



达·芬奇与流体力学¹⁾

陈光耀* 杨绍琼^{*,†,2)} 姜楠*

* (天津大学机械工程学院, 天津 300350)

† (青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东青岛 266237)

摘要 旷世全才列奥纳多·达·芬奇 (Leonardo da Vinci), 被世人誉为画家、雕刻家、天文学家、发明家、音乐家、数学家、解剖学家、生理学家、地质学家、植物学家、作家、军事、建筑工程和制图师, 是意大利文艺复兴时期人文主义的代表人物。本文对其流体力学相关思想及湍流、飞行、波浪和风暴等几个方面的研究贡献进行梳理, 认为他是流体力学科学研究的先驱和奠基人, 也是一位“流体力学家”。

关键词 科学史, 力学史, 达·芬奇, 流体力学

中图分类号: O351 文献标识码: A doi:10.6052/1000-0879-19-154

LEONARDO DA VINCI AND FLUID MECHANICS¹⁾

CHEN Guangyao* YANG Shaoqiong^{*,†,2)} JIANG Nan*

* (School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

† (Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, Shandong, China)

Abstract Leonardo da Vinci, known as painter, sculptor, astronomer, inventor, musician, mathematician, anatomist, physiologist, geologist, botanist, writer, military engineer, architect and cartographer, is a representative figure of the Italian Renaissance humanism. This paper describes another aspect of Da Vinci: his research results of fluid mechanics and the contributions related with turbulence, flight, wave and storm, and it is concluded that he is the pioneer and founder of fluid mechanics science as well.

Key words history of science, mechanics history, Leonardo da Vinci, fluid mechanics

题记 1519年5月2日, 列奥纳多·达·芬奇在法国安波斯城克鲁堡去世; 作者谨以此文纪念达·芬奇500周年忌辰。

意大利语 da Vinci, 旧译“达文西”, 闻一多首译为“达·芬奇”, 全名列奥纳多·迪·皮耶罗·达·芬奇 (Leonardo di ser Piero da Vinci, 1452—1519年)(图1), 意大利语意为“芬奇城梅瑟·皮耶罗之子——列奥纳多”。他是意大利文艺复兴时期人文主义的代表人物, 历史上最著名的画家, 与米开朗基罗 (Michelangelo, 1475—1564年) 和拉斐尔 (Raffaello,

1483—1520年) 并称为“文艺复兴三杰”。

1 达·芬奇与湍流

“Ladies and gentleman: as we are currently experiencing some air **turbulence**, for your safety, please remain seated and fasten your seat belt/please return to your seat and keep your seat belt fasten. During the **turbulence**, lavatory will be closed and we will stop cabin service. Thank you.”

2019-04-18 收到第1稿, 2019-05-14 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金 (11902219)、天津市自然科学基金 (18JJCQNJC05100)、青岛海洋科学与技术试点国家实验室主任基金 (QNL201705) 和青岛市海洋工程装备与技术智库项目联合资助。

2) 杨绍琼, 讲师, 主要研究方向为深海智能装备、水下机器人和实验流体力学等。E-mail: shaoqiong@tju.edu.cn

引用格式: 陈光耀, 杨绍琼, 姜楠. 达·芬奇与流体力学. 力学与实践, 2019, 41(5): 634-639

Chen Guangyao, Yang Shaoqiong, Jiang Nan. Leonardo da Vinci and fluid mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2019, 41(5): 634-639



图1 达·芬奇自画像(约1513年,33.3 cm×21.3 cm, 现收藏于意大利都灵图书馆内)

“女士们和先生们:受到航路不稳定气流影响,我们的飞机正在‘颠簸’。(各位旅客,我们的飞机在爬升过程中遇到一些‘气流’,有些‘颠簸’,请您回到您的座位上),请大家在座位上坐好,并系好安全带。在此期间,洗手间将暂时关闭,客舱服务也会暂停。感谢您的合作。”

乘坐过飞机的人士对空乘人员的这句提示一定非常熟悉,并亲身体会着那种不稳定的“气流颠簸”状态。“Turbulence”,即“颠簸气流”,学术语为“湍流”。而“Turbulence”最早出现在意大利语中,就源自16世纪早期达·芬奇的“la turbolenza”(图2)^[1]。彼特·戴维森(Peter A. Davidson)等编辑的“A Voyage Through Turbulence”(《湍流迷航》,笔者译)一书,详细介绍了对流体力学“湍流”研究作出过突出贡献的奥本·雷诺(Osborne Reynolds, 1842—1912年)等12位著名学者。但笔者认为,或许他们应该把列奥纳多·达·芬奇列在第一位,而仅仅放入后记中是不够的。

除了最早给出“湍流”一词,在爱德华·马克库蒂(Edward MacCurdy)英译版《列奥纳多·达·芬奇笔记》^[2]中,其关于一般水流和“湍流”流动(eddy motions)的详细描述就单独占用了121页。在这本笔记手稿中,达·芬奇最早提出了“湍流”(eddy)的概念并分析了其成因。他的手绘(图3(b))“一股自由水射流从一个方形渠流至水池”或许是现世最早的“湍流涡旋”流动显示(flow visualization)图。他写到:“人的头发包括有两种运动,其一是因为自身

重力(的下垂);其二是因(发丝)内卷的方向性。而如果观察水表面的运动,也类似:水的涡旋运动一部分是主体水(因为重力)的运动;另一部分则包括一些随机或者反方向的(湍流)流动。”除了这里他最早提出了“湍流”的概念,美国专攻湍流的著名科学家勒姆莱(John L. Lumley, 1930—2015年)认为达·芬奇的这一思想或许就是当今著名的“湍流雷诺分解”,而他领先了奥本·雷诺近乎400年^[3]。在描述经过一个钝体后水的运动时(图3(a)和图3(c)),达·芬奇在钝体下游画了一排尾流涡,并最早指出流体绕体运动中涡的重要作用即“通常,任何物体都渴望保持自己本来的状态。流动的水也不例外,因此,它在自身能量驱动下努力保持原态流动;但当其在路径遇到障碍物时,就会结束之前的流动状态,出现环流和旋转运动。”而实际上图3(a)画的就是圆柱尾流中的卡门涡街^[4]。他还进一步地解释道:(运动流体中)小涡不计其数,大的主体运动只由大的湍流旋转构成,而小的运动却是由大湍流和小湍流一起促成。这大概就是湍流理论研究中“理查德森能量级串”(Richardson’s energy cascade)、“柯尔莫哥洛夫均衡理论”(Kolmogorov’s equilibrium theory)、相干结构(coherent structures)及“大涡模拟理论”(large-eddy simulations)思想的雏形了^[4]。

13
Epilogue: a turbulence timeline
The Editors 427

Table 13.1 Some major events in the history of turbulence

Reference	Brief description of the event
Leonardo da Vinci (c. 1500)	Used the word “turbolenza” and sketched a variety of turbulent flows
Katsushika Hokusai (c. 1831)	Sketched the “Great wave off Kanagawa” depicting turbulent broken waves
Hagen (1839)	Formally recognized two states of fluid motion
Saint-Venant (1851), Boussinesq (1870)	Postulated eddy viscosity
Reynolds (1874)	Analogy between eddy motion of fluid and heat transport
Reynolds (1883)	Direct and sinuous motion in pipe flows; Reynolds number
Kelvin (1887)	Used “turbulence” in modern scientific literature
Rayleigh (1892)	Inviscid instability
Reynolds (1895)	Reynolds decomposition; Reynolds stresses
Prandtl (1904)	The concept of the boundary layer; its separation and control

(cont.)

图2 《湍流迷航》后记截图^[1]

而现代流体力学知识告诉我们,常态下的流体运动是稳定的,但是当其流速达到一定大小时(临界雷诺数),这种稳定性就会被破坏,即流动失稳形成“湍流”。而“湍流”就是由一个个大大小小的“涡旋”组成的。符松^[5]曾指出“列奥纳多对涡的观察、

研究并不局限于钝体绕流,在流动截面突然收缩或突然扩张时,他都发现了涡的产生,并且是不对称的——尽管流场几何呈对称形状。”并总结了达·芬

奇对流体力学的主要贡献,包括“三维不定常流场显示”,“钝体绕流”,“湍流运动”等。因此,我们认为达·芬奇是“湍流”研究的先驱。



(a) 圆柱绕流

(b) 渠道湍流

(c) 绕体湍流

图3 达·芬奇手绘

2 达·芬奇与飞行

据传约600年前,达·芬奇在其飞行研究手稿的边缘写有一段文字,“幼年尚睡在摇篮中的他曾梦见被一只大鸟袭击,它黑色的尾翼刺进了他的嘴巴”。可见达·芬奇对于鸟类飞行(图4),或者说人类飞行器研究的痴迷始于其摇篮时代,并执着一生。因为对鸟类飞行的痴迷,他在对鸟类飞行的空气动力学进行详细研究的基础上,于1505年完成了18页手稿《论鸟的飞行》。达·芬奇通过观察得知“鸟尾巴有调整飞行高度的作用”,“鸟在高速飞行时,双腿收拢,这是为了减少阻力;而在慢速飞行或降落时,双腿

垂下,这样增大阻力,起到减速作用。”他还认为“鸟是一架按数学原理工作的机器,人有能力仿制这种机器包括它的全部运动”。他相信“一个带有足够大的翅膀并正确安装的人将会学到如何克服空气阻力,征服天空,成功地调节翅膀并飞入天空。”^[6]而这一思想距离1903年12月17日美国的莱特兄弟成功试飞人类首架飞机和1909年9月21日“中国航空之父”冯如(1884—1912年)成功首飞中国人自己设计、自己制造的第一架飞机提前了约400年。2003年,达·芬奇设计的翅膀(图5右上图),其气动性能已经被验证^[7]。



图4 达·芬奇手绘:鸟类飞行的技巧

达·芬奇对于飞行研究的初级阶段,即机械飞行,是对降落伞的研究。1485年,达·芬奇设计了第一个飞行器,即“降落伞”原型(图5):一个被没有开口的亚麻布包裹形似金字塔的刚体结构。他注释

到“人们借助这个降落伞可以从任意的高处跳下而且不会受到任何伤害”。2008年4月26日,在瑞士西部城市帕耶讷,36岁的奥利维耶·维耶提·特帕使用由达·芬奇设计的金字塔型降落伞从距地面600m

高的直升机上成功跳下,验证了其设计^[8]。而与机械飞行不同,达·芬奇飞行研究的终极目的是想要实现人类依靠挥动人工翅膀而“自主飞行”。在1487年,达·芬奇画出了“扑翼机”草图(图5右下图)。这种“扑翼机”设计地相当精巧,其翅膀由几根弯曲的金属杆连接的骨架,通过一套轮子和连杆,使每一根都产生多种弯度,从而达到模仿鸟的扑翼动

作的目的。但是正如达·芬奇曾从飞禽的解剖中发现的“鸟的臂肌相当有力,而人的臂肌却显得太‘苍白无力’了”,目前实用的扑翼机由于控制技术、材料和结构方面的问题一直未能解决,并没有被真正制造出来。虽然扑翼机没有真正被验证,但人类用人力作扑翼飞行试验时,却派生出了另外一种飞行器——滑翔机。



图5 达·芬奇手绘:“降落伞”和“扑翼机”(背景图片自:《Da Vinci: Shaping the Future》)

<http://zh.marinabaysands.com/museum/exhibition-archive/davinci/themes/natural-science.htm>

此外,达·芬奇还根据“物体运动时,对空气的压力等于空气作用于其上的力”于1483—1486年间设计发明了空气螺旋桨(图6),这架飞行器设计的理论基础或许就是早于艾萨克·牛顿(Isaac Newton, 1643—1727年)约200年的“第三运动定律”的雏形。这架4人力运作的“空气螺旋桨”起初的研究目的是测试它的效率,它整体由亚麻布和一些金属线组成;

4个人站立于中央,靠手臂力量推动一个轴旋转以实现飞行。尽管这架“空气螺旋桨”没有实现离地,但是它却是著名航空先驱恩里科·费莱尼尼(Enrico Forlanini, 1848—1930年)的蒸汽直升机及现代直升机设计灵感的来源。因此,从某种意义上说,达·芬奇是流体力学航空科学研究第一人。

3 达·芬奇与波

之后,达·芬奇的研究又从鸟类等飞行生物延伸到自然界影响飞行的主要因素上来,即流体水与空气。《列奥纳多·达·芬奇笔记》^[2]就记载了达·芬奇对波浪、空气波及其波间相互作用的研究,江志荣^[6]曾对其理论进行了初步探讨,这里仅摘录一些达·芬奇的理论,以飨读者。首先关于波的多样性方面:“水的表面,运动的力量(即水面上运动物体对水的作用力)所引起的水波呈半圆形”,“如果将一块石子投入静止的水中,(在水的表面)会自该中心形成圆形水圈传播,但是如果石子被扔进流动的水中,水圈将被

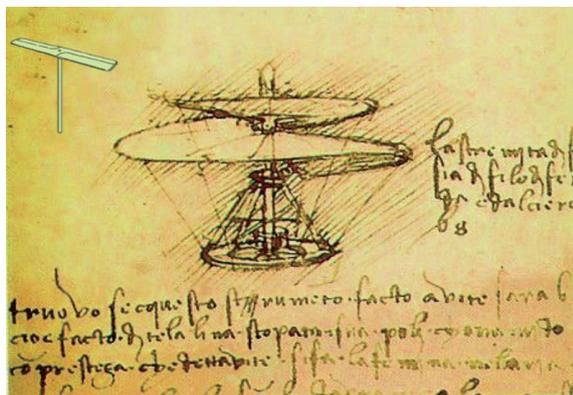


图6 达·芬奇手绘:“直升机”原型“空气螺旋桨”

拉长,几乎成了卵形”,“呈圆形传播的水波到了运动的水中将变成卵形”;关于波峰和波谷的概念:“波谷是两个波(峰)之间的低谷”,“介于两个波之间的波谷比正常的水面要低”;关于波是振动形式的传播:“以石击水形成水波,离开原位,因石子撞开的水面随即合拢,水面突然开合的运动产生某种起伏,这种起伏与其说是运动倒不如说是振动”;最后,关于波的传播具有独立性:“如果你将两块石头同时抛至静水中,彼此相隔一段距离,你将看到围绕两个撞击点形成两列清晰的圆圈,当这些圆圈相遇时,这些相互交叠的圆圈仍然保持以各自撞击点为圆心……两列圆形水波相遇时并不互相破坏”。可见,他是波动理论的先祖^[6]。另外,笔者认为达·芬奇指出光和水波的运动方式相似,其实也预见多普勒效应,这也是现代流体力学测试方法激光多普勒测速的理论基础。

4 达·芬奇与风暴

达·芬奇还第一次将地球作为有机体进行研究,认为大气层内流体(指风、雨、云等)在一定条件下可以形成更“大尺度”的风暴并引发洪水(图7)。这种“风暴”和“洪水”的(流体)运动不受固定边界的限制,因而表现出更“大尺度”和更具破坏力,从而驱动湖泊和海洋,进而影响人类居住的环境。达·芬奇敢于研究和认识自然环境中对人类不利的流体运动,可以从某种意义上说他是研究环境流体力学和大气边界层中“大尺度”结构的第一人。



图7 达芬奇手绘:“洪水”与“风暴”

(更多图片: <https://lebbeuswoods.wordpress.com/2010/12/03/da-vincis-blobs/>)

5 其他

达·芬奇除了研究流体力学中湍流(湍涡)、(航空)飞行、波(浪)理论及风暴等自然气象,还分析了关于液体的体积流量守恒原理“在同一管道中,相等

的时间里流过不同面积的横截面的流体体积是相同的。”这一看似简单的结论,其实暗含着一个极其重要的假设,即“流体不可压缩”。他还据此进一步推导了一维不可压缩水的连续性及质量守恒定律^[9]。此外,他还总结出“河水的流速同河道宽度成反比”,因受到古代哲学家的深深影响,将流动的水与人类的循环系统比较,甚至用这一结论解释了血液在血管中的流动状态。他还发现了液体压力的概念,提出了连通器原理“在连通器内,同一液体的液面高度是相同的,不同液体的液面高度不同,液体的高度与密度成反比。”他还基于对水的特性的理解,创新了液压工具,使其能够将破坏大自然的水(能)转换成有利于人类的动力(能),发明了千斤顶。他还发明了潜水艇、潜水机,以猪皮制成潜水装;设计制作了通风设备(世界上第一台空调设备);发明了风速仪(图8),抽水机等等^[2]。但因为其性格上疑神疑鬼,行事隐秘,劣于跟别人分享自己的思绪,导致世人无缘见识他的诸多伟大发明。

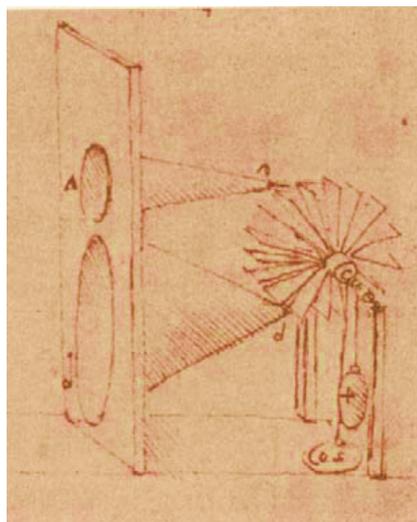


图8 达芬奇手绘“风速仪”(约1490年,现收藏于大英图书馆)

6 结语

如果说达·芬奇是一只满腹各门各类科学知识的“大象”,那笔者仅当是流体力学学科的“盲人”。而对左利手作者来说,在当时条件下将羽毛笔由右向左“拉”过来写比由左向右“推”过去写要容易的多,而且不会将刚写好的字弄糊,因此,熟知流体知识的“左撇子”“大象”——流体力学家达·芬奇终其一生均以镜像写字,其笔记也多是镜像字也就能够解释了。

以上部分信息和图片来自网络,仅作为科普教育使用,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Davidson PA, Kaneda Y, Moffatt K, et al. A Voyage Through Turbulence. Cambridge: Cambridge University Press, 2011
- 2 Maccurdy E. The Notebooks of Leonardo da Vinci. New York: Reynal & Hitchcock, 1938
- 3 Lumley JL. Some comments on turbulence. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1992, 4(2): 203-211
- 4 Gad-El-Hak M, Buschmann MH. Turbulent boundary layers: Is the wall falling or merely wobbling? *Acta Mechanica*, 2011, 218(3-4): 309-318
- 5 符松. 湍流——达·芬奇的科学追求. *力学与实践*, 2000, 22(4): 77-79
- 6 汪志荣. 列奥纳多反颌芬奇波动理论研究. *力学与实践*, 2005, 27(4): 83-87
- 7 Kemp M. Leonardo lifts off: A wing designed by Leonardo da Vinci proves to be aerodynamic. *Nature*, 2003, 421: 792
- 8 Bartoli G, Borsani A, Borri C, et al. Leonardo, the wind and the flying sphere. *EACWE*, 2009, 5: 225
- 9 http://www.forgottenbooks.com/readbook_text/Leonardo_da_Vincis_Note-Books_v1_1000746990/123 (updated on November 2nd, 2015)

(责任编辑: 胡 漫)