

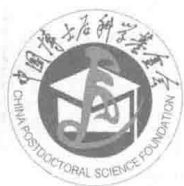
博士后文库
中国博士后科学基金资助出版

拍动翼动力学分析与应用

许国冬 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

拍动翼动力学分析与应用

许国冬 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以仿生流体动力学为背景,侧重拍动翼动力学分析与仿生应用,对拍动翼的高雷诺数运动的动力学原理与特性进行研究。本书梳理拍动翼应用的历史与现状,从人类仿鸟飞行、仿鱼游动的实际案例出发,分析生物飞行或者游动的特点,采用计算流体力学方法研究拍动翼的非定常流动,对简化的拍动翼运动进行了深入分析,揭示了拍动翼产生推力或升力的机理与特性,特别分析了翼近水面效应及串列拍动翼的涡-翼干扰特性。

本书讨论了拍动翼力学原理的应用案例,将原理分析与创新设计结合,理论联系实践。从生物拍动到仿生流体动力学模型,再从力学分析到基于拍动翼相关装备的概念设计,可为新型仿生装备的开发提供理论上的支持,也可启发研究人员创新思路。

图书在版编目(CIP)数据

拍动翼动力学分析与应用/许国冬著. —北京:科学出版社,2019.3
(博士后文库)

ISBN 978-7-03-060864-2

I. ①拍… II. ①许… III. ①航空器-流体力学-研究 IV. ①V212.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 049099 号

责任编辑:刘信力 郭学雯/责任校对:彭珍珍
责任印制:肖兴/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张:13

字数:242 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度；同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之材，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

自序

研究机翼的定常与非定常流体力学性能是一件很有意义的事情。2013年在段文洋教授的建议下我开设了研究生课程“仿生流体动力学及其应用”，开始积累素材，总结当前仿生推进与拍动翼能量采集方面的研究成果。在课程讲授及与学生的研讨过程中我对仿鸟和仿鱼机器人的流动动力学研究有了更为深入的理解。拍动翼源于仿生，其动力学原理与鸟翼、鱼鳍推进的动力学原理是一致的。拍动翼的运动看似简单，但一些设计人员对拍动翼流体力学性能的理解仍有或多或少的不足，这是一些实验模型与原理样机设计失败的主要原因。推进器和潮流能、风能转换装置都在水或空气中运动，存在肉眼看不见的流动现象，我们很难直观地理解其中流动的规律。机械或电子专业背景的设计人员不能完全理解产生升力的机理，想要获取推力最优或者效率最优的拍动翼装置，设计人员必须顺应拍动翼的动力学规律，把力学原理和机械设计完美地融合。在进行设计时应扬长避短，避免盲目模仿生物因自身局限性而形成的运动特点。因此，仿生更应该注重“神仿”而不是“形仿”。那种刻意仿造结构外形而不能很好把握力学规律的仿生显然是本末倒置。

当前一些仿生设计还处于概念创意阶段，离商业应用还有很长的路要走。市场上的无人机以旋翼为主，风能、潮流能发电装置以水平轴轮机为主。基于拍动翼装置的设计与应用还处于概念设计或原理样机阶段。拍动翼虽然有自身的优点，但是其缺点也需要被充分认识。结合自身的研究，我整理拍动翼流体力学的研究成果准备了本书的内容，希望能够给关心扑翼机、仿生推进研究的读者以启示，能在总体上更好地把握拍动翼的运动控制。

本书得到了中国博士后科学基金的出版资助，在此表示感谢。书稿的部分研究成果是在国家自然科学基金(51479044, 11602067)的资助下完成的。本书的成稿过程中得到了许多学生的帮助，包括徐文华、麻彩朋、楚振嘉、杨晓彬、庞顺翔、林甜甜、裴浩、雷洁等同学，他们在插图、资料查找、内容校对等方面给予了帮助，在此表示感谢。

特别感谢我的妻子刘变对我工作的支持。

作者

于哈尔滨工程大学船海楼

2018年3月13日

前 言

仿生科学技术是一门集合了生物学、力学、材料学、机械设计制造与控制技术的交叉学科。拍动翼推进是鱼类游动与鸟类飞行运动的简化,是仿生学研究的重要内容。古人有云“道法自然”,“道”即原理或规律。人们观察生物的构造与运动,从中发现相关的生物学原理或规律并服务于我们的生活与工程。大自然中的飞行类与游水类动物经历地质年代的自然选择与进化,逐步形成与其生存环境相适应的形态与习性,其背后所蕴藏的生物学机理值得我们深入学习与探讨。仿生学是一个科学系统,致力于效法生物的自然功能。仿生学的范畴十分广阔,包括生物形态、构造、运动等。本书将关注与鸟类飞行、海洋鱼类游动相关的拍动翼流体动力学原理,将力学原理应用于仿生推进运载器的设计。我们研究拍动翼推进的目的在于研究仿生翼产生推力的机理,揭示拍动翼运动过程中的流体力学原理。本书主要研究刚性翼拍动运动,总结其流体力学规律,为相关设计提供理论参考。在设计仿生推进运载器时,我们将生物推进的力学规律加以拓展应用,有时甚至可以摆脱生物构造自身的局限性,创造出新的概念设计。

流体力学是一门古老而又具有生命力的科学,至今依然存在许多尚未解决的流体力学机理问题。拍动翼研究从生物原型出发,近似鸟翼、鱼尾的拍动运动,建立对应的力学模型,采用数学分析或者数值计算的方法,针对效率与推力等目标参数研究拍动翼的流体力学原理。简单而言,就是描述“是什么”,解释“为什么”,并告诉人们“怎么办”。由于仿生力学自身的复杂性,研究者要对鸟翼或鱼尾进行数值模拟或者仿造,如果过多地考虑各种相关度并不紧密的力学因素,反而不利于力学原理的探索。我们将仿生推进问题简化为机翼的简谐拍动运动,化繁为简,研究生物摇摆推进的力学规律。本书建立对应的拍动翼数学模型,求解数学力学方程,再通过数值解反过来解释拍动翼运动的力学特性背后的原理。

研究仿生流体力学首先需要观察生物的运动特性。借助照相机和高速摄像机等设备,我们可以捕捉生物运动的细节。还可以运用解剖学还原生物的构造特征,帮助我们理解生物推进力学。例如,海鸥与天鹅,它们的身体覆盖有羽毛,伸展翅膀后身体依然为较好的流线型;羽毛不仅仅帮助御寒保暖,更有助于减小飞行时的阻力;翼尖的层叠羽毛具有良好的抗震降噪功能。观察发现,蜂鸟悬停时翅膀的运动轨迹为横着的“8”形,这种运动似乎是为悬停定制的;同样的运动形式也可见于蜜蜂等昆虫的悬停。对各种现象的观察可激发我们去思考运动背后的流体力学原理,对流体动力学机理的解释将帮助我们得到拍动翼的最佳运动参数

组合, 可将力学原理应用到工程设计中去。生物学的观察对拍动翼仿生研究至关重要。

仿生流体动力学研究生物运动与对应的流体动力学性能, 选取合适的研究对象是关键的一步。鸟类飞行或者鱼儿游动一般被认为是其最优化的运动方式, 或达到效率最优, 或实现推力(加速度)最优。例如, 长距离迁徙的大雁、天鹅等, 身体形状具有低阻力特性, 其扑扇翅膀可达到效率最优, 适合长距离飞行。迁徙的大雁常常排成“人”字形或“一”字形, 排列方式及距离是为了实现推进效率最优还是仅仅只是它们的生活习性呢? 个体之间又存在怎样的关联呢? 这些都需要我们通过力学分析来寻找答案。大型肉食海洋动物需要具有极强的机动性, 它们对快速启动有很高的要求。蜂鸟为汲取花蜜, 对飞行的稳定性要求很高, 空中悬停是其必备的飞行技能。研究仿生动力学应该从大面上着手, 选择合适的研究对象, 例如, 以珊瑚鱼作为快速性的研究对象, 很难达到预期目标, 而选择金枪鱼或者剑鱼为研究对象, 则可以抓住快速游动的本质。

仿生流体动力学研究的是生物力学原理, 还可以与其他学科交叉与融合。例如, 考古人员发现了一种阿根廷巨鸟化石, 检测表明, 该鸟生存于 600 万年以前, 体重约 70kg, 达到甚至超过了一般成人的体重, 其翼展达 7m。然而分析表明, 该巨鸟可能不具备飞行能力, 因为对应翼展的飞行速度需要超过 12m/s 才能获取足够的升力支撑其体重。巨鸟如果拍动翅膀飞行, 其身体结构可能不能承受快速扑扇翅膀引起的载荷。仿生流体动力学的知识与其他行业或产业的结合会发挥更大的作用。

我们在研究生物的流体动力学问题时需考虑其生活习性、运动特点, 然后观察、思考, 提炼力学问题, 进行力学分析, 获取运动规律及对应的力学机理并应用于工程实践。与鸟翼、鱼尾等复杂的多自由度运动相比, 刚性拍动翼运动易于描述, 运动可控, 可直接应用于相关工程的设计。本书选择简化的拍动翼作为研究对象, 分别采用理想流体边界元方法与计算流体动力学方法, 研究拍动翼的相关力学规律。希望此书能有助于大家对拍动翼力学原理的认识与理解, 也为相应的仿生设计提供参考与借鉴。本书难免存在疏漏之处, 请读者批评指正。

作 者

2018 年 3 月

目 录

《博士后文库》序言

自序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 拍动翼的研究意义	1
1.2 古代拍动翼仿生的探索与应用	2
1.2.1 我国古代飞行的例证	2
1.2.2 早期的飞行事故与警示	3
1.3 当代拍动翼研究经典实例	6
1.3.1 拍动鳍的水下推进	6
1.3.2 仿生拍动翼飞行器研究	14
1.4 当前拍动翼动力学研究与挑战	17
1.5 本书的主要内容	18
第 2 章 生物运动器官构造与拍动翼运动特点	19
2.1 水游类生物的鳍构造与运动特点	19
2.1.1 鱼身与鱼鳍构造	20
2.1.2 鱼运动分类与运动规律	23
2.2 飞行类动物翼的构造与特点	28
2.2.1 鸟类的特点	28
2.2.2 蝙蝠	32
2.2.3 昆虫类翼的特点	33
2.3 拍动翼仿生的问题与挑战	36
第 3 章 拍动翼的流体动力学模型	38
3.1 机翼分析理论简介	39
3.1.1 势流理论方法	39
3.1.2 黏性流体力学方法	40
3.2 坐标系与拍动翼的运动描述	43
3.2.1 单个拍动翼的运动方程	43
3.2.2 并列双翼的运动方程	43
3.2.3 串列拍动翼运动描述	44

3.2.4	有效攻角与运动模式	45
3.3	基于理想流体力学的边界元分析	46
3.3.1	单个拍动翼的控制方程与边界值问题	46
3.3.2	双拍翼的边界积分方程	50
3.3.3	拍动翼的首缘涡分离的考虑	51
3.3.4	边界元数值计算结果的验证	52
3.4	基于黏性流体力学的数值计算	53
3.4.1	控制方程	53
3.4.2	单拍动翼的 CFD 网格与算法选择	54
3.4.3	串列翼的网格与算法选取	56
3.4.4	重叠网格技术	58
第 4 章	拍动翼的推进动力学分析	61
4.1	单个拍动翼的推进性能	62
4.1.1	机翼定常运动分析	64
4.1.2	推进运动模式	65
4.1.3	制动模式	68
4.1.4	飞行模式	70
4.2	拍动翼的自由面效应	74
4.2.1	机翼的自由面效应及辐射、绕射水动力学分析	75
4.2.2	水翼在浅水域的兴波与水动力	84
4.2.3	拍动翼在波浪中的推进性能分析	98
4.3	双拍动翼的推进性能	111
4.3.1	串列拍动翼的推进性能与涡干扰	111
4.3.2	对拍双翼的推进特性分析	121
第 5 章	拍动翼的能量采集特性	124
5.1	单个拍动翼的能量采集性能分析	126
5.1.1	拍动翼势流理论分析	126
5.1.2	拍动能量采集的涡分离与 CFD 模拟	130
5.1.3	拍动翼实验研究	136
5.2	自由面及水底效应	142
5.2.1	自由面效应	142
5.2.2	底部壁面效应	143
5.2.3	浅水域水深的影响	144
5.3	双翼能量采集与涡干扰特性	146
5.3.1	双翼并列布置的水动力干扰	146

5.3.2	串联拍动翼的能量采集与涡干扰	150
5.3.3	串联拍动翼的 CFD 数值模拟与边界元方法计算的比较	155
第 6 章	拍动翼在工程中的应用	159
6.1	拍动翼装备的设计	160
6.1.1	总体框架与造型	160
6.1.2	运动机构形式	161
6.2	基于拍动翼的新概念设计	164
6.2.1	仿生拍动翼推进的水下航行器概念设计	164
6.2.2	内河船舶的对拍翼推进	166
6.2.3	长航程拍动翼飞行器	167
6.2.4	助推减摇阵列翼	168
6.2.5	蛙人助推器	170
6.2.6	仿生海龟	171
6.2.7	柔性波动翼推进的仿生乌贼	172
6.2.8	仿生海鸥	174
6.2.9	仿蜻蜓飞行器	175
6.2.10	联轴拍动翼的能量采集方案	176
6.2.11	轨道控制攻角的垂直轴轮机	177
6.2.12	串联拍动翼轮机设计	179
	参考文献	181
	编后记	192

第1章 绪 论

1.1 拍动翼的研究意义

天空中的飞鸟、江河湖海中的游鱼大多是优秀的流体力学大师。飞鸟通过扑扇翅膀来获得升力与推力，升力用于支撑自身重力，推力用来克服飞行过程中的阻力，进而实现空中翱翔。鱼类则通过摆动鱼鳍，包括尾鳍、胸鳍乃至背鳍，获得向前的推力。与鸟类不同，鱼可以利用水的浮力来克服重力。不论是鸟还是鱼，它们都能通过自身的神经系统感知自身所处环境中流体的流动，根据身边流场的变化来调整自身器官的运动从而获得最优的力学性能。然而鸟类与鱼类生物对流体力学的理解主要来自运动过程中的经验总结，通过感知自身运动与飞行特性之间的关系而学习摸索出适合自身的最优运动轨迹。其背后隐藏的拍动翼力学原理，包括升力与攻角、拍动频率等参数的关系，以及涡系的形成与演化，有待我们深入发掘。

数千年来，人类就梦想可以像鸟一样在空中飞翔，像鱼一样在水中游弋。然而由于生理构造与生活环境的巨大差异，人类仅能依靠自身手臂和腿的往复运动来实现游动，相比鱼的游动，即使是现代最优秀的游泳健将也望尘莫及。人类模仿鸟类飞行更是无从着手。人们组织的鸟人大赛深得大众喜爱，更多的是人们对仿鸟飞行梦想的寄托与怀念；大赛中出现的千奇百怪的飞人造型既娱乐大众亦实现商业营销。人类对升力产生的机理的正确理解开启了航空工业的序幕。自莱特兄弟发明飞机以来，人类通过各种载人飞行器实现飞行已经是极为平常之事。目前飞行器的绝对飞行速度大大超越了任何一种鸟类，可以运送旅客至全球绝大部分的空域。我们的航天飞行器已经突破大气层抵达月球与火星。这一切均得益于低速与高速空气动力学、高性能发动机、新型燃料、新材料等学科的发展。遗憾的是，人类建造的舰船、潜艇等装备都还很难达到海洋鱼类的速度。仿生学或许可以为我们打开另一扇门。仿生推进研究可能促进舰船航行效率的大幅提高，节约能源，减少碳排放，降低船舶推进的噪声。我们也可以通过研究小型鸟类的飞行大幅提高微小型飞行器的航程范围。因此对仿生拍动翼力学机理的研究具有直接的理论工程意义。

飞鸟与游鱼大都依靠摇摆运动器官获得前进的推力。由于运动器官具有柔性，精确描述其运动十分困难。流动的空气与水流是透明的，我们肉眼很难看到流体在生物器官附近的流动变化。流动的分流、涡的生成与演化悄无声息，却能产生高效率的推进力。当代流体力学的发展，包括计算流体力学与现代实验技术的进步，使

得我们可以模拟涡旋的运动,可以通过实验来观察流动现象,这将极大地促进仿生流体动力学的研究。结合理性分析,研究人员去伪存真,抓住主要因素,可以对高效率推进给出机理性的解释。我们将从生物的构造、运动特性及力学分析几个方面来进行探索。仿生最为重要的是对力学机理的模仿。考虑到精细模型制作与控制的难度、高昂的成本,形式上的精准仿生可能难以实现,甚至不得要领。因此我们化繁为简,研究刚性拍动翼运动对推进性能的影响规律。我们接下来对历史上仿鸟飞行的努力与尝试进行简单的回顾。

1.2 古代拍动翼仿生的探索与应用

1.2.1 我国古代飞行的例证

在我国古代人们一直十分向往可以像鸟一样飞翔,飞行一直是人们追逐的梦想。我国古代典籍记录有很多关于飞行的努力与尝试^[1]。《韩非子》就记载了“墨子为木鸢,三年而成,蜚(古同‘飞’)一日而败”。图 1.1 是现代对墨子制作的木鸢的假想图。可以估计,墨子在形式上实现了鸟的造型,其双翼机构可进行扑扇运动。然而从假想图来看,仅有形式上的仿生,未能表明其可以提供足够的动升力与推力进行长时间飞行。人们对飞行的向往也记录在其他典籍之中,例如,《庄子·逍遥游》记载的“列子御风”;《楚辞·离骚》中记录的“驷玉虬以桀鸢兮,溘埃风余上征”;《山海经》中出现的“以取百禽,能作飞车,从风远行”。古代人们已经认识到风可以产生向上的升力,进而将人托举升空。然而古人对飞行的基本要素缺乏理性的分析,并不理解升力产生的原理。



图 1.1 墨子所制木鸢的假想图

我国最早的关于人类驾空飞行的记录见于《竹书纪年》和《史记·五帝本纪》^[1]。舜帝年轻时曾经手持两个斗笠从高处跳下,他实际上是利用斗笠的阻力减缓了下降的速度,保证了自身的安全。《史记·索隐》有类似记载,“有似鸟张翅而下,得不损伤”^[1],可见那时的人已经明白鸟翼可以逆风滑翔。《前汉书·王莽传》记载了王莽抗击匈奴时曾召集到具有飞行技能的人打探军情,此人披上羽毛翅膀,从高处可以飞行数百步^[1]。此人利用翼进行了滑翔,这表明他已经理解空气与翼的相对

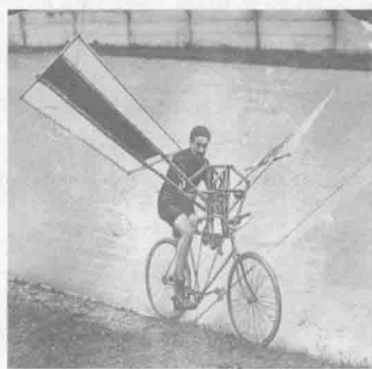
流动可以产生升力，并应用到军事侦察方面。中国古代人还制作了竹蜻蜓，可以旋转升空再稳定下落，竹蜻蜓后来传入欧洲，被称为“中国陀螺”。竹蜻蜓利用旋翼的转动与空气必须形成相对速度及恰当的攻角，产生气动升力用于飞行，这表明当时的匠人已经掌握了控制升力的经验。

1.2.2 早期的飞行事故与警示

人类探索飞行的历史中，灾祸、失败和意外从未停止。这里给大家介绍记载的失败单人飞行试验^[2]。如 1.2.1 节所述，从高处通过类似鸟翼的物体滑翔再落地实现起来相对容易，难的是模仿鸟儿拍动翅膀，从低处飞到高处。历史记载的世界各地的仿鸟扑翼飞行的人，除了造成死伤，尚无人能平地飞升。发明家们模仿鸟类飞行一直处于失败的状态，直到现代还未出现真正意义上成功的载人扑翼飞行器。在没有流体力学相关理论支撑的历史早期，不论是神话传说还是有史料记载的真人真事，不管是偏简单的飞行器玩具设计还是有一定技术含量的复杂装置，最终都逃不过失败的命运。图 1.2 显示了一些飞行试验的插图。下面将介绍欧洲国家一些看似有趣实则惨烈的仿鸟扑翼飞行的故事。



(a)

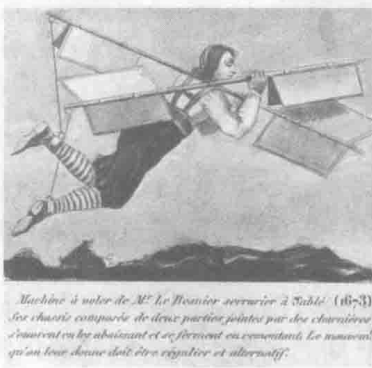


(b)



Le marquis de Buequelles avait annoncé qu'il trouverait la Seine avec des ailes de son invention. Au jour fixé il s'éleva dans le jardin de son hôtel, Quai des Théâtres. Son vol fut d'abord assez heureux, mais au milieu de la Seine il se embarrassa et le marquis tombant sur un bateau, se cassa le cou.

(c)



Machin à voler de M. le Plessier secrétaire à Toulon. (1673) Sa charrie composée de deux poutres jointes par des charnières s'avance en se balançant et se fécroit en descendant. Le mouvement qu'on leur donne doit être égaliter et alternatif.

(d)

图 1.2 人类尝试飞行的示意图

罗马诗人奥维德 (Ovid) 在公元 7 年发表的神话集《变形记》(The *Metamorphoses*) 中描述过飞行的场景, 代达罗斯和伊卡洛斯就是用胶水和羽毛翅膀从克里特城逃走的。有史料记载的人类最早的飞行探索可以追溯到公元前 850 年的特洛伊时代。在当时的特洛伊城, Bladud 国王在人类航空史上书写了浓墨重彩的一笔。Bladud 这个神话般的人物形象很可能是某位历史人物的原型。传说 Bladud 国王还会巫术或者通灵之术。他用巫术在胳膊上生出一对翅膀, 并且尝试着在阿波罗神坛飞行。但是他似乎没能利用好他的超能力, 结果坠亡了。

历史记载的另一项真人飞行尝试大约发生于公元 1000 年。在阿拉伯半岛的尼沙布尔 (Nishapur), 飞行员 Al-Djawhari 在 1002~1010 年的某个时间把两片木板绑在了自己的胳膊上, 然后爬上尼沙布尔的一座清真寺屋顶。他的大胆举动引来了大量的人群围观, Al-Djawhari 对围观者喊道: “人类! 此前没有做过这种事, 但是现在, 我将在你们的注视中起飞。飞行是人类最伟大的壮举, 也是我即将要做的事。”非常遗憾的是, Al-Djawhari 几乎是垂直掉落而摔死的。

达·芬奇是世界著名的艺术家。他不仅绘画成就斐然, 还是个雕刻家、解剖学专家、设计家, 曾预言过蒸汽机、坦克和潜水艇的诞生。达·芬奇在 30 多岁的时候对飞行产生了极大的兴趣, 他收集了多年的飞行理论, 甚至被认为造出了扑翼飞行器。图 1.3 是现代复原的达·芬奇扑翼机图。图中显示有一对可以模仿鸟类拍动的翅膀。考虑他一生中很多设计都仅仅是纸上谈兵, 没有人知道达·芬奇是否真的制作过扑翼飞行器模型。达·芬奇的一个合伙人 Cardanus 记录了达·芬奇在 1505 年曾经尝试让扑翼飞机起飞但徒劳无功的事实, 他的扑翼飞机最后摔成了碎片。

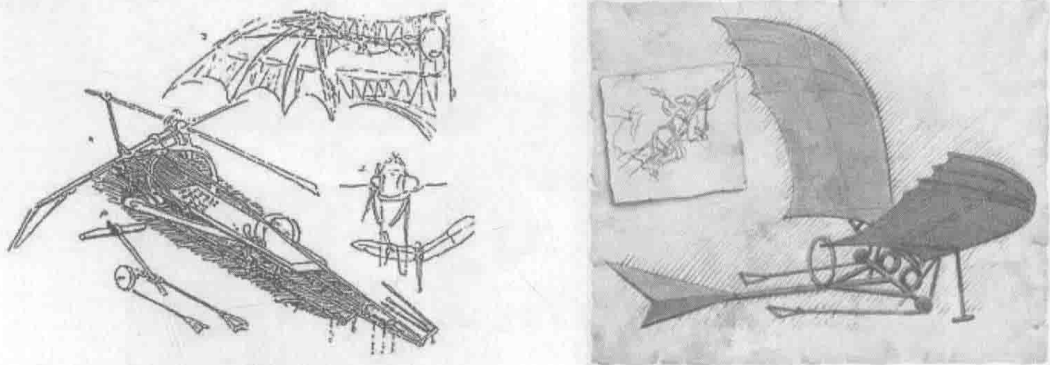


图 1.3 达·芬奇扑翼机复原图 (图片源自网络)

文艺复兴时期意大利数学家乔瓦尼·巴蒂斯·但丁同样爱好飞行。中世纪和文艺复兴早期的飞行探索者们都误以为鸟儿振动的翅膀有着无限的能量。如同许多前仆后继的人们一样, 但丁用胶水把羽毛粘在胳膊上, 拼命地上下摆动, 期望羽毛能产生飞升力助其腾飞。他希望在特拉西梅湖上空飞行, 于是从圣玛利亚大教堂

屋顶跳下，最后惨烈坠落。

保罗·歌托蒂 (Paolo Guidotti) 也是一位文艺复兴时期的杰出艺术家。他生活的时代虽然距达·芬奇和但丁的时代相差大约 100 年，却仍然没能摆脱扑扇翅膀就能飞行的理论。他用鲨鱼骨制作成翅膀，在上面覆盖羽毛，随后带着翅膀持续飞行了约 366m 后坠落在一个屋顶上，摔断了大腿。此后他彻底放弃了飞行的想法，还是觉得作画比较安全，也更有乐趣。

在威尔士的康威镇有一位 7 岁的男孩约翰·威廉姆斯 (John Williams) 在城墙上闲逛，年少的约翰鬼使神差般地想要飞到城墙的另一边去，希望海风把他带走。当时他穿的外套很长，他觉得外套可以迎风鼓起，当成船帆或者翅膀。根据约翰·哈克特 (John Hacket) 1693 年的记载，小男孩“遭遇了突然的灾难”，并且很快坠落在一块岩石上面，这块石头导致其要害部位受伤，失去了生育能力。但小男孩并没有灰心丧气，相反还成了约克大主教，一直活到 78 岁。

皮埃尔·德斯福格斯 (Pierre Desforges) 神父 1723 年出生于法国。他的一生都处在风口浪尖上。他在 1758 年写了一部关于应该允许天主教神父和主教结婚的书，于是教会把他当成那种虽无造反之意却顽固不化的逆反分子，因此被判入狱一年。服刑期间，皮埃尔仔细研究了燕子的生活习性，他开始对飞行机械产生了兴趣甚至达到痴迷的状态。1770 年，皮埃尔神父制作了一对翅膀，但他并没有足够的信心亲自尝试飞行，于是他把翅膀绑到了教堂附近的一位农民身上。他希望这位农民可以拍动翅膀并飞到天上去，于是他们来到了一个钟楼上，并告诉农民挥动翅膀就能飞起来，这位农民对这个明显送死的行为断然拒绝，皮埃尔无奈地放弃了这次试验。之后皮埃尔又筹集资金制作了一个更具可信性的装置，飞行器在两年后终于面世。他实际上是制作了一只 6ft(1.8m) 长的飞船，上部建有顶棚，两侧伸出长长的翅膀。神父找了几个农民把飞船抬到教堂旁的一个观光塔楼上。可能先前那位农民想到这个神父会再次找人去送死，就提醒过身边的人不要被神父忽悠去飞船冒险，神父很难找到飞行员，因此这次皮埃尔需要亲自进行飞行。在众人面前农民们把皮埃尔推出了塔楼，结果他直接坠落在地上，摔断了一条胳膊。

法国 Sablé 的一个锁匠贝斯尼尔 (Besnier) 在 1678 年前后放弃了原来的工作开始尝试发明飞行器。贝斯尼尔知道自己可能建造不了可以像鸟一样的扑翼飞行器。他另辟蹊径简化设计，转而设计了两根可以架在肩上的木杆，木杆上连着两个翼板，再将木杆通过绳索系在脚上，这样可以用脚来控制需要扑扇的翅膀，如图 1.2(d) 所示。贝斯尼尔从未在远离地面的地方试验飞行，一般选择较低的位置进行测试，比如桌椅和窗台，后来他的飞行试验移到阁楼和屋顶上。他可以在低处跳下保证安全，但在高处进行的长距离飞行都失败了。

在葡萄牙发生过一次著名的飞行试验。若昂·托特 (João Torto) 是一位文艺复兴人士，有着多重职业，包括护士、理发师、有资质的医师、占星家和老师。他

在葡萄牙航空史上也留下了自己的名字。托特自认为博学多才，很想成为一名飞行员。1540 年 6 月的一天，托特用两幅印花棉布做成翅膀，绑在自己的身上，他还佩戴了鹰状头盔，从圣马汀斯广场的大教堂钟楼上尝试起飞，但很快就跌落在下方的小教堂上方。由于落地的时候头盔滑落阻碍了他的视线，他直接摔在地上。

以上的故事在今时今日看起来十分荒诞。他们是人类航空史上用实际行动尝试飞行的人，都尝试以扑翼的形式飞行，很遗憾的是他们都从天上掉下来了。时至今日，不理解空气动力学原理的人依然可能犯同样的错误。飞行的本质在于获取足够的升力与适当的推力。空气动力学则需要适当的迎流面和迎流速度，否则飞行只能停留在想象阶段。直到近代，人们发明了机翼，了解这种翼型结构极佳的升阻比特性，人类飞行的梦想才逐步成为现实。然而人们对拍动翼的仿生力学原理的理解依然不够充分，这也是目前人们在设计制作仿生鸟或仿生鱼时显得力不从心的原因之一。下面我们介绍当代具有代表性的仿生案例。

1.3 当代拍动翼研究经典实例

基于拍动翼原理的仿生飞行与游泳技术是多个学科交叉的结果。借助空气动力学与水动力学研究、新材料、新能源及微电机等学科的发展，仿生学的研究得到了突破性的进展。研究人员根据生物飞行或游泳运动的动力学原理设计了合理的运动机构，匹配动力与重力，对飞行器或者仿生机构进行合理的控制，最终集成出优秀的仿生系统。我们首先了解一下当代经典的仿生鱼和仿生鸟。

1.3.1 拍动鳍的水下推进

20 世纪 90 年代，美国中央情报局先进技术办公室制作了“查理”(Charlie) 机器鲶鱼(图 1.4)，它是无人水下航行器可行性研究的一部分。机器鱼由无线遥控，可用于收集水下情报和水样，同时保持不被探测到。最引人注目的是美国麻省理工学院(MIT) Triantafyllou 教授团队在 1994 年研发的仿蓝鳍机器金枪鱼(Robo Tuna)^[4](图 1.5)。这是世界上第一条可以仿鱼游动的机器鱼，开创了人类仿鱼游动的研究。机器鱼 Robo Tuna 全长约 1.25m，宽 0.21m，高 0.3m，采用直流电机驱动。研究人员宣称鱼尾的推进效率高达 91%。机器鱼摆动躯体和尾鳍游动的最大游动速度约为 2m/s。该仿生机器鱼主要关节的材料由铝合金制成，此外它具有复杂的不锈钢缆和皮带轮系统，起到肌肉和肌腱的作用。它的外壳是由弹性聚氨酯纤维莱卡覆盖的泡沫柔性层组成的，模拟金枪鱼皮肤的柔韧性和平滑度。它由 6 个强大的伺服电机控制，每个电机功率为 2 个马力(hp, 1hp=745.7W)，可以根据侧向力传感器的持续反馈实时调整机器鱼的运动。