DOI: 10.3901/JME.2013.05.123

车身外覆盖件面畸变缺陷模面补偿方法*

倪啸枫¹ 沈洪庆¹ 李淑慧^{1,2}

(1. 上海交通大学汽车车身设计与制造技术研究所 上海 200240;
2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘要: 面畸变缺陷是指车身外覆盖件成形回弹阶段产生的深度在几十至几百微米的局部小凹陷, 面畸变缺陷对整车外观质量影响很大, 因此在模具设计阶段即通过准确预测面畸变缺陷并进行补偿和控制十分重要。通过有限元仿真分析和试验验证, 能够准确预测车门把手特征件的面积变缺陷。一种抑制面畸变缺陷的模面补偿方法被提出。通过车门把手特征件和柱面扁壳特征件的有限元仿真, 特征件表面反映面畸变缺陷的二维评价指标在经过模面补偿后减少 90% 以上, 验证了提出的面畸变缺陷模面补偿方法的有效性。该方法基于数值计算获得理想的模面几何模型, 通过改变板料在成形过程中厚度方向的应力梯度控制厚度方向弯矩导致的面畸变, 为模具在设计阶段对板料成形后的面畸变缺陷进行控制提供了依据和解决方案。

关键词: 车身外覆盖件 回弹 面畸变 模面补偿

中图分类号: TG386

Method of Surface Defects Control by Tool Surface Compensation for Exterior Auto-panels

NI Xiaofeng¹ SHEN Hongqing¹ LI Shuhui^{1,2}

(1. Auto Body Manufacturing Technology Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Surface defects are small concave imperfections that can develop during forming on exterior auto-panel like doors. They occur during springback steps, and the depths are usually from dozens of micron to hundreds of micron. Surface defects can alter significantly the final quality of the automobile and it is very important to predict and control them as early as possible in the design of the forming tools. In order to prove the accuracy of the simulation, a sample panel with a door handle feature is stamped and measured in experiment to be compared with the FEM result. A method of surface defects control by tool surface is advanced. The sample panel with a door handle feature and the sample panel of cylindrical shallow shell are simulated. The quantitative evaluation result of the sample panels' surfaces decrease above 90% after tool surface compensation. And the validity of the method is approved. Tool surface compensation is a method to control the surface defect by changing the elements nodes of tools. This method bases on numerical simulation. After compensating for several times, the reasonable tool surface mesh is gained. It can control the surface defect result in the bending moment by controlling the stress through thickness direction. It provides the solution to control the surface defects in the design of the forming tools.

Key words: Exterior auto-panel Springback Surface defect Tool surface compensation

0 前言

面畸变缺陷是指车身外覆盖件成形回弹阶段产生的局部小凹陷, 深度在几十至几百微米。车身外覆盖件的面畸变问题是影响冲压件表面质量的难题之一。面畸变缺陷对整车的外观质量影响很大, 甚至破坏整车的表面刚度。伴随着大型整体化零件

在车身中的推广应用, 车身覆盖件面畸变问题急剧增多, 成为制约车身制造质量与生产效率的重要因素。

目前在实际生产中比较常用的两种控制面畸变的方法: 通过模具研磨在局部实现加压及通过在模具间增加垫片实现局部加压。但是这些方法依赖生产经验且效果不稳定, 面畸变缺陷的预测和控制一直以来都是车身覆盖件生产企业面临的工程难题。

FUKUMURA 等^[1]通过实际车门外板的表面二维轮廓扫描与仿真结果的表面轮廓比较, 认为有限

* 机械系统与振动国家重点实验室(MSVMS201101)、高等学校博士学科点专项科研基金(20100073110034)和上海市教育委员会曙光计划(10SG13)资助项目。20120712 收到初稿, 20121227 收到修改稿

元计算回弹可以准确地得到门把手附近的几何形变,因此有限元法可以预测面畸变缺陷,并且可以定量消除面畸变缺陷。SUN 等^[2]通过柱面扁壳特征件,用试验方法研究局部加压工艺对面畸变缺陷的影响。认为局部加压可以使板料产生局部的变形。加压区域产生微量塑性变形,在板厚方向使贴近垫片的内层产生压应力,外层产生拉应力,能够不同程度地抵消成形件的残余应力,降低成形件脱模后的面畸变。SHEN 等^[11]提出了针对车身外覆盖件面畸变缺陷的数值分析方法,可以准确地计算出成形件不同截面的面畸变缺陷的程度。在此基础上,本文研究了通过模具模面补偿对板料实现局部加压,用有限元方法定量消除面畸变缺陷。

1 车门门把手特征件的试验简介

车门门把手特征件试验中所用模具如图 1 所示。凸模长度方向曲率为 0,宽度方向的曲率为 $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$,凹模与凸模的模具间隙为 1.1 mm。拉延深度为 30 mm。

图 1 试验所用模具

试验材料为 B170P1,材料参数如表 1 所示。板料的尺寸为 $420 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ 。压边力为 10 kN。

表 1 B170P1 材料参数

材料	方向/(°)	板厚 d/mm	屈服极限 $\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$
B170P1	0	0.7	183
	45		186
	90		179
抗拉极限 σ_m/MPa	塑性应变 比 r	加工硬件指数 n	强度系数 K/MPa
328	2.20	0.245	598
335	2.03	0.246	612
336	1.61	0.254	622

对冲压件进行表面轮廓扫描,选取 8 个有代表性的截面轮廓线如图 2 所示。截面轮廓由探针扫描仪测量得到,探针与成形件之间接触力小于 0.03 N,

所以探针接触所引起的成形件形变可以忽略。 z 方向扫描的精度误差在 0.003 5 mm 以内。扫描的结果以点坐标的形式输出,可以用于数值分析。

图 2 试验特征件扫描位置及编号

2 模面补偿方法

模具模面补偿方法实际是对回弹产生的面畸变缺陷进行模面补偿,效果类似于实际生产中的模具研磨和加垫片实现局部加压。

2.1 二维面畸变缺陷评价指标

对于某一截面轮廓线上第 i 点的面畸变缺陷可以描述为一个局部偏差量 d_{vi} ,如图 3 所示

$$d_{vi} = z_i - z_{0i} \quad (1)$$

式中 z_i ——该点在实际截面轮廓线上的 z 坐标
 z_{0i} ——对应的理想截面轮廓线上的 z 坐标

图 3 回弹后实际轮廓线偏离理想轮廓线 d_{vi}

反映轮廓线二维面畸变缺陷的两个指标, D_a 和 D_z , 对于第 j 条截面线

$$D_{aj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_{vij}| \quad (2)$$

$$D_{zj} = \frac{1}{2} \left[\max \left(\{d_{vij} | i=1, 2, \dots, n\} \right) - \min \left(\{d_{vij} | i=1, 2, \dots, n\} \right) \right] \quad (3)$$

式中 D_{aj} ——第 j 条截面线平均偏差量

D_{zj} ——第 j 条截面线最大偏差量

d_{vij} ——第 j 条截面线第 i 点的局部偏差量

S_{D1a} 和 S_{D1z} 为评价面二维面畸变缺陷的平均偏差量和最大偏差量。一般情况下, w_j 取第 j 条截面线的长度和所有截面线总长度的比值。对外观影响较大的截面部分,可以适当增加该截面线的权重

$$S_{Dla} = \sum_{j=1}^k w_j D_{aj} \quad (4)$$

$$S_{Dlz} = \sum_{j=1}^k w_j D_{zj} \quad (5)$$

2.2 模面补偿计算方法和流程

假设模具上某一节点为 $m_i(x, y, z)$, 在合模时板料上对应的一点为 $n_i(x, y, z)$ 。回弹后 n_i 点 z 坐标偏离理想轮廓线 d_{vi} , 模具节点 m_i 补偿计算方法如下

$$m_i(X, Y, Z) = m_i(x, y, z - k(d_{vi} + \delta)) \quad (6)$$

式中 $X=x$ $Y=y$ $Z=z$

k ——优化参数

δ ——修正量

d_{vi} 为 n_i 点 z 坐标偏离理想轮廓线的值, δ 使补偿区域边界处的节点在 x 轴方向能够平滑过渡, 同一截面节点的 δ 值是相同的。由于 n_i 点的 d_{vi} 较难得到, 而板料回弹后 z 坐标变化较大, x, y 坐标变化很小, 所以可以用回弹后 m_i 对应成形件上的 n_i' 点的 d_{vi}' 代替 n_i 点的 d_{vi} 。 n_i' 可以由节点插值得到。理想轮廓线由最小二乘法拟合实际的轮廓线为二次曲线得到。

模面补偿的流程图如图 4 所示, 其中 a, b 为 k 的两个初始值, 一般取 $a < 1, b > 1$ 。定义 $D_a(x)$ 为 k 取 x 值时的 D_a 值。 D_{a0} 为 $D_a(a), D_a(b), D_a(a/2+b/2)$ 中的最小值, D_{a1} 为中间值。 t 为阈值, $t < 1$ 。也可以用 D_z 值来代替 D_a 值进行优化。对于选取多条截面线的面, 可以用 S_{Dla} 和 S_{Dlz} 值优化。

图 4 模具模面补偿方法流程图

3 模面补偿实例

3.1 数值仿真与分析

有限元模型中材料硬化方程采用 Ludwik, 屈服函数采用三参数 Barlat, 由 Keeler 经验公式计算 FLC。板料使用三节点壳单元, 初始网格大小为 5, 自适应 3 级, 厚向积分点为 11, 摩擦因数为 0.125。计算方式为增量法, 模具设置为双动拉延。压边力恒定为 10 kN, 凸模冲压速度为 1 000 mm/s, 初始状态凹模与板料接触。

探针扫描的表面轮廓线与仿真结果的中性层轮廓线比较如图 5 所示。

(a) 截面线1表面轮廓线

(b) 截面线2表面轮廓线

图 5 试验与仿真结果部分轮廓线比较

计算截面线 1 轮廓线 4 个极值的 x 坐标和 d_{vi} 值, 如表 2 所示。4 个极值点的 x 坐标, 仿真和试验结果一致, 仿真和试验 d_{vi} 值的比值趋势一致。结论: 考虑到试验的误差及板厚的影响, 可以认为有限元仿真可以准确计算出车门门把手特征件回弹后产生面畸变的位置, 面畸变的深度和试验比较趋势一致。

表 2 截面线 1 轮廓线 4 个极值点的 x 坐标和 d_{vi} 值

仿真 x 坐标/mm	仿真 d_{vi} /mm	试验 x 坐标/mm
24.532 9	0.108 145	25.982 3
62.311 9	-0.045 450	63.015 4
175.146 3	-0.114 350	175.047 9
225.481 3	0.137 880	224.527 0
试验 d_{vi} /mm	仿真与试验 x 坐标误差(%)	仿真与试验 d_{vi} 比值
0.064 387	-0.580 0	1.679 609
-0.025 810	-0.281 0	1.761 257
-0.068 960	0.039 4	1.658 111
0.079 101	0.381 7	1.743 088

3.2 柱面扁壳特征件

由于门把手特征件较为复杂,因此把门把手反向拉伸部分去掉,凸模圆角半径改为 10 mm,成为柱面扁壳特征件,其他尺寸和之前建模的门把手特征件相同。压边力为 20 kN,加等效拉深筋,板料尺寸为 420 mm×320 mm,材料为 B170P1。为较好反映整个面的面畸变缺陷,共截取 5 条轮廓线如图 6 所示,权重矢量为 $w=(0.2,0.2,0.2,0.2,0.2)$ 。为实现板料成形时的局部加压,要对产生面畸变缺陷位置接触的模具进行模面补偿,一般为凸模。凸模的网格大小设为 10。取 $\alpha=0.9$, $b=1.1$, $t=0.9$,评价指标使用 S_{Dla} 。

图 6 截面轮廓线位置及编号

图 7 所示为 5 条截面轮廓线的 D_z 和 D_a 值。当 $k=1.025$ 时有

$$\frac{D_{a0}}{D_{a1}} = \frac{S_{Dla}(1.05)}{S_{Dla}(1.025)} = \frac{0.001674}{0.001763} = 0.9495$$

比值大于 0.9,收敛。优化过程中 k 值对应的 S_{Dlz} 和 S_{Dla} 值如表 3 所示。图 8 所示为柱面扁壳特征件模面补偿前后的虚拟油石效果比较。图 9 所示为回弹前后 x 轴方向的曲率。

表 3 优化过程 k 值对应的 S_{Dlz} 和 S_{Dla} 值

	S_{Dla}/mm	S_{Dlz}/mm
$k=0$	0.059 224	0.030 721
$k=0.900$	0.009 582	0.003 593
$k=1.100$	0.006 352	0.002 249
$k=1.000$	0.004 741	0.001 926
$k=1.050$	0.005 390	0.001 674
$k=1.025$	0.005 696	0.001 763

3.3 车门门把手特征件

车门门把手特征件比较复杂,需要把模面的网格画的较细,保证模面补偿后节点能平滑过渡,凸模圆角半径改为 10 mm。压边力为 20 kN,有实体拉深筋。 $k=1$ 时的 D_z 和 D_a 值,如图 10 所示。图 11

(a) 5条轮廓线的 D_z 值

(b) 5条轮廓线的 D_a 值

图 7 柱面扁壳件 5 条轮廓线的 D_z 、 D_a 值

(a) 柱面扁壳特性件的虚拟油石效果

(b) $k=1.05$ 时模面补偿的虚拟油石效果

图 8 柱面扁壳特征件模面补偿前后的虚拟油石效果比较

所示为车门门把手特征件模面补偿前后的虚拟油石

图9 柱面扁壳特征件回弹前后 x 轴方向的曲率 (a) 8条轮廓线的 D_z 值 (b) 8条轮廓线的 D_a 值图10 车门门把手特征件8条轮廓线的 D_z 、 D_a 值

效果比较。图12为车门门把手特征件部分截面轮廓线模面补偿前后对比。

3.4 应力分析

成型过程中板料厚度方向的应力不均匀所形成的弯矩是导致面畸变缺陷的重要因素。以柱面扁壳特征件为例,取3号截面轮廓线回弹前的横向拉应力,如图13所示。在 $x=0$ mm、 $x=125$ mm 和 $x=250$ mm 附近,板料厚度方向的应力梯度较大,上层拉应力明显小于下层,形成了厚度方向的弯矩,回弹后在 $x=0$ mm 到 125 mm 和 $x=0$ mm 到 250 mm 两段之间产生凹陷,即面畸变。经过模面补偿,柱面扁壳特征件板料厚度方向应力梯度有了明显的减小,如图13所示,但是没有完全消除,这是由于板料合模时的型面和原有设计有了一定差

(a) 门把手特征件虚拟油石效果

(b) $k=1$ 时模面补偿后的虚拟油石效果

图11 模面补偿前后的虚拟油石效果比较

(a) 截面线2

(b) 截面线3

图12 门把手特征件部分截面轮廓线模面补偿前后对比

别,需要靠板料厚度方向应力梯度形成的弯矩使板料在回弹后抵消之。

4 结论

(1) 通过车门门把手特征件的有限元仿真与试验的结果的轮廓线对比,验证了特征件回弹后面畸

图 13 柱面扁壳特征件回弹前截面线 3 的横向接应力

变缺陷的预测精度。

(2) 提出了一种针对车身外覆盖件面畸变缺陷的模具模面补偿方法。在柱面扁壳特征件和门把手特征件的算例中, 模面补偿后 D_a 和 D_z 值都有显著降低, 且曲率与理想型面吻合较好。

(3) 通过模面补偿, 可以减小板料成形过程中厚度方向的应力梯度, 从而大大减少应力梯度形成的弯矩所导致的面畸变缺陷。

(4) 由于只引入了一个方向的修正量, 在另一个方向的边界处会产生微小的缺陷如图 8 和图 11 所示。因此在 y 方向边界处的模具网格需要划分更细, 保证 y 方向边界处的节点过渡平滑。

参 考 文 献

[1] FUKUMURA M, YAMASAKI Y, INAGE D, et al. Finite element simulation of surface defects in the automobile door outer panel[J]. AIP Conf. Proc., 2004, 712: 1917-1922.

[2] SUN Zhenzhong, YANG Yuying, SHI Lei. Experimental study on controlling technique of surface deflection[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199:

445-447.

- [3] SHEN Guozhe, HU Ping, ZHANG Xiangkui, et al. Springback simulation and tool surface compensation algorithm for sheet metal forming [J]. AIP Conf. Proc., 2005, 778: 334-339.
- [4] ANDERSON A. Evaluation and visualization of surface defects on auto-body panels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 821-837.
- [5] 杨玉英, 孙振忠. 汽车覆盖件面畸变评价指标研究[J]. 塑性工程学报, 2004, 11(4): 76-80.
- YANG Yuying, SUN Zhenzhong. Study on evaluation standard of automobile panels' surface deflection[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(4): 76-80.
- [6] 孙振忠, 徐雳, 宋立君. 局部加压工艺对面畸变控制的研究[J]. 汽车工艺与材料, 2004(5): 23-25.
- SUN Zhenzhong, XU li, SONG Lijun. Research on surface aberration control by taking local pressure technology[J]. Automobile Technology & Material, 2004(5): 23-25.
- [7] THUILLIER S, PORT A, MANACH P. Surface defects in sheet metal forming: A simulative laboratory device and comparison with FE analysis[J]. AIP Conf. Proc., 2011, 1383: 839-846.
- [8] OHNIMUS S, PETZOLDT M, RIETMAN B, et al. Compensating springback in the automotive practice using MASHAL[J]. AIP Conf. Proc., 2005, 778: 322-327.
- [9] 孙振忠, 杨玉英, 赵立红. 柱面扁壳面畸变的试验研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(4): 372-374.
- SUN Zhenzhong, YANG Yuying, ZHAO Lihong. Experiment study on surface deflection of cylinder shallow shells[J]. Materials Science & Technology, 2005, 13(4): 372-374.
- [10] ZHOU Chi, LIAO Juan, ZHU Yin, et al. A method of springback prediction and tool shape compensation for multi-curvature sheet metal bending[J]. AIP Conf. Proc., 2010, 1252: 868-874.
- [11] SHEN Hongqing, LI Shuhui, CHEN Guanlong. Quantitative analysis of surface deflections in the automobile exterior panel based on a curvature-deviation method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 1548-1556.
- [12] 孙振忠, 杨玉英. 柱面扁壳面畸变形成机理及控制[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 210-214.
- SUN Zhenzhong, YANG Yuying. Generating mechanism and controlling technique on surface deflection of cylinder shallow shells[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 210-214.
- [13] 韩金全, 万敏, 李卫东. 基于回弹的飞机蒙皮拉形模

型面修模技术研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 184-188.

HAN Jinquan, WAN Min, LI Weidong. Surface improvement based on springback compensation for aircraft skin stretching tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 184-188.

- [14] HU Ping, BAO Jingru, ZHAO Kunmi. Low / distortion on exterior surface of auto body and its correction method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(2): 299-305.

- [15] LIU Yuqi, LIU Junhua, HU Ping, et al. Quantitative

prediction for springback of unloading and trimming in sheet metal stamping forming[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(2): 190-192, 196.

作者简介: 倪啸枫, 男, 1986 年出生。主要研究方向为板料冲压成形。

E-mail: buaaloda@sjtu.edu.cn

沈洪庆, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为板料塑性成形。

E-mail: hqshen@sjtu.edu.cn

李淑慧(通信作者), 女, 1973 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车板先进成形技术。

E-mail: lishuhui@sjtu.edu.cn

第 2 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

基于多模式单演特征检测与匹配的三维视觉测量技术研究

博士: 李进军

毕业学校: 西安交通大学

指导教师: 赵宏

三维视觉测量技术旨在从一幅(或多幅)二维图像(或者视频剪辑)自动获取现实世界中目标和场景的几何模型、运动和形变等信息, 从而识别和理解三维现实环境。论文选题来源于国家 973 项目子课题, 研究内容从目标场景轮廓测量、时空连续运动跟踪及局部瞬时形变估计等问题出发, 对基于多模式单演特征检测、匹配及融合的三维视觉测量方法进行了深入的理论分析和实验研究, 选题具有重要的学术意义和工程应用价值。论文研究和解决的主要问题及创新点如下。

提出了联合人工图像标定和由运动到结构捆绑调整标定的三维视觉测量系统标定方法, 有效地提高了摄像机及视觉测量系统的标定精度。该标定方法采用最真实反映摄像机射影变换关系的一般摄像机模型, 结合人工图模式标定方法和由运动到结构捆绑调整标定方法的优点, 由粗到精地优化估计立体视觉系统的内外参数和标定目标的几何结构, 有效地克服了传统立体标定方法精度低、可靠性差等缺点。

模拟人眼视觉信息分析和处理功能, 提出了二维图像信号在泊松尺度空间和单演小波域的建模分析方法, 采用二维广义希尔伯特变换代替传统的梯度法或高斯微分法, 从原始图像提取多尺度、多分辨、多模式的各向同性单演局部特征, 包括彩色纹理特征、彩色相位特征、几何特征(局部方向、旋转不变顶角)、结构特征(局部振幅、局部相位)、结构内在维度, 建立了多模式单演特征描述向量、特征相似性测量函数及立体匹配价值函数, 实现了鲁棒而精确的图像特征点匹配、双目立体视觉的密集数据估计及立体图像序列的时空视差估计。

综合局部单演特征相似性测量与由稀疏到稠密的多视图方向面片重建方法, 实现了三维实体形貌的高精度重构。以纸张、纸杯、包装盒等静态目标重建为研究对象, 将目标或场景视为由一个覆盖该目标或场景表面的可视稠密面片集组成的实体形貌, 通过特征点检测、特征匹配、面片生成、膨胀、滤波、网格建模、表面特征融合等过程, 由稀疏到稠密地重建高精度、高保真的三维模型。三维重建中, 不需要目标和场景的任何初始边界信息, 能够自动检测和抛弃外部点和缺失部分; 不需要对邻域特征进行任何平滑处理。

采用三维跟踪原理处理非刚体运动目标或运动场景的瞬时形貌与形变测量, 实现了动态目标的瞬时时空形貌和运动的鲁棒重建。以旋转纸杯跟踪和纸张变形测量为例, 采用具有固定拓扑关系的多面体网格来表示运动目标或场景的瞬时几何结构, 初始表面网格利用多视图静态形貌重建算法建模, 后续每一帧的网格形变通过局部刚体运动和全局非刚体形变两个优化过程来跟踪时变的表面顶点实现, 优化过程中具有高形变能量的误运动顶点被作为外部点而被滤除, 该过程迭代进行直到没有误运动。其优点在于, 可以处理快速、复杂和大的非刚体形变, 且在长帧序列中误差积累有限, 可以处理大误差和严重缺失; 高效的表面纹理和多模式特征描述更有利于外部点的检测与滤除, 而由优化网格表示的全局形状允许停止或重新开始跟踪那些由于遮挡而再次可见的点。