

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.05.002

协同研制背景下复杂装备可靠性增长技术与方法

刘思峰^{1,2} 芮菡菡^{1,2} 方志耕^{1,2}

(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京, 211106; 2. 南京航空航天大学灰色系统研究所, 南京, 211106)

摘要:复杂装备的研制大多具有“主制造商-供应商”协同研制的特点, 装备的可靠性增长过程作为研制的关键环节融于其生产全过程, 具有分布式网络化协同特征, 且获得的数据多源异构。本文首先介绍了早期经典可靠性增长模型及其国内外发展历史; 随后针对不确定信息下可靠性增长的信息融合与数据生成、贝叶斯推理模型和虚拟样机技术这 3 个方面, 阐述了最新研究进展; 最后运用图示评审技术(Graphical evaluation and review technique, GERT)模型、灰色系统理论和概率论等方法, 探讨了协同研制背景下复杂装备可靠性增长技术方法与模型, 并对其未来发展研究进行了展望。

关键词:协同研制; 复杂装备; 可靠性增长; 多源异构数据

中图分类号: TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2017)05-0599-07

Reliability Growth Technology and Methods of Complex Equipment Under Background of Collaborative Development

LIU Sifeng^{1,2}, RUI Handan^{1,2}, FANG Zhigeng^{1,2}

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China;
2. Institute for Grey System Studies, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: The development of most complex equipment presents the feature of “main manufacture-supplier”. As the key point of equipment development, reliability growth integrates with the whole manufacturing process and has the character of distribution and collaboration, so the data are always multi-source and heterogeneous. In this paper, the early classic reliability growth models and their history are introduced first. Then the latest research progress of reliability growth models under the background of uncertain information is explained, which includes information integration, Bayes inference and virtual prototype technology. At last, by using graphical evaluation and review technique (GERT), grey system theory and probability theory, the reliability growth technology and models of complex equipment under the background of collaborative development are discussed and the future research direction is

基金项目:国家自然科学基金(71671091)资助项目; 欧盟第 7 研究框架玛丽·居里国际人才引进计划(FP7-PIIF-GA-2013-629051)资助项目; 国家自然科学基金与英国皇家学会国际合作交流(7111130211)资助项目; 中央高校基本科研业务费专项基金(NP2015208)资助项目; 国家级教学团队基金(10td128)资助项目。

收稿日期: 2017-07-01; **修订日期:** 2017-08-15

作者简介:刘思峰,男,南京航空航天大学特聘教授、博士生导师。主要研究领域:灰色系统理论、复杂装备研制管理。主持国家社科基金重大项目、重点项目、国家自然科学基金重大研究计划、面上项目、国际合作项目等国家课题 10 余项; 发表论文 600 多篇, 其中 SSCI、SCI、EI 收录论文 400 余篇; 出版著作 22 部。获省部级以上科技成果奖 16 项。2008 年当选系统与控制世界组织荣誉会士; 2013 年入选欧盟第 7 研究框架玛丽·居里国际人才引进计划 Fellow; 2017 年获欧盟“最有为科学家奖”。

通信作者:芮菡菡, E-mail: 411789104@qq.com。

引用格式:刘思峰, 芮菡菡, 方志耕. 协同研制背景下复杂装备可靠性增长技术与方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 599-605. LIU Sifeng, RUI Handan, FANG Zhigeng. Reliability growth technology and methods of complex equipment under background of collaborative development[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(5): 599-605.

forecasted.

Key words: collaborative development; complex equipment; reliability growth; multi-source heterogeneous data

2015年国务院印发《中国制造2025》的通知,对中国制造业转型升级和跨越发展作了整体部署,确定了中国制造10大重点领域,这些重点领域大多与复杂产品研制有关。复杂装备研制均为多系统协同研制过程,一方面随着复杂装备技术越来越先进、结构越来越复杂,其专业化分工越来越细,需要更广泛的合作、更丰富的智力资源和更专业化的合作团队。另一方面随着复杂装备研制费用的大幅度增加,其投资风险也越来越大,需要寻求更丰富稳健的融资方式来降低与分摊投资风险。再者随着复杂装备研制周期缩短、成本控制更加严格、质量与可靠性的要求也越来越高,需要更先进的管理能力和管理团队。诸多因素决定了现代复杂装备的研制呈现出若干主制造商(通常是一个或两个)和供应商(通常比较多)分布在异地的特征。主制造商与供应商通过互联网平台进行紧密协同创新,其中若干系统供应商在协同研制过程中将起到十分重要的作用,人们通常将这种研制模式称为主制造商-供应商模式。

在复杂装备的研制过程中,新产品的研制通常要经历模样、初样、试样、定型及批量生产等多个阶段。从模样阶段开始,各阶段都要进行各种试验,发现设计、工艺和材料等方面的问题,暴露薄弱环节,试验以后,分析失效模式,找出故障原因,提出改进措施,进行改进;最后通过试验加以验证。这样的过程反复进行,从而使产品的可靠性不断增长,直到产品可靠性满足要求,这个过程就是可靠性增长过程。可靠性增长是保证复杂装备投入使用后可靠性满足研制要求的有效途径,贯穿于系统全寿命周期的各个阶段。而在多系统协同主制造商-供应商管理模式,复杂装备研制的可靠性增长过程主要呈现出以下4个方面的特征:

(1)复杂装备可靠性增长融于其科研生产的一体化过程。复杂装备的研制大多是多品种、小批量,且其研制周期要求越来越短,难以像普通产品一样在产品研制完成后有一个十分明确的可靠性增长过程,因此其可靠性增长往往融于其科研生产过程,呈现出一体化的特征。

(2)重要系统供应商在复杂装备可靠性增长过程中扮演着十分重要的角色。由复杂装备的技术复杂性、分工的专业化、利益关系的复杂性等特征所决定,相关重要系统供应商在其研制过程中起着越来越重要的作用,作为系统综合集成的主制造商对这些供应商的依赖程度越来越高,这样相关重要

系统供应商在复杂装备可靠性增长过程中扮演的角色就十分重要。

(3)复杂装备可靠性增长过程呈现出分布式网络化协同特征。现代复杂装备几乎都是通过若干主制造商和供应商紧密合作来完成的,其供应商遍布全球,通过网络平台与相应的机制安排进行紧密协同,呈现出典型的分布式网络化协同研制特征,由这一特征所决定,复杂装备可靠性增长过程必然呈现出分布式网络化协同特征。

(4)复杂装备可靠性增长过程中可获取的数据信息呈现出多源、异构,且大数据与小样本共存的特征。在复杂装备的研制过程中,一方面由于其所涉及的知识领域、产业门类、专业种类与研制合作部门众多,研制供应链长、涉及范围广、协同研制关系极其复杂,故其研制与可靠性增长过程可获取的数据信息具有多源、异构和大数据的特征;另一方面,由于复杂装备的研制几乎都是多品种、小批量的,且其结构极其复杂,装备所涉及系统、部件和零件种类与数量巨大,这样在其研制和可靠性增长过程中所涉及的数据信息呈现出系统底层数据信息量大,而系统顶层数据信息量较少的金字塔型特征,如图1所示。

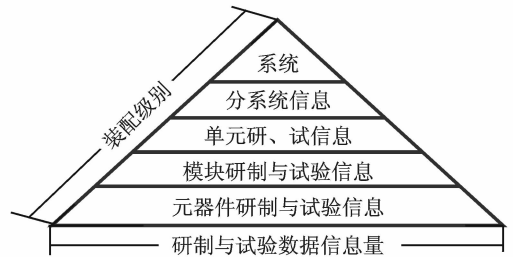


图1 复杂装备研制与可靠性增长过程数据信息数量特征
Fig.1 Feature of information quantity in the procedure of reliability growth and complex equipment development

无论采用何种研制模式,装备可靠性增长的基本规律是不会改变的,而且随着现代复杂装备的大型化、重型化、综合化、集成化和更新换代快、创新性强等趋势和特征越来越明显,这一过程愈显重要。在装备研制初期,其性能参数与可靠性都不可能立即达到所规定的指标。在主制造商-供应商模式下,装备可靠性必须要经过主制造商和供应商的紧密协同工作的可靠性增长过程才能达成最终研制目标。这一可靠性增长过程主要是:反复“试验-暴露缺陷-改进-再试验”的工作过程,使得装

备在设计、材料、制造工艺和操作方法等方面的问题与缺陷不断地被暴露,而经过分析和改进后又不断地趋于完善,从而使其可靠性和其他性能不断提高,直到满足要求。

1 早期可靠性增长研究的经典模型

可靠性增长模型的发展得益于数学领域的巨大进步。1763年,英国学者 Bayes 发表文章《论有关机遇问题的求解》,文章中提出了采用归纳推理的方法进行统计推断求解的思路。由于 Bayes 方法便于利用先验信息,节省时间和经费,该方法广泛用于可靠性分析。1939年,瑞典物理学家威布尔提出威布尔分布,并将其用于疲劳寿命试验,该分布在可靠性工程中得到广泛的应用,如1956年利布林、泽林等人在滚珠轴承的疲劳试验中及高寿康在电子管的寿命试验中用到了威布尔分布。

1962年美国通用电气工程师 Duane 通过对两种液压装置及3种飞机发动机的近600万小时的试验数据进行分析,发现在双对数坐标纸上,累积故障数与累积试验时间是一条直线,开创了可靠性增长的量化研究。1972年,美国陆军装备系统分析中心的 Crow 在 Duane 模型的基础上提出了可靠性增长的 AMSAA 模型,该模型给出了模型参数的极大似然估计与无偏估计、产品 MTBF 的区间估计、拟合优度检验以及分组数据的分析方法等,将可靠性增长过程中关联故障的累积过程建立在随机理论上,系统地解决了可靠性增长中的统计推断问题。随后,Smith 针对阶段可靠性的顺序约束关系,以无信息验前分布的 Bayes 方法讨论了成败型可靠性增长模型,能够有效地利用产品研制阶段的试验数据和工程信息来预测可靠性。Higgins 和 Erto 等又利用 Bayes 方法研究了成败型可靠性增长模型、指数分布可靠性增长模型、双参数指数分布可靠性增长模型以及威布尔分布可靠性增长模型。Kececioglu 等^[1]针对 Gompertz 模型存在估计精度偏低,可能出现不合理的评估结果的问题,提出了改进的 Gompertz 模型。Feinberg^[2]提出卡方加速可靠性增长模型用于多层次可靠性增长数据的分析,可用于分析单一应力或多种应力对总体可靠性的影响程度。Bidhan 和 Awasthi^[3]基于群体智能的随机搜索技术提出一种对软件可靠性增长的非齐次泊松过程参数的优化模型,给出了可靠性增长参数的优化估计。

国内学者对可靠性增长的探索始于20世纪70年代,经过十几年的努力,引入了 Lloyd-Lipow 指数增长模型、Gross-Kamins 模型、Gompertz 模型、Duane 模型、AMSAA 模型和非齐次泊松过程

等,并做了许多工程验证工作。周源泉和翁朝曦二位学者把经典可靠性增长方法与模型结合实践经验,在 AMSAA 模型的基础上提出了更有普遍意义的 AMSAA-BISE 模型,该模型解决了多台可靠性增长模型及数据处理问题,包括趋势检验、拟合优度检验、模型参数及系统 MTBF 的点估计与区间估计、分组数据及丢失数据的统计推断、未来故障预测区间等问题。2000年,周源泉^[4]等在加速试验和可靠性增长试验的基础上,系统阐述了加速可靠性增长试验评估方法;2003年,梅文华出版了《可靠性增长试验》,在系统阐述可靠性增长技术和发展的同时,丰富和发展了 AMSAA 模型的理论和方法。近年来,明志茂等^[5]基于新 Dirichlet 先验分布,建立了一种适合小子样复杂系统异总体可靠性增长分析的 Bayesian 模型,结合试验数据,利用该模型实现了未来阶段可靠性的预测;刘琦等^[6]建立了系统可靠性增长的集成评价模型,通过子系统的可靠性增长规划实现系统的可靠性增长需求;谢景燕等^[7]考虑不完美排错的情况,引入了一种故障排除率随时间变化的故障排除率函数,提出了一种新的 NHPP 类软件可靠性增长模型,取得了更好的拟合结果和预测效果。

中国的可靠性增长技术的研究主要集中在学习和消化国外已提出来的可靠性增长模型,在此基础上,针对具体的工程应用提出新的可靠性增长模型,并研究参数估计及统计判断方法。从近几年情况看,比较集中在可靠性增长管理和增长试验过程中如何应用好已提出的模型。

2 不确定信息下常用的可靠性增长模型与技术

在复杂装备系统的可靠性增长评价分析中,由于详细的可靠性数据较为缺乏,统计分析方法大多难以应用,或结果不甚理想。对于一些复杂装备中可靠性要求极高的核心元件,详细的可靠性增长数据难以获得,因此小样本不确定信息的可靠性增长研究得到了广泛重视。在小样本不确定数据集下进行可靠性评估,为了缩短置信区间,提高评估结果的准确度,客观上仍需扩大样本信息量,目前主要有几种思路:一种是融合产品元件级和子系统级的可靠性信息、相似产品的可靠性信息以及在加严条件下强化寿命试验中获得的试验信息进行样本信息量的扩充,然后应用经典统计方法进行可靠性推断;另一种是 Bayes 方法,通过极大熵、最大后验风险等找到一个合理的验前分布,再利用 Bayes 公式导出可靠度的验后分布,以此作为产品可靠性评判依据;另外还可以用一些基于样品本身数据的数

字仿真技术进行样本扩充,解决小样本不确定信息可靠性推断问题。

2.1 基于信息融合与数据生成的可靠性增长研究

复杂装备从早期样机试验,到性能试验、环境试验、安全试验及可靠性研制试验等,在相当长的试验时间内产生了相当数量的试验数据。Jiang等^[8]考虑先验信息的鲁棒性给出了一种可靠性增长试验的数据折合因子;Zhong等^[9]通过建立测试环境因素与产品的可靠性之间的影响关系提出一种基于 Duane 模型的综合可靠性评估模型;Yang等^[10]运用数据折合和融合技术提出了一种可利用复杂系统各层级单元相关信息进行系统可靠性评估的模型,该方法可将连续分布转换为成败型可靠性数据,融合先验信息和现场试验信息进行可靠性评估;Wang等^[11]综合论述了可靠性增长问题的多源信息融合问题和信息融合的一般步骤,对信息融合的优缺点进行了评述。胡明祥等^[12, 13]通过引入环境折合概念,将不同试验环境条件下产生的试验数据通过环境折合,修正为在实际使用条件下产生数据的模拟值,可应用连续性可靠性增长模型进行统计分析;刘解放等^[14]引入相似系数的概念提出了一种基于多阶段试验信息的成败型产品可靠性评价的加权 Bayes 方法,据此得到了产品可靠性的置信下限。数据生成技术对扩大可靠性数据的样本量,提高分析准确性有很大帮助。贾志新等^[15]选取 RBF 神经网络经典的聚类学习算法作为学习方法模拟生成的可靠性数据,在保持与原始数据具有相同统计规律的情况下,扩充了样本数量,从而使对数正态分布参数的估计结果更加准确;刘洁梁等^[16]采用灰色预测模型扩充退化数据来处理贫数据多退化量产品可靠性评估问题。

2.2 基于小子样数据的可靠性增长 Bayes 推理模型

Bayes 方法由于能够融合历史信息、专家经验等多源验前信息,结合现场试验数据则可有效缩短可靠性评估置信区间,提高评估结果的准确度,因此受到不少可靠性理论工作者的重视。Savchuk 和 Mart^[17]应用极大熵和最大后验风险对多源先验信息进行融合。Martz 与 Duran^[18]将 Monte Carlo 仿真技术与 Bayes 理论进行融合,提出了 Bayes Monte Carl 模拟法;Xing 等^[19]提出一种 Bayes 序贯检验方法,可融合产品多阶段可靠性数据,给出可靠性增长过程中的可靠性指标;Tang 等针对部件可靠性极高的小样本串联系统利用渐进理论实现了验后分布的渐进扩展,可有效计算系统可靠度的验后分布及 Bayes 置信区间,并且可对有限串联扩展的截断误差进行估计;Huang^[20]利用模糊先验信息,研究了制造执行系统功能模块故障率的 Bayes 估计,解决了系统可靠性增长试验问题。国内学者在小子样系统可靠性增长的 Bayes

方法应用中也做了大量的工作。周源泉等提出了可靠性增长幂律模型,在无信息先验分布下给出了过程参数、当前的系统 MTBF(平均故障间隔时间)与故障强度的 Bayes 点估计与区间估计,并将之与经典方法进行了比较,避免了非随机化最优置信下限的保守性和随机化最优置信下限的随机性,模型能很好地运用于发动机可靠性增长过程;于春雨等^[21]利用 D-S 证据理论融合多源可靠性信息,将专家经验转换成概率分布,构造了指数型产品多阶段可靠性增长的 Bayes 模型,给出了失效率、MTBF 和可靠度的 Bayes 点估计和置信下限。

2.3 可靠性增长视角下虚拟样本与虚拟样机技术

虚拟样本生成的关键在于对“部分”已知信息的生成和开发挖掘蕴含在实际小样本产品中的重要信息。Hyeongjin 等^[22]提出一种虚拟支持向量机,使用近似法生成虚拟样本来提高可靠性分析精度;洪东跑等^[23]结合火工品升降法实验数据的特点,将二元成败型数据转化为虚拟完全样本数据,在较小样本下实现了对高可靠性火工品的可靠性评估;徐宇亮等^[24]针对退化特征量难以确定和试验样本数目有限这两方面的困难,提出了一种基于虚拟样本加速退化试验的电子设备可靠性评估新方法,解决了加速退化试验中极少样本数据的处理问题;张永进等^[25]以系统部件失效时间序列作为样本空间,应用 Monte Carlo 法仿真产生更多的虚拟样本,建立了虚拟样本序列下系统实时可靠性估计的一般框架,据此导出了系统实时可靠性模型。虚拟样机是物理样机在计算机系统内的一种映射,这种映射能够保证基于虚拟样机的仿真结果和基于物理样机的测试结果在一定精度范围内等同,从而可用仿真替代测试。Barna 等^[26]结合试验和虚拟样机仿真技术给出了一种可靠性设计方法;王惠方等^[27]在 RccurDyn 中建立火炮装填系统弹协调器多刚体模型和刚柔藕合虚拟样机模型,导入 Matlab 中建立机械控制混合模型,在考虑协调过程中的蜗轮的磨损、小平衡机压力变化和驱动电压变化 3 个影响因素的基础上进行仿真,从而得到可靠性分析数据;于霖冲等^[28]提出了一种集成仿真环境下建立虚拟样机模型并进行运动仿真的方法,在 UG-ANASYS-ADAMS 多软件平台上进行动力学分析,利用蒙特卡罗随机抽样方法实现随机动态响应分析。

然而无论是经典的可靠性增长模型还是不确定信息下的可靠性增长模型,其方法本质都是针对独立系统而建立的,无法描述与反映现代复杂装备研制过程中,主制造商-供应商分布式协同研制环境下的可靠性增长模式。而且目前对装备可靠性增长的研究多集中在单一装备的可靠性增长试验设计与结果分析,可靠性增长模型大多采用独立系

统实验数据的概率拟合而得到,难以揭示子系统、系统和装备之间故障发生与排除等可靠性增长机理及其本质。此外,经典可靠性增长模型大多为统计分析模型,对统计数据的质与量要求都很高,其理论基础是大样本概率统计理论,不能适应现代复杂装备研制可靠性增长过程中可获取的数据信息呈现出网络化、多源、异构、变动统计样本,且大数据与小子样共存的特征。

2.4 复杂装备可靠性增长技术与方法的工程应用

可靠性增长模型近年来大量被运用于复杂装备的研制过程中。冯静^[29]针对航天产品小子样、变总体的特点,研究了可靠性增长建模中的数据融合问题;刘飞^[30]针对固体火箭发动机的可靠性增长的特点,在 Bayes 方法的基础上系统研究了可靠性增长试验管理、规划和分析方法,具有很好的实用价值;刘洋等^[31]运用 AMSAA 模型,结合两次联试阶段截尾数据计算,得到了雷达平均寿命的数学表达式,从而揭示了航天测控雷达在设计定型后装备使用前的调整过程中的可靠性增长规律,最后采用两阶段截尾时刻的平均寿命估计值是否落在指数分布验证值的置信区间内的检测手段,验证了该方法的正确性;程皖民等^[32]针对武器装备小子样、不可修的特点,提出了 Bayes 可靠性增长分析方法:首先利用多台产品异步增长理论得到各阶段试验数据的似然函数,然后构造了增长模型参数的 Gamma-均匀验前分布并给出了模型参数估计的 ML-II 方法,通过 Bayes 统计推断对装备研制全过程的可靠性增长规律进行分析,最后通过仿真示例说明了该方法在工程上的应用。

3 协同研制背景下复杂装备可靠性增长模型

现代复杂装备的研制特征决定了其可靠性增长过程融于相对独立的各系统研制过程。作为多系统耦合系统和整体装备进行可靠性试验与增长的独立过程时间短、可获取的样本量小,然而经典的可靠性增长模型大多是以大样本为基础的概率统计模型,近年来也有许多学者和实际工作者对小子样、变动统计样本、底层子系统的折中数据和 Bayes 推理模型等问题进行了一定的探讨,但是对于由若干主制造商和供应商在分布式协同创新模式下,复杂装备研制可靠性增长模型的系统研究尚不多见,远不能满足复杂装备研制实际工作的需要,因此本文提出以下模型构想,以此来解决协同研制背景下复杂装备可靠性增长问题。

3.1 故障树 FTAoPSD 网络框架

复杂装备研制过程的特性决定了其参与研制的供应商众多,可分为不同的层次;装备的可靠性增长主要任务首先是由各系统供应商各自独立完

成,而后再由作为系统综合集成的主制造商花费一定的时间(通常都比较短),进行装备级性能和可靠性增长综合试验与调试,完成其装备可靠性增长过程。通过大量的实际调研和文献研究发现,目前还没有一种能够系统描述这种可靠性增长过程的模型,用以满足复杂装备可靠性增长过程的迫切需要。复杂装备可靠性增长故障树 FTAoPSD 网络模型的构建,应首先梳理复杂装备主制造商-供应商之间的工作原理与物理、逻辑结构,建立主制造商与供应商的可靠性增长网络框架结构和协同可靠性增长机制分析模型;揭示主制造商-供应商协同研制背景的复杂装备可靠性增长机理;借助供应商在系统研制过程中的 FMECA 信息,建立故障树 FTAoPSD 网络模型,根据质量损失原理,将可靠性质量损失分配至子系统供应商的每一个节点。

3.2 GERT 网络模型构建与求解问题

复杂装备可靠性增长故障树 FTAoPSD 网络模型对静态或一步概率转移网络的运算比较方便,而对于存在自环、动态多步转移概率、分布函数传递等复杂问题的深入表征与运算分析存在一定的障碍。以可靠性增长故障树 FTAoPSD 网络模型为基础,运用 GERT 网络理论思想方法和技术,建立其相应的 GAN 网络,并运用 GERT 网络逻辑设计与转换规则,将 GAN 网络转化成主制造商-供应商协同研制过程的复杂装备可靠性增长 GERT 网络模型;利用经典可靠性增长模型描述可靠性增长过程,并基于供应商投入资源之间的映射关系,对可靠性增长 GERT 网络参数赋值问题进行研究;最后运用智能代理技术和排队论思想方法,为复杂装备可靠性增长 GERT 网络模型的求解问题提供完整解决方案。

3.3 GERT 网络评价与预测问题

可靠性增长模型的核心功能就是对系统可靠性增长情况进行科学的评价与预测。在基于系统供应商分布式协同研制背景的复杂装备可靠性增长过程中,相对独立个体系统,其可靠性增长的评价与预测问题可以运用经典模型。通过大量的实际调研和文献研究发现,对于由若干子系统构成的耦合系统或装备整体的可靠性增长评价与预测问题,目前还难以找到一种科学系统地解决办法。依据 3.2 节中的复杂装备可靠性增长 GERT 网络模型,分析子系统在装备中的敏感性和重要性,建立基于可靠性增长 GERT 网络的多子系统可靠性试验数据“折中传递”模型,充分挖掘小子样信息;在获取先验分布信息的基础上,建立基于 GERT 网络的复杂装备可靠性增长变动样本、小子样和动态评价 Bayes 推理模型;运用随机网络理论及其解析算法,构造基于分布式协同研制背景的可靠性改进有效性系数和增长潜力估计 Bayes 推理模型;最后

运用矩母函数理论和优化技术方法,结合具有贫信息特征的灰色系统评价和预测技术,构建基于灰色 GERT 网络的可靠性增长供应商资源最优配置模型,为复杂装备可靠性增长供应商资源最优配置问题提供科学解决方案。

4 结束语

现代复杂装备的研制无不是多系统协同创新研制过程,一般采用主制造商-供应商组织管理模式。其可靠性增长过程呈现出融于科研生产一体化、分布式网络化协同、重要系统供应商起决定性作用等特征,其可获取的数据信息也呈现出多源、异构,且大数据与小子样共存的特征。大量的实际调研工作与文献研究表明,现有的可靠性增长模型不能很好地适应这些特征。本文吸纳相关领域的最新研究成果,综合运用概率论、GERT 网络技术、Bayes 推理与分析方法、灰色系统模型等先进工具,提出了协同研制背景下复杂装备可靠性增长的故障树 FTAoPSD 网络框架设计、GERT 网络模型和评价与预测模型,在新的视角下为协同研制背景下复杂装备可靠性增长评价与预测问题提供系统、科学的解决方案。

参考文献:

- [1] KECECIOGLU D, SIYUAN J, VASSILIOU P. The modified Gompertz reliability growth model[C]//Reliability and Maintainability Symposium. Anaheim, CA, USA: IEEE, 1994: 160-165.
- [2] FEINBERG A. Chi-squared accelerated reliability growth model[C]//59th Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). Orlando, FL, USA: IEEE, 2013: 1-4.
- [3] BIDHAN K, AWASTHI A. Estimation of reliability parameters of software growth models using a variation of particle swarm optimization[C]//2014 5th International Conference Confluence the Next Generation Information Technology Summit (Confluence). Noida, India: IEEE, 2014: 800-805.
- [4] 周源泉, 朱新伟. 论加速可靠性增长试验(II): 理论基础[J]. 推进技术, 2001, 22(1): 1-5.
ZHOU Yuanquan, ZHU Xinwei. Research on accelerated reliability growth testing(II): Theoretic basics [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(1): 1-5.
- [5] 明志茂, 张云安, 陶俊勇, 等. 研制阶段系统可靠性增长的 Bayesian 评估与预测[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 150-156.
MING Zhimao, ZHANG Yunan, TAO Junyong, et al. Bayesian reliability assessment and prediction during product development[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4): 150-156.
- [6] 刘琦, 武小悦. 复杂系统可靠性增长试验评价的集成分析模型[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(8): 1477-1483.
LIU Qi, WU Xiaoyue. Integrated analysis model for reliability growth test evaluation of complex system [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2010, 30(8): 1477-1483.
- [7] 谢景燕, 安金霞, 朱纪洪. 考虑不完美排错情况的 NHPP 类软件可靠性增长模型[J]. 软件学报, 2010, 21(5): 942-949.
XIE Jingyan, AN Jinxia, ZHU Jihong. NHPP software reliability growth model considering imperfect debugging[J]. Journal of Software, 2010, 21(5): 942-949.
- [8] JIANG Y, YAN Z, XIE H. The analysis of reliability growth tests based on conversion factor when considering robustness[C]//International Conference on Risk and Reliability Management (RRM 2008). Beijing, China: Operations Research Society of China, 2008: 637-640.
- [9] CAI Zhongyi, CHEN Yunxiang, ZHANG Zhiguo, et al. Method on integrated reliability assessment of test data based on Duane model[C]//2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). [S. l.]: IEEE, 2014: 737-740.
- [10] YANG Q, TENG H, GUO K, et al. A reliability assessment method for complex system based on information conversion and fusion technologies[C]//Progress in Safety Science and Technology Series. Beijing: Science Press, 2010: 1876-1882.
- [11] WANG Y, MU X, NIU Y, et al. The Application of information fusion in reliability evaluation of complex electromechanical system[C]//AER-Advances in Engineering Research. [S. l.]: Nova Publishers, 2015: 1490-1493.
- [12] 胡明祥, 宋保维, 邵成. 复杂设备可靠性增长中的一种精确分析方法[J]. 机械设计与制造, 2006(9): 15-17.
HU Mingxiang, SONG Baowei, SHAO Cheng. Precise reliability growth analysis of complex equipment [J]. Machinery Design & Manufacture, 2006(9): 15-17.
- [13] 赵宇, 王智, 黄敏. 产品研制阶段可靠性增长过程的综合分析[J]. 实验技术与管理, 2001, 18(4): 115-118.
ZHAO Yu, WANG Zhi, HUANG Min. Analysis on the reliability growth process in product development phase[J]. Experimental Technologies and Management, 2001, 18(4): 115-118.
- [14] 刘解放, 刘思峰, 方志耕. 成熟型产品可靠性评价的加权 Bayes 方法[J]. 中国机械工程, 2013(24): 3371-3374.
LIU Jiefang, LIU Sifeng, FANG Zhigeng. Weighted Bayesian method of reliability evaluation for binomial

- products[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013(24):3371-3374.
- [15] 贾志新, 张宏斌, 郗安民. 基于径向基函数神经网络的电火花线切割机床可靠性数据模拟生成[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(2):145-149.
JIA Zhixin, ZHANG Hongbin, XI Anmin. Simulating and extending wire electrical discharge machining reliability data by radial basis function neural network[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2):145-149.
- [16] 刘洁梁, 王宏力, 崔祥祥. 贫数据多退化量产品可靠性评估[J]. *电光与控制*, 2014(2):77-79.
LIU Jieliang, WANG Hongli, CUI Xiangxiang. Product reliability evaluation on multivariate degradation measures with few[J]. *Data Electronics Optics & Control*, 2014(2):77-79.
- [17] SAVCHUK V P, MARTZ H F. Bayes reliability estimation using multiple sources of prior information: binomial sampling[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1994, 43(1):138-144.
- [18] RAUSAND M, HØYLAND A. Bayesian reliability analysis[M]. [S. l.]: John Wiley & Sons Press, 1982.
- [19] XING Yunyan, WU Xiaoyue. Bayesian sequential testing for exponential life system with reliability growth[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(6):1023-1029.
- [20] HUANG Z. Analysis of manufacturing execution systems reliability growth based on Bayesian information fusion[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013:2324-2328.
- [21] 于春雨, 苏子美, 孙永全, 等. 指数型产品多阶段可靠性增长的 Bayes 模型[J]. *中国机械工程*, 2015(23):3146-3149.
YU Chunyu, SU Zimei, SUN Yongquan, et al. Bayes model of exponential product multi-stage reliability growth[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015(23):3146-3149.
- [22] HYEONGJIN S, CHOI K K, IKJIN L, et al. Adaptive virtual support vector machine for reliability analysis of high-dimensional problems[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, 47(4):479-491.
- [23] 洪东跑, 赵宇, 温玉全. 基于虚拟样本的火工品可靠性评估[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(6):669-672.
HONG Dongpao, ZHAO Yu, WEN Yuquan. Reliability assessment for explosive initiator using virtual samples[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(6):669-672.
- [24] 徐宇亮, 陈西宏, 孙际哲, 等. 采用虚拟样本加速退化试验的复杂电子设备可靠性评估[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(6):79-84.
XU Yuliang, CHEN Xihong, SUN Jizhe, et al. Reliability assessment for complicated electronic equipment with virtual samples of accelerated degradation tests[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(6):79-84.
- [25] 张永进, 孙有朝, 张燕军. 基于虚拟失效序列样本的系统实时可靠性研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(5):1339-1345.
ZHANG Yongjin, SUN Youchao, ZHANG Yanjun. Real-time reliability of system based on virtual failure sequence samples[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(5):1339-1345.
- [26] BARNAT S, GUÉDON-GRACIA A, FRÉMONT H. Virtual prototyping in a Design-for-Reliability approach[J]. *Microelectronics Reliability*, 2015, 55:1849-1854.
- [27] 王惠方, 潘江峰, 宋华斌, 等. 基于虚拟样机的某弹协调器定位可靠性分析[J]. *火炮发射与控制学报*, 2015, 36(3):27-30.
WANG Huifang, PAN Jiangfeng, SONG Huabin, et al. Analysis on positioning reliability of the coordinator based on virtual prototype[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2015, 36(3):27-30.
- [28] 于霖冲, 白广忱, 焦俊婷, 等. 空间站展开机构虚拟样机仿真及可靠性分析[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(1):78-80.
YU Linchong, BAI Guangchen, JIAO Junting, et al. Virtual prototype simulation and reliability analysis of space station expand mechanism[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(1):78-80.
- [29] 冯静. 小子样复杂系统可靠性信息融合方法与应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004.
FENG Jing. Study on the method of reliability information fusion and application for complex system with small sample[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
- [30] 刘飞. 固体火箭发动机可靠性增长试验理论及应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
LIU Fei. Research on methods and applications of reliability growth for solid rocket motor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [31] 刘洋, 杨奕飞. 某航天测控雷达的可靠性增长试验方法探析[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2005, 23(2):8-11.
LIU Yang, YANG Yifei. The analysis of a TT&C radar's reliability growth test[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2005, 23(2):8-11.
- [32] 程皖民, 冯静, 周经伦, 等. 小子样不可修武器装备的 Bayes 可靠性增长分析[J]. *电讯技术*, 2007, 47(1):13-16.
CHENG Wanmin, FENG Jing, ZHOU Jinglun, et al. Bayes reliability growth analysis for non-repairable arm equipment with small samples[J]. *Telecommunication Engineering*, 2007, 47(1):13-16.