

文章编号:1000-582X(2010)09-014-05

序列响应面方法在薄壁梁轻量化设计中的应用

张 勇¹, 李光耀²

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘 要:提出将近似模型引入到薄壁梁的耐撞性优化设计中,并利用序列响应面优化方法对近似模型进行优化。针对基于有限元网格模型的设计变量难于参数化的问题,开发了相应的程序将薄壁梁的材料、截面尺寸及焊点布置等参数进行参数化建模。研究表明:优化设计改善了薄壁梁的吸能特性,使它的质量大大减轻;基于近似模型的优化算法能较大程度地提高优化效率。

关键词:轻量化;序列响应面;优化设计;薄壁梁;近似模型

中图分类号:TG302; TP399

文献标志码:A

Application of sequential response surface method to thin-wall beam lightweight design

ZHANG Yong¹, LI Guang-yao²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, P. R. China)

Abstract: It is proposed to introduce approximate model method to crashworthiness optimization design of thin-wall beam, and the approximate model can be optimized by using sequential response surface method. In order to solve the parameterization design problem of finite element model, a parameterization model about material, cross-section size and spotweld of thin-wall beam is established by developing corresponding procedures. The results show that optimization design can not only improve the performance of absorbing energy of thin-wall beam, but also reduce the weight greatly; the approximate model method can greatly improve optimization efficiency.

Key words: lightweight; sequential response surface; optimization design; thin-wall beam; approximate model

节约能源、减少环境污染成为世界汽车工业界亟待解决的两大问题。汽车轻量化是汽车降低油耗,减少排放最为有效的途径,因此,如何减轻汽车质量、降低燃油消耗与排放污染已成为当前汽车工

业发展所面临的核心问题。研究数据表明,若汽车整车质量降低 10%,燃油效率可提高 6%~8%,其油耗将减少 10%,排放量降低 5%~6%^[1-2],汽车轻量化已成为目前汽车行业研究热点之一,也是当前

收稿日期:2010-04-18

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60635020);汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金资助项目(30915003)

作者简介:张勇(1980-),男,湖南大学博士,主要从事汽车碰撞安全性、轻量化以及数值优化方法研究。

李光耀(联系人),男,湖南大学教授,博士生导师,(E-mail)gyli@hnu.cn.

汽车工业发展的重要趋势。

车身薄壁纵梁是汽车车身承载结构的主要承载部件,同时,在汽车碰撞发生时,它也是受到强烈撞击而产生塑性变形的的主要吸能部件。其变形模式和吸能特性不仅直接决定了车体在碰撞时的加速度和力的响应,而且也直接影响到车内乘员的安全。因此,薄壁纵梁是影响车身安全性的关键部件,开展车身薄壁纵梁结构优化设计研究,使其在满足车体耐撞吸能性要求的同时减少车体重量具有重要理论意义和工程实用价值。

近年来,随着数字模拟技术、优化理论的逐渐成熟以及计算机技术的快速发展,怎么把有限元技术结合优化理论对车身零部件进行耐撞吸能性设计已经成为国内外学者的研究前沿之一。但是,直接在有限元模型的基础上开展优化设计研究仍然存在以下几个关键性问题:1)优化过程是一个反复迭代运算的过程,然而非线性有限元分析中,单次计算过程往往需要较长的计算时间,迭代收敛过程导致仿真计算工作量呈几何级数增长,势必造成优化问题的瓶颈——计算时间太长;2)碰撞仿真分析是一个涉及高度非线性、大变形、大位移的过程,具体的设计目标的导数绝大多数是不连续的,其灵敏度会变得高度非线性,传统的基于梯度的优化方法难以找到正确的优化解。

针对汽车薄壁件的优化设计研究,国内外的一些学者做了相关的研究工作,Redhe, Forsberg 和 Nilsson^[3-4]等人对薄壁吸能圆筒的厚度及其材料参数进行了耐撞吸能性优化设计,钟志华、林忠钦、朱西产、隋允康^[5-8]等人都在汽车的薄壁构建的吸能性仿真方面作了卓有成效的工作,但是,由于基于有限元模型参数化设计至今仍存在诸多困难,因此,很少有研究工作是针对薄壁纵梁的形状几何尺寸、焊点间距等设计参数开展的优化设计,并通过该结构优化方法来确定薄壁结构的最佳几何尺寸以及最佳焊点布置间距。

针对上述问题,笔者提出将试验设计、近似模型、数值优化技术相结合,构建了基于薄壁纵梁耐撞性的轻量化设计方法,较好地达到了薄壁梁轻量化设计的目标。

1 序列响应面优化方法

响应面方法是一种将试验设计与数理统计相结合来建立经验模型的一种优化方法^[9-10]。它以试验设计、经验公式或数值分析为基础,对设计空间内的设计点的集合进行连续的试验求值,通过拟合实验

设计数据中的设计变量和系统响应之间的函数关系来表达出两者之间的变化关系。它是一种全局逼近方法,常用来处理多变量问题的建模与分析。

针对薄壁梁有限元模型的轻量化优化设计时,常难以写出功能函数的表达式,而直接的数值模拟工作量太大,因此,需要构建出薄壁梁轻量化设计的设计约束、设计目标与设计变量之间的函数关系,从而用该函数来替代薄壁梁的有限元模型进行优化分析,此方法也常常被称之为近似模型方法。

序列响应面方法是响应面方法的一类,它是一种在优化进行过程的不同阶段使用不同次数的多项式近似回归模型的方法^[11-14]。初始线性的近似模型由合适试验设计方法构建,然后在优化设计过程中不断引入新的设计点来更新响应面近似模型。每一个新的设计变量点都用于模型未知回归系数的计算,最终收敛到一个精度较高的响应面近似模型和最优设计点,该方法能够有效地消除噪声,改善优化算法的收敛性能。

序列响应面方法的基本理论即是把目标函数和约束都近似为设计变量 x_i 的二次多项式,具体数学表达式为

$$\Phi_i(x) \approx y = \alpha_{i0} + \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} x_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \alpha_{ijk} x_j x_k, \\ i = 1, 2, \dots, N_c + 1, \\ j, k = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: N_c 为约束变量的个数; m 表示设计变量的个数; $\alpha_{i0}, \alpha_{ij}, \alpha_{ijk}$ 为多项式系数。其中, y 与 x 之间的线性关联程度,即拟合的近似模型的精度主要用复相关系数 R^2 检测来判断,它主要是通过 R^2 的值与 1 的接近程度来评价,若是接近 1,则表示回归方程的拟合精度高,可以作为近似模型使用。 R^2 的具体理论表达式为^[15]

$$R^2 = 1 - \frac{Q_c}{Q_z} = \frac{Q_h}{Q_z}, Q_z = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \\ Q_c = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2, Q_h = \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y})^2, \\ \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2)$$

式中: n 表示采样点的数目; \bar{y} 为均值; y_i 为第 i 个样本点上的响应值; \tilde{y}_i 为第 i 个样本点上的近似值。

由于 R^2 易于计算且常用于工程设计问题的判断,故选用它作为准则来判断回归方程的拟合精度。图 1 表示运用序列响应面方法经过 3 次优化迭代收敛到最优设计点的优化过程示意图。

1) 定义初始设计变量数 m ;

- 2) 通过实验设计方法采样初始样本点;
- 3) 利用最小二乘拟合得到目标函数和每一个约束函数的多项式系数;
- 4) 用数值优化算法求解近似优化设计;
- 5) 分析近似优化设计;
- 6) 判断是否收敛, 如果收敛则停止;
- 7) 如果不收敛转到第 3 步继续执行。

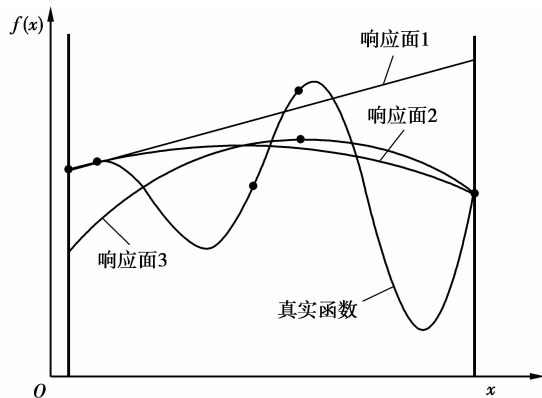


图 1 3 次迭代优化示意图

2 最优拉丁方试验设计

在整个设计空间选取有限数量的样本点, 使之尽可能地反映设计空间的特性, 即称为试验设计, 它主要是用来研究设计参数对响应的影响, 并以此作出适当的设计决定。试验设计是构建近似模型过程中必不可少的环节, 只有通过试验设计点才能找到每一个设计空间样本点所对应的设计响应, 这样才能最终拟合出它们之间的函数关系。因此, 设计样本点的选取是否合适对后续的响应面近似模型的构建起着非常重要的作用, 它将直接影响所构建的近似模型的精度, 故试验设计方法的选取也显得尤为重要。

笔者采用自己编制程序的最优拉丁方试验设计方法进行试验采样, 最优拉丁方试验设计是在拉丁方试验设计的基础上运用优化算法使采样点均匀地分散在设计空间中, 它具有用尽可能少的实验设计点代表尽可能多的信息, 并且每个因素的水平数可以根据需要任意设定等优点, 它常用的优化准则为:

假定响应的数学模型为 $Y(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(x) + Z(x)$, $Z(x)$ 是均值为零的高斯分布函数, l 维输入 s 与 t 的协方差函数是 $R(s, t) = \sigma^2 \exp(-\theta \sum_{j=1}^l |s_j - t_j|^q)$, ($0 < q \leq 2$), 参数 θ 与 q 决定 $Z(x)$ 的性能,

故最终最优化准则即是等价于使得 $-\log|R|$ 最小。

图 2 显示了传统拉丁方设计采样与自主开发的最优拉丁方程序生成的二因素 (x_1, x_2) 并采样 9 个点的空间布置对比图。

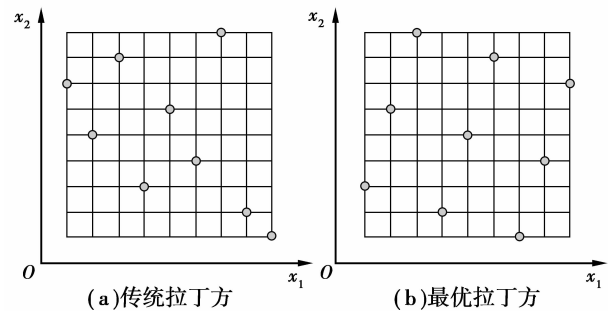


图 2 二因素拉丁方与最优拉丁方采样图

3 薄壁纵梁轻量化优化设计

3.1 薄壁梁轻量化优化模型的建立

对于薄壁帽型梁的轻量化, 由于纵梁为耐撞性设计的主要吸能部件, 因此, 笔者主要考虑将薄壁梁的变形吸能长度及其平均碰撞力作为设计响应, 并建立了薄壁纵梁的耐撞性有限元模型, 其截面几何参数分别如图 3、4 所示。

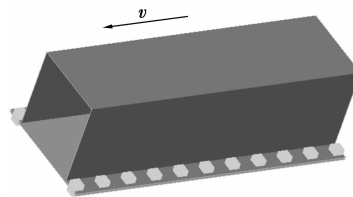


图 3 薄壁梁耐撞性模型

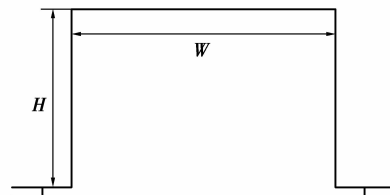


图 4 薄壁梁截面图

图 3 给出了薄壁帽型梁以 13.8 m/s 的速度撞击刚性墙, 优化设计以薄壁梁的截面宽度 w 、截面高度 h 、焊点间距 s 、薄壁梁板材厚度 t_1 以及盖板的厚度 t_2 为设计变量, 薄壁纵梁的质量 M 为设计目标, 为了减轻碰撞过程中的加速度和增大吸能性, 对刚性墙的平均碰撞力 F_m 与吸能量的吸能长度 L 定义为约束函数, 因此, 该薄壁梁的轻量化优化问题的数

学模型为:

$$\begin{aligned} &\text{Variable: } t_1, t_2, s, \omega, h \\ &\text{Objective: } \min(M) \\ &\text{s. t } F_m < 50.0 \text{ kN} \\ &50.0 < L < 110 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t_1 、 t_2 为帽型梁与盖板的板料厚度; s 为焊点之间的间距; ω 为帽型梁截面宽度; h 为帽型梁截面高度; M 为帽型梁的质量; F_m 为刚性墙的平均碰撞力; L 为薄壁梁吸能长度。

3.2 薄壁梁轻量化优化过程及结果分析

针对薄壁梁耐撞性的有限元模型的计算涉及几何非线性与材料非线性等问题,此外,基于有限元模型的优化设计常常由于单次运行时间较长而使得整个优化设计问题变得不可行,该类问题的优化设计必须借助近似模型方法,因此,笔者首先通过最优拉丁方试验设计构建了薄壁梁有限元模型的初始近似模型,在优化过程中不断完善和更新此近似模型,薄壁梁轻量化的整个优化设计流程如图 5 所示。

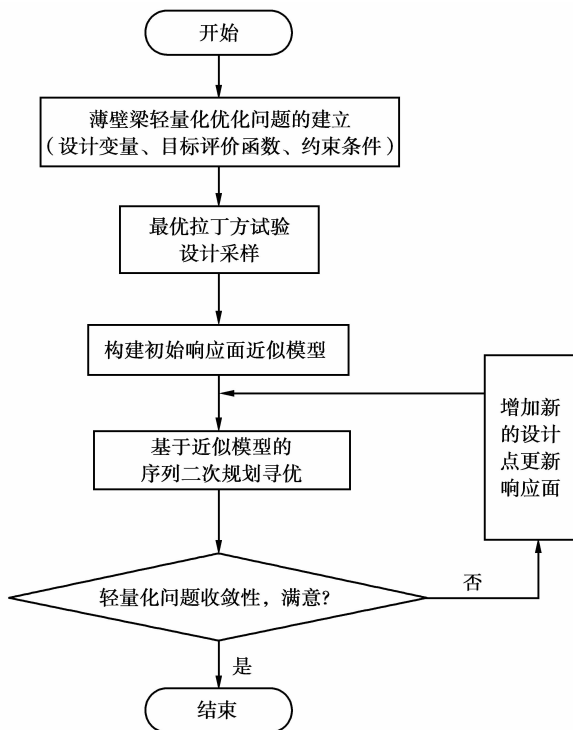


图 5 薄壁梁轻量化优化设计流程图

帽型梁轻量化优化设计的目的即是:通过结合试验设计与序列响应面方法,找到合适的梁的截面形状尺寸、板料厚度与焊点间距等设计变量的合理匹配,满足薄壁梁的平均碰撞力、吸能长度约束下,使得薄壁梁的质量最小化,从而达到轻量化的目的。整个优化设计过程的迭代收敛曲线如图 6 所示。

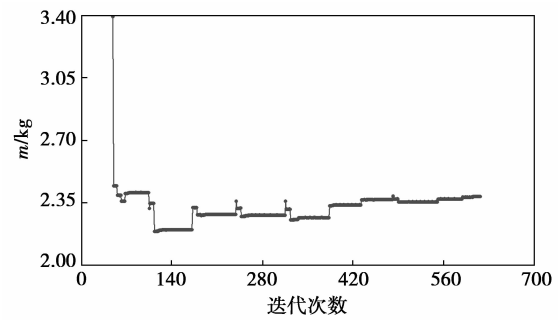


图 6 质量目标优化迭代收敛曲线

由图 6 可知,设计目标(质量)经过多次迭代后趋于收敛,虽然优化迭代的次数较多,但是由于整个优化过程都是在基于式(1)构建的多项式近似模型上进行的,且在优化迭代过程中,通过对初始构建的近似模型的多次更新,从而得到了各个设计响应的高精度近似模型。整个优化过程节省了大量的计算成本,提高了优化效率。各个设计变量与响应的初始设计值、上下限以及优化结果、设计目标与设计约束的近似模型的拟合精度 R^2 的值见表 1。

表 1 设计变量和响应的初始值和优化值

设计变量	初始设计值	下限	上限	优化值	R^2
t_1 /mm	3.0	1.0	4.0	2.2	—
t_2 /mm	3.0	1.0	4.0	1.8	—
s /mm	25.0	10.0	40.0	31.0	—
ω /mm	100.0	80.0	120.0	88.4	—
h /mm	100.0	80.0	120.0	111.2	—
F_m /kN	49.3	0	50.0	48.5	0.983
L /mm	56.1	50.0	110.0	107.8	0.974
m /g	3 389.3	—	—	2 387.0	0.998

由表 1 可以看出,经过多次响应面的更新与完善过后,最终得到的设计目标与约束的近似模型的拟合精度都非常接近于 1,具有很高的近似精度,同时,由于初始设计时薄壁梁及其盖板的厚度较大,导致薄壁梁的设计刚性较大,因此其变形吸能长度仅仅只有 56.0 mm,其平均碰撞力也较大,通过基于序列响应面方法的优化设计后,整个薄壁梁的质量降低幅度达到 29%,使得整个薄壁梁的用材得到较大幅度的减少,从而节约了材料成本,并且,优化设计过后薄壁梁的吸能长度由原来的 56.0 mm 增大到 107.8 mm,较好地克服了初始设计前端刚性较大的缺点,符合汽车安全吸能性设计的原则。优化设计后薄壁梁的几何截面尺寸及其焊点的布置如图 7。

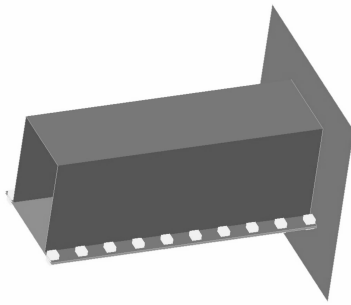


图7 优化设计后薄壁梁模型

4 结 语

1) 开发相应的前处理程序,对薄壁纵梁的截面几何尺寸、焊点间距等进行参数化设计,较好解决了基有限元网格模型难于参数化的问题。

2) 提出将试验设计、近似模型、序列响应面方法相结合来构建汽车薄壁纵梁的轻量化优化设计模型。

3) 优化探索过程在近似模型上进行,且在不同阶段使用不同次数的近似模型,因此,整个优化过程节约了大量的计算成本,提高了优化效率。

4) 薄壁梁轻量化优化设计算例表明,该方法具有一定的理论意义和较好的工程实用价值,对汽车纵梁的设计提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 田浩彬,林建平,刘瑞同,等. 汽车车身轻量化及其相关成形技术综述[J]. 汽车工程,2005,27(3):381-384.
TIAN HAO-BIN, LIN JIAN-PING, LIU RUI-TONG, et al. A review on ultralight auto body and related forming technologies[J]. Automotive Engineering,2005,27(3):381-384.
- [2] 冯美斌. 汽车轻量化技术中新材料的发展及应用[J]. 汽车工程,2006,28(3):213-220.
FENG MEI-BIN. Development and applications of new materials in automotive lightweighting technologies[J]. Automotive Engineering,2006,28(3):213-220.
- [3] FORSBERG J, NILSSON L. On polynomial response surface and Kriging for use in structural optimization of crashworthiness[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2005, 29(3): 232-243.
- [4] WANG H, LI E Y, LI G Y. Development of metamodeling based optimization system for high nonlinear engineering problems [J]. Advances in Engineering Software ,2008, 39(8): 629-645.
- [5] FORSBERG J, NILSSON L. Evaluation of response surface methodologies used in crashworthiness optimization [J]. International Journal of Impact Engineering,2006, 32(5):759-777.
- [6] HOU S J, LI Q, LONG S Y, et al. Multiobjective optimization of multi-cell sections for the crashworthiness design [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(11): 1355-1367.
- [7] BAHLOUL R, MKADDEM A, DAL SANTO P, et al. Sheet metal bending optimization using response surface method, numerical simulation and design of experiments [J]. International Journal of Mechanical Sciences,2006, 48(9): 991-1003.
- [8] WANG H, LI G Y, ZHONG Z H. Optimization of sheet metal forming processes by adaptive response surface based on intelligent sampling method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1/3): 77-88.
- [9] YOUN B D, CHOI K K. A new response surface methodology for reliability-based design optimization [J]. Computers and Structures, 2004, 82(2/3): 241-256.
- [10] 钟志华,张维刚,曹立波,等. 汽车碰撞安全技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [11] 张立新,隋允康,高学仕. 基于响应面方法的结构碰撞优化[J]. 力学与实践,2005,27(3):35-39.
ZHANG LI-XIN, SUI YUN-KANG, GAO XUE-SHI. Structural optimization based on response surface methodology [J]. Mechanics in Engineering, 2005, 27(3):35-39.
- [12] FREMGEN C, MKRTCHYAN L, HUBER U, et al. Modeling and testing of energy absorbing lightweight materials and structures for automotive applications[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2005, 6(8): 883-888.
- [13] KURTARAN H, ESKANDARIAN A, MARZOUGUI D, et al. Crashworthiness design optimization using successive response surface approximations[J]. Computational Mechanics, 2002,29: 409-421.
- [14] 张峻,柯映林. 序列响应面方法在覆盖件成形过程中的应用研究[J]. 汽车工程,2005,27(2):246-250.
ZHANG JUN, KE YING-LIN. A research on the optimization of auto panel forming process with sequential response surface method [J]. Automotive Engineering,2005,27(2):246-250.
- [15] 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,2006,13(5):298-302.
LIAO XIN-TAO, ZHANG WEI-GANG, LI QING, et al. Application research of response surface methodology in thin-walled structural optimization design in crashworthiness[J]. Journal of Engineering Design ,2006,13(5): 298-302.

(编辑 张 苹)