

以科学为基础的复杂系统工程研制

徐志磊

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

[摘要] 核武器是特殊的复杂系统, 对使用有效性、安全性、可靠性有特殊的要求, 核武器的工程研制是以科学为基础的方法进行的, 强调基础应用研究, 加强系统研究和计算机数值模拟。对复杂系统环境适应能力的力学和材料科学的数值模拟是重要的发展方向, 数值模拟的关键建模和试验设计, 目前对复杂系统还没有普适的建模理论, 21世纪科学的发展, 必将在各种学科领域中加快数值模拟的应用。

[关键词] 复杂系统; 核武器; 数值模拟; 系统性能建模

[中图分类号] N945; TJ9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)10-0026-05

1 复杂系统

许多简单的元件组合在一起, 相互发生的作用产生了与原来单独元件性能完全不一样的新的结构和系统, 这就是复杂系统。大自然形成了无数的复杂系统。电子在固体中相互作用, 可以形成半导体和超导体; 化学结构不同, 可以形成形形色色各种不同性能的宇宙万物; 生物可以说都是复杂系统; 人体结构更为复杂, 例如大脑, 人们至今还远未弄清它的原理及内在的相互作用。

人类在自己的历史发展进程中, 创造了众多的工具和器具, 由简单到复杂。20世纪以来人们制造(或创造)的产品越来越复杂, 人们把简单的硅材料制成了半导体, 由此开发出众多的电子产品如电视机、计算机等。到了21世纪, 可以说, 人类已经进入了一个不断创新开发新的复杂系统的时代。在世界上有两类复杂系统产品的工程技术受到了挑战^[1], 一类是超强的应力条件, 另一类是超长的使用寿命要求。飞机、空间飞行器、人造卫星和核反应堆等这些复杂系统就是例子。这些产品在设计、制造和以后的使用、运行中都有特别严格的要求, 一旦失效, 它造成的危害将会付出沉重的

代价: 重大的经济损失, 人身安全事故, 有的甚至会造成人类居住星球的环境破坏。

2 复杂系统——核武器的特点

核武器是由很多不同材料和部件组合的复杂系统, 它也面临设计、制造、维护使用中工程技术的挑战。

核武器在作战使用中经历运载工具的发射环境, 弹头与导弹弹体分离后再入大气层时会经历高速飞行的加速度过载应力和振动环境。

核武器在装备服役长期贮存条件下(例如10~20年或更长), 要求有持久保持性能的能力, 随时处于战备状态, 一旦国家需要, 必须保证作战使用的有效性。国家需要一个持久有效的核武器库。

核武器在操作使用过程中有极高的可靠性和安全性要求, 如果发生安全事故, 将会是最高级别的灾难性后果, 其风险是很大的。

核武器中含有多种特殊的材料, 这在一般工程产品中是遇不到的。对它们的长期性能, 人们至今还没有经验。一些不同的材料, 装入核武器狭小的空间之后, 其相互作用极其复杂, 短期内看不出问题, 长时间之后, 不知什么时候变坏, 坏到什么程

度产品会失效，都是面临挑战的难题。

核武器不可能做全系统的性能试验。经过足够长贮存周期的核武器，进行一次实战条件下的全系统性能试验是不可能的。过去可以做核试验对贮存武器进行核性能考核，现在已经全面禁试了，而全系统的经过运载飞行后的作战考核试验是不可能做的。

3 核武器的工程研制

核武器的工程研制，在早期都是沿用二次世界大战时代工程界普遍采用的权宜之计解决问题的方法，例如边做边试 (cut-and-try)，反复试验 (trial and error)，过量冗余 (over kill, extreme redundancy)，缩比试验 (small-scale model tests)，覆盖设计 (over lapping design) 等，在我国也叫“画加打”，这些方法满足当时的工程设计需要都是有效的而且是必要的，设计出来的产品，经生产试制后，通过大量的试验最后修改设计，完善产品性能，达到研制要求。

随着现代武器发展要求的提高，要独立自主地设计研制出精良、有效、全面满足作战使用的现代化武器装备，上述的方法已经远远不够了。

4 以科学为基础的研制方法

4.1 加强应用基础研究

以科学为基础的工程研制方法就是在产品方案设计和工程研制过程中，了解各分系统、零件的基本原理，深化分析能力，需要理论与工程经验相结合，物理、化学、材料科学和电子学等方面的专家很好地合作，提供对事物的深层次了解 (understanding) 来指导研制工作。中国工程物理研究院在工程技术领域提出了“加深科学认识”作为一条技术路线。

在研制中仍然需要设计—试验—改进这样的过程，但在设计和试验中不断渗入以理论为基础的分析研究，将基础性研究试验、系统分解试验、综合试验达到最有效地结合起来，用最少量的试验也能对产品性能进行很好的考核。

以科学为基础的研制方法需要加强基础研究，例如，在力学环境响应研究方面，要加强静态力学、振动和冲击力学、应力波传递和温度环境影响的基础力学研究；在辐射环境研究方面要加强辐射效应对材料损伤的基础研究等，需要对研究对象进

行从第一原理出发的思考方法求得更深层次的了解。

在工程研制方面，面临需要解决的综合性难题，例如武器的可靠性和安全性问题，需要技术上新的思维的突破。

我们面临的工程问题经常是在面对不完整的、通常是矛盾的信息下，去解决具体问题。在这个层面上，可以暂时回避追求全面纯科学逻辑的思考，采用系统性综合分析的方法建立比较粗糙的但又符合物理过程规律的工程化模式去研究有限的问题，用巧妙的工程手段达到问题的解决，但是一定要把科学思维方法与工程实践很好地结合起来。重要的是必须在工程前沿上寻找基于深层次数理分析的 (以科学为基础的) 研究课题，以深化我们的理论知识水平。好的工程师就要努力去增加基础科学研究在实际工程技术上的应用，使工程决策更加可靠，思维更加科学化并发展更多的创新思维。21 世纪工程师面临的问题就是要很好地解决在科学和工程之间的平衡。

4.2 加强系统分析研究

以科学为基础的研制，需要对产品综合性能加强系统性研究。任何一个系统中的单独元件，它的性能不仅是自身的性能，而且与其系统的性能优化有关。产品综合性能优化是多维的专业技术结合的集成，运用系统工程的方法对产品性能进行分解、组合、集成分析，达到最终满足全寿命期作战使用指标的要求。

1) 产品综合性能评估，是指产品的可用性、可靠性、安全性、经济性等综合性能是否达到相对优化的水平。

2) 产品的全寿命设计 (从摇篮到坟墓) 应包括以下过程：产品技术要求—产品技术指标—概念设计和可行性分析—产品设计—产品性能试验、验证—产品设计定型和工艺定型—生产—操作使用和维护—产品的退役、拆卸和处理。

3) 产品在交付使用后所经历的环境影响过程。产品的可用性、可靠性、安全性都应该放到环境过程中进行适应性考核。

4) 满足全用户使用特性的要求，包括市场需求、产品开发周期、质量水平、售后服务等。

现代产品设计的系统分析研究要求“集成设计”的思维，从总体顶层设计开始就要考虑全寿命期各种技术要求的集成，采用并行工程的方法对各

阶段不同技术问题进行综合集成和优化。

4.3 计算机数值模拟的应用

4.3.1 计算机辅助工程 (CAE) 20 世纪 40 年代, 大数学家冯·诺曼 (von Neumann) 和乌拉姆 (Ulam)^[2]开辟了计算机在科学计算上的应用。原子弹和氢弹理论设计的物理过程都是通过计算机数值模拟和核试验验证相结合的方法来完成的。以后的半个世纪, 数值模拟在核武器理论物理方面有了很大的发展, 建立了计算物理的学科, 目前已经制成的每秒万亿次运算的计算机^[3], 可以对物理模型进行三维模拟计算, 可以用来支持“全物理”(full-physics)、“全系统”(full-system)模拟计算。

在随后的年代, 计算机用于工程技术领域也有很大的发展, 从 CAD, CAM 到 CAE, 在产品研制开发的每个阶段都有应用。有限元方法在复杂的机械结构分析方面是一个重要的工具, 在固体力学和流体力学方面都可以应用。与产品方案设计阶段有关的优化设计方法, 得力于 CAD 和结构空间仿真, 结合力学分析可以有效地达到优化目标。在产品阶段, CAD 提供了有力的手段, 使零部件设计效率和质量大大提高。与环境因素有关的产品性能响应如力学强度、振动、冲击、温度复合等在计算机上的模拟试验可以在设计阶段早期预估产品环境响应的薄弱环节和性能变化, 减少试验产品投产数量和大型试验次数。图 1 为核反应堆零件胀套等效应力分布的计算机模拟图。



图 1 胀套等效应力

Fig.1 Equivalent stress of sleeve

4.3.2 材料科学的数值模拟 近年来, 数值模拟在材料科学领域有引人注目的发展。首先是新材料的设计, 可以利用计算机进行复杂结构材料的开发, 根据需要, 设计开发出综合性能符合要求的新

型材料; 其次是材料微观结构的计算机模拟, 用量子力学的严格理论基础 (即从第一原理出发) 来研究电子和原子、化学键、分子结构、界面和缺陷等; 用分子动力学, 结合牛顿力学和量子力学的理论来计算原子和分子的运动, 高能粒子对固体材料的碰撞和辐射损伤; 用物理基础概念来模拟材料结构的性能, 如位错移动、晶界滑移等。材料科学的计算模拟为产品零部件性能设计增强了对以科学为基础的物理学基本原则的理解。

产品制造过程中的建模和数值模拟, 是一个重要的发展领域。计算机模拟制造工艺过程改进了人们对复杂工艺过程 (焊接、锻压、铸造、热处理等) 的理解, 使工艺参数更为优化, 有效地改进产品质量和降低制造成本。图 2 为旋压工艺过程的计算机模拟工件材料的移动。

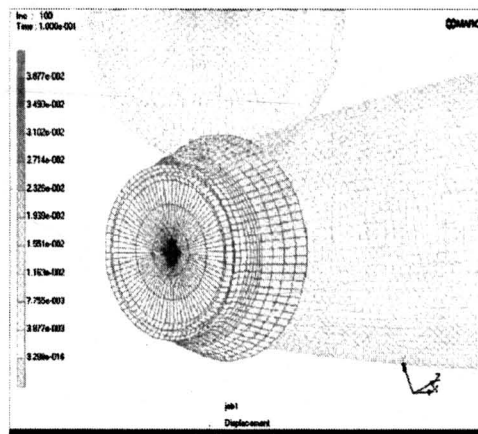


图 2 旋压过程中工件的位移

Fig.2 Material moving in spinning process

材料科学的计算机模拟在中国工程物理研究院已经开展和可以开展的课题有:

- 1) 钢系元素的状态方程环境影响、微结构特性、老化机制和表面物理。
- 2) 氢与金属及合金, 抗氢脆容器材料与氢同位素有关材料相容性问题, 材料的模拟选优和预测, 氢脆、氦脆的机制及解决途径。
- 3) 功能材料和结构材料力学性能及抗环境性能的优化设计和预测。
- 4) 含能材料的分子设计、配方研究、老化性能、粘接、涂层及相容性问题的模拟预测。

结合计算机材料模拟可以对产品材料在特殊环境中材料性能及其功能的状况和变化进行仿真模拟和预测, 预测可能发生什么事情, 其原因和规律,

提出解决办法和对策。

4.3.3 系统性能的数值模拟 复杂系统整体及子系统、部件的计算机性能模拟是最近发展起来的,也是我们目前很想去做的事。由于有了超级计算机,可以把对系统性能中感兴趣的部分进行建模和数值模拟,运用科学和工程知识来分析、预估系统在长寿命期中的行为和变化特性。例如可以从基本原理开始对武器电子系统在各种环境下寿命期为 50 年以上进行精确表达,从而理解其性能变坏的物理、化学因素,以改进设计。计算机模拟比之实物试验,是可以从空间和时间上进行缩小和扩展,较快地预估产品的性能趋势。

复杂系统性能数值模拟的任务是^[4]: a. 现象学的了解; b. 系统性能建模和模拟; c. 系统试验和验证。

系统性能的数值模拟不仅是为了预测部件失效和建立维修周期,其研究成果的信息还应是一种知识基础,支持部件的设计、制造、验证、安全分析、维护。成功的建模使这些新知识建立在更宽广和更深远的科学基础之上,使设计、研制水平大大提高。

产品性能的计算机数值模拟并不是轻易能做到的,它的可信性必须建立在试验的基础之上,建模和计算的结果必须与试验结果有相当的吻合(或合理的外推),建模才能成立。这里有两方面的问题,一方面是试验模型的设计,是全尺寸实际部件还是简化的模型,其困难在于(即使有超级计算机)复杂系统“全系统”的建模和模拟是十分困难的,甚至是做不到的,而简化模型又有很大的局限性乃至完全失真,其可信性能否得到验证?解决途径是对系统进行全面分析,特别是利用基础研究的知识对产品性能某些特定的方面首先进行宏观分析或现象学建模(phenomenological logical models)的分析方法,将研究对象集中到一定的范围,根据要解决的具体技术问题建模和建立基本方程,随后根据建模要求针对性地设计出试验模型,使试验取得的参数数据满足验证模拟结果的需要,使所建模型得以成立,计算结果有实际意义。系统的数值模拟需要有多种学科的知识支持,例如流体力学和热科学,固体力学和结构力学,材料科学和材料力学,化学和空气动力学,以及计算机科学。图 3 为核反应堆中水流速度的计算机模拟。

另一方面是要发展各种先进技术(试验手段)

和工具,以期获得必要精细的、可信的试验参数。复杂系统研究取决于理论分析、物理功能建模、试验(实验)验证,而试验数据的获得和解释转化为理论建模表徵的规律性结论与客观事物之间要有一定程度的符合性,才能使建模成立,外推可信,才能发现规律性和有意义的成果。现代测试技术和工具的发展使这种过程成为可能。例如高能脉冲 X 光源获得了核装置的爆轰压缩过程中瞬态图像,高亮度、高空间分辨率的同步辐射源可同时测量材料的宏观和微观结构等。

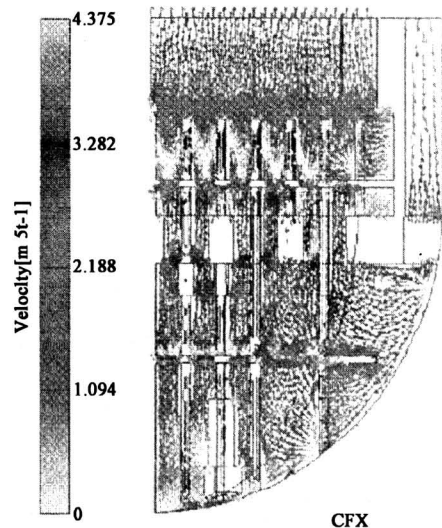


图 3 秦山 I 期原设计结构 CFD 分析
0°角速度矢量图

Fig.3 0° angular velocity vector diagram
of CFD analysis

材料的特性参数、状态方程、强度特性数据、表面化学反应行为、中子截面等都需要先进的检测测量手段给出精密的数据作为计算机模拟的依据。

复杂系统性能的数值模拟举例: a. 核武器贮存寿命期的预估; b. 爆炸安全壳的结构分析(爆炸动力学的响应); c. 产品贮存环境评估; d. 电镀 LIGA 过程的最优化; e. 全球气候模拟; f. 汽车悬挂系统的道路谱模拟(在虚拟的道路谱上,计算出悬挂系统的应力)。

5 计算机模拟的局限性

过去的年代,由于计算机软硬件的能力水平较低,对于复杂系统的模拟只能是粗糙的和简化的,这样的数值模拟对产品性能的描述较为粗浅,对工程结构无实际应用意义。现代科技的发展,特别是

计算机软硬件的发展,改变了这种状态。美国启动的加速战略计算倡议计划(accelerated strategic computing initiative)已经具备了万亿级计算能力,可以用来做三维物理计算和多种工程结构性能计算,我们也需要逐步建立相应的计算能力。

但是对复杂的工程问题进行逼真的计算模拟并不是都能成功的,有的可以模拟的问题,需要更精确建模和详细的试验数据库,并非一朝一夕能够完成。而有的问题,初始条件不稳定,后继发展的非线性特性不能收敛,要模拟复杂的发展规律,在近期几乎不可能。

应该承认计算机数值模拟应用到复杂系统分析,在现阶段仍有相当大的局限性,我们只是看到一些曙光,在力所能及的课题上逐步开展,以期取得有实际应用成果。

6 前景

从面向21世纪的前景来说,我国对复杂系统产品要掌握自主开发能力,以科学为基础的研制方法是必由之路。别人开发的产品,由于日趋复杂化和微型化,有朝一日我们将会连仿制的能力都没有了!计算机数值模拟从理论物理设计模拟走向工程设计模拟已经是必然的发展趋势,对基本原理进行的数值模拟将有利于增强人们对相关物理学基本原则的理解,从而悟出新的思维,创造新的东西,使

工程设计更接近于优化水平。

但从目前来看,我们对复杂系统还没有普遍的建模理论,只能从现有的知识水平出发,做一些比较容易模拟的系统,例如某些力学分析和材料科学的模拟,它已经使我们获益匪浅。未来更大更快的计算机能从时间和空间尺度的扩张来完成更多的第一原理模拟。面对21世纪科学发展的前沿,如生物学中蛋白质结构的模拟,纳米技术中各种材料的分子水平自组装设计和性能研究等,都将离不开计算机数值模拟的应用^[5]。

新的世纪期待我们有新的探索,而更深刻地了解复杂系统就可以有新的设计和控制技术,从而创造出更新的复杂系统。

参考文献

- [1] Graboske H. Life performance of complex systems[J]. S&TR, LLNL, Sep 1999
- [2] Hardouin O B M, Parc D, et al. Atomistic simulation [A]. Computer Simulation in Materials Science[M]. 1996
- [3] ASCI at LLNL www.llnl.gov/asci/[EB/OL]
- [4] Engineering sciences research foundation [R]. FY98 Report, Sandia National Labs, 1998
- [5] Complex systems[A]. Science for the 21st century[C]. Office of Science work shop, DOE, 2000

Science-based Engineering R & D of Complex Systems

Xu Zhilei

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

[Abstract] Nuclear weapons are complex systems with special requirements on effectiveness, safety and reliability and, therefore, science-based engineering studies have been conducted, while enhancing system engineering and computer simulation. To further study mechanics and material science for environmental adaptability of the complex systems, theoretical and computational advances must be pursued. The most important issues are theoretical modeling and test designing. Unfortunately, appropriate theories and models for complex system have not been formed yet so far. Following the science development in the 21st century, applications of computer simulations will be speed up for complex systems investigations in various disciplines.

[Key words] complex systems; nuclear weapons; computer simulation; modeling of functional systems