文章编号：1003-1480（2022）05-0013-04

一种采用自定义参量实现小样本评估可靠性的方法

于 江[1]，柳 洋[2]

（1.陕西应用物理化学研究所，陕西 西安，710061；2.北京航天动力研究所，北京，100076）

摘 要：为准确全面地评估某火药点火器的可靠性，基于其高可靠性要求（0.999 9），本文结合产品结构及工作原理，提出通过自定义参量（点火冲量）实现小样本条件下评估点火器可靠性的方法，并通过拉偏试验进行验证。结果表明该火药点火器的可靠性达到 0.999 99 以上，采用自定义参量开展可靠性评价是可行的。

关键词：火药点火器；可靠性评估；点火冲量；小样本

中图分类号：TJ450.2 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2022.05.004

A Method for Assessing Reliability in Small Samples Using Custom Parametrics

YU Jiang[1]，LIU Yang[2]

(1.Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061；2.Beijing Aerospace Power Research Institute,Beijing,100076)

Abstract：In order to accurately and comprehensively assess the reliability of some gunpowder igniter, based on the high reliability requirement of 0.999 9, in this paper, a method of customised parameter (ignition impulse) to assess the reliability of the igniter under small sample condition was proposed, by combining the structure and function principle characteristics of the product, and the pull-off tests were carried out to verify the correctness and feasibility of this method. The results show that the reliability of gunpowder igniter is over 0.999 99, the custom parametrics method is feasible to assess the reliability.

Key words：Gunpowder igniter；Reliability assessment；Ignition impulse；Small sample

某火药点火器是我国某重型运载火箭的氢氧发动机的关键件，为发动机提供初始点火能源。作为执行重大航天任务的重型运载火箭中使用的终端火工装置，此类火工品设计可靠度通常要求不小于 0.999，有时甚至要求达到 0.999 9（置信水平 0.95）[1]。

火工品及装置的可靠度评估已形成了多种方法和标准。计数法和计量法是两种适用性较广的方法。最大熵试验法[2]、基于 Bayes 法[3]等评估方法也在一定范围内获得应用。对于火药点火器这类经济价值高、设计参量多、各单元任务界面交错的火工装置来说，直接应用上述方法，难以获得比较理想的可靠性评估结果。若采用计数法评估可靠性，根据现有试验数量，实际只能达到 0.997 3，与要求值差距明显。若采用计量法评估可靠性，由于火药点火器的数值类设计参量众多且彼此影响，无法用个别参量准确表征产品整体技术性能，难以全面而准确地评估可靠性。

本研究在对历史测试数据进行分析的基础上，尝试设计一种自定义变量，对传统设计参量的内涵进行充实和拓展，并以此为基础采用计量法对该火药点火器进行可靠性评估，以获得更为接近真实值的可靠性

收稿日期：2022-04-30

作者简介：于江（1979-），男，高级工程师，从事火工品及火工药剂技术研究。

评估结果。

1 火药点火器结构与工作原理分析

火药点火器是发动机的始发装置，其结构见图 1，主要部件有：电点火器（双发并联）、点火药盒、工作药柱等，额定工况为-40~-10℃，属于低温工作火工装置。

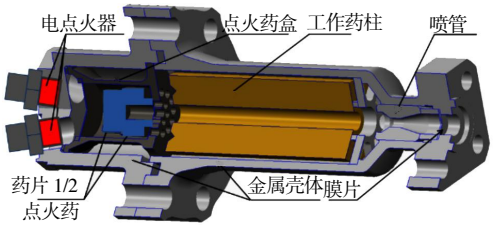


图 1 点火器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the igniter

点火药盒的结构如图 2 所示，其内部有药片 1、药片 2 两种装药。药片 1 为实心圆柱体，成分为硼/硝酸钾点火药，这是一种适应强、通用性好、燃速较高的点火药[4]。药片 2 呈中心开孔结构回转体，和工作药柱都属低燃速双基推进剂，成分为硝化棉、硝化甘油等。该类推进剂不吸潮，热安定好，燃速压强指数小，燃气清洁无残留，常被用于气源[5]。

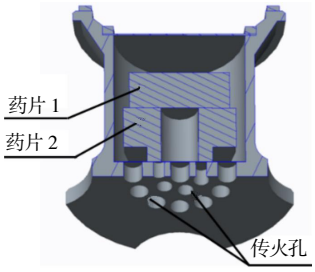


图 2 点火药盒的结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the ignition cartridge

火药点火器中，电点火器属始发器件，点火药盒起“接收能量-激发放大-再次输出”的作用，是核心组成和关键部件，工作药柱可实现的长时稳定燃烧是火药点火器的功能基础。从设计角度分析，3 个发火单元分别承担点、传、输等 3 个不同的功能。由于工作药柱燃速较低，进入稳定燃烧前，往往无法自持，需上游持续传火，故各级火工品的功能界面并不十分清晰，存在多级传火序列交错和相互作用的现象，并对整体性能产生影响。此外，初温、内压力、点火持续时间和燃烧流速等也会对工作药柱的工作性能产生影响，对火药点火器试验数据统计分析与可靠性评估造成困难。

2 基于自定义参量的可靠性评估

2.1 自定义参量的设计

结合试验测试和产品结构分析，火药点火器的燃喉比对点火压力、点火持续时间等参数影响较大。但通过对试验测试数据的统计发现，当燃喉比一定时，点火压力、点火持续时间也会存在较大的散差，这种散差在特定的条件下可能使点火器的工作药柱无法持续发火，导致点火失败。当燃喉比较大时，即使出现点火压力高、持续时间短或点火压力低、持续时间长等极端的情况时，工作药柱都能正常发火且完全燃烧。说明对于这类点火装置而言，火药装药能否正常发火是内压力和点火持续时间共同作用的结果，单独采用某一个设计参量很难准确表征其点火输出能力。

本文借鉴燃烧学理论，引入综合性的特征参量点火冲量 I_D[6]，以表征点火器点火输出能力。点火冲量综合了点火压力和点火时间两方面因素对点火过程的影响，其定义为：火药点火器点火阶段压力曲线与时间轴围成的积分面积。点火冲量的计算方法见式（1）：

$$I_D=\int_0^{t_d} p\mathrm{d}t \qquad (1)$$

式（1）中：p 为输出压力，MPa；t 为点火时间，s；t_d 为截止时间，s。在点火曲线上，截止时间对应于压力从峰值下降时出现第 1 个凹坑点的时间，如图 3 所示。

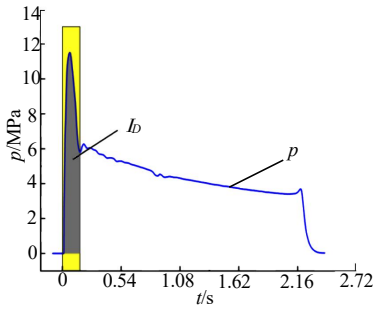


图 3 点火冲量计算方法示意图

Fig.3 Diagram of the ignition impulse calculation method

根据上述点火冲量的定义，收集了该火药点火器技术状态确定过程中各阶段历史试验数据 152 个，如表 1 所示。

表 1　各阶段历史试验数据
Tab.1　Historical test data

产品序号	点火冲量 I_D/(MPa·s)	点火状态
1	1.22	成功
2	1.20	成功
3	0.95	成功
……	……	……
35	0.81	失败
……	……	……
92	0.87	失败
……	……	……
150	1.27	成功
151	1.04	成功
152	1.31	成功

从表 1 统计结果可知，I_D 的数值在 0.8 以上，大多分布在 1.00 ~ 1.30 之间，数值较大时，火药点火器均正常发火，压力输出稳定；反之，则存在点火失败的可能。当 I_D 的数值小于某数值时，则火药点火器无法被点燃，显示两者存在正相关性。该特性表明可用其作为敏感参量来评估该点火器的可靠性。

2.2　确定自定义参量的下限值

在评估前，应当确定自定义参量边界条件，作为点火器点火正常与失败的判据。根据前述分析，点火冲量越大，发火的可靠性越高，故仅确定其下限值即可。本文通过对历史数据的分析和试验验证，确定合理的点火冲量的下限值。表 2 是历史数据的统计情况。通过调整燃喉比，在点火冲量下沿附近进行 15 发产品的验证试验，结果如表 3 所示。

表 2　历史试验数据的统计分析情况
Tab.2　Statistical analysis of historical test data

产品序号	$I_{点火}$/(MPa·s)
样本均值	1.22
成功样本最小值	1.20
成功样本最大值	1.20
失败样本最小值	0.81
失败样本最大值	0.87

表 3　点火冲量下限验证情况
Tab.3　Verification of the lower ignition impulse limit

产品序号	$I_{点火}$/(MPa·s)	备注
1	0.83	熄火
2	0.89	稳定燃烧
3	0.87	稳定燃烧
	……	
13	0.86	稳定燃烧
14	0.85	熄火
15	0.85	稳定燃烧

统计分析表 3 中的数据可知，有 5 个样本稳定燃烧，最小值为 0.85，最大值为 0.89；10 个样本出现了熄火，最小值为 0.83，最大值为 0.85。可认为点火冲量为 0.85~0.87 之间是火药点火器稳定燃烧的临界区间，故可将点火冲量的边界条件（下限）值定为 0.87。

2.3　计算与分析

2.3.1　试验数据收集与分析

以某批次火药点火器的低温试验样本为基础估算可靠度，温度为-40℃，测得 11 个数据。利用公式（1）分别计算出每个样本的点火冲量，如表 4 所示。

表 4　试验数据分析
Tab.4　Analysis of test data

产品序号	点火冲量 I_D/(MPa·s)
1	1.17
2	1.19
3	1.13
4	1.17
5	1.13
6	1.22
7	1.16
8	1.09
9	1.11
10	1.15
11	1.12
平均值	1.149
标准差	0.037 8

2.3.2　数据的正态性检验

本次试验共 11 个样本，按照 GB/T 4882-2001[7] 中规定的 Shapiro-Wilk 检验法进行正态分布检验。计算各参数如表 5 所示，将结果带入公式（2）中，计算 W 值：

$$W=\frac{\left\{\sum_{i=1}^{[n/2]}a_i(W)[x_{n+1-i}-x_i]\right\}^2}{\sum_{i=1}^{n}[x_i-\bar{x}]^2} \qquad (2)$$

式（2）中：x 为变量值；n 为样本量；[n/2]表示 n/2 的整数部分，取值为 5；a_i 为检验系数，可查 GB/T 4882 的表 10 获得。

表 5　S-W 检验所需参数计算结果
Tab.5　Calculation of the parameters required for the S-W test

i	x_i	$(x_i-x_{avg})^2$	x_{n+1-i}	$x_{n+1-i}-x_i$	a_i	$a_i(x_{n+1-i}-x_i)$
1	1.09	3.49×10^{-3}	1.22	0.13	0.560 1	7.28×10^{-2}
2	1.11	1.53×10^{-3}	1.19	0.08	0.331 5	2.65×10^{-2}
3	1.12	8.46×10^{-4}	1.17	0.04	0.226 0	1.13×10^{-2}
4	1.13	3.64×10^{-4}	1.17	0.04	0.142 9	5.72×10^{-3}
5	1.13	3.64×10^{-4}	1.16	0.01	0.069 5	2.08×10^{-3}
6	1.15	8.20×10^{-7}	-	-	-	
7	1.16	1.19×10^{-4}	-	-	-	
8	1.17	4.37×10^{-3}	-	-	-	
9	1.17	4.37×10^{-3}	-	-	-	
10	1.19	1.67×10^{-3}	-	-	-	
11	1.22	5.03×10^{-3}				

将表 5 中的数据代入公式（2），计算得到检验统计量 W 的值为 0.981。根据给定的检验水平 α 和样本容量 n，查得 α 分位数系数为 W_α=0.850，计算值 $W\geqslant W_\alpha$，表明样本具有正态性，适用于计量法中的正态容许限法进行可靠性计算。

2.3.3　计算可靠性

确定样本符合正态性分布后，采用正态容许限法

进行可靠性评估[8]。按照公式（3）计算单侧容许系数：

$$K_L=\frac{\mu-L}{\sigma} \quad (3)$$

式（3）中：L 为临界下限；μ为样本均值；σ为样本标准差。将前述获得的数值代入，计算得到 7.383。查正态容许限表，并利用插值法计算置信度γ=0.95 时的可靠度下限值 R_L=0.999 991。

也可按照公式（4）计算发火可靠度点估计[9]：

$$R=P\{X>L\}=1-P\{X<L\}=1-\Phi\left(\frac{L-\mu}{\sigma}\right) \quad (4)$$

式（4）中：P 为概率；X 为随机变量；$\Phi(\cdot)$为标准正态分布函数；L、μ、σ的含义同公式（3）。将相应数值代入公式（4），得到：

$$R=1-\Phi\left(\frac{0.87-1.149}{0.037\ 8}\right) \quad (5)$$

通过查标准正态分布函数，得出 R=0.999 999。

综上，该火药点火器的可靠性评估结果为：点估计 R=0.999 999，置信度为 0.95 时，可靠度下限 R_L=0.999 991，表明通过该自定义参量评价产品具有可行性，同时也表明该火工装置具有较高的可靠性。

2.4 其余传火序列可靠性验证

为进一步验证该火药点火器发火可靠性，技术状态确立后，开展多次拉偏试验，验证其设计裕度。

（1）针对点火过程，进行 80%药量条件下单发电点火器点火试验，点火药盒内的药片 1 正常点燃并输出，试验结果正常。

（2）针对输出过程，药片 1 和药片 2 调整为 80%标准装药量进行发火，工作药柱正常点燃，火药点火器工作正常。

（3）进行 85%燃喉比的裕度试验，火药点火器工作正常，符合火工品可靠性裕度试验的要求[10-11]。

对拉偏试验的数据进行统计分析，其点火冲量均大于 0.87 MPa·s，证明点火冲量下限值设计是合理的。

3 结论

本文结合某火药点火器的结构特点和工作过程分析，基于装置工作特点，提出了一种采用自定义参量用于实现小样本评估可靠性的方法，经过分析验证，获得以下结论：（1）经过可靠性评价和裕度试验法对传火序列的验证，火药点火器的可靠性达到 0.999 99 以上，满足相关标准要求。（2）在装置结构复杂或工作界面较多时，采用自定义参量开展可靠性评价是可行的，且可实现更为高效的评价效果。（3）将自定义的点火冲量作为敏感参量，用于开展可靠性评价的方式，为行业内采用低燃速推进剂且低温工作的火药点火器可靠性设计与评估，提供了思路与借鉴。

参考文献：

[1] Q/QJA 748-2020 航天火工装置研制[S]. 北京：航天标准化研究所,2020.

[2] 刘炳章,丁同才.小子样验证高可靠性的可靠性评估方法及其应用[J].质量与可靠性,2004(1):19-22.

[3] 田玉斌.敏感性产品的可靠性评估方法研究[D].北京：北京理工大学机电工程学院,2000.

[4] 吕巧莉.直列式安全点火系列用硼/硝酸钾制备粒径对性能影响因素分析[C]//中国兵工学会第十一届火工烟火学术年会论文,2001.

[5] 张超,杨立波,贺海民,等.一种新型低燃温宽平台双基推进剂燃烧特性[C]//中国宇航学会固体火箭推进第 22 届年会论文集(推进剂分册),2005.

[6] 刘大斌.塑料导爆管的起爆、传爆及输出性能研究[D].南京：南京理工大学,2002.

[7] GB/T 4882-2001 数据的统计处理和解释 正态性检验[S]. 北京:中国标准出版社,2001.

[8] 张强.火工品可靠性评定方法的分析与研究[J].船舶科学与技术,2010,5(3):73-78.

[9] 温玉全,张利敏,洪东跑.基于感度的火工品发火可靠性试验数据分析[J].兵工学报,2010,11(31):1 498-1 501.

[10] GJB 1307A-2004 航天火工装置通用规范[S].北京:国防科工委军标出版发行部,2004.

[11] 王鹏,杜志明.火工烟火装置裕度研究与设计方法综述[J].火工品,2005(2):34-38.