

文章编号 1004-924X(2026)13-2022-11

大面域多维测力仪轻量化设计与研制

张 军, 冯 泽, 刘金龙, 赵玉乾, 邵恒昆, 刘 巍, 任宗金*
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116000)

摘要:针对大尺寸工件切削力监测中,大面域测力仪因测试面域扩大而导致质量增大、固有频率下降的技术问题,引入轻量化思想,研制了一种大面域压电多维测力仪,并开展了系统的理论分析与实验验证。通过结构功能分析明确了轻量化的设计约束与优化方向,运用拓扑优化获取初始结构,确定关键尺寸参数。采用试验设计结合响应面法建立参数与优化目标的代理模型。然后,结合多目标优化算法进行参数寻优,确定最终设计方案,完成测力仪样机制备。最后,通过静、动态标定以及实际铣削实验对轻量化测力仪的性能进行验证。实验结果表明,测力仪实测整体质量下降 8.3%,一阶固有频率提升 33.2%,各向线性度、重复性均小于 0.5%,各向耦合误差小于 3%,三向固有频率不低于 1.9 kHz;铣削测力实验验证了其在工作面域内的测试稳定性,清晰揭示了其对不同工况的灵敏响应,证明了轻量化后的测力仪仍具有优异性能。该研究为后续测力仪结构设计和固有频率提升提供了理论指导,具有明确的工程应用价值。

关键词:测试面域;切削力测量;响应面分析;轻量化

中图分类号:TH823;TH703 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263413.2022 **CSTR:**32169.14.OPE.20263413.2022

Lightweight design and development of large-area multi-dimensional dynamometer

ZHANG Jun, FENG Ze, LIU Jinlong, ZHAO Yuqian, SHAO Hengkun, LIU Wei, REN Zongjin*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

* Corresponding author, E-mail: renzongjin@dlut.edu.cn

Abstract: In the monitoring of cutting forces for large-sized work pieces, the enlargement of the working area in large-area dynamometers leads to the technical challenges of increased mass and decreased natural frequency. To address this, this study introduces a lightweight design philosophy and proposes a large-area piezoelectric multi-component dynamometer. A systematic theoretical analysis and experimental verification are conducted. Through structural-functional analysis, the design constraints and optimization direction for lightweighting are clarified. Topology optimization is employed to obtain the initial structure and identify the key dimensional parameters. Design of experiments combined with the response surface methodology is adopted to construct surrogate models relating the parameters to the optimization objectives. A multi-objective optimization algorithm is then applied for parameter optimization, determining the final design solution and completing the fabrication of the dynamometer prototype. The performance of the lightweight dynamometer is validated through static and dynamic calibration tests as well as practical milling

收稿日期:2026-04-09;修订日期:2026-05-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52125504)

force experiments. The experimental results show that the overall mass of the dynamometer is reduced by 8.3%, while its lowest first-order natural frequency is increased by 33.2%. The linearity and repeatability errors are both below 0.5%, the cross-axis interference errors are less than 3% in all directions, and the natural frequency of each axis exceeds 1.9 kHz. The milling force experiments confirm its measurement stability across the working area and clearly reveal its sensitive response to different working conditions. This verifies that the lightweight dynamometer retains excellent performance. The study provides theoretical guidance for the subsequent structural design and natural frequency enhancement of dynamometers and holds clear value for engineering application.

Key words: test area; cutting force measurement; response surface analysis; lightweight

1 引 言

随着航空航天、能源装备等领域向大型化发展,大尺寸工件的高效精密加工已成为先进制造领域的核心挑战之一^[1-3]。在此类加工过程中,切削力是评价切削加工过程的重要依据,准确快速地获取切削力参数是保证加工精度和加工效率的前提^[4-5]。利用测力仪监测切削力是工程中常用的技术手段^[6]。

工件尺寸的增大,要求测力仪的测试面域^[7],即用于装夹工件并检测切削力的平面区域相应增大,以减少重复装夹次数,提高测量效率,但这意味着测力仪结构尺寸的增大,从而导致整体质量增加,固有频率^[8]降低,严重削减测力仪在工程中的使用价值。

在较大面域测力仪的研究方面,张鹏等^[9]基于多参数化仿真设计了一款四维切削测力仪,测试面域为260 mm×260 mm,固有频率不低于1 kHz。Kistler公司^[10]9255C型测力仪的测试面域为260 mm×260 mm,固有频率不低于1.8 kHz,质量为52 kg。王炳^[11]为满足790 mm×300 mm的测试需求,设计了一款八点支撑测力仪,通过加强筋结构改善结构刚度,但未进行动态性能测试。Wang等^[12]面向风洞实验所需的大规模高负载场景,设计了一款测试面域为1 800 mm×300 mm的测力仪,固有频率不低于341 Hz。

在提高和确保测力仪固有频率的研究方面,G. Totis等^[13]通过仿真分析,采用铝合金上板材料,设计了一款刚度与固有频率可接受的铣钻削测力仪,但测试面域与量程较小。Lyu等^[14]通过多自由度系统振动分析,设计了一块用于高速铣

削的应变式测力仪,固有频率不低于9 150 Hz,但测试面域为48 mm×48 mm,量程较小。Kistler公司^[15]的9109AA型三维测力仪,其固有频率不低于15 kHz,但测试面域为30 mm×30 mm,量程为500 N。

目前,针对测力仪的研究难以兼顾大面域、结构质量、固有频率多方面的耦合问题。结构轻量化是工程领域的重要研究方向,在能源、机械及汽车等行业得到持续探索。Nouman等^[16]利用拓扑优化对海域浮动平台进行设计,在满足刚度与应力约束的同时实现了减重。Al-Sanad等^[17]结合有限元与遗传算法对陆上风机塔架进行优化,整体减重2.9%。敖凤等^[18]采用响应面法对立柱结构进行轻量化设计,质量降低了20%。Feng等^[19]则通过混合建模与粒子群优化算法,实现了汽车车身的轻量化。因此,在大面域测力仪设计中,可引入轻量化的思想,以解决结构质量、固有频率间的矛盾,进而在保证测力仪性能的前提下实现其工程适用性的提升。

基于此,结合测力仪结构的功能,本文通过分析和优化,设计并研制了一种轻量化的大面域压电多维测力仪,并进行了静、动态标定及实际的铣削实验验证其性能。

2 测试原理及结构分析

2.1 测试原理

压电式多维测力仪以4个三向压电力传感器为核心,将其呈矩形阵列布置,并通过预紧螺栓夹持固定在测力仪的上、下板之间。在刚体假设下,建立其在矢量力作用下的力学模型,如图1所

示。根据静力学平衡关系,各传感器输出与测力仪所受六维载荷之间的解算公式为:

$$\begin{cases} F_j = \sum_{i=1}^4 F_{ij} (j=x, y, z) \\ M_x = (F_{1z} + F_{2z} - F_{3z} - F_{4z}) \cdot b - c \cdot \sum_{i=1}^4 F_{iy} \\ M_y = (-F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} - F_{4z}) \cdot a + c \cdot \sum_{i=1}^4 F_{ix} \\ M_z = (-F_{1x} - F_{2x} + F_{3x} + F_{4x}) \cdot b + (F_{1y} - F_{2y} - F_{3y} + F_{4y}) \cdot a \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $2a, 2b$ 为传感器间距称为跨距, h 为工件加载平面到传感器中心的位置, 即测试高度, F_{ij} 为 i ($i=1, 2, 3, 4$) 号传感器的 j ($j=x, y, z$) 向输出, F_j , M_j 是测力仪所感受的力和力矩。

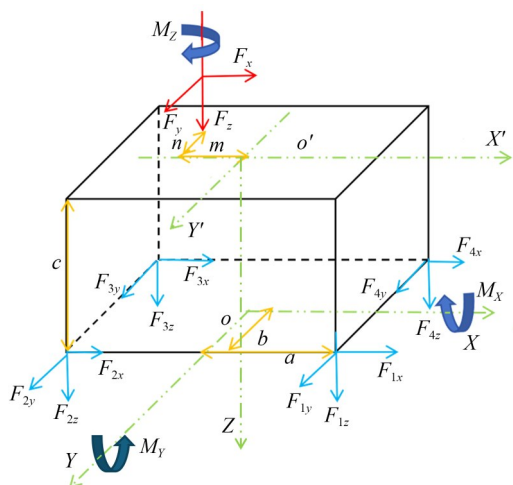


图1 矩形布置下压电测力仪力学模型

Fig. 1 Mechanical model of piezoelectric dynamometer under rectangular arrangement

2.2 结构功能分析及轻量化原则

现有测力仪整体结构如图2所示,其测试面域尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,为确保高刚度,其多处为实心结构,存在材料利用率低及整体质量

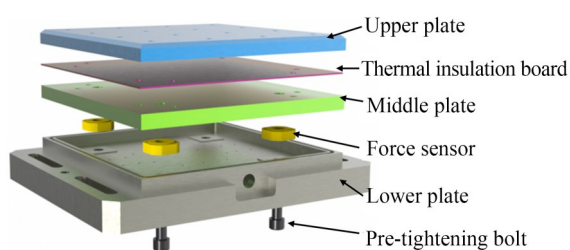


图2 测力仪结构

Fig. 2 Structure of dynamometer

过大的问题。拟基于轻量化思想对结构再设计,对各组成部分的功能进行分析,是轻量化的前提和依据。

上板是测力仪中直接承载并传递切削力的部件,其刚度直接影响测量精度。在实际应用中,上板为工件提供装夹定位同时隔离切削液与切削热,其上表面的螺纹孔会削弱其局部刚度,上板维持原样。

中板位于隔热板下方,将力传递给传感器。其设计需遵守中心对称原则,以改善力分配关系。改变结构形状的同时保证刚性,是对其轻量化的原则。

测力仪底板是集成内部支撑、走线布局、外部连接的关键部件。其内部需设计传感器凸台,为传感器提供支撑,并规划4个传感器12路输出信号线布置方案,通过合理布置螺纹孔与压线板实现线缆可靠固定。同时底板需具备高抗弯刚度,以确保与机床连接稳定性并抵抗加工中的侧向载荷。从功能和可改变结构形式的角度上看,其轻量化裕度较大。

在轻量化分析中,当对某部件进行优化分析时,其余部件保持原始状态。整个分析过程均以测力仪整体结构的一阶固有频率和当前被分析部件的最大变形量为核心评价依据。考虑到底板结构的复杂性,首先以其作为研究对象,开展轻量化设计。

3 测力仪结构轻量化设计

3.1 结构拓扑设计

为获取满足轻量化原则的理想初始结构,本文采用拓扑优化方法。优化基于变密度法(SIMP),在ANSYS软件中实现。具体设置为:将载荷施加区域与边界支撑区域设定为非设计

域,以单元相对密度为设计变量,以最大化结构刚度为优化目标,同时考虑结构体积约束与静力学平衡方程,由此建立拓扑优化的数学模型如下所示:

$$\begin{cases} \rho = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_i) \in R \\ \max: C(\rho) = 1/U^T K U = 1/\sum_{i=1}^N (\rho_i)^p u_e^T K_0 u_e \\ s. t. \quad K U = F \\ \frac{V(\rho)}{V_0} \geq k \\ 0 \leq \rho_{\min} \leq \rho_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases}, \quad (2)$$

其中: ρ 代表设计变量, R 代表拓扑设计域, $C(\rho)$ 是结构刚度, K 为结构整体矩阵, U 为结构整体位

移矩阵, F 为载荷矩阵, ρ_i 是单元相对密度, $\rho_{\min}$ 是最小密度, p 是惩罚系数, u_e 为单元位移矩阵, K_0 为单元刚度矩阵, $V(\rho)$ 为在设计变量状态下的结构体积, V_0 为结构原始体积, k 为体积约束系数。

以底板为例的拓扑优化过程如图 3 所示,图 3(a)定义拓扑域,其中预留凸台、传感器输出端压线平面及出线槽作为非设计域,并在 4 个凸台表面均匀施加 15 kN 垂向载荷,底板面设置固定支撑,设置 $\rho_{\min}$ 为 1×10^{-3} , p 为 3, k 为 0.6;图 3(b)为拓扑优化的结果,保留了必要结构,在内部形成十字形槽结构,并去除了输出端压线平面附近的材料;图 3(c)为结合可加工性的初步设计,在底板内部中心设计深槽结构。

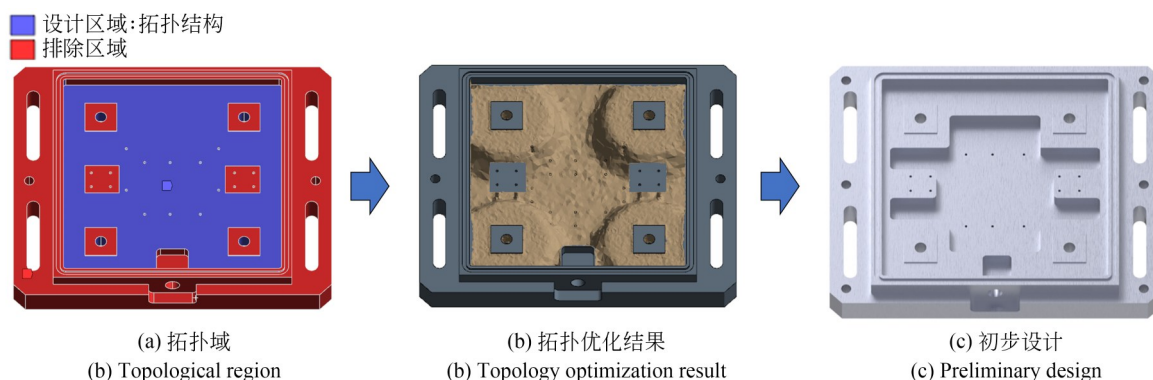


图 3 初始构型获取流程

Fig. 3 Initial configuration acquisition process

基于底板功能,进行弯曲刚度仿真以探究槽深对弯曲刚度性能影响趋势。边界条件为底板左侧固定,右侧施加 15 kN 翻转力,结果如图 4 所示。

随着槽深的增加,结构体积近似线性下降,板最大变形增大,即整体弯曲刚度下降,在 16 mm 处出现拐点,此后,增大槽深,弯曲刚度下降趋势逐渐减缓。综合考虑底板整体厚度与轻量化效果,设定槽深度为 17.5 mm。此时相较原结构,弯曲刚度下降约 11%,考虑通过结构设计予以补偿。

工程中增加局部刚度常用的途径有优化截面形状、布置加强结构、改善材料或工艺。采用加强筋思想,将通槽设计为中心槽与外围正方形槽,加入类隔加强筋结构如图 5 所示。

二次设计结构相较原始结构,抗弯刚度下降

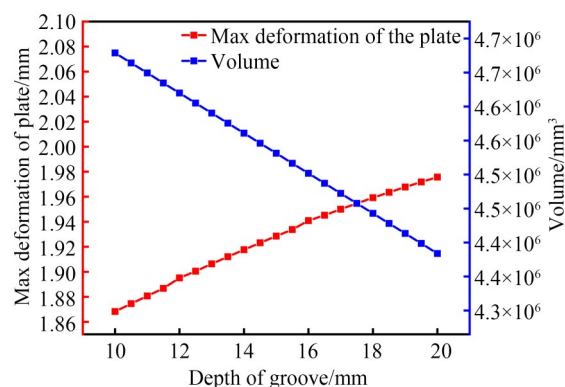


图 4 底板性能随槽深变化趋势

Fig. 4 Trend of plate performance variation with groove depth

8.8%,中心矩形槽尺寸对抗弯刚度影响较小,考虑预留充足布线转接区域以及对体积去除比例,将其尺寸设定为 140 mm×140 mm×17.5 mm。

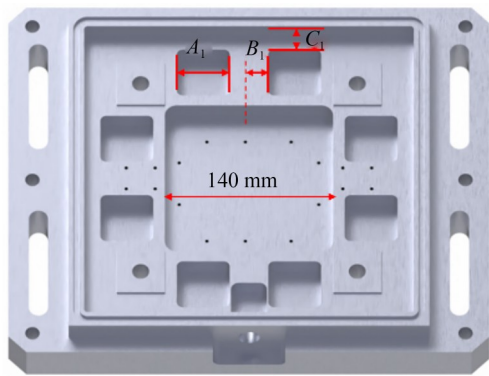


图5 二次设计
Fig. 5 Secondary design

分析表明,外部正方形槽边长、槽边距中心轴距离、距侧壁距离是影响结构性能的核心参数,将其依次定义为 A_1, B_1, C_1 。出线槽用于汇集和引出内部线缆,其内部在线引出后需在槽内灌注防水胶,以实现固定和密封。因此,出线槽与临近两正方形槽尺寸将在最优尺寸下适当改变以适应整体结构。

3.2 响应面模型建立及评估

对于多参数、多目标的性能优化问题,采用试验设计(Design of Experiments, DOE)结合代理模型的方法可有效平衡计算精度与效率。选用在工程中广泛应用、能高效逼近非线性关系的响应面法(Response Surface Methodology, RSM)。以3个结构参数作为设计变量,以底板最大变形 L 、测力仪一阶固有频率 f 作为双优化目标,建立多目标优化问题。

基于Box-Behnken试验设计方法,将输入三因素分为三水平分析,因素与水平设计如表1所示。共设计15组试验,包含3组中心试验,12组析因试验。通过Creo与ANSYS Workbench进行参数化建模仿真分析。所有仿真均在整体装配模型中进行,以评估在整体耦合作用下,待轻量化部件的性能。边界条件为在测力仪上板面施加15 kN垂向载荷,底板面固定支撑,上中板

表1 BBD试验设计水平与试验因素

Tab. 1 BBD experimental design level and experimental factors

水平	因素		
	A_1/mm	B_1/mm	C_1/mm
-1	38	10	5
0	44	14	10
1	50	18	15

设置摩擦接触,系数为0.1,其余为绑定接触。每组实验方案对应的设计变量和响应值如表2所示。

表2 样本点仿真结果

Tab. 2 Simulation results of sample points

组	设计变量			响应值	
	A_1/mm	B_1/mm	C_1/mm	$L/\mu\text{m}$	f/Hz
1	44	18	15	0.462 26	1 968.50
2	44	10	15	0.472 74	1 979.78
3	50	18	10	0.463 85	1 935.90
4	38	10	10	0.462 83	1 983.12
5	50	14	15	0.469 20	1 962.48
6	38	18	10	0.460 14	1 977.31
7	44	14	10	0.463 35	1 973.36
8	50	14	5	0.464 71	1 951.49
9	44	14	10	0.463 35	1 973.36
10	44	18	5	0.461 06	1 961.10
11	44	10	5	0.463 75	1 977.22
12	38	14	5	0.459 93	1 980.15
13	38	14	15	0.462 96	1 981.72
14	50	10	10	0.475 01	1 968.72
15	44	14	10	0.463 35	1 973.36

采用二阶多项式拟合三因素与响应值间的函数关系,得到关于 L 及 f 回归方程分别如下:

$$\begin{aligned} L = & 0.4382 + 1.529 \times 10^{-5} \times A_1 + 1.503 \times 10^{-3} \times B_1 + 1.128 \times 10^{-3} \times C_1 + \\ & 1.883 \times 10^{-5} \times A_1^2 + 8.949 \times 10^{-5} \times B_1^2 + 6.964 \times 10^{-6} \times C_1^2 - 8.815 \times 10^{-5} \times \\ & A_1 \times B_1 + 1.225 \times 10^{-5} \times A_1 \times C_1 - 9.739 \times 10^{-5} \times B_1 \times C_1, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f = & 1673.12 + 1.296 \times 10^1 \times A_1 + 1.357 \times 10^1 \times B_1 + 4.132 \times C_1 - 1.360 \times 10^{-1} \times \\ & A_1^2 - 1.378 \times 10^{-1} \times B_1^2 + 1.976 \times 10^{-2} \times C_1^2 - 2.814 \times 10^{-1} \times A_1 \times B_1 + \\ & 7.847 \times 10^{-2} \times A_1 \times C_1 + 6.055 \times 10^{-2} \times B_1 \times C_1. \end{aligned} \quad (4)$$

为评估模型可靠性,采用方差分析验证拟合精度。结果表明,模型的显著性检验 P 值分别为

0.000 5, 0.000 2 均小于 0.001, 变异率 $C.V. \%$ 均小于 0.2%, 相关系数 R^2 均大于 0.98, 调整决定系数与预测决定系数差值均小于 0.2, 指标证明模型具有良好的显著性与预测精度, 达到工程应用的可信度要求。

根据式(3)和式(4)分析, 三因素对 L 影响程度顺序为 $B_1 > A_1 > C_1$, 对 f 影响程度顺序为 $A_1 > B_1 > C_1$ 。绘制三因素交互作用对 L 及 f 的响应曲面, 如图 6 所示。

图 6 表明, 各因素间对响应值存在显著的交通

耦合影响, 一个参数的最佳值, 会随其他参数的变化而变化, 无法简单确定最优值。已建立的响应面模型的优化目标均与结构质量间存在耦合关系, 若仅以最小化 L 和最大化 f 进行优化, 会驱使 A_1 无约束地偏向下界。而三因素间仅有 A_1 与结构质量有关, 无法拟合三因素响应模型, A_1 的取值不仅直接决定质量, 更通过其与 B_1, C_1 的结构耦合显著影响 L 与 f 的响应, 从而制约了 B_1 与 C_1 的全局最优解空间。基于此, 将结构质量加入寻优约束。

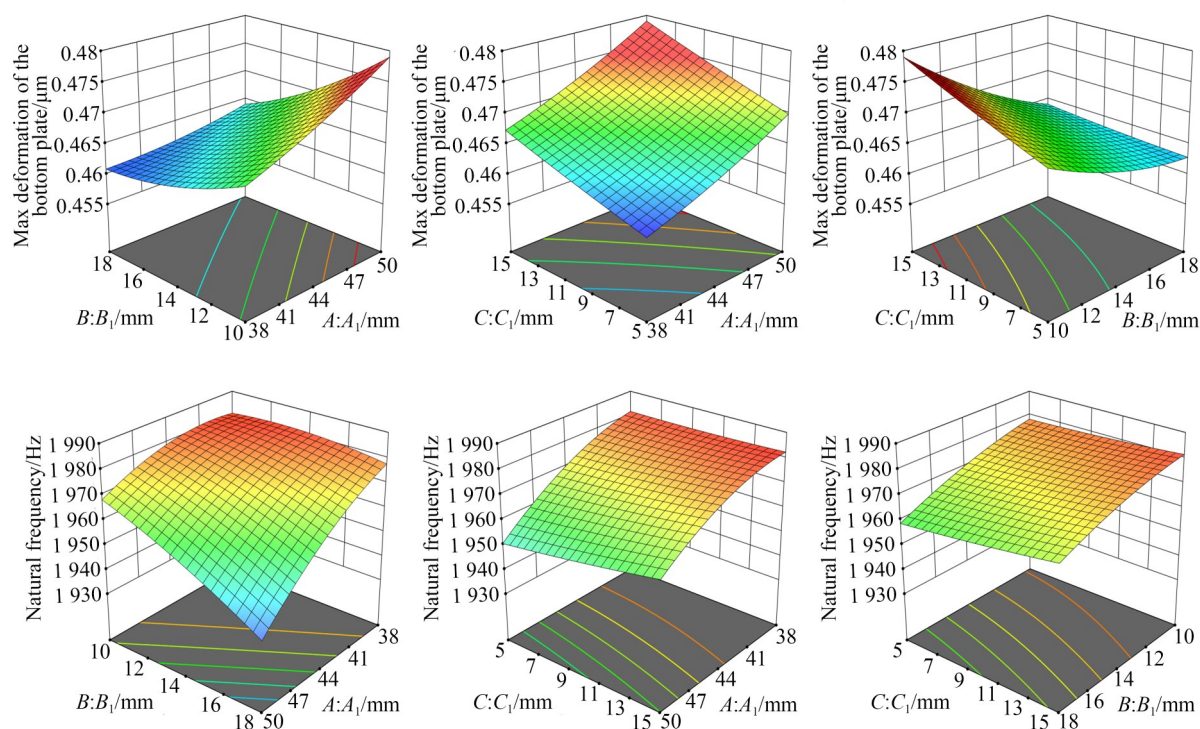


图 6 三因素交互响应曲面

Fig. 6 Three factors interactive response surface

3.3 多参数寻优及最优方案确定

针对多目标寻优问题, 多采用优化算法在复杂的设计空间自动寻优。结合非支配排序遗传算法(NSGA-II)对响应模型进行求解, 以最小化底板变形、最大化固有频率、最小化质量即最大化 A_1 为目标。

设定算法种群规模为 100, 最大迭代次数为 300 次, 经迭代计算得到 Pareto 最优解集。为选出最优设计方案, 采用逼近理想解排序法(TOP-SIS)进行多准则决策, 三目标权重设置为 0.33,

0.30, 0.37, 在均衡权重评价基础上略微侧重质量, 结果如图 7 所示。

相对贴合度最高为最优解, 考虑可加工性, 尺寸取整处理, 确定为方案 1, 为验证方案合理性, 从解集中取两组对照方案 2、3 进行对比, 如表 3 所示。数据表明方案有效性, 中板流程一致不再赘述。

基于最终确定的整体轻量化方案, 进行有限元仿真, 并与原始结构性能对比, 如表 4 所示。表 4 表明, 理论中轻量化后的测力仪质量下降

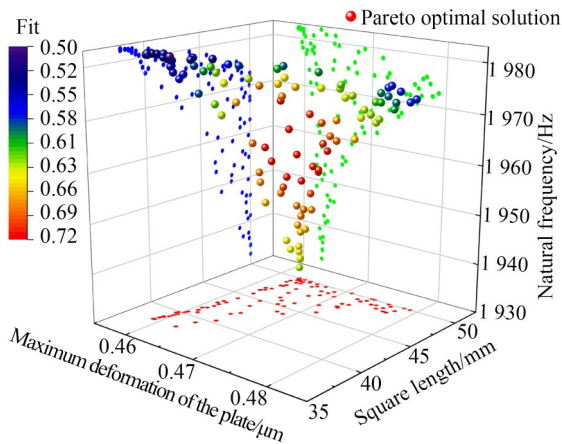


图7 Pareto最优解集
Fig. 7 Pareto-optimal set

10.0%，一阶固有频率提高33.2%，主向刚度虽下降7.7%，但仍高于常见机床主轴轴向刚度一个数量级，处于良好水平，满足测试需求。

表3 最优方案及对照组

Tab. 3 Optimal solution and control group

组	A_1/mm	B_1/mm	C_1/mm	$L/\mu\text{m}$	f/Hz
1	47	26	9	0.465	1 968.5
2	47	36	9	0.463	1 952.0
3	47	26	7	0.465	1 967.3

表4 测力仪仿真性能对比

Tab. 4 Comparison of simulation performance of dynamometer

测力仪	质量/kg	一阶固有频率/Hz	主向刚度 $\text{N}/\mu\text{m}$
现有	65.95	1 474	2 799
轻量化	59.35	1 963	2 583

对所设计的结构投产加工，并进行调试与装配，各零件、内部结构、外形如图8所示。

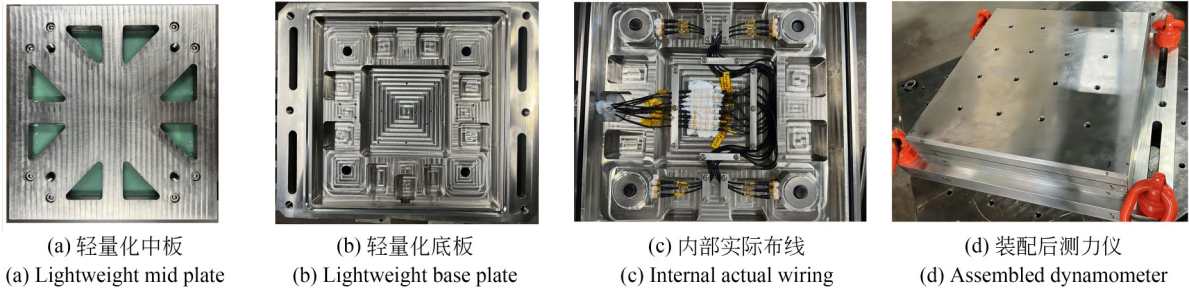


图8 轻量化部件及装配后的测力仪
Fig. 8 Lightweight components and assembled dynamometer

4 实验

4.1 测力仪静态性能标定

为获取测力仪实际性能，进行静态性能标定实验。以主向标定为例，实验系统主要包括：标定台、标准力传感器、测力仪、电荷放大器、数据采集卡、上位机及软件，如图9所示。

静态标定采用逐级加载法。实验时，在加载头与液压油缸之间串联一个高精度应变式标准力传感器作为基准，通过上位机软件实时监控并记录施加的力值。分别在 X, Y 方向施加0~7.5 kN的力，在 Z 方向施加0~15 kN的力，在 M_x, M_y, M_z 方向施加0~800 N·m的力矩进行标定。最终，标定得到的静态性能指标如表5所示。

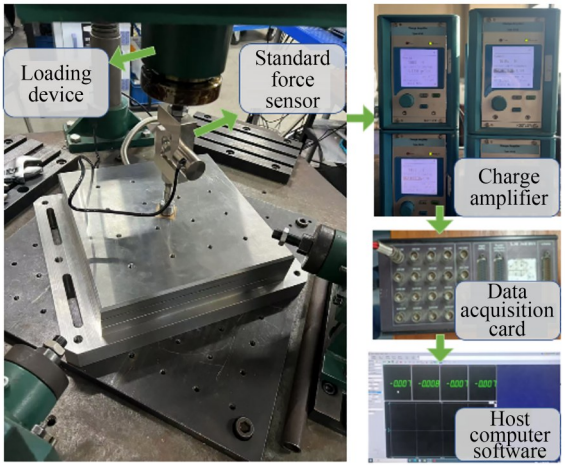


图9 测力仪主向标定实验
Fig. 9 Main calibration experiment of dynamometer

表 5 轻量化测力仪静态性能
Tab. 5 Static performance of lightweight dynamometer

测量 方向	耦合误差/%						线性度/%	重复性/%
	X	Y	Z	M_x	M_y	M_z		
X	—	0.8	0.6	0.4	0.3	0.6	0.14	0.27
Y	0.8	—	0.5	0.6	0.5	0.7	0.14	0.27
Z	0.2	1.3	—	0.1	0.1	0.1	0.14	0.07
M_x	0.1	0.3	0.6	—	0.2	0.4	0.06	0.13
M_y	0.1	0.3	0.7	0.2	—	0.2	0.08	0.13
M_z	0.2	0.4	0.5	0.4	0.5	—	0.19	0.25

表 5 表明,测力仪各向重复性误差最大为 0.27%,线性度误差最大为 0.19%,各向耦合误差均小于 3%,静态性能良好。

4.2 测力仪动态性能标定

为评估测力仪的动态响应特性,采用脉冲激励法获取测力仪三向固有频率,即通过力锤敲击施加脉冲信号,对信号进行快速傅里叶变换获取测力仪三向幅频特性曲线,如图 10 所示。

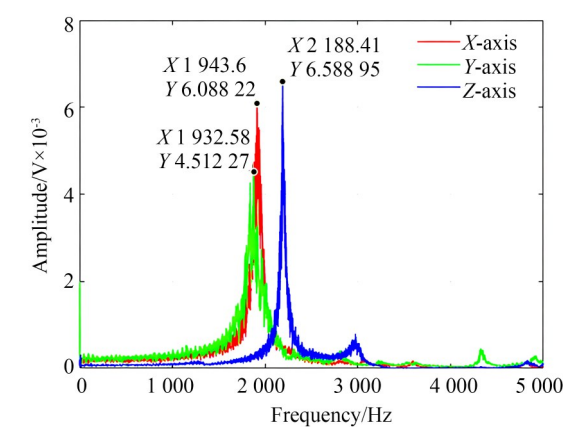


图 10 测力仪三向固有频率
Fig. 10 Three directional natural frequency of dynamometer

X, Y, Z 三向固有频率分别为 1 943.6 Hz, 1 932.6 Hz, 2 188.4 Hz,因实际装配中加入弹性密封圈、密封胶及内部输出线缆,导致测力仪实际固有频率与仿真中略有差异。最终轻量化后的测力仪各向性能指标与现有测力仪对比如表 6 所示。相比现有结构,轻量化后测力仪整体质量下降 8.3%,一阶固有频率提升 33.2%。

表 6 实际测力仪性能对比
Tab. 6 Comparison of performance of dynamometers in reality

测力仪	质量/kg	一阶固有频率/Hz	耦合误差
现有	67.75	1 450.7	<5%
轻量化	62.10	1 932.6	<3%

4.3 铣削测力实验

为验证测力仪实际使用性能,进行铣削测力实验,通过监测切削力变化来反映不同切削参数及刀具状态影响。实验设备包含加工中心、待加工工件、压电测力仪、电荷放大器、数据采集卡、采集软件,整体布置如图 11 所示,研究采用组间对照方式,对比不同工况下的切削力信号特征,综合评估测力仪的实际测试性能。

实验采用单刃铣刀,刀具直径为 50 mm,每齿进给量为 0.05 mm/z,具体三组实验的切削参数设置如表 7 所示。

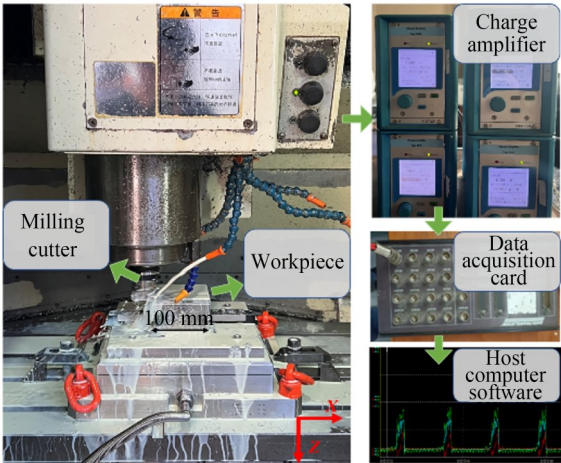


图 11 铣削实验装置
Fig. 11 Milling experiment setup

表 7 组间切削参数

Tab. 7 Cutting parameters of different groups

切削参数	切削速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	进给速度/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	背吃刀量/ mm
一组	29.437 5	9.375	0.25
二组	35.325 0	11.25	0.25
三组	35.325 0	11.25	0.25

使用DewSoft软件采集并记录切削力数据,采样频率设置为10 kHz。采用经验模态分解(EMD)对采集到的数据进行降噪处理。分析发现,各组实验的切削力趋势相近,以第二组为例,其处理后的三向切削力信号如图12(a)所示,同时为验证信号周期与理论切削频率的一致性,截取稳定切削阶段的信号进行短时分析,细节如图12(b)和12(c)所示。

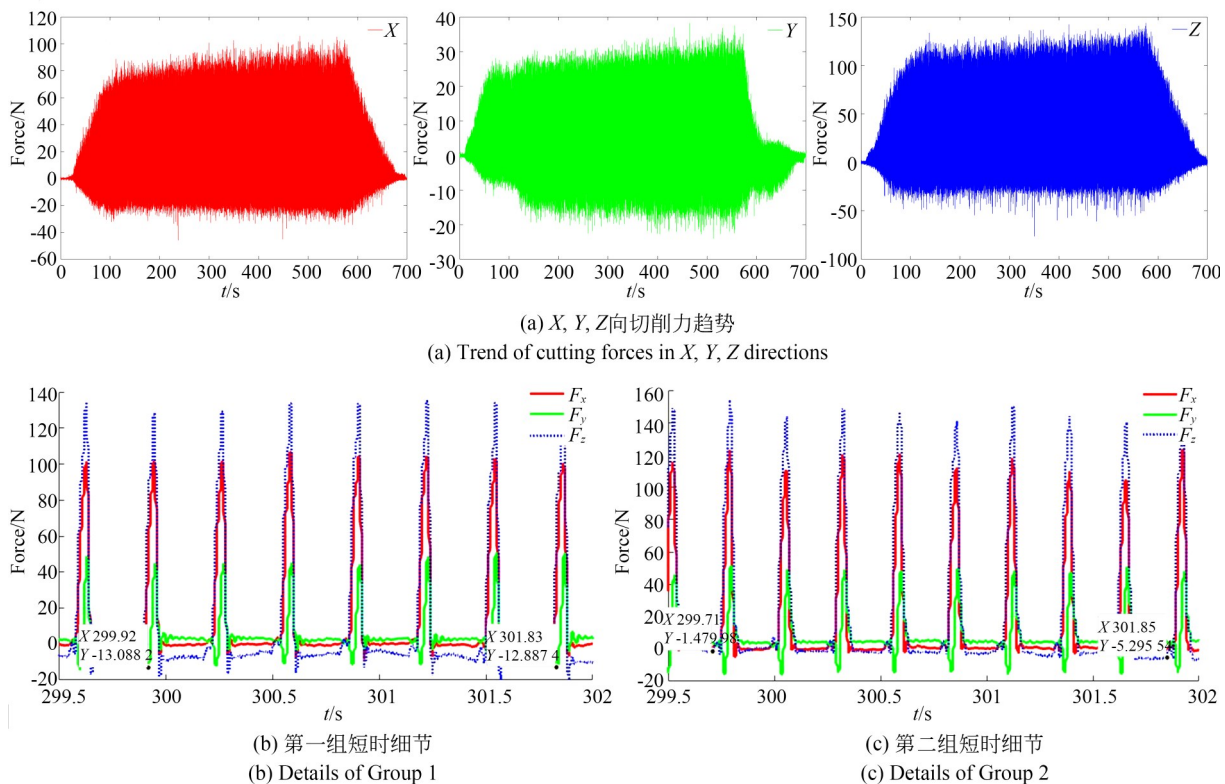


图 12 三向切削信号及细节
Fig. 12 Three-dimensional cutting signals and details

本次铣削实验的走刀路径覆盖了工件的全长100 mm。在铣削过程中,随着刀具移动,切削力的作用点也随之平移。如图12(a)和12(c)所示,在稳定切削阶段,各向切削力幅值在整个路径上均保持高度稳定,未因加载点位置改变出现显著波动或漂移,证明所研制的测力仪在工作面内具有良好的测试一致性。在整个切削过程中,三向切削力呈缓慢增大趋势,这主要由于刀具逐渐磨损引起。第一组阶段持续1.91 s,包含6个循环;第二组阶段持续2.14 s,包含了8

个循环。据此计算切削频率如下:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{6}{1.91 \text{ s}} = 3.141 \text{ Hz} \\ f_2 = \frac{8}{2.14 \text{ s}} = 3.738 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5)$$

相比于理论计算得到的3.125 Hz、3.75 Hz,误差为0.51%和0.32%,证明数据采集与处理准确性。

断续切削中常用铣削力峰值评判力的大小。计算峰值平均值,得到各组铣削力如图13所示。由图可见,随着切削参数的增大,X、Y、Z三向切

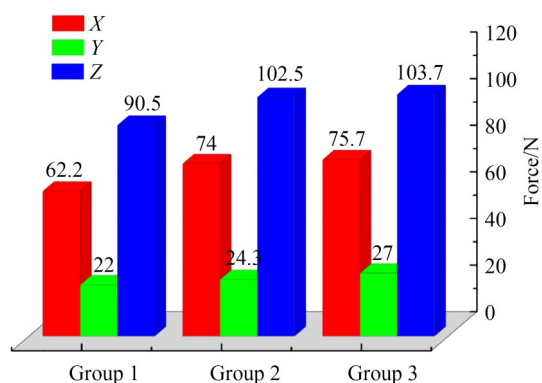


图 13 组间切削力对比

Fig. 13 Comparison of cutting forces between groups

削力呈现不同的上升趋势,符合切削力学规律。第二、三组为同参数下的重复性对比试验,其三向切削力峰值平均值基本接近。由于第三组实验中刀具后刀面磨损带宽度为 0.133 mm,略大于第二组的 0.117 mm,导致全程切削力增大,所研制的测力仪有效捕捉并反映这一差异变化,充分验证其具备优良的动态测试精度与工况适应性。

5 结 论

针对大面域测力仪因尺寸增大导致质量增

加、固有频率下降的问题,本研究基于轻量化思想,通过结构功能分析、拓扑优化、响应面建模与多目标算法寻优,完成了测力仪的设计与制备,并开展了静动态标定及实际铣削测力实验。实验表明,轻量化后的测力仪在保持优异静态性能的同时,实现了整体减重:整体质量下降 8.3%,一阶固有频率提升 33.2%,各向线性度与重复性误差均小于 0.5%,耦合误差小于 3%,三向固有频率不低于 1.9 kHz。通过实际铣削实验验证了测力仪在工作面内具有良好的输出一致性,并有效区分了不同切削参数下的力信号,验证了其工程实用性。本研究证实了轻量化设计在解决大尺寸测力仪性能权衡问题上的有效性,为后续测力仪设计提供了新思路。

作者贡献声明:

张 军:论文思路梳理,提供实验支持,整体工作指导;

冯 泽:结构研制,实验设计,数据分析和论文撰写;

刘金龙:文献调研及协助验证;

邵恒昆:提供思路及协助验证;

赵玉乾:参与装配,实验及相关调试工作;

刘 巍:论文方法指导,提供实验支持;

任宗金:论文内容审核。

参考文献:

- [1] DE BIASIO A, MOUSSAOUI K, GOGU C. Review on machining process optimization for metallic aerospace parts affected by distortions induced by residual stresses[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2026, 143(1): 97-143.
- [2] GUO Q. Reviews on the machining and measurement of large components[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2023, 15(9).
- [3] 杨仁川,崔海华,赵西富,等. 面向组合光学跟踪测量的多位姿耦合中转标定[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(17): 2686-2697.
YANG R CH, CUI H H, ZHAO X F, *et al.* Multi-purpose coupled transformation calibration for combined tracking-based optical measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(17): 2686-2697. (in Chinese)
- [4] 孙晓欢,王丰,池广伟,等. 石英预制棒深孔加工测力夹具设计及实验研究[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(11): 1761-1770.
SUN X H, WANG F, CHI G W, *et al.* Design and experimental study of force measuring fixture for deep hole machining of quartz prefabricated rods[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(11): 1761-1770. (in Chinese)
- [5] SOUSA V F C, SILVA F J G, FECHEIRA J S, *et al.* Cutting forces assessment in CNC machining processes: a critical review[J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4536.
- [6] SUSANTO A, SETIYANA B, ISMAIL R, *et al.* Application of low-cost dynamometer based on full octagonal ring for turning process monitoring[J]. *Archive of Mechanical Engineering*, 2025: 153-175.
- [7] ZHANG J, MA Y X, REN Z J, *et al.* Research on

- the reliable test range of four-point supported piezo-electric dynamometer[J]. *Sensor Review*, 2022, 42(2): 230-240.
- [8] 赵瑞杰, 王鹏, 王楠, 等. 三维切削力测力仪结构的多目标优化设计[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 14-20.
- ZHAO R J, WANG P, WANG N, *et al.* Optimization design of three-dimensional cutting force dynamometer structure[J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 36(3): 14-20. (in Chinese)
- [9] 张军, 张鹏, 滕玄德, 等. 压电四维测力仪扭矩测量精度提升[J]. 光学 精密工程, 2025, 33(10): 1584-1593.
- ZHANG J, ZHANG P, TENG X D, *et al.* Improvement of torque measurement accuracy in piezo-electric four-dimensional force sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(10): 1584-1593. (in Chinese)
- [10] KISTLER INSTRUMENTE AG. Quartz 3-Component Dynamometer Type 9255C [Z]. Winterthur, Switzerland: Kistler Instrumente AG, 2010.
- [11] 王炳. 大面域多点布局压电测力研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- WANG B. *Research on Piezoelectric Force Measurement Under Large-Area Multi-Point Layout* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [12] WANG J, TIAN Y Z, LI X Y, *et al.* Design and calibration of a large-sized and high-stiffness wind tunnel test dynamometer composed of dual multi-point distributed force-measuring units[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2026, 31(1): 896-905.
- [13] TOTIS G, ADAMS O, SORTINO M, *et al.* Development of an innovative plate dynamometer for advanced milling and drilling applications[J]. *Measurement*, 2014, 49: 164-181.
- [14] LYU Y L, JAMIL M, HE N, *et al.* Development and testing of a high-frequency dynamometer for high-speed milling process[J]. *Machines*, 2021, 9(1): 11.
- [15] KISTLER INSTRUMENTE AG. Quartz 3-Component Dynamometer Type 9109A [Z]. Winterthur, Switzerland: Kistler Instrumente AG, 2018.
- [16] SAEED N, GONG J L, WAN Y J, *et al.* A novel design of multifunctional offshore floating platform structure based on topology optimization[J]. *Engineering Structures*, 2024, 306: 117782.
- [17] AL-SANAD S, PAROL J, WANG L, *et al.* Design optimisation of wind turbine towers with reliability-based calibration of partial safety factors[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 2548-2556.
- [18] 敖凤, 霍伟猛, 朱光旭, 等. 基于响应面法的高层堆垛机变截面立柱轻量化设计[J]. 起重运输机械, 2023(11): 58-66.
- AO F, HUO W M, ZHU G X, *et al.* Lightweight design of variable cross-section column of high-rise stacker based on response surface method [J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2023(11): 58-66. (in Chinese)
- [19] XIONG F, WANG D F, MA Z D, *et al.* Structure-material integrated multi-objective lightweight design of the front end structure of automobile body [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, 57(2): 829-847.

作者简介:



张 军(1969—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,1994年、2009年于大连理工大学分别获得硕士和博士学位,主要从事压电式传感器与测力仪研制、火箭发动机矢量力测量。E-mail: zhangj@dlut.edu.cn

通讯作者:



任宗金(1978—),男,博士,教授,博士生导师,2002年、2009年于大连理工大学分别获得学士和博士学位,主要从事压电机理探究及压电式传感器在气动力学的测量研究。E-mail: ren-zongjin@dlut.edu.cn