

分级型放射肋短壳结构集中力扩散优化设计

张家鑫, 王 博*, 牛 飞, 程耿东

(大连理工大学 工程力学系 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘 要:在航天箭体结构设计中,燃料贮箱因其特殊的连接形式往往受较大的集中力作用。传统的放射肋短壳结构被用来扩散集中力以减小其造成的危害,但实际效果并不理想。本文基于拓扑优化的概念设计,综合实际短壳结构承载环境和可制造性,提出了一种“分级型放射肋”贮箱短壳结构。围绕刚度、强度、减重、稳定性和集中力扩散效果等多种需求,基于NSGA-II遗传算法建立了多目标优化问题模型。通过形状和尺寸的协同优化策略,得到多目标优化的最优 Pareto 解集。通过三层级、两层级、单一级最优设计与传统均匀放射肋设计的对比,验证了分级型放射肋设计的优势和效果;之后,结合实际工程要求选择合理的设计方案。

关键词:贮箱短壳;集中力扩散;多目标优化

中图分类号:O221.6

文献标志码:A

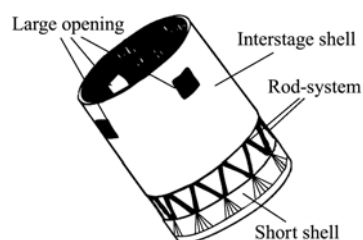
doi:10.7511/jslx201402001

1 引 言

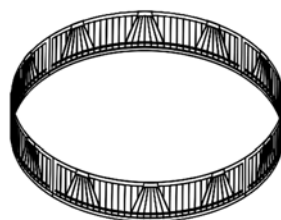
航天箭体部段间的连接构件,除连接功能外,其最主要的目的是将一侧较大的集中力均匀扩散到另一侧。以某型号运载火箭热分离式级间段所采用的蒙皮桁条和杆系结构组合的结构形式(图1(a))为例,其杆系部分由24根杆件焊接组装而成,杆系前端安装在转接框上,通过转接框与级间段壳体部分的后端框连接;杆系后端是两两连接构成的异性接头与下面级贮箱短壳连接。这样形式的结构优点是结构简单、开敞性好,有利于火焰的顺利排出;缺点是传递给级间壳和贮箱前短壳的是多点集中载荷,结构上需要采取使集中力扩散的措施^[1]。与贮箱连接往往使用具有放射肋的短壳结构。以避免箱体发生局部破坏,图1(b)为传统贮箱短壳设计中大量使用“放射肋”结构形式,即短壳蒙皮上从集中力处开始的“肋骨”采用的是直条形放射状。而这种传统型的放射肋设计虽然起到扩散作用,但仍需改进;尤其均匀断面的放射肋方案,设计过程中常会因平衡集中力扩散效果和面外失稳而使得设计增重。因此,针对贮箱短壳的“肋骨”布局,考虑集

中力扩散的性能要求开展优化设计具有现实意义。

实际工程中,结构的性能要求是多方面的,所以合理的优化设计模型往往是多目标的。对于复杂问题的多目标模型,其目标函数和约束函数大都是非线性、不可微或不连续的,传统的数学规划法求解效率较低。而大量研究表明,进化算法作为一类启发式搜索算法,对于寻找多目标优化问题的 Pareto 最优解集是很有用的^[2]。近年来,各国学者相继提出了不同的多目标优化算法^[3,4]。Fonseca 等^[5]提出的 MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm), Srinivas 等^[6]提出的 NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm),以及 Erichson 等^[7]提出



(a) 热分离级间段结构示意图
(a) Thermal separation interstage structure



(b) 贮箱短壳“放射肋”结构形式
(b) Short shell with “radial rib” of storage trunk

图 1
Fig. 1

收稿日期:2012-12-04;修改稿收到日期:2013-02-05.

基金项目:973(2014CB0490000);国家自然科学基金(113720629,91216201);辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013005);高等学校学科创新引智计划(CB14013)资助项目.

作者简介:张家鑫(1988-),男,硕士生;

王 博*(1978-),男,博士,副教授
(E-mail: wangbo@dlut.edu.cn);

程耿东(1941-),男,中国科学院院士.

的 NPGA(Nicked Pareto Genetic Algorithm)作为下一代进化多目标优化算法^[8],其主要特点是采用基于 Pareto 等级的个体选择方法与基于适应度共享机制的种群多样性保持策略^[9]。第二代进化多目标优化算法是以精英保留机制为特征^[10],主要包括 Zitzler 等^[11]提出的 SPEA(Strength Pareto Evolutionary Algorithm), Knowles 等^[12]提出的 PAES(Pareto Archived Evolution Strategy), Coello Coello 等^[13]提出的 Micro-GA(Micro-Genetic Algorithm),以及 Deb 等^[14]学者通过对 NSGA 进行改进,提出的非常经典,表现优异的 NSGA-II。

2 参数化模型建立

对于集中力扩散结构的优化设计,牛飞等^[15]从连续体结构拓扑优化的角度开展了研究工作。在传统结构最小柔顺性设计优化模型的基础上增加节点反力的方差约束条件,提出了集中力扩散优化问题的数学列式,并采用基于灵敏度的优化方法求解。本节首先基于文献^[15]的方法,针对贮箱短壳结构给出了拓扑优化概念设计,拓扑优化设计中忽略蒙皮影响;接下来考虑实际的工艺制作要求,对拓扑优化的结果进行特征识别,得到了一个可供后续精细化设计的分级型放射肋结构参数优化模型。

2.1 贮箱短壳拓扑优化设计

对于图 1(b)所示的贮箱短壳模型,依据结构的受力及边界对称特征,选取结构的 1/12 来研究,具体参数:直径为 335 cm,高为 450 cm,厚为 10 mm,弹性模量 $E=69$ GPa,泊松比为 $\nu=0.3$ 。指定上部高度为 350 cm 的区域 Ω_1 为拓扑优化的设计域,余下 100 cm 区域 Ω_2 为不可设计的弹性支承区域,其内部的应力分布将用于评估设计方案。假设作用于顶部中点集中载荷 $F=10$ kN,主要靠蒙皮上的“肋骨”传递。考虑到工程设计中短壳的上下两端实际连接刚度,本算例将其底部设定固支,顶部

为简支;另外,在柱坐标系下对两侧施加对称性边界条件,其拓扑优化的初始有限元模型如图 2(a)所示,图中位于考察节点下方的部分为不可设计域,用于模拟“短壳”的弹性边界。

以结构的最小柔顺性为目标函数,考虑了集中力扩散的性能约束,在给定设计域内 30% 的材料用量的情况下,借助连续体结构的拓扑优化方法得到了图 2(b)所示的最优材料分布。图 2(c)是对图 2(b)进行边界光滑处理后的结果,拓扑构型更为清晰。由优化结果可知,结构对称轴两侧具有明显的条带状材料分布,且外侧的材料分布更为“粗壮”,每个靠近考查节点处局部区域均是相对细小的“分叉状”材料分布。结合简化了的蒙皮影响,这些材料分布可以理解为短壳上的“肋骨”分布。

2.2 拓扑特征提取

上述基于结构拓扑优化的概念设计结果展现出一种多层逐级分叉的放射肋形式,保证结构刚度的同时,使集中力尽可能均匀地扩散到弹性支撑区域;但是,这种设计加工困难。本节从工程实际角度出发,考虑设计方案的可加工性,从拓扑优化概念设计结果提取主要特征。图 3(a)是特征提取后的“肋骨”分布,即一种三层逐级分叉的结构形式。需要说明的是,为了符合工程实际,图中提取后的结构模型考虑了前一节拓扑优化模型中所忽略的蒙皮。图 3(b)给出了拓扑特征提取后的有限元模型,该分析模型采用与概念设计相同的几何尺寸。有限元模型的单元尺寸为 0.01 m,蒙皮和弹性支撑区域采用壳单元,其中 4 节点 S4 壳单元 4487 个,3 节点 S3 壳单元 81 个,肋骨采用 2 节点 B31 梁单元,共 225 个。结构总体共划分 4795 个单元,4663 个节点,其中梁壳单元之间采用共节点的方式连接。

对于提取后的结构模型,考虑到后续的精细优化(比如形状、尺寸)设计要求,本文将结构主要的形状和尺寸参数定义为优化变量,并以此在商用有限元软件 Abaqus 上进行参数化建模。表 1 给出了图 4

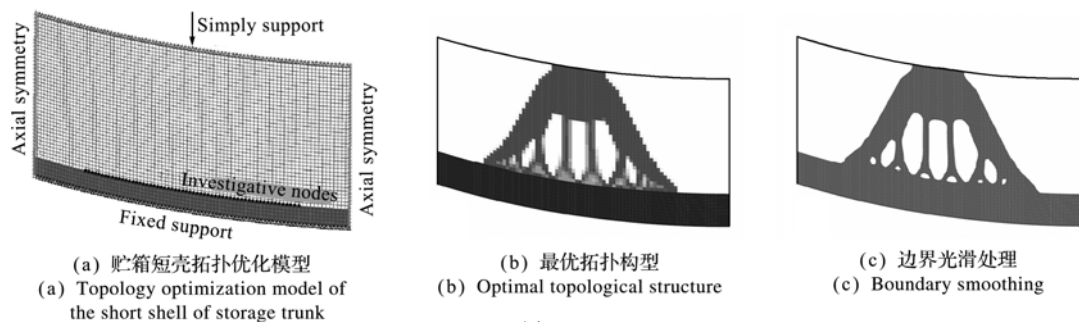
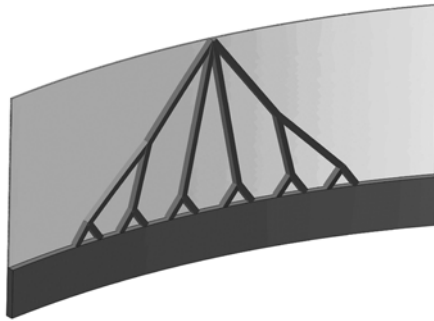


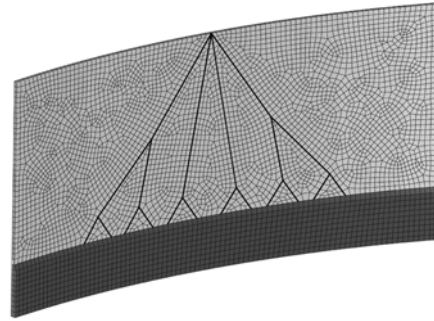
图 2
Fig. 2

表 1 模型参数说明
Tab. 1 Model parameters description

	Shape parameters		Size parameters		
	Rib length	Rib inclination	Rib width	Rib height	Skin thickness
Parametric design models	d_1, d_2, d_3, d_4	$\alpha_i (i = 1, 2, \dots, 10)$	$w_i (i = 1, 2, \dots, 10)$	$h_i (i = 1, 2, \dots, 10)$	t



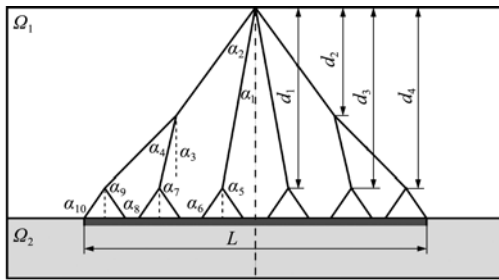
(a) 几何模型
(a) Geometry



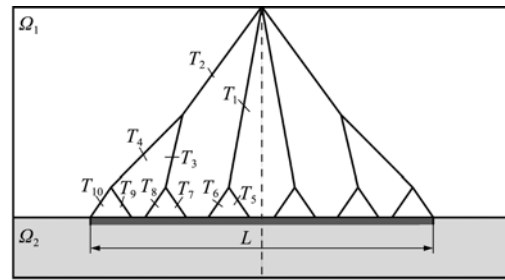
(b) 有限元模型
(b) Finite element model

图 3 拓扑特征提取后的蒙皮“肋骨”结构

Fig. 3 Skin “rib” stiffener structure after interpreting the result from topology optimization



(a) 形状参数
(a) Shape parameters



(b) 尺寸参数
(b) Size parameters

图 4
Fig. 4

中相关参数的具体说明, t 为设计域蒙皮厚度, 图 4 中的 $T_i (i = 1, 2, \dots, 10)$ 为肋骨断面参数示意, 每条肋骨对应平面内的断面宽度 w_i 和平面外的断面高度 h_i 两个参数。选取不可设计域边界上长为 $L = 0.56 \text{ m}$ 的单元 (共 56 个) 作为考察单元。

对比拓扑优化的结果与参数化模型可知, 对于拓扑优化结果的特征提取, 一方面要考虑提取前后模型的一致性; 另一方面也要考虑后续形状和尺寸参数优化的复杂程度和计算规模。过于复杂的参数化模型分析计算量大, 非但不利于优化设计, 并且增加制造难度。

3 精细优化设计

从文献[15]不难看出, 以寻找主传力路径的概念设计为目标拓扑优化模型, 材料的体积用量是给定的, 约束中没有体现结构的强度要求, 在一定程度上偏离了工程实际。对于特征提取得到的参数化模型, 本节考虑实际的设计要求进行精细的优化

设计。

3.1 优化问题模型

作为连接结构的贮箱短壳设计, 首先要保证自身结构不发生破坏 (即满足强度和稳定性要求), 才能实现集中力扩散的功能性需求。同时作为航天箭体结构, 在实现集中力扩散的功能外, 要求尽可能地轻量化。这样, 围绕着结构的重量、强度、稳定性以及集中力扩散性能等因素之间的制约与平衡关系, 本文建立了多目标优化模型, 其数学列式如下:

$$\begin{aligned}
 & \text{find: } \mathbf{X} \\
 & \min: \mathbf{F}(\mathbf{X}) = [\text{Mass}(\mathbf{X}), \text{MaxSF}(\mathbf{X})]^T \\
 & \text{s. t.: } \text{VarSF} \leq C_1 \\
 & \quad \text{MaxMises} \leq C_2 \\
 & \quad \text{Buckling load factor} > 1 \\
 & \quad \mathbf{X}_L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_u
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 \mathbf{X} 是一组决策变量, 即优化设计参数, 主要包括“肋骨”的长度、倾角等形状参数及其截面宽度、高度和蒙皮厚度等尺寸参数, 见表 1。考虑工程实

际的尺寸要求和加工工艺,同时提高优化效率,本文给定蒙皮厚度 $t = 2 \text{ mm}$, 肋骨面外高度 $h_i = 8 \text{ mm}$;最小化目标函数有两个,其中 $\text{Mass}(\mathbf{X})$ 表示结构的总重量, $\text{MaxSF}(\mathbf{X})$ 表示设计域和弹性支承交界面上的最大截面力,即在“肋骨”末端位置截面的截面力。在商用有限元软件 Abaqus 中,截面力(Section Force)的定义与相邻一侧单元有关,当假定单元边长相等时,截面力即可反映单元的应力水平。在短壳结构的支撑区域边界, SF_j 是第 j 个壳单元对应的截面力的值。为了保证集中力的扩散效果,式(1)中仍然引入了单元截面力方差约束 VarSF 不大于指定值 C_1 , VarSF 的定义为

$$\text{VarSF} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left(\text{SF}_j - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \text{SF}_j \right)^2 \quad (2)$$

式中 M 是考察截面上的单元个数。 MaxMises 是结构全局的最大 von-Mises 应力,即需要保证优化后的结构设计处处满足强度要求;Buckling load factor 是采用 Abaqus 中的 Lanczos 方法进行线性特征值屈曲分析得到的失稳载荷系数,大于 1 保证了结构不发生失稳破坏, \mathbf{X}_L 和 \mathbf{X}_u 分别代表决策变量取值的下限与上限。

3.2 NSGA-II 算法及参数优化流程

非支配排序遗传算法 NSGA^[6] 是一种高效的分类排序算法,通过对经典遗传算法的选择操作进行改进,可以将多目标优化问题简化成用一个适应度函数表达的方式,适用于任意目标数的优化问题。NSGA 算法的具体思路是,首先根据 Pareto 支配关系定义对种群中的个体进行非支配分层,确定每个个体的层级;再通过引入共享函数法控制每一个层级个体的分布,以维持群体的多样性;最后,依据个体的层级高低和小生境数进行选择操作,再与传统遗传算法其他操作过程结合,可以得到 Pareto 最优解集。NSGA-II^[14] 主要在以下三个方面对 NSGA 算法加以改进:(1) 新的基于分级的快速非支配解排序方法将目标数为 M , 种群大小为 N 的计算复杂度,由原来 $O(mN^3)$ 降到 $O(mN^2)$ 。(2) 加入了精英保存策略以改善算法的鲁棒性和收敛速度。(3) 采用拥挤度评价方法取代适应度共享函数法,以避免给定峰半径值 δ_{share} 。NSGA-II 算法有很好的收敛速度和鲁棒性,已成为多目标优化领域的基准算法之一,并成功地用于解决实际工程中的力学优化问题^[16,17]。

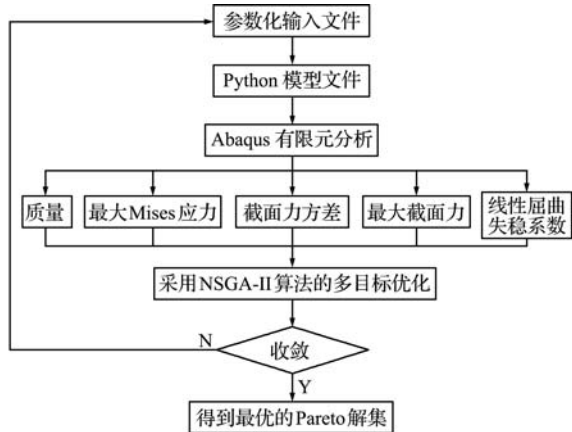


图5 优化设计任务流程图

Fig. 5 Flowchart of the optimization process

本文在多学科优化平台 iSIGHT 上集成有限元分析软件 Abaqus 来实现优化模型的求解以及设计变量的更新迭代。利用 Abaqus 二次开发语言 Python 编写的脚本程序,可自动实现有限元模型的前处理操作(包括几何造型、网格剖分及载荷施加等)、后台求解以及结果后处理(用于计算优化所需的响应,包括结构重量、最大 von-Mises 应力、截面力方差、最大截面力以及失稳载荷临界系数等),iSIGHT 中遗传算法 NSGA-II 用来求解该多目标优化问题。整个优化设计任务流程如图 5 所示。

3.3 优化设计结果

将 2.2 中的参数化模型作为初始设计按照 3.2 中的流程进行优化,得到图 6 所示的优化目标的迭代曲线,右侧坐标为最大截面力优化目标,左侧坐标为重量优化目标。图 7(a)给出了满足约束的 Pareto 最优解边界。可以看出,优化的两个目标(结构重量和最大截面力)近似呈现出此消彼长的竞争关系,Pareto 最优边界呈抛物线形状。图 7 给出 A、B、C 三个 Pareto 最优边界上的点,相应的目标及参数值列入表 2。A 点和 B 点在结构重量上很接近,但在最大截面力的目标方向 B 点较 A 点要

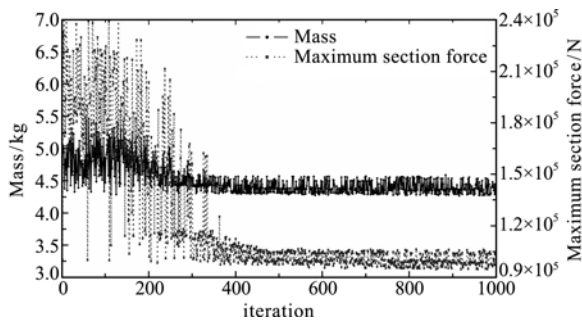


图6 多目标优化迭代历史曲线

Fig. 6 Iterative history of multi-objective optimization

表 2 A、B、C 三点的目标及约束值
Tab. 2 Objectives and constraints value of A, B, C

Selected point	Mass/kg	MaxSF($\times 10^5$ N)	VarSF	MaxMises/MPa	Buckling factor
A	4.451	1.314	0.2229	278.6	2.675
B	4.576(2.8% ↑)	1.185(9.8% ↓)	0.1764(20.9% ↓)	266.4	3.012
C	4.944(8.0% ↑)	1.122(5.3% ↓)	0.1462(34.4% ↓)	139.1	4.558

表 3 形状参数设计变量
Tab. 3 Design variables of shape parameters

Shape parameter	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm	α_1/rad	α_2/rad	α_3/rad	α_4/rad	α_5/rad	α_6/rad	α_7/rad	α_8/rad	α_9/rad	α_{10}/rad
upper bound	350	350	350	350	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
lower bound	100	100	100	100	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
initial value	300	200	300	300	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
optimal value	303	183	301	315	0.21	0.40	0.31	0.45	0.51	0.78	0.40	0.68	0.45	0.8

表 4 尺寸参数设计变量
Tab. 4 Design variables of size parameters

Size Parameters	h_1/mm	h_2/mm	h_3/mm	h_4/mm	h_5/mm	h_6/mm	h_7/mm	h_8/mm	h_9/mm	h_{10}/mm
upper bound	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
initial value	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
lower bound	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
optimal value	2.2	2.0	2.0	18.1	15.4	7.9	2.0	4.6	2.0	5.5

优秀;B点相对 A 点,用较低的增重百分比换取较高的扩散效果的提升;C点相比于 B 点,虽然最大截面力目标方向上较优,降低了约 5.3%,但在重量目标方向上,C点的重量比 B 点重 0.368 kg,增重 8.0%,C点相对于 B 点,用更高的增重百分比换取较低的扩散效果的提升。校核了 A 点到 B 点之间的 Pareto 最优边界点,均处于强度约束上限 280 MPa 左右;相反,C点的强度约束存在较大冗余。从图 7(b)可以看出,强度与重量的多目标关系呈近似抛物线形状,在一定范围内增重可以降低结构的最大应力;C点的重量较大,其最大应力远

低于 A、B 两点。从航天器结构对减重的要求来看,尽管 C 点扩散效果最佳,但并不是理想的选择。对于决策者来讲,如果更加关注减重效果,可以选择 A 点;如果更加关注集中力扩散效果,可以选择 C 点。本文选取 B 点为最终的优化设计方案,是一个折中的选择。表 3 和表 4 分别给出了最优设计的形状参数值和尺寸参数值以及相应的初始值以及设计上下限取值。

图 8(a)给出了此优化方案的结构模型。不难看出,参数优化结果中,位于外侧的“肋骨”截面尺寸大于内侧的“肋骨”,相对比较粗壮;从不同层次

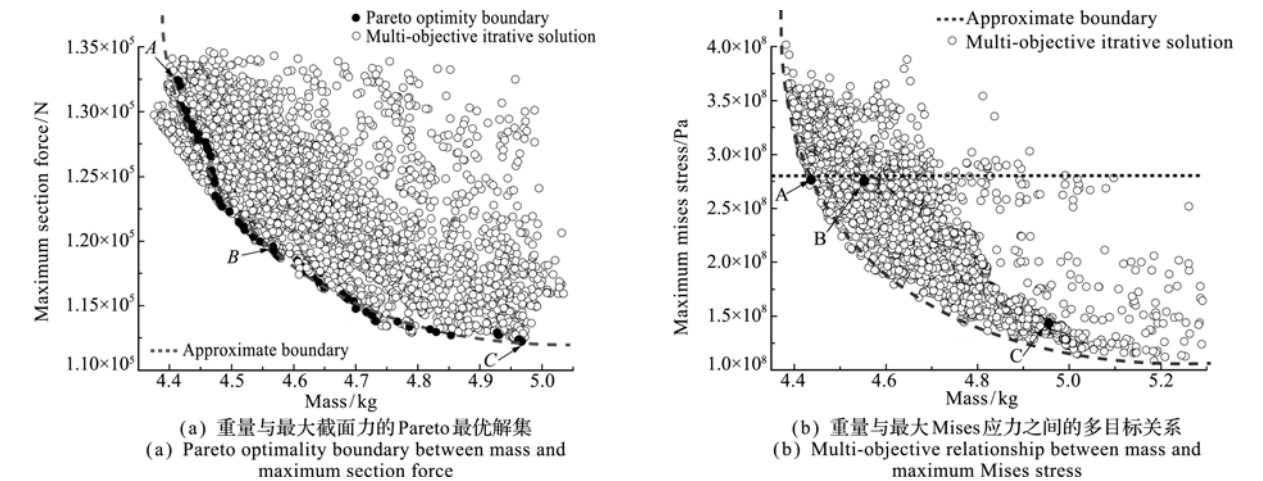


图 7
Fig. 7

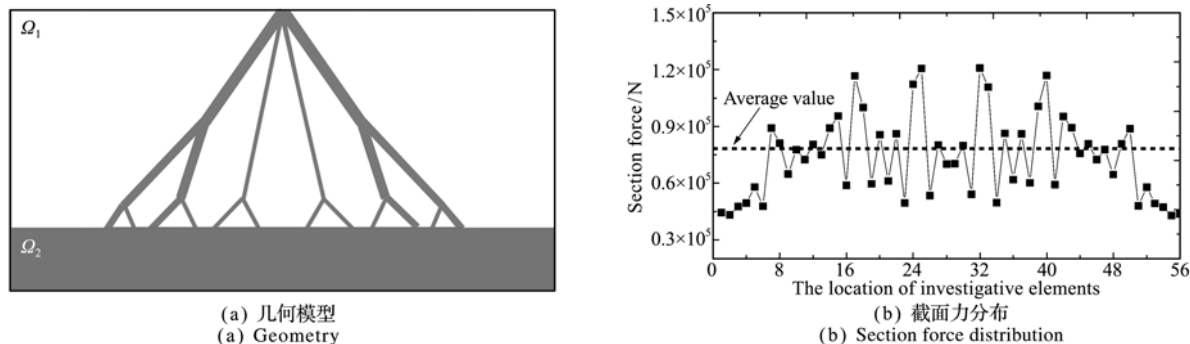


图8 三层级最优设计

Fig. 8 Geometry and section force distribution of three levels optimal design

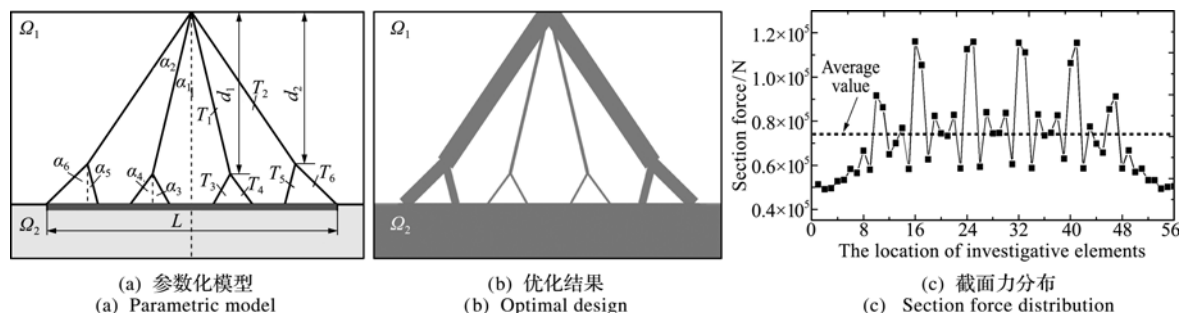


图9 两层级特征提取方案

Fig. 9 Two levels design

的高度来看,外侧“肋骨”的第二层“分叉”更接近加载位置,集中力在沿着外侧刚度相对较大的位置传递时得到了一定程度的扩散,而这种两层到三层“分叉”使其扩散的更为均匀。内侧的第一层“肋骨”连接集中力作用点保证结构的强度要求,第二层“肋骨”控制内侧蒙皮不发生局部失稳。图9给出了指定区域的截面力分布情况,截面力方差为0.217,截面力最大值为 1.185×10^5 N,集中力扩散效果的考察区域长为0.56 m,共56个单元,即整个弹性支撑区域62.7%的范围内截面力沿着集中载荷的作用方向均匀分布,定量地表明了集中力扩散的效果。

4 方案对比讨论

回顾传统的贮箱短壳结构(图1(b)),比较本文优化得到的设计方案,两者既有共同点,又有不同之处。共同之处在于两种设计方案的“肋骨”布局均为“放射状”,不同之处体现在:传统的短壳结构中“放射肋”不具有多层级特征,呈现“太阳式”的单层辐射状,并且放射肋绝大多数肋骨的断面尺寸是相等的;而本文提出的设计方案为三层逐级分叉的“放射肋”结构,肋骨断面尺寸也呈现了明显的差异。为了进一步比较这种层级特征的“放射肋”结

构的优越性,本节基于相同的材料用量进行单目标优化,给出两层级和单层级方案的最优化设计结果,连同上节的三层级优化设计结果,与传统等肋骨断面的单层级方案进行对比。

4.1 两层级优化方案

本节对图3中的三层方案进一步简化,忽略外侧底层的两个小“分叉”得到新的两层分叉状“放射肋”短壳参数化模型,如图9(a)所示。其中参数的选取和定义与表1类似,参数个数有所减少,形状参数8个(“肋骨”的倾角及高度),尺寸参数6个(“肋骨”的宽度)。采用上一节提出的优化模型,同时保证与三层方案的材料用量相同。本节最终得到图9(b)所示的结构模型。与三层“放射肋”结构一样,位于外侧的“肋骨”截面尺寸大于内侧的“肋骨”,相对比较粗壮,同样说明了集中力在沿着外侧刚度相对较大的位置传递时扩散效果更好。图9(c)给出了相应的截面力分布情况,截面力方差为0.1593,截面力最大值为 1.165×10^5 N,平均值为 7.435×10^4 N;约占总体85%的考察单元的截面力分布在 0.5×10^5 N与 1×10^5 N之间,定量地说明了较为均匀的集中力扩散效果。

4.2 单层级优化方案

对于传统采用单一层分叉形式的“放射肋”贮

表 5 三种优化方案与传统设计的目标、约束结果对比

Tab. 5 Comparison of objectives and constraints between three optimal designs and traditional design

Optimal design	Mass/kg	MaxSF($\times 10^5$ N)	VarSF	MaxMises/MPa	Buckling factor
Traditional	4.576	2.225	0.9771	199.3	2.775
One level	4.576	1.556 (30.1% ↓)	0.3899 (60.1% ↓)	241.2	2.674
Two levels	4.576	1.165 (47.6% ↓)	0.1593 (83.7% ↓)	263.6	2.636
Three levels	4.576	1.163 (47.7% ↓)	0.1528(84.4% ↓)	271.5	2.931

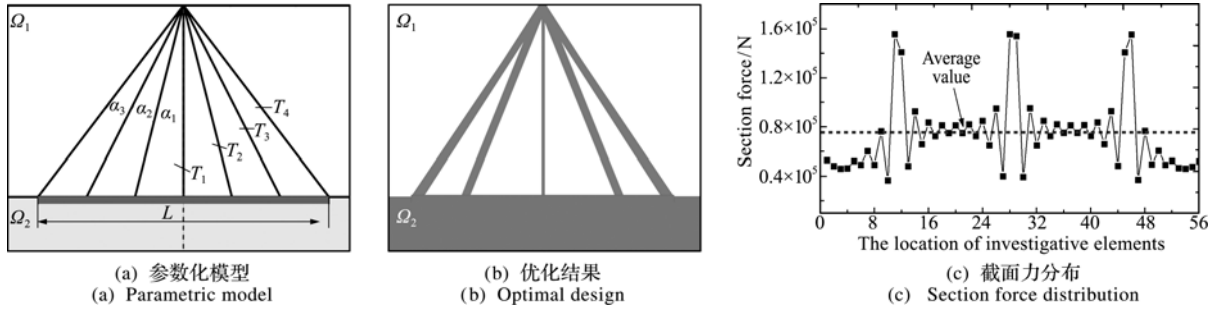


图 10 单一层级优化方案
Fig. 10 One level design

箱短壳结构,其参数化模型如图 10(a)所示,仍然将“肋骨”的倾角和截面尺寸作为设计变量,按照前面所述优化模型和方法最终得到图 10(b)所示的优化结果。类似前面的两种优化方案,位于外侧的“肋骨”截面尺寸大于内侧的“肋骨”,相对比较粗壮;另外,次外侧的肋骨几乎与最外侧重合,说明了集中力的均匀扩散是尽可能从两侧肋骨传递。图 10(c)给出了相应的截面力分布情况,截面力两侧较小,中间较高,呈现出多点的峰值效应,这是集中力沿“肋骨”传递未得到很好扩散造成的。

4.3 结果对比

将以上三层级、两层级和单一层级的最优设计方案,与传统等肋骨断面的方案进行对比,如图 11 所示。可以看出,传统的均匀肋骨设计以及改进的单一层级优化方案,都存在多点的峰值,这些截面力峰值远高于平均值,集中力扩散得不够。两层级和三层级最优方案的截面力主要分布于 0.5×10^5 N $\sim 1 \times 10^5$ N 之间,与理想的均匀分布即平均值水

平分布都较为接近。这说明,分叉特征有利于集中力的均匀扩散。三种优化方案采用与传统方案相同的重量,在最大截面力性能指标上,单一层级性能提升 30.1%,两层级和三层级提升均在 45% 以上,效果明显;在截面力方差的性能指标上,三种优化方案相比于传统方案均有显著提升,两层级和三层级的效果更为优异,性能提升均在 80% 以上。三种优化方案均满足强度和稳定性要求。从性能指标来看,三层级参数优化方案优于两层级,但考虑到加工困难,建议采用两层级方案。在这个方案中,两侧的分叉“肋骨”提升了集中力沿两侧传递的能力,降低了截面力的峰值;靠近弹性支撑区域的细小分叉“肋骨”使得集中力类似均布力一样更均匀的传递和扩散,具体指标列入表 5。

5 结论及展望

航天箭体中连接级间段与贮箱的短壳起着将级间段传递过来的集中力均匀扩散到贮箱壳体的作用,但是,传统的放射肋结构形式扩散效果并不明显。本文基于拓扑优化概念设计的主要特征,分析其受力特性并考虑实际加工要求,选取合适的结构参数构造了可用于精细优化设计的参数化多目标优化模型,采用商用软件集成调用的分析平台等技术手段,通过 NSGA-II 算法求解得到最优 Pareto 解集,得到了满足工程要求的形状和尺寸参数,有利于指导工程师得到创新的结构设计。但是,下面几个关键细节仍然需要进一步深入研究。

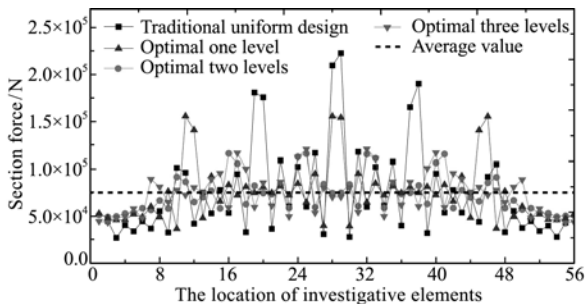


图 11 优化方案与传统设计方案的截面力分布对比
Fig. 11 Comparison of section force distribution between three optimal designs and traditional design

(1) 拓扑优化结果特征进行识别提取时,基于优化模型的复杂度和分析效率等考虑,识别结果并非足够精细。按杆系特征提取,不易处理拓扑优化中的灰度单元和粗糙边界;可以考虑基于挖孔策略的特征提取方式,作为对拓扑特征进行精细的提取识别。

(2) 对于概念设计结果的层级特性,还可以做更为细致的讨论,挖掘这种“分叉”结构对于集中力扩散的本质意义;还可以从自相似理论入手,研究多层多级“分叉”结构的性能及优化。

(3) 最终得到的精细优化方案,构形简单,易于制造加工。后续工作考虑对文中给出的不同设计方案,研制工装,借助实验手段对比验证。

参考文献(References):

- [1] 杨炳渊. 航天技术导论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1998. (YANG Bing-yuan. *Introduction to Space Technology*[M]. Beijing: China Astronautic Press, 1998. (in Chinese))
- [2] 公茂果, 焦李成, 杨咚咚, 等. 进化多目标优化算法研究[J]. 软件学报, 2009, **20**(2): 271-289. (GONG Mao-guo, JIAO Li-cheng, YANG Dong-dong, et al. Research on evolutionary multi-objective optimization algorithms[J]. *Journal of Software*, 2009, **20**(2): 271-289. (in Chinese))
- [3] Coello Coello C A. Evolutionary multiobjective optimization: current and future challenges[A]. *Advances in Soft Computing-Engineering, Design and Manufacturing* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003, 243-256.
- [4] Coello Coello C A. Evolutionary multi-objective optimization: A historical view of the field[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, **1**(1): 28-36.
- [5] Fonseca C M, Fleming P J. Genetic algorithms for multi-objective optimization: formulation, discussion and generation[A]. *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms* [C]. San Mateo, California, 1993, 416-423.
- [6] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. *Evolutionary Computation*, 1994, **2**(3): 221-248.
- [7] Horn J, Nafpliotis N, Goldberg D E. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization[A]. *Proc of the 1st IEEE Conf on Evolutionary Computation* [C]. Piscataway, N J: IEEE Service Center, 1994, 82-87.
- [8] Coello Coello C A. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, **1**(1): 28-36.
- [9] Coello Coello C A, Toscano Pulido G, Mezura Montes E. Current and future research trends in evolutionary multiobjective optimization[A]. *Information Processing with Evolutionary Algorithms Advanced Information and Knowledge Processing* [M]. 2005.
- [10] Coello Coello C A, Van Veldhuizen D A, Lamont G B. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems* [M]. Kluwer Academic Publishers, 2007.
- [11] Zitzler E, Thiele L. Multi-Objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1999, **3**(4): 257-271.
- [12] Knowles J D, Corne D. Approximating the non-dominated front using the pareto archived evolution strategy[J]. *Evol Comput*, 2000, **8**(2): 149.
- [13] Coello Coello C A, Pulido G T. A micro-genetic algorithm for multiobjective optimization[A]. *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization* [C]. Zurich, 2001, 126-140.
- [14] Deb K, Pratap A, Agrawal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Trans Evolutionary Computation*, 2002, **6**(2): 182-197.
- [15] 牛 飞, 王 博, 程耿东. 基于拓扑优化技术的集中力扩散结构设计[J]. 力学学报, 2012, **5**: 529-536. (NIU Fei, WANG Bo, CHENG Geng-dong. Optimum topology design of structural part for concentration force transmission[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, **5**: 529-536. (in Chinese))
- [16] Tang X G, David Hicham Bassir, Zhang W H. Shape, sizing optimization and material selection based on mixed variables and genetic algorithm [J]. *Optim Eng*, 2011, **12**: 111-128.
- [17] Zhang J, Zhao W H, Tang Y P, et al. Structural optimization of labyrinth-channel emitters based on hydraulic and anti-clogging performances[J]. *Irrig Sci*, 2011, **29**: 351-357.

An operator custom-design wavelet-based thin plate element and its application

WANG You-ming^{*1,2}, WANG Wen-qing¹, SHEN Jian-dong¹, CAO Hong-rui³

(1. School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology,
Dalian 116023, China;

3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An adaptive operator custom-design wavelet finite element method based on the lifting scheme is proposed and a new operator custom-design wavelet thin plate element is constructed. A two-dimensional Hermite-type multiresolution finite element space and two-level relation are built. The inner production equation of scaling functions and wavelet functions of thin plate structure, also called the operator, is derived based on the general variational principle. The construction method of operator custom-design wavelet finite elements based on the lifting scheme is presented to meet the operator-orthogonalization. The property of the method is that the wavelets can be designed with the specified feature depending on the requirements of the problems. An adaptive operator custom-design wavelet finite element method is presented on the two-level error estimation, which can solve the thin plate problems efficiently by adding operator custom-design wavelets into the local domains higher than the threshold value. The operator custom-design wavelet finite element method saves a great deal of preprocessing time of refining the meshes or increasing the approximating order of the interpolating functions and realizes efficient decoupling computation of thin plate problems.

Key words: adaptive operator custom-design wavelet finite element method; thin plate; operator-orthogonalization

(上接第 148 页)

Optimal design of concentrated force diffusion for short shell structure using hierarchical radial ribs

ZHANG Jia-xin, WANG Bo^{*}, NIU Fei, CHENG Geng-dong

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment and Department of Engineering Mechanics,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: During the structural design of space rocket, fuel tanks are usually bearing large concentrated forces due to their special form of connection. Traditional radial ribs of short shell structure are used to decrease the damage by diffusing the concentrated forces, but the actual effect is not ideal. Our present work based on the concept of topology optimization and actual bearing environment and manufacturability propose a kind of "hierarchical radial ribs" structure of short shell. Considering the engineering requirements of the stiffness, strength, weight loss, stability and diffusion effect of concentrated forces, a multi-objective optimization model using NSGA-II genetic algorithms is established. Optimized Pareto fronts in multi-objective optimization are obtained using concurrent optimization strategy integrated shape and sizing optimization. By contrast of three levels, two levels, one level and traditional radial ribs design, the advantages and effects of hierarchical radial ribs has been sufficient validated, and then a finally optimal design is selected meeting the actual requirements.

Key words: tank short shell structure; concentrated force diffusion; multi-objective optimization