

[ 华好 ] Hua Hao

作者单位  
东南大学建筑学院 ( 南京, 210096)

收稿日期  
2017/02/20

国家自然科学基金项目  
(51538006, 51478116, 51408123)

摘 要

结合东南大学“建筑运算与应用研究所”在 2006—2016 年期间的教学科研实践, 主要从材料、数控设备、运算化设计 3 个方面阐述数控建造的方法与技术。

关键词

数控建造; 物质化; 运算化设计; 数控

ABSTRACT

This paper introduces the methods and technologies of digital fabrication in three regards: materials, machines, and computational design, as manifest in the teaching and research of The Institute of Architectural Algorithms & Applications at Southeast University between 2006 and 2016.

KEY WORDS

digital fabrication; materialization; computational design; computer numeric control

数控建造 (digital fabrication) 把虚拟的设计转化为实物, 是数字化建筑设计中的一个核心课题。数控建造对设计、建造、材料等建筑元素进行统筹考虑, 因此, 它并不是设计的下游环节。当今运算化设计 (computational design) 与数控建造融为一体, 可以称之为“运算化设计与建造”。数控建造项目通常采用计算机编程进行设计, 用数据来驱动数控 (Computer Numeric Control, CNC) 设备完成加工与建造<sup>[1-2]</sup>。由“设计运算—数控制造”构成的数字链促使设计师探索新的设计哲学与方法。建筑学的各个子学科都有数字化延伸, 例如:

- 方案设计——生成设计 (generative design)<sup>[3-4]</sup>;
- 建筑结构——拓扑优化 (topology optimization)<sup>[5]</sup>;
- 建筑构造——数字建构;
- 建筑物理——性能优化;
- 建造与施工——数控建造。

这些数字化方法都或多或少与数控建造有关, 因为从实际出发的数字化设计都需要物质化才能成为现实。数控建造还扮演着“承上启下”的角色: 高迪 (Antoni Gaudi) 处理力与形的方法、奈尔维 (Pier Luigi Nervi) 的结构主义、奥托 (Frei Otto) 的最小曲面研究等是当今数

控建造频繁讨论的话题。一方面, 数字化方法对传统课题进行延伸; 另一方面, 数字化方法正在潜移默化地改变人们对建筑本身的理解与认识<sup>[6]</sup>。

材料、数控、运算是数控建造的三大基石。材料是物质化的载体, 数控加工是物质化的主要过程, 而运算统一了物质化与数字化。本文结合东南大学“建筑运算与应用研究所”在 2006-2016 年期间的教学科研实践 (图 1) 阐述相关的方法与技术。

1 数字化与物质化

欧洲文艺复兴之后建筑的设计与建造逐渐分离, 在 20 世纪末的建筑“数字化”浪潮中建筑的抽象化达到了顶峰。自 2000 年以来, 以机器人技术为代表的数控建造技术历史性地把设计与建造重新融合起来<sup>[7]</sup>, 使建筑的数字化与物质化 (materialization) 获得了历史性的统一, 为当今的建筑学提供了一个全新而系统化的视角来研究形式、材料、结构等建筑元素。

建筑数字化技术初步成熟的标志是数控建造的实现 (2000 年以后), 表明数字化方法可以贯彻从设计到建成的所有环节。从此, 数

字化设计方法自成体系，不再依附于其他建筑理论和方法。抽象化（运算）与物质化（数控建造）在当代的数控建造中是相辅相成的，从理论到数学模型，到操作，到物质化是连贯的，例如，自组织理论（self-organization）—多智能体数学模型（multi-agent system）—面向对象编程—数控加工与建造。在建筑学的历史上很难找到比它更全面、更具操作性的理论或方法。从某种意义上讲，基于数控建造的数字设计方法是建筑学的一个新起点。

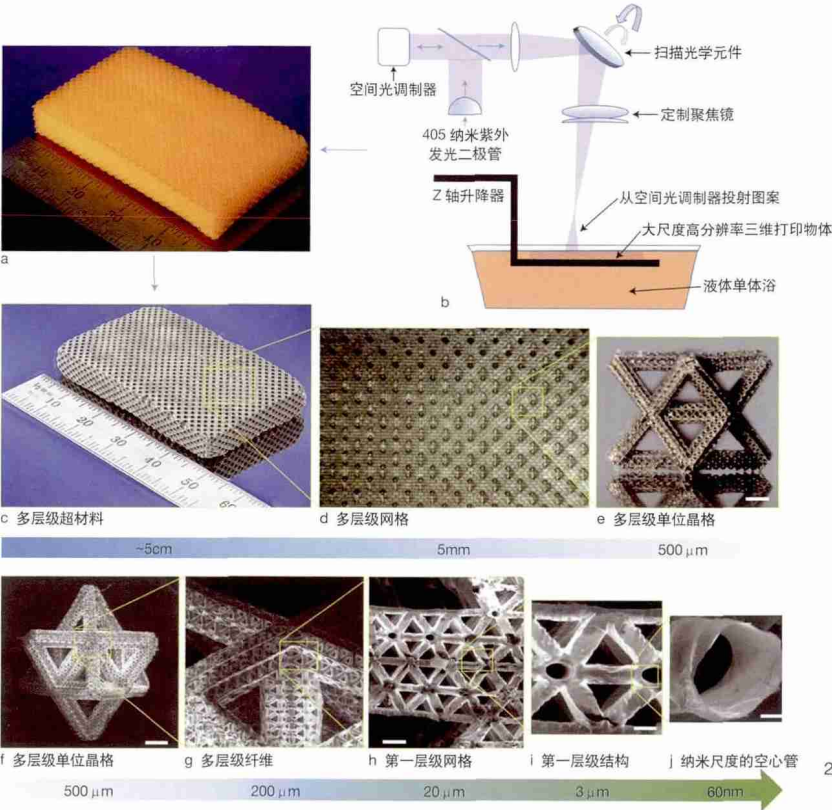
建筑的数字化和物质化的统一在客观上促进了其他学科和产业渗透到建筑的设计与建造中。例如，在建筑的形式与力学性能主导早期设计决策的情况下，结构工程师甚至是数学家就有可能通过数理方法成为建筑形式与结构的创造者。又如，当一个建筑的大部分实体是由工业化制造方式实现的时候，制造企业的软件系统和加工流水线将在很大程度上主宰建筑的设计。如今，“数字化设计—数字化制造—数字化搭建”的链条日益成熟，建筑的设计者将面临前所未有的繁杂的技术性限定（建筑信息模型 BIM，绿色建筑体系如 LEED，以及各类制造商如幕墙公司的技术标准等）；但另一方面，设计师可以用编程的方式个性化、系统化地处理建筑中的各类问题，在设计初期就把各类评价体系（结构、能耗、安全等）的数学模型和用于制造和搭建的数据结构纳入到自己的“程序”中，从而在程序生成方案时自然而然地与行业规范、工业生产标准无缝对接。

2 材料的设计、制造与运用

传统建筑师通常强调材料的外在表征，如密度、强度、防水性、耐久性等，并顺应其固有的特性进行运用。在数控建造中，材料本身就是设计对象，可以根据项目需要制造新的材料或转化原有材料的特性。在量子物理学中，物质依赖于信息，并不是固有的存在。在材料科学领域，纳米打印机<sup>[8]</sup>已经实现了在微观层面上控制材料自身的构成



1 东南大学数控建造项目



2 从纳米到厘米尺度的材料打印

(图 2)。在不同的空间尺度，我们可以设置不同的材料组织方式，从而获得前所未有的材料性能。

建筑师也正在用数字技术探索新材料或材料的新应用。蒙格斯(Achim Menges)在《材料运算》<sup>[9]</sup>一书中指出运算不但可以增进我们对材料的认识，还可以指导我们在设计中运用材料。科尼克(Toni Kotnik)认为设计师不应把材料当做形式的奴隶，而应该用统一的逻辑把力学、材料、形式三者结合起来形成方案<sup>[9][105]</sup>。建筑师利用数控技术创造性地

运用材料，可举例如下：

1) 响应环境变化的立面系统<sup>[10]</sup>

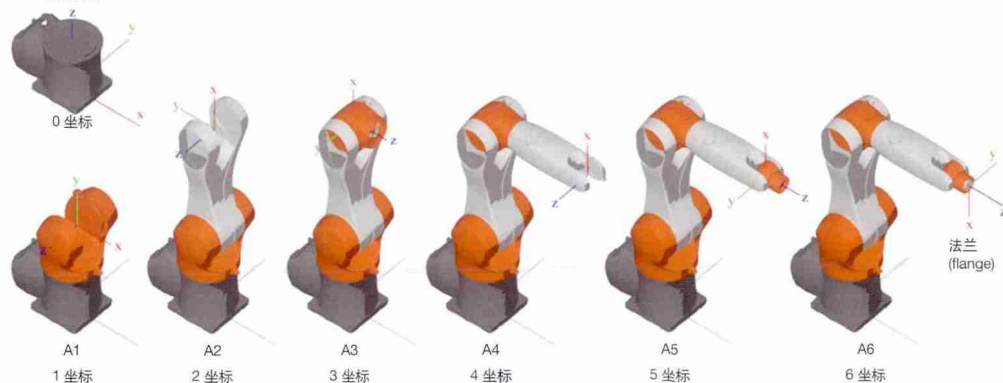
薄木片会随着环境中湿度的变化而产生形变，这通常被看做是这种材料的缺陷。设计师艾希特(S. Reichert)把两层对湿度敏感度不同的薄木片紧贴在一起，构成了一个能够随着湿度变化而开合的构件。这些构件组成一个实时响应环境中湿度变化的立面系统，而且不需要任何能源。

2) 可定制的曲面板材(zip shape)<sup>[11]</sup>

一对锯齿状木板相互咬合能够形成一个



在 java 中进行 kuka 机器人编程  
世界坐标



3 从 Java 语言编写 Kuka 机器人代码的开源代码库 (javakuka.com)

稳定的曲面。有趣的是，我们可以精确地控制每一对锯齿的间隔距离，从而在整体上精确地控制最终的曲面形态。建筑师辛德勒 (C. Schindler) 的团队开发了一个计算机程序，把目标曲面转化成特定的锯齿，并生成对应的数据用于数控设备的加工。

### 3) 充气薄钢结构 (FiDU)<sup>[12]</sup>

薄钢板受力时容易变形，这本来是材料的一个缺点，但波兰设计师齐特 (O. Zieta)

充分利用了这一特点，把两片激光切割而成的薄钢板叠在一起，边缘用机器人无缝地焊接在一起，然后向两片钢板中间充气或注水使其变成一个立体物件。这种不可逆的形变把“柔弱”的薄钢板转变成刚硬的三维物体。不规则的形变具有一定的不可预测性，在软件中预测这种复杂的形变就成为了设计的关键。

### 4) 纤维线与树脂形成的薄壳<sup>[13]</sup>

碳纤维和玻璃纤维是轻质而具有抗拉性能的柔性材料，而液态的树脂在凝固之后就变成了坚硬的固体。斯图加特大学的研究小组用机械臂把涂有液态树脂的纤维线缠绕成一个极轻、极薄的构筑物。凝固后的树脂与纤维线组成的混合物构成了一种新型的薄壳材料，它既是结构，又是表皮。该构筑物的形态设计来源于材料的形成过程（物质化过程）。

从这些数控建造的例子中不难看出，材料的加工方式与组织过程的创新是建筑设计（或工业设计）的源动力。得益于计算机程序

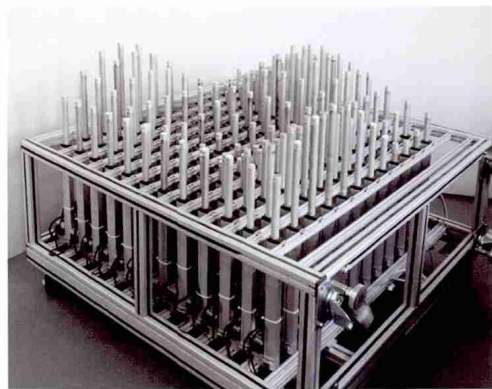
（软件工具）和数控加工设备（物质化工具），设计师可以创造前所未有的材料，或者是前所未有的材料组织方式，从而使建筑（或产品）获得独特的品质与性能。

## 3 数控设备的设计、制作与控制

建筑师深入数控建造的一个分水岭就是参与数控设备的设计、制作和控制。因此，数控建造与机械工程、电气与电子工程、自动化控制都有密切联系。数控加工设备是与材料直接接触的主要媒介，高度定制化的制造过程往往只能用自制或改装的数控设备才能实现<sup>[14]</sup>。而材料与加工设备的实际特性也会使设计师调整或重做设计方案。

数控设备由数据来驱动，具体来说是由相应的机器代码来控制。三轴铣床 (milling machine)、一部分激光切割机和三维打印机由 G-code 驱动。六轴工业机器人一般有自己的特定机器语言，譬如 Kuka 机器人采用 KRL 语言。建筑运算与应用研究所<sup>[6]</sup>通过 Java 编程，把设计信息转化为机器代码，最终严密地控制加工过程。例如，用 Java 编写三维打印机的 G-code，从而系统化地打印大量非标准化产品<sup>[15]</sup>；或用 Java 编写 Kuka 机器人的 KRL 语言（图 3），实现铣削、热线切割等加工工艺，并发布了开源代码<sup>[16]</sup>。对底层机器代码的编程，是为了最大限度地定制特殊的加工制造过程，并在定制过程中进行建筑物质化过程的创新。

工业机器人的广泛运用<sup>[14]</sup>是当代数控建造技术的一个主要特点。六轴机械臂的主要优势是它的加工方式的灵活性：在机械臂法兰盘上安装不同的末端工具 (end effector) 就能实现不同的加工工艺，如切割、焊接、打印、弯折、组装等。工业领域中的大部分数控设备，都只能完成其特定的加工任务。机械臂的多功能性为建筑师提供了一个极佳的平台，使针对某一个项目的个性化加工方式成为可能。因此，末端工具的研制和工艺流程设计成为了建筑学的新课题。标准化（机器人工业标准、电子电气自动化标准）和个



4 数控可变模具

性化(加工方式与流程的特殊性)在机器人建造项目中并存。

为了探索数字化的造型、制模、浇筑工艺,建筑运算与应用研究所开发了一套数控可变模具。每个模具由144个(12行12列)独立的步进电机伸缩杆组成(图4),能够在一定范围内模拟任意曲面。上位机(PC电脑)把形状转化为坐标数据传递给主控板(ARM平台),主控板再把信息传递给18个电机驱动板,每个电机驱动板控制8个伸缩杆的运动。

4 运算化设计

运算化设计能够利用数理逻辑来自动生成方案<sup>[17-18]</sup>,而且能够利用数控技术把具体的材料组合成最终的实物。运算化设计(关注抽象的逻辑)与数控建造(关注物质化过程)两者是密不可分的。密斯曾说“建筑始于两块砖被仔细地连接在一起”。用具体的材料来创造建筑实体和空间一直是建筑学的一个本质问题。数控建造用数字化的方式探索材料之间的组织方式与连接构造<sup>[1]</sup>,并用数字化技术来实现加工与建造过程。

完整的数控建造项目追求从设计到建造的一体化<sup>[2]</sup>,在最初生成设计的阶段就探索材料特性和建造流程。传统的建筑师希望施工方能够尽可能地按照图纸(或模型)进行建造,但数控建造给我们的启示是:材料特性和施工特点可以(或应该)是推动方案诞生的积极因素<sup>[19]</sup>。在建筑业中,设计与制造(建造)长期分离,极大地削弱了设计师对最终实物的控制力,也降低了建筑的品质,限制了建筑作品的创新。数控建造提供了一种新的可能性:设计师通过编程来生成方案并控制数控设备实现建造,即设计师可以通过抽象的代码(程序)精确地控制最终实物的每一个细节(图5)。数控建造方法可以实现从设计到实物的数字链的完整性与一致性。

计算几何(computational geometry)是数字化设计与制造的基础。笛卡尔的解析几何把形状与数学公式联系起来。计算



5 数控建造中的数字流与物质流

机出现以后,计算几何(以及计算机图形学)成为描述和解决现实几何问题的核心课题。近10年来,像数学家波特曼(Helmut Pottmann)<sup>[20]</sup>、计算机科学家波利(Mark Pauly)<sup>[21]</sup>等人通过计算几何的研究渗透到了建筑数字技术当中。同时,很多基于建筑学的组织,如Smart Geometry、Advances in Architectural Geometry、Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design也大力开展计算几何的探索与应用。如今在建筑系学生中泛滥的Sketchup和Rhino(以及Grasshopper插件)等软件,其实是特定计算几何学的商业化应用。通过编程(Java, C/C++, Python等),我们可以抛开某一款具体的软件,真正专注于计算几何本身和自己的设计问题。

计算机编程无疑是运算化设计与数控建造的基础。编程的方式是多样的,1)采用通用编程语言,如Java和C++进行编程;2)针对某一款三维软件的脚本语言进行编程,如Rhino的VB语言脚本、Maya的

MEL脚本、Revit的脚本语言等;3)图形化的程序编辑,如Rhino的Grasshopper插件。采用通用编程语言的优势在于其语言本身的普适性和大量的第三方库(library),如基于C++的图形学库CGAL和基于Java的几何学库JTS Topology Suite;而基于某一款软件进行脚本编程或图形化编程的优势在于可以利用软件自带的各种功能,如Rhino丰富的曲面处理功能。

在运算化设计中有两大类方法可以提高建筑性能。第一类方法是性能的模拟与优化:先用数学模型来描述一类设计的所有可能状态,然后定义一个目标函数(输入一个具体的状态,输出它的性能得分),最终通过系统化的方式在所有可能状态中找到那个性能得分最高的。在数控建造中常见的性能包括力学稳定性、材料用量、空间适用性等。第二类方法是通过理性化的经验来获得高性能。例如,在古代就频繁采用的拱形,具有良好的力学性能,如今悬链线(Catenary)数学模型可以更理性地生成表面只有压力



(compression-only) 的薄壳形态。因此, 建筑师的经验和理性的运算之间有着微妙的联系。

东南大学建筑学院开设的数控建造课程(本科四年级, 建筑设计课程)十分重视学生运用计算机编程和计算几何的能力<sup>[1]</sup>。在为期 8 周的课程中, 学生们从零开始学 Java 编程, 同时开始接触计算几何。为了制造真实的构筑物, 学生们以小组为单位进行材料研究和数控设备的探索。最终每个小组独立编写一个 Java 程序生成构筑物的形态, 同时产生每一个构件的几何数据, 并输出对应加工设备(激光切割机、铣床、机械臂等)可以直接使用的文件格式<sup>[22-23]</sup>。高度理性化、系统化的设计与建造方式对学生们来说是一个巨大的挑战, 但同时也能激发他们前所未有的设计创造力。

5 结论

建筑师定制或创造机器来实现建造, 颠覆了建筑师用图纸与语言和其他建筑从业者进行交流的传统。一个成熟的数字化设计与建造团队可以独立完成一个项目的设计与建造, 在流程上掌控一个建筑项目的每个环节(方案设计、结构设计、材料供应、施工等)。因此, 设计师可以成为那个最终把产品(建筑)交给甲方的人, 由此支配整个建筑项目的收益, 而其他建筑从业者都将成为设计师的雇员。

数字化的物质化方法具有深远的社会意义。欧洲现代纺织工业的崛起, 象征了工业化生产对传统手艺的颠覆。数控建造的前身——1804 年出现的用穿孔卡片来定制花纹的提花织布机(Jacquard loom), 第一次用数理逻辑把设计和制造统一起来。如果从设计到建造的一体化能够在建筑行业中顺利进行, 必将极大地提高建造的效率和建筑的品质, 并引发建筑行业的重组以及利益与责任的重新分配。从数控建造这个契机出发, 建筑师应该积极推动相关工业技术的革新。国内大部分加工企业的技术, 介于手动操作机器和使用数控设备之间。数控化程度比较高

的企业, 也很少具备进行软件开发的能力。最大的局限性在于企业没有能力或不愿意把设备改造和软件编写统一起来进行工艺流程的创新<sup>[22]</sup>。而数控建造的特点就是把高度定制化的加工设备和高度定制化的软件系统结合起来创造独一无二的工艺流程。因此数控建造是更新加工业技术的驱动力。

建筑学是一个历史悠久的学科, 但在现代历史进程中错过了与几次工业革命(机械、电气、电子、信息)结合的机会, 一度远离当代科技与技术。21 世纪初数控建造的崛起<sup>[7,9]</sup>使建筑学有机会全面吸收与利用科学与工程领域的优秀成果, 并重新审视建筑学自身的理论与方法。如今, 一个囊括建筑学方方面面(理论、设计、结构、性能、材料、施工、经济等)的数字化方法正在逐渐成形。不难发现, 传统的建筑学教学大纲和运算化设计与建造的要求是不相称的。大部分理工类学科, 其课程都非常重视数学和计算机编程, 而建筑学有意地回避它们, 降低了建筑学学生的跨学科发展的潜力与机会。此外, 建筑学中的关于材料、构造和建造的介绍都局限于书本, 学生包括教师都很少直接接触真实的建筑材料和构造, 没有实际参与建造活动, 这种状况已经阻碍了数控建造在高校的深入开展。

近十几年来, 数控建造方法快速地在科研、教育、实践 3 个层面上并行发展。科研将促进不同学科之间的融合, 并衍生出新的研究领域; 教育需要建立系统化的理论与方法, 并引导学生们用数字技术进行创新。实践则需要更新现有的建筑产业技术和相关的制造业技术, 实现建筑设计与建造的智能化。



参考文献

[1] 李飏. 东南大学“数字链”建筑数字技术十年探索[J]. 城市建筑, 2015(10): 39-42.  
[2] 华好. 数控建造驱动的构造设计趋势[J]. 建筑学报, 2014(8): 26-29.  
[3] P Merrell, E Schkufza, V Koltun. Computer-generated residential building layouts[J]. ACM Trans. Graph, 2010, 29 (6): 485 – 501.

[4] H Hua. Irregular Architectural Layout Synthesis with Graphical Inputs [J]. Automation in Construction, 2016 (72): 388 – 396.  
[5] M P Bends, O Sigmund. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.  
[6] 建筑运算与应用研究所. <http://labaaa.org> [2017-03-29].  
[7] F Gramazio, M Kohler, S. Langenberg. Fabricate[M]. Zurich: gtaVerlag, 2014.  
[8] X Zheng, W Smith, J Jackson, et al. Multiscale metallic metamaterials [J]. Nature Materials, 2016(15): 1100-1107.  
[9] A Menges. Material Computation [J]// Architectural Design, Wiley, 2012, 82(2): 4-21, 104-111.  
[10] S Reichert, A Menges, D Correa. Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness [J]. Computer-Aided Design, 2015(60): 50-69.  
[11] <https://www.stylepark.com/en/news/zip-shape-by-design-to-production> [2017-03-29].  
[12] 齐特设计工作室. <https://zieta.pl> [2017-03-29].  
[13] M Doerstelmann, J Knippers, A Menges, S Parascho, M Prado, T Schwinn. ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14 – Modular Coreless Filament Winding Based on Beetle Elytra [J], Architectural Design, 2015, 85(5): 54-59.  
[14] F Gramazio, M Kohler. The robotic touch: how robots change architecture [M]. Zurich: Park books, 2014  
[15] 三维打印. <http://labaaa.org/2-5d-print/> [2017-03-29].  
[16] Javakuka 开源代码库. <http://javakuka.com> [2017-03-29].  
[17] Z Guo, B Li. Evolutionary approach for spatial architecture layout design enhanced by an agent-based topology finding system[J]. Frontiers of Architectural Research, 2017(6): 53-62.  
[18] H Hua. A case-based design with 3D mesh models of architecture[J]. Computer-Aided Design, 2014(57): 54-60.  
[19] F Gramazio, M Kohler, J Willmann. Authoring Robotic Processes [J]. Architectural Design, Wiley, 2014, 84(3): 14-21.  
[20] H Pottmann. A Asperl, M Hofer, A Kilian. Architectural Geometry[M]. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2007.  
[21] M Pauly, NJ Mitra, J Wallner, et al. Discovering structural regularity in 3D geometry[J]. ACM transactions on graphics (TOG), 2008, 27(3): 43.  
[22] 华好. 数控工艺探索——基于编程技术的建筑数控加工过程创新 [J], 新建筑, 2015(10): 52-56.  
[23] 华好, 李飏, 俞敏浩, 郝子宏, 唐浩铭. 运算化设计——本科四年级教学实践 [C]. 沈阳 2016 年全国建筑院系建筑数字技术教学研讨会, 2016.

图片来源

图 1: Nature Publishing Group 授权, 参考文献 [8] 其余图片均为作者绘制