

基于 GSPN 的飞机测试性指标确定方法研究

王小强, 韩斌

(中航工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 针对目前飞机测试性指标论证时缺乏有效方法支撑问题, 提出了一种基于广义随机 Petri 网 (Generalized Stochastic Petri Nets, GSPN) 的测试性指标确定方法; 通过分析飞机航线级的维修过程, 构建过程的 GSPN 模型, 并对模型进行求解和分析, 得到测试性指标与使用可用度和平均修复时间之间的关系, 以这两个指标共同作为约束目标, 通过权衡分析确定飞机合理的测试性指标, 并以某飞机测试性指标论证为例, 演示验证了方法的可行性。

关键词: 测试性指标; 广义随机 Petri 网; 使用可用度; 平均修复时间

Research on Determination Method for Testability Index of Aircraft Based on GSPN

Wang Xiaoqiang, Han Bin

(AVIC First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Aiming at the problem of lacking of effective method in the determination of aircraft testability index, a new method is proposed based on Generalized Stochastic Petri Nets. Through analyzing the maintenance process of the aircraft line level, the GSPN model of the process is constructed. Then the model is solved and analyzed. Meantime the relationship between testability index and operational availability and mean time to repair is also obtained. Using the two indexes as a constraint, rational testability index is determined by trade-off analysis. Finally, taking the determination of one aircraft testability index as an example, the feasibility of the method is demonstrated.

Keywords: testability index; generalized stochastic Petri nets; operational availability; mean time to repair

0 引言

测试性是指产品能及时、准确地确定其状态 (可工作、不可工作或性能下降程度), 并隔离其内部故障的一种设计特性^[1]。现代飞机的功能越来越先进, 技术和结构复杂性越来越强, 各系统的设计也越来越高度集成化和综合化, 因此对飞机的故障诊断与隔离提出了更高、更新、更严的要求。在飞机测试性设计之初, 首先应确定合理的测试性指标作为输入和依据, 过高的指标要求将使产品设计难度、开发周期以及开发费用大幅度地增加, 过低的指标要求将不能充分利用系统资源, 达不到系统的最终要求^[2]。目前在工程研制过程中, 确定飞机测试性指标时往往参考类似机型或其它机型的数据, 结合工程经验及飞机特点进行确定, 主观性太强, 缺乏科学依据及方法的支撑。

测试性指标与可靠性、维修性、保障性等指标之间是相互影响、相互约束的, 本文依据 GSPN 的相关理论, 构建飞机航线级维修过程的 GSPN 模型, 通过求解模型的稳态概率得到可用度与测试性指标之间的关系, 并进一步分析得到平均修复时间与测试性指标的关系, 以可用度和平均修复时间作为约束目标, 通过权衡分析确定飞机合理的测试性指标。

1 构建维修过程 GSPN 模型

飞机航线级维修一般包括故障发生、故障检测、故障隔离、故障修复、检测校准等活动, 其中故障修复又可根据故障检测、故障隔离的结果进行细化, 具体过程如图 1 所示。

广义随机 Petri 网是 SPN 的扩展, 通过在 SPN 中引入零

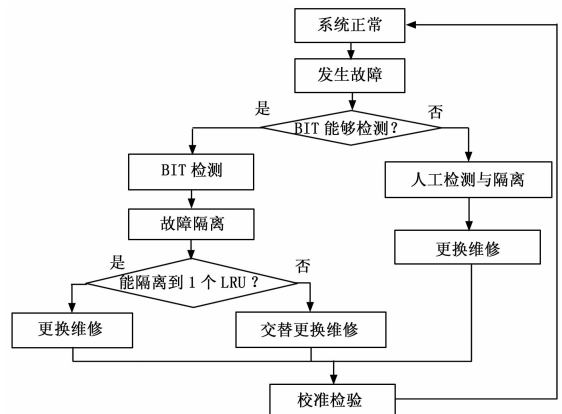


图 1 飞机航线级维修过程

延迟时间变迁而得到, 通常零延迟时间变迁也称为立即变迁, 其变迁优先级高于时间变迁^[3]。GSPN 模型中变迁有效地描述了时间参数 (如任务时间、故障检测时间、故障隔离时间、维修时间等) 和概率参数 (故障率、故障检测率、故障隔离率等), 根据图 1 的飞机航线级维修过程, 构建其 GSPN 模型, 如图 2 所示。

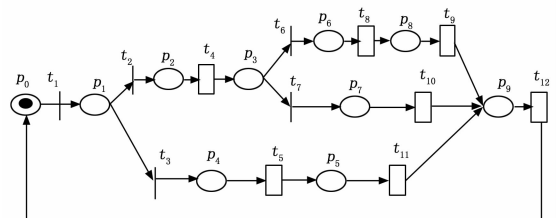


图 2 维修过程的 GSPN 模型

维修过程 GSPN 模型中的库所和变迁的具体含义如表 1 所示。

收稿日期: 2015-10-29; 修回日期: 2015-11-27。

基金项目: 航空科学基金 2013 年度资助项目 (2013ZD03016)。

作者简介: 王小强 (1985-), 男, 陕西岐山人, 硕士, 工程师, 主要从事飞机维修性、测试性设计与分析方向的研究。

表 1 图 2 中库所和变迁的具体含义

库所	含义	变迁	含义	速率或概率
P_0	系统正常工作	t_1	故障发生	λ
P_1	系统故障状态	t_2	故障通过 BIT 能够检测	γ_{FD}
P_2	系统待检测	t_3	故障通过 BIT 无法检测	$1 - \gamma_{FD}$
P_3	故障 BIT 检测结束	t_4	通过 BIT 进行故障检测	η_D
P_4	故障待人工检测	t_5	人工检测	η_λ
P_5	人工检测结束	t_6	故障可以隔离到 1 个 LRU	γ_{FI}
P_6	故障待隔离到 1 个 LRU	t_7	故障无法隔离到 1 个 LRU	$1 - \gamma_{FI}$
P_7	故障待修复 (交替更换维修)	t_8	故障隔离	η_I
P_8	故障待修复 (直接更换维修)	t_9	直接更换维修	μ_1
P_9	故障修复结束, 待校准检验	t_{10}	交替更换维修	μ_2
		t_{11}	更换维修	μ_3
		t_{12}	检验校准	μ_4

2 模型的求解

从数学上讲, GSPN 和连续时间马尔可夫链 (continuous time Markov chain, CTMC) 是同构的, 因此可以采用同构法对系统进行分析^[4-5]。设 GSPN 的可达标识集为 S , 按照其特性可以分为两个集合 T 和 V , 其中 T 为显状态, 是时间变迁集合, V 为隐状态, 是立即变迁集合。

根据 GSPN 模型, 可以得到状态可达图, 基于可达图可以得到系统显状态之间的状态转移矩阵 U' , 由 U' 可以得到 CTMC 的状态转移矩阵 Q , 矩阵中的元素 Q_{ij} 为:

$$Q_{ij} = \begin{cases} U'_{ij}, & i \neq j \\ -\sum_{k \in T, k \neq i} U'_{ik}, & i = j \end{cases} \quad (1)$$

设 $\pi = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k, \dots]$ 为系统的显状态概率, 则其满足:

$$\pi Q = 0 \text{ 且 } \sum_{k \in T} \pi_k = 1 \quad (2)$$

通过求解式 (2) 可得到系统的稳态概率解。

根据上述理论, 对图 2 构建的维修过程 GSPN 模型进行求解, 过程如下:

1) 设可达表示集 $S = \{M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9\}$, 其中显状态集 $T = \{M_0, M_2, M_3, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9\}$, 隐状态集 $V = \{M_1, M_4\}$, 从而得到系统的状态可达图, 如图 3 所示。

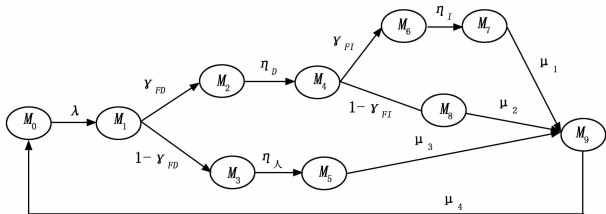


图 3 状态可达图

2) 根据图 3 可以得到显状态的状态转移矩阵为:

$$U' = \begin{bmatrix} 0 & \lambda\gamma_{FD} & \lambda(1-\gamma_{FD}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_D\gamma_{FI} & 0 & \eta_D(1-\gamma_{FI}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta_\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 \\ \mu_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3) 根据式 (1) 构造稳态转移矩阵:

$$Q = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda\gamma_{FD} & \lambda(1-\gamma_{FD}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\eta_D & 0 & 0 & \eta_D\gamma_{FI} & 0 & \eta_D(1-\gamma_{FI}) & 0 \\ 0 & 0 & -\eta_\lambda & \eta_\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mu_3 & 0 & 0 & 0 & \mu_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_I & \eta_I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_1 & 0 & \mu_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_2 & \mu_2 \\ \mu_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4) 根据式 (2) 建立方程组, 求系统处于状态 M_0 的稳态概率 π_0 即为系统的稳态使用可用度 A_0 。

$$A_0 = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu_4} + \lambda\gamma_{FD} \left(\frac{1}{\eta_D} + \frac{\gamma_{FI}}{\eta_I} + \frac{\gamma_{FI}}{\mu_1} + \frac{1-\gamma_{FI}}{\mu_2}\right) + \lambda(1-\gamma_{FD}) \left(\frac{1}{\eta_\lambda} + \frac{1}{\mu_3}\right)\right)^{-1} \quad (5)$$

飞机研制过程中维修性常用的指标是平均修复时间 (MTTR), 它与使用可用度 (A_0) 和平均故障间隔时间 (MTBF) 之间的关系为:

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6)$$

通过式 (5) 和式 (6), 得出 MTTR 与测试性指标之间的关系为:

$$MTTR = \frac{1}{\mu_4} + (1-\gamma_{FD}) \left(\frac{1}{\eta_\lambda} + \frac{1}{\mu_3}\right) + \gamma_{FD} \left(\frac{1}{\eta_D} + \frac{\gamma_{FI}}{\eta_I} + \frac{\gamma_{FI}}{\mu_1} + \frac{1-\gamma_{FI}}{\mu_2}\right) \quad (7)$$

3 基于 GSPN 的测试性指标确定方法流程

工程中测试性常用的指标包括采用 BIT 的故障检测率 (γ_{FD})、隔离到 1 个 LRU 的故障隔离率 (γ_{FI})、平均故障检测时间 ($1/\eta_D$)、平均故障隔离时间 ($1/\eta_I$)、人工检测时间 ($1/\eta_\lambda$), 式 (5) 和式 (7) 分别给出了这些指标与可靠性、维修性和保障性指标之间的约束关系, 当可靠性、维修性、保障性指标确定之后, 通过权衡分析, 可以得到合适的测试性指标值, 具体流程如图 4。

4 工程实例

某飞机指标论证时确定的可靠性指标 MFHBF 不低于 10fh ($\lambda \leq 1/10$), MTTR 不大于 1.6 h, 使用可用度 A_0 不低于 0.87, 其它与维修相关的指标分别为直接平均更换维修时

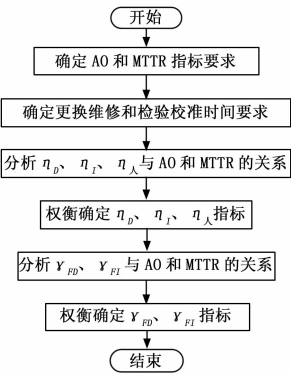


图 4 基于 GSPN 的测试性指标确定方法流程

间 1 h ($\mu_1 = 1 \text{ h}^{-1}$), 平均交替时间 2 h ($\mu_2 = 1/2 \text{ h}^{-1}$), 平均更换维修时间 1 h ($\mu_3 = 1 \text{ h}^{-1}$), 平均检测校准时间 10 min ($\mu_4 = 6 \text{ h}^{-1}$), 通过上述方法, 权衡分析飞机的测试性指标。

将上述已知参数代入式 (5) 和式 (7), 设故障检测率和故障隔离率相同, 取故障检测率分别为 0.7、0.8、0.9、0.95 时, 分别以故障检测速率、故障隔离速率和人工检测速率为自变量, 分析这些参数与使用可用度和 MTTR 之间的影响关系, 结果如图 5 所示。

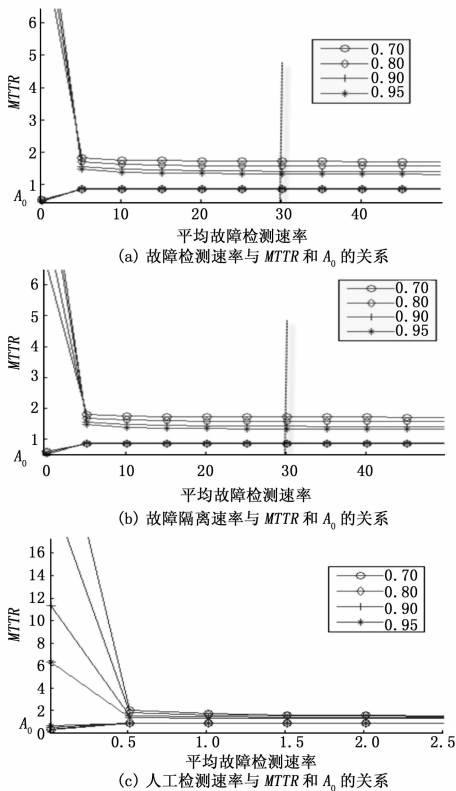


图 5 影响关系结果图

从图 5 (a) 和图 5 (b) 可以看出, 取不同的故障检测率和故障隔离率, 随着平均故障检测速率和平均故障隔离速率的增大, MTTR 都随之减小, 使用可用度 A_0 都随之增大, 当速率增大到一定程度时, 对 MTTR 和 A_0 的影响变化已经很小, 此时再增大速率对于降低 MTTR 和提高 A_0 意义不大, 相反可

能会提高实现成本以及增加系统的复杂性, 因此权衡分析取通过 BIT 进行检测的平均故障检测速率 η_D 不小于 30, 平均故障隔离速率 η_I 不小于 30, 即平均故障检测时间和平均故障隔离时间均为不大于 $1/30 = 2 \text{ min}$ 。

从图 5 (c) 可以看出, 随着平均人工检测速率的增大, MTTR 随之减小, A_0 随之增大, 当 $\eta_A > 0.5$ 时, 随着平均故障检测速率的增大, 故障检测率和故障隔离率对 MTTR 和 A_0 的影响越来越小, 说明此时平均人工检测速率对 MTTR 和 A_0 的影响已经很小, 同时考虑实际中人工检测具有很多不确定性, 因此速率也不宜过高, 权衡考虑, 取 $\eta_A = 1$, 即平均人工检测隔离时间为 1 h。

将确定的 η_D 、 η_I 和 η_A 指标值代入式 (5) 和式 (7), 取不同的故障隔离率, 以故障检测率为自变量, 分析其余 A_0 和 MTTR 的关系, 结果如图 6 所示。

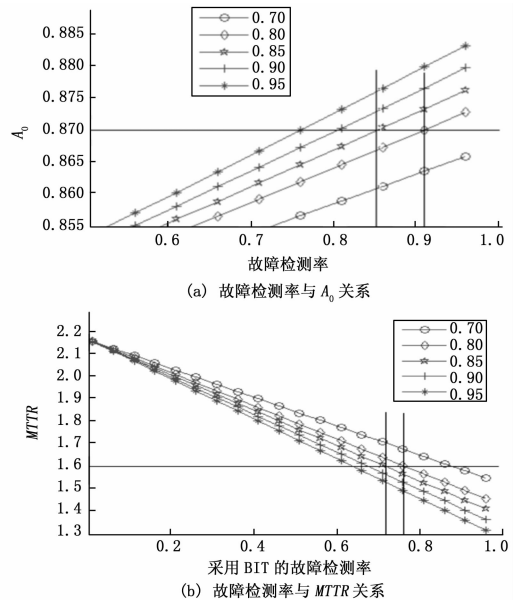


图 6 关系图

从图 6 可以看出, 当故障隔离速率为 0.8 时, 要满足 A_0 不小于 0.87 的要求, 故障检测率必须大于 0.91, 同时要满足 MTTR 不大于 1.6 h 的要求, 则需故障检测率大于 0.76; 当故障隔离率为 0.85 时, 要同时满足 A_0 和 MTTR 要求, 则需要故障检测率分别大于 0.85 和 0.72; 考虑到实际工程中, 故障隔离时应尽可能隔离到单个 LRU, 避免出现模糊组的情况, 因为模糊组的修复时间往往大于直接更换维修时间, 同时结合工程实际, 考虑设计的可实现性、成本、机载设备的测试性设计水平以及测试性试验结果等因素, 故障检测率和故障隔离率也不宜过高, 结合因此综合权衡考虑, 采用 BIT 的故障检测率 γ_{FD} 为 0.9, 隔离到单个 LRU 的故障检测隔离率 γ_{FI} 为 0.85。

5 结论

本文以飞机航线级维修过程为基础, 构建了过程的 GSPN 模型, 通过模型求解得到测试性指标与使用可用度 A_0 和平均修复时间 MTTR 之间的关系, 依此为基础通过权衡分析确定测试性指标, 给出了指标确定方法的具体流程, 并以某飞机为例, 验证了方法的可行性。该方法有效地构建了测试性与可靠

(下转第 18 页)