

基于变形力数据的结构件残余应力场重构方法

黄 冲¹, 刘长青¹, 赵智伟¹, 刘明芳², 郭立杰²

(1. 南京航空航天大学 直升机传动技术国家级重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 201109)

摘 要: 残余应力是引起零件加工变形和失效的重要因素, 残余应力场的重构有助于消除和控制零件在设计、制造、评价和使用过程中的残余应力。针对已有方法难以准确重构残余应力场的问题, 提出了一种通过零件加工过程中的变形力数据实现零件残余应力场重构的方法。该方法首先提取了由于材料去除引起的应力重新分布带来的装夹力变化数据, 即变形力。残余应力到变形力之间通过协方差矩阵自适应进化策略(CMA-ES 算法)反复迭代求解出映射关系, 从而构建出零件的残余应力场, 最后在仿真环境下对该方法进行了验证。验证结果表明: 该方法能较好地预测残余应力场, 重构出的零件的初始残余应力场与原始施加的应力场平均误差值约 0.38 MPa, 为零件残余应力场的重构提供了一种新思路。

关键词: 残余应力场重构; 变形力; 结构件; CMA-ES 算法; 数据驱动

中图分类号: V 260.5

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.03.019

A Method for Residual Stress Field Reconstruction of Structural Parts Based on Deformation Force Data

HUANG Chong¹, LIU Changqing¹, ZHAO Zhiwei¹, LIU Mingfang², GUO Lijie²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 201109, China)

Abstract: Residual stress is an important factor for the deformation and failure of parts. The reconstruction of residual stress field is helpful to eliminate and control the residual stress in the design, manufacture, evaluation, and application of parts. In view of the problem that it is difficult to reconstruct the residual stress field accurately by existing methods, a method for the residual stress field reconstruction of parts is proposed by means of the deformation force data during the manufacturing process of the parts. In this method, the data of clamping force change due to the stress redistribution caused by material removal is extracted firstly, i.e., the deformation force. The mapping relationship of the residual stress and the deformation force of a part is solved by iterations with the covariance matrix adaptation evolution strategy (CMA-ES) algorithm, so that the residual stress field of the part is constructed. Finally, the method is verified in the simulation environment. The results show that the method can well predict the residual stress field, and the average error between the reconstructed initial residual stress field and the original applied stress field is about 0.38 MPa. The method provides a new idea for the residual stress field reconstruction of parts.

Key words: residual stress field reconstruction; deformation force; structural part; covariance matrix adaptation evolution strategy (CMA-ES) algorithm; data-driven

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775278); 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目(COMAC-SFGS-2019-328)

作者简介: 黄 冲(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为智能数控加工。

通信作者: 刘长青(1986—), 男, 副教授, 主要研究方向为智能数控加工。

0 引言

在毛坯的制造、零件的加工和使用过程中,残余应力是不可避免的,由于热、力等效应,它会影响材料的变形稳定性、加工精度、抗疲劳性能、脆性断裂、应力腐蚀开裂和硬度^[1-5]。以飞机结构件的加工为例,由于其零件尺寸大,加工中材料去除率高(最高可达 95% 以上^[6-7]),在完成加工后,残余应力的释放会导致飞机结构件产生弯曲、扭曲等各种形式加工变形^[8],严重者会导致零件报废。若能了解残余应力的分布,即零件内部的残余应力场,有助于消除和控制机械零件在设计、制造、评价和使用过程中的残余应力,所以残余应力场的重建具有很高的实用价值。

随着残余应力测试技术与计算机计算能力的提高,人们对残余应力的分析能力也日愈加强。国内外的学者做了大量的相关研究,主要可以分为 3 个方面:实验法、数学模型法、有限元法。

实验测试作为验证理论分析的有效方法,一直以来对于通过使用不同的测试手段来分析残余应力的探索从未间断。残余应力的实验法包括破坏性实验法和非破坏性实验法。破坏性实验主要有钻孔法^[9]、逐层剥离法^[10]、纳米压痕法^[11]等,这类方法的机理就是通过释放存在材料内部的原始应力,进而通过测量该过程所产生的应变位移反求出残余应力值。该方法的问题是残余应力测量后零件的结构也会遭到破坏,无法进一步使用。非破坏性实验主要有 X 射线衍射法^[12]、超声法^[13]、中子衍射法^[14]等无损检测方法,这类方法目前只能检测表面或近表面的残余应力。

在使用数学模型来构建残余应力方面,JACO-BUS 等^[15]通过建立平面应变热弹塑性模型,研究材料的切削运动以预测工件表面和亚表面的残余应力分布。EL-AXIR^[16]建立了一个考虑材料弹性强度、切削速度和进给量的模型用来分析以上工艺参数对于最大残余应力的影响,最终确定在加工过程中最大残余应力的位置和深度。LAZOGLU 等^[17]采用松弛法建立了一个增强的解析弹塑性模型,并用 X 射线衍射测量得到了验证,有效提高了残余应力预测效率和精度。国内对使用数学模型构建残余应力的研究较少,其中华中科技大学的毛宽民等^[18]提出了一种利用表面应力测量数据预测零件完整的残余应力状态的方法,求解了单元和整体的

残余应力平衡方程,得到了结构的残余应力场。但是数学模型法受其预测精度和求解难度的限制,仍需要开展更多的相关的研究工作。

为了分析零件残余应力的状态,许多学者探索了基于有限元的求解方法,在切屑-刀具接触模型、切屑分离准则和网格重划分技术等方面都取得了很大的进展。LIN 等^[19]通过在有限元仿真环境中研究了切深、切削速度等工艺参数对残余应力的生成的影响。YANG 等^[20]采用“生死单元”技术模拟材料去除,通过有限元仿真分析了残余应力对飞机结构件加工变形的影响。GUO 等^[21]利用有限元法分析了在车削和磨削中残余应力的分布规律。但是有限元法局限于计算耗时、模型精度低,所以该方法依然需进一步提高。

从以上分析可以知道,残余应力测量方法大多比较复杂昂贵,测量范围和精度受限,并且数学模型与有限元法预测精度有待提高。针对这些问题,本文提出了一种通过零件加工过程中的变形力数据实现零件残余应力场重构的方法,该方法首先提取了由于材料去除引起的应力重新分布带来的装夹力变化数据,即变形力,残余应力到变形力之间通过协方差矩阵自适应进化策略(CMA-ES 算法)反复迭代求解出映射关系,从而构建出零件的残余应力场,较好地实现了预测残余应力场。

1 基于 CMA-ES 算法残余应力场重构

因为残余应力场受到多种因素的耦合作用,很难精准地建立一个物理模型来实现残余应力场的重构,所以我们把它处理成一个黑盒问题,而 CMA-ES 算法在这种问题上能展现出非常好的实用价值,因此,我们在残余应力到变形力之间采用此算法来求解出映射关系,从而构建出残余应力场。协方差矩阵自适应进化策略(Covariance Matrix Adaptation Evolutionary Strategies, CMA-ES)^[22-23],该算法使用高斯分布在优化问题的解空间中进行采样,并且根据某种样本选择机制对高斯分布进行采样和更新过程持续迭代,当搜索到满意的解或者达到采样最大次数等停止条件时就会停止优化过程。

故针对优化目标:

$$\arg \min_x f(x), x \in S \subseteq R^D \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为优化目标函数; x 为输入样本; S 为 D 维的实数空间。

CMA-ES 使用高斯分布 $N(m_t, \sigma_t^2 C_t)$ 在 D 维的 S 空间进行采样,其中 m_t 为第 t 代的高斯分布的均值, σ_t 为第 t 代的搜索步长,是用于控制高斯分布的局部搜索能力, C_t 为第 t 代的高斯分布的协方差矩阵。在 CMA-ES 中,每一次迭代从 $N(m_t, \sigma_t^2 C_t)$ 中产生 λ 个样本(一般 λ 取值为 $\log n$ 的量级, n 为解空间的维度),然后对样本进行适应度计算,也就是计算 $f(x)$,然后使用选择策略从样本中选出适应度最好的前 $\mu = \left\lfloor \frac{\lambda}{2} \right\rfloor$ 样本用于更新分布参数。CMA-ES 算法是一个不断迭代的优化算法,在采样操作和高斯分布更新两个阶段中不断循环,当满足停止条件时就会停止计算。

使用所选择的样本分别对分布参数 m_t, σ_t, C_t 进行独立的更新。大体来说,对 m_t, C_t 的更新使用的是最大似然估计(ML-update)。分布的均值即为所选择的 μ 个样本的加权的最大似然估计:

$$m_{t+1} = \sum_{i=1}^{\mu} w_i x_{i,\lambda} = m_t + \sum_{i=1}^{\mu} w_i (x_{i,\lambda} - m_t) \quad (2)$$

式中: m_{t+1} 为第 $t+1$ 代均值; w_i 为第 t 代每个样本的权重系数,这里权重系数取相同的 $w_i = \frac{1}{\mu}$,所以此式就是使用所选择的样本的最大似然估计; $x_{i,\lambda}$ 为第 t 代 λ 个样本中适应度最好的前 μ 个样本。更新项 $\sum_{i=1}^{\mu} w_i (x_{i,\lambda} - m_t)$ 可以理解为对 m 的自然梯度信息几何优化、随机优化与进化策略。

CMA-ES 默认使用累积式步长调整(Cumulative step size adaptation, CSA)。CSA 是当前最成功、用得最多的步长调整方式,其原理是相继搜索的方向应该是共轭的。如果相继搜索方向之间正相关,则表明步长太小,应该增大;如果相继搜索方向之间负相关,则表明步长太大,应该减小。所以步长的更新公式为

$$\sigma_{t+1} = \sigma_t \exp \left(\frac{c_s}{d_s} \left(\frac{\|s_{t+1}\|}{E\|N(0, I)\|} - 1 \right) \right) \quad (3)$$

式中: σ_{t+1} 为第 $t+1$ 代搜索步长; c_s 与 d_s 为调整步长变化幅度的控制参数,通常设置为 $c_s \propto \frac{1}{D}$, $d_s > 1$; s_{t+1} 为第 $t+1$ 代共轭进化路径,其搜索路径可以看成是一个 n 维标准正态分布的随机向量,在平稳性条件下有 $s_{t+1} \sim N(0, I)$ 。因此,其模长服从卡方

分布 $\|s_{t+1}\| \sim \chi(n)$, 并且 $E(\|s_{t+1}\|) = \sqrt{D}$, 而 $E(\|N(0, I)\|) = \sqrt{D}$ 。

高斯分布协方差矩阵 C 的更新结合了 rank-1 和 rank- μ , 更新公式为

$$C_{t+1} = (1 - c_1 - c_\mu) C_t + c_1 p_{t+1} p_{t+1}^T + c_\mu \sum_{i=1}^{\mu} w_i y_{i,\lambda} y_{i,\lambda}^T \quad (4)$$

式中: C_{t+1} 为第 $t+1$ 代的高斯分布协方差矩阵; p_{t+1} 为第 $t+1$ 代的平滑指数; c_1 与 c_μ 为学习率; $y_{i,\lambda}$ 为第 t 代 λ 个样本搜索方向中适应度最好的前 μ 个。 C 的更新原理是增大沿成功搜索方向的方差,即增大沿这些方向采样的概率。rank-1 使用平滑指数 p 对均值的偏差进行记忆,随着优化过程历史信息逐代衰减; rank- μ 为对 C 的自然梯度信息的几何优化的策略。这里的每一个 $y_i \in R^D$ 是一个搜索方向,一般情况下 y 可以通过协方差矩阵 C 的特征分解或者 Cholesky 分解得到。学习率 c_1 与 c_μ 的设计原理是 $c_1, c_\mu \propto \frac{1}{D}$, 即学习率与所调整的变量维度(参数个数)成反比。

根据变量维度从 CMA-EA 算法的解空间赋予材料各层的残余应力值,在各层材料去除的过程中提取由于残余应力重分布而产生的变形力。将变形力数据与原始变形力差的平方和作为此算法的优化目标,在优化目标最小化的过程中,从解空间中得到的应力值就会无限逼近初始施加的应力值,从而实现残余应力的重构。

2 基于 Abaqus 二次开发仿真环境的建立与变形力数据获取

在零件制造过程中,变形的产生大部分为弹性变形,本文在不考虑零件塑性变形的情况下,根据线性弹性问题的解是唯一的,即基于基尔霍夫唯一性定理^[24]可以知道应力场的解是唯一的,也就是说,当一个毛坯的内部应力场确定,按照同样的方式去除材料在同一点得到的变形力是唯一的。所以本文可以通过在二维仿真环境中获取材料去除过程中的变形力,从而构建出零件的残余应力场。以下分为仿真环境的搭建与二次开发获取变形力数据来论述。

2.1 仿真环境的搭建

通过在 Python 脚本在 Abaqus 软件在平台上建立一个 $70\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 二维平面, 本文以广泛应用于飞机结构件中的 7050-T7451 铝合金为例, 材料的力学属性见表 1。在仿真环境中为所建平面赋予该铝合金的材料属性。边界条件则是限定平面中间区域 $2\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ 的 6 个自由度, 在加工仿真中将其作为固定区域。网格划分则是以大小为 1 mm^2 四边形在平面上进行划分, 以保证材料去除的完整性, 如图 1 所示。

根据黄晓明^[25]提出 7050-T7451 铝合金坯料的初始残余应力场函数, 见式(1), 在平面上沿 Y 轴方向上逐层施加沿 X 方向的主应力 σ_x , 如图 1 所示。

表 1 7050-T7451 铝合金力学属性

Tab.1 Mechanical properties of 7050-T7451 aluminum alloy

弹性模量/ GPa	抗拉屈服强 度/MPa	剪切强度/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)
71.7	469	303	0.33	2.83

$$\sigma_x = 70.74 - 71.51 e^{-0.003 93 z^2} - \sum_{i=1}^2 90.63 e^{-0.017 [Z - 23.18 \times (-1)^i]^2} \quad (5)$$

式中: Z 为毛坯上某一位置到毛坯中性层的相应距离。

施加方法是首先将初始残余应力场离散化, 然后将离散后的应力值逐层施加到网格单元中, 将初

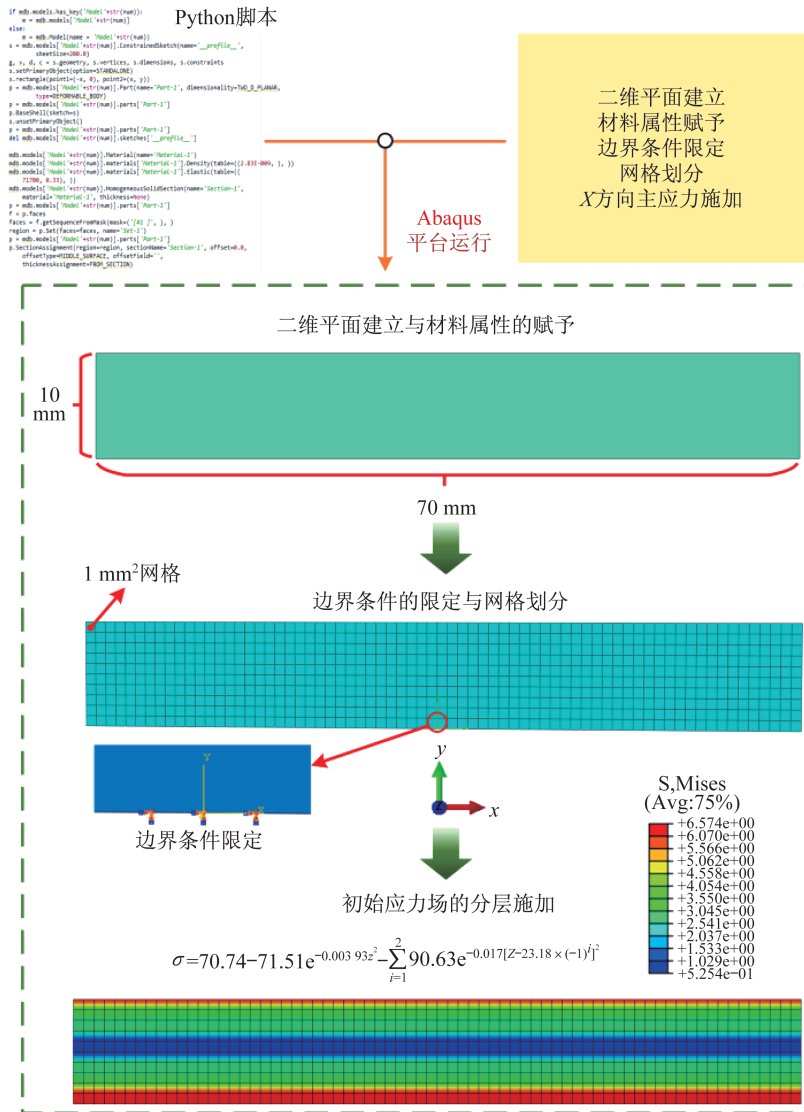


图 1 基于 Abaqus 平台仿真环境的建立

Fig.1 Establishment of the simulation environment based on Abaqus platform

始残余应力与平面的宽度(毛坯厚度)之间的函数关系通过 Python 脚本施加到铝合金预拉伸毛坯板材的二维平面中,这样保证了初始残余应力的连续性,提高了计算精度,同时实现了初始残余应力施加的自动化。

2.2 变形力数据的获取

本文通过模拟实际的加工过程,提取每去除一层材料所产生的变形力。实际加工时材料的去除是一个动态的过程,刀具走过的位置材料就会被去除,在 Abaqus 仿真平台采用“生死单元”技术来实现材料的去除过程。通过 Python 脚本在仿真平台上将所去除的单元的刚度矩阵乘以一个约为零的缩

减因数,来达到杀死单元的目的,具体的表现是将与单元相关的单元属性,比如质量、阻尼、比热容等全部置为零。在结构件有限元变形计算中,去除材料单元一旦被杀死其应变即为零,从而避免了从材料变形的微观角度来讨论被切除单元的分离标准。

在加工仿真中,将材料分为 9 层去除,每层去除厚度为 1 mm 的两个槽,随着模拟加工过程中单元的去除,残余应力逐层释放,每去掉一层单元,在有限元中分为一个分析步计算一次,一共有 9 个分析步。通过 Python 脚本在平面底边两个顶点上施加弹簧用来提取每层材料去除产生的变形力,如图 2 所示。

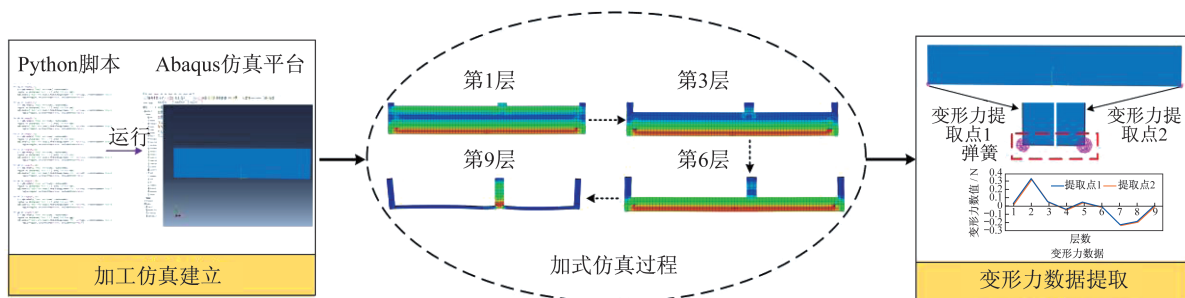


图 2 变形力数据提取

Fig.2 Acquisition of deformation force data

使用 Python 脚本通过 Abaqus 接口访问 Abaqus 对象中数据。在对象创建后,可使用该对象提供的方法来处理对象中的数据成员。ODB 对象是结果数据库对象,包含了模型数据和结果数据,本文通过访问 ODB 下面的 steps 对象,遍历多个分析步和帧的位移值(U),部件实例的节点集合 NodeSets,读取变形力提取点 1 和 2 的节点在每一层材料去除后的位移值,再与弹簧弹性系数相乘得到变形力数据,写入 CSV 文件以作 CMA-ES 算法的数据输入。

3 重构结果对比与分析

根据初始应力场施加的层数确定 CMA-EA 算法解空间的维度,本文案例的维度为 10。根据变量维度从算法的解空间赋予材料各层的残余应力值,本文为解空间赋予的初始值为 0 MPa。在算法的解空间不断搜索的过程中使得优化目标最小化,从而在优化目标最小化时得到的应力值就会逼近初始施加的应力值。每层 X 方向主应力与训练次数关系如图 3 所示。从图中可以看出,在仿真次数为 1 400

次左右以后,基于 CMA-ES 算法的残余应力场解空间趋于收敛,各层应力值只会小幅度波动。因此就有理由认为在这 1 810 次仿真中,我们优化的目标值即每层变形力差值的平方和最小的状态,就是各层应力最逼近原始应力的状态。

本文方法的优化目标与仿真次数的关系如图 4 所示。从图中可以看出,仿真次数在 1 400 次左右以后优化目标趋于收敛,变化趋势趋于平缓,不会再有大幅度波动。因此,有理由认为基于 CMA-ES 算法的残余应力场解空间中使得优化目标最小的值包含在这 1 810 次仿真中。同时,仿真次数在 356 次的时取到了优化目标的最小值 0.012。

本文根据式(1)施加的 X 方向主应力的原始值与优化目标最小时所施加的各层应力值的对比见表 2。从表中可以看出,这 10 层的应力重构值与与初始施加的原始值变化趋势是相同的,其中最大误差为 0.8 MPa,最小误差为 0.02 MPa,平均误差为 0.38 MPa,如图 5 所示。

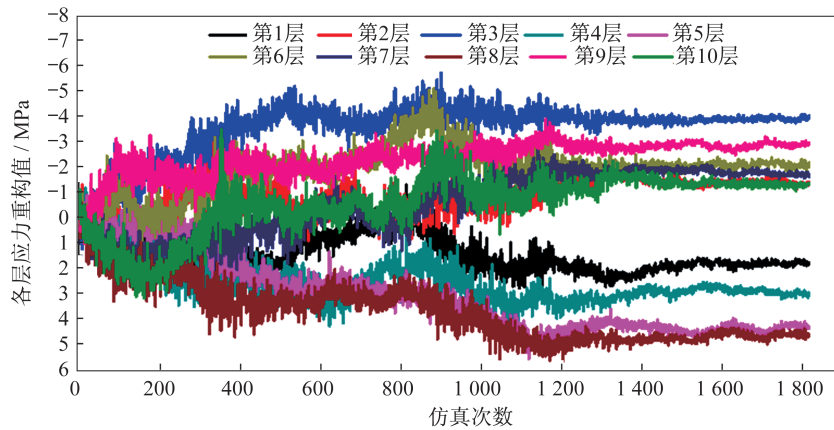


图3 各层应力重构值与仿真次数关系

Fig.3 Relationship between the reconstruction value of each layer stress and the simulation time

表2 应力场重构结果与施加的初始残余应力对比

Tab.2 Comparison of the stress field reconstruction result and the applied initial residual stress

层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
原始值/MPa	4.59	-4.38	-1.12	3.32	1.34	-0.13	1.34	3.32	-1.12	-4.38
重构值/MPa	3.85	-3.65	-1.28	2.80	1.60	-0.11	1.58	3.53	-1.29	-3.54
误差值/MPa	0.74	0.73	0.16	0.52	0.16	0.02	0.24	0.21	0.17	0.80

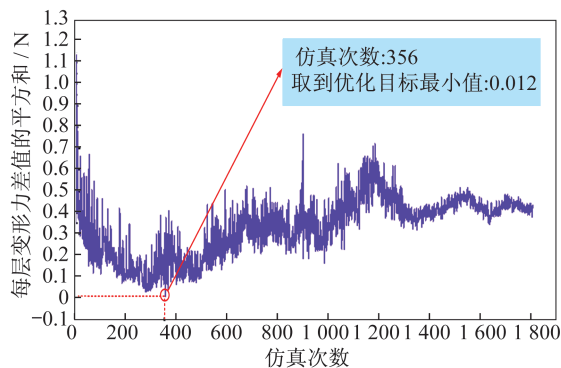


图4 优化目标与仿真次数关系

Fig.4 Relationship between the optimization objective and the simulation time

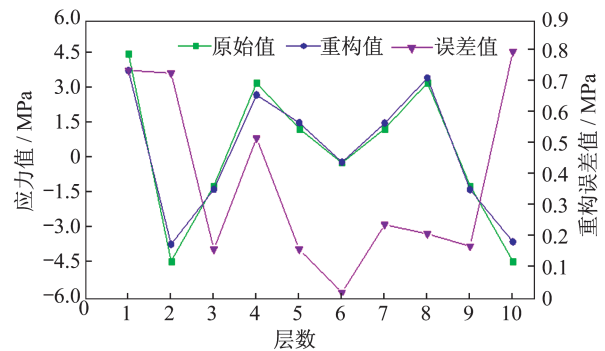


图5 应力值与重构误差值对比

Fig.5 Comparison of the stress value and the reconstruction error

4 结束语

本文研究了一种通过零件加工过程中的变形力数据实现零件残余应力场重构的方法。通过少量点的变形力数据就能重构出零件的残余应力场,结果表明该方法能较好地预测残余应力场,重构出的零件的初始残余应力场与原始施加的应力场平均误差值约 0.38 MPa。但本文只考虑二维平面的应力场,后续将研究推广到三维实体,并将通过提取更多点的变形力数据,从而提高应力场重构的精度。

参考文献

- [1] YONEZU A, KUSANO R, HIYOSHI T, et al. A method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(1): 362-372.
- [2] LYON K, MARROW T, LYON S. Influence of milling on the development of stress corrosion cracks in austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 218: 32-37.
- [3] FENG A, LI B, XU C, et al. Reliability analysis on errors of measuring residual stress in 7050 aluminum

- alloy with X-Ray diffraction [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 105: 1867-1871.
- [4] KHAN M, FITZPATRICK M, HAINSWORTH S, et al. Effect of residual stress on the nanoindentation response of aerospace aluminium alloys [J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(10): 2967-2976.
- [5] SPILIOPOULOS K, PANAGIOTOU D. A residual stress decomposition based method for the shakedown analysis of structures [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2014, 276: 410-430.
- [6] 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, 482(13): 56-59.
- [7] ZHANG G, YU C, SHI R. Experimental study on the milling of thin parts of titanium alloy (TC4) [J]. *Journal of Materials Machining Tech*, 2003, 138(1): 489-493.
- [8] CHANTZIS D, VAN-DER-VEEN S, ZETTLER J, et al. An industrial workflow to minimise part distortion for machining of large monolithic components in aerospace industry [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 8: 281-286.
- [9] MAXWELL A, TURNBULL A. Measurement of residual stress in engineering plastics using the hole-drilling technique [J]. *Polymer Testing*, 2003, 22(2): 231-233.
- [10] BENDEK E, LIRA I, FRANCOIS M, et al. Uncertainty of residual stresses measurement by layer removal [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, 48(12): 1429-1438.
- [11] CHEN X, YAN J, KARLSSON A. On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 416(1/2): 139-149.
- [12] PINA J, DIAS A, LEBRUN J. Study by X-ray diffraction and mechanical analysis of the residual stress generation during thermal spraying [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 347(1/2): 21-31.
- [13] YA M, MARQUETTE P, BELAHCENE F, et al. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 382(1/2): 257-264.
- [14] WIMPORY R, OHMS C, HOFMANN M, et al. Statistical analysis of residual stress determinations using neutron diffraction [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009, 86(1): 48-62.
- [15] JACOBUS K, DEVOR R, KAPOOR S. Machining-induced residual stress: experimentation and modeling [J]. *J Manuf Sci Eng*, 2000, 122(1): 20-31.
- [16] EL-AXIR M. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(9): 1055-1063.
- [17] LAZOGLU I, ULUTAN D, ALACA B, et al. An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining [J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(1): 81-84.
- [18] WANG F, MAO K, LI B. Prediction of residual stress fields from surface stress measurements [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 140: 68-82.
- [19] LIN Z, LAI W, LIN H, et al. Residual stresses with different tool flank wear lengths in the ultra-precision machining of Ni-P alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 65(1/2/3): 116-126.
- [20] YANG Y, LI M, LI K. Comparison and analysis of main effect elements of machining distortion for aluminum alloy and titanium alloy aircraft monolithic component [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(9/10/11/12): 1803-1811.
- [21] GUO Y, BARKEY M. FE-simulation of the effects of machining-induced residual stress profile on rolling contact of hard machined components [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(3): 371-388.
- [22] BEYER G. Convergence analysis of evolutionary algorithms that are based on the paradigm of information geometry [J]. *Evolutionary Computation*, 2014, 22(4): 679-709.
- [23] HANSEN N, ROS R, MAUNY N, et al. Impacts of invariance in search: when CMA-ES and PSO face ill-conditioned and non-separable problems [J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(8): 5755-5769.
- [24] 陆明万,罗学富.弹性理论基础[M].北京:清华大学出版社,1990.
- [25] 黄晓明.铝合金航空整体结构件加工变形机理与预测研究[D].济南:山东大学,2015.