能力，有责任解决关系国家全局和长远发展的基础性、前瞻性、战略性重大科技问题，有责任引领中国科学走自主创新之路。中国科学院学部汇聚了我国优秀科学家的代表，更要责无旁贷地承担起引领中国科技进步和创新的重任，系统、深入地对自然科学各学科进行前瞻性战略研究。这一研究工作，旨在系统梳理世界自然科学各学科的发展历程，总结各学科的发展规律和内在逻辑，前瞻各学科中长期发展趋势，从而提炼出学科前沿的重大科学问题，提出学科发展的新概念和新思路。开展学科发展战略研究，也要面向我国现代化建设的长远战略需求，系统分析科技创新对人类社会发展和我国现代化进程的影响，注重新技术、新方法和新手段研究，

提炼出符合中国发展需求的新问题和重大战略方向。开展学科发展战略研究，还要从支撑学科发展的软、硬件环境和建设国家创新体系的整体要求出发，重点关注学科政策、重点领域、人才培养、经费投入、基础平台、管理体制等核心要素，为学科的均衡、持续、健康发展出谋划策。

2010年，在中国科学院各学部常委会的领导下，各学部依托国内高水平科研教育等单位，积极酝酿和组建了以院士为主体、众多专家参与的学科发展战略研究组。经过各研究组的深入调查和广泛研讨，形成了“中国学科发展战略”丛书，纳入“国家科学思想库—学术引领系列”陆续出版。学部诚挚感谢为学科发展战略研究付出心血的院士、专家们！

按照学部“十二五”工作规划部署，学科发展战略研究将持续开展，希望学科发展战略系列研究报告持续关注前沿，不断推陈出新，引导广大科学家与中国科学院学部一起，把握世界科学发展动态，夯实中国科学发展的基础，共同推动中国科学早日实现创新跨越！



“流体动力学学科发展战略研究”作为中国科学院学部研究部署的系列学科战略研究项目，于2011年12月经中国科学院数学学部常务委员会审议立项，由李家春院士负责，以中国科学院力学研究所为依托单位，成立了由14位院士及专家组成的专家组，27位专家组成的工作组，经过多次研讨，大家共同完成了本战略研究报告。

通过学科战略研究引领学科发展方向是全球学术界的共识。1996年，美国理论和应用力学国家委员会邀请 J. L. Lumley、A. Acrivos、L. G. Leal 和 S. Leibovich 任主编，组织世界知名流体动力学家撰写各个分支领域的发展趋势，编辑出版了 *Research Trends on Fluid Dynamics*。2000年，英国剑桥大学 G. K. Batchlor、H. K. Moffat 和 M. G. Worster 精选了涉及界面现象、流动稳定性和湍流、热对流、定向凝固、磁流体动力学、血流动力学、地球物理流体动力学的11个主题，出版了 *Perspective in Fluid Dynamics, A Introduction to Current Research*。这两本综述论著对引领21世纪的流体动力学研究和发展起到了积极的推动作用。1993年，由国家自然科学基金委员会编写的《现代流体力学进展》出版，结合学科发展趋势和我国具体情况，提出了未来若干年流体动力学的研究重点。因此，20年以后的今天，我们再以上述著作作为蓝本，开展流体动力学的学科战略研究是非常适时和十分必要的。

按照原计划，本战略研究报告共分五部分二十七章。绪论由李家春撰写，介绍了流体动力学的发展概况，重点突出经济社会的重

大需求和未来发展的前沿交叉领域。第一部分包括第一至第六章，由朱克勤、林建忠、孙其诚、王光谦、沈清、罗纪生、符松、何国威、李家春等专家负责撰写，介绍了流体动力学的基础研究，涉及复杂流体介质的特性和状态，包括非牛顿流、多相流、颗粒物质和颗粒流、流动稳定性和湍流、湍流模式、大涡模拟等内容；第二部分包括第七至第十二章，由叶友达、姜宗林、樊菁、邓学鋆、陆利蓬、俞刚、孙晓峰等专家负责撰写，介绍了可压缩流体动力学前沿领域的内容，涉及航空、航天工程相关空气动力学问题，包括高温气体动力学、稀薄气体动力学、旋涡主控的流动机制、航空涡轮发动机气体动力学，超声速燃烧和高超声速推进、气动声学 and 航空噪声控制等内容；第三部分包括第十三至第十八章，由鲁传敬、刘桦、周济福、王道增、刘青泉、黄宁等专家负责撰写，介绍了不可压缩流体动力学的前沿领域的内容，涉及船舶、近岸、海洋、环境工程的流体力学，包括高速水动力学、海岸工程水动力学、海洋工程流体力学、水环境治理中的流体力学、自然界的水沙流动、风沙环境动力学等内容；第四部分包括第十九至第二十四章，由吴承康、潘文霞、倪明玖、陈义良、谭文长、孙茂、陆夕云、胡国庆等专家负责撰写，介绍了流体动力学的交叉学科，包括低温等离子体流动、核能相关多场耦合传热传质、燃烧与反应流、生物医学工程中的流体力学、动物飞行与游动的流体力学、微纳米流体力学等内容；第五部分包括第二十五至第二十七章，由任玉新、王晋军、姜宗林、俞鸿儒等专家负责撰写，介绍了流体动力学数值模拟和实验新技术，包括计算流体力学，三维流速场的体测量技术和高焓流动实验装置和测试技术等内容。阅读由这些专家精心撰写的综述，读者可以深信，流体动力学是一门富有生命力和广阔应用前景的基础学科。

在研讨过程中，我们注意充分发挥专家组和工作组的作用，由专家组提出总体框架和学科选题，并对文稿进行了评审。由工作组的刘青泉、符松、何国威、姜宗林、叶友达、潘文霞、黄宁等协助组织，分专题进行多次研讨。初稿完成后，专家组认真评审、反复

修改，以保证稿件的质量。本战略研究报告最后由中国科学院数理学部常务委员会审定，并正式出版。

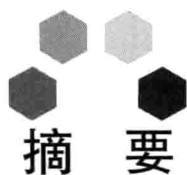
本战略研究报告适合高层次的战略和管理专家、相关学科领域的专家，从事流体动力学相关领域研究的高等院校师生、研究机构和产业部门的研究人员和工程技术人员，以及社会公众阅读，期望本战略研究报告能在流体动力学的前沿研究和工程应用中发挥积极作用。

流体动力学学科发展战略研究组对中国科学院力学研究所和科技处的全力支持、秘书处孙相人的辛勤工作表示衷心感谢。

由于时间仓促，认识局限，本战略研究报告中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

李家春

2013年6月



本战略研究报告是中国科学院数学部力学学科关于流体动力学及其各分支领域、学科前沿的战略研究报告。在分析科技发展和国家需求的基础上，预测未来十年流体动力学的学科发展方向和趋势。

本战略研究报告共五部分二十七章。绪论部分回顾学科发展简史后，综述了流体动力学在众多工程问题中的重大需求和在前沿、交叉领域的研究方向。随后的五部分包括：流体动力学的基础研究、可压缩流体动力学、不可压缩流体动力学、流体动力学的交叉学科、流体动力学的计算方法和实验技术。参与研究的专家学者分别对 27 个主题的国内外研究现状、最新进展、未来趋势进行了评述，并有针对性地提出了若干建议。

流体广泛地存在于自然界、生命体和工程技术领域，流体介质及流动的复杂性使得流体动力学蕴含着大量的重大基础科学问题，如湍流、流动稳定性、非牛顿流、多相流、颗粒流等，它们始终是流体力学界着重关注的基本问题，是流体动力学的基本理论框架，并在各个领域得到广泛的应用。为此，流体动力学的基础研究部分，选取了非牛顿和黏弹性流体，多相流的理论、模拟和实验，自然界和工程中的颗粒物质和颗粒流，可压缩剪切层的发展与转换，可压缩湍流及其模拟，湍流的大涡模拟等 6 个基础前沿领域方向，从宏观上介绍了各领域方向的学科特点和国内外研究现状，分析了今后的发展趋势，指出了当前研究的难点和存在的问题，从学科前沿和国家重大需求两个方面，针对性地提出了未来发展方向和亟待

研究解决的问题。

可压缩流体动力学主要关注以空气为介质的高速流动问题。自空气动力学诞生之日起,在航空技术领域发挥了巨大作用,特别是近30年以来,随着国防和航天技术的发展需求,展现出巨大的应用前景和发展潜力。可压缩流体动力学的前沿部分,选取了与航空、航天密切相关的高温气体动力学、稀薄气体动力学、旋涡主控的流动与控制、航空发动机的气体动力学、超声速燃烧和高超声速推进、气动声学 and 航空噪声控制等6个前沿领域。从学科特点、发展历程、应用背景及研究进展等多个角度阐述了国内外在这几个领域的研究现状和发展趋势;同时,分析了空间时代学科所面临的机遇和挑战,以及我国在该领域发展中存在的不足和问题,并从学科前沿和国家重大需求两个方面,建议了未来发展方向和亟待研究解决的问题。

不可压缩流体动力学主要研究可忽略流体介质密度变化的流动问题,是流体力学比较早的一个重要分支,对理解以水体为介质的流动及以空气为介质的低速流动发挥着重要的作用。不可压缩流体动力学为研究河流、湖泊、河口、近岸、海洋等地表水和岩土体地下流动,以及大气边界层流动提供了重要的理论基础。在船舶海洋工程、水利交通工程、大气环境和水环境治理等领域发挥了巨大的作用,并随着深海能源开发、舰船武器研制及环境保护需求的不断提高,不断涌现出新的科学问题,显现出巨大的发展潜力。不可压缩流体动力学的前沿部分,选取了高速水动力学、海岸工程水动力学、海洋工程流体动力学、水环境治理中的流体力学、自然界的水沙流动、风沙环境力学等6个前沿及交叉研究领域。重点从现代工程需求出发,论述了这些流动的基本特征,回顾了各领域的研究发展历程,分析了国内外的研究现状和学科发展趋势,特别强调了在国防建设、能源开发、水利工程、环境治理等新的需求下出现的新的科学问题和遇到的新挑战,在此基础上,提出了学科发展中存在的不足和急需继续研究解决的问题,以及相应的建议。

随着现代科技和工程技术的发展,人类面对的实际问题越来越

复杂,对解决实际问题的要求也越来越高,流体力学与其他学科的交叉和融合日益突出,成为流体力学的一个重要发展趋势,尤其是近 50 年来,这种交叉形成多个流体力学交叉分支学科,如等离子体动力学、电磁流体力学、生物流体力学、仿生流体力学等,不断丰富着流体力学的研究内容和方法,使流体力学始终保持着旺盛的生命力,并在核工程技术、发动机技术、人类健康、空间探测、微电子技术,以及武器设计和工业安全防护等方面发挥了重要作用。流体动力学的交叉学科部分,选取了低温等离子体流动、核能相关的多场耦合传热和传质、燃烧和反应流、生物医学工程中的流体力学、动物飞行和游动的流体力学、微纳米流体力学等 6 个流体力学的交叉前沿领域。结合国际研究发展和我国学者的工作,分析了这些交叉领域的研究进展和发展动态,同时,针对我国在这些领域的发展,指出了存在的问题和不足,并提出了今后需要加强的基础前沿方向和针对国家需求需要着力解决的重大科学问题。

流体力学的发展离不开技术和方法的创新,方法和技术上的重大突破将带动学科的发展,特别是流体力学实验,在流体力学理论体系的建立过程中起到了至关重要的作用;随着计算机技术和计算方法的快速发展,计算流体力学已成为流体力学的一个重要分支学科,在现代流体力学发展及解决日益复杂的流体力学问题中发挥着越来越重要的作用。流体动力学数值模拟和实验新技术部分,选取了计算流体力学、三维速度场的体测量技术、高焓流动实验装置和测试技术 3 个领域方向。从技术方法的总体发展趋势、国内外研究发展现状、最新发展趋势及国内研究存在的问题等方面进行了阐述,并提出了今后重点发展的方向和亟须解决的问题。其中,在计算流体力学中,主要关注流体模拟计算的高精度、高效率和适应性;在三维速度场的测量技术中,主要关注三维测速技术、数据处理方法、流场诊断技术及实验硬件技术等方面;在高焓流动实验装置和测试技术中,主要关注高焓激波风洞装备技术和流场诊断技术,显示了高参数实验装备和测试技术的重要性。

总之,流体动力学蕴含着重大的基础科学问题,同时又与国家