

基于高斯过程回归的线性激光束指向稳定优化

刘哲生 张冬冬 李洪阳 宋立伟 田野

Optimization of linear laser beam pointing stability based on Gaussian process regression

LIU Zhesheng, ZHANG Dongdong, LI Hongyang, SONG Liwei, TIAN Ye

引用本文:

刘哲生, 张冬冬, 李洪阳, 等. 基于高斯过程回归的线性激光束指向稳定优化[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1265–1272. DOI: 10.5768/JAO202344.0610014

LIU Zhesheng, ZHANG Dongdong, LI Hongyang, et al. Optimization of linear laser beam pointing stability based on Gaussian process regression[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1265–1272. DOI: 10.5768/JAO202344.0610014

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

以高斯波束为探针的太赫兹叠层成像系统

Terahertz ptychography system using Gaussian beam as probe

应用光学. 2021, 42(4): 571–576 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401001>

基于线性模型的自适应优化去雾算法

Adaptive optimization defogging algorithm based on linear model

应用光学. 2020, 41(1): 114–119 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0102008>

一种基于粒子群优化的高斯混合灰度图像增强算法

Gaussian mixture grayscale image enhancement algorithm based on particle swarm optimization

应用光学. 2017, 38(4): 592–598 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0402003>

镜面瑕疵对激光光束质量的影响

Effect of mirror defect on laser beam quality

应用光学. 2017, 38(4): 665–669 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407002>

单线阵CCD相机双激光器立靶测量系统误差分析

Error analysis on measuring system of vertical target with single-linear array CCD camera and dual-laser

应用光学. 2018, 39(2): 240–245 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0205001>

基于LD激发荧光粉白光光源的窄光束照明光学系统设计

Design of narrow beam illumination optical system based on LD excitation phosphor white light source

应用光学. 2020, 41(3): 469–476 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1265-08

基于高斯过程回归的线性激光束指向稳定优化

刘哲生^{1,2}, 张冬冬², 李洪阳^{2,3}, 宋立伟², 田野²

(1. 中国科学技术大学 物理学院, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800; 3. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 为解决激光应用中的光束指向抖动问题, 提出一种基于高斯过程回归 (Gaussian process regression) 的激光光束指向稳定性优化方案。介绍了激光光束指向稳定系统装置构成及原理, 论述了高斯过程回归方法的原理及其作为激光光束快速稳定控制算法的优势。经过该方法优化后, 指向抖动达到水平方向 $2.3 \mu\text{rad}$, 竖直方向 $3.3 \mu\text{rad}$, 将激光系统指向稳定性提高了1个数量级以上。指向性抖动为已有线性反馈系统的20%, 尤其对于高频噪声优化有显著效果。该研究对于激光光束指向性敏感的精密实验和精密加工具有重要意义。

关键词: 高斯过程回归; 线性激光束; 系统设计; 性能分析

中图分类号: TN247; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610014

Optimization of linear laser beam pointing stability based on Gaussian process regression

LIU Zhesheng^{1,2}, ZHANG Dongdong², LI Hongyang^{2,3}, SONG Liwei², TIAN Ye²

(1. School of Physics Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 3. School of Physical

Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To solve the problem of beam pointing jitter in laser applications, a laser beam pointing stability optimization scheme based on Gaussian process regression was proposed. The composition and principle of the laser beam pointing stability system device were introduced, and the principle of Gaussian process regression method and its advantages as the fast stabilization control algorithm for laser beams were discussed. After optimization by this method, the pointing jitter reaches $2.3 \mu\text{rad}$ in the horizontal direction and $3.3 \mu\text{rad}$ in the vertical direction, which improves the pointing stability of the laser system by more than an order of magnitude. The pointing jitter is 20% of the existing linear feedback system, and has a significant effect on high-frequency noise optimization. This study is of great significance for precision experiments and precision machining that are sensitive to the directionality of laser beams.

Key words: Gaussian process regression; linear laser beam; system design; performance analysis

引言

激光在现代科技、军事国防、工业生产等领域发挥着重要作用。光束指向稳定性作为激光应用

的关键参数之一, 在精密制造、医疗、光学、光物质相互作用等领域对产品质量和实验准确性至关重要^[1]。尤其是在激光微纳加工^[2-3]和激光打靶^[4-7]

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (62105346); 基础研究特区计划 (JCYJ-SHFY-2021-002); 中国科学院基础前沿科学研究计划 (ZDBS-LY-SLH018); 中国科学院基础研究青年团队 (YSBR059)

作者简介: 刘哲生 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机辅助强场激光实验研究。E-mail: 1929224987@163.com

通信作者: 宋立伟 (1983—), 男, 博士生导师, 主要从事强场太赫兹技术、超快激光技术研究。E-mail: slw@siom.ac.cn

过程中,如果激光光束指向不稳定,就会导致加工误差或激光对准偏差,从而影响到产品的精度和激光物理实验的可靠性。然而,受激光装置本身和环境因素影响,在自由运行状态下,激光光束的指向会发生漂移^[8-9]。因此,引入激光光束指向稳定控制系统成为一个必要且紧迫的目标。

在实际应用中,导致激光指向不稳的因素来源于两个方面:1) 光学平台和光学器件存在热漂移、机械振动,及其他机械效应导致的各种系统误差;2) 测量误差、空气湍流等环境干扰或人为操作不确定性等随机因素会引起随机误差。这两类误差均可能对系统的指向稳定性造成干扰,尤其激光光程较大时,一般需要考虑光束的指向稳定问题;通过引入主动激光光束稳定控制系统,可以实现对激光光束的精确控制和调整。这种系统一般包括光学元件、传感器、反馈控制器等组成部分。光学元件可以修正激光光束的形状和方向,传感器可以实时监测光束的参数,而反馈控制器则根据传感器的反馈信号对光束指向进行精确调整。激光光束指向稳定控制系统的引入不仅可以提高产品光学实验精度、优化实验参数,还可以降低要求条件、延长设备使用寿命,并且有助于避免潜在的安全隐患。同时,该系统的引入也为激光技术的应用提供了更广阔的空间,促进了相关行业的发展。

传统的指向稳定性控制系统主要是采用位置测量-反馈控制的方案。例如:1999年,日本的NEC公司设计的电磁驱动光束校正装置^[10](wide-range fine pointing mechanism, WFPM),其控制精度可达 30 μrad , 偏转范围为 140 mrad, 相应带宽达 380 Hz。2010年, WU Y 等首次提出了全被动光束稳定指向技术,他们针对单次低重频激光系统提出一种基于图像旋转与和频生成的无源光束指向稳定方法,该方法在原理验证实验中将指向稳定性提高了 2 个数量级,达到 10 mrad 水平^[11]。德国 MRC 公司的激光束指向稳定控制模块^[12]最大矫正量达到 2 mrad 水平,其稳定精度与光斑大小相关。2022年, ZHAO H N 等人使用自动准直的光学方法,同时测量径向、轴向和倾斜误差运动,指向稳定性达到 $\pm 25.1 \mu\text{rad}$ 水平^[13]; MENG Q X 等人设计的 3D 打印激光自准直仪,能够在长时间的实验中以精确的计时连续监测并准直角度,其指向稳定性优于 $14.5 \mu\text{rad}$ ^[14]。以上几种激光束指向稳定控制方法主要采用基于位置检测-误差分析-系统调整-反馈控制的流程,这些步骤通常在实时控制系统

中以很高的速度进行,以确保对激光束指向的快速响应和稳定控制。但对于高精度要求的激光系统,还需要更先进的控制算法和更高精度的传感器来实现精确的指向稳定。此外,还需要考虑环境因素、机械振动、温度变化^[15-16]等外部因素对激光束指向的影响,并采取相应的措施进行补偿和抑制。

影响激光稳定性的因素对于复杂使用环境和不同的激光系统之间差异巨大,且难以建立准确的物理模型来精准描述指向抖动的问题。而近年来随着机器学习^[17-19]的发展,特别是在物理领域的应用,比如解决一些多变量耦合的复杂问题,机器学习有着天生的优势。机器学习首先根据目标问题设计数据算法,然后使用统计方法从输入的大量数据中学习提取规律,总结数据的变化特征,并利用这些模式和规律来做出预测或做出决策。

目前,机器学习主要有以下几种主流算法:

1) 网格搜索算法

网格搜索算法^[20-21]是一种用于寻找最佳模型超参数组合的优化算法,其优点是能够保证找到全局最优解,而不仅仅是局部最优解。然而,由于需要遍历所有可能的超参数组合,算法的时间复杂度较高。

2) 随机森林

随机森林^[22]是一种集成学习方法,通过组合多个决策树来提高预测准确性。该方法随机选择样本和特征进行建模,并通过统计或投票来得出最终预测结果。随机森林具有较好的泛化能力和解释性,但需要较多的计算资源和较为复杂的超参数调优。

3) 高斯过程回归

高斯过程回归^[23-24]是统计学和机器学习领域中的一种数学工具,用于建模随机过程,无需对模型做出任何假设,其分析过程只需估计输入数据与输出之间的关系。给定一组观测数据,可以使用高斯过程预测新的未知输入对应的输出值,并提供相应的不确定性估计。高斯过程回归具有较高的计算效率,特别是在处理大规模数据时效率更加明显。由于高斯过程的求解可以通过矩阵计算来进行,因此可以利用矩阵运算的高效性,从而很好地处理大量数据。同时,高斯过程建模可以方便地进行增量学习,即在已有数据基础上随时添加新的数据进行建模,这使得高斯过程回归在实时应用和动态环境中具有适应性和实时性。

本文为提高激光光束指向稳定性, 使用机器学习方法, 通过采集大量激光束的光束指向位置坐标, 采用高斯过程回归算法对这些数据进行分析和学习, 提取激光束抖动模式和规律, 最后通过控制策略给出对应调控参数对激光稳定性进行控制。相比传统方法, 机器学习方法响应时间更短、控制效果更加精确和稳定, 预期未来可应用到激光手术、医疗影像学、激光切割焊接、气象监测等领域。

1 实验原理

本研究中, 我们利用高斯过程回归对复杂的光束准直过程进行建模。建模过程中, 算法优化主要包含以下几个步骤:

1) 定义参数空间

确定需要优化的参数范围和步长, 对于激光束指向稳定性的问题, 可能涉及到调整激光束的位置、角度等参数。本文中的参数主要为位置传感器采集到的光束指向的数据集中的数据, 包括水平方向和竖直方向上激光束的指向性抖动的时序。根据具体情况, 可以确定每个参数的范围和步长。

2) 采集并预处理数据

使用位置传感器采集光束指向的位置数据, 并对数据进行预处理。划分训练集和测试集, 训练集用于构建高斯过程回归模型, 测试集用于验证模型的性能。

3) 定义评估函数

根据激光束指向稳定性的评估指标, 可以定义1个评估函数。评估函数的输入是参数组合, 输出是评估指标的值。评估指标可以是激光束的偏移量、方向稳定性等。本文中使用的评估指标为均方误差(mean squared error, MSE)。

4) 构建参数组合

根据参数空间中的范围和步长, 构建参数组合。对于每个参数, 根据步长在范围内生成一系列的取值。

5) 模型评估

使用测试集的数据对构建好的高斯过程回归模型进行评估, 包括计算预测偏差、确定模型的置信区间等。

6) 持续优化

根据评估指标的值, 找到最优的参数组合, 可

以是最小化评估指标值或最大化评估指标值。根据实际应用的结果和反馈, 不断调整和优化高斯过程回归模型, 从而进一步提高激光束指向稳定的性能。

实验步骤流程框图如图1所示。

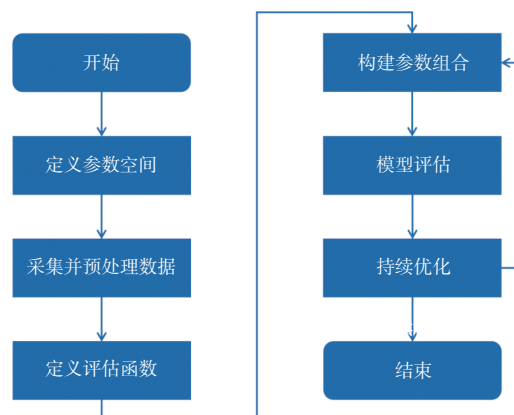


图1 实验步骤流程框图

Fig. 1 Flow block diagram of experimental procedures

实验装置如图2所示, 该装置包含钛宝石飞秒激光器(输出单脉冲能量为2 mJ, 脉冲宽度为30 fs, 激光中心波长为800 nm, 重复频率为1 kHz)、2个位置敏感探测器(position sensitive detector, PSD), 型号为Thorlab PDQ80A、1个集成在计算机中的基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的高速图像处理系统, 以及2个快速转向镜(fast steering mirror, FSM)。计算机中的图像处理系统从探测器上的参考位置确定中心点偏差, 并在捕获新帧后的3 ms内发送控制信号, 驱动快速转向镜在1 ms内精确调整角度。

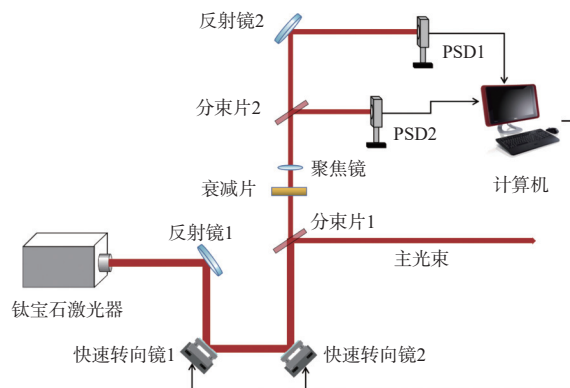


图2 基于高斯过程回归的激光光束指向稳定系统装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser beam pointing stabilization system device based on Gaussian process regression

首先,我们评估激光系统自由运行(无指向性反馈控制)时经 $f=2\text{ m}$ 透镜聚焦的焦点位置的横向抖动情况和指向抖动情况。测量中使用了 Ophir SP932U high resolution CCD 相机(30 万像素, 2048×1536), 以 24 帧/s(frames per second, FPS)的采样频率记录了 5 min 内在激光焦平面上的远场光斑质心的分布变化, 如图 3 所示, 其中右上角插图 of 光斑图样。自由状态下, 焦斑在 $100\text{ }\mu\text{m}$ 范围内抖动, 对应的指向性抖动的均方差(root mean square, RMS)为水平方向 $65\text{ }\mu\text{rad}$, 竖直方向 $85\text{ }\mu\text{rad}$ 。这一抖动主要来自于系统噪声和随机噪声, 对于指向性敏感的激光物理应用, 需要通过指向稳定性系统加以反馈控制。

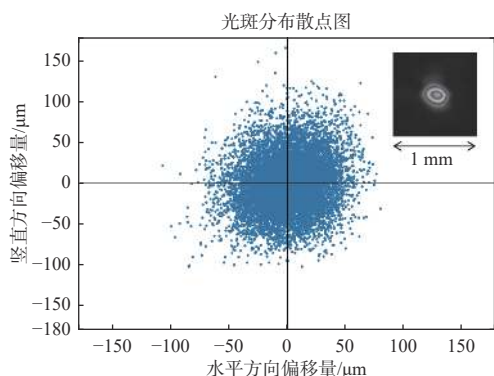


图 3 光斑分布散点图和光斑图(插图)

Fig. 3 Scatter diagram of light spot distribution and light spot image (illustration)

已有的指向稳定系统大多采用线性反馈的方法, 即基于位置检测-噪声计算-系统调整-反馈控制的流程, 并未系统考虑引起抖动的因素及其作用规律。本研究中采用高斯过程回归算法, 对噪声数据进行综合分析, 能够实现更高精度的指向稳定性快速反馈。

在高斯过程回归模型中, 被拟合函数 $f(x)$ 可以表示为

$$f(x) = g(m(x), K(x, x')) \quad (1)$$

式中: x 是输入向量, 在这里的值为位置传感器采集到的光束指向数据集中的数据; $m(x)$ 则为给定的均值函数; $K(x, x')$ 为定义域内任取 x, x' 两点的协方差函数。

在高斯过程回归中, 我们通常用核函数 $K(r)$ 表示任意两点的协方差的值。常用的核函数有指数二次协方差核函数:

$$K(r) = \left(1 + \frac{r^2}{2\alpha l^2}\right)^{-\alpha} \quad (2)$$

RBF 核函数:

$$K(r) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\|r\|^2}{2l^2}\right) \quad (3)$$

Periodic 核函数:

$$K(r) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{2}{l^2} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right)r\right) \quad (4)$$

式中: r 表示欧氏空间中 x, x' 两点的距离测度; σ, l, α 和 p 都是核函数中的超参数。径向基函数是最为常用的协方差函数之一:

$$K(x, x') = \alpha^2 \exp\left(-\frac{|x - x'|}{2l^2}\right) \quad (5)$$

高斯过程的推导与使用何种均值函数无关, 故我们先假设 $m(x) = 0$, 则 N 个目标点上的高斯先验分布可写为

$$p(f|x) = (2\pi)^{(-N/2)} |K|^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2} f^T K^{-1} f\right), K = K(x, x') \quad (6)$$

假设 x 点观测值 y 受到方差 σ^2 影响且相互独立, 则似然函数为

$$p(y|f, x) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma^2} \exp\left(-\frac{(y_i - u_i(x_i))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

接下来, 我们可以使用贝叶斯定理计算其后验分布:

$$p(y|f, x) = \frac{p(y|f, x) p(f, x)}{p(y|x)} \quad (8)$$

对数似然估计为

$$\begin{aligned} \log p(y|x) &= \int p(y|f, x) p(f, x) df = \\ &= -\frac{1}{2} y^T (K(x, x') + \sigma^2 I_N)^{-1} y - \\ &= \frac{1}{2} \log |K + \sigma^2 I_N| - \frac{N}{2} \log 2\pi \end{aligned} \quad (9)$$

式中: I_N 表示大小为 $N \times N$ 的矩阵, 其物理意义为时间序列数据中的观测值, 其中 N 表示时间点的数量。

则点 x^* 处对高斯过程回归 $f^* = f(x^*)$ 的预测可表示为

$$E(f^*) = K(x^*, x) (K + \sigma^2 I_N)^{-1} y \quad (10)$$

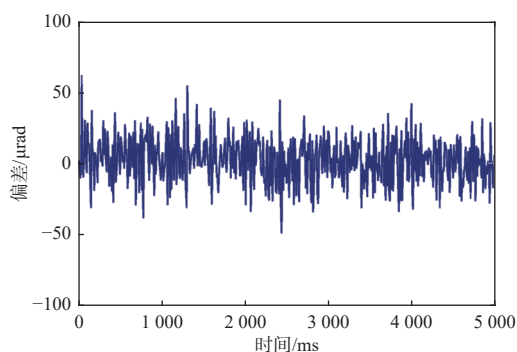
$$V[f^*] = K(x^*, x^*) - K(x^*, x) (K + \sigma^2 I_N)^{-1} K(x, x^*) \quad (11)$$

式中: E 为函数 $f(x)$ 的近似期望值; V 为函数 $f(x)$ 的近似方差。

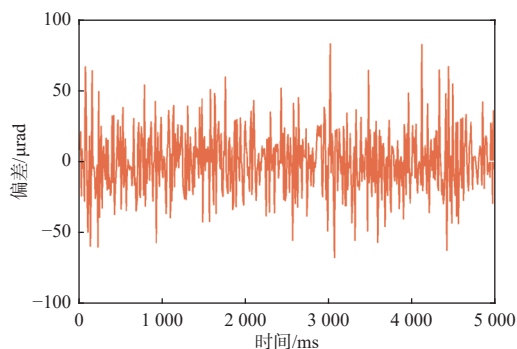
通过高斯过程回归模型, 可以得到较高的拟合精度与预测值对应的方差和可信度。通过计算相关样本点, 可以拟合得到高维模型。

2 结果与分析

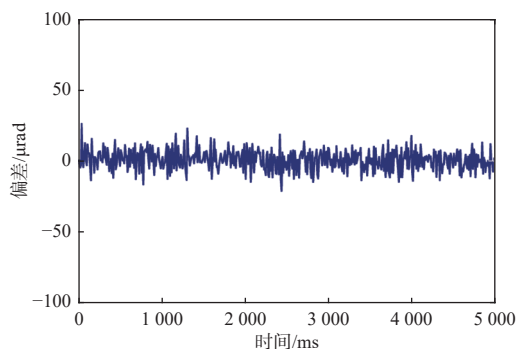
图 4 分别记录了准直前使用传统线性优化方法和高斯过程回归方法的激光束指向抖动的细节, 其中深色实线表示水平方向偏差, 其零点为在 5 000 ms 内记录期间的平均点中心; 浅色实线则表示参考同一参考位置的竖直方向的偏差。其中光斑的中心位置由 PSD 采集得出, 而角度和像素偏差之间的关系在测试前进行校准。



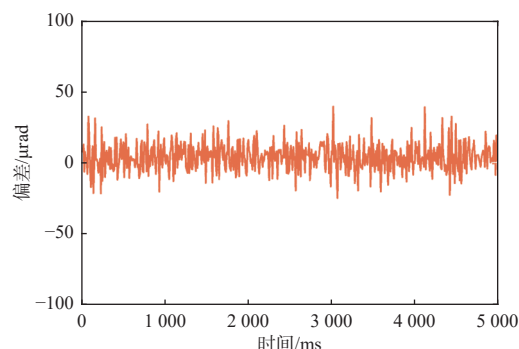
(a) 自由运行状态下, 水平方向指向性抖动时域曲线



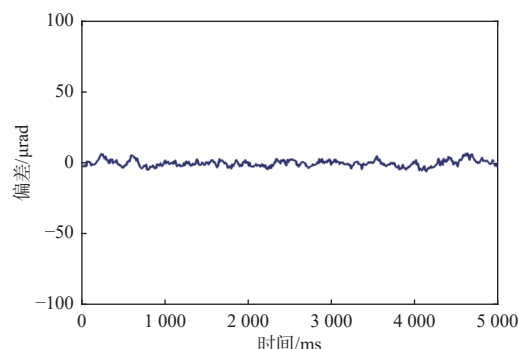
(b) 自由运行状态下, 竖直方向指向性抖动时域曲线



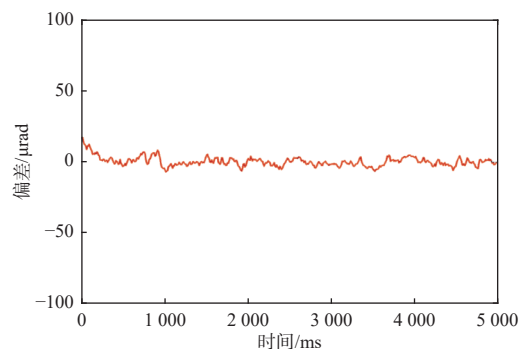
(c) 线性优化条件下, 经过反馈后水平方向指向性抖动时域曲线



(d) 线性优化条件下, 经过反馈后竖直方向指向性抖动时域曲线



(e) 高斯过程回归优化条件下, 经过反馈后水平方向指向性抖动时域曲线



(f) 高斯过程回归优化条件下, 经过反馈后竖直方向指向性抖动时域曲线

图 4 光束指向抖动时域分析图

Fig. 4 Time-domain analysis diagram of beam pointing jitter

由图 4 可知, 准直前的光束指向抖动 RMS 为水平方向上 $65 \mu\text{rad}$, 竖直方向上 $85 \mu\text{rad}$; 使用线性优化方法后的光束指向波动 RMS 为水平方向上 $30.8 \mu\text{rad}$, 竖直方向上 $45.4 \mu\text{rad}$; 而使用高斯过程回归优化后的光束指向波动 RMS 为水平方向上 $2.3 \mu\text{rad}$, 竖直方向上 $3.3 \mu\text{rad}$ 。可以看出, 高斯过程回归优化相较线性优化, 指向稳定性提高了 1 个数量级以上, 其原因主要是高斯过程回归是一种非参数方法, 它对数据没有严格的假设或限制, 能够自适应地适应光束指向波动优化问题中的各种数据分布和非线性关系。相比之下, 线性优化方

法在处理复杂光束指向波动模型时可能受到线性假设的限制而失去准确性和鲁棒性。

为了进一步分析影响光束稳定性的主要来源, 本文根据测得的时域指向波动, 通过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 分析光束指向波动的频谱分布, 如图 5 所示。

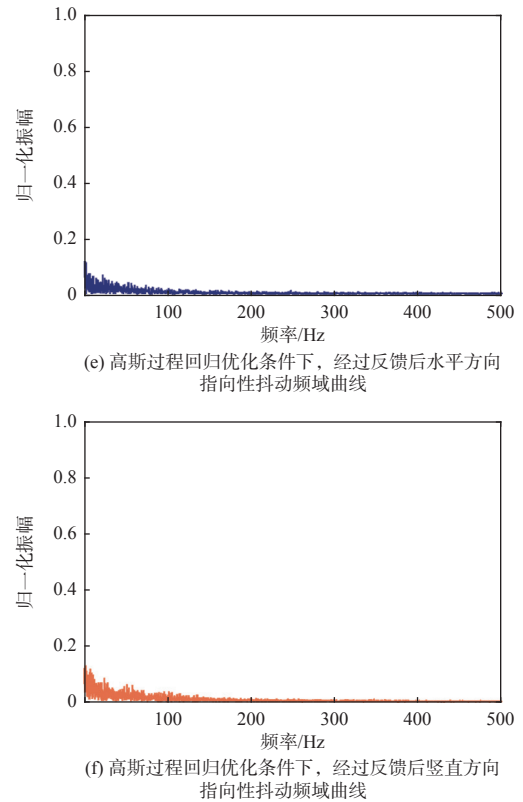
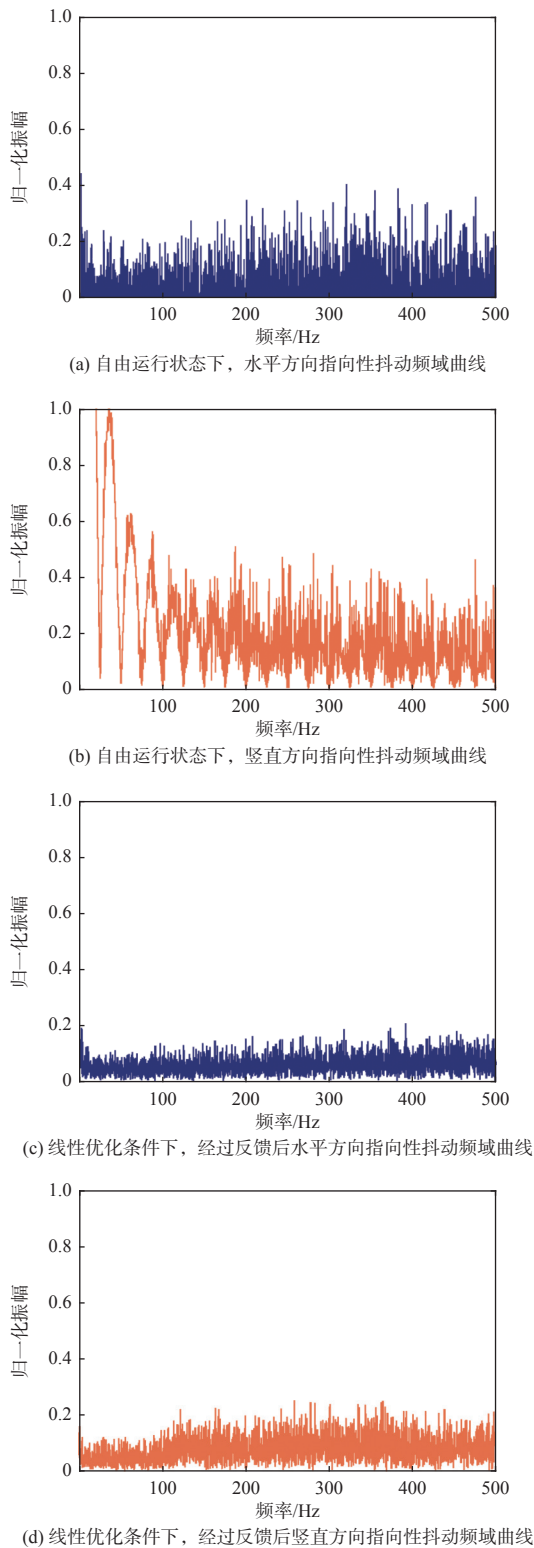


图 5 光束指向波动频域分析图

Fig. 5 Frequency-domain analysis diagram of beam pointing fluctuations

由图 5(a)可以看出, 在系统无准直时, 水平方向上存在着明显的高低频振荡; 由图 5(b)可以看出, 在系统无准直时, 垂直方向 36 Hz 的振荡占主导, 因此推断该成分主要来源为实验光学平台的固有振荡频率, 与前期测试的机械振动频率范围相吻合。而高频相位可能来自于激光放大器中的系统噪声, 由图 5(c), 图 5(d), 图 5(e)和图 5(f)分析发现, 使用高斯过程回归优化要显著优于传统线性优化方案, 其不仅在低频部分 (100 Hz 以内) 能够有效消除噪声影响, 在高频系统中的噪声优化效果也极佳。整体来说, 高斯过程回归优化将高频噪声幅度降低了 1 个数量级, 将低频噪声幅度降低到了约 45%, 体现了基于高斯过程回归的机器学习方案在处理多因素耦合问题上的优越性。

3 结论

本研究提出了一种基于高斯过程回归的激光束指向稳定优化系统, 用于评估激光系统中的指向抖动特性并降低指向抖动。该系统使用机器学习方法对采集到的先验数据进行训练, 大大降低

了线性光学系统中激光束指向的系统噪声; 主动光束稳定系统测试后振幅约为水平方向上 $2.3 \mu\text{rad}$, 竖直方向上 $3.3 \mu\text{rad}$ 。通过提高激光系统的光束指向稳定性, 可以提高其在作用区域的平均功率, 降低由于指向性抖动带来的噪声和其它不利影响。未来可以进一步优化高斯过程回归模型, 提高激光束指向稳定性的预测和优化能力。同时, 可以考虑引入其他机器学习算法或优化方法, 以进一步提高系统的性能和稳定性。

目前, 该系统已在线性飞秒激光系统中取得了良好的效果, 未来可以将该系统应用于非线性的激光系统中。通过适当的调整和改进, 可以实现对不同类型激光系统中的指向波动进行评估和控制; 通过提高激光束的指向稳定性, 可以降低指向波动, 从而提高激光系统在作用区域内的平均功率。进一步的研究可以探索如何最大程度地利用稳定的激光束, 提高激光系统的输出功率和性能。未来将该系统应用于实际的激光加工、激光通信和激光雷达等领域, 通过在实际应用场景中验证该系统的效果, 验证其实用性和可行性, 并为实际应用提供技术支持。

参考文献:

- [1] 姚林海, 陆培国, 杨永安, 等. 光束指向稳定性高精度检测方法研究[J]. *应用光学*, 2022, 43(2): 339-344.
YAO Linhai, LU Peiguo, YANG Yongan, et al. High precision measurement method of laser beam pointing stability[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 339-344.
- [2] SUGIOKA K, CHENG Y. Femtosecond laser three-dimensional micro- and nanofabrication[J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(4): 041303.
- [3] 王洪庆, 温积森, 杨臻垚, 等. 高速并行双光子激光直写光刻系统[J]. *中国激光*, 2022, 49(22): 2202009.
WANG Hongqing, WEN Jisen, YANG Zhenyao, et al. High-speed parallel two-photon laser direct writing lithography system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(22): 2202009.
- [4] COLE J M, BEHM K T, GERSTMAYR E, et al. Experimental evidence of radiation reaction in the collision of a high-intensity laser pulse with a laser-Wakefield accelerated electron beam[J]. *Physical Review X*, 2018, 8: 011020.
- [5] 谢卓, 温智琳, 司明奇, 等. 双激光脉冲打靶形成Gd等离子体的极紫外光谱辐射[J]. *物理学报*, 2022, 71(3): 207-214.
- [6] XIE Zhuo, WEN Zhilin, SI Mingqi, et al. Characteristics of extreme ultraviolet emission from Gd plasma produced by dual pulse laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(3): 207-214.
- [7] KOZAWA Y, MATSUNAGA D, SATO S. Superresolution imaging via superoscillation focusing of a radially polarized beam[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 86.
- [8] ZHANG K, CHENG F, YANG G, et al. Precise measurement for beam pointing stability of high power repetition rate TEA CO₂ laser[J]. *Optik*, 2017, 131: 892-898.
- [9] LI S S, PENG Y W, FAN D, et al. Study of evaluating nearfield beam quality of the high power laser beams[J]. *Optik*, 2018, 157: 148-155.
- [10] GRAY J, THOMAS P, ZHU X D. Laser pointing stability measured by an oblique-incidence optical transmittance difference technique[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(9): 3714-3717.
- [11] INAGAKI K, MIYAZAKI T, FUJISE M. High-speed tracking target simulator for fine tracking mechanisms[J]. *SPIE*, 1994, 63(8): 652-654.
- [12] WU Y, FRENCH D, JOVANOVIĆ I. Passive beam pointing stabilization[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(2): 250-252.
- [13] MRC Systems GmbH. Active laser beam stabilization[EB/OL]. [2023-9-15]. <https://www.mrc-systems.de/en/products/laser-beam-stabilization>.
- [14] ZHAO H N, DING W J, FAN M Y, et al. An optical method based auto-collimation for measuring five degrees of freedom error motions of rotary axis[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(12): 125110.
- [15] MENG Q X, STIRLING J, WADSWORTH W J, et al. ACute3D: a compact, cost-effective, 3-D printed laser autocollimator[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-11.
- [16] FENG C, DONG Y, JIN G Y. Dynamic effects of temperature-dependent aberration factors on the beam quality of LD end-pumped lasers[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(10): 100904.
- [17] ZHANG X, ZHANG X X, XIANG A P. Analysis of thermal effect and beam wavefront properties for LD-pumped Q-switch Nd: YAG laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 268-273.
- [18] LIN J P, QIAN Q, MURPHY J, et al. Beyond optimization—supervised learning applications in relativistic laser-plasma experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28(8): 083101.

- 083102.
- [18] GENTY G, SALMELA L, DUDLEY J M, et al. Machine learning and applications in ultrafast photonics[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 91-101.
- [19] SHASTRI B J, TAIT A N, FERREIRA DE LIMA T, et al. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 102-114.
- [20] YAO L, FANG Z, XIAO Y, et al. An intelligent fault diagnosis method for lithium battery systems based on grid search support vector machine[J]. *Energy*, 2021, 214: 118866.
- [21] ENSOR K, GLYNN P. Stochastic optimization via grid search[J]. *Lectures in Applied Mathematics*, 1997, 33: 89-100.
- [22] ATHEY S, TIBSHIRANI J, WAGER S. Generalized random forests[J]. *The Annals of Statistics*, 2019, 47(2): 1148-1178.
- [23] ERIC S, MAARTEN S, ANDREAS K. A tutorial on Gaussian process regression: modelling, exploring, and exploiting functions[J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2018, 85: 1-16.
- [24] LIU H T, ONG Y S, SHEN X B, et al. When Gaussian process meets big data: a review of scalable GPs[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(11): 4405-4423.