**火炸药摩擦感度的QMU评估方法**

**摘要**

**引言**

裕度与不确定度量化QMU（Quantification of Margin and Uncertainty）方法由美国的劳伦斯利弗莫尔国家实验室、洛斯阿拉莫斯实验室在2002年提出，并在随后被美国核安全委员会正式确定为核武器库存有效性评估的新方法。[1]QMU方法的基本思想是，确定关键性能参数的观测清单，建立模型分析计算相关性能参数的阈值、安全区间，计算置信因子，判定系统或部件是否满足可靠性要求，其数据结构可视为最佳估计加不确定度(BE+U)。[2]。QMU思想适用于不具有统计意义、难以重复、可靠性要求高的试验，在一定程度上解决了系统评估的数据和认知缺乏、样本少等问题[3]，以直观的形式为系统或部件的可靠性判定提供依据。

由于QMU从提出到应用的时间较短，相关理论体系尚未完全成熟，国内外有关研究仍处于不断发展中，且目前针对火炸药摩擦感度的QMU评估方法研究较少。因此，本文提出一种以摩擦感度试验中爆炸概率作为性能参数的计算方法，为火炸药摩擦感度可靠性的QMU评估提供建议和指导。

**1火炸药可靠性QMU评估概述**

进行QMU评估时，需要建立观测清单参数和性能通道。QMU的数学表述形式如下：

M即裕量，为性能参数裕度的最佳估计，是火炸药最坏情况下的估计值和性能要求最低（相当于失效判据）的估计值之差。U为M的不确定度。如何定义M和U至关重要，不同的定义方式会产生截然不同的评估结果，需要根据具体的研究对象和试验提出对应的计算方法。

Q为火炸药可靠性的置信系数，是一个无量纲的比值，以Q是否大于1作为产品是否可靠的判据。当Q>1时，表明不确定性包括与性能裕量中，火炸药的安全性可靠；否则当Q<1时，火炸药安全性不可靠，即可能失效。火炸药可靠性QMU评估关键要素如图所示。



图1 火炸药可靠性QMU评估的关键要素

对于火炸药机械感度的可靠性特征，如撞击和摩擦感度，不宜使用确定性模型，而应采用概率模型进行QMU评估。概率认证不要求寻找一个能保证产品绝对可靠的参数边界，但可以分析求出产品的安全性能阈值，留出设计裕度。通过给出一个大致的可靠域，使得需满足状态参数的设计范围包含于可靠域[4]。而由于火炸药机械感度的试验数据有限，且试验过程存在不确定性（试验方法、计算方法的认知不确定性、客观条件随机因素影响的随机不确定性等），对性能参数不确定性的量化成为了QMU方法中的关键内容。

火炸药可靠性QMU评估的主要流程为：

1. 分析火炸药关键性能和所需评估参数对可靠性的贡献，建立系统关键性能参数清单；
2. 根据试验、模拟仿真获得的信息以及专家经验等多源信息，建立性能通道，量化性能参数和阈值，确定火炸药的性能裕量；
3. 收集信息，分析有关性能参数的不确定性来源，并对不确定性进行量化和传递等；
4. 根据量化得出的性能裕量和不确定性，计算置信系数，进行最终的QMU评估，得出火炸药可靠性评估结论，QMU最终结果能直观显示系统中的薄弱环节。

**2 火炸药摩擦感度的QMU评估**

**2.1 摩擦感度试验**

机械感度是指爆炸物在机械作用下发生燃烧或爆炸的难易程度，爆炸物在生产、运输、使用时，不可避免地要发生一些机械撞击、摩擦、挤压等作用。依据不同形式的机械作用，可以将爆炸物的机械感度分为撞击感度、摩擦感度、惯性力的感度等。

根据GJB 772A-97炸药试验方法中的602.1爆炸概率法[6]，进行火炸药的摩擦感度测定。常采用WM-1型摆式摩擦仪，其摆锤以该标准规定的摆角—表压—药量条件，击打待测火炸药的试样。观察试样受摩擦作用时发生的现象，以发声、发光、分解、冒烟等来判断是否爆炸。

每组试验共25发，其爆炸概率点估计值（即爆炸概率）为：

(3)

X为25发试验中发生爆炸的次数。

平行测试两组，取两组爆炸概率的平均值表征试样的摩擦感度。

**2.2 数据统计分析**

单发摩擦感度试验的结果表现为0-1分布（爆炸或不爆炸），考虑将0-1分布近似服从为正态分布N（0,1），根据中心极限定理[7]

(4)

其中，n为样本容量（摩擦感度试验的总发数），为试验求得的爆炸概率平均值，为置信水平。

解(4)中的不等式

(5)

等价于

(6)

记

(7)

其中

(8)

可以求得摩擦试验爆炸概率在置信水平为的近似的置信区间。

**2.3 基于B类不确定度的QMU评估方法**

和常用的贝塞尔公式等方法计算标准差，即A类不确定度评定相比，对于难以进行多次重复测量的试验中，不确定度只能用非统计分析的方法评定，即B类不确定度评定：

(9)

其中a为测量可能区间的半宽：

(10)

Up为区间的置信水平对应的置信因子。

为了计算更精确，取自由度，查t分布表得到t值，公式(9)改写为：

(11)

将该值作为爆炸概率平均值的标准差：

(12)

参考GB∕T 27418-2017测量不确定度评定和表示的“C.4用标准差作为不确定度的度量”[8,9]，计算平均值标准差的标准差：

(13)

参考火工品可靠性评估方法[10]，计算爆炸概率置信限的标准差：

(14)

在有关k系数的QMU评估方法[11]中，裕量(M)定义为为性能特征的均值和临界阈值之差，即，不确定度(U)定义为性能特征的标准差。Newcomer[12]从k系数的评估方法推广，构造基于性能特征分位数及其置信区间的指标k\*：

(15)

或

(16)

和为性能特征的分位数，和为性能阈值的上下限，和为分位数的置信限，体现了性能特征的不确定性。Newcomer的研究表明，这种QMU方法不要求数据满足指定的分布类型，使用较为灵活。

参考Newcomer提出的方法，建立如下裕度与不确定度评价方法。

Pth

Pmax

P2

P0

P1

Pmin

M

U

由于摩擦感度试验的爆炸概率越高，火炸药可靠性越低，参考公式(16)的置信上限，结合公式(9)—(14)，建立相关QMU评估，为摩擦感度安全性设计值：

(17)

(18)

(19)

Q越大，表示该产品爆炸概率在满足指定置信水平的情况下可靠度越高。

**3 计算示例**

西安近代化学研究所提供的火炸药摩擦感度试验数据，经整理后如表1所示

表1 试验数据统计

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 总发数 | 爆炸数 | 未爆数 | 爆炸概率 |
| 第1组 | 25 | 21 | 4 | 84% |
| 第2组 | 25 | 20 | 5 | 80% |

对两次试验数据处理，摩擦感度试验的参考置信水平为0.95，样本数，，，代入公式(5)—(8)，解得摩擦试验爆炸概率在置信水平为0.95的近似置信区间：

由公式(10)得区间半宽：

查t分布表得，置信水平为0.95时：

代入公式(11)(12)，得爆炸概率平均值的标准差：

由公式(13)，得的标准差：

由公式(14)，得置信上限处的不确定度：

根据有关可靠性理论[13]，通过以下不等式初步确定摩擦安全性设计值：

解得 ，所以安全设计值可取0.956，作为失效判据。

结合公式(17)—(19)，计算摩擦感度Q值

Q>1，表明该火炸药在0.95的置信水平下，满足爆炸概率不高于0.956的可靠性要求。

**4 结论**

研究火炸药的摩擦感度，建立合理的摩擦感度可靠性评估方法，对指导火炸药生产、运输和使用安全的规范等过程有重要意义。本文提出一种基于摩擦感度试验爆炸概率的QMU方法，可以初步表征火炸药摩擦感度的可靠性。

由于试验存在各方面的不确定性，以及相关可靠性的性能参数难以全部获取，对于QMU评估方法在摩擦感度的应用还存在诸多可以发展和完善的地方，如基于专家经验判断建立性能通道[14]，提出更多可表征的性能参数，尝试证据理论[15]或概率盒[16]的多源信息不确定性融合，建立不确定性分级制度，利用状态检测与预测技术实现动态评估[17]等方式，值得进一步挖掘和研究。

待修改格式

参考文献

[1] TRUCANO T. Uncertainty Quantification[J]. 2004: 8.

[2] HELTON J, TRUCANO T, PILCH M. Ideas underlying quantification of margins and uncertainties(QMU): a white paper.: SAND2006-5001, 891369[R/OL]. 2006: SAND2006-5001, 891369[2021-12-10]. https://www.osti.gov/servlets/purl/891369/.

[3] SHARP D H, WOOD-SCHULTZ M M. and Nuclear Weapons Certification[J]. 2003(28): 7.

[4] QMU认证方法及其实现途径.pdf[M].

[5] 考虑混合不确定量化技术的机械结构系统安全和风险评价\_尹闯.caj[M].

[6] GJB 772A-1997.pdf[M].

[7] 概率论与数理统计浙大第四版.pdf[M].

[8] GB ∕ T 27418-2017 测量不确定度评定和表示.pdf[M].

[9] 测量不确定度表述讲座\_\_第...标准测量不确定度的B类评定\_李慎安.caj[M].

[10] 火工品可靠性评估方法.pdf[M].

[11] 一种针对实验数据的裕量和不确定性量化方法.pdf[M].

[12] NEWCOMER J. A new approach to quantification of margins and uncertainties for physical simulation data.: SAND2012-7912, 1055920[R/OL]. 2012: SAND2012-7912, 1055920[2022-02-23]. https://www.osti.gov/servlets/purl/1055920/.

[13] QMU\_产品\_设备与系统可靠性认证的新方法.pdf[M].

[14] 可靠性评定中专家信息的提取研究\_马溧梅.caj[M].

[15] 基于证据理论和代理模型的QMU分析.pdf[M].

[16] 基于QMU的装备可靠性评估方法研究.pdf[M].

[17] 基于RVM\_PF的动态安全裕度与不确定性评估方法.pdf[M].