

流体涡旋漫谈

王振东

涡旋(vortex, 过去曾译为“旋涡”, 现依据全国自然科学名词审定委员会公布的《力学名词》, 译为“涡旋”。)是流体团的旋转运动(见《中国大百科全书·力学卷》495页)。近代力学的奠基人之一、德国力学家普朗特(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。”这句话是流体力学中的至理名言, 深刻概括了涡旋在流体运动中的作用。普朗特的另一位学生、北京航空航天大学陆士嘉教授则更进一步地指明“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, 紧贴在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, 这就产生了对流体发生“搓”的剪切力。

在流体力学中, 涡旋尚没有明确的严格定义。但涡量(vorticity)有严格的数学定义, 即定义为速度的旋度

$$\omega = \text{rot } \mathbf{v}$$

它是空间坐标 x, y, z 和时间坐标 t 的函数, 涡量 ω 和速度 $\mathbf{v}$ 一样, 也是矢量场, 称为涡量场。

流体的涡旋运动有明确的严格定义: 在流场的某一区域中, 如 $\omega \neq 0$, 称在这个区域中流动是有旋的, 也称为涡旋运动, 否则则称为是无旋的(见周光炯、严宗毅、许世雄、章克本编著, 《流体力学》第二版, 上册 220 页)。

涡旋产生的原因很多, 也十分复杂。近代流体力学已经证明, 只要在流体中有“涡量源”, 就会产生涡量。已证明如有下面几种情况, 都会有“涡量源”出现:

(1) 流体团所受到的力, 可以分为体积力(如引力、惯性力、电磁力、柯氏力等)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)。如果体积力不能表示为一个势函数的梯度, 就是一个“涡量源”。

(2) 黏性流体加上固体边界, 会有“搓”流体的剪切力, 也是一个“涡量源”。

(3) 如果流体的状态方程中有两个以上独立的热力学变量(在流体力学中称作是斜压流动), 又是一个“涡量源”。

因为上述几种“涡量源”普遍存在于流体运动中, 所以涡旋运动就成为流体运动中极普遍的运动形态。

我们可以从下面一些例子来了解存在于大自然中形形色色的流体涡旋。

涡旋星云

宇宙空间的涡旋星云, 是大自然中尺度最大的涡旋, 其尺度是“光年”。美国科学院院士、中国科学院外籍院士、美国麻省理工学院林家翘教授曾在涡旋星云研究方面, 作出过开创性的贡献。

哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope)是以天文学家哈勃为名, 在环绕着地球的轨道上工作的望远镜, 由美国宇航局和欧洲航天局共同管理。其位置在地球的大气层之上, 影像不会受到大气湍流的扰动, 视相度很高, 又没有大气散射造成的背景光, 还能观测会被臭氧层吸收的紫外线, 所以获得了地基望远镜所没有的好处。

哈勃空间望远镜自 1990 年发射之后, 拍摄到了许多美妙的涡旋星云照片, 让我们认识到在宇



猎犬座的涡旋星云



大熊座的涡旋星云



大犬座的一对涡旋星云



Arp274 的星座系统，由三个相互作用的涡旋星云组成



距地球 7000 万光年棒锤型的涡旋星云



哈勃望远镜的 3 号宽视场照相机 2010 年 12 月 17 日拍摄到的涡旋星云

宙中还存在如此多姿多态的星系，也说明了涡旋状态是星系存在的常态之一。

台风

每年，随着仲夏季节的到来，在我国气象预报的卫星云图上，经常可以看到由大团白云显示的反时针旋转的大尺度流体涡旋。

台风是诞生在热带海洋上风

种严重的气象灾害。美国 2005 年 8 月的卡特里娜 (Katrina) 飓风，曾造成 1330 人死亡，损失 960 亿美元。

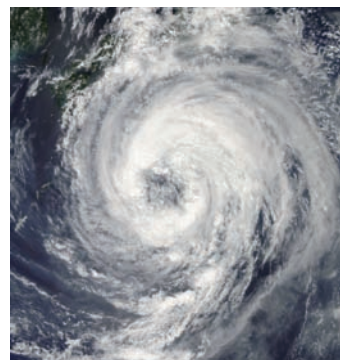
这些尺度相当大的流体涡旋，我国曾统称为台风，现在按气象部门的定义，当热带气旋中心附近的风力为 8 ~ 9 级时称为热带风暴，10 ~ 11 级时称为强热带风暴，12 级及以上才称为台风。在北半球，热带气旋是反时针方向旋转的强烈的涡旋，其形状如漏斗，下层周围的空气向中心流入并向上升，而上层空气则向四周流出，其半径可达数百千米。由于它对人类的生活、生产有极大的破坏力，所以气象部门已将每年发生的热带气旋编号并命名来进行观测和预报。

全球热带海洋上每年生成约 80 ~ 100 个气旋。其中约 36% 发生在西北太平洋和南中国海上，这里是全球生成台风最多的海区之一。南大西洋热带海区，因为南极流来的冷洋流降低了水温，而不易发生台风。有人统计了 42 年资料，西北太平洋上共发生台风（包括热带风暴）1178 个，平均每年约 28 个。

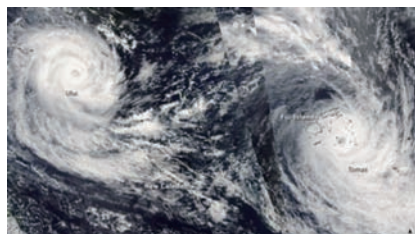
台风具有很强的破坏力，是一种气象灾害；但对于干旱地区而言，台风又可带来降水，以解除伏旱。



美国 2005 年的卡特里娜飓风

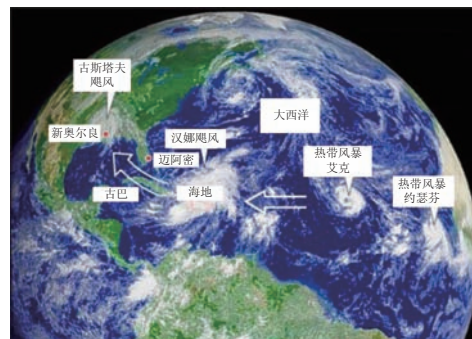


2011 年 9 月 1 日登陆美国的塔拉斯飓风



美国宇航局的Terra卫星所拍2008年8月20日费伊热带风暴，虽未形成飓风，但却给美国佛罗里达州带来了750毫米特大暴雨

卫星拍到太平洋上形成了风速为时速200多千米的两个热带气旋



2008年8月4个飓风正列队袭向美国

有时候，也能在电视台气象预报的卫星云图上，看到同时产生的两个或多个热带气旋。

龙卷风

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（《力学与实践》，2010，32（4），112～115）。其中心的气压可以比周围气压低百分之十。龙卷风的平均直径为200～300米，直径最小的不过几十米，只有极少数直径大的才达到1000米以上。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。其移动速度平均每秒15米，最快的可达每秒70米；移动路径的长度大多在10千米左右，短的只有几十米，长的可达几百千米以上。它造成破坏的地面宽度，一般有1～2千米。

龙卷风上端与雷雨云相接，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。远远看去，它不仅很像吊在空中晃悠悠的一条巨蟒，而且很像一个摆动不停的大象鼻子。发生在海上，犹如“龙吸水”的现象，称为“水龙卷”（或

称“海龙卷”，waterspout）；出现在陆上，卷扬尘土，卷走房屋、树木等的龙卷，称为“陆龙卷”（landspout，美国国家气象局称dust-tube tornado）。世界各地的海洋和湖泊等都可能出现水龙卷。在

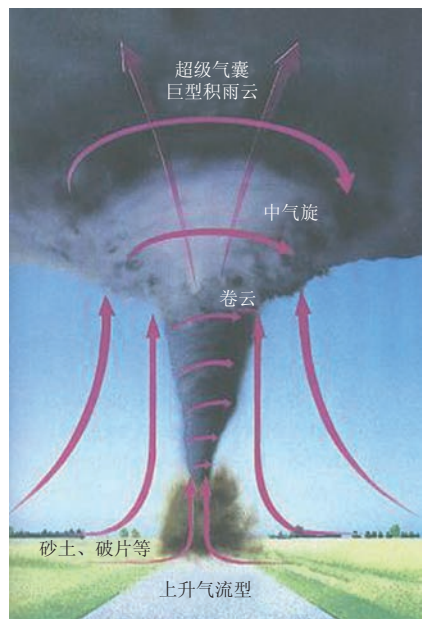
美国，水龙卷通常发生在美国东南部海岸，尤其在佛罗里达南部和墨西哥湾。水龙卷虽在定义上是龙卷风的一种，其破坏性要比最强大的大草原龙卷风小，但是它们仍然是相当危险的。龙卷风经过的地方，



龙卷风是破坏性很大的涡旋



2008年5月8日美国堪萨斯州大草原上空的陆龙卷



龙卷风的示意图



2009年6月29日在美国圣约翰河上出现的水龙卷



2009年5月20日在珠海度假村拍到的龙卷风

常会发生拔起大树、掀翻车辆、摧毁建筑物等现象，有时把人吸走，危害十分严重。

沙尘暴

沙尘暴 (sand duststorm) 是沙尘暴 (sandstorm) 和尘暴 (duststorm) 两者兼有的总称，是指强风把地面大量沙尘物质吹起卷入空中，使空气特别混浊，水平能见度小于1千米的严重风沙天气现象



2008年在俄罗斯西伯利亚同时出现了二个水龙卷

(《自然杂志》，2009，31(6)，360～362)。其中沙尘暴系指大风把大量沙粒吹入近地层所形成的挟沙风暴；尘暴则是大风把大量尘埃及其他细颗粒物卷入高空所形成的风暴。

沙尘暴是我国西北地区和华北北部地区出现的强灾害性天气，可造成房屋倒塌、交通供电受阻或中断，火灾、人畜伤亡，污染自然环境，破坏作物生长，给经济建设和人民生命财产安全造成严重的损



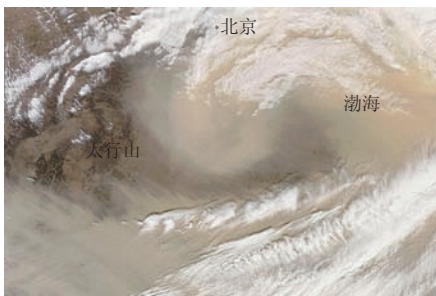
青海格尔木2010年5月14日遭受沙尘暴，最小能见度200米



2006年4月16日北京的沙尘暴



2001年美国宇航局卫星在亚洲上空拍摄到的沙尘暴涡旋



美国宇航局2010年3月22日公布卫星所拍摄中国沙尘暴照片

失和极大的危害。

从卫星拍摄的图片来看，沙尘暴也是大尺度的涡旋。

海啸

海啸在许多西方语言中称为“tsunami”，它由日语中“tsu”和“nami”两个词组成，“tsu”的词意是海港，“nami”的词意是波浪。此词源自日文“津波”，即“港边的波浪”（津，是港口；波，指水流）。国际科学大会于1963年决定采用这一词汇来表示海啸。除北冰洋外，地球上的其他三大水域即太平洋、大西洋和印度洋，都多次发生过海啸，也都有重大灾难性海啸的记录。

海啸是一种具有强大破坏力的海浪（见《力学与实践》，2011，33(2)，108～111），海



2011年3月11日在日本东北部名取，海啸引发的大涡旋

啸的波速高达每小时 700 ~ 900 千米,用不了一天时间就能横过大洋,波长达数百千米,可以传播几千千米而能量损失很小;在茫茫大洋里波高不足一米,但当到达海岸浅水地带时,波长减短而波高急剧增高,可达数十米,形成有巨大能量的破坏性“水墙”。

由于地震、海底火山爆发或海底崩塌,以及宇宙天体的影响,引发地壳运动造成海底板块变形、断裂,板块之间出现滑移,使部分地层猛然出现抬升或下沉,从而造成从海底到海面的整个水体

发生了剧烈“抖动”。这种“抖动”与平常所见到的海浪大不一样。一般海浪只在海面附近起伏,涉及的深度不大,波动的振幅随水深衰减很快。地震等原因引发的海水“抖动”则是从海底到海面整个水体的波动,其所含的能量惊人,引发海水开始大规模的运动,形成海啸。在海啸发生时,也会出现海水的大涡旋。

飞机

飞机的升力、阻力都与涡旋

密切相关。飞机飞行时,接近飞机的空气层在飞行产生的剪切力作用下,会搓出各式各样的涡旋。从下面的几个图,可以看出飞机飞行时产生的涡旋。

卡门涡街

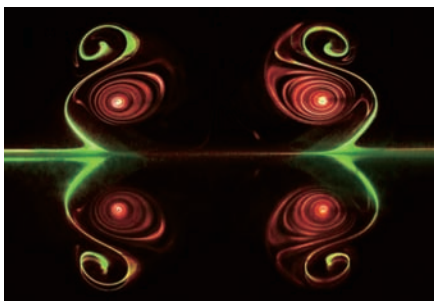
美国宇航局 2009 年 5 月公布了所评选出的 50 年十佳地球卫星照片,排在十佳第一的是“陆地卫星 7 号”2007 年拍摄的照片,图片展示了一排涡旋正在交替改变向前运行的方向,这正是“冯·卡门涡街”(见《自然》杂志,2010, 32 (4), 243 ~ 245)。当风或者洋流被岛屿挡住去路时,会出现这种图形。此图片中的这些卡门涡街,是当风吹过太平洋北部向东运行过程中,遇到阿留申群岛时形成的。

实际上,也还有卫星拍摄到的另外一些很清晰的卡门涡街照片。

2009 年 2 月 24 日,来自北方的冷空气(可能是来自格陵兰的重力风)遭遇格陵兰海域上空的潮湿空气,在扬曼因(Jan Mayen)岛附近上空形成了一排排的积云。扬曼因岛阻碍了风的行进,对天气也施加了影响。就像水流会分开绕过河里的巨石一样,吹来的风也会在扬曼因岛的北面分叉,然后在它的南面又再次汇拢。在扬曼因岛的下风处,当冷空气从岩石表面刮过时,形成了一连串螺旋状的涡旋,这也正是卡门涡街。在图片的左上角,可以看到一小片白雪覆盖的格陵兰岛的海岸线以及海冰。在靠近海岸线的地方还有许多巨大而不规则的浮冰漂浮着。这张照片是由美国宇



飞机着陆时翼尖处的涡旋



翼尖涡旋图



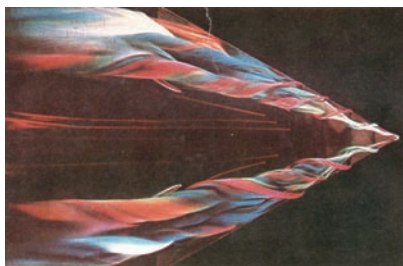
有攻角(即锥头的轴与来流速度的夹角)的锥头在背风面处涡的后部断面图。人们形象地称为“猫眼图”。(取自《中国大百科全书·力学卷》1985,插图 30 页)



协和式飞机着陆时流场中涡旋的正视图(取自《中国大百科全书·力学卷》1985,插图 31 页)



直升飞机前进时螺旋桨梢部产生的涡旋(取自《中国大百科全书·力学卷》1985,插图 29 页)



有攻角三角薄翼上表面的卷状涡(取自《中国大百科全书·力学卷》1985,插图 29 页)

航局卫星上的中等分辨率成像光谱仪拍摄的。

还有两张卫星拍摄的照片，也很清楚地看到了卡门涡街，它们分别是在智利和北极圈内的小岛后面形成的。

这些卫星拍摄的卡门涡街照片，引起了人们对冯·卡门和卡门涡街进一步了解的興趣。

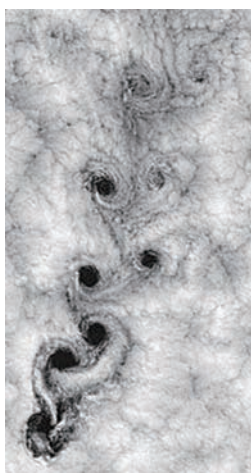
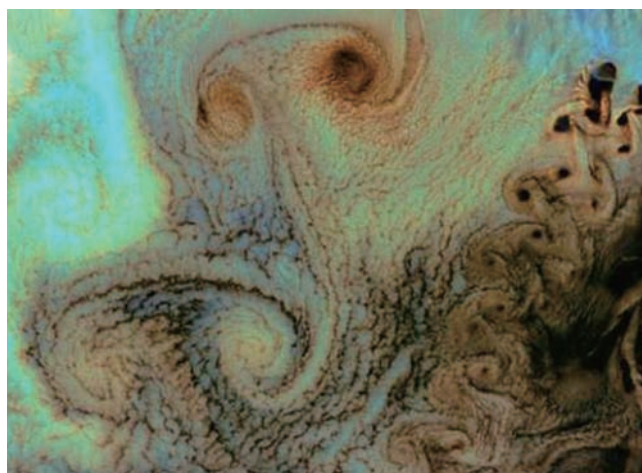
冯·卡门(Theodore von Kármán 1881 ~ 1963) 被誉为“航空航天时代的科学奇才”，他是美籍匈牙利

裔力学家，近代力学的奠基人之一，是我国著名科学家钱学森、钱伟长、郭永怀，以及美籍华人科学家林家翘在美国加州理工学院学习时的导师。

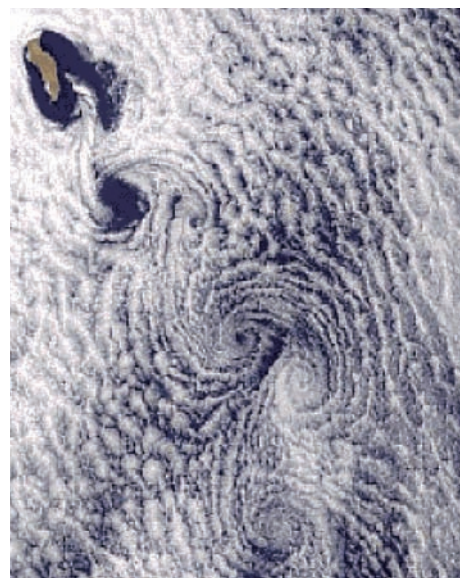
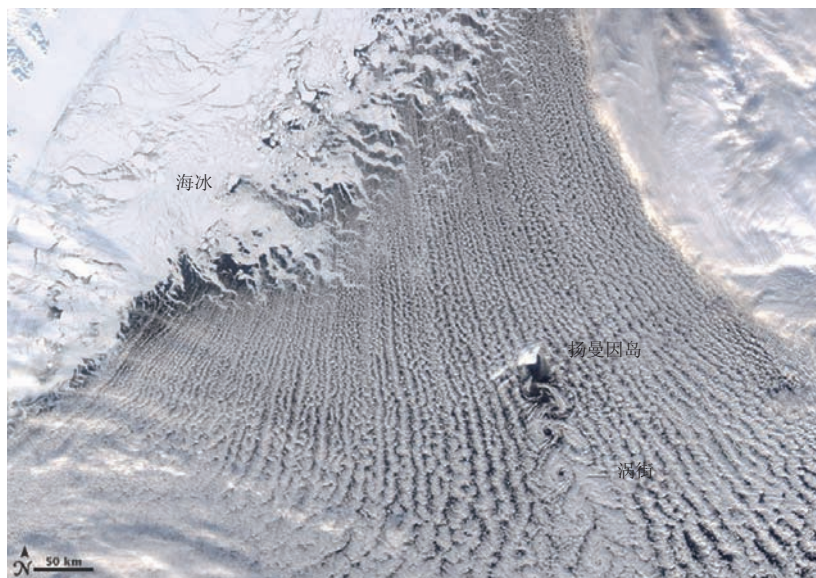
卡门涡街是流体力学中重要的现象，在自然界中常可遇到。流体运动通常是随时间变化的，但有时随时间变化不大，如河水在相当长一段时间内，流动几乎一样；飞机上的观测者来看，流动也几乎没有变化。这时就可认

为流场状态不随时间变化，是定常流动。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。卡门涡街的图片十分漂亮，有时可当作艺术品来欣赏。

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，例如在高层楼宇、电视发射塔、烟囱等建筑物后形成。这些建筑物受风



2007 年美国“陆地卫星 7”拍摄的阿留申群岛后的卡门涡街 智利小岛后的卡门涡街 西伯利亚东北极圈内的弗兰格尔岛后的卡门涡街



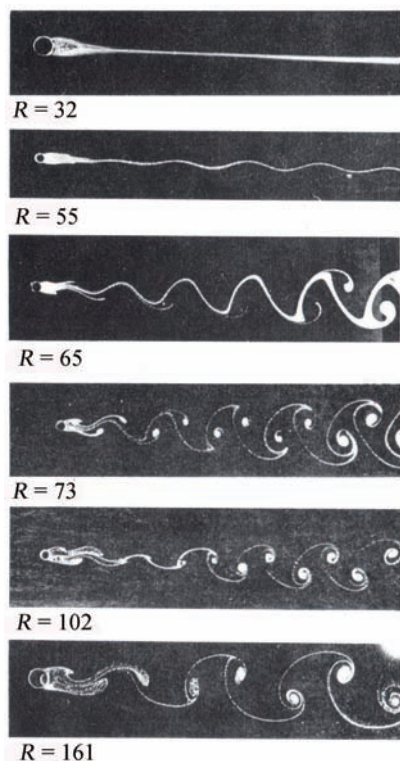
2009 年美国宇航局卫星拍摄的扬曼因岛后面的卡门涡街

扬曼因岛后的卡门涡街（左图的局部放大）

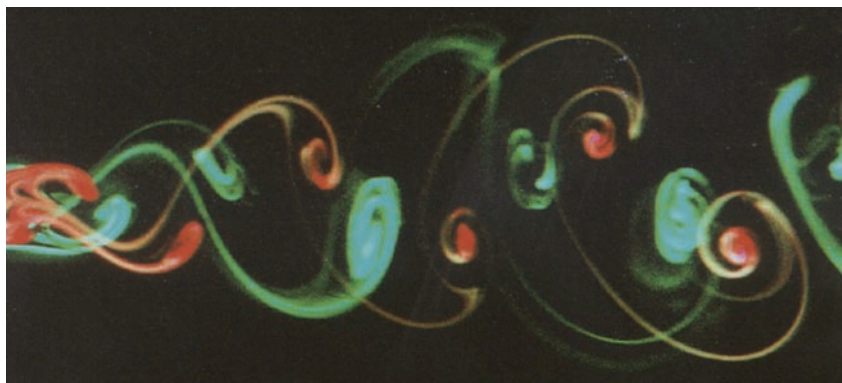
作用而引起的振动，往往与卡门涡街有关。因此，现在进行高层建筑物设计时都要进行计算和风洞模型

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

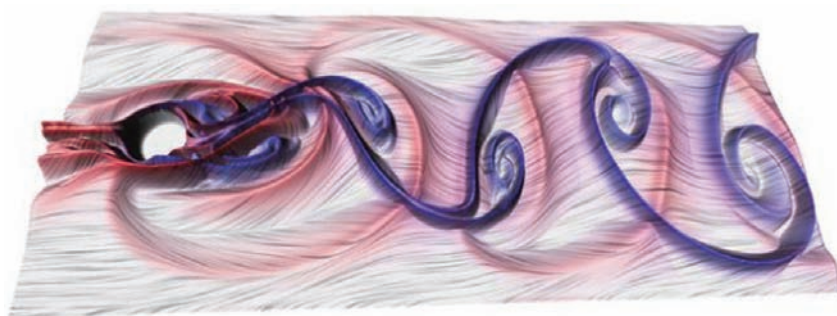
电视塔在建造前，都在北京大学力学与工程科学系的风洞中做过模型实验。



在一油流中圆柱后尾迹中卡门涡街的形成
(取自 F. Homann, *Forsch. Ing.-Wes.*, 1936, 7, I.)



用 LIF (激光诱导荧光) 法拍摄的卡门涡街
(取自 *Journal of Visualization* 2001, VOL. 3 No. 4 封面)



这幅电脑合成图片“冯·卡门涡街现象”是美国物理学会 2009 年度最佳流体运动图片作品展的获奖作品



火柴头燃烧时引起的湍流



微风中燃烧蜡烛附近的气流

燃烧气流中的涡旋

燃烧是在气体中进行的，燃烧产生的湍流中有许多涡旋。



火焰中气体流动的混沌图像



灯丝燃烧形成的涡旋

各种各样的涡旋

在许多自然现象和研究领域中都可以看到各种各样的涡旋，也还有一些人们常见到的涡旋，如在小河转弯处常看到的涡旋，放掉家里澡盆里洗澡水时在澡盆出水口看

到的澡盆涡，在高层楼房底部感觉到的马蹄涡，以及在两同轴旋转圆筒间出现的泰勒涡等。

H.J.Lugt 曾列表总结了各种涡旋的尺度谱（见 *Vortex Flow in Nature and Technology*, 1983），如下表所示：

涡旋的害与利

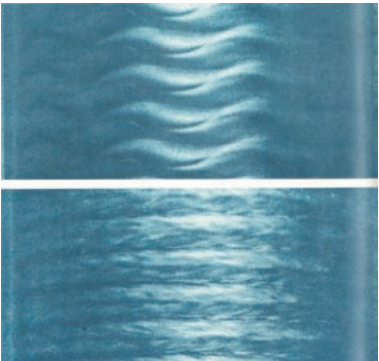
前面所谈到的台风，龙卷风，海啸等现象，常常伴随着灾难或惊险，从而引起人们全神贯注的集中关心或全力拼搏、抢救，所以社会科学也将“涡旋”（下转第 8 页）



河流拐弯处的涡旋

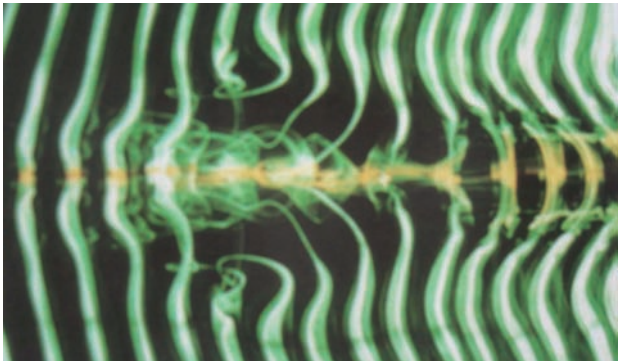


肥皂膜上泛起的涡旋涟漪
（取自：Teis Schnipper, DTU, via APS）



两同轴旋转圆筒间的泰勒涡
（取自《中国大百科全书·力学卷》1985，插图 20 页）

表 各种涡旋的尺度谱	
涡旋的名称	涡尺度结构
液氦中的量子涡	10^{-8}cm
最小的湍流涡	0.1cm
昆虫引起的涡旋 乌贼喷射的涡环	$0.1 \sim 10\text{cm}$
尘卷 潮水中的涡旋	$1 \sim 10\text{m}$
火山爆发的涡环热对流云	$100 \sim 1000\text{m}$
湾流的涡旋台风 大气高压和低压系统	$100 \sim 2000\text{km}$
海洋环流 大气环流 地球内部的热对流胞涡	$2000 \sim 5000\text{km}$
木星的红斑 土星环 太阳黑子	$5000 \sim 10^5\text{km}$
银河的涡旋星系	用光年计



圆柱尾迹中的脱体对称涡
（取自 C. H. K. Williamson, *JFM*, 1992, 243, 393 ~ 441）

(上接第16页)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之中”。

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、船舶、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,人为地制造涡旋以加速消耗水流的动能。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,所以科学工作者一直在研究如何在生产过程中控制涡旋的产生和发展,并

加强对自然界中有巨大破坏作用的这类涡旋的预报,研究减轻灾害的方法。

(本文部分图片自网络收集,来源不详,仅供力学科普之用,特此致谢图片的原作者)

(天津大学力学系 300072)

作者简介

王振东,天津大学力学系教授、博士生导师,1937年6月出生于江苏南京市,1958年7月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。曾任中国力学学会和中国科学院力学研究所联合主办的《力学与实践》杂志主编。

科苑快讯

科学家找到大规模生产纳米石墨烯薄片新方法

据美国物理学家组织网3月26日报道,韩国和美国的研究人员近日表示,通过混合固态二氧化碳和相应溶剂,能简单、经济地大规模生产出高质量的纳米石墨烯薄片。相关研究报告发布在本周出版的美国《国家科学院院报》网络版上。

石墨烯源自石墨,因极佳的导电性、导热性和坚固性闻名。全世界的科学家都认为石墨烯将彻底改变计算、电子和医药领域现状,但无法大规模生产石墨烯薄片却阻碍了它的广泛应用。论文的共同作者、美国凯斯西储大学高分子科学和工程系的戴黎明(音译)教授表示,他们开发了一种低成本的简单方式,可大规模生产出质量更好的石墨烯薄片。而目前常用的是酸性氧化法,因需要使用有毒的化学物质,推广受到影响。

此次研究由韩国蔚山国立科技学院的白钟范(音译)教授主导。研究人员将石墨和固态二氧化碳置于充满不锈钢球的筒罐中,两天后可经羧酸和机械力磨制加工,生产出石墨烯薄片,且边缘处于打开状态,以便产生化学反应。由羧酸处理的边缘可使石墨溶于质子溶剂之中,其中包括水和甲醇;也可溶于极性非质

子型溶剂中,包括二甲基亚砷等。

一旦分散在溶剂之中,石墨烯薄片就会分离成5层或层数更少的纳米石墨烯薄片。为测试这些材料能否直接形成电子应用所需的模塑物体,研究人员将样本压缩为芯块。对比后发现,这些芯块的导电性可比由酸性氧化石墨法生产出的传统芯块高688倍。

为了形成大面积的纳米石墨烯薄膜,科学家基于3.5厘米×5厘米的硅晶片,对压缩芯块进行2小时高达900摄氏度的加热。随后,磨制而成的薄片边缘脱去了羧基,这意味着纳米薄片的边缘可与临近的薄片发生强劲的氢键结合,并保持黏合的状态,而酸性氧化压缩而成的芯块则会在加热过程中发生破碎的状况。研究人员表示,这一过程只会受到晶片的尺寸限制,生成的大面积薄膜的导电性将远超过酸性氧化法的产物,同时还将保有更高的透光率。

此外,通过改用氨或三氧化硫作为干冰的替代物,并使用不同的溶剂,科学家能自定义适用于电子产品、超级电容和可取代铂的无金属催化剂等不同应用的石墨烯薄片边缘,还能定制边缘以组装二维和三维结构等。

(摘自2012年3月28日《科技日报》,作者张巍巍)