

基于响应面法的板料成形工作模面几何参数优化

陈文琳 邹文超 曹俊

(合肥工业大学材料科学与工程学院, 合肥 230009)

【摘要】 阐述了以响应面法建立板料成形参数与有限元模拟结果的代理模型的基本原理;介绍了板料成形中的设计变量、目标函数、约束条件,多目标优化的处理方法;基于响应面法,以汽车后桥悬架内板零件为研究对象,成形后最小板料厚度为优化目标,成形极限图为约束条件,建立了模面几何参数优化模型;对模面几何参数进行优化并获得最优参数组合;以最优几何参数组合进行了实际的冲压试验,验证了优化结果。

关键词: 响应面法 有限元模拟 参数优化 模面设计 板料成形

中图分类号: TG386

文献标识码: A

Die-face-geometric Parameters Optimization Based on Response Surface Method

Chen Wenlin Zou Wenchao Cao Jun

(School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

More traditional die-face designs are carried out according to experience without considering the mapping function between design parameters and finite element simulation results. So it is difficult to optimize the design parameters. In the present research, the basic principle of the sheet metal forming optimization by the response surface method was discussed, along with the replacement model of finite element simulation results. Specially, the design variables, the objective function, constraints and the multi-objective optimization approach in sheet metal forming optimization were introduced. Based on the response surface method, the inner panel of automotive suspension was studied, and the optimal model of the die-face-geometric parameters was established with the least blank thickness as the object, the die-face-geometric parameters as the variables and the constraints as the FLD. Finally the die-face-geometric parameters were optimized. With the optimal parameters, the pressing test was carried out to verify the optimization result.

Key words Response surface method, Finite element simulation, Parameters optimization, Die-face design, Sheet forming

引言

拉深模型面设计在保证产品不出现缺陷的前提下,通常会对某类目标进行最优化,如板坯、板料厚度、刚度和回弹等,优化目标需要知道目标与待设计变量之间的函数映射关系;近年来数值模拟精度和速度都有极大提高,仿真结果更加可靠全面,但数值模拟仍无法直接给出待定设计参数与目标之间函数关

系,故需要建立代理数学模型解决这一问题^[1]。

板料成形是一个复杂的弹塑性变形过程,具有强烈的几何、物理和边界非线性特征,待定设计参数与优化目标的显式函数求解十分困难;基于统计学理论的响应面法(response surface method)能够在多维设计空间中构造复杂目标函数的显式函数关系,从而大幅度降低优化计算的难度,满足求解非线性优化问题的需要^[2]。文献[3]利用移动最小二乘法

构建响应面模型对铝板成形参数进行了优化;文献[4]通过智能抽取试验样本点构建响应面模型对拉伸筋设置进行了优化。本文对模面重要几何特征进行参数化,建立数学模型,以实现模面几何特征的优化。

1 优化策略

1.1 响应面法

响应面法(RSM)是试验设计与数理统计相结合用于经验模型建立的优化方法,基本思想是在试验测量、经验公式或数值分析的基础上,对设计变量子域内的样本点集合进行连续的试验求值,实现目标的全局逼近。RSM能够消除噪声效应,提高优化算法的收敛速度^[5]。

响应面模型设计变量 x 与真实响应 y 的函数关系式为

$$y = f(x) + \epsilon = \sum_{i=1}^L \beta_i \phi_i(x) + \epsilon \quad (1)$$

式中 $f(x)$ ——目标的近似响应,表示响应面
 ϵ ——综合误差项,含随机误差和建模误差
 L ——基函数 ϕ 的数目
 β_i ——多项式项回归系数

一般情况下,用一个多项式函数来逼近未知函数 $f(x)$

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \beta_{iii} x_i^3 + \sum_{i=1}^n \beta_{iiii} x_i^4 + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式中 n ——变量维数

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{iii}, \beta_{iiii}$ ——一次、二次、三次、四次基函数多项式回归系数

整个多项式无超过 2 维和 2 阶的交叉项,对多项式回归系数向量 $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L]^T$ 的求解采用最小二乘法

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3)$$

要使式(3)有解,真实响应 y 即样本设计点数应大于等于基函数 ϕ 的数目,即样本数量 S 应满足 $S \geq L$,当 $S = L$ 时式(3)确定的设计点近似响应值等于精确响应,因此设计初始样本设计点数目通常取 $S = L$ 。

1.2 目标和约束

板料成形常常同时有多个质量目标要求^[6],如最小板料厚度、破裂、起皱、回弹等。对于多目标优化问题,常用解法有:一是主要目标法,即确定一个目标为主要目标其余目标作为约束,将问题化为单目标问题;二是线性加权和法,即按照多目标 $f_i(x)$

($i = 1, 2, \dots, m$) 的重要程度,分别乘以一组权系数 λ_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 然后相加作为目标函数而构成单目标规划问题。对于模面设计优化,一般采用第一种方法处理多目标问题,选取成形后最小板料厚度 $J(x)$ 为目标,选择成形不出现破裂和起皱作为约束条件。

数值模拟中一般用成形极限图来作为破裂和起皱的判断标准,满足约束的条件为所有有效单元最终应变值介于破裂和起皱极限间的成形安全区间内,数学表达式为

$$W(\epsilon_2^e) < \epsilon_1^e < C(\epsilon_2^e) \quad (4)$$

式中 ϵ_1^e ——有效单元的工程主应变

ϵ_2^e ——有效单元的工程次应变

W ——起皱极限曲线

C ——成形极限曲线(FLC)

1.3 逐次逼近

利用响应面模型建立成形参数和模拟结果的数学模型后,将设计转换成优化问题进行系统求解。为了提高优化的效率,本文通过多次迭代逐次逼近寻找全局最优^[7];响应面模型建立后,求解当前模型最优点并进行最优点的精细数值模拟,以该模拟结果为基础寻找下一次建模的变量子域范围,所确定子域范围小于等于上一子域;多次迭代,直到目标收敛。收敛准则为:在满足约束条件的前提下,前后两次迭代目标差值小于给定值。

2 模面几何参数优化

2.1 汽车后桥悬架内板成形特点

汽车后桥悬架内板如图 1 所示。工件长、宽、高的尺寸约为:1 000 mm × 240 mm × 200 mm,长度方向形状对称,两端到中间拉深深度不均匀,中间与两端深度差异很大,深度较大的部分无法一次成形,所以工件整体需两次成形,即两端和底部一次拉深成形,其余部分通过一个类似于反翻边的整形工序成形;拉深工序模面几何参数设计空间较大,也难以确定。

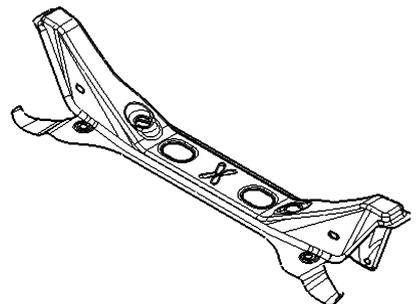


图 1 汽车后桥悬架内板(等轴视图)

Fig. 1 Inner panel of automotive suspension

拉深模型面的设计是整个工艺的关键,不但不能出现成形缺陷,且要考虑对后续工序的影响。如图2所示,为了便于试验设计和有限元建模,将汽车后桥悬架内板拉深模型面几何参数简化为以 X_1 、 X_2 、 R_1 、 R_2 4 个因素为变量的数学模型,本文选取这 4 个参数作为设计变量进行优化。

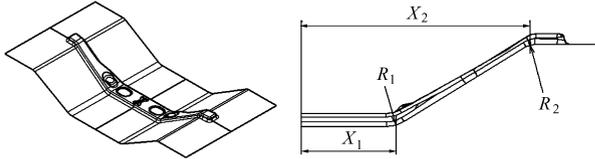


图2 凹模待优化的几何参数

Fig.2 Geometrical parameters of die

2.2 有限元建模

典型的拉深模有限元模型包括凸模、凹模、压边圈、拉延筋和板料。抽取模具凸模表面曲面作为有限元网格建立基准,通过划分、偏置和定位获得有限元模型,因工件对称,只建立实际模型 1/2 进行仿真;板坯尺寸由工件反求确定;为保证工件表面质量,工件需二次成形部分对应压料面上不设置拉延筋,拉延筋只设置在一次成形的两端和底部;压边力由初始模型调试确定为 30 kN。整个有限元模型如图3所示,模拟参数如表1所示。

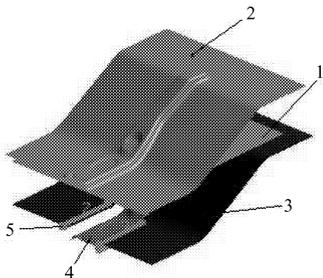


图3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

1. 板料 2. 凹模 3. 拉延筋 4. 凸模 5. 压边圈

表1 模拟参数

Tab.1 Parameters of simulation

求解器	LS-DYNA ^[8]
板坯单元类型	BT壳单元
板坯材料/mm	ST14, 初始 $t_0 = 1.5$
板坯尺寸/mm	1 100 × 460
虚拟冲压速度/ $m \cdot s^{-1}$	闭合 2, 成形 5
摩擦因数	0.125
模具间隙/mm	0.165

2.3 结果分析

以最大最小成形后板料厚度 $f(x)$ 为优化目标,几何参数 X_1 、 X_2 、 R_1 、 R_2 为设计变量,不出现破裂和起皱为约束条件;优化模型数学表达式为

$$\begin{cases} \max & f(x) \\ \text{s.t.} & W(\epsilon_2^e) < \epsilon_1^e < C(\epsilon_2^e) \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{x} = [X_1, X_2, R_1, R_2]^T$

设计变量初始域值范围由对工件实际测量和经验计算确定: $170 \text{ mm} \leq X_1 \leq 200 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} \leq R_1 \leq 70 \text{ mm}$, $405 \text{ mm} \leq X_2 \leq 425 \text{ mm}$, $30 \text{ mm} \leq R_2 \leq 50 \text{ mm}$ 。

初始建模利用 D 最优设计^[9]选取 25 个样本点,其中 15 个用于构建响应面,10 个用于检验约束;对响应面函数的最优解进行精细数值模拟,以精细模拟结果为基础选取新的变量域值;以新的变量域值选取样本点再次构建响应面并求解最优解。多次迭代,直到目标收敛。定义前后两次迭代最优解之差小于 0.01 mm,目标收敛。

优化模型在迭代 5 次后收敛,共进行 91 次模拟,其中精细模拟 6 次,如表 2 所示。设计变量优化历程如图 4 所示。最终优化结果为: $X_1 = 177.25 \text{ mm}$ 、 $X_2 = 414.65 \text{ mm}$ 、 $R_1 = 58.32 \text{ mm}$ 、 $R_2 = 38.43 \text{ mm}$ 、 $f(x) = 1.20 \text{ mm}$ 。

表2 精细模拟结果

Tab.2 Result of accurate simulation mm

次序	X_1	X_2	R_1	R_2	$f(x)$
1	170	405	40	30	1.04
2	178.89	417.12	68.41	34.48	1.10
3	176.04	413.89	61.23	36.81	1.14
4	176.78	414.41	59.45	37.92	1.16
5	177.43	414.74	58.74	38.79	1.19
6	177.25	414.65	58.32	38.43	1.20

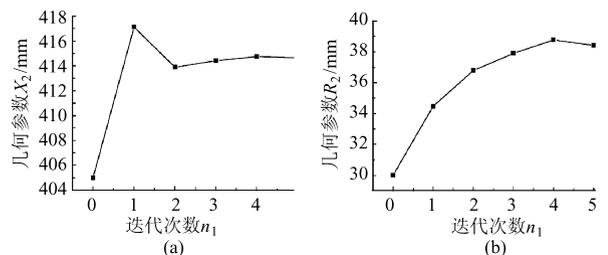


图4 设计变量优化历程

Fig.4 Optimize process of design variables

2.4 试验

参照优化结果,完善模具设计,并进行有限元仿真试验和实际冲压试验。试验结果表明优化结果符合生产要求。试验结果分别如图 5~8 所示。

3 结论

(1)对板料成形过程,采用响应面方法代理模型,使设计变量的目标和约束函数显式化,易于寻找

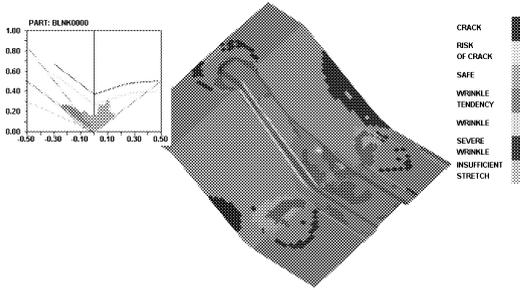


图 5 拉深工序极限图

Fig. 5 FLD of drawing process

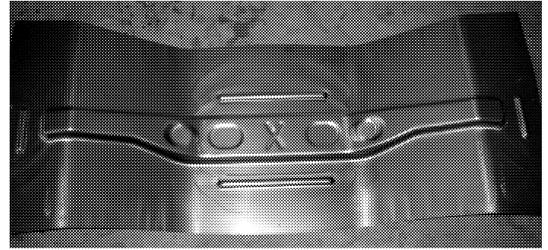


图 7 拉深成形后的板坯

Fig. 7 Blank after drawing process

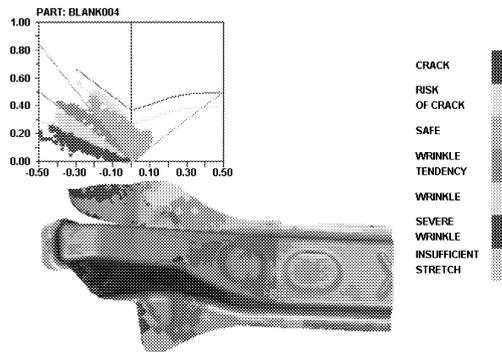


图 6 整形工序成形极限图

Fig. 6 FLD of restriking process



图 8 完全成形的零件

Fig. 8 Completely forming part

(2) 根据模面几何特征, 将模具几何型面参数化, 有助于建立数学优化模型, 进行最优搜寻, 快速确定最优设计参数。

(3) 设计变量和优化目标选择依赖于设计人员经验, 其取值直接影响优化结果的优劣。

全局最优解, 有助于明确设计方向, 提高设计效率。

参 考 文 献

- 1 谢延敏, 于沪平, 陈军, 等. 基于代理模型的板料成形优化技术进展[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(2): 20~24.
Xie Yanmin, Yu Huping, Chen Jun, et al. Recent advances of sheet metal forming optimization based on metal modeling [J]. Journal of Plastically Engineering, 2006, 13(2): 20~24. (in Chinese)
- 2 Jansson T, Nilsson L. Optimizing sheet metal forming processes——using a design hierarchy and response surface methodology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 178(1~3): 218~233.
- 3 Wang Hu, Li Enying, Li Guangyao. Optimization of drawbead design in sheet metal forming based on intelligent sampling by using response surface methodology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206(1~3): 45~55.
- 4 Naceur H, Ben-Elechi S. Response surface methodology for the rapid design of aluminum sheet metal forming parameters [J]. Materials & Design, 2008, 29(4): 781~789.
- 5 张峻, 柯映林. 基于动态序列响应面方法的钣金成形过程参数优化[J]. 中国机械工程, 2005, 16(4): 307~310.
Zhang Jun, Ke Yinglin. Process parameter optimization of sheet metal forming using dynamic sequential response surface method[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(4): 307~310. (in Chinese)
- 6 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 7 Oudjenea M, Ben-Ayedb L. Shape optimization of clinching tools using the response surface methodology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 194(1~3): 1~8.
- 8 Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual, version 971[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 9 陈良生. 最优设计单纯形构造法的软件设计及分形模拟中的应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
Chen Liangsheng. The software design of simplex constructing algorithm for optimal design and the application research on fractal simulation system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005. (in Chinese)