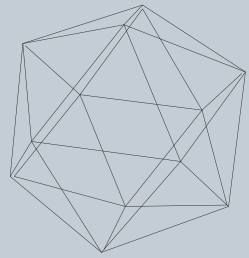
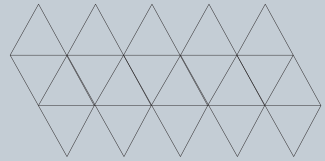
高等院校产品设计专业系列教材

产品结构设计

张莹 王逸钢 谌禹西 编著

Design of Product Structure





Design

清華大學出版社
北京

新改产品结构设计扉页23.3.indd 1 2023/3/10 下午4:02

内 容 简 介

产品结构设计与自然结构、人因工程、材料、力学、加工工艺等学科紧密相关，本书尝试从相对系统的多学科视角，阐述结构设计从理论到实践的一系列相关知识要点，内容包括认识、理解和分析结构，了解结构背后的物理学原理，以及不同材料及其加工工艺。全书共分为 6 章：第 1 章从自然界中的结构入手，延伸到建筑结构、平面设计结构，以不同的视角介绍结构；第 2 章从力学、机械原理、流体力学、光学等角度分析和讲解结构；第 3 章从几何的层面，介绍结构设计中的多面体、杆件、壳结构、膜结构，以及拓扑优化在结构设计中的应用；第 4、5、6 章介绍常用的金属、塑料和复合材料在结构设计中的应用，及其主要加工方法。

本书不仅可以作为高等院校工业设计、产品设计专业的教材，还可以作为广大工业产品设计人员的参考手册。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目 (CIP) 数据

产品结构设计 / 张莹，王逸钢，谌禹西编著 . —北京：清华大学出版社，2023.2

高等院校产品设计专业系列教材

ISBN 978-7-302-62736-4

Ⅰ. ①产… Ⅱ. ①张… ②王… ③谌… Ⅲ. ①产品结构—结构设计—高等学校—教材 Ⅳ. ① TB472

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 027645 号

责任编辑：李 磊

装帧设计：陈 侃

责任校对：成风进

责任印制：宋 林

出版发行：清华大学出版社

网 址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com

地 址：北京清华大学学研大厦A座 邮 编：100084

社 总 机：010-83470000 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：北京嘉实印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm **印 张：**10.25 **字 数：**249千字

版 次：2023年4月第1版 **印 次：**2023年4月第1次印刷

定 价：69.80元

产品编号：068537-01

编委会

主　编

兰玉琪

副主编

高雨辰
高　思

编　　委

邓碧波　白　薇　张　莹　王逸钢　曹祥哲　黄悦欣
杨　旸　潘　弢　张　峰　张贺泉　王　样　陈　香
汪海溟　刘松洋　候巍巍　王　靖　殷增豪　李鸿琳
丁　豪　霍　冉　连彦珠　李珂蕤　廖倩铭　周天翼
谌禹西

专家委员

天津美术学院院长	贾广健　教授
清华大学美术学院副院长	赵　超　教授
南京艺术学院院长	张凌浩　教授
广州美术学院工业设计学院院长	陈　江　教授
鲁迅美术学院工业设计学院院长	薛文凯　教授
西安美术学院设计艺术学院院长	张　浩　教授
中国美术学院工业设计研究院院长	王　昀　教授
中央美术学院城市设计学院副院长	郝凝辉　教授
天津理工大学艺术设计学院院长	钟　蕾　教授
湖南大学设计与艺术学院副院长	谭　浩　教授

序

设计，时时事事处处都伴随着我们，我们身边的每一件物品都被有意或无意地设计过或设计着，离开设计的生活是不可想象的。

2012年，中华人民共和国教育部修订的本科教学目录中新增了“艺术学-设计学类-产品设计”专业，该专业虽然设立时间较晚，但发展趋势非常迅猛。

从2012年的“普通高等学校本科专业目录新旧专业对照表”中，我们不难发现产品设计专业与传统的工业设计专业有着非常密切的关系，新目录中的“产品设计”对应旧目录中的“艺术设计(部分)”“工业设计(部分)”，从中也可以看出艺术学下开设的“产品设计专业”与工学下开设的“工业设计专业”之间的渊源。

因此，我们在学习产品设计前就不得不重点回溯工业设计。工业设计起源于欧洲，有超过百年的发展历史，随着人类社会的不断发展，工业设计也发生了翻天覆地的变化：设计对象从实体的物慢慢过渡到虚拟的物和事，设计方法越来越丰富，设计的边界越来越模糊和虚化。可见，从语源学的视角且在不同的语境下厘清设计、工业设计、产品设计等相关概念，并结合对围绕着我们的“被设计”的事、物和现象的观察，无疑可以帮助我们更深刻地理解工业设计的内涵。工业设计的综合性、交叉性和边缘性决定了其外延是广泛的，从艺术、文化、经济和技术等不同的视角对工业设计进行解读或许可以更全面地还原工业设计的本质，有利于人们进一步理解它。从时代性和地域性的视角对工业设计的历史进行解读并不仅仅是为了再现其发展的历程，更是为了探索工业设计发展的动力，并以此推动工业设计的进一步发展。人类基于经济、文化、技术、社会等宏观环境的创新，对产品的物理环境与空间环境的探索，对功能、结构、材料、形态、色彩、材质等产品固有属性及产品物质属性的思考，以及对人类自身的关注，都是工业设计不断发展的重要基础与动力。

工业设计百年的发展历程为人类社会的进步做出了哪些贡献？工业发达国家的发展历程表明，工业设计带来的创新，不但为社会积累了极大的财富，也为人类创造了更加美好的生活，更为经济的可持续发展提供了源源不断的动力。 在这一发展进程中，工业设计教育也发挥着至关重要的作用。

随着我国经济结构的调整与转型，从“中国制造”走向“中国智造”已是大势所趋，这种巨变将需要大量具有创新设计和实践应用能力的工业设计人才。未来，工业设计及教育，以及产品设计及教育在我国的经济、文化建设中将发挥越来越重要的作用。因此，如何构建具有创新驱动能力的产品设计人才培养体系，成为我国高校产品设计教育相关专业面临的重大挑战。

由于产品设计与工业设计之间的渊源，且产品设计专业开设的时间相对较晚，那么针对产品设计专业编写的系列教材，在工业设计与艺术设计专业知识体系的基础上，应当展现产品设计的新理念、新潮流、新趋势。

本系列教材的出版适逢我院产品设计专业荣获“国家级一流专业建设单位”称号，我们从全新的视角诠释产品设计的本质与内涵，同时结合院校自身的资源优势，充分发挥院校专业人才培养的特色，并在此基础上建立符合时代发展要求的人才培养体系。我们也充分认识到，随着我国经济的转型及文化的发展，对产品设计人才的需求将不断增加，而产品设计人才的培养在服务国家经济、文化建设方面必将起到非常重要的作用。

结合国家级一流专业建设目标，通过教材建设促进学科、专业体系健全发展，是高等院校专业建设的重点工作内容之一，本系列教材的出版目的也在于此。本系列教材有两大特色：第一，强化人文、科学素养，注重中国传统文化的传承，吸收世界多元文化，注重启发学生的创意思维能力，以培养具有国际化视野的创新与应用型设计人才为目标；第二，坚持“科学与艺术相融合、创新与应用相结合”，以学、研、产、用一体化的教学改革为依托，积极探索国家级一流专业的教学体系、教学模式与教学方法。教材中的内容强调产品设计的创新性与应用性，增强学生的创新实践能力与服务社会能力，进一步凸显了艺术院校背景下的专业办学特色。

相信此系列教材的出版对产品设计专业的在校学生、教师，以及产品设计工作者等均有学习与借鉴作用。

天津美术学院国家级一流专业(产品设计)建设单位负责人、教授

产品结构设计.indd 3 2023-03-14 09:07:55

前言

万物的生长和运行都遵循自然规律，在设计的过程中可以寻找、发现和认识这些规律。除了造物的过程和物品本身，物与人、物与环境的关系，以及由对物的使用而衍生出的人与人、人与环境的关系，也同样属于设计的范畴。这一系列的元素——物、人、环境，可以整合为一个系统，在某种意义上，这个系统就是我们的生活方式。基于自然规律，整合其他的元素，我们也可以构建各种不同的系统，比如经济、法律，以及人类社会。无论是有形的还是无形的元素，元素构成体系的方法和原则都可以称为结构设计，而结构设计需要遵循的是自然规律。

在传统的产品设计范畴内，结构设计与材料、工艺和力学相关，要解决的基本问题是如何使产品自身稳固、耐用，更加适合人的使用，以及选择与力学结构相适应的工艺及材质。但在广义的设计定义下，我们要考虑的问题远不止于此：作为科学与艺术的载体，设计应体现人类对外部世界的理解与认识；作为设计成果的产品，由于其自身的先天属性，使设计也同时承载了对社会与自然的责任。在广义的设计定义下，设计的命题可以扩展到生态、能源、社会体系，乃至生命。

詹姆斯 • 洛夫洛克(James E. Lovelock)提出的盖亚假说认为，无论是否有生命，地球上的所有物质共同构成了一个具有自我调节能力的有机生态体系。同样，作为生态体系内的人类，其所构建的各种内部或外部联系也是这个生态体系的组成部分之一。由于人类在自然界中的独特地位和人类社会的复杂性，人的某些行为似乎在尝试摆脱自然规律的束缚和生态体系的规则限制，当下由于人类活动而造成的物种消失和环境破坏就是例证之一。设计的本质在于洞察、批判、思辨与创新，如果设计的视角只局限于满足人的需求与愿望，无疑会削弱设计本应具有的价值与承担的责任。

设计最朴素的目标应该是遵循自然规律，所有通过人为努力而构建的物品、空间、组织与系统都可视为设计活动的结果，它们都是为了实现某种目的，而使人、物品、环境、社会与自然建立起各种各样的联系。本书尝试把最基本的自然规律融入基础的产品结构设计中。

产品结构设计.indd 4 2023-03-14 09:07:55

本书第1章结构概述，由自然界的结构形成引申到产品设计和其他设计领域，帮助读者破除对产品结构的固有认知，认识结构形成的本源，将结构的理论和生活的实例相结合。

设计的核心目的是以人类的解剖结构、行为习惯和认知为基础，构建有意义的物品或活动，使之改善人们的生活，促进人类社会的进步，协调人与自然环境的关系，而这些都建立在对自然规律的深刻理解和认识的基础之上。本书第2章对力学原理、机械原理、流体力学原理及光学原理等基础知识进行简单介绍，它们是学习产品结构设计的基础。

人为设计创造的结构和自然演化的结构一样，“好”的结构只有一个本质特点，就是用最小的成本获得最大的效益。本书第3章介绍了常用的结构元素，从几何的层面对结构进行分析，并通过案例详细讲解了产品设计中结构元素的使用。

书中的第4章到第6章以金属、塑料和复合材料为例，通过实际案例阐述、分析产品结构与材料、加工工艺的关系。

本书将产品结构基础视为产品创新的重要一环，采用跨学科的思维方式对其进行介绍和分析，体现了产品设计作为交叉学科的特点。

为便于学生学习和教师开展教学工作，本书提供立体化教学资源，包括PPT课件、教学大纲、教案等，读者可扫描右侧二维码获取。

教学资源

由于书中涉及的跨专业知识较多，加之作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，望广大专家和读者不吝指教。

编　者

2023.1

产品结构设计.indd 5　　2023-03-14 09:07:56

目录 CONTENTS

第1章 结构概述 1

1.1 自然界中的结构 2

1.1.1 人体结构及其应用 4

1.1.2 动物结构及其应用 6

1.1.3 植物结构及其应用 12

1.1.4 系统结构及其应用 14

1.2 人造的结构 16

1.2.1 建筑中的结构 16

1.2.2 平面设计中的结构 17

第2章 结构设计基础原理 19

2.1 结构设计原理概述 20

2.2 力学原理 20

2.2.1 框架结构 22

2.2.2 桁架结构 25

2.2.3 悬臂结构 29

2.3 简单机械原理 32

2.3.1 斜面和楔子 33

2.3.2 杠杆 35

2.3.3 轮子和轮轴 38

2.4 流体力学基本原理 40

2.4.1 汽车和风洞试验 41

2.4.2 吸尘器和无叶风扇 43

2.5 光学基本原理 44

第3章 结构元素在产品设计中的应用 49

3.1 结构元素与自然规律的关系 50

3.2 多面体结构及应用 51

3.3 杆件的结构及应用 56

3.3.1 杆件和网格 56

3.3.2 运动的杆件 61

3.4 面的折叠结构及应用 63

3.5 曲面的结构及应用 65

3.5.1 壳结构 65

3.5.2 膜结构 67

3.6 拓扑优化和产品设计 70

第4章 常用金属材料结构设计准则 75

4.1 金属材料应用简史 76

4.2 常用金属材料概述 76

4.3 铸造加工 78

4.3.1 常用铸造工艺流程 78

4.3.2 铸造结构基本设计原则 80

4.3.3 铸造加工案例分析 83

4.4 钣金加工 86

4.4.1 常用钣金加工工艺 86

4.4.2 钣金结构基本设计原则 89

4.4.3 钣金加工案例分析 93

4.5 数控加工 96

4.5.1 数控加工技术的出现和发展 96

4.5.2 数控加工中的结构设计原则 99

4.5.3 数控加工案例分析 102

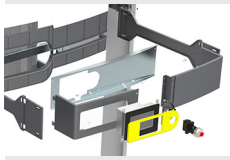
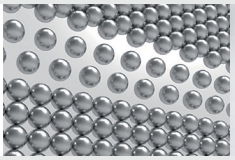
第5章 常用塑料材料结构设计准则 105

5.1 塑料材料应用简史 106
5.2 常用塑料概述 107
5.3 热塑性塑料及其主要加工方法 108
5.3.1 热塑性塑料的类型 108
5.3.2 热塑性塑料的加工方法 110
5.4 塑料产品结构设计原则 112
5.4.1 塑料产品结构设计要点 112
5.4.2 塑料加工案例分析 118
5.5 生物塑料的类型及优势 119
5.6 3D打印技术及应用 121
5.6.1 3D打印概述 121
5.6.2 3D打印技术工艺 124
5.6.3 3D打印设计案例分析 126

第6章 常用复合材料结构设计准则 129

6.1 复合材料应用简史 130
6.2 常用复合材料概述 130
6.3 碳纤维复合材料 132
6.3.1 碳纤维复合材料概述 132
6.3.2 碳纤维复合材料加工方法 134
6.3.3 碳纤维复合材料结构设计要点 137
6.3.4 碳纤维复合材料设计案例分析 139
6.4 智能复合材料 143
6.4.1 压电材料的原理及应用 143
6.4.2 铁磁流体的原理及应用 149
6.4.3 记忆合金的原理及应用 151

产品结构设计.indd 7 2023-03-14 09:07:56

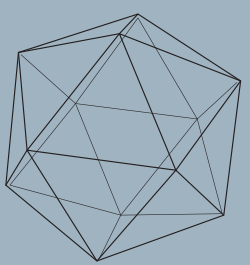
第1章

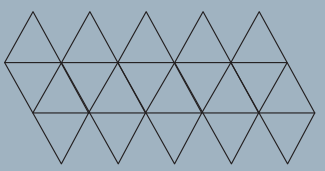
结构概述

主要内容：从自然界中的结构入手，联系到设计中的建筑结构、平面设计结构，尝试从不同视角介绍结构，使读者认识到“万事万物皆有结构”的道理。

教学目标：通过学习本章的知识，使读者将结构的理论同生活和设计中的实例联系起来。

学习要点：结构的定义，自然界中的结构，人造的结构。





Product Design

1.1 自然界中的结构

结构，即事物自身各要素之间相互关联和作用的方式。例如，构成事物要素的数量比例、排列次序、结合方式及因为环境变化或自身发展而引起的变化等都是事物的结构。可以说，结构就是事物的客观存在方式，万事万物都有结构，而事物不同则结构也不同。

在本书的开始，我们先来介绍一下大自然中各种客观存在的结构，如图1-1所示。它们往往是从古至今人造物结构设计的灵感来源和出处，可以说自然结构是创新者和设计师们取之不竭的灵感库。

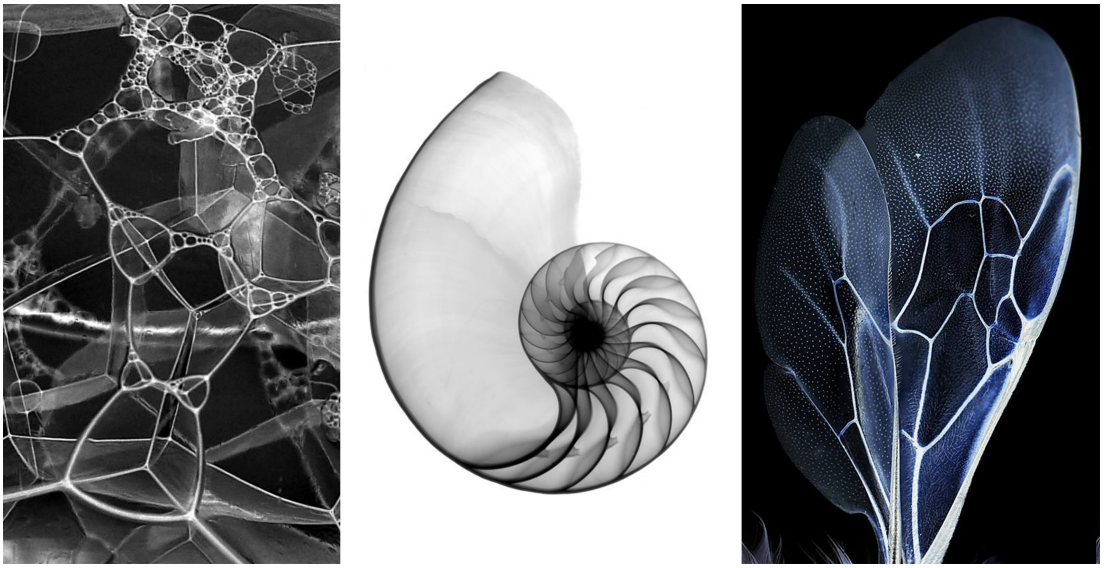


图1-1　大自然中的结构

法国雕塑家奥古斯特·罗丹(Auguste Rodin)在他的《罗丹艺术论》中说，美到处都有，对于我们的眼睛，不是缺少美，而是缺少发现。自然界中的“美”一直围绕着我们，这些随处可见的“美”的背后，则是自然界的法则和规律。这些规律有些我们已经了解，而更多的仍是未知。

例如，0，1，1，2，3，5，8，13，21，34……在这串数列中，每个单独的数都是前两个数字之和。这是由13世纪欧洲数学界的代表人物、意大利数学家雷昂纳多·斐波那契(Leonardo Fibonacci)提出的斐波那契数列。因为斐波那契数列最初是借由兔子繁殖的问题提出的，所以又称兔子数列。此后，科学家在自然界越来越多地发现了斐波那契数列的存在，如在植物界，很多花的花瓣数量是斐波那契数列，有3、5、8、13或21瓣，如图1-2所示。最有意思的是向日葵的花盘，如果把花盘归纳为两组方向不同的螺

图1-2　花瓣的斐波那契数列

产品结构设计.indd 2　2023-03-14 09:07:57

线，一组顺时针，一组逆时针，两组彼此交错。我们会发现花盘中的种子数量往往不超出34和55、55和89、89和144这三组数，如图1-3所示。这个结构在植物界随处可见，因为遵循这一规律的植物可以将尽量多的种子包裹到一个相对小的空间里，从而可以更多地繁殖。

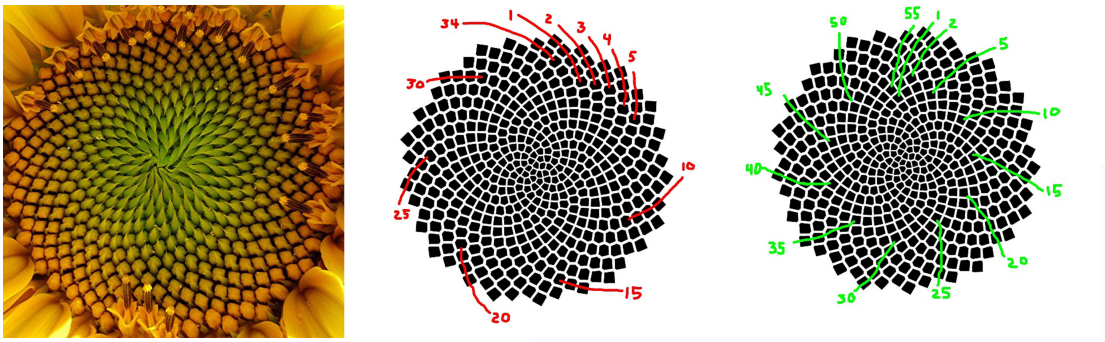


图1-3　向日葵花盘中的斐波那契数列

如果我们用斐波那契数列来创建图形：首先，将边长为1的正方体旁边放一个相同边长的正方体；然后，下面再接着放边长为2的正方体，旁边放置边长为3的正方体，再下面是边长为5的正方体，旁边是边长为8的正方体，以此类推，我们会得到长宽比例依次变化的矩形，如图1-4所示。如果相邻的两个矩形数大小相除，即13除以8等于1.625，21除以13等于1.615，34除以21等于1.619，55除以34等于1.6176……随着数值的增大，商就会无限接近1.618 033，也就是我们常说的黄金分割率，而我们得到的矩形则会无限接近黄金矩形，即完美的图形比例。

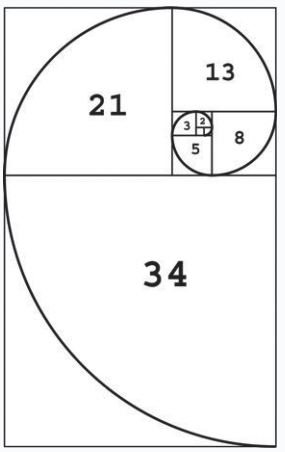


图1-4　斐波那契数列和黄金分割

斐波那契数列和黄金分割线的神奇规律，不仅体现在植物上，而是体现于各个方面，如著名的海底活化石鹦鹉螺。有五亿年历史的鹦鹉螺，其坚硬的外壳中是符合黄金分割比例关系并逐渐增大的腔室。这样的结构，让鹦鹉螺可以实现更大的外壳强度，节省内部空间，从而节省壳体材料，并且随着身体增长始终保持合适的浮力。鹦鹉螺和它的内部结构，如图1-5所示。

图1-5　鹦鹉螺和它的内部结构

产品结构设计.indd 3　2023-03-14 09:07:57

1.1.1 人体结构及其应用

人类虽然作为一种高级智慧生命存在，但我们的身体结构同样受到地球环境和自然规律的影响。在地球引力的作用下，我们的身体要保证正常运动，就需要以骨骼作为人体结构中的硬质支架，以关节作为骨骼之间的活动联结，通过肌肉收缩牵引骨骼，从而实现人体的正常行动。所以，骨骼、关节和肌肉，是构成人体的三个基本结构。

骨骼像是人体内可以活动的支架，在肌肉的牵引下起到杠杆的作用。人体既需要灵活运动，又需要稳定的支撑，这意味骨骼在减轻重量保证运动的灵活性的同时，又要保持硬度和人体结构的稳定性，这就促使人类的骨头进化出应对这两种要求的结构。如果我们切开一块骨骼，就会发现它的内部结构，是由靠近外部主要用于支撑的“密质骨”，和内部如同海绵一样可以承受拉力和压力的“松质骨”组成，如图1-6所示。我们的骨头是由有机物和无机物组成，有机物主要是蛋白质，它让骨骼具有韧性；而无机物主要是由钙质和磷质组成，它们让骨骼具有硬度。我们的骨骼就是利用这样的结构层次和材料特性来同时保证轻质和强度的。

在人造世界里，结构和材料特性也是不可分割的一体两面，著名的埃菲尔铁塔的结构设计原理就与骨骼的内部结构原理相似，如图1-7所示。它的桁架结构有层次地结合起来，让各部分的力可以合理传递，使得三百多米高的埃菲尔铁塔既轻巧又结实挺拔。

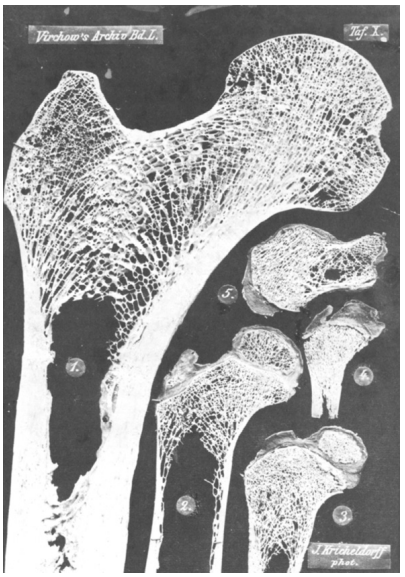


图1-6　骨骼内部结构

图1-7　埃菲尔铁塔结构

骨和骨之间的联结部位就是关节，在解剖学中指的是两块或两块以上骨头之间能活动的连接。根据运动的幅度不同，关节又分为不动关节、活动关节和微动关节三种。不动关节和微动关节的运动幅度很小或者根本不具有运动性，它们起到的主要作用是连接，如胸骨和颅骨。活动关节在两块骨头之间有关节间隙，关节接触面有关节软骨作为保护，如肩关节、髋关节和膝关节。

当我们需要握住桌子上的一件东西(如一个水杯)并放到某个位置，在这个简单的动作中，

产品结构设计.indd 4　2023-03-14 09:07:57

需要用到我们上臂的三个关节，肩关节、肘关节和腕关节，三个关节相互配合才能完成这个对人类而言非常简单的动作，如图1-8所示。而相同的，机械臂要完成这个简单的工作，也至少需要排列组合三个节点，一个万向关节、一个铰链关节和一个旋转关节，如图1-9所示。

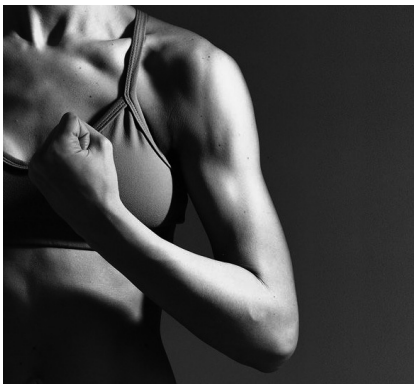


图1-8　人体上臂和关节

图1-9　机器人手臂

我们的肌肉组织分为三类：骨骼肌、心肌和平滑肌。牵引骨骼的肌肉就是骨骼肌，附着于骨骼上的肌肉有六百多块，肌肉与骨骼附着的接触点称为肌肉附着点。每一条肌肉都是由圆柱状的纤维，又叫肌肉细胞组成，它们的直径只有50 ~ 100微米，长度却从几厘米到一米不等，这些纤维被包裹分组为束状，每一束肌肉分别包裹在鞘中。肌肉的横截面积、纤维数量和长度决定了肌肉的力量，如图1-10所示。

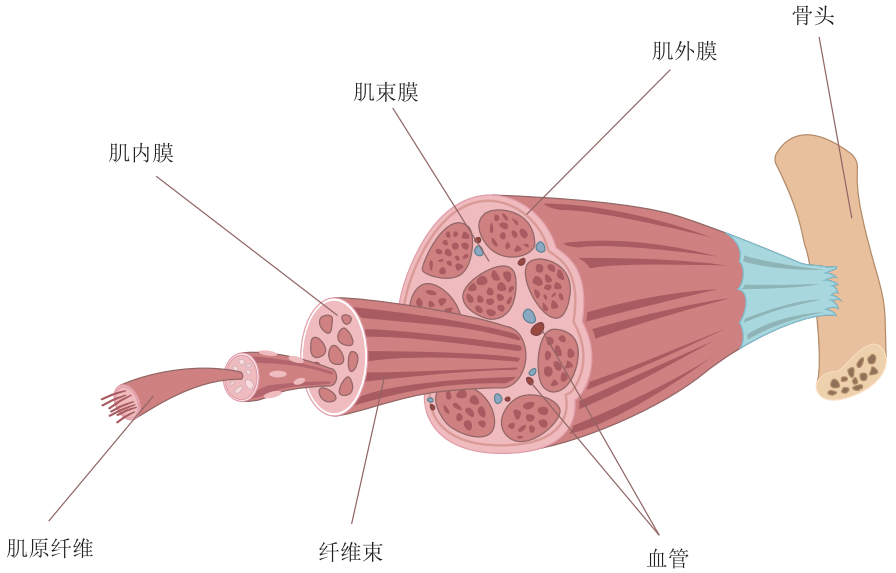


图1-10　人体肌肉结构

德国费斯托研究所研发的具有气动肌腱的机器人手臂，由人造骨骼与肌腱组成，它与人类肌肉的运作方式类似，使用压电比例阀精准控制气动肌腱，如图1-11所示。仿生肌肉主要由中空的人造橡胶缸筒构成，内部嵌有尼龙纤维，当气动肌腱内充满空气的时候，其直径增加、长度缩短，形成流畅的弹性运动，因为它自身是充气结构，所以重量也很轻，如图1-12所示。

产品结构设计.indd 5　2023-03-14 09:07:57

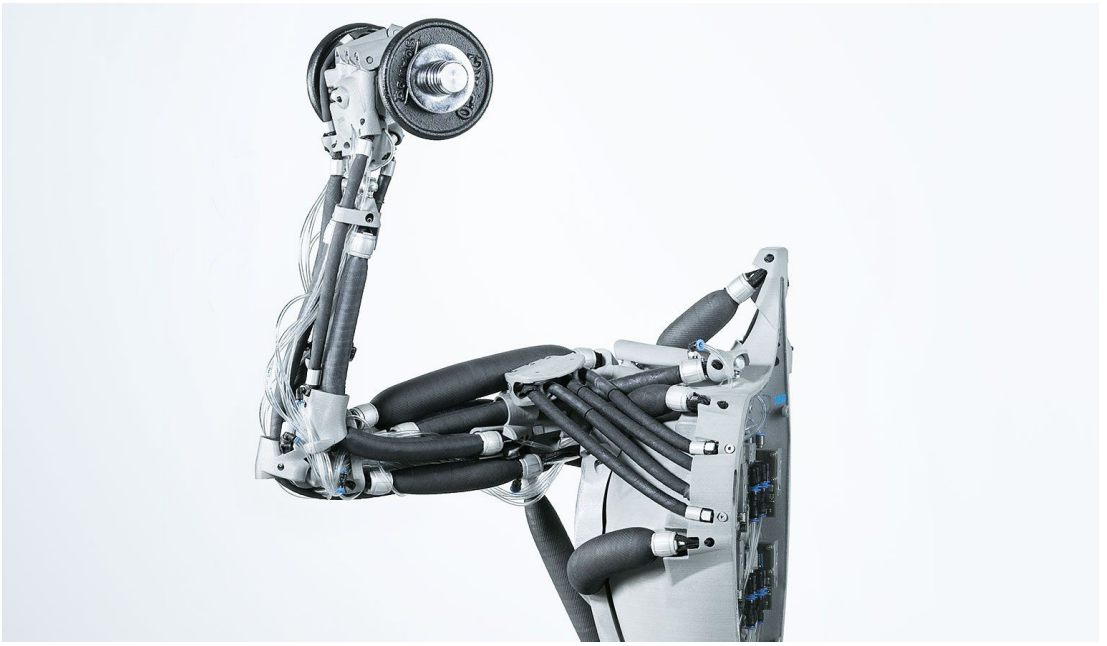


图1-11　机器人手臂

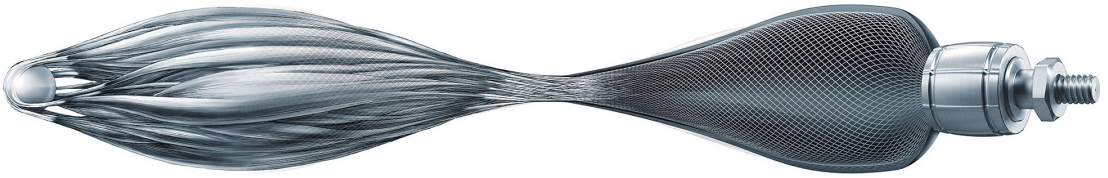


图1-12　气动肌腱

1.1.2　动物结构及其应用

除了人类之外的其他动物，从体型庞大的大象到没有内部器官的水生动物海绵，每一个进化至今的物种都有其独特的生存之道。有些动物的独特“天赋”来自它们的生理结构，而这些结构并不都是肉眼可见的。

1. 壁虎结构

壁虎是蜥蜴家族中的小型动物，最小的壁虎只有2cm长，最大的可以达到30cm。壁虎由于其飞檐走壁的“超”能力，一直是仿生实验室的主角。以前很多人认为壁虎的爪子结构和吸盘相似，是利用压强吸附在墙壁上，但事实并非如此。20世纪60年代，通过电子显微镜发现，壁虎能在垂直的墙壁甚至光滑的玻璃表面上快速行进，是因为它的脚上和尾巴上存在数十亿根丝状体(刚毛)，这让它在各种光滑的表面如履平地，不管这个表面是干燥还是湿润。我们在显微镜下可以观测这些丝状体的结构和形态——它们紧密排列并可以深入到物体的分子之间，从而和接触面产生分子之间的吸引力并实现吸附，如图1-13所示。

产品结构设计.indd 6　2023-03-14 09:07:58

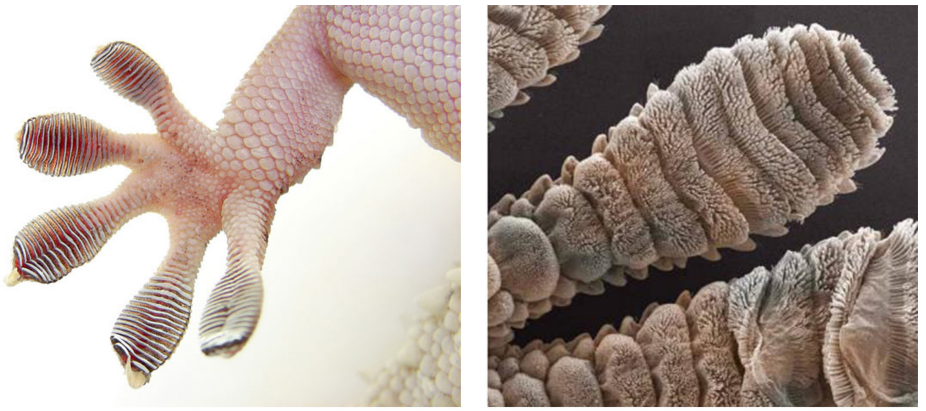


图1-13　壁虎的爪子和微观结构

2010年的诺贝尔物理学奖得主安德烈·海姆(Andre Geim)教授受到壁虎爪子的启发，经过实验，他的研究团队制备出类似壁虎脚部的结构——由聚酰亚胺微纤维构成的阵列。这种具有多层级纳米尺度的阵列，具有类似壁虎脚掌的结构，如图1-14所示。用这种结构制成的胶带比普通胶带粘贴更稳固，还可反复使用。

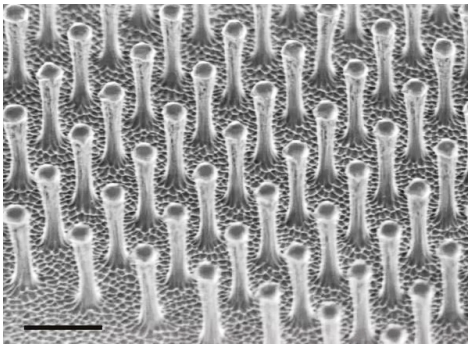


图1-14　聚酰亚胺阵列构成的壁虎胶

在爬行机器人领域，这种仿生结构得到进一步应用，欧洲航天局和加拿大西蒙·弗雷泽大学的研究人员利用壁虎的脚部微观结构发明了另一种“干胶”，并应用在爬行机器人阿比盖尔(Abigaille)上，由于这种胶不会聚集灰尘的特性，使Abigaille在太空的真空环境下也可以很好地爬行，如图1-15所示。

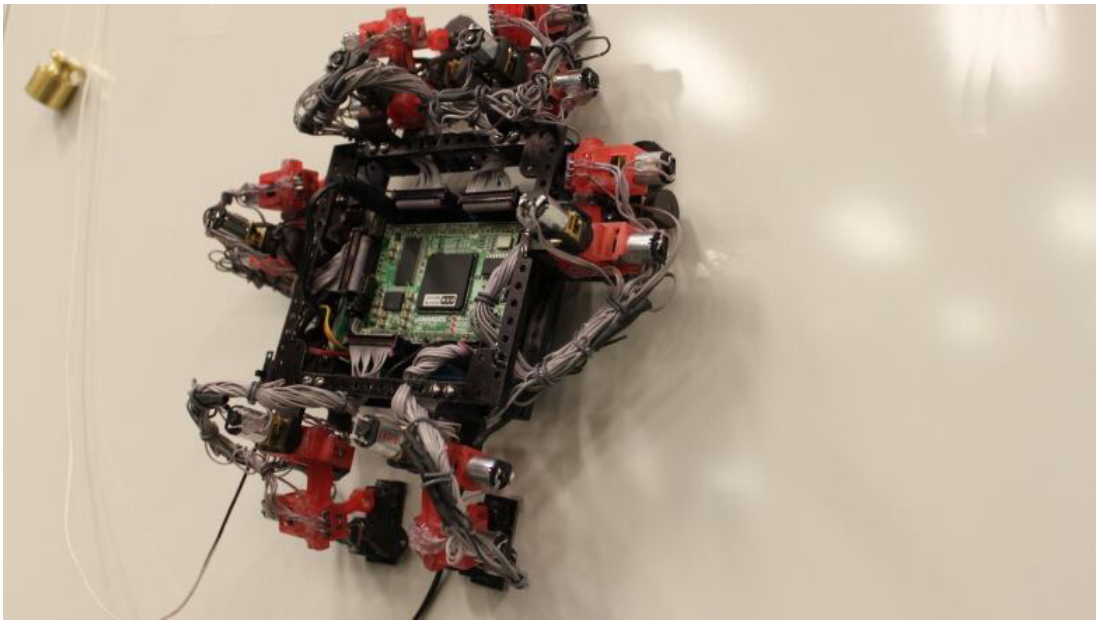


图1-15　Abigaille爬行机器人

产品结构设计.indd 7　2023-03-14 09:07:58

2. 海绵结构

海绵是动物还是植物？关于这个问题的争议曾经在博物学领域存在了很长一段时间。18世纪中叶，海绵被定义为动植物(介于动物和植物之间的生物)，一百年后，博物学家们为其正名为群体动物。如今，科学界普遍认为海绵是一种存在时间可以追溯到至少6亿年前寒武纪的原始多细胞动物。

生长分布在地中海、加勒比海和西印度群岛的沐浴角骨海绵既坚硬又柔软，很早就被当地人捕捞，作为沐浴时的清洁工具，如图1-16所示。它在市场上大受欢迎，催生了当地“采绵人”的职业，但过度的捕捞也导致当地海绵在20世纪中叶面临灭绝。

图1-16　沐浴角骨海绵

海绵动物独特的结构，让它具有既坚硬又柔软的特性。海绵动物看起来柔软，但是触摸起来却粗糙和坚硬，这是因为大部分海绵动物都是具有骨骼的。由骨针组成的骨骼支撑和保护海绵动物的身体，保证它的生长和发育，这些骨针约占海绵动物本身重量的75%。常见的骨针形态有单轴、三轴、三轴六放、四轴八放等，如图1-17所示。

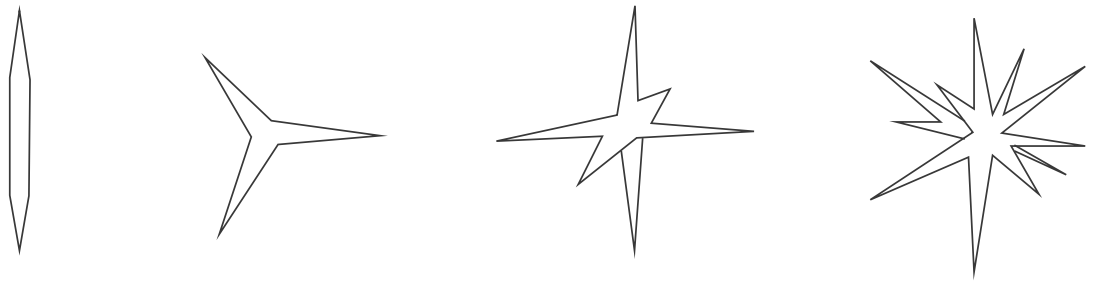


图1-17　海绵骨针形态图

除了微观的骨针结构，海绵动物没有其他执行各种机能的器官，更没有大脑和中枢神经系统，属于动物界最低等的多细胞动物。水沟系统是海绵动物最主要的结构和特征，它的摄食、排泄、呼吸等生理功能的完成都依赖于水沟系统，如图1-18所示。水沟系统的运作，是通过海绵体壁上的鞭毛震动并带动水流，水流将碎屑、藻类等营养物质带入海绵身体的小孔内，营养被细胞捕捉吞食，剩下的杂质与海水再通过出水口流出体外。在漫长的演化过程中，海绵动物通过增加细胞数量和分布面积，以及体壁的褶皱数量，形成了单沟型、双沟型和复合型的体壁结构。

产品结构设计.indd 8　2023-03-14 09:07:58

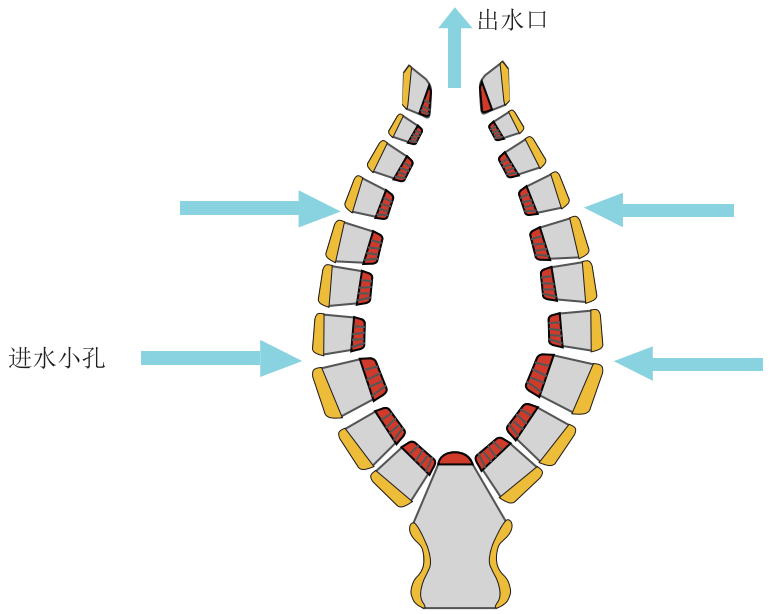


图1-18　海绵的水沟结构

2012年我国提出的“海绵城市”理念，在一定程度上就借鉴、转化和发展了海绵动物吸水和排水的原理，如图 1-19所示。将仿生结构运用到城市系统的设计中，从生态系统的角度出发，构建新的城市用水循环系统，是海绵城市的基本目标。海绵城市的工作原理是，下雨时吸水、蓄水、渗水、净水，需要时将蓄存的水释放并加以利用，实现雨水在城市中的高效、灵活和合理利用。

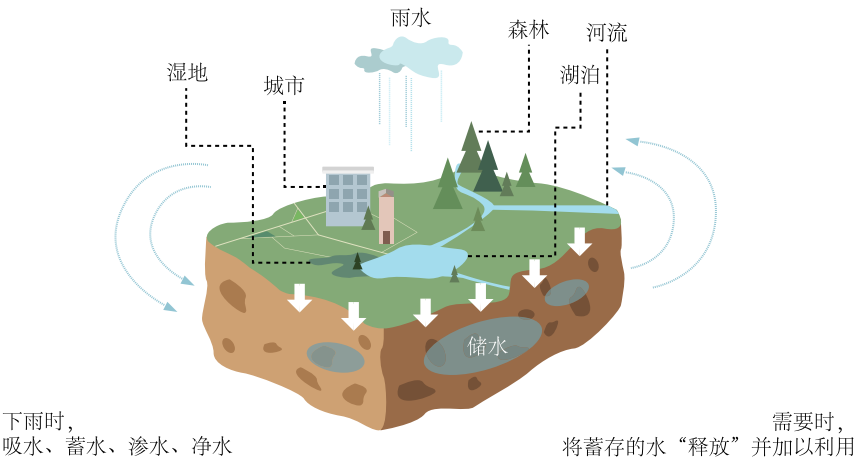


图 1-19　“海绵城市”原理示意图

3. 鸟类结构

鸟类具有独特的生理结构，为了适应飞行，鸟类进化出高度发达的骨骼与呼吸系统。

翠鸟是一种中小型水鸟，以鱼类为主要食物。为了捕获猎物，翠鸟先是在水边观测猎物的行动，然后像一支箭一样快速俯冲入水，将猎物咬在嘴里，它嘴部的曲线可以让其在入水时不激起任何水花，如图1-20所示。

产品结构设计.indd 9　2023-03-14 09:07:58

图1-20　翠鸟俯冲

日本新干线高铁车头的设计，是仿生设计领域里著名的案例。1989年日本新干线高铁的建设遇到了严重的问题，连接东京和博多的高铁线路需要穿越众多隧道，因其运行速度超过了320公里，每次列车进入隧道时，快速且巨大的压力变化让车头前端的空气产生声波，使响声震耳欲聋，对乘客和沿线居民，以及野生动物都造成了影响。负责新干线测试的工程师中津英治是一个资深鸟类爱好者，他从对鸟类活动的观察中获得启发，根据翠鸟嘴部的形态和结构优化了新干线车头的设计，如图1-21所示。新的设计降低了30%的空气阻力，解决了因压力差异变化造成的噪声问题，使列车运行速度增加了10%，还节约了15%的电力。

图1-21　优化后的新干线车头

产品结构设计.indd 10　　2023-03-14 09:07:58