

doi: 10.7690/bgzd.2016.10.023

常规弹药研发过程中的可靠性预计与分配

赵丽俊^{1,2}, 焦志刚¹, 刘锦春², 黄晓杰², 李晓婕², 赵东志², 朱小平²

(1. 沈阳理工大学装备工程学院, 沈阳 110159;

2. 北方华安工业集团有限公司 123 厂科研一所, 黑龙江 齐齐哈尔 161046)

摘要: 可靠度的预计方法有多种, 其中常用的有性能参数法、相似产品类比论证法、故障率预计法和专家评分法, 每种预计方法都有特定的研究领域和自身的缺陷, 而常规弹药研发中可靠性的预计与分配又没有特定的研究方法, 为了研究常规弹药研发过程中的可靠性预计与分配, 以相似产品类比论证法为基础, 通过设计一种与新研产品类似的“理想结构”模型, 采用“理想结构”的故障率来评判新研产品故障率的研究方法, 对新研产品的可靠性进行预计和分配。通过建立“理想结构”的可靠性数学模型, 利用“相似产品类比论证法”进行有针对性的比照, 寻找出修正因子, 从而确定新研产品的可靠度。通过实例计算, 对新研产品的发射安全性、外弹道飞行和终点作用的可靠性进行了预计与分配, 结果表明: 该方法使用方便、简单, 能够相对准确地预计新研产品的故障率, 为常规弹药研发过程中的可靠性预计与分配提供了新思路, 有一定的实践指导意义。

关键词: 弹药; 可靠性; 预计; 分配**中图分类号:** TJ410.2 **文献标志码:** A

Reliability Prediction and Allocation in Process of Research and Development of Conventional Ammunition

Zhao Lijun^{1,2}, Jiao Zhigang¹, Liu Jinchun², Huang Xiaojie², Li Xiaojie², Zhao Dongzhi², Zhu Xiaoping²(1. *Equipment Engineering College, Shenyang University of Technology, Shenyang 110159, China;*2. *No. 1 Scientific Research Institute, No. 123 Factory, North Hua'an Industrial Group Co., Ltd., Qiqihar 161046, China*)

Abstract: There are multiple ways reliability is expected, of which the common performance parameters of the method, the similar product of analogy method, the failure rate is expected to method and expert grading method, each method is expected to have a specific area of research and its own defects, and the research and development of conventional ammunition is expected and the reliability of the distribution and no specific research methods, in order to study the reliability prediction and allocation, in the process of research and development of conventional ammunition based on similar products of analogy method, through the design of a new developed product with similar structure of “ideal” model, adopt the structure of “ideal” failure rate to judge the research method of the new developed product failure rate on the reliability of the new developed products and distribution is expected. By establishing the mathematical model of the reliability of the structure of “ideal”, use “similar products of analogy method” to carry out targeted comparison, to find out the correct factors, so as to determine the reliability of the new developed product. Through example calculation, the launch of new research products, exterior ballistic flight safety and reliability of the finish effect is expected and distribution, the results show that the method is convenient and easy to use and can relatively accurately estimated failure rate of the new developed products, for reliability prediction and allocation in the process of research and development of conventional ammunition provides a new way of thinking. The method has the certain practical guiding significance.

Keywords: ammunition; reliability; expect; distribution

0 引言

所谓可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力^[1]。在科学技术迅速发展的今天, 产品的可靠性设计显得尤为重要。我国已把可靠性列为评价产品的重要质量指标。特别是在弹药的研制过程中, 弹药的可靠性包括弹药的安全性和弹药的作用可靠性^[2-3], 其可靠性水平是最重要的质量指标, 是保证装备战斗力水平的重要因素。在武器装备的研制过程中, 运用可靠性分析手段解

决设计中薄弱环节的方法已经越来越被设计者所重视, 将有助于提高武器装备的研发质量, 研制出“开则能动, 动则成功”的可靠产品; 但是, 可靠度预计的方法有多种, 且每种方法又有特定的研究领域或存在着不足之处, 在常规弹药新研制产品可靠性分析过程中, 对可靠性分析还没有特定的研究方法。基于此, 针对常规弹药研制过程中可靠性预计与分配问题, 笔者采用另外一种思路, 即设计一个与研发产品类似的“理想结构”, 利用“理想结构”的

收稿日期: 2016-07-08; 修回日期: 2016-08-20

作者简介: 赵丽俊(1980—), 男, 内蒙古人, 蒙古族, 硕士, 高级工程师, 从事弹药工程研究。

故障率为基础评判新研制产品的故障率。

1 可靠度预计方法

1) 性能参数法^[4]：对分析参数进行统计，利用最小二乘法进行回归分析，得出经验公式及系数后进行计算，仅适用喷气式客机的可靠性分析。

2) 相似产品类比论证法^[5]：事先查不到故障率，利用成熟的相似产品所得到的经验数据来估计新产品的可靠性并根据不同的因素给出系数，适用于各种产品的可靠性预计。

3) 故障率预计法^[5]：在实验室条件下，能准确测得元器件故障，确定该零部件的可靠性指标，适用于电子及元器件的可靠性预计。

4) 专家评分法^[6]：依靠有经验的工程技术人员，根据故障因素对元器件进行故障率评分。该法用人多，规模大，准确性差，适用于各种产品的可靠性预计。

根据以上预计方法和适用特点可知，适用于常规弹药研制的方法基本为“相似产品类比论证法”和“专家评分法”。由于“专家评分法”存在用人多、规模大、准确性差等缺点，不被研制单位所看好，唯一适用于武器装备研制的只有“相似产品类比论证法”。但是，在分析“相似产品类比论证法”过程中，发现该法也存在许多不足之处：

1) 结构相似程度高的几乎没有；

2) 常规弹药可靠性分析起步晚。在过去的几年里，研制单位对可靠性分析认识不足，可靠性分析资料“空洞”使之无法借鉴，分析数据准确性差，采用“相似产品类比论证法”困难；

3) 行业间可靠性资源不能共享，参考资料匮乏。

2 可靠性模型的建立

要进行可靠性模型的预计与分配，首先建立产品的可靠性模型。典型系统的可靠性模型分为串联系统、并联系统、表决系统和贮备系统4种类型^[6]。常规弹丸一般由引信、炸药、弹体、导带、尾部等零部件组成。该系统属于串联系统，只要有一个零部件发生故障，就会发生故障。笔者建立可靠性模型如图1所示。

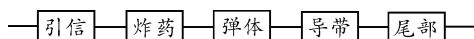


图1 弹药可靠性框图

对于串联系统，若各分系统的可靠性分别为 $R_1(t)$, $R_2(t)$, $R_3(t)$, $R_4(t)$, $R_5(t)$, \dots , $R_i(t)$ ，因其相互独立，系统的可靠性^[5]

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (1)$$

对于并联系统，若每个单元的可靠性分别为 $R_1(t)$, $R_2(t)$, $R_3(t)$, $R_4(t)$, $R_5(t)$, \dots , $R_i(t)$ ，因其相互独立，系统的可靠性

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (2)$$

可靠性指标分配的上述各分系统，其目的是结合产品设计，保证可靠性指标的完成。每个分系统由若干单元或零部件组成，需要将可靠性指标进一步分解，只有分配到最底层，才能对零部件的设计、制造工艺有指导意义。

可靠性指标的分配必须考虑当前的技术水平，在生产费用、功能研制周期等限制条件下，所能达到的可靠性水平，按系统全面综合考虑。对于形状复杂、制造加工困难、废品率高的零件，应从实际出发，在保证性能的条件下，适当降低可靠性要求。可靠性分配方法在于求解以下不等式^[6]：

$$f(R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)) \geq R_S^*(t) \quad (3)$$

式中： $R_S^*(t)$ 为系统可靠性指标； $R_1(t)$, $R_2(t)$, \dots , $R_n(t)$ 为分配给第1, 2, \dots , n 个分系统的可靠性指标； $f(R_i(t))$ 为分系统的可靠性和系统的可靠性之间的函数关系。

对于简单的串联系统而言，式(1)就成为

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \geq R_S^*(t) \quad (4)$$

如何使该不等式的解合理并符合实际，需按照一定的原则和方法进行可靠性分配。

3 实例计算

3.1 可靠性预计

在弹药设计阶段要对全弹的可靠性进行预计，以便及时发现设计中存在的可靠性问题并及时修改，确保在资金和时间等资源限制下达到所要求的指标。可靠性预计的目的^[7]为：1) 将预计的结果与要求的可靠性指标相比较，审查是否可以达到设计任务书中提出的可靠性指标；2) 在方案论证阶段，通过可靠性预计选择最优方案；3) 在设计过程中，通过可靠性预计发现设计中的薄弱环节并加以改进；4) 通过可靠性预计给可靠性分配奠定基础。

以炮射预制破片弹为例，该预制破片弹的弹体材料为高破片率弹钢，弹体装填高能炸药，采用的预制破片可以是单枚、四瓣形或环形，外用套筒将

预制破片包络起来，通过机械加工与制式弹的外形保持一致，结构见图 2。

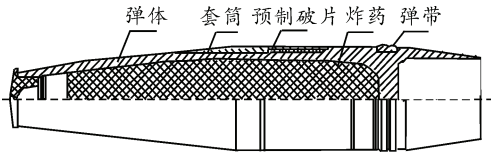


图 2 新研预制破片弹结构

为了相对准确地预计研发产品的故障率，随着研发产品方案的确定，可设计出与研发产品相似的“理想结构”。“理想结构”是一个当前的技术水平实现困难但确实存在的结构，且满足如下要求：

- 1) 弹体及零部件结构强度满足强装药射击要求；
- 2) 弹体内装感度低炸药，且装药工艺成熟，弹体装药无安定性问题；
- 3) 预制破片质量、规格与炸药装药爆速匹配，威力满足战技指标要求；
- 4) 弹体结构特征数与精度指标匹配，且在出炮瞬间预制破片不使弹体产生过大章动；
- 5) 产品在包装状态下搬运、贮存，满足可靠性要求。

根据弹丸系统可靠性定义，“理想结构”的系统可靠度为一个定位基准，对“理想结构”进行可靠性分解，并按各零部件的重要程度进行分配。

根据这个要求，确定“理想结构”结构见图 3。

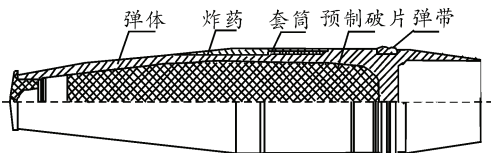


图 3 理想结构

3.2 “理想结构”可靠度预计及计算

根据“理想结构”的结构特点，参考有关定型产品的设计可靠度，确定“理想结构”的设计可靠度为 $R_s = 0.85$ 。按各零件重要程度分配到各个零件上，并按重要程度排序如下：

炸药装药 $R_1 >$ 弹体 $R_2 >$ 预制破片 $R_3 >$ 导带 $R_4 >$ 套筒 R_5 ；分配到各零件上的指标为：

$$R_1 = 0.99, \quad R_2 = 0.98, \quad R_3 = 0.97, \quad R_4 = 0.96, \\ R_5 = 0.95.$$

某新研制产品与“理想结构”相比的技术状态因子分析计算如下：

K_1 为原材料差异修正因子。原材料相同，取 $K_1 = 1$ 。

K_2 为炸药安全性差异修正因子。新设计为高能炸药，“理想”的为 TNT， $K_2 = 0.998$ 。

K_3 为套筒结构差异修正因子。新设计的长些，加工难度大，与弹体配合时有缝隙且强度试验时易碰地解脱。“理想”的上述因素均不存在。 $K_3 = 0.996$ 。

K_4 为弹体结构差异修正因子。新设计的弹壁薄，有螺纹；“理想”的只是在弹体圆柱部开槽，将预制破片装入后，外表面以“收带”形式收缩一个圆筒，两端焊接。系数取 $K_5 = 0.9815$ 。

K_5 为发射过载差异修正因子。过载相同，取 $K_5 = 1$ 。

K_6 为全弹道飞行时间差异修正因子。飞行时间相同，取 $K_6 = 1$ 。

K_7 为预制破片结构差异修正因子。新设计的为环形，易产生炮口章动；“理想”的为 3~4 瓣，在直线和旋转惯性力下被分解，炮口章动小。取 $K_7 = 0.9914$ 。

K_8 为精度指标差异修正因子。指标相同：取 $K_8 = 1$ 。

修正因子计算结果为

$$K = \prod_{i=1}^8 K_i = 0.9766.$$

某新研制产品系统可靠度预计值为

$$R_{SJ} = R_s \prod_{i=1}^8 K_i = 0.85 \times 0.9766 = 0.83.$$

新产品各分系统可靠度预计值见表 1。

表 1 新研产品各分系统可靠度预计值

分系统(排序)	零件名称	可靠性预计值 R_i
1	套筒连接可靠度	$R_{SJ1} = R_1 \prod_{i=1}^8 K_i = 0.9277$
2	导带可靠度	$R_{SJ2} = R_2 \prod_{i=1}^8 K_i = 0.9375$
3	预制破片可靠度	$R_{SJ3} = R_3 \prod_{i=1}^8 K_i = 0.9473$
4	弹体可靠度	$R_{SJ4} = R_4 \prod_{i=1}^8 K_i = 0.9571$
5	炸药装药可靠度	$R_{SJ5} = R_5 \prod_{i=1}^8 K_i = 0.9668$
		$R_{SJ} = 0.7624$

3.3 可靠度指标转换

预计零部件的可靠度指标的最终目的，是将零部件的可靠性指标落实到任务可靠度上和贮存可靠度上。其中，任务可靠度又分解为发射安全可靠度、外弹道飞行可靠度、终点作用可靠度^[8]。目前，常

规弹药贮存可靠度还不具备分析条件，还依赖于专家评分法进行确定。

可靠度指标转换时，将涉及的相关可靠度集中到一个可靠度指标上。如发射安全可靠度涉及的零部件为：弹体、装药弹体，则发射安全可靠度为 2 个主要零件可靠度的乘积。各个指标根据表 1 中的内容对照转换如下：

$$1) \text{ 发射安全可靠度预计值： } R_A = R_{SJ4} \times R_{SJ5} = 0.9253。$$

$$2) \text{ 外弹道飞行可靠度： } R_f = R_{SJ1} \times R_{SJ2} \times R_{SJ3} \times R_{SJ4} \times R_{SJ5} = 0.7624。$$

$$3) \text{ 终点作用可靠度： } R_z = R_{SJ3} \times R_{SJ4} \times R_{SJ5} = 0.941。$$

4 可靠性分配

根据弹药可靠性资料显示，弹药发射安全可靠度一般不小于 0.90^[9]；外弹道飞行可靠度不小于 0.85；终点作用可靠度(贮存后)不小于 0.75。在可靠性预计中的预计指标均接近《弹药可靠性》指标。为了使设计弹药可靠性有一定的裕度，有必要在可靠性分配时对个别零件的可靠性进行优化提高。

4.1 发射安全可靠分配

根据可靠性预计结果，将发射安全可靠度由 0.9253 提高到 0.93。可靠性分配计算时采用“最小工作量算法”。

计算条件：分系统数， $n=2$ ；提高的发射安全可靠度， $R_{S1}^* = 0.93$ ，按预计可靠度由小到大排序，即弹体 < 炸药装药，

$$R_{SJ4} = 0.9571 > R_{SJ5} = 0.9668。$$

令 $R_{n+1} = 1$ ，通过求解不等式确定 k_0 ， k_0 为满足不等式的 j 的最大值，利用计算式 (5)^[5]：

$$r_j = \left[\frac{R_S^*}{\prod_{i=j+1}^{n+1} R_i} \right]^{\frac{1}{j}}。 \quad (5)$$

有：

$$j=1,$$

$$r_1 = \left[\frac{R_S^*}{R_{SJ5} \times 1} \right]^{\frac{1}{1}} = \left[\frac{0.93}{0.9668 \times 1} \right]^{\frac{1}{1}} = 0.9619 > R_{SJ4}；$$

$$j=2；$$

$$r_2 = \left[\frac{R_S^*}{1} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{0.93}{1} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.9643 < R_{SJ5}。$$

由此，确定出 k_0 就是满足不等式的 j 的最大值为 1，计算可靠度提高值利用式 (2)^[5]得到：

$$R_0 = \left[\frac{R_S^*}{\prod_{j=k_0+1}^{n+1} R_{SJj}} \right]^{1/j} = \left[\frac{0.93}{0.9668 \times 1} \right]^{\frac{1}{1}} = 0.9619， \quad (6)$$

则 $R_{0SJ5}^* = 0.9619$ 。

验算：

$$R_S = R_0^{k_0} \prod_{j=k_0+1}^{n+1} R_i^* = 0.9619 \times 0.9668 \times 1 = 0.93，$$

满足要求。

由此确定出新的发射安全可靠度：第 4 分系统可靠度指标提高到 $R_{SJ5} = 0.9619$ ，第 5 分系统起可靠度保持不变。

4.2 外弹道飞行可靠度分配

根据可靠性预计结果，外弹道飞行可靠度不小于 0.85。笔者将外弹道飞行可靠度由 0.764 提高到 0.90。计算时采用“最小工作量算法”。

计算条件：分系统数， $n=5$ ， $R_{S1}^* = 0.90$ ，按预计的可靠度由小到大排序，即：

套筒连接可靠度 < 导带可靠度 < 预制破片可靠度 < 弹体可靠度 < 炸药装药可靠度；

$$R_{SJ1} = 0.95 < R_{SJ2} = 0.96 < R_{SJ3} = 0.97 < R_{SJ4} = 0.98 < R_{SJ5} = 0.99。$$

令 $R_{n+1} = 1$ ，

确定 k_0 ，利用式 (1) 计算得：

$$j=1，$$

$$r_1 = \left[\frac{R_S^*}{R_{SJ2} \times R_{SJ3} \times R_{SJ4} \times R_{SJ5} \times 1} \right]^{\frac{1}{1}} = \left[\frac{0.90}{0.96 \times 0.97 \times 0.98 \times 0.99 \times 1} \right]^{\frac{1}{1}} = 0.996 < R_{SJ1}；$$

$$j=2，$$

$$r_2 = \left[\frac{R_S^*}{R_{SJ3} \times R_{SJ4} \times R_{SJ5} \times 1} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{0.90}{0.97 \times 0.98 \times 0.99 \times 1} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.9779 < R_{SJ2}；$$

$$j=3，$$

$$r_3 = \left[\frac{R_S^*}{R_{SJ4} \times R_{SJ5} \times 1} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{0.90}{0.98 \times 0.99 \times 1} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.975 > R_{SJ3}；$$

$j = 4,$

$$r_4 = \left[\frac{R_S^*}{R_{SJ5} \times 1} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{0.90}{0.99 \times 1} \right]^{\frac{1}{4}} = 0.9764 < R_{SJ4}。$$

由此，确定出 k_0 就是满足不等式的 j 的最大值为 3，计算可靠度提高值利用式 (6) 得：

$$R_{SJ0}^* = 0.975。$$

验算：

$$R_S = R_0^{k_0} \prod_{j=k_0+1}^{n+1} R_j^* = 0.975^3 \times 0.98 \times 0.99 \times 1 = 0.90，$$
 满足要求。

由此确定出新的外弹道飞行可靠度，第 1 分系统到第 3 分系统可靠度指标提高到 $R_{SJ5} = 0.975$ ，第 4 分系统起可靠度保持不变。

4.3 终点作用可靠度分配

根据可靠性预计结果，终点作用可靠度(储存后)不小于 0.75。根据可靠性分配原则，将终点作用可靠度由计算的 0.941 提高到 0.955。计算时采用“最小工作量算法”。

计算条件：分系统数， $n = 3$ ， $R_{S1}^* = 0.955$ ，按预计的可靠度由小到大排序，即

预制破片可靠度 < 弹体可靠度 < 炸药装药可靠度；

$$R_{SJ3} = 0.97 < R_{SJ4} = 0.98 < R_{SJ5} = 0.99。$$

令 $R_{n+1} = 1$ ，确定 k_0 ，利用式 (1) 计算得：

$j = 1,$

$$r_1 = \left[\frac{R_S^*}{R_{SJ4} \times R_{SJ5} \times 1} \right]^{\frac{1}{1}} = \left[\frac{0.955}{0.98 \times 0.99 \times 1} \right]^{\frac{1}{1}} = 0.9843 > R_{SJ3}；$$

$j = 2,$

$$r_2 = \left[\frac{R_S^*}{R_{SJ5} \times 1} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{0.955}{0.99 \times 1} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.982 > R_{SJ4}；$$

$j = 3,$

$$r_3 = \left[\frac{R_S^*}{1} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{0.955}{1} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.9847 < R_{SJ5}。$$

由此，确定出 k_0 就是满足不等式的 j 的最大值为 2，计算可靠度提高值利用式 (2) 得：

$$R_{SJ0}^* = 0.982。$$

验算：

$$R_S = R_0^{k_0} \prod_{j=k_0+1}^{n+1} R_j^* = 0.982^2 \times 0.99 \times 1 = 0.955，$$
 满足要求。

由此确定出新的终点作用可靠度，第 3 分系统到第 4 分系统可靠度指标提高到 $R_{SJ5} = 0.982$ ，第 5 分系统起可靠度保持不变。

5 结束语

可靠性预计与分配只是可靠性分析的一部分，其涉及的内容还有很多，如：可靠性分配后采取的主要措施，可靠性增长及验证，可靠性综合评估^[10-11]等。笔者只探讨了在常规弹药设计过程尤其是在产品工程化过程中，开展可靠性预计和分配时遇到的困难，为新研产品的可靠性预计和分配开辟了新的思路。需要说明的是：在常规弹药的研制阶段，可靠性预计与分配既要反复进行又要灵活多变，特别是在缺乏较详细可靠性指标的情况下，要紧密围绕产品性能向高可靠性目标发展，为设计者和管理人员提供有效的可靠性信息，及时发现设计方案的薄弱环节。随着设计工作的不断深入，通过对产品反复进行可靠性的预计与分配，有助于产品结构更加趋于合理，更有利于产品研制与可靠性分析的交叉进行，确保产品研发在投放使用环节上并在规定的条件下完成规定的功能。

参考文献：

- [1] 陆廷孝, 郑鹏洲. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 20-90.
- [2] 许兴春, 陈亚旭, 李天鹏, 等. 基于可靠性弹药壳体分析设计[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 85-87.
- [3] 李良巧. 兵器可靠性技术与管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 20-60.
- [4] 董少峰. 弹药可靠性技术基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991: 41-73.
- [5] 秦英孝. 可靠性、维修性、保障性概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 33-81.
- [6] 王建, 黄德武, 王伟, 等. 小口径弹药可靠性指标分配及应用[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(2): 108-110.
- [7] 乔相信, 王欣, 阎思江, 等. 航空火箭弹研制和发射可靠性设计与分析[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(4): 108-110.
- [8] 杨冬梅, 赵守友. 弹药结构可靠性设计研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 23(5): 174-176.
- [9] 刘江, 姚安东, 王攀, 等. 新型弹药可靠性评估方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(5): 1-3.
- [10] 武小悦, 沙基昌, 党晓玲, 等. 系统可靠性预计与分配集成系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 1999, 35(11): 44-55.
- [11] 孙德福. 弹药可靠性数据分析方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 29(4): 113-115.