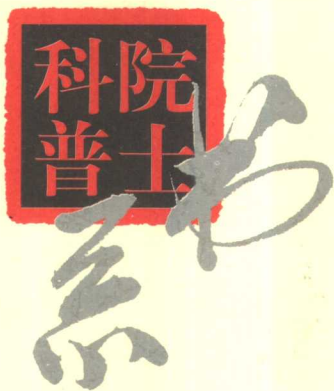


国家重点图书

林宗虎 著

变幻流动的科学

—— 多相流体力学



清华大学出版社
暨南大学出版社

林宗虎 著

变幻流动的科学

—— 多相流体力学



清华大学出版社



暨南大学出版社

(京)新登字 158 号

图书在版编目(CIP)数据

变幻流动的科学:多相流体力学/林宗虎著. —北京:清华大学出版社;广州:暨南大学出版社,2000.12

(院士科普书系/路甬祥主编)

ISBN 7-302-04205-5

I. 变… II. 林… III. 多相流体力学-普及读物 IV. 0359-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 83433 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

暨南大学出版社(广州天河,邮编 510630)

<http://www.jnu.edu.cn>

责任编辑: 潘真微

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 **印张:** 6.375 **字数:** 125 千字

版 次: 2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04205-5/G·172

印 数: 0001~5000

定 价: 12.00 元

《院士科普书系》编委会(第二届)

编委会名誉主任 周光召 宋 健 朱光亚

编委会主任 路甬祥

编委会委员 (两院各学部主任、副主任)

陈佳洱 杨 乐 闵乃本 陈建生 周 恒

王佛松 白春礼 刘元方 朱道本 何鸣元

梁栋材 卢永根 陈可冀 匡廷云 朱作言

孙 枢 安芷生 李廷栋 汪品先 陈 颢

王大中 戴汝为 周炳琨 刘广均 杨叔子

钟万勰 关 桥 吴有生 刘大响 顾国彪

陆建勋 龚惠兴 吴 澄 李大东 汪旭光

陆钟武 王思敬 朱建士 郑健超 胡见义

陈厚群 陈肇元 崔俊芝 张锦秋 刘鸿亮

方智远 旭日干 周国泰 王正国 赵 铠

钟南山 桑国卫

编委会执行委员 郭传杰 常 平 钱文藻 罗荣兴

编委会办公室主任 罗荣兴(科学时报社)

副主任 周先路(中国科学院学部联合办公室)

白玉良(中国工程院学部工作部)

蔡鸿程(清华大学出版社)

周继武(暨南大学出版社)

总 策 划 罗荣兴 周继武 蔡鸿程

总 责 任 编 辑 周继武 蔡鸿程 宋成斌

提高全民族的科学素质

——序《院士科普书系》

人类走到了又一个千年之交。

人类的文明进程至少已有 6000 余年。地球上各个民族共同创造了人类文明的灿烂之花。中华文明同古埃及文明、古巴比伦文明、古印度文明、古希腊文明等一起，是人类文明的发源地。

15 世纪之前，以中华文明为代表的东方文明曾遥遥领先于当时的西方文明。从汉代到明代初期，中国的科学技术在世界上一直领先长达 14 个世纪以上。在那个时期，影响世界文明进程的重要发明中，相当部分是中华民族的贡献。

后来，中国逐渐落后了。中国为什么落后？近代从林则徐以来许多志士仁人就不断提出和思索这个历史课题。但都没有找到正确的答案。以毛泽东同志、邓小平同志为代表的中国共产党人作出了唯一正确的回答：中国落后，是由于生产力的落后和社会政治的腐朽。西方列强对中国的欺凌，更加剧了中国经济的落后和国家的衰败。而落后就要挨打。所以要进行革命，通过革命从根本上改变旧的生产关系和政

治上层建筑,为解放和发展生产力开辟道路。于是,就有了 80 多年前孙中山先生领导的辛亥革命,就有了 50 年前我们党领导的新民主主义革命的胜利,以及随后进行的社会主义革命的成功。无论是革命还是我们正在进行的社会主义改革,都是为了解放和发展生产力。

邓小平同志提出的“科学技术是第一生产力”的著名论断,使我们对科学技术在经济和社会发展中的地位与作用的认识,有了新的飞跃。我们应该运用这一真理性的认识,深刻总结以往科学技术发展的历史经验,把我国科技事业更好地推向前进。中国古代科技有过辉煌的成果,但也有不足,主要是没有形成实验科学传统和完整的学科体系,科学技术没有取得应有的社会地位,更缺乏通过科技促进社会生产力发展的动力和机制。为什么近代科学技术首先在文艺复兴后的欧洲出现,而未能在中国出现,这可能是原因之一吧。而且,我国历史上虽然有着伟大而丰富的文明成果和优良的文化传统,但相对说来,全社会的科学精神不足也是一个缺陷。鉴往开来,继承以往的优秀文化,弥补历史的不足,是当代中国人的社会责任。

在新的世纪中,中华民族将实现伟大的复兴。在一个占世界人口五分之一的发展中大国里,再用 50 年的时间基本实现现代化,这又是一项惊天动地的伟业。为实现这个光辉

的目标,我们应该充分发挥社会主义制度的优越性,坚持不懈地实施科教兴国战略。

科教兴国,全社会都要参与,科学家和教育家更应奋勇当先,在全社会带头弘扬科学精神,传播科学思想,倡导科学方法,普及科学知识。科教兴国也要抓好基本建设。编辑出版高质量的科普图书,就是一项基本建设,对于提高全民族的科学素质,是很有意义的。在《院士科普书系》出版之际,写了上面这些话,是为序。

A handwritten signature in black ink, reading '江泽民' (Jiang Zemin), written in a cursive style.

1999 年 12 月 23 日

人民交给的课题

——写在《院士科普书系》出版之际

世界正在发生深刻的变化。这一变化是 20 世纪以来科学技术革命不断深入的必然结果。从马克思主义的观点看来,生产力的发展是人类社会发展与文明进步的根本动力;而“科学技术是第一生产力”,因此,科学技术是推动社会发展与文明进步的革命性力量。从生产力发展的阶段看,人类走过了农业经济时代、工业经济时代,正在进入知识经济时代。

知识经济时代,知识取代土地或资本成为生产力构成的第一要素。知识不同于土地或资本,不仅仅是一种物质的形态,知识同时还是一种精神的形态。知识,首先是科学技术知识,将不仅渗透到生产过程、流通过程等经济领域,同时还将渗透到政治、法律、外交、军事、教育、文化和社会生活等一切领域。可以说,在新的历史时期,一个国家、一个民族能否掌握当代最先进的科技知识以及这些科技知识在国民中普及的程度将决定其国力的强弱与社会文明程度的高低。科技创新与科普工作是关系到一个国家、一个民族兴衰的

大事。

对于我们科技工作者来说,我们的工作应当包含两个方面:发展科技与普及科技;或者说应当贯穿于知识的生产、传播及应用的全过程。我们所说的科普工作,不仅是普及科学知识,更应包括普及科学精神和科学方法。

我们的党和政府历来都十分重视科普工作。党的十五大更是把树立科学精神、掌握科学方法、普及科技知识作为实施科教兴国战略和社会主义文化建设的一项重要任务提到了全党、全国人民和全体科学工作者的面前。

正是在这样的背景下,1998年春由科学时报社(当时叫“中国科学报社”)提出创意,暨南大学出版社和清华大学出版社积极筹划,会同中国科学院学部联合办公室和中国工程院学部工作部,共同发起《院士科普书系》这一重大科普工程。

1998年6月,中国科学院与中国工程院“两院”院士大会改选各学部领导班子,《院士科普书系》编委会正式成立,各学部主任均为编委会委员。编委会办公室在广泛征求意见的基础上拟出150个“提议书目”,在“两院”院士大会上向1000多名院士发出题为《请科学家为21世纪写科普书》的“约稿信”,得到了院士们的热烈响应。在此后的半年多时间里,有176名院士同编委会办公室和出版社签订了175本书的写作出版协议,开始了《院士科普书系》艰辛的创作过程。

《院士科普书系》的定位是结合当代学科前沿和我国经济建设与社会发展的热点问题,普及科技知识、科学方法。科学性、知识性、实用性和趣味性是编写的总要求。

编写科普书对我国大多数院士来说是一个新课题。他们惯于撰写学术论文。如何把专业的知识和方法写成生动、有趣、有文采的科普读物,于科技知识中融入人文教育,不是一件容易的事。不少院士反映:写科普书比写学术专著还难。但院士们还是以感人的精神完成自己的书稿。在此过程中,科学时报社和中国科学院学部联合办公室、中国工程院学部工作部以及清华大学出版社、暨南大学出版社也付出了辛勤的劳动。

《院士科普书系》首辑终于出版了。这是人民交给科学家课题,科学家向人民交出答卷。江泽民总书记专门为《院士科普书系》撰写了序言,指出科普是科教兴国的基础工程,勉励科学家、教育家“在全社会带头弘扬科学精神,传播科学思想,倡导科学方法,普及科学知识”,充分表达了党的第三代领导集体对科普的重视,对提高全民族科技素质的殷殷期望。

《院士科普书系》将采取滚动出版的模式。一方面随着院士们的创作进程,成熟一批出版一批;另一方面随着科学技术的进步和创新,不断有新的题材由新的院士作者撰写。因此,《院士科普书系》将是一个长期的、系统的科普工程。

这一庞大的工程,不但需要院士们积极投入,还需要各界人士和广大读者的支持——对我们的选题和内容提出修订、完善的建议,帮助我们不断提高《院士科普书系》的水平与质量,使之成为国民科技素质教育的系统而经典的读本。在科学家群体撰写科普书方面,我们也要以此为起点为开端,参与国际竞争与合作,勇攀世界科普创作的高峰。

中国科学院院长
《院士科普书系》编委会主任

路甬祥

2000年1月8日

前 言

多相流体力学主要研究多相流体在流动时的力学问题。常见的多相流体有气液混合物,夹带着颗粒的气体或液体,多种气液混合物,气液和颗粒混合物等。这些混合物在流动时,其中的气体、液体或颗粒在混合物中的分布是时刻在变化的,形成一种变幻的流动。

多相流体的流动过程不仅是日常生活和自然界的常见现象,而且广泛存在于一系列现代工程设备中。在自然界中常见的夹着灰粒、尘埃或雨滴的风,夹着泥沙奔流的河水以及海面上带雾的上升气流等都是多相流动的实例。在日常生活中常见的烟雾,啤酒或饮料夹着气泡从瓶中注入杯子的流动过程以及水壶中水的沸腾过程也都属于多相流体流动现象。

在动力、核能、化工、石油、制冷、冶金、管道输送、宇航、医药、食品等现代工程设备中也广泛存在多相流体的流动过程,如果不掌握这些流动过程的力学规律就无法保证有关设备的可靠设计和安全运行。因此,多相流体力学对于现代工程设备的研制与开发是十分重要的。

如所周知,流体力学是一门复杂的学科,主要论述气体或液体的力学规律。本书论述的多相流体力学是由流体力学发展而成的,其研究对象为多种流体及颗粒混合物的流动过程和力学行为,因而其研究难度和复杂性更甚于一般流体

力学。现今要在十余万字篇幅下深入浅出地论述这门学科，实非易事。

思考再三，最后确定还是采用循序渐进的方式来进行论述。因而在本书中先扼要论述一般流体力学的主要研究内容，然后论述多相流体力学的发展过程和基本研究内容。最后结合多种现代工程实例来论述多相流体力学在指导研制和开发现代工程设备中的重要作用。

在论述方式中力求通俗易懂，着重于物理概念的叙述而避免纯数学的推导，以达到科普的目的。

多相流体力学总的来说是一门大有发展前途的新兴学科，其中不少领域尚属空白或有待进一步研究。希望通过本书能使读者对多相流体力学及其对现代工程的重要作用有一个概略的了解。更希望有更多的青年学者和各方面的专家参加到这一新兴学科的研究领域中来，为发展这门学科和研制更多更好的具有创造性的现代工程设备而作出贡献。

由于篇幅有限、涉及面广，书中可能存在不少缺点错误，敬请读者批评指正。

林宗虎

2000年7月

目 录

1 流体力学的发展及主要研究内容	
1.1 流体力学的发展	1
1.2 流体静力学的基本内容及工程应用	5
1.3 流体动力学的基本内容及工程应用	13
2 多相流体力学的发展、流型和主要参数	
2.1 多相流体的定义及分类	49
2.2 多相流体力学的发展	53
2.3 多相流的流型(流动结构)和流型图	59
2.4 多相流的主要参数及其计算	90
3 多相流体力学的基本方程式和研究内容	
3.1 多相流体力学的基本方程式	94
3.2 多相流的流动阻力研究	97
3.3 多相流的流型研究	108
3.4 多相流中的真实容积含量和 重位压力降研究	110
3.5 管内多相流体的不稳定流动研究	113
3.6 多相流体的分离与均匀分配研究	128
3.7 强化传热过程中的多相流问题研究	144

4 多相流体力学在现代工程中的应用

4.1 多相流体力学在现代火电工程中的应用	157
4.2 多相流体力学在现代核电工程中的应用	172
4.3 多相流体力学在其他现代工程中的应用	182

1

流体力学的发展及 主要内容

多相流体力学起源于流体力学,是流体力学的一个重要分支,并且许多计算式还涉及流体力学中的一系列基本内容,因此在论述多相流体力学之前,应该使读者对流体力学及其发展有一个概要的了解。

1.1 流体力学的发展

通常,人们将具有流动性的气体和液体统称为流体。在自然界中流体是广泛存在的,它们和人类的生活和生产以及其他生物的生存有着极其密切的关系。人类和其他生物离开了空气和水就无法生存。人

流体力学开始形成一门独立的科学约始于 18 世纪。

类的工农业生产、交通运输乃至衣食住行等日常生活都与流体有关。早在数千年前人们已开始对流体及其作用力进行了研究。第一篇有关流体力学的论文应属公元前 250 年左右希腊著名数学及力学家阿基米德所著“论浮体”一文。在此论文中得出了著名的有关浮力的阿基米德定律。在随后的 17 个世纪内,由于奴隶制和封建制度的束缚,生产力发展缓慢,流体力学也未得到重大的发展。直到 16 及 17 世纪,在欧洲由于封建制度的开始崩溃,社会经济制度发生了变革,从而使生产力得到了进一步发展。由于生产发展的需要,有力地促进了人们对流体的研究。例如,达·芬奇、伽里略、巴斯加、托里拆里、牛顿等都对流体进行了研究并获得一系列成果。特别是牛顿,他在固体力学方面的研究成果给流体力学的发展注入了重要的推动力。

流体力学开始形成一门独立的科学约始于 18 世纪。在此期间由于蒸汽机的发明引起的工业革命以及航海、水利等工程的发展促进了流体力学的发展。其中欧拉的研究奠定了经典流体力学的基础。欧拉建立的欧拉方程式得出了研究流体的基本方法,并且他著述丰硕。欧拉的著作不仅具有重要的理论意义,而且也有巨大的实际意义。在此期间伯努利的研究工作对流体力学的发展起到重要的促进作用。伯努利首先将能量守恒定律应用到流体上来,并得出了著名的伯努利方程式。这一方程式确定了流体运动速度、流体压力和流体所处高度间的相互关系。先是在不可压缩流体中应用,后来又被推广到可压缩流体,成为气体动力学中最基本的公式之一。