

文章编号: 1001-2486(2003)01-0072-06

基于领域知识的仿真策略及其在可靠性设计决策中的应用*

张明, 谢红卫, 周宗潭

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 在可靠性工程的需求驱动下, 提出了一种描述性的模型框架:“功能仿真模型”。该模型既明确引入了反映系统工作原理的性能领域知识, 又能刻画系统的功能逻辑关系, 还能建立性能与功能的联系。在此基础上给出了可操作的、基于领域知识的仿真策略——在性能仿真基础上进行功能推理。最后讨论了该仿真策略在可靠性工程中的应用途径。

关键词: 领域知识; 仿真; 可靠性设计

中图分类号: TB114.3; TP391.9 **文献标识码:** A

Domain-knowledge-based Simulation Strategy and Its Application in Reliability Design

ZHANG Ming, XIE Hong-wei, ZHOU Zong-tan

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Urged by the request of the reliability engineering, the function simulation models are proposed and discussed. This kind of model can not only describe how the system works, but also discover the functional logical relations of the system and the connections between the performance and function. Moreover, the simulation strategy based on function simulation models is given in detail. Finally, the paper illustrates how the domain-knowledge-based simulation strategy can be applied to the reliability engineering.

Key words: domain knowledge; simulation; reliability design

在可靠性工程技术的发展历程中, 可靠性设计分析技术与性能设计分析技术是相对独立的技术体系。随着数字技术的迅速发展和广泛应用, 系统日趋复杂化和综合化, 对系统可靠性的要求也越来越高, 使得二者的分离越来越成为一种突出的矛盾, 尤其使得传统的基于结构化模型的可靠性设计分析技术(故障树分析 FTA, 事件树分析 ETA, 可靠性框图分析等传统可靠性设计分析技术^[1]的处理过程如图 1 所示)不能满足于复杂技术系统的需要。这就要求在理论上探讨新的复杂技术系统的建模技术, 研究新的可靠性设计分析技术, 以综合考虑可靠性设计分析技术与性能设计分析技术。

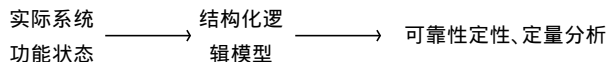


图 1 传统可靠性设计分析技术的处理过程

Fig. 1 Processing procedure of traditional reliability design analysis techniques

国内外的许多研究人员及机构都开展了相关的研究: 20 世纪 90 年代兴起的功能化建模方法 (Functional Modelling Method) 为复杂技术系统尤其是人机系统提供功能建模的强有力工具, 其中较为典型的有多层流图建模 MFM^[2] (Multilevel Flow Modeling) 方法、目标树—成功树 GTST^[3] (Goal Tree-Success Tree) 方法和 HMG^[4] (Hybrid MFM-GTST) 方法等; Virginia 大学的 Johnson 等以容错数字电路

* 收稿日期: 2002-05-10

基金项目: 国家部委项目基金资助

作者简介: 张明(1970—), 男, 副教授, 在职博士生。

为对象,提出的先进设计环境原型工具 ADEPT^[5~6] (Advanced Design Environment Prototype Tool), 可以在设计阶段对产品的性能及可靠性的一体化分析与权衡; Kaman Science Corporation 研究的 Go 法^[7]、日本舰船研究院的 Mastuoka 和 Kobayashi 在 Go 法基础上研究的 Go-Flow 分析法^[8] 以及 Yellman 和 Jackson 等研究的事件序列分析法^[9~10], 都易于利用系统的功能特点去建立系统的可靠性分析模型, 从而在性能设计与可靠性设计中建立了方便的桥梁; 美国 Duke 大学的 Dugan 等人研制的 DIFtree^[11] (Dynamic Innovative Fault Tree) 方法, 通过引入动态故障树的概念, 从而达到了对动态容错系统进行功能建模与分析的目的; NASA 兰利研究中心的 Palumbo 等人采用对系统结构描述及组成单元特性描述的方式来建立功能模型, 从而可利用逻辑推理的方式自动完成故障影响分析^[12~15]; 北京航空航天大学可靠性工程研究所的孙宇锋等人对功能可靠性仿真的内涵与相关机理进行了综述^[16~17], 并在对高级 Petri 网加以扩展的基础上, 提出了功能可靠性仿真的通用模型 FraNets 及其描述方法, 并对功能可靠性仿真的内涵与相关机理进行了综述。

本文则在系统考察并借鉴知识建模技术^[18] 和人工智能领域的本体论理论^[19] 的基础上, 构造了一种描述性的模型框架——“功能仿真模型”, 以充分描述系统的性能工作原理(行为知识)、系统结构关系(结构知识)、系统功能关系(功能知识)等多方面的知识以及性能与功能之间的关系, 并提出了可操作的基于领域知识的仿真策略——在性能仿真基础上进行功能推理。与文献^[12~14] 提出 FMECA 自动化技术相比, 从分析的基础看, 提出的功能仿真模型具有更强的领域知识描述能力; 从分析的策略上看, 基于功能仿真模型的逻辑推理是建立在性能仿真的基础之上的。

1 功能仿真模型的对象描述及说明

1.1 功能仿真模型的对象描述

功能仿真模型由部件级的功能仿真模块 CFMSM 和系统级的功能仿真模块 SFMSM 等两类模块构成, 这两类模块可分别定义如下:

(1) 部件级的功能仿真模块 CFMSM

$$CFM = \{I, O, Fstate, FsTPF, IFsF, IOBMS\}$$

其中:

I: 输入变量集, 流入该模块的性能数据;

O: 输出变量集, 流出该模块的性能数据;

Fstate: 功能状态变量, 本模块的功能状态(可以细化成不同故障模式或现象);

FsTPF: 功能状态转移概率函数;

IFsF: 输入—功能状态函数, 刻画了本模块输入变量 I 如何影响功能状态的领域知识, 是由性能分析支持功能分析的一条途径;

IOBMS: 不同状态下的输入输出模型集, 刻画了在不同功能状态下输入变量向输出变量转换的领域知识。

(2) 系统级的功能仿真模块 SFMSM

$$SFM = \{I, O, C, Fstate, IFsF, GFF, Links, FM_s\}$$

其中:

I: 输入变量集, 流入该模块的性能数据;

O: 输出变量集, 流出该模块的性能数据;

Fstate: 功能状态变量, 本模块的功能状态(可以细化成不同故障模式或现象);

IFsF: 输入—功能状态函数, 刻画了本模块输入变量 I 如何影响功能状态的领域知识, 是由性能分析支持功能分析的一条途径;

GFF: 广义功能函数, 刻画了下级模块的功能状态对本级模块功能状态的影响规律;

Links: 刻画的是下级模块的输入输出变量与本模块的输入输出变量之间的连接关系, 以及下级模块之间的输入输出连接关系;

FM_s: 下级功能仿真模块集。

1.2 关于功能仿真模型的补充说明

(1) 功能仿真模块的数据可以分为两大类: 一类是与系统工作流程有关的性能变量, 包括输入变量 I、输出变量 O 等; 另一类是与系统可靠性分析紧密联系的功能状态变量 F_{state} 。

(2) 输入变量集 I/ 输出变量集 O: 逻辑变量或者是实际物理变量。例如: 在弹性联轴器的功能模型中, 力矩和转速可以定义为偏高、正常和偏低等逻辑变量, 也可以定义为真实的物理量。

(3) F_{state} : 只能是逻辑变量。功能状态的内涵和数目可以根据认识的深浅程度进行调整, 但在广义功能关系中要保持内涵的一致性。

(4) IFsF: 是把性能与功能联系起来的桥梁。还需要指出的是: 输入- 功能状态函数是开放的, 允许用户随着认识的深化来扩充输入功能函数表达领域知识的能力。

(5) GFF: 与传统可靠性分析方法中的结构函数、广义逻辑函数相似, 反映了下级模块功能状态对本级模块功能状态的影响关系, 但由于功能状态变量 F_{state} 能更细致地刻画失效模式, GFF 也能更明确地标识失效路径。进一步, GFF 允许扩充功能状态的数目, 同时也只需要描述确认正确或有把握的逻辑关系, 而不苛求逻辑关系的完备性。

(6) IOBMS: 刻画的是如何把输入转化为输出的性能模型, 它源于系统工作原理, 是性能仿真的基础。

(7) F_{sTPF} : 功能状态转移概率函数, 表达的是底层部件功能状态之间的转移概率。

(8) 从上至下地定义功能仿真模块, 便能完整定义系统的功能仿真模型。通过 Links 和 BM (横向) 联系各级模块的性能数据 I、O, 便能全面描述系统的工作原理, 并在此基础上进行功能仿真; 通过 GFF (纵向) 描述下级模块功能状态变量与上级模块功能状态变量 FS 的功能关系, 便能描述系统的功能关系, 并能从下至上地进行功能推理。

(9) 因为在功能仿真模型中, 可采用树型结构来描述结构知识, 所以可借助树型结点的概念来定义功能模块的级数和功能仿真模型。n 级功能模块和 n 级功能仿真模型可定义为: 对于 $n > 2$, 如果一个功能模块的结点至少要经过 $(n-2)$ 个结点才能与根结点相连, 那么称该模块为 n 级功能模块; 如果一个功能仿真模型中所有功能模块的级数的最大值为 n, 那么称该功能仿真模型为 n 级功能仿真模型。

2 基于功能仿真模型的仿真策略

2.1 基于功能仿真模型的仿真步骤

(1) 根据要求选择适当的功能仿真模型;

(2) 生成功能仿真模型实例: 设定系统输入函数、功能状态的初始值、功能状态转移的概率函数等模型边界条件以及仿真总时间、仿真周期和仿真终止条件等仿真边界条件, 并把输入输出行为模型转化为相应的脚本程序。

(3) 实施仿真试验: 对仿真模块进行排序, 生成仿真模块序列, 运行仿真实例。有两种方式终止仿真试验: 设定的仿真时间已到, 终止试验; 运行过程中, 符合仿真结束条件。

(4) 存储与管理仿真结果, 以备决策使用。

2.2 运行仿真实例

运行仿真实例是整个仿真的关键步骤, 下面从三个方面作如下说明: 功能模型的模块排序算法是依据性能数据的输入输出关系 (Links) 对 n 级功能模型进行模块排序, 是为简化运行仿真实例的调度算法服务的; 在一个时钟周期内, 仿真实例的运行可以分为: 性能仿真计算、数据更新以及功能推理和条件判断等三个阶段; 运行仿真实例的结果包括定性和定量结果, 将以直线行驶的履带车辆系统为例, 说明如何利用仿真结果。

2.2.1 功能模型的模块排序算法

算法 1: 对二级功能模型进行模块排序的算法

记部件级模块序列为 $MS1$, 子级功能模块集的随机排序为 Set 。

(1) 把父级(1-级)功能模型 P 作为仿真模块序列 MS 的第 1 个模块。

(2) 对子级功能模型模块进行排序,并添加到 MS 中。

①如果 Set 非空,则从 Set 中取出第一个功能模块 M,转下一步②;否则转④

②如果 M 的输入变量只与序列 MS 中的父级模块的输入以及 Order 中已有的本级模块的输出有连接关系,那么把该模块添加到序列 MS 的后面,并从 Set 中删除 M,然后转①;否则转③。

③把 M 放在随机序列 Set 的最后,并转①。

④步骤(2)结束,转步骤(3)。

(3) 把 P 从 MS 中删除,即完成排序。

注:算法 1 是依据性能数据的输入输出关系(Links)对二级功能模型进行模块排序,是算法 2 的基础。

算法 2: 对 n 级功能模型进行模块排序的算法

令 Order(i) 为 n 级功能模型的 i 级模块序列,其中初始条件: $i=1$, Order(1), Order1 为仅含一个根结点功能模型的模块序列。

(1) 如果 $i > n$, 转最后一步(5); 否则转下一步(2)。

(2) 对于 Order(i) 中的所有第 i 级功能模型模块 {M} 进行如下操作:

①如果该模块 M 是系统级的功能模型,那么调用算法 1,生成相应的子序列 MS;

②如果该模块 M 是部件级的功能模型,那么生成相应的子序列 $MS=M$ 。

(3) 对于 Order(i) 中的所有第 i 级功能模型模块 M,用相应的子序列代替 MS,生成 Order(i+1) 序列;

(4) $i=i+1$, 转(1);

(5) 结束, Order(i) 即为 n 级功能模型的 i 级模块序列, Order1=Order(n) 即为部件级模块序列。

注:算法 2 是以算法 1 为基础,它是依据性能数据的输入输出关系(Links)对 n 级功能模型进行模块排序。算法 2 本质上是简化运行仿真实例的调度算法服务的。

2.2.2 运行仿真实例的算法说明

在一个时钟周期内,仿真实例的运行可以分为数据更新、功能推理及条件判断、性能仿真计算等三个阶段。

(1) 数据更新阶段:调用模块排序算法,依据初值(或上个时钟的计算结果)和 Links 依次对每个模块的输入性能数据进行更新;并依据每个模块的当前输入和输入-功能状态函数对功能状态进行更新。

(2) 功能推理及条件判断阶段:设 $i=0$ 。

① $i=i+1$, 如果 $i > n$, 那么转④; 否则转下一步。

②依据第 i 级模块功能状态和对应的 GFF 函数,从下至上地推演系统级模块的功能状态,判断系统是否失效? 是,转下一步; 否则转①。

③仿真终止,并记录失效路径。

④系统正常,进入性能仿真阶段。

(3) 性能仿真阶段:依据每个部件级模块的功能状态,选择对应的行为模型 IOBM;再依据(1)中获得的输入进行仿真计算,本仿真周期结束。进入下一个仿真时钟周期。

2.2.3 仿真结果的说明

运行仿真实例可分为两种模式:一次仿真模式和多次仿真模式。下面结合直线行驶的履带车辆系统(如图 2 所示)来说明这两种模式的运行结果:

(1) 一次仿真模式:设定仿真边界条件(仿真步长、仿真总时间、系统输入函数、部件级功能状态的修改规则、仿真终止条件为系统失效等)进行仿真。当仿真因系统失效而终止时,将输出系统失效路径。例如在履带车辆系统的仿真试验中,可以表现路况恶劣引起的失效、离合器断裂引起的功能失效、驾驶员操作不当引起的操作失效等。

(2) 多次仿真模式:设定仿真边界条件(仿真步长、单次仿真总时间、系统输入函数、部件级功能状态

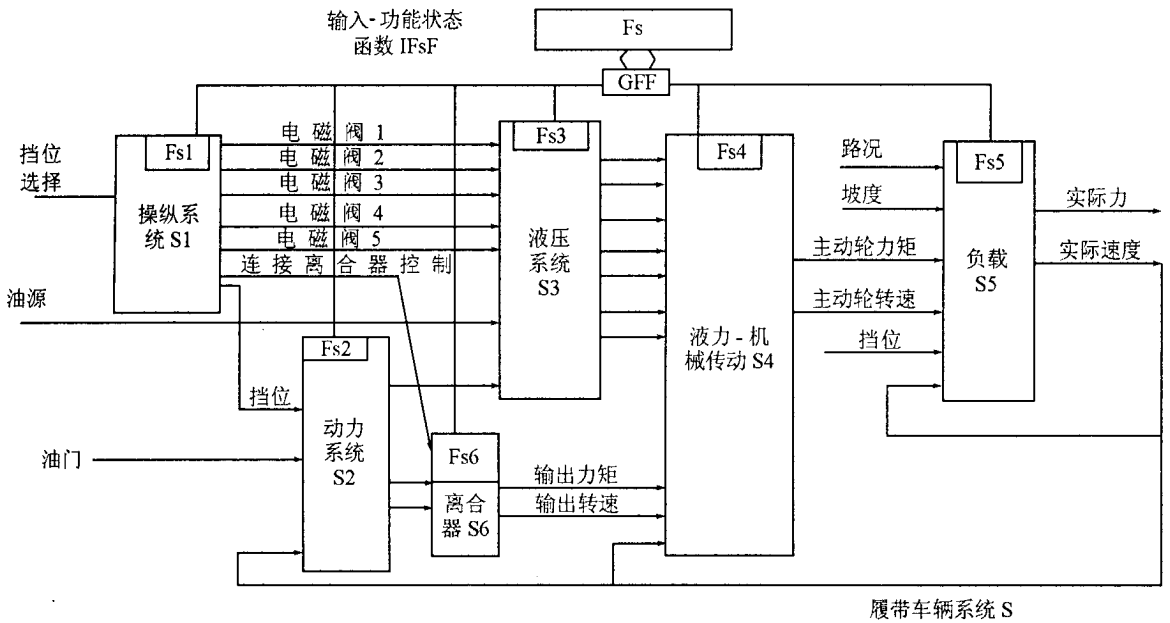


图 2 履带式车辆系统级模块

Fig. 2 System-level module of tracklayer

的修改规则、单次仿真终止条件为系统失效、仿真次数等) 自动进行多次仿真, 并最后输出统计结果。例如在履带式车辆的多次仿真试验中, 可以假定典型路况作为固定的边界条件, 自动记录每次的失效时间和行驶路程, 并计算统计结果: 平均失效时间和平均无故障里程。把这些统计数据与设计指标(如维修性要求)比较, 看是否满足设计要求, 便可以为设计决策服务。

3 仿真策略在可靠性工程中应用

如图 3 所示, 功能仿真策略在可靠性设计决策中的应用思路是: (1) 建立典型系统的功能模型: 针对典型系统的具体特点和系统在全寿命周期的阶段, 结合已经掌握的典型系统的领域知识, 建立典型系统的不同细化程度的功能仿真模型; (2) 基于功能模型的仿真: 根据典型系统所处全寿命周期阶段的任务需求, 设定边界条件(初始状态条件、系统输入函数和仿真结束的边界条件), 从而生成相应的功能仿真模型实例, 并在此基础上进行仿真试验; (3) 仿真结果在设计决策中的应用: 仿真试验的结果作为反馈信息, 为系统设计提供决策依据: 判断有无明显缺陷? 有, 否决设计方案, 重新设计; 否则, 进一步深化设计

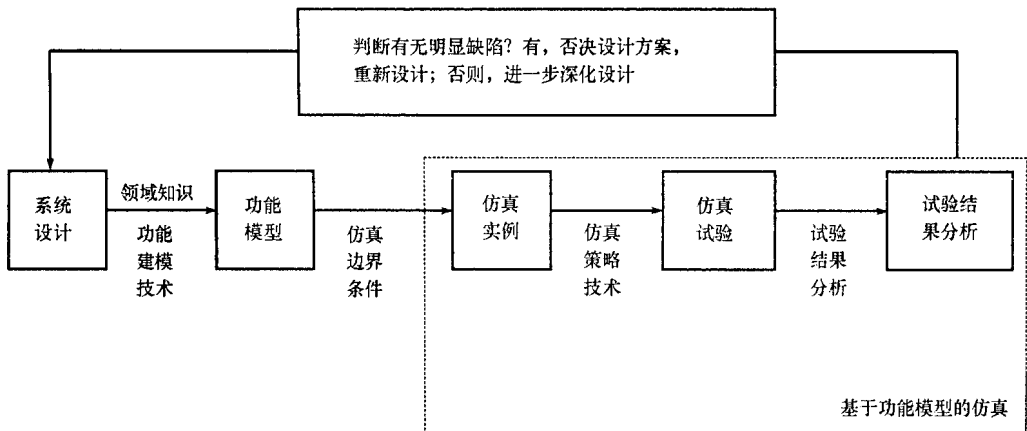


图 3 基于 FSM 策略在可靠性设计决策中的应用

Fig. 3 Applying FSM-based strategy to reliability design decision

计。

4 小结

本文借鉴人工智能和计算机科学的概念方法,根据可靠性工程的需要,提出了功能仿真模型(FSM),并在此基础上提出了基于FSM的仿真策略。该策略的优点在于:(1)功能仿真模型中既明确引入了反映系统工作原理的性能领域知识,又刻画了系统的功能逻辑关系,并建立了性能与功能的联系,所以该模型可成为领域工程师与可靠性工程师的交流平台;(2)不刻意要求领域知识是完备的,允许用户在已有的领域知识条件下分析演绎,这样,在信息不完备的条件下,也可以尽早发现潜在的问题,证伪某些不合理的设计方案;(3)在该仿真策略中,无论输入输出行为模型是定性的还是定量的,都可以转化脚本程序来演绎,从而拓展了仿真分析能力。

参考文献:

- [1] 陆廷孝,郑鹏洲主编. 可靠性设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [2] Lind M. Modeling Goals and Functions of Complex Industrial Plants[J]. Applied Artificial Intelligence, 1994, 8(2): 259- 83.
- [3] Modarres M. Functional Modeling of Complex Systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 64: 135- 136.
- [4] Jalashgar A. Goal-oriented System Modelling: Justification of the Approach and Overview of the Methods[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 64: 271- 278.
- [5] Cutright E D, Johnson B W. A Simulation-based Approach to Integrated Performance & Reliability Modeling Using VHDL[C]. In Loomis RJ. Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium. Anaheim, California. IEEE. 1994: 402- 408.
- [6] Rao R, Rahman A, Johnson B W. Integrated Performance and Dependability Analysis Using the Advanced Design Environment Prototype tool ADEPT[R]. AIAA- 95- 0999- CP, New York: AIAA 1995.
- [7] Kent. Go Methodology (Volume 1: Overview Manual)[R]. EPRI NP- 3123- CCM. Washington, DC: EPRI, 1983.
- [8] Mastuoka T, Kobayashi M. An Analysis of a Dynamic System by the G-flow Methodology[J]. Nuclear Science and Engineering, 1988, 98: 64- 78.
- [9] Yellman T W. Event-sequence analysis[C]. In: Webster LR. Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium. Washington, DC., IEEE. 1975: 286- 291.
- [10] Jackson T. How to Use Event Sequence Analysis for Supporting Concurrent Engineering[R]. AIAA- 92- 0973, New York: AIAA 1992.
- [11] Dugan J B, Bavuso S J, Boyd M A. Fault Trees and Sequence Dependencies[C]. In: Coppola A., Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium. Los Angeles, California, IEEE. 1990: 286- 293.
- [12] Palumbo D L. Using Failure Modes and Effects Simulation as a Means of Reliability Analysis[R]. NASA TP3242. August, 1992.
- [13] Palumbo D L. Automating Failure Modes and Effects Analysis[C]. In: Loomis RJ Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium, Anaheim California, IEEE 1994: 304- 309, New York: AIAA 1995.
- [14] Prince C J, Pugh D R, Wilson M S, Snooke N. The Flame System: Automating Electrical Failure Modes & Effects Analysis (FMECA)[C]. In: Wollner JL. Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium. Washington, D C, IEEE 1995: 90- 95.
- [15] Russomanno D J, BOWLES J B, Bowles J B. A Black Model of an Expert System for Failure Mode and Effects Analysis[C]. In : Sackett RE. Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium. Las Vegas, Nevada. IEEE, 1992: 483- 490.
- [16] 孙宇锋,屠庆慈,杨为民. 功能可靠性仿真研究[J]. 航空学报, 1999, 20(6): 509- 513.
- [17] 孙宇锋. 功能可靠性仿真技术研究[D]. 北京航空航天大学, 2000.
- [18] Chittaro L, Guida G, Tasso C, Toppano E. Functional and Teleological Knowledge in the Multimodeling Approach for Reasoning About Physical Systems: A Case Study in Diagnosis [J]. IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(6), 1718- 1751.
- [19] Chandrasekaran B, Josephson J R. What Are ontologies, and Why Do We Need Them? [J]. IEEE Intelligent Systems, 1999: 20- 26.