

基于模型“四性”综保系统工程设计

危虹, 傅耘

(中航工业综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: **目的** 研究在基于模型的系统工程设计环境下可靠性、测试性、维修性、保障性(以下简称“四性”)及综合保障的一体化设计方法。**方法** 应用 Altarica 语言提供的故障建模方法,完成基于故障模型的可靠性、测试性的建模与分析,在多体动力学仿真环境下借助耐久性仿真技术,完成预防性维修任务的定量分析。**结果** 以基于复杂系统功能模型推演得到的系统故障模型为纽带,借助“四性”建模与仿真技术,可实现面向任务场景的“四性”综保一体化设计。**结论** 在基于模型的系统工程设计中能实现基于模型的“四性”综保一体化设计。

关键词: 系统工程; 建模; 可靠性; 测试性; 维修性; 保障性; 综合保障

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.06.009

中图分类号: TJ01 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)06-0053-07

Model-based System Engineering Application in Reliability, Testability, Maintainability and Supportability

WEI Hong, FU Yun

(AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

ABSTRACT: Objective To study the method of integrated design with reliability, testability, maintainability and supportability (RTMS) under model-based system engineering. **Methods** The fault model provided by Altarica language was applied to develop the model of reliability and testability. The quantitative analysis of the preventive maintenance task was completed with the help of durability simulation technology in the multi-body dynamics simulation environment. **Results** Taking the system fault model derived from the complex system function model as the bond, according to modeling and simulation of RTMS, the RTMS integrated design satiable with operational scene can be achieved with the help of RTMS modeling and simulation technology. **Conclusion** The integrated design for RTMS can be achieved under model-based system engineering.

KEY WORDS: system engineering; modeling; reliability; testability; maintainability; supportability; logistics.

现代航空装备已发展成一个由多系统、多环境、多任务和多资源构成的相互关联、相互支持、相互集成和相互制约的复杂系统,具有多目标、多信息、多专业、多任务、多功能、多资源以及多过程组成的复杂系

收稿日期: 2015-10-09; 修订日期: 2015-11-02

Received: 2015-10-09; Revised: 2015-11-02

作者简介: 危虹(1968—)女,陕西人,硕士,研究员级高工,主要研究方向为可靠性、测试性、维修性、保障性与综合保障。

Biography: WEI Hong(1968—), Female, from Shaanxi, Master, Professor level senior engineering, Research focus: reliability, testability, maintainability, supportability, logistics.

统构成与管理特征。复杂系统的出现,导致传统的可靠性、测试性、维修性、保障性(以下简称“四性”)设计分析方法已无法满足复杂系统设计的需求,必须通过基于模型的系统工程这一重要手段实现对复杂系统“四性”的设计^[1-5]。

基于模型的系统工程是从以文档为核心的工程化实践模式,转变为对结构、行为、物理和仿真等技术设计过程进行模型化表达、一体化集成和支持全生命周期各个阶段的逐步演变,并支持前期市场调查、设计校验和系统验证的工程实践模式。

随着基于模型技术的出现,现代飞机设计中大量采用电子样机、功能仿真样机、性能仿真样机、多体动力学仿真模型等模型设计分析技术^[6]。“四性”设计也同时在此基础上发展出基于电子样机的维修性分析,基于多体动力学模型的设备耐久性分析,基于系统性能仿真模型的安全性和任务可靠性分析,基于热、振、磁等环境应力模型下的设备可靠性分析等技术。同时达索公司创作 Altarica 语言基于有限状态机技术实现了复杂系统的故障行为建模^[7-8],还有近年发展出的基于多信号流模型、键合图模型、冲突集模型的测试性建模技术等,基于系统模型完成“四性”的分析设计已成为“四性”综保专业的发展趋势。

基于模型“四性”综保系统工程设计主要解决在统一的系统模型下完成故障建模,基于统一的故障模型完成“四性”建模,“四性”建模的数据最终反映到保障效能评估模型中,完成面向作战任务的保障效能分析,并由保障效能的分析结果重新指导飞机平台及各系统的“四性”综合权衡设计。

1 基于模型的复杂系统“四性”设计

典型的基于模型的系统工程设计过程如图1所示。设计过程中“四性”的需求模型来源于任务场景分析得到的“四性”顶层指标与分解到的系统、设备设计指标。规范模型代表系统的功能模型,结构设计模型表达了系统的物理结构模型,行为模型代表系统或设备的性能模型,组件模型是产品级模型。基于模型的“四性”设计就是要与复杂系统的设计模型一起完成系统功能和性能的权衡迭代,在满足任务需求的同时实现系统工程的设计。

在基于模型的“四性”设计过程中,故障模型是衔接“四性”设计之间及“四性”与产品设计之间的重要纽带,复杂系统因其故障的动态特性使可靠性和测试性的设计更加需要借助故障模型。

1.1 故障模型的建立

结构化的系统故障建模首先在已完成的系统功能模型的基础之上,自顶向下分析影响系统的关键重要故障,基于系统数据流功能模型逐层分析各子系统(子功能)的关键重要故障,直到各功能单元或模块的关键重要故障。基于系统控制流功能模型分析各关键重要故障模式的动态特性,以及因时序、事件排序等造成的新的关键重要故障,然后采用有限状态机建模方法(即事件驱动模型法)实现故障模式的结构化建模。该方法可以对具有离散特征的系统进行紧凑而有效的再现,通过有限状态机能真实表达故障逻辑的动静态关系^[9]。

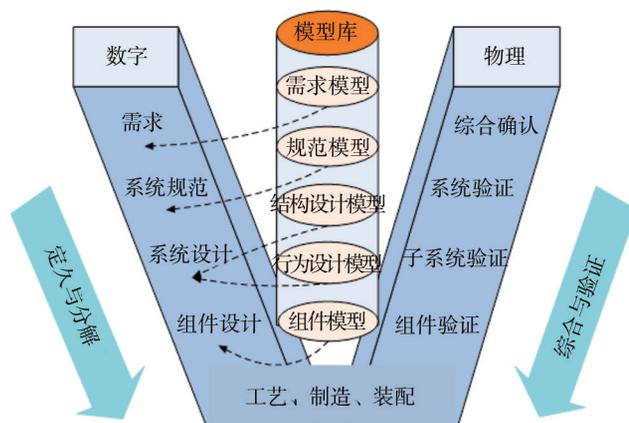


图1 基于模型的系统工程

Fig.1 Model-based system engineering

由于有限状态机模型结构具有规范的结构化与层次化特性,构建不同的有限状态机模型后,可以封装成不同的子系统,并连接成多样化的层次关系,通过不同的连接方式实现不同有限状态机模型之间数据、函数的传输与驱动关系。复杂系统故障动静态模型如图2所示,左半部分显示系统由多个子系统构成,每个子系统又可分解为多个设备。每个设备都可构建反映自身状态特征的有限状态机,形成相对独立的系统组成单元模型,依次构建反映设备之间串联/并联耦合结构的有限状态机模型,反映设备与上层子系统之间的层次化结构,子系统与系统之间层次化结构的有限状态机^[10],以及状态机相互之间的信息传输、驱动关系,从而形成层次清晰的网络关系,反映复杂的系统耦合结构。

对于系统的动态逻辑变化如图2中右半部分所示,由于有限状态机是事件驱动系统,可以将模型之间数据、函数、指令的传输与驱动以时间顺序按序列

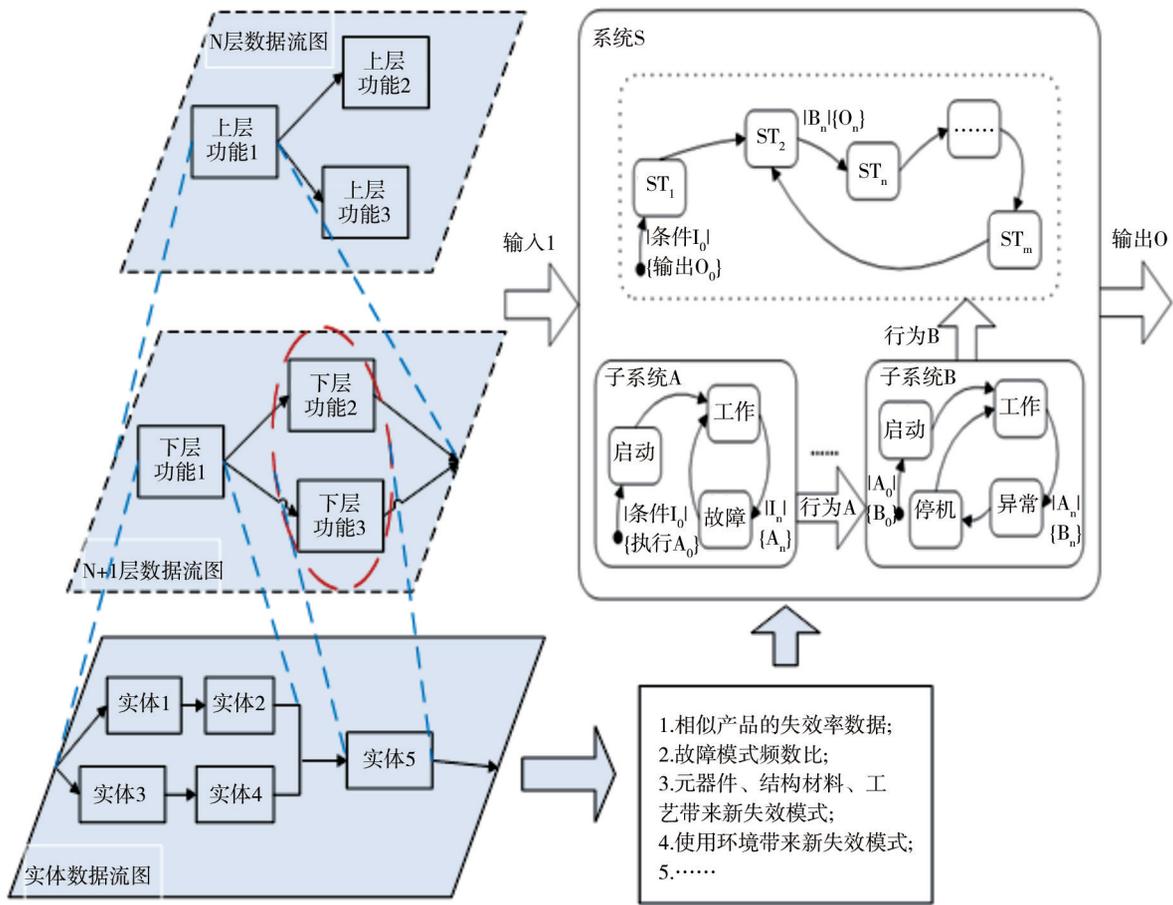


图2 复杂系统故障动静态模型

Fig.2 Dynamic and static fault modeling of complex system

传递和运行,因此,也可以用这种方式实现系统事故过程的动态行为建模,只要按照既定的规则,就可以方便地构建事故过程中系统的状态变化规律。

根据有限状态机原理^[11],进行系统的动态过程建模,首先定义如下元素:状态、输入、输出、状态转移函数、输出函数,然后依据系统的工作原理,制定状态转移规则,分别构建子系统、系统的有限状态机模型。每个子系统包含多个状态、转移弧、输入和输出信息,并作为独立的状态机进行封装,通过输入输出信息与其他子系统形成交互。输入来源于系统关联的设备故障、人员操作、环境影响,输出随着子系统状态变化而响应,输出相应的函数、数据变量等,从而对其他系统造成影响。

1.2 可靠性设计

复杂系统因大量采用冗余、重构、容错、备份等架构技术使其功能实现具有复杂的柔性特征,采用简单的基本可靠性已无法满足对其功能可靠能力的评定,必须针对其任务特性进行任务可靠性的评定。经典

的任务可靠性分析方法是可靠性框图法、成功路径法和FTA法,它们对简单的系统是有效的,但当系统的功能逻辑非常复杂时,建立任务可靠性框图或获取系统的成功路径是非常困难的,必须借助系统功能模型完成系统故障行为的分析^[12]。

常见的对复杂系统动态可靠性分析建模的方法有:马尔科夫过程、状态转移链、有限状态机、Petri网。借助复杂系统已构建的有限状态机故障模型,可以有效反映复杂系统故障的组合效应、耦合效应、时序效应、累积效应等^[13]。进行系统任务可靠性分析时,必须首先规划系统任务剖面,系统按任务剖面中功能线程要求运行功能逻辑,基于蒙特卡洛仿真法抽取故障事件,故障依据其行为模型反映到系统功能层面,根据任务判据决定系统是否任务成功,最终统计出其特定时间历程内系统任务可靠性的水平。

1.3 测试性设计

在测试性分析和计算之前首先要完成测试性建模。多信号流模型是目前广泛使用的一种测试性模

型,它在系统结构和功能分析基础上,以分层有向图表示信号流向、测试和各组成单元(故障模式)的构成及相互连接关系,并通过定义信号(功能)以及组成单元(故障模式)、测试与信号之间的关联性,来表征系统组成、功能、故障及测试之间相关性的一种模型表示方法^[14]。

如图3所示,测试性的分层故障关系模型与结构化故障模式库表达的内容相同,可以将已形成的系统结构化故障模型数据自动导入测试性模型,然后补充测试点布局、测试信号、测试判据、测试时间等信息,形成可分析计算的测试性模型。

基于测试性模型可以自动生成反映测试与故障

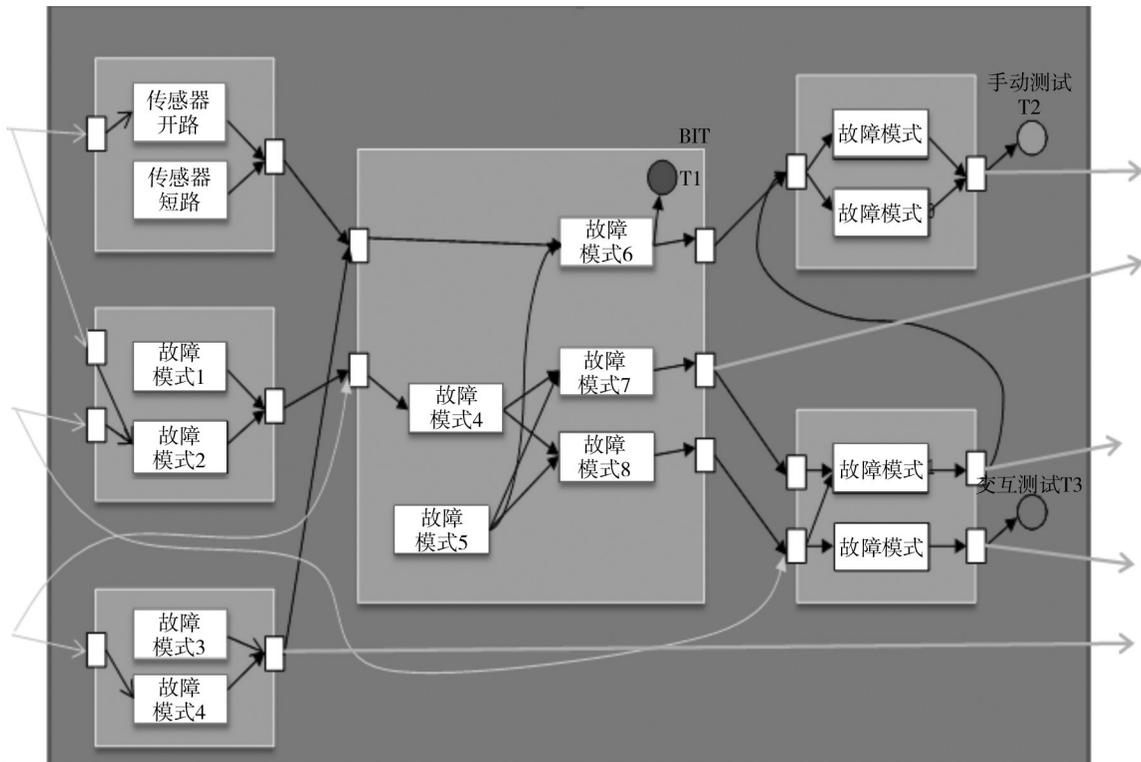


图3 与系统故障模型集成后的测试性模型

Fig.3 Testability model integrated with system fault model

之间依存关系的依存矩阵,通过OA*等自动搜索算法形成最小测试向量、故障字典、最小隔离程序等。测试性分析的主要任务是确认相关重要故障模式的测试覆盖性,计算故障隔离效率,优化测试布局,并针对不同功能单元提出测试需求等,其分析方法包括静态分析和动态分析两种^[15-16]。

静态可测性分析可分析系统的固有可测性,识别系统的设计缺陷,为提高故障诊断能力提出建议。其主要识别的状态为未检测故障、模糊组、冗余测试、隐藏故障以及掩盖故障。

动态可测性分析,可以计算整个系统或指定功能模块的检测率和隔离率,并根据用户指定的优化函数生成最优测试序列,为测试资源的布局权衡提供建议。

1.4 耐久性仿真模型

耐久性仿真技术是在仿真软件环境下,通过数

字样机和故障物理模型,将产品预期承受的液压、机械、摩擦等工作载荷应力及环境应力与产品各组成零部件的潜在故障发生、发展过程联系起来,从而定量计算产品各种潜在故障发生时间,指明薄弱环节,以便于采取有针对性的改进措施提高产品的设计寿命水平。

耐久性仿真技术不同于结构强度和耐久强度计算,它能够将产品寿命与影响寿命的主要失效机理紧密联系起来,从而在支撑寿命设计的同时完成关键结构件和重要机电产品的预防性维修任务分析^[17-18]。耐久性仿真分析的失效机理主要包括结构疲劳、磨损与腐蚀,以及材料老化等。通过耐久性仿真分析得到的定性定量结果,可进一步确认采用无损检测的手段及时机、润滑清洗工作部位与时机、定期检查或定期更换的内容。

耐久性仿真分析的一般流程包括产品故障机理分析、结构强度分析、应力仿真分析、零部件寿命仿真、损

仿过程分析等。耐久性仿真分析的设计输入是在系统故障模型中获得的关键结构件和重要机电产品。

2 “四性”综保一体化设计下的软件平台

“四性”综保一体化软件平台构建的原理如图4所示,整个平台由基础信息管理、“四性”综保建模、分析工具、人机界面与输出四大模块构成。

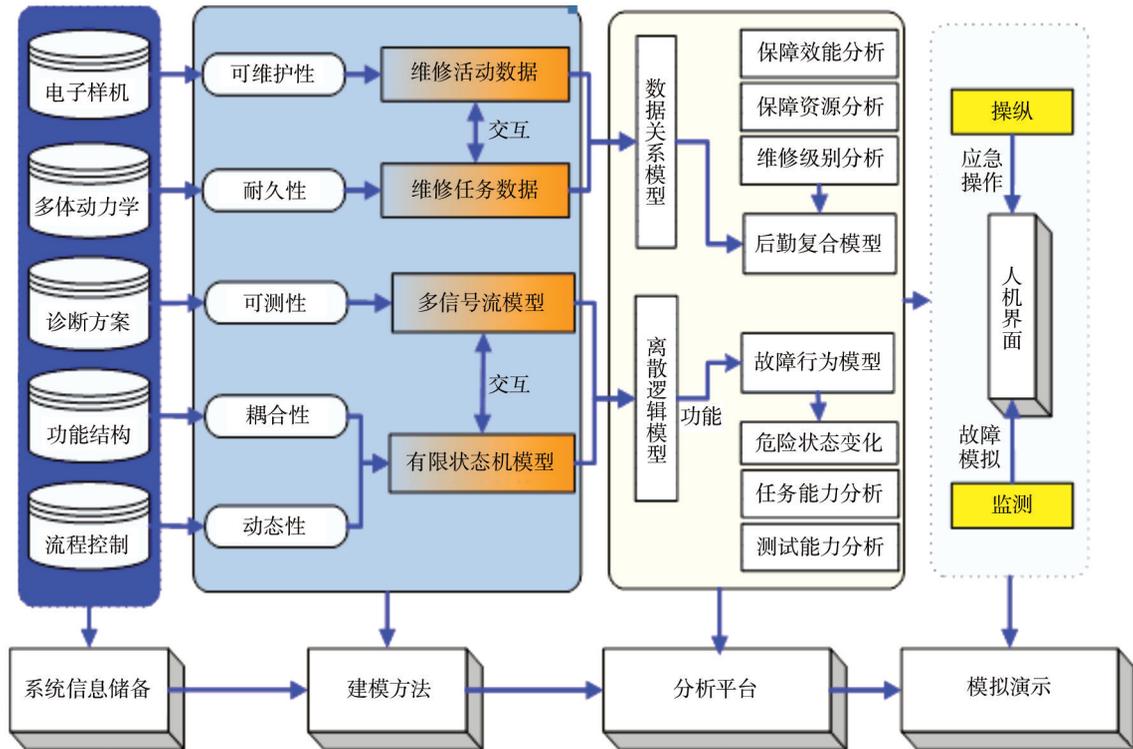


图4 “四性”综保一体化软件平台架构

Fig.4 Software platform architecture for integrated model of reliability, testability, maintainability and supportability

现事故/故障的动态功能推演,基于有限状态机形成的故障模型添加测试诊断信息后自动形成用于测试性分析的多信号流模型。通过调用关键结构件和重要动部件的多体动力学模型,并结合其故障模型触发耐久性仿真分析,导入耐久性仿真分析结果完成系统预防性维修任务的数据定义。预防性维修任务和测试性模型导出的诊断任务一起放入电子样机中,结合电子样机布局与拆装程序要求形成维修活动数据。

3) 分析工具主要包含安全性分析工具、可靠性分析工具、测试性分析工具、维修级别分析工具、保障资源分析工具、保障效能分析工具。

4) 人机界面与输出模块提供人机操作的输入接口,能进行系统故障推演的动态检测,能选择不同分析对象配置各种分析方案,能自动进行方案对比分析,能通过事件概率触发机制基于蒙特卡洛法按时序

1) 基础信息管理提供各种输入接口、系统功能构型跟踪维护、基础故障模型建立维护、各功能层级备选方案的功能结构与控制逻辑、故障模式的诊断能力信息等^[19],同时可通过接口控制程序调用电子样机和各动部件的多体动力学模型。

2) “四性”综保建模模块首先利用系统功能层次结构,定义各功能节点的状态(含故障状态)^[20],其次利用系统控制逻辑定义各节点状态转换的逻辑过程,实

进行故障过程仿真,能基于输出格式要求自动形成输出报告。

3 面向作战的保障效能仿真

保障效能是保障系统保障主装备在预期的使用环境和条件下经济有效地满足平时战备完好和战时任务持续能力的度量,是对装备通用质量特性水平的综合反映。保障效能是保障能力的综合反映,是装备“四性”一体化水平的顶层度量,主要度量参数包括可用度、装备完好率、出动架次率、任务成功率等。保障效能仿真评估是采用离散事件仿真方法,抽取飞机在各类飞行任务中的使用、飞机和部件的航线维修、备件供应等数据,对使用与维修保障活动进行多次模拟,统计计算出装备系统的效能^[21]。

基于模型的“四性”一体化保障效能评估过程如图5所示。在作训任务的驱动下,根据任务构型和资源需求从可用飞机中进行飞机调度,并执行相应的任务。在任务执行过程中,集成FMEA模型判定故障是否在任务期间发生,若任务期间不发生故障,则继续执行完任务并进行任务后检查^[22],检查后的飞机返回可用飞机资源池。若故障在任务期间发生,则集成测试性模型判定故障是否可检测,若故障在任务执行过

程中无法检测到,忽略该故障并继续完成任务,同时再一次集成测试性模型,针对完成任务后的飞机进行更详细的故障诊断,确定故障LRU后集成维修性模型,完成排故工作。若故障在任务执行过程中可以被检测到,则集成任务可靠性模型判定该故障LRU是否影响任务,若故障影响任务直接返航,故障不影响任务则继续完成任务并进行任务后检查,返航和任务检查后的飞机集成维修性模型完成排故工作。

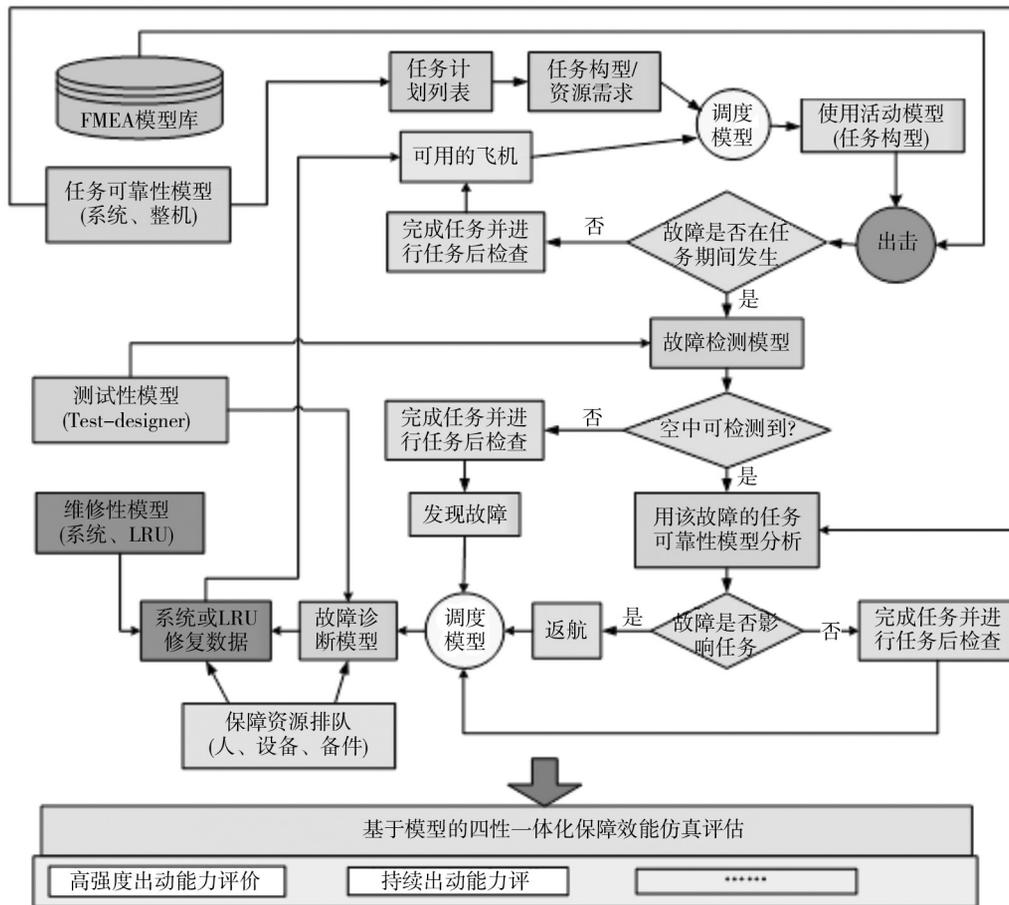


图5 基于模型的“四性”一体化保障效能评估过程

Fig.5 Procedure of logistics efficiency evaluation under data of model-based reliability, testability, maintainability and supportability

4 结语

围绕基于模型的系统工程理论,从复杂系统故障建模技术、“四性”建模与分析技术、保障效能建模与分析技术和基于模型的“四性”综保一体化软件平台的构架几方面论述了在基于模型的系统工程设计技术下“四性”综保设计技术的发展,包括复杂系统可靠性建模与分析技术发展、基于耐久性仿真分析的预防性维修任务分析技术的发展、基于统一故障模型的

“四性”一体化设计权衡技术发展、基于模型面向任务场景的“四性”与综保效能仿真技术发展。通过上述研究,可为在基于模型的系统工程设计环境下开展“四性”综保设计提供有力指导。

参考文献:

[1] 国际系统工程协会. 系统工程手册 系统生命周期流程和活动指南[M]. 张新国译. 北京:机械工业出版社,2013. International Council on Systems Engineering Website. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities[M]. ZHANG Xin-guo Translate. Chi-

- na Machine Press, 2013.
- [2] 李玉峰,许路铁,陈永康,等.某炮弹地面制导装备维修器材平战一体化保障研究[J].装备环境工程,2014,11(6):159—162.
LI Yu-feng, XU Lu-tie, CHEN Yong-kang, et al. Research on Peace War Combined Support of Maintenance Equipment of Ground Guidance Kits for a Certain Ammunition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6):159—162.
- [3] 樊富友,余智超,陈明,等.制导炸弹贮存可靠性分析与探讨[J].装备环境工程,2013,10(4):102—105.
FAN Fu-you, YU Zhi-chao, CHEN Ming, et al. Analysis and Discussion on Storage Reliability of Guide Bombs[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4):102—105.
- [4] 曹宏安,黄鹏波,谢全民,等.外军装备维修及对我军弹药维修的启示[J].装备环境工程,2014,11(5):62—68.
CAO Hong-an, HUANG Peng-bo, XIE Quan-min, et al. The Status and Developing Trend of Foreign Troops Equipment Maintenance and the Enlightenment to Ammunition Maintenance of PLA[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5):62—68.
- [5] 刘炜,李田科,于仕财,等.基于GM-RBF神经网络的导弹武器系统使用可用度评估方法研究[J].装备环境工程,2013,10(6):108—113.
LIU Wei, LI Tian-ke, YU Shi-cai, et al. Study on the Operational Availability Evaluation Method of Missile Weapon System Based on GM-RBF Neural Network[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6):108—113.
- [6] JIN R, CHEN W, SIMPSON T W. Comparative Studies of Meta Modeling Techniques under Multiple Modeling Criteria[J]. Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 23(1):1—13.
- [7] BOITEAU M, DUTUIT Y, RAUZY A, et al. The AltaRica Data-Flow Language in Use: Modeling of Production Availability of a Multi-States System[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 75:379—388.
- [8] KEHREN C, SEGUIN C, BIEBER P. Advanced Multi-System Simulation Capabilities with AltaRica[C]// International System Safety Conference 2004 Proceedings. System Safety Society, 2004.
- [9] LISAGOR O, PROF J, MCDERMID A, et al. Towards a Practicable Process for Automated Safety Analysis[M]. New York: Department of Computer Science, The University of York, 2005.
- [10] SHERBROOKE C C. Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques[M]. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [11] PATTIPATI K R, ALEXANDRIDIS M G. Application of Heuristic Search and Information Theory to Sequential Fault Diagnosis[J]. IEEE Trans on SMC, 1999, 29(4):872—887.
- [12] PIERRE David, VINCENT Idasiak, FREDERIC Kratz. Reliability Study of Complex Physical Systems Using SysML[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95:431—450.
- [13] BILLINTON R, ALLAN R. Reliability Evaluation of Engineering Systems[M]. New York: Plenum Press, 1982.
- [14] 杨智勇,许爱强,牛双诚.基于多信号模型的系统测试性建模与分析[J].工程设计学报,2007,14(5):364—368.
YANG Zhi-yong, XU Ai-qiang, NIU Shuang-cheng. Based on Multi-signal Model System Testability Modeling and Analysis[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2007, 14(5):364—368.
- [15] 王红霞,叶晓慧,田树新.复杂电子装备故障诊断建模方法研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2007,29(6):62—64.
WANG Hong-xia, YE Xiao-hui, TIAN Shu-xin. Modeling of Fault Diagnosis for Complex Electronic Equipments[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2007, 29(6):62—64.
- [16] RAGHAVAN V, SHAKERI M, PATTIPATI K R. Optimal and Near-optimal Test Sequencing Algorithms with Realistic Test Models[J]. IEEE Trans on SMC, 1999, 29(1):11—26.
- [17] 何建新,李继红,周堃,等.基于Matlab编程实现Arrhenius模型寿命预测[J].装备环境工程,2013,10(3):87—90.
HE Jian-xin, LI Ji-hong, ZHOU Kun, et al. Life Prediction Based on Arrhenius Model with Matlab Programming[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3):87—90.
- [18] 穆志韬,孔光明,李旭东.预腐蚀LY12CZ铝合金的疲劳寿命预测模型[J].装备环境工程,2014,11(4):16—20.
MU Zhi-tao, KONG Guang-ming, LI Xu-dong. Fatigue Life Prediction Model of Pre-corroded LY12CZ Aluminium Alloy [J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4):16—20.
- [19] 谢峰,孙江生,代冬升,等.装备保障数据仓库实施中的多维数据模型构建研究[J].装备环境工程,2014,11(5):137—141.
XIE Feng, SUN Jiang-sheng, DAI Dong-sheng, et al. Study on Multidimensional Data Modeling in Building Equipment Support Data Warehouse[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5):137—141.
- [20] WEILKIENS Tim. Systems Engineering with SysML, Modeling Analysis Design[M]. Burlington: Morgan Kaufmann, 2008.
- [21] FISHER R R, DRAKE W F, DELFAUSSE J J. The Logistics Composite Model: AN Overall View[M]. California: RAND, 1968.
- [22] 刘震宇,马小兵,洪东跑,等.基于飞行剖面的作战飞机任务可靠性评估方法[J].北京航空航天大学学报,2012,38(1):59—63.
LIU Zhen-yu, MA Xiao-bing, HONG Dong-pao, et al. Mission Reliability Assessment for Battle-plane Based on Flight Profile[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(1):59—63.