

# 跌落/撞击载荷下装药结构的安全性评估方法

郭历伦, 刘平, 罗景润, 李明海

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** **目的** 提出装药结构在跌落/撞击事故条件下安全性的定量评估方法。**方法** 针对装药结构跌落/撞击条件下含能部件非冲击点火存在的不确定性大、缺乏可供工程应用的点火判据等问题, 采用基于数理统计思想的定量评估思路, 建立“3类试验+1种方法”的安全性评估体系, 并提出试验设计、方法选取和评估实施的方法及要求, 可供工程应用。**结果** 采用该方法, 开展了某装药结构跌落安全性的定量评估, 通过标准试验探索获得了特定约束下的起爆阈值范围, 通过设计并开展多发能包络整体级响应的构型试验, 获得的实验数据可作为评估的样本数据。采用单侧置信下限方法进行了定量评估, 获得了安全度为 0.999 99 (置信度 0.9) 的定量评估结果。**结论** 该方法可实现对武器装备、航天发动机跌落/撞击条件下安全性的定量评估, 但该方法仅适用于装药结构具有足够安全裕度的情况。

**关键词:** 安全性定量评估; 装药结构; 跌落/撞击载荷; 构型试验

中图分类号: TJ410

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)05-0001-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.001

## Safety Assessment Method of Charge Construction under Drop/Impact Loading

GUO Li-lun, LIU Ping, LUO Jing-run, LI Ming-hai

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT:** To propose a quantitative method for safety assessment of charge construction under the condition of drop-impact accident. Aiming at the problems of large uncertainty in the non-shock ignition of energetic components under the condition of the charge construction drop/impact, and lack of ignition criteria for engineering applications, a quantitative evaluation method based on mathematical statistics is adopted, and an evaluation system of “3 types tests and 1 method” is established. The methods and requirements of experimental design, quantitative evaluation method selection, and evaluation implementation are given, which can be used in engineering evaluation. Based on this method, a quantitative assessment of the drop safety of a certain charge construction is carried out, and the detonation threshold range under the specific constraints is obtained through exploration using standard tests. The safety value data of sample tests are obtained by designing and carrying out a configuration test which can envelope the overall response, and the quantitative evaluation result of safety is 0.999 99 (with confidence level of 0.9). This method can realize the quantitative assessment of safety for weapon equipments and aerospace engines under drop/impact conditions, but this method is only suitable for the situation where the charge construction has sufficient safety margin.

**KEY WORDS:** quantitative safety assessment; charge construction; drop/impact loading; configuration tests

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-04-06

Received: 2021-04-01; Revised: 2021-04-06

作者简介: 郭历伦 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为系统安全性、冲击动力学。

**Biography:** GUO Li-lun (1979—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: system safety, impact dynamics.

引文格式: 郭历伦, 刘平, 罗景润, 等. 跌落/撞击载荷下装药结构的安全性评估方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 001-005.

GUO Li-lun, LIU Ping, LUO Jing-run, et al. Safety assessment method of charge construction under drop/impact loading[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 001-005.

在武器装备和航天发动机等系统,将炸药、推进剂中含能材料作为其重要的功能部件的,为典型的装药结构。在吊装、运输等使用过程中,可能因设备故障、人员误操作等因素导致产品跌落、撞击等意外事故,可能致使装药结构损伤,引发含能部件局部温升,造成燃烧、爆燃,甚至爆轰反应,导致灾难性的后果。因此,装药结构在跌落/撞击事故下的安全性,关系到武器装备或航天发动机等的使用安全,备受研制部门和使用部门的共同关注。

相对于传统的冲击起爆而言,跌落/撞击等低速加载条件下装药结构为非冲击点火机制,含能部件所受的压力虽远未达到冲击起爆阈值,但仍可能因局部的剪切、摩擦等作用导致点火,且问题的不确定性大<sup>[1-8]</sup>。国内外学者针对非冲击点火问题开展了大量的研究,并发展了不同类型的点火模型<sup>[9-10]</sup>,但是,由于该问题的复杂性,目前,尚缺乏可供工程应用的点火判据。在工程实践中,如何对装药结构进行安全性评估,未看到相关报道。

文中采用数理统计的思想,探讨了装药结构的定量评估方法,提出了基于“3类试验+1种方法”的定量评估思路和工作方案,并探讨了具体的定量评估方法和试验实施要求,可供装药结构在跌落/撞击载荷下的安全性评估参考。

### 1 评估的总体思路

由于涉及非冲击点火问题,装药结构在跌落/撞击载荷下的安全性评估,其主要难点在于不确定性大、缺乏安全判据,无法采用基于确定性理论的方法进行评估,即不能仅基于有限次试验结果进行评估。对安全性评估而言,提出了巨大的挑战。

在工程系统的可靠性评估中,针对无法建立评估判据、不确定性较大的问题,已广泛采用数理统计的思想进行定量评估,并发展了一些定量评估方法。例如 QMU<sup>[11-13]</sup>、最大熵试验法<sup>[14-19]</sup>、单侧置信下限方法<sup>[20]</sup>等。结合相关的样本试验结果,可实现对不确定性的覆盖和包络。

借鉴可靠性的思路,提出基于裕度和统计的工程方法进行定量评估,其总体评估思路如图1所示,涉及3类试验和1种评估方法。

1) 定量评估方法。以统计的方法覆盖响应的分散性和点火的不确定性,给出一定置信度条件下的定量评估结果,主要解决问题的不确定性和结果的可信性问题。

2) 标准试验。为小构型的材料级试验,主要用于探究装药结构特定约束和边界条件下的点火机理和点火模型问题,给出能反映含能部件(炸药或推进剂)响应严酷程度且可试验测试的参量,为评估提供特征参量。

3) 构型试验。能反应整体级装药结构的响应特征及规律,用于替代整体级装药结构开展重复试验,为定量评估提供样本数据。解决整体级试验做样本试验时,试验成本无法接受的问题。要求构型试验对整体级响应等效。

4) 整体级试验。有限次(2次左右)装药结构的整体级试验,测量装药结构整体级响应的特征参量,为构型试验和标准试验设计提供依据,同时也对评估结果进行综合验证和演示。

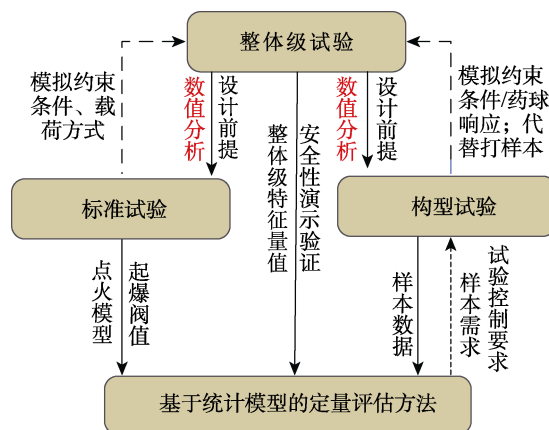


图1 总体评估思路  
Fig.1 Overall assessment thought

### 2 定量评估实施方案

#### 2.1 标准试验设计

标准试验的目的是,通过大量材料级小构型试验,探究在该装药结构特定的约束和边界条件下,含能部件的点火机理和点火模型。其要求如下:

1) 试验构型能反映该整体级装药结构中含能部件特定的约束条件和边界条件,载荷类型和试验加载方式能模拟该整体级装药结构的实际加载模式。

2) 给出能反映含能部件响应严酷程度的力学参量,并要求这些力学参量为3类试验中均可通过试验测试的量。

3) 探究该装药结构特定约束条件和边界条件下,含能部件的点火模型,给出基于第2)点中能反映含能部件响应严酷程度的单一综合特征参量。

基于上述目的和要求,结合学术界已有的研究成果,开展标准试验设计。对于装药结构跌落/撞击载荷下的点火机理,学术界已开展了大量研究,一般认为其主要影响因素包括炸药压力 $\sigma_A$ 、脉宽 $t$ 和局部剪切应变率 $\dot{\gamma}$ 相关。美国洛斯阿拉莫斯实验室的Browning R. V.给出了如下的点火预测模型<sup>[9]</sup>:

$$c = \sigma_A^{0.66} \dot{\gamma}^{1.27} t^{0.27} \tag{1}$$

式中: $c$ 为反映装药响应严酷程度的综合特征参量。

傅华等<sup>[10]</sup>为便于工程实施,提出了特定结构的工程点火模型:

$$c = p^m \cdot v \cdot t^n \quad (2)$$

式中:  $p$ 、 $t$  分别为装药的压力和脉宽;  $v$  为装药局部撞击速度;  $n$ 、 $m$  为常数, 与装药结构局部的约束和结构有关。实际结构中, 由于材料、结构等的差异, 装药的力学响应参数  $p$ 、 $v$ 、 $t$  存在差异,  $c$  值存在不确定性, 故不能将该模型直接应用于装药结构的安全性评估, 但可将  $c$  值作为评估的综合特征参量。在特定工程结构和约束下, 用标准试验探究其工程点火模型的模型参数。如通过系列研究确定式 (2) 中的  $m$  和  $n$ , 为评估提供特征参量  $c$  的计算方法。

## 2.2 构型试验设计

构型级试验的目的是, 替代该整体级装药结构开展多发重复性的样本试验, 为定量评估提供样本数据, 同时大大降低试验和评估的成本。为达到替代整体级装药结构开展样本试验的目的, 要求构型试验在含能部件的响应上能实现对整体级装药结构的等效或包络。具体如下:

- 1) 构型试验中, 含能部件的局部结构、约束与整体级装药结构一致。
- 2) 载荷类型及加载方式能模拟整体级装药结构。
- 3) 可实现对含能部件特定位置压力、脉宽和局部撞击速度的试验测试。
- 4) 含能部件的响应与整体级相当或适当偏严, 综合特征参量  $c$  值应较整体级略高。

构型试验设计时, 可在整体级装药结构受撞击部位至含能部件的载荷传递路径上, 截取局部的真实结构和材料, 作为构型试验件的基本结构。在此基础上, 通过力学分析, 增加能反映装药结构整体级的横向约束效应、界面效应等的调节结构。结合整体级和构型级响应的数值计算分析, 对构型试验的力学响应进行调整, 使构型试验件的响应能等效或包络整体级响应。

## 2.3 整体级试验设计

整体级试验的目的包括 2 个方面: 获得整体级装药结构撞击条件下含能部件的力学响应特征和规律, 为构型级试验及标准试验的设计提供基准; 对评估结论进行综合验证和演示。为达到上述目的, 要求如下:

- 1) 整体级试验的试验条件, 包括撞击速度、姿态及靶体条件等, 能反映该装药结构在特定撞击场景下最严酷的撞击条件, 可结合数值计算进行明确。
- 2) 至少开展 2 发整体级试验, 1 发用于确定整体级响应基准, 1 发用于验证和演示。前者的装药部件可采用力学特性相近的材料替代, 后者必须采用全真状态。
- 3) 需对含能部件特定位置的压力、脉宽和局部撞击速度进行试验测试。

## 2.4 定量评估方法

### 2.4.1 选择原则和要求

定量评估方法, 其目的是在统计样本的基础上, 给出可覆盖分散性和不确定性的定量评估结果, 解决评估的科学性和可信性问题。不同定量评估方法, 在相同评估目标的前提下, 如安全度 0.999 99 (置信度 0.9), 其对试验样本数、评估参数等的需求是不一样的。确定评估方法考虑的关键因素是工程可实施问题, 具体要求如下:

- 1) 为满足高安全评估的需要, 要求评估方法至少能给出最高安全度达 0.999 999 的评估结果。
- 2) 从评估成本控制的角度考虑, 要求评估方法所需的试验样本数不能太高, 宜控制在 20 以内。
- 3) 为便于工程实施, 要求评估方法所需的评估参数均易于获得, 样本试验的加载条件具有可实施性。

### 2.4.2 评估方法的确定

常见考虑不确定性的定量评估方法包括 QMU 方法、单侧置信下限评估方法和最大熵试验法。

QMU 方法要求不确定性分布有边界, 且可度量<sup>[11]</sup>。对于涉及非冲击起爆问题的评估中, 其评估参数很难获得, 不满足第 3) 条要求。

最大熵试验法, 实质为一种加严条件下的小样本试验方法, 其试验样本数  $N$ 、安全度  $R_L$ 、置信度  $\gamma$ 、熵强化系数  $k$  和变异系数  $C_x$  间的相互关系见式 (3)<sup>[12]</sup>。其中熵强化系数  $K=L_a/L_b$ , 为样本试验与整体级试验的加载载荷比值, 体现样本试验的加严程度, 是从试验条件角度表征裕度。假设安全度和置信度要求分别为 0.999 99、0.9, 熵强化系数要求为 4.5, 炸药火工品的变异系数一般按 0.2 考虑, 则所需的试验样本数为 50。样本试验加载条件要求过高, 试验样本数难以接受, 也不满足上述第 3) 条要求, 故该方法在本问题的工程实施上不具备可操作性。

$$N = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln\{1-\Phi[(k-1)/C-k\Phi(R)]\}} \quad (3)$$

单侧置信下限方法<sup>[20]</sup>, 包括查表法和直接法 2 种方法。查表法仅需已知相关评估参数, 直接查表即可, 简单方便, 但精度稍低。直接法需要求解相关参数复杂的非线性方程, 精度较高, 但过程较繁杂。工程实践中, 可根据实际评估的进度、经费及评估目标等进行确定。查表法和直接法除流程和精度不同外, 其所需的评估参数完全一样, 建议采用查表法。实施时, 在确定了安全度  $R_L$ 、置信度  $\gamma$  和强化系数  $k$  的条件下, 通过查 GB/T 4885—2009 中的附表即可确定样本试验数  $N$ 。其关键评估参数为强化系数  $k$ , 反映了装药结构所具有的裕度。  $k$  值越大, 说明裕度越大, 所需的样本试验数越少。采用单侧置信下限方法的规范限方法, 则  $k$  可由式 (4) 计算获得:

$$k = (C_0 - \bar{C}) / \sigma \quad (4)$$

式中： $C_0$ 为点火阈值； $\bar{C}$ 和 $\sigma$ 分别为多发样本试验获得的综合特征参量 $C$ 的均值和标准差。可以看出，该方法是从含能部件的响应与点火阈值间差距的角度来定义裕度。其好处在于不用提高样本试验的试验加载条件，为评估和试验的实施提供了极大的便利，该方法经验证在工程实施上具有可行性。但需对点火阈值有一个大致的判断，这个判断来自于标准试验的探索以及对该装药结构的工程经验等。

### 2.4.3 评估的实施方法

由于非冲击起爆机制不确定性大，很难给出一个确定的点火阈值 $C_0$ 。偏保守考虑，工程实践中，可通过加严的构型试验确定装药结构确定未到点火阈值的 $C_1$ 替代 $C_0$ 进行评估，即 $k = (C_0 - \bar{C}) / \sigma$ ，如图2所示。由此，在样本标准差 $\sigma$ 一定的条件下，样本均值 $\bar{C}$ 越远离 $C_1$ ， $k$ 值越大，所需的试验样本数越少。在均值 $\bar{C}$ 与 $C_1$ 差值一定的条件下（即裕度确定的条件下），样本标准差 $\sigma$ 越小（即分散性越小）， $k$ 值越大，所需的试验样本数越少。

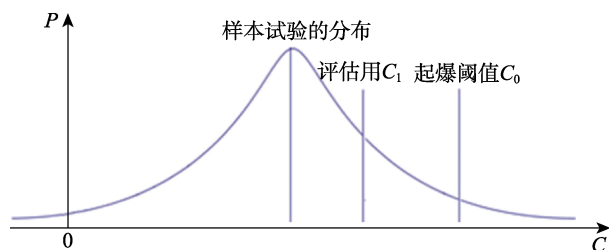


图2 评估用上规范限示意

Fig.2 Schematic diagram of upper specification limit method for evaluation

试验样本数据的分散性，与构型试验的结构、材料的分散性以及装药部件局部微结构的分散性等相关，但此类型的分散性正是该问题不确定性的来源，也无法通过人为控制或降低。此外，试验样本数据的分散性还与试验姿态、试验加载和试验测试等因素相关，这部分的分散性可通过严格的试验控制降低，甚至基本消除。试验设计时，应着重对此部分进行严格控制，降低试验分散性，从而降低试验样本数据的标准差 $\sigma$ ，从而使 $k$ 值增大和所需的试验样本数降低。

根据上述分析及要求，评估时需做如下工作：通过标准试验，估计起爆阈值 $C_0$ 的大致范围；通过加严条件的构型试验，获得较样本试验加严但远未达起爆阈值的 $C_1$ 值；通过数值模拟，确定对试验姿态等的试验控制要求；开展多发重复性的样本试验，由试验数据计算强化系数 $k$ ；由强化系数 $k$ 和样本数 $N$ ，查表获得定量评估结果，即安全度和置信度。

### 2.5 适用范围

文中所提出的方法为工程评估方法，在多处进行

了偏保守考虑，且要求所有的构型试验和整体级试验不能发生反应，适用于具有足够安全裕度的装药结构撞击安全性定量评估。

## 3 评估实例

问题：要求对某装药结构在3 m跌落条件下的安全性进行评估。

标准试验：根据该装药结构的特点，设计并开展了系列材料级的标准试验，获得了该装药结构中炸药材料在该特定约束和边界条件下，起爆阈值 $C_0$ 在2500~3000。

整体级试验：开展了2发整体级试验，1发用于确定特征参量 $c$ 的设计基准，其 $c$ 值为325。1发用于对评估结果的验证和展示，含能部件全真状态未发生反应。

加严条件的构型跌落试验：开展了3发6 m跌落试验，均未发生反应，获得 $C_1$ 值为1490。

构型试验：开展了10发3 m跌落试验，作为样本试验，根据其试验数据，样本均值 $\bar{C}$ 为558.40，样本标准差 $\sigma$ 为130.45。

评估结果：计算获得强化系数 $k$ 为7.14，结合试验样本数10，查表获得其安全度和置信度分别为0.999 99、0.9。

## 4 结论

1) 针对装药结构在跌落/撞击事故条件下的安全性评估问题，提出了基于“3类试验+1种方法”的定量评估思路，并给出了具体的实施方案和评估实例。该方法可应用于武器装备、航天发动机等装药结构撞击安全性的定量评估。

2) 明确了3类试验和1种方法的具体要求和实施方法。

3) 根据装药结构的特点，在对现有定量评估方法比较分析的基础上，确定了采用单侧置信下限方法作为其定量评估方法。

4) 该评估方法适用于具有足够安全裕度的装药结构撞击安全性的定量评估。

### 参考文献：

- [1] 赵峰, 孙承伟. 固体高能炸药和推进剂的滞后起爆[J]. 爆炸与冲击, 1997(2): 10-26.  
ZHAO Feng, SUN Cheng-wei. Delayed initiation of solid high explosives and propellants[J]. Explosion and shock waves, 1997(2): 10-26.
- [2] 柯加山, 陈朗, 冯长根. 低冲击条件下凝聚炸药延迟起爆现象的研究进展[J]. 火炸药学报, 2002(2): 35-38.  
KE Jia-sha, CHEN Lang, FENG Chang-gen. Progress in investigation of condensed explosives initiated by low

- amplitude shock (XDT)[J]. Chinese journal of explosives & propellants, 2002(2): 35-38.
- [3] 陈朗, 柯加山, 方青, 等. 低冲击下固体炸药延迟起爆(XDT)现象[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 214-218.  
CHEN Lang, KE Jia-sha, FANG Qing, et al. Delayed detonation of solid explosives under low amplitude shock wave loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 214-218.
- [4] 王永杰, 伍俊英, 陈朗. 低冲击下固体推进剂延迟起爆现象[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 132-136.  
WANG Yong-jie, WU Jun-ying, CHEN Lang. Low-amplitude shock-induced delayed detonation of solid propellant[J]. Explosion and shock waves, 2009, 29(2): 132-136.
- [5] 周彬, 安振涛, 甄建伟. 跌落条件下箱装弹药安全性的数值评估[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 50-53.  
ZHOU Bin, AN Zhen-tao, ZENG Jian-wei. Numerical evaluation of packaged ammunition security under condition of dropping[J]. Equipment environmental engineering, 2009, 6(5): 50-53.
- [6] 杨洁, 尚海林, 李克武. 落锤撞击下非均质炸药点火特性实验研究[J]. 高压物理学报, 2017, 31(6): 820-823.  
YANG Jie, SHANG Hai-lin, LI Ke-wu. Experimental research on ignition and burning of heterogeneous explosives under drop-weight impact[J]. Chinese journal of high pressure physics, 2017, 31(6): 820-823.
- [7] 张钊, 吴艳青. 糖颗粒对 HMX 和 RDX 两种单质炸药非冲击点火的影响[J]. 含能材料, 2019, 27(10): 805-811.  
ZHANG Zhao, WU Yan-qing. Effect of sugar particles on non-shock ignition of two kinds of single compounds HMX and RDX[J]. Chinese journal of energetic materials, 2019, 27(10): 805-811.
- [8] 胡海波, 傅华, 李涛. 压装密实炸药装药非冲击点火反应传播与烈度演化试验研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(1): 1-14.  
HU Hai-bo, FU Hua, LI Tao. Progress in experimental studies on the evolution behaviors of non-shock initiation reaction in low porosity pressed explosive with confinement[J]. Explosion and shock waves, 2020, 40(1): 1-14.
- [9] BROWNING R V. Microstructural model of mechanical initiation of energetic materials[R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1995.
- [10] 傅华. 局部撞击作用下 PBX 炸药响应与点火研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
FU Hua. Plastic-bonded explosives dynamic response and ignition under local impact[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [11] 彭忠明, 王玉明. 基于试验数据的性能裕量及其不确定性量化方法[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(6): 682-686.  
PENG Zhong-ming, WANG Yu-ming. Methods of quantifying performance parameter margins and uncertainties based on test data[J]. Information and electronic engineering, 2010, 8(6): 682-686.
- [12] 谢朝阳, 李贵杰, 彭忠明, 等. 基于证据理论和代理模型的 QMU 分析[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(1): 66-72.  
XIE Chao-yang, LI Gui-jie, PENG Zhong-ming, et al. Quantification of margins and uncertainties approach using evidence theory and surrogate model[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2018, 47(1): 66-72.
- [13] 花成, 张盛国, 高大元. 冲击波作用下炸药安全性 QMU 评估[J]. 火炸药学报, 2015, 38(4): 31-34.  
HUA Cheng, ZHANG Sheng-guo, GAO Da-yuan. QMU evaluation of explosive safety under shock wave effect[J]. Chinese journal of explosives & propellants, 2015, 38(4): 31-34.
- [14] 胡松伟. 最大熵法在发射装置可靠性评估中的应用[J]. 四川兵工学报, 2014(5): 30-32.  
HU Song-wei. Maximum entropy method application on missile launching system reliability evaluation[J]. Journal of Sichuan ordnance, 2014(5): 30-32.
- [15] 李刚, 周春晓, 曾岩, 等. 一类改进最大熵方法的可调参数分析[J]. 计算力学学报, 2019, 36(6): 707-712.  
LI Gang, ZHOU Chun-xiao, ZENG Yan, et al. Adjustable parameter analysis of an improved maximum entropy method[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2019, 36(6): 707-712.
- [16] 卫征, 叶继红, 沈世钊. 最大熵法可靠性理论在工程中的应用[J]. 振动与冲击, 2007, 26(6): 146-151.  
WEI Zheng, YE Ji-hong, SHEN Shi-zhao. Engineering application of the maximum entropy reliability theory[J]. Journal of vibration and shock, 2007, 26(6): 146-151.
- [17] 董博. 核电站安全限制分析方法的比较研究及应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
DONG Bo. Nuclear power plant safety limit analysis method of comparative study and application[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [18] 冯顺山, 王宇, 芮久后. 最大熵原理在钝感熔铸炸药配方设计中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(11): 1261-1264.  
FENG Shun-shan, WANG Yu, RUI Jiu-hou. Application research of maximum entropy theory in insensitive melting-cast explosive formulation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(11): 1261-1264.
- [19] 夏群力, 郭涛, 李然. 导弹产品的可靠性检验研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(3): 577-580.  
XIA Qun-li, GUO Tao, LI Ran. Study of reliability test evaluation of missile products[J]. Systems engineering and electronics, 2008, 30(3): 577-580.
- [20] GB/T 4885—2009, 正态分布完全样本可靠度置信下限[S].  
GB/T 4885—2009, Lower confidence limit of reliability for complete sample from normal distribution[S].