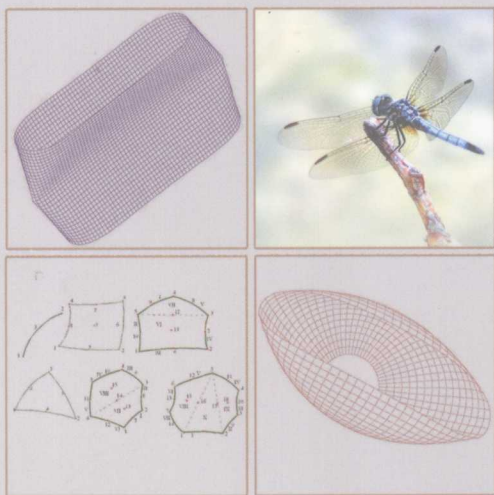


结构仿生学与新型 有限元计算理论

李忠学 著



科学出版社

www.sciencep.com

结构仿生学与新型有限元 计算理论

李忠学 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

结构仿生学已在土木建筑、航空航天、机械工程和工程力学等诸多领域得到了广泛的应用。本书介绍了作者针对蜻蜓翅膀结构开展的仿生研究在新型有限元计算理论和结构仿生设计等方面取得的新成果。内容包括:仿生学的发展现状和工程应用前景综述,以及各种高层建筑结构和大跨空间结构体系的仿生设计原理与方法;系列新型协同转动梁元和三角形、四边形曲壳单元计算理论及五种超级有限单元;常用的结构非线性平衡方程增量求解方法;蜻蜓翅膀样本试验成果及对蜻蜓翅膀结构进行有限元分析得出的启示性结论;新型空间结构体系仿生(蜻蜓翅膀)设计等。

本书可作为土木建筑、航空航天、机械工程和工程力学等相关领域的科研人员、技术人员、高等学校教师、研究生和高年级本科生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

结构仿生学与新型有限元计算理论/李忠学著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025584-6

I. 结… II. 李… III. ①仿生学-研究②有限元法-研究 IV. Q811
O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 164543 号

责任编辑:王志欣 张 丽 / 责任校对:包志虹
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年9月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年9月第一次印刷 印张:15

印数:1—2 500 字数:287 000

定价:55.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自然界中的生物大多都是经过亿万年的生物进化和自然选择后幸存下来的,它们在结构、形态和功能等方面得到了全面优化。人类完全有必要研究和借鉴这些生物物种的优点,以改善人类的生存条件和生活质量。结构仿生学是以自然界中生物体的力学特性、结构关系、材料性能等为研究内容,并尝试将生物体优良的结构性能应用于工程结构设计中,实现传统结构无法实现的功能要求。结构仿生学目前已在土木建筑、航空航天、机械工程和工程力学等诸多领域得到了广泛应用,如北京奥运会主体育场——鸟巢、国家游泳中心——水立方和国家大剧院等都采用了仿生设计。自由飞行的蜻蜓能够通过拍动翅膀实现悬停、前飞、倒飞、侧飞、急转、急升及倒着降落等各种高难度、高机动性的特技飞行动作。它的飞行结构十分精妙,四片看上去十分轻薄且完全透明的膜质翅膀,被纵横交错的网状翅脉加固后,变得既轻巧又结实,这种翅膀结构在强度、稳定性和变形性能等方面都具有不可比拟的优越性,因此,在新型空间结构体系和智能飞行器柔性机翼等的仿生设计中都可以借鉴。

蜻蜓在拍翅飞行时,其翅膀结构既产生了大的刚体平动和转动,同时也伴有较大的弹性变形。因此,要揭示其结构性能的优越性,必须采用能考虑大位移大转角变形的非线性梁元和曲壳单元对其进行有限元模拟。现有的各种非线性梁元和曲壳单元普遍都采用转角作为节点转动变量,而结构产生大位移大转角变形时,其最终的变形状态与转角施加的方式有关。在结构非线性增量平衡方程的求解过程中,必须先采用转角变量的增量构造旋转矩阵,才能对节点定向矢量进行更新。但是单元的节点弯矩和转角变量之间不存在共轭关系,因此单元切线刚度矩阵不能直接通过能量泛函对节点变量求二阶微分得到,导致目前几乎所有的基于协同转动法建立的非线性梁元和曲壳单元的切线刚度矩阵都是不对称的。于是,有人断言,采用协同转动法的所有有限单元的切线刚度矩阵必然是不对称的。此结论已引起了学术界的激烈争论,如 Teh 和 Clarke、Ritto-Corrêa 和 Camotim 以及 Izzuddin 等都曾参与了这场争论。Crisfield 撰写了两本关于非线性有限元理论的学术专著,其中非线性梁元和板壳单元都采用了协同转动法,得到的单元切线刚度矩阵都是不对称的,但 Crisfield 和 Simo 预言,如果采用一种能用简单加法直接进行增量累加的矢量型转动变量,应该能得到对称的单元切线刚度矩阵。

作者在国家留学基金的资助下,曾于 2003~2004 年在英国帝国理工学院与

Izzuddin 教授开展合作研究。首次面谈时,他给了作者一篇会议论文,内容是介绍他与其刚毕业的一位博士生研制的一种采用了矢量型转动变量的组合楼板平板单元,希望作者能在此基础上发展一种新型协同转动曲壳单元。在访问结束前,我们建立了一套 9 节点四边形协同转动曲壳单元的理论公式,并完成了有限元编程和算例验证,程序模块也已加入到 Izzuddin 教授研制的有限元分析软件 ADAPTIC 中。但当时在该单元中采用的是协调应变,在解决有些曲壳问题时可能会遇到闭锁现象,影响单元的收敛性。回国后,作者继续开展基于新型协同转动法的有限元理论与应用研究,并得到了国家自然科学基金项目“蜻蜓翅膀结构仿生及新型有限单元法研究”和浙江大学“新星”计划的资助。期间曾先后前往美国与佛罗里达大学的 Vu-Quoc 教授和西北大学的 Liu 教授在非线性的有限元理论和结构仿生学方面开展了进一步的合作研究,发展了系列新型协同转动梁元和曲壳单元。这些成果大多都已发表在国际期刊上,且已引起了国际同行的关注。作者在智能飞行器柔性机翼仿生设计方面所做的工作,也已引起了国内有关工业企业的重视。因此,作者认为有必要将这些研究成果整理成书,以使其更为系统化。

本书的主要内容安排如下:第 1 章介绍结构仿生学在国内外的研究现状和应用前景,并结合现有的仿生建筑实例及其生物原型对结构仿生学的分类及仿生原理进行阐述,然后介绍开展蜻蜓翅膀结构仿生研究的理论价值和工程应用前景,以及作者对蜻蜓翅膀开展仿生研究已取得的成果;第 2~5 章分别介绍基于新型协同转动法发展的二维、三维梁元和三角形、四边形曲壳单元的理论公式,以及为消除这些单元的膜闭锁和剪切闭锁问题所采用的各种方法,并通过丰富的典型算例,对这些单元的可靠性、收敛性和计算精度进行系统的检验;第 6 章介绍针对蜻蜓翅膀独特的网状翅脉与翅膜杂交结构,基于新型梁元和曲壳单元建立的超级单元的理论公式;第 7 章介绍前面几章算例分析中采用的求解结构非线性增量平衡方程的方法(该章部分内容引用了李元齐教授、罗永峰教授、沈祖炎教授、杨永斌教授和 Carrera 教授等的研究成果);第 8 章介绍对蜻蜓翅膀网状翅脉结构进行有限元分析得出的结论,并给出几个新型空间结构体系仿生设计方案;第 9 章对本书的内容进行总结,对今后进一步开展的研究工作进行展望。

本书的主要内容是国家自然科学基金资助项目(50408022)的研究成果,同时还得到了国家留学基金、教育部和浙江省留学回国人员科研启动基金以及浙江大学“新星”计划的资助。最近,作者又得到了航天支撑技术基金和浙江省钱江人才计划项目的资助,拟在本书内容的基础上继续开展更深入的研究工作。在课题研究或准备书稿期间,得到了沈祖炎院士、董石麟院士以及严慧、Izzuddin、Vu-Quoc、Liu、李元齐、金伟良、童根树、高博青、郑耀和袁行飞等教授的热心支持与帮助。硕

士生沈伟、田嘉盟、张戈、莫伟刚、徐晋、刘永方、叶青会、俞冬良、陶健和张小连等参与了部分内容的研究工作。此外,分析测试中心的洪健研究员和何黎平老师,以及浙江大学结构 02 班的曹毅等 26 位同学参与了本课题的蜻蜓翅膀样本试验工作。在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

李忠学

2009 年 7 月 18 日于浙江大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 结构仿生学的发展现状及应用前景	1
1.2 建筑结构仿生学的分类及工程应用实例	2
1.3 结构仿生学中的关键力学问题.....	10
1.4 蜻蜓翅膀结构仿生及新型有限元计算理论.....	11
参考文献	12
第 2 章 新型协同转动二维梁单元计算理论	14
2.1 概述.....	14
2.2 二维梁元的协同转动框架描述.....	14
2.3 二维梁元的运动学方程.....	17
2.4 二维梁元在局部坐标系下的切线刚度矩阵.....	19
2.5 二维梁元在整体坐标系下的切线刚度矩阵.....	24
2.6 算例分析.....	25
2.7 结语.....	34
参考文献	34
附录	37
第 3 章 新型协同转动三维梁单元计算理论	42
3.1 概述.....	42
3.2 三维梁元协同转动框架描述.....	43
3.3 三维梁元的运动学方程.....	47
3.4 三维梁元在局部坐标系下的切线刚度矩阵.....	49
3.5 三维梁元在整体坐标系下的切线刚度矩阵.....	56
3.6 等效节点荷载计算.....	57
3.7 算例分析.....	58
3.8 结语.....	68
参考文献	69

附录	72
第 4 章 新型协同转动四边形曲壳单元计算理论	90
4.1 概述	90
4.2 四边形曲壳单元协同转动框架描述	91
4.3 四边形曲壳单元的运动学方程	94
4.4 四边形曲壳单元在局部坐标系下的切线刚度矩阵	95
4.5 四边形曲壳单元在整体坐标系下的切线刚度矩阵	104
4.6 算例分析	105
4.7 结语	115
参考文献	115
附录	119
第 5 章 新型协同转动三边形曲壳单元计算理论	124
5.1 概述	124
5.2 三边形曲壳单元协同转动框架描述	125
5.3 三边形曲壳单元的运动学方程	128
5.4 三边形曲壳单元在局部坐标系下的切线刚度矩阵	129
5.5 三边形曲壳单元在整体坐标系下的切线刚度矩阵	143
5.6 算例分析	144
5.7 结语	158
参考文献	158
附录	162
第 6 章 新型协同转动超级有限单元	170
6.1 概述	170
6.2 四边形曲壳单元公式的改进	171
6.3 三边形曲壳单元公式的改进	175
6.4 梁元与曲壳单元杂交多边形超级单元	179
6.5 结语	187
参考文献	187
附录	188
第 7 章 结构非线性平衡方程的增量求解方法	192
7.1 概述	192

7.2 广义位移控制法	193
7.3 位移控制法	194
7.4 弧长法	195
7.5 位移扰动法和力扰动法	202
参考文献	204
第8章 蜻蜓翅膀结构性能研究及新型空间结构体系仿生设计	207
8.1 概述	207
8.2 蜻蜓翅膀样本试验	208
8.3 蜻蜓翅膀结构计算模型及有限元分析	211
8.4 新型空间结构体系仿生设计	219
8.5 结语	224
参考文献	224
第9章 总结与展望	227
9.1 本书内容总结	227
9.2 需进一步开展的研究工作	228

第 1 章 绪 论

1.1 结构仿生学的发展现状及应用前景

自然界中现存的生物物种, 大多都是经过漫长的生物进化和自然选择后幸存下来的。优胜劣汰、适者生存, 这一生物生存规律, 一方面使优良的生物物种保留了下来; 另一方面也促进了这些物种不断地进化, 以适应千变万化的自然环境, 因此许多生物物种在结构、形态和功能等方面都得到了全面优化^[1]。人类完全有必要研究和借鉴这些生物物种的优点, 以改善人类的生存条件和生活质量。Gayley 在 18 世纪首次提出了“仿生学 (bionics)”的概念^[2]; 1960 年 9 月在美国俄亥俄州召开了首届仿生学研讨会, 并进一步明确了仿生学的概念和定义; 文献 [3] 对仿生学进行了更确切的定义, 即仿生学是研究生物系统的结构、性状、原理、行为以及相互作用, 从而为工程技术提供新的设计思想、工作原理和系统构成的技术科学, 是一门生命科学、物质科学、数学与力学、信息科学、工程技术以及系统科学等学科的交叉学科。仿生学为科学技术创新提供了新思路、新原理和新理论。虽然仿生学的概念出现还不到 300 年, 但人类通过仿生途径进行发明创造却已有悠久的历史, 如古人模仿落叶浮水漂流而建造了船, 从蜘蛛织网捕捉昆虫中受到启发而发明了渔网, 原始人的“巢居”则是对鸟窝的模仿等。仿生学目前已在土木建筑、航空航天和机械等诸多领域得到了广泛应用。羽茅草和禾本科植物的长叶往往卷曲成筒形或壳形, 具有天然的空间结构形态, 在长期的进化过程中它们形成了最合理、最稳定的结构形态。自第二次世界大战以来, 各国为举办奥林匹克运动会而建造的许多体育馆都采用了薄壁空间结构; 仿效蜘蛛网, 人们设计出了最经济的悬索结构和帐篷结构; 生物的某些机体依靠细胞内的液压或气压支承, 又以其压力的增减来调整机体的刚柔变化, 基于这种机体功能仿生, 人类发展了现代充气 and 充液建筑^[4]。Wright 兄弟由鸟类滑翔得到启示而发明了飞机^[5,6]; 直升机设计师们由蜻蜓翅膀前边缘的翅痣能消除飞行过程中翅膀的震颤受到启发, 解决了直升机飞行过程中由于剧烈振动而导致的机翼断裂难题^[5,7~10]; 模仿动物的走、跑、飞、游等运动, 人类发明了智能机器人和昆虫跑步机^[11]。仿生学的应用极为广泛, 已涉及所有的技术领域和大多数应用领域。下面将重点介绍仿生学在建筑结构领域的应用, 并结合具体的工程实例来阐明建筑结构仿生的原理与方法, 为今后进一步开展建筑结构仿生研究和结构仿生设计提供依据。

1.2 建筑结构仿生学的分类及工程应用实例

建筑仿生学是仿生学的一个重要分支,它是**以某些生物体的功能组织和形态构成规律为研究对象,探寻自然界中科学合理的建造规律,以丰富和完善建筑设计,促进建筑形体结构以及建筑功能布局等的高效设计和合理形成,使人类创造出更符合自然规律与人性要求的建筑的一门学科**^[12~15]。建筑仿生不仅是建筑创新的有效手段,也是建筑与自然和谐共生的实现途径。仿生建筑从形态、功能、材料、建筑环境和结构等方面模仿自然界中某些生物的特性,使建筑更实用、更美观、更节能、更生态、可持续性更强。它们采用的仿生学原理可归为形态仿生、功能仿生、材料仿生和结构仿生等。当然,有时也会在同一建筑中综合运用多种仿生原理。下面将结合实例对形态仿生、功能仿生、材料仿生和结构仿生进行介绍,重点将放在结构仿生上,特别是空间结构仿生。

1.2.1 形态仿生

形态仿生是在研究自然界生物体的外部形态特征及其象征寓意认知的基础上,以自然界生物机体的形态为原型,进行艺术加工和再创造的一种设计手段。其目的是为了**满足人类的审美需求,拉近建筑与人的距离。它要求功能、结构与新的形态之间有机融合,是一个超越模仿而升华为创造的过程,也是创新的一种有效方法**^[16]。如芝加哥玛丽娜城大厦的外形酷似玉米(见图 1.1),又被称为“玉米楼”。由于其所在的州盛产玉米,这两座形神兼备的玉米双塔楼不仅产生意想不到的宣传效果,也对周围的环境起到重要的点缀作用,从而成为芝加哥城市标志性建筑之一。



图 1.1 芝加哥玛丽娜城大厦及其生物原型——玉米

1.2.2 功能仿生

功能仿生是通过研究生物体在适应环境过程中自然形成的高效低耗、自适应应变等合理的生理功能,应用类推等方法,在建筑设计中实现新颖、节能、相互协调的建筑功能^[12]。如 Kenzo 于 1966 年设计的日本山梨县文化会馆就是一座新陈代谢派的著名作品(见图 1.2)。它的空间组合是模仿植物的新陈代谢作用,设计了一个个垂直的圆形交通塔,内为电梯、楼梯与各种服务设施,所有办公空间则建立在各塔间,根据建筑功能需要能不断扩建或减少,这样可以使得建筑具有自适应应变的类生命体功能。

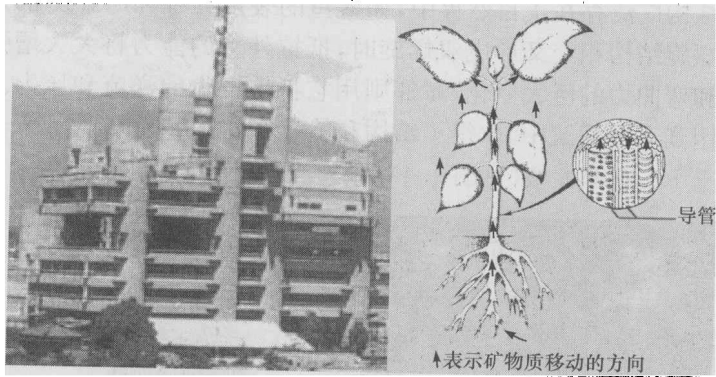


图 1.2 山梨县文化会馆及其生物原型——植物新陈代谢之营养运输

1.2.3 材料仿生

材料仿生则是研究生物材料在组织结构等方面的特征和优越性能,进而设计和制造出具有特殊强度、韧性及类生物特性的新材料。如人们从蜂巢中获得启示,而发明了蜂窝泡沫混凝土、泡沫塑料和泡沫玻璃等(见图 1.3)。这些内含蜂窝状孔隙的仿生材料作为建筑材料既隔热又保温,且使结构既轻巧又美观^[17]。

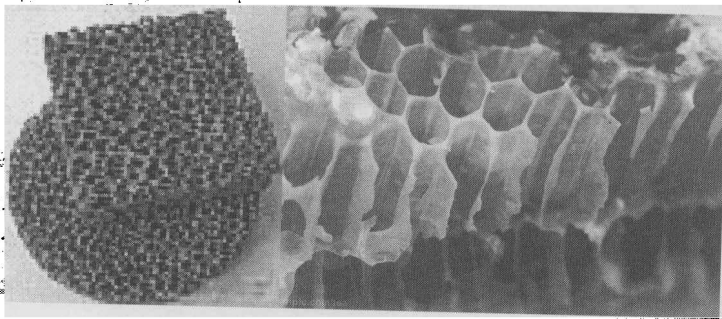


图 1.3 蜂窝泡沫材料及其生物原型——蜂巢

1.2.4 结构仿生

建筑结构仿生是从自然界物种的力学特性、结构关系、材料性能等汲取灵感,应用于建筑的结构设计中,实现传统结构无法实现的功能要求。合理地模拟生物体构造的建筑结构不仅用料省、强度高、刚度大、稳定性好,而且极富建筑艺术美。建筑结构仿生已有悠久的历史,在工程领域也已得到了广泛的应用。建筑结构仿生可分为高层建筑结构仿生和空间结构仿生。

1. 高层建筑结构仿生

双螺旋结构广泛存在于自然界中,如鲨鱼的表皮纤维和海虾窝都是双螺旋结构。当两个螺旋结构相交又形成双螺旋时,抵抗外力的能力将大大增强。鲨鱼借此承受体压和弯曲力的巨大变化,海虾则用它抵抗巨大的洋流和压力。人类将双螺旋结构运用到高层建筑中,取得了结构和美学上的双重效果,东京千年塔和福斯特设计的瑞士 RE 总部大楼(见图 1.4)都是成功的范例^[14]。

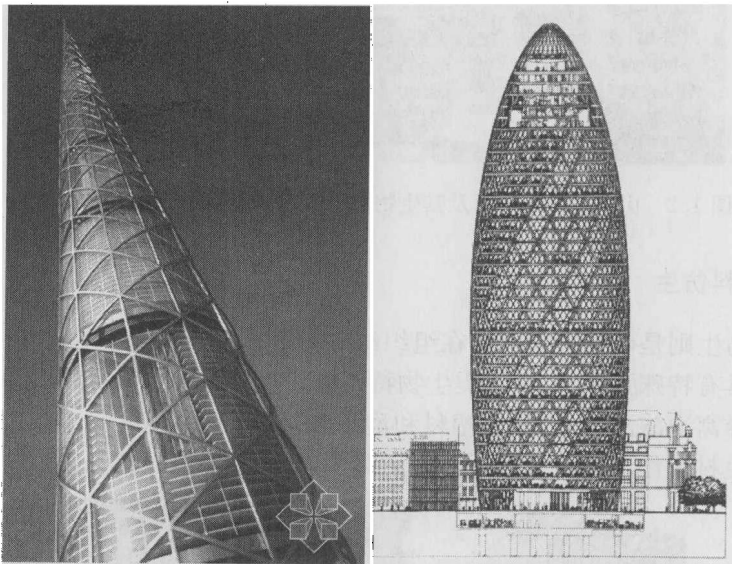


图 1.4 东京千年塔(左)及瑞士 RE 总部大楼(右)

竹子是空心的,还生有竹节,既减轻了自重,又具有较大的抗弯能力,同时竹节是抵抗横向剪切的关键,是增加竹子强度的有机部分。受竹子这种结构的启示,在高层建筑间隔一定高度时设置加强层,形成“竹节”,提高了建筑物的侧向刚度,这些“竹节”还往往与筒体结构结合,增加了结构的整体刚度。图 1.5 所示的上海金茂大厦就利用了竹子的这种优良的结构。



图 1.5 上海金茂大厦及其生物原型——竹子

2. 空间结构仿生

空间结构已被广泛应用于各种大跨度公共建筑中,其结构形式包括拱结构、薄壳结构、网架结构、网壳结构、折板结构、索结构和膜结构等,在自然界中也可以找到它们的生物原型。下面将结合典型的工程实例及其生物原型,分析它们的结构仿生原理。

1) 拱结构

曾生活在中生代的恐龙体形十分庞大,其身体上部的骨架犹如一座拱桥,将其笨重的躯体自重传递到其粗壮的四肢上。工程中常用的拱结构正是借鉴了恐龙骨架的结构特征,它能够充分发挥砖石、混凝土或泥土等脆性材料的抗压性能,实现梁式结构难以实现的大跨度^[18,19]。建于1320年的巴黎圣母教堂(见图1.6),采用的就是拱形结构,其外观宏伟,内部空间大,且光线充足。

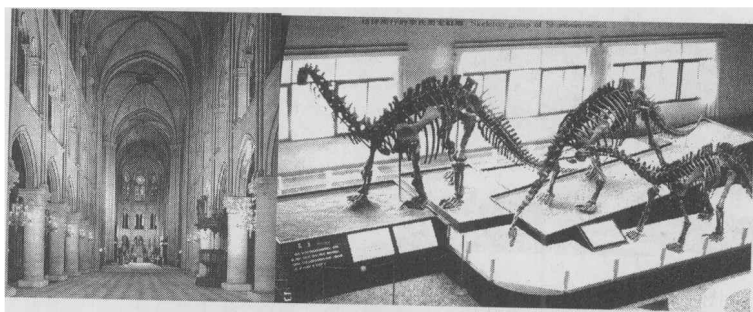


图 1.6 巴黎圣母教堂及其自然界原型——恐龙拱形骨架

2) 薄壳结构

自然界的各种蛋壳、贝壳、乌龟壳、海螺壳以及人的头盖骨等都是一种曲度均匀、质地轻巧的薄壳结构。这种结构的表面虽然很薄(如鸡蛋壳的厚跨比仅为 1:120~1:150),但利用其弧状曲面结构能分散外部作用的特性,可以显著提高其承载能力。它能以极少的材料创造较大的空间,由此形成了一种仿生学原理,即薄壳原理。

法国巴黎国家工业与技术中心(CNIT)大厦建于 1958 年,它的整体结构造型就像一个倒扣的贝壳,其造型非常独特(见图 1.7)。这幢纯现代主义的建筑有当时全世界最大的水泥苍穹,是只有三个支撑点的曲壳建筑,其内部以钢索张力拉住,顶下所覆盖的面积几乎可罩住巴黎协和广场。虽然法国巴黎国家工业与技术中心陈列大厅跨度较大,但它采用的混凝土壳层的厚度仅 12cm。

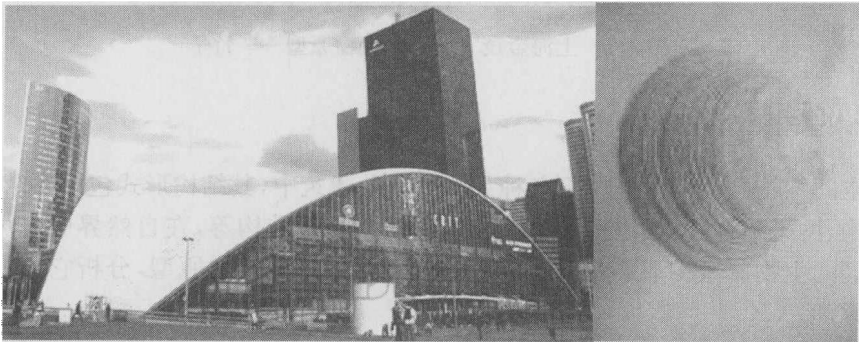


图 1.7 巴黎国家工业与技术中心及其自然界原型——贝壳

被称为“世界上最有魅力的候机楼”的美国纽约肯尼迪机场候机大楼(见图 1.8),它的外形似一只展翅欲飞的大鸟。其屋面为四瓣组合式薄壳,由下部的 Y 形柱支撑,中间有缝隙采光,整个屋面很像拼合的人的头盖骨。这一别出心裁的设计,既解决了自由曲线造型的难点,在结构与形式上也达到了有机地融合^[13]。

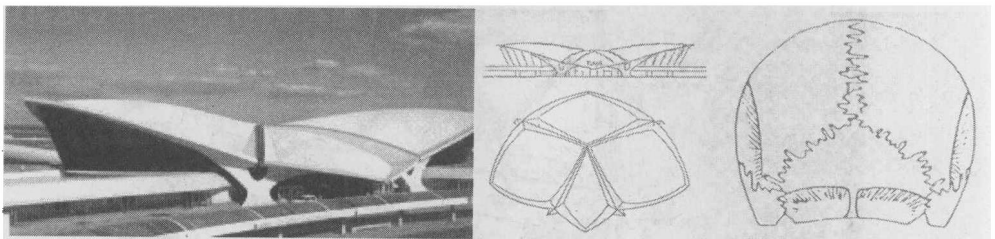


图 1.8 纽约肯尼迪机场候机大楼及其自然界原型——人的头盖骨

3) 网架结构

王莲为世界上最大的睡莲科植物,其叶片直径可达 3m,最大承重可达 60kg (见图 1.9)。王莲之所以具有如此大的支撑力,是因为其叶片背面具有排列成肋条状的粗壮叶脉,且支叶脉相互交织呈网状,使整个组织成为一个不易折断的受力工作整体。借鉴王莲在受力性能方面的优越性,人们提出了一种王莲脉络网架结构形式(见图 1.9)^[20]。

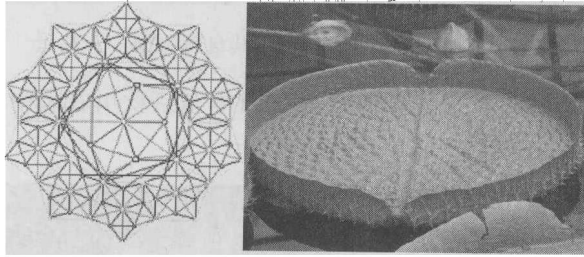


图 1.9 王莲脉络网架结构形式及其自然界原型——王莲

蜜蜂的巢房是一种轻巧的六边形网格状结构,与其他结构形式相比,它具有结构稳固、经济性好的优点。受蜜蜂巢房结构的启发,人们发明了一种新型蜂窝形三角锥网架结构体系(见图 1.10)。它是一种杆件数和节点数相对较少的网架类型,不仅能使建筑造型美观,还便于施工。

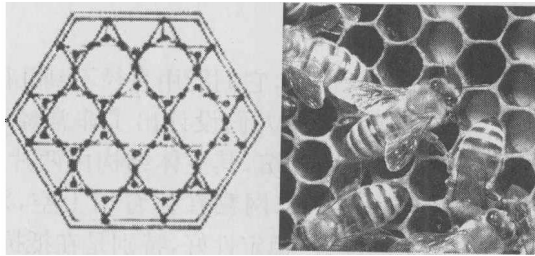


图 1.10 蜂窝型三角锥网架及其自然界中的原型——蜂房

4) 网壳结构

网壳结构的受力性能与壳体相似,它借鉴了薄壳结构的受力机理,还兼有杆系结构经济性好、便于施工的优点,是一种综合性能较好的结构体系。由 Andreu 设计的北京国家大剧院主体结构就是一种双层肋环体系网壳。它的外形酷似 1/2 蛋壳,经湖水倒映后就像一个庞大的水中“巨蛋”(见图 1.11)^[21]。

5) 折板结构

椰子树呈“V”形折叠的长叶即使遭遇狂风暴雨也很少折断。参照这种优良的“V”形结构,人们发展了折板结构。这类结构通过薄壁板的空间组合,使其横向抗

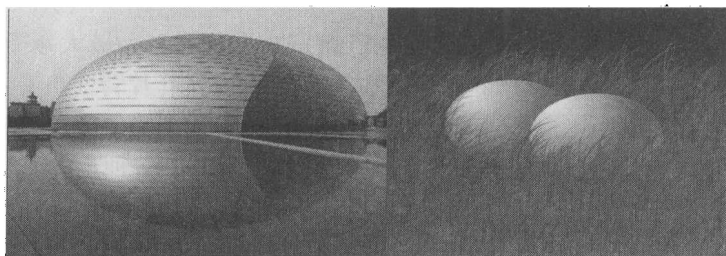


图 1.11 北京国家大剧院及其自然原型——鸡蛋

弯和抗剪能力都大为增强。建于 1993 年的日本东京秋川农园中心,就采用了折板屋顶(见图 1.12)。

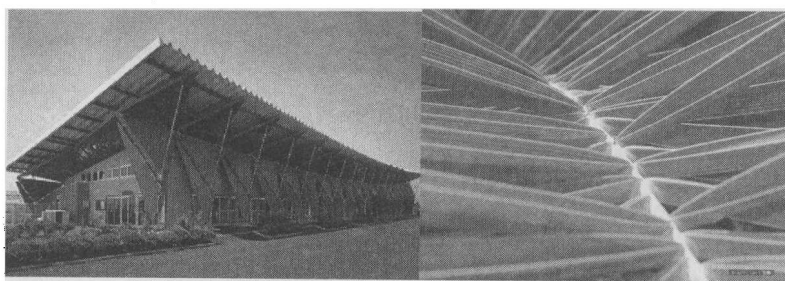


图 1.12 东京秋川农园中心及其自然界原型——椰子的“V”形叶子

6) 悬索结构

蜘蛛是自然界中最杰出的编织高手,它们能用直径不到几微米的蛛丝,编织出直径可达几米的蛛网。受蛛网的启发,人们设计出了非常经济的悬索与帐篷结构^[22]。建于 1989 年的北京市朝阳区体育馆,其主体结构由两片索网和中央支撑结构组成,它的索网就像一张硕大的蜘蛛网黏在体育馆上空,承担着全部屋盖荷载(见图 1.13)。这种结构体系刚度大、稳定性好,特别是在抵抗集中力或局部荷载时,变形较小^[23]。



图 1.13 北京市朝阳区体育馆及其自然原型——蜘蛛网