

惯性约束聚变激光装置片放系统任务可用性建模与分析

陈光宇¹ 李婧^{1*} 张小民² 郑万国² 刘雁冰¹ 申晨^{1,2}

¹电子科技大学经济与管理学院, 四川 成都 610054

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 在发次任务条件下稳态和瞬时可用性具有局限性,通过惯性约束聚变(ICF)激光装置任务可用性一般模型分析,提出完整的片放系统可用性评价方法。建立片放系统的多层可靠性框图,提出任意发次的威布尔型与指数型分布期望累积失效次数的相等关系,采用分层建模方法构建氙灯多种故障模式下的片放模块任务可用性模型以及冗余结构的片放系统任务可用性评价方法。利用实验数据,验证其有效性并得到国家点火装置(NIF)和神光(SG)装置片放系统任务可用性的稳定增长趋势,给出氙灯可靠性设计指标建议,为巨型ICF激光装置可靠性工程设计优化提供理论和方法依据。

关键词 激光光学;激光装置;片放系统;任务可用性;多种故障模式

中图分类号 TN242;N945

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081407

Mission-Availability Modelling and Analysis of Disk Amplifier System of Inertial Confinement Fusion Laser Facilities

Chen Guangyu¹ Li Jing¹ Zhang Xiaomin² Zheng Wanguo² Liu Yanbin¹ Shen Chen^{1,2}

¹Economics & Management School, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Steady state and instantaneous availability have limitations in shot tasks. Based on a general model of mission-availability of inertial confinement fusion (ICF) facilities, a complete mission-availability model for disk amplifier system is proposed. A multilevel reliability block diagram is established. Equal relationship of expected accumulative failure number between Weibull distribution and exponential distribution is gained during each shot. Mission-availability model for disk amplifier modules with multi-failure modes of Xe-flash lamps and a method to evaluate mission-availability of the system with redundant modules are given successively by hierarchical modelling ideas. According to experimental data, the effectiveness of the method is verified and increasing trends of mission-availability of national ignition facility (NIF) and Shenguang (SG) facility are compared with each other, and then the suggested reliability index of Xe-flashlamps is obtained. The results provide designers a theoretical and methodological basis to optimize reliability design of the large ICF laser facilities.

Key words laser optics; laser facilities; disk amplifier system; mission-availability; multi-failure modes

OCIS codes 140.3280; 140.3460; 140.3580

1 引言

惯性约束聚变(ICF)激光装置通常用于开展高能量密度物理、惯性约束聚变等物理实验^[1],是一种体系庞大、结构复杂的科学实验装置^[2]。装置的可用性、可靠性和可维护性将在很大程度上决定装置服务于物理实验的能力与效率。作为装置的基本组成部分和重要组成单元,片放系统提供了装置的绝大部分储能和增益,同时,受片状放大器的热恢复时间等因素限制,发射频率较低,一般需间隔3~4 h,因此,片放系统对整个

收稿日期: 2015-04-09; 收到修改稿日期: 2015-05-25; 网络出版日期: 2015-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51275554, 71172095)、科技部创新方法工作专项项目(2013IM020400)

作者简介: 陈光宇(1969—),男,教授,主要从事质量管理与可靠性方面的研究。E-mail: chenguangyu@uestc.edu.cn

*通信联系人。E-mail: 13668280429@163.com

装置的输出性能、运行可靠性和安全性产生重要影响^[3]。美国国家点火装置(NIF)片放系统可用度设计指标高达0.998^[4]。显然,片放系统可用度评价方法研究对于装置运行能力的实现和效率的提升是非常必要的。

可用度相关研究多集中在稳态可用度和瞬时可用度等方面,其中系统结构、失效分布和故障模式等是关注的重要因素。文献[5]研究 $k/M(G)+W$ 系统, M 个冗余部件, W 个同质部件,分别假设其失效时间服从指数分布和一般分布,利用递归方法得到系统稳态可用度。文献[6]利用更新过程理论提出单维修工,部件寿命与维修时间服从指数分布条件下的系统可用度评价方法。对于结构复杂系统,文献[7]采用分层建模的方法,顶层和底层分别选用可靠性框图和状态转移图的马尔科夫微分方程构建系统的可用度模型。文献[8]考虑多种故障模式,利用马尔科夫模型描述系统状态研究 $k/N(G)$ 系统可用度;文献[9]在装备作战单元执行任务过程中各故障状态逗留时间服从指数分布情况下研究作战单元瞬时可用度。稳态和瞬时可用度是表征系统可用性的重要指标。对于片放系统在执行发次任务时具有运行时限和维修时限的时间约束,稳态和瞬时可用度模型具有局限性,应选用任务可用度表示系统可用性水平。

考虑时间约束,文献[10]中给出了系统任务可用度的评价方法;文献[2]研究了时间约束的任务可用度评价方法并应用于ICF激光装置,建立装置任务可用度评价的一般模型;文献[11]利用仿真与解析相结合的方法,提出了连续工作状态下存在时间约束的 $k/N(G)$ 系统任务可用度模型。这些研究虽然考虑了任务过程中的时间约束,但没有考虑片放系统在任意发次的层次结构和故障模式多样性的综合情况。

针对片放系统执行任务中的时间约束和多种故障模式的复杂条件,当关键件失效时间服从威布尔分布时,研究片放系统任意发次的任务可用度评价方法。分析片放系统的结构和运行过程,生成片放系统的多层可靠性框图及运维时间模型;分析任意发次的威布尔型与指数型分布期望累积失效次数相等的关系,构建片放模块任务可用度的评价方法;从下至上逐层分析得到片放系统任务可用性评价模型。在此基础上,对比分析NIF和神光(SG)装置中片放系统任务可用度变化趋势并给出氙灯的可靠性指标建议。

2 理论及方法基础

2.1 系统任务可用度模型

假定可修系统在执行任务过程中,有任务成功和失败两种结果。变量 $X(T)$ 表示系统执行任务的结果,则有

$$X(T) = \begin{cases} 1, & \text{success} \\ 0, & \text{failure} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 T 为执行任务的计划运行时间。则可修系统在计划运行时间 T 内的任务可用度可定义为

$$A(T) = P\{X(T) = 1\}, \quad (2)$$

即可修系统成功执行任务的概率。

Birolini^[10]进一步提出存在维修时限约束下系统任务可用度模型。其描述为:可修系统在计划运行时间 T 内,在所有失效的累积修复时间不超过维修时限 T_d 条件下,成功执行任务的概率为

$$A(T, T_d) = 1 - F(T) + \sum_{i=1}^{\infty} [F^i(T) - F^{i+1}(T)] G_i(T_d), \quad (3)$$

式中 T 和 T_d 是连续的时间变量, $F(T)$ 表示在初始状态正常的条件下系统在 $(0, T)$ 内的失效概率; $F^i(T)$ 表示在 $(0, T)$ 内发生不少于 i 次失效的概率; $G_i(T_d)$ 表示系统 i 次累积维修时间之和小于 T_d 的概率,且每次维修时间的分布函数为 $G(T_d)$ 。第一部分 $[1 - F(T)]$ 表示在 $(0, T)$ 内系统不发生失效的概率;余下的第二部分表示系统发生 $i(i=1, 2, \dots)$ 次失效且在维修时限内维修完好的概率。

当失效函数服从指数分布时,求系统在 $(0, T)$ 内失效 i 次的概率,即(3)式第二部分中 $[F^i(T) - F^{i+1}(T)]$ 可由泊松过程及其概率分布求解。当失效函数服从威布尔分布时,应对失效函数 $F(t)$ 求 i 重卷积^[12]:

$$F^i(T) - F^{i+1}(T) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} A_{i+1,n} T^{nm}}{\Gamma(nm+1)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} A_{i+2,n} T^{nm}}{\Gamma(nm+1)}, \quad (4)$$

对于所有的 n , $A_{i,n} = \alpha_n$; 当 $n < i$ 时, $A_{i,n} = 0$; 对于所有 i , $A_{i,1} = (-1)^{i-1} \alpha_1^i$; 当 $n > i$ 时, $A_{i,n} = -\sum_{j=i-1}^{n-1} A_{i-1,j} \alpha_{n-j}$; 其中 $\alpha_i = \Gamma\left[im + \left(\frac{1}{i!}\right)\right]$ 。

2.2 $k/N(G)$ 系统可用度模型

在可靠性理论中, $k/N(G)$ 系统是一类重要的系统模型。 $k/N(G)$ 系统为含有 $N(N=1,2,\dots)$ 个部件的系统,当且仅当 N 个部件中至少有 k 个正常工作,系统才正常工作^[13]。当 $k=1$ 时,为 N 个部件组成的并联系统;当 $k=N$ 时,为 N 个部件组成的串联系统。已知部件的失效和维修时间服从参数为 λ 、 μ 的指数分布,假设系统中部件修复如新, $N, N-1, N-2, \dots, N-k+1, N-k$ 表示处于正常工作状态的部件数量,给出 $k/N(G)$ 系统状态转移图(图1)。

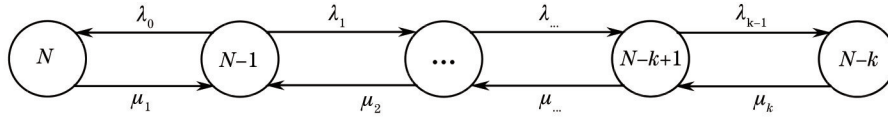


图1 $k/N(G)$ 系统状态转移图

Fig.1 State-transition diagram of $k/N(G)$ system

根据更新过程及理论,得到系统稳态可用度为

$$A = 1 - P_{N-k+1} = 1 - \frac{\lambda_0 \cdots \lambda_{N-k}}{\mu_1 \cdots \mu_{N-k+1}} \left(1 + \sum_{i=1}^{N-k+1} \frac{\lambda_0 \cdots \lambda_{N-k}}{\mu_1 \cdots \mu_{N-k+1}} \right)^{-1}, \tag{5}$$

式中 P_i 表示共计 $i(i=0, 1, \dots, N-k+1)$ 个部件失效的概率。此建模方法广泛应用于系统稳态可用度的评价,其参数只涉及系统的失效率和维修率,没有表征时间的参数,无法描述片放系统的时间约束。因此,以下从梳理片放系统的可靠性结构和运行任务过程入手,以便剖析系统的结构层次、时间约束和任务发次数对片放系统任务可用性的影响。

3 片放系统任务可靠性框图及运行任务分析

3.1 片放系统可靠性框图分析

梳理系统结构层次和系统与部件之间逻辑关系的目的是生成片放系统的可靠性模型,是任务可用性分析中不可缺少的一环。考虑片放系统的结构特点,生成由系统层、组件层、模块层和元器件层构成的片放系统4层次可靠性框图(见图2)。各层次组成单元的可靠性模型由下层的可靠性框图表示。

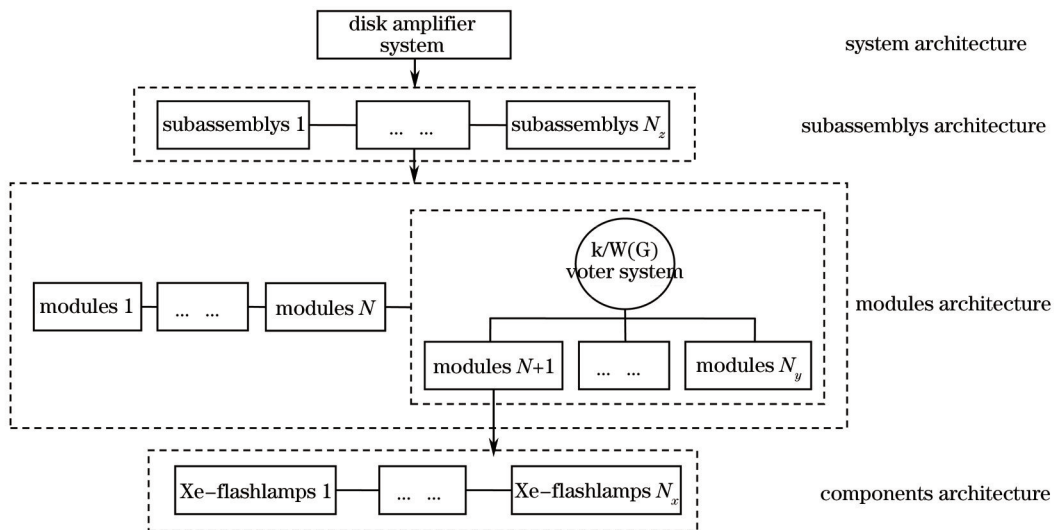


图2 片放系统可靠性框图

Fig.2 Reliability block diagram of disk amplifier system

片放系统由组件层的 N_z 个独立的片放组件构成,执行任务时,要求所有片放组件都正常工作。因此,组件层是串联的可靠性框图,详见图2的第二层。

单一片放组件由模块层的 N_y 个独立的片放模块构成,采用 $N+k/W(G)$ 结构设计,其中, $N+W=N_y$ 。执行任务时,要求 N 个片放模块都正常工作, W 个片放模块中至少 k 个是正常的。那么,模块层是串联和并联混合结构的可靠性框图,详见图2的第3层。

单一片放模块的元器件主要包括钨玻璃片(增益介质)、银反射器、隔板和脉冲氙灯(抽运源)等。其中,脉冲氙灯提供电光转换功能,抽运光通过抽运腔辐射到钨玻璃^[4]。对于钨玻璃片、银反射器和隔板,因为在计划维修期内可及时更换受损件,所以其损伤不会影响片放系统的任务可用性。而对于脉冲氙灯,由于在系统中含有几千甚至上万支,在运行过程中易损坏、影响大,且维修成本高,而安装和维护的通道和空间均比较紧张^[15],导致氙灯可靠性与维修性水平成为影响系统任务可用性的主要因素。因此,元器件层可看作由 N_x 支脉冲氙灯组成的串联的可靠性框图,详见图2的第4层。

脉冲氙灯的不同故障模式的影响差异较大。参考文献[16],将脉冲氙灯的多种故障模式按发生的概率及危害程度划分为两类:a类(触发失效和引线或基座的电绝缘失效);b类(氙灯爆炸)。其中,a类故障模式下脉冲氙灯可及时进行更换;b类故障模式下会损伤相邻元器件,所需维修时间较长且成本高。显然,相同元器件在不同故障模式下的危害程度和维修时间存在明显差异。因此,应从不同故障模式下分析片放模块的任务可用度。

3.2 片放系统运行任务分析

片放系统执行任务时,对于第 $j(j=1,2,\dots)$ 发次,有如下假设:1)在任务的初始时刻,系统处于正常工作状态;2)修复如旧,即每次维修可使片放模块恢复到故障发生前一刻的状态;3)氙灯的两类故障模式相互统计独立。

基于上述假设,针对片放模块的发次过程进行分析,得到运维时间模型图(图3)。其中,片放模块可能出现两种状态:正常运行和维修。在单发次内,包括预电离和主发射等过程,片放模块一旦有氙灯发生故障,都应立即进行维修。当片放模块的累积维修时间大于维修时限 T_d 时,则影响本发次任务完成。反之,视为及时修复,不影响本发次任务。

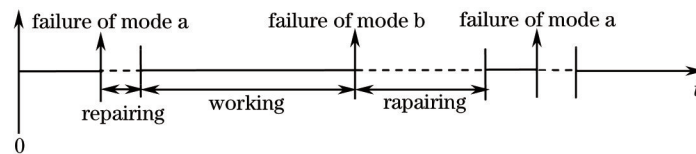


图3 片放模块运维时间模型图

Fig.3 Mission-time model diagram of disk amplifier modules

在图3中,片放模块执行发次任务过程中可能存在维修和运行两种状态交替发生的情况。以下假设片放模块的维修时间服从指数分布;对现有可靠性数据进行拟合分析得到,片放模块中氙灯的失效分布函数为威布尔分布。

4 片放系统多层次任务可用度建模方法

基于图2,采用分层建模的思路对片放系统进行自下而上建模和推算。模型中参数含义及符号说明如表1所示。

表1 参数定义及符号说明

Table 1 Parameter definitions and symbol descriptions

Symbol	Implication
$A_{y,s}(j,T_d)$	Mission-availability of disk amplifier modules for failure of type S
$A_y(j,T_d)$	Mission-availability of disk amplifier modules in j th shot
$A_s(j,T_d)$	Mission-availability of disk amplifier subassemblies in j th shot
$A(j,T_d)$	Mission-availability of disk amplifier system in j th shot
$F_x(t)$	Failure function of Xe-flashlamps
$F_y(t)$	Failure function of disk amplifier modules for failure of type S

首先,考虑维修时限和多种故障模式的因素建立离散工作状态下片放模块任务可用度模型。由于片放模块中 $S(S=a,b,c,\dots)$ 类故障模式之间是相互独立的,多种故障模式下片放模块的任务可用度为

$$A_y(j,T_d) = \prod_{S=a,b,c,\dots} A_{y,s}(j,T_d) \quad (6)$$

根据(1)式,建立片放模块在 S 类故障模式下任意单发次的任务可用度模型

$$A_{y,s}(j, T_d) = 1 - [F_y(j) - F_y(j-1)] + [F_y^i(j) - F_y^{i+1}(j)]G_i(T_d), \quad (7)$$

(7)式中 $F_y(j)$ 表示片放模块从 0 到 j 发次的失效概率, 定义 $F_y(0) = 0$; 第一部分 $\{1 - [F_y(j) - F_y(j-1)]\}$ 表示模块在第 j 发次不发生失效的概率。 $F_y^i(j)$ 表示片放模块在第 j 发次内发生不小于 i 次失效的概率; $G_i(T_d)$ 表示片放模块的 i 次累积维修时间之和小于 T_d 的概率; 第二部分 $[F_y^i(j) - F_y^{i+1}(j)]G_i(T_d)$ 表示模块在第 j 发次内发生 i 次失效且在维修时限 T_d 内维修完好的概率。与(3)式任务可用度初始时刻为 0 不同, (7)式考虑的是任意发次的任务可用度。

设氙灯在 S 类故障模式下的失效函数为参数 (m, η_s) 的威布尔分布, 则片放模块在第 j 发次不发生失效的概率表示为 N_x 个氙灯同时正常工作的概率:

$$1 - F_y(j) = [1 - F_x(j)]^{N_x}, \quad (8)$$

式中 $F_x(j) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{j}{\eta_s}\right)^m\right]$, $j = 1, 2, \dots$ 。

则 S 类故障模式下片放模块的失效函数是参数为 $\{m, \eta_s N_x^{-1/m}\}$ 的威布尔分布, 即

$$F_y(j) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{j}{\eta_s \cdot N_x^{-1/m}}\right)^m\right]. \quad (9)$$

此时, (7)式第一部分, 即片放模块在第 j 发次没有发生 S 类故障模式的概率

$$1 - [F_y(j) - F_y(j-1)] = 1 + \exp\left[-N_x \left(\frac{j}{\eta_s}\right)^m\right] - \exp\left[-N_x \left(\frac{j-1}{\eta_s}\right)^m\right]. \quad (10)$$

对于(7)式的第二部分, 利用(4)式的算法得到的是无穷级数, 为了便于计算, 以下借鉴文献[12]中“累积失效率相等”的原则, 建立威布尔分布与指数分布在第 j 发次内累积失效次数相等的关系, 利用泊松过程及其概率分布求解片放模块在第 j 发次内发生 i 次失效的概率。

图 4 给出 S 故障模式下片放模块的失效率与发次的关系图, 横轴表示发次数, 纵轴表示失效率。其中, 阴影部分的面积表示片放模块在对应发次的期望累积失效率, 实际意义表示期望累积失效次数。

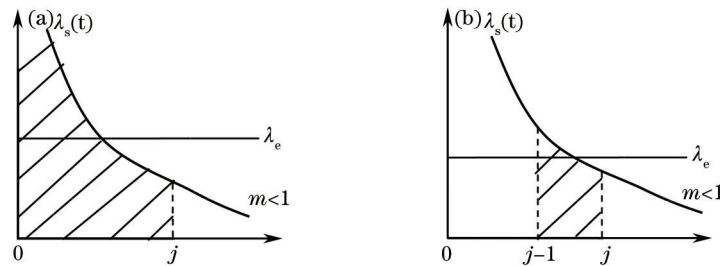


图 4 威布尔分布与指数分布的失效率关系图。(a) 第 0 到 j 发次内的累积失效次数; (b) 第 j 发次内的累积失效次数

Fig.4 Failure rate relation diagram of Weibull distribution and exponential distribution. (a) Cumulative failure number between 0th and j th shorts; (b) cumulative failure number in j th shot

在图 4(a)中, 片放模块在第 0 到 j 发次的累积失效次数可定义为 $\sum_{p=0}^j \int_p^{p+1} \lambda_s(t) dt$, 则图 4(b)中片放模块在

第 j 发次的失效次数 $N_w = \sum_{p=0}^j \int_p^{p+1} \lambda_s(t) dt - \sum_{p=0}^{j-1} \int_p^{p+1} \lambda_s(t) dt = \int_{j-1}^j \lambda_s(t) dt$ 。在指数分布条件下, 第 j 发次的失效次数 $N_e = j\lambda_e - (j-1)\lambda_e = \lambda_e$ 。

令 $N_w = N_e$ 相等, 得到

$$\lambda_e = \int_{j-1}^j \lambda_s(t) dt, \quad (11)$$

式中 $\lambda_s(t) = \frac{N_x m}{\eta_s} \left(\frac{t}{\eta_s}\right)^{m-1}$, $t = 1, 2, \dots$ 。

此时,片放模块在第 j 发次发生失效的过程可用参数为 λ_c 的泊松过程描述,则发生 i 次失效的概率为

$$F_y^i(j) - F_y^{i+1}(j) = \frac{\int_{j-1}^j \lambda_s(t) dt}{i!} \exp\left[-\int_{j-1}^j \lambda_s(t) dt\right]. \quad (12)$$

已知 S 类故障模式下的片放模块维修时间服从参数为 μ_s 的指数分布,在累积维修时限 T_d 内维修完好意味着片放模块在 $(0, T_d)$ 内能够完成大于 i 次维修活动,其概率为

$$G_i(T_d) = 1 - \sum_{l=0}^i \exp(-\mu_s T_d) \frac{(\mu_s T_d)^l}{l!}. \quad (13)$$

将(10)、(12)和(13)式代入(7)式中,在故障模式 $S(S=a, b, c, \dots)$ 多种情况下,片放模块在第 j 发次的任务可用度为

$$A_y(j, T_d) = \prod_{s=a, b, c, \dots} \left\{ 1 + \exp\left[-N_x \left(\frac{j}{\eta_s}\right)^m\right] - \exp\left[-N_x \left(\frac{j-1}{\eta_s}\right)^m\right] + \left[\frac{\int_{j-1}^j \lambda_s(t) dt}{i!} \exp\left[-\int_{j-1}^j \lambda_s(t) dt\right]\right] \left[1 - \exp(-\mu_s T_d) \frac{(\mu_s T_d)^l}{l!}\right] \right\}. \quad (14)$$

对于片放组件,依据图2中串联和表决相混合的 $N+k/W(G)$ 可靠性模型,在第 j 发次的任务可用度为

$$A_z(j, T_d) = [A_y(j, T_d)]^N \cdot \sum_{i=k}^W C_w^i [A_y(j, T_d)]^i [1 - A_y(j, T_d)]^{W-i}. \quad (15)$$

最后,得到片放系统在第 j 发次的任务可用度为

$$A(j, T_d) = [A_z(j, T_d)]^{N_z} = \left\{ [A_y(j, T_d)]^N \cdot \sum_{i=k}^W C_w^i [A_y(j, T_d)]^i [1 - A_y(j, T_d)]^{W-i} \right\}^{N_z}. \quad (16)$$

5 算例分析

5.1 NIF与SG装置的片放系统任务可用度对比分析

以NIF与SG装置中片放系统为例,验证方法的有效性并分析片放系统任务可用度的变化趋势。

针对氙灯的a、b两类故障模式,依据现有ICF装置已有的实验数据,给定失效函数参数分别为: $m=0.9$, $\eta_a = 125,000$ 发, $\eta_b = 11,628,000$ 发。氙灯单发次内的累积维修时限 $T_d=120$ min。两种激光装置片放系统的a、b类故障模式维修速率分别为 $\mu_a=0.0333$, $\mu_b=0.00139$ 。表2列出NIF和SG装置片放系统的配置规模。

表2 片放系统数量配置

Table 2 Allocated quantity of disk amplifier systems

Allocated quantity	NIF	SG($k=7$)	SG($k=6$)
N_x	20	20	20
N_m	16	18	18
$N+k/W(G)$	11+5/5(G)	11+7/7(G)	11+6/7(G)
N_A	24	6	6

基于表2的数据,利用(16)式,评价装置片放系统在不同运行发次的任务可用度如表3所示。

表3 NIF和SG装置的片放系统任务可用度

Table 3 Mission-availability of disk amplifier system in NIF and SG

j	$A(j, T_d)$	Disk amplifier	Disk amplifier system	Disk amplifier system
		system (NIF)	(SG, $k=7$)	(SG, $k=6$)
1000		0.997	0.99918	0.99950
3000		0.997	0.99926	0.99955
5000		0.998	0.99930	0.99957
10000		0.998	0.99935	0.99960
20000		0.998	0.99940	0.99963

绘制NIF和SG装置中片放系统在不同运行发次的任务可用度变化曲线,如图5所示。

观察图5中片放系统任务可用度的变化趋势可以看出:两种装置片放系统的任务可用度随运行发次数的变化趋势是一致的,在工作寿命内,将随运行发次数的增加而增大。同时,对于NIF,在 $j=5000$ 发次时,其

片放系统的任务可用度达到 0.998; 对于 SG 装置, $k=6$ 和 7 时, 任务可用度都大于 0.998, 原因是其规模小于 NIF。在给定上述条件下, NIF 和 SG 装置片放系统的任务可用度能够满足设计要求。

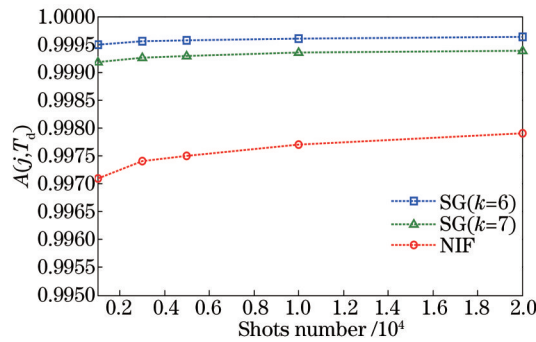


图5 任务可用度随发次变化曲线

Fig.5 Curve of mission-availability in different shots number

5.2 不同故障模式下氙灯可靠性对系统任务可用度的影响分析

当 SG 装置的规模扩大 5 倍, 即 $N_A = 30$ 时, 得到片放系统的任务可用度(如表 4 所示)。

表 4 不同发次的片放系统任务可用度

Table 4 Mission-availability of disk amplifier system with different shots number

j	$A(j, T_d)$	Disk amplifier system ($k=6$)	Disk amplifier system ($k=7$)
1000		0.998	0.996
3000		0.998	0.996
5000		0.998	0.997
10000		0.998	0.997
20000		0.998	0.997

表 4 中, 只有 $k=6$ 时, 随着发次数的增加片放系统的任务可用度能达到设计要求。这说明冗余设计对片放系统任务可用度的提高是有效的。

当 $k=7$ 时, 利用上述方法, 通过改进 η_s 满足片放系统任务可用度的设计要求, 并分析片放系统的任务可用度随 η_s 值变化的趋势。在片放系统任务可用度为 0.998 要求下, 取 $j=1000$ 时, 分别求解 η_a , η_b 的取值范围(如表 5 所示)。

表 5 不同 η_a 值下系统任务可用度

Table 5 Mission-availability of disk amplifier system with different η_a

$\eta_a (\times 10^5)$	$A(j, T_d)$	$\eta_b = 1.1628 \times 10^7$
1.5		0.9977
2		0.9979
2.5		0.9980

从表 5 和表 6 可以看出, 为满足任务可用度指标要求, 当 η_b 不变时, η_a 的值应达到 2.5×10^5 发次; 而 η_a 不变时, η_b 的值应达到 2.35×10^7 发次。同理, 利用本方法可以分析多故障模式下关键件可靠性的改善对系统层甚至装置层任务可用度的影响程度, 为系统结构的冗余设计和优化提供必要支持。

表 6 不同 η_b 值下系统任务可用度

Table 6 Mission-availability of disk amplifier system with different η_b

$\eta_b / 10^5$	$A(j, T_d)$	$\eta_a = 1.25 \times 10^5$
1.5		0.9977
2		0.9979
2.5		0.9980

6 结 论

ICF激光装置片放系统的任务可用度是装置设计和建造的重要指标。建立4层次的可靠性框图和运维时间模型,生成多种故障模式下威布尔型与指数型分布期望累积失效次数相等的关系,构建时间约束下冗余结构的片放模块到片放系统任务可用度的多层次建模方法。通过对实验数据的算例分析得出:片放系统任务可用度在工作寿命内随运行发次数的增加而稳步增长;片放模块的冗余设计可有效提高系统任务可用度;多种故障模式下多层次建模与评价方法可为装置关键件可靠性指标优化提供有效的解决途径,其应用验证了方法的正确性和有效性,为巨型ICF激光装置可靠性工程设计优化提供理论和方法依据。

参 考 文 献

- 1 Cheng Ningbo, Li Fuquan, Feng Bin, *et al.*. Research on route optimization for laser beam alignment at target area of an ICF laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202005.
程宁波,李富全,冯 斌,等. ICF激光装置靶场光束引导路径的优化研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202005.
- 2 Chen Guangyu, Zhang Xiaomin, Zheng Wanguo, *et al.*. Evaluation methods and models of mission availability for ICF laser facilities[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9): 2103-2108.
陈光宇,张小民,郑万国,等. ICF激光装置的任务可用性模型和分析方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9): 2103-2108.
- 3 Zhang Panzheng, Lin Xianping, Pan Feng, *et al.*. Research of grounding of high power Nd: glass disk amplifier of SG-II [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302004.
张攀政,林贤平,潘 峰,等. 神光II高功率钕玻璃片状放大器接地实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302004.
- 4 K C Majumdar, C E Annese, A T MacIntyre, *et al.*. System Reliability Analysis for the National Ignition Facility[R]. Washington, 1996.
- 5 U C Gupta, R T S S Srinivasa. On the M/G/1 machine interference model with spares[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 89(1): 164 - 171.
- 6 F Esther, L Benny. On the availability of r out of N repairable systems[J]. Naval Research Logistics, 2002, 49(5): 483 - 498.
- 7 S T Kishor, S K Dong, R Ghosh. System availability assessment using stochastic models[J]. Stochastic Models Business and Industry, 2013, 29(2): 94 - 109.
- 8 M S Moustafa. Availability of K-out-of-N: G systems with M failure modes[J]. Microelectronics Reliability, 1996, 36(3): 385 - 388.
- 9 Guo Jizhou, Guo Bo, Huang Zhuo, *et al.*. Availability model and its analysis for combat unit during the mission[J]. Journal of Systems and Management, 2007, 16(2): 161-169.
郭继周,郭 波,黄 卓,等. 面向作战单元任务的可用性建模与分析[J]. 系统管理学报, 2007, 16(2): 161-169.
- 10 A Birolini. Reliability Engineering Theory and Practice[M]. New York: Springer-Verlag Press, 2010: 3-4.
- 11 Chen Guangyu, Li Jing, Liu Nan, *et al.*. Mission availability modeling methods for k/N(G) fleet under time constraints [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(6): 944-949.
陈光宇,李 婧,刘 楠,等. 时间约束下k/N(G)机群任务可用度的建模方法[J]. 电子科技大学学报(自然版), 2014, 43(6): 943-949.
- 12 Liu Tianhua, Zhang Zhihua, Liang Shengjie, *et al.*. An improved method for the spare demand of the Weibull-distribution [J]. System Engineering-Theory and Practice, 2012, 32(5): 1124-1128.
刘天华,张志华,梁胜杰,等. 一种威布尔型备件需求量的改进算法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 1124-1128.
- 13 R Moghaddass, M J Zuo, J Qu. Reliability and availability analysis of a repairable k-out-of-n: G system with R repairmen subject to shut-off rules[J]. IEEE Transition on Reliability, 2011, 60(3): 658 - 666.
- 14 Peng Baohua, Sun Quan, Zhao Jianyin, *et al.*. Simulation study on the reliability of the sheet amplifier system of the SG-III[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2006, 43(1): 19-23.
彭宝华,孙 权,赵建印,等. 神光III片状放大器系统可靠性仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(1): 19-23.
- 15 Wang Meicong, Zhu Mingzhi, Chen Gang, *et al.*. Research of transport beams arrangement in target area for large scale ICF facility[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011403.
王美聪,朱明智,陈 刚,等. 大型ICF装置靶场传输光路排布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 011403.
- 16 Chen Guangyu, Yang Dong, Zhang Xiaomin, *et al.*. Reliability analysis of Xe-flashlamps of disk amplifier subsystems for laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(7): 1125-1128.
陈光宇,杨 东,张小民,等. 激光装置片状放大器模块的氙灯可靠性分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(7): 1125-1128.

栏目编辑: 宋梅梅