蒙皮拉形加载轨迹优化

张彦敏 周贤宾

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 对双曲度飞机蒙皮拉伸成形问题,探讨了加载轨迹对成形质量的影响,提出了采用最优化理论与算法和有限元数值模拟相结合,确定最优拉形加载轨迹的原理与方法. 分析了单凸双曲度蒙皮拉伸成形常用加载轨迹的成形特点和不足,采用有限元数值模拟和序列二次规划相结合的方法,通过正交试验设计建立近似响应模型和设计变量的取值范围,以减小卸载回弹提高贴模度为研究目标、最大主应变为约束条件建立最优化数学模型,确定最合理的拉形加载轨迹. 优化结果表明成形零件贴模度和应变分布与厚度的均匀程度均有明显提高.

关 键 词: 蒙皮; 加载轨迹; 优化; 数值模拟

中图分类号: TG 386

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)02-0201-05

Optimization of bading trajectory in skin stretch forming process

Zhang Yanmin Zhou Xianbin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The influence of loading trajectory was discussed to solve the precision forming problem of double curve skin in stretch forming. The method of combing finite element analysis and optimization algorithms was proposed to acquire the reasonable loading trajectory. Characteristic and insufficiency of common loading trajectories were analyzed which used in double curve skin forming. Optimization mathematics model was set up in order to reduce springback and improve the fittability. Approximate model and variables range were set up with orthogonal design. The reasonable loading trajectory was found through the numerical simulation and sequential quadratic programming optimization algorithm under the restrictive of maximal thickness strain. The optimization results show that the fittability, strain distributing and thickness uniformity were improved greatly.

Key words: skin; loading trajectory; optimization; numerical simulation

拉伸成形 (简称拉形)是双曲度飞机蒙皮的主要成形方式,依靠工作台顶升和拉形机夹钳的拉伸包覆运动使坯料贴合到模具表面,得到最终的零件形状. 拉形机构运动涉及拉、弯、压、扭及其组合、模具摆放方位等,使得加载轨迹对蒙皮零件的成形质量尤为重要. 目前生产和理论研究中的加载方式主要有持续拉伸,包覆—拉伸和拉伸—包覆—拉伸[1]. 随着多自由度精密数控拉形设备在飞机蒙皮成形中的应用,成形过程中夹钳和工作台的机构运动更加灵活,使得拉形过程存在多种可行加载轨迹,生产中仍以上述传统加载方式为基础,经过多次反复试拉,对于新材料、新结构零件有时需要几十次的试拉也不能生产理想合格零件;因此迫切需要建立一种快速可靠制定加载轨迹的方法,减少试模次数,为实际生产提供依据.

蒙皮拉形零件主要成形缺陷如滑移线、粗晶、纵向鼓包等通过多工步成形、控制拉形速度和最大变形量等方法能够克服[2-4],但对于卸载回弹引起的不贴模问题是制约零件精度的主要问题.

收稿日期: 2006-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10477001)

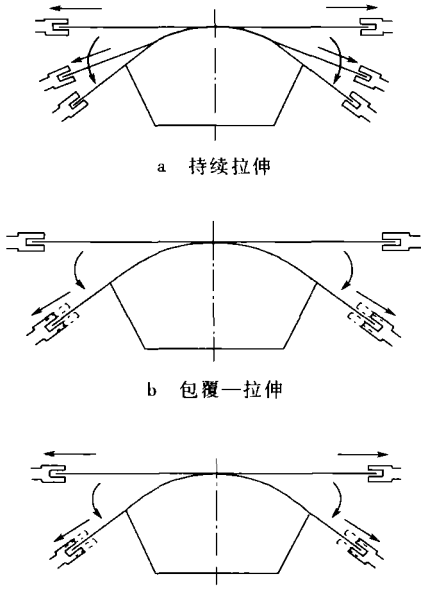
作者简介: 张彦敏(1970-),女,河北无极人,博士生, zym9@eyou.com.

理论解析计算回弹常经过大量的简化,结果难免会造成较大的误差.有限元数值模拟技术的发展为分析成形过程提供了快速可靠的手段[5-6],但是当前也出现了一个瓶颈问题,即采用数值模拟技术,根据经验对不同工艺手工更改参数进行多次模拟,从中找到比较合适的工艺参数,在一定程度上起到了优化作用,但从有限次的模拟结果中选择较优参数,从科学角度看没有实现真正的优化.因此当数值模拟技术达到一定水平时,将有限元数值模拟和最优化理论结合起来[7-9],使原来人工寻找合适工艺参数的办法改为让计算机自动寻找,以减少主观因素.随着数值模拟技术和优化算法逐渐完善及计算机运算能力的提高,开发应用最优化理论与数值模拟技术相结合成为发展趋势.

本文采用最优化理论和有限元数值模拟相结合的方法,对单凸双曲度蒙皮拉形中最佳成形工艺参数进行优化设计,在保证控制最大变形量的同时,以卸载后回弹为目标函数,寻求应变均匀、贴模度好的拉形轨迹.

1 蒙皮拉形工艺

蒙皮是飞机外形零件,外表面直接和气流接触,单凸双曲度蒙皮应用于机身表面和进气道中,在双曲度蒙皮中占有较大比重,其主要加载方式及成形原理如图 1所示.假设拉形过程为均匀拉伸,成形过程中板料中性层长度随时间变化如图 2所示,ΔL_1 为弹性伸长量,ΔL_2 为塑性伸长量.



a 持续拉伸

b 包覆—拉伸

c 拉伸—包覆—拉伸

图 1 蒙皮拉形加载方式示意图

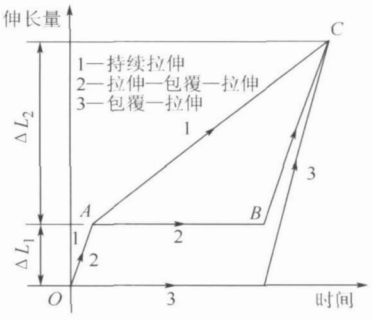


图 2 不同加载轨迹下板料中性层变形情况

1.1 持续拉伸 (stretch)

板料放置好并夹紧,夹钳对板料施加拉应力的同时绕模具施加包覆运动,使板料逐渐和模具贴合,特点是整个成形过程没有卸载.

1.2 包覆—拉伸 (wrap-stretch)

板料放置好并夹紧后,夹钳带动板料施加弯矩,板料产生纯弯曲变形并且尽可能和模具贴合,板料中性层长度不发生变化,然后夹钳施加拉应力,使板料完全贴合在模具上.

1.3 拉伸—包覆—拉伸 (stretch-wrap-stretch)

板料放置好并夹紧后,夹钳首先对板料施加一定预拉伸率,然后保持拉力的同时将工件包向模具,使它和模具外形的各点贴合,包覆完毕时再施加一定的补拉伸率提高零件的贴模度.

2 不同拉形方式有限元分析

为了成形合格零件,最大限度控制卸载回弹,制定最佳的拉形工艺参数,分析了不同加载方式下蒙皮成形特点.对同一零件在相同变形程度下,最大主应变分布情况和卸载回弹大小进行比较.

2.1 有限元模型

蒙皮成形示意图如图 3所示,通过控制模具上顶和夹钳的水平运动实现不同的加载模式,模具上顶行程和夹钳水平移动行程以 x_i (i = 0, 1, 2, 3)表示.拉形工艺参数和对应的成形方式如表 1所示,表中,x_0 为预拉;x_1 为模具上顶,成形;x_2 为模具上顶,补拉;x_3 为夹钳水平跟进.

拉形模具和夹钳口部分的单元剖分情况如图 4所示,由于零件对称,为减少迭代计算时间,采

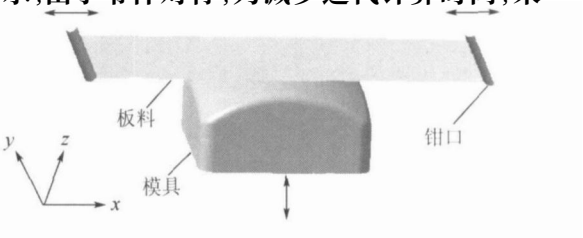


图 3 单凸双曲度蒙皮成形示意图

用 1/4模型,在对称面 x-x和 y-y施加对称约束. 板料尺寸为 1 000 mm ×600 mm;采用四节点四边形壳单元,单元尺寸为 6 mm;模具采用三维四边形和三角形刚性单元,单元尺寸为 10 mm,以 ABAQUS作为有限元分析软件;成形分析采用动态显示算法,厚度方向采用 5个积分点;静态隐式无模法计算回弹,厚度积分点采用 7个,计算回弹的约束点选在零件的顶点附近. 计算结果如图 5所示.

表 1　拉形工艺参数和成形方式

x_0 /mm	x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	成形方式
0	200	70	170	包 —拉
5	220	30	40	拉 —包 —拉
0	250	0	50	拉伸

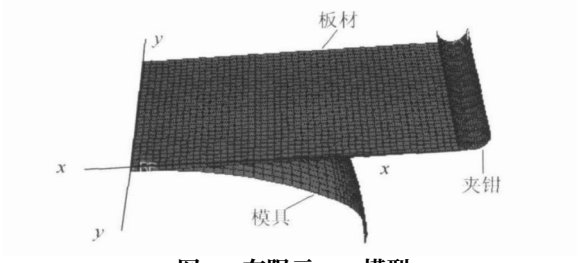


图 4　有限元 1/4模型

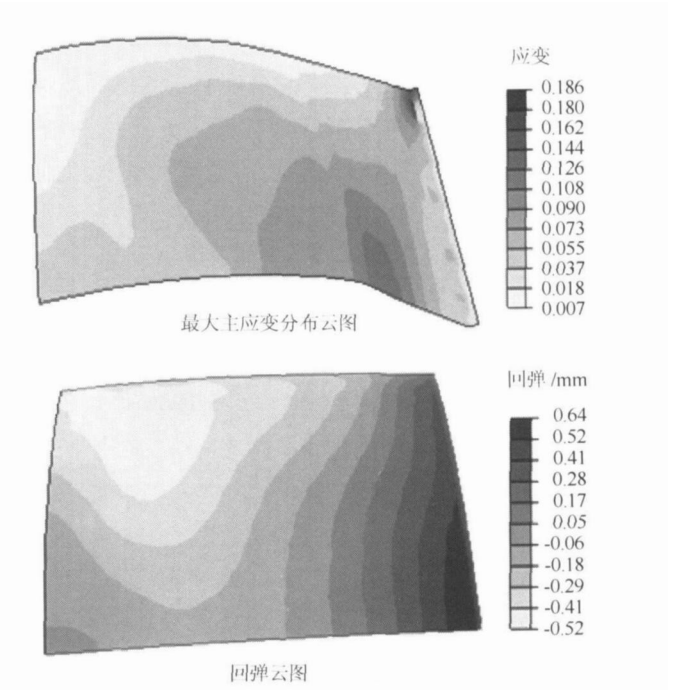
2.2　成形质量分析

由图 5可知,在相同变形程度下,拉伸 —包覆 —拉伸成形方式的应变均匀程度较好,而持续拉伸时应变均匀程度最差. 原因是持续拉伸时板料初始为弹性变形,模具顶部和板料接触. 随着变形的增加,接触区域沿顶部向四周逐渐扩散,但由于接触部位的摩擦作用,顶部进一步变形受到阻碍,使得变形主要产生于悬空段,从而出现应变不均匀现象. 但持续拉伸变形方式下卸载回弹最小,贴模度最好. 包覆 —拉伸的加载方式由于卸载后出现较大回弹,同时应变均匀性也不理想,实际中很少采用.

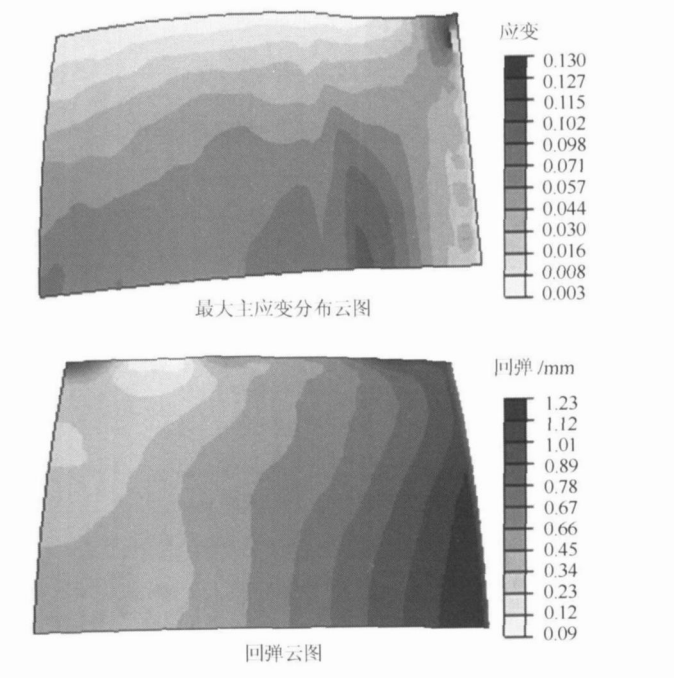
2.3　卸载回弹机理分析

蒙皮拉伸成形时材料主要发生弯曲应变和拉伸应变,拉形结束后截面上存在应力差是引起卸载回弹的根本原因[10],弯曲过程施加一定的拉伸能够改善截面的应力、应变分布,从而减小卸载回弹,提高贴模度[11-13].

由于拉伸 —包覆 —拉伸成形时应变相对比较均匀,实际生产中多采用该成形方式,通过改变预拉伸率和补拉伸率大小来提高成形零件的成形质量,尤其是贴模问题. 实际上,除预拉伸 (*OA*段)、补拉伸 (*BC*段)外,*AB* 包覆变形阶段对整个成形过程质量影响很大 (图 2所示). 对包覆阶段的变形研究更有助于分析整体的变形情况. 本文采用优化算法寻求变应变条件下最佳的拉形轨迹. ISIGHT作为优化算法软件,通过数据接口实现 ISIGHT和 ABAQUS的无缝链接.



a　持续拉伸



b　拉伸 —包覆 —拉伸

图 5　不同加载方式最大主应变与卸载回弹模拟结果

3　拉伸成形工艺优化设计

3.1　设计变量选取

文献[11-13]已经证明,一定的预拉伸率和

补拉伸率可有效抑制回弹,且预拉伸率一般取1%左右合适.因此,优化过程中预拉伸率作为一个常量取1%,而将包覆阶段的拉伸率、补拉伸率作为优化对象.通过对不同加载模式下模具、夹钳的行程作为设计变量,确定成形过程中设计变量的取值范围,如表2所示.

表2 设计变量及取值范围

x_0/mm	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm
5	215～250	10～60	0～35

首先采用正交试验设计分析各设计变量和卸载回弹的函数关系,如图6～图8所示.并根据试验结果建立设计变量和目标函数之间的响应面近似模型.

采用最小二乘法将正交试验结果进行拟合,建立目标函数回弹和设计变量之间的函数关系,以便于采用基于梯度的优化算法进行优化.

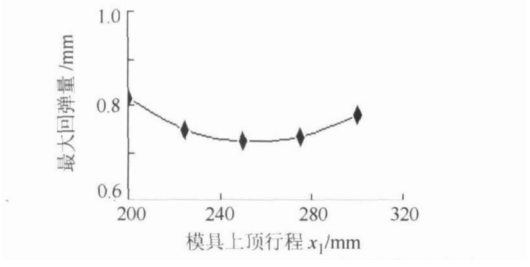


图6 包覆阶段模具行程和零件最大回弹关系

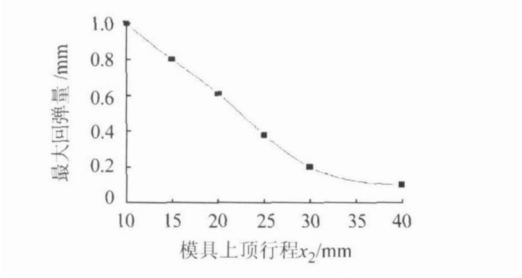


图7 补拉阶段模具行程和零件最大回弹关系

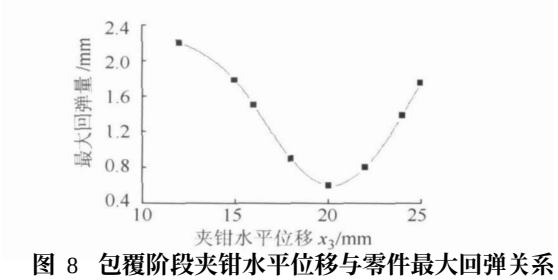


图8 包覆阶段夹钳水平位移与零件最大回弹关系

3.2 优化模型及算法

以卸载后单元回弹的最大值为目标函数,采用序列二次规划法与混合整数规划结合的方法,在所建立的响应面上对各拉形工艺参数进行优化,优化数学模型如式(1)所示.

$$\left.\begin{aligned} U &= \min(\max(u_i)) \quad i = 1, 2, \cdots, n \\ \text{s.t.}\quad & 215 \le x_1 \le 250 \\ & 10 \le x_2 \le 60 \\ & 20 \le x_3 \le 35 \\ & \max(\varepsilon_{\max}) \le 0.1 \quad i = 1, 2, \cdots, n \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中,U为目标函数;$\max(u_i)$为成形零件中各单元卸载回弹后的最大值;$\varepsilon_{\max}$为成形零件中单元最大主应变中的最大值.

程序经过优化迭代计算,得出各拉形工艺参数的最优值为:x_1=217.385 mm, x_2=15.627 mm, x_3=20.000 mm.以卸载前后z向位移为回弹量,优化后零件成形回弹如图9所示,最优加载轨迹所对应各阶段的变形量如图10中O—A—B′—C所示.图11～图13对比了优化前后不同加载轨迹下零件对称面上单元厚度和回弹情况.

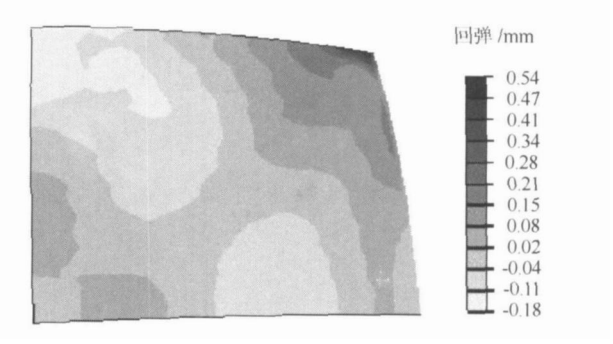


图9 优化后零件回弹云图

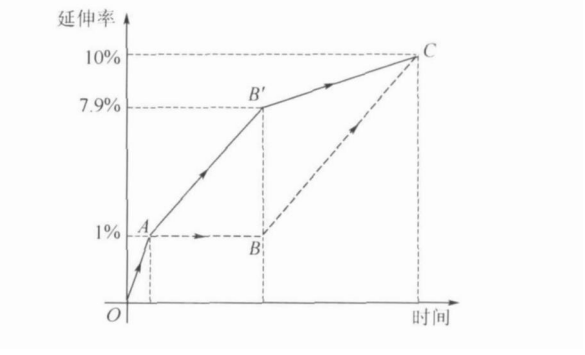


图10 最优加载轨迹

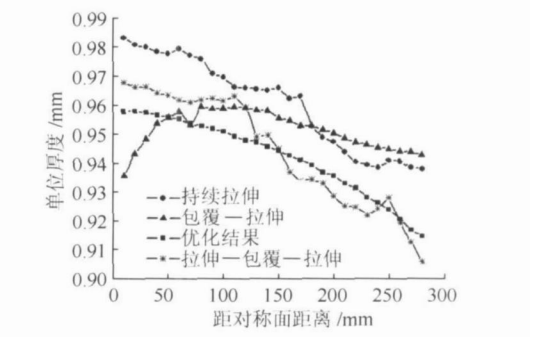


图11 不同加载轨迹成形后 x-x截面单元厚度

3.3 优化结果分析

从成形的总体情况看,优化后零件的应变分

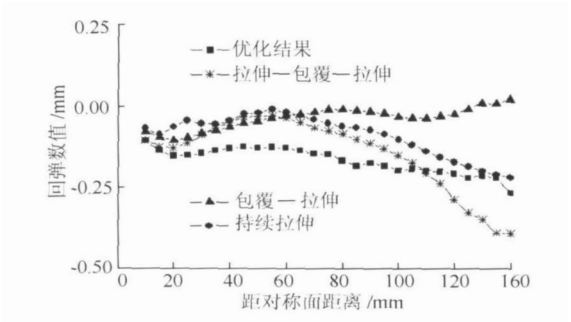


图 12　不同加载轨迹成形后 y-y截面回弹大小

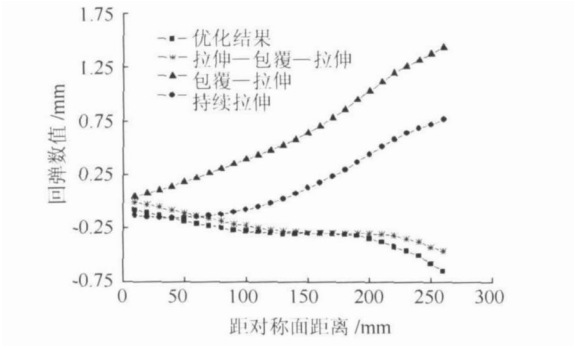


图 13　不同加载轨迹成形后 x-x截面回弹大小

布进一步趋于均匀,回弹量除局部较大(0.700～0.900mm)外,零件大部分的回弹量都在0.500mm以下,最大回弹量由优化前的1.230mm降低到0.997mm,贴模度提高了26%,并且回弹梯度最小.由于该零件为单凸双曲度蒙皮,因此在拉伸方向的对称面 *x-x*(图4所示)变形量最大,图11分析了不同加载轨迹下成形 *x-x*截面单元厚度情况,最大厚度减薄率为9.2%,最小减薄率为4.3%,优化后零件的减薄率虽不是最小,但是厚度分布最均匀,且厚度梯度最小.以上结果完全可以说明采用优化后的加载轨迹进行拉伸成形,从应变均匀性、厚度分布及回弹几个方面都比优化前有明显提高.

4　结 束 语

采用传统试错方法进行拉形轨迹设计已不能满足精密成形要求和复杂新型零件的生产,随着有限元数值模拟技术的成熟和优化理论与算法在金属成形领域的应用,二者相结合成为确定工艺参数的新方法.本文通过对单凸双曲度蒙皮拉形轨迹的优化,使优化后成形零件变形更加均匀,贴模度有较大提高,说明该方法有广泛的应用前景.

参考文献 (References)

[1] 唐荣锡,陈鹤峥,陈孝戴. 飞机钣金工艺[M]. 北京:国防工业出版社,1983: 30 - 36
Tang Rongxi, Chen Hezheng, Chen Xiaodai. Aiplane sheet metal technics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1983: 30 - 36 (in Chinese)

[2] 万敏,周贤宾,李晓星,等. 镜面蒙皮拉形工艺参数研究[J]. 航空学报,1999,20(4): 326 - 330
Wan Min, Zhou Xianbin, Li Xiaoxing, et al. Process parameters in stretch forming of mirror skins[J]. Acta Aeronautical et Astronautic Sincia, 1999,20(4): 326 - 330 (in Chinese)

[3] 游中厚,黄勇胜,吴瑞豪. 改善飞机前侧壁蒙皮表面橘皮研究[J]. 航空工程与维修,2001(6): 45 - 47
You Zhonghou, Huang Yongsheng, Wu Ruihao. A study of orange-like routhness on front side on aiplane[J]. Aviation Engineering, 2001(6): 45 - 47 (in Chinese)

[4] 万敏,周贤宾,李晓星,等. 拉形条件对镜面蒙皮成形质量的影响[J]. 北京航空航天大学学报,1998,24(6): 654 - 657
Wan Min, Zhou Xianbin, Li Xiaoxing, et al. Effects of stretching conditions on forming quality of mirror skins[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(6): 654 - 657 (in Chinese)

[5] 张晓静,周贤宾. 板料成形回弹模拟[J]. 塑性工程学报,1999,16(13): 56 - 62
Zhang Xiaojing, Zhou Xianbin. Simulation of springback in sheet metal forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1999, 16(13): 56 - 62 (in Chinese)

[6] 白笛,周贤宾,李东生,等. 飞机复杂蒙皮拉形数值模拟系统开发及关键技术研究[J]. 航空学报,2004,25(6): 606 - 610
Bai Di, Zhou Xianbin, Li Dongsheng, et al. Key technology research and system development of complex aircraft skin stretch forming simulation[J]. Acta Aeronautical et Astronautic Sincia, 2004,25(6): 606 - 610 (in Chinese)

[7] Liu Gang, Lin Zhongqin, Bao Youxia. Optimization design of drawbead in drawing tools of autobody coverpanel[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2002, 124(2): 278 - 285

[8] Fann K J, Hsiao P Y. Optimization of loading conditions for hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1/2/3): 520 - 524

[9] Naceur H, Guo Y Q. Blank optimization in sheet metal forming using an evolutionary algorithm[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 151(1/2/3): 183 - 191

[10] 余同希,章亮炽. 塑性弯曲理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1992
Yu Tongxi, Zhang Liangchi. Plastic bend theory and application [M]. Beijing: Scientific Press, 1992 (in Chinese)

[11] Parris A. Precision stretch forming of metal for precision assembly [D]. Dapartment of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1996

[12] 金朝海,周贤宾,刁可山,等. 铝合金型材拉弯成形回弹的有限元模拟[J]. 材料科学与工艺,2004,12(4): 394 - 397
Jin Chaohai, Zhou Xianbin, Diao Keshan, et al. Springback analysis for stretch bending of aluminum profile [J]. Materials Science & Technology, 2004, 12(4): 394 - 397 (in Chinese)

[13] Clausen A H, Hopperstad O S, Langseth M. Stretch bending of aluminum extrusions for car bumpers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102(1/2/3): 241 - 248

(责任编辑:卢　硕)