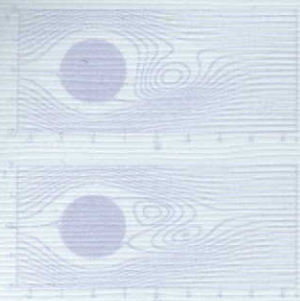


■ 大众力学丛书



王振东 著

诗情画意谈力学



高等教育出版社
Higher Education Press

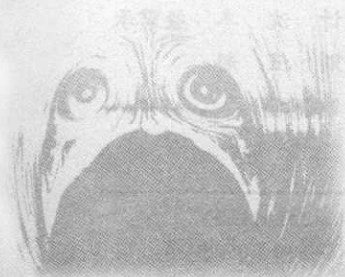
本书是一本科学与艺术交融的力学科普读物，内容大致可分为“力学诗话”和“力学趣谈”两部分。“力学诗话”的文章，力图从唐宋诗词中对力学现象观察和描述的佳句入手，将诗情画意与近代力学的发展交融在一起阐述。“力学趣谈”的文章，结合问题研究的历史，就日常生活、生产中的力学现象，风趣地揭示出深刻的力学道理。

全书内容生动新颖，文理交叉，图文并茂，笔调流畅，可读性强，是一本适合文理工科大学生、研究生，大中专物理教师，工程技术人员及诗词和自然科学爱好者的优秀读物。这本科普小册子，能使读者感受力学魅力、体验诗情人生，有益于读者交融文理、开阔思路和激发创造性。

■ 大众力学丛书

诗情画意谈力学

王振东 著



高等教育出版社
Higher Education Press

图书在版编目(CIP)数据

诗情画意谈力学/王振东著. —北京: 高等教育出版社,
2008. 6

ISBN 978 - 7 - 04 - 024464 - 9

I. 诗… II. 王… III. 力学 - 普及读物 IV. 03 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 067047 号

策划编辑 王超 责任编辑 张玉海 封面设计 沈冬 殷君承
责任绘图 尹莉 版式设计 陆瑞红 责任校对 王超
责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网址	http://www.hep.edu.cn
总机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印刷	保定市中美美凯印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开本	880 × 1230 1/32	版次	2008年 6月第1版
印张	7.125	印次	2008年 6月第1次印刷
字数	170 000	定价	15.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 24464 - 00

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

陈立群 戴世强⁺ 刘延柱 苗天德 余振苏

隋允康 王振东 武际可* 叶志明 张若京

仲 政 朱克勤 朱照宣

(注：后加*者为主任委员，后加⁺者为副主任委员)

中国力学学会《大众力学丛书》

总 序

科学除了推动社会生产发展外，最重要的社会功能就是破除迷信、战胜愚昧、拓宽人类的视野。随着我国国民经济日新月异的发展，广大人民群众渴望掌握科学知识的热情不断高涨，所以，普及科学知识，传播科学思想，倡导科学方法，弘扬科学精神，提高国民科学素质一直是科学工作者和教育工作者长期的任务。

科学不是少数人的事业，科学必须是广大人民参与的事业。而唤起广大人民的科学意识的主要手段，除了普及义务教育之外就是加强科学普及。力学是自然科学中最重要的一个基础学科，也是与工程建设联系最密切的一个学科。力学知识的普及在各种科学知识的普及中起着最为基础的作用。人们只有对力学有一定程度的理解，才能够深入理解其他门类的科学知识。我国近代力学事业的奠基人周培源、钱学森、钱伟长、郭永怀先生和其他前辈力学家非常重视力学科普工作，并且身体力行，有过不少著述，但是，近年来，与其他兄弟学科（如数学、物理学等）相比，无论从力量投入还是从科普著述的产出看来，力学科普工作显得相对落后，国内广大群众对力学的内涵及在国民经济发展中的重大作用缺乏有深度的了解。有鉴于此，中国力学学会决心采取各种措施，大力推进力学科普工作。除了继续办好现有的力学科普夏令营、周培源力学竞赛等活动以外，还将举办力学科普工作大会，并推出力学科普丛书。2007年，中国力学学会常务理事会决定组成《大众力学丛书》编辑委员会，计划集中出版一批有关力学的科普著作，把它们集结为

《大众力学丛书》，希望在我国科普事业的大军中团结国内力学界人士做出更有效的贡献。

这套丛书的作者是一批颇有学术造诣的资深力学家和相关领域的专家学者。丛书的内容将涵盖力学学科中的所有二级学科：动力学与控制、固体力学、流体力学、工程力学以及交叉性边缘学科。所涉及的力学应用范围将包括：航空、航天、航运、海洋工程、水利工程、石油工程、机械工程、土木工程、化学工程、交通运输工程、生物医药工程、体育工程等等。大到宇宙、星系，小到细胞、粒子，远至古代文物，近至家长里短，深奥到卫星原理和星系演化，优雅到诗画欣赏，只要其中涉及力学，就会有相应的话题。本丛书将以图文并茂的版面形式，生动鲜明的叙述方式，深入浅出、引人入胜地把艰深的力学原理和内在规律介绍给最广大范围的普通读者。这套丛书的主要读者对象是大学生和中学生以及有中学以上文化程度的各个领域的人士。我们相信它们对广大教师和研究人員也会有参考价值。我们欢迎力学界和其他各界的教师、研究人員以及对科普有兴趣的作者踊跃撰稿或提出选题建议，也欢迎对国外优秀科普著作的翻译。

丛书编委会对高等教育出版社的大力支持表示深切的感谢。出版社领导从一开始就非常关注这套丛书的选题、组稿、编辑和出版，派出了精兵强将从事相关工作，从而保证了本丛书以优质的形式亮相于国内科普丛书之林。

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

2008年4月

序

Preface

大众
力学
丛书

力学是研究物体机械运动的科学。力学既是工程科学技术的基础，也是一门基础的自然科学。力学广泛存在于人的生活、自然现象和各种生产过程中，普及力学知识，是力学工作者的责任和义务。

科学普及是一切科学活动的目的和归宿。科学活动的成果，一方面是用物质形式上的普及，改善和丰富了人们的生活，让人们享受科学研究的成果。另一方面在精神上，要较充分地用科普形式，使因社会分工和知识背景的差异，不了解科学活动的人，也能学习科学知识，理解科学精神和科学方法，破除迷信，树立科学的世界观。

科学和艺术，是社会物质和精神财富“金币”的两个侧面。她们互相依托和关联，共同基础都是人类的创造力。历史上，曾经有过科学和艺术相互融会的辉煌年代。后来由于社会分工越来越细，二者才逐渐分开。文理本来是相通的，只是由于人为的原因才在学校的教学中被分割开来。

中国是一个诗词的国度。唐宋诗词是中国文学史上的瑰宝，千百年来一直传诵不衰。过去人们总是从老子、庄子、墨子等一些思想家的著述中，去寻找古代的力学思想。实际上，唐宋诗词

中也有一些佳句，是古人对力学现象观察的精湛描述。

本书所收的力学科普文章，多已在《力学与实践》、《科学》、《自然杂志》等期刊上刊登。现适当修改补充，其内容大致可分为“力学诗话”和“力学趣谈”两部分。

“力学诗话”的文章，力图从唐宋诗词中对力学现象观察和描述的佳句入手，将诗情画意与近代力学的发展交融在一起阐述。

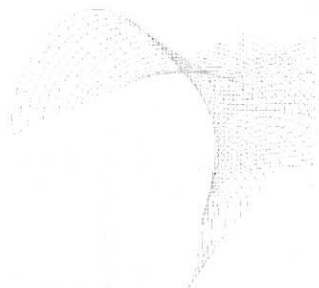
“力学趣谈”的文章，希望结合问题研究的历史，就日常生活、生产中的力学现象，风趣地揭示出深刻的力学道理。

诺贝尔物理奖得主崔琦先生，在谈到自己为什么会得奖时说：“我就是觉得好玩，我每天走进实验室，我的感觉每天都是新的，不知道实验会产生什么结果，这让我非常好奇。”他是带着一种顽童的心态去做研究，才做出了创新的成果。

希望这本科普小册子，能使读者感受力学魅力、体验诗情人生，有益于读者（特别是大学生、研究生）交融文理、开阔思路和激发创造性。

王振东

2007年12月于天津大学新园村



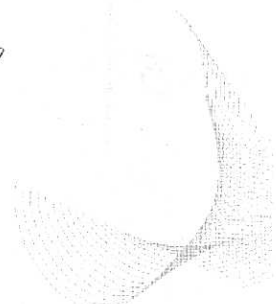
目 录

Contents

- 1 野渡无人舟自横
——漫话流体运动中物体的稳定性 / 1
- 2 不尽长江滚滚流
——漫话流体与流动性 / 7
- 3 但见流沫生千涡
——漫话流体中的涡旋 / 18
- 4 郡亭枕上看潮头
——漫话潮汐及其开发利用 / 29
- 5 风乍起，吹皱一池春水
——漫话流体运动的不稳定性 / 39

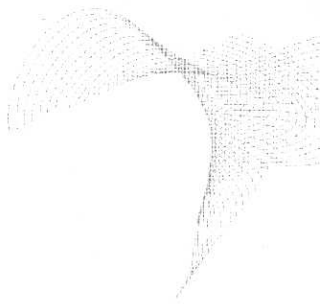
大众
力学
丛书

- 6 长使英雄泪满襟
——漫话润湿现象及其应用 / 50
- 7 车如流水马如龙
——漫话交通流动 / 60
- 8 直挂云帆济沧海
——漫话各式各样的帆 / 71
- 9 飞湍瀑流争喧豗
——漫话流体运动致声和声音的双重作用 / 82
- 10 春蚕到死丝方尽
——漫话液体的拉丝现象 / 90
- 11 排云结阵南北行
——漫话雁群和飞机的结阵飞行 / 99
- 12 大风起兮云飞扬
——漫话流动显示及纳斯方程 / 109
- 13 漫谈卡门涡街及其应用 / 122
- 14 漫谈涂布流动 / 130
- 15 漫谈动物运动对仿生力学的启示 / 139
- 16 孤立波与孤立子 / 152





17	非牛顿流体及其奇妙特性 / 160
18	腱鞘囊肿治愈记 ——漫谈材料的触变性 / 168
19	奇异的电磁流变液体 / 173
20	流变学的研究对象 / 182
21	漫谈化工中的流体力学问题 / 192
	后记 / 204



7

Chapter

野渡无人舟自横

——漫话流体运动中物体的稳定性

独怜幽草涧边生，
上有黄鹂深树鸣；
春潮带雨晚来急，
野渡无人舟自横。

大众
力学
丛书

这首脍炙人口的优美的山水诗七绝名篇《滁州西涧》，系唐代诗人韦应物(约735—约792)在唐德宗建中二年(781年)出任滁州(今安徽滁州市)刺史时所作。当您反复吟诵这美丽的诗句时，如画的意境就重现在您的眼前，真是美不胜收(图1)。可是，您曾否想到在这洗练的诗句中还凝聚着诗人对力学现象的洞察力!

“春潮带雨晚来急，野渡无人舟自横”，意思是郊野渡口拴着的一条无人驾驭的小船，在晚潮加之春雨形成的小河湍急的流动中，横在河里，随波荡漾。这里形象又真实地描绘了在河中荡漾的小船，因要处于一个稳定的平衡位置，它总要横在河中。



图1 滁州西涧插图

二百年后，担任过宋代宰相的寇准(961—1023)在19岁(980年)进士及第，初知巴东县(今湖北巴东县西北)时，登高楼眺望也作了一首五言律诗《春日登楼怀归》：

高楼聊引望，杳杳一川平。野水无人渡，孤舟尽日横。
荒村生断霭，古寺语流莺。旧业遥清渭，沉思忽自惊。

诗的前三联写春日登楼见闻，尾联由见闻而怀归。清人何文焕曾评论“野水无人渡，孤舟尽日横”此联，说寇准登楼看见相仿景色时，很自然地受到《滁州西涧》诗的触发，便随手点化了韦句，而意境却比韦来得更加丰厚。

在上海辞书出版社出版的《唐宋词鉴赏辞典》中还收入了另一位宋代词人廖世美的词《烛影摇红：题安陆浮云楼》，其后半片写道：

催促年光，旧来流水知何处？断肠何必更残阳，
极目伤平楚。晚霁波声带雨。悄无人、舟横野渡。
数峰江上，芳草天涯，参差烟树。

“晚霁波声带雨。悄无人、舟横野渡。”确也写出了与韦应物同样观察到的自然现象。

另外，很有趣的是我国古代四大名著之一、明代罗贯中所著《三国演义》的第四十九回“七星坛诸葛祭风，三江口周瑜纵

火”，对这一现象也有一段颇精彩地描述：（天津百花文艺出版社，1994）

孔明“借”得东风后，即乘赵子龙前来接应的船返夏口。周瑜急唤帐前护军校尉丁奉、徐盛二将各带一百人，分水陆两路追杀孔明。

徐盛教拽起满帆，抢风而驶。遥望前船不远，徐盛在船头高声大叫：“军师休去！都督有请。”只见孔明立于船尾大笑曰：“上复都督：好好用兵，诸葛亮暂回夏口，异日再容相见。”徐盛曰：“请暂少住，有紧话说。”孔明曰：“吾已料定都督不能容我，必来加害，预先教赵子龙来接。将军不必追赶。”徐盛见前船无篷，只顾赶去。看看至近，赵云拈弓搭箭，立于船尾大叫曰：“吾乃常山赵子龙也！奉令特来接军师。你如何来追赶？本待一箭射死你来，显得两家失了和气。教你知我手段！”言讫，箭到处，射断徐盛船上篷索。那篷堕落下水，其船便横。赵云却教自己船上拽起满帆，乘顺风而去，其船如飞，追之不及。

“箭到处，那篷堕落下水，其船便横”，这段话明确指出了，在湍急的河流中，帆落下、失去风力推动而不能行驶的船，只好横在河中这一自然现象。

为什么在河中荡漾的船总是要横在河里呢？这里有一个流体力学问题。一般物体在静力作用下的平衡问题，是一个古老的力学问题。直立在桌子上的细杆，系处于不稳定的平衡位置，当此细杆受一扰动后，重力形成的力矩将使细杆远离平衡位置；而悬挂的直杆平衡是稳定的，当此直杆受一扰动后，重力形成的力矩会倾向于恢复平衡位置。由于流体运动时对物体产生的合力和合力矩，计算起来比较复杂，所以要得到在运动流体中物体平衡稳定性的精确分析，需要艰苦细致的工作积累。经过了许多力学家的持续努力，直到19世纪末、20世纪初才得到解决。所以唐代诗人韦应物对船体稳定性问题的观察，比起西方精确描述的出现要早一千一百多年。

现在，我们用近代流体力学来精确分析韦应物等人所观察到

的现象。用流体力学的观点可将舟或小船简化成一个细长椭圆柱体，来讨论理想不可压缩流体绕椭圆柱体的二维流动问题，以计算流体对椭圆柱体的作用力和力矩，从而找到其稳定的相对平衡位置。设河中流体相对于椭圆柱体以匀速 v 流动，椭圆的长轴与流动方向呈 α 夹角，用平面流动的复变函数分析可计算出椭圆上所受的合力为零；合力矩的大小与来流同长轴的夹角有关，即为

$$M = \frac{1}{2} \pi \rho (a^2 - b^2) v^2 \sin 2\alpha \delta \alpha$$

式中 ρ 为流体密度， a 、 b 为椭圆的长短半轴。

当 $\alpha = 0$ 和 $\pi/2$ 时， $M = 0$ ，即小船顺向或横向来流时，均为平衡位置，但这两个位置的稳定性却是大不相同的。

对于 $\alpha = 0$ (图 2)，当来流或船体受一扰动，使椭圆与来流的夹角产生任一扰动小偏角 $\delta \alpha$ ，则得到力矩为

$$\delta M |_{\alpha=0} = [\pi \rho (a^2 - b^2) v^2 \cos 2\alpha \delta \alpha] |_{\alpha=0} = \pi v^2 \rho (a^2 - b^2) \delta \alpha$$

δM 的符号永远与 $\delta \alpha$ 相同，即力矩会使得偏角增大。可见这个平衡位置是不稳定的。

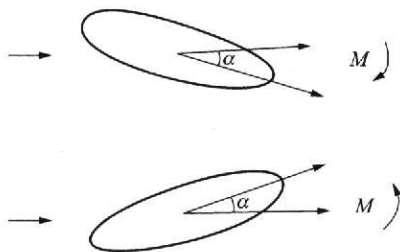


图 2 $\alpha = 0$ 附近的情况

对于 $\alpha = \pi/2$ 情形 (图 3)，若椭圆与来流的夹角产生任一扰动小偏角 $\delta \alpha$ ，则在椭圆上的作用力矩为

$$\delta M |_{\alpha=\pi/2} = [\pi \rho (a^2 - b^2) v^2 \cos 2\alpha \delta \alpha] |_{\alpha=\pi/2} = -\pi v^2 \rho (a^2 - b^2) \delta \alpha$$

δM 的符号永远与 $\delta \alpha$ 相反，即力矩会使得偏角减小。所以这个平衡位置是稳定的。

因为上面的分析是对理想不可压缩流体二维流动进行的，而实际情况既是黏性流体，又是三维问题，尾部还有涡旋区。为检验此分析是否正确，我们在天津大学流体力学实验室回流式水槽中进行了实验。水槽的实验段长 6.2 m，宽 0.25 m，高 0.35 m。实验模型为一椭圆柱体小木船，长轴 10 cm，短轴 5 cm，高 2.5 cm，因木质较重，故吃水较深。实验中水流速度采用激光测速仪 (LDV) 测速，流动显示采用

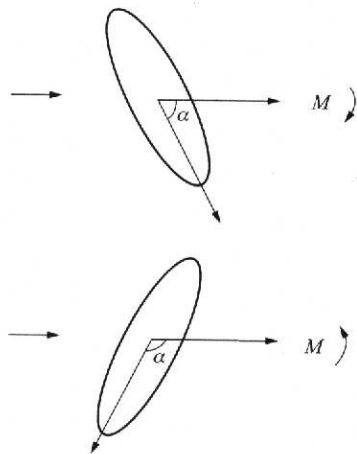


图3 $\alpha = \pi/2$ 附近的情况

氢气泡法显示，实验过程用摄像机进行记录。氢气泡丝位于模型中心轴线前 6 cm 处，且垂直于水流方向。光源位于模型所在实验段前下方。固体摄像机 (CCD) 放在模型的正上方。水流速度在 0.3 ~ 0.6 m/s 变化。

在椭圆柱模型上下两面的中心点分别固定长 1 cm 的细轴，并分别套入一个圆环，圆环与轴之间可自由转动。圆环与水槽两侧壁面间，分别用与模型上下面平行的柔软细线相连，以防模型被水冲走。

开启水泵使水流动，可见到模型横于水中，即椭圆的长轴与水流方向垂直。用外力改变模型长轴与水流方向的夹角，然后撤去外力，模型又很快重新横于水中。这说明横于水中是稳定的平衡位置。施加外力使模型长轴与水流方向平行，撤去外力后，模型在此位置有短暂平衡，稍后即又横于水中。这说明长轴与水流方向平行是不稳定的平衡位置。改变水流的速度，重复以上实验，对结果没有影响。

实验证实了前面的计算分析结果，也说明虽然椭圆柱后面有涡旋区，黏性流体三维运动的流场也相当复杂，但以理想不可压

缩流体二维流动的简化模型，来研究流体运动中物体的稳定性这一问题，确实抓住了问题的本质。椭圆柱的稳定平衡位置确实为其长轴与来流相垂直的情况。

以上关于小船平衡稳定性的分析，对于航行中的小船也是适用的。若小船的航速为 v ，顺着 v 向前的平衡也是不稳定的，为保持其航向，舵手需要不断地调整操纵。这就是为什么一个划船的生手，总是难以使小船笔直航行的道理。在初学划船时，船往往总是在水里打转转。而拴于郊野的无人渡船，在湍急的来流中，总欲自横，处于 $\alpha = \pi/2$ 的稳定位置，或在 $\alpha = \pi/2$ 位置附近摆动。

当然，以上的分析仍还是粗糙的。要真正考虑航行中小船的稳定性，还需要考虑小船的惯性。而这些内容就是近代导向船舰、飞行器在航行中运动稳定性的深入的学问了。它是近代航海、航空、航天技术的理论基础之一。

“春潮带雨晚来急，野渡无人舟自横”，唐代诗人韦应物对船体稳定性入细入微的观察，并仅仅用了七个字便活脱脱地勾画了出来，不仅使我们获得了美的享受，而且还从中体味出自然规律。而这却早在距今一千二百多年以前就有了。

参考文献

- [1] 王振东，武际可. 力学诗趣[M]. 天津：南开大学出版社，1998.
- [2] 王振东，陈桂英，尚晓东. “野渡无人舟自横”的实验研究[J]. 力学与实践，2000，22(1)：75.

首刊于《力学与实践》，1992，14(4)：76-78.

2 Chapter

不尽长江滚滚流

——漫话流体与流动性

大众
力学
丛书

何处望神州？
满眼风光北固楼。
千古兴亡多少事？
悠悠，不尽长江滚滚流！

这是辛弃疾(1140—1207)在宋宁宗嘉泰四年(1204年)三月赴镇江任知府，登临北固亭时，所写的《南乡子·登京口北固亭有怀》一词的上半阙。词人站在长江之滨的北固楼上，满眼望去，那壮丽的自然山水里似乎隐隐弥漫着历史的烟云，引起了千古兴亡之感。因此，接下来问一句：“千古兴亡多少事？”纵观千古成败，往事悠悠，词人以流体的流动抒发了感怆雄壮的忧虑之情，以长流不息的江水表达了胸中翻滚的不尽愁思和感慨。

唐宋诗词的一些名家颇善于用流体的流动性来表达各种情

感，写出了一些脍炙人口的精美绝句：

李白(701—762)《金陵酒肆留别》诗：

请君试问东流水，别意与之谁短长。

《梦游天姥吟留别》诗：

世间行乐亦如此，古来万事东流水。

《将进酒》诗：

君不见黄河之水天上来，奔流到海不复回！

君不见高堂明镜悲白发，朝如青丝暮成雪！

杜甫(712—770)《登高》诗：

无边落木萧萧下，不尽长江滚滚来。

李煜(937—978)《虞美人》词：

问君能有几多愁？恰似一江春水向东流。

寇准(961—1023)《江南春二首(其二)》诗：

日落汀州一望时，柔情不断如春水。

王安石(1021—1086)《桂枝香·金陵怀古》词(图1)：

六朝旧事随流水，但寒烟衰草凝绿。

苏轼(1140—1207)《念奴娇·赤壁怀古》词：

大江东去，浪淘尽，千古风流人物。

在诗句中用流体的流动抒发情感的事，可以追溯到我国最早的诗歌总集——《诗经》。它是自西周末年到东周春秋中叶(公元前1100—前600)这500年间的抒情诗集，共有305首，约在公元前600年左右编集成册。现在我们来看其中用流体的流动性抒发情感的两首(左为原诗，右为白话译文)：

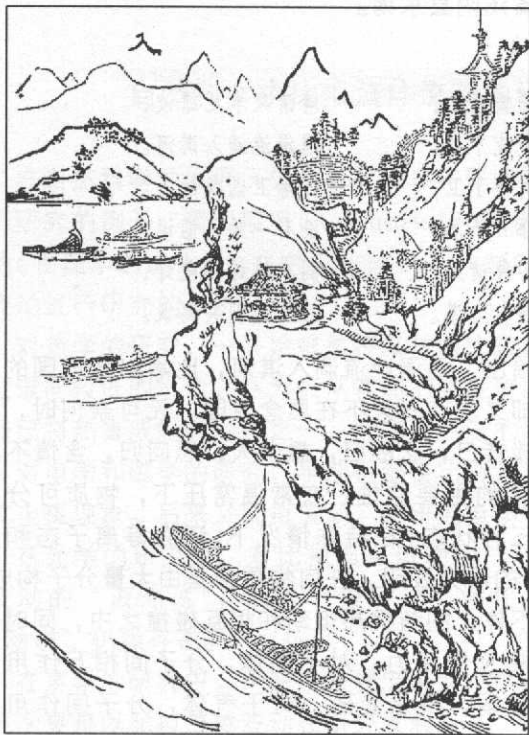


图1 王安石“桂枝香”（六朝旧事随流水）插图

《邶风·柏舟》

泛彼柏舟，	泛荡着的柏木舟，
亦泛其流。	随着河水在飘流。
耿耿不寐，	焦虑不安难成眠，
如有隐忧。	痛苦忧伤涌心头。
微我无酒，	不是我家无美酒，
以敖以游。	遨游也不能消愁。

诗中以随河水飘流的柏舟，写出了主人公沉郁的心情。即使是美酒、遨游也不能排除自己的痛苦忧伤。邶(bèi)是周代诸侯

国名，在今河南省汤阴县东南。

《邶风·泉水》

淇彼泉水，	清泉水泛绿波，
亦流于淇。	涓涓流入淇河。
有怀于卫，	怀念卫国我故土。
靡日不思。	没有一天不惦记，
爰彼诸姬，	同来姊妹多美好，
聊与之谋。	且和她们共商议。

诗中以泉水始出，涓涓地流淌入淇河，比喻出嫁他国的妇人不能回归卫国，却又没有一天不在思念卫国。无可奈何时，只有与同嫁来的女子谈昔日，念故旧，想亲人，思回归，含情不尽。

流动性是流体的主要特性。在常温常压下，物质可分为固体、液体和气体三种状态（在特殊情况下，还有等离子态和超固态）。近代物理学的研究表明，任何物质都是由大量分子构成的，这些分子处于永不停止的随机热运动和相互碰撞之中，同时各分子之间还有一种相互作用力。对于固体，分子间相互作用力较强，无规则运动较弱，不易变形；对于气体，分子间作用力较弱，无规则运动剧烈，易于变形和压缩；对于液体，其特征介于固体和气体之间，易变形，不易压缩。

气体和液体又合称为流体。从力学分析的角度，通常认为，流体与固体的主要差别在于它们对于外力的抵抗能力是不同的。固体有能力抵抗一定大小的拉力、压力和剪切力。当外力作用在固体上时，固体将产生一定程度的相应变形。只要作用外力保持不变，固体的变形也就不会变化。因此，当固体静止时，既有法向应力，也有切向应力。而流体在静止时，不能承受切向应力，任何微小的剪切力的作用，都会使流体产生连续不断的变形。只有当外力停止作用时，流体的变形才会停止。流体这种在外力作用下连续不断变形的宏观特性，通常称为流动性（或易流性）。

自然科学中比拟流体流动的研究

在自然科学的发展历史上，有许多将研究对象比拟流体流动进行研究的例子。爱因斯坦(A. Einstein)和英费尔德(L. Infeld)合著的《物理学的进化》一书中，就谈到了一些在物理学上比拟流体流动进行研究的事例。如：

对热学的研究，一开始就是将其与水比较，比拟水从较高的水位流向较低的水位，认为热从较高的温度流向较低的温度。后来虽已将热看成能的形式之一，但这种热流的比拟仍在起作用。

对电学和磁学的研究，早期也都曾比拟为电流体和磁流体来研究电磁现象。后来又比拟流场，来研究电场和磁场。

在光学的研究上，有比拟质点运动的“粒子说”和比拟流体波动的“波动说”，后来“粒子说”演化为“量子说”，但“波动说”仍然存在。

在声学的研究中，声速本身就定义为小扰动传播的速度，所以声学更是以比拟流体波动在研究发展。

在天文学的研究上，有不少概念也是比拟流体流动得来的，如将夜晚天空中由闪烁的星座组成的一条明亮的光带，比拟成“银河”。又如，将银河系之外一种从正面看形状像涡旋，从侧面看形状像梭的星云，称为“涡旋星云”；将星际空间分布着的许多细小物体与尘粒，叫做“流星体”。(图2)

现代自然科学正面临着深刻的变化，非线性科学贯穿着数理科学，生命科学、空间科学和地球科学，成为当代科学研究最重要的前沿领域之一。而推动非线性科学发展的一些重要概念恰巧又来源于流体运动的研究。如：

孤立波，是拉塞尔(J. S. Russell)于1834年在英国爱丁堡格拉斯哥运河中，观察到的一种他称为大传输波的现象。当时他正



图2 流星

骑在马背上，追踪观察一个孤立的水波在浅水窄河道中的持续前进，这个水波长久地保持着自己的形状和波速。这一奇妙现象的发现，就是关于孤立波和现今关于孤立子研究的起始。

混沌的研究尽管在数学上可以追溯到 Poincare 栅栏和 Birkhoff 平面环扭转映射的吸引子，但促使混沌研究热起来的，却正好是流体湍流的研究。洛伦兹 (E. N. Lorenz) 于 1963 年在研究大气对流现象时，从流体动力学基本方程组 (纳维 - 斯托克斯方程组) 出发，经过量纲一化并作傅里叶级数展开，截取第一、二项，得到傅里叶系数满足的一组常微分方程，称为洛伦兹方程 (Lorenz 方程)，它的解在一定的参数范围内，当时间充分大时是一个混沌解 (图 3)。自洛伦兹模型发表之后，对混沌的研究才热了起来。

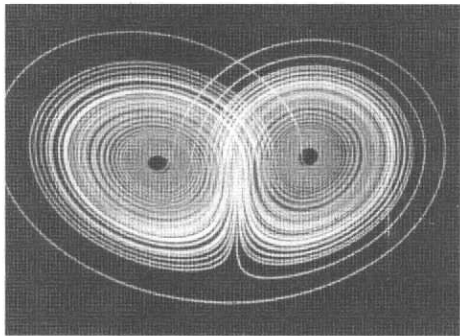


图3 洛伦兹吸引子

分形，是曼德勃罗 (B. B. Mandelbrot) 1967 年在研究湍流时首先提出的，并将其应用于星系、海岸、河网、树皮等的测量，现已应用到自然科学和工程技术的各个领域，成为推动非线性科学的重要概念之一(图 4)。

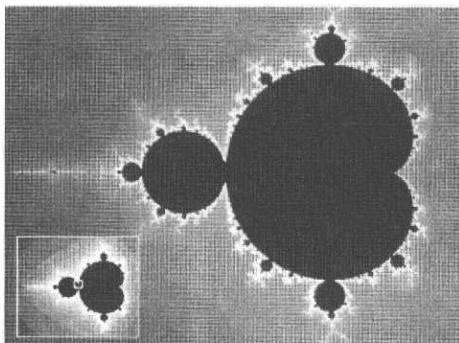


图 4 曼德勃罗集

社会科学中比拟流体流动的研究

在人文社会科学中，经常可以看到用比拟流体流动所引出的许多概念和术语。如：

- 将文学上的一种创作方法称为“意识流”；
- 将人们工作单位或地方的改变，称为“人才流动”；
- 将社会成员的社会地位或职业的改变，称为“社会流动”；
- 将某产品的加工过程分成若干不同的工序，按顺序进行，称为“流水作业”，这样的生产线亦称为“流水线”；
- 将商品或资金的周转过程，称为“流通过程”；
- 将物资的运输、配送，称为“物流”；
- 将某一件事的历史很悠久，称为“源远流长”；
- 将时间过得非常快，称为“年华似水流”或“似水流年”；

将人的心情很平和、安静，称为“心平如水”或“心静如水”；

将没有根据的传言，称为“流言蜚语”；

将感情不自觉地表现出来，称为感情的“流露”；

将某一事物或事件在短时间内集中出现，比喻为“潮水”，如“学潮”、“民工潮”、“金融潮”等。

在军事科学上，被国际公认为最早的军事理论著作的《孙子兵法》，其“虚实篇”的最后一段：

夫兵形象水，水之形避高而趋下，兵之形避实而击虚。水因地而制流，兵因敌而制胜。故兵无常势，水无常形。能因敌变化而取胜谓之神。故五行无常胜，四时无常位；日有短长，月有死生。

也正是将用兵作战比拟如同水的流动。这段话的意思是：用兵作战如同水的流动。水流动的规律是避开高处而流向低处；用兵取胜要避开敌人坚实之处，而攻击其虚弱的地方。水因地势的高低而不断改变流向，用兵作战要根据敌情变化而决定其取胜的方针。水没有固定不变的形态，所以用兵也没有固定不变的原则。能够根据敌情的变化而取得胜利的，才可以称得上用兵如神。用兵作战的原则，如同自然现象一样，五行（古人认为：金、木、水、火、土是五种物质）相生相克；四季（春、夏、秋、冬）依次交替，不可能哪一个季节在一年中常在；白天有短有长，月亮有明暗圆缺，永远处于变化之中。这段话以流体的流动等自然现象的变化，生动地比喻并阐述了兵家之法。《孙子兵法》系孙武（约公元前500—前440）所著，此书总结了春秋（公元前770—前476）末期及以前的作战经验，揭示了战争的一些重要规律。所以，这实际上是我国古代对流体属性认识和应用得很早的科学论述。

还有一个有趣的例子，是莱特希尔（M. J. Lighthill）和惠瑟姆（G. B. Whitham）于1955年成功地将行驶的车流，当作可压缩流体来处理。他们提出了一个流体力学的模型来研究一条很长的单

行路上车辆的运动。于是在研究交通管理时，又出现了“交通流动”的概念和术语。

流体与固体的区分并不绝对

前面谈到流体与固体的主要区别在于会不会流动，而这种区分实际上并不绝对。当放大了时间尺度后，就可以看到固体也会流动。沥青是固体，但容易发现，在马路旁边堆放着的准备修路用的沥青，时间一长就在悄悄地“流动”，向四周伸展开去。由于小草生长不快，可以慢慢地将铺设简单又较薄的沥青面推开，在地上露出来。瑞利(J. W. S. Rayleigh)对玻璃板作过一个实验：取一块长35 cm、厚0.3 cm的玻璃板，在沿长度的两边支起来，板的正中放一质量为6 kg物体。从1938年4月6日到1939年12月13日，放置了一年零八个月后，将重物取下，测出玻璃板中部向下“流动”了 6×10^{-4} cm。这个实验表明，玻璃在受力相当长的时间后，也具有流体的性质。金属会有蠕变，也是一种流动。当观察地层断面时，我们可以看到岩石有皱纹状的褶曲结构，这是岩石在流动的证据。在几亿年的地质年代里，岩层受着横向的力而流变或褶曲形状(图5)。在一些山谷里，冰川慢慢地向下流了几千年，古代冰川流动的痕迹还遗留在岩石的表面上。

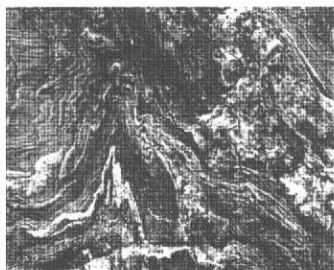
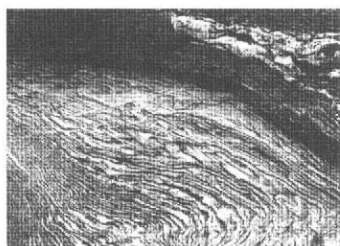


图5 秦岭岩石褶曲结构

有人测量计算过冰川的黏滞性，大约是混凝土的 100 万倍；而混凝土的黏滞性，大约是水的 100 亿倍。可见无论冰川是多么“黏”，多么难于流动，然而经过几千年、几万年，冰川终究还是在慢慢地向下流动。当然还有一个使固体流动的因素是温度。温度升高后，也会促使固体更快地表现出流动性性质。

流体与固体的关系还巧妙地在现代工业生产中表现出来。现代工业生产工艺的重要趋势之一，是将固体形态的原材料采用粉碎、浸提、融化、加某种流体搅拌等办法使之流体化后，在流体运动的过程中进行反应、提炼、加工、改性等，最后再经过冷却、干燥、浓缩、蒸发、挤入模具等形成固体形态的产品。如冶金、造纸、化纤、塑料、橡胶、化肥、制糖、制造巧克力等食品……无一不是这种生产工艺思路。于是，这些工业生产的效率及产品的质量，也就在很大程度上依赖于人们对流体运动规律的认识、掌握和应用。

总之，人们在从流体运动及其规律中吸取各种各样的“营养”，去发展自然科学和人文社会科学，去发展生产，为人类造福。

参考文献

- [1] 王振东，武际可. 力学诗趣[M]. 天津：南开大学出版社，1998.
- [2] 爱因斯坦，英费尔德. 物理学的进化[M]. 周肇威，译. 上海：上海科技出版社，1962.
- [3] 王振东. 湍流研究的进展[J]. 物理通报，1992(12)：1-4.
- [4] 中川鹤太郎. 流动的固体[M]. 宋玉升，译. 北京：科学出版社，1983.

- [5] 汤普森. 可压缩流体动力学[M]. 田安久, 张瑜, 朱丰宗, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1986.

首刊于《力学与实践》, 1996, 18(6): 57-59.



但见流沫生千涡

——漫话流体中的涡旋

3
Chapter

大众
力学
丛书

长洪斗落生跳波，轻舟南下如投梭。
水师绝叫鳧雁起，乱石一线争磋磨。
有如兔走鹰隼落，骏马下注千丈坡。
断弦离柱箭脱手，飞电过隙珠翻荷。
四山眩转风掠耳，但见流沫生千涡。

……

这是苏轼(1037—1101)所作《百步洪二首》其中一首的上半段，系作者于1078年(宋神宗元丰元年)任徐州知州时所作。诗句形象地写出了舟行水中的惊险。长洪为乱石阻激，陡起猛落，急湍跳荡。舟行其间，如同投掷梭子一般，就连驾船能手也不免大声喊叫，甚至水边的野鸭，都惊飞起来。急流与乱石互相磋磨，发出撞击的响声。水波有如疾走的狡兔，猛落的鹰隼，如骏马奔下千丈的险坡；轻舟像飞箭脱手，如飞电之过隙，如荷叶上

跳跃的水珠，在波涛上动荡。而身处于舟中的乘客，仿佛四面的山峰都在旋转；急风掠过耳边，使人心动神驰。人们所见到的则是流沫飞逝，百漩千涡。

苏轼诗中所述乘船者见到水中“百漩千涡”的涡旋，正是在流体运动中可普遍观察到的一种运动形态。

稍后，宋代诗人范成大(1126—1193)也有两首五言诗，形象地描述了在长江三峡段行舟时，所遇涡旋的惊险情景。一首是《初入巫峡》的五言律诗：

钻火巴东岸，搯金峡口船。束江崖欲合，漱石水多激。
卓午三竿日，中间一罅天。伟哉神禹迹，疏凿此山川！

诗中前半段的意思是，寒食节(古代风俗在这天应钻木取新火，直到明朝仍存此风俗)时在巴东县峡口搯金(chuang jin 即敲锣)登舟，入巫峡，江路极狭窄，江流漱(shù 即冲刷)石回旋成涡，涡旋既多又凶猛。这首诗形象地描述了当时长江巫峡段水中多涡旋的情景。

范成大另一首五言古诗《刺瀆淖(并序)》，更加生动地描绘了峡江中涡旋的险恶：

瀆淖，盘涡之大者，峡江水壮则有之，或大如一间屋。相传水行峡底，遇暗石则瀆起，已而下旋为涡。然亦未尝有定处，或无故突然而作，叵测也。舟行遇之，小则敬侧，大则与赍俱入，险恶之名闻天下。

峡江饶暗石，水状日千变；不愁滩洄来，但畏瀆淖见；人言盘涡耳，夷险颇有间；仍于非时作，未可一理贯；安行方斲毂，无事忽翻练；突如汤鼎沸，翕作茶磨旋；势迫中成注，怒霁外始晕；已定稍安慰，倏作更惊眩；漂漂浮沫起，疑有潜鲸噉；勃勃骇浪腾，复恐蛰鳖拏。篙师瞪褫魄，滩户呀雨汗；逡巡怯大敌，勇往决鏖战；幸免与赍入，还忧似蓬转；惊呼招竿折，奔救竹竿断；九死船头争，万苦石上牵；旁观兢薄冰，撇过捷飞电。前余叱馭来，山险固尝遍；今者击楫誓，岂复惮波面？澎澎三峡长，颭颭一苇乱；既微掬指忙，又匪科头慢；天子赐之履，江神敢吾玩？但催

叠鼓轰，往助双橹健！

湮淖(fén nào)是指大涡旋；贲(jì)即为“脐”字，指涡旋的中心。

范成大这首五言古诗及序，生动形象地描述了在长江三峡行舟时，所遇涡旋的惊险情景：有时能安稳行舟，江面上如熨靱(微波涟漪)一样顺利恬静；但江水忽然翻滚而起如缣练翻搅，使人猝然不备，只好殊死鏖战渡险，如履薄冰，逃过湮淖。

古诗中关于涡旋的记载，在宋代以前，诗圣杜甫(712—770)的《最能行》一诗中亦有：

欹帆侧柁入波涛，撇漩消湮无险阻

之句，描述驾舟航行时逃避涡旋的情景。

范成大不但对峡江水中的涡旋进行了形象描述，还可见其对涡旋为何产生在进行思考。特别是其涡旋湮起“未尝有定处，或无故突然而作”这段描述，竟与近代流体力学对壁湍流猝发(bursting)现象的描述颇有相似之处。这正像钱钟书先生在《谈艺录》中所说：“唐诗、宋诗亦非仅朝代之别，乃体格性分之殊。天下有两种人，斯分两种诗。唐诗多以丰神情韵擅长，宋诗多以筋骨思理见胜。”范成大看起来亦是在“思理”，思考峡江水中涡旋的产生规律，从而留下“无故突然而作”、“无事忽翻练”、“突如汤鼎沸、翕作茶磨旋”等精彩的诗句。

在考古方面，我国甘肃省1973年出土的彩陶涡旋纹双耳壶(图1)，表明人类对涡旋的观察历史已很长久了。

实际上也不只是江水中涡旋，在自然界中我们经常可以看到各种形形色色的流体涡旋(图2)。



图1 双耳壶

(中国马家窑文化的陶瓷彩绘,其中涡旋纹饰是结构复杂、完美而又典型的几何纹饰)



图2 河流拐弯处的涡旋

涡旋是流体运动的肌腱

涡旋是流体团的旋转运动。德国力学家、近代力学的奠基人之一普朗特(L. Prandtl)的学生、空气动力学家屈西曼(D. Küchemann)曾经说过：“涡旋是流体运动的肌腱。”这句话深刻概括了涡旋在流体运动中的作用，现在已成为流体力学中的至理名言。普朗特的另一位学生、已故的北京航空航天大学陆士嘉教授曾更进一步地指明：“流体的本质就是涡，因为流体经不住搓，一搓就搓出了涡。”这句话既道出了流体与固体的本质区别，又点明了在流体运动中出现涡旋的原因。这里的“搓”是指作用在流体上的剪切力。只要有物体(如飞行器、船舰、汽车、火车等)在流体中运动，紧贴着物面上的流体由于黏附在物面上，会被物体带着一起运动，而远处的流体却在静止中，这就产生了“搓”流体的剪切力。

涡旋通常用涡量来量度其大小和方向，涡量定义为速度场旋度的一半。在流体中，只要有“涡量源”，就会产生涡旋。流体团所受到的力，可以分为体积力(如引力、惯性力、电磁力等)和表面力，表面力又可分解为垂直于流体团表面的法向力(即压力)和与表面相切的切向力(即剪切力)。近代流体力学已经证明：如果体积力不能表示为一个势函数的梯度，就会有一个“涡量源”；黏性加上固体边界，就会有“搓”，又是一个“涡量源”；如果流体的状态方程中有两个以上独立的热力学变量(在流体力学中称为斜压流动)，也是一个“涡量源”。

因为上述几种“涡量源”在流体运动中是普遍存在的，所以涡旋就成为流体运动中极为普遍的运动形态(图3、图4)。

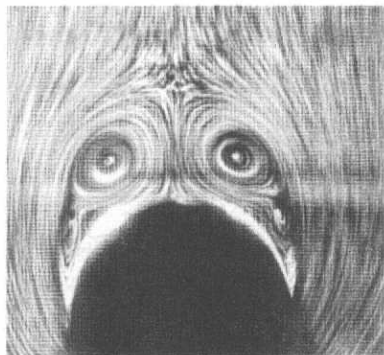


图3 猫眼图

[有攻角(即锥头的轴与来流速度的夹角)的锥头在背风面处涡的后部断面图。人们形象地称为“猫眼图”]

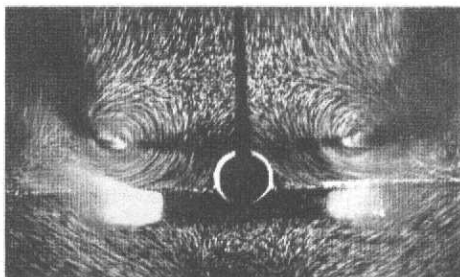


图4 飞机着陆时气流场中的涡旋
(这是协和式飞机着陆时流场中涡旋的正视图)

涡旋星云、台风、龙卷风

宇宙空间的涡旋星云(图5、图6),大概是我们见到的尺度最

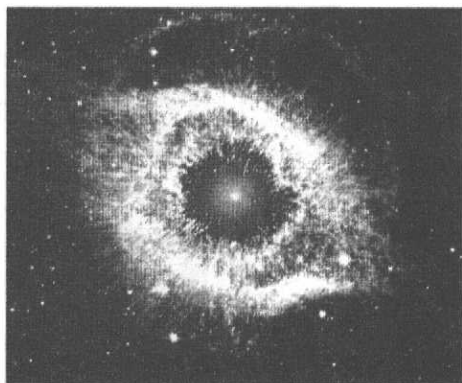


图5 美国斯波策太空望远镜所拍距地球700光年的涡旋星云图片

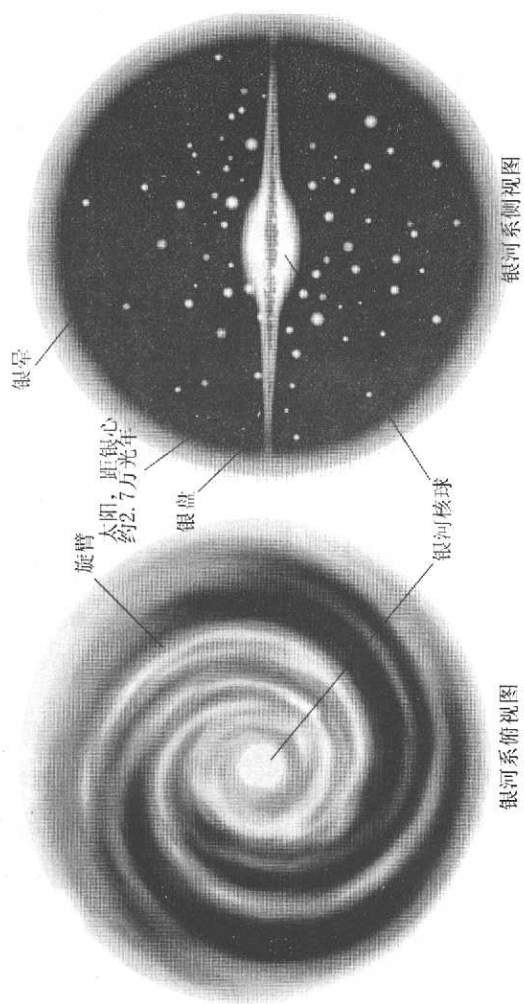


图 6 银河系的俯视图(左)和侧视图(右)

(银河系属于涡旋星系,银盘是银河系的主体,是一直径约8.2万光年,厚度约4200光年,中间厚,边缘薄的扁盘)

3 但见流沫生千涡

大的涡旋。中国科学院外籍院士林家翘教授曾在研究涡旋星云方面，做出过开创性的贡献。

夏季在电视台气象预报节目展示卫星云图时，经常可以看到由大团白云显示的热带气旋，这也是相当大尺度的流体涡旋。过去曾将它们统称为台风，现在按气象部门的定义，当热带气旋中心附近的风力为8~9级时称为热带风暴，10~11级时称为强热带风暴，12级及以上则称为台风(图7)。在北半球，热带气旋是反时针方向旋转的强烈的涡旋，其形状如漏斗，下层周围的空气向中心流入并向上上升，而上层空气则向四周流出，其半径可达数百公里。由于它对人类的生活、生产有极大的破坏力，所以气象部门已将每年发生的热带气旋编号并命名来进行观测和预报。

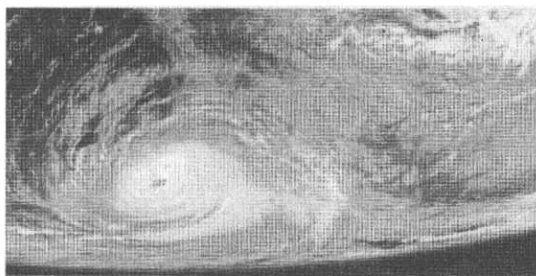


图7 航天飞机拍摄的台风照片

海面 and 地面上的龙卷风(图8)，其涡轴从海面或地面一直延



图8 龙卷风

伸到云层，在涡的中心有强烈的轴向流，能将海水或地面上的物体卷吸到高空，也是一种破坏性极强的涡旋。

卡门涡街及其应用

当流体流过一柱体时，在柱体后面的尾流中会出现两排互相交错的涡旋。普朗特的学生、著名力学家冯·卡门(von Kármán) 1911—1912年对这一现象给出了清楚的理论分析。后来人们就用其名字来命名，称为卡门涡街(图9)。

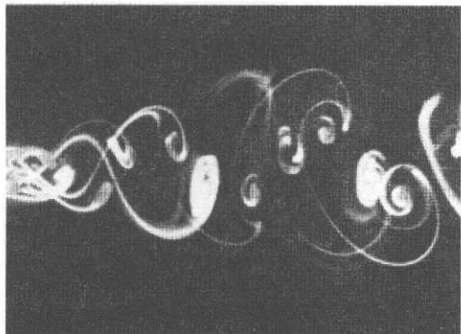


图9 卡门涡街

1940年11月7日，美国建筑史上发生了一场悲剧。由一位精明能干的桥梁工程师建造的全长853.4 m的塔科玛(Tacoma)峡谷悬索桥，在一场并不算大的风(风速仅19 m/s)中发生了剧烈的扭曲振动，振幅接近9 m；不到1h，这座价值640万美元的大桥便崩塌殆尽。大桥的崩塌引起了美国工程界的震惊，许多专家从不同角度来分析研究崩塌的原因。最后从理论和实验上证实了，大桥边墙在大风中发放的卡门涡街是这座大桥崩塌的祸根。这件事情使卡门涡街声名大振。后来，人们在设计桥、塔桅、超高建筑时，都必须将卡门涡街作为一个重要因素来考虑，以使它

们安全可靠。

人们还根据卡门涡街的原理，将圆柱放置在均匀流动中使其产生尾流，通过测量尾流产生的卡门涡街的发放频率，以达到测量流速和流量的目的。这种名为“卡门涡街流量计”的流量测试装置，目前已在工业界得到了广泛的应用(可参见本书“13.漫谈卡门涡街及其应用”)。

涡旋的害与利

前面所谈到的急流的大涡旋、台风、龙卷风等常常伴随着灾难或惊险，从而引起人们全神贯注的集中关心或全力拼搏、抢救，所以社会科学也将“涡旋”一词移植了过去，用来比喻遇到了极大的麻烦，像“陷入了某问题的涡旋”。实际上，在人们的生活与生产活动中，有时需要防止涡旋的不利作用，有时也需要涡旋帮忙，发挥涡旋的积极作用。

涡旋的产生伴随着机械能的耗损，从而使物体(飞机、舰、车辆、汽轮机、水轮机等)增加流体阻力或降低其机械效率。但另一方面，也正是依靠适当设计的外形，才能产生使飞机获得升力、又减少阻力的涡旋。在水利工程中，例如水坝的泄水口附近，为保护坝基不被急泻而下的水流冲坏，需采用消能设备，人为地制造涡旋以消耗水流的动能。还可以利用涡旋这种急剧的旋转运动，完成加快掺混媒质的任务，以加快化学反应的速度，增强轻工、冶金过程的混合速度，大大提高燃烧效率和热交换效率等。

人为制造涡旋所制成的旋风分离器，可用来分离由锅炉排放出烟气中的固体颗粒，使烟筒排放的气体较洁净，以达到环境保护的目的。

涡旋有害也有利，所以科学工作者要研究如何在生产过程中控制涡旋的产生和发展，并对自然界中有巨大破坏作用的涡旋加

强预报，研究减轻灾害的方法。

参考文献

- [1] 王振东, 武际可. 力学诗趣[M]. 天津: 南开大学出版社, 1998.
- [2] Saffman P G, Baker G R. Vortex Interactions[J]. Ann Rev Fluid Mech. 1979(11): 95.
- [3] Lugt H J. Vortex Flow in Nature and Technology[M]. Wiley, 1983.
- [4] Kuchemann D J. Report on the IUTAM Symposium on Concentrated Vortex Motion in Fluids [J]. J. Fluid Mech. 1961, 12: 1.
- [5] 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书: 力学卷[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985.

首刊于《力学与实践》, 1995, 17(2): 68-70.

4

Chapter

郡亭枕上看潮头

——漫话潮汐及其开发利用

江南好，风景旧曾谙。
日出江花红胜火，春来江水绿如蓝。能不忆江南？
江南忆，最忆是杭州。
山寺月中寻桂子，郡亭枕上看潮头。何日更重游？
江南忆，其次忆吴宫。
吴酒一杯春竹叶，吴娃双舞醉芙蓉。早晚复相逢？

大众
力学
丛书

这篇《忆江南》，是诗人白居易(772—846)抒发对江南忆恋之情的名作。早在青年时期，白居易就曾漫游江南，行旅苏杭；中年又曾先后于822年任杭州刺史，825年任苏州刺史。江南，特别是苏杭二州的秀丽风景，给他留下了美好的回忆。回洛阳后曾作多首诗词叙苏杭胜事，此词系开成三年(838年)他67岁时所作。

我们着重来看此词中段。偌大一个杭州，可忆的美景当然很多，而按此词牌结构，只能纳入两句，这就要选择最有代表性、

感受最深的景物。月中桂子和浙江涌潮，便是白居易所选最有代表性、最美的回忆。钱塘江（又名浙江、之江、罗刹江）流至海门入东海，钱塘江大潮汹涌澎湃，犹如直立的水墙，排山倒海而来，怒潮滚滚，势不可挡；潮头如万马奔腾，山飞云走，撼人心目。所以诗人任杭州刺史时，躺在郡衙建造的亭子上，就能观赏那卷云拥雪的壮丽景色。“郡亭枕上看潮头”，其形体当然是静的，但其内心世界是否也是静的呢？白居易另有一首七绝《观潮》，可以说明其观潮时的内心活动：

早潮才落晚潮来，一月周流六十回。
不独光阴朝复暮，杭州老去被潮催。

这里显然已蕴含着人生有限、而宇宙无穷的哲理，很值得人们深思。

苏轼（1037—1101）在杭州任通判时，于宋神宗熙宁六年（1073年）中秋写了五首钱塘看潮七绝诗《八月十五日看潮五绝》：

定知玉兔十分圆，已作霜风九月寒。
寄语重门休上钥，夜潮留向月中看。
万人鼓噪慑吴侬，犹似浮江老阿童。
欲识潮头高几许？越山浑在浪花中。
江边身世两悠悠，久与沧波共白头。
造物亦知人易老，故教江水向西流。
吴儿生长狎涛渊，重利轻生不自怜。
东海若知明主意，应教斥卤变桑田。
江神河伯两醜鸡，海若东来气似霓。
安得夫差水犀手，三千强弩射潮低。

第一首只是做出看潮的打算，是一组诗的开头。第二首描述所看到潮的实景。第三至第五首，均是抒发看潮后兴起的感想、

感慨、议论。我们着重来看第二首，其前两句“万人鼓噪慑吴侬，犹似浮江老阿童”连用了两个比喻，描绘潮来时的威势。怒潮掀天揭地呼啸而来，潮头奔涌，声响洪大，有如万人鼓噪，使弄潮和观潮的吴侬（吴人称我为侬），无不为之震慑。这里暗用了春秋时代吴越战争中的一个故事。鲁哀公十七年（公元前478年），越国军队在深夜中进攻吴军的中军，就在战鼓声中，万军呼喊前进，使吴军主力于震惊之余，一败涂地。诗人借用越军在此战役中迅猛攻坚的声威，非常形象地比喻奔啸的潮头。第二句又用了另一个威势壮猛的比喻，说是怒潮之来，有如当年王阿童（阿童是西晋名将王浚的小名。唐代诗人刘禹锡《西塞山怀古》诗中曾写：“王浚楼船下益州，金陵王气黯然收”）统率长江上游的水军，浮江东下，楼船千里，一举攻古吴都建业（今江苏南京）。这两个句都是实景虚写，借用典故比喻，写出了潮势之大。第三四句，则是实景实写，夸饰描述潮头之高。先以“欲识潮头高几许？”故作设问，以引出“越山浑在浪花中”的回答：这潮头究竟有多高呢？越山竟好似浮在浪花中间了。越山近指吴山和凤凰山，远指龛山和赭山，龛山、赭山在萧山境内对峙，形成海门。现在看来，海门在苍茫浩瀚的潮水中，潮头似卷越山而去，白浪滔天，怒潮似箭（图1）。这时诗的境界，也仿佛图画一样展现在人们眼前了。



图1 2006年9月的钱塘江潮

实际上，众多唐宋诗人墨客，还留下不少精彩的诗句，描述过钱塘江大潮的雄伟壮观。如宋之问《灵隐寺》：

楼观沧海日，门对浙江潮。

苏轼《催试官考较戏作》：

八月十八潮，壮观天下无。

刘长卿《送陶十赴杭州摄篆》：

浙中山色千万状，门外潮声朝暮时。

陈师道(1053—1102)《观潮二首》：

一年壮观尽今朝，晚日沉浮急浪中。

李廓《忆钱塘》：

一千里色中秋月，十万军声半夜潮。

张巽《江潮》：

罗刹江头八月潮，吞山挟海势雄豪。

刘禹锡(772—842)《浪淘沙·八月涛声》：

八月涛声吼地来，头高数丈触山回。

这些诗句都生动、集中地表现了雄奇壮阔、声势浩大、千姿百态的钱塘潮景观(图2、图3)。



图2 (清)袁枚：观潮图

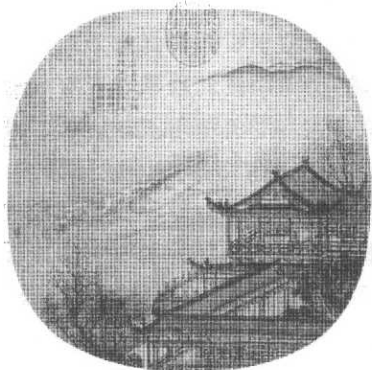


图3 (南宋)李嵩:月夜观潮图

我国有 18 000 多公里的海岸线，海域面积 470 多万平方公里，南部沿海平均潮差 4 ~ 5 m 的地区比比皆是，以钱塘江口的潮差最大。夏季去北戴河旅游时，许多人去过山海关附近的孟姜女庙。在孟姜女庙堂的门口，有一副不太容易念下来的对联：

海水朝朝朝朝朝朝朝落
浮云长长长长长长消

这正是关于描述潮汐与白云的流体运动现象的一副对联，可以念为：

海水朝(cháo)、朝(zhāo)朝(zhāo)朝(cháo)、朝(zhāo)朝(cháo)朝(zhāo)落；浮云长(zhǎng)、长(cháng)长(cháng)长(zhǎng)、长(cháng)长(zhǎng)长(cháng)消。

这里，朝(cháo)与潮通用。

潮汐及其产生原因

那么，什么是海洋潮汐？为什么钱塘江的潮汐如此雄伟壮

观呢？

从流体力学看，海洋潮汐是海水受引潮力作用，而产生的海洋水体的长周期波动现象，它在铅直方向表现为潮位升降，在水平方向表现为潮流涨落。古人将早晨海水上涨称为潮，黄昏上涨称为汐，故合称为潮汐，或称海涛（古代涛与潮通用）。月球、太阳或其他天体对地球上单位质量物体的引力，与对地心单位质量物体的引力之差称为引潮力。太阳因离地球远，其引潮力只有月球的46%。农历每月的朔（初一）和望（十五或十六），月球、太阳和地球的位置大致处于一条直线上。此时月球和太阳的引潮力的方向相同，所引起的潮汐相互增强，使潮差出现极大值。这种极大值每半个朔望月（14.765 3天）出现一次，称为大潮。农历每月上弦（初八或初九）、下弦（廿二或廿三）时，月球和太阳的引潮力方向接近正交，互相削弱情况最显著，故潮差达极小值，称为小潮。

古人对潮汐的认识，可追溯到汉代王充（27—97）在《论衡》中所说“涛之起也，随月盛衰，大小满损不齐同”，它科学地说明了潮汐对月球的依赖关系。宋代余靖（1000—1064）指出潮汐是一种“彼竭此盈，往来不绝”的波动现象。西方到17世纪，才由牛顿（1643—1727）根据其提出的万有引力定律，用引潮力说明潮汐的原因，并为大家所接受。之后，D. 伯努利（1700—1782）和P. S. 拉普拉斯（1749—1827）分别建立了潮汐的静力学和动力学基本理论。到19世纪60年代末，才形成潮汐分析和预报的方法，并得到应用。

发生在杭州湾钱塘江口的潮水暴涨现象，被称为钱塘江涌潮。我国沿海的潮波主要是由太平洋传入的，浙江沿岸、杭州湾一带正当其冲，加上杭州湾连接钱塘江口呈漏斗形状（图4），水域变浅变狭，单位体积海水的势能增大，致使潮差在海宁可高达8.93 m。潮波在这里又与河水相遇，波面受到较大的阻力，使潮波波峰的前沿出现破碎现象；又遇水下沙坝，迫使涌潮分为“东

4 郡亭枕上看潮头

湖”和“南湖”两支，继续向河口推进，并在大尖山和海宁之间发生潮波的折射、反射和交汇，有时能激起十余米高的水柱。破碎的潮峰呈滚滚白浪，高度1~2 m，并以4~6 m/s的速度传播。大潮带来的海水，一秒钟内常可达数万吨，所产生的力量也是惊人的。1953年8月的一次大潮，竟将海宁镇海塔附近高出海面7~8 m的石塘上，一座1500多公斤重的“镇海铁牛”，冲出十几米之外。因为每年农历八月十八日，恰逢临近秋分的大潮，又正值雨季，平均海面升高，若再遇强劲东风或东南风，则风助潮势，涌潮的景象更加壮观，诗人描述的吞山挟海、涛声吼地、雄奇壮阔、千姿百态的钱塘潮景观就出现了。所以，现在每年农历八月十八日，已被海宁定为观潮节，它吸引着海内外游客前去观赏。

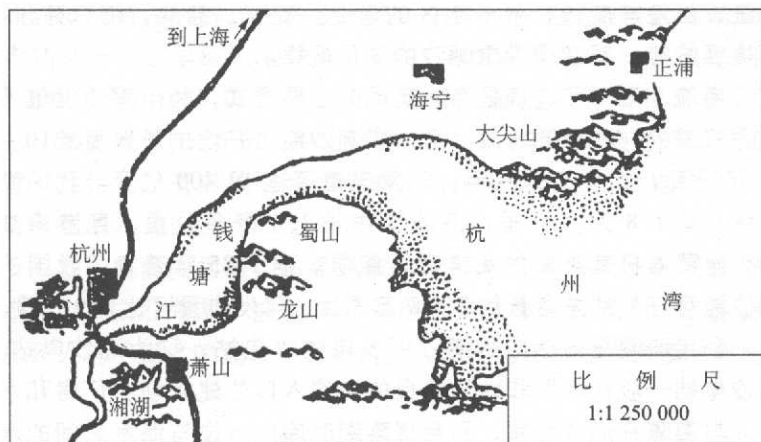


图4 杭州湾喇叭口形势图

在流体力学中，把涌潮看做是逆水流传播的水跃。所谓水跃是指海水自由表面，从一个高度在很短的距离内跃升到较大的高度。可用弗劳德数 $Fr = v/\sqrt{gh}$ 来描述涌潮是否出现，式中 v 是水流速度， g 是重力加速度， h 是水深， \sqrt{gh} 是潮波的传播速度。

当 Fr 略大于 1 时，出现弱涌潮波；当 Fr 远大于 1 时，出现强涌潮波。对具体河口来说，潮差大并有平缓、宽阔漏斗形状的河口是发生涌潮的基本条件，钱塘江口正具备了这两个条件。世界上至少有 15 处以上的涌潮，如南美洲的亚马逊河口，涌潮可高达 5 m，流速约 6 m/s；法国的塞纳河口，涌潮高达 4~6 m。

世界上最大的潮差在加拿大的芬迪湾，为 19.6 m。我国沿海的平均潮差在 1~4.5 m，最大潮差就在钱塘江口，为 8.93 m。

潮汐的开发利用

潮汐的升降、涨落与人们的生活和生产活动密切相关。舰船的进、出港与航行，沿海地区的渔业、农业、盐业，港口建设，环境保护等，都必须考虑潮汐的变化规律。

海流、潮汐和波浪是海水运动的主要方式，利用潮汐发电是能源开发的一个重要方向。全世界潮汐能可开发的总容量约 10~11 亿千瓦，如能充分利用，年发电量可达 12 400 亿度。我国海岸线长达 1.8 万多公里，岛屿岸线长 1.4 万多公里，且港湾交错，蕴藏着极其丰富的海洋潮汐能源。据 1985 年普查，我国的潮汐能可开发的总容量约 2 158 万千瓦，年发电量可达 619 亿度。

利用海潮涨落形成的潮汐能发电的水电站，称为潮汐电站。潮汐电站一般在地形和地质优良的海湾入口处建堤坝、厂房和闸门，与海隔开形成水库，利用涨落潮时库内水位与海水之间的水位差，将海水引至厂房内的水轮发电机组发电。

潮汐电站有许多优点：

- (1) 是可再生能源。潮汐周而复始，可经久不息地利用。
- (2) 虽有周期性间隙，但具有准确规律可预报，能有计划地纳入电网运行。
- (3) 是清洁能源。无废弃物的污染问题。

- (4) 没有淹没损失、移民等问题。
- (5) 一般离用电中心近，不必远距离送电。
- (6) 水库内可发展水产养殖、围垦和旅游。

在经济全球化时代的今天，资源和能源的效率将是市场经济持续成功发展的重要标志。由于潮汐电站有以上优点，世界上经济较发达的沿海国家，都很重视潮汐能的开发利用。

目前潮汐电站尚处于试验探索阶段，以法国起步最早，成效最大。法国在圣玛塔 1966 年建成的“朗斯”潮汐电站，年发电量达 54 400 万度。加拿大在芬迪湾 1983 年投入运行的“安纳”潮汐电站，年发电量 5 000 万度。

我国从 20 世纪 60 年代起，在山东、江苏、浙江、福建、广东等省已修建 10 多座小型潮汐电站，为沿海农村、渔场提供电能。浙江省温岭的江夏潮汐电站，是世界已建成的较大双向潮汐电站之一，这里最大潮差 8.39 m，平均潮差 5.08 m，电站功率 3 200 千瓦，1989 年发电量 620 万度。福建平潭幸福洋潮汐电站，最大潮差 7.16 m，平均潮差 4.54 m，年发电量达 315 万度。曾有人估计，著名的钱塘江大潮，如用来发电，其发电能力几乎等于三峡水电站的 50%。

我们有理由相信，在强调科学发展观和可持续性发展战略的今天，我国沿海潮汐能的开发利用必将会受到重视，一定会使古代诗人笔下描述的潮汐，为社会主义现代化建设提供更多的电能。

参考文献

- [1] 王振东，武际可. 力学诗趣[M]. 天津：南开大学出版社，1998.

- [2] 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书: 大气科学、海洋科学、水文科学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987.
- [3] 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书: 水利[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992.

首刊于《力学与实践》, 1995, 17(4): 74-76.

5

Chapter

风乍起，吹皱一池春水

——漫话流体运动的不稳定性

风乍起，吹皱一池春水。
闲引鸳鸯香径里，
手授红杏蕊。
斗鸭栏杆独倚，
碧玉搔头斜坠。
终日望君君不至，
举头闻鹊喜。

大众
力学
丛书

这首受到人们普遍赞赏、传诵而经久不衰的《谒金门》，被评价为历代传下描写闺怨的少数优秀词作之一。作者冯延巳（903—960），字正中，广陵（今江苏扬州）人，是南唐中主李璟的丞相，也是唐、五代存词最多的作家。马令《南唐书·党与传下》有一段涉及此词的记载：

延巳有“风乍起，吹皱一池春水”之句，皆为警策。元宗尝戏延巳曰：

“吹皱一池春水，千卿何事？”廷巳曰：“未如陛下‘小楼吹彻玉笙寒’。”元宗悦。

元宗即南唐中主李璟，他也是一位才情横溢的著名词人。这段诙谐的对话，说明李璟对此词赞叹之情已溢于言表。

“风乍起，吹皱一池春水”是这首词的头一句，也是全词最精彩的一句。作者用一个“皱”字，将春风吹拂而过，在水面上荡漾起细微波纹，使静景成为动景，把生活中常见的景色写活了。当然冯延巳这里是由景入情，以景寓情，以春水被吹皱，来形容少妇的思绪荡漾。而“风乍起，吹皱一池春水”，从力学的角度来看，是一幅流动不稳定性画面。冯延巳正是用流动不稳定性物理图像，将女主人公不平静的内心世界巧妙地揭示了出来。

美籍华裔流体力学家易家训 1980 年在其《Stratified flows》（《分层流动》）一书中，曾用这一名句以及李璟与冯延巳那段精彩的对话，作为“流体动力学稳定性”一章的开头。他的好友、中国科学院外籍院士冯元桢将这句话用毛笔写出，放在这本英文著作第四章的起始，让人看了十分新鲜（图 1）。

樓
吹
徹
玉
笙
寒

曰
未
若
陛
下
小

底
事
延
巳
對

一
池
春
水
千
卿

主
戲
也
曰
吹
皺

池
春
水
李
中

風
乍
起
吹
皺
一

馮
延
巳
有
詞
曰

Fung Yen-Sze, prime minister for the Middle King of South Tang, was the author of the poem which starts with*

The wind suddenly rises, and ruffles the surface of the newly melted pond...

The king of South Tang, himself an accomplished poet, much appreciated this line, but, instead of praising it seriously, teased its author: "So the wind ruffles the water surface. What concern is that of yours?" Flattered by this subtle compliment, Fung returned it with "Not as good as Your Majesty's 'I from the little pavilion wafted songs that someone blew deep through his jade sheng - his breath hardly warming the stone he touched.'"

图 1 冯元桢在英文著作上的题词

流体运动的不稳定性，是指某种形态的流体运动受到某一扰动后，不能恢复到原来形态的运动情况。风吹过水面引起波浪的不稳定性问题，是流体力学中著名的“风生波”问题。实际上在古诗词中，还有不少涉及风生波这一流动不稳定性过程的诗词。

有关“风生波”的古代诗词

唐代诗人韦应物有好几首诗均涉及了他所观察到的风生波的现象。如：

《野次听元昌奏横吹》：

立马莲塘吹横笛，微风动柳生水波。
北人听罢泪将落，南朝曲中怨更多。

野次即郊外，横吹是乐府横吹曲辞，出自北方的军中音乐，多在马上演奏。诗首句写奏乐者的姿态，接下来以景写声，描绘了眼前景色。乐声如微风使柳枝摇曳，使池塘表面水波荡漾，掀起了听者情感的波澜。哀怨的笛声，使来自北方的诗人思乡之情油然而生，不禁潜然泪下。

《送汾城王主簿》：

少年初带印，汾上又经过。芳草归时遍，情人故郡多。
禁钟春雨细，官树野烟和。相望东桥别，微风起夕波。

表达了诗人傍晚送客远行、告别时对友朋依恋难舍的深情厚意。送到东桥这个地方，相互道别，望着客人远去，这时诗人的心境，已如“微风起夕波”那样不平静了。

《夕次盱眙县》：

落帆逗淮镇，停船临孤驿。浩浩风起波，冥冥日沉夕。
人归山郭暗，雁下芦洲白。独夜忆秦关，听钟未眠客。

叙说了诗人黄昏日暮在盱眙县(唐代属楚州,今属江苏省)泊舟孤驿时的见闻与感受,这时风也吹得河面上兴起了波浪。

元结《石鱼湖上醉歌》:

长风连日作大浪,不能废人运酒舫。

范成大《眼儿媚》:

春慵恰似春塘水,一片粼纹愁。

溶溶曳曳,东风无力,欲避还休。

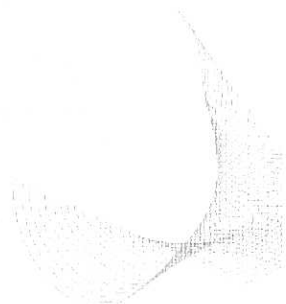
春日的慵懒恰似池塘里静静的春水,水面上一片涟漪就像春愁泛起。碧碧缓缓波荡(溶溶曳曳是指荡漾的样子),东风柔软无力,水面像要皱起波浪,又将微波抹去。

风生波是流动不稳定性的过程

当风突然吹向平静的池面时,马上就会引起细小的波浪(图2)。而风一停止,波浪不久就会消失。但如果风持续地吹送(或足够大),



图2 水面细小波浪



5 风乍起，吹皱一池春水

则会产生波长较长的波浪，并向着风的下沿方向传播开去，甚至在风下沿方向不太远的对岸处，就可以看到波长超过 20 cm 的波浪。风越强，波浪的波长越长，波高也越大，波峰就接二连三地破碎，而变成所谓的白浪 (white cap, 亦译为白冠浪) 状态 (图 3)。

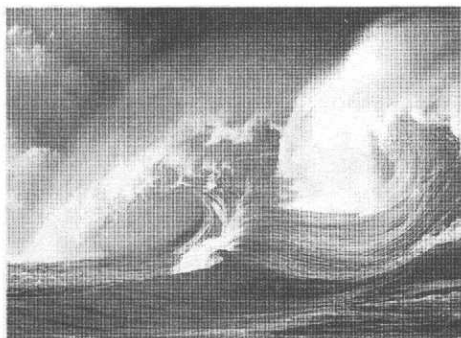


图 3 水面白浪

“风乍起，吹皱一池春水”实际上描述的是风突然吹向平静的池面，引起细小波浪的过程，也就是近代流体力学研究的“风生波”这一流体运动的不稳定性问题，其简化的模型亦称为 Kelvin-Helmholtz 界面不稳定性问题。这种界面不稳定性是讨论两层不同密度的流体作平行于其水平界面的相对运动时的不稳定性问题。海面 (或水面) 上由于风而引起波浪的问题，正是这种界面不稳定性问题。若用 v_1 , v_2 分别表示空气和海水的速度，并设其方向相同； ρ_1 , ρ_2 分别表示空气和海水的密度 (显然 $\rho_1 < \rho_2$)，并设流体在各方向上伸至无穷远。当不考虑流体的黏性和界面张力时，由线性稳定性理论可以得知，只要相对速度 $v_1 - v_2$ 不等于零，界面都不稳定，即有波浪形成。这就是风一吹，马上就会有波浪形成的解释。若考虑界面张力 σ ，则当相对速度为

$$(v_1 - v_2)^2 > \frac{2(\rho_1 + \rho_2)}{\rho_1 \rho_2} \sqrt{\sigma g (\rho_2 - \rho_1)}$$

时界面不稳定。若用这个模型分析海面上由于风吹引起波浪，则

可得当 $v_1 - v_2 > 6.4 \text{ m/s}$ 时，界面失稳而使细小的波浪开始增长。实际上造成海浪增长的不只是相对速度，还有其他一些原因，所以当风速远小于此值时，波浪也可能开始增长。但观察发现，当风速达到此值时，碎浪和蒸发率都突然增加；且当风速增大达到 8.88 m/s 时，波浪的临界波长可增大到 6 cm (图 4)。



图 4 烟台海面 2007 年 2 月 14 日由八级风引起的大浪

用线性稳定性理论来研究“风生波”问题，只是一种初步的近似。实际问题由于因素很多(如辐射、湍流边界层等)，还比较复杂。

所谓水波，系指我们附近的水洼、水池、河流中的水所产生的波浪，甚至在湖泊、海洋表面传播的风浪，以及使湖泊和海湾内的整个水体产生显著振荡的静振(seiche)、潮汐波等。由于海洋开发和利用的需要，风浪的发生机制问题至今仍是流体力学和海洋科学工作者关心和研究的对象。尽管如此，“风乍起，吹皱一池春水”仍不失为定性描述“风生波”乃至整个流动不稳定性问题的千古绝句。

龙卷风是由气流不稳定产生的

龙卷风是一种风力极强而范围不太大的涡旋，状如漏斗，风速极快，破坏力很大。其中心的气压可以比周围气压低百分之

5 风乍起，吹皱一池春水

十。龙卷风长期以来一直是个谜，它的出现和消失都十分突然，很难进行有效的预报。

龙卷风是一个猛烈旋转着的圆形空气柱，其上端与雷雨云相接，下端有的悬在半空中，有的直接延伸到地面或水面，一边旋转，一边向前移动。发生在海上，犹如“龙吸水”的现象，称为“水龙卷”；出现在陆上，卷扬尘土，卷走房屋、树木等的龙卷，称为“陆龙卷”。远远看去，它不仅很像吊在空中晃晃悠悠的一条巨蟒，而且很像一个摆动不停的大象鼻子(图5~图11)。

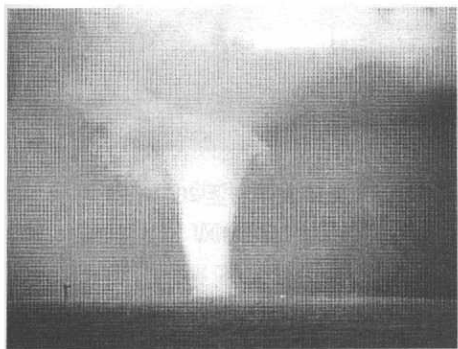


图5 龙卷风

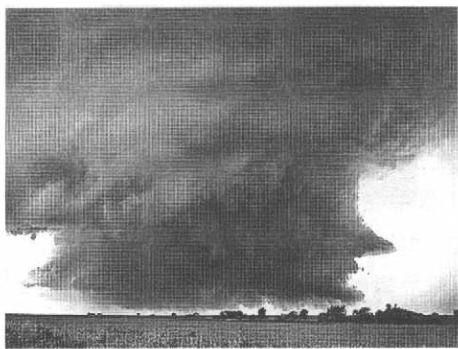


图6 近距离拍摄龙卷风



图7 远距离拍摄龙卷风

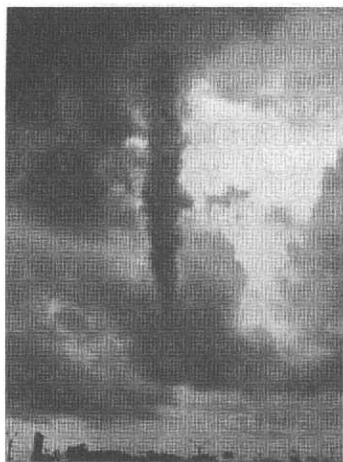


图8 美国印第安纳州
2005年11月的龙卷风



图9 加拿大伊利亚2007年6月
的龙卷风

大众
力学
丛书

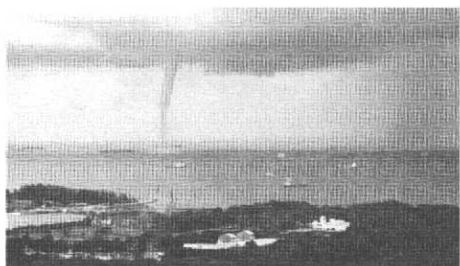


图10 新加坡海面2007年
5月的龙卷风



图11 云南江川县星云湖
2007年9月的龙卷风

龙卷风的危害很大。在美国，龙卷风每年造成的死亡人数仅次于雷电。它对建筑的破坏也相当严重，经常是毁灭性的。在强烈龙卷风的袭击下，房子屋顶会像滑翔翼般飞起来。一旦屋顶被卷走后，房子的其他部分也会跟着崩解。1995年在美国俄克拉荷马州阿得莫尔市发生的一场陆龙卷，诸如屋顶之类的重物被吹出几十英里之远。大多数碎片落在龙卷通道的左侧，按重量不等常常有很明确的降落地带。较轻的碎片却飞到300多千米外才落地。

龙卷风究竟是怎样形成的？可以从夏天在操场上常看到的一种现象，得到启示：一阵风刮来，突然在操场中间出现了一个气流涡旋，它卷起了沙土和树叶随气流旋转，而且越转越快地在移动着，过了一会，又迅速慢了下来，突然消失了。这是很小尺度的气流不稳定性造成的。而龙卷风则是中尺度的气流不稳定性造成的，其平均直径为200~300 m，直径最小的不过几十米，只有极少数直径大的才达到1 000 m以上。它的寿命也很短促，往往只有几分钟到几十分钟，最多不超过几小时。其移动速度平均15 m/s，最快的可达70 m/s；移动路径的长度大多在10 km左右，短的只有几十米，长的可达几百公里以上。它造成破坏的地面宽度，一般有1~2 km。

有人认为，龙卷风是云层中雷暴的产物，是雷暴巨大能量中的一小部分在很小的区域内集中释放的一种形式。龙卷风的形成可以分为四个阶段：

(1) 大气的不稳定性产生强烈的上升气流，由于急流中的最大过境气流的影响，它被进一步加强。

(2) 由于与在垂直方向上速度和方向均有切变的风相互作用，上升气流在对流层的中部开始旋转，形成中尺度气旋。

(3) 随着中尺度气旋向地面发展和向上伸展，它本身变细并增强。同时，一个小面积的增强辅合，在气旋内部形成了龙卷核心。

(4) 龙卷核心中的旋转与气旋中的不同，它的强度足以使龙卷一直伸展到地面。当发展的涡旋到达地面高度时，地面气压急剧下降，地面风速急剧上升，形成龙卷。

从上可知，龙卷风的形成和消失，都是气流运动不稳定的过程。

台风和飓风是产生于热带洋面上风速达到 33 m/s 以上的一种强烈的热带气旋，只是发生地点不同，习惯的叫法不同。在北太平洋西部、国际日期变更线以西，包括南中国海范围内发生的热带气旋称为台风；而在大西洋或北太平洋东部的热带气旋则称飓风。台风和飓风的形成、发展加强、移动、减弱和消失都是大尺度流体运动不稳定的过程(图 12)。

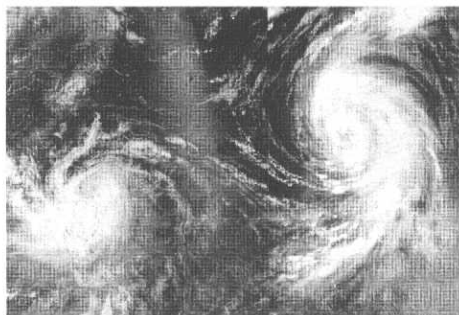


图 12 2004 年 6 月 30 日美国 NACA 的一颗名为 Terra 的卫星捕捉到了太平洋上空两个并排的台风

由于国内用语的习惯，通常所说的“流动稳定性问题”，在国际上多称为“流动不稳定性问题”。只要翻开国际上著名的几种流体力学杂志，就不难看到，研究各种流动不稳定性问题的文章占有很大的比例。这是因为自然界以及人们生产活动与许多流动不稳定性问题密切相关(图 13)。

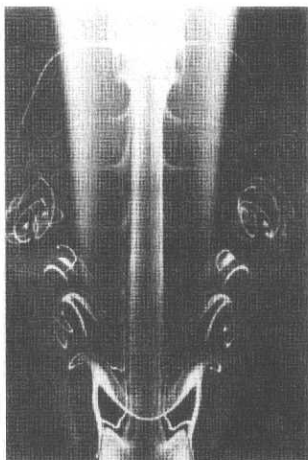
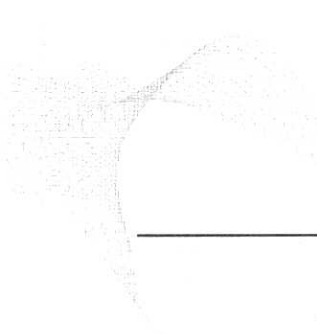


图 13 火焰中气体流动的图案
(这种气流在总体上是稳定的，但局部是极不稳定的)

参考文献

- [1] Yih Chia-shun(易家训). Stratified Flows[M]. London: Academic Press, 1980.
- [2] 富永政英. 海洋波动: 基础理论和观测成果[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [3] 周恒, 王振东. 流动稳定性理论[M]//是勋刚. 湍流. 天津: 天津大学出版社, 1994.
- [4] 王振东, 武际可. 力学诗趣[M]. 天津: 南开大学出版社, 1998.
- [5] 王振东. 微风动柳生水波[J]. 自然杂志, 2006, 28(3): 177-179.
- [6] 萧涤非, 程千帆, 马茂元, 等. 唐宋词鉴赏辞典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1988.
- [7] 蘅塘退士. 唐诗三百首[M]. 北京: 宗教文化出版社, 2001.
- [8] 上疆村民. 宋词三百首[M]. 北京: 宗教文化出版社, 2001.

首刊于《力学与实践》, 1994, 16(5): 77-78.



长使英雄泪满襟

——漫话润湿现象及其应用

6
Chapter

大众
力学
丛书

蜀相祠堂何处寻，锦官城外柏森森。
映阶碧草自春色，隔叶黄鹂空好音。
三顾频频天下计，两朝开济老臣心。
出师未捷身先死，长使英雄泪满襟。

这是杜甫(712—770)移居成都，筑草堂于浣花溪，找寻武侯祠堂拜谒后所写的七言律诗《蜀相》。他到祠堂后，一不观赏殿宇巍巍，二不瞻仰塑像凛凛，而注意到的是阶前的萋萋碧草，叶外黄鹂的数声啾啾。在这荒凉之境，想到了三顾茅庐的知人善任、始终不渝，两朝辅佐的鞠躬尽瘁、死而后已，使得诗人不禁老泪纵横，襟袖湿润。有诗评人指出：“长使英雄泪满襟”的英雄，当指包括老杜在内的千古仁人志士，为国为民的大智大勇者。这篇以“泪满襟”的润湿现象来抒发情感的七律，使天下后世，凡读到此诗者，无不为之感动。

唐宋诗词作者常以润湿现象来抒发别离和思念的感情，有的还引申到美丽景色使身心受到滋润和浸染，用以展示景色给人心灵以诗意般的感受，如：

王勃（约 650—676）《送杜少府之任蜀川》诗：

海内存知己，天涯若比邻。无为在歧路，儿女共沾巾。

杜甫《哀江头》诗：

人生有情泪沾臆，江水江花岂终极。

孟浩然（689—740）《与诸子登岷山》诗：

羊公碑尚在，读罢泪沾襟。

刘长卿（？—约 786）《饯别王十一南游》诗：

望君烟水阔，挥手泪沾巾。

杜审言（约 645—708）《和晋陵陆丞早春游望》诗：

忽闻歌古调，归思欲沾巾。

陆游（1125—1210）《新津小宴之明日欲修觉寺以雨不果呈范舍人》诗：

风雨长亮话别离，忍着清泪湿燕脂。

王维（？—761）《山中》诗：

荆溪白石出，天寒红叶稀。山路元无雨，空翠湿人衣。

张旭《山中留客》诗：

纵使清明无雨色，入云深处亦沾衣。

辛弃疾（1140—1207）《木兰花慢·席上送张仲固帅兴元》词：

追亡事，今不见，但山川满目泪沾衣。

这里，湿、沾均是润湿之意。

另外，在唐诗中也有描述不润湿现象的，如：

韦应物(约735—约792)《咏露珠》诗：

秋荷一滴露，清夜坠玄天。将来玉盘上，不定始知圆。

这首五言绝句生动地描绘了秋夜由天空掉下的一个露滴，落到展开的碧绿的荷叶面上，成为晶莹透亮的水珠，滚来滚去，煞是好看。“不定始知圆”是说，由于看到露珠在荷叶面上滚来滚去，方知它是圆球形。其实，秋荷上的露珠也不一定从天空掉下来的，秋天的后半夜空气湿度大、温度低，在荷叶上凝结的露水，也可形成露珠。但由现代科学来看，韦应物这首诗正是描述了一滴露珠在荷叶面上不润湿的力学现象。

稍后，白居易(772—846)也有一首七绝《暮江吟》：

一道残阳铺水中，半江瑟瑟半江红。

可怜九月初三夜，露似真珠月似弓。

也写出了露珠在绿草上的不润湿现象，系诗人于822年赴任杭州刺史途中所写。他选取了在红日西沉的黄昏和一弯新月的夜晚两组景物，生动地描绘了所观察到的力学现象。前两句描绘了残阳中水面皱起的波动；接近地平线的“残阳”，几乎贴着地面照射过来，像是铺在江上；而暮江水缓缓流动，江面上细波粼粼，波纹受光多的部分，呈现一片红色；受光少的部分，呈现出如同青玉般的深碧色。后两句描绘了新月下，露珠在江边绿草上因不润湿而形成的奇特现象：九月初三夜十分可爱，当凉露下降的时候，江边草地的绿草上因为不润湿而挂满了晶莹的露珠；在弓也似的一弯新月的清辉下，圆润的露珠闪烁着光泽，就像是镶嵌在上面的粒粒真珠(珍珠)一样(图1)。

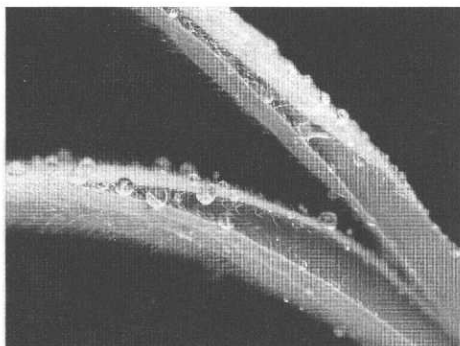


图1 露似真珠

润湿与不润湿的现象

液体对固体的润湿，是指液体与固体接触时，沿固体表面扩展的现象。将一滴液体，放在一均匀平滑的固体表面上，会产生两种情况：一种是液体完全展开覆盖固体表面；另一种是液滴与固体表面形成一定角度仍留在固体表面上。这个在固、液、气三相交界处，自固—液界面经过液体内部到气—液界面之间的夹角（图2）称为接触角，通常以 θ 表示。接触角的大小可以反映液体对固体表面的润湿情况。接触角越小，润湿得越好。习惯上将液体在固体表面上的接触角 $\theta = 90^\circ$ 时定义为润湿与否的界线。 $\theta > 90^\circ$ 时为不润湿， $\theta < 90^\circ$ 则为润湿。水与洁净玻璃的 $\theta = 0^\circ$ ，为完全润湿；水银与玻璃的 $\theta = 138^\circ$ ，所以水银在玻璃上收缩成球形。杜甫、孟浩然、陆游、王勃、王维、辛弃疾等人的诗词涉及的是润湿，而韦应物、白居易的诗，则涉及的是不润湿。

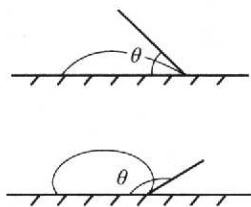


图2 接触角

古人对润湿的作用早有认识。这可以追溯到汉代淮南王刘安(前179—前122)等撰写的《淮南子》。它所表述的道家自然天道观中就有“山云蒸，柱础润”之说。后来宋代苏东坡之父苏洵(1009—1066)在《辨奸论》中说“月晕而风，础润而雨”，已明确将础石由于润湿出现的潮湿，作为将要下雨的征兆。

在自然界、工程技术和日常生活中，液体对固体的润湿和不润湿现象都有重要的意义和作用。彩色感光材料和录音、录像磁带在生产过程中，都要将配制好的感光材料涂液或磁浆，又快又均匀地涂布到固体薄片基上，然后再干燥、裁切、整理包装成产品。能不能又快又均匀地涂上去，就与所涂液体能否在固体薄片基(现通常是采用涤纶薄膜片基)上润湿，并能迅速铺展开来密切相关。现在比较讲究的印刷纸张表面要加上一层薄薄的涂料，其涂布过程也要考虑涂液对纸基需要有好的润湿性能。在印刷过程中，要又快又好地印出多彩的图案来，各种油墨对纸张也要有好的润湿性能。即使在日常生活中，墙壁的刷浆、家具的刷漆，均有类似的需要润湿性能好的问题。

生活中有时也希望应用不润湿的现象。几乎所有的防水用品，都希望水对其不润湿。例如风雨衣、雨伞的面布，就希望雨水打到上面后完全不润湿，形成水珠落下。

据报道，法国有人看到郁金香花瓣的表面粗糙不平，上面有许多仿佛人汗毛形状的物质，当水滴到郁金香花瓣上，因不润湿而保持圆珠状，并自己滑走；从而试图把这一原理嫁接到汽车的挡风玻璃上，将玻璃表面处理成郁金香花瓣表面那样，使水不润湿。当雨水落在这种经过改造的挡风玻璃上，会保持圆珠状，当汽车在行驶时，由于风速和重力的原因，雨滴会自动滑走。如果这一技术成功，汽车的雨刷将成为摆设。其实从一千多年前韦应物和白居易的诗，我们也应可以得到启发，仿照荷叶面或小草表面来改造玻璃面，使雨水完全不润湿，也可以达到雨滴从汽车挡风玻璃上自动滑走的目的。

图3~图6给出了自然界中动植物的不润湿几个示例。

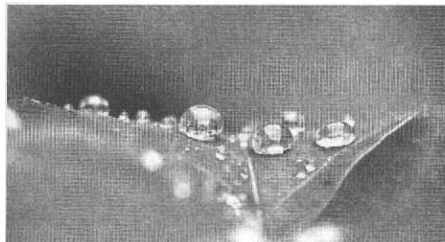


图3 花叶上的水珠

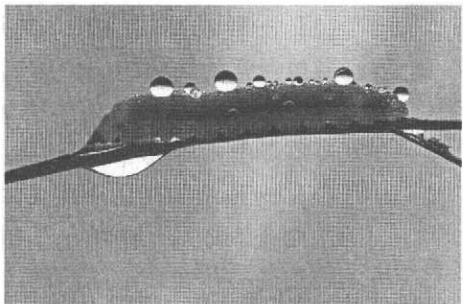


图4 水珠在毛毛虫身上的不润湿

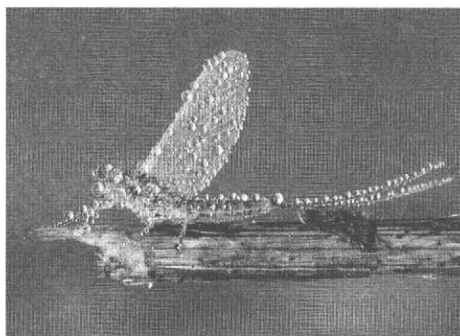


图5 蜻蜓身上的水珠

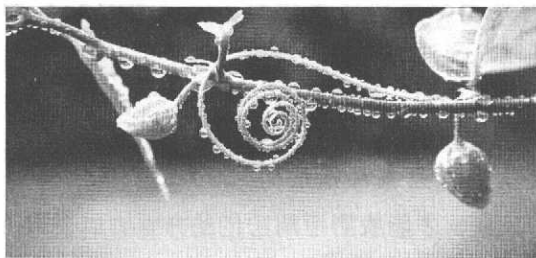


图6 花枝叶上水珠的不润湿

若将一滴液体放到另一种与它不相混溶的液体表面上，则也有润湿与否（亦称能否铺展）的现象。可能发生以下情况：

(1) 一种液体（例如油）在另一种液体（例如水）表面上不铺展，形成漂浮的油滴式“透镜”。

(2) 一种液体在另一种液体表面上展开形成双重膜，此膜有相当的厚度，形成液1—液2、液1—空气两个界面。

(3) 一种液体在另一种液体上展开，形成一单分子膜。

这种液体与另一种和它不相溶的液体之间润湿与否的现象，与发展先进的石油采油技术密切相关。储存在地下石灰岩及其他多孔介质中的原油，经过喷出（称为一次采油）、抽油机抽出（称为二次采油，即平时所常见的“磕头机”抽油）之后，几乎还有一半的石油仍粘附在孔隙中，没有被采出。为迫使这些原油流出，就要在采油井附近再打另一口井，将水（或其他高分子液体）从这口井加压注入，迫使粘附在孔隙中的石油流向采油井再抽出（称为三次采油）。现代科学研究发现，将水加压注入高黏性液体中时，水是按照具有很多细小且高度分枝的线段组成的珊瑚状分形结构前进的，称为黏性指进（viscous fingering，图7）。黏性指进限制了三次采油的效率。因为当水的细枝如果由于润湿性能不合适，而从注水井到采油井这段距离破裂时，就有可能从采油井采出的将是注入的水，而不是油，或者水多油少，实际上在油田经常发生这种情况。因此必须在研究黏性指进时，考虑润湿的因素，才能找到控制它们的方法，以发展先进有效的采油技术。

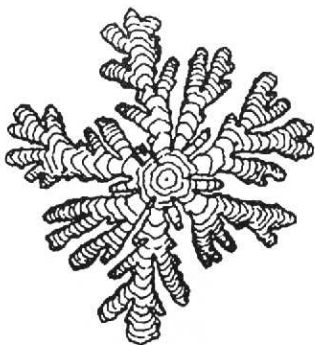


图7 黏性指进

润湿过程与表面张力

润湿过程大体可分为沾湿、浸湿和铺展三类，每一类过程都有定量的公式。用它可判断这一过程能否自发(或自动)进行。

沾湿是指液体与固体接触，变液—气界面、固—气界面为固—液界面的过程。液体对固体的沾湿能力可用黏附功 W_a 表示，即

$$W_a = \gamma_{LG}(1 + \cos \theta) \quad (1)$$

式中 γ_{LG} 是液体的表面张力， θ 是液体在固体表面上的接触角。式(1)称为杨氏润湿方程。根据热力学，在等温等压的条件下， $W_a \geq 0$ 的过程为天然过程的方向，这就是沾湿过程自发进行的条件。

浸湿是指固体浸入液体的过程，即变固—气界面为固—液界面的过程。液体表面在此过程中没有变化。浸湿的能力用浸湿功 W_i 表示，即

$$W_i = \gamma_{LG} \cos \theta \quad (2)$$

若 $\theta \leq 90^\circ$ ，则浸湿过程可以自发进行。

铺展是一种液体在另一种液体表面上展开的过程。其能力可用铺展系数 S_{ab} 来判断，即

$$S_{ab} = \gamma_a - \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (3)$$

式中 γ_a 、 γ_b 分别是液体 a 和液体 b 的表面张力， γ_{ab} 是液体 a、b 间的界面张力。若 $S_{ab} \geq 0$ ，则液体 a 能在液体 b 表面上自动展开。

式(1)~式(3)均涉及液体的表面张力，那么什么是表面张力，它与润湿现象有什么关系呢？

表面张力是指垂直地通过液体表面上任一单位弧元，并沿着与液面相切方向的收缩表面的力，以 mN/m (毫牛顿/米)为单位，通常用 γ 表示。液体表面的基本特性是倾向于收缩，即总是尽可

能取最小的表面积。一切容积相等的形状中，以球形的表面积为最小，因此小量水银和露珠会趋向球形，肥皂膜会自动收缩成滴。这就是韦应物、白居易诗中露珠成球形的原因。

表面张力与润湿现象的联合作用，形成了毛细现象(图8)。毛细现象是指将内径很小的管子(毛细管)插入液体中，管内液面产生高度差的现象。当液体与构成毛细管的固体材料润湿时，管中液面升高并呈凹状；当液体与毛细管材料不润湿时，管中液面下降并呈凸形。毛细现象在科学技术和日常生活中经常可以见到。含有许多毛细管的“上水石”，可作为盆景中的假山，它正是靠水因毛细作用上升的现象，使假山上的植物获得水分。植物所以能够通过根和茎将土壤中的水和养分吸收到自己机体中来，其重要原因也是凭借机体中的毛细管和毛细作用。润滑油通过孔隙进入机器部件中去润滑机器，靠的也是毛细现象。大量多孔性的固体材料，如纸张、纺织品、粉笔等能够吸水，是因为水能润湿这些多孔性物质，从而产生毛细现象。“山云蒸，柱础润”，“础润而雨”，础石是多孔性材料，也正是因空气中所含大量水分，由毛细现象使础石潮湿，从而可以作为空气湿度大，将要下雨的预示。

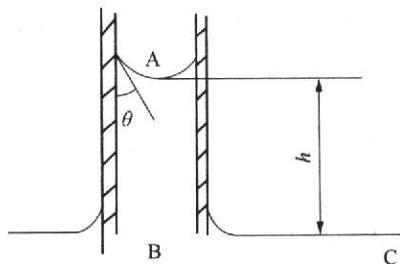


图8 毛细现象

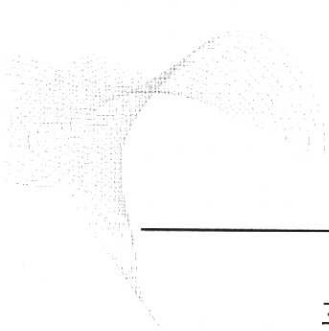
既然表面张力和润湿与否密切相关，那么有没有办法通过加合适的化合物，使液体的表面张力改变，从而改变液体对固体的

润湿性能呢？科学研究表明，确有这样的化合物能在很低浓度时，就可显著降低液体的表面张力和固—液界面的界面张力，以改善润湿性能，使液体更易润湿固体。也有这样的化合物，它能降低液—液界面的界面张力，使一种液体能在另一种与它不相混溶的液体表面上更快、更好地铺展。这样的化合物，通常称为表面活性剂或润湿剂。我国感光材料工业就曾使用过合适的润湿剂，攻克了因润湿性能不好、涂布不够均匀，致使冲洗出的彩色电影胶片发花、发闪的难题。我们相信，如选择采用了合适的表面活性剂，将会提高三次采油的采油效率，也会制造出更多更好的工业品与日常生活用品来。

参考文献

- [1] 王振东，武际可. 力学诗趣[M]. 天津：南开大学出版社，1998.
- [2] 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书：力学，物理学，化学[M]. 北京：中国大百科全书出版社.
- [3] 辞源[M]. 北京：商务印书馆，1979.

首刊于《力学与实践》，1994，16(3)：74-76.



车如流水马如龙

——漫话交通流动

7
Chapter

大众
力学
丛书

现代的交通流动理论(traffic flow theory)萌芽于20世纪30年代,起初是应用概率论分析交通流量和车速的关系。从20世纪40年代起,在运筹学和计算技术等学科发展的基础上又获得新进展。1959年12月,在美国底特律召开了第一次国际交通流理论会议,有美、英、澳、联邦德国等国的代表参加。这次会议被认为是交通流动理论形成的标志。之后,平均每三年召开一次会议。

唐宋诗词中的交通流动

有趣的是,在一千多年之前,我国的唐宋诗词中早就将车辆的运动比作流体的运动,写出了脍炙人口的诗词:

多少恨,昨夜梦魂中。

还似旧时游上苑,车如流水马如龙,花月正春风。

这首《望江南》词,系南唐后主李煜(937—978)在亡国入宋

后所写。李煜在这首词中，刻意渲染了梦中对故国繁华的追恋，是一首典型的以乐写愁的词。往日繁华的生活，虽然内容纷繁，而在他的记忆中最清晰、印象最深刻的是“游上苑”（上苑是皇帝的园林）。而无数次上苑之游中，印象最深的热闹繁华景象，又正是“车如流水马如龙”。这里已很明确地将车辆的运动比喻成水的流动。

将车辆运动比作流体运动的说法，在李煜之前还有《后汉书·明德马皇后传》：

前过濯龙门上，见外家问起居者，
车如流水，马如游龙。

唐代王勃（650—676）《还冀州别洛下知己序》：

凤烟匝地，车马如龙。

以及唐代苏颋（670—727）《夜宴安乐公主新宅》：

车如流水马如龙，仙史高台十二重。
天上初移衡汉匹，可怜歌舞夜相从。

车络绎不绝，有如流水；马首尾相接，好像长龙，非常形象地以流体的运动，形容了车马往来不绝，繁华热闹的景象。

现代交通流动理论

在高速公路上各种类型的机动车一辆接一辆地飞驰而过，就像在江河中奔腾的水流一样。一股车流沿着公路滚滚向前，它启发人们将运动着的车辆看成是连续的流体，利用力学上处理流体运动的思路和方法，来分析和研究公路交通方面车辆运动的有关问题。

最简单的模型是研究一条很长的单行路（设为 x 轴），车辆沿

x 轴的正向运动(暂不允许超车)。用流体力学的欧拉方法,在某一点 x 来观测不同时刻通过此点的汽车速度的变化,则有车流速度函数 $u(x,t)$ 。观测者还可以在 x 位置,观测到单位时间内通过的车辆数,即交通流量 $q(x,t)$ 。另外还有车辆的密度,即在固定的时间、单位距离的公路上的车辆数 $\rho(x,t)$ 。这样就可以将流体力学的方法和术语,用来描述交通流动了。但还要注意的,是我们所讨论的交通流,与流体力学中讨论的连续介质仍有不同处。在一个车流中,每辆车的车身长度,以及车辆之间的距离是不能忽略不计的。因此,若将 q, ρ 理解为瞬间和很短距离内的车流特征,就会破坏其连续性,使后面的分析难以进行下去。所以这里应将它们理解为一定时间段或一定距离内的平均数值,以保证其必要的连续性。至于如何确定这个时间区间段及空间距离的大小,给出 q 和 ρ 的最好的估计值,则是一个统计学的问题。这里,我们已认为 q 和 ρ 满足了必要的连续性条件。

三个基本的交通流变量(速度、密度、流量)之间存在着紧密的关系

$$q(x,t) = \rho(x,t)u(x,t)$$

类似于建立流体力学中质量守恒方程(连续性方程)的办法,也容易从车辆守恒的观点出发建立起交通流的模型——车辆守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

或

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{dq}{d\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$$

这是一个关于未知函数 ρ 的偏微分方程,也称为简单的交通流模型。如果有一个非常数的初始交通密度 $\rho(x,0) = \rho_0(x)$, 就可以求解它。

莱特希尔(M. J. Lighthill)和惠瑟姆(G. B. Whitham)在1955年

成功地将行驶的车流，当作可压缩流体处理，在一定条件下求解了这一方程。

应用交通流动的观点和模型，可以解决许多交通管理方面的问题，如：交通灯或停车标记的设置；交通灯的转换周期长度；是否需要把一条双行线的街道改为单行线；新建一条高速公路需要多少条车道；等等。

关于交通方面的发展方针和决策是否科学合理，也应从交通流动理论上加以研究。如在我们这个人口众多、人均可利用土地又较少的国家，大中城市的交通工具究竟是以发展小汽车为主，还是以发展大客流量的交通工具（如大巴、地铁、轻轨火车等）为主，就是一个应慎重考虑的问题。因为车流量大，并不等于货流（goods flow）量大，也不等于客流（passenger flow）量大。而人们希望的，是从我国的国情出发，以较少的道路占地面积，取得较大的客流量和货流量。

与汽车有关的力学问题

1. 汽车空气动力学问题

20世纪20年代末期，美国克莱斯特汽车公司的工程师卡尔·比尔（Karl Beer）在俄亥俄州的代顿，建造了一个用来测量汽车模型风阻的风洞实验室，这个风洞就建在首次试飞飞机成功的莱特兄弟的实验室附近。风洞试验段高500 mm，宽760 mm，使用35马力（1马力 \approx 735 W）的变速电动机，用V形胶带驱动风扇，以产生不同速度的气流供测量用。

美国密歇根大学流体力学研究中心的朗依（W. E. Lay）教授，在风洞实验室对不同形状的汽车模型测量了空气动力系数。试验表明，不同造型的车身所产生的空气阻力是截然不同的，流线型

后背的车型与方方正正的车型相比，空气阻力可减少 $1/2$ ，若汽车前端也呈流线造型，则空气阻力再次降低约 $1/2$ 。

经过吸取许多汽车空气动力学专家的研究结果，1964 年出现了“楔型”车身的福特 GT40 赛车。它有效地减少了空气阻力，更重要的是在高速运动下能产生较大的下压力，而不像普通流线型车身那样产生正升力。鸭尾形的造型凸起在车尾，起到后扰流板的作用，进一步增强后轮的下压力，这种下压力加大了车轮与地面之间的附着力，增强了车辆的操纵性和横风稳定性，并有助于提高车速。GT40 接连获得了好几项大赛的冠军，一时名声大噪。

现在汽车外形的空气动力学设计，可以用计算流体动力学软件（如 fluent 软件）计算，再配合汽车风洞的实验，已能进行得相当好了。

2. 与汽车安全有关的力学问题

目前在世界的公路上，奔驰着几亿辆汽车，虽然公路交通事故没有像空难、海难和铁路交通事故那样引起媒体的关注，但实际上空运、海运和铁路等交通事故遇难人数的总和，还到不了公路车祸的零头。自 1886 年德国奔驰造出了世界第一辆汽车以来，一百多年中，累计已有 2 000 多万人被车祸夺去了生命。据统计，目前世界上每年死于公路交通事故的有 50 多万人，已成为当今世界非疾病的第一杀手。

所谓车祸，不管是发生了碰撞、翻车，还是跌落到沟下，无非是汽车突然改变了原来的运动状态，产生了异乎寻常的加（减）速度。所以，对车祸的研究是与力学有关的课题。

最常见的事故是两车相撞，或汽车与障碍物相撞。这时，汽车突然停止前进，而坐在车里的人，由于惯性仍以汽车原来的速度向前。以一辆速度 90 km/h 前进的汽车来说，车因碰撞停下时，人却还以 25 m/s 的速度继续前进，这大约相当于人从 10 层

楼跳下来落地时的速度。而从楼上跳下落地时，地一般是平的，但惯性前进的人要碰到的却是转向盘、车窗等物体，造成的结果一般是头颅被前玻璃窗撞破，或司机向前撞在转向盘上，肋骨和心脏受到伤害。

(1) 安全带

为减少这类伤害，人们早就采用系安全带的措施，来保护驾驶员和乘车者。安全带的作用主要有三：①增长人体的受力时间。因为安全带紧贴身体，当汽车因意外突然减速时，人体即已开始受安全带的拉力，由于安全带具有弹性，能增长受力时间，所以减小了人体所受的冲力。②安全带和人体有足够的接触面积 A ，由 $p = F/A$ 一式可见，安全带可减小对人体的压强。③安全带束缚着人体肩胛骨和骨盆，这是人体易受伤的部分，故能发挥保护人体的功效。

根据香港运输处的调查结果，汽车前座乘客若不使用安全带，其意外伤亡机会是 8.7%；而使用安全带者则为 3.3%。

对安全带的力学性能，人们开展了许多研究。安全带不能太宽也不能太窄，太宽了会妨碍人驾驶操作，太窄了撞车时人和带间的压强过大，会勒伤人的身体；安全带的弹性要适当，不能太刚也不能太软，太刚了，安全带好似固壁会伤害人，太软了，碰撞时又会拉得过长、易让人碰到其他物体而致伤害；安全带的强度要足够，最好还要能够吸收能量，即被拉长后、回弹的力量尽量小，以避免回弹时的二次伤害。有人曾设想，最好能研制一条智能安全带，即要求在撞车时，安全带的伸长是根据人受的力量来控制的，使人受的力量总是处于不致伤害的最大力，从而可最大限度地减少伤害。

为减少碰撞对身体的伤害，人们还考虑将转向盘及其支撑系统做成柔性的。当人因为撞车按惯性向转向盘撞去时，转向盘及其支撑系统又可以吸收一部分能量。

(2) 安全气囊

从20世纪70年代开始,人们又开始用安全气囊在碰撞时减缓人和转向盘之间的冲击。安全气囊是美国机械工程师约翰·赫缙克(John Hetrick)于1953年发明的。他原先在鱼雷修理厂工作,有一次看到鱼雷中释放出的压缩空气吹入覆盖在鱼雷上的帆布袋,使其突然膨胀起来,立即顶到了天花板上,为他提供了灵感。1953年他设计了气袋垫在驾驶员面前作缓冲装置,申请了专利,并于当年得到批准。安全气囊在20世纪70年代才得到应用。当装在车上的传感器,测得汽车的加(减)速度超过某设定的数值时,便自动将预先放置好的气囊迅速充气,使气囊在人和转向盘间形成软垫,减少人碰撞部位的局部压力,以避免伤害。汽车碰撞是瞬间的事,气囊充气就须在更短时间内完成。以90 km/h(25 m/s)速度前进的汽车为例,如突然停止,人仍以此速度前进,如果人与转向盘间距离有25 cm,则人只需要0.01 s就要与转向盘相碰。所以从传感器检测到加(减)速度的门限发出指令,到气囊完成充气,必须在几毫秒、甚至在若干微秒时间内完成。这只有在气囊内引入一个小爆炸,才能满足要求。而这在力学上又须仔细研究,爆炸小了不能充足气,大了则有可能会将人炸伤。

据统计,安全气囊与安全带的联合作用,确实可进一步减少汽车碰撞对人的伤害。现在,已有的汽车不仅在前面安装了安全气囊,在两侧车门内也装有安全气囊,以减少侧面冲击给乘客带来的伤害。侧面气囊隐藏在座椅旁边,当侧面出现撞击时,触及座椅侧面底部的感应器时,气囊会自动弹出,保护乘坐人的肩膀。瑞典富豪是第一家采用侧面安全气囊的公司。1995年款的美国通用别克汽车配备了8个气囊,前面4个,侧面4个。

(3) 能量吸收装置

若能设计汽车的刚度,使碰撞的过程适当延长,加大碰撞后的变形量,也可成倍地减小碰撞时汽车的加(减)速度,从而减少伤害。这种设计思想是,尽可能增加在碰撞过程中汽车变形所吸收的能量,使碰撞时的动能(包括乘车人运动的动能),尽可

能多地被汽车的变形部件吸收。汽车前边的保险杠是碰撞时与别的车辆或物体最先接触的部件，其变形过程需要认真地研究，使符合以上的要求。近年来，能量吸收装置是应用固体力学研究的一个热点，它不仅在汽车碰撞问题上有应用，在船体、飞机、军事防护工程中都有重要的应用。新材料的使用，也可为汽车的能量吸收装置提供好处。如可再生的热塑料保险杠，其重量只有5~7 kg，但却能大量吸收冲击能。

对汽车碰撞所致车祸的研究，现场考查自然是一种方法，但为了取得完全的数据，往往需要做大量的模拟实验(图1)。试验时，汽车里坐有一个模型人，其质量分布、刚度和关节活动程度，都尽量做得和真人一样。模型人身上装有各种传感器，以测量各种所需要的数据。事故对人体的可能伤害、安全带和安全气囊的有效性、车身结构的强度、刚度和能量吸收性能等，都需要通过这类试验反复地进行验证。

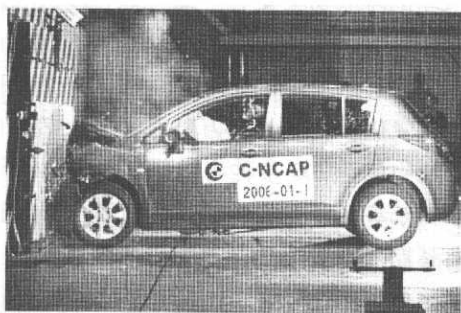


图1 汽车碰撞实验

汽车引起的环境保护问题

自1886年1月29日德国人本茨(Karl Benz)发明“奔驰1

号”机动车(图2)以来,世界已累计生产了十几亿辆汽车。汽车的发展使人们的生活方式发生了很大的变化,甚至影响了整个世界的变革。但是,汽车工业的发展也给人类带来了前所未有的难题,首当其冲的就是汽车的排放污染对人类生存环境的破坏。

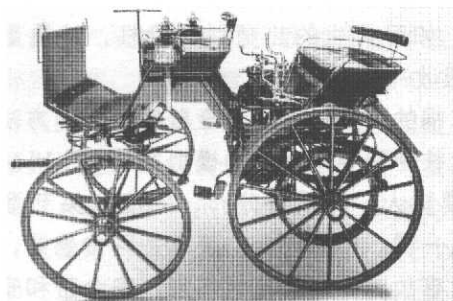


图2 1886年的第一辆汽车

汽车的排放物主要有一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO)、细微颗粒及硫化物。一氧化碳侵入人体,会很快与血液中的血红素结合,形成对人体有害的一氧化碳血红素。当人们长期生活在一氧化碳含量为百万分之十的大气中时,就会慢性中毒。碳氢化合物中包括200多种有机物成分,已证明其中部分成分是致癌物质,如苯等多环芳烃类物质。危险的是,这些致癌物质在人体内还具有长期的积累效应。汽车排放的氮氧化物包括两大部分,较多的一氧化氮和较少的二氧化氮,尽管低浓度的一氧化氮毒性不大,但二氧化氮则是毒性很强的气体,对人的呼吸系统和免疫功能有很大的危害。此外,碳氢化合物与氮氧化物在强烈的日光作用下会进一步发生光化学反应,形成毒性很大的光化学烟雾污染。光化学烟雾是一种白色或淡棕色的烟雾,会使大气能见度降低,具有特殊气味,刺激眼睛和喉黏膜,使呼吸困难,给人体健康和生态环境带来严重的危害。这种由于汽车排放造成的极为严重的大气污染事件,近半个多世纪以来,已在世界上发生过多起。20世纪40年代,美国

洛杉矶发生了世界上第一个由于汽车排放造成的严重光化学污染事件；20世纪70年代末期，希腊首都雅典也经常出现光化学烟雾；1992年11月，墨西哥城发生了以臭氧为标志的光化学污染。1998年冬天，北京天空“灰蒙蒙”、“白茫茫”，看着太阳像是月亮的“黑锅盖”现象，经北京环保局采用最新的大气监视仪器进行监测，发现正是汽车尾气污染物和煤烟污染物，两者在大气物理化学的作用下生成的新污染物——细粒子所造成的。这种分布于地面到800 m高空的细粒子，对阳光有很强的消光作用，同时也是细菌、微生物、病毒和致癌物的载体，极易通过人的呼吸系统，沉积于人的肺中，对人体有极大的危害。

20世纪80年代以来，各国科技人员对汽车排放物进行了大量的研究，证明汽车排放物不仅会对局部环境造成不利影响，而且还会扩散到大气层中很远的地区，持续时间也很长。科技人员首先从改进发动机做起，使燃料燃烧得更充分，排污更少，如用电喷发动机取代传统的化油器，就属于这方面的努力。另一方面，科技人员又在研究如何最大限度地控制发动机向大气排污，如研制了三元催化转换器等装置，通过氧化与还原反应，尽可能地将发动机排出的一氧化碳、碳氮化合物、氮氧化物转化为无害的水、二氧化碳和氮气。

随着环境和能源形势的日趋恶化，世界范围内的环保呼声越来越高，汽车作为污染环境和消耗能源的大户，备受人们关注。开发排污小的“绿色发动机”已成为各汽车公司的竞争热点。使用压缩天然气、液化石油气、醇类生物燃料的汽车均已出现，此外还有电动汽车以及太阳能汽车。

人们完全有理由希望发展和使用清洁能源的交通工具，使交通流动，使“车如流水马如龙”既快捷便利地服务于人民，又能为大众提供一个无污染、无噪声、节能、节约土地、收费低、乘坐时舒适宽敞、用最短的距离和最少的时间将乘客送到目的地的高效交通系统。

参考文献

- [1] 王振东. 车如流水马如龙——漫谈交通流动[J]. 力学与实践, 1999, 21(6): 70-71.
- [2] 武际可. 与公路交通事故有关的研究[J]. 力学与实践, 2003, 25(4): 74-76.
- [3] 吕植中, 刘焯. 飞轮载世界——汽车科技[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.

首刊于《力学与实践》, 1999, 21(6): 70-71.

直挂云帆济沧海

——漫话各式各样的帆

大众
力学
丛书

唐宋诗词中的帆

谈到帆，人们就会想起一句口头常用于美好祝愿的成语：“一帆风顺”。挂上帆，遇顺风，则能更快航行，平安到达目的地。

在唐宋诗词中，有不少以帆来寄情思、诉衷情的诗句，仅李白就有多首，如脍炙人口的七绝《黄鹤楼送孟浩然之广陵》：

故人西辞黄鹤楼，烟花三月下扬州。
孤帆远影碧空尽，唯见长江天际流。

下半联说的就是送别孟浩然时，恋恋不舍的心情：目光望着帆影，一直到逐渐模糊，消失在碧空的尽头。

七绝《望天门山》：

天门中断楚江开，碧水东流至此回。

两岸青山相对出，孤帆一片日边来。

传神地描绘出挂帆的小船，乘风破浪，越来越靠近天门山时的情景，包含了诗人欣睹名山胜景、目接神驰的激情。

七绝《哭晁卿衡》（晁卿，又名朝衡，日本人，原名阿信仲麻吕，系由日本来中国求学人员）：

日本晁卿辞帝都，征帆一片绕蓬壶。

明月不归沉碧海，白云愁色满苍梧。

蓬壶是传说中的蓬莱仙岛，泛指海外三神山。诗人在这里以诗句，自然而又潇洒地抒发了对晁卿的哀思。

七言古诗《行路难》之一：

金樽清酒斗十斤，玉盘珍羞直万钱。

停杯投箸不能食，拔剑四顾心茫然。

欲渡黄河冰塞川，将登太行雪满山。

闲来垂钓碧溪上，忽复乘舟梦日边。

行路难，行路难，多歧路，今安在。

长风破浪会有时，直挂云帆济沧海。

该诗指出，虽然前路崎岖、障碍重重，但总会乘长风破万里浪，挂上云帆，横渡沧海，到达理想的彼岸。

五言律诗《夜泊牛渚怀古》：

牛渚西江夜，青天无片云。登舟望秋月，空忆谢将军。

余亦能高咏，斯人不可闻。明朝挂帆去，枫叶落纷纷。

牛渚是安徽当涂西北紧靠长江的一座山，北端突入江中，即著名的采石矶。诗人在回忆几百年前“谢尚闻袁宏咏史”事之后，联想明朝挂帆离去的情景：在飒飒秋风中，片帆高挂，客舟即将离开牛渚；枫叶纷纷飘落，像是无言地送着寂寞离去的行舟。

其他也有许多以帆阐发各种情思的诗词，如：

李商隐的七律《隋宫》：

紫泉宫殿锁烟霞，欲取芜城作帝家。
玉玺不缘归日角，锦帆应是到天涯。
于今腐草无萤火，终古垂杨有暮鸦。
地下若逢陈后主，岂宜重问后庭花。

七绝《隋宫》：

乘兴南游不戒严，九重谁省谏书函？
春风举国裁官锦，半作障泥半作帆！

高适的七律《送李少府贬峡中王少府贬长沙》：

嗟君此别意如何，驻马衔杯问谪君。
巫峡啼猿数行泪，衡阳归雁几封书。
春风江上秋帆远，白帝城边古木疏。
圣代即今多雨露，暂时分手莫踌躇。

卢纶的七律《晚次鄂州》：

云开远见汉阳城，犹是孤帆一日程。
估客昼眠知浪静，舟人夜语觉潮生。
三湘秋鬓逢秋色，万里归心对月明。
旧业已随征战尽，更堪江上鼓鼙声。

孟浩然的五言律诗《早寒有怀》：

木落雁南渡，北风江上寒。我家襄水曲，遥隔楚云端。
乡泪客中尽，孤帆天际看。迷津欲有问，平海夕漫漫。

刘长卿的五言律诗《饯别王十一南游》：

望君烟水阔，挥手泪沾巾。飞鸟没何处，青山空向人。
长江一帆远，落日五湖春。谁见汀州上，相思愁白苹。

王湾的五言律诗《次北固山下》：

客路青山下，行舟绿水前。潮平两岸阔，风正一帆悬。
海日生残夜，江春人旧年。乡书何处达，归雁洛阳边。

韦应物的五言律诗《夕次盱眙县》：

落帆逗淮镇，停舫临孤驿。浩浩风起波，冥冥日沉夕。
人归山郭暗，雁下芦洲白。独夜忆秦关，听钟未眠客。

《赋得暮雨送李胄》：

楚江微雨里，建业暮钟时。漠漠帆来重，冥冥鸟去迟。
海门深不见，浦树远含滋。相送情无限，沾襟比散丝。

柳永的《送神引》词：

一叶扁舟轻帆卷，暂泊楚江南岸。孤城暮角，引胡笳怨。
水茫茫，平沙雁，旋惊散。

温庭筠的《忆江南》词：

梳洗罢，独倚望江楼。
过尽千帆皆不是，斜晖脉脉水悠悠。
肠断白苹洲。

叶梦得《贺新郎》词：

万里云帆何时到？送孤鸿，目断千山阻。

孙光宪的《浣溪沙》词：

蓼岸风多桔柚香，江边一望楚天长，片帆烟际闪孤光。
目送征鸿飞杳杳，思随流水去茫茫，兰红波碧忆潇湘。

我国殷商时期(3600—3066年前)的甲骨文中，已有“凡”，即“帆”字，并已完全具备制作风帆的材料、工具和技术。由此可知，我们的祖先至少在3000多年前，就能制作比较成熟的风帆了。帆船是人类和大自然和谐相处求发展的一个见证，帆船的历史同人类文明史一样悠久。

锦帆应是到天涯

船在水中航行时，若挂上帆，则能借助风的推动力，推动船向前行驶。当顺风时，船自然会加速行驶。当风从船的侧向吹来时，帆的受力分析示意图如 1a 所示，设风向与航向成一角度 β ，这时帆(船)上受到一个空气动力 F ，这个力可以分解出沿航向 x 的分力 F_x ，这是一个推动船向前行的力，叫做前进力。另一分力将推动船向横向移动，叫做横向力。由于船底有一大片中央板，可使船身不致发生较大的横向移动，而只能前进。当 $\beta = 0$ 时，即风向与航向相同的“顺风”状态，此时 $F_x = F$ ，对船的航行最有利。而在其他情况下， F_x 总是小于 F 。当逆风行船时， $\beta = 180^\circ$ ，船就要巧妙地走一个弯曲的之字形路线，调整帆的朝向使其可受侧风作用，图 1b 所示是在逆风行船时，船头偏向一侧的典型受力示意图。由此可见，帆已从用于顺风航行，逐步用到侧风行船，直到巧妙地在逆风中也能用帆助船行(图 2)。总之，不论风向与航向成任何角度，借助风力，帆总能助船运行。

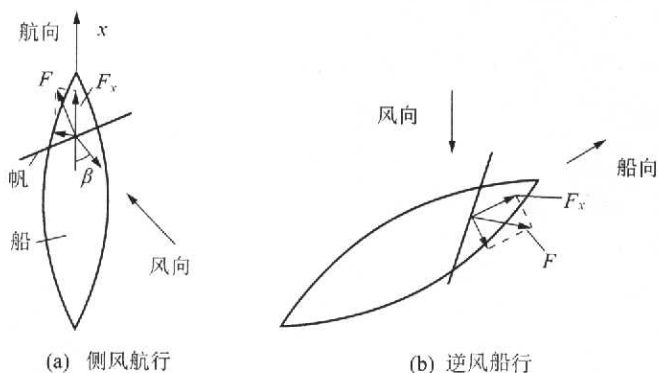


图 1 船帆受力分析示意图

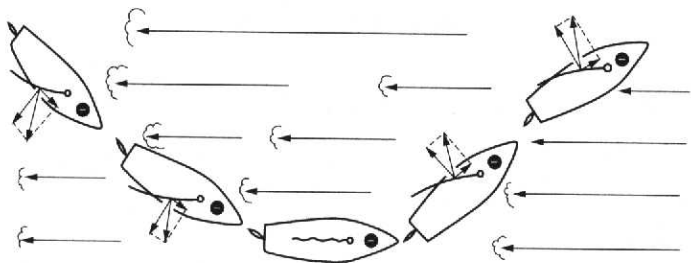


图2 采用之字形路线逆风航行示意图

帆船的发展令人瞩目，从小河里行驶的单帆船，发展到能横渡海洋的大型多帆船。600多年前，我国明代郑和下西洋时所用的，就是大型多帆船队(图3)。



图3 郑和帆船的复制品

中国是世界上造船航海历史最悠久的国家之一。唐代对外贸易的商船直达波斯湾和红海之滨，所经航路被誉为“海上丝绸之路”。那时使用的海船具有9个水密隔舱，抗沉性好，并设有帆和舵，可利用侧、逆风行驶。12世纪初，中国首先将指南针用于航海导航。15世纪初至15世纪30年代，郑和率巨大船队7次

8 直挂云帆济沧海

下西洋，所用宝船有 9 桅 12 帆，长 44 丈，宽 18 丈。船队大小船 200 余艘，最远航程到达非洲东岸现今的索马里和肯尼亚一带。

图 4 ~ 图 6 为帆船的几个示例。

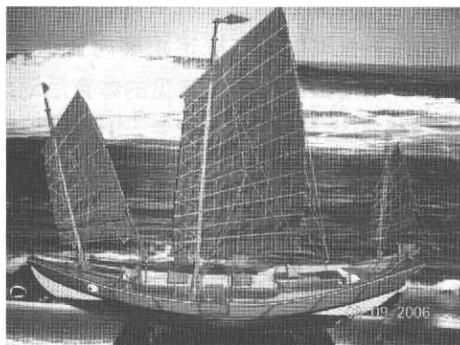


图 4 厦门鼓浪屿郑成功博物馆中的帆船模型

大众
力学
丛书



图 5 纽约的古帆船

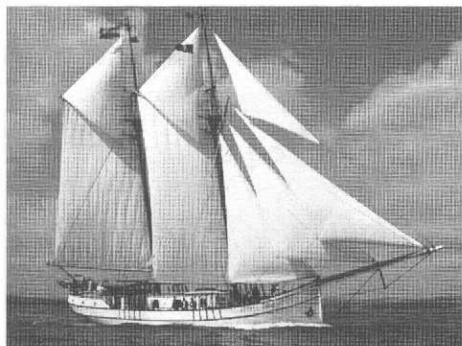


图 6 现代多帆船

帆船运动是奥运项目

帆船运动是集娱乐性、观赏性、探险性、竞技性于一体的项目，它是借助风帆推动帆船在规定距离内竞速的一项水上运动，目前已经成为世界沿海国家和地区常见的体育活动之一（图7、图8）。

现代帆船运动起源于荷兰。1660年荷兰的阿姆斯特丹市长将一条名为“玛丽”的帆船送给英国国王查理二世。1662年查理二世举办了英国与荷兰之间的帆船比赛。1720年爱尔兰成立皇家科克帆船俱乐部。1851年英国举行环怀特岛国际帆船赛。1870年美国 and 英国首次举行横渡大西洋的美洲杯帆船赛。

早在1896年第一届奥运会上，帆船运动就被列为正式比赛项目，但由于天气条件不好，临时取消了比赛。1900年第二届奥运会在法国巴黎举行，帆船运动共进行7个级别的比赛。以后除在美国圣路易举行的第三届奥运会没有进行帆船比赛外，其余各届奥运会都进行了帆船比赛。但比赛级别在不断变化，船艇也不断地改进。玻璃钢的问世，使船艇的造价降低，工艺水平提

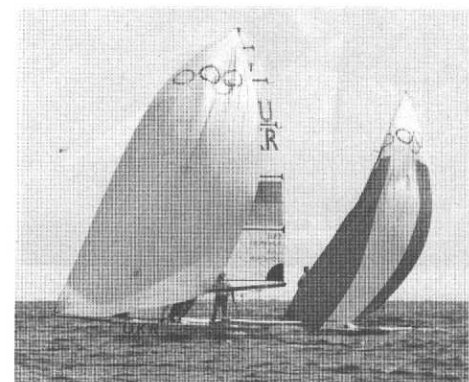


图7 帆船运动

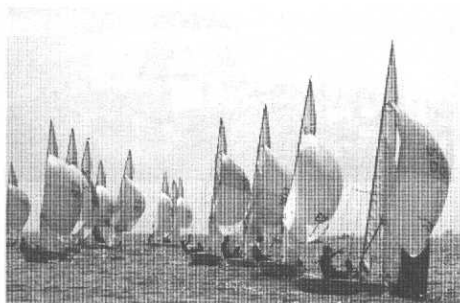


图8 2006 青岛帆船赛

高，轻巧而小型的帆船逐渐替代了过去的老式帆船。从 1976 年第 21 届奥运会开始，已全部是小型船体的帆船。比赛级别最多的是 25 届巴塞罗那奥运会，男女共 10 个级别。从 1988 年奥运会起，将原男女混合的项目改为男、女分设的单独项目。比赛在开阔的海面绕标航行，场地由 3 个浮标构成等边三角形，每段航道长度不少于 2~2.5 海里。

帆船运动项目中包括有帆板运动。帆板运动是介于帆船和冲浪之间的新兴水上运动项目，帆板由带有稳向板的板体、有万向节的桅杆、帆和帆杆组成。运动员利用吹到帆上的自然风力，站到板上，通过帆杆操纵帆使帆板产生速度在水面上行驶，靠改变帆的受风中心和板体的重心位置在水上转向。因和冲浪运动有密切关系，故又称风力冲浪板或滑浪风帆。

将于 2008 年在青岛举行的第 29 届北京奥运会帆船项目设 9 个级别 11 项比赛。其中男子项目包括：男子 470 级，男子激光级，男子星级，男子帆板；女子项目包括：女子 470 级，女子英凌级，女子雷迪尔级，女子帆板；混合项目包括：芬兰人级，49 人级，托纳多级；2008 年 8 月 9 日到 8 月 21 日，将产生 11 枚金牌。

鸟翅和机翼上的帆

人们也观察到，鸟的翅膀端处，不同排列开的大羽毛也在起到帆(片)的作用。近年来，更是发展到在飞机的机翼上加“帆”助飞。因此，思考鸟和飞机上帆的功能，是件有趣的事情。

鸟在天上飞，必须借助于翅膀(羽翼)才能升起和前进。人们观察到，天上的飞鸟(尤其是大型飞鸟)有时在羽翼的翼梢处，呈现出特殊的排列。细致地观察可发现，这些在翼尖处展开的大羽毛，不仅是分开的，而且不在同一个平面上，成不同的角度，并随状态而变。实际上，这些大羽毛成了一片片具有帆一样功能

的“帆片”，能够产生向前推进的分力(减少了阻力)，(如图9~图11所示)。



图9 鹭鸟翅膀的羽毛“帆”片



图10 鸟翅膀的羽毛“帆”片

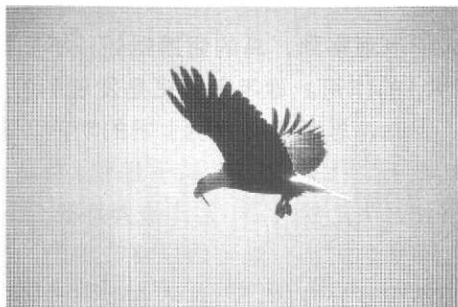


图11 鸟翅膀上的“帆”片已张开

受到鸟飞行时羽翼的形状的启发，人们希望在机翼也添上像“帆片”一样的东西，以改进飞机的设计。

飞机设计的一个重要指标，是要减少飞行的阻力。机翼为飞机提供了升力，却同时又增加了诱导阻力(其系数与升力系数平方成正比)，这是由于在机翼的翼尖处形成了强涡旋系，它与翼尖的形状直接有关。所以人们对翼尖处的配置做了很多研究，在翼尖处装上了称为“帆片”(sails)的很小的辅助翼面(亦称“翼梢小翼”)，并可以有不同形状、大小和排列方式，类似于鸟的羽翼尖处的大羽毛，它能够有效地改变翼尖处的流动特性，非常好地减少了飞行阻力。研究表明，机翼加上帆片后，会打碎导致阻力大增的翼尖强涡旋系，使其强度减弱，增加了机翼的有效展弦比，增大了翼尖处的局部有效攻角，从而增加了推动飞机向前的力(图12)。



图12 翼梢小翼和机翼后缘的帆片

当你乘坐在波音飞机机翼附近的窗口位置时，很易看到，在飞机降落过程中，机翼后缘处的“帆片”不断地在运动，有时伸出去，有时还会转一定角度。这都像鸟飞行时调整其羽毛那样，以调整其“帆片”，增大飞行阻力，使客机更好地安全降落和减速(图13)。

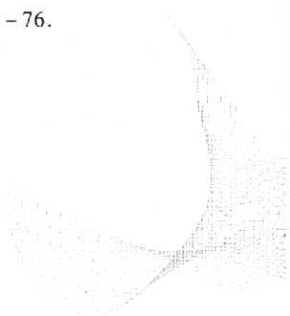


图 13 飞机机翼后缘的帆片已向下转

参考文献

- [1] 周光炯. 从考古看史前流体力学的发生和发展[J]. 力学与实践, 2001, 23(6): 62.
- [2] 唐登斌, 王振东. 孤帆一片日边来——漫谈船、鸟、飞机的“帆”[J]. 力学与实践, 2002, 24(6): 74-76.
- [3] 蘅塘退士. 唐诗三百首[M]. 北京: 宗教文化出版社, 2001.
- [4] 上疆村民. 宋词三百首[M]. 北京: 宗教文化出版社, 2001.

首刊于《力学与实践》, 2002, 24(6): 74-76.



飞湍瀑流争喧豗

——漫话流体运动致声和声音的双重作用

连峰去天不盈尺，枯松倒挂倚绝壁。
飞湍瀑流争喧豗，砢崖转石万壑雷。

大众
力学
丛书

这是唐代大诗人李白(701—762)的名作《蜀道难》片断。《蜀道难》相传是唐玄宗天宝初年，李白第一次到长安，秦蜀道路上奇丽惊险的山川给他留下了深刻的印象。于是李白袭用乐府古题，用浪漫主义的激情写就了这首千古绝唱。上述这段七言古诗片断，被认为是从山川之险揭示古时蜀道之难的描写，达到登峰造极地步的四句。

诗人先托出山势的高险，用“连峰去天不盈尺”夸饰山峰之高，“枯松倒挂倚绝壁”衬托绝壁之险。然后由静而动，又用“飞湍(tuān)瀑(pù)流争喧豗(huī, 喧豗指轰响声)，□(pēng, 撞击意)崖转石万壑雷”写出飞流而下湍急的瀑布争竞作响，水石激荡，山谷轰鸣的惊险场景。

读这四句诗，眼前仿佛是一连串的电影镜头：开始是山峦起

伏、连峰接天的远景画面；接着是平缓地推出枯松倒挂绝壁的特写；而后是一组快镜头，飞湍、瀑流、悬崖、转石，配合着万壑雷鸣的音响飞快地从眼前闪过，惊险万状，目不暇接，从而造成一种势若排山倒海的强烈艺术效果，使古蜀道之难的描写达到了让人惊心动魄、望而生畏的地步。诗人的这组快镜头正是用飞流惊湍、悬崖落瀑造成的万壑雷鸣的流体运动致声的景象，来达到浪漫主义的艺术描写的。

实际上，不少古代诗人都有涉及流体运动致声的诗句，如高适（约702—765）《金城北楼》：

湍上急流声若箭，城头残月势如弓。

岑参（约715—770）《走马川行奉送封大夫出师西征》：

轮台九月风夜吼，一川碎石大如斗，随风满地石乱走。

刘禹锡（772—842）《浪淘沙·八月涛声》：

八月涛声吼地来，头高数丈触山回。

唐肃（1328—1371）《峡口晚泊》：

渐闻湍响急，渡峡是归州。

高启（1136—1374）《登金陵雨花台望大江》：

石头城下涛声怒，武骑千群谁敢渡？

唐代诗人韦应物（约735—约792）与众不同，擅于思理，写有两首涉及思考流体运动为什么会引起巨大声响问题的五言古诗，其一是《听嘉陵江水声，寄深上人》：

凿崖泄奔湍，称古神禹迹。夜喧山门店，独宿不安席。

水性自云静，石中本无声。如何两相激，雷转空山惊。

贻之道门归，了此物我情。

其二是《赠卢嵩》：



百川注东海，东流无虚盈。泥滓不能注，澄波非益清。
恬然自安流，日照万里晴。云物不隐象，三山共分明。
奈何疾风怒，忽若砥柱倾。海水虽无心，洪涛亦相惊。
怒号在倏忽，谁识变化情？

韦应物这两首诗，不仅形象地描述了流体运动致声的现象，而且还对流体运动为什么会致声，深入思考并提出了疑问：“水性自云静，石中本无声。如何两相激，雷转空山惊。”“海水虽无心，洪涛亦相惊。怒号在倏(shū)忽，谁识变化情。”云静的水和无声的石为什么相拍激就会发出巨大的声响？海水为什么会产生惊涛，为什么突然会发出怒吼的响声？这使诗人在诗的结尾喊出了：“谁识变化情？”

韦应物诗中提出了两个疑问，一是疾风何以引起海水的波涛？这是风生波的流动不稳定性问题(可见“5. 风乍起，吹皱一池春水——漫话流体运动的不稳定性”)。另一是水石相激为什么会发生声响？波涛为什么会发出声响？这同属于流体运动为什么会发出声响的问题(图1、图2)。

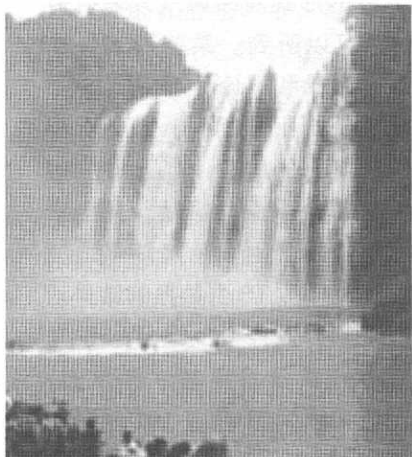


图1 黄果树瀑布



图2 黄河壶口瀑布

声音是由物体运动产生的

什么是声音？现在我们用“声音”一词有两重意思：客观的声波（或声振动），和人主观的声感觉（即响声）。声波是在任何弹性媒质（气体、液体、固体）中传播的扰动（压力、应力、质点速度、质点位移等的变化，或其中几种量的同时变化）。弹性媒质的质点发生振动，以波的形式向四面八方传播开来，就在人的听觉器官上引起了声响的感觉。人可以听到的声波的频率范围为 $20 \sim 20\,000$ Hz（赫兹，每秒振动一次为 1 赫兹）。 20 Hz 以下的声波称为次声波， $20\,000$ Hz 以上的声波称为超声波。在不同的媒质中，声波的传播速度不同，在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 和标准大气压下，声波在空气中的速度是 344 m/s ，在水中的传播速度是 $1\,450\text{ m/s}$ ，在钢铁中的传播速度约为 $5\,000\text{ m/s}$ 。

声音是由物体运动产生的，然后通过辐射传播传到人耳引起听觉。水、空气、岩石都是弹性媒质，它们之间相撞（包括水与水，气与气相撞）都会发生振动，并以波的形式向四面八方辐射传播，凡在 $20 \sim 200\,000$ Hz 的声波，人都可以听到。某些形式弹性媒质相撞所辐射的总声功率，已可以从实验和理论计算得到。

声波发出后，遇见物体时还会反射、折射和衍射。人们听到的流体运动所产生的声响，往往是多种声波的组合。当区域的边界条件（如山谷等）使某几种声波互相激励、发生共振时，就会产生轰鸣的感觉。李白《蜀道难》诗中所写飞流惊湍、悬崖落瀑造成的万壑雷鸣的音响，也正是多种声波相互激励、产生共振的结果。

我国古代不仅乐律、乐器等发展很早，对声学的理解也是先人一筹。东汉王充（27—约 97）在《论衡》中已将声与水波类比，对声音的波动性质有了正确的看法。北宋张载（1020—1077）更明确地认为“声者形气相轧而成”，这包括气体相互作用的雷电、固体间撞击、固体高速穿过气体、高速气体喷注及其与固体相遇

时产生声音的过程，几乎与今日的理解相同。张载还认为“声成文谓之音”（音指好听的声，现称为律音），“音和乃成乐”（音乐），“响之附声如影之著形”（响是声的作用，即人的声觉），“群呼烦忧”为噪（即噪声）。可见那时对声学理解的表达用字已相当讲究。

声音的双重作用

声音（包括流体运动所致声）对人的影响作用是双重性的。悠扬悦耳的乐曲能使人心旷神怡，消除疲劳。据考古发掘证实，我国约八千年前就已有笛，七千年前就有古老的吹奏乐器一埙，之后有钟、磬、鼓、琴、箫等。《诗经》中提到的乐器，有29种之多。唐代的乐器空前发达，加上外域传来的，据记载已有300种以上。北宋沈括（1031—1095）在《梦溪笔谈》中记载了琴瑟上调弦时的共振实验：“欲知其应者，先调诸弦令和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦则纸人跃，他弦不动”。明皇子朱载堉在世界上首先提出了十二平均律。这些贡献都是很了不起的。但由于没有形成量化的精确表达方式，所以像振动周期、频率、音速等基本概念都不是首先在中国准确形成的。

瀑流发出的声音有时也是悠扬悦耳的，是对健康有益的环境因素。所以瀑流的声响有时也被当作为旅游资源开发，如天津蓟县的盘山以“水胜、石胜、松胜”闻名，其中水胜即由刻于清同治十一年（1872年）的景点“响涧”而来。这里瀑布奔泻和水击岩石的声响声势虽很大，但却叫人心旷神怡，使游人赞叹不已。

另一方面，杂乱烦人的噪声使人烦躁不安，威胁着人们的身心健康。噪声是不同频率、不同强度、无规律而杂乱组合在一起的声音。噪声的波形是无规则、非周期的曲线。由构件碰撞或摩擦等所辐射的噪声称为机械噪声；由流体运动或物体相对于流体

运动所辐射的噪声，称为气流噪声或水动力噪声。人若长时间留在噪声的环境中，大脑处于兴奋状态不能抑制，会使神经系统失去平衡，引起失眠、疲劳、头昏、思维能力和记忆力衰退等症状，甚至会损伤人的听力。我国规定城市区域环境噪声的标准为：白天 45 ~ 70 dB (分贝, 分贝是声功率的单位, 0 dB 对应 1 pW/m^2 , 即 10^{-12} W/m^2)，夜间 35 ~ 55 dB。现在许多地方的噪声已经超出此标准，被称为噪声污染，是一种公害。

噪声在个别时候也可利用，如人们从自然噪声中可获取生活上必需的信息：风啸和雷声可预报风雨；人们也在制造噪声弹，其爆炸产生的噪声波可造成水中鱼短时间昏迷，以便人们捕捉。

声纳技术是在水中以声音导航与测距的技术，它能辨认是什么船只发出的螺旋桨声音，以及声音的方向。而潜水艇发出的噪声是潜水艇的特征之一，所以各国海军均将其潜水艇的噪声资料作为绝密资料保存起来。图 3 所示为船舶噪声的传播途径。

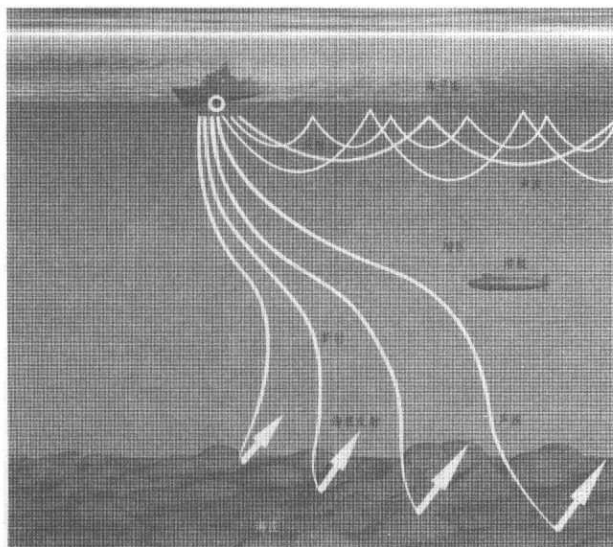


图 3 声在水中的传播

气流噪声或水动力噪声是重要的噪声污染源。从喷气式飞机和火箭，锅炉排气放空，汽车和其他热机的进、排气，气动工具，通风系统，到管道和阀门的排气漏气等都存在噪声问题。有效地降低流体噪声是减少噪声污染的重要方面。科学工作者在分别研究各种流体噪声的规律和特征的基础上，设计出了有针对性的消声装置和降噪方法，以降低各种流体噪声。

参考文献

- [1] 王振东，武际可. 力学诗趣[M]. 天津：南开大学出版社，1998.
- [2] 马大猷. 环境声学[M]. 北京：科学出版社，1992.
- [3] 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书：环境科学[M]. 北京：中国大百科全书出版社，1983.

首刊于《力学与实践》，1996，18(1)：69-71.

春蚕到死丝方尽

——漫话液体的拉丝现象

10
Chapter

相见时难别亦难，东风无力百花残。
春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干。
晓镜但愁云鬓改，夜吟应觉月光寒。
蓬山此去无多路，青鸟殷勤为探看。

这首脍炙人口的七言律诗，是唐代诗人李商隐（约813—858）所作的《无题》。此诗早已被选入包括《唐诗三百首》在内的各种唐诗选本之中。“春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干”是这首七律中最有名的两句。后人常用这两句来赞美人间忠贞不渝的爱情，歌颂心目中的英雄人物和人类灵魂工程师那种“鞠躬尽瘁，死而后已”的崇高精神。可是当您诵读“春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干”时，是否曾想到，在这名句之中，也蕴含着十分有趣的力学现象。

李商隐诗中并没有明确说蚕丝是怎么形成的，但是从古至

今，一直有人根据头脑中的“常识”，想当然地认为，蚕丝是从蚕的嘴里“吐”出来的。如唐代诗人于濂所写的《野蚕》：

野蚕食青桑，吐丝亦成茧。无功及生人，何异偷饱暖。
我愿均尔丝，化为寒者衣。

与蚕丝成茧类似的现象，还有蜘蛛以丝结网。另一位唐代诗人苏拯的《蜘蛛谕》写道：

春蚕吐出丝，济世功不绝。蜘蛛吐出丝，飞虫成聚血。
蚕丝何专利，尔丝何专孽。映日张网罗，遮天亦何别。
倘居要地门，害物可堪说。网成虽福己，网败还祸尔。
小人与君子，利害一如此。

在现今的报刊及文学著作中，也经常可见到蚕“吐”丝，蜘蛛“吐”丝的说法。

我国当代文学家周汝昌先生称“春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干”这一诗句，有“惊风雨的境界，泣鬼神的力量”，并对此诗句作过精彩的注释：“春蚕自缚，满腹情丝，生为尽吐；吐之既尽，命亦随亡。绛蜡自煎，一腔热血，蒸而长流；流之既干，身亦成烬。有此痴情苦意，几于九死未悔，方能出此惊人奇语。”对于如此精美的注释，笔者亦颇欣赏，但从力学的观点可以提出这样的问题：蚕丝究竟是怎样形成的，是蚕从嘴里“吐”出来的吗？

蚕丝是拉出来的

现代科学对蚕丝形成的过程，已有了明确的认识。蚕卵孵化成幼蚕后，在25~30天内经过5个龄期，蜕4次皮，发育成5龄蚕。5龄蚕食桑6~8天后停止食桑，皮肤透明，成为熟蚕。

这时蚕腹的丝腺内充满了由于化学反应形成的黏液体——蚕丝的原料，亦称为丝液。“后部丝腺”是合成丝蛋白的地方，“中部丝腺”是贮存丝蛋白的胶质溶液（即丝液）的地方（图1）。

让我们仔细观察一下蚕出丝的动作。蚕将嘴里的丝液粘到某物体上（丝液中的丝胶起着“粘”的作用），然后蚕的头按照8字形左右摇摆，摇晃着把丝液拉成丝线，靠丝线表面上剩留的丝胶将丝线粘到茧的内侧，这样就慢慢地做成了茧（图2）。

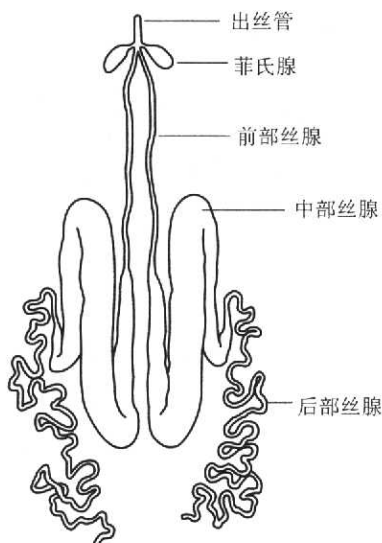


图1 蚕的丝腺(贮存丝液的地方)

有人作了这样的试验：让一个粘着丝液的物体也随着蚕的脑袋一起摆动，那么从蚕的嘴里

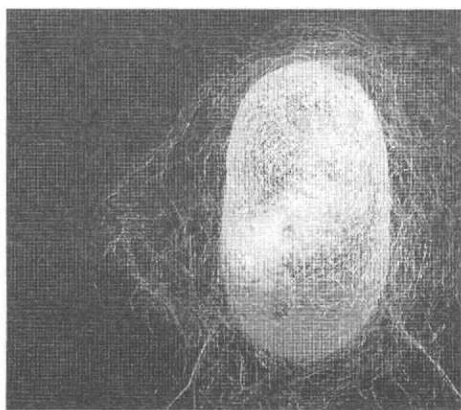


图2 蚕茧

就“吐”不出丝线来了。也就是说，如果蚕的脑袋不摆动，丝线就不会“吐出来”。而如果拿住丝线头抽拉，可以连续不断地拉出丝线来；如果你用剪刀将丝线剪断，蚕就不能再继续拉丝了，于是它的脑袋就在空中摇晃着，试图再找一个拴线的地方拉丝。这个试验说明：蚕丝不是“吐”出来，而是“拉”出来的（图3）。

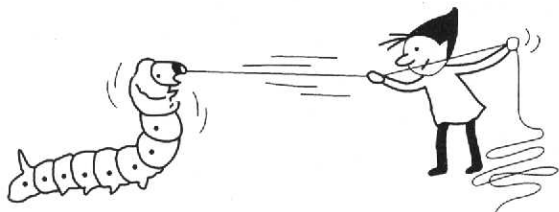


图3 蚕拉丝图

养蚕的农家儿童常捉蚕来玩。捉一条又肥又大的即将做茧的蚕，捏住它的头尾，猛地一下左右拉开，这时头尾分离了，而从蚕腹中却拉出一条直径约1毫米、长约30厘米的透明结实的丝线。如果慢慢地拉就不行了，蚕体被拉断后，其体液滴滴答答地流出来，什么也得不到。

为什么快拉能成丝，慢拉就是液体流出来呢？现代科学的研究表明，蚕丝是通过力的作用由丝液拉成的，这个过程称为“牵引凝固”。丝液的主要成分是丝蛋白，丝蛋白的链状分子是线团状态。丝液是黏性液体，它的线团状分子呈圆球状，当慢慢拉伸时，圆球分子之间只有滑动，没有其他变化，所以整个液体只是流动。当快速拉伸时，各个分子还来不及流动就被抻开了。被拉开的丝蛋白链状分子有了新的排列，产生了变异，相互靠近的分子之间产生了很强的结合力。这种丝蛋白分子之间的“结合力”虽然比原子之间的作用力弱，但是长链的各链节之间却有很强的结合，所以形成了整体上很结实的蚕丝。

蚕腹的丝液直接用手去拉，只能拉成像钓鱼线那样粗的丝

线，但如果借助于蚕的嘴就能拉成纤细而漂亮的丝线，其直径可以细到 0.002 mm ，长度可达 $1\ 200\text{ m}$ 左右。蚕的嘴是由“角质蛋白”形成的，嘴巴上有一个“调节口”，当丝液经过它时，可对拉出的流量进行适当的调节。由解剖得知，在蚕的嘴巴上，吃桑叶与出丝的“调节口”是不同的两个口。

由上所述，可以得出如下结论：蚕丝的原料（丝液）在蚕腹中是由于化学反应形成的，而蚕腹中的胶状丝液变成结实而又漂亮的蚕丝却是由于力的作用。蚕丝不是从蚕嘴里“吐”出来的，而是通过蚕嘴巴的流量调节用力拉出来的。除了桑蚕外，柞蚕、蓖麻蚕、木薯蚕、樟蚕、柳蚕和天蚕等也都不是吐丝，而是拉丝的。这就纠正了一些人根据头脑中的“常识”而提出的、没有可靠的实验根据的蚕“吐”丝的传统看法。

在现代化学纤维工业中，人们正在模仿蚕所做的工作，用“拉伸”的办法制造尼龙和涤纶等各种合成纤维。只是在开始做成丝状时，先要对液体施加很大的压力，使其从一个小孔中挤压出来，再去拉伸。如何又快又好地拉出丝来，正是“流变学（Rheology）”中“拉丝流动”所研究的内容（流变学是力学、化学、物理和工程科学交叉形成的新兴分支学科）。实际上目前的技术还比不上蚕，还不能像蚕那样只靠拉牵就能制出漂亮而结实的丝线来。我们需要努力地对蚕进行研究，蚕这个小生物身上还有许多问题，有待人们去努力探索。

蜘蛛拉丝结网

蜘蛛以丝结网与蚕的情况类似，它的肚子里有“蜘蛛液”，从腹部末端（而不是从头部嘴里）拉出丝来。根据化学家的研究，蜘蛛丝的成分与蚕丝的丝蛋白大体相似。蜘蛛为结网拉出的丝有两种：一种是指向外面的，它较结实而光滑；另一种是一圈一圈

10 春蚕到死丝方尽

的，它很有弹性，并且布满黏液珠(图4、图5)。据说，在一个好的蜘蛛网上有25万个以上的黏液珠，以用来粘住飞虫供蜘蛛饱餐。

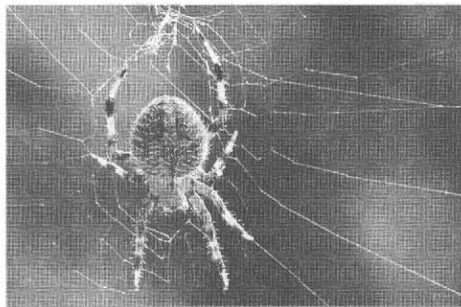


图4 蜘蛛在结网

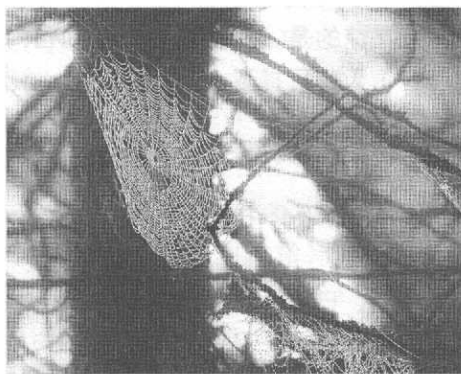


图5 蜘蛛网

唐代诗人孟郊的五言诗《蜘蛛》是这样描述的：

万类皆有性，各各禀天和。蚕身与汝身，汝身何太讹。
蚕身不为己，汝身不为他。蚕丝为衣裳，汝丝为网罗。
济物既无功，害物日已多。百虫虽切恨，其将奈尔何。

宋代诗人范成大在《四时田园杂兴》诗中所写：

静看檐蛛结网低，无端妨碍小虫飞。

都是这一情况的生动描述。

还有一种结草虫，也可以拉出与蚕丝结实程度不相上下的丝，其“巢壳”外表有树叶和小枝缠挂着，“巢壳”的内侧像蚕茧一样结实，用手指都不易戳破它。

科学家研究得知，有些种类蜘蛛的蛛丝和钢丝一样坚硬，却又比钢丝富有弹性；还特别耐寒，在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温下才会变脆发生断裂，而一般聚合物在零下十几摄氏度就会变脆。利用蛛丝的这些特性，若以它为原料制作防弹服装、降落伞等军需物资，在冬季使用时会有极佳的性能。据报道，美国军方已责成有关部门饲养能产坚韧的金黄色蛛丝的巴拿马蜘蛛。这种蜘蛛个体大，是一般蜘蛛的十几倍。采集者从蜘蛛腹中引出蛛丝，用镊子夹住末端，将其绕到装有小型电动机的纺锤上，纺锤轻巧地转动，蛛丝也就唾手可得。一般每次可提取蛛丝 $3\sim 5\text{ mg}$ ，每段蛛丝长可达 300 多米。最令人吃惊的是，使用这种方法抽丝对蜘蛛并无伤害，只要饲养得当，每天都可提取。

形形色色的液体拉丝

只要稍加留意就可以看到，日常生活中有不少液体也是能拉丝的。比如敲开鸡蛋，将蛋黄取走后，只留下蛋清放在碗里。用筷子慢慢搅蛋清时，你会感到它与普通液体不同。蛋清是搅动一下后能弹缩回来的液体，也是一种向上挑能拉丝的液体。可用筷子插入向上挑一下试试看。当向上挑的速度很慢时，蛋清会像液体一样流了下来，不拉丝；当向上挑的动作很快时，蛋清不粘筷子，也不拉丝；可是当向上挑的速度适当时，蛋清就拉丝了。当蛋清拉的丝断了的时候，还可看到在断开的一瞬间，会像橡胶条那样稍有收缩。山药汁（将山药捣碎制取的黏液），以及婴儿流的口水，情况也都与此相似。这些液体能拉丝，也跟蚕的丝液能

拉出丝一样，是因为它们有黏性和弹性的双重性质。

动物与植物的“黏液”大多具有黏性和弹性的双重性质。比如蜗牛和蛞蝓的黏液，人的唾液、痰、鼻涕，鳝鱼的黏液，海藻表面的黏液，芋头的黏液、纳豆的黏液(图6)等。这些液体用力搅动后都能表现回缩的弹性，向上挑的速度合适也能拉出丝来。研究表明，在液体拉丝现象中，黏性起主要作用，弹性起辅助作用。也就是说，可流动性是拉丝的基本条件，再加上可伸缩的弹性，才能出现拉丝的现象。

有些食品以能拉出丝来而著名。如主产于河北沧县和山东乐陵的“金丝小枣”，以核小、肉厚、色鲜、味浓、糖多、质细著称，购买时鉴别质量是否上乘的主要标准是，用手抓住小枣两头，猛一撕开后，看是否能拉出很多金色的丝来判别。成语“藕断丝连”，描述了鲜藕切断后，藕中所含黏液被拉出丝的情景。菜肴中有一道拔丝菠萝(或拔丝苹果、拔丝山药)，就是用炒糖稀做成黏液裹在上面，以能拉出许多糖丝而著称。当然也有的食品，在新鲜的时候不会有拉丝，腐坏了才容易拉丝，人们也常以此来判断这些食品是否腐坏变质了，比如农历八月十五中秋节时的月饼。



图6 纳豆的黏液拔丝现象

参考文献

- [1] 王振东, 武际可. 力学诗趣[M]. 天津: 南开大学出版社, 1998.
- [2] 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书: 纺织卷[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1984.
- [3] 中川鹤太郎. 流动的固体[M]. 宋玉升, 译. 北京: 科学出版社, 1983.

首刊于《力学与实践》, 1994, 16(1): 75-77.

11

Chapter

排云结阵南北行

——漫话雁群和飞机的结阵飞行

春辉满朔方，候雁发衡阳。
望月惊弦影，排云结阵行。
往还倦南北，朝夕苦风霜。
寄语能鸣侣，相随入故乡。

这是唐代诗人李峤的五言诗《雁》，已经写到雁群转移南北时，结阵飞行的景象。另一位唐代诗人张九龄所写五言诗《二弟幸邑南海见群雁南飞因成咏以寄》也写到：

鸿雁自北来，嗷嗷度烟景。
尝怀稻粱惠，岂惮江山永。
大小每相从，羽毛当自整。
双凫侣晨泛，独鹤参宵警。
为我更南飞，因书至梅岭。

这两首五言唐诗都写到我们现在常看到的景象：每当秋冬

季节，大雁就从俄罗斯西伯利亚一带，成群结队、浩浩荡荡地飞到我国的南方气候温暖的地方过冬。第二年春天，它们再经过长途旅行，飞回到俄罗斯西伯利亚产蛋繁殖。《吕氏春秋》所说：

孟春之月鸿雁北，孟秋之月鸿雁来

正是雁群南来北往飞行的写照。

大雁的飞行速度很快，每小时能飞 68~90 公里，几千公里的漫长旅途中，雁群的队伍组织得十分严密，常常排成人字形(图 1)，一边飞着，一边还不断发出“嘎、嘎”的叫声。大雁的这种叫声起到互相照顾、呼唤、起飞和停歇等的信号作用。

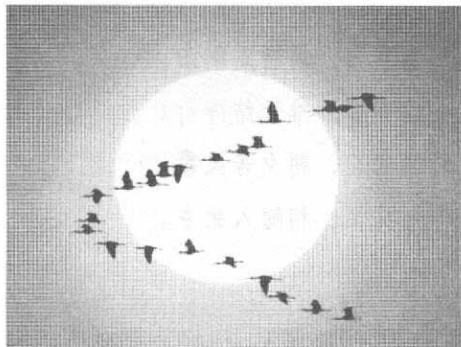


图 1 雁群以人字形排列飞行

大雁在向南、向北迁徙飞行时，常是几十只、数百只汇集在一起，互相紧接着列队而飞，古人称之为“雁阵”。那么，大雁为什么会保持整齐的队形，排成人字形飞行呢？

有人认为：大雁属于鸟类中极有组织性和纪律性的一类飞禽。它们不但十分讲究团结友爱，而且还互相帮助。大雁排成整齐的人字形飞行，是一种集群的本能表现。因为这样有利于防御敌害。雁群总是由有经验的老雁当“队长”，飞在队伍的前面。

幼鸟和体弱的鸟，大都插在队伍的中间。停歇在水边找食水草时，也总由一只有经验的老雁担任哨兵。如果孤雁独飞，就有被敌害吃掉的危险。

这里所讨论的问题是：雁群结阵飞行与力学有怎样的关系？排成人字形来飞，有什么力学道理吗？

雁飞行的升力

大雁和其他飞鸟一样，在空中飞行时，必须要产生足够的升力 Y ，以克服自身的重量 G 。在平飞时达到力的平衡 $Y=G$ 。大雁的升力是通过扑打翅膀(羽翼)产生的(图2)。鸟的扑翼飞行是一种复杂的运动。当向下扑动羽翼时，大羽毛会相互紧拢而使整个羽翼成为上、下表面基本上不透气的翼面，从而能形成上、下表面有一定的压力差，以产生足够的升力将鸟举在空中。尽管飞鸟与飞机产生升力的方式不同，但它们的升力都是源于上、下翼面压力差形成的，一般上表面主要是负压力(吸力)，下表面主要是正压力，因而能够形成向上的升力。

大众
力学
丛书

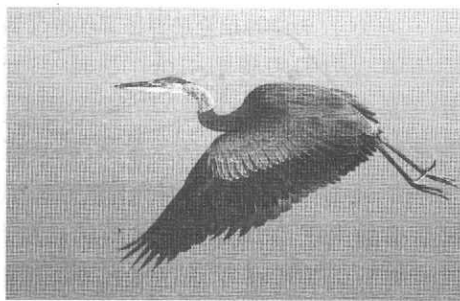


图2 雁扑翼飞行

雁飞行的诱导阻力

由于空气具有从高压力处向低压力处流动的特性，因此在无阻挡的翼梢处，高压力的下翼面气流向低压力的上翼面翻转，因而使得下翼面气流向翼梢处偏转，上翼面气流则向翼根处偏转（图3）。这样将减少上、下翼面压力差，使得升力有所减小，与升力直接有关的有效迎角（翼型弦线和飞行方向间的夹角）也减少了 ε ，形成了新的平行于飞行方向的力 $X = Y \tan \varepsilon$ ，这个力通常称为诱导阻力（图4）。



图3 下翼面流线示意图

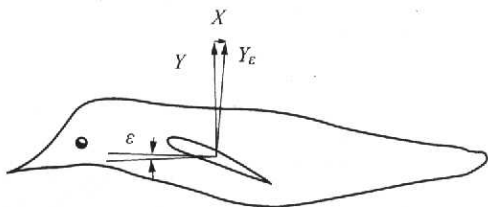


图4 升力和诱导阻力

翼面上的气流偏转会使得在翼后有尾涡拖出，并在向下游发展时逐渐卷起，这可由实验观察到，也可通过计算得出。从能量角度来看，卷起强涡旋的气流总是要多带走一些动能，也就是为抵消诱导阻力需要多消耗能量。

雁群的结阵队形

实际上，在翼面后将会形成包括翼梢强涡旋在内的复杂的尾涡系，图 5 给出了在翼后的不同流向位置的尾涡横截面所组成的分层曲线。这个复杂的涡系，将对流场中各点产生诱导速度。

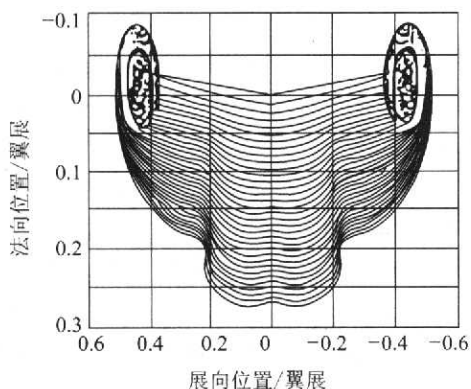


图 5 翼面后的尾涡横截面分层曲线

图 6 所示为一典型的在翼面下游的诱导速度场，其中间部分有向下的诱导速度；而在两外侧，则有向上的诱导速度，并随在翼后的流向、法向距离和展向位置而变化。当雁进入前面雁后的流场时，在流场的不同位置会有不同的结果。若在前飞雁的正后方，会遇到向下的诱导气流，反而要比前面无雁时的单独飞行付出更多的能量；但若在前飞雁后方的两侧适当位置，则会受到向上的诱导气流而省力。

雁群迁徙一次大约要连续飞行 1~2 个月，因此它们需要摸索飞行的窍门，有效地节约体力。对于长途跋涉的雁群来说，排

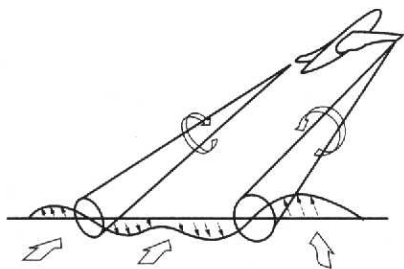


图6 翼面后方流场的诱导速度分布

成人字形的飞雁队形，由强壮的领头雁在前领飞，而其后各雁可利用前面雁飞行时所产生的有利向上气流，以滑翔的方式来节省体力，则能减少体能消耗而受益。“头雁”因为没有这股微弱的上升气流可利用，体能消耗大，很容易疲劳。当领飞的头雁疲倦了，它会退到侧翼，由另一只雁接替飞在队形的最前端。所以在长途迁徙的过程中，雁群需要经常地变换队形，更换“头雁”。有人研究指出，借着人字队形，整个雁群比每只雁单飞时，能增加50%以上的飞升能力。

所以，在无强侧风的情况下，雁群按人字形结阵飞行，是符合流体力学原理的合理队形(图7)。

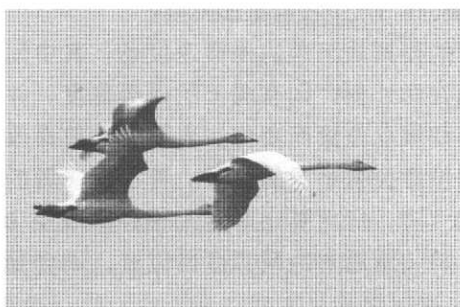


图7 三只飞行的大雁

航空表演的结阵飞行

飞机列队进行航空表演的情况，与雁群结阵飞行的情况很类似。从下面几幅航空表演的照片(图8~图10)，可以清楚看出，机群也是按照流体力学原理，排成人字阵形进行航空表演，除排在最前面的领先飞机外，其他的飞机都在前面飞机的后侧合适部位飞行，以省力、省油。

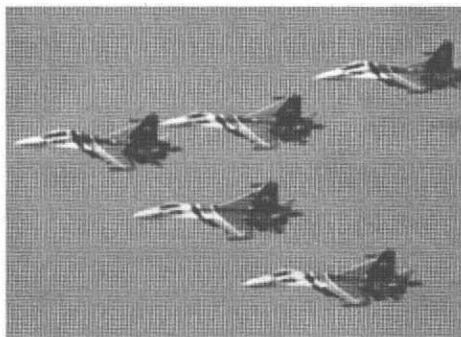


图8 珠海2006年航空表演



图9 飞行队在天门山表演



图 10 航空特技表演

在军事上，为使飞机在空中执行任务的续航时间增加，或者能少带油料多带弹药，就有在空中为飞机加油的需要，所以人们又专门制造了空中加油机。在空中加油时，去加油的飞机常在被加油飞机的后侧面进行加油作业，如图 11 和图 12 所示。



图 11 空中加油机

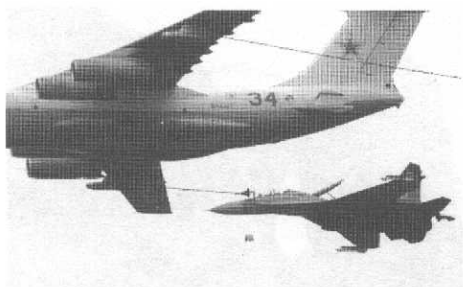


图 12 加油机在空中加油

对田径运动员的启示

大雁排队飞行，可以减少侧后大雁飞行的能量消耗，这对中长跑运动员也有启发。运动员在中长跑比赛时的开始阶段，紧随在领头队员的后面也可省力，这当然已不是因为利用上升气流的关系，而是在前面队员的身后涡旋区中跑，可减少阻力。在中长跑比赛中，一些有经验的运动员并不在一开始就去领跑，而是在领跑队员的后面跟跑，因为这样会使其跑步时的体能消耗比领跑的小。等到冲刺阶段的前夕，再发力突然加速，超过原领跑者。

相同的情况在长途自行车运动赛场上也有。经常可见到有实力、有心计的自行车运动员，在长途自行车赛的一开始，紧紧跟在领骑队员的后面涡旋区中跟骑，以减少体能消耗，等到接近冲刺阶段，再突然发力加速，超过原领骑者，尽全力冲刺冠军。由于大家都知道了这种战术，以致现今在自行车比赛的规则中对此做法已有所限制，对跟随的距离有规定，不允许跟得太近。

有人在美国的高速公路上也有过这样的体验，跟在加长大货车的后面开小轿车，一段路程跑下来，觉得确实省力又省油，也是同样的道理。

参考文献

- [1] 李峤. 雁[M]//马东田. 唐诗分类大词典: 下册. 成

都：四川辞书出版社，1992。

- [2] 张九龄. 二弟宰邑南海见群雁南飞因成咏以寄[M]// 马东田. 唐诗分类大词典：下册. 成都：四川辞书出版社，1992.
- [3] 唐登斌，王振东. 大小每相从，排云结阵行——从雁群结阵飞行谈起[J]. 力学与实践，2001，23(5)：79-80.

首刊于《力学与实践》，2001，23(5)：79-80.

大风起兮云飞扬

——漫话流动显示及纳斯方程

大风起兮云飞扬，
威加海内兮归故乡，
安得猛士兮守四方！

大众
力学
丛书

这是汉高祖刘邦(前 247—前 195)在击破英布军以后，回长安时，途经他的故乡沛(今江苏徐州市沛县)，设宴招待家乡的故交父老，酒酣时自己击筑(古代乐器)而歌，所作慷慨豪情的《大风歌》。

《史记·高祖本纪》：“高祖(刘邦)还归，过沛，留。置酒沛宫，悉召故人父老子弟纵酒，发沛中儿得百二十人，教之歌。酒酣，高祖击筑，自为歌诗曰：大风起兮云飞扬，威加海内兮归故乡，安得猛士兮守四方！令儿皆和习之。高祖乃起舞，慷慨伤怀，泣数行下”。正是记载了这段历史。刘邦短短三句，洋洋自得，气壮山河，但并没有被胜利冲昏头脑，最后一句流露出了居安思危的忧患意识。

刘邦在这里是以“云飞扬”流动显示大气运动的物理图像，来抒发衣锦还乡、荣归故里的壮志豪情。这是历史上有名的一则典故——“大风歌”或“大风诗”的来历。之后直至现代，不少人皆仿此“歌大风、唱大风”，以表示慷慨悲歌、治国安邦的豪情壮志。

古代诗词以流动显示来抒发情思：

汉武帝刘彻（前156—前87）也有一首以风吹白云飞，表达情感的诗《秋风辞》：

秋风起兮白云飞，草木黄落兮雁南归。
兰有秀兮菊有芳，携佳人兮不能忘。
泛楼舫兮济汾河，横中流兮扬素波。
箫鼓鸣兮发棹歌，欢乐极兮哀情多。
少壮几时兮奈老何。

唐太宗李世民（599—649）《辛武功庆善宫》诗：

共乐还乡宴，欢比大风诗。

《过旧宅二首》之二：

八表文同轨，无劳歌大风。

李白《登广武古战场怀古》诗：

按剑清八极，归酣歌大风。

林宽《歌风台》诗：

蒿棘空存百尺基，酒酣曾唱大风词。

王德贞《奉和圣制过温汤》诗：

停舆兴睿览，还举大风篇。

直到近代也有类似的大风诗，如：

董必武（1885—1975）《感时杂咏》诗：

欲守四方歌大风，飞鸟未尽先藏弓。

朱德(1886—1976)《赠友人》诗：

北华收复赖群雄，猛士如云唱大风。

陈毅(1901—1972)《莱芜大捷》诗：

鲁中霁雪明飞帜，渤海洪波唱大风。

现在以云来显示大气的流动，已很常见。如在电视台的气象预报节目中，人们常能看到由云显示千姿百态流动图案的卫星云图，所显示大气中所发生的动力过程。图1是卫星拍摄到的，2005年对美国新奥尔良造成巨大灾害的卡特里娜飓风。

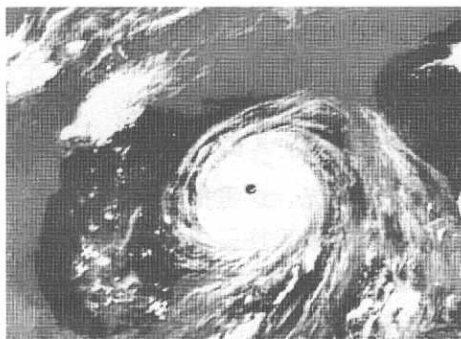


图1 云显示的美国2005年卡特里娜飓风

也有古诗词用风叶和船只所显示的流体运动，来形象、生动地比喻和描述远行在外人的行迹和旅途。如宋代诗人范成大(1126—1193)的五言律诗《道中》：

月冷吟蛩草，湖平宿鹭沙。客愁无锦字，乡信有灯花。

踪迹随风叶，程途犯斗槎。君看枝上鹊，薄暮亦还家。

程途是指旅程途中；槎(chá)亦做查、楂，系水中木筏意，犯斗槎是指远行所乘的船只。

古代诗人还常以杨絮、柳絮以及虫类拉的丝(亦名游丝、晴

丝)，所显示的空气流动情况（风、对流或布朗运动），来抒发各种各样的情思，如：

韩愈（768—824）《晚雪》诗：

杨花榆荚无才思，唯解漫天作雪飞。

以及《次同冠峡》诗：

落英千尺堕，游丝百丈飘。

周紫芝《踏莎行》词：

情似游丝，人如飞絮，泪珠阁定空相觑。

范成大《碧瓦》诗：

无风杨柳漫天絮，不雨棠梨满地花。

以及《初夏二首》诗：

晴丝千尺挽韶光，百舌无声燕子忙。

韶光是美好的时光，这里指春天。诗人想象春末夏初的游丝是在恋惜时光，想把春天挽留住。

石彘《绝句》诗：

来时万缕弄轻黄，去日飞毡满路旁。

我比杨花更飘荡，杨花只是一春忙。

以杨花比喻自己奔波游宦，道出了深沉的乡思旅愁。

苏轼《水龙吟·次韵章质夫杨花词》词：

似花还似非花，也无人惜从教坠，抛家傍路，思量却是，无情有思。

将杨花比作缠绵衰感的思妇。

文天祥《过零丁洋》诗：

山河破碎风飘絮，身世浮沉雨打萍。

把风中柳絮比作日益沦丧的国土。

各种各样的流动显示方法

流动显示是在力求不改变流体运动性质的前提下，用图像显示流体运动的方法，其任务是使流体不可见的流动特征，成为可见的。俗话说“百闻不如一见”，人们通过流动显示看到了流场的特征，从而可进一步研究探索和应用流体运动的规律。

西方一些人认为，意大利文艺复兴时期的艺术家和科学家达·芬奇(Da. Vinci, 1452—1519)，是第一个运用流动显示的方法，来叙述涡旋构图的人。但比起运用流动显示的图像，来描述峡江水流涡旋的运动特征，和抒情言志的我国古代诗人，达·芬奇却要落后好几个世纪了。

首先应用流动显示方法，对现代流体力学发展做出重要贡献，当推英国科学家雷诺(O. Reynolds, 1842—1912)。他在1883年，将苯胺染液注入长的水平管道水流中做示踪剂，从而可以看出管中水的流动状态。当流速小时，苯胺染液形成一根纤细的直线与管轴平行，表示流动是稳定的和有规则的流动，称为层流；当流速慢慢地增加，达到某一数值时，流动形式突然发生变化，那根苯胺染液细线受到激烈的扰动，苯胺染液迅速地散布于整个管内，表示流动已十分紊乱，称为湍流。这一试验明确提出了两种不同的流动状态，及其转换的概念，还提出了后来被称为“雷诺数”的这一十分重要的量纲一的参数。至今湍流研究的历史，一般都公认从1883年雷诺这个经典的流动实验算起。

德国科学家普朗特(L. Prandtl, 1875—1953)，1904年用在水中撒放粒子的方法，获得了水沿薄平板运动的画面。由于画面上粒子留下的轨迹正比于流动的速度，在靠近壁面有一薄层，其中速度比离壁面较远处的速度明显较小，且有大的速度

梯度。正是对这一流动显出画面的观察和分析，使他提出了边界层的概念，指出在远离壁面处，可不计黏性，能应用理想流体力学的研究结果；而在物体表面附近的薄层中，由于有很大的速度梯度，从而产生很大的剪切力，不能忽略黏性。这一基于流动显示的新观点，使得可利用边界层很薄的特点，使问题的数学处理大为简化，至今它仍是黏性流体力学最重要的基础理论之一。

20世纪50年代，有人提出了氢气泡显示技术：用很细的金属丝放在水中作为阴极，通电后在金属丝上形成的氢气泡随水流走，而成为显示流场的示踪粒子(图2)。克拉茵(Kline)等1967年首先用氢气泡显示技术，发现了近壁湍流的相干结构(Coherent Structure,也有译为拟序结构)。这是一种大尺度的涡旋运动，它在将平均运动动能转变为湍流动能的过程中，作了大部分贡献。后来经许多人用更精确、先进的实验手段(热线热膜测速、激光测速以及数据自动采集、图像处理技术等)进行重复，使实验越做越精确。不但对壁湍流，而且对自由剪切湍流也发现了相干结构，到20世纪80年代，湍流相干结构已为国际流体力学界公认，并认为这是对湍流生成、维持、演化起主要作用的结构。这一由流动显示所发现的相干结构，被认为是对湍流认识上的一次革命，是在湍流研究上的一次重大进展。20世纪

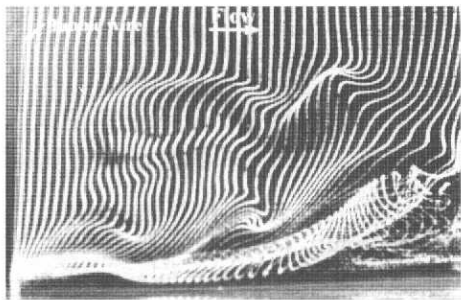


图2 氢气泡显示壁湍流的猝发

80年代之后至今,关于湍流相干结构及其控制的研究,一直是湍流研究的热点课题。

由以上三个例子可见,流动显示是了解流体运动特性,深入探索其物理机制的一种直观、有效的手段。它能发现新的流动现象,如层流和湍流两种流动状态及其转捩、涡旋、分离、激波、边界层、壁湍流相干结构等;据了解,流动显示技术已在许多实际问题的研究中,发挥了很大的作用,如三角翼和双三角翼的前缘主涡、二次涡和尾涡的形成和发展,钝物体尾迹的涡旋结构,以及多体干扰等。

上面提到的流动显示方法,主要涉及示踪法。示踪法是在流体中加入某些示踪物质,通过对加入物质踪迹观察得到流体运动的图像。由于所加示踪物质的不同,又可分为用途不一的染色线法(图3)、烟迹(含烟丝)法(图4)、空气泡和氢气泡法、氦气泡法、激光-荧光法、蒸汽屏法等。当然,在流体中加入了示踪粒子,就又存在粒子的跟随性问题。

除示踪法外,流动显示的方法还有光学方法和表面涂料显迹法。光学方法又分阴影法、纹影法和干涉法。前两者利用了光通过非均匀流场不同部位时的折射效应,后者通过扰动光和未扰动光的相互干涉得到干涉条纹图(图5),从而进一步可得到流动参数的定量结果。表面涂料显迹法是在物面上涂以薄层物质,以其

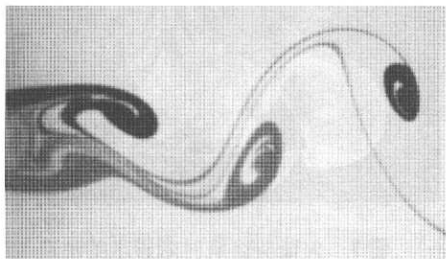


图3 染色法显示的卡门涡街

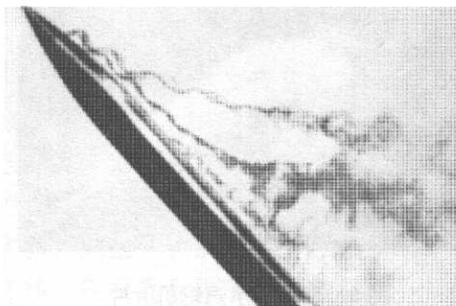


图4 烟迹显示的流动图



图5 机翼边界层剖面的全息摄影干涉图

与流动相互作用时，产生一定的可见图像，从而可定性或定量地推断物面附近的流动特性。按所涂物质的不同，还可分为油流（荧光油流）、丝线（荧光微丝）、染料、升华、相变涂层、液晶、感温漆等方法，如图6、图7所示。

流动显示技术目前发展相当快，特别是与计算机图像处理技术相结合，使传统的流动显示方法得到很大的改进。计算机数据的采集与处理，可对显示结果进行深度的加工分析，以获得更清晰的流动图像，以及有关流动参数的分布。



图6 液晶显示汽轮机叶片附近的湍流

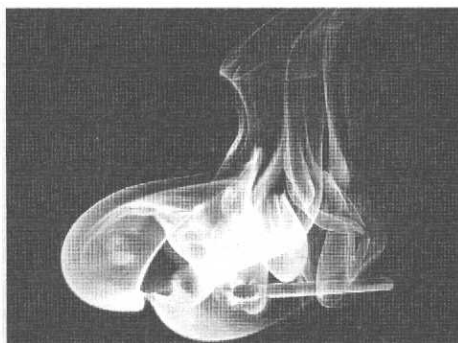


图7 火柴头燃烧时烟显示的湍流

多种流动显示方法的联合使用，又可得到更丰富的流动信息。随着光学技术和计算机技术的发展，激光全息术、光学层析术、散斑、粒子成像测速 (particiale image velocimetry, PIV)、激光诱导荧光 (laser induce fluorescent, LIF) 等方法也已出现并在发展完善之中，为实现瞬时、高分辨率和定量化的空间流动显示展现了美好的前景 (图 8、图 9)。

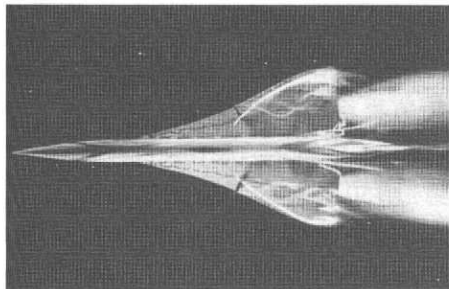


图 8 协和飞机模型的风洞实验

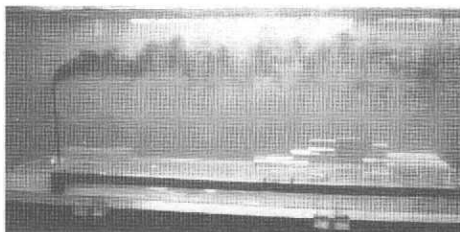


图 9 天津大学流体力学
实验室用流动显示进行
小区环境评估的实验

数值模拟、实验检验和世纪数学难题

要弄清流动显示对流体力学的研究能有多大的作用，还需要从流体力学的研究现状来说起。

力学是以实验为基础的科学，流体力学更是建立在实验的基础之上。在流体力学中，绝大多数重要的概念和原理都源于实验，例如，大气压强，流体的可压缩性，黏性剪应力，层流，湍流，雷诺数，卡门涡，二次流，附加质量，激波，孤立波，湍剪切流的相干结构，声障现象等；又如，完全气体的状态方程，连续性方程，能量守恒原理，达西定律，托里拆利原理，伯努利原理等。

瑞士数学家、力学家欧拉(L. Euler, 1707—1783)于1755年建立了理想流体的动力学方程组,现称为欧拉方程组。法国力学家、工程师纳维(C. L. M. H. Navier, 1785—1836)于1821年,以及英国力学家、数学家斯托克斯(G. G. Stokes, 1819—1903)于1845年,分别对黏性不可压缩流体建立了动力学方程组,现称为纳维-斯托克斯方程组。在无黏性的情况下,纳维-斯托克斯方程组可简化为欧拉方程组。现在人们对于自然界、国防和各种工程技术中的流体力学问题,都在用纳维-斯托克斯方程组进行分析、计算和研究。纳维-斯托克斯方程组(亦可简称为纳斯方程),被公认是描述流体运动规律的流体力学基本方程组。

对于纳维-斯托克斯方程组,经过150多年的研究,仅在一些简化的特殊情况下,找到不多的准确解。由于纳维-斯托克斯方程组光滑解的存在性问题,至今尚没有在数学上解决,且这个问题又关系到人类的生产、生活、军事和对大自然的认识,极其重要,所以克莱数学促进会(Clay Mathematics Institute, CMI)于2000年5月24日在法国巴黎的法兰西学院,将其发布为新千年数学大奖悬赏的7个世纪数学难题之一,奖金高达一百万美元。克莱数学促进会发布的7个世纪数学难题是:P与NP问题、黎曼(Riemann)假设、庞加莱(Poincaré)猜想、霍奇(Hodge)猜想、贝尔什和斯威尔顿(Birch及Swinnerton-Dyer)猜想、纳维-斯托克斯方程、杨-米尔斯(Yang-Mills)理论。比纳维-斯托克斯方程组简单得多的欧拉方程组,解的存在性的问题也尚未得到证明,只是它不属于悬赏奖励的问题。

在学习微分方程理论时,我们知道:

(1) 如果描述物理问题的某微分方程被证明其解不仅存在而且唯一时,则无论用何种方法找到这个微分方程的解,可以认为这就是该方程的解。

(2) 当描述物理问题的某微分方程,被证明解是存在的,但却不见得唯一时,则如果用一种方法找到了解,还必须研究解

的稳定性问题，只有证明了所找到的解是稳定的，才能认为这个解有可能代表实际存在的物理现象。

(3) 如果描述物理问题的某微分方程，解的存在性尚还不能被证明，若用某种近似方法(如渐近方法或差分法、有限元法等数值方法)找到了“解”，则我们难以肯定它是否真是代表实际存在的物理现象的解。

不幸的是，我们在流体力学中所遇到的欧拉方程组和纳维-斯托克斯方程组，正好都属于第三种情况。

当然，如果经过数学家的努力，解决了 CMI 的百万美元悬赏问题，纳维-斯托克斯方程组解的存在性问题得到了证明，这自然是皆大欢喜的事。可是 CMI 关于纳维-斯托克斯方程组解的存在性问题的悬赏，还包括给出其解不存在的证明。如果是后者获奖，那问题就更大了。也有可能，经过仔细研究后认为纳维-斯托克斯方程组应作某些修正和改进，才能使解存在。如果这样，流体力学教科书就需要改写了。

有人曾说，我们不必等弄清楚消化理论后才去吃饭，而应一面吃饭、一面研究消化理论。笔者很同意这种看法，实际上大家也是在这么做的。尽管欧拉方程组和纳维-斯托克斯方程组解的存在性问题尚未解决，对于大量自然界、国防和各种工程实际中的流体力学问题，我们仍在坚持用理论分析、数值计算、物理实验相结合的方法有效地进行研究，并得到很好的解决。

由于计算机和数值计算技术的快速发展，出于科学研究和生产实际的需要，对于流体力学问题进行大规模数值模拟，现已很常见，国内已有几种功能较强的计算流体动力学的商品软件在应用(如 FLUENT, STAR-CD, TASC flow, PHOENICS 等)，且已使用并行计算机进行大规模数值模拟。但所得到的数值模拟结果，仍须用物理实验来检验其正确性。而作物理实验又需要投入更多的人力、财力、物力，所以巧妙地构思、设计小规模、精细的物理实验，以较少的花费来检验大规模数值模拟的正确性，就显得十

分重要。

流动显示方法和技术，正是我们在流体力学研究中，能达到上述目的的重要实验方法和技术，它不仅能提出新的观念、新的研究模型，揭示流体运动规律，也能为流体力学计算提供可靠的流动条件（如边界层转捩点、激波位置、涡核位置、尾迹宽度等）和对数值模拟的结果进行检验。

附录 新千年数学大奖悬赏的 7 个世纪数学难题

Notices of the AMS(美国数学会(AMS)的会刊)在克莱数学促进会发布 7 个世纪数学难题后，曾为悬赏问题准备了如下的简介：

P 和 NP 问题：一个问题称为是 P 的，如果它可以通过运行多项式次（即运行时间至多是输入量大小的多项式函数）的一种算法获得解决；一个问题称为是 NP 的，如果所提出的解答，可以用多项式次算法来检验。P 等于 NP 吗？

Riemann 假设：黎曼 ζ 函数的每个非平凡零点，有等于 $1/2$ 的实部。

Poincaré 猜想：任何单连通闭 3 维流形同胚于 3 维球。

Hodge 猜想：任何霍奇类关于一个非奇异复射影代数簇，都是某些代数闭链类的有理线性组合。

Birch 及 Swinnerton - Dyer 猜想：对于建立在有理数域上的一条椭圆曲线，它在 1 处的 L 函数变为零的阶，等于该曲线上有理点的阿贝尔群的秩。

Navier - Stokes 方程组：（在适当的边界及初始条件下）对 3 维纳维 - 斯托克斯方程组，证明或反证其光滑解的存在性。

Yang - Mills 理论：证明量子杨 - 米尔斯场存在，并存在一个质量间隙。

参考文献

- [1] 王振东, 姜楠, 新千年数学大奖问题——证明纳维-斯托克斯方程组光滑解的存在性[J]. 力学与实践, 2003, 25(3): 72-73.
- [2] 王振东. 关于流体力学方法论问题[J]. 力学与实践, 2004, 26(2): 83-85.
- [3] 王振东, 武际可. 力学诗趣[M]. 天津: 南开大学出版社, 1998.
- [4] Allyn Jackson. Million-dollar Mathematics Prizes Announced[J]. Notices of the AMS, 2000, 47(8): 877-879.
- [5] Wenjei Yang. Handbook of Flow Visualization [M]. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [6] Smits AJ, Lim TT. Flow Visualization [M]. Imperial College Press 2000.

首刊于《力学与实践》, 1996, 18(2): 75-77.

卡门涡街是流体力学中重要的现象。在自然界中常可遇到，在一定条件下的定常来流绕过某些物体时，物体两侧会周期性地脱落出旋转方向相反、排列规则的双列线涡，经过非线性作用后，形成卡门涡街。如水流过桥墩，风吹过高塔、烟囱、电线等都会形成卡门涡街。卡门涡街有一些很重要的应用，因此有必要了解其研究历史及有关的应用情况。

卡门涡街的研究历史

冯·卡门(Theodore von Kármán, 1881—1963)(图1)是美籍匈牙利力学家，近代力学的奠基人之一，1881年5月11日生于匈牙利布达佩斯，1963年5月6日卒于德国亚琛。他出身于奥匈帝国一个教育学教授的家庭，1902年毕业于布达佩斯皇家工学院，1906年去德国哥廷根(Göttingen)大学求学，在普朗特(Ludwig Prandtl, 1875—1953)教授的指导下，完成了关于柱体塑性区内屈

曲问题的论文，于1908年获得博士学位。1911年时，他在哥廷根大学当助教。普朗特教授当时的研究兴趣，主要集中在边界层问题上。普朗特交给博士生哈依门兹(Karl Hiemenz)的任务，是设计一个水槽，使能观察到圆柱体后面的流动分裂，用实验来核对按边界层理论计算出来的分裂点。为此，必须先知道在稳定水流中圆柱体周围的压力强度如何分布。哈依门兹做好了水槽，但出乎意外的是在进行实验时，却发现在水槽中的水流不断地发生激烈的摆动。



图1 冯·卡门

哈依门兹向普朗特教授报告这一情况后，普朗特告诉他：“显然，你的圆柱体不够圆”。可是，当哈依门兹将圆柱体作了非常精细的加工后，水流还是在继续摆动。普朗特又说：“水槽可能不对称”。哈依门兹于是又开始细心地调整水槽，但仍不能解决问题。

冯·卡门当时所做的课题与哈依门兹的工作并没有关系，而他每天早上进实验室时总要跑过去问：“哈依门兹先生，现在流动稳定了没有？”哈依门兹非常懊丧地回答：“始终在摆动”。

这时冯·卡门想，如果水流始终在摆动，这个现象一定会有内在的客观原因。在一个周末，冯·卡门用粗略的运算方法，试计算了一下涡系的稳定性。他假定只有一个涡旋可以自由活动，其他所有的涡旋都固定不动。然后让这一涡旋稍微移动一下位置，看看计算出来会有什么样的结果。冯·卡门得到的结论是：如果是对称的排列，那么这个涡旋就一定离开它原来的位置越来越远；而对于反对称的排列，虽然也得到同样的结果，但当行列的间距和相邻涡旋的间距有一定比值时，这涡旋却停留在它原来位置的附近，并且围绕原来的位置作微小的环形路线运动。

星期一上班时，冯·卡门向普朗特教授报告了他的计算结果，并问普朗特对这一现象的看法如何？普朗特说：“这里面有些道理，写下来罢，我把你的论文提交到学院去。”冯·卡门后来回忆时，对此事写道：“这就是我关于这一问题的第一篇论文。之后，我觉得，我的假定有点太武断。于是又重新研究一个所有涡旋都能移动的涡系。这样需要稍微复杂一些的数学计算。经过几周后，计算完毕，我写出了第二篇论文。有人问我：‘你为什么在三个星期内提出两篇论文呢？一定有一篇是错的罢。’其实并没有错，我只是先得出个粗略的近似，然后再把它细致化，基本上结果是一样的；只是得到的临界比的数值并不完全相同。”

冯·卡门是针对哈依门兹的水槽实验，进行涡旋排列的研究的。后来人们由于冯·卡门对其机理详细而又成功的研究，将它冠上了卡门的姓氏，称为卡门涡街(图2)。

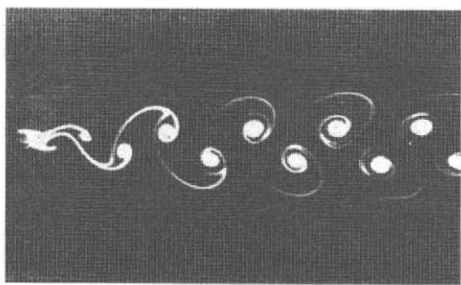


图2 雷诺数为 105 时圆柱后的卡门涡街

冯·卡门自己后来在书中写道：“我并不宣称，这些涡旋是我发现的。早在我生下来之前，大家已知道有这样的涡旋。我最早看到的是意大利 Bologna 教堂中的一张图画。图上画着 St. Christopher 抱着幼年的耶稣涉水过河。画家在 Christopher 的赤脚后面，画上了交错的涡旋。”冯·卡门还说，在他之前，有一位英国科学家马洛克 (Henry Reginald Arnulph Mallock, 1851—

1933)也已观察到障碍物后面交错的涡旋,并摄有照片。又还有一位法国教授贝尔纳(Henry Bénard,1874—1939)也作过关于这一问题的研究。只不过贝尔纳主要考察了黏性液体和胶悬溶液中的涡旋,并且其考察的角度是实验物理学的观点多于空气动力学的观点。

冯·卡门认为他在1911—1912年,对这一问题研究的贡献主要是两个方面:一是发现涡街只有当涡旋是反对称排列,且仅当行列的距离对同行列内相邻两涡旋的间隔有一定的比值时才稳定;二是将涡系所携带的动量与阻力联系起来。

塔科玛桥风毁事故与卡门涡街

塔科玛峡谷桥(Tacoma Narrow Bridge)风毁事故的惨痛教训,使人们认识到卡门涡街对建筑安全上的重要作用。

1940年,美国华盛顿州的塔科玛峡谷上花费640万美元,建造了一座主跨度853.4m的悬索桥。建成4个月后,于同年11月7日碰到了一场风速为19m/s的风。虽风不算大,但桥却发生了剧烈的扭曲振动,且振幅越来越大(接近9m),直到桥面倾斜到45°左右,使吊杆逐根拉断导致桥面钢梁折断而塌毁,坠落到峡谷之中。当时正好有一支好莱坞电影队在以该桥为外景拍摄影片,记录了桥梁从开始振动到最后毁坏的全过程,它后来成为美国联邦公路局调查事故原因的珍贵资料。人们在调查这一事故收集历史资料时,惊异地发现:从1818年到19世纪末,由风引起的桥梁振动已至少毁坏了11座悬索桥。

第二次世界大战结束后,人们对塔科玛桥的风毁事故的原因进行了研究。一开始,就有两种不同的意见在进行争论。一部分航空工程师认为塔科玛桥的振动类似于机翼的颤振;而以冯·卡门为代表的流体力学家认为,塔科玛桥的主梁有着钝头的H形

断面，和流线型的机翼不同，存在着明显的涡旋脱落，应该用涡激共振机理来解释。冯·卡门 1954 年在《空气动力学的发展》一书中写道：塔科玛峡谷大桥的毁坏，是由周期性涡旋的共振引起的。设计的人想建造一个较便宜的结构，采用平板来代替桁架作为边墙。不幸，这些平板引起了涡旋的发放，使桥身开始扭转振动。这一大桥的破坏现象，是振动与涡旋发放发生共振而引起的。

20 世纪 60 年代，经过计算和实验，证明了冯·卡门的分析是正确的。塔科玛桥的风毁事故，是一定流速的流体流经边墙时，产生了卡门涡街；后涡的交替发放，会在物体上产生垂直于流动方向的交变侧向力，迫使桥梁产生振动，当发放频率与桥梁结构的固有频率相耦合时，就会发生共振，造成破坏。

卡门涡街不仅在圆柱后出现，也可在其他形状的物体后形成，例如在高层楼厦、电视发射塔、烟囱等建筑物后形成。这些建筑物受风作用而引起的振动，往往与卡门涡街有关。因此，现在进行高层建筑物设计时都要进行计算和风洞模型实验，以保证不会因卡门涡街造成建筑物的破坏。据了解，北京、天津的电视发射塔，上海的东方明珠电视塔在建造前，都曾在北京大学力学与工程科学系的风洞中做过模型实验。

他准备“对不幸的事故负责”

20 世纪 60 年代，在北京郊区曾建造了一座高达 325 m 的气象塔，以研究北京地区的大气污染情况。该塔用 15 根纤绳固定在地面上，是当时亚洲最高的气象塔。但在竣工不久便出现了奇怪的现象：在天气晴朗、微风吹拂时，高塔发生振动，伴之有巨大轰鸣声，使附近居民感到担心；而在刮风下雨的恶劣天气，反倒无事。经过科研人员的详细测量和分析，终于弄清了这一现象

的原因，是在那样的风速下，气流在塔的纤绳这一柱体上发放涡旋，形成了卡门涡街，其频率又与纤绳的自振频率相耦合而发出了轰鸣声。

1912年，冯·卡门的论文发表不久，时任英国剑桥大学校长的力学家、物理学家瑞利(John William Strutt Rayleigh, 1842—1919)爵士就指出，这些交错的涡旋必定就是风吹竖琴(Aeolian harp)发音(线鸣)的原因。冯·卡门也说：“有人想必还记得双翼机的线鸣现象，这声音就来自涡旋的周期性发放。”

葛威尔(Gongwer, C A)曾通过实验，指出了水下交通工具的某些短撑有时会唱出很高的音调，原因就在于短撑后面没有合适的锐利边缘，以致周期性发放涡旋而引起振动。顾策(Gutsche, F)所发现的船下推进器的唱音，冯·卡门认为也可以这样来解释。

有一个法国海军工程师告诉冯·卡门，当某一潜艇在潜航速率超过7海里(1 n mile = 1 852 m)时，潜望镜忽然完全失去作用。冯·卡门认为，这是因为镜筒发放周期性的涡旋，在一定速率下，涡旋发放的频率和镜筒的自然振动频率发生了共鸣。由于同样的原因，无线电天线塔也会在天然风中发生共鸣振动；输电线的低频振动也与发放涡旋有关系。

有趣的是，冯·卡门1954年所写的《空气动力学的发展》一书中，在列举了塔科玛桥风毁及一些由卡门涡街引起的事故后，曾幽默风趣地说，“我永远准备对卡门涡街所造成的其他不幸事故负责”。

卡门涡街流量计

实际上，卡门涡街并不全是会造成不幸的事故，它也有很成功的应用。比如已在工业中广泛使用的卡门涡街流量计(图3、图

4), 就是利用卡门涡街现象制造的一种流量计。它将涡旋发生体垂直插入到流体中时, 流体绕过发生体时会形成卡门涡街, 在满足一定的条件下, 非对称涡列就能保持稳定, 此时, 涡旋的频率 f 与流体的流速 v 及涡旋发生体的宽度 d 有如下关系:

$$f = St(v/d)$$

其中 St 为斯特劳哈尔数, 在正常工作条件下为常数。

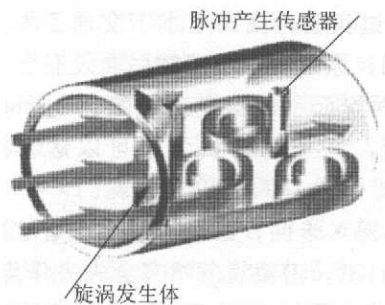


图3 卡门涡街流量计原理示意图



图4 流量计外形

卡门涡街流量计有许多优点: 可测量液体、气体和蒸汽的流量; 精度可达 $\pm 1\%$ (指示值); 结构简单, 无运动件, 可靠、耐用; 压电元件封装在发生体中, 检测元件不接触介质; 使用温度和压力范围宽, 使用温度最高可达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 并具备自动调整功能, 能用软件对管线噪声进行自动调整。

参考文献

- [1] Theodore von Kármán. 空气动力学的发展[M]. 江可

宗, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1962.

- [2] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2000.

首刊于《力学与实践》, 2006, 28(1): 88-90.

当您观看电影时，您知道正在欣赏的电影拷贝(正片)以及拍摄电影时所用的胶片(负片)是怎样制造出来，流体力学在它们的生产制造过程中起着什么样的作用吗？当您使用相机拍摄得到漂亮的彩色照片时，您知道彩色胶片的底片(负片)和相纸(正片)是怎样生产出来，流体力学在其生产制造过程中有着怎样关键的作用吗？现在数码相机已十分流行，但扩印成照片时，仍需要使用相纸(正片)。这里将简要介绍从1824年以来，在感光材料发展180多年的历史过程中，流体力学曾经和正在起着的 key 作用。

让我们先从感光材料产生和发展的历史谈起。

1824年 法国物理学家 Nicéphore Niépce 在一块玻璃板上涂上一层含银盐的化合物，经光照得到了图像。

1839年 Niépce 的同事向巴黎科学院做了在烈日下较长时间曝光而得到银汞齐正像的实验。

1841年 英国科学家 Talbot 宣布一种含 AgI (碘化银) 纸基感光材料可得到负像，再由负像使另一感光材料感光即可得到正

像，曝光时间已可缩短，但图像尚不太清楚。

1851年 出现珂罗酊(即硝棉胶)湿板照相法，可得以玻璃板为基底的照相底片。

1871年 发明溴化银明胶干板。

1876年 找到对所有光敏感的乳剂。

1887年 以硝酸纤维素酯薄膜代替玻璃的感光软片，使照相机工业得到迅速发展。

1951年 出现不易燃烧的三醋酸纤维素酯片基。

20世纪70年代 发明涤纶片基，使片基强度得到提高。

从这段历史可以看到，感光材料的产生和发展过程，一方面是发现和逐步完善能对所有光线敏感的乳剂；另一方面是发明能够将乳剂涂布上去的片基，并逐步使片基做到既安全又有高强度。

在中国，直到20世纪60年代，有时底片还是以玻璃为基底的照相底片。1965年笔者去坐落在天津劝业场旁著名的中国照相馆照相时，所得的底片，就是玻璃基底的照相底片。那个时候在电影拷贝的胶片盒上，常常见到显著标有“安全胶片”字样，就是指盒中胶片是三醋酸纤维素酯片基的，不易燃烧，以区别这之前的电影拷贝胶片，由于是硝酸纤维素酯片基的，容易燃烧，不安全。现在我们所使用的电影胶片拷贝已都是涤纶片基的了，既安全，强度也高，已不再需要在片盒上标明是安全胶片。

感光材料工业的产品为彩色胶片、黑白胶片、相纸(包括冲扩和打印用的相纸)、X光胶片、磁带等信息记录材料。感光材料的生产过程，先是分头制造感光材料乳剂和片基，再将感光材料乳剂涂布到片基上，经干燥后再进行裁切、整理、包装，即可成为产品。流体力学的作用就体现在将感光材料乳剂涂布到片基上，形成感光材料的过程中，感光材料的涂布流动是指将感光材料乳剂涂布到片基上的流体运动过程。

感光材料涂布流动的工程目的，是要求能将乳剂在片基上涂

得：快，薄，匀，高黏度，（有时需要）同时多层。涂得快，才能生产效率高。涂得薄，才能使感光后的胶片或相纸较容易显影和定影、加快冲洗扩印的速度。涂得匀，才能使涂布宽度为 1 m 多的胶片，经裁切得到的各条宽 35 mm 的胶片性能一致，同一条胶片的前后性能也一致；只有性能一致，才能在同样的冲洗条件下得到统一的感光效果。乳剂高黏度是为了涂得快，干得快，以降低对干燥设备和条件的要求。同时涂布多层，是为适应信息记录材料（如彩色胶片）结构的需要（下面会进一步介绍）。这 5 个要求实际上就是感光材料生产对涂布技术在数量和质量上的具体要求，流体力学应用得好不好，就要看能否保证这些要求的同时实现。

在感光材料工业发展的历史上，对软片基第一个成功的涂布方式是浸涂（dip coating）。浸涂是将片基浸入所要涂的黏性液体中再拉出，从而使片基涂布上槽内的黏性液体，如图 1 所示。在涂布槽内放有需涂布的黏性流体，浸涂的方式基本上有 2 种类型，一种为通常的简单浸涂（图 1a）；另一种为对辊涂布（roll coating）（图 1b），多加一个转动的辊子，是为了浸入拉出后再压一下，使涂得更薄些。德国阿克发（Agfa）胶片公司 20 世纪 30 年代的浸涂技术代表了这一技术的成熟。

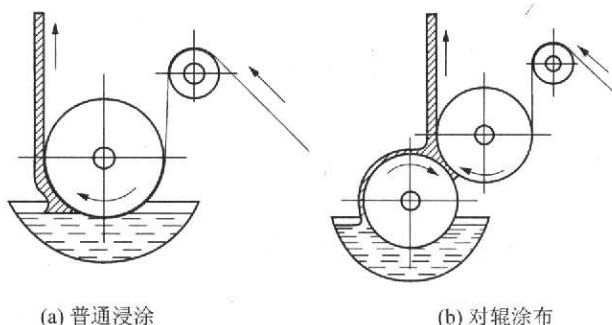


图 1 浸涂示意图

支持体在等速运动，希望在单位时间内，单位面积上带走的

黏性液体(乳剂) Q 是常数;而且最终的涂布厚度可通过有关参数调节,并尽量降低涂布厚度。

对于图2所示的浸涂方式,杰里亚金(Deryagin)1958年曾列出其流体力学方程和边界条件进行求解,得到最终的涂布厚度

$$h_0 = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\mu v}{\rho g \sin \alpha}}$$

即 h_0 由 μ , v , ρ , α 四个因素决定,其中 ρ 是乳剂的密度, μ 是乳剂的表现黏度, g 是重力加速度, v 是涂布时片基的运动速度, α 是液面与片基抽出方向的夹角。他未考虑表面张力,所以仅适用于涂层厚、速度慢的情况。

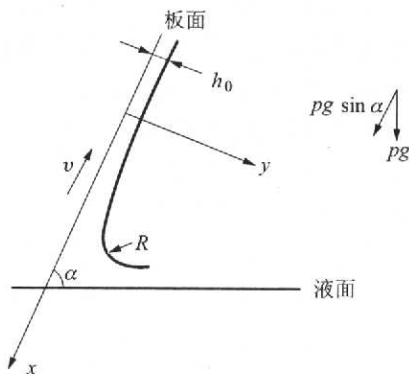


图2 浸涂

后来人们将表面张力 σ 的因素考虑进去,从流体力学的纳维-斯托克斯方程可得到问题的微分方程和边界条件,并用数值方法求得了其近似解。最后可得,在 $\alpha = 90^\circ$ 时,涂布厚度达极小值

$$h_{\min} = 1.32 \left(\frac{\mu v}{\sigma} \right)^{2/3}$$

工程上最关心降低 h_{\min} 的方法。由上式可见,可能的方法有:

(1) 降 μ (乳剂太稀,不容易干);

- (2) 减小 v (车速太慢, 产量不高);
- (3) 加大 σ (加表面活性剂后, 一般 σ 要降低);
- (4) 降低 R (即将液体往内推, 限制弯月面)。

因前 3 条方法均不可取, 人们就在第 4 条上下功夫, 研究出可采取的限制弯月面的办法有: 用气刀; 用机械刮刀; 用轮子 (对辊, 见图 1b); 从反方向抽真空, 造成负压; 用电磁场。

实际上先后出现的 20 多个专利, 其实质都是通过限制弯月面, 降低 R , 以降低最终的涂布厚度。

浸涂的速度快了, 涂布的厚度就要加大, 这个道理易从生活中的小事情联想到。以前去商店买食用油的时候, 不像现在这样是用瓶装好的, 商店也没有用计量机械, 是靠售货员用小提勺来打油的。操作的时候不能提得太快, 因为只有将提勺往上提得慢些, 才能使提勺外壁带上的油 (也就是浸涂在外壁上的油) 再流回些到油桶内, 如果提得太快则会有蚀本的可能。所以浸涂的速度不能太快, 否则涂布厚度也难降低。实际上, 浸涂的速度最快也只能到 30 m/min 左右。

众所周知, 可见光 (白光) 是由红、绿、蓝三基色组成的。人的视觉神经中也正好有感红、绿、蓝的三种神经细胞。早在 1861 年 Maxwell 就开始认识到彩照的原理, 并获得了物体的彩色影像。但到 20 世纪 60 年代由于流体力学的应用, 涂布技术的进步, 才得到了逼真的彩照。

现代彩色胶片是一种多层结构, 如图 3 所示, 其涂层的总厚

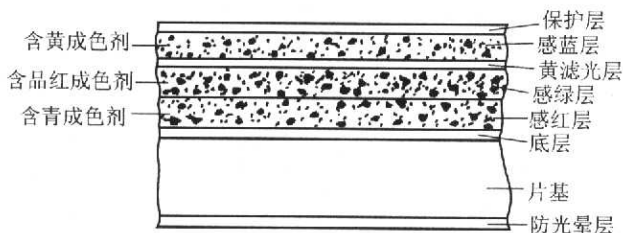


图 3 多层彩色胶片的基本结构

度在干燥后只有几微米。这么多层的乳剂怎么才能涂布上去呢？如果用浸涂的办法，一次只能涂一层乳剂，干了后卷起来，再放开，才能去再涂另一层乳剂。而每一层又都很薄，在片基卷放的过程中，无论怎样小心，也很难保证没有划伤。如果划伤了，就会形成胶片的弊病。况且这样做生产效率也太低。于是逼迫人们运用流体力学原理去寻找新的涂布方法，来解决彩色胶片的涂布技术问题。

20世纪50年代末，美国柯达(Kodak)胶片公司的两位工程师提出了用坡流涂布(slide coating)方式(图4所示是3层坡流涂布的示意图,图5所示是坡流涂布嘴示意图)来解决彩色胶片的涂布技术问题。他们的创意是让多层黏性液体在斜面上形成严格的层流，然后一起涂布到片基上，再一起进行干燥，以形成需要的多层结构彩色胶片。柯达胶片公司到20世纪60年代后期，已使这一涂布技术基本成熟，并以坡流涂布技术垄断了

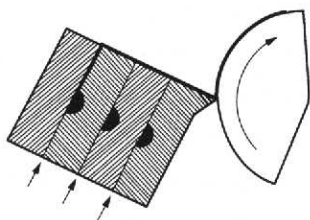


图4 坡流涂布示意图

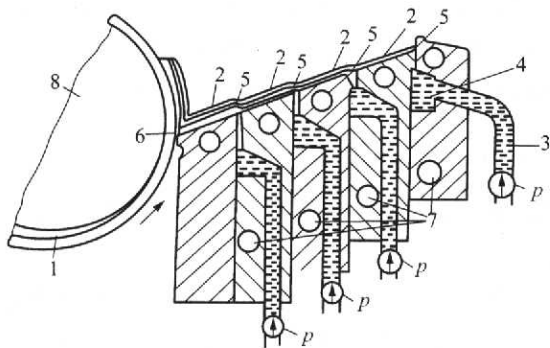


图5 坡流涂布嘴示意图

- 1—片基;2—斜面;3—乳剂;4—乳剂分布槽;
5—扁平毛细窄缝;6—弯月面;7—保温水循环管;8—轴辊

当时世界彩色胶片生产的四分之三以上。逼得世界上一些胶片公司处境艰难，要么花大价钱购买其专利，并接受苛刻条件让其控制；要么几家公司合并，商量对策，以求生存。像前面提到的阿克发公司就走上了后一条路。

层流和湍流是黏性流体运动的两种基本形态，这两种形态的流动在物理图像上有着重大差别。层流的流体质点像是排列成队一样地向前运动，所以层流的流线层次分明。而湍流的流体质点运动则是杂乱无章的。层流在一定条件下会过渡到湍流状态。有关层流向湍流过渡的理论目前还不够成熟，但是已经知道，层流向湍流的过渡是与流动中受到扰动分不开的。在感光材料的涂布过程中，液体供料泵的压力波动、涂布机的微小振动、甚至操作人员的行动等，都有可能给坡流面上的乳剂层流施加扰动。理想的坡流涂布必须保持乳剂作严格的定常层流流动。能否做到这一点，要看乳剂受到扰动后，扰动能不能很快地衰减，使流动恢复到原来的状态后再干燥固化。这就是液体沿斜面向下流动时的层流稳定性问题。

进行流体运动稳定性分析时，先要求出定常层流的解，进一步推出扰动所满足的扰动方程，再分析扰动方程的各种解的性质。只有在各种扰动解都衰减时，才能保证层流的稳定性。用流动稳定性的小扰动方法，得到层流稳定的条件是

$$Q < \frac{5}{6} v b \cot \alpha$$

式中 Q 是流量， v 是运动学黏度， b 是涂布宽度， α 是斜面与水平的夹角。

由于坡流涂布时，实际发生的扰动并不都是小扰动，因此还要对有限扰动研究坡流涂布流动的非线性稳定性问题。这方面也取得了很好的结果。

随着感光化学对乳剂的成分和结构怎样更好地还原彩色研究的发展，认为彩色底片(负片)涂层的结构最好要有 14 层之多，

从而对涂布技术提出了更高的要求：同时涂更多层，而且每层要涂得更薄，以使干燥后总厚度仍是几微米；生产效率也要进一步提高，即希望要涂得更快。这促使人们再从流体力学上动脑筋。美国柯达胶片公司又提出了落帘涂布 (curtain coating) 技术：让斜坡流面上形成的多层乳剂层流，一起落帘而下，再一起涂布到片基上 (图 6 所示是 3 层落帘涂布的示意图)。

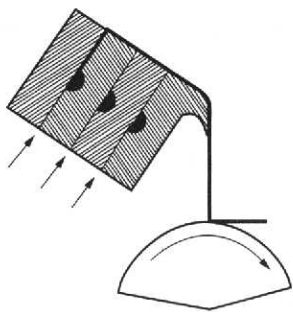


图 6 落帘涂布示意图

当甲乙两列高速奔驰的列车速度相同时，两列车的相对速度为零，一个人从甲列车的车门能很容易地迈步走进正对着的乙列车车门。在太空中，宇宙飞船与空间站的对接，宇航员在飞船与空间站间的出入，也是同一原理。多层乳剂层流的落帘，作为自由落体而下，在重力的作用下，进一步拉薄了，也加快了速度，只要片基的速度相应快，使相遇时相对速度是零，也就很容易涂上去了。目前，落帘涂布技术尚正在研究开发之中。可以相信流体力学一定能为感光材料工业提供更好的涂布技术，为人们提供更多更好的消费品。

参考文献

- [1] 王振东. 化工中的流体力学[M]. //教育部工程力学专业教学指导委员会. 力学与工程技术的进步: 140-146. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [2] 刘旦初. 化学与人类[M]. 2版. 上海: 复旦大学出

版社，2000.

- [3] 王振东. 从流体力学谈坡流式挤压涂布[J]. 感光材料, 1979(6): 7-11.
- [4] 王振东. 薄液膜沿坡流面流动的稳定性[J]. 感光材料, 1980(4): 7-10.
- [5] 王振东, 谭绍勤. 关于液体薄膜流动的实验研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 1981(1): 14-18.

首刊于《力学与实践》, 2003, 25(4), 77-79.

15

Chapter 漫谈动物运动对仿生力学的启示

动物和其他生物间最重要的区别，在于它们拥有经过亿万年漫长的演化过程，形成了优化的器官和组织，能巧妙地通过运动，主动有目的地迅速改变其空间位置。为了生存，动物发展了不同的运动本领，以提高其生命效力和生活质量。动物的运动大体可分为游泳、行走、奔跑、跳跃、爬行、飞行等类型。无论哪种类型的运动，动物既要向前行进，又须适应地心引力的作用，以维持身体的平衡。在有些情况下，尚需发展附着的能力，例如壁虎在竖立的墙壁上行走。

这里将漫谈动物的运动，以及对仿生力学的一些启示。思考这一话题，至少可对以下几方面有益：

(1) 利用动物运动的力学机理，为民用或军用的目的，考虑如何改进现有的机械设备和工具，或设计制造新型的仿生高效机械设备和工具。

(2) 模仿动物行走、奔跑、跳跃、游泳、飞行、爬行的特点，设计、制造相应有不同特色和应用范围的智能机器人(分别可称为智能行走器、智能机器鱼、智能潜行器、智能爬行器、智能飞

行器等),既可在地球上某些特殊环境下使用,以达到特定的目的;又可以为到月球、火星等别的星体上探测、研究时使用。

(3)在竞技体育运动上,根据动物行走、奔跑、跳跃、游泳的特点,吸取其奥秘,提高运动能力和水平,以做到“更高、更快、更强”。

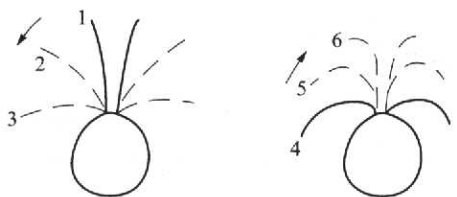
游 泳

在水中生活的动物种类多、数量大。现在普遍认为,生命是起源于水中的。水生动物适应水中的环境,其运动形式以游泳为主。水是水生动物运动的媒质,其质量比空气重得多。水生动物要受到水的浮力,其在水中的运动阻力亦要比在空气中大。已进化了几亿年的水生动物,其游泳的方式是多样化的,粗略可分为摆动法、划动法、水翼法、喷射法等。

摆动法是指鱼利用鳍的波浪式摆动来游泳。多数鱼类有较大的尾鳍,以尾鳍摆动产生向前的推力。如体长约18 cm的鳙鱼摆动尾鳍2次,可从静止状态达到平均游泳速度1.33 m/s。但也有尾鳍很小,体形细长、有易弯曲的脊椎骨,如鳗鱼在游泳时身体前部保持直而不弯,后部则左右弯曲摆动。还有很多鱼类也靠摆动背鳍、胸鳍和腹鳍来游泳;当要提高速度时,便把胸鳍贴着身体,用尾鳍摆动来辅助背鳍和腹鳍的运动。

划动法是指动物利用胸鳍、腿、鞭毛或纤毛划水游泳。蛙的幼体蝌蚪是靠尾部的摆动游泳的,长成蛙后便依靠后肢的划动游泳了。龙虱、水龟虫等鞘翅类和划鳍、仰泳鳍、田鳖等半翅类昆虫,其身体不能弯曲,靠扁形的后腿划游。衣滴虫用两根鞭毛划水(图1);草履虫是长着纤毛的细胞原生动物,纤毛长约10 μm ,相距约2 μm ,像是一艘由5 000具浆划动的潜艇。在水面游泳的鼓虫,后腿划动每秒钟达50~60次,可前进达100 cm,

而且能分泌降低水表面张力的油类，故行动迅速。鸟类中有游禽，包括鸭、鹅、鸳鸯等靠腿的划动游泳，其趾间有蹼，当腿向后伸时蹼就展开，以增加对水的推力；而收腿时，蹼又褶缩，以减少对水的阻力。



(a) 衣滴虫用两根鞭毛划水(虚线与数字表明鞭毛的位置,箭头表明移动的方向)



(b) 甲虫后肢向后滑动游泳时毛丛张开,向前回复时毛丛闭合

图1 水生昆虫划动法的游泳

水翼法是指动物使用其流线型运动器官游泳。以水翼法游泳的，多是体形较大的水生动物，如企鹅、海豚、鲸鱼、海龟、金枪鱼等。它们除了有流线型的体型外，还有流线型的运动器官。试验表明，体长 1.9 m 的海豚游泳速度可达 21.0 m/s。

喷射法是指动物用其器官喷水以产生推力游泳。乌贼与章鱼的呼吸鳃位于套腔中，在头下方后端的腹面有一漏斗状构造和裂口。水可通达裂口进入套腔以供呼吸；套腔肌肉又可收缩，将水迅速挤出，以产生推力(图2)。体长 0.2 m 的章鱼，由静止状态收缩一次，在水中推进的速度可达 2.1 m/s。还有扇贝，利用闭壳肌舒展收缩来开合两壳，将水从套膜腔挤出去而实现游泳。

工程技术专家希望通过对水生动物游泳力学原理的了解，获

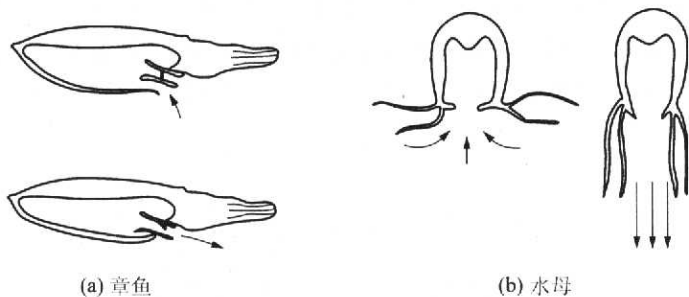


图2 喷射法的游泳(箭头表明水进出的方向)

得启示,以改进现有民用或军用船舰,设计制造新型高效船舰,设计制造智能机器鱼、潜行机器人。目前,人们对鱼类游泳的研究与模仿均还很不够,例如船用螺旋桨的流体推进效率还未超过40%,而鱼游的相应效率可达80%以上。鱼游的高机动性、稳定性、低噪声等指标,更为潜水艇所望尘莫及。

美国和日本等国家都在大力进行鱼类游动推进机制的研究,研制智能机器鱼(图3)。研制机器鱼,除模拟鱼游动的局部功能外,其主要应用目的是军事侦察、海洋考察、寻找污染源头等用途。

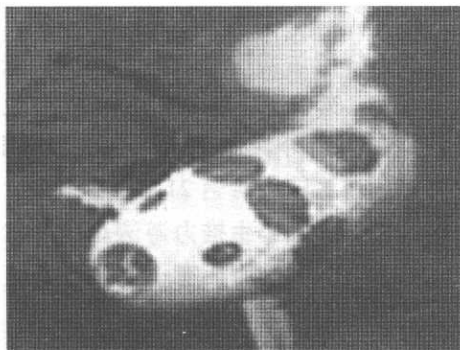


图3 智能机器鱼

在竞技体育运动方面,也希望借鉴、模仿水生动物的游泳,以提高运动能力和水平,夺取更多的金牌,为国争光。据了解,

我国这方面的研究和应用有很成功的例子。

2001年在世界蹼泳10个项目的比赛中，俄罗斯队夺得8枚金牌，中国队仅获1枚金牌，远远落后于俄罗斯队。为改变落后的情况，武汉体育学院等单位在北京大学力学系陈耀松教授的指导和帮助下，对蹼泳的水动力学进行了研究，研制了蹼泳板运动仿真模拟设备，一方面进行蹼泳板的非定常数值模拟，另一方面参考数值模拟结果，在循环水槽中对不同类型的蹼泳板，进行了大量的测试实验。依据这些结果，在蹼泳板的选材、设计和制作上，针对不同运动员的身体特点，采取不同的措施，对运动技术不断完善，使运动水平有了喜人的突破。在2002年9月举行的第11届蹼泳世界锦标赛上，中国队打破了1项世界纪录，夺得13枚金牌和8枚银牌，仅用了1年时间就战胜了俄罗斯队。

飞 行

人类自古以来就幻想模仿鸟在空中飞行，制造由人工支配的翼，冒险地进行飞行实验。屈原在《离骚》诗中曾描述了空中飞行，想象自己像鸟一样展翅飞翔，又期望驾云雾腾空。达·芬奇自30岁起用了20余年时间，认真研究鸟类的飞行，完成了《论鸟的飞行》研究手稿，论述了鸟的飞行原理。美国的莱特兄弟仔细观察和分析鸽子的飞行，于1903年12月17日，成功地进行人类第一架有动力、可操纵的载人飞机的飞行试验。以后的100年，经历了第一次和第二次世界大战，飞机得到了飞快的发展，并已向太空延伸，进入到航天时代。

动物界能飞行得最好的是鸟类和昆虫。当然也有例外，哺乳动物的蝙蝠，也是善于飞行的。航空100年来，人对鸟类作了不少研究和模仿，制造了各类定翼飞行器和旋翼飞行器，但实际上对鸟类和昆虫飞行原理的了解均还较浮浅，尤其是对昆虫研究和

模仿得还相当少。

昆虫是动物界种类最多的类群，现已定名的昆虫已达七八十万种，还有数倍于此的昆虫尚未能鉴定、命名。昆虫主要在陆地生活，分布很广，对环境的适应性很强，这主要是因为它们能够飞行。昆虫的翅与鸟类的翅不同，它们不是由前肢演化而来，而是由体节的背板向两侧扩展变成的。昆虫的翅生长在胸部。除蚊、蝇等双翅类的昆虫外，昆虫一般都有两对翅，生在中胸和后胸，分别称为前翅和后翅。昆虫翅基部都有小骨片和胸部相连(图4)，这为翅具备各种活动能力创造了条件，也是翅脉起始的地方。有很多昆虫在停止时，把翅叠起来贴在背部，起飞时马上将翅展开，扑击飞行，如甲虫、椿象等。也有不能叠翅的昆虫，如蜻蜓、蜉蝣等的翅只能平伸，不能折叠。

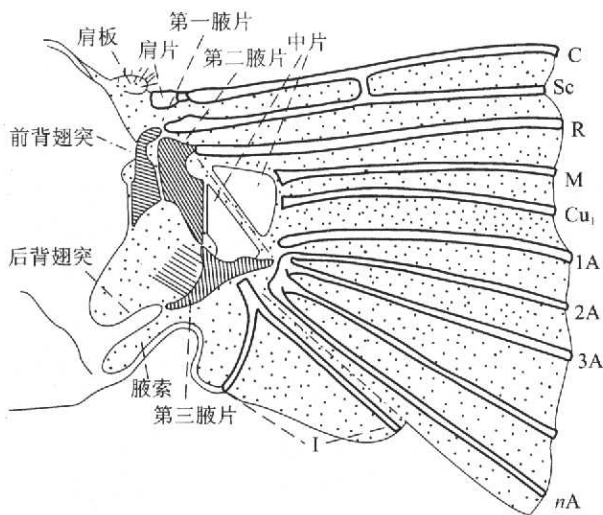


图4 昆虫翅基部的关节构造

含有数种骨片，并与胸背的翅突相连；翅右大部省略，仅显示不同翅脉的排列；C. 前缘脉，Sc. 亚前缘脉，R. 径脉，M. 中脉，Cu. 肘脉，A. 臀脉，J. 轭脉

昆虫飞行时，翅的运动包括上下拍击和前后倾折两种基本动作。翅的上下拍击，主要依靠背腹肌和背纵肌的交替收缩所造成（图5）。与翅基相连的前上侧肌、后上侧肌的交替收缩，分别拉动翅基的前上侧片和后上侧片，使翅面作前后倾斜活动。翅下拍时，其前缘向下方切入空气；翅上举时，其前缘向上方切入空气。这样，翅上下拍击一次，翅便沿自身的纵轴扭动一次。昆虫不前进而拍动翅膀时，翅尖成“8”字运动；前进拍动翅膀时，翅尖便造成一系列的开环运动（图6）。

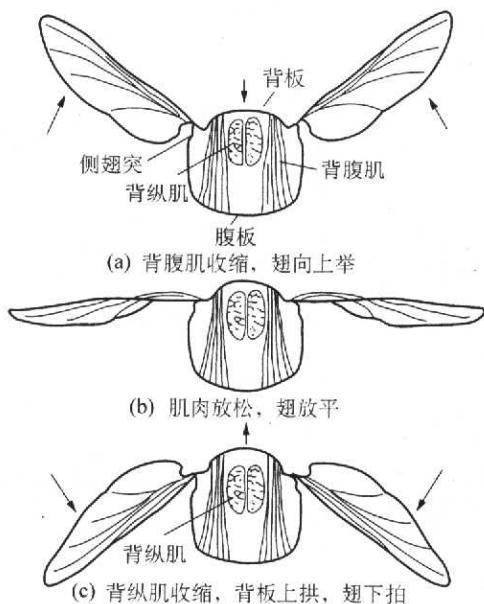


图5 胸部肌肉交替收缩造成翅的上下拍动

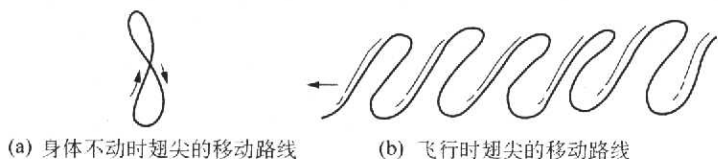


图6 昆虫飞行时翅尖的移动路线

总的来讲，昆虫的飞行是翅的拍击造成的。翅的拍击要有足够的频率和幅度，翅拍击造成的气流所产生的空气动力，可分成向前的推力，促成虫体前进，和向上的升力，以抵消虫体的重力，使虫体能漂浮在空气中。翅的拍击和转动，将空气推向后方和下方，使昆虫能在空中漂浮前进。有些昆虫能改变翅拍击的斜度、幅度或频率，以便在飞行中转弯、倒退或停在空中。

昆虫的体形大小对飞行活动很有影响。蚜小蜂是一种体形微小的昆虫，翅长仅 0.5 mm。用高速摄影可知，其翅振频率为 240 次/秒。蚜小蜂飞行时，其左右双翅在每次上升到顶时，拍合后再行分离，并以翅前沿最早分离(图 7)。蚜小蜂这种振翅方式，在翅的周围产生了非定常涡旋，其力量足以举起蚜小蜂的体重。据了解，近年来国内外许多学者在对昆虫的飞行机理进行研究，较细致地研究昆虫翅膀拍动过程的空气动力学原理。现已有人在研究蚜小蜂振翅所产生非定常涡的机理，但至今尚未能完全揭示其飞行奥秘。

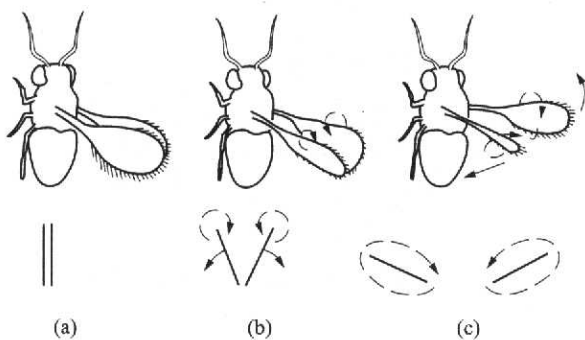


图 7 蚜小蜂飞行时翅的动作

上排从左到右表示前翅与后翅分开时使空气产生涡旋；下排是二翅分开(黑箭头)活动所产生的空气涡旋(虚线)

蝙蝠是哺乳动物，它的前肢演化成为皮上有毛的翅膀。在滑

翔时，它通过调节超前缘的迎角，降低高度而前进。在振翅飞行时，它依靠翅的上下扑击克服曳力而前进、上升。蝙蝠有机动性很强的慢飞动作，对其在空中捕食飞虫十分有利。对于蝙蝠，人们对其飞行原理的研究还不够。

鸟类是人类最早注视并模仿的飞行对象，鸟类也是振翅飞行的，鸟翅是由脊椎动物的前肢演化而成的，鸟翅长着初级飞羽和次级飞羽，组成了鸟类的主要飞行器官。鸟类在飞行时，可变动双翅的面积和形状，及与躯体的相对位置，促成飞行时的机动性以及起飞或停歇。可是人类航空 100 年模仿的结果，却只是各类定翼飞行器和旋翼飞行器，其飞行原理仍与鸟类的飞行原理相去甚远。

国外很重视昆虫飞行机理的研究，20 世纪 90 年代开始也在大力研究智能微型飞行器(图 8)。

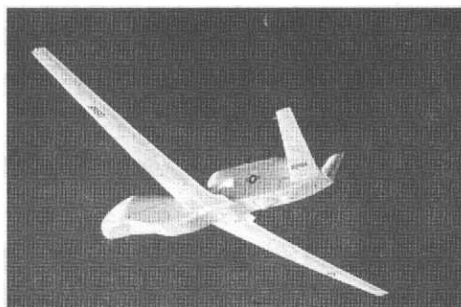


图 8 美国全时鹰无人驾驶侦察机

通过以上对动物飞行情况的讨论，容易看出需要挑选几种飞行本领卓越、用现行空气动力学知识尚解释不清的昆虫(如蚜小蜂)、鸟类以及蝙蝠，进行深入地观察、研究和实验，探寻其飞行机理的奥秘，以供改善现有的飞行器、设计制造新型仿生高效飞行器、设计制造智能微型飞行器时参考(图 9)。

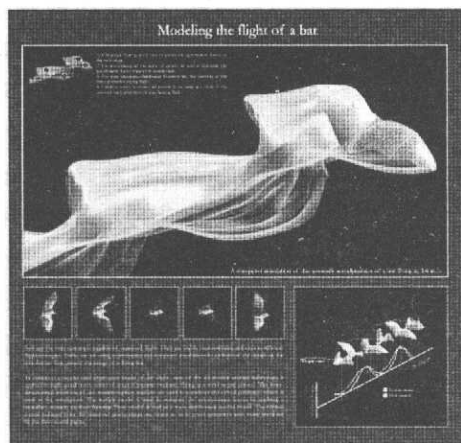


图9 布朗大学的工程师肯尼斯·布劳尔利用激光和先进的多镜头动态跟踪系统记录下了果蝇在飞行时其翅膀与翅膀周围的空气变化情况

行走、跳跃与爬行

人和鸟类都以双腿行走，行走时其体重由双腿交替负担。用四肢行走的动物，当举起一腿时，重心便落在其余三腿所组成的三角形之内。昆虫是六足动物，有很多种类的昆虫善于行走，如蜚蠊、瓢虫、步行虫、椿象等。美洲蜚蠊在 25 ℃ 温度下，1 s 最快可行走 130 cm。昆虫行走时，一般均以一边的前足、后足和另一边的中足为一组，使身体重心处于另一组由另三足形成的三角形中，前进时二组交替进行。

很多昆虫善于跳跃，有些鸟类和兽类也能跳跃。袋鼠、袋猴以跳跃代步，较为特殊。蝗虫、蚱蜢、蟋蟀、跳蚤等昆虫的后足特别发达，当其后足的腿节和腓节由褶折状态突然伸直时，就产

生了跳跃的动作(图10)。一只重3 g的蝗虫双腿产生的力量可使其以初速为3.4 m/s跳离地面,跳跃的角度常为 60° ;一只5龄的蝗虫可跳30 cm高,70 cm远。跳蚤跳跃最高15 cm,最远30 cm。如果将几种动物的跳跃能力和其身体长度作比较,青蛙能跳到自身长度的12倍,跳蚤可达200倍,而体形较大的袋鼠却只有5倍。

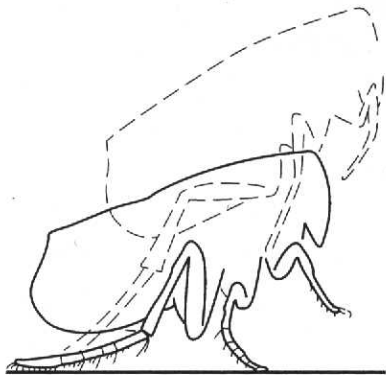


图10 蝗虫起跳时后肢的动作

在人类举行的运动会中,跑和跳是传统的田径比赛项目。人跳高时的四肢动作与动物颇有相似之处,但起跳前有一助跑过程,以获得重心上升的冲力,成绩优良的运动员可越过2 m高的横杆。跳远是利用一腿的力量,将身体重心向上、向前推进。优秀运动员可跳7 m以上。人跳远时,身体在空中移动的轨迹与青蛙的跳跃颇相似,都须有一定的高度使身体离地面的时间较长。若重心提高的时间达1 s时,距离将可达9 m之远。是否可设想:将跳跃时,一跳离跳点较远的动物(如青蛙)的高速摄影图像,用计算机与某竞技运动员的跳远动作进行比较分析,以调整其动作,提高其运动成绩。

在爬行类动物中,首先容易想到的是蛇。蛇的最大特点是脊椎数目多,常达160颗以上,最多的可达400颗以上。蛇是依靠身体不同部分的弯曲,获得支撑物反作用所产生的力量前进的。蛇可以在十分狭窄的地方爬行(如进入鼠穴捕食),其身体一部分弯曲,形成的波浪向后移动,使整个身体得以前进。蛇爬行的许多活动自如的特点,是由于其躯体演化成长形、而无四肢所造成的。由此我们不妨可以设想,研究和模仿蛇的动作,设计制造

出智能运动蛇，以达到某种特殊应用的目的。

和蛇相反的是多足爬行动物，如蜈蚣、马陆、蚰蜒等。它们的身体分为头和躯干两部分，躯干由许多具有步足的体节组成。体节最少为 11 节，最多的上百节。蜈蚣的足活动时，每足向后一推的时间比向前一扒的时间长，而且足推动时使躯干产生一个波动，从而向前进。腹足类软体动物，如蜗牛、螺蛳、蛞蝓等，是用块状的足，附在固体上爬行。可通过玻璃板来观察蜗牛的爬行，若在足上预先滴一小滴墨水，可清楚看到蜗牛足的运动是由肌肉伸长和缩短的波形活动形成的。这些软体动物爬行都不快，如蜗牛的爬行速度只约为 2.5 mm/s 。

如果将昆虫作为超级英雄，蟑螂也许是其中令人惊奇的一个。有些蟑螂每秒钟的行走距离达到其体长的 50 倍(很少有人能在一秒钟内走过自身体长的 5 至 6 倍的距离)，也有一些蟑螂在逃逸的时候，遇到高低不平的表面和比自身要高的障碍物时不必降低速度。科学家曾经制造出 6 条腿的机器人，主要是因为这种结构具有很好的稳定性，但是其移动速度从来未达到蟑螂的速度。蟑螂的逃逸技能非比寻常。其体型使其速度和稳定性达到最大化，能很快地将身体挤进窄缝中。对蟑螂移动方式与技能的详细研究，会为机器人仿生学提供有益的思路。

综上所述，观察与研究动物的运动机理，模仿它们来制造各种有用的工具和设备，提高人类的竞技运动水平，既是很有趣的事情，又是有重要意义的工作，应当引起人们更多的关注。

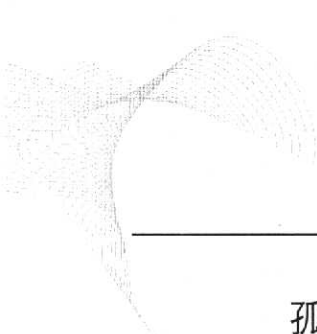
参考文献

- [1] 钦俊德. 动物的运动[M]. 北京: 清华大学出版社,

广州：暨南大学出版社，2000.

- [2] 童秉纲. 鱼类波状游动的推进机制[J]. 力学与实践, 2000, 22(3): 69-74.
- [3] 崔尔杰. 生物运动仿生力学与智能微型飞行器[J]. 力学与实践, 2004, 26(2): 1-8.
- [4] 孙茂. 昆虫是怎样飞行的[J]. 力学与实践, 2004, 26(1): 80-83.
- [5] 武际可. 人类飞起来前后[J]. 力学与实践, 2003, 25(6): 76-80.
- [6] 李艳平, 戴念祖. 漫话中国古代的飞行[J]. 力学与实践, 2004, 26(3): 90-92.
- [7] 李成智. 飞机百年发展与空气动力学[J]. 力学与实践, 2003, 25(6): 1-13.

首刊于《力学与实践》, 2005, 27(2): 90-94.



孤立波与孤立子

16

Chapter

大众
力学
丛书

现代自然科学正发生着深刻的变化，非线性科学贯穿着数理科学、生命科学、空间科学和地球科学，成为当代科学研究重要的前沿领域。孤立波与孤立子正是推动非线性科学发展的重要概念之一，而此概念最初的提出，正好又来源于流体力学的研究。孤立子起源于孤立波，它已在非线性光学、磁通量子器件、生物学、等离子体及光纤孤立子通信等一系列高科技领域有了令人瞩目的应用，所以了解孤立波与孤立子的研究历史，对于学习与研究力学史和科学史，均是很有必要的。

孤立波的发现历史

拉塞尔 (John Scott Russell, 1808—1882。注：曾有译为罗素，现根据周光坳先生所译，译为拉塞尔) (图 1) 是苏格兰一位优秀的造船工程师，对船体的设计有独到的见解，作过重要的贡献。1834 年 8 月为研究船舶在运动中所受到的阻力，他在爱丁堡格



图1 拉塞尔像

拉斯哥运河中，牵引船舶进行全尺寸
的实验与观测。最初，牵引船舶的动
力是两匹马，以后改用滑轮和配重系
统。在实验中，他观察到一种他称为
孤立行进波的现象。当时他骑着马追
踪观察一个孤立的水波，在浅水窄河
道中的持续前进，这个水波长久地保
持着自己的形状和波速。这一奇妙现
象的发现，就是孤立波和现今关于孤
立子研究的起始。

拉塞尔后来在做学术报告和发表文章时，是这样描述他的发现的：

“我把注意力集中在船舶给予流体的运动上，立刻就观察到一个非同寻常而又非常绚丽的现象，它是如此之重要，以致我将首先详细描述它所表现出来的外貌。当我正在观察一只高速运动的船舶，让它突然停止时，在船舶周围所形成的小波浪中，一个紊乱的扰动现象吸引了我的注意。在船身长度的中部附近，许多水聚集在一起，形成一个廓线很清楚的水堆，最后还出现一尖峰，并以相当高的速度开始向前运动，到船头后，继续保持它的形状不变，在静止流体的表面上，完全孤立地向前运动，成为一孤立行进波，直到河道的转弯处才开始消失。”

拉塞尔还继续生动地描述了他对这一现象所做出的反应：

“我立刻离开了船舶停留的地方，准备用步行去跟上它，却发现它运动得很快，我即刻骑上马，在几分钟之内赶上了它，并发现它以一均匀速度沿静止流体表面作孤独的运动。跟随它一英里多以后，我发现它开始逐渐衰减，并在运河的转角处最后消失。这一现象只要船舶快速行驶时，突然让它停止，就可以重复观察到。它是如此的重要和有趣，以致后来诱使我进行了许多有关水波课题的实验。”

为了进一步验证这一现象的存在并了解其性质，拉塞尔在1837年8月又在一长20英尺、宽1英尺的水槽中，进行了一系列受人工控制的实验，获得了与现场实验相同的结果。同时根据这些实验结果，他提出了孤立波的传播速度

$$c = \sqrt{g(h_0 + a)}$$

式中 g 是重力加速度， h_0 是静止水的初始深度， a 是孤立波的高度。

关于孤立波的争论与问题的解决

纵观力学和物理学的发展史不难看到，每当开始引入一种新思想或新概念的时候，往往会受到怀疑和非难，并常会引起激烈的争论，孤立波的命运也是如此。

当时科学界的权威们对拉塞尔的这些结果，一开始时就表示了怀疑和反对。甚至连当时对波动研究颇有造诣的英国天文学家艾里 (George Biddell Airy, 1801—1892) (图2) 爵士，与英国流体力学家斯托克斯 (George Gabriel Stokes, 1819—1903) (图3) 爵士



图2 艾里像



图3 斯托克斯像

也对此提出质疑，怀疑在静止水面上能存在不变形的行波。他们的怀疑的问题主要是：一个完整的波动为什么会全部在水面上，而不是一部分在水面上，一部分在水面下；波在传播的过程中，为什么波幅不会衰减；波的运动速度也与他们的研究结果不符。

这一争论延续到 19 世纪 70 年代才初步得到解决。1862 年和 1865 年巴津 (H. E. Bazin) 对孤立波进行了一系列的实验，证明了拉塞尔的工作是正确的。英国科学家瑞利 (John William Strutt Rayleigh, 1842—1919) (图 4) 在经过仔细的研究后指出，斯托克斯所研究的波，水深与波长之比接近于 1，而拉塞尔所发现的孤立波，这一比值接近于 0，他们二人研究的具体对象是有差别的，因此各自得到的波的传播速度也就不同。瑞利在 1876 年发表的著作中，首次使用了孤立波 (the solitary wave) 这一专门术语。他说“这就是拉塞尔先生给他描述的那个奇特的波起的名字” (拉塞尔在 1840 年的报告中称他发现的波为 A large solitary progressive wave)。



图 4 瑞利像

拉塞尔与艾里、斯托克斯的争论，最终在 1895 年由数学家科尔特弗 (D. J. Korteweg) 和他的学生德·弗里斯 (G. de Vries) 所解决。他们在小振幅与长波的假定下，从流体动力学导出了关于孤立波的方程 (后来称它为 KdV 方程)。这一方程的行波解，在波长趋于无限的情况下，正是拉塞尔所发现的孤立波。KdV 方程的提出，从理论上阐明了孤立波的存在，给这场争论画上了句号。

从拉塞尔的发现到 KdV 方程的提出，大约经历了 60 年时间，孤立波才为学术界普遍接受。拉塞尔当时已经知道了孤立波的一些重要性质，如：孤立波在传播过程中保持波形和速度不

变；两个孤立波碰撞时互相穿透且维持原来的波形和速度；孤立波的波幅愈高，其传播速度愈快；等等。

拉塞尔当时发现孤立波的河流，是流经在苏格兰、爱丁堡 Heriot-Watt 大学校园附近的 Union Canal。为纪念拉塞尔这一重要的科学发现，他当年发现孤立波的地方，已被列为历史名胜受到保护。英国 Heriot-Watt 大学在 1982 年曾举办了纪念拉塞尔逝世 100 周年学术讨论会，来自世界各地十多个学科的科学家的聚集一堂，热烈地交谈和讨论有关孤立波和孤立子的学术问题。

60 年寂静和重又活跃

虽然 1895 年 KdV 方程从理论上阐明了孤立波的存在，但当时学术界还没有能回答孤立波是否稳定；两个孤立波碰撞后其速度和波形是否改变；以及在流体以外的其他领域，孤立波是否存在等重大问题。

从 19 世纪末到 20 世纪中，关于孤立波的研究工作处在寂静时期，没有明显的进展。尽管在非线性电磁学、固体物理、流体动力学、神经动力学等学科中，相继提出了一些与孤立波有关的问题，但当时有关孤立波的已有知识，在新问题面前显得很不够用，且这些问题与应用数学之间相互促进的关系，也没有得到足够的重视。人们似乎已忘记了拉塞尔发现孤立波的重要意义。

经过了约 60 年的平静时期之后，1955 年由于费米 (Enrico Fermi)、帕斯塔 (John Pasta)、犹拉姆 (Stan Ulam) (以下简称 FPU) 发表了 “Studies of nonlinear problem” 一文，重新燃起了人们对孤立波的兴趣，使对孤立波的研究又活跃了起来。FPU 实验原先是要研究一维非线性动力学系统：一根一维的、连续分布的弦两端固定，将其分成 n 段，每段当成一个单元；并将每个单元简化成具有相同质量的质点，其间相互作用力包括线性和非线性

部分。FPU 在 Los Alamos 的 Maniac I 计算机上进行数值计算，出乎人们意料地得知能量集中在最低的振动模式。1965 年，美国普林斯顿大学的应用数学家 Martin D. Kruskal 和贝尔实验室的 Norman J. Zabusky 对 FPU 结果的进一步研究发现，若用弦的位移表示，它们正好满足 KdV 方程。图 5 表示两个 KdV 孤立波的碰撞，可以看到三个特点：孤立波在碰撞前后保持高度不变，像是“透明地”穿过对方；碰撞时两个孤立波重叠在一起，其高度低于碰撞前孤立波高度较高的一个（这表明在非线性过程中，不存在线性叠加原理）；碰撞后孤立波的轨道与碰撞前有些偏离（即发生了相移）。他们在数值实验中，既研究了两个孤立波的碰撞，也研究了四个孤立波碰撞，并首次引入“孤生子”（soliton）这一术语，用来描述这种具有粒子性质的孤立波。

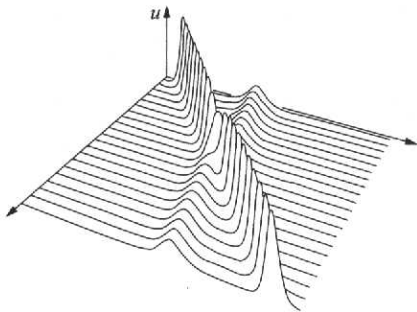


图 5 两个 KdV 孤立波的碰撞

之后，在固体物理、非线性电磁学和神经动力学等学科里也发现了与孤立波有关的问题，促使人们考虑在流体以外的领域，孤立波是否存在？若存在的话，其表示孤立波演化的微分方程应如何求解？这些问题引起了人们的关注。

目前在不同的著作中，孤立波和孤生子两者含意的区别，并不完全一致。多数作者称波形分布在有限的空间范围内，且具有弹性碰撞性质，即碰撞后保持原有的速度和波形的孤立波为孤生子。而对呈非弹性碰撞的一类，仍称为孤立波。还有的作者称 KdV 方程和

其他类似的方程的单孤立波解为孤立波，多孤立波解为孤立子。当然，也有作者认为，孤立波与孤立子两词沿用至今，已无严格的区别。而在物理学界，亦有人将孤立子简称为“孤子”。

从事孤立子理论研究的数学家们，多数采用以是否弹性碰撞来区分的意见。但物理学家，对孤立子的定义要宽松些，认为只要波的能量有限，且分布在有限的空间或时间范围内，即使在传播过程中波形发生变化(例如光纤中的高阶光孤立子)，也都称为孤立子。

孤立子研究进展及其应用

20世纪60年代以来，孤立子的研究有了突飞猛进的发展。除了在流体，还在固体物理、激光、电气工程、等离子体、生物学等领域相继发现了孤立子的存在。而且在数学领域，逆散射方法的提出与推广，也为求解孤立子演化方程提供了有力的数学工具。1972年夏天在美国召开了一次时间长达3周半的孤立子学术讨论会，来自数学、力学、物理学、电气工程、生物学、地质、地球物理等十多个学科的学者聚集在一起，交流对孤立子研究的进展和经验。

由下面的几个例子可看出孤立子研究及其应用的新进展：

在超导研究方面，约瑟夫逊(Brian D. Josephson)效应中的磁通量子实际上就是孤立子，于是将孤立子的研究方法引入进来，现已促进在研发耗能特别小、速度特别快的新型计算机器件上有新进展。

在生物学方面，发现了达维多夫(A. S. Davydov)孤立子，探讨了生物体蛋白质中孤立子的传播问题，为弄清肌肉收缩的机制提供了有力的途径。

孤立子在高科技方面最具代表性的成功应用，是光纤中的光孤立子(亦称光孤子)。它具有长距离传输损耗小、无需中继站、

比特率(单位时间传输的信息量)高等优点。联合国教科文组织、国际原子能机构和国际理论物理中心,于1995年2月在意大利联合召开了“光纤中超速传输系统”会议,其内容主要是讨论光纤中的孤生子问题。现普遍认为,光纤孤生子通信有望成为超高速率和超长距离通信的重要手段。

结语:170年历史的启示

从1834年流体运动中孤立波地发现,至今正好已有170多年的历史。60年的争论、60年的寂静,和当今在多学科、多领域的重要应用,充分说明了力学基础研究的重要性。力学中基本规律的发现与研究,有极其深刻的意义。

以史为鉴,由这段170年的历史不难看出:那种用急功近利的眼光,来看待力学基础的研究和教学,显然是违背科学史和短视有害的。

参考文献

- [1] 武际可. 力学史[M]. 重庆:重庆出版社,2000.
- [2] 周光炯,严宗毅,许世雄,等. 流体力学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2000.
- [3] 黄景宁,徐济仲,熊吟涛. 孤子:概念、原理和应用[M]. 北京:高等教育出版社,2004

首刊于《力学与实践》,2005,27(5):86-88.

现在去医院作血液测试的项目之一，已不再是“血黏度检查”，而是“血液流变学检查”（简称血流变）。为什么会有这样的变化呢？这就要从非牛顿流体谈起。

英国科学家牛顿于 1687 年，发表了以水为工作介质的一维剪切流动的实验结果。实验是在两平行平板间充满水时进行的（图 1），下平板固定不动，上平板在其自身平面内以等速 v 向右运动。此时，附着于上、下平板的流体质点的速度，分别是 v 和 0，两平板间的速度呈线性分布，斜率是黏度系数。由此得到了著名的牛顿黏性定律：

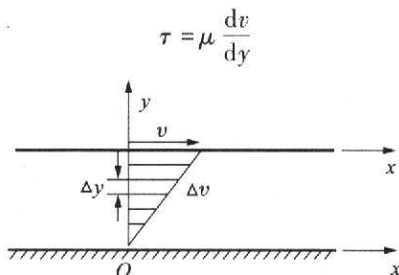


图 1 两块相对运动平板之间的流体

式中 τ 是作用在上平板流体平面上的剪应力， dv/dy 是剪切应变率，斜率 μ 是黏度系数。

斯托克斯 1845 年在牛顿这一实验定律的基础上，作了应力张量是应变率张量的线性函数、流体各向同性及流体静止时应变率为零的三项假设，从而导出了广泛应用于流体力学研究的线性本构方程，以及被广泛应用的纳维 - 斯托克斯方程（简称纳斯方程）。

后来人们在进一步的研究中知道，牛顿黏性实验定律（以及在此基础上建立的纳斯方程），对于描述像水和空气这样低分子量的简单流体是适合的，而对描述具有高分子量的流体就不合适了，那时剪应力与剪切应变率之间已不再满足线性关系。为区别起见，人们将剪应力与剪切应变率之间满足线性关系的流体称为牛顿流体，而把不满足线性关系的流体称为非牛顿流体。因为对血液而言，剪应力与剪切应变率之间不是线性关系，已无法只测一个点，给出斜率（即黏度系数）来说明血液的力学特性，只好作血流变学测试，测三个点，才能对血液给出剪应力与剪切应变率之间的非线性曲线关系。

形形色色的非牛顿流体

早在人类出现之前，非牛顿流体就已存在，因为绝大多数生物流体都属于现在所定义的非牛顿流体。人身上的血液、淋巴液、囊液等多种体液，以及像细胞质那样的“半流体”，都属于非牛顿流体。

近几十年来，促使非牛顿流体研究迅速开展的主要动力之一，是聚合物工业的发展。聚乙烯、聚丙烯酰胺、聚氯乙烯、尼龙 6、PVS、赛璐珞、涤纶、橡胶溶液、各种工程塑料、化纤的熔体、溶液等，都是非牛顿流体。

石油、泥浆、水煤浆、陶瓷浆、纸浆、油漆、油墨、牙膏、

家蚕丝再生溶液、钻井用的洗井液和完井液、某些感光材料的涂液、磁浆、泡沫、液晶、高含沙水流、泥石流、地幔等也都是非牛顿流体。

非牛顿流体在食品工业中也很普遍，如番茄汁、淀粉液、蛋清、苹果浆、菜汤、浓糖水、酱油、果酱、炼乳、琼脂、土豆浆、融化巧克力、面团、米粉团以及鱼糜、肉糜等各种糜状食品物料。

综上所述，在日常生活和工业生产中，常遇到的各种高分子溶液、熔体、膏体、凝胶、交联体系、悬浮体系等复杂性质的流体，差不多都是非牛顿流体。有时为了工业生产的目的，在某种牛顿流体中加入一些聚合物，在改进其性能的同时，也将其变成非牛顿流体，如为提高石油产量使用的压裂液、新型润滑剂等。

现在也有人将血液、果浆、蛋清、奶油等这些非常黏稠的液体，牙膏、石油、泥浆、油漆、各种聚合物(聚乙烯、尼龙、涤纶、橡胶等)溶液等非牛顿流体，称为软物质。

非牛顿流体的奇妙特性及应用

1. 射流胀大

如果非牛顿流体被迫从一个大容器，流进一根毛细管，再从毛细管流出时，可发现射流的直径比毛细管的直径大(图2)。射流的直径与毛细管直径之比，称为模片胀大率(或称为挤出物胀大比)。对牛顿流体，它依赖于雷诺数，其值约在0.88~1.12之间。而对于高分子熔体或浓溶液，其值大得多，甚至可超过10。一般来说，模片胀大率是流动速率与毛细管长度的函数。

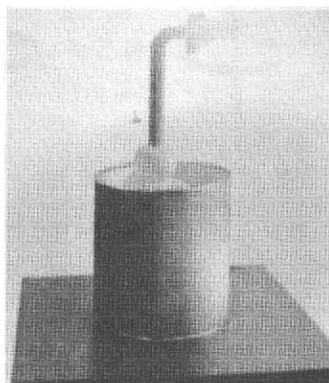


图2 奶酪生产情景：奶酪从管中流出后马上胀大

模片胀大现象，在口模设计中十分重要。聚合物熔体从一根矩形截面的管口流出时，管截面长边处的胀大，比短边处的胀大更加显著。尤其在管截面的长边中央胀得最大。因此，如果要求生产出的产品的截面是矩形的，口模的形状就不能是矩形，而必须是四边中间都凹进去的形状。

这种射流胀大现象，也叫 Barus 效应，或 Merrington 效应。

2. 爬杆效应

1944 年 Weissenberg 在英国伦敦帝国学院，公开表演了一个有趣的实验：在一只盛有黏弹性流体（非牛顿流体的一种）的烧杯里，旋转实验杆，黏弹性流体，会向杯中心流动，并沿杆向上爬，液面变成凸形，甚至在实验杆旋转速度很低时，也可以观察到这一现象（图 3）。而对于牛顿流体，由于离心力的作用，液面将呈凹形。

爬杆效应也称为 Weissenberg 效应。在设计混合器时，必须考虑爬杆效应的影响。同样，在设计非牛顿流体的运输泵时，也应考虑和利用这一效应。

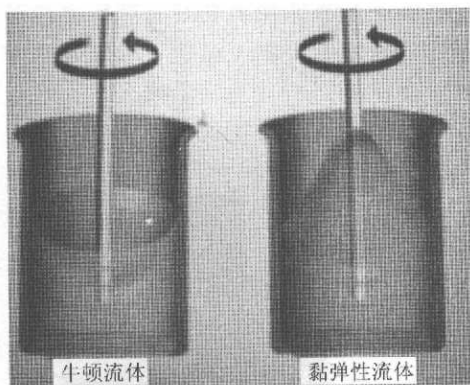


图3 爬杆效应实验

3. 无管虹吸

对于牛顿流体来说，在虹吸实验时，如果将虹吸管提离液面，虹吸马上就会停止。但对高分子液体，如聚异丁烯的汽油溶液和百分之一的 POX 水溶液，或聚醚在水中的轻微凝胶体系等，都很容易表演无管虹吸实验。将管子慢慢地从容器拔起时，可以看到虽然管子已不再插在液体里，液体仍源源不断地从杯中抽出，继续流进管里。甚至更简单些，连虹吸管都不要，将装满该液体的烧杯微倾，使液体流下，该过程一旦开始，就不会中止，直到杯中液体都流光。这种无管虹吸的特性，是合成纤维具备可纺性的基础(图4)。

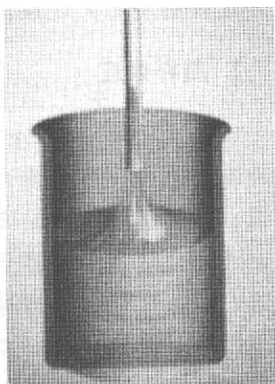


图4 无管虹吸：对于化纤生产有重要意义

4. 湍流减阻

非牛顿流体显示出的另一奇妙性质，是湍流减阻。人们观察到，如果在

牛顿流体中加入少量聚合物，则在给定的速率下，可以看到显著的压差降。图5给出了两种不同浓度的聚乙烯的氧化物溶液的管摩擦系数 f 对于雷诺数 Re 的关系曲线。湍流虽然一直是困扰理论物理和流体力学界未解决的难题，然而在牛顿流体中加入少量高聚合物添加剂，却出现了减阻效应。有人报告：在加入高聚合物添加剂后，测得猝发周期加大了，认为是高分子链的作用。

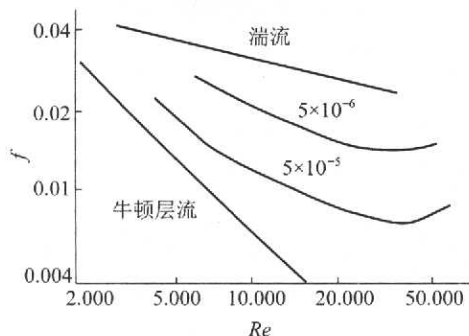


图5 湍流减阻

减阻效应也称为 Toms 效应，虽然其道理尚未弄得很清楚，却已有不错的应用。在消防水中添加少量聚乙烯氧化物，可使消防车龙头喷出的水的扬程提高 1 倍以上(图6)。应用高聚合物添加剂，还能改善气蚀发生过程及其破坏作用。

非牛顿流体除具有以上几种有趣的性质外，还有其他一些受到人们重视的奇妙特性，如拔丝性(能拉伸成极细的细丝，可见“10. 春蚕到死丝方尽”)，剪切变稀(可见“18. 腱鞘囊肿治愈记”)，连滴效应(其自由射流形成的小滴之间有液流小杆相连)，液流反弹等。

由于非牛顿流体涉及许多工业生产部门的工艺、设备、效率和产品质量，也涉及人本身的生活和健康，所以越来越受到科学工作者的重视。1996年8月在日本京都国际会议中心召开的第19届国际理论与应用力学大会(IUTAM)上，非牛顿流体流动是

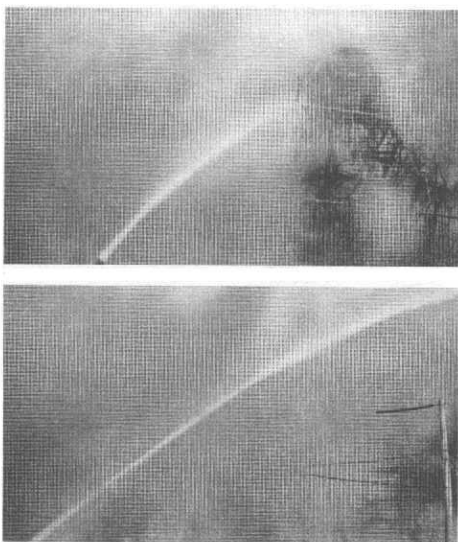


图 6 湍流减阻：在同样动力下消防水
龙头喷水图

上图为未添加聚乙烯氧化物的情形，
下图为添加聚乙烯氧化物后的情形

大众
力学
丛书

大会的 6 个重点主题之一，也是流体力学方面参与最踊跃的主题。Grochet 邀请报告的观点是，高分子溶液和熔体的特性远异于牛顿流体，并认为对这些异常特性的研究，都是带有挑战性的课题。

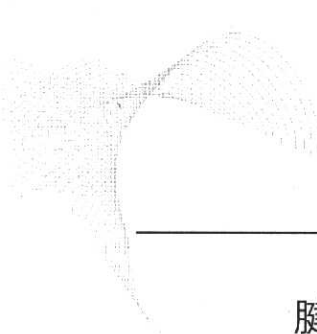
参考文献

- [1] 王振东，武际可. 力学诗趣[M]. 天津：南开大学出

版社，1998.

- [2] 王振东. 非牛顿流体[M]//彩图科技百科全书编辑委员会. 彩图科技百科全书: 第一卷. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.
- [3] 陈文芳. 非牛顿流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

首刊于《力学与实践》, 1998, 20(1): 72-74.



腱鞘囊肿治愈记

——漫谈材料的触变性

18
Chapter

大众
力学
丛书

笔者左手腕(小指一侧)有3次开刀留下的疤痕,它记录了1963—1966年在天津市睦南道西口的天津医学院附属第一中心医院,切除腱鞘囊肿的3次外科门诊手术和最后治愈的经过,这里有一段巧遇著名医学权威鲜为人知的有趣故事。

1963年笔者正在天津马场道上的河北大学数学系任教,左手腕(小指一侧)鼓起了一个疱,越长越大,还越来越硬,由于压迫神经,左手臂已感到发麻,第一中心医院诊断为腱鞘囊肿,进行了门诊手术切除,留下一条约2 cm的疤痕。过了一年左右,在原刀口附近,腱鞘囊肿又复发,再去医院做了第2次门诊切除手术。又过了一年左右,再次复发,第3次切除了腱鞘囊肿。就这样在左手腕的小指一侧,先后留下了3条2 cm左右的疤痕。

1966年的秋天,左手腕的腱鞘又鼓出了疱,一天中午再去这家离河北大学不远处的医院外科就诊。匆忙中没带挂号证卡片,花5分钱到挂号处查找病历,却查出了在这家医院就诊的竟有16位同姓名“王振东”的病历,再以年龄和职业,才找到我那份动过3次门诊手术的病历。因正是午休,大夫还没上班,只

有一位头发斑白的老人在诊室打扫卫生。他问看什么病？听我叙述三次手术、现又复发后，说他会治，并问敢不敢让他看？我说敢！他在我的病历本上画了腱鞘囊肿示意图（图1），并告知就是再次手术，仍然会复发，只要用右手去揉它，揉揉就会软了，慢慢会好的，不必再做手术。

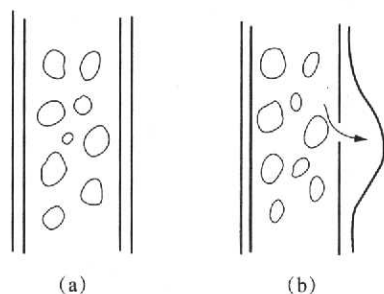


图1 腱鞘囊肿示意图

老人通过画的示意图告知：囊液是骨头之间的润滑液，正常情况下，囊液包在两层膜内流动（图1a）；发生囊肿时，靠里的一层膜因某种原因破损了一个小口，囊液就会通过此缺口流出，将另一层膜鼓起泡来（图1b）；所流出的囊液静止在泡中，慢慢会硬结，成为囊肿瘤。由于手腕处骨头很多也很小，包住骨与囊液的膜的形状很复杂。手术能切掉硬结的囊肿瘤，但很难将原破损的小缺口完全缝好，所以囊液还会慢慢从没缝好的缺口处流出，再形成囊肿。而硬结的囊液，只要揉揉就会软化，囊液还可从原缺口挤回骨腔中。没有囊液挣开的膜破损处，自己也会愈合，经常揉又能创造使膜自行修复的良好环境。

按照这位老人说的办法，笔者用揉的办法治愈了腱鞘囊肿。后来又曾复发过几次，也都是揉好的。

以后才知道，这位老者是我国著名外科权威张纪正教授（1905—1984），当时被“文革”剥夺了医疗的权力，被分派打扫卫生。

笔者是在北京大学力学专业流体力学专门化毕业的，当时听张纪正教授讲述囊液的运动时，从流体力学角度，似乎懂了这一道理。但为什么囊液静止时会硬结，而受剪切力(揉，就是给予剪切力)又会软化的道理，是后来学习研究流变学时，才完全弄明白的。

英国科学家牛顿于 1687 年提出，水在作一维剪切流动时，其剪应力与剪应变成正比关系。后来发现，只有水和空气等简单流体，才满足这种剪应力与剪应变的线性关系，它们也因此被称为牛顿流体。生活和生产中遇到的大多数流体属于非牛顿流体，它们在作一维剪切流动时，其剪应力与剪应变率之间，呈非线性关系。

血液、果浆、蛋清、奶油等这些非常黏稠的液体，都是非牛顿流体；牙膏、石油、泥浆、油漆、各种聚合物(聚乙烯、尼龙、涤纶、橡胶等)溶液也都是非牛顿流体。通常，这些物质也称为软物质。

与牛顿流体相比，非牛顿流体有许多奇妙的特性，剪切变稀就是其奇妙特性之一。

从一个简单的管流对比实验(图 2)，可以说明非牛顿流体的剪切变稀现象。在直径和长度完全相同的两根垂直管中，分别放置牛顿流体(N)(例如甘油的水溶液)和高分子溶液(P)(例如聚丙烯酰胺水溶液)。开始实验时，两者液面相平，同时打开下边的阀门，让两流体流出。第一阶段，P 流得较快，液面低于 N；但当管中只剩下少量液体时，N 液面反低于 P 液面，并且先流空。这个实验说明：在高液位的高剪应力下，高分子溶液由于剪切变稀，黏度变得比牛顿流体的黏度小，液面下降得较快；但随着液面下降，剪应

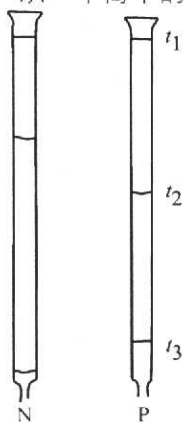


图 2 管流对比实验

力变小，使高分子溶液的黏度又超过牛顿流体的黏度，下降变慢，最后反而迟流完。

实际上，不少非牛顿流体的黏度，不仅依赖于剪应力，而且依赖于剪应力作用的持续时间。如果剪应力持续作用保持常数，而黏度随时间减小，则将这种明显表现剪切变稀现象的流体，称为触变流体。

还有些材料，既具有固体特性，也具有液体的特性（比较准确地说，应叫做流变体），其触变特性更加明显。水田土壤就是一个例子，当水田土壤在机械作用下受到不断扰动后，结构逐渐被破坏，强度逐渐下降，变得较稀而较易流动。当停止机械作用的扰动，经过一段时间，它又能逐渐恢复原状。

人们对材料触变性的认识，目前还不够深刻，解释也多种多样。比如有：

材料的触变性，是指它在被剪切时逐渐变稀，而在剪切停止后又逐渐变稠。如果没有温度变化，这个过程是可逆的。

触变性，是材料在机械作用下，由固体转化为液体时的一种属性。或者，如果它原来就是液体，则机械作用使它变得更易流动。

触变是一种等温的、可逆的、与时间有关的过程，此过程在成分和容积不变的条件下发生。具有这种性质的材料，在静止时硬化，在受剪切时软化或液化。

尽管说法各有不同，但都在认为，触变现象是某些流变体在机械作用下，所呈现的一种内部结构的变化过程。已有人提出了基于结构概念的触变理论。

现在再回头来看囊液或囊肿瘤，它正是一种具有触变性的流变体材料。囊液在静止时会硬化，而在被剪切时会软化，且变稀并较易流动，这正是典型的触变现象的特征。“揉”（róu），在汉语字典中的解释，是回旋地按、抚摩，从力学上说，就是在持续地施加剪切力。“揉揉就会软了，慢慢会好的”，正是著名外

科专家张纪正先生对囊液触变性的一种纯朴的认识和说法。

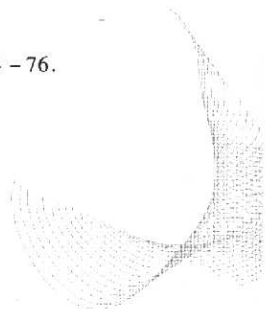
在笔者治愈，并从流变学角度，对囊液的触变性有了进一步了解之后，曾多次对在关节处类似患有囊肿的亲戚朋友和同事，讲述亲身的经历和认识。他们用揉的方法，也都治愈、康复了。

实验中还发现，还有的流体能够表现出与触变流体相反的反应，这类流体称为反触变（震凝）流体。在一个常剪切率的作用之下，反触变流体的黏度，是随时间而增加的。碱性的丁腈橡胶的乳胶悬浮液，就是反触变流体的一种。通常这种溶液，呈一种类似于液体的乳状，但如果让它受到剪切作用一个长时间之后，将变成一种类似于弹性体的状态；然后如果将其静置，则它将重新回复到液体状态。

参考文献

- [1] 王振东. 奇妙的非牛顿流体[J]. 力学与实践, 1998, 20(1): 72-74.
- [2] 王振东. 从胰鞘囊肿谈起[J]. 力学与实践, 2000, 22(3): 74-76.
- [3] 陈文芳. 非牛顿流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [4] 江体乾. 工业流变学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995.

首刊于《力学与实践》，2000，22(3)：74-76。



在常温常压下，物质可分为固体、液体和气体三种状态，也称为三个相。如水蒸气、水和冰，就是三个相。任何人都容易使用一台冰箱和一个低浅容器，将水（液体）冻成冰（固体），然后又可再取出冰（固体）来加热，使其化成水（液体）。但是，你能在几秒钟或更短的时间内，将液体固化，然后又将其液化吗？

“T-1000 型终结者”，是在电影“终结者之二：世界末日（Terminator2: Judgment Day）”里出现的科学幻想机器人。它几乎是不可摧毁的，能够毫不费力地使液态和固态相互转换。它的液态金属皮肤，如果被子弹射穿，就能马上使弹孔融合；如果被打成碎片，也能马上熔化，并再凝结恢复为原样。这样的科学幻想能实现吗？电流变或磁流变液体，正好为影片制作者的这一科学幻想，提供了实现的可能。

本文将介绍能实现这种科学幻想的智能性材料——电流变液体和磁流变液体。它们是一种在电场或磁场里，可发生状态变化的物质。根据其所受场强的不同，它们可像水一样流动，也可像

蜂蜜那样黏稠，还可以像骨胶一样固化。而这种物质，从一种状态转变为另一种状态，所需时间又很短。

磁流变制动器的小实验

简单的磁流变制动器的示意图如图 1 所示。实验用的磁流变液体 (magnetorheological fluids, 以下简称 MRF) 由铁屑和玉米油组成。用放大镜能鉴别出铁屑的单个颗粒，但其长度应全部小于 0.5 mm。MRF 由按质量计的 25 份玉米油对 100 份铁屑搅拌混合而成。

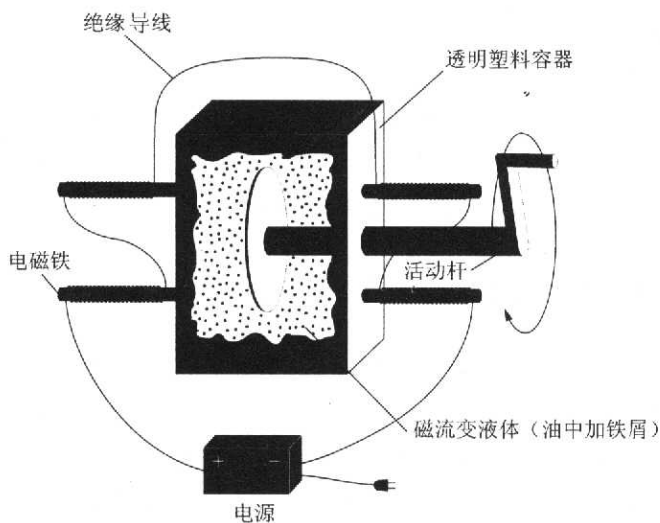


图 1 磁流变实验器示意图

杆由不可能被磁化的材料做成，如塑料或铝。为更好地观察实验结果，可用一塑料盘与位于 MRF 中的杆端相连接。杆与透

明塑料容器间放橡胶环，以使液体不泄漏。电磁铁可用几伏特的电源供电，或用强有力的永久磁铁来取代。

在未施加磁场之前，杆的旋转几乎没有阻力；当磁场加上时，液体马上就固化了，杆已很难转动；但一旦去除磁场，容器内的 MRF 材料又立即液化，杆又可自由旋转了。这就是花钱虽不多，却能在几秒钟之内将液体固化，然后又将其液化的磁流变制动器的小实验。

电流变液体及其性能

美国科学家 W. M. Winslow 在 1947 年，以专利形式公布了他以 8 年时间研究发现的电流变液体 (electrorheological fluids, 以下简称 ERF)。他将一些半导体型的固体颗粒，分散在低黏、绝缘性良好的油中，再添加一些分散剂，制得悬浮体。当加上一定的电场场强时，很薄一层 ERF 的表观黏度，就能增大几个数量级，甚至出现明显的固化现象。当去掉电场后，液体的表观黏度又迅速恢复原样。后来，人们将这种可逆的黏度突变效应，称为电流变效应，或 Winslow 效应。

但对 ERF 引起重视，却是 20 世纪 80 年代之后的事。这主要是人们逐渐看到了 ERF 有许多可供发展的技术和工程应用的奇异性能。这些可被利用的主要特性是：

(1) 在电场作用下，液体的表观黏度或剪应力能有明显的突变，可在毫秒瞬间产生相当于液态属性到固态属性间的变化。

(2) 这种变化是可逆的，即一旦去除电场，可恢复到原来的液态。

(3) 这种变化是连续和无级的，即在液 - 固、固 - 液的变化过程中，表观黏度或剪应力是无级连续变化的。

(4) 这种变化是可控制的, 并且控制变化的方法简单, 只需加一个电场; 所需的控制能耗也很低。因此运用微型计算机进行自动控制有广阔的前途。

由以上奇异的特性, 人们将 ERF 称为“智能性材料”, 也有人称它为“聪明流体”。

今天的电流变液体, 已不再是 20 世纪 40 年代时那种较简单的混合物。除了介电常数和黏度较低的基液和极化特性很高的固体微粒两种关键成分之外, 往往还含有活化剂和分散剂。分散剂的作用是防止微粒在无电场时相互粘合, 活化剂的作用机制还不完全清楚。活化剂(往往使用水, 有时用酒精)里含有杂质, 通常是溶解盐。一般认为, 水受油质悬浮液排斥, 而聚集在微粒表面, 而溶解盐在电场作用下被极化, 其电荷增强了微粒的固有极化。

电流变液体是有复杂性质的悬浮体系, 是一种典型而又复杂的非牛顿流体。

1987 年以前, ERF 研究只在美、英和苏联等少数国家保密进行, 目前世界上已有美、英、日、德、法、俄和我国等十多个国家在进行研究。对电流变现象的机理, 已了解得越来越清楚, 在 ERF 材料的选择上也有长足的进展。对 ERF 的工程应用, 提出了许多诱人的设想。

电流变现象的机理

电流变现象之所以引起科学家们的极大兴趣, 不仅因为 ERF 这种材料具有实用的物理性能, 而且还因其有错综复杂的结构。当流体自由流动时, ERF 中微粒的运动相互之间没有关系; 当液体在电场作用下变成固态时, 微粒连结成肉眼可见的细链和粗柱状, 见图 2。

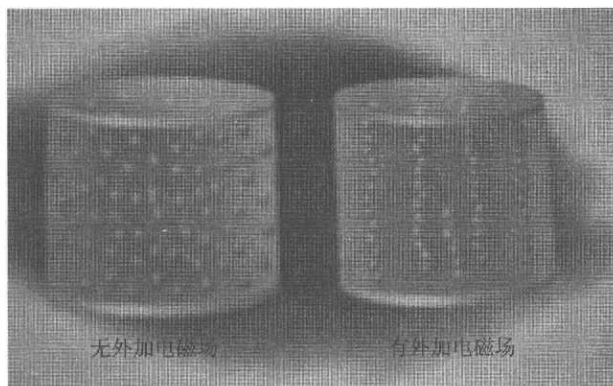


图2 电流变机理示意图

微粒在电场的作用下，不论其运动方向如何，其两极或上或下始终指向电极，从而使微粒吸合在一起，首尾相连，排列成行，构成长链。这种情况，就好像铁屑在磁场作用下沿磁力线(磁感线)的排列一样。电流变液体内的微粒链迅速形成，并在容器内从一端延伸至另一端，这就是流体迅速固化的关键因素。

实验中发现，柱状体的形成要比预期的快，这与微粒的布朗运动有关。布朗运动是1827年由苏格兰植物学家R.布朗首先发现的液体内悬浮微粒不停顿的随机运动，其成因是微粒和大量液体分子之间的碰撞。在ERF中，悬浮微粒在受到液体分子从各方面的冲撞时，就围绕其在链中的平均位置作不规则运动。因此，尽管微粒链总的来说可能是直线，但在某一时刻，却因布朗运动的影响而发生弯曲。这种轻微变形，却又增强了各链之间的互相吸引力，并促使各链聚集成柱状体。

ERF在电场作用下固化后可承受机械力。像其他固体材料那样，其发生破坏的应力称为屈服应力。此时微粒链断裂，材料开始流动。为了某种工程应用，希望屈服应力尽可能大些。但在研究过程中，人们还不满意现有的ERF，因为它的屈服应力不够

高。近几年已开始研究屈服应力更高的磁流变液体(MRF)。流变学是研究材料流动与变形的学科,深入地研究这些问题,正是流变学的研究范围。

令人振奋的应用前景

电或磁流变液体的应用前景,是十分令人振奋的。已见到申请专利的元器件,有离合器、液压阀、减振器等。下面将就其原理作一简单的介绍。

1. 电流变离合器

将电流变液体充于两个圆筒或平板之间。当ERF形成固态时,就迫使传动轴转动;而当它变成液态时,就使发动机脱离传动轴,而自由旋转,好像处于空挡一样(图3)。两个筒或板之间的转速比,也可以调节。这样的离合器几乎不存在零件磨损,或损坏的问题。而且这样的离合器结构简单,噪声低,反应时间仅为千分之几秒,是纯机械的离合器所望尘莫及。

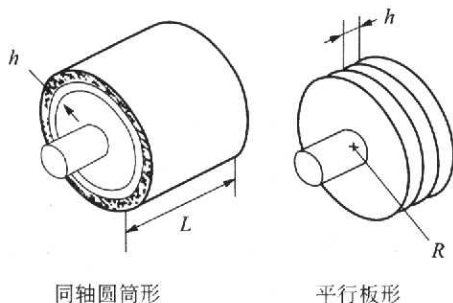
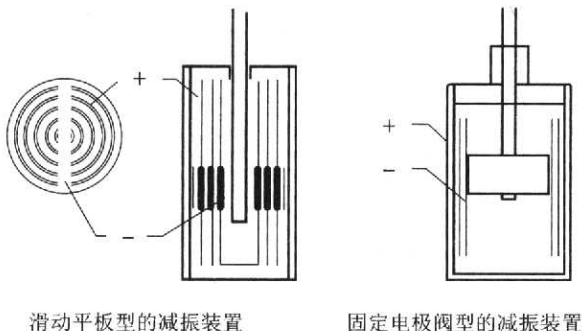


图3 同轴圆筒形和平行板形的离合器

2. 电流变减振器

同心圆筒固定电极阀式减振器(图4),在同心圆筒间充满ERF,来源于电流变效应的阻力,阻止了流体在同心圆筒间的流动。当活塞(内圆筒)运动时,微型计算机可以立即调节电极电压,以改变ERF的黏稠度。如用在汽车上,毫秒级时间的迅速反应,有可能在活塞运动冲程的中途,就提高了流体的黏稠度,以减缓因道路不平而造成的颠簸。随后,流体又可变稀,再迅速复原。因此一种减振器,就可适合各种车辆和工作环境。



滑动平板型的减振装置

固定电极阀型的减振装置

图4 电流变减振器示意图

滑动平板型减振器,是在两滑动板间充满ERF。来源于两滑动板间流体电流变效应的阻力,产生剪切力,并由此引起压力增大。

3. 电流变液压阀

将电流变液体注入一狭缝容器中,通过电场控制ERF的黏稠度,以起到节流阀和开关的作用。当ERF固化时,就使流动完全停止,从而关闭了流经细管段的液流。这种电流变液压通路“阀”(图5),也可以设计成同轴圆筒形或平板形。还可将几个

ERF 通路，按一定的方式组合在一起，做成特殊用途的装置。液压系统有希望采用 ERF 通路“阀”，而成为新的液压系统，它比传统的液压系统反应还要迅速。

4. 机器人的活动关节

在机器人领域中，可用 ERF 制造出体积小、反应快、动作灵活、直接用微型计算机控制的活动关节。如今，简易的机器人已在从事工业中的许多工作。如果有非常灵巧的电流变活动关节，就可以完成能

迅速做出反应的更复杂的事，比如说接棒球、绕精细金属丝等。“T-1000 型终结者”那样的科幻机器人，将会更早地出现。

目前有人提出，寻找一种既具有电流变效应，又具有磁流变效应的微粒，制造电磁流变液体 (EMRF)。这种粒子和悬浮液，不仅可以受电场的作用，产生电流变效应；而且还可以受磁场的作用，产生磁流变效应。电流变液体、磁流变液体、电磁流变液体的研究和技术刚刚开始，还没有进入成熟的阶段，从基础理论到应用技术，都还有许多问题有待研究解决。但可以预期：电磁流变液体这一高新技术，必将促使新一代的机电一体化器件出现，并会在汽车、机械、航空、航天、石油、化工和其他工业部门，得到广泛应用。

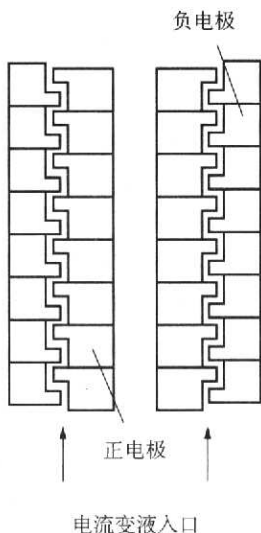
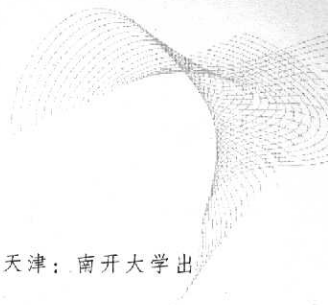


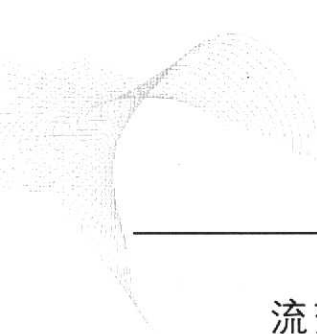
图5 电流变通路“阀”示意图



参考文献

- [1] 王振东, 武际可. 力学诗趣[M]. 天津: 南开大学出版社, 1998.
- [2] Klingenberg D J. 用磁铁将液体制成固体[J]. 鲁兰, 译. 科学, 1994(2): 75-76.
- [3] Halsey T C. Martin J E. 电流变液体[J]. 董淳, 译. 科学, 1994(2): 29-33.
- [4] 郝田, 陈一泓. 电流变学研究进展[J]. 力学进展, 1994, 24(3): 315-335.

首刊于《力学与实践》, 1998, 20(6): 74-76.



流变学的研究对象

20

Chapter

大众
力学
丛书

流变学是研究材料的流动和变形的科学，它是一门介于力学、化学、物理与工程科学之间的新兴交叉学科。这里所说的材料既包括流体形态，也包括固体形态的物质。在常温常压下，物质可分为固体、液体和气体三种状态；特殊情况下，还有等离子态和超固态。气体和液体又合称为流体。从力学分析的角度，通常认为流体与固体的主要差别，在于它们对于外力的抵抗能力不同。固体有能力抵抗一定大小的拉力、压力和剪切力。当外力作用在固体上时，固体将产生一定程度的相应变形。固体静止时，可以有法向应力和切向应力。而流体在静止时，则不能承受切向应力，微小的剪切力将使流体产生连续不断的变形。只有当剪切力停止作用时，流体的变形方会停止。流体这种在外力作用下连续不断变形的宏观性质，通常称为流动性。

一般认为，英国物理学家胡克于1678年首先提出了在小变形情况下，固体的变形与所受的外力成正比。这一弹性体变形与应力关系的基本规律，后来称为胡克定律。英国科学家牛顿在1687年最先提出了流体的应力和应变率成正比，后来称为牛顿

黏性定律，并将符合这一规律的流体称为牛顿流体，其中包括最常见的流体——水和空气，而将不符合这一规律的流体称为非牛顿流体。上述两定律是在 17 世纪发表的，但直到 19 世纪末才由柯西、纳维、斯托克斯等人推广到三维变形和流动，并为科学界广泛接受。从那以后，胡克弹性固体力学和牛顿流体力学随着它在许多工程分支学科中的应用，而得到巨大的发展。但是流变学通常并不包括对上述两种情况的研究，流变学要研究更加复杂的材料。

1. 流动的固体——流变学的研究对象之一

流动的固体，是指弹性形变与黏性流动同时存在的物体。“弹性形变”是指短暂的、能恢复原状的形变。而“黏性流动”是指持续的、不能恢复原状的形变，它也被称为“流变”。过去一般谈固体时，是指只有弹性形变的物体；谈到流体时，是指只有黏性流动的流体。实际上，同时具有这两种性质的物体是很多的。

用钢棒和沥青棒作如下的实验(图 1)。将钢棒放在两支点上，棒的正中间放一重物，此时钢棒弯了；当重物取走时，弯曲了的钢棒能完全恢复原状(图 1a)。钢棒此时是弹性形变。将沥青棒放到两支点上，如图 1b 那样，中间也放一重物。重物放置一段时间后取走，沥青棒稍恢复了一点，但并没恢复原状，还是弯的。这里的沥青棒，除有弹性形变外，已有了流变。如在沥青棒中间用手快速按一下，抬起手后，它能恢复原状，表现出很好的弹性。但若手按下较长时间再抬起，就已不能恢复原状。同是一根沥青棒，迅速按一下，它是弹性体；较长时间地按，又显现有流体的性质。

实际上很多物体，当外力作用的时间小于某一时间时，物体表现出弹性；当外力作用的时间大于这一时间，物体就会流变。这个时间就叫做物体的“缓和时间”。缓和时间是一个时间阈

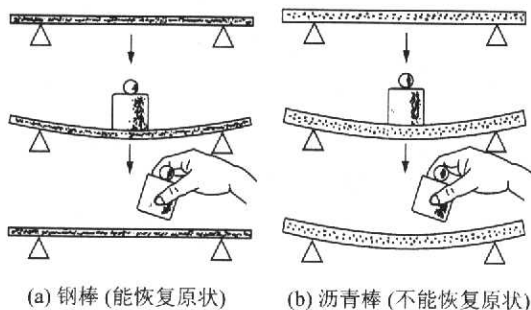


图1 钢棒与沥青棒的变形

值，当外力作用时间超过此阈值时，物体的弹性就会“缓和”而产生流变。弹性体与流体之所以不同，也可认为只是其缓和和时间不同而已。缓和时间无限长的物体，是理想的弹性体；缓和时间等于零的物体是理想的流体。具有弹性和黏性混合性质的物体，其缓和时间既不为零，也不是无穷大，它们就是可流动的固体，或者是有弹性的流体。

固体表现出流动的性质，除了外力作用时间的因素外，还有温度的因素。当温度不断升高时，大部分物体都会要流变，表现出流体的性质。

金属由应力引起的应变随时间变化的流动现象，称为蠕变。通常，升高温度或增加应力会使蠕变加快并缩短达到断裂的时间。金属材料在恒拉应力作用下，经过一定的时间 t_f 以后发生断裂的现象，称作蠕变断裂。在土木工程中，土地基的流变可延续数十年之久。地下隧道竣工数十年之后，仍可出现蠕变断裂。固体材料的蠕变是流变学研究的重要课题。

现代工业需要耐高温、耐蠕变的高质量的金属、合金、陶瓷和高强度的聚合物，因此与固体蠕变断裂有关的流变学分支会迅速发展起来。核工业中核反应堆和粒子加速器的发展，也为研究辐射产生的流变打开了新的领域。

在地球科学中，人们很早就知道时间过程这一重要因素。当

观察地质断面时，可以看到岩石有皱纹的褶曲结构，这是岩石在流动的证(图2)。在几亿年的地质年代里，岩层受着横向的力而流变成褶曲形状。在江西庐山芦林桥附近，有一处“第四纪冰川遗迹”已立碑成为向旅游者展示岩石也在流动的景点(图3)。有人曾测量计算过冰川的黏性，大约是混凝土的100万倍；而混凝土的黏性，大约是水的100亿倍。可见无论冰川是多么

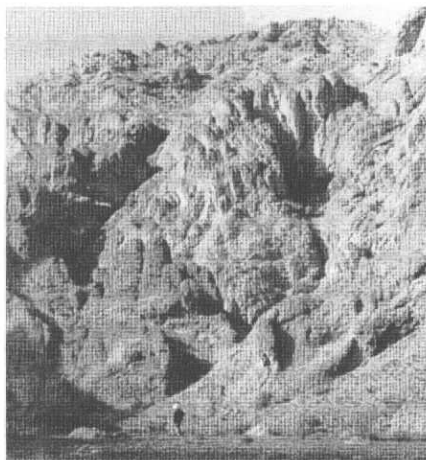


图2 自然界中整个地质年代里的蠕变，岩石的流动尚在继续中

“黏”，多么难于流动，然而经过几千年、几万年，终究还是在慢慢地向下流动着。流变学为研究地壳中有趣的地球物理现象(如冰川期以后的上升、层状岩层与褶皱、造山作用、地震成因以及成矿作用等)提供了物理-数学工具。对于地球内部的过程，如



图3 庐山第四纪冰川遗迹

岩浆活动、地幔热对流等，也可利用高温、高压岩石流变试验来模拟，从而推动了地球动力学的研究。

2. 非牛顿流体——流变学的研究对象之二

非牛顿流体是指不满足牛顿黏性实验定律的流体，即其剪应力与剪应变率之间不是线性关系的流体。非牛顿流体广泛存在于生活、生产和大自然之中。

绝大多数生物流体都属于现在所定义的非牛顿流体。人身上血液、淋巴液、囊液等多种体液，以及像细胞质那样的“半流体”都属于非牛顿流体。绝大多数聚合物，如聚乙烯、聚氯乙烯、聚丙烯酰胺、尼龙6、PVS、赛璐珞、涤纶、橡胶溶液、各种工程塑料、化纤的熔体、溶液等，也都是非牛顿流体。

石油、泥浆、水煤浆、陶瓷浆、纸浆、磁浆、油漆、油墨、牙膏、泡沫、液晶、泥石流、地幔、家蚕丝再生溶液、钻井用的洗井液和完井液、感光材料的涂液、高含沙水流等都是非牛顿流体。在食品工业中，蛋清、炼乳、琼脂、果酱、酱油、土豆浆、番茄汁、淀粉液、苹果浆、浓菜汤、糖稀、融化巧克力、面团、米粉团以及鱼糜、肉糜等各种糜状食品物料，也都是非牛顿流体。

总之，在日常生活和工业生产中常遇到的各种高分子溶液、熔体、膏体、凝胶、交联体系、悬浮体系等复杂性质的流体，差不多都是非牛顿流体。有时为了工业生产的目的，在某种牛顿流体中，加入一些聚合物，在改进其性能的同时，也将其变成非牛顿流体，如为提高石油产量使用的压裂液、新型润滑剂等。

非牛顿流体有许多奇妙的特性，如射流胀大、无管虹吸、剪切变稀、拔丝、湍流减阻等，其中有一个使人感兴趣的特性，就是部分非牛顿流体具有弹性，亦称为黏弹性流体。当旋转杆插入黏弹性流体时，流体将沿杆向上爬，液面呈凸形（可见“17. 非牛顿流体及其奇妙特性”）。

3. 流变学的诞生

1928年雷纳(M. Reiner)从巴勒斯坦到美国访问,并且与化学家宾汉(E. C. Bingham, 1878—1945)一起工作。宾汉对雷纳说,我(一个化学家)和你(一个土木工程师),一起工作解决共同的问题,随着胶体化学的发展,这种工作方式将会变得很平常,因此需要建立一个物理学科的分支来处理这类问题。雷纳告诉宾汉,这样的分支是存在的,并且作为连续介质力学而被人们所认识。宾汉认为这样做不好,会吓跑化学家,需要给它起一个新的名字。

宾汉根据古希腊哲学家赫拉克利特“一切皆流”的说法,在与一位语言学家商议之后,提出了“流变学”(rheology)这个名字,并于1928年在美国提议成立了流变学会(Rheological Society),研究材料的变形和流动。1929年召开了流变学会的第一次会议,并创办了《流变学杂志》(Journal of Rheology)。这个流变学杂志,在1933年后曾停止出版;1957年作为《Transactions of Society of Rheology》重新出版;1978年又恢复其最初的名字《流变学杂志》。

宾汉是流变学的奠基人。他研究了悬胶、油漆、水泥等一些材料的流变特性,写了一系列论文,特别是在1919年和H. 格林联合发表的论文“油漆是一种塑性材料而不是黏性流体”,该文指出,油漆在剪应力较小时,剪应变率为零(或不发生流动),只有在剪应力超过临界值(即屈服应力)时,才发生流动,这时应变率和应力与屈服应力之差成正比。后来人们将具有这种流变规律或本构关系的材料或物质,称为黏塑性材料或宾汉塑性材料(简称宾汉体)。除油漆外,石膏、悬胶、面粉团、水泥砂浆等均可作为宾汉体来处理。圣维南的塑性流动材料和牛顿流体,均可作为宾汉体的特殊情况,前者的流动速度为零,后者的屈服应力为零。

直到第二次世界大战爆发为止，美国流变学会仍是世界上唯一的流变学会。1939年，荷兰皇家科学院成立了以J. M. 伯格为首的流变学小组。1940年，英国成立了流变学家俱乐部。

1945年12月国际科学联合会(International Council of Scientific Unions)组织了一个流变学委员会。1947年在冯·卡门主席的主持下举行了第一次会议，代表们来自物理、化学、生物科学、大地测量、空气物理、理论和应用力学的国际联合会。委员会的职能是：对流变学的专门名词进行命名；对流变学的论文进行摘要；组织国际流变学会议等。1968年前，国际流变学会议每5年举行一次。1968年以后，每4年举行一次。第13届国际流变学会议是2000年8月20~25日在英国剑桥大学举行的，会议文集共刊登578篇论文。

1973年，国际流变学委员会被接纳为国际纯粹和应用化学联合会的分支机构。1974年，国际流变学专业委员会被接纳为国际理论和应用力学联合会的分支机构。

4. 中国的流变学研究

中国最早从事流变学研究工作的可能是地质力学家。第一本翻译成中文的流变学书籍，是雷纳的《理论流变学讲义》，是由中国科学院岩体土力学研究所的6位研究人员于1965年合译出版的。

1978年制定全国力学发展规划时，认为流变学是必须重视和加强的薄弱领域。

1985年，中国力学学会与中国化学会联合成立了流变学专业委员会，并在湖南长沙召开了第一届全国流变学学术会议。经中国科学技术协会批准，中国流变学专业委员会对外称为“中国流变学会”，第一届的主任委员是北京大学教授、英籍华裔科学家陈文芳。第一届全国流变学会议有来自高等院校、研究和生产部门的178位代表参加，提交了125篇研究论文。会后由学术期

刊出版社出版了《流变学进展——中国化学会、中国力学学会第一届全国流变学会议论文集》，收入 115 篇论文，按内容分别列为专题评论、非牛顿流体力学、聚合物熔体、聚合物溶液、黏弹性和固体力学、分散体系、生物医学物质、聚合物加工、流变测量法等 9 章，反映了当时中国流变学研究的状况。

1987 年在成都召开了第二届全国流变学会议，并开始使用中国流变学学会的会徽(图 4)。1990 年在上海、1993 年在广州、1996 年在北京、1999 年在武汉、2002 年在廊坊、2006 年在济南，分别召开了第 3~8 届全国流变学会议，每届会议均正式出版了会议论文集。1995 年在上海、1997 年在西安、2000 年在合肥，召开了电-磁流变学全国会议。1991 年 10 月在北京召开了



图 4 中国流变学学会会徽

“中日国际流变学学术会议”。1997 年 9 月受国际理论与应用力学联合会(IUTAM)委托，在北京召开了“带缺陷物体流变学科学研讨会”。另外，2005 年在上海召开了第四届泛太平洋地区国际流变学学术会议(PCR4)。这三次国际会议都出版了论文集。

从流变学产生的简史可以看出，流变学从一开始就是由于工程实际的需要，从连续介质力学和胶体化学的边缘上生长出来的新兴交叉学科，它不但从一开始就沟通了力学和化学这两个一级学科，而且在力学中也沟通了流体力学和固体力学这两个二级学科。

5. 流变学是沟通流体力学和固体力学的学科

反映物质或材料物理性质之间的关系式，统称为本构方程（或本构关系）。在固体力学中，本构方程一般专指应力张量与应变张量之间的关系。在流体力学中，本构方程是指应力张量与应变率张量之间的关系。

对于固体，人们已认识到同时体现弹性形变和黏性流变的材料，是黏弹性材料。材料的黏弹性又可分为线性和非线性两大类。若材料兼有塑性和黏性的性质，则称为黏塑性材料，对于聚合物和一定条件下的金属往往需要考虑其黏塑性。当应力达到一定值时，黏弹性材料呈塑性变形，或物体在弹性变形过程和塑性阶段均具有黏性效应，则称这种材料为黏弹塑性材料。许多作者已在研究工作中讨论和使用黏弹性、黏塑性和黏弹塑性的本构方程，这实际上已突破了经典的固体力学本构关系，进入了固体流变学的领域。

在固体力学研究中，因要深入研究材料的破坏机理，还要类似流体力学，对固体材料考虑应变率，研究其动力学过程。

流体力学的研究内容，在 20 世纪中期之后已有了很大的转变。在石油、化工、能源、材料、生物工程和环保等领域所遇到的流体，已常是非牛顿流体。由于非牛顿流体涉及许多工业生产部门的工艺、设备、效率和产品质量，也涉及人本身的生活和健康，所以越来越受到力学工作者的重视。

流变学是力学在 20 世纪与化学、物理、工程科学交叉发展的新兴学科。中国许多力学工作者的工作实际上已涉足流变学的研究领域，但由于对流变学缺乏了解，而又未意识到，因此也就未能从与工程科学密切联系又正蓬勃发展的流变学中吸取营养。力学发展的关键之一，在于与各个学科及工程领域相结合，流变学正是这样一个有生命力

的重要研究领域。

参考文献

- [1] 中川鹤太郎. 流动的固体[M]. 宋玉升, 译. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] 陈文芳. 非牛顿流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [3] 雷纳. 理论流变学讲义[M]. 郭友中, 王武陵, 杨植之, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1965.
- [4] 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书: 力学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985.

首刊于《力学与实践》, 2001, 23(4): 68-71.

化工是国民经济中一个很重要的产业，既生产多种产业所需要的原料，也提供很多中间产品或最终产品。在化工生产过程中，会涉及大量的流体力学问题。

所谓化工过程，广义上讲是指物质经受性质上变化的过程，包括物理的和化学的性质的变化。它与只有物体形状和位置变化的一般机械-物理过程不同。早在古代，陶器的制作、酒和醋的酿造、青铜器的冶炼以及稍后的炼丹、造纸、火药制造等，都属于化工过程。后来有些化工部门由于生产规模发展相当庞大，已独立形成了各自的生产部门，如黑色与有色金属的冶炼，玻璃、陶瓷和水泥的制作，以及放射物质的提炼，等等。现在虽然它们已分别叫做冶金工业、硅酸盐工业、原子能工业等，但仍保持着化工过程所具有的共同特点。这些部门与包括酸、碱、盐的无机化工，包括基本有机原料和高分子化合物的重有机化工，以及包括造纸、制糖、发酵、染料、涂料、制药等的轻化工，还有近代的环境工程和生物医学工程等领域一起，提供了各式各样的物理-化学变化过程的课题，其中大量是涉及流体运动问题的。

化工中流动问题的特点

为了解流体力学在化工的发展中起什么作用，有必要了解化工过程中流体运动的特点。化工中的流体运动问题大致有以下5个特点。

1. 化工生产时物料一般都在流动

化工过程大部分是连续操作的，不论是气体、液体或固体的原料，一般都在流动中。现代化工生产工艺的一个重要趋势，就是将固体形态的原材料，采用粉碎、浸提、溶解、熔化、加某种流体搅拌等方法，使之流体化后在流动的过程中进行反应、改性、加工、提炼等，最后再经过冷却、干燥、浓缩、蒸发、挤入模具等形成固体形态的产品。如冶金、造纸、化纤、塑料、橡胶、化肥、感光材料、制糖、制药等的工艺过程都如此。所以这些部门的生产效率和产品质量，就在很大程度上依赖于人们对流体运动规律的认识、掌握和应用的水平。化学生产工艺的设计，在相当大的程度上是流体力学的设计。

2. 各种化工过程所使用的设备结构形式既多样又复杂

这些化工设备有着各式各样的进、出口，还有各种类型的换热管、搅拌器，以及改变物料流动方向和混合状态用的各种形式的挡板、分布器或其他内部构件。这就使得流动的边界条件很复杂，所以除少数问题外，求解析解一般是不可能的。

3. 流体物料的种类十分广泛

各种化工过程所处理的流体物料种类十分广泛，从高真空下的稀薄气体，到黏度达几千帕的高黏液体；从一般的牛顿流体，到各式各样的非牛顿流体；从单相流体，到各种多相的流体体系，如气-液、液-液、气-固及气-液-固多相流体等。不同

种类流体的力学行为常常很不相同，其中对不少种类流体，我们还了解得很不够。

4. 流动同时伴有热量与质量的传递

化工过程中流体流动的另一个基本特点是同时伴有热量与质量的传递。如丁基橡胶是在近 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的搅拌釜中生产的，而天然的裂解制乙炔则在 $800\sim 1\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温燃烧炉中进行。又如尾气处理时，往往要从大量流动的气体中将含量仅十万分之几的组分回收下来；而在产品精制时，则有时需要通过几百块塔板上的气液两相逆流接触，才能把沸点相差不到 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的物质分离。因此，流体流动与热量、质量传递常是互相依存而不可分开的，这也增加了问题的复杂性。

5. 流动的同时伴有化学反应

化学反应过程在化工中的重要地位是不言而喻的，而化学反应的存在又使得流动情况进一步复杂化。在没有化学反应时，流体力学的相似理论或量纲分析的方法用起来就已经较困难；对伴有化学反应的流动来说，这些方法往往就行不通了。只有另外想办法建立有针对性的数学模型，进行数学模拟放大。对于流动体系，建立数学模型的第一步是明确流体动力学规律，因为一切热量传递、质量传递及化学反应都是载在流体的身上的。正是这样的原因，才使在国际上的化学工程文献中，涉及流体力学方面的文章始终占有最多的篇幅。

化工生产规模大小不等，小的年产甚至不到 1 t (如制药)，大的可达 $1\times 10^6\text{ t}$ (如炼油)。由于相差悬殊，问题往往截然不同。对于小装置，问题常在化学和工艺方面；而对于大型装置，流体力学方面的问题则变得十分突出。一个化工产品，从实验室开始到大规模生产，其中要经过小试、中试等阶段。这主要不是因为化学反应不清楚，而是流动状态不清楚。据说美国在研制化

工产品时，某些情况下已能免去小试、中试等过程，原因就在于他们对某些设备的流体力学问题弄得比较清楚。

典型化工设备中的流体运动

1. 促使化工设备中流体运动发生的方式

化工生产中促使流体产生运动的方式很多，常用的有以下3种：

(1) 用流体机械、风机或泵对流体施加一定的压力，促使流体在压力差的推动下运动。根据所产生的压力梯度类型的不同，流体运动的方式也有所不同。当压力梯度周期性变化时，流体运动也将有周期性的变化。

(2) 通过边界的运动或流体中物体的运动以推动流体，例如搅拌器中桨叶的运动。根据边界或物体运动的类型不同，如移动、转动或振动，所产生的流体运动也有不同的规律。

(3) 由于温度或浓度不同，空间各处流体的密度也不同，致使流体中产生自然对流。这时浮力是造成运动的主要原因。控制运动的因素将不同于强制对流的情况。

实际上常是几种方式联合作用，促使化工设备中的流体产生运动。

2. 换热器与管内外运动

流体运动按其边界条件可分为绕流(外流)与内流。以化工生产所使用的换热器为例，绕流与内流的问题都会遇到。如外掠换热时，流体经过单根换热圆管，这是绕流问题；流体在各种输送管道或套管、蛇管、列管等各种换热器管内的流动，都是内流问题。图1给出了几种典型的换热器，多数可同时产生这两种

流动。

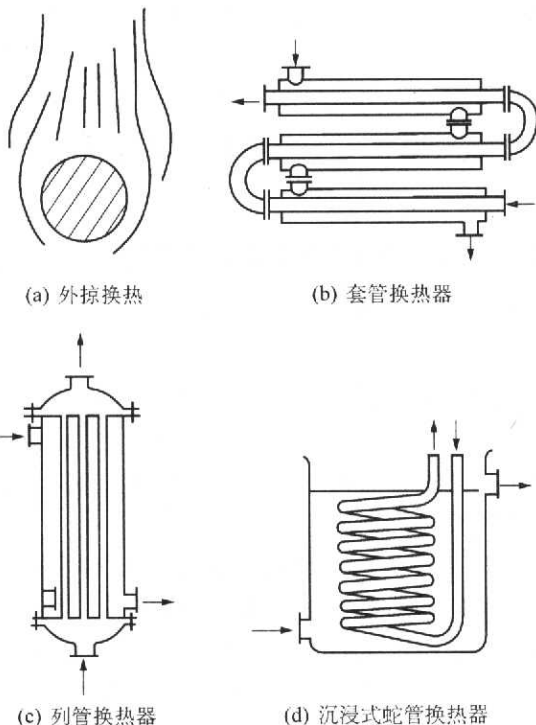


图1 换热器

化工设备中的流体，并不只是水和空气，还涉及各种有机溶液、无机溶液、悬浮液、泡沫液等。所用设备如分离设备、混合器、反应器等种类繁多，几何形状复杂。所以化工设备中流体的流动，经常不能只用外流或内流来概括，更多的是同时具有内外流动的问题。

3. 搅拌槽

在化工生产中，常用搅拌的方式使物料混合，以促进热量和物质的传递和化学反应。搅拌槽的基本结构如图2所示，它是由

圆筒形槽、叶轮、挡板等组成的，叶轮以一定速度旋转，促使槽中液体运动。显然，这是内外边界同时存在的流动问题。

叶轮的形状、几何尺寸、数目，槽的形状、直径和高度，挡板的数目及宽度等，都是影响流动的重要参数。为了简化处理，常需根据不同的目的，对众多的几何特征进行分析后做出取舍。通常认为，最重要的参数是叶轮直径 d 和搅拌直径 D 之比。提高混合效率是设计搅拌器的最主要目标，这牵涉到流体中各种尺度运动的强度和分布。

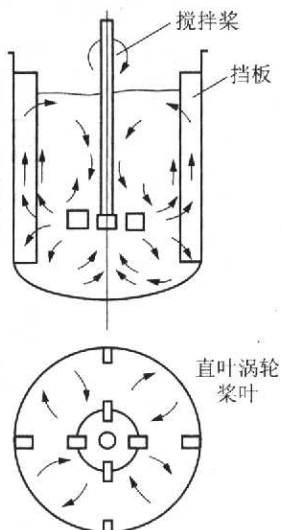


图2 搅拌槽

4. 塔设备与气、液两相流动

林立的高塔是化工厂的主要标志之一，这些塔大多数用来实现传质、传热和反应，如内装几十甚至上百块泡罩板、浮阀板或筛孔板的板式塔，高达 40 ~ 50 m 是常见的，气、液两相就在塔内逆向流动进行接触。有的进行蒸馏，将互溶的组分根据其蒸气压不同而加以分开；有的进行吸收，将气相中的某一组分依靠它在溶剂中溶解度特别大的性质而回收，等等。

筛板塔是最常用的一种，如图 3 所示。筛板是一种规则排列着许多小孔的多孔板。塔板上的液体横向流过塔板，逐板由降液管溢流而下；气体则自下而上逐板由小孔鼓泡通过液层。这是典型的气液两相操作。塔效率的高低与气体、液体的接触面大小有关，而这又与流体中气泡的破碎及分布有关。设计的指标之一是加强气体流经液体时破碎的程度，及分布的均匀度。孔的直径、孔之间的距离，以及表示板上小孔面积与塔板面积之比的开孔

率，这些都是控制塔效率的主要几何特征参数。

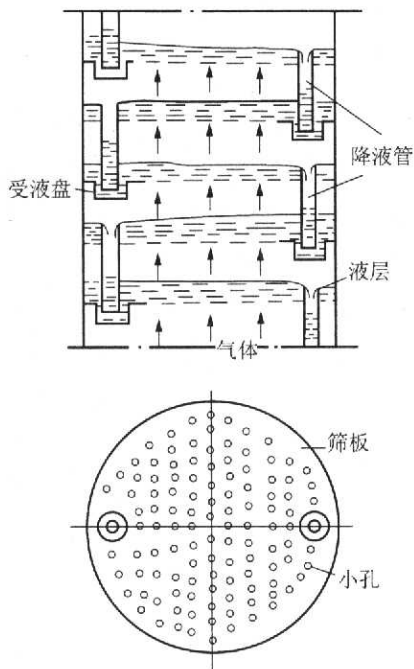


图3 筛板塔

塔板上的孔，有时为某种需要做成凸起的带帽的形状。液相在塔板上流，气相则从下顶起盖帽，穿过孔洞流上来，在此过程中完成传质、传热或其他物理、化学过程。对这样复杂的流动问题，要想彻底弄清，得到一个普适的公式是极困难的。当前可行的办法是针对一些典型设备，进行深入的机理研究，并配合必要的实验和经验，找到相应的规律。

5. 固定床与流体通过多孔介质的流动

由大量固体颗粒堆积而成的静止的颗粒层，称为固定床。流体从颗粒间的空隙中通过，这种类型的流动常称为通过多孔介质

的流动，如图 4a 所示。当颗粒是催化剂时，固定床是进行化学反应的反应器；当颗粒是吸附剂时，它是干燥器或分离器，可除去气体中的湿分（如水）或分离混合物。此外，过滤操作、地下水、石油渗流等也都与固定床有关。

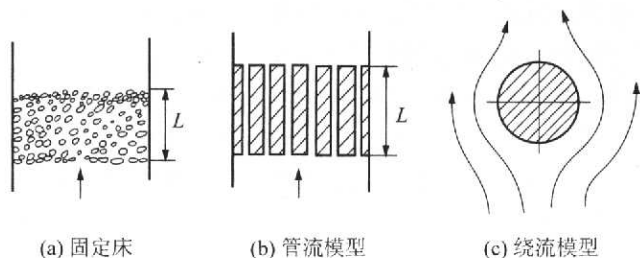


图 4 固定床中的流动

由于颗粒层内的空隙通道弯曲多变，流动情况相当复杂，并不是单纯的内部或外部问题。在工程上用简化方法来处理，提出了两种基本模型：

(1) 管流模型：将空隙串联起来，形成虚拟的管道，流体从其中通过，简化成了内部问题，如图 4b 所示。

(2) 绕流模型：将颗粒各自孤立，流体绕过颗粒，简化成外部问题处理，如图 4c 所示。这些模型由于太过于简化，与实际情况差得尚远，还需要做深入的研究。

固定床与自然界的渗透不同之处，在于它们一般是在外加专门力场下进行的。

6. 流化床与流体和固体的两相流动

流体自下而上通过堆积的固体颗粒床层，当流体在床层缝隙中穿行的实际速度小于颗粒的沉降速度时，床层静止，即为前述的固定床。随着流体流速的增大，床层膨胀，直至颗粒悬浮，分散于流体之中。此时，床层的上界面犹如液体沸腾时的状态，具有类似流体的某些宏观特性，故称为流化床或沸腾床，如图 5

所示。

在液-固系统中，床层比较均一、平稳，如图 5a 所示；而在气-固系统中情况则不同，除部分气体均匀分散外，相当大量的气体以气泡的形式穿越床层，如图 5b 所示。流化床广泛用于换热、干燥、反应、焙烧、吸附等化工过程。流化床设备的外形（如长方形、圆柱形或圆锥形等）和内部构件（气体分布板、换热器、挡板等）的几何特征以及颗粒粒度分布，对气泡行为和气固接触状况均有重大的影响。适当的气泡能提高流化床的效率，而气泡若太大了，操作又会不稳定。近年来，流体力学工作者已经在流化床的稳定性问题上提出了一些很有用的理论模型，对流化床的设计有理论指导意义。

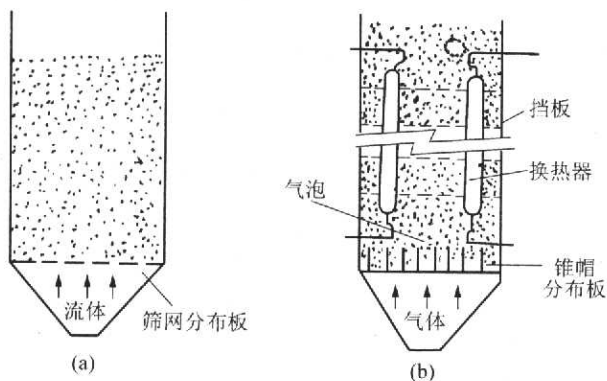


图5 流化床

流化床尽管应用已相当广泛，大型的甚至直径约达 10 m，藏量达 100 t 以上，其可靠的定量研究报告还不算多。为了将流态化技术切实掌握起来，需要深入研究有关的流体力学问题，如流化床测试技术的研究，特别是局部的实时测量和数据的分析处理问题；三维床中气泡的聚并和稳定性，特别是它与固体粒子的物性、大小和粒度分布的关系问题；气泡相与含粒子相间的相互运动和相间质量交换问题；分布孔口射流的结构及其影响区内的

传质问题；各内部构件与床内气、固两相流动和传质的定量关系问题，等等。

7. 燃烧炉

近代化工中的著名大型装置，如年产 3×10^5 t 乙烯及年产 3×10^5 t 合成氨的装置，其化工过程都是在外烧气体或液体燃料的管式炉中进行的。以乙烯装置为例，我国 20 世纪 80 年代初引进的 Lumus SRT (Short residence time) 裂解炉 (图 6)，就是由多组 70 m 长的变径炉管构成的。管内走裂解原料，存留时间只有 0.45 ~ 0.6 s；管外侧墙两侧配置有 112 个无焰喷嘴，底部亦有 16 个烧油的喷嘴。为了获得高的乙烯产出率，必须斤斤计较大型装置的经济性问题，要求在高温 (因受管子材质限制，一般引进装置的管壁最高可承受温度在 $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右) 和短暂停留时间内 (目前已有所谓的“毫秒”炉) 将反应进行完毕，这就需要有特殊的燃

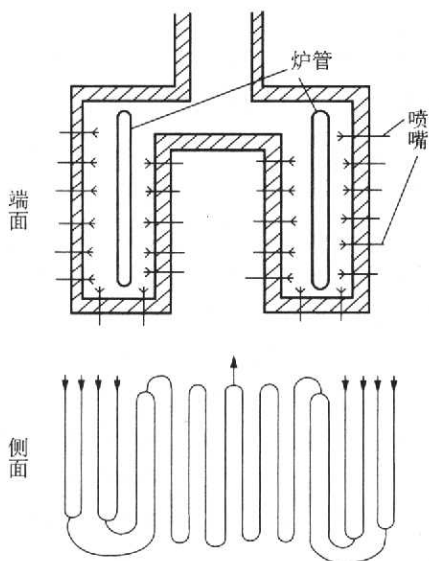


图 6 SRT 炉

烧技术。国外一些公司都曾在这方面投入大量的人力、物力，长期进行研究，发明了各种专利，这些专利在以下方面各有技术专长：

(1) 热强度大，可在很短时间内送入大量的热量。

(2) 可调节热负荷，以适应不同性质的原料和调节全反应管的温度分布。

(3) 提高热效率，减少消耗定额。

(4) 结构紧凑，操作、维修方便。

要切实掌握和发展这方面的技术，需要进行炉中的流场显示和分析，并要研究喷嘴结构和燃烧效率，以及建立整个炉的设计计算模型。

结 语

从以上这些典型的化工设备中的流体流动问题，不难看出化工中流体力学问题的重要性和复杂性。化工中所遇到的流体常是多相、多组分和多反应的“三多”系统，而且流体流动与传质、传热和化学反应又经常紧密结合在一起。

为了正确地设计化工中所采用的设备，关键之一就是对其中的流动有充分的认识并能定量计算。但由于流动的复杂性，目前流体力学还不能给出它们通用的计算方法或公式。现在所用的解决方法，是在一般流体力学的原理指导下，针对不同类型的设备，通过试验来寻找具体的规律。试验往往只能在小的模型上做，还要将在小模型上得到的规律应用到大的装置上，重要的指导原则是流体力学中的相似性原理。但由于相似性原理提出的条件一般又很难同时满足，这时还要依靠以往的经验或做一些补充的试验及分析以做出取舍。由于这些不确定性，往往要经过模型试验→小试(小规模装置的试验)→中试等中间过程，而这样显

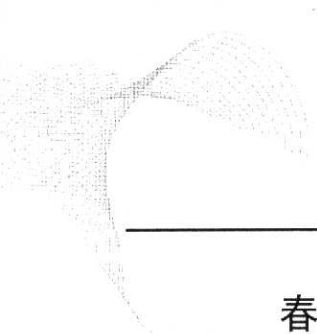
然是很不经济的。

随着测试手段和计算手段的改进，已经逐渐有可能对单相流问题直接进行计算，对多相流问题则先弄清细观层次规律，然后在宏观层次上进行计算。如能做到这一步，则化工过程的设计就有可能更多地依靠科学，较少地依赖主观经验，其意义是十分重大的。尽管做起来十分困难，但由于其重大的意义，世界各先进国家都正在这个方向上努力。

参考文献

- [1] 列维奇. 物理-化学流体力学[M]. 戴千策, 陈敏恒, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.
- [2] 戴千策, 陈敏恒, 等. 化工流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.

首刊于《力学与实践》, 2002, 24(3): 73-77.



春潮带雨晚来急

——“野渡无人舟自横”的写作札记

后 记

Afterword

大众
力学
丛书

常有人问：你怎么会在力学的学习和研究中，想起将唐宋诗词与力学现象联系起来呢？这里将叙述笔者省悟唐宋诗词中有关力学现象和知识的经过，力学诗话文章的北大渊源，以及40余年来多次写“野渡无人舟自横”文章过程中遇到的一些趣事

初识“野渡无人舟自横”

1958年8月，我从北京大学数学力学系力学专业流体力学专门化毕业，分配至交通大学西安部分（西安、上海两部分1960年分家后，西安部分才称为西安交通大学）数理力学系任助教，1960年在交大第一次登上讲台，为应用数学专业1957级讲“流体力学”课。1961年初调到天津河北大学数学系任教，由于刚在交大教过“流体力学”，系主任杨从仁教授就立即安排我为数学系1958级讲“流体力学”课。河北大学的蒋子绳副校长（1937年毕业于北京大学物理系），让我去拜物理系的二级教授

马沅先生(1897—1966,1921年毕业于北京大学物理系,1922—1926年留学英国里兹大学,1926年获硕士学位,1927年任河北工学院机械系主任)为师,进修流体力学(武际可教授所著《近代力学在中国的传播与发展》中有专段陈述,称马沅先生是民国时期较早从事流体力学教学与研究的学者)。马沅先生1949年后长期卧病,当时在马路道108号西一楼家中已行动不便,我每星期去他家两次,主要学习 Milne-thomson 的名著 Theoretical Hydrodynamics。马先生的要求十分严格,每次均需事先用英文写好阅读笔记,并用英文作好书后所附英国著名大学的研究生考题,交先生审阅。一次在用复变函数方法,演算椭圆柱在平行来流中的受力情况时,得到椭圆长轴与来流垂直时为稳定平衡位置的结论,马沅先生笑着说:这就是唐诗中的“野渡无人舟自横”。从马先生家回来后,立刻去学校图书馆找出(清)蘅塘退士编的《唐诗三百首》,非常高兴地查到了韦应物的七绝《滁州西涧》:

独怜幽草涧边生,上有黄鹂深树鸣;春潮带雨晚来急,野渡无人舟自横。

初次认识到古人早就对所算流体力学题目的结论有所认识,并仅用了七个字便将此力学现象活脱脱地勾画了出来。

不久,1963年河北大学举行了首届科学报告会,我在所作的“二维流动的复变函数方法”报告中,指出了中唐诗人韦应物的诗句“野渡无人舟自横”,描述的正是流体力学的现象。这洗练的诗句里凝聚了诗人对力学现象的洞察力。

一写“野渡无人舟自横”

1970年河北大学在文革“备战”的气氛下由天津迁到保定,1972年2月军宣队让我去设在安新县白洋淀的河北大学五七农场种植水稻。在当时特殊的历史环境下,空余时间不能看业务

书，但可以读领袖喜欢的唐宋诗词。由于在北大读书时，周末及假期常去听文科举办的各种讲座，在燕园浓厚人文氛围的熏陶下，对古诗词很感兴趣，再加上马泮老师的启发引导，我将唐诗三百词、宋词一百首等几本古代诗词书，以及北京大学中文系王力教授的“诗词格律十讲”带去了白洋淀农场。劳动之余较系统地看了些唐宋诗词，很受启发，领悟到其中有一些诗词是在用力学运动景象来抒发情思。过去人们是从老子、庄子、墨子等一些思想家的著述中，去寻找古代的力学思想，却忘了唐宋诗词中也有一些佳句，是古人对力学现象的精湛描述。当时还写了一点读书笔记和打油诗，如“挑沟常见卡门涡，给排渠水思流力”，“看畦余暇诗词赏，身心陶淑载文回”。这为后来写作多篇力学诗话的文章作了准备。

文革结束后，自然科学学会开始恢复学术活动。在河北物理学会 1978 年举行的学术报告会上，我作了“野渡无人舟自横——兼论二维流动的复变函数方法”的报告，受到了欢迎。有趣的是，这篇以七绝《滁州西涧》开始切入问题的报告，竟然在事隔 18 年后，促使了与另一学者的相识。那是 1996 年参加天津市的一次学术活动时，有位河北工学院物理学教授过来与我打招呼，我不认识他，他却说：你不是 1978 年作过“野渡无人舟自横”的报告吗！我听后真是十分惊讶和感慨，没想到这一诗句竟成了我们认识的话题。

作为一名好教师，应将不容易明白的东西，努力使学生不仅能弄懂，而且还饶有兴趣。1986 年底我调至天津大学力学系任教，给天津大学力学系 1985 级学生讲“流体力学”课，1987 年底的最后一堂课，正好是讲用复变函数方法求解平面流动问题，作为例题讲到了椭圆柱长轴垂直于来流方向时是稳定的平衡位置。这时已临近中午下课时间，我在黑板上写下了七绝《滁州西涧》，指出这个例题得到的结论就是“野渡无人舟自横”，全班突然响起了长时间的热烈掌声。掌声使我很感动，说明文理是相

通的，大学生非常欢迎在理工科课堂教学中融入我国的传统文化。这件事鼓舞了我后来将自己对唐宋诗词中对力学现象观察和描述的佳句，和近代力学发展交融在一起阐述的心得体会，陆续写出来在《力学与实践》杂志上发表，提供给更多的大学生阅读。

二写“野渡无人舟自横”

1991年我加入了《力学与实践》第四届编委会。7月在回龙观饭店召开的编委会上，上届主编北京大学武际可教授提议以“身边的力学”为题，深入浅出地写一些大学生容易看懂，而且有趣味的文章，以改变刊物的文风。我以在河北物理学会的报告稿为基础，修改后寄给了杂志。不久收到编辑部来信，建议将公式推导部分列为附录，以加强文章的可读性。我接受了建议，又修改使文章的科普色彩更加浓厚，就成了在1992年4期上发表“野渡无人舟自横——谈流体运动中物体的稳定性”一文。

这篇文章是作为“身边力学的趣话”栏目开篇文章发表的，当时的主编北京大学朱照宣教授为这个新开设的栏目加了编者按：“本期开辟的这一‘趣话’小栏目，讲的是我们身边的力学。文体不拘，或庄或谐，可长可短。内容则摆事实，讲力学。要求文质并重，盖‘质胜文则野，文胜质则史’也。”

文章刊登后，天津大学力学系的舒玮教授告诉了我一个“笑话”：20世纪50年代天津大学理论力学教研室有位老先生曾出过一个谜语：



谜面是“野渡无人舟自横”，打一人名。谜底是：“周恒”。（周恒是天津大学力学系教授，1993年当选中科院院士。）

为了使《力学与实践》杂志新开辟的“身边力学的趣话”栏目文章不断档，武际可与我便一人一篇地接着写了下去，当年在白洋淀农场对唐宋诗词的品味和体会，被拿上了案头。后来中国科普作家协会副理事长汤寿根先生在《科技日报》上撰文，说我们俩在“打科普擂台”，其实是笑谈而已。就这样，我陆续在《力学与实践》上发表了10多篇由唐宋诗词切入的力学诗话科普文章。

三写“野渡无人舟自横”

1997年天津《今晚报》的副刊上刊登了博导征文启事，我以“野渡无人舟自横”为题写了一篇300字短文应征，刊于1997年9月20日副刊“日知录”栏目（后又收入1998年天津人民出版社出版的《博导晚谈录》一书）。这篇短文主要是引了韦应物的几首诗，说明诗句中反映了不少力学道理。1997年11月18日出版的中学《语文报》又全文转载了它。

有趣的是，《今晚报》的这篇短文促成了一个跨学科的合作。天津医科大学80多岁的老专家陈世峻教授看了《今晚报》副刊的短文后，托天津大学精仪系的一位副教授找到我，约去他的办公室晤谈。这次会面的讨论，促成了用我们在湍流实验中分析湍流数据的子波分析软件，对同为时间序列的脑电波数据进行分析，寻找奇异点与病变之间的联系，取得了很好的效果。

南开大学出版社的李正明编审见到《今晚报》上文章后，打电话约为“大学生丛书”写一本书，开始我觉得工作量太大，没有时间承担，便谢辞了。后经再三诚邀，想起可将我与武际可5年来在“身边力学的趣话”中发表的文章集为一册。于是将我

们在这个栏目中刊登的 20 篇文章，适当修改补充，并加了一些图，分为“力学诗话”、“力学趣谈”两部分，在 1998 年 10 月出版了《力学诗趣》一书。1998 年是母校北京大学建校百年，1999 年又是《力学与实践》杂志创刊 20 年，所以在序言中写了以这本书献给母校北大百年华诞，并庆祝《力学与实践》杂志的创刊 20 年。

《力学诗趣》出版后，既得到了许多大学生的欢迎，也受到了一些老一辈科学家的称赞。我的老师、北大王仁教授（中科院院士）在信中说：“你们将力学与唐宋诗词交融，又和生活渗透，给大学生课外阅读，开阔他们的思路和境界是会有很大好处的。”我的另一位老师、北大周光 教授已将这本书中有的内容作为例子，引到他所著的《流体力学》教科书中。著名美籍华人学者冯元桢教授（中科院外籍院士、美国科学院院士）来信说：“《力学诗趣》一书，观察精深，趣味盎然，精彩之至，所引诗文，均系珠玉。”“这本书一定会流传广阔的，获益的不限于青少年也。”2001 年 4 月 20 日《科技日报》发了专版评介。2001 年 5 月还获得了中国科学技术协会、中华人民共和国新闻出版总署、国家自然科学基金委员会、中国作家协会共同颁发的第四届全国优秀科普作品二等奖。

1995 年舒玮教授作为专家组组长，去北京大学评审湍流国家重点实验室时，会间休息听到有人对力学诗话文章的议论：《野渡无人舟自横》一文中流体力学分析还不能使人信服，因为实际流动是三维的黏性流，还有涡旋区，而分析是对理想流体的二维流动进行的。舒教授回天大后建议做实验来检验。我们在水槽中作了实验，证实了文中的计算分析结果，也说明虽然椭圆柱后面有涡旋区，黏性流体三维运动的流场也相当复杂，但以理想不可压缩流体二维流动的简化模型，来研究流体运动中物体的稳定性这一问题，是抓住了问题本质的，椭圆柱的稳定平衡位置确实为其长轴与来流相垂直的情况。这一实验结果以“野渡无人舟

自横的实验研究”为题，刊登在《力学与实践》2000年22卷1期上。

四写“野渡无人舟自横”

2003年初上海科学技术出版社毛文涛副总编，邀我为1915年创刊的《科学》杂志撰文，并希望见到类似《力学诗趣》中那样的诗话文章。

《力学与实践》1992年发表“野渡无人舟自横”文以后的10多年，我在阅读古代诗词及文学著作时又看到了几段与此力学现象有关的诗文，如：

宋代宰相寇准在进士及第，初知巴东县（今湖北巴东县西北）时，登高楼眺望也作了一首五言律诗《春日登楼怀归》：

高楼聊引望，杳杳一川平。野水无人渡，孤舟尽日横。
荒村生断霭，古寺语流莺。旧业遥清渭，沉思忽自惊。

宋代词人廖世美的词《烛影摇红：题安陆浮云楼》，其后半片写道：

催促年光，旧来流水知何处？新肠何必更残阳，
极目伤平楚。晚霁波声带雨。悄无人，舟横野渡。
数峰江上，芳草天涯，参差烟树。

还很有趣的是我国古代四大文学名著之一、明代罗贯中所著《三国演义》的第四十九回“七星坛诸葛祭风，三江口周瑜纵火”，对这一现象也有一段颇精彩地描述：（孔明“借”得东风后，即乘赵子龙前来接应的船返夏口。周瑜急唤帐前护军校尉丁奉、徐盛二将各带一百人，分水陆两路追杀孔明。）：

徐盛教拽起满帆，抢风而驶。遥望前船不远，徐盛在船头高声大叫：“军师休去！都督有请。”只见孔明立于船尾大笑曰：“上复都督：好好用兵，诸葛亮暂回夏口，异日再容相见。”徐盛曰：“请暂少住，有紧话说。”孔明曰：“吾已料定都督不能容我，必来加害，预先教赵子龙来接。将军不必追赶。”徐盛见前船无篷，只顾赶去。看看至近，赵云拈弓搭箭，立于船尾大叫曰：“吾乃常山赵子龙也！奉令特来接军师。你如何来追赶？本待一箭射死你来，显得两家失了和气。教你知我手段！”言讫，箭到处，射断徐盛船上篷索。那篷堕落下水，其船便横。赵云却教自己船上拽起满帆，乘顺风而去，其船如飞，追之不及。

箭到处，那篷堕落下水，其船便横。这段话明确指出了，在湍急的河流中，帆落下、失去风力推动而不能行驶的船，只好横在河中这一自然现象。

因此，为发行量很大的《科学》杂志再次改写“野渡无人舟自横”一文时，将以上2段古代诗词和《三国演义》第四十九回的有关内容，加了进去，又写入了2000年发表的实验研究结果，并删去了原来附录的大段数学公式推导，希望新改写的文章能适合中学以上文化水平的广大读者阅读。再写此文时，也对科学普及写作有了一点新体会：因为对科学的认识总会不断深入，新生代又在不断产生，所以科普是没有止境的。普及是科学的力量所在，在某种意义上说，它是一切科学活动的目的和归宿。只有较充分地用科普形式，宣传我们所从事的力学工作，才能使因社会分工和知识背景的差异，不太了解力学的人，也能欣赏和享受力学对社会的贡献，了解力学的思维方式和探索精神，理解力学的基础作用和应用潜力。这无疑是我们力学工作者不可推却的责任。

参考文献

- [1] 王振东. 二维流动的复变函数方法, 河北大学首届科学报告会, 1963 天津.
- [2] 王振东. 野渡无人舟自横—谈流体运动中物体的稳定性[J]. 力学与实践, 1992, 14(4): 76-78.
- [3] 王振东. 野渡无人舟自横 [N]. 今晚报, 1997-09-20.
- [4] 王振东. 野渡无人舟自横 [M] // 郭长久. 博导晚谈录. 天津: 天津人民出版社, 1998: 346-348.
- [5] 王振东, 武际可. 力学诗趣 [M]. 天津: 南开大学出版社, 1998: 50-56
- [6] 王振东, 陈桂英, 尚晓东. “野渡无人舟自横” 的实验研究 [J]. 力学与实践, 2000, 22(1): 75.
- [7] 王振东. 野渡无人舟自横—漫话流体运动中物体的稳定性 [J]. 科学, 2004, 56(1): 40-41.
- [8] 武际可. 近代力学在中国的传播与发展 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [9] 武际可. 挖掘和阐述科学之美 [N]. 科技日报, 2001-04-20.
- [10] 王振东. 普及是科学的力量所在 [N]. 科技日报, 2001-04-20.
- [11] 汤寿根. 从两位教授科普打擂台说起 [N]. 科技日报, 2001-04-20.

首刊于《力学与实践》, 2006, 28(3): 83-85.

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

传 真：(010)82086060

E-mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118



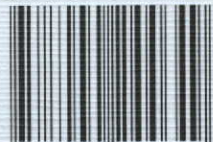
王振东，天津大学力学系教授、博士生导师。1937年6月出生于江苏省南京市，1954年毕业于南京市第八中学，1958年毕业于北京大学数学力学系力学专业。一直从事基础力学和流体力学的教学和研究工作，主要研究方向为：湍流与流动稳定性及其工程应用，工业中的流体力学和流变学问题。发表论文百余篇。曾任中国力学学会与中国科学院力学研究所联合主办的《力学与实践》杂志主编。



装帧设计 沈冬
殷君承



ISBN 978-7-04-024464-9



9 787040 244649 >

上架建议：科普类

定价：15.00元