

# 基于残余应力场原位推断的结构件 加工顺序优化方法

徐逸云<sup>1</sup>, 刘长青<sup>1</sup>, 张一帆<sup>1</sup>, 赵智伟<sup>1</sup>, 马文瑞<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324)

**摘要:** 针对飞机大型结构件加工后极易在残余应力场作用下产生复杂变形的问题, 提出了一种基于残余应力场原位推断的加工顺序优化方法。该方法通过粗加工阶段实时监测工件变形力, 原位推断毛坯残余应力场分布, 并以变形力时序均匀性为评价指标, 结合有限元仿真实现加工顺序优化。在飞机三米级铝合金结构件上进行了对比实验, 实验结果表明: 经优化后零件全局 99.31% 的变形量小于 0.20 mm, 高精度区域(变形量 $\leq 0.10$  mm)占比从 48.48% 提升至 81.94%, 平均变形量由 0.109 mm 降至 0.059 mm。该方法有效抑制了大型结构件的加工变形。

**关键词:** 残余应力场; 变形力; 加工顺序优化; 加工变形控制

中图分类号: TH 161+11

文献标志码: A

## Optimization method of machining sequence for structural components via in-situ residual stress field inference

XU Yiyun<sup>1</sup>, LIU Changqing<sup>1</sup>, ZHANG Yifan<sup>1</sup>, ZHAO Zhiwei<sup>1</sup>, MA Wenrui<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

**Abstract:** Large aircraft structural components are highly susceptible to complex deformation under the influence of residual stress fields after machining. An optimization method of machining sequence based on in-situ inference of residual stress fields was proposed. The proposed method monitored workpiece deformation forces in real-time during the rough machining stage, in-situ inferred the blank residual stress field distribution, and employed the temporal uniformity of deformation forces as an evaluation criterion, combined with finite element simulation, to achieve machining sequence optimization.

收稿日期: 2025-11-24

第一作者: 徐逸云(2002—), 男, 硕士研究生。研究方向: 加工变形控制。E-mail: SZ2405194@nuaa.edu.cn

通信作者: 刘长青(1986—), 男, 教授。研究方向: 数字化制造与智能制造。E-mail: liuchangqing@nuaa.edu

引文格式: 徐逸云, 刘长青, 张一帆, 等. 基于残余应力场原位推断的结构件加工顺序优化方法[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(1): 14-21.

Citation: XU Yiyun, LIU Changqing, ZHANG Yifan, et al. Optimization method of machining sequence for structural components via in-situ residual stress field inference[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(1): 14-21.

Comparative experiments were conducted on a three-meter-scale aluminum alloy aircraft structural component. The experimental results demonstrate that after optimization, 99.31% of the global deformation of the part is less than 0.2 mm, the proportion of the high-precision region (deformation  $\leq$  0.1 mm) increases from 48.48% to 81.94%, and the average deformation decreases from 0.109 mm to 0.059 mm. This method effectively suppresses the machining deformation of large structural components.

**Keywords:** residual stress field; deformation force; machining sequence optimization; machining deformation control

航空大型结构件作为飞机的主要承力和重要连接部件, 其制造精度对整机性能具有至关重要的影响。这类零件通常尺寸大、壁薄、材料去除率高<sup>[1]</sup>, 在加工过程中, 由于毛坯内部初始残余应力场的存在, 材料的不断去除会打破原有应力平衡, 导致应力重新分布, 进而引发工件产生弯曲、扭曲或弯扭组合等复杂变形<sup>[2]</sup>。这类变形不仅会降低装配精度、增大装配应力, 还可能影响飞机的运行性能和服役寿命, 并带来大量的经济损失。随着新一代飞机对结构性能与制造精度要求的不断提升, 加工变形控制已成为飞机制造过程中的关键瓶颈问题<sup>[3]</sup>。

优化加工工艺是加工变形控制的有效方法, 尤其是加工顺序。不同的加工顺序会改变工件在加工过程中的刚度演化路径, 进而影响残余应力的释放与重新分布行为<sup>[4]</sup>, 最终导致不同程度的变形。近年来, 研究人员提出了多种面向加工变形的加工顺序优化方法, 包括镜像铣削法<sup>[5]</sup>、分区交替法<sup>[6]</sup>等。黄志刚等<sup>[7]</sup>采用热力耦合模型, 通过有限元模拟对比了整体框类结构件的不同铣削顺序, 并得出优化策略。Wang等<sup>[8]</sup>考虑了因工件刚度变化引起的加工变形, 通过反向增块与逆序策略, 实现了加工顺序的优化。Cerutti等<sup>[9]</sup>基于仿真分析揭示了加工变形的路径依赖性, 据此提出了以减缓残余应力变化梯度为目标的优化框架。Sugisawa等<sup>[10]</sup>将加工变形风险融入专家知识, 提出一种基于深度逆强化学习的加工序列智能决策方法。Yang等<sup>[11]</sup>基于能量原理, 通过定义弯曲势能参数量化残余应力影响, 进而提出了优先去除高势能单元的材料顺序优化方法, 有效抑制了加工变形。

残余应力场是导致加工变形的主要原因<sup>[12]</sup>。因此, 在加工顺序优化中考虑残余应力场是提升

控制变形效果的关键。然而, 现有研究主要考虑工序间刚度变化对变形的影响, 并且受限于测量技术, 难以获取准确的全场分布信息。

零件残余应力测量的本质是测量能够感知残余应力的物理量, 进而推断残余应力。根据测量手段的不同, 现有方法可以分为有损法和无损法。有损法通过物理或化学手段破坏材料, 释放部分区域的残余应力, 通过测量由于局部残余应力变化引起的应变或位移计算去除材料区域的残余应力。Mathar等<sup>[13]</sup>于1934年提出的钻孔法, 通过测量因钻孔所引发孔周边应变场的分布, 实现了残余应力的定量评估。Prime等<sup>[14]</sup>于1999年提出的改进裂纹柔度法, 通过测量预制裂纹不同深度处因应力释放产生的应变, 实现了对垂直裂纹面单向残余应力场的计算。Treuting等<sup>[15]</sup>于1951年提出了基于曲率的剥层法, 通过逐层去除材料并测量试样的曲率变化, 以计算矩形件中的残余应力。无损法通过衍射或超声技术, 测量以“零应力”试样为基准的原子间间距或振动谱变化, 进而计算出材料的残余应力。Noronha等<sup>[16]</sup>于1973年提出的超声波法, 基于声弹性效应, 通过测量应力引起的超声波传播速度变化来计算残余应力。中子衍射法<sup>[17]</sup>利用中子束的高穿透能力, 通过测量材料内部因残余应力导致的晶格间距变化来计算残余应力。同步辐射法<sup>[18]</sup>可以通过逐点测量的方式获得残余应力场的三维分布, 但成本高、效率低、测量空间有限, 主要是在实验室环境中使用, 难以应用于工业环境中。

这些方法存在破坏性强或仅能获取表面或局部应力数据的问题, 难以满足基于完整应力场进行加工顺序优化的数据需求, 制约了加工顺序优化技术在变形控制中的实际应用效果。

针对以上问题, 本文提出一种基于变形力原

位推断残余应力场<sup>[19]</sup>的加工顺序优化方法。首先引入变形力这一物理量,建立其与残余应力场之间的力学映射关系,利用浮动装夹系统实时监测获取加工过程中工件变形力数据,依据残余应力场与变形力力学关系原位推断毛坯初始残余应力场。根据残余应力场与零件特征制定差异化的加工顺序,结合优化算法与有限元仿真,以变形力时序均匀性为评价指标,实现加工顺序的优化,从而有效控制加工变形。

## 1 理论与方法

### 1.1 残余应力场推断方法

针对现有测量残余应力场方法破坏性强,仅能获得表面或局部残余应力的问题,引入基于变形力推断残余应力场的方法,通过测量工件在加工过程中产生的变形力,来无损推断其内部全域的残余应力分布,实现了残余应力场的非破坏性全域测量。工件在非切削状态下,因切削去除材料引起的不平衡应力场使工件产生变形趋势,在装夹约束状态下,变形趋势必然会在工作台、装夹等约束位置产生力的变化,因此产生等效变形趋势的力为变形力。变形力是一种能够感知残余应力场的有效物理量,可在加工过程中实时监测。根据虚功原理,外部力(即变形力)对虚拟位移所做的功等于残余应力场对虚拟位移所做的功。对于某一几何状态 $v$ ,其平衡方程可表示为

$$\mathbf{K}^v \delta^v = \mathbf{F}^v + \mathbf{R}_{\sigma_0}^v \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}^v$ 和 $\mathbf{R}_{\sigma_0}^v$ 分别为系统的外力载荷和残余应力等效载荷; $\mathbf{K}^v$ 为系统刚度矩阵; $\delta^v$ 为系统的节点位移。

通过考虑边界条件,即零件的约束点,可以建立单一时刻内零件内变形力与残余应力场之间的力学关系:

$$\mathbf{M}^v \sigma_0 = \mathbf{F}_c^v \quad (2)$$

式中:体积系数矩阵 $\mathbf{M}^v = [\mathbf{B}_c^v - \mathbf{K}_{cr}^v \mathbf{K}_{rr}^{v,-1} \mathbf{B}_r^v] \in \mathbb{R}^{m \times n}$ , $m$ 、 $n$ 为向量维度, $\mathbf{B}_c^v$ 、 $\mathbf{B}_r^v$ 分别为约束节点单元和非约束节点单元对应的几何矩阵, $\mathbf{K}_{cr}^v$ 、 $\mathbf{K}_{rr}^{v,-1}$ 分别为依据节点释放条件 $r$ 与约束条件 $c$ 所划分的子刚度矩阵; $\sigma_0 \in \mathbb{R}^n$ 为残余应力向量; $\mathbf{F}_c^v \in \mathbb{R}^m$ 为作用在约束点(即夹具监测点)上的变形力向量。式(2)表征了特定几何边界条件下变形力监测数据与残

余应力场之间的映射关系。鉴于未知残余应力分量数目众多,需通过采集多组不同几何状态下的变形力数据以构建完备的超定方程组。在此基础上,若假设局部变形效应可忽略不计,则变形力与残余应力场之间的系列方程可表述如下:

$$\mathbf{M} \sigma_0 = \mathbf{F} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为表征整个加工工艺的几何体积系数矩阵, $\mathbf{M} = [\mathbf{M}^1, \mathbf{M}^2, \dots, \mathbf{M}^v]^T$ ; $\mathbf{F}$ 为所有加工状态下各约束节点沿不同方向的变形力向量,即 $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_c^1, \mathbf{F}_c^2, \dots, \mathbf{F}_c^v]^T$ 。在方程组构建完成后,当变形力数据量不少于残余应力场未知量数目时,可采用正则化方法实现残余应力场 $\sigma_0$ 的求解;反之,则直接应用正则化方法存在困难,需引入层内应力均布等假设以降低应力场待求未知量维度,从而使问题可解。该方法为分析加工顺序对应力重分布的影响提供了数据基础,进而支撑后续加工顺序的优化。

### 1.2 加工顺序优化

机械加工零件通常由多种表面元素或加工特征构成,包括槽、筋、孔、轮廓等几何要素。每个表面元素或加工特征都需要通过一系列加工操作完成材料去除,使毛坯逐步演化为最终的设计模型。加工顺序作为确定这些加工特征切削先后次序的关键决策,是零件加工工艺方案中的核心要素<sup>[20]</sup>。

为分析不同加工顺序对加工变形的影响,在有限元仿真中构建了尺寸为600 mm×240 mm×20 mm的方形铝合金零件,包含4个标记为A~D的槽,如图1所示。

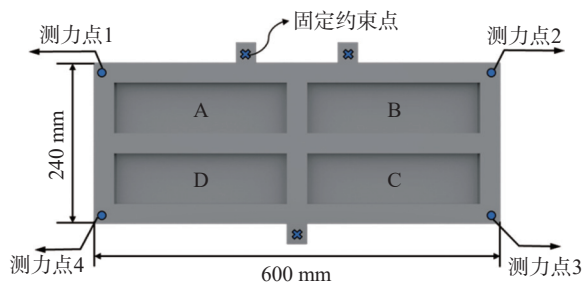


图1 零件仿真示意图

Fig.1 Schematic diagram of component simulation

为研究加工顺序对零件变形行为的影响规律,针对4个槽特征设计了两种典型的加工顺序方案进行对比,如图2所示。这两种方案基于航空结构件制造的工程经验,代表了实际生产中两种差异化的加工策略:顺序1采用从左到右、自

上而下的常规连续加工模式, 反映了传统单向顺序加工的特点; 顺序2采用对称跳跃式加工策略, 通过交替加工对称位置的槽特征, 在加工过

程中实现刚度演化与残余应力重分布的动态平衡。这两种顺序构成了对比研究的工况, 可充分揭示不同顺序策略对变形控制的影响。

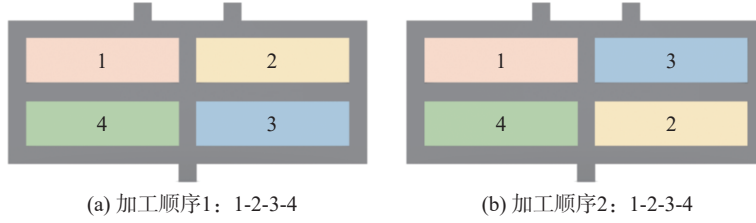


图2 不同加工顺序示意图

Fig.2 Schematic diagram of different machining sequences

在施加相同初始残余应力场的条件下, 对两种方案进行了仿真对比分析。为模拟实际加工条件, 在中间3个凸台位置施加固定约束, 并在零件的4个角点处设置弹簧约束点, 用于监测加工过程中的变形力分布, 具体布置方式如图1所示。

由于仿真模型采用铝合金材料, 其本构参数依据工程手册设置为: 密度  $2.83 \text{ g/cm}^3$ 、弹性模量  $71.7 \text{ GPa}$ 、泊松比  $0.33$ 。为确保数值模拟精度, 网格划分实施分区离散化策略, 在综合考虑几何特征与切削区域分布特性的基础上, 选用最大尺寸  $5 \text{ mm}$  的六面体单元进行离散。针对残余应力场的施加, 充分考虑了其沿厚度方向呈层状分布的特性以及铝合金厚板典型的M形应力分布规律, 通过随机抽样算法生成符合上述统计特征的初始应力场, 并将其作为预定义场载入模型, 从而更真实地再现工件在加工前的实际应力状态。

在加工顺序仿真中, 由于软件 Abaqus/CAE 中材料去除操作(model change)存在局限, 无法在时序工步之间自动传递应力、应变等历史状态变量。这导致难以真实模拟加工顺序带来的累积力学效应。为解决此问题, 采用在每一工步仿真求解完成后, 提取当前模型的几何构型、网格信息及应力-应变等状态变量, 并将其映射为下一工步的初始条件, 从而实现加工顺序的真实力学仿真, 获取含有加工顺序信息的逐工步仿真数据。

为实现加工变形的精确控制, 基于变形力与材料内部残余应力场对变形影响的等效关系, 提出以残余应力场变化均匀性作为加工顺序优化的评价准则。加工过程中去除会导致工件刚度分布发生变化的材料。刚度作为抵抗变形的固有属性, 其下降会破坏原有残余应力的平衡状态, 引发残余应力的释放与重分布<sup>[21]</sup>。

$$\sigma(t_0) = \mathbf{DBK}(t_0)^{-1} \mathbf{F}' \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{K}(t_0)$  为  $t_0$  时工件的刚度矩阵;  $\mathbf{F}'$  为外载荷向量;  $\mathbf{B}$  是应变-位移矩阵;  $\sigma(t_0)$  为  $t_0$  时单元的应力向量;  $\mathbf{D}$  是弹性矩阵。

由式(3)可知, 变形力作为变形趋势的力学表征量, 与刚度变化对变形量的影响具有等效互补性。根据变形量与刚度成反比、与变形力成正比的物理关系, 刚度变化越平缓, 残余应力重分布就越均匀, 这等价于变形力变化越均匀, 从而使加工变形更易控制。因此, 可通过刚度变化均匀性或变形力变化均匀性来等效表征残余应力场的演变稳定性。针对不同加工顺序方案, 通过计算其变形力时序序列  $F_i$  的变异系数  $CV_F$  进行定量评估。

$$CV_F = \frac{\sigma_F}{\mu_F} \quad (5)$$

式中:  $CV_F$  为变异系数;  $\sigma_F$  为变形力时序序列的标准差;  $\mu_F$  为变形力时序序列的均值。变异系数越小, 表明变形力变化越均匀, 残余应力场演化越稳定, 对应的加工顺序越优。

提取仿真过程中的变形力对两种加工顺序进行评估。两种加工顺序各监测点的变形力变异系数如表1所示。通过对比分析可以发现, 加工顺序2的变异系数峰值相较于加工顺序1更小, 表明加工顺序2的应力场变化更加均匀。

表1 不同加工顺序下变形力变异系数

Tab.1 Deformation force variation coefficient for different machining sequences

加工顺序	变异系数			
	监测点1	监测点2	监测点3	监测点4
顺序1	0.2115	0.4931	0.4834	0.3652
顺序2	0.2109	0.4878	0.4416	0.3241

为进一步验证优化结果的有效性,提取仿真后的变形数据进行对比,如表2所示。结果表明,采用变形力变异系数较低的加工顺序2,零件的最终变形量明显小于加工顺序1,表明基于变形力均匀性准则优化加工顺序能够有效控制零件的加工变形。

表2 不同加工顺序下零件最大变形量

Tab.2 Maximum deformation of a part under different machining sequences

项目	顺序1	顺序2
最大变形量/mm	0.324	0.184

## 2 实现与验证

为验证本文方法的有效性,在某主机厂对一典型三米级铝合金零件进行了实验验证。首先,

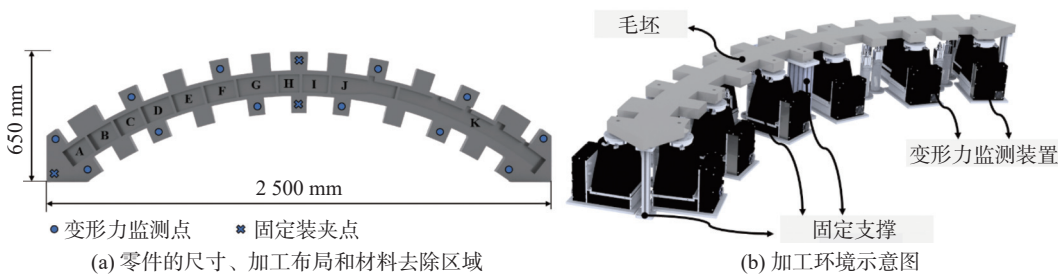


图3 实验环境示意图

Fig.3 Schematic diagram of the experimental environment

力传感器能实时监测并记录因材料被切削去除而引起的残余应力场重新平衡过程中所产生的变形力。在实际加工中,按照层加工的顺序,在每层加工间隙记录变形力数据,每个加工过程去除2 mm的层,共去除15层。因此,在12个夹具中总共监测了180个变形力数据,如图4所示。

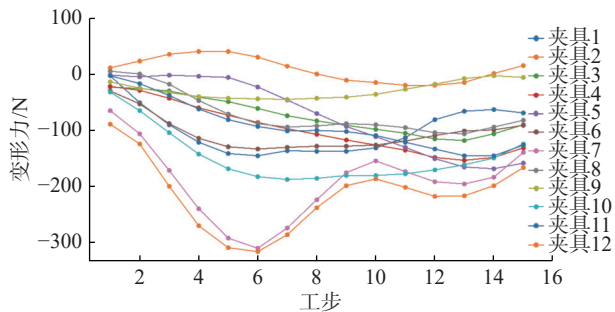


图4 变形力数据

Fig.4 Deformation force data

根据零件的尺寸和几何特征,将整个空间离散化处理, $z$ 轴方向和平面内进行了分区。该毛坯

基于变形力原位推断残余应力场,并通过仿真对比不同加工顺序下的变形力均匀性,从而确定最优加工顺序。随后,在实际加工环节中,对比采用优化顺序与传统顺序的零件变形结果,进行实证效果分析。

### 2.1 监测变形力原位推断残余应力场

为验证该方法的有效性,以飞机实际铝合金结构件为对象进行加工实验。零件及加工环境如图3所示。零件是尺寸为2500 mm×650 mm×44.45 mm的C型结构件,由预拉伸铝合金坯料制成。它包含11个标记为A~K的槽和4个缺口,如图3(a)所示。基于零件既有工艺路线,选取材料去除率较高的粗加工作为变形力数据采集阶段。实验装置由两类夹具构成:3组固定夹具建立加工基准(约束6个自由度),12组浮动夹具集成力传感器并布设在凸台以实时监测变形力,整体布局见图3(b)。

$z$ 轴方向尺寸为44.45 mm,在求解残余应力场时 $z$ 轴方向分成22层,零件 $z$ 轴方向0~2.45 mm为第一层,其余层均为2 mm。在 $xy$ 平面关于短轴对称位置分为2个区域,分布形式如图5所示。最终构建共计44个离散分区的计算网格,每个分区均独立表征 $x$ 与 $y$ 方向的残余应力分量。

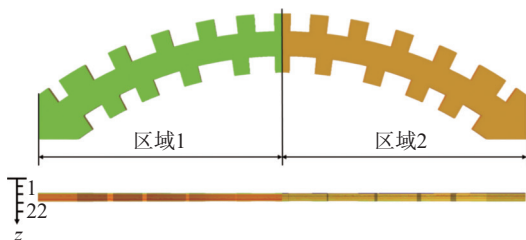


图5 残余应力场分区示意图

Fig.5 Residual stress field distribution map

为获取本批次毛坯初始残余应力场 $\sigma_0$ 的定量分布,首先基于粗加工过程中实时采集的变形力数据,在仿真环境中建立了考虑材料去除效应的

有限元仿真模型, 并由此提取了体积系数矩阵  $M$ 。继而将  $M$  与实测变形力向量  $F$  代入由虚功原理

导出的式 (3), 通过逆向求解推导出毛坯初始残余应力场的空间分布特征, 如图 6 所示。

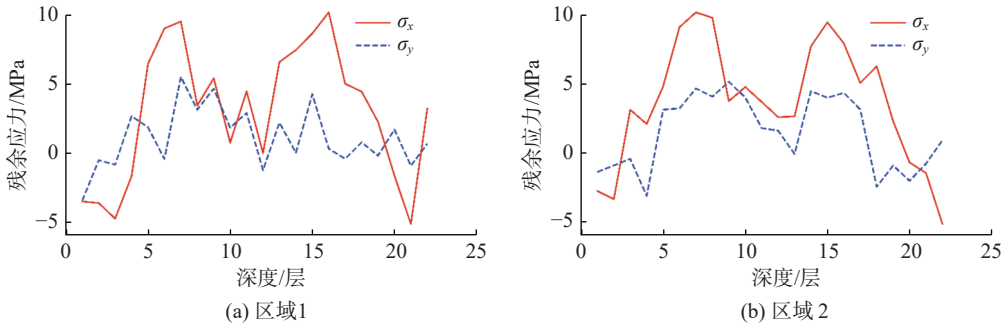


图 6 残余应力场推断结果

Fig.6 Inferred results of the residual stress field

对残余应力场的推断结果进行分析, 发现其分布模式符合预拉伸铝合金板的典型特征,  $x$ 、 $y$  方向的正应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  呈现出显著的 M 形分布, 且在  $z$  方向同一深度上, 区域 1 与区域 2 的应力值表现出高度一致性, 反映了板材内部残余应力沿面内分布的均匀性。上述特征均与理论先验及类似工艺下的研究结论相吻合。

### 2.2 基于残余应力场优化加工顺序

为实现零件加工顺序的优化, 首先制定多组候选加工方案, 基于原位推断获得的残余应力场对各方案进行有限元仿真, 提取加工过程中的变形力时序数据, 通过评估变形力序列的均匀性来筛选最优加工顺序。

对本次实验的最终零件切削特征进行系统性分析, 其几何形态包含 11 个槽特征(C)与 5 个缺口特征(Q)等, 如图 7 所示。槽特征因材料去除量最大主导整体变形, 而缺口特征通过几何不连续诱发局部应力集中, 二者构成加工变形的主控因素。为有效控制并抑制加工变形, 本研究聚焦于特征级工艺规划策略, 对槽特征与缺口特征的加工顺序展开优化研究。

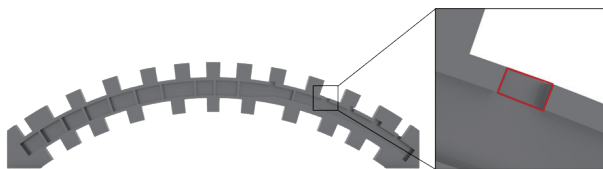


图 7 零件缺口特征

Fig.7 Geometric notch feature

具体而言, 采用分层制造方法, 将槽特征沿深度方向离散为 4 个加工子层, 缺口特征离散为两个加工子层, 通过排列组合构建如表 3 所示的 6 种候选加工顺序。

表 3 候选加工顺序

Tab.3 Candidate machining sequences

加工顺序	顺序代号	加工顺序	顺序代号
顺序1	C1-C2-C3-C4-Q1-Q2	顺序4	Q1-C1-C2-C3-C4-Q2
顺序2	C1-C2-Q1-Q2-C3-C4	顺序5	C1-C2-C3-Q1-Q2-C4
顺序3	Q1-Q2-C1-C2-C3-C4	顺序6	C1-Q1-Q2-C2-C3-C4

针对候选加工顺序, 利用 ABAQUS/CAE 二次开发平台构建多工序加工过程的有限元仿真模型。仿真中实时监测关键位置的变形响应, 并借助预置弹簧单元获取变形力时序数据。通过对该时序序列的统计分析, 可揭示不同加工顺序下残余应力的释放模式与演化规律, 进而基于式 (5) 计算其变异系数  $CV_F$  实现加工顺序的量化评估与优化选择。

在此基础上, 本文进一步构建了加工顺序优化的规划数学模型。该模型的决策变量定义为二元变量  $x_{i,j,k} \in \{0,1\}$ , 表示第  $j$  个特征的第  $k$  子层是否在第  $i$  步加工 ( $i = 1, \dots, N$ ); 目标函数为最小化变形力变异系数峰值  $\min_x \max_{c \in C} \{CV_F\} = \max_{c \in C} \left\{ \frac{\sigma(F_c(t))}{\mu(F_c(t))} \right\}$ , 式中:  $C$  为监测点集合;  $F_c(t)$  为监测点  $c$  的时序变形力。约束条件包括: a. 顺序约束  $\sum_{i=1}^N x_{i,j,k} = 1$  确保每个子层仅加工一次; b. 几何约束  $\sum_{i=1}^p x_{i,j,k_1} \geq \sum_{i=1}^p x_{i,j,k_2} (k_1 < k_2)$  保障特征由下至上逐层加工; c. 工序约束  $\sum_{j,k} x_{i,j,k} = 1$  限定每步仅加工一个子层。该模型通过分层枚举、仿真评估、变异系数计算与最优选择的四步策略求解: 首先基于经验规则生成满足约束的候选顺序集合, 继而采用有限元仿真

提取各顺序下的变形力序列, 最终选取使 $\max\{CV_F\}$ 最小的方案作为最优加工顺序, 实现了加工顺序优劣的量化评估与智能决策。

如图8所示, 加工顺序3的变异系数峰值最小, 表明其应力场演化过程最为均匀稳定, 故将其作为优化后的加工顺序。

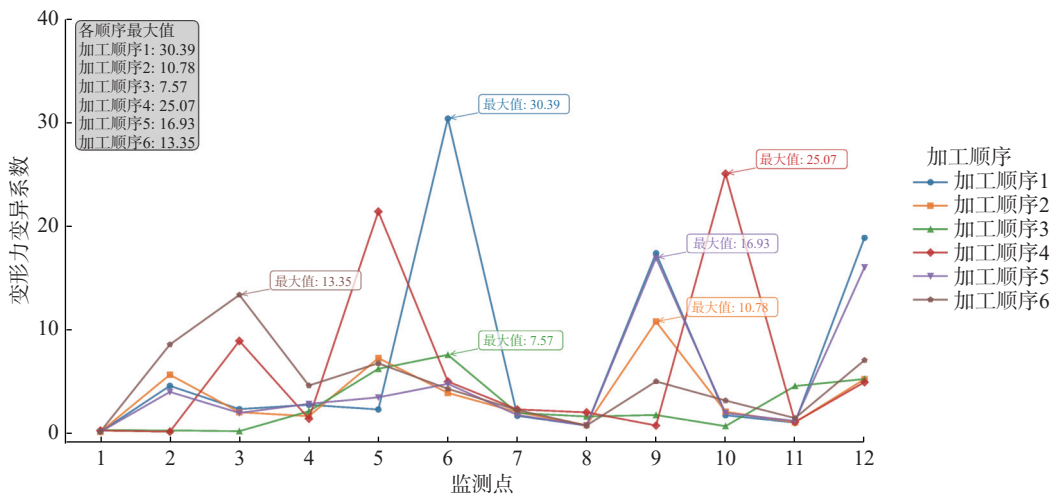


图8 变形力序列变异系数对比

Fig.8 Comparison of the variation coefficients of deformation force sequences

## 2.3 优化结果

为验证优化加工顺序的有效性, 在某大型航空制造企业的五轴加工中心开展对比实验。实验选用同批次7050铝合金毛坯, 分别采用传统经验加工顺序(记为方案A)与本研究优化的加工顺序(记为方案B)进行加工。图9为实验加工现场实录, 展示了零件在龙门加工中心上的完整加工过程。加工完成后, 采用CARP402015型龙门式三坐标测量机对零件变形进行精密测量, 行程 $X/Y/Z=4\ 000\ \text{mm}/2\ 000\ \text{mm}/1\ 500\ \text{mm}$ , 最大允许示值误差 $MPEE \leq (4.5+4.5L/1\ 000)\ \mu\text{m}$ , 最大允许探测误差 $MPEP \leq 5\ \mu\text{m}$ ( $L$ 为测量长度, 单位 $\text{mm}$ )。测量时利用三坐标测量仪对两个零件的轮廓、切边及孔系等关键特征区域进行系统采样, 共获取153个测点的三

维坐标数据, 通过与理论CAD模型对比计算各点变形量, 测量结果如表4所示。

表4 优化前后变形量对比

Tab.4 Comparison of deformation before and after optimization

零件号	平均变形量/mm	标准差	变形量 $\leq 0.10\ \text{mm}$	变形量 $\leq 0.15\ \text{mm}$	变形量 $\leq 0.20\ \text{mm}$
A(优化前)	0.109	0.067	48.48%	72.73%	87.12%
B(优化后)	0.059	0.042	81.94%	97.92%	99.31%
提升效果	45.87%	38.24%	69.02%	34.63%	13.99%

相较于基于经验的加工顺序, 使用本文方法加工出的零件99.31%的变形控制在0.20 mm以内, 高精度区间(变形 $\leq 0.10\ \text{mm}$ )占比从48.48%提升至81.94%, 整体平均变形从0.109 mm减小至0.059 mm。

## 3 总结与展望

针对航空大型结构件加工变形控制难题, 本文提出了一种基于残余应力场原位推断的加工顺序优化方法。该方法利用粗加工过程中实时监测的变形力数据, 结合有限元仿真反演求解了毛坯初始残余应力场, 推断结果呈现典型的M形分布特征, 与预拉伸铝合金板理论分布相符, 为加工顺序优化提供了数据基础。

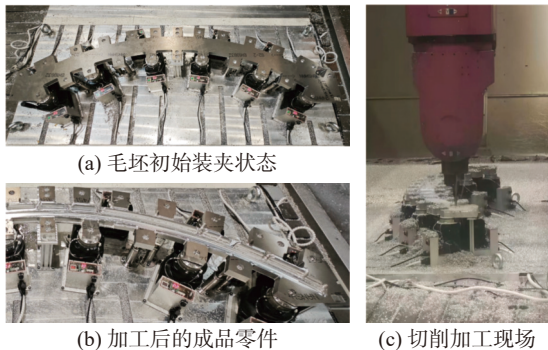


图9 实验加工现场与零件实物图

Fig.9 Experimental machining site and physical component

基于残余应力场与变形力的力学关系, 提出了以变形力均匀性为核心的加工顺序优化准则。通过理论推导与仿真验证, 揭示了变形力变异系数与残余应力重分布均匀性的负相关关系。该准则有效量化了不同加工顺序下应力场演化稳定性, 为最优顺序选择提供了数值化评估标准。

在三米级 7050 铝合金航空结构件上开展对比实验。相较于传统经验加工顺序, 优化后高精度区域(变形量 $\leq 0.10$  mm)占比从 48.48% 提升至 81.94%, 平均变形量降低 45.87%, 99.31% 的区域变形量控制在 0.20 mm 以内, 显著改善了加工变形控制效果。该方法基于加工过程实时监测数据, 无需破坏性检测或昂贵专用设备, 为航空大型结构件高精度制造提供了可行的技术路径。

基于当前研究成果, 未来将构建残余应力场驱动的加工变形场预测模型以提升工艺迭代优化效率, 并融合强化学习等智能优化算法实现加工工艺的自适应优化与加工变形精确控制, 持续推动航空航天结构件智能制造水平的提升。

#### 参考文献:

- [1] 牟文平, 隋少春, 李迎光. 飞机结构件智能数控加工关键技术研究现状 [J]. *航空制造技术*, 2015(13): 56–59.
- [2] 秦国华, 林锋, 叶海潮, 等. 基于残余应力释放的航空结构件加工变形模型与结构优化方法 [J]. *工程力学*, 2018, 35(9): 214–222, 231.
- [3] 岳彩旭, 张俊涛, 刘献礼, 等. 薄壁件铣削过程加工变形研究进展 [J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 99–124.
- [4] HUANG X M, SUN J, LI J F. Effect of initial residual stress and machining-induced residual stress on the deformation of aluminium alloy plate[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 61(2): 131–137.
- [5] 周金强, 刘晓, 江小辉, 等. 运载火箭贮箱整体箱底镜像铣削工艺研究 [J]. *航空制造技术*, 2024, 67(22): 118–125.
- [6] 张安顺, 隋少春, 卢朝琴, 等. 超大型壁板类零件加工变形控制技术 [J]. *航空制造技术*, 2012(17): 57–59.
- [7] 黄志刚, 柯映林, 董辉跃. 框类整体结构件铣削加工顺序的有限元模型 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(3): 368–372.
- [8] WANG J, IBARAKI S, MATSUBARA A. A cutting sequence optimization algorithm to reduce the workpiece deformation in thin-wall machining[J]. *Precision Engineering*, 2017, 50: 506–514.
- [9] CERUTTI X, MOCELLIN K. Influence of the machining sequence on the residual stress redistribution and machining quality: analysis and improvement using numerical simulations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(1/4): 489–503.
- [10] SUGISAWA Y, TAKASUGI K, ASAKAWA N. Machining sequence learning via inverse reinforcement learning[J]. *Precision Engineering*, 2022, 73: 477–487.
- [11] YANG Y F, FAN L X, LI L, et al. Energy principle and material removal sequence optimization method in machining of aircraft monolithic parts[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(10): 2770–2781.
- [12] 张永亮, 陈向, 徐裕超, 等. 基于磁流变液的薄壁零件铣削技术研究 [J]. *上海理工大学学报*, 2024, 46(2): 146–151.
- [13] MATHAR J. Determination of initial stresses by measuring the deformations around drilled holes[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1934, 56(3): 249–254.
- [14] PRIME M B. Residual stress measurement by successive extension of a slot: the crack compliance method[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1999, 52(2): 75–96.
- [15] TREUTING R G, READ W T JR. A mechanical determination of biaxial residual stress in sheet materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22(2): 130–134.
- [16] NORONHA P J, CHAPMAN J R, WERT J J. Residual stress measurement and analysis using ultrasonic techniques[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1973, 1(3): 209–214.
- [17] JIANG W C, WOO W, AN G B, et al. Neutron diffraction and finite element modeling to study the weld residual stress relaxation induced by cutting[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 415–420.
- [18] SINGH D R P, DENG X, CHAWLA N, et al. Residual stress characterization of Al/SiC nanoscale multilayers using X-ray synchrotron radiation[J]. *Thin Solid Films*, 2010, 519(2): 759–765.
- [19] ZHAO Z W, LIU C Q, LI Y G, et al. A new method for inferring and representing a workpiece residual stress field using monitored deformation force data[J]. *Engineering*, 2023, 22: 49–59.
- [20] LIU Z K, WANG L H. Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning[J]. *Computers in Industry*, 2007, 58(4): 295–303.
- [21] HUANG X, SUN J, LI J. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(5/8): 1035–1041.