

响应面法在薄壁结构碰撞吸能上的应用

房加志¹ 焦群英¹ 常崇义² 刘金朝² 王成国²

(1. 中国农业大学理学院,北京 100083; 2. 中国铁道科学研究院,北京 100081)

摘要 运用响应面法,以碰撞吸收能量最大为目标,薄壁结构几何尺寸为设计变量,碰撞作用力为约束,对薄壁结构进行结构优化。利用有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 计算大变形的高度非线性碰撞问题。根据正交试验设计法安排每个试验点,最小二乘法拟合响应面,利用 DOT 程序得到该响应面的最优值。不断重复整个过程,直到获得薄壁结构的优化设计参数。研究结果表明响应面法应用于碰撞吸能的结构优化问题是可行的,具有提高计算效率,节省计算机时间等优点。

关键词 结构优化;碰撞;响应面法;有限元

中图分类号 U 292.94.3

文章编号 1007-4333(2005)01-0081-05

文献标识码 A

Application of response surface method in impacting energy absorption of thin-walled structure

Fang Jiazhi¹, Jiao Qunying¹, Chang Chongyi², Liu Jinzhao², Wang Chengguo²

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract An optimization process of a thin-walled structure was performed by the response surface method, which took the maximum absorption energy from an impacting process as objective, the properties of the thin-walled structure as variables, and the impacting axial force as constraint. In this study, the explicit finite element code, ANSYS/LS-DYNA, was adopted to simulate the complicated impacting behavior of the thin-walled structure. The orthogonal design and least square methods were used to fit the response surface, and the optimal one was obtained by the numerical optimization program DOT. This optimization process would be repeated until a set of parameters optimized for optimum design of a thin-walled structure was obtained. The results demonstrated that the response surface method in structural optimization of impacting energy absorption was feasible, and had merits of high computing efficiency and short computing time.

Key words structural optimization; impact; response surface method; finite element

我国铁路事业的飞速发展,对列车被动安全性的要求越来越高,国内许多高校和科研机构都已开始了这方面的研究。车体发生碰撞时,在非常短的时间(约几百 ms)内,车体结构发生大变形,部分结构由弹性状态进入塑性状态。薄壁结构是客车车身设计的基本组件,同时也是客车发生碰撞时的主要能量吸收结构。许多学者运用有限元程序如 DYNAS3D, PAM-CRASH, MSC-DYTRAN 等,研究了薄

壁结构的吸能以及碰撞作用力^[1-8],也有人对提高薄壁结构的吸能性进行了研究^[9-11]。中南大学研究了几种典型薄壁结构的吸能特性,以设置“伪”塑性较的方法设计了正弦形状的薄壁板,该结构具有较好的力学特性和稳定的变形模式^[12]。很少有人尝试通过结构优化方法来确定薄壁结构的最佳几何尺寸。因为碰撞是一个高度非线性问题,如接触非线性、材料非线性及几何非线性,通过求灵敏度的规

收稿日期: 2004-07-07

基金项目: 中国铁道部基金资助项目(2002 YF16)

作者简介: 房加志,博士研究生;焦群英,教授,博士生导师,主要从事生物材料力学分析研究, E-mail: jiaoqy@cau.edu.cn

划方法很难得到最优解。笔者采用响应面法研究薄壁结构的碰撞吸能问题,计算过程中运用正交试验决定实验点,采用非线性有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 计算薄壁结构的复杂碰撞行为。根据数值计算结果,基于设计变量,运用最小二乘法拟合吸收能量的目标函数。运用数值优化程序 DOT 在有约束和无约束 2 种情况下对目标函数进行优化。

1 碰撞分析的有限元基本方程

在时刻 t^N , 变形体运动微分方程的离散形式为^[9]

$$M\dot{q}^N = F^N - P^N \quad (1)$$

其中: M 为凝聚质量矩阵; \dot{q}^N 为 t^N 时刻加速度矢量; F^N 为总体载荷矢量; P^N 为单元应力场的总体等效节点矢量。

在显式算法中为了提高运算速度,通常采用缩减积分算法,并采用适当的沙漏控制方法消除单点高斯积分的四边形和六面体单元计算中产生的沙漏模式。以沙漏黏性阻尼为例,加入阻尼后的方程为

$$M\dot{q}^N = F^N - P^N + H^N \quad (2)$$

式中 H^N 为结构沙漏阻尼力矢量。当结构存在接触力 F_c 时,方程为

$$M\dot{q}^N = F^N - P^N + F_c + H^N \quad (3)$$

时间积分采用显式中心差分

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}^{N+1/2} &= \dot{q}^{N-1/2} + t^N \ddot{q}^N \\ \dot{q}^{N+1} &= \dot{q}^N + t^{N+1/2} \ddot{q}^{N+1/2} \\ t^N &= \frac{t^{N-1/2} + t^{N+1/2}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\dot{q}^{N-1/2}$ 和 $\dot{q}^{N+1/2}$ 分别为 $t^{N-1/2}$ 和 $t^{N+1/2}$ 时刻的节点速度矢量; \dot{q}^N 和 \dot{q}^{N+1} 分别为 t^N 和 t^{N+1} 时刻的节点位移矢量。

2 吸能优化

2.1 响应面法

响应面法^[13,14]是试验设计与数理统计相结合的优化方法。首先给定初始试验设计点,分别对这些点进行仿真运行,产生与各设计试验点的仿真输出响应;利用最小二乘法,将这些响应拟合成响应面,在响应面的最大梯度方向上寻优,对回归函数进行优化,得到该响应面上的最优解。然后以该点为中心再做试验设计,得到新的试验点。重复进行,直到满足终止条件。因此,构造合适的响应面以及确

定下一步拟合的子区域是本方法的重点。薄壁结构碰撞吸能的优化问题可以描述为

$$\left. \begin{aligned} \min y(X) \\ y_j(X) &= 0 \quad j=1, 2, \dots, n_c \\ x_{il} &\leq x_i \leq x_{iu} \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $y(X)$ 为目标函数,即碰撞中所吸收的能量; $y_j(X)$ 为第 j 个约束函数; x_i 为第 i 个设计变量; x_{il} 和 x_{iu} 分别为第 i 个设计变量的下限和上限; n_c 和 n 分别为约束和设计变量的个数。

一阶响应面模型:

$$y = y_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (6)$$

二阶响应面模型:

$$y = y_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (7)$$

采用最小二乘法确定待估参数

$$E(\beta) = \sum_{i=1}^p [y^i - \hat{y}^i]^2 = \min \quad (8)$$

得

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (9)$$

式中: y^i 为 i 试验点的真实值, \hat{y}^i 为 i 试验点的回归值; p 为拟合用的试验点数。

2.2 子区域的确定

子区域的尺寸 $|x_{iu}^{(k)} - x_{il}^{(k)}|$ 对于构造更精确的拟合函数非常重要。通常,子区域的尺寸越小拟合精度越高,然而,在优化过程中,当拟合达不到精度要求时,为了更快地收敛得到真正的最优值,下一步拟合子区域的尺寸应该减小或者保持不变。子区域缩减系数可通过式(10)和(11)求得:

$$\alpha_i^{(k+1)} = \alpha_i^{(k)} + (\alpha_i^{(k)} - \alpha_i^{(k-1)}) \frac{|x_i^{(k)*} - \frac{x_{il}^{(k)} + x_{iu}^{(k)}}{2}|}{x_{iu}^{(k)} - x_{il}^{(k)}} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{il}^{(k+1)} &= x_i^{(k)*} - \frac{1}{2} \alpha_i^{(k+1)} (x_{iu}^{(k)} - x_{il}^{(k)}) \\ x_{iu}^{(k+1)} &= x_i^{(k)*} + \frac{1}{2} \alpha_i^{(k+1)} (x_{iu}^{(k)} - x_{il}^{(k)}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中 $\alpha_i^{(k+1)}$, 和 $\alpha_i^{(k)}$ 为计算下一步变量区间的系数, $\alpha_i^{(k+1)} = \max(\alpha_i^{(k+1)})$ ($i=1, 2, \dots, n$)。对于线性拟合, $\alpha_i = 0.5$, $\alpha_i = 0.8$, 而对于二次拟合 $\alpha_i = 1.0$ 。
 $x_i^{(k)*}$ 为第 k 次优化得到的 i 变量的最优值, x_{iu}^k 和 x_{il}^k 分别为第 k 次优化时 i 变量的上界和下界, $x_{iu}^{(k+1)}$ 和 $x_{il}^{(k+1)}$ 分别为由第 k 次优化得到的第 $(k+1)$ 次

优化时 i 变量的上界和下界。

3 计算实例

3.1 仿真模型

刚性墙以 20 m/s 的初速度正面撞击薄壁方形梁，梁的长度为 300 mm，薄壁梁末端固定。薄壁梁的单元类型均选为四节点壳单元，材料模型为 Bilinear Isotropic 塑性材料。刚性墙为四节点壳单元，材料模型为刚体。在刚性墙上附加 10 kg 质量，以提供碰撞所需的足够能量，且以点单元建模。薄壁梁定义了自接触以及和刚性墙的面面接触。在面面接触中考虑摩擦，摩擦因数 0.25；自接触不考虑摩擦。薄壁方形梁和刚性墙的材料参数见表 1。

表 1 薄壁方形梁及刚性墙的材料参数

Table 1 Material parameters of beam and rigid wall

名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	杨氏模 量/ GPa	切线模 量/ MPa	屈服应 力/ MPa
刚性墙	7 850	0.3	200		
薄壁梁	7 850	0.3	210	950	285

3.2 优化结果

以上描述的优化过程应用到实际的薄壁方形梁碰撞吸能优化问题上，碰撞分析模型如 3.1 所述。

以薄壁方形梁横截面宽 k 、高 g ，以及四壁的壁厚 h 为设计变量，附加质量为常数。优化模型为

$$\left. \begin{aligned} \max f &= U(x_g, x_k, x_h) \\ g &= P_{\max} / P_{ma} - 1 \quad 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \\ 15 \text{ mm} & \quad x_g \quad 35 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} & \quad x_k \quad 20 \text{ mm} \\ 1.0 \text{ mm} & \quad x_h \quad 2.5 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中： U 为碰撞过程中所吸收的能量， P_{\max} 为碰撞过程中轴向平均作用力的最大值， P_{ma} 为轴向平均作用力最大值的允许值。采用三因素两水平正交试验设计方法，同时符合 D-最优化设计要求。

在有约束情况下，取 $P_{ma} = 100 \text{ kN}$ ，得到薄壁梁的最优设计变量： $x_g = 22.28 \text{ mm}$ ， $x_k = 13.74 \text{ mm}$ ， $x_h = 2.15 \text{ mm}$ ，最大吸能为 8 017.45 J，接触力为 83.39 kN。采用最优设计变量，由 ANSYS/LS-DYNA 计算得到最大吸能为 8 015.02 J，最大接触为 82.23 kN。图 1 为薄壁梁设计变量、吸收能量和接触力的优化历程。优化得到的吸能与由 ANSYS/LS-DYNA 得到的结果的相对误差为 0.03%，说明采用响应面法得到的优化结果非常精确，且满足约束要求。利用优化后新的薄壁梁进行同样条件下的碰撞计算，新梁在 12.999 ms 时，完全失效。其最大变形图、能量与作用力曲线见图 2。

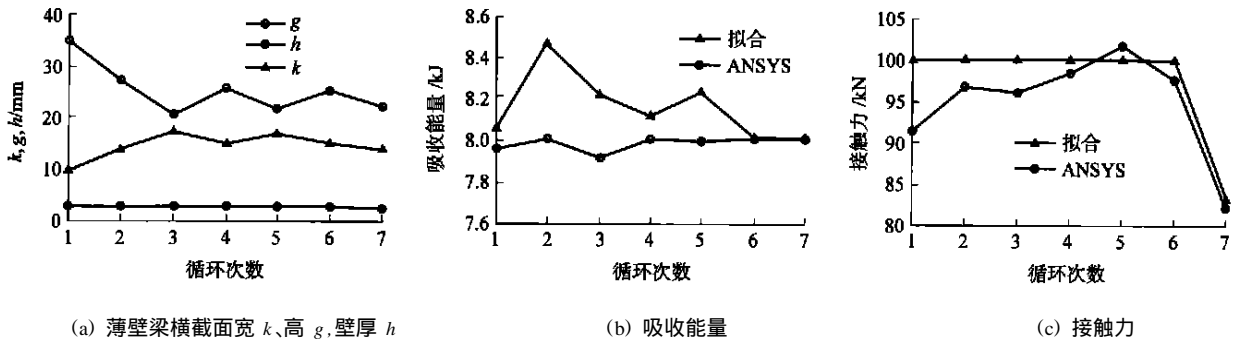


图 1 有作用力约束薄壁梁的优化历程

Fig. 1 Optimization history of thin-walled structure with constrain of force

无约束情况下，得到的薄壁梁的最优设计变量为： $x_g = 43.43 \text{ mm}$ ， $x_k = 12.6 \text{ mm}$ ， $x_h = 3.51 \text{ mm}$ ，最大吸能为 8 033.33 J，接触力为 83.39 kN。采用最优设计变量，由 ANSYS/LS-DYNA 计算得到最大吸能为 8 033.33 J，最大接触为 212.09 kN。图 3 示出薄壁梁的设计变量、吸收能量和接触力的优化历程。优化得到的吸能与由 ANSYS/LS-DYNA 得到

的结果相互吻合，说明采用响应面法得到的薄壁梁的优化结果非常精确。但同时也可以看到，虽然吸能特性有了很大改善，但接触力却比未优化前增加了很多，这对于车辆的被动安全性设计来说是极为不利的。利用优化后新的薄壁梁进行同样条件下的碰撞计算，新梁在 4.499 ms 时，完全失效，其最大变形、能量与作用力曲线见图 4。

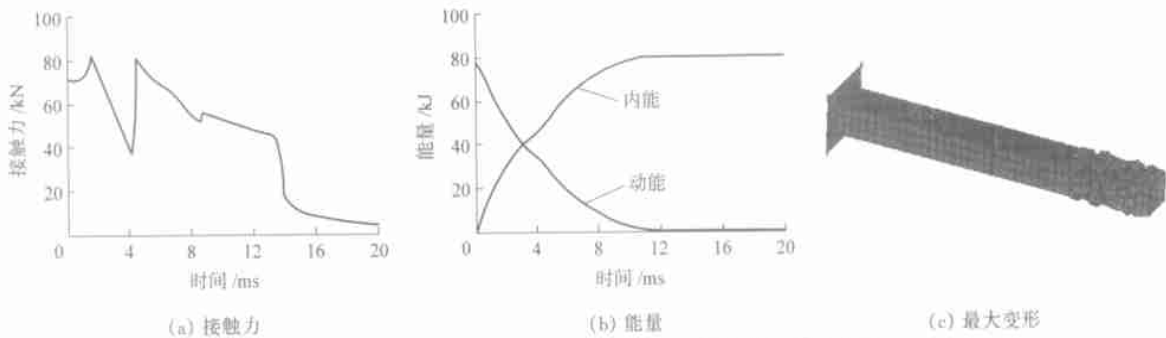


图2 有作用力约束新薄壁梁的接触力、能量曲线及最大变形

Fig.2 Curves of force and energy and the deformation with constrain of force

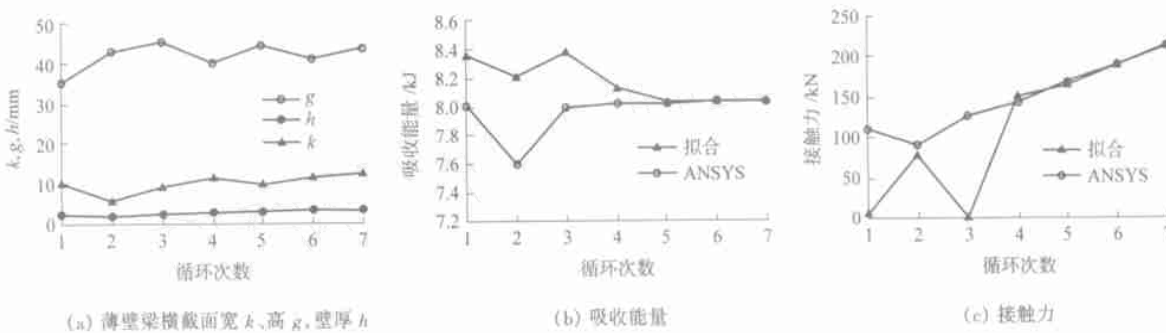


图3 无作用力约束薄壁梁的优化历程

Fig.3 Optimization history of thin-walled structure with no constrain of force

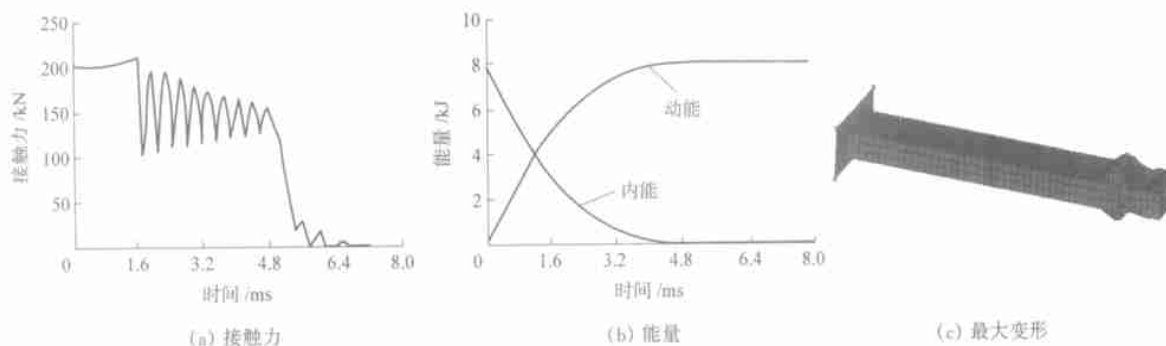


图4 无作用力约束新薄壁梁的接触力、能量曲线及最大变形

Fig.4 Curves of force and energy and deformation with no constrain of force

4 结论

1) 采用显式有限元可以有效地对结构碰撞进行数值模拟。

2) 对于碰撞这个复杂的高度非线性问题,采用响应面法进行动态结构优化。迭代精度为 6.0×10^{-4} , 7次循环后,有约束和无约束2种情况下得到最优解,收敛速度和结果令人满意。优化后薄壁结构发生个数较少的对称褶皱屈曲而不是弯曲失效,

可见其吸能特性有很大改进,表明响应面法对解决复杂的碰撞吸能结构优化问题是可行的、有效的。

3) 对有约束和无约束2种情况下优化后的作用力进行比较,结果表明设置作用力约束对提高车辆的被动安全性具有积极意义。

4) 薄壁结构是客车车身的基本组件,同时也是客车发生碰撞时的主要能量吸收结构。本文中提出的结构优化设计方法,可以应用到车辆设计中,为提高车辆的被动安全性设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] 雷正保, 钟志华. 受冲薄壁结构后屈曲分析的显式有限元法[J]. 应用力学学报, 2000, 17(4): 158 - 163
- [2] 薛量, 林忠钦, 姜正旭. 闭口帽型薄壁梁结构碰撞性能的数值模拟[J]. 华东船舶工业学院学报, 1999, 13(4): 24 - 28
- [3] 宋宏伟, 赵桂范, 杜星文. 玻璃/环氧圆柱管撞击性能研究[J]. 汽车工艺与材料, 2001(1): 23 - 26
- [4] 刘振闻, 雷正保. 受冲薄壳塑性大变形力学特性的有限元分析[J]. 长沙交通学院学报, 1999, 15(2): 17 - 21
- [5] 吴阳年, 姜平, 杨士钦, 等. 汽车薄壁杆件的轴向耐撞性分析[J]. 合肥工业大学学报, 2000, 23(4): 542 - 545
- [6] 朱西产, 钟荣华. 薄壁直梁件碰撞性能计算机仿真方法的研究[J]. 汽车工程, 2000, 22(2): 85 - 89
- [7] Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of circular tubes[J]. International of Impact of Engineering, 1984, 2(3): 263 - 281
- [8] Florence A L, Gefken P R, Kirkpatrick S W. Dynamic plastic buckling of copper cylindrical shells[J]. International Journal of Solids and Structures, 1991, 27(1): 89 - 103
- [9] 贾宏波, 黄金陵, 郭孔辉, 等. 汽车车身结构碰撞性能的计算机模拟、评价与改进[J]. 吉林工业大学学报, 1998(2): 6 - 11
- [10] 王万静, 田红旗, 王军, 等. 出口伊朗车吸能车体设计及撞击分析[J]. 铁道机车车辆, 2003, 23(3): 17 - 20
- [11] 贾宏波, 黄金陵, 谷安涛, 等. 车辆典型薄壁梁结构碰撞模拟研究与参数选择[J]. 农业机械学报, 1998, 29(1): 24 - 28
- [12] 姚松, 田红旗. 车辆吸能部件的薄壁结构碰撞研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 55 - 60
- [13] Yamazaki K, Han J. Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells[J]. Advances in Engineering Software, 2000, 31: 425 - 434
- [14] Myers R H. Response surface methodology: process and product optimization using design of experiments [M]. New York: Wiley & Sons Inc, 2001

科研简讯 ·

“气流冲击烘烤设备”和“9DRF 系列多功能无筛饲料揉粉机”2 项研究成果达国内领先水平

2004 年 12 月, 工学院王德成教授主持的北京市重点项目“气体射流冲击烘烤技术与设备”和高振江教授主持的北京市项目“无筛粉碎机理及配套机具的研制”通过北京市验收, 项目研究成果同时通过鉴定。“气流冲击烘烤设备”首次应用于烤鸭、板栗、甘薯等传统食品的加工, 为 3 种食品实现工业化和无污染加工提供了相应的设备和技术基础。项目研制完成 6 种样机, 获得国家实用新型专利 3 项。

“9DRF 系列多功能无筛饲料揉粉机”首次采用阻尼揉搓、冲击破碎与切割组合无筛粉碎技术, 强制排料结构和隔板间隙调整控制粉碎长度和粒度, 工作流程通畅, 满足饲料适口性加工要求, 解决了我国农作物秸秆饲料化利用存在的采食率低、加工设备适应性差等问题。

(科学技术处供稿)