

结合测试性验证的任务可靠性验证方法

张艺琼*, 曾照洋, 刘萌萌

中航工业综合技术研究所, 北京 100028

摘要: 针对目前任务可靠性尚无工程验证的现状, 在基于现有测试性试验工程应用的基础上提出了一个任务可靠性验证方法。阐述了该方法的理论, 分析了需评估的参数, 介绍了验证的流程, 给出了数据收集和处理的方法, 并根据收集处理的结果给出了任务可靠性的评估方法, 包括点估计、置信下限估计和置信区间估计。在基本可靠性评估的基础上综合测试性的数据, 实现了对任务可靠性的有效评估, 为任务可靠性的考核提供了依据。

关键词: 任务可靠性; 测试性试验; 置信下限; 置信区间

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2016) 04-0046-04

目前, 可靠性验证试验主要考核设备或系统的基本可靠性指标, 如平均故障间隔时间(MTBF)、基本可靠度。而任务可靠性的考核尚未开展。任务可靠性是产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力, 任务可靠性需要考虑任务期间那些影响任务完成的故障, 产品也应该达到相应的任务可靠性指标, 如任务可靠度等。

目前, 可靠性试验受到载荷施加的局限, 试验无法涵盖完成任务过程中存在的工作载荷应力, 如数据的输入和输出、数据的边界条件、数据的组合以及由于载机飞行状态的变化引起的数据变化等, 因而无法开展任务可靠性的验证。

本文结合目前比较常用的测试性验证方法, 采用故障模拟的方法获得任务可靠性评估验证数据, 完成任务可靠性的验证。

1 验证的指标参数

1.1 平均故障间隔时间

GJB 451A《可靠性维修性保障性术语》中, 平均故障间隔时间定义为: 在规定的条件下和规定时间内, 产品的寿命总数与故障总数之比^[1]。用下面的公式表示:

$$MTBF = \frac{T_{\text{寿命}}}{N_{\text{故障}}} \quad (1)$$

式中: $T_{\text{寿命}}$ 为产品的寿命周期; $N_{\text{故障}}$ 为影响产品功能的故障总

数, 可按照GJB z1391-2006中4.2.7节的故障判据进行收集。

1.2 平均严重故障间隔时间(MTBCF)

GJB 451A《可靠性维修性保障性术语》中平均严重故障间隔时间定义为: 在规定的系列任务剖面中, 产品任务总时间与严重故障总次数之比。用下面的公式表示:

$$MTBCF = \frac{T_{\text{任务}}}{N_{\text{严重故障}}} \quad (2)$$

式中: $T_{\text{任务}}$ 为产品的任务时间; $N_{\text{严重故障}}$ 为影响任务的严重故障总数, 其中严重故障是指不能完成规定任务的或可能导致人或物重大损失的故障或故障组合。

1.3 任务实现率(MAR)

本文引入任务实现率的概念, 定义为在规定的系列任务剖面中, 武器装备的所有关联故障对其任务的影响程度, 用下式表示:

$$MAR = \frac{N_R}{N_M} \times 100\% \quad (3)$$

式中: N_R 为在产品的所有寿命周期中, 所有影响任务的故障总数; N_M 为在产品的所有寿命周期中, 所有关联故障总数。

2 任务可靠性的验证思路

结合测试性验证的任务可靠性验证方法仍采用统计试验方案, 其可靠性的验证采用指数分布试验方案, 测试性的

收稿日期: 2015-12-28; 录用日期: 2016-01-30

*通讯作者: Tel.: 010-84380262 E-mail: zhangyiqiong1982@163.com

引用格式: ZHANG Yiqiong, ZENG Zhaoyang, LIU Mengmeng. Research on test technology of mission reliability based on testability verification [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(04): 46-49. 张艺琼, 曾照洋, 刘萌萌. 结合测试性验证的任务可靠性验证方法研究 [J]. 航空科学技术, 2016, 27(04): 46-49.

验证采用二项分布^[3,4],综合验证方案的具体思路,具体流程如图1所示。

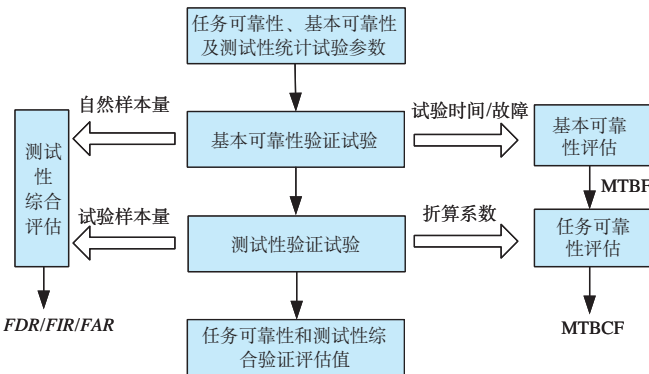


图1 任务可靠性与测试性综合验证思路

Fig.1 Mission reliability and testability synthesis verification

- (1) 首先根据任务可靠性与测试性综合验证参数,选取可以构成完整统计试验方案的试验参数。
- (2) 根据可靠性统计试验参数,开展产品的基本可靠性验证试验,验证产品的基本可靠性指标。试验中,记录可靠性验证试验的试验时间和发生的所有自然故障的信息(包括关联故障和非关联故障)。
- (3) 根据测试性统计试验参数,开展产品的测试性验证试验,以验证产品的测试性指标。试验中,记录所有的注入故障信息、故障检测信息、故障隔离信息,以及各故障对任务的影响结果等信息。
- (4) 任务可靠性的评估。首先,根据可靠性试验的数据,评估产品的MTBF;其次,根据测试性数据,评估折算系数;最后,将两个结果综合,评估平均严重故障间隔时间MTBCF。
- (5) 测试性指标的评估。首先,根据可靠性试验数据,获得自然故障数据;其次,开展测试性验证试验,获得模拟注入试验样本信息;最后,综合两部分试验的所有故障样本量,对产品机内测试(BIT)的检测结果进行分析评估^[5]。

3 评估算法

3.1 相关数据的收集

任务可靠性相关数据的收集是任务可靠性评估的基础,任务可靠性相关数据的收集包括2部分:评估基本可靠性的相关数据收集以及计算折算系数MAR的相关数据收集^[6]。

3.1.1 基本可靠性验证试验中数据的收集

可靠性验证试验中,首先需要记录试验的总试验时间 T 和试验中发生的责任故障总数 r 。

3.1.2 计算折算系数MAR的相关数据收集

计算折算系数MAR所需要的数据来源包括可靠性验证试验和测试性验证试验。下面将分别介绍:

(1) 可靠性验证试验中可靠性相关数据的收集

在可靠性验证试验开展的过程中、试验前和试验后需要对发生所有故障进行收集,找出可以进行折算系数计算的有用故障数据,记入表1中。将所有的故障总数求和,记为 A_R ,对所有影响任务的故障总数求和记为 a_{TE}^R 。数据筛选的原则为:产品未在任务工作模式下发生的故障不记录。

(2) 测试性验证试验中可靠性相关数据的收集

在测试性验证试验中,需要对模拟注入的所有故障进行记录,记入表2。测试性验证试验中可用于折算系数计算的数据与故障模拟注入的故障数据相同,总数为 N_T 。将影响任务的故障数求和,计为 n_{TE}^T 。

3.2 相关数据的处理

任务可靠性水平的综合评估,需要首先完成对产品基本可靠性水平的评估,然后计算出折算系数MAR,最后完成任务可靠性水平的综合评估。为了完成折算系数MAR的计算,需对可靠性验证试验和测试性验证试验中收集的所有数据进行处理。

3.2.1 可靠性验证试验中相关数据的处理

依据3.1节中的可靠性故障数据的收集结果,可靠性验

表1 可靠性验证试验中可靠性相关数据
Table 1 The reliability data in reliability verification test

产品名称: (1)				产品编号: (2)		
产品级别: (3)				产品数量: (4)		
试验名称: (5)				试验时间: (6)		
试验条件: (7)		分析者:			日期:	
序号 (8)	故障模式 / 代码 (9)	故障率 (10)	故障原因 (11)	故障部位 (12)	任务完成情况 (13)	是否影响任务 (14) 备注 (15)
1						
...						
总计	A_R				a_{TE}^R	

注: (1) 该表所记录的产品名称; (2) 该表所记录的产品编号; (3) 该表所记录产品的级别; (4) 进行试验的样件数量; (5) 试验名称记录; (6) 试验时间记录; (7) 试验条件记录; (8) 故障模式的顺序编号,当某一种故障模式重复发生时,需重复记录; (9) 发生故障的故障模式,当某一种故障模式重复发生时,需重复记录; (10) 发生故障的故障模式的故障率; (11) 故障原因为说明该故障记录是否有效; (12) 故障发生的部位; (13) 具体说明该故障对产品的任务完成的影响情况; (14) 若该故障影响任务的完成,则填入1,否则填入0; (15) 根据需要填入相关信息。

表2 测试性验证试验中可靠性相关数据
Table 2 The reliability data instestability verification test

产品名称: (1)			产品编号: (2)			
产品级别: (3)			产品数量: (4)			
试验名称: (5)			试验时间: (6)			
试验条件: (7)			分析者:		日期:	
序号 (8)	故障模式/代码 (9)	故障率 (10)	故障原因 (11)	故障注入部位 (12)	任务完成情况 (13)	是否影响任务 (14) 备注 (15)
1						
...						
总计	N_T				n_{TE}^T	

注: (1) 该表所记录的产品名称; (2) 该表所记录的产品编号; (3) 该表所记录产品的级别; (4) 进行试验的样件数量; (5) 试验名称记录; (6) 试验时间记录; (7) 试验条件记录; (8) 故障模式的顺序编号, 当某一种故障模式重复发生时, 需重复记录; (9) 发生故障的故障模式, 当某一种故障模式重复发生时, 需重复记录; (10) 发生故障的故障模式的故障率; (11) 故障原因为产品 FMECA 报告中分析的下一层次引发该故障模式的原因; (12) 故障注入部位为故障模拟时故障注入的位置; (13) 具体说明该故障对产品的任务完成的影响情况; (14) 若该故障影响任务的完成, 则填入 1, 否则填入 0; (15) 根据需要填入相关信息。

证试验中统计的故障总数为 A_R , 设第 i 个故障模式中发生的故障数为 a_i^R , 满足:

$$a_1^R + a_2^R + \cdots + a_N^R = A_R \quad (4)$$

其中对各故障模式中影响任务的故障模式数为 $a_{TE,1}^R, \cdots, a_{TE,N}^R$ 。则:

$$a_{TE,1}^R + a_{TE,2}^R + \cdots + a_{TE,N}^R = a_{TE}^R \quad (5)$$

3.2.2 测试性验证试验中相关数据的处理

依据 3.1 节中的测试性相关数据的收集结果, 测试性验证试验中抽取的试验样本量为 N_T , 设从第 i 个故障模式中抽取的样本数为 n_i^T , 满足:

$$n_1^T + n_2^T + \cdots + n_N^T + n_{N+1}^T + \cdots + n_M^T = N_T \quad (6)$$

其中对各故障模式中影响任务的故障模式数为 $n_{TE,1}^R, \cdots, n_{TE,N}^R$ 。则:

$$n_{TE,1}^R + n_{TE,2}^R + \cdots + n_{TE,N}^R = n_{TE}^R \quad (7)$$

3.3 任务可靠性的评估

3.3.1 基本可靠性的评估^[2]

(1) 点估计

依据 3.1.1 节, 试验数据为: 总试验时间为 T , 试验中发生的责任故障总数 r 。首先计算 MTBF 的观测值 (点估计值) $MTBF$ 。

$$MTBF = \frac{T}{r} \quad (8)$$

(2) 单侧置信下限估计

产品基本可靠性 MTBF 的单侧置信下限根据下式计算:

$$MTBF_{L1} = 2T / \chi_{1-c}^2 (2r+2) \quad (9)$$

式中: c 为置信度; r 为产品任务可靠性中责任故障的总数; $\chi_r^2(i)$ 为自由度为 r 的 χ^2 分布的 γ 上侧分位点。

(3) 置信区间估计

按式 (10) 和式 (11), 计算 MTBF 的置信下限 $MTBF_{L2}$ 和

置信上限 $MTBF_{\mu2}$:

$$MTBF_{L2} = 2T / \chi_{1-c}^2 (2r+2) \quad (10)$$

$$MTBF_{\mu2} = 2T / \chi_{1+c}^2 (2r) \quad (11)$$

3.1.2 任务可靠性的评估

任务实现率 MAR 的点估计值计算公式为:

$$\widehat{MAR} = \frac{a_{TE}^R + n_{TE}^T}{A_R + N_T} \quad (12)$$

式中: A_R 为可靠性验证试验中责任故障总数, N_T 为测试性验证试验中模拟注入的故障总数, a_{TE}^R 为可靠性验证试验中影响任务的责任故障总数, n_{TE}^R 为测试性验证试验中影响任务的责任故障总数。

(1) 点估计

根据上面分析的结果, 产品的平均严重故障间隔时间的点估计计算公式为:

$$MTBCF = \frac{MTBF}{\widehat{MAR}} \quad (13)$$

(2) 单侧置信下限估计

产品任务可靠性 MTBCF 的单侧置信下限根据下式计算:

$$MTBCF_{L1} = \frac{MTBF_{L1}}{MAR_{L1}} \quad (14)$$

式中: MAR_L 为任务实现率的单侧置信下限。

(3) 双侧置信下限

按式 (15), 计算 MTBCF 的双侧置信下限:

$$MTBCF_{L2} = \frac{MTBF_{L2}}{MAR_{L2}} \quad (15)$$

式中: $MTBCF_{L1}$ 为平均严重故障间隔时间的双侧置信下限, $MTBF_L$ 为平均故障间隔时间的双侧置信下限, MAR_{L2} 为任务实现率的双侧置信下限。

4 结论

通过本论文研究,克服了目前任务可靠性验证尚无工程可操作方法的现状,为任务可靠性的验证提供有效的手段。通过在基本可靠性评估的基础上综合测试性的数据,实现了对任务可靠性的有效评估,为任务可靠性的考核提供了依据。

AST

参考文献

- [1] GJB 451A, 可靠性维修性保障性术语 [S]. 1991.
GJB 451A, The terms of reliability and maintainability and supportability [S]. 1991. (in Chinese)
- [2] GB/T 4087.3-2009, 数据的统计处理和解释二项分布可靠度单侧置信下限 [S]. 2009.
GB/T 4087.3-2009, Data statistical processing and interpretation for the two distribution reliability of the lower confidence limit [S]. 2009. (in Chinese)
- [3] GB 5080.5-1985, 设备可靠性试验成功率的验证试验方案[S]. 1985.
GB 5080.5-1985, Verification testing program for equipment reliability test success rate [S]. 1985. (in Chinese)
- [4] 田仲, 石君友. 现有测试性验证方法分析与建议[J]. 质量与可靠性, 2006(2): 47-51.
TIAN Zhong, SHI Junyou. Analysis and suggestions on the existing testability verification methods [J]. Quality and Reliability, 2006(2): 47-51. (in Chinese)
- [5] 田仲, 石君友. 系统测试性设计分析与验证[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
TIAN Zhong, SHI Junyou. System testability design analysis and verification [M]. Beijing: Beihang University Press, 2003. (in Chinese)
- [6] 何国伟, 戴慈庄. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
HE Guowei, DAI Cizhuang. Reliability test technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)

作者简介

张艺琼(1982—) 女, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 测试性验证与设计。

Tel: 010-84380262

E-mail: zhangyiqiong1982@163.com

Research on Test Technology of Mission Reliability based on Testability Verification

ZHANG Yiqiong*, ZENG Zhaoyang, LIU Mengmeng

AVIC China Aero-polytechnology Establishment, Beijing 100028, China

Abstract: Aiming at there is no method to validate the mission reliability, introduced a way to validate mission reliability base on testability test engineering application. Emphasized the theory of this method, analyzed need assessment parameters, introduced the validation flow, provided the method of data collecting and processing. According to the results of processed data, the mission reliability evaluation method was put forward, including point estimation, lower confidence limits estimation, confidence interval estimation. The research integrated testability data based on basic reliability assessment, realized the effective assessment of mission reliability. It can provide evidence for validating the mission reliability.

Key Words: mission reliability ; testability test; lower confidence limits; confidence interval

Received: 2015-12-28; Accepted: 2016-01-30

*Corresponding author. Tel. : 010-84380262 E-mail: zhangyiqiong1982@163.com