

引文格式: 王禹封, 赵正彩, 苏宏华, 等. 基于近似模型的装夹应力场虚拟映射方法研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(21): 67-73.

WANG Yufeng, ZHAO Zhengcai, SU Honghua, et al. Study of virtual mapping method for residual stress field in clamping process based on approximate models[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(21): 67-73.

基于近似模型的装夹应力场虚拟映射方法研究*

王禹封¹, 赵正彩¹, 苏宏华¹, 陈 燕¹, 徐宝德²

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100071)

[摘要] 切削加工过程中材料内部残余应力是影响加工质量的关键因素之一, 在虚拟环境实现应力场演化过程的可视化能有效监测其演化规律, 有助于提高零件加工质量。为实现应力场在虚拟环境的实时映射, 依据数字孪生技术开发了一种装夹应力场实时映射方法。首先, 阐明了切削加工系统数字孪生层级。然后, 提出了加工过程残余应力场在虚拟环境的映射方案, 具体为: 基于有限元仿真方法, 采用 RBF 神经网络建立了应力场仿真近似模型; 以孪生几何模型为载体, 采用数据驱动方法实现了近似模型仿真结果在虚拟环境的映射。最后, 以工件装夹残余应力场分布情况为例进行验证。结果表明, 近似模型实时仿真结果与有限元仿真结果的最大偏差为 7.7%, 验证了该应力场虚拟映射方法的可行性与有效性, 为切削加工过程数字孪生提供了技术支持。

关键词: 数字孪生; 切削加工; 装夹; 残余应力场; 近似模型; 数据驱动

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.21.067



王禹封

博士研究生, 研究方向为薄壁件铣削加工变形智能控制。

近年来, 航空航天产品在设计中大量使用轻量化薄壁零件。由于其应用场景恶劣, 这类薄壁零件不仅需要满足结构、材料、形状和几何精度的要求, 还需要满足强度等性能指标^[1-3]。因此, 高性能航空航天薄壁零件制造需要严格几何和性能的质量控制。薄壁件切削加工过程中, 由于材料内部残余应力大、结构尺寸大、材料去除率大和整体刚度小等原因, 使其加工完成后极易发生变形^[4-6]。薄壁件的加工变形主要是指工件在夹具释放后最终形状与最初设计形状之间的偏差, 夹具的夹紧与释放主要影响材料内部残余应力场的分布状态。因此, 研究不同装夹方案对应力场状态演化的影响是控制加工变形的重要方法。

目前残余应力的研究方法主要包括试验法^[7]、解析法^[8]和有限元仿

真法^[9]。虽然近年来提出的基于应力场的加工变形控制技术有显著的质量改进, 但是在整个切削加工周期的应用中还存在局限性: 首先, 现有控制方法主要在切削加工前对加工变形进行预测, 而很少考虑在切削加工过程中的应力状态演变情况; 其次, 切削加工生产中会产生大量的数据流, 目前还无法完全收集和分析。因此, 工艺设计、制造和服务阶段的精度、效率、智能性和可持续性还有待提高。

随着多传感器技术、大数据、物联网和云计算等新一代信息技术的发展, 数据驱动的制造业时代正在见证下一代信息技术的无限应用, 数字孪生作为一项突破性的技术发展, 势头非常显著^[10]。数字孪生的出现为融合物理世界和虚拟世界提供了一种有效的解决方案。虚拟世界中

* 基金项目: 国家自然科学基金(92160301)。

的虚拟模型可用于实时观察产品状态,分析产品变化,并通过双向交互实现决策控制。这一领域的许多相关研究都显示了数字孪生在切削加工的应用潜力^[11]。Zhu等^[12]提出了数字孪生驱动薄壁件制造的框架,提供了物理制造与数字、数据实时交互的平台,基于工件孪生模型,提出了一种刀具路径优化算法,在虚拟环境中实现虚拟仿真以帮助操作人员在现实环境做出更好的决策。Zhuang等^[13]提出了一种基于数字孪生的复杂产品装配车间智能生产管理和控制方法框架,为卫星装配车间提供了预测服务,并说明了所提出的框架的可行性,以促进在产品装配阶段实现预测制造。Liu等^[14]提出了一种数字孪生驱动的方法,用于自动化流水车间制造系统的快速个性化设计,提出的数字孪生原型可以为设计者提供智能模拟和优化引擎。Lai等^[15]提出了一种形状-性能集成数字孪生使能技术,包含了分析模型、数值模型和人工智能模型,以臂架起重机为孪生对象,在虚拟环境中实时显示和记录臂架起重机运行过程中的形状和性能信息。Ridwan等^[16]开发了一种智能机床状态监测系统,通过优化加工前、加工中和加工后的加工参数,最大限度地减少了加工时间,提高了产品质量。此外,Atluru^[17]还提出了智能机床监控系统的系统框架,该系统集成了各种过程监控模块,实现了全局最优加工计划。然而,目前制造业数字孪生研究集中于几何模型孪生,很少关注制造过程中涉及的物理量的孪生。

在薄壁件切削加工中会产生多种影响最终加工质量的物理量,如切削力、切削温度、夹紧力和残余应力等。目前,现实物理环境切削加工过程中的切削力、切削温度和夹紧力都可以用设备测量并反馈结果,而零件内部应力场在切削加工中的演化过程还很难实现检测及实时反馈。有

限元仿真是研究应力场演化的主要手段,但为了提高有限元仿真精度,不得不牺牲其仿真效率,极大限制了有限元仿真模型在数字孪生中的应用。

因此,本文将数字孪生平台作为现实世界与虚拟世界之间的桥梁,阐明了切削加工系统中几何和应力场在虚拟环境的映射模型;采用有限元仿真数据,基于径向基函数神经网络提出了一种应力场仿真的近似模型,可以替代有限元法实现应力场实时仿真,为实现应力场演化情况的数字孪生提供了技术支持。本文的组织结构阐明了应力场数字孪生框架;介绍了切削加工过程几何模型的映射流程,研究了采用近似模型替代有限元仿真模型的方法,并提出了以数据驱动的残余应力场映射方法;采用工件装夹残余应力场仿真进行了实例验证;最后得出了结论并对未来工作进行了展望。

1 切削加工系统数字孪生框架

1.1 切削加工系统数字孪生层级

根据制造系统的定义,正在进行

切削加工的机床、生产线、车间和整个工厂可以看作不同层次的制造系统。本文将切削加工系统的架构分为3类,分别是单元的单元级、单元级和系统级,如图1所示。其中,单元的单元级数字孪生是以映射工件切削加工过程的物理量为基础构建的模型;单元级数字孪生是以机床制造资源为基础构建的模型;系统级数字孪生是以多个单元级数字孪生模型为基础构建的产线或车间模型。

目前的数字孪生主要包含物理实体、虚拟模型和数据库的三维模型,以及在此基础上增加数据传输和交互的五维模型。本文以五维数字孪生模型^[18]为基础,根据单元的单元级模型建立用于残余应力场映射的数字孪生模型,其形式化建模语言可以表示为

$$C_{DT}=(W_{PE}, W_{VE}, C_{CN}, C_{DD}, C_{AM}) \quad (1)$$

式中, C_{DT} 表示用于切削加工系统的数字孪生模型; W_{PE} 表示工件物理实体; W_{VE} 表示工件几何模型; C_{CN} 表示物理实体和虚拟环境之间的连接; C_{DD} 表示现实环境检测得到的数据;

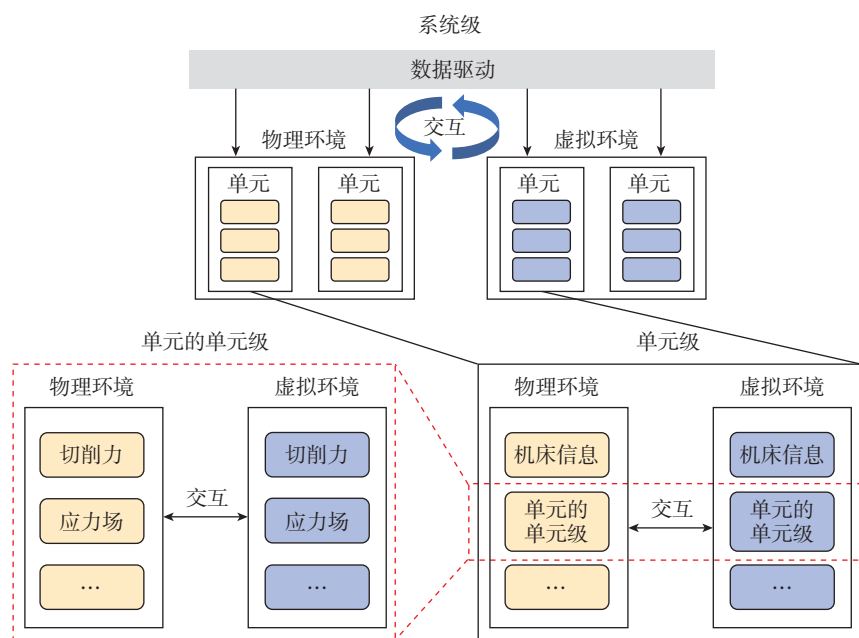


图1 切削加工系统的数字孪生分类

Fig.1 Digital twin classification of cutting systems

C_{AM} 表示通过近似模型得到的实时仿真数据。

1.2 工件几何及应力场映射模型

残余应力场的数字孪生系统以数据处理技术为驱动,通过建立有限元仿真结果与虚拟空间之间的数据传输实现数据融合。虚拟环境中工件的孪生数据能够对工件内部残余应力场的分布情况。随后,采用机器学习方法以有限元仿真结果训练近似模型,建立夹紧力和工件节点应力之间的函数关系。最后,将近似模型仿真数据输入到虚拟环境中的工件几何模型,实现夹紧力变化引起的残余应力场变化情况的实时映射。

该映射模型在切削加工过程及其相关 3D 模型的基础上,结合数据驱动技术和机器学习等新兴技术,利用代理模型构建残余应力场物理行为和规则的虚拟模型。现实环境的物理实体是整个模型的物理基础,主要涉及工件的加工工艺,包括切削参数、装夹方案和刀具轨迹等。虚拟环境模块是对物理环境的数字映射,包

括几何模型的映射和加工过程相关物理量的映射,主要实现设备、工件等物理实体的高保真在线和交互界面设计。首先,采用现实环境工件的几何信息和工艺信息建立切削加工有限元仿真模型,计算工件的初始残余应力场和装夹引入夹紧力后应力场的分布情况。随后,采用机器学习方法以有限元仿真结果训练近似模型,建立夹紧力和工件节点应力之间的函数关系。最后,将近似模型仿真数据输入到虚拟环境中的工件几何模型,实现夹紧力变化引起的残余应力场变化情况的实时映射。

数据驱动模块是整个模型中的桥梁,主要负责各个模块之间数据的传输、分析及存储,主要包括:(1)物理实体的相关信息输入至有限元仿真模型;(2)有限元仿真结果数据的提取、处理及存储;(3)近似模型输入数据和输出数据的分析及存储;(4)虚拟环境的数据输入等。整个数字孪生模型的数据流为残余应力场的实时映射提供了条件。

2 基于数据驱动的应力场虚拟映射

2.1 工件几何模型映射流程

数字孪生平台是实现应力场在虚拟环境映射的载体。Unity 3D 软件作为一个广泛使用的实时 3D 创作平台,拥有庞大的开发社区,广泛应用于数字孪生技术开发。本文拟采用 Unity 3D 软件开发数字孪生平台。

除了被加工零件外,虚拟环境的其他模型只需要实现几何模型的映射即可。因此,在虚拟环境中物理实体的映射分为实体模型的几何映射和实体模型的物理量映射两部分。图 3 为实体模型的映射流程。

为实现物理实体在虚拟环境的几何映射,首先使用 UG 软件建立机床的三维模型,将建立好的几何模型导入 3ds Max 软件中进行渲染,再把三维几何模型导出为 .fbx 格式文件并导入 Unity 3D 软件中。由于物理实体模型包含颜色球文件,先将材质球导入,再导入几何模型。

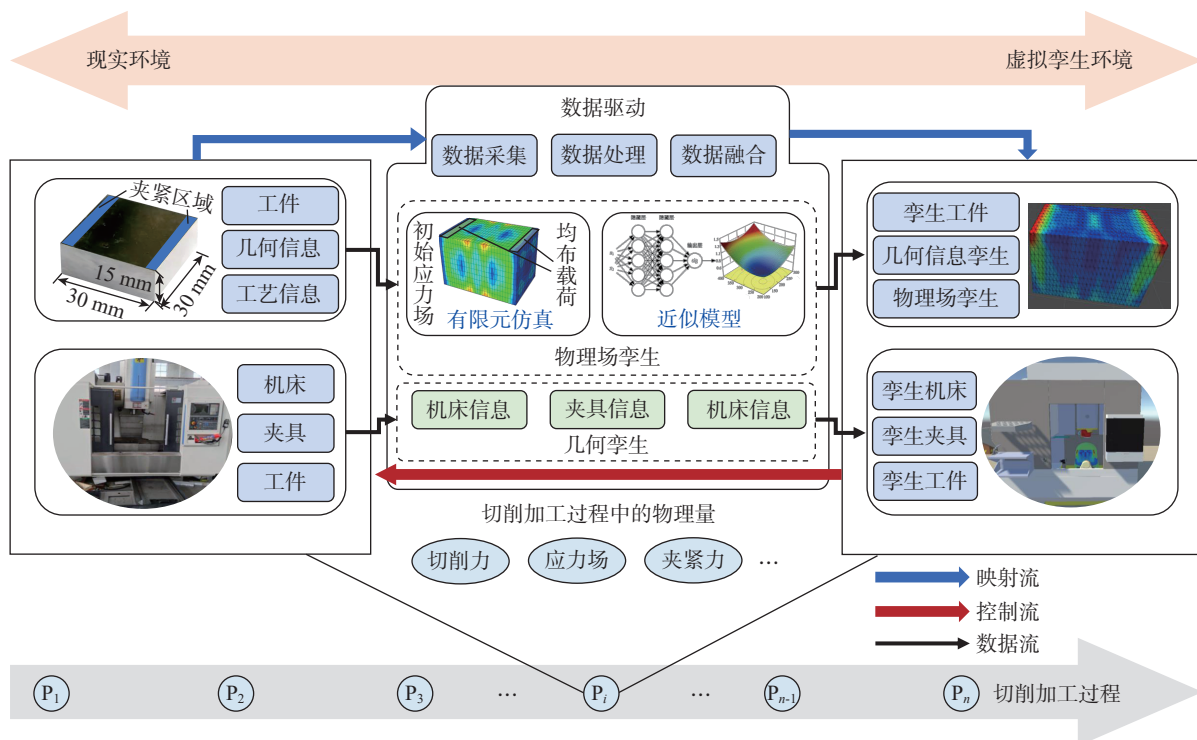


图 2 用于切削加工过程残余应力场映射的模型

Fig.2 Model for mapping residual stress field in cutting process

实现工件应力场在虚拟环境的映射需要 Unity 3D 中工件模型的网格划分与有限元仿真一致,获取工件在有限元仿真中几何模型的网格节点坐标和编号。先将 UG 建立的几何模型导入到 ABAQUS 软件中进行网格划分,再把带有网格信息的模型文件保存为.obj 格式并导入到 Unity 3D 软件中。这样 Unity 3D 环境中零件的网格节点坐标与 ABAQUS 仿真中网格节点坐标一致,便于后续进行物理场的映射。

2.2 应力场仿真近似模型

由于夹紧力发生变化时,采用有限元仿真法计算应力场难以满足数字孪生的实时性要求,因此提出了采用近似模型代替有限元仿真的方法。近似模型的实现包括 3 个步骤:(1)建立有限元仿真模型;(2)循环计算获得数据;(3)径向基函数(RBF)神经网络训练模型(图 4,其中, P 为夹紧力; n 为节点编号; C_n 为节点坐标(x_n, y_n, z_n); S 为节点 n 的应力值)。为获得工件装夹后内

部残余应力场演化数据,需要建立有限元仿真模型。在有限元模型中施加夹紧力的边界条件需要参数化,首先,通过有限元仿真获得工件内部应力场状态后,编写 Python 脚本提取仿真结果中的 P 、 n 、 C_n 和 S 数据,并保存在.txt 文件中。其次,采用 Isight 软件调用有限元模型,设定 P 的区间及采样方法,以通过设置不同的 P 获得多组应力场数据。在 Isight 中取 P 值范围为 $D_1 \sim D_t$, Isight 会多次调用 ABAQUS 进行计算以获得与

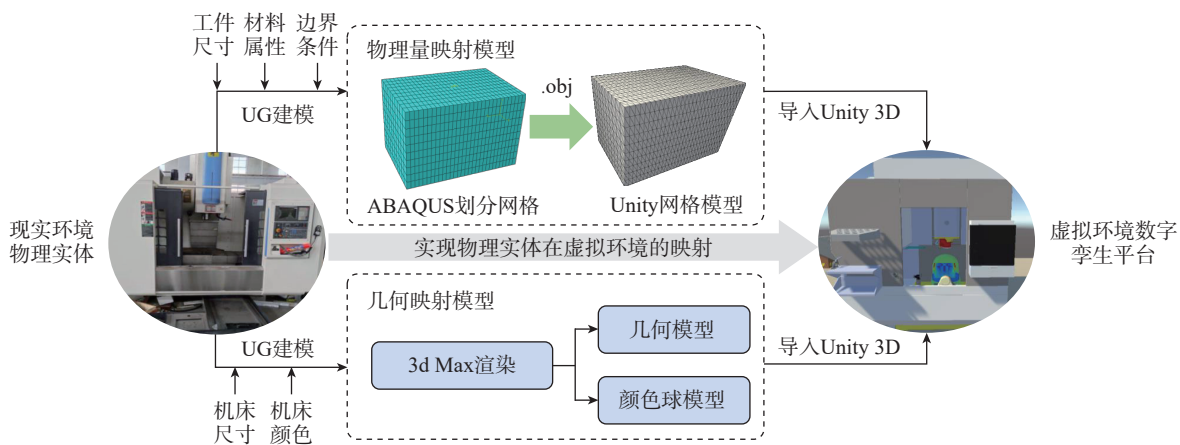


图3 几何模型在虚拟环境的映射流程

Fig.3 Mapping process of geometric modeling in virtual environment

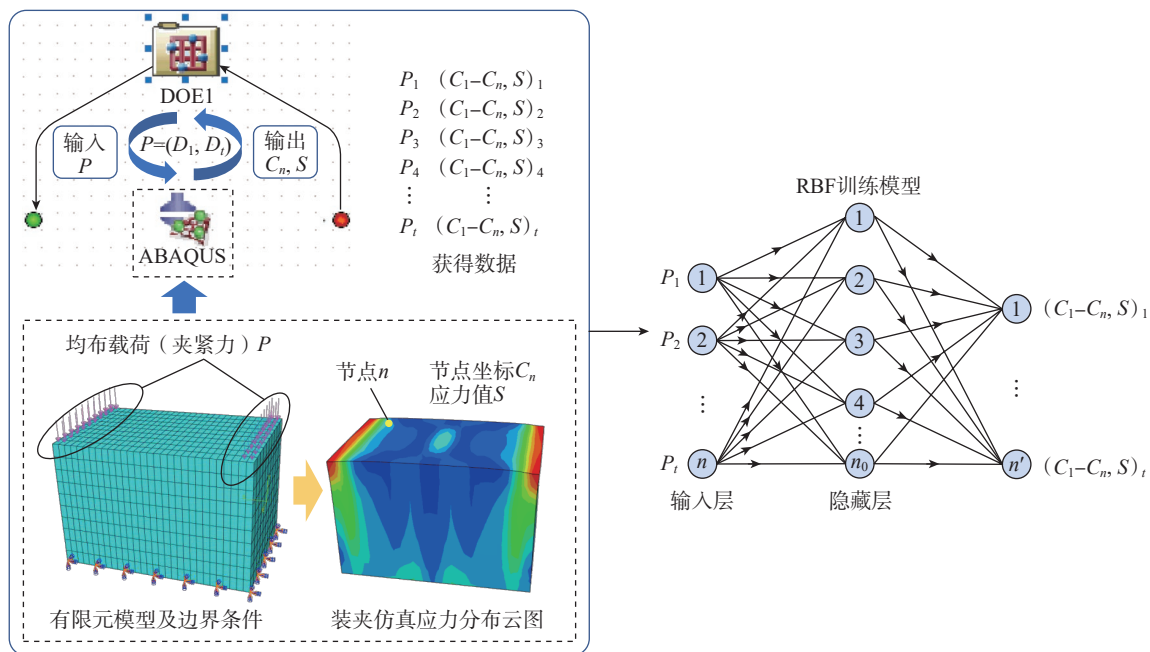


图4 应力场仿真近似模型的建立流程

Fig.4 Establishing process of approximate model for stress field simulation

P 相对应的 C_n 和 S 。其中,需编写 Python 脚本使 Isight 只读取有限元仿真结果中的每个节点 n 及其应力数据 S ,并将提取的数据存储在一个 n 行 1 列的矩阵中。利用 Isight 软件中 RBF 神经网络模块建立近似模型。RBF 模型具有良好的非线性逼近和泛化能力,被广泛应用于函数近似、分类和回归等领域。RBF 神经网络是一种使用径向基函数作为激活函数的人工神经网络,其输出是输入径向基函数和权重系数的线性组合,本文使用常用的高斯函数作为激活函数。

RBF 神经网络的原理如图 4 所示。其中输入层中, P_i ($i=1,2,\dots,n$) 是与夹紧力变化范围相对应的设计变量;隐藏层中, j ($j=1,2,\dots,n$) 是对应于第 i 个数据的径向基函数向量,隐藏层到输出层之间存在一个权重向量;输出层是通过将径向基函数与隐藏层中的权重相加而获得的目标函数向量。

RBF 神经网络的激活函数可以表示为

$$R(x_j - c_i) = e^{-\frac{\|x_j - c_i\|^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中, x_j 表示第 j 个输入样本; c_i 表示第 i 个中心点; σ 表示高斯核宽度。

根据 RBF 神经网络结构,可以

获得如下神经网络输出:

$$y_i = \sum_{j=1}^h w_{ij} e^{-\frac{\|x_j - c_i\|^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中, w_{ij} 表示基函数的权重; h 表示隐藏层节点数。

最后,采用 RBF 神经网络对现有的 $P-n-C_n-S$ 数据进行训练,选取高斯函数作为基函数,建立 P 与 $n-C_n-S$ 之间的函数关系,最终获得近似模型。近似模型的使用大大缩小了模拟分析中的计算成本,是实现数字孪生虚拟现实交互的重要保证。

2.3 工件应力场仿真映射流程

上述方法实现了在虚拟环境的实时仿真后,以虚拟环境孪生的几何模型为数据载体,在虚拟环境实现加工物理量的映射。在 Unity 3D 中编写脚本来处理近似模型的输出数据,编程流程如图 5 所示。首先,读取近似模型输出的节点坐标数据和应力数据并分类;随后,获取应力的最大和最小值;建立 HSV 颜色模型,将应力最大值与最小值与 HSV 颜色模型中的参数相对应,再按照 HSV 颜色模型的梯度划分对应的应力区间;最后结合节点坐标为几何模型渲染,实现应力场的可视化。

3 实例验证

为了验证应力场映射方法的有

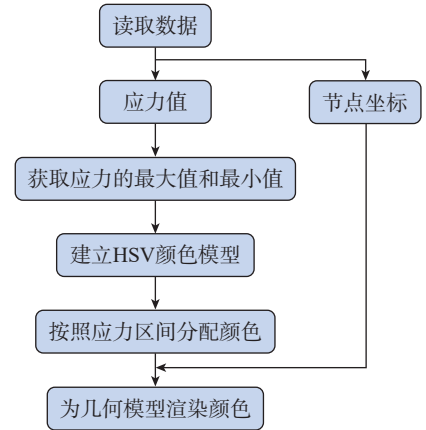
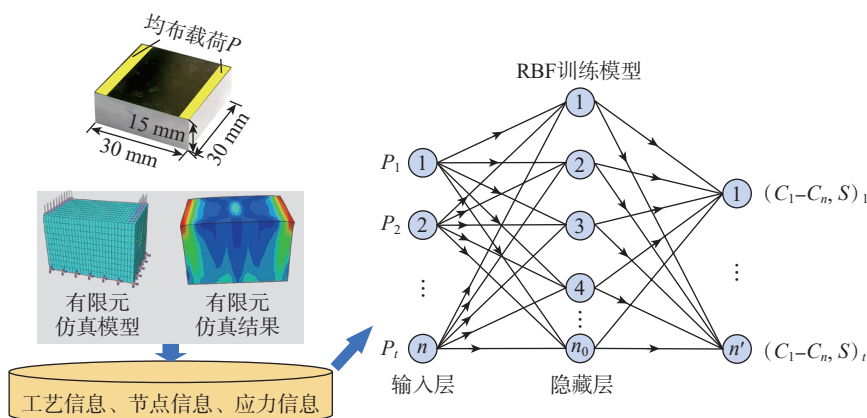


图 5 编程实现应力场的映射流程

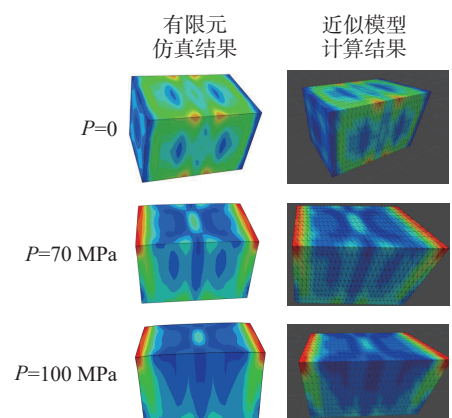
Fig.5 Programming process of stress field mapping

效性,采用钛合金 TC4 正方体试样作为实例对象来构建装夹残余应力场的数字孪生模型(图 6),具体实施方式如下。

首先创建有限元仿真模型,工件材料物理属性^[19]:密度 4420 kg/m³、泊松比 0.33、弹性模量 110 GPa。根据文献[20]中检测得到的零件残余应力数据,对有限元模型施加同等初始残余应力,验证过程如图 6(a)所示(其中黄色区域为夹具与工件接触区域,对其施加 $P=100$ MPa 的压力)。建立工件有限元仿真模型,边界条件与实际装夹一致。将有限元仿真模型提交至求解器计算得到仿真结果,通过 Python 脚本提取工艺信息、节



(a) 应力场近似模型验证流程



(b) 近似模型与有限元模型仿真结果

图 6 应力场数字孪生验证结果

Fig.6 Digital twin verification results of stress field

点信息和应力信息,并将数据进行存储。在 Isight 中采用 RBF 神经网络建立近似模型,以 P 为自变量且取值范围为 50~150 MPa。

本文中,近似模型的输入为固定数值的夹紧力,具体实施步骤:将含有 0、70 MPa 和 100 MPa 数据的文档依次输入到近似模型中,最终得到 3 个夹紧力下工件的残余应力场数据。采用 Unity 3D 软件实时读取数据结果如图 6 (b) 所示,包含 3 个夹紧力的有限元仿真结果。可以看出,近似模型计算结果映射到虚拟环境时,应力分布可视化结果与有限元仿真结果基本一致。

图 7 对比了有限元仿真结果与近似模型计算结果的最大值。可以看出,虚拟环境中近似模型的模拟结果与有限元仿真结果最大偏差为 7.7%。结合应力场分布可视化情况来看,近似模型代替有限元仿真模型在虚拟环境中能够进行实时仿真并映射应力场的分布状态,且实时仿真的结果与有限元仿真结果相差不大。

4 结论

为了实现切削加工过程中残余

应力场在虚拟环境的映射,本文针对装夹残余应力场的变化情况,分析了切削加工系统数字孪生的层级,阐明了切削加工过程数字孪生模型的概念,提出了虚拟环境工件及应力场实时映射模型。基于有限元仿真方法,采用 RBF 神经网络训练了应力场近似模型,实现了应力场的实时仿真。在数字孪生建模及数据驱动方法的支撑下,完成了应力场在虚拟环境的实时映射。经工件装夹仿真验证,得出工件最大残余应力近似模型实时仿真结果与有限元仿真结果的最大偏差为 7.7%,验证了该应力场实时映射方法的可行性与有效性,为数字孪生技术应用于切削加工系统中物理量可视化监测提供了技术支撑。

后续将对数字孪生技术包含的反馈及虚实交互技术进行研究,设计一个可在线调整和监测夹紧力的智能夹具,并在虚拟孪生环境中建立该夹具模型。在虚拟环境调整夹具的夹紧力后,将夹紧力的监测数据输入至本文提出的近似模型中,将内部应力场的变化情况映射至虚拟环境,以实现装夹应力场的虚实交互。

未来,为实现切削加工全过程残

余应力场在虚拟环境的映射,还需引入加工过程中切削力、切削温度等物理量来训练近似模型,构建更成熟的切削加工系统数字孪生模型。

参考文献

- [1] MANIKANDAN H, BERA T C. A turning simulation environment for geometric error estimation of thin-walled parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(1): 789-809.
- [2] WANG B, LIU Z Q, CAI Y K, et al. Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high speed metal cutting: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 166: 103744.
- [3] WANG X Z, LI Z L, BI Q Z, et al. An accelerated convergence approach for real-time deformation compensation in large thin-walled parts machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 142: 98-106.
- [4] ZHANG Z W, LUO M D, TANG K, et al. A new in-processes active control method for reducing the residual stresses induced deformation of thin-walled parts[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 316-325.
- [5] ZHAO Z W, LIU C Q, LI Y G, et al. A new method for inferencing and representing a workpiece residual stress field using monitored deformation force data[J]. Engineering, 2023, 22: 49-59.
- [6] LI W T, WANG L P, YU G. Force-induced deformation prediction and flexible error compensation strategy in flank milling of thin-walled parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117258.
- [7] LI X L, LI L T, YANG Y, et al. Variance-based sensitivity analysis for the influence of residual stress on machining deformation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 1072-1085.
- [8] HU D J, GRILLI N, WANG L, et al. Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel: Computational simulation[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2022, 161: 104822.
- [9] LIU Y, XU D D, AGMELL M, et al. Investigation on residual stress evolution in nickel-based alloy affected by multiple cutting operations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 818-833.

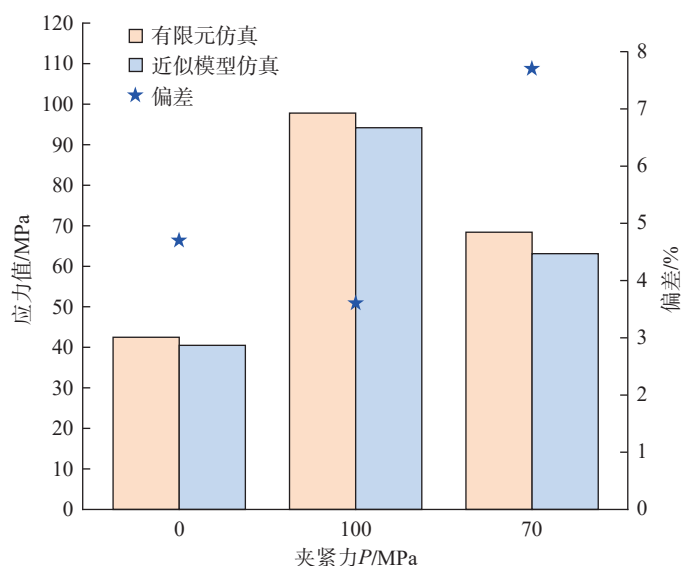


图 7 不同均布载荷下最大残余应力值与偏差的对比结果

Fig.7 Comparison of maximum residual stress values and deviations under different uniformly distributed loads

- [10] QI Q L, TAO F, HU T L, et al. Enabling technologies and tools for digital twin[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 3–21.
- [11] LIU S M, LU Y Q, LI J, et al. Multi-scale evolution mechanism and knowledge construction of a digital twin mimic model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 71: 102123.
- [12] ZHU Z X, XI X L, XU X, et al. Digital twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 59: 453–466.
- [13] ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1): 1149–1163.
- [14] LIU Q A, ZHANG H, LENG J W, et al. Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3903–3919.
- [15] LAI X N, WANG S, GUO Z G, et al. Designing a shape-performance integrated digital twin based on multiple models and dynamic data: A boom crane example[J]. Journal of Mechanical Design, 2021, 143(7): 071703.
- [16] RIDWAN F, XU X. Advanced CNC system with in-process feed-rate optimisation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(3): 12–20.
- [17] ATLURU S, HUANG S H, SNYDER J P. A smart machine supervisory system framework[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5): 563–572.
- [18] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1–18.
- TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1–18.
- [19] NI C B, ZHU L D. Investigation on machining characteristics of TC4 alloy by simultaneous application of ultrasonic vibration assisted milling (UVAM) and economical-environmental MQL technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116518.
- [20] GAO H J, ZHANG Y D, WU Q, et al. Investigation on influences of initial residual stress on thin-walled part machining deformation based on a semi-analytical model[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 437–448.

通讯作者: 赵正彩, 副教授, 博士, 研究方向为复杂结构自适应智能加工技术。

Study of Virtual Mapping Method for Residual Stress Field in Clamping Process Based on Approximate Models

WANG Yufeng¹, ZHAO Zhengcai¹, SU Honghua¹, CHEN Yan¹, XU Baode²

(1. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Beijing Xinghang Electro-Mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100071, China)

[ABSTRACT] The residual stress of parts is one of the critical factors affecting the machining quality during the cutting process. Visualizing the evolution process of residual stress field in virtual environment can effectively monitor its evolution law, which helps to improve the machining quality of parts. In order to achieve real-time mapping of stress field in virtual environment, a real-time mapping method for stress field in clamping was developed based on digital twin technology. Firstly, the overall architecture of the digital twin in the cutting process was elucidated. Secondly, a mapping scheme for the residual stress field during the machining process in a virtual environment was proposed. Specifically, based on the finite element simulation method, an approximate model for the simulation of residual stress during clamping was established using RBF neural networks; The data-driven method was used to achieve the mapping of approximate model simulation results in a virtual environment. Finally, taking the distribution of residual stress field during workpiece clamping as an example for verification, the maximum deviation between the real-time simulation results of the approximate model and the finite element simulation results is 7.7%, which verifies the feasibility and effectiveness of the real-time mapping method for stress field. In general, this method provided the technical support for digital twin in the cutting process.

Keywords: Digital twin; Cutting process; Clamping; Residual stress field; Approximate model; Data driven

(责编 七七)