



状态概率矩阵及其在 GO 法中应用

江秀红^{*1,2}, 段富海¹, 金霞¹, 魏学东³

- (1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136;
3. 惯性技术航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 状态组合算法和概率公式算法是 GO 法常用的定量分析方法, 但对于多输入多状态的复杂系统, 二者的计算均过于烦琐. 结合两种算法, 提出了一种简化的 GO 定量概率矩阵算法. 首先引入状态概率矩阵的概念, 对常用操作符导出基于矩阵的定量计算公式; 然后针对系统中共有信号的修正, 提出了对任意多状态共有信号均适用的新算式; 最后通过两个算例的可靠性计算, 证明了所提算法的有效性. 新算法不仅便于分析操作符状态和信号流状态之间的组合关系, 而且算式直观、计算简单、易于编程, 尤其在多输入多状态系统的可靠性计算上具有更大的优势.

关键词: GO 法; 可靠性; 概率矩阵; 共有信号

中图分类号: TB114.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201402004

0 引言

故障树分析 (fault tree analysis, FTA)^[1-2]、故障模式与影响分析 (fault modes and effect analysis, FMEA)^[3]、Markov 链^[4]等是复杂系统可靠性评估中经常使用的方法, 但这些传统方法在实际应用中总会遇到不适用于动态系统、计算规模庞大、分析结果不够精确等问题. GO 法 (GO methodology) 是美国军方为分析武器系统安全性和可靠性而提出并逐渐发展起来的一种可靠性分析与评估方法, 最初由美国 KAMAN 科学公司提出^[5-6]. 近年来随着其功能和算法的不断发展完善, GO 法在应用中表现出很多独特的优点, 已在航空、核电、设备性能分析、电网配电等高可靠领域得到成功应用^[7-10].

GO 法的分析方法主要有状态组合算法和概率公式算法. 状态组合算法需考虑所有信号的状态组合, 定量计算比较烦琐, 尤其对含共有信号或多重逻辑门的系统, 状态组合数可能变得更加庞

大而复杂. 概率公式算法通过引入信号流状态累积概率, 导出 GO 操作符的定量计算公式, 简化了可靠性的定量计算^[6], 但对于多状态多输入的系统或操作符 (如类型 2、6、7 等), 计算过程仍过于烦琐. 为简化计算, 目前诸多基于 GO 法的可靠性分析与评估都将系统设定为两状态^[7-10], 这不仅限制了 GO 法特长的发挥, 也降低了系统分析结果的精度.

本文在状态组合和概率公式两种算法的基础上, 提出一种简化的 GO 定量计算方法. 对部分常用操作符基于概率矩阵的计算公式进行推导, 并对文献^[11]中共有信号的处理算式进行扩展. 通过列写输出与共有信号的多元一次方程组来求解输出状态概率的精确值, 打破原算法对共有信号状态个数的限制, 以期对多输入多状态共有信号的处理提供一种简易方法.

1 状态概率矩阵的概念

设 $P_s(i)$ 为输入信号的状态概率, $i = 0,$

收稿日期: 2012-11-18; 修回日期: 2014-01-21.

基金项目: 航空科学基金资助项目(20130863006); 国家自然科学基金资助项目(51275068); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT12LK21).

作者简介: 江秀红*(1977-), 女, 博士生, E-mail: jxh_mt@163.com; 段富海(1965-), 男, 教授, 博士生导师.

1, ..., N, 表示信号流的状态值, 0 表示提前状态, N 表示故障状态, 1 ~ (N-1) 表示多种成功状态 (0 ~ N 也可代表有时序问题的多个时间点). 按状态值 i 的大小将 $P_S(i)$ 排列成 $1 \times (N+1)$ 维矩阵:

$$P_S = (P_S(0) \quad P_S(1) \quad \cdots \quad P_S(N)) \quad (1)$$

称 P_S 为输入状态概率矩阵, 又因 $\sum_{i=0}^N P_S(i) = 1$, 只有 N 个 $P_S(i)$ 线性无关, 定义 $1 \times N$ 维矩阵 $P'_S = (P_S(0) \quad P_S(1) \quad \cdots \quad P_S(N-1))$ 为输入的独立状态概率矩阵. 同样可给出输出和操作符的状态概率矩阵 P_R 、 P_C 及相应 P'_R 和 P'_C 的定义.

假设操作符代表的单元和输入输出信号代表的子系统都是相互独立的, 则操作符和输入信号的状态组合联合概率可用它们的概率相乘来得到, 引入 Φ 和 Φ' :

$$\Phi = P_S^T P_C \quad (2)$$

可见矩阵 Φ 中元素对应输入和操作符所有状态组合的联合概率, 称为状态联合概率矩阵. 同样, 定义独立状态的联合概率矩阵

$$\Phi' = P'_S{}^T P'_C \quad (3)$$

基于这些定义, 下面对常用操作符导出输出状态概率的计算公式.

2 概率矩阵定量分析算法

2.1 信号发生器

此操作符没有输入, 可直接按输出状态值大小, 将对应的状态概率合成输出状态概率矩阵:

$$P_R = (P_R(0) \quad P_R(1) \quad \cdots \quad P_R(N)) \quad (4)$$

若输出不包含状态值 i , 则相应 $P_R(i) = 0$.

2.2 两状态单元

用来模拟只有成功和故障两种状态的单元, 其独立状态概率矩阵可表示为 $P'_C = (P_C(1))_{n \times 1}$, 则输入与操作符独立状态的联合概率矩阵

$$\Phi' = \begin{pmatrix} P_S(0)P_C(1) \\ P_S(1)P_C(1) \\ \vdots \\ P_S(N-1)P_C(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi'_{01} \\ \Phi'_{11} \\ \vdots \\ \Phi'_{(N-1)1} \end{pmatrix}$$

由其运算规则, 输出状态概率矩阵可表示为

$$P_R = \left(\Phi'_{01} \quad \Phi'_{11} \quad \cdots \quad \Phi'_{(N-1)1} \quad 1 - \sum_{i=0}^{N-1} \Phi'_{i1} \right) \quad (5)$$

2.3 触发发生器

模拟的单元有 3 个状态: 提前、成功、故障, $P_C = (P_C(0) \quad P_C(1) \quad P_C(2))$, 若输入状态值为 $0 \sim N$, 则

$$\Phi = \begin{pmatrix} P_S(0)P_C(0) & P_S(0)P_C(1) & P_S(0)P_C(2) \\ P_S(1)P_C(0) & P_S(1)P_C(1) & P_S(1)P_C(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_S(N)P_C(0) & P_S(N)P_C(1) & P_S(N)P_C(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{00} & \Phi_{01} & \Phi_{02} \\ \Phi_{10} & \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Phi_{N0} & \Phi_{N1} & \Phi_{N2} \end{pmatrix}$$

根据其状态组合规则, Φ 左上倒“L”区域的元素均为输出提前的联合概率, 右下倒“L”区域的元素均为输出故障的联合概率, 而中间列剩余元素从上到下依次为输出状态为 1 ~ (N-1) 的概率, 即

$$P_R = \left(\Phi_{01} + \sum_{i=0}^N \Phi_{i0} \quad \Phi_{11} \quad \cdots \quad \Phi_{(N-1)1} \right. \\ \left. \Phi_{N1} + \sum_{i=0}^N \Phi_{i2} \right) \quad (6)$$

2.4 或门

用来模拟多个信号的或逻辑关系, 假设有两个输入 P_{S_1} 、 P_{S_2} , 则令

$$\Phi = P_{S_1}^T P_{S_2} =$$

$$\begin{pmatrix} P_{S_1}(0)P_{S_2}(0) & P_{S_1}(0)P_{S_2}(1) & \cdots & P_{S_1}(0)P_{S_2}(N) \\ P_{S_1}(1)P_{S_2}(0) & P_{S_1}(1)P_{S_2}(1) & \cdots & P_{S_1}(1)P_{S_2}(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{S_1}(N)P_{S_2}(0) & P_{S_1}(N)P_{S_2}(1) & \cdots & P_{S_1}(N)P_{S_2}(N) \end{pmatrix}$$

或门的运算规则是输出所有输入信号中的最小状态值, 按这一原则, 从 Φ 左上角开始, 第一个倒“L”区域内元素对应的输出状态为 0, 第二个倒“L”区域对应的输出状态为 1, 依次类推, 最右下角的元素输出状态为 N , 所以

$$P_R = \left(\sum_{i=0}^N (\Phi_{0i} + \Phi_{i0}) - \Phi_{00} \quad \cdots \right. \\ \left. \sum_{i=k}^N (\Phi_{ki} + \Phi_{ik}) - \Phi_{kk} \quad \cdots \quad \Phi_{NN} \right) \quad (7)$$

对于多输入或门, 可采用分级方式, 按式(7)

两两进行计算,前一级的输出再作为下一级或门的输入,也即如有 M 个输入的或门,则可有 $M-1$ 次的矩阵相乘.

2.5 与门

与门一样,假设有两输入 P_{S_1} 、 P_{S_2} , 设两输入状态值均为 $0 \sim N$, 则

$$\Phi = \begin{pmatrix} P_{S_1}(0)P_{S_2}(0) & P_{S_1}(0)P_{S_2}(1) & \cdots & P_{S_1}(0)P_{S_2}(N) \\ P_{S_1}(1)P_{S_2}(0) & P_{S_1}(1)P_{S_2}(1) & \cdots & P_{S_1}(1)P_{S_2}(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{S_1}(N)P_{S_2}(0) & P_{S_1}(N)P_{S_2}(1) & \cdots & P_{S_1}(N)P_{S_2}(N) \end{pmatrix}$$

与门的运算规则是输出所有输入信号中的最大状态值,从 Φ 右下角开始,第一个倒“L”区域内元素到左上角倒“L”区域内元素,对应的输出状态概率依次为 $N, \dots, 1, 0$, 所以输出状态概率矩阵为

$$P_R = \left(\Phi_{00} \quad \cdots \quad \sum_{i=0}^k (\Phi_{ki} + \Phi_{ik}) - \Phi_{kk} \quad \cdots \right. \\ \left. \sum_{i=0}^N (\Phi_{Ni} + \Phi_{iN}) - \Phi_{NN} \right) \quad (8)$$

对于多输入,与门处理过程同或门.

2.6 有动作信号而关断的元件

有主次两个输入信号 S_1 、 S_2 , 通过分析其状态运算规则,可将本操作符的运算等价分解为两步.首先,次输入信号 S_2 与操作符之间的关系与触发发生器相同,由式(6)得到二者的输出 R_1 的状态概率矩阵;其次,求 S_1 与 R_1 的联合概率矩阵,并求得最终输出 R 的状态概率矩阵.

$$\Phi = \begin{pmatrix} P_{S_1}(0)P_{R_1}(0) & P_{S_1}(0)P_{R_1}(1) & \cdots & P_{S_1}(0)P_{R_1}(N) \\ P_{S_1}(1)P_{R_1}(0) & P_{S_1}(1)P_{R_1}(1) & \cdots & P_{S_1}(1)P_{R_1}(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{S_1}(N)P_{R_1}(0) & P_{S_1}(N)P_{R_1}(1) & \cdots & P_{S_1}(N)P_{R_1}(N) \end{pmatrix}$$

$$P_R = \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{0i} \quad \cdots \quad \sum_{i=k+1}^N \Phi_{ki} \quad \cdots \quad \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \Phi_{ij} \right) \quad (9)$$

2.7 有动作信号而导通的元件

次输入信号与操作符之间的关系也与触发发生器相同,所以可先由式(6)求得 S_2 与操作符的输出 R_1 的状态概率矩阵.而 S_1 与 R_1 的关系相当于与运算,利用式(8)即可求得输出的最终 P_R .

限于篇幅,只给出上述操作符的运算规则.其余操作符推导过程类似.

3 共有信号的精确处理方法

某些操作符有多个输入信号,若这些输入不是完全独立的,则输出概率需要进行修正.对于简单系统,在输出信号的概率展开式中,直接将共有信号的高次项概率用一次项替代即可.但对于有多个共有信号和多重逻辑门的复杂系统,概率展开式的推导和计算过程将变得很复杂.文献[11]在状态累积概率的基础上提出了一种解决思路,只要对共有信号的状态组合进行多次简单 GO 运算,就可得到输出概率的精确值,但此算法只针对具有两状态值的共有信号.本文在概率矩阵的基础上,对文献[11]的算法加以改进.

假设任意一个系统包含 2 个共有信号 S_1 、 S_2 , 则从系统输入开始,经过共有信号修正(一次项代替高次项)后,输出状态概率矩阵一般可表示为

$$P'_R = A_0 + P'_{S_1} A_1 + P'_{S_2} A_2 + P'_{S_{12}} A_{12} \quad (10)$$

上式可看作多元一次方程组,其中 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_{12} 为与共有信号无关的未知系数矩阵, P'_{S_1} 、 P'_{S_2} 、 $P'_{S_{12}}$ 为独立状态的概率矩阵, $P'_{S_{12}}$ 为 S_1 与 S_2 的独立状态的联合概率矩阵 Φ' 组成的向量,即

$$P'_{S_{12}} = (\Phi'_{00} \quad \cdots \quad \Phi'_{0(N-1)} \quad \cdots \quad \Phi'_{k0} \quad \cdots \quad \Phi'_{k(N-1)} \\ \cdots \quad \Phi'_{(N-1)0} \quad \cdots \quad \Phi'_{(N-1)(N-1)}) \quad (11)$$

因 P'_R 未知,为了消元,需找出 P'_{S_1} 、 P'_{S_2} 、 $P'_{S_{12}}$ 与 P'_R 之间的对应关系.又 $1^k = 1, 0^k = 0 (k = 0, 1, \dots, \infty)$, 可取 $P_{S_1}(i) = 1$ 和 $P_{S_2}(j) = 1$ 的状态组合 $(i, j = 0, 1, \dots, N)$, 并在不考虑共有信号修正的情况下,将每一种组合直接进行 GO 运算,得到 P'_{S_1} 、 P'_{S_2} 、 $P'_{S_{12}}$ 与 P'_R 对应的数据对,代入式(10),求得 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_{12} . 这时方程组中只有 P'_R 未知,将初始正确的 P'_{S_1} 、 P'_{S_2} 、 $P'_{S_{12}}$ 代入式(10),即可得到修正共有信号后的精确输出 P'_R .

若存在 M 个共有信号 S_i , 则输出的独立状态概率矩阵可表示为

$$P'_R = A_0 + \sum_{k_1=1}^M P'_{S_{k_1}} A_{1k_1} + \sum_{k_2=1}^{M-1} \sum_{k_1=k_2+1}^M P'_{S_{k_1 k_2}} A_{k_1 k_2} + \cdots + \\ \sum_{k_l=1}^{M-l+1} \cdots \sum_{k_2=k_3+1}^{M-1} \sum_{k_1=k_2+1}^M P'_{S_{k_1 \dots k_l}} A_{k_1 \dots k_l} + \cdots + \\ P'_{S_{k_1 \dots k_M}} A_{k_1 \dots k_M} \quad (12)$$

其中 $P'_{S_{k_1 \dots k_l}}$ 为 P'_{S_i} 与 $P'_{S_{k_1 \dots k_{l-1}}}$ 的联合概率矩阵行向量组成的行矩阵, 形如式 (11). 式 (12) 是式 (10) 的推广, M 个 N 状态的共有信号有 N^M 个状态组合, 在每一种状态组合下进行直接的 GO 运算, 然后将特定状态组合下的 P'_R 代入式 (12) 求得系数 $A_0, \dots, A_{k_1 \dots k_M}$, 进而得到输出状态概率的精确值.

由以上分析可见, 若共有信号状态个数增加, 只需增加相应的变量和方程, 求解过程依然类似, 所以此方法对共有信号的状态个数是有限制的.

4 算例验证

4.1 概率矩阵算法的一般步骤

图 1 和表 1 分别是某设备驱动系统的 GO 图和状态数据.

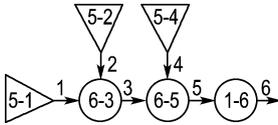


图 1 某设备驱动系统 GO 图

Fig. 1 GO diagram of some device driver system

表 1 某设备驱动系统状态概率

Tab. 1 State probability of some device driver system

编号	类型	状态概率			
		0	1	2	3
1	5	0.95	0	0	0.05
2	5	0	1.00	0	0
3	6	0	0.90	0.10	—
4	5	0	0	1.00	0
5	6	0.05	0.85	0.10	—
6	1	—	0.80	0.20	—

这是一个四状态系统, 应用概率矩阵进行定量计算的步骤如下:

步骤 1 确定各输入及操作符的概率矩阵.

$$P_{R_1} = P_{S_1} = (0.95 \ 0 \ 0 \ 0.05)$$

$$P_{R_2} = P_{S_2} = (0 \ 1.00 \ 0 \ 0)$$

$$P_{C_3} = (0 \ 0.90 \ 0.10)$$

$$P_{R_4} = P_{S_4} = (0 \ 0 \ 1.00 \ 0)$$

$$P_{C_5} = (0.05 \ 0.85 \ 0.10)$$

$$P_{C_6} = (0.80 \ 0.20)$$

步骤 2 沿信号流的方向利用概率矩阵公式求各操作符输出概率矩阵.

单元 3 为有动作信号而导通的元件, 由 2.7,

$$\Phi_T = P_{R_2}^T P_{C_3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.90 & 0.10 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_t = (0 \ 0.90 \ 0 \ 0.10)$$

由式 (8) 得 $P_{R_3} = (0 \ 0.855 \ 0 \ 0.145)$. 单元 5 类型同单元 3, 同样 $P_{R_5} = (0 \ 0.042 \ 75 \ 0.726 \ 75 \ 0.230 \ 50)$. 单元 6 为两状态单元,

$$\Phi'_6 = P_{R_5}^T P'_{C_6} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.034 \ 2 \\ 0.581 \ 4 \end{pmatrix}, \text{ 由式 (5) 得 } P_{R_6} =$$

$(0 \ 0.034 \ 2 \ 0.581 \ 4 \ 0.384 \ 4)$, 这也即为最终输出的各状态概率值.

步骤 3 共有信号的修正.

若系统不含共有信号, 则步骤 2 的输出即为最终输出, 否则需对共有信号进行修正.

4.2 共有信号的修正

图 2 为某供电系统的 GO 图, 各单元均无提前状态, 状态概率数据为

$$P_{S_1} = P_{C_9} = P_{C_{10}} = (0.995 \ 0.005)$$

$$P_{C_2} = P_{C_3} = P_{R_4} = P_{R_5} = P_{C_7} = P_{C_8} = (0.99 \ 0.01)$$

$$P_{S_6} = P_{C_{13}} = P_{C_{14}} = (0.999 \ 0.001)$$

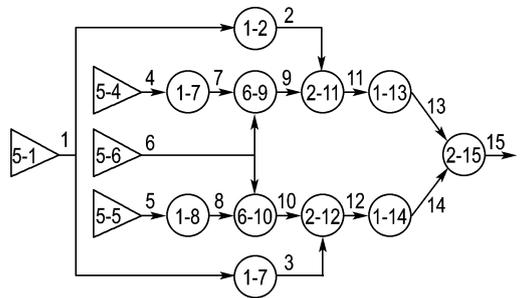


图 2 某供电系统 GO 图

Fig. 2 GO diagram of the power supply system

按 4.1 中步骤, 不考虑共有信号求得最终输出 $P_{R_{15}} = (0.999 \ 998 \ 1 \ 0.000 \ 001 \ 9)$. 但由图 2 可见, 信号流 1 和 6 同时输入到多个操作符, 属于

共有信号,导致信号流 13、14 非独立,在计算或门 15 时就需进行修正。

假设信号流 1 和 6 相互独立,考虑到共有信号的影响,由式(10)最终输出状态概率可表示为

$$P'_{R_{15}} = A_0 + P'_{S_1} A_1 + P'_{S_6} A_2 + P'_{S_{16}} A_{12} \quad (13)$$

$M = 2, N = 2$, 共有信号有 $2^2 = 4$ 个状态组合,各状态组合如表 2 所示。

表 2 共有信号的状态组合

Tab.2 State combinations of shared signal

组合	P_{S_1}	P_{S_6}
1	(0 1)	(0 1)
2	(0 1)	(1 0)
3	(1 0)	(0 1)
4	(1 0)	(1 0)

按 4.1 步骤 1 和 2,重新计算系统的输出成功概率,作为式(13)的常数项,进而求得 $A_0 = 0, A_1 = 0.999\ 879\ 2, A_2 = 0.999\ 335\ 6, A_{12} = -0.999\ 216\ 4$, 代入式(13),得到输出的成功概率精确值为 $P'_{R_{15}} = 0.999\ 879\ 2 \times 0.995 + 0.999\ 335\ 6 \times 0.999 - 0.995 \times 0.999 \approx 0.999\ 990\ 0$,此结果与文献[11]分析的结果一致,证明此方法有效。

5 结 语

GO 法由于其自身的特点和优势,近年来逐步受到重视和发展。本文在状态组合和概率公式两种经典算法的基础上,提出了一种更为直观简便的 GO 法定量分析方法——概率矩阵算法。引入了状态概率矩阵和联合状态概率矩阵的概念,通过矩阵相乘和矩阵元素归类实现可靠性的定量分析。此算法通过矩阵相乘列出所有状态组合,不仅便于分析操作符状态和信号流状态之间的组合关系,而且对于多输入多状态的复杂系统,在精简计算复杂度上具有更大的优势。

本文还对共有信号的精确处理提出了新的算式,使应用范围扩展到多状态共有信号,最后通过包含二重或门操作符的供电系统证明了此修正方法的有效性。

参 考 文 献:

[1] Majdara A, Wakabayashi T. Computerized fault

tree construction for improved reliability analysis [J]. **WIT Transactions on Information and Communication Technologies**, 2010, **43**(1): 149-160.

[2] 贾立德,王金安,杨忠堂,等. 基于故障树分析的飞船检漏间泄漏分析与建模[J]. 宇航学报, 2012, **33**(6):844-848.

JIA Li-de, WANG Jin-an, YANG Zhong-tang, *et al.* Analysis and modeling of leak factors of spaceship leak-testing room based on FTA method [J]. **Journal of Astronautics**, 2012, **33**(6):844-848. (in Chinese)

[3] 周 真,马德仲,于晓洋,等. 用于产品可靠性分析的模糊 FMECA 方法[J]. 电机与控制学报, 2010, **14**(10):89-93.

ZHOU Zhen, MA De-zhong, YU Xiao-yang, *et al.* Application of fuzzy FMECA in analysis of product reliability [J]. **Electric Machines and Control**, 2010, **14**(10):89-93. (in Chinese)

[4] 朱正福,李长福,何恩山,等. 基于马尔可夫链的动态故障树分析方法[J]. 兵工学报, 2008, **29**(9): 1104-1107.

ZHU Zheng-fu, LI Chang-fu, HE En-shan, *et al.* The dynamic fault tree analysis method based on Markov chain [J]. **Acta Armamentarii**, 2008, **29**(9):1104-1107. (in Chinese)

[5] Chun B B. **GO Methodology: Overview Manual** [M]. Washington D C: Electric Power Research Institute, 1983.

[6] 沈祖培,黄祥瑞. GO 法原理及应用——一种系统可靠性分析方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

SHEN Zu-pei, HUANG Xiang-rui. **Principle and Application of GO Methodology: A System Reliability Analysis Methodology** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

[7] 金 霞,段富海. 基于 GO 法的电动静液作动器可靠性分析[J]. 大连理工大学学报, 2013, **53**(6): 846-850.

JIN Xia, DUAN Fu-hai. Reliability analysis of electro hydrostatic actuator based on GO methodology [J]. **Journal of Dalian University of**

- Technology**, 2013, **53**(6):846-850. (in Chinese)
- [8] 郭昱霄. 基于 GO 法的复杂配电网可靠性评估及其软件系统研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
GUO Yu-xiao. Reliability and software study of electric distribution system based on GO method [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [9] 李 哲, 鲁宗相, 刘井泉. 基于 GO 法的核电厂电气主接线系统可靠性分析[J]. 核动力工程, 2010, **31**(3):69-73.
LI Zhe, LU Zong-xiang, LIU Jing-quan. Reliability analysis of nuclear power plant bus systems arrangement based on GO methodology [J]. **Nuclear Power Engineering**, 2010, **31**(3): 69-73. (in Chinese)
- [10] DU Hui-bin, HU Jia-peng, DU Yu-long. *et al.* Stated analysis technique of GO methodology for reliability of fire protection systems [J]. **Advanced Materials Research**, 2011, **183-185**:1383-1388.
- [11] 沈祖培, 郑 涛. 复杂系统可靠性的 GO 法精确算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, **42**(5): 569-572.
SHEN Zu-pei, ZHENG Tao. Exact algorithm for complex system reliability using the GO methodology [J]. **Journal of Tsinghua University: Science and Technology**, 2002, **42**(5):569-572. (in Chinese)

State probability matrix and its application to GO methodology

JIANG Xiu-hong^{*1,2}, DUAN Fu-hai¹, JIN Xia¹, WEI Xue-dong³

- (1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. College of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
3. Key Laboratory of Aeronautic Science and Technology on Inertial Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: State combination and probability formula algorithms are the two commonly used quantification analysis algorithms of GO methodology, but their calculations are too complicated for complex systems with multi-input and multi-state signals. Combining the two algorithms, a simplified GO quantification probability matrix algorithm is presented. Firstly, concept of state probability matrix is introduced and matrix-based quantitative formulas for common operator are derived. Then, based on revising of shared signals, a new equation is presented suitable for any multi-state shared signal. Finally, the results of two examples show that the algorithm is effective. The new algorithm is not only suitable to analyze the state combination relations between operator and signal flow, but also has the advantages of intuitive formula, simple calculation, easy programming, especially a greater advantage in reliability calculation of multi-input multi-state system.

Key words: GO methodology; reliability; probability matrix; shared signal