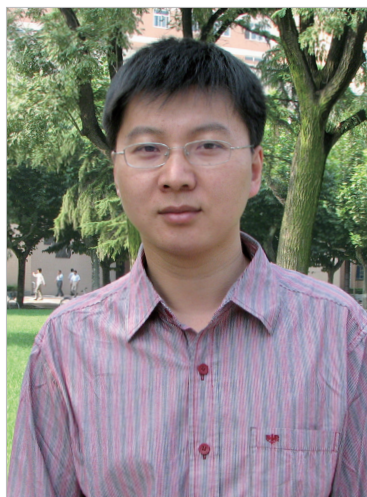


基于回弹补偿的零件成形模具设计技术：过程、现状与实例*

Springback Compensation-Based Part Die Design Technology: Process, Present Research and Case

西北工业大学陕西省数字化制造工程技术研究中心 刘 闯 路骐安 杨忆涓 王俊彪



刘 闯

西北工业大学机电学院副教授, 博士, 主要从事数字化与智能制造技术研究, 研究方向包括制造模型数字化定义、制造知识重用、数字化设计制造系统集成, 获得了国家自然科学基金、国防基础科研等项目支持, 多项研究成果已在飞机制造企业中应用。

面向精确成形的零件成形模具设计的关键在于型面回弹补偿, 而型面回弹补偿技术的难点源于零件外形面为不连续的双曲面, 变形方向不唯一, 结构要素之间相互影响以及铝锂合金等新型轻质材料逐渐应用。

零件制造的本质是使设计的几何尺寸通过机床设备和工艺装备准确地传递到实物工件上。钣金零件是飞机的主要结构件, 构成飞机的气动外形和骨架, 其制造的尺寸传递经历零件设计数据、形状控制数据、成形模具再到零件的过程, 模具是零件形状控制数据的载体。随着制造技术的发展, 成形模具的依据从模拟量到数字量不断衍变, 制造效率和质量随之逐步提高。

在模拟量尺寸传递体系中, 飞机产品信息以模线、样板、标准样件等模拟量作为载体传递至模具, 存在

的突出问题包括 3 个方面, 一是模具制造需严格按尺寸传递协调路线规定的先后次序进行, 周期长; 二是模具可复制性和协调性差, 尤其在新型号的研制过程中, 靠试验的方法进行修模, 返工现象更为明显, 新型模具返修率达 100%; 三是尺寸传递环节多, 成形模具外形误差往往达 0.2~0.3mm, 局部甚至高达 0.5mm, 零件成形精度低。随着数字化技术的发展应用, 三维建模已成为设计中的基本选择, 从飞机产品数字模型中提取零件三维模型, 根据工艺要求建立工艺模型作为模具设计的依据, 再进

* 国家自然科学基金项目(51275420)资助。

行成形模具制造,可以省掉用于移形的样板和标准工艺装备,提高了成形模具的制造准确度和加工效率,缩短零件生产准备周期。然而,由于零件在赋形后存在回弹变形,仅以设计模型型面数字量传递到成形模具并不能实现高效、高精度制造,航空制造企业在工程实践中为了防止装配干涉仅在下陷区进行了加深。如果不进行零件级回弹变形补偿,只能采用“成形+热处理”的工艺方式和“设备和模具粗成形+手工精校形”的制造方式,手工校形工作量大、零件性能和表面质量不高。

随着现代飞机产品性能要求的不断提高,外形变化更为复杂,结构复杂度全面增加,材料日益轻量化,我国航空制造企业面临着繁重的飞机研制和生产任务,制造周期和质量要求不断提高。以框肋零件为例,在大型客机中,该类零件尺寸长达3m、外缘型面为双曲率且通常带有下陷,其制造质量要求不只是符合外形形状和尺寸,而且要有良好的表面质量和稳定的性能状态,也就意味着从毛坯到零件一步达到设计形状、尺寸和性能要求,这对现有成形工艺极限提出了新的挑战,迫切要求发展基于回弹补偿的零件成形模具设计技术体系。本文在给出了基于回弹补偿的成形模具设计及其应用过程的基础上,总结了成形模具型面回弹补偿技术研究现状,给出了以框肋零件回弹补偿模型为依据的模具设计实例并分析了成形效果。

基于回弹补偿的成形模具设计及其应用过程

“一步法”成形是适应钣金零件成形质量和周期要求不断提高而必须采用的制造方式,即在铝合金零件热处理后的新淬火状态成形,一步达到形状和性能要求。这要求面向制造全过程考虑成形工艺因素,根据设计模型建立零件工艺模型传递至成

形模具;控制零件形状的工艺模型是根据控形节点工件形状,考虑成形工艺因素而对回弹变形进行预测和补偿后生成的几何模型,目标在于高效、精确制造工件。回弹是钣金零件成形的主要缺陷,回弹量取决于成形工艺过程、成形模具等因素,通过对成形工艺过程的调整,虽然能在一定程度上减小回弹量,但是效率低且不能完全消除回弹的影响;通过对控形型面的修正来实现对回弹的补偿,使得回弹后的工件形状与所需要的零件形状尽量一致,理论上可以彻底消除回弹对零件的影响。因此,零件精确成形制造的关键不在于作为赋形载体的模具的加工精度,而在于在设计模型和工艺过程基础上预测和补偿于弹性恢复内力作用所产生的回弹变形以建立工艺模型作为成形模具设计的依据。

如图1所示,采用“一步法”成形实现零件的精确成形。零件数字化制造包括框肋零件设计、工艺模型设计、成形模具设计、成形模具制造、零件液压成形和零件三维检测等主要环节,具体过程是:以零件设计所得的零件设计数模为基础,对零件设计数模进行回弹修正建立工艺数模;零件成形模具的设计以零件工艺数模为唯一的数据来源,通过对工艺数模型面进行移形,并设计加强结构、定位孔等辅助结构,得到模具数模;依据模具数模采用数控加工得到成形模具;由于回弹补偿后成形模具的工作型面已不同于零件最终形状,无法再作为检验依据,因此,对成形后

工件可通过数字化测量,逆向建立工件的数字模型,与设计零件数模进行比对检测其成形准确度。

零件成形模具型面回弹补偿技术研究现状

国内外诸多企业和研究机构围绕飞机、汽车等产品零件精确成形技术的发展,对回弹补偿开展了大量研究,相关论文数量逐年增加^[1]。数字化制造条件下通过数字化技术预测变形并对设计模型进行补偿以用于模具设计。

近年来,数字化仿真在零件成形预测与补偿中得到了广泛应用,采用数值模拟软件把零件型面离散为网格,使用不同的后置处理算法对变形进行预测,沿不同方向补偿回弹变形,直至成形后形状满足精度要求。代表性方法包括应力反向补偿法^[2],适于形状对称、回弹量较小的零件;节点几何位移补偿法^[3],补偿方向有多种^[4],可以有效对简单二维零件进行补偿;光顺补偿法^[5]和曲面控制过弯法^[6]是对节点几何位移补偿法进行改进而用于曲面零件的探索,对复杂曲面的拟合仍是难点所在,典型

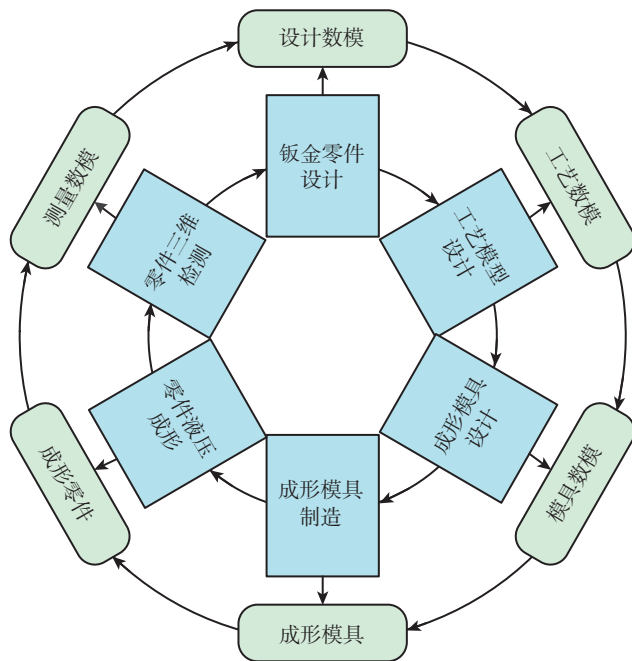


图1 基于回弹补偿的成形模具设计及其应用过程

方法如响应面法^[7]。从模型补偿的角度来看,目前几乎所有大型软件对复杂零件回弹数值模拟的误差和离散性都较大,预测精度仍较低,预测准确性仍然是国际上的一大难题^[1],仿真结果准确度常通过与物理试验结果进行对比来确定,因此,需要对复杂零件结构和变形特点发展一种可调控的模具型面回弹补偿方法,这样才能实现精确成形。

与基于点离散的型面回弹补偿方法不同,复杂形状零件基于线离散化后,采用解析法或智能化方法进行变形预测后来补偿,重构形成用于模具设计的型面。对复杂型面零件离散,首先划分截面,对任意形状截面线,按照离散点曲率分为圆弧段,将回弹修正后各弧段组合得到整个截面线的回弹^[8]。对于飞机钣金零件而言,不但外形尺寸各异、型面复杂,而且通常带有多个下陷;回弹不只发生在一个方向,因此,需要在分析其变形的基础上建立基于线的定量离散表达方法。对变形预测,解析计算法是针对各种简单几何形状基于塑性成形基础理论建立描述零件弯曲成形的力学模型^[9-10]或根据经验规律建立预测函数^[11],但计算结果与实际值有一定差距。随着人工智能的不断发展,人工神经网络、基于实例推理等方法在回弹预测之中也广泛应用。从知识使用看,可采用人工神经网络模型建立起影响因素和回弹量之间关系^[12],前提是有足够量的知识作为样本,相关研究中知识多源于仿真结果,知识数量要求和精确度限制了其应用;也可采用基于实例推理的方法^[13],知识检索简捷、快速,但由于实际零件尺寸各不相同,仅采用相似度评价算法也不足以实现精确成形。

可见,面向精确成形的成形模具型面回弹补偿技术综合运用了计算模型、仿真工具、知识工程方法和科学试验手段,由零件几何精度和物理

性能驱动,通过对成形工艺过程回弹变形的数字化建模、精确化预测和定量化控制,建立控制零件形状的工艺数模再传递到成形模具,以使零件成形后不需要加工或仅需少量加工就可满足质量要求。

零件成形模具型面回弹补偿实例及其效果分析

本研究在基础科研、国家自然科学基金项目的支持下,综合运用计算几何、塑性成形、知识工程、数字仿真等理论与工具,针对框肋、型材零件回弹补偿技术工程化开发了零件信息离散、回弹预测与补偿等软件工具,并开展了试验验证,下面以框肋零件为例说明。框肋零件是一类重要飞机结构件,包括腹板、弯边、下陷等多种结构要素,肋零件实例如图2所示,材料为LY12,厚度为1.0mm,应用本项目组开发的回弹补偿软件工具集说明成形模具设计过程及其成形效果。

(1)零件信息提取:首先通过框肋零件弯边离散专用工具针对弯边进行离散,将弯边与腹板边界线均匀离

散,通过各离散点分别做弯边边界线的法平面,与弯边面圆角区和凸缘区相交形成各截面线,见图3。

(2)回弹预测与补偿:如表1所示,回弹预测知识库系统根据零件材料牌号、材料厚度、圆角半径和斜角值计算得到对应的回弹角及回弹补偿后弯边角度和半径。使用型面补偿与重构工具对回弹补偿后各弯边截面进行重构(图4),根据零件设计模型建模过程建立零件工艺模型,见图5。

(3)模具设计与制造:依据零件

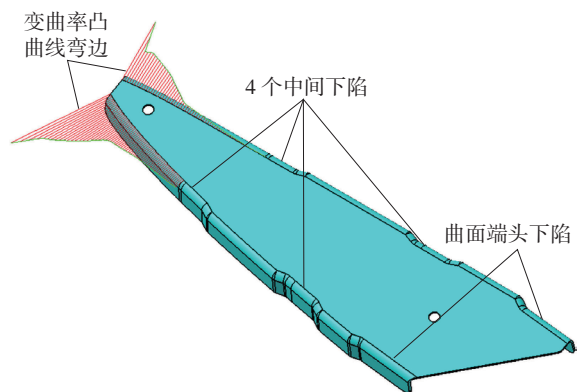


图2 零件模型

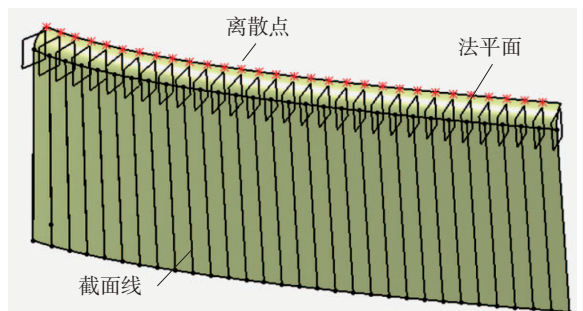


图3 弯边离散截面线

表1 基于知识的弯边回弹值预测

离散截面段编号	弯曲半径/mm	弯曲角度/ $^{\circ}$	回弹角度/ $^{\circ}$	补偿后半径/mm	补偿后角度/ $^{\circ}$
1	3.0	89.517	2	2.926243	91.773
2	3.0	89.517	2	2.926243	91.773
3	3.0	89.518	2	2.926244	91.774
4	3.0	89.519	2	2.926245	91.775
5	3.0	89.520	2	2.926246	91.776
6	3.0	89.521	2	2.926246	91.777
7	3.0	89.522	2	2.926247	91.778

工艺模型完成其成形模具工作型面部分的设计,非工作部分根据模具的结构方案进行设计(图6),采用数控加工制造成形模具(图7)。

(4) 成形试验与检测:采用橡皮囊液压成形,成形压力30MPa,保压时间为3s,橡皮硬度为A70。使用三维影像扫描仪(扫描精度为0.01mm)对成形加工的零件进行扫描,使用三维测量软件对逆向重构的

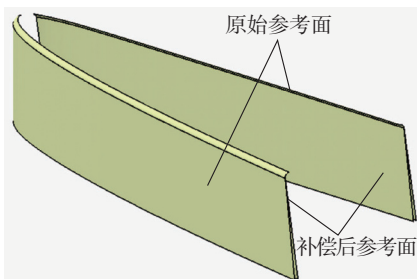


图4 弯边补偿前后模型对比

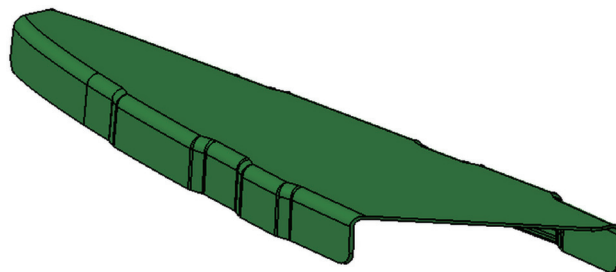


图5 实例零件成形工艺模型

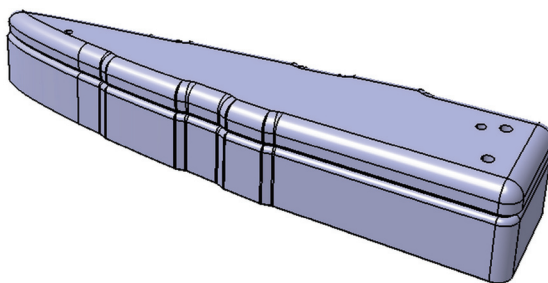


图6 成形模具设计模型



图7 成形模具实物

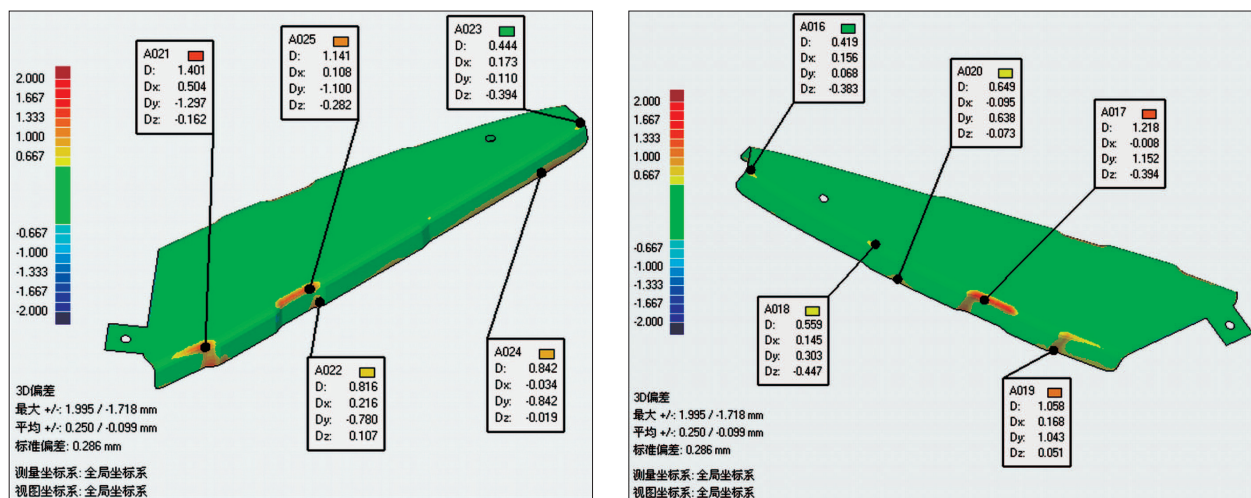


图8 实例零件工件模型与设计模型偏差分析结果

工件模型与零件设计模型进行比对检测,云图如图8所示。实例零件弯边高度最大处18mm,小于20mm,零件外形公差要求为 $\pm 0.5\text{mm}$,弯边弯曲角度精度要求为 $1^\circ 30'$,换算为弯边外缘边界点的偏差约为0.471mm。检测结果表明,零件外形满足精度要求;除了4处弯边与下陷的过渡区处超差外,其余弯边的角度偏差均符合精度要求,超差的原因在于工艺模型型面补偿中未考虑过渡区的回弹,这也是在复杂结构零件回弹补偿方法完善和优化中需要进一步解决的问题。

结束语

面向精确成形的零件成形模具设计的关键在于型面回弹补偿,而型面回弹补偿技术的难点源于零件外形面为不连续的双曲面,变形方向不唯一,结构要素之间相互影响以及铝锂合金等新型轻质材料逐渐应用。传统依赖于手工校形的制造方式无法适应飞机产品快速、高质量研制的要求,只有发展回弹变形的预测、补偿和定量调控方法,才能为该类零件精确成形工艺与技术手段突破提供

理论基础,促使零件制造活动由部分定量、基于经验的试错模式向全面数字化的计算和推理模式转变,实现对零件成形、成性过程的定量主动控制。本研究通过试验验证对钣金件回弹补偿技术进行了完善,技术成熟度逐步提高,该项技术的进一步推广转化将推动航空制造企业钣金件成形技术向高效、精确方向发展。

本文共有参考文献13篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 良辰)