

## 机头锥蒙皮数控拉形过程全流程有限元仿真及回弹预测

张贺刚<sup>1</sup>, 王志成<sup>2</sup>, 王晓臣<sup>2</sup>, 杜建宁<sup>2</sup>, 彭皓云<sup>2</sup>, 朱 丽<sup>2</sup>, 李小强<sup>3</sup>, 阳晓军<sup>4</sup>

(1. 航发智造(北京)科技有限公司, 北京 100083; 2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034;

3. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 4. 广州希鹏计算机科技有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** 为了提高新一代飞机的气动性能, 对表面外形精度的要求显著提高, 因此, 必须控制蒙皮拉形后的零件回弹。基于自主开发的国产蒙皮拉形仿真软件 AISF, 对机头锥蒙皮数控拉伸成形、切边、回弹全过程进行了有限元仿真。对 VTL1000 数控蒙皮拉形机的关键运动机构进行了测量, 建立了考虑机床实际运动的蒙皮拉形有限元仿真模型。将实际零件数控拉形代码直接输入有限元仿真模型, 保证仿真边界条件与试验完全一致。考虑实际生产条件, 建立了拉形—回弹—切边—压紧仿真模型, 实现了回弹的仿真预测。根据优化后的数控拉形代码, 成形出了实际零件并进行了数字化检测, 发现回弹预测与实际基本吻合, 验证了有限元仿真模型的准确性。

**关键词:** 蒙皮; 拉形; 回弹预测; 数控拉形机; 全流程仿真

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.013

中图分类号: V260.5; TH164; TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 09-0083-07

## Finite element simulation and springback prediction on whole process for CNC stretch forming process of nose cone skin

Zhang Hegang<sup>1</sup>, Wang Zhicheng<sup>2</sup>, Wang Xiaochen<sup>2</sup>, Du Jianning<sup>2</sup>, Peng Haoyun<sup>2</sup>,

Zhu Li<sup>2</sup>, Li Xiaoqiang<sup>3</sup>, Yang Xiaojun<sup>4</sup>

(1. Hangfa Intelligent Manufacturing (Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China; 3. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. C3P Engineering Software International Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** In order to improve the aerodynamic performance for new generation of aircraft, the requirements on the surface shape accuracy have been significantly increased, so it is necessary to control the springback of parts after the skin is stretched. Therefore, based on the self-developed domestic skin stretch forming simulation software AISF, the whole process of CNC stretch forming, trimming, springback for the nose cone skin was simulated numerically. Then, the key motion mechanism of VTL1000 CNC skin stretch forming machine was measured, and a finite element simulation model of skin stretch forming considering the actual motion of machine tool was established. Furthermore, the CNC stretch forming code of the actual parts was directly input into the finite element simulation model to ensure that the simulation boundary conditions were completely consistent with the experiment. Considering the actual production conditions, a simulation model of stretch forming-springback-trimming-pressing was established to realize the simulation prediction of springback. According to the optimized CNC stretch forming code, the actual parts were formed and digitally inspected. The results show that the springback prediction is basically consistent with the actual situation, which verifies the accuracy of the finite element simulation model.

**Key words:** skin; stretch forming; springback prediction; CNC stretch forming machine; whole process simulation

为了提高新一代飞机的气动性能, 对表面外形

精度的要求显著提高, 因此, 必须控制蒙皮拉形后的零件回弹。国外飞机公司与设备公司, 利用有限元仿真技术, 实现了蒙皮拉形过程的精准预测, 通过优化显著提高了蒙皮成形精度, 节约了大量成本<sup>[1]</sup>。比如波音<sup>[2]</sup>、诺斯罗普·格鲁曼<sup>[3]</sup>、庞巴迪<sup>[4-5]</sup>等公司, 利用商用 CAD/CAE 软件(如 CAITA、PATRAN、MARC、PAM-STAMP 等)搭建

收稿日期: 2022-02-24; 修订日期: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075025)

作者简介: 张贺刚(1978-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: hgbox@qq.com

通信作者: 李小强(1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: littlestrongcn@163.com

钣金仿真系统,对蒙皮拉形工艺的仿真、优化、回弹补偿等技术进行了深入研究,提高了蒙皮拉形的成形精度和表面质量,手工修复与校形大幅降低,效率大幅提升,避免了过多的浪费,生产周期显著缩短,1个项目每年即可节约数百万美元的投入。值得一提的是,法国ACB公司与俄罗斯合作,针对蒙皮拉形开发了专用的工艺仿真软件S3F,该软件结合数控蒙皮拉形机,利用摄动法,能够对蒙皮拉形过程进行分析,可以输出相应的机床数控代码。相对于有限元法,计算速度快、计算精度基本达到使用要求,但其未考虑上压成形,加载方式比较简单,功能有限<sup>[6-8]</sup>。ACB-TEXHO公司新推出FormCAM软件,是在S3F基础上改进并重新开发的,在保留了原有理论解析算法的基础上,引入了有限元计算功能,但在起皱计算方面,仍存在一些误差。

国内的蒙皮拉形有限元仿真技术起步较晚,但在蒙皮拉形仿真方面已展开诸多研究,白雪飘等<sup>[9]</sup>、李卫东等<sup>[10-11]</sup>、韩志仁等<sup>[12]</sup>、陈根发等<sup>[13]</sup>、房涛涛等<sup>[14]</sup>、谢洪志等<sup>[15]</sup>对蒙皮拉形工艺加载轨迹设计、蒙皮拉形设备机构运动仿真、蒙皮拉形工艺有限元仿真等问题进行了深入的研究,取

得了可喜的成果。但国内蒙皮拉形有限元仿真技术,多是在国外CAE软件的基础上进行的部分工艺的仿真,尚未在国产自主化软件上实现拉形—回弹—切边—压紧全流程仿真。

## 1 工艺关键信息

### 1.1 试验件

数模如图1所示,其基本尺寸为1228.7 mm×996.4 mm×490.6 mm,试验件原材料的供货状态为O态,拉形时采用新淬火状态一次拉形,W态为新淬火状态,新淬火状态材料表示为7B04-W。材料的力学性能如表1所示。

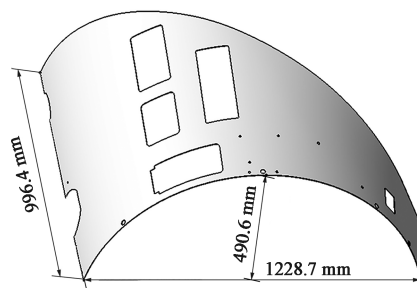


图1 蒙皮零件CATIA模型

Fig. 1 CATIA model of skin part

表1 7B04-W 铝合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 7B04-W aluminum alloy

参数	厚度/mm	弹性模量 $E$ /GPa	密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	各项异性指数 $r$	屈服强度 $R_{\text{el}}$ /GPa	应变强化系数 $K$ /GPa	硬化指数 $n$
数值	2.0	72.98	2700	0.37	0.74	0.439	0.618	0.084

### 1.2 成形设备

试验设备为VTL1000数控蒙皮综合拉形机,由美国Cyril-Bath公司生产,该拉形设备为横纵一体数控拉形机,该机床包含两套可以调整曲形的夹钳、3个模具工作台、4个托架、4个拉伸筒和1个上压机构,上压机构可提供10000 kN的压力,夹钳可以旋转和摆动。

该设备主要的机构动作为:(1)夹钳夹紧、松开;(2)夹钳成曲线状;(3)夹钳摆动;(4)夹钳回转;(5)夹钳旋转;(6)托架平移;(7)托架偏置;(8)拉伸作动筒拉伸;(9)模具工作台横向移动和上顶;(10)模具工作台倾斜;(11)上压机构横向移动;(12)上压机构下压。图2为VTL1000数控蒙皮拉形机示意图<sup>[16]</sup>。

### 1.3 试验件工艺性分析

本试验件适合采用横拉成形工艺,设计的模具

模型如图3所示,其几何尺寸为1245 mm×1243 mm×605 mm。试验件展开后,长度方向约为1700 mm,模具型面展开后,长度方向约为2005 mm,综合考虑拉形过程、装夹量、切边余量以及机床的工作范围,最终,确定采用尺寸为2700 mm×1200 mm的矩形毛料。试验件采用“包覆—补拉”的工艺。该试验件在蒙皮拉形过程中,容易出现粗晶、滑移线、拉裂和不贴模等缺陷。

### 1.4 拉形关键参数分析

在CATIA软件中建立用于拉形模具定位的局部坐标系,并将数模转换到此坐标系下,如图4所示。将数模在XOY和YOZ平面进行投影,模具数模坐标轴的方向与图2中设备坐标轴的方向一致,模具倾角的测量结果如图4所示。拉形模左侧倾斜角约为3.3°,右侧倾斜角约为1.2°,顶部倾斜角约为2.3°。另外,模具高度约为605 mm。确定拉形轨迹

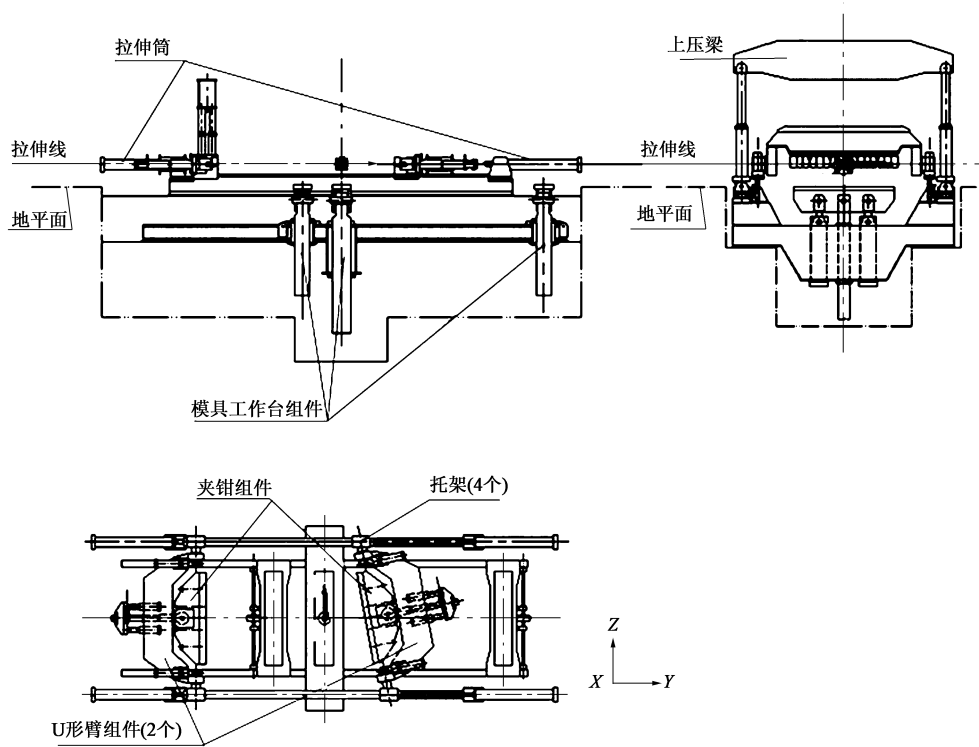


图 2 VTL1000 数控蒙皮拉形机示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VTL 1000 CNC skin stretch forming machine

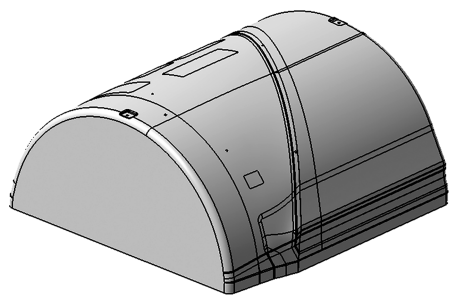


图 3 模具 CATIA 模型

Fig. 3 CATIA model of die

时，需考虑上述角度和高度。

2 有限元仿真与机构运动仿真

2.1 数控蒙皮拉形仿真软件

AI-Form Stretch Forming (AISF) 是一个专注于蒙皮拉形工艺的软件包，是一套国产的具有自主知识产权的蒙皮拉形仿真解决方案，由广州希鹏计算机科技有限公司与北京航空航天大学轻质结构精密成形与装配实验室联合开发的。AISF 软件包将 CAD 设计、工艺过程机构运动学分析和有限元模拟有机地结合在一起。AISF 采用了最新的数值模拟技术，充分考虑到蒙皮坯料大变形、大位移的真实力学行

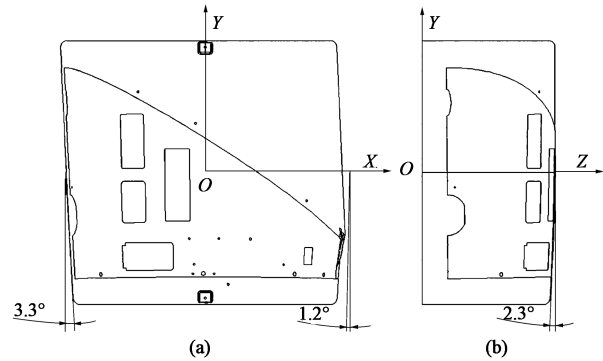


图 4 模具拉形面倾角测量

(a) XOY 平面 (b) YOZ 平面

Fig. 4 Inclination angle measurement of stretch forming surface for die

(a) XOY plane (b) YOZ plane

为，具有很高的计算精度和高效的模拟速度。AISF 的分析计算包括两个阶段：拉形机的机构运动过程仿真和板材变形的有限元模拟，进而设计和优化拉形成形过程中的工艺参数。当拉形工艺制定后，AISF 可以自动生成工艺报告文件来指导实际生产。对于给定的授权拉形机，可以直接生成 NC 加工代码。

2.2 有限元模型的建立

基于 VTL1000 型数控蒙皮拉形机，对蒙皮拉形过程进行了有限元仿真研究。数据来源于机床的真实参数，设置如图 5 所示。基于 AISF 软件包的横拉

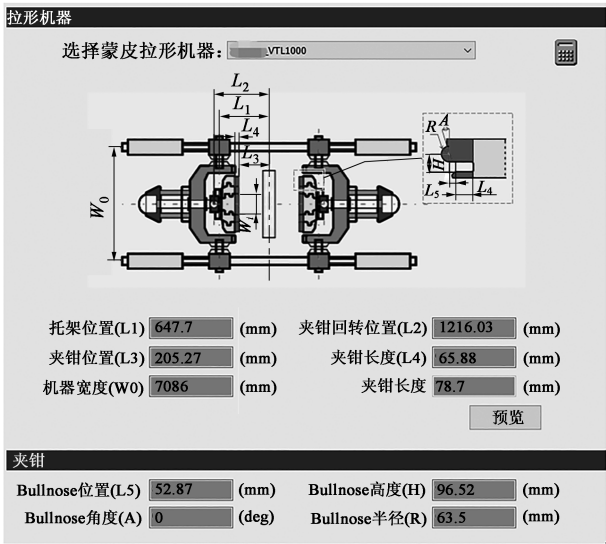
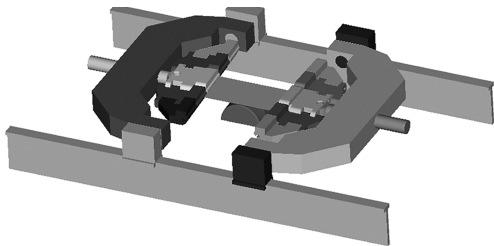


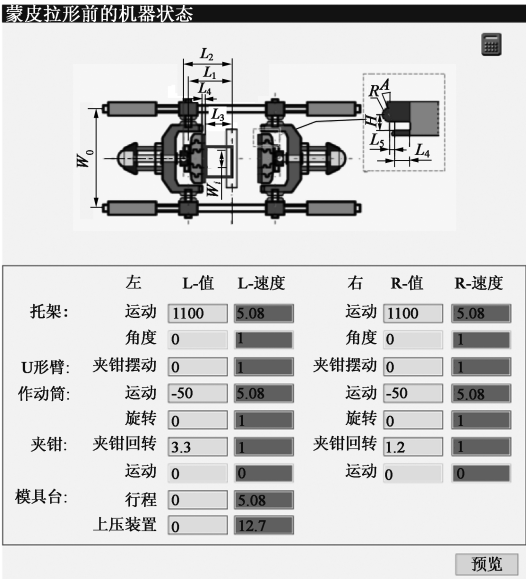
图 5 蒙皮拉形设备参数设置

Fig. 5 Parameters setting of skin stretch forming machine

功能，对机头锥蒙皮零件的拉形工艺进行仿真，建立的仿真模型如图 6a 所示，图 6b 为相关参数。图 6b 的软件界面中， $W_i$  为第  $i$  个夹钳的宽度。



(a)



(b)

图 6 仿真模型 (a) 及其初始参数 (b)

Fig. 6 Simulation model (a) and its initial parameters (b)

### 2.3 机构运动设置

实际生产过程中，坯料经过新淬火处理，会产生一定的变形，不会像有限元模拟软件中初始坯料那样平整，装料状态也和有限元模拟的状态有所不同。为了使实际装料状态和有限元模拟状态尽量一致，在模拟软件中，设置平整装料状态向实际装料状态的机构运动过程，以此将实际装料状态在模拟中展现出来。表 2 为实际生产中的装料状态的机床参数，图 7 为装料状态的机床姿态，图 7 所示姿态是由图 5 的初始状态根据表 2 在软件中设置的机头锥蒙皮零件装料状态机床参数而得到的。由如图 7 所示的拉形过程装料姿态，根据表 3 在软件中设置的机头锥蒙皮零件数控加载轨迹参数，从而得到如图 8 所示的拉形过程结束姿态。当机床多个动作同时开始并执行时，其动作指令会被编入同一序号组中，见表 3，如序号 1 表示左托架、右托架、中台的动作是同时开始执行的。当执行完序号 1 的动作之后，依次执行序号 2、序号 3 和序号 4 的动作指令。

表 2 机头锥蒙皮零件装料状态机床参数

Table 2 Machine parameters of loading state for nose cone skin parts

机构	机床参数		
	位置/mm	角度/(°)	速度
左钳口架	拉伸筒	430	—
	钳口架摆臂	—	20
右钳口架	拉伸筒	430	—
	钳口架摆臂	—	20
左托架	—	800	3.3
右托架	—	800	1.2
工作台	中台	750	2.3

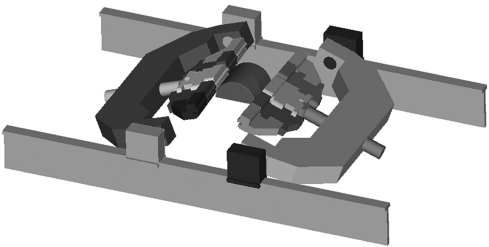


图 7 拉形过程装料姿态

Fig. 7 Charge pose of stretch forming process



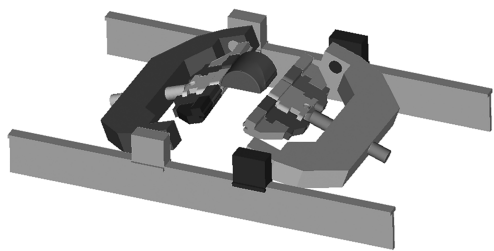


图 8 拉形过程结束姿态  
Fig. 8 End pose of stretch forming process

2.4 拉形过程模拟仿真结果

拉形过程设置好之后，提交求解器进行计算，可以用后处理查看计算的结果。结果包括拉形不同阶段的动画过程、厚度、变薄率、应力、应变、贴模度等。如图 9 所示，图 9a~图 9d 分别为拉形过程不同阶段的模拟结果。如图 10 所示，零件切边线区域内的厚度在 1.8 mm 以上，最大减薄率小

表 3 机头锥蒙皮零件数控加载轨迹参数  
Table 3 CNC loading trajectory parameters of nose cone skin parts

序号	机构	位移模式	位移/mm	速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	角度/(°)
1	左托架	绝对位移	580	508	3.3
	右托架	绝对位移	570	508	1.2
	中台	绝对位移	1035	508	2.3
2	中台	增量位移	40	80	0.0
3	中台	绝对位移	1112	80	2.3
4	中台	增量位移	-10	300	0.0

于 10%。如图 11 所示，蒙皮零件未卸载前的贴模度大部分均在 0.2 mm 以内，只是在蒙皮的小端，局部贴模度不甚理想，贴模间隙最大约为 2.5 mm。这是由于模具相应部位有一个内凹的造型而造成的。

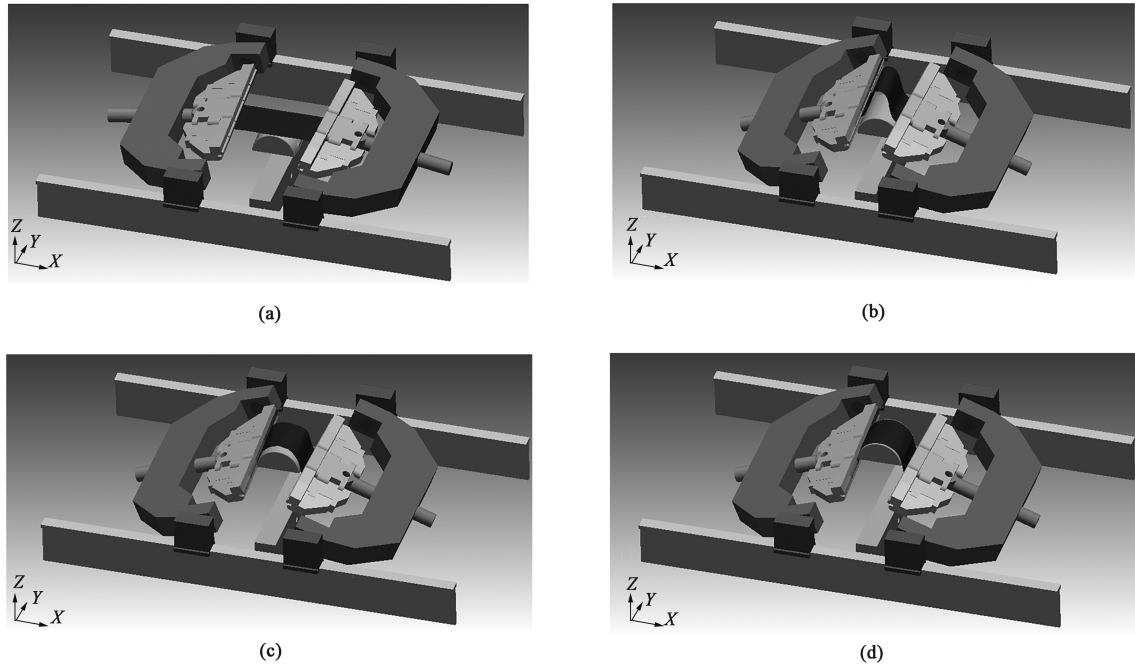


图 9 拉形过程仿真过程  
(a) 装夹 (b) 包覆 (c) 贴模阶段 (d) 拉形结束

Fig. 9 Simulation process of stretch forming process  
(a) Clamping (b) Wrapping (c) Stage of closing up to die (d) End of stretch forming

2.5 回弹仿真设置

实际生产过程中，零件拉形结束后，松开夹钳取下零件，零件会产生一定的回弹；然后将零件粗切，用钻模钻定位孔，用绑带将粗切的零件绑在切边模上，并插上两个定位销钉，进行精细切边；再进行扫描，与理论零件进行拟合比对，得到在一定约束下的回弹结果。

本文根据上述操作步骤，将拉形仿真结果导入到 AI-FORM 软件中，建立如图 12 所示的回弹仿真模型，此回弹仿真模型包含“回弹—切边—压紧”3 个工步。回弹计算采用了双精度隐式算法，在零件顶端选择一点，对其 6 个自由度进行约束，回弹模拟中无工具参与；切边按照图 12 所示进行；将零件摆放在切边模之上，留有一定间隙，利用



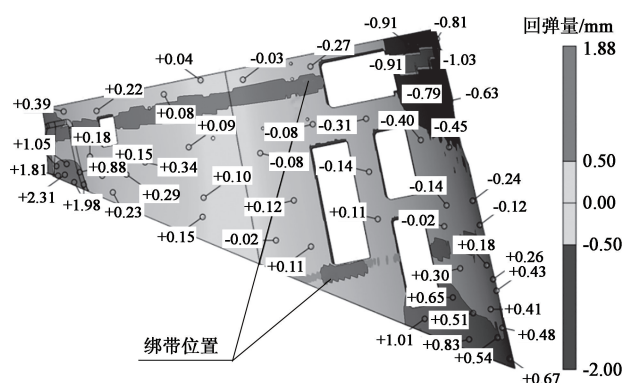


图14 实际零件回弹测量结果

Fig. 14 Measurement results of springback amount for actual part

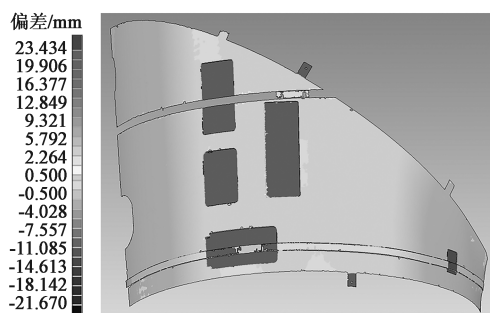


图15 法向距离偏差的计算结果与测量结果对比图

Fig. 15 Comparison diagram of calculation results with measurement results for normal distance deviation

全流程回弹仿真的结果和试验测量得到的结果基本吻合,从而验证了有限元仿真模型的准确性。

## 4 结论

(1) 考虑 VTL1000 数控拉形机的真实机构运动,建立了运动仿真模型,进而建立了拉形过程的全流程仿真模型,包含了拉形—回弹—切边—压紧全工序,实现了拉形各结果指标以及拉形回弹的仿真预测。

(2) 通过试验,验证了基于有限元的全流程拉形仿真模拟的有效性。

### 参考文献:

- [1] 朱明华,王文斌,李小强,等. 大型客机钣金数字化柔性精准成形技术 [J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43 (2): 216-221.  
Zhu M H, Wang W B, Li X Q, et al. Digital, flexible and precise forming technology of sheet metal in large airliner [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43 (2): 216-221.
- [2] Corporation M S. MSC Virtual Manufacturing [R]. USA: MSC Software Corporation, 2001.
- [3] Corporation N G. Stretch Forming Simulation (SFS) [R]. Indiana: AMSE, 1998.
- [4] Ashbridge M T J, Leacock A G, Gilmour K R, et al. The effect of solution heat treatment and natural ageing on the yield characteris-

tics of a 2024-O aluminium alloy [A]. ASME. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition [C]. USA: ASME, 2000.

- [5] Leacock A G. Numerical Simulation of Anisotropic Plasticity in Stretched Formed Aluminium Alloys [D]. Jordanstown: University of Ulster, 1999.
- [6] Oding S, Stourov N. Technological Parameter Calculation and Stretch Forming Process Control of 3D Profile Parts [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003.
- [7] Oding S S. Controlling the formation of double curvature skin elements on a program-controlled stretch former. I. [J]. Soviet Aeronautics; English translation of Izvestiya VUZ, Aviatcionnaya Tekhnika, 1987, 30 (3): 57-61.
- [8] Oding S S. Control of shaping of double-curvature skins on stretch-forming equipment with programmed control. II. [J]. Soviet Aeronautics; English translation of Izvestiya VUZ, Aviatcionnaya Tekhnika, 1987, 30 (4): 44-48.
- [9] 白雪飘,李东升,万敏,等. 基于蒙皮拉形模拟系统的数控拉形仿真与实践 [J]. 塑性工程学报, 2004, 11 (1): 43-45.  
Bai X P, Li D S, Wan M, et al. Simulation and practice on NC stretch-forming for the stretch form system [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11 (1): 43-45.
- [10] 李卫东,万敏,韩金全. 飞机蒙皮数字化拉形系统 ASSFCAE [J]. 航空制造技术, 2007, (z1): 498-503.  
Li W D, Wan M, Han J Q. Numerical stretch forming system for aircraft skin [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, (z1): 498-503.
- [11] 李卫东,万敏,占强,等. 数控蒙皮横拉机运动分析与仿真控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30 (2): 105-108.  
Li W D, Wan M, Zhan Q, et al. Motion analysis and simulation control of numerical controlled transverse stretching machine for aircraft skin [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30 (2): 105-108.
- [12] 韩志仁,孔庆猛,孟祥韬,等. 飞机蒙皮拉形加载轨迹研究 [J]. 机械设计与制造, 2016, (4): 258-261.  
Han Z R, Kong Q M, Meng X T, et al. Study on loading trajectory of aircraft skin in stretch forming [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016, (4): 258-261.
- [13] 陈根发,方继钊,王勇,等. 复杂鼓包蒙皮成形技术分析与优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 82-87.  
Chen G F, Fang J Z, Wang Y, et al. Analysis and optimization on complex bulging skin forming technology [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 82-87.
- [14] 房涛涛,李晓星,郎利辉. 大厚度双曲度铝合金飞机蒙皮拉伸成形工艺优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 29-36, 42.  
Fang T T, Li X X, Lang L H. Optimization on stretch forming process for hyperbolic aluminum alloy aircraft skin with large thickness [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 29-36, 42.
- [15] 谢洪志,王玲,赵天章,等. 基于数字化的蒙皮拉形加载轨迹优化与应用 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 56-59.  
Xie H Z, Wang L, Zhao T Z, et al. Optimization and application of loading trajectory in stretch forming of skin based on digital [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 56-59.
- [16] 李小强,宋楠,李东升. VTL 型数控蒙皮拉形机加载轨迹设计 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19 (4): 49-55.  
Li X Q, Song N, Li D S. Design of loading trajectory for VTL numerical control stretch forming machine [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19 (4): 49-55.