

Weis-Fogh 机构流体力学

Weis-Fogh Mechanism Fluid Dynamics

章社生 王献孚 吴秀恒 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

Weis-Fogh 机构流体力学/章社生等著. —北京:国防工业出版社, 2002. 1

ISBN 7-118-02598-4

I. W… II. 章… III. 机构学:流体力学
IV. TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 044599 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 5% 150 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:16.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

在自然界中,黄蜂和蝴蝶等昆虫种类繁多,遍布世界。昆虫以振翅拍击和挥摆急动获得升力,具有较好的机动性和起动性。昆虫的飞行原理与鸟类的飞行原理不同,不能用常规的流体力学理论解释。因而探索昆虫飞行原理,对其开发应用将具有重要意义。

英国生物学家 Weis-Fogh T. 根据观察黄蜂的飞行结果,设计出一种模拟昆虫飞行的机构——Weis-Fogh 机构。Weis-Fogh 机构流体力学是以 Weis-Fogh 机构为主要研究对象,研究昆虫飞行机理的一门新型的流体力学分支。至今,国内外关于“Weis-Fogh 机构流体力学”的著作尚不多见。本书试图系统地描述昆虫飞行机理,论述 Weis-Fogh 机构流体力学理论,从而为设计新型推进装置提供理论依据和开辟新的研究途径。

全书包括 Weis-Fogh 机构概论、势流理论、点涡模型、推力线理论、Weis-Fogh 机构试验和数值模拟共七个方面内容。第一章除了介绍 Weis-Fogh 机构的研究历史和研究进展外,还包括基础流体力学理论和数学理论。第二章至第四章为二维 Weis-Fogh 机构流体力学理论,第五章研究了有限展弦比 Weis-Fogh 机构,第六章为 Weis-Fogh 机构实验,第七章为 Weis-Fogh 机构的数值模拟。

本书是在章社生的博士论文“叶栅型 Weis-Fogh 机构流体动力性能及应用研究”基础上修改而成(指导教师吴秀恒、王献孚),对书中重要结论改用通俗化语言描述,便于一般读者阅读了解昆虫飞行机理。本书可供大学高年级学生、研究生选课使用,也可供有关专业教师和广大工程技术人员阅读参考。

本书第一章由王献孚编写,第六章由吴秀恒编写,第七章第 2 节的初稿由卫加宁提供,在导师吴秀恒教授和王献孚教授的指导

下,其他章节由章社生编写。编写本书的创议由上海交通大学何友声院士提出,在成书过程中,获得武汉水利电力大学梁在潮教授和华中理工大学庄业高教授的评阅和指教,使作者受益匪浅。“国防科技图书出版基金”评委会对本书提出了宝贵的修改意见,使书稿质量有进一步提高。此外,在撰著本书过程中,还得到武汉交通科技大学出版社徐祖兴同志对本书图稿描绘给予的支持以及其他同志对本书给予的帮助,在此对他们表示感谢。

因作者水平有限,本书难免还有错误和不妥之处,恳请使用本书的读者给予指正。

作 者

1999.11

目 录

第一章 Weis-Fogh 机构研究概论及基础理论	1
§ 1.1 国内外研究概述	1
§ 1.2 Weis-Fogh 机构物理模型及流动初步分析	8
§ 1.3 若干流体力学基础理论	12
§ 1.4 若干数学积分公式的导出和应用	21
第二章 Weis-Fogh 机构物理模型	30
§ 2.1 Weis-Fogh 机构	30
§ 2.2 单翼叶栅型 Weis-Fogh 机构	32
§ 2.3 复合翼叶栅型 Weis-Fogh 机构	33
第三章 Weis-Fogh 机构势流理论	36
§ 3.1 复合翼叶栅型 Weis-Fogh 机构势流理论	36
§ 3.2 单翼叶栅型 Weis-Fogh 机构势流理论	48
§ 3.3 Weis-Fogh 机构势流理论	59
§ 3.4 可变弦长 Weis-Fogh 机构势流理论	69
§ 3.5 叶栅型可变弦长 Weis-Fogh 机构势流理论	75
附录 3A 作用力计算	82
附录 3B 力矩级数表达式	87
第四章 前缘分离点涡模型	89
§ 4.1 单翼叶栅型 Weis-Fogh 机构点涡模型	89
§ 4.2 Weis-Fogh 机构点涡模型	104
§ 4.3 可变弦长 Weis-Fogh 机构点涡模型	110
§ 4.4 叶栅型可变弦长 Weis-Fogh 机构点涡模型	116
附录 4A 点涡积分公式	122
第五章 有限翼展 Weis-Fogh 机构绕流	124

§ 5.1	有来流推力线理论	124
§ 5.2	无来流推力线理论	130
§ 5.3	推力线位置	134
第六章	Weis-Fogh 机构试验	139
§ 6.1	Weis-Fogh 机构试验	139
§ 6.2	壁面效应 Weis-Fogh 机构试验	143
§ 6.3	有限翼展 Weis-Fogh 机构试验	146
§ 6.4	三维翼 Weis-Fogh 机构试验	150
§ 6.5	平旋 Weis-Fogh 机构推进装置	153
第七章	Weis-Fogh 机构数值计算	155
§ 7.1	双翼 Weis-Fogh 机构势流计算	155
§ 7.2	Weis-Fogh 机构多重网格边界元法	162
§ 7.3	Weis-Fogh 机构流场直接计算	166
§ 7.4	Weis-Fogh 机构并行计算	171
参考文献		175

Contents

Chapter I	An Introduce to the Weis-Fogh mechanism	1
§ 1.1	Research and progress of Weis-Fogh mechanism	1
§ 1.2	Introduction of Weis-Fogh mechanism fluid dynamics	8
§ 1.3	Basic fluid dynamics theory	12
§ 1.4	Basic mathematics theory	21
Chapter II	The model of the Weis-Fogh mechanism	30
§ 2.1	Weis-Fogh mechanism	30
§ 2.2	Cascade Weis-Fogh mechanism	32
§ 2.3	Compound wing cascade Weis-Fogh mechanism	33
Chapter III	Weis-Fogh mechanism potential theory	36
§ 3.1	Compound wing cascade Weis-Fogh mechanism potential theory	36
§ 3.2	Cascade Weis-Fogh mechanism potential theory	48
§ 3.3	Weis-Fogh mechanism potential theory	59
§ 3.4	Chord changeable Weis-Fogh mechanism potential theory	69
§ 3.5	Cascade Chord changeable Weis-Fogh mechanism potential theory	75
Appendix3A	The formula of force	82
Appendix3B	Moment series formula	87
Chapter IV	Separate single-vortex model	89

§ 4.1	Cascade Weis-Fogh mechanism single-vortex model	89
§ 4.2	Weis-Fogh mechanism single-vortex model	104
§ 4.3	Chord changeable Weis-Fogh mechanism single-vortex model	110
§ 4.4	Cascade Chord changeable Weis-Fogh mechanism single-vortex model	116
Appendix 4A Single-vortex integral formula		122
Chapter V Finite aspect-ratio Weis-Fogh mechanism		124
§ 5.1	Thrust -line theory with free stream velocity	124
§ 5.2	Thrust-line theory with zero free stream velocity	130
§ 5.3	The position of the thrust-line	134
Chapter VI Experiment of Weis-Fogh mechanism		139
§ 6.1	Experiment of Weis-Fogh mechanism	139
§ 6.2	Experiment of cascae Weis-Fogh mechanism	143
§ 6.3	Experiment of Weis-Fogh mechanism with finite aspectratio	146
§ 6.4	Experiment of 3-D Weis-Fogh mechanism	150
§ 6.5	Vertical axis propeller of Weis-Fogh mechanism	153
Chapter VII Numerical solution of Weis-Fogh mechanism		155
§ 7.1	Numerical double-foil of Weis-Fogh mechanism	155
§ 7.2	Mutil-grid finite-boundary-method of Weis-Fogh mechanism	162
§ 7.3	Direct simulation of Weis-Fogh mechanism	166
§ 7.4	Parallel calculation of Weis-Fogh mechanism	171
Reference		175

第一章 Weis-Fogh 机构研究概论 及基础理论

§ 1.1 国内外研究概述

自从 18 世纪工业革命以来,许多科学家一直在寻求推力大、效率高、且具有工业应用价值的推进装置。现有的推进装置大多数是根据鱼、鸟和昆虫的推进原理设计而成^[1~4]。例如,机翼和螺旋桨是根据鸟的飞行原理设计的。

Weis-Fogh 机构(Weis-Fogh Mechanism)^[5]是一种不同于普通机翼组成的升力机构,由一位英国生物学家 Weis-Fogh 发现而命名的。Weis-Fogh T. 在 1973 年对一种黄蜂的飞翔运动的观察分析,发现“振翅拍击和挥摆急动”(clap and fling)而产生的新机构,这种机构不仅能产生更大的升力,而且能瞬时产生升力,不像普通翼那样产生升力时存在 Wagner 效应(即升力产生的滞后现象),并有极好的机动性和起动性。因此,对这种机构进行研究,并开发应用,具有重要意义。

自 Weis-Fogh 从生物学角度提出一种产生升力的“振翅拍击和挥摆急动”的机构后,同年,以小黄蜂为例,Lightill M. T^[6]从流体力学角度论述了该机构产生升力的机理。小黄蜂的“振翅拍击和挥摆急动”过程如图 1-1 所示。两翅拍击在一起时如(a);然后两翅张开绕尾缘旋转如(b),此时流体进入两翅空隙;当两翅张开到一定角度后,它们便分开挥摆急动如(c);接着开始下一次拍击。根据高速摄像观察,两翼张开角度在 $0^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 之间。Lighthill 通过一简化的刚性模型,对两翼板旋转张开—分开—闭合诸过程

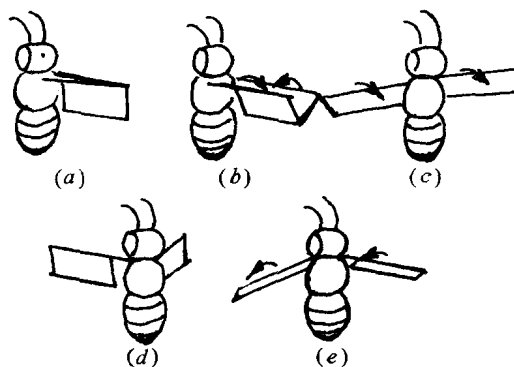


图 1-1 黄蜂振翅拍击挥摆过程

进行模拟,如图 1-2 所示,并根据无粘性二维势流作出理论分析。两翼板拍击闭合时(图 1-2(a))翼弦处于垂直方向;然后绕共同的根部以角速度 Ω 旋转张开(图 1-2(b)),当半张开角度约为 60° 时(图 1-2(c)),两翼以速度 v 分开(图 1-2(d))。当两翼旋转张开

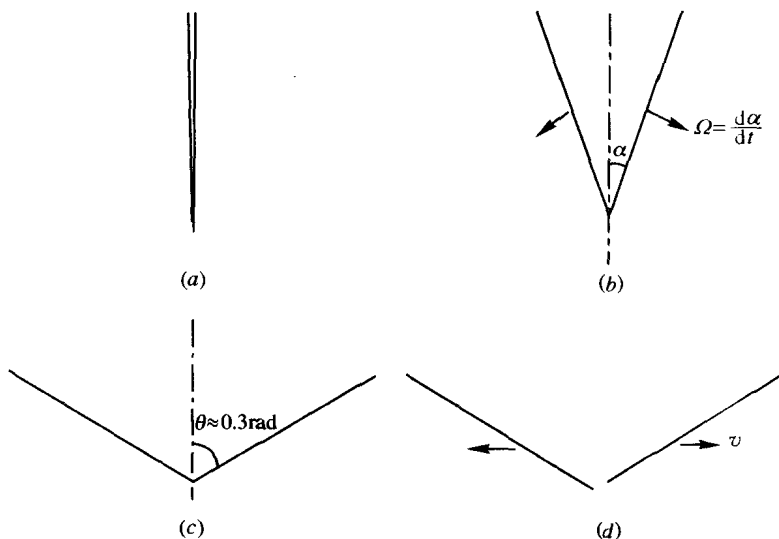


图 1-2 Weis-Fogh 机构刚性模型

时,流体进入两翼之间的空隙,同时产生大小相等,方向相反的速度环量 Γ ,并不违背总环量保持为零的开尔文定理。因此,当两板分开时,每一翼板将立即获得流体升力 $L = \rho \Gamma v$ 的作用力,其中 ρ 为流体密度,故不存在由下泄涡获得升力的滞后现象。

因为势流理论与物体边界运动的历史无关,而只确定于边界上瞬时速度。这样,根据无粘性二维势流理论,Lighthill 获得该运动机构产生的速度环量值 Γ 的计算公式^[3]。当半张开角 $\theta = \alpha\pi = 60^\circ$ 时,求得对应环量值 $\Gamma = 0.69\Omega C^2$,其中 C 为翼板弦长, Ω 为两翼板旋转角速度。在这里我们可以看到,正是由于两翼产生的环量大小相等而方向相反,因此它不需要起动涡就能立即产生环量或升力,亦不违背环量守恒汤姆逊定律。同时还允许两翼在非定常运动中,不发生任何涡的脱落,这是 Weis-Fogh 效应的一种特征。

Lighthill(1973)认为,昆虫两翼张开时,张开的间隙需要流体充填,而流体在充填时产生非常高的速度,导致两翼建立起很大的环量,此时流体对两翼的作用力也非常大。Eilington 等人(1996)根据试验认为,导边分离涡使翼的正面与背面之间的压力差长时间保持较大值。因而,可以认为昆虫能产生较高升力的机理为:两翼张开时迅速建立较大的升力,分离涡使机翼长时间保持较大的升力值。

Maxworthy(1979)^[7]通过刚性机构试验,证实了 Weis-Fogh 和 Lighthill 的一些基本提法,还指出两翼张开时产生前缘分离涡的重要作用,前缘分离涡导致产生更大的升力,其速度环量可以一直增加到半张开角 $\theta = 15^\circ$ 时,且有对应环量值提高到 $\Gamma = 6\Omega C^2$ 。在半张开角 $\theta < 45^\circ$ 时,涡心位置接近于半角的平分线上。在半张开角 $\theta > 45^\circ$ 时,涡心位置逐渐接近于半角的 $2/3$ 处。

Haussling(1979)^[8]应用 N-S 方程,求解了 Weis-Fogh 机构张开和闭合过程中瞬时流线和等涡线,根据计算数据,绘出了流动图像,从图像可以清楚地看到分离涡的存在。

Edwards and Chang(1982)^[9]根据 Lighthill 的思路在计算两

翼板张开过程中加入一个集中涡代表粘性流体中前缘分离涡,计算结果表明,升力增加,并获得与 Maxworthy 试验相近的数据。后来 Wu. J. C 和 Hu. Chen. H(1984, AIAA Paper No. 2184) 也计算出类似的结果。

Spedding 和 Maxworthy(1986)^[10]通过可视化流场观察和瞬时力的测定,进一步证实 Weis-Fogh 机构的平均升力系数(基于翼梢平均速度表示)高达 7~8,从而消除了人们早就存在的一个疑问:根据一些昆虫的翅翼,如果按常规的升力理论产生升力,往往不足以支持其自身重量并推动其飞行,这些昆虫正是使用了不同的机理来产生升力才有了自由飞行的可能。

我们曾于 1994 年、1996 年、1998 年研究了 Weis-Fogh 机构流体动力计算,推导出力和力矩的计算公式,并将结果推广到叶栅型 Weis-Fogh 机构^[11~21]。

英国科学家 Eilington 等人(1996)^[22],对一种称为鹰蛾(Hawkmoth)的蝴蝶进行了风洞试验,将鹰蛾悬挂在风洞中,用烟线法观察鹰蛾振翅拍击过程。由于实际鹰蛾尺寸太小,不便于测量,于是,加工了一个放大 10 倍的鹰蛾模型,用计算机控制模型鹰蛾振翅拍击。观察结果表明,当两翼张开时,从导边形成分离涡,涡快速旋转,附在导边机翼背流面,直到张开过程结束后,才从导边脱离两翼。

自 Weis-Fogh 揭示了一种产生升力的新机构后,在开展对其机理研究的同时,探讨其实际应用显然具有重要意义。Furber 和 Williams(1979)^[23]首先提出在涡轮机中能否利用 Weis-Fogh 效应的问题,他们通过对轴流压气机转子和定子的叶片之间相互作用的理论进行分析和试验研究,证实了转子和定子两组叶片相互作用所引起的 Weis-Fogh 效应,能改进压气机的性能。

利用 Weis-Fogh 机构来设计船舶推进装置也曾提出过一些设想,这是我们所关注的课题。由于 Weis-Fogh 机构产生升力所起作用的是流体惯性力,因此在高雷诺数和在水中的条件下将会比空气中有更好的效果。现将研究情况列举如下。

(1) 日本神户大学 Tsutahara 和 Kimura(1987)^[24] 提出一种模仿 Weis-Fogh 机构的船舶推进器所设计的两个推进翼在双体船之间作周期性开启和闭合运动。通过模型试验,测量了该装置产生的推力和两翼移动的阻力,当两翼开启角为 30° ,翼的横移运动速度与船速之比为 0.5 时,认为可获得高达 75% 的推进效率,全过程平均效率约为 53%,显示有进一步研究的前景。

(2) Tsutahara 和 Kimura(1994)^[25] 又提出一种两级 Weis-Fogh 机构的船舶推进装置的设想,推进机构的模型如图 1-3 所示。前后两翼在槽道内通过两翼的驱轴,沿虚线上下往复运动,当翼的尾缘与槽壁接触时,翼板绕尾缘旋转使翼板张开,张开角达到 30° 后,翼便上下位移,位移过程中使角度保持不变,然后翼板前缘与另一槽壁接触,翼板将绕前缘旋转使板闭合。两翼板工作过程相同,它们只有相位差别,可以作同相或异相运动。试验取上下壁间距离 $h = 2.5c$,两翼间距离 $d = 1.15c$,水流速度 u 在 $0.16\text{mm/s} \sim 0.31\text{m/s}$ 之间变化,翼板上下运动位移速度 u 在 $0.12\text{m/s} \sim 0.36\text{m/s}$ 之间变化。根据他们所作的试验研究表明,两级翼板的相互作用,在这里未发生比单级更好的效果。问题可能是需在机构配合上作进一步改进。在轴流压气机中转子和定子叶片之间的试验也表明^[23],两叶片之间的 Weis-Fogh 效应不能很好地形成。

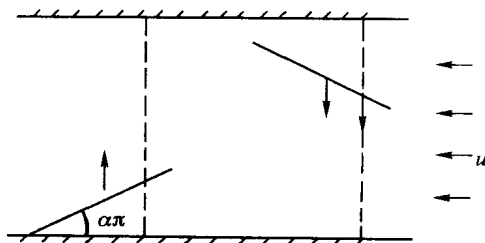


图 1-3 两级 Weis-Fogh 推进器

(3) 早在 Weis-Fogh 机构发现之前,一项法国专利 No. 1 418 806, Oct. 18, 1965 和一项美国专利 No. 3 307 358, Mar. 7, 1967 提出一种泵水或用于推进船舶的新装置,如图 1-4 所示,它实际上已

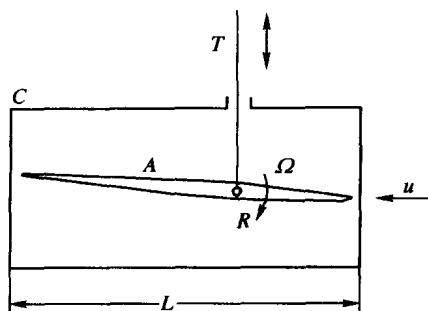


图 1-4 液压脉冲器

是一种 Weis-Fogh 机构,其装置简单,动作巧妙,有进一步开发的应用前景。

该装置称为液压脉冲器(Hydropulser)^[26],其主要部件是翼板 A 和壳体 C 。翼板 A 可绕驱轴 R 自由摆动,驱轴 R 固结于推杆 T 上,推杆 T 与动力相连作上下往复运动。驱轴位置在翼展中间,位于离翼板前缘为弦长 $1/3$ 的地方。壳体 C 为一平行六面体,除翼板前后方敞开外,壳体包围翼板 A ,它一方面使翼板展向受限制,另一方面在翼板上下能起到压挤流体的作用,如将壳板以镜像翼代替,则上下壳板便相当于能使单个翼板呈现 Weis-Fogh 效应相同的结果。其动作原理可按图 1-5 顺序说明如下。

(a) 当杆 T 推动翼板 A 向下运动时,翼板绕驱轴 R 以顺时针方向开始旋转向下运动。

(b) 在推杆 T 向下运动时,翼板 A 继续以角速度 Ω 顺时针方向旋转,其旋转角速度与推杆受力大小和进流速度 u 有关。

(c) 当翼板前缘与壳体下壁面相接触后,翼板下方流体被压挤排出,并使翼板开始绕逆时针方向旋转,直至整个翼板与壳体下表面相平行。

(d) 推杆 T 反向运动,此时翼板又开始以角速度 Ω 逆时针方向旋转,其旋转角速度与推杆 T 受力大小和进流速度 u 有关。

(e) 当翼板前缘与壳体上壁面相触后,翼板上方流体被压排出,