

## 矿冶技术

# 矿井防尘供水管网系统的 GO 法可靠性分析

桑海涛 孟稚松<sup>1</sup> 周 真<sup>2</sup>

(黑龙江科技学院计算机与信息工程学院,哈尔滨 150027;黑龙江农垦管理干部学院<sup>1</sup>,哈尔滨 150090;  
哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院<sup>2</sup>,哈尔滨 150080)

**摘要** 为保障煤矿生产的安全运行,采用 GO 法分析矿井防尘供水管网的可靠性。以双鸭山某矿防尘系统为例,根据其工作原理和结构建立 GO 图,利用概率公式算法对防尘供水管网系统进行定量和定性的 GO 运算,获得了系统的状态概率和最小割集。结果表明,比故障树法对同一系统的分析结果更精确。GO 方法能够反映系统原貌,非常适合模拟有序列过程的状态系统。对于较复杂的系统,GO 法则显得比较简单,优势更加明显。

**关键词** 供水管网 矿井防尘 GO 法 可靠性

中图法分类号 TD783; 文献标志码 A

矿井防尘供水管网(简称防尘管网)负责向井下各工作地点输送清水,用以满足井下各采掘工作面及其他工作地点的生产和防尘用水。防尘管网作为防治井下尘害的主要设施,其可靠性对煤矿的安全生产运行起着至关重要的作用。因此,开展防尘管网的可靠性研究具有重要的意义。

目前,管网系统可靠性分析的方法主要有蒙特卡罗法<sup>[1]</sup>、故障树法<sup>[2]</sup>和状态空间法<sup>[3]</sup>等。而 GO 法(GO methodology)<sup>[4]</sup>是从核物理领域引入的新的可靠性分析方法,产生于 20 世纪 60 年代中期,由美国 Kaman 科学公司提出,用以分析武器和导弹系统的安全性和可靠性。Matsuoka 等人<sup>[5]</sup>在此基础上发展了 GO-FLOW 方法,用于处理系统共因失效、故障概率的不确定性和动态可靠性等复杂可靠性问题,并开发了相应的通用软件,成为核物理工业概率风险分析的强有力工具。因其技术复杂且保密,GO 法的普及和应用受到一定的限制。近年来,GO 法的功能和算法不断发展和完善,应用中也表现出

很多优于其他方法的特点,因而越来越受到人们的重视。目前 GO 法在供水系统的应用尚不多见,现将该方法用于井下防尘供水管网系统,以期为 GO 法在类似系统的应用开辟新的路径。

## 1 GO 法基本原理

GO 法是一种以成功为导向的系统可靠性分析方法。目前,国内外对 GO 法的理论研究和应用均取得了比较令人满意的成果<sup>[6-8]</sup>。与其他图形化的方法相似,GO 法的基本思想是将系统图或工程图直接翻译成相应的模型,该模型称为 GO 图。GO 图用操作码代表具体的部件或逻辑关系,操作码的属性有类型、数据和运算规则。类型是操作码的主要属性,反映操作码所代表的单元功能和特征;用信号流连接操作码,代表具体的物流或逻辑上的运输通道,信号流的属性是状态值和状态概率。GO 法定义了 17 种标准操作码,如图 1 所示。各操作码的概念及运算规则可参见文献[4]。

## 2 防尘管网系统

2010 年 7 月 12 日收到,7 月 26 日修改 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11553088)资助  
第一作者简介:桑海涛(1979—),男,黑龙江省哈尔滨人,讲师,硕士,研究方向:传感器测量与可靠性技术。

图 2 是双鸭山某矿三区防尘系统,井下防尘与城市给水管网系统相比,所处环境更为复杂,经常受各种内外因素影响。例如随着采掘工作面的延

伸,并下防尘管网多数呈枝状分布,每次改变,都将增加泵、阀门等硬件设施。

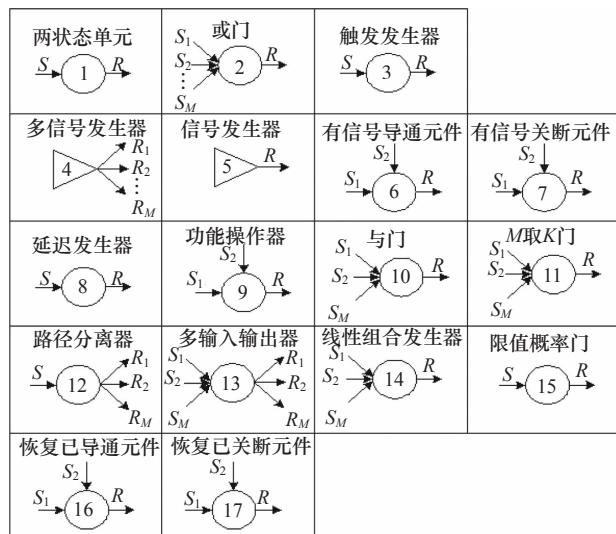


图 1 GO 标准操作码类型

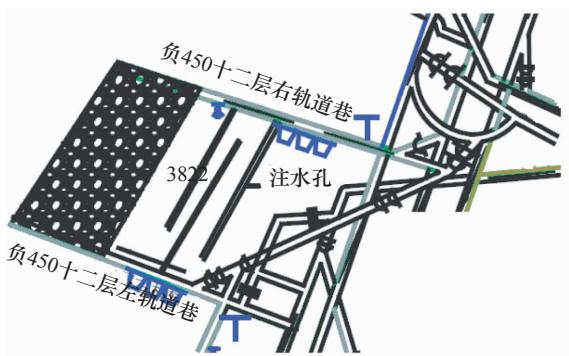


图 2 三区防尘系统

图 3 是三区 3822 段支路的工作示意。3822 段支路由 1 个水源和 2 条水管支路组成,每条水管支路各有 1 台电动泵、1 个逆止阀和两个并联的常闭控制阀。供水管网系统正常工作的条件是 4 个供水出口中有 2 个以上出口正常供水。由此建立 GO 图:以两状态单元(类型 1 操作码)代表逆止阀;用单信号发生器(类型 5 操作码)代表水源、电源和驱动信号;以有信号导通元件(类型 6 操作码)代表电动泵和控制阀;用 4 取 2 门(类型 11 操作码)表示 4 个控制阀的逻辑关系。3822 段支路管网的 GO 图如图 4 所示。

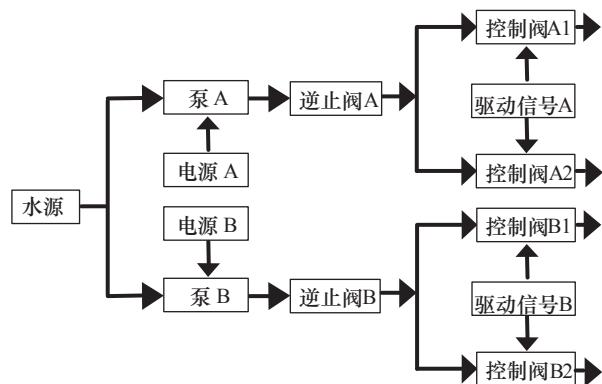


图 3 3822 段支路工作示意

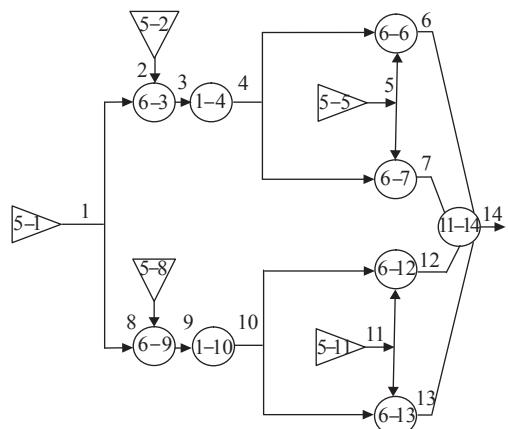


图 4 3822 段支路供水系统 GO 图

给定各单元的失效率如表 1 所示。其中,部分来自 ML—HDBK—217F,是根据元器件的工作环境、工作原理和内部结构选择的处于通用工作环境下的可靠性参数;其余是参考原理相近的元器件的可靠性参数。

表 1 防尘管网系统操作码数据

操作码编号	类型	单元名称	失效率
1	5	水 源	$1.500 \times 10^{-6}$
2,8	5	电 源	$1.600 \times 10^{-6}$
3,9	6	电动泵	$3.260 \times 10^{-7}$
4,10	1	逆止阀	$5.000 \times 10^{-3}$
5,11	5	驱动信号	$5.000 \times 10^{-2}$
6,7,12,13	6	控制阀	$3.900 \times 10^{-6}$
14	11	4 取 2 门	

### 3 可靠性分析

GO 图的操作码代表系统的单元,信号流代表单元的输入、输出以及单元之间的关联。以 GO 图为基础,系统可靠性指标的定量和定性分析采用以信号流状态累积概率定义为基础的概率公式算法。

#### 3.1 定量 GO 运算

采用概率公式算法<sup>[9]</sup>,沿信号流方向,由操作码概率计算直接定量计算系统可用率。设  $A_{Si}$  表示编号为  $i$  的信号流的成功状态累积概率,  $P_{Cj}$  表示编号为  $j$  的操作码的成功概率,所有信号流的状态累积概率为

$$A_{S1} = P_{C1}, A_{S2} = P_{C2}, A_{S3} = A_{S1}A_{S2}P_{C3},$$

$$A_{S4} = A_{S3}P_{C4}, A_{S5} = P_{C5}, A_{S6} = A_{S4}A_{S5}P_{C6},$$

$$A_{S7} = A_{S4}A_{S5}P_{C7}, A_{S8} = P_{C8}, A_{S9} = A_{S1}A_{S8}P_{C9},$$

$$A_{S10} = A_{S9}P_{C10}, A_{S11} = P_{C11}, A_{S12} = A_{S10}A_{S11}P_{C12},$$

$$A_{S13} = A_{S10}A_{S11}P_{C13},$$

$$A_{S14} = U_{4-2} = \sum_{j_1=1}^M \sum_{j_2=j_1+1}^M [1 - A_{Sj_1}] \times [1 - A_{Sj_2}] \prod_{j=1, j \neq j_1, j \neq j_2}^M A_{Sj}.$$

计算 4 取 2 门操作码的状态概率需要考虑输入信号的共有信号,公式展开式时,若存在信号流 6、7 的状态累积概率乘积,则应除以信号流 4、5 的成功概率;若存在信号流 6、7 和 12 的状态累积概率乘积,则应将信号流 6、7 的联合概率乘以信号流 12 的成功概率,然后除以共有信号 1 的成功概率。由此,代入表 1 数据,得到系统的成功状态概率为 0.990 881。

#### 3.2 定性 GO 运算

定量计算方法可以直接、方便地证明定性分析系统。假设系统 GO 图除逻辑操作码外,还有  $M$  个操作码,分别代表系统的功能部件。假设  $M$  个操作码的某个操作码处于故障状态,其成功概率为零,其他操作码概率不变,即可直接计算系统的成功概率。如果系统的成功概率为零,则该操作码的故障状态即为系统的一个一阶割集。 $M$  个操作码依此类推,即可得到系统的所有一阶割集。从一阶割集外的  $M$  个操作码中取两个操作码,并假设处于故障

状态,成功概率为零,其余  $M-2$  个操作码的状态概率不变,即可直接计算系统的成功概率。如果系统的成功概率为零,则这两个操作码的故障状态组合为系统的一个二阶割集。对一阶割集操作码以外的所有操作码两两组合,依次计算即可得到所有二阶割集。

该方法得到系统的最小割集共有 37 个,其中一阶 1 个,二阶 32 个,三阶 4 个,由于篇幅有限,选取有代表性的 16 组数据,如表 2 所示。由于各割集的故障概率  $P$  都很小,可以用所有割集故障概率的总和近似为系统不能正常工作的概率,结果是 0.009 626,这是系统故障概率的近似值。系统故障概率应为所有最小割集的并集概率,由于最小割集不是完全独立的,用布尔代数计算其并集的概率是极其复杂的。通常最小割集发生概率较小,对计算结果精度要求不高的情况,近似假设最小割集相互独立,用发生概率的总和作为系统故障概率的上限是可以接受的。

表 2 防尘管网系统最小割集

阶数	操作码编号	$P/10^{-6}$	阶数	操作码编号	$P/10^{-6}$
1	1	1 000	2	4,8	50
2	2,8	100	2	4,12	50
2	2,9	100	2	5,9	500
2	2,10	50	2	6,10	50
2	2,11	500	2	7,11	500
2	3,8	100	3	6,7,13	1
2	3,9	100	3	6,12,13	1
2	3,10	50	3	7,12,13	1

### 4 故障树法结果验证及两种方法比较

故障树法作为一种较为成熟的可靠性分析方法,其分析结果是可信的,笔者将基于故障树法对同一系统进行分析以验证 GO 法的准确性。选取系统失效的顶事件为不能正常供水,沿着顶事件追踪导致事件发生的直接原因,画出各终端事件与顶事件之间的关系图。通过分析,可以建立防尘管网系统的故障树,如图 5 所示。

本矿井防尘管网系统有 13 个基本故障事件和 7 个逻辑门,表 3 和表 4 给出它们的数据。应用故障树系统分析软件(CAFTA)对防尘管网系统进行定性分析,得到对应表 2 的故障最小割集如表 5 所示,这与利用 GO 法所得的结果一致,只是次序有差别。

本矿井防尘管网系统故障树定量计算,采用最小割集独立近似假设,进行顶事件故障概率计算结果为 0.009 588,成功概率为 0.990 412。结果与 GO 法定量分析得到的精确值 0.990 881 要小一些,这是由于最小割集不是完全独立的计算偏差。

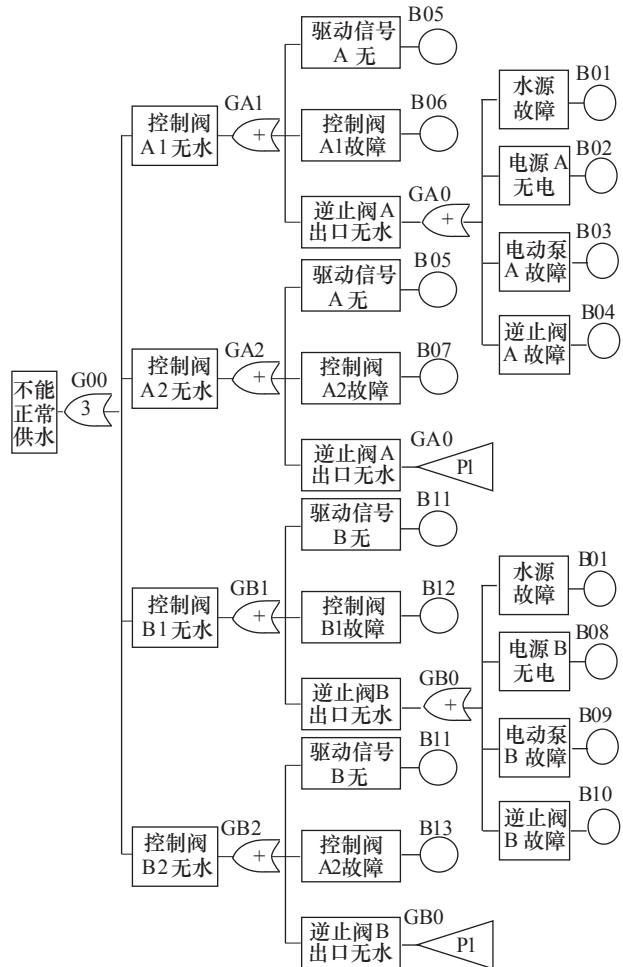


图 5 防尘管网故障树图

表 3 防尘管网故障树基本事件数据

代码	故障模式	故障概率	代码	故障模式	故障概率
B01	水源故障	0.001	B07	控制阀 A2 故障	0.01
B02	电源 A 无电	0.01	B08	电源 B 无电	0.01
B03	电动泵 A 故障	0.01	B09	电动泵 B 故障	0.01
B04	逆止阀 A 故障	0.005	B10	逆止阀 B 故障	0.005
B05	驱动信号 A 无	0.05	B11	驱动信号 B 无	0.05
B06	控制阀 A1 故障	0.01	B12	控制阀 B1 故障	0.01
B07	控制阀 B2 故障	0.01			

表 4 防尘管网故障树逻辑门数据

代码	故障模式	代码	故障模式
G00	不能正常供水	GB1	控制阀 B1 出口无水
GA1	控制阀 A1 出口无水	GB2	控制阀 B2 出口无水
GA2	控制阀 A2 出口无水	GA0	逆止阀 A 出口无水
GB0	逆止阀 B 出口无水		

无论是定量分析还是定性分析,基于 GO 法和故障树法所得结果都是基本一致的,GO 法能够反映系统原貌,几乎一一对应,其操作码和信号流可以表示系统的多个状态,非常适合模拟有序列过程的状态系统。

表 5 防尘管网故障最小割集表

割集阶数	割集号	代码	割集阶数	割集号	代码
1	1	B01	2	14	B03 B10
2	3	B05 B09	2	17	B04 B08
2	7	B02 B08	2	21	B04 B12
2	8	B02 B09	2	29	B06 B10
2	9	B02 B10	2	30	B07 B11
2	10	B02 B11	3	35	B06 B07 B13
2	12	B03 B08	3	36	B06 B12 B13
2	13	B03 B09	3	37	B07 B12 B13

## 5 结束语

利用 GO 法分析了典型矿井防尘管网系统,依据双鸭山某矿三区现场防尘系统图建立 GO 图,进行定性和定量分析运算,得到了防尘管网的系统状

态概率和系统的最小割集,进而与故障树方法进行比较,用以分析管网系统发生故障的原因。分析表明,GO法更适用于矿井防尘供水管网系统的可靠性分析。后续的研究将更深入分析GO法在其他管网系统可靠性,为管网系统可靠性分析提供新的研究方向。

### 参 考 文 献

- 1 章征宝,余云进,徐得潜,等. 基于蒙特卡罗法的城市给水管网可靠性分析. *给水排水*,2007;33(7):106—109
- 2 侯晓东,蒋仲安. 矿井防尘供水管网失效模糊故障树分析. *金属矿山*,2008;(6):112—115
- 3 刘丽霞. 城市给水管网系统的可靠性分析与研究. 重庆:重庆大

学学位论文,2007

- 4 沈祖培,黄祥瑞. GO法原理及应用. 北京:清华大学出版社,2004
- 5 王超,张雪松,徐政,等. 基于GO法的特高压直流输电可靠性研究. *浙江大学学报:工学版*,2009,43(1):159—165
- 6 王智,包成玉. YAG激光器系统可靠性分析中GO法的应用. *清华大学学报:自然科学版*,2007;47(3):377—380
- 7 高振清,孙厚芳,吴琼. 基于GO法的制造系统可靠性分析. *机械科学与技术*,2007;26(3):320—323
- 8 徐荆州,李扬,陈霄. 基于GO法的配电网可靠性评价. *电力系统及其自动化学报*,2006;18(5):66—69
- 9 Shen Zupei, Gao Jia, Huang Xiangrui. A new quantification algorithm for the GO methodology. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000;67 (3):241—247

## Reliability Analysis of Water Supply Network System for Mine Dust-proofing in GO Methodology

SANG Hai-tao, MENG Zhi-song<sup>1</sup>, ZHOU Zhen<sup>2</sup>

(College of Computer & Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science & Technology, Harbin 150027, P. R. China;  
Heilongjiang Agricultural Management College<sup>1</sup>, Harbin 150090, P. R. China;  
Institute of Measurement & Communication, Harbin University of Science and Technology<sup>2</sup>, Harbin 150080, P. R. China)

**[Abstract]** The reliability of water supply network for mine dust-proofing by using GO method is analyzed in order to ensure the safe operation of coal mine. Based on mine dust-proofing system in Shuangyashan city, the production of GO chart is introduced on the working principles and structure of mine dust-proof system and the quantitative and qualitative analysis of mine dust-proof network system by using the probability algorithm to obtain the systematic state probability and minimal cut sets. The results show that GO method is more precise than the fault tree analysis method is used to analyze the same system. GO method, capable of reflecting the original condition of system, lends itself better to simulating the system in which the sequential process exists. When used to more complex systems, GO method shows more simplicity and advantages.

**[Key words]** water supply network      mine dust-proofing      GO methodology      reliability