

多点模蒙皮拉形的技术关键*

Key Points of Skin Stretch-Forming Technology on Multi-Point Die

北京航空航天大学机械学院 汪华 周贤宾

[摘要] 阐述了多点成形技术在飞机蒙皮制造领域的发展和研究现状,指出了多点成形技术研究中的成形设备设计、零件缺陷消除及零件成形精度控制等关键技术。

关键词: 柔性可调模具 多点成形 拉形

[ABSTRACT] The development and research status of multi-point forming (MPF) technology in aircraft skin manufacturing field is presented. Some key points of the research works are put forward, such as design of forming equipment, elimination of component defects and control of component forming accuracy and so on.

Keywords: Flexible reconfigurable die Multi-point forming Stretch-forming

多点成形技术起源于 20 世纪 60 年代,通过对传统成形模具进行离散化处理,以高度可调的阵列顶端构成的空间包络曲面替代传统模具的实体表面,完成设备的柔性化。其调节原理如图 1 所示,在调节钉杆高度时,此包络曲面随之改变,达到一套模具经过少

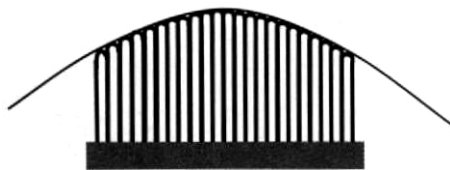


图 1 多点模具调形原理

Fig.1 Configuration principle of multi-point die

量调整即可适用于不同零件的制造需求。

1 发展现状

多点成形设备通过调整阵列不同区域的高度来实现设备的型面可调性,这种有限可调性使得多点成形技术特别适合于制造一些存在一定相似性、曲率变

化较平缓等特点的零件。多点成形技术的典型应用实例有北京航空航天大学的高精度反射面板制造平台、2008 年北京奥运会的“鸟巢”工程钢结构,以及现阶段研究的热点:大尺寸薄壁件的柔性成形,这主要表现在飞机蒙皮和型材零件的制造领域。

由于产品的特殊性,航空工厂的蒙皮零件生产普遍具有多品种、小批量甚至是单件生产的特点,这给工装的制造和维护带来了很大困难。而大量的工装需求又和产品的快速响应、降低零件的制造成本等构成了巨大的矛盾,传统的实体常规工装制造技术在这样的矛盾面前显得无能为力。

美国飞机制造商 Northrop Grumman 公司在美国军方的资助下,与麻省理工学院 (MIT)、美国 Cyril Bath 机床公司以及美国海军研究署协同^[1],于 20 世纪后期进行了将多点模具用于飞机蒙皮拉形的研究工作。该研究项目将多点可调模具用于蒙皮生产的各个环节,取得了很大进展。新工艺设备的应用极大地缩短了工装的准备周期,并完全改变了传统的按“模线样板-标准样件”的模拟量传递方式,摆脱了各环节孤立地按“串行”流程的工作模式。

多点蒙皮拉形模具配合形象直观的 CAD 环境、强大的有限元分析工具以及先进的光学非接触型面检测技术,构成了先进的数字化蒙皮制造系统,如图 2^[2]所示。该系统以多点蒙皮拉形模具为核心,期望实现蒙皮零件从设计、制造到检测的全面数字化,代表

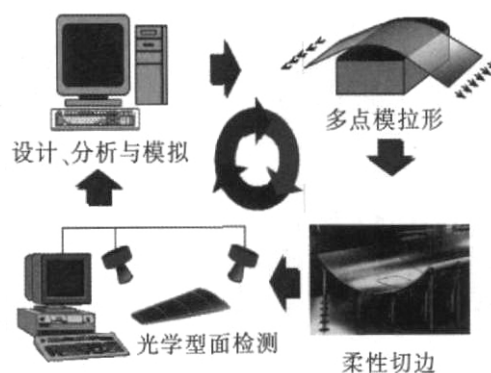


图 2 数字化蒙皮制造系统

Fig.2 Digitized skin manufacturing system

* 国家自然科学基金(10477001)资助项目。

着先进蒙皮拉形技术的发展方向。

统计数据表明^[1], 零件制造的时间在应用新型多点蒙皮拉形模具之后将大大缩短, 对于典型的蒙皮零件来说, 新工艺条件下从设计到成品入库, 所需要的时间为 13 个工作日, 仅相当于传统方法的 30% 左右, 而由此带来的辅助工艺的简化、人员劳动强度的降低以及库房面积的减少却可获得极大的经济效益。

2 多点成形工艺的关键技术

2.1 成形设备

多点成形设备是多点成形技术的硬件核心, 通过诸多可调单元的相对高度的变化, 模具具备了适应一定范围内不同型面的成形能力。就多点成形设备的设计而言, 首要考虑的尺寸参数为单一可调单元的特征尺寸以及模具的整体规模。

2.1.1 单一可调单元的特征尺寸

多数多点模具的设计方案中, 为了使调整单元具备实现不同方向曲面变化的适应能力, 其顶端都设计为旋转体曲面, 通常为球形; 同时, 为了使模具整体具有较好的强度和刚度, 调整单元(钉杆)的横截面采用正四边形设计, 便于各个调整单元之间互相承托和依靠。在这样的设计方案中, 可调单元的特征尺寸包括球头的半径以及钉杆的横截面尺寸。

球头半径影响钉杆的高度可调范围, 钉杆阵列调形时 2 个相邻钉杆的截面图如图 3, 剖面为过钉杆中心且垂直于其中一组对边的平面, S 为钉杆的横

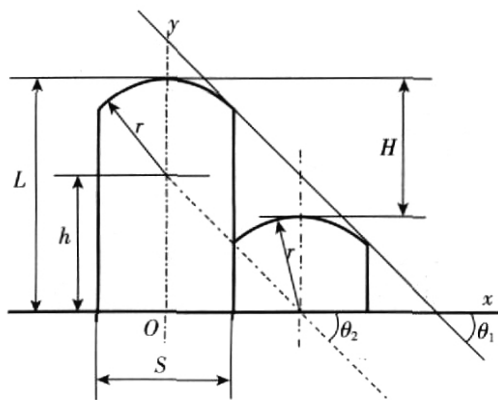


图 3 球形钉头的极限落差

Fig.3 Limit drop height of ball

面边长, r 为钉杆球头的半径。

可见, 随着球头半径 r 的减小, 球头边缘处的斜率增大, 因而能具有更大的调节落差。根据圆的几何

方程可得 y 轴上圆弧切线的斜率为:

$$Y = -\frac{X}{\sqrt{r^2 - X^2}}$$

当 r 取极小值 ($\sqrt{2}/2$) S 时, 可计算出球头边缘处 $x = \frac{S}{2}$ 的最大斜率为 1, 即 $\theta_{1\max} = 45^\circ$; 这是钉头边缘能达到的最陡峭程度, 也是这种结构形式的钉头可成形的最小形状的极限斜率。再由图 3 所示的简单几何关系可知, 相邻 2 根钉杆之间的极限高度差为:

$$H = h = S,$$

即: 正方形截面钉杆采用球形头部时, 能获得的极限调节落差与钉杆边长等值。

横截面为正方形的钉杆设计方案中, 增大钉杆的横截面边长即可增加单个钉杆相对邻近钉杆的可调范围, 同时, 对于这种截面方案来说, 增加截面边长可以平方速度减少同等面积内钉杆的数量, 大大降低模具制造成本, 但钉杆边长的增加将使同等成形条件下零件的型面缺陷逐渐恶化。

任选一单曲型面作为多点成形试验对象: 柱面曲率半径 1 600mm, 模具尺寸 360mm×360mm, 毛料尺寸 700mm×1 200mm, 采用厚度 1mm 的 2024-O 铝板, 不采用任何垫层。数值模拟建模如图 4, 为节约计算时间, 利用对称条件取实际模型的 1/4 计算。拉形过程为: 夹持边固定不动, 模具以 3m/s 的速度上顶 120mm, 然后停止。为分析钉杆截面边长与零件型面缺陷之间的关系, 试验模拟了当正方形可调钉杆截面边长尺寸分别为 10mm、20mm、30mm、40mm、50mm 以及 60mm 时, 零件在用不同的多点模具成形同样型面的零件时的表面缺陷状况, 见图 5。

由图 5 可知, 在其他条件不变的情况下, 随着钉杆截面边长的增加, 零件表面的凹陷情况会急剧恶化, 大大增加零件表面缺陷控制的难度, 虽然增大钉

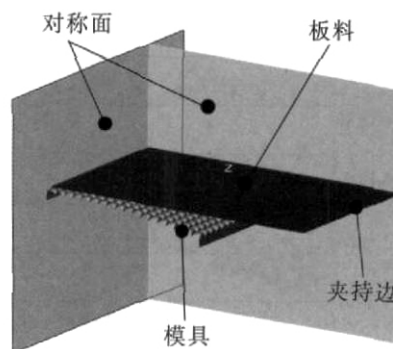


图 4 数值模拟建模

Fig.4 Modelling for numerical simulation

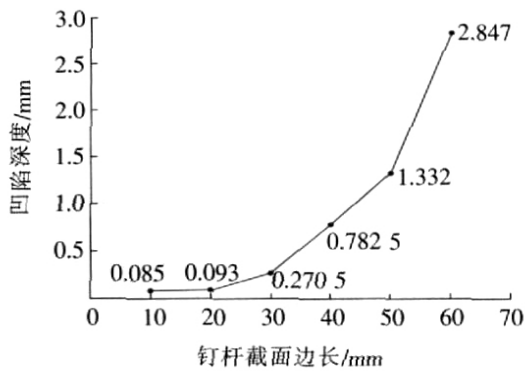


图5 钉杆截面边长与凹陷深度的关系
Fig.5 Relationship between edge length of pin rod section and collapse depth

杆截面边长有利于减少设备制造成本以及降低控制难度，但钉杆截面边长增加必须控制在一定范围内。数值模拟显示，边长小于20mm时，它对截面缺陷的影响趋于稳定，继续缩减边长对改善零件表面质量作用不大，而边长大于40mm后，将引起零件表面缺陷的剧烈增长。因此，将多点成形工艺用于飞机蒙皮拉形时，需根据不同机型蒙皮曲率的变化范围，综合考虑成形表面质量的可控性和经济因素，合理确定钉杆的阵列密度。

2.1.2 模具的整体规模及结构设计

确定模具的整体规模关系到模具的整体制造成本、模具对不同尺寸零件的适应能力以及零件毛料的利用率等多种因素，良好的经济性是多点模具蒙皮拉形技术的实用性的保证。

通过对某在役机型的考察，统计其蒙皮零件的尺寸分布，以其长宽尺寸为坐标点绘制全部零件尺寸的幅面分布范围如图6所示。

由图6可见，实际蒙皮零件的尺寸跨度悬殊，最大零件的幅面尺寸超过最小零件的数10倍之多，这

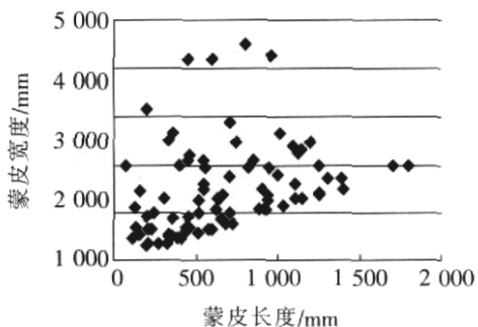


图6 某型飞机蒙皮零件尺寸分布
Fig.6 Skin size distribution in one aircraft

给多点模具设计带来了很大困难。

为了提高材料利用率，模具的模面设计通常以零件曲面添加必要的切边余量构成，从这个角度看，模具必须具备足够的专一性，即制造过程中模具模面尺寸应当是零件设计尺寸的合理外延，过大的余量将使制造过程不经济。另一方面，多点蒙皮拉形模具的设计目标是以一套柔性模具成形尽可能多的蒙皮零件，以降低模具的制造数量，这就要求模具必须具备良好的通用性，即在保证合理经济性的前提下，模具具备良好的尺寸适应性，即柔性。这两个不同角度考虑的着眼点是确立多点模具设计规模的矛盾所在。

因此，为了满足一个航空制造企业尽可能多的蒙皮制造需求，多点模具设计前期必须根据企业生产任务的具体需求，对待生产蒙皮零件进行包括零件尺寸、曲率变化、拓扑形状等在内的零件特征统计，并据此确定模具对零件大小的合理覆盖范围，这样才能充分利用多点模具的可调能力，最大限度实现经济性和通用性的统一。

2.2 零件的表面质量控制

多点模具的成形模面为并非物理存在的空间曲面，在这种成形条件下，零件表面会由于离散且不均匀的接触状况而产生压印、压窝以及凹陷等型面缺陷^[2]，如图7。蒙皮的这些表面缺陷不仅影响零件的表面质量，而且会成为零件日后潜在的疲劳源从而威胁飞行安全，因此抑制零件表面的种种型面缺陷，关系到多点成形技术能否顺利应用于飞机蒙皮类零件的成形制造。

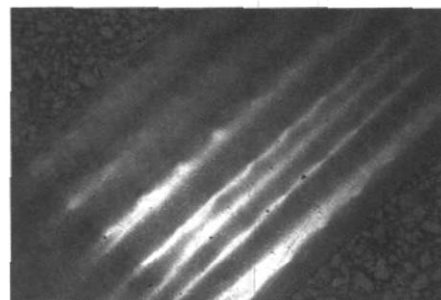


图7 多点模具拉形的实际零件
Fig.7 Actual stretch-forming part by multi-point die

引发零件表面种种成形缺陷的主要原因在于模具和零件之间的恶劣接触条件，抑制零件表面的种种成形缺陷，需要通过改变模具和零件之间的接触状态来实现，由此发展出了不同的零件表面缺陷抑制技术。

2.2.1 柔性垫层隔离技术

柔性垫层隔离技术通过在多点模具和零件毛料

之间添加工艺垫层,阻断模具的离散表面同零件毛料的直接接触,使离散且不均匀的接触力变得连续分布和变化平缓,从而实现零件表面缺陷的抑制。从垫层的设计和制造方法分,目前实用中的垫层主要有金属垫层和橡胶垫层 2 类。

北京航空航天大学周贤宾教授利用多点成形设备制造高精度紧缩场反射面板,蜂窝夹层面板结构的表层工作板由薄铝板通过真空负压成形。为了保证工作表面具有完好的型面质量,制造过程中采用经过开缝处理的钢板作为面板零件与模具设备之间的垫层,如图 8 所示。由于紧缩场反射面板曲率不大并且成形载荷小,因此钢板经过开缝处理即可顺利贴合多点模具表面充当垫层,并且足以保证面板零件的优良外观不受损坏^[3]。

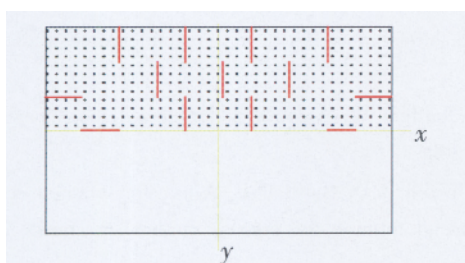


图 8 开缝钢质垫板
Fig.8 Slotted steel sheet interpolator

开缝钢板使用方便,但仅适用于小曲率零件及较小成形载荷的场合,当零件曲率增大时,钢板难以有效贴合各种不可展曲面,此外,当产品需要较大的成形载荷时,开缝钢板自身还将发生较大变形,无法有效重复利用,也不能保障零件的光洁外观,因此这种垫层技术无法适用于大多数的蒙皮多点模拉形。

美国 Northrop Grumman 飞机公司与 MIT 合作,开展利用多点成形技术进行柔性飞机蒙皮制造的系统研究。为了使多点成形条件下的蒙皮零件具有良好的外观,最终采用了以聚合物材料(如工业橡胶)等作为垫层的技术措施,见图 9。橡胶垫层直接铺放于模具之上,承载后发生变形并完全贴合多点模具,载荷卸去之后垫层可恢复初始形状便于下次使用。各种试验及数值模拟研究表明,对于研究环境中所使用的可调钉杆截面边长约 30mm 的多点蒙皮拉形模具,采用厚度 1 英寸(25.4mm)、中等硬度的橡胶垫层即可有效抑制各种零件表面缺陷的产生^[4]。

橡胶具有良好的变形能力,但在拉形过程中不同区域的橡胶垫层将由于不同的接触压力而发生差异

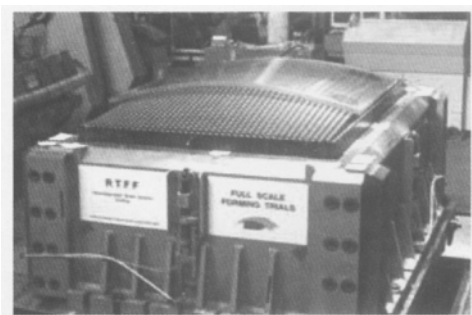


图 9 橡胶垫层
Fig.9 Rubber pad interpolator

很大的厚度变形。橡胶垫具有的这种不同部位变形不同的特点使得模具钉高无法由设计型面直接计算得出,成形后还需要使用 DTF (Deformation Transfer Function) 算法进行后续多次的迭代调整过程,才能使零件的成形精度逐渐收敛至接近设计要求^[5-7]。不仅如此,MIT 的 Valijavec 还发现,DTF 算法对于单纯橡胶垫具有一定的调节盲区,解决这个问题需要研制更好的垫层材料及结构。

2.2.2 电磁多点成形技术

柔性垫层在抑制零件表面缺陷的同时,也增加了成形问题的分析复杂度。而新近提出的电磁多点成形技术,则独辟蹊径地提出了另外一种崭新思路,这种方法在利用多点设备的柔性成形能力的同时,可消除其不连续表面对成形产生的种种副作用,兼具多点模具和实体模具的长处。

电磁多点成形技术区别于普通多点成形技术最主要的部分为电磁修形系统。当多点模具调形完成后,在各个钉头上施加所需要的修形磁场,将磁粉吸附并填充至模具钉头空隙,再以同样大小的凹模磁场去除钉头多余磁粉,这就是电磁多点成形系统的修形过程。修形完成后以更大磁场将磁粉夹紧至钉头即可用于成形,设备组成见图 10^[8]。

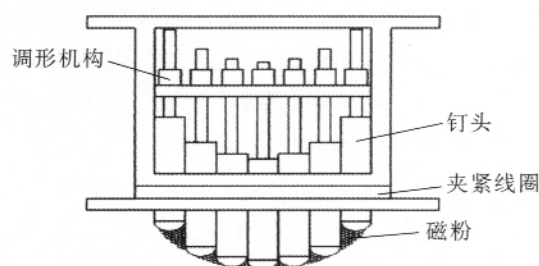


图 10 电磁多点成形设备
Fig.10 Electromagnetic multi-point forming die

通过磁粉的吸附和填充压紧,多点模具离散的面将由于磁粉的填充而变得连续,从而达到改善模具和零件之间接触状态的目的。当成形结束需要改变模具型面时,只需要消除当前磁场、清除钉头上的磁粉,并重复一次调形和填充过程即可。

电磁多点成形技术涉及电磁学、力学、自动控制、成形理论等多个学科,其中的主要难点在于修形磁场的分析和计算。

2.3 零件的成形精度控制

在多点模具蒙皮拉形过程中,影响蒙皮成形精度的主要因素不仅在于零件的弹性回复,还有垫层的不均匀厚度变形。由于使用单纯橡胶垫层时垫层不同区域的厚度变化差异较大,因此,常规的实体模具回弹补偿算法不再适用,而通过比较成形零件型面与设计型面的误差,以此误差作为模具调形的修正依据,经过若干次闭环迭代后,零件的最终成形精度可以得到提高。基于这个原理的控制算法中,MIT联合Northrop Grumman公司提出的DTF很有代表性。

DTF算法是为改善复杂多点成形环境下板成形零件的精度而提出的,这是一种具有自调整能力的模具钉高调整算法,它通过分别测量两次不同模具调形量条件下的零件成形精度,并将精度差作为误差反馈为算法输入以确定下次成形时模具的修正量,通过若干次迭代,零件成形精度即可收敛于设计尺寸。使用DTF算法时,所有成形过程中对零件成形精度有影响的因素不再单独考虑,可以统一反映到最终零件成形精度上。当零件成形精度达不到设计或装配要求时,通过对钉高即模具型面的调整,来补偿并提高零件的成形精度。

通过DTF算法对模具的迭代调节,零件最终的成形精度得到提高,这种方法无需对成形过程中各种干扰因素分别分析,各种工艺因素如材料性能的波动、接触摩擦的变化以及加载轨迹和速度的变动等都不影响DTF算法对零件最终成形精度的提高。但受传递函数选择的影响,在用于某些复杂蒙皮的成形时,DTF算法可能出现迭代不收敛的情况,此外,受目前垫层结构及材料选用的影响,DTF算法存在初值选择难、迭代收敛慢以及具有一定响应盲区的问题。

3 结束语

飞机蒙皮零件具有尺寸大、数量少、种类多、型面精度要求高等特点,以多点拉形模具取代传统实体拉形模具大有可为。实施这项技术关键在于保证模具的

功能性,即制造出型面质量和精度都满足要求的零件,此外,还应当考虑模具的经济性,尽量提高零件的材料利用率。

参 考 文 献

- [1] Papazian J M, Anagnostou E L. Tooling for rapid sheet metal parts production // The 6th Joint FAA/DoD/NASA Conference on Aging Aircraft. September 16- 19, 2002.
- [2] 汪华,周贤宾. 多点成形条件下蒙皮拉形的表面缺陷. 航空制造技术, 2006(6): 89-92.
- [3] 周贤宾,陈连峰,李东升. 反射器夹层面板精密成形原理. 北京航空航天大学学报, 2004,30(4): 296-300.
- [4] Papazian J M, Anagnostou E L, Christ R J. Innovative tooling for sheet metal forming. Innovations in processing and manufacturing of sheet materials, 2001: 17-31.
- [5] Valijavec M. A closed-loop shape control methodology for flexible stretch forming over a reconfigurable Tool [D].MIT, 1999.
- [6] Norfleet W. Algorithms for closed loop shape control [D]. MIT, 2001.
- [7] Webb R D, Hardt D E. A transfer function description of sheet metal forming for process control // Trans. ASME, J. Eng. Ind. 113.
- [8] 刘敬平,樊延良,王斌修. 电磁辅助钣金拉延快速成形技术. 锻造与冲压, 2006(3), 62-63. (责编 依然)

霍尼韦尔公司公布 2008- 2018 年 民用涡轮直升机市场预测报告

2008年2月24日,霍尼韦尔公司预测未来5年里全球将有4450架新的民用涡轮直升机投入使用,其中公务型、紧急医疗服务(EMS)型和警用型约占65%以上。

霍尼韦尔公司在其第10个民用直升机采购预测报告中说:“2007年民用直升机的交付量上升了25%~30%,2008年预计仍保持上升态势,因为直升机制造商加快了生产以满足全球对新飞机的强劲需求。2008-2018年间,全球对民用直升机的需求将会超过10000架,而且未来5年的销售量将比2003-2007年增长50%。”

就全球来看,对新直升机的需求将主要来自于北美(40%)、欧洲(20%)、亚太地区(18%)、拉丁美洲(18%)以及非洲/中东地区(4%)。霍尼韦尔预测,在北美20%的销售为警用型、20%为公务型、23%为通用航空型、26%为EMS型。(本刊记者 金卯)