

# 大班啄木鸟啄击运动观测及运动机理分析

费 烨<sup>1</sup>,赵梓淇<sup>1</sup>,沈昕慧<sup>2,3</sup>,刘金国<sup>2,3</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室,辽宁 沈阳 110016;3. 中国科学机器人与智能制造创新研究院,辽宁 沈阳 110016)

**摘 要** 目的 研究啄木鸟的啄击运动机理,探究啄木鸟啄击树干时运动和力学特性。方法 利用 MATLAB 将高速摄像机拍摄的啄木鸟啄击运动视频片段分解成图像序列,观测啄木鸟啄击运动并分析运动参数;根据啄木鸟啄击运动特点和骨骼系统特点建立啄木鸟连杆模型,并对啄木鸟啄击进行力学分析。结果 啄木鸟最大啄击速度为 4.056 m/s、冲击加速度为 8 112 m/s<sup>2</sup>、啄击时胸椎和尾椎所受最大力矩分别为 2.3 N·m 和 3 N·m。结论 啄木鸟在产生大冲击时身体稳定且关节承受力矩较小,可将啄木鸟啄击运动机理应用在破碎锤的仿生设计中可使机构受力状态更加合理,从而降低材料性能要求,有利于降低成本延长使用寿命。

**关键词** 啄木鸟;啄击运动机理;连杆模型;力学分析;仿生设计

中图分类号 Q811

文献标志码 A

## Observation and Motion Mechanism Analysis of Pecking Motion of Great Spotted Woodpecker

FEI Ye<sup>1</sup>, ZHAO Ziqi<sup>1</sup>, SHEN Xinhui<sup>2,3</sup>, LIU Jinguo<sup>2,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110016; Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110016)

**Abstract:** This paper investigates the mechanism of woodpeckers and explores the movement and mechanical properties when they peck the trunk. The woodpecker pecking motion is recorded with a high-speed camera and decomposed into an image sequence with MATLAB. The woodpecker pecking motion is observed and captured with the image sequence, and the pecking motion parameters were analyzed. Based on the characteristics of pecking motion and the skeletal system, the woodpecker linkage model is established and the mechanical analysis of woodpecker pecking is carried out. Through observation and analysis of pecking motion, the maximum pecking speed (4.056 m/s), impact acceleration (8 112 m/s<sup>2</sup>), and the maximum torque of thoracic (2.3 N·m) and caudal vertebra (3 N·m) during pecking are obtained. The results show that

收稿日期:2018-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51775541)

作者简介:费烨(1963—),男,教授,主要从事工程机械及液压技术方面研究。

woodpeckers have a stable body with a small moment of joint resistance under the big impact. The woodpecker pecking motion can be applied to the quartering hammer design to make more reasonable under the force, thus reducing the material performance requirements, which can reduce the cost and prolong the service life.

**Key words:** woodpecker; pecking motion mechanism; linkage model; mechanical analysis; bionic design

啄木鸟通常通过啄击树木觅食和筑巢,具有很高的啄击效率.啄木鸟体积小质量轻,却可以在10 cm以内的短行程内用0.062 5 s左右的时间达到3.5 m/s的啄击速度,并产生很大的冲击力破坏树干,自身又不受损伤,其啄击运动机理具有很重要的研究意义,不仅可以应用于工程机械中破碎锤的仿生设计,还可为地外星球自主采样机构的设计提供新的思路.

长期以来,啄木鸟独特的啄击行为得到了许多科学家的关注.达尔文在《物种起源》中最早提到了“啄木鸟以其足、尾、喙与舌的结构,如此令人赞叹地适于捕捉隐藏于树皮下的虫子”,表明了啄木鸟通过足、尾和喙等身体结构的合作,发出啄击动作,啄开树皮,凿出洞来.H. Sielmann等<sup>[1]</sup>通过对啄木鸟长期的观察研究发现,啄木鸟在2.1~2.69 s就可以啄击树木35~44次,每天啄木次数高达12 000次.P. R. May等<sup>[2]</sup>利用高速摄像机采集了一只北美啄木鸟啄木过程中头部的运动情况,并得出如下结果:①啄木鸟啄击轨迹是一条近似直线,头部几乎没有旋转;②啄击之后头部有微小的移动;③啄击速度为600~700 m/s;④冲击加速度为1 000 g. P. R. May的研究将啄木鸟啄木过程中头部的运动进行了量化,并提出了啄木鸟的啄击轨迹是一条直线,根据A. H. S. Holbourn<sup>[3]</sup>的旋转致伤理论,认为这种直线运动方式避免了旋转运动所导致的剪切力,从而避免了脑部产生撕裂伤或者脑震荡.R. D. Stark等<sup>[4]</sup>对加利福尼亚地区11个啄木鸟种群的啄击行为进行了系统性地研究并进行了统计学分析,得到了不同种类啄木鸟的啄击频率,

可达到10~22次/s.J. F. V. Vincent等<sup>[5]</sup>通过对啄木鸟啄木视频中啄木鸟啄木动作进行运动分析,提出了啄木鸟啄击动作的单一循环分解动作:初始阶段、初后仰阶段、中后仰阶段、身体加速阶段和撞击树干阶段;对每个分解动作中啄木鸟身体各部分的状态进行了详细阐述,并发现啄木鸟首先收缩腿部肌肉使身体产生角动量,再通过脖子带动头部加速进行啄木,有效地实现了短距离加速,产生较大的冲量保证喙部凿开树皮,并依据这个发现建立了啄木鸟和树干组成的动力学模型,对其进行了仿真分析,得到了啄击角度、头部速度、啄击深度和啄击力的动态响应曲线.与以往仅研究啄木鸟头部运动不同,J. F. V. Vincent对身体各部分运动进行了研究,并利用啄木鸟的运动行为特点,提出了一种低惯性仿生锤,可实现短距离内加速,易于在狭小空间内对物体施力.这一设计将对啄木鸟啄击运动的研究提升到了工程应用的层面,对啄木鸟的研究具有重要的推进作用.L. Wang等<sup>[6]</sup>利用两台高速摄像机采集啄木鸟头部的三维运动数据,并利用六轴力-扭矩传感器采集了啄力,并利用动态应变仪采集了颅骨和喙部选定点处的动态应变变化曲线;最终通过对运动学数据的分析,表明大斑啄木鸟啄木过程中头部不仅有直线运动,同时还伴随有旋转运动;通过对啄击力的采集分析,提出冲击过程中除了啄击力还存在扭矩.L. Wang的研究增加了啄木鸟啄击运动的俯视视角的运动观测发现了啄木鸟头部的旋转运动,推动了对啄木鸟啄击运动的研究,但是没有解释啄木鸟头部在啄击过程中会进行旋转运动的原因.Y. Liu等<sup>[7]</sup>利用啄木鸟

骨骼标本和一些啄木鸟啄木的视频对啄木鸟如何在短时间内产生很高的碰撞速度进行了研究,提出了鞭打机构,并对其进行了运动学分析,发现了自由端的速度随着铰链数量的增加而增大.除了在啄木鸟运动方面,也有很多学者从头骨结构、材料等方面对啄木鸟头部减振机理和喙部受到冲击后全身的能量流开展了研究<sup>[8-25]</sup>,使得对啄木鸟的研究更加深入且全面.

在对啄木鸟的运动和减振机理的研究中皆存在啄木鸟全身啄击运动模型难以表述的问题,人们通常在对啄木鸟建模时进行很大程度的简化. J. F. V. Vincent 等<sup>[5]</sup>建立的力学模型中啄木鸟身体为一个绕固定支点转动的刚体,头颈部分简化为一阶振动系统; Y. Liu 等<sup>[7]</sup>建立的啄木鸟模型,将啄木鸟的头以球体替代,身体以连杆机构替代,并假设颈部关节转角相同.两种方式均无法准确地复刻啄木鸟的啄击运动,进而造成对啄木鸟的运动分析结果不准确.

目前对啄木鸟啄击运动的研究主要分为对啄木鸟啄击动作的研究和对啄木鸟减振抗冲击机理的研究,笔者从啄木鸟啄击运动参数分析和啄击力学分析两方面入手,通过高速摄像和建模的方法,对啄木鸟啄击运动机理进行研究.研究表明:可将啄木鸟啄击运动机理应用在破碎锤的仿生设计中可使机构受

力状态更加合理,从而降低材料性能要求,有利于降低成本延长使用寿命.

### 1 啄木鸟啄击运动的采集

为了采集运动数据,本实验用一台高速摄像机 (YI Action Camera, YI Technology, China) 拍摄大斑啄木鸟啄击杨树树干的运动视频,拍摄帧频设置为240 fps,分辨率设置为640×480 像素.实验对象为一只人工饲养在鸟笼中的成年大斑啄木鸟,体长 22 cm,质量 63 g,具有良好的健康状态,并且具有正常的啄木行为.

本实验主要利用单个高速摄像机从侧面对啄木鸟的啄击动作进行近距离视频采集,但由于挪动摄像机会对啄木鸟产生影响,所以预先固定好摄像机位置,然后用面包虫和枯树干诱导啄木鸟侧对着摄像机进行啄木行为.

由于啄木鸟啄击频率很高,很难在正常的速度下观察啄木鸟啄木时全身的运动,所以本实验将高速摄像机采集的啄木鸟啄木运动视频传入电脑,利用电脑视频播放器的慢速播放功能,对啄木鸟啄木运动进行细致观察,并截取有效的啄击片段.利用 MATLAB 对视频片段进行解帧,得到啄木鸟啄击运动的图像序列,如图 1 所示,通过啄木鸟的运动图像序列可对啄木鸟瞬时动作进行观测与分析.

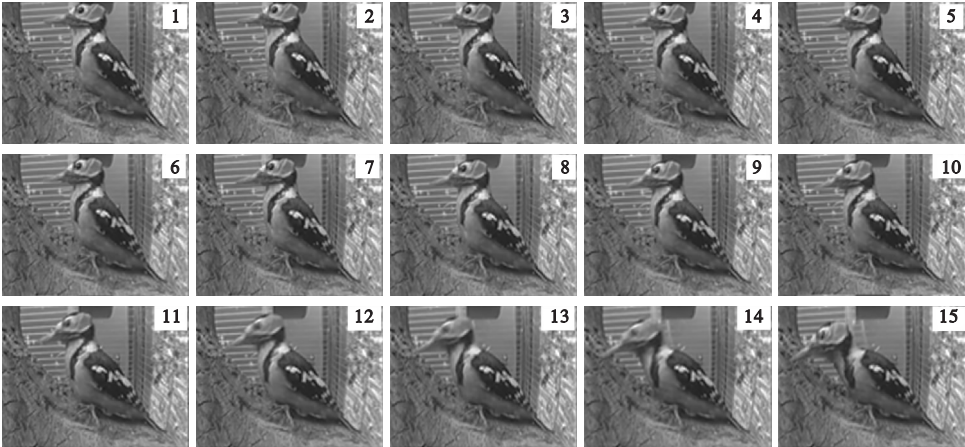


图 1 啄木鸟啄击运动图像序列

Fig. 1 Image sequence of woodpecker in pecking motion

在每帧图像上手动标记啄木鸟喙尖点为跟踪特征点,提取所有帧图像中特征点的位置并将其叠加,可初步得到啄木鸟喙尖的运动轨迹散点图,如图 2 所示。



图 2 啄木鸟啄击运动特征点跟踪

Fig. 2 The feature points extraction of woodpecker in pecking motion

因为相邻两帧图片时间间隔相同,所以可初步根据轨迹散点图中轨迹点的疏密判断啄木鸟的运动速度。由图 2 所示,啄木鸟啄击运动的前 9 个轨迹点位置较密集,所以啄木鸟喙尖运动速度较慢;运动的后 6 个轨迹点间明显比较疏远,并且除最后一点外,另外 5 点相邻轨迹点间距逐次增大,可见在啄木鸟做速度较大的加速运动。因此,可将啄木鸟的单次啄击运动分为调整阶段和加速阶段,在调整阶段中,啄木鸟通过调节身体姿态,将喙指向啄击点,然后进入加速阶段,喙加速啄向树干上的啄击点。

2 啄木鸟啄击运动分析

啄木鸟的啄击运动可分为调整阶段和加速阶段,其中调整阶段主要用于调整喙的啄击方向,在加速阶段产生高速的啄击运动,所以为了得到啄木鸟啄击运动参数,主要对啄木鸟头部在加速阶段的运动进行研究。

为了计算出啄木鸟加速阶段的啄击速度和加速度,对实验获得的标记点坐标数据进行进一步处理。啄击动作的加速阶段共为  $n$  帧,按时间顺序对采集的喙尖标记点进行编号  $a_i$ ,其对应平面直角坐标为  $(x_{a_i}, y_{a_i})$ ,其中,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

因为啄木鸟啄击过程中是先通过调整将喙尖指向树干上的啄击点然后加速啄击,所以加速阶段喙尖的运动轨迹近似一条直线。啄木鸟啄击运动图像序列如图 3 所示。利用最小二乘法将啄木鸟喙尖的轨迹点拟合为一次函数获得轨迹函数如下:

$$y = Ax + B.$$
 (1)

其中,  $A = 2.019\ 0, B = 7.994\ 3$ 。

求得各轨迹点坐标在拟合的直线上的投影点坐标  $(x'_{a_i}, y'_{a_i})$ ,其中  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

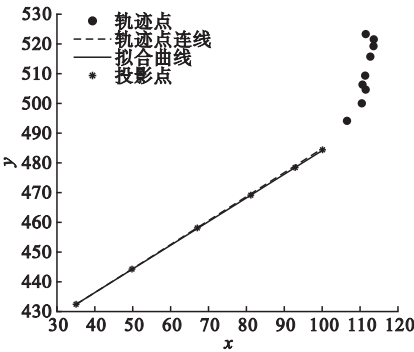


图 3 啄木鸟啄击运动图像序列

Fig. 3 Motion profile of woodpecker in pecking motion

由于啄木鸟喙尖接触树干后会接触一段时间,图 3 中最后一个轨迹点是啄木鸟喙尖与树干接触的点,其与上一点的时间间隔不一定与其他相邻两帧图像间时间间隔相同为  $\Delta t = 1/240\ s \approx 0.004\ 17\ s$ ,所以不考虑最后一点,计算  $i = 1, 2, \dots, n - 1$  时,拟合曲线上各投影点坐标  $(x'_{a_i}, y'_{a_i})$  与第一个投影点的坐标  $(x'_{a_1}, y'_{a_1})$  间的距离  $S_i$  获得啄木鸟喙尖的位移-时间散点图(见图 4)。

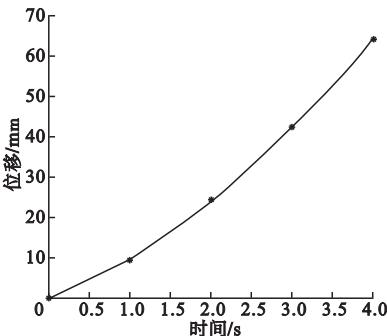


图 4 啄击运动位移-时间拟合曲线

Fig. 4 The displacement-time fitting curve of woodpecker in pecking motion



$$S_i = \sqrt{(y'_{ai} - y'_{a1})^2 + (x'_{ai} - x'_{a1})^2}. \quad (2)$$
其中,  $i = 1, 2, \dots, n - 1$ .

利用最小二乘法对其进行二次函数拟合,得到位移-时间函数  $S(t)$ ,函数图像如图4所示.

$$S(t) = Ct^2 + Dt + E. \quad (3)$$
其中,  $C = 2.019\ 0, D = 7.994\ 3, E = -0.178\ 2$ .

对位移-时间函数求导数,获得速度-时间函数  $v(t)$ .

$$v(t) = \frac{dS(t)}{dt} = Ct + D. \quad (4)$$

再对速度-时间函数求导即得啄击时的驱动加速度  $a$ ,在速度-时间函数中代入  $t = 0$ ,求得加速过程第一点处的初速度  $v_0$ .

$$a = \frac{dv(t)}{dt} = C. \quad (5)$$

$$v_0 = v(0) = D. \quad (6)$$

最大位移  $S_{\max}$  即为第一点  $(x'_{a1}, y'_{a1})$  与第  $n$  点  $(x'_{an}, y'_{an})$  之间的距离. 由于啄木鸟在啄击过程中做加速运动,所以啄击过程中的最大速度  $v_{\max}$  发生在最大位移  $S_{\max}$  处,即喙尖与树干接触前瞬间. 因此,  $v_{\max}$  与碰撞减速时间  $t_d$  的比值即为啄木鸟喙尖与树干碰撞瞬间的加速度  $a'$ .

$$S_{\max} = \sqrt{(y_{an} - y_{a1})^2 + (x_{an} - x_{a1})^2}. \quad (7)$$

$$v_{\max} = \sqrt{2aS_{\max} + v_0^2}. \quad (8)$$

$$a' = \frac{v_{\max}}{t_d}. \quad (9)$$

将测得的啄木鸟啄击运动喙尖位置坐标数值代入计算公式,求得  $S_{\max} = 64.110\ \text{m}$ ,  $v_{\max} = 4.056\ \text{m/s}$  和  $a = 127.443\ \text{m/s}^2$ . 设减速时间为  $0.5\ \text{ms}$ ,可求得啄木鸟喙尖接触树干时的碰撞加速度  $a' = 8\ 112\ \text{m/s}^2$ .

3 啄木鸟啄击力学分析

人体和动物的运动系统由骨骼和肌肉组成,各种运动都是在神经系统的调控下,由肌肉的收缩和舒张带动骨、关节运动而实现的. 啄木鸟与家鸽等其他鸟类骨骼和肌肉类型一

致,但由于啄木鸟啄木行为的独特性,有些骨骼和肌肉的形状与其他鸟类有所不同. 啄木鸟的喙因为用于啄击树干,所以又直又硬又尖;啄木鸟在啄击过程中需要承受树干对它向外的反作用力,所以需要爪子紧紧抓住树干,所以啄木鸟的爪子分成两个锋利而有力的向前脚趾和两个向后脚趾,其中一个向前的脚趾能够绕关节自由运动,这样能够保证脚趾就像一对钢钳一样抓紧树皮;啄木鸟的舌骨与其他鸟类不同,在收回状态下啄木鸟的舌骨从喙的根部绕过颅骨然后终止在口中喙尖位置,啄木鸟的舌骨可伸出喙尖  $15\ \text{mm}$  左右;啄木鸟的尾综骨和尾椎也较比其他鸟类发达,因为在啄击过程中,啄木鸟需要利用坚硬的尾羽紧紧抵住树干,与双爪相配合,三个支撑点保持身体平衡,而且在侧面尾羽、腿和树干组成三角形,防止在竖直的树干上发生后仰,也能增加啄击过程中下肢的稳定性. 通过对啄木鸟运动的观察,发现啄木鸟的啄击运动主要由颈椎、胸椎、尾椎和腿的运动组成,如图5所示.

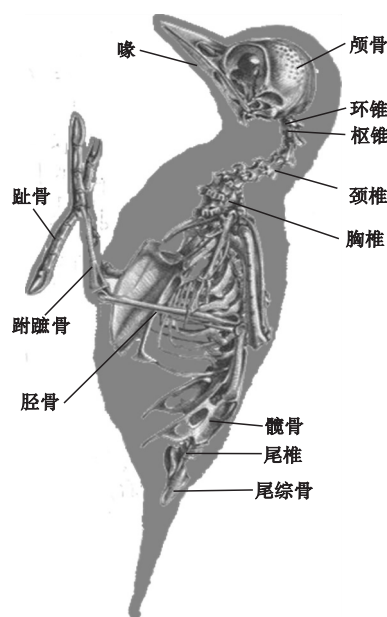


图5 啄木鸟骨骼系统

Fig. 5 The skeleton system of woodpecker

为了更好地分析其整体机构的受力分布,对啄木鸟啄击动作进行力学分析,如图6



表 2 关节间距测量数据

Table 2 Distance measurement data between joints

mm					
$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_g$
84.50	89.01	36.22	61.41	73.34	58.43

将表 1 和表 2 中的数据带入式 (11) 和 (12) 中,可得到  $F_n$ 、 $F_{sx}$ 、 $F_{sy}$  与  $F_p$ 、 $F_g$  的关系,如图 7 和图 8 所示.

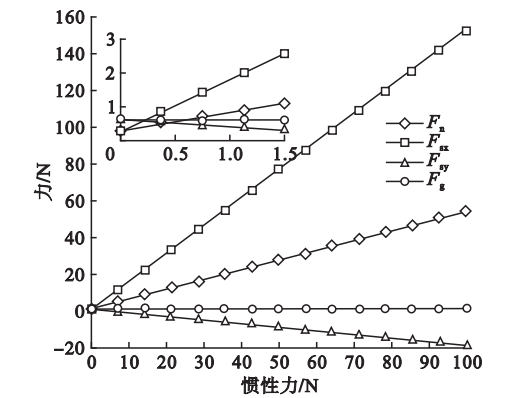


图 7 运动过程中啄击力与其他外力关系图  
Fig. 7 Relationship between pecking force and other external forces

表 3 加速阶段受力、力矩计算结果

Table 3 Results of force and moment during pecking acceleration stage

$F'_g/\text{N}$	$F'_p/\text{N}$	$F'_{sx}/\text{N}$	$F'_{sy}/\text{N}$	$F'_n/\text{N}$	$M'_1/(\text{N}\cdot\text{mm})$	$M'_2/(\text{N}\cdot\text{mm})$
0.62	1.15	2.02	0.39	0.89	35.76	68.80

表 4 接触碰撞阶段受力、力矩计算结果

Table 4 Results of force and moment during contact impact stage

$F'_g/\text{N}$	$F'_p/\text{N}$	$F'_{sx}/\text{N}$	$F'_{sy}/\text{N}$	$F'_n/\text{N}$	$M'_1/(\text{N}\cdot\text{mm})$	$M'_2/(\text{N}\cdot\text{mm})$
0.62	73.01	111.01	-13.81	39.44	2 270.30	3 050.64

2. 3  $\text{N}\cdot\text{m}$  和  $3\text{ N}\cdot\text{m}$ , 可见在啄木鸟重度啄击的过程中,产生大冲击的同时关节所承受的力矩并不是很大,在工程应用上具有应用价值和指导意义.

4 结 论

- (1)啄木鸟啄击运动可分为调整阶段和加速阶段,调整阶段将喙指向与啄击平面垂直方向,加速阶段啄击方向不改变.
- (2)通过拟合曲线,将啄木鸟啄击运动

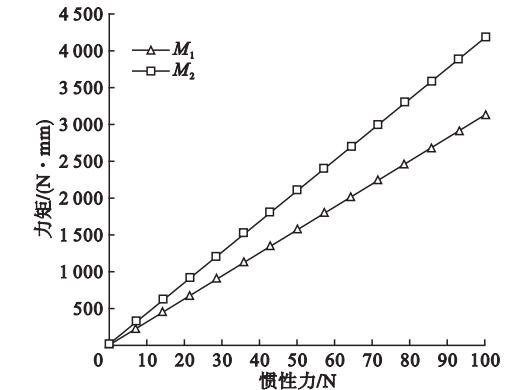


图 8 运动过程中啄击力与力矩关系图  
Fig. 8 Relationship between pecking force and torque

本实验对象啄木鸟体重为 63 g,按身体比例估算啄木鸟头部重量约为 10 g,取重力加速度  $g=9.8\text{ m/s}^2$ .并代入式 (10)、式 (11) 和式 (12) 中,得到啄木鸟加速阶段和碰撞阶段受力和力矩的数值,如表 3 和表 4 所示.

通过对啄木鸟啄击过程中啄击加速阶段和接触碰撞阶段的力和力矩的对比发现,在接触碰撞阶段的力和力矩均明显大于啄击加速阶段,而且胸椎力矩与尾椎力矩分别约为

的加速阶段近似为一段具有初速度的匀加速直线运动.

(3)啄木鸟的啄击方式和姿态可以实现产生大冲击的同时身体保持稳定且关节所承受的力矩很小.

参考文献

[ 1 ] SIELMANN H. My year with the woodpeckers [ M ]. Germany: Barrie & Rockliff, 1959.  
[ 2 ] MAY P R, FUSTER J M, HABER J, et al. Woodpecker drilling behavior. an endorsement of the rotational theory of impact brain injury

- [J]. *Jama neurology*, 1979, 36(6): 370 – 373.
- [3] HOLBOURN A H S. Mechanics of head injuries[J]. *Lancet*, 1943, 242(6267): 438 – 441.
- [4] STARK R D, DODENHOFF D J, JOHNSON E V. A quantitative analysis of woodpecker drumming[J]. *Condor*, 1998, 100(2): 350 – 356.
- [5] VINCENT J F V, SAHINKAYA M N, O'SHEA W. A woodpecker hammer[J]. *Journal of mechanical engineering science*, 2007, 221(10): 1141 – 1147.
- [6] WANG L, CHEUNG J T, PU F, et al. Why do woodpeckers resist head impact injury: a biomechanical investigation[J]. *Plos one*, 2011, 6(10): e26490.
- [7] LIU Y, QIU X, YU T, et al. How does a woodpecker work? an impact dynamics approach[J]. *Acta mechanica sinica*, 2015, 31(2): 181 – 190.
- [8] BOCK W J. Kinetics of the avian skull[J]. *Journal of morphology*, 1964, 114(1): 1 – 41.
- [9] 崔亚琳, 徐鹏, 倪义坤, 等. 啄木鸟头颈部解剖结构分析[J]. *中国科学: 生命科学*, 2018, 48(10): 1084 – 1092.  
(CUI Yalin, XU Peng, NI Yikun, et al. Analysis of the anatomical structure of woodpecker head and neck[J]. *Scientia sinica vitae*, 2018, 48(10): 1084 – 1092.)
- [10] 祝昭丹. 啄木鸟头颅结构抗冲击力学机理[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
(ZHU Zhaodan. The mechanical principle of anti-shock of woodpecker head under dynamic impact[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.)
- [11] 王丽珍, 张宏泉, 樊瑜波. 啄木鸟颅骨及颌骨的材料学特征在头部抗冲击性中的作用[J]. *中国科学: 生命科学*, 2012, 42(3): 234 – 239.  
(WANG Lizhen, ZHANG Hongquan, FAN Yubo. The role of the material characteristics of the woodpecker skull and jaw in the head impact resistance[J]. *Scientia sinica vitae*, 2012, 42(3): 234 – 239.)
- [12] ODA J, SAKAMOTO J, SAKANO K. Mechanical evaluation of the skeletal structure and tissue of the woodpecker and its shock absorbing system[J]. *JSME international journal*, 2006, 49(49): 390 – 396.
- [13] YOON S H, ROH J E, LYUG KIM K. Woodpecker-inspired shock isolation by microgranular bed[J]. *Journal of physics d applied physics*, 2008, 42(3): 035501.
- [14] ZHOU P, KONG X Q, WU C W, et al. The novel mechanical property of tongue of a woodpecker[J]. *Journal of bionic engineering*, 2009, 6(3): 214 – 218.
- [15] YOON S H, PARK S. A mechanical analysis of woodpecker drumming and its application to shock-absorbing systems[J]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2011, 6(6): 016003.
- [16] ZHU Z D, MA G J, WU C W, et al. Numerical study of the impact response of woodpecker's head[J]. *Aip advances*, 2012, 2(4): 350.
- [17] WANG L, LU S, LIU X, et al. Biomechanism of impact resistance in the woodpecker's head and its application[J]. *Scientia sinica vitae* 2013, 56(8): 715 – 719.
- [18] WANG L, NIU X, NI Y, et al. Effect of microstructure of spongy bone in different parts of woodpecker's skull on resistance to impact injury[J]. *Journal of nanomaterials*, 2013, 2013: 1 – 6.
- [19] ZHU Z, WU C, ZHANG W. Frequency analysis and anti-shock mechanism of woodpecker's head structure[J]. *Journal of bionic engineering*, 2014, 11(2): 282 – 287.
- [20] ZHU Z D, ZHANG W, WU C W. Energy conversion in woodpecker on successive peckings and its role on anti-shock protection of brain[J]. *Science China technological sciences*, 2014, 57(7): 1269 – 1275.
- [21] LIU Y, QIU X, ZHANG X, et al. Response of woodpecker's head during pecking process simulated by material point method[J]. *Plos one*, 2015, 10(4): e0122677.
- [22] JUNG J Y, NALEWAY S E, YARAGHI N A, et al. Structural analysis of the tongue and hyoid apparatus in a woodpecker[J]. *Acta biomaterialia*, 2016, 37: 1 – 13.
- [23] LEE N, HORSTEMEYER M F, PRABHU R, et al. The geometric effects of a woodpecker's hyoid apparatus for stress wave mitigation[J]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2016, 11(6): 066004.
- [24] LIU Y Z, QIU X M, MA H L, et al. A study of woodpecker's pecking process and the impact response of its brain[J]. *International journal of impact engineering*, 2017, 108: 263 – 271.
- [25] NI Y, WANG L, LIU X, et al. Micro-mechanical properties of different sites on woodpecker's skull[J]. *Computer methods in biomechanics & biomedical engineering*, 2017, 20(14): 1483 – 1493.

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)