

文章编号: 1001-2486(2008)04-0006-05

## 固体发动机星形药柱的形状优化分析\*

雷勇军<sup>1</sup>, 袁端才<sup>1</sup>, 何煌<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410072)

**摘要:** 为了极大地提高发动机的结构完整性能, 利用 MSC.Nastran 软件的结构优化功能, 对星形药柱发动机进行了形状优化分析。探讨了发动机形状优化中位移模式和辅助模型的建立方法, 根据发动机的结构和受力特点, 建立了星形药柱的平面应变模型, 对星形药柱的控制参数进行了灵敏度分析, 并在此基础上对星形药柱进行了形状优化。优化结果表明: 增大星边夹角和顶弧倒角可有效地缓解应力应变的集中程度。

**关键词:** 固体发动机; 形状优化; 灵敏度分析; 结构完整性

**中图分类号:** V435      **文献标识码:** A

## The Shape Optimization Analysis of Solid Motor Star Grain

LEI Yong jun<sup>1</sup>, YUAN Duan cai<sup>1</sup>, HE Huang<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Primary Education for Officers, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Structural integrity is one criterion of vital importance for solid motor. It is shown that the optimization of grain shapes and material properties can greatly improve the structural integrity. Owing to particularity of shape optimization, the Basis Vector which guides the optimization procedure is introduced. The auxiliary model which is used to help generate basis vectors is also designed. Based on the characteristics of solid motor and its loads conditions, the plain-strain model of the star is built. Several sensitivity factors of the shape parameters are studied, and the optimal schemes are discussed later. The results obtained will offer guidance to the structural integrity analysis and optimization design for solid motor. The methods and conclusions are beneficial to the designers and manufacturing of solid motor.

**Key words:** solid motor; shape optimization; sensitivity analysis; structural integrity

不同的几何构型直接决定了固体发动机药柱受载作用时应力应变的集中位置和集中程度, 药柱的结构完整性能不可避免地受到发动机几何构型的影响。陈汝训<sup>[1]</sup>系统地分析了不同药型对结构完整性的影响, 蒙上阳等<sup>[2]</sup>探讨了通过调整伞盘药型来缓解药柱应力应变集中水平, 以提高含伞盘药型低温时的力学性能。李晓斌<sup>[3]</sup>考虑药柱变形带来的装药几何参数不确定性, 进行了几何参数不确定性优化设计研究。对发动机结构完整性的研究尽管很多, 但基本上都是在原有设计的基础上进行分析, 起“优化校核作用”, 没有在概念设计阶段充分考虑发动机的结构完整性能, 在其他设计参数确定之后, 发动机的结构完整性能往往并不能很好地满足, 因此, 在概念设计阶段或方案验证阶段就考虑发动机的结构完整性能具有重要的意义。

由于几何构型和边界条件复杂的结构需要非常大的有限元求解矩阵, 致使计算量过大, 结构响应和灵敏度分析困难, 因此, 目前国内对结构优化的研究还主要限于杆系、梁系等一维结构, 其设计变量一般也仅限于杆元和梁元截面积等相对简单的属性。大型商业计算软件的普及, 将结构优化技术推到一个新的层次。商业软件将有限元技术与结构优化技术相结合, 具有高效、直观、过程明确、可控性好和参数获取容易的特点。基于有限元法的结构优化与灵敏度分析可以针对结构的任意性能参数, 如质量、刚

\* 收稿日期: 2008-03-19

基金项目: 国防科技大学预研基金资助项目(JC06-01-01); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20069998002); “十一五”国家部委资助项目

作者简介: 雷勇军(1968-), 男, 教授, 博士。

度、强度或一阶扭转频率等进行优化设计与分析。近年来,利用商业软件进行固体发动机结构优化的研究也相继出现,如苏建河等<sup>[4]</sup>利用 ANSYS 软件对固体火箭发动机设计中的优化做了研究。

为了极大地提高固体发动机的结构完整性能,本文从 MSC. Nastran 软件形状优化方法出发,对工程中广泛使用的星形药柱进行了形状优化和灵敏度分析。

## 1 MSC. Nastran 形状优化方法

在形状优化中,每个节点都是一个设计变量,对于大规模问题而言,分析每个节点的变化灵敏度并随之做出优化改变,简直是不可能的。所幸的是,尽管每个节点都是独立的,但经验和理论都表明,在形状优化中,最优曲线(曲面)都是光滑并连续的,因此,可以用几个典型几何特征参数作为设计变量,来定义整个边界和有限元模型的形状改变,从而大大减小问题求解的规模。

一般来说,位移模式就是某个节点的变形方向,它的提出是为了解决形状优化中的方向搜索问题<sup>[5]</sup>。

一个节点形状的改变可表示为

$$\{\Delta G\} = [T]\{\Delta x\} \quad (1)$$

其中 $\{\Delta G\} = \{G\}^{i+1} - \{G\}^i$  ( $i$  为循环次数)表示节点位移的改变量, $\{\Delta x\} = \{x\}^{i+1} - \{x\}^i$  表示设计变量的改变量,定义位移模式

$$[T] = \text{Coef} * \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

表示节点随设计变量变化时所表征形状的改变量。其中  $\text{Coef}$  为系数, $N_1, N_2, N_3$  用于定义一个直角坐标系  $xyz$  下的矢量, $N_1, N_2, N_3$  分别为矢量  $x, y, z$  轴的分量数值。

由于结构优化的实质是对各个位移模式的线性组合形式即各个系数的优化,因此定义一族合适的位移模式是至关重要的。位移模式要求其矢量方向的改变能够较明显地减小目标函数的值,至少不能对目标函数是钝感的。通常位移模式所指的形变方向还应该是实际结构允许发生改变的方向,即不是固定约束或是受其他部件形状约束限制的方向。同时,位移模式还应该尽量考虑边界的协调性条件,不造成局部明显的应力应变集中。

位移模式的定义直接影响着形状优化结果的优劣。但当一个模型节点数目比较多时,逐个节点地手动定义位移模式,无论是从工作量上还是位移模式的数值计算上,都是不可能实现的。为了解决手动生成位移模式的复杂性和易出错性,引入辅助模型的概念,并用它精确快速地生成位移模式。

位移模式的实质是一系列的方向矢量,每个节点都对应着一种或几种位移模式(未特别指定者,则认定该节点的形状是不可改变的,在分析时取其位移模式为 0)。对于特定的结构,只要添加了适当的载荷与边界条件,就可以生成相应的位移场。通过和位移模式的对比,我们知道,该种位移场完全可以用于表示优化计算所需要的位移模式。这个有限元计算模型及其边界条件被称作是形状优化设计中的辅助模型。

由辅助模型的定义可以看出,辅助模型是一个另外定义的有限元模型,其本身并不参与优化计算,仅仅用来生成位移模式。辅助模型与优化模型可以是同一个模型,也可以是完全不同的模型。辅助模型也有自己的载荷工况,但与主模型(优化模型)通常并不一定相同。辅助模型定义的位移模式一般在优化运算前生成,并被存放在数据库中,在优化运算过程中调用。

在 MSC. Nastran 软件<sup>[6]</sup>中,通过对 BDF 文件进行修改与定义,可以形成一个能够被 MSC. Nastran 优化模块执行的输入文件,利用该输入文件,即可实现对 MSC. Nastran 优化功能的调用。

## 2 星形药柱的形状优化分析

### 2.1 星形药柱星边夹角优化

星形药柱具有多个可设计参量,可通过调整各几何参量的值,有效地提高发动机药柱的结构完整性

能,首先对星边夹角即槽倾斜度进行优化,分析槽倾斜度对发动机结构完整性的灵敏度变化规律。为了便于分析,建立如图1所示的简化有限元模型。为方便处理,将沟槽根部形状作了简化处理。

由于在优化过程中,药柱形状的变化主要是槽边的角度发生变化,表现为其位移模式从顶部到根部逐渐线性加大,并且优化后槽边的形状应当仍然保持直线。为获得形状优化所需要的位移模式,建立如图2所示的辅助模型。

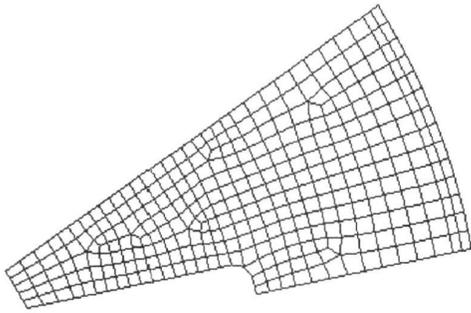


图1 星形药柱简化有限元模型示意图  
Fig. 1 The simplified finite element model

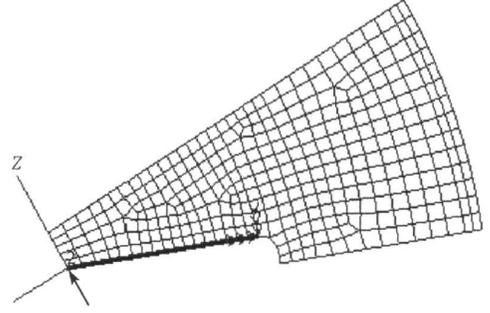


图2 星形药柱星边交角优化辅助模型图  
Fig. 2 The auxiliary model of angle optimization

在槽内沿直角边上建立一系列梁单元模型,梁单元节点与原有四边形单元的节点重合。梁模型一端固定,另一端加一强迫位移,方向沿着内边界的方向,固定除梁单元节点外的其他所有节点。对辅助模型单独计算,得到梁单元各个节点的位移场如图3所示。经过分析可知,该位移模式完全符合我们对星形药柱星边夹角优化的需求。

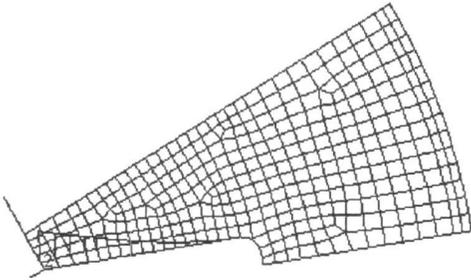


图3 星形药柱星边交角优化位移模式图  
Fig. 3 The displacement model of angle optimization

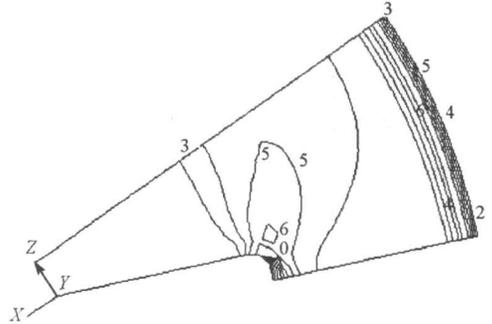


图4 星形药柱星边交角优化结果等值线图  
Fig. 4 The Von Mises strain of angle optimization grain

利用该位移模式作为形状优化的基本方向矢量,对原模型进行优化计算,所得结果如表1所示。

表1 星形装药星边夹角优化结果

Tab. 1 The result of angle optimization

优化迭代 次数	设计变量 (位移模式)	最大点变形 (mm)	星边夹角 (°)	Von Mises 应变	灵敏度系数
1	1.00E+ 00	1.00E- 01	1.74E- 01	19.22%	- 2.59E- 03
2	1.40E+ 00	1.40E- 01	3.34E- 01	19.11%	- 2.60E- 03
3	1.96E+ 00	1.96E- 01	3.33E- 01	18.96%	- 2.63E- 03
4	2.74E+ 00	2.74E- 01	3.31E- 01	18.75%	- 2.66E- 03
5	3.84E+ 00	3.84E- 01	3.28E- 01	18.44%	- 2.70E- 03
6	5.38E+ 00	5.38E- 01	3.25E- 01	18.01%	- 2.78E- 03
7	7.53E+ 00	7.53E- 01	3.20E- 01	17.37%	- 2.94E- 03
8	1.05E+ 01	1.05E+ 00	3.13E- 01	16.39%	- 3.37E- 03
9	1.48E+ 01	1.48E+ 00	3.02E- 01	14.68%	- 4.58E- 03

从表 1 可以看出,星边夹角对药柱的最大 Von Mises 应变比较敏感,其角度改变不到  $0.2^\circ$ ,最大 Von Mises 应变的绝对改变约为 4.5%,其灵敏度系数为  $10^{-3}$  以上。因此,在星形药柱设计中,在内弹道或其他性能指标允许的情况下,应尽可能地增大星边夹角。

图 4 为优化后药柱的 Von Mises 应变分布图。根据 Von Mises 应变的分布可以看出,尽管改变星边夹角能有效降低药柱整体的 Von Mises 应变水平,但对应变场分布的影响并不大,顶槽部位的应变集中现象仍然严重。

## 2.2 星形药柱顶槽倒角优化

发动机药柱的 Von Mises 应变最大值位于顶槽上,我们接着分析顶槽形状的改变对发动机结构完整性的影响。对顶槽附近局部区域加密网格,如图 5 所示。顶槽形状通常是由若干段光滑的曲线通过倒角连接形成,图 5 所示的模型中通过半径为 3mm 的倒角将沟槽顶线和边线连接起来。

图 6 是用于生成位移模式的辅助模型示意图。对倒角进行优化时,辅助模型和主优化模型取同一个模型,但载荷工况有所变化。如图 6 所示,将倒角内表面部位加均匀压力载荷,将其他所有边界节点的六个自由度均固定,对其进行静力分析,所得位移的等值线图如图 7 所示。

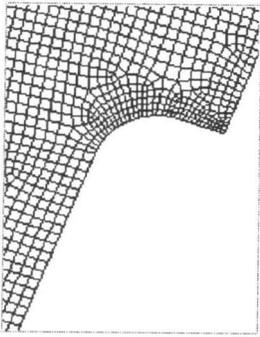


图 5 星形药柱顶槽形状优化模型(局部)  
Fig. 5 The shape optimization model of tip slot

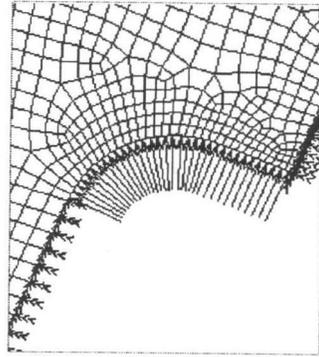


图 6 星形药柱顶槽形状优化辅助模型  
Fig. 6 The auxiliary model of tip slot optimization

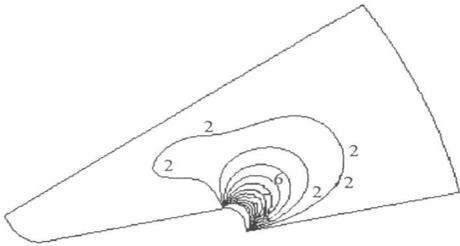


图 7 星形药柱顶槽形状优化位移模式  
Fig. 7 The displacement model of tip slot optimization

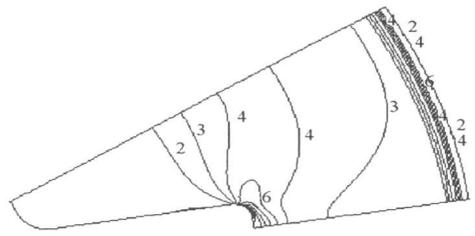


图 8 星形药柱顶槽形状优化应变等值线图  
Fig. 8 The Von Mises strain of tip slot optimization grain

由于其他部位的节点都被固定了,因此辅助模型在静力工况下的位移只发生在倒角周围附近区域,在倒角中部区域的值略大,可以很好地模拟不同半径的倒角形状。对星形药柱顶槽倒角进行优化,其计算结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,随着设计循环的增大,设计变量值的逐渐增加,对应的最大 Von Mises 应变值也逐渐减小,并且 Von Mises 应变降低很快。图 8 给出了星形药柱顶槽形状优化的最终结果,从图 8 可以看出,尽管沟槽顶部依然是药柱最大 Von Mises 应变的所在区域,但与优化前相比,其 Von Mises 应变值明显减小,应变集中程度也有所降低,说明对槽顶倒角的优化是成功的。

表2 星形药柱顶槽形状优化结果  
Tab.2 The result of tip slot optimization

优化迭代次数	设计变量(位移模式)	最大点变形(mm)	Von Mises 应变	灵敏度系数
1	1.00E+ 00	4.00E- 02	9.99%	- 2.53E- 03
2	1.80E+ 00	7.20E- 02	9.79%	- 2.50E- 03
3	3.24E+ 00	1.30E- 01	9.43%	- 2.44E- 03
4	5.83E+ 00	2.33E- 01	8.80%	- 2.33E- 03
5	1.05E+ 01	4.10E- 01	7.74%	- 2.16E- 03
6	1.89E+ 01	7.56E- 01	6.02%	- 1.91E- 03
7	3.40E+ 01	1.36E+ 00	3.39%	- 1.54E- 03
8	5.00E+ 01	2.00E+ 00	1.18%	- 1.18E- 03

### 3 结束语

探讨了 MSC. Nastran 软件中的形状优化方法,引入了位移模式和辅助模型的概念,对星形药柱进行优化设计。

(1) 位移模式决定着结构形状优化的方向,辅助模型生成位移模式时必须满足这一特征。

(2) 星形药柱通常在顶槽部位存在很大的应力应变集中,通过增大星边夹角和优化顶弧倒角可有效地缓解应力应变的集中程度。在星型药柱设计中,在内弹道或其他性能指标允许的情况下,应尽可能地增大星边夹角。

本文的分析方法与结论对固体发动机的结构完整性分析和优化设计具有指导作用,可供发动机设计和制造部门参考。

### 参考文献:

- [1] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究 [M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [2] 蒙上阳, 唐国金, 雷勇军. 低温环境下固体发动机药柱伞盘结构设计 [J]. 推进技术, 2004, 25(5): 397- 400.
- [3] 李晓斌, 张为华, 王中伟. 装药几何参数不确定性优化设计 [J]. 推进技术, 2006, 27(2): 132- 136.
- [4] 苏建河, 尤军锋. ANSYS 程序优化技术在固体火箭发动机设计中的应用 [J]. 固体火箭技术, 2006, 29(8): 337- 340.
- [5] Moore G J. MSC/Nastran Design Sensitivity and Optimization [M]. Los Angeles: The Macneal-schw endler Corporation, 1994.
- [6] MSC. Software. MSC. Nastran 2005 Quick Reference Guide [M]. Santa Ana: The MSC Software Corporation, 2005.