

# 基于机内测试(BIT)的LCC模型改进

董彦非, 张恒喜, 马新力  
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:**在分析原寿命周期费用(LCC)模型的基础上,给出了一种将机内测试(BIT)结合到电子系统LCC中的方法;推导了改进的LCC费用模型。该模型反映了采用BIT带来的益处,减少了维修时间、外部测试设备、备件等的需求量、以及对人员技术水平和预防性维修的要求。在改进的LCC模型中考虑了如下设计因素:诊断差错、诊断不明、未检测故障、BIT硬件故障和虚警等。

**关键词:**寿命周期费用;机内测试;费用模型;电子系统

**中图分类号:**TB114.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)04-25-28

根据统计,在修复性维修中,故障检查和隔离时间占了维修时间的60%左右<sup>[1]</sup>。为了减少故障诊断时间,提高系统的维修性和测试性,从70年代开始,在维修性设计中(尤其是电子系统)广泛采用了机内测试设备(BITE)。机内测试(BIT)即任务系统或设备本身为故障检测、隔离或诊断提供的自动测试能力<sup>[2]</sup>。根据自身的设计,BIT可以进行连续或周期监视,以及在线或离线检测。BIT(包括硬件和软件)用来执行两个过程:1)检测过程,用于检测主设备中是否有故障;2)隔离过程,在检测出故障的前提下,将故障隔离到可更换单元(Replaceable Unit, RU)。

采用BIT可以降低电子系统的保障费用,显著地提高飞机的维修性,缩短维修停机时间,提高飞机的战备完好率。采用BIT的同时也带来了新问题,主要有<sup>[3]</sup>:1)虚警,即BIT错误地将某些功能正常的RU报告为失效;2)BIT诊断错误,即BIT将一个存在的故障隔离到一个或多个正常的RU中;3)未发现故障,即BIT未能检测出故障的RU;4)BIT硬件故障,即BIT本身的物理故障;5)BIT诊断不明,即BIT检测出故障,但是将其隔离到两个或更多的RU中。但是这些问题对LCC模型的影响并没有体现出来,需要对其改进。

## 1 原寿命周期费用模型分析

寿命周期费用(LCC)是在预期的装备寿命周期内,为装备的论证、研制、生产、使用保障、退役所付出的一切费用之和,也称全寿命费用<sup>[4]</sup>。对于LCC的估算方法<sup>[5-6]</sup>与模型的建立<sup>[7-8]</sup>,国内外进行过不少研究。电子系统采用的MIL-STD-001591A中的LCC模型为<sup>[3]</sup>。

$$\begin{aligned} LCC = & C_D + N \cdot C_P + C_{aux} + Z \cdot C_{max} + \\ & (1 - P_F) N_0 \lambda_{PE} T_0 Z (M_i + M_s) C_{MH} + \\ & P_F N_0 \lambda_{PE} T_0 Z \cdot M_{RP} C_{MH} + \\ & P_0 N_0 \lambda_{PE} T_0 Z \cdot C_{FD} + \\ & N_B \lambda_B T_B Z (C_B + M_B C_{MH}) + \\ & (N_B T_B Z M_{PM} C_{MH}) / T_{PM} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $M_i$ 为BIT每隔离一个故障所需工时; $M_s$ 为解决每个BIT诊断不明的故障平均所需工时; $N$ 为BIT的单元数或包含BIT的设备单元数; $Z$ 为预期系统/设备使用的年数。

公式(1)的分析如下:

收稿日期:2000-10-06

基金项目:国防科技预研基金(98J19.3.2.JB3201)

作者简介:董彦非(1970-),男,河南开封人,博士生,主要从事装备管理系统工程研究。

第一行包括了 BIT 发展费用总和( $C_D$ ),生产费用( $N \cdot C_P$ ),辅助设备费用( $C_{aux}$ )以及在剩余寿命中辅助设备的维修费用( $Z \cdot C_{max}$ )。

第二行是在 BIT 发挥作用的情况下隔离故障所需费用。 $(1 - P_F)$ 是由 BIT 检测出来并隔离的主设备的故障比例。 $(N_0 \lambda_{PE} T_0 Z)$ 是主设备剩余寿命中全部故障数;在所有 BIT 检测出来的故障中, $(M_i + M_s)$ 是隔离到故障 RU 所需的平均工时。如果 BIT 自动运行,则  $M_i = 0$ ,如果不存在诊断不明的情况,则  $M_s = 0$ 。

第三行是在 BIT 不能发挥作用的情况下隔离故障所需费用。 $(P_F N_0 \lambda_{PE} T_0 Z)$ 是主设备在剩余寿命中此类故障的总数。

第四行表示检测出 BIT 未发现的主设备故障所需费用。 $(P_0 N_0 \lambda_{PE} T_0 Z)$ 是此类故障的总数。这里假设这些故障最终都被检测出来。

第五行表示每个 BIT 硬件故障所需材料和工时费用。 $(N_B \lambda_B T_B Z)$ 是全部 BIT 硬件故障数。

第六行是 BIT 的预防性维修费用, $T_{PM}$ 为 BIT 预防性维修间隔时间。

公式(1)中第二行和第三行表示了将故障隔离到 RU 的费用,但是并未包括拆除和替换的费用,这是由于此费用对任何 BIT 设计都一样。此外,虚警、预防性维修、备件以及 5 种 BIT 差错所要求的费用等也未能包括在公式(1)中。因此,有必要对公式(1)所表示的 LCC 模型进行改进以求全面地反映寿命周期费用。

## 2 改进费用模型

### 2.1 重新定义设计参数

输入量  $P_F$  是 BIT 未能隔离的故障部分,这部分故障表现为两类差错:第一类,BIT 正确地检测到故障,但在诊断时出错;第二类,BIT 未检测到故障,但故障通过某些形式表现出来。如任务失败或被迫取消。

公式(1)中假设这两类差错的平均故障维修时间相同,所有故障迟早都会暴露。为区分这两类差错,这里定义新的参数: $P_i$  = BIT 未能正确隔离的故障概率,这里假设 BIT 检测到该故障。则 BIT 正确检测到故障而诊断时出错的概率就是  $(1 - P_0)P_i$ 。于是,BIT 不能隔离某一故障的概率为

$$P_F = (1 - P_0)P_i + P_0 = P_0 + P_i - P_0P_i \quad (2)$$

### 2.2 虚警费用

假设只要主设备工作,BIT 就连续工作,即: $T_0 = T_B$ 。这样,维修活动可能在下列三种情况下发生,主设备故障、BIT 物理故障和虚警。除了公式(1)中主设备的故障率(不包括 BIT) $\lambda_{PE}$ 和 BIT 故障率  $\lambda_B$  外,这里假设 BIT 具有一个常量虚警率  $\lambda_{FA}$ ,则总的系统故障率为

$$\lambda = \lambda_{PE} + \lambda_B + \lambda_{FA} \quad (3)$$

如果定义  $M_{FA}$  = 平均虚警维修工时, $C_{FA}$  = 设备剩余寿命中的虚警维修费用,则

$$C_{FA} = N_B \lambda_{FA} T_B Z M_{FA} C_{MH} \quad (4)$$

对于周期 BIT, $T_0 \neq T_B$ ,只需定义  $\lambda_{FA}$  为 BIT 实际工作时每小时的虚警数,则公式(4)仍然适用。如果主设备没有 BIT,仍然会有伪故障出现,维修人员就不能发现操作者报告的问题,就无法利用公式(1)计算 LCC,而公式(4)仍然可用(这是因为  $\lambda_{FA}$  可以解释为伪故障率)。将公式(4)加入公式(1),就可以提供一个统一的方式进行设备间有无 BIT 设计的费用对比。

### 2.3 器材保障费用

公式(1)中,包含维修故障的直接费用,但是并没有包含其它保障费用,如维修器材等。这是由于在公式(1)中假设所有故障迟早都会被正确隔离,这些其它保障费用对于所有 BIT 设计都是相同的。所以在比较备选方案时可以忽略。但是,如果希望得到全部 LCC 的真实估计就要加入这部分费用。

定义  $C_{PE}$  = 平均 RU 故障保障费用, $C_{MS}$  = 装备剩余寿命中维修 RU 故障的保障费用,则

$$C_{MS} = N_0 \lambda_{PE} T_0 Z C_{PE} \quad (5)$$

### 2.4 预防性维修费用

公式(1)中虽然包含 BIT 的预防性维修费用,但并没有包含主设备的预防性维修费用。而连续的 BIT 监视将会减少主设备的维修行动,因此将此部分费用加入 LCC 可以体现 BIT 在这方面的优势。

定义  $M_{PE}$  = 主设备平均预防性维修工时; $T_{PM}$  = 主设备预防性维修间隔时间; $C_{PM}$  = 主设备剩余寿命中预防性维修费用,则

$$C_{PM} = (N_0 T_0 Z M_{PE} C_{MH}) / T_{PE} \quad (6)$$

2.5 备件费用

根据各自具体的设计,BIT 可以在各级维修发挥作用:基层级(外场)、中继级(修理厂)和基地级(大修厂)。下面以 BIT 在外场应用进行讨论(基层级的 RU 简称 LRU)。相似的模型也可以用于其它维修级别。

在基层级出现伪故障和虚警时,如果维修人员认为有故障发生,就会发生“误拆除”,定义误拆除率 = 误拆除 LRU 数/真实 LRU 故障数。

BIT 硬件故障也会导致外场维修行动。如果维修人员不能修理 BIT 硬件故障或者认为是某个 LRU 故障,则会导致“BIT 误拆除”。定义一个 LRU 的 BIT 误拆除率 = 由 BIT 硬件故障引起的误拆除 LRU 数/真实 LRU 故障数。

安装 BIT 可以减少伪故障的发生,但是会出现 BIT 硬件故障和虚警。因此,BIT 设计会影响误拆除率和 BIT 误拆除率,进而影响需要 RU 的备件数。

下面讨论如何将 LRU 引入 LCC 模型中<sup>[3]</sup>。为减少输入数据,这里作两个假设:所有 RU 的误拆除率相同;BIT 误拆除率也相同。则要求的输入内容如下(其中“( I )”表示第一类 RU,即 LRU):

$B_{PR}$ (BIT 拆除率);	$B_{SF}$ (修理厂备件因素);	$C_{OND}(I)$ (LRU 的故障比例);
$F_{PR}$ (RU 误拆除率);	$NB$ (修理厂数目);	$N_{RTS}(I)$ (在大修厂修理的 LRU 故障比例);
$O_{ST}$ (修理厂与维修基地间的转包量和运输时间);	$Q_{PA}(I)$ (各完整系统中所含 LRU 数);	$R_{CT}$ (修理厂月维修周期);
$R_{TS}(I)$ (在修理厂修理的 LRU 故障比例);	$U_C(I)$ (LRU 单价);	$\lambda(I)$ (LRU 故障率)。

于是全系统平均每年拆除的 LRU 数为

$$REM(I) = Q_{PA}(I) N_0 T_0 \lambda(I) [1 + B_{PR} + F_{PR}] \quad (7)$$

LRU 的平均供应量为

$$PL(I) = REM(I) \{ R_{TS}(I) R_{CT} + [N_{RTS}(I) + C_{OND}(I)] O_{ST} \} / (1.2N \cdot B) \quad (8)$$

各修理厂所需 LRU 的初始备件数为

$$S(I) = \text{int} \{ PL(I) + B_{SF} \sqrt{PL(I)} + 0.5 \} \quad (9)$$

公式(9)基于两个假设:1)LRU 故障是一个泊松随机过程,则 LRU 的供应量也具有泊松概率分布;2)在均值很大时,泊松分布可以用正态分布近似。这里 int 是最大整数函数( $\text{int}(x) \leq x$ )。

初始备件的全部费用为

$$BIS = \sum N_B \times S(I) \times U_C(I) \quad (10)$$

2.6 改进后的 LCC 模型

综合以上各项改进,总的 LCC 模型成为

$$\begin{aligned} LCC = & C_D + N \cdot C_P + C_{aux} + Z \cdot C_{max} + \\ & (1 - P_0)(1 - P_i) N_0 \lambda_{PE} T_0 Z (M_i + M_s) C_{MH} + \\ & (P_0 + P_i - P_0 P_i) N_0 \lambda_{PE} T_0 Z M_{RP} C_{MH} + \\ & P_0 N_0 \lambda_{PE} T_0 Z \cdot C_{FD} + \\ & N_B \lambda_B T_B Z (C_B + M_B C_{MH}) + \\ & [ (N_B T_B M_{PM}) / T_{PM} + (N_0 T_0 M_{PE}) / T_{PE} ] Z \cdot C_{MH} + \\ & N_B \lambda_{FA} T_B Z \cdot M_{FA} C_{MH} + \\ & N_0 \lambda_{PE} T_0 Z \cdot C_{PE} + BIS \end{aligned} \quad (11)$$

3 结束语

公式(11)是根据公式(1)发展而来,但它又补充了虚警、器材保障、预防性维修和备件等方面的费用。公式(11)反映了 BIT 对维修时间、外部测试设备、备件的需求量,以及对人员技术水平和预防性维修要求的

减少。公式(11)还包括了5种BIT差错所要求的费用。改进后的LCC模型可以用来回答如下问题:

- 1) 计算出节余的保障费用能否补偿某种BIT的设计和生费用;
- 2) 在给定研制和生产费用的情况下,哪种BIT设计方案最好;
- 3) 对于某一种BIT设计,需要生产多少单元才能使效费比合理;
- 4) BIT设计中的不确定性参数是怎么转移到寿命周期费用(LCC)中的;
- 5) 如何最大限度地减少保障费用,通过减少未检测故障、诊断差错、虚警还是BIT硬件故障?

#### 参考文献:

- [1] 章国栋. 系统可靠性与维修性的分析与设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1990.
- [2] 甘茂治,吴真真. 维修性设计与验证[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [3] Zachary F Lansdowne. Built-in test factors in a life cycle cost model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1994, 43(3):325-330.
- [4] 陈学楚. 装备系统工程[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [5] Marina Karyagina, Walter Wong, Ljubica Vlacic. Life cycle cost modeling using marked point processes[J]. Reliability Engineering & System Safety 1998, 59:291-298.
- [6] 赵全仁,邱志明,窦守健,等. 武器装备论证导论[M]. 北京:兵器工业出版社,1998.
- [7] 甘茂治,康建设,高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [8] 李明,刘澎,张宏森,等. 武器装备发展系统论证方法与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

## Improved LCC Model in Terms of Built-in Test

DONG Yan-fei, ZHANG Heng-xi, MA Xin-li

(The Engineering Institute of the Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the original LCC model, a method is given for incorporating the effects of built-in test (BIT) into the life cycle cost of a given electronic system. An improved LCC model is given that captures the savings achieved by BIT through reducing the maintenance times, complexity of external test equipment, personnel skill levels, amount of spare parts, and the need for preventive maintenance. The model also includes such design considerations as false alarms, diagnostic errors, undetected faults, BIT hardware failures, and diagnostic ambiguity.

**Key words:** life cycle cost; built-in test; cost models; electronic system