

有关机翼升力理论的其人其事



丁祖荣¹⁾

(上海交通大学教育部水动力学重点实验室, 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要 回顾了 19 世纪末、20 世纪初探索建立机翼升力理论的过程, 包括牛顿的正弦平方定律, 对马格努斯效应的认识和应用, 兰切斯特、库塔、儒柯夫斯基建立机翼升力环流理论和普朗特建立升力线理论等。本文追溯了历史事实, 并阐述了有关其人其事。

关键词 机翼升力, 马格努斯效应, 环流理论

中图分类号: O351 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-19-407

A BRIEF HISTORY OF THE WING LIFT THEORY

DING Zurong¹⁾

(MOE Key Laboratory of Hydrodynamics and School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract This paper reviews the process of exploration of the wing lift theory in the late 19th and early 20th centuries. It includes Newton's sine-square law, the understanding and application of the Magnus effect, Lanchester, Kutta, and Joukowski's establishment of the wing lift circulation theory and Prandtl's establishment of the lift line theory. The historical facts are traced with stories about related scholars.

Key words wing lift, Magnus effect, circulation theory

鸟的自由翱翔激励着人类飞向天空的遐想, 但对鸟动作的单纯模仿不能使人飞起来。早期的飞机发明家虽然实现了动力飞行, 但由于缺乏理论的指导, 飞行器的性能无法得到实质性改进。无论在飞行速度、高度、距离和载重量方面, 现代飞机都远远超过了鸟类, 它建立在现代飞行理论的基础之上, 其中流体力学(空气动力学)的贡献是关键性的。边界层理论解决了飞行阻力问题, 环流理论则解决了机翼升力问题。前者已有很多文章讨论, 本文着重介绍后者。

1 牛顿正弦平方定律

从 16 世纪起, 学者们开始认真研究鸟的飞行原理。达·芬奇发表的著名论文《论鸟的飞行》认为鸟逆风飞行时不扑动翅膀是得益于下面的气流; 17 世

纪, 另一位意大利学者波莱里发表的权威著作《动物的运动》也认为鸟的翱翔飞行是上升气流造成的。这说明“气流从下方冲击翅膀, 支撑起鸟的重量”是早期的普遍认识。从 18 世纪起不断有人模仿鸟的翅膀从高处逆着气流作滑翔飞行, 均以失败告终。从 19 世纪起, 飞行实验家开始制造风洞或旋臂机对机翼模型作测试。经不断摸索和改进, 在 20 世纪初, 莱特兄弟终于实现了载人动力飞机的短暂飞行。但到此时, 无论是飞行实验家还是学者都没有搞清楚鸟类飞行的科学原理, 特别是翅膀的升力机理。

19 世纪初, 被英国人誉为“航空之父”的乔治·凯利用自行设计的旋臂机揭示了一块沿着飞行方向的斜平板(具有攻角)可以获得升力的事实。他在论文《论空中航行》中指出, 只要“给一块斜平板提供动力, 使之在空气中产生升力并支持一定重量”就

本文于 2019-11-04 收到。

1) E-mail: zrding@sjtu.edu.cn

引用格式: 丁祖荣. 有关机翼升力理论的其人其事. 力学与实践, 2020, 42(5): 645-649

Ding Zurong. A brief history of the wing lift theory. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(5): 645-649

能实现机械飞行,他还给出了计算升力的半定量关系式,但没有解释产生升力的原因。另一位英国人菲利普斯通过风洞实验发现,向上凸起的弧形面即使前后缘处于同一高度(攻角为零)也能产生升力,而且比斜平板更优越,他同样没有对此现象作出解释。后来英国人理查德·费里斯在其名著《怎样飞行》(1910)中指出:“飞机的上表面必需外凸才能获得升力效应。这是飞机设计中的一个谜,至今没有人能解释。”凯利和菲利普斯的发现、费里斯的疑问没有引起学者们对理论探究的重视。其中一个重要原因是,当时科学界正被一种悲观情绪笼罩着,即对飞机普遍持怀疑态度,其根源可追溯到18世纪的牛顿。

牛顿在《自然哲学的数学原理》(1726)中首次讨论了物体在流体中运动时所受到的阻力。他指出,两个形状相同的物体分别在密度不同的流体中沿水平作定常运动时,物体受到的阻力(1)与运动速度的平方成正比;(2)与物体的线性尺度的平方成正比;(3)与流体的密度成正比;并对圆球、圆柱体和圆锥体进行了计算。事实上,用力学的基本定理——动量定理可以证明牛顿的论断是正确的。牛顿的追随者们按牛顿的方法计算了一块面积为 S ,攻角为 α 的斜平板,在密度为 ρ 的流体中以速度 U 沿水平作定常运动时,作用在平板法线方向的作用力为

$$F = \rho S U^2 \sin^2 \alpha$$

按照流体从下方冲击平板形成托力即升力的认识,上式就是升力公式。此公式被称为计算斜平板升力的牛顿正弦平方定律,可用来估算鸟在滑翔时翅膀上的升力。由于鸟滑翔时翅膀的攻角很小,攻角正弦的平方更小,因此按公式计算的升力也极小。将斜平板用于飞机时,为了获得足够大的升力必须设计面积巨大的机翼。另一方面斜平板的升力与阻力之比为 $\cot \alpha$,也是小量。为了使斜平板升空必须配置巨大的推进发动机,这两点都是不现实的。

由于正弦平方定律冠以了牛顿的大名,吓退了当时一批学者和科学家。他们认为人类要想实现动力飞行是不可能的,其中包括大科学家开尔文勋爵。开尔文对英国航空学会写信说:“除了气球以外,我不相信比空气重的飞行器能取得什么结果,对此我一点信心也没有。”另一位大科学家亥姆霍兹也持相同观点。据说在一次考试中,一名学生因表达了相信

动力飞行可能实现的观点,亥姆霍兹给他成绩为不及格。

事实上,包括凯利在内的许多飞行实验家从试验中都发现升力与攻角的正弦成正比,而不是与攻角的正弦平方成正比。有人因此抱怨牛顿耽误了飞行的发展。后来冯·卡门在1953年为纪念动力飞行五十周年所写的书中说了公道话:“我个人并不相信牛顿的影响会造成这么大的恶果。我认为在我们所谈论的那个时代,真正对飞行发生兴趣的人们绝大多数都是不相信任何理论的。”人们也没有因此而停止对机翼升力的理论探索,只不过要寻找另外的突破口。

2 马格努斯效应

建立机翼升力理论的突破口是马格努斯效应的发现^[1]。马格努斯效应是指:当一个物体在沿某方向运动的同时发生绕另一方向的旋转时,在与由这两个方向矢量组成的平面的垂直方向上将产生一个横向力,使物体飞行轨迹发生偏移。在球类运动和炮弹运行中都可以观察到马格努斯效应,如网球的飘球、乒乓球的弧圈球,足球的香蕉球,棒球的摇摆球和下坠球等;炮兵们发现从刻有来福线的炮膛里射出的炮弹常常偏离弹道。类似的现象引起学者和工程师们的关注。

早在1671年牛顿在观看剑桥学院的网球比赛中就注意到网球的飘球现象。他在一封信中试图作出解释:“我经常看到用球拍斜击网球时使其走一条曲线。球拍的斜击让球既旋转又前进,这种复合运动造成球两侧附近的空气受到较强烈的压缩和打击,于是空气作出相应的反弹。”1805年英国枪炮工程师罗宾斯在发表的《空气的阻力》论文中把子弹偏离抛物线轨道的原因归为子弹的旋转增加了空气阻力。1852年,德国柏林大学的物理学教授马格努斯通过科学实验发现了马格努斯效应(图1)。在他的实验中,一个两端装有锥形轴承的铜质圆柱可绕轴旋转;他将圆柱置于两个可自由转动的悬臂之间,让吹风机的气流沿悬臂方向吹过圆柱,并借助弦线让圆柱高速旋转。他发现圆柱总是朝转轴的侧向偏转。1853年,马格努斯在一份学会纪要上发表了他的发现,此现象被称为马格努斯效应。

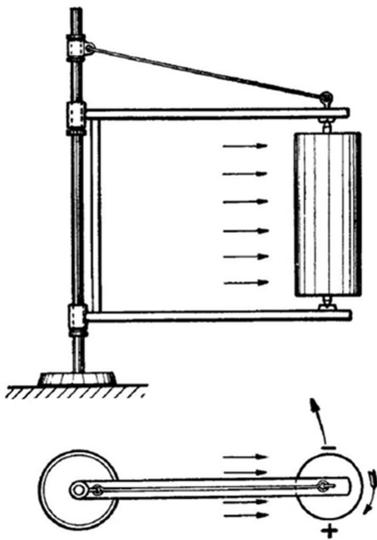


图 1 马格努斯效应实验

马格努斯效应的发现引起了科学界的关注。英国物理学家瑞利探讨了马格努斯效应的流体力学机理。他在 1878 年发表的论文《论网球的不规则运动》中,用伯努利定律解释了马格努斯效应。他首先把马格努斯效应的流动抽象为均流与环流叠加的力学模型,认为环流是圆柱的旋转带动了周围流体一起旋转形成的。当旋转的方向矢量与运动方向不一致时,横向一侧的流体速度增加,另一侧流体速度减小。根据伯努利定律流体速度增加使压强减小,流体速度减小使压强增加,这样就产生横向压力差,形成横向力。当这个横向力作用在飞行物体的向上方向时就形成了升力。亥姆霍兹、开尔文也把注意力集中在环流上,引入了环量和涡量概念,分别建立了静止流体中环量不变定理(1843),和沿封闭流体线环量守恒定理等(1869)。遗憾的是这几位理论科学家都没有将马格努斯效应引伸到机翼的升力机理上,主要是因为不清楚固定的机翼何以产生环流。

工程界也对马格努斯效应发生兴趣,提出了各种实际应用的方案,其中最著名的是德国工程师弗莱特纳设计制造了用旋转圆筒代替布帆的船。弗莱特纳特地咨询了哥廷根大学的普朗特团队,后者在风洞里测试了旋转圆筒的侧向力,确认若将旋转圆筒装在船上其侧向推动力将比相同面积的布帆大好几倍。弗莱特纳还接受了普朗特的建议,在圆筒两端设置了突出的环形板,形成所谓弗莱特纳转子,并于 1922 年取得了专利。弗莱特纳在实船上沿轴线前后安装了两个用电驱动的可旋转弗莱特纳转子,仅

依靠转子的马格努斯力推动和操纵船前进。1924 年,第一艘弗莱特纳转子船下水试航成功,当时冯·卡门亲自坐过这艘船。1926 年,该船横渡大西洋抵达纽约。由于弗莱特纳转子船造价昂贵,无法与柴油机船匹敌,在商业上难以推广,但是将其作为柴油机船的辅助设备是可行的。装有弗莱特纳转子的柴油船在有风时启动转子推进,无风时用柴油机推进,可节约 30% 的燃料。2008 年德国建造一艘排水量达 10 万吨、柴油机功率为 3.5 MW,装有 4 个高达 27 m,直径 4 m 的转子的货船。该船于 2010 年下水,满载货物从德国的恩登开到爱尔兰的都柏林。在造船业和航空业中开发运用马格努斯效应的努力和实践从来没有停止过,在资源匮乏、提倡绿色能源的今天仍具有潜在的应用价值。

3 兰切斯特、库塔、儒柯夫斯基关于翼型升力的环流理论

马格努斯效应的发现距离翼型升力理论仅一步之遥,完成这关键性一步的跨越应归功于三个人:英国工程师兰切斯特、德国数学家库塔和俄国物理学家儒柯夫斯基^[2]。

兰切斯特是一个富有传奇色彩的人物,在汽车、航空、数学等不同领域都取得了业界公认的成就。在肯辛顿科技学院毕业后,他长期从事汽车技术研究和开发工作,取得众多发明专利。27 岁时发明制造了英国第一辆 4 轮汽车,并成立了自己的公司。46 岁时发表一系列有关空战方面的论文,他被世界公认为军事运筹学的奠基者之一。美国运筹学会在约翰·霍普金斯大学建立了以兰彻斯特命名的奖金,每年颁给最优秀的运筹学论文的作者。由于在汽车、航空领域的卓越贡献,他先后被授予英国皇家航空协会金质奖章、机械工程师学会瓦特奖章、美国古根海姆金质奖章等;在伦敦市中心的布鲁姆斯伯里绿地竖有兰彻斯特汽车纪念碑。

兰切斯特被公认为机翼升力环流理论的最先发现者。他在大学毕业后最先感兴趣的其实是飞行器。他做了大量飞机模型进行弹力实验,1894 年制成了全尺寸的飞机样机,只因缺乏匹配的轻型发动机而错失了初期动力飞行的机会。他潜心研究机翼的升力机理,为此不厌其烦地到海边观察海鸥的飞翔,特别是滑翔时翅膀的姿态,还测量了海鸥的重心和浮力中心。经过深思熟虑并用模型做实验后,他终于悟

出上凸的翼型产生升力的根本原因是涡和环流的作用。他认为由于产生了绕机翼的环流导致上翼面低压，下翼面高压，因此形成升力。

1894年，兰切斯特把阐述机翼升力理论的论文投寄给伯明翰自然历史与哲学学会，1897年又写论文《鸟的翱翔和机械飞行的可能性》投寄给英国物理学会，均遭到拒绝。两个学会都严肃警告他一个工程师不应该有这种疯子的想法。直到莱特兄弟飞机上天后的1907年，兰切斯特才得以发表两卷本专著：《空气动力学和滑翔力学》。该书详细论述了机翼的环流理论，涉及机翼的升力和阻力，还首次提出机翼附着涡、有限翼展的翼梢涡概念。当时的英国学术界非常保守，兰切斯特的著作在英国没有引起注意，却在德国受到了重视。1908年，兰切斯特应邀到哥廷根大学讲学，与普朗特的团队进行学术交流。

另一位独立发现机翼升力环流原理的是德国年轻的数学家库塔。在德国工程师李林塔尔在柏林进行持续载人滑翔机飞行试验(1890—1896)并最后死于飞行事故的感人事迹的激励下，库塔决定对李林塔尔偏爱的带有尖锐尾缘的弯曲翼型进行研究，在他慕尼黑大学的毕业论文中作了理论探讨和计算。他首先确认升力是由翼型表面环流造成上下气流速度不同引起的，同时推测尖锐尾缘决定了环流的大小；他认为上下表面的气流在尾缘汇合并速度相等是确定环流的条件。库塔起先不愿公布自己的想法，在他的导师鼓励下才以简报的形式公开发表，题为“流动流体中的升力”，时间是1902年。库塔给出的条件后来被称为“库塔条件”。

机翼环流与升力之间定量关系是俄国数学与物理学家儒柯夫斯基给出的。儒柯夫斯基深深迷恋于航空学，除了理论研究外他还自己制造的风洞里作实验研究。在不知道库塔简报的情况下，儒柯夫斯基独立地发展了定量计算机翼升力的理论，其中包括著名的儒柯夫斯基变换、儒柯夫斯基翼型和机翼升力公式等，主要内容包含在1906年发表的论文中。后人将他和库塔的理论称为“库塔-儒柯夫斯基定理”。

由他们三人共同建立的翼型升力环流理论的简要表述是：翼型在静止的空气中启动后尖锐尾缘处出现初始启动涡，根据开尔文环量守恒定律在翼型上产生大小相等、方向相反的涡，称为附着涡；当满足库塔条件后启动涡被冲向下游，附着涡则与翼型

一起运动，附着涡引起的环流产生了升力(图2)。普朗特用实验显示了这一现象，风洞测量表明翼型上表面吸力的贡献远大于下表面的压力。

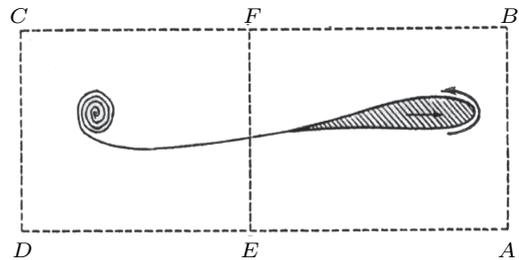


图2 翼型升力环流理论

4 普朗特升力线理论

“库塔-儒柯夫斯基理论”主要适用于二维机翼，即翼展无限长的等截面机翼。实际机翼是有限长且截面沿展向变化的，称为有限翼展机翼。普朗特在有限翼展机翼的升力理论方面做出了重大贡献，主要是创建了升力线理论(1911)^[3]。如图3所示，普朗特假定：(1)机翼可用一根代表附着涡的升力线代替；(2)升力线各点的环量和升力可用库塔-儒柯夫斯基定理确定；(3)环量沿升力线发生变化，产生了向下游沿流线伸展的自由涡；(4)升力线与自由涡线构成了连续的马蹄涡。根据普朗特的理论，对有限翼展机翼升力问题可以进行数学处理。在工程上一方面可以由机翼的几何参数及攻角确定升力沿翼展的分布，另一方面根据升力沿翼展的分布可直接计算马蹄涡内的感生速度以及所需要的能量。因此升力线理论成为中等速度飞机的设计基础，并用普朗特的名字命名。

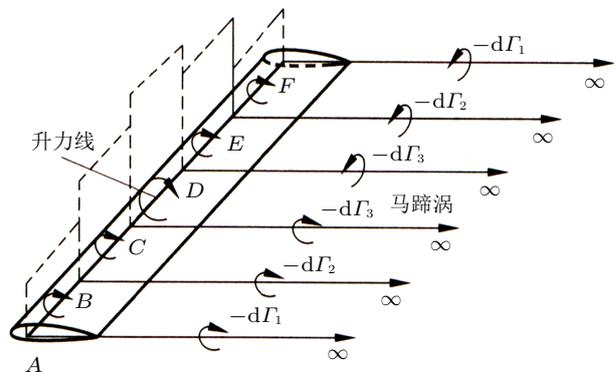


图3 升力线理论

兰切斯特在1907年发表的《空气动力学》中曾提出了有限翼展机翼附着涡的概念，并用图描绘了

翼稍滚卷成稍涡的设想。对有限翼展机翼理论的贡献有多少应归功于兰切斯特曾有过争论。兰切斯特在逝世前曾抱怨他的贡献没有得到充分承认, 英国有些人甚至认为普朗特偷了兰切斯特的思想。普朗特在一次演讲中反驳了这种议论, 他指出: “事实并非如此, 早在看到兰切斯特的著作之前建立这个理论的观念已经在我头脑中出现了。” 因此一读到他的著作就立即理解了他的意思, 并邀请他来哥廷根交流讨论。冯·卡门认为事实上两人走的是不同的途径。兰切斯特的观念很难进行数学处理, 在表达方式上深奥艰涩, 令一般人难以理解。而普朗特则沿着应用力学的思路来描述和处理这一问题, 因此获得了巨大成功。事实上普朗特也肯定了兰切斯特的成就, 他说“你们在英国称之为‘兰切斯特-普朗特理论’,

这是对的, 因为兰切斯特也独立地得到了这个结果的一个重要部分……我们从他的书上也吸取到许多有用的观念。”

参 考 文 献

- 1 冯·卡门. 空气动力学的发展. 江可宗译. 上海: 上海科学技术出版社, 1958
Von Carmen T. The Development of Aerodynamics. Jiang Kezong, translation. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1958 (in Chinese)
- 2 Seifert J. A review of the Magnus effect in aeronautics. *Progress in Aerospace Sciences*, 2012, 55: 17-45
- 3 丁祖荣. 流体力学, 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2018
Ding Zurong. Fluid Mechanics, 3rd edn. Beijing: Higher Education Press, 2018 (in Chinese)

(责任编辑: 胡 漫)