基于逆滤波原理的铣削力补偿研究

侯马骁¹,曹宏瑞¹,史江海¹,任军旗² 1.西安交通大学 精密微纳制造技术全国重点试验室,陕西西安 710049 2.中国航发西安动力控制科技有限公司,陕西西安 710077

摘 要:铣削力是航空零件加工过程中的重要参数,影响着零件表面质量和刀具寿命。针对台式测力仪在高频段测量失真 的问题,本文基于逆滤波原理对实测铣削力进行补偿。首先,针对测力仪系统的结构和动态特性,对铣削力测量误差进行分 析。然后,介绍了逆滤波的原理及其在铣削力补偿中的应用。此外,选择航空等领域有着广泛应用的6061 铝合金开展了铣 削试验,利用逆滤波进行铣削力补偿,分析了补偿后铣削力的特性。最后,通过激振器试验和位移信号高频标定试验,验证 了铣削力补偿的必要性和准确性。试验结果表明,激振器输入力与补偿力的误差指标 EVE 低于6%,位移信号辨识铣削力 与补偿铣削力的误差为5.49%,所提铣削力补偿方法可以准确补偿航空等领域零件加工过程中的铣削力。

关键词:6061铝合金; 铣削力; 误差分析; 补偿; 试验验证

中图分类号:V26

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.12.013

航空工业对复杂精密零件(如航空发动机叶片、整体叶 轮、机匣等)高速高效铣削加工日益增长的需求,促使主轴 的速度、精度、可靠性等性能指标向更高的水平发展,从而 达到更高的铣削速度和效率。智能主轴是新一代高端智能 机床的核心功能部件,也是未来主轴的发展方向。铣削力 感知是智能主轴的重要功能之一^[1]。加工过程中的铣削力 影响着航空零件的表面质量、刀具的使用寿命和主轴的动 态性能。因此,监测加工过程中准确的铣削力对航空零件 加工精度和效率的提升至关重要。

目前,多种传感器用于测量航空零件加工过程中的铣 削力^[2-4]。大部分研究团队选择不影响主轴动态特性的台 式测力仪^[5-6]来测量铣削力。然而,测力仪的结构和动态特 性可能会使得测量结果存在误差。因此,对测量铣削力的 补偿十分有必要。

一些有前景的铣削力测量和预测方法也被大量研究。 利用电流信号^[7-8]、位移信号^[9-10]以及加速度信号^[11-12]来对 铣削力进行间接辨识。罗明等^[13]将 PVDF嵌入刀具中,在 不改变加工系统的动态特性下,对每个独立刀片所受的铣 削力进行估算。Altintas等^[14]考虑了剪切力和犁切力的作 用,在铣削力解析模型中做了大量的工作。然而,无论是间 接辨识、创新的传感元件还是铣削力模型,都需要准确的铣 削力来验证结果的正确性。这是测量铣削力需要补偿的另 一个主要原因。

针对台式测力仪在高频段测量失真问题,普遍采用增 广Kalman滤波方法来对测量的铣削力进行补偿。Scippa 等^[15]将增广卡尔曼滤波应用到测力仪测量中,用于补偿失 真的铣削力。尽管增广Kalman滤波在干扰情况下表现出 较好的补偿效果,但这种方法需要已知过程干扰的先验知 识。观测器引入1₁/H_∞性能指标降低了对过程干扰先验知识 的需要^[16]。滑膜观测器^[17]的引入,克服了需要已知过程干 扰先验知识的难题。然而,增广Kalman滤波和观测器方法 补偿铣削力的准确性,都依赖于状态空间方程中的参数矩 阵。状态空间方程中的参数矩阵是通过拟合传递函数得到 的,这样势必会影响某些频率下铣削力补偿的准确性。通 过测量的频响函数和逆滤波可以克服上述问题。此外,很 少有研究通过试验来验证补偿的铣削力是否准确。

本文基于逆滤波原理来对测量的铣削力进行补偿。针 对台式测力仪系统结构和动态特性,对铣削力测量误差的 原因进行分析。在此基础上,将逆滤波应用于铣削力补偿。 最后,利用激振器试验和位移信号高频标定试验,来验证铣

收稿日期:2024-04-30;退修日期:2024-08-05;录用日期:2024-10-09 基金项目:航空科学基金(2022Z072070002)



引用格式: Hou Maxiao, Cao Hongrui, Shi Jianghai, et al. Research on milling force compensation based on inverse filtering[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(12):103-110. 侯马骁, 曹宏瑞, 史江海, 等. 基于逆滤波原理的铣削力补偿研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(12):103-110.

削力补偿的必要性和准确性,为航空等领域零件加工过程 中的铣削力准确获取,提供了切实可行的思路。

1 铣削力测量误差分析

图1是在加工航空零件过程中,测力仪测量铣削力的 示意图。从图1可以看出,铣削加工过程中,测量的铣削力 为刀具和航空零件的相互作用力。然而,台式测力仪输出 的是航空零件和测力仪之间的相互作用力。根据测力仪系 统结构可知,铣削力通过航空零件和螺栓传递给测力仪。 因此,测力仪并不是直接测量真实的铣削力。理想情况下 (航空零件刚度足够大,螺栓连接足够紧密),测力仪测量的 力等于真实的铣削力。实际加工中,这种理想情况很难保 证。因此,对测力仪测量的铣削力进行补偿在实际加工中 十分有必要。



图1 测力仪系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the dynamometer system

本文采用测力仪(见图2)来说明铣削力测量误差的原因。从图2可以看出,航空零件与测力仪通过10个螺栓连接,测力仪通过4个螺栓固定在工作台上。整个测力仪系统的输入为铣削力F_{eut},输出为测量力F_{mea}。铣削力和测量力之间的传递函数如下所示



图 2 测力仪系统 Fig.2 Dynamometer system

$$G(s) = \frac{F_{\text{mea}}(s)}{F_{\text{cut}}(s)} \tag{1}$$

式中,*G*(*s*)为测力仪系统的传递函数,*F*_{mea}(*s*)为测量力时域 信号的拉氏变换,*F*_{eut}(*s*)为铣削力时域信号的拉氏变换。

测力仪系统的测量力-铣削力频响函数可以通过锤击 试验(见图3)获得。加工零件材料选择在航空等领域有着 广泛应用的6061铝合金。力锤(灵敏度为1.1mV/N)用于产 生激励力,数据采集装置(采样频率设置为10240Hz)用于 记录激励力和响应力并计算得到频响函数。



图 3 测力仪系统的锤击试验 Fig.3 Hammer test of the dynamometer system

通过多次锤击试验得到的频响函数如图4所示。从图 4可以看出,当频率处于0~500Hz范围内,两个方向的频响 函数幅值接近1。随着频率的增加,频响函数的幅值发生了 较大的变化。因此,对测量的铣削力进行补偿十分有必要。 铣削力失真现象并非该型号测力仪特有现象,实际上测力 仪系统测量结果受其本身动态特性的影响是广泛存在的。 测量的铣削力失真,势必会影响航空零件在铣削加工过程 中监控技术的可靠性。





2 逆滤波原理及应用

2.1 逆滤波原理

逆滤波^[18]是一种信号处理技术,通过反卷积操作,可以 近似原始信号的恢复结果。这种技术在通信^[19]、声音处 理^[20]以及图像处理^[21]等领域应用广泛。反卷积通常是通过 输出信号的傅里叶变换和频响函数,在频域中求得输入信 号。频域中的输入信号通过傅里叶逆变换得到时域中的输 入信号。

在铣削力补偿中,输入信号为铣削力,输出信号为测力 仪的测量力,频响函数为测力仪系统的频响函数。

首先,通过锤击试验获得测力仪系统*X*和*Y*方向上的 频响函数。然后,将测量力进行傅里叶变换。最后,直接除 以测力仪系统的频响函数,即

$$F_{\rm cut}(i\omega) = \frac{F_{\rm mea}(i\omega)}{H_{\rm f}(i\omega)}$$
(2)

其中

 $\begin{aligned} \boldsymbol{F}_{cut}(i\omega) &= [F_{cutx}(i\omega), F_{cuty}(i\omega)]^{T} \\ \boldsymbol{F}_{mea}(i\omega) &= [F_{meax}(i\omega), F_{meay}(i\omega)]^{T} \\ \boldsymbol{H}_{f}(i\omega) &= \begin{bmatrix} H_{fxx}(i\omega) & H_{fxy}(i\omega) \\ H_{fyx}(i\omega) & H_{fyy}(i\omega) \end{bmatrix} \end{aligned}$ (3)

式中, $F_{eut}(i\omega)$ 为铣削力频域信号矢量, $F_{mea}(i\omega)$ 为测量力频域信号矢量, $H_{f}(i\omega)$ 为频响函数矩阵。

本文主要研究径向铣削力的补偿,不涉及轴向铣削力。 $H_{fy}(i\omega)和H_{fx}(i\omega)表示频响函数在X和Y方向之间的耦合$ $关系。以X方向为例,通过锤击试验获得的<math>H_{fy}(i\omega)$ 如图5 所示。





Fig.5 Amplitude of the coupled frequency response function in the *X* and *Y* directions of the dynamometer system

测力仪系统中的*Y*方向对*X*方向和*X*方向对*Y*方向的 耦合效应较小,可以忽略不计。

将式(2)简化为

$$F_{\text{cutr}}(i\omega) = \frac{F_{\text{mear}}(i\omega)}{H_{\text{fxr}}(i\omega)}$$

$$F_{\text{cuty}}(i\omega) = \frac{F_{\text{mear}}(i\omega)}{H_{\text{fyr}}(i\omega)}$$
(4)

通过式(4)可得到铣削力的频域信号,然后利用傅里叶 逆变换即可得到补偿后的铣削力,整个铣削力补偿流程如 图6所示。



inverse filtering

2.2 逆滤波应用

在三轴机床^[22]上进行铣削试验,来验证逆滤波补偿铣 削力的有效性。铣削过程中并未发生颤振及刀具磨损^[23]。 铣削试验所用装置如图7所示。



图7 铣削试验装置 Fig.7 Milling setup

刀具的参数见表1,数据采集装置的采样频率设置为 10240Hz,铣削加工参数见表2。利用逆滤波补偿铣削力的 结果如图8和图9所示。所提方法耗时0.449ms完成了对 测量0.5s的铣削力进行补偿。由图8和图9可知,经过补偿 后,以500Hz为分割线,铣削力高频成分幅值降低较大,低 频成分略有上升。如图4所示,频率低于500Hz范围内频 响函数幅值略小于1,频率高于500Hz范围内频响函数大于 1。补偿后的铣削力成分主要集中在刀齿通过频率f_c,与铣

表1 铣刀参数 Table 1 Milling tool parameters

齿数	直径/mm	悬长/mm	刃长/mm
3	10	60	40

		Table 2	Milling para	Milling parameters		
铣削条件	转速/(r/min)	径向	轴向	每齿		
		切深/mm	切深/mm	进给量/mm		
	1	4000	3	1	0.040	
	2	5000	3	1	0.032	

铣削加工参数

表2







Fig.9 Compensation results for the measured milling force under milling condition 2



$$f_{\rm c} = \frac{\Omega N}{60} \tag{5}$$

式中, 2为主轴转速; N为铣刀齿数。

3 试验验证

本节分别利用激振器试验和位移信号高频标定试验, 来验证铣削力补偿的必要性和准确性,这在相关研究中很 少出现。

3.1 激振器试验

激振器试验装置如图 10 所示。其中,信号发生器产生 特定频率(800Hz 和 1200Hz)的电压,正弦电压通过功率放 大器输入激振器中,激振器产生正弦激励,该正弦激励力的 大小由动态力传感器测量并且施加到航空零件上。



图 10 激振器试验 Fig.10 Shaker experiment

利用逆滤波和测力仪系统频响函数,对测量力进行补偿。测量力、输入力以及补偿力的结果如图 11 和图 12 所示。

从图 11 和图 12 可以看出,测量力与输入力有较大误





差。测量力在高频段存在严重的失真现象,这与第1节铣 削力测量误差分析的结论一致。利用第2节所介绍的逆滤 波对测量力进行补偿。补偿力与输入力几乎一致。为了更 直观地表示补偿力与输入力之间的误差,采用如下量化 指标

$$EVE = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\tau}} \left(\frac{\left| F_{imax}^{com} - F_{imax}^{in} \right|}{\left| F_{imax}^{in} \right|} + \frac{\left| F_{imin}^{com} - F_{imin}^{in} \right|}{\left| F_{imin}^{in} \right|} \right)}{2N_{\tau}}$$
(6)

式中,N_T为计算周期数,Fⁱⁿ_{imax}和Fⁱⁿ_{imin}分别为第i个周期输入 力的最大值和最小值,F^{com}和F^{com}分别为第i个周期补偿 力的最大值和最小值。

输入力和补偿力的误差结果见表3。由表3可知,输入 力和补偿力之间的误差指标EVE均低于6%,验证了测量力 补偿的准确性。此外,也说明了补偿铣削力的必要性。

表3 输入力和补偿力误差分析 Table 3 Input force and compensated force error analysis

频率	800Hz		1200Hz	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
EVE	5 18%	5.00%	3 67%	5.95%

3.2 位移信号高频标定试验

利用激振器试验来验证铣削力补偿的必要性和准确 性,是将铣削力近似为某一频率下的输入力。本节提出基 于位移信号的高频标定方法来验证铣削力补偿结果的必要 性和准确性。基于刀柄/刀杆位移信号进行铣削力辨识是 一种较为准确的方法,受限于位移传感器在实际加工中易 受切削液等干扰而难以应用。本节将该方法应用于验证铣 削力补偿结果的准确性。

利用逆滤波,得到某一频率位移信号对应的铣削力,具体公式如下

$$F_{\rm cut}(i\omega) = \frac{X(i\omega)}{H_{\rm dis}(i\omega)} \tag{7}$$

式中, $F_{cut}(i\omega)$ 为频率为 ω 的铣削力, $F_{cut}(i\omega)$ 为频率为 ω 的 位移, $H_{dis}(i\omega)$ 为频率为 ω 的位移频响函数。

试验所需装置如图13所示,其中位移传感器测量刀柄 处*X*和*Y*方向的位移信号。



图 13 位移信号高频标定试验 Fig.13 High frequency calibration experiment of displacement signal

通过锤击试验得到位移频响函数H_{dis}(*iω*)。X方向的位 移频响函数如图14所示。位移信号高频标定试验的铣削 加工参数见表4。

本节以X方向为例,测力仪测量X方向的铣削力如图 15所示。铣削加工过程中的位移信号主要由两部分组成: 空转位移和铣削力导致的位移。因此,采集一段时间的空 转位移信号是必要的。铣削加工时,X方向的位移信号如 图16所示。

选择1200Hz作为验证频率,各信号在1200Hz下的频 率成分见表5。将表5的参数代入式(4)和式(7)中,得到补 偿后的铣削力和位移信号辨识的铣削力,具体数值见表6。



Fig.14 Amplitude of displacement frequency response function in *X* direction

表4 位移信号高频标定试验的铣削加工参数 Table 4 Milling parameters for high frequency calibration test of displacement signal









从表6可以看出,未补偿的铣削力与位移信号辨识的铣削 力相差较大,这说明了补偿铣削力的必要性。补偿后的铣 削力与位移信号辨识的铣削力几乎一致(误差为5.49%), 这说明了补偿铣削力的准确性。

表5 各信号在1200Hz下的频率成分

	i requeriey (or outer eig	
频率/Hz	铣削位移/m	空转位移/m	铣削力/N	位移频响/(m/N)
1200	1.36×10 ⁻⁶	1.201×10-7	19.17	4.536×10 ⁻⁷

表6 铣削力在1200Hz下的频率成分对比 Table 6 Comparison between frequency components of milling forces at 1200Hz

频率/Hz	补偿前/N	补偿后/N	辨识铣削力/N	误差/%
1200	19.17	2.58	2.73	5.49

4 结论

针对台式测力仪测量航空零件加工过程中铣削力失真 的问题,利用逆滤波对实测铣削力进行补偿。通过激振器 试验和位移信号高频标定试验,验证了补偿铣削力的必要 性和准确性。通过研究,得出以下结论:

(1)通过研究台式测力仪系统结构和动态特性,对铣削 力测量误差的原因进行分析。在此基础上引入了逆滤波, 对测量的铣削力进行补偿。

(2)通过比较动态力传感器和台式测力仪的测量结果, 验证了补偿铣削力的必要性。使用逆滤波补偿的力与动态 力传感器测量力的误差指标 EVE 低于 6%,验证了补偿铣削 力的准确性。

(3)在实际铣削条件下,提出了基于位移信号高频标定 的补偿结果验证方法。该方法通过位移频响函数和位移信 号,来辨识铣削力。试验结果表明,辨识的铣削力与测量的 铣削力相差较大,辨识的铣削力与补偿后的铣削力误差为 5.49%,这验证了实际铣削条件下补偿铣削力的必要性和准 确性。

本文为准确获取航空等领域零件加工过程中的铣削力 提供了新的思路,并用大量试验验证了所提方法的必要性 和准确性。

参考文献

- Cao Hongrui, Zhang Xingwu, Chen Xuefeng. The concept and progress of intelligent spindles: a review[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2017, 112: 21-52.
- [2] Yaldiz S, Unsacar F, Saglam H, et al. Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2007, 21(3): 1499-1511.
- [3] Gomez M F, Schmitz T L. Displacement-based dynamometer for milling force measurement[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 34: 867-875.
- [4] Subasi O, Yazgi S G, Lazoglu I. A novel triaxial optoelectronic based dynamometer for machining processes[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 168-177.
- [5] Gautschi G H. Cutting forces in machining and their routine measurement with multi-component piezo-electric force transducers[C]. Proceedings of the 12th International Machine Tool Design and Research Conference, 2016.
- [6] Jullien A, Ahmadi K. Measurement of high-frequency milling forces using piezoelectric dynamometers with dynamic compensation[J]. Precision Engineering, 2020, 66: 1-9.
- [7] Altintas Y. Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurements[J]. Transactions

of the ASME Journal of Engineering for Industry, 1992, 114 (4): 386-392.

- [8] 李斌,张琛,刘红奇.基于主轴电流的铣削力间接测量方法研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 5-7.
 Li Bin, Zhang Chen, Liu Hongqi. Indirect measurement of the milling forces based on spindle motor current[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(3): 5-7. (in Chinese)
- [9] Albrecht A, Park S S, Altintas Y, et al. High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(9): 993-1008.
- [10] 朱坚民, 王健, 张统超, 等. 基于刀具振动位移的动态铣削力 测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2772-2782.
 Zhu Jianmin, Wang Jian, Zhang Tongchao, et al. Dynamic milling force measuring method based on cutting tool vibration displacement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 2772-2782. (in Chinese)
- [11] Li Qi, Hou Maxiao, Cao Hongrui. Online identification of milling forces using acceleration signals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127: 4491-4501.
- [12] Hou Maxiao, Cao Hongrui, Li Qi, et al. Dynamic force identification in milling based on IRLS using acceleration signals[J]. Measurement, 2023, 217: 113096.
- [13] Luo Ming, Luo Huan, Axinte D, et al. A wireless instrumented milling cutter system with embedded PVDF sensors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 110: 556-568.
- [14] Altintas Y, Yellowley I. In-process detection of tool failure in milling using cutting force models[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1989, 111(2): 149-157.
- [15] Scippa A, Sallese L, Grossi N, et al. Improved dynamic compensation for accurate cutting force measurements in milling applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 54-55: 314-324.
- [16] Hou Maxiao, Shi Jianghai, Cao Hongrui, et al. Dynamic Compensation of Distorted Measured Forces Using Improved Luenberger Observer[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024, 229(3): 2385-2395.

- [17] 顾子箫, 赵振华, 闻子侠, 等. 基于滑模观测器的飞翼无人机 输出 反馈控制[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 75-82.
 Gu Zixiao, Zhao Zhenhua, Wen Zixia, et al. Sliding mode observer based output feedback controller design of flying wing UAV[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34 (12): 75-82. (in Chinese)
- [18] 李东兴, 赵剡, 许东. 基于非负支持域递归逆滤波技术的湍流 退化图像复原算法[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2062-2067.
 Li Dongxing, Zhao Yan, Xu Dong. Restoration algorithms based on the nonnegativity and support constraints recursive inverse filtering technique for the turbulence degraded images[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 2062-2067. (in Chinese)
- [19] 李瑞,朱梦韬,李云杰.基于逆滤波处理的雷达干扰效果在线 评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(9): 2706-2717.
 Li Rui, Zhu Mengtao, Li Yunjie. Online evaluation method of radar jamming effect based on inverse filtering processing[J].
 System Engineering and Electronics, 2023, 45(9): 2706-2717. (in Chinese)
- [20] 马骁晨, 李建龙, 宋昊, 等. 声学覆盖层吸声系数的多通道逆 滤波测量[J]. 声学学报, 2019, 44(4): 726-734.
 Ma Xiaochen, Li Jianlong, Song Hao, et al. Measurement of the absorption coefficient for acoustical coating samples using multichannel inverse filter[J]. Acta Acustica, 2019, 44(4): 726-734. (in Chinese)
- [21] 陈黎艳, 熊强强, 曾美琳. 基于改进逆滤波的红外图像目标信息快速复原研究[J]. 激光杂志, 2022, 43(8): 164-168.
 Chen Liyan, Xiong Qiangqiang, Zeng Meilin. Research on rapidrestoration of infrared image target information based on improved inverse filtering [J]. Laser Journal, 2022, 43(8): 164-168. (in Chinese)
- [22] 苗迪迪, 郑达, 郑侃, 等. 旋转超声铣削钛合金残余应力及疲 劳试验研究智能主轴高速铣削颤振的模糊控制方法[J]. 航空 科学技术, 2020, 31(6): 73-77.

Miao Didi, Zheng Da, Zheng Kan, et al. Experimental study on residual stress and fatigue of titanium alloy by rotary ultrasonic milling [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(6): 73-77. (in Chinese)

 [23] 王健肖, 陈光军, 赵理想, 等. 切削加工刀具磨损及其预测建 模技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 66(18): 98-109.
 Wang Jianxiao, Chen Guangjun, Zhao Lixiang, et al. Research progress of tool wear and its prediction modeling technology in cutting process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 66(18): 98-109. (in Chinese) milling force based on identified milling force coefficients and tool runout parameters in time-frequency domain[J]. Mechanical Systems Signal Processing, 2023, 203: 110729.

[24] Shi Jianghai, Hou Maxiao, Cao Hongrui, et al. Prediction of

Research on Milling Force Compensation Based on Inverse Filtering

Hou Maxiao¹, Cao Hongrui¹, Shi Jianghai¹, Ren Junqi²

1. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. AECC Xi' an Power Control Technology Co., Ltd., Xi' an 710077, China

Abstract: Milling force is an important parameter in machining processes that affects the aerospace part quality and tool life. Aiming at the distortion problem of dynamometer in the high frequency, this paper compensates the measured milling force based on the inverse filtering. First, the milling force measurement error is analyzed with respect to the structure and dynamic characteristics of the dynamometer system. Next, the principle of inverse filtering and its application to milling force compensation is presented. In addition, 6061 aluminum alloy, which is widely used in aerospace and other fields, is selected for milling experiments. The inverse filter is used to compensate the milling force, and the characteristics of the displacement signal are used to verify the necessity and accuracy of milling force compensation. The experimental results show that the EVE of the input force and the compensated force is less than 6%, and the error of the identified milling force and the compensated milling force is 5.49%. The proposed milling force compensation method can accurately compensate the milling force during the machining process of the parts in aerospace and other fields.

Key Words: 6061 aluminum alloy; milling force; error analysis; compensation; experimental validation