



木鱼花舞动的力学原理¹⁾

严志权* 孙晓蝶† 赵俊†,2)

* (广州地铁建设管理有限公司, 广州 510000)

† (安徽建筑大学土木工程学院, 合肥 230601)

摘要 木鱼花是由鲣鱼干薄片制成, 在日料里常被作为调味品使用, 当其撒在各种食物上时, 可以观察到令人惊奇的舞动现象。本文主要通过实验观察几种木鱼花自持续运动现象, 探究现象产生的力学原理, 并对其进行解释。

关键词 木鱼花, 蒸汽驱动, 自持续运动, 力学原理

中图分类号: O323 DOI: [10.6052/1000-0879-24-274](https://doi.org/10.6052/1000-0879-24-274)

文献标识码: A CSTR: [32047.14.1000-0879-24-274](https://cstr.cn/32047.14.1000-0879-24-274)

THE MECHANICAL PRINCIPLE OF BONITO FLAKES DANCING¹⁾

YAN Zhiquan* SUN Xiaodie† ZHAO Jun†,2)

* (Guangzhou Metro Construction Management Company Limited, Guangzhou 510000, China)

† (School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract Kayo flakes are made from thin slices of dried bonito and are often used as a condiment in Japanese cuisine. When bonito flakes are sprinkled on food, it can be observed that the phenomenon of bonito flakes surprising dance occurs, and this paper mainly observes several self-sustained movement phenomena of bonito flake through experiments, explores the mechanical principle of the phenomenon, and explains it.

Keywords bonito flakes, steam-driven, self-sustained motion, mechanics principle

自激振荡是系统在受到恒定外部刺激时出现的周期性变化现象, 通过外部能量的输入补偿系统运动的损耗来维持系统的持续周期性运动, 风吹动着树叶^[1]、大桥的晃动^[2]和导线的舞动^[3]都属于此类。长期以来, 具有自主、自我维持的刺激驱动材料变形而产生的自持续运动模式一直都是人类关注的, 在生物体中也无处不在, 在生命活动中发挥着重要作用, 例如, 企鹅采取摇摇摆摆的步态, 周期性地左右摇摆^[4]。据研究, 这种摇摇摆摆的步态通过最大限度地交换重力势能和动能, 巧妙地减少了肌肉的工作量。许多其他的例子包括鱼尾的摇摆、人类的心脏跳动和鸟的振翅,

这些都是有趣且值得人们学习研究的。此外, 在我们日常的食物中也会发生自持续运动, 木鱼花是由鲣鱼干薄片制成, 在日料里常被作为调味品与各种食物相搭配^[5], 当木鱼花撒在食物上时可以观察到令人惊奇的舞动现象, 这种现象令食物有了生命力, 常常引起食客的啧啧惊奇, 人们会习惯性地认为木鱼花之所以能舞动是因为其本身薄且重量轻, 是被食物上的热气流吹动的, 但实际上并非如此, 其中所蕴涵的科学原理却鲜有人知, 想要很好地解释它, 涉及到热学、材料学和力学等多学科融合。

本文尝试通过简单的实验观察研究, 从力学

2024-06-12 收到第 1 稿, 2024-08-31 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金面上项目 (12172001) 和中铁科研项目 (HYB20220184) 资助。

2) 赵俊, 副教授, 主要从事结构振动与控制研究。E-mail: junzhao@ahjzu.edu.cn

引用格式: 严志权, 孙晓蝶, 赵俊. 木鱼花舞动的力学原理. 力学与实践, 2024, 46(6): 1328-1332

Yan Zhiquan, Sun Xiaodie, Zhao Jun. The mechanical principle of bonito flakes dancing. *Mechanics in Engineering*, 2024, 46(6): 1328-1332

原理的角度定性地解释这一生命复活运动的现象。如图 1 所示，为观察到木鱼花的运动，将一把木鱼花撒在热米饭上，当木鱼花落在热米饭上后，木鱼花片好像一个个都活了过来，俨然化身为一群舞者，有的翻滚（图示 A），有的摇摆（图示 B），有的卷曲（图示 C），还有的奋力摇动手臂（图示 D），向我们展示着生命在于运动。

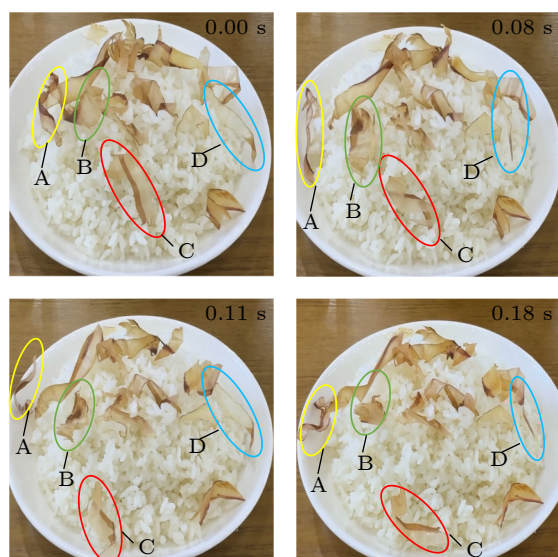


图 1 木鱼花在热米饭上的舞动现象

1 木鱼花材料特性

1.1 关于热气流吹动木鱼花说法的验证

人们常常认为木鱼花之所以能舞动是因为木鱼花本身薄且重量轻，是被食物上的热气流吹动的，本节通过对比实验来验证该解释的真伪。首先选用与木鱼花重量、厚度和刚度均相当的塑料纸片，将木鱼花和塑料纸片都剪成 $1\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 的矩形，将剪好的矩形木鱼花和塑料纸片用镊子夹住竖直放在热水壶壶口，记录木鱼花和塑料纸片的运动状态。图 2 为对比实验图，可以观察到木鱼花在壶口发生持续的左右摆动现象，而塑料

纸片始终未动。如果木鱼花是因为热气流吹动的说法是正确的，那么与它重量、厚度和刚度均相当的塑料纸片也应发生相同的运动现象，但实验结果却只有木鱼花发生舞动运动，所以通过这个简单的对比实验可以看出木鱼花是被热气吹动的说法是错误的。



图 2 木鱼花与塑料纸片对比实验

1.2 蒸汽响应性材料

通过进一步观察发现，木鱼花发生舞动与木鱼花本身的材料属性密切相关，将木鱼花单独放在热台上或用喷雾器喷水汽作用其表面均未能使其发生变形，而将其放到掌心却发生了弯曲变形，如图 3 所示。可见，单独的热或湿气均不能使其发生形变，只有两者结合即蒸汽作用才能使其发生形变，故可以认为木鱼花为蒸汽响应性材料。另外，木鱼花呈淡黄色，其表面有纹路，与木材很相似，一般木鱼花片会沿着顺纹方向发生弯曲，可见顺纹方向的热膨胀系数明显大于横纹方向，故初步判断木鱼花为蒸汽响应性正交异性材料。

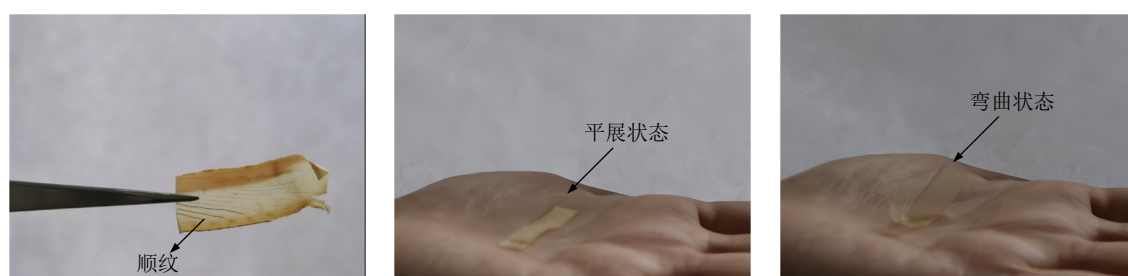


图 3 木鱼花材料特性

热、汽共同作用会使得木鱼花表面产生膨胀应变,而其导热系数低,进而产生弯曲变形,弯曲变形又影响了蒸汽的作用,变形和蒸汽作用相互耦合影响,最终形成了我们看到的舞动现象,本质上就是蒸汽驱动木鱼花产生了自持续运动现象。

2 自持续摆动现象

从图1可以看出,部分木鱼花摆动身躯或摇动着手臂,可以将其简化为悬臂结构,即一端固定,另一端自由。将长4 cm,宽1 cm的矩形木鱼花固定垂直放置在温度50℃蒸汽上方,图4(a)可以观察到木鱼花呈现自持续摆动现象,图4(b)为木鱼花片顶端位移的时程曲线图。

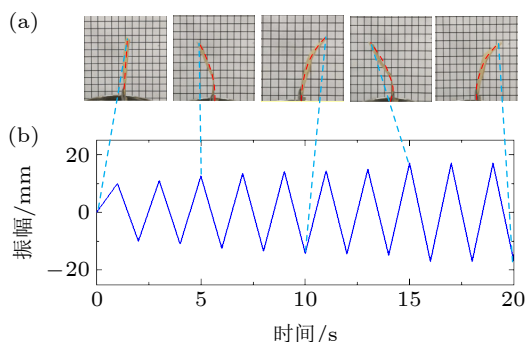


图4 木鱼花摆动时程曲线图

图5是悬臂木鱼花在稳定蒸汽下的自持续运动机理图,在初始状态下,木鱼花与蒸汽作用方向有夹角 θ_0 ,可称其为倾斜角度,此时木鱼花的

左侧暴露于蒸汽,如图5(a)所示。在蒸汽的作用下,向着蒸汽上升的方向弯曲变形,一旦木鱼花的自由端向右移动到角度 θ ,右侧将均匀地暴露在蒸汽中,木鱼花右侧表面层开始膨胀,驱动木鱼花向左侧弯曲,如图5(b)所示。当木鱼花移动到坐标轴的左侧角度 θ 时,蒸汽驱动木鱼花再向右弯曲,如图5(c)所示。最终,木鱼花可以在稳定蒸汽的驱动下发生自持续的周期摆动现象。

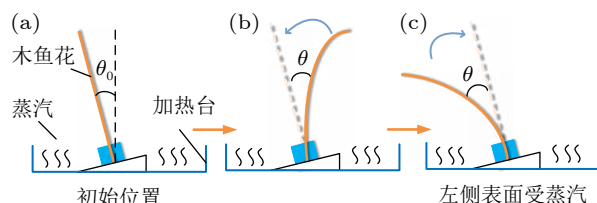
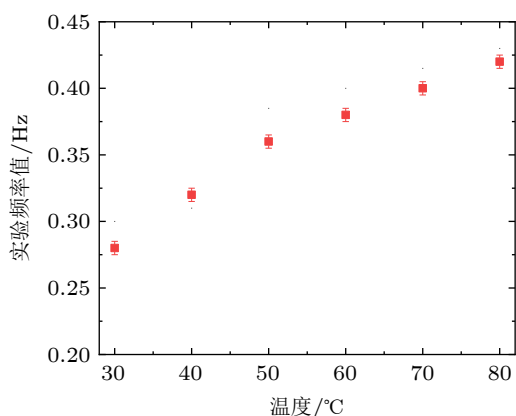
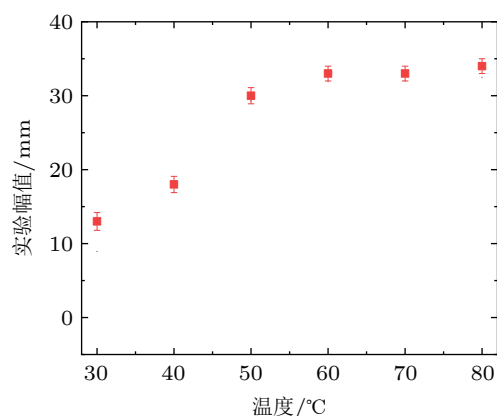


图5 木鱼花自持续摆动机理图

以上说明,倾斜角度和温度都会影响其摆动状态。为研究蒸汽温度对其摆动影响,在不同的蒸汽温度下记录摆动过程,计量出摆动幅值和频率,最后形成图6。可以看出,随着温度的增加,在60℃以内时摆动频率和幅值均会快速增加,而大于60℃后摆动频率会增加,而幅值变化不大。蒸汽温度增加,外界给系统注入的能量就增加,故木鱼花弯曲变形的速度和程度就会增加,最终体现在频率和幅值上。另外,若倾斜角度太大,蒸汽驱动下弯曲的木鱼花仍处在坐标轴的一侧,另一侧蒸汽无法接触到木鱼花,木鱼花弯曲变形后就会静止,就不会发生自持续运动状态。



(a) 摆动频率随温度的变化



(b) 摆动幅值随温度的变化

图6 温度对摆动幅值和频率的影响

3 自持续摇摆现象

从图1可以看出,部分木鱼花片呈现左右摇

摆的舞姿,可以将其简化为矩形,自由放置在蒸汽平台上。实验所用矩形木鱼花尺寸为长 $L=3$ cm,

宽 $W=1\text{ cm}$, 将矩形木鱼花放在蒸汽平台上, 通过调节蒸汽温度, 观察矩形木鱼花的运动情况。设定温度为 40°C , 通过摄像机记录下矩形木鱼花的自持续运动过程, 图 7 给出了矩形木鱼花从中性位置到最右、最左再到最右的一个周期的自持续摇摆过程。

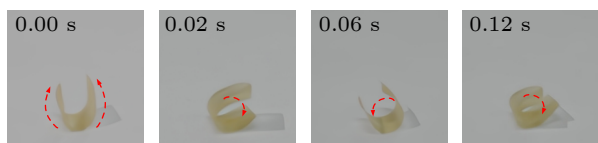


图 7 木鱼花自持续摇摆实验图

图 8 是木鱼花片在蒸汽驱动下的自持续摇摆机理图。初始时刻是平展状态, 在蒸汽的作用下, 木鱼花片底面产生膨胀应变, 木鱼花会发生向上弯曲, 重心位置 g 上移, 当重心位置达到此时底部接触点曲率半径对应的圆心位置 ρ 时, 弯曲的木鱼花片不再稳定, 因为实验中木鱼花质量的不均匀性和蒸汽平台的不平直性, 弯曲的木鱼花将向一侧倾倒, 接触面发生变化, 接触点随之发生变化, 木鱼花片在蒸汽作用下重新变形, 重心位置调整, 产生“扶正”力矩, 木鱼花片有着朝平衡位置转动的趋势, 整个体系从热蒸汽中吸收能量用来抵抗系统的能量消耗, 从而达到平衡, 这样, 就实现了摇摆运动的一个周期, 自锁负反馈回路在不改变外部刺激的情况下维持这样的自持续摇摆运动。以上说明, 蒸汽温度和木鱼花片的几何尺寸是产生自持续摇摆现象的关键因素, 当温度小于临界温度或尺寸较小时 (即结构变形相对刚度较大), 木鱼花片虽有弯曲变形, 但重心位置 g 一直小于底部接触点曲率半径, 这时候整个状态类似于不倒翁, 处于一种稳定状态, 就不会发生自持续摇摆运动。

4 自持续翻滚现象

将上述实验蒸汽温度调整为 50°C 时, 矩形木鱼花片便不在摇摆, 而是呈现连续翻滚运动模式,

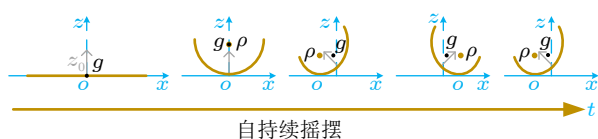


图 8 自持续摇摆机理图

如图 9 所示。



图 9 木鱼花自持续翻滚实验图

图 10 为木鱼花片自持续翻滚运动的机理图, 当蒸汽温度增加时, 木鱼花片摇摆的幅度进一步增加, 重力产生的力矩将会逐渐增大, 而此时输入能量足够, 弯曲的木鱼花片将会实现跃迁而发生翻转, 翻面之后原本受热膨胀面将处于上方, 此时底面获得受热膨胀, 使弯曲的木鱼花片伸展铺平, 将进入下一个循环变形过程。可见, 通过改变蒸汽温度调节运动状态, 可以实现不同模态运动的转换。

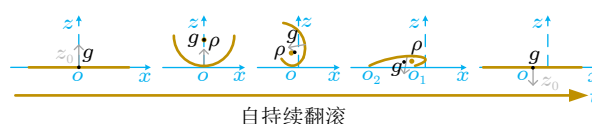


图 10 自持续翻滚运动机理图

5 结论

本文抛出了木鱼花舞动这一有趣的美食现象, 发现木鱼花是一种可以蒸汽驱动的敏感性生物材料, 蒸汽可以驱动其快速变形, 变形又同时影响蒸汽的作用, 最终因其耦合作用产生了生命力而翩翩起舞。再叠加重力作用、几何形状和边界条件的影响, 产生了多样的自持续运动模式。这种现象既有趣, 也很深刻, 木鱼花俨然就是一个小型的软体机器人^[6]。本文只是宏观上从力学基本原理浅要地对其几种运动模态的机理进行了解释, 其实还远远不够, 搞清楚蒸汽驱动木鱼花运动的微观结构机理更有意义, 其将在新材料、软机器人、能量收集和柔性传感等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 刘延柱. 曾逐东风拂舞筵——再谈自激振动. *力学与实践*, 2007,

- 29(6): 87-89
- 2 闵光云, 刘小会, 蔡萌琦等. 考虑温度效应的覆冰导线动力学建模及舞动特征研究. *力学与实践*, 2021, 43(1): 84-93
Min Guangyun, Liu Xiaohui, Cai Mengqi, et al. Dynamic modeling and galloping characteristics of iced conductor with consideration of temperature effect. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(1): 84-93 (in Chinese)
- 3 颜大椿. 湍流、风工程和虎门大桥的风振. *力学与实践*, 2020, 42(4): 523-525
Yan Dachun. Turbulence, wind engineering and wind vibration of Humen Bridge. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(4): 523-525 (in Chinese)
- 4 Griffin TM, Tolani NA, Kram R. Walking in simulated reduced gravity: mechanical energy fluctuations and exchange. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 86(1): 383-390
- 5 周彬. 鲢鱼——舞动在味觉之巅的木鱼花. *食品与健康*, 2016 (9): 20-20
- 6 冯若愚, 陈轲, 张厚振等. 软体机器人实践与创新教学. *力学与实践*, 2020, 42(3): 347-350
Feng Ruoyu, Chen Lu, Zhang Houzhen, et al. Practice of soft robotics and innovation education. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(3): 347-350 (in Chinese)

(责任编辑: 胡 漫)