

文章编号: 1672-2892(2010)06-0682-05

## 基于试验数据的性能裕量及其不确定性量化方法

彭忠明, 王玉明

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 在QMU方法中, 对性能参数的裕量及其不确定性进行量化的结果将作为QMU评估的输入量。为了开展性能裕量及不确定性量化方法研究, 文章首先根据获得的性能裕量结果的不同表示形式, 给出了优良指数相应的计算方法, 然后通过试验数据确定某部件关键性能参数随时间的变化规律。最后提出了基于统计理论的性能参数裕量及其不确定性量化的通用方法, 并给出了相应的实例。

**关键词:** 性能参数; 试验数据; 性能裕量; 不确定性; 优良指数

**中图分类号:** TJ91

**文献标识码:** A

## Methods of quantifying performance parameter margins and uncertainties based on test data

PENG Zhong-ming, WANG Yu-ming

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

**Abstract:** Because quantification outcomes of primary performance parameter margins and uncertainties are inputs to a Quantification of Margins and Uncertainties(QMU) analysis, the method research of quantifying performance parameter margins and uncertainties plays an important role in QMU. In this paper, relative computing methods for figures of merit are presented according to different expressions of performance margin outcome. The changing trend of the key performance parameters over time for some component is determined by test data. The general method of quantifying performance parameter margins and uncertainties based on statistics theory is proposed. At last a relative example is introduced.

**Key words:** performance parameter; test data; performance margin; uncertainty; figures of merit

2001年以来, 美国核安全局(NNSA)隶属的一些著名实验室针对库存武器开展试验样本少、数值模拟可信度低等问题, 提出一种能认证库存复杂系统性能、可靠性和安全性的新方法—QMU方法, 该方法已在多个型号中应用, 仍处于发展之中。QMU方法的基本思想<sup>[1-6]</sup>是: 对于一个系统或部件而言, 首先建立一套能表征系统或部件性能、可靠性或安全性的关键性能参数清单, 然后确定这套关键性能参数的上下限, 即在该上下限内能保证系统或部件不失效; 接着运用各种量化方法对关键性能参数的裕量及不确定性进行量化; 最后用优良指数即性能裕量与不确定性的比值表征关键性能参数的好坏。

QMU方法有3个关键要素(element)<sup>[4]</sup>: 一是性能阈值的识别和规范(Identification and specification); 二是性能裕量的识别和规范; 三是量化阈值和裕量规范中存在的确定性。另外性能裕量及不确定性的量化结果作为QMU评估的输入量<sup>[1]</sup>。由此可见, 开展性能裕量及不确定性量化方法研究具有非常重要的意义。

本文根据性能参数获得的途径, 认为获取性能参数主要有两条: 一条是通过试验数据获得的; 另一条是基于建模与仿真确定。本文主要介绍了基于试验数据的性能裕量及不确定性的量化方法。

### 1 优良指数

QMU方法采用了一个重要参数, 利弗莫尔国家实验室称为置信因子(Certainty Factor, CF)<sup>[3]</sup>, 洛斯阿拉莫

斯实验室则称为置信系数(Confidence Ratio, CR)<sup>[1]</sup>, 都表示性能裕度  $M$  和评估该性能的不确定度  $U$  之比, 即  $M/U$ 。而在参考文献[6]中则提出用优良指数来表示  $M/U$ , 不仅涵盖 CF, CR, 而且还包括  $K$  因子。该参数的作用是: 根据优良指数的估计结果, 当大于 1.0 时就认为性能可靠度为 1; 当小于 1.0 时就认为性能可靠度不满足要求。对于一个复杂系统或部件而言, 如果每个关键性能参数的优良指数都大于 1.0, 那么整个系统就能够被认为是安全的、可靠的。当某项性能的良好指数接近 1.0 时, 就表示一个警告信号, 表明这是一个薄弱环节, 需要采取措施来保证其可靠性。如果不确定度  $U$  没有被低估, 优良指数可取作 1.0。

通过研究, 由于试验数据或数值模拟获得的性能裕量结果存在不同的表示形式, 于是性能优良指数计算也有不同的方式, 下面逐一介绍。

1) 当性能裕量的估计结果是区间  $[M_{\min}, M_{\max}]$  形式时, 优良指数可用置信因子 CF 表示<sup>[3-4]</sup>, 即  $CF = M/U$ , 这里  $M$  为性能裕量名义值, 取为区间中点,  $M = 0.5 \times (M_{\min} + M_{\max})$ ;  $U$  为区间半宽度  $U = 0.5 \times (M_{\max} - M_{\min})$ 。

2) 当性能裕量的估计结果用性能裕量的最佳估计值加不确定性即用  $M+U$  形式表示时, 同样采用置信因子 CF 表示, 即  $CF = M/U$ 。

3) 当性能裕量估计结果用最佳估计值加标准差即  $M+\sigma$  形式表示时, 可采用  $K$  因子(或称可靠性系数  $\beta$ )表示, 即:

$$K = \beta = M/\sigma \tag{1}$$

式中  $\sigma$  为性能裕量的标准差。

4) 当性能估计结果用分布函数表示<sup>[7]</sup>(见图 1)时, 性能裕量最佳估计  $M$  和扩展不确定度  $U$  计算如下:

$$M = F_{\text{阈值}}^{-1}(0.5) - F_{\text{性能}}^{-1}(0.5) \tag{2}$$

式中:  $F_{\text{阈值}}^{-1}(\cdot)$  表示性能阈值分位数函数, 这里取概率为 0.5 时对应的性能阈值;  $F_{\text{性能}}^{-1}(\cdot)$  表示性能值分位数函数, 这里取概率为 0.5 时对应的性能值。

$$U = \sqrt{U_{95}^2 + U_{T,05}^2} \tag{3}$$

式中:  $U_{95}$  表示置信度为 0.95 的性能参数扩展不确定度, 其置信度可根据具体情况确定, 一般不低于 0.9, 计算公式为

$U_{95} = F_{\text{性能}}^{-1}(0.95) - F_{\text{阈值}}^{-1}(0.5)$ ;  $U_{T,05}$  表示置信度为 0.95 的性能阈值扩展不确定度, 其置信度可根据具体情况确定, 一般不低于 0.9, 计算公式为  $U_{T,05} = F_{\text{性能}}^{-1}(0.5) - F_{\text{阈值}}^{-1}(0.05)$ 。

## 2 性能参数变化趋势分析

依据试验数据分析性能参数变化趋势是 QMU 的一个重要组成部分, 并关注当前确定的性能裕量是否与基线性能裕量一致<sup>[6]</sup>。识别变化趋势最简单的分析工具就是绘制性能参数与时间之间的关系<sup>[8]</sup>如图 2 所示。通过使用绘图法、统计分析法或其他方法来分离影响性能参数的各种因素。例如, 如果温度影响性能参数, 那么基于时间的绘图就根据每个试验温度来构成。也可使用协方差或方差分析法来分析环境影响因素和基于时间的影响因素。

图 2 给出了某部件性能均值与贮存时间之间的变化关系图。该曲线表明了随贮存时间的推移性能变异性在增大, 性能呈下降趋势, 当性能裕量与不确定性的比值大于 1.0, 表示该部件在此贮存时刻性能满足要求。本文给出的例子的某性能参数变化规律如图 2 所示。

## 3 基于试验数据的裕量及不确定性量化方法研究

### 3.1 性能裕量及不确定性量化思路

基于试验数据的系统或部件关键性能参数的裕量及其不确定性量化流程如图 3 所示。

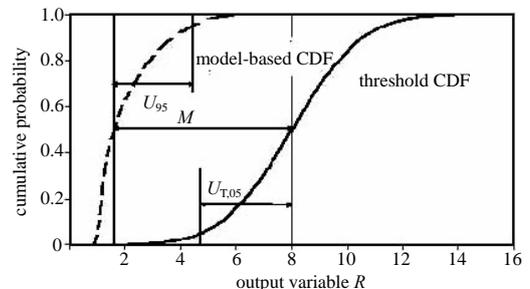


Fig.1 Diagram of estimating outcome by distribution function  
图 1 估计结果用分布函数表示的示意图

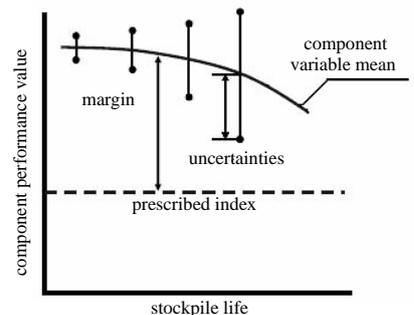


Fig.2 Diagram of changing trend for the mean of performance parameters over time  
图 2 性能参数均值变化趋势示意图

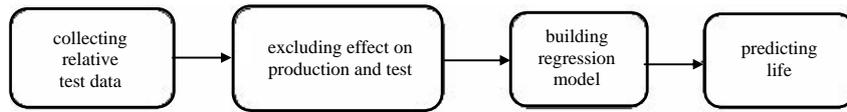


Fig.3 Quantifying the performance parameter margin and uncertainty based on test data  
图3 基于试验数据的裕量及不确定性量化示意图

3.2 裕量及不确定性量化通用步骤

3.2.1 数据收集

按规定格式收集物理试验数据。所收集来的物理数据必须是实际中能用来推断性能的测量参数。例如收集与生产时间、试验时间有关的物理试验数据格式见表1所示。

表1 收集试验数据的格式示例

Table1 Format of collecting test data

No.	production time	test time	test data
...	...	...	...
...	...	...	...

3.2.2 排除各种因素对试验数据的影响

建议采用绘图法进行排除，即如果有某种特别显著的异常，那么绘制的平面图就会表现出来。如果出现双峰、粗大误差、分布偏斜等异常，就需要进一步分析处理物理数据的有效性，或根据数据特征将测试结果分成2个或多个集合来处理。

3.2.3 建立性能裕量回归模型

首先根据确定的性能阈值，计算出每个试验数据点的性能裕量： $M_{U_i} = Y_U - Y_i$  和  $M_{L_i} = Y_L - Y_i (i=1,2,\dots,n)$ ，并将它们标在横坐标为时间  $t$ ，纵坐标为性能裕量的坐标系图上。

采用广泛使用的统计分析方法——回归法(该方法能在数理统计理论中查阅到，这里不再详述)，来研究性能裕量  $M(t)$  与年龄  $t$  之间的关系。采用最简单的线性回归进行拟合，即可计算得到与贮存时间相关的性能裕量表达式：

$$\bar{M}(t) = at + b \tag{4}$$

式中： $a$ 为回归曲线的斜率； $b$ 为性能裕量随着贮存时间变化的速率。

计算残余标准差：

$$S_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{U_i} - \bar{M}(t_i))^2 / (n - 2)} \tag{5}$$

在图上标出回归曲线上下一定概率(例如取90%， $\pm 1.64 S_p$ )的预测区间，作为判断性能裕量变化趋势的依据。

3.2.4 预测产品寿命

首先验证性能裕量服从哪种分布。即利用实测性能裕量值  $M_i$  减去回归值  $M(t_i)$  构造残差  $res_i = M_i - M(t_i)$ ，然后用各种分布的坐标概率纸绘制残差概率图，最后根据作图判定分布。

然后建立  $K$  因子回归模型。对裕量回归模型除以  $S_p$  得到  $K$  因子回归模型，用  $K$  因子回归模型进行产品寿命预测。

$$\hat{K}(t) = \bar{M}(t) / S_p = (at + b) / S_p \tag{6}$$

$K$  因子的预测标准差为：

$$S_K(t) = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\left(t - \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}\right)^2}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}\right)^2}} \tag{7}$$

3.3 举例分析

假设已知某部件已经贮存20年，在20年期间通过试验获得其关键性能参数一系列试验数据，见表2。该关键性能参数的性能阈值的上限值为  $PTU=10.26$ 。要求通过运用 QMU 方法处理试验数据，确定其性能裕量及不确定性、优良指数，预测其寿命。

表2 某部件关键性能参数试验数据表

Table2 Test data list of key performance parameters for some component

stockpile life/a	test data	samples
0.8	10.035,9.990,9.965,9.975,9.975,9.975,9.985,9.945,9.935,9.925,9.920,9.915	12
1.5	10.035,10.020,9.970,9.755,9.945,9.910,9.865	7
2.0	10.050,10.045,10.020,9.980,9.955,9.955	6
2.4	10.045,9.995,9.955	3

续表

stockpile life/a	test data	samples
3.0	10.055,10.045,10.035,9.955,9.905	5
5.2	10.065,9.990,9.950,9.920	4
8.6	9.960	1
11.4	10.190,10.130,10.120,10.110,10.030,10.020,10.000,9.9900,9.935	9
11.8	10.105,10.08,10.045,10.030,10.020,10.010,10.000,9.995,9.935	9
13.2	10.070,10.060,10.030,10.020,9.970,9.955	6
14.1	10.070,10.015	1
16.2	10.055	1
18.5	10.195,10.165,10.140,10.140,10.090,10.085,10.050,10.045,10.020,10.005,9.995,9.960,9.955	13
	$\Sigma=780.940$	77

解:通过作图(见图 4)进行分析,数据总的来说是向增大的趋势发展的,没有出现跳变、粗大误差等异常现象,可用于预测寿命。

根据表 2,  $PTU=10.26$ , 计算该性能参数裕量均值为  $\bar{M} = 0.248$  及样本总标准差  $S_R = 0.0656$ 。确定统计模型(Statistical model)。采用线性回归进行拟合, 得:

$$\bar{M}(t) = -0.00563301t + 0.29534602$$

从图 5 可知, 该性能参数的裕量随时间的增加而呈逐渐减少的趋势。

假设性能参数值服从正态分布。根据上述计算结果获得性能裕量的残差  $res_i = M_i - \bar{M}(t_i)$ , 然后用正态分布的坐标概率纸绘制残差概率图, 见图 6。通过目测, 就可以判断假设成立。

预测产品贮存寿命。利用公式(4)计算结果绘制图 7。假设关注概率值为 0.995, 那么运用公式  $\Phi(K) = 0.995$  就可得到预测寿命的参考线  $K$  值为 2.576。于是根据曲线的变化规律将贮存年限 20 年以后的曲线进行外推, 当曲线与参考线相交时就可获得预测报警寿命  $A$ , 置信度为  $\gamma$  的寿命区间为  $(A_{LB}, A_{UB})$ 。图 7 所示的报警寿命  $A$  为 24.1 年, 置信度为 90% 的寿命置信区间  $(A_{LB}, A_{UB}) = (19.6 \text{ 年}, 32.6 \text{ 年})$ 。

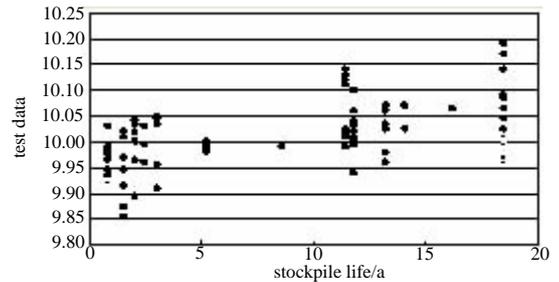


Fig.4 Relation between test outcomes and stockpile years  
图 4 试验结果与贮存年限之间的关系图

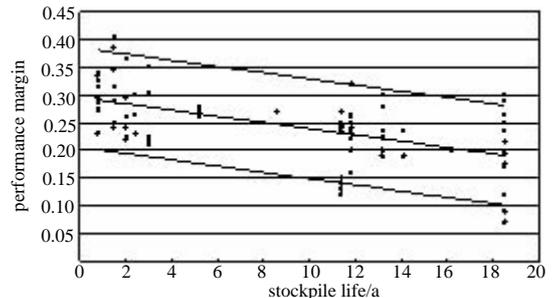


Fig.5 Linear regressive model  
图 5 线性回归模型示意图

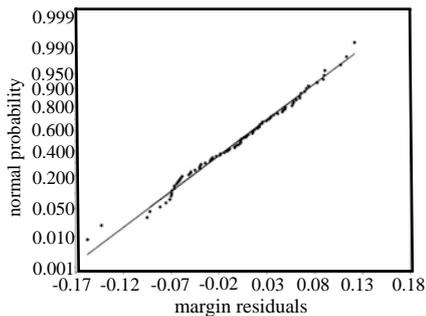


Fig.6 Normal probability plot of residuals  
图 6 正态分布概率纸

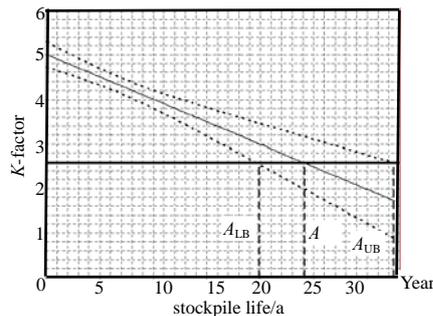


Fig.7 Diagram of life prediction  
图 7 寿命预测图

#### 4 结论

本文根据性能裕量估计结果的不同形式, 分别给出了优良指数的相应计算形式, 丰富了  $M/U$  形式的内涵。针对试验数据的特点, 提出了基于数理统计的性能裕量及不确定性量化的思路、方法, 并给出了相应的实例, 该方法成熟、简单、直观, 易于处理具有大量试验数据的情况, 为基于试验数据量化性能裕量及不确定性提供了一条实用的途径。

另外, 性能参数裕量及其不确定性量化方法很多, 本文主要针对可以通过实验数据确定性能参数情况开展了统计量化方法研究, 还可以针对这种数据类型开展其他的量化方法研究。

## 参考文献:

- [1] Sharp D H, Wood-Schultz M M. QMU and Nuclear Weapons Certification[R]. USA:[s.n.], 2003,28:47-53.
- [2] Sharp D H, Wallstrom T C, Wood-Schultz M M. One versus 1.0.LA-UR-04-0496[R]. Los Alamos National Laboratory. USA:[s.n.], 2004.
- [3] Katie Walter. A better method for certifying the nuclear stockpile[EB/OL]. (2004-03-03) [2010-03-05]. <http://www.llnl.gov/str/March04/Verdon.html>.
- [4] Chris Burroughs. New Integrated Stockpile Evaluation program to better ensure weapons stockpile Safety, Security, Reliability[R]. USA:[s.n.], 2006.
- [5] Martin Pilch. Ideas Underlying Quantification of Margins and Uncertainties(QMU):A White Paper[R]. USA:[s.n.], 2006.
- [6] Kathleen V, Diegert. Toward a More Rigorous Application of Margins and Uncertainties within the Nuclear Weapons Life Cycle-A Sandia Perspective[R]. USA:[s.n.], 2007.
- [7] Swiler L P, Giunta A A. Aleatory and Epistemic Uncertainty Quantification for Engineering Applications[R]. USA:[s.n.], 2007.
- [8] John Ahearne, Marvin Adams. Evaluation of Quantification of Margins and Uncertainties Methodology for Assessing and Certifying the Reliability of the nuclear Stockpile[M]. USA:the national academies press, 2008.

## 作者简介:



彭忠明(1972-),女,四川省资中县人,硕士,高级工程师,研究方向为装备系统的可靠性、维修性、保障性研究.email:pengzm@caep.ac.cn.

王玉明(1963-),男,江苏人,高级工程师,研究方向为装备系统的可靠性、维修性、保障性研究.

(上接第 632 页)

## 作者简介:



聂在平(1946-),男,成都市人,教授,博导,主要研究方向为天线理论与技术、非均匀介质中的场与波、计算电磁学、电磁散射与逆散射、移动通信中的天线新技术等;先后完成二十余项科研项目,获得国家科技进步二等奖一项,省部科技进步一、二、三等奖共 10 项;在国内外学术期刊发表论文逾 300 篇,其中 SCI 和 EI 收录 200 余篇;完成学术著作 20 万字,译著 60 余万字,其中与他人合著专著《复杂系统中的电磁波》获第三届国家图书奖和 97 年全国科技图书一等奖;作为副主编,筹划、组织并参加编写了国内第一部“天线工程手册”(2002 年电子工业出版社出版);作为主编,参与规划、组织并参加编写了专著“目标与环境电磁散射建模——理论、方法与实现”(包括基础篇和应用篇两册,2009 年 3 月国防工业出版社出版).email:zpnie@uestc.edu.cn.

胡俊(1973-),男,浙江省衢州市人,博士,教授,主要研究方向为计算电磁学.

阙肖峰(1977-),男,重庆市梁平县人,博士,副教授,主要研究方向为计算电磁学.

宗显政(1979-),男,山西省山阴县人,博士,讲师,主要研究方向为电磁辐射与散射.

何十全(1984-),男,四川省射洪县人,在读博士研究生,主要研究方向为计算电磁学.

麻连凤(1984-),男,山东省青岛市人,在读硕士研究生,主要研究方向为计算电磁学.