

基于 GO 法的激光点火系统可靠性建模与分析

曹可, 严楠, 董海平, 杨媛媛

(北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

摘 要: 为了提高和评价激光火工系统可靠性, 本文采用 GO 法建立了激光点火系统可靠性模型, 并进行可靠性定性分析和定量计算. 首先, 通过元器件应力法预计激光点火系统各个组成模块的可靠性参数, 然后通过 GO 法定性分析得到该激光点火系统的最小割集, 并采用 GO 法定量分析计算系统非工作状态贮存 5 y、工作状态工作时间 1 h 任务剖面下系统作用可靠度. 通过与故障树定性分析结果、蒙特卡洛仿真分析结果对比, 验证了采用 GO 法对激光点火系统进行可靠性分析的正确性与合理性.

关键词: 激光点火系统; GO 法; 可靠性分析; FTA; Monte Carlo

中图分类号: R855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2017)增刊 2-0076-06

Reliability Modeling and Analysis of Laser Ignition System Based on GO Methodology

CAO ke, YAN Nan, DONG Hai-ping, YANG Yuan-yuan

(School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To enhance and evaluate the reliability of laser ignition systems, reliability model of laser ignition system was established by using GO methodology. The results of reliability analysis including minimal cutset of the system gotten by using GO methodology qualitative analysis and reliability of laser ignition system calculated by GO methodology quantitative method were carried on. Reliability parameters of various modules were predicted by using component stress method under the mission profile of non-working state for 5 y and working state with working time of 1 h. Compared with the results of FTA and Monte Carlo simulation, the applicability and the accuracy of reliability analysis of laser ignition system based on GO methodology are verified.

Key words: Laser ignition system; GO Methodology; Reliability Analysis; FTA; Monte Carlo

随着现代战场装备技术发展, 激光点火系统作为武器系统首发装置结构, 其作用可靠性对武器系统的正常功能作用具有重要影响, 通过系统可靠性分析, 可发现系统薄弱环节, 并通过采取改进措施提高武器系统战场环境实用性. 目前, 故障树分析法 (FTA) 和故障模式影响及危害性分析 (FMECA) 等常用可靠性分析方法针对静态、简单系统能够快速有效地分析, 而对于一些具有多状态、有时序变化等特性的复杂系统的可靠性分析则有较大的局限性. GO 法^[1]是一种以成功为导向的系统概率分析方

法, 直接通过系统组成和功能原理建立系统可靠性模型, 能够更好地表达出系统各个部件之间的物理关系和逻辑关系, 更适用于具有多时序、多状态等特性的复杂系统可靠性分析. 近年来伊泉剑等^[2-5]研究了多输入、多功能组件以及可修系统和多故障模式的可修系统 GO 法可靠性分析方法, 使基于 GO 法的复杂系统可靠性分析技术取得了长足的进步.

激光点火系统具有多工作状态、多时序和实际物流 (在光路中传输的激光) 的特点, 针对其多状态有时序变化的复杂性特点, 本文通过 GO 法对系统

收稿日期: 2017-09-20

作者简介: 曹可 (1993—), 男, 硕士生, E-mail: 1282462351@qq.com; 严楠 (1960—), 男, 博士, 教授, E-mail: yn@bit.edu.cn.

各个部件进行功能分析选择合适的操作符,从而建立 GO 图模型对系统进行可靠性分析,依据 GO 法操作符的类型、运算规则及相关数据进行 GO 法运算,从而获得激光点火系统的最小割集和在不同状态下的可靠度,可为激光点火系统的可靠性设计和评价提供参考。并通过与 FTA 及蒙特卡洛(Monte Carlo)分析法进行对比分析,验证 GO 法对激光点火系统可靠性分析的正确性和适用性。

1 GO 法的基本原理及分析流程

GO 法的基本思想是把系统原理图、流程图或者工程图按照一定的规则直接转为 GO 图。GO 法进行可靠性分析过程包括建立 GO 图及 GO 运算,

GO 操作符与信号流是 GO 图两大要素。现有 GO 法定义的 17 种标准操作符,分为功能操作符和逻辑操作符,它们是用来表示系统单元的功能和单元输入、输出间的逻辑关系。每个操作符都有类型、数据和运算规则 3 大属性。GO 法信号流用以描述各组成单元输入和输出间的相互联系,状态值与状态概率是 GO 法信号流的 2 个属性。GO 法运算包括定性分析与定量计算,通过 GO 法运算得到系统输出信号的状态概率和导致系统失效的最小割集^[1]。

基于 GO 法的激光点火系统可靠性分析基本流程主要包括激光点火系统分析及定义、建立 GO 图、定性分析、定量计算及系统评价等 5 个部分,其分析流程图如图 1 所示。

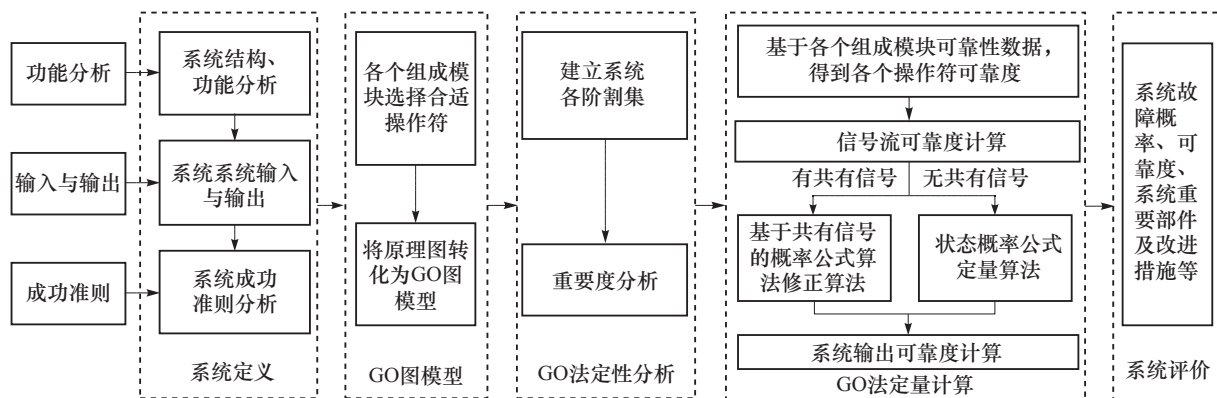


图 1 激光点火系统 GO 法分析流程

Fig. 1 GO methodology analysis process of laser ignition system

2 激光点火系统可靠性 GO 法分析

2.1 激光点火系统工作原理分析

系统工作原理框图如图 2 所示。

激光点火系统输出为激光火工品可靠点火以及 DS 显示检测激光在激光火工品表面发射的功率值以及点火激光稳定的功率值。激光点火系统输入为 28 V EPS 以及各个开关通断的控制信号。检测激光检测完光路完整性后,才能将 K2 接通到点火激光供电电路,完成激光点火过程,因此,系统各个控制开关动作时序不同,且两种激光二极管功能各不相同,激光二极管工作具有严格的时序控制,从而完成激光点火系统功能。激光点火系统的成功准则为在检测激光二极管产生一定功率脉冲激光验证光能传输单元的检测后,点火激光输出稳定功率和波长的激光能够成功点燃激光火工品。

2.2 建立激光点火系统 GO 图模型

按功能划分,系统可分为电源供电单元、显示单

元、点火控制单元、光能传输单元与激光火工品 5 个单元组成^[6]。信号控制开关通断信号与 28 V 外部供电电源作为信号输入模块,选择类型 5 操作符;电源开关、功能选择开关与检测与点火激光的输出开关作为有控制信号而导通元件选择类型 6 操作符;其余各组成模块电路、点火与检测激光二极管、制冷器、检测 PD 等基本组成模块存在正常与故障两种状态,因此选择类型 1 操作符;9 V 降压电路与 5 V 降压电路同时对电路模块供电,因此选择类型 10 操作符作为两个信号的逻辑关系;TEC 制冷器与点火激光供电电路共同对点火激光二极管作用选择类型 10 操作符作为两种信号的逻辑关系;选择类型 10 逻辑操作符表示功率检测电路与温度采集放大电路的关系;选择类型 10 操作符作为激光点火系统显示单元显示点火激光功率与激光火工品输出点火信号状态的逻辑关系。建立的 GO 图模型如图 3 所示,图 3(a)所示为激光点火系统光路自检状态 GO 图模型,图 3(b)所示为不考虑激光点火系统温度反

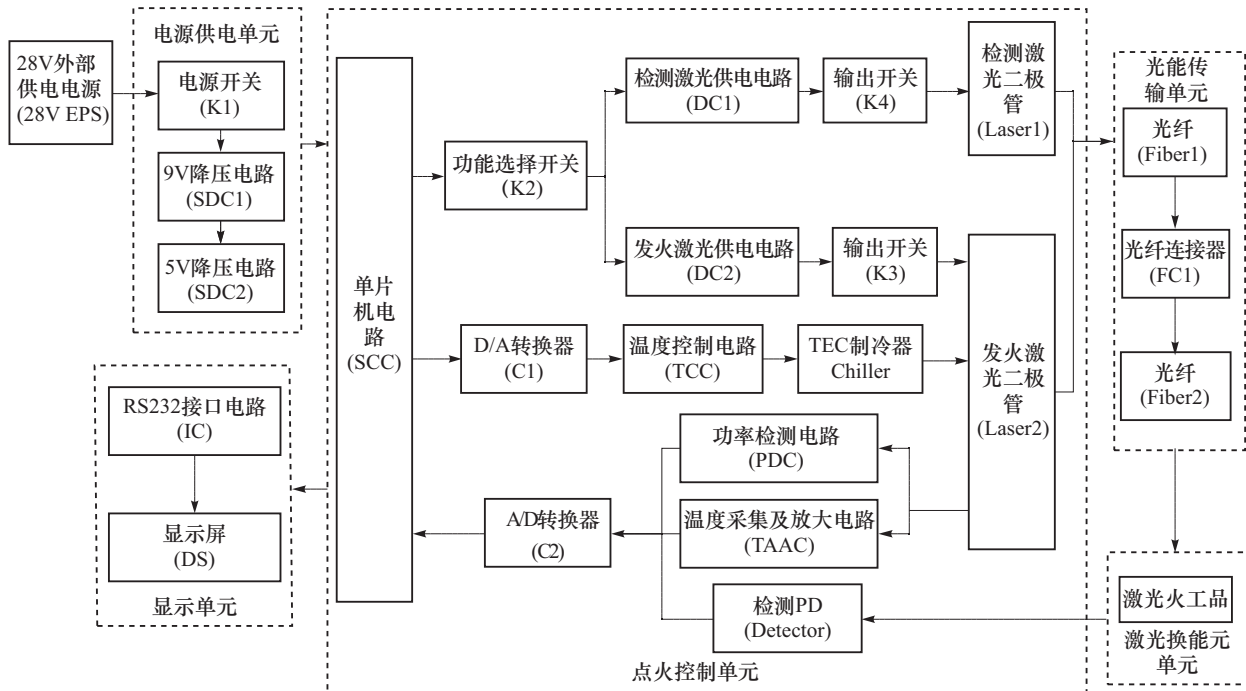


图2 激光点火系统原理图

Fig. 2 Laser ignition system schematic

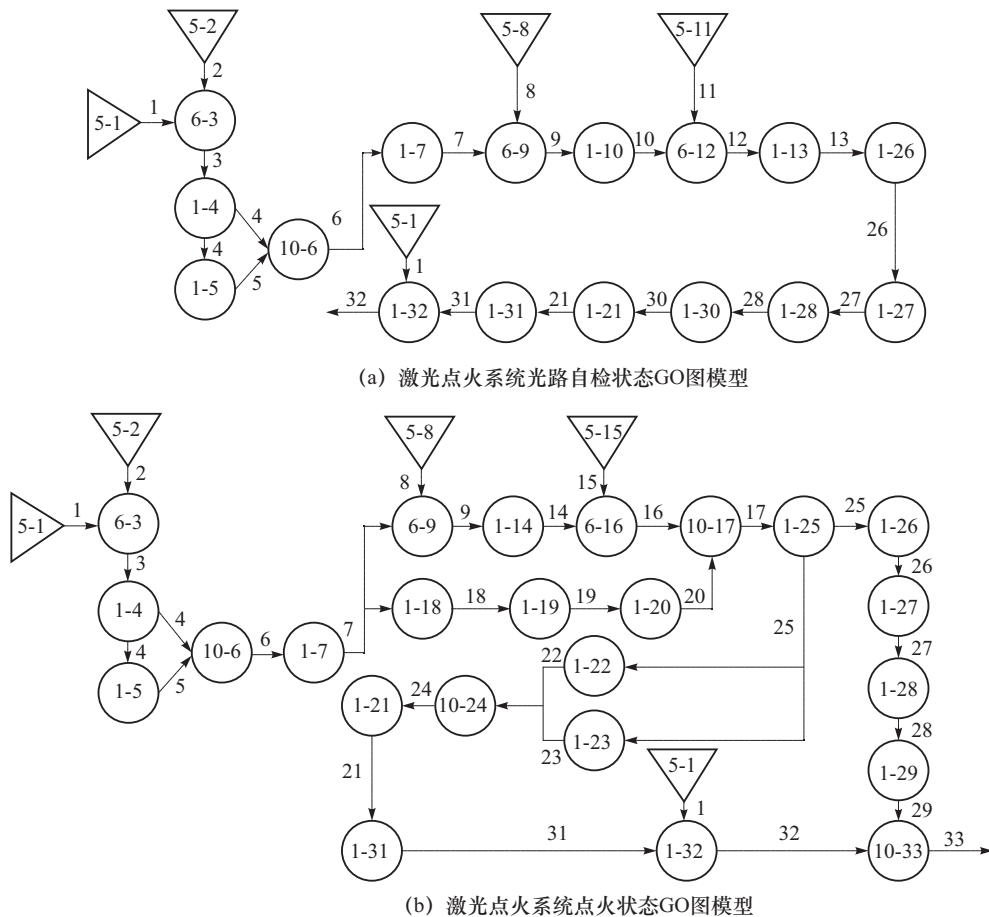


图3 激光点火系统GO图模型

Fig. 3 Laser ignition system GO diagram

馈调节的激光点火系统激光点火状态 GO 图模型. 操作符 X-X 的前一个数字表示操作符类型编号, 后一个数字表示操作符编号, 信号流上数字表示信号流编号. 两种状态下的信号流 S32 和 S33 分别表示激光点火系统光路自检状态和激光点火状态的

输出.

2.3 激光点火系统 GO 法定性分析

GO 法定性分析得到系统故障的各阶最小割集结果如表 1 所示. 通过 GO 法定性分析激光点火系统结果为各个组成模块均为 1 阶最小割集.

表 1 激光点火系统最小割集

Tab. 1 Minimum cutset of laser ignition system

割集阶数	符号	失效事件	割集阶数	符号	失效事件	割集阶数	符号	失效事件
1 阶割集	X ₁	28 V EPS 模块故障	X ₁₀	TCC 模块故障	X ₁₉	IC 模块故障		
	X ₂	K1 开关故障	X ₁₁	C2 模块故障	X ₂₀	DC2 模块故障		
	X ₃	SDC1 模块故障	X ₁₂	Chiller 模块故障	X ₂₁	Detector 模块故障		
	X ₄	SDC2 模块故障	X ₁₃	PDC 模块故障	X ₂₂	FC1 模块故障		
	X ₅	SCC 模块故障	X ₁₄	TAAC 模块故障	X ₂₃	DS 模块故障		
	X ₆	K2 开关故障	X ₁₅	Fiber2 模块故障	X ₂₄	激光火工品点火故障		
	X ₇	DC1 模块故障	X ₁₆	Fiber2 模块故障	X ₂₅	Laser2 模块故障		
	X ₈	K3 开关故障	X ₁₇	Laser1 模块故障				
	X ₉	C1 模块故障	X ₁₈	K4 开关故障				

2.4 激光点火系统 GO 法定量计算

对激光点火系统可靠性定量分析, 基于系统各个组成模块可靠性参数, 采用基于共有信号的 GO 法概率公式算法的修正算法计算两输出状态的成功概率, 最后获得系统成功概率. 非工作状态下, 系统处于地面环境贮存状态: 温度为 10~30 ℃, 湿度控制在 75% 以内, 内部设施很好, 处于 I 级水平^[7]; 工作状态下, 系统处于发射状态, 温度为 50 ℃. 建立系统任务剖面: 5 y 非工作状态, 和 1 h 工作状态. 通过 GJB 108A-2006《电子设备非工作状态可靠性

预计手册》和 GJB 299C《电子设备可靠性预计手册》中元器件应力分析法分析非工作状态及工作状态下元器件失效率, 然后综合分析系统在整个任务剖面下的失效率^[8]. 各个模块及对应的操作符的可靠性参数, 各个模块操作符类型、编号和失效率如表 2 所示, 假定各种开关控制信号可靠度为 1, 激光火工品操作符编号为 29, 操作符类型为 1, 发火可靠度为 0.995.

不考虑各个控制开关的控制信号的失效率, 且满足激光点火系统各组成模块的寿命服从指数分布, 则各基本组成模块的可靠度函数如式 1 所示.

表 2 组成模块操作符及其可靠性参数

Tab. 2 Various module operators and their reliability parameters

操作符编号	模块名称	操作符类型	失效率 $\lambda/(10^{-6} \text{ h}^{-1})$	操作符编号	模块名称	操作符类型	失效率 $\lambda/(10^{-6} \text{ h}^{-1})$
1	28V EPS	5	0.033 00	20	Chiller	1	0.039 00
3, 9, 12, 15	K1, K2, K3, K4	6	0.024 15	22	PDC	1	0.013 00
4, 5	SDC1, SDC2	1	0.056 27	23	TAAC	1	0.015 00
7	SCC	1	0.109 00	26, 28	Fiber1, Fiber2	1	0.014 00
10, 14	DC1, DC2	1	0.019 30	30	Detector	1	0.090 00
13, 25	Laser1, Laser2	1	0.900 00	27	FC1	1	0.011 00
18, 21	C1, C2	1	0.084 00	31	IC	1	0.030 00
19	TCC	1	0.017 00	32	DS	1	0.020 00

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

式中: $P(t)$ 为激光点火系统基本组成模块的可靠度; λ 为组成模块的失效率.

根据图 3 所示的激光点火系统 GO 图模型, 采用概率公式算法进行可靠性定量分析, 其中概率公式算

法有直接算法、有共有信号的修正算法和有共有信号的精确算法. 在计算激光点火系统光路自检状态输出信号 S32 和激光点火系统点火状态输出信号 S33 在不同时刻的成功概率, 对于光路自检状态下共有信号 S4 和激光点火状态下共有信号 S4, S7, S25 采用如

式(2)所示的精确算法进行计算,对不含共有信号的操作符可用相应时刻的成功概率,采用操作符的运算规则直接进行计算,其结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 基于共有信号状态下激光点火系统的光路自检状态可靠度

Tab. 3 System reliability of laser ignition system at light path self-test state based on common signal

共有信号的信号流 4 状态	状态组合概率	系统成功概率
0	0	0
1	0.992 787	0.943 813
信号流 32 成功概率 $P_1(S_{32})$	0.962 875	

表 4 基于共有信号状态下激光点火系统的激光点火状态可靠度

Tab. 4 System reliability of laser ignition system at ignition state based on common signal

共有信号状态			状态组合概率	系统成功概率
信号流 4	信号流 7	信号流 25		
0	0	0	0	0
0	1	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	0.989 141	0.947 292
信号流 33 成功概率 $P_2(S_{33})$			0.954 762	

$$P_R = \sum_{K_1=0}^1 \sum_{K_2=0}^1 \cdots \sum_{K_L=0}^1 P_{RK_1 K_2 \cdots K_L} \prod_{l=1}^L [(1 - P_{SL})(1 - K_l) + P_{SL}K_l], \quad (2)$$

式中: P_R 为系统输出信号的状态概率; P_{SL} 为 L 个共有信号的状态概率; $P_{RK_1 K_2 \cdots K_L}$ 为 L 个共有信号的一种组合状态下,系统输出信号状态概率值. 对组合状态中第 l 个共有信号,当 $K_l=0$ 时取故障状态,当 $K_l=1$ 时取成功状态。

激光点火系统光路自检状态下,GO 图模型中信号流 4 与信号流 7 存在共有信号,采用共有信号的修正算法,系统可靠度计算结果如表 3 所示。

激光点火系统激光点火状态下,GO 图模型中信号流 4、信号流 7 与信号流 21 存在共有信号,采用共有信号的修正算法,系统可靠度计算结果如表 4 所示。

采用共有信号的修正算法,得到激光点火系统作用可靠度 P_s 为 0.937 005。

3 GO 法与 FTA、Monte Carlo 法对比分析

3.1 与 FTA 定性分析结果对比

通过分析建立激光点火系统点火无输出对应的故障树如图 5 所示,采用下行法建立该故障树结构函数,其布尔代数式如式(2)所示,表示所有最小割集的加和,式 2 表示符号所对应的事件见表 1,对比 GO 法分析结果,可得两者所得最小割集完全一致,验证了 GO 法定性分析结果的正确性。

$$T = X_1 + X_2 + \cdots + X_{25}. \quad (3)$$

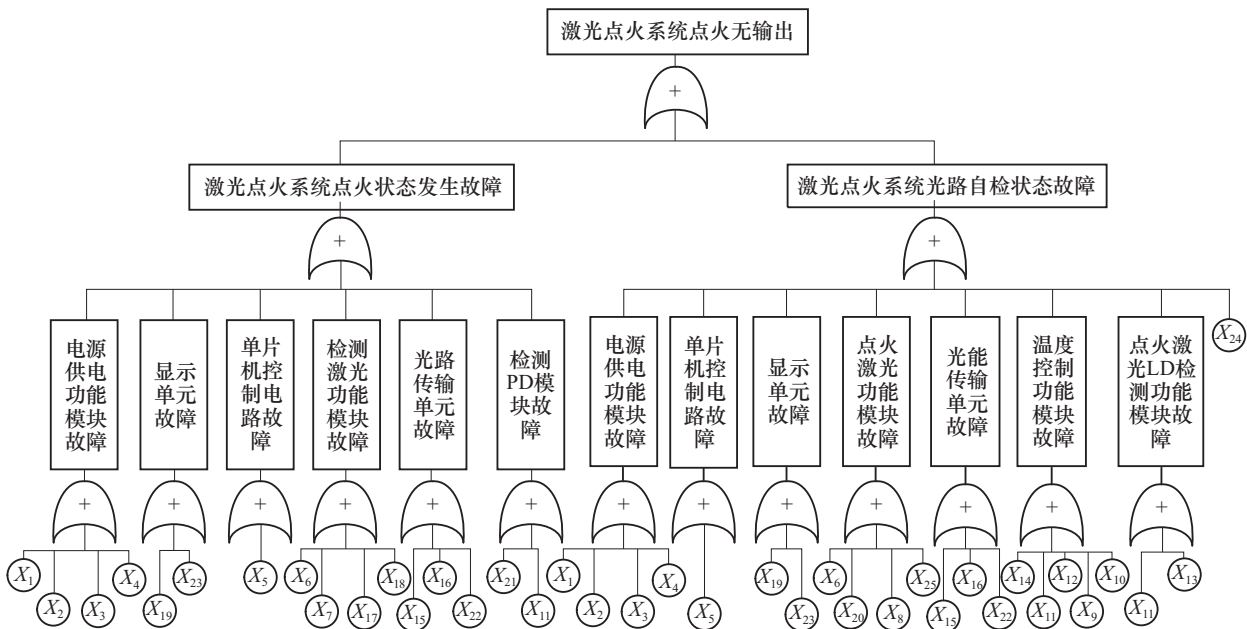


图 5 激光点火系统故障树

Fig. 5 FTA of laser ignition system

3.2 与 Monte Carlo 定量分析结果对比

基于激光点火系统可靠性框图,采用 Monte Carlo 仿真分析,获得该系统在模拟次数为 10^6 次条件下系统的可靠度,对比运用 GO 法定量分析得到激光点火系统在任务剖面下各状态的任务可靠度及激光点火系统作用可靠度,其结果如表 6 所示。

表 6 GO 法与 Monte Carlo 仿真分析得到系统可靠度
Tab. 6 System reliability by using GO methodology and Monte Carlo simulation

定量分析方法	光路自检状态	激光点火状态	激光点火系统
GO 法	0.962 875	0.954 762	0.937 005
Monte Carlo	0.961 361	0.954 311	0.937 132
偏差	0.1%	0.05%	0.01%

对比 Monte Carlo 仿真分析结果与 GO 法定量分析方法结果,基本一致,误差最大为 0.1%,工程上是可以接受的,验证了采用 GO 法进行激光点火系统可靠性定量分析的适用性。

4 结 论

通过 GO 法建立了具有多状态多时序的激光点火系统 GO 图模型,并进行了可靠性定性分析和定量分析,得到了激光点火系统各个组成模块均为 1 阶最小割集;通过定量计算得非工作贮存时间 5 年,工作时间 1h 任务剖面下激光点火系统光路自检状态可靠度为 0.962 875,激光点火状态可靠度为 0.954 762,激光点火的作用可靠度为 0.937 005。该定性分析结果和定量分析结果可为激光点火系统的可靠性设计和可靠性评价提供参考。并把该激光点火系统的 GO 法可靠性定性分析结果与 FTA 法进行了对比,得到其两种分析方法的定性分析结果一致,验证了 GO 在激光点火系统可靠性定性分析的正确性;采用 Monte Carlo 仿真分析方法得到光路自检状态可靠度 0.961 36、激光点火状态可靠度 0.954 311、和系统作用可靠度 0.930 132,与 GO 法定量分析结果对比,误差不超过 0.1%,验证了 GO 法进行激光点火系统可靠性定量分析的适用性。

参考文献:

- [1] 沈祖培,黄祥瑞. GO 法原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
Shen Zhupei, Huang Xiangrui. Principle an application of go methodology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [2] Yi X J, Dhillon B S, Dong H P, et al. Quantitative reliability analysis of repairable systems with closed-loop feedback based on GO methodology[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2016;1-14.
- [3] Yi X J, Shi J, Mu H N, et al. Reliability analysis of repairable system with multiple-input and multi-function component based on go methodology[C]// Proceedings of ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Houston, Texas; [s. n.], 2015.
- [4] Yi X J, Shi J, Dong H P, et al. Reliability analysis of repairable system with multiple fault modes based on goal-oriented methodology[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, 2016, 2(1):011003.
- [5] Zhou Ligan, Dong Haiping, Yi Xiaojian, et al. Reliability analysis of retracting actuator with multi-state based on goal oriented methodology[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science ed, 2015, 20(3):307-311.
- [6] 王欢. 激光二极管点火系统研究[D]. 北京:北京理工大学, 2006.
Wang Huan. Research on laser diode ignition system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006 (in Chinese)
- [7] 孟涛,张士念,易当祥,等. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京:中国宇航出版社, 2013.
Meng Tao, Zhang Shiyun, Yi Dangxiang, et al. Introduction to the technology of storage and longevity of missiles [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013. (in Chinese)
- [8] 刘海,汪佩兰,曾庆轩. 冲击片发火控制电路的可靠性预计[J]. 制导与引信, 2005(01):52-56.
Liu Hai, Wang Peilan, Zeng Qingxuan. Reliability prediction of ignition control circuit of impact plate [J]. Guidance and Fuze, 2005 (01):52-56. (in Chinese)

(责任编辑:李兵)