

多阶段任务系统可靠性建模研究

邢 涛

(北京市 1481 信箱理标室, 北京, 102442)

摘 要: 随着系统复杂性和自动化程度的提高, 多阶段任务系统(PMS)的应用越来越多。与单一阶段系统相比, PMS的可靠性分析由于阶段之间的相关性而变得更加复杂。在对 PMS 作简要介绍基础上, 文中对 PMS 可靠性建模的故障树方法作了系统描述, 并以某个多阶段系统为例, 进行了比较计算分析。

关键词: 多阶段系统; PMS; 可靠性; 故障树

中图分类号: O 213.2

文献标识码: A

1 概述

多阶段任务系统(Phased Mission System, PMS)是指系统配置及故障修复过程会多次发生变化的系统^[1]。随着核、舰船、飞机、化学、电子和其他工业系统复杂性和自动化程度的提高, 复杂系统的任务过程通常需由执行不同功能的多个阶段构成, 其不同阶段的任务通常由不同的子系统、功能单元组合完成。多阶段系统的阶段性可分为三类, 即任务阶段性、系统配置阶段性以及环境条件阶段性。许多实际系统都是 PMS, 例如, 巡航导弹攻击任务可分为发射、惯性制导段、未制导段等阶段; 容错计算机系统任务过程可分为输入、缓存、处理、检查、输出等阶段, 太空飞行器本体从发射、运行、返回亦需经历不同的环境阶段等。

与单一阶段系统相比, PMS 的可靠性分析由于阶段之间的相关性而变得更加复杂。通常, 单元当前阶段的结束状态就是其下一阶段的初始状态, 而且同一单元在不同阶段的工作方式、环境条件、失效判据等都可能不同。PMS 建模和分析方法与单阶段系统的主要区别即在于对多阶段相关性的处理。

本文采用故障树方法对多阶段任务系统作可靠性建模研究。故障树分析(FTA)是系统可靠性研究中的常用方法, 它以逻辑图的形式, 直观地反映出哪些事件的组合可以导致危及系统安全的故障, 并计算它们的发生概率, 然后通过设计改进和有效的故障监测、维修等措施, 设法减小它们的发生概

率^[2]。故障树方法还可以让分析者对系统有更深入的认识, 实践证明, 该方法在系统安全性、可靠性、维修性和保障性分析方面很有工程实效。

2 PMS 建模的故障树方法

2.1 PMS 的故障树精确解法

故障树精确解法的基本思路为, 将原多阶段系统转化为多个独立的单阶段系统, 用单阶段分析方法逐一求解后再作综合^[3]。基本过程如下:

(1) 任务割集消减: 如果当前阶段与此后阶段中包含同一最小割集, 则将当前阶段中的该割集删除。

(2) 基本事件转化: 即用一组基本事件 C_{K1}, \dots, C_{Kj} 代替阶段 j 中的基本事件 C_K , 其中 C_{K1}, \dots, C_{Kj} 都是失效率为 $\bar{\pi}_{kj}$ 的不相关事件。

(3) 转化后得到一个等效的单阶段系统, 该系统包含新的逻辑序列, 原系统各阶段成为该系统的子系统。

(4) 求得新故障树的最小割集。

(5) 由常用的故障树定量评估方法从各阶段的最小割集得到全系统的不可靠度。

图 1 为一简单多阶段任务系统, 虚线 OR 门表示多阶段任务顶事件的输入, 三角内的数字代表阶段序号。由图首先将阶段 1 中两阶段的相同割集 $\{C1, C2\}$ 消除, 得到简化后的模型图 2; 再由上述第 (2) 和第 (3) 步将模型转化为图 3, 得到一个等价的单阶段系统, 而转换后的原阶段相当于一个

收稿日期: 2005-06-20

作者简介: 邢 涛 (1966-), 男, 博士生。

分系统；根据单事件割集 {C41} 消除多余割集得到图 4。对该故障树，由常用的解法就可得到系统的不可靠度。

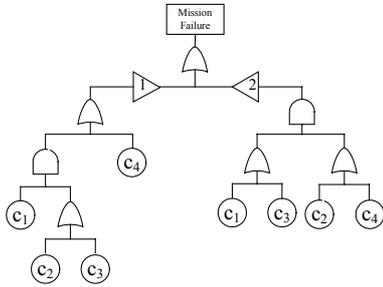


图 1

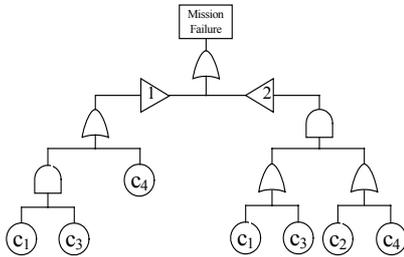


图 2

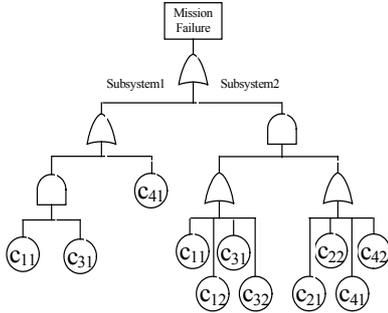


图 3

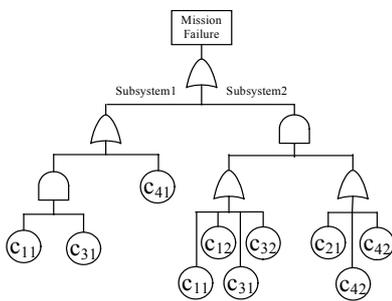


图 4

2.2 PMS 的近似解法

上述方法虽能得到 PMS 不可靠度的精确解，但由于多阶段的存在及其相关性，故障树方法在单阶

段系统分析中就存在的“组合爆炸”问题在多阶段分析中更为突出。因此即使使用计算机辅助分析，精确解法的计算量仍然太大。^[4]

由上述基本过程的第 (2) 步可见，基本事件转化过程额外引入了许多附加割集 (由图可见，最小割集从 6 个增加到 14 个)，所以在精度允许条件下，应设法回避基本事件转化过程，而用其他方法直接得到系统不可靠度的近似值。以下为两种 PMS 不可靠度的故障树近似解法。

2.2.1 INEX 方法

INEX 方法包括以下步骤：

- (1) 由原系统故障树求得各阶段的最小割集。
- (2) 直接由单阶段系统不可靠度的计算方法，由最小割集计算各阶段的不可靠度 \bar{R}_j ($1 \leq j \leq m$)。
- (3) 根据下式计算系统可靠度 ρ_{INEX} ，

$$\rho_{INEX} = \prod_{j=1}^m R_j, \quad (1)$$

式中， m 为阶段总数。

上述过程未考虑阶段间的相关性，则全系统不可靠度 $\bar{\rho}_{INEX}$ 小于各阶段不可靠度之和：

$$\bar{\rho}_{INEX} \leq \sum_{j=1}^m \bar{R}_j. \quad (2)$$

2.2.2 INEX-CC 方法

该方法与 INEX 方法相似，仅在计算各阶段的 \bar{R}_j 前进行了任务割集消除 (精确解法第 (1) 步)。由于割集的减少，这样得到的 \bar{R}_j 通常小于 INEX 方法中第 (2) 步得到的 \bar{R}_j 值。

除 INEX、INEX-CC 外，类似方法还有 MCB 方法、MCB-CC，但都是在 INEX 方法基础上，结合精确解法各处理步骤所作的不同近似，这里不作赘述。

3 PMS 故障树计算示例

仍考虑图 1 所示多阶段系统。设各阶段持续时间为 100h，从图 1 可得到如下割集：

阶段 1： $\{C_1, C_2\}$ ， $\{C_1, C_3\}$ ， $\{C_4\}$ ；

阶段 2： $\{C_1, C_2\}$ ， $\{C_1, C_4\}$ ， $\{C_2, C_3\}$ ， $\{C_3, C_4\}$ 。

设 $c_i = P\{C_i\}$ ； $i=1, \dots, 4$ ，对上述割集应用相容事件的概率公式考虑其交集，则各阶段失效概率的精确表达式：

$$\bar{R}_1 = c_1c_2 + c_1c_3 + c_4 - c_1c_2c_3 - c_1c_2c_4 - c_1c_3c_4 + c_1c_2c_3c_4; \quad (3)$$

$$\bar{R}_2 = c_1c_2 + c_1c_4 + c_2c_3 + c_3c_4 - c_1c_2c_3 - c_1c_2c_4 - c_1c_3c_4 - c_2c_3c_4 + c_1c_2c_3c_4 \quad (4)$$

若不考虑各最小割集间的相关性, 可得各阶段失效概率的近似表达式:

$$\bar{R}_1 = 1 - (1 - c_1c_2)(1 - c_1c_3)(1 - c_4); \quad (5)$$

$$\bar{R}_2 = 1 - (1 - c_1c_2)(1 - c_1c_4)(1 - c_2c_3)(1 - c_3c_4)。 \quad (6)$$

在式(3)~(6)中未作任务割集的消减。

下面通过一组不同的失效率(1/h)取值, 来比较各近似方法。设

$$\lambda_1 = 10^{-5}, \lambda_2 = 10^{-4}, \lambda_3 = 10^{-4}, \lambda_4 = 10^{-3},$$

式中, λ_i 是事件 C_i 的失效率。

由式(3)、(4)及式(1), 可得 INEX 方法的计算结果:

$$\bar{\rho}_{\text{INEX}} = 9.907\%,$$

式中: $\bar{R}_1 = 9.51\%$; $\bar{R}_2 = 0.4297\%$ 。

由 INEX-CC 方法求 $\bar{\rho}_{\text{INEX-CC}}$, 需对任务割集作消减操作, 即将割集 C_1 、 C_2 从阶段 1 的割集列表中删除, 则式(3)变为:

$$\bar{R}_1 = c_1c_2 + c_4 - c_1c_3c_4。 \quad (7)$$

则由式(7)、(4)及式(1), 可得 INEX-CC 方法的计算结果:

$$\bar{\rho}_{\text{INEX-CC}} = 9.906\%,$$

式中: $\bar{R}_1 = 9.52\%$; $\bar{R}_2 = 0.43\%$ 。

此多阶段系统不可靠度的精确值为 $\bar{\rho} = 9.74\%$ 。

由上述结果可见, 各种方法系统不可靠度计算结果大小排序为:

$$\bar{\rho} \leq \bar{\rho}_{\text{INEX-CC}} \leq \bar{\rho}_{\text{INEX}}。$$

可见, INEX-CC 方法的计算结果与精确解更接近。其正确性是显然的, 因为较之方法 INEX, 方法 INEX-CC 更多地应用了精确解法的有关步骤。

上述基于故障树的 PMS 分析方法实质上是将传统的单阶段故障树分析方法直接沿用于多阶段的分析, 简洁易懂, 对于熟悉故障树方法的分析者易于掌握。由于多阶段任务系统较之单阶段系统更为复杂, 实际分析中, 除了采用故障树方法, 还应将多种可靠性分析方法相结合, 以取得最佳的分析效果。^[5]

参考文献:

- [1] 谢红卫, 宫二玲, 贺勇军. 时变结构多阶段任务系统的可靠度研究[J]. 国防科技大学学报, 1999,21(5): 40-48
- [2] 周经纶, 孙权. 一种故障树分析的新算法[J]. 模糊系统与数学, 1997,11(3):74-78
- [3] Burdick G R. Phased mission analysis: a review of new developments and an application[J]. IEEE Trans. on reliability, 1977,26(1)
- [4] Bouissou M. An ordering heuristic for building binary decision diagrams from fault-trees. Proc. 1996 Ann. Reliability & Maintainability Symp. 1996:208-214
- [5] Smotherman M K, Zemoudeh K. A non-homogeneous Markov model for phased mission reliability analysis[J]. IEEE Trans. Reliability. 1989,38:585-590

Research on the reliability model for phased mission system

XING Tao

(Academic Atandard Ataff, P.O. BOX 1481, Beijing, 102442)

Abstract: With the raising of systematic complexity and automation level, the application of Phased Mission System (PMS) increases. Comparing with unitary stage system, the reliability analysis of PMS becomes more complex because of the correlation between stages. After brief introduction for PMS, this paper builds the fault tree model for PMS reliability analysis. Taking certain PMS as an example, several calculation methods are compared.

Key words: phased mission system; PMS; reliability; fault tree