

文章编号: 1672-2892(2011)01-0083-04

复杂系统关键特征参数确定方法

唐 炜, 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: QMU方法能够在综合利用试验信息和数值模拟信息的基础上, 通过揭示系统失效因素及量化其裕量与不确定性, 对系统的综合性能做出合理的评价和认证, 虽尚处于发展之中, 但对复杂系统有效性评价具有借鉴意义。确定系统关键特征参数是QMU方法的关键技术之一。本文借鉴质量功能展开(QFD)等技术, 主要运用关键特征参数展开矩阵, 量化分析关键特征参数要求与特征参数间的关系度, 最终确定产品关键特征参数。

关键词: 裕量与不确定性的量化; 关键特征参数; 展开矩阵

中图分类号: TJ91

文献标识码: A

A method of confirming critical characteristic parameters for complex system

TANG Wei, WANG Yu-ming

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

Abstract: Since Comprehensive Test Ban Treaty to ban all nuclear weapons test explosions has been passed, Quantification of Margins and Uncertainties(QMU) for certifying the availability of the Nuclear Stockpile in the USA is a newly presented method. It is able to reveal the failure fact efficiently and give QMU in assessment combining with the information of tests and numerical simulations. Although QMU is still under development, it can provide a reference for the effectiveness evaluation of complex systems. The determination of the critical characteristic parameters is one of the key techniques in QMU. In this paper, a method is presented to quantitatively analyze the relational degree between the requests on critical characteristic parameters and the characteristic parameters, by utilizing the uncoiling matrix of critical characteristic parameters, then the critical characteristic parameters of the product are determined.

Key words: Quantification of Margins and Uncertainties; critical characteristic parameter; deployment chart

QMU方法是近年美国重点武器实验室针对试验数据不足等诸多原因提出的认证复杂系统性能、可靠性和安全性的一种方法^[1-5]。它的主要思想是识别出能够影响复杂系统性能和使用的各种因素(因子), 针对每个因素寻找表征它的特征参数, 创建一个包含这些特征参数的清单(称为“观测清单”), 并通过量化每一个特征参数的裕量、不确定性、比较裕量和不确定性, 为评价复杂系统性能和可靠性等提供依据。关键特征参数是观测清单中那些对复杂系统使用和性能至关重要的因素, 是全部特征参数的一个子集, 是裕量较少、稳定性差、灵敏度高或不确定性大, 部件或系统工程师应该更加关注的那些特征参数^[6]。本文在研究 QMU 方法基本原理与基本思想的基础上, 结合可靠性工程及质量功能展开(Quality Function Deployment, QFD)等技术, 提出了一种确定关键特征参数的方法, 为 QMU 方法的进一步研究与应用提供技术支持。

1 关键特征参数的特征要求

由 QMU 方法的基本原理可以看出, 观测清单应该是一套全面、精炼、合理, 能够表征系统在规定条件下完

收稿日期: 2010-04-21; 修回日期: 2010-06-23

基金项目: 武器装备预先研究重点基金资助项目(9140A19030908ZW0401)

成其规定功能的能力,并能通过试验测量或建模仿真(M&S)计算的特征参数。建立观测清单的关键是将难以通过试验观测或建模仿真的系统性能,分解为可以试验观测或建模仿真,并能够表征系统性能的一套特征参数。QMU方法将对观测清单中的特征参数分别进行裕量及其不确定性量化,并逐个进行有效性认证,为判断系统的有效性提供依据。QMU方法不需要提供类似传统系统可靠度那样的单一指标,强调对失效模式(或影响因素)的独立分析,强调薄弱及最薄弱环节,避免在常规可靠性评估时用高可靠度单元有的优势弥补低可靠度单元有的劣势^[7]。据文献资料,作为观测清单中的关键特征参数(简称关键参数)应具有以下特征^[6]:

- a) 对于需要的边界值或允许的极限值具有较少的裕量;
- b) 随着时间(或环境)的变化满足需求的裕量易于发生改变,趋于减少;
- c) 性能参数值的变动对部件或系统性能影响大,具有高灵敏度;
- d) 性能参数变异的可能性较大(稳定性差)或对裕量情况具有较大的不确定性。

这些特征可以作为确定、识别关键参数的原则。对FMECA(Failure Mode Effects and Criticality Analysis)和系统功能分解分析,是获得失效特征参数集的有效途径,其分析过程中所获得的丰富信息是帮助分析、识别出其中关键参数的依据。例如:对故障模式发生原因和发生概率等级分析可以反映裕量的不确定性及波动情况;对故障影响和严酷度类别分析可以反映性能参数变动对系统影响灵敏性方面的信息;对故障观测方式和所选的测试参数分析可以帮助预测裕量是否充裕。对于较复杂的系统,则需要进行更深入的专门分析,才能从中识别出关键参数。

确定复杂系统关键特征参数的流程如图1

所示。图中,PP set为性能参数集, CPP set为关键性能参数集。

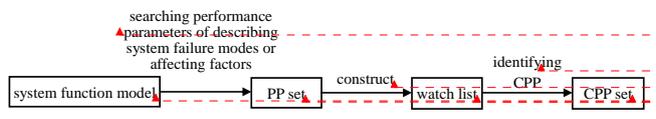


Fig.1 Flow diagram for critical characteristic parameters
图1 确定关键特征参数流程

2 确定关键特征参数的方法

2.1 特征参数重要度分析方法

质量功能展开(QFD)技术是把顾客对产品的需求进行多层次的演绎分析,转化为产品的设计要求、零部件特性、工艺要求或生产要求的质量策划、分析、评估工具,可用于指导产品的健壮设计和质量保证。它的基本过程就是利用质量屋,一种形象的二元矩阵展开图的形式,量化分析顾客需求与工程措施间的关系度,经数据分析处理后找出对满足顾客需求贡献最大的工程措施作为关键措施,从而指导设计人员抓住主要矛盾,开展优化设计,开发出顾客满意的产品。因此对复杂系统,借鉴质量功能展开(QFD)技术,开展特征参数重要度综合分析,是从特征参数集中遴选关键参数的一个有效方法。它的基本方法是运用关键参数特征展开矩阵的形式,量化分析关键参数的特征要求与特征参数间的关系度,经数据分析处理后找出对满足关键参数特征要求贡献最大的特征参数,列为关键参数。

2.2 展开矩阵的建立

根据QMU方法的基本原理和确定关键特征参数的基本原则^[6],归纳、总结关键参数的特征要求有4条,分别是:裕量较少,裕量易变异,灵敏度高,认知不确定性大。由此建立关键参数特征展开矩阵如表1所示。

表1 关键参数特征展开矩阵

Table1 Critical parameter characteristic deployment				
①CPP requirement	②PP			
	1	2	...	n
weightiness K_i				
small margin variability of margin high sensitivity large total uncertainty				③relation r_{ij}
④PP weightiness h_j				

表中基本结构要素如下:

- ①左墙——关键参数特征要求及其重要度;
- ②天花板——观测清单中的所有特征参数;
- ③房间——关系矩阵;
- ④地板——特征参数重要度。

关键参数矩阵展开表是用于记录关键参数特征要求与特征参数指标之间的关系矩阵,其取值 r_{ij} 代表了关键参数的第 i 项特征要求与观测清单中第 j 项特征参数的关系度,关系越密切,其取值越大。

为了建立矩阵展开表,分析人员应借助部分试验数据或数值模拟仿真等获得相关信息,将评定出关键参数特征要求重要度 $K_i (i=1,2,\dots,m)$ 和各项特征参数与每一个关键参数特征要求的关系度 r_{ij} 填入表中。例如,可从以下

带格式的

带格式的: 字体: 7 磅

带格式的: 字体: 8 磅

带格式的: 字体: 8 磅

几个方面分析特征参数与关键参数特征要求间的相对关系度：

- a) 通过性能指标、产品工作环境和工作方式等允许极限确定产品特征参数所需要的边界值或允许极限，分析特征参数的裕量；
- b) 通过故障模式、影响因素发生概率等级、严酷度或危害性分析等，分析其特征参数裕量的变异及波动性；
- c) 通过运用灵敏度分析等方法，分析特征参数值的变动对部件或系统性能影响的灵敏性；
- d) 分析故障模式、影响因素或对应特征参数认知的不确定性，包括对其上述 a, b, c 几个方面认知的不确定性。

2.3 综合量化分析方法

矩阵展开表中重要度 K_i 、关系度 r_{ij} 等各数值的确定十分重要，直接关系到展开矩阵应用的效果。加权评分法是用于量化评估的基本方法，其特点是简明、直观、易行。本文对相应的评分准则和计算方法将作说明。分析者的工程经验越丰富(或试验与仿真信息越多，越准确)，采用加权评分法的准确度就越高，必要时应尽可能集中较多专家的经验进行评分。另外还有一些较为复杂的量化评估方法，如模糊集合理论等，如能正确使用，将提高量化评估的准确度。

运用加权评分法，可以对下列因素进行量化评估：

- a) 关键参数特征要求重要度 $K_i (i=1, 2, \dots, m)$ ；
- b) 特征参数与关键参数特征要求之间的关系度 $r_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ ；
- c) 特征参数的重要度 h_j 。

2.3.1 关键参数特征要求重要度评估

应根据对该系统的任务要求及设计情况，评定各项关键参数特征要求的重要度值，填入表 1。例如在某些情况下，重要度值 $K_i (i=1, 2, \dots, m)$ 可取下列 5 个等级：

- a) 不影响功能实现的要求；
- b) 不影响主要功能实现的要求；
- c) 比较严重地影响功能实现的要求；
- d) 严重地影响功能实现的要求；
- e) 涉及安全或影响任务成败的要求。

实际运用中对重要度的评估不一定完全局限于某个等级，只要根据关键特征参数的每个特征需求对产品功能影响有一个相对比较即可。

2.3.2 特征参数与关键参数特征关系度评估

通过 2.2 建议的途径获得相关信息后，可对特征参数与关键参数特征要求关系度 r_{ij} 进行评分，填入表 1。评分可采用 a), c), e), g), i) 等关系度等级，其中：

- a) 该交点所对应的特征参数指标与关键参数特征要求间存在微弱的关系；
- c) 该交点所对应的特征参数指标与关键参数特征要求间存在较弱的关系；
- e) 该交点所对应的特征参数指标与关键参数特征要求间存在一般的关系；
- g) 该交点所对应的特征参数指标与关键参数特征要求间存在密切的关系；
- i) 该交点所对应的特征参数指标与关键参数特征要求间存在非常密切的关系。

用 0 表示不存在关系。

根据实际情况，必要时也可采用中间等级，其中：

- b) 介于 a) 与 c) 之间的等级；
- d) 介于 c) 与 e) 之间的等级；
- f) 介于 e) 与 g) 之间的等级；
- h) 介于 g) 与 i) 之间的等级。

2.3.3 特征参数重要度计算

每个特征参数的重要度是全部关键参数特征要求的加权关系度之和，加权系数即相应的关键参数特征要求的重要度。特征参数的重要度 h_j 按式(1)计算：

$$h_j = \sum_{i=1}^m K_i r_{ij} \quad (1)$$

如果第 j 项特征参数(特征参数指标)与多项特征要求均密切相关，并且这些特性要求较重要(K_i 较大)，则 h_j

取值就大,即该项特征参数较关键,应该首先入选关键特征参数集,重点关注。

关键参数重要度应高于一般特征参数重要度,例如可将重要度高于所有特征参数平均重要度规定倍数以上的特征参数列为关键参数。

3 关键参数集合的调整

因为环境因素促使材料老化或材料之间的不相容引起化学反应、机械应力释放、低剂量辐射以及上述这些因素与其他潜在因素的综合影响等,表征系统或部件的关键参数随着时间的推移可能会发生变化,当在产品寿命周期中获得的信息更多,表明当前的裕量与不确定性发生变化时应对关键参数集作适应性的修改与调整。例如,当对某关键参数认知的不确定性减少时,这些关键参数可以从关键参数集中减去;当随着武器系统老化趋势增加,裕量减少,认知不确定性增加或稳定性发生改变时,这样的特征参数可以加入到关键参数集中。因此随着时间的推移,当人们对产品的认识不断深入或产品的特征发生了改变时,应该对关键参数特征展开矩阵进行完善或修改,并依据其结论调整关键参数集合。

4 结论

本文依据 QMU 方法的基本原理,借鉴 QFD 方法,提出了关键特征参数特征要求及量化分析关键特征参数要求与特征参数间的关系度,确定产品关键特征参数的方法。它是确定复杂系统关键特征参数的有效途径,可以为运用 QMU 方法开展复杂系统有效性评价提供技术支持。

参考文献:

- [1] Sharp D H, Wood-Schultz M M. QMU and Nuclear Weapons Certification[J]. Los Alamos Science, 2003(28):47-53.
- [2] Katie Walter. A Better Method for Certifying the Nuclear Stockpile[EB/OL]. (2004-03-03) [2010-04-21]. <http://www.llnl.gov/str/March04/Verdon.html>.
- [3] Chris Burroughs. New Integrated Stockpile Evaluation program to better ensure weapons stockpile safety, security, Reliability[R]. USA:[s.n.], 2006.
- [4] Martin Pilch. Ideas Underlying Quantification of Margins and Uncertainties(QMU):A White Paper[R]. USA:[s.n.], 2006.
- [5] John Ahearne, Marvin Adams. Evaluation of Quantification of Margins and Uncertainties Methodology for Assessing and Certifying the Reliability of the Nuclear Stockpile[M]. Washington D.C: The National Academies Press, 2008.
- [6] Kathleen Diegert, Scott Klenke, George Novotny. Toward a more rigorous application of margins and uncertainties within the nuclear weapons life cycle-A Sandia perspective[R]. USA:[s.n.], 2007.
- [7] 马智博, 应阳君, 朱建士. QMU 认证方法及其实现途径[J]. 核科学与工程, 2009, 29(1):1-9. (MA Zhibo, YING Yangjun, ZHU Jianshi. QMU certifying method and its implementation[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2009, 29(1):1-9.)

作者简介:



唐 炜(1964-), 女, 湖南湘潭人, 高级工程师, 主要研究方向为装备系统的可靠性、维修性、保障性研究, email: tangw@caep.ac.cn.

王玉明(1963-), 男, 江苏扬州人, 主要研究方向为装备系统的可靠性、维修性、保障性研究.