

面向增材制造的正向产品建模技术

刘继红^①, 许文婷^①, 敬石开^{②*}

① 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191

② 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

* 通信作者. E-mail: jingshikai@126.com

收稿日期: 2014-07-20; 接受日期: 2014-09-10; 网络出版日期: 2014-12-16

摘要 传统 CAD 建模技术因其自身的局限性, 极大地限制了增材制造产品的设计空间. 为了最大限度地发挥增材制造的技术优势, 需要在产品设计阶段通过综合产品形状、大小、层次结构以及物质组成实现产品性能的最优化及制造成本的节约化. 本文根据增材制造的 4 种特性, 从复杂形状建模、复杂材料建模、复杂层次建模以及面向制造的建模等 4 个方面论述了国内外对于面向增材制造的正向产品建模技术的研究概况. 在此基础上, 本文对该领域的发展趋势进行了探讨, 认为综合一体化建模与轻量化建模将成为未来发展方向.

关键词 增材制造 复杂形状建模 复杂材料建模 复杂层次建模 面向制造的建模

1 引言

1.1 增材制造技术及其发展

增材制造 (additive manufacturing, AM) 指依据产品三维 CAD 模型, 基于离散材料逐层叠加的成形原理, 通过有序控制将材料逐层堆积, 制造出实体产品的数字化制造技术^[1]. 从其各个发展阶段的不同特点出发, 该技术也被称为“材料累加制造”、“分层制造”、“增量制造”、“快速原型”、“实体自由制造”、“3D 打印”等.

增材制造中“材料叠加”的核心制造思想最早起源于美国. 1902 年, Carlo Baese 的专利就阐述了用光敏聚合物制造塑料件的原理. 20 世纪 80 年代到 90 年代, 增材制造技术有了根本性的发展. 1986 年 Hull 发明了光固化成形技术, 1988 年 Feygin 发明了分层实体制造技术, 1989 年 Deckard 发明了粉末激光烧结技术, 1992 年 Crump 发明了熔融沉积制造技术, 1993 年 MIT 的 Sachs 发明了三维打印技术. 其中, Hull^[2] 在其专利中提出了一个用激光束照射液态光敏树脂, 从而分层制作三维物体的现代快速成型机的方案, 并依此成立了世界上第一家生产增材制造设备的公司——3D Systems 公司. 1988 年, 该公司生产出了第一台现代增材制造设备, 开创了增材制造技术发展的新纪元. 20 世纪 90 年代是增材制造技术蓬勃发展时期, 十余种新工艺和新系统设备纷纷面世. 这十年中, 增材制造在全球迅速推广和发展, 德国、英国、法国、中国、以色列等国家也都相继开始了增材制造技术和装备的研发.

引用格式: 刘继红, 许文婷, 敬石开. 面向增材制造的正向产品建模技术. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 181-196, doi: 10.1360/N112014-00204

2012年4月,英国《经济学人》杂志¹⁾以“第三次工业革命”为主题,称增材制造技术将“与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”,使得该技术迅速成为政治、经济、社会各界关注的热点话题,也大大激发了从事相关研究与应用的科技界和产业界的热情。

1.2 增材制造的优势及挑战

与传统的“去材加工”相比,增材制造技术不需要刀具、模具,所需工装、夹具较少;能够大幅度缩短生产准备周期,从而加速制造过程;能够制造出传统工艺方法难以加工,甚至无法加工的结构,从而实现自由制造;能够精确制造出复杂零件,从而有效提高材料利用率。而且产品的结构越为复杂,其制造优势也越为显著^[3]。

增材制造的特性及优势主要体现在以下4个方面^[4]:

- (1) 形状复杂性: 增材制造几乎可以制造任意复杂程度的形状和结构。
- (2) 材料复杂性: 增材制造既可以制造单一材料的产品,又能够实现异质材料零件制造。
- (3) 层次复杂性: 增材制造允许跨越多个尺度(从微观结构到零件级的宏观结构)设计并制造具有复杂形状的特征。
- (4) 功能复杂性: 增材制造可以在一次加工过程中完成功能结构的制造,从而简化甚至省略装配过程。

增材制造的这些新特性为其设计、过程建模和控制、材料和机器、生物医学应用、能源和可持续发展应用、社区发展、教育等各方面均带来了一定的机遇与挑战。其中,传统CAD设计因其自身局限性,只能利用数字化方法来描述零件的表面信息,却难以描述其内部结构、组织和材料信息,极大地限制了增材制造的发展空间。面向增材制造的设计技术(design for additive manufacturing, DFAM)的目标就在于根据增材制造的特性,通过综合产品形状、大小、层次结构以及物质组成实现产品性能的最优化。因此,如何通过产品建模技术最大限度地发挥增材制造的优势已成为计算机辅助设计领域的又一研究热点。

1.3 各国面向增材制造的产品设计发展计划

2009年,美国国家科学基金会和海军研究办公室组织来自学术界、工业界和政府的65位专家提出了未来10~12年的增材制造技术路线图^[5,6]。在设计方面,该路线图指出应研究新的概念设计方法,帮助设计人员定义和探索面向增材制造的设计空间;研究新的计算机辅助设计理论基础,克服现有实体建模方法在表达复杂几何形状和多种材料方面的局限性;研究多尺度建模和逆向设计方法,协助梳理复杂的工艺—结构—性能关系;研究具有形状、性能、工艺等可变性的建模和设计方法。日本、澳大利亚²⁾及欧盟³⁾⁴⁾也均在其增材制造路线图中明确了面向增材制造的产品设计建模技术的重要性与紧迫性。

2013年,我国科技部在《3D打印技术发展综述报告》中指出将支持增材制造的设计方法研究作为未来5年的技术方向和重点之一^[1]。研究基于增材制造的个性化产品创意设计、基于互联网的开

1) The Economists. The third industrial revolution. <http://www.economist.com/node/21553017#sthash.qsUCKSJa.dpbs>.

2) Wohlers Associates, Inc. Additive Manufacturing Technology Roadmap for Australia. <http://3dprintingexpo.org/wp-content/uploads/Additive-Manufacturing-Technology-Roadmap-CSIRO-2011.pdf>.

3) European Commission. AM-Platform: the European platform for Additive Manufacturing. <http://www.rm-platform.com/>.

4) European Commission. Roadmap for standardisation activities 2014. <http://www.sasam.eu/>.

放式创新服务等技术; 研究异质材料结构建模、异形 (多孔、网状等) 复杂结构建模、基于离散点云的结构直接建模等支持增材制造的三维 CAD/CAM 技术; 研究材料制备与零件制造一体化设计、材料—性能—工艺—结构一体化设计优化等面向增材制造的设计技术。

1.4 面向增材制造的产品建模方法

增材制造过程以三维 CAD 模型作为制造依据, 三维模型的信息决定了产品最终的结构、材料以及性能。建立产品的三维模型是增材制造过程的第一步, 也是后续所有工作的基础。因此, 通过建立内涵更为丰富的实体模型, 探索更为广阔的设计空间, 对于发挥增材制造的优势具有重要意义。

面向增材制造的产品建模方法主要分为正向建模与逆向建模两大类。逆向建模通过各种测量手段和三维重建方法, 将已有实物原型转化为计算机上的三维数字模型^[7]。这种方法能够有效缩短产品的设计、开发周期, 降低新产品开发的成本与风险, 有助于产品的系列化设计。然而, 这些优势都建立在已有实物原型的基础之上, 应用范围有较大的局限性。同时, 已有产品模型很容易束缚设计者的设计思维, 不利于探索新的设计空间。而正向建模技术往往是一个从无到有的过程, 设计者拥有更大的设计自由度, 可以任意发挥想象, 也更有利于发挥增材制造的技术优势。

因此, 本文将围绕增材制造的 4 种重要特性, 从复杂形状建模、复杂材料建模、复杂层次建模以及面向制造的建模等 4 个方面论述国内外面向增材制造的正向建模技术的研究概况。

2 复杂形状建模

三维建模主要分为实体建模与曲面建模两大类。实体建模主要面向工业设计和制造领域, 一般用来设计规则的几何形状, 而不擅长对不规则的形体进行建模, 因而难以满足增材制造形状复杂性的需求。曲面建模虽然可以创建复杂、精细的不规则形状, 但其只考虑形状的表面而不考虑其内部结构, 因而主要面向影视动漫、游戏娱乐领域, 难以为增材制造提供完整的产品模型。目前, 大多数面向增材制造的复杂形体建模都通过逆向工程实现, 然而这类技术只能对已有形体进行建模, 且其建模过程往往费时繁琐^[8]。因此, 研究复杂形状的正向建模方法对于增材制造技术的发展具有重要的意义。根据建模结果的灵活性, 本节将分别论述复杂形状建模中的数学造型、生成设计与直接编辑技术。其中, 数学造型得到的设计结果具有唯一性且完全遵从于参照的数学原理; 生成算法支持的建模过程大多由设计者的设计思维和主观判断所驱动, 其建模结果因人而异, 往往带有一定的随机性, 但都应遵从于应用的基本生成规则; 直接编辑常常作为辅助建模手段支持设计过程, 其初始模型由其他建模方法建立, 而编辑结果则千差万别, 完全遵从于设计者本身的审美判断。

2.1 数学造型

数学可视化的目的是将抽象的数学模型通过计算机以图形的方式呈现出来, 使人们能够更为直观的认识其涵义。随着计算机辅助设计技术的发展, 这种利用数学原理支持三维 CAD 建模的方法已成为一种建立复杂规则形体的重要建模手段^[9,10]。为了与一般意义的数学建模相区分, 将这种建模方法称为数学造型。

众多国内外学者采用数学造型方法实现了 3D 模型的创建与打印。Hart^[11~13]通过数学造型构建了 Sierpinski 分形四面体模型、Goldberg 多面体模型、Menger 海绵模型、饼海胆模型、珊瑚模型

以及各种多面体模型. Grossman⁵⁾所设计的基于数学原理的金属艺术品已成为数字雕塑的经典范例. 她提出了一种建立多孔表面模型的方法, 将孔的尺寸与表面曲率相关联, 并用该方法建立了螺旋二十四面体的三维周期性极小化曲面模型^[14]. Séquin^[15] 不仅针对空间填充曲线的创建提出了一种名为“Hilbert 立方体”的方法, 还利用数学造型建立了中心点对称的翻转圆环面网格模型.

在拓扑学中, 莫比乌斯 (Mobius) 带与克莱因 (Klein) 瓶是两个最为著名的形体. 莫比乌斯带是一条仅有一个面的单侧曲面. 将两条莫比乌斯带沿着它们唯一的边粘合起来, 就得到了一个名为克莱因瓶的立体图形. 克莱因瓶是一个不可定向的二维紧致流形, 没有“内部”和“外部”之分, 只有在四维空间中才可能真正表现出来. 在三维空间中只能创建出允许其与自身相交的“浸入”模型. 其结构如一个底部有孔的瓶子, 延长瓶子的颈部, 并且扭曲地进入瓶子内部, 然后和底部的孔相连接. Grossman 根据克莱因瓶结构设计了一个开瓶器模型^[16], 并通过增材制造的方式将其变为了金属制品. Séquin^[17] 则对这两类形体的拓扑学原理进行了分析, 并将克莱因瓶分为了 4 种类型, 以便于设计者创造更多新颖、奇特的形体.

2.2 生成设计

生成设计是一种通过一定的规则以自组织形式得到设计结果的方法. 该方法借助计算机技术, 用生成规则模仿自然界的进化法则, 通过生成代码获得丰富的结构形式, 现阶段主要应用于建筑领域当中. 复杂建筑或产品的设计要求设计者在概念设计阶段探索多种可选方案, 而创意设计中关键参数无法量化的性质造成了一部分设计过程具有一定的主观性. 这一问题因人而异, 设计结果将取决于设计师做出的主观选择, 体现了设计师的内涵和品位. 生成设计方法依赖设计者的主观评价推动设计过程, 能够很好地支持此类设计问题. 采用生成建模的主要目的是利用计算能力模仿大自然的设计智慧, 支持设计师和自动化设计流程的各个部分, 从而生成丰富多变的个性化模型. 常用的生成设计方法包括 L 系统^[18]、遗传算法^[19]、元胞自动机^[20]、群智能^[21]、形状文法^[22]等.

近年来, Flanagan^[23] 论述了建筑设计中数字化设计的生成逻辑, 并将时间变量与多感官设计变量应用于建筑设计当中. Trescak 等^[24] 为自动生成设计提出了一个改进的通用形状文法框架, 能够有效支持设计者积极参与设计过程并自动获取生成的设计结果. 同时通过优化的子形状检测算法检测出生成过程中现有形状的子形状, 从而获得更优吸引力的设计结果. Krish^[25] 提出了一个基于 CAD 的生成设计探索方法, 通过约束系统将大的设计空间缩小为由一组较小的由独特设计表示的可行设计空间, 用于复杂的、重要性能指标不可计算的多准则设计问题, 能够在减小设计师负担的同时保持创意设计探索所需的灵活性. Cui 等^[26] 将形状语法融入生成系统对壮族刺绣设计进行了探索, 使用自由 B 样条曲线和一种新的插值算法获得最初的设计概念, 并用审美评价模型和设计探索算法帮助设计师根据自己的主观评估找到喜欢的设计方案. Singh 等^[27] 通过对比分析常用的 5 种生成设计方法, 根据设计认知和数字化设计思想提出了一个集成的生成建模框架, 支持设计师进行设计探索. Platform Wertel Oberfell 的 Wertel Oberfell 和 Matthias 通过模仿几何分形的成长模式设计了分形桌. 底部粗壮的枝干分出更小的分支, 由底部至顶部逐渐密集, 最终形成了由规则的网格组成的平面. 在这一设计中, 设计师运用不同的 CAD 软件创建了 NURBS 模型和多边形模型⁶⁾. Nervous System 工作室借助计算机模拟技术模拟自然界生命现象的发生和发展. 该工作室结合仿生学思想, 运用生成设计软件进行产品设计, 最后通过数字化制造技术创造出众多独一无二的符合自然界生长逻辑的艺术品、珠宝和

5) Grossman B. Bathsheba Sculpture. <http://www.bathsheba.com/>.

6) Platform Wertel Oberfell. Fractal Table. <http://www.platform-net.com/>.

家居用品⁷⁾。

2.3 直接编辑

直接编辑的核心是模型的几何结构而非特征, 通常用于对已有模型进行修改与完善. 该技术既无需关注模型的建立过程, 也无需维护模型的历史树, 甚至无需处理任何约束条件或主从关系. 设计者通过直接修改尺寸或推、拉几何结构就可以直接对来自任何 CAD 系统的模型进行操作. 这种忽略模型特征的建模方式给予了设计者更大的设计空间, 使其可以在 3D 设计环境下以直观的方式对模型进行实时浏览、直接编辑与动态操作, 十分适合产品的局部修改与频繁变更. PTC 公司的 Creo 平台等建模软件都使用了这一技术, 不仅降低了非专业人员的设计门槛, 而且加快了产品开发速度, 增加了设计团队的灵活性⁸⁾。

网格编辑是一类最为常见的直接编辑建模方法. 随着计算机处理速度的加快, 这种像编辑照片一样编辑三维模型的建模方式也在不断发展完善. Nealen 等^[28]提出了一个通过绘制草图来直观编辑网格表面的方法. 该方法无需像现有方法那样进行一系列点的选择、移动操作, 只需要选择和裁剪轮廓或者在表面直接绘制草图, 形成模型的特征曲线, 从而极大地简化了复杂形状的建模工作. Schmidt 等^[29]开发了一种名为 Meshmixer 的基于任意表面网格的创作工具. 该工具采用几何拖拽法完成基于边界特征的融合任务, 允许创作者选择一个复杂结构并沿着表面将其拖拽到新的区域或另一个表面上, 并自动修补留下的孔使其能够平顺地与目标表面相融合. 针对细节变换, 工具设计者提出了“网格克隆刷”的概念, 允许创作者直接在表面精确指定变化细节的范围和力度. Zimmermann 等^[30]提出了一种手绘系统用于特征保留的表面网格编辑. 用户只需根据需求在零件表面的轮廓上进行绘制, 系统就会分割所有图像投影表面的轮廓, 并从中识别出最佳的匹配部分, 提取与零件轮廓相符的表面网格顶点, 选择网格的下部区域进行修改, 完成符合用户意图的变形. Zhang 等^[31]改进了传统的拉普拉斯算子表面编辑方法, 提出了一种稳健的网格编辑框架, 包括基于骨架的刚性造型和细节保护的网格优化. 与传统基于拉普拉斯算子的方法相比, 该方法能够有效保证网格质量并保护细节形状, 且不显著增加计算的复杂性.

3 复杂材料建模

随着材料科学及计算机科学的高速发展, 异质材料得到了广泛的关注和研究. 不同于传统的由单一均匀材料构成的实体, 异质材料实体由多种材料连续或非连续分布构成, 使得产品既具有较高的单项指标又有良好的综合性能^[32]. 异质材料主要包括多材料模型、嵌入零件模型以及功能梯度材料^[33]. 其中, 功能梯度材料以其独特的性能获得了国内外学者的青睐. 一般情况下, 异构材料零件建模包括两个基本过程: 几何建模和材料建模. 几何建模关注零件的几何表达, 材料建模则旨在定义几何区域内的材料分布. 然而, 以图形学为基础的传统 CAD 模型常常难以描述三维模型的异质属性. 增材制造技术的快速发展和应用使得异质材料的制备更加便捷. 为了满足增材制造对于复杂材料三维模型的需求, 各国学者针对异质材料建模问题开展了大量的研究^[34].

数据表示在异质材料零件建模的过程中发挥着基础性的作用, 表示方式的不同也体现了建模方法的差异. 张争艳等^[35]将异质材料模型表示及建模方法划分为基于集合的方法、基于体素的方法以

7) Nervous System. Nervous System. <http://n-e-r-v-o-u-s.com/>.

8) Parametric Technology Corporation. PTC Creo Elements/Direct Modeling Express. <http://www.ptc.com/products/creo-elements-direct/modeling-express/>.

及基于拓扑结构的方法, 并提出了一种基于材料边界的表示方法. Kou 等^[36] 分析了异质材料零件建模方法的表达能力、直观性、正确性、紧凑性、效率等指标, 认为从模型的正确性和紧凑性出发, 大多数现有的异质材料数据表示模型的可分为估值模型与非估值模型两大类. 估值模型是不精确的, 表示离散、近似的对象; 非估值模型一般不涉及空间分解及离散, 理论上可以确保几何形状和材料分布的真实度. 从复杂性的角度来看, 还存在着一类复合模型, 可以被看作是由估值模型或非估值模型表达的子对象的集合.

3.1 估值建模

估值建模通过密集的空间分解表示异质材料的分布, 得到的结果往往是近似而不精确的, 主要包括基于体素的建模和基于体网格的建模.

基于体素的异质建模首先将实体分成空间中的若干个体素 (通常是等边的立方体). 体素的几何信息由笛卡尔坐标系的坐标来表示, 体素的坐标基准点也就是体素的体心. 其材料信息则由组成实体的各材料体积分数来表示. 这里体素并不局限于均匀体素, 已有研究者用伯恩斯坦 (Bernstein) 多项式^[37] 和三线性方程^[38] 来表示异质实体内部材料的分布. 由于计算机强大的细分能力, 体素的尺寸可以相对很小, 因此该方法能够较为精确地表达材料任意分布的异质材料实体的模型信息, 其描述能力已受到广泛的认可. 然而, 体素模型的缺陷也是显而易见的. 模型的准确性与体素的分辨率直接相关. 为了得到准确的异质材料模型, 通常需要巨大的存储空间, 同时也给实体可视化表达带来了一定的影响. 此外, 体素模型在几何精度和材料精度上都是不精确的. 几何精度上的阶梯效应已经是一个众所周知的问题, 而在材料精度上理想的材料成分与体素模型间通常存在着较大的差异. 从模型维护的角度而言, 体素模型的修正也存在着如材料空间的均匀或非均匀缩放等操作壁垒^[39]. Zhang 等^[40] 提出了一种特种异质材料活塞的优化设计方法. 在该方法中, 几何区域首先被离散为 82 个三角单元, 并用预设的均质材料初始化每个单元. 通过最小化活塞在热激励和机械负荷下的径向位移, 得到一个优化的材料热膨胀系数分布. Hu 等^[41] 针对多模态问题, 使用一种自适应、实值进化策略的优化器, 对三维工字钢结构的材料分布进行多目标优化, 以在快速原型制造条件下尽量减少工字钢的结构重量, 缩短额外制造时间.

基于体网格的异质材料建模一般先将实体划分为由一系列顶点表达的多面体单元网格 (例如, 四面体、六面体等), 并将几何信息和材料信息存储在网格节点中. 与体素模型不同的是, 基于实体网格的模型不要求明确储存每个体素的几何和材料信息, 而是通过插值形函数 (通常具有连续性) 获得网格内任意点的模型信息^[42]. 网格节点既可以是多面体单元顶点, 也可以是单元边上的点; 信息和材料信息既可以同时存储在同一个节点上, 也可以由成对的节点分别存储. Wang^[43] 提出了一种新的算法从由不同组成材料的隐式表示的异质模型中直接提取表面网格, 将隐式表示的异质模型转换为表面模型分离的均质材料区域. 相对于体素模型, 这种表示方式能够使数据结构更为紧凑, 在一定程度上减轻了的信息储存量巨大所带来的问题^[37]. 虽然体网格模型有诸多的优势, 但这种表示方法也有其固有的局限性. 首先, 内存的消耗仍是一个沉重的负担. 根据 Liu^[44] 的研究, 一个只有 9480 个面片组成的小 STL 模型就有 109760 个四面体信息需要储存. 另外, 对体网格模型进行材料搜寻的代价也相当可观^[45]. 首先需要确定与查询点距离最近的边界面. 由于对象边界已被离散成很多个面, 搜索所有的边界面可能是过于费时费力. 从直观性的角度来看, 由于用户的功能需求可能并不与底层的分解相关, 生成的网格还可能会对捕捉用户的设计意图造成影响.

3.2 非估值建模

与依赖密集空间细分的估值模型不同, 非估值模型利用精确的几何数据和严格的函数来表达材料

的分布. 非估值模型一般与分辨率无关, 理论上可以满足任意精度信息查询的需求. 给定一个采样分辨率, 非估值模型即可转换为估值模型, 但由估值模型转换为非估值模型则往往非常困难, 甚至难以实现. 非估值模型更加紧凑、简洁, 在数学层面上也更加严格, 因而获得了更广泛的接受^[32,46,47]. 非估值模型又分为基于控制特征的模型、基于控制顶点的模型、显式函数模型和隐式函数模型.

基于控制特征的异质材料建模用梯度源的概念来表示实体中的材料分布. 梯度源就是梯度发生的几何位置, 一般用点、线或者面表示. 根据实体中的点到这些参考特征的最小欧式距离, 用设定的材料分布函数确定异质实体的材料分布^[48]. 这种表达方法较为简单, 使用者可以直观地对特征进行材料分配, 然后应用不同的材料混合特征定义异质材料. 材料混合特征的特征系数可有由不同的方式确定, 其中最简单的情况是由设计者根据其设计意图直接指定相应的特征系数. Biswas 等^[32]提出了一个通用的根据与材料特征间的距离进行空间参数化的方法来解决材料连续变化的建模问题. Qian 等^[49]应用基于控制特征的建模方法对异质材料涡轮叶片进行了设计. Nemat-Alla^[50]提出了一个用显式函数来建立二维功能梯度材料零件模型的方法, 并在热载荷下计算其热应力, 结果显示二维功能梯度材料比传统功能梯度材料具有更高的性能, 可以有效减少热应力. 基于控制特征的异质材料建模方法直观、灵活, 更有利于捕捉设计者的设计意图, 便于调用已有的材料分布函数, 并实时更改设计方案.

基于控制特征的模型并不要求所有特征尺寸均匀一致. 当所有特征尺寸一致时, 则形成了一种特殊情况, 也就是基于控制顶点的模型. 基于控制顶点的模型可以认为是参数线、面、体在每个控制点中附加材料信息的直接扩展. Huang 等^[51]针对材料特性分布符合通用 Bezier 曲线的梯度功能材料建模进行了研究. Samanta 等^[52]提出了用 B 样条曲面和体分别表示 2D 和 3D 材料分布的方法. Qian 等^[49]提出了 B 样条张量积模型表达异质材料实体的方法. 基于控制顶点的模型还有其他一些优点, 例如可以通过给定的参数坐标迅速查询到该点的材料组成. 除此之外, 这种模型还能有效表述复杂的材料分布, 局部的几何和材料定义都可以直接进行修改. 这种模型缺点是过于依赖空间参数化, 并且不论对于何种 3D 模型, 空间参数设计都起着同等重要的作用.

显式函数模型具有表达直观、易于理解等特点. 而且由于计算机能够快速处理解析函数的计算, 实现材料的高效查询也成为显式函数模型的突出优势^[53]. 线性函数、指数函数、抛物线函数以及幂函数均被广泛的应用于异质材料建模之中. Elishakoff 等^[54]使用幂函数对一块单向功能梯度板材进行了建模. Eraslan 等^[55]运用指数函数和抛物线函数对梯度材料转轴和转盘进行了设计. 然而, 显式函数模型的简单性和易用性也限制了其表现能力. 用显式函数表示模型的材料分布通常较为简单, 而复杂的异质材料实体通常很难用显式解析函数来表示其整体材料的分布^[56]. 显式函数模型的另一个缺点是过于依赖坐标系. 用户往往更倾向于用零件的特征来表达自己的想法, 而不会参照特定的坐标系来描述零件的材料分布.

在上述非估值建模方法中的, 零件的几何形状主要通过边界表示法 (B-Rep) 表达, 而材料分布建模则遵从于显式或过程函数. 与这些模型不同的是, 基于隐函数的模型使用功能表示法 (F-Rep)^[57]作为点集几何形状和材料分布的共同基本模型. 功能表达法提供了一个严格的框架来指定、编辑、分析点集以及它们的材料组成, 具有简洁紧凑的特点. 更重要的是, 功能表达法与传统的 CSG 方法相类似, 支持从简单初始形状逐步类推建立复杂零件模型. 隐式功能模型同样具有高效性, 可以较为便捷地通过使用查找表或者直接通过显函数进行评估得到某一位置的材料成分.

3.3 复合建模

异质材料复合建模就是将几种不同的建模方法集成应用在一个实体的建模过程, 主要分为装配模型和单元模型两种^[58]. 装配模型就是对于复杂实体把预建的模型按照所需的材料特征进行空间分区,

针对每个分区分别设计其材料分布模式. Sun 等^[59]给出了一种有效的空间分区方法. 分区之间的接合由异质布尔集算子(包括材料的合并、相交、求差、分割等)来实现. 为使界面处的材料分布光滑过渡, 采用混合函数或局部控制函数的方式来对材料分布的衔接部分进行建模.

上述各类异质材料建模方法的研究在 21 世纪最初 10 年就达到了顶峰. 随着增材制造技术精度的日益提高, 纳米/微观结构及介观结构的制备变得更为简单、便捷. 因此, 学者们纷纷将目光从普通异质材料建模转向了具有多尺度性的结构建模之上.

4 复杂层次建模

长期以来, 设计制造人员将更多注意力集中于结构的外部形态, 而微观结构控制则属于材料科学的范畴^[60]. Olson^[61]将系统工程的思想引入到了材料设计与结构制造的过程中, 提出了一种工艺、结构、性质、性能一体化的多层次结构材料概念设计方法. 通过改变材料组成、组合方式及制备工艺改变材料的宏观性能. 工程中的许多问题都具有这种多尺度性. 针对这类问题, 增材制造允许跨越从微观结构到零件级宏观结构的多个尺度进行设计与制造. 在一些多尺度性并不十分重要的问题中, 可以通过建立精度满足要求的等效模型来替代微观上的影响. 然而在复杂系统中, 由于等效模型的局限性, 得到的模型精度总是难以满足要求. 因此, 学者们将高精度的微观模型与简单有效的宏观模型相结合, 提出了多尺度模型的概念. 其基本思想在于在某一尺度上的特征一定附加有更小的特征, 而这些更小的特征还可以由比其更小的特征构成. 在实际应用中, 多尺度模型往往与功能梯度材料等异质材料的建模或有限元分析结合在一起^[62]. 根据应用对象可将复杂层次建模分为介观结构建模、微观结构建模与表面纹理建模等.

4.1 介观结构建模

介观结构也称作细观结构或亚微观结构, 是介于微观结构和宏观结构之间的结构形式. 绝大多数工程设计问题都要求设计者在确保结构符合物理、力学等性能要求的前提下尽量减轻结构的重量. 而具有良好介观结构的材料大多具有较好的隔热性、隔音性与能量吸收特性, 且能在提高材料性能的同时降低材料的相对密度, 有助于实现产品的轻量化设计及制造. 由于增材制造技术几乎可以用于制造任意复杂程度的结构, 为介观结构提供了一种有效、便捷的制造方式. 材料设计者逐渐将注意力由发现密度更轻、强韧性更好的新材料转向探索较好的材料介观结构, 并称这类具有良好介观结构的材料为结构材料. 多孔材料是一类最为重要的结构材料, 常见的泡沫材料、蜂窝材料、点阵材料等都属于多孔材料的范围.

Gitman 等^[63]针对局部多尺度模型进行了关于宏观网格尺寸及微观单元尺寸依赖性的研究, 并提出了一种新的多尺度方法. 该方法建立了宏观网格尺寸这一数值参数与微观单元尺寸这一模型参数间的唯一关联关系, 并成功消除了其依赖性. Smith 等^[64]研究了结构优化方法, 并将其应用于制造重量优化组件. Reinhart 等^[65]研究了点阵结构杆件直径优化问题, 并通过拓扑优化方法及点阵结构的周期性排布实现结构对载荷变化的适应. Rosen 等^[66]在材料设计方面提出了一种面向增材制造的工艺—结构—性能—行为一体化计算机辅助设计方法, 并以多孔材料的设计和制造为例验证了该方法的有效性. 其后又开发了一种用于定制蜂窝结构设计的自动化工具. 该工具主要应用于快速制造领域中的中尺度蜂窝结构的定制化设计. 在吸取了已有工具优点的同时, 对现存问题进行了优化, 为进行定制蜂窝结构设计的设计人员提供了新的选择^[67]. 为寻找合适的处理设计问题的方案并探索与蜂

窝结构相关的大型、复杂设计空间的求解算法, 该团队根据粒子群优化算法 (PSO) 和莱文伯格 - 马夸特 (Levenberg-Marquardt, LM) 法对有限复杂性的两个实际问题进行了研究. 同时考虑了增材制造工艺上的制约, 确保了设计的可行性 [68].

4.2 微观结构建模

自然界中存在很多利用微观结构实现优良性能的范例, 如植物枝干、动物骨骼等. 因此, 纳米/微观结构的设计建模往往与结构仿生设计相结合.

Bruck 等 [69] 在对广义多孔模型的微力学行为和复合材料微结构进行研究的基础上, 对遗传算法等优化算法进行了集成, 提出了一种多孔材料微观结构的设计优化方法. 并研究了优化方法中算法的组合形式对结果收敛性的影响. Podshivalov 等 [70] 提出了一种基于微 CT 图像生成微米级支架的方法, 用于设计在微观层次上与人体组织相类似的支架, 以提高其生物相容性, 促进患者的康复. 该方法在支架的设计和制造过程中根据患者的身体状况和病史情况模拟其组织的真实结构和机械特性. 通过多分辨率立体建模方式, 该设计方法还可以根据需求确定支架的孔隙度. Hengsbach 等 [71] 提出了一种基于两种增材制造工艺结合的多尺度生物医学微系统的设计和制造方法. 该方法在制造精度、制造速度以及多功能性等方面都具有显著优势, 能够制造从亚微米级到数毫米的植入物或微系统. Lin 等 [72] 研究了钛合金仿骨微结构的设计制造方法, 并在临床上将用这种方法制造的髌关节用于更换金毛猎犬的股骨头, 取得了良好的效果. 从而证实了这种仿骨骼结构具有极好的生物相容性. 连苓等 [73] 以关节软骨下骨板为研究对象, 提出骨软骨复合材料支架的界面结构仿生设计与优化方法, 并分析了孔隙结构参数对骨软骨界面力学行为的影响. 马建峰等 [74] 在分析竹子优良力学性能及其微观结构间关系的基础上, 提取其微观特征结构, 并将其应用于实际的柱状结构设计之中.

4.3 表面纹理建模

表面纹理建模可以视为微观结构建模的一种特殊情况. 具有特定表面纹理的结构可以显著提高材料的某些性能, 因此对表面纹理建模的研究也在逐渐深入. 为了方便纹理的设计, Wang 等 [75] 提出了“虚拟纹理”的概念, 通过数值工具精确量化地分析表面纹理和润滑性能之间的关系, 借助虚拟变形为创新的表面设计提供比较信息及优化方向. 董全武等 [76] 在介绍实体纹理的概念和计算原理的基础上, 给出了一种将实体纹理分三步实现的方案, 对纹理参数进行了分类, 给出了一个纹理数据结构的组织方法并讨论了这种方案的实际应用. 裘迪等 [77] 提出了基于多尺度高度场修正的零件表面形貌建模方法, 通过特征函数模拟零件表面微观结构, 借助小波分析对不同尺度下的基准面进行评定, 提出了基于多尺度参数驱动的零件表面形貌修正与合成方法, 用以生成满足技术要求的零件表面形貌模型.

5 面向制造的建模

面向制造的设计 (design for manufacturing, DFM) 是指在产品设计阶段考虑其结构工艺性、可制造性及加工制造的成本、时间等, 在保证产品质量的同时, 使设计出的产品易于制造和装配, 从而缩短开发周期、降低产品成本. 该技术在 20 世纪 90 年代就已成为了并行工程中最为重要的研究内容之一 [78]. 因此, 面向增材制造的产品设计不仅需要通过综合产品形状、大小、层次结构以及物质组成实现产品性能的最优化, 也应在设计建模过程中综合考虑其可制造性、可装配性以及制造成本.

5.1 考虑可制造性的建模

增材制造技术虽然可以制造出传统工艺方法难以加工、甚至无法加工的结构, 解决了众多复杂精细零部件的设计和制造难题, 但这类制造方法自身也存在着一些不可忽略的缺点. 例如: 熔融沉积成型目前的最高精度只能达到 0.1 mm, 成型后表面粗糙, 且因材料本身的限制在结构尺寸较大时易发生变形; 选择性激光烧结零件表面粗糙, 后期处理工艺复杂、难以保证制件尺寸精度, 且易因翘曲变形等原因导致无法装配; 光固化立体成型材料多为树脂类, 价格贵且强度、刚度、耐热性有限, 需要设计工件的支撑结构. 这些工艺的缺陷都是在面向增材制造的建模过程中不可忽略的问题. Rosen^[79] 提出了一种面向增材制造的支持规范化建模、工艺规划与制造仿真的多孔结构设计方法. 并对零件区域进行参数化解, 定义了制造单元的概念, 用以实现与制造工艺相关联的设计. Yan 等^[80] 针对选择性激光融化技术制造的周期性多孔结构进行研究, 发现其与原始 CAD 模型有较好的吻合性, 且具有较小单元尺寸的点阵支杆具有较高的密度, 而结构的屈服强度与杨氏模量则随着单元尺寸的减小而增大. 该团队分析了这种现象产生的原因, 为考虑可制造性的多孔结构设计提供了实验依据. Kerbrat 等^[81,82] 提出了一种混合模块化设计方法, 通过可制造性指标对 CAD 模型的各个模块进行可制造性分析, 并为其选择最合适的加工方法, 从而将传统机械加工与增材制造有机结合在一起. Muir 等^[83] 提出了一种结合评估与结构拓扑优化的方法用于增材制造技术, 通过优化制造顺序消除有害因素的影响, 并最大限度地提高制造过程的经济性.

5.2 考虑装配简化的建模

增材制造可以在一次加工过程中完成功能结构的制造, 因而, 在面向增材制造的设计建模过程中可以考虑通过设计免装配结构减轻制造过程中的装配任务量. Yang 等^[84]、Chen 等^[85] 通过研究发现旋转机构的性能在很大程度上取决于其机构间隙的大小, 因此提出了一种鼓形接头的设计方案用以减小机构间隙, 并在万向节的设计制造上进行了该方法的实践. 由于增材制造相对于数控加工工艺尚且精度较低, Song 等^[86] 提出了一种考虑增材制造自身限制条件的接头设计方法用以减小接头间隙, 并对采用该方法设计的光固化立体成型圆柱销接头进行分析, 证实其比传统方法设计的销接头具有更好的旋转性能. Cali 等^[87] 提出了一种将 CAD 模型转换为具有内摩擦的功能性免装配模型的方法. 在关节接口处通过摩擦抵抗重力的作用, 使其能够在没有驱动的情况下保持当前姿态, 并在不同的关节模型上证明了该方法的有效性.

5.3 考虑制造成本的建模

在工艺设备和材料已选定的情况下, 增材制造的效率和成本主要取决于产品的体积而非其结构复杂程度. 因而, 研究如何实现模型的轻量化不仅有助于提高产品性能, 还可以有效缩短制造时间、节约制造材料, 从而降低制造成本. Emmelmann 等^[88] 将结构优化工具、仿生结构以及激光立体成形的工艺特点融入到设计过程中, 提出了一种轻量化设计方法, 能够帮助设计人员在设计新型飞机可适应负载结构的过程中实现轻量化设计. Wang 等^[89] 提出了一种混合式几何建模方法, 能够高效地创建大型共形多孔结构的 CAD 模型, 帮助支持桁架结构的设计、分析、优化与制造. 然而, 定型化结构填充的方法大多不能自动计算掏空物体的薄层厚度以及判断所填充的网状结构的密度. 若设置不合理就可能会出现产品不能满足物理、力学性能要求或浪费打印材料的情况. 对此, 刘利刚等^[90] 提出了一种“蒙皮—框架”轻质结构的多目标优化方案, 即在内部嵌入尽可能简洁的框架结构来支撑打印物体表

面和承受各个方向的物理受力,使得目标物体体积最小且能够满足物理强度、受力稳定性、自平衡性及可打印性等的要求,从而实现节约型设计制造。

6 发展趋势与展望

增材制造技术实现了把复杂抽象的模型从虚拟世界拉入现实世界这一构想,面向机加工等传统制造工艺的传统产品建模技术难以完全满足增材制造的需要。为了充分发挥增材制造的优势,面向增材制造的建模技术还有待进一步的探索,已有一些学者分析阐述了该项技术中存在的机遇与挑战^[91~96]。根据上述相关研究现状的介绍和分析,本文认为该领域未来的发展将有以下两个方向:

(1) 针对专业设计人员的综合一体化建模技术。复杂形状建模、复杂材料建模与复杂层次建模从增材制造的不同特性出发,为面向增材制造的设计建模技术提供支持。然而,这三者之间并没有严格的界限划分。例如 Rosen 等^[4]认为多孔结构设计是一种针对形状复杂性的设计,而 Junior 等^[62]则认为多孔结构建模是一类重要的材料建模问题,并认为应用多尺度算法设计具有强耦合关系的多孔微观结构是未来材料建模的一个重要的发展方向。现阶段,复杂材料与复杂层次方面的建模结合较为紧密,众多学者将复杂层次建模作为探索新型功能材料的有效手段。在实际应用中,多尺度建模往往与功能梯度材料等异质材料的建模结合在一起。从国内外该方面的研究现状来看,目前建模研究多数集中在复杂形状、复杂材料、复杂层次建模中的一点或两点之上。然而,只有将复杂形状、复杂材料以及复杂层次的建模有机的结合在一起,并在设计过程中考虑产品可制造性、可装配性以及制造成本,研究面向专业设计人员的综合一体化建模,才能够获得性能更高、成本更低的产品模型,才能更有力地推动增材制造技术的良性发展。

(2) 针对普通设计者的轻量化 CAD 建模技术。增材制造的特性及其现阶段的制造水平决定了该项技术并不适用于大批量生产,但却与个性化产品定制的需求极度吻合。增材制造越来越成为 DIY 制作过程的核心工具,也极大地带动了与之紧密相关的轻量化 CAD 建模工具的发展。Autodesk、达索、Sculpteo 等公司都敏锐捕捉到了这一商机,通过发布新型建模软件、建立三维模型社区等方式抢占用户市场。轻量化 CAD 建模工具面向的并非受过专业培训的企业设计开发人员,而是普通爱好者。除了具有一定开发能力的创客群体,也有众多普通设计者迫切期望能将自己的创意转变为三维模型,进而通过增材制造技术将其变为独一无二的个性化产品。这样的用户类型要求 CAD 工具必须充分考虑其开放性与可负担性。随着技术的发展,增材制造的制造成本不断降低,越来越多的爱好者希望通过这一技术获得具有个人创意的个性化定制产品。因而,轻量化的 CAD 建模技术,尤其是支持产品在线设计与分析的交互式设计技术将为增材制造的发展注入新的动力。除了上述两大发展方向,本文还认为面向增材制造的建模不仅是一个技术问题,还应从改变建模者的思维方式出发,使其摆脱原有传统建模思想的束缚,从而充分发挥增材制造的技术优势。

7 结论

发达国家相比,现阶段我国制造业仍存在大而不强、自主创新能力弱、能源消耗大等问题。增材制造技术对我国而言既是紧迫的挑战,也是重大的机遇,既是技术性的革命,更是工业社会性的革命。研究面向增材制造的产品建模技术,不仅有利于发挥增材制造的技术优势,更有利于推动我国制造业实现由“中国制造”向“中国创造”的转变,对于提升我国的核心竞争力具有极为重要的战略意义。

参考文献

- 1 MOST. A Review Report of 3D Printing Technology Development. 2013 [国家科技部. 3D 打印技术发展综述报告. 2013]
- 2 Hull C W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US Patent, US4575330 A, 1986
- 3 Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology. *Mach Build Automat*, 2013, 42: 1–4 [卢秉恒, 李涤尘. 增材制造 (3D 打印) 技术发展. *机械制造与自动化*, 2013, 42: 1–4]
- 4 Rosen D W, Gibson I, Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 2010
- 5 Bourell D L, Leu M C, Rosen D W. Roadmap for additive manufacturing: identifying the future of freeform processing. 2009
- 6 Bourell D L, Rosen D W, Leu M C. The roadmap for additive manufacturing and its impact. *3D Print Addit Manuf*, 2014, 1: 6–9
- 7 Wang J, Gu D X, Yu Z Y, et al. A framework for 3D model reconstruction in reverse engineering. *Comput Ind Eng*, 2012, 63: 1189–1200
- 8 Wu H Y. *3D Printing: Three-Dimensional Creation via Intelligent Digitization*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014 [吴怀宇. 3D 打印: 三维智能数字化创造. 北京: 电子工业出版社, 2014]
- 9 Séquin C H. Interactive construction of 3D mathematical visualization models. In: *Proceedings of Interactive 3D Graphics and Games*, San Francisco, 2011. 206
- 10 Segerman H. 3D printing for mathematical visualisation. *Math Intell*, 2012, 34: 1–7
- 11 Hart G W. Creating a mathematical museum on your desk. *Math Intell*, 2005, 27: 14–17
- 12 Hart G W. Procedural generation of sculptural forms. In: *Proceedings of Bridges Leeuwarden: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture*, Leeuwarden, 2008. 209–218
- 13 Hart G W. Sculptural forms from hyperbolic tessellations. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, New York, 2008. 155–161
- 14 Holyst R. Liquid crystals: infinite networks of surfaces. *Nat Mater*, 2005, 4: 510–511
- 15 Séquin C H. Tori story. In: *Proceedings of Bridges 2011: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture*, Phoenix, 2011. 121–130
- 16 Ornes S. Mathematics in metal. *P Nat Acad Sci*, 2013, 110: 17603
- 17 Séquin C H. On the number of Klein bottle types. *J Math Art*, 2013, 7: 51–63
- 18 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A, Hanan J S, et al. *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Springer, 1990
- 19 Holland J H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Oxford: University of Michigan Press, 1975
- 20 Wolfram S. *Theory and Applications of Cellular Automata*. Singapore: World Scientific, 1986
- 21 Dorigo M. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Dissertation for Ph.D. Degree. Milano: Politecnico di Milano, 1992
- 22 Stiny G. Introduction to shape and shape grammars. *Environ Plan B*, 1980, 7: 343–351
- 23 Flanagan R H. Generative logic in digital design. *Automat Constr*, 2005, 14: 241–251
- 24 Trescak T, Rodríguez I, Esteva M. General shape grammar interpreter for intelligent designs generations. In: *Proceedings of 6th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization*, Tianjin, 2009. 235–240
- 25 Krish S. A practical generative design method. *Comput Aid Des*, 2011, 43: 88–100
- 26 Cui J, Tang M X. Integrating shape grammars into a generative system for Zhuang ethnic embroidery design exploration. *Comput Aid Des*, 2013, 45: 591–604
- 27 Singh V, Gu N. Towards an integrated generative design framework. *Des Stud*, 2012, 33: 185–207
- 28 Nealen A, Sorkine O, Alexa M, et al. A sketch-based interface for detail-preserving mesh editing. In: *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007*, San Diego, 2007. 42
- 29 Schmidt R, Singh K. MeshMixer: an interface for rapid mesh composition. In: *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010*, Los Angeles, 2010. 6
- 30 Zimmermann J, Nealen A, Alexa M. SilSketch: automated sketch-based editing of surface meshes. In: *Proceedings of the 4th Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, Riverside, 2007. 23–30
- 31 Zhang S, Huang J, Metaxas D N. Robust mesh editing using Laplacian coordinates. *Graph Mod*, 2011, 73: 10–19

- 32 Biswas A, Shapiro V, Tsukanov I. Heterogeneous material modeling with distance fields. *Comput Aid Geom Des*, 2004, 21: 215–242
- 33 Cho J R, Oden J T. Functionally graded material: a parametric study on thermal-stress characteristics using the Crank-Nicolson-Galerkin scheme. *Comput Method Appl Mech Eng*, 2000, 188: 17–38
- 34 Wu X J, Liu W J, Wang T R. Heterogeneous material object modeling for 3D CAD Part. *J Mech Eng*, 2004, 40: 111–117 [吴晓军, 刘伟军, 王天然. 三维 CAD 零件异质材料建模方法. *机械工程学报*, 2004, 40: 111–117]
- 35 Zhang Z Y, Wang X P, Hu J Q, et al. Representation algorithms of multi-materials part for rapid prototyping. *Chin J Mech Eng*, 2013, 49: 163–173 [张争艳, 王小平, 胡吉全, 等. 快速成形领域的多材料零件表示算法. *机械工程学报*, 2013, 49: 163–173]
- 36 Kou X Y, Tan S T. Heterogeneous object modeling: a review. *Comput Aid Des*, 2007, 39: 284–301
- 37 Shin K. Representation and Process Planning for Layered Manufacturing of Heterogeneous Objects. Dissertation for Ph.D. Degree. Michigan: University of Michigan, 2002
- 38 Chen M, Tucker J V. Constructive Volume Geometry. In: *Proceedings of Computer Graphics Forum*. Malden: Blackwell Publishers, 2000. 281–293
- 39 Park S, Crawford R H, Beaman J J. Volumetric multi-texturing for functionally gradient material representation. In: *Proceedings of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, New York, 2001. 216–224
- 40 Zhang X, Chen K, Feng X. Optimization of material properties needed for material design of components made of multi-heterogeneous materials. *Mater Des*, 2004, 25: 369–378
- 41 Hu Y, Blouin V Y, Fadel G M. Design for manufacturing of 3D heterogeneous objects with processing time consideration. *J Mech Des*, 2008, 130: 31701
- 42 Jackson T R. Analysis of Functionally Graded Material Object Representation Methods. Dissertation for Ph.D. Degree. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2000
- 43 Wang C C. Direct extraction of surface meshes from implicitly represented heterogeneous volumes. *Comput Aid Des*, 2007, 39: 35–50
- 44 Liu H. Algorithms for Design and Interrogation of Functionally Graded Material Solids. Dissertation for Ph.D. Degree. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2000
- 45 Shin K H, Cheong S K. FEA-based design and fabrication of functionally graded materials. *Key Eng Mater*, 2006, 326: 1681–1684
- 46 Kou X Y, Tan S T. A hierarchical representation for heterogeneous object modeling. *Comput Aid Des*, 2005, 37: 307–319
- 47 Liu H, Maekawa T, Patrikalakis N M, et al. Methods for feature-based design of heterogeneous solids. *Comput Aid Des*, 2004, 36: 1141–1159
- 48 Wu X J, Liu W J, Wang T R, et al. Heterogeneous material CAD part modeling under distance field definition. *J Comput Aid Des Comput Graph*, 2005, 17: 313–319 [吴晓军, 刘伟军, 王天然, 等. 距离场定义下异质材料 CAD 信息建模方法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17: 313–319]
- 49 Qian X, Dutta D. Design of heterogeneous turbine blade. *Comput Aid Des*, 2003, 35: 319–329
- 50 Nemat-Alla M. Reduction of thermal stresses by developing two-dimensional functionally graded materials. *Int J Solids Struct*, 2003, 40: 7339–7356
- 51 Huang J, Fadel G M, Blouin V Y, et al. Bi-objective optimization design of functionally gradient materials. *Mater Des*, 2002, 23: 657–666
- 52 Samanta K, Koc B. Feature-based design and material blending for free-form heterogeneous object modeling. *Comput Aid Des*, 2005, 37: 287–305
- 53 Shin K, Dutta D. Constructive representation of heterogeneous objects. *J Comput Inf Sci Eng*, 2001, 1: 205–217
- 54 Elishakoff I, Gentilini C, Viola E. Three-dimensional analysis of an all-round clamped plate made of functionally graded materials. *Acta Mech*, 2005, 180: 21–36
- 55 Eraslan A N, Akis T. On the plane strain and plane stress solutions of functionally graded rotating solid shaft and solid disk problems. *Acta Mech*, 2006, 181: 43–63
- 56 Yang J, Liew K M, Wu Y F, et al. Thermo-mechanical post-buckling of FGM cylindrical panels with temperature-dependent properties. *Int J Solids Struct*, 2006, 43: 307–324
- 57 Pasko A, Adzhiev V, Schmitt B, et al. Constructive hypervolume modeling. *Graph Mod*, 2001, 63: 413–442

- 58 Huang P, Deng D, Chen Y. Modeling and fabrication of heterogeneous three-dimensional objects based on additive manufacturing. In: Proceedings of ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Diego, 2013. 215–230
- 59 Sun W, Hu X. Reasoning Boolean operation based modeling for heterogeneous objects. *Compu Aid Des*, 2002, 34: 481–488
- 60 Li D C, He J K, Tian X Y, et al. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures. *Chin J Mech Eng*, 2013, 49: 129–135 [李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造. *机械工程学报*, 2013, 49: 129–135]
- 61 Olson G B. Computational design of hierarchically structured materials. *Science*, 1997, 277: 1237–1242
- 62 Junior M V, de Souza Neto E A, Munoz-Rojas P A. *Advanced Computational Materials Modeling: From Classical to Multi-Scale Techniques*. New York: John Wiley & Sons, 2011
- 63 Gitman I M, Askes H, Sluys L J. Coupled-volume multi-scale modelling of quasi-brittle material. *Eur J Mech-A Solids*, 2008, 27: 302–327
- 64 Smith C J, Todd I, Gilbert M. Utilizing additive techniques to fabricate weight optimized components designed using structural optimization methods. In: Proceedings of the 25th International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2013. 879–894
- 65 Reinhart G, Teufelhart S. Load-adapted design of generative manufactured lattice structures. *Phys Procedia*, 2011, 12: 385–392
- 66 Rosen D W, Chu C, Graf G. Design for additive manufacturing of cellular structures. *Comput Aid Des Appl*, 2008, 5: 686–696
- 67 Engelbrecht S. *Design of Meso-scale Cellular Structure for Rapid Manufacturing*. Dissertation for Ph.D. Degree. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2009
- 68 Chu J, Engelbrecht S, Graf G, et al. A comparison of synthesis methods for cellular structures with application to additive manufacturing. *Rapid Prototyp J*, 2010, 16: 275–283
- 69 Bruck H A, Gilat R, Aboudi J, et al. A new approach for optimizing the mechanical behavior of porous microstructures for porous materials by design. *Model Simul Mater Sci Eng*, 2007, 15: 653–653
- 70 Podshivalov L, Gomes C M, Zocca A, et al. Design, analysis and additive manufacturing of porous structures for biocompatible micro-scale scaffolds. *Procedia CIRP*, 2013, 5: 247–252
- 71 Hengsbach S, Lantada A D. Rapid prototyping of multi-scale biomedical microdevices by combining additive manufacturing technologies. *Biomed Microdevices*, 2014, 16: 617–627
- 72 Lin S L, Lin C C, Lin D Y, et al. Laser additive manufacturing technology in titanium 64 implant of microstructure fabrication and analysis. In: Proceedings of 8th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Suzhou, 2013. 594–597
- 73 Lian C, Li D C, Zhu L C, et al. Biomimetic interface design and finite element optimisation for osteochondral composite scaffold. *Chin J Mech Eng*, 2014, 50: 32–38 [连岑, 李涤尘, 朱林重, 等. 复合材料支架的仿生界面设计与有限元优化方法. *机械工程学报*, 2014, 50: 32–38]
- 74 Ma J F, Chen W Y, Zhao L, et al. Bionic design of columnar structure based on microstructure of bamboo. *J Mach Des*, 2008, 25: 50–53 [马建峰, 陈五一, 赵岭, 等. 基于竹子微观结构的柱状结构仿生设计. *机械设计*, 2008, 25: 50–53]
- 75 Wang Q J, Zhu D. Virtual texturing: modeling the performance of lubricated contacts of engineered surfaces. *J Tribol*, 2005, 127: 722–728
- 76 Dong Q W, Liang X D. An approach for the design and implementation of solid texture. *J Comput Aid Des Comput Graph*, 2000, 12: 401–404 [董全武, 梁训东. 一种实体纹理的设计方法和实现. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2000, 12: 401–404]
- 77 Qiu C, Liu Z Y, Zhou S H, et al. Modeling of part surface topography based on revised multi-scale altitude field. *J Comput Aid Des Comput Graph*, 2012, 24: 1631–1639 [裘迪, 刘振宇, 周思杭, 等. 基于多尺度高度场修正的零件表面形貌建模及应用. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24: 1631–1639]
- 78 Song Y Y. Study of product manufacturability and evaluation methods. *J Tsinghua Univ Sci Tech*, 1998, 38: 111–114 [宋玉银. 产品可制造性及评价方法的研究. *清华大学学报 (自然科学版)*, 1998, 38: 111–114]
- 79 Rosen D W. Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures. *Comput Aid Des Appl*, 2007, 4: 585–594

- 80 Yan C, Hao L, Hussein A, et al. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *Int J Mach Tool Manu*, 2012, 62: 32–38
- 81 Kerbrat O, Mognol P, Hascoet J. Manufacturability analysis to combine additive and subtractive processes. *Rapid Prototyp J*, 2010, 16: 63–72
- 82 Kerbrat O, Mognol P, Hascoet J. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Comput Ind*, 2011, 62: 684–692
- 83 Muir M J, Toropov V V, Ouerin O M. Rules, precursors and parameterization methodologies for topology optimized structural designs realized through additive manufacturing. In: *Proceedings of 10th AIAA Multidisciplinary Design Optimization Conference, National Harbor, 2014*. 1–11
- 84 Yang Y, Wang D, Su X, et al. Design and rapid fabrication of non-assembly mechanisms. In: *Proceedings of 6th International Conference on Manufacturing Automation, Hong Kong, 2010*. 61–63
- 85 Chen Y, Chen Z Z. Joint analysis in rapid fabrication of non-assembly mechanisms. *Rapid Prototyp J*, 2011, 17: 408–417
- 86 Song X, Chen Y. Joint Design for 3-D Printing Non-Assembly Mechanisms. In: *Proceedings of ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, 2012*. 619–631
- 87 Cali J, Calian D A, Amati C, et al. 3D-printing of non-assembly, articulated models. *ACM Trans Graph*, 2012, 31: 130
- 88 Emmelmann C, Sander P, Kranz J, et al. Laser additive manufacturing and bionics: redefining lightweight design. *Phys Procedia*, 2011, 12: 364–368
- 89 Wang H, Chen Y, Rosen D W. A hybrid geometric modeling method for large scale conformal cellular structures. In: *Proceedings of ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Long Beach, 2005*. 421–427
- 90 Liu L G, Wang T Y, Yang Z W, et al. Cost-effective printing of 3D objects with skin-frame structures. *ACM Trans Graph*, 2013, 32: 177
- 91 Doubrovski Z, Verlinden J C, Geraedts J M P. Optimal design for additive manufacturing: opportunities and challenges. In: *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Washington, 2011*. 635–646
- 92 Anderson E. Additive manufacturing in china: threats, opportunities, and developments (part 1). *SITC Bull Anal*, 2013, 5: 1–5
- 93 Ivanova O, Williams C, Campbell T. Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyp J*, 2013, 19: 353–364
- 94 Melchels F P, Domingos M A, Klein T J, et al. Additive manufacturing of tissues and organs. *Prog Polym Sci*, 2012, 37: 1079–1104
- 95 Crane N B, Tuckerman J, Nielson G N. Self-assembly in additive manufacturing: opportunities and obstacles. *Rapid Prototyp J*, 2011, 17: 211–217
- 96 Marga F, Jakab K, Khatiwala C, et al. Toward engineering functional organ modules by additive manufacturing. *Biofabrication*, 2012, 4: 1–12

Product modeling for additive manufacturing

LIU JiHong¹, XU WenTing¹ & JING ShiKai^{2*}

¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

² School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

*E-mail: jingshikai@126.com

Abstract The intrinsic limitations of traditional CAD modeling severely restrain the design space of additive manufacturing (AM). In order to maximize the technological superiority of AM, great effort should be made

to optimize product performance and save manufacturing cost through considering the shape, size, hierarchical structure, and material composition in the design phase. According to AM characteristics, this paper summarizes the state-of-the-art research of AM product modeling in the following four aspects: complex shape modeling, complex material modeling, complex hierarchy modeling, and modeling for manufacturing. Based on this, future development trends in this field are discussed. Integrated modeling and lightweight modeling are considered as the potential development direction of AM product modeling.

Keywords additive manufacturing, complex shape modeling, complex material modeling, complex hierarchy modeling, modeling for manufacturing



LIU JiHong was born in 1966. He received the Ph.D. degree from the Tokyo Metropolitan University, Tokyo, in 1996. Currently, he is a professor at Beihang University. His research interests include modern design theory and method, complex product engineering, digital design and manufacturing, knowledge management and engineering.



XU WenTing was born in 1989. She is currently working toward the Master's degree at Beihang University. Her research interests include complex product engineering, digital design and manufacturing.



JING Shikai was born in 1975. He received the Ph.D. degree in Engineering from Northwestern Polytechnical University, Xi'an, in 2005. Currently, he is a lecturer at Beijing Institute of Technology. His research interests include product data management, digital design and manufacturing, knowledge management, and manufacturing service technology.