网络首发：

标题：基于决策树算法的快速高精度宽调谐光参量振荡器
作者：栗冯静,李佳伟,贺耀辉,靳丕钰,卢华东
收稿日期：2026-03-03
录用日期：2026-04-16
DOI：10.3788/CJL260605

引用格式：
栗冯静,李佳伟,贺耀辉,靳丕钰,卢华东. 基于决策树算法的快速高精度宽调谐光参量振荡器[J]. 中国激光,2027,54(05):0501002.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

基于环形腔KTA光参量振荡器的972 nm纳秒脉冲激光器
宋越 于真真 李世光 张晟 王明建 许赟成 侯霞 陈卫标
中国科学院上海光学精密机械研究所空天激光技术与系统部王之江创新中心，上海 201800
中国激光,2025,52(6):0601005

高光束质量、窄线宽皮秒脉冲KTiOAsO₄光参量振荡器的研究
焦夏卓 买里克古丽·艾合买提 周玉霞 苏比努尔·牙库甫 冶建强 杨曦凝
新疆师范大学物理与电子工程学院，新疆发光矿物与光功能材料研究重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054
中国激光,2025,52(2):0208001

主被动双调Q内腔MgO：PPLN中红外光参量振荡器
吴淼鑫 金小萍 姚晓岱 刘航 于永吉 刘仲宇 金光勇
长春理工大学重庆研究院，重庆 401135
中国激光,2024,51(14):1401013

kHz、mJ量级的可调谐MgO：PPLN中红外光参量振荡器
刘帅 陈锴 孙悦 闫超 乔鸿展 常继英 李吉宁 王与烨 钟凯 徐德刚 姚建铨
天津大学精密仪器与光电子工程学院，天津 300072
中国激光,2024,51(7):0701019

闲频光单谐振KTiOAsO₄涡旋光参量振荡器的研究
苏比努尔·牙库甫 周玉霞 宣闯 冶建强 买里克古丽·艾合买提 焦夏卓 塔西买提·玉苏甫
新疆师范大学物理与电子工程学院，新疆发光矿物与光功能材料研究重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054
中国激光,2024,51(5):0501004

基于决策树算法的
快速高精度宽调谐光参量振荡器

栗冯静[1]，李佳伟[1]，贺耀辉[1,3]，靳丕钰[1,2]，卢华东[1,2]

[1]山西大学光电研究所光量子技术与器件全国重点实验室，山西大学光电研究所，山西 太原 030006；

[2]山西大学极端光学协同创新中心，山西 太原 030006

[3]山西大学物理电子工程学院，山西 太原 030006

摘 要 本文提出了一种基于 BBO 晶体与标准具联合调谐的光学参量振荡器（Optical Parametric Oscillator，OPO）自动波长控制方法，通过 BBO 和标准具联合调谐，并针对实验中出现的跨自由光谱区（Free Spectral Range，FSR）导致的跳模问题，引入融合物理先验约束的决策树方法对标准具扫描过程进行约束，实现了快速、宽范围、高精度的波长调谐与扫描。实验结果表明，所提出的方法可在 410–600 nm 波段内实现连续调谐与扫描，在目标波长自动调谐过程中达到约 1 pm 的调谐精度，并将单点平均调谐时间从约 40 s 大幅缩短至 6 s 以内，调谐效率提升约 6 倍。在扫描实验中，通过选择标准具调谐范围，显著抑制了随机跳模现象，使 10 pm 步进扫描过程具有良好的可控性。波长差分数据的离散度从 7.81 显著下降至 1.35，降幅约为 82.7%。该方法在不引入额外光学复杂度的前提下，有效提升了机械调谐型 OPO 的调谐速度与波长控制精度，为高性能可调谐激光光源的工程应用提供了一种实用方案。

关键词 光参量振荡器；自动波长控制；LabVIEW；Python；决策树算法；标准具角度调谐

中图分类号 TN242 **文献标志码** A

1 引 言

紫外（UV）泵浦的纳秒脉冲光学参量振荡器（Optical Parametric Oscillator，OPO）[1]因其调谐范围覆盖了可见和近红外波段而被广泛应用于工业、医疗、国防以及科学研究等领域[2]。在高分辨光谱测量、共振电离质谱[3]以及非线性光学实验等应用中，通常需要在极宽光谱范围内实现高精度、可重复的波长调谐与扫描。

目前 OPO 的波长调谐方法主要有温度调谐和角度调谐[4]，其中温度调谐的调谐速度受制于热响应时间，调谐速度较慢[5]。例如，Zhang 等人报道了一种基于周期极化 $LiNbO_3$（PPLN）的红外 OPO，实验表明要使信号光波长由约 1.48 μm 调谐至约 1.54 μm，晶体温度需要从 60 ℃提高至 250 ℃[6]。而角度调谐更易实现波长的快速、宽范围调谐。例如，Vodopyanov 等人报道了一种角度调谐的 $ZnGeP_2$ 光学参量振荡器，通过旋转非线性晶体可在约 4–10 μm 的范围内实现波长的快速调谐[7]。因此，在面向共振电离质谱等对调谐速度及范围有较高要求的应用中，角度调谐[8]得以更广泛的应用。然而，由于 OPO 的增益带宽较宽[9]，单纯依赖角度

基金项目：国家自然科学基金(62575163)、国家重点研发计划（2022YFC2204003）

通信作者：* luhuadong@sxu.edu.cn；

调谐难以实现皮米级的高精度波长调谐。

为提升角度调谐的输出波长精度，研究者通常在 OPO 腔内引入标准具（etalon）等光谱选择元件，以增强纵模选择能力[10]。2021 年，C.S.RAO 等人利用单个标准具实现了 OPO 的单纵模输出[11]，但该方法中标准具的角度固定，无法实现波长的高精度调谐。

本系统在 BBO 角度调谐的基础上，引入振镜电机控制标准具的角度，弥补 BBO 调谐中的波长间隙，从而实现波长的高精度调谐。然而，在实际调谐过程中，波长调谐受到自由光谱区（Free Spectral Range，FSR）影响，会导致在跨越相邻 FSR 时出现模式竞争和跳模现象[12]，进而影响波长扫描的稳定性和波长调谐的速度。因此，必须将调谐限制在曲线平滑、无突变的单一 FSR 内。传统依赖人工经验的区段选取方法适用范围有限、准确率低，难以满足宽波段稳定调谐的需求。

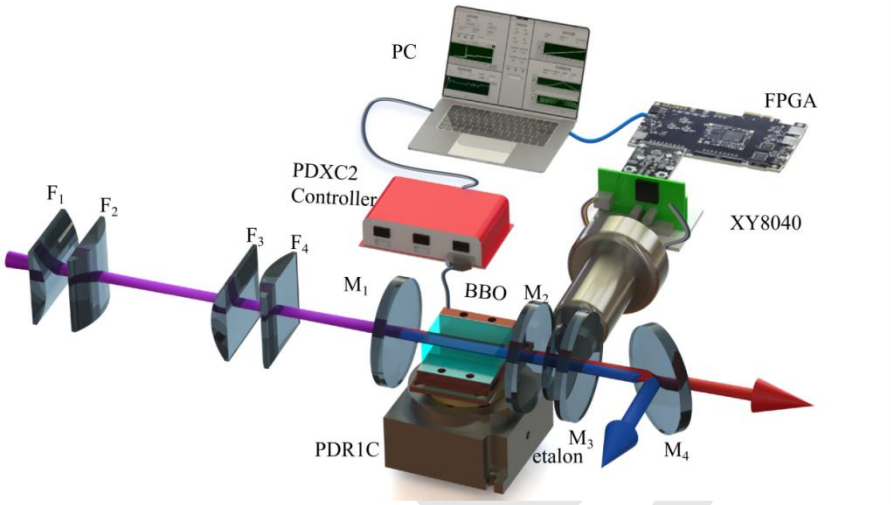
针对上述问题，亟需引入一个合适的算法来抑制标准具调谐和扫描出现的跳模现象。在模型选择上，最小二乘法等全局拟合易受跳模点干扰[13]。而遗传算法、粒子群算法等随机优化方法高度依赖连续的反馈迭代、缺乏对硬性约束条件的直接处理机制，且计算复杂度较高、结果具有随机性[14]，均不利于系统的实时控制与工程实现。基于此，本文采用一种基于决策树算法[15]的区段筛选与约束控制方法。该算法将标准具扫描数据拆分为多个子区段，并依据波长变化单调性、连续性、区段长度及输出稳定性等判据进行逐级判断与筛选。与依赖全局拟合或随机搜索的算法不同，该策略直接利用调谐过程中的物理先验信息对扫描数据进行结构化分类，在跳模频繁、高噪声及多波段扫描条件下，实现对精细调谐有效区段的稳定识别。将标准具的调谐范围限制于该区段内，进而抑制跨 FSR 扫描导致的模式竞争与跳模现象。

实验结果表明，该系统在 410–600 nm 范围内表现出优异的高精度波长调谐能力，自动调谐精度达 1 pm。相比传统方法，单点平均调谐时间由 40 s 缩短至 6 s 以内，效率提升约 6 倍。在 10 pm 步进扫描实验中，通过算法对调谐区间的精准锁定，波长差分数据的离散度由 7.81 降至 1.35（降幅达 82.7%）。该方法凭借运算效率高、物理可解释性强且易于工程实现等优势，为研制宽波段、高分辨率可调谐 OPO 光源提供了一条高效的技术路径。

2 光学系统设计

2.1 光学实验装置

为了实现高精度、宽波段的波长调谐，实验设计并搭建了 OPO 系统，其装置示意图如图 1 所示。为了获得高功率的信号光输出并降低非线性晶体的热效应，系统采用了纳秒脉冲激光器作为泵浦源，重复频率均为 10 kHz。其中，波长为 355 nm 的紫外脉冲激光器用于泵浦产生蓝绿波段（410–600 nm）的信号光，其最大输出功率为 1.9 W；波长为 532 nm 的绿光脉冲激光器用于泵浦产生红光至近红外波段（680–950 nm）的信号光，其最大输出功率达到 3.5 W。



M1：输入耦合镜；M2：泵浦反射镜；M3：输出耦合镜；M4：分光镜；F1–F4：柱透镜。

图1 高重复频率和高平均功率OPO装置图。

M1: input coupler; M2: pump mirror; M3: output coupler; M4: beam splitter; F1–F4: cylindrical lenses.

Fig. 1. Schematic diagram of the high-repetition-rate and high-average-power OPO setup.

OPO 的谐振腔设计为紧凑的线性平平腔结构（Linear Cavity），主要包含输入耦合镜（M1）、泵浦反射镜（M2）、输出耦合镜（M3）和分光镜（M4）。输入耦合镜 M1 镀有对泵浦光（355 nm）的高透（HT）膜以减少泵浦损耗，同时镀有对信号光波段的高反（HR）膜以维持腔内振荡。输出耦合镜 M2 则镀有对信号光的部分透射膜（Partial Transmission），以实现信号光的有效输出。

腔内插入一块尺寸为 3*12*18 mm 的β-偏硼酸钡（BBO）晶体作为非线性增益介质，采用 II 类相位匹配（Type-II Phase Matching）方式。实验选用了晶体切割角为θ=37°，φ=30° 的 BBO 晶体；BBO 晶体安装在高精度的压电旋转台 PDR1C 上，系统通过 LabVIEW 程序控制 PDXC2 驱动器，驱动压电旋转台 PDR1C，从而控制 BBO 角度来实现波长的粗调谐。

为了进一步压窄线宽并实现精细的波长扫描，在谐振腔内放置了一个厚度为 1 mm 的熔融石英（Fused Silica）法布里-珀罗标准具（Etalon），其自由光谱区约为 100 GHz。该标准具安装在振镜电机上，系统通过 FPGA 实时处理来自 PC 端的控制指令，控制 XY8040 驱动

器调节振镜电机的偏转角度，从而改变标准具倾斜角度来精细调节腔内损耗，实现纵模的选择。

2.2 BBO 晶体和 Etalon 联合调谐理论

为在 OPO 中兼顾宽波段覆盖与高精度波长控制，本系统采用了 BBO 晶体相位匹配角粗调与腔内标准具精细调谐相结合的级联方案。首先，基于相位匹配[16]理论，通过调节 BBO 晶体的角度可改变参量光增益中心位置[17]，从而实现数百纳米量级的波长粗定位（如图 2(a)所示）。然而，受限于机械旋转台的物理分辨率及 OPO 较宽的增益带宽，单纯依靠晶体角度调节难以直接实现皮米级的精细波长锁定。

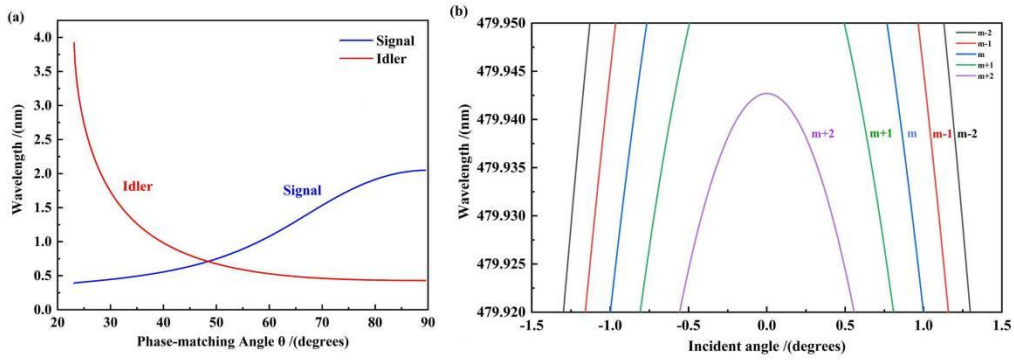


图2 波长调谐的理论曲线

Fig 2. Theoretical curves of wavelength tuning.

为此，系统引入腔内标准具以进一步约束输出线宽。如图 2(b)，依据多光束干涉原理，标准具透射峰波长满足

$$\lambda_m = \frac{2nd\cos\theta}{m} \tag{1}$$

其中 n 为标准具折射率，d 为厚度，θ为入射角，m 为整数[18]。通过振镜电机微调入射角θ，可驱动透射峰在自由光谱范围内连续漂移，从而在 BBO 确定的增益包络下，实现对纵模的高精度筛选与连续扫描。

这种分层调控机制有效整合了 BBO 的宽谱优势与标准具的选模特性：BBO 晶体负责确定增益主峰位置，标准具负责实现纵模的精细锁定。二者的协同作用确保了系统在宽波段范围内具备稳定的高精度波长调控能力，为后续基于决策树的波长闭环控制程序奠定了物理基础。

3 波长调谐与扫描系统设计

基于前述联合调谐理论，本研究构建了一套集成化的波长自动控制系统。该系统以 LabVIEW 程序作为控制中枢，采用双路并行驱动，一路通过指令控制 PDXC2 驱动器，操作 PDR1C 压电旋转台带动 BBO 晶体旋转；另一路控制信号经 FPGA 处理后传输至 XY8040 驱动器，驱动振镜电机微调标准具倾角。

3.1 分级协同波长控制流程

整套系统的控制逻辑遵循“BBO 粗调—标准具精调—数据反馈”的分级协同策略（如图 3 所示）。其中λ_s表示目标波长；λc 表示当前测量波长，由光谱仪实时采集获得；$\Delta\lambda$表示波长误差判定阈值，用于判断当前输出波长是否达到目标精度要求。在控制过程中，通过比较当前波长与目标波长之间的偏差$|\lambda c-\lambda_s|$与阈值$\Delta\lambda$的大小关系，实现调谐状态的判定。当满足$|\lambda c-\lambda_s|<\Delta\lambda$时，调谐过程结束，否则继续执行 BBO 粗调或标准具精调过程。

在具体的控制过程中，首先根据基于晶体角度与波长的映射关系，对 BBO 晶体的角度进行控制。针对给定的目标波长，控制程序首先对相位匹配方程进行数值反解，得到对应的理论相位匹配角，并将其转换为电机控制步长，驱动电机使 BBO 晶体大角度旋转，完成输出波长的快速定位，使其迅速进入目标波段；随后在该波段内以最小步长微调晶体转角，弥补机械误差，进一步缩小误差范围；最后利用标准具在局部区域内实现波长的高精度调谐和扫描。在整个流程中，上位机实时获取光谱仪的监测数据作为反馈量，动态调用各级执行单元以达到目标波长。

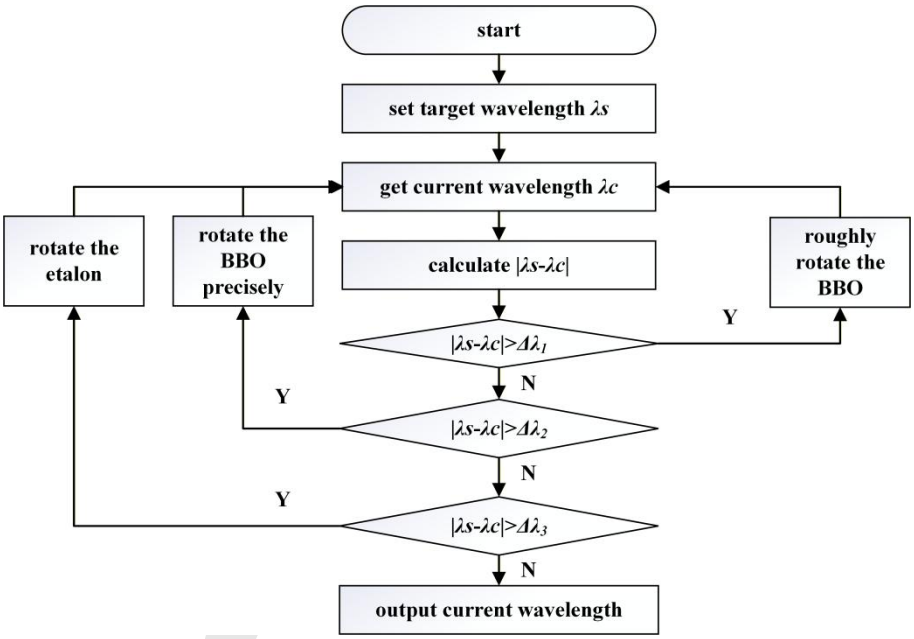


图3 波长调谐与扫描系统流程图

Fig 3. Flowchart of the wavelength tuning and scanning system

然而，在实际应用中，波长调谐受限于标准具的 FSR 特性。当扫描过程跨越相邻 FSR 时，极易引发模式竞争与跳模现象，严重制约了波长扫描的稳定性与调谐速度。因此，实现高精度、高稳定的调谐，关键在于将工作点限制在调谐曲线平滑、无阶跃突变、宽覆盖范围及高光功率的单一 FSR 内。若缺乏算法辅助，该优选区间的确定通常依赖人工经验。这种方法不仅准确性较低、适用范围有限，且难以在宽波段范围内保证调谐过程的一致性与稳定性。为解决这一问题，本系统引入了决策树算法来约束区间。

3.2 基于决策树算法的标准具路径优选策略

在标准具精细调谐过程中，传统经验调参的方式无法保证长期在单一 FSR 内稳定调谐，容易出现跨 FSR 导致的跳模问题，为解决这一问题，本系统引入一种融合物理先验约束的决策树方法来约束区间。

决策树（Decision Tree）是一种基于树状拓扑结构的非参数监督学习方法，其核心机制在于采用自顶向下的递归划分策略（Recursive Partitioning）。该结构主要由根节点（Root Node）、内部节点（Internal Node）以及叶节点（Leaf Node）三部分构成[19]。具体结构和分类如图 4 所示。

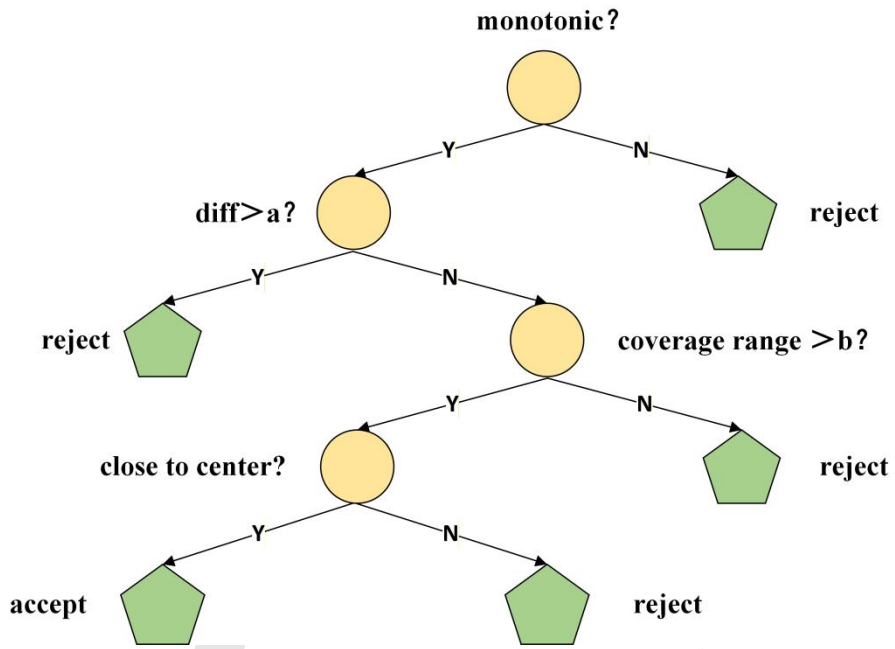


图4 决策树原理图

Fig. 4. Principle of the decision tree algorithm.

针对本文所研究的标准具路径优选问题，决策树算法在该类具有明确物理约束、规则主导且需实时响应的工程场景中具有不可替代性。相比于其他复杂优化或学习方法，决策树能够直接将物理规则映射为层级判定结构，实现快速决策与可解释推理，既满足工程系统对计算效率与稳定性的要求，又保证了调谐过程的可控性与可实现性。

已有研究表明，在结构清晰、规则主导的分类任务中，决策树方法具有良好的性能与稳定性。例如，在 Luiz H G Marrega 等人做的决策树与遗传编程（GP）的对比研究中，决策树在分类准确率上表现出统计显著优势[20]；在 Fakher Rahim 等人研究的医疗诊断问题中，决策树模型相较于支持向量机（SVM）表现出更高的分类精度与判别能力[21]；在 Dinda Anggraini 等人的实际工程数据分析场景中，决策树在准确率与可解释性方面同样优于 SVM[22]。

本文所研究的标准具路径优选问题，本质上属于基于多特征输入，通过规则驱动的逐级划分，实现离散类别判定的问题，这一问题特性与上述文献中的规则驱动分类问题具有较高一致性，因此，决策树方法在本文所涉及的基于物理约束的区段筛选与路径判定问题中具有更好的适用性。

具体的研究方法在整体结构上可划分为两个相互关联但功能不同的阶段：基于物理规则的数据标注与候选区段筛选和基于监督学习的决策树模型训练与自动分类决策。首先建立了“单调性—平滑性—覆盖范围—中心性”的树状筛选流程，以工程规则量化候选区间的筛选标准并生成样本标签。其中单调性通过相邻波长差分符号一致性进行判定；平滑性通过局部二阶差分并设定阈值进行约束；覆盖范围以连续有效采样点数量衡量；稳定性通过输出功率波动的标准差进行评估。基于该标签体系，采用决策树算法构建波长控制系统的状态决策模型，并设计分层策略以适应不同的调控需求：全局模型利用经排序编码后的波段索引（*Band ID*）与步进值的联合特征向量 $x_{global}=[band_id, step]$ 以学习跨波段的非线性边界，而局

部子模型则在单波段样本充足且类别完备的条件下启用，仅基于步进特征向量$[step]$挖掘单一波段内的精细结构。

考虑到训练数据中普遍存在的类别不平衡现象，本研究引入了类权重参数（Class Weighting）来修正决策偏差[23]。基于经验公式

$$w_c = \frac{N_{total}}{K \cdot N_c} \tag{2}$$

计算了各类别样本的权重。其中N_{total}为样本总数，N_c为该类样本数，K为类别常数。在此加权体系下，节点内部的统计量不再基于原始样本计数，而是基于加权样本和（Sum of Weights）。设节点内的加权样本总和为W，第k类的加权和为W_k，则类概率估计p_k[24]定义为：

$$p_k = \frac{W_k}{W} = \frac{\sum_{i \in k} w(i)}{\sum_{j \in D} w(j)} \tag{3}$$

决策树的生长通过递归分裂进行，选用 Gini 系数[25]作为不纯度度量算子，其计算严格依赖于上述加权概率：

$$G(D) = 1 - \sum_{k=1}^{K} p_k^2 \tag{4}$$

最优分裂规则旨在最大化加权不纯度增益ΔI。假设当前节点被切分为左右子节点D_L和D_R，其加权样本和分别为W_L和W_R，则增益计算公式修正为

$$\Delta I = G(D_{\text{parent}}) - \frac{W_L}{W_{\text{parent}}} G(D_L) - \frac{W_R}{W_{\text{parent}}} G(D_R) \tag{5}$$

最终，模型采用预剪枝策略[26]以抑制过拟合，输出端的预测类别$\hat{y}$由叶节点内累积的加权概率最大值确定，即

$$\hat{y} = \arg\max_{k \in \{1,\ldots,K\}} p_k \tag{6}$$

系统的训练数据由约 8.5×10^3条逐点标注样本组成。全局模型采用二维特征（band_id, step），局部模型采用一维特征（step）。模型基于 scikit-learn 实现，最大深度 max_depth=6，类别权重 class_weight='balanced'，随机种子 random_state=42。并通过 80%/20%的分层采样划分训练集与测试集。在测试集上，全局模型分类准确率达到 0.976。对于满足最小样本数及类别多样性的波段，共构建了 3 个局部子模型。

选用决策树算法的根本原因，在于调谐区间的筛选的本质属于由硬性约束主导的离散决策过程。区段的单调性、连续性及跳变点等指标，并非需要通过数值优化来权衡权重的模糊变量，而是必须逐级判别、严格剔除的硬性判据。

相比之下，粒子群（PSO）或遗传算法（GA）等启发式算法高度依赖反馈迭代，计算开销大且在处理此类离散约束时收敛迟缓。而决策树能直接利用物理条件对数据进行快速剪

枝，将反馈数据作为辅助修正，而非决策的主要依赖，这种机制在保证精度的同时，大幅降低了算力需求并提升了鲁棒性。

3.3 路径优选策略执行流程

具体算法流程如图 5 所示，首先分析历史数据，检测各独立波段内是否存在满足预设长度阈值的单调区段。若检测达标，则优先选取该区段作为有效调谐区间，以确保调谐过程严格处于单 FSR 范围内。若各单波段均不满足条件，算法则自动进入多波段联合分析阶段，通过枚举连续波段组合，在步索引维度上筛选兼具平滑度与跨度要求的候选区段。若在多波段联合分析后仍未找到满足条件的有效区段，则触发回退策略（fallback strategy）。对候选区段进行放宽约束筛选，回退至历史最优区段附近进行局部搜索，以保证算法能够输出稳定的调谐路径。扫描完成后，新采集的数据将与历史数据库比对，实现数据集的动态更新与优化。

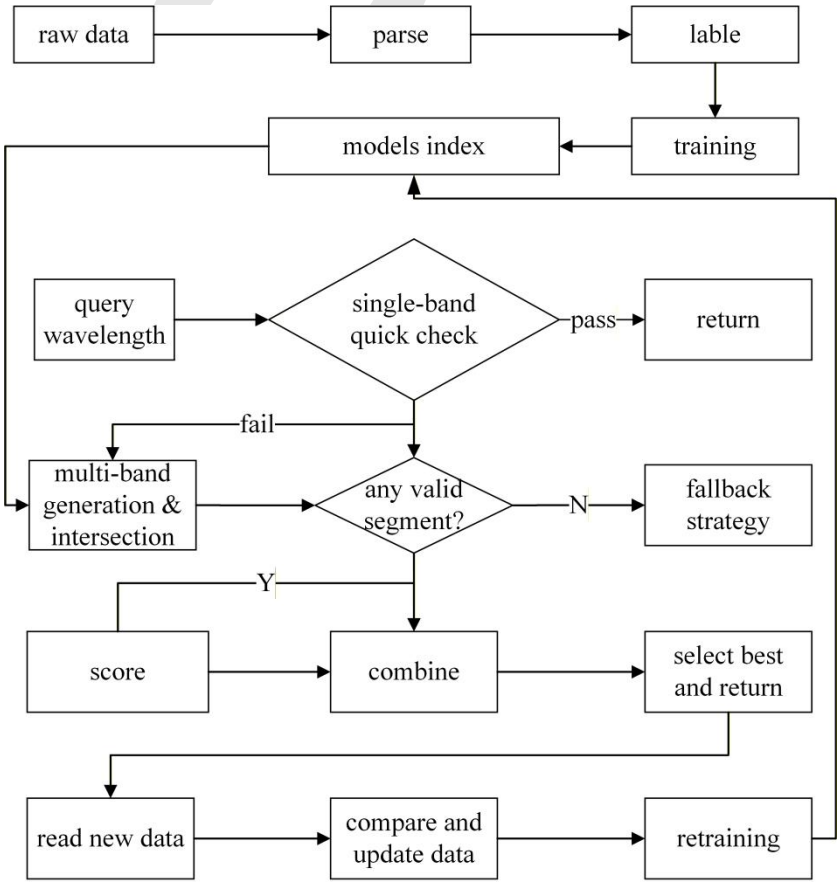


图5 决策树算法流程图

Fig 5. Flowchart of the decision tree algorithm.

通过将区段筛选转化为一系列物理判据驱动的决策，该方法有效规避了跨 FSR 调谐带来的跳模风险，显著提升了系统在复杂扫描环境下的自动化程度与鲁棒性。这种兼顾物理合理性与工程可控性的方案，为 OPO 标准具的高精度稳定运行提供了坚实的技术支撑。

3.4 实验结果与分析

为了验证系统的性能，我们从调谐速度和扫描稳定性两个维度对系统进行了测试与评估。

3.4.1 自动调谐速度的提升

实验首先对比了未加决策树算法的自动调谐与基于决策树算法的自动调谐在寻找目标波长时的速度。图 6 展示了从起始波长自动调谐至目标波长的过程中，输出波长随时间的变化曲线。

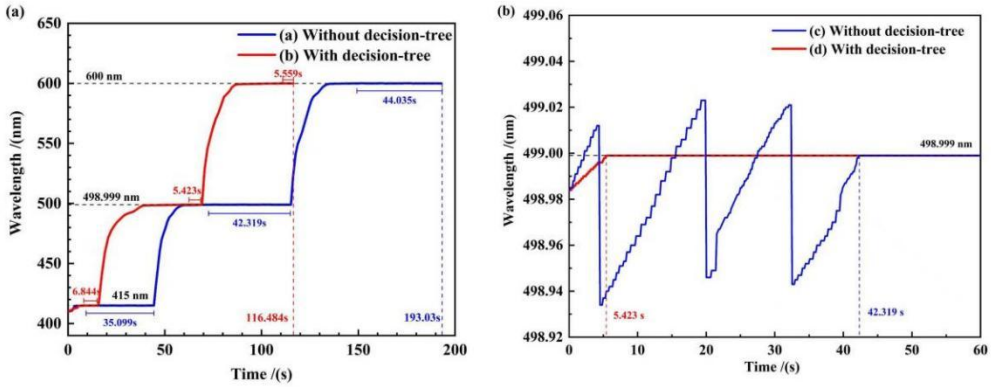


图 6 使用算法前后调谐速度对比。(a)使用决策树算法前后的联合波长调谐速度对比，(b)使用决策树算法前后的标准具波长调谐曲线

Fig 6. Comparison of tuning speeds before and after applying the algorithm: (a) Comparison of combined wavelength tuning speeds with and without the decision tree algorithm; (b) Etalon wavelength tuning curves before and after applying the decision tree algorithm.

实验结果表明，结合了 BBO 拟合粗调与决策树精调的控制策略，能够使波长在更短时间内迅速逼近目标值。如图6(a)所示，在 410 nm-600 nm 的范围内，将波长分别调谐至 415 nm、499 nm、600 nm 时，调谐速度均有大幅提升，调谐精度控制在 1 pm 以内。在 415 nm 处，标准具调谐时间由 35.099 s 优化至 6.844 s；在 499 nm 处，标准具调谐时间由 42.319 s 优化至 5.423 s；在 600 nm 处，标准具调谐时间由 44.035 s 优化至 5.559 s；总调谐时间从 193.03 s 优化至 116.484 s。图 6(b)展示了图 6(a)中标准具调谐放大后的详细过程，直观反映了算法对调谐效率的提升。

3.4.2 扫描步长稳定性的优化与分析

扫描稳定性是衡量 OPO 性能的关键指标。为了直观展示算法对扫描质量的改善，实验采集了标准具连续扫描过程中的波长差分数据，以验证决策树算法对扫描质量的提升效果（如图 7 所示）。

在未应用决策树优化前（图 7(a)），表明 OPO 系统处于剧烈的多模竞争状态，频繁发生的随机跳模导致了波长扫描的不稳定性。

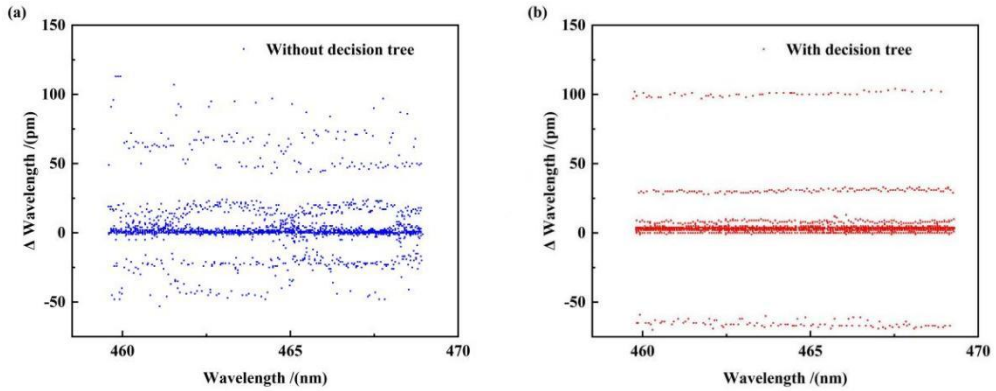


图 7 使用算法前后波长扫描

Fig. 7. Wavelength scanning results with and without the decision tree algorithm.

在应用决策树算法后（图 7(b)），波长差值点呈现出显著的规律性，波长差值点从无序散点收敛为显著的离散条带状结构。这种分布具有明确的物理意义：中间的主带代表系统处于稳定的单纵模扫描状态，波长随标准具角度平滑连续变化，无跳模发生，这也是算法优选出的最佳工作区域；而其余条带则分别对应 OPO 谐振腔的一个纵模间隔，这表明即使受限于物理机制的约束发生跳模，算法也能将其限制在相邻的单一纵模之间，而非不可控的的混沌跳变。为量化这一改善，引入基于最近中心的平均绝对离差（Mean Absolute Deviation based on Nearest Center，MAD-NC）指标。

$$\mathrm{MAD}_{\mathrm{multi}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \min_{j\in\{1,\ldots,k\}} | x_i - c_j | \qquad (7)$$

其中 x_i 与 N 分别代表第 i 个波长差分采样值与样本总数，c_j 表示第 j 个条带的聚类中心值.计算结果显示，数据的离散度从 7.81 显著下降至 1.35，降幅约为 82.7%。这证明了该算法能有效抑制多模噪声，将系统成功约束在稳定的离散纵模轨道上运行，极大地提升了波长扫描的可控性。

3.4.3 自动波长控制 OPO 的输出特性

集成自动波长控制策略的 OPO 系统，在宽调谐范围内展现出优异的运行稳定性。如图 8 所示，在 355 nm 紫外泵浦模式下，该系统稳定输出了 410 nm–600 nm 的蓝绿信号光，最大输出功率达 1.9 W。

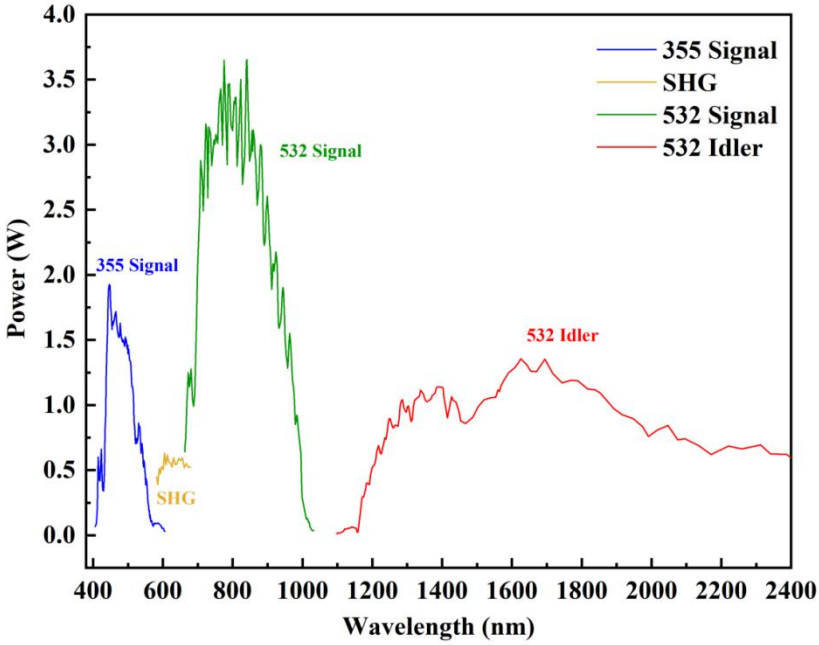


图 8 OPO 波长-功率曲线图

Fig. 8. Output power versus wavelength of the OPO.

此外，该控制策略具有显著的宽谱适应性。除 355 nm 紫外泵浦产生的蓝绿波段（410–600 nm）外，系统在 532 nm 绿光泵浦产生的红光至近红外波段（680–950 nm）中，同样实现了稳定的波长调谐与扫描，最大功率达到 3.5 W。这种不同泵浦配置下的稳定工作能力表明，表明所提出的控制策略具备良好的可推广性，能够为其他机械调谐型 OPO 系统的自动化控制提供有效的技术方案。

4. 结　论

本文提出并实验验证了一种面向宽波段高精度调谐的 OPO 自动控制方法，构建了“BBO 晶体相位匹配粗调+标准具精细调谐”的分级协同调控机制，并引入融合物理先验约束的决策树方法，实现了标准具调谐区间的自适应筛选与约束控制。该方法有效解决了跨 FSR 调谐过程中易出现的跳模问题，在不增加系统光学复杂度的前提下，提高了波长调谐的效率与稳定性。

在性能验证方面，系统在 410–600 nm 范围内实现了连续可控调谐，自动调谐精度优于 1 pm。相比传统经验调参方法，单点调谐时间由约 40 s 缩短至 6 s 以内，体现出显著的效率提升。同时，在波长扫描过程中，差分数据离散度由 7.81 降低至 1.35（降幅约 82.7%），表明该方法能够有效抑制随机跳模，将系统运行稳定约束于可控的纵模范围内。

从方法层面看，本文将物理先验约束与决策树模型相结合，构建了一种兼顾可解释性与实时性的混合建模策略，为复杂光学系统中的自动调控问题提供了一种可行思路。该策略不仅适用于本文所构建的 OPO 系统，在不同泵浦条件及更宽波段范围内同样具有良好的适应性。

综上，该方法在兼顾调谐速度、精度与扫描稳定性的同时，无需依赖窄线宽种子注入等复杂手段，为机械调谐型 OPO 系统提供了一种高效、低成本的实现路径，在共振电离质谱、高分辨光谱测量等领域具有潜在应用价值。

CJL

参考文献

[1] GIORDMAINE J A, MILLER R C. Tunable Coherent Parametric Oscillation in $LiNb_3$ at Optical Frequencies [J]. Physical Review Letters, 1965, 14(24): 973-6.

[2] LI J, CAO X, ZHANG Y, et al. Realization of a high-power UV-pumped optical parametric oscillator depending on the decrease of the color center density [J]. Opt Express, 2025, 33(2): 2839-46.

[3] WHITAKER T J, WILLEY K F, GARRETT W R, et al. Resonance ionization mass spectrometry—applications to surface analyses and depth profiles of semiconductors [J]. AIP Conference Proceedings, 1998, 449(1): 786-9.

[4] ECKARDT R C, NABORS C D, KOZLOVSKY W J, et al. Optical parametric oscillator frequency tuning and control [J]. J Opt Soc Am B, 1991, 8(3): 646-67.

[5] POWERS P E, KULP T J, BISSON S E. Continuous tuning of a continuous-wave periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator by use of a fan-out grating design [J]. Opt Lett, 1998, 23(3): 159-61.

[6] ZHANG B-G, YAO J-Q, ZHANG H, et al. Temperature Tunable Infrared Optical Parametric Oscillator with Periodically Poled LiNbO3 [J]. Chinese Physics Letters, 2003, 20(7): 1077.

[7] VODOPYANOV K, GANIKHANOV F, MAFFETONE J, et al. ZnGeP2 optical parametric oscillator with 3.8–12.4-μm tunability [J]. Opt Lett, 2000, 25: 841-3.

[8] HUANG Z Z, LUO Q H, LU T T, et al. Study on wide tunable blue-green laser output characteristics of end-face cavity BBO-OPO [J]. Chinese Journal of Lasers, 2026, 53(10): 1-14.

[9] QU S, ZOU X, LIANG H, et al. A generalized analytical model of gain bandwidth for design of optical parametric amplifiers [J]. Optics Communications, 2019, 449: 1-7.

[10] HU X, LU C, WANG N, et al. A Narrow-Linewidth Optical Parametric Oscillator Inserted with Fabry–Perot Etalon [J]. Photonics, 2021, 8(12): 528.

[11] RAO C S, KUNDU S, RAY A K. SLM operation of a high repetition rate BBO Optical Parametric Oscillator pumped by DPSSL at 355 nm [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106878.

[12] JIN P, WEI J, SU J, et al. Recent progress in continuously tunable low-noise all-solid-state single-frequency continuous-wave laser based on intracavity locked etalon [J]. Frontiers in Physics, 2022, Volume 10 - 2022.

[13] DESGAGNé A. Efficient and robust estimation of regression and scale parameters, with outlier detection [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2021, 155: 107114.

[14] GAD A G. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(5): 2531-61.

[15] KOTSIANTIS S B. Decision trees: a recent overview [J]. Artificial Intelligence Review, 2013, 39(4): 261-83.

[16] YAO G J, LI J C, LIU H Z, et al. Research progress of nonlinear optical crystals and phase matching methods (invited) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(05): 106-17.

[17] SONG Y, YU Z, LI S, et al. Tunable and injection-seeded operation of a narrow-linewidth BBO optical parametric oscillator pumped by 355 nm laser [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 192: 113671.

[18] DU X, XU C, JIN Y, et al. A Model of Dual Fabry–Perot Etalon-Based External-Cavity Tunable Laser Using Finite-Difference Traveling-Wave Method [J/OL] 2023, 10(5):579[10.3390/photonics10050579

[19] MIENYE I, JERE N. A Survey of Decision Trees: Concepts, Algorithms, and Applications [J]. IEEE Access, 2024, PP: 1-.

[20] MARREGA L H G, SILVA S M, MANFFRA E F, et al. Comparison between Decision Tree and Genetic Programming to distinguish healthy from stroke postural sway patterns; proceedings of the 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), F 25-29 Aug. 2015, 2015 [C].

[21] RAHIM F, KAZEMNEJAD A, JAHANGIRI M, et al. Diagnostic performance of classification trees and hematological functions in hematologic disorders: an application of multidimensional scaling and cluster analysis [J]. BMC Medical Informatics and Decision Making, 2021, 21(1): 313.

[22] ANGGRAINI D, GAMAYANTO I, WIBOWO S. Comparing Decision Tree and Support Vector Machines in Hospital Satisfaction [J]. Journal of Applied Informatics and Computing, 2025, 9(2): 364-72.

[23] BAKıRARAR B, ELHAN A. Class Weighting Technique to Deal with Imbalanced Class Problem in Machine Learning: Methodological Research [J]. Turkiye Klinikleri Journal of Biostatistics, 2023, 15: 19-29.

[24] ZHANG H, SU J. Learning probabilistic decision trees for AUC [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 892-9.

[25] TETTEH E T, ZIELOSKO B. Greedy Algorithm for Deriving Decision Rules from Decision Tree Ensembles [J/OL] 2025, 27(1):35[10.3390/e27010035

[26] BRAMER M. Pre-pruning Classification Trees to Reduce Overfitting in Noisy Domains; proceedings of the Intelligent Data Engineering and Automated Learning — IDEAL 2002, Berlin, Heidelberg, F 2002//, 2002 [C]. Springer Berlin Heidelberg.

Rapid, High-Precision, and Broadly Tunable Optical Parametric Oscillator Based on Decision Tree Algorithm

Li Fengjing[1],Li Jiawei[1],He Yaohui[1,3],Jin Pixian[1,2],Lu Huadong[1,2*]

[1,]*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*

[2] *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*

[3] *School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*

Abstract

Objective Ultraviolet (UV)-pumped nanosecond pulsed Optical Parametric Oscillators (OPO) have been found extensive applications in industry, medicine, national defense, basic scientific research and so on owing to their broad tunability spanning the visible to near-infrared spectral regions. However, for the cutting-edge applications including high-resolution spectroscopy, resonance ionization mass spectrometry and nonlinear optical experiments, it is necessary to simultaneously achieve the rapid and high-precision tuning over a wide spectral range for a tunable source. To address this challenge, we design and implement an integrated automatic wavelength control system based on a machine learning decision tree algorithm into a UV-pumped OPO. As a result, a rapid, high-precision, and highly repeatable wavelength tuning OPO which can scan across a broad spectrum is attained.

Methods The developed OPO employs a compact linear plane-parallel cavity structure primarily composed of an input coupler (M1), a pump reflector (M2), an output coupler (M3), and a beam splitter (M4). M1 is coated with a high-transmission (HT) film for the pump light to minimize pump loss and a high-reflection (HR) film for the signal band to maintain the oscillation of the intracavity signal, while M3 is coated for partial transmission of the signal light to ensure efficient laser output. A type-II phase matching β-Barium Borate (BBO) crystal with dimensions of 3*12*18 mm is inserted into the cavity and acts as the nonlinear gain medium. Its cutting angle is θ=37°,φ=30° for the experiment. Furthermore, to further narrow the linewidth and achieve fine spectral scanning, a 1-mm-thick fused silica Fabry-Perot etalon with a free spectral range (FSR) of approximately 100 GHz is inserted into the cavity.

Based on this optical configuration, an automatic wavelength control system combining BBO crystal angle tuning and etalon tuning is designed. The BBO crystal is mounted on a high-precision piezoelectric rotation stage (PDR1C) driven by a PDXC2 controller via LabVIEW. By adjusting the BBO crystal angle to shift the parametric gain center, coarse wavelength tuning over a range of hundreds of nanometers is achieved. On this basis, the intracavity etalon serves as a fine mode-selection element and is mounted on a galvanometer

motor controlled by an XY8040 driver via FPGA which processes real-time commands from the host computer to adjust the tilt angle and intracavity loss for longitudinal mode selection. To address the issue of random mode-hopping when the etalon scans across the FSR of the resonator, a decision tree algorithm is introduced into the control system to intelligently constrain the valid scanning range. Specifically, this algorithm analyzes the acquired wavelength-step scanning data to automatically identify a valid tuning range within a single FSR that exhibits smooth tuning curves and good monotonicity. By constraining the etalon scanning within valid the range, the algorithm effectively suppresses mode-hopping and improves tuning speed and stability. The system utilizes LabVIEW as the main platform for multi-motor coordination and human-machine interaction, while the decision tree model is deployed in Python. Through this hierarchical strategy of "BBO coarse tuning + Decision Tree-based etalon fine tuning," the system effectively achieves an organic combination of wide-range tuning and fast, high-precision control of the output wavelength.

Results and Discussions By automatically and synchronously controlling the BBO crystal and the etalon within the OPO resonant cavity, and combining a decision tree algorithm to intelligently constrain the scanning process, a fully automatic and widely tunable optical parametric oscillator control system was successfully constructed (Fig. 1). And a fast, high-precision, and joint tuning of the OPO was achieved (Fig. 6). Experimental results demonstrated that the system utilized the joint tuning strategy of "BBO coarse tuning + decision-tree-based etalon fine tuning" to automatically and precisely tune to the target wavelength. Compared to the traditional tuning approach relying on manual and empirical parameter adjustment, the etalon tuning times at 415 nm, 499 nm, and 600 nm were drastically reduced from 35.099 s, 42.319 s, and 44.035 s to 6.844 s, 5.423 s, and 5.559 s, respectively. Consequently, the total tuning time was significantly optimized from 193.03 s to 116.484 s (Fig. 6). Furthermore, the system maintained a high tuning precision of approximately 1 pm while substantially improving the tuning speed. In addition, during the wavelength scanning experiments, the decision tree algorithm demonstrated excellent multimode noise suppression capabilities. Differential data analysis revealed that the distribution of wavelength successfully converged from the disordered random scatter points into an ordered and discrete band structure after introducing the algorithm. Quantitative evaluation indicated that the Mean Absolute Deviation (MAD) metric based on the nearest cluster center dropped significantly from 7.81 to 1.35, achieving a massive 82.7% reduction in dispersion (Fig. 7).

Conclusion This paper introduced a broadly tunable optical parametric oscillator system integrated with an automatic wavelength control strategy. Without relying on the expensive narrow linewidth seed injection, the system achieved high-level automated wavelength control of the OPO solely through algorithmic optimization, successfully improving the system's broadband tuning speed, control precision, and wavelength scanning stability. Furthermore, the designed automatic control system demonstrated significant broadband adaptability. It not only achieved a stable tuning and scanning of blue-green signal light (410 nm–600 nm) under 355 nm UV pumping, but also realized the stable operation in the red to near-infrared band (680 nm–950 nm) under 532 nm green pumping, proving the excellent generalizability of this strategy. Based on the aforementioned automatic control system, a

fully automatic, high-precision, and broadly tunable OPO light source was successfully realized. The maximum output powers under 355 nm and 532 nm pumping reached 1.9 W (Fig. 8) and 3.5 W, respectively. While maintaining fast broadband tuning, it achieved high-precision wavelength tuning with an error of less than 1 pm, along with a more stable and controllable wavelength scanning process. In summary, this research provided an efficient and low-cost solution for the engineering application of mechanically tuned OPO systems, and the achieved OPO also showed the broad application prospects in fields such as resonance ionization mass spectrometry and precision spectroscopy.

Key words Optical parametric oscillator; Automatic wavelength control; LabVIEW; Python; Decision tree algorithm; Etalon angle tuning

CJL