

文章编号:1000-582X(2010)12-040-07

## GO 法在供应链可靠性诊断中的应用

张根保<sup>1</sup>, 陈国华<sup>1,2</sup>, 庞继红<sup>1</sup>, 任显林<sup>1</sup>, 张淑慧<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044; 2. 襄樊学院 机械与汽车工程学院, 湖北 襄樊, 414000)

**摘要:**为研究供应链可靠性的精确计算与失效模式诊断等问题, 提出将一种新的方法—GO 法引入到供应链可靠性诊断中。通过对导致供应链系统成功的各类重要因素的详细分析, 以三级供应链为研究对象, 建立了供应链可靠性诊断的 GO 模型。该模型具有通用性, 能对供应链可靠性进行精确计算, 并能对供应链系统进行失效模式的诊断及其重要度的计算, 为供应链系统改善与优化提供了思路。实例验证了方法的可行性与有效性。

**关键词:**供应链; 可靠性; GO 法; 失效模式; 重要度

**中图分类号:** N945. 12; N945. 17

**文献标志码:** A

### Application of GO methodology in reliability analysis of supply chain

ZHANG Gen-bao<sup>1</sup>, CHEN Guo-hua<sup>1,2</sup>, PANG Ji-hong<sup>1</sup>, REN Xian-lin<sup>1</sup>, ZHANG Shu-hui<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Institute of Mechanical & Auto Engineering, Xiangfan University, Xiangfan 441000, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** To study the accurate calculation and fault mode diagnosis of supply chain, a new method-GO methodology is applied in reliability analysis of supply chain. Through analyzing every important factor leading to success of supply chain system and taking three-tier supply chain as the object, GO model of reliability analysis of supply chain is developed. The model can not only calculate reliability of supply chain system in detail, but also diagnose its failure mode and calculate its importance, which provides the way for improving and optimizing supply chain system. The example is presented to prove the method's feasibility and validity.

**Key words:** supply chain; reliability; GO methodology; failure mode; importance

供应链是由供应商、制造商、分销商(或配送中心)、销售商及用户等实体组成的供需网络, 是跨越企业中多个职能部门活动的集合, 它包括从订单的发送和获取、原材料的获得、产品的制造, 到产品分发发放给销售商及最终用户整个的过程<sup>[1]</sup>。供应链系统是 1 个复杂系统<sup>[2-3]</sup>, 同时供应链系统还是 1 个不确定性系统<sup>[4-5]</sup>。诚然, 供应链的不确定性加剧了

供应链的复杂性。正是由于供应链的复杂性与不确定性特征, 供应链可靠性问题的研究成了近年来研究的热点。从已有的文献资料来看, 我国学者对供应链可靠性的研究主要集中在 3 个方面: ①从定性的角度阐述供应链可靠性的概念<sup>[6-8]</sup>, 虽然他们对供应链概念的定义均只集中在供应链系统中某一方面, 如产品质量的可靠性、交付时间的可靠性以及库

收稿日期: 2010-06-23

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2009AA04Z119); 国家自然科学基金资助项目(50835008); 数字制造装备与技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金资助; 湖北省教育厅重点资助项目(D20092506)

作者简介: 张根保(1953-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代质量工程、先进制造技术、可重构企业信息化等, (E-mail) gen. bao. zhang@263. com。

存可靠性等,但笔者认为,供应链的可靠性实质是满足用户要求的可靠性;②供应链的可靠性度量指标<sup>[7,9]</sup>,但他们都是从不同角度进行的度量,并不能完全反映供应链系统可靠性的整体性能;③供应链的可靠性评价<sup>[10-13]</sup>,为了进行供应链系统的定量化评价,他们往往通过一定的假设,并借助各种数学、计算机等工具,建立非常复杂的模型,但由于模型的复杂性,他们中很多研究成果却难以得到推广,应用起来也相当困难。鉴于此,笔者提出将 GO 法引入到供应链的可靠性分析中。

GO 法是一种以成功为导向的系统概率分析技术,它的基本思想是把系统原理图、流程图或工程图直接按照一定规则翻译成 GO 图(或 GO 模型),利用 GO 图(或 GO 模型)就可以进行系统可靠性分析的各种功能。目前,GO 法主要应用在有关机器设备运转、现代生产运行的实际系统中<sup>[14-16]</sup>,而在供应链这一虚拟系统中的应用就很少。尽管文献<sup>[13]</sup>将 GO 法应用在了供应链的可靠性分析中,但由于文中将供应商、制造商与分销商等分别当作 1 个部件来处理,并从可维修系统的角度假定他们服从指数分布规律,显然供应商、制造商与分销商等都是 1 个非常复杂的子系统,有许多影响因素,不能简单的同等为 1 个部件来处理,因此文献<sup>[13]</sup>所建立起来的 GO 模型只存在理论上的意义,难以在实际中得到应用。

笔者通过对供应链中的供应商、制造商与分销商等子系统进行深入的分析,分析导致它们成功与否的若干重要因素,运用 GO 法建立供应链可靠性诊断的 GO 模型,为分析供应链的可靠性提供了一种新的方法。

## 1 GO 法在供应链系统可靠性诊断中的应用

### 1.1 基本假定

为研究问题的方便,须对供应链的结构模型进行假定。对于供应链的结构,不同的文献提出了不同的模型。文献<sup>[17]</sup>提出网状模型,认为供应链是 1 个由计划、协调、原材料的控制及加工直至最终产品相联系的物流网络结构;文献<sup>[8]</sup>提出供应链的结构有链状结构和网状结构之分;文献<sup>[2]</sup>提出以核心企业为中心的结构模型。笔者认为,这几种结构模型是一致的,仅仅是从不同的角度,或者是从研究问题的不同方面提出来的。在此,在不失一般性的前提下,为简化问题以及研究问题的方便,笔者以供应商、制造商(核心企业)和分销商组成的三级供应链

结构(其中供应商  $m$  个,制造商 1 个,分销商  $n$  个,如图 1)为研究对象,来探讨相关问题。

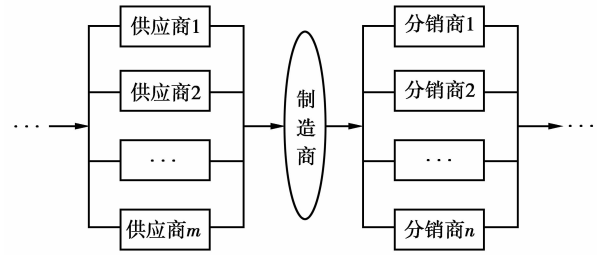


图 1 核心企业型的供应链结构

### 1.2 供应链诊断的系统分析

供应链从系统运营的角度来看,有供应商分系统、制造商分系统、分销商分系统,因此,要保证供应链的正常运营,各分系统必须正常运营。文献<sup>[18]</sup>指出导致供应链失效的 14 类因素,最根本的只有 6 类。在其基础上,总结出供应商、制造商和分销商成功运作的重要因素,分类如下:①对于供应商的成功运营因素有 8 类:生产设备不失效、生产技术水平达到要求、生产计划合理、运输设备完善、运输计划合理、原材料质量及性能有保证、信息沟通畅通、无人人为过失;②对于制造商成功运营的因素也有 8 类:生产设备不失效、生产技术水平达到要求、生产计划合理、运输设备完善、运输计划合理、原材料质量及性能有保证、信息沟通畅通、无人人为过失;③对于分销商成功运营的因素有 6 类:市场预测准确、销售计划合理、运输计划合理、运输设备完善、市场信息反应灵敏、无人人为过失。

### 1.3 供应链系统 GO 图的建立

根据供应链的结构特征以及供应链的系统分析,可以建立供应链系统 GO 图,如图 2。图中只有 3 种类型的操作符:第 5 类(信号发生器)、第 2 类(或门)以及第 10 类(与门),且该图中输入操作符全为功能操作符,中间操作符全为逻辑操作符,这些特征为实现计算机自动化计算提供了可能。

图 2 的相关说明:为了具有 GO 图的形象性及通用性特征,输入操作符编号按照供应商、制造商和分销商用具体字符表示。输入操作符中: $g_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, 8$ )表示第  $i$  个供应商的第  $j$  类导致系统成功重要因素的代号; $z_r$  ( $r=1, 2, \dots, 8$ )表示制造商的第  $r$  类导致系统成功重要因素的代号; $f_{st}$  ( $s=1, 2, \dots, n; t=1, 2, \dots, 8$ )表示第  $s$  个分销商第  $t$  类导致系统成功重要因素的代号。信号流中: $g_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, 8$ )、 $z_r$  ( $r=1, 2, \dots, 8$ )与  $f_{st}$  ( $s=1, 2, \dots, n; t=1, 2, \dots, 8$ )分别表示

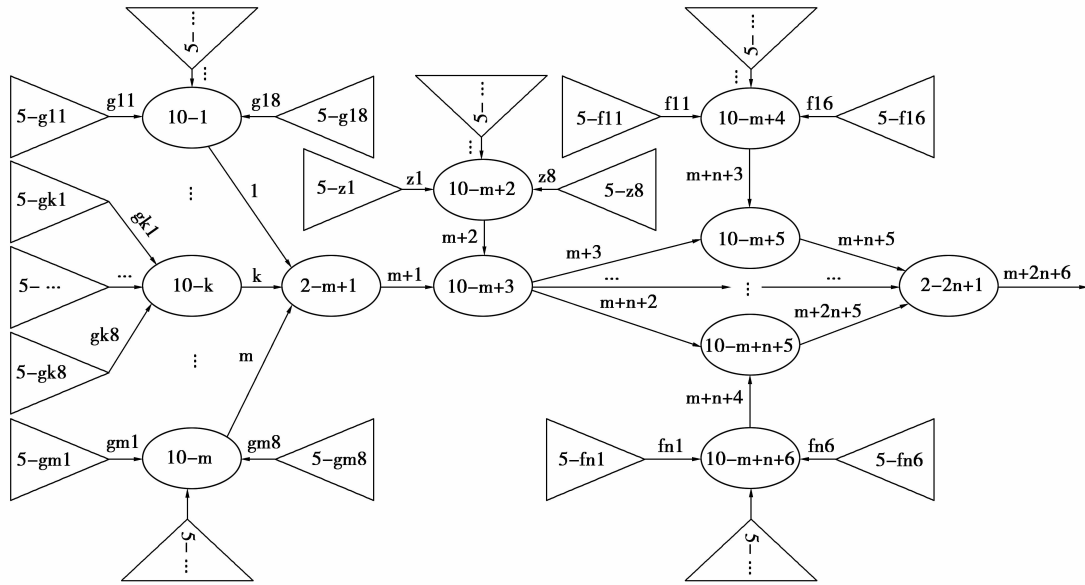


图 2 供应链系统 GO 图

它们信号流的编号。当供应商 1 中的各重要因素全部成功,才会有信号流的输出,因此信号流“ $g_{11}$ ”、“ $g_{12}$ ”...“ $g_{18}$ ”用第 10 类“与门”连接;而“供应商 1”、“供应商 2”...“供应商  $m$ ”中只要有 1 个成功,就有信号流的输出,因此它们用第 2 类“或门”连接。图中其它操作符与连接符的表达方法完全类似,可以采取类似方法推导。

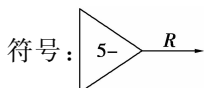
信号流中除了输入操作符发出的信号流按照各自具有象形符号意义的字符表示外,其它信号流均按照数字顺序从小到大排列。

#### 1.4 基于 GO 法供应链系统可靠性分析

1) 供应链系统可靠度的计算。供应链系统可靠性的计算主要是依据 GO 图的运算规则来确定,从 GO 图的输入操作符的输出信号开始,根据下个操作符的运算规则进行运算,得到其输出信号的计算结果,按照信号流序列逐个操作符进行运算直到系统的 1 组输出信号,最后的输出信号即代表了系统的可靠性值。

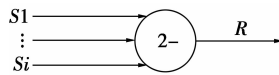
供应链系统完全是 1 个两状态系统,输入操作符只有成功和失效 2 个状态,由于供应链系统 GO 图(如图 2)中间操作符全为逻辑操作符,因此进行定量计算非常方便。设输入操作符的成功状态为 1,失效状态为 2,因此信号流也只有成功状态 1 和失效状态 2。涉及到供应链系统 GO 图的 3 种类型操作运算符的运算规则为

①第 5 类(信号发生器)



设操作符的成功概率为  $P(1)$ ,失效状态概率为  $P(2)$ ,则输出信号  $R$  的概率即与操作符成功与失效状态概率相同。如图 2 中,输出信号  $g_{11}$  的成功概率为输入操作符“ $5-g_{11}$ ”的成功概率相同,失效状态概率也与之对应。

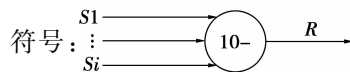
②第 2 类(或门)



表示的意义是输入信号中只要有 1 个成功,就会有输出信号。

运算规则为:输出信号的成功概率为  $P(R=1) = 1 - P(s_1=2) \times P(\dots) \times P(s_i=2)$ ,失效概率为:  $P(R=2) = P(s_1=2) \times P(\dots) \times P(s_i=2)$ 。

③第 10 类(与门)



表示的意义所有输入信号成功,才会有输出信号。运算规则为:输出信号的成功概率为  $P(R=1) = P(s_1=1) \times P(\dots) \times P(s_i=1)$ ,失效概率为  $P(R=2) = 1 - P(s_1=1) \times P(\dots) \times P(s_i=1)$ 。

通过以上运算规则,就可以很方便的计算最终输出信号的成功与失效的概率,即供应链系统的可靠性。

2) 供应链系统失效模式的确定及其重要程度的计算。供应链系统失效模式的确定就是确定供应链系统中最小割集。GO 图确定最小割集的方法是:求一阶割集时,只要假设  $N$  个功能操作符中某个操作符为失效状态,其它操作符无论何种状态,计算系

统成功概率,若为 0,则该操作符的失效状态即为系统的 1 个一阶割集,依次进行就可以求得所有一阶割集;求二阶割集时,在一阶割集以外取 2 个操作符号,并假设为失效状态,其它功能操作符无论何状态,计算系统概率,若为 0,则该两个操作符为二阶割集,依次可以求得所有二阶割集。如此类推,就可以求得系统的各阶割集,如此求得的各阶割集即为系统的最小割集。

由供应链的结构以及供应链系统 GO 图可知,供应链系统中失效模式只有一阶、 $m$  阶和  $n$  阶三种(当  $m=n$  时只有 2 种)最小割集。一阶割集主要是由核心企业中的重要因素来确定, $m$  阶割集是由  $m$  个供应商中每个供应商的 1 个重要因素所组成的集合, $n$  阶割集是由  $n$  个分销商中每个分销商的 1 个重要因素所组成的集合。

最小割集中操作符失效状态的组合代表系统功能子系统失效事件的组合,这些子系统失效概率的乘积代表了最小割集的发生概率。最小割集的发生概率用于评价最小割集的重要度,进行系统的

改善。

## 2 实例分析

### 2.1 基本情况

某一核心型的供应链由 3 个零部件供应商(用  $g_1, g_2$  和  $g_3$  表示)、1 个制造商(用  $z$  表示)和 2 个分销商(用  $f_1$  和  $f_2$  表示)组成,各底事件是相互独立的,同时根据 07 年 6 月至 9 月该供应链运行 500 次过程中的统计资料(见表 1)分析可知: $g_1$  出现的失效因素有  $\{g_{11}, g_{13}, g_{14}, g_{16}\}$ ,出现的概率为  $\{0.390, 0.080, 0.120, 0.150\}$ (即概率度,计算方法为底事件发生的失效次数与供应链运营次数之比,以下同); $g_2$  出现的失效因素有  $\{g_{24}, g_{26}, g_{28}\}$ ,概率为  $\{0.040, 0.180, 0.100\}$ , $g_3$  出现的失效因素有  $\{g_{31}, g_{33}, g_{34}\}$ ,概率为  $\{0.080, 0.170, 0.060\}$ 。制造商  $Z$  出现的失效因素有  $\{z_6, z_7\}$ ,概率为  $\{0.020, 0.038\}$ 。分销商  $f_1$  出现的失效因素有  $\{f_{11}, f_{12}, f_{15}, f_{16}\}$ ,概率为  $\{0.034, 0.140, 0.012, 0.010\}$ , $f_2$  出现的失效因素有  $\{f_{21}, f_{25}, f_{26}\}$ ,概率为  $\{0.010, 0.026, 0.140\}$ 。

表 1 某灯具装配公司供应链失效诊断情况

	供应商			制造商	分销商	
	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$z$	$f_1$	$f_2$
供应商失效因素	1. 生产设备不完善	195	0	40		
	2. 生产水平不高	0	0	0		
	3. 生产计划不合理	40	0	85		
	4. 运输设备不完善	60	20	30		
	5. 运输计划不合理	0	0	0		
	6. 原材料质量问题	75	90	0		
	7. 信息沟通不畅通	0	0	0		
	8. 人为过失	0	50	0		
制造商失效因素	1. 生产设备不完善			0		
	2. 生产水平不高			0		
	3. 生产计划不合理			0		
	4. 运输设备不完善			0		
	5. 运输计划不合理			0		
	6. 产品质量问题			10		
	7. 信息沟通不畅通			19		
	8. 人为过失					
分销商失效因素	1. 市场预测不准确				17	5
	2. 销售计划不合理				70	0
	3. 运输计划不合理				0	0
	4. 运输设备不完善				0	0
	5. 市场信息反应迟缓				6	13
	6. 人为过失				5	70

### 2.2 供应链可靠性诊断的 GO 法分析

1) 建立 GO 图。表 1 中当供应链失效诊断情况

某因素的失效次数为 0 时,表明该项因素所在的输入操作成功概率为 1,失效概率为 0。由于该因素对

系统可靠性的计算没什么影响,因此在绘制 GO 图时可以不放在图形中。该供应链系统 GO 图见图 3,图中均按照数字从小到大顺序进行了排序。

2)各信号流的计算。图 3 中最终信号流“31”的概率代表了系统的可靠性状况,具体的计算结果见表 2。

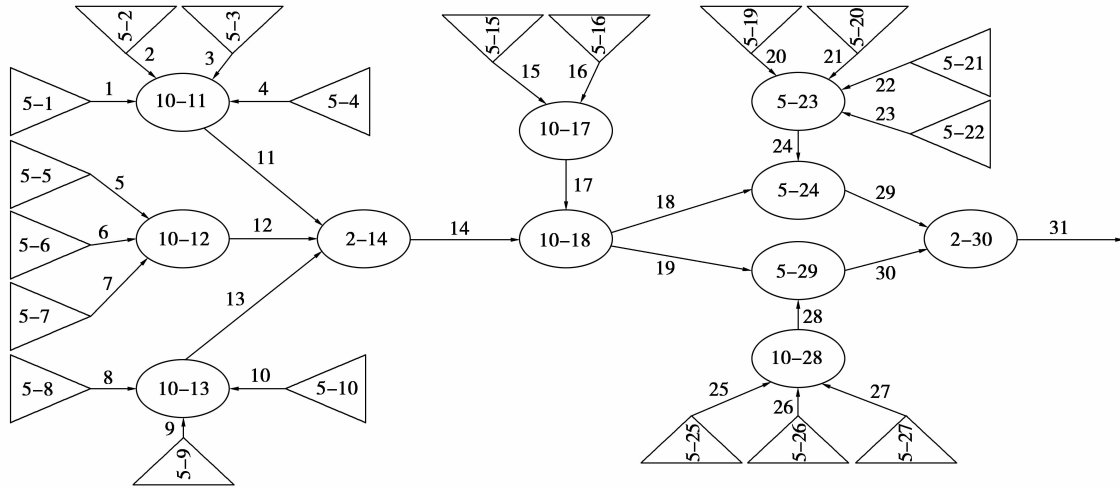


图 3 某车灯装配公司供应链系统 GO 图

表 2 各信号流的计算结果

信号流编号	成功概率	失效概率
1	0.610 000	0.390 0
2	0.920 000	0.080 0
3	0.880 000	0.120 0
4	0.850 000	0.150 0
5	0.960 000	0.040 0
6	0.820 000	0.180 0
7	0.900 000	0.100 0
8	0.920 000	0.080 0
9	0.830 000	0.170 0
10	0.940 000	0.060 0
11	0.419 800	0.580 2
12	0.708 480	0.291 6
13	0.717 784	0.282 3
14	0.952 345	0.047 7
15	0.980 000	0.020 0
16	0.962 000	0.038 0
17	0.942 760	0.057 3
18	0.897 881	0.102 2
19	0.897 881	0.102 2
20	0.966 000	0.034 0
21	0.860 000	0.140 0
22	0.988 000	0.012 0
23	0.990 000	0.010 0
24	0.812 683	0.187 4
25	0.990 000	0.010 0
26	0.974 000	0.026 0
27	0.860 000	0.140 0
28	0.829 363 6	0.170 7
29	0.729 571 5	0.270 5
30	0.744 534	0.255 5
31	0.869 000	0.131 0

系统可靠性为:0.869 0

表 2 说明:在计算信号流“31”的时候,涉及到了有关共有信号流的计算问题,具体方法可参考文献[19]。

3)最小割集的确定及重要度的计算。该供应链系统最小割集的组成如表 3 所示,割集概率是由割集内各失效事件概率的乘积得到,重要度表示的是割集失效概率占系统失效概率的百分数,重要度越大说明该项因素对系统失效越有影响,从而应加以重点控制或改善。

表 3 最小割集及重要度情况

阶数	操作符组合	割集概率( $10^{-1}$ )	重要度/%
1	15	2.000	12.06
	16	3.800	22.90
2	19,25	0.0340	0.204
	19,26	0.0884	0.533
	19,27	0.4760	2.869
	20,25	0.1400	0.844
	20,26	0.3640	2.194
	20,27	1.9600	11.810
	21,25	0.0120	0.723
	21,26	0.0312	0.188
	21,27	0.1680	1.013
	22,25	0.0100	0.060
	22,26	0.0260	0.157
	22,27	0.1400	0.844
3	1,5,8	0.1248	0.752
	1,5,9	0.2652	1.599
	1,5,10	0.0936	0.564
	2,5,8	0.0256	0.154
	2,5,9	0.0544	0.328
	2,5,10	0.0192	0.116
	3,5,8	0.0384	0.231
	3,5,9	0.0816	0.492

续表

阶数	操作符组合	割集概率( $10^{-1}$ )	重要度/%
	3,5,10	0.0288	0.174
	4,5,8	0.048	0.289
	4,5,9	0.102	0.615
	4,5,10	0.0360	0.217
	1,6,8	0.5616	3.385
	1,6,9	1.1934	7.193
	1,6,10	0.4212	2.539
	2,6,8	0.1152	0.694
	2,6,9	0.2448	1.476
	2,6,10	0.0864	0.521
	3,6,8	0.1728	1.042
	3,6,9	0.3672	2.213
	3,6,10	0.1296	0.781
	4,6,8	0.216	1.302
	4,6,9	0.459	2.767
	4,6,10	0.162	0.976
	1,7,8	0.312	1.881
	1,7,9	0.663	3.996
	1,7,10	0.234	1.410
	2,7,8	0.064	0.386
	2,7,9	0.136	0.820
	2,7,10	0.048	0.289
	3,7,8	0.096	0.579
	3,7,9	0.204	1.230
	3,7,10	0.072	0.434
	4,7,8	0.12	0.723
	4,7,9	0.255	1.537
	4,7,10	0.09	0.542

所有最小割集失效概率之和为 16.590 4

由表 3 可知,重要度最大的是由 16 号操作符组成的割集,即制造商中的“信息沟通不畅”,达到了 22.90%,是该供应链系统中的最危险因素,应予以重点控制;其次是操作符为 15 号的割集,即制造商中“产品质量问题”,达到了 12.06%;操作符为 20 和 27 组成的割集,即分销商 1“销售计划不合理”和分销商 2“人为过失”,达到了 11.81%;操作符为 1 号、6 号和 9 号组成的割集,即供应商 1“生产设备不完善”、供应商 2“原材料质量有问题”和供应商 3“生产计划不合理”,达到了 7.193%,如此类推,就可以确定哪些因素应优先控制与优化,这就为供应链系统的最优改善与优化提供了方法与思路。

### 3 结 论

1) 供应链是非常复杂的系统,传统供应链可靠性的研究所建立的模型复杂且难以应用,将 GO 法应用于供应链可靠性分析中,应用十分方便且便于推广。

2) 通过对供应链系统分析,运用 GO 原理建立了供应链系统可靠性的 GO 模型,该模型具有通用性,能进行可靠性的精确计算,为供应链可靠性的分析提供了方法与指导。

3) 所建立的供应链系统可靠性 GO 模型,可以进行供应链的失效模式诊断及重要度的计算,为供应链系统改善与优化提供了思路。

#### 参考文献:

- [1] LEE H L, BILLINGTON C. Material management in decentralized supply chain[J]. *Operations Research*, 1993, 41(5): 835-847.
- [2] OH H C, KARIMI I A, SRINIVASAN R. Supply chain management in the chemical industry: trends, issues, and research interests[M]// TANG C S, TEO C P, WEI K K. *Supply chain analysis: a handbook on the interaction of information, system, and optimization*. [s. l.]: Springer, 2007, 119: 45-67.
- [3] BOZARTH C C, WARSING D P, FLYNN, B B, et al. The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance [J]. *Journal of Operations Management*, 2009, 27(1): 78-93.
- [4] JAIN V, WADHWA S, DESHMUK S G. E-Commerce and supply chains: modelling of dynamics through fuzzy enhanced high level petri net [J]. *Sadhana*, 2005, 30(2/3): 403-429.
- [5] XU M H, QI X T, YU G, et al. The demand disruption management problem for a supply chain system with nonlinear demand functions[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2003, 12(1): 82-97.
- [6] 穆东,杜志平. 供应链固有可靠性和运作可靠性研究[J]. *物流技术*, 2004(12): 37-39.  
MU DONG, DU ZHI-PING. On reliability inherency and operation in SC [J]. *Logistics Technology*, 2004(12): 37-39.
- [7] 霍佳震,隋明刚,刘仲英. 集成化供应链整体绩效评价体系构建[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2002, 30(4): 495-499.  
HUO JIA-ZHEN, SUI MING-GANG, LIU ZHONG-YING. Construction of integrated supply chain performance measurement system[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science Edition*, 2002, 30(4): 495-499.
- [8] 陈国华,王永建,韩桂武. 基于可靠性的供应链构建[J]. *工业工程与管理*, 2004, 1(1): 72-74.  
CHEN GUO-HUA, WANG YONG-JIAN, HAN GUI-WU. Reliability-based supply chain construction [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2004, 1(1): 72-74.
- [9] 刘元洪,罗明. 供应链成员企业可靠性评价指标体系研究[J]. *商业研究*, 2007(4): 120-122.  
LIU YUAN-HONG, LUO MING. Reliability evaluation index system on member enterprise of supply chain[J]. *Commercial Research*, 2007(4): 120-122.
- [10] PALMER J W. Electronic markets and supply chains: emerging models, execution and performance measurement[J]. *Electronic Markets*, 2004, 12(4):

- 268-269.
- [11] 郭雪松, 孙林岩, 徐晟. 一类基于随机着色 Petri 网的多级供应链可靠性模型研究[J]. 运筹与管理, 2006, 15(6): 66-70.  
GUO XUE-SONG, SUN LIN-YAN, XU SHENG. Study on a kind of reliability model on multi-echelon supply chain based on SCPN[J]. Operations Research and Management Science, 2006, 15(6): 66-70.
- [12] 齐楠楠, 王笑坤. 供应链可靠性的随机模型[J]. 管理科学, 2006, 6(19): 3153-3157.  
QI NAN-NAN, WANG XIAO-KUN. A stochastic model of the reliability of supply chain[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(19): 3153-3157.
- [13] 蔡鉴明, 曾峰. 基于 GO 法的供应链可靠性分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(3): 141-144.  
CAI JIAN-MING, ZENG FENG. Reliability analysis of the supply chain based on the GO methodology[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(3): 141-144.
- [14] 张雪松, 王超, 常勇, 等. GO 法在特高压直流输电可靠性研究中的应用[J]. 高压电技术, 2009, 2: 236-241.  
ZHANG XUE-SONG, WANG CHAO, CHANG YONG, et al. Reliability analysis of UHVDC system by the GO methodology [J]. High Voltage Engineering, 2009, 2: 236-241.
- [15] 王智, 包成玉. YAG 激光器系统可靠性分析中 GO 法的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(3): 377-380.  
WANG ZHI, BAO CHENG-YU. Application of GO methodology for reliability analysis of YAG laser system [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2007, 47(3): 377-380.
- [16] 沈祖培, 黄卫刚, 李晓东, 等. 大亚湾核电站外电源系统可靠性分析中 GO 法的应用[J]. 核动力工程, 2003, 24(1): 68-72.  
SHEN ZU-PEI, HUANG WEI-GANG, LI XIAO-DONG, et al. Application of GO methodology in reliability analysis of offsite power supply of daya bay NPP[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(1): 68-72.
- [17] LEE B K, KANG K H, LEE Y H. Decomposition heuristic to minimize total cost in a multi-level supply chain network [J]. Computers and Industrial Engineering, 2008, 54(6): 945-959.
- [18] 王冬冬, 达利庆. 基于模糊 Petri 网的供应链诊断建模分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(4): 662-666.  
WANG DONG-DONG, DA LI-QING. Analyzing and modeling of supply chain diagnosis based on fuzzy petri net [J]. Journal of southeast university : Natural Science Edition, 2006, 36(4): 662-666.
- [19] 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.  
(编辑 张小强)

## (上接第 39 页)

- [9] VOGT H. Contribution to the interpretation of the anode effect [J]. Electrochimica Acta, 1997, 42(17): 2695-2705.
- [10] PENDEKANTI R, HENRIQUEZ C S, HOFFMANN D A. Electrochemical model of the transient resistance of a bubble layer[C/OL]. // Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Chicago, IL, USA, October 30-November 2, 1997; [2002-08-06]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=754484&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=754484&tag=1).
- [11] 徐惠宇, 朱荻, 史先传. 微细电解加工系统设计及实验研究[J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(4): 26-30.  
XU HUI-YU, ZHU DI, SHI XIAN-CHUAN. Investigation on the electrochemical micro-machining system and related experiments[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2005, 41(4): 26-30.
- [12] 王明环, 朱荻, 徐惠宇. 提高微细电解加工精度的研究[J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(6): 24-28.  
WANG MING-HUAN, ZHU DI, XU HUI-YU. Research of improving the precision of micro-ECM [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2005, 41(6): 24-28.
- [13] 王明环, 朱荻, 徐惠宇. 微螺旋电极在改善微细电解加工性能中的应用[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(3): 348-352.  
WANG MING-HUAN, ZHU DI, XU HUI-YU. Use of Micro-helix Electrodes in improving performance of Micro-ECM [J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(3): 348-352.
- [14] 李小海, 王振龙, 赵万生. 高频窄脉冲电流微细电解加工[J]. 机械工程学报, 2006(1): 162-168.  
LI XIAO-HAI, WANG ZHEN-LONG, ZHAO WAN-SHENG. Electrolytic micromachining with high frequency short pulse current [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006(1): 162-168.
- [15] 五机部第五设计院三大队. 离心分离的基础[J]. 石油化工设备简讯, 1976, (3): 73-81.  
The 5th Institute of Project Planning & research, Machinery Industry of China. Centrifugal separation foundation [J]. Petrochemical Equipment Brief, 1976(3): 73-81.
- [16] HINE F, MURAKAMI K. Bubble effects on the solution IR drop in a vertical electrolyzer under free and forced convection [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1980, 127(2): 292-297.  
(编辑 张小强)