

DOI : 10.3901/JME.2014.17.171

结构耐撞性优化中径向基函数散布常数选取方法*

伊建军^{1, 2, 3} 李云鹏^{2, 3} 陈飙松^{2, 3} 张 盛^{2, 3}

(1. 中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司 武汉 430034 ;

2. 大连理工大学工程力学系 大连 116024 ;

3. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116024)

摘要：针对代理模型优化技术在结构耐撞性优化中的应用问题，开展了径向基函数和响应面的预测精度检测和适用性研究，并针对径向基函数中散布常数取值机制不明确的问题进行数值分析，提出基于优化计算的选取策略。具体实施为，先使用遗传算法(Genetic algorithm, GA)直接进行搜寻优化，得到的结果可认为是最优结果，并作为代理模型优化方法的参照；通过实例证实代理模型精度检测的必要性，并检验均匀试验设计、中心复合试验设计、析因试验设计在碰撞问题中的适用性；在构造径向基函数时将散布常数设为变量，再以几个随机样点处的数值结果为目标进行模型修正，得到修正的散布常数，代入构造的径向基函数中。结果表明该方案得到的散布常数能够使得径向基函数更好地表征结构耐撞性问题。

关键词：耐撞性；代理模型；径向基；散布常数

中图分类号：O347

Selection Method of Shaping Parameter of the Radial Basis Function in Structure Crashworthiness Optimization

YI Jianjun^{1, 2, 3} LI Yunpeng^{2, 3} CHEN Biaosong^{2, 3} ZHANG Sheng^{2, 3}

(1. Bridge Science Research Institute Ltd., China Railway Major Bridge Engineering Group, Wuhan 430034;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

3. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract : The prediction accuracy and applicability of the radial basis function (RBF) and the response surface method (RSM) are studied, and an optimization idea is put forward to solve the problem of selecting an applicable shaping parameter of the RBF model when the surrogate model technology is employed in structure crashworthiness optimization. The genetic algorithm (GA) is used to optimize the crashing energy absorption of a thin-walled structure and find the global optimum which can be viewed as the target of the surrogate model. The necessity of testing surrogate model's prediction accuracy via numerical examples is demonstrated and the applicability of several methods of design of experiments is tested. Thaping parameter of RBF model is treated as a variable, and a few random sample points are used to update radial basis function model suitable. The results show that the updated radial basis function model will be more suitable for structure crashworthiness problem.

Key words : crashworthiness ; surrogate model ; radial basis function (RBF) ; shaping parameter

0 前言

在进行大型复杂系统和多学科优化时，为解决优化迭代次数或试验次数过多、计算量过大，或需要对没有显式函数模型的各学科问题进行优化设计的难题，引入了代理(近似)模型优化技术。所谓代

理模型是指通过较小的计算量或试验代价构造出代理函数来近似表征实际问题的一种近似的数学方法，而基于代理模型的优化技术则称为代理模型优化技术。在结构的耐撞性能研究方面，由于试验研究的周期和花费代价很大，近些年随着计算机的发展和 CAE 技术的成熟，在前中期研究中多采用有限元仿真技术以提高效率。然而，由于结构碰撞问题的高度非线性、数值噪声问题，使得传统基于梯度信息求解的优化算法较难适用。后期的智能搜寻式优化算法可以不受高度非线性和数值噪声这两点因

* 国家自然科学基金(11232003, 91315302)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2010CB832704)、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2012AA050901)和高等学校博士学科点专项科研基金(20130041110050)资助项目。20130910 收到初稿, 20140612 收到修改稿

素的影响,但智能算法的一个显著特点是计算量较大。在对结构碰撞问题进行仿真分析时,一个几千自由度的结构在一般个人计算机上进行一次碰撞分析的时间代价是十几分到几十分钟不等,智能算法的优化迭代需要进行几百次,或更多的计算。由于智能算法的优化计算代价非常大,研究学者通常采用代理模型优化技术进行结构耐撞性优化研究^[1-4],然后再以实际的物理试验进行后期验证,这就极大缩短结构耐撞性研究和设计的周期,加快了新产品开发的进程。

在目前研究结构耐撞性所使用的代理模型优化方法中,仍有一些方面值得研究与探讨,比如响应面模型函数现有评价机制的局限性^[5];代理模型评价的必要性;代理模型的内部参数设置问题,比如径向基函数中散布常数的取值^[6-8];以及不同试验设计方法在结构耐撞性问题中的适用性。其中,散布常数这一参数对径向基函数拟合效果的影响非常大,但是在以往使用径向基函数时,工程或研究人员多依靠经验或根据实际问题粗略估值,这就明显不够严谨和可靠。

本文针对上面提到的一些问题做了一些探索性研究。具体是针对一薄壁直梁碰撞模型,首先使用直接优化方法(设置优化算法为遗传算法)进行以比吸能最大为目标的单目标无约束优化,将其优化结果作为代理模型方法的参照,然后研究响应面和径向基函数的评价问题,并通过实例证实代理模型精度检测的必要性,以及各种试验设计方法的适用性,接着依据优化思路提出了径向基模型函数的散布常数选取策略,并验证给出的策略。

1 基本理论

本文将在结构耐撞性领域对于响应面模型和径向基模型的应用问题进行一些研究,尤其是径向基函数中散布常数选择问题的研究,因此需要对这两种近似模型的数学理论及公式进行简要介绍。

响应面(Response surface method, RSM)是利用回归分析和方差分析确定设计变量和响应的关系。其具有良好的连续性和可导性,能较好地去除数值噪声的影响(最小二乘法)。该方法具有数学基础理论扎实,系统性、实用性强,适用范围广的特点,已成为复杂工程系统设计的有力工具。响应面的数学模型为

$$Y(x) = \tilde{y}(x) + \varepsilon = \sum_{i=1}^m \alpha_i \varphi_i(x) + \varepsilon(x) \quad (1)$$

式中 $\tilde{y}(x)$ ——近似函数,此处为拟合的响应面;
 ε ——拟合的综合误差,包括建模误差和随机误差等;
 $\varphi_i(x)$ ——响应面的基函数;
 m ——基函数 $\varphi_i(x)$ 的数目;
 α_j ——各项基函数的系数, $i=1,2,\dots,m$ 。

利用最小二乘法,使得近似函数在随机样点处误差(ε)平方求和最小,求解基函数系数 α_i 。

径向基函数神经网络,简称径向基函数(Radial basis function, RBF),是一种具有局部逼近能力的三层前向神经网络模型,由输入层、隐含层和输出层组成。该模型求解算法常用的有正交最小二乘算法和 k-means 算法。其数学基本形式为

$$y = \sum_{i=1}^n \beta_i \phi(r_i, C) \quad (2)$$

式中 $r_i(x)$ ——基函数,为 x 与第 i 个样本点 x_i 在设计空间上的欧拉范数;
 $r_i(x) = \|x - x_i\|$;
 $\|\bullet\|$ ——欧拉范数;
 n ——基函数 $r_i(x)$ 的数目;
 β_i ——基函数的加权系数, $i=1,2,\dots,n$;
 C ——散布常数,或称为控制参数。

在径向基函数中,常用的基函数有薄板样条曲线(Thin-plate spline, THS),多二次基函数(Multi quadric, MQ),逆多二次基函数(Inverse multi quadric, IMQ)及高斯基函数(Gauss)等。下面为研究径向基函数时所涉及三个基函数形式

$$\text{MQ: } \phi(r) = \sqrt{r^2 + C^2} \quad (3)$$

$$\text{IMQ: } \phi(r) = 1/\sqrt{r^2 + C^2} \quad (4)$$

$$\text{Gauss: } \phi(r) = \exp(-r^2/C^2) \quad (5)$$

2 薄壁直梁耐撞性优化模型

本文采用的碰撞模型为刚性板轴向匀速冲击金属材料的薄壁直梁。其长度 L 为 400 mm,截面外围方形边长 a 为 80 mm,边角有小方形。如图 1 所示的刚性板压缩薄壁直梁,直梁的左端固定,自由度全部约束,右端受刚性平板压缩,刚性板只保留压缩方向上的自由度,以 10 mm/ms 的恒定速度沿直梁轴向压缩。图 2 为薄壁厚度 t 为 2 mm,边角边长 b 为 20 mm 时薄壁模型在碰撞过程中的冲击力-位移曲线,由曲线波动可以看出该结构具有良好的冲击力效率。

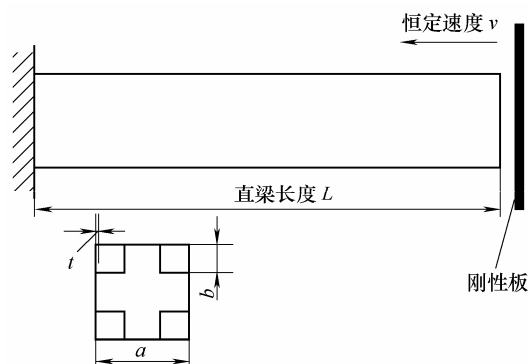


图1 刚性板压缩薄壁直梁

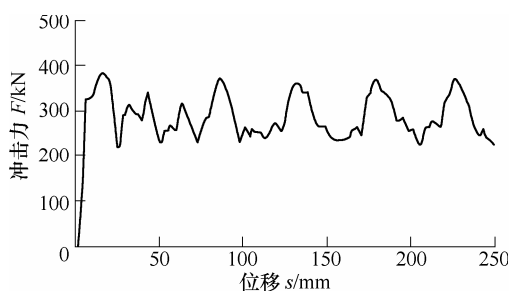


图2 碰撞过程中冲击力-位移曲线

利用 ANSYS/Preprocessor 进行参数化建模，采用四节点 Belytschko-Tsay 壳单元建立有限元模型。Belytschko-Tsay 壳单元是 LS_DYNA 中最快速的显示动力学壳单元，它基于 Mindlin-Reissner 假设，包括了横向剪切力。为了准确描述结构单元的局部变形以及保证应变能信息的完整性，厚度方向上积分点数取 5 个；为了保证较高的计算速率，单元面内取 1 个积分点。

对于划分单元的问题，单元的尺寸可根据 WERZBICKI 等^[9]的研究，方形薄壁直梁的平均折叠半径为 $r = 0.72a^{1/3}t^{2/3}$ ，其中 a 为方形截面边长， t 为薄壁厚度，则单元尺寸应取 $l \leq 0.5\pi r$ (约 6 mm)。为保证计算精确，这里单元特征长度取为 3 mm。在刚性板匀速压缩薄壁直梁的过程中，直梁的自身接触采用单面自动接触 ASSC 模拟，动、静摩擦因数取 0.2；刚性板和直梁间采用面-面自动接触 ASTS 模拟，动、静摩擦因数均取 0.3；薄壁壳单元的本构行为采用分段线性塑性模型 (*MAT_24) 和 Von-Mises 各向同性塑性法则。

碰撞模型采用低碳钢材料参数，其力学性能：弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3，初始屈服应力为 331 MPa，强度极限为 531 MPa；低碳钢应力-应变曲线如图 3 所示。

本文对该碰撞模型进行优化设计，以探讨试验设计、响应面和径向基函数的适用性以及径向基函数中散布常数的取值问题，因此优化模型取简：建

立以边角方形边长和薄壁厚度为设计变量，以薄壁直梁碰撞比吸能最大为目标的单目标无约束优化模型。具体的数学模型见式(6)

$$\begin{aligned} \max \quad & E(t, b) \\ \text{s.t.} \quad & 1.2 \text{ mm} \leq t \leq 2.4 \text{ mm} \\ & 15 \text{ mm} \leq b \leq 30 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 E ——薄壁直梁碰撞比吸能；
 t ——薄壁直梁壁厚；
 b ——薄壁直梁边角方形边长。

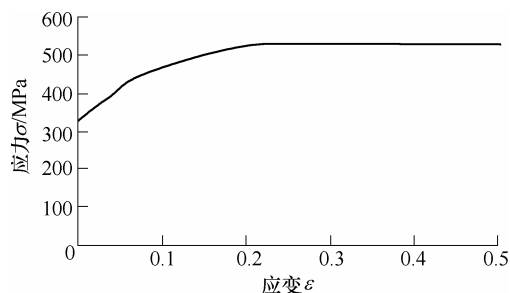


图3 低碳钢应力应变曲线

本文使用的优化计算软件为 SiPESC.OPT^[10]。SiPESC.OPT 是由大连理工大学工程力学系 SiPESC 软件所自主研发的通用优化求解软件。该软件集成了拟牛顿法、线性规划、二次规划、遗传算法等多种优化算法，这些优化算法的初始程序来自于成熟的开源优化代码库，并有所调整和改善，经过了大量经典算例的验证，能够保证优化计算的准确和可靠性。另外，它提供了试验设计、近似模型、灵敏度分析、子系统集成、文本文件解析及脚本语言 (JavaScript) 等功能模块，具有操作简单、功能全面及可扩展性强等特点。SiPESC.OPT 作为通用性的优化软件工具，能够集成 CAD、CAE 等方面的相关商业程序在较宽泛的领域进行多种优化设计，比如，用于单目标或多目标、线性或非线性及多学科等复杂优化问题的研究与优化计算。

3 直接优化法

对于一个可以进行优化的优化模型，一般来说，总是存在最优解的，很多情况下都可以利用优化算法求得最优解或者非常接近最优解的结果。然而，采用代理模型优化技术进行结构耐撞性优化设计研究时，一般只能得到较准确的结果，准确度是与代理模型的拟合精度相关的。由于本文的后面涉及响应面和径向基函数两种代理模型结合几种试验设计方法的相关优化研究，因此在这里试图找出前述优化问题的最优结果或准最优结果，以作为后面研究的参照结果。

为得到最优结果或准最优结果，就需要对该优

化模型直接求解,传统梯度算法是失效的,只能采用智能搜寻算法。这里采用 SiPESC.OPT 具有的遗传优化算法(GA),GA 算法可参阅文献[11]。具体是以薄壁结构的壁厚和边角方形边长为设计变量,以结构碰撞比吸能最大为目标进行优化计算,由于设计空间是二维的,可认为这个直接优化结果是非常接近理论上最优的,因此作为后面代理模型优化研究的参照结果。具体实施是编写优化模型的脚本文件,通过 SiPESC.OPT 运行脚本文件调用非线性有限元软件 ANSYS/LS_DYNA 对前述模型进行直接优化计算,优化流程见图 4。

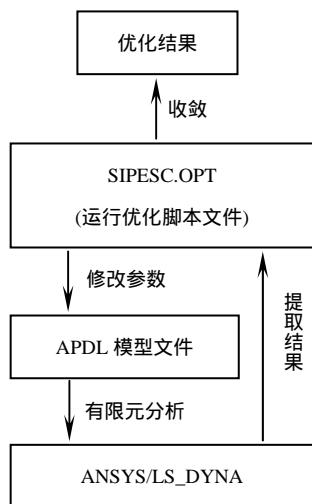


图 4 SiPESC.OPT 结合 LS_DYNA 直接优化流程图

该优化脚本需要包括设计变量的定义与范围设置、调用商用程序计算、在计算文件中的提取结果、优化算法的设置、优化的迭代计算,只需修改 SiPESC.OPT 自动生成的优化脚本即可完成。GA 的设置:循环终止的最大迭代代数 30 代;初始种群数目为 30 个;交配概率为 0.9;变异概率为 0.01。对于该薄壁碰撞模型,每次分析时间估计为 18 min,共需计算 900 次,计算时间约为 11.25 天。在实际计算过程中,在第 7 代以后,结果不再变化,到第 15 代时手动截止,总计时间为 5.5 天,优化计算迭代曲线如图 5 所示。由此可见,使用智能算法进行结构耐撞性优化时,较大或复杂模型的计算时间代价是难以承受的,因而人们转而寻求代理模型或近似函数的帮助进行高效的优化设计。

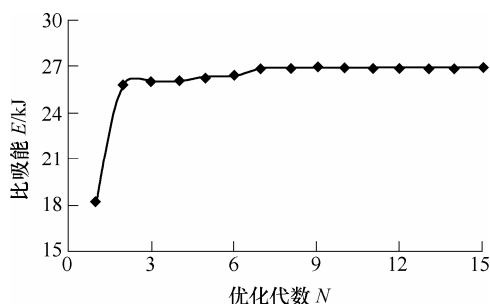


图 5 遗传算法优化迭代曲线

具体的优化结果见表 1,利用遗传(GA)算法进行迭代优化计算得到最大比吸能(Direct optimization, D_OPT),D_OPT 相比初始结构增加了 48.15%,优化效果非常显著,故将该结果作为后面代理模型相关研究的参照数据,此时壁厚增加 83.77%,边角方形边长增加 3.63%。

表 1 直接优化法结果

模型	壁厚 t/mm	边角方形边长 b/mm	比吸能 E/J
初始结构	1.30	23.00	18 166.5
最大比吸能	2.39	23.85	26 912.7
相对增加(%)	83.77	3.63	48.15

另一方面,上述直接优化方案的实施也证实了自主优化软件 SiPESC.OPT 集成商用软件进行集成优化计算的可行性与有效性。

4 代理模型精度检测及径向基模型散布常数的选取

在构造实际问题的近似数学模型之前需要选取一定量的试验样点,不同试验设计方法选取的试验样点在空间中的分布情况是不一样的,也将导致近似模型拟合效果的差别。故本文针对均匀试验设计、中心复合试验设计和析因试验设计方法^[12]这三种试验设计方法,研究其在结构耐撞性问题上的适用性。前述耐撞优化模型的设计空间为二维,考虑实际情况,可以均取为九个设计样点。图 6 为均匀试验设计取点的分布图,表 2 为试验设计样点与相应的有限元分析值,图 7 为后面进行预测精度检查时相应 9 个随机样点的分布图。接下来,使用二阶响应面 RSM2 和分别以 MQ、IMQ、Gauss 为基函数的三种径向基模型函数 MQ-RBF,IMQ-RBF, Gauss-RBF 拟合出近似模型,并基于拟合出的近似模型进行优化计算,共有 12 种组合方案。

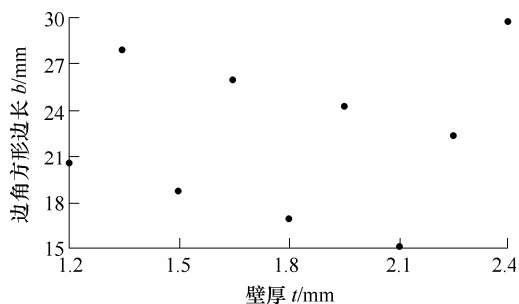


图 6 均匀试验设计的取点分布

在有些文献中,有时并没有对代理模型进行足够精确的预测精度检查,比如对于响应面大多只采用确定性系数和修正确定性系数进行检验,若这两

个系数接近于 1，且近似函数得到的优化结果与相应数值结果之间相对误差很小，则认为代理模型优化得到的结果是较准确的。但这两个系数只针对设计样点本身的拟合效果，对于近似函数在其他未知区域的预测精度则不能判断。另外，对于三个不同基函数的径向基模型，模型通过所有样点，即在样点处预测值的误差为 0，只能通过其在随机点或其他方式的预测方法来评估代理模型的有效性和精确性。因此，将通过随机样点处近似模型的预测值与相应仿真分析值之间的误差来评估近似模型的预测精度，随机样点如图 7 中分布。

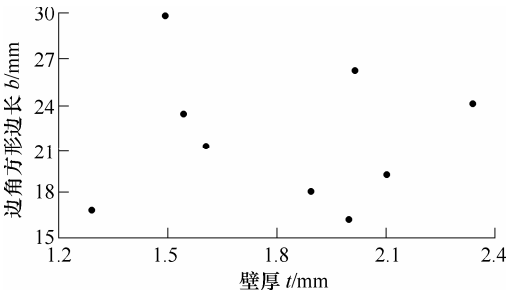


图 7 9 个随机样点分布

由表 2 中数据拟合的二阶响应面 RSM2 为

$$E = -9\,423.2 + 4\,490.4t + 1\,778.5b - 558.3t^2 + 225.4tb - 47b^2 \tag{7}$$

式(7)响应面的确定性系数 R^2 为 0.991 936，修正确定性系数 R^2_{adj} 为 0.987 521，说明该模型在样点处的拟合效果是非常好的。为了说明近似模型预测精度检测的必要性和重要性，首先给出基于这些组合方案的预测优化结果。

表 2 均匀试验设计样点对应有限元分析值

序号	壁厚 t/mm	边角方形边长 b/mm	比吸能 E/J
1	1.20	20.625	17 124.1
2	1.35	28.125	17 327.1
3	1.50	18.750	19 635.4
4	1.65	26.250	20 078.8
5	1.80	16.875	20 391.1
6	1.95	24.375	23 305.7
7	2.10	15.000	20 561.7
8	2.25	22.500	25 659.7
9	2.40	30.000	25 416.1

表 3 各种代理模型优化方案的预测优化结果及误差

试验设计	代理模型	壁厚 t/mm	边角方形边长 b/mm	预测 E/J	计算 E/J	相对误差 (%)	接近最大比吸能 D_OPT 的程度 (%)
均匀试验设计	RSM2	2.40	24.59	26 749.1	26 749.1	1.27	99.39
	MQ-RBF	2.40	22.83	26 223.8	26 625.1	-1.51	98.93
	Gauss-RBF	2.23	22.54	25 698.3	25 571.9	0.46	95.02
	IMQ-RBF	2.23	22.50	25 663.7	25 404.8	1.01	94.40
中心复合试验设计	RSMZ	2.09	30.00	26 394.6	23 348.7	13.05	86.76
	MQ-RBF	2.40	30.00	27 988.2	25 416.1	10.12	94.44
	Gauss-RBF	1.80	29.98	27 070.0	20 965.2	29.12	77.90
	IMQ-RBF	1.82	29.87	27 198.5	21 265.2	27.90	79.02
析因试验设计	RSMZ	2.40	26.19	26 504.1	25 197.7	5.18	93.63
	MQ-RBF	2.40	22.56	27 067.4	26 890.6	0.66	99.92
	Gauss-RBF	2.40	22.49	27 061.6	27 220.3	-0.58	101.14
	IMQ-RBF	2.40	22.50	27 062.1	27 138.1	-0.28	100.84
最大比吸能 D_OPT		2.39	23.84	26 912.7	26 912.7	0	100

注：径向基模型函数的散布常数初始取为 1。

表 4 代理模型(均匀试验设计取点)在随机样点处的精度 %

序号	均匀试验设计				中心复合试验设计				析因试验设计			
	RSM2	MQ-RBF	Gauss-RBF	IMQ-RBF	RSM2	MQ-RBF	Gauss-RBF	IMQ-RBF	RSM-RBF	MQ-RBF	Gauss-RBF	IMQ-RBF
1	0.34	-5.75	-25.72	-11.62	-15.46	-20.45	-92.31	-37.06	-0.82	-4.46	-90.35	-34.91
2	4.43	-7.98	-21.72	-11.89	8.25	-5.51	-89.78	-24.58	5.60	-3.52	-100.00	-45.37
3	2.54	-2.76	-34.36	-6.27	5.57	-2.11	-81.38	-17.79	4.29	1.45	-82.63	-18.71
4	6.29	2.32	-14.25	0.95	-8.88	-12.07	-40.52	-12.23	6.42	-1.92	-80.90	-22.00
5	-6.78	25.80	-36.90	11.46	29.11	43.21	32.94	41.77	-0.46	-0.48	-1.61	-1.09
6	1.13	18.50	-30.57	14.42	9.67	4.10	-43.94	-4.99	3.44	1.13	-48.56	-9.30
7	3.25	-1.81	-27.61	-7.66	-5.82	-12.06	-64.25	-23.86	3.58	-5.42	-100.00	-43.25
8	-4.11	-17.49	-52.28	-25.12	-19.12	-24.37	-98.61	-42.80	-5.00	-12.92	-100.00	-50.03
9	-7.33	9.18	-13.98	5.58	-2.58	1.87	-9.27	0.71	-2.69	-5.81	-97.44	-29.49
平均值 e	4.02	10.18	28.60	10.55	11.61	13.97	61.44	22.87	3.59	4.12	77.94	28.24

注：|e|为在各点处误差取绝对值后所求的平均值。

在以上的计算中,三种径向基函数的散布常数均取为 1,由表 3 中数据可以看出均匀试验设计和析因试验设计取点时的方案,其优化值与相对应的仿真计算结果非常接近。析因试验设计和均匀试验设计取点时,基于近似模型得到的优化结果较好,甚至达到前面直接优化方法得到的结果。然而,中心复合试验设计取点时,得到的优化结果较差,包括相对稳定的响应面模型。在表 4 中二阶响应面模型 RSM2 在随机样点处误差绝对值的平均值达到 11.61%,最大误差达到 29.11%,是三种试验设计中最差的,可以得出中心复合试验设计方法不适用于类似该碰撞问题的结论。

表 3 数据显示均匀和析因试验设计取点时相应的优化结果较好,但是,在表 4 数据中可以观察到,除了均匀和析因试验设计下二阶响应面函数外,其他组合的预测误差都非常大,比如均匀试验设计情况下,高斯函数径向基模型 Gauss-RBF 的平均预测误差达到 28.599%,最大误差达到 52.280%,完全丧失了表征该问题的有效性。这就说明了近似模型预测精度检测的必要性和重要性。

径向基函数的拟合效果是很差的,这个问题与其散布常数的取值是有直接关系的。目前没有散布常数的取值方法,只是凭借对问题的理解和研究经验大致估计出一个值,具有盲目性。因此本文设想使用优化的思路:第一步,随机选取几个(此处取 4 个)不同于拟合函数样点处的点,计算每个点的预测值与相应仿真值之间的相对误差,求得相对误差绝对值之和;第二步,将其转化为优化问题,以散布常数 C 为变量,以相对误差绝对值之和最小化为目标。第三步,求出散布常数 C ,代入相应代理模型,在上面的九个随机样点处再进行检验。具体的优化

模型如下

$$\min E(C) = \sum_{i=1}^m \left| \frac{F_i(C) - f_i}{f_i} \right| \quad (8)$$

s.t. $0 < C < 50$

式中 $E(C)$ ——相对残差;

m ——随样点数,此处为 4;

$F_i(C)$ ——第 i 个预测值;

f_i ——第 i 个仿真值。

表 5 给出了通过该优化模型得出的散布常数 C 的参考数值。例如在均匀试验设计方法取点时,多二次函数径向基模型在随机点处的相对残差最小值为 0.241 78,随机样点为 9 个,平均每个点误差在 3%以内,故散布常数 C 为 8.516 的模型拟合效果是相对精确的(表 6)。无论在使用哪种试验设计方法时,高斯函数径向基模型 Gauss-RBF 的相对残差最小值都非常大,这意味着 Gauss-RBF 不适宜作为类似该耐撞问题的近似模型;而相对误差绝对值和可以达到 0.3 左右及 0.3 以下的代理模型可用于此次结构耐撞性优化问题的近似函数。

表 5 径向基模型散布常数 C 参考数值

试验设计类型	RBF 模型基函数类型	散布常数 C	相对残差最小值
均匀试验设计	MQ-RBF	8.516	0.242
	Gauss-RBF	0.712	964.738
	IMQ-RBF	9.137	0.223
中心复合试验设计	MQ-RBF	8.964	1.085
	Gauss-RBF	2.364	461.413
	IMQ-RBF	1.288	1.137
析因试验设计	MQ-RBF	9.189	0.315
	Gauss-RBF	6.167	13 663.600
	IMQ-RBF	17.004	0.304

表 6 径向基模型 MQ-RBF(均匀试验设计)取不同散布常数 C 时的精度对比

序号	壁厚 t/mm	边角方形边长 b/mm	MQ-RBF 预测值 E/J	仿真值 E/J	误差($C=1$)(%)	误差($C=8.516$)(%)
1	2.33	24.04	26 671.1	26 167.4	-5.74	1.92
2	2.01	26.26	23 097.8	22 551.3	-7.98	2.42
3	1.60	21.17	20 185.3	20 071.6	-2.76	0.57
4	1.99	16.30	20 964.0	19 891.2	2.32	5.39
5	1.49	29.93	19 369.0	18 483.1	25.79	4.79
6	1.54	23.31	19 743.2	19 966.0	18.50	-1.12
7	1.89	18.19	21 967.3	20 936.9	-1.81	4.92
8	2.10	19.20	23 829.4	24 456.9	-17.49	-2.57
9	1.29	16.90	17 518.6	18 328.1	9.18	-4.42
误差绝对值平均(%)					10.18	3.12

均匀试验设计取样点时，拟合出二阶响应面的相对准确性在前面已通过较高的多重拟合系数、随机样点检测精度和预测优化结果的良好效果得以证实。通过图 8 的函数图形对比；表 6 中调整散布常数后的径向基代理模型在随机样点处的相对误差；表 7 中良好的预测优化结果数据，这三点因素证实了本文的径向基模型散布常数优选策略是可行的和有效的。

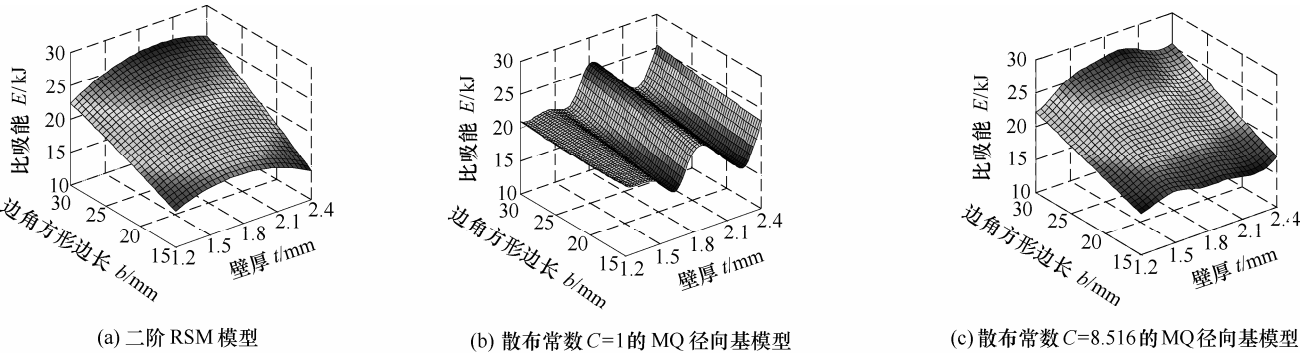


图 8 代理模型函数(均匀试验设计)图形示例

5 结论

(1) 针对薄壁直梁的耐撞性优化设计，首先通过 SiPESC.OPT 调用 LS_DYNA，并使用遗传(GA)算法直接进行优化，并将得到的优化结果作为后面研究的参考数据。研究证实了通过 SiPESC.OPT 集成商用程序进行结构耐撞性优化设计的可行性；利用智能算法进行耐撞性优化时，计算代价过大。

(2) 实例验证了均匀、中心复合、析因三种试验设计方法在碰撞问题上的适用性和近似模型预测精度检查的必要性。通过优化方法选取了对径向基模型函数拟合效果影响较大的散布常数值，并加以对比分析。结果表明，均匀和析因试验设计在碰撞问题上具有较好的适用性；散布常数的取值对径向基函数的拟合效果影响较大，通过优化策略得到的散布常数使得径向基函数能更好地表征实际问题。

(3) 本文工作基于自主的集成优化软件 SiPESC.OPT 开展，该系统提供了优化算法、试验设计/代理模型、脚本语言功能，构建了灵活、方便的优化计算环境；工作表明该优化系统也同样适用于其他学科/多学科优化计算研究工作。

参 考 文 献

[1] KURTARAN H ,ESKANDARIAN A ,MARZOUGUI D , et al. Crashworthiness design optimization using

表 7 散布常数 C 为 8.516 的 MQ 径向基模型(均匀试验设计)优化结果与 D_OPT、RSM2_OPT 方案对比

方案	厚度 t/mm	四角方形 边长 b/mm	方案优化 值 E/J	仿真比吸 能 E/J	误差(%)
D_OPT	2.39	23.84	26 912.7	26 912.7	0.00
RSM2_OPT	2.40	24.59	26 271.9	26 749.1	1.82
MQ	2.40	24.00	27 232.9	26 891.9	1.27

successive response surface approximations[J]. Computational Mechanics , 2002 , 29 : 409-421.

[2] 王海亮,林忠钦,金先龙. 基于响应面模型的薄壁构件耐撞性优化设计[J]. 应用力学学报 ,2003 ,20(3) :61-65. WANG Hailiang ,LIN ZHongqin ,JIN Xianlong. Optimal design of thin-walled sections for structural crashworthiness based on the response surface model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics , 2003 , 20(3) : 61-65.

[3] FANG H ,RAIS-ROHANI M. A comparative study of meta-modeling methods for multi-objective crashworthiness optimization[J]. Computers and Structures , 2005 , 83 : 2121-2136.

[4] FORSBERG J ,NILSSON L. Evaluation of response surface methodologies used in crashworthiness optimization[J]. International Journal of Impact Engineering , 2006 , 32 : 759-777.

[5] 张勇. 基于近似模型的汽车轻量化优化设计方法[D]. 长沙：湖南大学，2009. ZHANG Yong. Optimization design method of vehicle lightweight based on approximate model[D]. Changsha : Hunan University , 2009.

[6] FANG H ,RAIS-ROHANI M ,et al. A comparative study of meta-modeling methods for multi-objective crashworthiness optimization[J]. Computers and Structures , 2005 , 83(25-26) : 2121-2136.

- [7] 李恩颖. 近似模型优化体系关键技术研究及应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- LI Enying. The key of research and application of Metamodel-based optimization[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [8] XUE Deyi, ZHAO Dong. A comparative study of meta-modeling methods considering sample quality merits[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 42(6): 923-938.
- [9] WEIRZBICKI T, ABRAMOWICZ W. Development and implementation of special elements for crash analysis[R]. SAE, Paper 880895, 1988, doi: 10.4271/880895.
- [10] 杨春峰, 陈飙松, 张盛, 等. 通用集成优化软件 SiPESC.OPT 的设计与实现[J]. 计算机辅助工程. 2011, 20(4): 42-48.
- YANG Chunfeng, CHEN Biaosong, ZHANG Sheng, et al. Design and implementation of general integrated optimization design software SiPESC.OPT[J]. Computer Aided Engineering, 2011, 20(4): 42-48.
- [11] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究. 2008, 25(10): 2911-2916.
- GE Jike, QIU Yuhui, WU Chunming, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(10): 2911-2916.
- [12] 杨德. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- YANG De. Design and analysis of experiments[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002.
-
- 作者简介: 伊建军, 男, 1988 年出生, 助理工程师。主要研究方向为结构优化, 桥梁工程。
E-mail: 605816291@qq.com
- 李云鹏, 男, 1972 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为虚拟现实, 计算可视化等。
E-mail: lyp@dlut.edu.cn
- 陈飙松, 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为结构有限元、结构优化及软件系统等。
E-mail: chenbs@dlut.edu.cn
- 张盛 (通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为结构有限元及软件系统。
Email: zhangs@dlut.edu.cn