

文章编号: 1006-9941(XXXX)XX-0001-08

火工序列能量传输界面可靠性评估

曾晓云¹, 穆慧娜¹, 秦国圣², 王寅², 李晓刚¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对火工序列能量传输界面的可靠性评估问题, 提出了一种基于信仰统计推断法的可靠性评估方法。该方法充分考虑了能量传输界面数据的随机性特征, 通过构建性能参数的概率分布模型, 将先验知识与试验数据有机结合, 实现了对界面可靠性的精确评估和随机性量化。研究首先建立了火工序列能量传输界面的可靠性模型; 在此基础上设计了基于信仰统计推断的可靠性评估算法框架; 为验证所提方法的有效性, 分别与分位数修正法、蒙特卡罗方法的评估结果进行对比分析。结果表明, 在样本量为3到70时, 基于信仰统计推断法的评估结果与真实值的偏差最小, 且具有良好的收敛性和稳定性。特别是在样本量小于等于10情况下, 该方法表现出更接近置信度的覆盖率和良好的稳定性, 有效克服了传统方法对样本量的依赖问题, 为火工序列能量传输界面的可靠性评估提供了新的方法。

关键词: 火工序列; 应力-强度干涉模型; 信仰统计推断; 可靠性评估

中图分类号: TJ55; TJ45+6

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2025043

0 引言

火工序列是航空航天、国防军工等领域中不可或缺的结构, 其核心功能是通过精确的能量传递实现可靠的点火或起爆。能量传递界面作为火工序列的核心环节, 其可靠性直接决定了系统的性能与可靠性。近年来, 随着航空航天和国防技术的快速发展, 对火工序列及能量传递界面的可靠性评估提出了更高的要求。然而, 能量传递界面涉及复杂的物理化学过程, 其可靠性评估面临数据随机性、小样本问题等多重挑战。因此, 研究高效、精确的可靠性评估方法具有重要的理论意义和工程价值^[1]。

针对火工序列能量传递界面可靠性评估方法的研究, 国内外学者致力于构建高精度的理论模型与评估体系。其中, 刘玉存^[2]、王凯民^[3]、马文涛等^[4]提出了传爆序列界面爆轰传递可靠性的数学模型, 通过定量分

析传爆序列中各级爆炸元件界面间的能量传递特性及结构参数匹配关系, 为典型传爆序列的设计与可靠性评估提供了重要的理论支撑。此外, 尽管部分评估方法并非专门针对能量传递界面可靠性评估, 但其数据特性与火工序列能量传递界面类似, 因此可借鉴的方法日益丰富, 如 Bootstrap 法^[5]、Bayes 近似方法^[6]、蒙特卡罗方法 (Monte Carlo)^[7] 以及分位数修正法^[8] 等。具体而言, Bootstrap 法以其计算简便、精度较高的特点受到关注, 但在极小样本条件下 (如样本量小于 20), 其覆盖率相对于置信度表现较低, 可能导致评估结果过于冒进; Bayes 近似方法在可靠性近似下限的精度上表现优异, 但其计算过程需依赖 Wilson-Hilferty 近似公式、Toda 近似公式等^[9-10], 计算复杂度较高; 蒙特卡罗方法与分位数修正法在工程实践中具有一定适用性, 但其评估结果对样本量的依赖性较强。

由于火工序列的特殊性和复杂性, 其能量传递界面的可靠性评估方法研究仍面临诸多挑战和问题: (1) 数据的随机性: 火工序列能量传递界面的性能测试数据往往具有随机性, 这种随机性可能来源于材料特性、制造工艺、环境条件等多方面因素。现有评估方法通常假设数据服从某种确定分布, 难以准确描述实

收稿日期: 2025-03-13; 修回日期: 2025-05-14

网络出版日期: 2025-06-17

作者简介: 曾晓云 (2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事火工品可靠性设计与评估。e-mail: xiaoy_zeng@163.com

通信联系人: 穆慧娜 (1981-), 女, 副研究员, 主要从事复杂系统可靠性与安全性分析与评估。e-mail: mhnzhy@126.com

引用本文: 曾晓云, 穆慧娜, 秦国圣, 等. 火工序列能量传输界面可靠性评估[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2025043.

ZENG Xiao-yun, MU Hui-na, QIN Guo-sheng, et al. Reliability Evaluation Method of Energy Transfer Interface of Pyrotechnic Sequence[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2025043.

际数据的复杂性和随机性,导致评估结果存在偏差;(2)小样本问题:火工序列高可靠性和高成本特性导致试验数据通常较少,难以满足传统统计方法对样本量的要求;(3)理论研究与工程应用的脱节:尽管理论研究取得了诸多进展,但其与工程实际应用的结合仍存在一定差距。部分评估方法在理论上具有较高精度,但在实际工程中难以实施或成本过高,限制了其推广应用。

为解决上述问题,研究提出了一种基于信仰统计推断的可靠性评估方法,该方法的亮点在于构建了适用于火工序列能量传递界面的信仰统计推断评估框架。为验证所提方法的有效性,将其与分位数修正法以及蒙特卡洛方法进行了系统性对比试验。

1 基于信仰推断的可靠性评估方法理论研究

信仰统计推断方法^[11]是一种基于信仰分布(Fiducial Distribution)进行统计推断与决策的理论框架,其核心在于通过引入信仰分布,将先验知识与试验数据有机结合,从而实现对随机性问题的量化分析与决策支持。相较于传统频率学派的统计方法,信仰统计推断方法在处理随机性、模糊性以及小样本数据的统计推断问题中展现出显著优势,尤其在复杂、高随机性场景下,能够提供更为鲁棒和灵活的推断结果。

火工序列能量传递界面的可靠度主要取决于界面两级结构的能量匹配关系,即上一级结构的输出能量 Y 与下一级结构临界起爆能量 X 的相对大小。当满足 $Y>X$ 时,界面实现可靠传爆的概率较高,表明其可靠性较高;反之,则可能导致传爆失败或能量传递不完全。需要指出的是,在火工序列能量传递界面中, X 和 Y 并非固定不变的常量,而是受多种随机因素影响的动态变量,包括环境条件(如温度、湿度、振动等)以及产品自身的材料特性(如密度、结构均匀性等)^[12]。为量化其可靠度,可采用应力-强度干涉模型^[13]进行计算。该模型认为:产品在给定运行条件下保持功能稳定、不易失效的能力,取决于应力与强度的平衡。当产品受到的应力大于其强度时,就会发生失效,模型关系如图1所示^[14]。

假设 X 和 Y 的概率密度函数分别为 $f_x(x)$ 和 $f_y(y)$,根据概率论与数理统计两个随机变量差的计算公式^[15],可靠度 R 的计算模型如式(1):

$$R = P\{Y > X\} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_x(x) \left[\int_x^{\infty} f_y(y) dy \right] dx \quad (1)$$

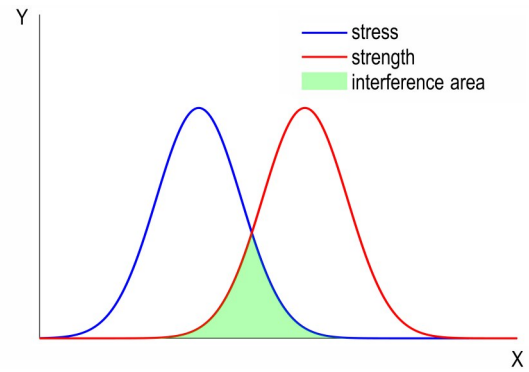


图1 应力-强度干涉模型关系图^[14]

Fig.1 Stress-strength interference model diagram^[14]

式中, X 为下一级结构的临界起爆能量, Y 为上一级结构的输出能量。

当 X 和 Y 均服从正态分布时,设 $X \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$, $Y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$,其中 μ_x, σ_x 和 μ_y, σ_y 分别为感度、刺激量的均值和标准差。根据上述假设,设 $Z=Y-X$,则 Z 也服从正态分布,其均值为 $\mu_z = \mu_y - \mu_x$,方差为 $\sigma_z^2 = \sigma_y^2 + \sigma_x^2$ 。则可靠度如式(2):

$$\begin{aligned} R &= P\{Y > X\} = P\{Z > 0\} \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left\{-\frac{(t-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} dt = \Phi\left(\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) \\ &= \Phi\left(\frac{\mu_y - \mu_x}{\sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_x^2}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

对于能量传递界面,临界起爆能量 X 的分布参数可通过敏感性试验方法(如步进法、升降法或Neyer法^[16])直接获得;输出能量 Y 的分布参数则需要通过性能试验数据确定。假设性能试验数据记为 Y_1, Y_2, \dots, Y_n ,且满足独立同分布条件,基于性能试验数据,可计算样本均值和样本方差分别为:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (3)$$

式中, \bar{Y} 为样本均值, S^2 为样本方差。

根据信仰统计推断理论,可得 $T = \sqrt{n}(\bar{Y} - \hat{\mu}_y)/S$ 服从自由度为 $n-1$ 的 t 分布, $Z = (n-1)S^2/\hat{\sigma}_y^2$ 服从自由度为 $n-1$ 的 χ^2 分布。将 $\hat{\mu}_y = \bar{Y} - T \times S/\sqrt{n}$, $\hat{\sigma}_y = \sqrt{(n-1)S^2/Z}$ 带入(2)式,可得可靠度 R 关于 T, Z, μ_x, σ_x 的函数,即

$$R = f(T, Z, \mu_x, \sigma_x) \quad (4)$$

式中, μ_x, σ_x 已知, T, Z 服从的分布已知。利用随机模拟仿真可计算出对应置信度下 R 的近似下限值,具体

计算步骤如下:

(1) 产生随机数: 产生自由度为 $n-1$ 的 t 分布的随机数、自由度为 $n-1$ 的 χ^2 分布随机数, 分别记为 $t_1, t_2, \dots, t_m, z_1, z_2, \dots, z_m$;

(2) 计算可靠度: 当 T, Z 分别取值 $t_i, z_i, i=1, 2, \dots, m$, 代入式(2)中, 可得 m 个 R 值, 并按从小到大排序记为 $\hat{R}_{(1)}, \hat{R}_{(2)}, \dots, \hat{R}_{(m)}$;

确定置信下限: 给定置信水平 $\gamma=1-\alpha$, 计算 $m^*=[m\alpha]$, 则该界面置信水平为 γ 的可靠度置信下限为 $\hat{R}_L = \hat{R}_{(m^*)}$, 通常 m 不小于 2000。

2 评估精度及有效性仿真分析

2.1 模拟流程

基于 MATLAB 软件, 采用随机抽样的方法分别计算了信仰统计推断法、分位数修正法以及蒙特卡洛方法的可靠度下限, 并通过覆盖率和均方差两项指标对 3 种方法的评估效果进行对比分析。其中, 覆盖率定义为模拟计算中可靠度下限值小于可靠度真值的次数与总模拟次数 k 的比值(通常取 $k=10000$)。覆盖率越接近预设的置信度水平, 表明评估方法的精度越高。均方差则通过计算 k 个可靠度下限值的样本方差来衡量评估结果的离散程度, 均方差越小, 表明评估结果的稳定性越好, 方法的可靠性越高。通过上述两项指标的综合分析, 能够全面评估不同方法在可靠度下限计算中的性能表现。

假设能量传递界面上一级结构的输出能量服从正态分布 $Y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$, 其输出能量的测试数据分别为 Y_1, Y_2, \dots, Y_n , 样本量为 n ; 后一级结构的临界起爆能量服从正态分布 $X \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$; 可靠性评估置信度为 γ 。模拟步骤如下:

(1) 计算可靠度真值: 根据给定的参数 $\mu_x, \sigma_x, \mu_y, \sigma_y$, 利用应力-强度干涉模型计算可靠度真值 R_T ;

(2) 生成样本并计算可靠度下限: 从正态分布 $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ 中随机抽取一组样本量为 n 的样本 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 作为前一级结构的输出性能测试数据, 分别采用以下 3 种可靠性评估方法计算可靠度下限;

① 基于信仰推断的可靠性评估方法:

按照信仰统计推断方法的理论框架, 计算可靠度下限。

② 蒙特卡洛方法:

按照以下步骤计算可靠度下限:

步骤 1: 基于性能测试数据, 计算分布参数均值和标准差的极大似然估计 $\hat{\mu}_z$ 和 $\hat{\sigma}_z$ 。

步骤 2: 从总体中 $N(\hat{\mu}_z, \hat{\sigma}_z^2)$ 随机产生一组样本 $Z^* = (Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_m^*)$, 一般取 $n = m$ 。同样得 $\hat{\mu}_z$ 和 $\hat{\sigma}_z$ 的极大似然估计 $\hat{\mu}_z^*$ 和 $\hat{\sigma}_z^*$, 并利用应力-强度干涉模型计算可靠度点估计值 R^* 。

步骤 3: 重复步骤 2 W 次(通常 $W \geq 2000$), 得到 W 个可靠度点估计值 $R_1^*, R_2^*, \dots, R_W^*$, 将其升序排列得到 $R_{(1)}^* \leq R_{(2)}^* \leq \dots \leq R_{(W)}^*$, 取第 $W(1-\gamma)$ 值 $R_{(W(1-\gamma))}^*$ 作为置信水平为 γ 的可靠度置信下限。

③ 分位数修正法:

根据性能测试数据, 计算分布参数均值和标准差的极大似然估计 \bar{Y}, S 。火工序列能量传递界面的可靠度置信下限可按式(5)计算^[8]:

$$\hat{R}_L = \Phi\left(V - K_\gamma \hat{\delta} - \frac{3}{8} \times \frac{\bar{Y} - \mu_1}{(S^2 + \sigma_1^2)^{5/2}} \times \frac{2S^4}{(n-1)}\right) \quad (5)$$

式中 $V = \frac{\bar{Y} - \mu_1}{\sqrt{S^2 + \sigma_1^2}}$; K_γ 为标准正态分布单侧分位数;

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i; S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2; \hat{\delta} = \frac{S^2/n}{S^2 + \sigma_1^2} + \frac{(\bar{Y} - \mu_1)^2}{4(S^2 + \sigma_1^2)^3} \left(\frac{2S^4}{n-1}\right) + \left(\frac{3}{8}\right)^2 \frac{(\bar{Y} - \mu_1)^2}{(S^2 + \sigma_1^2)^5} \frac{8S^3(n+5)}{(n-1)^3}。$$

(3) 重复模拟并统计分析:

重复步骤(2)10000次, 分别得到基于信仰推断、蒙特卡洛方法和分位数修正法的可靠度下限模拟值。计算各组方法的覆盖率和均方差, 以评估其统计性能。

2.2 数值模拟

为全面分析产品设计裕度和一致性对火工序列能量传递界面可靠性评估结果的影响, 对前一级界面的输出能量 Y 和后一级界面的临界起爆能量 X 在不同变差系数条件下的工况进行了数值模拟研究, 模拟工况见表 1, 置信度均为 0.9。

表 1 不同工况的参数数值

Table 1 Parameter values of different modes

different modes	the critical initiation energy X of the latter interface that obeys the distribution	the output energy Y of the previous interface that obeys the distribution	the true value of reliability
	1	$N(100, 2^2)$	
2	$N(100, 2^2)$	$N(120, 3^2)$	0.99999985
3	$N(100, 6^2)$	$N(120, 6^2)$	0.9908

2.3 数值模拟的结果与讨论

2.3.1 工况 1 模拟结果与分析

在工况 1 条件下, 研究通过数值模拟对比了不同可靠性评估方法的覆盖率和均方差随样本量变化的关系, 结果如图 2 和图 3 所示。

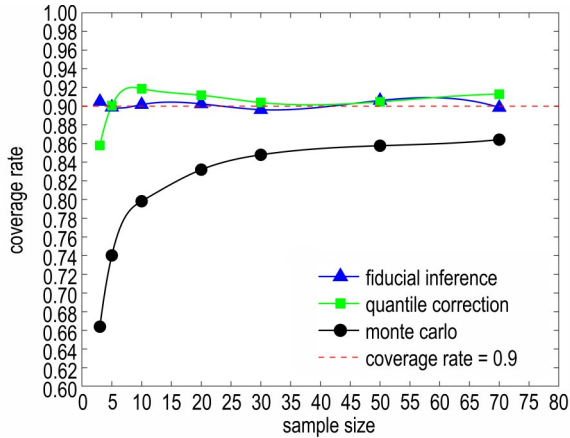


图 2 不同方法样本量与覆盖率的关系曲线图(工况 1)

Fig. 2 The relationship curve between sample size and the coverage rate of different methods (mode 1)

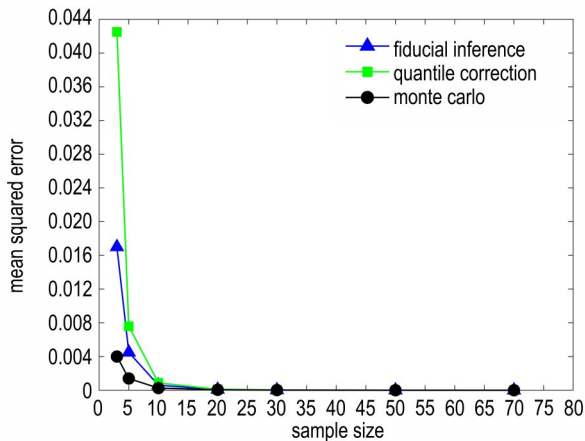


图 3 不同方法样本量与均方差的关系曲线图(工况 1)

Fig. 3 The relationship curve between the sample size and the mean squared error of different methods (mode 1)

由图 2 可以看出, 当 $n < 5$ 时, 信仰统计推断法的覆盖率基本与置信水平 γ 一致; 相比之下, 分位数修正法与蒙特卡罗方法的覆盖率均偏低, 尤其是后者, 其覆盖率仅为 66.39%, 偏离程度较大; 当 $5 \leq n \leq 70$ 时, 信仰统计推断法的覆盖率依然维持在置信水平附近; 分位数修正法有明显改善, 覆盖率也趋近于置信水平; 而蒙特卡罗方法, 虽然其覆盖率随着样本量的增加而有所提升, 但始终低于置信水平, 过于冒进。

由图 3 可以看出, 随着样本量的不断增加, 三种方法的方差均显著下降, 说明其稳定性普遍增强。其中,

蒙特卡罗方法在稳定性方面表现最为突出, 其次为信仰统计推断法。

由此可见, 信仰统计推断法在全样本范围内均展现出较高的评估精度, 尤其是在极小样本 (如 $n=3$) 条件下, 显著优于其余两种方法, 且具有良好的稳定性; 蒙特卡罗方法虽然在样本量小于 10 条件下表现出优异的稳定性, 但其在全样本范围内覆盖率过低, 会导致评估结果过于冒进。因此, 在工况 1 条件下, 信仰统计推断方法具有更接近于置信水平的覆盖率和良好的稳定性, 特别是在样本量小于 30 条件下。

2.3.2 工况 2 模拟结果与分析

在工况 2 条件下, 研究通过数值模拟对比了不同可靠性评估方法的覆盖率和均方差随样本量变化的关系, 结果如图 4 和图 5 所示。

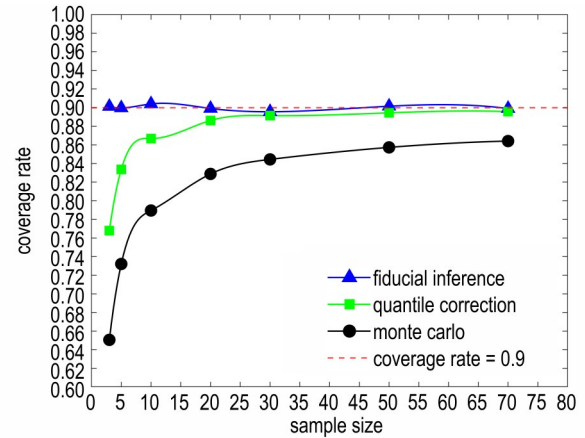


图 4 不同方法样本量与覆盖率的关系曲线图(工况 2)

Fig. 4 The relationship curve between the sample size and the coverage rate of different methods (mode 2)

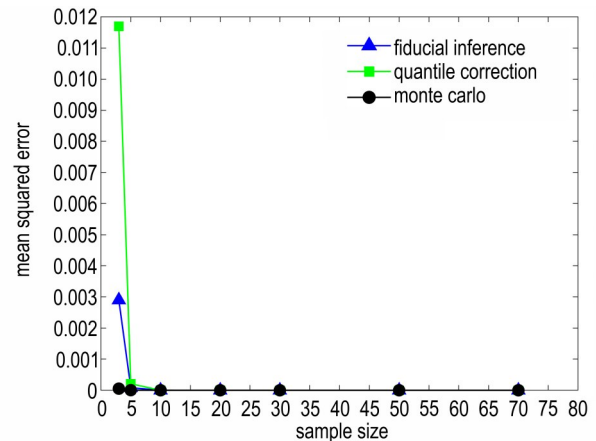


图 5 不同方法样本量与可靠度下限均方差的关系曲线图(工况 2)

Fig. 5 The relationship curve between the sample size and the mean squared error of different methods (mode 2)

从图4可以看出,当 $3 \leq n \leq 30$ 时,信仰统计推断法的覆盖率基本与置信水平一致;而分位数修正法与蒙特卡罗方法的覆盖率整体偏低,尤其是后者,在样本量为3时覆盖率仅为65.06%,过于冒进;当 $30 < n \leq 70$ 时,信仰统计推断法的覆盖率仍能维持在置信水平附近,分位数修正法有明显改善,覆盖率也趋近于置信水平;相比之下,蒙特卡罗方法的覆盖率虽随样本数量增加而升高,但始终未达到置信水平,评估结果仍过于冒进。

从图5可以看出,同工况1一样,样本量的增长促使三种方法的方差显著降低,表明三种方法稳定性普遍增强。

由此可见,在工况2条件下,信仰统计推断法在各样本量下均展现出较高的评估精度,尤其是样本量小于30时,显著优于其余两种方法,且具有良好的稳定性。

2.3.3 工况3模拟结果与分析

在工况3条件下,研究通过数值模拟对比了不同可靠性评估方法的覆盖率和均方差随样本量变化的关系,结果如图6和图7所示。

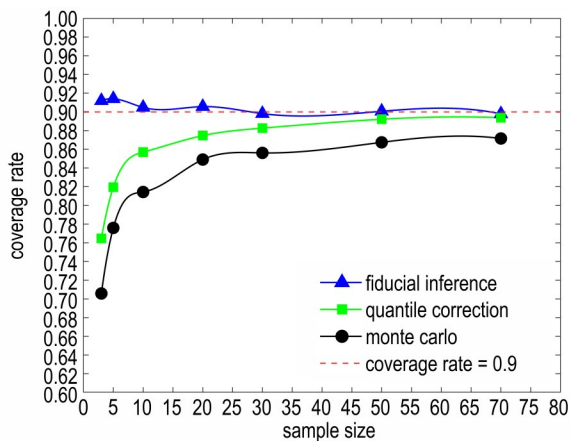


图6 不同方法样本量与覆盖率的关系曲线图(工况3)

Fig.6 The relationship curve between the sample size and the coverage rate of different methods (mode 3)

从图6可以看出,当 $3 \leq n \leq 50$ 时,信仰统计推断法的覆盖率基本与置信水平一致,分位数修正法与蒙特卡罗方法的覆盖率整体偏低;当 $50 < n \leq 70$ 时,信仰统计推断法的覆盖率仍能维持在置信水平附近;分位数修正法有改善;蒙特卡罗方法的覆盖率依旧低于置信水平,评估结果仍过于冒进。

从图7可以看出,同工况1一样,随着样本量的增加,三种方法的方差显著降低,表明其稳定性普遍增强。其中,蒙特卡罗方法在稳定性方面依旧表现最为

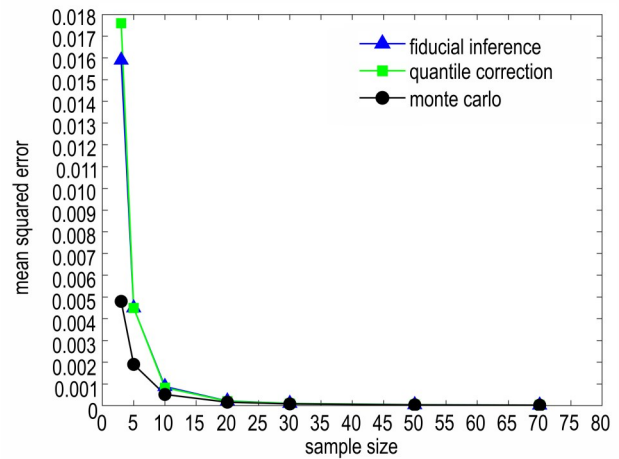


图7 不同方法样本量与均方差的关系曲线图(工况3)

Fig.7 The relationship curve between the sample size and the mean squared error of different methods (mode 3)

突出,其次为信仰统计推断法,最后为分位数修正法。

由此可见,在工况3条件下,信仰统计推断方法再次验证了其在小样本条件下的优越性,覆盖率高且偏差与方差控制良好。

3 案例应用

为印证所提方法的适用性,以某火工序列能量传递界面可靠性评估为例进行应用试验研究,要求在置信度 $\gamma=0.9$ 评估该界面的可靠性。

3.1 样品与仪器

样品为某火工序列传递界面,该界面结构由发火件、飞片、加速膛和下级装药HNS-IV组成,其中发火件包括桥丝和爆炸箔,如图8所示。铜爆炸箔尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \times 4 \text{ }\mu\text{m}$;聚酰亚胺飞片尺寸为 $\Phi 0.45 \text{ mm} \times 25 \text{ }\mu\text{m}$;陶瓷加速膛长度为 0.45 mm 。

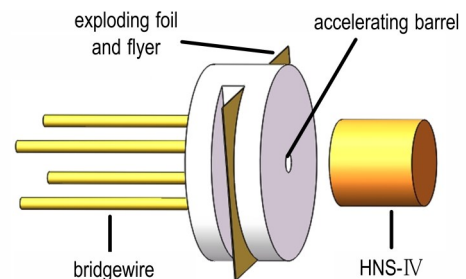


图8 能量传递界面结构图

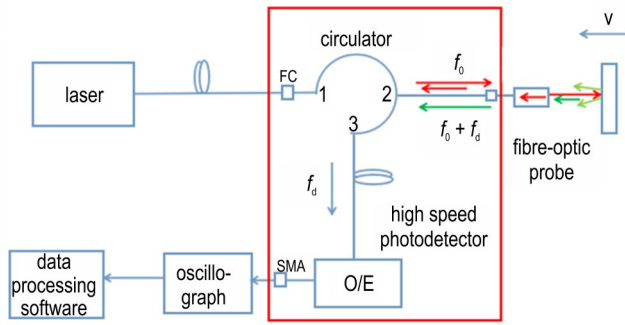
Fig.8 Energy transfer interface structure diagram

试验用到的仪器包括PDV测速仪主机、激光器、示波器、高压电源、数字高压表、脉冲功率源。

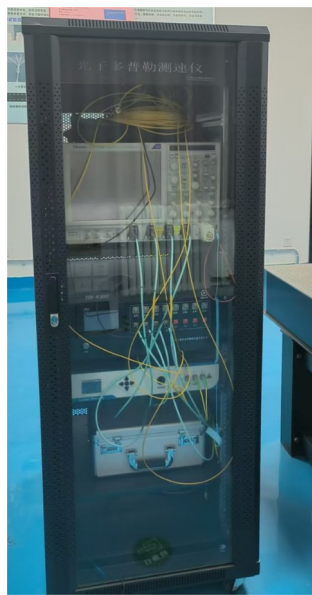
3.2 试验方法

试验方法采用光子多普勒测速方法(PDV),测试

原理图如图 9a 所示, 实物图如图 9b 所示。从激光器发出的单频激光(其频率为 f_0)分成两束, 其中一束光是光纤探头表面的反射光返回系统, 作为参考光; 另一束是飞片上反射回来的激光, 作为信号光。两次反射光发生干涉后, 利用探测器的平方检测特性, 检测参考光和信号光的差拍干涉信号, 并由光电探测器实现光电转换, 将电信号放大后由示波器采集。



a. PDV test principle diagram



b. PDV test physical diagram

图 9 PDV 测试原理图及实物图

Fig.9 PDV test principle diagram and physical diagram

3.3 结果与讨论

实测 5 组飞片速度, 测试结果为 (3110, 3155, 3202, 3061, 3150) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; HNS-IV 的临界起爆飞片速度为 $2850 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由测试结果可得, 飞片速度样本均值 $\bar{v}=3135.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 标准差 $s=54.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 则由经典点估计法计算得可靠度 $\hat{R}=0.9999$ 。通过不同方法获得的可靠性评估结果如表 5 所示。

表 5 可靠性评估结果

Table 5 Reliability evaluation results

method	fiducial inference	quantile correction method	monte carlo simulation
evaluation results \hat{R}_L	0.9912	0.9962	0.9987

表 5 的评估结果表明, 在小样本 $n=5$ 条件下, 信仰统计推断法给出的可靠度下限值最低, 蒙特卡洛方法的评估结果最高。从保守角度考虑, 取基于信仰统计推断评估方法给出的结果作为该界面的可靠性评估值, 即该能量传递界面的可靠度评估结果为 $\hat{R}_L=0.9912$ 。

4 结论

针对小样本条件下火工序列能量传输界面可靠性评估方法精度低的问题, 提出一种基于信仰统计推断法的评估方法, 通过仿真分析和案例应用可得如下结论:

(1) 信仰统计推断法在全样本范围内均展现出较高的评估精度, 尤其是在极小样本(如 $n=3$)条件下, 且具有良好的稳定性;

(2) 信仰统计推断方法的覆盖率受样本量和产品散差影响很小, 始终稳定在置信水平附近; 当 $n \geq 10$ 时, 评估精度显著提高, 评估均方差小于 0.1%;

(3) 在案例应用中, 采用信仰统计推断方法获得的可靠度下限与分位数修正法、蒙特卡洛法相比, 可靠度值最低, 这种保守性特征确保了可靠性评估的稳健性。

参考文献:

- [1] 乔丽. 传爆序列界面爆轰传递可靠性设计与评估[D]. 太原: 中北大学, 2015.
QIAO Li. Design and evaluation on the detonating sequence interface detonation transfer reliability [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [2] 刘玉存. 引信传爆序列界面爆轰传递可靠度的估算[J]. 太原机械学院学报, 1989, (2): 36-41.
LIU Yu-cun. Evaluation of detonation transfer reliability between two explosive elements in a fuze explosive train[J]. *Journal of Taiyuan Institute of Machinery*, 1989, (2): 36-41.
- [3] 王凯民, 符绿化. 引信爆炸序列钝感化发展研究[J]. 现代引信, 1995, (3): 42-49+41.
WANG Kai-min, FU Lv-hua. Research on insensitive development of fuze explosion sequence [J]. *Journal of Detection & Control*, 1995, (3): 42-49+41.
- [4] 马文涛, 穆慧娜, 秦国圣, 等. 冲击片雷管四点阵列输出界面作用可靠性设计方法[J]. 含能材料, 2023, 31(12): 1279-1286.
MA Wen-tao, MU Hui-na, QIN Guo-sheng, et al. Reliability

- design method of four-point array output interface of exploding foil initiator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(12): 1279-1286.
- [5] 洪东跑, 温玉全. 基于 Bootstrap 方法的火工品双边可靠性评估[J]. 质量与可靠性, 2008, (1): 21-24.
HONG Dong-pao, WEN Yu-quan. Two-sided reliability assessment of initiating explosive device based on Bootstrap method[J]. *Quality and Reliability*, 2008, (1): 21-24.
- [6] 孙新利, 余文力. 正态双边可靠性的一种工程近似计算[J]. 应用概率统计, 2001, (4): 337-340.
SUN Xin-li, YU Wen-li. The approximate lower limit of bilateral reliability for the normal distributions[J]. *Chinese Journal of Applied Probability and Statistics*, 2001, (4): 337-340.
- [7] 曹伟, 徐诚, 王亚平. Monte Carlo 方法在拉壳钩强度可靠性分析中的应用[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(1): 112-116.
CAO Wei, XU Cheng, Wang Ya-ping. Application of Monte Carlo method in strength reliability analysis of the extractor[J]. *Maching Design and manufacturing engineering*, 2019, 48(1): 112-116.
- [8] 郭奎, 荣伟, 谢淮. 降落伞系统可靠性综合评估[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(4): 1-6+17.
GUO Kui, RONG Wei, XIE Huai. Integration evaluation for parachute reliability[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(4): 1-6+17.
- [9] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性评定[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
ZHOU Yuan-quan, WENG Chao-xi. Reliability evaluation[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [10] 胡昌寿. 可靠性工程: 设计, 试验, 分析, 管理[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.
HU Chang-shou. Reliability engineering: Design, Test, Analysis, Management[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1989.
- [11] 陈希孺. 高等数理统计学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
CHEN Xi-ru. Higher mathematical statistics[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2009.
- [12] ALOUAAMARI M, LEFEBVRE M H, PERNEEL C, et al. Statistical assessment methods for the sensitivity of energetic materials[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific and Technological Aspects of Energetic Materials*, 2008, 33(1): 60-65.
- [13] 伊泉剑, 董海平, 翟志强, 等. 基于应力-强度干涉模型的火工品可靠性设计方法[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(10): 1007-1011.
YI Xiao-jian, DONG Hai-ping, ZHAI Zhi-qiang, et al. Reliability design for initiating devices based on stress-strength interference model[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(10): 1007-1011.
- [14] 程立, 董海平, 穆慧娜, 等. 基于感度分布均值的火工品发火可靠性小样本评估方法[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2444-2450.
CHENG Li, DONG Hai-ping, MU Hui-na, et al. A small sample assessment method for firing reliability of explosive initiator based on the mean of sensitivity distribution[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(12): 2444-2450.
- [15] 龚光鲁. 概率论与数理统计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
GONG Guang-lu. Probability and statistic[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [16] GJB Z377A-94. 感度试验用数理统计方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1994.
GJB Z377A-94. Statistical methods for sensitivity tests[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of People's Republic of China, 1994.

Reliability Evaluation Method of Energy Transfer Interface of Pyrotechnic Sequence

ZENG Xiao-yun¹, MU Hui-na¹, QIN Guo-sheng², WANG Yin², LI Xiao-gang¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Shaanxi Institute of Applied Physical Chemistry, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the reliability evaluation of the energy transfer interface of pyrotechnic sequence, a reliability evaluation method based on fiducial inference method was proposed. This method fully considered the randomness characteristics of the energy transfer interface data. By constructing the probability distribution model of the performance parameters, the prior knowledge was organically combined with the test data, and the accurate evaluation and randomness quantification of the interface reliability were realized. Firstly, the reliability model of the energy transfer interface of pyrotechnic sequence was established. On this basis, the reliability evaluation algorithm framework based on fiducial inference was designed. In order to verify the effectiveness of the proposed method, the evaluation results of the quantile correction method and the Monte Carlo method were compared and analyzed. The results showed that when the sample size was 3 to 70, the deviation between the evaluation results based on the fiducial inference method and the true value was the smallest, demonstrating good convergence and stability. Especially when the sample size is less than or equal to 10, this method shows significant advantages, which effectively overcomes the dependence of traditional methods on sample amount, and provides a new method for the reliability evaluation of the energy transfer interface of pyrotechnic sequences.

Key words: pyrotechnic sequence; stress-strength interference model; fiducial inference; reliability evaluation

CLC number: TJ55; TJ45+6

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025043

(责编: 姜梅)

图文摘要:

