



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Intelligent Manufacturing—Article

基于变形力监测数据的残余应力场推断和表征方法

赵智伟^{a,#}, 刘长青^{a,#}, 李迎光^{a,*}, James Gao^b

^a College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

^b School of Engineering, University of Greenwich, Chatham Maritime ME4 4TB, UK

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 March 2022

Revised 4 May 2022

Accepted 4 July 2022

Available online 14 October 2022

关键词

残余应力场

精密加工

变形力

反问题

在位测量

摘要

残余应力是材料的基本属性之一,与零件的几何/尺寸稳定性和疲劳寿命直接相关。针对具有高精度要求的大型零件,其残余应力场的准确测量和预测一直是一个挑战。目前的残余应力场测量技术分为基于应变的有损法以及效率和精度较低的无损法。本文提出了一种基于变形力推断残余应力场的无损法。本方法通过能够反映去除材料后不平衡残余应力场整体效应的变形力来推断零件的残余应力场。利用虚功原理建立了变形力与残余应力场之间的力学关系,并引入正则化方法求解残余应力场。为验证方法的有效性,本文进行了理论验证和实际实验验证。实验结果表明,该方法对于大型结构件的残余应力场测量具有可靠的精度和灵活性。在数字化和智能制造的趋势下,该方法的基本原理为利用加工监测数据预测和补偿由残余应力引起的零件加工变形提供了重要参考。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

残余应力是材料的基本属性之一[1],残余应力在材料内部的分布可表示为残余应力场,直接影响材料强度[2]、加工精度、几何和尺寸稳定性、疲劳寿命[3]和自然时效变形[4]。因此,在航空、航天和核工业等高价产品领域的设计、制造和服役过程中,残余应力场的分析对于大型构件的加工制造至关重要[5]。同时,为满足高价产品和设备的性能及安全需求,在制造过程中在不损坏零件的前提下精确测量大型构件的残余应力场必不可少[6]。尤其是飞机大型结构件,因为无法准确测量或预测残余应力场,其尺寸、形状和位置等制造精度面临挑战,难以保证

装配精度,影响飞机的动力学性能、疲劳寿命和隐身性。

1.1. 现有方法与技术

现有残余应力测量方法可分为有损法和无损法。有损法通过破坏材料释放残余应力,并测量由此引起的局部应变,进而计算得到残余应力。局部材料破坏方法包括钻孔[7]、裂纹[8]、切割轮廓[9]和逐层剥除材料[10]等方式,如图1(a)所示。因此,为测量工件的整体残余应力场,需破坏工件。此外,应变测量过程中的应力释放导致应力重分布,容易造成测量误差累积。

为避免破坏工件,无损法通过测量受应变影响的材料属性计算残余应力,如衍射法、热弹性残余应力测量方法

* Corresponding author.

E-mail address: liyingguang@nuaa.edu.cn (Y. Li).

These authors contributed equally to this work.

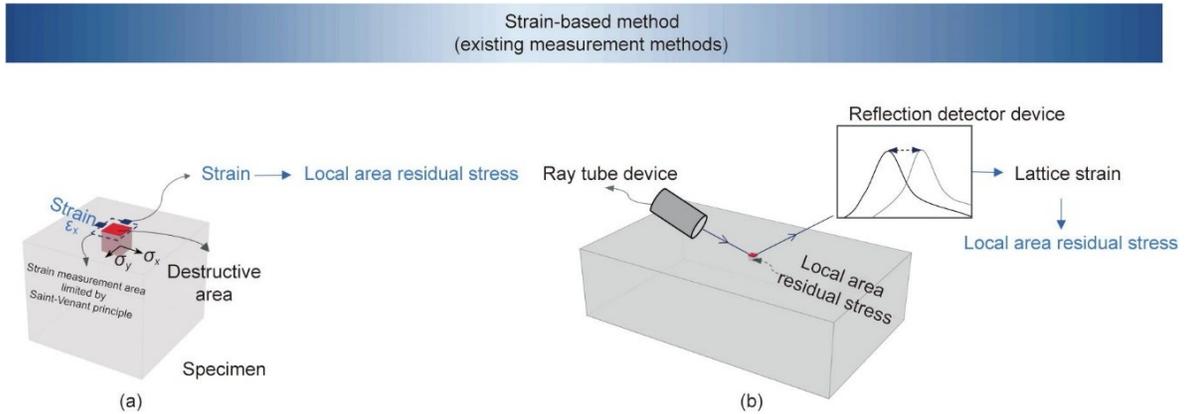


图1. 现有基于应变的测量方法示意图。(a) 有损法；(b) 无损法。 ϵ_x : x 向应变； σ_x : x 向残余应力； σ_y : y 向残余应力。

[11]和压痕法[12]等。然而，对于整体残余应力场测量，无损法测量次数多、效率低。如X射线衍射法[13]被广泛应用于工业[14–16]，但仅能测量工件表面的残余应力，如图1(b)所示。中子衍射[17]和同步辐射方法[18]具有较大的穿透深度，可在不损坏工件的情况下测量残余应力场。但其测量过程需要高度专业、复杂的设备[19]，需要进一步改进其测量效率和精度，以适用于工业应用。同时，无损法需要与“零应力”（zero stress）参考试样比较，以计算晶格应变变化，进而得到相对于“零应力”的残余应力。然而“零应力”试样作为残余应力测量基准，不易制作，“非零应力”试样容易造成测量误差。此外，对于具有织构组织的金属材料（如铝合金和钛合金），衍射方法的测量误差较大，与有损法相比，测量差异可达50 MPa甚至100 MPa [20]。

现有残余应力场测量方法本质上属于“应变法”，即通过测量应变计算残余应力。然而，根据圣维南定理（Saint-Venant's principle）[21]，荷载只对力作用区域附近的应力分布产生影响，导致目前基于应变的残余应力场测量方法只能通过测量局部区域应变来计算残余应力。因此，为构建整体残余应力场，需要测量大量的局部残余应力，造成有损法需要破坏零件，引起测量精度误差，无损法需要高度专业和复杂的设备以及长达数天甚至数周的测量时间[8]。综上所述，现有的残余应力场测量方法主要存在以下局限性：应变测量区域受圣维南定理限制、破坏待测零件、测量效率低。随着产品功能和质量要求的提高，对材料内部整体残余应力场的测量和预测提出了新的挑战，包括以下方面：

(1) 高精度和高分辨率。对于大型构件，残余应力场分布的粗略估计已不能满足精密制造的需要，应获得零件更高精度和更高分辨率的残余应力值。

(2) 测量过程对零件无损伤。由于大尺寸、高精度零件的制造成本较高，需要在不损伤零件的前提下，对每个

零件的残余应力场进行推断或测量。

因此，由于测量效率和测量精度的限制，现有残余应力场测量方法难以满足数字化和智能制造背景下高质量的零件加工过程控制要求。

1.2. 基于变形力的残余应力场推断方法

在材料去除过程中，材料内部不平衡的残余应力场使装夹点（或表面）产生作用力，即变形力，如图2所示。因此，本文提出了一种新的残余应力场推断思路：基于虚功原理建立变形力与残余应力场的机理模型，进而基于变形力推断残余应力场。

与现有方法相比，有损法需要破坏零件以测量零件不同点的残余应力，无损法需要高度专业的设备进行长时间的测量。使用本文方法，仅需要在结构件加工过程中，利用监测的变形力，便可推断零件的残余应力场，无需额外的测量过程且不会对零件造成不必要的损坏。该方法的另一个优点是，变形力可在工件固定和夹紧的状态下，每次去除材料之后监测，为推断工件原始状态和加工后残余应力场提供了可能性。同时，可以根据要求灵活设置残余应力场的分辨率，以推断出每个工件的残余应力场，也为高质量工艺控制奠定了基础，对于高精度要求的大尺寸零件加工制造具有重要意义。

2. 基于变形力的残余应力场推断方法原理

2.1. 变形力与残余应力场力学关系

工件材料去除后，内部不平衡的残余应力场将导致工件产生变形。因此，可将变形力定义为一组面力，等效残余应力场对变形的影响[22]。在实际制造环境中，有限的变形力数据可以通过在加工过程中多个阶段监测工件在固定状态下约束点在 x 、 y 和 z 方向上的作用力变化获得，如

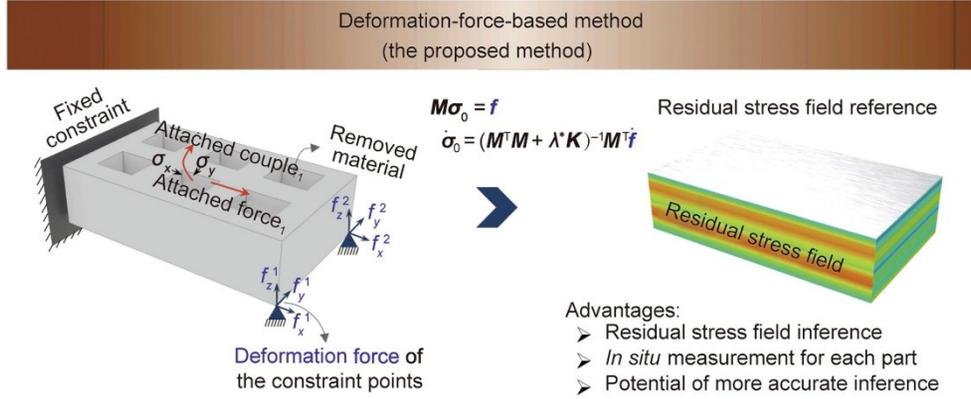


图2. 基于变形力的残余应力场推断方法。 M : 全局体积系数矩阵; σ : 残余应力; f : 变形力; $\hat{\sigma}$: 推断残余应力; λ^* : 优化后的参数; K : 正则化矩阵; \hat{f} : 测量的变形力; f_x^1 、 f_y^1 和 f_z^1 : 夹具1测量的x、y和z向变形力; f_x^2 、 f_y^2 和 f_z^2 : 夹具2测量的x、y和z向变形力。

图2所示。在线弹性假设条件下，材料的局部变形在材料去除过程中可忽略不计，同时材料内部的残余应力场在材料去除后装夹约束不变的情况下保持不变。

当变形力的反力与残余应力作用于同一工件时，工件处于平衡状态。根据虚功原理，外力（即变形力的反力）对虚位移所做的功等于内力（即残余应力场）对虚位移所做的功。考虑体积力的平衡方程可以表示为：

$$\sum_{V_n} (\delta_c^*)^T f_l^{V_n} + \sum_{V_n} \int_{V_c} (\delta_c^*)^T g dV_c = \sum_{V_n} \int_{V_c} (\epsilon_c^*)^T \sigma^c dV_c \quad (1)$$

式中， δ_c^* 是单元节点的虚位移； f_l 是作用在单元节点处的外力； ϵ_c^* 是单元的虚应变； σ^c 是单元应力，由产生的应力 σ_1^c 和残余应力 σ_0^c 相减获得； g 是体积力； V_n 是第 n 次材料去除后零件的几何状态； V_c 是单元体积。

虚应变 ϵ^* 满足 $\epsilon^* = [B](\delta^*)^c$ ，其中 $[B]$ 是单元几何矩阵，该方程将虚应变转换为虚位移。因此，

$$\sum_{V_n} (\delta_c^*)^T f_l^{V_n} = (\delta_c^*)^T \sum_{V_n} \int_{V_c} [B]^T \sigma^c dV_c - (\delta_c^*)^T \sum_{V_n} \int_{V_c} g dV_c \quad (2)$$

进一步，变形力和残余应力的平衡方程可表示为：

$$\dot{M}^{V_n} (\sigma_1 - \sigma_0) - g^{V_n} = F^{V_n} \quad (3)$$

式中， \dot{M}^{V_n} 是几何体 V_n 的体积矩阵，而 $\dot{M}^{V_n} = \sum_{V_n} \dot{m}^{V_n}$ 。其中 $\dot{m}^{V_n} = \int_{V_n} [B]^T dV_n$ (\dot{m}^{V_n} 表示单元应力对特定单元节点的影响程度)； σ_0 是残余应力向量； σ_1 是系统应力向量； F^{V_n} 是单元节点力向量，是基于线性叠加原理由残余应力场和体积力得出的。 F^{V_n} 由监测节点的变形力和未被监测节点的零值组成。

2.2. 基于变形力的残余应力场推断方法

公式(3)表示有限数量的变形力和残余应力场数值

的力学关系。通过考虑边界条件并忽略体积力，可以消除 $\dot{M}^{V_n} \sigma_1$ ，进而得到 $\dot{M}^{V_n} \sigma_0 = F^{V_n}$ 。为推断零件残余应力场，根据实际制造过程多个材料去除过程采集的变形力数据，构造残余应力场-变形力方程组：

$$M \sigma_0 = f \quad (4)$$

式中， M 是全过程体积系数矩阵， $M = [M^1, M^2, \dots, M^v]^T$ ； f 是所有几何状态中约束点的变形力测量值， $f = [F^1, F^2, \dots, F^v]^T$ 。在体积系数矩阵 M 中， m_{ij}^v 指残余应力 σ_i 对于几何状态 v 中变形力 f_i^v 的影响，其大小由几何和约束条件决定，不随 σ_i 的值而改变，可通过考虑边界条件的有限元方法计算得到。

公式(4)建立了残余应力场与整个材料去除过程中变形力之间的力学关系。残余应力场分布对复杂几何形状中变形力的影响来自不同区域中残余应力影响的积分效果。因此，为获取零件的整体残余应力场，可按照加工工艺去除零件的部分材料，获取足够的变形力，以推断零件的残余应力场，并且其测量过程对大型构件无额外损伤。

基于变形力的残余应力场推断问题是一个反问题。体积系数矩阵 M 呈现病态性，受零件几何形状和变形力测量位置影响。当变形力测量过程引入测量误差时，将影响残余应力场的推断精度，如公式(5)所示。针对残余应力场推断问题，本文基于Tikhonov正则化方法，引入了包含几何权重的正则化矩阵，通过限制解的大小和稳定性求解方程。正则化参数由广义交叉验证(GCV)方法选择，如公式(6)和公式(7)所示。

$$\hat{f} = f + e \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_0 = (M^T M + \lambda^* K)^{-1} M^T \hat{f} \quad (6)$$

$$\lambda^* = \min V(\lambda) = \frac{\|\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{M}\hat{\boldsymbol{\sigma}}_0\|^2}{\text{Tr}[\mathbf{I} - \mathbf{M}(\mathbf{M}^T \mathbf{M} + \lambda \mathbf{K})^{-1} \mathbf{M}^T]}, \lambda \in (0, 1) \quad (7)$$

式中, $\hat{\mathbf{f}}$ 是实际测量的变形力; \mathbf{e} 是变形力的测量误差; λ^* 是优化的正则化参数; \mathbf{I} 是单位矩阵; $\hat{\boldsymbol{\sigma}}_0$ 是残余应力场推断结果; \mathbf{K} 是根据残余应力场的先验分布设计的正则化矩阵, 其中 $k_{qq} = Z_{\sigma_q}$, Z_{σ_q} 是工件中第 q 个残余应力 σ_q 的深度, k_{qq} 是 \mathbf{K} 的元素。正则化矩阵通过调整推断结果的方差和偏差, 提高了推断结果的稳定性并减少了推断误差的下限。Tr 是矩阵的迹; $(\mathbf{M}^T \mathbf{M} + \lambda^* \mathbf{K})^{-1} \mathbf{M}^T$ 是 \mathbf{M}^{-1} 的替代项。

理论上, 如果有足够数量的变形力监测数据, 可以求解每个单元的残余应力, 从而获得较高的分辨率。然而, 受零件材料去除过程限制, 在实际加工过程中变形力的测量数量有限。因此, 根据实际加工环境对残余应力场的分布进行合理假设或引入先验知识, 是通过有限的变形力数据推断残余应力场的可行方法。

总而言之, 零件在约束系统 (即装夹装置) 的约束作用下, 其局部变形在材料去除过程中保持不变。随着零件材料的去除, 不平衡的残余应力场在约束点产生作用力, 获得不同几何状态下的变形力 $\hat{\mathbf{f}}$ 。同时根据材料的去除过程和边界条件, 得到体积系数矩阵 \mathbf{M} 。进而, 便可通过提出的正则化方法推断残余应力场 $\hat{\boldsymbol{\sigma}}_0$ 。

3. 验证与结果

分别在理论环境和实际实验环境中对本文方法的有效性进行了验证。以一种典型航空长梁类结构件为验证对象, 该零件尺寸为 $640 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 材料为

7075-T6 铝合金, 杨氏模量为 71.7 GPa , 泊松比为 0.3 。考虑该零件可测量的变形力数量和残余应力场的分布, 将其残余应力场分为 52 个区域, 并通过合并区域内单元的体积系数得到了零件体积系数矩阵。相比传统残余应力测量方法, 该方法提高了大型零件的残余应力测量分辨率。残余应力场分区结果如图 3 (a) 和 (b) 所示, xy 平面分为 4 个区域并沿 z 方向分为 13 层, 其中 1~12 层深度为 2 mm , 第 13 层深度为 1 mm 。每个区域都包含沿 x 方向的残余应力 (σ_x) 和沿 y 方向的残余应力 (σ_y)。该预拉伸铝合金材料沿 z 方向的残余应力 (σ_z) 和剪切应力可忽略。因此, 残余应力场由 104 个残余应力值组成并分布于 52 个区域中。在零件加工过程中, 零件由三个固定装夹装置和 4 个变形力监测装置约束, 考虑零件材料的主要变形力方向为 z 方向, 因此变形力监测装置布置了 z 向力传感器。根据零件加工工艺要求, 三个固定装置约束零件的 6 个自由度, 以保证加工定位基准, 如图 3 (a) 和 (b) 所示。

如图 3 (a) 所示, 零件共包括 7 个槽特征, 分别记为 A、B、C、D、E、F 和 G, 其加工深度均为 22 mm , 每次去除材料的深度 (切深) 为 2 mm , 因此, 共去除 11 层材料。7 个槽特征共进行 77 次材料去除操作。在该实验中, 材料去除方式为铣削, 并按照“层优先”策略去除材料, 即按相同切深和顺序依次加工各槽腔, 材料去除顺序如图 3 (a) 中的 A~G 所示。每去除一个槽腔的一层材料, 通过变形力监测装置内的 4 个传感器监测得到 4 个变形力数据。因此, 该零件加工共获得了 308 个变形力数据。该实验中通过有限元方法获得的全体积系数矩阵 \mathbf{M}_{11} 的规模为 308×104 。在验证要求下, 选择一部分变形力数据用于推断整体残余应力场。如使用前十层加工操作中获得的变形力数据推断整体残余应力场, 其中 \mathbf{M}_{10} 的规模为 $280 \times$

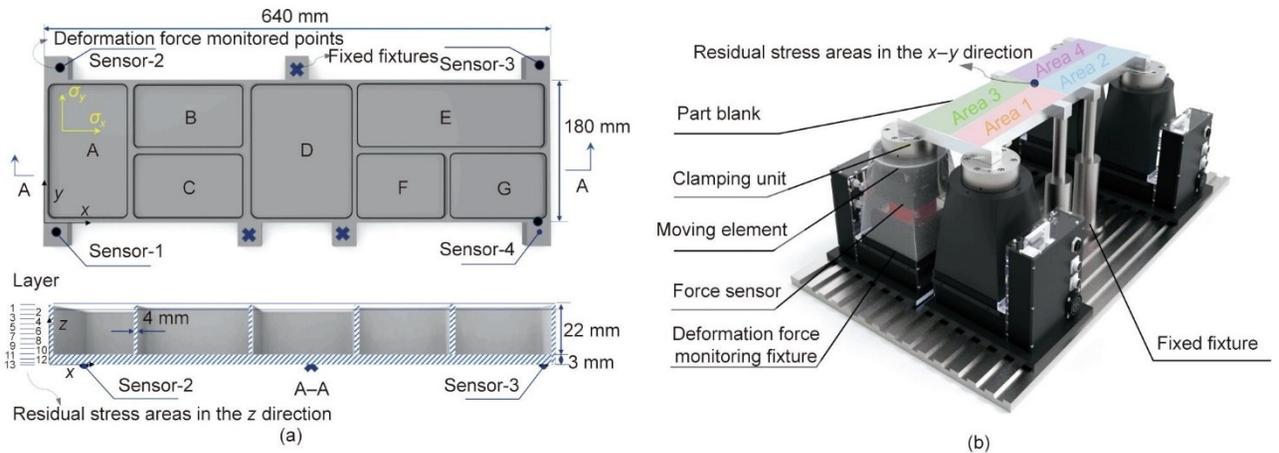


图 3. 实验加工环境。(a) 飞机零件示意图, 零件共有 7 个槽, 去除 11 层材料 (12 层和 13 层为保留的材料); (b) 实际加工实验, 零件 xy 平面分为 4 个区并在加工过程中被装备力传感器的夹具夹紧。

104, 即在前10层的70个材料去除操作中, 4个力传感器中共采集了208个变形力数据。

如之前章节所述, 体积系数矩阵 \mathbf{M} 通过有限元 (FEM) 获得, 边界条件与实际实验环境中装夹装置的约束相同。零件几何模型为零件的理论设计模型, 残余应力区域与预设区域相同。

3.1. 理论验证

理论验证的目的是验证反问题的属性和正则化方法的有效性, 零件的残余应力场数据来源于文献[23], 其残余应力场表达为与 z 方向深度相关的方程, 零件如图3所示。因此, 残余应力场中的 σ_x 和 σ_y 从残余应力场方程中采样获得, 其分布曲线呈“M”形 (图4), 为典型的预拉伸铝合金板残余应力分布。为验证本文方法对复杂残余应力场推断的有效性, 将残余应力分布分别乘以系数 0.8、1.0、1.2 和 1.5, 以在同一零件内构成4个不同的残余应力场分布区域。

$$\sigma = [\sigma_x^{0.8}, \sigma_x^{1.0}, \sigma_x^{1.2}, \sigma_x^{1.5}, \sigma_y^{0.8}, \sigma_y^{1.0}, \sigma_y^{1.2}, \sigma_y^{1.5}] \quad (8)$$

首先, 使用在有限元环境中基于理论残余应力场计算的变形力验证了所提出方法的正确性。该零件的残余应力场共有104个未知残余应力值, 因此根据上文描述, 仅需要104个变形力即可求解104个残余应力场中的未知量, 即当第4层中第6个槽加工结束后的变形力数据。利用以上104个变形力数据对应的体积系数矩阵推断理论残余应力场结果, 如图4所示。从结果可以得出, 根据当前残余

应力场假设, 当有与未知残余应力数量相等的变形力数据时, 可以求解残余应力场。这一结果证明了变形力是推断残余应力场的有效物理量。

为了验证正则化方法对残余应力场推断反问题的求解效果, 模拟真实环境, 对仿真环境中的理论变形力进行噪声测量。分别引入了2%和5%的测量变形力的外部噪声, 使仿真环境接近始终存在测量误差的真实环境。对于每种测量误差规模, 随机生成50组具有预设误差的测量数据, 并利用前10层材料去除过程中的变形力推断未知的残余应力场。图5为区域1内应力场的推断结果、均方根误差 (RMSE) 和推断结果的对数概率。

从推断结果可以看出, 对于2%测量误差组, 所有区域的推断误差约为2.0 MPa; 对于5%测量误差组, 推断误差为4.2 MPa。同时, 与 σ_y 相比, σ_x 更接近真实值且标准差更小。此外, 前10层去除材料区域的残余应力场推断结果更准确, 优于没有去除材料的区域推断结果, 如图5 (b) 和 (c) 所示。但从图5 (d) 可以看出, 所有区域推断结果的对数概率都较高, 表明推断结果可信度高。

为了证明上述结论, 首先分析了体积系数矩阵的特性。根据奇异值重构误差 (见附录A中的附注A), 测量误差主要影响 y 方向未去除材料的区域, 如图6 (a) 所示。进一步, 分析了所提出正则化方法的方差和偏差。从图6 (b) 和 (c) 可以得出结论, 去除材料区域的残余应

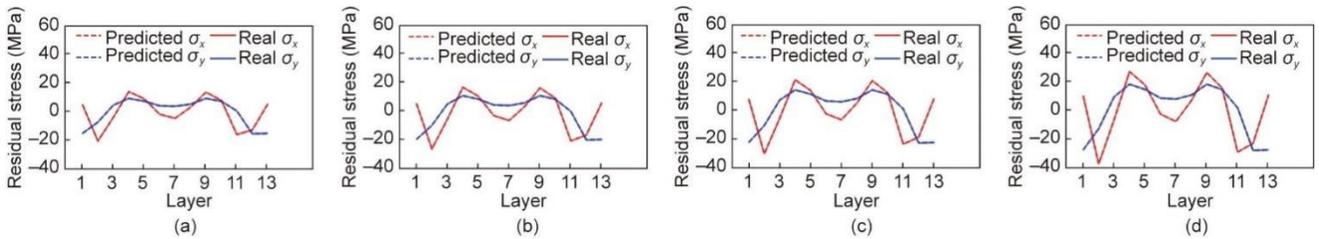


图4. xy 平面4个区域的残余应力场推断结果。不同区域结果: (a) 区域1; (b) 区域2; (c) 区域3; (d) 区域4。

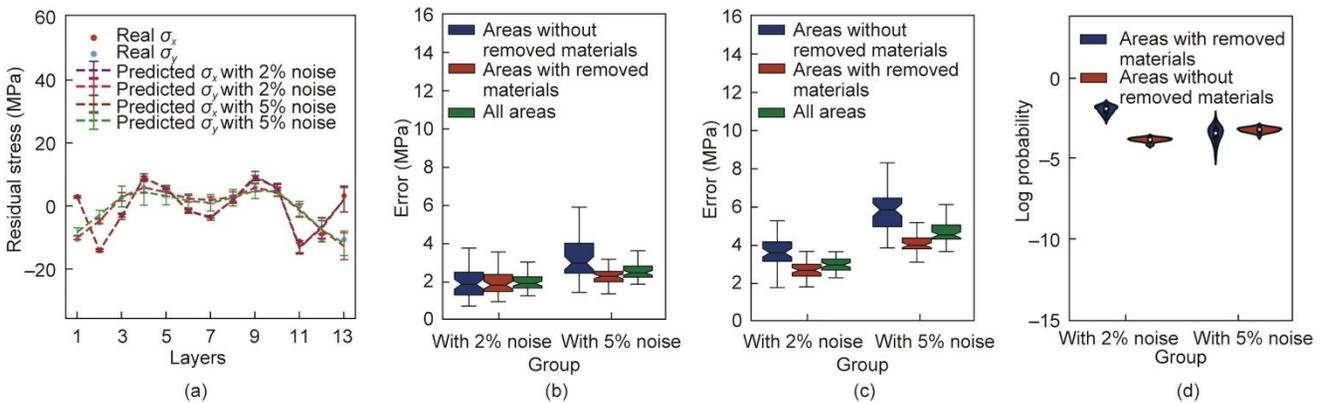


图5. 理论验证分析。(a) 在2%和5%的噪声影响下, 使用10层变形力数据推断的区域1的残余应力场结果; (b)、(c) 未去除材料区域、去除材料区域和所有区域的 σ_x (b) 和 σ_y (c) 推断结果的RMSE; (d) 推断结果的对数概率。

力场推断结果方差和偏差比未去除材料区域的更小，所提出的正则化方法通过调整方差和偏差的分布，提高了推断结果的准确度（见附录A中的附注B，包含分析和本文方法与TR方法的详细比较）。

理论验证和分析表明，本文方法在去除材料的区域具有准确的推断结果，在未去除材料的区域具有可靠的推断结果。

3.2. 实验验证

为了验证本文方法在实际环境中的有效性，在DMG 80P机床上以实际航空结构件为验证对象进行了加工实验，如图3所示。由于在实际实验中，难以获得真实的残余应力值，因此分别以变形力和变形量作为评价指标，即利用推断残余应力场后零件在后续加工操作中产生的变形力和所有加工操作后的变形量，与监测的变形力和变形量进行对比。例如，利用前10层加工过程中监测的变形力推断残余应力场，并用于预测第11层加工过程中的变形力，之后与第11层的实际加工操作中测量的变形力进行对比。

在实际加工过程中，采用基于先前研究[22,24–25]的方法测量零件的变形力，如图3(a)和(b)所示。零件由三个固定装夹装置夹紧，用于保证零件的6个自由度的定位基准，4个集聚力传感器的变形力监测装置安置在工件的转角处，形成简支约束，测量 z 方向的变形力。装夹装置的布局主要考虑零件加工工艺和变形力测量要求。变形力监测装置由力传感器、零位置夹紧装置、多自由度补偿装置和主动调整装置组成。为了确保力传感器的初始力为0，使用零点定位夹紧零件；然后通过主动调整装置驱动多自由度补偿装置来调整装夹位置，以使零件在自由状态下被固定，保持工件无应力装夹，确保无额

外的夹紧力引入工件。变形力监测装置如图3(b)所示，装置中的力传感器基于应变原理，其测量范围为2 kN，分辨率为1 N，具有较好的温度补偿能力，从而保证传感器可长时间稳定工作。在去除每个槽特征每层材料后，4个力传感器依据顺序记录变形力的变化，结果如图7(a)所示。

将本文提出的变形力方法与常用的残余应力测量方法进行比较，包括有损法[即图7(b)中的钻孔法]和无损法[即图7(c)中的X射线衍射法]。在钻孔法实验中，从同批材料中取尺寸为100 mm × 100 mm × 25 mm的试样，每次钻孔深度2 mm，测量钻孔层的残余应力。然后，通过化学铣削去除2 mm的材料，测量下一层的残余应力，以此重复直至测量所有层的残余应力。在X射线衍射法实验中，从同批材料中取尺寸为100 mm × 100 mm × 25 mm的试样，用于测量残余应力。每层残余应力表面测量结束后，用线切割去除深度为1.95 mm的材料，并用化学铣削去除剩余的50 μm材料，以尽量减少加工对后续残余应力测量的影响，以此重复直至测量所有层的残余应力。

图8为通过三种方法得到的残余应力场推断和测量结果。从图中可以看出，本文方法推断4个区域的 σ_x 分布接近“M”形曲线。区域3和区域4的分布也类似于“M”形曲线的形状。钻孔法测得的结果与变形力方法推断的结果具有相似的量级，而X射线衍射法测得的结果与变形力方法的差异较大，原因可能是受到材料织构组织的影响，或X射线衍射法测量过程中的零应力样品与实际测量材料的差异较大。此外，X射线衍射法侧重于使用晶面距离确定残余应力，适用于测量表面的单点应力，而大型构件的变形依赖于区域内的平均残余应力。

为验证本文方法残余应力场推断结果的可靠性，分别计算前8、9、10层记录的变形力数据推断的残余应力场

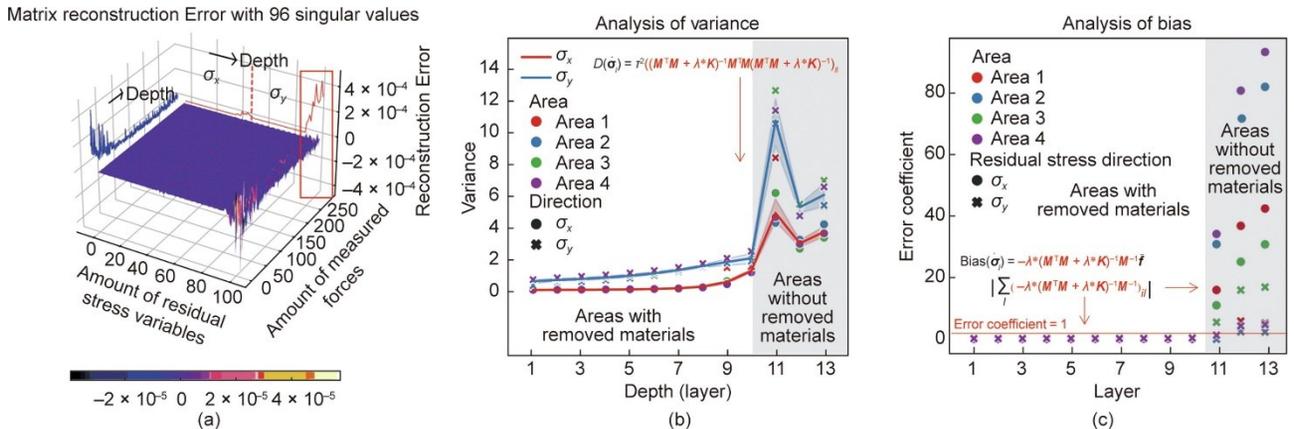


图6. 体积系数矩阵特性分析。(a) 使用奇异值重构的体积系数矩阵；(b) 方差性质分析；(c) 偏差性质分析。 $D(\hat{\sigma}_i)$: 推断残余应力 $\hat{\sigma}_i$ 的方差； $Bias(\hat{\sigma}_i)$: 推断残余应力 $\hat{\sigma}_i$ 的偏差； $\hat{\sigma}_i$: 单位权方差； \hat{f} : 真实无噪声的变形力。

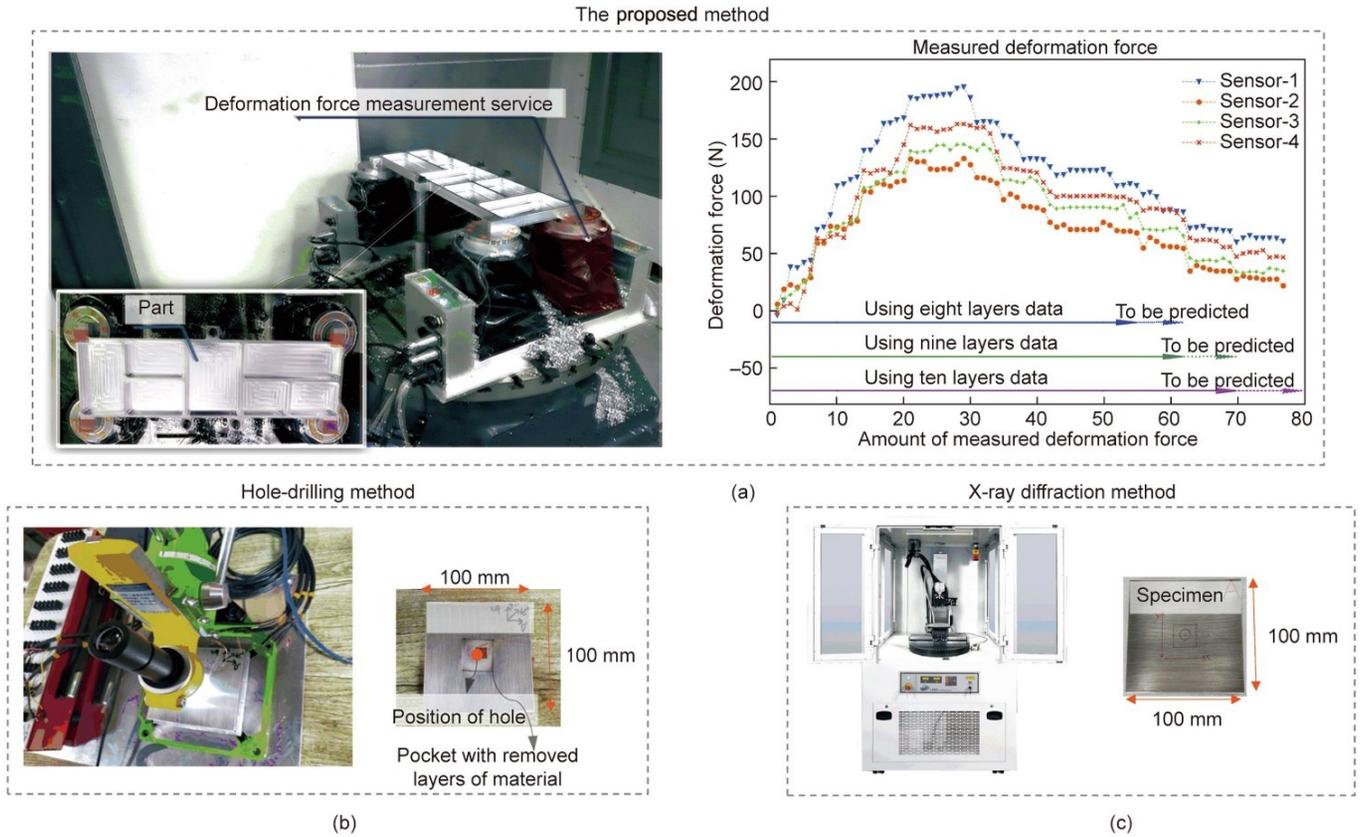


图7. 实际实验环境。(a) 加工结束后的零件；(b) 钻孔法（有损法）；(c) X射线衍射法（无损法）。

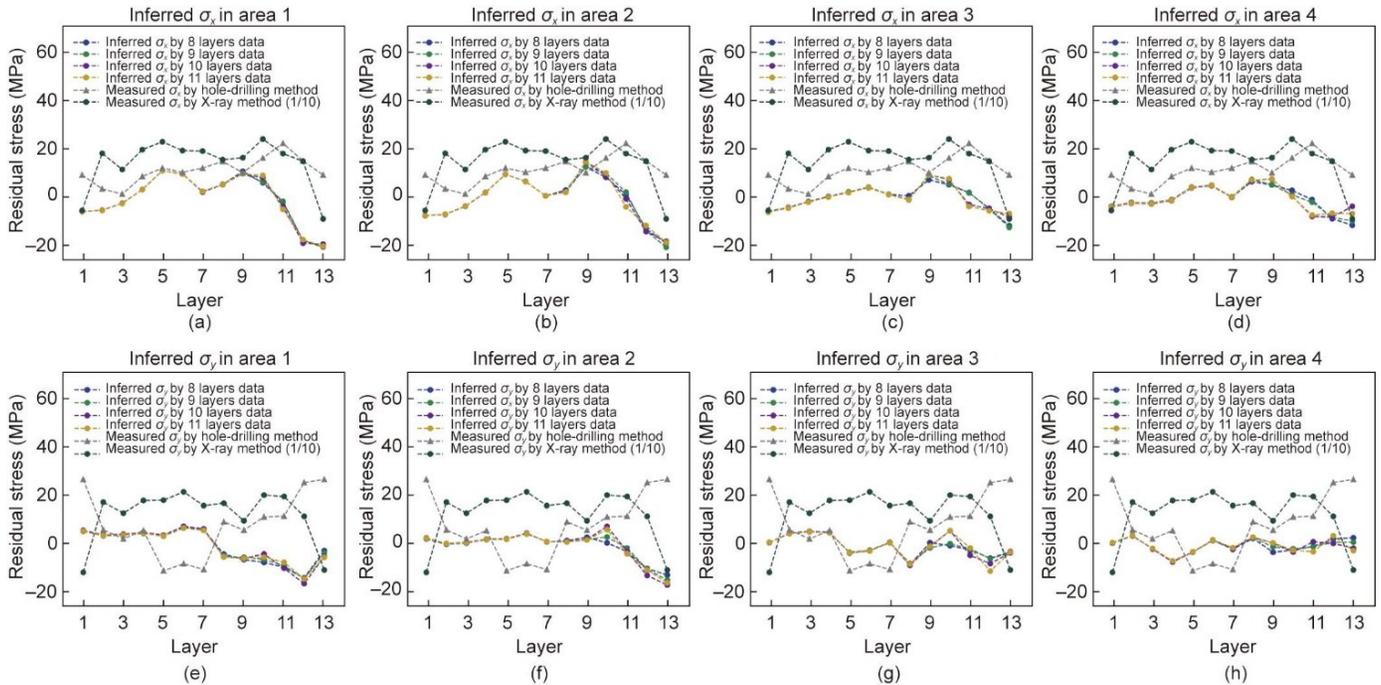


图8. 本文方法推断结果与已有方法测量结果的对比，包括 σ_x [(a) ~ (d)] 和 σ_y [(e) ~ (h)]。

结果与全部11层变形力数据推断残余应力场结果的差异，如图9 (a) 和 (b) 所示。可以看出，随着用于推断的变形力数据数量的增加，预测结果的差值逐渐收敛，并且去

除材料区域的推断结果差异较小，这与从图5 (b) 和 (c) 和图6 (a) 得出的结论相同。其次，图9 (c) ~ (j) 给出了使用前10层变形力数据推断残余应力场结果的置

信度估计。从图中可以看出，推断 σ_x 的置信度高于 σ_y ；同时去除材料的区域，即前10层的区域的残余应力场推断结果比未去除材料区域的更可靠，证实了图6(b)的结论，表明推断结果的可靠性。

为验证推断残余应力场结果的准确性，将由推断的残余应力场结果预测的后续变形力和最终的变形作为验证指标，预测的变形力和变形结果如图10和图11所示。从图中可以看出，其他两种方法预测的变形力和实际测量的变形力的趋势相似，但值相差较大。三种方法预测的变形力及统计结果，如图10(e)~(h)和图11(f)所示。X射线衍射法的RMSE最大。钻孔法的RMSE比本文方法大25倍，分别为53.05 N和2.31 N。此外，本文方法的最大预测误差为6.57 N，小于钻孔法的77.44 N。表明本文方法残余应力场推断结果的稳定性。附录A中附注C提供了

更多的实验结果。

进一步，本文以预测零件变形量作为三种残余应力场测量方法的对比指标。零件加工结束后，将探测的零件变形量与利用推断的残余应力场进行有限元计算得到的变形量进行比较，变形等值线如图11(a)~(d)所示，推断的残余应力场如图11(e)所示。从图中可以看出，由本文方法推断残余应力场计算的变形结果与实际检测的变形结果接近。三种方法的变形预测误差统计结果如图11(f)所示，本文方法的RMSE为0.0280 mm，最大误差为0.0574 mm，均小于其他两种方法。更多的飞机结构件实验结果详见附录A中附注D。实验结果表明，由基于本文方法推断的残余应力场得到的变形力和变形更接近实际情况。综上所述，本文所提出的残余应力推断方法比现有方法更准确、更稳定。

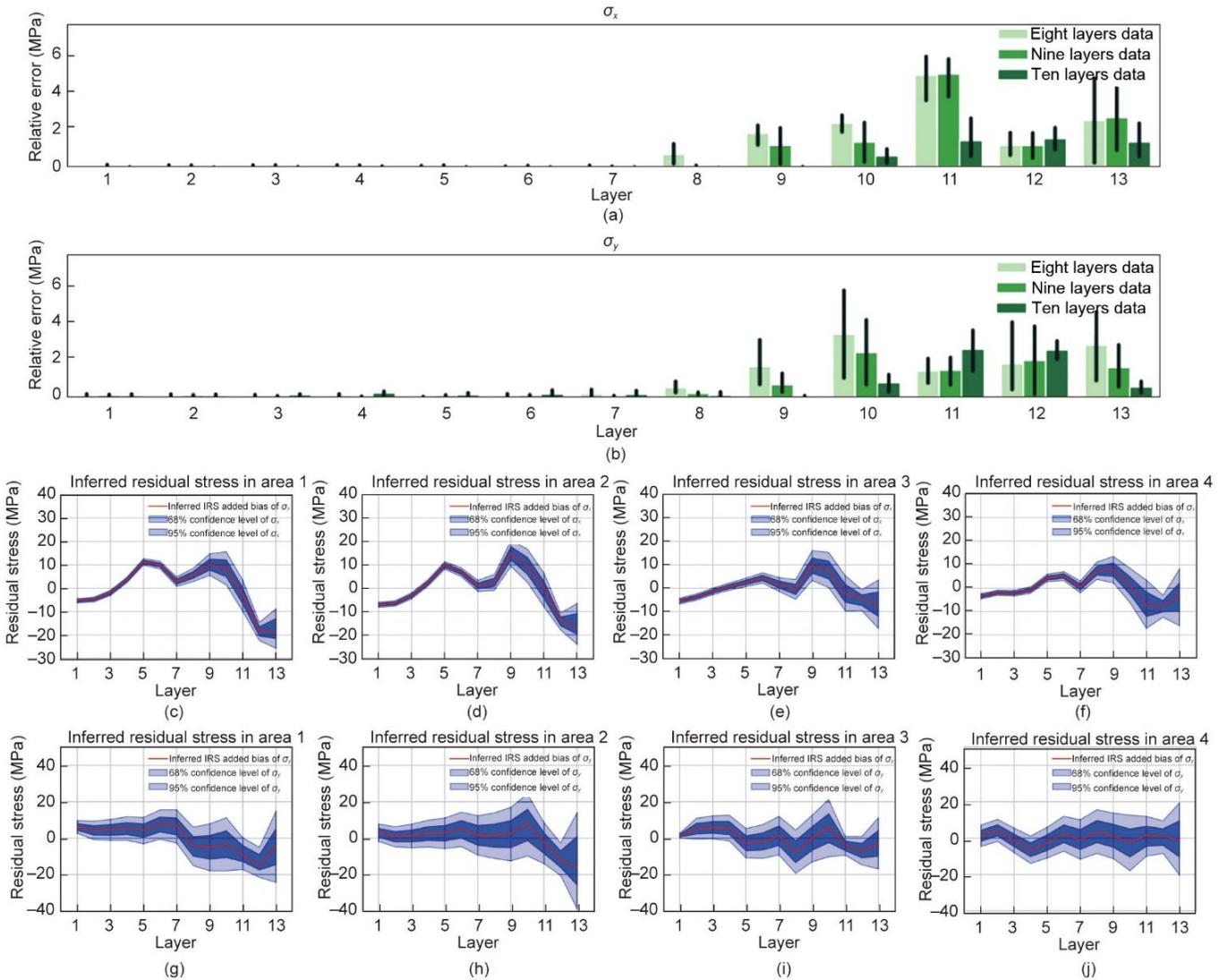


图9. 推断结果验证。(a)、(b)使用8层、9层和10层数据推断的残余应力场与使用11层数据推断残余应力场(基线)的比较；(c)~(j)推断的 σ_x 置信区间[(c)~(f)]和推断的 σ_y 置信区间[(g)~(j)]。RSF: 残余应力场。

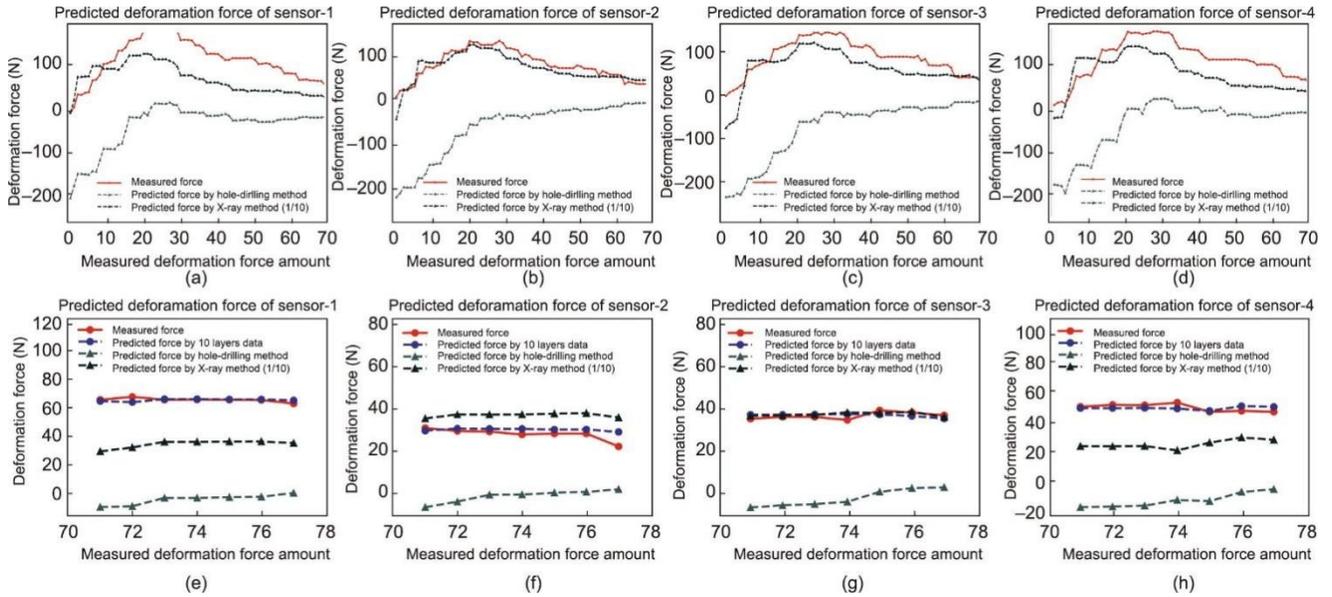


图10. 残余应力场引起的变形力验证。(a) ~ (d) 使用本文方法、钻孔法和X射线衍射法得到残余应力场拟合的变形力；(e) ~ (h) 三种方法得到残余应力场预测的变形力。

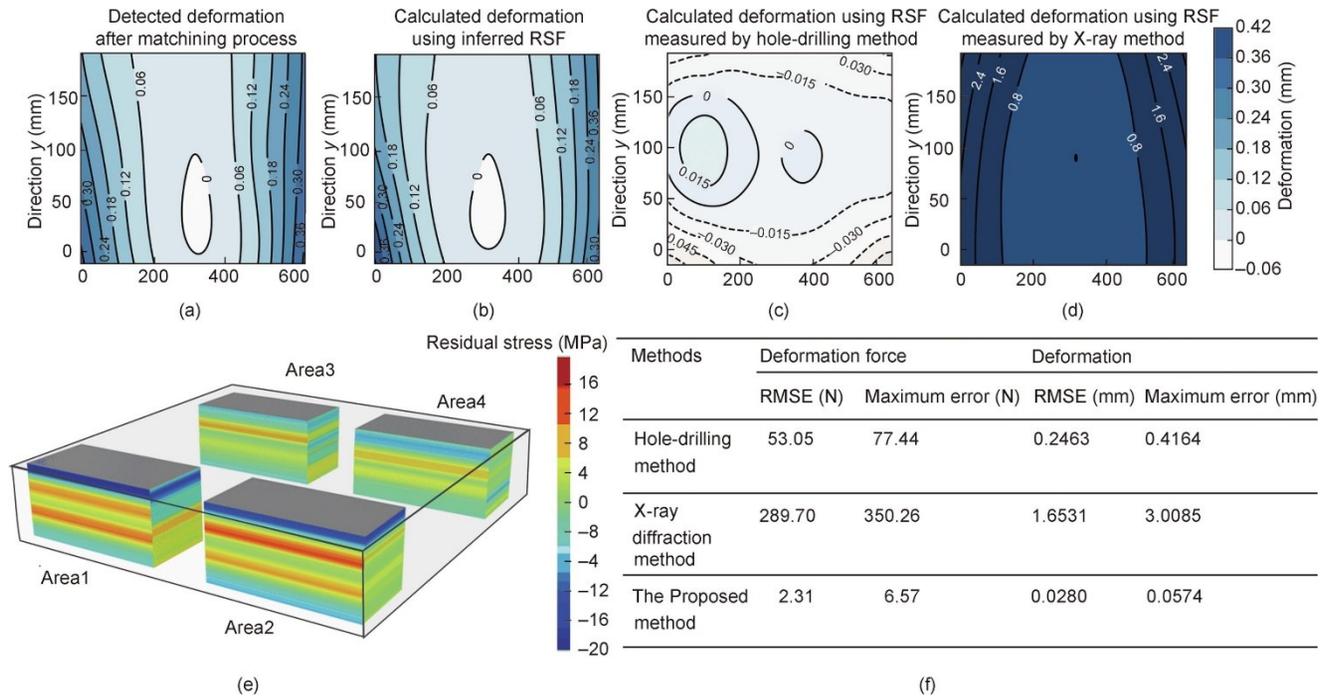


图11. 残余应力场引起的变形量验证。(a) ~ (d) 检测变形与三种方法得到残余应力场计算的变形量；(e) 推断的残余应力场；(f) 三种方法预测的变形力与变形结果比较。

4. 讨论、结论和未来工作

残余应力场推断精度的影响因素包括变形力测量准确性和根据残余应力场分布先验知识的分区策略。其中变形力的测量准确性受加工残余应力和重力（尤其是对于大型零件）的影响。实验中铝合金铣削引起的残余应力较小，可忽略不计；而对于难加工材料如钛合金，铣削引起的残

余应力可以在矩阵 M 中考虑。在实验中，切屑和切削液对变形力测量的影响通过在材料去除过程中的及时清洗降低。残余应力场推断分辨率的影响因素主要包括零件尺寸和不同加工过程所需的变形力测量数量，通过变形力测量数量的增加可以提高分辨率。此外，本文方法需要通过一定的加工方法改变零件的几何形状，以产生不平衡的残余应力场和变形力。因此，可结合工件制造规划的加工操

作，通过加工过程去除材料，从而获取变形力数据，该过程无额外的独立测量或实验，与现有的有损法和无损法不同。

本文介绍了一种残余应力场推断方法，基于装夹装置中传感器监测的变形力数据推断残余应力场。该方法通过残余应力场区域划分和在线变形力监测数据，提高了大尺寸、高价值零件的残余应力场推断的准确性、可靠性和分辨率。为验证本文所提方法的有效性，以实验室加工的实际零件为验证对象，验证了该方法在飞机结构件中的应用，获得了精确可靠的残余应力场推断结果。同时，本文方法还具有在增材制造中推断零件残余应力场的潜力。零件残余应力场的准确推断对零件生命周期管理至关重要，也将改进零件加工质量控制和大型构件的疲劳寿命分析方面的应用。本文方法的原理为数字化和智能制造系统中通过动态监测数据测量和分析残余应力场提供了重要的参考。

在正在进行和未来的工作中，本文研究团队将探索该方法在航空航天、核能和船舶等行业中不同类型零件和材料中的应用。此外，也将研究如何通过优化变形力监测系统的布局 and 材料去除顺序以减少体积系数矩阵的病态性，从而实现在材料去除过程中获得更少的变形力数据，精确地推断整体残余应力场。

致谢

本研究得到了李迎光教授主持的国家自然科学基金杰出青年基金(51925505)和刘长青教授主持的国家自然科学基金面上项目(52175467和51775278)的资助。

Compliance with ethics guidelines

Zhiwei Zhao, Changqing Liu, Yingguang Li, and James Gao declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.07.018>.

References

- [1] Geenenough GB. Internal stresses in metals. *Nature* 1948;161(4096):683.
- [2] Wang YM, Voisin T, McKeown JT, Ye J, Calta NP, Li Z, et al. Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility. *Nat Mater* 2018;17:63–71.
- [3] Xu Y, Joseph S, Karamched P, Fox K, Rugg D, Dunne FPE, et al. Predicting dwell fatigue life in titanium alloys using modelling and experiment. *Nat Commun* 2020;11:5868.
- [4] Li Y, Shi Z, Lin J, Yang YL, Saillard P, Said R. Effect of machining-induced residual stress on springback of creep age formed AA2050 plates with asymmetric creep-ageing behaviour. *Int J Mach Tools Manuf* 2018;132:113–22.
- [5] Yuan S. Fundamentals and processes of fluid pressure forming technology for complex thin-walled components. *Engineering* 2021;7(3):358–66.
- [6] Lu Y, Sun G, Xiao X, Mazumder J. Online stress measurement during laser-aided metallic additive manufacturing. *Sci Rep* 2019;9:7630.
- [7] Withers PJ, Bhadeshia HKDH. Residual stress. Part 1—measurement techniques. *Mater Sci Technol* 2001;17(4):355–65.
- [8] Prime MB, Hill MR. Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate. *Scr Mater* 2002;46(1):77–82.
- [9] Prime MB. Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut. *J Eng Mater Technol* 2001;123(2):162–8.
- [10] Treuting RG, Read WT. A mechanical determination of biaxial residual stress in sheet materials. *J Appl Phys* 1951;22(2):130–4.
- [11] Wong AK, Dunn SA, Sparrow JG. Residual stress measurement by means of the thermoelastic effect. *Nature* 1988;332(6165):613–5.
- [12] Lu L, Dao M, Kumar P, Ramamurthy U, Karniadakis GE, Suresh S. Extraction of mechanical properties of materials through deep learning from instrumented indentation. *Proc Natl Acad Sci USA* 2020;117(13):7052–62.
- [13] Kirchlechner C, Martinschitz KJ, Daniel R, Mitterer C, Donges J, Rothkirch A, et al. X-ray diffraction analysis of three-dimensional residual stress fields reveals origins of thermal fatigue in uncoated and coated steel. *Scr Mater* 2010;62(10):774–7.
- [14] Fratini L, Zuccarello B. An analysis of through-thickness residual stresses in aluminium FSW butt joints. *Int J Mach Tools Manuf* 2006;46(6):611–9.
- [15] Shen X, Zhang D, Yao C, Tan L, Yao H. Formation mechanism of surface metamorphic layer and influence rule on milling TC17 titanium alloy. *Int J Adv Manuf Technol* 2021;112(7–8):2259–76.
- [16] Zhang Y, Chen S, Cai Y, Lu L, Fan D, Shi J, et al. Novel X-ray and optical diagnostics for studying energetic materials: a review. *Engineering* 2020;6(9):992–1005.
- [17] Jiang W, Woo W, An GB, Park JU. Neutron diffraction and finite element modeling to study the weld residual stress relaxation induced by cutting. *Mater Des* 2013;51:415–20.
- [18] Singh DRP, Deng X, Chawla N, Bai J, Hubbard C, Tang G, et al. Residual stress characterization of Al/SiC nanoscale multilayers using X-ray synchrotron radiation. *Thin Solid Films* 2010;519(2):759–65.
- [19] Chen H, Wang XL. China's first pulsed neutron source. *Nat Mater* 2016;15(7):689–91.
- [20] Spradlin TJ, Olson MD. Comparison of residual stress measurements from multiple techniques in die-forged 7085-T7452. In: *Proceedings of the 2017 Residual Stress Summit; 2017 Oct 23–26; Dayton, OH, USA. 2017. p. 1–32.*
- [21] Schajer GS. *Practical residual stress measurement methods*. Wiley; 2013.
- [22] Zhao Z, Li Y, Liu C, Liu X. Predicting part deformation based on deformation force data using physics-informed latent variable model. *Robot Comput Integr Manuf* 2021;72:102204.
- [23] Cerutti X, Mocellin K. Influence of the machining sequence on the residual stress redistribution and machining quality: analysis and improvement using numerical simulations. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;83(1–4):489–503.
- [24] Hao X, Li Y, Chen G, Liu C. 6+X locating principle based on dynamic mass centers of structural parts machined by responsive fixtures. *Int J Mach Tools Manuf* 2018;125:112–22.
- [25] Li Y, Liu C, Hao X, Gao JX, Maropoulos PG. Responsive fixture design using dynamic product inspection and monitoring technologies for the precision machining of large-scale aerospace parts. *CIRP Ann Manuf Technol* 2015;64(1):173–6.