

与蝠永相伴

杨德红^{1,*}, 刘少康^{1,†}, 王坤¹, 秦琦¹, 范文捷¹, 焦明立¹, 杨本勇²

¹中原工学院材料电子与储能学院, 郑州 450007

²中原工学院智慧能源与环境学院, 郑州 450007

摘要: 蝙蝠以大毒王闻名于世, 却是人类实实在在的良师益友。它具有控制害虫、种子传播、植物授粉等不可或缺的生态作用和巨大的经济价值, 且在健康长寿、生物仿生等方面具备重要的研究意义。作为唯一会飞行的哺乳动物, 人们对它的观察与研究从未停止。蝙蝠声纳系统的发现见证了人类探求真理的曲折历程和顽强精神。蝙蝠拥有“心眼”这样的超能力, 人类依据其回声定位和形体结构制造出蝙蝠机器人, 未来应用及发展前景非常广阔。蝙蝠还是中国福文化的代表, 值得我们永远颂扬。论文讲述了蝙蝠的优缺点、身体结构、生活习性和夜视能力以及蝙蝠机器人的相关知识, 旨在引领学生全面辩证地看待蝙蝠的问题, 培养学生的思辨意识和能力, 体会仿生学的奥妙, 传承中华传统福文化思想精髓, 树立人与自然和谐共生的发展观。

关键词: 蝙蝠; 生存价值; 回声定位法; 蝙蝠机器人; 仿生学

中图分类号: G64; O6

Forever with Bats

Dehong Yang^{1,*}, Shaokang Liu^{1,†}, Kun Wang¹, Qi Qin¹, Wenjie Fan¹, Mingli Jiao¹,
Benyong Yang²

¹ School of Materials Electronics and Energy Storage, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China.

² School of Smart Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China.

Abstract: Although bats are notorious for their association with poison, they are genuine teachers and friends to humans. They play indispensable ecological roles in pest control, seed dispersal, and plant pollination, and hold significant economic value. Furthermore, they are crucial for research in health and longevity, as well as in biomimetics. As the only flying mammals, bats have always been subjects of human observation and study. The discovery of the bat sonar system illustrates the complex and persistent human quest for truth. Bats possess the extraordinary ability of echolocation, which has inspired the creation of bat robots. The future applications and development prospects for these technologies are vast. Additionally, bats are a symbol of good fortune in Chinese culture, deserving of our eternal praise. This paper discusses the advantages and disadvantages of bats, their body structure, living habits, night vision abilities, and the related knowledge of bat robots. The aim is to guide students to comprehensively and critically understand bats, cultivate critical thinking skills, appreciate the marvels of biomimicry, inherit the essence of traditional Chinese good fortune culture, and establish the concept of harmonious coexistence between humans and nature.

Key Words: Bat; Ecological value; Echolocation; Bat robot; Biomimetics

收稿: 2024-01-30; 录用: 2024-04-07; 网络发表: 2024-08-22

[†]化学 22 级本科生

*通讯作者, Email: ydh@zut.edu.cn

基金资助: “纺织之光”高等教育教改项目(2021BKJGLX531, 2021BKJGLX532); 中原工学院课程思政建设项目(2023ZGSZKC001, 2023ZGSZTD001); 河南省本科高校研究性教学示范课程(教高〔2023〕388号)

三年疫情期间，以“超级毒王”而名噪全球的动物，非蝙蝠莫属。它身上封印的冠状病毒、狂犬病毒、埃博拉病毒等高达173种，且有61种可以传染给人类^[1]。加上它生来外貌不讨喜、不合人类的审美观，因而被刻上了如此邪恶的鬼画符(图1)。西方文化中蝙蝠是黑夜和不祥预兆的象征，影视作品中的吸血魔王和蝙蝠侠常和黑暗人物勾连在一起就是明证^[2]。



图1 蝙蝠携带的病毒(源自百度)

1 蝙蝠的人间清醒

然而，蝙蝠仿佛深谙人间“价值为王”的游戏规则。它爱干净，虽然生活在阴暗潮湿的洞穴里，却总能保持体表的毛光滑亮堂，以确保飞行万无一失^[3]。大眼睛果蝠(图2)采食野果和花蜜，顺便为香蕉、芒果、榴莲等300多种热带森林植物传粉和播种。蝙蝠家族中占70%的食虫性小蝙蝠，一只一个夏夜能吃掉的苍蝇、夜蛾和金龟子等多达3000–5000只(图3)。没有蝙蝠，美国农民每年要损失40–500亿美元。蝙蝠聚集地的粪便不仅是上好的肥料，加工后制成的中药夜明砂，有清肝明目的功效。蝙蝠的胴体还是传统中药材。蝙蝠居住过的山岩、洞穴和桥梁也常成为著名的旅游景点，如美国得克萨斯州奥斯丁的国会大道桥^[2]。



图2 埃及果蝠^[1]



图3 苍白洞蝠捕食蝗虫^[1]

2 天上的哺乳动物

蝙蝠是世界上分布最广、种群数量最多、进化最成功的哺乳动物类群之一，超过现存哺乳动物种类的1/5，是自然界生态链中的关键物种^[4]。在数千万年的进化历程中，蝙蝠形成了栖息、迁徙、冬眠等生活习性以及免疫力强悍等超常的生存能力。它独特的回声定位和高超的飞行技巧，不仅使其成为生物仿生学者的心头宝，也使它成了著名的“夜行侠”^[5]。

蝙蝠绝对是“飞禽走兽”中的例外，它不会走，却善于飞。它起飞时与鸟类不同，需要依靠滑翔；这大概是蝙蝠喜欢玩“倒挂金钩”(图4)的主因^[2]。蝙蝠是能够用翅膀自主飞行的哺乳动物，拥有令所有鸟类都羡慕的飞行技能——飞行途中悬浮在原地，它真的有“吹嘘”的资本。蝙蝠超能力的背后离不开特殊的形体构造。不可思议的是，蝙蝠与马和狗竟然同属一个老鼠样儿的祖先！现代基因序列比对显示这个进化始自1亿年前^[6]。

蝙蝠是翼手目动物，前肢骨头很长，且包裹着没有羽毛的翼膜，它“手上长有翅膀”。它的翼手不只用来飞行，还可以“抓”东西(图5)。当猎物还没来得及反应，就已经在蝙蝠“掌握之中”了。蝙蝠的翼手(图6)^[7]就像人类的手指，由一节一节的软骨链接，可以自由弯曲、轻松变换角度和方位、甚至悬停在空中；薄而极具弹性的翼膜内含丰富的血管与神经，飞行过程中翼的扇动和其柔韧性及弹性配合得天衣无缝，堪称世界上最离奇、最完美的运动^[8]。



图4 倒挂休眠的蝙蝠(源自百度)



图5 蝙蝠抓飞蛾(源自百度)



图6 蝙蝠的翼手

3 黑暗中之倾听

听声辨位，就算蒙上双眼也能够行走如飞，本是小说中大侠们才拥有的能力，俗称“心眼”。人们在深入了解蝙蝠之后，才终于认识到：用声去观察世界不是幻想而是真的存在。蝙蝠天赋“心眼”，能够在“黑暗中倾听”，它是怎样做到的呢？

原来，大部分蝙蝠进化出了一套高效的超声波回声定位系统，包括信号发射部(嘴或鼻孔)、信号接收部(外耳)和信号处理部(大脑)。蝙蝠在飞行过程中借助声纳系统传递的信息不断调整飞行的方向，或寻找猎物或避开障碍物或相互交流，就这样蝙蝠在黑暗中触摸到了世界万象^[9](图7)。类似地，飞机驾驶员凭借雷达的指引知晓前方有否障碍物。那么，人类真的是从蝙蝠身上得到启示才发明了雷达吗？这是谬传，其实雷达的发明与蝙蝠无关。

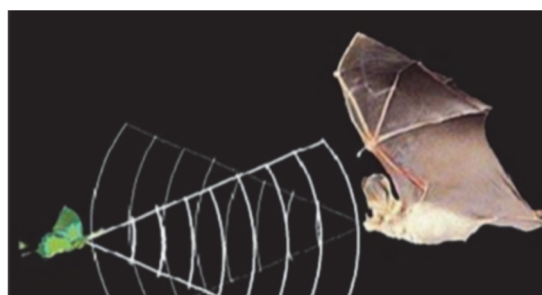


图7 蝙蝠回声定位(源自百度)

蝙蝠的超声波属于机械波，雷达发出的是电磁波。1886年德国物理学家海因里希·赫兹证实了电磁波及其反射性，奠定了雷达发明的理论基础；1935年英国罗伯特·沃特森·瓦特发明第一台实用雷达，次年将其用于军事领域并在第二次世界大战中发挥重要作用。而蝙蝠超声波的发现者是美国动物学家唐纳德·格里芬，他在1938年大学时期开始蝙蝠研究，直到1944年才确定了动物的回声定位法。然而蝙蝠和雷达两者定位原理的相似性使人们总是将其混为一谈^[10]。

不妨再追寻一下蝙蝠声纳系统的曲折发现史(表1)^[11]：雷达问世的时候“史氏蝙蝠问题”还未真正解决；人类揭示蝙蝠的回音定位之术，确实晚于雷达的发明。真理胜于雄辩，而实践是检验真理的唯一标准。执着于实验检验的格里芬，终成蝙蝠问题的集大成者。一场持续近150年的有关“飞老鼠”能否用耳朵“看”东西的纷争终于盖棺定论。格氏被尊称为“回音定位之父”。

表1 蝙蝠声纳系统发现史

年代和代表人物	主要贡献	实验验证
1793年，意大利生理学家斯巴兰札尼(L. Spallanzani)	发现了著名的“史氏蝙蝠问题”，提出瞎蝙蝠能自由飞翔的原因是其翅膀及身体在飞行时所产生的声波振动被四周障碍物反射回来，刺激双耳，而后“耳朵”如同“双眼”能“看得精且远	蝙蝠能在室内黑暗中自由飞翔而不撞及任何物体，而同样条件下猫头鹰频频误撞房中物件；黑暗中瞎眼蝙蝠仍能照常飞翔，而眼睛瞎的蝙蝠或者眼睛嘴封的蝙蝠均无法飞翔如故
与斯氏同时代的法国生理学家居维叶(G. Cuvier)	提出“触感论”，认为蝙蝠用触感可精确探测四周环境而自由飞翔	未进行实验验证
1908年美国年轻动物学家哈恩(C. W. Hahn)	设计新的实验方案重启“史氏蝙蝠问题”，推翻了居氏“触感论”。认为蝙蝠内耳中有种感觉器官能探测到四周障碍物的存在	眼睛瞎的蝙蝠飞越垂吊铜丝时碰撞的次数比浑身涂满凡士林而除去触感的瞎蝙蝠碰撞铜丝的次数高得多
1912年德国枪械设计师毛瑟(P. P. Maose)	提出瞎蝙蝠的耳朵能从其振翅所产生的低频声波由障碍物反射而回的回音中探测周遭环境状况	未进行实验验证
1920年英国神经生理学家哈特里奇(H. Hartridge)	提出蝙蝠利用了“声纳”原理，由嘴发出超声波，并从四周反射回来的回音中探测其自身与周遭环境的相对位置	借助超声波先驱皮尔斯(G. W. Pierce)组装的一台能收发高频音波的声测器，发现蝙蝠在自由飞翔时发出强度高达120分贝的高频声音
1938年至1944年美国动物学家格里芬(D. R. Griffin)	证实蝙蝠能发两万赫兹以上超声波的理论；确定蝙蝠利用“声纳”原理探悉周遭环境的理论；定义“回音定位法”和“回音定位者”	格氏及其指导的学生们和世界各地的追随者多角度系统研究蝙蝠回音定位之术
1944年之后美国动物学家格里芬(D. R. Griffin)	格氏所著《黑暗中之倾听》被研究蝙蝠声纳者视若“圣经”	

蝙蝠利用回声定位可以探测0.18 mm的物体，其检波、抗噪及自适应性能现代声纳系统也望尘莫及^[9]。但是大部分蝙蝠却逐渐失去了用眼睛观察世界的机会，这正是现代生物学家着迷的研究方向。人们普遍认为蝙蝠的视觉能力已经退化，不能分辨颜色。借助系统遗传学和分子生物学的方法，科学家们发现：大蝙蝠主要依靠视觉和嗅觉搜索食物，尽管它们的视蛋白基因功能或视蛋白基因已经不够完全；小蝙蝠中有紫外视觉完全失去的，也有依然保留的；大多数蝙蝠具有双色觉(紫外光和红光)，少数是色盲；有趣的是所有的蝙蝠物种都有暗视觉，能感受弱光但是无色觉功能^[12]。可见蝙蝠并不是真“瞎”，它们只是用肉眼视觉为代价换来了“心眼”这一人类梦寐以求的超能力。

蝙蝠还能灵活地调整声音强度和频率，以时刻更新其他蝙蝠的速度和猎物位置来寻找最优解，所以蝙蝠能够准确高效地捕食猎物而不至于出现多个蝙蝠“哄抢”同一猎物或者发生两只蝙蝠互“抓”

的事件。基于蝙蝠这一“匪夷所思”的“计算预判”能力，人们开发出了“蝙蝠算法”^[13]并将其应用于蝙蝠机器人中。

4 蝙蝠机器人

蝙蝠因其特殊的翼翅结构和飞行机制、高超的飞行技能等优势而备受仿生学关注。它利用双翼向上运动而产生升力来支撑自身的重量，并在向前飞行时产生推力来克服阻力、增加机动灵活性和能量利用效率，在低速飞行时会向后折叠翅膀以减小阻力，所以蝙蝠主要依靠翅膀来保持稳定和控制飞行动作^[7]。蝙蝠机器人拥有与蝙蝠一样的“翅膀”，能够自由改变形状而自主飞行，在复杂环境通行自如且无噪音，使它可以完成更加隐秘高效的侦察任务。当发生地震等自然灾害时，蝙蝠机器人可以在黑暗的狭缝中依靠回声定位和“预判”能力及自身灵活性畅行无阻，能够精确地寻找到被困人员；相比于盲目地在地上搜救，大大地提高了救援效率。它还能帮助人们完成复杂未知的勘测工作，有望代替传统飞行器。

蝙蝠机器人是如此完美的微型飞行器，其结构有哪些特殊的地方呢？它主要包括底座、身体、肱骨、桡骨、手指和膜(图8)。改变底座与身体、身体与肱骨、肱骨与桡骨、桡骨与手指的角度，可以分别改变相应的襟翼、肘部、横扫、腕部角度。塑料涂层不锈钢钢丝绳用于将运动从马达转移到挡板，附在马达轴上的金属线、电缆缠绕在线轴上，将骨骼元件与机器人连接起来。它的翼膜富有弹性，飞行时它能用“手指”控制翼膜的形状，从而在空中灵活飞行；即使是慢速飞行，也能依靠形状的变化获得最大的升力；这种柔韧的翅膀由柔性材料组成。蝙蝠机器人的所有关节基本处于同一平面，可以单独控制以及折叠双翼，这些关节经复杂的蝙蝠算法协调，能够像正常生物一样拥有高机动性。其翅膀的骨架和主体部件还可以在3D打印机上用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)塑料打印出来^[14]。

美国研制的一种手掌大小的蝙蝠机器人(图9)，轻如鸿毛，重量不到6 g。它四肢处的关节采用具有超强弹性的形状记忆合金制成，能够帮助蝙蝠机器人完成各种需要的运动且能返回原来的滑翔状态。而肌肉采用智能材料合金，能对电流所产生的热做出反应，并通过合金里面头发般粗细的微型电线使“金属肌肉”收缩，使蝙蝠机器人能够快速响应环境变化^[7]。拥有复杂的系统关节和柔性翼膜的扑翼飞行器，可以逼真地模仿蝙蝠翅翼折叠运动，也可非常快地改变飞行高度和飞行方向。科技的进步使蝙蝠机器人的自主性与灵活度越来越高，正朝着小型化、轻量化和智能化发展，已经能做到与蝙蝠“神似”。

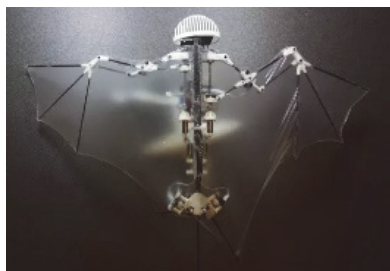


图8 蝙蝠机器人俯视图^[7]



图9 蝙蝠机器人关节和肌肉^[7]

柔性智能材料无疑是制造蝙蝠机器人的关键技术。世界各国都在为实现该材料的高性能致动功能而不断探索，刺激响应水凝胶、液晶弹性体、形状记忆材料、介电弹性体、导电聚合物、缠绕纱线等应运而生^[15]。其中像人的肌肉一样灵活的材料俗称“人工肌肉”(电压激励下产生较大的弯曲响应)，新兴的主要有离子聚合物金属复合材料(IPMC)、电活性陶瓷(EAC)和形状记忆合金(SMA)三种。SMA具有形状记忆效应、超弹性、抗疲劳效应和耐腐蚀性以及结构简单、位移量大等特点，主要有

Ni-Ti基、Cu基和Fe基等，表现出良好的控制效果。以钛酸钡(BaTiO_3)陶瓷和锆钛酸铅(PZT)为代表的EAC存在优越的压电性能，具有响应速度快、易于控制及传感致动一体的优势^[16]。

而IPMC性能更加优越。这种新型的电致动变形材料，属于高分子聚合物材料，有着奇妙的“三明治”夹心结构(图10)^[17]：上下两层厚度在微米级的电极镀层，常用铂金(Pt)、银(Ag)、金(Au)等化学性质稳定的金属材料，铂金使用最多。中层是富含聚合物分子链、水合阳离子、阳离子等物质的离子聚合物薄膜层，常用美国DuPont公司生产的Nafion薄膜或溶液制作。IPMC相对轻量($2.0\text{--}2.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)，很低的驱动电压(2–5 V)便可产生较大的弯曲变形效果。其变形机理(图11)^[18]主要是由于水合阳离子受电场力作用迁移的结果，使它能保持全柔性、无噪音，且能随意裁剪。IPMC智能材料兼具响应速度快、生物相容性好以及环境适应性强等优势，使其迅速成为业界翘楚。IPMC作为柔性制动材料制备人工肌肉、人工皮肤和柔性传感器等软体机器人，在仿生机器人、航空航天和生物医药等领域崭露头角。其形变量大、弹性好，与生物肌肉最相似，可制作人造手臂、人造手指、胶囊机器人、微型机器鱼、太空除尘器、触觉显示器等，应用潜力无穷^[18]。

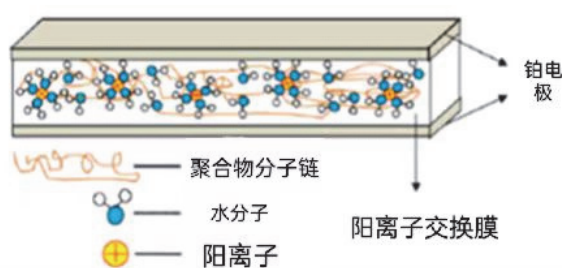


图10 IPMC结构^[18]

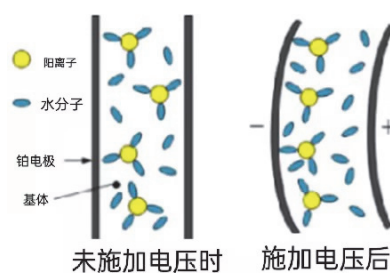


图11 IPMC电致动变形机理^[18]

在人类和自然界矛盾日益凸显的今天，科学家越来越青睐仿生技术，蝙蝠仿生学促进了生物、化学、材料、医学、物理、数学和计算机等学科的发展和进步。陆空两用的超级飞行汽车、自主飞行的蝙蝠栖附机器人、带有脚部防护的蝙蝠靴、帮助盲人“指路”的蝙蝠眼镜和蝙蝠拐杖等高科技装备正在走近人们的生活。

5 结语

蝙蝠是个神奇的物种，进化出谜一样的身体结构和超能力，不仅完全适应各种复杂的自然环境并能接近完美地利用能量。蝙蝠在生态环境、社会发展、科技文化等领域发挥着必不可少的作用。然而近年来蝙蝠的生存空间越来越小，全球和中国分别约22%和51%的蝙蝠物种位于近危等级之上^[5]。人类和蝙蝠的共生是大自然的选择，生态系统中因失去蝙蝠族群而造成的后果，是人类无法承受的。我们需要不断检醒自己的行为，敬畏生命，崇尚科学，遵循天道。蝙蝠是吉祥之物，是福寿安康和幸运的代表。让我们爱护、善待自己的朋友，大力宣扬中国传统福文化，为人和自然能够和谐共处，为人类自身的未来福祉，营造浓厚的社会氛围。

参 考 文 献

- [1] 杨先碧. 科学24小时, 2020, No. 4, 30.
- [2] 欧阳江南. 资源与人居环境, 2015, No. 10, 36.
- [3] 吾玛尔·阿布力孜, 艾尼瓦尔·吐米尔, 马合木提·哈力克. 生物学通报, 2005, No. 5, 13.
- [4] 蔡亚娜. 城市与减灾, 2013, No. 6, 40.
- [5] 江廷磊, 赵华斌, 何彪, 张礼标, 罗金红, 刘颖, 孙克萍, 余文华, 吴毅, 冯江. 兽类学报, 2020, 40 (6), 539.

- [6] 陈超. 蝙蝠与马和狗同属一个祖先. 科技日报, 2006-06-23 (002).
- [7] 齐津浩. 仿蝙蝠飞行器的设计制造与优化[硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [8] 朱光剑. 生命世界, **2009**, No. 4, 22.
- [9] 王福勋. 基于蝙蝠耳的仿生麦克风轮廓模型的数值分析[博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2010.
- [10] 张劲硕, 吴海峰. 生物学通报, **2015**, *50* (3), 1.
- [11] 任晔菀. 生命世界, **2010**, No. 1, 40.
- [12] 武进伟. 蝙蝠的特异性状、食性转变及视觉功能的分子进化研究[博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [13] 许德刚, 赵萍. 计算机工程与应用, **2019**, *55* (15), 1.
- [14] Yin, D. F.; Zhang, Z. S. *Sci. China Technol. Sci.* **2016**, *59* (12), 1921.
- [15] 张浩. 仿生IPMC柔性驱动器材料设计与性能研究[硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [16] 嵇聪. 基于智能材料的仿生微型变体机翼研究[硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
- [17] 岳英豪. 基于智能材料IPMC的柔性抓取器设计和控制研究[硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [18] 于甜, 李树锋. 化工新型材料, **2020**, *48* (2), 6.