

# 高重频窄脉宽多波长激光器可靠性分析

崔 铮, 于 勇, 李祚涵, 李之通, 潘 超  
(北京遥测技术研究所 北京 100094)

**摘要:** 本文对高重频窄脉宽多波长激光器的可靠性进行了分析及验证, 建立了高重频窄脉宽多波长激光器的框图法模型。在初始设计阶段开展激光器的可靠性分析, 定量计算了激光器各单元的可靠性结果, 包括失效率 $\lambda$ 和平均无故障工作时间 (Mean Time Between Failure, MTBF), 预计激光器整机的无故障工作时间为 1 798.8 h。为满足激光器的设计指标要求, 通过选用高品质晶体、半导体激光器的 I 级降额设计和电源控制的冗余设计, 实现激光器的可靠性优化。经优化设计后, 激光器整机的无故障工作时间达 2 260.9 h。搭建激光器整机对可靠性优化设计结果进行验证, 验证结果表明: 激光器无故障工作时间可达 2 400 h。

**关键词:** 高重频; 窄脉宽; 激光器; 可靠性; 框图法

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2024)04-0115-09

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20240328001

**引用格式:** 崔铮, 于勇, 李祚涵, 等. 高重频窄脉宽多波长激光器可靠性分析[J]. 遥测遥控, 2024, 45(4): 115-123.

## Reliability Analysis of High Repetition Frequency and Narrow Pulse Width Multi-wavelength Laser Technology

CUI Zheng, YU Yong, LI Zuohan, LI Zhitong, PAN Chao  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

**Abstract:** This article analyzes and verifies the reliability of high repetition rate narrow pulse width multi-wavelength lasers. A block diagram method model of high repetition rate narrow pulse width multi-wavelength lasers was established, and reliability analysis of the laser was conducted at the initial design stage. The reliability results of each unit of the laser were quantitatively calculated, including failure rate  $\lambda$  and Mean Time Between Failures (MTBF), with an expected MTBF of the entire laser system being 1 798.8 hours. To meet the design requirements of the laser, reliability optimization of the laser was achieved through selecting high-quality crystals, first-level derating design of semiconductor lasers, and redundant design of power control. After optimization, the MTBF of the entire laser system was increased to 2 260.9 hours. The reliability optimization design results of the laser system were validated, and the validation results showed that the laser's MTBF could reach 2 400 hours.

**Keywords:** High repetition frequency; Narrow pulse width; Laser; Reliability; Block diagram method

**Citation:** CUI Zheng, YU Yong, LI Zuohan, et al. Reliability Analysis of High Repetition Frequency and Narrow Pulse Width Multi-wavelength Laser Technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(4): 115-123.

## 0 引言

大气是人类生存环境的基本要素, 大气环境状态的改变直接影响着人类的生活和发展。大气探测激光雷达是一种主动遥感仪器, 其利用激光与大气的相互作用对大气参数进行测量, 在大气科学研究、精细天气预报、极端气象预警和航空器材飞行保障等领域有着重要意义及应用需求<sup>[1-7]</sup>。

激光器是大气激光雷达的激光发射单元, 其性能的优劣直接决定着大气激光雷达的探测能力。随着全固态激光器技术的发展, 大气激光雷达对大气基础参数的探测能力取得了长足的进步<sup>[1]</sup>。高重频窄脉宽多波长激光器属于全固态激光器, 是大气激光雷达激光发射单元的发展方向之一。高重复频率使得大气激光雷达具有更快的目标捕获速度、更多的回波数据和更高的标准点数据密度;

窄脉冲宽度使得大气激光雷达具有更高的探测精度;多波长输出使得大气激光雷达具有更宽的光谱探测范围,易于获得更多光学参数,测量结果更具真实性<sup>[8-12]</sup>。

高重频窄脉宽多波长激光器是光机电一体化能量转换产品,应用环境的改变、技术的成熟度和误操作等因素,都会造成激光器输出性能的不稳定或功能失效。为此,在激光器的设计及生产阶段,需根据激光器的设计指标要求,结合激光器谐振腔的稳定性设计、材料的选择、元器件的老化及筛选等因素,对激光器进行可靠性研究,明确激光器的薄弱环节,并针对薄弱环节设计相应措施以保证或提高激光器的可靠性,从而满足大气激光雷达的应用需求。

可靠性模型是可靠性研究的基础,是对系统各单元之间逻辑关系的数学描述。可靠性模型有多种,应用比较广泛的有故障树模型、Go图模型和可靠性框图<sup>[13,14]</sup>。故障树模型是描述系统故障及故障关系的树状图,侧重于故障状态的描述和故障产生的原因,要求研究人员对系统具有全面且深入的认识。GO图模型是利用Go法操作符对系统功能、各单元及元器件间的逻辑关系进行描述,要求研究人员对系统非常熟悉,且对GO法有足够的理解。可靠性框图是描述系统、单元、元器件间关系的框图,可以简明扼要地分析元器件运行正常或出现故障对系统状态的影响。

文中通过建立高重频窄脉宽多波长激光器的框图法模型,在初始设计阶段进行激光器可靠性分析,定量分析了激光器中各组件、单元的失效率,确定了激光器高失效率部位,并预计激光器整机的无故障工作时间为1 798.8 h。通过选用高品质晶体元器件、半导体激光器的I级降额设计和电源控制器的冗余设计,逐级开展激光器的可靠性优化,优化设计后激光器整机的无故障工作时间达2 260.9 h,可靠度R(2 000)达到41.29%。搭建激光器整机对可靠性优化设计进行验证,激光器无故障工作时间可达2 400 h,多波长激光输出能量分别为1.34@1 064 nm、1.15@532 nm和0.6@355 nm,满足高重频窄脉宽多波长激光器设计指标要求。

## 1 高重频窄脉宽多波长激光器

高重频窄脉宽多波长激光器的设计指标见表

1。高重频窄脉宽多波长激光器由电源、控制器和激光头三部分组成及工作原理图,如图1所示。电源输出电压为DC24V,用于对电源控制器供电。电源控制器能够独立实现对激光头内部有源器件的上电、控制和反馈。激光头用于实现激光束输出,包括电学部分和光学部分,其中电学部分包括散热风扇、制冷器 and 高压驱动;光学部分包括半导体激光器、光纤、耦合、固体激光器光学腔、非线性和分光模块,光学部分原理图,如图2所示。在图2中,半导体激光器采用脉冲泵浦方式为固体激光器光学腔提供泵浦能量,泵浦光束采用光纤耦合方式输出,且光束在Nd:YAG晶体中聚焦;固体激光器光学腔为U型结构,选用KD\*P作为调Q晶体,采用加压式电光调Q获得1 064 nm脉冲激光输出;非线性和分光模块中分别选用I类LBO晶体和II类LBO晶体,用于1 064 nm激光的倍频效应、和频效应,以实现1 064 nm、532 nm和355 nm的多波长激光输出,分色镜用于实现多波长激光束分束,并任一波长单一光束输出。制冷器为TEC型,且使用散热风扇对制冷器进行热交换。

表1 高重频窄脉宽多波长激光器设计指标

Table 1 Design indicators of high repetition frequency and narrow pulse width multi-wavelength laser

序号	参数	指标
1	波长	1 064 nm、532 nm、355 nm
2	脉冲能量	$\geq 1.1$ mJ@1 064 nm; $\geq 1.1$ mJ@532 nm; $\geq 0.5$ mJ@355 nm
3	脉冲宽度	<5 ns
4	重复频率	1 kHz
5	光束质量因子	$M_x^2 \leq 2$ @1 064 nm&532 nm&355 nm; $M_y^2 \leq 2$ @1 064 nm&532 nm&355 nm
6	无故障工作时间	$\geq 2 000$ h

## 2 可靠性建模

激光器中的光学单元包括半导体激光器、光纤、耦合、固体激光器光学腔、非线性和分光模块。半导体激光器的性能会随着工作时间的延长而产生缓慢退化,主要原因包括晶格内部的缺陷、阈值电流增加引起的效率下降、加工工艺引入的材料污染及引起的后期短路。半导体激光器的可靠度一般符合对数正态分布<sup>[15]</sup>,其失效率一般在 $10^{-5}$  h<sup>-1</sup>量级,为便于激光器整机可靠性评估,采用指数分布定义半导体激光器的可靠度分布函数<sup>[16]</sup>。



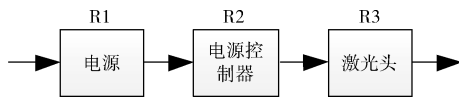


图3 激光器的一阶可靠性框图

Fig.3 First order reliability block diagram of laser

一阶可靠性框图失效率为:

$$\lambda_{SYS} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (1)$$

根据图1所示的激光器功能, 电源控制器分别向半导体激光器、制冷器和高压驱动提供电源控制, 且三路电源控制相对独立, 任意一路电源控

制发生故障均不会对另外两路发生影响, 但会导致激光器故障, 因此逻辑上仍为串联结构; 每路电源控制中包含各自组件, 任意组件发生故障均会导致该路电源控制故障, 各组件逻辑上为串联结构。建立混联式电源控制器的二阶可靠性框图, 如图4所示。根据图1所示的激光头组成, 散热风扇、制冷器、高压驱动、半导体激光器、光纤、耦合、固体激光器光学腔、非线性和分光模块, 任意组件发生故障均会导致激光头故障, 建立串联式激光头的二阶可靠性框图, 如图5所示。

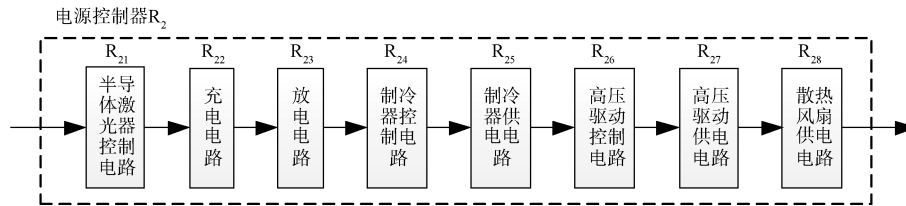


图4 电源控制器的二阶可靠性框图

Fig.4 Second order reliability block diagram of power controller

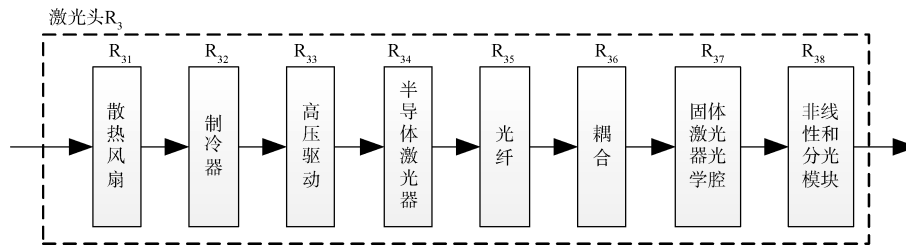


图5 激光头的二阶可靠性框图

Fig.5 Second order reliability block diagram of laser head

二阶可靠性框图失效率为:

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{26} + \lambda_{27} + \lambda_{28} \quad (2)$$

根据图1所示的激光器功能, 制冷器分别向半导体激光器、固体激光器光学腔、非线性和分光模块提供制冷通信, 制冷位置分别为半导体激光器、Nd:YAG 晶体和LBO晶体, 且三处位置的制冷器相对独立, 任意一处位置的制冷器发生故障均不会对另外两处发生影响, 但会导致激光器故障, 因此逻辑上仍为串联结构, 建立并联式制冷器的三阶可靠性框图, 如图6所示。根据图2所示, 耦合包括准直镜和聚焦镜, 任意一个元器件发生故障均会导致耦合故障, 建立串联式耦合的三阶可靠性框图, 如图7所示。根据图2所示, 固体激光器光学腔包括后腔镜、二色镜(2只)、Nd:YAG 晶体、偏振片、KD\*P 晶体、(1/4) $\lambda$  波片和输出镜, 任意一个元器件发生故障均会导致固体激光器光

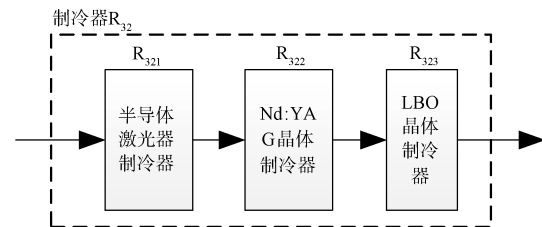


图6 制冷器的三阶可靠性框图

Fig.6 Three order reliability block diagram of cooler

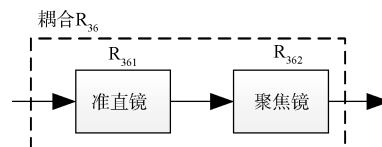


图7 耦合的三阶可靠性框图

Fig.7 Three order reliability block diagram of coupling

学腔故障, 建立串联式固体激光器光学腔的三阶可靠性框图, 如图8所示。根据图2所示, 非线性和分光模块包括反射镜、I类LBO晶体、II类LBO



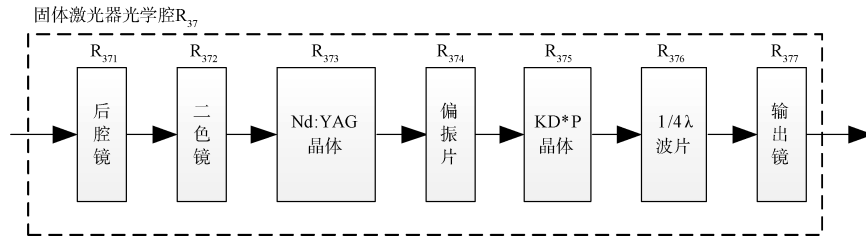


图8 固体激光器光学腔的三阶可靠性框图

Fig.8 Three order reliability block diagram of optical cavity of solid-state laser

晶体、分色镜(3只)和窗口片(3只),任意一个元器件发生故障均会导致非线性和分光模块故障,建立串联式非线性和分光模块的三阶可靠性框图,如图9所示。三阶可靠性框图失效率为:

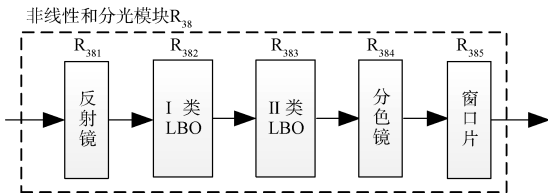


图9 非线性和分光模块的三阶可靠性框图

Fig.9 Three order reliability block diagram of nonlinear and spectroscopic modules

$$\lambda_3 = \lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{33} + \lambda_{34} + \lambda_{35} + \lambda_{36} + \lambda_{37} + \lambda_{38} \quad (3)$$

制冷器的三阶可靠性框图失效率为:

$$\lambda_{32} = \lambda_{321} + \lambda_{322} + \lambda_{323} \quad (4)$$

耦合的三阶可靠性框图失效率为:

$$\lambda_{36} = \lambda_{361} + \lambda_{362} \quad (5)$$

固体激光器光学腔的三阶可靠性框图失效率为:

$$\lambda_{37} = \lambda_{371} + 2\lambda_{372} + \lambda_{373} + \lambda_{374} + \lambda_{375} + \lambda_{376} + \lambda_{377} \quad (6)$$

非线性和分光模块的三阶可靠性框图失效率为:

$$\lambda_{38} = \lambda_{381} + \lambda_{382} + \lambda_{383} + 3\lambda_{384} + 3\lambda_{385} \quad (7)$$

### 3 可靠性预计

由于元器件失效率 $\lambda$ 受所使用的元器件型号、种类、数量和生产工艺所影响,因此无法做到精确计算。结合经验公式和相关参考文献<sup>[22-27]</sup>,可以推测激光器内各单元基本可靠性参数,见表2。

结合表2及式(1)~式(7),可以对激光器各单元及整机进行可靠性预计,见表3。由表3可知,激光器整机的无故障工作时间为1 798.8 h,不满足设计指标中无故障工作时间大于等于2 000 h的要求,因此需对激光器中高失效单元进行优化,以提高激光器整机的可靠性。

表2 各单元基本可靠性参数

Table 2 Basic reliability parameters of each unit

序号	单元名称	$\lambda/10^{-6} \text{ h}^{-1}$	序号	单元名称	$\lambda/10^{-6} \text{ h}^{-1}$
1	电源	22.8	16	光纤	0.1
2	半导体激光器控制电路	11.4	17	准直镜	6.8
3	充电电路	11.4	18	聚焦镜	6.8
4	放电电路	11.4	19	后腔镜	22.8
5	制冷器控制电路	11.4	20	二色镜	11.4
6	制冷器供电电路	11.4	21	Nd:YAG晶体	22.8
7	高压驱动控制电路	11.4	22	偏振片	11.4
8	高压驱动供电电路	11.4	23	KD*P晶体	22.8
9	半导体激光器制冷器	11.4	24	1/4λ波片	11.4
10	Nd:YAG晶体制冷器	11.4	25	输出镜	17.1
11	LBO晶体制冷器	11.4	26	反射镜	11.4
12	散热风扇供电电路	11.4	27	I类LBO	34.2
13	散热风扇	11.4	28	II类LBO	57
14	高压驱动	34.2	29	分色镜	11.4
15	半导体激光器	45.7	30	窗口片	11.4

表3 激光器各单元及整机的可靠性预计

Table 3 Reliability analysis results of each unit and the whole laser

序号	单元名称	失效率 $\lambda/10^{-6} \text{ h}^{-1}$	MTBF/h
1	电源	22.8	43 800
2	电源控制器	91.3	10 950
3	散热风扇	11.4	87 600
4	制冷器	34.2	29 200
5	高压驱动	34.2	29 200
6	半导体激光器激光头	45.7	21 900
7	光纤	0.1	8 760 000
8	耦合	13.7	73 000
9	固体激光器光学腔	131.3	7 617.4
10	非线性和分光模块	171.1	5 844.2
11	激光器整机	555.9	1 798.8

### 4 可靠性优化及验证

由表3可知激光器整机的高失效单元包括非线性

性和分光模块、固体激光器光学腔、电源控制器、半导体激光器, 失效率分别为  $171.1 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 、 $131.3 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 、 $91.3 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$  和  $45.7 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。结合表 2 可知, 非线性和分光模块的高失效元器件为 I 类 LBO 晶体、II 类 LBO 晶体, 固体激光器光学腔的高失效元器件为 Nd:YAG 晶体和 KD\*P 晶体。对于光学元器件, 可通过提高元器件品质的方式降低光学单元的失效率, 从而提高激光器整机的无故障工作时间。因此选用表 4 中的高品质晶体后, 非线性和分光模块的失效率降低至  $136.9 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ , 固体激光器光学腔的失效率降低至  $124.4 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ , 激光器整机的无故障工作时间为 1 942.1 h, 仍不满足设计指标, 需对其他高失效单元进一步优化。

对半导体激光器采取 I 级降额设计<sup>[28]</sup>, 电流的最大工作值降至额定值的 50%, 半导体激光器的失效率<sup>[29]</sup>可表示为:

$$\lambda_{34}' = \pi_1 \times \pi_T \times \lambda_{\text{ref}} \approx e^{1.4 \times 0.5^8} \times 0.41 \times \lambda_{34} \approx 0.41 \lambda_{34} \quad (8)$$

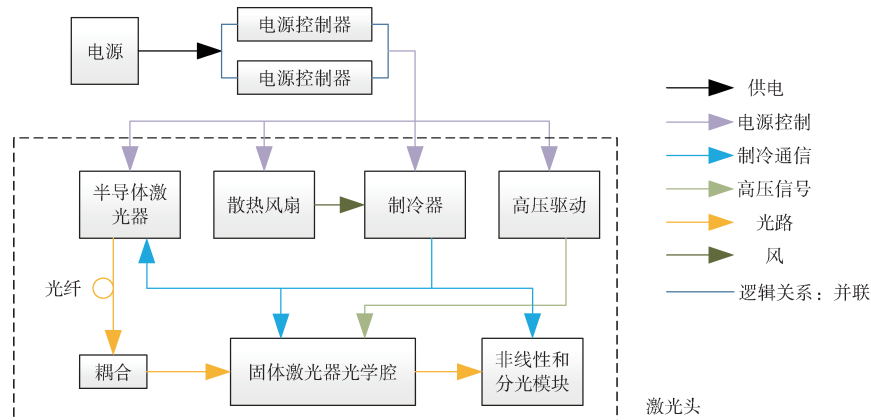


图 10 有冗余设计的激光器组成及工作原理图

Fig.10 Composition of high repetition frequency and narrow pulse width three-wavelength laser

对激光器整机的高失效单元依次采取选用高品质晶体、半导体激光器 I 级降额设计、电源控制器冗余设计后, 激光器可靠性的优化结果, 见表 5。由表 5 可知, 通过对激光器逐级可靠性优化, 激光器整机的失效率由  $514.910^{-6} \text{ h}^{-1}$  最终降低至  $442.310^{-6} \text{ h}^{-1}$ , 激光器整机的无故障工作时间由 1 942.1 h 最终提高至 2 260.9 h, 无故障工作时间超出激光器设计指标 11.3%, 激光器可靠性更高, 如图 11 所示。

采用指数分布定义的可信度分布函数<sup>[30]</sup>对激光器整机可靠性进行评价, 可信度分布函数表示为:

$$R(t) = \exp(-\lambda \times t) \quad (9)$$

式中,  $\lambda$  为失效率;  $t$  为工作时间。优化设计的激光

表 4 普通与高品质晶体失效率比较

Table 4 Comparison of failure rate between ordinary and high quality crystals

序号	单元名称	普通品质 $\lambda/10^{-6} \text{ h}^{-1}$	高品质 $\lambda/10^{-6} \text{ h}^{-1}$
1	I 类 LBO 晶体	34.2	22.8
2	II 类 LBO 晶体	57	34.2
3	Nd:YAG 晶体	22.8	16
4	KD*P 晶体	22.8	18.2

上式中  $\pi_i$  为电流应力系数、 $\pi_T$  为温度应力系数。对半导体激光器 I 级降额设计后, 激光器整机的无故障工作时间提高至 2 049.6 h, 满足设计指标。

为进一步提高激光器整机的可靠性, 对电源控制器采取冗余设计, 有冗余设计的激光器组成及工作原理如图 10 所示。对电源控制器采取冗余设计后, 激光器整机的无故障工作时间提高至 2 260.9 h, 满足设计指标。

器可靠度比较结果, 如图 12 所示。对激光器整机的高失效单元依次采取选用高品质晶体、半导体激光器 I 级降额设计、电源控制器冗余设计后, 激光器整机的可靠度  $R(2\ 000)$  由 35.71% 先后提高至 37.69% 和 41.29%, 激光器运行更可靠。

对激光器整机采用选用高品质晶体+半导体激光器 I 级降额设计+电源控制器冗余设计, 搭建激光器整机, 并进行可靠性验证, 激光器无故障工作时间, 如图 13 所示。对激光器进行无故障工作时间测试, 在激光器工作至 2 000 h 时, 激光器未发生故障, 多波长输出能量分别为  $1.38@1\ 064 \text{ nm}$ 、 $1.21@532 \text{ nm}$  和  $0.64@355 \text{ nm}$ , 满足高重频窄脉宽

表5 激光器可靠性的优化结果  
Table 5 Reliability optimization results of laser

序号	名称	选用高品质晶体		选用高品质晶体+I级降额设计		选用高品质晶体+I级降额设计+冗余设计	
		失效率 $\lambda/10^{-6} h^{-1}$	无故障工作时间 MTBF/h	失效率 $\lambda/10^{-6} h^{-1}$	无故障工作时间 MTBF/h	失效率 $\lambda/10^{-6} h^{-1}$	无故障工作时间 MTBF/h
1	非线性分光模块	136.9	7 304.1	136.9	7 304.1	136.9	7 304.1
2	固体激光器光学腔	124.4	8 035.5	124.4	8 035.5	124.4	8 035.5
3	半导体激光器	45.7	21 900	18.7	53 475.9	18.7	53 475.9
4	电源控制器	91.3	10 950	91.3	10 950	45.7	21 900
5	激光器整机	514.9	1 942.1	487.9	2 049.6	442.3	2 260.9

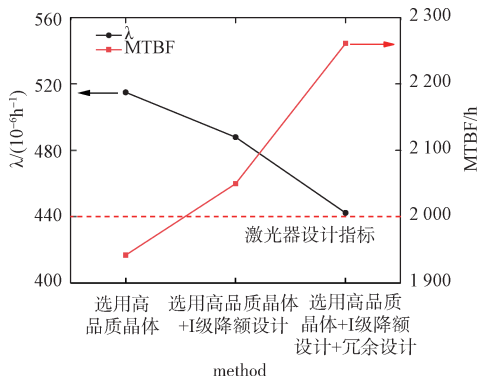


图11 激光器可靠性的比较结果

Fig.11 Comparative results of laser reliability

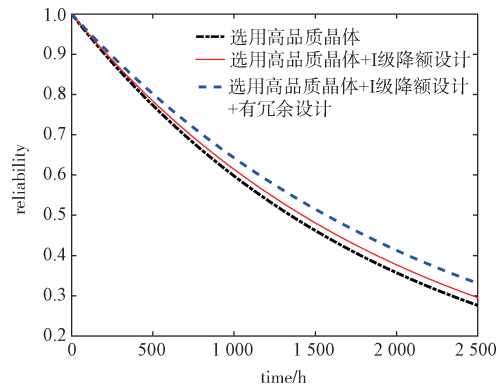


图12 优化设计的激光器可靠度比较结果

Fig.12 Reliability comparison results of the optimized laser design

多波长激光器设计指标要求。激光器继续工作至 2 400 h时，未发生故障，多波长激光输出能量已下降，分别为 1.34@1 064 nm、1.15@532 nm 和

0.6@355 nm，但仍满足设计指标要求。

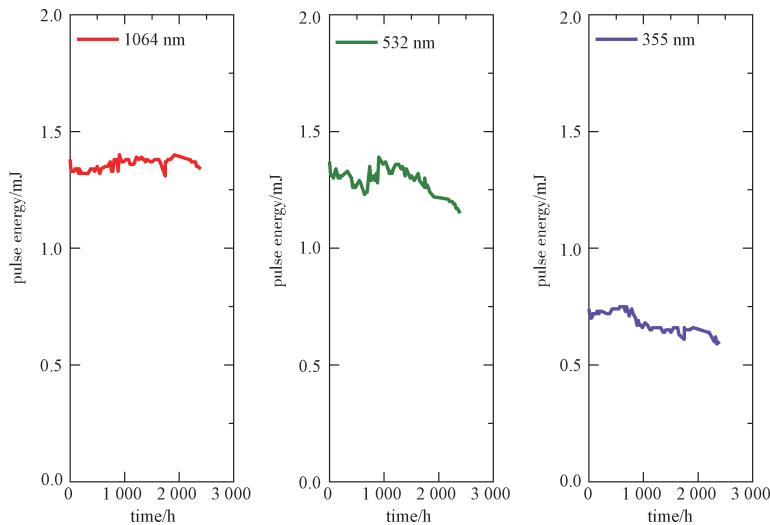


图13 激光器的无故障工作时间

Fig.13 The trouble-free operating time of the laser

### 5 结束语

本文对高重频窄脉宽多波长激光器的可靠性

进行分析与验证。采用框图法模型对高重频窄脉宽多波长激光器的可靠性建模，在激光器初始设计阶段预计了激光器整机的无故障工作时间为

1 798.8 h, 发现不满足高重频窄脉宽多波长激光器的设计指标, 且 I 类 LBO 晶体、II 类 LBO 晶体、Nd:YAG 晶体和 KD\*P 晶体为激光器中的高失效元器件, 失效率分别为  $34.2 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 、 $57 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 、 $22.8 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$  和  $22.8 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。于是采取逐级优化的方式对激光器可靠性优化设计, 首先选用高品质晶体元器件开展可靠性优化, 随后对半导体激光器采用 I 级降额设计, 最后对电源控制器采用冗余设计。实现了激光器整机的无故障工作时间由 1 942.1 h 先后提高至 2 049.6 h 和 2 260.9 h, 满足设计指标的要求。激光器的可靠度  $R(2000)$  由 35.71% 先后提高至 37.69% 和 41.29%, 激光器运行更可靠。搭建激光器整机对可靠性优化设计进行验证, 激光器无故障工作 2 400 h 时, 多波长激光输出能量分别为  $1.34 @ 1\ 064 \text{ nm}$ 、 $1.15 @ 532 \text{ nm}$  和  $0.6 @ 355 \text{ nm}$ , 满足高重频窄脉宽多波长激光器设计指标要求。验证结果表明: 本文对高重频窄脉宽多波长激光器的可靠性分析方法可行。本文对高重频窄脉宽多波长激光器可靠性的研究方法, 对在轨激光通信与激光遥感等领域中应用的长寿命高可靠性空间激光器也适用, 可为长寿命高可靠性空间激光器的设计提供一定的支撑。

### 参考文献

- [1] 狄慧鸽, 华灯鑫. 底层大气探测激光雷达国内研究现状与进展 (特邀) [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 20210032.  
DI Huige, HUA Dengxin. Research status and progress of Lidar for atmosphere in China (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3): 20210032.
- [2] 杨勇, 程学武, 杨国韬, 等. 高层大气探测激光雷达研究进展 [J]. 量子电子学报, 2020, 37(5): 566-579.  
YANG Yong, CHENG Xuewu, YANG Guotao, et al. Research progress of Lidar for upper atmosphere [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(5): 566-579.
- [3] HARA Y, NISHIZAWA T, SUGIMOTO N, et al. Retrieval of aerosol components using multi-wavelength Mie-Raman Lidar and comparison with ground aerosol sampling [J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 937.
- [4] 季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测卷云有效激光雷达比 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 262-268.  
JI Chengli, TAO Zongming, HU Shunxing, et al. Effective Lidar ratio of cirrus cloud measured by three-wavelength Lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 262-268.
- [5] 王丽东, 郭畅, 赵一鸣, 等. 大气探测激光雷达组网观测一致性研究 [J]. 遥测遥控, 2023, 44(6): 72-79.  
WANG Lidong, GUO Chang, ZHAO Yiming, et al. Consistency research of atmospheric detection Lidar network observations [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 72-79.
- [6] 潘超, 李凉海, 曹海翊, 等. 多波束三维成像激光雷达高精度收发匹配方法研究 [J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 62-70.  
PAN Chao, LI Lianghai, CHAO Haiyi, et al. High accuracy alignment method for the transceiver of a multi-beam 3D imaging Lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 62-70.
- [7] 叶珊珊, 黄海波, 陈颂元, 等. TiCN 作为可饱和吸收体的  $2.8 \mu\text{m}$  被动调 Q 锁模光纤激光器 [J]. 光电工程, 2023, 50(7): 87-95.  
YE Shanshan, HUANG Haibo, CHEN Songyuan, et al.  $2.8 \mu\text{m}$  passively Q-switched mode-locked fiber laser using TiCN as saturable absorber [J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(7): 87-95.
- [8] 杨昊, 谢晨波, 方志远, 等. 星-地激光雷达联合观测合肥地区的气溶胶垂直分布 [J]. 中国激光, 2021, 48(1): 160-171.  
YANG Hao, XIE Chenbo, FANG Zhiyuan, et al. Joint observations of vertical distribution of aerosols in Hefei area by spaceborne and ground-based Lidars [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 160-171.
- [9] 徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 403-412.  
XU Junjie, BU Lingbing, LIU Jiqiao, et al. Airborne high-spectral-resolution Lidar for atmospheric aerosol detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 403-412.
- [10] 冉子涵, 赵一鸣, 李静, 等. LD 端面泵浦千赫兹多波长激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 221-227.  
RAN Zihan, ZHAO Yiming, LI Jing, et al. LD end-pumped kilohertz multiwavelength lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 221-217.
- [11] 董宗戈, 邓凯, 蔡旺. 大气探测激光雷达技术发展综述 [J]. 光电技术应用, 2022, 37(6): 53-57.  
DONG Zongge, DENG Kai, CAI Wang. Summary of laser radar technology development for atmospheric detection [J]. Electro-Optic Technology Application, 2022, 37(6): 53-57.



- [12] 冉子涵, 赵一鸣, 李静, 等. 全固态高重频电光调Q激光器研究进展[J]. 遥测遥控, 2021, 42(2): 1-12.  
RAN Zihan, ZHAO Yiming, LI jing, et al. Research progress of all-solid-state high-repetition frequency electro-optic Q-switched lasers[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(2): 1-12.
- [13] 刘东, 张红林, 王波等. 动态故障树分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [14] 梅启智. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社出版, 1992.
- [15] ZHURAVLEVA O V, IVANOV A V, KURNOSOV V D, et al. Reliability estimate for semiconductor laser module ILPN-134[J]. Semiconductors, 2010, 44(3): 359-365.
- [16] 李鹏飞. 空间辐射环境下卫星激光通信星上终端可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [17] 刘泰, 翟庆诗, 刘红峰. 通信用光纤可靠性影响因素分析[J]. 光通信研究, 2012(5): 33-36.  
LIU Tai, ZHAI Qingshi, LIU Hongfeng. Analysis of factors affecting optical fiber reliability[J]. Study on Optical Communications, 2012(5): 33-36.
- [18] 陈静. 非均匀污染对卡塞格伦光学系统的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [19] 毛红祥. 军用光学系统可靠性研究[J]. 应用光学, 1997, 18(3): 1-5.  
MAO Hongxiang. Research on reliability of military optical system[J]. Applied Optics, 1997, 18(3): 1-5.
- [20] 国家标准局. 电子设备可靠性预计手册 GJB/Z 299C—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [21] 张朗. 激光驱动器主放大系统可靠性建模与分析技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [22] 王亚辉. 卫星光通信粗瞄系统可靠性设计及实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [23] 王同桓. 激光通信星上高速数据源设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [24] 凌铭, 武志超, 张海波, 等. LD泵浦Nd:YAG无水冷固体激光器可靠性分析[J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 211-213.  
LING Ming, WU Zhichao, ZHANG Haibo, et al. Reliability analysis of LD pumped solid laser without water cooling based on fault tree[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(3): 211-213.
- [25] 杨文是, 王伟, 秘国江, 等. GO法在无水冷全固态激光器系统可靠性分析中的应用[J]. 激光与红外, 2010, 40(2): 211-213.  
YANG Wenshi, WANG Wei, BI Guojiang, et al. Reliability analysis in no water-cooled solid-state laser system with GO method[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(2): 211-213.
- [26] 曹可. 半导体激光点火系统可靠性建模与分析方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [27] 曾梓航, 潘超. 基于GO法的Nd:YAG侧面泵浦激光器可靠性分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 66-72.  
ZENG Zihang, PAN Chao. Reliability analysis of Nd:YAG side-pumped laser based on GO method [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 66-72.
- [28] 国家标准局. 电子元器件降额的基本准则 GJB/Z35—93[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [29] 国家标准局. 电子元器件可靠性失效率的基准条件和失效率转换的应力模型 GB/Z7289—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [30] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 77-82.  
ZHANG Peichao, GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 77-82.

## [作者简介]

- 崔 铮 1987年生, 博士, 工程师。  
于 勇 1971年生, 博士, 研究员。  
李祚涵 1989年生, 博士, 高级工程师。  
李之通 1991年生, 硕士, 工程师。  
潘 超 1981年生, 博士, 研究员。

(本文编辑: 杨秀丽)

(英文编辑: 赵尹默)