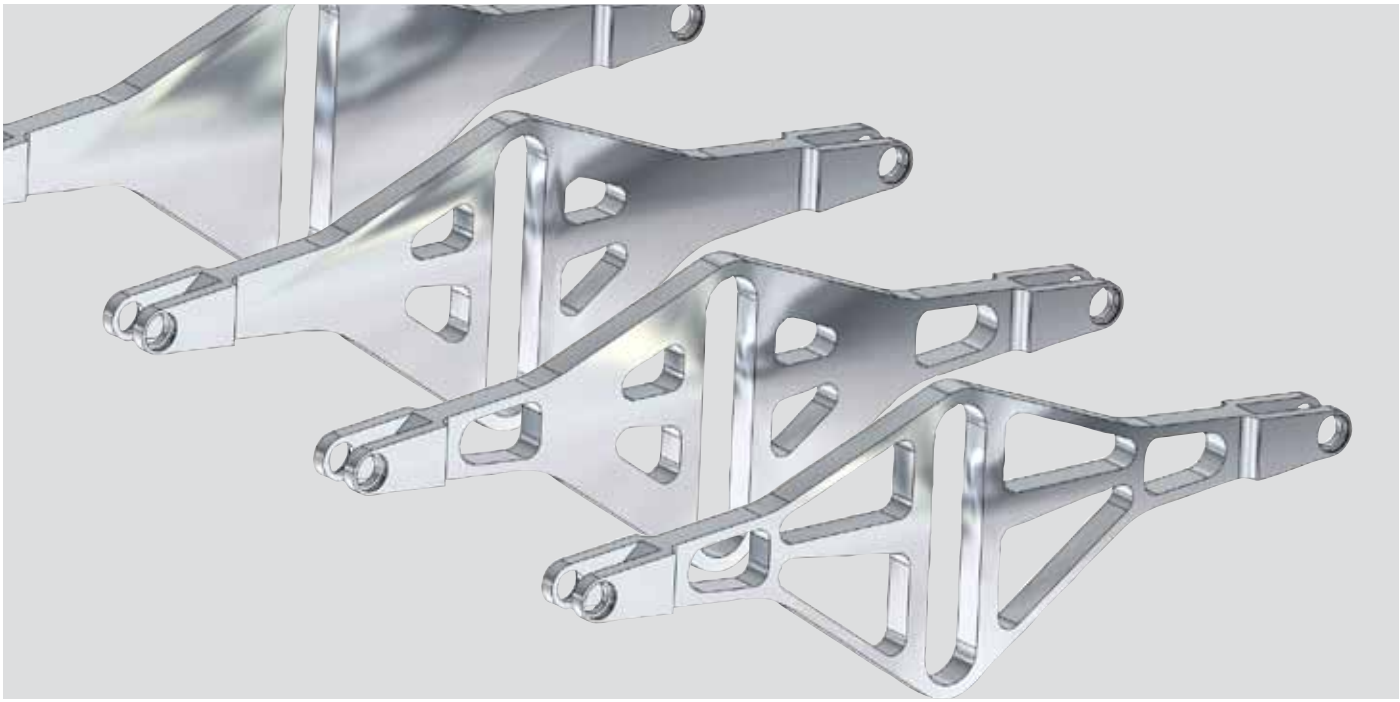
# SOLIDWORKS 优化


## 摘要

优化是对重量、应力、成本、挠度、自然频率或温度因素进行计算，所有这些都以尺寸、载荷和约束、材料和/或制造要求为条件。挑战在于在设计流程的初期，我们很少知道这些输入。

本文考察了优化过程中的一些基本概念、目前可供受“有限元分析”驱动的优化过程使用的工具，然后将着重讲述设计工程师如何在他们的日常工作中取得最好的优化效果。

## 优化简介

十年前，设计工程师开始学习使用有限元分析 （finite element analysis，FEA）、计算流体力学 （computational fluid dynamics，CFD） 和运动仿真等计算机辅助工程 （computer-aided engineering，CAE） 工具，并将它们作为尽快推出更好的设计的重要手段。他们相信，借助于这类工具所设计出的零部件、装配体和产品能够经受住有可能加诸其上的最为粗暴的使用。

不过，旨在满足“最坏情况”的产品，对实际操作环境来说可能并非最佳设计。它们可能会因要满足安全与强度的要求而被过分设计，远超出它们使用目的的要求；或者非常难于制造，成本高昂。如果设计工程师进一步希望自己设计出的产品就其功能而言是最好、最赢利的，则他们需要将下一个 CAE 步骤带入产品开发过程中，这就是优化。

设计优化能够改善产品在使用环境中的性能，从而提高其价值。

## 设计工程师眼中的优化

设计优化可以提高产品的价值，其手段有：提高产品在自身操作环境中的性能；或者减少用来制造产品的材料数量，降低产品的生产成本。

设计工程师理所当然是处在产品开发的最前线。现在，该工程师对设计分析肯定已非常熟悉，也就是说，他或她已经掌握了优化过程所需的基本知识，所需要的只是采取下一步操作的优化工具。

通过加入优化过程，设计工程师能够增进对其产品表现的了解，并对设计加以改进，同时还能不违背从前面已完成的分析中得出的数据。

图1：与扳钳有异曲同工之妙的优化过程

## 优化的基本组件

优化的过程有三个主要组件：

- 目标
- 约束
- 变量

最简单的情况下，经过优化的设计应该通过改变变量求得目标的最大值或最小值，同时确保关键性响应不超出所定义的约束条件。

## 目标

目标就是执行优化过程的目的所在。例如，如果某家公司研究表明，生产重量最轻或价格最低的产品将赢得竞争优势，那么，最大限度地减少重量或成本就将成为优化的目标 — 这类情况称为单目标优化。

工程师经常需要面对多目标优化，不过，这种情况下所需要的资源可能超过日常所能提供的量。如果设计工程师能够将他的问题定义细化为一个目标（或一次只有一个目标），优化过程就能变得简单。

在大多数情况下，处理结构响应的工程师会将重量最小化作为目标。在流体应用中，最常见的目标是实现压降和紊流能最小化或速度最大化。

## 约束

约束将现实带入了优化。图 2 中显示的悬臂示例就属于这类情况。如果将优化问题设置为不受约束的重量最小化问题，优化程序将直接选择尺寸变量所允许的用料最少条件。不过，在现实世界中，绝大多数零部件都会有强度或刚度等其他方面的操作要求。因此，工程师要选择用来定义部件在其系统内的可接受行为的约束条件，这一点很重要。一般而言，他所选择的约束条件是在单一的静态分析、频率分析或热分析中所允许的情况。

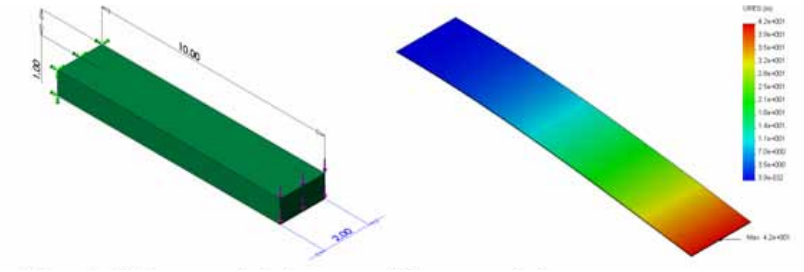



图2：重量最轻的横梁可能会过度弯曲。

## 设计变量

在约束研究中，如果工程师希望从几个可能的设计配置中找到最佳配置，则他需要更改设计参数。这些参数就是设计变量。它们可以是尺寸、阵列中的实例数量、材料属性、载荷或弹簧刚度 — 或者拥有可检测的“最佳”值或需要加以考虑的设计的任何其他方面。

变量可以是连续的，也就是说，变量能够在指定的最小值和最大值之间选择任意值。绝大多数尺寸变量都属于连续变量。

它们也可以是离散的，也就是说，变量只能取定义好的一组可能值。离散变量的最简单形式是“开关”或“是否”变量。例如，是否经过了焊接或是否带扣件就属于离散变量类别。阵列的实例也属于离散变量。再举个例子，皮带轮或转轮的辐条数可以是任意整数，但不能是 3.2 或 4.7 等小数。

钣金规格是一种可落入两种类别的变量。一般而言，规格厚度有预先定义的值，但通常的作法还是将厚度指定为一个连续变量，然后再上取整或下取整到最接近的规格厚度。

在优化研究过程中，选择变量是一个非常重要的步骤。如果工程师选择的变量过多或过少，分析的效果都会大打折扣。变量过多或取值范围过大，会使程序难以确定设计的最佳配置 — 考虑相对最小值和最大值时尤其如此。与之相反，如果设计师提供的变量数过少或范围过窄，将会对成功进行研究施加不必要的限制。

正确选择变量的最可靠方法是面向不同的可能性执行初始灵敏度研究，这一过程将在后面的部分加以讨论。

如果设计工程师能够将他的问题定义细化为一个目标（或一次只有一个目标），优化过程就能变得简单。

如果工程师选择的变量过多或过少，分析的效果都会大打折扣。

## 产品优化的工具

受“有限元分析”驱动的优化乃是工程方面一个不断上升的研究领域。尽管程序和技术都可以用来执行这一过程，替换法研究、灵敏度研究以及形状优是目前最常用的方法。形状优化的两种最常用方法是梯度搜索和实验设计（design of experiments，DoE）。后者是以响应面计算为基础，能够获得“健壮的”解决方案 — 也就是说，能够在产品的生命周期中，有效应对范围最广的工作条件。

形状优化的两种最常用方法是梯度搜索和实验设计 （design of experiments，DoE）。

### 替换式研究

替换式研究是用迭代方法来考察各种可选的设计配置。例如，设计工程师可以通过增减筋的方式来了解这样做对性能产生的影响。

替换式研究对于快速评估多个选项很有价值，它可以确定哪一个可能的变化（如果有的话）会对零部件产生最大的影响。因为特征的组合数可以是无限的，所以对每次迭代及其相应的响应进行记录，这一点很重要 — 可以避免重复或遗漏。SolidWorks® 的用户可以使用“配置” (Configurations) 这一优秀的实用工具来管理替换式研究迭代。

限定了可能的更改之后，如果觉得某些更改值得做进一步的研究，设计师可以利用灵敏度研究来考察相关尺寸或设计特征的变化情况。

### 灵敏度研究

灵敏度研究会系统地评估对输入变化做出响应的变化情况。通常是采用图解或图表方式来显示这类研究的结果：在 X 轴指定参数的改变量，在 Y 轴指定对这一改变的响应。图 3 即显示了这一输出的一个示例。在给定输入范围的情况下，如果响应的变化范围很大，即意味着灵敏度较高；响应的变化范围很小，即表示不灵敏。这类研究有助于向工程师说明那些值得做进一步研究的特征。

灵敏度研究可以向工程师指出意义最为重大的参数以及对目标有最大影响的数值的范围。

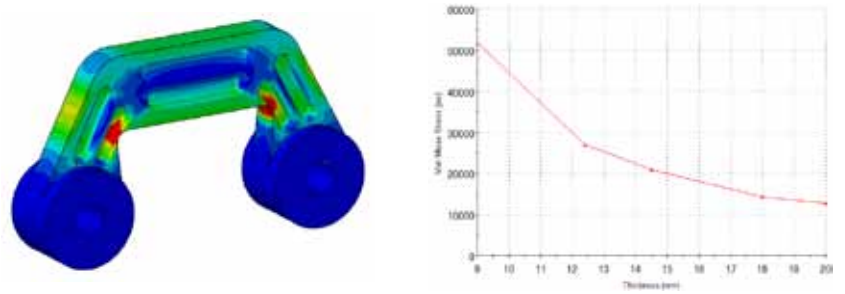
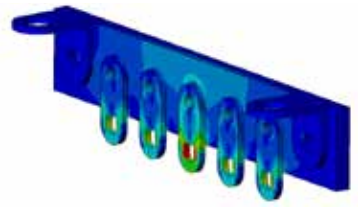


图3：参数灵敏度研究 — 应力与厚度

另外，灵敏度研究可以向工程师指出意义最为重大的参数以及对目标有最大影响的数值的范围。基于“有限元分析”的优化程序可以完善这一研究过程，其方法是根据某一具体参数的一系列数值求出问题的解，然后再描绘出目标以及受约束的响应。

图4 显示了采用 SolidWorks Simulation 程序中的“设计情形” (Design Scenarios) 功能设置这样一个灵敏度研究的输入表。这一自动化方法通过指明待研究的维度值，将每一个待考察的参数范围均分为几段。在解出每一维度的模型之后，程序将生成响应图解，如图 4 所示。



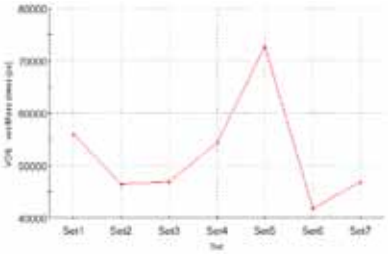


图4：使用“设计情形”设置多参数灵敏度研究

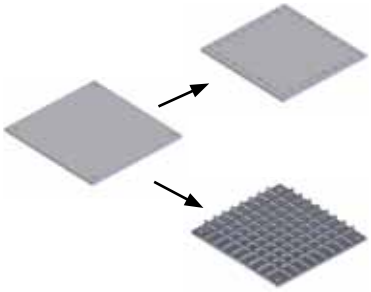


图5：“健壮”的优化算法能够确定最佳设计方向。

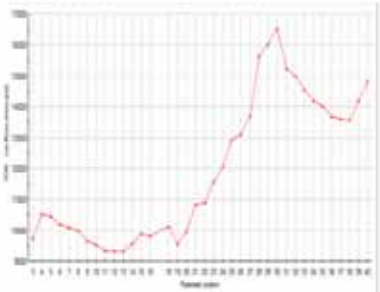


图6：带有多个极小值的灵敏度图解

## 使用SolidWorks 进行优化

SolidWorks Simulation 使用了基于“实验设计”的优化方式。要求解某一问题，工程师会提供其维度设计变量的最大值和最小值，然后选择“标准” (Standard) 或“高质量” (High Quality) 优化方式。“标准”方式假设限制值之间的目标响应曲线是线性的，只计算这些值处的响应。“高质量”优化会考虑到在限制值之间存在二阶响应的可能性，除了极大、极小值之外还会求一个中间值。图 7 显示了随三圆角的尺寸变化而自动执行的汽车悬架设计迭代过程。这一情况下，设计约束是不超出材料在静态载荷下的屈服强度。

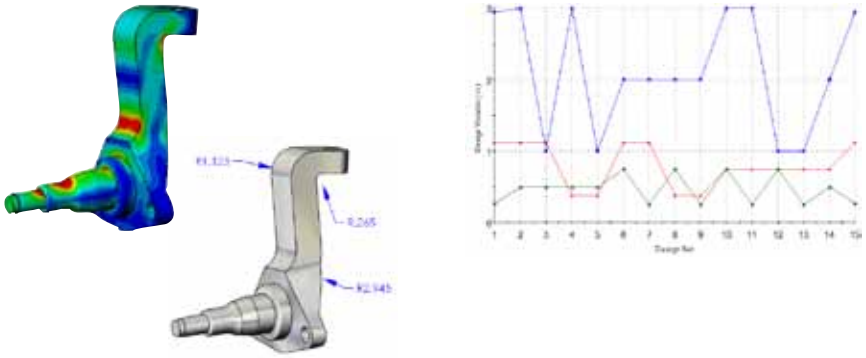


图7: 在不同圆角半径下对主轴形状的优化

SolidWorks Simulation 优化研究会为每一变量生成表征最佳配置的单一值。为了在采用此方法时获得最高的准确度，工程师应该细化每一变量的取值范围，并进行二次优化或灵敏度研究。由此，他可以借助优化程序快速、有效地了解如何改善自己的产品，并且实现最优化设计。

## 进行优化的最佳时机

负责优化的工程师如果能在设计过程的早期阶段执行优化过程，将能最大限度地提高技术利用价值。随着设计过程的进展，设计的复杂性会越来越高，更改也将越来越难于评估和实施。

在设计的概念阶段，工程师能够借助于优化，确保为基础设计提供准确的材料、壁厚、硬化特征和扣紧方式等等。研究表明，产品成本的 80% 是在设计过程的最初 20% 阶段确定的。为了确保参与竞争的产品发挥出最佳效果，很值得在产品开发的最早期阶段考察一下理想配置。

负责优化的工程师如果能在设计过程的早期阶段执行优化过程，将能最大限度地提高技术利用价值。

除了在设计过程的早期阶段执行优化过程这一点很重要之外，优化在设计过程的后期也有自己的用武之地，工程师能够借助于这一手段解决问题或改善某个特征。

## 优化中 CAD 与分析之间的联系

上述所有内容涉及的都是受“有限元分析”驱动的优化，而“有限元分析”通常与生成设计的 CAD 程序密切相关。CAD 系统对优化同样非常重要，原因在于生成模型、尺寸标注方案以及嵌入关系的方法会影响设计师对不同设计方案的考察能力。

在创建自己的模型时，工程师所考虑的尺寸应能允许修改那些以前经过优化的特征，同时不会导致任何模型重建错误。

规划过程对优化至关重要。设计师最好能先完全围绕优化目的生成 CAD 模型，然后再借助于这一过程所收集的信息来完成对 CAD 模型的细节设计与生产。零部件和结构的复杂性应该是他在选择要研究的特征时所考虑的问题。

## 最大限度地利用优化过程

那些打算将优化过程作为设计与产品的改善手段的工程师需要清除他们头脑中任何先入为主的有关“最优化”的概念。要实现这一目的，很大程度上可以先由优化程序提供相关信息，然后再由他们来了解各种数据的不同含义。

针对同一问题，思想开放的设计师可能会发现优化工具提供了几个不同的解决方案 — 对这些解决方案，需要参照最终获得质量最好、最赢利的产品的制造要求和效率来加以考虑。

图8：用于 NASA 火星探险漫游车 (MER) 任务的机械臂

那些打算将优化过程作为设计与产品的改善手段的工程师需要清除他们头脑中任何先入为主的有关“最优化”的概念。

## 优化方面的成功故事

**Alliance Space Systems**

位于加州 Pasadena 的 Alliance Space Systems, Inc. (ASI) 为航天器和科学仪器设计与制造机械系统、机器人、机械结构与装置。最为著名的是，ASI 为 NASA 面向火星探险漫游车 （Mars Exploration Rover，MER） 任务所开发的大获成功的*勇气*号和*机遇*号漫游车制作了机械臂。

ASI 使用集成的 SolidWorks Simulation 软件来测试并优化零部件和装配体的设计。“我们对每一克的重量、每一毫米的空间都斤斤计较，” ASI 的工程总监 Brett Lindenfeld 说。“因为我们的分析人员使用 SolidWorks Simulation 进行应力分析和热分析，他们能够为我们的设计人员提供支持，并与设计人员展开有效的协作，以便对设计加以优化。我们的团队将机械臂的体积减少了 20%，这相当于汽车的发动机和传动装置所需要的空间；同时将返工工作量保持在 1% 之内。虽然时间很紧，但我们仍然推出了质量更高、更具创新性的设计。”

**Kadant Johnson**

位于密歇根州 Three Rivers 的 Kadant Johnson（前身是The JohnsonCorporation）为流程工业所用的流体和热交换设备设计与制造先进的流程控制系统、旋转接头、弯管和加热系统以及相关的零部件。产品开发总监 Alan Ives 及其团队需要优化高速造纸机干燥部分所用的旋转接头和弯管装配体的设计。采用手工计算和现有“有限元分析”软件对已经成型的设计进行细化，这会非常浪费时间，他们无法承担这样做的成本。该团队需要新的工程解决方案，以便实现节约时间与提高设计投资回报率的目的。

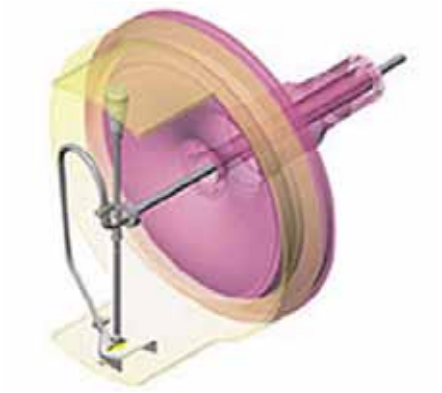


图9：弯管装配体在 The Johnson Company 得到了优化。

该公司使用 SolidWorks Simulation 来分析和优化每一个零部件，用合理的时间与较少的设计迭代次数跟踪了更多的设计。结果，他们得到了更坚固、更耐用而质量更轻的装配体，其开发时间却只占正常开发时间的一小部分。“我们发现 SolidWorks Simulation 是一个非常健壮的软件包，它帮助我们按期实现了所有的设计目标，”Ives 说。他们在三个项目上各自减少了 40% 到 50% 的重量，并且能够实现预测响应与实际测试的关联。减少重量这一结果直接来自于使用 SolidWorks 对设计进行优化，”他补充到。

## 结论

设计优化可以提高产品的价值，其手段有：提高产品在自身操作环境中的性能；或者减少用来制造产品的材料数量，降低产品的生产成本。通过加入优化过程，设计工程师能够增进对其产品表现的了解，并对设计加以改进。

公司总部
Dassault Systèmes
SolidWorks Corp.
300 Baker Avenue
Concord, MA 01742 USA
电话：+1-978-371-5011
电子邮件：info@solidworks.com

亚太地区总部
电话：+65 6511 7988
电子邮件：infoap@solidworks.com

大中国区
电话：400-818-0016
电子邮件：infochina@solidworks.com

SolidWorks 是 Dassault Systèmes SolidWorks Corp. 的注册商标。所有其他公司和产品名称均属各自所有者的商标或注册商标。
©2011 Dassault Systèmes。保留所有权利。 MKOPTWPCHS0111