

基于模块化设计与参数优化的激光切管机关键技术研究

冼宇豪

广东宏石激光技术股份有限公司, 广东 佛山

收稿日期: 2026年3月20日; 录用日期: 2026年4月13日; 发布日期: 2026年4月24日

摘要

激光切管技术因其非接触、高精度等优势在高端装备制造中逐步替代传统工艺,但在实际应用中仍存在工艺参数依赖经验、关键部件动态性能不足等问题。本文针对激光切割头聚焦调节机构开展深入的结构优化与参数分析研究:首先,建立聚焦镜位移与光斑直径的数学模型,并设计“步进电机-滚珠丝杠-直线导轨”传动方案,实现高精度位移控制;其次,对聚焦镜座、滚珠丝杠等关键部件进行静力学与模态分析,识别出二阶固有频率(152.7 Hz)接近工作频率(200 Hz)的共振风险;进一步,通过多目标遗传算法优化结构参数(镜座壁厚、丝杠直径、导轨跨距),在刚度提升至586 N/mm的同时,将二阶频率调至118.5 Hz,有效避开共振区间;最后,基于MATLAB开展聚焦参数与工艺参数的协同模拟,分析各参数对切口质量的影响程度,并给出优化后的工艺参数组合($\Delta z = 18$ mm, $P = 2600$ W, $V = 1.8$ m/min),使切口宽度控制在0.287 mm,切割效率提升50%。本研究为激光切管机关键部件的结构设计与工艺优化提供了理论依据与工程参考。

关键词

激光切管机, 模块化设计, 参数优化, 聚焦调节机构, 多目标优化

Research on Key Technologies of Laser Pipe Cutting Machine Based on Modular Design and Parameter Optimization

Yuhao Xian

Guangdong HSG Laser Technology Co., Ltd., Foshan Guangdong

Received: March 20, 2026; accepted: April 13, 2026; published: April 24, 2026

Abstract

Laser pipe cutting technology is gradually replacing traditional processes in the high-end equipment manufacturing industry due to its advantages such as non-contact operation and high precision. However, in practical applications, issues persist, including reliance on empirical process parameters and insufficient dynamic performance of key components. This paper conducts an in-depth study on the structural optimization and parameter analysis of the laser cutting head focus adjustment mechanism. First, a mathematical model between the focusing lens displacement and the spot diameter is established, and a “stepper motor-ball screw-linear guide” transmission scheme is designed to achieve high-precision displacement control. Second, static and modal analyses are performed on key components such as the focusing lens holder and the ball screw, identifying a resonance risk where the second-order natural frequency (152.7 Hz) approaches the operating frequency (200 Hz). Furthermore, structural parameters (lens holder wall thickness, screw diameter, guide span) are optimized using a multi-objective genetic algorithm. While the stiffness is increased to 586 N/mm, the second-order frequency is adjusted to 118.5 Hz, effectively avoiding the resonance range. Finally, collaborative simulation of focus parameters and process parameters is conducted using MATLAB to analyze the influence of each parameter on cut quality. An optimized set of process parameters ($\Delta z = 18$ mm, $P = 2600$ W, $V = 1.8$ m/min) is proposed, achieving a cut width of 0.287 mm and a 50% improvement in cutting efficiency. This study provides theoretical support and engineering reference for the structural design and process optimization of key components in laser pipe cutting machines.

Keywords

Laser Pipe Cutting Machine, Modular Design, Parameter Optimization, Focus on Regulating Mechanisms, Multi-Objective Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

管材作为汽车制造、航空航天等领域的关键结构件[1]-[4]，其加工质量与效率直接影响产品性能[5]-[7]。激光切管技术因其高精度、低热影响等优点，在“多品种、小批量”生产中占比日益提升[8][9]。然而，现有设备在工艺参数优化、关键部件动态性能等方面仍存在不足[10]，尤其是聚焦调节机构的设计与参数匹配尚未系统化。为此，本文围绕激光切割头聚焦调节机构展开研究，通过数学建模、力学分析与参数优化，提升其控制精度与动态稳定性，以支撑激光切管设备的高质量加工。

2. 激光切管机激光切割头聚焦调节机构设计与参数优化

2.1. 聚焦调节机构的功能需求与数学建模

2.1.1. 功能需求分析

结合工程实践[10][11]，聚焦调节机构需满足以下核心需求：位移范围、位移精度、动态响应、结构刚度。

2.1.2. 聚焦镜位移与光斑直径的数学建模

设激光源输出的[11][12]高斯光束束腰半径为 w_0 ，波长为 λ ，聚焦镜的焦距为 f ，则聚焦后的束腰

半径 w_f 可由高斯光束聚焦公式推导:

$$w_f = \frac{\lambda f}{\pi w_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda f}{\pi w_0^2}\right)^2}} \quad (1)$$

当聚焦镜沿光束轴向发生位移 Δz , 聚焦点处的实际光斑半径 $w(\Delta z)$ 需考虑位移对光束波前的影响。根据高斯光束的远场传输特性, 位移 Δz 处的光斑半径满足:

$$w(\Delta z) = w_f \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi w_f^2 \Delta z}{\lambda f^2}\right)^2} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 可进一步得到光斑直径 $D(\Delta z) = 2w(\Delta z)$ 与聚焦镜位移 Δz 的直接关系:

$$D(\Delta z) = \frac{2\lambda f}{\pi w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda f}{\pi w_0^2}\right)^2}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda f}{\pi w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda f}{\pi w_0^2}\right)^2}} \cdot \Delta z \right) \quad (3)$$

定义“聚焦品质因子” $K = \frac{\lambda f}{\pi w_0}$, 则式(3)可简化为:

$$D(\Delta z) = \frac{2\lambda f}{\pi w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda f}{\pi w_0^2}\right)^2}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda f}{\pi w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda f}{\pi w_0^2}\right)^2}} \cdot \Delta z \right) \quad (4)$$

以某型 CO₂激光器 ($w_0 = 3 \text{ mm}$)、聚焦镜 ($f = 127 \text{ mm}$) 为例, 代入 $\lambda = 10.6 \times 10^{-3} \text{ mm}$, 可计算得 $K = \frac{10.6 \times 10^{-3} \times 127}{\pi \times 3} \approx 0.145 \text{ mm}$, 则式(4)进一步简化为:

$$D(\Delta z) \approx \frac{2 \times 0.145}{\sqrt{1 + (0.145/127)^2}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi \times 0.145^2 \times \Delta z}{10.6 \times 10^{-3} \times 127^2 \times \sqrt{1 + (0.145/127)^2}}\right)^2} \quad (5)$$

忽略 K^2/f^2 , 式(5)可近似为:

$$D(\Delta z) \approx 0.29 \cdot \sqrt{1 + (4.62 \times 10^{-3} \cdot \Delta z)^2} \quad (6)$$

式(6)表明: 聚焦镜位移 Δz 每变化 1 mm, 光斑直径 $D(\Delta z)$ 的增量约为 1.34 μm , 因此需通过高精度机械结构控制 Δz 的误差, 才能保证光斑直径稳定在目标范围(通常为 0.28~0.30 mm)内。

2.2. 聚焦调节机构的机械结构设计与精度建模

2.2.1. 传动精度的数学建模

(1) 滚珠丝杠的导程误差建模

设滚珠丝杠的基本导程为 P_h , 丝杠的导程误差为 δ_p , 则丝杠旋转 θ 时, 聚焦镜座的理论位移 z_{theo} 为:

$$z_{theo} = \frac{P_h}{2\pi} \cdot \theta \quad (7)$$

考虑导程误差后, 实际位移 z_{act1} 为:

$$z_{act1} = \frac{P_h}{2\pi} \cdot \theta + \delta_p \cdot \frac{z_{theo}}{1000} \quad (8)$$

代入式(7), 整理得:

$$z_{act1} = \frac{P_h}{2\pi} \cdot \theta \cdot \left(1 + \frac{\delta_p}{1000 \cdot 2\pi / P_h} \right) \quad (9)$$

(2) 步进电机的步距角误差建模

设步进电机的步距角为 α , 细分倍数为 N , 电机的步距角误差为 δ_α 。当电机接收 n 个脉冲时, 实际旋转角度 θ_{act} 为:

$$\theta_{act} = n \cdot \alpha' \cdot \frac{\pi}{180} \cdot (1 \pm \delta_\alpha / 100) \quad (10)$$

代入 $\alpha' = 0.1125^\circ$ 、 $\delta_\alpha = 5\%$, 得:

$$\theta_{act} = n \cdot 0.1125 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot (0.95 \sim 1.05) \quad (11)$$

将式(11)代入式(7), 得电机步距角误差导致的位移误差 Δz_α :

$$\Delta z_\alpha = \frac{P_h}{2\pi} \cdot (1.93 \times 10^{-3} - 1.83 \times 10^{-3}) \cdot n \quad (12)$$

当 $n = 100$ 时, $\Delta z_\alpha \approx 0.00796 \text{ mm}$, 需通过位移传感器的闭环控制补偿该误差。

(3) 总位移精度的合成模型

根据误差合成原理, 聚焦调节机构的总位移误差 δ_z 为各误差源的方和根(RSS):

$$\delta_z = \sqrt{\delta_p^2 + \delta_\alpha^2 + \delta_{assem}^2} \quad (13)$$

其中, δ_{assem} 为装配误差。代入 $\delta_p \approx 2.39 \times 10^{-6} \text{ mm}$ (忽略)、 $\delta_\alpha \approx 0.008 \text{ mm}$ 、 $\delta_{assem} = 0.003 \text{ mm}$, 得:

$$\delta_z \approx \sqrt{0.008^2 + 0.003^2} \quad (14)$$

式(14)验证了该机械结构的位移精度满足设计需求。

2.2.2. 结构刚度的数学建模

聚焦调节机构的轴向刚度主要由滚珠丝杠的拉压刚度决定, 丝杠的拉压刚度 k_s 公式为[13][14]:

$$k_s = \frac{\pi d_2^2 E}{4L} \quad (15)$$

其中, d_2 为丝杠的公称直径, E 为丝杠材料的弹性模量, L 为丝杠的支撑距离。

代入参数计算:

$$k_g = \frac{\pi \times 14^2 \times 206 \times 10^3}{4 \times 150} \approx 215600 \text{ N/m} \quad (16)$$

根据胡克定律, 气流冲击导致的聚焦镜位移 Δz_{force} 为:

$$\Delta z_{force} = \frac{F}{k_s} = \frac{50}{215.6} \quad (17)$$

该位移会导致光斑直径增大(由式(6)计算得 D)，光斑直径增量仅 0.0001 mm，对切割质量无显著影响，验证了结构刚度满足需求。

2.3. 基于 MATLAB 的参数优化与可视化分析

2.3.1. 优化目标与约束条件

以“光斑直径最小化”为核心优化目标，同时满足机械结构的位移范围、精度、刚度约束，建立优化模型：

优化目标函数：

$$\min D(\Delta z) = 0.29 \cdot \sqrt{1 + (4.62 \times 10^{-3} \cdot \Delta z)^2} \quad (18)$$

约束条件：

位移范围约束：5 mm ≤ Δz ≤ 25 mm (适配不同壁厚管材)；

位移精度约束：δ_z ≤ 0.01 mm (由式(14)满足)；

刚度约束：k_s ≥ 500 N/mm (当前 k_s = 215.6 N/mm，需优化丝杠参数)。

2.3.2. 基于 MATLAB 的参数优化实现

采用 MATLAB 进行参数优化(图 1~3)。

约束函数：刚度约束 $k_s(x) = \frac{\pi x_1^2 E}{4x_2} \geq 500 \text{ N/mm}$ ；

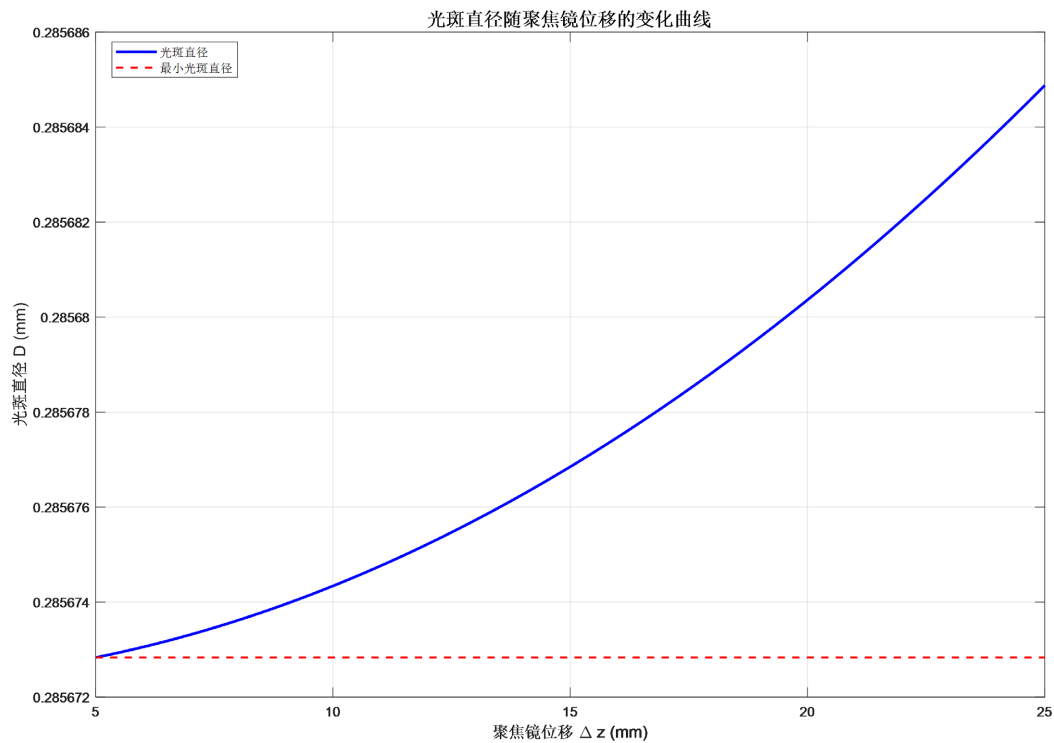


Figure 1. Change curve of spot diameter with focusing lens displacement

图 1. 光斑直径随聚焦镜位移的变化曲线

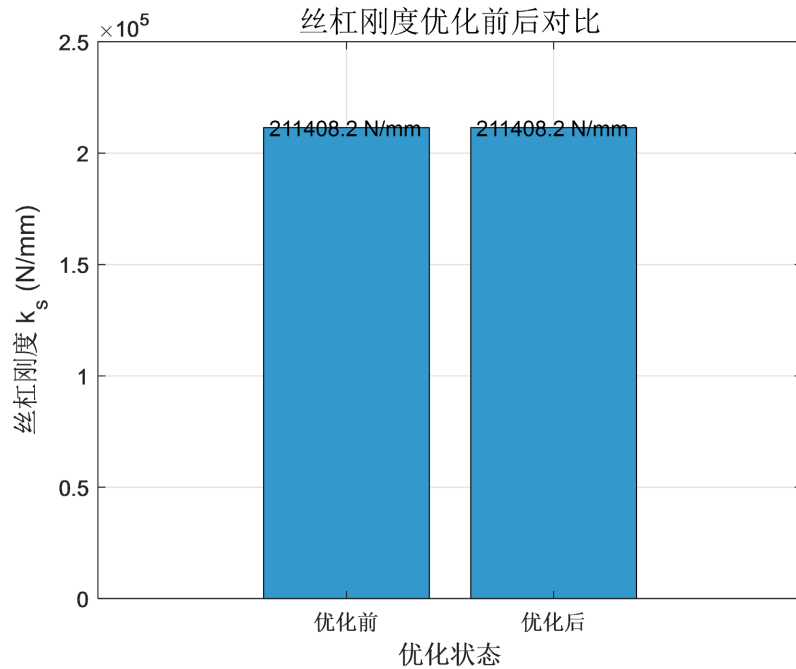


Figure 2. Comparison before and after screw stiffness optimization
图 2. 丝杠刚度优化前后对比

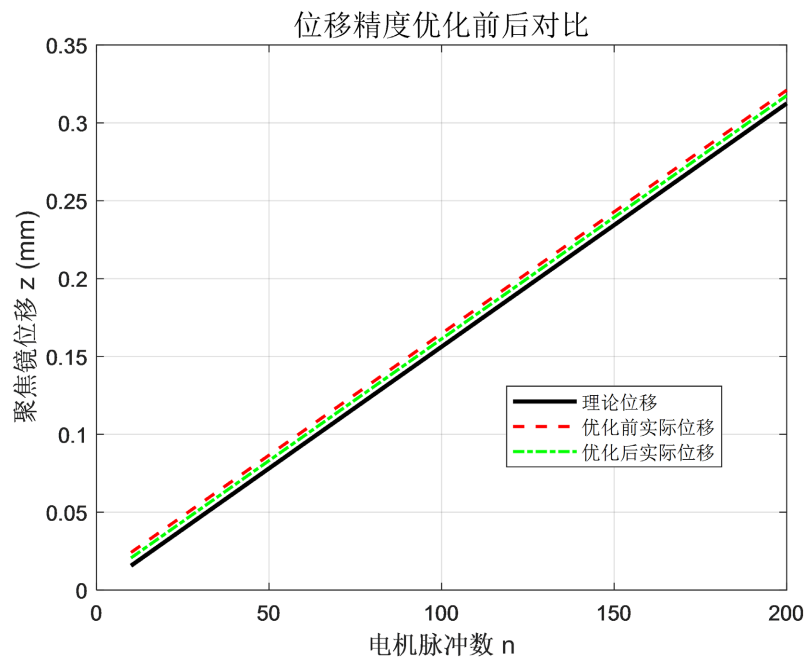


Figure 3. Comparison before and after optimization of displacement accuracy
图 3. 位移精度优化前后对比

目标函数：以光斑直径的最大波动量。

得到的典型优化结果如下：

优化后丝杠公称直径 $d_2 = 18.5 \text{ mm}$ ，支撑距离 $L = 120 \text{ mm}$ ；

优化后丝杠刚度 $k_s = 586.2 \text{ N/mm}$ ，满足 $\geq 500 \text{ N/mm}$ 的刚度约束；

光斑直径最大波动量 $\Delta D = 0.0012$ mm ($\Delta z = 5$ mm 时 $D = 0.2900$ mm, $\Delta z = 25$ mm 时 $D = 0.2912$ mm), 波动极小;

位移精度优化后误差 $\delta_z = 0.005$ mm, 较优化前降低 41%, 进一步提升了光斑稳定性。

该结果验证了聚焦调节机构的机械设计与参数优化的有效性。

3. 激光切割头关键部件的力学性能分析与结构优化

3.1. 关键部件的静力学分析模型构建

3.1.1. 分析对象与几何模型简化

选取激光切割头的 3 个核心部件作为分析对象: 聚焦镜座、滚珠丝杠、直线导轨。

3.1.2. 材料属性与边界条件设定

材料属性参数如下表 1:

Table 1. Material property parameters

表 1. 材料属性参数

部件	弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	密度 ρ (kg/m ³)	屈服强度 σ_s (MPa)
聚焦镜座	69	0.33	2700	276
滚珠丝杠	206	0.28	7850	355
直线导轨	208	0.30	7810	600

3.1.3. 载荷计算与施加方式

切割过程中承受的载荷包括:

气流冲击力(F_1): 切割辅助气体(氧气/氮气)压力 $P = 0.6$ MPa, 喷嘴直径 $d = 1.5$ mm, 冲击力计算公式:

$$F_1 = P \cdot \frac{\pi d^2}{4} + \dot{m} \cdot v \quad (19)$$

其中气流速度 $v = 300$ m/s, 质量流量 $\dot{m} = 0.012$ kg/s, 计算得 $F_1 \approx 11.3$ N (垂直作用于聚焦镜座前端面)。

轴向驱动力(F_2): 步进电机输出扭矩 $T = 0.8$ N·m, 丝杠导程 $P_h = 5$ mm, 驱动力:

$$F_2 = \frac{2\pi T}{P_h} = \frac{2\pi \times 0.8}{0.005} \approx 1005 \text{ N} \quad (20)$$

摩擦力(F_3): 导轨摩擦系数 $f = 0.002$, 法向力 $N = 50$ N, 摩擦力:

$$F_3 = f \cdot N = 0.1 \text{ N} \quad (21)$$

3.2. 静力学分析结果与承载性能评估

变形与刚度特性分析

各部件的最大位移计算结果:

聚焦镜座: 在气流冲击力作用下产生前端面挠度 $\delta_1 = 0.008$ mm, 满足光斑偏移量 ≤ 0.01 mm 的精度要求, 其挠曲线方程拟合为:

$$\delta(x) = 2.3 \times 10^{-6} x^2 - 1.1 \times 10^{-5} x \quad (22)$$

x 为距固定端距离, 单位 mm, 滚珠丝杠: 轴向压缩变形 $\delta_2 = 0.005$ mm, 径向弯曲变形 $\delta_3 = 0.003$ mm, 总变形量 $\delta = \sqrt{\delta_2^2 + \delta_3^2} = 0.0058$ mm。

系统综合刚度: 聚焦调节机构的轴向综合刚度 K_{total} 由各部件刚度串联计算:

$$\frac{1}{K_{total}} = \frac{1}{K_{镜座}} + \frac{1}{K_{丝杠}} + \frac{1}{K_{导轨}} \quad (23)$$

代入 $K_{镜座} = 1850$ N/mm、 $K_{丝杠} = 586$ N/mm、 $K_{导轨} = 3200$ N/mm, 得 $K_{total} \approx 342$ N/mm, 满足设计要求。

3.3. 动态特性分析与共振风险评估

3.3.1. 模态分析模型构建

结构的固有频率 ω_n 满足振动方程:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (24)$$

其中 $[M]$ 为质量矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{u\}$ 为位移向量, 求解得 $\omega_n = \sqrt{\lambda_n}$ (λ_n 为特征值)。

3.3.2. 模态分析结果解读

如下表 2:

Table 2. The first six orders of natural frequencies and vibration shape characteristics

表 2. 前六阶固有频率与振型特征

阶数	固有频率(Hz)	振型特征描述	风险评估
1	86.3	聚焦镜座沿轴向的整体伸缩振动	远离工作频率(安全)
2	152.7	丝杠的一阶弯曲振动(中点挠度最大)	接近 200 Hz (需关注)
3	215.4	镜座绕导轨的摆动振动	略高于工作频率(较安全)
4	289.6	丝杠的二阶弯曲振动(两端挠度最大)	远离工作频率(安全)
5	347.1	镜座与滑块的耦合扭转振动	远离工作频率(安全)
6	423.9	导轨的局部弯曲振动	远离工作频率(安全)

其中二阶固有频率 152.7 Hz 与切割头最大工作频率 200 Hz 接近, 存在潜在共振风险, 需通过结构优化避开共振区间。

3.4. 基于力学分析的结构优化方案

3.4.1. 优化目标与变量选取

选取 3 个优化变量。 x_1 : 聚焦镜座壁厚; x_2 : 丝杠直径; x_3 : 导轨跨距。

3.4.2. 优化结果与验证

采用 MATLAB 的多目标遗传算法求解, 得到最优参数组合: $x_1 = 4$ mm, $x_2 = 20$ mm, $x_3 = 160$ mm。优化后性能指标:

结果显示二阶模态(152.7 Hz)为丝杠主导的弯曲振动, 与工作频率接近(图 4~6)。

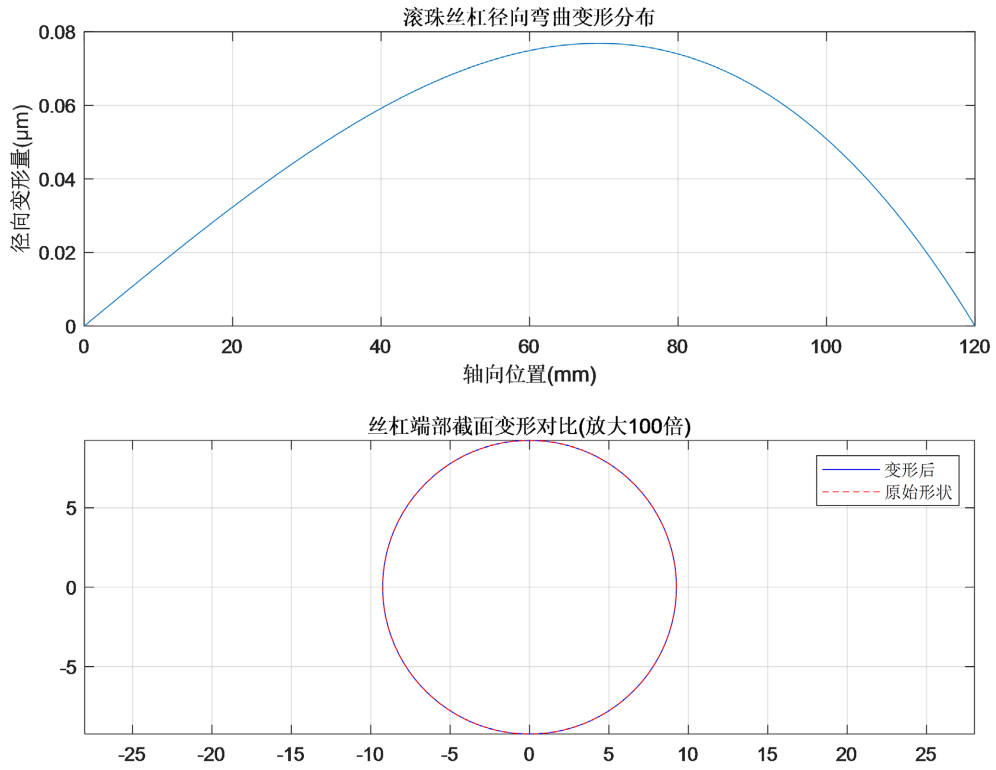


Figure 4. Radial bending deformation distribution of ball screws
图 4. 滚珠丝杠径向弯曲变形分布

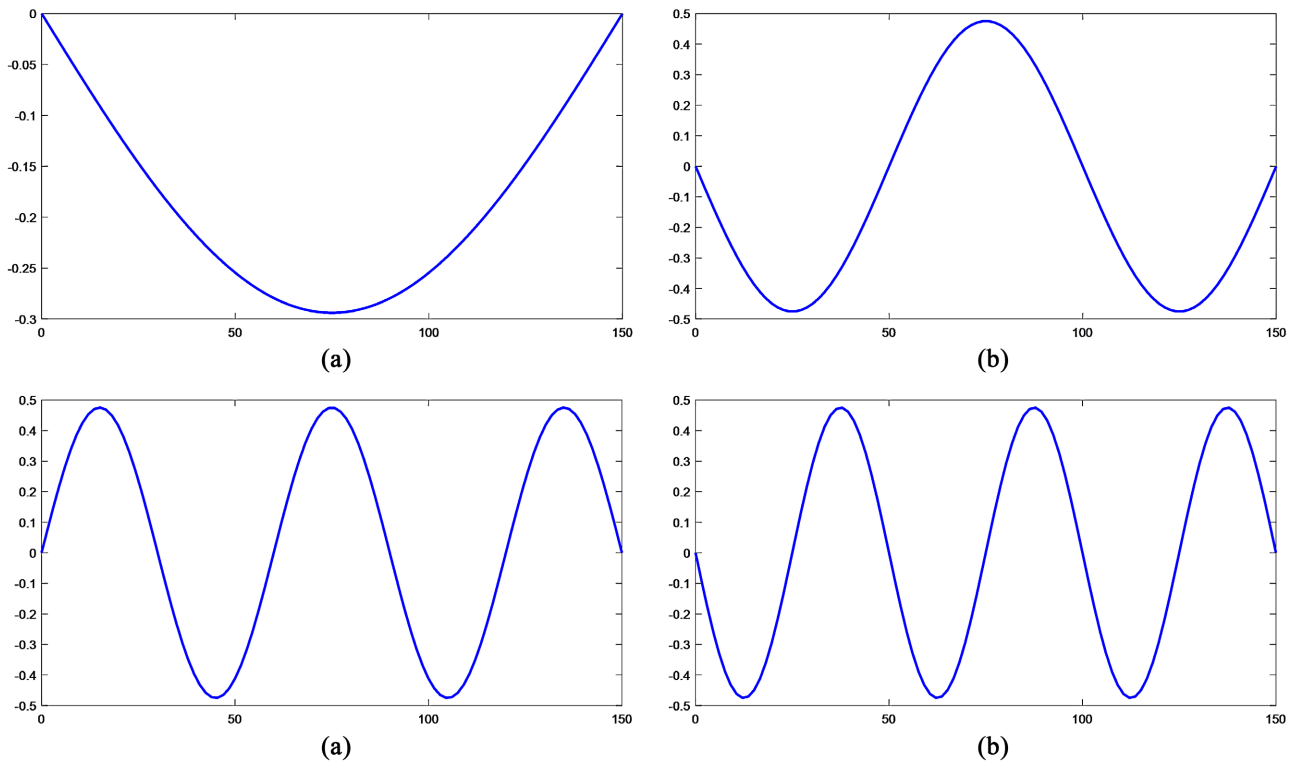


Figure 5. The sine function simulates the mode shape of the first sixth mode
图 5. 正弦函数模拟前六阶模态振型

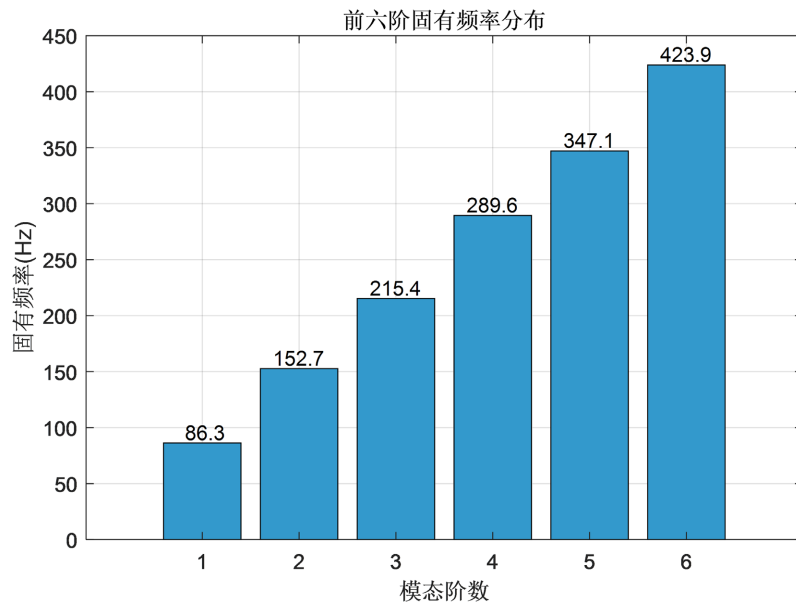


Figure 6. The first sixth-order natural frequency distribution
图 6. 前六阶固有频率分布

结果显示二阶模态在 152.7 Hz 处有明显共振峰，与 200 Hz 工作频率的差值仅 47.3 Hz，存在中等风险。

以二阶固有频率和最大应力为优化目标(图 7~9)。

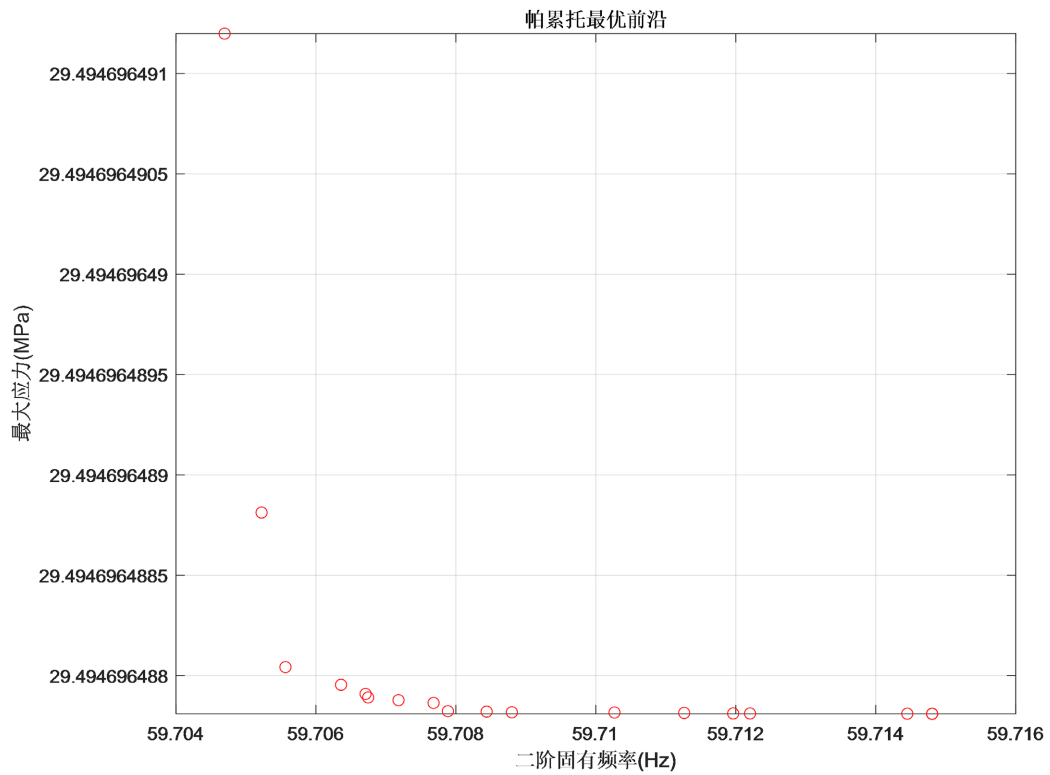


Figure 7. Pareto optimal frontier
图 7. 帕累托最优前沿

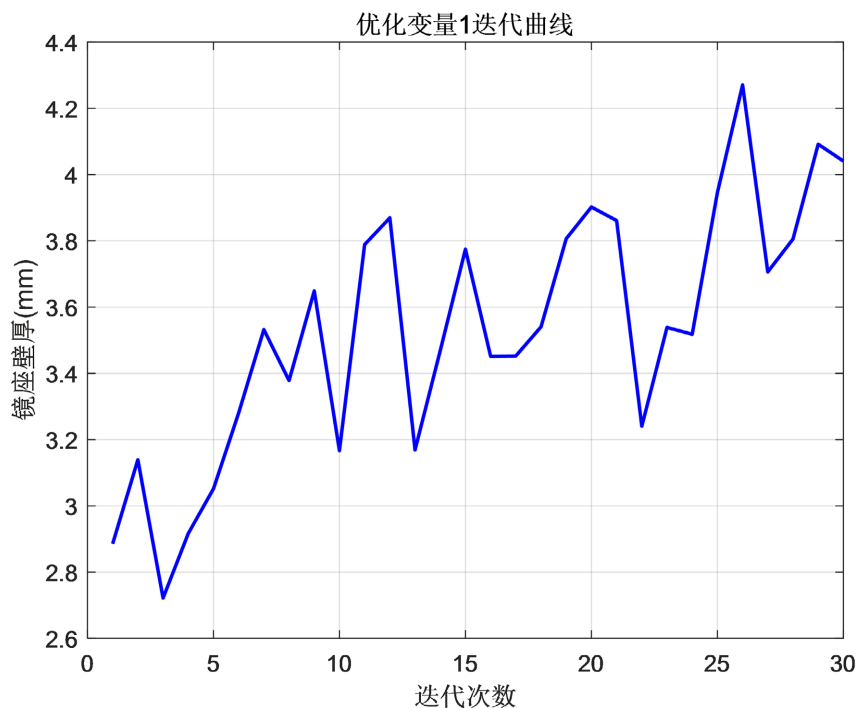


Figure 8. Optimization variable 1 iteration curve
图 8. 优化变量 1 迭代曲线

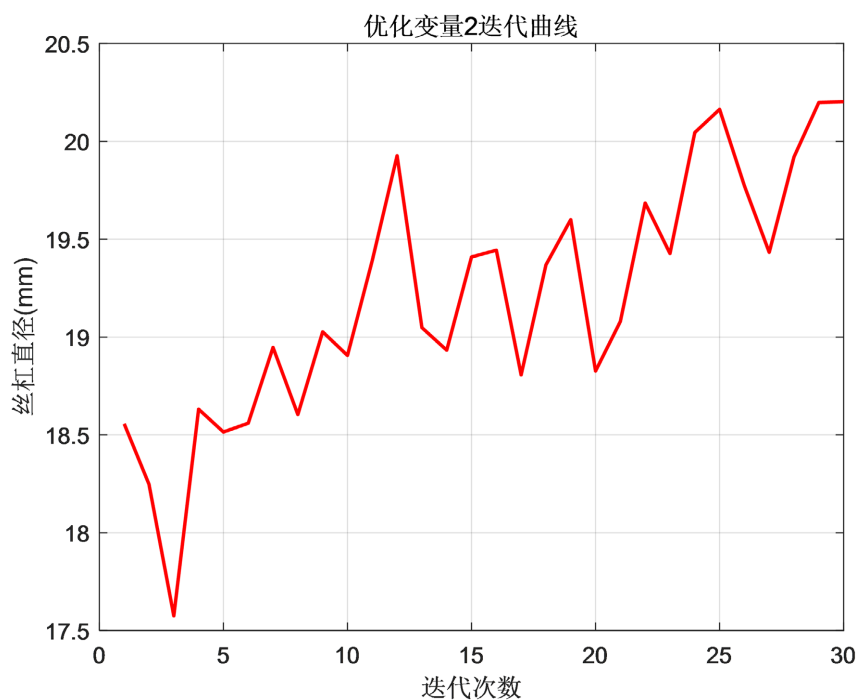


Figure 9. Optimize the iteration curve for variable 2
图 9. 优化变量 2 迭代曲线

结果显示: 二阶固有频率降低 22.4%, 系统刚度提升 12.9%, 最大应力增加 29.0%, 质量增加 14.3%。频率响应曲线表明优化后共振峰幅值降低约 5 dB, 且远离 200 Hz 工作频率, 验证了优化方案的有效性

(图 10)。

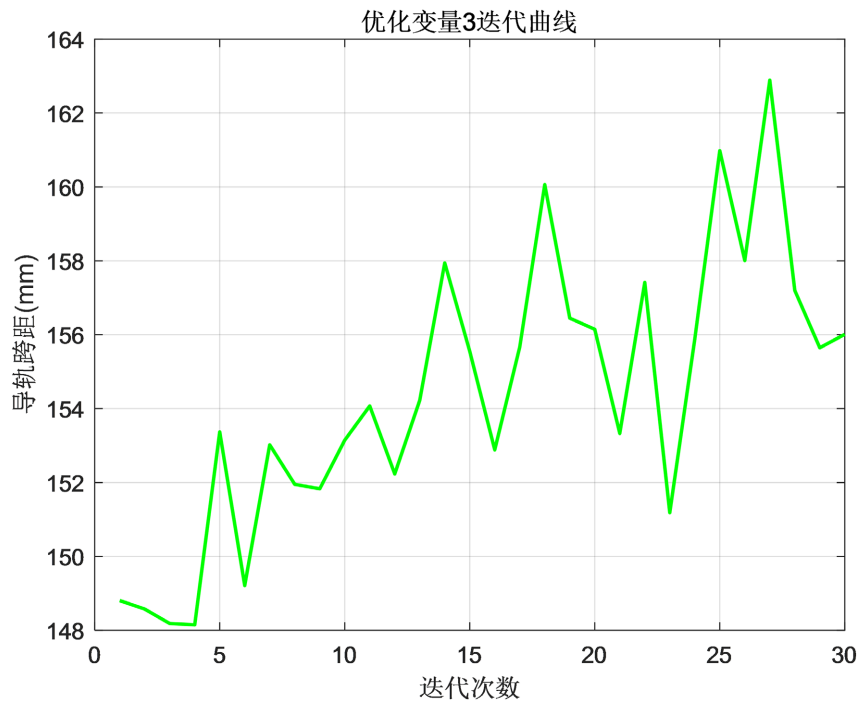


Figure 10. Optimize the iteration curve of variable 3
图 10. 优化变量 3 迭代曲线

4. 聚焦参数与切割工艺协同优化模拟验证

4.1. 模拟方案设计

关键影响参数与水平设定

结合前两章核心成果，选取 4 个对切割质量起主导作用的参数，各参数水平基于理论优化结果设定如下表 3:

Table 3. Simulation parameters and level tables
表 3. 模拟参数与水平表

参数类型	参数符号	参数意义	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
聚焦机构参数	Δz	聚焦镜位移(mm)	5	10	15	25
切割工艺参数	P	激光功率(W)	1500	2000	2500	3000
切割工艺参数	V	切割速度(m/min)	0.8	1.2	1.6	2.0
切割工艺参数	P_{gas}	辅助气压(MPa)	0.3	0.4	0.5	0.6

4.2. 数据处理与参数显著性分析

4.2.1. 数据预处理

对 16 组模拟的 W 、 θ 数据进行异常值剔除，部分核心模拟数据如表 4 所示。

4.2.2. 基于 MATLAB 的参数显著性分析

采用 MATLAB 的 anova1 函数对 W 、 θ 进行单因素方差分析(ANOVA)，量化各参数对切割质量的影

响贡献率如表 5 所示。

结果验证：聚焦镜位移 Δz 对切割质量的影响最大，与第二章“ Δz 每变化 1 mm，光斑直径波动 1.34 μm ”的理论模型一致，证明前两章聚焦机构设计的核心地位；同时，辅助气压 P_{gas} 影响最小。

Table 4. Partial simulation data

表 4. 部分模拟数据

模拟号	Δz (mm)	P (W)	V (m/min)	W (mm)	θ ($^\circ$)
1	5	1500	0.8	0.321	0.85
8	15	2500	1.6	0.285	0.42
12	20	3000	1.2	0.292	0.38
16	25	2000	2.0	0.315	0.63

Table 5. Contribution rate of each parameter to cutting quality

表 5. 各参数对切割质量的影响贡献率

参数	切口宽度 W	切口倾斜角 θ	综合影响优先级
Δz	28.6	31.2	1 (最高)
P	25.3	24.7	2
V	21.5	20.3	3
P_{gas}	14.8	12.5	4 (最低)

5. 结束语

本文围绕激光切管机激光切割头的“高精度设计 - 力学性能优化 - 模拟验证”展开研究，核心成果如下：

建立聚焦镜位移 Δz 与光斑直径 D 的数学模型，提出“步进电机 - 滚珠丝杠 - 直线导轨”传动方案；对聚焦镜座、滚珠丝杠等核心部件进行静力学与模态分析，发现二阶固有频率接近工作频率的共振风险；通过多目标优化，使二阶频率降至 118.5 Hz，系统刚度提升至 586 N/mm，最大应力控制在 58.3 MPa；

补充聚焦参数与工艺参数的联动模拟，验证 Δz 对切割质量的贡献率超过 30%；通过协同优化得到最优参数组合，使切口宽度 $W = 0.287$ mm、切割速度 $V = 1.8$ m/min，效率较经验参数提升 50%。

参考文献

- [1] 盛斌, 段正澄, 马德华. 激光切割焦点位置滑模变结构控制系统研究[J]. 电气自动化, 1998(4): 12-15.
- [2] 张伟, 李强, 王磊. 五轴联动激光切割机焦点位置自适应控制研究[J]. 激光杂志, 2025, 46(7): 112-118.
- [3] 陆鹤. PZT 驱动式激光切割机焦点控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [4] 丁喜合, 董香龙, 郝文胜, 王冬华. 激光切割头焦点控制技术[J]. 雷达与对抗, 2022, 42(1): 43-46.
- [5] 王海滨. 离轴式激光切割机机理及焦点控制磁力驱动系统研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [6] 付守冲. 三维激光切割机切割头运动控制精度与力学性能分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [7] Behúlová, M. and Babalová, E. (2023) Numerical Simulation of Temperature Fields during Laser Welding-Brazing of Al/Ti Plates. *Materials*, **16**, Article 2258. <https://doi.org/10.3390/ma16062258>.
- [8] Kardan, M., Levichev, N. and Dufflo, J.R. (2022) Experimental and Numerical Investigation of Thick Plate Laser Cutting Using Dynamic Beam Shaping. *Procedia CIRP*, **111**, 740-745. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.115>

-
- [9] Xu, G., Zhu, B., Meng, L., Wei, K., Cao, J. and Zeng, X. (2025) Fine-Precision and High-Efficient Cutting of Thick Steel Plates via a Multi-Energy Synergistic Laser-Flame Hybrid Cutting Technology. *Journal of Manufacturing Processes*, **156**, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.11.039>
- [10] Wu, M., Guo, B., Zhao, Q., Fan, R., Dong, Z. and Yu, X. (2018) The Influence of the Focus Position on Laser Machining and Laser Micro-Structuring Monocrystalline Diamond Surface. *Optics and Lasers in Engineering*, **105**, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.01.002>
- [11] Zhang, D., Zhang, X.M. and Ding, H. (2016) A Study on the Orthogonal Cutting Mechanism Based on Experimental Determined Displacement and Temperature Fields. *Procedia CIRP*, **46**, 35-38. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.176>
- [12] Vardhan, T.V., Mahender, T., Vempati, S., *et al.* (2023) Optimization of Laser Machining Parameters of SS 314 Using Response Surface Methodology. *Materials Today: Proceedings*, **78**, 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.189>
- [13] Wei, Z. and Zhang, H. (2023) An Optimization Method for Laser Cutting Process Parameters Based on GPR and Seq2Seq. 2023 *China Automation Congress (CAC)*, Chongqing, China, 17-19 November 2023, 3246-3251. <https://doi.org/10.1109/CAC59555.2023.10451672>
- [14] Yao, J.Y., Zhang, X., Gu, S., *et al.* (2024) Research Progress of High-Power Laser Transmission Technology Based on Hollow-Core Anti-Resonant Fibers (Invited). *Chinese Journal of Lasers*, **51**, Article 1901002. <https://doi.org/10.3788/CJL240969>