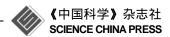
www.scichina.com

tech.scichina.com



生物耦合功能特性及其实现模式

任露泉*,梁云虹

吉林大学工程仿生教育部重点实验室,长春 130022 *E-mail: lgren@jlu.edu.cn

收稿日期: 2009-05-19; 接受日期: 2009-08-28 国家自然科学基金(批准号: 50635030)资助项目

摘要 生物在大自然优胜劣汰的法则下,进化出与自身生长和生存环境高度适应的功能特性.生物通过两个或两个以上不同部分的协同作用或不同因素的耦合作用有效地实现生物的各种功能,充分展现其对生境的最佳适应性.本文从仿生学角度,分析了生物耦合功能、特性及其类别,初步揭示了生物耦合功能实现的机制与模式,最后,展望了生物耦合功能仿生实现的工程技术前景

关键词 生物耦合 生物功能 生物特性 生物功能实现模式 耦合仿生

自然界的生物,经过亿万年在各自生存环境中 的进化优化,逐渐具有各种与生存环境高度适应的 功能特性[1-5]. 在生命过程中, 生物通过两个或两个 以上不同部分的协同作用或不同因素的耦合作用有 效地实现生物的各种功能, 充分展现对其生境的最 佳适应性,这种生物耦合现象是生物界普遍存在的, 是生物的固有属性[1,3]. 生物功能源自生物耦合作用 的现象,是仿生学领域的重要发现. 在生物长期进化 中, 在生命活力不断呈现中, 特别是在生物功能的种 种超强展现中, 生物耦合的特征规律始终在起着重 要作用[6~12]. 基于生物耦合机制与规律的多元耦合仿 生, 较之传统的单元仿生, 更接近于生物模本的功能 原理, 能更有效地实现仿生设计的功能要求, 甚至可 以解决单元仿生难以解决的问题,将会产生更好的 仿生效能.显然,分析生物耦合功能、特性及其类别, 揭示生物耦合功能实现机制, 探索生物耦合功能实 现模式,是仿生学领域需要研究的重要内容,也是多 元耦合功能仿生实现的重要生物学基础.

1 生物功能与生物特性

1.1 生物功能

生物功能即生物体、生物群(落)(植物、动物、微生物)在生命过程中所呈现的某种(些)能力或作用^[3]. 这里,主要是指具有工程技术意义的,而非完全生物学意义的功能.生物功能是生物不同因素相互耦合所呈现出的能力或作用,故又可称其为生物耦合功能.生物功能以生物体、生物群(落)为载体,在其生命过程中展现.生物功能是多样的,不同的生物具有不同的生物功能,同一生物体也可能具有多种功能;生物功能是复杂的,甚至同一生物体也会呈现出功能的多重性与复合性^[3].

自然界中的生物,经过亿万年在各自生存环境中的进化优化,逐渐具有各种不同的功能,甚至是特殊的功能,其功能的类别是多种多样的.例如,荷叶、苇叶等植物叶片以及蝴蝶、蜻蜓、蜜蜂、蝉等昆虫翅膀皆具有自清洁功能^[13~15];蜣螂、蚯蚓、蝼蛄、蚂

引用格式: Ren L Q, Liang Y H. Biological couplings: function, characteristics and implementation mode. Sci China Tech Sci, 2010, 53: 379–387, doi: 10.1007/s11431-010-0043-2

蚁等土壤动物的体表或全身具有减粘脱附的能力^[16~19];穿山甲、潮间贝以及生活在沙漠地区的沙漠蜥蜴等具有优异的抗冲蚀、耐磨功能^[20];长尾林鸮、长耳鸮等具有消声降噪功能等^[21,22].不仅如此,生物还具有更多对工程有重要意义的功能,如耐腐蚀、抗疲劳、减阻、隐身、变色等等,不胜枚举,其不断被发现、被揭示,在生物功能仿生实现中,发挥着越来越重要的作用.

1.2 生物特性

生物特性即生物在生命过程中呈现的某种特征、 品质、品性或特点. 生物特性更具普遍性和多样性, 同时, 生物特性还具有复杂性, 主要体现在各种特性 的多层面、多尺度、多场复合、联合及多态变化上.

生物特性的类别如下.

1) 按生命过程分类

生长特性即生物在适宜的条件或环境中具有按照一定的模式进行生长的特性,表现为组织、器官、身体各部分以至全身的几何形状、形态、大小和重量的可逆或不可逆改变以及身体成分的变化,即发育过程中质与量的改变.生物生长是按一定的变化模式进行的稳定过程.在生命过程中,生物体随时间而发生变化,它在任何一个特定时间的状态都是自身生长发育的结果.生长特性是生物基本特征之一,所有的生物都有各自的按一定模式和规律进行生长的特性.揭示生物生长特性(包括时间上的周期性、空间上的相关性和生理上的异质性等),是生物学领域研究的重要内容,在农林仿生学、医学仿生学等领域大有用武之地,同时,亦是生物医学、组织工程学以及生物制造与仿生制造的生物学基础.

行为特性即生物呈现出的对内外界环境变化作出相应反应的特征. 例如, 动物的取食、御敌、沟通、社交、学习等. 生物的行为特性是复杂多样的, 不同的生物对外界环境变化表现不同的行为特性, 同一生物在不同环境中亦可能表现出不同的行为特性, 即使同一生物体, 其不同部位也会呈现出不同的行为特性; 不仅如此, 同种生物群内不同个体行为特性也不同. 生物行为特性是生物适应环境变化的一种表现形式, 因此, 生物的行为特性具有一定的生态学意义, 它们可被内外环境变化刺激触发, 在适当条件下产生.

运动特性即生物展现出的在一维、二维或多维空

间内整体或部分进行移动的特征. 例如, 许多动物的行走、奔跑、游泳、飞翔等位移运动; 一些植物的向光、向地、向水、向触性等定向运动; 某些植物叶片以及花朵昼开夜合的感夜运动等. 不同的生物为适应各自的生存环境具有不同的活动特性, 其是生物在长期进化的过程中逐步适应生存环境的结果. 运动特性, 亦是生物最为突出的显性行为特性.

生境特性即生物经过长期的进化与自然选择, 呈现出的与生存环境相适应的特征、品质、品性. 例 如, 生物体表的保护色、警戒色、拟态等; 鱼类的身 体呈流线型, 用鳃呼吸, 用鳍游泳, 这些都是其与水 生环境相适应的生境特性. 生境特性具有普遍性, 即 自然界中的每种生物都具有与一定环境相适应的特 性, 其使生物能在一定的环境条件下生存与发展; 生 境特性又有相对性, 即每种生物对环境的适应都不 是绝对的、完全的适应, 只是一定程度上的适应, 环 境条件的不断变化对生物的适应性有很大的影响.

2) 按性质分类

几何特性即生物在生命过程中呈现出具有一维、二维或多维几何性质的特征.例如,树枝、水草等植物以及田鼠、蛴螬等土壤动物体表的柔性,这种柔性呈现出一维、二维和三维的多种柔形,使生物体本身的不同部分,可进行非线性大变形,并能在外力作用下恢复原形^[23].

机械特性即生物在生命过程中呈现出具有机械性质的特征、特点. 例如, 穿山甲鳞片、潮间带贝类的贝壳、动物牙齿等的耐磨性; 竹子、木材的强韧性; 蜘蛛丝的高延展性等.

物理特性即生物呈现出的具有力、声、光、电、磁、热等物理性质的特征、特点、品质.例如,蛋壳的抗压力学特性,鸮类的无声捕食特性,一些蝶类的结构色光学特性,电鳗等鱼类的放电特性和蚯蚓等土壤动物体表的电渗特性,一些候鸟的磁定向特性以及响尾蛇等的热敏效应等等.

物化特性即生物在生命过程中呈现出的具有物理化学性质的特征、特点、品性. 例如, 荷叶、苇叶等植物叶片以及蝴蝶、蜻蜓、蛾等昆虫翅膀的润湿性.

生物学特性即生物凸现其生命现象的特有的品质、品性或特征.例如,动物的新陈代谢,植物的光合作用,生物的自适应、自学习、自组织和自繁殖等,都是鲜明的生物学特性.

1.3 生物功能与生物特性的异同

在耦合仿生学中,通常将生物功能作为因变量(试验指标、目标函数等),而生物特性常被作为自变量(因素、变量),例如,生物柔性是作为减阻、脱附功能的因素来考虑的.生物功能与生物特性之间没有必然的因果关系,如荷叶自洁功能与荷叶的润湿性有关,但不全是因果关系,而是自洁功能的一种度量(非全部度量),因此,不能将润湿性作为自洁功能的自变量去考虑.为了研究方便,常将生物的某些机械特性如耐磨性、延展性、强韧性、抗弯特性等作为生物功能去考虑;也将生物的一些物理、化学或物化特性作为生物功能的度量指标,如将润湿性(接触角大小)作为生物自洁功能的度量指标之一.

2 生物功能实现及其机制

2.1 生物功能实现

在生命过程中,生物功能的实际展现,并取得成效,这种过程与结果,即为生物功能实现.例如,蚯蚓只有在土壤中穿行,其防粘脱附的功能才得以实现;蝼蛄只有在土壤中挖土前行,其脱附减阻耐磨的功能才能展现.

生物功能实现的内涵如下.

1) 生物的生命过程是耦合的必然展现

生物的生命过程,是生物在其环境中变化、运动和发展的过程.生物通过耦合作用有效地实现生物的各种功能,充分展现对其环境的最佳适应性,从而使生物达到最大的生命效应,即生长健康,行为正常,活动自由,生境和谐等.整个生命过程,生物耦合始终在调控并发挥着作用,显然,耦合是生命过程的必然展现.

2) 生物耦合功能实现类似于函数式y = f(x)中的"="号

如果将生物功能看作因变量或试验指标 y,将耦元看作是自变量或试验因素 $X=(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n)$,将耦联看作是 y=f(x)中的函数关系 f,其作用是将耦元与耦元联系起来,将生物耦合看作 f(x),则生物耦合功能实现,就类似于函数式 y=f(x)中的"="号,其作用是将生物耦合所具有的生物功能实际展现出来,重在强调生物功能被有效实现.

3) 生物耦合功能实现是一种鲜明的生命现象

生物一切功能特性被生物体、生物群(落)所承载,在其生命过程中展现,贯穿生命的全过程.生物功能的实际展现,并取得成效,是生命过程得以延续的基础环节,否则,生命过程就会遭到伤害,甚至终结.生物耦合功能实现是一种鲜明的生命现象,是生物在生命过程中必须(主动或被动)实现的重要目标之一

2.2 生物功能实现机制

1) 通过多元耦合

在生命的进程中,生物功能的实现很少是靠生物体单一部分或单一因素完成的,事实上,是生物体多个不同部分协同作用或不同因素耦合作用的结果.单一耦元自身虽有相关功能,但若没有与其他耦元的耦合或相互协同的作用,也就难于有效实现生物功能的最佳展现.生物通过多元耦合,有效地、充分地实现生物各种功能,以达到其对环境适应的最佳化和自身生长的最佳化.因此,生物功能实现亦是生物多元耦合发挥功效的过程,故又可称之为生物耦合功能实现.

2) 有耦合体与其环境的相互作用

生物与其生存环境息息相关,任何生物都无法脱离环境而生存.生物与其环境介质和生存条件长期相互作用,促使其进化出与生存环境高度适应的功能特性.生物功能实现必须有耦合体(生物体、生物群(落))与其环境的相互作用,这是耦合体在一定的时间、空间历程内与环境相互作用并发挥功效的过程和结果,即耦合的运动学和动力学显示.在生命过程中,生物如果失去了对环境变化的感知,脱离环境而展示的生物功能是毫无意义的,也是不存在的.生物与环境不断地进行相互作用,生物亦不断地调整耦合,以达到其自身物质能量消耗最低化、展现的生物功能最优化、对环境适应最佳化,以利于生物与环境协调发展.

3) 有一定的时间历程

生物在环境中变化、运动和发展的过程,永远都 是在时间和空间之内发生的,没有时间历程的生物 是不存在的,更无生物功能可言.生物功能实现必须 有一定的时间历程,与其所处环境变化保持同步性 存在,如此,生物在环境中方能存在.

4) 并行实现

为实现对环境的最佳适应性,同一时空域内的

生物功能必须并行实现,且在并行实现的过程中不断优化以适应环境变化.生物功能并行实现,但功能实现的程度、方式和侧重点皆可能不同,且允许时间历程有异,同时但有先后,从而使其实现过程静动态交叠、显隐性交错,这也是生物耦合或耦合系统功能实现智能化和系统化的特征表现.

3 生物功能实现模式

生物为适应各自不同的生存环境和实现特定的生物学行为,常常具有不同的生物功能,相应地,其不同生物功能的实现模式也是不同的.探索生物功能与环境因子间的关系,揭示生物功能实现模式,是解析生物功能超强展现的奥秘的关键,是进行多元耦合功能仿生不可或缺的生物学基础.根据对生物功能实现模式的初步研究,可将其按以下两个方面进行分类.

3.1 完全均衡并行式

完全均衡并行式即耦合体整个工作面上均衡地同时以同种方式实现生物耦合功能.例如,荷叶、苇叶等植物叶片正面通过形态、结构和材料等因素的耦合具有自洁功能,展现自洁功能时,其整个工作面上的任何点或区域与介质的作用方式都是相同的,皆均衡地同时以同种方式实现自洁功能(如图 1(a)).又如,沙漠蜥蜴体背由硬质鳞片(鳞片中部呈突起状)与多层组织柔性耦合构成,具有优异的抗冲蚀功能,受到风沙冲蚀时,其功能的体现面上的各点皆同时以同种方式实现抗冲蚀功能(如图 1(b))^[20].

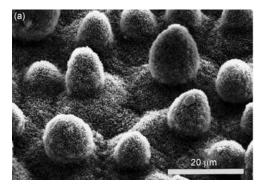
3.2 非完全均衡并行式

非完全均衡并行式即耦合体(生物体、生物群)工作表面同时进行耦合功能实现,但不同部位、区域,不同器官,不同个体与介质作用方式不同,局部耦合功能实现模式也不同.耦合体功能的实现是通过上述不同方式复合、组合或联合而实现的.因此,其又可分为复合式非完全均衡并行实现、组合式非完全均衡并行实现和联合式非完全均衡并行实现等.

1) 复合式非完全均衡并行实现

复合式非完全均衡并行实现即耦合体工作表面同时进行耦合功能实现,但不同部位或工作区段采取不同的实现方式,即耦合体整个工作表面的耦合功能实现是由上述不同部位(区段)采取不同实现方式并行复合而完成。例如,蚯蚓防粘脱附功能的实现主要是由前部环节膨胀分泌润滑与中后部表面电渗十非光滑形态十柔性等不同实现方式并行组成。

蚯蚓(如赤子爱胜蚓,湖北环毛蚓等)身体由百余个环状体节组成,形成波纹型非光滑形态.蚯蚓靠体节纵肌、环肌收缩舒张,使其体节动态变化,产生柔性变形向前推进,在运动过程的每一瞬间,体表均呈波浪形几何非光滑形态(如图2(a))^[24,25].这种体表非光滑形态与柔性,有利于减少其与土壤的接触面积,粘结的土壤易于脱离,从而减小体表的粘附力和摩擦力.运动着的体表部分受到土壤作用产生局部变形,引发出体表动作电位,相对于未运动体表部位呈负电位,正极与负极在同一表面.电位差使靠近体表的水化阳离子向接触区流动,产生生物表面电渗现象^[1],改善界面水润滑,从而降低界面水膜张力和黏滞力,使土壤粘附力和摩擦力减小(如图 2(b)和(c)).



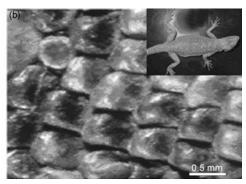


图 1 荷叶和沙漠蜥蜴体背鳞片 (a) 荷叶; (b) 沙漠蜥蜴体背鳞片

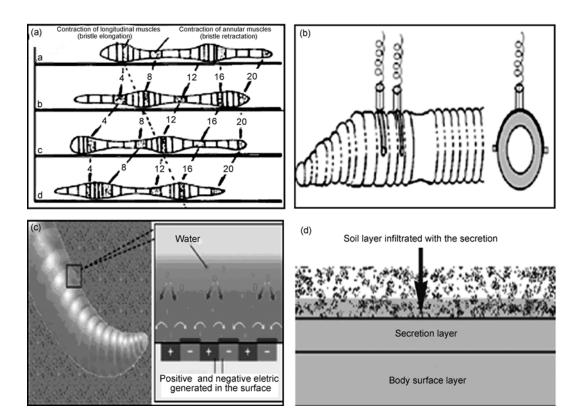


图 2 蚯蚓防粘脱附功能实现过程示意

(a) 蚯蚓运动过程; (b) 蚯蚓体表生物电测试; (c) 蚯蚓体表电渗原理; (d) 三层界面系统示意

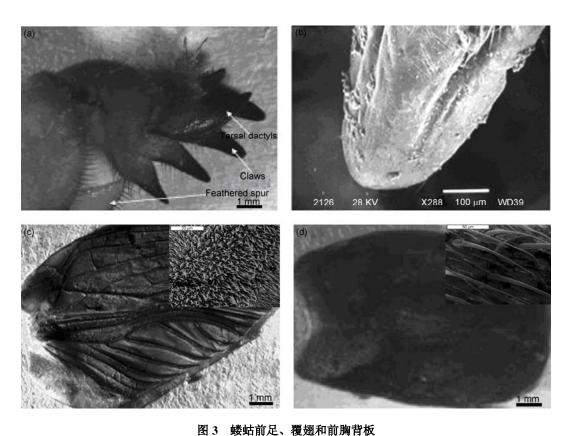
蚯蚓体表分布着能自动调控开启和关闭的多个背孔,需要润滑时,就会分泌体表液.体表液与体表、土壤一起构成三层界面系统,即体表层、体液层和渗有体液的土壤层(如图 2(d)).体表液提供了一个弱剪切层,在蚯蚓体表与土壤层之间形成润滑界面,降低土壤对蚯蚓体表的粘附^[1].由此可见,蚯蚓不同部位通过润滑、电渗、体表非光滑形态和柔性等不同实现方式复合并行实现了防粘脱附功能.

2) 组合式非完全均衡并行实现

耦合系统即两个或两个以上耦合,通过一定的联系方式组成的系统.系统中的基本单元是耦合,耦合与耦合间的联系类似于生物耦合中耦元与耦元间的联系方式.此外,同一生物个体相对一定的生物功能,可能不止一个耦合.

组合式非完全均衡并行实现即耦合系统中的所 有工作表面,同时进行生物耦合功能的实现,但系统 中不同耦合会采取不同的功能实现模式,即系统中 所有工作表面耦合功能的实现,是系统中不同耦合 的不同实现方式相组合且并行地实现了耦合系统的 功能. 例如, 蝼蛄作为一个耦合系统在土壤中前行时, 其前爪趾(挖掘足)是一个耦合, 覆翅和前胸背板是一 个耦合, 系统中两个耦合的有机组合, 有效实现其脱 附减阻耐磨功能.

蝼蛄挖掘足形状似铲,由爪趾、附爪和股节上的羽状刺组成,爪趾间密生纤毛(如图3(a))^[26].爪趾前部呈楔形,楔尖圆钝,楔角两相皆30°(如图3(b)).挖掘足耦合在挖土时,爪趾前部楔形,有助于分散土壤压力,减小摩擦,且楔角为30°楔入深土层阻力最小;附爪和羽状刺从上下两个方向有效清除爪趾上的泥土,使土壤不易粘附其上;爪趾间密生纤毛,亦可防止土壤颗粒粘附在爪趾的表面.显然,蝼蛄挖掘足是由瓜趾的特殊构形、结构和局部非光滑形态形成的三元耦合,并通过对土壤的挖掘,实现减阻脱附耐磨功能.在蝼蛄覆翅和前胸背板组成的耦合中,前翅呈椭圆形外凸状,翅上有纵横交错的翅脉作为骨架支撑着整个翅面,可以抵抗土壤的压力,翅面覆盖着浓密簇生的微毛(如图3(c)),形成一定厚度的柔形,具有柔性减阻脱附作用;蝼蛄的前胸背板坚硬膨大,呈马



(a) 蝼蛄前足; (b) 蝼蛄前足最大趾尖端; (c) 蝼蛄覆翅; (d) 蝼蛄前胸背板

鞍形(如图 3(d)),能分散土壤的压力并使土壤顺利滑落,且背板上分布的长短刚毛在与土壤接触的过程中不断抖动,缓解土壤压力,使空气和水分易于逸出,增加润滑,起到减小摩擦的效果.显见,蝼蛄覆翅和前胸背板也是其构形、结构和柔性非光滑形态组成的三元耦合,并通过相对土壤的滑动,实现减阻脱附耐磨功能.

尚须注意,耦合系统中各耦合的功能不尽相同,同时实现的生物功能有时也可能相异,主要是不同耦合实现的功能的侧重点不一样,时间历程有异,同时但有先后.例如,蝼蛄通常生活在沙壤土中,该土黏性不大,其耦合的主要功能是减阻耐磨.一般情况下,主要在挖掘足处有绒毛,这是由于挖掘力较大,对沙壤土压实较大,引起沙壤粘附于足趾上,故在挖掘足凹处生有绒毛、纤毛,形成局部柔性,以减黏防粘.

3) 联合式非完全均衡并行实现

联合式非完全均衡并行实现即在生命过程中, 若干个生物个体紧密联合的生物集体或大量生物个 体有机组成的生物群(落)中的相关生物个体,亦即耦合系统中的相关耦合,通过不同形式的联合,非完全均衡地并行实现生物的特定功能. 其特点是: (1) 生物功能的这种实现,或是多个生物个体或多个耦合的集体行为,或是大量生物个体或耦合的社会行为; (2) 生物个体或耦合体具有相对独立性,它们在生物功能实现过程中,可以具有不同活动方式或具体行为. 例如,三只虎或五只狼等联合捕食;蚁群、蜂群的社会性活动,如筑巢、觅食、防御、运输等.

尚须指出,生物功能的实现模式是复杂的、多样的,决不限于我们已经认识到的上述几种并行实现模式,还有许多功能实现模式有待于进一步探索和揭示.解析生物功能实现模式,是进行多元耦合功能仿生的重要生物学基础,也是仿生学领域的重要研究内容.随着生物学和仿生学研究的不断深入,人们对生物功能特性及其实现模式的认识和揭示,会越来越深入,越来越全面,从而使工程仿生领域的多元耦合仿生的生物学基础越来越坚实,研究内容越来越丰富.

4 生物功能的仿生实现

生物功能的仿生实现,亦即运用工程仿生学的原理与方法,人工实现具有工程技术意义的生物功能,这不仅是工程仿生学的最基本任务,也是众多工程领域的实际需求.

如前所述, 生物实现其功能的模式是多种多样 的,而人工即仿生实现生物功能的模式也必然是多 种多样的, 如单功能单元仿生、单功能多元仿生、单 功能耦合仿生、多功能单元仿生、多功能多元仿生、 多功能耦合仿生等等. 不同的仿生实现模式, 都是基 于生物不同的功能实现原理. 因此, 对于不同的仿生 实现模式, 其设计思想也是不同的. 对于基于完全均 衡并行实现模式而进行的仿生, 不论是单元仿生、多 元(耦合)仿生, 还是单功能、多功能仿生, 在设计时, 主要考虑静态因素、固化因素; 对于基于非完全均衡 并行实现模式而进行的仿生, 不论何种形式的仿生, 在设计时, 既要考虑静态因素, 更要考虑动态因素, 而且还要从系统的观点综合考虑因素之间和整个系 统的有效协调与合理控制. 例如, 基于荷叶、苇叶和 蜣螂头前部"推土板"等生物体的完全均衡并行实 现模式而进行的表面功能仿生, 单元仿生时, 设计仿 生犁壁, 只考虑形态, 将犁壁表面变为非光滑, 实现 生物的脱附减阻功能; 二元仿生时, 设计仿生炊具, 考虑形态与材料,将炊具的金属内表面变为疏水表 面, 实现生物的防粘功能; 三元仿生时, 设计仿生自 洁表面,考虑形态、微-纳复合结构和材料,将金属表 面变为超疏水, 实现生物的自洁功能. 显然, 上述三 种仿生, 仅考虑结构因素, 只是静态设计. 又如, 基 于蝼蛄、田鼠等土壤动物的非均衡并行实现模式的仿 生深松铲设计, 进行构形与结构二元仿生时, 必须综 合考虑其结构参数和运动学、动力学参数进行一体化设计^[1]、才能有效实现松土减阻功能.

工程实际中的重大技术难题,许多是基于生物功能实现原理得以有效解决的,而基于生物耦合功能实现原理的多元耦合仿生,则是工程仿生领域的最新进展,它能更有效地实现仿生设计的功能要求,将产生更好的仿生效能.目前,多元耦合功能仿生的理论与技术,在机械、能源、冶金、地质、轻工、医学、军事等众多工程领域,在进行脱附、减阻、自洁、耐磨、抗疲劳、抗冲蚀、降噪、隐身等多种生物功能的仿生实现中,发挥着越来越重要的作用,正成为工程仿生领域研究的前沿与热点.

5 结束语

生物在大自然优胜劣汰的法则下,进化出与其 生存环境高度适应的功能特性.生物通过两个或两 个以上不同部分的协同作用或不同因素的耦合作用 有效地实现生物的各种功能,充分展现其对生境的 最佳适应性.

生物功能的实际展现,并取得成效,这种过程与结果,即为生物功能实现.生物耦合的多样性、复杂性,必然展现生物耦合功能特性的多样性、复杂性,亦必然展现生物功能实现机制的多元性、集成性与实现模式的多样性、并行性.揭示生物耦合功能实现的机制与模式,是工程仿生学领域的重要研究内容,也是进行多元耦合功能仿生不可或缺的生物学基础.

生物功能的仿生实现,是工程仿生学的基本任务,也是众多工程领域的实际需求.接近生物模本功能原理的多元耦合仿生,能更有效地完成生物功能仿生实现的种种要求,甚至可以解决单元仿生难以解决的问题,将会产生更好的仿生效能.

参考文献 _

- 1 任露泉. 地面机械脱附减阻仿生研究进展. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(9): 1353—1364
- 2 Ren L Q, Wang S J, Tian X M, et al. Non-smooth morphologies of typical plant leaf surfaces and their anti-adhesion effects. J Bionic Eng, 2007, 4: 33—40
- 3 任露泉, 梁云虹. 生物耦合及其分类学与特征规律研究. 中国科学 E辑: 技术科学, 2010, 40(1): 5-13
- 4 Lu Y X. Significance and progress of bionics. J Bionic Eng, 2004, 1: 1—3
- 5 Bogatyrev N R. A "Living" machine. J Bionic Eng, 2004, 1: 79—87
- 6 任露泉, 杨卓娟, 韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望. 农业机械学报, 2005, 36: 144—147
- 7 房岩, 孙刚, 丛茜, 等. 仿生材料学研究进展. 农业机械学报, 2006, 37: 163—167
- 8 Edison T L. Systems biology, integrative biology, Commentary Predictive Biology. Cell, 2005, 121: 505—506

- 9 Paton R. Process, structure and context in relation to integrative biology. Biosyst, 2002, 64: 63—72
- 10 Zhang Y, Zhou C H, Ren L Q. Biology coupling characteristics on soil-engaging components of mole crickets. J Bionic Eng, 2008, 5: 164—171
- 11 任露泉,徐德生,邱小明,等. 仿生非光滑耐磨复合层的研究. 农业工程学报,2001,17:7-9
- 12 钱志辉, 任露泉, 田丽梅, 等. 仿生耦合功能表面应力-应变本构关系. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38: 1105—1109
- 13 Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. Planta, 1997, 202: 1—8
- 14 Fang Y, Sun G, Cong Q, et al. Effects of methanol on wettability of the non-smooth surface on butterfly wing. J Bionic Eng, 2008, 5: 127—133
- 15 Fang Y, Sun G, Wang T Q, et al. Hydrophobicity mechanism of non-smooth pattern on surface of butterfly wing. Chin Sci Bull, 2007, 52: 711—716
- 16 Ren L Q, Tong J, Li J Q, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: A review. J Agr Eng Res, 2001, 79: 239—263
- 17 任露泉, 陈德兴, 胡建国. 土壤动物减粘脱土规律初步分析. 农业工程学报, 1990, 6: 15—20
- 18 Ren L Q, Tong J, Li J Q, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components in anti-adhesion against soil: A review. In: Proc 13th Int Conf ISTVS. Munich: ISTVS, 1999
- 19 陈秉聪,任露泉,徐晓波,等. 典型土壤动物体表形态减粘脱土的初步研究. 农业工程学报, 1990, 6:1-6
- 20 高峰, 黄河, 任露泉. 新疆岩蜥三元耦合耐冲蚀磨损特性及其仿生试验研究. 吉林大学学报, 2008, 38: 86—90
- 21 孙少明. 风机气动噪声控制耦合仿生研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 2008
- 22 孙少明, 任露泉, 徐成宇. 长耳鸮皮肤和覆羽耦合吸声降噪特性研究. 噪声与振动控制, 2008, 3: 119—123
- 23 Ren L Q, Wang Y P, Li J Q, et al. Flexible unsmoothed cuticles of soil animals and their characteristics of reducing adhesion and resistance. Chin Sci Bull, 1998, 43: 166—169
- 24 任露泉, 王云鹏, 李建桥. 典型生物柔性非光滑体表的防粘研究. 农业工程学报, 1996, 12: 31—36
- 25 施卫平, 任露泉, Yang Y Y. 蚯蚓蠕动过程中非光滑波纹形体表的力学分析. 力学与实践, 2005, 27: 73—74
- 26 Zhang Y, Zhou C H, Ren L Q. Biology coupling characteristics of mole crickets soil-engaging components. J Bionic Eng Suppl, 2008, 5: 164—171