

基于区间不确定性的涡轮盘强度可靠性优化设计^{*}

方鹏亚, 常新龙, 胡 宽, 赖建伟, 龙 兵

(第二炮兵工程大学 动力工程系, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对涡轮盘在初期设计过程中可利用试验数据少的问题, 采用区间模型描述不确定性, 以非概率可靠性模型描述可靠性, 提出了基于区间不确定性的涡轮盘强度可靠性优化设计方法。同时, 为了提高该方法的计算效率, 提出两级分阶段构造法, 建立非概率可靠性指标关于设计变量的响应面函数, 并以此响应面函数表征可靠性约束, 从而将可靠性优化设计的双重优化过程转化为单重优化过程, 简化了算法结构。典型涡轮盘强度可靠性优化设计算例结果表明, 所提方法降低了对试验数据量的需求, 且计算成本较低, 计算效果较好, 能够较好适用于涡轮盘的初期设计。

关键词: 涡轮盘; 有限元分析; 区间不确定性; 响应面法; 可靠性优化设计

中图分类号: V434.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2013) 07-0962-06

Reliability Optimization Design for Turbine Disk Strength Based on Interval Uncertainty

FANG Peng-ya, CHANG Xin-long, HU Kuan, LAI Jian-wei, LONG Bing

(Power Engineering Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the problem that the experimental data is lack in the initial design stage of the turbine disk, the reliability optimization design method for turbine disk strength based on interval uncertainty was developed, in which the uncertainty and reliability were represented with interval model and non-probabilistic reliability model, respectively. Moreover, to improve the computational efficiency of this method, the reliability restriction is characterized by the response surface function of the non-probabilistic reliability index through two-level phased formulation, which converts the double loop structure of the reliability optimization into the single loop structure, and therefore simplifies the algorithm structure. At last, the reliability optimization design for typical turbine disk strength was applied as the numerical example. The results show that the method presented can reduce the demand of the experimental data. In addition it has lower computational cost and good computational effect. This method is adaptive to the initial design of the turbine disk.

Key words: Turbine disk; Finite element analysis; Interval uncertainty; Response surface method; Reliability optimization design

1 引 言

在现代航空推进系统中, 涡轮盘是航空发动机的

关键部件, 往往承受着较大的机械载荷及热载荷, 其设计水平直接影响着航空发动机的推重比、稳定性和使用寿命等性能, 为了提高涡轮盘性能, 需要对其进

* 收稿日期: 2012-11-14; 修订日期: 2013-03-19。

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2011JQ6007)。

作者简介: 方鹏亚 (1986—), 男, 博士生, 研究领域为失效物理与可靠性。E-mail: pyfang12@163.com

行优化设计^[1]。同时,由于涡轮盘在实际加工和工作过程中,其材料属性、几何尺寸、工作条件等都存在分散性,受此影响,涡轮盘的性能也存在一定的分散性。采用传统的确定性优化设计方法对其设计,得到的设计最优解只具有数学或理论上的意义,往往将优化结果推向约束条件的失效边缘,不确定变量的任何微小变动都可能导致涡轮盘可靠性降低甚至失效。因此在对涡轮盘进行优化设计的同时需要考虑变量不确定性的影响,加入可靠性指标的要求,即需要对其进行可靠性优化设计。

在考虑不确定性的过程中,随机模型在此领域发挥了重要的作用,取得了较为成功的应用。但是随机模型参数的概率分布需要较多的数据信息来描述和支撑,且概率数据的小误差可能导致结构的概率计算出现较大误差^[2],这在一定程度上限制了随机模型的应用。另一广泛使用于工程结构不确定性分析的模糊分析模型,采用隶属函数来表示认知不确定性^[3,5],但它同样需要较多的数据信息来确定其隶属函数,因此模糊模型的应用也受到一定限制。在实际工程结构分析和设计过程中,有时很难获得较多的统计数据来描述不确定性参数的概率分布或隶属函数。这就势必需要一种通过较少数据信息就可以描述结构不确定性的分析方法,由于区间分析方法仅需知道不确定量的界限而不需知道其具体的分布形式或隶属函数,大大降低了对原始数据的要求,因此进入了可靠性研究学者的视线,并被尝试应用于工程结构的不确定性分析^[6,8]。同时,相比概率可靠性分析方法,基于区间不确定性的非概率可靠性分析方法计算更为简单,因此在类似涡轮盘这样复杂结构的可靠性优化设计过程中,区间分析能够大大减轻可靠性分析的压力,进而提高可靠性优化设计的效率。

鉴于此,本文采用区间模型描述可靠性优化设计过程中存在的不确定性因素,提出了基于区间不确定性的可靠性优化设计模型和求解方法,并通过典型高负荷涡轮盘强度设计算例验证了所提方法的有效性和可行性。

2 区间不确定性及非概率可靠性分析方法

2.1 区间不确定性

若结构的不确定参数 p 在某区间内变化,其上、下界分别为 p^u, p^l 。则 $p \in p^l = [p^l, p^u]$ 称为区间变量。令

$$p^c = \frac{p^u + p^l}{2} \quad (1)$$

$$p^r = \frac{p^u - p^l}{2} \quad (2)$$

则区间 p^l 和区间变量 p 可分别表示为

$$p^l = p^c + p^r \Delta^r \quad (3)$$

$$p = p^c + p^r \delta \quad (4)$$

式中 $\Delta^r = [-1, 1]$ 为标准化区间, $\delta \in \Delta^r$ 称为标准化区间变量; p^c 为区间数的算术平均,称为 p^l 的均值; p^r 表示区间数相对于均值 p^c 的分散程度,称为 p^l 的离差。

2.2 基于区间分析的非概率可靠性模型

设向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示与结构可靠性有关的基本区间变量的集合

$$x_i \in x_i^l = [x_i^l, x_i^u] \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

结构的功能函数

$$M = g(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

当 $g(\cdot)$ 为 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的连续函数时, M 也为区间变量。设其均值和离差分别为 M^c 和 M^r , 上界和下界分别为 M^u 和 M^l 。则非概率可靠性指标的基本定义^[9,10]为

$$\eta = M^c / M^r = (M^u + M^l) / (M^u - M^l) \quad (5)$$

按照一般的结构可靠性理论,超曲面 $g(X) = 0$ 称为失效面,它将结构的基本参量空间分为失效域和安全域, $g(X) < 0$ 和 $g(X) > 0$ 分别表示结构处于失效和安全状态。根据式(5)容易得出:

当 $\eta > 1$ 时,对 $\forall x_i \in x_i^l (i = 1, 2, \dots, n)$, 均有 $g(X) > 0$, 结构可靠。

当 $\eta < -1$ 时,对 $\forall x_i \in x_i^l$, 均有 $g(X) < 0$, 结构失效。

而当 $-1 \leq \eta \leq 1$ 时,对 $x_i \in x_i^l (i = 1, 2, \dots, n)$, $g(X) < 0$ 和 $g(X) > 0$ 均有可能,即结构可能安全,也可能不安全。

由于区间变量属于确定性区间,在区间内取任何值的可能性均存在,从严格意义上讲,此时不能认为结构是可靠的。同时,由式(5)易知,无量纲量 η 的值越大,结构的安全程度越高。因而,可用 η 作为结构可靠程度的度量。

3 基于区间不确定性的可靠性优化设计方法

3.1 基于区间不确定性的可靠性优化设计模型

相比随机可靠性的概率表示方法,区间不确定性借助非概率可靠性指标来表征和量化可靠性。因此,

在基于区间不确定性的可靠性优化设计中,自然想到用非概率可靠性指标来度量各约束可靠性,继而产生基于区间不确定性的可靠性优化设计模型:

$$\begin{aligned} & \text{Find. } X \\ & \text{Min. } f(X, P) \\ & \text{s. t. } \eta_k(X, P) \geq \eta_k^{\text{accept}}, (k=1, 2, \dots, m) \\ & X^l \leq X \leq X^u, P \in [P^l, P^u] \end{aligned} \quad (6)$$

式中 X 为设计变量向量,既可以为区间变量也可以为确定性变量。这里为了叙述方便,将其视为确定性变量,取其设计约束的上下界为 X^u 和 X^l ;当设计变量为区间变量时,优化变量变为设计变量均值 $\bar{X}$ 。 P 为区间型不确定性设计参量向量,区间模型为 $[P^l, P^u]$ 。 $f(X)$ 是目标函数, $\eta_k(X, P)$ 为第 k 个约束的非概率可靠性指标,为 X 和 P 的函数, η_k^{accept} 为第 k 个约束要求达到的非概率可靠性指标, m 为该优化问题的约束个数。

3.2 基于区间不确定性的可靠性优化设计模型求解方法

可靠性分析是可靠性优化设计求解的关键环节,占用了整个过程大部分计算成本,因此可靠性优化设计的效率很大程度上受限于可靠性分析的效率。相比随机可靠性分析方法,基于区间分析的非概率可靠性分析方法计算较为简单。但是由式(5)知,为了计算非概率可靠性指标,还必须提前求解功能函数的上限 M^u 及下限 M^l 。对于线性功能函数, M^u 和 M^l 可以通过区间运算法则方便求解,但是对于非线性功能函数, M^u 和 M^l 只能通过数学优化方法来求解。这样,非概率可靠性指标的求解就成为数学优化问题,加上可靠性优化模型中目标函数本身的优化问题,基于区间不确定性的可靠性优化设计的求解过程变成了一个双重优化结构。在设计时,外环需要不断调用内环可靠性分析,而内环可靠性分析又要反复调用结构分析(如有限元分析)。这种结构势必恶化了求解过程的可操作性,大大增加了计算成本。

为了简化计算过程,降低计算成本,本文采用响应面函数来表示非概率可靠性指标和设计变量的关系,这样非概率可靠性指标的求解便可以通过简单的函数计算来实现,从而避免了复杂的优化过程。可靠性优化设计的双重优化结构也就随之变成了简单的单重优化结构。

在非概率可靠性指标响应面函数的构造上,本文提出了两级分阶段构造的实现方法。具体步骤如下:

第一阶段:在设计变量 X 的约束范围和不确定

性参量 P 的区间界限内,建立优化问题中各约束所涉状态变量 Y 关于设计变量 X 和不确定性参量 P 的响应面函数。

(1)试验设计。将设计变量 X 和不确定性参量 P 均视为试验设计的因素,并根据因素个数和各因素的限制变化范围,合理确定水平数,最后选择合适的抽样方法进行抽样,得到样本点向量 $C = (X, P)$ 。其中各样本点表示为

$$C_i = (X_i, P_i), i=1, 2, \dots, n$$

n 为样本点个数。常用抽样方法包括全析因法^[11]、优化拉丁超立方方法^[12]、正交设计法和均匀设计法^[13]等。

(2)响应面构造。对所选样本点进行试验,并根据试验所得的样本对数据,采用合适的响应面方法构造状态变量 Y 关于设计变量 X 和不确定参量 P 的响应面函数 $Y = r(C) = r(X, P)$,并对其近似能力进行验证。对于结构分析,试验一般指有限元分析、传热分析和流场分析等,状态变量通常指应力或应变等。常用响应面法包括二次多项式法、径向基法、神经网络法和 Kriging 模型法等^[14]。

第二阶段:基于第一阶段构造的响应面函数,对第一阶段抽取的各设计方案样本进行非概率可靠性分析,并建立非概率可靠性指标关于设计变量的响应面函数。

(1)功能函数的确立。根据状态变量 Y 和状态变量允许值 Y^{accept} ,建立功能函数

$$M = Y^{\text{accept}} - Y = Y^{\text{accept}} - r(X, P)$$

式中 $M \geq 0$ 表示结构可靠。

(2)非概率可靠性分析。在第二阶段抽取的样本点 $C_i = (X_i, P_i)$ 中

$$X_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iq})$$

式中 x_{ij} 表示第 j 个设计变量在第 i 个样本点中的取值。

$$j=1, 2, \dots, q$$

q 为设计变量个数。所以 X_i 既表示第 i 个样本点中各设计变量的取值组合,也表示第 i 个设计方案。基于功能函数

$$M = Y^{\text{accept}} - r(X, P)$$

对每组样本点,将设计变量 X 视为固定值,将不确定参量 P 视为区间变量,求解该设计方案所对应功能函数 M 的上限和下限,并通过式(5),求得各设计方案下的非概率可靠性指标 η 。

(3)非概率可靠性指标响应面函数构造。将设

计变量作为输入量,非概率可靠性指标作为响应量,以前一步非概率可靠性分析结果作为样本,构造非概率可靠性指标关于设计变量的响应面函数

$$\eta = G(X) = G(x_1, x_2, \dots, x_j \dots x_q)$$

4 涡轮盘可靠性优化设计算例

涡轮盘作为涡轮叶片的承力部件,常用的可靠性优化设计目标是在满足强度约束的前提下盘体重量最轻。当材料确定时,目标亦变为体积最小。

4.1 涡轮盘优化设计模型

为简化计算,在进行轮盘结构方案设计时,将涡轮盘简化为一个轴对称模型,即重点考虑其子午面的形状优化。此外,通常宏观上涡轮盘有一个垂直于旋转轴的对称面,故可取其一半进行分析。其典型子午面轮廓如图1所示。

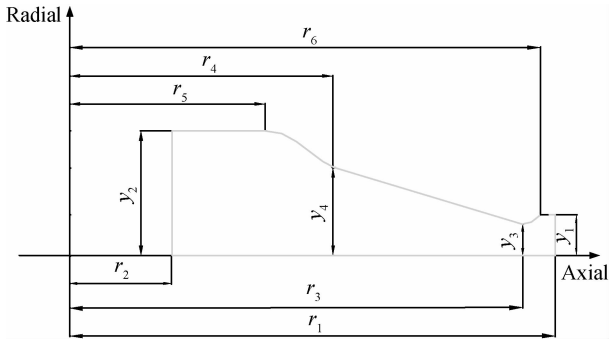


Fig.1 Feature sizes of meridian surface for the turbine disk

由于涡轮的气动性能和效率主要受到涡轮叶片的影响,因此,涡轮盘的设计要以涡轮叶片的设计结果为前提。在涡轮盘的结构设计中,轮盘的外径尺寸受气流通道尺寸的限制,外缘宽度受叶片宽度的限制,中心孔受中心结构的限制,这些参量基本都不能改变。

鉴于此,本例给定的设计分析条件包括轮盘外径 r_1 ,轮盘内径 r_2 ,轮缘宽度 y_1 ,轮缘载荷 f ,最大转速 w 以及温度场 T ,待设计变量为 $r_3, r_4, r_5, r_6, y_2, y_3$ 和 y_4 。

仿真过程中,考虑温度应力的影响,涡轮盘的温度场按如下经验公式^[15]插值计算

$$T(R) = T_{in} + (T_{out} - T_{in}) \times \frac{(R^3 - R_{in}^3)}{(R_{out}^3 - R_{in}^3)} \quad (7)$$

式中 R_{in}, R_{out} 为盘内、外半径, T_{in}, T_{out} 为盘内、外半径温度, $T(R)$ 表示半径 R 处的温度。

除轮盘主要几何尺寸约束以外,约束条件主要考

虑使涡轮盘具有足够的应力储备。为了验证本文所提方法的合理性和有效性,初步选定以下三个主要约束:(1)盘内径处周向应力 S_{in} , (2)子午面平均周向应力 S_{avg} , (3)轮盘最大等效应力 S_{max} 。

综上所述,涡轮盘子午面形状的优化问题可用如下数学模型来描述

$$\begin{aligned} \min \quad & V = f(r_i, y_j) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} S_{in} \leq S_{in}^{\text{accept}} \\ S_{avg} \leq S_{avg}^{\text{accept}} \\ S_{max} \leq S_{max}^{\text{accept}} \\ r_i^l \leq r_i \leq r_i^u, y_j^l \leq y_j \leq y_j^u \end{cases} \quad (8) \\ & i = 3, 4, 5, 6 \\ & j = 2, 3, 4 \end{aligned}$$

式中 V 为涡轮盘体积。 r_i, y_j 为设计变量, r_i^l, r_i^u 分别为设计变量 r_i 的约束上下界, y_j^l, y_j^u 分别为设计变量 y_j 的约束上下界。 $S_{in}^{\text{accept}}, S_{avg}^{\text{accept}}$ 和 S_{max}^{accept} 为许用应力。

4.2 基于区间不确定性的涡轮盘可靠性优化设计

由于涡轮盘的材料参数、几何尺寸和工作环境都具有不确定性,这里选择涡轮盘尺寸 r_i, y_j ,弹性模量 E 和轮外缘温度 T_{out} 为区间变量,其中,轮盘尺寸的离差取 0.3mm,弹性模量 E 和轮外缘温度 T_{out} 的离差取为各自区间均值的 5%。

根据 3.2 节的求解方法,按照以下三个步骤进行可靠性优化设计。

(1) 样本点确定和有限元仿真

由于涡轮盘涉及的设计变量较多,而均匀设计方法可以在保证精度的前提下大大减少样本点的数量^[13],因此本文采用均匀设计方法进行抽样,样本数量取为 31。对这 31 组样本点进行有限元仿真,求得对应的体积 V 和应力 S_{in}, S_{avg} 和 S_{max} 。

(2) 响应面函数建立

在响应面函数构造过程中,考虑到二次多项式响应面法在非线性拟合方面有较好的适用性,本文采用二次多项式作为响应面函数形式。同时,为了避免回归系数计算时出现奇异解,对设计变量 r_i, y_j 和响应量 V, S_{in}, S_{avg} 和 S_{max} 进行了归一化处理。求得归一化后的涡轮盘体积 δ_v , 应力 $\delta_{S_{in}}, \delta_{S_{avg}}$ 和 $\delta_{S_{max}}$ 的响应面函数如下

$$\begin{aligned} \delta_v = & -0.301 + 0.033\delta_{r_3} + 0.185\delta_{r_4} + 0.048\delta_{r_5} - \\ & 0.013\delta_{r_6} + 0.185\delta_{y_2} + 0.259\delta_{y_3} + 0.464\delta_{y_4} - \\ & 0.003\delta_{r_3}^2 + 0.036\delta_{r_4}^2 + 0.023\delta_{r_5}^2 + 0.009\delta_{r_6}^2 + \end{aligned}$$

$$0.019\delta_{y_2}^2 + 0.047\delta_{y_3}^2 \tag{9}$$

$$\delta_{s_{in}} = -0.257 + 0.04\delta_{r_3} - 0.015\delta_{r_4} - 0.045\delta_{r_5} - 0.04\delta_{r_6} - 0.587\delta_{y_2} + 0.494\delta_{y_3} + 0.399\delta_{y_4} + 0.125\delta_T + 0.052\delta_E + 0.002\delta_{r_3}^2 + 0.092\delta_{r_4}^2 + 0.143\delta_{r_5}^2 - 0.014\delta_{r_6}^2 + 0.215\delta_{y_2}^2 + 0.083\delta_{y_3}^2 - 0.063\delta_{y_4}^2 - 0.104\delta_T^2 - 0.078\delta_E^2 \tag{10}$$

$$\delta_{s_{avg}} = -0.32 - 0.025\delta_{r_3} - 0.263\delta_{r_4} - 0.075\delta_{r_5} + 0.004\delta_{r_6} - 0.559\delta_{y_2} + 0.051\delta_{y_3} - 0.45\delta_{y_4} - 0.015\delta_T + 0.032\delta_E + 0.029\delta_{r_3}^2 + 0.026\delta_{r_4}^2 + 0.071\delta_{r_5}^2 - 0.043\delta_{r_6}^2 + 0.103\delta_{y_2}^2 + 0.059\delta_{y_3}^2 + 0.179\delta_{y_4}^2 + 0.002\delta_T^2 + 0.116\delta_E^2 \tag{11}$$

$$\delta_{s_{max}} = -0.091 + 0.023\delta_{r_3} + 0.156\delta_{r_4} + 0.007\delta_{r_5} - 0.011\delta_{r_6} - 0.624\delta_{y_2} + 0.22\delta_{y_3} + 0.391\delta_{y_4} + 0.065\delta_T + 0.07\delta_E + 0.016\delta_{r_3}^2 + 0.012\delta_{r_4}^2 + 0.022\delta_{r_5}^2 + 0.035\delta_{r_6}^2 + 0.097\delta_{y_2}^2 + 0.018\delta_{y_3}^2 - 0.027\delta_{y_4}^2 - 0.021\delta_T^2 - 0.051\delta_E^2 \tag{12}$$

根据计算 $\delta_V, \delta_{s_{in}}, \delta_{s_{avg}}$ 和 $\delta_{s_{max}}$ 调整后的复相关系数 R^2 分别为 0.998, 0.990, 0.974 和 0.998, 说明这四个模型均具有较好的拟合度。

基于式(10~12), 对各样本点组成的设计方案进行非概率可靠性分析, 求得对应的非概率可靠性指标, 并建立非概率可靠性指标关于设计变量的响应面函数

$$\eta_{s_{in}} = -1.922 - 0.221\delta_{r_3} + 0.084\delta_{r_4} + 0.243\delta_{r_5} + 0.226\delta_{r_6} + 3.272\delta_{y_2} - 2.757\delta_{y_3} - 2.241\delta_{y_4} - 0.001\delta_{r_3}^2 - 0.52\delta_{r_4}^2 - 0.796\delta_{r_5}^2 + 0.097\delta_{r_6}^2 - 1.174\delta_{y_2}^2 - 0.462\delta_{y_3}^2 + 0.339\delta_{y_4}^2 \tag{13}$$

$$\eta_{s_{avg}} = 18.781 - 0.22\delta_{r_3} + 0.087\delta_{r_4} + 0.267\delta_{r_5} + 0.197\delta_{r_6} + 3.396\delta_{y_2} - 2.861\delta_{y_3} - 2.201\delta_{y_4} - 0.556\delta_{r_4}^2 - 0.886\delta_{r_5}^2 + 0.095\delta_{r_6}^2 - 1.174\delta_{y_2}^2 - 0.465\delta_{y_3}^2 + 0.337\delta_{y_4}^2 \tag{14}$$

$$\eta_{s_{max}} = 2.421 - 0.19\delta_{r_3} - 1.267\delta_{r_4} - 0.057\delta_{r_5} + 0.095\delta_{r_6} + 5.066\delta_{y_2} - 1.785\delta_{y_3} - 3.172\delta_{y_4} - 0.133\delta_{r_3}^2 - 0.098\delta_{r_4}^2 - 0.178\delta_{r_5}^2 - 0.292\delta_{r_6}^2 -$$

$$0.763\delta_{y_2}^2 - 0.146\delta_{y_3}^2 + 0.211\delta_{y_4}^2 \tag{15}$$

(3) 涡轮盘可靠性优化模型建立及求解
基于式(13~15), 可建立涡轮盘可靠性优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & V=f(r_i, y_j) \\ (i=3, 4, 5, 6, \quad j=2, 3, 4) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \eta_{s_{in}} - \eta_{s_{in}}^{\text{accept}} \geq 0 \\ \eta_{s_{avg}} - \eta_{s_{avg}}^{\text{accept}} \geq 0 \\ \eta_{s_{max}} - \eta_{s_{max}}^{\text{accept}} \geq 0 \\ r_i^l \leq r_i \leq r_i^u, y_j^l \leq y_j \leq y_j^u \end{cases} \end{aligned} \tag{16}$$

式中 $\eta_{s_{in}}^{\text{accept}}, \eta_{s_{avg}}^{\text{accept}}$ 和 $\eta_{s_{max}}^{\text{accept}}$ 分别为约束 1、2 和 3 要求达到的非概率可靠性指标, 可以根据实际需求进行设定。为了保证涡轮盘绝对可靠, 本文选定约束 1、2 和 3 要求达到的非概率可靠性指标为 1。将 $\eta_{s_{in}}^{\text{accept}}, \eta_{s_{avg}}^{\text{accept}}$ 和 $\eta_{s_{max}}^{\text{accept}}$ 均设为 1, 代入式(16)进行计算, 得到优化结果如表 1 第一行所示。

同时, 为了对比确定性优化结果和可靠性优化结果, 本文对涡轮盘进行了确定性优化设计, 并将优化方案代入式(13~15), 取三个约束中的最小可靠性指标作为最终可靠性指标, 并将结果列于表 1 第二行。

从表 1 看出, 相比涡轮盘确定性优化设计, 可靠性优化设计使得涡轮盘可靠性指标从 0.6042 增长到 1, 满足了可靠性要求, 但体积从 5477790.50mm³ 增加到 5659421.36mm³, 说明可靠性优化设计为了保证可靠性要求, 牺牲了一定的体积要求, 这与实际情况也是相符的。因此, 在可靠性优化设计时, 应根据实际情况, 权衡可靠性和体积的比重, 确定合适的可靠性要求。

同时, 相比传统的优化设计方法, 计算成本较高的有限元仿真不再贯穿于整个优化过程, 而仅出现在初期响应面构造过程中, 且由于采用了均匀抽样方法, 仿真次数较少, 因此大大提高了计算效率。

Table 1 Results of deterministic optimization and reliability optimization for turbine disk

Methods	r_3/mm	r_4/mm	r_5/mm	r_6/mm	y_2/mm	y_3/mm	y_4/mm	V/mm^3	η
Reliability optimization	250	130.88	102.17	262	65.33	9.85	30	5659421.36	1.00
Deterministic optimization	250	124.35	105.00	262	66.00	9.00	30	5477790.50	0.6042

5 结 论

为了减少涡轮盘强度可靠性优化设计对试验数据量的需求,进一步提高计算效率,提出了基于区间不确定性的涡轮盘强度可靠性优化设计方法,得出如下结论:

(1)基于区间不确定性的可靠性分析模型采用区间描述不确定性因素,减少了对数据的需求量,并且基于区间模型的可靠性分析方法相对简单,一定程度上提高了可靠性优化设计的效率。本文通过采用响应面方法将可靠性优化设计的双重优化过程简化为单重优化过程,在保证精度的前提下,进一步降低了计算量,提高了计算效率,能够大大缩短涡轮盘的设计周期。

(2)响应面方法是本文方法的前提,响应面函数的精度直接影响了最终设计方案的精度,乃至准确性。本文选取的响应面方法为多项式响应面法,基本能够满足涡轮盘简单结构分析的精度需求。对于其它更复杂的结构设计,应根据实际问题的分析复杂度和非线性程度,合理选择精度较高的响应面方法。

参考文献:

- [1] 黄章俊,王成恩. 基于 Kriging 模型的涡轮盘优化设计方法[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(5):905-911.
- [2] Elishakoff I. Essay on Uncertainties in Elastic and Viscoelastic Structures: From A M Freudenthal's Criticisms to Modern Convex Modeling[J]. *Computers & Structures*, 1995, 56(6): 871-895.
- [3] Mon D L, Cheng C H. Fuzzy System Reliability Analysis for Components with Different Membership Functions[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 64(2): 145-157.
- [4] Lu Z Z, Yue Z F, Feng Y W. General Failure Probability

- Simulation an Application for Multi-modes[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2000, 21(4): 425-432.
- [5] Cremona C, Gao Y. The Possibilistic Reliability Theory: Theoretical Aspects and Applications[J]. *Structural Safety*, 1997, 19(2): 173-201.
- [6] Qiu Zhiping, Chen Suhuan, Elishakoff I. Non-probabilistic Eigenvalue Problem for Structures with Uncertain Parameters via Interval Analysis[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 1996, 7(3): 303-308.
- [7] Rao S S, Berke L. Analysis of Uncertain Structural Systems Using Interval Analysis[J]. *AIAA Journal*, 1997, 35(4): 727-735.
- [8] Muhanna R L, Mullen R L. Uncertainty in Mechanics Problems-Interval-Based Approach[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2001, 127(6): 557-566.
- [9] 邱志平,王晓军,马智博. 结构疲劳寿命估计的集合理论模型[J]. 固体力学学报,2006,27(1):91-97.
- [10] 郭书祥,吕震宙,冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠性模型[J]. 计算力学学报,2001,18(1):56-60.
- [11] Scott A. Uebelhart. Non-Deterministic Design and Analysis of Parameterized Optical Structures During Conceptual Design[D]. *Massachusetts: The Massachusetts Institute of Technology*, 2006.
- [12] 刘晓路,陈英武,荆显荣,等. 优化拉丁方试验设计方法及其应用[J]. 国防科技大学学报,2011,33(5):73-77.
- [13] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [14] 朱雄峰. 飞行器 MDO 代理模型理论与应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010
- [15] 陆 山,李伦未. 航空发动机高负荷涡轮盘双辐板结构优化设计[J]. 推进技术, 2011, 32(5): 631-636 (LU Shan, LI Lun-wei. Twin-Web Structure Optimization Design for Heavy Duty Turbine Disk Based for Aero-Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(5): 631-636.)

(编辑:史亚红)