引文格式：岳彩旭, 张志怡, 周天祥, 等. 航空薄壁曲面件加工变形预测及补偿研究进展[J]. 航空制造技术, 2026, 69(20): 26020186.
YUE Caixu, ZHANG Zhiyi, ZHOU Tianxiang, et al. Research progress on machining deformation prediction and compensation for aviation thin-walled curved parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(20): 26020186.

航空薄壁曲面件加工变形预测及补偿研究进展

岳彩旭[1]，张志怡[1]，周天祥[1]，顾志勇[2]，李春雨[2]，于加辉[2]
（1. 哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室，哈尔滨 150080；
2. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司，哈尔滨 150066）

[摘要] 航空薄壁曲面件具有刚度低、曲面复杂、材料难加工等特点，在铣削加工过程中极易受到弹性恢复、振动等因素影响，产生加工变形，导致薄壁曲面件表面质量差、精度不达标等问题，因此开展对薄壁曲面件加工变形的预测及补偿具有重要的现实意义。以航空薄壁曲面件多轴加工特点及结构难点为分析基础，阐述了薄壁曲面件加工变形产生的因素以及多轴加工铣削力建模的研究现状；总结了加工变形预测及补偿方法，并对数字孪生技术在薄壁件铣削加工变形预测与控制中的应用与发展趋势作出展望，为航空薄壁曲面件加工提供技术参考。通过对航空薄壁曲面件加工变形预测与补偿技术进行系统综述，梳理归纳现有研究成果，可为工程实际中复杂曲面零件加工提供新的参考与解决方案。

关键词：航空薄壁曲面件；变形预测；铣削力建模；变形补偿；数字孪生
中图分类号：V261.2+3　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.26020186



岳彩旭
教授，博士，研究方向为切削加工智能化技术、数字孪生、复杂刀具现代化设计技术。

航空薄壁曲面件作为飞行器核心承载与功能构件，凭借轻质、高强度比、空间结构紧凑等核心优势，广泛应用于机身、机翼、发动机叶片以及机匣等关键部位，其加工质量直接决定航空航天装备的安全运行与生命周期[1–2]。但航空薄壁曲面件普遍存在壁厚薄、刚性较弱、曲面曲率变化大、材料去除率高等问题，且在铣削加工过程中，受材料力学特性、切削力波动、刀具磨损、热变形等多重因素影响，极易产生加工变形，导致零件尺寸精度、形位公差无法满足设计要求[3–4]。因此，开展加工变形预测及补偿技术研究，不仅是解决航空航天制造领域问题的关键，更对行业发展和国家战略具有深远意义。

随着有限元仿真技术与智能算法的不断发展，目前已能够借助有限元软件以及智能算法对加工过程进行仿真模拟与预测，实现对薄壁曲面件加工误差的定量分析[5]。当前，国内外在薄壁曲面件加工误差影响因素分析、铣削力预测模型的建立、薄壁曲面件加工变形量的预测以及加工变形的控制方法等方面的研究取得了显著的进展，对薄壁曲面件的加工具有指导意义[6]。然而，复杂曲面类薄壁件非对称强、刚度分布不均匀且多用于特殊场合，导致其加工难度极大、加工精度要求更高，因此相关技术的集成与创新仍需深入探索[7]。

本文从薄壁曲面件结构特点以及加工难点入手，分析薄壁曲面件加

收稿日期：2026-05-20；**退修日期：**2026-05-29；**录用日期：**2026-06-16
基金项目：国家自然科学基金（U24B2060）；黑龙江省“春雁”团队支持计划（CYCX24001）

工过程中的变形影响因素；综述多轴加工铣削力建模研究现状，梳理加工变形预测方法；分别从变形控制与补偿两方面，总结了加工变形调控技术策略；以数据驱动为支撑，完成数字孪生体动态迭代，实现加工变形实时预测与工艺智能调控，建立了薄壁件铣削数字孪生优化框架；最后阐述了当前薄壁曲面件加工变形预测及控制方法面临的挑战以及未来发展的趋势。可为航空薄壁曲面件高精度、高效率、高表面质量铣削加工的工艺优化与工程应用提供重要理论依据和实践指导。

1 薄壁曲面件的分类及加工特点

航空航天领域对所用薄壁曲面零部件的加工质量有着十分严格的要求，为适应新一代航天任务需求[8]，相关专用薄壁曲面零部件的性能标准也在不断地提高，对其在更高精度、更优稳定性与更长的使用寿命等核心特性提出了更高的要求。

1.1 航空薄壁曲面件分类

航空薄壁曲面件根据几何结构特征可分为3类，分别为壁板曲面类零件、旋转曲面类零件以及复杂曲面类零件[9-10]。

（1）壁板曲面类零件。作为航空航天飞行器机体结构的典型零件，此类零件为机体横向结构的主要承力部件，也是形成并保障机身径向姿态的重要结构构件。其结构多由单曲率/小双曲率薄壁板壳、加强筋组成，外形贴合机身、机翼，厚度薄、平面展宽大[11]。

（2）旋转曲面类零件。旋转曲面类零件主要应用于飞行器发动机外壳和变速箱壳体等，其结构多为轴对称薄壁结构，回转轮廓光滑连续。可承受内压和轴向载荷等多种载荷，受力状况复杂[12]。

（3）复杂曲面类零件。复杂曲面构件常包含变曲率、自由曲面等多种复杂型面，不仅外形形态多变、内部结构繁杂，还存在尺寸跨度大、壁厚不均匀等问题，这对型面加工精度提出了极高要求[13]。最具有代表性的复杂曲面类零件如叶轮、叶盘、叶片，是航空发动机中重要零件，如图1所示。

1.2 薄壁曲面件的加工特点

（1）工件特点。航空薄壁曲面件壁厚与轴向或径向尺寸比一般大于1:20，壁厚较薄、刚性较弱，与一般薄壁件相比曲率变化剧烈，常选用钛合金、高温合金以及复合材料等难加工材料[14]。且加工过程中随着材料不断被去除，刚度逐渐降低，受载时易产生弹性变形，导致精度不足等问题。

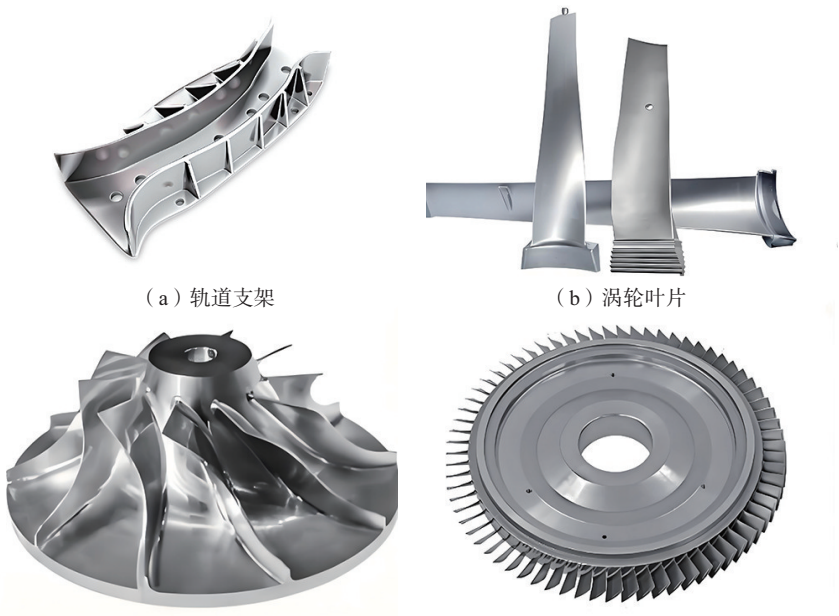
（2）加工方式。航空薄壁曲面件结构刚度弱、曲面构型复杂，且具备高精度、高表面质量的严苛加工要求，因此多采用高速铣削工艺。相较于常规切削，高速铣削可大幅降低铣削载荷、减少热变形与应力变形，可显著提升加工质量与加工效率。

（3）加工装备。五轴机床凭借结构优势，成为其精密加工的唯一可行装备。此类机床可实现刀轴随曲面法向实时摆动，一次装夹即可完成复杂空间曲面加工，减少装夹误差，但五轴机床虽具备较高刚度与精度，但加工航空薄壁曲面件时仍易受高次谐振影响，使工件按固有频率产生振动，影响薄壁曲面件的加工质量。

2 薄壁曲面件铣削加工误差主要来源

在数控铣削领域，加工误差由多种因素引起，制造系统中的误差源于机床运动精度的误差、刀具的尺寸误差以及机床、刀具和工件产生的热变形和弹性变形。此外，工件在加工完成后，内部残余应力的释放与重新分布也是影响加工精度的重要原因。基于上述影响因素，本文对铣削过程中遇到的误差进行分析和总结，并将误差分为加工前误差（机床固有误差）、加工中误差（刀具轨迹/插补误差）和加工后误差（残余应力释放误差）。

（1）机床误差。机床引起的误差主要有几何误差、跟踪误差、力误差



（a）轨道支架　（b）涡轮叶片　（c）叶轮　（d）叶盘

图1 典型复杂曲面类薄壁件

Fig.1 Typical thin-walled parts with complex curved surfaces

及热误差[15]。几何误差源于机床的机械部件不受负载的影响[16],是机床固有的静态误差;跟踪误差是指刀具的命令位置与实际位置之间的差异,导致加工表面上的轮廓不准确而产生的误差;热误差是机床零部件由于环境温度的变化而产生的热膨胀和变形;切削力载荷误差指的是在加工过程中由切削力载荷造成的工件结构变形或动态扰动而产生的加工误差;上述误差均会在加工中引发薄壁件变形。

(2)线性插补误差。工件表面加工过程中,刀具的理想刀触点轨迹本应为连续光滑曲线,由刀具与工件型面的啮合关系决定。然而,实际数控加工中通常采用线性插补方法,以离散直线段逼近理想轨迹,由此引入刀触点非线性误差。该误差表现为实际刀触点轨迹与理论轨迹的偏差,进而导致刀具扫掠形成的包络面偏离理论加工表面,产生欠切或过切的现象,是影响薄壁件铣削精度的关键因素之一。

(3)残余应力引起的误差。残余应力对薄壁件的变形起着至关重要的作用[17]。在整个加工过程中,随着材料的不断去除,由于薄壁叶片的刚度较低,这种现象在薄壁叶片中尤为明显,随着材料的大量去除会导致残余应力发生较大的变化,会导致这些力的释放和重新分布,薄壁叶片只能通过变形来达到新的应力平衡,因此对残余应力的研究是提升薄壁曲面件加工精度的关键。

薄壁曲面件的加工误差主要由残余应力释放误差、刀具轨迹/插补误差及机床几何与运动误差3类构成,3类误差在加工不同阶段的主导作用、占比及影响因素存在显著差异[18–20],机床几何与运动误差的影响贯穿加工全过程,在精加工阶段其影响权重会有所上升;刀具轨迹及插补误差主要在精加工阶段发挥作用,且易在工件弱刚性区域被放大;残余应力释放误差则是粗加工阶段的主要误差来源,也是大型薄壁构件加工变形的核心诱因。现有研究表明,铣削力导致的表面误差是薄壁曲面件在铣削加工中最主要的误差来源,因此第3章将对铣削力建模方法进行详细概述。此外,除上述误差来源外,其他常见的误差来源包括刀具磨损、夹具安装问题和热机械误差,现有文献已对其形成有了较为系统的研究成果,本文将不再进一步讨论。

3 铣削力建模研究进展

薄壁曲面件加工变形来源包括薄壁曲面上的铣削力引起的变形、加工产生的残余应力变形和夹具的夹紧载荷引起的变形。其中,铣削力是薄壁零件铣削加工中最具代表性的物理量,它不仅直接影响加工精度和加工效率,还是产生颤振的主要因素,而且不稳定或过大的切削力会加速刀具磨损,从而影响加工精度。因此,建立铣削力的精确数学模型对于推进加工变形预测、刀具磨损分析和工艺参数优化等领域的研究至关重要。

现有的铣削力预测模型可分为3类:经验模型、数值仿真模型和解析模型[21]。经验模型是基于大量试验数据集,采用最小二乘拟合、多元线性回归等统计技术拟合得到的铣削力与加工参数之间的数学关系,通过给定输入,毫秒内即可出结果。杨毅青等[22]指出经验模型精度分化明显,线性、指数瞬时类经验模型误差可控制在8%以内,但指数平均模型铣削力最大误差达16%。相比之下,数值仿真模型借助有限元分析来避开大量资源消耗型物理试验,其预测准确性依赖于材料本构模型和边界条件定义的精度。在钛合金Ti–6Al–4V薄壁件铣削中,Wu等[23]通过试验验证不同方向的铣削力的仿真偏差较为明显,其中径向力误差11.61%;进给力误差16.38%;轴向力误差高达26.1%。此外,若针对完整工件开展全加工路径铣削仿真,计算耗时会大幅增加,其运算成本更是经验模型的数百万倍。虽然目前有限元法在网格划分技术和计算能力方面取得了一定的进展,但在复现真实铣削动力学特性与提升计算效率方面仍存在固有局限,这主要是由于薄壁零件铣削过程中固有的时变因素。解析模型基于斜角切削变换和剪切区理论的经典模型,在五轴自由曲面铣削中,解析预测模型预测误差一般在12%以内[24]。与经验模型通过给定输入,即可得出结果所不同的是,解析模型需要计算剪切角、摩擦角等隐式方程,或进行少量常微分方程积分,耗时一般在几十毫秒级别。

综合考虑预测精度和计算效率,解析模型因具有高精度、高效率、理论清晰等优点,已被广泛应用于铣削力预测[25]。研究人员主要采用微分离散策略来建立动态铣削力模型。在该方法中,准确的铣削力预测取决于瞬时未变形切屑厚度(IUCT)和刀具–工件啮合(CWE)确定,在薄壁零件铣削过程中,由于铣削力的波动而产生变形,这种变形会导致刀具进给方向和跳动方向的不断变化,使CWE精确计算难度显著提升[26]。目前CWE区域的计算方法主要有实体模型法、离散表示法和解析法。实体建模法是通过布尔运算求解网格实体的交集,获取了CWE的离散边界点,进一步拟合得到接触区域形态[27–29]。离散表示法是通过将切削刃或接触区域按微小单元离散化(如z–map网格[30]、点云[31]、体素[32]等),分别计算每个微元的切削状态,再叠加合成整体CWE。解析法是将工件加工表面与刀具切削刃转化为规则几何模型,并用数学表达式对其进行表达,结合切削参数、工件几何形貌等建立几何约束条件,求解得到CWE[33–35]。

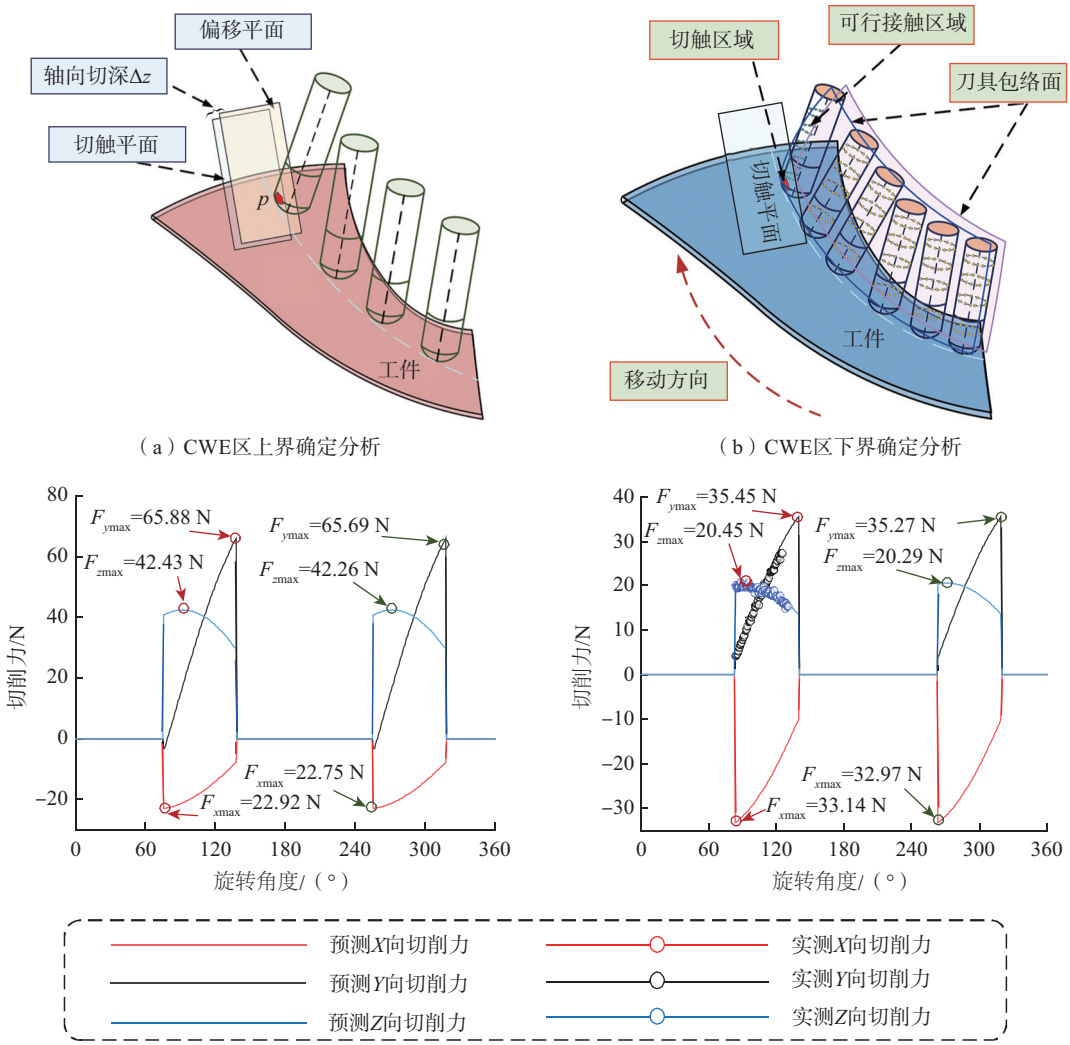
图2[36]展示了薄壁叶片在使用

球头铣刀铣削时采用上下边界概念的CWE确定原则，以及不同参数下的铣削力仿真结果。在五轴加工过程中，工件位置、刀具姿态不断变形[37]，为了提高铣削力模型的预测精度，须通过建立多坐标系与坐标转换才能准确地表征刀具姿态与工件位置。并基于此来研究刀具轨迹、刀具偏移、刀具跳动等对瞬时未变形切屑厚度的影响[38–40]。除了考虑上述问题外，最近的研究进一步将刀具磨损、刀具压痕、工件弹性变形纳入瞬时未变形切屑厚度建模中[41–42]，明确地解决了刀具–工件的动态相互作用。与此同时，人工智能驱动模型在铣削力预测方面显示出了优越的优势，为传统的分析方法提供了一种强有力的替代方法。改进的RBF神经网络在薄壁加强筋零件的半精加工过程中取得了较高的预测精度[43]。

综上所述，铣削力是薄壁零件铣削加工中最具代表性的物理量，其精准预测对加工质量至关重要。现有预测模型分为经验模型、数值仿真模型与解析模型3类，其中解析模型因精度高、流程明确成为主流，其预测关键在于确定刀具–工件啮合，进而计算瞬时未变形切屑厚度，而航空薄壁曲面件五轴铣削的动态特性及各类干扰因素增加了预测难度，目前通过整合动态因素及引入大模型算法已逐步了提升预测精度。

4 薄壁件加工变形预测

薄壁件具有壁薄、刚度低、结构复杂的特点，在铣削力的作用下，薄壁件极易产生加工变形，进而影响零件最终尺寸精度与表面质量，这已成为薄壁件多轴铣削加工中亟待解决的另一核心难题，因此，在实现铣削力预测的基础上，深入研究铣削力作用下薄壁曲面件的加工变形规律，建立可靠的加工变形预测模型，对实现对加工变形的精准预测



（a）CWE区上界确定分析　（b）CWE区下界确定分析

（c）不同参数下的铣削力仿真结果

图2　上下边界法及铣削力仿真结果图[36]

Fig.2　Upper and lower boundaries method and simulation results of milling force[36]

与有效控制具有重要意义。目前，加工变形预测方法主要分为基于物理模型的预测方法和基于数据驱动的预测方法。

4.1 基于物理模型的加工变形预测

基于物理的模型是在假设条件下开发的，物理模型包括切削力模型、残余应力模型和变形模型。这些模型可分为解析法和有限元方法。

4.1.1 基于解析模型预测加工变形

解析法变形预测是基于弹性力学、塑性力学以及材料力学等基础理论，通过将复杂模型进行合理简化，关注核心变形机理，并结合加工过程中的工件所受的载荷类型，建立变形控制方程并推导解析解，从而实现工件加工变形定量求解与预测。

Wu等[44]针对薄壁板的实际加工情况，提出一种基于有限差分法的薄壁板加工变形求解数学方法，通过使用程序代码编写的程序，可以估计固定边、自由边、简单支撑3种不同边界条件下的变形。王姝淇[45]基于板壳理论，综合考虑材料初始残余应力、加工残余应力及工件结构特征，构建了薄壁曲面件加工变形预测模型，有效提升了工件加工变形的预测精度。针对传统模型普遍存在的自由度多、计算效率低、仿真与试验差距大等痛点，Li等[46]通过耦合两个子结构的刚度方程，降低了整个薄壁零件变形模型的自由度，简化的自由度预测模型可以大大提高变形预测的效率，最高可达73.6%。

解析法具有计算效率高、理论体系清晰、模型通用性强等优势。但在实际加工中，解析法建模依赖较强简化假设，如小变形、各向同性等简化复杂因素，导致复杂工况下的预测精度有限。同时，解析法难以处理非线性行为，也无法精确描述动态边界条件，进一步影响预测精度，导致预测变形量与实际变形量之间出现偏差。

4.1.2 基于有限元法预测加工变形

有限元仿真法是通过有限元软件（如ABAQUS、ANSYS等），建立刀具–工件接触关系、切削力/热载荷、材料去除与边界约束的数值模型，模拟计算工件在加工过程中受力、热、应力耦合作用下的变形量。有限元仿真预测变形过程中，工件的网格划分数量和质量直接影响到仿真模拟的精度[47]，复杂零件的理论分析需要对特征进行简化和提取。将复杂薄壁曲面件的局部特征提取为简化后的特征，简化后特征的分析结果与原特征基本一致，如图3所示[44]。

Jia等[48]利用生死单元技术，根据仿真模型输出的铣削力预测值，建立了薄壁零件微细加工变形预测模型，提高了薄壁零件微细加工变形预测的效率和准确性。喻明让等[49]考虑整体叶轮叶片加工时受到的铣削力和自身刚度变化，基于ABAQUS软件二次开发的有限元仿真技术，构建了叶片五轴铣削变形预测模型。Li等[50]针对框梁类薄壁件铣削变形预测，使用改进剥层法测量了初始残余应力，并将其作为模型输入参数。在具体预测过程中，粗加工阶段用生死单元法、精加工阶段用刀具–工件接触法分别模拟材料去除与变形，该方法较传统方法的变形预测精度提升11.2%。Ge等[51]首次提出了一种有效的变形预测方法，该方法对工件刚度矩阵进行了简化和动态修改，避免了网格的重新划分，同时减小了求解过程的计算量。

相较于解析法，有限元法能处理非线性变形、复杂结构等解析法难以解决的问题，如钛合金薄壁腹板所受的力–热耦合下的变形、整体叶盘的叶片所受的铣削力以及温度等多因素导致的变形。但有限元法对残余应力难以准确表征，在多物理场耦合条件下存在计算量过大、求解时间长等问题，同时装夹力、刀具与工件的摩擦力等边界条件难以准确界定。

4.2 基于数据驱动的加工变形预测

在工业大数据背景下，AI的发展为薄壁件变形预测技术提供了一条新的路径。数据驱动的变形预测模型是从大量的加工过程中获取加工数据，并使用这些数据，构建信号与工件变形量之间的深层非线性映射关系。在数据充足的情况下，更容易拟合两者之间的复杂函数关系。与物理模型相比，数据驱动的变形预测模型结果一般更准确。数据驱动的变形预测技术的发展经历了从简单的信号分析到多变量数据融合的阶段。数据驱动的薄壁件加工变形预测模型构建可以大致分为3个部分：信号采集和预处理、特征提取以及算法模型的选择。

4.2.1 信号采集与预处理

数据质量是决定薄壁件加工变形预测精度的核心前提，采集到的数据完整性、信噪比与真实度越高，后

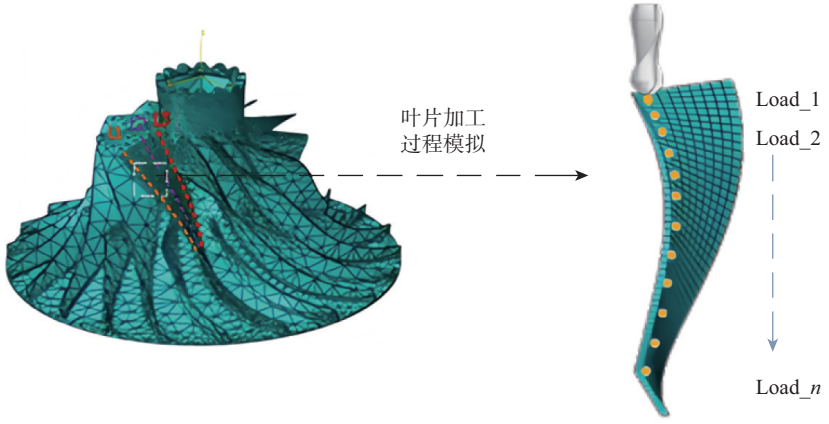


图3 复杂几何零件局部特征提取[44]

Fig.3 Local feature extraction of complex geometric parts[44]

续模型的变形预测结果就越精准可靠。在实际工程应用中，航空薄壁件铣削加工的变形原始数据，一般可通过直接测量法与间接推算法两类主流方式进行获取，不同采集方法在数据精度、适用工况与采集成本上各有差异。

（1）直接测量法。直接测量法是通过传感器或设备直接输出变形相关物理量，如位移、挠度、应变以及轮廓偏差等，无需额外模型换算，即可得到工件变形大小。采用直接法测量时，测量装置与切削面之间不存在机械接触及力学相互作用，不会影响系统的刚度，测量结果准确。最常用的直接测量变形法是采用激光位移传感器、三坐标测量仪对变形进行直接测量。

激光位移传感器的优点是具有更高的采样频率，能在铣削过程中连续采集数据，实时捕捉切削力以及温度等引起的瞬时变形，且无须与工件直接接触，不会因探头接触薄壁件而造成额外变形。如使用应变片对变形进行测量时，应变片贴片需要打磨、胶水固化，胶层会引入附加应力，且贴片本身重力会增加薄壁件局部受力，导致测量结果失真。三坐标测量仪的优点是不仅能测量单点挠度，还能测量变薄曲面的翘曲、扭曲变形，可实现三维全域变形测量。

直接法在获得变形数据后，需要对这些数据进行预处理，可以通过去除异常值、提高对比度和降低噪声等特定方法来提高其质量。直接法具有测量结果准确的优点，但是由于采样频率高会产生大量的数据，这就需要强大的算法和更多的计算资源对这些数据进行处理。此外，在实际加工条件下，不可避免地会出现冷却液飞溅、加工振动、电磁干扰等现象，导致测量数据出现噪声大、波动漂移、失真等问题。

（2）间接测量法。间接测量法是先测量应力、力、温度、振动等其他物理量，再通过力学或数学模型反算、推算出变形量，本身不直接测量变形。间接测量法常见的信号采集装置如图4所示[52-54]，主要有加速度传感器、旋转测力仪和声发射传感器等。

旋转测力仪常布置在刀具下端位置，可精准感知切削力动态变化。这类传感器灵敏度与可靠性高，可同步采集多维度切削力数据，在切削力间接检测方式中应用最为广泛[55]。振动信号能够真实体现切削力波动特性，是薄壁曲面件加工变形预测的重要数据依据。工程中多采用加速度传感器采集振动信号[56]，布设时尽量贴近刀具，规避机床惯性带来的信号衰减问题。声发射传感器用于拾取加工瞬时应力波，信号频率远高于切削主频，可有效表征工件表面加工状态。其安装方式与加速度传感器相近，易受现场噪声干扰[57]。与直接监测方法类似，间接监测方法也需依赖预处理以保证获取高质量数据。Zhang等[58]提出融合残差结构与双向LSTM网络的混合模型，结合刀具磨损特征与传感器信号，为序列学习提取更具抽象性的特征。Wei等[59]构建了无迹卡尔曼滤波–循环生成对抗网络模型以消除信号噪声。

间接测量法虽能采集到大量信号，但同时也给后续数据处理工作带来了难题。且传感器采集到的数据，只能间接体现工件在加工过程中的形变特征。想要实现更高精度的变形在线监测，还需要后续进一步深入研究。

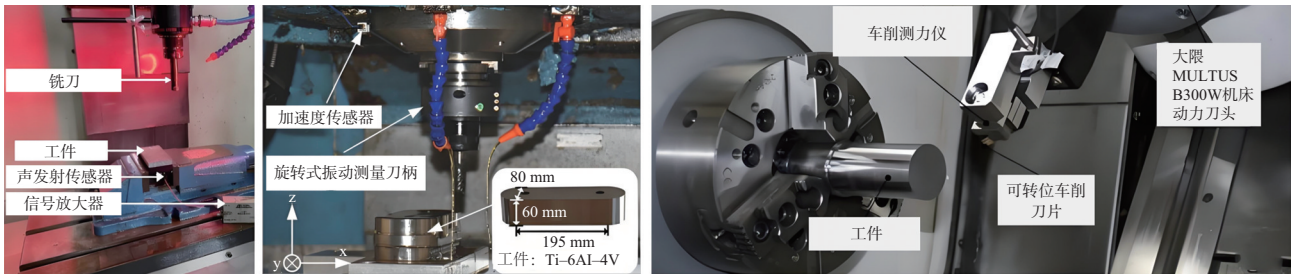
4.2.2 特征提取和选择

薄壁件的加工变形预测在实际加工过程中容易受到加工条件、机械振动等因素的干扰，导致采集到的信号中存在大量的冗余信息。采集数据需经预处理与特征提取，以提取和选择与薄壁件加工变形密切相关的特征参数[60]。时域、频域和时频域分析可以显著降低数据的维度，并为后续决策系统提供更准确的输入[61]。图5[62]说明了薄壁件加工变形预测框架中特征提取和选择的典型应用。

时间域分析主要包括自回归模型、自回归滑动平均过程、相空间重构和自回归滑动平均模型[63]。通过时域分析直接从时间维度挖掘信号特征，采用时域统计分析法，提取均值、方差等时域统计参数，以此表征并判别薄壁件的变形状态，是最常用的方法。此外，奇异谱分析无需要假定模型结构，适用于分析非线性和非平稳信号，在薄壁件加工变形检测领域应用十分广泛。随着频谱分析技术的发展，频域特征的提取开始受到研究人员的重视。频域分析依据信号的频率结构与谐波分量，从信号频率维度提取与薄壁件表面变形相关的频域特征[64]，通常采用快速傅里叶变换将采集到的信号从时域转换至频域[65]，再对变换后的频域信号开展进一步分析。与时域分析相比，频域分析可通过滤波手段选择性增强或衰减特定频率分量，从而凸显工件变形的特征。

时域、频域分析仅能提供单一维度特征，难以完整表征工件表面变形状态。时频域分析则可同时获取信号的时频分布，清晰揭示其频率成分随时间的演化规律，时频域特征的分析和提取方法主要包括经验模态分解与小波变换。

经验模态分解最早是由Huang等[66]提出，是一种面向非线性、非平稳信号的自适应信号处理方法。该方法无需依赖预定义基函数，可直接根据信号自身特征完成分解。然而，传统经典的经验模态分解有一些局限性，如模态混叠、噪声敏感性和计算复杂度高等问题。为了克服这些限制，Wu等[67]提出了一种新的集成经验模态分解方法。该方法通过向信号中添加白噪声，并取多次分解结果的均值作为最终有效结果，显著提升了分解过程的稳定性。Barbosh



（a）声发射传感器[52]　（b）加速度传感器[53]　（c）测力仪[54]

图4　间接方法中声发射传感器、加速度传感器以及测力仪的放置和定位

Fig.4　Placement and positioning of acoustic emission sensors, acceleration sensors and dynamometers in indirect methods

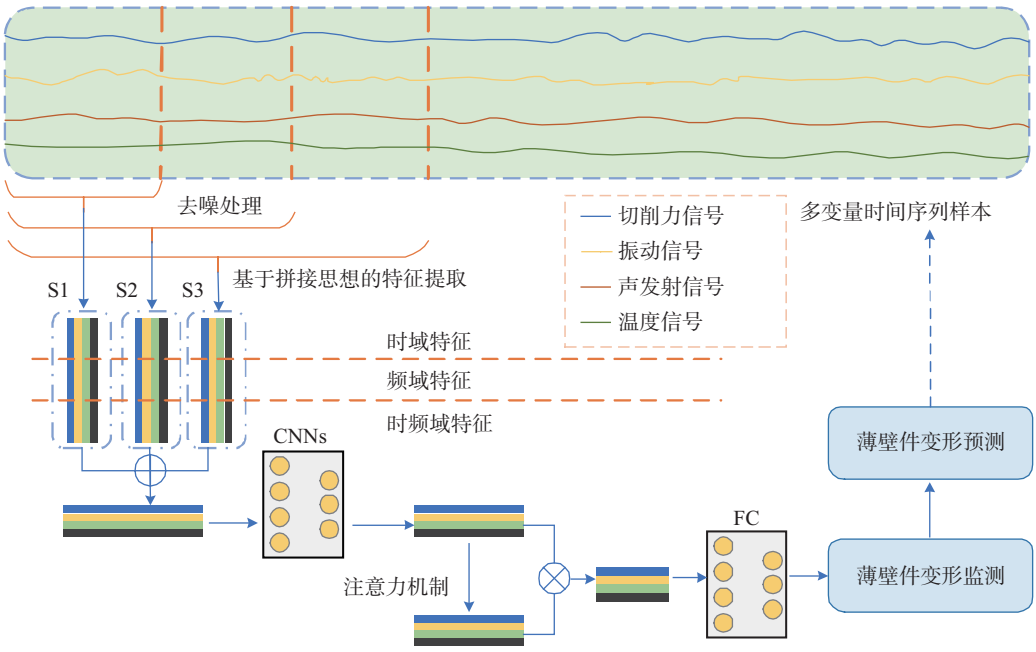


图5　特征提取和选择在薄壁件变形预测框架中的应用[62]

Fig.5　Application of feature extraction and selection in deformation prediction framework of thin-walled parts[62]

等[68]提出多元经验模态分解方法，结合独立成分分析与多元经验模态分解，有效降低了模态响应中的模态混叠问题。同样，小波变换原理是将非平稳信号分解到不同的频段。并且在时域或频域中选择敏感信号进行特征提取。与经验模式分解不同，小波变换需要选择小波基函数。连续小波变换的应用非常广泛，包括滚动轴承故障诊断、变速箱故障诊断等。连续小波变换可以提供连续的尺度信息。但是，经过处理后有大量的冗余信息，计算速度很慢。为了进一步提高精度，Madhuudana 等[69]在使用端面铣刀加工42CrMo4合金钢制件的过程中，采用不同的特征提取技术（离散小波变换、统计方法和经验模式分解）对得到的声音信号进行处理。试验结果表明，离散小波变换比统计方法和经验模式分解方法具有更好的识别效果。

随着机器学习和深度学习技术的发展，特征提取已逐步实现自动化。像CNN这样的深度学习模型可以从大量的传感器数据中自动学习复杂的高维特征，这些特征不再受限于人工预设的特征维度与特征空间。

4.2.3　融合智能算法的变形预测技术

在完成特征提取与特征选择后，基于数据驱动的薄壁件加工变形监测系统的核心任务是构建算法模型，将提取到的特征映射至实际工件指标，包括变形状态分类（如初始变形、正常弹性变形、严重塑性变形）、定量变形量（如薄壁件最大变形量、曲面轮廓误差）及加工剩余变形演化趋势与变形预测。这类模型主要分为两大类：机器学习与深度学习，二者在对人工特征设计的依赖程度、模型架构与适用场景上存在显著差异。

传统机器学习模型完全以人工设计的特征为输入，通过在标注数据集上的监督训练，学习特征与薄壁件变形标签之间的映射关系。其性能高度依赖特征工程的质量。常用机器学习模型包括决策树（DT）、支持

向量机(SVM)、随机森林(RF)、隐马尔可夫模型(HMM)及自适应神经模糊推理系统(ANFIS)。机器学习模型依赖高质量的人工特征设计,难以捕捉多传感器数据中的复杂非线性关系。同时,此模型在变工况下的泛化能力较差,也不适用于大规模数据集场景。

深度学习模型无需人工特征设计,可通过端到端架构直接从原始信号(如切削力、振动、声发射信号)或图像中自动学习分层、高级抽象特征。这类模型专为处理复杂非线性加工工况与大规模多传感器数据集设计,是现代工业薄壁件加工变形监测的主流选择。常用架构包括卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)及其变体、基于注意力机制的模型以及混合结构。

Fang 等[70]突破纯数据、纯物理模型局限,提出了一种基于U–NET网神经网络和物理模型相结合的铣削变形预测融合模型,预测误差相较纯U–NET模型大幅度降低。Zhao等[71]提出了一种基于变形力估计残余应力场的加工变形预测方法。基于物理场估计神经网络,利用加工过程中的变形力监测数据,用潜能场表示残余应力场。通过推理网络结合加工过程信息,利用所估计的潜能场来预测后续的变形力和变形。Wang 等[72]构建了 Inception–残差结构,该结构融合了 Inception 模块的多尺寸卷积核,用于替代残差结构中执行残差计算的单尺寸卷积核,并基于该结构提出了一种在线监测环境下的加工变形检测与预测方法。变形预测模型采用模块化设计,分为当前时刻变形检测和后续变形预测两个阶段。随后建立了两阶段深度学习模型,增强了模型的可解释性和灵活性。该模型能够实时处理时序多源传感信号,产生当前和未来变形的输出,符合机械加工过程在线监测技术的要求,所提出的加工变形预测及在线检测模型框架如图6所示[72]。

尽管机器学习模型在简单、稳定的加工场景中仍具备实用性,但深度学习模型已成为现代薄壁件加工变形监测系统的主流方法,尤其适用于复杂工业环境。然而,深度学习模型需要大量标注数据与大量计算资源进行训练,在小样本场景下易发生过拟合,且缺乏物理可解释性,这限制了其在安全关键型工业应用中的部署。

解析预测模型计算效率高、理论体系清晰,但难以精准表征加工过程中的动态边界条件,容易导致预测结果与实际测量值产生偏差。经试验验证,薄壁件加工在单边、双边、三边固定3种典型边界条件下,解析法绝大多数工况的预测误差小于10%,仅有部分测点的误差分布在10%~22%区间内[45]。有限元仿真模型可综合考量多重因素对加工变形的影响,预测结果更贴近真实工况。以采用单元生死技术搭建的有限元预测模型为例[49],其变形预测最大相对误差为25.8%,平均相对误差为9.6%;但该方法在多物理场耦合仿真场景中,存在计算量大、求解耗时的突出问题。相较于传统物理模型,数据驱动预测模型在特定工件上的预测误差可控制在10%以内。其中融合物理信息的卷积神经网络(CNN)变形预测模型整体误差低于10%,单点最大绝对误差小于7 μm,模型在插值、外推测试中稳定性优异,完全满足航空零件的加工精度要求[73]。数据驱动模型具备独特的效率特征为模型训练阶段耗时较长,但训练完成后推理速度极快,且不受工件结构限制,非常适用于加工实时控制,但该方法的短板也较为明显,模型物理可解释性弱、泛化能力不足,同时试验数据采集的成本偏高。因此,当前各类预测方法仍有不足,可根据不同的场景选择

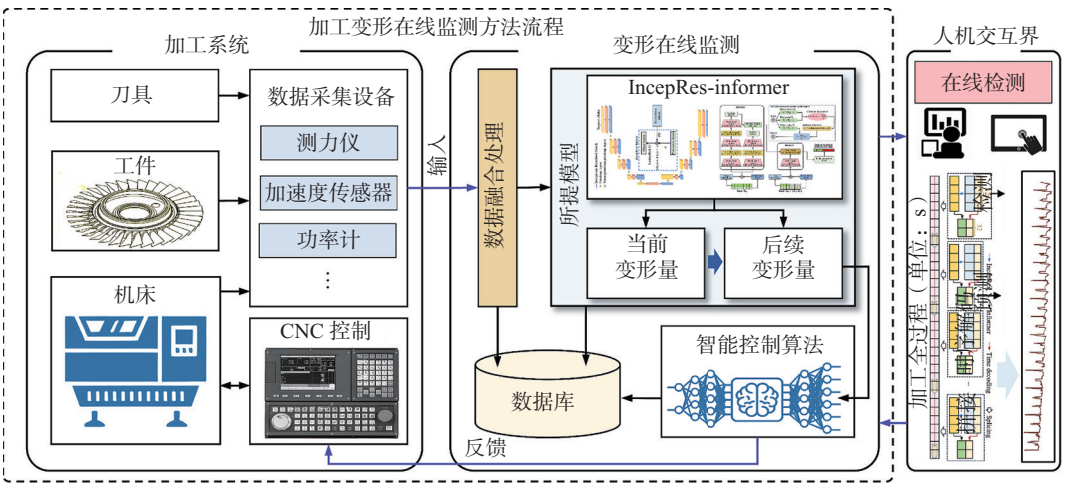


图6 加工变形预测与在线监测一体化框架[72]

Fig.6 Integrated framework for machining deformation prediction and on-line monitoring[72]

合适的模型，有充足的数据，选择数据驱动模型更准；预测一个全新工件的变形，选择有限元模型更准。从工程实用性看，有限元以离线仿真分析为主，数据驱动模型可支撑在线实时预测。将有限元机理信息嵌入数据驱动框架实现机理–数据融合建模，是优化预测准确度、强化模型工程适用性的关键发展趋势。

5 航空薄壁曲面件加工变形控制及补偿

航空薄壁曲面件壁厚较薄、刚性差、曲率变化大，在加工过程中受多种力、热等加工因素下，极易发生弹塑性变形以及振动变形。若没有有效的变形控制与补偿方法，加工后的零件会出现各种误差，严重的则会直接偏离设计图纸要求，导致零件报废。为保证加工精度提升加工质量稳定性，国内外学者对薄壁件的变形控制做了大量研究，主要可分为变形控制和变形补偿。

5.1 加工变形控制

对于薄壁曲面件加工变形的控制研究主要从铣削方式、走刀路径以及装夹布局等方面展开。

5.1.1 镜像铣削

镜像铣削是适用于薄壁零件加工的先进工艺，自身通过在工件两侧对称分布的铣削装备与支撑装备，让刀具与支撑头在加工过程中保持镜像同步运动与实时对齐[74–76]。工作时支撑头紧贴零件形面形成动态浮动基准，既可抵消切削力、抑制工件振动，又能自适应零件形面变化，同时依靠精准调控刀具与支撑头的法向间距实现壁厚的高精度控制，有效突破了传统大型薄壁零件加工的工艺局限[77]。航空航天大型薄壁曲面零件高精高效加工需求愈发迫切，镜像铣削装备成为先进制造领域研究热点，其装备构型迭代始终围绕精度、效率、柔性3大维度开展，整体呈现由串联机构向混联机构发展的趋势[78–80]。

早期采用双五轴机床作为核心加工装备，该系统依托成熟可靠的数控系统及机床本体高刚性结构，运动控制精度优异，能够稳定实现航空蒙皮的高精度铣削作业，可满足基础薄壁件的精加工需求，但设备体积大、造价高、灵活性差。为提升柔性、降低成本，后续研发出双串联机器人系统[81]，依靠工业机器人多自由度灵活运动的特点，拥有更大的作业空间，可适配各类复杂曲面工件加工，同时依托模块化设计有效压缩设备成本、提升加工柔性[82]。针对航空航天与制造领域变壁厚复杂曲面零件的镜像加工，Sun等[83]提出双串联机器人镜像铣削系统，先利用5次非均匀有理B样条曲线描述刀具轨迹，建立点位同步映射并推导运动约束，再结合多项约束构建时间最优速度规划模型。经六轴机器人开展仿真与加工试验，验证了该方法可有效实现双机器人高精度同步作业。然而串联机器人运动链冗长，存在末端刚度不足的问题，且运动过程中各关节误差会逐级累积放大，严重制约加工精度。

随着混联机器人技术进步，又发展出双混联机器人系统，结合串并联机构优势，综合性能更均衡，可有效抑制薄壁件加工变形，但混联机器人系统结构复杂，同步控制与误差补偿难度较大。刘祺等[84]结合薄壁件加工特点提出双混联机器人镜像铣削路径规划策略，依据双机器人坐标系位姿关系与目标壁厚，设计镜像对称的加工轨迹，并通过加工试验证实，工件壁厚误差稳定在±0.18 mm范围内，整套技术方案切实有效。针对双混联机器人镜像铣削系统，天津大学肖聚亮团队研发了双混联机器人镜像铣削系统对称布置两台相同的混联机器人[85]，并提出双混联机器人镜像铣削协同运动控制方案[86]。采用外置光栅实时测量关节位移，计算末端位姿偏差并通过逆运动学补偿关节指令，实现误差实时修正。经平面、曲面薄壁件铣削试验验证，试验

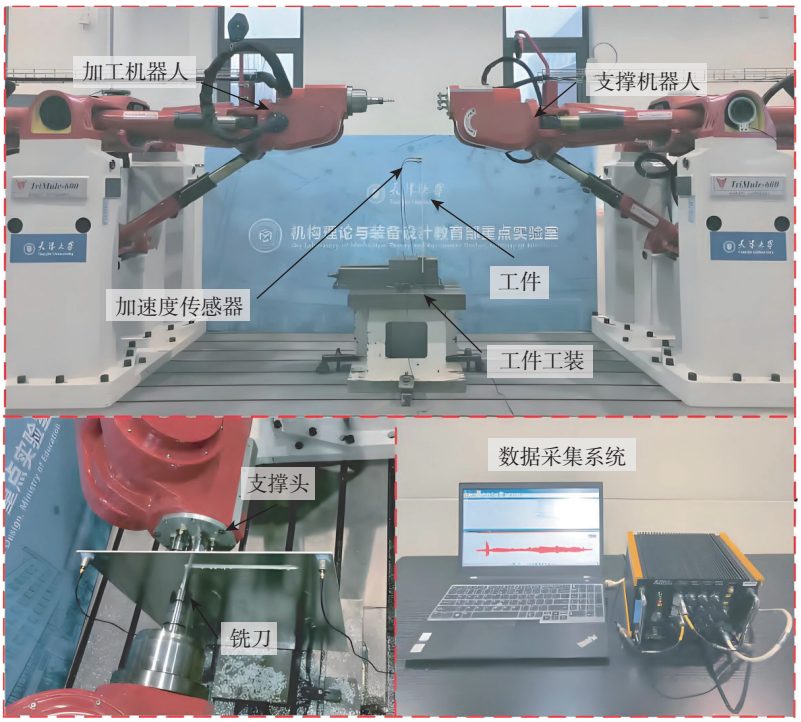


图7 双混联机器人镜像铣削加工试验平台[86]

Fig.7 Experimental platform of dual hybrid robots mirror milling[86]

平台如图7所示[86]。该方法可有效抑制铣削颤振、保障壁厚精度。最终将双机协同位置误差控制在30 μm内、刀轴方向误差控制在0.004°内，大幅提升薄壁件镜像铣削的加工质量与精度。

5.1.2 走刀路径优化

走刀路径通过改变切削力分布、材料去除顺序、切削热累积以及刀具与工件接触状态，直接影响工件的弹性变形以及初始残余应力的释放与重新分布，是控制加工变形的关键工艺因素。不同的走刀路径、加工顺序会直接影响残余应力的释放顺序与分布形态，致工件产生差异化加工变形。同时，走刀方式决定了材料的去除顺序，随着材料的不断去除，会使工件的刚性逐渐降低，不合理的走刀方式会使工件弱刚性区域过早丧失支撑，从而产生弹性变形。优化走刀路径可以解决残余应力与弹性恢复对工件加工质量的影响。

Hong等[87]设计了一种基于表面三角测量的方法来确定球头铣刀的位置，从参数不确定的曲面上提取离散特征点及其法向量，规避了加工过程中的过切和干涉等挑战。Sun等[88]针对不同刀具轨迹下的五轴球头铣削，建立了铣削稳定性模型，可为五轴球头铣削规划稳定无振的加工轨迹。宜亚丽等[89]对刀具路径的离散补偿点用非均匀有理B样条曲线进行拟合，并将拟合后的路径输入机器人铣削系统做刀具轨迹规划，减少误差累积，提高了加工精度。Kim等[90]提出了一种适用于圆柱立铣刀和球头立铣刀的优化刀具路径生成算法，该算法在全局优化框架内提高了加工近似质量。于剑驰等[91]采用等参数线法规划刀具路径，并通过等角速度法生成刀位点，以保障切削过程的稳定、提升表面加工质量。Zhu等[92]提出基于数字孪生计算的加工优化方法，将有限元分析与变形预测模型相融合，实现了对刀具路径与加工精度的评估和优化，其算法如图8所示。

5.1.3 夹具及辅助支撑

夹具作为薄壁件铣削加工的关键支撑部件，其结构、约束布局及夹紧力大小直接决定工件应力分布与变形趋势，是控制加工变形的重要手段。现在夹具多是单侧柔性夹具[93]、双面柔性夹具[94]或通过优化夹具位置、作用力及数量的设计方法来提升工件整体刚度[95]，但这类夹具多为固定支撑形式，容易造成工件刚度分布不均，因此，有研究提出移动夹具方案，让夹具跟随铣削刀具同步移动，避免使用多余的固定夹具[96]。

Fei等[97]提出一种全新方法来抑制工件变形，该方法是在工件背面的刀具与工件接触区域投影位置增设夹具支撑件。铣削加工时，该支撑件会与铣刀保持同步移动。针对弱刚度工件铣削颤振问题，Wan等[98]设计了可实时补充刚度与阻尼的移动夹具，依靠夹具移动实现全程抑振。Tian等[99]创新地设计了磁吸随动支撑工装，工装可随刀具同步移动，并在工件加工侧对面施加可控气压，规避了传统镜像支撑空间占用大的弊端。针对飞机蒙皮减薄加工的振动

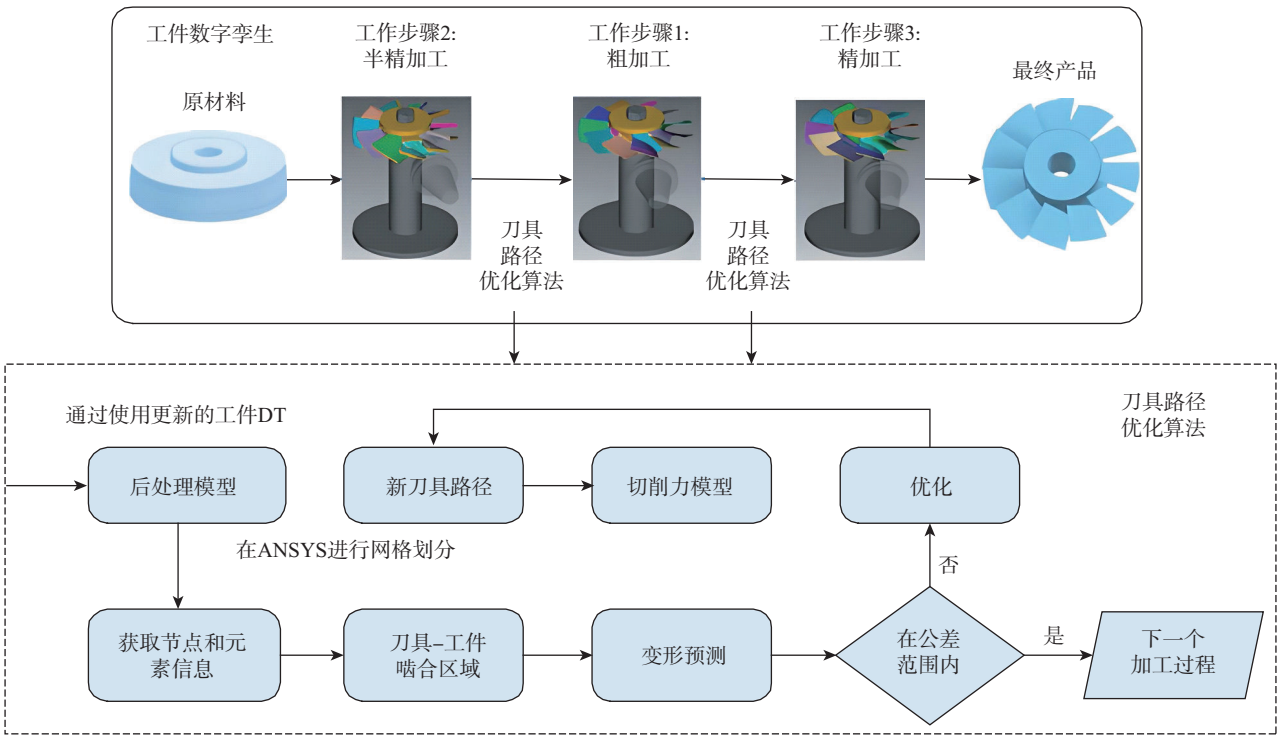
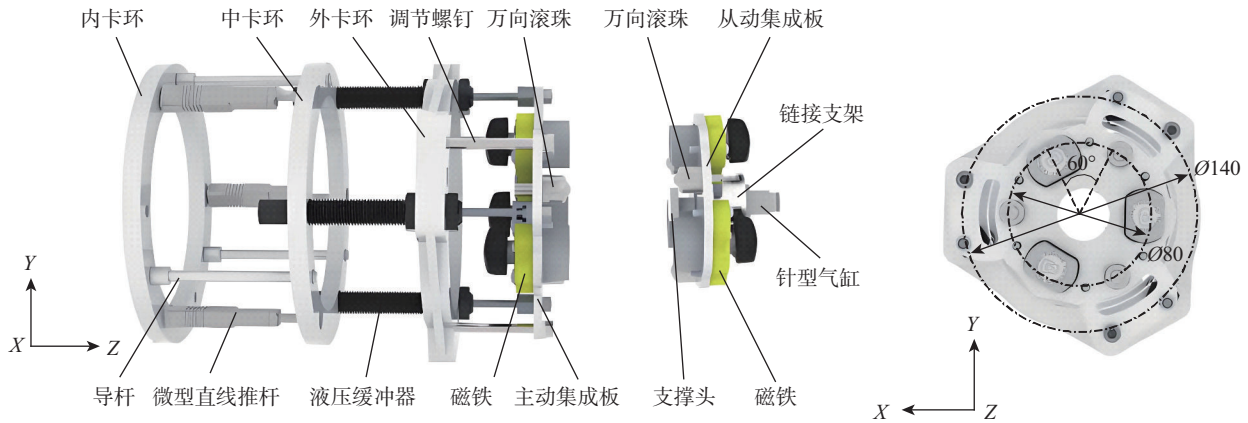


图8 刀具路径优化算法[92]

Fig.8 Algorithm for tool path optimization[92]



（a）夹具　　（b）磁吸与万向滚珠布局

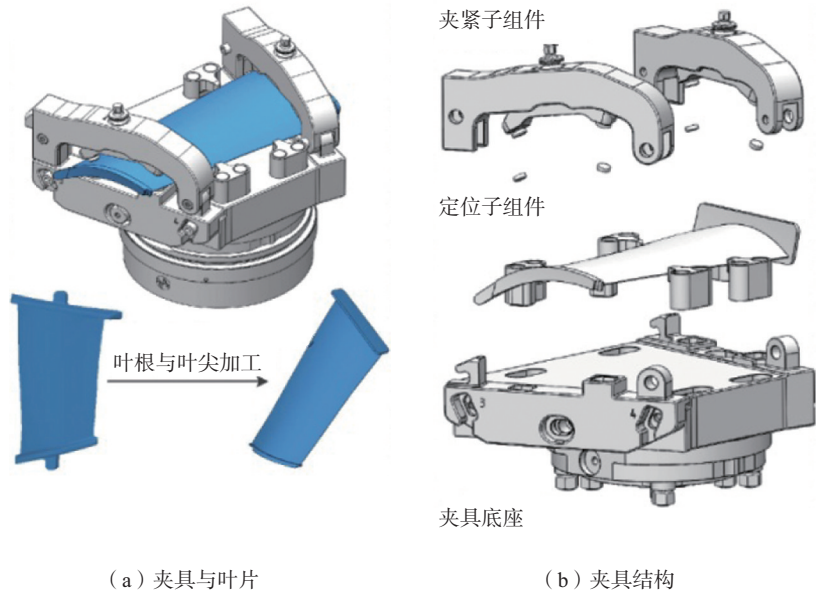
图9　磁吸随动支撑夹具结构[100]

Fig.9　Structure of magnetic follow-up support fixture[100]

问题，田雨等[100]结合混联机器人高刚度、工作空间大的优势，提出基于新型磁吸随动支撑夹具（夹具结构如图9所示）的薄壁件镜像铣削抑振技术。研究分析了该技术的抑振机理，建立考虑夹具俯仰夹角的轴向磁力模型，并探究万向滚珠未接触工件时的动态响应。

随着智能材料的不断研究，利用磁流变液可快速相变、刚度与阻尼可调的特点，设计柔性夹具，通过调节电流来提高工件固有频率与系统刚度[101]。此外，针对传统夹具功能单一、仅侧重抑制振动或变形控制的问题，有学者提出了高度集成的自适应夹具[102]，能有效抑制振动并提升加工效率。由于叶片刚性弱、曲面复杂难以装夹，Wu等[103]设计了一种多头叶片夹具，如图10所示，采用9点非过定位支撑设计提升系统刚度，双独立夹紧单元配合铰链传力实现压力均匀分布，可稳定夹持叶片并有效抵抗切削变形。

辅助支撑技术可有效提高薄壁件在加工过程中的刚性，是薄壁件变形控制的基础手段。对于薄壁件刚度极低的薄弱区域，常规夹具支撑易出现局部支撑不足或应力集中，而辅助支撑作为夹具支撑体系的重要补充，可以有效提高薄壁件的局部刚性。Xiang等[104]使用高温精密铸造蜡为辅助支撑的变形控制方法，并进行了5个关键位置的测量，结果显示在高温精密铸造蜡辅助支撑下，不同横向位置、不同切削深度的铣削力波动更小，5个关键位置的平均壁厚绝对误差从自由铣削的29.69 μm降至22.486 μm，误差降幅达24.3%。考虑加工载荷与绿色制造需求，Liu[105]针对悬臂薄壁件低刚度、易产生加工变形的问题，提出新型冰基夹具控制变形方法，该方法依托夹具支撑实现了对悬臂薄壁件加工变形的控制。郝清龙[106]基于无应力辅助支撑原理及复杂曲面离散化原则，设计了一种用于叶片类薄壁工件辅助支撑的多点磁力辅助夹具，如图11所示，并通过使用该辅助支撑夹具对叶片进行了磨削加工试验，验证了所设计的辅助夹具在弱刚性工件刚性增强及加工变形控制方面的优越性。



（a）夹具与叶片　　（b）夹具结构

图10　多定位头叶片夹具[103]

Fig.10　Blade fixture with multiple positioning heads[103]

5.2　加工变形补偿

对于自由形状薄壁叶片，精加工过程主要依赖于手动或机器抛光。然而，这些方法难以确保叶片形状和位置精度，易造成零件返工、报废，从而增加了加工成本。误差补偿方法

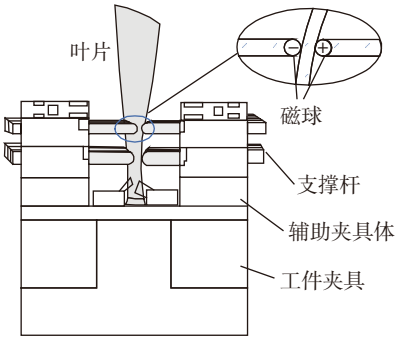
涉及量化识别的误差，随后重新校准加工路径和刀具位置以消除这些差异。目前，误差补偿主要包括离线补偿和在线补偿。

5.2.1 离线补偿

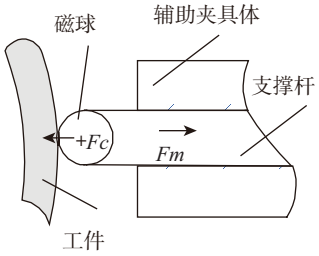
离线补偿是指在零件加工前，再根据变形规律，建立加工偏差与补偿量之间关系的数学模型，然后对工件变形反向等量补偿，如对通过试切、仿真或以往经验得出工件变形规律，工件的原始工装或加工路径进行修正（图 12），将修正后的加工参数、刀具轨迹重新输入到数控程序中以抵消原始变形，使零件加工后因变形恰好回到设计尺寸。

Li 等[107]综合考虑了整体叶盘叶片等自由曲面在加工时，刀具轨迹的复杂性远大于常规薄壁零件，修正这种复杂的刀具轨迹和偏转矢量需要大规模的转换和修正处理，且不能排除新生成的刀具路径存在 NC 代码错误、加工过程中的干涉和刀具碰撞问题。基于此，提出了逆向重构几何建模补偿方法，并通过叶片铣削加工试验和叶片表面尺寸测量试验验证了所提方法的有效性。Li 等[46]提出的薄壁件侧铣离线变形补偿方案，以刀位调整的镜面补偿原理为基础，针对相邻刀具进给位置，提出了灵活的变形误差补偿策略。为了验证提出改进刀位补偿法的优越性，以 3 mm 薄壁零件为研究对象进行了切削加工试验以及仿真，并将柔性补偿策略在每个进给位置的迭代次数与普通刀位补偿方法的迭代次数进行了比较，加工变形误差补偿方法对比及效果验证如图 13 所示[46]。结果表明，所提改进刀位补偿法迭代次数以及误差变形量大幅降低。

离线补偿在加工前完成全部准备，加工中无需停机检测，不占用工时，可显著提升加工效率，且离线补



（a）磁力多点柔性辅助夹具



（b）支撑杆受力图

图 11 磁力多点柔性辅助夹具及支撑杆受力图[106]

Fig11 Force diagram of magnetic multi-point flexible auxiliary fixture and support rod[106]

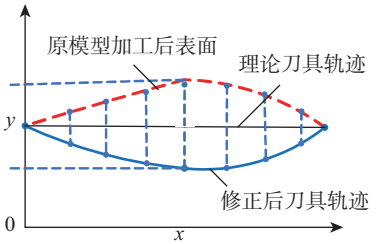
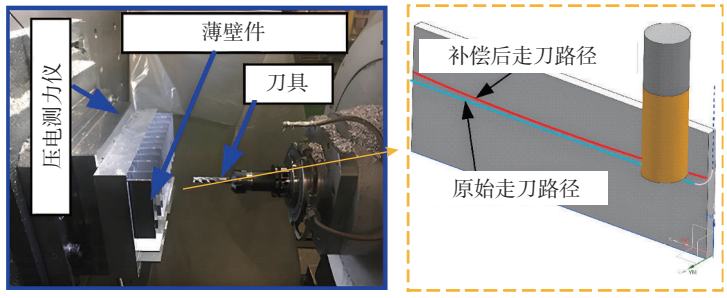
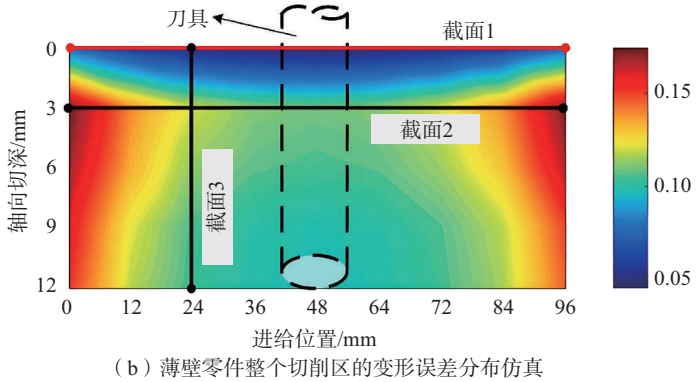


图 12 离线补偿原理

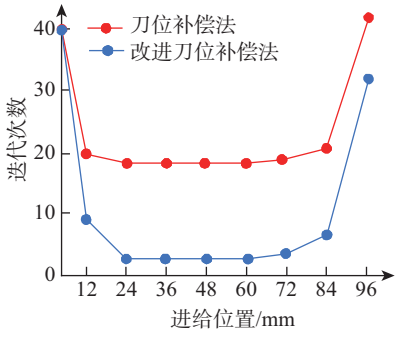
Fig.12 Principle of off-line compensation



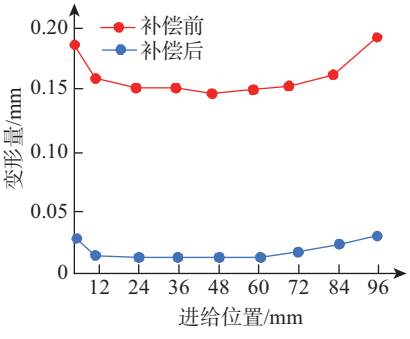
（a）试验装置及走刀路径



（b）薄壁零件整个切削区的变形误差分布仿真



（c）误差补偿方法迭代次数对比



（d）补偿前后变形误差对比

图 13 薄壁件加工变形误差补偿方法对比及效果验证[46]

Fig.13 Comparison and effect verification of machining deformation error compensation methods for thin-walled parts[46]

偿无需在机床上安装接触式探头、激光测头等在线检测传感器，对现有产线兼容性强，已投产使用的加工生产线无需大规模改造。但离线补偿精度高度依赖所建模型与经验，当加工过程中出现随机实时问题，如刀具磨损、崩刃、材料组织内部出现气孔、材质等导致局部变形异常等问题，原有补偿方案的补偿精度将大幅下降。

5.2.2 在线补偿

在线补偿是通过实时传感器采集加工过程中工件的应力、振动、温度等数据；再利用控制系统快速计算需要修正的工艺参数或刀具轨迹，并根据计算所得到的补偿值动态调整切削参数、刀具运动坐标或装夹参数，以此来抵消当前加工过程中产生的变形。

zhang 等[108]提出一种基于改进 Smith 预估器与扰动观测器的实时厚度补偿策略，通过动态调整刀具走刀路径，实现对加工厚度误差的有效补偿（图 14）。Wang 等[109]提出了一种加速 ACD 迭代平差收敛法，对现有实时补偿方法中常用的实时补偿过程进行了数学分析；提出了一种基于高阶收敛的割线法，并将其引入到大型薄壁板加工的实时补偿过程中，经过试验验证了此方法具有较高的精度。

Diez 等[110]提出了一种基于压电驱动器的柔性周边铣削加工变形补偿系统，该系统考虑了加工过程中相互作用的 3 个子系统的性能，该系统加工出的零件精度较高，且适用于较小的薄壁零件的加工。

Ge 等[111]提出并开发了一种集加工状态监测、在机测量检测、加工误差建模和实时补偿于一体的高度自动化方法，并通过对薄腹板零件进行加工补偿试验，验证了该方法的有效性，补偿原理以及结果如图 15 所示，加工误差减小了 58.1%。Wang[112]等提出了一种新颖的在线测量和余量补偿方法，该方法可以避免机床和刀具的切削力、功率和扭矩的监控不及时以及工件与刀具之间偏斜的非线性计算，显著提高薄壁零件加工精度。

在薄壁构件在线误差补偿体系中，镜像补偿是一项关键核心技术。镜像补偿技术融合实时壁厚检测与位置伺服控制，在消除弹性让刀、保证壁厚精度的同时，通过提升切削区的刚度与阻尼抑制加工颤振。传统误差镜像补偿法通过迭代叠加加工误差来修正切削深度，但存在收敛速度慢、补偿效率偏低的不足。为此，王娜娜等[113]结合割线法，并兼顾补偿后刀具轨迹的连续性，提出一种误差实时补偿新方法。试验结果表明，该方法能够有效减小加工误差，显著提升镜像铣削的补偿效率与壁厚加

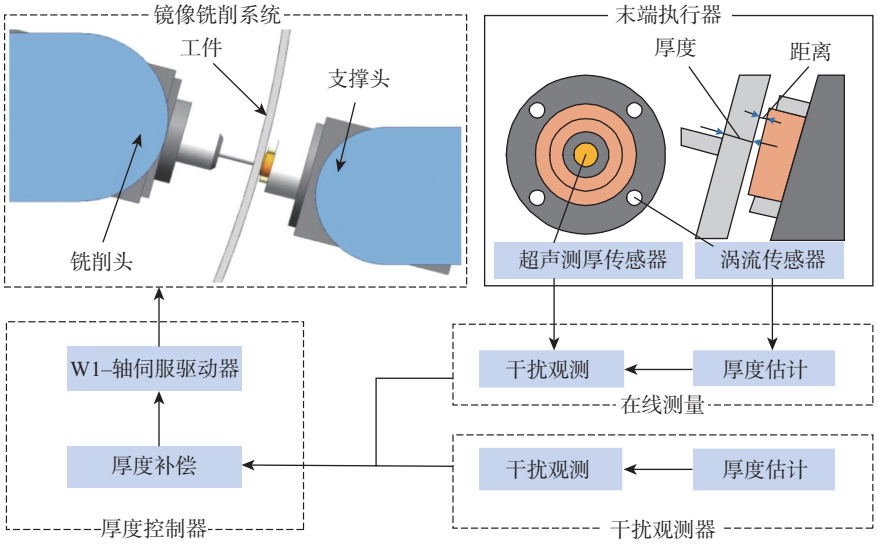
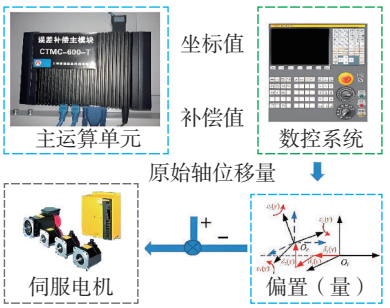
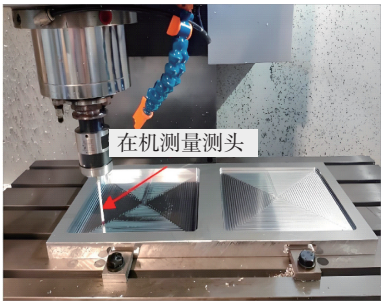


图 14 薄壁件加工在线测量与误差补偿[108]

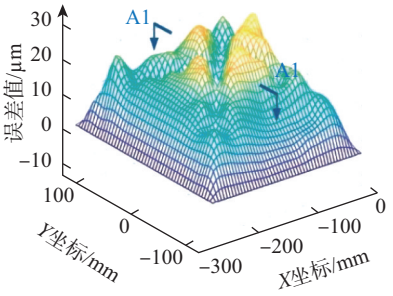
Fig.14 On-line measurement and error compensation in thin-walled part machining[108]



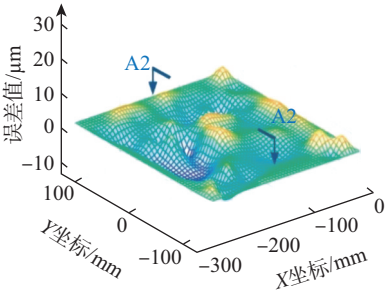
（a）误差补偿系统原理图



（b）在机测量过程



（c）无补偿误差值分布



（d）有补偿误差值分布

图 15 薄壁件加工误差补偿系统原理、在机测量过程及补偿效果验证[111]

Fig.15 Error compensation system principle, on-machine measurement and compensation effect verification for thin-walled parts[111]

工精度。林俊等[114]针对双五轴镜像铣削的非线性误差，建立机床运动与误差模型，以非线性误差和旋转轴角速度约束确定优化区间，通过四元数球面插补、三次Bezier曲线拟合旋转轴角度，并选取垂直工件表面的刀轴矢量完成补偿，有效降低加工误差。周金强等[115]提出了镜像铣削内侧法向柔性支撑补偿机制，以W_2轴波动量量化加工稳定性并优化射流压力，结合切削力规律确定工艺参数，通过镜像同步路径与后置处理，实现火箭贮箱整体箱底高精度薄壁减薄加工。

在线补偿通过对工件实时检测工件状态，动态修正加工过程中产生的变形，与离线补偿相比无需依赖建模精度，并避免了预处理大量数据，也可在加工过程中及时发现偏差并修正，解决了因变形累积导致的整件报废。但在线补偿设备改造成本高，在实时检测过程中，可能需要进行停机检测，占用工件加工时间。

6 面向薄壁件铣削过程的数字孪生优化方法

近年来，随着智能制造技术的发展，基于加工过程的数据驱动在线监测技术得到了广泛的研究。通过对加工过程物理信号的在线监测，结合智能学习算法，可实现加工变形的实时预测与加工质量的提升。但在薄壁零件加工过程中，由于其独特的结构和精度要求，零件加工周期长、废品率增加，导致生产成本较高。作为网络物理系统中的新概念，数字孪生有着明确的定义，即依托最优物理模型、传感器实时更新数据、机床历史数据等，对飞行器或系统开展多物理场、多尺度、概率化等进行综合仿真，用以映射其物理实体的全生命周期状态。这一技术可为薄壁件铣削加工提供强大的实时感知、优化与控制能力，在工业4.0背景下，数字孪生在解决上述薄壁零件加工难题方面展现出巨大潜力，成为支撑薄壁零件加工质量与效率提升的关键技术。

Zhang等[116]将领域对抗神经网络（DANN）与数字孪生工艺模型相结合，构建了薄壁件变形预测框架。该框架以多维高保真建模、知识驱动低时延变形仿真、在线优化控制为核心支撑技术，为工程应用提供了理论依据与实践参考。Ward等[117]提出了一套带实时自适应控制功能的智能加工数字孪生系统，通过模型驱动的实时仿真与在线反馈机制，实现了加工残余应力的动态调控。刘金锋等[118]提出了一种基于数字孪生的新型工艺评估方法。该方法实现了加工实测数据与工艺设计信息的实时映射，基于数字孪生的工艺过程评估框架构建及数字孪生数据驱动的工艺评估。Zhu等[92]提出了数字孪生驱动的薄壁零件制造框架，其中包含物理空间中的薄壁零件和机床以及在虚拟空间的数字孪生模型，通过使用智能人机界面连接和沟通物理与虚拟空间。

薄壁零件加工变形由多因素耦合引起，传统有限元仿真、机理研究等方法时效性差、过程理想化，未充分考虑实际环境因素。实际加工中，操作人员依赖仿真和静态加工数据，缺乏实时/历史数据的有效应用，虚实数据无有效交互，且研究多聚焦单个加工步骤，未实现全制造过程优化。数字孪生具备实体与虚拟实时映射、数据交互融合、迭代优化的优势，可解决上述问题，同时结合三维可视化、深度学习等技术，能实现加工变形的快速模拟、准确预测与优化，为突破薄壁零件加工精度控制难题提供创新方案。基于数字孪生技术，建立了薄壁件加工变形预测与控制的理论框架，如图16所示，该框架主要由5部分组成，分别为物理空间、孪生空间、通信层、孪生数据层与服务和应用层，主要目的是实现薄壁零件加工变形的在线预测与控制。

物理空间包括机床、数控机床、工件、传感器及其配套设施等。传感器主要有旋转测力仪、振动传感器和激光位移传感器。传感器数据采集是建立薄壁零件加工数字化孪生数据库的重要支撑。通过通信模块将物理实体层采集的数据传输至孪生空间，经孪生空间处理后的信号反向反馈至物理实体层，是物理空间和孪生空间之间进行数据通信的关键。孪生信息层中，数据是薄壁零件加工孪生模型的重要基础，包括数据的分类、存储和分析，数字双驱动模式为解决薄壁零件加工变形的预测和控制问题提供了新的思路。通过采集和存储加工过程中的历史铣削力和振动数据，可以作为智能算法训练的数据源。孪生空间是基于物理层特征的薄壁零件加工过程的数字孪生模型。孪生空间可以接收实时信息并不断进化，以保持与实体机床的一致性。为薄壁零件的加工状态监测提供了方便。将薄壁零件加工变形预测模型的映射机制嵌入到孪生空间中，实现了薄壁零件加工变形的实时预测。服务与应用层作为操作员观察界面和功能操作模块，主要包括薄壁零件加工变形设计要求和加工变形监测模块。实现了薄壁零件变形数据的显示和加工过程的可视化。利用薄壁零件加工变形的预测结果，如果满足变形要求，则进行加工；如果不满足变形要求，则需要优化工艺参数，以调整薄壁零件加工过程中的主轴转速或进给速度。

通过构建薄壁件加工过程的数字孪生体，可实现加工场景、设备状态、材料特性的全维度数字化映射，实时复刻加工过程中的力、热、变形等多物理场耦合过程，不仅能精准预测加工变形量，还能通过虚拟仿真优化加工参数，提前规避变形风险，弥补传统模型物理可解释性不足的短板，为薄壁件加工变形的精准管控提供了全新技术支撑。

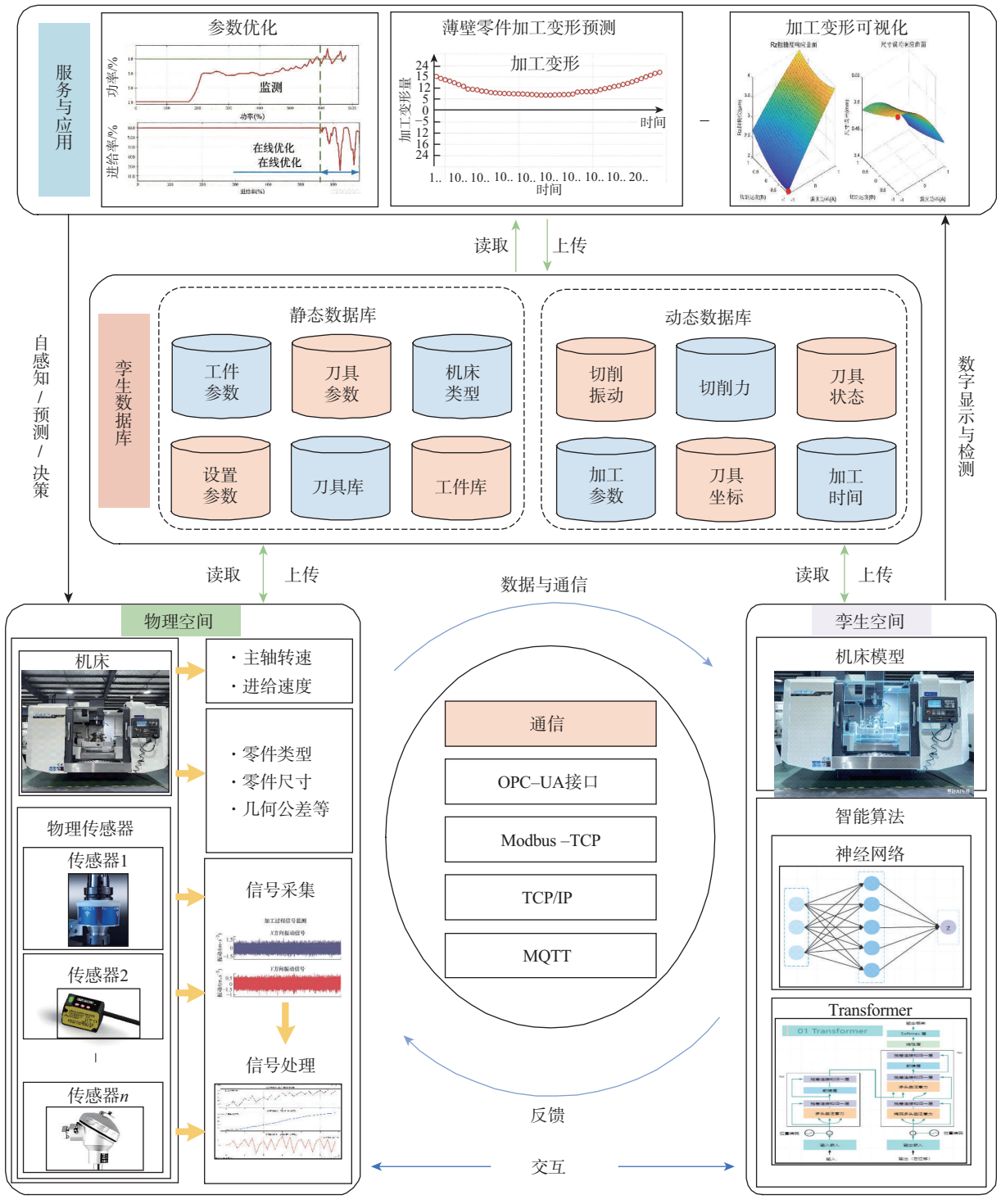


图16 基于数字孪生技术的薄壁零件变形预测与控制框架

Fig.16 A framework for deformation prediction and control of thin-walled parts based on digital twin technology

7 结论

本文介绍了有关航空薄壁曲面件的结构及加工特点，分析了影响薄壁曲面件加工质量的主要因素，结合国内外研究，综述了航空薄壁曲面件在多轴加工时铣削力的建模方法、薄壁曲面件加工变形预测与补偿技术，并构建了以数字孪生为基础的变形预测与控制系统框架，并对这些方面做了以下总结。

（1）薄壁曲面件多轴铣削加工中，铣削力是影响加工变形最直接的因素，铣削力的预测是把控加工质量的核心环节。现有铣削力模型多侧重稳态平均力计算，常忽略或简化刀具磨损、切削颤振等实际因素，导致模型与真实工况偏差较大，要建立能

全面描述真实多轴加工工况的铣削力模型还面临着很大的挑战。

(2)航空薄壁曲面件因其自身壁薄、刚度低、结构复杂的特性以及其加工特点,在加工过程中产生的加工变形严重制约其加工精度,现有加工变形预测主要是基于物理模型(解析法、有限元法)和数据驱动法。然而,解析法依赖强假设,复杂工况下预测精度不足。有限元法虽然能总结考虑多因素对变形的影响,但求解时间长,边界条件难以确定;数据驱动法无结构限制,但模型可解释性差、泛化能力弱。

(3)优化走刀路径、使用辅助支撑技术以及变形补偿技术已在控制薄壁曲面件加工变形中得到了应用,但在实际加工过程中,受到多种因素的影响,变形机制复杂,同时各类补偿方法及工艺优化手段在适配不同结构的薄壁曲面件时,存在针对性不足、适用性有限的问题,难以全面满足航空航天领域多样化、高精度的加工需求。

(4)数字孪生技术依托最优物理模型、实时与历史数据,可实现物理实体全生命周期状态映射,为解决薄壁件加工周期长、废品率高、生产成本高的难题提供支撑,现有研究已构建多种数字孪生相关框架,实现了变形预测、工艺评估、多物理场仿真等功能,并建立了包含物理空间、虚拟空间、通信、孪生数据与服务和应用5部分的变形预测与控制理论框架。但当前研究仍存在不足:数字孪生模型的构建,未充分兼顾制造环境、操作工况及工件结构复杂程度等实际影响因素。同时现有加工预测模型多单一依靠切削力信号进行状态监测,受测功机自身限制难以适配实际加工场景,且铣削数字孪生研究过于侧重数据精度,忽略了虚拟与物理空间交互的实时性需求;此外现有的薄壁零件加工变形预测方法适用结构单一,算法鲁棒性、泛化能力有限,整体模型预测精度仍有较大提升空间。

针对现有研究的不足,结合航空航天领域对薄壁件加工精度、效率及稳定性的更高要求,未来可从以下4个方面开展深入研究。

(1)建立与实际一致的动态瞬时铣削力预测模型。在铣削力建模过程中考虑实际加工中的刀具磨损、切削颤振等因素,使模型更符合实际加工过程;同时通过工艺参数优化、机器学习算法融合等方式,提升模型复杂工况拟合能力。

(2)深入研究解析法、有限元法与数据驱动法之间的优势互补融合。构建解析法与数据驱动法相混合的数模联动法,利用解析法明确变形的核心影响机理,减少数据驱动模型的输入维度与数据需求量,同时通过数据驱动法修正解析模型的计算误差,提升模型对复杂结构的适应性。

(3)增强在线补偿与离线补偿协同控制能力。离线补偿阶段,基于精准的变形预测模型与历史加工数据,结合遗传算法、粒子群优化等优化算法,制定全局最优的预补偿方案。在线补偿阶段利用实时数据驱动的动态修正模型,对离线补偿方案进行实时调整,从而提高全局补偿。

(4)完善数字孪生加工过程理论框架,纳入制造环境、操作条件与工件结构复杂度等多元影响因素;摒弃仅依靠切削力信号的单一监测方式,引入主轴功率、电流等信号以更精准表征加工负载状态,同时进一步优化数据采集方案,兼顾传输速度、数据准确性与安全性,满足虚实交互的实时性要求。在模型优化方面,可在训练过程中融入物理方程作为约束,采用数据–物理混合建模方法提升算法鲁棒性,并通过扩充数据集、优化大数据分析手段,增强模型对不同结构薄壁零件变形预测的泛化能力,提升加工变形预测精度。

参 考 文 献

[1] Li X B, Ni J, Liu X L, et al. Chatter-free milling of aerospace thin-walled parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 341: 118903.

[2] Li M C, Wang W X, Huang Y, et al. 3D printed compliance tool incorporated internal-impeller structure for high performance face grinding of titanium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 329: 118446.

[3] Yu Y Y, Shi D M, Ding H, et al. Prediction of thin-walled workpiece machining error: A transfer learning approach[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2025, 36(4): 2803–2827.

[4] 夏伟, 刘献礼, 岳彩旭, 等. 考虑力致变形时变效应的薄壁构件侧铣切削力建模[J]. 机械工程学报, 2026, 62(9): 430–446.

Xia Wei, Liu Xianli, Yue Caixu, et al. Modeling of side milling cutting force on thin-walled components considering time-varying effect of force-induced deformation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2026, 62(9): 430–446.

[5] 王运巧, 梅中义, 范玉青. 薄壁弧形件装夹布局有限元优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 214–217, 223.

Wang Yunqiao, Mei Zhongyi, Fan Yuqing. Finite element optimization of machining fixture layout of thin-walled arc workpiece[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 214–217, 223.

[6] 赵欣, 欧剑, 李跃. 薄壁叶片加工变形模型预测与误差补偿[J]. 制造业自动化, 2014, 36(13): 36–40.

Zhao Xin, Ou Jian, Li Yue. The thin blade processing deformation prediction model and error compensation[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(13): 36–40.

[7] Li Z L, Zhu L M. An accurate method for determining cutter-workpiece engagements in five-axis milling with a general tool considering cutter runout[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(2): 021001.

[8] Ratchev S, Liu S, Huang W, et al. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(15): 1629–1641.

[9] 孙浩宇, 宋树权, 窦菲, 等. 薄壁件

加工变形预测与控制技术研究进展 [J/OL]. 汽车工程学报,2025: 1–17. https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/qcgcxb202604002.

Sun H Y, Song S Q, Dou F, et al. Research Progress of Deformation Prediction and Control Technology for Thin – Walled Parts Machining [J/OL]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025: 1 – 17. https://d. wanfangdata.com.cn/periodical/qcgcxb202604002.

[10] Xu K, Li Y G, Zhang J C, et al. ForceNet: An offline cutting force prediction model based on neuro-physical learning approach[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 61: 1–15.

[11] 张敏, 田锡天, 李波. 整体壁板压弯成形的形状控制 [J]. 航空学报, 2020, 41(7): 623620.

Zhang Min, Tian Xitian, Li Bo. Shape control for press bend forming of integral panels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41 (7): 623620.

[12] 张小娟, 王婧, 仝大明, 等. 薄壁壳体零件高压气淬过程的变形预测模拟及其淬火工艺优化[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(9): 182–190.

Zhang Xiaojuan, Wang Jing, Tong Daming, et al. Deformation prediction simulation of thin-walled shell parts during high pressure gas quenching and its quenching process optimization[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(9): 182–190.

[13] 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): 525164.

Yue Caixu, Zhang Juntao, Liu Xianli, et al. Research progress on machining deformation of thin-walled parts in milling process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43 (4): 525164.

[14] 蔡立猛. 航空零件加工中材料特性对工艺选择的影响及优化策略[J]. 冶金与材料, 2025, 45(6): 22–24.

Cai Limeng. Influence of material characteristics on process selection and optimization strategy in aviation parts processing[J]. Metallurgical and Materials, 2025, 45(6): 22–24.

[15] 张瑞, 任军学, 张淑宁, 等. 薄壁结构加工误差预测与控制研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(7): 77–95.

Zhang Rui, Ren Junxue, Zhang Shuning, et al. Research progress on prediction and control of machining errors in thin-walled structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(7): 77–95.

[16] Yuen A, Altintas Y. Geometric-error compensation with a six degree-of-freedom rotary magnetic actuator[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(11): 111016.

[17] Zhang Z X, Luo M, 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.

[18] 季泽平, 田春苗, 郭世杰. 数控机床几何误差研究现状与展望[J]. 航空制造技术, 2021, 64(22): 65–77.

Ji Zeping, Tian Chunmiao, Guo Shijie. Research status and prospect of geometric error of CNC machine tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(22): 65–77.

[19] 周永洪, 郭灿彬, 李志强. 优化五轴联动非线性误差的刀具姿态控制方法[J]. 机电工程技术, 2024, 53(12): 115–118.

Zhou Yonghong, Guo Canbin, Li Zhiqiang. A tool posture control method for optimizing nonlinear error of five-axis CNC machining[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(12): 115–118.

[20] Li Z Q, Zeng Z P, Yang Y, et al. Research progress in machining technology of aerospace thin-walled components[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 119: 463–482.

[21] Radu P, Schnakovszky C. A review of proposed models for cutting force prediction in milling parts with low rigidity[J]. Machines, 2024, 12(2): 140.

[22] 杨毅青, 张斌, 刘强. 铣削建模中多种切削力模型的分析比较[J]. 振动工程学报, 2015, 28(1): 82–90.

Yang Yiqing, Zhang Bin, Liu Qiang. Analysis and comparison of various cutting force models in the milling process simulation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(1): 82–90.

[23] Wu G, Li G X, Pan W C, et al. A prediction model for the milling of thin-wall parts considering thermal-mechanical coupling and tool wear[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(11): 4645–4659.

[24] Lazoglu I, Boz Y, Erdim H. Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1): 117–120.

[25] Duan Z J, Li C H, Ding W F, et al. Milling force model for aviation aluminum alloy: Academic insight and perspective analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34: 18.

[26] Hajdu D, Astarloa A, Kovacs I, et al. The curved uncut chip thickness model: A general geometric model for mechanistic cutting force predictions[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 188: 104019.

[27] Aras E, Albedah A. Extracting cutter/workpiece engagements in five-axis milling using solid modeler[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(9): 1351–1362.

[28] Gong X, Feng H Y. Cutter-workpiece engagement determination for general milling using triangle mesh modeling[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2016, 3 (2): 151–160.

[29] Yang Y, Zhang W H, Wan M, et al. A solid trimming method to extract cutter-workpiece engagement maps for multi-axis milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9): 2801–2813.

[30] Wei Z C, Wang M J, Zhu J N, et al. Cutting force prediction in ball end milling of sculptured surface with Z−level contouring tool path[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(5): 428–432.

[31] Yan B L, Xu G F, Lu H, et al. Identification of milling information and cutter-workpiece engagement in five-axis finishing of turbine blades based on NURBS and NC codes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 107: 43–56.

[32] Guo D M, Fei R, Yuwen S. An approach to modeling cutting forces in five-axis ball-end milling of curved geometries based on tool motion analysis[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(4): 041004.

[33] Xi X L, Cai Y L, Gao Y F, et al. An analytical method to calculate cutter-workpiece

engagement based on arc-surface intersection method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1): 935–944.

[34] 田博. 复杂曲面五轴铣削刀具—工件接触几何提取与切削力建模方法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2025.

Tian Bo. Research on cutter-workpiece engagement extraction and cutting force modeling methods for five-axis milling of complex surfaces[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2025.

[35] Li Z L, Niu J B, Wang X Z, et al. Mechanistic modeling of five-axis machining with a general end mill considering cutter runout[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 96: 67–79.

[36] Zhou T X, Yue C X, Liu X L, et al. Modeling of milling force in multi-axis machining process for thin-walled sculptured surface[J]. Thin–Walled Structures, 2025, 208: 112831.

[37] Kiswanto G, Hendriko H, Duc E. An analytical method for obtaining cutter workpiece engagement during a semi-finish in five-axis milling[J]. Computer–Aided Design, 2014, 55: 81–93.

[38] Sai L, Belguith R, Baili M, et al. An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 7–17.

[39] Jing X B, Lv R Y, Song B W, et al. A novel run-out model based on spatial tool position for micro-milling force prediction[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 739–749.

[40] Wojciechowski S. The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 110–123.

[41] Gao S S, Duan X Y, Zhu K P, et al. Investigation of the tool flank wear influence on cutter-workpiece engagement and cutting force in micro milling processes[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 209: 111104.

[42] Tuysuz O, Altintas Y, Feng H Y. Prediction of cutting forces in three and five-axis ball-end milling with tool indentation effect[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 66: 66–81.

[43] Zhu Z R, Yan R, Peng F Y, et al. Parametric chip thickness model based cutting forces estimation considering cutter runout of five-axis general end milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 35–51.

[44] Wu Q, Li D P, Ren L, et al. Detecting milling deformation in 7075 aluminum alloy thin-walled plates using finite difference method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5): 1291–1302.

[45] 王姝淇. 航空结构件铣削残余应力预测及加工变形控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

Wang Shuqi. Research on milling residual stress prediction and machining distortion control technology of aerospace structure parts[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[46] 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.

[47] 吴琼, 张以都, 张洪伟, 等. 航空薄壁件铣削加工动态特性与实验分析[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1118–1122.

Wu Qiong, Zhang Yidu, Zhang Hongwei, et al. Dynamical characteristic and experimental analysis for thin-wall part of aviation in the milling[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(9): 1118–1122.

[48] Jia Z Y, Lu X H, Gu H, et al. Deflection prediction of micro-milling Inconel 718 thin-walled parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 291: 117003.

[49] 喻明让, 杨博, 陈云. 整体叶轮叶片五轴铣削变形预测与误差补偿技术研究[J]. 工具技术, 2021, 55(12): 117–122.

Yu Mingrang, Yang Bo, Chen Yun. Study on deformation prediction and error compensation technology of integral impeller blade in five-axis milling[J]. Tool Engineering, 2021, 55(12): 117–122.

[50] Li C H, Yue C X, Xu Y S, et al. Simulation study on multi-process milling deformation of frame thin-walled parts considering initial residual stress[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 136 (11): 5553–5568.

[51] Ge G Y, Xiao Y K, Feng X B, et al. An efficient prediction method for the dynamic deformation of thin-walled parts in flank milling[J]. Computer – Aided Design, 2022, 152: 103401.

[52] Chen M L, Li M D, Zhao L F, et al. Tool wear monitoring based on the combination of machine vision and acoustic emission[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(7): 3881–3897.

[53] Zhou C A, Guo K, Sun J. An integrated wireless vibration sensing tool holder for milling tool condition monitoring with singularity analysis[J]. Measurement, 2021, 174: 109038.

[54] Totis G, Sortino M. Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(1): 34–42.

[55] Salonitis K, Kolios A. Force-based reliability estimation of remaining cutting tool life in titanium milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(7): 3321–3333.

[56] Zhou Y Q, Xue W. Review of tool condition monitoring methods in milling processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (5): 2509–2523.

[57] Kuntoğlu M, Sağlam H. ANOVA and fuzzy rule based evaluation and estimation of flank wear, temperature and acoustic emission in turning[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 35: 589–603.

[58] Zhang N, Chen E P, Wu Y K, et al. A novel hybrid model integrating residual structure and Bi-directional long short-term memory network for tool wear monitoring[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(9): 6707–6722.

[59] Wei X D, Liu X L, Yue C X, et al. A multi-sensor signals denoising framework for tool state monitoring based on UKF – CycleGAN[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200: 110420.

[60] Ambhore N, Kamble D, Chinchanikar

S, et al. Tool condition monitoring system: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2 (4–5): 3419–3428.

[61] Suprock C A, Roth J T. Methods for on-line directionally independent failure prediction of end milling cutting tools[J]. Machining Science and Technology, 2007, 11 (1): 1–43.

[62] Xi L, Wang W, Chen J Y, et al. Appending-inspired multivariate time series association fusion for tool condition monitoring[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024, 35 (7): 3259–3272.

[63] Ao Y H, Qiao G. Prognostics for drilling process with wavelet packet decomposition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50 (1): 47–52.

[64] Samantaray L, Dash M, Panda R. A review on time-frequency, time-scale and scale-frequency domain signal analysis[J]. IETE Journal of Research, 2005, 51(4): 287–293.

[65] Li X L, Guan X P. Time-frequency-analysis-based minor cutting edge fracture detection during end milling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(6): 1485–1496.

[66] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454 (1971): 903–995.

[67] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1–41.

[68] Barbosh M, Sadhu A, Vogrig M. Multisensor-based hybrid empirical mode decomposition method towards system identification of structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(5): e2147.

[69] Madhusudana C K, Kumar H, Narendranath S. Face milling tool condition monitoring using sound signal[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2017, 8(2): 1643–1653.

[70] Fang Z, Qian S Y, Wang C H, et al. Milling deformation prediction for thin-walled components based on fusion model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 135(7): 3437–3449.

[71] Zhao Z W, Li Y G, Liu C Q, et al. A subsequent-machining-deformation prediction method based on the latent field estimation using deformation force[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 63: 224–237.

[72] Wang Y F, Zhao Z C, Zheng Y W, et al. A novel machining deformation twinning model for online monitoring under current detection and subsequent prediction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 240: 113358.

[73] Li W F, Ren J X, Shi K N, et al. A method for monitoring machining errors of complex thin-walled parts based on the fusion of physical information and CNN[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2025, 81: 208–221.

[74] 张盛桂, 高诚, 郑博森, 等. 镜像铣削系统的蒙皮零件在机测量技术研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(1): 19–22.

Zhang Shenggui, Gao Cheng, Zheng Bosen, et al. On-machine measurement technology research for mirror milling system of skin parts[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(1): 19–22.

[75] Dong X J, Tu G W, Hu L, et al. Suppress chatter in milling of thin-walled parts *via* fixture with active support[J]. Journal of Vibration and Control, 2024, 30(5–6): 1286–1296.

[76] Verl A, Valente A, Melkote S, et al. Robots in machining[J]. CIRP Annals, 2019, 68 (2): 799–822.

[77] Bi Q Z, Huang N D, Zhang S K, et al. Adaptive machining for curved contour on deformed large skin based on on-machine measurement and isometric mapping[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 136: 34–44.

[78] Lan J, Lin B, Huang T, et al. Path planning for support heads in mirror-milling machining system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1–4): 617–628.

[79] 赵素雷. 大型薄壁构件双机器人镜像铣削协同加工[D]. 天津: 天津大学, 2018.

Zhao Sulei. Dual-robot mirror milling collaborative machining of large thin-walled parts[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[80] 吴泽明. 双机器人蒙皮镜像铣削系统标定与协同加工轨迹生成[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.

Wu Zeming. Calibration of dual-robot skin mirror milling system and collaborative processing path generation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.

[81] 岳晓明, 臧烁, 徐作珂, 等. 基于6自由度串联机器人的电火花铣削加工轨迹规划及伺服控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(9): 20–27.

Yue Xiaoming, Zang Shuo, Xu Zuoke, et al. Trajectory planning and servo control strategy of EDM milling based on a 6-DOF serial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(9): 20–27.

[82] Ma J J, Zhang D H, Wu B H, et al. Stability improvement and vibration suppression of the thin-walled workpiece in milling process via magnetorheological fluid flexible fixture[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5): 1231–1242.

[83] Sun Y W, Shi Z F, Xu J T. Synchronous feedrate scheduling for the dual-robot machining of complex surface parts with varying wall thickness[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(3): 2653–2667.

[84] 刘祺, 郭梦娜, 山显雷, 等. 基于双混联机器人的镜像铣削系统运动学分析与加工路径生成方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67 (5): 46–52.

Liu Qi, Guo Mengna, Shan Xianlei, et al. Kinematics analysis and machining path generation of mirror milling system based on dual hybrid robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(5): 46–52.

[85] 张清越. 薄壁构件双机器人镜像铣削的速度协同及振动抑制研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.

Zhang Qingyue. Research on thin-walled parts dual-robot mirror milling speed coordination and vibration suppression[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.

[86] 肖聚亮, 赵雨昂, 刘思江, 等. 基于双混联机器人协同运动控制的薄壁件镜像铣削研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(7): 14–27.

Xiao Juliang, Zhao Yuang, Liu Sijiang, et al. Research on mirror milling of thin-walled parts based on collaborative motion control of dual hybrid robots[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(7): 14–27.

[87] Hong X Y, Hong R J, Lin X C. Tool orientations' generation and nonlinear error control based on complex surface meshing[J]. The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(10): 4279–4288.

[88] Sun C, Altintas Y. Chatter free tool orientations in 5−axis ball-end milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 106: 89–97.

[89] 宜亚丽, 陈一凡, 程阳洋, 等. 大型薄壁构件加工变形误差综合补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 1–10.

Yi Yali, Chen Yifan, Cheng Yangyang, et al. The comprehensive compensation method for machining deformation errors in large thin-wall components[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 1–10.

[90] Kim Y J, Elber G, Bartoň M, et al. Precise gouging-free tool orientations for 5−axis CNC machining[J]. Computer−Aided Design, 2015, 58: 220–229.

[91] 于剑驰. 大型球壳薄壁件整体变形分区域协调补偿加工技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.

Yu Jianchi. Research on multi-fiducial coordination compensation machining technology by area division for global deformation of large spherical shell thin-walled parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.

[92] 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.

[93] Aoyama T, Kakinuma Y. Development of fixture devices for thin and compliant workpieces[J]. CIRP Annals, 2005, 54(1): 325–328.

[94] Craig O, Picavea J, Gameros A, et al. Conformable fixture systems with flexure pins for improved workpiece damping[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 638–652.

[95] Zeng S S, Wan X J, Li W L, et al. A novel approach to fixture design on suppressing machining vibration of flexible workpiece[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 58: 29–43.

[96] 孙宝玉, 李焕震, 毕海峰, 等. 惯性摩擦焊机精密调整移动夹具结构设计分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(5): 94–100.

Sun Baoyu, Li Huanzhen, Bi Haifeng, et al. Design and analysis of precision adjustment mobile fixture structure for inertial friction welding machine[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(5): 94–100.

[97] Fei J X, Lin B, Xiao J L, et al. Investigation of moving fixture on deformation suppression during milling process of thin-walled structures[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 403–411.

[98] Wan M, Dang X B, Zhang W H, et al. Chatter suppression in the milling process of the weakly-rigid workpiece through a moving fixture[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117293.

[99] Tian Y, Xiao J L, Liu S J, et al. Vibration and deformation suppression in mirror milling of thin-walled workpiece through a magnetic follow-up support fixture[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 99: 168–183.

[100] 田雨, 肖聚亮, 刘思江, 等. 基于磁吸随动支撑夹具的薄壁件镜像铣削振动抑制技术[J]. 航空制造技术, 2025, 68(12): 94–105.

Tian Yu, Xiao Juliang, Liu Sijiang, et al. Vibration suppression technology for mirror milling of thin-walled parts based on magnetic follow-up support fixture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(12): 94–105.

[101] Liu H B, Wang J P, Luo Q, et al. Effect of controllable magnetic field-induced MRF solidification on chatter suppression of thin-walled parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(9): 2881–2890.

[102] Chai S L, Ouyang L H, Bi Q Z, et al. An adaptive fixture for suppress vibrations and measuring workpiece deformation of thin-walled casings[J]. Procedia CIRP, 2021, 101: 322–325.

[103] Wu D B, Wang H, Peng J S, et al. Machining fixture for adaptive CNC machining process of near-net-shaped jet engine blade[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(4): 1311–1328.

[104] Xiang J F, Yi J. Deformation mechanism in wax supported milling of thin-walled structures based on milling forces stability[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 32: 356–369.

[105] Liu H B, Wang C X, Han L S, et al. The influence of ice-based fixture on suppressing machining-induced deformation of cantilever thin-walled parts: A novel and green fixture[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(1): 329–341.

[106] 郝清龙, 沈帅祺, 许云. 薄壁工件多点磁力辅助夹具设计研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(7): 142–145, 149.

Hao Qinglong, Shen Shuaiqi, Xu Yun. Research on multi-point magnetic auxiliary fixture for thin-walled workpieces[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(7): 142–145, 149.

[107] Li X, Gong Y D, Ding M X, et al. Research on prediction and compensation strategy of milling deformation error of aitanium alloy integral blisk blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(11): 5099–5117.

[108] Zhang S K, Bi Q Z, Ji Y L, et al. Real-time thickness compensation in mirror milling based on modified Smith predictor and disturbance observer[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 144: 103427.

[109] 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.

[110] Diez E, Leal−Muñoz E, Perez H, et al. Dynamic analysis of a piezoelectric system to compensate for workpiece deformations in flexible milling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 91: 278–294.

[111] Ge G Y, Du Z C, Yang J G. On-machine measurement-based compensation for machining of thin web parts[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 48: 844–851.

[112] Wang G, Li W L, Tong G, et al. Improving the machining accuracy of thin-walled parts by online measuring and allowance compensation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5): 2755–2763.

[113] 王娜娜. 蒙皮镜像铣削变形控制及误差补偿技术研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2024.

Wang Nana. Research on deformation control and error compensation technology for skin mirror milling[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2024.

[114] 林俊, 曹珍珍, 李军利, 等. 双五轴镜像铣削加工非线性误差优化方法[J]. 航空制造技术, 2025, 68(8): 105–112, 129.

Lin Jun, Cao Zhenzhen, Li Junli, et al. Nonlinear error optimization method for dual five-axis mirror milling machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(8): 105–112, 129.

[115] 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.

Zhou Jinqiang, Liu Xiao, Jiang Xiaohui, et al. Research on mirror milling process for integral bottom of launch vehicle tank[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(22): 118–125.

[116] Zhang C, Zhou G H, Xu Q F, et al. A digital twin defined autonomous milling process towards the online optimal control of milling deformation for thin-walled parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(7): 2847–2861.

[117] Ward R, Sun C, Dominguez-Caballero J, et al. Machining digital twin using real-time model-based simulations and lookahead function for closed loop machining control[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(11): 3615–3629.

[118] 刘金锋, 赵鹏, 周宏根, 等. 数字孪生驱动的机械加工工艺评价方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1600–1610.

Liu Jinfeng, Zhao Peng, Zhou Honggen, et al. Digital twin-driven machining process evaluation method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1600–1610.

Research Progress on Machining Deformation Prediction and Compensation for Aviation Thin-Walled Curved Parts

YUE Caixu[1], ZHANG Zhiyi[1], ZHOU Tianxiang[1], GU Zhiyong[2], LI Chunyu[2], YU Jiahui[2]

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150066, China)

[ABSTRACT] Aerospace thin-walled curved parts have the characteristics of low stiffness, complex curved surfaces and difficult-to-machine materials. During the milling process, they are extremely prone to machining deformation due to factors such as elastic recovery and vibration, resulting in problems such as poor surface quality and substandard accuracy. Therefore, it is of great practical significance to predict and compensate the machining deformation of thin-walled curved parts. Based on the analysis of the multi-axis machining characteristics and structural difficulties of aerospace thin-walled curved parts, this paper elaborates on the factors causing machining deformation of thin-walled curved parts and the research status of multi-axis milling force modeling; summarizes the prediction and compensation methods of machining deformation, and looks forward to the application and development trend of digital twin technology in the prediction and control of milling deformation of thin-walled parts, providing technical reference for the machining of aerospace thin-walled curved parts. By systematically reviewing the prediction and compensation technology for machining deformation of aerospace thin-walled curved parts and sorting out and summarizing the existing research results, it can provide new references and solutions for the machining of complex curved parts in engineering practice.

Keywords: Aviation thin-walled curved surface parts; Deformation prediction; Milling force modeling; Deformation compensation; Digital twin

（责编 晓月）