

文章编号:1672-9331(2021)01-0095-07

基于混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计

刘 鑫^{1,2}, 张远洋²

(1. 长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 工程车辆安全性设计与可靠性技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 针对多种不确定性因素对汽车结构耐撞性产生的影响, 本研究提出了一种基于混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计方法。首先, 建立了基于概率-区间混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计模型, 并分析其嵌套情况; 然后, 为了减少嵌套层数, 提出了一种高效的解耦策略, 将原始的嵌套问题等效转化为单层的优化设计问题; 最后, 使用径向基函数构建了近似可靠性优化设计问题, 并采用局部加密策略提高优化结果的精度。研究表明: 该方法收敛迅速, 能够达到对混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计问题快速求解的目的, 对汽车结构耐撞性的优化设计具有一定的参考价值。

关键词: 混合模型; 汽车结构耐撞性; 可靠性优化设计; 解耦策略; 局部加密策略

中图分类号: TB114.3

文献标志码: A

Reliability-based design optimization for vehicle structural crashworthiness based on hybrid model

LIU Xin^{1,2}, ZHANG Yuan-yang²

(1. Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114; 2. Hunan Province

Key Laboratory of Safety Design and Reliability Technology for Engineering Vehicle,

Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114)

Abstract: Aiming at the influence of uncertainties on the vehicle structural crashworthiness, a reliability-based design optimization (RBDO) method for vehicle structural crashworthiness based on hybrid model was proposed. First, a RBDO model for vehicle structural crashworthiness based on probability and interval hybrid model was established, and the nesting level was analyzed. Then, in order to reduce the nesting, an efficient decoupling strategy was proposed, which transformed the original nesting problem into a single-layer design optimization problem. Finally, the approximate RBDO problem was constructed by using the radial basis function. The local densifying strategy was employed to improve the accuracy of the results. The research results show that the method converges rapidly, and the RBDO problem of vehicle structural crashworthiness is solved quickly. It has a wide ap-

收稿日期: 2020-05-15

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3323); 长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(kfj170401)

通讯作者: 刘 鑫(1981—), 男, 副教授, 主要从事汽车结构可靠性优化技术方面的研究。E-mail: lxym810205@163.com

plication prospect in the field of vehicle crashworthiness design optimization, which has certain reference value for the design optimization of vehicle structural crashworthiness.

Key words: hybrid model; vehicle structural crashworthiness; reliability-based design optimization; decoupling strategy; local densifying strategy

汽车作为目前使用最为广泛的交通工具,其结构的耐撞性对乘客的生命安全起着关键的作用,因此受到了广泛的关注。廖兴涛等^[1]构建了车辆薄壁构件的有限元模型,并使用响应面法对薄壁构件的耐撞性进行了优化设计;邳薇等^[2]选择汽车的车门作为优化目标,并使用 Kriging 模型构建了对应的近似模型,在满足车辆耐撞性的条件下达到了轻量化;陈新等^[3]分析了车顶强度的全局灵敏性,选择出主要分析部件,并将其尺寸作为设计变量,利用近似模型进行优化设计。

上述研究都是将车辆的结构参数作为确定性变量进行优化设计,但不确定性普遍存在于汽车结构耐撞性的优化设计中,如车辆零部件的尺寸及车身材料的弹性模量等。早期的方法是通过简化假设来引入不确定性,如考虑极端值以及安全系数等。但是参数的摄动有可能对最优结构设计表现出显著的敏感性,不同类型的不确定性也会导致汽车结构的性能和可靠性发生不同程度的变化。因此,充分合理地将各种不确定因素考虑其中,可以强化汽车的结构耐撞性,提高汽车的安全性。在对汽车的结构耐撞性进行优化设计时,尽管可靠性水平高是一个基本目标,但高水平的可靠性通常伴随着巨大的经济成本。在工程实践中,应在可接受的可靠性水平和汽车轻量化等经济成本之间适当权衡。所以,关于汽车结构耐撞性的可靠性优化设计(reliability-based design optimization, RBDO)问题逐渐引起了研究者的注意。武和全等^[4]针对车门对车辆结构耐撞性的影响进行了研究,通过选定车门及防撞杆为优化目标,分别对其进行了确定性优化及可靠性优化,体现了可靠性优化设计对车辆耐撞性的重要性;曹立波等^[5]为了研究混合动力汽车的耐撞性,选取 B 柱各板的尺寸及材料特性作为设计变量进行了可靠性优化设计,既满足了耐撞性和可靠性要求,同时也减轻了汽车质量;吴斌等^[6]针对模型 SUV 建立了有限元模型,并在 40% 偏置碰撞的工况下进行了车辆耐撞性的可靠性优化设计,扩大了乘

客的生存空间,提高了乘客乘坐的安全性;张勇等^[7]提出了一种新的薄壁结构,内部填充材料为轻质铝泡沫,为了提高其性能,使用 Kriging 近似模型进行了耐撞性的可靠性优化设计。

概率模型作为一种较精确的统计学模型,被广泛用来描述工程实践中的不确定性。然而,使用概率模型描述不确定性变量需要掌握对应的概率密度分布函数,这对工程实际而言非常具有挑战性,因此概率模型实际上存在一定的局限性。非概率模型作为概率模型的补充,由于其不需要大量样本,只需要确定分布的上下限,在一定程度上避免了概率模型的局限性。近年来,一些研究者结合概率模型及非概率模型,提出了许多针对汽车结构耐撞性的可靠性优化设计方法,并应用到了工程实践当中。王琼等^[8]针对汽车正面碰撞工况,建立了混合模型车辆耐撞性的可靠性优化设计方法,利用漂移向量算法,实现了顺序迭代求解可靠性优化设计问题;李方义等^[9]提出了一种基于概率-凸集混合模型的可靠性优化设计方法,首先构造优化问题函数的近似模型,并使用功能测度法计算概率约束,然后将其运用到汽车正面碰撞的结构可靠性优化设计上。虽然上述方法在一定程度上提高了汽车耐撞性设计过程中内部可靠性分析的嵌套求解效率,但基于概率-区间混合模型的可靠性优化设计问题的求解仍然处于嵌套状态,这对求解效率有不可忽视的影响。

针对求解效率较低的问题,本研究提出一种基于混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计方法。首先,构建了基于概率-区间混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计问题,并分析其嵌套情况;然后,提出解耦策略,利用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)最优化条件及最大熵原理,得到了单层可靠性优化设计问题,避免了嵌套求解;最后,为了减少数值模型计算的耗时,利用径向基函数构建优化设计问题中各函数的近似模型,利用遗传算法进行求解,并配合局部加密策略保证求解精度。结果表明:本方法收敛迅速,能够

达到对混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计问题快速、准确求解的目的。

1 模型的建立

耐撞性设计作为当前汽车产品开发过程中重要的一环,具有不可替代的地位。汽车耐撞性分析包括低速偏置碰撞、高速正面碰撞两种工况。为了满足车辆耐撞性、轻量化等要求,本研究开展了车辆在 15 km/h 低速偏置碰撞工况和 56 km/h 高速正面碰撞工况下的结构耐撞性分析(见图 1 和图 2),并选择车辆的耐撞性作为约束条件,进行了车辆结构耐撞性的可靠性优化设计。选取前保险杠的厚度 d 为设计变量,碰撞箱内板厚度 X_1 和碰撞箱外板厚度 X_2 为概率变量,前纵梁内板厚度 Y_1 和前纵梁外板厚度 Y_2 为区间变量,并将前保险杠的厚度 d 作为目标函数。

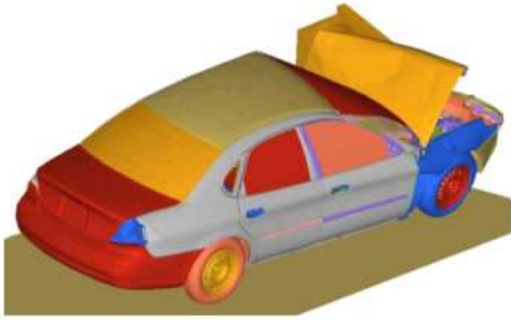


图 1 低速偏置碰撞示意图

Fig. 1 Offset collision at low speed

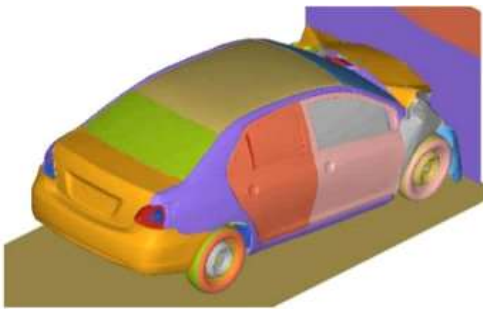


图 2 高速正面碰撞示意图

Fig. 2 Frontal collision at high speed

在低速碰撞的情况下,乘客一般都比较安全,所以要考虑保护车体,即应尽可能减少前纵梁的变形,从而降低车辆修复的费用。因此,前纵梁内外板的总能量吸收 E 应小于给定值 E_0 。在高速碰撞的情况下,则需要保障乘客的安全。因此,左后座的平均积分加速度 \bar{a} ,以及发动机上下两个

标记点 I_H 和 I_L 的侵入量,要分别小于给定值 \bar{a}_0 、 I_{H0} 和 I_{L0} 。引入 4 个二次多项式响应面模型(其响应值与模拟值的相对误差均在 5% 以内)^[10]:

$$E(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 1\,094.28d + 4\,468.16X_1 + 2\,921.61X_2 - 7\,831.19Y_1 - 14\,550.22Y_2 - 789.12dX_1 - 1\,798.22dX_2 + 557.35dY_1 + 689.27X_1X_2 + 975.46dY_2 - 990.46X_1Y_1 - 884.14X_1Y_2 - 354.61X_2Y_1 + 522.59X_2Y_2 + 1\,857.17Y_1Y_2 + 148.5Y_1^2 + 1\,349.94X_1^2 + 2\,753.08Y_2^2 + 12\,779.336 \quad (1)$$

$$\bar{a}(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 9.449X_1 - 1.832d + 11.69X_2 + 10.636Y_1 + 6.679Y_2 - 1.232dX_1 - 1.329dY_1 + 1.106X_1X_2 - 0.914dY_2 - 1.313X_1Y_2 - 3.759X_2Y_1 - 1.197\,8X_2Y_2 + 1.225d^2 - 2.366X_1^2 - 1.353X_2^2 - 0.906Y_1^2 + 16.596 \quad (2)$$

$$I_H(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 37.824d^2 + 12.634dX_1 - 21.495dX_2 - 20.773dY_2 - 135.479d + 25.779X_1^2 - 15.08X_1Y_1 + 8.781X_1Y_2 - 123.145X_1 + 29.194X_2^2 + 7.606X_2Y_1 - 65.554X_2 + 31.565Y_1^2 - 15.874Y_1Y_2 - 93.243Y_1 - 14.968Y_2^2 + 106.945Y_2 + 643.436 \quad (3)$$

$$I_L(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 51.820d - 9.242X_1 + 8.394X_2 - 79.998Y_1 - 64.932Y_2 - 5.156dX_1 + 6.211X_1X_2 + 14.747dY_2 - 5.878X_1Y_1 - 9.894X_1Y_2 - 8.811X_2Y_1 - 2.477X_2Y_2 + 7.152Y_1Y_2 - 15.196d^2 + 6.761X_1^2 + 20.438Y_1^2 + 7.471Y_2^2 + 275.327 \quad (4)$$

由此,可得到可靠性优化设计问题如下:

$$\min_d d \quad (5)$$

s. t.

$$\beta_L(g_1(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = E_0 - E(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0) \geq \beta_{t1},$$

$$\beta_L(g_2(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \bar{a}_0 - \bar{a}(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0) \geq \beta_{t2},$$

$$\beta_L(g_3(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = I_{H0} - I_H(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0) \geq \beta_{t3},$$

$$\beta_L(g_4(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = I_{L0} - I_L(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0) \geq \beta_{t4},$$

$$2\text{ mm} \leq d \leq 3\text{ mm}$$

式中: $E_0 = 140\text{ J}$; $\bar{a}_0 = 40\text{ g}$; $I_{H0} = 350\text{ mm}$; $I_{L0} = 200\text{ mm}$ 。

为研究上述问题的嵌套求解情况,针对其中任意的极限状态函数,可得到其失效概率为:

$$p_f = P(g(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) < 0) \quad (6)$$

由于加入了区间向量 \mathbf{Y} ,使得极限状态曲面 $g(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y})=0$ 在 \mathbf{X} 空间可能呈现多种状态,所以失效概率的值同样为一个区间:

$$p_f \in [p_{f,L}, p_{f,R}] \quad (7)$$

式中: $p_{f,L}$ 、 $p_{f,R}$ 分别为失效概率的下限和上限。

在实际工程中,最大失效概率 $p_{f,R}$ 更能合理地体现结构的状态。 $p_{f,R}$ 可表示为:

$$p_{f,R} = P(\min_{\mathbf{Y}} g(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq 0) \quad (8)$$

基于一次二阶矩法求解式(5),可得优化问题:

$$\begin{aligned} \beta_L &= \min_{\mathbf{U}} \|\mathbf{U}\| \\ \text{s. t. } \min_{\mathbf{Y} \in \mathbf{Y}^I} G(d, \mathbf{U}, \mathbf{Y}) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: β_L 为最小可靠性指标,且 $p_{f,R} = \Phi(-\beta_L)$; \mathbf{U} 为随机向量 \mathbf{X} 标准正态化后的向量; G 为标准正态化后的约束函数。

很显然,式(9)包含两层优化,外层优化为:

$$\begin{aligned} \beta_L &= \min_{\mathbf{U}} \|\mathbf{U}\| \\ \text{s. t. } G(d, \mathbf{U}, \mathbf{Y}^*) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

内层优化为:

$$\begin{aligned} G(d, \mathbf{U}, \mathbf{Y}^*) &= \min_{\mathbf{Y}} G(d, \mathbf{U}, \mathbf{Y}) \\ \text{s. t. } Y_{i,L} &\leq Y_i \leq Y_{i,R}, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (11)$$

在通常情况下,针对式(5)所示的可靠性优化设计问题,除了内层混合模型的可靠性分析,还要对目标函数进行寻优,因此属于一个三层嵌套的优化问题。使用传统算法嵌套求解优化问题,所花费的时间成本通常是难以接受的。因此,需要一个合理的解耦策略解决优化设计问题的嵌套情况,从而实现问题的快速求解。

2 问题的求解

2.1 嵌套解耦策略

为了用单层优化问题等效替换式(5)所示的三层嵌套优化问题,本研究利用 KKT 最优化条件^[11]将区间向量 \mathbf{Y} 转换成服从区间均匀分布的随机向量 \mathbf{u} :

$$\mathbf{u} \sim U(\mathbf{u}_L, \mathbf{u}_R) \quad (12)$$

由于极限状态函数只含有概率向量 \mathbf{X} 和 \mathbf{u} ,而基于最大熵原理的二次四阶矩法^[12]针对只含概率向量的约束函数,可通过积分直接计算最大失效概率 $p_{f,R}$,从而得出可靠性指标 β ,达到了避免嵌套求解可靠性指标 β 的目的。利用最大熵原理求解最大失效概率的过程如下:

首先,将约束函数 $g(d, \mathbf{X}, \mathbf{u})$ 进行标准化处理,可得随机变量 y :

$$y = \frac{g - \mu_g}{\sigma_g} \quad (13)$$

式中: μ_g 和 σ_g 分别为约束函数 $g(d, \mathbf{X}, \mathbf{u})$ 的期望值和标准差。

然后,计算 y 的前四阶原点矩 $v_{y,c}$ ($c = 0, 1, \dots, 4$),可得积分方程组^[12]为:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} y^c \exp\left(-\sum_{k=0}^4 a_k y^k\right) dy = v_{y,c} \quad (14)$$

式中: a_k ($k = 0, 1, \dots, 4$)为积分方程组的参数。

对式(14)进行求解,可以得到 a_k ,进而可以计算失效概率 p_f 为:

$$\begin{aligned} p_f &= P(g(d, \mathbf{X}, \mathbf{u}) \leq 0) = P\left(y \leq -\frac{\mu_g}{\sigma_g}\right) = \\ &= \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_g}{\sigma_g}} \exp\left(-\sum_{k=0}^4 a_k y^k\right) dy \end{aligned} \quad (15)$$

最后,可通过下式将失效概率转化为可靠性指标 β :

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) \quad (16)$$

式中: $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数累积分布函数的反函数。

综上所述,通过该解耦策略能够将式(5)所示的双层嵌套可靠性分析最终转换成通过积分方法求解可靠性指标 β ,无需通过优化迭代求解。

2.2 近似优化设计问题的建立

为减少数值模型的计算耗时,通过径向基函数构建式(5)对应的近似可靠性优化设计问题为:

$$\min_d \quad (17)$$

s. t.

$$\beta_L(\tilde{g}_1(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = E_0 - E(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0) \geq \beta_{t1},$$

$$\beta_L(\tilde{g}_2(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \bar{a}_0 - a(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0) \geq \beta_{t2},$$

$$\beta_L(\tilde{g}_3(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = I_{H0} - I_H(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0) \geq \beta_{t3},$$

$$\beta_L(\tilde{g}_4(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = I_{L0} - I_L(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0) \geq \beta_{i4},$$

$$2 \text{ mm} \leq d \leq 3 \text{ mm}$$

式中: $\tilde{g}_j(d, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 为第 j 个极限状态函数的近似函数。

基于上述嵌套解耦策略,可将式(17)转换为单层近似可靠性优化设计问题:

$$\min_d \quad (18)$$

s. t.

$$\int_{-\infty}^{\frac{\mu_{\tilde{g}_j}}{\sigma_{\tilde{g}_j}}} \exp\left(-\sum_{k=0}^4 a_{j_k} \tilde{y}(d, \mathbf{X}, \mathbf{u})_j^k\right) d\tilde{y}_j \leq \Phi(-\beta_{ij}),$$

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

$$d \in \Omega_d^s, \mathbf{X} \in \Omega_X^n, \mathbf{u} \in \Omega_u^m,$$

$$2 \text{ mm} \leq d \leq 3 \text{ mm}$$

式中: $\mu_{\tilde{g}_j}$ 、 $\sigma_{\tilde{g}_j}$ 分别为第 j 个极限状态函数的近似函数值的均值及标准差; $\tilde{y}(d, \mathbf{X}, \mathbf{u})_j$ 为第 j 个极限状态函数的近似函数标准化后的变量。

2.3 求解流程

采用遗传算法对得到的单层近似耐撞性的可靠性优化设计问题进行求解,并利用局部加密策略保证求解的准确性。具体的优化求解步骤为:

1) 利用 LHD 方法对汽车耐撞性的可靠性优化设计问题函数包含的变量进行采样。令 $s = 1$, 并给定允许误差 $\epsilon > 0$ 。

2) 计算样本点集对应的目标函数响应值及约束函数响应值,构建目标函数和各约束函数的近似模型,从而建立式(17)所示的近似可靠性优化设计问题。

3) 利用解耦策略获得式(18)所示的单层近似可靠性优化设计问题。

4) 使用遗传算法对式(18)进行求解,得到当前步的优化设计解 X_s 。

5) 计算优化设计解 X_s 对应的目标函数及各约束函数的近似模型值和真实响应值。

6) 计算近似模型的误差 δ_{\max} :

$$\delta_{\max} = \max\left\{\left|\frac{f - \tilde{f}}{f}\right|, \left|\frac{g_j - \tilde{g}_j}{g_j}\right|\right\},$$

$$j = 1, 2, \dots, p \quad (19)$$

如果 $\delta_{\max} < \epsilon$, 则此时的优化设计解 X_s 为最优设计解,迭代终止;否则,将此时的优化设计解

作为新的样本点,加入样本空间,返回步骤 2), 并令 $s = s + 1$, 继续迭代求解,直至 $\delta_{\max} < \epsilon$ 。

3 结果与分析

本研究车辆碰撞问题的随机变量的概率分布信息见表 1, 区间变量的边界信息见表 2。

表 1 随机变量的概率分布信息

Table 1 Probability distribution information of random variables

概率变量	期望/mm	标准差/mm	分布类型
X_1	2.15	0.05	正态分布
X_2	1.70	0.05	正态分布

表 2 区间变量的边界信息

Table 2 Boundary information of interval variables

区间变量	区间下限/mm	区间上限/mm
Y_1	2.00	2.30
Y_2	1.90	2.20

4 个约束函数的目标可靠性指标均设为 $\beta_i = 3$, 对应的可靠性为 99.87%。考虑到响应面模型存在 5% 的误差, 因此对近似模型的精度要求较为严格, 以此控制误差的传递。设定近似模型的给定允许误差 $\epsilon = 3\%$ 。使用遗传算法求解优化问题, 其迭代过程如图 3 所示。

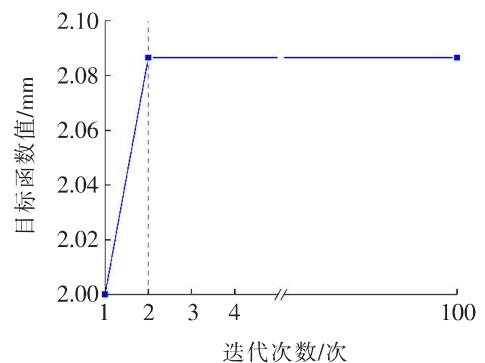


图 3 迭代过程

Fig. 3 Iteration process

显然, 遗传算法在第 2 次迭代就达到了收敛状态, 最终得到优化设计解为 $d = 2.0866 \text{ mm}$ 。优化设计的目的是实现设计变量的轻量化, 因此目标函数值也为 2.0866 mm 。由于目标函数值即为设计变量值, 所以只对 4 个约束函数的近似

模型的精度进行对比分析。将优化设计解 $d = 2.0866 \text{ mm}$ 分别代入近似模型和响应面模型,当随机变量取其期望值,区间变量取其名义值时,得到的约束函数响应值如表 3 所示。

表 3 近似模型与响应面模型的比较

Table 3 Comparison between approximate model and response surface model

模型	g_1 / J	$g_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	g_3 / mm	g_4 / mm
近似模型	40.90	350.13	76.75	53.64
响应面模型	42.40	351.24	77.07	53.73
误差/%	3.67	0.32	0.42	0.17

不难看出,使用近似模型和响应面模型得出的约束值比较接近,只有针对前纵梁总能量吸收的近似模型的相对误差为 3.67%,略高于近似模型给定的允许误差。因此,将此时的优化设计解及对应的前纵梁总能量吸收响应值加入到对应的近似模型样本中,进行局部加密,再次对优化设计问题求解,其迭代过程如图 4 所示。

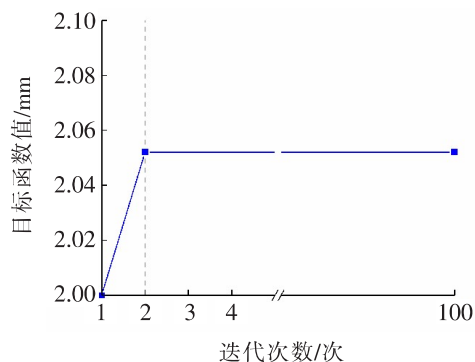


图 4 一次局部加密后的迭代过程

Fig. 4 Iteration process after once local densifying

从图 4 可以看出,遗传算法依然在第 2 次迭代就达到了收敛状态,最终得到的优化设计解为 $d = 2.0521 \text{ mm}$,优化目标值也为 2.0521 mm 。

为了探究此时近似模型的精度,将优化设计解 $d = 2.0521 \text{ mm}$ 分别代入近似模型和响应面模型进行计算,并比较两者的误差,结果如表 4 所示。很显然,4 个约束函数响应值的误差均在 1% 以内,远低于给定的允许误差 3%。因此,可以认为近似模型精度较好,使用近似模型求得的优化设计解真实有效。

表 4 一次局部加密后近似模型与响应面模型的对比

Table 4 Comparison between approximate model and response surface model after once local densifying

模型	g_1 / J	$g_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	g_3 / mm	g_4 / mm
近似模型	40.80	351.09	76.00	54.01
响应面模型	40.97	350.00	75.72	53.92
误差/%	0.42	0.31	0.37	0.17

4 结论

针对基于混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计中存在的导致求解效率低下的嵌套问题,本研究提出了一种基于混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计方法。

1) 建立了基于概率—区间混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计问题的数学模型,并分析了嵌套情况。

2) 提出了一种嵌套解耦策略,将求解效率低下的嵌套问题转化为单层可靠性优化设计问题,避免了混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计问题的嵌套求解。

3) 为了减少数值模型的计算耗时,基于径向基函数构建了近似可靠性优化设计问题,并利用局部加密策略保证优化设计解的精度。

综上所述,本研究提出的基于混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计方法能够在保证车辆耐撞性和可靠性的情况下实现快速求解,对汽车生产过程中结构耐撞性的可靠性优化设计具有一定的参考价值。但由于条件有限,本研究并未进行实车碰撞试验,且本方法只涉及单目标可靠性优化设计问题,而工程实践中不乏对多个目标进行优化求解。因此,下一步的研究工作将围绕实车碰撞试验及多目标混合模型汽车结构耐撞性的可靠性优化设计问题展开。

〔参考文献〕

- [1] 廖兴涛,张维刚,李青,等. 响应表面法在薄壁构件耐撞性优化设计中的应用研究[J]. 工程设计学报, 2006(5):24-28.
LIAO Xing-tao, ZHANG Wei-gang, LI Qing, et al. Application research of response surface methodolo-

- gy in thin-walled structural optimization design in crashworthiness[J]. Journal of Engineering Design, 2006(5):24-28.
- [2] 邳薇,崔新涛,王树新. 基于 Kriging 模型的汽车车门抗撞性优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(1):34-36.
- PI Wei, CUI Xing-tao, WANG Shu-xin. Optimal design of car door for structural crashworthiness based on the Kriging model[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2007(1):34-36.
- [3] 陈新,雷飞,陈国栋,等. 基于高强度钢选型及成本控制的车顶结构耐撞性优化设计[J]. 中国机械工程, 2013(1):119-124.
- CHEN Xin, LEI Fei, CHEN Guo-dong. Optimal design of roof structural crashworthiness based on selection of high strength steel and its cost control[J]. China Mechanical Engineering, 2013(1):119-124.
- [4] 武和全,毛鸿锋,曹立波. 汽车侧面碰撞车门可靠性优化设计[J]. 公路交通科技, 2016(8):146-151.
- WU He-quan, MAO Hong-feng, CAO Li-bo. Optimal design of reliability of car door against side impact[J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development, 2016(8):146-151.
- [5] 曹立波,刘衡,武和全,等. 某混合动力汽车侧面碰撞中 B 柱可靠性优化设计[J]. 汽车安全与节能学报, 2016,7(3):272-278.
- CAO Li-bo, LIU Heng, WU He-quan, et al. Reliability optimal design of B-pillar for a hybrid electric vehicle in side impact[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2016,7(3):272-278.
- [6] 吴斌,辛勇,叶盛. 基于耐撞性可靠性优化的 SUV 车架改进[J]. 机械设计与研究, 2015,31(1):160-164.
- WU Bin, XIN Yong, YE Sheng. Improvement analysis of the SUV frame for crashworthiness reliability optimization[J]. Machine Design & Research, 2015, 31(1):160-164.
- [7] 张勇,林福泳. 铝泡沫填充薄壁结构耐撞可靠性优化设计[J]. 机械工程学报, 2011,47(22):93-99.
- ZHANG Yong, LIN Fu-yong. Crashworthiness reliability design optimization of aluminum foam filled thin-wall structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(22):93-99.
- [8] 王琼,黄志亮. 含概率一区间混合不确定性的汽车正面碰撞可靠性优化设计[J]. 汽车工程, 2019,41(5):545-549,563.
- WANG Qiong, HUANG Zhi-liang. Reliability-based optimization for vehicle front crash with probability-interval mixed uncertainty[J]. Automotive Engineering, 2019,41(5):545-549,563.
- [9] 李方义,荣见华,胡林,等. 基于概率一凸集混合模型的汽车正面碰撞结构可靠性优化设计[J]. 振动与冲击, 2016,35(3):215-220,230.
- LI Fang-yi, RONG Jian-hua, HU Lin, et al. Reliability-based optimization design of structure subjected to vehicle frontal impact based on probability-convex hybrid model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(3):215-220,230.
- [10] Huang Z L, Jiang C, Zhou Y S, et al. Reliability-based design optimization for problems with interval distribution parameters[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2017,55(2):513-528.
- [11] Nocedal J, Wright S. Numerical optimization[M]. New York:Springer, 2006.
- [12] 张明. 结构可靠度分析:方法与程序[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- ZHANG Ming. Structural reliability analysis: methods and procedures[M]. Beijing:Science Press, 2009.