

The Introduction
of Bionics

仿生学导论

任露泉 梁云虹 著



科学出版社

仿生学导论

任露泉 梁云虹 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

学习、模拟生物与大自然的仿生学是驱动创新的重要途径,其高效、低耗、绿色、可持续的仿生态理念正成为人类经济发展和社会进步的科学理念与发展模式。今天,仿生学已成为活力最强、发展最快、应用最广的前沿学科之一。本书共14章,除系统介绍和阐述仿生学内涵的演进、仿生学基础理论、基本原则和主要方法与技术外,还通过多个方面的大量比照分析,阐释了生物是人类之师,人类是万物之灵,人类一定要向生物学习,也一定能学好这一仿生学的本源问题。本书具有系统性、前沿性、创新性和趣味性,特别是书中详述了大量生动实例和最新研究进展,将会让读者收获颇丰。

本书可作为仿生学、生物学、生物医学与健康、生态学、环境科学,以及工程技术等学科的教师、本科生、研究生的教学或科学研究的参考书,也可供相关学科专业的研究人员、技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

仿生学导论/任露泉,梁云虹著. —北京:科学出版社,2016.9

ISBN 978-7-03-050099-1

I. ①仿… II. ①任…②梁… III. ①仿生-研究 IV. ①Q811

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第228920号

责任编辑:王静 李悦 / 责任校对:李影

责任印制:张伟 / 封面设计:北京铭轩堂设计有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第一版 开本: B5 720×1000

2016年9月第一次印刷 印张: 22 3/4

字数: 456 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

仿生学是 20 世纪生物学与技术科学快速发展中产生的一门新兴交叉学科。自诞生以来，仿生学以其可持续发展的强大生命力和充满原始创新的无限活力，飞速扩展到自然科学、技术科学和工程科学的众多领域，不仅如此，还拓展到人文社会科学领域，产生重大影响，并得到广泛应用。仿生学已发展成为多学科交叉融合，促进人类进步与发展的大学科。现在，很难举出一个例子说明一个学科、一个领域与仿生学没有关系。而且由于仿生学的发展，还产生了许多新的领域、新的学科。国内外许多高等院校和科研机构不仅开展了多个方向的仿生学研究，还创建了多个仿生分支学科与专业，培养仿生专业人才。许多企业，包括《财富》杂志排名世界 100 强的大公司也在采取措施，在企业落实仿生学。仿生学不仅是创新之道、创业之道，也是实践高效、低耗、绿色、可持续的仿生理念解决经济与环境难题之道。仿生学受到越来越多的关注与重视，吸引越来越多的人去学习、去实践。然而，一直以来国内缺乏对仿生学进行系统性介绍的学术性书籍，而适用于高等院校和科研机构人才培养的仿生学教学用书国内也少见。鉴于此，我们撰写了本书。

笔者从事仿生学研究 30 余载，也担负着硕士生、博士生的指导与教学任务。2005 年我校设立了仿生科学与工程硕士学位点和博士学位点，并开设了多门有关仿生学的课程，其中“仿生学导论”由我们承担，但一直未有正式的书面教材。当时也曾承诺撰写《仿生学导论》一书，但只是经过多年对仿生学的学习与积累，以及仿生科研与人才培养的实践与体悟，才在 10 多年后由任露泉和梁云虹合作完成本书的撰写，实现了夙愿。

本书由任露泉构思，拟订全书章节纲目，提供积累的相关资料，并对全书进行了统稿、修改、补充与完善；全书由梁云虹执笔，在国内外不同工作环境中，靠信念与毅力笔耕不辍，历经 4 年，6 易其稿，最终完成初稿。这里要特别感谢李秀娟博士快速完整地多次打印书稿，并与分处国内、国外的作者及时有效沟通，得以如约完成书稿。

全书共分 14 章。

第 1~3 章，介绍了仿生学的基本概念，重点阐述仿生学内涵的演进，仿生学研究的内容、目标、特点与意义，进而对仿生学的分类进行了初步的尝试，最后阐释了仿生学四大基本要素及其之间的关系。主要回答：①什么是仿生学？②为什么要学习、研究仿生学？③仿生学发展的动力何在？④仿生学研究的内容是什么？

第 4~10 章，阐述了仿生学的本源问题：①人类为什么要向生物学习？特别是，为什么把生物、生活、生境和大自然都作为仿生模本？书中阐明，生物在许多方面强于人类，是人类之师，值得人类很好地学习。而生活、生境是仿生学不可或缺的重要仿生资源，大自然的运行机制与演化规律则是人类社会进步与经济

发展之必需。②人类向生物学习，能学好吗？答案是，人类是大自然进化出的具有最高智慧的生物，是动物界中智慧思维和学习、掌控能力最强的物种，人类是万物之灵，完全能够向生物学好。

第11章，阐述仿生学的发展历程及其前景，回答人类向生物学得如何，亦即仿生学发展得怎样的问题。

第12~14章，阐释仿生学的基本原理、基本原则和主要方法与技术，这是进行仿生研究时应遵循的原则、依据的原理和常用的方法与技术。回答今后如何更好地向生物学习，如何更好地进行仿生研究的问题。

本书具有以下特点：①系统性。围绕前述8个基本问题，系统阐明了仿生学的基本概念、基本理论、主要方法及其发展规律，也阐明了仿生学在纵向不断发展与深化、横向不断扩展与拓展中，已成为发展脉络清晰、纵横交融、多学科交叉的横断学科。②前沿性。本书引用 *Nature*、*Science*、*PNAS* 等国际著名刊物最近年份发表的许多研究实例，介绍了仿生学一些热点领域的最新研究成果和正在进行的研究，以及仿生学的某些发展态势，展现了仿生学多学科交叉前沿研究的惊人进展。③创新性。在介绍仿生学基本概念的基础上，本书通过人类与生物多个方面的大量比照分析，阐明了生物是人类之师、人类是万物之灵，人类一定要向生物学习，而且一定能学好这一仿生学的本源问题。这一创新性的编排将会使读者受到启发。书中的部分内容出自作者的科研与教学成果，如仿生内涵的演进、仿生基本要素、仿生基本理论、仿生基本原则、生活仿生、生境仿生、非光滑形态仿生及耦合仿生等。这些内容是基于仿生研究的需要提出的，还需要仿生实践的进一步检验，以便更好地修正与完善，以使仿生学更好地发展。④趣味性。本书有意识地引入大量实例，不仅有仿生的经典范例和近年来的研究故事，更有生物和大自然的才智的精彩展现，犹如充满无穷奥秘的世界讲述一个又一个满含趣味与神奇的故事。目的是激发人们对生物、对大自然的敬畏与热爱，引导对仿生学的兴趣、关注与参与。

本书只是多姿多彩的仿生学世界的一个剪景。我们愿本书能使读者收获生物灵感、自然的启示、仿生的理念，精神上回归自然，从而高效、低耗、绿色、可持续地脚踏实地前行。

本书可作为仿生学、生物学、生物医学与健康、生态学、环境科学及工程技术等学科的教师、本科生、研究生的教学或科学研究参考书，也可供相关学科专业的研究人员、技术人员和管理人员参考。

本书在撰写过程中参阅和引用了国内外许多相关文献资料，在此，向所有原作者表示感谢。作者向关心、支持本书著述、出版的专家、学者和同事谨致谢意。

仿生学发展太快，应用太广，几乎每天都有新进展，每个领域都有新成果，作者思维难免时有跟不上发展形势，考虑不周全、挂一漏万之处；再者，限于作者学术水平和写作能力，书中难免有不当之处，敬请指正。

作者
2016年5月

目 录

第 1 章 仿生学基本概念	1
1.1 仿生学含义	1
1.1.1 定义原则	1
1.1.2 斯蒂尔 (J.E.Steele) 定义	3
1.1.3 传统定义	3
1.1.4 现代定义	4
1.1.5 仿生学相关定义	6
1.1.6 “仿生学”英文释义	8
1.1.7 工程仿生学	9
1.2 仿生学研究内容	10
1.2.1 生物、生活、生境与大自然	10
1.2.2 工程技术需求	18
1.2.3 仿生转化	19
1.2.4 仿生制品设计与制造	20
1.2.5 仿生成果评价	22
1.3 仿生学研究目标	23
1.3.1 自然发现	23
1.3.2 技术发明	24
1.3.3 工程创造	26
1.3.4 思维创新	27
1.4 仿生学研究特点	28
1.4.1 新兴、前沿	28
1.4.2 学科交叉	28
1.4.3 原创性强、生命力强	28
1.4.4 上、中、下游研究紧密结合	29
1.4.5 可持续发展	29
1.5 仿生学研究意义	29
1.5.1 开启向自然学习的新时代	29
1.5.2 加快揭示生物奥秘的步伐	29
1.5.3 促进生物进化优化成果的应用	30
参考文献	30

第2章 仿生学分类	33
2.1 仿生学分类原则.....	33
2.1.1 传统与现代相结合.....	33
2.1.2 形式与内容相统一.....	34
2.1.3 纵向与横向相衔接.....	34
2.1.4 交叉渗透相融合.....	35
2.2 从横向联系分类.....	36
2.2.1 不同领域.....	36
2.2.2 不同学科.....	37
2.3 从纵向联系分类.....	37
2.3.1 不同尺度.....	37
2.3.2 不同层面.....	39
2.4 从模拟因素分类.....	40
2.4.1 单元仿生.....	40
2.4.2 多元仿生和耦合仿生.....	40
参考文献.....	41
第3章 仿生学基本要素	43
3.1 仿生需求.....	43
3.1.1 需求驱动.....	43
3.1.2 科学推动.....	57
3.1.3 任务促动.....	59
3.2 仿生模本.....	60
3.2.1 生物模本.....	60
3.2.2 生活模本.....	62
3.2.3 生境模本.....	63
3.3 仿生模拟.....	64
3.3.1 模拟内容.....	65
3.3.2 模拟方法.....	75
3.4 仿生制品.....	75
3.4.1 非生命仿生制品.....	75
3.4.2 包含生命组件的仿生制品.....	76
3.4.3 具有完整生命的仿生制品.....	78
3.5 仿生学基本要素间的关系.....	80
参考文献.....	81

第 4 章 人类与生物的进化	86
4.1 进化历程	86
4.1.1 人类进化历程	86
4.1.2 生物进化时间	91
4.2 生存空间	103
4.2.1 人类生存空间	103
4.2.2 生物生存空间	103
4.3 物种分类	110
4.3.1 人类	110
4.3.2 生物	111
参考文献	117
第 5 章 人类与生物的感知	121
5.1 视觉	121
5.2 听觉	125
5.3 嗅觉	126
5.4 味觉	129
5.5 触觉	131
参考文献	134
第 6 章 人类与生物的控制	136
6.1 控制系统	136
6.1.1 控制器	136
6.1.2 感受器	140
6.1.3 效应器	140
6.2 控制原理	141
6.3 控制成效	142
6.3.1 快速	142
6.3.2 精确	145
6.3.3 高效	146
6.3.4 可靠	149
参考文献	149
第 7 章 人类与生物的反应	151
7.1 运动	151
7.1.1 有位移运动	151
7.1.2 无位移运动	154

7.2	生物自适应特性	155
7.2.1	自医、互医与自我保健	156
7.2.2	伪装	159
7.2.3	共生与寄生	169
7.2.4	定时、定位、导航	175
7.2.5	休眠	180
7.2.6	耐抗性	182
7.3	生物机械功能特性	184
7.3.1	强韧性	184
7.3.2	减阻	186
7.3.3	自洁	187
7.3.4	耐磨	188
7.4	生物社会功能特性	190
7.4.1	社会构成	190
7.4.2	社会特征	191
7.4.3	社会功能	192
7.4.4	社会行为	199
	参考文献	206
第8章	人类与生物的关系	213
8.1	生物为人类之师	213
8.1.1	进化史比较	213
8.1.2	自我调控过程比较	214
8.1.3	结构功能特性比较	215
8.2	人类为万物之灵	216
8.2.1	智力	216
8.2.2	创造性思维	218
8.3	人类与生物关系的时变规律	220
	参考文献	221
第9章	人类与生活	223
9.1	人类生活及其方式	223
9.1.1	生活含义	223
9.1.2	生活方式	225
9.2	人类生活现象	228
9.2.1	日常生活中的生活现象	228
9.2.2	人文生活中的生活现象	230
9.2.3	本体生活中的生活现象	234

9.3 人类自然生命	237
9.3.1 生活的主体, 智慧的载体	237
9.3.2 创造文化的大脑智慧系统	237
9.4 人类生活是仿生学的重要源泉	238
9.4.1 生活现象仿生	238
9.4.2 人类自身资源仿生	241
9.4.3 人类脑资源仿生	244
参考文献	247
第 10 章 人类与生境	249
10.1 生存环境——生境	249
10.1.1 生境的含义	249
10.1.2 人类生境	252
10.2 自然环境	254
10.2.1 自然景观	254
10.2.2 自然现象	256
10.3 生态系统	259
10.3.1 自然生态系统	259
10.3.2 人类生态系统	262
10.4 生境是仿生的重要源泉	265
10.4.1 学习自然进行仿生	265
10.4.2 学习生态进行仿生	271
参考文献	274
第 11 章 仿生发展态势与规律	276
11.1 仿生实践先于仿生学	276
11.1.1 仿生意识的萌发	276
11.1.2 仿生实践的助推	277
11.1.3 仿生始终伴随着人类社会的进步与发展	279
11.2 仿生道路曲折	279
11.2.1 仿生学诞生	279
11.2.2 并非一帆风顺	280
11.2.3 遵循科学的“实践—认识—再实践—再认识”规律	282
11.3 仿生理念不断深化, 仿生学发展迅速	283
11.4 竞争焦点、前景无限	286
11.4.1 竞争焦点	286
11.4.2 前景无限	287
参考文献	291

第 12 章 仿生学基本原理	293
12.1 需求性原理.....	293
12.1.1 需求性原理的主旨.....	293
12.1.2 单目标需求.....	294
12.1.3 多目标需求.....	294
12.1.4 需求的合理性与科学性分析.....	295
12.2 模本原理.....	295
12.2.1 模本优选原则.....	296
12.2.2 单目标模本.....	296
12.2.3 多目标模本.....	298
12.2.4 模本优选与综合优化.....	300
12.2.5 模本的简化与凝炼.....	301
12.3 相似性原理.....	301
12.3.1 需求与仿生模本的相似性.....	302
12.3.2 相似性性质分析.....	303
12.3.3 相似性方法优选.....	304
12.4 可实现性原理.....	304
12.4.1 仿生方案可行性.....	305
12.4.2 仿生技术路线可行性.....	305
12.4.3 仿生目标实现的风险性分析.....	305
12.5 比较优化原理.....	306
12.5.1 比较优化原理的内涵.....	306
12.5.2 优于传统.....	307
12.5.3 优于非仿生.....	307
参考文献.....	307
第 13 章 仿生学基本原则	309
13.1 主动仿生.....	309
13.1.1 高度重视培养仿生意识的自觉性.....	310
13.1.2 高度重视走仿生创新路径的主动性.....	310
13.1.3 高度重视基于科学推动进行仿生的积极性.....	311
13.2 绿色仿生.....	312
13.2.1 绿色是仿生的前提条件.....	313
13.2.2 仿生全程应是绿色的.....	313
13.2.3 仿生成果的绿色管理与应用.....	315

13.3 可持续仿生	315
13.3.1 仿生理念可持续	316
13.3.2 仿生路径可持续	316
13.3.3 仿生资源可持续	317
13.4 最佳化仿生	318
13.4.1 单目标最佳化与多目标最佳化	318
13.4.2 局域最佳化与全域最佳化	319
参考文献	320
第 14 章 仿生研究的主要方法与技术	321
14.1 仿生研究的主要方法	321
14.1.1 理论分析法	321
14.1.2 计算机仿真法	324
14.1.3 相似模拟法	325
14.1.4 试验优化法	328
14.2 仿生研究的主要技术	333
14.2.1 仿生建模技术	333
14.2.2 仿生设计技术	338
14.2.3 仿生制造技术	341
14.2.4 仿生测试技术	343
14.2.5 仿生效能评价技术	345
参考文献	348

第1章 仿生学基本概念

人类通过观察、辨识、分析和利用自然界的种种策略来解决面临的各种难题，自然界已成为各种技术思想和发明取之不尽、用之不竭的源泉，仿生学也取得了令人瞩目的成就，许多影响人类文明进程的重大发明都得益于仿生学。现今，仿生学正引领着一次又一次的技术创新，成为当代最引人注目、最具活力的前沿学科之一。那么，什么是仿生学？为什么要研究仿生学？仿生学研究的内容是什么？本章将予以回答。

1.1 仿生学含义

1.1.1 定义原则

人类在漫长的岁月里，不断地观察自然界，研究和模仿各种生物，发明创造各种工具和机器，由简单到复杂，由粗糙到精细，以适应生存和发展的需求。自20世纪50年代以来，人们已经认识到学习和模拟生物是开辟新技术的重要创新途径之一，许多工程技术人员和科研人员主动地向生物界去寻求新的设计思想和原理，于是，生命科学和工程技术科学结合在一起，互相渗透孕育出一门新的科学——仿生学。

那么，什么是仿生学？仿生学内涵怎么样界定？仿生学如何定义？虽然，美国斯蒂尔（J.E.Steele）博士在仿生学诞生的第一次全美仿生学术会议上就定义了仿生学，但随着仿生科学研究的不断深入、研究内容的不断丰富、应用领域的不断拓展，仿生学内涵与外延也在不断地变化。还应指出，多个相关学科交叉融合的实践，不仅催生了仿生学，而且也产生了仿生子学科；生物学基础研究引导的相关学科的仿生实践活动，也产生了相应的仿生子学科；工程领域重大或紧迫需求直接驱动的仿生原理指导下的实践活动，同样也产生了相应的仿生子学科。显见，实践活动不仅促动了仿生理念的萌生、实现与深化，催生了仿生学的诞生，而且相应地也产生了不少仿生子学科。这不仅使仿生学定义多样化，也使其与时俱进、内涵丰富。因此，仿生学不仅是基础研究、应用基础研究与应用研究紧密结合的交叉学科，亦是重在实践的应用生物学之一。还应注意到，不同的专业人员探究仿生学的奥秘会有不同的侧重点，当然，也会对仿生学产生不同的认识和理解。事实上，迄今为止，仿生学还没有一个严格意义上的统一而明晰的定义。但其基本内涵是明晰的，即首先是研究、认识生物；进而学习、利用、模拟生物；最后，在上述基础上，

开发和研制人们需要的,同时具有生物一定功能特性的技术、方法或产品(包括自然科学、技术科学、工程科学、人文科学和社会科学领域的产品)。

简言之,仿生学基本内涵不可或缺的要素是生物,即仿生的模本;模拟生物形成的理论、方法、技术或产品可统称为仿生制品,是仿生学的目的,这里用制品一词重在其更广义;模拟是模本向制品转化的基本途径,仿生模拟是仿生学的重中之重。因此,仿生学定义的原则,除了应内涵准确、界定明晰外,还应与时俱进,适应时势需求,重视实践出真知;同时,亦要尊重不同学科领域不同研究人员对仿生学定义的不同认识、理解与阐释。事实上,从仿生学研究与实践来看,仿生学的定义,有传统的与现代的,即使是传统与现代的定义,也都有广义与狭义之分。此外,还有不同专业人员从自身研究的立场和体验出发给出的更专业化、更领域化的定义。这也正是仿生学充满活力,蓬勃发展的体现。

由图 1-1 可以看出,仿生学定义的时变性很明显:①仿生目标由自控机到人工技术制品,到人工制品,到包含自然或人造生命及其组件的人工制品,再到发

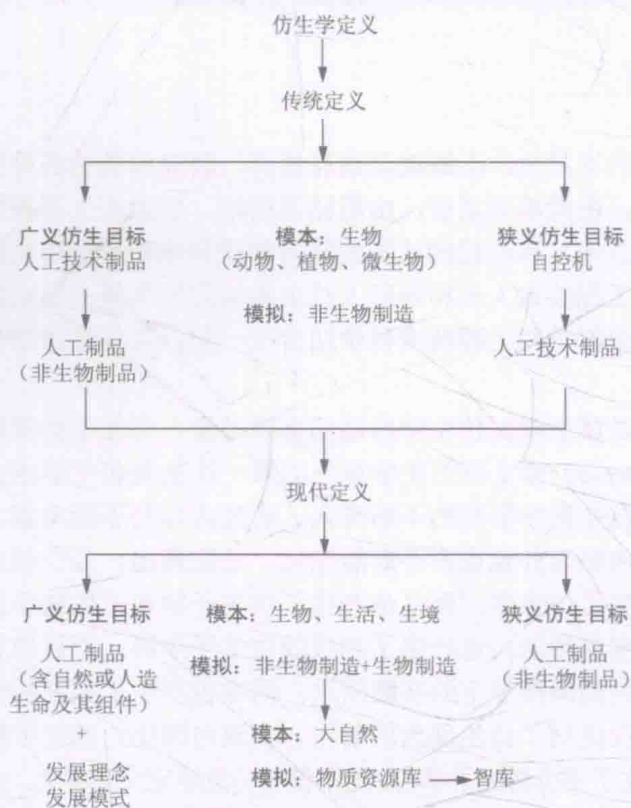


图 1-1 仿生学定义的时变性

展理念、发展模式，内涵在不断扩大与深化；②模本由生物（动物、植物、微生物）到生物、生活、生境，再到大自然，内容在不断丰富与拓展；③模拟由非生物制造到生物制造与非生物制造的结合，再到将大自然仅作为物质资源库变为智库，方法也在不断增加与创新。

本节着重分析仿生学的内涵及其定义的多样性、实践性和时变性，目的在于更全面、系统、历史地了解与认识仿生学，进一步明晰：①仿生学的核心是学习、模拟自然；②仿生学的重点是实践、是应用、是基础研究与应用研究的紧密结合；③仿生学活力无限，时时能生根发芽；④仿生学应用前景广阔，处处可开花结果。

1.1.2 斯蒂尔 (J.E.Steele) 定义

1960年，美国斯蒂尔博士在美国第一届仿生学术会议上，把仿生学定义为，模仿生物原理来建造技术系统，或者使人造技术系统具有或类似于生物特征的科学^[1]。从上述定义中可看出三个关键词，即生物、技术系统和模仿。显然，生物是仿生的模本；技术系统是仿生的制品，即仿生目标；模仿即模拟，是仿生设计与制造，是实现仿生目标，即将模本转化为仿生制品的途径和桥梁。在科学和技术不断发展的道路上，尽管人类很早便从生物界获得启示创造人工制品，但仿生学的诞生，一般以1960年全美第一届仿生学术会议的召开为标志。仿生学的光荣使命就是为人类提供最可靠、最灵活、最高效、最经济的接近于生物的技术系统，为人类造福。

1.1.3 传统定义

仿生学定义最早是从信息科学，更具体地说，是从控制科学与工程开始的，这从斯蒂尔的仿生学定义及第一次仿生学会议的主要议题——“生物系统所得到的概念能够用到人工制造的信息加工系统的设计上去吗”，即可明显看出。而从仿生学的传统狭义定义及其把电烙铁和手术刀“积分”在一起的图标更能直证之。仿生学传统狭义定义是“研究生物体接受、传递、加工及其机制，并将之作为模拟对象，来设计各种自控机的科学”。在仿生学研究不断深化的形势下，又产生了仿生学传统广义定义，即仿生学是“研究生物界各种各样的特征（包括物质、能量、信息等），并以之作为模拟对象，来改善现代技术设备并创造新技术”。显然，仿生学的目标从仅仅是自控机扩大到整个技术领域，即仿生制品从自控机扩大到人工技术制品。

随着仿生学向人文社会科学领域的发展，仿生制品中出现了非技术性质的人工制品，即仿生制品由“人工技术制品”扩展到“人工制品”，因此，“模拟生物制造人工技术制品”的仿生学定义变为“模拟生物制造人工制品”的广义定义。仿生制品从纯技术层面向包含技术层面在内的更多的层面拓展、扩容。

尚需指出,仿生学传统定义中,无论是狭义定义、广义定义,还是后来演变的定义,都是在下列条件下定义的:①仿生模本都是生物,即动物、植物、微生物;②仿生模拟都是非生物制造。显然,仿生模本内容没变,仿生模拟方法一样,但由于仿生领域由自然科学领域向人文社会科学领域拓展,仿生制品在质和量上都有了大的飞跃。

1.1.4 现代定义

经过亿万年进化的大自然,不仅拥有开启许多奇思妙想的金钥匙,也有实现这些构想的最佳办法。与人类建造的各种工厂不同,大自然通常不需要高温、高压等苛刻条件,它总能找到巧妙适宜的方法,利用现有材料,耗费最小的能量,制造出功能最优的“产品”,而不会有任何浪费。仿生学的出现,开启了人类由向自然界索取转为向自然界学习的新纪元,人类在长期的生产与生活实践中,总是自觉或不自觉地运用从自然界获取的信息去解决问题。

审视仿生学的发展轨迹可以清晰地看出,仿生学发展迅猛,已渗透到人类社会的众多领域,远远超出了仿生学诞生时所界定的范畴。在现代,随着人类对自然探索的不断深入,仿生学也经历了孕育—发展—成熟的不同历程,进入了一个全新的发展阶段。仿生学的定义也随着现代科学技术的发展,特别是与生命科学、医学、保健科学等的深入结合,得到进一步的丰富、拓展和提升。仿生学现代的狭义定义,即为仿生学传统的广义定义,而现代的广义定义可表述为,学习、模拟生物、生活和生境制造包含自然或人造生命及其组件的人工制品。定义中所体现的不仅是仿生模本从生物拓展到生活与生境的突破,更是仿生模拟实现了非生物制造与生物制造的紧密结合,而且仿生制品不仅仅是人工制品,而是直接包含有生命体或其组件,这些都是前所未有的,将会对正在孕育的新的科技革命和工业革命产生不可估量的深远影响。

现代广义定义中对仿生学还有进一步的表述,即仿生学是学习、模拟大自然,在建造的人工制品中实现回归自然的仿生发展理念和发展模式的科学。仿生学是解决人类面临的经济与社会发展的重大难题的一条有效途径。这既是仿生学的根本宗旨,亦是其最新发展。

与仿生学传统定义相比,可以看出,现代定义在研究内容上,人们已不再是仅仅模拟生物,还注重对人类生活以及人类与生物的生存环境(生境)所发生的一些现象进行探索,将一切对人类有用的信息进行仿生尝试,尤其是将生活与生境作为生活模本和生境模本,同生物模本一样进行仿生模拟。在实际需求的驱动及相关学科的渗透和影响下,现代仿生学的研究领域正变得越来越宽,已经远远超出传统仿生学的研究范围与深度。随着分子生物学、系统生物学、纳米技术、微机电技术等的发展,仿生学正向微纳结构和微纳系统仿生学、分子仿生学、细胞仿生学方向发展;随着人们对自身生活现象与生境奥秘的探索与揭示,将促

进生活仿生学、生境仿生学、过程仿生学、能源仿生学等学科的发展；随着对基因组、蛋白质结构、脑与神经结构与功能认识的深入，将会推动以解读生命信息为目的的计算仿生学的发展；随着信息技术向网络和智能化方向发展以及神经发育生物学的助推，将会推动智能与认知仿生学、管理仿生学等学科的发展。例如，现今，仿生学在人文社会科学领域也充满着勃勃生机，经济仿生学的提出，为社会与经济发展提供了一种新的观察视角、新的参照标系、新的发展模式、新的运行法则。当人们为解决各种各样的经济难题而冥思苦想、绞尽脑汁时，经济仿生学可望给人们带来意想不到的灵感。

在模拟手段上，随着观测、试验、仿真手段的完善，特别是非生物制造与生物制造的紧密结合，使现代仿生学的模拟广度和深度得到进一步的强化。仿生学已不再是简单地对自然进行“形似”模拟的单元仿生，而是模仿生物多因素及其相互耦合、相互协同作用的原理而进行的多元仿生或耦合仿生，这更近于神似仿生。“神似”模拟是在形似模拟的基础上更注重对生物功能原理与规律的探究，以多元仿生为主，原理模拟为要。其是从概念、内容到方法上有质的变化的仿生态念，有望解决传统形似仿生难以解决的问题，将会产生更好的仿生效能。特别是，将大自然从仅仅作为物质资源库去索取，转变成作为人类经济与社会发展的智库，去学习、去模拟，这是仿生学对人类在人与自然关系上几百年来的认识的一次根本性的变革，必将产生重大而深远的影响。

在制造人工制品方面，随着仿生学与生命科学、医学、药学、物质科学、认知科学、纳米技术、信息技术、能源技术和制造技术等交叉渗透愈益深入，现今，仿生制品内涵更广，除了非生命的传统仿生制品外，已有包含生命组件和具有完整生命的仿生制品不断涌现。例如，2015年4月，美国3D生物打印技术公司(Organovo)利用3D打印技术，将活细胞组合在一起形成可用的器官结构，成功地打印出全细胞肾组织^[2,3]，如图1-2所示，这一成果有望帮助数以百万计患有肾脏疾病的人恢复健康。这些具有一定生命活性的仿生制品，在功能性、选择性、适应性、灵活性、灵敏度、抗干扰性、微型化等方面，与目前各种同类的传统仿生制品相比较，存在着明显的优越性。



图 1-2 3D 打印全细胞肾组织^[2]