

一种包边模边界缩进控制方法

袁鹏飞, 张召春, 吴彩庭, 汪 壮, 刘 钊, 曹贵华, 薛 静

三一重工股份有限公司, 长沙 410100

摘要 将确定性优化方法用于板料包边设计。汽车板料包边仿真中变形区域小导致有限元模型在变形区域的网格很小, 模型计算时间太长。本文针对影响板料包边后边界缩进较大的 3 个参数, 建立目标函数的径向基函数近似模型, 并用确定性优化方法对近似模型进行优化, 近似模型计算效率高, 提高了优化方法计算效率, 使板料包边的优化设计成为可能, 并为生产中的汽车板料控制包边后的边界缩进提供了一种新的思路。

关键词 包边; 边界缩进; 确定性优化; 径向基函数近似模型

中图分类号 TH16

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.20.008

A Method of Hemming Roll-in Control

YUAN Pengfei, ZHANG Zhaochun, WU Caiting, WANG Zhuang, LIU Zhao, CAO Guihua, XUE Jing

Sany Heavy Industry Co. Ltd., Changsha 410100, China

Abstract Optimization methods are applied to sheet metal hemming. For the determination of parameters that influence the roll-in, an approximation Hemming model is proposed, to be used with optimization methods. The small area of sheet metal hemming lead to low efficiency, while the approximation hemming model can solve the problem, which make hemming model optimization possible. And the approximation hemming model based certain optimization method offer a new method to control the roll-in in hemming.

Keywords hemming; roll-in; certain optimization; radial basis function approximation model

0 引言

汽车的左、右前车门, 左、右后车门, 发动机盖和行李箱盖, 即四门两盖, 是汽车车身总成的重要组成部分, 因在车身制造中所具有的普遍性和工艺上的特殊性而越来越受到重视。实际生产表明, 车门包边过程形成的边界缩进是前、后门与门框配合间隙不均匀的根本原因^[1]。生产中对包边模的设计和制造一直是凭借经验。采用商业有限元软件对板料包边进行分析计算时, 由于板料包边有限元模型变形区域网格很小, 模型计算时间很长, 无法进行优化设计。

一些学者对包边模的边界缩进和优化方法的应用进行了研究。Livatyali 等对包括边界缩进在内的不同包边缺陷进行分析, 得到在几个不同的设计参数影响下包边缺陷的变化趋势, 并对包边边界产生的成形缺陷进行分析^[1]。Svensson 和 Mattiasson^[2]用有限元方法采用不同的单元类型、不同的算法进行计算比较, 并找到合适板料包边后边界缩进使用的单元类型和算法。Lin 等^[3]用退化的实体单元建立三维有限元模型

进行仿真, 并与壳单元和实体单元进行比较。目前在包边模的边界缩进控制中存在以下问题: 板料包边的边界缩进机制研究不够透彻; 生产中的边界缩进控制依靠设计和模具调试人员的经验, 不易于对生产技术的掌握, 且对包边质量不好控制; 在用有限元软件计算汽车板料包边的边界缩进时, 由于板料变形区域小导致计算时间太长, 不能对板料包边后的边界缩进进行优化设计。

为此, 本文基于数值仿真技术, 建立壳单元板料包边三维有限元模型, 并对其进行确定性优化, 从而为包边模的设计提供一种新方法。

1 包边原理

包边, 是将待包边向内翻折 90°, 包住内板边缘。理论分析和试验表明, 很难做到将待包边从 90°一步翻折至 0°包住内板边缘。因此, 将包边工艺分成两步: 首先, 将待包边从 90°翻折至 45°, 称之为预包边; 然后, 将其从 45°翻折至 0°并压

收稿日期: 2011-03-01; 修回日期: 2011-06-30

作者简介: 袁鹏飞, 工程师, 研究方向为车身结构设计, 电子邮箱: ypf3344@163.com

实,称为终包边^[1]。板料包边顺序为:板料定位→预包边→终包边,如图1所示。

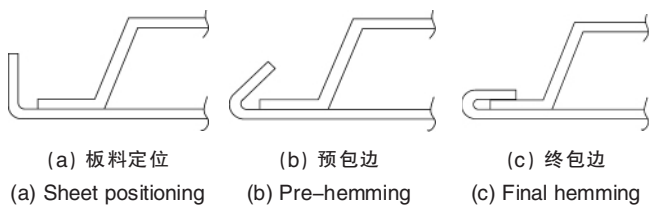


图1 板料包边顺序

Fig. 1 Order of sheet metal hemming

2 板料包边有限元建模

建立板料包边有限元模型 (Finite Element Model, FEM) 可以指导模具的设计和调试,从而降低模具开发成本。通过研究表明,壳单元和实体单元对于板料包边时的边界缩进可能给出不同的结果。试验比较发现,相对于实体单元,壳单元在包边仿真方面有更的计算精度^[2],因而采用壳单元建立板料包边三维有限元模型(图2),并选取三参数 Barlat 材料模型进行分析。

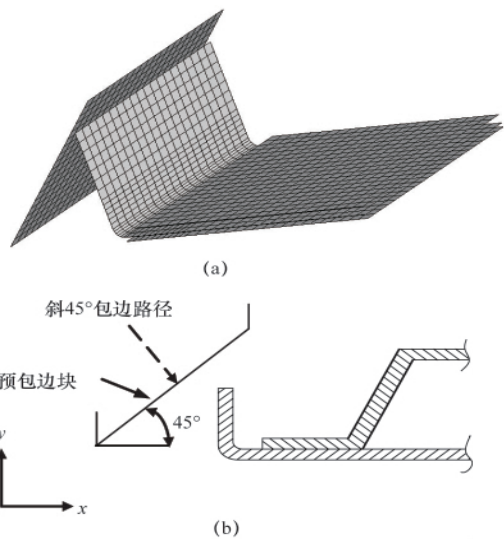


图2 板料包边三维有限元模型(a)及其运动示意(b)

Fig. 2 Three-dimensional FEM of hemming and the movement diagram

3 边界缩进优化模型建立

通过单因素敏感分析,影响板料包边后边界缩进的主要因素有:翻边转角半径 R_d 、立边高度 H 、内外板之间的间隙 G ,其空间关系如图3所示。而对于这些参数取何值时,有利于控制板料包边后的边界缩进还研究得不透彻,所以在边界缩进优化模型建立时,在一个区间内对这几个参数进行取值,将板料包边后的边界缩进值 P 作为优化目标,测量方法如图4所示。

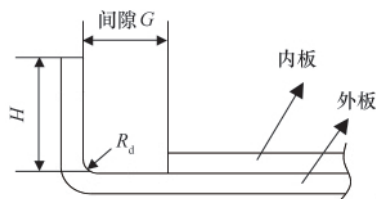


图3 R_d , H 和 G 的空间关系

Fig.3 Spatial relationship of R_d , H and G

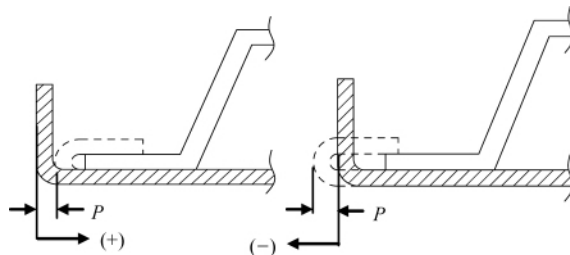


图4 边界缩进的测量

Fig. 4 Measure of roll-in

基于上述分析,板料包边后边界缩进 P 的确定性优化问题描述为

$$\min_x f(X) \quad X \in [X^L, X^R] \quad (1)$$

其中, X 为 n 维设计矢量,取值范围为 Ω^n 。 f 为目标函数,是关于 X 的非线性连续函数,上标 L 和 R 分别表示区间数的下界和上界。

下文将使用确定性优化方法求解以上问题。

4 基于径向基函数近似模型的优化

在板料包边优化问题上,板料变形区域网格很小,有限元模型计算时间长,基于真实模型的优化每次计算目标函数值都需要调用费时的真实模型,计算效率低下,有时甚至是无法接受的,严重阻碍了优化方法在板料包边问题上的应用,采用近似模型进行优化成为解决这一问题的一个方法。

4.1 实验设计方法

在建立近似模型之前,需要先选取样本点,并通过计算真实模型得到每个样本点对应的响应值。拉丁超立方实验设计^[4]是一种随机优化采样方法,它有以下优点:(1) 采样点数可以根据实际情况进行控制;(2) 采样点的分布比较均匀,有利于获取更充分的模型信息。本文利用该方法进行采样。

4.2 径向基函数近似模型

径向函数是以待测点与样本点之间的欧氏距离为自变量的一类函数。以径向函数为基函数,通过线性叠加构造出来的模型即为径向基函数模型^[5]。文献[6]针对14个不同类型问题的算例,利用包括径向基函数模型在内的方法进行系统研究对比后发现,在同时考虑模型的精度和鲁棒性的情况下,径向基函数近似模型最为可靠。

估计点 x 处响应值的径向基模型的基本形式如下:

$$f_p(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i \Phi(r^i) \quad (2)$$

其中, n 为样本数目; w_i 为权系数, $i=1, 2, \dots, n$; $r^i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|$ 为估计点和样本点之间的欧氏距离; $\Phi(r^i)$ 为径向函数(距离 r 的单调函数), 本文选用 Gauss 函数作为径向基函数:

$$\varphi(r) = \exp(-r^2/c^2) \quad (3)$$

其中, c 为给定的大于 0 的常数。根据插值原理, 当知道 n 个样本点和每个样本点对应的响应函数值的对应关系, 可以得到以下方程组, 写成矩阵形式为

$$\mathbf{f} = \Phi \mathbf{w} \quad (4)$$

4.3 确定性优化问题的建立

本文主要针对影响板料包边后边界缩进的 3 个参数进行优化, 使板料包边后的边界缩进达到最小。建立如式(1)的优化问题。利用拉丁超立方实验设计方法进行采样, 将采样点值代入真实模型进行计算, 得到真实模型的响应值。通过采样点和对应的响应值, 构造径向基函数近似模型。在确定性优化中利用近似模型代替真实仿真模型, 大大提高了计算效率。基于优化理论的包边模边界控制技术的算法流程如图 5 所示。

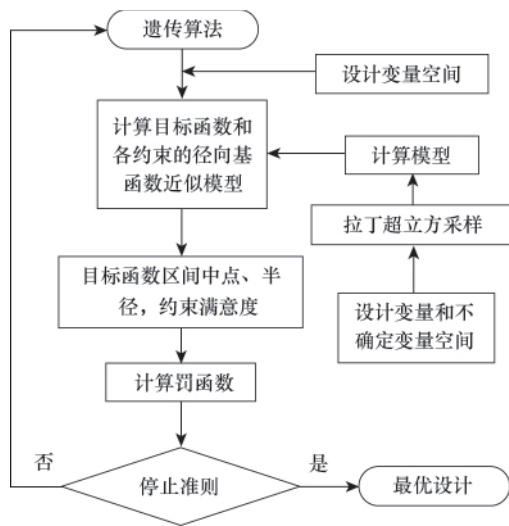


图 5 基于优化理论的包边模边界控制技术的算法流程

Fig. 5 Algorithm flow of roll-in control which based on optimization theory

5 应用实例

将以上基于径向基函数近似模型的确定性优化方法应用于汽车板料包边。板料包边后边界缩进的参数优化问题可以描述为:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{X}) \quad (5)$$

建立有限元模型时, 在找到影响包边板料边界缩进的 3 个设计参数翻边转角半径 R_d 、立边边高度 H 、内外板之间的间隙 G 后, 翻边转角 $0.5\text{mm} \leq R_d \leq 4.0\text{mm}$, 内外板间隙 $0.5\text{mm} \leq G \leq 4.0\text{mm}$, 立边高度 $3.0\text{mm} \leq H \leq 16.0\text{mm}$ 。由于设计

参数中存在条件: $R_d \leq G \leq H$, 而在拉丁超立方实验设计方法进行采样中所采集的样本参数之间应该是没有大小关系的, 所以需要对包边板料的设计参数进行转化:

$$H = G + A \quad (6)$$

$$G = R_d + B \quad (7)$$

因此, 板料包边的设计参数就转化为 A 、 R_d 和 B , 其中 A 表示在板料包边后外板与内板相重叠的部分, B 表示立边内侧圆弧根部与内板外侧的距离(图 6), 这 3 个参数之间没有大小关系。

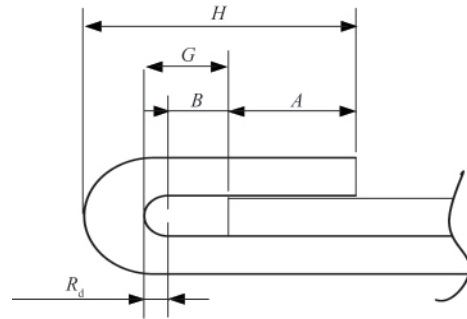


图 6 包边板料设计参数及经过转化后各个参数的关系

Fig. 6 Relationship of parameters

采用四边形壳单元, 建立长 25mm、宽 20mm 的有限元模型, 其最小单元为 0.9mm, 单元数为 3120 个(图 2)。用拉丁超立方实验设计方法^[9]在转化后的板料包边的 3 个设计参数 A 、 R_d 和 B 组成的空间中进行采样, 得到 35 个样本点, 在每个样本点处构造包边板料的有限元模型(板料外板和内板材料分别是 CR3 和 CR4, 其材料参数如表 1 所示), 计算得到采样点的边界缩进值, 建立径向基函数近似模型, 并用确定性优化方法进行优化。

表 1 材料 CR3 和 CR4 的参数

Table 1 Materials parameters of CR3 and CR4

材料参数	CR3	CR4
质量密度 $R_0/(\text{mg} \cdot \text{mm}^{-3})$	7.80	7.85
杨氏模量 E/GPa	206	207
泊松比 μ	0.33	0.28
厚向异性系数 r_0	1.85	1.995
厚向异性系数 r_{45}	1.37	1.945
厚向异性系数 r_{90}	2.02	2.676
板料厚度/mm	0.8	0.8

由于包边后边界缩进的存在, 在包边板料的设计中, 一般要把边界向外延伸 1mm 左右以预留边界缩进量, 但由于各种设计参数的不同和包边条件的不同, 包边后板料各处的边界缩进量并不相同, 因而出现了板料包边后边界不均匀的现象。采用基于径向基函数近似板料包边模型进行优化, 可在

板料设计之初对包边后的边界缩进进行预测,从而减少模具调试的时间和难度。

得到使边界缩进达到最小的3个敏感设计参数的最优组合为 $A=2.5127\text{mm}$, $R_d=0.5\text{mm}$, $B=0$,边界缩进 P 的最小值为 0.28905mm 。将这3个参数代入式(6)和式(7)中得到 H 、 G 和 R_d 的设计值如表2所示。根据这3个设计值建立有限元模型进行计算,得到有限元的仿真结果并与优化结果进行对比如表2所示。

表2 确定性优化结果和仿真结果对比

Table 2 Comparison of certain optimization and simulation

H/mm	G/mm	R_d/mm	P/mm	
			优化结果	仿真结果
3.0127	0.5000	0.5000	0.28905	0.2173

从优化结果可以看出,翻边转角半径 R_d 得到了在优化区间的最小值。在实际生产中为了使板料包边后的边界缩进最小,一般会尽可能在板料翻边时减小翻边转角半径 R_d ;内外板之间的间隙 G 越小越容易减小板料包边后的边界缩进,但是如果 G 值太小,在板料包边过程中外板会碰到内板导致包边质量变差,而实际生产中的内、外板间隙会根据包边模调试时的情况进行修改;立边高度 H 也是影响边界缩进的重要因素,所以在板料设计中要合理选择立边高度,为了防止包边时材料堆积,在转角处的立边高度会有所降低。

从优化结果和仿真结果的分析中可以看出,优化结果与仿真结果的边界缩进值相差不大,可以认为结果是可信的,通过确定性优化,为板料包边后的边界缩进估计与预测提供了一种新的思路,并可以指导实际生产实践,通过合适选取

包边板料的设计参数就可以达到控制边界缩进的目的。

6 结论

本文以汽车板料包边为研究对象,针对影响板料边界缩进加大的3个参数,通过径向基函数建立板料包边的近似模型,进行确定性优化,得到使包边板料边界缩进值最小的设计参数,并通过有限元验证后结果误差不大,具有一定的可信性,这为设计人员提供了一种包边板料设计的新思路。

参考文献 (References)

- [1] 张如飞. 车身门盖件机器人包边运动规划与仿真 [D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
Zhang Rufei. Robot motion planning and simulation of door hemming[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005.
- [2] Svensson M, Mattiasson K. Simulation of hemming with different element formulations and time integration methods [C]//Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications, Swets & Zeitlinger. Lisse: A A Balkema Publishers, 2001: 933–938.
- [3] Lin G S, Li J, Hu S J, *et al.* A computational response surface study of three-dimensional aluminum hemming using solid-to-shell mapping[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, 129(2): 360–368.
- [4] Morris M D, Mitchell T J. Exploratory designs for computational experiments[J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 1995, 43(3): 381–402.
- [5] 穆雪峰, 姚卫星, 余雄庆, 等. 多学科设计优化中常用代理模型的研究[J]. 计算力学学报, 2005, 22(5): 608–612.
Mu Xuefeng, Yao Weixing, Yu Xiongqing, *et al.* *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2005, 22(5): 608–612.
- [6] Jin R, Chen W, Simpson T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria [J]. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, 23(1): 1–13.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·

“2011年复杂系统理论与方法 及其工程实践学术会议”征文



中国系统工程学会、北京航空航天大学、《系统工程与电子技术》杂志社将于2011年10月在北京联合举办“复杂系统理论与方法及其工程实践学术会议”。

征文范围: 系统科学及复杂系统理论研究进展; 系统工程理论与方法研究进展; 系统工程实践。

征文截止日期: 2011年9月10日。

通信地址: 北京142信箱32分箱《系统工程与电子技术》杂志社(100854)。

联系电话: 010-68388406; 电子邮箱: cstmep2011@126.com。

会议网址: <http://www.sys-ele.com>。