

航天火工机构可靠性的强化试验验证方法

荣吉利, 张 涛

(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 针对性能参数服从正态分布的一类航天火工机构, 参照“应力-强度”模型, 提出了一种强化试验的小子样可靠性验证方法。试验中将火工机构性能参数置于相对额定条件更为严酷的条件下, 用传统的成败型试验方法评估其可靠性, 然后结合火工机构的力学特性推导出它在额定条件下的可靠性。公式的计算验证表明: 利用本方法, 在0.95的置信度下, 只需要少于10次的试验就能够评定0.9999~0.99999的可靠性。最后, 文章对强化试验的设计方法进行了说明。

关键词: 航天火工机构; “应力-强度”模型; 强化试验; 可靠性验证

中图分类号: V438.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)06-2426-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.061

0 引言

火工机构是由火炸药提供能量或动力源以完成规定功能的特殊的做功机械装置, 是一类特殊的火工品。作为一次性作用的装置, 火工机构在其应用的领域尤其是载人航天领域有着广泛的应用并发挥着重要的作用^[1]。如果航天火工机构出现故障, 将导致系统级的灾难性故障。因此, 航天火工机构具有极高的可靠性要求, 多数要求可靠性要达到0.9999(置信度为0.9)。其特殊的工程需求和重要作用, 使航天火工机构具有高价值和高可靠性两方面的特点, 而在产品鉴定和验收时, 必须要完成可靠性的评定工作。通常, 采用试验方法来实现航天火工机构的可靠性评定。

我国于1987年制定出了自己的火工品可靠性的军用标准 GJB376—87《火工品可靠性评估方法》^[2], 该标准中给出了火工品可靠性评估的两种常用方法: 计数法和计量法。计数法采用二项分布模型, 仅判断产品成功还是失败。由于有可靠的数学基础, 目前仍被广泛采用。但由于计数法忽略了产品性能分布特点所提供的信息, 所以在高可靠性要求时, 所需样本量很大。计量法通过正态容许限来计算产品可靠性, 如果火工品的关键性能参数符合正态分布假设, 采用计量法评估其可靠性具有较明

显的优越性, 试验数量可以减少到20~30发, 较大地节省了样本数量, 但对于小批量生产的航天项目其应用亦存在较大困难。通过相关文献了解到, 法国、美国、俄罗斯等国针对航天火工机构采用了一种所需试验次数极少的可靠性评定方法^[3-4], 即: 强化试验方法。但是由于技术的保密性等原因, 使得对这些资料的理论依据及方法很难得到。目前, 国内已引入了“强化试验”验证火工机构的可靠性方法, 2002年邵德生提出了基于裕度思想的火工机构可靠性设计方法, 以及减少试验样本的“强化试验”验证可靠性方法^[5], 并且阐述了过程控制在可靠性方面的重要性。

2004年荣吉利、白美、刘志全提出了一种在加严条件下评定火工机构性能可靠性的方法^[6]。该工作是一个很好的尝试, 由其理论公式得出的试验样本数量对于航天领域也是比较理想的。而且它将“裕度试验”的思想渗透其中, 但工作还不全面。本文在此基础上对其理论方法进行了进一步的深入研究, 给出了更为全面的火工机构可靠性强化试验评定方法。

1 火工机构可靠性模型的建立

火工机构性能参数一般服从正态分布、对数正态分布, 逻辑斯谛分布及对数逻辑斯谛分布等几类。

本文的工作主要针对性能参数服从正态分布的一类航天火工机构进行研究,并引入文献 6 对火工机构可靠性模型的简化分析,研究火工机构火药爆炸作用可靠性,通过参照“应力-强度”模型并进行合理的简化,给出的性能可靠性、强度可靠性模型如下:

1.1 性能可靠性模型

一般地,火工机构的性能可靠性可简化为火药爆炸产生燃气力值大于机构阻力值的概率^[6]。实际生产中,由于环境温度 压强 药粒厚度 均匀性等存在一定的随机误差,使得火药力具有一定的散布特性。火药力的散布以及装药质量 药室容积等均存在的随机误差使压强具有一定的随机性。而其中火药力的散布对火药爆炸产生燃气力的偏差影响最大。这些独立随机因素的影响造成了火药爆炸产生燃气力值并非某一确定值,而是呈某种统计分布特性。而通过实际试验分析,阻力 Y 所受影响因素较少,可以通过设计、加工、装配等方式很好的控制,变化范围较小,计算分析时可取其最大值,即: $Y = F$ 。此时性能可靠性模型可简化如图 1 所示,图 1 中曲线 1 为火工机构燃气压力分布的概率密度曲线, F 为机构阻力的最大值。

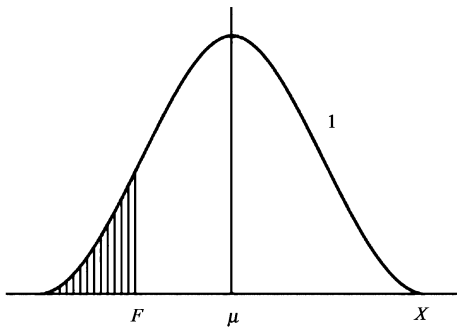


图 1 简化的性能可靠性模型

Fig.1 Simplified model of performance reliability

此时性能可靠性为:

$$R = P(X \geq F) = 1 - \Phi\left(\frac{F - \mu}{\sigma}\right) \quad (1)$$

其中 $\Phi(x)$ 为标准正态分布函数, μ, σ 分别为正态随机变量燃气力 X 的均值与方差。

1.2 强度可靠性模型

火工机构的强度可靠性亦可简化为火药爆炸产生燃气力值小于腔体强度的概率。一般情况下,影响火工机构腔体强度的主要因素有:材料机械性能、加工方法和使用环境等。机械结构的形状和尺寸不

可能造得绝对准确,由于制造误差是随机变量,所以结构的形状和尺寸也是随机变量,具有离散性;并且还由于原始材料生产中的随机性使材料的物理和机械性能具有差异。这些随机误差的存在构成了腔体强度的随机性,使得强度的分布呈正态分布^[8]。

由于壳体强度和燃气力同为正态分布,对强度可靠性的分析也可参照“应力-强度”的结构可靠性模型建立,如图 2 所示,图 2 中曲线 1 为火工机构燃气压力分布的概率密度曲线,曲线 2 为火工机构腔体强度分布的概率密度曲线。

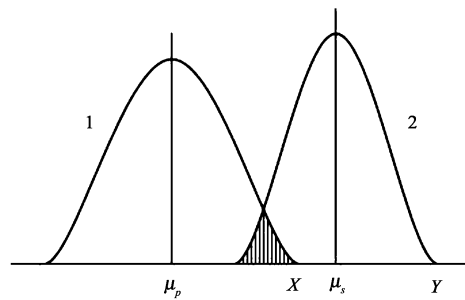


图 2 药室腔体强度可靠性模型

Fig.2 The model of the structural reliability for cavity

此时的强度可靠性为:

$$R = P(X_2 \geq X_1) = \Phi\left\{\frac{\mu_s - \mu_p}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_p^2}}\right\} \quad (2)$$

其中 $\Phi(x)$ 为标准正态分布函数, $\mu_s, \sigma_s; \mu_p, \sigma_p$ 分别为腔体强度和燃气压力分布的均值与方差。

从以上 2 个图中可看出,影响火工机构可靠性的最主要因素是模型尾部相对于均值的偏离程度,在此用变差系数 $c = \sigma/\mu$ 来表示。此值越大则压力对于均值的偏离越大,此时正态分布曲线就更趋于扁平,火工机构可靠性降低。因此在火工机构的设计、生产过程中应该分析并控制影响变差系数的因素,使其在一个较小的范围内变化。

2 可靠性强化试验评定公式

传统火工机构可靠性评估时一般简单视其为成败型产品而用经典二项式分布评定可靠性。强化试验的思想是将产品性能参数置于相对额定条件更为严酷的条件下,降低其可靠性,近而通过一定的方法推断出产品在额定条件下的高可靠性。

2.1 性能可靠性强化试验评定公式

在性能可靠性强化试验中利用减小压力的方法,

即通过减小装药量或扩大药室容积来实现强化的目的。其原理如图 3 所示。图中 μ_p 和 μ_d 分别是强化条件和额定条件下火药爆炸产生燃气力的均值。

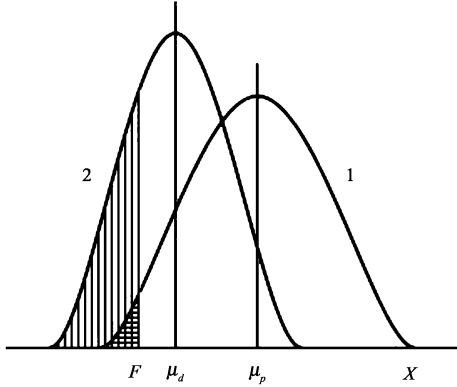


图 3 性能可靠性强化试验模型

Fig.3 Performance reliability under severity conditions

假设强化条件下燃气力分布变差系数 c_d ，额定条件下燃气力分布变差系数 c_p ，以及机构阻力 F 皆为已知定值。根据已知的额定条件下的可靠性下限 $R_{L,N}$ 及对应的置信度 $\gamma = 1 - \alpha$ ，试验设计任务是选择加严因子 k 确定，试验次数 n ；通过结合可靠性知识推导出强化试验公式。

其中加严因子与试验次数的理论计算公式为

$$k = \frac{\mu_d}{\mu_p} = \frac{1 - \Phi^{-1}(R_{L,N}) \cdot c_p}{1 + \Phi^{-1}(1 - \alpha^{\frac{1}{n}}) \cdot c_d} \quad (3)$$

$$n = \ln \alpha / \ln \left\{ \Phi \left[\frac{\Phi^{-1}(R_{L,N}) \cdot c_p + k - 1}{kc_d} \right] \right\} \quad (4)$$

2.2 强度可靠性强化试验评定公式

在强度可靠性强化试验中，一般采用增大装药量以达到增大压强实现强化的目的。其原理如图 4 所示。图 4 中，曲线 1 为额定状态下的燃气压力概率密度曲线，曲线 2 为强化条件下的燃气压力概率密度曲线，曲线 3 为腔体强度概率密度曲线。

额定条件下强度可靠性计算公式，如式(5)所示

$$R_{L,N} = \Phi \left\{ \frac{\mu_s - \mu_p}{\sqrt{\mu_s^2 c_s^2 + \mu_p^2 c_p^2}} \right\} = \Phi \left\{ \frac{\bar{\eta}_p - 1}{\sqrt{\bar{\eta}_p^2 c_s^2 + c_p^2}} \right\} \quad (5)$$

其中 $\mu_s, c_s; \mu_p, c_p$ 分别为腔体强度和额定条件下燃气压力分布的均值与变差系数， $\bar{\eta}_p = \mu_s / \mu_p$ 为额定条件下的储备系数；

强化条件下强度可靠性计算公式，如式(6)所示

$$R_{L,s} = \Phi \left\{ \frac{\mu_s - \mu_d}{\sqrt{\mu_s^2 c_s^2 + \mu_d^2 c_d^2}} \right\} = \Phi \left\{ \frac{\bar{\eta}_d - 1}{\sqrt{\bar{\eta}_d^2 c_s^2 + c_d^2}} \right\} \quad (6)$$

其中 $\mu_s, c_s; \mu_d, c_d$ 分别为腔体强度和强化条件下燃气压力分布的均值与变差系数， $\bar{\eta}_d = \mu_s / \mu_d$ 为强化条件下的储备系数。

根据给定的 $R_{L,N}$ 由式(5)求出 $\bar{\eta}_p$ ，并选择适当的加严系数 k

$$k = \frac{\bar{\eta}_p}{\bar{\eta}_d} = \frac{\mu_s / \mu_p}{\mu_s / \mu_d} = \frac{\mu_d}{\mu_p} \quad (7)$$

由式(7)得到 $\bar{\eta}_d = \bar{\eta}_p / k$ ，再由无失效条件下二项分布法则及给定的置信度 γ ，确定试验次数 n ，验证合格准则为试验无一失效。

$$n = \ln \alpha / \ln \Phi \left\{ \frac{\bar{\eta}_d - 1}{\sqrt{\bar{\eta}_d^2 c_s^2 + c_d^2}} \right\} \quad (8)$$

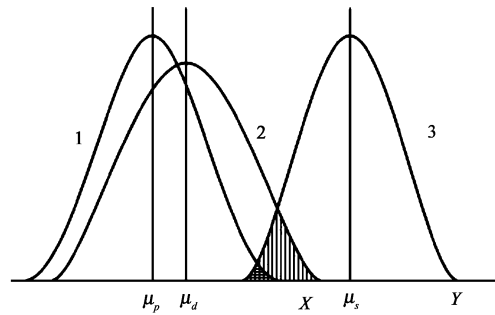


图 4 强度可靠性强化试验模型

Fig.4 Structural reliability under severity conditions

3 试验条件及原理分析

对于性能可靠性试验，考虑到实际试验燃气力应大于机构阻力 F ，所选取的加严系数应该有一定的范围，即： $s < k < 1$ 。 s 可由火工机构生产设计过程中的最小临界药量试验进行确定。同样，对于强度可靠性试验，实际试验的燃气力应小于腔体强度 S ，所选取的加严系数应满足 $1 < k < M$ 。 M 由腔体强度试验来确定。

变差系数是一种反映随机变量取值相对离散程度的系数，是进行火工机构可靠性设计的重要参数之一^[9]。影响变差系数的因素有很多，如：原材料、生产工艺等，这些因素具有随机性，在理论上很难给出变差系数的确定值，一般是通过相应试验和已往的同类型产品试验数据综合确定(取值较保守)。在强化试验中要改变装药量的大小(实际操作可为更换定型的燃气发生装置)，势必会影响燃气压力变差系数发生变化，而如果当试验和额定条件下的燃气发生装置为同一状态产品时，其燃气压力变差系数

差别不大,可以认为 $c_p = c_d = c$, 这里分开表示只是想区别强化状态和额定状态的两种情况。

强化条件下可靠性评估依照经典的二项分布律,而经典的置信下限在小子样情况下比较保守^[10],即它一般只能满足 $P(R > R_{L,S}) > \gamma$,而不能满足 $P(R > R_{L,S}) = \gamma$,最优化随机置信下限可改善小子样的保守性,当失败数 $F = 0$ 时,经典置信下限与最优化随机置信下限相等,所以可认为 $F = 0$

表1 强化试验中给定可靠性与所需试验次数对照

Table 1 The number of tests under severity conditions at given reliability level

K	R						
	0.99999	0.9999	0.9998	0.9996	0.9992	0.999	0.99
0.470	4	2	1	1	1	1	1
0.570	25	6	4	3	3	2	1
0.662	208	34	21	13	9	8	3
0.693	433	63	37	23	14	12	4
0.709	632	87	51	30	19	16	4
额定	299958	29957	14979	7393	3732	2996	298
1.279	1304	229	140	87	55	48	12
1.410	229	54	36	25	17	16	5
1.511	80	23	17	12	9	8	4
1.847	8	4	3	3	3	2	2
2.036	4	3	2	2	2	2	1

将表1与国军标 GJB376-87 对比,在验证置信度为0.95,可靠性为0.99999的火工机构时,利用国军标中方法需要做无失效试验299958次,而利用本文中方法,无论对于性能可靠性还是强度可靠性其最少时只需4次。因此本文中的方法具有极大的优越性。将表1与从其他渠道中获得的信息对比,试验次数的数量级是一致的,其优越性并不低于国外现有的方法。

5 可靠性强化试验评定设计方法

5.1 性能可靠性评定的试验设计方法

(1) 根据试验条件确定可行的强化方式:改变装药或者改变腔体容积,并根据所选择的强化方法来确定加严系数 k 。

(2) 由已知的额定装药量所产生燃气压强的均值 μ_p 求算强化试验条件下的燃气力压强均值: $\mu_d = k\mu_p$,从而确定强化试验时的装药量或者机构的腔体容积。

(3) 掌握本型号火工机构装药爆炸压强的离散情况,确定变差系数 c 。

(4) 根据上文给出的公式,求算所需的试验次

数 n ,并根据验证合格准则确定可靠性指标。

4 计算验证

在置信度 $\gamma = 0.95$,变差系数 $c_p = c_d = 0.12$ 时,用本文中方法计算所得的试验次数与可靠性对应数据如表1所示。

数 n ,并根据验证合格准则确定可靠性指标。

5.2 强度可靠性评定的试验设计方法

(1) 根据额定状态和加载状态下的火工机构运行条件及试验的目的和要求,在设计余量允许的范围内,即 $1 < k < M$,确定合适的加严系数 k ;

(2) 利用经验的或现有的设计试验数据,求出燃气压强及腔体强度分布的变差系数;

(3) 根据给定的 $R_{L,N}$ 由式(5)求出 $\bar{\eta}_p$,由前面确定的加严系数 k 通过式(7)得到 $\bar{\eta}_d$;

(4) 由无失效条件下二项分布法则及给定的置信度 γ ,利用强度可靠性试验评定公式(10)确定值 n ;

(5) 按 k 的要求,准备好 n 个样本,并在 k 所对应的加载状态下进行成败型试验。若这 n 个样本全部成功,则我们认为,火工机构满足额定状态下可靠性 $R_{L,N}$ 和置信度 γ 的要求;若这 n 个样本中有一个失效,则必须查明原因,返回步骤(1),重做试验。

6 结论

结合已知的变差系数、机构阻力及腔体强度分布等验前信息,参考“应力-强度”可靠性的干涉理论,针对火工机构的力学特性提出了其可靠性(性

能、强度)强化试验评定方法,可以用极少的试验次数验证极高的可靠性(如表 1),对航空航天类火工机构或其他类型的产品的可靠性评定具有极高的应用和理论价值。但需说明的是:

(1) 应用变差系数评定可靠性,它的精度直接影响可靠性评定的结果,如何根据设计、生产中的试验数据确定变差系数的值,是下一步研究的重点。

(2) 本文提出的强化试验原理适用于性能参数服从正态分布的航天火工机构,但原则上本文的强化试验思想同样也适用于其他分布的情况,只是计算比较复杂,有待于进一步研究。

(3) 本文中的假设以及数据都是参照我国航天火工机构特性所建立,由此而进行的推导也是基于可靠性理论而得。其有效性和实用性与国外同类可靠性评定方法进行对比,其结果具有同等的优越性。

参考文献:

- [1] 李志强. 火工装置在航天飞行器上应用[J]. 航天返回与遥感, 1997, 18(2): 63 - 66. [LI Zhi-qiang. The applications of pyrotechnics in spacecraft[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 1997, 18(2): 63 - 66(in Chinese).]
- [2] GJB376 - 87. 火工品可靠性评估方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1987. [GJB376 - 87. Assessment method of reliability of initiating devices[S]. Beijing: Military Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1987(in Chinese).]
- [3] Beurtey X. Reliability Prediction on Ariane 5 Pyrotechnical Devices using the Hardened Test Method. Probabilistic Safety Assessment and Management, ISTP, 1997, 1687 - 1695.
- [4] [苏]卓洛托夫, 季托夫. 空间运载器的可靠性保证[M]. 潘绍珍, 译. 北京: 宇航出版社, 1996. [Zhuoluotoufu, Jituofu. Reliability Ensures for the Space Vehicles[M]. PAN Shaozhen, transl. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1996.]
- [5] 邵德生. 关于火工装置的可靠性设计与验证问题[J]. 质量与可靠性, 2002, (增刊 2): 34 - 36. [SHAO De-sheng. About the reliability design and testing of the pyrotechnical devices[J]. Quality and Reliability, 2002, (Suppl. 2): 34 - 36(in Chinese).]
- [6] 荣吉利, 白美, 刘志全. 加严条件下火工机构可靠性评估方法[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(2): 117 - 120. [RONG Ji-li, BEI Mei, LIU Zhi-quan. Reliability assessment of pyrotechnical devices under rigorous conditions[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(2): 117 - 120.]
- [7] 鲍廷钰, 邱文坚. 内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. [BAO Ting-yu, QIU Wen-jian. Interior Ballistics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995(in Chinese).]
- [8] 张骏华. 结构可靠性设计与分析[M]. 北京: 宇航出版社, 1989. [ZHANG Jun-hua. The Structure Reliability Design and Analysis[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1989(in Chinese).]
- [9] 何国伟. 可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. [HE Guo-wei. Reliability Design[M]. Beijing: China Machine Press, 1993(in Chinese).]
- [10] 徐振相, 秦士嘉. 火工品可靠性技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996. [XU Zhen-xiang, QIN Shi-jia. Reliability Technology of Initiating Devices[M]. Beijing: Armament Industry Press, 1996(in Chinese).]

作者简介: 荣吉利(1964 -), 男, 博士, 教授、博导, 研究方向为振动理论与应用、设备故障诊断、可靠性理论与应用、弹道力学、转子动力学。

通信地址: 北京市海淀区中关村南大街 5 号北京理工大学宇航学院(100081)

电话: 13910834650

E-mail: rongjili@bit.edu.cn

Reliability Validation on Spacecraft Pyrotechnical Devices Using the Hardened Test Method

RONG Ji-li, ZHANG Tao

(Department of Mechanics, School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A strength-stress model for the reliability of spacecraft pyrotechnical devices is proposed, based on the mechanical characters of the products and one-shot product reliability assessment theory. From this, a reliability validation method with small sample under hardened conditions was presented. In this method the products are tested under hardened conditions. If they can still work without failure under such conditions, then the reliability in normal conditions can be calculated by a series of formulas. It indicates that using this method, with the confidence level of 0.95, only less than 10 times trials are needed to validate the reliability of 0.9999 ~ 0.99999. Finally, the design of test under severe conditions was described.

Key words: Spacecraft pyrotechnical devices; Strength-stress model; Hardened test; Reliability validation