

文章编号: 1001-1455(2009)06-0613-04

火工品可靠性的感度参数设计法^{*}

董海平, 蔡瑞娇, 穆慧娜, 曹建华

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 提出一种能同时满足火工品发火可靠性和安全可靠性的设计方法, 把火工品可靠性指标转换成感度分布参数的取值范围, 通过对感度的调节使产品满足发火可靠性和安全可靠性要求, 为火工品可靠性设计提供了一条新思路。推导出了常见火工品感度在正态分布、逻辑斯谛分布、对数正态分布和对数逻辑斯谛分布等常见分布条件下把可靠性指标转换为感度分布参数的表达式, 实例证明这种方法对火工品研制有指导作用。

关键词: 爆炸力学; 感度分布; 可靠性设计; 火工品; 发火可靠性; 安全可靠性

中图分类号: O389; TJ450

国标学科代码: 130 · 35

文献标志码: A

1 引 言

火工品在武器、航空航天等领域应用广泛, 其可靠性和安全性是武器和航空航天器能否避免意外事故、实现最终目标的关键^[1]。随着武器和航空航天技术的发展, 与之配套的多数火工品的发火可靠性和安全可靠性指标都已达到了 0.999, 有的甚至达到了 0.999 9。如何设计这种高可靠性产品一直是个难题。国内较早对火工品可靠性设计进行研究的是张济平^[2], 他对卫星用火工品的元件选用、装药、结构等给出了建议, 并提出了 10 项可靠性设计准则。随后, 周正伐^[3]也对火工品可靠性设计作了总结, 马有林等^[4]则充分应用了冗余设计、田口方法和环境防护设计等技术设计电起爆器, 设计出的产品可靠度大于 0.999 5, 贮存寿命达 12 年。高滨^[5]借鉴美国经验, 强调功能裕度设计是火工品可靠性的保证, 并建议采用模拟方法进行可靠性优化设计。近年来, 许多研究者^[6-7]在将通用可靠性设计方法应用于火工品设计方面, 作了不少的尝试。由于火工品发火可靠性和安全可靠性是由感度特性决定的, 本文中将根据火工品的感度特性和可靠性、安全性指标, 通过理论计算, 确定火工品感度参数的范围, 使设计的产品感度符合该范围, 保证产品同时满足发火可靠性和安全可靠性的要求。

2 正态分布情况下的火工品可靠性设计

在火工品可靠性设计中, 一般把火工品感度看作随机变量, 把外界输入能量看作固定值。假设某火工品的上级系统要求该火工品在外界刺激量 Y_f 作用下, 发火可靠度为 R_f , 在外界刺激量 Y_s 作用下, 安全可靠度为 R_s 。根据发火可靠度和安全可靠度定义^[8], 有

$$P(Y < Y_f) \geq R_f \quad (1)$$

$$P(Y > Y_s) \geq R_s \quad (2)$$

式中: Y_f 和 Y_s 均为定值, Y 为火工品感度, 它为服从某一分布 $F(y)$ 的随机变量。所谓火工品发火、安全可靠性设计过程, 即通过感度分布特性和可靠性指标来确定感度分布参数值, 然后使设计产品的感度符合所确定的感度分布参数值的过程。假设 Y 服从正态分布 $N(\mu_y, \sigma_y^2)$, 即

$$F(y) = \int_0^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{(t-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] dt \quad 0 < y < \infty \quad (3)$$

* 收稿日期: 2008-07-21; 修回日期: 2008-09-13

作者简介: 董海平(1969—), 男, 博士, 副教授。

先对式(1)进行讨论。当取 $P(Y < Y_f) = R_f$ 时,有

$$P\left(\frac{Y - \mu_{y1}}{\sigma_{y1}} < \frac{Y_f - \mu_{y1}}{\sigma_{y1}}\right) = R_f \quad (4)$$

根据正态分布的性质,可得

$$(Y_f - \mu_{y1}) / \sigma_{y1} = u_{R_f} \quad (5)$$

式中: u_{R_f} 为 R_f 对应的标准正态分布的分位数。由式(5)变换可得

$$\mu_{y1} = Y_f - u_{R_f} \sigma_{y1} \quad (6)$$

若令 $\sigma_{y1} = k\mu_{y1}$ ($0 < k < 1$), k 为变差系数,代入式(6)可得

$$\mu_{y1} = Y_f / (1 + k u_{R_f}) \quad (7)$$

由式(7)结合式(1)可知,如果火工品的感度均值小于 μ_{y1} ,标准差取 $k\mu_{y1}$,在外界刺激量 Y_f 作用下,火工品的发火可靠性可满足要求。其中变差系数 k 的取值可根据历史同类产品的状况结合当前的生产水平按文献[9]的研究结果确定。

对于式(2),当取 $P(Y > Y_s) = R_s$ 时,由正态分布的性质可推得

$$(\mu_{y2} - Y_s) / \sigma_{y2} = u_{R_s} \quad (8)$$

式中: u_{R_s} 为 R_s 对应的标准正态分布的分位数。

考虑到标准差是由制造水平决定的,对同一产品应该保持一致,因此可假设 $\sigma_{y2} = \sigma_{y1} = k\mu_{y1}$,则可得

$$\mu_{y2} = Y_s + u_{R_s} k\mu_{y1} \quad (9)$$

同样由式(9)结合式(2)可知,如果火工品的感度均值大于 μ_{y2} ,标准差取 $k\mu_{y1}$,在外界刺激量 Y_s 作用下,火工品的安全可靠性能满足要求。

在实际设计中,如果要求同时考虑式(1)和式(2),此时可令设计的火工品感度设计均值 μ_y 和标准差 σ_y 满足

$$\mu_{y2} < \mu_y < \mu_{y1}, \quad \sigma_y = k\mu_y \quad (10)$$

按照式(6)和式(9)分别计算出 μ_{y1} 和 μ_{y2} ,即可获得 μ_y 的设计范围。按此要求设计出的火工品能同时满足发火可靠性和安全可靠性的要求。在实际设计中,为兼顾发火可靠性和安全可靠性的裕度,可根据实际需要取 (μ_{y2}, μ_{y1}) 区间上的某个值作为感度的设计均值。一般推荐取该区间的中值,这样可使发火可靠性和安全可靠性的裕度较大。本文中把这种通过确定感度分布参数范围而保证发火可靠性和安全可靠性的设计方法称为感度参数设计法。

3 逻辑斯谛分布的可靠性设计公式

对发火可靠度 R_f ,由式(1)知,当取 $P(Y < Y_f) = R_f$ 时,设感度 Y 服从逻辑斯谛分布 $L(\mu_{y1}, \gamma_{y1})$,即

$$F(y) = 1 / \left[1 + \exp\left(-\frac{y - \mu_{y1}}{\gamma_{y1}}\right) \right] \quad (11)$$

根据逻辑斯谛分布的性质和发火可靠度定义有

$$R_f = 1 / \left[1 + \exp\left(-\frac{Y_f - \mu_{y1}}{\gamma_{y1}}\right) \right] \quad (12)$$

令 $\gamma_{y1} = k_1\mu_{y1}$ ($0 < k_1 < 1$),代入上式可解得

$$\mu_{y1} = Y_f / [1 - k_1 \ln(1/R_f - 1)] \quad (13)$$

式中: k_1 不是变差系数,由文献[10]知,它与变差系数 $k = \sigma_{y1} / \mu_{y1}$ 有如下关系

$$k_1 = \sqrt{3} k / \pi \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),经变换可得

$$\mu_{y1} = Y_f / [1 - (\sqrt{3} k / \pi) \ln(1/R_f - 1)] \quad (15)$$

对于安全可靠度,取 $P(Y > Y_s) = R_s$,同样由产品标准差的一致性,可得

$$\mu_{y2} = Y_s - (\sqrt{3} k / \pi) \mu_{y1} \ln(1/R_s - 1) \quad (16)$$

当火工品感度 Y 服从 $L(\mu_y, \gamma_y)$ ，则火工品要同时满足式(1)的着火可靠性和式(2)的安全可靠性要求，其感度均值的设计值 μ_y 和参数 γ_y 应满足

$$\mu_{y2} < \mu_y < \mu_{y1}, \quad \gamma_y = \sqrt{3} k \mu_y / \pi \tag{17}$$

式中的 μ_{y1} 和 μ_{y2} 分别由式(15)和式(16)决定。

4 对数正态分布和对数逻辑斯谛分布可靠性设计公式

将感度对数化后进行与以上正态分布和逻辑斯谛分布相同的推导，可得出对数正态分布和对数逻辑斯谛分布可靠性设计公式，表 1 列出了火工品感度分别服从上述 4 种分布的可靠性设计感度均值的计算式，表中感度均值范围为 $\mu_{y2} < \mu_y < \mu_{y1}$ 。

表 1 感度服从不同分布类型的火工品可靠性设计感度均值计算式

Table 1 Sensitivity mean value expressions for reliability design of explosive initiator with different sensitivity distributions

分布类型	R_f 对应感度均值 μ_{y1}	R_s 对应感度均值 μ_{y2}	备注
正态	$Y_f / (1 + k u_{R_f})$	$Y_s + u_{R_s} k \mu_{y1}$	$k = \sigma_{y1} / \mu_{y1}$
逻辑斯谛	$\frac{Y_f}{1 - k_1 \ln(1/R_f - 1)}$	$Y_s - k_1 \mu_{y1} \ln(1/R_s - 1)$	$k_1 = \gamma_{y1} / \mu_{y1}$
对数正态	$\sqrt{1+k_1^2} Y_f \exp[-u_{R_f} \sqrt{\ln(1+k_1^2)}]$	$\sqrt{1+k_2^2} Y_s \exp[u_{R_s} \sqrt{\ln(1+k_2^2)}]$	$k_1 = \sigma_{y1} / \mu_{y1}$ $k_2 = \sigma_{y1} / \mu_{y2}$
对数逻辑斯谛	$\frac{\ln Y_f}{1 - k_1 \ln(1/R_f - 1)}$	$\ln Y_s - k_1 \mu_{y1} \ln(1/R_s - 1)$	$k_1 = \gamma_{y1} / \mu_{y1}$

注：表中给出的对数正态分布对应的 μ_{y2} 并非解析式，需通过数值迭代求解。

5 应用举例

某型针刺火工品技术指标要求在 56 g·cm 针刺作用下可靠发火，在 8 g·cm 针刺作用下不发火，可靠性指标要求发火可靠度和安全可靠度在置信度 0.95 下均为 0.999。现将本文中提出的设计方法与实际产品进行对比分析。

步进法试验结果表明，该火工品的针刺感度服从对数正态分布。设其感度服从对数正态分布 $LN(\mu_y, \sigma_y^2)$ ；并根据同类产品的变差系数和设计的高可靠性要求，设变差系数 $k_1 = 0.15$ 。

由指标要求，查标准正态分布表得可靠度 R 的分位数 $u_{0.999} = 3.1$ 。对于发火可靠性，由表 1 中对数正态分布的 R_f 对应感度均值计算式可得 $\mu_{y1} = 35.7 \text{ g} \cdot \text{cm}$ ， $\sigma_{y1} = 5.35 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 。

对于安全可靠性，由制造工艺一致，可假设 $\sigma_{y2} = \sigma_{y1}$ ， μ_{y2} 的计算需通过数值迭代求解，用 C++ 语言编写一个二分法迭代^[11] 计算程序，算得结果为 $\mu_{y2} = 19.3 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 。

按照本文方法，若把产品的感度均值范围控制在 (19.3 g·cm, 35.7 g·cm) 范围内，可以使产品同时满足发火可靠性和安全可靠性要求。为了使两者都具有较大的裕度，可使产品感度均值接近该范围的中值 27.5。用感度参数设计法得到的结果为：感度均值 μ_y 、标准差 σ_y 、 $Y_{0.999}$ 、 $Y_{0.001}$ 分别为 27.5、5.35、44.1、10.9 g·cm，而实际产品的结果为：感度均值 μ_y 、标准差 σ_y 、 $Y_{0.999}$ 、 $Y_{0.001}$ 分别为 16.8、4.48、36.6、7.2 g·cm。 $Y_{0.999}$ 、 $Y_{0.001}$ 分别表示可靠度为 0.999 对应的发火限和安全限。

从以上数据可见，该实际产品发火可靠性能满足要求，且有较大的裕度，而安全可靠性没有达到要求。原因是感度均值偏低，造成发火上限裕度很大，而安全限不达标。若采用本文方法，先从发火可靠性指标和安全可靠性指标出发，确定一个合适的感度均值范围，选取合理的感度均值，使研制的火工品接近该均值，就能兼顾两者的裕度，可避免实际产品出现的这种情况，提高产品设计效率。

6 结 论

根据火工品发火可靠性和安全可靠性指标与感度分布参数之间的数学关系，通过可靠性指标确定火工品感度分布参数的范围，提出了一种火工品可靠性的感度参数设计法。应用实例表明，应用该方

法,可通过调节感度分布的参数来实现对火工品可靠性的有效控制,减少设计的盲目性,对火工品可靠性设计具有指导意义。

参考文献:

- [1] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999.
- [2] 张济平. 提高 JB-1 卫星火工装置可靠性的技术途径[R]. GF-A0015804G, 1989.
- [3] 周正伐. 火工品可靠性设计方法[C]//第二届国际可靠性、维修性和安全性会议论文集. 北京,1994:505-510.
- [4] 马有林,张兴顺,杨树彬,等. 可靠性技术在电起爆器设计中的应用[J]. 火工品,1995(1):19-29.
MA You-lin, ZHANG Xing-shun, YANG Shu-bin, et al. Application of reliability technology on designing electric initiator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1995(1):19-29.
- [5] 高滨. 航天火工装置设计和研制的思路[J]. 航天返回与遥感,1998(1):52-58.
GAO Bin. Thoughts of design and development of space pyrotechnics devices[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1998(1):52-58.
- [6] 李永安,刘永德. 提高撞击火帽发火感度与可靠性的有效途径[J]. 火工品,2002(3):36-38.
LI Yong-an, LIU Yong-de. The effective approaches to improve fire sensitivity and reliability of impact primer[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(3):36-38.
- [7] 杨福东,陈传明. 组合点火管中 2 号管作用可靠性的提高[J]. 火工品,2002(3):39-40.
YANG Fu-dong, CHEN Chuan-ming. Improvement of action reliability of No. 2 tube of combined ignition tube[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(3):39-40.
- [8] 曹建华. 火工品可靠性设计与可靠性增长研究[D]. 北京:北京理工大学,2004.
- [9] 穆慧娜,焦清介,温玉全. 机械类火工品感度变差系数统计分析[J]. 含能材料,2008,16(2):212-215.
MU Hui-na, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan. Statistical analysis of sensitivity coefficient of variation for mechanical explosive devices[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(2):212-215.
- [10] 徐振相,秦士嘉. 火工品可靠性技术-基础与管理[M]. 北京:兵器工业出版社,1996.
- [11] 李树钰,穆勤科. 数值计算方法[M]. 天津:天津科学出版社,1994.

A sensitivity parameter design method for reliability of explosive initiators

DONG Hai-ping^{*}, CAI Rui-jiao, MU Hui-na, CAO Jian-hua
(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A sensitivity parameter design method for reliability of explosive initiators is presented. To meet the requirements of fire reliability and safety reliability, the reliability index is transformed to sensitivity distribution parameter and it may control reliability of explosive initiator by modulating sensitivity during its development. The mathematical expressions about reliability index and parameter of sensitivity distribution of explosive initiator with Normal distribution, Logistics distribution, LogNormal distribution and LogLogistics distribution are deduced. An application example shows that it is instructive for development of explosive initiators.

Key words: mechanics of explosion; sensitivity distribution; reliability design; explosive initiator; fire reliability; safety reliability

* Corresponding author; DONG Hai-ping
Telephone: 86-10-68915859

E-mail address: dhpphd@bit.edu.cn