

文章编号:1006-9941(2019)10-0875-08

基于GO法的单输出爆炸逻辑网络系统可靠性分析

杨小玉^{1,2},李燕华¹,温玉全¹,范富博³

(1.北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081; 2.北京国科环宇空间技术有限公司,北京 100086;

3.北方特种能源集团有限公司西安庆华公司,陕西 西安 710025)

摘要: 为有效提高爆炸逻辑网络系统可靠性水平,识别系统的薄弱环节,基于GO法(goal oriented methodology)原理建立了爆炸逻辑网络可靠性分析方法。根据某单输出爆炸逻辑网络的工作原理建立了GO图模型,并利用状态组合法进行可靠性定量计算和定性分析,结果表明单输出爆炸逻辑网络系统的可靠度为0.977,最小割集为雷管 I_1 、雷管 I_2 、雷管 I_3 、零门 N_1 和零门 N_3 。建立了单输出爆炸逻辑网络系统的可靠性框图,并计算了系统可靠度,结果与GO法状态组合法一致,验证了GO法运用于单输出爆炸逻辑网络可靠性分析的可行性。

关键词: 爆炸逻辑网络;GO法;可靠性分析

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018328

1 引言

单输出爆炸逻辑网络^[1]是一种低能直列式爆炸序列,其关键部件是设置在输入雷管与输出传爆药之间的传爆组件,通过判断一组(两个以上)雷管的起爆时序以控制输出。仅当一组雷管按所规定的时序起爆时,爆轰波才能被传递到输出装药,否则爆炸逻辑网络实现自锁而无法输出爆轰波。在实际战斗部中,当引信做出起爆判定后,给出一组符合起爆时序的编码,控制该组雷管按规定时序起爆,使得传爆装药正常输出爆轰波,引爆战斗部。该爆炸逻辑网络的可靠性关系到整个武器系统可靠性,关系到武器能否准确打击预定目标,因此其可靠性要求很高。

爆炸逻辑网络的研究始于20世纪60年代。1963年,Courser^[2]设计出第一个具有逻辑功能的爆炸

元件-爆炸感应器。1973年,Menz^[3]利用制成的与/非门逻辑组件,设计出二输入三输出的复合逻辑网络。1984年,法国炸药中心(NSPE)^[4]也进行了爆炸逻辑网络的技术研究并公布了相关方面的研究成果。1991年,Silvia^[5]提出了爆炸延期通路。自20世纪70年代以来,国内北京理工大学^[6-8]、中国工程物理研究院^[9]和中北大学^[10]等机构对爆炸逻辑网络的药剂、装药工艺、逻辑元件、组网技术及其应用技术进行了广泛而深入的研究,并取得了一系列成果。而对于爆炸逻辑网络可靠性的研究,国外鲜见公开报道,国内学者则开展了一些研究。1997年,吉利国等^[11]采用故障树分析方法,计算得到了“二入一出”和“三入一出”爆炸逻辑网络系统顶事件发生的概率,并且利用系统可靠性框图分析方法,建立了可靠性数学模型,得到相应的系统可靠度。1998年,王军波等^[12]将马尔可夫(MARKOV)过程应用于引信安全系统爆炸逻辑网络的过程识别,通过状态转移过程分析和转移概率计算,得出爆炸逻辑网络的安全性及可靠性的计算方法。2016年,覃鹏^[13]对爆炸逻辑网络及其组成单元进行故障分析,分析了网络失效的主要模式及其所有可能影响,建立了爆炸逻辑网络故障树,并对其进行定性分析,得到最小割集,找到爆炸逻辑网络的薄弱环节并提出具体改进的措施。

收稿日期:2018-11-21;修回日期:2019-02-25

网络出版日期:2019-05-05

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1530135)

作者简介:杨小玉(1993-),女,硕士研究生,主要从事可靠性研究。e-mail:15040097206@163.com

通信联系人:温玉全(1965-),男,副教授,主要从事新型起爆技术研究。e-mail:wyquan@bit.edu.cn

引用本文:杨小玉,李燕华,温玉全,等.基于GO法的单输出爆炸逻辑网络系统可靠性分析[J].含能材料,2019,27(10):875-882.

YANG Xiao-yu, LI Yan-hua, WEN Yu-quan, et al. Reliability Analysis of Single Output Explosive Logic Circuit System Based on GO Method[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(10):875-882.

爆炸零门是组成爆炸逻辑网络的基础元件,其作用的可靠性直接影响爆炸网络的可靠性。在爆炸零门可靠性研究方面,1997年,焦清介等^[14]建立了拐角效应零门和接触零门作用可靠性的数学模型,通过试验确定了两种爆炸零门的作用可靠性概率窗口。2006年,罗华平等^[15]根据可靠性分析建立了爆炸逻辑零门和破坏性交叉通路的可靠性数学模型。间隙零门的可靠度为 $R=P(L_{CR1}<L<L_{CR2})$,间隙零门最佳设计值 $L=0.7\text{ mm}$ 时,可靠度为0.99938。破坏性交叉通路的可靠度为 $R=P(\alpha<\alpha_{CR}<2\alpha)$,破坏性交叉通路最佳设计值 $\alpha=41^\circ$ 时,可靠度为0.9994。2007年,王玉明等^[16]建立了间隙零门可靠度模型以及时间匹配可靠性模型,以用于间隙零门可靠性分析和参数的优化。

从国内外调研情况看,随着可靠性研究的发展,已形成了多种可靠性分析的方法,如可靠性框图(RBD)^[17]、故障树分析(FTA)^[18]、失效模式及影响分析(FMECA)^[19]、马尔科夫分析^[20]、蒙特卡罗^[21]、GO法(goal oriented methodology)^[22]和贝叶斯网络(BN)^[23]等分析方法。目前针对爆炸逻辑网络的可靠性建模与分析主要采用的还是传统的RBD建模方法,但该方法对于研究对象而言,建模的规模庞杂,导致运算繁琐,计算效率低下,并且只有简单的串联、并联和桥联等方式,难以描述研究对象自身的时序、逻辑控制等特性。GO法是一种以成功为导向的可靠性分析方法,它把系统的原理图、功能图或流程图直接按一定规则翻译成GO图。相比于FMECA和FTA,GO法能更加客观地进行建模及分析,在实际的工程应用中,其具有结构简洁、通用性强、扩展性强、综合分析能力强、分析效率高和一致性高等优点。此方法多应用在相对大型的系统可靠性分析中,如武器、交通物流等系统,并取得了较好的效果。但是,目前尚无GO法应用于爆炸逻辑网络的公开报道。

本研究基于GO法,将爆炸逻辑网络看作一个小的系统,内部的爆炸逻辑元件及雷管可看作系统的单元,继而应用GO法对某单输出爆炸逻辑网络进行可靠性分析,这将为爆炸逻辑网络系统的可靠性分析提供一种新思路,也为将来分析更复杂爆炸逻辑网络的可靠性提供借鉴和参考。

2 GO法

GO法主要由GO图和GO运算组成,而GO图由GO操作符和信号流组成,所以GO法可靠性分析的要素是GO操作符、信号流、GO图以及GO运算^[22]。

2.1 GO法分析步骤

利用GO法进行可靠性分析的一般分析流程^[22]如图1所示。

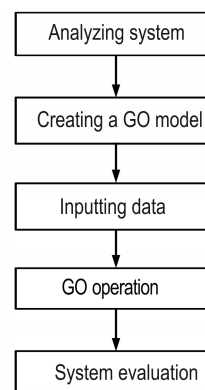


图1 一般GO法的分析流程图

Fig.1 The flow chart of GO methodology

基于GO法对某单输出爆炸网络系统进行可靠性分析的具体步骤如下:

(1)对某单输出爆炸逻辑网络系统进行分析。

(2)根据单输出爆炸网络系统的原理图,建立系统GO图。

(3)确定单输出爆炸逻辑网络系统中各单元的可靠性相关数据。

(4)对单输出爆炸逻辑网络进行GO运算。

(5)对单输出爆炸逻辑网络系统进行评价,得到系统的可靠性分析结果。

2.2 操作符简介

目前,已有17类标准的操作符被GO法定义。本研究用到了两种类型操作符,分别为类型5操作符和类型7操作符,符号分别如图2和图3所示。

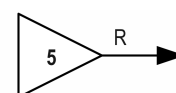


图2 类型5操作符符号

Fig.2 The symbol of the type 5 operator

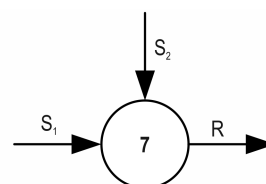


图3 类型7操作符符号

Fig.3 The symbol of the type 7 operator

2.2.1 类型5操作符

图2中R是输出信号。类型5操作符是最常用的

输入操作符,一般系统的GO图中都存在类型5操作符-信号发生器。它作为系统的输入,本身是没有输入的,可产生一个起始信号。信号发生器操作符可以模拟空气、电源、发生器、水源、电池等,还可以代表环境的影响,如光线、振动、温度、辐射等,也可以模拟人为因素对系统的影响。在一个模型中出现两个或多个类型5操作符时,它们表示的信号必须是相互独立的。雷管可以作为爆炸逻辑网络的输入,因此选用类型5操作符指代雷管。

数据:给出信号的状态值 I_j 和概率 P_j ,各有 L 个可能值,即 $I_1, P_1, I_2, \dots, I_L, P_L$ 。其中,信号状态值 I_j 应在系统信号流规定的状态值 $0 \sim L$ 内,相应的概率 P_j 应满足 $\sum_{i=1}^L P_i = 1$ 。

运算规则:信号流R的概率为 $P_R(I_j) = P_j, j=1, \dots, L$ 。

2.2.2 类型7操作符

图3中 S_1 为主输入信号, S_2 为次输入信号,R为输出信号。有信号而关断是指当元件动作成功且有动作信号而关断通路时,或者当元器件提前动作关断通路时,这些情况下主输入信号不能通过,其他情况下,主输入信号可以通过。由于类型7操作符成功导致主输入信号不能通过,因此可用于模拟非单调关联系统中的部件,如常闭的接触器、合上的电闸、常开的流体阀门等。类型7操作符可表示这一类部件,即在激励之前一直让输入通过,经历激励后,输入不能通过的部件。爆炸零门是指能够切断或破坏爆轰通道装药,从而关闭爆轰传播通道的爆炸逻辑网络元件,类型7操作符具有相似的功能,因此选用类型7操作符指代爆炸零门。

数据:状态值 V_C 为0、1。故障、成功概率分别为 $P_C(0)、P_C(1)$ 。

类型7操作符符号运算规则见表1。

3 单输出爆炸逻辑网络系统可靠性分析

3.1 单输出爆炸逻辑网络原理与结构

“三入一出”网络^[29]是一种典型的单输出爆炸逻辑网络,由四个零门和若干长度的直线装药及圆弧装药构成,结构如图4所示,其中I表示雷管,N表示零门,B、C、O表示装药线路上的点。其原理是: I_1 首先输入,爆轰波沿 I_1N_1 将 B_1N_2 切断;经过一定的时间间隔后 I_2 输入,爆轰波沿 $I_2B_1C_1N_3$ 和 B_2N_4 切断;再经过一定的时间间隔后 I_3 输入,爆轰波沿 $I_3C_2N_4$ 向O端输入爆

表1 类型7操作符的运算规则

Table 1 The operation rules of the type 7 operator

V_{S_1}	V_{S_2}	V_C	V_R
$I_1(0,1)$	$I_2(0,1)$	0	I_1
$I_1(0)$	$I_2(0,1)$	1	0
$I_1(1)$	$I_2(0)$	1	1
$I_1(1)$	$I_2(1)$	1	0

Note: V_{S_1} is the state value of the main input signal. V_{S_2} the state value of the secondary input signal. V_C is the state value of the operator. V_R is the state value of the output signal.

轰。仅有一个或任何次序的两个,或三个爆轰输入的时间顺序不符设计,O端均不能有爆轰输出。

所有的雷管和零门只考虑两种状态:状态1成功和状态0失效。规定三个雷管作为系统的输入,爆轰波传播到O点作为系统的输出。规定三个雷管可靠作用的含义为: t_1 时, I_1 雷管成功起爆; t_2 时, I_2 雷管成功起爆,须满足 $t_2 - t_1 \geq \tau_1$; t_3 时, I_3 雷管成功起爆,须满足 $t_3 - t_2 \geq \tau_2$,其余情况下视为失效。规定O点有爆轰波输出为系统成功,O点无爆轰波输出为系统失效。

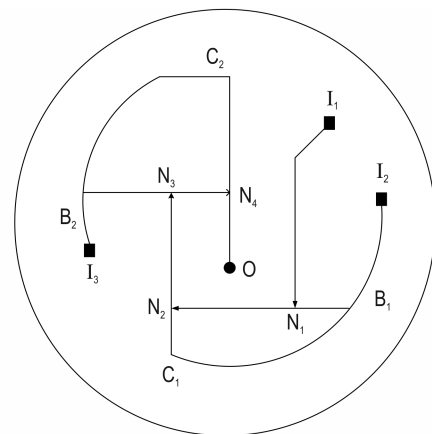


图4 “三入一出”爆炸逻辑网络结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the three-in-one-out explosive logic circuit structure

由图4可知:

$$\tau_1 = t(I_1N_1) - t(I_2B_1N_1) \quad (1)$$

$$\tau_2 = t(I_2B_1C_1N_2) - t(I_3B_2N_2) \quad (2)$$

式中, t 和 τ 分别代表爆轰波在某一线路传播时间和爆轰波在两段线路传播的时间差,单位为 μs ; τ_1 为 I_2 相对于 I_1 的起爆延迟时间, τ_2 为 I_3 相对于 I_2 的起爆延迟时间。

该爆炸逻辑网络只起爆 I_3 时, N_3 已经起了作用,切断了 B_2N_4 ,则爆轰波能够沿 $I_3B_2C_2N_4$ 传播,系统O点有输出。 N_3 是否作用是由 C_1N_3 是否有爆轰波决定,只有当 C_1N_3 没有被切断时, N_3 才能起作用。 C_1N_3 是否被切

断由 N_2 决定, N_2 是否作用则由 N_1N_2 是否有爆轰波决定, 而 N_1N_2 是否有爆轰波通过是由 N_1 决定。

3.2 基于 GO 法的单输出爆炸逻辑网络的可靠性分析

3.2.1 GO 操作符的选择

根据系统组成单元的特性以及单元与单元之间的逻辑关系, 选择正确的操作符, 雷管作为输入元件, 选择类型 5 操作符, 零门的工作过程与类型 7 操作符的描述相符, 因此选择类型 7 操作符来描述零门, 元件与操作符之间的对应关系如表 2 所示。其中操作符 1、2、6 为输入操作符, 操作符 3、4、5、7 为功能操作符。

表 2 单输出爆炸逻辑网络系统 GO 操作符列表

Table 2 GO operator list of the single output explosive logic circuit system

operator number	component name	operator type
1	detonator I_1	type 5
2	detonator I_2	type 5
3	null gate N_1	type 7
4	null gate N_2	type 7
5	null gate N_3	type 7
6	detonator I_3	type 5
7	null gate N_4	type 7

3.2.2 GO 图模型的建立

根据单输出爆炸逻辑网络系统中对应的单元所选择的操作符及该爆炸逻辑网络的工作原理, 建立该单输出爆炸逻辑网络的 GO 图如图 5 所示。其中, 5-1, 5-2, 7-3, 7-4, 7-5, 5-6, 7-7 表示操作符; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 表示信号流。

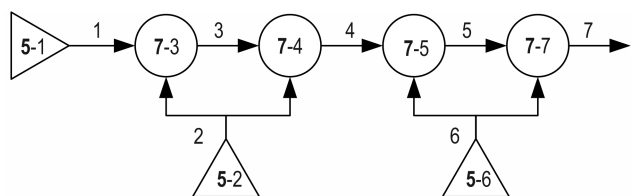


图 5 单输出爆炸逻辑网络系统 GO 图

Fig.5 GO model of the single output explosive logic circuit system

3.2.3 数据输入

参考文献[14], 可得单输出爆炸逻辑网络系统的输入操作符和功能操作符数据, 见表 3 和表 4。

3.2.4 定量计算

采用 GO 运算进行定量计算, 可以得到所有信号流的状态概率, 通常以一个或多个输出信号流的状态概率代表整个系统对其可靠性做出定量评价。基于

表 3 单输出爆炸逻辑网络系统的输入操作符数据

Table 3 Input operator data for the single output explosive logic circuit system

operator number	operator type	name	state probability	
			state 1	state 0
1	type 5	detonator I_1	0.999	0.001
2	type 5	detonator I_2	0.999	0.001
6	type 5	detonator I_3	0.999	0.001

表 4 单输出爆炸逻辑网络系统的功能操作符数据

Table 4 Functional operator data for single output explosive logic circuit system

operator number	operator type	name	state probability	
			state 1	state 0
3	type 7	null gate N_1	0.99	0.01
4	type 7	null gate N_2	0.99	0.01
5	type 7	null gate N_3	0.99	0.01
7	type 7	null gate N_4	0.99	0.01

GO 法的定量分析方法有状态组合算法和概率公式算法。本研究的研究对象结构较简单, 且不考虑共有信号影响因素, 所以采用状态组合算法^[22]对某单输出爆炸逻辑网络进行定量计算。状态组合算法定量分析是沿着信号流序列, 逐个操作符进行, 每个操作符计算时仅涉及操作符及其输入信号的信息, 得到输出信号的概率。输出信号 3 的状态组合概率计算如表 5 和表 6 所示。

输出信号 4 的状态组合概率计算如表 7 和表 8 所示。

输出信号 5 的状态组合概率计算如表 9 和表 10 所示。

表 5 输出信号 3 的状态组合概率计算

Table 5 Calculation for the state combination probability of output signal 3

signal 2 state value	signal 1 state value	operator 3 state value	output signal 3		
			state value	state probability	state combination
1	1	1	0	9.8802×10^{-1}	$1_1 2_1 3_1$
1	0	1	1	9.8901×10^{-4}	$1_0 2_1 3_1$
0	0,1	1	0	9.9000×10^{-4}	$12_0 3_1$
1	0,1	0	1	9.9900×10^{-3}	$12_1 3_0$
0	0,1	0	0	1.0000×10^{-5}	$12_0 3_0$

Note: The subscripts 0 and 1 represent the status value success and failure, respectively.

表 6 输出信号 3 的状态概率

Table 6 State probability of the output signal 3

state value	state probability	state combination
1	1.0979×10^{-2}	$12_1 3_0 + 1_0 2_1 3_1$
0	9.8902×10^{-1}	$12_0 3 + 1_1 2_1 3_1$

表7 输出信号4的状态组合概率计算

Table 7 Calculation for the state combination probability of output signal 4

signal 2 state value	signal 3 state value	operator 4 state value	output signal 4		
			state value	state probability	state combination
1	1	1	0	1.0869×10^{-2}	$12_13_04_1+1_02_13_14_1$
1	0	1	1	9.7814×10^{-1}	$1_12_13_14_1$
0	0,1	1	0	9.9000×10^{-4}	12_034_1
1	0,1	0	1	9.9900×10^{-3}	12_134_0
0	0,1	0	0	1.0000×10^{-5}	12_034_0

表8 输出信号4的状态概率

Table 8 State probability of the output signal 4

state value	state probability	state combination
1	0.9881	$1_12_13_14_1+12_134_0$
0	0.0119	$12_034_1+1_02_13_14_1+12_13_04_1$

输出信号7的状态组合概率计算如表11和表12所示。

表12中, $1_12_13_14_15_16_17_1$ 表示当所有雷管和零门都处于成功状态时,系统O点有输出; $12_134_05_16_17_1$ 表示当雷管 I_2 、 I_3 成功起爆时,零门 N_4 失效,爆轰波可以直接通过 $I_3B_2C_2N_4$,系统O点有输出; 123456_17_0 表示当零门 N_4 失效,雷管 I_3 成功时,无论其它雷管和零门状

态如何,系统O点都有输出; $12_0345_16_17_1$ 表示当雷管 I_2 失效,雷管 I_3 成功时,爆轰波通过 $I_3B_2N_4$,零门 N_4 起作用,将 C_2O 切断,系统O点无输出; $1_02_13_14_15_16_17_1$ 表示当雷管 I_1 失效,其他雷管和零门都成功时,爆轰波通过 $I_2B_1N_1N_2$,零门 N_2 将 C_1N_3 切断,爆轰波通过 $I_3B_2N_4$,零门 N_4 起作用,将 C_2O 切断,系统O点无输出; $12_13_04_15_16_17_1$ 表示当雷管 I_2 、 I_3 成功起爆时,零门 N_1 失效,爆轰波通过路径与 $1_02_13_14_15_16_17_1$ 相同; $12345_06_17_1$ 表示雷管 I_3 成功,零门 N_3 失效,爆轰波通过 $I_3B_2N_4$,零门 N_4 起作用,将 C_2O 切断,系统O点无输出; 123456_07 表示雷管 I_3 失效,系统O点无输出。

表9 输出信号5的状态组合概率计算

Table 9 Calculation for the state combination probability of output signal 5

signal 6 state value	signal 4 state value	operator 5 state value	output signal 5		
			state value	state probability	state combination
1	1	1	0	9.7727×10^{-1}	$1_12_13_14_15_16_1+12_134_05_16_1$
1	0	1	1	1.1174×10^{-2}	$12_0345_16_1+1_02_13_14_15_16_1+12_13_04_15_16_1$
0	0,1	1	0	9.9000×10^{-4}	12345_16_0
1	0,1	0	1	9.9900×10^{-3}	12345_06_1
0	0,1	0	0	1.0000×10^{-5}	12345_06_0

表10 输出信号5的状态概率

Table 10 State probability of the output signal 5

state value	state probability	state combination
1	0.0217	$12_0345_16_1+1_02_13_14_15_16_1+12_13_04_15_16_1+12345_06_1$
0	0.9783	$1_12_13_14_15_16_1+12_134_05_16_1+12345_06_0$

表11 输出信号7的状态组合概率计算

Table 11 Calculation for the state combination probability of output signal 7

signal 6 state value	signal 5 state value	operator 7 state value	output signal 7		
			state value	state probability	state combination
1	1	1	0	2.1511×10^{-2}	$12_0345_16_17_1+1_02_13_14_15_16_17_1+12_13_04_15_16_17_1+12345_06_17_1$
1	0	1	1	9.6750×10^{-1}	$1_12_13_14_15_16_17_1+12_134_05_16_17_1$
0	0,1	1	0	9.9000×10^{-4}	123456_07_1
1	0,1	0	1	9.9900×10^{-3}	123456_17_0
0	0,1	0	0	1.0000×10^{-5}	123456_07_0

表 12 输出信号 7 的状态概率

Table 12 State probability of the output signal 7

state value	state probability	state combination
1	0.977	$1_1 2_1 3_1 4_1 5_1 6_1 7_1 + 12_1 34_0 5_1 6_1 7_1 + 123456_1 7_0$
0	0.023	$12_0 345_1 6_1 7_1 + 1_0 2_1 3_1 4_1 5_1 6_1 7_1 + 12_1 3_0 4_1 5_1 6_1 7_1 + 12345_0 6_1 7_1 + 123456_0 7$

输出信号 7 代表系统的最终输出信号,按状态值完成所有信号流的状态概率计算,结果列于表 13。

表 13 单输出爆炸逻辑网络系统信号流状态概率

Table 13 Signal flow state probability of the single output explosive logic circuit system

signal flow number	state probability	
	state value 1	state value 0
1	0.999	0.001
2	0.999	0.001
3	0.011	0.989
4	0.988	0.012
5	0.022	0.978
6	0.999	0.001
7	0.977	0.023

3.2.5 定性分析

通过 GO 法定性分析可以得到系统最小割集,分析导致系统故障的原因。GO 法的输出信号状态是通过输入信号状态的信号流以及操作符状态的逐个进行组合得到。状态组合内操作符的数量在运算过程中不断增加,直至系统全部操作符都包含为止。系统故障状态的割集如表 14 所示,得到 5 个最小割集,都为一阶割集。

表 14 单输出爆炸逻辑网络系统割集

Table 14 Cut set of the single output explosive logic circuit system

simplified state combination	minimum cut set	component state
6_0	6_0	detonator I_3 is invalid
$2_0 5_1 6_1 7_1$	2_0	detonator I_2 is invalid
$1_0 2_1 3_1 4_1 5_1 6_1 7_1$	1_0	detonator I_1 is invalid
$5_0 6_1 7_1$	5_0	null gate N_3 is invalid
$2_1 3_0 4_1 5_1 6_1 7_1$	3_0	null gate N_1 is invalid

输出信号 7 代表系统,输出信号 7 的状态概率是对系统可靠性的定量评价,系统可靠度为 0.977,系统失效概率为 0.023。 1_0 、 2_0 、 3_0 、 5_0 和 6_0 为一阶割集,雷管 I_1 、 I_2 和 I_3 ,零门 N_1 和 N_3 是影响该爆炸逻辑网络可靠性最重要的事件,需要在设计中引起重视。

3.3 单输出爆炸网络系统可靠性框图分析

3.3.1 单输出爆炸网络系统可靠性框图

系统可靠性框图是根据单输出爆炸逻辑网络的结构和作用原理建立的。由 3.1 节可知,O 点有爆炸波输出要满足如下条件:雷管 I_1 起爆时间先于雷管 I_2 至少为 τ_1 ;雷管 I_2 起爆时间先于雷管 I_3 至少为 τ_2 。

爆炸逻辑网络系统可靠度主要由输入雷管、装药线路和零门的作用可靠度组成。建立可靠性框图如图 6~图 8 所示。考虑雷管、装药线路可靠性时,“三入一出”爆炸逻辑网络系统可靠性框图如图 6 所示。

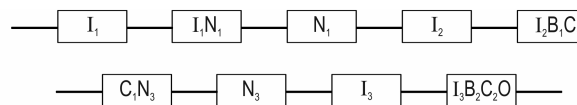


图 6 考虑雷管、装药线路可靠性的系统可靠性框图

Fig.6 Block diagram for the system reliability when considering the reliability of the detonators and charge lines

装药线路可靠性为 1 时,“三入一出”爆炸逻辑网络系统可靠性框图如图 7 所示。

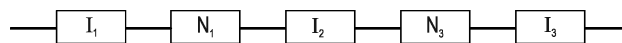


图 7 装药线路可靠性为 1 时系统的可靠性框图

Fig.7 System reliability diagram when the reliability of the charging line is 1

雷管和装药线路可靠度均为 1 时,“三入一出”爆炸逻辑网络系统可靠性框图如图 8 所示。

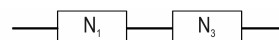


图 8 雷管和装药线路可靠度均为 1 时系统的可靠性框图

Fig.8 System reliability diagram when the detonator and charge line reliability are both one

3.3.2 单输出爆炸网络系统可靠性数学模型

根据图 6~图 8 的可靠性框图可建立下述数学模型,系统可靠性事件为 O_{123} ,指 I_1, I_2, I_3 按时间顺序起爆时,O 正常输出。

考虑雷管和装药线路可靠度, I_1, I_2, I_3 按时间顺序起爆时,网络系统可靠性数学模型为

$$R_{O_{123}} = R_{I_1} R_{I_1 N_1} R_{N_1} R_{I_2} R_{I_2 B_1 C_1} R_{C_1 N_3} R_{N_3} R_{I_3} R_{I_3 B_2 C_2 O} \quad (3)$$

设装药线路可靠度为 1,考虑雷管和零门可靠性,

可使模型简化为

$$R_{O_{123}} = R_{I_1} R_{N_1} R_{I_2} R_{N_3} R_{I_3} \quad (4)$$

设雷管和装药线路可靠性为1,只考虑零门作用可靠性,模型将进一步简化为

$$R_{O_{123}} = R_{N_1} R_{N_3} \quad (5)$$

式中, $R_{O_{123}}$ 为“三入一出”网络系统作用可靠度; R_{N_i} 为第*i*个零门打断的可靠度,定义为零门作用的可靠度; R_{I_i} 为第*i*个雷管作用可靠度; R_{XYZ} 为XYZ段装药线路可靠度。

从建立的数学模型可知,系统可靠性主要决定于零门、雷管及装药线路可靠性,在雷管、装药线路可靠度为1时,系统可靠度决定于零门可靠度,见式(3)。将零门可靠度值带入可得系统可靠度值为0.99。考虑雷管可靠度后,当起爆雷管的可靠度为0.999时,从式(2)得出,“三入一出”爆炸网络系统可靠度为0.977。由于可靠性逻辑框图为串联系统,考虑装药线路可靠性以后,系统可靠性将明显降低,见式(1)。所以包括接点、直线和圆弧的装药线路的设计可靠度显得尤为重要,因此设计时应采用裕度设计法,提高装药线路的设计裕度,使装药线路可靠度为1。

当装药线路的可靠度的值为1时,计算出的爆炸网络的系统可靠度值为0.977,与GO法结果一致,说明GO法可用在单输出爆炸逻辑网络的可靠性分析中。

4 结论

(1) 由GO法得出的单输出爆炸网络系统成功的概率为0.977,最小割集为雷管 I_1 、雷管 I_2 、雷管 I_3 、零门 N_1 和零门 N_3 ,表明这些部件单元对系统的可靠性影响很大,在设计加工过程中应引起重视。

(2) 建立了单输出爆炸逻辑网络系统的可靠性框图,计算出的爆炸逻辑网络系统成功概率与GO法状态组合法计算结果一致,证实了GO法可用于单输出爆炸逻辑网络的可靠性分析,GO图模型更为简单直观。

参考文献:

- [1] 周世罡, 李国新. 爆炸逻辑网络起爆控制系统研究[J]. 火工品, 1997(1): 19-22.
ZHOU Shi-gang, LI Guo-xin. Explosive logic network detonation control system research [J]. *Pyrotechnics*, 1997(1): 19-22.
- [2] Courser D L. Explosive means[P]. US, 3095812, 1963.

- [3] Menz F L, Osburn M R. Explosive and/nand logic element[P]. US,3753402, 1973.
- [4] Souletis E, Cloitre J L E. Miniaturized transmission networks [C]//12th Symposium on explosives and pyrotechnics. San Diego, USA, 1984(3): 43-53.
- [5] Silvia D A. Safe/arm explosive delay path[P]. US, 4989516, 1991.
- [6] 黄亨建, 罗华平, 阳世清, 等. 炸药网络、挠性炸药及反应材料在高效毁伤弹药中的应用[C]//2008年钝感弹药学术研讨会论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008: 48-53.
HUANG Heng-jian, LUO Hua-ping, YANG Shi-qing, et al. Application of explosive network, flexible explosives and reaction materials in efficient damage ammunition [C]//Proceedings of the 2008 Insensitive Ammunition Symposium. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2008: 48-53.
- [7] 冯长根. 小尺寸微通道爆轰学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
FENG Chang-gen. Small-scale microchannel detonation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999.
- [8] 刘举鹏. 爆轰波拐角绕射现象机理及应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1991.
LIU Ju-peng. Mechanism and application of detonation wave cornering phenomenon [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1991.
- [9] 王作山, 刘玉存, 张景林. 装药尺寸对传爆传爆可靠性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(3): 31-33.
WANG Zuo-shan, LIU Yu-cun, ZHANG Jing-lin. Effects of charge size on the reliability of booster explosives [J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(3): 31-33.
- [10] 李晓刚, 焦清介, 温玉全. 超细钝感HMX小尺寸拐角装药爆轰延迟时间研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 621-623.
LI Xiao-gang, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan. Study on detonation delaying time of ultra-fine insensitive HMX small-size corner charge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 621-623.
- [11] 吉利国, 焦清介, 蔡瑞娇. 单输出爆炸逻辑网络系统安全可靠性研究[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(4): 444-450.
GI Li-guo, JIAO Qing-jie, CAI Rui-jiao. Research on security and reliability of single output explosion logic network system [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1997, 17(4): 444-450.
- [12] 王军波, 杨帆. 马尔可夫理论在爆炸逻辑网络安全性与可靠性分析中的应用[J]. 火工品, 1998(4): 18-21.
WANG Jun-bo, YANG Fan. Application of markov theory in safety and reliability analysis of explosive logic network[J]. *Pyrotechnics*, 1998(4): 18-21.
- [13] 覃鹏. 基于失效分析的爆炸逻辑网络系统的功能可靠性和健康评估[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
QIN Peng. Functional reliability and health assessment of explosive logic network system based on failure analysis [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [14] 焦清介, 吉利国, 蔡瑞娇. 爆炸逻辑零门可靠性研究[J]. 兵工学报, 1997, 18(2): 116-120.
JIAO Qing-jie, GI li-guo, CAI Rui-jiao. Research on the reliability of null-gate of explosion logic [J]. *Journal of Ordnance Engineering*, 1997, 18(2): 116-120.
- [15] 罗华平, 黄亨建, 王玉明, 等. 爆炸逻辑零门、破坏性交叉通路

- 的可靠性[J]. 工程物理研究院科技年报, 2006, (1): 303-303.
- LUO Hua-ping, HUANG Heng-jian, WANG Yu-ming, et al. Reliability of null gate and destructive crossing path of explosion logic [J]. *Journal of Engineering Physics Annual Report*, 2006, (1): 303-303.
- [16] 王玉明. 爆炸逻辑网络间隙零门可靠性模型研究[J]. 质量与可靠性, 2007(3): 24-26.
- WANG Yu-ming. Research on reliability model of interval zero gate in explosive logic network [J]. *Quality and Reliability*, 2007(3): 24-26.
- [17] Kim M C. Reliability block diagram with general gates and its application to system reliability analysis[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, 38(11): 2456-2461.
- [18] Lee W S, Grosh D L, Tillman F A, et al. Fault tree analysis, methods, and applications-a review [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1985, 34(3): 194-203.
- [19] Stamatis D H. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution[M]. New York: Asq Press, 2003.
- [20] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- HUANG Xiang-rui. Reliability engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.
- [21] Metropolis N, Ulam S. The Monte Carlo method[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, 44 (247) : 335-341.
- [22] 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 Zu-pei, HUANG Xiang-rui. Principle and application of GO method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [23] Langseth H, Portinale L. Bayesian networks in reliability [J]. *Reliability engineering and system Safety*, 2007, 92 (1) : 92-108.

Reliability Analysis of Single Output Explosive Logic Circuit System Based on GO Method

YANG Xiao-yu^{1,2}, LI Yan-hua¹, WEN Yu-quan¹, FANG Fu-bo³

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Beijing UCAS Space Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3. CNGC Xi'an Qinghua, North Special Energy Group Co. Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to effectively improve the reliability level of the explosive logic circuit system and identify the weakness of the system, the reliability analysis method of the explosive logic circuit system was established based on the GO theory (goal oriented methodology). According to the working principle of the single output explosive logic circuit system, the GO model was established, and the state combination method was used for quantitative calculation and qualitative analysis. Results show that the reliability of the single output explosive logic circuit system is 0.977, while the minimum cut set is the detonator I_1 , detonator I_2 , detonator I_3 , null gate N_1 and null gate N_3 . The reliability block diagram of the single-output explosive logic circuit system was also established, and the system reliability was calculated. The result is consistent with the GO state combination method, which verifies the feasibility of the GO method applied to the reliability analysis of single-output explosive logic circuit system.

Key words: explosive logic circuit; GO method; reliability analysis

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018328

(责编:姜梅)