

基于 CMSR 的火箭弹可靠性综合评估

徐如远¹, 张生鹏¹, 王韶光², 胡雨晴¹

(1. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854; 2. 32181 部队, 西安 710032)

摘要: 当火箭弹的数量较少或造价昂贵时, 针对各组件试验信息多而系统级产品信息较少, 无法准确有效实现系统可靠性综合评估的问题, 给出基于 CMSR 的由组件试验信息向系统级试验信息等效的折合方法, 并与系统级试验信息融合, 从而实现可靠性评估。综合考虑储存期间组件检测试验的试验数据, 利用 CMSR 方法实现组件试验信息向系统级试验信息的折合, 综合系统级试验数据, 最终实现可靠性评估。在不同置信度下, 系统综合火箭弹组件试验数据和系统级试验数据, 给出火箭弹储存多年后的任务可靠度, 为火箭弹能否继续服役使用提供支撑。针对系统试验数据少或无试验数据的情况下, 利用组件的试验信息折算成系统级试验信息, 利用成败型可靠性计算公式, 可求取储存一定年限后系统级产品的任务可靠度。

关键词: 火箭弹; 等效折合; 可靠性评估

中图分类号: TJ410.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)04-0041-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.04.007

Comprehensive Evaluation of Rocket Reliability Based on CMSR

XU Ru-yuan¹, ZHANG Sheng-peng¹, WANG Shao-guang², HU Yu-qing¹

(1. Aerospace Science and Industry Corporation Defense Technology Research and Test Center, Beijing 100854, China;
2. 32181 Unit of PLA, Xi'an 710032, China)

ABSTRACT: When the number of rockets is small or the cost is high, the test information of each component is much and the system-level product information is less. It is difficult to realize the comprehensive assessment of system reliability accurately and effectively. Give the equivalent conversion method from component test information to system-level test information based on CMSR. Integrate the system-level test information to achieve reliability evaluation. Consider the test data of the component inspection test during storage. Realize the conversion of component test information to system-level test information based on the CMSR method. Integrate the system-level test information to achieve reliability evaluation. Under different confidence levels, Considering the test data of the rocket components and the system-level test data, give the mission reliability of the rocket after many years of storage to provide the support for whether the rocket can continue to be used. In the case of little or no test data in the system, converting the test information of the components into system-level test information. Use the success-failure reliability calculation formula to calculate the mission reliability of the system-level product after a certain number of years of storage.

KEY WORDS: rocket; equivalent reduction; reliability evaluation

收稿日期: 2021-01-05; 修订日期: 2021-04-28

Received: 2021-01-05; Revised: 2021-04-28

作者简介: 徐如远(1995—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为可靠性环境试验技术。

Biography: XU Ru-yuan (1995—), Male, Master, Engineer, Research focus: reliability environmental test technology.

引文格式: 徐如远, 张生鹏, 王韶光, 等. 基于 CMSR 的火箭弹可靠性综合评估[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 041-045.

XU Ru-yuan, ZHANG Sheng-peng, WANG Shao-guang, et al. Comprehensive Evaluation of Rocket Reliability Based on CMSR[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 041-045.

火箭弹装备具有“长期贮存，一次使用”^[1-2]的特点，大部分生命周期是处于储存状态。随着高新技术在弹药上的广泛应用，含有电子部件的信息化弹药不断列装，温度、湿度等应力对弹药的影响非常显著，会使内部元器件、材料发生老化。传统的火箭弹可靠性评估一般是仅针对火箭弹某一部件进行分析，比如控制系统^[3-4]、发动机^[5-8]等，或仅利用现场靶场射击试验数据对系统的可靠性进行评估^[9]，试验数据利用率不高，无法有效地对整弹进行可靠性评估。

鲁力等^[10]利用 Bayes 方法，综合部件存储数据，对其实现了可靠性评估。范志峰等^[11]基于性能参数分布实现了火箭弹储存可靠性评估。冯保红等^[12]针对小子样、零失效的单元部件，利用马尔科夫动态模型，实现了对系统的可靠性评估。赵宇等^[13]基于变母体、变环境数据实现了可靠性综合评估。徐延学等^[14]针对系统可靠性验证试验样本量少的特点，提出基于最大熵理论的可靠性评估方法，并应用遗传算法进行求解。牟园伟等^[15]针对机载设备可靠性增长试验不规则的特点，提出基于 AMSAA 模型的系统可靠性评估方法。

在工程中，仍是以 LM 等传统方法进行系统可靠性评估或直接通过系统级试验数据进行分析计算，这种方法计算出的结果较保守，误差较大。本文首先对系统可靠性评估方法进行介绍，当系统级产品试验数据缺失或试验数据较少时，利用 CMSR 方法对部组件试验数据进行等效折合。最后以一个真实案例验证了该方法的有效性。

1 传统可靠性评估方法

产品试验结果只有成功和失败 2 种状态。按二项分布，采用经典模型^[16]可计算不同置信度下火箭弹发射飞行可靠度的单侧下限值。在工程上一般利用 LM 法^[17]实现系统的可靠性评估。

设系统由 m 个单元组成，若部件 j 在 n_j 次试验中有 r_j 次失效， s_j 次成功，则系统可靠性 R_s 的极大似然估计为：

$$\hat{R}_s = \prod_{j=1}^m (n_j - r_j) / n_j \quad (1)$$

令 $n_* = \min(n_1, \dots, n_m)$ ，得：

$$r^* = n_* (1 - \hat{R}_s) \quad (2)$$

$$s^* = n_* \hat{R}_s \quad (3)$$

将 n_* 、 s^* 看作是进行 n_* 次成败型试验和 s^* 次成功，则可靠度单边置信下限 R_L 则由式 (4)^[18] 计算获得。如果 s^* 不是整数，则按照 $(n_*, [s^*])$ 和 $(n_*, [s^*] + 1)$ 进行分析计算。

$$\sum_{x=0}^f C_n^x R_L^{n-x} (1 - R_L)^x = 1 - \gamma \quad (4)$$

式中： γ 为置信度。

当 $f=0$ 时，有式 (5) 成立。

$$R_L(n) = (1 - \gamma)^{1/n} \quad (5)$$

经典可靠性评估方法相对保守，可靠性评估效果不佳。

2 系统可靠性评估的 CMSR 法

2.1 系统可靠性评估模型

为解决系统可靠性精确置信下限计算复杂、难以实现的问题，Lloyd 等^[17]提出了 LM 法，实现了对系统可靠性进行近似计算，适用于多个部件串联组成的系统。Easterling 等^[19]提出了 MML (修正的极大似然估计) 法，使单元或部件产生的系统渐近方差与系统自身的渐近方差相等，从而得到系统等效的试验信息，但是该方法不适用于存在无失效数据的系统可靠性评估问题。SR 法基于点估计不变的原则对信息进行压缩，最终得到系统的等效试验数据，解决了 MML 法不适用于存在无失效数据的系统可靠性评估问题。

本文采用 CMSR 法对各分系统试验数据的进行处理，最终实现可靠性综合评估。CMSR 法将 MML 法与 SR 法有效融合，互相弥足各自的缺点。CMSR 法将试验次数最小的无故障数据进行信息折合，并基于 MML 法实现可靠性评估。

假设某系统产品包括 l 个成败型单元和 m 个指数寿命型单元，可靠性模型为串联模型。当 $F_j \neq 0$ ， $0 \leq j \leq l$ ，同时存在 $z_k \neq 0$ ， $0 \leq k \leq m$ ，系统可靠性评估模型见式 (6)。

$$N_{折} = \frac{\prod_{j=1}^l \frac{N_j}{S_j} \prod_{k=1}^m \exp\left(\frac{z_k}{\eta_k}\right) - 1}{\sum_{j=1}^l \frac{F_j}{S_j N_j} + \sum_{k=1}^m \frac{z_k}{\eta_k^2}} \quad (6)$$

$$F_{折} = N \left[1 - \prod_{j=1}^l \frac{S_j}{N_j} \prod_{k=1}^m \exp\left(-\frac{z_k}{\eta_k}\right) \right] \quad (7)$$

$$\begin{cases} N = N_{折} + N_0 \\ F = F_{折} + F_0 \\ S = N - F \end{cases} \quad (8)$$

式中： N_j 为成败型各分系统试验数； S_j 为成败型成功数； F_j 为成败型失败数； η_k 为指数型分系统的等效任务次数，为该分系统的总试验时间 T / 单次任务时间 t_0 ； z_k 为指数型分系统的责任故障数； $N_{折}$ 为综合后的系统等效试验次数； $F_{折}$ 为综合的系统等效失败次数； N_0 为系统试验次数； F_0 为系统失败次数。

2.2 分系统试验数据折算

分系统的试验数据可能具有多种形式，要针对不同形式数据分别进行分析计算。

1) 当所有单元故障数均不为 0 时, 直接利用式 (6)、(7) 计算系统等效试验次数 $N_{折}$ 和等效失败次数 $F_{折}$ 。

2) 当成败型分系统存在故障数为 0, 指数型分系统故障数均不为 0 时, 需要先进行信息压缩, 再进行公式套用。具体方法如下: 首先进行信息压缩, 对 $F_j \neq 0$ 的成败型分系统试验数据按试验次数由大到小进行排序, 假设试验次数为 N_j 、成功数为 S_j 、失败数为 F_j ($1 \leq j \leq l'$); 对 $F_j = 0$ 的分系统排在有失败数分系统的后面, 假设试验数为 N_j 、成功数为 S_j 、失败数为 F_j ($l'+1 \leq j \leq l$)。对成功数为 $S_{l'}$ 的分系统和 $F_j = 0$ 的所有分系统共 $l - l' + 1$ 个分系统进行信息压缩, 即 $N(2) = \min(N_j)$ ($l'+1 \leq j \leq l$)、 $S(2) = N(2)$, 同时令 $N(1) = N_{l'}$ 、 $S(1) = S_{l'}$, 再对试验信息 $[S(1), N(1)]$ 、 $[S(2), N(2)]$ 按照式(9)进行压缩, 将 $l - l' + 1$ 个分系统信息压缩为一个成功数为 $S_{l'}$ 、试验数为 $N_{l'}$ 的分系统:

$$(S_{l'}, N_{l'}) = \begin{cases} (S(2), N(1) \cdot N(2) / S(1)) & S(1) > N(2) \\ (S(2), N(1)) & S(1) = N(2) \\ (S(1) \cdot S(2) / N(2), N(1)) & S(1) < N(2) \end{cases} \quad (9)$$

然后, 将 l' 个成败型分系统数据信息和 m 个指数型分系统信息代入式 (6)、(7), 计算系统等效试验次数 $N_{折}$ 和等效失败次数 $F_{折}$ 。

3) 当指数型分系统存在故障数为 0, 成败型分系统故障数均不为 0 时, 需要先进行信息压缩再进行公式套用。具体方法为: 首先进行信息压缩, 对 $z_k \neq 0$ 的指数型分系统试验数据按等效任务次数由大到小进行排序, 假设等效任务次数为 η_k 、故障次数为 z_k ($1 \leq k \leq m'$); 对 $z_k = 0$ 的分系统排在有故障分系统后面, 假设等效任务次数为 η_k ($m'+1 \leq k \leq m$)。对失败数为 $z_{m'}$ 的分系统和 $z_k = 0$ 的所有分系统共 $m - m' + 1$ 个分系统进行信息压缩, 即 $\eta(2) = \min(\eta_k)$ ($m'+1 \leq k \leq m$), $z(2) = 0$, 同时令 $\eta(1) = \eta_{m'}$ 、 $z(1) = z_{m'}$, 再采用式(6)方法将指数型数据转换为成败型数据 $[S(1), N(1)]$ 、 $[S(2), N(2)]$, 对其按成败型试验信息方法压缩, 即将 $m - m' + 1$ 个分系统信息压缩为一个成功数为 $S_{m'}$ 、试验数为 $N_{m'}$ 的成败型分系统。

然后, 将成功数为 $S_{m'}$ 的成败型分系统、 $m' - 1$ 个指数型分系统和 l 个成败型分系统的数据信息代入式 (6)、(7), 计算系统等效试验次数 $N_{折}$ 和等效失败次数 $F_{折}$ 。

4) 当试验信息均为无失效试验数据时, 利用上述方法进行信息压缩, 计算系统等效试验次数 $N_{折}$ 和等效失败次数 $F_{折}$ 。

根据上述 1) — 4) 得到系统等效试验次数 $N_{折}$ 和等效失败次数 $F_{折}$ 后, 再综合系统级试验, 利用式 (8) 计算出系统的总试验信息, 并通过式 (4) 进行系统可靠性置信下限的评估。

3 仿真算例

某型号火箭弹已在部队服役 15 a, 超过寿命期限, 需对其可靠性进行评估, 判断能否继续服役使用。现将某一地区的同批次的火箭弹进行拆解, 将各个部件返厂进行静态试验检测, 考察其性能能否达到指标要求。

火箭弹主要由 3 个分系统组成, 每个分系统具有不同部件, 任意部组件故障都可能导致系统发生失效, 系统可靠性模型为串联模型。火箭弹属于弹药火工品, 包括战斗部、控制舱、发动机, 战斗部是火工品为分系统 1, 控制舱是电子产品, 为分系统 2。在本次案例中, 只有战斗部的某一部件发生了故障, 控制舱是否按照指数分布计算对结果无影响, 为简化案例计算过程, 则利用成败型单元计算方法处理。对已储存 15 a 的火箭弹设备静态检测数据和射击试验数据进行汇总, 见表 1。

表 1 储存 15 a 的火箭弹试验数据汇总
Tab.1 Summary of rocket test data stored for 15 years

序号	设备名称	部件名称/试验名称	样本量	致命故障
1	分系统 1	部件 A1	10	1
2		部件 A2	34	0
3		部件 A3	9	0
4		部件 A4	12	0
5	分系统 2	部件 B1	16	0
6		部件 B2	10	0
7		部件 B3	40	0
8	分系统 3	发动机	8	0
9	火箭弹整弹	射击试验	10	0

由表 1 可知, 在本次试验中, 分系统 1 存在失效, 其余均正常。利用式 (9) 对试验信息进行折算, 可得到整个系统的等效试验次数和失败次数分别为 8.9 和 0.9。靶场射击试验数为 10, 失败数为 0, 综合静态检测信息和射击试验数据, 由式 (8) 可计算出火箭弹试验信息为: 试验数 18.9, 失败数 0.9。若利用经典的 LM 系统可靠性方法, 则火箭弹总试验信息为试验数 18, 失败数 1。

LM 法对样本量最小的产品试验数据进行试验信息折合。例如, 在本案例中, 最小无失效试验样本量为 8, 系统可靠性的极大似然估计为 0.9, 则等效试验结果为: 试验数 8, 失效数 1。CMSR 法综合最小无失效样本和失效样本的信息进行计算, 最小无失效样本量为 8, 最小失效试验样本量为 10, 则得到的等效试验结果为: 试验数 9, 失效数 1。故 LM 法相对于本文方法较保守。

取置信度为 0.6 或 0.7, 利用经典模型公式 (4)

可计算不同置信度下火箭弹发射飞行可靠度单侧下限值,并将传统方法与本文方法进行对比,结果见表2。

表2 不同置信度下储存15a火箭弹可靠度
Tab.2 Reliability of rockets stored for 15 years under different confidence levels

方法	置信度	
	0.6	0.7
本文方法	0.896	0.876
传统方法	0.891	0.870

在置信度0.6和0.7下,利用CMSR法计算储存15a的可靠度分别为0.896和0.876,利用传统的LM法计算出来的结果为0.891和0.870,传统方法相对较保守。火箭弹可靠度已经低于出厂时的可靠性指标0.95,应具体研究部件A1失效的具体原因,采取一定的维修措施后,再去确定是否继续服役使用此装备。

4 结语

当系统级产品价格昂贵且数量少时,可充分考虑部组件的试验信息,利用系统可靠性综合评估方法实现由部组件数据向系统级数据的折合。当部组件存在无失效数据的情况,利用一定的折合方法将无失效数据与失效数据进行融合,得到系统级产品的等效折合数据。基于成败型可靠性评估方法计算产品的可靠度置信下限,并给出工程上的判断。

参考文献:

- [1] 王进才,秦博,杨懿松.系统部件在储存状态下最佳检测周期的确定[J].现代防御技术,2004,32(1):31-33,72.
WANG Jin-cai, QIN Bo, YANG Yi-song. Determination of the Optimal Check Period for Parts of System in a Storage State[J]. Modern Defense Technology, 2004, 32(1): 31-33, 72.
- [2] 高萌,王金柱,何学广.基于可靠性统计分析法的制导弹药储存寿命评估[J].装备环境工程,2013,10(4):110-113.
GAO Meng, WANG Jin-zhu, HE Xue-guang. Evaluation of Guided Ammunition Storage Life Based on Reliability Statistics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 110-113.
- [3] 范志锋,崔平,王卫民,等.基于Wiener过程的火箭弹控制系统储存可靠性评估[J].弹箭与制导学报,2014,34(1):108-110.
FAN Zhi-feng, CUI Ping, WANG Wei-min, et al. Storage Reliability Estimation of Rocket Projectile Control System Based on Wiener Process[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(1): 108-110.

- [4] 胡海峰,翟邵蕾,孙海峰.基于全概率公式的运载火箭控制系统可靠性模型研究[J].航天控制,2014,32(3):87-94.
HU Hai-feng, ZHAI Shao-lei, SUN Hai-feng. Study on Reliability Model of Launch Vehicle GNC System Based on Total Probability Formula[J]. Aerospace Control, 2014, 32(3): 87-94.
- [5] 唐国金,申志彬,田四朋,等.固体火箭发动机药柱概率率贮存寿命预估[J].兵工学报,2012,33(3):301-306.
TANG Guo-jin, SHEN Zhi-bin, TIAN Si-peng, et al. Probabilistic Storage Life Prediction of Solid Rocket Motor Grain[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(3): 301-306.
- [6] 高鸣,徐廷学.固体火箭发动机药柱可靠性及寿命预估研究[J].固体火箭技术,2008,31(3):220-224.
GAO Ming, XU Ting-xue. Study on Reliability and Life Prediction of SRM Grain[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(3): 220-224.
- [7] 邹思斯,严聪,马岑睿,等.定应变下HTPB推进剂延伸率二元回归模型[J].弹箭与制导学报,2013,33(4):131-133.
ZOU Si-si, YAN Cong, MA Cen-rui, et al. The Dualistic Linear Regression Model of HTPB Propellant's Elongation under Constant Strain[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(4): 131-133.
- [8] 韩庆田,曹文静,李文强.基于多源信息的发动机无故障数据可靠性评估[J].导弹与航天运载技术,2012(3):52-54.
HAN Qing-tian, CAO Wen-jing, LI Wen-qiang. Reliability Assessment of Zero-Failure Engine Data Based on Multi-Sources Information[J]. Missiles and Space Vehicles, 2012(3): 52-54.
- [9] 黄延平,高俊国.小子样条件下火箭弹射击密集度可靠性研究[J].计算机工程与应用,2013,49(3):255-257.
HUANG Yan-ping, GAO Jun-guo. Study of Fire Concentration Reliability of Rocket under the Condition of Small Sample[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(3): 255-257.
- [10] 鲁力,黄淼,南骅.基于Bayes方法的火箭弹存储可靠性分析[J].四川兵工学报,2013,34(1):69-71.
LU Li, HUANG Miao, NAN Hua. Analysis of Reliability of Rocket Storage Based on Bayes Method[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(1): 69-71.
- [11] 范志锋,齐杏林,李宁,等.基于性能参数分布的某火箭弹储存可靠性评估[J].装备环境工程,2011,8(1):70-72.
FAN Zhi-feng, QI Xing-lin, LI Ning, et al. Storage Reliability Assessment of a Certain Type of Rocket Based on Distribution of Performance Parameters[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 70-72.
- [12] 冯保红,王煜,冯蔚.“零失效、小子样”情况下系统可靠性评估方法研究[C]//第五届信号和智能信息处理与应用学术会议论文集.银川:中国高科技产业化研究会,

2011.
FENG Bao-hong, WANG Yu, FENG Wei. Research on System Reliability Evaluation Method under "Zero Failure and Small Sample"[C]//Proceedings of the Fifth Conference on Signal and Intelligent Information Processing and Applications. Yinchuan: China High-Tech Industrialization Association, 2011.
- [13] 赵宇, 黄敏. 变母体变环境数据的可靠性综合评估模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 597-600.
ZHAO Yu, HUANG Min. Integrated Evaluation Model of Reliability Based on Varied Population-Environment Data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 597-600.
- [14] 徐廷学, 董琪, 张勇亮, 等. 基于遗传算法的最大熵导弹系统可靠性评估的研究[J]. 计算机与现代化, 2011(9): 15-18.
XU Ting-xue, DONG Qi, ZHANG Yong-liang, et al. Research on Maximum Entropy Reliability Evaluation for Missile System Based on Genetic Algorithm[J]. Computer and Modernization, 2011(9): 15-18.
- [15] 牟园伟, 陆山. 基于 AMSAA 模型的系统可靠性评估方法研究[J]. 航空计算技术, 2011, 41(4): 45-48.
MU Yuan-wei, LU Shan. Research on Estimation of System Reliability Based on AMSAA Model[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(4): 45-48.
- [16] CLOPPER C J, PEARSON E S. The Use of Confidence or Fiducial Limits Illustrated in the Case of the Binomial[J]. Biometrika, 1934, 26(4): 404-413.
- [17] LLOYD D K, LIPOW M. Reliability: Management, Methods and Mathematics[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1962.
- [18] WILSON E B. Probable Inference, the Law of Succession, and Statistical Inference[J]. Journal of the American Statistical Association, 1927, 22(158): 209-212.
- [19] EASTERLING R G. Approximate Confidence Limits for System Reliability[J]. Journal of the American Statistical Association, 1972, 67(337): 220-222.

责任编辑: 刘世忠