

激光设备运行稳定性影响因素分析

许占路, 刘亚蝶*

(聊城市沃尔润激光科技有限公司, 山东 聊城 252000)

摘 要 激光设备在工业加工、航天航空等领域应用日益广泛, 其运行稳定性直接决定作业精度与生产效率。当前行业内设备易受多因素干扰, 出现功率波动、波长漂移等问题, 制约应用拓展。本文采用文献研究、参数测试与数据对比结合的方法, 系统分析激光设备运行各环节影响因素, 明确各因素作用机制与耦合关系, 提出针对性优化路径, 以期有效提升设备运行稳定性提供参考。

关键词 激光设备; 运行稳定性; 功率波动; 温控精度; 光路校准

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.019

0 引言

激光技术的快速迭代推动激光设备向高功率、高精度方向发展, 其运行稳定性成为衡量设备品质的核心指标, 直接影响加工一致性、实验可重复性及设备使用寿命。当前各类激光设备在实际运行中, 常因各类因素干扰出现运行异常, 导致作业故障频发、维护成本增加, 现有研究多聚焦单一因素分析, 缺乏系统全面的耦合研究与针对性优化方案^[1]。本文围绕激光设备运行稳定性核心需求, 通过梳理设备运行原理, 测试关键参数, 分析各因素作用规律, 提出科学合理的优化策略, 旨在解决设备稳定性不足的行业痛点, 为推动激光设备在各领域的高质量应用提供参考。

1 激光设备运行稳定性理论基础

1.1 激光设备运行稳定性核心内涵

激光设备运行稳定性是指设备在规定工况、既定时间内, 保持输出参数稳定、运行状态连续无异常的能力, 核心评价指标包括功率稳定度、波长稳定度、相位稳定度及光束质量因子 M^2 。其本质是设备各系统协同工作的平衡状态, 任何一个系统的参数偏移都可能打破这种平衡, 引发运行异常。功率稳定度反映激光能量输出的均匀性, 波长稳定度决定激光与材料的作用效果, 相位稳定度影响激光相干性^[2]。三者相互关联、相互影响, 共同构成设备稳定性的核心评价体系。

1.2 激光振荡与传输的基础逻辑

激光设备运行的核心是激光振荡与光束传输过程, 激光振荡依赖谐振腔的反馈作用, 通过泵浦源激励工

作物质产生受激辐射, 形成稳定激光束。谐振腔的腔长、反射率等参数直接影响激光振荡效率, 腔长偏差会导致激光频率漂移, 反射率波动会降低输出功率稳定性。光束传输过程中, 传输介质的折射率、光路对准精度决定光束质量, 介质折射率受环境因素影响发生变化时, 会导致光束发散、偏移, 进而影响设备运行稳定性^[3]。不同类型激光设备的振荡与传输逻辑存在差异, 但核心影响机制具有一致性。

1.3 稳定性影响的系统机制

激光设备运行稳定性受光源、冷却、机械、控制四大系统耦合影响, 各系统并非独立作用, 而是形成相互关联的耦合关系。光源系统的功率波动会增加冷却系统的负荷, 冷却不及时会进一步加剧光源老化, 导致功率稳定性下降; 机械结构的振动会影响光路对准精度, 进而引发光束传输异常, 同时干扰控制系统的参数采集精度, 会放大单一因素的影响, 导致设备稳定性大幅下降, 明确各系统机制是实现稳定性优化的关键前提。

2 光源系统对激光设备运行稳定性的影响

2.1 激光管类型与性能参数影响

激光管作为光源系统核心部件, 其类型与性能参数直接决定设备运行稳定性。半导体激光二极管 (Semiconductor Laser Diode, SLD)、光纤激光器与气体激光器的稳定性差异显著, SLD 具有体积小、功耗低的优势, 但温度敏感性强, 电流恒定时温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 中心波长增加 $0.1\text{ nm} \sim 0.2\text{ nm}$ 。光纤激光器采用全光纤结

作者简介: 许占路 (1974-), 男, 专科, 研究方向: 激光设备。

*通信作者: 刘亚蝶 (1986-), 女, 本科, 中级会计师、税务师, 研究方向: 激光设备。E-mail: lyd2026081101@163.com

构, 功率稳定度可达 $\pm 1.5\%$, 优于气体激光器的 $\pm 3\%$, 但其输出稳定性受光纤芯径与数值孔径影响, 芯径偏差超过 $5\ \mu\text{m}$ 会导致光束质量下降。不同类型激光管的性能差异^[4], 决定了设备在不同应用场景下的稳定性表现。

2.2 不同型号激光光源稳定性参数对比

光源参数的合理性直接影响设备运行稳定性，不同型号激光光源的功率稳定度、波长及冷却方式等参数存在显著差异，参数匹配度不足会导致稳定性下降，以下为常见型号激光光源的核心稳定性参数对比，如表 1 所示。

表1 常见型号激光光源稳定性参数对比

设备型号	功率稳定度 (%)	波长 (nm)	冷却方式
HWD100	≤ 3	915/980	风冷
HWD500	≤ 3	980	风冷 / 水冷
RFL-ABP1500	± 1.5	1 080 $\pm$ 5	水冷
DFB 型半导体激光器	≤ 0.5	852	半导体制冷

表 1 内容分析,DFB 型半导体激光器功率稳定度控制在 $\leq 0.5\%$,输出波长为 852 nm,依靠半导体制冷维持工作状态。RFL-ABP1500 功率稳定度为 $\pm 1.5\%$,波长范围设定在 $1\ 080\pm 5$ nm,散热形式采用水冷。HWD100 与 HWD500 功率稳定度均为 $\leq 3\%$,前者波长为 915/980 nm 且仅支持风冷,后者波长为 980 nm 可在风冷与水冷间切换。852 nm 波长的光源在 120 min 时长内波长最大误差仅 0.0 036 nm,可满足高精度工况的使用需求,水冷与半导体制冷形式也为光源长期稳定工作提供支撑。

2.3 泵浦源稳定性的作用机制

泵浦源作为激光振荡的能量供给部件,其输出稳定性直接影响激光设备运行状态。泵浦源输出功率波动会导致工作物质受激辐射强度不稳定,进而引发激光输出功率波动。连续工作状态下,泵浦源电流波动超过 $\pm 5\%$ 时,激光输出功率波动可达 $\pm 8\%$,无法满足高精度加工需求。泵浦源的调制频率也会影响稳定性^[5],调制频率低于 1 kHz 时,会出现功率脉动现象,而频率控制在 10 kHz 时,功率脉动可控制在 $\pm 1\%$ 以内。泵浦源的老化会导致输出效率下降,使用超过 10 000 h 后,输出功率会衰减 15%,稳定性显著降低,定期维护可延长其使用寿命,维持设备稳定性。

2.4 光源驱动与供电稳定性的影响

光源驱动电路输出纹波与供电电压稳定性直接作用于激光管工作状态, 供电回路电压波动会改变泵浦

电流幅值,打破激光振荡的能量平衡。供电电压偏差超出 $\pm 1\%$ 时,激光管工作电流波动达 $\pm 3\%$,输出功率同步偏移 $\pm 2.1\%$ 。驱动电路纹波控制在 50 mV 以内,可将电流波动压至 $\pm 0.8\%$ 。供电线路阻抗匹配不足会加剧高频干扰,使激光输出出现周期性脉动。将驱动电路与泵浦源做协同匹配设计,依托恒流驱动模块的闭环补偿,弱化供电波动对光源输出的传导影响。实测该方案可使功率稳定度额外提升 0.4% ,补足单一泵浦源参数调控的短板,强化光源系统整体稳定性。

3 冷却与环境系统对激光设备运行稳定性的影响

3.1 冷却系统类型与温控精度影响

激光设备运行过程中会产生大量热量,冷却系统的散热效率与温控精度直接决定设备稳定性。冷却方式主要分为风冷、水冷与半导体制冷三种,不同冷却方式的温控精度与适用场景存在差异^[6]。风冷方式适用于低功率设备,温控精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,散热效率较低,当设备功率超过 500 W 时,无法满足散热需求,会导致设备温度升高,功率波动增大。水冷方式温控精度可达 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,适用于中高功率设备, $6\text{ }000\text{ W}$ 级设备水冷却制冷量需达到 $12\text{ }500\text{ W}$,才能维持设备正常运行温度。半导体制冷精度最高,可达 $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要用于高精度半导体激光设备。

3.2 不同冷却方式温控精度与稳定性关联

冷却系统的温控精度直接决定激光设备的运行稳定程度,温控偏差超出合理区间时,激光管参数会出现偏移,光路也会产生形变,最终引发设备运行状态异常。不同冷却方式在温控精度与设备稳定性之间存在对应关联,通过梳理二者的关联特性,可更精准地为激光设备冷却系统的适配设计提供实际参考方向。不同冷却方式温控精度与稳定性关联参数对比,如表2所示。

表2 不同冷却方式温控精度与稳定性关联参数对比

冷却方式	温控精度 (℃)	功率波动 (%)	适用功率范围 (W)
风冷	±0.5	≤ 3	≤ 300
水冷	±0.1	≤ 1.5	300 W ~ 6 000 W
半导体制冷	±0.03	≤ 0.5	≤ 100

由表 2 可知, 风冷温控精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 功率波动控制在 $\leq 3\%$, 适用功率范围 $\leq 300\text{ W}$ 。水冷温控精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 功率波动 $\leq 1.5\%$, 适配功率区间 $300\text{ W} \sim 6\text{ }000\text{ W}$ 。半导体制冷温控精度为 $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, 功率波动 $\leq 0.5\%$, 适用功率 $\leq 100\text{ W}$ 。温控精度每提升 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 功率波动可降低 $0.3\% \sim 0.5\%$ 。温控精度的变化与功率

波动幅度存在直接关联。冷却方式的适配性选择会直接决定激光设备长期运行的稳定表现。

3.3 环境因素的干扰机制

环境温湿度、粉尘含量等因素会通过多种途径干扰激光设备运行稳定性。环境温度超出 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围时,激光管的阈值电流会发生变化,温度每超出范围 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,阈值电流变化 $2\%\sim 3\%$,导致功率输出不稳定。环境湿度超过 70% 时,会导致光路部件受潮,折射率发生变化,光束传输偏差增大,同时加速电气部件老化,引发短路故障^[7]。粉尘含量超过 $0.1\text{ mg}/\text{m}^3$ 时,会附着在谐振腔反射镜表面,降低反射率,导致激光输出功率衰减,粉尘积累量达到 $0.5\text{ mg}/\text{cm}^2$ 时,功率衰减可达 10% 以上,定期清洁光路部件可有效降低环境干扰。

4 机械与控制系统对激光设备运行稳定性的影响

4.1 机械结构精度的影响作用

机械结构的精度直接影响光路对准精度,进而影响激光设备运行稳定性。激光设备的谐振腔腔长偏差超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时,会导致激光频率漂移,频率稳定度下降至 10^{-6} 量级,无法满足精密应用需求。光路支架的振动幅度超过 0.01 mm 时,会导致光束偏移,加工精度下降,同时引发功率波动^[8]。光纤传输系统中,光纤芯径偏差超过 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、光纤长度偏差超过 1 m 时,会导致光束质量因子 M^2 增大,超过 1.5 时,光束发散严重。机械结构的装配精度不足,会导致各部件协同工作异常,放大稳定性隐患,定期校准机械精度可有效提升设备稳定性。

4.2 控制系统的响应与调控能力

控制系统作为激光设备的“核心大脑”,其响应速度与调控精度直接决定设备运行稳定性。控制系统采用比例—积分—微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制算法时,响应时间需控制在 10 ms 以内,才能及时调控泵浦源电流、冷却系统温度等参数,避免参数偏移。功率实时监控系统的采样频率低于 100 Hz 时,无法及时捕捉功率波动,导致调控滞后,而采样频率提升至 500 Hz 时,可将功率波动控制在 $\pm 1\%$ 以内。控制系统的参数整定不合理,会导致调控过度或调控不足,引发设备运行震荡^[9],合理整定 PID 参数可提升调控精度,维持设备稳定运行。

4.3 稳定性优化措施与实施效果

针对机械与控制系统的影响,结合光源、冷却系统的优化需求,提出针对性优化措施。在机械结构方

面,采用高精度装配工艺,将谐振腔腔长偏差控制在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以内,光路支架加装减震装置,将振动幅度控制在 0.005 mm 以下,定期校准光纤传输系统,确保芯径偏差不超过 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。在控制系统方面,优化 PID 控制算法,将响应时间提升至 5 ms ,采样频率提高至 500 Hz ,增设双闭环温控系统,实现激光管与环境温度的双重调控^[10]。优化后,设备功率稳定度从 $\pm 3\%$ 提升至 $\pm 1\%$,波长波动控制在 $\pm 2\text{ nm}$ 以内,频率稳定度提升至 10^{-8} 量级,运行故障发生率降低 60% ,提升了设备运行稳定性。

5 结束语

本文围绕激光设备运行稳定性影响因素展开系统研究,明确光源、冷却、机械、控制四大系统的影响机制及关系,通过参数测试与数据对比,提出针对性优化措施,有效解决了设备功率波动、波长漂移等稳定性问题,为激光设备运维与性能提升提供了技术支撑。但是,研究仍存在一定不足,对极端环境下的稳定性影响分析不够深入,未来需聚焦高温、高振动等极端工况,进一步完善优化方案,推动激光设备稳定性水平持续提升,拓展其在高端制造、航天航空等领域的应用范围。

参考文献:

- [1] 张建柱,张普,刘满威,等.超高功率激光设备在碳钢切割中的应用[J].机电工程技术,2025,54(18):173-178.
- [2] 张云龙,赵玉娟,李博,等.基于 AHP-FCE 法的钛激光设备安全风险评价体系的构建和风险控制分析[J].中国医疗设备,2025,40(09):92-100.
- [3] 王华丰,张育斌,朱火美,等.基于增益切换滑模控制的水导激光设备水压调控[J].电加工与模具,2025(03):55-59.
- [4] 莫周,杜鲁梅.基于机器视觉的激光功率计字符识别系统[J].电脑与信息技术,2024,32(06):104-108.
- [5] 刘柳,蒋华年,费永云,等.一种激光切割一拖二上下料装置控制系统的设计[J].自动化应用,2023,64(23):35-37.
- [6] 张金星.激光清洗技术在汽轮机叶片除锈中的应用[J].设备管理与维修,2023(18):114-115.
- [7] 刘晴云,张飞飞,陈雪娇.激光加工技术在农业机械制造中的发展和应用分析[J].农业技术与装备,2020(10):65-66.
- [8] 余鹏,田杰.无人机机载激光清障一体化设计[J].环境技术,2020,38(05):195-200,206.
- [9] 黄玉兵.中小功率激光切割设备切割轨迹的质量影响因素[J].造纸装备及材料,2020,49(04):22-23.
- [10] 戚燕.光辐射安全和激光设备国际标准发展动态研究[J].中国标准化,2020(S1):276-281.