

DFM

可制造性设计的有限元分析

提供可制造性设计建议的工厂可以降低客户的加工成本和复杂程度。Parametric 工厂利用有限元分析作为精细 DFM 工作的一部分，这样有助于建立与客户工程师的长期合作关系。

文 | Derek Korn



更多精彩请扫描二维码

许多领先的机械工厂向客户提供可制造性设计 (DFM) 建议。只要不影响产品性能，对零件整体设计及特定零件特性或容差的修改，通常都会简化零件加工、降低总体制造成本和缩短生产时间。

如今 DFM 越来越重要，因为更多公司没有生产产品所需的内部加工或制造能力。因此，设计工程师无法向自己的制造专家征求意见，获得简化加工、完善设计的方法。另一方面，年轻工程师对于制造过程缺少或根本没有经验，这会导致设计的部件生产难度很大或几乎无法生产。两种情况致使他们更多地依赖外部加工供应商提供相关指导。

多数情况下，工厂会利用自身的加工经验形成 DFM 修改方案，并向其客户提供建议。Parametric 是一家位于 California 的 Santa Clara 的大中型合同工厂，它就在提供 DFM 服务。然而，它还可以将 DFM 带到一个更高的层次，即应用有限元分析 (FEA) 优化客户的零件设计，并考虑零件运行期间可能面临的受力和载荷条件，然后计算部件将会发生的位移和产生的应力与应变。这种方法将 FEA 用于 DFM，有效证明了推荐的零件生产优化设计变更不会导致零件超出运行限值或约束。

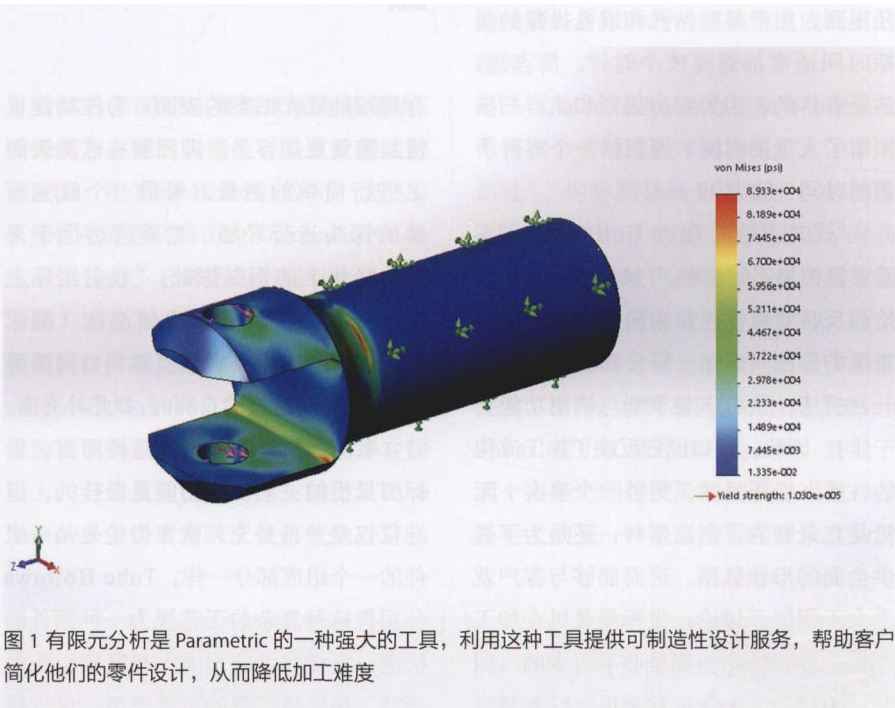


图 1 有限元分析是 Parametric 的一种强大的工具，利用这种工具提供可制造性设计服务，帮助客户简化他们的零件设计，从而降低加工难度

Parametric 公司 COO 和有资质的专业工程师 Ryan Teixeira 认为，FEA 能力是体现工厂差异的要素。“说服客户相信设计变更可以大大降低制造成本是很难的。” Ryan Teixeira 说道；“然而，FEA 是工程师的语言，它可以量化，增加了语言的分量。所以，我们努力与客户设计工程师建立密切的关系，并且意识到 FEA 和我们的先进加工和制造能力同样有价值。”

事实上，Teixeira 认为，通过 DFM 与工程师建立关系比帮助 Parametric 获

得更多新业务和留住优质客户更重要。它可以让工程师们量化经过优化的设计节省了多少钱，从而证明其为公司创造的价值。这种方法实现了工厂、工厂客户和客户工程师三赢的关系。

FEA 作为经营策略

Parametric 由一个家族式工厂发展而成，在 30 年前由机械师和机械工程师 Jon Drury 创办。这家 20 人的工厂生产的零件应用于多个领域，包括机器人、医疗、半导体、光纤和电动汽车工业。

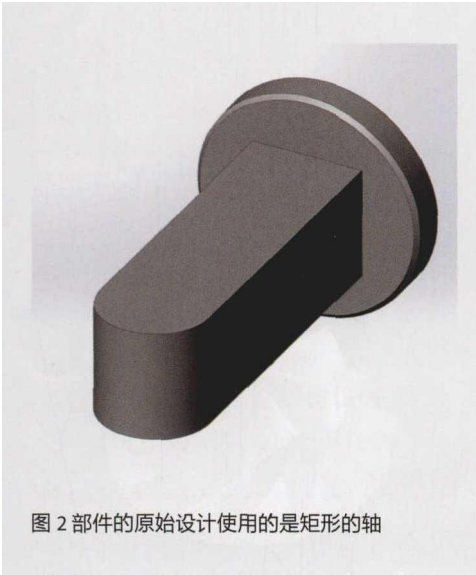


图 2 部件的原始设计使用的是矩形的轴

工厂占地 13 000 ft² (1 ft²=0.093 m²), 自有设备包括数控加工铣床、车削装置和线割装置。他们与当地提供各种工艺, 包括研磨、抛光、钎焊、丝网印刷和热处理的供应商建立合作关系, 已经成为了具备完整工艺的零件生产商。

Teixeria 与 Drury 在 2016 年开始合作, 之前他和 Drury 已经在硅谷工作了 20 年, 担任机械工程师。加入公司的目标之一就是将自己的工程和创业经验用到一项新的经营策略中, Parametric 这一策略针对的是客户运营中的一个新的群体: 设计工程师, 试图建立长期业务关系。

“我们已经看到, 工程师即便具备很多年的加工经验, 也很难接受机械师提供的 DFM 建议。” Teixeira 说, “然而,

我与工程师对话时可以先向他做出说明, 例如使用 FEA 零件模型后, 我发现去掉难以加工的内半径可以为每个零件节省 1.75 美元的成本, 同时还能将应力集中保持在可接受的屈服范围内, 并且挠度只增大 3%。使用这种工程师语言更容易获得他们的信任和尊重。另外, 他们还会变得更开放, 愿意分析载荷和受力数据以及其他零件的相关运行信息, 帮助我对这些零件的 DFM 进行 FEA。”

FEA 实例：零件和固定装置

在运行过程中, 有限元分析方法适用于计算近似位移、压力和构件装配载荷。这种方法首先将部件分成简单几何形状、规定材料特性和边界条件 (如果约束它们的移动) 的小元。求解它们的微分方程, 确定每个独立的元在载荷下的行为, 然后将这些元组合到一起, 得到一个描述整个部件的方程, 近似得出其在载荷下的行为。

Teixeira 使用的是 Solidworks 仿真 2017 FEA 软件, 即最新版本的 FEA 软件包, 他从 1998 年开始使用这款软件, 之后在几家不同公司工作时仍然继续使用, 直到 2008 年开始做 FEA 工程咨询业务时才购买了个人版。Teixeira 表示: “在一个软件包内做 FEA 和实体模型 CAD 让调整设计特性变得简单。另外, 我们很大一部分客户都是用 Solidworks, 通过访问他们的原生文件,

我可以更简单地调整和验证设计特性。”

即便拥有该软件, Teixeira 仍然会先进行手工初步计算 (也称为一阶计算), 大致确定后续 FEA 计算产生结果的范围。“正确设置一个 FEA 模型的边界条件、理解材料特性以及行为和理解结果的重要性, 需要基本了解工程静力学、动力学、热力学和材料强度。使用 FEA 软件之前, 我借助这些知识进行手工一阶计算, 以便了解结果的范围。然后, 我将计算转移到 FEA 软件上, 确定在零件应力、挠度、弱点等的行为, 从而有效调节零件的设计。” Teixeira 说道。

Parametric 已经使用 FEA 对多个客户项目进行了设计优化, 但保密协议要求 Teixeira 不能透露很多零件的细节。Teixeira 使用通用术语介绍的一个实例是为一家位于 California 的 San Jose 附近的紧固件力矩控制工具和相关产品设计制造商 Mountz Inc, 进行的一项持续一整年的产品开发工作。

了解到 Drury 和 Teixeira 的工程背景后, Mountz 邀请他们对初步设计进行 DFM 分析。他们对每个零件进行了详细研究, 并且证明了首批 100 个产品可节约成本 11 000 美元以上。

然而, 进行广泛的测试后, Mountz 认定需要进行重新设计, 形成一个符合产品性能要求的方案。因此, 他们与 Parametric 和其他行业专家开始了第二

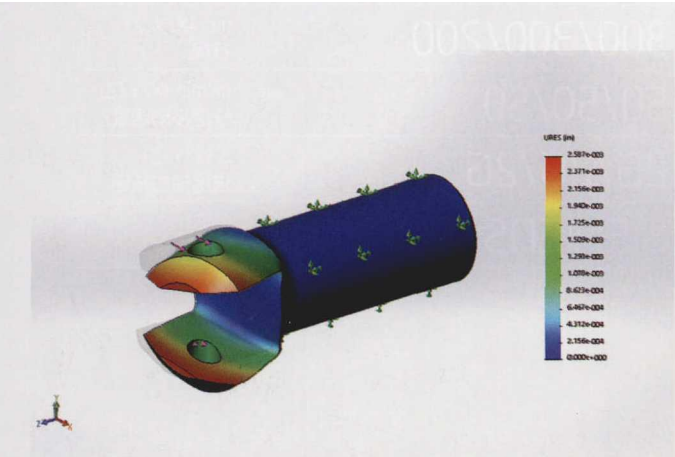


图 3 第一次 DFM 迭代对其进行了改变, 增加了带外圆角刨轮的圆柱形轴, 将加工成本降低了 75%

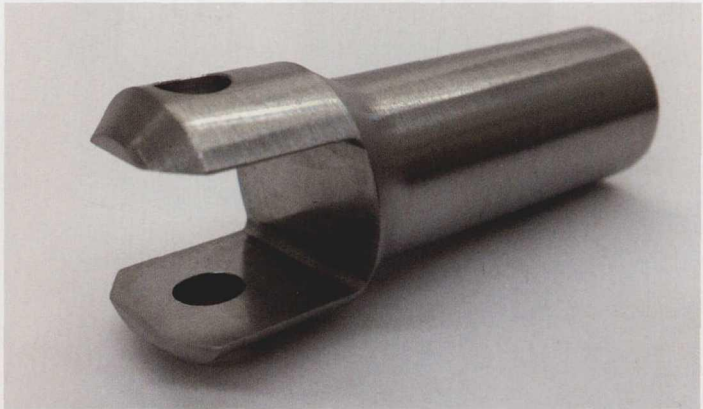


图 4 FEA 表明侧向载荷产生的挠度太大, 因此要再进行一次 DFM 迭代

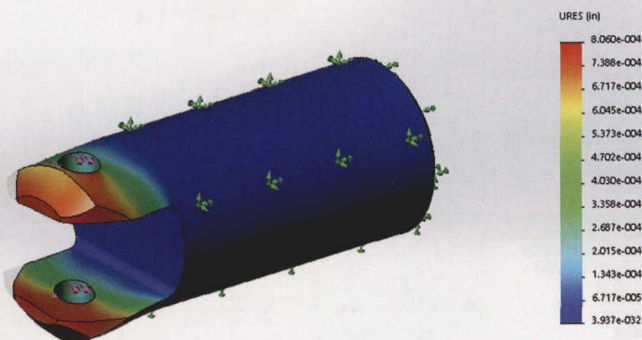


图5 通过增大轴参数去除外圆角特性,使车削和研磨更简单快速,并且可以使用现成的滑动轴承。1000个零件的估算节省成本约为33 000美元

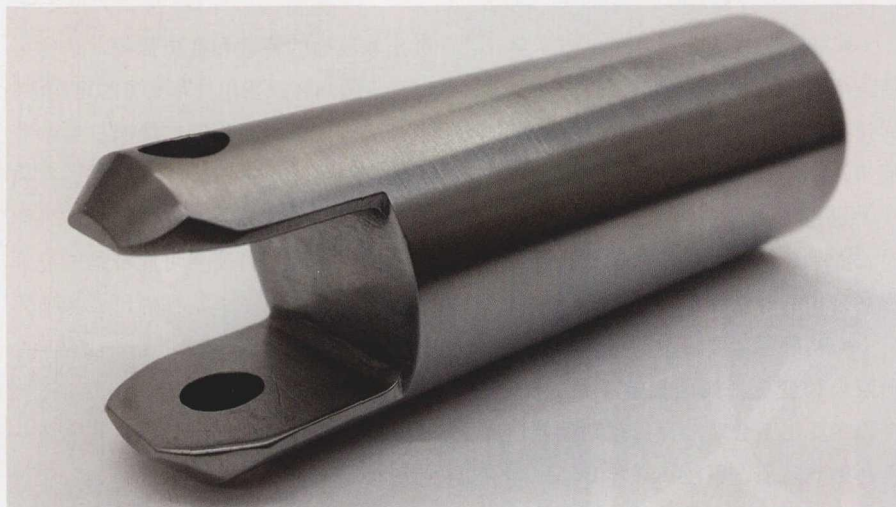


图6 这是 Parametric USA 的最终部件设计

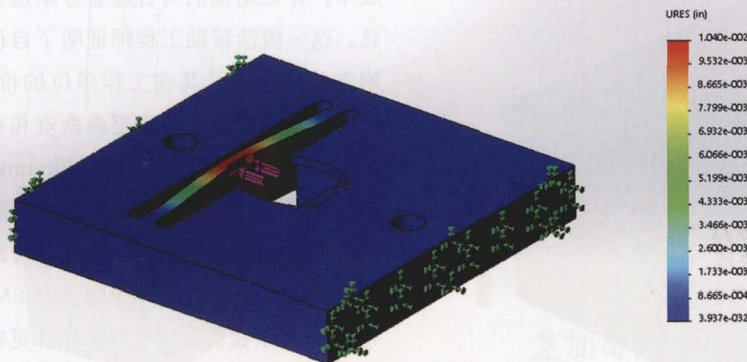


图7 这是一个固定装置实例,可以用于固定一个使用 FEA 进行精密加工的小型印刷电路板,确保装置产生符合加工需要的夹持力

次开发工作,得出了两种不同的机械方案。两个方案同时进行开发,汇聚成了一种设计方案,而实现这种方案必须依靠 FEA、DFM 和没完没了的测试。方案的目标不只是生产一种更容易制造的产品,还包括研究不同的材料、表面修饰和热处理方法。

前面提到的部件最终使用 9310 表面硬化钢制造,并且证明使用这种材料时,DFM 理念可以降低制造成本。部件在动态条件下承受 1500 b 的侧向载荷。轴的初步设计要求为矩形,需要花费 60 美元定制矩形滑块。设计还包括固有的圆柱盘。由于零件本身和滑动轴承的铣削费时,这些零件的制造成本很高。此外,部件需要进行表面硬化并达到 $R_{\text{a}} 6 \sim 8$ 的粗糙度,这一点对于复杂的几何图形很难实现。

Parametric 的首次 DFM 再设计将盘与部件分开,并使用不需要进行热处理的廉价零件代替了盘。部件的主要几何形状从矩形变成了圆柱形,带 0.75 in (1 in=25.4 mm) 轴和外圆角刨钼(见本文最开始的图片),与 Mountz 的设计相吻合,不影响其他组件。这种简化的加工方法将铣削操作改为了车削操作,只需使用现成的圆柱形滑动轴承,并提供了通过低成本、高精度的研磨实现规定表面粗糙度的方法。第一步即将两个组件的总制造成本降低了 50%。

可以确定的是,使用 FEA 时,侧向载荷会产生 0.0012 ~ 0.0015 的挠度,是目标挠度范围的两倍。另外,弯曲应力也超过了该应用的最佳疲劳强度点。因此,需要进行第二次 DFM 再设计。

去除外圆角可以使整个组件的外径达到 1 in,增大侧向载荷承受面积、降低应力集中。这样做可以实现 0.003 ~ 0.007 in 的目标挠度范围,同时进一步简化达到规定平整度所需的表面研磨工作。另外,可以使用现成的价格为 10 美元的圆柱形滑动轴承代替加工零件。每个零件的加工时间也得以从 28 min 缩短为 15 min。生产 1000 个

零件可以节省的成本估计值为 33 000 美元。

Teixeira 还使用 FEA 对难加工零件的固定装置设计进行了优化和验证。本文开头所示的固定装置就是 Teixeira 通过 FEA 进行修改和验证的最小组件简单设计的优秀实例。该固定装置用于固定使用 0.012 in 直径端铣刀加工的印刷电路板 (PCB)，而该电路板用于容纳尺寸仅为 3 mm×3 mm 的光学镜。采用这种设计，仅依靠固定装置的自然偏转就可以实现 PCB 的夹持，而无需使用弹簧、夹具或其他传统的固定组件。两个相距 0.125 in 的机加工槽形成一个偏转的梁，提供固定 PCB 的夹持力。Teixeira 先进行了一阶计算，确定了材料偏转 0.01 in 会产生 1 lb 的力。材料可以为机加工提供足够的夹持力，不会到 PCB 发生偏斜。之后，Teixeira 使用 FEA 调整了梁的宽度、厚度和材料类型，实现了目标梁偏转和夹持力。Teixeira 表示，最初制造的固定装置工作情况和预期相符，不需要修改。

发展合作关系

对于 Parametric，向客户销售其推荐的全部或部分 DFM 变更的关键是与客户的设计工程师建立和发展合作关系。下面是工厂建立密切关系的方法。

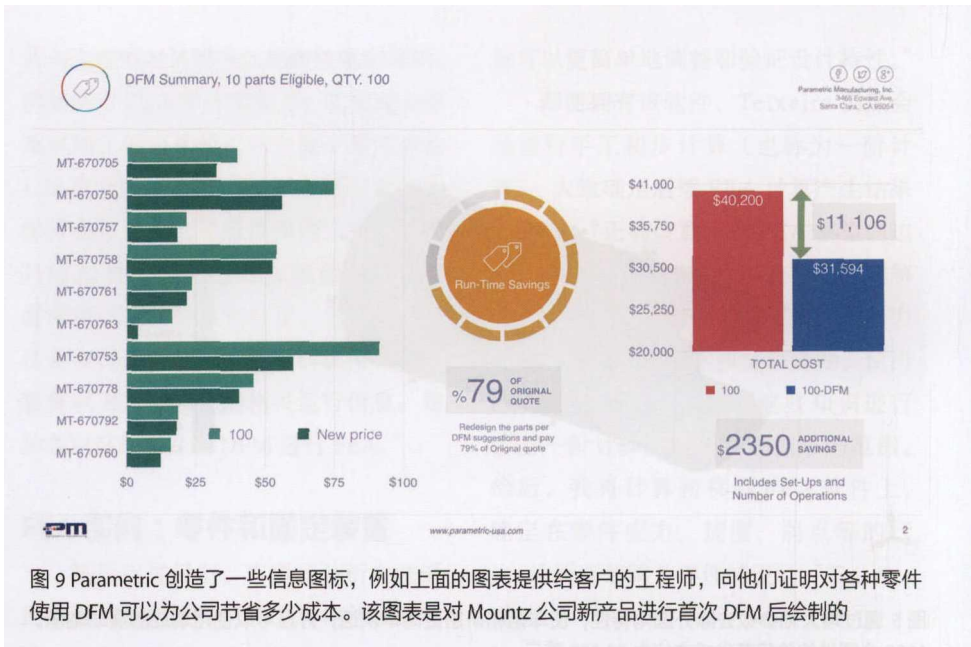


图 9 Parametric 创造了一些信息图标，例如上面的图表提供给客户的工程师，向他们证明对各种零件使用 DFM 可以为公司节省多少成本。该图表是对 Mountz 公司新产品进行首次 DFM 后绘制的

- 推荐 DFM 变更之前，先了解产品应用和单个部件的功能，理解工程师为什么按照当前的方式进行功能设计。例如，如果塑料零件有咬边，则很可能需要进行滑入配合。在未来推荐 DFM 时，如果建议去掉咬边，则只会降低客户对公司的尊重和信任。
- 明确可能要修改的零件特性并且确定设计变更会如何影响零件的功能。在确定变更不会对产品的预期性能造成不利影响之前，不应该推荐 DFM。
- 进行组件重设计时使用零件的实体模型。发送重设计模型和相关截图，

突出修改后的特性和变更描述，这样可以显著提高客户采用推荐变更的可能性。

- 理解设计工程师的情况。通常处理工程变更指令 (ECO) 增加的成本会超过变更后节省的制造成本。判断可能节约的成本和进行变更可能带给工程师痛苦，要始终铭记，工程师已经为项目付出了很多努力。
- 花费时间解释 DFM 建议如何为工程师个人和职业提供帮助以及为什么能够提供这些帮助。

最后一点尤为重要。Parametric 经常为客户的工程师绘制总结信息图标，向他们展示自己在近期的项目中，通过 DFM 简化零件设计为公司节省的时间和成本，并鼓励他们与管理者分享这些信息。这一做法帮助工程师证明了自己的附加值，体现了其在工作单位的价值，同时让他们有资格争取更高薪资和在公司内获得更多尊重。反过来，Parametric 已经发现那些工程师更喜欢在新产品设计流程之初即进入工厂，并建议公司使用 Parametric USA 的机加工和 DFM 服务。“这对于我们来说意味着零件更容易加工，需要的工具和劳动力更少，更高的机加工速度和进给率可以提高生产速度。并且，零件可以更早交付和开具发票。” Teixeira 说道。[MM]

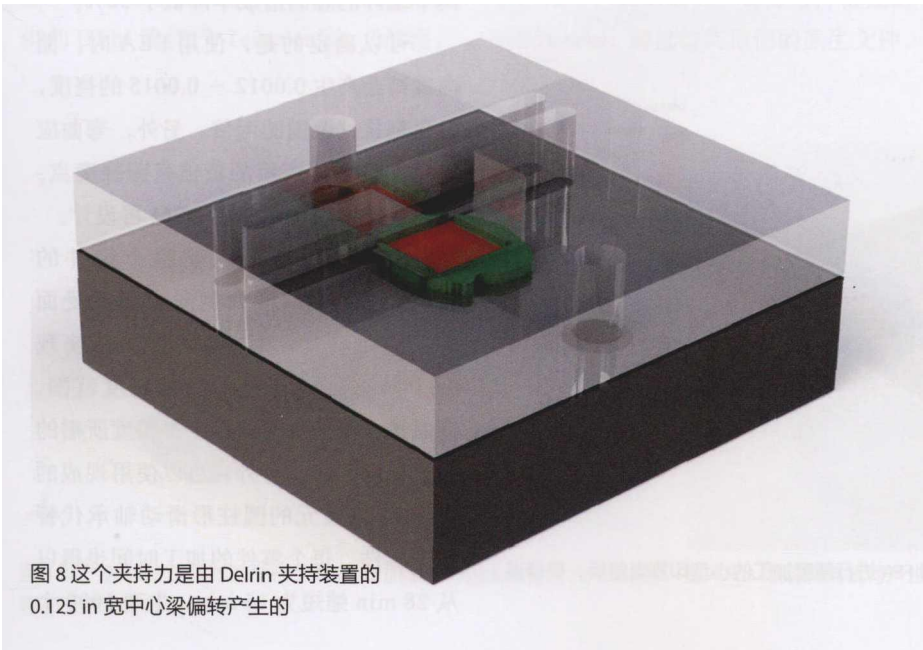


图 8 这个夹持力是由 Delrin 夹持装置的 0.125 in 宽中心梁偏转产生的