

文章编号:1000-8055(2013)08-1784-07

基于响应面法的可靠性稳健设计优化

彭茂林, 杨自春, 曹跃云, 初珠立
(海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033)

摘 要: 针对极限状态函数和结构性能函数为隐式的结构可靠性稳健设计优化问题, 将结构性能稳健性、可靠性灵敏度稳健性与 6σ 稳健设计思想相结合, 建立了一种基于响应面法的可靠性稳健设计优化模型并给出了具体算法。采用多项式拟合结构性能函数和极限状态函数, 推导了基于响应面函数的 1 阶可靠度指标以及性能函数均值和均方差的计算方程; 将结构可靠度作为基本约束条件, 采用序列二次规划法得到稳健设计优化结果。运用该方法对某涡轮叶片型线进行设计优化, 经过优化后, 静、动叶的动能效率均值分别提高 1.5% 和 6.4%, 动叶片最大应力均值下降 7.9%, 动叶叶身最大变形均值下降 5.6%, 动叶片结构强度可靠度由初始的 91.3% 提高到了 99.9%。

关 键 词: 稳健设计; 响应面法; 可靠性; 涡轮叶片; 设计优化

中图分类号: V21; TK474.1

文献标志码: A

Reliability robust design optimization based on response surface method

PENG Mao-lin, YANG Zi-chun, CAO Yue-yun, CHU Zhu-li

(School of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To solve the problem of reliability robust design optimization of structure with implicit limit state functions and limit output performance functions, the robustness of the performance, reliability sensitivity robust and six sigma robust design were integrated, and a reliability robust design optimization model based on response surface method was presented involving the detailed calculation processes of the method. The second-degree polynomials were introduced to simulate the output performance functions and the limit state functions of the structure. The equations of the first order reliability index, the mean value and the standard deviation of the structure were calculated based on the response function. Then taking the structural reliability as the basic constraint condition, the final optimization result with the sequential quadratic programming method was obtained. Finally the example was introduced to explain and validate the model. The method was used to design the model lines of a gas turbine blade. After design optimization, the results indicate that the aerodynamic efficiencies of the guide blade and working blade increase by 1.5% and 6.4% respectively, and the maximum stress and the maximum strain of the working blade decrease by 7.9% and 5.6% respectively. The intensity structural reliability of the working blade increases from 91.3% to 99.9%.

Key words: robust design; response surface method; reliability; turbine blade; design optimization

收稿日期: 2012-08-06

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130802.1224.201308.1784_015.html

基金项目: 海军工程大学博士研究生创新基金

作者简介: 彭茂林(1985—), 男, 湖南祁东人, 博士生, 主要从事动力及热力系统的结构可靠性分析及设计优化研究。

近年来,基于结构可靠性的稳健设计优化方法在工程结构设计优化中越来越受到重视^[1-2],该方法将可靠性设计和稳健设计相结合,在给定的结构可靠度的约束条件下,寻求结构性能函数对于随机变量的变化最不敏感的设计值.对于大多数实际工程结构,形状尺寸、承受载荷以及边界条件往往都较为复杂,因此无论是结构性能函数,还是极限状态函数的真实显式表达式往往都无法得到,稳健性目标函数的获取以及结构可靠度计算成为稳健设计方法的难点和重点.理论上,采用蒙特卡洛抽样方法可以较精确地得到性能函数的各阶矩以及结构可靠度,但对于需要采用数值模拟方法来精确计算结构响应的隐式工程结构来说,巨大的计算工作量使得该方法实际上不可行.针对上述难题,研究者提出了多种可靠性稳健设计优化模型及方法.美国爱荷华州立大学的 Lee 等^[3]将稳健目标函数用结构性能函数的均值和方差的加权组合表示,并提出一种维数缩减方法来计算函数的均值和方差.张义民等^[4-6]将结构可靠度对于设计变量均值和方差的灵敏度作为目标之一,结合有限元法和神经网络技术拟合结构极限状态函数表达式,结合随机摄动法计算结构可靠度并进行结构的稳健设计.李永华^[7]建立了基于物理规划的稳健可靠性优化模型.李玉强等^[8-9]将质量工程中的 6 σ 理念与双响应面法相结合,提出基于双响应面模型的 6 σ 稳健设计优化方法,即同时模拟极限状态函数均值和方差的两个响应面函数,通过将极限状态函数的均值和均方差的比值(σ 水平)作为稳健设计的约束条件,最后采用序列二次规划法求解最优设计值.其中,基于响应面模型的可靠性稳健设计优化受到广泛研究和应用^[10-14].本文将结构性能稳健优化、6 σ 稳健思想以及可靠性灵敏度稳健优化相结合,建立了一种新的可靠性稳健设计优化模型,以结构可靠度作为基本约束条件,采用二次多项式拟合结构性能函数和极限状态函数的表达式,采用序列二次规划法进行寻优,最后引用算例验证了模型及方法的可行性和正确性.

1 可靠性稳健设计优化模型

1.1 传统设计优化模型

$$\begin{aligned} \min & h(d) \\ g_i(d) & \leq 0 \quad i = 1, \dots, n_c \\ d^l & \leq d \leq d^u \quad d \in R^{n_{dv}} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中 $h(d)$ 为结构性能函数, g_i 是第 i 个约束函数, d 是设计变量, n_c 和 n_{dv} 分别为约束变量和设计变量的个数.该模型未考虑设计变量以及其他变量的随机性,得到的最优解位于约束边界上,对于随机变量的变化比较敏感^[3],实际结构违反约束条件的风险较大.

1.2 可靠性稳健设计优化模型

$$\begin{aligned} \min & \sum_{j=1}^k \omega_j f_j(X) \\ P[g_i(X; d) < 0] & \leq \Phi(-\beta_i) \\ \prod_{i=1}^{n_c} P[g_i(X; d) < 0] & \leq \Phi(-\beta_0) \\ i & = 1, \dots, n_c \\ d^l + f\sigma_d & \leq d \leq d^u - f\sigma_d \\ d & \in R^{n_{dv}} \quad X \in R^{n_{sv}} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中 $f_j(X)$ 为稳健设计问题的第 j 个目标函数; ω_j 为对应于第 j 个目标函数的权值; d 为设计变量; d^l , d^u , σ_d 分别为设计变量 d 的许可上、下限以及标准方差. X 为结构随机变量, g_i 是结构的第 i 个极限状态函数; k , n_c , n_{sv} , n_{dv} 和 β_i 分别为目标函数的个数、结构可靠度约束的个数、随机变量的个数、设计变量的个数以及第 i 个可靠度指标目标值; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态累积概率分布函数; $\prod$ 为连乘符号, β_0 为多失效模式下的结构系统可靠度指标; f 为设计变量的稳健性 σ 水平,以保证设计变量的最终优化结果超出取值范围的边界的概率小于等于 $\Phi(-f)$,通常取 $3 \leq f \leq 6$.

1.3 基于响应面函数的结构可靠度计算

对于隐式极限状态函数的工程结构,可采用响应面法计算结构可靠度,根据三水平正交试验设计方法选取试验点并采用有限元法计算结构响应,结合最小二乘法和不含交叉项的二次多项式拟合结构极限状态函数

$$g(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2 \quad (3)$$

将式(3)在验算点 X^* 处按 Taylor 级数展开并取至一次项,求得 $g(X)$ 的均值和均方差分别为

$$\mu_g = \sum_{i=1}^n (b_i + 2c_i X_i^*) (\mu_{X_i} - X_i^*) \quad (4)$$

$$\sigma_g =$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(b_i + 2c_i X_i^*) (b_j + 2c_j X_j^*) \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}]^2} \quad (5)$$

其中 ρ_{ij} 为变量 X_i 与 X_j 之间的相关系数.因此根

据式(4)和式(5)可得基于响应面函数的1阶可靠度指标为

$$\beta'_{\text{form}} = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i + 2c_i X_i^*)(\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(b_i + 2c_i X_i^*)(b_j + 2c_j X_j^*) \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}]^2}} \quad (6)$$

1.4 可靠性稳健设计目标函数

1.4.1 结构性能目标函数

结构性能指标通常包含结构的均值和方差,当性能函数的显式表达式无法得到时,同样可采用响应面法处理

$$H(X) = d + \sum_{i=1}^k e_i X_i + \sum_{i=1}^k f_i X_i^2 \quad (7)$$

将结构性能函数 $H(X)$ 在均值点处按 Taylor 级数展开并取至二次项,有

$$H(X) = H(\mu_X) + \sum_{i=1}^n (e_i + 2f_i \mu_{X_i})(X_i - \mu_{X_i}) + \sum_{i=1}^n f_i (X_i - \mu_{X_i})^2 \quad (8)$$

$H(X)$ 的均值和均方差分别为

$$\mu_H = E(H) = H(\mu_X) + \sum_{i=1}^n f_i \sigma_{X_i}^2 \quad (9)$$

$$\sigma_H = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(e_i + 2f_i \mu_{X_i})(e_j + 2f_j \mu_{X_j}) \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}]^2} \quad (10)$$

1.4.2 可靠性灵敏度稳健性目标函数

结构可靠度对变量 X_i 的灵敏度定义为^[15]

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\partial g(X^*)}{\partial X_i} \rho_{ij} \sigma_{X_j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial g(X^*)}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial g(X^*)}{\partial X_j} \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \right]^2}} \quad (11)$$

其中 α_i 表示第 i 个随机变量对极限状态函数标准差的相对贡献,同时也反映了各随机变量变化对一次可靠度指标的影响相对强弱^[16].

由式(11)知, $\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = 1$, 当某个变量对可靠度指标的影响占主要部分时,则可靠度对该变量不稳健,因此,自然地希望每个随机变量的变化对一次可靠度的影响相对均衡. 令 $t_i = \alpha_i^2$ ($i=1, \dots, n$), 则 $\sum_{i=1}^n t_i = 1, 0 \leq t_i \leq 1$. 由不等式可知: 当

$\sum_{i=1}^n t_i^2$ 越小时, t_i 各项越趋于相等, 当 $\sum_{i=1}^n t_i^2$ 取得最小值时, $t_i = 1/n; i=1, 2, \dots, n$. 因此选取下面的函数作为可靠性灵敏度稳健目标函数:

$$f(\alpha) = \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^4 \quad (12)$$

1.4.3 总体稳健目标函数

总体目标函数为各目标函数的加权和的形式,根据不同的总体稳健目标函数特性分为三类:

1) 对于望目特性

$$f(\mu_H, \sigma_H) = w_1 \left(\frac{\mu_H - h_t}{\mu_{H_0} - h_{t_0}} \right)^2 + w_2 \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{H_0}} \right)^2 + w_3 \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^4 / \sum_{i=1}^n \alpha_{i0}^4 \right)^2 \quad (13)$$

2) 对于望小特性

$$f(\mu_H, \sigma_H) = w_1 \cdot \text{sgn}(\mu_H) \left(\frac{\mu_H}{\mu_{H_0}} \right)^2 + w_2 \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{H_0}} \right)^2 + w_3 \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^4 / \sum_{i=1}^n \alpha_{i0}^4 \right)^2 \quad (14)$$

3) 对于望大特性

$$f(\mu_H, \sigma_H) = w_1 \cdot \text{sgn}(\mu_H) \left(\frac{\mu_{H_0}}{\mu_H} \right)^2 + w_2 \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{H_0}} \right)^2 + w_3 \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^4 / \sum_{i=1}^n \alpha_{i0}^4 \right)^2 \quad (15)$$

式(13)~式(15)中 $\mu_{H_0}, \sigma_{H_0}, \alpha_{i0}$ 分别为性能函数在初始设计点处的均值、均方差以及可靠度对变量 X 的灵敏度; $\text{sgn}(\mu_H)$ 为符号函数.

2 算法步骤

1) 确定结构目标函数、随机变量(包括设计变量和非设计变量).

2) 确定结构的失效模式,如刚度失效、强度失效等.

3) 采用三水平正交试验设计方法选取试验点,对结构进行建模及数值计算(通常是有限元分析),提取相关计算结果(如应力、变形、体积、效率等).

4) 拟合结构性能函数以及结构极限状态函数的响应面方程.

5) 基于结构极限状态函数的响应面方程,分别计算得到结构可靠度指标以及结构可靠度对随机变量的灵敏度;基于结构性能函数的响应面方程计算其均值和均方差.

6) 根据式(13)~式(15)得到总体稳健目标函数,将结构系统可靠度、设计变量的稳健性 σ 水

平界限等作为基本的约束条件,采用序列二次规划优化算法迭代计算并得到最优设计点,其中寻优过程可以借助软件 MATLAB 优化工具箱中的 fmincon 函数计算.

7) 重复步骤 3)~6)直到收敛.

3 实例分析

3.1 简支 I 型梁尺寸优化

以简支 I 型梁为例,如图 1 所示,要求在跨度均值 $L=2000\text{ mm}$ 、载荷均值 $P=600\text{ kN}$ 下确定截面面积(质量)最小的梁的尺寸,约束条件为:垂直挠度小于 0.3 mm ,弯曲应力小于许可值 160 MPa ,已知弹性模量均值 $E=2\times 10^5\text{ MPa}$. 设计变量的取值空间为 $100\leq x_1\leq 800, 100\leq x_2\leq 800, 9.0\leq x_3\leq 50, 9.0\leq x_4\leq 50$. 假定变量均服从相互独立的正态分布,标准差分别为 $\sigma(x_1, x_2, x_3, x_4)=(3.0, 1.8, 0.03, 0.03)$. L, P, E 的变异系数分别为 $(0.005, 0.005, 0.005)$. 初始设计尺寸为 $(x_1, x_2, x_3, x_4)=(750, 520, 15, 15)$.

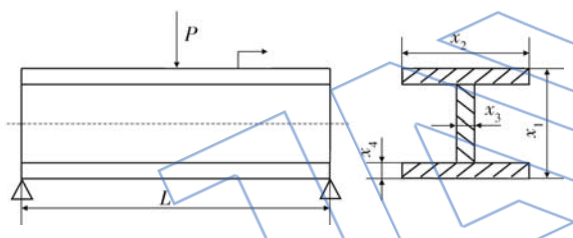


图 1 简支 I 型梁示意图

Fig. 1 Sketch map of simply supported I-beam

针对上述简支 I 型梁结构,可求得应力及变形的解析解.因此可对比并验证提出的可靠性稳健设计优化模型及方法的可行性与正确性.由题意可知,该问题的结构性能函数(面积)为

$$H(X)=2x_2x_4+x_3(x_1-2x_4)\tag{16}$$

垂直截面惯性矩为

$$I=[x_2x_1^3-(x_2-x_3)(x_1-x_4)^3]/12\tag{17}$$

梁的最大挠度为

$$y_{\max}=PL^3/(48EI)\tag{18}$$

梁承受的最大弯矩为

$$M_{\max}=PL/4\tag{19}$$

梁的最大正应力为

$$\sigma_{\max}=(M_{\max}/I)x_1/2\tag{20}$$

梁的刚度失效模式极限状态函数为

$$g_1(X)=0.3-y_{\max}\tag{21}$$

强度失效模式极限状态函数为

$$g_2(X)=160-\sigma_{\max}\tag{22}$$

分别采用传统设计优化模型以及可靠性稳健设计优化模型进行优化计算,结果见表 1. 根据题意,可靠性稳健设计优化总体稳健目标函数选择式(16)的形式,相关初始参数及优化结果如表 1 所示.表 1 中, β_i 为结构系统可靠度指标的可靠性稳健设计优化结果; β_{M-C} 为在优化点处根据解析方程式(16)~式(22),采用蒙特卡洛法(抽样 100 万次)计算得到的结果.

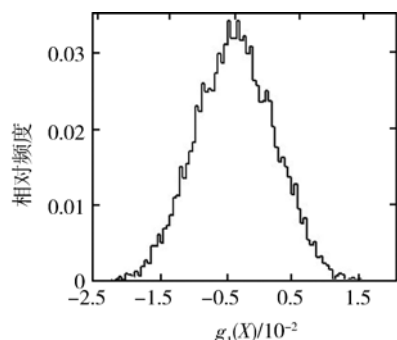
从表 1 的计算结果可以得到,与初始设计相比,可靠性稳健设计优化结果使得梁的设计目标(面积)均值和方差都减小,结构可靠性达到设计目标要求,且与蒙特卡洛法计算结果的误差较小,满足精度要求.从优化耗时方面看,由于采用响应面法消除了计算的数值噪声,本文可靠性稳健设计优化较传统优化耗时更少,计算效率更高.权值 w 的不同大小反映了各个性能函数的重要性并影响最终的优化结果,可根据设计者的要求进行调整.设计变量的 σ 稳健性水平 $f=6$ 保证了设计变量的最终优化结果超出取值区间的边界的概率小于等于 $\Phi(-6)$.

表 1 简支 I 型梁尺寸的不同设计优化结果

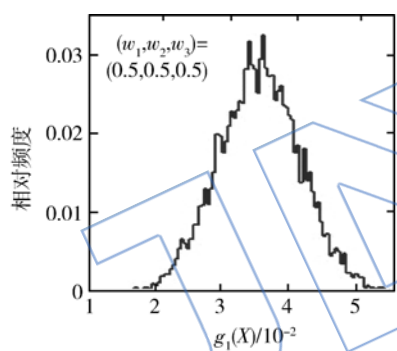
Table 1 Size design optimization results of simply supported I-beam with different methods

	权值 (w_1, w_2, w_3)	($\mu_H, \sigma_H, \sum_{i=1}^n \alpha_i^2$)	设计变量取值 (x_1, x_2, x_3, x_4)	β	β_{M-C}	优化耗时/ h
传统设计优化解		(26400, 79.53, 0.611)	(750, 520, 15, 15)	23.2	28.5	0.12
		(15399, 55.4, 0.612)	(800, 464.5, 9.0, 9.0)	0	0.014	29.8
可靠性稳健 设计优化解	(0.5, 0.5, 0.5)	(17246, 58.98, 0.422)	(782, 524.1, 9.18, 9.77)	6.00	6.23	21.3
	(1, 0, 0)	(17244, 58.91, 0.426)	(782, 556.6, 9.18, 9.18)	6.00	6.30	19.3
	(0, 1, 0)	(17230, 58.27, 0.425)	(782, 528.3, 9.18, 9.69)	6.00	6.28	17.5
	($f=6, \beta_i=\beta_0=6$)	(44584, 127.95, 0.354)	(750, 520, 19.37, 30.0)	75.1	91.6	7.0

图2分别为采用传统优化与可靠性稳健设计优化得到的刚度极限状态函数 $g_1(X)$ 的统计直方图. 采用传统优化方法得到的结果使得梁的截面积达到最小, 可以最大限度节省原材料成本, 但是由于随机性的存在, 传统优化使得 $g_1(X)$ 的均值约为 0, 梁尺寸处于失效边界附近, 其结构可靠度仅约为 50%; 可靠性稳健设计使得 $g_1(X)$ 的均值远离失效边界, 结构可靠度达到 $\Phi(6)$.



(a) 传统设计优化



(b) 可靠性稳健设计优化

图2 $g_1(X)$ 统计直方图

Fig. 2 Statistics histogram of $g_1(X)$

3.2 涡轮叶片型线优化

涡轮叶片是燃气涡轮发动机的关键部件, 叶片的设计须对气动性能、结构强度、振动频率等指

标综合考虑, 而叶片型线参数的设计优化至关重要. 本文采用 3 次贝塞尔曲线描述叶片型线方程, 以叶片型线进、出气角 β_1, β_2 , 前、后缘楔角 φ_1, φ_2 , 以及前后缘圆弧半径 R_1, R_2 等基本几何参数建立叶片型线的参数方程, 并结合软件 PRO/E 建立了涡轮叶片流场的通用参数化模型, 采用热-流-固耦合分析方法对叶片进行有限元分析, 得到叶片的气动效率、应力应变、变形以及固有频率等目标响应值, 根据前文提出的模型及方法, 对涡轮叶片进行可靠性稳健设计优化.

对于静叶型线的设计优化, 以气动效率最优为主要优化目标; 对于动叶, 同样以气动效率最优为主要目标, 但由于动叶在高温高速气流推动下高速旋转, 工作环境十分恶劣, 需将叶片的强度、变形、振动等结构可靠度指标作为约束条件.

选取动能效率 $H(X)$ 作为目标函数, 其望大特性总体稳健目标函数选取式(15)的形式.

强度可靠性约束

$$P(S - \sigma_s > 0) \geq \Phi(\beta_{\sigma_s}) \quad (23)$$

刚度可靠性约束

$$P(\xi - \xi_s > 0) \geq \Phi(\beta_{\xi_s}) \quad (24)$$

振动频率可靠性约束

$$P(|F - kF_i| \geq 7.5 \text{ Hz}) \geq \Phi(\beta_{F_i}) \quad (25)$$

式(23)~式(25)中 S, ξ 和 F 分别为涡轮叶片运行中承受的最大应力、最大变形以及叶片固有频率. ξ_s 为叶片变形允许值, σ_s 为叶片工作温度下的屈服强度, 本文分别为 0.006 m 和 550 MPa, F_i 为涡轮转动频率, 本文为 54.5 Hz, k 为均匀分布激振源数量, 通常只考虑 $k=1$ 和 2; $\beta_{\sigma_s}, \beta_{\xi_s}, \beta_{F_i}$ 分别为强度、刚度以及振动可靠度指标的约束值, 本文取值均为 3. 模型中其他参数 $\beta_0, f, w_1, w_2, w_3$ 分别取值为 3, 3, 0.5, 0.5 和 0.5.

整个优化计算过程共迭代 7 次计算结果达到收敛精度, 历时约 250 h. 表 2~表 4 为涡轮叶片型

表 2 涡轮叶片型线参数值设计优化前后对比

Table 2 Comparison of turbine blade model line parameters before and after design optimization

参数	静叶叶根截面			静叶叶顶截面			动叶叶根截面			动叶叶顶截面		
	范围	初始	优化	范围	初始	优化	范围	初始	优化	范围	初始	优化
R_1/mm	[3.0, 4.5]	3.7	3.5	[1.2, 2.0]	2.5	2.5	[2.0, 4.0]	3.0	3.5	[1.2, 2.0]	1.51	1.55
R_2/mm	[0.4, 1.5]	0.7	0.9	[0.4, 1.5]	0.7	0.7	[0.4, 1.5]	0.8	0.94	[0.4, 1.5]	0.8	0.8
$\beta_1/^\circ$	[20, 40]	26.96	30	[20, 40]	26.5	29.5	[20, 40]	27.0	30	[60, 85]	75	76
$\beta_2/^\circ$	[60, 80]	73.30	73	[60, 80]	74	72.5	[30, 50]	40.2	41.5	[20, 40]	33.5	34.5
$\varphi_1/^\circ$	[15, 30]	28.15	22	[15, 30]	23	20	[15, 30]	20	22.5	[8, 20]	10	12
$\varphi_2/^\circ$	[4, 10]	5.97	7.5	[4, 10]	5.47	6.5	[4, 10]	7	7.5	[4, 10]	5	6.5

表 3 涡轮动叶目标参数设计优化结果

Table 3 Design optimization results of target parameters of turbine rotating blade

项目	目标响应	动能效率	体积/mm ³	最大变形/10 ⁻³ m	最大应力/MPa	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz
均值	初始	0.7565	108749	4.47	518.25	291.32	613.92
	优化	0.8052	113536	4.22	472.87	286.86	628.43
均方差	初始	0.035	3589	0.265	23.52	3.28	6.31
	优化	0.034	3632	0.233	20.28	2.69	5.54

表 4 涡轮静叶目标参数设计优化结果

Table 4 Design optimization results of target parameters of turbine guiding blade

项目	目标响应	动能效率	体积/mm ³
均值	初始	0.9281	173289
	优化	0.9421	185557
均方差	初始	0.039	4935
	优化	0.041	5052

线设计变量及目标函数设计优化结果,经过优化后,静、动叶的动能效率均值分别提高 1.5%和 6.4%;动叶叶片最大应力均值下降 7.9%,动叶叶身最大变形均值下降 5.6%,振动频率满足约束条件,且这些性能的均方差都有一定程度的减小,因此稳健性得到提高.更重要的是,优化前动叶的结构强度可靠度约为 91.3%,而优化后动叶的结构强度可靠度达到了 99.9%,刚度及振动可靠度接近为 1.但是,优化后静、动叶片体积的均值和均方差都有所增大,因此在制造叶片时原材料成本将会有所提高.由此说明,可靠性稳健设计优化在提高稳健性和保证可靠性的同时,可能要在质量、成本等其他性能上付出代价,因此也是一个权衡折中的过程.叶片型线优化设计前后对比如图 3 所示.

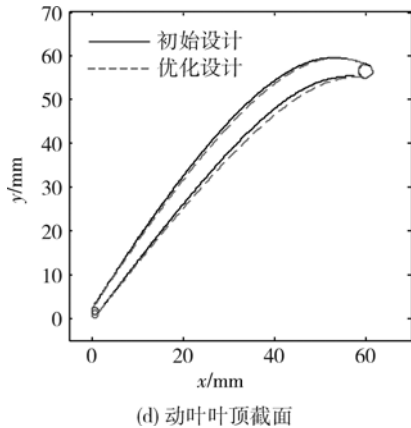
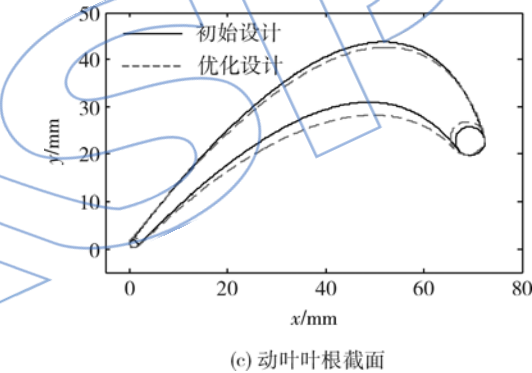
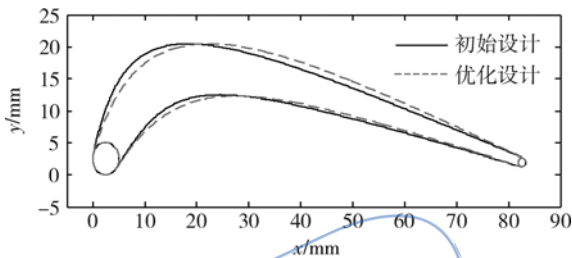
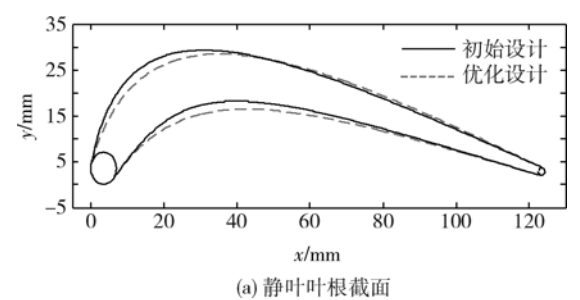


图 3 涡轮叶片型线设计优化前后对比

Fig. 3 Comparison of turbine blade model line figures before and after design optimization

4 结 论

针对隐式工程结构的可靠性稳健设计优化问题,给出了相关模型和具体算法步骤,首先引入存

在解析解的简支 I 型梁尺寸优化问题,验证了提出的模型及方法的正确性和可行性,然后对涡轮叶片型线进行了可靠性稳健设计优化。研究表明:

1) 模型将结构系统可靠度指标作为基本约束条件,可以同时考虑结构的多个失效模式,保证了所设计的产品结构可靠性。

2) 将响应面法引入隐式工程结构的可靠性稳健设计优化中,提高了计算效率,节省了优化时间。

3) 可靠性稳健设计在提高稳健性和保证结构可靠性的同时,可能导致产品的某些性能指标的下降(比如质量增大,制造成本增加等),实际工程中可根据具体情况对结构可靠度指标要求、稳健性水平、权值等进行调整以平衡提高产品质量与降低成本等之间的关系。

4) 模型及方法正确可行,计算效率较高,可用于涡轮叶片及其他复杂工程结构的可靠性稳健设计优化。

参考文献:

- [1] 贺谦,李元生,温志勋. 涡轮叶片多学科可靠性及稳健设计优化[J]. 推进技术,2010,31(2):193-197.
HE Qian, LI Yuansheng, WEN Zhixun. Multidisciplinary probabilistic and robust design optimization for turbine blade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(2): 193-197. (in Chinese)
- [2] 李峰,孟广伟,周振平. 结构疲劳寿命稳健性设计优化[J]. 机械工程学报,2010,46(2):155-158.
LI Feng, MENG Guangwei, ZHOU Zhenping. Robust design optimization of structural fatigue life [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 155-158. (in Chinese)
- [3] Lee I, Choia K K, Du L, et al. Dimension reduction method for reliability-based robust design optimization[J]. Computers & Structures, 2008, 86(13): 1550-1562.
- [4] 张义民,高妮,宋相强,等. 具有应力集中的机械零件可靠性稳健设计[J]. 工程力学,2008,25(11):237-240.
ZHANG Yimin, GAO Wei, SONG Xiangqiang, et al. Reliability-based robust design for mechanical components with stress concentrations[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 237-240. (in Chinese)
- [5] 贺向东,张义民,闻邦椿. 压杆稳定可靠性稳健设计[J]. 强度与环境,2007,34(1):59-64.
HE Xiangdong, ZHANG Yimin, WEN Bangchun. Reliability-based robust design of compressive bar[J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(1): 59-64. (in Chinese)
- [6] 宋保维,刘旭琳,王金华. 基于灵敏度分析的鱼雷联接结构稳健设计[J]. 系统仿真学报,2009,21(9):2746-2748.
SONG Baowei, LIU Xulin, WANG Jinhua. Robust optimization design on sensitivity analysis for wedge ring connection structure of torpedo[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(9): 2746-2748. (in Chinese)
- [7] 李永华. 稳健可靠性理论及优化方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2005.
LI Yonghua. Robust reliability theory and optimization methods [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [8] 李玉强,崔振山,陈军. 基于响应面模型的 6σ 稳健设计方法[J]. 上海交通大学学报,2006,40(2):201-205.
LI Yuqiang, CUI Zhenshan, CHEN Jun. Six sigma robust design methodology based on response surface model[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(2): 201-205. (in Chinese)
- [9] 李玉强,崔振山,陈军. 基于双响应面模型的 6σ 稳健设计[J]. 机械强度,2006,28(5):690-694.
LI Yuqiang, CUI Zhenshan, CHEN Jun. Six sigma robust design methodology based on dual response surface model [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(5): 690-694. (in Chinese)
- [10] Yeniyay O, Unal R, Lepsch R A. Using dual response surfaces to reduce variability in launch vehicle design: a case study [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(4): 407-412.
- [11] Liu D, Lai X, Ni J, et al. Robust design of assembly parameters on membrane electrode assembly pressure distribution[J]. Journal of Power Sources, 2007, 172(2): 760-767.
- [12] 宗志宇. 基于 RSM 的多响应稳健性设计方法的研究[D]. 天津:天津大学,2007.
ZONG Zhiyu. Study on multi-response robust design based on RSM [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [13] 王晶. 基于响应曲面法的多响应稳健性参数优化方法研究[D]. 天津:天津大学,2009.
WANG Jing. Robust parameter optimization for multi-response using response surface methodology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [14] 谢延敏. 基于 Kriging 模型和灰色关联分析的板料成形工艺稳健设计优化研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
XIE Yanmin. Research on robust optimization of sheet metal forming based on Kriging and grey relational analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [15] 安伟光,蔡荫林,陈卫东. 随机结构系统可靠性分析与优化 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007.
- [16] 秦权,林锦道,梅刚. 结构可靠度随机有限元:理论及工程应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2006.