

复杂系统可靠性增长试验评价的集成分析模型

刘琦, 武小悦

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘要 研究了可靠性增长的集成规划方法, 通过子系统的可靠性增长规划实现系统的可靠性增长需求. 建立了系统可靠性增长的集成评价模型, 实现子系统增长信息的融合. 最后, 给出了系统可靠性增长检验方法, 可用于完成系统可靠性增长模型的正确性验证.

关键词 复杂系统; 可靠性增长; 集成分析; 可靠性增长规划

Integrated analysis model for reliability growth test evaluation of complex system

LIU Qi, WU Xiao-yue

(College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Since some equipment system has complex configuration, existing reliability growth model can not complete its reliability growth plan and test evaluation. In this paper, the reliability growth integrated plan method was studied. Though subsystem reliability growth plan, the system reliability growth requirement was accomplished. The reliability growth integrated evaluation model was built to fusion subsystems reliability growth information. Finally, the system reliability growth test method was given. By the test method, the validity of integrated model can be demonstrated.

Keywords complex system; reliability growth; integrated analysis; reliability growth plan

1 引言

随着装备复杂化与军事需求的发展, 由于经费、试验时间、可用试验样本量等的限制, 由系统本身出发进行装备的可靠性增长试验^[1] 越来越困难. 而且, 装备系统的组成通常比较复杂, 如在子系统的构成上, 包括硬件装备、软件装备; 在子系统的分布类型上, 包括成败型 (如战斗部)、指数型 (如指控系统) 等分布类型; 从子系统的可靠性增长过程中故障的纠正模式看, 不仅包括及时纠正模式, 还包括延缓纠正模式. 此时, 建立复杂系统可靠性增长分析的差分或微分方程模型比较困难, 甚至有时是不可行的. 因此, 需对复杂系统的可靠性增长试验评价模型进行研究, 从子系统的角度出发, 研究系统可靠性增长试验评价的集成分析模型.

从可靠性增长研究的情况看, 对于组成比较单一的系统可靠性增长分析, 国内外进行了大量的研究, 建立了各种可靠性增长分析模型. 如在硬件可靠性增长分析方面, 经典的模型有 Duane 模型, AMSAA 模型, Gompertz 模型、EDRIC 模型等^[2-3]. 在软件可靠性增长分析方面, 比较经典的模型有 Schneidewind 模型^[4], Jelinski-Moranda 模型^[5], Littlewood-Verrall 模型^[5], Musa-Okumoto 模型等^[6]. 在 Bayes 可靠性增长分析方面, Goswami 等^[7] 针对不同软件故障模式检测与纠正花费的力度不同, 建立了离散软件可靠性增长模型, 并对模型的有效性进行了示例验证.

从现有的研究情况看, 可靠性增长模型主要是针对整个系统的可靠性增长情况进行同步分析, 而对于系统构成复杂, 子系统可靠性增长步骤不一致的情况并未进行论述. 本文结合装备系统组成复杂、子系统可靠

收稿日期: 2009-03-30

资助项目: 国家自然科学基金 (70971133)

作者简介: 刘琦 (1974-), 副教授, 博士, 主要研究方向: 装备试验与评价, 系统评价与决策分析; 武小悦 (1963-), 教授, 博士, 主要研究方向: 系统评价与决策分析.

性增长步骤不一致、可靠性增长分析模型各异的特点,对系统可靠性增长的集成分析模型进行研究.首先给出了系统可靠性增长的集成规划方法,然后对系统可靠性增长估计的 MML 方法进行论述,在此基础上,给出系统可靠性增长的检验方法,完成对集成可靠性增长分析模型正确性的检验.并以装备可靠性增长分析为例进行了示例分析.

2 可靠性增长的集成规划技术

可靠性增长规划是在可靠性增长试验之前对可靠性增长的计划与权衡,是产品研制规划的重要组成部分.现有的可靠性增长规划技术主要体现为理想增长曲线的绘制.而从研究的情况看,可靠性增长的理想曲线通常是以 Duane 模型^[8]为基础进行的,难以反映复杂系统可靠性增长的特点.有鉴于此,下面对可靠性增长的集成规划技术进行论述.

在系统可靠性分析中,通常假设系统为单调关联系统^[9],且不考虑子系统之间可靠性关系的耦合性,建立系统的可靠性框图模型.设复杂系统 S 由子系统 S_i 组成,各子系统的可靠性为 R_i ,其中 $i = 1, 2, \dots, n$.则系统可靠性 R 可描述为子系统可靠性的函数,如下:

$$R = g(R_1, R_2, \dots, R_n) \quad (1)$$

对于上式,当建立的可靠性框图模型为串联模型时, $R = \prod_{i=1}^n R_i$,当可靠性框图模型为并联模型时, $R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$.类似地,可给出表决、备份、网络等系统可靠性的计算公式^[10].当子系统之间存在耦合关系时,可将耦合的子系统合并作为单独的子系统进行可靠性分析.

集成规划技术的思想是:基于系统的初始可靠性和目标可靠性要求,根据子系统的可靠性增长潜力进行可靠性分配,依据可靠性分配的结果制定各子系统的可靠性增长规划.再根据子系统可靠性增长规划的结果,以式(1)为基础,完成系统的可靠性增长规划.具体步骤如下:

- 1) 建立系统可靠性分析的框图模型,明确式(1)的解析表达形式;
- 2) 明确可靠性增长的初始可靠性和目标可靠性要求;
- 3) 进行可靠性分配.结合各子系统的特点与系统可靠性要求,运用相关可靠性分配方法将系统可靠性要求分配到各子系统;
- 4) 根据各子系统的特点建立各自的可靠性增长模型;
- 5) 依据子系统可靠性增长模型,进行子系统可靠性增长规划;
- 6) 根据式(1)对子系统可靠性增长规划结果进行集成,形成系统的可靠性增长规划.

例 1 某系统 S 由子系统 S1、S2、S3 串联组成,系统的任务时间为 $t_0=3.8$ 小时,增长试验结束后要求的可靠性为 0.85.子系统 S1 相对比较成熟,增长潜力小,其初始可靠性为 0.99.子系统 S2 的寿命服从指数分布,其可靠性增长过程可用 Duane 模型描述,其初始任务可靠性为 0.6, S2 的可靠性增长试验时间为 1000 小时,第一次进行故障纠正的时刻为 100 小时.子系统 S3 的可靠性增长过程可用 Gompertz 模型描述,拟进行 12 个周期(每周期 100 小时)的可靠性增长试验.要求进行可靠性增长规划.

对于上述问题,由最小努力法进行可靠性分配,可得在可靠性增长试验截止时,子系统 S1、S2、S3 的可靠性要求分别为 0.99、0.9266、0.9266.所以 S1 的可靠性已达到要求,不用进行可靠性增长试验.对于 S2, Duane 模型为:

$$\theta_c(t) = t^m/a \quad (2)$$

其中, $\theta_c(t)$ 为可靠性增长试验的 t 时刻产品的累积 MTBF, a 为尺度参数, m 为增长率.

结合上述数据,对于子系统 S2 进行可靠性增长规划时,增长曲线中的参数分别为:第一次进行故障纠正的时刻 $t_I=100$ 小时,初始 MTBF 为 $\theta_I = -3.8/\log(0.6) = 7.4389$,增长试验时间为 $t_F = 1000$ 小时,目标 MTBF 为 $\theta_F = -3.8/\log(0.9266) = 49.8470$.

计算可得增长率 m 的估计为:

$$m \approx -1 - \ln\left(\frac{t_F}{t_I}\right) + \left\{ \left[1 + \ln\left(\frac{t_F}{t_I}\right) \right]^2 + 2 \ln\left(\frac{\theta_F}{\theta_I}\right) \right\}^{0.5} = 0.5330.$$

根据上述数据,对于任务时间 $t_0=3.8$,可得可靠性增长的理想曲线模型为^[8]:

$$R_2(t) = \begin{cases} \exp(-3.8/7.4389), & 0 < t \leq 100, \\ \exp\left(\frac{-3.8 \times 0.4670}{7.4389 \times (t/100)^{0.5330}}\right), & t > 100. \end{cases}$$

上式中, t 为可靠性增长试验时间 (单位为小时).

对于子系统 S3, Gompertz 可靠性增长模型为:

$$R_3(T) = ab^{c^i} \quad (3)$$

其中 i 表示可靠性增长试验的周期, $i = 1, 2, \dots$.

对于子系统 S3, 设可靠性增长的极限为 0.99, 求解可得:

$$a = 0.99, \quad b = 0.5859, \quad c = 0.8402.$$

可靠性增长的理想曲线模型为:

$$R_3(i) = 0.99 \times 0.5859^{0.8402^i}, \quad i = 1, 2, \dots, 12.$$

上式中, i 为可靠性增长试验周期 (单位为 100 小时).

由于子系统的可靠性增长试验不一定同步, 因此, 难以将子系统 S2、S3 的可靠性综合为系统级的可靠性. 将 S2、S3 可靠性增长的计划曲线绘制于同一坐标轴上, 可得如图 1 所示的可靠性增长计划曲线 (Plan reliability growth curve).

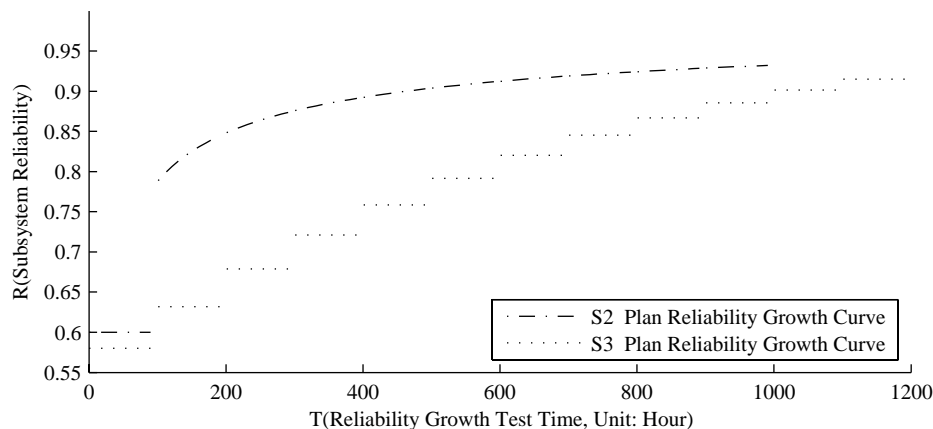


图 1 子系统可靠性增长计划曲线

若增长过程中, 子系统增长试验同时开始, 则系统可靠性增长的规划模型为:

$$R = \begin{cases} 0.99 \times R_2(t) \times R_3([t/100]), & t \leq 1000, \\ 0.99 \times R_2(1000) \times R_3([t/100]), & 1000 < t < 1200. \end{cases}$$

上式中, $[X]$ 为取整函数.

3 可靠性增长的 MML 方法

在装备系统的可靠性分析中, 通常系统级的可靠性试验较少, 而子系统级的可靠性试验较多, 因此建立系统可靠性分析的金字塔模型, 基于修正极大似然估计方法 MML (Modification of the maximum likelihood) 进行系统可靠性参数的估计与评价, 在工程上得到了大量的应用. 下面对可靠性增长的 MML 方法进行分析.

设复杂系统在可靠性增长的累积试验时间 T , 各子系统的可靠性为 $R_i(T)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 则由可靠性结构函数 (1), 可得系统 S 在 T 时刻的可靠性为:

$$R(T) = g(R_1(T), R_2(T), \dots, R_n(T)) \quad (4)$$

上式中, $R_i(T)$ 可通过各子系统的可靠性增长分析模型进行估计. 式 (4) 即为基于子系统可靠性增长分析得出的系统可靠性增长模型.

通常, 利用子系统的可靠性增长试验数据, 根据可靠性增长分析模型计算可得子系统可靠性 $R_i(T)$ 的估计 $\hat{R}_i(T)$ 及估计的方差 $D(\hat{R}_i(T))$. 以式 (4) 为基础, 即可得到系统在增长试验时刻 T 可靠性 $R(T)$ 的估计与方差, 过程如下.

将 $\hat{R}_i(T)$ 代入式 (4), 得出 $R(T)$ 的估计:

$$\hat{R}(T) = g(\hat{R}_1(T), \hat{R}_2(T), \dots, \hat{R}_n(T)) \quad (5)$$

将 $\hat{R}(T)$ 在真值 $R(T)$ 处进行 Taylor 展开, 并进一步计算, 可得^[1]:

$$\hat{R}(T) \approx R(T) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \hat{R}(T)}{\partial R_i(T)} \right)_{\hat{R}_i=R_i} (\hat{R}_i - R_i) \quad (6)$$

$$D(\hat{R}(T)) \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \hat{R}(T)}{\partial \hat{R}_i(T)} \right)_{\hat{R}_i=R_i}^2 D(\hat{R}_i(T)) \quad (7)$$

以式 (5)、(7) 为基础, 即可得出系统可靠性在任意可靠性增长时刻 T 的估计以及估计的方差大小.

例 2 以例 1 为基础, 设在子系统可靠性增长试验中, 由子系统 S2 得到的试验数据如表 1 所示, 由子系统 S3 得到的可靠性增长数据如表 2 所示.

表 1 子系统 S2 的可靠性增长数据

序号	A	B	C	D	E	F	G
1	3	100	4.6052	33.3333	3.5066	3/100	0.0269
2	6	200	5.2983	33.3333	3.5066	3/100	0.0243
3	13	500	6.2146	38.4615	3.6497	7/300	0.0212
4	18	800	6.6846	44.4444	3.7942	5/300	0.0198
5	22	1000	6.9078	45.4545	3.8167	4/200	0.0192

注: A 列对应于累积失效数 $N(t_j)$, B 列对应于累积可靠性增长试验时间 t_j , C 列对应于 $\ln t_j$, D 列对应于由试验数据获得的累积 MTBF 的估计 $\theta_c(t_j)$, E 列对应于 $\ln \theta_c(t_j)$, F 列对应于由极大似然法得到的瞬时失效率的估计 $\hat{\lambda}_M$, G 列对应于由式 (8) 得到的瞬时失效率的估计 $\hat{\lambda}$.

表 2 子系统 S3 的可靠性增长数据

序号	组号	研制时间	R_j	\hat{R}_j	$R_j - \hat{R}_j$
1	1	0	0.58	0.5768	0.0032
2	1	1	0.64	0.6410	-0.0010
3	1	2	0.70	0.6973	0.0027
4	1	3	0.74	0.7457	-0.0057
5	2	4	0.79	0.7867	0.0033
6	2	5	0.82	0.8211	-0.0011
7	2	6	0.85	0.8495	0.0005
8	2	7	0.87	0.8729	-0.0029
9	3	8	0.89	0.8920	-0.0020
10	3	9	0.91	0.9075	0.0025
11	3	10	0.92	0.9201	-0.0001
12	3	11	0.93	0.9303	-0.0003

注: 研制时间单位为 100 小时, R_j 为根据各阶段试验数据得出的可靠性的估计, \hat{R}_j 为根据 Gompertz 模型得出的 R_j 的估计.

对于 S2, 由 Duane 模型的最小二乘法估计^[11], 可得 m 、 a 的最小二乘估计分别为:

$$\hat{m} = \frac{5 \times \sum_{j=1}^5 \ln \theta_c(t_j) \ln t_j - \sum_{j=1}^5 \ln \theta_c(t_j) \sum_{j=1}^5 \ln t_j}{5 \times \sum_{j=1}^5 (\ln t_j)^2 - \left(\sum_{j=1}^5 \ln t_j \right)^2} = 0.1468;$$

$$\hat{a} = \exp \left\{ \frac{1}{5} \left(\hat{m} \sum_{j=1}^5 \ln t_j - \sum_{j=1}^5 \ln \theta_c(t_j) \right) \right\} = 0.0619.$$

将上述 \hat{a} 、 \hat{m} 带入下式, 即可得出任意时刻 t 瞬时失效率 $\lambda(t)$ 的估计^[11].

$$\hat{\lambda}(t) = \hat{a}(1 - \hat{m})t^{-\hat{m}}, \quad t \leq 1000 \quad (8)$$

如在增长试验结束时 ($t = 1000$ 时), 瞬时失效率的估计为:

$$\hat{\lambda}(1000) = \hat{a}(1 - \hat{m})/1000^{\hat{m}} = 0.0192$$

由多元线性回归的性质^[12], 可得对瞬时失效率 $\lambda(t)$ 进行估计的误差为:

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^5 \left(\hat{\lambda}_M(t_j) - \hat{\lambda}(t_j) \right)^2 / (5 - 2) = 1.9036 \times 10^{-5}.$$

由于在任务时间 3.8 小时子系统的可靠性为 $R_2 = \exp(-3.8\lambda)$, 所以可认为 R_2 服从对数期望为 $\mu_{\ln R_2} = -3.8 \times 0.0192 = -0.0730$, 对数方差为 $\sigma_{\ln R_2}^2 = 3.8^2 \times 1.9036 \times 10^{-5} = 2.7488 \times 10^{-4}$ 的对数正态分布. 从而可靠性 R_2 的期望和方差分别为:

$$E(R_2) = \exp \left(\mu_{\ln R_2} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln R_2}^2 \right) = 0.9297,$$

$$D(R_2) = \exp \left(2\mu_{\ln R_2} + \sigma_{\ln R_2}^2 \right) \times \left(\exp \left(\sigma_{\ln R_2}^2 \right) - 1 \right) = 2.3764 \times 10^{-4}.$$

对子系统 S3, 由 Gompertz 模型求解的 Virene 算法^[11], 可得:

$$S_1 = \sum_{j=1}^4 \ln R_j = -1.6488; \quad S_2 = \sum_{j=5}^8 \ln R_j = -0.7360; \quad S_3 = \sum_{j=9}^{12} \ln R_j = -0.3668.$$

$$\hat{c} = \left(\frac{S_3 - S_2}{S_2 - S_1} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.7975; \quad \hat{a} = \exp \left(\frac{1}{4} \left(S_1 + \frac{S_2 - S_1}{1 - \hat{c}^4} \right) \right) = 0.9714; \quad \hat{b} = \exp \left(\frac{(S_2 - S_1)(\hat{c} - 1)}{(1 - \hat{c}^4)^2} \right) = 0.5938.$$

进一步可得对于子系统 S3, 可靠性 R_3 的估计的方差为 $\hat{\sigma}_R^2 = \sum_{i=1}^{12} (R_j - \hat{R}_j)^2 / (12 - 2) = 8.21 \times 10^{-5}$.

增长试验结束后, 子系统 S3 的可靠性的估计为 $\hat{R}_3 = 0.9714 \times 0.5938^{0.7975^{12}} = 0.9385$.

由式 (5) 可得增长试验结束后, 系统可靠性的估计为 $\hat{R}(T) = 0.99 \times 0.9297 \times 0.9385 = 0.8637$.

由式 (7) 可得增长试验结束后, 系统可靠性估计的方差为:

$$D(\hat{R}(T)) \approx (0.99 \times 0.9385)^2 \times 2.3764 \times 10^{-4} + (0.99 \times 0.9297)^2 \times 8.21 \times 10^{-5} = 2.7469 \times 10^{-4}.$$

4 系统可靠性增长检验

式 (5) 给出了在可靠性增长过程中, 由子系统信息进行系统可靠性估计的方法, 式 (7) 给出了估计量的误差. 然而, 系统的可靠性是否确实符合式 (4) 所示的模型, 可靠性增长是否能依据集成 MML 方法进行分析, 还需进行可靠性增长的检验分析.

在检验中, 记在检验试验阶段 H 获得的系统级可靠性试验数据为 X . 其中 X 根据系统的特点, 可能为成败型的试验数据, 也可能为寿命型的试验数据. 检验的目的在于检验由 X 计算得出的可靠性 R 的期望是否近似为 $\hat{R}(T)$ 、方差是否近似为 $D(\hat{R}(T))$.

由中心极限定理, 在大样本试验条件下, 由试验数据估计得出的系统可靠性 \hat{R} 应近似服从正态分布. 所以, 可作如下检验:

$$H_0: \hat{R} \text{ 服从正态分布 } N \left(\hat{R}(T), D \left(\hat{R}(T) \right) \right); \quad H_1: \hat{R} \text{ 不服从正态分布 } N \left(\hat{R}(T), D \left(\hat{R}(T) \right) \right)$$

采用如下的简单分析方法进行检验.

由极大似然法或其他方法, 得出阶段 H 系统可靠性 R 的估计 \hat{R}_H , 作如下判断:

1) 若 $\hat{R}_H \geq \hat{R}(T) - u_{1-\alpha/2} \sqrt{D(\hat{R}(T))}$ 且 $\hat{R}_H \leq \hat{R}(T) + u_{1-\alpha/2} \sqrt{D(\hat{R}(T))}$, 则认为 H_0 成立. 即认为基于子系统的可靠性增长分析可以反映系统可靠性增长的情况.

2) 若 $\hat{R}_H < \hat{R}(T) - u_{1-\alpha/2} \sqrt{D(\hat{R}(T))}$, 或者 $\hat{R}_H > \hat{R}(T) + u_{1-\alpha/2} \sqrt{D(\hat{R}(T))}$ 则认为 H_0 不成立. 前者说明可靠性增长的 MML 模型过于激进, 后者说明可靠性增长的 MML 模型过于保守.

当不能接受 H_0 时, 说明基于 MML 建立的可靠性增长分析模型不能反映系统的真实可靠性增长情况, 这可能是由于以下原因造成的:

1) 在可靠性框图建模中, 假设系统是单调关联系统, 并且可以构建式 (1) 所示的系统可靠性函数. 此时需对可靠性框图建模方法进行分析, 检查装备的子系统之间是否有耦合关系, 是否会发生关联失效等. 如果出现这种情况, 则需对式 (1) 进行修正, 建立能正确描述系统层次关系的可靠性函数.

2) 系统可靠性试验的数据 X 或者子系统的可靠性增长试验数据中存在不合理数据. 由于可靠性增长以及可靠性增长的检验是通过抽样试验完成的. 利用样本推断总体时, 难免会出现两类错误. 所以, 在可靠性框图模型正确的条件下, 需对出现的数据进行检查, 看是否存在不合理的数据, 或者重新进行验证试验, 完成可靠性增长检验.

在例 2 中, 设给定的置信水平 $1 - \alpha = 0.8$, 则:

$$\hat{R}(T) - u_{1-\alpha/2} \sqrt{D(\hat{R}(T))} = 0.8425; \quad \hat{R}(T) + u_{1-\alpha/2} \sqrt{D(\hat{R}(T))} = 0.8849.$$

所以, 若系统级可靠性试验的评价结果处于区间 $[0.8425, 0.8849]$, 则接受 H_0 ; 否则不能接受 H_0 , 即由于系统的可靠性增长信息不能准确地分析系统的可靠性增长情况, 需要对式 (4) 进行修正.

5 结果分析

将例 1、例 2 的结果绘制于同一坐标轴上, 可得如图 2 所示的结果, 图中 “Actual Reliability Growth Curve” 表示由例 2 计算得出的实际可靠性增长曲线. 从图 2 可见, 对于子系统 S2、S3, 实际可靠性增长试验数据分析的结果均高于可靠性增长规划的结果. 而从实际试验数据的分析看, 子系统在各阶段的试验评价结果都比较高, 这说明在可靠性规划过程中对子系统可靠性的估计结果稍微偏于保守.

上述结论提醒我们, 在可靠性增长规划过程中, 应准确地估计系统或者子系统的初始可靠性水平, 从而准确地完成可靠性增长规划.

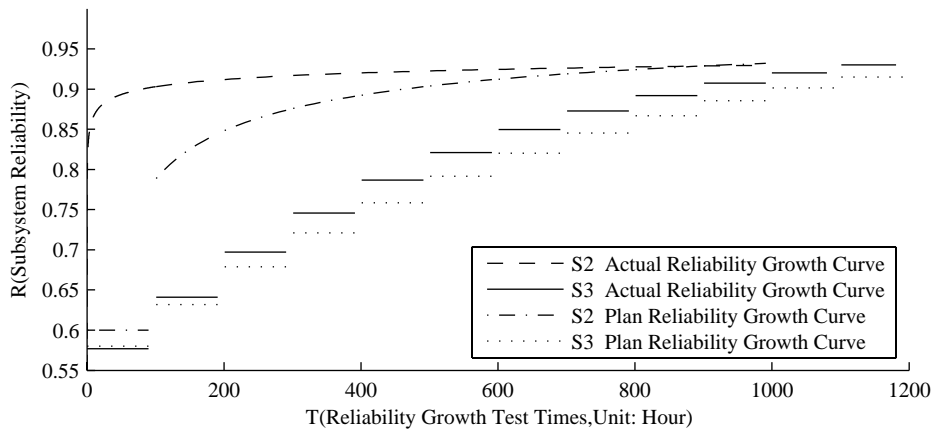


图 2 可靠性增长数据分析与规划结果对比

6 结论

本文以可靠性分析的金字塔模型为基础, 对复杂系统可靠性增长试验评价的集成分析模型进行了研究. 主要完成了如下工作:

1) 给出了系统可靠性规划的集成方法. 以可靠性分配方法为基础, 将系统的可靠性需求分配到各相关子系统, 由各子系统独立完成可靠性增长规划, 避免了在系统级进行可靠性增长规划, 使得可靠性增长规划的目标更容易实现.

2) 建立了可靠性增长评估的集成模型. 以 MML 方法为基础, 给出了子系统可靠性增长信息向系统可靠性增长信息融合的计算方法, 并给出了可靠性估计的方法.

3) 给出了系统可靠性增长检验的方法. 为避免子系统信息不能如实反映系统可靠性增长的实际情况, 对系统可靠性增长的假设检验方法进行了论述.

参考文献

- [1] 武小悦, 刘琦. 装备试验与评价 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Wu X Y, Liu Q. Military Equipment Test and Evaluation[M]. Beijing: National Industry Press, 2008.
- [2] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性增长 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
Zhou Y Q, Weng C X. Reliability Growth[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [3] Ellner P M, Hall J B. An approach to reliability growth planning based on failure mode discovery and correction using AMSAA projection methodology[C]//Reliability and Maintainability Symposium (RAMS '06). Washington: IEEE Computer Society, 2006: 266–272.
- [4] 徐仁佐. 软件可靠性工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
Xu R Z. Software Reliability Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [5] 蔡开元. 软件可靠性工程基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
Cai K Y. Element of Software Reliability Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [6] 卡恩. 软件质量工程的度量与模型 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2004.
Kan S H. Metrics and Models in Software Quality Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [7] Goswami D N, Khatri S K, Kapur R. Discrete software reliability growth modeling for errors of different severity incorporating change-point concept[J]. International Journal of Automation and Computing, 2007, 4(4): 396–405.
- [8] GJB/Z77-1995. 可靠性增长管理手册 [S]. 1995.
GJB/Z77-1995. Reliability Growth Management Handbook[S]. 1995.
- [9] 梅启智, 廖炯生, 孙惠中. 系统可靠性工程基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Mei Q Z, Liao J S, Sun H Z. Element of System Reliability Engineering[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [10] 郭波, 武小悦. 系统可靠性分析 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
Guo B, Wu X Y. Analysis of System Reliability[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2002.
- [11] 梅文华. 可靠性增长试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
Mei W H. Reliability Growth Test[M]. Beijing: National Industry Press, 2003.
- [12] 茆诗松, 王静龙, 等. 统计手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Mao S S, Wang J L, et al. Handbook of Statistics[M]. Beijing: Science Press, 2003.