

轻与巧的完美结合: 缨甲飞行的秘密

张 星 *

¹ 中国科学院力学研究所, 北京 100190

² 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

摘 要 通过实验手段, 重构了缨甲飞行的三维形态学和运动学模型. 利用计算流体力学 (CFD) 分析, 成功地揭示了缨甲超强飞行能力的秘密.

关键词 缨甲, 飞行, 空气动力学

中图分类号: V211 文献标识码: A DOI: [10.6052/1000-0992-22-011](https://doi.org/10.6052/1000-0992-22-011)

动物的飞行速度一般与其大小呈正相关 (Tennekes 2009). 缨甲 (*Paratuposa placentis*) 是世界上最小的甲虫, 身长 300 ~ 400 μm . 但是缨甲的飞行速度可与三倍其体长的昆虫相媲美 (Farisenkov 2020). 近日, 俄罗斯、日本和德国的科学家合作, 通过综合技术手段, 结合形态学和运动学测量以及计算流体力学 (CFD) 仿真, 成功地揭示了缨甲超强飞行能力的秘密. 论文以“Novel flight style and light wings boost flight performance of tiny beetles”为题, 于 2022 年 1 月 19 日发表在《Nature》杂志上 (Farisenkov et al. 2022). 在这篇论文中, 作者将缨甲的高超飞行性能归功于“轻”与“巧”的完美结合. 具体来说, 即以下两个关键因素的结合: (1) 独特的翅膀拍动方式 (巧); (2) 特殊的翅膀结构 (轻).

缨甲翅膀的拍动方式既不同于大、中型昆虫通常采用的标准悬停模式 (Freymuth 1990), 也不同于一些微小昆虫采用的“深 U 形”上挥模式 (Cheng & Sun 2018, Lyu et al. 2019). 它的翼尖轨迹呈几乎完全前后对称的“横卧 8 字形”. 它的一个拍动周期可以划分为四个阶段, 包括两段快速向下的动力拍击和两段缓慢向上的恢复拍击 (见图 1(a)). 由于产生的气动力力臂较大, 会引起身体大幅度的俯仰振荡. 但是, 缨甲鞘翅大幅度的打开 (与闭合) 运动产生的惯性俯仰力矩起到

收稿日期: 2022-02-21; 录用日期: 2022-03-29; 在线出版日期: 2022-04-02

* E-mail: zhangx@lnm.imech.ac.cn

引用方式: 张星. 轻与巧的完美结合: 缨甲飞行的秘密. 力学进展, 2022, 52(2): 410-413

Zhang X. Perfect combination of lightness and ingenuity: secrets in the flight of *Paratuposa placentis*. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(2): 410-413

© 2022 《力学进展》版权所有

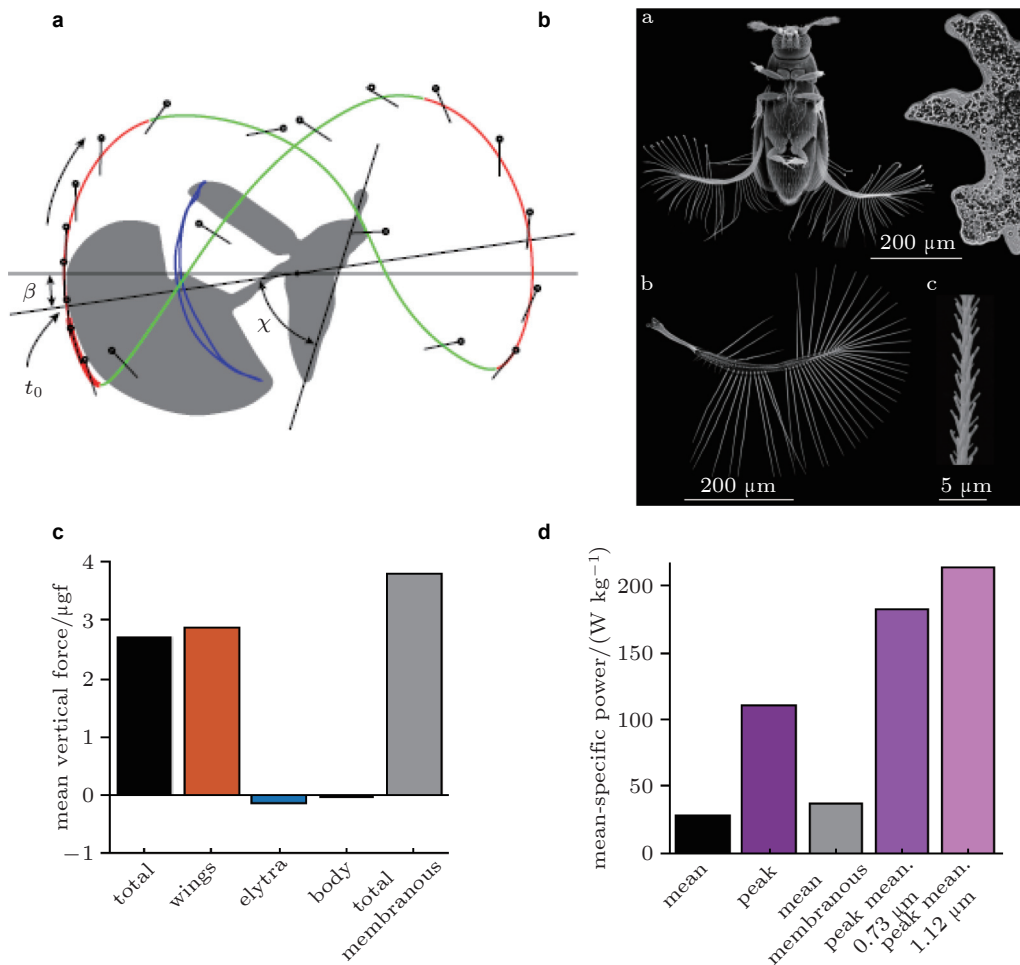


图 1

(a) 翼尖的“8字形”运动轨迹:快速下扑时翅膀呈平躺姿态,缓慢上挥时呈侧立姿态;(b)后翅结构:叶柄、窄翼叶片、刚毛状缘缨以及刚毛上的次级突起;(c)时均垂直力:垂直力合力、后翅产生的垂直力、鞘翅产生的垂直力、身体产生的垂直力、(假想)膜状翼产生的垂直力合力;(d)比质量需用功率:时均值、峰值、(假想)膜状翼的时均值、两种不同厚度(假想)膜状翼的峰值 (Farisenkov et al. 2022).

了“刹车”作用,有效地减小了身体的俯仰振荡.此外,缨甲的一对翅膀在腹背部各出现一次“合拢打开”过程,通过左右翼之间的相互作用,进一步提高了支持体重的垂直气动力 (Weis-Fogh 1973).

缨甲翅膀的这种拍动方式成功地实现了拍动幅度的最大化,势必导致惯性需用功率的峰值增大,但是缨甲利用其特殊的翅膀结构克服了这个潜在的问题.缨甲用于飞行的翅膀是一对藏在鞘翅下的羽毛状后翅(feathered wing).它由叶柄、窄翼叶片和刚毛状缘缨组成,每根刚毛还带有很小的次级突起(见图1(b)).与一般昆虫翅膀的实心薄膜结构相比,这种带有孔隙的疏松结构在扑动过程中的气动性能略有降低(见图1(c)),但是由于其惯性更小,有效降低了肌肉需用功率的峰值(图1(d)),同时也无需翅膀的弹性储能机构.此外,关于“合拢打开”机制的研究表明,

羽毛状翼在“打开”过程中需要克服的阻力也小于膜状翼 (Jones et al. 2016) .

缨甲后翅的这种羽毛状结构和蒲公英种子的冠毛结构非常类似,但两者的飞行机制却完全不同.在蒲公英种子的飞行中,它的垂直力产生完全依赖阻力机制.流体绕过冠毛结构后,在其上部隔空形成一个非附着的稳定涡环,使得种子飞得更稳、更远 (Cummins et al. 2018) .而缨甲采用扑翼方式产生垂直方向的力,升力机制和阻力机制同时对垂直力的产生有重要贡献.

近期的一系列研究表明,在雷诺数处于(10~100)范围内的微小尺度生物的飞行与游动中,推进器官的结构以及运动规律存在着一些趋同进化的现象.例如,完全或部分利用阻力机制产生推进(或支持体重),利用“合拢打开”机制增大力的强度,利用带有孔隙的疏松结构降低重量和减小惯性需用功率等.这些现象为仿生飞行器和仿生水下航行器的小型化设计提供了新思路.

参考文献

- Cheng X, Sun M. 2018. Very small insects use novel wing flapping and drag principle to generate the weight-supporting vertical force. *J. Fluid Mech.*, **855**: 646-670.
- Cummins C, Seale M, Macente A, et al. 2018. A separated vortex ring underlies the flight of the dandelion. *Nature*, **562**: 414-418.
- Farisenkov S E, Lapina N A, Petrov P N et al. 2020. Extraordinary flight performance of the smallest beetles.. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **117**: 24643-24645.
- Farisenkov S E, Kolomenskiy D, Petrov P N, et al. 2022. Novel flight style and light wings boost flight performance of tiny beetles. *Nature*, **602**: 96-100.
- Freytmuth P. 1990. Thrust generation by an airfoil in hover modes. *Exp. Fluids*, **9**: 17-24.
- Jones S K, Yun Y J J, Hedrick T L, et al. 2016. Bristles reduce the force required to ‘fling’ wings apart in the smallest insects. *J. Exp. Biol.*, **219**: 3759-3772.
- Lyu Y Z, Zhu H J, Sun M. 2019. Flapping-mode changes and aerodynamic mechanisms in miniature insects.. *Phys. Rev. E*, **99**: 012419.
- Tennekes H. 2009. *The Simple Science of Flight: From Insects to Jumbo Jets*. MIT Press.
- Weis-Fogh T. 1973. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanism for lift production. *J. Exp. Biol.*, **59**: 169-230.

(责任编辑: 王展)

Perfect combination of lightness and ingenuity: secrets in the flight of *Paratuposa placentis*

ZHANG Xing*

¹ Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract By using experimental approach, three-dimensional morphological and kinematic models for the flight of *Paratuposa placentis* are reconstructed. The secrets in the high-performance flight of *Paratuposa placentis* are successfully unveiled through computational fluid dynamics (CFD) analysis.

Keywords *Paratuposa placentis*, flight, aerodynamics



张星, 中国科学院力学研究所研究员、中国科学院大学岗位教授. 主要从事流体力学数值方法、生物推进与流固耦合方面的研究. 目前担任《Computer Modeling in Engineering & Sciences (CMES)》期刊副主编和《Fluids》期刊编委.

Received: 21 February 2022; accepted: 29 March 2022; online: 2 April 2022

* E-mail: zhangx@lm.imech.ac.cn

© 2022 *Advances in Mechanics*.