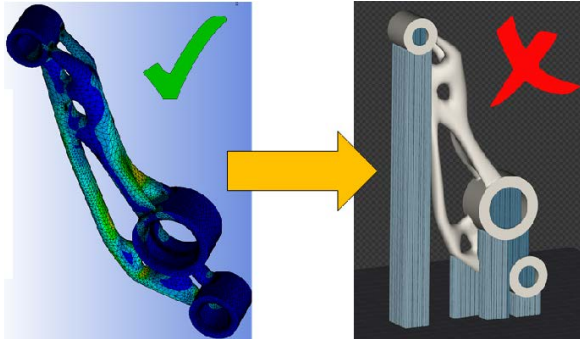


金属增材制造设计 — 入门指南

增材制造 (AM) 在加工具有自由形状和复杂特征的零件方面有极大的自由度，可直接根据CAD数据制造成品，无需使用成本高昂的模具。然而，采用传统方式制造这些设计复杂的零件却是非常不切实际，甚至根本不可能完成的。增材制造零件往往重量更轻、加工效率更高、性能更优。

然而，这种灵活性并不意味着我们可以随心所欲地设计任何想要的形状。至少在成本的约束下，我们也不可能做到这一点。

与任何其他制造工艺一样，增材制造技术也有其优势和局限性。例如，对于采用激光粉末床熔融技术制造的零件，如果设计有悬伸部分，也就是需要在未熔粉末上方进行熔融加工，则可能需要添加一次性支撑才能顺利加工。这些支撑会增加加工时间，消耗更多材料，而且还需要通过额外的序后处理程序去除支撑。



功能虽经优化但并未采用增材制造设计的零件可能需要大量支撑，导致加工效率偏低。

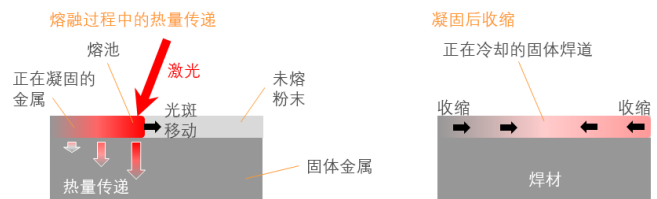
因此，如果要采用增材制造技术生产性能优异的零件，同时又要兼顾经济和实用性，那么增材制造设计 (DfAM) 就尤为重要。[“拓扑优化确实是最优的吗？”](#)一文介绍了功能优化与工艺设计之间的紧密联系。

本文则介绍了能够提高增材制造加工的成功率及效率的诸多关键因素，并且阐释了设计师在开发加工高效的零件时应遵循的一些重要指导原则。

因素1 — 残留应力

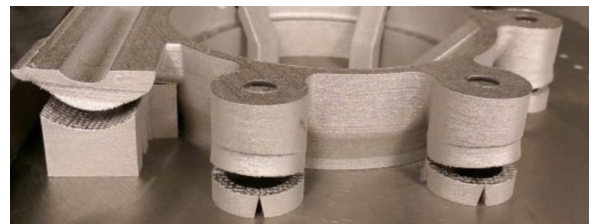
残留应力是快速加热和快速冷却的必然产物，这是激光粉末床熔融工艺的固有特性。每一个新的加工层都是通过如下方式形成的：在粉末床上移动聚焦激光，使顶层粉末熔融并与下方的加工层熔合。热熔池中的热量传递至下方的固体金属，这样熔融的金属就会冷却并凝固。这个过程非常迅速，大约只有几微秒。

当新的金属层在下层金属的上表面凝固和冷却时，会出现收缩现象。但由于受到下方固体结构的限制，这种收缩会导致层与层之间形成剪切力。



激光在固体基体的顶部熔融粉末形成新的焊道（左）。激光沿扫描矢量移动并熔融粉末，在热量传递至下方的固体金属之后，熔融粉末冷却下来。金属在冷却凝固的过程中收缩，从而与下一层之间形成剪切力（右）。

残留应力具有破坏性。当我们在一个加工层的上方增加新的加工层时，应力会随之形成并累积，这可能导致零件变形，使其边缘卷起，甚至脱离支撑：



在比较极端的情况下，应力可能会超出零件的强度，造成组件破坏性开裂或加工托盘变形：



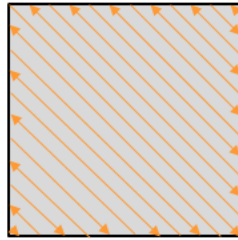
这些效应在横截面较大的零件中最为明显，因为此类零件的焊道往往较长，因而剪切力作用的距离更长。

最大程度减小残留应力

解决这个问题的方法之一是改变扫描策略，选择最适合所加工的零件几何形状的方法。当我们用激光轨迹填充零件中心时，通常会来回移动激光，这个过程称为“扫描”。我们所选择的模式会影响扫描矢量的长度，因而也会影响可能在零件上累积的应力水平。扫描矢量越短，则残留应力越小：

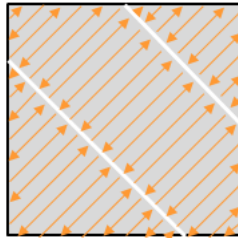
迂回扫描模式

- 每层扫描完成后旋转67°
- 加工效率较高
- 残留应力逐渐增加
- 适合较小和较薄的特征



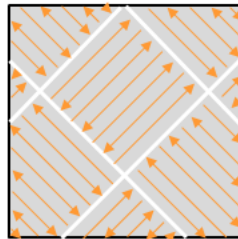
条纹扫描模式

- 残留应力分布均匀
- 适合大型零件
- 加工效率高于棋盘扫描模式



棋盘扫描模式

- 每层分为若干个5 x 5 mm的岛状区域
- 每层扫描完成后将整体模式和每个岛状区域旋转67°
- 残留应力分布均匀
- 适合大型零件



上图 — 扫描策略及其适合的不同零件类型。两种最常见的扫描策略分别是用于薄壁零件的“迂回”扫描（也称为光栅扫描），以及用于厚壁零件的“条纹”扫描。“棋盘”或“岛状”扫描策略的加工效率也很高。条纹和棋盘扫描的扫描线较短，可减少残留应力的累积。

我们也可以在从一个加工层移至下一个加工层时旋转扫描矢量的方向，这样一来，应力就不会全部集中在同一个平面上。每层之间通常旋转67度，以确保在加工完许多层之后扫描方向才会完全重复。

加热加工托盘也是减少残留应力的一种方法，此外，序后热处理也可以减少累积的应力。

残留应力设计建议

通过设计最大程度消除残留应力：

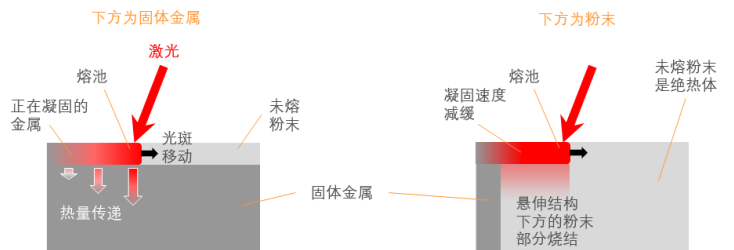
- 避免大面积不间断熔融
- 注意横截面的变化
- 混合加工，将较厚的底板整合到增材制造零件中
- 在应力可能较高的位置使用较厚的加工托盘
- 选择合适的扫描策略

因素2 — 方向

在任何叠层制造工艺中，加工方向始终限定在Z轴，即垂直于加工托盘。请注意，加工方向并非始终都是通用方向。选择合适的方向，从而使用最少的支撑材料甚至不使用支撑材料制成最稳定的加工件。

悬伸结构及其熔融过程

在粉末床加工工艺中，由于形状是一层层构建起来的，因此层与层之间的关联方式非常重要。每一层熔融时都需要下面一层来提供物理支撑和散热路径。



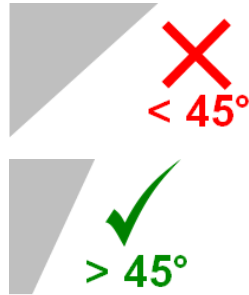
在固体金属上方熔融粉末能够快速冷却（左）。当熔融悬伸区域的粉末时，由于下方是未熔粉末，因此冷却时间更长，导致多余的材料可能会附着在零件的底面。

当激光熔融粉末层时，如果粉末层下方为固体金属，则热量会从熔池传递至下方结构，这样会重熔部分固体金属并形成坚固的焊材。当激光源移开后，熔池会快速凝固，因为热量已经有效传递出去。

如果零件具有悬伸部分，那么熔池下方至少有一部分区域会是未熔粉末。粉末的导热性远低于固体金属，因此来自熔池的热量会保留更长时间，导致周围更多粉末烧结。结果可能是，多余材料附着在悬伸区域的底面，导致悬伸结构呈现畸形和粗糙表面。

摆放方向选择

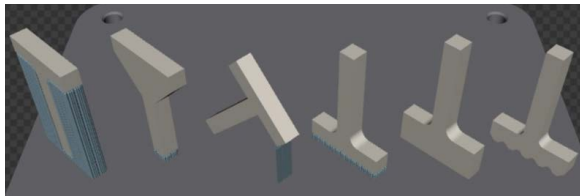
一般来说，与加工托盘之间的角度小于45度的悬伸结构需要支撑。



悬伸表面被称为下表层。这些表面通常会比垂直壁面和朝上表面更粗糙。这种效果产生的原因是，熔池冷却速度减慢会导致悬伸结构下方的粉末局部烧结。

一个零件通常能够从多个方向完成加工。理想情况下，我们应选择可实现零件自行支撑的摆放方向，以最大程度降低加工成本并简化序后处理程序。

“设计阶段的加工件摆放方向考量是增材制造设计的基本原则之一”



零件通常可从多个方向完成加工，而摆放方向的选择将大大影响支撑材料用量以及序后处理工作量。

从左起：

- 大悬臂部分需要大量的支撑材料（如蓝色所示）
- 修改设计，额外添加锥形部分以减少支撑，但这样会导致零件质量增加，并且可能需要序后处理/线切割加工
- 倾斜45度 — 除了一个局部最低点外，零件的大部分可自行支撑（详情请参见下文）。但下表层和上表层的表面粗糙度会有差异
- 倒置，底面采用短支撑 — 加工时间缩短，但需要对支撑面进行序后处理
- 紧密附着在粉末床上，留出适合电火花（EDM）移除的毛坯余量 — 残留应力可能是个问题
- 与前一种方式相似，但附着区域较少，应力累积减少 — 从制造角度来看，这可能是最高效的设计
- 最后一种方法（未显示）是将零件平放在托盘上。这种方式可以降低加工高度，但也会限制加工托盘上可摆放的零件数量，并且容易形成更大的残留应力。

最好在最开始设计零件时便使用加工文件处理软件评估各个摆放方向，以确定最有效的方式。确定了摆放方向之后，即可在此基础上继续设计细节。

局部最低点

局部最低点是零件上不与下方粉末熔融层连接的任何区域。这些区域在加工过程中需要添加支撑来固定。如果在下方没有支撑结构的情况下开始加工，当刮刀处理下一层时可能会造成第一个加工层发生位移，导致加工失败。

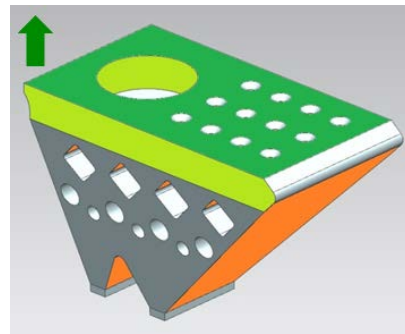


局部最低点可能一目了然，如图中左侧所示，也可能出现在与零件边缘相交的横孔和斜孔的顶部，如图中右侧所示。

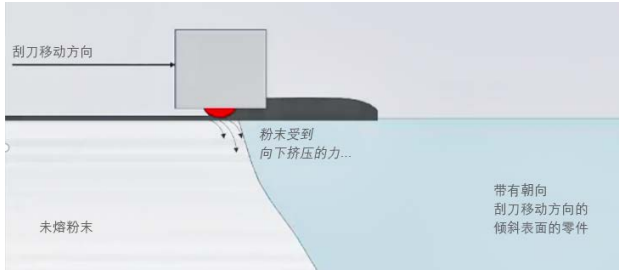
我们的目标应该是通过设计消除局部最低点，以尽可能减少支撑。

特征定向

如前所述，下表层的表面光洁度一般较差。如果对细节特征的精度要求高，那么最好将这些特征定位在零件的顶面，也就是上表层。下表层上的细节特征有可能会损失精度。



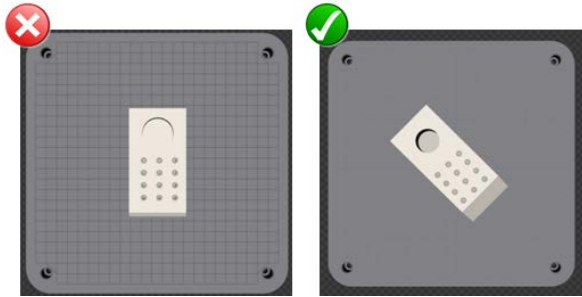
另一个要考虑的问题是零件相对于加粉刮刀的摆放方向。每新添一层粉末时，刮刀会在粉末床上铺开粉末，粉末逐渐被刮刀挤压，形成新的密集层。当材料被挤压时会在粉末床上形成压力波。该压力波会与朝向刮刀方向倾斜的零件表面相互作用，向下挤压粉末并向上挤压零件的前边缘。这可能会使零件钩到刮刀上，导致加工失败。请注意，软刮刀可以减小这种不利影响。



加粉刮刀与零件斜边的相互作用。

支撑和斜边应尽可能远离刮刀方向摆放。旋转零件之后，压力波会以倾斜的角度冲击零件，因此降低了零件变形的可能性。

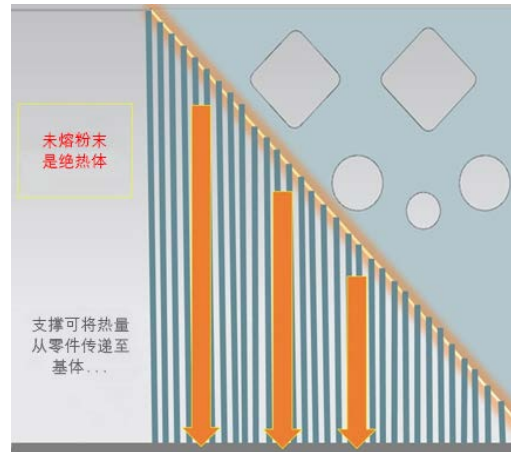
如果无法通过旋转调整位置，或者零件是旋转对称的，则可能需要添加支撑，而受影响的加工面可能需要进行序后处理。



摆放设计建议

- 增材制造零件的加工摆放方向**设计应一目了然**
- 设计师应尽量采用能够**自行支撑**的设计
- **加工成功**是首要考量
- **残留应力**和**表面光洁度**也是受摆放方向影响的重要因素
- 摆放方向可影响**加工时间和成本**
- **具有复杂几何形状的零件可能不太容易摆放** — 通常需要在表面质量、细节、加工时间/成本和支撑结构之间权衡取舍
- 设计师必须评估冲突因素以确定摆放方向

因素3 — 支撑



正如上文所述，依赖支撑来克服摆放方向问题不是一种好的工程设计实践。虽然我们可以接受在制造原型零件时付出额外的加工时间和序后处理操作，但是此类浪费在批量化增材制造时是不可接受的。过度依赖支撑则表明这个零件的几何形状“不够稳固”，这对成品率有潜在影响。

支撑目的

尽管我们可以通过设计最大程度减少支撑，但有时也不可能完全消除支撑。支撑有三大主要功能：

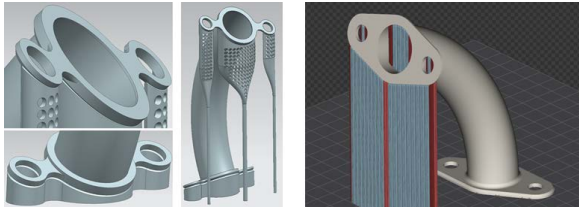
隔离材料 — 支撑可用于“固定”不与前一层相连的材料（即与加工托盘形成的角度小于45°的悬伸结构，或局部最低点特征）。最好是将支撑结构集成到零件设计中。

残留应力 — 我们应通过设计减小加工过程中的残留应力，避免直接紧贴加工托盘构建尖锐边缘和大面积区域。如果这点无法实现，那么可以应用支撑来抵消零件中的应力，防止材料从加工托盘上脱落。但是在批量增材制造中不推荐这种方法。

散热通道 — 未熔粉末是一种绝热体。支撑会从下表层区域转移走一些热量，从而有助于避免粉末燃烧、过度熔融、变形和变色；对于正对刮刀方向的下表层，效果尤为显著。通过旋转零件改变其与刮刀的相对朝向，也可以减少上述不利影响。

主要支撑和辅助支撑

主要支撑是指在CAD环境中随零件一起开发的支撑，属于一次性结构，将在加工完成时被移除。**辅助支撑**是指在加工文件处理软件中生成的支撑。



在CAD中生成的主要支撑（左）和在加工文件处理软件中生成的辅助支撑（右）。

主要支撑的特点是坚固，可控性好。它们可以导入到加工文件处理软件中（以STL形式），或随零件的主体一起设计；还可以使用完整的版本控制功能以参数的形式导出，也可以执行有限元应力分析。此外，我们可以设计和模拟主要支撑，以可控方式通过支撑传递热量。

在加工文件处理软件中创建的辅助支撑也可通过参数进行管理，但其可追溯性和可重复性或有不足。如果更改了零件设计，则可能需要重建辅助支撑。

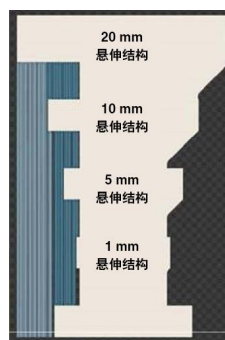


在加工文件处理软件中生成的辅助支撑类型。选择支撑时应考虑最大程度减少加工时间和序后处理成本。

混合支撑设计是充分利用CAD设计和加工文件处理软件的优势生成的最佳方案。

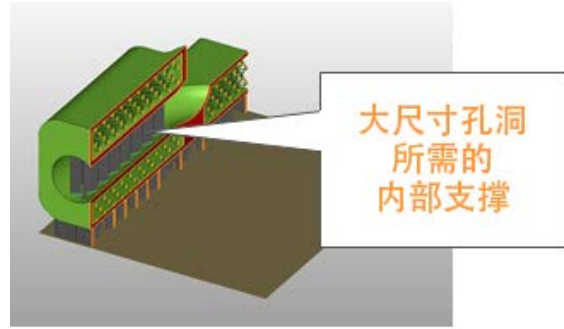
圆角和倒角

虽然0.3 – 1 mm的水平悬伸结构可自行支撑，但是不建议这样做。而超过1 mm的悬伸结构则必须要重新设计或添加支撑。在零件上添加圆角和倒角可消除悬伸结构（如图中右侧所示）。

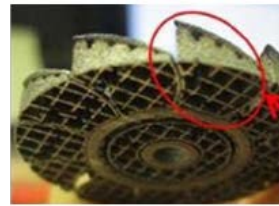


支撑移除问题

孔洞和管道内的支撑很难移除，并且可能需要序后处理。同样，支撑太小也会增加移除难度。如果零件的几何形状比支撑更加脆弱，则在序后处理过程中零件损坏的风险较高。



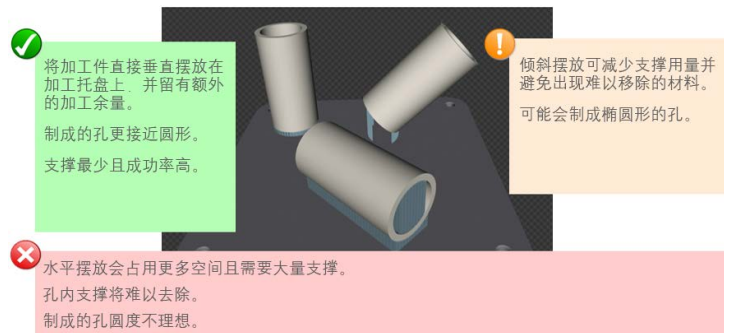
大尺寸孔洞所需的内部支撑



在尝试移除支撑材料时，由于零件太小且易碎导致无法装夹

去除支撑时难免会损坏零件。

最大程度减少支撑的零件摆放示例



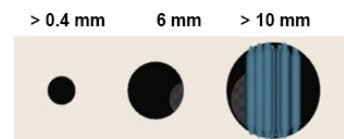
✓ 将工件直接垂直摆放在加工托盘上，并留有额外的加工余量。制成的孔更接近圆形。支撑最少且成功率高。

! 倾斜摆放可减少支撑用量并避免出现难以移除的材料。可能会制成椭圆形的孔。

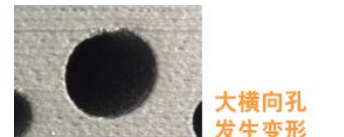
✗ 水平摆放会占用更多空间且需要大量支撑。孔内支撑将难以去除。制成的孔圆度不理想。

水平细节 — 添加支撑或重新设计

零件侧面露出的横向孔可能也需要支撑。大多数激光粉末床机器可加工的孔的最小直径为0.4 mm。



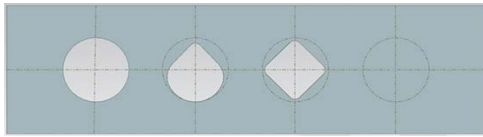
直径大于10 mm的孔洞和管道将需要在其中中心添加支撑，这种情况下应考虑重新设计。直径介于这两个尺寸之间的孔洞无需支撑即可加工，但是其下表层可能会出现一定程度的变形，这是由于悬伸部分的熔池冷却速度减慢所致。



大横向孔发生变形

由于水平孔的圆度很可能不太理想，因此更好的方法通常是改变它们的形状使其能够自行支撑。在某些情况下，泪滴形或菱形孔都是可接受的最终特征。这两种形状都可用于流体通道，并具有相似的液压性能。其中，菱形孔能够更好地抵抗流体压力。

在其他情况下，如果要求必须有高精度圆孔，则需要进行序后处理。菱形孔是一种对称导孔，比泪滴形孔更方便进行铣削加工。在许多情况下，最可行的方法可能是，不在增材制造阶段加工这些孔，而在序后处理阶段在实心结构上钻孔。



横向孔选项：按尺寸加工，并接受一定程度的变形；加工成能够自行支撑的泪滴形或菱形孔，并留有一定的加工余量；或者在增材制造过程完成后，再在实心工件上加工出孔状特征。

支撑设计建议

- 将直径10 mm以上的孔修改成能够自行支撑的菱形孔
- 使用倒角半径以避免较高的支撑
- 移除与加工托盘之间的角度小于45度的悬伸结构
- 旋转下表层使其远离刮刀方向
- 在增材制造完成后再次加工小型特征
- 直接紧贴加工托盘进行加工，同时留有额外的加工余量
- 移除水平下表层区域

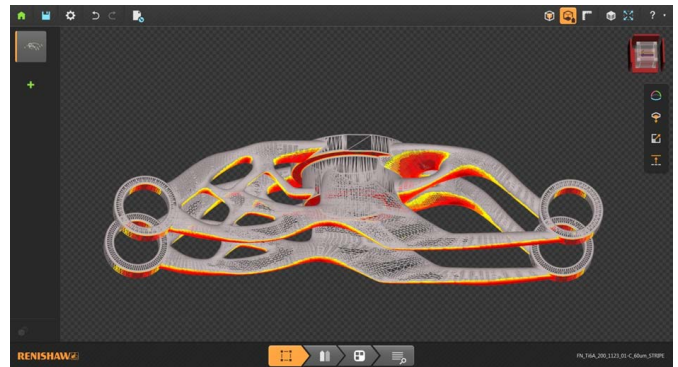
因素4 — 优化

为提高零件加工效率，零件设计中越来越多地采用拓扑优化和衍生式设计。网状结构也具有减轻重量的优势。增材制造技术能够生产复杂形状，因此是将此类设计制成实物的最佳途径。

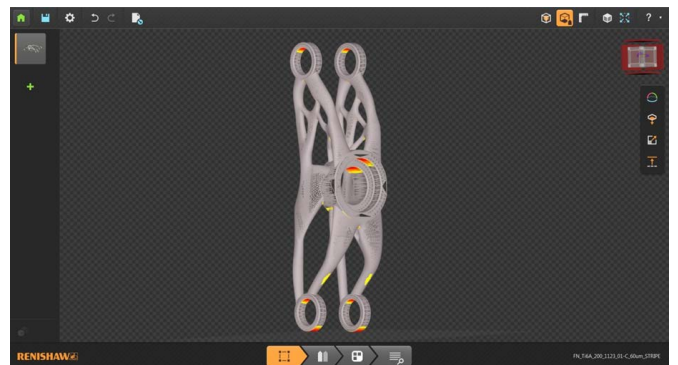


这些优化技巧的主要目的是，在移除多余材料的同时保持结构的强度和刚性。经过优化的零件通常呈现出更为复杂、有机的外观。需要注意的是，功能经过优化的零件可能未必适合增材制造 — 尤其是从加工摆放来说。

例如，从下图中可以明显地看出，如果按水平摆放方向加工该零件，那些突出显示为红色的悬伸区域内需要添加很多支撑。



沿垂直方向重新摆放零件后，需要添加支撑的区域变少。圆孔等细节特征将需要添加支撑或重新设计。此外，还需要注意优化后的支撑杆与圆角半径的交汇角。



在设计阶段重新评估零件时已将摆放方向考虑在内，因此很显然，该零件在进行增材制造时只有一个摆放方向。现在需要针对序后处理重新设计横向孔等细节：



优化设计建议

- 应用最小壁厚准则
- 确定需要精加工的粗糙表面
- 考虑支撑的位置和移除难度，或者通过重新设计消除支撑
- 设计时考虑零件摆放方向并相应修改细节
- 验证是否能够满足表面光洁度要求

设计师可能需要结合各种优化技巧，包括拓扑优化、空心零件、网状结构（如适用）等，创建高效的设计。零件摆放方向应该是继尺寸、形状及功能之后的又一个关键的设计驱动因素。

总结

增材制造技术为高效生产高性能的零件提供了极大的设计自由。但是若要以最低的成本、最少的浪费批量生产零件，则必须充分考虑增材制造的工艺特性。

将增材制造设计思维融入到设计过程中，有助于提高加工成功率，增强增材制造工艺的经济效益。毋庸置疑，要想提高竞争力，设计师不仅要思维灵活，而且必须对增材制造工艺有深入的了解。

作者简介

Marc Saunders，增材制造应用总监

Marc Saunders先生在高科技制造领域有超过25年的丰富经验。Saunders先生在雷尼绍先后担任了多个职位，在开发公司屡获殊荣的RAMTIC自动化加工平台中做出了关键贡献，还成功为航空航天领域客户提供交钥匙测量解决方案。

Marc现在是雷尼绍全球增材制造解决方案中心网络的负责人，致力于帮助考虑将增材制造工艺纳入生产流程中的客户在采购新设备之前获得实际操作体验。

www.renishaw.com.cn/additive



扫码关注雷尼绍官方微信

