

# 带预测有效约束的优化法对燃烧室构件的设计

张德欣, 安伟光

(哈尔滨工程大学 航天工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 用带预测有效约束的全解析敏度分析的方法, 对燃烧室壳体构件进行优化设计, 能更好地改善燃烧室壳体的应力集中状况和防止热变形损伤, 提高其承载能力。在燃烧室壳体构件优化设计中, 建立带预测有效约束的全解析敏度分析技术, 并将该技术与通用的形状优化设计算法相结合, 对燃烧室壳体中的某一平面应力下的构件进行形状优化设计, 降低了内孔最大切向应力值, 最后获得满意的结果。

**关键词:** 燃烧室壳体; 有效约束; 边界元; 优化设计

中图分类号: TK473.2; O175 文献标识码: A

## 引 言

发动机的主要结构是燃烧室壳体, 燃烧室的外壁与内腔是相互连接的, 它承受很大的热应力。燃气压力是燃烧室壳体的基本载荷, 它将影响燃烧室的总体强度和刚度, 还影响内外壁连接件间的局部强度和刚度。

在结构形状优化设计中, 陈建军给出了结构优化中的灵敏度分析<sup>[1]</sup>, 对常用构件, 使其在部分边界上满足边界条件。尹莲花给出了飞行器热结构优化方法<sup>[2]</sup>。张德欣给出了敏度分析的方程<sup>[3]</sup>, 使问题得到简化, 整个优化过程完全由边界及边界上的物理量所决定, 使形状优化设计更加简单优化结果更加精确。秦东晨给出了六面顶压机关键零部件的结构优化设计<sup>[4]</sup>。

本文建立了一种带预测有效约束的解析敏度分析技术的优化算法, 并用该算法, 对燃烧室壳体中的某一构件进行优化, 并与现有的结果进行了比较。

## 1 预测有效约束的优化理论和公式推导

在形状优化计算中, 可用预测有效约束的方法, 提高优化结果的精度。有效约束逐个地按目标函数梯度, 在有效约束集的切平面上投影方向来选取, 其数量逐渐增加, 直到由这些线性独立的有效约束的

梯度所形成的 K-T 锥能容纳目标函数梯度为止。

优化问题是求:  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$

使目标函数:  $F(\vec{x}) = \min$

且满足约束:  $g_i(\vec{x}) \geq 0$

现以找出  $g_i(\vec{x})$  中的有效约束, 使问题得到简化。公式推导如下:

(1) 计算当前设计点  $x_p$  沿目标函数负梯度方向到达各个约束边界的距离  $l_i$ , 并选取大于零的  $l_i$  中最小者所对应的约束  $g_i(\vec{x})$  作为第一个有效约束;

(2) 计算  $\nabla F(\vec{x})$  在  $g_k(\vec{x})$  上的投影  $\vec{d}$ :

$$\vec{d} = \nabla g_k(\vec{x}) [ \nabla g_k^T(\vec{x}_p) \nabla F(\vec{x}_p) ] / [ \nabla g_k^T(\vec{x}_p) \times g(\vec{x}_p) ] - \nabla F(\vec{x}_p)$$
 若  $\|\vec{d}\| = 0$ , 则转向(7), 否则转向(3);

(3) 计算从当前设计点  $\vec{x}_p$  沿方向  $\vec{d}$  到达各线性化约束界面的距离(相对距离):

$$x_p N_i = -g_i(\vec{x}_p) / d^T \nabla g_i(\vec{x}_p)$$

(4) 选取最近的一个约束, 其约束梯度为  $\nabla g_{r+1}(\vec{x}_p)$ ;

(5) 计算  $D_0$ :

$$D_0 = \nabla g_{r+1}(\vec{x}_p) \nabla g_{r+1}(\vec{x}_p) - \nabla g_{r+1}^T(\vec{x}_p) \times (\nabla G_r^T \nabla G_r)^{-1} \nabla G_r^T \nabla g_{r+1}(\vec{x}_p)$$

若  $D_0 = 0$ , 则该约束与前面已选取的  $r$  个约束线性相关, 去掉该约束, 重执行(4)。否则, 计算乘子  $\vec{\lambda}$ :

$$\vec{\lambda} = (\nabla G_{r+1}^T \nabla G_{r+1})^{-1} \nabla G_{r+1}^T \nabla F(\vec{x}_p)$$

若  $\lambda_i < 0$  则去掉新选的约束返回(4);

若  $\lambda_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, r+1)$ , 则所选的约束是有效的;

(6) 计算  $-\nabla F(\vec{x}_p)$  在  $r+1$  个有效约束的  $\vec{g}_i(\vec{x})$  交集的切面上的投影  $\vec{d}$ :

$$\vec{d} = \nabla G_{r+1} \vec{\lambda} - \nabla F(\vec{x}_p), r=r+1$$

(7) 若  $\|\vec{d}\| < \epsilon (\epsilon$  为任意小的正数), 则约束

删除工作告终。否则, 返回(3)。

### 2 基本理论与公式

以各向同性线性弹性体  $\Omega$  为对象 (边界用  $\Gamma$  表示) 边界积分方程为:

$$c_{ik}^i u_k^i + \int_{\Gamma} P_{ik}^* u_k^i d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ik}^* P_k^i d\Gamma + \int_{\Omega} u_{ik}^* P_k^i d\Omega \quad (1)$$

其中:  $C_{ik}(P^i) = \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \begin{pmatrix} 4\pi(1-\nu) \left\{ 2(1-\nu)\alpha + \frac{1}{2}\text{Sin}^2\alpha \right\} & -\text{Sin}^2\alpha \\ -\text{Sin}^2\alpha & 4\pi(1-\nu) \left\{ 2(1-\nu)\alpha - \frac{1}{2}\text{Sin}^2\alpha \right\} \end{pmatrix}$

$\Gamma = \Gamma_U + \Gamma_P$ ,  $\Gamma_U$  是位移边界,  $\Gamma_P$  是面力边界。

其中:  $Q, P \in \Gamma$ ,  $u_{ik}^*(P^i Q^i)$  是位移基本解,  $P_{ik}^*(P^i Q^i)$  是与  $u_{ik}^*(P^i Q^i)$  对应的表面力。

对应于平面应力问题的基本解和基本解对应的表面力为:

$$u_{ik}^*(P^i Q^i) = \frac{1+\nu}{4\pi E} \left[ (3-\nu) \text{In} \frac{1}{r} \delta_{ik} + (1+\nu) r, r, k \right] \quad (2)$$

$$P_{ik}^*(P^i Q^i) = -\frac{1}{4\pi r} \left\{ \frac{\partial}{\partial n} \left[ (1-\nu) \delta_{ik} + 2(1+\nu) r, r, k \right] - (1-\nu) (r, m_k - r, m, i) \right\} \quad (3)$$

式中:  $E, \nu$ —材料弹性模量和泊松比;  $r$ — $P$  点和  $Q$  点之间的距离。通过  $E$  和  $\nu$  的代换可以得到平面应变问题的基本解。

### 3 解析灵敏度分析

在发动机燃烧室结构体中某一构件的优化设计中, 它们大多是由位移和面力数据组成, 由方程  $[A]\{Y\} = \{F\}$  求出位移和面力, 这些面力和位移可以确定应力。即所谓的应力恢复, 由边界已知的面力和位移得到应力分量。通过应力方程对  $X_L$  隐含求导, 可得到这些应力对第  $L$  个设计变量的灵敏度。即求出目标函数和约束函数的偏导数。经过计算可知应力灵敏度取决于位移、面力和几何参数的灵敏度。

#### 3.1 边界面力和位移的灵敏度

所有的未知量在方程左边, 已知量在方程右边的边界元方程是:

$$[A]\{Y\} = \{F\} \quad (4)$$

由式(4)对设计变量  $X_L$  隐含求导, 可得未知位移和面力的灵敏度方程为:

$$[A]\{Y\}, L = \{r\}, L \quad (5)$$

式中:  $\{r\}, L = \{F\}, L - [A], L \{Y\}$ ;  $\{F\}, L = [M], L \{Y\} + [M] \{Y\}, L$ 。

#### 3.2 边界应力灵敏度分析

在边界  $\Gamma$  上:

$$\sigma'_{11} = P_1 \quad (6)$$

$$\sigma'_{12} = P_2 \quad (7)$$

$$\sigma'_{22} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma'_{11} + \frac{E}{1-\nu^2} e'_{22} \quad (8)$$

式中:  $e'_{22} = \frac{du_2}{ds} = \frac{du_2}{d\xi} \frac{d\xi}{ds} = \frac{du_2}{d\xi} J^{-1}$ ;

$$\frac{du_2}{d\xi} = \sum_{i=1}^3 \frac{dh^i}{d\xi} U_2^i$$

通过式(6)~式(8)对  $X_L$  求导, 可得到这些应力对第  $L$  个设计变量的灵敏度:

$$\sigma'_{11,L} = P_{1,L}; \sigma'_{12,L} = P_{2,L}; \sigma'_{22,L} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma'_{11,L} + \frac{E}{1-\nu^2} e'_{22,L}$$

式中:  $e'_{22,L} = J^{-1} \sum_{i=1}^3 \frac{dh^i}{d\xi} U_{2,L}^i - J^{-2} J_{,L} \sum_{i=1}^3 \frac{dh^i}{d\xi} U_2^i$

$$J_{,L} = J^{-1} \left[ \frac{dx_1}{d\xi} \left[ \frac{dx_1}{d\xi} \right]_{,L} + \frac{dx_2}{d\xi} \left[ \frac{dx_2}{d\xi} \right]_{,L} \right];$$

$$\left[ \frac{dx_j}{d\xi} \right]_{,L} = \sum_{i=1}^3 \frac{dh^i}{d\xi} x_{j,L}^i$$

#### 3.3 用高斯积分计算下列 4 个积分式

$$h_{ij}^1 = \int_{\Gamma} \Phi_i P^* d\Gamma = \int_{-1}^{+1} \frac{1}{2} (1-\xi) P^* \frac{l_j}{2} d\xi = \int_{-1}^{+1} \frac{l_j}{4} (1-\xi) P^* d\xi$$

同理:  $h_{ij}^2 = \int_{-1}^{+1} \frac{l_j}{4} (1+\xi) P^* d\xi$ ;

$$g_{ij}^1 = \int_{-1}^{+1} \frac{l_j}{4} (1-\xi) U^* d\xi$$

$$g_{ij}^2 = \int_{-1}^{+1} \frac{l_j}{4} (1+\xi) U^* d\xi$$

所用积分公式为:

$$\int_{-1}^1 f(\xi) d\xi = \sum_{k=1}^4 W_k f(\xi_k)$$

### 4 例题计算

用所编制的带预测有效约束的灵敏度分析优化程序, 对发动机燃烧室壳体某一开孔板件进行了计算。该板件的形状及受力情况如图 1 所示, 其中,  $P = 50 \text{ MPa}$ ;  $E = 200 \text{ GPa}$ ;  $\nu = 0.25$ ; 边界元划分如图 2 所示。

采用平面线性单元, 对该例题进行边界元分析。

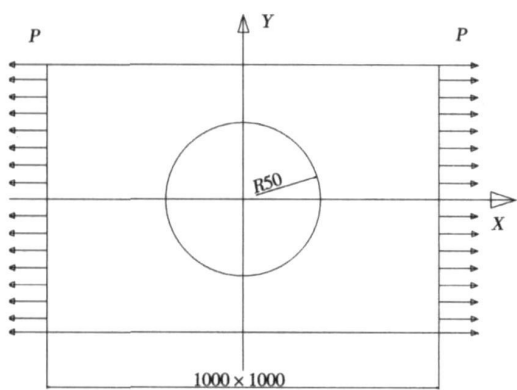


图 1 方板开孔的形状及受力情况

方板受拉时, 边界最大切向应力出现在内孔边界处, 此处易出现裂纹, 为此, 对该例题的内孔形状进行优化, 使内孔边界处的最大切向应力值最小。优化过程中采用的终止准则是规定两迭代阶段的探索点之间的距离小于某一规定值。本文用椭圆曲线来描述内孔边界, 选椭圆的两轴为设计变量, 即  $x_{33}$  和  $y_{38}$  为设计变量, 内孔边界方程为:

$$\frac{x_{33}^2}{x_{33}^2} + \frac{y_{38}^2}{y_{38}^2} = 1$$

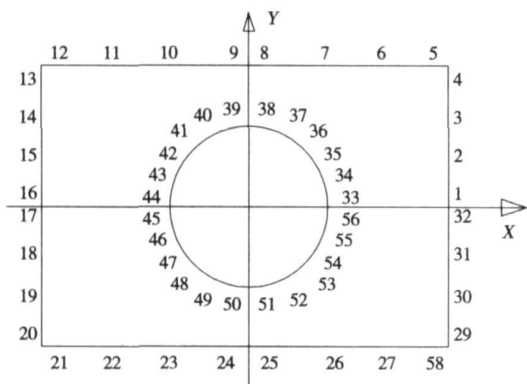


图 2 开孔方板的边界元划分

考虑在不增加方板重量的情况下, 进行形状优化。于是该问题数学模型可以写成:

$$\text{Min: } G(1) = F(X) = \sum_{j=1}^n \lambda_j | \sigma'_j(X) | / [ \sigma ]$$

$$\text{S. t } G(i) = ([ \sigma ] - [ \sigma'_i(X) ]) / [ \sigma ] \geq 0$$

$$i = 2, 3, \dots, 6.; j = i + 5$$

$$G(7) = 1 - X_{33} / 500 \geq 0$$

$$G(8) = 1 - Y_{38} / 500 \geq 0$$

$$G(9) = X_{33} \geq 0$$

$$G(10) = Y_{38} \geq 0$$

$$G(11) = \pi X_{33} Y_{38} / \left[ \frac{1}{2} \pi R^2 \right] - 1 \geq 0$$

式中:  $X_{33}$ 、 $Y_{38}$ —椭圆孔的长短轴。

用带预测有效约束的解析敏度分析方法, 进行的结构形状优化结果如下:

优化后, 椭圆孔的长短轴:

$$X_{33} = 199.9893 \text{ mm};$$

$$Y_{33} = 23.8878 \text{ mm}$$

优化后的剪应力:

$$\tau_{34} = 30.5659 \text{ MPa};$$

$$\tau_{35} = 59.5151 \text{ MPa};$$

$$\tau_{36} = 61.5794 \text{ MPa};$$

$$\tau_{37} = 75.1687 \text{ MPa};$$

$$\tau_{38} = 78.2845 \text{ MPa}$$

分析次数: 213; 敏度分析次数: 35。

用解析敏度分析方法, 进行的结构形状优化结果如下:

优化后, 椭圆孔的长短轴:

$$X_{33} = 140.6157 \text{ mm};$$

$$Y_{33} = 46.71705 \text{ mm}$$

优化后的剪应力:

$$\tau_{34} = 25.0696 \text{ MPa};$$

$$\tau_{35} = 54.3158 \text{ MPa};$$

$$\tau_{36} = 74.0818 \text{ MPa};$$

$$\tau_{37} = 81.2754 \text{ MPa};$$

$$\tau_{38} = 83.6159 \text{ MPa}$$

分析次数: 249; 敏度分析次数: 38。

比较带预测有效约束的解析敏度分析结构形状优化和解析敏度分析结构形状优化, 得到用带预测有效约束的解析敏度分析结构形状优化算法计算的内孔最大切向应力值比用解析求敏度的结构形状优化算法计算的内孔最大切向应力值降低了约 6%, 计算时间减少 14%。

## 5 结束语

(1) 用带预测有效约束的敏度分析了燃烧室壳体构件的一般优化方法公式, 并用该方法编制了计算机程序, 优化了一个带孔板件, 对方板两边加载拉力, 其最大切向应力出现在内孔边界处, 此处易出现裂纹, 用本文的优化方法对方板的内孔形状进行优化, 通过改变内孔边界形状, 使内孔最大切向应力值减小。将所得优化结果与现有的结果进行比较, 其精度较高。

(2) 优化过程中采用的终止准则是规定两迭代阶段的探索点之间的距离小于某一规定值。本文用椭圆曲线来描述内孔边界, 选椭圆的两轴为设计变量, 用该优化方法对燃烧室壳体构件比用解析法有很多优点。将该方法用于部件形状优化设计中, 可以使优化问题的维数降低一维, 大大减少计算工作量, 并降低计算的复杂程度。且易与通用的形状优化算法相结合, 发展前景看好。

(3) 在敏度分析领域中, 可用近似的解析求敏度的方法, 在对精度影响不大的情况下, 减少计算机费用, 该方法正在研究中。

#### 参考文献:

[1] 陈建军. 结构可靠性优化中的灵敏度分析[J]. 应用力学学报,

2002, 19(1): 14—17.

- [2] 尹莲花, 刘 莉. 飞行器热结构优化方法研究综述[J]. 战术导弹技术, 2006(5): 53—58
- [3] 张德欣. 形状优化的全解析敏度分析[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(11): 1193—1200.
- [4] 秦东晨, 梁 颖, 陈立平. 六面顶压机关键零部件的结构优化设计研究[J]. 中国机械工程 2007, 18(6): 697—701.
- [5] 陈 奕. 机械结构优化研究与实践[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(6): 35—38.
- [6] 彭玉成, 张克危, 陈喜阳. 基于 CFD 数值解析的轴流泵优化设计[J]. 水泵技术, 2005(5): 24—26.
- [7] 陈 钢. 声场-结构耦合系统灵敏度分析及优化设计研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 86—89.
- [8] 戴 君. 结构动力响应可靠性优化设计中的灵敏度分析[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(5): 736—737, 747.

(编辑 柴舒)

#### 新技术

## 等离子点火节油技术在超临界直流锅炉的应用

江苏镇江发电厂与 600 MW 机组配套的超临界直流锅炉采用等离子点火和低负荷稳燃技术, 在试运前冲管阶段, 共节约柴油 3 832 t。在试运及 168 h 期间, 均采用等离子点火技术, 证明该技术应用于超临界直流锅炉是成功的, 也是今后运行节油的途径。

镇江电厂该炉系上海锅炉厂生产的 1 913 t/h 可变压运行的螺旋管圈直流炉。等离子点火安装在 B 层四角, 在点火和低负荷时投入等离子点火器, 在正常运行时仍作为主燃烧器。

燃烧器由等离子发生器、中心筒一级燃烧室、内套筒二级燃烧室、方形外套筒等部分组成。由中心筒一级燃烧室引入已分离成浓缩后的含粉气流等离子电弧与煤粉在此发生强烈的电化学反应, 煤粉被裂解, 大量挥发分析出并被点燃, 在挥发分及煤粉内套筒二级燃烧室继续燃烧, 并将后续引入的煤粉点燃, 实现分级燃烧。外套筒内利用高速含粉气流冷却二级燃烧室, 同时将部分煤粉推入炉膛燃烧。等离子载体风母管风压 6~8 kPa, 由扩容后的火检风机提供, 等离子点火装置的引弧风和火检冷却风需要 1 200 m<sup>3</sup>/h, 燃烧器风量为 2 000 m<sup>3</sup>/h, 火检风机气压 9 kPa, 风量为 5 000 m<sup>3</sup>/h。等离子体磁极线圈的冷却水采用全厂闭式除盐冷却水, 母管水压 0.55 MPa, 这是在等离子体标高为 28 m 下设计的。此外还设有等离子控制系统和逻辑保护系统。

(赵旺初 供稿)

Power University, Baoding, Post Code: 071003)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2008, 23(1). —50 ~ 54

Under an operating condition of desulfurization with or without CaO, studied was the nano-TiO<sub>2</sub>-catalyzed combustion effectiveness of Wen-nan lignite and Inner-Mongolia bituminous coal. Through the thermogravimetric curves an analysis was conducted of the experimental results from such combustion properties as ignition temperature, weight loss and heat release rate etc. The analytic results show that during the desulfurization without CaO, the nano-TiO<sub>2</sub> can lower the ignition temperature of the bituminous coal by 15 °C and the burn-off temperature of the lignite, by 32 °C. During the desulfurization with CaO, however, the nano-TiO<sub>2</sub> can lower the ignition temperature of the lignite by 17 °C, and the burn-off temperature of the bituminous coal, by 8 °C. In the meanwhile, the activation energy of both coals from combustion reaction has decreased by 5.9 kJ/mol and 1.3 kJ/mol respectively, and calorific power of the lignite, increased. No new substance being generated in the XRD (X-ray diffraction) spectrum also proves the catalyzed combustion effectiveness of the nano-TiO<sub>2</sub>. The above result can provide a theoretical basis for the simultaneous implementation of desulfurization and the combustion efficiency enhancement, resulting in sizable coal savings. **Key words:** nano-TiO<sub>2</sub>, catalyzed combustion, thermogravimetric analysis, X-ray diffraction analysis

220 MW 燃煤机组飞灰对汞的吸附特性研究 = A Study of the Mercury Adsorption Characteristics of Flyash in a 220 MW Coal-fired Power Plant [刊, 汉] / JIANG Yi-man, DUAN Yu-feng, WANG Yun-jun, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, Post Code: 210096)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2008, 23(1). —55 ~ 59

The specific surface area, pore diameter, pore volume, pore distribution and fractal dimension of flyash in four electric fields of an electrostatic precipitator (ESP) in a 220 MW coal-fired power plant were measured by use of nitrogen isothermal adsorption (at a constant temperature of 77.35 K). By employing a scanning electron microscope the visual morphological characteristics of flyash particles were analyzed. The results show that the smaller the particle diameter and the greater the specific surface area, the higher the mercury content in flyash. The carbon and mercury content in flyash exhibits a positive correlation. With an increase of load, the mercury adsorption tends to be weakened. There exists an optimum fractal dimension, at which the physical and chemical adsorption of mercury by flyash attains a maximum value. The broader the pore distribution and the greater the effective utilization rate of the pore volume, the more favorable condition for the adsorption of mercury. The adsorption capacity of mercury by a sub-micron level particle depends on its pileup morphology and the utilization rate of its specific surface area. **Key words:** coal-fired plant, mercury, flyash, adsorption, surface utilization rate, fractal dimension

带预测有效约束的优化法对燃烧室构件的设计 = Design of Structural Members of a Combustion Chamber by Adopting an Optimization Method Featuring a Predictable Effective Restraint [刊, 汉] / ZHANG De-xin, AN Wei-guang (Aerospace Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin, Post Code: 150001)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2008, 23(1). —60 ~ 63

By adopting a fully analytic sensitivity analysis method with a predictable effective restraint, an optimization design was conducted of the structural members of a combustion chamber shell in order to better improve the stress concentration condition of the shell in question, prevent any damage from thermal distortion and enhance its load bearing capacity. During the optimization design of the shell members, a fully analytic sensitivity analysis technology, incorporating the above restraint, was established. By a combination of the above technology with a general-purpose shape optimization design algorithm, a shape optimization design of the structural members under a plane stress in the combustion chamber shell was conducted, thus reducing the maximal shear stress of the inner holes and finally achieving a satisfactory result. **Key words:** combustion chamber shell, effective restraint, boundary element, optimization design

周期性模型在管壳式换热器数值模拟中的应用 = Application of a Periodic Model in the Numerical Simulation