PART 01

第一部分

仿生学概述

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 1 2022/10/31 18:08:36

第 1 章

仿生学的发展

1.1 仿生学的提出

自然界中生物的进化史就是一部解决困难、化解危机的百科全书。经过数亿年的漫长协同演化，大自然出现丰富多样、让人叹为观止的生物、现象和过程。人类发现和命名的动物、植物和微生物约有 170 多万种，科学家推测地球上的物种在 1000 万种以上。生物为了生存、繁衍和发展，努力适应环境，逐渐演化出特异性的形态结构、生理特性、生化途径、遗传机制和生命系统等。各种生物虽然没有发展出人类语言这样复杂的沟通方式，但它们不断学习和尝试，用实际行动展现着各自应对复杂自然环境、勇敢斗争的聪明才智、生存技能和优越性状，而这些是目前人工技术、产品和系统所无法比拟的。

人和人类社会都是劳动创造的。劳动既是人与自然之间的物质交换途径和能量转化过程，又是整个人类生活和历史的前提及基本条件、人类赖以生存和发展的根本力量。在漫长的劳动和生产实践中，人类依靠直立的身躯、手足的分工、勤劳的双手、灵巧的工具、语言的出现和情感的交流，在自然生态系统中获得了更大的自由、更多的选择和更广的活动范围，极大地刺激了神经系统尤其是大脑的高度发育和发达，使人类得以从动物界分化出来，人类无与伦比的思维、智慧、本领和力量远远超越其他所有的生物类群。自人类诞生以来，大自然一直是理论探索、方法创新、工艺改进、技术革新和发明创造的不竭源泉。自然界中的各种生物提供了最优秀、最合理的方案选择，不仅是因为这些生物在恶劣的自然环境中能够巧妙地应对、进化出许多“聪明”的解决策略，更是因为所有这些生物过程都是天然实现、可循环的绿色过程。仿生学的发展可以追溯到人类文明的早期，在严苛的原始自然条件下，人类必须向其他生物类群、自然过程和现象学习，以保障自身的生存和安全。人类的才智水平

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 2 2022/10/31 18:08:36

早已不单单停滞在观察和描述生物界上，而是运用人类独有的逻辑思维、认知和模仿能力进行设计与制造。在创造性劳动的直接推动下，人类不断扩展自身的能力。因此，在人类文明形成和发展的早期过程中就有对仿生学不自觉的应用，只是这些应用还处于原始阶段。

顾名思义，仿生学就是模仿生命有机体和自然过程的科学，主要研究范畴为学习生物结构和功能的工作原理，获得新的启示、工艺和科学技术，制造更加优秀的工具、材料、设备、产品等，解决人们实际应用中的问题。1960 年 9 月 13—15 日，在俄亥俄州（The State of Ohio）戴通市（Dayton）的赖特 – 帕特森空军基地（Wright-Patterson Air Force Base），美国空军航空局组织召开了首届仿生学会议（The First Symposium on Bionics），主题为“生物系统分析得到的概念能够用于人工信息加工系统的设计吗？”，标志着仿生学作为一门独立学科的正式诞生。美国的杰克·埃尔伍德·斯蒂尔（Jack Ellwood Steele）为这一新兴的学科命名为“Bionics”，由希腊文词头“bio”（意为生命方式）和词尾“nics”（意为具有某种性质）构成，表示研究生命系统特征和功能的科学。按照斯蒂尔的定义，仿生学是“模仿生物原理建造技术系统，或者使人造技术系统具有或类似于生物特征的科学”。具体而言，仿生学是研究生命有机体的结构、形貌、过程、机能、物质交换、能量利用、生理生化、信息传递、新陈代谢、系统控制等各种特性和原理，将新方法和新途径应用于技术领域，优化原有的工程装置和设备，开发新的工艺流程、产品构型、自动化生产线等技术系统的综合性科学（樊雪梅等，2012；周方彤和高彤，2013）。我国于 1963 年引入“Bionics”一词并翻译为“仿生学”。从生物学角度来看，仿生学属于“应用生物学”（applied biology）和“生物工程学”（biological engineering）的一个分支，其使命是提供最可靠、最合理、最灵活、最安全、最经济、最友好、最高效、最绿色的接近于自然生态系统的人工技术系统，为人类社会造福（刘福林，2007）。

1.2 仿生学发展历史

仿生学是一门既古老又年轻的学科。生命、环境等自然形态以其自身的多样性、复杂性和合理性，向人类展现高度感性的美，常被作为学习、借鉴、汲取灵感的对象。人类在古老的年代就已经意识到，能够从自然生态系统中得到生存、繁衍和发展的启迪。人类对自然界始终充满着无穷的好奇心，从蒙昧阶段向文明时代的跨越就是在学习、模仿、适应和应用自然规律的基础上完成的。当人们专心研究生物的“生存绝技”时，发现人类面临的许多难题早已被“聪明”的生物们巧妙地解决了。

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 3　2022/10/31 18:08:36

人类运用优越的观察、思考和创造能力，不断借鉴自然界中的各种生物原理，制造各类实用工具，通过长期的劳动和实践，逐渐提高与大自然抗争的技能。

仿生学的应用其实早已深入到我们身边。从远古时代起，人们就已经开始从事仿生学的尝试性探索。尖状器、砍砸器、刮削器（如石斧、石刀、树枝、木棒、骨针、骨棒、砭石）等人类最初的工具形式，虽然是天然的、简单的、原始的、粗糙的、表面的，但这些工具的选择和使用不是人类凭空想象和制造出来的，而是对自然界中生命和非生命物质存在模式、作用方式的直观模仿，属于人类最初级的创造阶段，是仿生设计的开端和源头，也是人类今天得以发展的基础（张丽英等，2014）。在中国的古文明史中，处处可见对自然生命外在形态和内在功能的模仿。《庄子·盗跖》中记载："古者禽兽多而人民少，于是民皆巢居以避之，昼拾橡栗，暮栖树上，故命之曰有巢氏之民。"《太平御览》卷七提到："上古穴处，有圣人教之巢居，号大巢氏。"我们的祖先早在公元前 3000 多年，为了抵御大型、凶猛兽类的攻击和伤害，仿照鸟类在树上筑巢安家。4000 多年前，古人"见飞蓬转而知为车"，即看到飞蓬草（*Erigeron speciosus*）随风转动时受到启发，进而发明了轮子，并使用轮子制成了最早期的车。春秋战国时期，鲁班在上山伐木的途中，手指被锯齿草（*Lindernia ciliata*）划破，于是，鲁班认真观察并模仿锯齿草叶片的齿状边缘，经过反复的试验，在人类发展史上第一次制作了带有锯齿的木锯。某些仿生形象是古代人用于追求趣味性、装饰性或者敬拜的。从仰韶文化以动物形象（如鱼纹、蛙纹、鸟纹、鹿纹等）为标志的半坡彩陶，到生活实践中以各种动物形态为原型的实用器皿（如牛角杯、猪形杯、鹰形壶等），丰富多彩的仿生设计充分体现了我国劳动人民的聪明智慧（刘福林，2007；张亚林等，2011）。

早在大禹时期（夏朝，公元前 2029 年—公元前 1982 年），中国古代劳动人民就注意到水中的鱼类可通过尾部的摇摆而自由转向、游泳，于是模仿鱼类的形体造出流线型的独木舟和船，并在船尾位置加装木桨。在多次尝试、修正和验证后，进一步优化为橹和舵，有效地提升了船的动力供给，获得了操控舟船方向、角度和平衡的方法。即使在波涛汹涌、风大浪急的大海、江河或湖泊中，船只也能够安全、自如地航行。人类生活离不开水，原始村落都是临水而居，居住在河南、河北、河东和河西。为了彼此交流，人们用棍棒测量水的深浅和宽窄。如果河流不宽，人们就用放倒的树木架在两岸，这就是最早的独木桥；如果河流很宽，人们看到大树干可以飘在水上，从而想到将若干树干绑在一起，发明了最初的木筏和竹筏（刘福林，2007）。

从诞生之时起，仿生学就成为联结生物系统与工程技术的桥梁。人类从来不满足于二维地球表面的活动空间。中国古代劳动人民对飞行动物——鸟类的模仿卓有

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 4 2022/10/31 18:08:36

成效，很早就仿照鸟类的形状制造“飞行器”。据《韩非子》记载，鲁班“削竹木以为鹊，成而飞之，三日不下”。他以湖北当地产的竹子为材料，制成竹鹊。由于竹子强度、弹性和韧性均优于木材，因此他做的风筝飞行时间长，掉在地下也保持完好。“墨子为木鸢，三年而成，飞一日而败”。墨子为今山东藤城人，出身于手工业世家。他看到老鹰在天空中盘旋，于是花了三年时间采用当地木材做成木鸢，在空中飞行了一天摔坏了。据《杜阳杂编》记载，唐朝工匠艺人韩志和“善雕木作鸾、鹤、鸦、鹊之状，饮啄动静与真无异，以关戾置于腹内，发之则凌云奋飞，可高达三丈至一二百步外，始却下。”这些器物就是中国最早的风筝。与可飞行的器物相比，人们更加期待也能像鸟儿那样在空中自由飞翔，从而产生了嫦娥奔月的神话。西汉时期（公元前 202 年—公元 8 年），有人使用鸟类的羽毛制成人造翅膀，试图像鸟那样从高处一飞而下。明代（公元 1368—1644 年），发明了一种称为“神火飞鸦”的早期火箭武器，从另一个侧面映射出人们向鸟类学习和借鉴的渴望。以上几例充分说明，我国古代劳动人民用辛勤劳动和聪明才智，对鸟类的扑翼和飞行进行了细致的观察、记录和分析，这是最早期的仿生设计活动之一，为我国辉煌灿烂的古代文明增添了斑斓的色彩。外国的文明史大致经历了类似的发展过程。在涉及丰富的生产和生活知识的古希腊神话中，伊卡洛斯（Icarus）借助羽毛和蜡制成的翼膀，成功地从迷宫中逃脱并飞往太阳。15 世纪，德国天文学家米勒使用金属制作了机械苍蝇和仿生鹰，并成功进行了试飞。500 多年前，欧洲文艺复兴时期的杰出代表、意大利著名的艺术家、科学家、发明家、建筑师、机械工程师、未来学家列奥纳多·迪·皮耶罗·达·芬奇（Leonardo di ser Piero da Vinci）与助手通过解剖鸟类、观察身体构造和飞行特点，设计并制造了最原始的机械飞行器——扑翼飞机（ornithopter），机翼像鸟的翅膀一样上下扑动，能够同时产生向上的升力和向前的推动力，这是世界上首架人造航空器（刘福林，2007）。由于科学发展的程度不够，人类的飞翔一直没有成功。这些早期的仿生学萌芽和成就，是模仿生物结构和功能的发明与尝试，可谓人类仿生学的先驱。然而这些发明没有从原理上认识生物的运动规律，只是科学史上相对有限的阶段性发展成果，尚未相互联系、相互交叉成为一门真正独立的学科。

英国著名发明家、化学家、机械工程师、英国皇家学会院士、爱丁堡皇家学会院士詹姆斯·瓦特（James Watt）对蒸汽机进行了重大改进，使早期常压蒸汽机的使用效率和范围发生了质的提高，并于 1769 年获批专利；瓦特后来又相继发明了气压表和汽动锤，实现了具有实用价值蒸汽机的批量生产和走向市场，将通用工业蒸汽机真正转化为现实生产力，开创了能源利用的崭新时代。人类从此在生产实践中获得了前所未有的强大动力，基本上解决了工业技术领域的能量发生、转化、传输和

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 5　2022/10/31 18:08:36

调控等问题，成为第一次工业革命的核心驱动力。丰富多样的机器如雨后春笋般层出不穷，极大地提高和拓展了人类的各种能力，使广大生产者从繁重的体力劳动负荷中得到部分解脱。英国航空科学家、工程师、空气动力学的创始人之一——乔治·凯利爵士（Sir George Cayley）是达·芬奇之后首位系统研究航空飞行器的先驱者。凯利一生对中国孩童的古老玩具——竹蜻蜓着迷，他的很多研究成果源自对竹蜻蜓的观察和模仿，并由此领悟出螺旋桨的部分工作原理。1796 年，凯利根据科学计算的结果，制造了第一架相对旋转的直升飞行器（直升机的雏形）并进行了试飞，为航空工程师们带来了直升机设计的灵感，大大地推动了飞机研发的进程。1799 年，凯利率先提出固定机翼现代飞机的概念，并且给出了设计草图和主要部件说明。这架滑翔飞行器具有独立的起飞、上升、前进、平衡和操控系统，甚至已经包括现代飞机才有的上反角（机翼基准面与水平面之间的夹角，dihedral angle）机翼、尾翼和机身。1800 年前后，凯利研究和仿照鳟鱼（*Salmo*）、山鹬（*Scolopax rusticola*）的纺锤形身体，寻求阻力更小的流线构型。1804—1852 年，凯利不断改进设计方案，模仿鸟类翅膀优化机翼曲线，在经过多次试验后，制造了多架不同种类的滑翔机，并于 1853 年成功进行了一次载人飞行。1809 年，凯利的题为“论空中航行”（On aerial navigation）一文在《自然哲学杂志》（*Journal of Natural Philosophy*）上发表，详细地刻画出现代飞机的基本框架，系统分析了飞行器在空气中所受的 4 种力（重力、阻力、升力和推力），明确指出固定翼飞机（fixed-wing aeroplane）的重要性，被视为现代航空学诞生的标志。凯利的研究和发明在航空史上具有探索性、开创性和代表性，对现代航空技术的问世和发展起到重要的促进作用。凯利的多方面贡献远远超越了他所处于的时代，对后世的影响广泛而深远，被称为“航空之父”和“空气动力学之父”（刘福林，2007）。

进入近代，生物学、物理学、化学、数学、工程学、动力学等学科以空前的速度和规模迅猛发展，有力地推动了仿生学理论与方法的进步。模仿鸟类的飞行经历了无数次的失败，但人们经过不懈的坚持和努力，终于发现了鸟类飞行的基本原理。鸟类的翅膀上部弯曲、下部平坦，飞行时上面的气流速度超过下面的气流速度，造成下面的压力大于上面的压力，由此翅膀产生了向上的垂直升力，飞行速度越快，垂直升力越大。1852 年，法国工程师、发明家亨利·吉法尔（Henri Giffard）设计并制造了历史上第一艘真正意义上的可操纵飞艇，直径 12 m、长 44 m，下面悬挂着驾驶员乘坐的吊舱。飞艇的动力来自 3 hp 的蒸汽机，配有螺旋桨和可活动翼面，能够控制飞行方向。吉法尔驾驶飞艇飞行了 27 km，正式开启了飞艇进入应用领域的序幕。1873—1874 年，法国动物生理学家艾蒂安·朱尔斯·马雷（Étienne-Jules Marey）在对鸟类飞行进行细致研究的基础上，先后以法文和英文出版了名为《动物

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 6 2022/10/31 18:08:36

的机器：关于陆地和空中运动的论述》（*Animal Mechanism*：*A Treatise on Terrestrial and Aerial Locomotion*）的著作，详细探讨了鸟类体重与翅膀面积之间的相关关系。1870 年，德国工程师和滑翔飞行家、世界航空先驱者之一奥托·利连塔尔（Otto Lilienthal）发明了第一架实用的滑翔机，被称为“滑翔机之父”。1891 年，利连塔尔模仿蝙蝠翅膀研制出肋状、弧形的单翼滑翔机并成功试飞。1891—1896 年，利连塔尔滑翔飞行 2000 次以上，并且与鸟类的飞翔进行了比较，发现气流经过机翼上部曲面的距离大于气流经过机翼下部平直表面的距离，上部气流速度较快且更加稀薄，确保气流在机翼后缘（wing trailing edge）汇合，由此产生的强大吸力约占机翼升力的 2/3，其余的升力主要源自下部气流对机翼的压力。美国著名发明家威尔伯·莱特（Wilbur Wright）和奥维尔·莱特（Orville Wright）努力掌握前人在飞行领域的研究成果，首创飞行控制系统，研制成功人类历史上第一架真正意义上的飞机，并于 1903 年 12 月完成试飞。在飞机的设计制作过程中，为了解决飞机的姿态稳定、变换方向等问题，莱特兄弟仔细观察了鸟类在空中的飞行，思考鸟类起飞、上升、下降、盘旋和着陆的机制。例如，鹞鹞转动一只下垂的翅膀，依靠翅膀上增大的压力保持身体的平衡和稳定。受此启发，莱特兄弟为滑翔机安装翼梢小翼（winglet），在地面人员的绳索操控下，使之发生转向或翘曲（warp）。另外，莱特兄弟利用飞机后部的可转动方向舵（rudder），操纵飞机转弯。随着设计和制造技术的不断进步，飞机的体形不再笨重而难看，而是更加简洁实用，比以前飞得更快、更高、更安全。莱特兄弟当年的许多新颖想法和伟大发明，在其后的航空工业中得到了广泛应用，为飞机的实用化发展奠定了重要基础，深刻地改变了人类的交通、生产、经济、军事和日常生活的传统方式（刘福林，2007）。

在 20 世纪 40 年代之前，人们并未自觉地、理性地把生物和自然作为设计思想、生产路线和发明创造的主要来源。科学家们对于自然生态系统的探究绝大多数局限于生物体外观结构和基础功能的粗略描述及简易应用层面。工程技术人员很少有计划、有意识、有组织地向生物界主动学习，更多地依赖于自身的智慧和辛勤的付出取得人工发明。人们对于开发一种类似鱼类水下航行工具的设想由来已久。荷兰人科内利斯·雅各布斯·德雷贝尔（Cornelis Jacobsz Drebbel）是一位在化学、光学、测绘、机械和控制领域做出重要贡献的创新者。1620 年德雷贝尔主持设计建造了世界上第一艘导航潜艇，在英国泰晤士河（Thames River）上试航成功，潜入水面以下 4 ~ 5 m 深处。潜艇真正作为一种新式武器在实战中正式使用，是在第一次世界大战时期。出于军事上的需要，军方希望拥有在水下隐蔽航行的潜艇，具备较强的续航力、自给力和突击能力，能够利用水层的掩护进行较长时间和较大作战半径的移动，可对敌方实施突然袭击，攻击海上和陆上目标。

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 7　2022/10/31 18:08:36

当工程师们设计潜艇的模型时，沉浮问题摆在突出的位置。最开始是向潜艇中加装铅块或石块使之下潜，想要上浮的时候，将承载的铅块或石块卸掉，就可以使潜艇重新返回水面。经过数次改进后，采用浮箱（floating box）轮流加水和排水的方式，转换潜艇的整体重量，实现下潜和上浮。后来又在内壳与外壳之间增加了压载水舱（ballast tank），以调控潜艇的浮态（floating condition）、平衡、稳定和重心位置。在水舱的上部和下部分别设置放气阀（vent）和注水阀（water injection valve），当水舱充满海水时，重量的升高使艇身下潜。现代潜艇内还额外备有速潜水舱（quick-diving tank），在紧急的情况下，可使潜艇迅速地上浮或下沉。当潜艇全部潜入水中后，再排空速潜水舱中的海水。如果向一部分压载水舱中注满海水，另一部分保持空仓，则潜艇处于半潜航行状态（awash proceeding state），此时固壳艇身基本被水淹没，但上甲板仍高于水面，属于潜艇潜浮过程的中间过渡状态。潜艇要上浮时，将压缩空气注入水舱排出海水，潜艇重量降低后即可上升。凭借这套优异的机械系统，潜艇实现了自由浮沉。其实，鱼类的沉浮系统（up-and-down system）仅仅是可充气（inflatable）的鱼鳔（swim bladder），比人工系统更加简单和高效。多数鱼类依靠鳔的体积膨胀或压缩，改变身体的平均密度，在水中自由地上浮或下潜。鱼鳔内部实际上并不受到肌肉的调节，而是通过产生气体进入鳔内或者吸收鳔内部分气体，控制鱼鳔中的气体含量。当鱼舒张肌肉时，鱼鳔变大，鳔内充满了气体，鱼体受到的浮力随之增大，进而完成上浮；反之，当鱼收缩肌肉时，鱼鳔缩小，鱼体的平均密度升高（空气质量忽略不计），伴随着浮力的减小而下沉。鱼鳔内一定量的气体还可以使鱼体的密度与周围水体环境的密度取得一致，从而保持在原有水层。人类在技术上、原理上、工艺上遇到的很多困难，早在数百万年前就曾出现于自然生态系统中，并且在生物与环境协同进化的过程中已完美解决（于晓红，2004；刘福林，2007）。

20 世纪 40 年代，各种新理论、新思想、新观念不断涌现，科学技术进入新的发展阶段。人们根据生产实践的需要，将无机的机器、装置与有机的生物体结合起来，探索两者的内在相关关系。越来越多的科学家和工程师认识到生物系统与技术工艺之间存在着某种程度的联系和统一。尤其是电子计算机的出现，可以通过安全、可靠、高速、便捷的手段处理海量信息，使人们得以从各类数字、数据、符号和记录的浩瀚海洋中解脱出来，为人类科学技术的进步提供了划时代的方法支撑。在电子计算机和一系列自动化机械装置的帮助下，人们即使面对庞杂的生产工序和繁重的劳动强度，也可以相对轻松省力地完成，精准地控制、调整和优化产品性能及生产程序，确保产品质量、规格和表现的标准化。但是，所有的自动控制装置都是严格按照事先制订的计划和程序运行，这一点使得系统的真实控制能力受到很大的局

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 8 2022/10/31 18:08:36

限。自动机械缺乏对于外部环境状况同步分析、即时反应和灵活决策的能力，一旦有意外情况发生，自动控制系统就会停止运转，甚至可能引发事故。这个严重缺陷的克服需要机器各个组件之间、各个模块之间、机器与外界环境之间能够有效“沟通”（communicate），也就是要解决信息接收、传递、转化、解译、交换等问题，使自动控制装置获得内外环境变化的适应和反馈能力。数据、信息的控制、调节及利用是工业科技发展过程中的主要矛盾之一，人类可从生物系统中得到启示。1940年出现了“自我调节理论”（self-regulation theory），在一般意义上对生物与机器进行类比。到 1944 年，许多科学家已经明确了人造机器与生物系统在结构、功能、调节机制、控制途径、统计学特征、力学原理等诸多方面具有高度的一致性。1947年，一个崭新的学科——“控制论”（cybernetics）诞生了，为人类的自然科学体系增添了重要的成员。“cybernetics”源自希腊文，原意为“掌舵人”。控制论最核心的创始人诺伯特·维纳（Norbert Wiener）希望通过船舵这一历史上最悠久、最成功的自动控制系统，表达对这门新学科的理解和认识，给出的定义为：“控制论是关于动物和机器控制与沟通的科学”。虽然这个定义看起来有些简单，只是维纳 1948年控制论经典著作名称的副标题（*Control and Communication in the Animal and the Machine*），但简单明了地把人们对生物与机器的认识联系在一起。自 20 世纪 50 年代以来，不同领域的科学家们都已经开始认识到生物系统是开发新技术、解决新问题的一大捷径，利用数学、材料学、化学、物理学、力学、工程学和系统科学的方法和模型，深入地研究生物有机体的结构、功能及原理，极大地促进了仿生学的发展。理论生物学家与产业工程师、设计师、建筑师携手合作，将从自然生态系统获悉的知识和信息引入旧的技术设备改造或新的工艺流程创新，把生物和环境模拟从令人神往的幻想转化为可以实现的事实。仿生学逐渐迈入各行各业的产品发明和技术革新中，并率先在航空、航海、军事、自动控制等领域获得了成功（刘青春和何霞，2006）。

科学技术的迅猛发展往往伴随着生态破坏、环境污染、能源枯竭、资源耗竭、系统失衡等问题。到了现代，世界人口持续增长，先进的交通、通讯技术和网络显著扩大了人类的生产、生活和社会活动范围；同时，资源和能源消耗量不断升高，开发利用已经突破地区和国家的界限，自然和人力资源配置格局进一步迈向国际化、全球化和一体化。人类越来越清醒地认识到，需要重新认识自然，寻找与自然生态系统有机融合、更加和谐的共存方式，意识到仿生设计对于未来社会发展的紧迫性和重要性。仿生学概念的内涵和外延不断得到拓展和完善，逐步形成如今的仿生学理论体系。仿生学带来全新的思考方式、设计视角、价值取向和模拟技术，促使人类跳出自身的利益圈，从科学的、理性的、可持续的角度审视世界，揭示前人尚未

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 9　2022/10/31 18:08:36

发现的生命与环境系统规律，实现科学技术的原始创新和集成创新，这是其他学科不可比拟的优势。从仿生学正式诞生到 20 世纪 70 年代，美国、日本、苏联、英国等许多国家对仿生学知识进行了大规模的普及和宣传，争相举办国内和国际仿生学研讨会，相关的科普性文章、专著和会议论文集相继大量出版，学术论文在各类著名的学报和杂志上发表。人们利用仿生学的设计思想和工作路线，在自然科学、社会科学和工程技术领域积累了丰硕的研究成果，为深入了解仿生学这门新兴的交叉和边缘学科做出了不可磨灭的贡献（谷博，2011；李瑞，2014）。仿生设计获得飞跃式的发展和广泛的应用，雷达、潜艇、声纳、抗荷服（anti-G suit）、人工器官、隐形飞机、电子蛙眼、节能汽车、自动导航仪、自动传感器、自动控制器、风暴预测仪、智能机器人等一大批现代仿生产品应运而生。20 世纪 90 年代初，各国开始为仿生学的基础研究和应用开发制定长期发展战略和规划。

现代仿生学诞生已有 60 余年历史，对人类的生产和生活产生了多方面的影响，已被广泛应用于航空、航天、军事、工业、农业、医疗和日常生活等多个领域。仿生学的快速发展对各行各业都具有重要的意义，同时对于各科学领域有着不同程度的相互促进作用，在国内外都获得了极大的关注。维纳认为，“在已经建立起的科学部门之间的无人空白地带，更加可能获取丰硕的成果”（孙久荣和戴振东，2007）。进入 21 世纪，人类的科学技术高度发展，仿生学课题很多源于工程和实践领域的技术难题及实际需求。人类对于自然生态系统及其生物类群不再是表观的简单模仿，而是利用先进的现代科学技术，结合人类的认知水平和生产生活需要，通过对生物的各种官能感觉和思维判断功能更完美的学习、模仿、同化、复制、建构和再造，主动发现和发展相关的理论和技术方法。

仿生的理念由来已久，模拟自然环境和生物是人类从事了数千年的生产生活形式和途径。从远古到近代、再到现代和当代，仿生始终伴随着人类生存、发展、斗争、适应、进化的历史。仿生学是一门既古老又年轻、既传统又创新的学科，始终与时俱进、蓬勃发展、生生不息。纵观学科发展过程和现状，仿生学的成果和产品已经进入人类社会生活的各个层面，完全超越了仿生学诞生之初所涵盖的范围，充分反映了仿生学强大的吸引力、影响力和生命力。受到自然生态系统启迪而进行的仿生设计是一种潮流，各国都在不遗余力地增加仿生学研究项目的支持力度和广度。仿生学的发展水平已成为现代高新技术的代名词、科学技术领域的热点和前沿课题、国家整体科技实力和综合国力的重要标志。仿生学的重大贡献主要体现在研究思想、理念、方式和方法的源头创新，与工程技术相互融合、相互影响、互相促进，使人类的一些梦想成真。科学家们面对材料组成、数据存储、信息处理、数值计算、自动控制、智能反馈、力学模式、模拟仿真和能量转化等大量技术难题，正在向生

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 10 2022/10/31 18:08:36

物和自然系统寻求启发和灵感，在人工智能、纳米技术、信息技术、认知技术等领域不断取得突破。仿生学作为人类社会生产活动与自然界的契合点，将集多种理论、技术和方法于一体，极大地推动未来科学、经济和社会的发展，更加高效地为人类服务。

q22-13 昆虫体表复合浸润性与仿生设计185-260.indd 11　2022/10/31 18:08:36