

基于成功流法的共因失效可靠性仿真

陈 辰¹, 贾成斌¹, 杨建军²

(1. 海军装备技术研究所理标室, 北京 102442; 2. 海军工程大学管理工程系, 武汉 430033)

摘 要: 针对共因失效使系统可靠性分析复杂化的问题, 提出基于成功流(GO)法的共因失效可靠性 Simulink 仿真方法。在构建共因集 GO 模型时, 考虑共因失效的影响。运用累积概率法进行定量计算, 并构建共因集 Simulink 模型, 利用仿真工具降低建模、计算的难度。经算例验证, 改进仿真方法较传统计算方法更为简单, Simulink 在共因失效可靠性 GO 法分析中具有可行性与有效性。

关键词: 共因失效; 可靠性分析; 成功流法; 共因集模型; 累积概率法

Reliability Simulation of Common Cause Failure Based on Goal Orient Methodology

CHEN Chen¹, JIA Cheng-bin¹, YANG Jian-jun²

(1. Dept. of Theory and Standard, Naval Equipment Technology Institution, Beijing 102442, China;

2. Dept. of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

【Abstract】 Common Cause Failure(CCF) makes the reliability analysis more complex. The Simulink simulation method of CCF reliability analysis based on Goal Orient(GO) methodology is put forward. The GO model of Common Cause Group(CCG) is presented with importing CCF. The cumulative probability algorithm is used for quantification calculate. The simulink model of CCG is presented for making modeling and calculating easier. An example shows that the improved method is more simple than the traditional calculation methods. Simulink has feasibility and validity in reliability GO analysis method of CCF.

【Key words】 Common Cause Failure(CCF); reliability analysis; Goal Orient(GO) methodology; model of Common Cause Group (CCG); cumulative probability algorithm

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.04.064

1 概述

冗余系统中普遍存在一种部件间的失效相关性——共因失效(Common Cause Failure, CCF)^[1], 它是指由于空间、环境、设计以及人为因素等方面的共同原因造成 2 个或 2 个以上的部件同时或短时间内相继失效的现象, 是系统失效相关性的重要表现之一。高可靠性系统通常采用冗余设计, 而共因失效已经成为冗余系统失效的主要原因。如果忽略这种相关性, 简单地在各部件失效相互独立的假设条件下进行系统可靠性分析, 常会导致过大的误差, 甚至得出错误的结论^[2]。所以, 考虑共因失效的影响是系统可靠性分析中必不可少的一部分。

共因失效已经引起了国内外诸多学者的重视, 构建了因子、 α 因子、多希腊字母等多种模型来定量描述共因失效。故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)是传统的可靠性分

析方法, 考虑共因失效的系统可靠性分析主要有显性方法和隐性方法^[3]。显性方法需要扩展故障树, 这势必会在故障树中添加大量共因失效基本事件, 造成故障树的冗长和难以求解。而对于隐性方法, 大型故障树的系统可靠度表达式是难以求解并简化为基本事件概率“乘积和”形式的。文献[4]提出将故障树转换为二元决策图(Binary Decision Diagram, BDD), 求解可靠度表达式, 再隐性引入共因失效影响的解决办法。

成功流(Goal Orient, GO)法是一种较新的可靠性分析方法, 易于描述系统的结构组成, 能够较方便地分析多状态有时序的系统并将共因失效引入整个系统分析。本文在此基础上, 提出共因失效的可靠性 Simulink 仿真方法。

2 GO 法

GO 法以成功为导向, 将系统结构原理图直接“翻译”

作者简介: 陈 辰(1988—), 男, 助理工程师、硕士, 主研方向: 可靠性分析, 信息管理; 贾成斌, 高级工程师、硕士; 杨建军, 讲师、博士

收稿日期: 2012-07-02 **修回日期:** 2012-09-26 **E-mail:** 527281588@qq.com

成 GO 图, 再根据操作符提供的运算规则计算信号流各状态发生的概率。GO 图主要由操作符与信号流组成, 操作符代表具体的部件或者逻辑关系, 信号流连接操作符代表具体的物流或者逻辑上的进程。文献[5]介绍了 17 种操作符的定义、特点、用法, 图 1 是本文将会用到的 3 种操作符, S 表示输入信号, R 表示输出信号。

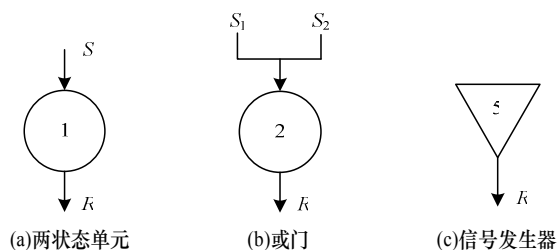


图1 类型1、2、5的GO操作符

GO 法起源于 1967 年, 美国 Kaman 科学公司开发了 GO 法及相应的分析程序, 并用以解决了多项装备的可靠性分析问题, 80 年代日本学者在此基础上开发了 GO-FLOW 方法。多年来, GO 法的应用范围以及计算精度都取得了很大的发展。清华大学提出了 GO 法的累积概率算法^[6], 并进一步提出包含共有信号的复杂系统概率定量计算的精确算法^[7], 以及有共因失效的系统可靠性计算方法^[8], 使 GO 法更加简捷、精确。其成果运用于核电站电源系统、天然气管道运输系统的可靠性、安全性分析^[9-10], 效果显著。文献[11-12]介绍了如何利用 GO-FLOW 方法分析共因失效, 以及处理共有信号的概率定量计算的精确算法。

3 基于 GO 法的共因失效改进方法

上述的成果在处理共因失效时, 均是运用隐性方法。本文构建考虑共因失效的共因集操作符, 在建模阶段就考虑共因失效的影响, 建立模型后直接运用累积概率法求解系统可靠度, 下面以二阶并联冗余共因集为例, 介绍处理方法。

3.1 假设条件

建立如下假设条件:

(1) 共因失效仅存在于统计同一的部件中, 服从相同共因失效的部件统称为一个共因集, 共因集包含部件数量不变。

(2) 每个部件最多服从一种共因失效且在同一时刻只能处于一种状态。

(3) 部件一旦从工作转为失效, 不可修复。

(4) 共因失效发生后, 共因集包含的部件全都失效。

3.2 共因集 GO 模型的构建

图 2 是一个二阶并联冗余系统, 若不考虑共因失效影响, 它的常规 GO 模型如图 3 所示, 1 号、2 号操作符表示部件 A、B 失效, 3 号操作符表示或门逻辑操作符。但是部件 A、B 除了独立失效外, 还会受到共因失效的影响而同时失效。对图 3 所示常规 GO 模型进行可靠性分析时, 在计

算输出信号后, 采取隐性分析法引入共因失效并将其影响在输出信号表达式中表现出来, 但是逻辑计算较难理解。本文既希望完整地表达共因失效的影响, 又希望简化后期引入共因失效影响的计算。于是考虑在建模时就引入共因失效, 从而利用 GO 法累积概率法计算简捷的优势直接定量计算, 避免后期较为复杂的共因失效计算。考虑到共因失效的特点, 本文在建模时将共因失效单独看作一个两状态部件, 提到并联部件之前, 并联部件输出的信号流在或门计算时只考虑共有信号而不再考虑共因失效影响。

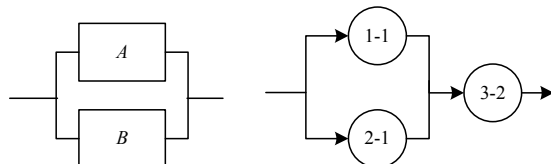


图2 二阶并联冗余系统可靠性框图

图3 不考虑共因失效时的GO模型

图 4 构建的是二阶共因集的 GO 模型, 1 号操作符表示共因失效, 2 号、3 号操作符表示部件独立失效, 4 号操作符表示或门逻辑操作符。

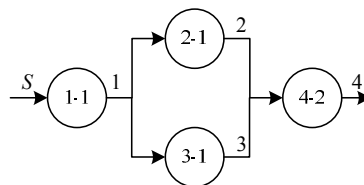


图4 二阶共因集GO模型

3.3 定量计算

针对 GO 模型, 运用累积概率法^[5], 顺着信号流的前进就可以计算出输出信号发生的概率, 即系统可靠度: P_i 表示信号流 i 的成功概率; P_{Cj} 表示部件 j 成功概率; P_S 表示输入信号成功概率:

$$P_1 = P_{C1} \times P_S \quad (1)$$

$$P_2 = P_1 \times P_{C2} \quad (2)$$

$$P_3 = P_1 \times P_{C3} \quad (3)$$

处理了共有信号后, 有:

$$P_4 = P_2 + P_3 - \frac{P_2 \times P_3}{P_1} \quad (4)$$

因为共因集部件具有同一性 $P_{C2} = P_{C3}$, 所以:

$$P_4 = 2P_{C1}P_S P_{C2} - P_{C1}P_S P_{C2}^2 = P_{C1}P_S P_{C2}(2 - P_{C2}) \quad (5)$$

上述内容就是二阶共因集 GO 模型的构建、计算过程, 多阶共因集的处理以此类推, 只是并联部件数增加, 处理方法相同。

4 Simulink 建模

Simulink 是 Matlab 环境下对动态系统建模、仿真和分析的一个软件包, 用户可以在屏幕上调用现成的模块, 并将它们连接起来以构成系统的可视化模型。本文构建图 2、图 3 所示共因集的 Simulink 模型, 希望借用 Simulink 强大

的建模、计算能力使系统可靠性计算变得更加简捷。

由式(1)~式(5)可知共因集 GO 模型的计算规则,借助 Simulink 中 Sources、Sinks 以及 Math Operations 这 3 个模块库中的标准模块,建立如图 5 所示的共因集模型, P_s 、 P_r 分别表示输入、输出信号流的成功概率, P_{C1} 、 P_{C2} 、 P_{C3} 即部件的成功率。

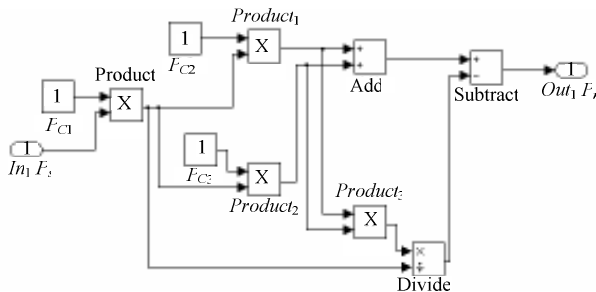


图 5 二阶共因集 Simulink 模型

在本文所提出的方法中,共因集是作为一个整体进行建模的,可以看作一个新的 GO 操作符。为了减少系统中的模块数目,使其应用于复杂系统时,模型规模缩小,将共因集模型封装成图 6 所示的模型,功能不变。

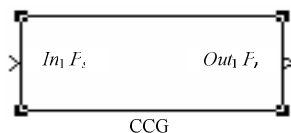


图 6 封装后的二阶共因集 Simulink 模型

同理,可以将其他 GO 操作符的 Simulink 模型进行封装,简化建模。

5 算例分析

图 7 为串并联系统的可靠性框图,并联部件 A、B 和部件 D、E 分别是 1 号和 2 号二阶共因集, ∂ 因子均为 $\partial_1 = 0.8$, $\partial_2 = 0.2$, 部件 A、B、C、D、E 的失效概率分别是 0.1、0.1、0.2、0.1、0.1。

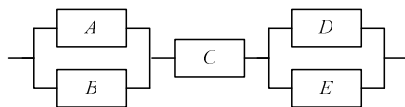


图 7 串并联系统可靠性框图

(1)应用文献[4]提出的隐性 BDD 算法,可以建立图 8 所示的 BDD 图。

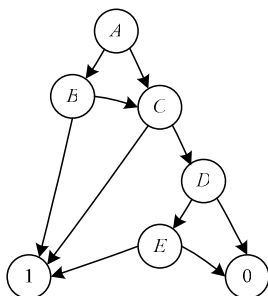


图 8 串并联系统 BDD 图

可得:

$$P = P_r \{ACD\} + P_r \{AC\overline{DE}\} + P_r \{\overline{AB}CD\} + P_r \{\overline{ABC}\overline{DE}\} \quad (6)$$

若不考虑共因失效(即计算中不考虑 ∂ 因子),直接将各路径的成功概率代入式(6)即可得到理想化的系统可靠度:

$$P = 0.9 \times 0.8 \times 0.9 + 0.9 \times 0.8 \times 0.1 \times 0.9 + 0.1 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.9 + 0.1 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.1 \times 0.9 = 0.784 \ 08 \quad (7)$$

考虑共因失效后,经过运算,最终得到的系统可靠度更加准确、贴近实际。其中, P_{ki} 表示 i 号共因集中 k 个部件不发生(共因)失效的概率:

$$P = P_r \{C\} \times (4P_{11}P_{21}P_{12}P_{22} - 2P_{11}^2P_{21}P_{12}P_{22} - 2P_{11}P_{21}P_{12}^2P_{22} + P_{11}^2P_{21}P_{12}^2P_{22}) = 0.758 \ 52 \quad (8)$$

对比式(7)与式(8)可知,分析时是否考虑共因失效,对整个系统的可靠度精度影响较大。

(2)应用 GO 改进算法,建立 GO 模型,如图 9 所示。

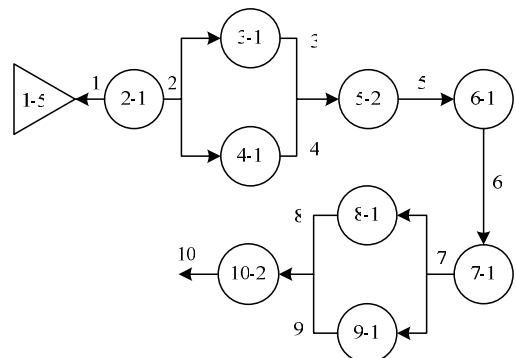


图 9 串并联系统的 GO 模型

因为 GO 模型必须要有输入信号,所以加入编号为 1、类型 5 的信号发生器,输入信号恒为 1,用于保持 GO 模型的完整性,由式(5)可得:

$$P_5 = P_{C3}P_{C2}P_1(2 - P_{C3}) \quad (9)$$

$$P_6 = P_5P_{C6} = 0.778 \ 982 \ 4 \quad (10)$$

$$P_{10} = P_6P_{C7}P_{C8}(2 - P_{C8}) = 0.758 \ 52 \quad (11)$$

(3)应用封装的两状态部件、共因集部件的 Simulink 模型,如图 10 所示。

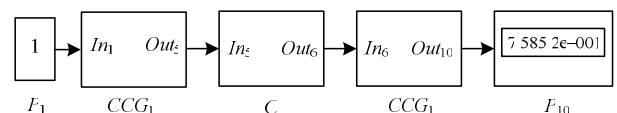


图 10 串并联系统的 Simulink 模型

用常数输入信号充当信号发生器,数值显示器显示出信号成功概率,将所需参数输入 2 个部件,点击运行,数值显示器中迅速显示信号流 10 成功概率为 $7.585 \ 2e-001$ 。

(4)应用上述 3 种计算方法进行计算,得到的系统可靠度是一致的,证明了在 GO 法的改进用法中,运用 Simulink 仿真处理共因失效可靠性分析是可行、简捷的。

(下转第 286 页)