基于网格的电路功能可靠性仿真系统

孙宇锋 杨立波 赵广燕

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 功能可靠性仿真是建立系统功能与可靠性一体化分析的综合仿真技术,论述了电路功能可靠性仿真系统的体系结构、功能及其实现的故障建模、故障虚拟注入、仿真器集成、故障自动判别等主要技术方法. 为解决电路功能可靠性仿真系统中长仿真时间和大数据量存储的难点,提出了基于网格计算技术的体系结构,研究了仿真服务、分析服务和数据管理服务的实现方法,建立了通过网格平台向电路功能可靠性仿真系统提供虚拟计算和存储的能力,减少了系统分析所需要的仿真时间,实现了大量仿真结果数据的分布式存储. 基于上述技术思想,实现了以 TyrensGrid 为网格平台、PSpice 为仿真内核的 TG-CFRS 软件原型,证明了基于网格的电路功能可靠性仿真技术的有效性.

关 键 词: 网格; 可靠性分析; 功能可靠性仿真; 电子设计自动化

中图分类号: TB 114.3; TP 391.9

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)12-1337-05

Circuit functional reliability simulation based on grid

Sun Yufeng Yang Libo Zhao Guangyan

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The functional reliability simulation (FRS) is an advanced integrative simulation and analysis technology in reliability by integrating functional simulation with reliability analysis of system. The architecture and functions and mostly realization methods were discussed, such as failure modeling, virtual failure rejection, simulator integration, failure automatic criterion about FRS. In order to resolve the problems about simulation time and data storage, a new architecture was put forward, which is based on the grid technology, and the related service of simulation, analysis, data management and so on was represented. The grid provides a virtual capability of computing and storage. The new architecture shortens the simulation time and realizes the distributed data storage. The Tyrensgrid circuit functional reliability simulation (TG-CFRS) system was produced based on the idea, which makes the Tyrensgrid as the grid platform and PSpice as the simulation kernel and proves the availability of the new architecture.

Key words: grid; reliability analysis; functional reliability simulation; electron design automation

由于市场竞争的加剧,产品研发过程中通常以"并行交叉"方式进行,以缩短研制周期. 虽然可靠性工程技术的发展已极大地促进了产品可靠性的提高,但现有可靠性设计与分析技术方法自成体系,不易为性能专业的技术人员所理解和掌握,使得产品的性能设计与可靠性设计不能有效结合,导致产品设计质量易出现问题而又缺少有效的手段加以控制. 特别是在电子产品的研制过程中还会出现多态、容错、非相干等可靠性分析难点问题,当这些问题综合出现时,就难于准确分析与评估产品可靠性状况. 正是基于这种需求,国内外已逐步发展形成一项新的可靠性和性能综合分析技术,即系统功能可靠性仿真技术.

系统功能可靠性仿真技术以数字仿真为手

收稿日期: 2004-10-13

作者简介: 孙宇峰(1969-),男,内蒙古呼和浩特人,副教授, syf@buaa.edu.cn.

段,从常规性能设计思维出发,强调通过分析系统内部的功能关系和功能层次,建立统一的性能和可靠性分析环境,实现同步分析系统的性能及可靠性. 该技术可以综合分析参数漂移、硬件损伤、环境因素、时间因素等对系统可靠性的影响,可以利用性能数据分析系统的可靠性,还可以处理故障相关性、系统的多态性及非单调关联系统等方面的问题[1]. 从技术特征上讲,系统功能可靠性仿真技术是一项在产品设计阶段利用故障注入和仿真手段来实现性能与可靠性一体化分析的新技术,是对现有可靠性设计分析技术的补充.

自上世纪 80 年代以来,国内外有许多机构开展了相关的技术研究工作,如美国 Virginia 大学的 ADEPT[2] 与 DEPEND[1]、美国 Duke 大学的 DIFtree[3]、以色列飞机公司的 IRAT[1]、俄罗斯航空中心的 SIM _ S[1]、北航可靠性工程研究所的 CFRSP[4] 等,此外代表性的研究方向还有 MFM、GTST[1]、自动 FMEA[5]、FraNets[1]、GO 法[1]、GO-FLOW 法[1]、ESA[6] 等,这些研究都从不同角度推动了功能可靠性仿真技术的发展,目前其理论研究已日益深入,但工程应用仍有限.

1 电路功能可靠性仿真系统

电路功能可靠性仿真系统(CFRS)是以一般电子系统为对象开展性能和可靠性综合分析的软件平台. 该系统从建立元器件和电路板的故障仿真模型出发,以成熟的电子设计自动化(EDA)工具为依托构建电子系统性能和可靠性综合分析环境,利用仿真和故障注入手段,分析电路中的元器件损伤、参数漂移、温度等对系统性能的影响,目的是为在产品设计阶段就能对产品性能和设计质量进行分析和评测,实现电路性能与可靠性的一体化设计和分析.

电路功能可靠性仿真系统的结构体系如图 1 所示. 该系统从结构上看主要有 3 部分组成:EDA 仿真软件、控制器和可靠性相关的仿真分析工具.

1) EDA 仿真软件:是系统进行电路性能分析和故障仿真计算的核心工具,一般由现有成熟 EDA 仿真软件组成,如 PSpice A/D.

2) 可靠性相关的仿真分析工具:由系统集成的进行电路可靠性分析(含测试性分析)的系列工具或软件模块,包含的分析功能可参见图 2.

3) 系统控制器:是系统功能模块和数据传递的管理模块. 它控制系统中 EDA 仿真工具和各功能模块的相互调用,对系统需要的大量仿真运算进行协调,管理系统中各功能模块需要创建的输入数据和需要存储的输出数据.

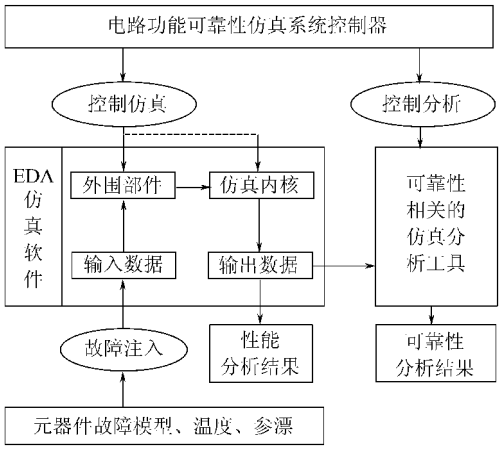

图 1 电路功能可靠性仿真系统结构图

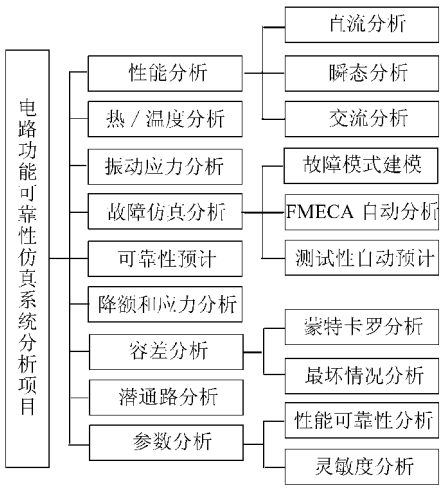

图 2 电路功能可靠性仿真系统分析项目

电路功能可靠性仿真系统中的故障仿真功能是实现电路性能和可靠性一体化分析的关键功能模块,涉及到多项关键的技术方法.

1) 电路可靠性影响因素建模:指元器件故障模式(例如开路、短路、参漂、固高/低电平、逻辑错误、参数退化等)建模和电路板级故障建模,而电路温度和振动应力的分析和建模则利用热分析和有限元分析软件进行.

2) 电路的故障注入:同系统中的 EDA 仿真器的电路功能模型密切相关,一般有代码法、原理图法、信号法、黑盒代换法.

3) EDA 仿真器的集成技术:受限于系统中 EDA 仿真器的具体类型,一般有外围控制和直接内核控制 2 种方式.

4) 故障判定:系统需要分析的电路故障种类众多,只能由计算机进行自动判定,它涉及复杂的信号处理和人工智能技术.

在故障仿真分析过程中一个突出问题是仿真计算时间过长和大批量仿真数据对计算机资源的需求问题. 利用北航可靠性工程研究所研发的CFRSP 系统,对包含约 200 个器件的数模混合电路(含 FPGA)[7] 进行一次性能仿真,在主频 2 GHz 的工作站上进行计算需要约 8 min,并且产生 60 MByte数据,如果该电路需要分析 5 000 个故障模式,则总仿真时间将近 700 h(约 28 d),并产生300 GByte数据. 通常随着电路规模和待分析的故障模式规模的增加,仿真计算时间和数据量会以指数增加,即使采用了系统分层仿真技术,故障仿真在时间和数据存储上的消耗,对于单机系统而言仍无法满足工程应用的需要. 为此本文提出将网格计算技术引入电路功能可靠性仿真系统,作为上述问题一个经济有效的解决方案.

2　网格计算技术

计算网格是一种无缝的、集成的计算和协作环境,它通过协同非集中控制的分布的异构资源,包括超级计算机、大规模存储系统、个人计算机、各种设备等,向用户提供超级计算能力,从而能够以方便的形式解决各种复杂问题[8]. 从 20 世纪 90 年代产生网格计算的概念至今,网格研究日益深入,其应用领域日渐广泛,已形成世界性的网格研究组织,正式的网格标准和协议也在形成. 网格计算技术发展如此迅速,在于它具有独特技术优势,它能够充分发挥网络中各种资源的能力,以较低的成本完成系统目标. 网格作为新一代基础设施,具有以下特点[9]:

1) 异构性:网格包含多种异构资源,除了计算机系统之外还可以是其它设备,它们的规模不同、体系结构和管理策略不同,而且资源间的能力不均衡;

2) 可扩展性:网格系统的规模是动态变化的,会随着各种资源的不断加入,规模不断扩大;

3) 行为不可测性:在计算网格中,资源共享会造成系统行为和性能经常发生变化,导致系统行为是不可预测的;

4) 可适应性:网格资源是动态分布的,网格中资源集合可视为一个虚拟组织(VO),地理上分布的成员(服务提供者和使用者)可以自由加入和退出,因而网格的资源管理或应用必须能动态适应这种不可预测的结构,调用网格中可用的资源和服务来取得最大的性能;

5) 自治性与管理多重性:网格资源是属于某一组织或个人,其拥有者具有完全的控制权,这就是网格自治性,同时网格资源也必须接受网格的统一管理,这种管理是以一种协作的方式进行.

目前具有代表性的网格技术,有 Globus[10]、Vega[11]和 Tyrens 网格等,Globus 发展比较早,技术比较成熟,但是系统规模庞大和复杂,比较适宜于信息共享(信息网格),对于电路功能可靠性仿真系统来讲实用性较差,Vega 和 Tyrens 目前技术发展都不是很成熟,而且 Vega 设计是基于信息网格的体系架构,对于仿真计算,其实用性也较差,Tyrens 网格体系结构简单,功能单一,使得基于 Tyrens 网格技术的系统架构的可塑性强,具有很大伸缩空间.

3　基于网格的 CFRS

3.1　系统体系结构

电路功能可靠性仿真系统(如图 1)中,集成了 EDA 仿真器、热分析软件、机械应力分析软件和多种可靠性分析工具,体系结构复杂,在电路性能和可靠性综合分析过程中需要的计算量和数据存储量巨大,各仿真器和各分析工具之间的数据交换频繁. 为使该系统能够实现工程实用化,本文提出了基于网格计算技术的电路功能可靠性仿真系统的体系结构(如图 3 所示). 其特点是:基于部件化设计模式,以网格平台为基础设施,以电路功能可靠性仿真平台控制器为总体控制,实现对仿真计算和数据存储的分布处理,对 EDA 仿真器与相关分析工具(如热分析软件)的集成.

在该体系中,电路功能可靠性仿真系统在结构上由 3 个部分构成:网格平台、电路功能可靠性仿真平台控制器、EDA 仿真器和相关的分析工具.

1) 网格平台:是基础设施,为电路功能可靠性仿真系统提供一个虚拟的超级计算机系统,仿真计算是利用网格的虚拟计算能力来完成的. 在网格平台控制下,将仿真计算和与仿真数据相关

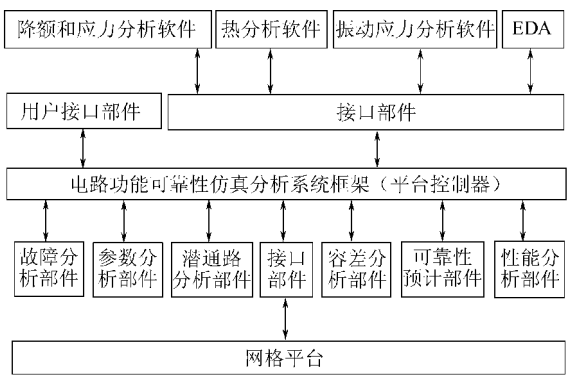

图 3　基于网格的电路功能可靠性仿真系统体系结构

的分析作为网格服务,分布配置在网格中的各个节点上作为网格资源,其中仿真服务实现对网格节点的计算资源和存储资源的共享,而数据分析服务则实现对数据资源(仿真结果数据)的共享.由于仿真数据是在仿真的过程中产生的,因而,在实现仿真计算分布处理的同时也实现了对仿真数据的分布存储.

2) 平台控制器:是系统的神经中枢,完成数据的管理和部件之间的数据传递,作为电路功能可靠性仿真系统的框架,将各种功能部件和工具软件集成在一起.

3) EDA 仿真器和相关分析工具:是系统的功能部件,包括 CFRS 的系统部件和其它软件系统,系统部件之间的交互通过平台控制器进行,其它软件系统与系统部件的交互是通过接口部件和平台控制器的协调完成的.

3.2 仿真服务和数据分析服务

在基于网格的电路功能可靠性仿真系统中,仿真服务实现对网格中计算资源和存储资源的共享.平台控制器给每一个仿真任务都生成一个标识符,然后将该仿真任务提交给网格.网格根据网格中资源的状态,寻找合适的网格节点,然后将该仿真任务提交给该节点上的仿真服务.仿真服务将执行该仿真任务,并将仿真数据存储在本地.此后该仿真数据即可作为网格中的数据资源向用户共享,而且以仿真任务的标识符作为该共享数据的标识符.

在基于网格的电路功能可靠性仿真系统中,数据资源的共享是通过数据分析服务实现的,用户通过网格向共享数据所在节点的分析服务发送任务,分析服务收到任务后,即根据任务的要求对仿真数据进行处理,并将结果返回给用户.图 4 给出了仿真任务请求和数据分析任务请求的处理过程,其中服务 S_1 为仿真服务,服务 S_2 为分析服务.

3.3 数据管理

数据管理是平台控制器实现集成 EDA 仿真器和可靠性相关的分析工具的关键.由于网格的存在,电路功能可靠性仿真系统中的数据被分为本地数据和分布数据 2 种类型进行管理.

1) 本地数据:与用户相关的和工程项目管理相关的数据都必须在本地存放,而且都存放在一个工程文件夹中,用户对该数据具有绝对的控制权,可以实现包括搬移或复制等操作,这类数据包括有:工程文件,元器件故障模式的设定及各种可

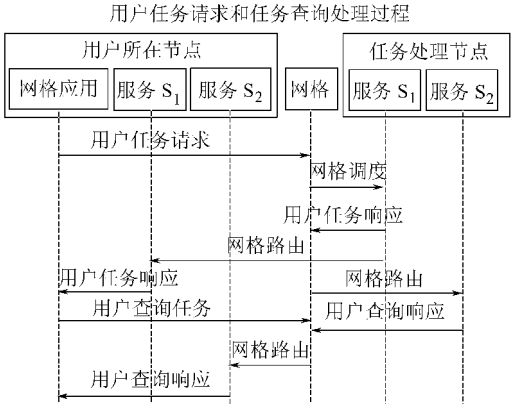

图 4 基于网格的任务处理过程序列图

靠性分析结果等.

2) 分布数据:具有大存储量要求的数据均通过网格进行分布存储,它是工程项目在任务处理过程中的一些中间数据,这些数据具有一定的有效期,在用户彻底放弃这些数据之前,对这些数据需要进行一些操作处理,如数据查询或分析处理等,平台控制器必须对这些数据进行有效的管理,这类数据包括有:电路的仿真结果等.

图 5 给出了基于网格的电路功能可靠性仿真系统的数据管理示意图,对于本地数据,系统框架可以实现对数据的绝对控制,但是对于分布数据,平台控制器必须通过网格实现对数据的管理和访问.在网格中,所有资源包括计算资源和数据资源等,都是以服务的形式进行共享,所以系统框架对数据的管理和访问也是通过网格应用服务实现的.

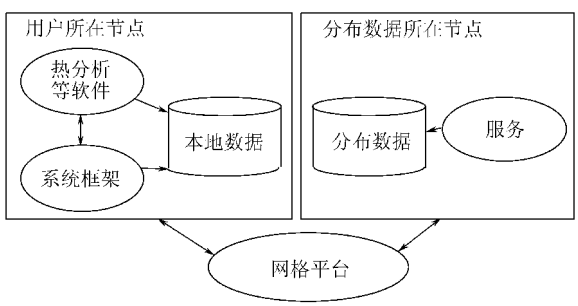

图 5 数据管理示意图

4 TG-CFRS 应用案例

基于文中前述的建立在网格技术基础上的电路功能可靠性仿真系统结构和相关技术,在 CFRPS 平台基础上开发出了基于网格的电路功能可靠性仿真系统的软件原型(即 TG-CFRS).系统组成结构如图 6 所示.

TG-CFRS 以 TyrensGrid 为网格平台,其可靠性综合分析部件可以完成参数分析、容差分析、故

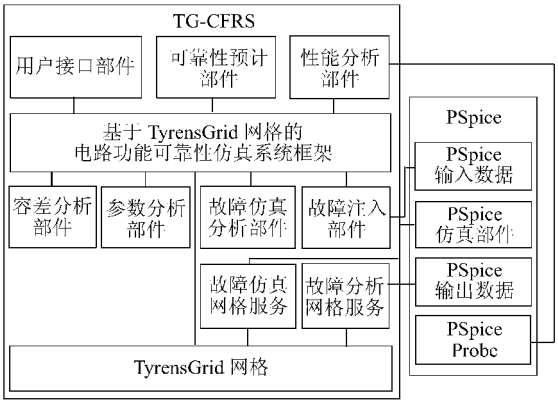

图 6　TG-CFRS 组成结构图

障分析、FMEA 分析、可靠性预计,其性能分析部件和故障仿真部件以 PSpice 为仿真内核,以 PSpice 电路模型为故障注入对象,很好地实现了在正常电路模型基础上对电路指定故障模式的影响分析,其分析能力可以覆盖电路中的几乎所有故障. 整个分析过程可以完全由电路性能设计人员完成,而不必依赖于专业可靠性技术人员,实现了建立电路功能可靠性仿真系统的初衷,充分地体现了产品设计过程中电路性能设计与可靠性设计一体化的思想.

在 TG-CFRS 试验环境中,共有 30 台 PC 机作为 TyrensGrid 网格的节点,在对前文提及电路[7]进行分析时,仅需要不到 36 h 即完成了共 5 000 个模式的故障仿真计算任务. 在基于网格的环境中,将一个大的用户任务分割成一些小的任务,然后分给网格中的每个节点进行处理,除了通信消耗之外,网格的计算能力基本上是各网格节点能力的加和. 由于在故障仿真中通信量比较小,仿真计算时间基本上就是总的任务时间与网格节点数量之比,所以随着网格节点的增多,上述仿真时间会随之减少.

5　结　论

基于 EDA 的电路功能可靠性仿真技术的研究正不断深入,它继承了电路设计分析和可靠性设计分析两大技术领域的研究成果,使它们不断走向融合,为提高电子产品的可靠性提供了新的工具和手段. 在电路功能可靠性仿真系统中引入网格计算技术,是解决系统仿真分析过程中长仿真时间和大数据量存储问题的一种有效方案. 通过 TG-CFRS 案例的应用,表明建立基于网格的电路功能可靠性仿真系统,能使电子产品性能和可靠性综合分析技术真正进入工程实用阶段.

参考文献 (**References**)

[1] 孙宇锋. 功能可靠性仿真技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学工程系统工程系, 2000
Sun Yufeng. Study on functional reliability simulation technique [D]. Beijing: Dept of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000 (in Chinese)

[2] Rao R, Rahman A, Johnson B W. Reliability analysis using the ADEPT-REST interface[A]. In: Loomis R J. Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium[C]. Anaheim, California: IEEE, 1994. 73 ~ 81

[3] Dugan J B, Venkataraman B. DIFtree: a software package for the analysis of dynamic fault tree models[A]. In: Mcafee N J. Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium [C]. Philadelphia, Pennsylvania:IEEE, 1997. 64 ~ 70

[4] Sun Yufeng. Circuit integrated design of performance and reliability based on EDA[A]. The 6th International Conference on Reliability Maintainability & Safety[C]. Beijing: Hua Xia Publishing House, 2004. 446 ~ 452

[5] Palumbo D L. Automating failure modes and effects analysis [A]. In: Loomis R J. Proceeding of the Reliability and Maintainability Symposium[C]. Anaheim, California: IEEE, 1994. 304 ~ 309

[6] Yellman T W. Event-sequence analysis[A]. In: Webster L R. Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium [C]. Washington, DC: IEEE, 1975. 286 ~ 291

[7] Zhao Guangyan, Wu Yue, Sun Yufeng. Circuit fault simulation based on EDA[A]. The 6th International Conference on Reliability Maintainability & Safety[C]. Beijing: Hua Xia Publishing House, 2004. 784 ~ 779

[8] Foster I, Kesselman C. The grid: blueprint for a new computing infrastructure[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998

[9] 都志辉, 陈　渝, 刘　鹏. 网格计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
Du Zhihui, Chen Yu, Liu Peng. The grid computing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese)

[10] Foster I, Kesselman C. Globus: a metacomputing infrastructure tookit[J]. International Journal of Supercomputer Applications, 1998, 11(2):115 ~ 129

[11] 徐志伟, 李晓林, 游赣梅. 织女星信息网格的体系结构研究[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(8):948 ~ 951
Xu Zhiwei, Li Xiaolin, You Ganmei. The research on architecture of Vega information grid[J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(8):948 ~ 951(in Chinese)