

# 基于 MCS-CA 的考虑共因失效的复杂系统 可靠性评估

阮渊鹏, 何 楨

(天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

**摘要:** 共因失效普遍存在于现实的工程系统中。如果忽略共因失效对系统的影响,按照传统假设其部件独立的方法进行可靠性分析会得出过于乐观的结论,并且作出认为系统符合可靠性需求的错误判断。在考虑系统由部件选择性失效传播引起的共因失效的同时,提出了一种面向复杂系统的基于蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation, MCS)与元胞自动机(cellular automata, CA)集成的可靠性评估算法。传统方法只能解决可以转化为串、并联结构的简单系统的可靠性评估问题,而所提出的算法打破了这种限制,使得其应用范围更加广泛。

**关键词:** 复杂系统可靠性; 部件选择性失效传播; 蒙特卡罗模拟; 元胞自动机

**中图分类号:** TB 114.3

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.38

## Reliability evaluation of complex systems with common cause failures based on MCS-CA

RUAN Yuan-peng, HE Zhen

(School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Common cause failures exist in the real-life engineering systems widely. If the impact of common cause failures on systems is ignored and the systems reliability is analyzed with traditional methods in which each component is independent, it will draw a too optimistic conclusion and make a wrong judgment that systems reliability meets the demand. This paper presents a complex systems oriented method of evaluating the reliability based on the integration of Monte Carlo simulation (MCS) and cellular automata (CA) in consideration of components with propagated failures having selective effect. The traditional methods have the limitation that they can only be used to solve the problems of reliability evaluation of simple systems which can be decomposed into series and parallel structures, but the proposed method is out of the limitation and with broader applications.

**Keywords:** complex system reliability; components with propagated failures having selective effect; Monte Carlo simulation; cellular automata

## 0 引言

共因失效(common cause failure, CCF)是一种源于某种共因的多个部件的失效,共因失效的存在使得传统上认为各个部件之间相互独立的假设不再成立,如果忽略部件间的失效的相关性,简单地认为各部件是相互独立的,往往就会高估系统的可靠性,不能很好地解决实际问题。

共因失效可以大致分为两类<sup>[1]</sup>:一类是来源于系统外部环境,如雷电使得电子设备失效;另一类是来源于部件本身,如某电子设备短路引起其他部件失效。部件本身的失效传播可以分为两类:一类是传播到整个系统,使得系统中

所有的部件都失效,这类失效的发生是由系统存在不完全故障覆盖机制或不存在故障覆盖机制引起的;另一类是有选择性地传播到系统中的部分其他部件,使得这些部件发生失效,这类失效在现实工程中也经常出现。

在考虑共因失效的系统可靠性分析与建模方面,现有的研究主要可以归为两种形式:一种是先建立系统可靠性框图或故障树,将共因失效也作为基本事件,即所有存在共因失效的部件对应两个失效事件,一是“独立失效”,二是“共因失效”<sup>[1-3]</sup>。另一种是根据部件的失效原理,没有把“共因失效”作为一种特殊事件而强调,但也没有作部件间失效相互独立的假设<sup>[4-6]</sup>。现有的大量研究都是假设共

因失效来源于外部环境或者是来源于部件对整个系统的失效传播,而对于来源于部件选择性失效传播的共因失效研究较少。文献[1,7]分别做了在二状态与多状态系统中存在部件选择性失效传播的研究,他们所用的方法都是在假定系统能分解为一般结构(串联,并联)的情况下才能得以应用,推广性不强,目前还尚未有在不能简单地分解为一般结构的复杂系统中考虑部件选择性失效传播影响的研究。

现实中的许多如通讯系统<sup>[8]</sup>、电力传输系统<sup>[9]</sup>、交通运输系统<sup>[10]</sup>等复杂系统都能通过将其可靠性框图转化为二终端网络来对其进行可靠性分析,在对二终端网络进行可靠性评估时,传统的一些基于最小路集或最小割集的计算网络可靠性的方法<sup>[11]</sup>需要预先计算网络的最小路集或最小割集,而最小路集或最小割集的求解是 NP 难问题。因此,当网络较复杂时,这些方法都不适用。针对传统方法的缺陷,一些学者采用蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation, MCS)结合图论的方法对二终端网络可靠性进行评估<sup>[11-12]</sup>。在使用 MCS 对二终端网络进行可靠性分析时,一个很重要的问题是如何判断两点间的连通性,比较常用的算法是深度优先搜索算法(depth first search, DFS)、广度优先搜索算法(breadth first search, BFS),但是,当网络变得很复杂时,这两种算法的计算时间较长。因此,一些学者借鉴了元胞自动机(cellular automata, CA)的思想,利用元胞自动机并行搜索的优势将其应用到可靠性分析过程中<sup>[13-16]</sup>。

本文通过将复杂系统转化为二终端网络,再利用 MCS 与 CA 集成的方法对考虑部件选择性失效传播的复杂网络进行可靠性分析,评估系统中各共因失效对系统可靠性产生的影响,对实际工程中系统的可靠性改进有一定的指导意义。

## 1 问题基本假设及算法基本思想

### 1.1 问题基本假设

MCS-CA 集成算法已经被广泛应用到网络可靠性分析过程中,它的应用包括二终端或多终端网络可靠性计算、网络最大流问题、最小路径计算、最大可靠性路径计算以及最小路集或最小割集的计算等<sup>[13-16]</sup>。由于一些复杂系统存在冗余子系统以及部件选择性失效传播,MCS-CA 集成算法不能直接进行应用。因此,首先需要将复杂系统转换成网络,再利用部件选择性失效传播的特性对 MCS-CA 集成算法进行改进,以适应此类特殊问题。

对于含部件选择性失效传播的复杂系统,本文给出了以下几个基本假设:

(1) 对于部件本身,可能存在两种状态:“故障”与“正常”。它的“故障”状态(即状态为 0)可能由 3 种情况引起,一是受自身“共因失效”影响,二是受其他部件“共因失效”带来的选择性失效传播影响,三是受只影响自身的“独立失效”影响。

(2) 各部件“独立失效”事件之间相互独立。

(3) 存在选择性失效传播部件的“共因失效”事件之间相互独立,并且部件在受其他部件“共因失效”事件作用时自身的“共因失效”事件也能触发。

### 1.2 算法基本思想

针对已有方法的缺陷,本文提出了一种基于 MCS 与 CA 的计算复杂系统可靠性的方法。

本文提出算法的基本思想是首先将复杂系统可靠性框图转化成二终端网络,然后根据基本假设中提到的事件触发条件进行每一次仿真,用 CA 判断每次仿真对应网络的连通性,最后计算网络可靠性。

## 2 判断二终端网络连通性的元胞自动机方法

### 2.1 元胞自动机基本概念

CA 是 Ulam 与 Von Neumann 在 20 世纪 50 年代提出的一种用于模拟动态离散系统行为的方法。典型的元胞自动机是定义在网格上的,每一个网格代表一个元胞及其状态,并且状态是有限的。变化规则适用于每个元胞,并且同时进行。每个元胞有自己对应的邻居。元胞自动机的基本思想是: $t+1$  时刻每个元胞的状态取决于其  $t$  时刻的状态、其邻居的状态以及变化规则。根据元胞自动机对应元胞的维数,可以将其分为一维元胞自动机与二维元胞自动机,二维元胞自动机又根据其邻居的范围不同主要分为两个类型:Von Neumann 型与 Moore 型,如图 1 所示。

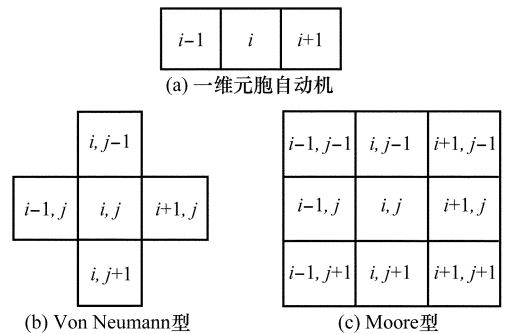


图 1 元胞自动机类型

### 2.2 计算二终端网络连通性的 CA 算法

在网络  $G=(N, A)$  中,这里  $N$  表示的是网络中  $n$  个节点的集合,而  $A$  表示的是网络中所有边的集合,每个边代表一个部件,边是有向的。假设用  $E_i$  来表示节点  $i$  的邻居,定义  $E_i = \{j \in N \text{ 且 } (j, i) \in A\}$ ,  $\omega(i, t)$  表示节点  $i$  在时刻  $t$  的状态,如果节点  $i$  被激活,状态为 1,反之,为 0。如果时刻  $t$  某节点  $i$  被激活,那么它以后的状态将保持为 1;如果节点  $i$  在时刻  $t$  没有被激活,但它的邻居里至少有一节点被激活,节点  $i$  将在时刻  $t+1$  被激活。用关联函数来表示,即

$$\omega(i, t+1) = \text{OR}(\omega(j, t), \dots, \omega(k, t), \omega(i, t)),$$

$$j, \dots, k \in E_i \quad (1)$$

判断节点  $S$  到节点  $T$  是否连通的 CA 算法为:

步骤 1 初始时刻  $t=0$ ;

步骤 2 设置所有元胞的初始状态都为 0;

- 步骤 3 设置节点  $S$  的状态为 1, 即  $w(1,0)=1$ ;
- 步骤 4 时刻  $t=t+1$ ;
- 步骤 5 按照关联函数(1)更新所有元胞的状态;
- 步骤 6 如果  $w(T,t)=1$ , 算法结束, 输出  $c=0$ , 即表示节点  $S$  到节点  $T$  是连通的;
- 步骤 7 否则, 假如  $t < n-1$ , 则回到步骤 4;
- 步骤 8 假如  $t = n-1$ , 输出  $c=0$ , 即表示节点  $S$  到节点  $T$  不连通。

### 3 含部件选择性失效传播的复杂系统可靠性评估

#### 3.1 含部件选择性失效传播复杂系统的可靠性评估 MCS-CA 集成算法

基于文献[1]中提出的发生函数法在解决复杂系统可靠性评估问题上的缺陷, 本文提出了基于 MCS-CA 的算法, 具体步骤如下:

(1) 首先要将复杂系统的可靠性框图转化成网络。冗余子系统需要经过特殊处理, 保留一个部件, 然后将其余部件都转化成两个部件, 一个是和原部件相同的部件, 另一个是失效概率为 0 的虚拟部件, 如图 2 所示。

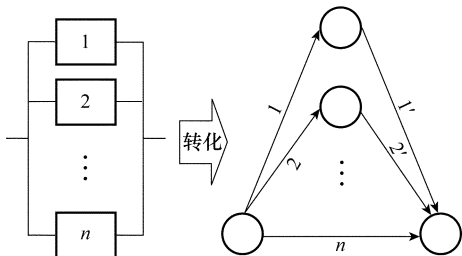


图 2 冗余系统网络转换

图 2 中, 左边部分是冗余子系统的可靠性框图, 右边部分是转化后的网络图, 网络图中的边  $1, 2, \dots, n$  代表的是部件  $1, 2, \dots, n$ , 而  $1', 2', \dots, (n-1)'$  代表失效概率为 0 的虚拟部件, 部件  $n$  没有虚拟部件。

(2) 仿真循环次数  $m$  的初始值为 1, 网络连通的次数  $c$  的初始值为 0。

(3) 根据原始网络  $G=(N, A)$  建立关联矩阵  $G$ 。

(4) 假设含选择性失效传播的部件数为  $L$ , 分别为  $i_1, i_2, \dots, i_L$ , 其对应的共因失效概率为  $p_{C1}, p_{C2}, \dots, p_{CL}$ , 独立失效概率为  $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iL}$ , 可靠概率为  $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iL}$ , 且  $p_{Cj} + p_{ij} + q_{ij} = 1 (j=1, 2, \dots, L)$ 。 $C$  是失效传播集矩阵, 行数为  $L$ , 列数为各部件对应失效传播数量的最大值, 矩阵的每行表示的是各部件对应的失效传播集, 若其对应元素小于失效传播数量最大值, 剩余单元用 0 表示。

(5) 对于含选择性失效传播的部件分别产生随机数  $r$ , 若  $r > 1 - p_{Cj} (j=1, 2, \dots, L)$ , 则此部件及其失效传播集中对应的其他部件在网络关联矩阵中对应的值将由 1 转化为 0, 从而形成新的网络  $G^{N1}=(N, A)$ 。

(6) 对于新的网络  $G^{N1}=(N, A)$ , 其对应新的关联矩阵

$G^{N1}$ 。假设此网络的可靠概率矩阵为  $R^{N1}$ , 若  $G^{N1}(i, j)=1$ , 则  $R^{N1}(i, j)$  对应的是此部件在不发生共因失效条件下的条件可靠概率, 即等于  $q_{ij} / (1 - p_{Cj})$ , 关联矩阵上对应 0 值的边表示其不存在或失效, 对应的  $R^{N1}(i, j)=0$ 。

(7) 对于关联矩阵  $G^{N1}$  中数值为 1 的每个边, 分别产生一个随机数  $r$ , 若  $r > R^{N1}(i, j)$ , 则关联矩阵对应的数值变为 0。

(8) 关联矩阵由  $G^{N1}$  变为  $G^{N2}$ , 用 CA 算法判断节点  $S$  到节点  $T$  的连通性, 并得出  $c$  值。

(9) 若  $c=1, c=c+1$ 。

(10) 若循环次数  $m < M, M$  为总的循环次数, 则转入步骤 3。

(11) 否则, 计算网络可靠性为  $c/M$ 。

#### 3.2 MCS-CA 集成算法结果分析

设系统的可靠性为  $R$ , 仿真循环次数为  $M$ , 那么, 每次仿真的结果  $c_i$  对应的两种状态 1 或者 0 的概率为  $p(c_i=0)=1-R, p(c_i=1)=R (i=1, 2, \dots, M)$ , 由此可以推出, 系统可靠性的估计量  $\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^M c_i}{M}$  的期望和方差分别为  $E(\bar{R}) = \frac{M \times (0 \times (1-R) + 1 \times R)}{M} = R, D(\bar{R}) = \frac{(1-R)R}{M}$ 。因此,  $\bar{R}$  是  $R$  的无偏估计量, 方差  $D(\bar{R})$  随着仿真循环次数的增加不断降低, 且当可靠性  $R$  值在大于 0.5 的情况下越大时, 方差越小。

## 4 算例分析

本文使用了文献[1]中给出的两个例子。第一个例子是为了验证本文提出算法的正确性。对第二个例子进行修改, 加入部件 7, 使原本的串联-并联结构变成存在桥联结构的混合结构, 增加了系统的复杂性, 文献[1]中提出的发生函数法已不适用于此新问题。已有的对于存在共因失效的系统可靠性研究都是假设系统可以简单拆分成串联和并联结构, 而本文提出的方法可以计算任意复杂结构的系统可靠性。

#### 4.1 算例 1

某工业生产模块由 5 个部件组成, 2 个泵设备(部件 1、2)以及 3 个反应器(部件 3、4、5), 部件 1、2 并联, 并与部件 3、4、5 组成的并联子系统串联, 系统可靠性框图如图 3 所示。第一个泵设备(部件 1)失效引起的火灾可以使反应器 3 失效, 第二个泵设备(部件 2)失效引起的火灾可以使反应器 3、4 失效。因此, 部件 1、2 存在选择性失效传播。

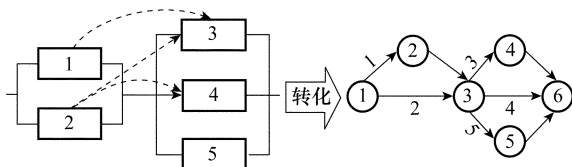


图 3 系统可靠性框图转化为系统网络图

将系统可靠性框图转化为网络图，网络图上已标注的每个边都表示一个部件，其余没标注的边是虚拟部件，其可靠性是 1，且不受任何共因失效的影响。

部件对应的基本信息如表 1 所示。

表 1 算例 1 部件基本信息

部件	网络图上对应的边	独立失效概率	共因失效概率	不发生共因失效条件下的条件可靠概率	选择性失效传播集
1	(1,2)	0.12	0.08	0.87	(1,2),(3,4)
2	(1,3)	0.12	0.08	0.87	(1,3),(3,4),(3,6)
3	(3,4)	0.2	0	0.8	—
4	(3,6)	0.2	0	0.8	—
5	(3,5)	0.1	0	0.9	—

分别用文献[1]中提到的发生函数法与本文中提出的算法进行计算，假设仿真循环次数  $M$  为 10 000，计算结果如表 2 所示。

表 2 两种方法的结果比较

	发生函数法	本文算法
可靠性	0.949	0.946 9
相对误差率/%	—	-0.22

由于相对误差率绝对值只有 0.22%，因此可以验证本文提出的算法是有效的，并且能应用到实际工程当中。

### 4.2 算例 2

如图 4 所示，系统由 13 个部件组成，存在冗余子系统。虚线部分表示了每个存在共因失效部件的选择性失效传播集，存在共因失效的部件有部件 1、2、8、9、11、13。

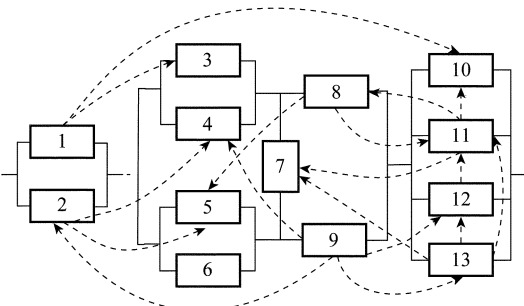


图 4 系统可靠性框图

首先将可靠性框图转化为网络图，如图 5 所示。

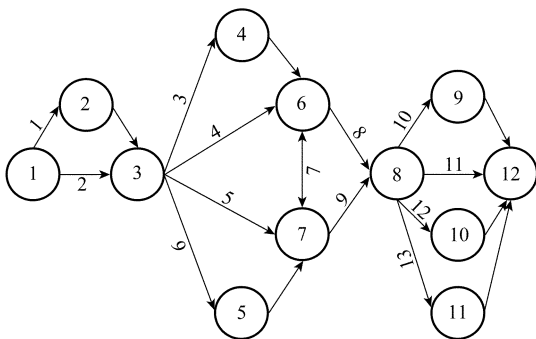


图 5 系统网络图

部件对应的基本信息如表 3 所示。

表 3 算例 2 部件基本信息

部件	网络图上对应的边	独立失效概率	共因失效概率	选择性失效传播集
1	(1,2)	0.05	0.08	(1,2),(3,4),(8,9)
2	(1,3)	0.08	0.12	(1,3),(3,6),(3,7)
3	(3,4)	0.1	0	—
4	(3,6)	0.15	0	—
5	(3,7)	0.1	0	—
6	(3,5)	0.15	0	—
7	(6,7)或(7,6)	0.08	0	—
8	(6,8)	0.02	0.08	(6,8),(3,7),(8,12)
9	(7,8)	0.03	0.07	(7,8),(1,3),(3,6),(8,10),(8,11)
10	(8,9)	0.1	0	—
11	(8,12)	0.01	0.02	(8,12),(6,7),(7,6),(6,8),(8,9),(8,10)
12	(8,10)	0.1	0	—
13	(8,11)	0.01	0.02	(8,11),(6,7),(7,6),(8,12),(8,10)

假设仿真循环次数  $M$  为 10 000，本文分别就① 受所有共因失效影响；② 所有部件不受共因失效影响；③ 不考虑某一部件共因失效的影响的 3 种情况对系统的可靠性进行仿真计算，计算结果如表 4 所示。

表 4 不同情况下的结果比较

	可靠性	增加值/%	
情况 1	0.946 1	—	
情况 2	0.996	5.274	
情况 3	部件 1	0.970 5	2.579
	部件 2	0.964	1.892
	部件 8	0.959 6	1.427
	部件 9	0.965	1.998
	部件 11	0.948 6	0.264
	部件 13	0.947 9	0.19

由于仿真循环次数达到了 10 000，而对应系统的可靠性水平都较高 ( $>0.9$ )。因此，结果误差很小，不会对分析造成影响。由上面结果可以看出，情况 2 的可靠性要比情况 1 大 5.274%。一方面，这说明忽略共因失效的影响会高估系统的可靠性，从而误导工程人员作出系统可靠性满足实际需求的错误判断；另一方面，这也说明了减少或消除由部件引起的共因失效能大幅度地增加系统的可靠性。对情况 3 的结果进行分析，可以看出，消除部件 1 的共因失效可以最大程度地提高系统的可靠性，在成本有限的情况下，这对合理制定系统可靠性改善计划有一定的指导意义。

## 5 结论

本文提出了对含部件选择性失效传播的复杂系统进行可靠性计算的 MCS-CA 集成算法，给出了算法的基础步骤，并最终通过实例具体说明算法在含部件选择性失效传

播的复杂系统可靠性分析中的应用。本文提出的算法借鉴了计算机模拟的优势,避免了传统方法只能解决简单系统问题的尴尬,并结合具有并行计算能力的元胞自动机,为含部件选择性失效传播的复杂系统可靠性评估提供了一条有效的思路。

## 参考文献:

- [1] Levitin G, Xing L D. Reliability and performance of multi-state systems with propagated failures having selective effect[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, 95(6): 655 - 661.
- [2] Levitin G. Incorporating common-cause failures into nonrepairable multi-state series-parallel system analysis[J]. *IEEE Trans. on Reliability*, 2001, 50(4): 380 - 388.
- [3] Ramirez-Marquez J E, Coit D W. Optimization of system reliability in the presence of common cause failures[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, 92(10): 1421 - 1434.
- [4] Goble W M, Brombacher A C, Bukowski J V. *Using stress-strain simulations to characterize common cause* [M]. New York: Springer, 1998.
- [5] Roy D, Dasgupta T. A discretizing approach for evaluating reliability of complex systems under stress-strength model[J]. *IEEE Trans. on Reliability*, 2001, 50(2): 145 - 150.
- [6] Xie L Y, Zhou J Y, Li C L, et al. Common cause failure analysis and discretely modeling for system probability prediction[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(1): 62 - 68. (谢里阳, 周金宇, 李翠玲, 等. 系统共因失效分析及其概率预测的离散化建模方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 62 - 68.)
- [7] Xing L, Dugan J B, Morrisette B A. Efficient reliability analysis of systems with functional dependence loops[J]. *Maintenance and Reliability*, 2009, 43 (3): 65 - 69.
- [8] Aggarwal K, Gupta J, Misra K. A simple method for reliability evaluation of a communication system[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1975, 23(5): 563 - 566.
- [9] Yeh W C. A revised layered-network algorithm to search for all dminpaths of a limited-flow acyclic network[J]. *IEEE Trans. on Reliability*, 1998, 47(4): 436 - 442.
- [10] Aven T. Availability evaluation of oil/gas production and transportation systems[J]. *Reliability Engineering*, 1987, 18(2): 35 - 44.
- [11] Billinton R, Allan R N. *Reliability evaluation of engineering systems, concepts and techniques*[M] 2nd ed. New York: Plenum Press, 1992.
- [12] Fishman G S. A comparison of four Monte Carlo methods for estimating the probability of s-t connectedness [J]. *IEEE Trans. on Reliability*, 1986, 35(2): 145 - 155.
- [13] Rocco S C M, Moreno J A. Network reliability assessment using a cellular automata approach[J] *Reliability Engineering and System Safety*, 2002, 78(3): 289 - 295.
- [14] Rocco S C M, Zio E. Solving advanced network reliability problems by means of cellular automata and Monte Carlo sampling[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2005, 89(2): 219 - 226.
- [15] Yeh W C, Lin Y C, Chung Y Y. Performance analysis of cellular automata Monte Carlo simulation for estimating network reliability[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(5): 3537 - 3544.
- [16] Zio E, Podofillini L, Zille V. A combination of Monte Carlo simulation and cellular automata for computing the availability of complex network systems [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006, 91(2): 181 - 190.

## 作者简介:

阮渊鹏(1985 -),男,博士研究生,主要研究方向为质量管理与可靠性工程。

E-mail: ruanyuanpeng@sina.com

何 桢(1967 -),男,教授,博士,主要研究方向为工业工程、质量管理与可靠性工程、六西格玛管理。

E-mail: zhhe0321@163.com