

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX/ISO 18459:2015

仿生学 仿生结构优化

Biomimetics — Biomimetic structural optimization

(ISO 18459:2015, IDT)

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
4 符号和术语缩写	3
5 自然界中自我优化原理及因此而被移植的优化方法	3
6 方法的运用	5
6.1 应用范围和局限	5
6.2 计算机辅助优化设计(CAO)	6
6.2.1 应力控制生长	6
6.2.2 皱缩	7
6.2.3 有限元分析(FEA)在实际中的应用	8
6.3 软区域清除 (SKO)	8
6.3.1 软区域清除法原理	8
6.3.2 在有限元分析中实施软区域清除原理	9
6.3.3 软区域清除法应用实例	10
6.4 计算机辅助内部优化设计(CAIO)	12
6.4.1 计算机辅助内部优化设计方法实例: 弯曲的圆柱体	13
6.5 拉伸三角形法	14
6.5.1 概述	14
6.5.2 拉伸三角形节省材料	15
6.5.3 拉伸三角形优化纤维取向	16
6.5.4 拉伸三角形法实例: 凸肩板	17
参考文献	19

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用ISO 18459:2015《仿生学 仿生结构优化》（英文版）。

与标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

——GB/T 14124-2009 机械振动与冲击 建筑物的振动 振动测量及其对建筑物影响的评价指南
（ISO 4866:1990/Amd. 2:1996(E)， IDT）

本标准的技术内容和组成结构与ISO 18459:2015《仿生学 仿生结构优化》（英文版）相一致，只做了以下编辑性修改：

——将“ISO 18459”改成“GB/T xxxxx；

——删除了 ISO 18459:2015 的前言，并根据我国国家标准编制要求重新起草了前言；

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由中国机械工业联合会归口。

本标准由北京机械工业自动化研究所负责起草。

本标准主要起草人：

引 言

仿生优化方法的基础来源于对自然生物结构及过程的研究所获取的知识。

作为优化的一个特殊分支,结构优化涉及了部件的理想化设计,并同时将目前的边界条件加以考虑。通常被优化的属性包括重量、荷载能力、刚度或有效期,其目的在于通过使它们的价值最大化或最小化而优化其中一种或多种属性。

总的来说,最理想的是尽可能完美地使用建筑材料,同时避免荷载范围过重和过轻。鉴于几乎每一个技术性部件都会因为功能原因而在段面呈现出一些变化而因此导致切口的变化,所以,在结构优化中最大程度地减小切口的承重力就显得尤为重要。在传统的结构优化中,切口形状因子,即切口上面的应力集中因子,通过选择切口最大曲度的半径或通过利用切口的相互作用和填充缓解受重力的切口,而被减少。但是,切口的形状并不会由于这个步骤而改变。早在 30 年代就已有有人提出使用其它的切口形状(波特曲线、椭圆、对数螺旋,等等)的建议,但并未被广泛应用在技术中,只是偶尔被使用。

基于计算机的仿生优化工具,例如计算机辅助优化(CAO)及软区域清除(SKO),分别改进了部件的形态和拓扑结构,因而通过使用有限元分析(FEA)使受力得以均衡。这些工具自 1990 年出现后已用于目前的工业中。然而,使用有限元分析以进行优化的这种需求实际上限制了可能用户的数量,因为进行这样的操作需要一个功能强大的计算机、特殊软件及一名专家。对于那些不仅是专家且设计工程师也能操作的更简单、更快捷的方法以达到优化部件的要求,最终导致了“拉伸三角形法”的出现。尽管该方法在 2006 年才开始得以开发,但它已被用在实际的应用中,其原因在于它易于理解、易于应用。仿生优化方法的广泛应用加之其相对容易操作、用户易懂及易应用,使得用户能够在设计过程初期便可进行部件优化操作。就拉伸三角形法的使用来说,使用计算机辅助设计(CAD)系统就有可能很容易地实施这种方法。

由于每一项优化都意味着对所选荷载状况进行专业化处理,因而服务加载能够被熟知。其他未被考虑进来的荷载条件也许会导致一个部件承受更大的作用力。

仿生学 仿生结构优化

1 范围

本标准指出了仿生结构优化方法的功能和范围。这些方法涉及的是静荷载及疲劳荷载条件下的线性结构问题。本标准中描述的方法有示例进行说明。

依据自然生长的生物模型和通过利用技术性部件有限元法 (FEM) 优化方法, 基于计算机的仿生优化工具被描述为计算机辅助优化设计 (CAO)、软区域清除 (SKO) 和计算机辅助内部优化设计 (CAIO)。这些方法的目的在于能够减轻部件重量或增强部件能力及提高部件使用期, 以实现优化材料应用。

此外, 本标准还描述了一个设计工程师人人可用的更简单快捷的“拉伸三角形法”。仿生优化法应用范围广泛, 加之更易于理解和便于使用, 这使得用户能够在设计过程的早期实施部件优化。

本标准的目的是让用户熟知仿生优化方法可作为有效工具来提高部件的使用期、减少部件重量, 并在支持可持续发展中促进这些方法的广泛使用。

本标准不仅为设计者、开发人员、工程师及技术人员, 也为那些被赋予设计和评估荷载结构任务的人员所拟定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件, 仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件, 其最新版本 (包括所有的修改单) 适用于本文件。

ISO 18458 仿生学 术语、概念和方法论 (Biomimetics — Terminology, concepts and methodology)

ISO 2394 结构可靠性通则 (General principles on reliability for structures)

ISO 4866 机械振动与冲击 建筑物的振动 振动测量及其对建筑物影响的评价指南 (Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures)

ISO 13823 建筑物耐用性设计通则 (General principles on the design of structures for durability)

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

机械性自适应生长 mechanical adaptive growth

树木和骨骼等生物结构通过局部性地向受力大的范围添加材料或从受力小的范围移除材料对条件变化所做出的适当反应 (如机械荷载)。

示例: 更加厚实的年轮。

3.2

运算法则 algorithm

以有限的步骤精确地描述完成一项任务的步骤。

3.3

设计空间 design space

可提供给一个元素的容量。

注1：部件所要设计的边缘不应超出设计空间的局限。

3.4

计算机辅助内部优化设计 Computer Aided Internal Optimization (CAIO)

基于有限元分析法（3.6），用于优化纤维复合材料中的局部纤维取向，目的在于提高其荷载能力。

3.5

计算机辅助优化设计 Computer Aided Optimization (CAO)

基于有限元分析（3.6），用于优化部件形状的方法。

注1：减少受作用力大的范围例如切口（3.8）的作用力，提高部件使用寿命。

3.6

有限元分析 finite element analysis (FEA)

获取最近似受限于边界条件的偏微分方程解决方案的数值解法。

注1：在工程科学中，它被用来作为一种分析方法，比如回答有关结构力学的问题。通过有限元分析法，一个复杂的结构被为小型、简易以及互联组元（FEA 网络划分）离散开来。当边界条件（荷载、承重）以及材料属性得以确定后，有可能在该复杂结构中的任何一段对应力及形变等进行计算。

3.7

形态优化 shape optimization

改变微元的外观，通过一种确定的行为（比如将应力减到最小）来改进某一个目标功能。

3.8

切口 notch

部件中的凹面，由于切口效应（3.9）使得一个部件的局部变薄弱。

注1：大部分时候，人们并不期望有该薄弱点的存在，但是切口在某些情况下是被用来作为预定的断裂点，以便明确部件应在何处出现故障，并可因此限制部件上可承载的荷载。

3.9

切口效应 notch effect

承受荷载的切口（3.8）上面局部所显现的应力峰值

注1：峰值的高度通常取决于切口（3.8）的尺寸及形状。当曲率减小以及切口（3.8）等高线提高时，应力就会减少。

3.10

拉伸三角形法 method of tensile triangles

一种可使部件均衡受力的简洁图形法。

注1：可用来减少如切口（3.8）上这些受力大的范围的应力，提高部件的使用寿命以及移除超低荷载的范围并节省材料。

3.11

软区域清除 Soft Kill Option (SKO)

基于有限元分析法（3.6）优化部件拓扑（3.12）的方法。

注1：通过连续从设计空间（3.3）移除受力小的材料而提出的轻量设计建议。

3.12

拓扑 topology

一个部件的结构性组元（洞孔，支撑等）间的关系（如位置和方向）。

4 符号和术语缩写

以下符号适用于本文件：

E 弹性模量

E 弹性模量的变量， $E = f(\sigma)$ 。

F 力

M 矩阵

$T(x, y, z)$ 热负荷

α 热膨胀系数

σ_{mises} 依据 *von Mises* 的等效应力

5 自然界中自我优化原理及因此而被移植的优化方法

借助于有限元分析（FEA），对生物荷载结构如树木、骨骼、爪子及刺所进行的大量研究揭示，这些承重结构已最佳地适应了其所承受的作用力，且相同的设计原理可适用于所有的结构。恒压定律已经表明，在荷载生物结构如树木或哺乳动物的骨头的成长时期，应将它作为一个基本原理来应用。它强调了一个荷载结构的表层不会显示其薄弱点（承受作用力大的范围）或超低荷载的范围（不必要的压载物或废料），这样作用在其表面的外力就可均衡地分布。这种具有机械性优点的应力状态是通过自适应生长而得以实现的。比如，树木凭借其内部受体分辨局部应力集中状态，从而通过自适应性地生长来进行自我修复。它们在超高负荷的范围上所生长的年轮因局部厚实而减少了应力峰值。然而，与人类和动物的骨头相背，树木则无法从受力小的范围移除多余的材料。

生物结构的自我优化不只局限在其外部的结构；它们的内部结构甚至也都很好地适应了其承重的作用力。骨骼中的自适应矿化过程使得承重更大的范围变得更加刚硬，而承重较小的范围被软化并最终被移除。

通常，生物材料可被视为是包含有几种组元的纤维复合材料。除了组元混合材料，其它能对其所具有的优质机械属性产生决定性因素的还包括其几个数量级分子的分层组织，以便形成完整的结构以及适应应力流材料的内部走向。软弧线型中树干所形成的木纤维在受损的地方如树木节疤周围朝受力方向形成

弯曲。这也同样适用于以相应的方式缠绕在血管细胞周围的木射线。甚至连形成木细胞内壁的纤维素纤维也显示出这种优化性。这在所有朝向为力流的树木纤维中都可以看到。同样，它还适用于本质上含有类似于胶合板薄层结构、具有强力的纤维及更加易碎材料的骨骼。比如靠近关节处的股骨（大腿骨）充满了松质骨，也被称为spongiosa或cancellous bone. 这类骨骼是由一个填充了全部股骨头和股骨颈的纤细的、朝向为力流的骨小梁所构成的微型框架。

作为设计的一个基本规则，均衡应力首先要通过基于计算机方法进行系统性的操作，使得人们有可能将这种用于生物荷载结构的优化原理应用到任何一种荷载结构中去。在技术设计中，这是利用自然界所提供的财富的一个主要前提。

计算机辅助优化设计（CAO）和软区域清除（SKO）是工业中所采用的方法，其开发的目地在于优化技术部件的形状和拓扑。使用计算机辅助优化设计（CAO）能有效地均衡应力，即减少了局部应力峰值，又大大地提高了部件的使用期，特别是当它们受到震荡或交替进行载荷时。相比较而言，软区域清除（SKO）提供的设计建议中不再包含有超低荷载材料。这就使得设计人员能够辨别部件中作用力的相关路径，从而设计轻质部件，并把将其进行生产的局限性也同时考虑了进来。

最后，计算机辅助内部优化设计（CAIO）使得设计人员可以通过使用电脑模拟将那些含有力流朝向的纤维生物荷载结构的内部设计移植到技术纤维复合材料中，以便提高其荷载能力。

对切口应力拥有更深的了解[1]以及进一步的开发工作导致了纯粹以图形出现的“拉伸三角形法”，使部件能事半功倍地达到其最佳状态。优化方法的发展从很大意义上来说应归功于发展过程中的薄弱点得以清除。在使用基于计算机方法的环境下，应用的结果虽然导致了更长的计算及模拟时间，但最终仍缩短了整体的开发时间、更少的原型以及更短的测试阶段。这里所阐述的是仿生结构优化方法的例证，更多的一些方法仍尚在开发过程中。

正如ISO 18458中所规定的，一个产品或技术满足三种条件即被认可为仿生学。也就是说，当一个生物体系时，将模型进行抽象，然后将模型以最小的雏形移植到一个技术应用中去。如表1所示，根据这三项准则，以上所描述的方法满足了ISO 18458中所提到的三个步骤。

计算机辅助优化方法（CAO）是仿生学的，因为生物体系是树木生长，这一现象有部分已被抽象成荷载自适应过程，并且这一过程以简单运算法则进行操作，并被移植到技术应用中以及工业中去以便用来优化技术部件。

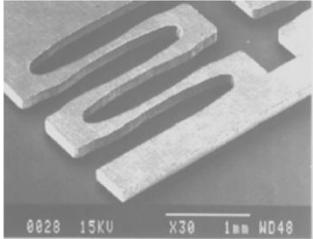
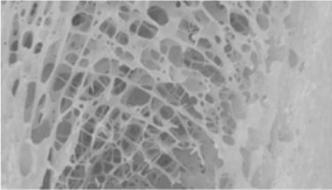
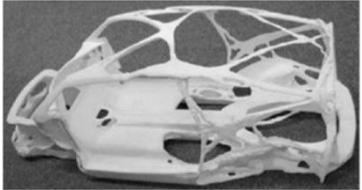
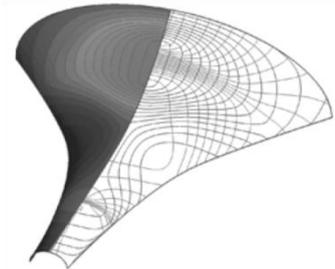
软区域清除（SKO）是仿生学的，因为用于SKO的生物体系是骨矿化，这一现象有部分被抽象成荷载自适应过程，这个过程已被抽象并以简单运算法则进行操作，而且也被移植到了技术应用中去。软区域清除用来设计轻量部件。

计算机辅助内部优化（CAIO）是仿生学的，因为CAIO是基于树木中木纤维取向性的生物系统，这一现象有部分被抽象成荷载自适应过程，这个过程已被抽象并以简单运算法则进行操作，也被移植到了技术纤维复合材料的优化应用中。

拉伸三角形法（Method of Tensile Triangles）是仿生学的，因为拉伸三角形法基于树木的茎根汇合点体系，这一现象有部分被抽象成荷载自适应过程，这一过程以简单运算法则进行操作，也被移植到技术应用中，以及应用到工业中以便优化技术部件。

表1列举了用于仿生结构优化的方法、其生物系统、主要目标以及这些方法在工业应用中的使用例证。

表1 仿生学结构优化方法，其生物模型，主要目的及技术应用

方法	生物模型	主要目的	技术应用
计算机辅助优化设计(CAO)	树木的自适应性生长 	<u>形态优化</u> 通过均衡受力来提高部件寿命或荷载能力	微驱动装置 
软区域清除 (SKO)	骨矿化过程 	<u>拓扑优化</u> 通过移除超低荷载材料来设计轻量部件	车架 
计算机辅助内部优化设计 (CAIO)	树木中的纤维取向 	<u>局部纤维取向优化</u> 以通过将局部纤维取向自适应性荷载从而提高纤维复合材料的能力	自行车座位 
拉伸三角形法 (Method of Tensile Triangles)	根茎汇合点形状 	<u>形态优化</u> 以通过均衡受力从而提高部件的荷载能力或使用寿命	螺钉 

6 方法的运用

6.1 应用范围和局限

在本标准中所提到的优化方法所依据的是线性静力问题。有限元法的结果可以用来对静力强度进行确认。

在动载准备就绪时，它们就可能被转换到同等的静载中去（ESLs）。

注：通过这些用于静载的方法而因此被优化了的结构也将对动载做出反应，且远好于未被优化的结构。

当所预期的荷载循环的数量很大以及那些由脆性材料所制成的部件时，对其切口形状进行优化的效果是最强的。静载的韧性材料对切口并不敏感，可以通过塑料变形释放压力。

选择进行优化的应力要视机械问题而定。更多的时候所使用的是冯·米塞斯应力（von Mises）或法向应力，但如有需要，也可使用其它等同的应力。

可以对几种荷载分别或同时进行分析及优化。通常情况下，对具有关键性的案例使用优化就已足以，但所获得的结果宜经验证适用于所有荷载。

这些方法并没有涉及到例如屈曲等这种失稳故障。因此，优化结果的效应还有待检验。

总的来说，优化结果应由有限元分析（FEA）或实际经验来进行确认。ISO 2394对相关结构可靠性总则进行了描述。要想确认一个结构的动态强度、震感强度以及耐性，必须要考虑ISO 13823和ISO 4866。

6.2 计算机辅助优化设计(CAO)

计算机辅助优化法为优化组元形态提供了一种辅助，研发该方法是为了借助“生长”而抵消部件关键截面的应力集中。

6.2.1 应力控制生长

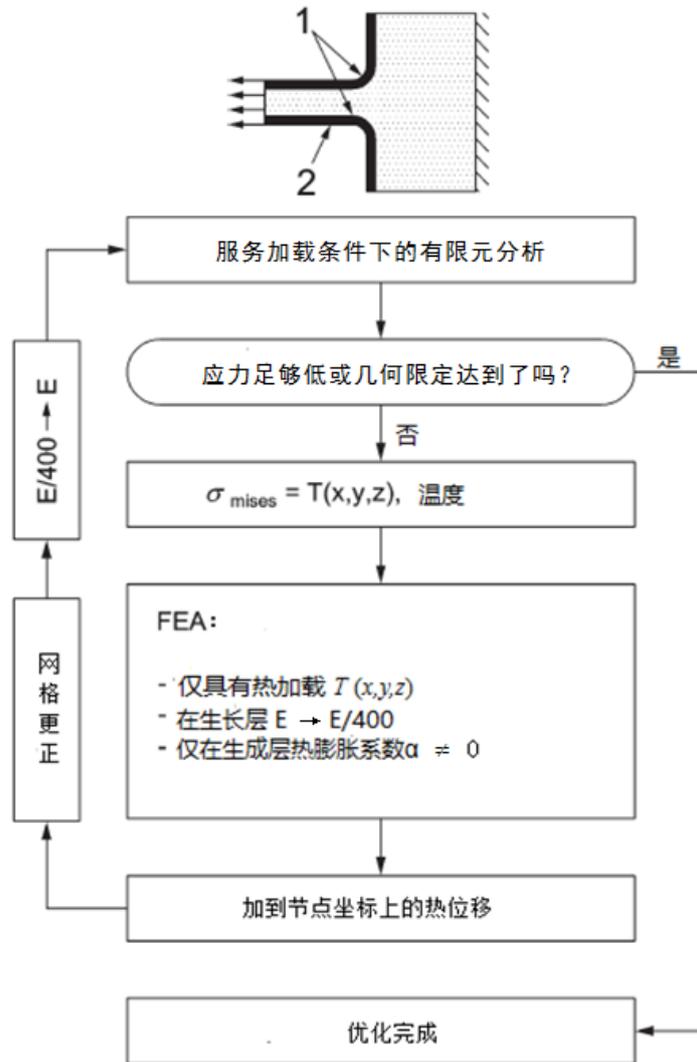
部件的载荷自适应性增加过程可以根据局部受力强度通过展示部件法线朝向的表层在计算机上进行模拟。可以以有限元作为一个基础，通过断定表层的正常朝向及节点的受力，或借助于热位移方法而得以实现。

有限元分析模型以及从该模型中计算出的冯·米塞斯（von Mises）参考应力，一般来说，充当了实施应力优化的基础。也可以不使用冯·米塞斯应力而使用其它比如主法向应力或其它参考应力值。在指定荷载及位置状况后，所做的第一步就是要实施有限元的应力分析。其后，将其成长性根据所计算出的应力在模型上进行模拟，也可使用不同方法进行操作。

比如，第二步可包括通过假设的温度分布，将所运用的应力分布建模，然后定义出一个不断增厚的“软”生长层及所要求的热膨胀系数，使弹性模量减少到其原始值的1/400，这能帮助避免基本结构产生偏差。也就是说，以热膨胀系数形式所进行的模拟式的生长被限定在软边界层。这时就可依据材料热膨胀的有限元分析（FEA）运算进行成长性操作。在这种情况下，受力较大且因而遭遇更高（假设）温度的地方的扩张程度，要大于那些受作用力较小的地方。

然后将这里计算出来的热位移加到有限元分析网格划分的节点坐标上去，其将与一个新的几何形状建立一个新的网格划分。最终，生长层的弹性模量被重新设回到其原始值，并可以进行一个新的有限元（FEA）应力分析。当达到了几何限定或获得了均衡应力分布时，就可认定优化步骤已经完成（见图1）。

除了对生长进行模拟外，计算机辅助优化设计（CAO）也可用来进行皱缩模拟，尽管应力受控生长更多的是用在自然界以及技术中。



说明:

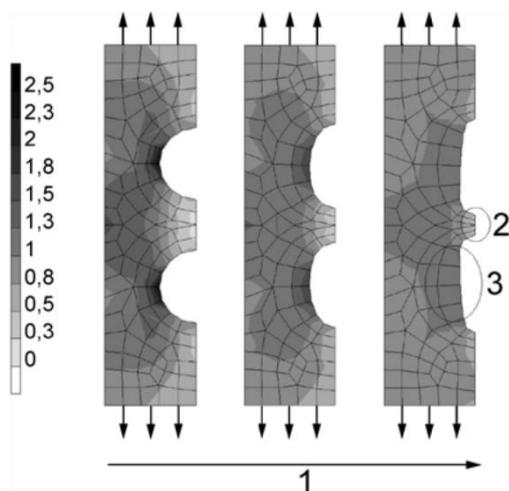
- 1 将要优化的切口。
- 2 均匀厚度的生长层。

图1 基于参考 (3) 的计算机辅助优化方法流程图

6.2.2 皱缩

可使用与应力受控生长相同的步骤用计算机辅助优化设计 (CAO) 来皱缩部件。使用该方法, 受力较小的范围被定义为“增长范围”, 或更准确地说是“皱缩范围”, 实施皱缩与先前执行一个有限元 (FEA) 应力分析后所实施的步骤一样。但是在这种情况下, 位移矢量是指向而非移离材料, 要确定一个温度值, 明确该部件被允许最大皱缩的位置点。为确保此加快进程, 也可在计算中包括一个与重量相关的因子。然而, 不应选择过大的重量因子以至于当皱缩范围缩小到最小的面积时, 网格划分节点从设计空间中被移动出去。如果位移太大, 那么实际的操作中就会出现这个问题。在此情况下, 如果将旁边的节点以相同的方向进行置换也将有所帮助。位移过大就应重新生成网格划分。该计算机辅助优化设计 (CAO) 版本建议进行一个迭代性步骤, 并还推荐在重新生成网格划分后进行应力分析操作。

计算机辅助优化设计（CAO）生长和皱缩可以合并在一个过程中进行（见图2）。



说明：

1——一个计算机辅助优化的迭代过程（iterative progression of a CAO-optimization）；

2——皱缩区域（shrinkage area）；

3——成长区域（growth area）。

注：高应力区域较暗。

图2 一个受拉伸荷载的、钻了孔的平板的半个模型的增长和皱缩相结合的实例

6.2.3 有限元分析(FEA)在实际中的应用

有限元分析(2)是一个用于计算的工程工具，而非一种用于仿生优化的方法。有限元分析法是通过使用一个包含有 h 组元的网格划分来进行计算机辅助优化方法设计（CAO）的操作。当将有限元分析法应用到计算机辅助优化设计方法时，最常用的元素类型是用于飞机对称和旋转对称问题的4节点的4边形组元和用于空间问题的8节点的6面体组元，但也可以使用三角形和四面体组元。当选择网格划分类型时，应确保中等重量组元也与网格划分一同被移动。

当生成网格划分时，应将通常的网格划分准则（分辨率、角度、纵横比）考虑进去，以便以足够精确的应力状态建模。

如果要对局部切口应力进行优化，那么所选择的生长范围应足够大，以便对几何所产生的全部应力进行计算，且宜将周边范围算入其中，这样可以形成一个均衡的应力分布。当使用迭代法时，如果新的应力集中出现在目前增长范围的边缘，那么宜增加其添加范围。

如果使用计算机辅助优化设计法对大范围的部件进行优化的化，那么用户宜明确指明恰当的生长范围，甚至还有可能用一个生长层将部件完全覆盖住。

6.3 软区域清除（SKO）

6.3.1 软区域清除法原理

依据参考(3)的软区域清除法（SKO）基于骨骼生长原理，目的是使得骨骼增长为轻量结构，以增强人类和动物的移动性。骨骼的生长基于自适应硬化过程，可以概括性地描述为以下情形：部分受力大的骨骼因吸收到更多的矿物质而变得更加刚硬，而受力较小的那部分骨骼又迅速地被吸收。

骨骼由骨细胞再建（破骨细胞和成骨细胞）。骨骼是由一层在受力大的范围所填充的松质骨（spongiosa 或 cancellous 骨）的硬质外表（骨外层corticalis）所构成的。松质骨内部的骨小梁将

荷载进行转移，朝向是由荷载方向而决定（3；4；5）的。因此，骨小梁受制于压迫及拉伸力，避免了弯曲应变以及中性纤维中由此产生的荷载超低的材料，就像一个坚固的木材结构建筑中所呈现出来的那种形状。在弯曲无法被避免的骨干周围，骨骼基本上是一条具有非常刚硬的壁的管状物，这也就意味着，荷载材料被移到了外边界。人类的股骨（见图3）即是一个最好的例证。

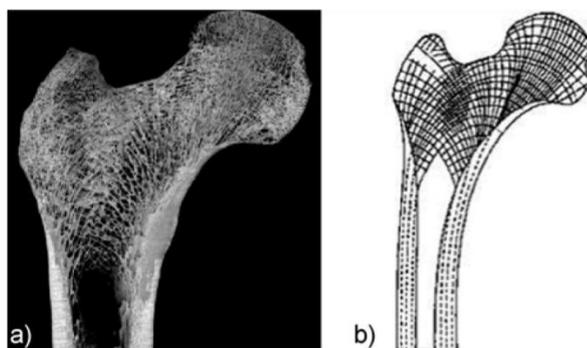


图3 a) 股骨交界处 b) 拉伸和压缩线模式

注：包含松质骨和血小板的微框架可以容易地被辨别出来，并与参考[4]描述的拉伸和压缩线模式相匹配。

6.3.2 在有限元分析中实施软区域清除原理

软区域清除的计算是通过模拟生长及吸收过程去刺激细胞融入到骨骼中。不过，这只适用于软化原理及最终消除非承重材料的情形。通过使用有限元分析法，将骨骼中的这些钙化过程在机械部件上建模。在此情况下，弹性模量根据部件中应力增长的不同程度而显现出异同。用户定义一个参考应力，其应力高度主要是确定在指定的设计空间内将会形成哪一种结构。为该参考应力所选择的值越高，被优化结构所需的材料就越少，因为所有显现出小于参考应力值的材料都将被软化并最终被移除。

该步骤使用迭代法。优化过程初始时，应为所期望的参考应力选择一个低值，随后循序渐进地增加直至其达到所期待的值。对这种参考应力逐步进行添加将防止优化初始时所进行的优化步骤移除过多的材料，从而避免对任何相关的荷载路径形成干扰。

通过把组元的弹性模量确定为部件温度的一种功能，就可以很容易地将这种方法用在所有有限元的求解。弹性模量在此情形下通常以线性形式被映射到元素的温度中去，而一个0温度所代表的是最低弹性模量，而温度为100则代表了最高弹性模量。这些温度并不具有任何物理意义，但它们使得优化期间可以容易地对弹性模量进行控制。原则上讲，也可使用现有的参数，例如密度或其它已经定义的参数来控制弹性模量。一个典型的软区域清除（SKO）优化过程（见图4）包含了以下几个步骤：

- 将边界条件及设计空间作为一个最具有均衡分布组元可能性的有限元模型规范化。设计空间范围代表了可设计荷载部件的范围局限。设计空间的单个组元的尺寸限定了在此情况下所形成结构的精细度；
- 在最初的一个有限元计算时，设计空间的所有组元都被指派有一个常量弹性模量，以便确定因材料特性及荷载条件而增长的应力；
- 设计空间中每个部件的弹性模量都不尽相同，要视其先前有限元分析中所计算出来的应力而定，这能使弹性模量在受力大的区域分布高弹性模量值，而在受力小的区域分布低弹性模量值；
- 使用新的弹性分布模量、借助于有限元分析对新应力分布进行计算。在需要因功能原因而特地保留未动的设计空间范围内，对弹性模量的原始值不进行改动；
- 经过几次计算周期后，应对高弹性模量区域和低弹性模量区域之间的隔离程度进行评估。最后一步即是要消除“软”区域。

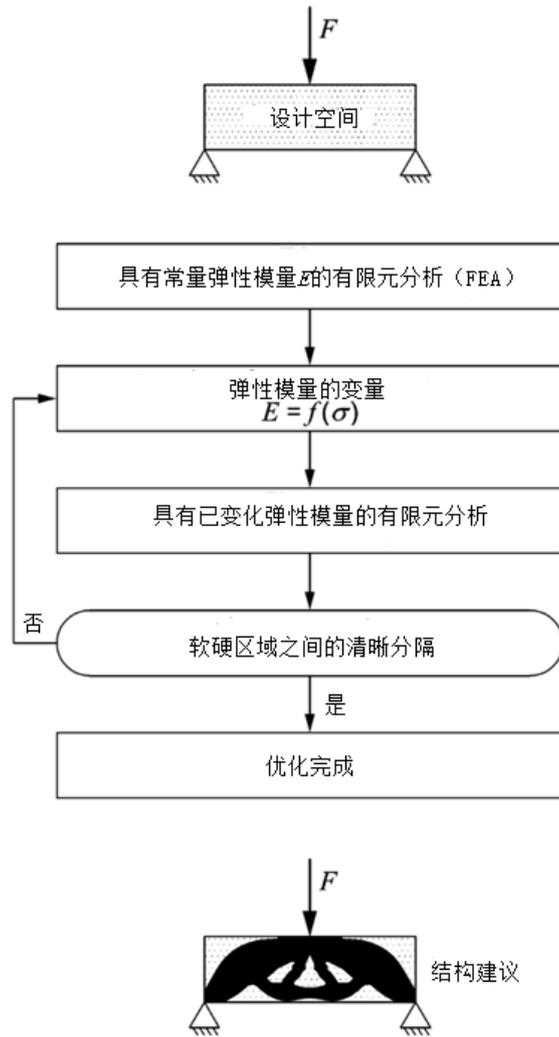


图4 根据参考(3)的软区域清除优化流程图

软区域清除 (SKO) 方法中受作用力很小的区域被移除，而受作用力大的切口仍留于此地。随后，计算机辅助优化可以减少仍被保留下来的切口应力。一步一步地应用软区域清除和计算机辅助优化将会产生出一个具有高度抗疲劳强度的轻量设计。

6.3.3 软区域清除法应用实例

6.3.3.1 概念车

人们所向往的仿生概念车的背后是要将盒子鱼作为一个空气动力模型（见图5），从而设计出一个由理想的空气动力外壳所围绕的、可以承重的车架结构。

选择盒子鱼作为模型是因为其形状不仅提供了大有可为的体积，而且还具有非常有益的空气动力特性。

为获得一个理想的轻质框架设计需要使用软区域清除对一个结构进行优化，然后再从优化所获得的主要荷载路径的知识用于随后的车架开发过程中去。

确定软区域清除优化的设计空间一方面是借助于盒子鱼的外表，而另一方面受限于如引擎隔层、玻璃、门把手、盖子及内部空间等所具有的规范。车辆悬浮炮塔上面的荷载被确定为边界条件。作为优化

基础而使用的载荷工况与用来制定一个框架的硬度具有相同的载荷工况，比如，扭矩及弯曲的载荷工况。此外，静态等同的荷载被用来模拟一个前侧、旁测及后测由于冲撞而产生的荷载。使用以上所提及的荷载方法来进行优化。设计中所建议的使用材料只是最初材料的百分之三十（使用水平 = 0,3）（见图6）。

进行车架开发的设计建议使用了软区域清除优化结果。图7为可从外部观察到的已融入到设计中的某些特性，比如汽车后镜的形状及屋顶结构。

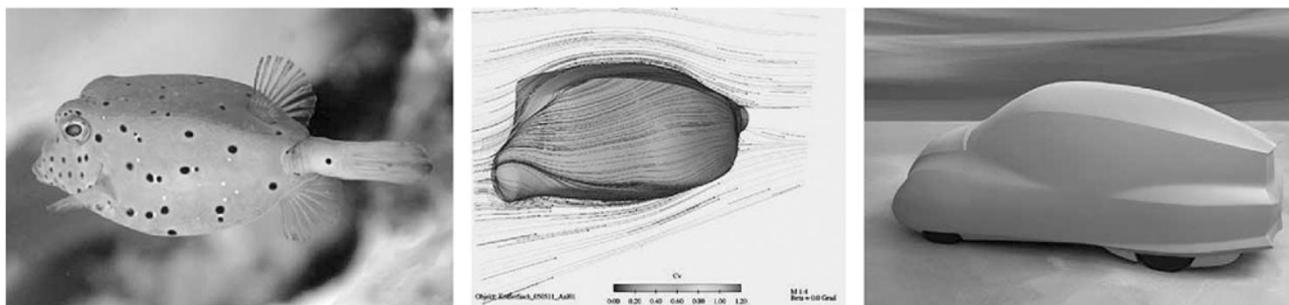


图5 从自然发展到一项产品或从一条鱼开发成一辆汽车的实例

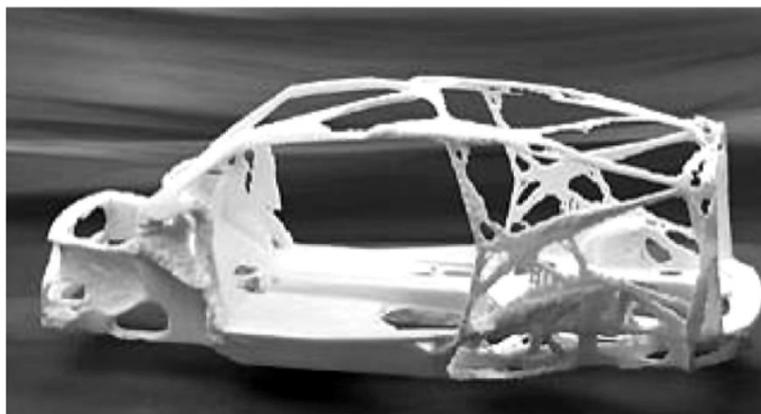


图6 软区域清除优化的结果，一个具有承重荷载、在刚硬度和重量方面属于最理想的车架



图7 车辆形状具有可辨别仿生优化效果的概念车（来源：© Daimler AG）

6.3.3.2 摇臂

图8显示了使用软区域清除法的优化摇臂。与其最初的版本相比较（见图8a），它不仅能节省材料，还能减少百分之二十九的冯·米塞斯von Mises应力。这样将这种优化版本制造成一个铸件从而减少制

造成本就成为可能。因为最初版本的设计目地就是要通过铸造来进行制造。将节省出的材料数量与使用更轻量的铸造材料相结合，其最终的结果是可以节省约总重量的百分之三十五。



图8 一个摇臂的软区域清除优化

6.4 计算机辅助内部优化设计 (CAIO)

纤维复合材料所具有的优点之一是可用于设计高强度、高硬度以及轻质的结构。在传统的人造纤维复合材料中，当几何形状遭到干扰时，比如遇到了一个洞坑时，纤维时常被切断。这在很大意义上消弱了部件的强度。为了发挥人造纤维复合材料的潜能，也可以将人造纤维复合材料的朝向顺着力流方向。如能成功的话，那么纤维就会承受所规定的拉伸力及压缩力，从而使得对于纤维复合材料来说非常关键的介于纤维相互之间的剪切应力被减到最小。

计算机辅助内部优化设计使能够承受作用力的纤维决定其纤维取向，从而将部件的剪切力减少到一个所划定的最小荷载[3][7]。该方法依据的是商业化有限元程序。首先，将一个任意方向的正交异性材料分派给将要被优化的模型。根据计算机辅助内部优化的例行程序，在计算完优化材料的朝向后进行一个应力分析。然后，计算机辅助内部优化的例行程序读出应力分析结果，并根据这些结果计算出材料轴的一个新朝向。接下来，再在这个不同的正交异性材料上进行一个新的应力分析。

由于沿着主应力轨线的材料的正交异性轴的重新变向，仅仅在首次迭代后，纤维之间的剪切力就减少了百分之九十。通过反复交替地进行计算机辅助内部优化计算及应力分析，甚至还有可能更大地减少剪切力。应用计算机辅助内部优化时所涉及的步骤见图9。

使用计算机辅助内部优化设计有可能展示静载部件的力流。使用流线型来表现力流，结果是特别实用的。流线密度与应力梯度之间的关系可按照期望制定，以便能使纤维密度和在结构的局部性受力之间产生一种依赖性。

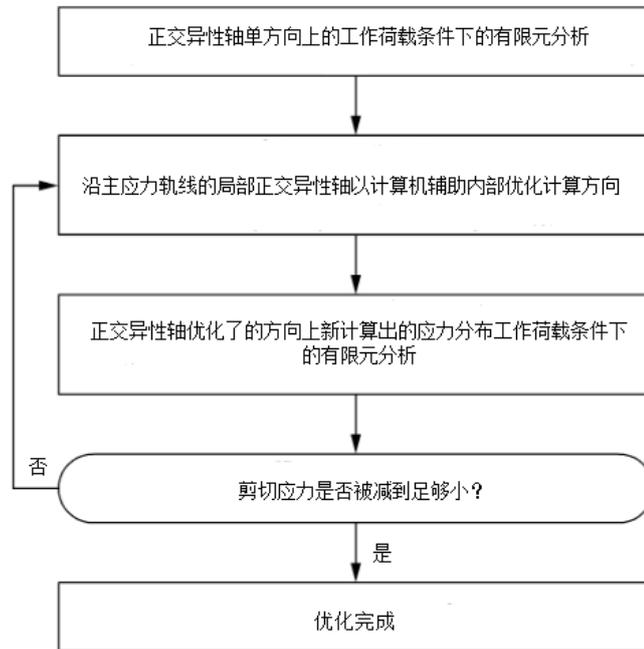
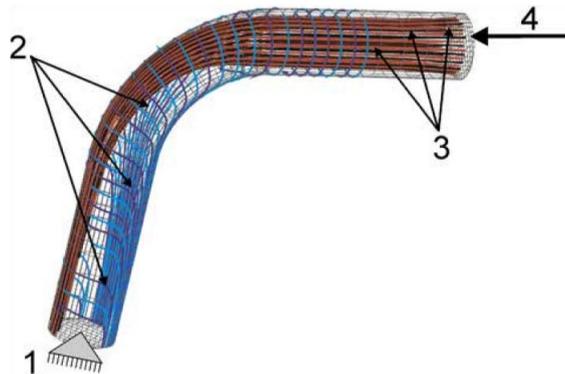


图9 基于参考（3）的计算机辅助内部优化设计流程图

6.4.1 计算机辅助内部优化设计方法实例：弯曲的圆柱体

图10显示了一个弯曲的圆柱体以及使用计算机辅助内部优化设计方法而计算出的纤维走向。结构的底部垂直的一端被固定注，如该图右上方所示，压力传递到了前面。均质轴的压力载荷产生了一种均衡的力流，并在弯曲了的圆柱体的横切面段中以等距纤维或棒眼形式所显现。在其易受弯曲应变的垂直面段中，压力集中在左侧面。而在垂直面段的右侧面，所计算出的结果是拉伸索状组织缠绕在左边的拉伸纤维上并将它们聚拢在一起。在结构的横面段部分，拉伸索状组织绳形成了循环圈。



说明：

- 压力杆pressure rods
- 拉伸绳tensile cords

- 1——固定的fixed
- 2——拉伸绳tensile cords
- 3——压力杆pressure rods
- 4——轴压axial pressure

图10 基于计算机辅助内部优化[7]的弯曲圆柱体的纤维朝向

6.5 拉伸三角形法

6.5.1 概述

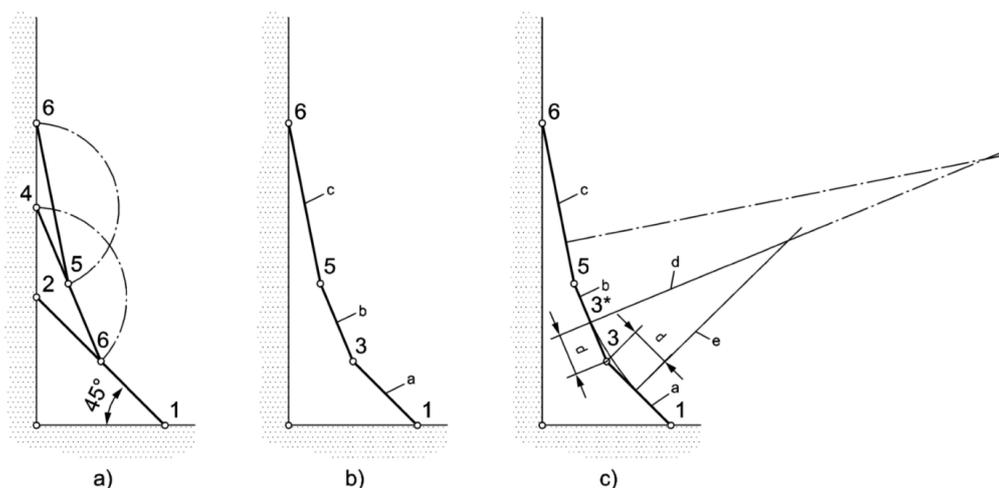
与上述方法形成鲜明对照的是，拉伸三角形允许对部件的寿命及/或材料的使用完全以一种图形的方式进行优化而不需使用计算机（8）。

优化了的边线轮廓是以几何形式来定义的。作为一般的通用规则，轮廓被分解成两个或三个拉伸等腰三角型。第一个拉伸三角型的大小决定了随后的拉伸三角型大小。一个通常形成右角的变形过渡被第一个拉伸三角形覆盖住，其底角为 45° 。随后的每一个拉伸三角形的底角为前一个拉伸三角形的一半。相应地，第二个底角为 22.5° ，第三个底角为 11.25° 。可以按照比例使轮廓适应任何设计空间。

这种几何构造通过在一个部件上将两个不同交叉段面（比如，凸肩板）的部分合并在一起的形式给出了解释。在尖的一角上，底角为 45° 的第一个拉伸三角形被放在所选设计空间中角的地方（见图11），这就磨圆了基础模型的角，并创立了两个点：点1处在凸肩上的位置，点2所表现的是直角三角形斜边的另一端，位于较细的轴的上面。

另外一个拉伸三角形在第一个拉伸三角形直角斜边的中心（点3）的起始点的位置被插入进去，在轴的纤细尾端而终止。第二个斜边的端点（点4）是通过摇摆那个位于第一个斜线（点2）的端点正中部、拥有一个等同于到第一个斜线（点3）中间点的距离的弧线来决定的。

在位于点4的中心通过重复以上的步骤构建第三个拉伸三角形，其分别产生的点5和点6作为第三个拉伸三角形斜线的起点和端点（见图11a）。在每个独立的拉伸三角形形成轮廓后，留有三条线，形成切点轮廓，再将这三条线按照构建顺序从线1到线3（见图11b）进行标注。为避免这些拉伸三角形之间过渡点的应力峰值，这些点然后通过使用最大半径被磨圆，以便每个摇摆的弧线与这些拉伸三角形的外部轮廓正切。或者，可以通过使用0到1,32范围的正切函数获取该边缘轮廓的一个近似值。



说明

- a —— 线 1
- b —— 线 2
- c —— 线 3
- d —— 法线 1
- e —— 法线 2

图11 根据拉伸三角形方法而构建及磨圆外形的步骤

对于单轴载荷工况来说，将一个拉伸三角形轮廓置放在一个切口中就足以。多轴荷载需要将两个拉伸三角形轮廓组合在一起以磨圆切口。然后，再根据特定的荷载条件对每个轮廓的设计空间进行设计。图12中，叉子向右倾斜所承受的荷载是其它倾斜的三倍，位于该面的拉伸三角形轮廓就需要拥有相应更多的设计空间。

通过在一个裂缝的终端凿洞而延缓疲劳裂缝的不断扩大是一个已经过时的工艺。如图13所示，也可使用拉伸三角形法来延缓裂缝及缝隙状裂纹的扩大而不需在裂缝的尖端部凿洞。三角形的狭槽可以在拉伸力为单轴时被放置在裂缝的原始尖端部，这样，裂缝的被重新变向的新终端将被偏转到一个受压区。当受到压迫时，一个裂缝的终端是不会受损害的，且偏斜外形的切口应力由于其被优化的形状从而所承受的作用力小。

6.5.2 拉伸三角形节省材料

借助于拉伸三角型法还有可能识别和消除处在一个机械性死腔中荷载过少的材料，比如在那些由于方向的突变而几乎没有力流的不同的交叉端的过度区域内，如图14中所示步骤。应用拉伸三角形法将凸肩的角度从90°减少到了45°。同时，通过增加如上所述的拉伸三角形还减少了该切口的应力。

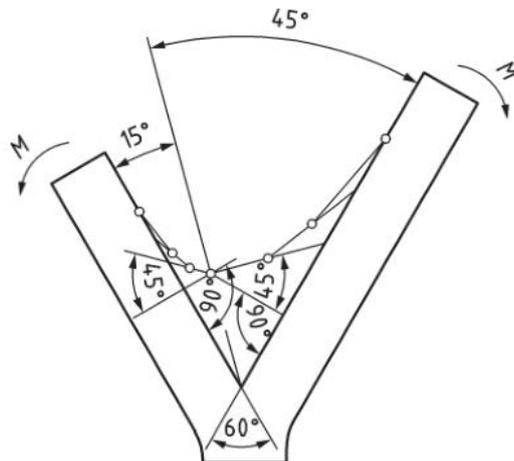
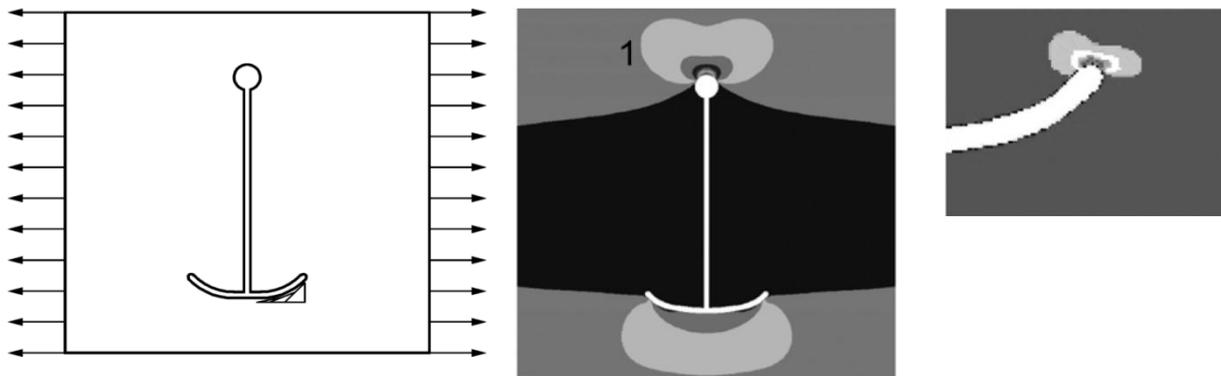


图12 磨圆的具有双边、非对称荷载的切口的拉伸三角形轮廓

该叉子的右边所承受的荷载是左边荷载的三倍，并且，为该边的拉伸三角形轮廓所选择的设计空间比左边的设计空间大三倍。



a) 模型

b) 主法线应力(拉伸状况下)

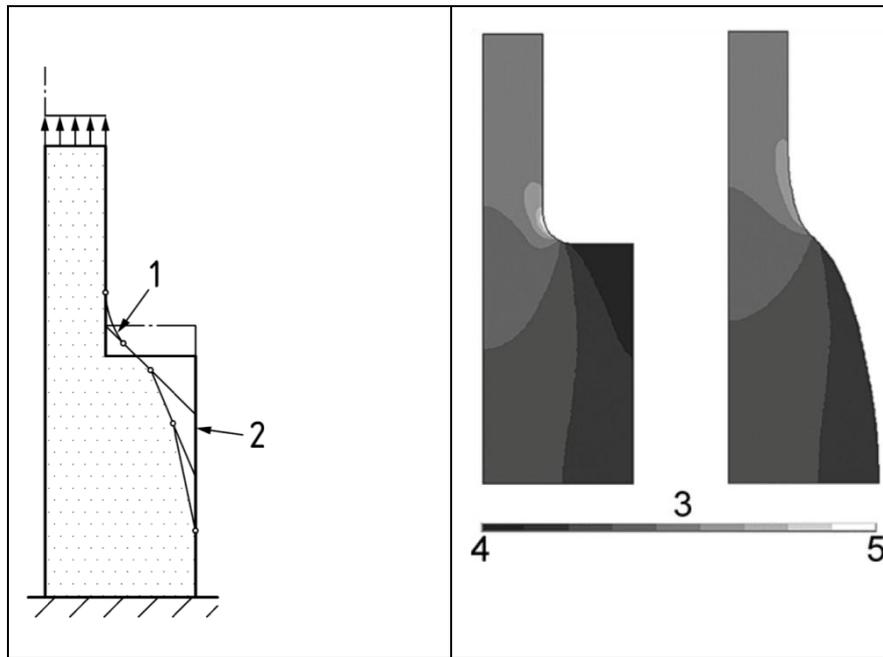
c) 第三主应力(压)

说明

1——拉伸最大应力

图13 易受拉伸荷载的狭槽板的有限元分析

改进狭槽尾端以便通过一个洞孔来减少顶部的切口效应,并通过一个拉伸三角形偏斜度来减少底部的切口效应。当与一个传统的凿眼技术b) 进行比较时,处于一个易受横向拉伸的狭槽末端的拉伸三角形轮廓最大程度地减少了拉伸应力,并使狭槽末端新的、偏斜的狭槽末端承受侧压力c)。



说明:

1——添加以减小应力growth to reduce stress

2——缩皱以减小重量shrinkage to reduce weight

3——冯·米塞斯应力von Mises stress

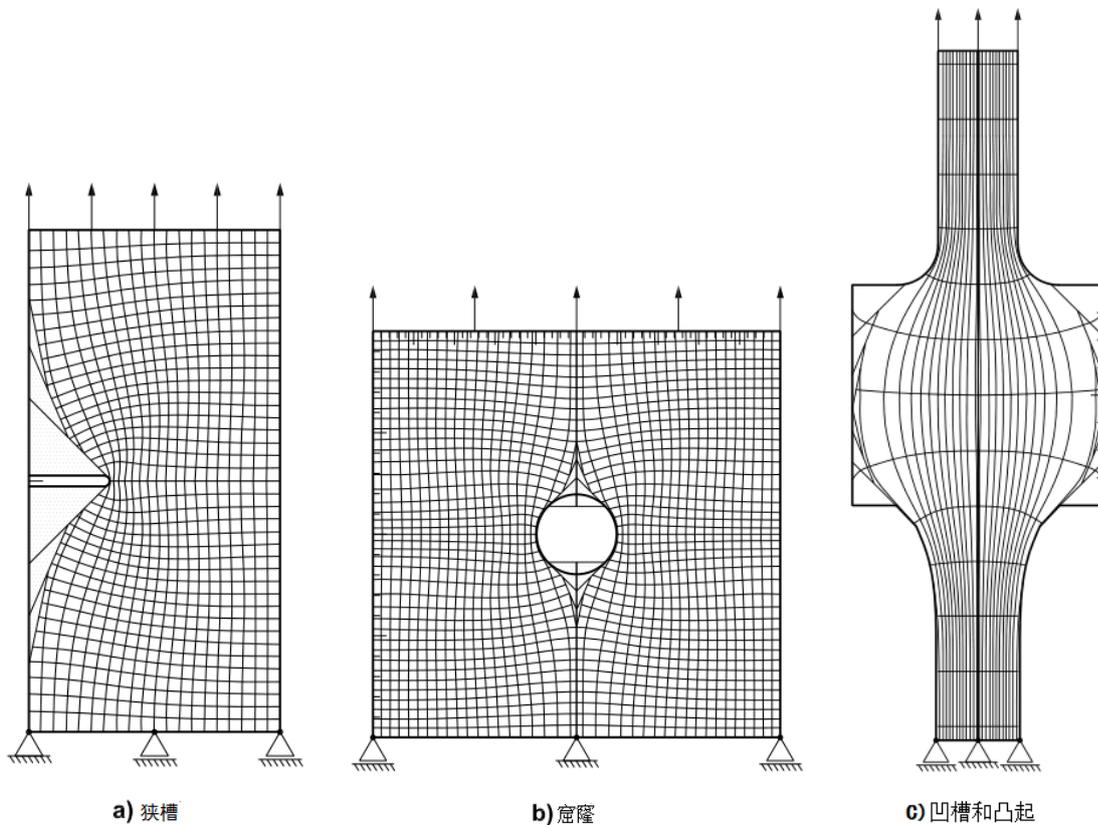
4——低low

5——高high

图14 使用拉伸三角形消除荷载超低材料(10)

6.5.3 拉伸三角形优化纤维取向

正如计算机辅助内部优化设计法所显示的那样,纤维复合材料结构的荷载容量也依赖于局部纤维的排列。当纤维走向及主应力轨线完全相同时即是最理想的状况,如当纤维与力流的方向平行时[11]。计算机辅助内部优化设计方法可以为整个结构核算出理想的纤维取向,特别是那些对于实际应用特别重要的,比如在结构中靠近凹陷或窟窿的地方的纤维走向。假如在该区域所选择的纤维排列与拉伸三角形外形相对应,那么其结果就将与计算机辅助内部优化设计解决方案非常接近(见图15)。



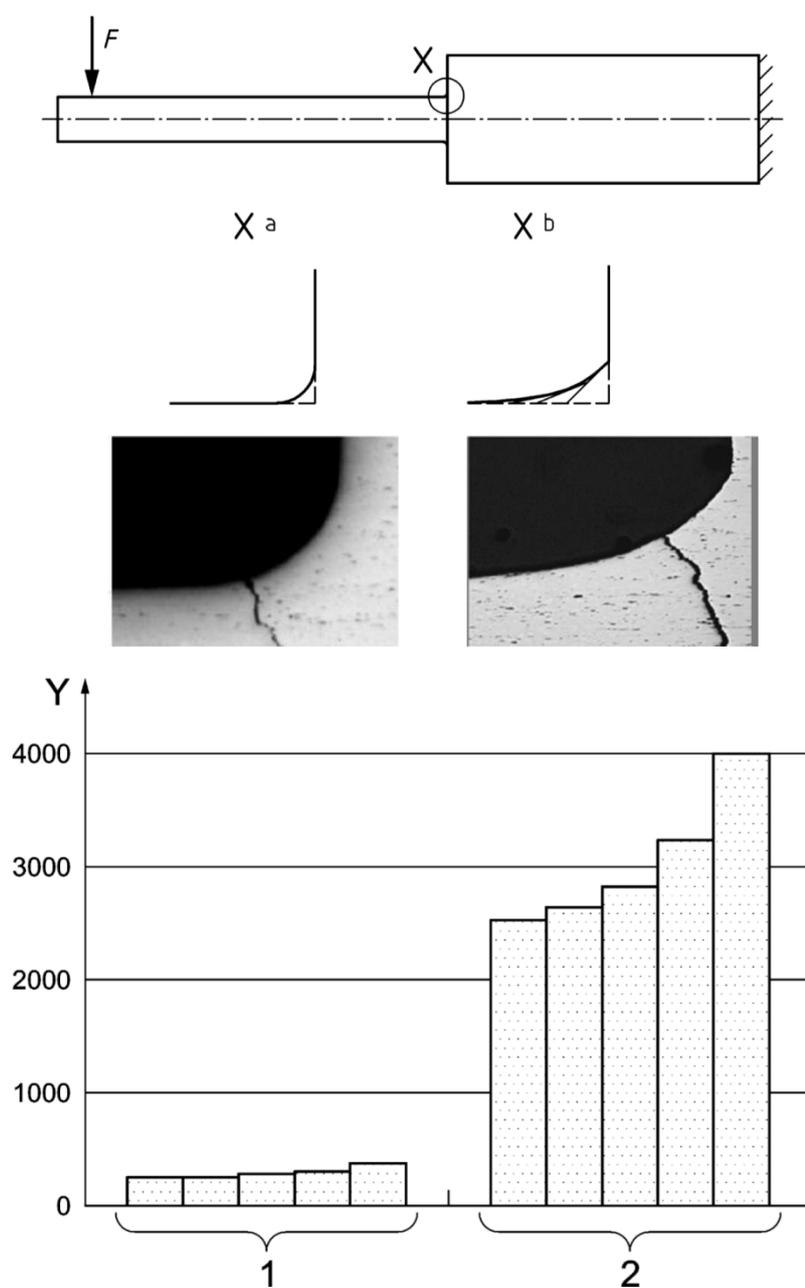
注：为确保不规则性（比如 a)狭槽、b)窟窿及 c)凹槽和凸起）不要在这些纤维复合材料中产生出薄弱点，这些地方的纤维取向需要适应荷载。

图15 优化纤维取向

可以通过使用计算机辅助内部优化设计法获得一个总体上的近似解，或借助于拉伸三角形法获得局部性近似解。在不规则形状附近所生成的拉伸三角形外形在图像中为灰色，线条通过计算机辅助内部优化设计方法所计算出的力流被直观地展现了出来。

6.5.4 拉伸三角形法实例：凸肩板

要完成任何一个部件都离不开阶梯式形状，这种阶梯式形状再反过来生成局部应力集中，比如，轴，无论是驾驶、还是生产或是攀登都会有这种阶梯形状存在。通常情况下，一个轴肩，即轴的厚和薄部位之间的过渡点，通过应用圆角半径而被磨圆，因这种规范化的过渡而生成的拉伸三角形外形所应用的设计空间等同于应用于有限元分析的设计空间，其结果还通过实验而进行了对比。轴肩的厚重尾端被夹紧，而轻薄尾端则荷载了弯曲所产生的许多荷载循环周期。在所进行的实验中，通过拉伸三角形法而优化了的钢制轴肩平均所承受的荷载周期几乎是具有同样设计空间的、拥有四分之一切口的轴肩的十倍（见图16）。



说明

X ——细节detail Z

X^a ——四分之一圆quarter circle

X^b ——拉伸三角形优化tensile triangle optimization

Y ——负载疲劳周期load cycles to failure[×1 000]

1 ——四分之一圆quarter circle

2 ——拉伸三角形优化tensile triangle optimization

注：图片显示了疲劳检测后切口外形的显微图。

图16 具有四分之一圆的轴肩以及需要进行疲劳测试的拉伸三角形切口形状的疲劳测试 [8]

参 考 文 献

- [1]Mattheck C. The face of failure in nature and engineering. Verlag Forschungszentrum Karlsruhe, 2004
- [2]Szabó B. Babuska I, I.: Introduction to Finite Element Analysis. Wiley & Sons, 2011
- [3]Mattheck C. Design in nature – learning from trees. Springer Verlag, Heidelberg, 1998
- [4]Wolff J. Über die innere Architektur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachstum. Virchow Arch Path Anat Physio. 1870, 50 pp. 389–453
- [5]Pauwels F. Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates. Springer Verlag, Berlin, 1965
- [6]http://www.sachs-engineering.com/tl_files/sachs/files/pdf/Flyer-Leichtbau-Optimierung.pdf; last hit: 08.04.2015
- [7] Reuschel D. Untersuchung der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Wissenschaftliche Berichte FZKA-6276, Dissertation, Universität Karlsruhe 1999
- [8]Mattheck C. Thinking Tools after Nature. Karlsruhe Institute of Technology, 2011
- [9]Sörensen J. Untersuchungen zur Vereinfachung der Kerbformoptimierung. Wissenschaftliche Berichte FZKA-7397, Dissertation, Universität Karlsruhe 2008
- [10]Sauer A. Untersuchungen zur Vereinfachung biomechanisch inspirierter Strukturoptimierung. Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7406, Dissertation, Universität Karlsruhe 2008
- [11]<http://www.tailored-fiber-design.com/english/index.php>; last hit: 08.04.2015
-