

复杂机电产品动态可靠性建模理论与方法研究

苏 春,许映秋

(东南大学 机械工程学院,江苏 南京 210096)

摘要:分析传统可靠性建模方法在描述时间及系统动态过程等方面存在的缺陷,研究了影响系统动态可靠性的各种因素,给出动态可靠性的定义及理论体系。在评述已有动态可靠性建模方法的特点及其应用的基础上,提出复杂系统动态可靠性建模的发展方向。

关键词:动态可靠性;建模;故障;Petri 网

中图分类号:TB114.3

文献标识码:A

文章编号:1672-1616(2006)09-0024-04

可靠性(Reliability)从研究如何提高武器装备的出勤率和可维护性起步,已有60多年历史。美国等工业发达国家始终重视可靠性理论和实验研究,尤其在航空、航天、电子等领域,并获得良好回报^[1]。

目前,可靠性指标数值已经成为企业必须提供的产品基本数据,如平均首次失效时间(Mean Time To Failure, MTTF)、平均无故障工作时间(Mean Time Between Failures, MTBF)等。经验表明,高可靠性的产品是提升品牌价值和提高企业市场竞争力的有效途径。

随着产品功能和结构的复杂化以及人们对产品可靠性要求的提高,传统可靠性建模方法面临挑战。近年来,动态可靠性(dynamic reliability)建模理论受到人们的高度重视。

1 传统可靠性建模方法存在的缺陷

传统可靠性建模方法主要有故障模式及其影响/危险程度分析(Failure Mode and Effect/Criticality Analysis, FMEA/FMECA)、可靠性框图(Reliability Block Diagram, RBD)、故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)、事件树(Event Tree, ET)等^[1]。其中,FMEA/FMECA表达不够严密,容易产生歧义;RBD只能从宏观上描述零部件的串并联等关系;FTA、ET等则是基于交、并、差等布尔运算(Boolean Operation)来描述系统零部件故障之间的因果关系。

此外,传统可靠性建模方法在描述时间、动态

过程等方面存在困难,在模型精确化等方面存在缺陷,具体表现如下:

a. 由应力-强度干涉模型可知,产品可靠度是强度大于应力的概率,即 $R = P(S > s)$,其中, R 表示产品可靠度; P 表示强度大于应力的概率; S 表示强度; s 表示应力。

由于强度、应力以及零件尺寸等工程变量具有随机性,多数工程变量的数值随时间而变化。例如,因疲劳、磨损和腐蚀造成的机械强度下降,电绝缘强度随时间和外界应力的变化等。因此,产品可靠性必然是时间的函数,并呈现出显著的动态性。

b. 机电产品运行是典型的动态过程,载荷、工况、应力等运行环境及参数都是时间的变量。科学技术的交叉集成使得机电产品日趋复杂,人-机-环境以及系统软硬件之间相互作用、相互影响,产品可靠性的动态性、相关性和随机性特征日益明显。

c. 随着产品的复杂化,人的可靠性对产品的使用可靠性影响更加显著。此外,软件可靠性也是影响复杂机电产品可靠性的重要因素。

d. 传统可靠性分析采用割集等概念描述系统故障逻辑或故障模式,难以准确描述和计算子系统故障状态的依赖性和传递性,也不能准确描述部件故障对产品可靠性的定量影响。此外,传统可靠性建模方法难以实现对容错系统、冗余系统、可修复系统等动态随机故障的精确计算,使得可靠性计算值与实际系统相差甚远。

总之,传统可靠性理论缺乏有效的建模工具,

收稿日期:2006-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50405021)

作者简介:苏 春(1970-),男,安徽全椒人,东南大学副教授,博士,主要研究方向为可靠性工程、制造系统建模及仿真等。

在很大程度上制约了产品可靠性的提高。可靠性研究开始从单纯的静态可靠性向产品全生命周期(设计、制造、使用、维护和报废)等动态可靠性转变。

2 动态可靠性的基本概念

目前,动态可靠性还没有形成统一的定义。但是,文献中的相关论述有助于我们了解动态可靠性的概念及特点:

a. 动态可靠性方法提供了一个框架,以便明确地记录时间及进程动态性对系统状况的影响,并由此实现可靠性研究重点从“分析者(analyst)”向“方法论(methodology)”转变^[2]。

b. 动态可靠性考虑故障传播过程中事件发生的顺序和时间、转换率的相关性和状态变量值的失效标准以及人因的作用^[3]。

c. 动态可靠性与传统静态可靠性的最大区别在于:动态可靠性认为系统失效等事件的发生不仅仅是由基本事件的静态逻辑组合而导致,基本事件对系统失效的影响可能依赖于其他事件是否发生以及发生的时序等^[4]。

d. 动态可靠性是指在规定的服役期限内,在正常

使用和正常维护条件下,考虑环境和结构抗力衰减等因素的影响,结构服役某一时刻后在后续服役基准期内完成预定功能的能力^[5]。

e. 动态系统是人-机-软件构成的系统,它对初始摄动的响应包括随时间变化的元件之间的相互作用以及与环境的作用。动态可靠性以概率方法研究受底层物理进程影响的人-机-软件系统^[6]。

综上所述,我们给出动态可靠性的定义:动态可靠性是研究受底层部件动态特性影响的人-机-软件系统动态行为的概率方法。其中,“动态”强调系统中包含动态性,包括失效、维修、控制和运行等活动。

3 动态可靠性的理论体系研究

目前,由机械、电子、液压、软件等功能部件的集成已成为产品开发的重要趋势。不考虑动态性将难以得到产品准确的可靠性数据。近年来,动态可靠性建模理论受到重视。人们从动态可靠性的定义、建模工具、计算和输出等角度开展研究,逐步形成动态可靠性理论体系如图1所示。

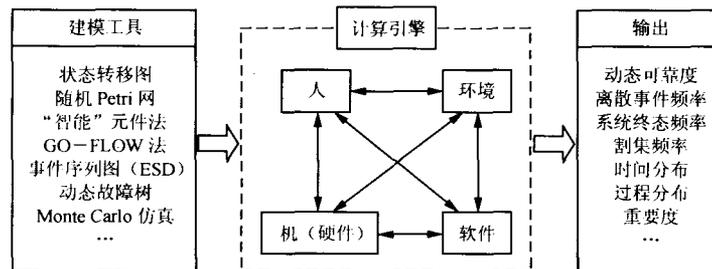


图1 动态可靠性理论体系

其中,建模工具是动态可靠性研究的关键和难点所在。目前,支持系统动态可靠性建模的主要方法有:

a. 状态转移图。

状态转移图(State Transition Diagram, STD)认为:系统中的每个实体都按照各自规律发生状态的循环变化,如静止、活动等。STD以特定的图形表示系统中每个实体的状态以及各状态之间的转移概率。

STD可以描述动态系统的状态转移过程,灵活性较好。但是,它存在以下缺点^[2]:(1)状态空间的爆炸问题,建模过程繁琐,且容易出错。(2)当系统状态空间较大时,状态转移图的可读性下降,

状态空间的确定和系统特性的分析困难。

b. GO-FLOW法。

GO-FLOW法源自GO法。20世纪60年代,美国能源公司率先将GO法用于核电站安全问题分析^[4]。GO-FLOW法从系统能正常工作的角度来描述系统,是一种以系统成功为目标的可靠性分析方法。采用GO-FLOW法时,首先要创建系统的GO-FLOW模型,GO-FLOW模型与系统的物理布局有关,可以由工程设计图直接构造而成。图2为GO-FLOW法建模的部分符号。图3为同一制造系统可靠性框图(RBD)、故障树模型(FTA)以及GO-FLOW模型之间的等价转换。

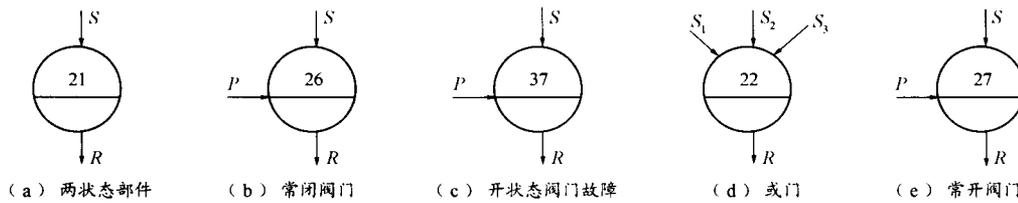


图2 GO-FLOW法建模的部分符号

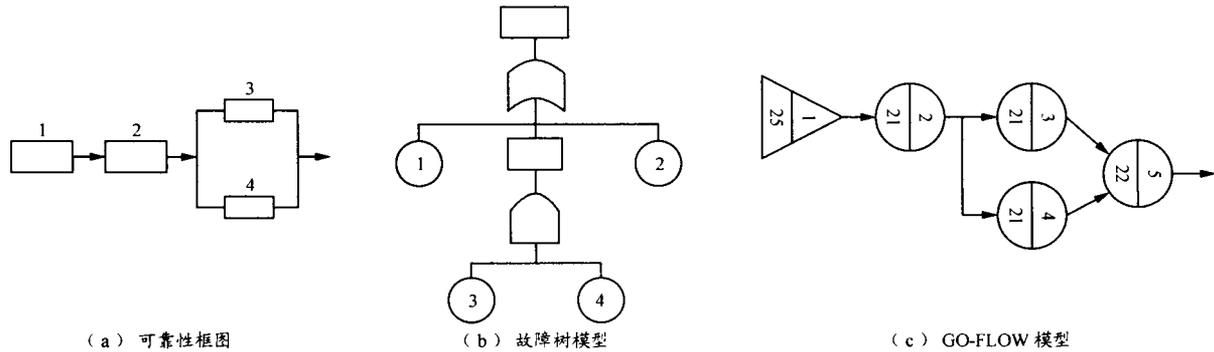


图3 GO-FLOW法与RBD、FTA模型的转换

与FTA相比,GO-FLOW法模型更加紧凑,且具有易于修改、核实等优点,在多状态、时序性和流程性系统可靠性分析方面具有优势。但是,GO-FLOW法是基于实体组件的图形表示法,不能提供系统状态场景的直观描述。由于GO-FLOW模型需要涵盖系统的所有状态,且没有分层图,在描述表决系统时较为繁琐。此外,当系统实体数目增加时,也存在组合爆炸问题。GO-FLOW法在核电站、船舶反应堆等领域得到应用^[7,8]。目前,已经出现商品化GO-FLOW法分析软件^[2]。

c. 智能组件法。

面向对象方法在软件工程领域得到广泛应用。近年来,面向对象的建模原理开始在可靠性分析领域得到重视^[9]。智能组件法(smart components)是一种面向对象的图形化可靠性建模方法,它将系统中的组件(component)定义为对象,对象具有自身属性(如状态、特性)和方法。

采用智能组件法分析系统时,先要建立组件库。利用组件库,可以创建对象的实例,根据组件之间的内在关系,编制仿真程序计算系统的所有状态及其稳态概率。

智能组件法的优点是:组件库一旦建立即可重复使用;更换或添加组件时,系统模型的更新也很方便,只需要修改对象属性或在组件库中添加新的对象即可。此外,智能组件法与马尔科夫(Markov)法的结合使用也是动态可靠性研究的重要发展方向。

d. 动态故障树。

传统故障树(FTA)缺乏对系统动态特性的描述能力。动态故障树(Dynamic Fault Tree, DFT)通过引入表征动态特性的新的逻辑门类型来描述底事件和顶事件之间动态、时序的逻辑关系。常用的逻辑门有功能触发门、优先与门、顺序门、冷储备门等如图4所示。

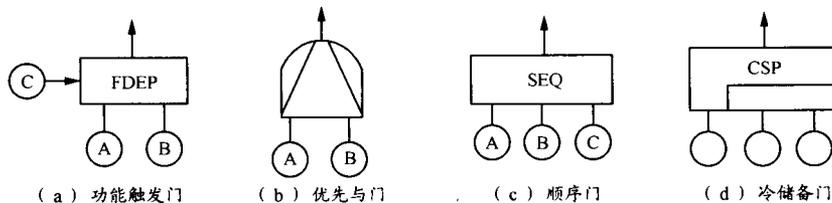


图4 动态故障树中常用的逻辑门

DFT已用于多种动态系统(如空间站、交通控制系统、核电站等)的可靠性分析。例如,文献^[10]将动态故障树应用于核电站的可靠性安全评估,成

功地降低了系统的风险系数。文献^[11]中介绍了动态故障树建模与分析软件Galleo。此外,动态故障树与马尔可夫链法的结合使用,有效地提高了

FTA 对动态系统建模分析能力^[12]。

e. 随机 Petri 网。

Petri 网理论兼有图形化建模能力和数学计算能力,着眼于系统中的各种状态及其动态变化之间的关系,已成为研究离散事件动态系统(DEDS)的有力工具^[13]。

1980年,Molly提出了随机 Petri 网(Stochastic Petri Nets,SPN)的概念,引起人们的极大关注^[14]。SPN 从概率论角度研究系统的性能,通过建立系统的随机状态空间和马尔可夫链,从统计意义上计算系统各状态出现的概率和持续时间,为动态可靠性研究提供了理想的建模和分析工具。

f. 事件序列图法。

事件序列图(Event Sequence Diagram,ESD)也称为广义事件树,是一种可视化建模方法。它的基本元素有事件(event)、条件(condition)、门(gate)、过程参数集(process parameter sets)、约束条件(constraints)/边界(boundaries)以及从属规则(dependency rule)等^[6]。

ESD 可以描述初始事件可能的演变过程,精确地描述系统状态,揭示过程变量、系统软硬件的状态。目前,该方法已经在航天飞机、太空望远镜、核工业以及化学工业的故障和风险分析中得到应用。

g. 动态逻辑分析方法。

动态逻辑分析方法(Dynamic Logical Analytical Methodology,DYLAM)是一种连接概率和系统物理行为的工具,它用数值仿真程序描述物理系统的部件及其各种工作状态(如正常、失效)。编译仿真程序,使之成为 DYLAM 的子程序;设定部件的初始状态,给出部件的时间循环和运行逻辑,就可以驱动仿真程序,计算出系统的顶条件(top condition)。DYLAM 可以视为由事件树和故障树互补而形成,顶条件的含义与事件树或故障树中的顶事件相类似。

DYLAM 方法已经成功用于 Boeing747 降落程序的动态可靠性分析。此外,DYLAM 还应用于核、化学和航空等工业领域^[15]。

h. Monte Carlo 仿真。

20世纪40年代, Monte Carlo 仿真首先应用于核武器研制。它以统计抽样理论为基础,产生随机数,并通过随机变量统计、抽样实验或随机模拟,以统计特征量作为待解问题的数值解^[2]。实践证明,数值仿真是复杂系统性能分析的有效方法,利用蒙特卡罗方法可以模拟系统的寿命过程,分析系

统的可靠性特征。

蒙特卡罗方法的突出优点是:对问题的维数不敏感,对故障分布规律没有严格的要求,适用于任意网络结构。因此,它特别适用于解决高维、非马尔可夫问题以及难以用确定性方法分析的复杂系统。对系统动态可靠性而言, Monte Carlo 仿真具有重要的应用价值^[16]。

上述动态可靠性建模方法各有特点,集各方法之所长、实现集成化应用是动态可靠性建模的重要趋势。

4 结束语

可靠性建模理论及其工程应用曾经极大地促进了世界工业的进步。动态可靠性理论是传统可靠性建模理论的演化和提升,它的应用研究无疑将促进复杂机电产品的开发。目前,动态可靠性建立理论体系繁多,还未形成公认的、规范化的建模体系。其中,基于 Petri 网和 Monte Carlo 仿真的建模方法优点突出,受到人们更多关注。

参考文献:

- [1] Patrick D T O' Connor. Commentary: Reliability—Past, Present, and Future[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2000, 49(4): 335 - 341.
- [2] Labeau P E, Smidts C, Swaminathan S. Dynamic reliability: towards an integrated platform for probabilistic risk assessment [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2000, 68(3): 219 - 254.
- [3] Marseguerra M, Zio E, Devooight J. A concept paper on dynamic reliability via Monto Carlo simulation [J]. Mathematics and Computers in Simalation, 1998, 47(2 - 5): 371 - 382.
- [4] 金光. 动态系统可靠性分析的新概念[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(2): 100 - 105.
- [5] 杨伟军, 张建仁, 梁兴文. 基于动态可靠度的服役桥梁维修加固策略[J]. 中国公路学报, 2002, 15(3): 49 - 52.
- [6] Swaminathan S, Smidts C. The event sequence diagram framework for dynamic probabilistic risk assessment [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1999, 63(1): 73 - 90.
- [7] Matasuoka Takeshi, Kobayashi Michiyuki. The GO - FLOW reliability analysis methodology - analysis of common cause failures with uncertainty [J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 175(3): 205 - 214.
- [8] 沈祖培, 黄卫刚. 大亚湾核电站外电源系统可靠性分析中 GO 法的应用[J]. 核动力工程, 2003, 24(1): 68 - 72.
- [9] Yanar DK. System structuring for risk analysis using object oriented methodology [C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, New York, USA, 1998: 227 - 232. (下转第 32 页)

点云光顺和数据过滤中,必须合理设置相对应的参数,使处理后的数据符合要求的精度。并且处理后的数据可按 IGES、ASC II 和 STL 文件格式输出,运用 Gemagic Studio 软件后续的数据处理,也可转入其他主流 CAD 软件,如 Catia v5 进行后数据处理。

3 结束语

三维测量系统(ATOS 系统和 TRITOP 系统)综合运用了数字图像处理技术、摄影测量和光栅测量等技术,来实现对三维实物轮廓表面的测量,和其他测量方法相比,具有速度快、测量精度高、范围大的特点,为产品的快速测量提供了一种更加方便快捷的方法。

参考文献:

- [1] 黄诚驹,齐 荣. 基于 ATOS 测量系统原型曲面快速数字测量及处理[J]. 机电产品开发与创新,2004,17(4):79-80.
- [2] GOM CORP. The proven 3D Digitizer [EB/OL]. http://www.gom.com/En/Products/atos2.html, 2005-12-05.
- [3] GOM CORP. 3D-Coordinate Measurement Technique Using Photogrammetry[EB/OL]. http://www.gom.com/En/Products/tritop.html, 2005-12-05.
- [4] 苏 发,牛曙光,孙洪江. 三维光学扫描测量系统在产品快速设计及制造中的应用[J]. 机床与液压,2005(7):19-20.
- [5] 吴琦峰. 基于 ATOS 测量系统的常规工程零件 CAD 模型重构方法研究[R]. 重庆:重庆大学,2003.
- [6] 张祖勋. 数字摄影测量学[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1996.
- [7] 周士侃,姜臻亮,舒世湘. 基于 Atos&Tritop 的点云采集方法[J]. 模具技术,2004(2):51-54.

The Fast Measuring and Data Processing Method of 3D Measuring System in Reverse Designing

SU Fa, LIANG Yong-bo

(Heilongjiang Institute of Science and Technology, Heilongjiang Harbin, 150027, China)

Abstract: It introduces the composing, working principle and application of a 3D Measuring system, shows the detail about digital image processing, photogrammetry, optical grating measuring technique. In order to measure rapidly and correctly geometric data of a 3D-object surface, it uses the spots clouds data to process with ATOS system. The system supplies a rapid method to product fast measuring.

Key words: ATOS System; TRITOP System; Photogrammetry; Optical Grating Measuring; Data Process

(上接第 27 页)

- [10] Marko Cepin, Borut Mavko. A dynamic fault tree[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 75(1):83-91.
- [11] Dugan Joanne Bechta, Sullivan Kevin J, Coppit David. Developing a low-cost high-quality software tool for dynamic fault-tree analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2000, 49(1):49-58.
- [12] 季会媛,孟 亚,孙 权,等. 一种容错系统可靠性分析方法[J]. 计算机工程与科学,2001,23(5):36-38.
- [13] Schneeweiss Winfrid G. Tutorial: petri nets as a graphical de-

scription medium for many reliability scenarios[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2001, 50(2):159-164.

- [14] Angela Adamyan, David He. System failure analysis through counters of petri net models[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2004, 20(4):317-335.
- [15] Giacomo Cojazzi. The DYLAM approach for the dynamic reliability analysis of systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1996, 52(3):279-296.
- [16] 肖 刚,李天柁. 动态系统可靠性仿真的 5 种蒙特卡罗方法[J]. 计算物理,2001,18(2):173-176.

Research on Theory and Methods of Dynamic Reliability Modeling for Complex Electromechanical Products

SU Chun, XU Ying-qiu

(Southeast University, Jiangsu Nanjing, 210096, China)

Abstract: It analyzes the limitations in describing time and dynamic system process of traditional reliability theory, studies the factors that can affect the system dynamic reliability, describes the definition and theory of dynamic reliability. Based on the analysis of the characteristic and applications for normal dynamic reliability modeling methods, it presents the development direction of dynamic reliability modeling.

Key words: Dynamic Reliability; Modeling; Failure; Petri Nets