

# 基于 GO 法的 Nd:YAG 侧面泵浦激光器可靠性分析

曾梓航<sup>1</sup>, 潘超<sup>2</sup>

(1 中国航天科技集团第九研究院质量技术部 北京 100076;

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 本文报道了基于 GO(Goad Oriented)法的 Nd:YAG 侧面泵浦激光器可靠性分析,建立了 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的 GO 图模型,定性分析了 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的薄弱环节,定量计算了激光头中各薄弱环节的可靠性结果,包括等效故障率 $\lambda_R$ 、等效维修率 $\mu_R$ 、平均无故障工作时间(MTBF)等;并定量计算了 KTP 晶体故障率的改善对 Nd:YAG 侧面泵浦激光器可靠性提高的影响。本文中建立的 GO 图模型可为 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的优化及可靠性评价提供理论依据。

**关键词:** GO 法; 激光器; 侧面泵浦; 可靠性

**中图分类号:** TN248.1; TN306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-1000(2023)02-0066-07

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20220923001

**引用格式:** 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.

## Reliability analysis of Nd:YAG side-pumped laser based on GO method

ZENG Zihang<sup>1</sup>, PAN Chao<sup>2</sup>

(1. Quality Technology Department, Ninth Research Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The reliability analysis of Nd:YAG side-pumped laser based on GO (Goal Oriented) method is studied. The GO diagram model of the Nd:YAG side-pumped laser is established. The weak links of the Nd:YAG side-pumped laser are analyzed qualitatively, and the reliability results of each weak link in the laser head are calculated quantitatively, including the equivalent failure rate  $\lambda_R$ , equivalent maintenance rate  $\mu_R$ , average fault-free operating time MTBF, etc. The effect of improving the failure rate of KTP crystal on the reliability of Nd:YAG side-pumped laser is quantitatively calculated. The GO diagram model established in this paper can provide a theoretical basis for the optimization and reliability evaluation of Nd:YAG side-pumped laser.

**Keywords:** The GO method; Laser; Side-pumping; Reliability

**Citation:** 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.

## 引 言

激光技术在激光加工、激光医疗、激光遥感等领域有着重要的应用及研究价值<sup>[1-3]</sup>,特别是随着半导体激光器(LD)和 YAG 激光基质的发展,高功率 LD 泵浦固体激光器(DPSSL)成为激光领域研究的热点<sup>[4]</sup>。由于热致双折射、非均匀泵浦畸变及径向温度梯度热应力分布不均匀等因素的影响<sup>[5]</sup>,基于圆棒状激光增益介质的端面泵浦方式已无法满足高功率 DPSSL 技术要求。为此,基于板条状激光增益介质的侧面泵浦方式 DPSSL 被提

出<sup>[6]</sup>。与棒状增益介质相比,板条状增益介质可以消除应力产生的双轴聚焦和双折射,且在板条状增益介质纵横比大于 2 时,板条状增益介质对热量的耐吸收能力优于棒状增益介质<sup>[7]</sup>。光束在板条内部沿“之”字路径传输时,传输路径中由于热致折射率变化引起的波前相位畸变将被明显减弱<sup>[8]</sup>。此外,与端面泵浦方式相比,侧面泵浦方式可以提供更高功率的泵浦注入。因此,基于板条状激光增益介质的侧面泵浦方式 DPSSL 自诞生以来,就引起了研究人员的浓厚兴趣<sup>[9]</sup>。

Nd:YAG 侧面泵浦激光器<sup>[10]</sup>是基于板条状激光

增益介质的侧面泵浦方式DPSSL典型代表。在Nd:YAG侧面泵浦激光器的设计及生产阶段,为满足应用需求,研究人员需针对Nd:YAG侧面泵浦激光器的薄弱环节,采用性能参数优化设计、冗余设计及环境防护设计等方式提高激光器的可靠性。为此,如何确认Nd:YAG侧面泵浦激光器的薄弱环节,并进行有效的定量评估成为Nd:YAG侧面泵浦激光器可靠性研究的重点。

可靠性研究包括可靠性设计、建模、分析和评价等方面,其中建模是可靠性研究的基础。目前常用的可靠性研究方法包括框图法、故障树分析法(FTA)及GO法等<sup>[11,12]</sup>。框图法是可靠性研究最基本及最早使用的方法,属于静态可靠性研究方法,其对复杂时序和多状态系统难以进行有效的建模。FTA是一种自上而下的可靠性研究方法,其受人为影响因素较大,要求研究人员对系统具有全面且深入的认识,且难以进行定量分析。GO法是一种以成功为导向的可靠性研究方法,具有多时序、多状态建模的能力,通过使用合适的操作符,可直接将原理图、流程图等按照一定的功能转换为GO图模型,且定性分析及定量分析原理简单。

本文通过建立Nd:YAG侧面泵浦激光器的GO图模型,定性分析了Nd:YAG侧面泵浦激光器的薄弱环节,定量计算了激光头中振荡级Nd:YAG晶体、放大级Nd:YAG晶体和KTP晶体的可靠性,并定量分析了KTP晶体故障率对Nd:YAG侧面泵浦激光器可靠性提高的影响。在激光器停机期间状态不变的情况下,KTP晶体的故障率 $\lambda_{c17}$ 为0.3时,按每天工作24 h计算,Nd:YAG侧面泵浦激光器的平均无故障工作时间为30.9 d,无故障发射脉冲数为 $2.670 \times 10^8$ ,满足设计指标要求。本文的研究结果可为Nd:YAG侧面泵浦激光器的优化及可靠性评价供理论依据。

## 1 Nd:YAG侧面泵浦激光器

对于设计指标如表1所示的Nd:YAG侧面泵浦激光器,主要包括电源、控制系统、水冷机和激光头四部分,如图1所示。电源为控制系统及激光头内部有源器件供电,控制系统为电源、激光头和水冷机提供控制信号,水冷机为激光头供水实现冷却,激光头输出激光束。激光头内部光学原理如图2所示: Nd:YAG晶体采用板条结构,半导体激光器阵列(LDA)对Nd:YAG晶体进行侧面泵

浦;全反射镜、振荡级Nd:YAG晶体、LDA、Cr:YAG晶体、输出镜组成光学谐振腔,Cr:YAG晶体作为被动调Q元件,实现1 064 nm调Q激光输出;后经光隔离器、直角棱镜和光束扩束器,进入放大级Nd:YAG晶体,实现主振荡功率放大(MOPA),输出1 064 nm大能量调Q激光;再经直角棱镜和柱面镜进入KTP晶体,实现非线性频率转换,输出1 064 nm和532 nm双波长、大能量调Q激光,并通过镀有双波长增透膜的光束扩束器发射。

表1 Nd:YAG侧面泵浦激光器设计指标

Table 1 Design indicators of Nd:YAG side-pumped laser

序号	参数	指标
1	波长	1 064 nm、532 nm
2	脉冲能量	35 mJ@1 064 nm; 15 mJ@532 nm
3	脉冲宽度	<6 ns
4	重复频率	100 Hz
5	光束发散角	110 $\mu$ rad(6X)
6	无故障反射脉冲	$>2.5 \times 10^8$ 脉冲数目

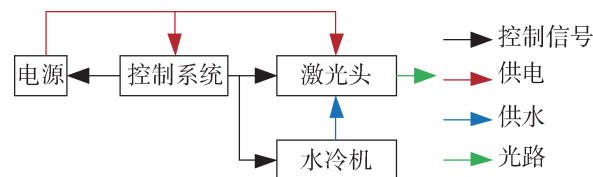


图1 Nd:YAG侧面泵浦激光器组成图

Fig.1 Composition of Nd:YAG side-pumped laser

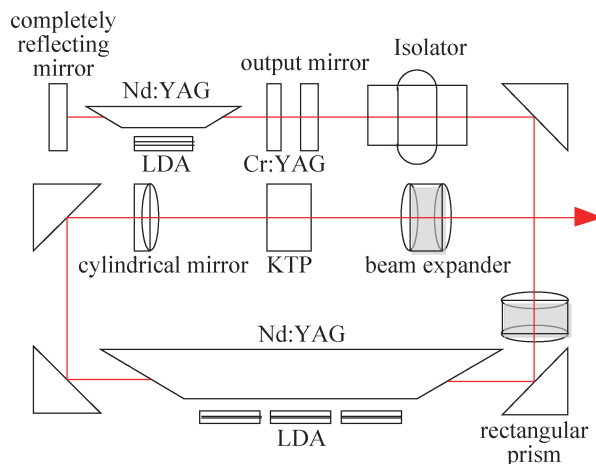


图2 激光头内部光学原理图

Fig.2 Schematic diagram of laser head internal optics

### 2 GO法原理

GO法的基本思想是把原理图、流程图等按一定规则转换为GO图模型, 并进行GO运算。其中, GO操作符与信号流是组成GO图模型的两个要素, GO操作符表征具体部件或部件间的逻辑关系, 信号流表征操作符的作用关系。目前, GO法已拥有17种确认的操作符<sup>[13]</sup>。信号流包括状态值和状态概率两个属性, 对于多状态的一个操作符m, 其(N+1)种状态的概率满足下式:

$$\sum_{i=0}^N P_m(i) = 1 \tag{1}$$

上式表征式中操作符m出现故障的概率为100%, 式中*i*=0表征操作符的提前状态, *i*=1,2, …, *N*-1表征操作符的多个成功状态, *i*=*N*表征操作符的故障状态, *P*(*i*)表征第*i*种状态的故障概率。

GO图模型建立的基本规则<sup>[14]</sup>, 为: (1) GO操作符需明确操作类型和唯一编号; (2) 表征输入的操作符数量≥1, 且作为起始编号; (3) 操作符以信号流连接, 信号流标注编号, 且编号唯一; (4) 信号流起始于输入操作符, 终止于输出信号流, 且不循环。

使用GO操作符与信号流建立GO图模型后, 利用GO操作符基本数据及每个操作符的运算规则, 进行GO运算, 最终获得系统输出信号的状态概率。GO运算包括定性运算和定量运算, 对于n个操作符组成的GO图模型, 定性运算用于分析产生系统各种状态的可能单元组合, 通过分析得到系统的薄弱环节。定量运算是从输入操作符开始计算, 沿着信号流方向依次计算各操作符的系统故障率λ和系统维修率μ, 最终得到系统输出信号的λ、μ及其他参数。GO定量运算流程图<sup>[15]</sup>, 如图3所示。系统其他参数包括: 平均无故障工作时间 $t_{MTBF}$ 、平均维修时间 $t_{MTTR}$ 、稳态可用度*A*、稳态不可用度*A'*、单位时间平均故障次数*f*, 计算公式分

别为<sup>[16]</sup>:

$$MIBF = \frac{1}{\lambda} \tag{2}$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \tag{3}$$

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tag{4}$$

$$A' = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \tag{5}$$

$$f = \frac{\lambda\mu}{\lambda + \mu} \tag{6}$$

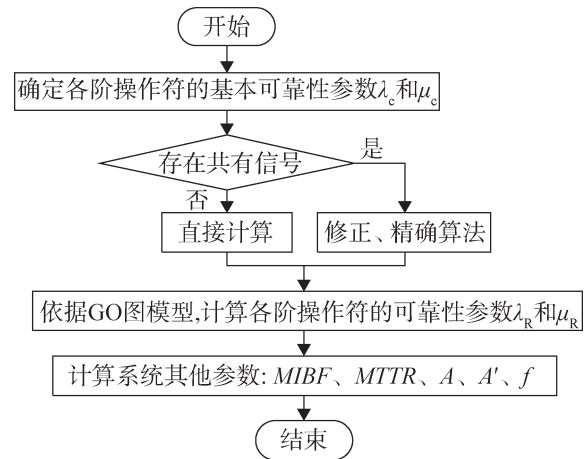


图3 GO定量运算流程图

Fig.3 Flow chart of GO quantitative operation

### 3 GO法可靠性分析

#### 3.1 操作符选择

根据Nd:YAG侧面泵浦激光器组成, 本文实际使用到的操作符有4种<sup>[17,18]</sup>, 其符号表示及描述, 如图4和表2所示。Nd:YAG侧面泵浦激光器各单元基本可靠性参数, 如表3所示。

$$\lambda_R = \lambda_S + \lambda_C, \mu_R = \frac{\lambda_R}{\frac{\lambda_S}{\mu_S} + \frac{\lambda_C}{\mu_C}} \tag{7}$$

$$\lambda_R = \lambda_C, \mu_R = \mu_C \tag{8}$$

表2 GO法操作符描述

Table 2 GO method operator description

序号	类型	名称	功能描述	类别	运算公式
1	1	两状态单元	模拟两状态单元, 即成功状态和故障状态	功能	式(7)
2	5	单信号发生器	模拟单输入信号	功能	式(8)
3	6	有条件通过元件	模拟经过激励后才能让输入通过的单元	功能	式(9)
4	10	与门	模拟逻辑关系“与”	逻辑	式(10)

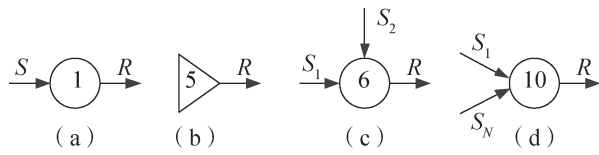


图4 GO法操作符:(a)两状态单元;(b)单信号发生器;(c)有条件通过元件;(d)与门

Fig.4 Operators of the GO method: (a) two state units; (b) single signal generator; (c) Conditional passage element; (d) and gate

$$\lambda_R = \lambda_{S_1} + \lambda_{S_2} + \lambda_C, \mu_R = \frac{\lambda_R}{\frac{\lambda_{S_1}}{\mu_{S_1}} + \frac{\lambda_{S_2}}{\mu_{S_2}} + \frac{\lambda_C}{\mu_C}} \quad (9)$$

$$\lambda_R = \lambda_{S_1} + \lambda_{S_2}, \mu_R = \frac{\lambda_R}{\frac{\lambda_{S_1}}{\mu_{S_1}} + \frac{\lambda_{S_2}}{\mu_{S_2}}} \quad (10)$$

式中,  $\lambda_S$  和  $\mu_S$  分别为操作符输入信号的等效故障率、等效维修率;  $\lambda_C$  和  $\mu_C$  分别为操作符本身的故障率、维修率;  $\lambda_R$  和  $\mu_R$  分别为操作符输出信号的等效故障率、等效维修率。

表3 各单元基本可靠性参数

Table 3 Basic reliability parameters of each unit

序号	类型-编号	单元名称	$\lambda_c/a^{-1}$	$\mu_c/h^{-1}$	序号	类型-编号	单元名称	$\lambda_c/a^{-1}$	$\mu_c/h^{-1}$
1	5-1	电源	0.2	0.25	16	1-16	Cr:YAG 晶体	0.3	0.5
2	1-2	总控制系统	0.1	0.25	17	6-17	KTP 晶体	3	0.5
3	1-3	水冷机	0.2	0.25	18	1-18	倍频热沉	0.1	1
4	1-4	振荡级控制系统	0.1	0.25	19	5-19	全反射	0.4	1
5	6-5	振荡级充电电路	0.1	0.25	20	1-20	输出镜	0.4	1
6	6-6	振荡极放电电路	0.1	0.25	21	1-21	柱面镜	0.4	1
7	6-7	振荡级 LDA	0.6	0.25	22	1-22	光隔离器	0.4	1
8	6-8	振荡级 Nd:YAG 晶体	0.3	0.25	23	1-23	直角棱镜	0.4	1
9	1-9	振荡级热沉	0.1	1	24	1-24	直角棱镜	0.4	1
10	1-10	放大级控制系统	0.1	0.25	25	1-25	直角棱镜	0.4	1
11	6-11	放大级充电电路	0.1	0.25	26	1-26	直角棱镜	0.4	1
12	6-12	放大级放电电路	0.1	0.25	27	1-27	光束扩束器	0.4	1
13	6-13	放大级 LDA	0.6	0.25	28	1-28	光束扩束器	0.4	1
14	6-14	放大级 Nd:YAG 晶体	0.3	0.25	29	10-29	与门	/	/
15	1-15	放大级热沉	0.1	1	30	10-30	与门	/	/

### 3.2 建立 GO 图模型

Nd:YAG 侧面泵浦激光器原理图, 如图 5 所示。电源为总控制系统供电后, 总控制系统发出水冷机工作指令、振荡级控制系统待机指令、放大级控制系统待机指令, 激光器处于待机状态。水冷机向振荡级热沉、放大级热沉和倍频热沉提供循环冷却水, 对激光头内的振荡级 LDA、振荡级 Nd:YAG 晶体、放大级 LDA、放大级 Nd:YAG 晶体和 KTP 晶体进行温度控制。振荡级控制系统依次发出振荡级充电电路工作指令、振荡级放电电路工作指令, 则振荡级放电电路在电源为振荡级充电电路完成充电后, 向振荡极 LDA 放电; 同时, 放

放大级控制系统依次发出放大级充电电路工作指令、放大级放电电路工作指令, 则放大级放电电路在电源为放大级充电电路完成充电后, 向放大级 LDA 放电, 激光头处于工作状态。激光头中振荡级处于工作状态。振荡级 LDA 发射中心波长为 808 nm 激光对振荡级 Nd:YAG 晶体进行泵浦, 1 064 nm 光子在 Nd:YAG 晶体内被激活, 并在全反射镜和输出镜之间往返运动, Cr:YAG 晶体实现激光器调 Q 运转, 1 064 nm 调 Q 激光在输出镜处被部分输出。后经光隔离器、直角棱镜、光束扩束器和直角棱镜进入放大级 Nd:YAG 晶体, 获得 1 064 nm 的大能量调 Q 激光输出。后经直角棱镜、柱面镜进

入KTP晶体实现倍频, 最终获得1064 nm和532 nm双波长激光, 并由光束扩束器出射。依据GO法原

理, 建立Nd:YAG侧面泵浦激光器的GO图模型, 如图6所示。

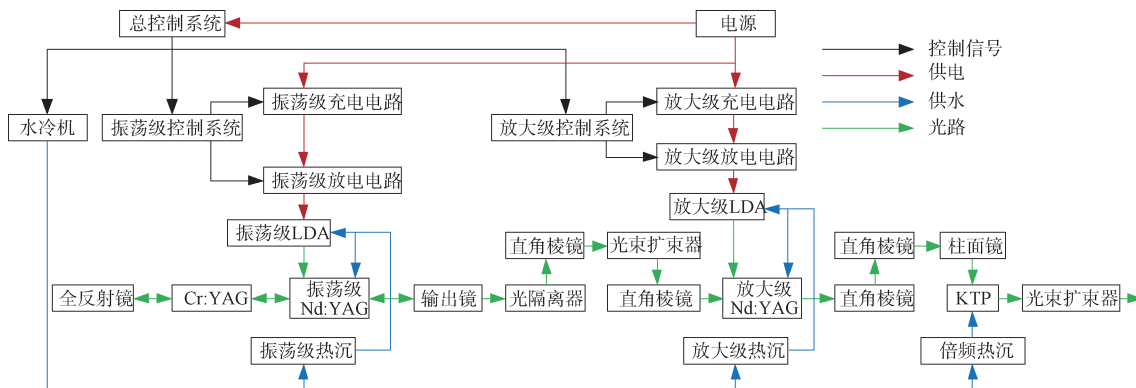


图5 Nd:YAG侧面泵浦激光器原理图

Fig.5 Schematic diagram of Nd:YAG side-pumped laser

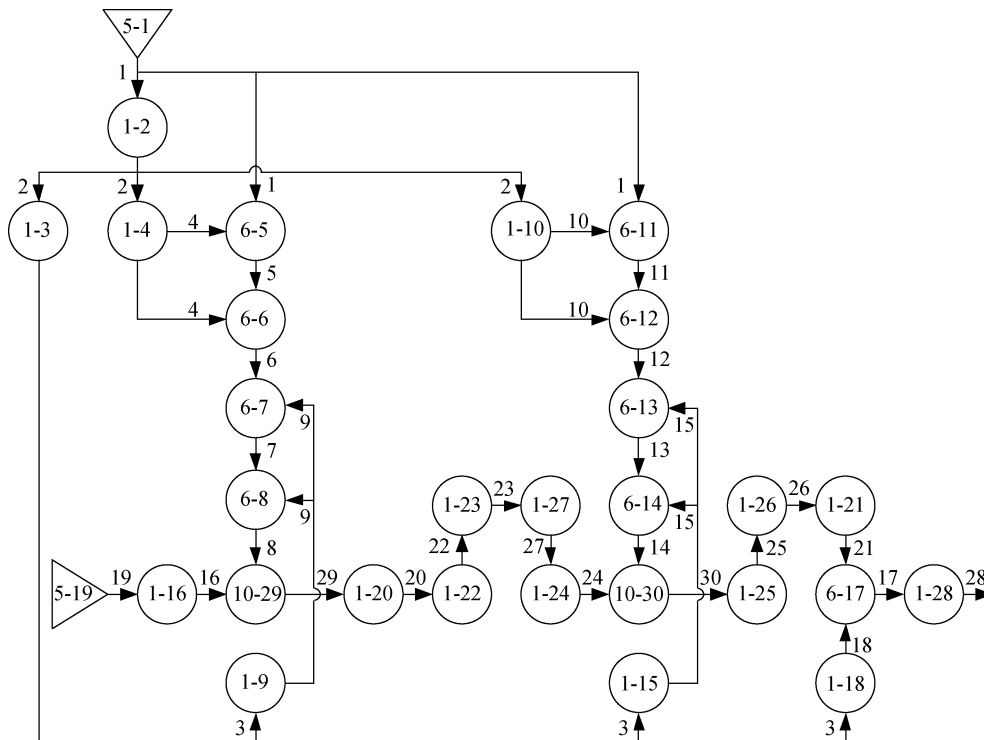


图6 Nd:YAG侧面泵浦激光器的GO图模型

Fig.6 GO diagram model of Nd:YAG side-pumped laser

3.3 可靠性分析

根据图6所示的GO图模型, 对Nd:YAG侧面泵浦激光器进行GO法定性分析, 得到Nd:YAG侧面泵浦激光器的薄弱环节为: 6-6、6-7、6-8、6-12、6-13、6-14、6-17。因此, 在激光头设计及生产阶段, 振荡级6-8(Nd:YAG晶体)、6-14(放大级Nd:YAG晶体)和6-17(KTP晶体)应作为关键单元被重点关注, 包括: ① 6-8、6-14和6-17自身

的损伤阈值; ② 6-8、6-14和6-17表面镀膜的光学损伤阈值。坚持使用高损伤阈值元件, 或通过对接激光头内光束模式的控制, 降低6-8、6-14和6-17的损伤概率, 从而提高Nd:YAG侧面泵浦激光器的可靠性<sup>[19]</sup>。结合表3, 获得激光头关键单元可靠性分析结果, 如表4所示。由表4可知, 在激光器停机期间状态不变的情况下, 按每天工作24 h计算, KTP晶体的故障率为14.1/a、平均无故障工作时间

为 25.9 d、单位时间平均故障次数为 14.0 次/a，KTP 晶体的故障率远大于振荡级 Nd:YAG 晶体、放

大级 Nd:YAG 晶体。因此，KTP 晶体故障率的降低可有效提高 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的可靠性。

表 4 激光头关键单元可靠性分析结果  
Table 4 Reliability analysis results of key elements of laser head

序号	类型-编号	单元名称	$\lambda_R/a^{-1}$	$\mu_R/a^{-1}$	MTBF/d	MTTR/h	A	A'	f/次·a <sup>-1</sup>
1	6-8	振荡级 Nd:YAG 晶体	3.3	2 294.29	110.6	3.8	99.856%	0.144%	3.3
2	6-14	放大级 Nd:YAG 晶体	3.3	2 294.29	110.6	3.8	99.856%	0.144%	3.3
3	6-17	KTP 晶体	14.1	3 293.76	25.9	2.7	99.574%	0.426%	14.0

对于 Nd:YAG 侧面泵浦激光器，激光器无故障发射脉冲数  $N_0$ ，计算公式如下所示：

$$N_0 = MIBF \times f_0 \quad (11)$$

式中， $f_0$  为激光器重复频率。结合表 1 可知： $f_0 = 100$  Hz。因此，结合表 4 可知：Nd:YAG 侧面泵浦激光器无故障发射脉冲数  $N_0 = 2.238 \times 10^8$ ， $N_0$  不满足设计指标要求。

对 KTP 晶体进行优化设计，降低 KTP 晶体的故障率。在 KTP 晶体操作符的故障率  $\lambda_{c17}$  分别为 3、2、1、0.5、0.3 时，Nd:YAG 侧面泵浦激光器的可

靠性分析结果，如表 5 所示。由表 5 可知，在激光器停机期间状态不变的情况下，按每天工作 24 h 计算，当  $\lambda_{c17}$  由 3 降低至 0.3 时，Nd:YAG 侧面泵浦激光器的故障率为由 14.5/a 降低至 11.8/a、平均无故障工作时间从 25.2 d 升高至 30.9 d、单位时间平均故障次数从 14.4 次/a 降低至 11.8 次/a，Nd:YAG 侧面泵浦激光器的可靠性明显提高。对于本设计的 Nd:YAG 侧面泵浦激光器，在 KTP 晶体操作符的故障率  $\lambda_{c17} = 0.3$  时，激光器无故障发射脉冲数  $N_0 = 2.670 \times 10^8$ ，满足设计指标要求。

表 5 Nd:YAG 侧面泵浦激光器可靠性分析结果  
Table 5 Reliability analysis results of Nd:YAG side-pumped laser

序号	符号	可靠性特征量	数值@	数值@	数值@	数值@	数值@
			$\lambda_{c17}=3$	$\lambda_{c17}=2$	$\lambda_{c17}=1$	$\lambda_{c17}=0.5$	$\lambda_{c17}=0.3$
1	$\lambda$	故障率/a <sup>-1</sup>	14.5	13.5	12.5	12	11.8
2	$\mu$	维修率/a <sup>-1</sup>	3 351.45	3 294.15	3 230.1	3 195.1	3 180.6
3	MIBF	平均无故障工作时间/d	25.2	27	29.2	30.4	30.9
4	MTTR	平均维修时间/h	2.6	2.7	2.8	2.7	2.8
5	A	平均工作概率	99.57%	99.59%	99.62%	99.63%	99.63%
6	A'	平均停工概率	0.43%	0.41%	0.38%	0.37%	0.37%
7	f	单位时间平均故障次数/(次·a <sup>-1</sup> )	14.4	13.4	12.5	12.0	11.8

#### 4 结束语

本文基于 GO 法对 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的可靠性进行分析，建立了 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的 GO 图模型，定性分析了 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的薄弱环节，明确了振荡级 Nd:YAG 晶体、放大级 Nd:YAG 晶体和 KTP 晶体作为激光头的关键单元，应被重点关注。同时定量分析了各关键单元的可靠性，通过对比发现：KTP 晶体的故障率对 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的可靠性影响重大，降低 KTP 晶体的故障率可以明显提高 Nd:YAG 侧面泵浦

激光器的可靠性。在激光器停机期间状态不变的情况下，按每天工作 24 h 计算，在 KTP 晶体的故障率  $\lambda_{c17}$  为 0.3 时，Nd:YAG 侧面泵浦激光器的故障率为 11.8/a、平均无故障工作时间为 30.9 d、单位时间平均故障次数为 11.8 次/a，激光器无故障发射脉冲数为  $2.670 \times 10^8$ ，满足设计指标要求。

本文研究结果表明：GO 法可为 Nd:YAG 侧面泵浦激光器的优化及可靠性评估提供理论依据。

#### 参考文献

[1] PARK J S, KIM H S, CHOI C P. Utilizing combined

- pulsed dye and Nd:YAG lasers in the treatment of connective tissue disease cutaneous symptoms[J]. Journal of clinical rheumatology, 2021, 27 (8s): S451-S452.
- [2] KANG S H, HAN D H, KANG L H. Defect visualization of a steel structure using a piezoelectric line sensor based on laser ultrasonic guided wave[J]. Materials, 2019, 12(23).
- [3] ZHU J, CHEN Y, ZHANG L, et al. Demonstration of measuring sea fog with an SNSPD-based lidar system[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 15113.
- [4] 张玲玲, 孟俊清, 黄燕. 高功率板条激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 33-36.  
ZHANG Lingling, MENG Junqing, HUANG Yan. Recent advances in high- power solid-state slab lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 33-36.
- [5] 周寿桓, 赵鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.  
ZHOU Shouhuan, ZHAO Hong, TANG Xiaojun. High average power laser diode pumped solid- state laser [J]. Chinese Journal of lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.
- [6] MARTIN W S, CHERNOCH J P. Multiple internal reflection face-pumped laser[P]. Patent, US 3633126, 1973-05-16.
- [7] INJEYAN H, GOODNO D. High-power laser handbook [M]. New York: Mc Graw Hill, 2011, 187-206.
- [8] 雷翔. 板条固体激光器光束净化控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [9] PIERRE R J S, INJEYAN H, RODGER C H, et al. One joule per pulse, 100 watt, diode-pumped, near diffraction limited, phase conjugated, Nd: YAG master oscillator power amplifier[C]//OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers, 1993, 15, 2-8.
- [10] MARMO J, INJEYAN H, KOMINE H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at northrop grumman[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195 (719507): 1-6.
- [11] 梅启智. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社出版, 1992.
- [12] 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.
- [13] 沈祖培, 黄祥瑞. GO法原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] 丁素芳. 装载机系统的可靠性分析及其变速箱的模糊可靠性优化设计研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [15] 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.
- [16] SHEN Z P, GAO J, HUANG X. An exact algorithm dealing with shared signals in the GO methodology[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 73(2): 177-181.
- [17] 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.
- [18] 王智, 包成玉. YAG激光器系统可靠性分析中GO法的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 3: 377-380.  
WANG Zhi, BAO Chengyu. Application of GO methodology for reliability analysis of YAG laser system[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2007, 3: 377-380.
- [19] 李德鹏, 李宝忠, 包照日格图. 氙灯泵浦Nd:YAG激光器的可靠性分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(11): 1340-1342.  
LI Depeng, LI Baozhong, BAO Zhaorigetu. Reliability analysis of xenon flash lamp pumped Nd:YAG laser[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(11): 1340-1342.

#### [作者简介]

曾梓航 1980年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天电子质量与可靠性。

潘超 1981年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达系统设计。

(本文编辑: 潘三英)