

基于可靠性的复杂装备综合集成设计

陈幼玲, 徐志磊

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川绵阳 621900)

[摘要] 为了获得低风险的复杂装备设计方案,提出了基于可靠性的综合集成设计。可靠性应在全寿命周期进行分析和量化,并在设计过程中采取措施确保产品在使用环境中其性能具有适当裕量;在综合集成设计过程中重要的问题是要在产品的先进性、可靠性、稳健性之间找到平衡的优化设计,它是在设计过程中逐步孕育而产生的,不是事后分析和评估出来的。由于常常是在信息不完备条件下进行产品设计与决策,在传统依赖于试验结果和部分数值模拟的决策方法基础上引入不确定性与裕度的量化的概念,以提供一种有效性评估的工程分析方法。实践表明,这种设计方法具有广泛的工程应用前景。

[关键词] 复杂装备;综合集成设计;不确定性与裕度的量化;

[中图分类号] TH12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)07-0028-07

1 前言

复杂装备(以下简称产品)的设计涉及多种技术领域。随着世界新的科学发展,新的技术突破及重大集成创新不断涌现,产品设计方法呈现出一些新的理论和方法。基于可靠性的复杂装备综合集成设计是一种将可靠性量化并贯穿于产品全寿命周期的综合集成设计,可保证产品性能的持续可靠性。在综合集成设计过程中引进 QMU(quantification of margins and uncertainty)裕度和不确定性量化新方法,在缺乏统计数据条件下,正确预测产品性能,合理决策低风险的设计方案。

近年来,新的产品设计方法的研究不断涌现,最重要的是,如何在设计过程引入产品的可靠性和稳健性。半个多世纪以来,美国的可靠性工程在产品中得到广泛应用。近30年来,我国可靠性工程已发展成为成熟的工程学科,其中最主要的内容就是可靠性设计与分析,它用于估计部件或系统的失效概率,并将随机性约束条件应用到优化设计中,提高了产品可靠度。健壮设计最早源于20世纪70年代日本学者G·Taguchi所创立的以试验设计和信噪比设计为工具的三次设计法(或称田口方法),即系统

设计、参数设计和容差设计,后来被称为健壮设计(robust design)方法。此方法使噪声因子对系统性能的影响降到最小,对于提高产品质量和性能稳定性具有重要作用,引起欧美各工业国家的关注,并在工程实践中大规模推广应用。

为提高产品质量和降低成本,20世纪80年代Motorola提出6-Sigma创新概念,90年代美国通用电气公司把6-Sigma方法提升到新的水平。目前美国正在推行DFSS(design for six sigma)设计方法,在设计阶段就赋予产品很高的固有质量,使新产品的的设计获得更高概率的成功。6-Sigma与健壮设计相结合的设计方法,可获得设计目标方差最小的设计方案,保证用户得到质量稳定,成本低的产品。

对产品开发而言,并行工程为其一体化开发或集成化提供了理论依据和实现手段。当并行工程用于产品设计领域就形成了并行设计。并行设计的产出是产品信息,并行工程的产出是产品实体。近十几年发展起来的并行工程、面向制造和装配的设计等是先进设计技术和过程技术的集成创新的代表性成果,而QFD(quality function deployment)、FMEA和FTA为实施产品设计和过程技术的集成创造了前所未有的理想工具^[1]。

[作者简介] 陈幼玲(1939-),女,湖北武汉市人,中国工程物理研究院总体工程研究所研究员,研究方向为新技术新结构;徐志磊(1930-),男,上海市人,中国工程院院士,中国工程物理研究院研究员,研究方向为新技术新结构

在 20 世纪末与 21 世纪初,世界新的科学与技术的发展,为产品的科学设计创造了条件。

在用户要求驱动下,产品设计的目标向着更小型化,更可靠,更安全的方向演化。系统应用新的设计方法和新的设计评估概念势在必行。

当前的产品设计,尤其是设计的初始阶段,常缺乏试验信息与同类产品的使用信息,决策的设计方案往往存在隐患。随着设计过程的进展,将获取丰富的工程研制阶段的试验数据与数值模拟计算结果,为验证设计方案提供了依据。试验过程中由于工程因素:如产品模拟技术状态、装配因素、夹具特性、载荷控制点的位置及大小偏差、测量技术等的不确定性对试验数据都带来不同程度的影响;数值建模的近似性及数值计算的误差,使数值模拟计算结果存在各种不确定性,因此设计方案的性能具有随机概率属性。尽管设计人员采用加大余度的办法,以保证产品通过定型试验的考核,实际上有时仍有故障出现。由于可靠性设计没有贯穿产品的全寿命周期,又难以预测实际产品在关键点失效的概率,在性能设计的基础上,没有充分考虑设计参数和性能的波动,对故障所采取的改进措施有时是几步才能到位,而重新设计必然带来重大损失。可见设计人员在最富创造性的设计阶段避免失误,决策人员减小决策风险,产品的可靠性设计最为关键。

2 可靠性设计与分析

对产品进行可靠性设计与分析时,关注的焦点是产品的失效模式、失效判据及评定标准的选择。通常的做法是用概率统计的方法,对影响产品性能的工程因素,如材料、环境、载荷、尺寸、制造工艺质量等的统计特性进行分析;用 FMEA 预测隐患所在,并采取设计措施消除隐患;通过几种具体的可靠性设计方法,把可靠性设计到产品中。如降额设计、简化设计、余度设计、耐环境设计、热设计等应用较为广泛。而非电子产品的概率可靠性设计方法,由于缺乏足够有效的实验数据,离工程应用还有一定距离,还有大量研究工作要做^[2]。

我院曾对关键部件的强度进行可靠性设计与分析,先建立应力(含工作应力及工艺成型残余应力)分析计算模型;再用确定值有限元(FEA)计算部件的应力场,通过应力分析确定薄弱环节;参考有关资料并统计工程研制试验数据,确定基本设计参数的随机特性:如材料的变异系数取为 0.03;载荷的变

异系数取为 0.12;加工尺寸的均方差用 3σ 准则进行估算;采用简化随机有限元(即一阶二次矩法)计算部件薄弱环节处的应力分布的特征参数,即可得薄弱环节处的应力的均值 \bar{s} 与方差 σ_s 。统计实验结果可得强度的均值 \bar{S} 与方差 σ_s ,求可靠性指数 β ,

$$\beta = \frac{\bar{S} - \bar{s}}{[\sigma_s^2 + \sigma_s^2]^{\frac{1}{2}}}$$
,由正态分布表查得部件的可靠度 R 。

由于追求产品小型化与轻量化指标,有时产品的可靠度不能满足用户要求,在总体方案不允许更换材料或加大尺寸的情况下,就要进行健壮设计,要确定一套设计参数来优化在“噪声”存在的环境中产品的性能,其目的是通过确定一套设计因素使噪声因子对产品性能的影响降到最小。

实践表明,制造工艺条件的差异在产品上能产生大小不同的残余应力,具有较大残余应力的产品性能对噪声因子很敏感,容易产生故障。为了降低产品成型后的残余应力,对产品成型过程中壳体上残余应力分布规律进行了数值模拟计算及系统的试验,获得一组稳健的工艺条件:如等静压的压力与温度;初始装配间隙对成型接触状态变化的影响;边界及端部的约束效应等。采用这组工艺条件,明显降低了工艺成型带来的残余应力。使用健壮设计可提高产品的可靠性。可见产品设计的关键是在产品先进性、可靠性、稳健性之间也就是在产品性能设计与质量设计之间找到平衡的优化设计。

3 可靠性评估的量化

按概率理论对产品可靠性评估的一般过程是:将产品按不同的分布分解成不同的单元类型,通过单元试验数据,将单元的可靠度置信下限评估出来,据此对产品可靠性进行综合评估。产品可靠性单元类型复杂,其中包括成败型、寿命型、干涉模型、正态型等类型,产品综合评估采用的是将不同数据类型单元均转化成成败型,然后进行系统综合。数据转换的方法有很多种,常用的方法是根据产品高可靠性的特点,可近似进行转换:1) 求出各单元的等效试验数及等效失效数,当试验单元的失效数大于等于 1 时,可直接统计得到等效试验数及等效失效数,当试验单元的失效数为零时,可设零失效单元的等效失效数为 1,将该单元的可靠性置信下限及置信度代入公式迭代求出等效试验数;2) 采用最大似然估计法求出系统的等效试验数及等效失效数;3) 求出系统总的等效试验数及总的等效失效数,系统总

的等效试验数(或等效失效数)是各单元试验数据折合得到的系统级等效试验数(或等效失效数)与系统级进行的试验数(或失效数)之和。

根据系统总的等效试验数、总的等效失效数及给定的置信度可综合评出产品的可靠度。

当前定型产品均采用上述方法进行综合评估。但产品交付后在使用阶段(或库存阶段)只能获得有限的试验数据及监测数据,对材料老化产生的缺陷演变存在不确定性,易损零件更换带来零件复制后新的不确定性,定型试验的试验设施散失等都给

产品的持续可靠性的评定带来困难,可见构建新的监测方法和预测能力,进行年度检查,寻找潜在问题;保持产品设计、实验室、生产和实验设施对避免新产生不确定性及保持产品持续的可靠性是至关重要的。

4 可靠性贯彻于产品的全寿命周期

4.1 产品研制全过程中与可靠性相关的活动

下列框图 1 表述产品各研制阶段的相关活动^[3]:

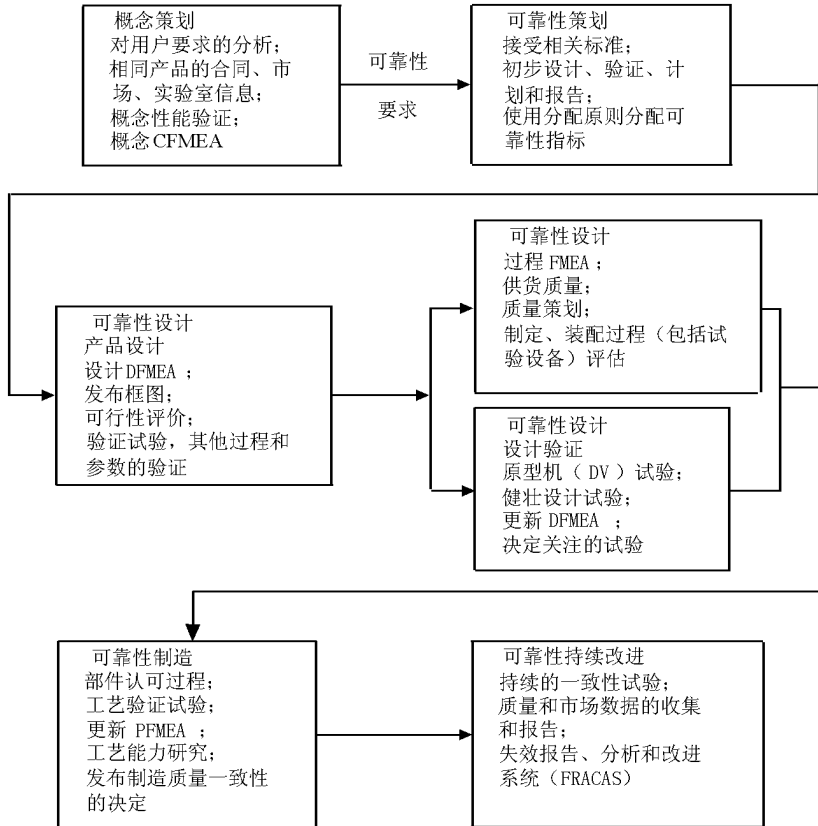


图 1 产品研制全过程中与可靠性相关的活动

Fig. 1 Activities that impact product reliability from cradle to grave

可靠性工作应贯穿于产品的全寿命周期,使方案决策更显科学性。

1992 年我国颁布了国军标 GJB1391 - 92《故障模式、影响及危害性分析程序》。适用于产品的研制,生产和使用阶段,所研究的对象是确定系统所有可能的故障,根据对故障模式的分析,确定每一故障对系统工作的影响,找出单点故障,并按故障模式的严酷度及其发生的概率,确定其危害性。在 2000 年发布 GB/T19004 - 2000 质量管理体系标准中,已把

FMEA 和 FTA 作为对“产品和过程的确定和更改”以及“设计和开发进行风险评估”的工具。FMEA 和 FTA 是经航天、航空、核武器应用证实的最强有力的分析工具,现已广泛用于设计分析,并扩展到后续研制阶段,以保证产品的持续可靠性。

4.2 概念 FMEA(CFMEA)

概念失效模式和影响分析(CFMEA)用于识别早期的任何可能导致安全危险或可靠性问题的设计薄弱环节。

CFMEA 在评估系统结构方案可行性时使用,可帮助选择最佳设计组合、评估设计可行性、确定关键件的设计冗余度。定量 CFMEA 对总体结构方案的确立尤为重要。当经验分析、理论计算尚不能充分评估方案可行性时,常用可行性试验来检测失效模式出现的概率。通过试验查明故障、重新设计、再试验以证实设计改进效果。实践证明,可行性试验是保证失效不被带到制造阶段之前检测失效模式的一种可靠性试验方法。

4.3 设计 FMEA (DFMEA)

FMEA 不仅是“事故预想”和“事故分析”的手段,而必须首先用于设计分析。DFMEA 用于系统结构方案尚未提交到制造部门时,识别和修正系统结构潜在失效模式。在作 DFMEA 时要研究设计缺陷在以后将会导致不可接受的制造或装配变化。因此,DFMEA 和过程 FMEA 之间有着必然的联系。

DFMEA 基本目的是推动设计改进,提出所有高风险失效模式,帮助制定设计验证试验项目,编制“取得教训”文件,用作再生产时失效模式识别的输入。

4.4 过程 FMEA (PFMEA)

过程 FMEA (PFMEA) 的主要目的是要识别潜

在的制造或装配过程原因及过程变量引起的失效,集中控制识别制造期间潜在的质量问题和检测潜在失效。PFMEA 为制造和装配不造成失效提供保证,对潜在的制造失效模式进行处理,识别重要的过程或装配特性,及早发现新工艺的薄弱环节并予以纠正,为改进制造与装配质量提供依据。

经验表明,在生产过程中,可增加必要的筛选工序,如弹性元件的环境应力筛选是暴露潜在缺陷的有力措施。在产品“研制”转“批生产”过程中,最大限度地使用故障报告、分析和纠正措施系统 FRA-CAS (failure reporting, analysis and corrective action systems),将“试制阶段”工艺缺陷在“定型生产”阶段工艺中予以彻底纠正,杜绝重复发生。

4.5 FMEA 分析的集成

在不同级别细节的 FMEA 信息:系统级——部件级——设计 FMEA 和过程 FMEA——必须一致。识别不同级别细节的 FMEA 之间的联系是很重要的。如图 2 所示,可以看出一个级制的失效模式与下一个较高级制的失效原因内涵相似。

分析不仅要降低层次 FMEA 分析结果综合到高一层次分析中去,还要将设计 FMEA 与设计验证 FMEA,计划和报告分阶段进行跟踪并集成在一起。



图 2 在某一级别最终失效模式视为更高级别(下一个更高的影响)的失效原因示意图

Fig. 2 Illustration of end-effect failure mode at one level viewed as a cause at the next-higher level(next-higher effect)

对关键部件 FMEA 应用的研究表明:FMEA 分析技术实际上对产品研制程序每一阶段都有益,虽然 FMEA 分析在产品方案设计与工程研制阶段用得最多,但在制造阶段、使用阶段也很有价值。FMEA 分析可导出优化的设计方案来支持制造。即使在使用阶段 FMEA 还可以用来分析贮存、运输、飞行中可能出现的行为。只有为每个阶段准备好独立的 FMEA 分析工作表格,并在产品的整个寿命周

期集成应用,才能定准故障原因。一套完整的 FMEA 资料,是多种领域经验总结,是宝贵的工程财富。

5 传统可靠性设计与评估在产品应用中存在的问题

在实际应用中由于工作体制的约束、技术领域的限制,没有真正做到将可靠性工作贯穿于产品全

寿命周期的各个环节。

依靠系统总的等效试验数、总的等效失效数评定产品的可靠性,存在技术上的困难,复杂系统不可能做大量的全系统试验。分解出来的子系统试验也是小子样,有时单个子样采用延长试验时间以获取子样数不够合理。同时失效的频率不能揭示失效的原因,不解决失效原因的深层次问题,如材料、制造、设计等基础物理和化学问题,难以保证产品的可靠度。

在产品的可靠性设计与评估过程中,由于产品的复杂性及认知上的局限性,存在两种不确定性:

1) 随机不确定性——也被称为“不可减少不确定性”或“随机可变性”,如制造公差、连结结构的刚度和阻尼、材料组份、试验条件和外环境因素的随机变化;

2) 认知不确定性——也被称为“可减少不确定性”,由于知识的不完整造成,例如,模型形式的不确定性(与计算模型正确性有关的不确定性)、方案中已知或未知的以及低质量的试验数据。

不确定性的量化是可靠性研究的核心问题。不确定性量化曾用的方法是概率方法。由于概率密度函数的微小误差可能导致计算可靠度出现较大误差,在统计数据十分有限的情况下,不确定性的量化方法要加大力度去研究,要作多种尝试。

6 产品综合集成设计

复杂装备研制实践表明设计与过程的集成是产

品全寿命程序中重要的设计方法,它将用户要求集成一体,能同时体现全过程中的设计要求,并能阶段解决各不相同的技术集成问题,特别适用于对性能、尺寸、重量、健壮性有严格要求的复杂技术产品。设计与过程的集成可分三步,首先采用质量功能展开 QFD 将用户要求转化成工程设计要求,根据已积累的研制工作经验和已基本掌握的技术贮备及可预见的技术发展,科学的选择技术方案,进行经费概算和研制进度的初步安排;其次是过程集成,从设计前期就考虑产品在生产、贮存、运输、使用环境中的各种工程因素对产品性能的影响,提出性能设计指标,采用新技术,诸如可靠性设计、分析技术,稳健性设计技术,及 6 σ 设计技术等,使产品的先进性、可靠性及质量的稳健性在设计过程中孕育、产生,而不是事后去分析、评估;第三步制定顶层设计,确定设计标的、技术路线、分析关键技术形成顶层设计方案,经验证与确认后加工生产、定型交付^[4]。

6.1 产品综合集成设计过程

图 3 描述了产品综合集成设计过程,并显示:

- 1) FMEA 已集成化并已量化;
- 2) 传统方案决策依赖于试验结果和部分数值模拟结果,在传统决策方法基础上,引入不确定性与裕度的量化 QMU 新方法;
- 3) QMU 是对产品部件性能提供一种有效性评估的工程分析方法。

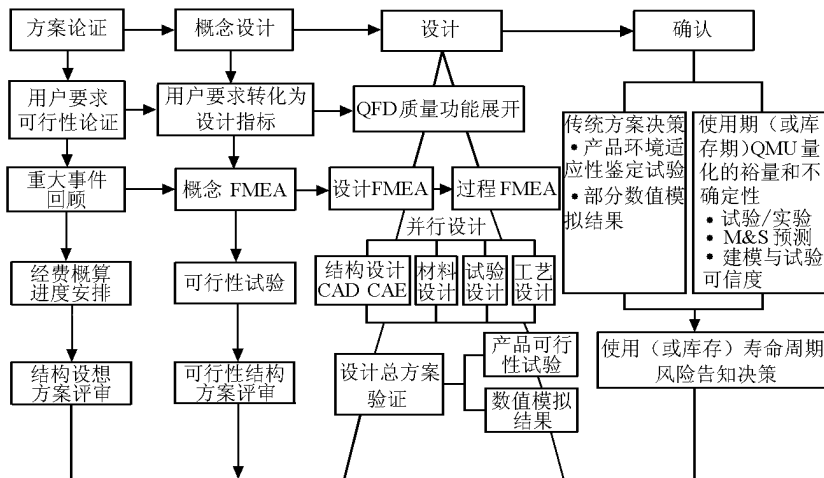


图 3 产品综合集成设计过程图

Fig. 3 Integrated design of product process

6.2 裕度和不确定性量化(QMU)的观点

QMU 意为裕量和不确定性量化,该方法自 2001 年以来,已在美国有关实验室研究应用。

作为一种方法学^[5],QMU 可以应用在产品寿命周期中所有的关键部分。通常这些部分可被归纳为:使用需求、设计、鉴定、生产、维护、退役。

Sharp 和 Wood——Schultz(2003)把 QMU 定义为“一种框架,它可获得我们对产品性能的已知或未知,从而用于处理风险和风险减轻”。Goodwin 和 Juzaitis(2003)把 QMU 归结为用于型号产品的某种认证方法学的一部分。QMU 是一种支持决策的方法学,QMU 支持的决策正式名称为风险告知决策。目前美国已经提出 QMU 的通用框架和关键要素,并已用于几个重要型号的延寿计划中,取得了成效。在产品库存有效性论证中,QMU 的第一步就是通过集成的 FMEA 及敏感度计算几套潜在失效模式和问题的可观察清单,找出对产品性能影响更大的重要因素。其次根据过去的地面试验数据,飞行试验数据,库存监测期间材料及部件试验数据,数值模拟结果等信息量化关键性能裕量及不确定性。第三步运用验证(verification)和确认(validation)(简称 V&V)方法,量化数值建模及模型计算的置信度,帮助决策人员做出具有高度合理性的决定。

6.3 不确定性的量化

不确定性的量化一般采用概率统计的方法。在评估可靠性遇到有限样本信息时贝叶斯(Bayes)方法是一个有用的方法,只要使用大量相似产品的信息获得参数的先验分布,再与有限数目的样本试验结果构建验后 Beta 分布,就可得到可靠性的 Bayes 估计。其中求取参数的先验分布有一定难度。实际上随机变量的统计参数依赖于较多的统计数据,在缺乏统计值的情况下,采用凸集模型来描述产品的不确定性便是一种尝试。

凸集模型是健壮可靠性理论(robust reliability theory)的数学基础。健壮可靠性理论是 Ben-Haim 教授于 20 世纪 90 年代中期在非概率可靠性模型基础上提出来的。在缺乏信息或系统未知的情况下,如果系统能够容许较大的不确定性而不失效,也就是说系统对不确定性的变化不敏感,系统就是健壮的^[6]。Ben-Haim 采用凸集合理论的方法,由系统的输入集合去推算响应集合,然后通过响应集合与失效集合之间的关系,对不确定性问题作出推断。如果输出集合与失效集合不相交,系统是可靠的。

为获得目标的随机特性(均值、方差、分布类型)可用响应面法即通过有限次计算求出一个近似的响应面,在响应与随机变量之间构建显式表达式,进行可靠度分析。当模型参数项目较多时,可用蒙特卡洛方法分析。Monte Carlo 方法亦称为随机模拟(random simulation)方法,有时也称作随机抽样(random sampling)技术或统计试验(statistical testing)方法^[7],能够逼真地描述随机性事物的特点及物理实验过程,量化并给出不确定性问题的度量,是研究多体复杂系统(many-body systems)以及不确定性过程(non-deterministic processes)的强有力工具^[7,8]。如果已知设计变量的随机特性,通过分析和评估一组随机挑选的设计方案,可获得系统响应或目标变量的统计特性。

7 结语

基于可靠性复杂装备综合集成设计进一步扩展了产品综合集成设计方法。采用这一新的设计方法,将可靠性设计贯穿于产品的全寿命周期并获得高可靠性。FMEA 的全程集成化及量化可识别产品最敏感的失效模型,在综合集成设计过程中重要的问题是要在产品的先进性、可靠性、稳健性之间找到平衡的优化设计。在方案确认阶段引入的 QMU 新方法增强了方案决策的科学性与合理性。经对产品关键部件的实际应用表明这种新的设计方法能降低方案决策中技术风险,具有广泛的工程应用前景。

随着产品日益复杂,环境因素更为严酷,在产品更新换代周期短的形势下,很难获得充分的统计数据以使用经典的概率统计法去确定不确定度。研究并应用非概率理论与方法,评定产品的健壮可靠性十分必要。在概率与非概率法量化不确定性的基础上,开展产品的综合集成设计,是获得低风险方案的最佳途径。

参考文献

- [1] 路甬祥. 设计技术与过程技术的集成创新[M]. 北京:机械工业出版社,2002
- [2] 陆廷孝,郑鹏洲. 可靠性设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,1997
- [3] Gary S. Reliability Verification, Testing and Analysis in Engineering Design[M]. Michigan: Wasserman Wayne State University Detroit, 2002
- [4] 陈幼玲,徐志磊. 复杂技术产品设计与过程的集成[A]. 第八届设计与过程集成技术世界大会论文集 IDPT-V01.1[C]. 2005

[5] Martin Pilch, Timothy G. Trucano, Jon C. Helton. Ideas underlying quantification of margins and uncertainties (QMU): A white paper[R]. California: Sandia Report Sand 2006-5001, 2006

[6] Yakov Ben-Haim. Robust reliability in the mechanical sciences [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996

[7] Fishman G S. Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1996

[8] Isabel Beichl, Francis Sullivan. The Metropolis Algorithm [J]. Computing in Science & Engineering, 2000, 2(1): 65-69

Integrated design based – on reliability of complex equipment

Chen Youling, Xu Zhilei

(Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

[Abstract] To get low-risk design project of complex weapon equipment, the integrated design methodology based-on reliability is proposed. The product's reliability must be analyzed and quantified during the whole product life-cycle; and in the design phase, some measures must be taken to assure appropriate margin of the product during the service and mission environments. It is an important problem to find one balanceable optimal design amid advantage, reliability and robustness of the product, so that these characteristics are all brewed and produced during the design procedure, and not analyzed and evaluated afterwards. Due to product design and decision-making with incomplete information in general, the new methodology of quantification of margins and uncertainty (QMU) is introduced based on traditional decision-making methodology, which does depend on experiment results and partial numeric simulations, to provide an engineering analysis method of validity evaluation. Some practice suggested that this design methodology may have extensive engineering application future.

[Key words] complex equipment; integrated design; QMU (quantification of margins and uncertainty);

(上接 17 页)

2) 通过静力超载试验分析, 空腹梁上肋“7”点, (见图 30) 的应变与荷载的关系曲线分析, 实测值与有限元计算和实用方法计算值, 在设计荷载作用下均很接近, 呈斜直线关系, 说明蜂窝形双重网格结构在弹性范围内, 荷载与应变仍呈线性关系。

[中国钢筋混凝土空间网格结构新体系的开拓与发展(下)将在本刊 2008 年第 8 期刊登]

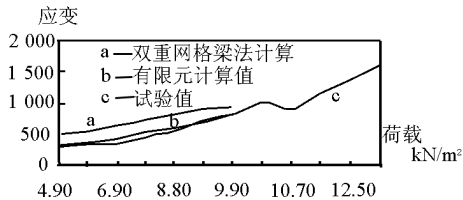


图 30 结构“7”点在各级荷载作用下的应变

Fig. 30 The strain of “7” spot under all levels of load