

结构 是什么？

[英] J. E. 戈登 / 著 李轻舟 / 译 刘新宇 / 审校

(J. E. Gordon)

Structures

理解伟大建筑的巧夺天工之处
探究历史上诸多灾难性事故的背后原因

Or Why Things Don't Fall Down

“这是一本关于结构设计的非常好的入门书。” —— 埃隆·马斯克

中信出版集团



Or Why Things Don't Fall Down

结 构 是 什 么 ？

[英] J. E. 戈登 / 著 (J. E. Gordon)

李轻舟 / 译 刘新宇 / 审校

图书在版编目 (CIP) 数据

结构是什么? / (英) J. E. 戈登著; 李轻舟译. --
北京: 中信出版社, 2019.8

书名原文: Structures: Or Why Things Don't
Fall Down

ISBN 978-7-5217-0654-3

I. ①结… II. ①J… ②李… III. ①结构力学-普及
读物 IV. ①O342-49

中国版本图书馆CIP数据核字 (2019) 第105186号

Structures: Or Why Things Don't Fall Down by J. E. Gordon

Text Copyright © J. E. Gordon, 1978

First published in Great Britain in the English Language by Penguin Books Ltd., 1978

Copies of this translated edition sold without a Penguin sticker on the cover are unauthorized and illegal.

Published under licence from Penguin Books Ltd.

Penguin(in English and Chinese) and the Penguin logo are trademarks of Penguin Books Ltd.

Simplified Chinese translation copyright © 2019 by CITIC Press Corporation

ALL RIGHTS RESERVED.

本书仅限中国大陆地区发行销售

封底凡无企鹅防伪标识者均属未经授权之非法版本

结构是什么?

著 者: [英] J. E. 戈登

译 者: 李轻舟

出版发行: 中信出版集团股份有限公司

(北京市朝阳区惠新东街甲4号富盛大厦2座 邮编 100029)

承印者: 中国电影出版社印刷厂

开 本: 880mm × 1230mm 1/32

插 页: 12

印 张: 12

字 数: 256千字

版 次: 2019年8月第1版

印 次: 2019年8月第1次印刷

京权图字: 01-2019-2778

广告经营许可证: 京朝工商广字第8087号

书 号: ISBN 978-7-5217-0654-3

定 价: 59.00元

版权所有·侵权必究

如有印刷、装订问题, 本公司负责调换。

服务热线: 400-600-8099

投稿邮箱: author@citicpub.com

献给我的孙辈

蒂莫西和亚历山大

数不清的窘迫在各个方面摧毁着人类的傲慢，我们好像对最普通的物体和效应也一无所知，这样的缺点让我们关注取得的每一点点进步。那些庸俗怠惰的心灵混淆了熟悉与知晓，当事物显露其形式或表明其用途时，他们又会以为自己洞悉了事物的全部本质；而不满足于肤浅之见的思辨者则会以徒劳的好奇心烦扰自身，但是，随着他探究愈多，他不过是察觉到所知愈少。

——塞缪尔·约翰逊 (Samuel Johnson)，

《漫步者》(The Idler)

前 言

我非常清楚，想写出一本有关结构的入门书是一种不自量力的行为。实际上，只有当这门学问从数学中脱离出来后，人们才开始意识到要准确表述那些通常所谓的“入门级”的结构概念是多么困难；我所说的“入门级”意即“基础性”或“根本性”。其中某些省略和简化是有意为之，但另一些无疑是因为我自己才疏学浅和对这门学问一知半解所致。

虽然本书几乎等于《强材料新科学研究》(*The New Science of Strong Materials*) 的续篇，但它仍可被视为一部在其所述领域完全独立的作品。因此，在前面几章里，难免有重复之处。

我要感谢曾为我提供素材、建议和灵感以及同我热烈讨论的很多人。其中的在世者，包括我在雷丁大学的同事，他们曾慷慨地给予我帮助，尤其是建筑学教授比格斯(W. D. Biggs)，以及理查德·查普林(Richard Chaplin) 博士、乔吉奥·杰洛尼米迪斯(Giorgio Jeronimidis) 博士、朱利安·文森特(Julian Vincent) 博士和亨利·布莱

斯（Henry Blyth）博士，还有哲学教授安东尼·弗卢（Anthony Flew），他为本书最后一章提出了有益的建议。我还要感激布鲁克医院的神经外科顾问医师约翰·巴特雷特（John Bartlett）先生。西印度群岛大学的休斯（T. P. Hughes）教授在与火箭相关的问题上给予了我诸多帮助。我的秘书琼·柯林斯（Jean Collins）在我陷入困境时帮了大忙。《时尚》杂志的内瑟柯特（Nethercot）女士在女装剪裁方面的见解使我获益良多。杰拉德·利奇（Gerald Leach）以及企鹅图书的多位编辑付出了他们一贯的耐心和友善。

在我要致谢的逝者中，我要感谢剑桥大学三一学院的马克·普莱尔（Mark Pryor）博士，他与我已探讨生物力学的问题近30年。最后，理所应当，我还要感谢希罗多德（Herodotus），我欠这位哈利卡纳苏斯城曾经的公民一份薄祭。

目 录

前言 V

第 1 章 如何与工程师无障碍地沟通 001

—— 第一部分 弹性科学的前世今生

第 2 章

结构的根基——胡克定律与固体的弹性 017

第 3 章

应力与应变——柯西男爵与弹性模量 029

第 4 章

设计的安全性——裂缝是怎么出现的 044

第 5 章

如何同裂缝和应力集中共存——弓、投石机和袋鼠 054

—— 第二部分

张拉结构

第 6 章

张拉结构与压力容器——锅炉、蝙蝠和中式平底帆船 095

第 7 章

接合、铆接、焊接的应用分布——蠕变和战车轮子 113

第 8 章

一只蠕虫的诞生——泊松比和弹性蛋白 130

—— 第三部分

承压结构与承弯结构

第 9 章

墙、拱与坝——通天塔与砖石建筑如何保持稳定 151

第 10 章

倒下的和未倒下的桥梁——拱桥、铸铁桥和悬索桥 178

第 11 章

一道梁的益处——屋顶、桁架与桅杆 190

第 12 章

剪切与扭转的奥秘——北极星导弹与斜裁睡袍 223

第 13 章

承压的失败——三明治、头盖骨与欧拉博士 249

—— 第四部分
结构与审美

第 14 章

设计的哲学——形状、重量与成本的平衡 277

第 15 章

罪魁祸首——误差、金属疲劳与操作不当 297

第 16 章

效率与美感——逃不掉的现实 326

致 谢 347

附录 I 推荐手册与公式 349

附录 II 梁理论公式 353

附录 III 扭转公式 361

附录 IV 压缩载荷作用下柱与板的效率 363

延伸阅读 367

第 1 章

如何与工程师无障碍地沟通

人们向东迁徙的时候，在示拿地遇见一片平原，便定居在那里。他们互相商量：“来吧，让我们制作砖块，把砖烧透了。”他们就以砖块为石，又以柏油为浆。“来吧，”他们说，“让我们为自己建造一座城和一座塔，塔顶通天，传扬我们的声名，免得我们流散到四面八方。”耶和华降临，要看看凡人所建造的城和塔。耶和华说：“他们在此，为同一种族，用同一语言，如今他们已开始如此行事，此后他们意欲所办没有办不到的了。来吧，让我们下凡去那儿，搅乱他们的言说，使他们彼此无法沟通。”于是，耶和华使他们从那里流散到四面八方，他们便停止造城了。这就是为何那里被叫作巴别（即巴比伦），因为上帝在那儿搅乱了世间的语言。

——《圣经·旧约全书·创世记》（Genesis 11: 2-9）

结构曾被定义为任何用于承受载荷的材料组合，而研究结构是科学的传统分支之一。如果一个工程结构倒塌，就可能出现人员伤亡，因此工程师务必小心谨慎地探究结构的行为。然而遗憾的是，当工程师要向大家普及他们的专业时，麻烦就来了：他们总是说着奇怪的用语，于是一些人便会认

为，研究结构及其负载的方式的确令人费解、无关紧要，也非常无聊。

但是，结构无处不在，我们实在没法视而不见：毕竟，所有动植物以及几乎所有的人造物都必须能够承受某种强度的机械性力量而不致损坏，所以实际上，万物皆有结构。当我们谈论结构时，我们不仅要问为何房屋和桥梁不会坍塌，机器和飞机为何有时会坏掉，还需要问蠕虫为何长成那种形态，以及蝙蝠为什么能飞过玫瑰花丛而保持翅膀完好无损。我们的肌腱如何工作？我们为何会“腰酸背痛”？翼手龙的体重怎么那么轻？鸟类为何有羽毛？我们的动脉如何工作？我们能为残疾儿童做些什么？为什么帆船要那样装配帆索？为什么奥德修斯之弓很难拉开？为什么古人晚上要把战车的轮子卸下来？希腊投石机如何工作？为什么芦苇会随风摇曳？为什么帕提神庙如此壮美？工程师能从天然结构中得到什么启示？医生、生物学家、艺术家和考古学家能从工程师那儿学到些什么？

事实表明，理解结构的原理和损坏的原因是一场斗争，其艰难与漫长远非常人所能预料。直到最近，我们才补上了所欠的知识，使得我们能以某些有效或巧妙的办法回答上述一部分问题。当然，随着将更多块拼图汇集组装，整个图景越发清晰：这门学科整体上不再局限于专业研究的狭窄范围，而越发贴近大众的普遍利益，普通人从中也能有所收获。

本书讲述了关于自然界、工程技术和日常生活中的结构元素的现代观点，探讨了对强度及支持不同载荷的需求如何影响各种生命体和机械装置的发展，包括人的进化。

生物的结构

生物学结构的出现远早于人工结构。在生命出现之前，世界上不存

在任何形式的目的性结构，只有山岳和成堆的沙石。即使是非常简单、原始的生命形态，也形成了一种微妙的平衡，其化学反应自发产生且不断延续，你要将其与非生命体分隔开，并防止其受到侵害。大自然创造了生命，并让其自生自灭，所以有必要设计出某种容器以使之存续。这样的薄层或薄膜至少要具备最低限度的机械强度，且要容纳生命物质，还要保护其免遭外力的侵袭。

在可能的条件下，某些最早的生命形态是由在水中游荡的微滴构成的，那么一个非常脆弱且简单的屏障，或许仅仅靠不同液体间界面上存在的表面张力，就已经够用了。渐渐地，随着生物形态日趋繁复，生命的竞争越发激烈，弱小、无法自主运动的球状生物将会处于不利的地位。生物的表皮变得越来越坚韧，各种各样的运动形式层出不穷。更大的多细胞动物出现了，它们会撕咬，并快速游动。生存的要义变成了追逐与被追逐，吃与被吃。亚里士多德称之为“*allelrophagia*”，即相互吞噬，达尔文则称之为自然选择。不管怎样，进化的历程取决于更强生物材料和更精妙活体结构的发展。

早期更原始的动物大多是由软材料构成的，不仅因为这样的材料能使之更易扭动且能任意延展自身，还因为这些软组织通常是坚韧的（正如我们将要看到的），而像骨骼这样的刚性结构却往往是脆弱的。此外，刚性材料的运用会给生长和繁殖带来各种各样的麻烦。女士们都知道，生产是一项涉及高应变和大挠度的大工程。尽管如此，但脊椎动物从受精卵发育到胎儿的过程，就像普遍的天然结构一样，在某些方面是从软变硬的过程，而且在婴儿出生后，这个硬化过程仍在持续。

这给人的感觉像是大自然很不情愿地接受了强劲的材料，然而当动物越来越大时，它们从水中登上陆地，大多数长出且用上了刚性的骨架和牙齿，有些还有硬角和甲壳。但是，动物绝对不会变成像大部分现代

机械那样以刚性装置为主导。骨骼通常只占全身的一小部分，下面我们将会看到，那些软的部分常常巧妙地减轻了骨骼上的负荷，使之免受折断之苦。

大多数动物的躯体主要是由柔性材料构成的，而植物则并不总是如此。那些更小且更原始的植物通常是软的，所以植物既不能追捕其食物，也没法躲避其天敌。然而在某种程度上，它可以通过长高来自保，并争夺更多的阳光雨露。尤其是树木，它们十分巧妙地伸展，既能收集散布在空中的若隐若现的阳光，又能挺立直面狂风的威胁，当然，是以最节能的方式。最高的树能长到约110米，这是迄今最大且最结实的活体结构。然而，一株植物即使只长到上述高度的1/10，其主体结构也需轻巧又有刚性，我们将在后文看到这为工程师提供了许多重要的经验。

很明显，像这样关于强度、柔度和韧度的问题遍布医学和动植物学等领域，然而长期以来，医生和生物学家都排斥这些观念，他们仰仗的是在这些领域的巨大成就和专业自尊。当然，这一方面关乎性格，另一方面关乎语言，或许工程师对数学概念的厌恶和畏惧也与此有关。在绝大多数情况下，从结构的角度研究动植物，确实是生物学家无法胜任的工作。但是我们也没有道理假定大自然在其化学与控制机制上精雕细琢，而在结构上却粗制滥造。

工艺结构

世上奇迹虽多，若论神奇

难比于人——

他迎着凛冬寒风，
穿过滔天巨浪，
横渡沧溟茫茫；
连不倦不朽之大地，这最古老的神灵，
亦厌倦他，年复一年，
来来去去，耕耘不辍。
逍遥自在者，飞鸟，
走兽，游鱼，
尽入其网，
败于他的狡黠。

——索福克勒斯 (Sophocles), 《安提戈涅》(Antigone)

本杰明·富兰克林曾把人定义为“一种会制造动物的动物”。事实上，好多其他动物也会制造并使用相当原始的工具，它们筑巢的本事甚至常常超过未开化的人。要指明人类走出洪荒的确切时刻绝非易事，彼时人类的技艺可以说完胜那些沦为食物的野兽。考虑到早期人类可能栖息于树上这个事实，或许，它比我们想象的要晚。

然而，人类从最早期的棍棒和石块（并不比高等动物使用的工具好多少）到石器时代晚期成熟精美的手工制品，跨越了一条巨大的鸿沟。金属工具时代之前的文明在化外之地存续已久，许多器物就陈列在博物馆里。不借助金属材料就制作出坚固的结构，需要一种把握应力分布和方向的天赋，这是现代工程师未必具备的；金属自有坚韧且均质之便，就其运用而言，既有直觉上的考量，也有工程之外的思索。自玻璃纤维等人工复合材料问世以来，我们间或回归波利尼西亚人和因纽特人开发出的那种含纤维的非金属结构。故而，我们越发意识到自身在运用应力

体系方面的不足，也因此更加敬重原始工艺。

事实上，金属工艺进入人类文明——大致在公元前2000年到公元前1000年间——对大部分人工结构来说，并没有带来特别巨大或直接的不同，原因在于金属既稀缺又昂贵，且不易成形。在切削工具、武器以及甲冑上局部使用金属自有其效果，但大多数承担负载的人工制品仍是由砖石、木材、皮革、绳索和纺织物构成的。

建磨坊的、造车的、造船的以及搞装配的工匠在使用这些旧式的混合构造时，需要具备高超的技能，但他们有各自的弱势，也会因缺乏正规理论训练而犯错。总而言之，蒸汽与机械的引入导致了手工技能的弱化，也使应用于“先进工艺”的材料范围局限于少数标准化的刚性材质，譬如钢材和混凝土。

虽然某些早期发动机的缸压并不比我们的血压高多少，但像皮革这样的材料无法承受灼热的蒸汽，工程师没法用皮囊、皮膜和软管制作出一台蒸汽发动机。因此，他们只能用金属，并借助机械手段实现。要是让动物来做同样的事，它们的办法可能更简单，耗材或许更轻。^①而工程师则不得不依靠轮子、弹簧、连杆和气缸中滑动的活塞来达成目标。

虽然这些笨重的装置最初是受材料所限而不得已用之，但工程师已逐渐把这种技术视作正当且体面的方法。在习惯使用金属齿轮和主梁后，工程师玩出了新花样。此外，这种对材料和技术的态度已经散播到普通人中间去了。不久前，在一场鸡尾酒会上，一位美国科学家的美丽妻子对我说：“你是说人们过去是用木材造飞机的吗？就用破木头！我不信，你就胡扯吧。”

我们应如何客观评价这些结构，它们又在多大程度上是基于偏见和

① 这里的“更轻”指比活塞和风箱更轻。

赶时髦的心血来潮，这是本书探讨的问题之一。我们需要保持一种均衡的观点。工程结构的传统选材范围遍及砖石混凝土、钢材和铝材，已经非常成功，我们显然不可等闲视之，既因为这些材料本身的作用，也因为我们从中获益良多。然而，我们或许记得，充气轮胎改变了陆上运输的面貌，这可能是比内燃机更重要的发明。但我们一般不怎么给工科生讲授轮胎的相关知识，工科学校有一个明显的倾向，即对柔性结构一概讳莫如深。当我们更宽泛地看待这个问题时，或许可以发现，出于定量的考虑，我们可以试着重构传统工程学的某些部分，将其建立在仿生学模型的基础上。

无论我们持何种观点，都无法回避这样的事实：工程技术的每个分支都必须或多或少地关注强度和挠度的问题。而且，如果我们在这些问题上犯错带来的仅仅是恼人的烦琐程序或高昂的花费，而非人员伤亡的后果，我们已经相当走运了。那些从事与电子相关工作的人可能会被提醒，大部分电气与电子设备的故障都是由机械故障引发的。

结构能够被破坏，也确实会遭到破坏，这可能很重要，有时也颇富戏剧性；但是，在传统的工程技术中，一个结构在破坏前的刚度和挠度在实践过程中可能更为重要。摇摇晃晃的房子、地板和桌子难遂人意，我们应该意识到光学设备，比如显微镜或照相机，其性能不仅取决于镜头的品质，还依赖于其架设位置的精度和刚度。而这类失误比比皆是。

结构与审美

能否寻一处胜境，得与天堂独处，

我欲言心声；天堂为我所欲。

林木参差，艳若山茱萸，