

仿生学在力学中的应用

李艳军 陆建隆

仿生学简介

什么是仿生学 我们羡慕鸟儿,更要用我们的智慧向鸟儿学习“飞”;我们羡慕鱼儿,更要研究它的“游”……从大自然的杰作中得到启示、寻找真理,自古有之,这也正是人类的聪明之处。自然界生物的神奇来自于亿万年的选择进化、优胜劣汰,例如尽管贝壳的基本组成单元很平常,只是碳酸钙和磷酸钙等最常见的材料,但因为有了适应其环境及功能需要的结构组装,所表现出的材料性能是传统人工合成材料无法比拟的。人类很早就注意到了这些现象并对生物系统的结构和性质作系统的研究,从而为工程技术提供新的设计思想及工作原理,这就是仿生学。

仿生的英文名字是 **Bionics**, 20 世纪 60 年代 **J.Steele** 正式提出仿生学的概念,而仿生学的诞生,一般以 1960 年全美第一届仿生学讨论会的召开为标志。现代仿生学首先在于“发现”——研究生物系统的结构、物质组成、功能、能量转换、信息控制等特征,然后再应用——将“发现”用于技术系统以解决人类社会应用上的问题。它既是一门化学、物理学、生物学、数学、工程技术学之间的交叉学科,也是一门应用基础和技术开发研究相结合的学科。可以说,仿生既是笼统的也是具体的。说它笼统,可以说它成为科学研究和发展的一个思路、指导思想,这个思想在生物学和科学技术之间架起了一座桥梁,并且对解决技术难题提供了帮助;说它具体,它是落实到某一学科、某一领域的实实在在的科学与发现,最后实现新的技术,设计并制造出更好的新型材料、工具等来满足社会生产和人民生活的需要。现代仿生学对生物体的研究从整体到组织器官再到细胞和分子水平,在更高层面上深入到了“形态和功能”水平,仿生学研究所揭示出的更为复杂的生物学现象,以及所阐明的有关机理将被用于解决人类社会更多的重要问题和难题。

仿生学的分类及其应用模式 仿生学的研究领域可大致分为:力学仿生、分子仿生、能量仿生、信息与控制仿生等几个方面:

力学仿生主要是研究并模仿生物体大体结构与

精细结构的静力学性质,以及生物体各组成部分在体内的相对运动和生物体在环境中运动的动力学性质。例如,建筑上模仿贝壳修造的大跨度薄壳结构建筑;军事上模仿海豚皮肤的沟槽结构,把人工海豚皮包敷在舰壳上,可减少航行湍流,提高航速;模仿袋鼠在沙漠中运动形式的无轮汽车(跳跃机)……

分子仿生主要是研究与模拟生物体中酶的催化作用、生物膜的选择性、通透性、生物大分子或其类似物质的分析和合成等。例如,在搞清楚森林害虫——舞毒蛾体内的某种化学结构后,合成了一种类似的有机化合物,在田间便可诱杀雄虫。

能量仿生主要是研究与模仿生物电器官发光、肌肉直接把化学能转换成机械能等生物体中的能量转换过程。在某些文献中,把分子仿生与能量仿生部分的内容统称为化学仿生。

信息与控制仿生主要是研究与模拟感觉器官、神经元与神经网络以及高级中枢的智能活动等生物体中的信息处理过程。例如根据象鼻虫视动反应制成的“自相关测速仪”可测定飞机着陆速度;根据复眼视网膜侧抑制网络的工作原理,构造出新型的计算机。信息和控制仿生也被称为神经仿生。

对生物体器官的仿生主要是指根据生物的感觉器官,来研制能够接受、记录和测定信号的装置,特别是各种有关视觉、听觉、嗅觉、触觉以及包括冷热、酸痛、振动和平衡等感觉方面的新颖传感器。生物的各种感觉器官,经过千万年的锤炼,无论在选择性、适应性、灵活性、灵敏度、抗干扰性、微型化等方面,和我们目前各种自动装置中的传感器相比较,都优越得多。对动物定向和导航能力的仿生如研究海豚、蝙蝠等的超声定位;研究响尾蛇、铜头蛇的热定位;研究电鳗和某些昆虫的电磁定位;研究鸟类的迁飞和鱼、龟、鲸等的洄游,从而改进近程定位和导航及通讯技术等,有的已经应用于生产、生活和军事,有的还在研制中。

本文主要通过实例来说明仿生学在力学中的广泛应用,提高人们对仿生学的认识,加深人们对仿生学这一门学科的理解。

仿生学在力学中应用的实例

仿生学在机动车设计中的应用 对生物体的整体形态或某一部分特征进行模仿、变形、抽象等，借以达到设计目的，车身的仿生设计有助于某项或某几项功能的实现或提升。

电动车的电池成本非常高，容量不大，且其功率较汽油发动机小，为了得到相应的速度和行驶里程，必须要减轻车身的重量并降低车辆行驶中地面和空气的阻力。这里有一些常见的手段：采用玻璃钢、铝合金等轻质材料，以减轻整车的重量；通过行驶中空气产生的升力，抵消一部分车的重力；减小前脸面积，降低车辆行驶中风的阻力；通过光滑流畅的车身形态，减小车辆行驶中空气的摩擦阻力等。

图1是一款前脸造型模仿白暨豚头部造型的电动车。白暨豚在漫长的进化过程中形成了良好的外部形态，便于在江水中高速、自如地游动，白暨豚与汽车在运行中具有类似的流体力学特征以及空气动力学特征。利用它头部狭窄、光滑流畅的造型，减少了车辆在行驶中受到的空气阻力。



图1 模仿白暨豚头部造型的电动车

该车被要求运行于起伏不平的地形，所以，在设计过程中对车的接近角的大小和前悬的尺寸有严格的要求。白暨豚有狭长的吻部，在设计过程中对吻部进行了抽象，缩短了它的长度；车轮在转动时会带起灰尘或泥浆，所以前轮的后部必须被遮蔽，以避免泥浆溅入驾驶室，为此，设计者选择了白暨豚头部弓起、吻部向下的形态进行模仿，在前脸的下部形成一道弧形，用以遮挡向后掠起的灰尘或泥浆；车头中部的凸起，仿自白暨豚的额头，它在造型上与下部的凸起相呼应，并起到横向加强筋的作用，优化了车头的力学性能，防止运行中产生不必

要的震动和意外撞击。

仿生学在建筑设计中的应用 不知道您在生活中有没有注意到这样的细节：我们炒鸡蛋的时候拿着鸡蛋往碗沿上这么一磕，鸡蛋就碎了，但是您要是用手拿着它捏，它是很难被捏碎的，因为这时候鸡蛋各个部位受到的力都是差不多的。贝壳也是这样的，它会把受到的外力向四周均匀地扩散，所以看起来很薄的结构却能承受很大的力，建筑上的薄壳结构就是受了这个启发。

由于薄壳结构能跨越长达几百米的跨度，同时给建筑内部留出不被隔断的大面积使用空间，因此在建筑设计特别是大型场馆的设计中被广泛应用。

没有薄壳结构这种来源于大自然的建筑形式，天津博物馆只能是一幅绘在图纸上的作品。而其神似天鹅的独特造型也是这座建筑仿生原理的重要体现（图2）。在谈到天津博物馆的设计起源时，天津大学的设计师们很自然地联想到了坐落于澳大利亚海港上的著名标志性建筑——悉尼歌剧院（图3）。

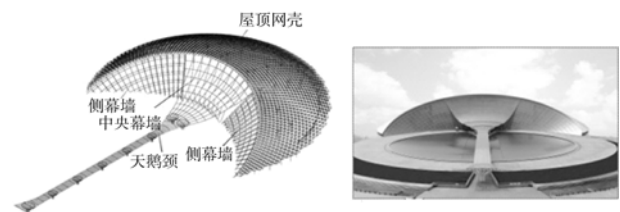


图2 天津博物馆钢结构图及实景图

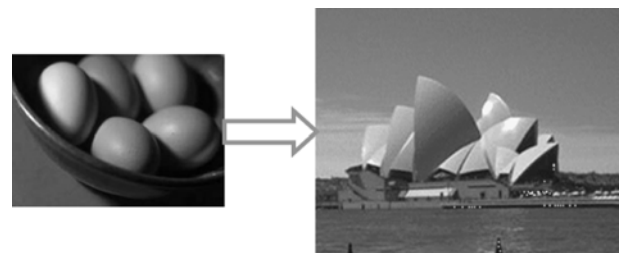


图3 源自于鸡蛋形状的薄壳结构

很多人看过悉尼歌剧院以后都会自然地联想到它是薄壳结构。事实上，在悉尼歌剧院最初设计的时候确实计划采用薄壳结构。但由于如此大的跨度带来的相应技术难度，这座经典的建筑最终依靠传统的拱形结构才得以完成。

但是，在几十年后的今天，即使更大的跨度也已经不是问题了。天津博物馆就横向跨越了186米，这是接近于一个普通田径场直径的超大跨度。在夜空下，天津博物馆就像一只展翅欲飞的天鹅，蓄势待发，即将腾空而起。在正式开放的时候，神似天

现代物理知识

鹅长颈的入口走廊两侧，注满碧蓝的海水，穿过这两个美妙的天鹅湖后，游客将看到一个历史和现实交相辉映的神奇世界。

除此之外，按照国家规范，这样大型的建筑物表面每隔 55 米就必须设置一个温度收缩缝，用来克服季节更替带来的热胀冷缩效应，但是这必然会让建筑的外观受到影响，同时这种传统的方式也不适应现代建筑的仿生理念；再者，一个大型的建筑物，需要有很强的抵抗自然界作用——风、地震、雨雪、湿度变化等的的能力，这就涉及到抗震设计。这里存在一个矛盾：建筑越牢固，在它抵抗能力增大的同时，自然的反应也随之相应增强，因此采取“硬抗”的方法来抵抗大自然的变化，是比较困难的。

在天津大学专家们研究的基础上，一种独创性的可呼吸结构最终成形，这种来源于自然的建筑技术成功取代了温度收缩缝的作用。通过建筑结构的布置，设计师们给建筑赋予了生命。支撑大屋盖的数根混凝土柱和各种受力钢部件都采用了可以轻微转动的螺栓进行固定，特别是在柱子接近地面的关键连接点，采用了一种名为板铰节点（图 4）的独创设计。这种节点用最低的造价实现了转动的功能，这样，当外界条件变化时，整个建筑可以相应地轻微转动，从而让建筑模拟了生物肺部的呼吸过程。

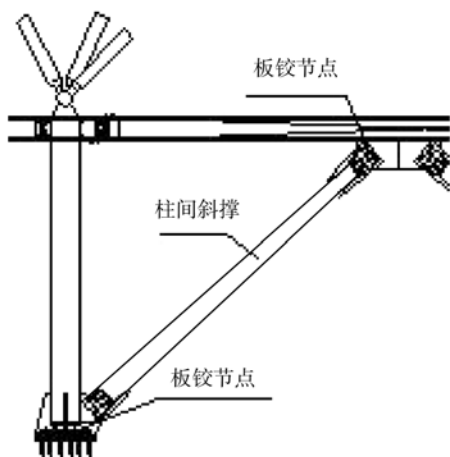


图 4 板铰节点结构示意图

事实上，这种仿生原理和人体的骨骼关节也有紧密的联系。在运动的时候，人的骨骼关节会受到很大的冲击力，但大多数情况下都不会发生意外，这就是由于人体关节的缓冲作用。这种以柔克刚的原理应用到建筑设计中，可以在一定程度上消除或削弱地震等外力带来的影响。

21 卷第 1 期 (总 121 期)

仿生学在航天技术中的应用 鲨鱼在海洋里已经生活了 3.5 亿年，它运动时的速度能达到甚至超过 70 千米每小时。在传统的观念中，表面越光滑产生的阻力就越小，但科学家在显微镜下检查深海鲨鱼的皮肤时，意外地发现鲨鱼的鳞屑是扇形的，而且有小槽（图 5）。于是科学家们把数百个模型鳞片按不同的角度装配，形成了一个人造的测试表面。测试的结果表明：摩擦损失比光滑表面还要小 10%，这项新发现马上找到了技术应用——包裹在飞机的外表面，使每架飞机的年燃料消耗减少了 350 吨。如果每年来往于世界各地的飞机都装上这种仿生皮肤，节省的燃料价值可达数十亿美元之巨，造成温室效应的二氧化碳和氮化合物也将会大大减少，对自然环境的优化也起到积极的作用。



图 5 鲨鱼鳞屑模型

随着 20 世纪末各种微型高新技术的迅速发展，人们提出了微型飞行器、微小水下航行器等新概念，它们在未来国家安全和民用服务等方面即将起到重大的作用。100 年前 Wright 兄弟由鸟类滑翔得到启示发明了飞机，但迄今为止飞机的整体飞行性能还无法与飞行动物相媲美。以当前正形成热流的研制微型飞行器为例，如果其尺度在 15cm 以下时仍采用固定翼的常规气动布局，则由于气流的相对黏滞性过大，飞行器在空气中运动时就犹如在浆糊那样的介质中运动。唯一的出路就是从昆虫飞行中寻找奥妙，因为昆虫是天然的微型飞行器，昆虫物种有上千万，平均尺度为 3~5mm，依靠拍翼的方式提供升力和推力，以平衡体重和克服前飞阻力实现悬停、前飞、机动运动等飞行状态。国外的小型拍翼飞行器已有样机，尺度小到 3cm 的机器苍蝇也正在试制之中。

昆虫的翼大多数是薄膜型，在拍动过程中，沿

· 25 ·

展向的扭转变形和沿弦向的弯度变形通常是很显著的。由于昆虫翼内部没有神经，除了翼的翅脉与基底相连，可部分调节翼的形状之外，翼在很大程度上是在惯性力和气动力的双重作用下产生的被动粘弹性变形，昆虫翼的柔性变形效应有哪些？什么最重要：是气动力增益，是节能，还是增强飞行的稳定性？至今尚无答案。从现有少量的研究结果来看柔性变形能够小幅度改变气动力，用以调节飞行姿态是可以的，但不会有大的气动力增益。

仿生学与体育竞技 很多昆虫善于跳跃，有些鸟类和兽类也能跳跃，袋鼠、袋猴以跳跃代步，较为特殊，蝗虫、蚱蜢、蟋蟀、跳蚤等昆虫的后足特别发达，当其后足的腿节和腓节由褶皱状态突然伸直时，就形成了一个完美的跳跃动作。一只重3克的蝗虫双腿的力量能产生的初速为3.4m/s，跳跃的角度通常为60°左右；一只5龄的蝗虫可跳30cm高，70cm远；跳蚤跳跃最高15cm，最远30cm。如果将几种动物的跳跃能力和其身体长度作比较，青蛙能跳到自身长度的12倍，跳蚤可高达200倍，而体形较大的袋鼠却只有5倍。

在人类举行的运动会中，跑和跳是传统的田径比赛项目。人跳高时的四肢动作与动物颇有相似之处，但起跳前需有助跑过程，以获得重心上升的冲力，成绩优良的运动员可越过2m高的横杆；跳远是利用腿的力量，将身体重心向上、向前推进，优秀的运动员可跳7m以上。人跳远时，身体在空中移动的轨迹与青蛙的跳跃颇为相似，都须有一定的角度使身体离地面的时间较长，若重心提高的时间达1秒时，距离将可达9m之远。如果将跳跃时跳离起跳点较远的动物（如青蛙）的跳跃过程进行高速摄影，然后用计算机与某竞技运动员的跳远动作进行比较分析，用以调整其动作，提高其运动成绩。

运动员们要想在比赛中取得好成绩，装备自然很重要，运用了高科技的运动服装能让运动员们如虎添翼。悉尼奥运会时，仿生科技的连体鲨鱼装改变了整个世界泳坛的格局，几乎大半以上的金牌得主都是鲨鱼装的使用者。第一代的鲨鱼装模仿了鲨鱼的皮肤，在泳衣上设计了一些粗糙的齿状突起，以有效地引导水流，并收紧身体，避免皮肤和肌肉的颤动；第二代的鲨鱼装又增加了一些新的亮点，加入了一种叫做“弹性皮肤”的材料，可使人在水中受到的阻力减少4%。此外，还增加了两个附

件——附着在前臂上的由钛硅树脂做成的缓冲器能使运动员游起来更加轻松，附着在胸前和肩后的振动控制系统能帮助身体有效引导水流。

仿生学的应用前景展望

远古时代，人类的祖先模仿蜘蛛编网捕鱼，受果实和瓢虫滚动的启发发明了轮子……

工业时代，人们模仿植物和动物的结构，创造新的建筑结构，模仿鸟的飞翔发明飞机，模仿人与动物发明了机器人，模仿海豚发明潜艇……

信息时代，模仿人的运算发明了计算机，模仿生物的信息传感创造了各种传感器……

在当今的知识时代人们开始模仿生命的微观结构与功能、遗传与发展，模仿人脑的认知，模仿生命的协同进化……

知识时代仿生学的前沿主要包括：

——随着分子生物学和系统生物学的进展以及纳米技术和MEMS技术发展的推动，仿生学向微纳结构和微纳系统仿生方向发展；

MEMS 是英文 **Micro Electro Mechanical systems** 的缩写，即微电子机械系统。微电子机械系统(MEMS)技术是建立在微米(纳米)技术基础上的21世纪前沿技术，是指对微米(纳米)材料进行设计、加工、制造、测量和控制的技术。它可将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成为一个整体单元的微型系统。这种微电子机械系统不仅能够采集、处理与发送信息或指令，还能够按照所获取的信息自主地或根据外部的指令采取行动。它用微电子技术和微加工技术(包括硅体微加工、硅表面微加工、LIGA和晶片键合等技术)相结合的制造工艺，制造出各种性能优异、价格低廉、微型化的传感器、执行器、驱动器和微系统。

——随着人们对生态环境的日益关注，将引发过程仿生学、能源仿生学等发展；

——随着对基因组蛋白质结构、脑与神经结构与功能的认识，可能会推动以解读生命信息为目的的计算仿生学的发展。

自然界中万物皆平等，人类要学会爱护自然界中的各种生物，它们提供了人类赖以生存的物质基础，是人类的益友，更是良师！自然和谐，生活更美好！

(李艳军，江苏省江阴市华士高级中学 214421；陆建隆，南京师范大学物理科学与技术学院 210097)