

星载光纤放大器可靠性建模与优化

胡韵俏,徐洁*,余馨,张楚涵,李珏,黄泽龙,杨期森,郭长磊

(中山大学天琴中心&物理与天文学院,广东珠海519082)

摘要:为提高星载光纤放大器在空间环境下的长期工作可靠性,以双包层掺铒光纤放大器为例,综合运用可靠性框图(RBD)、失效模式与影响分析(FMEA)和故障树分析(FTA)方法,建立了系统可靠性模型,并开展冗余设计与可靠性分配优化。分析结果表明:无冗余单级放大器工作5 a末可靠度为0.57,采用冷备份双泵浦方案可提升至0.75,提升约31.6%;冗余设计使泵浦源失效率对系统可靠度的敏感程度降低68.7%;采用阿林斯分配法进行元件可靠性分配,使系统5 a末可靠度高于0.91,满足设计要求。

关键词:星载光纤放大器;可靠性;故障树分析;冗余设计

中图分类号:TN929.1;TP202+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0082-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.014

Reliability modeling and optimization of spaceborne fiber amplifiers

HU Yunqiao, XU Jie*, YU Xin, ZHANG Chuhan, LI Jue, HUANG Zelong, YANG Qisen, GUO Changlei

(TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Frontiers Science Center for TianQin,

Sun Yat-sen University, Zhuhai Guangdong 519082, China)

Abstract: To enhance the long-term operational reliability of spaceborne fiber amplifiers in space environments, taking the double-clad ytterbium-doped fiber amplifier as an example, a system reliability model is established by comprehensively applying reliability block diagram(RBD), failure mode and effects analysis(FMEA), and fault tree analysis(FTA) methods. Redundancy design and reliability allocation optimization are also carried out. The analysis results show that the reliability of a non-redundant single-stage amplifier at the end of five years is 0.57, which can be increased to 0.75 with a cold backup dual-pump scheme, representing an improvement of approximately 31.6%. Redundancy design reduces the impact of pump source failure rate on system reliability by 68.7%. The ARINC allocation method is adopted for component reliability allocation, ensuring a system reliability higher than 0.91 at the end of five years, which meets the design requirements.

Key words: spaceborne fiber amplifier, reliability, fault tree analysis, redundancy design

0 引言

随着人类在深空探测、卫星激光通信及空间光学实验等领域的深入探索,对兼具高性能与高可靠性的

星载光纤放大器的需求日益增长^[1-6]。光纤放大器利用增益光纤将光信号从毫瓦量级放大至瓦级甚至更高,是实现十万至百万千米长基线测量的关键载荷^[7-8]。例如:天琴空间引力波探测任务中,卫星编队构建臂长为 1.7×10^5 km的大型激光干涉仪,其激光光源采用主振荡器光纤放大器结构出射4 W激光;欧洲空间局主导的激光干涉空间天线(LISA)引力波探测计划中,激光干涉仪臂长为 2.5×10^6 km,同样采用该结构实现2 W光功率输出。与地面环境不同,在空间环境中运行的星载光纤放大器难以在轨维修,必须在设计制造阶段充分考虑其可靠性,以确保在工作寿命内无故障或功能退化。因此,基于系统化的可靠性分析

收稿日期:2025-10-15。

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2205504)资助;国家自然科学基金项目(12404489)资助。

作者简介:胡韵俏(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为星载光纤放大器可靠性与空间环境适应性,该研究直接支撑空间激光通信、引力波探测等航天任务。

通信作者:徐洁(1991—),女,博士,副教授,主要研究方向为光纤通信技术和星载光纤激光系统。



方法,对星载光纤放大器进行可靠性评估,识别其关键薄弱环节,并在此基础上实现满足可靠性要求的整机优化设计,具有重要的研究意义。

可靠性分析理论在光学领域已有成熟应用,但对于光纤放大器,现有研究仍存在明显局限。目前,国内外针对光纤放大器的寿命评估与可靠性研究多集中于光纤本身的强度与寿命^[9-11]、地面环境模拟试验^[12-13]以及应力加速试验^[14]等方面,研究方法依赖器件级、部组件级测试和局部试验,缺乏失效机理层面的系统性可靠性建模。

本文依据可靠性分析基本理论,将融合可靠性框图(RBD)、失效模式与影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)的系统性可靠性建模与分析体系引入光纤放大器领域,构建星载光纤放大器可靠性模型,并且通过可靠性分配给出满足高可靠度要求的各元件失效率的指标。

1 光纤放大器可靠性建模

1.1 光纤放大器结构

本文以一款为空间引力波探测任务研制的低噪声、窄线宽、全保偏光纤放大器^[7-8, 15]为例,系统开展可靠性分析。该放大器基础结构如图1所示。

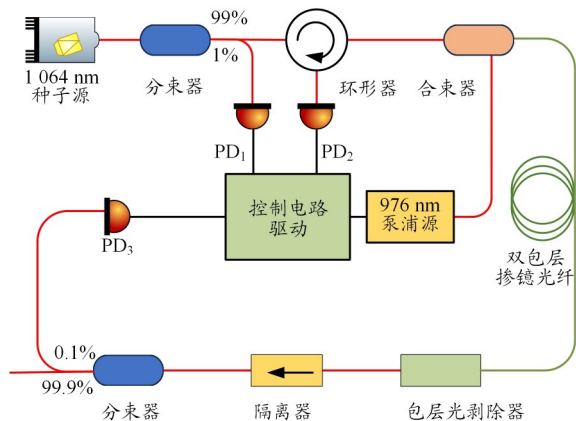


图1 光纤放大器基础结构示意图

该放大器采用976 nm多模激光二极管(LD)正向泵浦方案^[15-16]。种子源输出的1064 nm信号光经由一个1/99分束器,其中小功率端口连接光电探测器(PD₁)用于监测信号光,99%功率的光信号进入高隔离度保偏光纤环形器后,与泵浦光通过保偏光纤合束器合束,共同注入4 m长的双包层掺铒光纤进行功率放大。输出光经包层光剥离器去除残余泵浦光,再通过隔离器,进入分光比为0.1/99.9的分束器。分束器99.9%的大功率端作为激光输出端,0.1%的小功率端

口则接入反馈回路转换为电信号,用于调控LD驱动电流、调整LD光功率,从而抑制输出激光强度噪声。同时,利用环形器的第三端口连接PD₂监测背向反射光。基于此结构,本文将依次建立RBD、开展FMEA及FTA,构建评价光纤放大器可靠性的理论模型。

1.2 RBD

在对系统进行可靠性建模前,需明确其功能定义与故障判据,分解系统结构,并绘制功能流程图。星载光纤放大器在空间任务中的核心功能为:在特定种子光输入时,稳定输出满足要求的高质量激光信号。其故障判据定义为系统功能丧失或性能严重退化,具体表现为遥测数据显示输出光功率下降超过30%、信号中断或控制功能失效等。

本文根据元件类型与工作原理,分级建立光纤放大器的可靠性框图。通过分析图1所示结构可知,1064 nm种子源、976 nm泵浦源及其它光纤器件中任一环节故障均将导致放大器失效,据此建立一阶串联式RBD如图2所示。

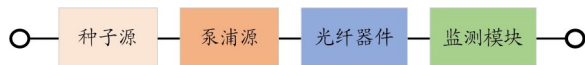


图2 光纤放大器一阶RBD

种子源作为主振荡功率放大器(MOPA)结构中的主振荡器,在系统关系上与功率放大部分并列,其可靠性取决于激光器类型^[17-19]。本文主要聚焦功率放大部分,因此将种子源视为整体单元。进一步分解泵浦模块和光纤器件模块,各组件在逻辑上仍为串联关系。因此,可在一阶RBD基础上,建立光纤器件模块、泵浦模块及监测模块的二阶RBD,如图3所示。可以看出,虽然RBD揭示了系统串联失效特性,但尚未细化至具体故障模式,需进一步结合FMEA,识别关键元件的潜在故障机制及其影响。

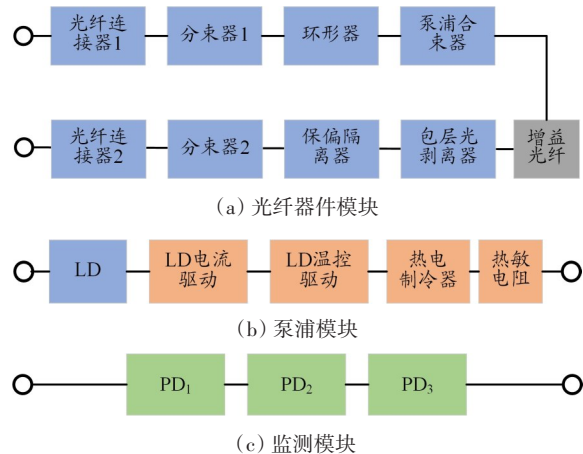


图3 光纤放大器二阶RBD

表1 光纤放大器元件FMEA

元器件名称	功能	失效模式	可能影响	故障检测方法与结果
种子源	提供信号光	光功率下降或中断	放大自发辐射损坏增益光纤、输出光功率下降甚至信号中断	PD ₁ 监测异常
光纤连接器 ^[21]	连接种子源与光纤放大器	光纤断裂、变形	光功率严重下降,甚至信号中断	PD ₁ /PD ₃ 监测异常
		接触不良		
		光纤断面污染或损伤		
热电制冷器	LD温度控制	焊点热疲劳断裂	控温能力下降、LD温度上升,功率波动甚至损坏	LD温度监测异常
		半导体材料热扩散		
增益光纤	信号光功率放大	辐射损耗	光功率下降甚至信号中断	PD ₃ 监测异常
		光纤损伤或熔融		
泵浦二极管 ^[35]	提供泵浦光	二极管失效,电流显著增加	泵浦光功率下降或完全丧失;输出信号光功率下降,增益光纤损坏	PD ₃ 监测异常
		耦合失效,输出功率显著退化		
光纤隔离器	防止背向反射进入前级器件	隔离度下降	反向传输光损坏前级器件、影响输出光功率	PD ₂ /PD ₃ 监测异常
		光纤损伤		
PD	监测输入/输出信号光功率、背向反射光功率	响应度下降	监控信号不稳定或错误,导致控制错误	PD ₁ /PD ₂ /PD ₃ 监测异常
		键合失效		

1.3 FMEA

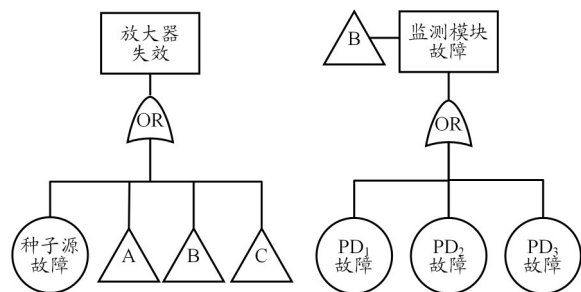
基于1.2节建立的串联式RBD,本文针对框图中关键单元进行FMEA,旨在识别光纤放大器潜在的失效模式,确定故障原因及可能影响,并根据遥测信息推测失效元件,得到光纤放大器元件FMEA如表1所示。可以看出,种子源、光纤连接器、增益光纤、泵浦二极管的失效或损坏均可能导致信号中断,严重度较高。为了提高放大器的可靠性,采用冗余设计是有效的缓解措施。

1.4 FTA

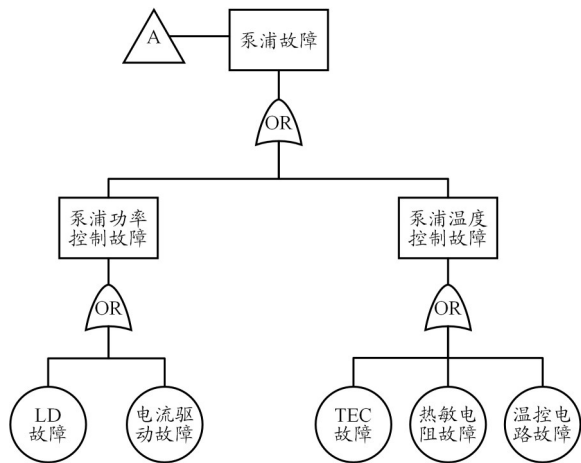
基于RBD和FMEA对光纤放大器进行的结构分解与失效模式分析,本文构建光纤放大器故障树模型,实现可靠性定量计算与寿命估算。该故障树以“输出光功率衰减达到阈值或控制功能失效”作为顶事件。引起顶事件的直接原因包括种子源故障、泵浦源故障、监测模块故障以及光纤器件故障,如图4(a)所示。图中OR表示“或门”,A、B、C表示不同事件。这4类中间事件通过逻辑“或门”与顶事件连接,即任一事件发生均导致系统失效。其中,种子源被视为独立整体,其故障在故障树中作为基本事件。

图4(b)监测模块包含3个PD,其中用于监测种子光的PD₁或构成反馈控制回路的PD₃发生故障,将直接触发系统保护性关机,从而导致系统级故障。在图4(c)所示泵浦模块中,LD失效、LD电流驱动故障等基本事

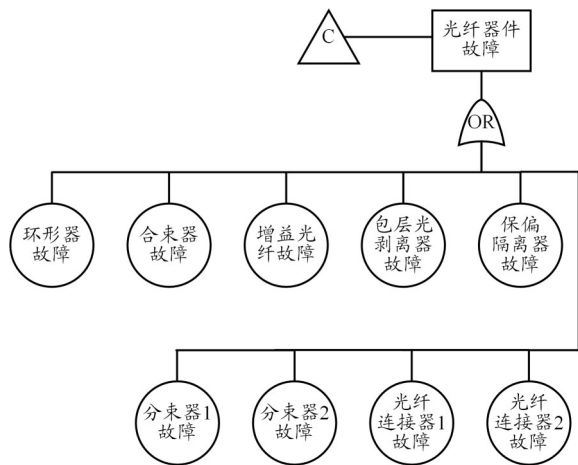
件任一发生,都将引发泵浦故障,因此构成“或门”关系。图4(d)所示光纤器件模块包含环形器、合束器、增益光纤等一系列通过熔接连接的元件,难以实现冗



(a) 直接引起顶事件的4种故障模式 (b) 监测模块故障树模型



(c) 泵浦源故障树模型



(d) 光纤器件模块故障树模型

图4 光纤放大器故障树模型

余备份,其可靠性逻辑为串联,任一器件故障即导致模块功能丧失。

目前,通常假设器件的失效分布服从指数分布,其可靠度函数表达式为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中: λ 、 t 分别为器件失效率、工作时间。

单个器件工作 t 小时后损坏的概率为

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

各模块可靠度可根据其串联关系分别计算,进而求得光纤放大器整机的可靠度为

$$R(t) = R_s(t)R_p(t)R_F(t)R_M(t) = e^{-\left[\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right) + 2\lambda_{12} + 3\lambda_{13} + 2\lambda_{14}\right]t} \quad (3)$$

式中: $R(t)$ 、 $R_s(t)$ 、 $R_p(t)$ 、 $R_F(t)$ 、 $R_M(t)$ 分别为单泵浦情况下光纤放大器整机、种子源、泵浦模块、光纤器件模块、监测模块的可靠度。光纤器件模块包含2个分束器和2个光纤连接器,监测模块包含3个PD。

对影响光纤放大器可靠性的器件失效率 λ 进行估计,各元件失效率如表2所示,数据来源为厂家提供、国家标准以及参考相似产品^[17, 20]。

将各元件失效率代入式(3),绘制光纤放大器单元可靠度随时间变化曲线,如图5所示。可以看出,单级光纤放大器的可靠度随时间的增大而下降。

工作3 a后,可靠度 R 为0.72;工作5 a后,可靠度 R 降至0.57。对于不可维修产品,通常采用平均无故障工作时间 t 表示其平均寿命 θ ,其表达式为

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (4)$$

仿真计算可得该掺铒光纤放大器的平均寿命为

表2 光纤放大器元件失效率数据

失效率名称	元件	失效率/h ⁻¹
λ_1	种子源	1.5×10^{-7}
λ_2	激光二极管	6.3×10^{-6}
λ_3	TEC	9.1×10^{-7}
λ_4	热敏电阻	2.9×10^{-8}
λ_5	LD电流驱动	1.0×10^{-7}
λ_6	LD温控电路	1.0×10^{-7}
λ_7	环形器	4.8×10^{-8}
λ_8	合束器	2.0×10^{-8}
λ_9	增益光纤	3.8×10^{-6}
λ_{10}	包层光剥离器	3.2×10^{-9}
λ_{11}	隔离器	4.8×10^{-8}
λ_{12}	分束器	6.8×10^{-10}
λ_{13}	PD	3.2×10^{-8}
λ_{14}	光纤连接器	5.6×10^{-7}

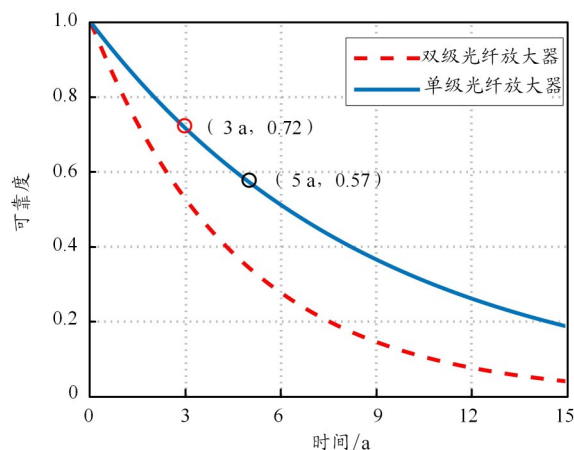


图5 单/双级光纤放大器可靠度曲线图

7.84×10^4 h(约8.9 a)。

上文所分析光纤放大器为单级结构,具有结构简单、组件数量少、增益较低的特点,适用于低功率场景。当存在更高功率需求时,常采用多级放大器结构。多级光纤放大器采用级联设计,可实现高增益与高输出功率,但其组件数量增多,潜在故障点相比单级结构亦相应增加。

本文的可靠性建模方法同样适用于多级光纤放大器。以双级放大器为例,在一级放大后,掺铒光纤需连接一个窄带宽保偏光纤带通滤波器,用于滤除放大自发辐射噪声,抑制其对信号光信噪比的影响。随后,一级放大光路的输出光作为种子光输入二级放大光路,二级光路结构与一级类似。整体而言,双级结

胡韵俏,徐洁,余馨,等:星载光纤放大器可靠性建模与优化

构较单级放大器增加了1组泵浦模块、1个带通滤波器、1个分束器、1个隔离器、1段增益光纤及1个PD。

根据双级放大器基本结构,其可靠度函数可修正为

$$R'(t) = e^{-\frac{-(\lambda_1 + 2\lambda_2 + 2\lambda_3 + 2\lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + 2\lambda_8 + 2\lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + 3\lambda_{12} + 4\lambda_{13} + 2\lambda_{14} + \lambda_{15})t}{\lambda_{10} + \lambda_{11} + 3\lambda_{12} + 4\lambda_{13} + 2\lambda_{14} + \lambda_{15}}} \quad (5)$$

式中: λ_{15} 为光纤带通滤波器失效率, $\lambda_{15}=5 \times 10^{-6}/\text{h}$ 。

双级光纤放大器在5 a末的可靠度为0.34,较单级光纤放大器(0.57)下降了40.3%。本文采用的可靠性建模方法主要考虑元件失效率,实际运行中,前级部分元件故障可能不会导致系统完全失效。若前级功率发生衰减,后级可能在一定程度上补偿性能损失,使系统进入降级运行模式。

根据上述可靠性分析理论,本文定量计算了光纤放大器整机可靠性随时间的变化,并估算了系统平均寿命。此外,可基于故障树模型对关键器件进行灵敏度分析,定量揭示泵浦源、增益光纤等关键单元对系统可靠度的影响程度,从而进一步定位薄弱环节,优化放大器的可靠性。

2 可靠性优化

2.1 泵浦冗余设计对可靠度的提升

在光纤放大器链路中,对泵浦模块进行冗余设计是提高系统可靠度的常用策略。若LD发生故障,将导致泵浦光功率下降乃至完全丧失,进而造成输出信号光性能退化或中断。鉴于星载环境下元器件无法更换,为降低此类故障概率,可采用冷备份设计,即引入双泵浦甚至三泵浦结构,备份单元在待机状态下不通电。

单个泵浦源的故障树如图4(c)所示。主份与备份泵浦源设计相同,通过 $(N+1) \times 1$ 型泵浦合束器连接。工作时仅启动主份泵浦,当PD₃监测到输出光功率下降超过30%时,系统切换至备份泵浦(假设切换开关为理想器件)。不同冷备份数量下泵浦模块的可靠度函数如表3所示。根据可靠度函数,代入各元件失效率,绘制光纤放大器整机可靠度随时间变化曲线,如图6所示。可以看出,双泵浦方案的可靠度在5 a末相比单泵浦无备份方案提升了31.6%,改善显著。三泵浦方案相比双泵浦方案,在3 a内的可靠度提升效果有限。由三泵浦增至四泵浦,对可靠度已无明显提升。这是因为经过冗余设计后,泵浦模块对系统总失效率的贡献已显著降低,其量级小于其它环节。若考虑更长的工作寿命,并在综合权衡电功耗、体积与质量等

表3 不同冷备份数量下泵浦模块可靠度函数与关键指标

泵浦类型	泵浦模块可靠度函数 $R(t)$	3 a末整机可靠度	5 a末整机可靠度	平均寿命 θ/a
单泵浦	$e^{-\lambda t}$	0.72	0.57	8.9
双泵浦	$e^{-\lambda t}(1 + \lambda t)$	0.85	0.75	14.0
三泵浦	$e^{-\lambda t}(1 + \lambda t + 1/2(\lambda t)^2)$	0.86	0.78	16.9
四泵浦	$e^{-\lambda t}(1 + \lambda t + 1/2(\lambda t)^2 + 1/6(\lambda t)^3)$	0.86	0.78	18.6

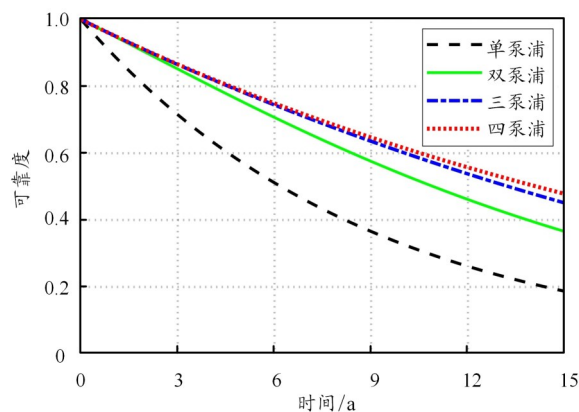
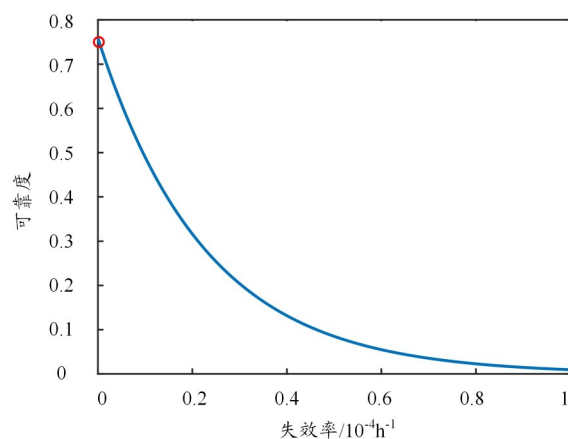


图6 不同数量泵浦下光纤放大器可靠度随时间变化曲线

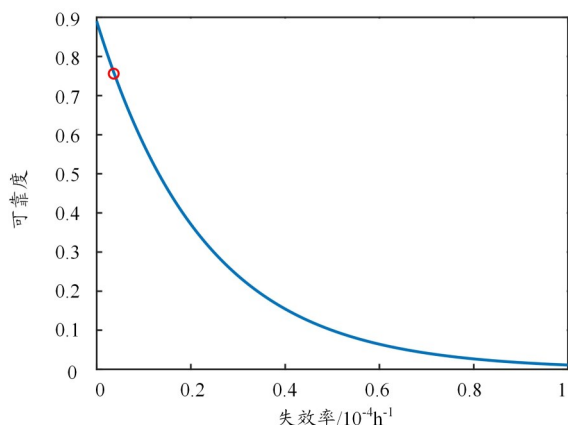
因素后,可考虑采用三泵浦方案以进一步提升可靠度。

2.2 关键元器件灵敏度分析

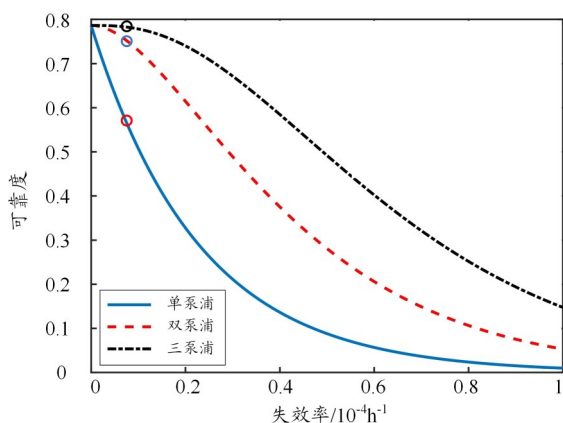
本文对链路中失效率较高的关键器件进行了灵敏度分析,研究其失效率参数变化对系统可靠度的影响,得到光纤放大器可靠度随种子源、增益光纤及泵浦源失效率变化的仿真结果如图7所示。图中圆圈表



(a) 种子源



(b) 增益光纤



(c) 泵浦源

图7 元件失效率参数变化对光纤放大器可靠度的影响

示仿真所使用的参数基准点。可以看出,种子源、增益光纤及泵浦源的可靠度均随失效率的增大而下降。其中,单泵浦的可靠度比双泵浦和三泵浦下降更快。

以当前失效率状态(表2中数据)作为基准,计算基准状态下系统可靠度 R ,进而求得关键元器件的概率重要度($\frac{\partial R}{\partial \lambda}$)与关键重要度($\frac{\lambda}{R} \frac{\partial R}{\partial \lambda}$),结果如表4所示。

表4 重要元件概率重要度与关键重要度

变量	概率重要度	关键重要度
种子源	-3.3×10^4	-0.006 7
增益光纤	-3.3×10^4	-0.166 4
合束器	-3.3×10^4	-0.000 9
单泵浦源	-2.5×10^4	-0.318 4
双泵浦源	-8.0×10^3	-0.076 9
三泵浦源	-1.3×10^3	-0.011 8

概率重要度反映了系统可靠度 R 对某一元器件失效率 λ 变化的敏感程度。其数值为负,表明当该元器件失效率 λ 增大时,系统可靠度 R 会下降。其绝对值越大,说明该元器件失效率的变化对系统可靠度影响越显著。由表4可知,单泵浦源(无备份)的失效率 λ 变化对整机可靠度 R 影响非常敏感,采用双泵浦冗余后,其敏感程度降低了约68.7%。

关键重要度则在概率重要度基础上,结合了该元器件自身失效率 λ 与系统当前可靠度 R 的比值,综合反映了元器件故障概率对系统失效的贡献程度。其数值亦为负,绝对值越大,表明该元器件在当前系统中既是高失效率元件,又是影响系统可靠度的关键环节,应作为可靠性优化的优先目标。由表4可知,提高系统可靠度应优先采用泵浦冗余备份。通过冗余设计,泵浦源模块的关键重要度绝对值从31.8%大幅降至7.7%,而增益光纤则成为新的贡献度最高的薄弱环节。因此,下一轮优化方向可聚焦于选用更高可靠性的增益光纤。

2.3 基于可靠性分配的元件指标优化

针对星载光纤放大器开展双机冷备份设计,设定系统在5 a末可靠度需优于0.996的指标,这意味着双泵浦冗余设计的单级光纤放大器在5 a末的可靠度需高于0.91。本文采用阿林斯分配法^[36]进行可靠性分配,得到各元件的目标失效率指标如表5所示。

表5 可靠性分配后元件失效率指标

失效率名称	元件	失效率/ h^{-1}
λ_1	种子源	5.0×10^{-8}
λ_2	LD	3.4×10^{-6}
λ_3	TEC	4.9×10^{-7}
λ_4	热敏电阻	1.6×10^{-8}
λ_5	LD电流驱动	5.4×10^{-8}
λ_6	LD温控电路	5.4×10^{-8}
λ_7	环形器	1.6×10^{-8}
λ_8	合束器	6.5×10^{-9}
λ_9	增益光纤	1.2×10^{-6}
λ_{10}	包层光剥离器	1.0×10^{-9}
λ_{11}	隔离器	1.6×10^{-8}
λ_{12}	分束器	2.2×10^{-10}
λ_{13}	PD	1.0×10^{-8}
λ_{14}	光纤连接器	1.8×10^{-7}

将可靠性分配后的数据代入式(3)验证,计算得到整机在5 a末的可靠度大于0.91,满足指标要求。表5所列指标为光纤放大器元器件的选型与优化方向提供了参考。

胡韵俏,徐洁,余馨,等:星载光纤放大器可靠性建模与优化

3 结束语

本文系统构建了星载光纤放大器的可靠性模型,采用RBD、FMEA与FTA相结合的方法,实现了对其可靠性的定量评估与优化。主要结论如下:

1)无冗余单级放大器工作5 a末可靠度为0.57;采用冷备份双泵浦方案可提升至0.75,提升幅度约31.6%。冗余设计使泵浦源失效率对系统可靠度的敏感程度降低68.7%。通过采用阿林斯分配法进行可靠性分配,给出了满足系统5 a末可靠度高于0.91要求的各元件目标失效率,为工程选型提供了依据。

2)所建模型可扩展至多级放大器,分析表明双级结构因组件增多,5 a末可靠度降至0.34,较单级下降40.3%。重要度分析识别出增益光纤与泵浦源为关键薄弱环节,指导了优化方向。

本文假设元器件失效服从指数分布,未充分考虑环境应力耦合与时变退化效应,后续可结合加速试验与失效物理分析进一步完善模型,并开展在轨健康监测方法研究。

致谢:中山大学中央高校基本科研业务费专项资金和中国国家航天局的支持。

参考文献:

- [1] Spellmeyer N W, Caplan D O, Robinson B S, et al. A high-efficiency Ytterbium-doped fiber amplifier designed for interplanetary laser communications[C]//OFC/NFOEC 2007-2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 25-29, 2007, Anaheim, USA. New York: IEEE, 2007: 1-3.
- [2] Motzigemba M, Zech H, Biller P. Optical inter satellite links for broadband networks[C]//2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), June 11-14, 2019, Istanbul, Turkey. New York: IEEE, 2019: 509-512.
- [3] Suemasa A, Shimo-Oku A, Ohtsuka S, et al. Stable and high power 515-nm lasers for the space gravitational wave detector: DECIGO[C]// International Conference on Space Optics—ICSO 2018, July 12, 2019, Chania, Greece. Bellingham: SPIE, 2019: 337-343.
- [4] Wang Z, Wang J, Li F, et al. Yb-Doped all-fiber amplifier with low-intensity noise in mhz range oriented to space-borne gravitational wave detection [J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 6338.
- [5] Dahl K, Cebeci P, Fitzau O, et al. A new laser technology for LISA[C]// International Conference on Space Optics—ICSO 2018, July 12, 2019, Chania, Greece. Bellingham: SPIE, 2019: 131-137.
- [6] Biswas A, Hemmati H, Lesh J R. High-data-rate laser transmitters for free-space laser communications[C]//Optoelectronics '99 - Integrated Optoelectronic Devices, April 26, 1999, San Jose, CA, United States. Bellingham: SPIE, 1999: 269-277.
- [7] Luo J, Bai S, Bai Y, et al. Progress of the TianQin project [J]. Classical and Quantum Gravity, 2025, 42(17): 173001-1~173001-44.
- [8] 段会宗,骆颖欣,张静怡,等. 星间激光干涉测量技术[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(Z1): 162-177.
- [9] Proctor B A, Whitney I, Johnson J W. The strength of fused silica[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1969, 297(1451): 534-557.
- [10] Evans A. Slow crack growth in brittle materials under dynamic loading conditions[J]. International Journal of fracture, 1974, 10: 251-259.
- [11] Matthewson M J. Environmental effects on fatigue and lifetime predictions for silica optical fibers[J]. Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks, 2003, 4940: 80-92.
- [12] Fitzau O, Betz P, Cebeci P, et al. Highly stable fiber lasers for satellite-based gravitational measurements[C]//SPIE LASE, March 7, 2019, San Francisco, USA. Bellingham: SPIE, 2019: 411-421.
- [13] Cebeci P, Giesberts M, Baer P, et al. Highly stable fiber amplifier development and environmental component-testing for the space-based gravitational wave detector LISA[C]//SPIE LASE, March 8, 2023, San Francisco, California, United States. Bellingham: SPIE, 2023: 158-163.
- [14] 任康宇,史伟,张雅婷,等. 钕铽共掺光纤放大器的高温老化输出功率[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 23-30.
- [15] 贾利民,林帅. 系统可靠性方法研究现状与展望 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(12): 2887-2893.
- [15] Li J, Fan W, Xu J, et al. Low-noise high-power dual-frequency MOPA laser with an NPRO seed[J]. Optics Express, 2025, 33: 4889-4901.
- [16] Fan W, Li W, Ma C, et al. Intracavity dual-frequency power locking for a high-stable NPRO laser[J]. Optics Letters, 2025, 50(17): 5250-5253.
- [17] 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.
- [18] 张成威. 高功率蓝光半导体激光器可靠性研究[D]. 长春:长春理工大学, 2022.
- [19] 吴迪,葛廷武,秦文斌,等. 光纤激光器故障模式分析[J]. 发光学报, 2018, 39(7): 1002-1007.
- [20] 吴振国. 掺铒光纤光源可靠性建模与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.