

文章编号:1001-5078(2024)10-1518-08

· 激光器技术 ·

## 阵列光纤激光器可靠性冗余策略研究

刘龙龙<sup>1</sup>, 艾小川<sup>1</sup>, 吴俊<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 基础部, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 为了提高阵列光纤激光器的可靠度, 本文利用  $k/n(G)$  表决模型灵活性和高容错的特点, 使用冷储备单元, 对光纤阵列进行冗余设计, 从而实现在激光器输出功率可控的前提下使用寿命得到提升。 $k/n:M(G)$  冷备表决系统包含  $n$  个工作单元,  $M$  个冷储备单元, 当至少有  $k$  个单元正常工作时系统正常工作。本文结合 5 光模块可控阵列光纤激光器, 建立  $3/5:2(G)$  冷备表决系统的等效模型, 对不同冗余策略下的光纤激光器的可靠度和平均寿命进行求解, 然后根据最佳策略对表决系统进行优化, 最后利用蒙特卡罗仿真试验证明方法的正确性与可行性。

**关键词:** 阵列光纤激光器; 冷备表决系统; 等效模型; 可靠度; 特征寿命

中图分类号: TN242 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.003

### Study on reliability redundancy strategies of arrayed fiber lasers

LIU Long-long<sup>1</sup>, AI Xiao-chuan<sup>1</sup>, WU Jun<sup>2</sup>

(1. Department of Basic Courses, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** To enhance the reliability of array fiber output lasers, the flexibility and high fault tolerance of the  $k/n(G)$  voting model are exploited, and the redundant design of the fiber array is carried out by using a cold reserve unit, so as to achieve the service life enhancement under the premise of controllable laser output power. The  $k/n:M(G)$  cold standby voting system consists of  $n$  working units and  $M$  cold standby units, and the system works normally when at least  $k$  units work properly. In this paper, a  $3/5:2(G)$  cold standby voting system equivalent model is established by combining a 5-module controllable array fiber laser, the reliability and average lifespan of the fiber laser under different redundancy strategies are solved, and then the voting system is optimized according to the best strategy. Finally, the Monte Carlo simulation test is used to prove the correctness and feasibility of the method.

**Keywords:** array fiber output laser; cold standby voting system; equivalent model; reliability; characteristic life

#### 1 引言

阵列光纤激光器是一种可扩展的光纤输出激光器, 激光器由电模块单元、光模块单元、与光模块单元对应的激光输出头和光斑定位器组成<sup>[1]</sup> 如

图 1 所示。光模块单元通过光纤与激光输出头连接, 激光输出头设置于光斑定位器中; 电模块同时对光模块单元进行供电和控制; 激光器输出的激光经过光纤传输至对应的激光输出头; 激光输出

作者简介: 刘龙龙 (2000 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为系统建模与仿真。E-mail: 1045223688@qq.com

通讯作者: 艾小川 (1978 -), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为数学与密码、可靠性数学。E-mail: 593884531@qq.com

收稿日期: 2024-03-18

头将激光聚焦后形成光斑;光斑定位器实现光斑单行或单列、多行或多列的阵列排布。通过这种方式,使阵列光纤输出激光器具有高功率输出、高能量密度、稳定性、光束质量高、灵活性、小尺寸轻量化和低维护成本等优点,适用于各种激光应用领域<sup>[2-3]</sup>。

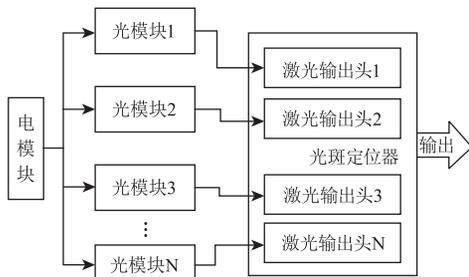


图1 阵列光纤激光器结构设计

Fig.1 Array fiber laser structure design

冗余设计是提高系统可靠性的一个重要方法<sup>[4]</sup>。普遍认为,如果不采用冗余设计,对于容错和安全要求较高的系统是无法实现预期的可靠性的需求<sup>[5]</sup>。常见的冗余类型有两种:(1)主冗余;(2)备用冗余<sup>[6]</sup>。根据备用状态下部件的故障特征,将备用冗余进一步分为冷储备、温储备、热储备, $k/n(G)$ 系统就属于热储备系统的一种。目前备用冗余在商业和军事中被广泛应用<sup>[7-9]</sup>于提高系统安全性和可靠性以及确定最优冗余配置,所以对冗余系统的可靠性和相关措施进行准确分析是非常重要的<sup>[10]</sup>。

$k/n(G)$ 表决系统被广泛应用于分析和提升各样系统的可靠度中。肖龙林<sup>[11]</sup>使用了 $k/n(G)$ 表决系统来描述传感器网络的可靠性,评估传感器网络在不同失效模式下的可靠性。陈书阳<sup>[12]</sup>使用 $k/n(G)$ 表决系统对无线传感器网络(WSN)的传输可靠性进行建模分析。在文献<sup>[13]</sup>中介绍了基于 $k/n(G)$ 表决系统的使用激光二极管备用冗余光中继器的海底传输系统的可靠性评估公式。目前在激光器的设计中仍然存在失效率过高和使用寿命太短的问题,文献<sup>[14]</sup>和<sup>[15]</sup>提到目前激光器阵列的设计中普遍存在串联使用的问题。激光器由光单元串联而成,激光阵列功率越高,串联的器件单元数目就越多,这本身就增大了失效率。因此本文将针对串联使用问题,设计基于 $k/n : M$

(G)模型的阵列光纤输出激光器,将 $k/n : M(G)$ 冷备表决系统和阵列光纤输出激光器相结合(如图1所示),并设置的最优冗余策略,计算结合后的系统可靠度和平均寿命,最后通过仿真验证冗余策略的正确性。

## 2 基于 $k/n : M(G)$ 模型的阵列光纤激光器设计

基于 $k/n : M(G)$ 模型的阵列光纤激光器(或称 $k/n : M(G)$ 阵列光纤激光器)是由一个电模块、 $n$ 个光模块单元和 $M$ 个冷储备光模块单元、 $n$ 个对应的激光输出头、一个 $k/n(G)$ 表决器以及一个光斑定位器组成。在该设计中阵列光纤激光器的输出功率强度为 $k$  ( $0 < k \leq n$ )个光模块输出功率之和,并拥有 $M$ 个冷储备光模块单元对损坏的光模块单元进行更换。该激光器正常工作的状态可以定义为:当至少有 $k$ 个光模块单元正常工作时激光器正常工作。结构设计图如图2所示。

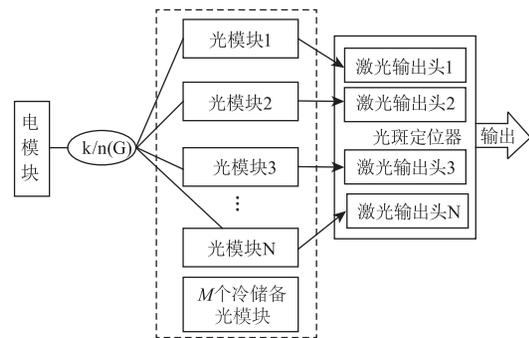


图2 基于 $k/n : M(G)$ 模型的阵列光纤激光器结构设计

Fig.2 Design of array fiber laser structure based on  $k/n : M(G)$  model

## 3 表决系统的等效模型

若 $k/n(G)$ 表决系统中单元寿命都服从相同的指数分布,单元失效率为 $\lambda$ ,则根据 $k/n(G)$ 表决系统的运行规律,系统寿命 $T_s$ 等于下列系统寿命之和:

- (1)  $n$ 个单元串联系统的寿命 $T_n$ ;
- (2)  $n-1$ 个单元串联系统的寿命 $T_{n-1}$ ;
- (3)  $n-2$ 个单元串联系统的寿命 $T_{n-2}$ ;
- ……
- $(n-k+1)k$ 个单元串联系统的寿命 $T_k$ .

即系统的寿命可表示为:

$$T_s = T_n + T_{n-1} + \dots + T_k,$$

且由于指数分布的无记忆性, $T_i$  ( $i = k, \dots, n$ )之间是相互独立的。系统的寿命分布函数 $F_s(t)$ 的

Laplace 变换可表示为:

$$\hat{F}_S(s) = \hat{F}_n(s) \cdot \hat{F}_{n-1}(s) \cdots \hat{F}_k(s) = \frac{(n\lambda) [(n-1)\lambda] \cdots (k\lambda)}{(S+n\lambda) [S+(n-1)\lambda] \cdots (S+k\lambda)} \quad (1)$$

系统可靠度为:

$$R_S(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i e^{-(n-i)\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^i \quad (2)$$

将系统寿命分解后,其平均寿命为:

$$E(T_S) = E(T_n + T_{n-1} + \cdots + T_k) = \frac{1}{n\lambda} + \frac{1}{(n-1)\lambda} + \cdots + \frac{1}{k\lambda} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=k}^n \frac{1}{i} \quad (3)$$

结果与文献[16]结果一致。

由表决系统和串并联系统的关系,可知串联系统、并联系统、表决系统都等效表示成多个相互独立的串联系统之和。 $k/n : M(G)$  冷备表决系统是一种特殊的表决系统,因此冷备表决系统也可以转化为多个相互独立的串联系统之和。

#### 4 3/5 : 2(G) 阵列光纤激光器模型假设

为了更好地考察由 5 个光模块单元和 2 个冷储备光模块单元构成的 3/5 : 2(G) 阵列光纤激光器的可靠度,本文提出以下假设。

假设 1: 5 个光模块单元和 2 个冷储备光模块单元属于同一种器件,且各个单元在系统之间相互独立。

假设 2: 在表决系统中,开关转换时间忽略不计以及开关的可靠度为 1 且不变,备件更换时间极短,因此更换时间暂且忽略不计,且更换后立刻恢复正常状态。

假设 3: 所有光模块单元寿命均服从指数分布<sup>[17]</sup>。即部件寿命  $T$  的概率密度为:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (4)$$

寿命分布函数为:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (5)$$

可靠度函数为:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (6)$$

$k/n(G)$  系统的可靠度函数为:

$$R_S(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i e^{-\lambda t(n-i)} (1 - e^{-\lambda t})^i \quad (7)$$

假设 4: 在表决系统出现故障时,可以进行开关转换到正常工作状态,同时也可以进行备件更换,备件可以在任何工作部位进行更换,同时也可以选择不更换。

#### 5 3/5 : 2(G) 阵列光纤激光器冗余策略研究

根据表决系统故障出现后转换开关和备件使用时机,可以将 3/5 : 2(G) 阵列光纤输出激光器的冷备件使用情况分为六种情形。根据表决系统的特性,我们将利用第二节提到的方法将表决系统转移为串联系统进行系统可靠度和平均寿命的计算。

情形 1: 在 3/5 : 2(G) 阵列光纤激光器中,表决系统出现光模块单元故障后先进行故障部位更换,系统运行直至所有备件用完且整个系统失效,具体如图 3 所示。

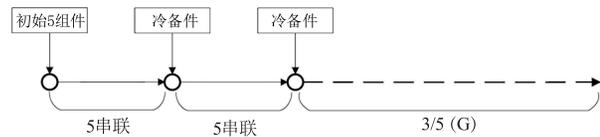


图 3 情形 1 系统结构设计

Fig. 3 Scenario 1 system architecture design

情形 2: 在 3/5 : 2(G) 阵列光纤激光器中,表决系统第一次出现光模块单元故障后先进行故障部位更换,第二次出现故障不进行冷备件更换,第三次出现故障进行冷备件更换,系统运行至系统失效,具体如图 4 所示。

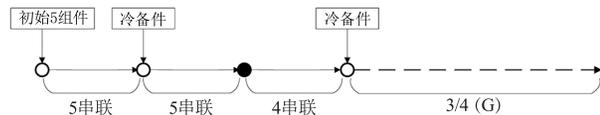


图 4 情形 2 系统结构设计

Fig. 4 Scenario 2 system architecture design

情形 3: 在 3/5 : 2(G) 阵列光纤激光器中,表决系统第一次出现光模块单元故障后先进行故障部位更换,第二次和第三次出现故障不进行冷备件更换,第四次出现故障进行冷备件更换,系统运行至系统失效,具体如图 5 所示。

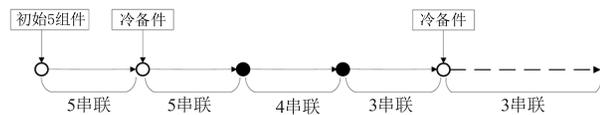


图 5 情形 3 系统结构设计

Fig. 5 Scenario 3 system architecture design

情形4: 在3/5:2(G)阵列光纤激光器中, 表决系统第一次出现光模块单元故障不进行更换, 第二次出现故障进行冷备件更换, 第三次出现故障进行冷备件更换, 系统运行至系统失效, 具体如图6所示。

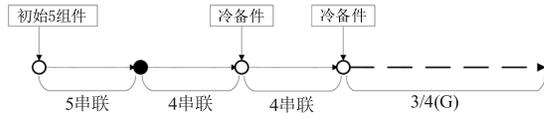


图6 情形4系统结构设计

Fig. 6 Scenario 4 system architecture design

情形5: 在3/5:2(G)阵列光纤激光器中, 表决系统第一次出现光模块单元故障不进行更换, 第二次出现故障进行冷备件更换, 第三次出现故障不进行更换, 第四次出现故障进行冷备件更换, 系统运行至系统失效, 具体如图7所示。

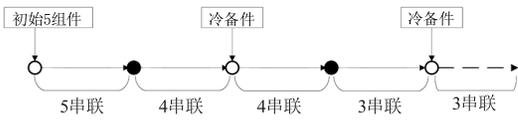


图7 情形5系统结构设计

Fig. 7 Scenario 5 system architecture design

情形6: 在3/5:2(G)阵列光纤激光器中, 表决系统第一次和第二次出现光模块单元故障不进行更换, 第三次和第四次出现故障进行冷备件更换, 系统运行至系统失效, 具体如图8所示。

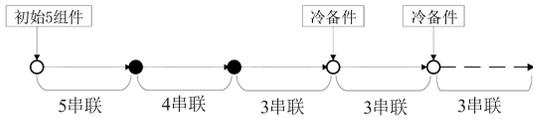


图8 情形6系统结构设计

Fig. 8 Scenario 6 system architecture design

设随机变量  $T_{S_i}$  ( $i = 1, 2, 3 \dots 6$ ) 为第  $i$  种情形下阵列光纤激光器的工作寿命。

$$T_{S_1} = T_5 + T_5 + T_5 + T_4 + T_3 \quad (8)$$

$$T_{S_2} = T_5 + T_5 + T_4 + T_4 + T_3 \quad (9)$$

$$T_{S_3} = T_5 + T_5 + T_4 + T_3 + T_3 \quad (10)$$

$$T_{S_4} = T_5 + T_4 + T_4 + T_4 + T_3 \quad (11)$$

$$T_{S_5} = T_5 + T_4 + T_4 + T_3 + T_3 \quad (12)$$

$$T_{S_6} = T_5 + T_4 + T_3 + T_3 + T_3 \quad (13)$$

变量  $T_k$  ( $k = 5, 4 \dots 1$ ) 表示为由  $k$  个相同光模块单元串联使用时的的工作寿命:

可以看出上述六种冗余策略下3/5:2(G)阵列

光纤激光器的寿命已根据表决系统的等效模型和冷备件使用的时机进行了分解, 均转化为相互独立的多个串联系统的寿命之和。此时利用拉氏变换和拉氏逆变换容易求各情形下系统可靠度:

$$R_{S_1} = 1 - \frac{1}{2}e^{-5t\lambda} (-627 + 750e^{t\lambda} - 125e^{2t\lambda} + 2e^{5t\lambda} - 30t\lambda(17 + 5t\lambda)) \quad (14)$$

$$R_{S_2} = 1 - e^{-5t\lambda} (324 - 225e^{t\lambda} - 100e^{2t\lambda} + e^{5t\lambda} + 120t\lambda + 300e^{t\lambda}t\lambda) \quad (15)$$

$$R_{S_3} = 1 - e^{-5t\lambda} (99 - 225e^{t\lambda} + 125e^{2t\lambda} + e^{5t\lambda} + 45t\lambda - 75e^{2t\lambda}t\lambda) \quad (16)$$

$$R_{S_4} = 1 - e^{-5t\lambda} (-96 + e^{t\lambda}(255 - 160e^{t\lambda} + e^{4t\lambda} + 60t\lambda(1 + 2t\lambda))) \quad (17)$$

$$R_{S_5} = 1 - e^{-5t\lambda} (-36 - 225e^{t\lambda} + 260e^{2t\lambda} + e^{5t\lambda} - 180e^{t\lambda}t\lambda - 120e^{2t\lambda}t\lambda) \quad (18)$$

$$R_{S_6} = 1 - \frac{1}{2}e^{-5t\lambda} (-27 + 270e^{t\lambda} - 245e^{2t\lambda} + 2e^{5t\lambda} + 210e^{2t\lambda}t\lambda - 90e^{2t\lambda}t^2\lambda^2) \quad (19)$$

3/5:2(G)阵列光纤激光器在六种冗余策略下可靠度曲线如图9所示。根据模型假设, 计算出六种情形的特征寿命(可靠度为1/e)和平均失效时间, 见表1。从图7和表1可以看出, 冷备件更换时间越晚, 系统越可靠, 且特征寿命和平均寿命越长。情形6的特征寿命和平均寿命是情形1的1.22倍, 提升了22%, 情形5相对情形1提升了15%的寿命。因此在3/5:2(G)阵列光纤激光器中, 备件的使用应当在表决系统临近失效时使用效果最佳。

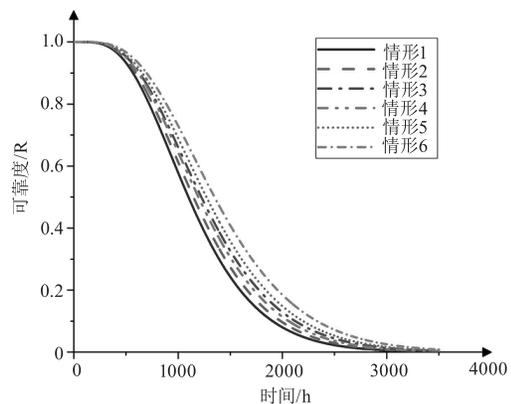


图9 不同策略可靠度对比图

Fig. 9 Comparison of reliability among different strategies

表1 不同策略可靠性指标对比表  
Tab.1 Comparison of different strategy reliability indicators

情形	特征寿命	平均失效时间
情形1	$\frac{1.28283}{\lambda}$	$\frac{71}{60\lambda}$
情形2	$\frac{1.3378}{\lambda}$	$\frac{37}{30\lambda}$
情形3	$\frac{1.4276}{\lambda}$	$\frac{79}{30\lambda}$
情形4	$\frac{1.39284}{\lambda}$	$\frac{77}{60\lambda}$
情形5	$\frac{1.48288}{\lambda}$	$\frac{41}{30\lambda}$
情形6	$\frac{1.577359}{\lambda}$	$\frac{29}{20\lambda}$

下面从理论上分析,为什么后启动冷储备单元能够使得系统更加可靠。

定理1 设  $X_1, X_2, X_3$  为三个相互独立的系统的工作寿命,其失效分布函数(不可靠度)分别为  $F_1(t), F_2(t), F_3(t)$ , 则当  $X_2$  的失效分布函数  $F_2(t)$  大于系统  $X_3$  的失效分布函数  $F_3(t)$  时,必有  $X_1, X_2$  和系统的失效分布函数大于  $X_1, X_3$  和系统的失效分布函数,即有:

$$F_1(t) \cdot F_2(t) > F_1(t) \cdot F_3(t).$$

证系统  $X_1 + X_2$  的失效分布函数为:

$$F_1(t) \cdot F_2(t) = \int_0^t F_1(t-\tau) dF_2(\tau) \quad (20)$$

系统  $X_1 + X_3$  的失效分布函数为:

$$F_1(t) \cdot F_3(t) = \int_0^t F_1(t-\tau) dF_3(\tau) \quad (21)$$

则:

$$\begin{aligned} & F_1(t) \cdot F_2(t) - F_1(t) \cdot F_3(t) \\ &= \int_0^t F_1(t-\tau) d[F_2(\tau) - F_3(\tau)] \\ &= \int_0^t F_1(t-\tau) d[F_2(\tau) - F_3(\tau)] \\ &= F_1(t-\tau) [F_2(\tau) - F_3(\tau)] \Big|_0^t - (-1) \cdot \\ & \quad \int_0^t [F_2(\tau) - F_3(\tau)] f_1(t-\tau) d\tau \\ &= \int_0^t [F_2(\tau) - F_3(\tau)] f_1(t-\tau) d\tau > 0 \quad (22) \end{aligned}$$

所以:

$$F_1(t) \cdot F_2(t) > F_1(t) \cdot F_3(t) \quad (23)$$

上述分析说明若系统  $X_2$  的可靠度小于系统  $X_3$  的可靠度,则系统  $X_1 + X_2$  的失效分布函数大于系统  $X_1 + X_3$  的失效分布函数,即此时系统  $X_1 + X_2$  可靠度小于系统  $X_1 + X_3$  的可靠度。

由于在相同单元构成的串联系统中系统的可靠性随构成系统的单元数量增多而降低。所以由定理1可知在六种策略下系统可靠度的表达式:

$$R_{S_1} = P(T_{S_1} \geq t) = P(T_5 + T_5 + T_5 + T_4 + T_3 \geq t),$$

$$R_{S_2} = P(T_{S_2} \geq t) = P(T_5 + T_5 + T_4 + T_4 + T_3 \geq t),$$

$$R_{S_3} = P(T_{S_3} \geq t) = P(T_5 + T_5 + T_4 + T_3 + T_3 \geq t),$$

$$R_{S_4} = P(T_{S_4} \geq t) = P(T_5 + T_4 + T_4 + T_4 + T_3 \geq t),$$

$$R_{S_5} = P(T_{S_5} \geq t) = P(T_5 + T_4 + T_4 + T_3 + T_3 \geq t),$$

$$R_{S_6} = P(T_{S_6} \geq t) = P(T_5 + T_4 + T_3 + T_3 + T_3 \geq t),$$

易知  $R_{S_1} < R_{S_2} < R_{S_4}, R_{S_3} < R_{S_5} < R_{S_6}$ , 而通过计算可以发现  $R_{S_3} > R_{S_4}$ , 所以有:

$$R_{S_1} < R_{S_2} < R_{S_4} < R_{S_3} < R_{S_5} < R_{S_6}.$$

可见后启动冷储备单元确实可以提高整个系统的可靠性。

本文以带两个冷储备单元的5中取3表决系统为例,实际上结果可以推广到更一般的情形,在冷备表决系统中,冷储备单元越晚启用,系统的可靠性越好。

### 6 3/5:2(G)阵列光纤激光器冗余策略同级优化

根据3/5:2(G)阵列光纤激光器的冗余策略方案中表现最优的情形——激光器在完全失效后进行冷备件最佳,我们对3/5(G)表决系统进行改进优化,共4种情形如下。

情形1:将3/5:2(G)阵列光纤激光器修正为3/7:0(G)激光器,具体如图10所示。

情形2:将3/5:2(G)阵列光纤激光器修正为3/6:1(G)激光器,具体如图11。

情形3:将3/4:3(G)阵列光纤激光器修正为

3/4 : 3(G)激光器,具体如图 12 所示。

情形 4: 将 3/3 : 4(G)阵列光纤激光器修正为 3 串联 + 4 冷备件的激光器,具体如图 13 所示。

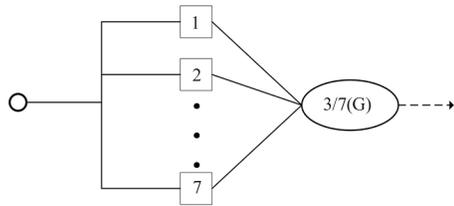


图 10 3/7 : 0(G)冷备表决系统

Fig. 10 3/7 : 0(G) Cold standby voting system

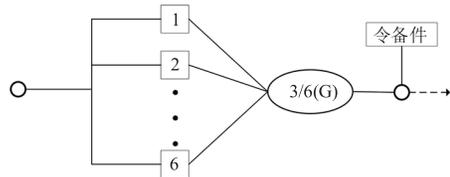


图 11 3/6 : 1(G)冷备表决系统

Fig. 11 3/6 : 1(G) Cold standby voting system

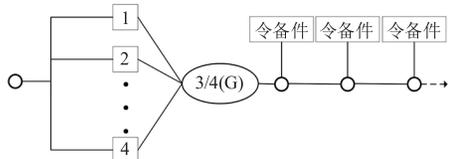


图 12 3/4 : 3(G)冷备表决系统

Fig. 12 3/4 : 3(G) Cold standby voting system

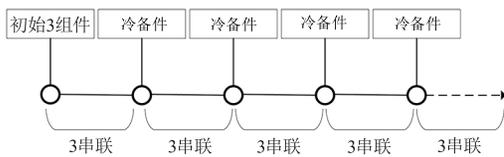


图 13 3/3 : 4(G)冷备表决系统

Fig. 13 3/3 : 4(G) Cold standby voting system

四种情形下系统可靠度分别为:

$$R_{S_1} = 1 - e^{-7t\lambda} (-1 + e^{t\lambda})^5 (15 + 5e^{t\lambda} + e^{2t\lambda}) \quad (24)$$

$$R_{S_2} = 1 - e^{-6t\lambda} (-10 + 54e^{t\lambda} - 135e^{2t\lambda} + 90e^{3t\lambda} + e^{6t\lambda} - 60e^{3t\lambda} t\lambda) \quad (25)$$

$$R_{S_3} = 1 - e^{-4t\lambda} (-81 + 80e^{t\lambda} + e^{4t\lambda} - 84e^{t\lambda} t\lambda + 36e^{t\lambda} t^2 \lambda^2 - 18e^{t\lambda} t^3 \lambda^3) \quad (26)$$

$$R_{S_4} = 1 - \frac{1}{8} e^{-3t\lambda} (-8 + 8e^{3t\lambda} - 24t\lambda - 36t^2 \lambda^2 - 36t^3 \lambda^3 - 27t^4 \lambda^4) \quad (27)$$

根据模型假设,计算出四种修正后激光器的特征寿命和平均寿命,将这四种修正后激光器与备件后换 3/5 : 2(G)阵列光纤激光器进行对比(如图 14

所示),3/5 : 2(G)激光器的特征寿命是 3/7(G)激光器的 1.33 倍;3/3 : 4(G)激光器的特征寿命是 3/5 : 2(G)激光器的 1.15 倍,是 3/7(G)激光器的 1.53 倍。由表 2 可以看出表决系统设计越简单系统的特征寿命越长(见表 2)。

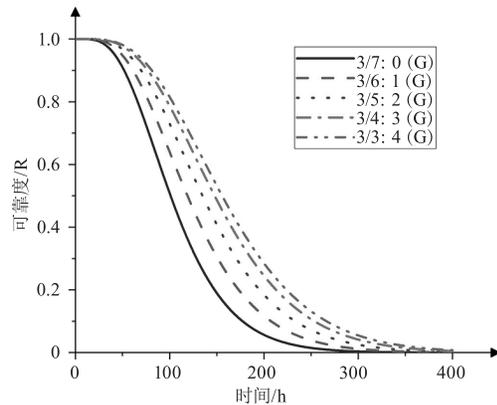


图 14 优化系统可靠性指标对比图

Fig. 14 Comparison of reliability metrics optimization system

表 2 优化系统可靠性指标对比表

Tab. 2 Comparison of reliability indicators for optimized systems

表决系统	特征寿命	平均失效时间
3/7 : 0(G)	$\frac{1.18231}{\lambda}$	$\frac{153}{140\lambda}$
3/6 : 1(G)	$\frac{1.39057}{\lambda}$	$\frac{77}{60\lambda}$
3/5 : 2(G)	$\frac{1.57359}{\lambda}$	$\frac{29}{20\lambda}$
3/4 : 3(G)	$\frac{1.72003}{\lambda}$	$\frac{19}{12\lambda}$
3/3 : 4(G)	$\frac{1.81176}{\lambda}$	$\frac{5}{3\lambda}$

## 7 算例分析

在本节中,通过蒙特卡罗仿真对本文所选方案进行仿真验证。将蒙特卡罗法得到的阵列光纤激光器可靠度作为真实系统可靠度。

算例 1: 3/5 : 2(G)阵列光纤激光器不同冗余策略下的不可靠度解算

假设所有光模块及其冷备件均服从  $\lambda = 0.001$  的指数分布,利用蒙特卡罗仿真获得不可靠度的仿真解,并利用上文中的方法求出解算解,  $t = 2000$  h, 仿真结果如表 3 所示。

算例 2: 3/5 : 2(G)阵列光纤激光器冗余策略同级不同优化下的不可靠度解算

假设所有光模块及其冷备件均服从  $\lambda = 0.001$  的指数分布,利用蒙特卡罗仿真获得不可靠度的仿真解,并利用上文中的方法求出解算解,  $t = 2000$  h, 仿真结果如表4所示。

表3 不同策略不可靠度仿真

Tab.3 Simulation of unreliability under different strategies

情形	$t/h$	仿真	解算	误差/%
情形1	2000	0.9185	0.9199	0.1435
情形2	2000	0.9013	0.9035	0.2500
情形3	2000	0.8685	0.8711	0.2977
情形4	2000	0.8848	0.8859	0.1165
情形5	2000	0.8506	0.8517	0.1321
情形6	2000	0.8137	0.8154	0.2024

表4 优化系统不可靠度仿真

Tab.4 Reliability simulation of the optimized system

表决系统	$t/h$	仿真	解算	误差/%
3/7 : 0(G)	2000	0.9438	0.9431	0.0685
3/6 : 1(G)	2000	0.8847	0.8827	0.2164
3/5 : 2(G)	2000	0.8137	0.8154	0.2024
3/4 : 3(G)	2000	0.7525	0.7547	0.2885
3/3 : 4(G)	2000	0.7140	0.7149	0.1291

## 8 小结

本文针对 3/5 : 2(G) 阵列光纤激光器备件更换策略进行了研究,并对最优方案进行了改进优化,研究表明:一是在冷备表决系统中,备件在表决系统失效后更换,能较大提升系统的可靠性、平均寿命和特征寿命;二是在冷备表决系统的设计中,表决系统的复杂度越低,系统的特征寿命越长。

本文忽略了表决系统的开关的不可靠性和备件更换时间,如果应用到具体实际情形,还需要结合多种因素进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Duan, Kailiang, Han Yuan, Ma Baotian. Expandable array fiber output laser. China; CN107065215B [P]. 2017 - 08 - 18. (in Chinese)  
段开棕, 韩媛, 马宝田. 可扩展阵列光纤输出激光器. 中国; CN107065215B [P]. 2017 - 08 - 18.
- [2] Zhang Jiabin, He Qing, Zhang Qingchao. Application of fiber Bragg grating sensor array in spatial temperature field measurement [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(6): 724 - 728. (in Chinese)  
张佳斌, 贺庆, 张青超. 光纤光栅传感器阵列在空间温度场测量中的应用 [J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 724 - 728.
- [3] Yan Lihua, Cheng Yitao, Zhang Houb. Design and implementation of broadband planar array laser [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(7): 1037 - 1042. (in Chinese)  
闫立华, 程义涛, 张厚博. 宽谱平面阵列激光器的设计与实现 [J]. 激光与红外, 2023, 53(7): 1037 - 1042.
- [4] Kuo W, Prasad V R, Tillman F A, et al. Optimal reliability design: fundamentals and applications [J]. Microelectronics Journal, 2001, 32(10): 911.
- [5] Ji Hwan Cha, Maxim Finkelstein. Stochastic modelling of operational quality of k-out-of-n systems [J]. TOP, 2020, 28(2): 424 - 441.
- [6] Robert D. Yearout, Prabhaker Reddy, Doris Lloyd Grosh. Standby redundancy in reliability-a review [J]. Reliability, IEEE Transactions on, 1986, 35(3): 285 - 292.
- [7] Wang, J., Zhao, X. & Xiang, J. Optimum design and replacement policies for k-out-of-n systems with deviation time and cost [J]. Ann. Oper. Res., 2024, 340: 593 - 617.
- [8] Xiao Zhicai, Li Haijun, Wang Ruiqi. Reliability evaluation of missile test system based on different types of redundancy configurations [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(9): 94 - 98. (in Chinese)  
肖支才, 李海君, 王瑞奇. 基于不同类型冗余配置的导弹测试系统可靠性评估 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 94 - 98.
- [9] Wu Wenqing, Tang Yinghui, Lan Shaojun. Repairable k/n(G) voting repairable system with replaceable equipment [J]. Acta Mathematica Sinica, 2016, 59(6): 799 - 820. (in Chinese)  
吴文青, 唐应辉, 兰绍军. 修理设备可更换的 k/n(G) 表决可修系统 [J]. 数学学报, 2016, 59(6): 799 - 820.
- [10] Achintya R, Nitin G. Reliability function of k-out-of-n system equipped with two cold standby components [J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 2021, 50(24): 5759 - 5778.
- [11] Xiao Longlin, Sun Rui, Huang Hongzhong, et al. Reliability analysis of wireless sensor arrays [J]. China Science and Technology Paper Online, 2010, (8). (in Chinese)

- 肖龙林,孙锐,黄洪钟,等.无线传感器阵列的可靠性分析[J].中国科技论文在线,2010,(8).
- [12] Chen Shuyang. Reliability analysis of wireless sensor networks for perception tasks[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- 陈书阳.面向感知任务的无线传感器网络可靠性分析[D].西安:西安电子科技大学,2017.
- [13] Kazuo Aida, Masaki Amemiya. Undersea transmission-system reliability with laser-diode standby-redundant optical repeaters[J]. Reliability, IEEE Transactions on, 1984, R33(5):439-441.
- [14] Ling Ming, Wu Zhichao, Zhang Haibo, et al. Reliability analysis of LD pumped Nd:YAG waterless solid-state laser[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(3):211-213. (in Chinese)
- 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.
- [15] Gao Songxin, Wu Deyong, Wei Bin, et al. Study on the reliability of high-power diode laser arrays[C]//Proceedings of the 17th National Laser Academic Conference, 2005. (in Chinese)
- 高松信,武德勇,魏彬,等.高功率二极管激光器阵列可靠性研究[C]//第十七届全国激光学术会议,2005.
- [16] Zhang Zhihua. Reliability theory and engineering applications[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- 张志华.可靠性理论及工程应用[M].北京:科学出版社,2012.
- [17] Chen Bing, Yin Lu, Xu Kui. Application of weibull distribution in the reliability assessment of electronic components[C]//National Virtual Instrumentation Conference, 2009. (in Chinese)
- 陈冰,尹禄,徐魁.威布尔分布在电子元器件可靠性评估中的应用[C]//2009全国虚拟仪器大会,2009.