

基于通用生成函数法的CFRP防撞梁碰撞 可靠性设计优化*

刘展鹏¹ 周金宇²

(1.盐城工学院,盐城 224000;2.金陵科技学院,南京 211169)

【摘要】为满足汽车耐撞性与轻量化的要求,对碳纤维增强复合材料(CFRP)防撞梁进行可靠性优化设计(RBDO)。以CFRP防撞梁关键控制点横坐标、厚度以及铺层角度为设计变量,以碰撞力峰值为约束条件,以比吸能最大为目标构建优化模型。采用拉丁超立方方法与克里金(Kriging)代理模型法相结合拟合出目标及约束函数的Kriging近似模型,采用通用生成函数(UGF)-直接映射法来进行碰撞可靠性优化设计。结果表明:在随机变量非正态、功能函数高度非线性的情况下,传统矩方法无法保证收敛,蒙特卡罗法精度最高但计算成本过大,使用UGF进行可靠性分析优化时收敛稳定,在保证精度的同时效率较高;引入非均匀聚类技术的UGF法效率进一步提高,采用UGF法得到的优化结果相较于初始目标值优化幅度达21.6%,达到预期效果。

关键词:碳纤维增强复合材料 通用生成函数法 耐撞性 可靠性设计优化 非均匀聚类
Kriging模型

中图分类号:U463.8 文献标志码:A DOI: 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230092

Crash Reliability-Based Design Optimization of CFRP Anti-Collision Beam Based on Universal Generating Function

Liu Zhanpeng¹, Zhou Jinyu²

(1. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224000; 2. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169)

【Abstract】 In order to meet the requirements of automotive crashworthiness and lightweight, the reliability optimization design of CFRP anti-collision beam was conducted. With the abscissa, thickness and ply angle of the key control points of the CFRP anti-collision beam as the design variables, and the peak impact force as the constraint conditions, an optimization model was built to maximize the specific energy absorption of the anti-collision beam. The Kriging approximation model of the objective function and the constraint function was obtained by fitting the data with the Latin superelevation method. The UGF-direct mapping method was used for the crash reliability optimization design. The results show that when the random variables are not normal and the function is highly nonlinear, the traditional moment method cannot ensure convergence, the Monte Carlo method has the highest accuracy, but the calculation cost is too high. The reliability analysis and optimization using UGF can ensure stable convergence, and the efficiency is also very high while ensure accuracy. At the same time, the UGF method combined with the non-uniform clustering technology further improves the efficiency. Compared with the initial target value, the optimization magnitude obtained by UGF method reaches 21.6%, reaching the expected effect.

Key words: CFRP, Universal generating function, Crashworthiness, Reliability-based design optimization, Non-uniform clustering, Kriging

【引用格式】刘展鹏,周金宇.基于通用生成函数法的CFRP防撞梁碰撞可靠性设计优化[J].汽车技术,2024(1):50-57.

LIU Z P, ZHOU J Y. Crash Reliability-Based Design Optimization of CFRP Anti-Collision Beam Based on Universal Generating Function[J]. Automobile Technology, 2024(1): 50-57.

*基金项目:国家自然科学基金面上项目(52075232);江苏省自然科学基金项目(BK20201112);盐城工学院研究生实践创新计划(SJXC21_XY001)。

通信作者:周金宇(1973-),教授,博士,主要研究方向为机械CAD/CAE、结构强度与可靠性,yuhangyuan888@sina.com。

1 前言

防撞梁在汽车的安全性设计中有着重要的地位,汽车防撞梁可以吸收碰撞时的能量,给予车身缓冲,对汽车的主体结构起到防护作用。汽车的碰撞过程是高度非线性的复杂过程,设计变量、随机变量与功能函数、目标函数之间不存在显式的函数关系式,常用的方法是构建功能函数和目标函数的代理模型,从而对汽车耐撞性与安全性进行优化。众多学者以此展开研究,仲伟东等^[1]结合响应面模型和多目标遗传算法对防撞梁进行优化设计。王爽等^[2]采用灰色关联及熵权法对碳纤维增强复合材料(Carbon Fibre Reinforced Plastics, CFRP)防撞梁进行优化设计。谢晖等^[3]采用响应面法和自适应模拟退火(Adaptive Simulated Annealing, ASA)算法对防撞梁进行设计优化。张鑫等^[4]采用Hyperkriging模型和遗传算法对防撞梁厚度进行优化。陈静等^[5]通过对复合材料防撞梁厚度进行多目标优化,使得防撞梁质量明显减轻。Belingardi^[6]从材料、结构两方面对汽车前防撞梁进行了优化,改善了前防撞梁的吸能效果。曹立波等^[7]采用中心复合试验设计方法和自适应响应面法对防撞梁进行优化设计。童小伟等^[8]采用Hyperkriging方法结合遗传算法对碳纤维增强复合材料防撞梁进行优化设计。王庆等^[9]采用Kriging代理模型方法和遗传算法对碳纤维增强树脂复合材料防撞梁结构进行优化。Duan^[10]等将响应面分析法(Response Surface Methodology, RSM)和非支配遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)相结合,对复合材料防撞梁进行优化设计。Jalauddin^[11]等研究不同材料的防撞梁的耐撞性和轻量化程度,最后得出碳纤维增强树脂复合材料的耐撞性与轻量化更好。Liu^[12]等结合Kriging近似模型和多目标优化算法对防撞梁进行优化设计。J. Hilmann等^[13]使用遗传算法对防撞梁进行低速碰撞研究并对防撞梁结构进行优化设计。Simon等^[14]使用LS-DYNA对质量相同的钢制和铝合金制防撞梁进行低速碰撞仿真分析,结果表明铝合金防撞梁的比吸能更高。上述文献主要采用传统的优化算法进行确定性的优化设计,但在实际工程中存在大量的不确定性,所以对复合材料防撞梁进行碰撞结构可靠性分析十分必要。

本文采用二次样条曲线对防撞梁轮廓进行描述,轮廓的形状主要由各个控制点横坐标进行控制,故选取轮廓曲线控制点横坐标为设计变量,同时选取厚度与铺层角度作为设计变量,以此建立数学模型。由于目标函数及功能函数为隐式函数,故使用有限元建模与代理模型

法拟合出显式关系式。最后在可靠性分析环节引入通用生成函数(Universal Generating Function, UGF)法,使用遗传算法进行优化。

2 CFRP 防撞梁的碰撞 RBDO 数学模型

根据国家标准 GB 17354—1998,以防撞梁轮廓曲线控制点横坐标 x_i ($i=1,2$)、厚度 t 以及复合材料铺层角度 θ_j 为设计参数,以防撞梁碰撞力峰值 F_{\max} 作为约束条件,以最大化比吸能 E_{SEA} 为设计目标,构建防撞梁的碰撞可靠性优化设计(Reliability-Based Design Optimization, RBDO)RBDO 数学模型。防撞梁的截面尺寸如图1所示。

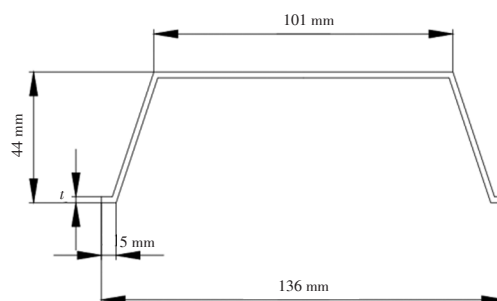


图1 防撞梁截面

2.1 建立 RBDO 数学模型

为了使数学模型的表达更加清晰,铺层角度值采用公式进行转化,将角度值用0,1,2,3来表示。铺层角度 θ_j 可由公式表示为:

$$\theta_j = (x_{j+3} - 1) \times 45^\circ (j = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中, x_{j+3} 的取值范围为{0,1,2,3}。

通过式(1)即可转换成铺层角度的取值。铺层角度如图2所示。

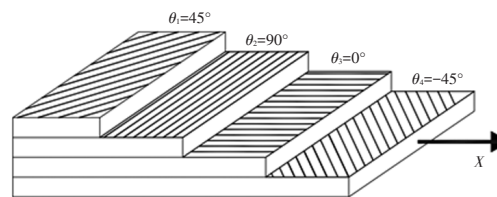


图2 铺层角度

复合材料的弹性模量和剪切模量是非常重要的参数,将弹性模量 E_1 、 E_2 和剪切模量 G_1 、 G_2 设定为随机参数。假设各随机参数相互独立,其中 E_1 、 E_2 服从正态分布, G_1 、 G_2 服从随机分布,参数信息如表1所示。从耐撞性角度考虑,需要防撞梁的总吸能 E 尽可能大,碰撞力峰值 F_{\max} 尽可能小;从轻量化角度考虑,需要防撞梁质量 m 尽可能小。因此,为了同时满足防撞梁耐撞性以及轻量化的要求,将比吸能 E_{SEA} 作为优化目标,以碰撞力峰值 F_{\max} 作为约束,构建数学模型如下:

$$\begin{cases} \text{find } \mathbf{d}=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \\ \max E_{SEA} \\ \text{s.t. } P_r\{G(\mathbf{d}, \mathbf{P}) \leq 0\} \leq \Phi(-\beta^T) \\ 170 \text{ mm} \leq x_1 \leq 200 \text{ mm} \\ 230 \text{ mm} \leq x_2 \leq 400 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} \leq x_3 \leq 5 \text{ mm} \\ x_{j+3} \in \{0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ\} (j=1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (2)$$

式中, \mathbf{d} 为确定性设计变量; $\mathbf{P}=(E_1, E_2, G_1, G_2)$ 为随机参数向量; $P_r\{G(\mathbf{d}, \mathbf{P}) \leq 0\}$ 为结构失效概率; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数, 许用可靠度指标 $\beta^T = 2$; x_3 为防撞梁厚度。

表1 随机参数信息表

随机参数/GPa	平均值	变异系数	概率分布
E_1	147	0.3	正态
E_2	9	0.3	正态
G_1	5	0.2	均匀
G_2	3	0.2	均匀

2.2 耐撞性与轻量化评价

通常将吸能量 H 、比吸能 E_{SEA} 、碰撞力峰值 F_{max} 、平均碰撞力 F_{ave} 、防撞梁侵入量 D 等参数作为结构耐撞性的评价参数。其中吸能量 H 是在碰撞过程中, 防撞梁变形所吸收的能量, 数值越大, 说明防撞梁吸能效果越好; 比吸能 E_{SEA} 为防撞梁单位质量的吸能量, 为总吸能量与质量的比值, 优化比吸能可以同时优化耐撞性和实现轻量化, 具有重大的意义。碰撞力峰值 F_{max} 是碰撞过程中防撞梁结构所受的最大冲击力, 数值越小, 说明防撞梁所受的冲击力越小, 安全性能越强。

3 CFRP 防撞梁碰撞工况有限元仿真

3.1 CFRP 防撞梁有限元建模

由于汽车 CFRP 防撞梁的轮廓曲线为左右对称的自由曲线, 可用二次 B 样条 (B-Spline) 曲线进行描述, 用控制点来改变轮廓曲线的形状。对 B-Spline 曲线的描述由 MATLAB 编程实现, 二次均匀 B-Spline 曲线可以表示为:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i, \quad a \leq u \leq b \quad (3)$$

式中, u 为描述曲线的控制点横坐标; n 为控制点数量; a 、 b 分别为防撞梁长度的上、下限; P_i 为 B-Spline 曲线控制点坐标; $N_{i,p}(u)$ 为 B-Spline 曲线函数, 其中 i 为样条曲线基函数的个数, p 为样条曲线的次数, 其表达式为:

$$\begin{cases} N_{0,2}(u) = \frac{1}{2}(u-1)^2 \\ N_{1,2}(u) = \frac{1}{2}(1-u^2+2u) \\ N_{2,2}(u) = \frac{1}{2}u^2 \end{cases} \quad (4)$$

基于上述公式由 B-Spline 曲线描述的 CFRP 防撞梁轮廓如图 3 所示。由图 3 可知, OA 段由直线构成, AC 段曲线是由点 B 控制的二次均匀 B-Spline 曲线, BD 段曲线是由点 C 控制的二次均匀 B-Spline 曲线, CE 段曲线是由点 D 控制的二次均匀 B-Spline 曲线。 B 、 D 点的横坐标为设计变量中的曲线关键点横坐标。

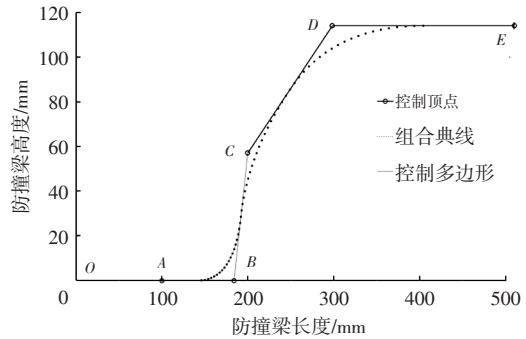


图3 组合 B-Spline 曲线

3.2 CFRP 防撞梁碰撞工况仿真

当前, 防撞梁正面碰撞工况仿真模型有 2 种建模方式: 一是将防撞梁进行固定, 赋予刚性墙一定的速度和质量, 使刚性墙撞击防撞梁; 二是将刚性墙固定不动, 使防撞梁以一定的速度进行撞击。由于第 2 种方案更加贴近实际的碰撞情况, 故本文采用第 2 种方案进行仿真。

将防撞梁以 4 km/h 的速度撞击固定的刚性墙, 防撞梁与刚性墙的接触形式为自动面面接触, 将静摩擦因数设定为 0.3, 动摩擦因数设定为 0.2 时模型不会出现穿透现象^[5]。

利用 MATLAB 与 Ansys 进行联合仿真, 首先在 MATLAB 中输入防撞梁的结构参数和材料参数, 采用二次 B-Spline 曲线完成对防撞梁轮廓曲线的描述, 将轮廓曲线的坐标以 txt 格式输入 Ansys 进行有限元建模。由于 Ansys 库中没有所需的材料模型, 而 LS-DYNA 的材料库较为齐全, 所以需在 LS-DYNA 中进行建模。建模完成后, 在 LS-PrePost 中进行碰撞仿真, 得到目标数据后再通过 txt 格式输出到 MATLAB 中进行计算, 最终得到碰撞力和比吸能数据。具体有限元碰撞仿真过程如图 4 所示。

4 试验设计与克里金代理模型

本节通过拉丁超立方试验法选取样本点, 再通过上节介绍的 CFRP 防撞梁的碰撞工况有限元仿真获取样本点的响应值, 之后便可通过克里金 (Kriging) 代理模型来建立目标函数以及功能函数的代理模型。

4.1 试验设计

汽车碰撞问题为高度非线性问题, 单次的碰撞仿真会消耗大量的时间, 优化设计需要多次迭代并调用仿真数据。解决该问题的通常做法是选取适当的试验设计

方法,在样本空间中生成足够的样本,通过这些样本得到近似模型,完成优化设计,而非碰撞仿真。试验设计的选择标准为:生成的样本足够多且均匀。最理想的试验设计是以较少的样本点得到较为精准的预测结果,多数学者在处理碰撞仿真等非线性问题时,常采用拉丁超立方方法。

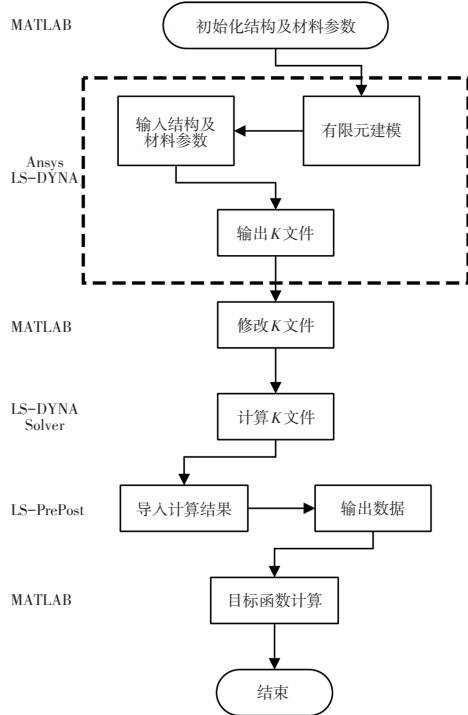


图4 有限元碰撞仿真过程

进行 n 次抽样,拉丁超立方方法将 m 个随机变量分别等分为 n 个区间,样本空间即被分为 n 个 m 维区间。对于每个变量,可以保证 n 次随机抽样分别落在各小区间,样本点可等概率地分布到整个随机空间内。通过拉丁超立方方法生成了120个数据,同时根据复合材料铺层的铺设原则,应避免将同一铺层角度的铺层连续放置,一般不超过3层,以避免出现应力集中和内部微裂纹,根据此原则对样本点进行删除。由于篇幅有限仅展示部分结果,如表2所示。

4.2 建立Kriging代理模型

在实际工程问题中,通常需要使用有限元的方式对工程进行分析,但会缺少显式的极限状态函数以及目标函数,造成可靠度计算的困难。为解决该问题,需引入代理模型法,常见的代理模型有响应面模型、Kriging代理模型、人工神经网络模型等。其中Kriging近似模型有较好的全局拟合精度,且考虑了局部偏差,可以较为精准地拟合变量值与响应值之间的数学关系,使得优化设计的计算成本降低。半参数化的Kriging模型不需要建立一个显式的数学模型,相较于

参数化模型,如响应面模型,半参数化的Kriging模型的应用更加灵活。

表2 拉丁超立方试验设计表

方案	x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	x_4	x_5	x_6	x_7	E_{SEA} /J·kg ⁻¹	F_{max} /kN
1	198.35	298.11	5	3	2	2	3	61.3	44.67
2	179.57	310.69	2	1	2	2	1	61.7	17.93
3	196.13	240.38	3	1	0	0	3	60.8	26.74
4	197.60	385.65	2	3	3	1	2	55.7	11.41
5	195.22	238.19	4	0	1	0	1	63.1	35.62
6	171.28	338.15	4	3	2	2	1	57.1	24.23
7	173.46	337.21	1	1	2	0	1	93.1	11.45
8	198.69	251.95	3	1	2	1	2	73.1	27.47
9	186.84	275.99	2	2	1	3	1	49.2	19.50
10	195.38	317.10	3	2	2	1	2	57.9	21.80
11	192.97	360.94	2	0	3	1	0	51.2	13.31
12	173.98	369.71	2	0	2	1	3	44.8	12.78
13	194.77	383.20	4	1	1	3	2	50.7	17.95
14	192.40	259.25	3	3	1	0	3	59.5	24.63
15	182.24	265.62	2	2	2	1	2	55.3	21.28

Kriging近似模型由一个参数模型和一个非参数随机过程构成:

$$y(\mathbf{K}) = F(\mathbf{K}) + Z(\mathbf{K}) \quad (5)$$

式中, $F(\mathbf{K})$ 为参数模型,形式为多项式回归方程; $Z(\mathbf{K})$ 为模型局部偏差的随机项,其均值为0,方差、协方差不为0。

5 RBDO分析

基于前文所得到的数学模型和隐式函数对CFRP防撞梁进行可靠性设计优化。传统的可靠性设计优化问题的本质为两层嵌套的双循环优化问题,分别为内层可靠性分析循环和外层优化循环。可靠性分析方法主要分为3类:近似解析法、数值模拟法和间接代理法。近似解析法包括一阶可靠性法、二阶可靠性法等,但该类方法具有固有局限性,在进行可靠性分析时精度偏低,当随机变量为非正态、功能函数高度非线性时,无法得到可行解。数值模拟法的典型方法有蒙特卡罗模拟法,虽然该方法适用范围广、精度高,但在处理小失效概率问题时计算成本极高,无法解决大型工程结构中的可靠性分析问题。基于以上考虑,本文将通用生成函数法引入防撞梁碰撞可靠性分析,在随机变量非正态、功能函数高度非线性的情况下得到更加精准的结果。

5.1 基于UGF的可靠性分析

对于连续变量 S , 假设其累积分布函数与概率密度函数分别为 $F_s(s)$ 和 $f_s(s)$, 将该变量在其定义域 (s_{\min}, s_{\max}) 内均匀离散成 m 个点, 而每个离散点 S_i 对应的概率值 P_i 为:

$$P_i = \int_{s_{\min} + (i-1)\delta}^{s_{\min} + i\delta} f_s(s) ds = F_s(S_{\min} + i\delta) - F_s(S_{\min} + (i-1)\delta) \quad (6)$$

式中, $\delta = (s_{\max} - s_{\min})/m$ 为离散步长。

通过式(6)计算可得离散数据集 $\{(S_i, P_i) | i = 1, 2, \dots, m\}$, 从而定义连续型随机变量 S 的 UGF 为:

$$U_s(z) = \sum_{i=1}^m P_i z^{S_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

式中, $U_s(z)$ 为随机变量 S 的 UGF; z 为离散后随机变量组成的多项式。

对于拥有 n 维连续型随机向量 \mathbf{S} 的工程结构, 需要在可靠性分析时根据式(6)、式(7)获得 \mathbf{S} 各分量的 UGF, 记为:

$$U_{S_i}(z) = \sum_{j=1}^{m_i} P_{ij} z^{S_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中, 指数项 S_{ij} 为随机变量 S_i 的第 j 个状态值; P_{ij} 为其对应的概率值。

设 $G(\mathbf{S})$ 为工程结构的功能函数, 则 $G(\mathbf{S}) \geq 0$ 时结构可靠, $G(\mathbf{S}) < 0$ 时结构失效。为了获得结构的总体 UGF, 需要对每个变量的 UGF 进行复合运算, 表达式为:

$$U_c(z) = \otimes_c (U_{S_1}(z), \dots, U_{S_n}(z)) = \sum_{j_1=1}^{m_1} \dots \sum_{j_n=1}^{m_n} (\prod_{i=1}^n P_{ij_i}) z^{G(S_{1j_1}, \dots, S_{nj_n})} \quad (9)$$

式中, $U_c(z)$ 为针对功能函数 $G(\mathbf{S})$ 的结构 UGF; \otimes_c 为复合算子。

式(9)可进一步简化为:

$$U_c(z) = \sum_{i=1}^M P_i z^{G_i} \quad (10)$$

式中, M 为随机变量离散状态组合总数。

最后对 UGF 的系数项求和, 即可得到最终可靠度 R :

$$R = \psi(U_c(z)) = \sum_{i=1}^M P_i I(G_i) \quad (11)$$

式中, $\psi()$ 为条件求和算子; $I()$ 为示性函数, 当 $G_i < 0$ 时取 0, 否则取 1。

5.2 UGF-直接映射方法

RBDO 问题是一个双层嵌套问题, 针对 RBDO 的求解效率问题, 当前研究已提出了解耦算法, 其思路是将 RBDO 的嵌套解耦成一系列确定性设计优化和可靠性分析组成的迭代过程。其代表方法是序列优化与可靠性评估 (Sequential Optimization and Reliability Assessment,

SORA) 方法, 通过引入偏移向量使最可能失效点 (Most Probable Point, MPP) 落在可行域内, 由于引入了偏移向量, 称为间接映射。采用 UGF-直接映射方法^[6], 可通过响应面模型来拟合设计变量与可靠度指标的函数关系式, 避开 MPP 且不需要偏移向量。由于 SORA 法对初始偏移向量较为敏感, 若不能确定初始偏移向量, 则会导致优化结果不稳定, 同时, 基于 MPP 来求解初始偏移向量存在原理性误差, 不适用于非正态变量和非线性极限状态问题, 故采用 UGF-直接映射法可提高求解效率。

UGF-直接映射法的原理为通过构建响应面模型来拟合设计点和可靠度指标之间的函数关系, 生成的函数定义为指标函数, 将指标函数带入 RBDO 的概率约束, 将含有概率约束的不确定优化转化为确定性优化, 转化后的 UGF-直接映射法的可靠性优化设计数学模型可表示为

$$\begin{cases} \text{find } \mathbf{d} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \\ \max E_{SEA} \\ \text{s.t. } \hat{\beta}(\mathbf{d}, \mathbf{P}) \geq \beta^T \\ 170 \text{ mm} \leq x_1 \leq 200 \text{ mm} \\ 230 \text{ mm} \leq x_2 \leq 400 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} \leq x_3 \leq 5 \text{ mm} \\ x_{j+3} \in \{0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ\} (j = 1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\hat{\beta}(\mathbf{d}, \mathbf{P})$ 为指标函数; 许用可靠度指标 $\beta^T = 2$ 。

5.3 非均匀聚类技术

UGF 可靠性分析法将随机变量离散化后, 需将离散后的状态项进行状态组合, 但在实际工程中随机变量较多, 会产生过多的状态组合, 使功能函数的评估次数随之增多, 导致可靠性分析求解效率极低, 此时可通过非均匀聚类技术解决此问题。

非均匀聚类算法对传统 K-均值 (K-Means) 聚类算法的聚类中心更新策略进行了改进, 提出了簇心概率加权方法。在可靠性分析中, 极限状态空间附近的点对结构的失效或可靠性分析更加敏感, 另外, 概率密度大的点对可靠性分析的结果影响也较大, 基于这两点对数据点进行加权, 使得数据点在极限状态曲面附近的同时也要向概率密度大的区域集中, 可以使需要的设计点数量减少且提高可靠性分析的精度。

簇心概率加权方法的具体操作为: 为了考虑概率密度的影响, 先对坐标点进行坐标概率加权, 即在划分高维空间坐标点对应的簇时, 将同一簇的坐标点乘以对应的取值概率, 得到坐标向量后进行求和, 所得的向量记作 \mathbf{E}_i 。将各坐标点的取值概率求和, 所得的值为 P ; 为

了向极限状态空间附近靠近,则对坐标点的功能函数值加权,功能函数值加权系数 j 为:

$$j = \frac{1}{\max(|G|, 0.001)^9} \quad (13)$$

然后将同一簇的坐标点乘以每个坐标点对应的功能函数值加权系数,将得到的值进行累加,所得的向量记作 E_2 。将各功能函数值加权系数进行求和,记作 g ;最后对中心点进行概率加权更新:

$$B = \frac{f}{P} E_1 + \frac{(1-f)}{g} E_2 \quad (14)$$

式中, G 为各坐标点对应的功能函数值; B 为簇心概率加权系数; f 为组合系数,通常取0.3。

具体流程如图5所示,以本文4个随机变量为例,将各变量离散成20个状态项。通过非均匀聚类算法的两步聚类,将160 000个状态项缩减至8 000个,在可靠性分析环节中,只需对全空间聚类所得到的8 000个状态项进行功能函数评估,相比较不使用非均匀聚类方法的160 000次功能函数评估,效率大幅提升。同时,在进行高维聚类时,通常会用到大量的多重循环语句,导致代码运行过慢,针对这一问题,本文采用矢量化编程技术来避免大量循环,从而提高代码运行效率。

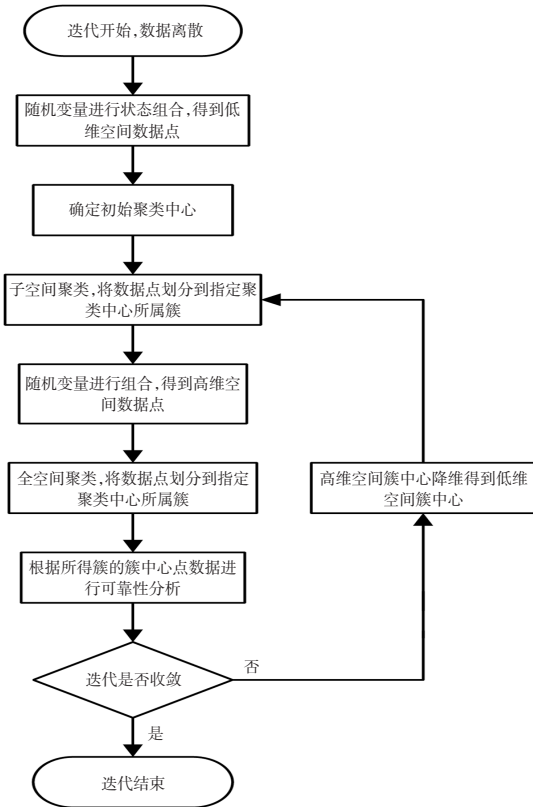


图5 非均匀聚类流程

6 CFRP防撞梁碰撞RBDO流程

在CFRP防撞梁的RBDO问题中,设计变量为控制

点横坐标、防撞梁厚度以及复合材料铺层角度。其中控制点横坐标为连续型设计变量,厚度和铺层角度为离散型设计变量,且厚度和铺层角度要求为整数,针对上述的混合整数非线性优化问题,传统的优化算法无法得到结果,本文拟采用遗传算法进行优化。

6.1 优化流程

CFRP防撞梁碰撞结构可靠性优化设计具体步骤如下:

- 通过拉丁超立方设计方法对所有设计变量进行试验设计,生成样本点;
- 基于生成的样本点,同时结合MATLAB与Ansys的相互调用进行防撞梁的有限元碰撞仿真;
- 基于生成的样本点,通过MATLAB与Ansys计算相应的目标值;
- 基于计算出的目标值,通过Matlab中的Kriging工具箱,即可构建有关目标函数及功能函数的Kriging代理模型,并验证其精度,若不满足要求则补充样本点并回到步骤c,若满足要求则进行下一步;
- 确定初始设计点 D_0 ,并通过UGF法求解对应可靠度指标;
- 构建可靠度指标响应面;
- 使用遗传算法计算当前设计点 D_k ,采用非均匀聚类技术并结合UGF法计算对应的可靠度指标;
- 验证结果是否收敛,若不收敛,则将初始设计点和当前设计点合并,返回步骤f,若结果收敛,则输出最优结果。

优化流程如图6所示。

6.2 结果对比

将传统矩算法、蒙特卡罗法、UGF法进行比较:算法1为基于FORM的双循环法;算法2为基于FORM的SORA法;算法3为UGF-直接映射法,可靠性分析由UGF法计算;算法4的可靠性分析由蒙特卡罗法计算;算法5为UGF-直接映射法的变形,优化流程中使用了非均匀聚类技术。算法1与算法2属于传统矩算法,算法4属于蒙特卡罗法,算法3和算法5属于UGF法。相对误差 ε 为:

$$\varepsilon = \left| \frac{\beta - \beta^T}{\beta^T} \right| \times 100\% \quad (15)$$

式中, β 为目标设计点的可靠度指标; β^T 为许用可靠度指标,取值为2。

不同算法优化结果对比如表3所示。

由表3可知,当极限状态函数高度非线性及随机变量非正态时,基于FORM的双循环法、基于FORM的SORA法无法收敛,UGF-直接映射法、MCS-直接映射法

以及基于非均匀聚类算法的UGF-直接映射法的可靠度指标均满足许可可靠度指标要求。由于每次迭代过程中,均需对功能函数进行调用计算,所以可将功能函数调用次数作为衡量算法效率的指标。由此可得,基于非均匀聚类算法的UGF-直接映射法效率最高,普通UGF-直接映射法效率次之,而MCS-直接映射法的效率最低。

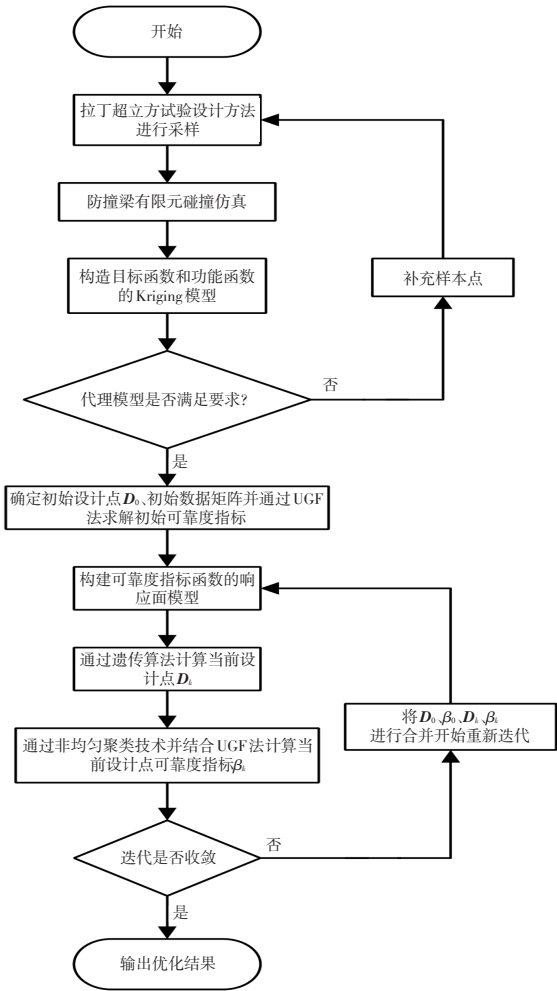


图6 优化流程

表3 不同算法优化结果对比

算法	设计点	目标值 $J \cdot \text{kg}^{-1}$	可靠度 指标	相对误 差/%	功能函数调 用次数/次
1					
2					
3	(177.812;225; 1;1;0;0;1)	103.955 8	2.102 9	5.1	1.8×10^5
4	(177.519;228; 1;1;0;0;1)	103.645 7	1.926 8	3.0	1.7×10^7
5	(177.519;228; 1;1;0;0;1)	103.645 7	1.834 4	8.2	1 000

7 结束语

本文对CFRP防撞梁进行了可靠性优化设计。对

传统矩方法、SORA法、UGF-直接映射法、MCS-直接映射法、结合非均匀聚类法的UGF-直接映射法进行了对比。结果表明,传统矩方法无法收敛;MCS-直接映射法求解精度最高,但计算成本过高;UGF-直接映射法可以稳定收敛,且求解精度较高,计算成本较小。结合非均匀聚类法的UGF-直接映射法的精度略低,但求解效率得到了极大提升,在应对更多随机变量的RBDO问题时更加适用。将初始设计点代入目标函数后可得初始目标值为81.22 J/kg,经过算法5的优化后得到的目标为103.64 J/kg,增幅为21.6%,达到预期优化效果。关于样件试制与试验的问题,刘成龙^[17]通过对复合材料样件进行拉伸试验,将计算试样的可靠度与理论仿真的结果进行对比,结果显示,理论结果和试验结果仅存在6.8%的误差,可间接验证UGF的合理性和有效性。但关于碰撞吸能试验因条件不足,直接验证存在难度,需后续加以深度研究。

参 考 文 献

- [1] 仲伟东,王东方,李静. 复合材料防撞梁低速碰撞的研究与多目标优化[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 463-471.
ZHONG W D, WANG D F, LI J. Research and Multi-Objective Optimization of Composite Anti-Collision Beam in Low-Speed Collision[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 41(4): 463-471.
- [2] 王爽,王登峰. 灰色关联及熵权法对碳纤维增强树脂复合材料防撞梁的耐撞性优化设计[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 345-355.
WANG S, WANG D F. Optimal Design of Crashworthiness of Carbon Fiber Reinforced Resin Composite Anti-Collision Beam by Grey Correlation and Entropy Weight Method[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 37(2): 345-355.
- [3] 谢晖,唐泽皓,王杭燕,等. 基于耐撞性能的保险杠轻量化研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(3): 81-87.
XIE H, TANG Z H, WANG H Y, et al. Research on Bumper Lightweight Based on Crashworthiness[J]. Journal of Plastic Engineering, 2020, 27(3): 81-87.
- [4] 张鑫,赵晓昱,兰祥,等. 汽车用碳纤维复合材料前防撞梁的轻量化与优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(8): 98-103.
ZHANG X, ZHAO X Y, LAN X, et al. Lightweight and Optimized Design of Carbon Fiber Composite Front Anti-Collision Beam for Automobile[J]. FRP/Composite Material, 2019(8): 98-103.
- [5] 陈静,崔晓凡,郑晋军,等. 基于加点多目标粒子群算法的碳纤维防撞梁优化设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(8): 21-28.

- CHEN J, CUI X F, ZHENG J J, et al. Optimal Design of Carbon Fiber Anti-Collision Beam Based on Multi-Point Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2022, 49(8): 21-28.
- [6] BELINGARDI G, BEYENE A T, KORICHO E G. Geometrical Optimization of Bumper Beam Profile Made of Pultruded Composite by Numerical Simulation[J]. Composite Structures, 2013, 102(8): 217-225.
- [7] 曹立波, 陈杰, 欧阳志高, 等. 基于碰撞安全性的保险杠横梁轻量化设计与优化[J]. 中国机械工程, 2012, 23(23): 2888-2893.
- CAO L B, CHEN J, OUYANG Z G, et al. Lightweight Design and Optimization of Bumper Beam Based on Collision Safety [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(23): 2888-2893.
- [8] 童小伟, 黄妙华. 碳纤维复合材料保险杠铺层优化设计研究[J]. 材料导报, 2017, 31(1): 477-488+500.
- TONG X W, HUANG M H. Research on Optimization Design of Carbon Fiber Composite Bumper Ply[J]. Material Guide, 2017, 31(1): 477-500.
- [9] 王庆, 卢家海, 刘钊, 等. 碳纤维增强复合材料汽车保险杠的轻量化设计[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(2): 136-141.
- WANG Q, LU J H, LIU Z, et al. Lightweight Design of Carbon Fiber Reinforced Composite Automobile Bumper[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(2): 136-141.
- [10] DUAN S, TAO Y, XU H, et al. Investigation on Structure Optimization of Crashworthiness of Fiber Reinforced Polymers Materials[J]. Composites Part B Engineering, 2014, 60B(4): 471-478.
- [11] JALAUDDIN M N, ALI A, et al. Performance of Automotive Composite Bumper Beams and Hood Subjected to Frontal Impacts[J]. Materials Testing, 2012, 54(1): 19-25.
- [12] LIU Z, LU J, ZHU P. Lightweight Design of Automotive Composite Bumper System Using Modified Particle Swarm Optimizer[J]. Composite Structures, 2016, 140(4): 630-643.
- [13] HILMANN J, PAAS M, HAENSCHKE A, et al. Automatic Concept Model Generation for Optimisation and Robust Design of Passenger Cars[J]. Advances in Engineering Software, 2007, 38(11/12): 795-801.
- [14] SIMON P, BEGGS P D. A Numerical Performance Comparison of A Dual-Phase Steel and Aluminium Alloy Bumper Bar System[J]. International Journal of Crashworthiness, 2010, 15(4): 425-442.
- [15] 苏尚彬. 汽车前防撞梁耐撞性分析及其轻量化研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
- SU S B. Crashworthiness Analysis and Lightweight Research of Front Bumper[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015.
- [16] 朱达伟. 基于UGF的结构可靠性优化算法研究[D]. 常州: 江苏理工学院, 2021.
- ZHU D W. Research on Structural Reliability Optimization Algorithm Based on UGF[D]. Changzhou: Jiangsu Institute of Technology, 2021.
- [17] 刘成龙. 复合材料层合板可靠性建模与分析[D]. 常州: 江苏理工学院, 2018.
- LIU C L. Reliability Modeling and Analysis of Composite Laminates[D]. Changzhou: Jiangsu Institute of Technology, 2018.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年3月10日。