

[英] 彼得·斯尔沃 [英] 威廉·麦克利恩 [英] 彼得·伊凡斯 著

陈志华 刘红波 译

国家“十二五”重点图书出版规划项目

建筑师 必读： 结构工程

[英] 彼得·斯尔沃 [英] 威廉·麦克利恩 [英] 彼得·伊凡斯 著
陈志华 刘红波 译

建筑师 必读： 结构工程

图书在版编目(CIP)数据

建筑师必读：结构工程 / (英) 斯尔沃(Silver,P.) , (英) 麦克利恩 (McLean,W.) , (英) 伊凡斯 (Evans,P.) 著 ; 陈志华, 刘红波译. —武汉：华中科技大学出版社, 2015.9
ISBN 978-7-5680-0765-8

I. ①建… II. ①斯… ②麦… ③伊… ④陈… ⑤刘… III. ①结构工程—教材 IV. ①TU3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第064327号

Text ©2013 Peter Silver, Will McLean and Peter Evans

Translation ©2014 Huazhong University of Science and Technology Press

This book was produced and published in 2013 by Laurence King Publishing Ltd., London. This translation is published by arrangement with Laurence King Publishing Ltd. For sale/distribution in The Mainland (part) of the People's Republic of China (excluding the territories of Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only and not for export therefrom.

简体中文版由英国劳伦斯·金公司授权华中科技大学出版社在中华人民共和国境内(香港、澳门和台湾除外)出版、发行。

湖北省版权局著作权合同登记 图字：17-2015-064号

建筑师必读：结构工程

[英] 彼得·斯尔沃
[英] 威廉·麦克利恩
[英] 彼得·伊凡斯 著
陈志华 刘红波 译

出版发行：华中科技大学出版社（中国·武汉）
地 址：武汉市武昌珞喻路1037号（邮编：430074）
出 版 人：阮海洪

责任编辑：刘锐楨
责任校对：杨 睿

责任监印：秦 英
装帧设计：张 靖

印 刷：天津市光明印务有限公司
开 本：969 mm × 1270 mm 1/16
印 张：12.75
字 数：315千字
版 次：2015年9月第1版第1次印刷
定 价：75.00元



投稿热线：(010)64155588-8815

本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换

全国免费服务热线：400-6679-118 竭诚为您服务

版权所有 侵权必究

[英] 彼得·斯尔沃 [英] 威廉·麦克利恩 [英] 彼得·伊凡斯 著
陈志华 刘红波 译

建筑师 必读： 结构工程

图书在版编目(CIP)数据

建筑师必读：结构工程 / (英) 斯尔沃(Silver,P.) , (英) 麦克利恩 (McLean,W.) , (英) 伊凡斯 (Evans,P.) 著 ; 陈志华, 刘红波译. —武汉: 华中科技大学出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5680-0765-8

I. ①建… II. ①斯… ②麦… ③伊… ④陈… ⑤刘… III. ①结构工程—教材 IV. ①TU3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第064327号

Text ©2013 Peter Silver, Will McLean and Peter Evans

Translation ©2014 Huazhong University of Science and Technology Press

This book was produced and published in 2013 by Laurence King Publishing Ltd., London. This translation is published by arrangement with Laurence King Publishing Ltd. For sale/distribution in The Mainland (part) of the People's Republic of China (excluding the territories of Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only and not for export therefrom.

简体中文版由英国劳伦斯·金公司授权华中科技大学出版社在中华人民共和国境内(香港、澳门和台湾除外)出版、发行。

湖北省版权局著作权合同登记 图字: 17-2015-064号

建筑师必读：结构工程

[英] 彼得·斯尔沃
[英] 威廉·麦克利恩
[英] 彼得·伊凡斯 著
陈志华 刘红波 译

出版发行：华中科技大学出版社（中国·武汉）

地 址：武汉市武昌珞喻路1037号（邮编:430074）

出 版 人：阮海洪

责任编辑：刘锐楨

责任监印：秦 英

责任校对：杨 睿

装帧设计：张 靖

印 刷：天津市光明印务有限公司

开 本：969 mm × 1270 mm 1/16

印 张：12.75

字 数：315千字

版 次：2015年9月第1版第1次印刷

定 价：75.00元



投稿热线：(010)64155588-8815

本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换

全国免费服务热线：400-6679-118 竭诚为您服务

版权所有 侵权必究

建筑师必读：结构工程

Structural
Engineering
for
Architects:
A Handbook

彼得·斯尔沃

Pete Silver

威廉·麦克利恩

Will McLean

彼得·伊凡斯

Peter Evans

序言

在我17岁那年，别人说我永远无法成为一名建筑师，因为他们认为我不可能彻底理解建筑结构。正因为如此，我怀着愤愤不平的心情开始学习建筑学。我认真地参加所有关于结构工程的课程，实际上是任何一门关于工程学的课程。然后我发现，它们竟然非常容易理解，而且它们十分有趣。之后我爱上了工程学这个专业，并不是因为我已经彻底理解它，但是那又有什么关系呢？就像你完全不必要“理解”爱情一样。

这本书就像你收到的众多情书之一，你只需要决定是否对其作出回应。我多么希望在我年轻时能够遇到这本书，这样我就不会浪费大量精力去阅读那么多无趣的书籍了。

你可以决定拿起这本书细细阅读，或是弃之不顾，但自从这本书面世以来，再也没有人会说“你永远都不会彻底理解结构”了。相信我，这本书能够带领你以一个崭新的视角去理解我们居住的这个星球。总而言之，它非常有趣！

伊娃·吉里克纳

2011年6月

这本书的目的是使学习建筑的学生培养一种对于结构工程直观的理解。从长远来看，这样便于他与结构工程师进行有效的交流。同时希望这本书可以作为大家在学习建筑学和工程学时的有价值的参考书和资料。

在乔治·博阿夏1965年出版的《里卡尔多·莫兰迪的混凝土建筑》一书中，意大利结构工程师莫兰迪讨论了建筑师和结构工程师之间艰难的关系，但是他并未在这个没有意义的争论中选择立场。更重要的是，莫兰迪提到，“在一定限制条件下，不论是在功能方面、结构方面，还是经济方面，人们总是能够用多种同样有效的方法解决问题”，并且“不管是有意还是无意，人们对外表细节的关注（与结构计算要求无太大联系）超越了对单纯的技术层面的关注，促进了艺术方面的创作”¹。在这些论述中，莫兰迪不偏袒有天赋的结构工程师或者是耀眼的建筑师，他只是关心工作的趣味性，哪怕这些工作看起来异常简单或者并没有想象中的令人印象深刻。

在1956年出版的《结构》一书中，皮埃尔·路易吉·奈尔维阐述了等压肋的应用，这种肋的结构形式与通过当时最新的光弹性成像技术观测到的应力分布相符合。最近，通过计算机图形输出这种强大到难以置信的技术，有限元分析的具体计算结果实现了可视化，给人们更加直观的认识。结构工程师蒂莫西·卢卡斯在此基础上向前

更进一步，他的数字物理反馈系统使结构工程师能够通过一个放大的物理模型直观地分辨和研究结构的受力状态。在科技发展史中，物理实验一直是技术发展和工程设计决策中的重要组成部分。同样，我们借鉴自然界中的形态和前人未公开或者被遗忘的发明来研究新的设计、工程、材料和操作方案，并经过漫长的过程和不断的科学化后形成了仿生学领域。

本书分为以下四个部分：

第一部分——自然界中的结构，介绍了自然界中一些常见的结构形式。

第二部分——理论，概述了被广泛应用于建筑环境中的结构和结构体系的适用理论。

第三部分——结构原型，介绍了研究和测试结构形式的方法，包括手工模型制作、足尺模型及计算机分析建模。

第四部分——实例分析，介绍了从19世纪中期至今的结构工程和建筑形式在发展演变过程中的代表性建筑。

¹ Boaga, G., and Boni, B., *The Concrete Architecture of Riccardo Morandi*, London: Alex Tiranti, 1965, p. 10.

1 自然界中的结构	8
1.1 树	10
1.2 蜘蛛网	12
1.3 蛋壳	14
1.4 肥皂泡	16
1.5 人体	18
2 理论	22
2.1 结构的一般理论	24
2.1.1 引言	24
2.1.2 外荷载	25
2.1.3 内力	26
2.1.3.1 轴力	26
2.1.3.2 剪力	26
2.1.3.3 弯曲	27
2.1.3.4 扭转	27
2.1.3.5 静力平衡	28
2.1.3.6 简要分析	30
2.1.3.7 常用梁的计算公式	36
2.1.4 材料性质	40
2.1.4.1 应力	40
2.1.4.2 应变	44
2.1.4.3 钢材性能	47
2.1.4.4 混凝土性能	48
2.1.4.5 木材性能	49
2.1.5 截面特性	50
2.1.5.1 弯曲	50
2.1.5.2 轴向受压	52
2.1.5.3 挠度	55
2.1.6 设计合理性	56
2.1.6.1 竖向挠度	56
2.1.6.2 侧向挠度	57
2.1.6.3 振动	57
2.1.7 结构	58
2.1.7.1 结构分类	58
2.1.7.2 稳定性	63
2.1.7.3 塔楼	71
2.2 结构体系	73
2.2.1 引言	73
2.2.2 结构材料评估	74
2.2.3 结构构件	77
2.2.3.1 梁体系	78
2.2.3.2 混凝土板体系	84

3 结构原型	86
3.1 找形分析	88
3.2 加载试验	92
3.3 可视化的力	104
4 案例研究	110
4.1 概述	112
4.2 1850—1949	114
4.2.1 维欧勒·勒·杜克的创新的工程方法	114
4.2.2 圣潘克拉斯火车站顶棚	116
4.2.3 埃菲尔铁塔	118
4.2.4 福斯铁路桥	120
4.2.5 全俄展览中心	122
4.2.6 四面体塔	124
4.2.7 马加季尼吉拉罗利仓库	126
4.2.8 萨苏埃拉竞技场	128
4.3 1950—1999	130
4.3.1 伊利诺伊理工大学皇冠厅	130
4.3.2 洛斯马纳提阿勒斯餐厅	132
4.3.3 英格兰混凝土薄壳结构	134
4.3.4 短程线穹顶	136
4.3.5 雷福尔宫（雷波尔宫）	140
4.3.6 瑞士混凝土薄壳结构	144
4.3.7 杰弗逊国土扩张纪念碑（大拱门）	150
4.3.8 Maxi/Mini/Midi体系	152
4.3.9 张拉整体结构	156
4.3.10 慕尼黑奥林匹克体育场	158
4.3.11 比尼穹顶——可充气模板	162
4.3.12 尼泰罗伊当代艺术博物馆	164
4.3.13 结构玻璃	166
4.4 2000—2010	172
4.4.1 安大略艺术与设计大学的扩建，以夏普设计中心为代表	172
4.4.2 阿托拉斯建筑	176
4.4.3 海特楼	178
4.4.4 天际屋	182
4.4.5 神奈川工科大学车间	186
4.4.6 米兹河段步行桥	190
4.4.7 蓬皮社—梅斯	194
4.4.8 哈利法塔	198

1 自然界中的结构

1.1 树

自然界中存在超过80000种树木，从只有几厘米高的北极柳，到能长到百米高的红杉木，它们覆盖了地球上30%的陆地。

结构

树木的形状和大小繁多，但基本结构都相同。树干是树木的中心支柱，它支撑着由大大小小的树枝组成的框架，这个框架叫作“树冠”。据统计，所有种类的树木的树枝体系数量都是有限的（大约30个）。树枝外部覆盖着一层树叶。树木通过根系固定在大地上，根系伴随着树木地上部分的生长相应地在土壤中延伸和生长。

树框架的所有组成部分——树干和大大小小的树枝都是在节点上柔性连接的悬臂结构，因此它们都具有弹性性能。

硬木和软木：指根据木材来源不同而区分的树木种类。硬木来自于落叶林，软木来自于针叶林。尽管硬木的密度和硬度通常比软木更高，但是也有例外，如巴尔沙木。

树的生长

在树的生长过程中，树叶所制造的大部分能量被运输并用于形成非生产性组织（例如树干、树枝和树根）。树木的绝大部分（最多可达99%）由非活体组织构成，新组

织仅生长在树木上很少的几个部分：树皮内侧、树枝和根系的尖端。在形成层和树皮之间，筛管不断地生长，它负责将营养从树叶运输至根部。所有的木质部都由内部形成层生成，所有的营养运输细胞都由外部形成层生成。

通过每年在形成层中生成一层新的木质部，树干得以生长。每层新生的木质部形成了一个可见的环，环的结构会随着季节而发生变化。一个环由浅色部分（春季生长）和深色部分（夏末/秋季生长）组成，它代表了树木一年的生长。用于工程建设的木材的选取应基于木板内应力平衡的原则。如果树木生长在山的一侧，那么树木某一侧的生长将会较为旺盛，从而应力汇集于此，变为坚硬的应压木，这最终会导致板材由于扭曲或者弯曲而产生翘曲。

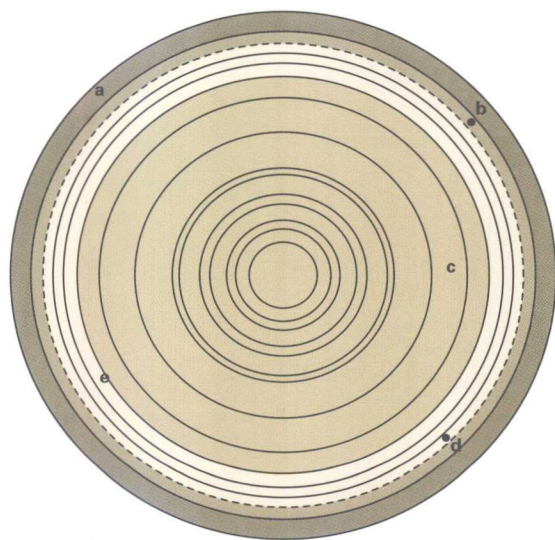
抗风性

虽然树木的弯曲性能各自不同，但是它们通常能够通过弯曲来抵御强风。首先小树枝会高速摆动，紧接着大树枝会较慢速晃动，最后树干会轻微摇摆，风能在这个过程中被逐渐吸收。树叶的表面积越大，在风荷载下则越容易被吹落。



1
树的基本结构

- 2
树干截面
a. 外树皮
b. 内树皮
c. 心材
d. 形成层
e. 边材



2

1.2 蜘蛛网

材料性质

蜘蛛丝，由复杂的蛋白质分子构成。这些具有不同性质的分子链交织在一起形成能量吸收能力极强的材料。人面蛛（Nephila）的蛛丝是人类已知的强度最高的自然纤维。

蛛丝结构的普遍形式是一组自组装为 β 折叠结构的氨基酸序列。这些片层堆叠形成晶体，而结构的其他部分构成非晶体区域。正是由于坚硬的晶体部分和弹性的非晶体区域之间相互作用，才赋予了蛛丝非凡的特性。这些区域氢键的断裂使得蛛丝具有极高的韧性。蛛丝的抗拉强度大于相同质量的钢材的抗拉强度，而且圆蛛的蛛丝在断裂前可以伸长30%至40%。

蛛丝的形成

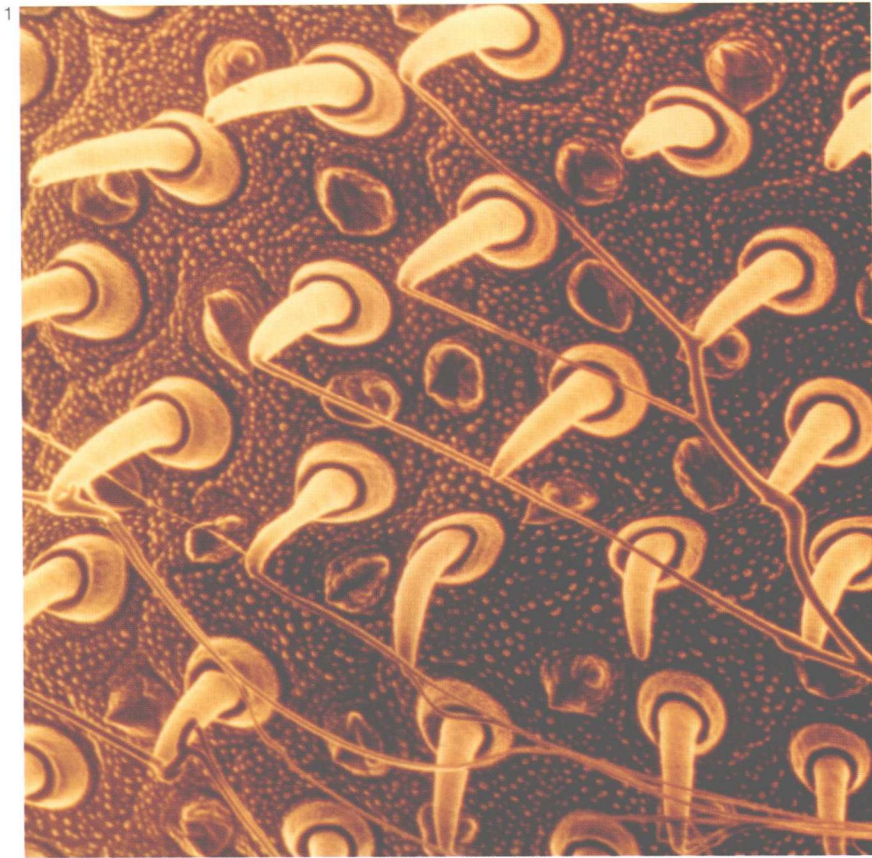
分泌蛛丝的腺体位于蜘蛛腹部的前端。蜘蛛使用不同类型的腺体分泌不同的蛛丝。一些蜘蛛在一生中可以分泌多达八种的蛛丝。

蛛网的设计和制造

蜘蛛通过放射出具有良好黏性的蛛丝使其能随风摇摆，从而跨越间距。当蛛丝的远端附着在合适的表面上时，蜘蛛会小心翼翼地沿着蛛丝走，同时用第二根蛛丝来加强这根丝线。这一过程会一直重复，直到丝线的强度足够支撑其余蛛网。接着，蜘蛛会增添许多径向丝线来编织Y形网，同时保证径向丝线间距足够小，以确保其自身能够通过。这意味着径向丝线的数量直接取决于蜘蛛的大小和整个蛛网的尺寸。之后，蜘蛛由内而外编织无黏性的、间距很大的螺旋形分布的临时丝线，以使其在织网过程中能绕蛛网移动。然后，蜘蛛会由外而内地用另一种间距更小的黏性丝线将之前的螺旋分布的丝线替换掉。

抗冲击性

蛛丝的性质使其具有很强的抗拉性能，同时也允许一定的弹性变形。整张蛛网在完成之后处于张拉状态，但是，纤维的弹性使其能够吸收高速飞行的昆虫所造成的冲击。在冲击下，蛛网会发生局部振动，振动越快，其抗冲击性越强。蛛网这种储存能量并通过纤维变形使能量耗散的性能，使得蜘蛛能够通过蛛网吸收其他生物动能，进而拦截和捕捉猎物。

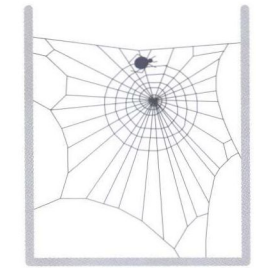
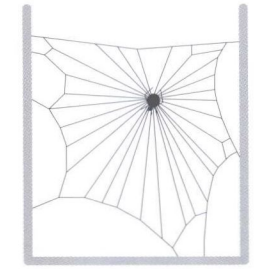
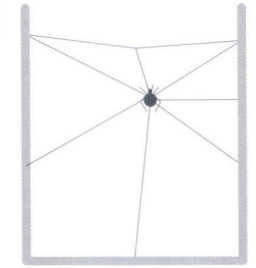
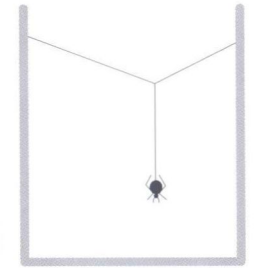
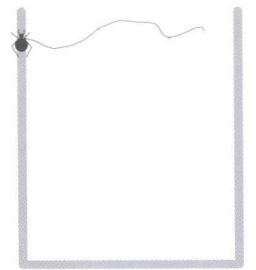


1 制造蛛丝的腺体

2 蛛网编织过程

3 一个巨大的蛛网

4 航空母舰飞行甲板上的拦阻着陆装置，飞机附着其上的制止装置的抗冲击原理与蛛网类似



2

4

1.3 蛋壳

不同物种蛋壳的结构差别很大，但是从本质上讲，它们都是由矿物晶体而非细胞所构成的基质（通常为化合物，例如碳酸钙），而且较硬的蛋壳比较软的蛋壳矿化程度更高。

鸟蛋——材料性质

众所周知，鸟蛋壳是硬质的。它们的蛋壳中包含95%的碳酸钙晶体，有机物（蛋白质）基质保证了它们稳定存在。若没有蛋白质，这种晶体结构就会过于脆弱以至于无法保持其形态。

壳的厚度是决定其强度的主要因素。有机基质将碳酸钙晶体连接在一起，在壳体形成过程中，它的结构会影响壳体的强度：它不断沉积使得晶体（碳酸钙）成分的尺寸和组织趋于完美，从而形成较高的强度。蛋壳大部分是由碳酸钙长链构成的。

标准的鸟蛋壳是多孔结构，外表面覆盖着一层角质层（鸡蛋壳中称为“bloom”），起到防水和抵御细菌的作用。

平均来算，母鸡形成蛋壳的过程大约需要20个小时。

强度和形状

鸟蛋结构的抗压强度较高而抗拉强度很低。当力作用于蛋壳顶部时，蛋壳外层受压而内层受拉。因此，蛋壳能够承受来自母鸡的荷载。虽然雏鸡非常弱小，但是通过在蛋壳内侧施加点荷载，它们可以无需外界帮助破壳而出（雏鸡的卵齿可用来钻洞）。

蛋壳的拱形或者穹顶形状使得它可以承受拉力。

蛋壳穹顶结构的强度取决于它的具体的几何形状，尤其是它的曲率半径。尖拱所需的抗拉钢筋少于半圆拱。这表明大曲率穹顶（曲率半径较小）的强度高于小曲率穹顶（曲率半径较大）。这就是为什么从两侧挤压鸡蛋要比从两端挤压更容易使它破碎。多伦多安大略科学中心的工作人员曾成功地让一个鸡蛋完好地承受90kg的人的重量。