

# Three-Dimensional Reconstruction and Numerical Simulation of Flight Performance of *Confuciusornis*

Lejiao Wang<sup>1</sup>, Ying Guo<sup>1,2\*</sup>, Xiaochen An<sup>1</sup>, Yan Zhao<sup>1,2</sup>, Jingying Wang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>The School of Life Science, Linyi University, Linyi Shandong

<sup>2</sup>The Institute of Geology and Paleontology, Linyi University, Linyi Shandong

<sup>3</sup>School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan Shandong

Email: \*guoying@lyu.edu.cn

Received: Oct. 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 13<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 20<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

*Confuciusornis* has always been one of the focuses of paleornithology, but the actual flight ability and movement performance of *Confuciusornis* have been speculated by morphological analogy and function, which has become one of the key problems hindering the study of the origin and evolution of bird flight. In this paper, the 3D structure of *Confuciusornis* was reconstructed by paleontology restoration technique, and the flight performance of *Confuciusornis* was quantitatively calculated by numerical simulation. The results showed that the geometry of *Confuciusornis* had aerodynamic significance. When its initial flight speed exceeded 4 m/s, it could glide for a certain distance with a certain height difference. This result will provide quantitative data supporting the final evaluation of *Confuciusornis* flight ability in the future.

## Keywords

*Confuciusornis*, Three-Dimensional Reconstruction, Flight Performance, Numerical Simulation

# 孔子鸟三维复原与飞行性能数值模拟初探

王乐姣<sup>1</sup>, 郭颖<sup>1,2\*</sup>, 安晓晨<sup>1</sup>, 赵艳<sup>1,2</sup>, 王京盈<sup>3</sup>

<sup>1</sup>临沂大学生命科学学院, 山东 临沂

<sup>2</sup>临沂大学地质与古生物研究所, 山东 临沂

<sup>3</sup>山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南

Email: \*guoying@lyu.edu.cn

收稿日期: 2019年10月29日; 录用日期: 2019年11月13日; 发布日期: 2019年11月20日

\*通讯作者。

## 摘要

孔子鸟一直是古鸟类学研究的重点之一，但是关于它的实际飞行能力和运动性能，长期以来只能通过形态类比和功能推测获得，这也成为鸟类飞行起源和演化的研究中亟待解决的关键问题之一。本文以孔子鸟为研究对象，运用古生物复原技术重建孔子鸟三维结构，并通过数值模拟方法定量化计算了孔子鸟的飞行性能。结果显示：孔子鸟整体的几何形态具备空气动力学意义，当其初始的飞行速度超过4 m/s，便可以凭借一定的高度落差进行相对较长距离的滑翔运动。这一结果将为今后孔子鸟飞行能力的最终评价提供定量化的数据支持。

## 关键词

孔子鸟，三维复原，飞行性能，数值模拟

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

古生物的三维(3D)复原形象经常出现在科幻题材的书籍、电影、游戏、动画甚至学术刊物之中，但是很多时候这些复原形象都存在着不同程度的不严谨，并带有明显的想象和过分夸张的成分[1]。但是随着数字化技术的进步和发展，近年来综合古生物和计算机技术的古生物复原方法，为解决古生物的3D复原带来了新的思路。此外，大量关于数值模拟和三维可视化的技术和方法被广泛地应用到古生物研究之中[2] [3] [4]，成为古生物学家求证化石生物功能性相关问题的重要方法和有力工具，在古生物学等领域已经显现出日益重要的作用。

本文以孔子鸟为研究对象，依据已有的古生物复原技术和方法，将化石材料的信息测量、提取出来，转换为二维(2D)复原图像，然后经过立体成像技术得到孔子鸟3D复原结构，最后通过数值模拟的方法定量化计算了孔子鸟的飞行性能。以期为早期鸟类飞行起源和演化研究提供定量化的新证据。

## 2. 孔子鸟研究概述

孔子鸟是生活在1.20~1.31亿年前的较大原始鸟类，作为基干鸟类中的一个重要类群，孔子鸟不论在数量上还是在演化辐射上，在早白垩世都经历了巨大的发展[5] [6] [7]。因其重要的演化位置、丰富的标本数量和精美的保存状态，孔子鸟一直是古鸟类学研究的重点之一。通过比较孔子鸟属种之间以及与其他古鸟类及非鸟恐龙之间的差异，目前在孔子鸟的运动形态演化过程中的关键结构以及功能的研究上取得了很大的进展，基本认同孔子鸟比始祖鸟更适于飞行[8]-[13]。然而古鸟类运动形态及其力学机制是一个长期存在的难题，因此要进一步理清孔子鸟结构形态与运动功能上的相互关联，并以此推断孔子鸟的实际飞行能力和运动性能，则还需要孔子鸟形态复原和数值模拟等定量化工作提供准确的数据支持。这也是我们开展孔子鸟3D复原工作和飞行性能数值模拟的理论基础。

## 3. 复原过程与方法

3D模型重建是对化石数据再加工的过程[3] [14]，主要包括3个步骤，分别是：数据采集与整理、复原2D图像以及构建3D模型。

### 3.1. 数据采集与整理

本论文中孔子鸟 3D 复原是基于山东省天宇自然博物馆一件保存较好的孔子鸟标本(STM13-45)开展(图 1)。孔子鸟形态参数采集主要采用直接测量、摄影测量、3D 扫描等技术手段,获得了外形、骨骼、结构比例以及软组织等的参数。其中,化石中相对难以保存的羽毛、肌肉、皮膜等软组织信息,往往在一件化石中难以采集完整,需要辅以大量其他孔子鸟标本进行综合统计和分析,并结合前期研究者的经验加以判读并最终确定。



Figure 1. Petrified picture of *Confuciusornis*  
图 1. 孔子鸟化石照片(STM13-45)

### 3.2. 复原 2D 图像

获取孔子鸟形态结构参数之后,首先根据不同部位的骨骼参数比例,确定孔子鸟体型特征和身体比例;然后,在骨骼数据的基础上对软组织结构进行复原。因孔子鸟尾部、腿部以及躯干附着正羽,肌肉、皮肤等组织又往往难以完整保存,而几何形态学研究结果又指示它与现代鸚属鸟类相似[15],因此在复原其外形特征的过程中参考了现代鸚属鸟类的部分特征。复原 2D 图像是构建 3D 模型的基础,遵循视图最少原则,只需绘制出孔子鸟的俯视图和侧视图(图 2),便可以准确、完整、简便地表达孔子鸟的结构立体结构。

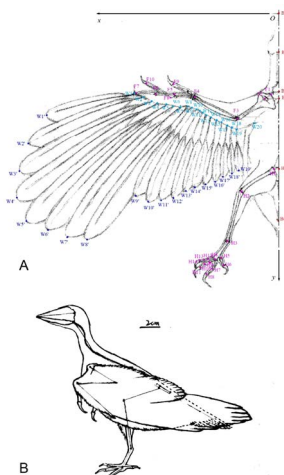


Figure 2. Manuscript of *Confuciusornis*'s top view and side view (femur of hind limb was treated by fluoroscopy)  
图 2. 孔子鸟俯视图和侧视图手稿(后肢股骨采用透视处理)

### 3.3. 构建 3D 模型

综合孔子鸟的相关形态学参数及复原平面图, 构建孔子鸟的 3D 数字化模型。模型使用计算机辅助设计工具 Rhinoceros 6 软件构建, 与化石标本实行 1:1 等比例设置, 模型的形状和比例来自于 2D 复原图像; 然后按照传统的自底向上建模过程(由面到实体)将这些二维轮廓连接起来建立三维模型[14]。模型构建的原则是保持整体形态, 合理控制轮廓结构, 维持各部分的比例关系协调。因本次复原工作的目的是为研究无动力条件时孔子鸟的空气动力学特性服务, 所以模型构建时将孔子鸟作为一个整体, 即头部、颈部、躯干、四肢和尾部作为一个刚性构件(图 3)。

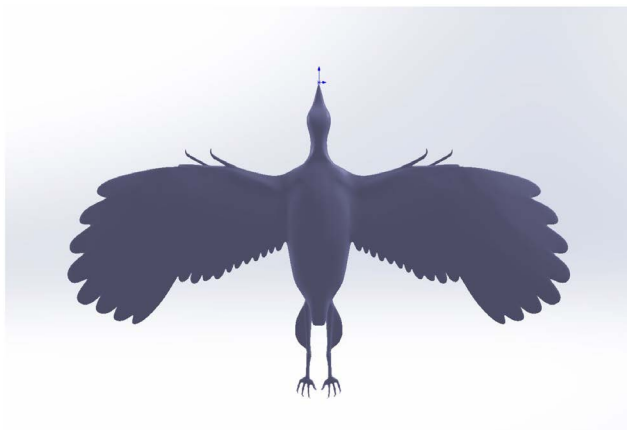


Figure 3. Top view of three *Confuciusornis* models

图 3. 孔子鸟三维模型俯视图

### 4. 数值模拟

数值模拟主要包括三个步骤: 生成离散网格、设置计算参数以及迭代计算[3] [14]。网格生成工作由商业软件 Pointwise 完成, 但是由于孔子鸟的几何形态相对不规则, 自动生成的结构网格适用性较差, 特别是模型的翅膀、指爪等部位因形状过于复杂, 对这一部分的网格需要进行手动优化(图 4)。

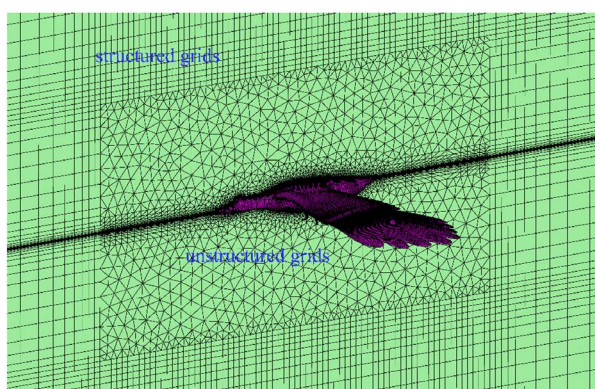


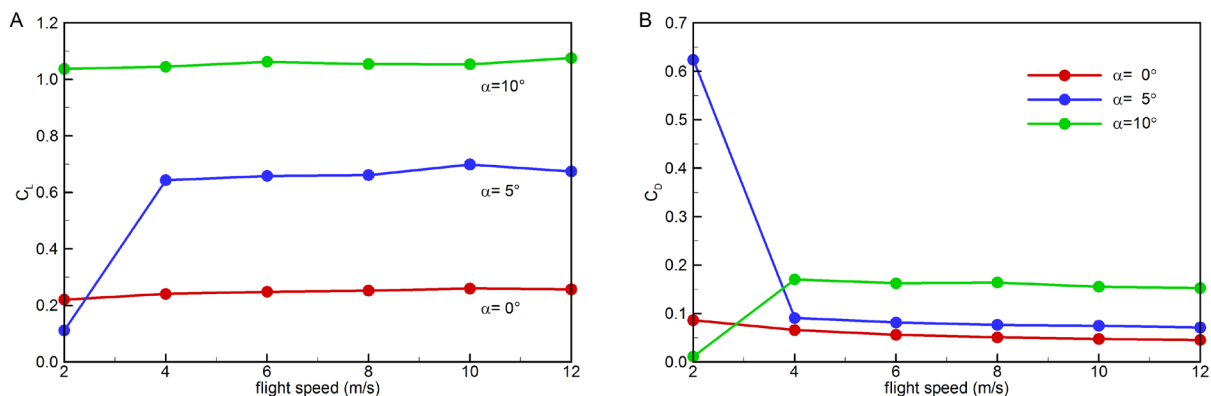
Figure 4. CFD grids. The hybrid grids were used to mesh the cube CFD domain, with unstructured grids for the near space of the *Confuciusornis* model and structured (hexahedral) grids for the rest part

图 4. CFD 网格。将混合网格应用于计算流体动力学(CFD)领域, 其余部分采用非结构化网格和结构化网格(六面体网格)

离散网格生成后, 需用运用 ANSYS Fluent 软件完成计算参数设置和迭代计算。依据前人研究的成果, 孔子鸟生活的早白垩世的大气成分与现在类似[16], 因此在设置计算参数时, 空气密度选取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,

粘度为  $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ ，温度则选为  $15^\circ\text{C}$ 。此外，由于孔子鸟的飞行相关结构相对原始，推测其飞行速度应该不会太快、雷诺数也不大，因此本文将流态模型设为不可压缩的层流。

评价鸟类空气动力学性能首先要获得两个重要参数：升力( $C_L$ )和阻力( $C_D$ )的无量纲系数。为使模拟结果严谨可靠，实验中设置对照组，分别计算器升力和阻力系数。对照实验中，攻击角( $\alpha$ )取值范围为  $0\sim 15^\circ$ ，步长为  $5^\circ$ ；飞行速度为  $2\sim 12 \text{ m/s}$ ，间隔  $2 \text{ m/s}$  (图 5)。计算参数设置好后便可以进行迭代求解，这一过程一般由软件自动完成，不需要人工干预。迭代求解时间取决于模型的复杂程度、网格划分量以及计算机的硬件性能等多重因素。



**Figure 5.** Non-dimensional aerodynamic forces plotted as a function of the flight speed for three angles of attack of the *Confuciusornis* model. (A) Lift coefficients; (B) Drag coefficients

**图 5.** 孔子鸟三个攻角条件下无量纲气动参数 - 飞行速度图。(A) 升力系数 - 速度图；(B) 阻力系数 - 速度图

## 5. 结果与讨论

### 5.1. 结论

模拟的结果显示(图 5)：不论孔子鸟的攻击角( $\alpha$ )为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$  还是  $10^\circ$ ，只要飞行速度大于  $4 \text{ m/s}$ ， $C_L$  和  $C_D$  便近乎处于保持不变的状态，可以近似看作是常数；这时因为  $C_L$  和  $C_D$  均与速度的平方成正比，遵循空气动力学中的二次方程，所以速度越大， $C_L$  和  $C_D$  也越大。这说明，孔子鸟的整体几何形态具备空气动力学意义，只要其初始的飞行速度超过  $4 \text{ m/s}$ ，便可以凭借一定的高度落差，进行较长距离的滑翔。

### 5.2. 讨论

目前，三维复原与形态 - 功能数值模拟在古生物学等领域已经显现出日益重要的作用，为化石生物精确的功能学分析和性能检验开创了新的研究方向[3] [14]。但是，现阶段更多地被应用在水动力条件下的海洋无脊椎动物静态模型的功能性分析上，对于空气动力条件下古鸟类和具飞行能力的爬行动物的运动方式和运动能力等方面的研究相对较少。本次开展孔子鸟 3D 复原工作和飞行性能数值模拟，便是在空气动力学条件下开展古鸟类运动形态及其力学机制定量化研究的一次尝试。这一结果将对后续孔子鸟飞行距离和飞行轨迹的模拟提供依据，并对孔子鸟飞行能力的最终评价提供定量化的数据支持。

### 基金项目

临沂大学大学生创新创业训练计划项目(S201910452064)和山东省自然科学基金项目(ZR2018BD013)共同资助。



## 参考文献

- [1] 陶思宇. 3D 复原应用于古生物的初探[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 古生物研究重点实验室, 2010.
- [2] Bright, J.A., Marugánlobón, J., Cobb, S.N. and Rayfield, E.J. (2016) The Shapes of Bird Beaks Are Highly Controlled by Nondietary Factors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**, 5352-5357. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602683113>
- [3] Cunningham, J.A., Rahman, I.A., Lautenschlager, S., Rayfield, E.J. and Donoghue, P.C.J. (2014) A Virtual World of Paleontology. *Trends in Ecology & Evolution*, **29**, 347-357. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.04.004>
- [4] Rahman, I.A., Zamora, S., Falkingham, P.L. and Phillips, J.C. (2015) Cambrian Cinctan Echinoderms Shed Light on Feeding in the Acestor Deuterostome. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **282**, Article ID: 20151964. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1964>
- [5] 张福成, 周忠和, 李东升, 李志恒. 孔子鸟的研究现状[J]. 自然杂志, 2009, 31(1): 8-11.
- [6] 郑光美. 鸟类学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2012: 1-100.
- [7] 郭颖, 王京盈, 张福成, 雷丽, 王孝理, 赵艳. 孔子鸟飞行能力相关问题研究现状与展望[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(8): 1338-1344.
- [8] 张福成, 侯连海, 欧阳涟. 孔子鸟(*Confuciusornis*)骨骼微观组织结构初步研究[J]. 古脊椎动物学报, 1998, 36(2): 126-133.
- [9] Dalsätt, J., Zhou, Z., Zhang, F. and Ericson, P.G.P. (2006) Food Remains in *Confuciusornis sanctus* Suggest a Fish Diet. *Naturwissenschaften*, **93**, 444-446. <https://doi.org/10.1007/s00114-006-0125-y>
- [10] Peters, W.S. and Peters, D.S. (2009) Life History, Sexual Dimorphism and “Ornamental” Feathers in the Mesozoic Bird *Confuciusornis sanctus*. *Biology Letters*, **5**, 817-820. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2009.0574>
- [11] Peters, W.S. and Peters, D.S. (2010) Sexual Size Dimorphism Is the Most Consistent Explanation for the Body Size Spectrum of *Confuciusornis sanctus*. *Biology Letters*, **6**, 531-532. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2010.0173>
- [12] Zheng, X., Zhou, Z., Wang, X., Zhang, F., Zhang, X., Wang, Y., Wei, G., Wang, S. and Xu, X. (2013) Hind Wings in Basal Birds and the Evolution of Leg Feathers. *Science*, **339**, 1309-1312. <https://doi.org/10.1126/science.1228753>
- [13] Zheng, X., O'Connor, J., Wang, X., Pan, Y., Wang, Y., Wang, M. and Zhou, Z. (2017) Exceptional Preservation of Soft Tissue in a New Specimen of *Eoconfuciusornis* and Its Biological Implications. *National Science Review*, **4**, 441-452. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx004>
- [14] 郭颖, 王京盈, 张福成, 雷丽, 赵艳, 王岩, 王孝理. 计算流体力学在古生物学形态功能定量分析中的应用[J]. 生物学杂志, 2019, 36(5): 92-95.
- [15] Zinoviev, A.V. (2009) An Attempt to Reconstruct the Lifestyle of Confuciusornithids (Aves, Confuciusornithiformes). *Paleontological Journal*, **43**, 444-452. <https://doi.org/10.1134/S0031030109040145>
- [16] Longrich, N.R. (2006) Structure and Function of Hindlimb Feathers in *Archaeopteryx lithographica*. *Paleobiology*, **32**, 417-431. <https://doi.org/10.1666/04014.1>