

# 绪论

19世纪60年代,研究学者初步将最优化理论与现代计算科学融合开始用于结构设计领域,以提升结构的预期性能,为现代工程装备提供了非常重要且具有科学理论依据的设计理念、方法与体系架构。发展至今,优化设计已经在各领域得到了广泛应用,从早期的工程装备设计到现代生活的点点滴滴,已经逐步融入各行各业,成为寻找最佳方案的必备途径。一般来说,通过优化设计理念,工程师可从无数种方案中找到满足各类设计需求的工程方案,大大提高工程设计的效率,降低研发成本,提高经济收益,优化设计也已成为现代工程人员的必备技能。目前在机械领域,随着现代计算科学和优化理论的逐步发展和应用,基于最优化理论建立的经典结构优化设计发展更迅猛。以下将从案例出发,介绍各类设计方式的思想与特点,并对本书的主要内容做详细介绍。

## 1 经典结构优化设计

如图1所示,人字架由两根钢管组成,其顶点处所受外力为 $2F=3\times 10^5\text{N}$ 。已知人字架跨度 $2B=152\text{cm}$ ,钢管壁厚 $T=0.25\text{cm}$ ,钢管材料的弹性模量 $E=2.1\times 10^5\text{MPa}$ ,材料密度 $\rho=7.8\times 10^3\text{kg/m}^3$ ,许用压应力 $[\sigma_y]=420\text{MPa}$ 。求钢管压应力 $\sigma$ 不超过许用压应力 $[\sigma_y]$ 和失稳临界应力 $\sigma_c$ 的条件下,人字架的高度 $h$ 和钢管的平均直径 $D$ ,使钢管总质量 $m$ 最小。

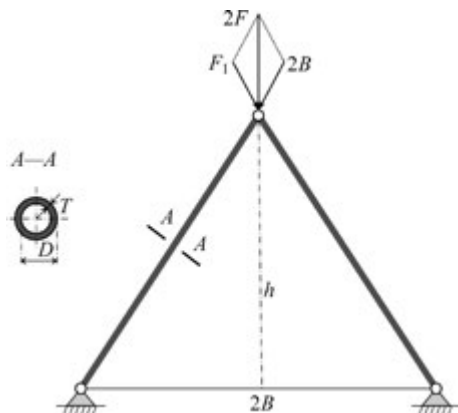


图1 人字架的受力

根据以上描述,可以将人字架的优化设计问题归结为求  $\mathbf{x} = (D, h)^T$ , 使结构质量  $m(\mathbf{x}) \rightarrow \min$ , 应满足强度约束条件  $\sigma(\mathbf{x}) \leq [\sigma_y]$  和稳定约束条件  $\sigma(\mathbf{x}) \leq \sigma_e$ 。

具体求解如下,首先可计算钢管所受的压力:

$$F_1 = \frac{FL}{h} = \frac{F(B^2 + h^2)^{1/2}}{h}$$

如图 2 所示,钢管的失稳临界力为

$$F_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

式中,  $I$  为钢管截面二次矩,具体计算如下:

$$I = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4) = \frac{A}{8}(T^2 + D^2)$$

式中,  $A$  为钢管截面面积,  $A = \pi(R^2 - r^2) = \pi TD$ ;  $r, R$  为截面内、外半径,  $D = R + r$ 。

钢管所受的压应力为

$$\sigma = \frac{F_1}{A} = \frac{F(B^2 + h^2)^{1/2}}{\pi TDh}$$

钢管的失稳临界应力为

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A} = \frac{\pi^2 E(T^2 + D^2)}{8(B^2 + h^2)}$$

因此,强度约束条件  $\sigma \leq [\sigma_y]$  可以写为

$$\frac{F(B^2 + h^2)^{1/2}}{\pi TDh} \leq [\sigma_y]$$

稳定约束条件  $\sigma \leq \sigma_e$ , 可以写为

$$\frac{F(B^2 + h^2)^{1/2}}{\pi TDh} \leq \frac{\pi^2 E(T^2 + D^2)}{8(B^2 + h^2)}$$

上述优化问题是以  $D$  和  $h$  为设计变量的二维问题,而且只有两个约束条件,可以用解析法求解。假定使人字架总质量:

$$m(D, h) = 2\rho AL = 2\pi\rho TD(B^2 + h^2)^{1/2}$$

最小的最优解刚好满足强度条件,即有

$$\sigma(D, h) = [\sigma_y]$$

从而可以将设计变量  $D$  用设计变量  $h$  表示,即

$$D = \frac{F(B^2 + h^2)^{1/2}}{\pi T[\sigma_y]h}$$

将  $D$  代入目标函数  $m(D, h)$ , 得

$$m(h) = \frac{2\rho F}{[\sigma_y]} \frac{B^2 + h^2}{h}$$

根据极值必要条件:

$$\frac{dm}{dh} = \frac{2\rho F}{[\sigma_y]} \frac{d}{dh} \left( \frac{B^2 + h^2}{h} \right) = \frac{2\rho F}{[\sigma_y]} \left( 1 - \frac{B^2}{h^2} \right) = 0$$

得



图 2 钢管(压杆)的稳定



$$h^* = B = \frac{152}{2} \text{cm} = 76 \text{cm}$$

$$D^* = \frac{\sqrt{2}F}{\pi T[\sigma_y]} \approx 6.43 \text{cm}$$

$$m^* = \frac{4\rho FB}{[\sigma_y]} \approx 8.47 \text{kg}$$

把所得参数代入稳定条件,可以证明  $\sigma(D^*, h^*) \leq \sigma_e(D^*, h^*)$ ,即稳定约束条件得到满足。所以  $h^*$ 、 $D^*$  两个参数是满足强度约束和稳定约束且使结构总质量最小的最佳参数。

通过上述经典人字架的优化设计求解过程,我们可以发现,在整个设计中优化目标是使钢管在满足各种应力的前提下实现总质量最小,其中以人字架的特征尺寸参数为设计变量。从整个过程来看,其本质建立了设计参数与目标之间的函数关系,以找寻函数的最大值或最小值。这种问题是工程中常见的结构优化设计问题,也是结构优化设计的经典问题,以性能目标引导特征参数的变化,实现性能达到最优。一般来说,优化设计的本质是根据力学、机械设计基础知识和各专业机械设备的知识推导方程或方程组,这些方程或方程组反映结构各参数之间的内在联系,通过它们可以研究各参数对设计对象工作性能的影响。

事实上在早期机械产品设计时,一般要经过调查分析、方案拟订、技术设计、零件工作图绘制等环节。传统的设计方法通常在调查分析的基础上,先通过估算、经验类比或试验,确定初始设计方案;再根据设计方案的参数进行强度、刚度与稳定性等性能分析计算,进行校核,检查各性能是否满足设计指标要求。如果设计不能完全满足性能指标的要求,设计人员将凭借经验或直观判断对参数进行修改。这样反复进行分析计算—性能检验—参数修改,直到产品性能完全满足设计指标的要求为止。可以发现:传统设计手段是基于“工程师经验”建立的一套反复试错的设计方式,通过不断地试错和分析比较,不断地对结构特征参数进行调控。整个设计过程就是人工试错和定性分析比较的过程,主要工作是性能的重复分析,至于每次参数的修改,仅凭经验或直观判断,并不是根据某种理论精确计算出来的。实践证明,按照传统设计方法设计的方案,大部分都有改进、提高的余地,并不是最佳设计方案。当前,这种设计方法因其本身的简便性仍然在工业界沿用。然而随着技术的进步,传统设计方法暴露出明显的缺陷,特别是在信息化、智能化技术飞速发展的今天。传统设计方法只是被动地重复分析产品的性能,而不是主动地设计产品的参数。从这个意义上讲,它没有真正体现“设计”的含义,没有充分利用先进的数学规划理论和计算机技术使“设计”过程具有更强的主动性、准确性和高效性。

事实上,产品结构的“设计”过程本身就包含优化的概念。作为一项设计,不仅要求方案可行、合理,而且应该是某些指标达到最优的理想方案。设计中的优化思想在人类历史上就有所体现。例如,古希腊学者欧几里得(Euclid)公元前300年前后就曾指出:在周长相同的一切矩形中,正方形的面积为最大。我国宋代建筑师李诫在其著作《营造法式》一书中指出:圆木做成矩形截面梁的高宽比应为3:2,这一结论与抗弯梁理论推得的结果十分接近。这样简单的优化问题用古典的微分方法便可以解决,但一般的工程优化问题的求解,需要采用数学规划理论并借助计算机才能完成,基于这一原因,“设计”中优化的概念一直未能很好地体现。直至20世纪60年代,计算科学和计算机技术迅速发展,优化设计才有条件日益发展

起来。

现代优化设计已不再像过去那样凭经验或直观确定结构方案,也不像过去的“安全寿命可行设计”方法那样,即在满足所提出要求的前提下,先确定结构方案,再根据安全寿命等准则对该方案的强度、刚度等进行分析、校核,然后进行修改,以确定结构尺寸。现代优化设计是以数学与力学为基础、以计算机为手段,应用精确度较高的力学数值模拟和分析方法进行研究,实现用理论设计代替经验设计,用精确计算代替近似,用优化设计代替一般的安全寿命的可行性设计。近年来,这类优化设计理念在工业中得到了广泛应用,如 20 世纪 90 年代,我国神舟号飞船的总体技术方案与返回技术方案就得到了系统的优化,确定了返回舱的姿态和总体布局、着陆点设计、轨道舱留轨利用等关键环节,为后续神舟系列飞船的成功发射和回收奠定了基础。在航天固体火箭发动机、火箭形体设计等方面,优化设计方法也发挥了重要作用。在航空领域,美国波音公司在波音 787 飞机的研制过程中,应用了基于有限元的拓扑优化、尺寸优化和形状优化方法,解决了飞机翼面的翼肋结构、龙骨梁结构及复合材料铺向等设计问题。通过统计,优化设计后的各翼肋结构比波音 777 飞机相应翼肋结构的质量减小了 25%~45%,使该系列飞机成为超低燃料消耗、低污染排放、高效益且乘坐舒适的一类机型。美国贝尔直升机公司采用优化方法解决 450 个设计变量的大型结构优化问题。在对一个机翼进行质量优化设计过程中,其质量减少了 35%。在高速铁路飞速发展的今天,从车体零件设计到外形优化,从单线路的运行参数设计到多线路的运行网络规划,都离不开优化方法。如在多线路的运行网络规划中,需要协调机车的周转与运行之间的关系,实现多变量、复杂约束条件下的优化模型的求解。在航天器地面半实物仿真设备的研制中,优化设计方法也为改善机械系统性能、提高产品经济性提供了重要手段。

另一方面,近些年发展起来的 CAD、计算机辅助制造(computer-aided manufacturing, CAM)、CAE、虚拟设计(virtual design, VD)技术及智能设计(intelligent design, ID),在引入优化设计理论与方法后,既能在设计过程中不断选择设计参数并评选出最优设计方案,又可以加快设计速度,缩短设计周期。在科学技术发展要求机械产品更新周期日益缩短的今天,将优化设计方法与计算机技术结合,使设计过程在科学化基础上实现智能化,已成为设计方法的一个重要发展趋势。

## 2 现代结构优化设计

近几年,随着增材制造技术的成熟,人们发现设计成了增材制造大量应用的瓶颈,开始提出一种“创成式设计”(generative design)理念。并且各大 CAD 厂商也相继推出自己的相关产品,代表制造业产品设计已经迈进创成式设计时代。这种发展包含对设计方法更深层次的理解,更明确了计算机、优化算法、数值求解等技术在设计过程中能够帮助设计师创新、探索更广泛的解决问题的能力。如欧特克开始提出“未来智造”的概念,随着技术和产品的一步迭代,并与最新的技术进行交互,最终推出了衍生式设计这一代表下一代 CAD 应用方向的技术。衍生式设计,事实上由英文 generative design 翻译而来,是指在传统 CAD 设计的基础上,根据零部件的承载进行应力分析和拓扑优化,通过拓扑优化确定和去除那些不影响零件刚性部位的材料,并在满足功能和性能要求的基础上,从多种结构优化方案中找到功能和性能要求相同但重量更轻的结构,从而实现轻量化的创新设计,优化后的零件重量甚



至可以达到优化前的 1/10 甚至更小。然后利用增材制造技术将这些传统制造工艺无法实现的复杂结构制造出来,从而实现整个过程,并简化了设计制造的整个流程,可以说对传统制造业而言是一个颠覆性转变。目前可知的 Autodesk Within 是一套衍生式设计软件解决方案,主要通过一种优化的引擎获取输入参数,比如要求的重量、最大应力和位移等,随后生成具有“可变密度晶格结构和表面外观”的设计。最后的对象可以根据严格的规格进行调整,最终所得的组件是使用传统方法设计出来的。除 Autodesk Within 之外,欧特克还在开发其他衍生式设计项目,其中包括 Project Dreamcatcher。衍生式设计的出现加速了传统设计技术的淘汰,在一定程度上降低了设计者的准入门槛,工程师只需在不同的设计阶段给出各种约束和限制性条件,计算机就能根据机器学习、人工智能、大数据分析、材料工程、分析仿真等新兴技术给出设计方案,从而将设计过程变得更智能,使设计的门槛进一步降低。

同时,SOLIDWORKS 倡导“The Future of Design”,是一款帮助工程师做正确的事情,而非一味追求越来越快、性能越来越好的软件。其在 SOLIDWORKS WORLD 2017 用户大会上表示,将通过与 Stratasys 公司合作,推出基于 nTopology 技术的“改善功能、效率和重量比”的下一代增材制造设计方案。结合 nTopology 技术,SOLIDWORKS 将提供产品轻量化设计的新方法。以竞技自行车为例,在脚踏板轻量化的过程中,既要保证其结构强度,又要应对传统加工制造的约束。将增材制造技术与 nTopology 技术结合,可以很好地解决这一问题。solidThinking 的两款软件 Inspire 和 Evolve 配合 3D 打印使用,可以帮助工程师考虑传统设计方法中难以解决的问题,将产品的轻量化设计发挥到极致,同时还能使产品性能有所提升。目前这种高效的设计方法已在航空航天、汽车、制造等领域广泛应用并获得了赞誉。solidThinking Inspire 为设计工程人员提供“仿真驱动设计”的创新解决方案,采用 Altair 先进的 OptiStruct 优化求解器。OptiStruct 是一种基于有限元技术的概念设计、结构分析和设计优化工具,在给定的设计空间中能够自动计算最优设计方案。OptiStruct 在设计的前期阶段利用最少的输入预测最优的结构形式,并在随后的详细设计阶段实现进一步的设计改良,使优化设计更方便、稳健和精确可靠,为 CAE 技术找到了自主创新的突破口。此外,利用先进的优化算法和精确的内嵌求解器,OptiStruct 能在较短时间内解决数百万设计变量的复杂优化问题。2017 年,Solid Edge ST10 新版本也引入了创成式设计概念。在 Solid Edge ST10 创成式设计中,用户可以为零件制定负载,例如力、压力或扭矩;然后指定与周围零件有装配关系的面和固定的面,就完成了约束条件的设定。用户还可以指定研究精度、希望减少的目标质量和安全系数,然后 Solid Edge 可进行多次迭代运算(类似生命体的逐代进化),产生最终的优化结果;优化结果中还能显示应力的分布情况。Solid Edge 的创成式设计将 CAD 设计、优化设计和 CAE 分析无缝集成在一起,达到近乎完美的效果。各类软件下的结构创成式设计案例如图 3 所示,主要包含典型支架结构设计、自行车转动轴设计等。

目前为止,创成式设计并无严格书面定义或文字定义。创成式设计是由“generative design”(GD)翻译而来的,一般来说,它更像一种对设计系统和方法的表达,早期通常翻译为“生成式设计”或“衍生式设计”,有些文献和书籍中称这种方法为“算法辅助设计”(algorithms-aided design, AAD)或“计算设计”(computational design)。整体来看,创成式设计更像是一个人机交互、自我创新的过程。根据输入者的设计意图,通过创成式系统,生成潜在的可行性设计方案的几何模型,然后进行综合对比,筛选出设计方案推送给设计者,

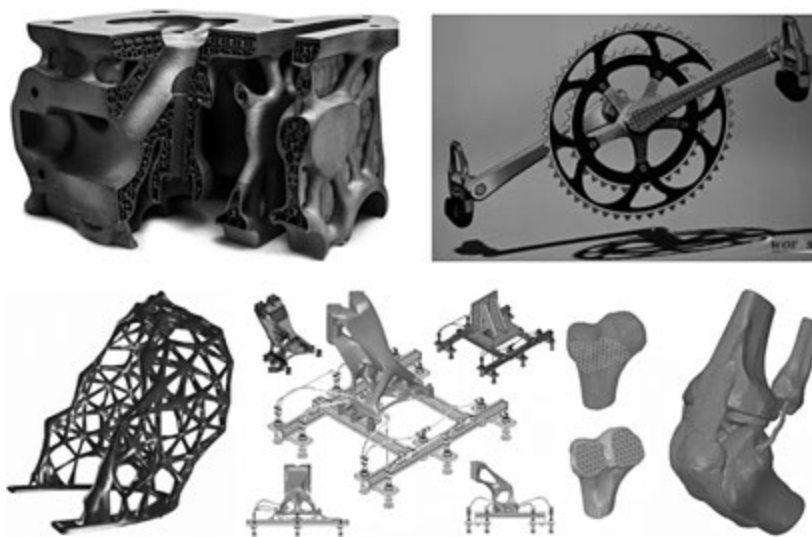


图 3 各类软件下的结构创成式设计案例

进行最后的决策。创成式设计使工程师的工作过程更像一个程序员,不像以往的设计流程中需要在脑中想出具体的形象,而要围绕任务、设计目标、功能、约束、几何关系、变形规则等,厘清它们的关系并采用规则对其进行描述。有了这些规则模型后,就可以着手进行编程了。然而对于产品设计工程师来说,可能不擅长写代码,通常选择使用可视化编程软件实现。创成式设计的方法流程如图 4 所示。设计师选择生成模型的策略、编写算法;算法自

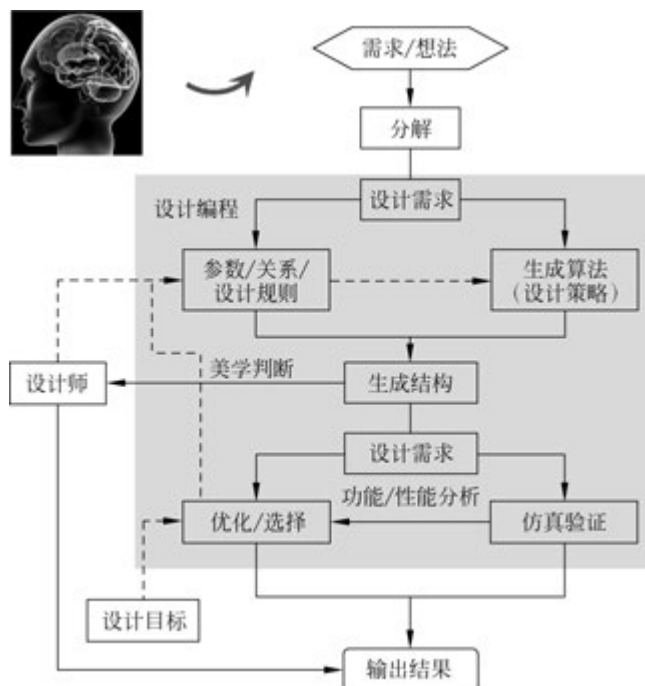


图 4 创成式设计的方法流程



动生成模型。模型的选择根据需求分为主观选择和客观选择,美学判断是通过人机交互修改参数改变模型;客观选择是根据设计目标,结合仿真、优化方法,由计算机自动完成的。仿真、优化过程本身也是通过算法实现的,因此“最佳”是与创成式建模程序一体化的。

创成式设计方法完全不同于传统 CAD 的手工建模方法,创成式设计是通过编写算法和程序进行设计的过程,可见的模型是执行算法和程序的结果。为了编写设计程序,设计者必须了解如何分解设计逻辑,并且必须选择适当的编程元素表示基本部分与这些部分之间的关系。这些程序与其他计算机程序一样,是按照一定的规则逻辑编写的,其中有些基础算法或特别专业的算法可能是别人编写的,在设计师编制自己的模型并生成算法时调用即可。我们可以用黑箱、白箱和灰箱来帮助理解创成式设计的程序。白箱算法建立在对系统的组构成及其相互联系有透彻了解的基础上,通过揭示系统内部的结构和功能来认识包括系统输入与输出在内的整体特性,这种算法通常由设计师自己编写。黑箱算法系统对于设计师来说内部是未知的,它通过设计师的输入直接给出输出结果,拓扑优化算法就是一种典型的黑箱算法。灰箱算法对设计师来说部分已知,而其余部分是未知的,在有些情况下设计师可以部分采用现有算法,而无须深入了解这种算法是怎么编写的,这时采用灰箱设计思路往往能起到事半功倍的效果。显然白箱算法是设计师完全掌控的设计过程,而黑箱算法相反,设计师看不到也无法修改算法,只能看到结果。

事实上,不管是创成式设计,还是生成式设计,或者说衍生式设计,其内核均体现为如何构造一个黑箱提供给用户,用户只需知道输入和输出即可。因此如何构造黑箱成为发展创成式设计的关键内核。从各大 CAD、CAE 厂商来看,目前均是基于现代优化技术建立的。因此优化技术在创成式设计中具有十分重要的作用,它能使设计者从众多设计方案中获得较为完善的设计方案。根据设计变量的类型,优化设计可分为尺寸优化、形状优化和拓扑优化。而在黑箱的构造中,应用最广泛的是拓扑优化。一般来说,尺寸优化是在给定结构类型、材料、布局和外形几何的情况下,优化各组成构件的截面尺寸,使结构最轻或最经济,它是优化设计中的最低层次。而形状优化可以使结构的几何变化,如将桁架和钢架的节点位置或连续体边界形状的几何参数作为变量,优化又进入一个较高的层级。相较于上面两者,如果再对桁架节点联结关系或连续体结构的布局进行优化,则优化将达到最高层级,即结构的拓扑优化。拓扑优化相比尺寸优化和形状优化,具有更大的设计自由度,能够获得更大的设计空间,更具发展前景。拓扑优化一方面可以帮助设计师根据产品的性能要求,在指定的设计空间内快速、准确地实现产品设计;另一方面可以优化改善结构性能、减小产品质量,最后得到一种全新的设计方案。因此创成式设计中的优化技术主要是拓扑优化(topology optimization, TO),即根据给定的负载情况、约束条件和性能指标,在给定的区域内对材料分布进行优化。

由于拓扑优化本身的优异特性,作为一种科学的计算方式搜寻材料在结构设计域内的最优分布形式,使拓扑优化逐渐应用于各领域,如航空航天、工业汽车、材料工程、化学工程、生物工程等。常见结构设计案例如图 5 所示的福特汽车底盘设计(从设计问题的提出到结构的最优设计方案的确立)、空客 A380 翼肋结构设计、卫星的主承力结构设计等。在航空航天这一对重量极其敏感的领域,拓扑优化已成为不可或缺的关键技术。通过智能算法精准剔除冗余材料,为运载火箭、军用飞机等重大装备减重增效。在长征五号重型火箭研制中,优化发动机推力结构,成功减重了 2.5 吨;在运 20 大型运输机研发中,突破 20 米级机

翼壁板 0.5 毫米精度制造难题,以“雕刻式加工”实现了 95% 的材料去除率。这一技术还应用于卫星天线支架设计,优化后的异形结构既满足了太空环境的刚度要求,又显著降低了发射成本。在无人机领域,大疆等领先企业通过优化机身框架和起落架结构,使飞行器的续航时间提升了 15%~20%,充分展现了拓扑优化在移动设备中的价值。在汽车领域,拓扑优化也成为提升性能与效率的关键手段。如宝马 i8 的底盘优化设计,在保障碰撞安全性的同时减重了 25%;保时捷 911 GT2 RS 的刹车卡钳通过优化不仅减重了 18%,散热性能还提升了 30%,有效解决了高性能跑车的制动过热问题。在国产汽车中,比亚迪优化副车架与悬架结构,减少冗余材料使整车减重 10%,续航里程增加 5%~8%。蔚来 ES8 采用拓扑优化设计车身接头与加强筋,在满足 C-NCAP 五星安全标准的前提下,车身减重 20%。吉利汽车对控制臂、转向节等部件进行拓扑优化,实现了 8%~12% 的减重,并降低了油耗。

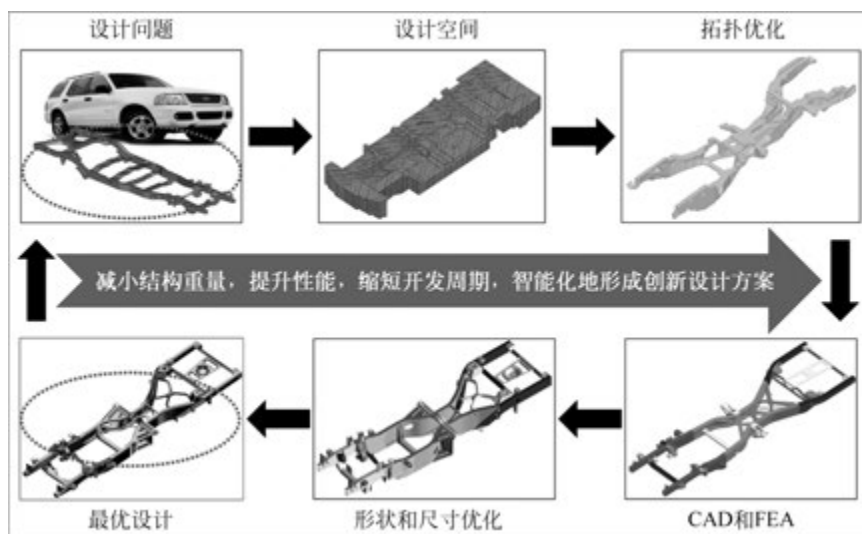


图 5 福特汽车底盘设计

能源与重工业对设备的可靠性和经济性有着极高的要求。西门子 Gamesa 对风力发电机叶片内部结构进行拓扑优化设计,在保证疲劳寿命的前提下,使单支叶片减重达 1.2 吨,按每台机组 3 支叶片计算,仅材料成本可节省近 20 万美元。石油天然气领域,壳牌公司应用拓扑优化技术开发的海底阀门支架,不仅质量减轻了 35%,还通过了 3000 米水深的高压测试,显著降低了深海开采的安装和运营成本。这些案例表明,拓扑优化不仅能提升产品性能,还能带来可观的经济效益。医疗健康领域对拓扑优化的应用则更注重生物力学适配性。在骨科植入物方面,Stryker 公司通过拓扑优化设计的人工髋关节,弹性模量更接近自然骨骼,有效解决了传统植入物导致的应力遮挡问题,使假体使用寿命延长了约 30%。假肢制造商利用该技术开发仿生假肢,通过优化内部桁架结构,在保证支撑强度的同时使质量减轻了 40%,大大提高了截肢患者的使用舒适度,这些创新不仅体现了工程技术的进步,更直接改善了患者的生活质量。在电子消费领域,Intel 在其高端 CPU 散热器中应用拓扑优化技术,通过设计复杂的内部流道结构,使散热效率提升了 45%,成功解决了处理器功耗持续增长带来的热管理难题。戴森在吸尘器电机支架设计中采用拓扑优化技术,在保证结构强度的前提下使塑料用量减少了 30%,每年可节省数百吨原材料。拓扑优化技术不仅能提升

产品性能,还能带来显著的环境效益。工程机械方面,三一重工通过优化液压挖掘机动臂结构,在保证承载能力的同时实现了 18% 的减重并提升了 25% 的疲劳寿命。机床制造领域,沈阳机床优化数控机床床身结构,在保持刚度的前提下减重 20%。机器人行业应用尤为突出,新松机器人通过关节轻量化设计实现了 30% 的减重并提升了 20% 工作节奏。特种装备方面,中国船舶重工优化深海潜水器耐压舱结构,在满足万米抗压要求下减重 12%。这些应用充分体现了拓扑优化在提升工业装备性能方面的巨大潜力。

总体而言,拓扑优化技术正在深度融合各工业领域,其价值不仅体现在单一产品的性能提升上,更在于推动整个产业链向高效、绿色、智能化方向发展。据行业统计,采用拓扑优化技术平均可带来 15%~40% 的减重效果,20%~35% 的材料节省,以及 10%~25% 的性能提升,这些数据充分表明其在现代工业中的核心价值,部分案例如图 6 所示。通过多个案例发现,拓扑优化在现代工业产品结构从设计问题的提出到最优方案的确立过程中发挥着至关重要的作用,其是以“数学与力学”为核心理论构建结构拓扑设计模型,基于“优化理论”实现结构拓扑不断迭代更新,实现以“科学、高效”为核心的现代化结构优化设计模式,改变了传统以“工程师个人经验”为核心的“设计—试验—修改—试验”不断反复的模式。拓扑优化可为现代工业产品结构的设计模式带来重大变革。

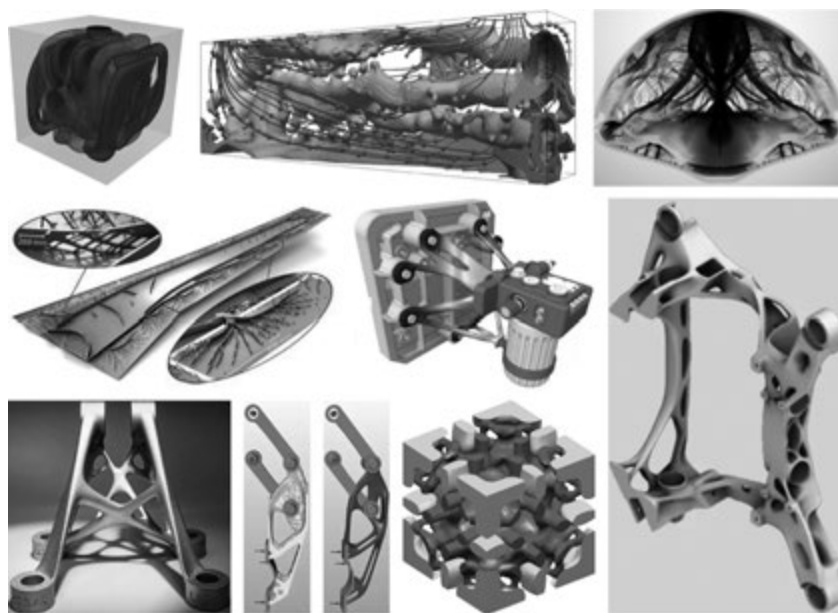


图 6 基于拓扑优化的各类设计案例

# 第 1 章 拓扑优化概述

## 本章要点

- 了解拓扑优化的基本内涵,与尺寸优化、形状优化的区别,及其在结构优化中所处的阶段
- 明确拓扑优化的基本组成部分,包括模型建立、几何构造、数值分析、优化求解等方面
- 深入了解均匀化方法、变密度方法、水平集方法、等几何拓扑优化方法的本质特点、构造机理、发展概况、应用前景
- 深入了解拓扑优化在各类问题中的扩展应用,包括力学超材料、材料/结构跨尺度设计、大规模并行优化、复杂结构设计和 AI 驱动智能设计 5 个方面

## 1.1 引言

近年来,拓扑优化因其本身优异的特点——“寻找结构设计域内满足性能需求的最优材料分布”,在学术界和工程界得到了广泛的关注和探讨。工程领域设计人员主要关注“如何实现结构材料用量最少”,以实现结构轻量化,常用于航空航天领域,即对结构重量非常敏感的行业,如载人登月着陆器、高超飞行器涡轮发动机叶片、空客 A320 各类零件(机舱铰链支架)、卫星关键部位支撑架等结构。近年来,随着拓扑优化理论的逐步发展,工程界对拓扑优化的应用也逐步从“高性能轻量化”转向“多物理场耦合”应用领域,如芯片散热微流动孔洞的设计、发动机叶片的多物理场耦合气动设计等。学术界研究人员则重点关注“拓扑优化理论发展及其应用研究”。总体来看,拓扑优化从 20 世纪开始到现在,前 10 年研究人员重点围绕“拓扑优化方法”展开一系列研究,主要就“如何实现拓扑优化”这一根本性问题进行深入,提出了多种经典拓扑优化方法,如均匀化方法、变密度方法、渐进结构优化方法、水平集方法。近 10 年综合各类方法的优势,逐渐发展起来的还有移动组元法、特征驱动方法、等几何拓扑优化方法等。并且以“拓扑优化在各类新问题中的应用”为出发点,开始深入性研究拓扑优化在各类设计问题中的高度可扩展性及其强大的设计能力,如力学超材料微结构优化设计、超轻质多孔结构优化设计、多物理场超材料优化设计、空天飞行器复杂薄壳优化设