

CFRP切削过程中的监测控制研究进展

詹迪雷 李鹏南 李树健 牛秋林 邱新义

(湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

文 摘 CFRP加工过程的实时监测和控制是提升零件最终加工质量的重要手段。本文从加工过程物理仿真、数学模型及智能模型三方面总结了CFRP切削加工预测方法研究现状。同时,基于切削过程状态信息获取、特征信息提取以及监测模型构建等方面概述了刀具磨损和加工质量在线监测方法研究进展。在此基础上,探讨了关于在CFRP切削过程中切削力和振动的在线智能控制方法。最后针对以上几方面未来的研究趋势进行了分析和展望。

关键词 CFRP,加工预测,在线监测,智能控制

中图分类号: TG506

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.02.002

Research Progress of Monitoring and Control in Cutting Process of CFRP

ZHAN Dilei LI Pengnan LI Shujian NIU Qiulin QIU Xinyi

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract The real-time monitoring and machining process control is an important method to improve the final machining quality of CFRP. In this paper, the prediction methods of the cutting process of CFRP are summarized from three aspects of physical simulation, mathematical model, and intelligent model. Moreover, the on-line monitoring methods of both tool wear and machining quality are reviewed based on the state information acquisition, feature information extraction, and monitoring model construction. Then, the on-line intelligent control methods of both cutting force and cutting vibration in the cutting process of CFRP are discussed. Finally, the future research trends of the above aspects are analyzed and prospected.

Key words CFRP, Machining prediction, Online monitoring, Intelligent control

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)因具有高比强度、高比模量、耐腐蚀、耐疲劳等优点,被汽车、航空航天、海洋工业等诸多领域广泛应用^[1-3]。由于CFRP的非均质、各向异性,其切削加工机理不同于金属材料,在切削加工过程中易发生分层、出口毛刺、撕裂和孔壁划痕等加工缺陷,对CFRP结构件的装配质量和服役性能产生严重影响^[4-5]。CFRP切削加工过程是一个高度非线性、时变、不确定性的复杂动态过程,任何状态的改变都会对加工过程及最后加工效果产生影响,常规的数控加工技术没有把状态变化量纳入考虑的范围内,对加工过程中出现的突发状况不能实时处理^[6],难以保证CFRP的最终加工质量。

本文主要从CFRP的切削加工预测、切削过程中的状态监测及在线智能控制3方面综述了学者们近年来的研究成果,并对未来研究趋势进行了分析和讨论,为改善CFRP加工质量,促进其广泛应用提供参考。

1 CFRP切削加工预测

1.1 加工过程物理仿真预测

加工过程物理仿真可以对CFRP切削过程中切削力、切削温度、刀具磨损、切屑形状等状态进行预测,根据仿真结果提出解决方案,对切削参数与刀具角度进行优化^[6]。针对CFRP加工过程物理仿真的研究,国内外学者从宏观、微观及宏微观有限元模型等方面展开了广泛研究。

图1为路冬等^[7]采用宏观有限元模型对CFRP切

收稿日期:2020-09-27

基金项目:国家自然科学基金(51775184,51905169,51975208)

第一作者简介:詹迪雷,1996年出生,硕士研究生,主要从事难加工材料切削加工技术研究工作。E-mail: zhandileiZDL@163.com

通信作者:李鹏南,1963年出生,教授,博士生导师,主要从事难加工材料/零件高效切削加工与刀具技术研究。E-mail: 2002lpn@163.com

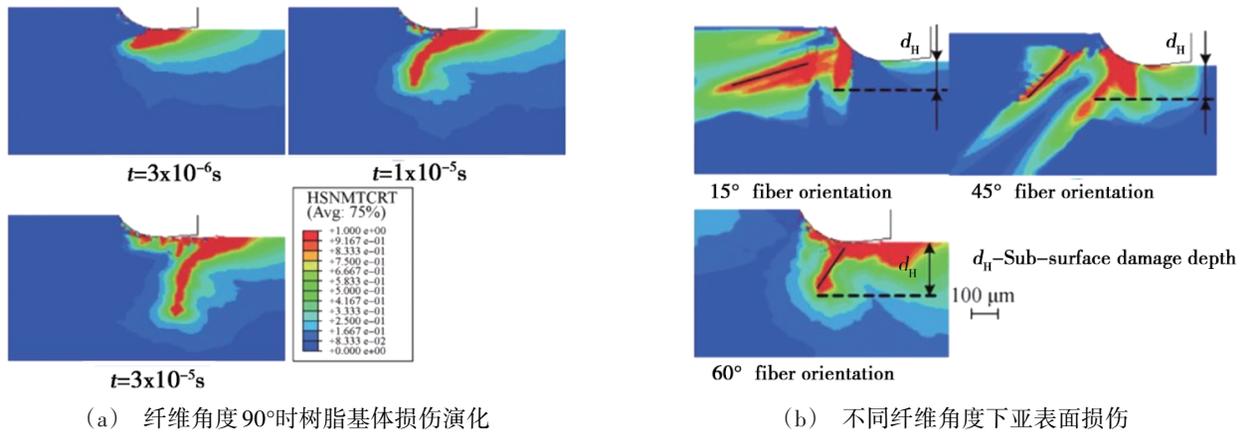


图1 CFRP宏观模型仿真^[7]

Fig. 1 CFRP macroscopic model simulation^[7]

削过程进行的仿真研究,探讨了切削过程中树脂基体、亚表面损伤演化过程。秦旭达^[8]则采用宏观有限元模型模拟了CFRP铣削加工过程,利用VUMAT子程序建立了三维Hashin起始失效准则以及损伤演化过程模型,采用Cohesive单元连接以模拟层间损伤的产生及扩展,利用该模型分析了切削力、层间应力及层间损伤随纤维方向角的变化规律,但所建立的模型忽略了纤维基体的结合问题以及切削温度的影响。CALZADA等^[9]对材料界面进行建模,提出了基

于微观结构的CFRP有限元模型,该模型能够描述整个切屑形成过程中纤维损伤形式。如图2为齐振超^[10]建立的CFRP直角切削三维多相有限元模型及仿真结果,对纤维、基体材料本构分开考虑,仿真结果很好的展示了切屑形成机理、基体破坏及亚表面损伤深度。RENTSCH^[11]建立了基于Hashin失效准则的CFRP微宏观有限元模型,获得了和实际相符的材料去除过程,将重点观察区采用微观模型,其余采用宏观模型,可以兼顾仿真效率与仿真精度。

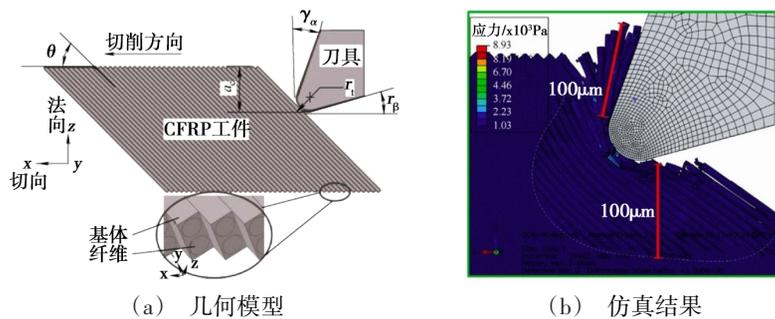


图2 $\theta=45^\circ$ 直角切削微观几何模型及仿真结果^[10]

Fig. 2 Microscopic geometric model and simulation results of orthogonal cutting at $\theta=45^\circ$ ^[10]

可见,CFRP宏观有限元模型在预测切削力、表面损伤等方面,能取得很好仿真精度,但并不能预测局部效应。微观有限元模型着重考虑材料的微观特性,能更好的诠释材料去除机理、切屑形成原因、切削热传递以及纤维基体损伤演化等诸多方面。微宏观有限元模型在兼具仿真效率与精度的基础上表现出更好的仿真效果,是未来研究的重点。

1.2 CFRP数学模型预测

针对CFRP切削过程的数学模型预测,学者们从宏观、微观层面对切削力的建模进行了广泛研究,而微观层面的切削力模型又可从特定纤维方向和全范围纤维方向进行研究。

从宏观层面开展的切削力模型研究,主要是对经典金属切削理论的应用或推广。如段春争^[12]等根据实验数据求出经验公式(1)系数,可直观的展示加工参数对结果参数的影响。MENG等^[13]则将切削刃分成连续的相邻元素集,每个都看作是单位宽度的正交切削刃,在每个元素上使用修正后的正交切削力模型建立了UD-CFRP钻孔过程中瞬时钻削力模型,并且可以预测力的波动,但此类模型无法考虑到纤维基体切削的微观特性。

$$F=C n^{a_1} v_t^{a_2} a_p^{a_3} a_c^{a_4} \quad (1)$$

式中, F 为切削力; C 为与加工材料及切削条件的相关系数; n 为转速; v_t 为进给速度; a_p 为轴向切深; a_c 为

径向切深; a_1, a_2, a_3, a_4 均为指数^[12]。

因此,利用材料的微观特性来描述正交切削物理本质,将切屑、一根纤维或一个有代表性的体积单元作为一根梁,研究人员获得了基于断裂力学、复合材料力学或能量法^[14-15]的切削力模型。如 A. JAHROMI 等^[14]认识到基于金属切削理论的模型在预测 CFRP 切削力方面存在局限性,故采用能量法预测纤维方向从 $\pi/2$ 到 π 的 UD-CFRP 正交切削力,这促进了 CFRP 微观结构的表征从等效均匀材料向多相材料的转变。如图 3 所示,ABC 三区域的力之和为总切削力,体积单元 RVE₁ 和 RVE₂ 被瞬间切断形成切屑时 RVE₃ 破坏刚开始,因此对 RVE₃ 进行单独分析(图 4)是建立受力预测模型关键, Qi 等^[15]根据这一思想采用能量法和最小势能原理进行了力预测模型的建立。

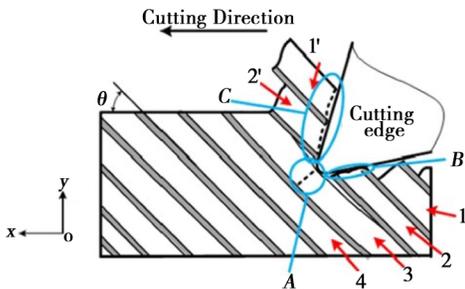


图 3 $0^\circ \leq \theta < Y_a + 90^\circ$ 时单向 CFRP 的正交切削^[15]

Fig. 3 Orthogonal cutting of UD-CFRP at $0^\circ \leq \theta < Y_a + 90^\circ$ ^[15]

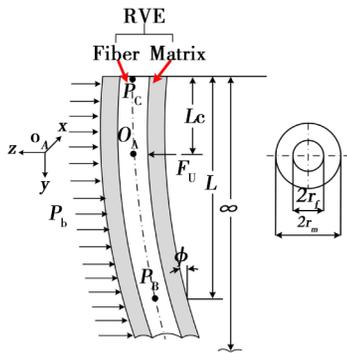


图 4 RVE₃ 载荷分析^[15]

Fig. 4 Load condition of RVE₃^[15]

基于前人研究, CHEN 等^[16]基于弹性基础理论和最小势能原理建立了全范围内 UD-CFRP 正交加工的切削力预测理论模型,模型被分为纤维取向为 0° 到 90° 、 90° 到 180° 和 0° 三部分,但模型中大量的材料参数使得难以在实际环境当中应用。

由上述研究发现, CFRP 数学模型预测主要集中在切削力的建模研究,而针对刀具磨损、加工质量等特定模型研究较少。切削力模型可直观反应加工参数对结果参数影响,并易于结合其他算法优化加工过程,但如何从微观层面去建立简单且能够表征任

意纤维方向的 CFRP 加工过程的切削力模型,仍需深入研究。

1.3 智能模型预测

图 5 所示为基于神经网络的 CFRP 加工预测结构示意图,以机床、刀具、材料等参数为输入,以切削力、分层系数、刀具磨损等为输出,学者们对 CFRP 加工结果进行了准确预测。

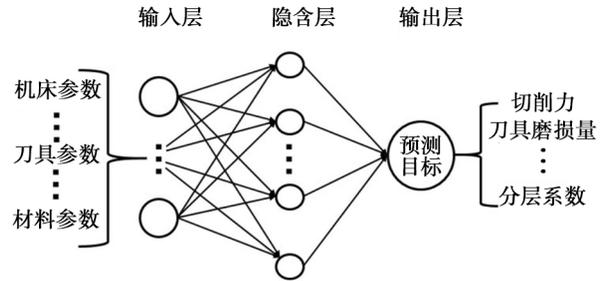


图 5 神经网络预测结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of neural network prediction structure

贾振元等^[17]以纤维方向、切削深度和刀具角度为输入,采用径向基函数神经网络准确预测了 CFRP 切削力,并探讨了基体失效问题。庆华楠等^[18]研究证明将刀具底刃切削的影响考虑进 BP 神经网络预测模型当中,可以进一步提升切削力预测精度。唐宁等^[19]研究发现自适应神经模糊推理系统在预测 CFRP 轴向力方面可能比单一神经网络精度更高。KARNIK^[20]、KRISHNAMOORTHY 等^[21]分别基于人工神经网络实现了 CFRP 钻削入口分层以及出口分层的准确预测,前者以主轴转速、进给速度和钻尖角为输入,高速钻削入口分层系数为输出,后者以主轴转速、钻头尺寸、进给量为输入,出口分层因子为输出且预测结果最大误差为 0.81%,最小误差仅为 0.03%。TSAO 等^[22]使用径向基函数神经网络和多变量回归分析分别探讨了 CFRP 钻削中进给速率、主轴转速和钻头直径与推力和表面粗糙度之间的相关性,通过实验证明采用径向基函数神经网络可以更有效地预测 CFRP 表面粗糙度。

已有研究表明,采用智能预测模型可以解决加工参数与预测目标之间非线性问题,预测精度更好,同时可以根据预测结果,确定最佳参数组合。但由于神经网络的学习复杂性、需要大量实验数据,使得加工成本加大,因此,考虑各种加工因素影响、优化预测模型结构、结合模糊逻辑及支持向量机等其他技术建立更精确的预测模型还需要深入研究。

2 CFRP 切削过程中状态监测

2.1 刀具磨损的监测

如图 6 所示为完整的刀具状态在线监测系统,主要由信号采集、特征提取、模式识别 3 部分组成。

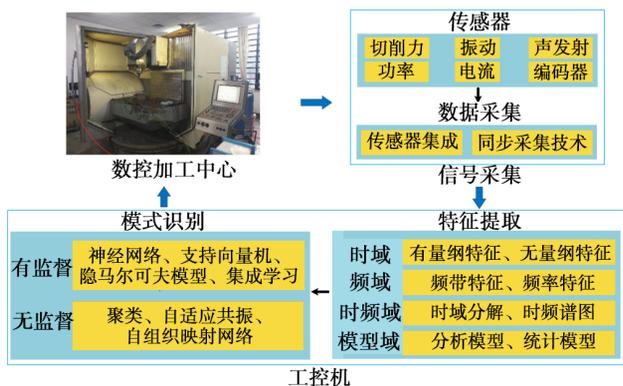


Fig. 6 Intelligent monitoring framework of tool condition^[23]

在状态信息获取方面,由于直接测量的方式受切削液、切屑影响且信号获取难度大,学者采用基于切削力^[24-25]、机械振动^[26-28]、切削温度^[29]、功率/电流^[30]和声发射^[31-35]等间接方法来获取CFRP加工中刀具状态信息,为寻求适合、高质的信息获取方法,国内外学者对以上方法进行了大量验证。LIN等^[24]建立了力信号与刀具磨损及其他切削参数之间的关系,该关系可用于在线钻头侧翼磨损监测,率先表明基于力信号的刀具磨损监测是可行的。FU等^[26]认为切削刀具振动信号的变化可以间接确定刀具磨损程度,采用小波去噪,然后从去噪后信号中得到分形维数,以此寻求和刀具磨损有关的特征量。CHERIF等^[30]通过处理主轴及进给驱动器电流信号获得了和CFRP刀具磨损相关的监测指标。WANG等^[31-35]都采用了声发射来研究CFRP切削中刀具磨损状态,这是因为切削力法存在设备安装困难、振动信号法需要解决噪声及刀具自激振动影响、功率/电流法灵敏性和瞬时响应性较差,而声发射法可以弥补以上方法的不足,实现在线实时监测,因此获得了广泛的应用。

在CFRP加工信号处理方面,主要有分形分

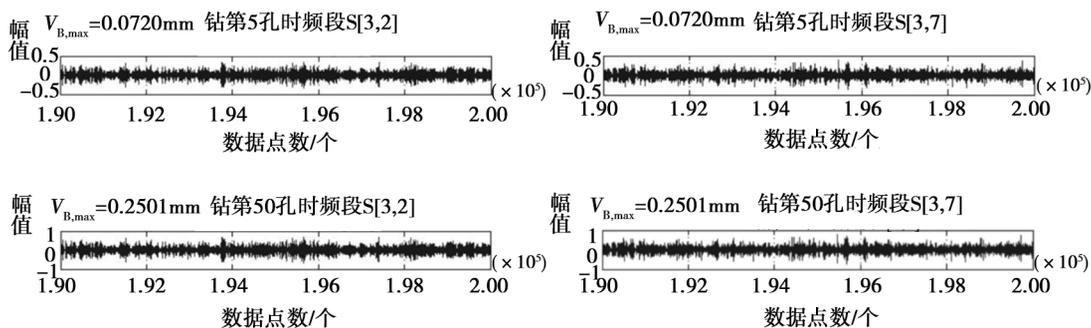


Fig. 9 Wavelet packet decomposition and reconstruction diagram of S[3,2] and S[3,7]^[35]

在刀具磨损监测模型方面,基于人工神经网络、支持向量机(SVM)的研究逐渐展开。CAGGIANO

等^[34]对钻削CFRP的轴向力及绕Z轴扭矩信号进行频域分析,创建了单传感器特征向量和多传感器特

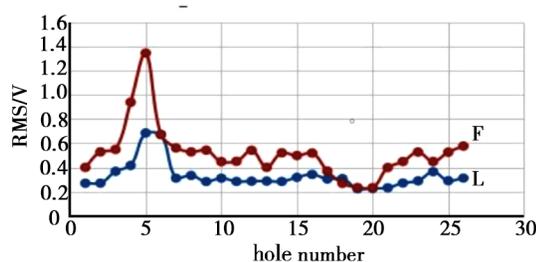


Fig. 7 Changes of RMS value with hole number in CFRP(F) and Ti(L)^[31]

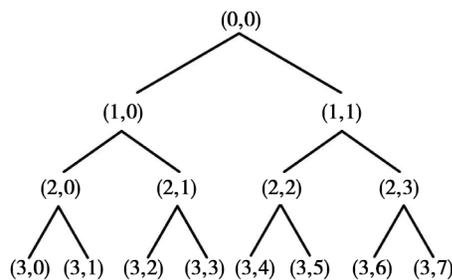


Fig. 8 Wavelet packet tree^[35]

等^[34]对钻削CFRP的轴向力及绕Z轴扭矩信号进行频域分析,创建了单传感器特征向量和多传感器特

征向量,再基于人工神经网络建立了特征向量和刀具磨损之间的监测模型,结果显示人工神经网络能够从多个传感器信号中提取的频率特征,以较高精度重建刀具侧翼磨损曲线,可用于在线监测刀具磨损。宋庆月等^[36]通过分析CFRP钻孔试验结果,得到刀具磨损、进给速度及两者耦合作用下对孔壁粗糙度的影响规律,提出基于参考切削力支持向量机回归识别模块的变切削参数刀具磨损监测方法,进而实现孔壁粗糙度的在线监测。

由上可知,声发射法在CFRP刀具磨损监测方面有很大优势,如何结合神经网络、模糊逻辑等策略建立一个明确的监测模型,还需深入研究。同时,当材料或加工方式发生改变时,所建立的监测模型需要重新研究与刀具磨损状态关联的声发射特征量,如何解决监测模型的通用性,是亟待解决的问题。结合多种信号优势,实现多信号融合,是未来进行磨损监测研究的另一重点。

2.2 加工质量的监测

CFRP无损检测方法如超声、射线、渗透检测以及压力、光纤传感器等,由于检测滞后性、检测信号无特征性^[37]等缺点,属于缺陷形成后的静态检测,无法用于CFRP实时监测。MÖHRING等^[38]通过对比加速度、主轴功率、声发射、空气传播声音和切削力等信号发现,声发射信号和被监测量有更好的相关性,最适用于监测CFRP切削加工质量。这是因为声发射法是实时无损监测,可以动态地对其进行无损评价,根据损伤分布和实时产生的数据,评价损伤区域、损伤类型及损伤程度^[37]。

因此,针对加工中产生的裂纹、分层、纤维断裂等损伤,FENGMING等^[39]提出利用PS-FBG检测的声发射信号来识别,对信号中的两种兰姆波进行时频分析,得到它们之间相对振幅比用于识别CFRP的微观损伤。OLIVERIA等^[40]通过声发射信号和红外热成像技术来监测CFRP对切削过程的响应,表明能量和振幅特征随切削长度而增加,这种关系可以实时监控加工过程,从而估计表面质量和预测缺陷。同样在信号特征提取之后用于监测加工质量的智能模型也成为研究的重点,如上文提到的CAGGIANO^[34],除此之外QIN等^[41]也通过开发人工神经网络模型探讨了CFRP螺旋铣削时分层与过程参数之间的相关性。芦吉云^[42]、贺梦悦等^[43]都采用支持向量机理论对CFRP分层损伤位置、大小进行了研究,所做研究虽不是用于CFRP切削过程中的质量监测,但对CFRP钻、铣等过程中的质量监测提供了参考。

3 CFRP切削过程中智能控制

CFRP切削加工过程是一个高度非线性、时变、宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第2期

不确定性的复杂动态过程,通过对切削力、振动在线智能控制可实现CFRP稳定切削,保护刀具,提升加工质量。

为保持切削力的平稳,传统研究领域如工艺规划^[44]、插补策略或加减速控制,及后来结合鲁棒控制^[45]、滑模控制^[46]、神经网络控制及模糊逻辑控制等智能控制算法的CFRP切削力智能控制研究逐渐展开。国内吴梦培^[47]、黄耀峰等^[48]先后采用神经网络和自适应控制结合方式研究了CFRP加工过程中切削力的控制问题,如图10所示,测力仪测得实际轴向力,通过数据采集与处理将其反馈至控制器,在线调节进给速度,将轴向力控制在临界轴向力之下,以此来减少CFRP钻削过程中的分层现象。

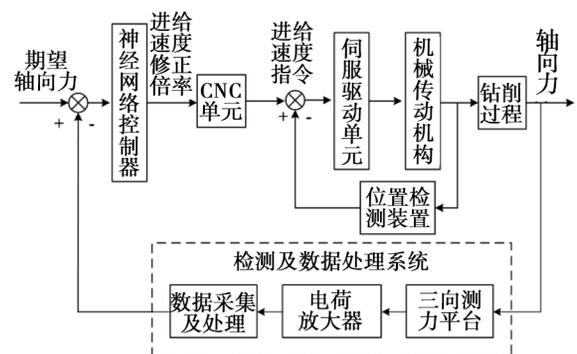


图10 神经网络自适应控制框图^[48]

Fig. 10 Block diagram of neural network adaptive control^[48]

国外早期CHUNG等^[49]提出了模糊逻辑模型和控制策略,将钻孔模型分为入口、中间和出口三个阶段,在中间阶段控制器维持切削力的稳定,在出口处控制器用于降低切削力减少分层,仿真结果表明,模糊控制器调节速度快、超调小且具有很强的鲁棒性。ROMOLI等^[50]基于轴向力以及侧翼磨损测量量的模糊逻辑算法,提出了CFRP钻孔监控策略。如图11所示,采用双重模糊逻辑,第一阶段以轴向力与钻头磨损量作为控制器输入量,将分层诊断作为输出量,可监测钻孔是否发生分层;第二阶段将分层诊断作为输入,将钻孔所需最佳进给速度作为输出并反馈给CNC数控单元,以此来控制钻削力达到分层损伤减少的目的。

除切削力之外,CFRP加工过程中的振动控制也是研究重点。徐玉高等^[51]设计了一种可减少CFRP深孔镗削中镗杆受激振动的导向装置,能有效提升镗孔质量。胡锦涛等^[52]研究发现,在CFRP切削中刀具振动引起的损伤较小,而主轴振动传至刀具使得刀具振动加剧从而使纤维破碎、纤维与基体界面出现分层。因此,机床的在线颤振抑制对CFRP的加工尤为重要,国内外基于智能控制方法的在线颤振抑

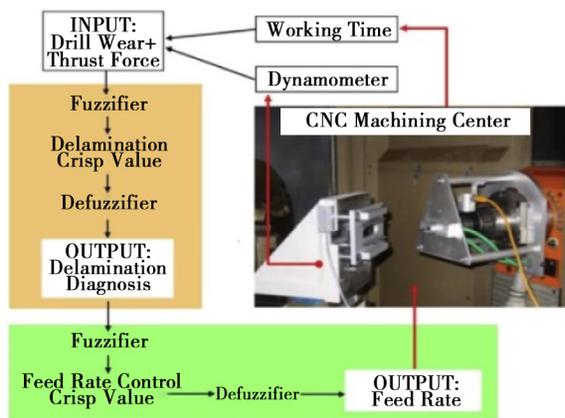


图 11 模糊逻辑控制系统原理图^[50]

Fig. 11 Schematic diagram of fuzzy control system^[50]

制研究已有很多,如 KUBICA^[53]、LIANG^[54]等分别在圆周铣削、端铣过程中采用模糊控制方法对颤振进行了有效抑制,从而大大提升了加工过程的稳定性。如何根据 CFRP 加工特性结合各种智能控制算法来实现加工过程中振动的智能控制,将会是 CFRP 未来研究的新方向。

由上可见,以神经网络控制和模糊控制为代表的智能控制方法可实现 CFRP 切削过程的智能调整,从而保证系统的稳定性提升加工质量,但如何解决模糊控制、神经网络控制等智能控制算法自身缺陷,加强智能控制方法与加工系统的集成还需深入研究。

4 结语

(1)在 CFRP 预测研究方面,基于微观有限元模型的加工过程物理仿真能更好的诠释材料去除机理、切屑形成原因、切削热传递以及纤维、基体损伤演化等诸多方面,微宏观有限元模型则能够兼顾仿真预测精度以及有限元计算效率,是后期研究重点。其次,基于 CFRP 微观切削机理建立精确切削力数学模型的同时还应展开有关刀具磨损、振动以及加工质量模型方面的研究。此外,结合人工智能技术建立更准确的智能预测模型还需要深入研究。

(2)CFRP 切削过程中刀具磨损、加工质量的监测需从状态信息获取、特征信息提取以及监测模型建立三方面展开研究。结合多种信号优势,实现多信号融合,获得满足实际加工中鲁棒性要求的传感器信号,是未来进行 CFRP 在线状态监测研究的前提。其次,还应借助先进信号处理技术及人工智能手段,深入研究传感器信号和 CFRP 加工过程状态之间的内在机理及映射关系。

(3)CFRP 加工中切削力、颤振的智能控制可实现 CFRP 稳定切削、降低分层等缺陷的产生。在线控制技术涉及在线数据处理,优化算法,实时驱动等关键技术,如何结合 CFRP 自身加工特性,建立准确智

能的控制系统,是未来研究的重点。

参考文献

[1] 陈燕,葛恩德,傅玉灿,等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 301-316.

CHEN Y, GE E D, FU Y C, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 301-316.

[2] GEIER N, DAVIM J P, SZALAY T. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites: a review [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 125: 1-31.

[3] GENG D, LIU Y, SHAO Z, et al. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: a review[J]. Composite Structures, 2019, 216: 168-186.

[4] 付鹏强,蒋银红,王义文,等. CFRP 制孔加工技术的研究进展与发展趋势[J]. 航空材料学报, 2019, 39(6): 32-45.

FU P Q, JIANG Y H, WANG Y W, et al. Research progress and perspective trend of drilling technology for carbon fiber reinforced polymer [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(6): 32-45.

[5] 王春浩,李鹏南,李树健,等. CFRP 钻削加工过程的分层缺陷研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2019(6): 109-115.

WANG C H, LI P N, LI S J, et al. Research progress on delamination defect in CFRP cutting process [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019(6): 109-115.

[6] 刘献礼,刘强,岳彩旭,等. 切削过程中的智能技术[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 45-61.

LIU X L, LIU Q, YUE C X, et al. Intelligent machining technology in cutting process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 45-61.

[7] 路冬,李志凯,融亦鸣,等. 基于宏观各向异性碳纤维增强树脂基复合材料的切削仿真[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 584-590.

LU D, LI Z K, RONG Y M, et al. Cutting simulation of carbon fiber reinforced resin matrix composite material based on macroscopic anisotropy [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 584-590.

[8] 秦旭达,唐心凯,葛恩德,等. CFRP 三维铣削仿真模型建立及层间损伤分析[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(1): 22-29.

QIN X D, TANG X K, GE E D, et al. Establishment of 3D milling simulation model for CFRP and analysis of interlaminar damage [J]. Aerospace Materials and Technology, 2020, 50(1): 22-29.

[9] CALZADA K A, KAPOOR S G, DEVOR R E, et al. Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced polymer

composites [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(2): 141-149.

[10] 齐振超,刘书暖,程晖,等. 基于三维多相有限元的CFRP细观切削机理研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(15): 170-176.

QI Z C, LIU S N, CHENG H, et al. Research on the mesoscopic cutting mechanism of CFRP based on three-dimensional multiphase finite element models [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(15):170-176.

[11] RENTSCH R, PECA T O, BRINKSMEIER E. Macro and micro process modeling of the cutting of carbon fiber reinforced plastics using FEM [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 1823 - 1828.

[12] 段春争,李朋欣. 刀具材料对CFRP铣削力影响[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(2): 116-118.

DUAN C Z, LI P X. Influence of tool materials on milling force of CFRP [J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2018(2): 116-118.

[13] MENG Q, ZHANG K, CHENG H, et al. An analytical method for predicting the fluctuation of thrust force during drilling of unidirectional carbon fiber reinforced plastics [J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(6): 699-711.

[14] JAHROMI A S, BAHR B. An analytical method for predicting cutting forces in orthogonal machining of unidirectional composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(16): 2290-2297.

[15] QI Z, ZHANG K, CHENG H, et al. Microscopic mechanism based force prediction in orthogonal cutting of unidirectional CFRP [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(5-8): 1209-1219.

[16] CHEN L, ZHANG K, CHENG H, et al. A cutting force-predicting model in orthogonal machining of unidirectional CFRP for entire range of fiber orientation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(1-4): 833-846.

[17] 贾振元,宿友亮,张博宇,等. 基于径向基函数神经网络的CFRP切削力预测[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(3): 516-524.

JIA Z Y, SU Y L, ZHANG B Y, et al. Prediction of cutting force in CFRP based on radial basis function neural network [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, (33):516-524.

[18] 庆华楠,和延立,张圣光,等. 考虑刀具底刃切削的CFRP铣削力精确建模研究[J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(4):560-567.

QIN H N, HE Y L, ZHANG S G, et al. Research on precise modeling of CFRP milling force considering bottom edge of tool [J]. *Mechanical Science and Technology*. 2018, 37(4): 560-567.

[19] 唐宇,张军,李原,等. 基于ANFIS的CFRP轴向钻削力预测[J]. *航空制造技术*, 2012, 415(19): 67-69.

TANG N, ZHANG J, LI Y, et al. Modeling of thrust force in drilling of CFRP based on ANFIS [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*. 2012, 415(19): 67-69.

[20] KARNIK S R, GAITONDE V N, RUBIO J C, et al. 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第2期

Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model [J]. *Materials & Design*, 2008, 29(9): 1768-1776.

[21] KRISHNAMOORTHY A, BOOPATHY S R, PALANIKUMAR K. Delamination prediction in drilling of CFRP composites using artificial neural network [J]. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2011, 6(2): 191-203.

[22] TSAO C C, HOCHENG H. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 203(1-3): 342-348.

[23] 王国锋,李志猛,董毅. 刀具状态智能监测研究进展[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(6): 16-23.

WANG G F, LI Z M, DONG Y. Recent advances in intelligent monitoring of cutting tool condition [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018 (6): 16-23.

[24] LIN S C, TING C J. Tool wear monitoring in drilling using force signals[J]. *Wear*, 1995, 180(1-2): 53-60.

[25] RIMPAULT X, CHATELAIN J F, KLEMBERG-SAPIEHA J E, et al. Tool wear and surface quality assessment of CFRP trimming using fractal analyses of the cutting force signals [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, 16: 72-80.

[26] FU P, LI W L, ZHU L Q. Cutting tool wear monitoring based on wavelet denoising and fractal theory [C]//*Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 48: 349-352.

[27] KABALDIN Y G, SERYS V, PROSOLOVICH A V, et al. Improving the stability of cutting on the basis of fractal, dimensional, and wavelet analysis [J]. *Russian Engineering Research*, 2010, 30(6): 587-595.

[28] CHIBANE H, MORANDEAU A, SERRA R, et al. Optimal milling conditions for carbon/epoxy composite material using damage and vibration analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5-8): 1111-1121.

[29] SORRENTINO L, TURCHETTA S, BELLINI C. In process monitoring of cutting temperature during the drilling of FRP laminate [J]. *Composite Structures*, 2017, 168: 549-561.

[30] CHERIF M, LEGRAND P, et al. Sensor less monitoring of CFRP drilling [C]. 2008: 275-278.

[31] WANG Z, LENG S, MIN T, et al. Analysis of AE characteristics of tool wear in drilling CFRP/Ti stacked material [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 211:03001.

[32] LENG S, WANG Z, MIN T, et al. Detection of tool wear in drilling CFRP/TC4 stacks by acoustic emission [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2020, 8(3): 463-470.

[33] 谢小明,冷晟,徐青,等. 复合叠层材料制孔刀具声发射特征分析[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(5): 70-74.

XIE X, LENG S, XU Q, et al. Analysis of acoustic emission characteristics during drilling composite laminated material [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018 (5): 70-74.

- [34] CAGGIANO A, NELE L. Artificial neural networks for tool wear prediction based on sensor fusion monitoring of CFRP/CFRP stack drilling [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2018, 12(3):275-281.
- [35] 黄文亮,李鹏南,邱新义,等. 基于声发射CFRP加工刀具磨损及孔出口损伤研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018,01:51-56.
- HUANG W L, LI P N, QIU X Y, et al. Tool wear and hole exit damage in drilling CFRP based on acoustic emission [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018 (1): 51-56.
- [36] 宋庆月. 复合材料钻削表面粗糙度在线监测与控制研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- SONG Q Y. Research on on-line monitoring and control of surface roughness in composite drilling [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [37] 黄展鸿,黄春芳,张鉴炜,等. 声发射技术在纤维增强复合材料损伤检测和破坏过程分析中的应用研究进展[J]. *材料导报*, 2018(7):1122-1128.
- HUANG Z H, HUANG C F, ZHANG J W, et al. Acoustic emission technique for damage detection and failure process determination of fiber-reinforced polymer composites: an application review [J]. *Materials Review*, 2018 (7): 1122-1128.
- [38] MÖHRING H C, ESCHELBACHER S, KIMMELMANN M. Material failure detection for intelligent process control in CFRP machining [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 77: 387-390.
- [39] FENGMING Y U, OKABE Y, QI W U, et al. Damage type identification based on acoustic emission detection using a fiber-optic sensor in carbon fiber reinforced plastic laminates [J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2016, 33: 271-278.
- [40] OLIVERIA T L L, ZITOUNE R, JR A C A, et al. Smart machining: monitoring of CFRP milling using AE and IR [J]. *Composite Structures*, 2020:112611.
- [41] QIN X, WANG B, WANG G, et al. Delamination analysis of the helical milling of carbon fiber-reinforced plastics by using the artificial neural network model [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(2): 713-719.
- [42] 芦吉云,王帮峰,梁大开. 基于小波包特征提取及支持向量回归机的光纤布拉格光栅冲击定位系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 712-718.
- LU J Y, WANG B F, LIANG D K. Identification of impact location by using FBG based on wavelet packet feature extraction and SVR [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 712-718.
- [43] 贺梦悦,梁智洪,张芝芳. 基于支持向量机的碳纤维增强复合材料梁的分层损伤识别[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018 (7):12-18.
- HE M Y, LIANG Z H, ZHANG Z F, et al. Delamination identification of composite laminated beams based on support vector machine [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018 (7):12-18.
- [44] ERKORKMAZ K, LAYEGH S E, LAZOGLU I, et al. Feed-rate optimization for free form milling considering constraints from the feed drive system and process mechanics [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 395-398.
- [45] DAVIS T A, SHIN Y C, YAO B. Adaptive robust control of machining force and contour error with tool deflection using global task coordinate frame [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 2018, 232(1): 40-50.
- [46] ZHU W H, JUN M B, ALTINTAS Y. A fast tool servo design for precision turning of shafts on conventional CNC lathes [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(7): 953-965.
- [47] 吴梦培. CFRP制孔过程中的轴向力分析及自适应控制器研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.
- WU M P. Analysis of thrust force and research on adaptive controller in CFRP drilling process [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [48] 黄耀峰. CFRP钻径向孔有限元分析及神经网络控制器研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.
- HUANG Y F. Finite element analysis and research on neural network controller in CFRP drilling radial hole [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [49] CHUNG B M, SHENG Y, TOMIZUKA M. Fuzzy logic modeling and control for drilling of composite laminates: simulation [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2001, 2(1): 11-17.
- [50] ROMOLI L, LUTEY A H A. Quality monitoring and control for drilling of CFRP laminates [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 40: 16-26.
- [51] 徐玉高,程寓,倪玉晋. 一种用于CFRP深孔镗削的阻尼导向头的研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2016 (6):121-123.
- XU Y G, CHENG Y, NI Y J. Study on a guiding device design with friction damping for deep-hole boring of CFRP [J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing technique*, 2016(6):121-123
- [52] 胡锦涛,苑泽伟,庄朋. 刀具振动对精密切割碳纤维增强树脂复合材料影响[J]. *机械设计*, 2019, 36(1):89-93.
- HU J T, YUAN Z W, ZHUANG P. Influence of tool vibration on precision cutting carbon fiber reinforced plastic composites [J]. *Mechanical Design*, 2019, 36(1):89-93.
- [53] KUBICA E G, ISMAIL F. Active suppression of chatter in peripheral milling. Part II. Application of fuzzy control [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1996, 12 (4):236-245.
- [54] LIANG M, YEAP T. HERMANSY AH A. A fuzzy system for chatter suppression in end milling [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2004, 218 (4):403-417.