

# 飞行鸟类脖子形态的力学分析与数学建模

金欣媛<sup>1</sup>, 全瑶<sup>1</sup>, 赵敏<sup>1\*</sup>, 张洪桐<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江传媒学院媒体工程学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>杭州外国语学校剑桥高中部, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月27日; 发布日期: 2026年3月9日

## 摘要

不同鸟类在飞行时的脖子姿态呈现显著差异: 如天鹅、野鸭在飞行时通常伸直脖子, 而大灰鹭等慢速滑翔鸟类保持S型弯曲脖子。本文通过简化几何模型和能量最小化原理, 对鸟类脖子形态进行数学建模。脖子被建模为柔性杆件, 考虑重力、空气阻力和惯性力的影响, 并计算不同姿态下的总能量消耗。模型解释了脖子形态与飞行稳定性和能量效率的关系。针对慢速滑翔鸟类, S型脖子在降低惯性摆动、减少空气阻力和提升视觉便利方面具有力学优势。

## 关键词

形态, 力学模型, 力矩, 稳定性, 能量

# Biomechanical Analysis and Mathematical Modeling of Neck Postures in Flying Birds

Xinyuan Jin<sup>1</sup>, Yao Tong<sup>1</sup>, Min Zhao<sup>1\*</sup>, Hongtong Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Media Engineering, Communication University of Zhejiang, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Cambridge A-Level Centre, Hangzhou Foreign Languages School, Hangzhou Zhejiang

Received: January 28, 2026; accepted: February 27, 2026; published: March 9, 2026

## Abstract

Different bird species exhibit significant differences in neck posture during flight: swans and mallards, for example, typically keep their necks fully extended, whereas slow-gliding birds such as great grey herons maintain an S-curved neck posture. In this paper, a mathematical model of avian neck morphology is developed based on simplified geometric models and the principle of energy minimization. The neck is modeled as a flexible rod, taking into account the effects of gravity, aerodynamic drag, and inertial forces, and the total energy consumption under different postures is

\*通讯作者。

文章引用: 金欣媛, 全瑶, 赵敏, 张洪桐. 飞行鸟类脖子形态的力学分析与数学建模[J]. 声学 & 振动, 2026, 14(1): 29-39. DOI: 10.12677/ojav.2026.141003

calculated. The model explains the relationship between neck morphology, flight stability, and energy efficiency. For slow-gliding birds, the S-curved neck presents mechanical advantages in reducing inertial oscillation, lowering aerodynamic drag, and improving visual convenience.

## Keywords

Morphology, Mechanical Model, Moment, Stability, Energy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

鸟类作为自然界中飞行效率极高的一类动物，其身体结构与飞行姿态反映了在长期进化中对环境适应与生存行为的精细优化。这些特征不仅服务于高效的能量利用，同时协调了空气动力学、神经控制与行为生态等多重因素。在飞行过程中，脖子的形态发挥着关键作用：它既是连接躯干与头部的解剖结构，也是一个动态调节系统，能够影响整体空气动力特性、视觉感知范围以及捕食与导航效率。通过调控脖子姿态，鸟类能够在复杂气流环境中维持平衡、优化能量分配，并及时响应环境与行为需求[1]。

观察显示，不同鸟类在飞行时的脖子姿态差异显著，反映出其生态位与飞行模式的多样性[2]。以长颈水鸟为例，如天鹅和野鸭，这些物种倾向于在巡航或迁徙飞行中采用伸直的颈部姿态，从而可能改善前方视觉范围并调整重心配置。相比之下，慢速滑翔或涉水鸟类，如鹭科鸟类(例如灰鹭)在飞行时常见将颈部收回或以S型弯曲形式呈现，其“飞行时颈部收回”这一特征已有特定物种记录[3]。此外，从头部稳定和颈部结构的研究可知，鸟类颈部形态与头部稳定化、视觉追踪与飞行振动响应相关。还有研究分析了鸟颈结构的变异性与运动特征，指出颈部结构——包括颈椎数量、关节灵活性——在运动效率与稳定性之间可能起关键作用[4]。

从力学视角来看，鸟类飞行过程可视为重力、空气阻力和惯性力之间的动态平衡，而颈部姿态则可能作为一种几何与结构调节手段，影响这些力学因素的作用路径与幅度[5]。经典空气阻力模型与转动惯量表达式提供了分析框架[6]。在这一框架下，不同颈部姿态——例如伸直或弯曲——可视为通过改变迎风面积、旋转臂长、质心位置等参数，进而影响系统总能量消耗与稳定性。本研究便以此为出发点，构建简化数学模型，将颈部视为一个柔性杆件系统，从受力分析、能量函数构建、参数化模拟等维度出发，探讨颈部姿态选择对飞行性能的影响[7]。

本文的主要工作包括：首先，在第2节中介绍模型的假设与简化，明确建模前提和力学因素；其次，第3节建立数学模型，包括脖子受力分析、能量函数定义与离散化参数化方法；接着在第4节中进行模拟与讨论，探究不同颈部姿态对稳定性与能耗的影响；最后，在第5节总结全文，阐述研究发现、应用意义与未来拓展方向。通过这一研究，希望为鸟类飞行机制的量化理解提供一个清晰的力学视角，并为仿生飞行器设计提供生物启发的思路。

## 2. 模型的假设与分析

为了进行受力分析，我们需要先给出合理的假设，然后再进行模型的建构。

### 2.1. 模型假设与符号说明

为了定量分析鸟类脖子姿态对飞行稳定性与能耗的影响，我们建立简化数学模型，作如下合理假设：

假设一：建模过程中，鸟体简化为刚性躯干，颈部简化为柔性杆件，其总长度与质量固定且均匀分布。

假设二：飞行速度为恒定水平速度，忽略垂直加速度和侧风扰动。

假设三：忽略主动肌肉功率、热量损耗及复杂湍流，仅考虑准静态力学平衡。

基于上述假设，我们在表 1 中给出本文所涉及到的数学符号。

**Table 1.** Symbols and notes

**表 1.** 模型符号说明

符号	含义	单位	符号	含义	单位
$L$	颈部长度	m	$C_d$	阻力系数	无量纲
$m_n$	颈部质量	kg	$\rho$	空气密度	kg/m <sup>3</sup>
$v$	飞行速度	m/s	$A$	迎风面积	m <sup>2</sup>
$g$	重力加速度	m/s <sup>2</sup>	$k$	颈部刚度系数	N·m/rad
$\theta$	弯曲角度	rad	$I$	转动惯量	kg·m <sup>2</sup>

## 2.2. 受力基本分析

鸟类行力学主要考虑三类因素：首先是重力，这是由颈部质量和地球重力加速度决定。其次是空气阻力，这种力遵循流体力学经验关系，即服从

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A. \quad (1)$$

最后就是惯性力，也就是颈部质量在加速度作用下产生的线性及旋转惯性响应。

我们还可以知道鸟类飞行时，颈部弯曲产生的弹性势能为

$$E_{\text{bend}} = \frac{1}{2} k \theta^2. \quad (2)$$

由此可知，我们需要分析鸟类飞行时颈部质量以及重力对飞行稳定性的影响，空气的阻力，惯性力以及飞行时保持形态的功率维持以及飞行爬升以及下降的功率等。

## 3. 数学模型

我们先基于飞行时的鸟类脖子受力力学特征进行分别建模，然后再进行目标函数的构建。

### 3.1. 颈部质量与重力对飞行稳定性的影响

鸟类颈部的质量记作  $m_n$ ，在地球重力作用下产生重力：

$$\mathbf{G} = m_n \mathbf{g}.$$

颈部的重力不仅影响颈部自身的受力，也对鸟体整体的质心位置、转动惯量以及飞行姿态稳定性具有显著作用。

为了量化颈部姿态对飞行力学的影响，我们分别讨论不同颈部姿态下的质心位置及其对旋转惯量的贡献，具体可分为直型颈部和 S 型弯曲颈部：

直型颈部：当鸟类将颈部完全伸直时，颈部质心相对躯干中心的位置较远，可近似为脖子长度的一半：

$$r_{\text{straight}} \approx \frac{L}{2},$$

此时颈部对旋转惯量的贡献较大，近似为：

$$I_{\text{straight}} = m_n r_{\text{straight}}^2.$$

转动惯量较大意味着当鸟体受到如风速变化或气流流动的外界扰动时，颈部及头部的响应速度较慢，鸟类需要额外的肌肉力量来维持飞行姿态的稳定。

S 型弯曲颈部：当颈部呈 S 型或弯曲姿态时，质心靠近躯干中心，距离可简化为

$$r_s < L/2.$$

相应的旋转惯量为：

$$I_s = m_n r_s^2.$$

转动惯量减小意味着颈部对扰动的惯性响应较小，滑翔或低速飞行时可以更快调整姿态，提高飞行稳定性，并减少肌肉控制所需的能量。

我们可以更加直观地进行理解，即可以将颈部简化为一根均匀杆：当杆子一端远离支点时，旋转起来更费力，对应伸直颈部的高惯性情形；而当杆子弯曲靠近支点时，旋转起来更轻松，对应 S 型颈部的低惯性情形。

因此，鸟类通过调节颈部姿态，不仅能够优化头部的视野与感知能力，还可以在不同飞行条件下平衡惯性响应与能量消耗，从而实现稳定性与效率的综合优化。

### 3.2. 空气阻力分析

鸟类在飞行过程中会受到空气阻力作用，阻力方向与飞行速度相反，其大小可表示为颈部与躯干两部分阻力之和，由(1)可得：

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 (C_{d,\text{neck}} A_{\text{neck}} + C_{d,\text{body}} A_{\text{body}}), \quad (3)$$

其中第一部分为颈部阻力，第二部分为身体阻力。

颈部阻力受颈部几何形状及流体力学效应影响。在低雷诺数条件下，阻力系数会随雷诺数变化而增加，由此颈部阻力系数修正为：

$$C_{d,\text{neck}} = 0.04 + \frac{0.06}{\sqrt{\text{Re}_{\text{neck}}}}, \quad \text{Re}_{\text{neck}} = \frac{\rho v d}{\mu},$$

其中  $d$  为颈部直径， $\mu$  为空气动力粘度。颈部迎风面积采用圆截面近似：

$$A_{\text{neck}} = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2.$$

此修正考虑了低速或小型鸟类颈部的黏性效应，使阻力计算更符合实际物理情况。物理意义在于：随着速度增加，雷诺数增大，阻力系数趋于常数，符合高雷诺数流动特性；低速时阻力系数增大，反映黏性主导的流体阻力。

鸟体身体阻力主要由机体几何形状和流线型特性决定。我们需要考虑宽长比修正和流线型系数：

$$C_{d,\text{body}} = \left( 0.06 + \frac{0.1}{L_{\text{body}}/W_{\text{body}}} \right) \cdot \text{coef}_s,$$

其中  $L_{\text{body}}$  和  $W_{\text{body}}$  分别为身体长度和宽度， $\text{coef}_s$  为流线型修正系数。迎风面积取机体投影面积的 60%：

$$A_{\text{body}} = 0.6 L_{\text{body}} W_{\text{body}}.$$

由此可以得到阻力产生的功率计算公式为:

$$P_{drag} = F_d \cdot v \quad (4)$$

通过将颈部与身体阻力叠加, 可得到鸟类在不同颈部姿态下的空气阻力大小。此模型(4)允许我们定量比较伸直颈部与 S 型弯曲颈部在不同飞行速度下的能耗差异, 为后续总能量函数计算提供基础。

### 3.3. 惯性力分析

鸟类在飞行过程中, 颈部不仅承受重力和空气阻力, 还会受到惯性力的作用。惯性力主要来源于飞行加速度, 包括鸟体整体的线性加速度以及转向或振动引起的旋转切向加速度。颈部惯性力可表示为:

$$F_i = m_n a,$$

其中  $a$  为颈部质心的加速度, 包括线性和平动分量以及由旋转产生的切向加速度。值得注意的是与重力主导的静态转动惯量不同, 此时惯性力对应的是动态转动惯量, 需引入阻尼系数反映飞行中的能量耗散。

我们进一步分析颈部姿态对惯性力的影响。当颈部伸直时, 质心远离鸟体躯干中心, 有效旋转臂长较大, 动态转动惯量为:

$$I_{straight} = m_n r_{straight}^2 (1 + \xi \dot{S}_c),$$

其中  $r_{straight} \approx L/2$  为质心到旋转轴的距离,  $\xi$  为惯性阻尼系数,  $S_c$  为稳定修复系数。较大的转动惯量意味着在受到扰动时, 颈部容易产生较大摆动, 从而可能放大整个鸟体的姿态波动, 降低飞行稳定性。而当颈部弯曲呈现 S 型时, 颈部折叠使质心靠近躯干, 转动臂长减小, 则有:

$$I_s = m_n r_s^2 (1 + \xi \dot{S}_c), \quad r_s < r_{straight}.$$

较小的转动惯量降低了惯性响应幅度, 减少颈部摆动, 从而提高滑翔或低速巡航飞行的稳定性。

通过这一分析可以看出, 颈部姿态不仅影响空气动力学阻力, 也直接调节惯性响应能力。鸟类通过调节颈部的弯曲程度, 实现对飞行姿态稳定性和能量消耗的平衡优化。

### 3.4. 姿态维持功率

在扑翼飞行过程中, 鸟类必须通过颈部肌肉持续提供调节力矩, 以抵抗气流扰动所产生的俯仰扰动力矩, 从而维持头部与躯干之间的相对稳定。该过程本质上是气动力矩与肌肉输出力矩之间的动态平衡问题。颈部所受气动扰动力矩可表示为

$$M_{aero} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_n L_n C_m,$$

其中  $S_n$  为颈部的等效迎风面积,  $L_n$  为颈部特征力臂长度,  $C_m$  为气动力矩系数。由该表达式可见, 气动扰动力矩与速度平方成正比。

在飞行中, 颈部姿态的微振荡通常由气流不稳定性或周期性涡脱落所驱动, 其特征频率可通过尺度分析估算为

$$f \sim \frac{V}{L_n},$$

因此对应的角速度尺度为

$$\omega \sim 2\pi f \sim \frac{V}{L_n}.$$

为实现姿态维持，颈部肌肉需提供与气动扰动力矩近似平衡的反向力矩，即  $M_{\text{muscle}} \approx M_{\text{aero}}$ 。姿态调节所消耗的机械功率可表示为力矩与角速度的乘积：

$$P_{\text{stability}} = M_{\text{muscle}} \omega.$$

将上述尺度关系代入可得

$$P_{\text{stability}} \sim \left( \frac{1}{2} \rho V^2 S_n L_n C_m \right) \left( \frac{V}{L_n} \right),$$

从而得到

$$P_{\text{stability}} = \frac{1}{2} \rho S_n C_m V^3.$$

由此可见，姿态维持功率呈现  $V^3$  标度，其物理来源在于气动扰动力矩的  $V^2$  依赖与扰动频率的  $V$  依赖叠加。为便于建模，可定义

$$\text{coef}_s = \frac{1}{2} \rho S_n C_m,$$

则姿态维持功率可写为

$$P_{\text{stability}} = \text{coef}_s V^3. \quad (5)$$

该系数反映颈部几何形态与气动耦合特性的综合影响。对于 S 型颈部，由于其等效迎风面积  $S_n$  与气动力矩系数  $C_m$  通常较大，姿态维持所需功率相对更高；而伸直颈部结构在气动扰动下的力矩耦合较弱，因此稳定功率需求相对较低。

若取典型参数  $\rho \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ ， $S_n \sim 10^{-2} \text{ m}^2$ ， $C_m \sim 0.5$ ，则

$$\text{coef}_s \sim 0.003 \sim 0.008.$$

### 3.5. 升力功率

飞行过程中，鸟类必须通过机翼产生足够升力以平衡重力，从而维持水平飞行。与简单的恒定升阻比假设不同，实际升力相关功率需同时考虑机翼有效功率与诱导功率两部分，前者与飞行速度正相关，后者随速度增大而减小，共同构成更符合实际飞行力学的能耗形式：

$$P_{\text{lift}} = P_{\text{wing}} + P_{\text{ind}},$$

其中  $P_{\text{wing}}$  为机翼克服气动损耗所需的有效功率， $P_{\text{ind}}$  为产生升力伴随的诱导功率。机翼有效功率主要用于克服翼型阻力与姿态调节损耗，与飞行速度近似呈线性关系：

$$P_{\text{wing}} = C_{\text{wing}} \cdot \phi_{\text{lift}} \cdot v,$$

式中  $C_{\text{wing}}$  为机翼基础功率系数， $\phi_{\text{lift}}$  为升力增益因子，该因子与翼型特性、身体流线度及颈部姿态密切相关，能够量化不同身体姿态对升力效率的调控作用。

诱导功率来源于气流在翼尖形成的涡旋损耗，是低速飞行时升力产生的主要能耗成分，其量级随速度增大而降低，具体表达式为：

$$P_{\text{ind}} = \frac{k_{\text{ind}} W^2}{v},$$

其中  $W$  为鸟体重量， $k_{\text{ind}}$  为诱导损耗系数。这一形式满足  $P_{\text{ind}} \propto v^{-1}$  的动力学规律，能够使总功率曲线在低速段因诱导功率主导而上升、高速段因机翼有效功率与阻力功率主导而下降，最终呈现出符合飞行力学普遍规律的 U 型特征。

从物理本质来看, 升力相关功率总体随鸟类体重的增大而显著提高, 体重更大的鸟类需要更高的能量消耗来维持同等速度下的水平飞行; 机翼有效功率随速度线性增加的特性, 反映了高速飞行时机翼克服气流阻力的能耗增长趋势, 而诱导功率随速度增大而减小的特征, 则体现了低速状态下翼尖涡旋损耗的主导作用。升力增益因子  $\phi_{\text{lift}}$  综合体现了翼型效率、身体流线程度与颈部姿态的协同影响: 良好的流线形态与舒展的颈部能够减小气流干扰、优化升流分布, 从而降低单位速度下的升力功率开销。以天鹅与苍鹭为例, 天鹅在巡航飞行中采用伸直颈部的姿态, 配合更优的身体流线布局, 能够获得更高的升力增益; 而苍鹭为适应低速机动与捕食需求, 飞行时保持 S 型弯曲颈部, 其升力增益水平相对适中。

将上述升力功率模型与空气阻力功率、姿态维持功率叠加, 即可得到能够合理反映速度依赖关系的总飞行功率模型, 该模型既保留了颈部姿态对气动特性的核心影响机制, 又符合飞行力学的基本规律, 为定量比较不同颈部姿态下的飞行能耗与速度适应区间提供了可靠的理论依据。

### 3.6. 总飞行功率

鸟类在飞行过程中消耗的总功率可由三部分组成:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{drag}} + P_{\text{stability}} + P_{\text{lift}}, \quad (7)$$

其中  $P_{\text{drag}}$  为克服空气阻力所需功率,  $P_{\text{stability}}$  为维持姿态稳定所需功率,  $P_{\text{lift}}$  为维持升力所需功率。这一表达式提供了一个直接量化飞行能耗的模型, 可用于比较不同颈部姿态或速度下的总功率消耗。

### 3.7. 能量函数与颈部最优型态

为了进一步分析颈部姿态对飞行稳定性和能量消耗的影响, 引入总能量函数:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{drag}} + E_{\text{bend}} + E_{\text{inertial}}. \quad (8)$$

公式(8)中

$$E_{\text{drag}} \approx F_d \cdot L_{\text{eff}},$$

表示空气阻力能量, 取决于有效迎风长度。

$$E_{\text{bend}} = \frac{1}{2} k \theta^2,$$

表示颈部弯曲产生的弹性势能, 而

$$E_{\text{inertial}} = \frac{1}{2} I \omega^2,$$

则表示颈部旋转惯性产生的能量。其中  $\theta$  为颈部弯曲角度,  $k$  为颈椎或肌肉刚度,  $I$  为转动惯量,  $\omega$  为角速度。

为了在飞行过程中实现能量最小化, 可通过求解总能量函数的导数得到最优弯曲角  $\theta_{\text{opt}}$ :

$$\frac{dE_{\text{total}}}{d\theta} = \frac{dE_{\text{drag}}}{d\theta} + k\theta + \frac{dE_{\text{inertial}}}{d\theta} = 0.$$

该条件表明, 颈部姿态会在空气阻力、弯曲弹性及惯性响应之间达到平衡, 从而实现飞行能耗的最优化。通过调整  $\theta$ , 可模拟不同姿态下的稳定性与能量消耗, 为鸟类飞行行为或仿生设计提供定量参考。

我们先对模型(8)进行离散化, 然后再给出参数值进行仿真求解。

### 3.8. 参数化离散模型

为了在数值模拟中精确刻画颈部弯曲对飞行力学的影响, 可将颈部离散为  $n$  个小杆段, 每段长度为

$$\Delta L = \frac{L}{n},$$

每段的弯曲角度从鸟体到头部编号记为  $\theta_i$ 。通过这种离散化方法，可对弯曲能量、空气阻力和转动惯量进行逐段累加计算。

弯曲能量同每段颈部的弹性势能与相邻段之间的弯曲角差相关，离散化为：

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} k (\theta_i - \theta_{i-1})^2,$$

其中  $k$  为颈椎或肌肉刚度。该项反映维持颈部弯曲所需的能量成本，角度变化越大，所需能量越高。

空气阻力则需要计算每段颈部在气流中的迎风投影贡献局部阻力，可近似表示为：

$$F_d \approx \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} C_d \rho v^2 \Delta L |\sin \theta_i|,$$

其中  $\theta_i$  的正弦值反映迎风投影长度。通过累加各段贡献，可以定量比较不同颈部姿态下的空气阻力。

转动惯量需要首先计算颈部各段的质心到旋转轴的距离

$$r_i = \sum_{j=1}^i \Delta L \cos \theta_j,$$

而总的转动惯量由各段质量与质心距平方累加得到：

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

伸直颈部时， $r_i$  较大，整体转动惯量大；S型弯曲颈部时， $r_i$  较小，转动惯量降低，从而减少惯性响应，提高滑翔或低速飞行的稳定性。

我们可以看出离散化模型意义在于通过这种逐段离散化方法，可以在数值模拟中灵活调整段数、弯曲角度或颈部长度，对不同姿态下的能量消耗和稳定性进行系统探索。该方法既保留了颈部弯曲的物理特性，又便于将理论模型与实际观测数据或仿真结果相结合。

通过上述力学分析与离散化模型，可以总结颈部姿态对飞行性能的影响：

- 伸直颈部 ( $\theta_i \approx 0$ )：颈部迎风面积较大，空气阻力  $F_d$  增加；质心远离躯干中心，转动惯量  $I$  较大，惯性响应明显。这种姿态适合高速、长距离巡航飞行，如天鹅在迁徙过程中的飞行模式。
- S型弯曲颈部 ( $\theta_i > 0$ )：颈部迎风投影减小，空气阻力降低；质心靠近躯干，转动惯量  $I$  降低，惯性响应减弱，滑翔或低速飞行更加稳定，同时便于快速调整头部方向。这种姿态常见于苍鹭等低速巡航或捕食鸟类。

#### 4. 模型求解

在进行数值仿真之前，需要明确天鹅与苍鹭的几何参数、质量及空气动力学特性，以及功率计算所需的相关系数和公式。表 2 列出了两种鸟类的主要几何参数，包括颈部与躯干的尺寸、流线系数以及稳定性与升力系数，可为后续功率计算提供基础。

**Table 2.** The main parameters for Swan and Heron (estimated)

**表 2.** 天鹅与苍鹭的主要参数(估测)

鸟类	脖子(L, D)米	身体(L, W)米	线型	稳定性/升力
天鹅	1.0, 0.10	1.5, 0.3	0.7	0.7/1.3
灰鹭	0.6, 0.08	1.0, 0.3	1.1	1.5/1.0

#### 4.1. 参数取值

表 3 给出了天鹅与苍鹭的质量及有效截面积, 反映了颈部和躯干在飞行中受空气阻力的大小。这些参数在模拟不同速度下的飞行功率时起关键作用。

**Table 3.** Mass and effective cross-sectional area of Swan and Heron (Units: kg, m<sup>2</sup>, estimated)

**表 3.** Swan 与 Heron 质量与有效截面积(单位: kg, m<sup>2</sup>, 估测)

鸟类	重量	$A_{neck}$	$A_{body}$
Swan	8	0.00785	0.27
Heron	2	0.00503	0.18

而表 4 则给出了基本的空气动力学与基本飞行参数。

**Table 4.** Aerodynamic and basic flight parameters [8]

**表 4.** 空气动力学参数[8]

参数	数值
$\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	$1.8 \times 10^{-5} Pa \cdot s$
$v$	8~25 m/s
$C_{d,neck}$	Re (见表注)
$C_{d,body}$	$0.06 + 0.1 * (W/L) \cdot coef_s$

注:  $Re = \rho v D / \mu$ ;  $C_{d,neck} = 24 / Re([0, 1e3]), 1 / (0.193 + 0.097 \ln Re) ([1e3, 2e5]), 0.2 ([2e5, \infty])$ 。

表 5 给出了功率相关参数的取值。

**Table 5.** Power-related parameters and formulas [8]

**表 5.** 功率相关参数与公式[8]

功	公式/系数
阻力	$P_{drag} = F_{drag} \cdot v$
稳定性	$P_{stability} = 0.008 \cdot v^3 \cdot coef_s$
升力	$P_{lift} = (Wg/L/D) \cdot v, L/D = 15 \cdot LiftGain$
总飞行	$P_{total} = P_{drag} + P_{stability} + P_{lift}$

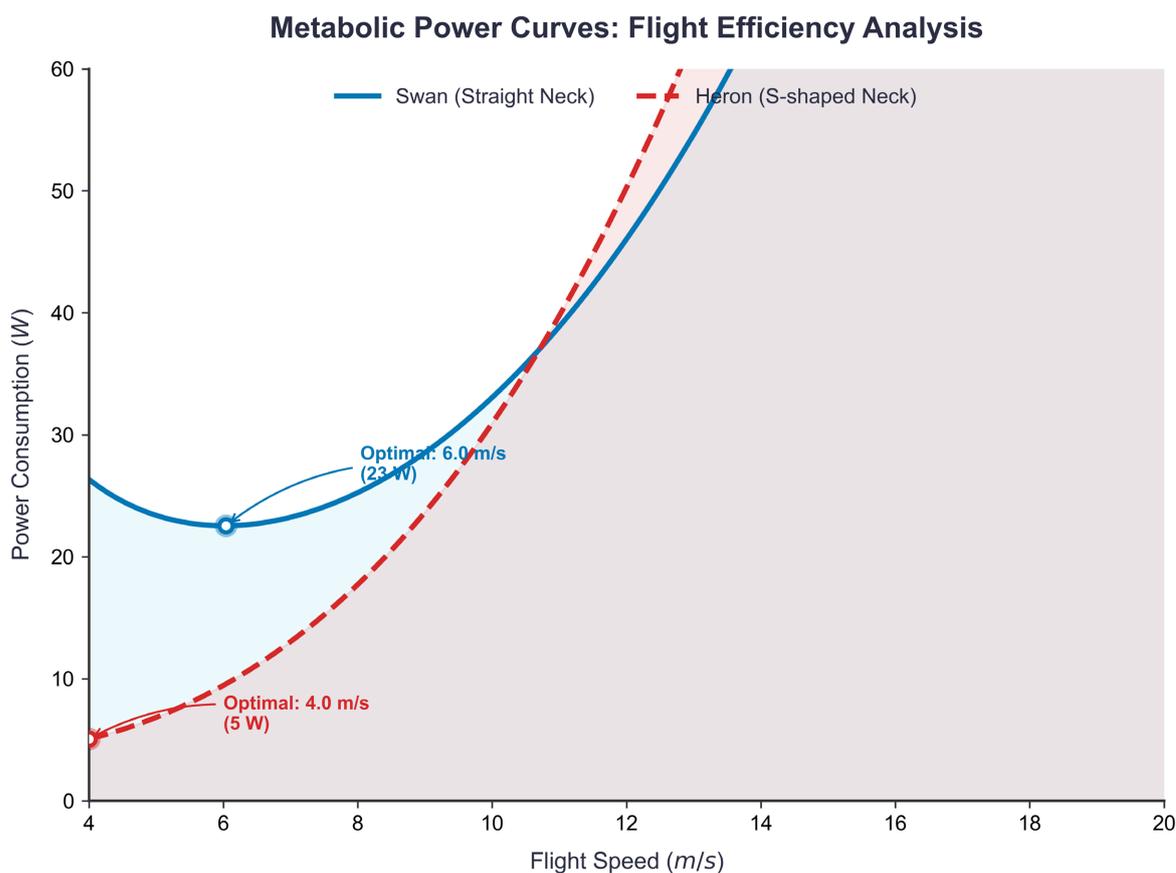
#### 4.2. 仿真结果

为进一步量化天鹅与苍鹭在不同飞行速度下的能量消耗差异, 我们基于前述飞行功率模型对速度范围 0~24 m/s 进行了数值仿真。表 6 汇总了几个关键速度下两种鸟类的总功率计算结果, 并标注了各速度段的优势物种, 从而直观展示不同颈型与几何特征对飞行性能的影响。

表 6 展示了天鹅与苍鹭在不同飞行速度下的总功率比较以及优势速度区间。可以看出, 在低速段(0~12 m/s), 苍鹭凭借较低的总功率占据优势, 而天鹅在高速段(12~24 m/s)表现更优。这与两种鸟类的颈型及几何参数差异密切相关, 反映了不同飞行策略对能量消耗的影响。

**Table 6.** Total power comparison and advantageous ranges between swan and heron at different flight speeds  
**表 6.** 天鹅与苍鹭在不同飞行速度下的总功率比较及优势区间

速度(m/s)	天鹅总功率(W)	苍鹭总功率(W)	优势物种
10	33.06	30.95	苍鹭
14	64.76	76.87	天鹅
18	122.25	156.69	天鹅
22	211.84	279.96	天鹅
24	270.75	360.88	天鹅
优势速度区间		天鹅: 12~24 m/s, 苍鹭: 0~12 m/s	



**Figure 1.** Comparative analysis of metabolic power curves for different avian neck morphologies

**图 1.** 不同鸟类颈部形态的代谢功率曲线对比分析

图 1 中展示了总飞行功率随飞行速度的变化关系。蓝色实线代表天鹅，红色虚线代表苍鹭。圆形标记指示了各自的最佳巡航速度。注意在约 10 m/s 处出现的交叉点，这标志着气动效率机制的显著转变。

模拟结果揭示了诱导功率与寄生功率之间的基本气动权衡，这种权衡受到天鹅与苍鹭不同形态策略的深刻影响。由此产生的 U 型功率曲线(图 1)清晰地划分了由临界交叉速度分隔的两个截然不同的飞行机制。

**低速域：**体重的代价。在低速飞行区间，飞行能耗主要由克服重力所需的诱导功率主导。天鹅具有显著较大的体重，在此区间必须付出高昂的能量代价。模拟数据显示，天鹅的最佳飞行速度较高，而苍鹭仅需 5 W 即可在  $4.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度下飞行。苍鹭轻盈的骨架约 2 kg 使其在低速下极具效率，这反映了其

对湿地环境中低速、高机动性觅食行为的进化适应。

交叉点与高速域的分化。在约  $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  处出现了一个关键的转折点,此时两者的功率消耗趋于一致,此时天鹅为  $33.06\text{ W}$ , 而苍鹭为  $30.95\text{ W}$ 。一旦超过此速度,气动格局发生剧变。随着飞行速度增加,诱导功率的影响减弱,而与速度立方成正比的寄生阻力成为主要的阻碍力。尽管天鹅体重更重,但其凭借更低的流线型系数展现出了卓越的高速效率。天鹅的身体宛如一枚稳定的高惯性“炮弹”,能以最小的空气阻力穿透气流。相反,苍鹭 S 形颈部带来的高阻力系数在高速下形成了一道陡峭的能量壁垒。如模拟输出所示,在  $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的冲刺速度下,苍鹭的功率需求飙升至  $360.88\text{ W}$ , 而天鹅仅需  $270.75\text{ W}$ 。这意味着在高速飞行时,苍鹭需比天鹅多消耗约 33% 的能量,尽管苍鹭的体重更轻。

这些数据表明,“直颈”结合大体重的形态是为高速、长距离巡航而进化的适应策略,旨在最小化高雷诺数下的传输成本。相比之下,苍鹭的形态则牺牲了高速性能,换取了低速下的经济性,这解释了为何长距离迁徙候鸟多具备类似天鹅的流线型特征,而留鸟或短途鸟类则更多样化。

## 5. 结论

本文针对不同鸟类飞行时颈部姿态的显著差异,以简化几何模型和能量最小化原理为基础,构建了鸟类颈部形态的数学力学模型,系统分析了颈部姿态与飞行稳定性、能量效率之间的内在关联,并通过数值仿真验证了模型的合理性与有效性。

研究将鸟类颈部简化为柔性杆件,综合考虑重力、空气阻力和惯性力的作用,量化计算了不同颈部姿态下的总能量消耗与飞行功率,明确了颈部弯曲角度、转动惯量、空气阻力等关键参数对飞行性能的影响机制。通过离散化建模进一步细化了颈部各段的力学响应,揭示了伸直颈部与 S 型弯曲颈部的力学特性差异:如天鹅、野鸭这类鸟类伸直颈部因质心远离躯干,转动惯量较大,更适配高速巡航飞行;而如苍鹭这类鸟类 S 型弯曲颈部通过缩短质心到躯干的距离,减小转动惯量和迎风面积,在降低惯性摆动、减少空气阻力及提升视觉便利性方面具有显著优势,更适合低速滑翔飞行。

数值仿真结果进一步验证了上述结论,在  $8\sim 25\text{ m/s}$  的飞行速度范围内,苍鹭等 S 型颈部在  $18\text{ m/s}$  以下的低速区间表现出更低的总飞行功率,天鹅等伸直颈部则在  $18\text{ m/s}$  以上的高速区间具有明显的能量效率优势,表明鸟类颈部形态的进化适应与其飞行速度生态位高度匹配。

本文构建的数学模型为鸟类飞行颈部姿态的力学机制提供了量化解释,不仅深化了对鸟类身体结构与飞行行为协同进化关系的理解,也为仿生飞行器的颈部结构设计、姿态控制及能量优化提供了重要的生物启发与理论参考。研究局限在于未考虑肌肉主动控制、复杂湍流环境等因素的影响,未来可进一步完善模型假设,结合实验观测数据优化参数取值,拓展模型在不同鸟类物种及复杂飞行场景中的适用性。

## 参考文献

- [1] 孙茂. 动物飞行的空气动力学[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(1): 122-128, 8.
- [2] 屈秋林, 王晋军. 鸟类飞行空气动力学对人类飞行的启示[J]. 物理, 2016, 45(10): 640-644.
- [3] 吴康灵, 叶正寅, 叶坤, 洪正. 鸟类羽毛在气流中变形的力学特性研究[J]. 力学学报, 2023, 55(4): 874-884.
- [4] 汪睿, 李典, 刘小民. 鸟翼表面非光滑结构流动控制机理研究[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(1): 144-150.
- [5] 薛栋, 宋笔锋, 宋文萍, 等. 仿鸟型扑翼飞行器气动/结构/飞行力学耦合研究进展[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(1): 88-97.
- [6] 常兴华, 马戎, 张来平. 海鸥翼折转运动的数值模拟及分析[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(1): 135-143.
- [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] Pennycuik, C.J. (2008) Modelling the Flying Bird. Academic Press.