

发射场地面设施设备可靠性设计分析方法探讨

刘占卿 郑明强

(北京特种工程设计研究院)

摘 要 阐述了发射场地面设施设备可靠性系统工程体系的主要研究内容、主要内容及分析的指标、用途;探讨了在方案论证、研制设计、试验生产等过程中推广应用可靠性设计、分析、试验验证方法的基本思路,提出了在不同阶段开展可靠性工作的主要内容、要求及所要达到的工作目标,以及所需的技术保障措施等,对于促进可靠性技术在发射场设施设备研制建设中的应用具有参考意义。

关键词 发射场 地面设施设备 可靠性设计 可靠性分析

1 前言

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。为了达到系统可靠性要求,从方案论证开始至系统报废整个寿命周期内,都需要有计划地开展有关设计、试验和生产等一系列可靠性工作。据美国海军电子实验室统计,产品不可靠的原因中,设计占 40%,元器件或零部件占 30%,使用维护占 20%,制造占 10%。日本电子行业的统计为:设计占 80%,元器件或零部件占 15%,制造工艺占 5%。我国对军用雷达和民用电视机的现场故障统计分析也表明,设计不合理是导致故障发生的主要原因。因此,提高系统和产品的可靠性,关键在于搞好产品的可靠性设计工作,在进行可靠性设计工作中,可靠性分析又是必不可少的。

发射场地面设施设备是顺利完成航天科研试验测试发射任务的重要技术支持与勤务保障系统,技术难度大、复杂程度高,其可靠性水平的高低直接影响到任务的顺利实施。将可靠性工程在发射场地面设施设备研制建设中推广应用,建立完善的评价机制、标准,以及相应的状态检测手段和质量评价体系等,是确保航天科研试验高可靠性、进一步提高试验任务保障能力、促进地面设施设备安全管理的科学化和规范化的需要。

2 地面设施设备可靠性系统工程主要研究内容

地面设施设备任务时刻的可用性取决于设施设

备的可靠性(Reliability)、维修性(Maintainability)和保障性(Supportability),因此,地面设施设备可靠性系统工程主要研究内容包括可靠性设计与分析、维修性分析和保障性分析(简称 RMS)。

开展发射场地面设施设备可靠性设计与分析,主要是帮助设计人员和决策人员从各种设计方案中选择满足可靠性要求的最佳方案;保证在系统设计和设备研制过程中对各种故障模式、影响及危害性都经过周密考虑;查找确定对系统故障具有重大影响的零部件、设备、分系统,开展针对性设计和设备选型等。

开展发射场地面设施设备维修性分析,主要用于三个方面:一是论证确定维修性要求,建立维修性设计方法、准则,把维修性设计到设施设备研制建设中去;二是进行地面设施设备维修性管理,制定维修性工作计划,建立对设备承制方的监督与控制,建立地面设施设备数据、分析与纠正措施系统;三是开展与设施设备维修密切相关的测试性设计与验证,及时、准确地检测隔离故障,确定设施设备状态。

针对发射场地面设施设备研制建设,开展保障性分析主要应用于两个方面:一是提出地面设施设备有关保障性的设计因素,通过使用保障问题分析以影响设施设备研究设计,确定设计与保障之间具有最佳协调关系;二是确定设施设备保障资源,获得在日常维护、使用管理中所需的保障要求。保障性分析需要综合考虑可靠性、维修性、测试性等分析结果,如以可靠性为中心的维修性分析、维修级别分析、故障诊断权衡分析、使用与维修工作分析、寿命

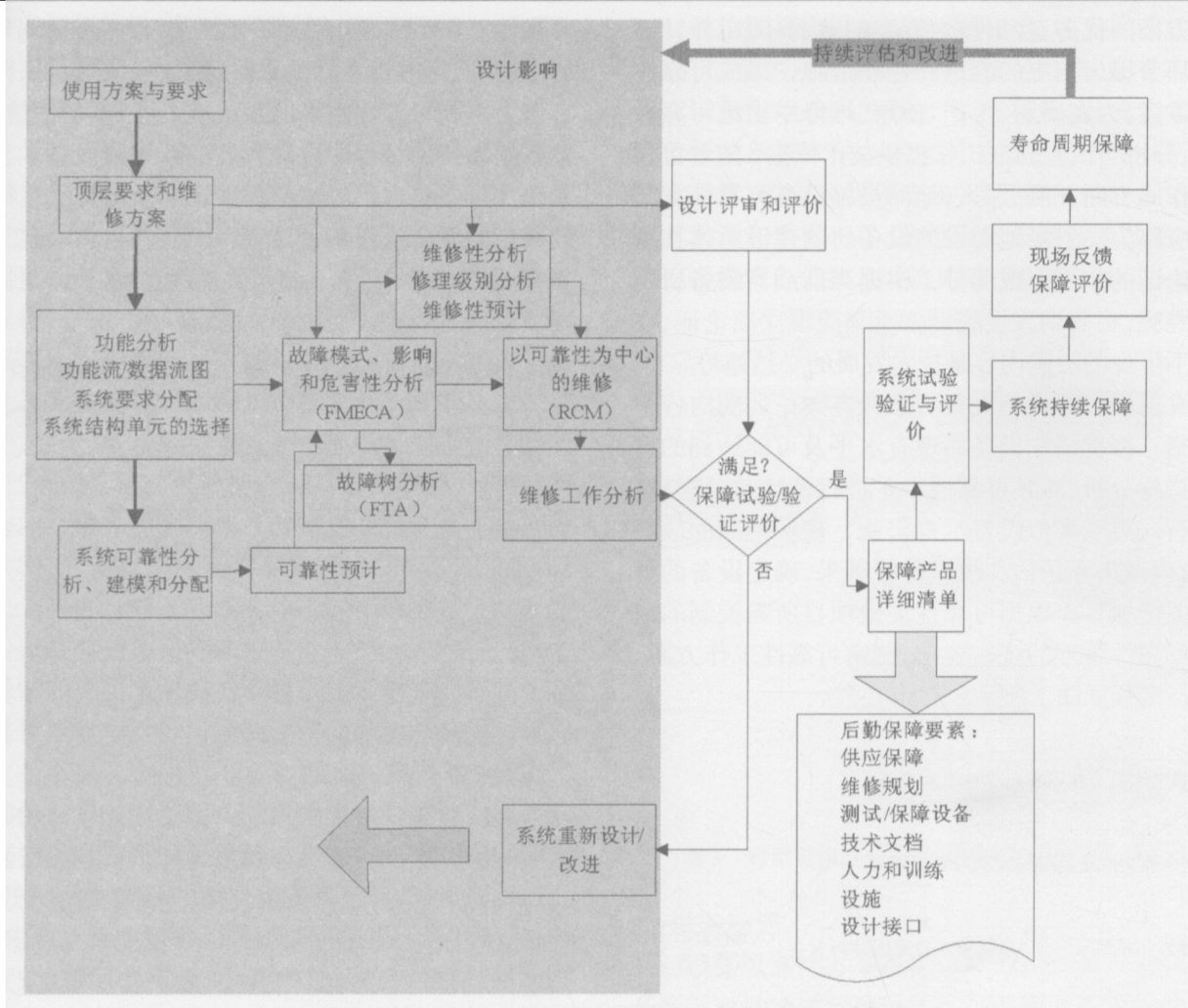


图 1 发射场地面设施设备可靠性系统工程技术流程示意图

周期费用分析等。

按照上述可靠性工作内容与目标，初步考虑发射场地面设施设备可靠性系统工程技术流程如图 1 所示。

发射场地面设施设备系统可靠性、维修性、保障性分析指标可归纳为四大类，即与地面设施设备完好性、执行任务成功性、维修人力与费用、保障资源与费用等有关的参数。其中，完好性是指地面设施设备在参加试验任务前，现有状态、完成试验任务计划的能力，可靠性指标包括平均故障间隔时间 (MTBF)、平均维修间隔时间 (MTBM) 等；任务成功性是指在规定的任务剖面内所涉及到的设施设备，在任意时刻能够正常工作 and 完成规定功能的能力和概率，可靠性指标包括完成任务的成功概率 (MCSP)、致命性故障间的任务时间 (MTBCF) 等；维修性参数是确立维修人力资源、维修费用有关的指标，主要包括平均故障间隔时间 (MTBF)、平均维修间隔时间 (MTBM) 等；与保障资源费用有关的系统可靠性、维

修性参数关系到系统对备件、维修工具和设备、维修设施的要求，其参数主要包括应急条件下故障排除、快速修复时间等。

3 可靠性设计分析在设施设备研制建设中的实施过程

发射场地面设施设备可靠性工程贯穿于设施设备方案论证、研制设计、试验、生产、设备选型、使用维护的每一个过程，对可靠性工作进行评价的重要标准之一就是在设施设备全寿命管理过程中是否能够有效地对其可能的故障加以识别和控制。以下针对影响可靠性水平最为关键的方案论证、研制设计等阶段的可靠性工作进行论述，明确在不同阶段可靠性工作内容、要求，所要达到的工作目标，以及一般的工作程序等。

3.1 可靠性方案论证

可靠性方案论证的作用是从可靠性的角度评价

技术方案的优劣,找出技术方案的薄弱环节,并针对薄弱环节提出相应的改进和控制措施,形成可靠性工作方案,为在研制、生产、使用、维修中实施可靠性设计、分析与试验验证工作提供技术依据。随着可靠性工作的不断开展、深入,地面设施设备可靠性方案论证应作为发射场地面设施设备研制建设总体技术方案论证的重要组成部分,根据当前武器装备研制建设经验,将其纳入设施设备研制建设立项论证、作为必不可少的重要内容是技术发展的必然趋势。

发射场地面设施设备可靠性方案论证的内容主要包括:根据研制设备的现有水平及可能达到的可靠性指标分析,对其可靠性水平进行预计与分配;统计分析同类或类似设备工程研制、现场使用的故障数据;根据指标预估和故障分析结果,确定设备的可靠性关键项目;根据可靠性关键项目所需控制的内容和可靠性管理的统一要求,制定可靠性工作方案。其工作流程如图 2 所示。

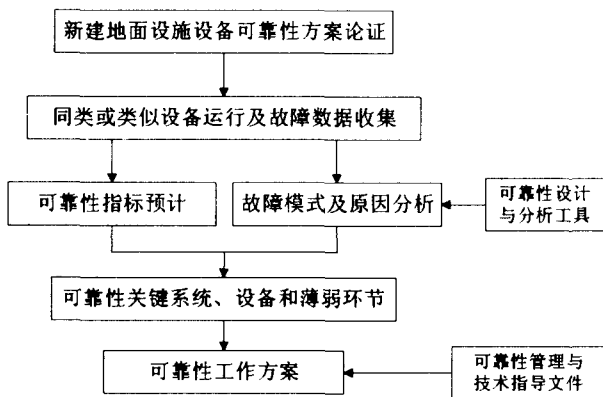


图 2 发射场地面设施设备可靠性方案论证工作流程

地面设施设备可靠性指标主要包括固有可靠度、任务可靠度等,如果具有充足的可靠性数据,可以比较准确地预估总体技术方案所能达到的可靠性水平,但是在方案论证阶段数据统计不够,很难做到这一点。因此,预计的方法宜采取相似法与专家评分法相结合的方式,或者采用故障预计法。

故障分析的内容主要包括出现过哪些故障、故障的影响性和危害性、频发故障的模式、引发故障的主要原因、在设计生产与维护中消除这些故障模式或降低故障率的措施与方法。故障分析可以采用 FMECA、FTA 或 RBD 等分析方法。

确定关键系统、设备和薄弱环节主要是为以后的设计、生产、试验过程中针对性地对关键项目开展

可靠性工作。确定可靠性关键系统、设备和薄弱环节的准则为:可靠性预计的水平远低于其它设备,同时有潜力提高可靠性水平的系统或设备;类似系统、设备研制和使用过程中故障频发的系统或设备;类似系统、设备出现了故障但未能证明故障模式已能有效避免的系统或设备;采用新技术、新材料、新工艺,具有质量奉献的设备。确定关键性系统、设备可以采用项目列表的格式^[2],如表 1 所示:

表 1 发射场地面设施设备可靠性关键系统及设备项目清单

系统设备名称		
确定理由		
改进/控制内容		
建议采取的措施		
措施适用阶段		

可靠性工作方案是可靠性总体论证工作的最终成果,是在系统和设备研制建设过程中开展可靠性工作的基本思路、要求及其适用的阶段。可靠性工作方案的内容主要是对确定的关键系统或设备所能够采取的改进或控制措施,包括管理因素和相应阶段的技术因素,具备包括四个方面的可靠性保证工作:一是管理保证,应进行的可靠性管理项目及要求,包括评审、信息、人员、机构等;二是设计保证,方案阶段和工程研制阶段应进行的可靠性设计、分析工作项目及其技术要求,包括建模、分配、预计、制定与实施设计准则、FMEA、FTA、试验验证及评估等;三是生产保证,工艺设计、施工和工程试验中应进行的工作项目及其技术要求,包括过程 FMEA、关键工序质量控制、产品可靠性评价等;四是使用与维修保证,使用维修过程中应注意和控制的内容及其要求,包括备品备件、预防性维修方案、数据采集等。

3.2 可靠性设计

根据可靠性方案论证结果,针对确定的关键系统和设备开展可靠性设计,其主要内容包括:

(1) 制定可靠性设计准则

把已有的、相似产品的工程经验总结起来,使其条理化、系统化、科学化,成为设计人员进行可靠性设计所遵循的原则和应满足的要求。发射场地面设施设备研制设计中制定的可靠性设计准则主要内容应包括概述、目的、使用范围、依据、可靠性设计准则等几个部分。如部分机械设备环境设计准则“应使电路和结构的设计对机械环境的响应程度最小;元器件、零

部件及材料特性应满足产品机械环境要求;细长或较重的零部件应予以固定以防振动疲劳断裂”等。

(2) 元器件、零部件或标准设备的选择控制

元器件(如集成电路、变压器、继电器、电缆等)、零部件(螺栓、轴承、弹簧、齿轮等)分别是发射场地面设施设备中广泛采用的电子电气系统、机械系统的基础组成部分,其性能、可靠性、费用等参数对整个系统性能、可靠性、寿命周期、费用等具有重要影响,因此,它们也是可靠性设计工作中的一个关键环节。作为发射场地面设施设备研制设计与技术把关部门,对于元器件、零部件或标准设备的选择控制要制定元器件、零部件或标准设备选择控制方案,提出其选用要求和控制程序,保证其选用控制工作的顺利进行。

元器件、零部件或标准设备选择控制方案主要是根据任务的致命性和重要性、产品的复杂程度、产品和零部件分类情况、生产数量、维修方案等因素来确定元器件、零部件或设备选择的控制深度和广度,明确是全面控制还是对部分系统和设备的元器件、零部件选择予以控制;方案中需要列出控制优选的元器件、零部件名称和种类,作为编制元器件、零部件或设备优选清单的依据,规定选用的优先顺序。

(3) 地面设施设备常用可靠性设计方法

发射场地面设施设备常用可靠性设计方法包括降额设计、简化设计、余度技术、耐环境设计等。降额设计要求使元器件、零部件和设备工作时承受的工作应力适当低于元器件、零部件和设备规定的额定值。简化设计要求在保证性能要求的前提下,尽可能使设计简单化。余度技术是为系统或设备获得高可靠性、高安全性的设计方法之一,采用余度技术需要处理好需要与可能的关系。发射场地面设施设备耐环境设计主要包括气象环境条件(如温湿度、风雨雪、沙尘、盐雾腐蚀等)、机械环境条件(如振动、冲击、爆炸、冲击波等)、电环境条件(如电场、磁场、雷击等)、辐射环境条件(如太阳辐射、射线防护等)、人为因素(使用、维护等)。

3.3 可靠性分析

发射场已建成的地面设施设备,从平时维护和保障角度、从完成规定试验任务角度,均要求进行可靠性分析,分析内容主要包括设施设备固有可靠性分析和设施设备任务可靠性分析,其目的分别是为实施技术改造(维修、更新改造或改进设计等)提供科学依据,评估设施设备参与执行任务的可靠度水平。

以论证提出设施设备技术改造项目和改造内容为例,可靠性分析主要是根据任务需求,结合以往系统或设备出现故障的频繁性、危害程度,确定需要重点分析的系统和设备;进行 FMECA、FTA 分析及重要度计算,确定薄弱环节和关键部件,结合设施设备状态检测和质量水平,依据设施设备技术改造准则,决策设施设备的技术改造内容,其流程如图 3 所示。

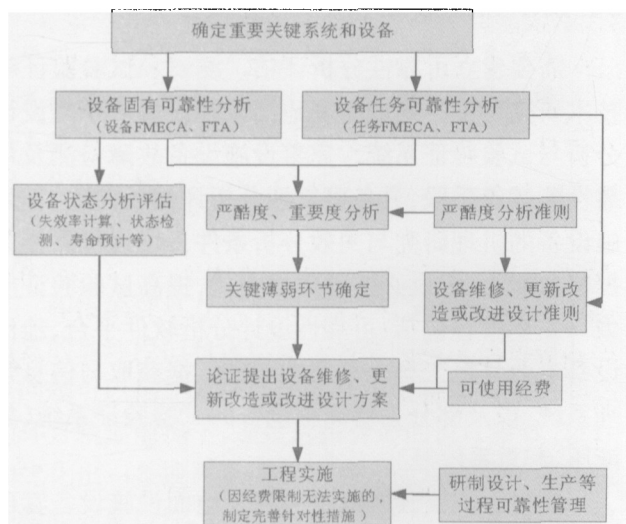


图 3 利用可靠性分析确定设施设备技术改造方案

3.4 试验验证

根据可靠性方案论证中确定的试验项目,需要开展针对性地试验验证工作,主要验证可靠性设计的故障模式、影响及危害性,验证其边界环境应力条件下的工作性能等。试验验证计划的制定通常与前期的 FMEA、FTA 工作有关,其分析工作的详细全面及准确性在很大程度上影响着试验验证的结果。以验证 FMEA 分析结果为例,试验验证与可靠性分析工作的迭代关系如图 4 所示。

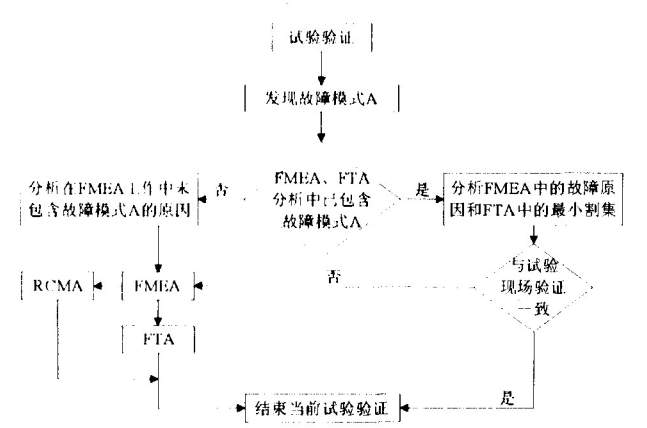


图 4 试验验证与可靠性分析的迭代关系示意图(以 FMEA 分析为例)

如图所示, 试验验证过程中出现了未曾预测到的故障模式, 需要充分分析在 FMEA、FTA 中没有考虑到该故障模式的原因, 以逐步提高可靠性分析的水平。由上图还可看出, 对故障模式的试验验证, 同时也是可靠性分析全面性、准确性的迭代完善过程, 从而保证系统分析的正确性和合理性。

5 技术保障措施

需要建立可靠性分析评估、测试和试验验证等技术研究环境, 建成一套地面设施设备可靠性设计与试验验证系统, 完善设施设备故障检测及可靠性测试等手段, 具备可靠性分析评估条件、关键设施设备的机理研究与失效分析条件, 增强可靠性数据获取能力、提供必要的技术支持, 提高试验验证能力。主要内容包括: 可靠性设计分析软件平台、地面设备专业分析工具, 可靠性基础数据获取与信息管理系统, 以及部分关键设施设备的试验验证系统(如液压、起重系统等)。

同时, 需要开展以研究制定地面设施设备管理使用规范、标准为代表的一系列关键技术研究, 进一步规范以可靠性为中心的质量管理工作, 涉及设施设备设计、生产、使用、管理、维修、检测等方面, 为规

范设施设备设计、生产工艺控制、设备选择、以及维修的时机、级别、维修方案等提供依据, 提高质量管理规范化、科学化水平。

6 结束语

可靠性设计分析方法在发射场地面设施设备研制建设中的应用, 有助于提高试验任务保障能力, 有助于提高地面设施设备可靠性设计水平, 有助于促进地面设施设备安全管理的科学化和规范化, 有助于推动以可靠性为中心的维修分析工作的全面开展, 以及状态检测、故障监测与诊断技术的广泛应用。

文中就发射场地面设施设备可靠性系统工程的构成、在设施设备研制建设各个阶段中建立可审核、可部署、可操作、可检查的可靠性工作内容、目标及要求进行了研究探讨, 对于促进可靠性研究的工程应用具有指导意义。◇

参考文献

- [1] 陆廷孝、郑鹏洲、何国伟、曾声奎, 可靠性设计与分析, 国防工业出版社, 1995
- [2] 方颖、王大钧, 舰船总体研制可靠性方案论证方法初步探讨, 第一届中国地区 Isograph 用户年会论文专辑, 2006.6

(上接第 23 页)

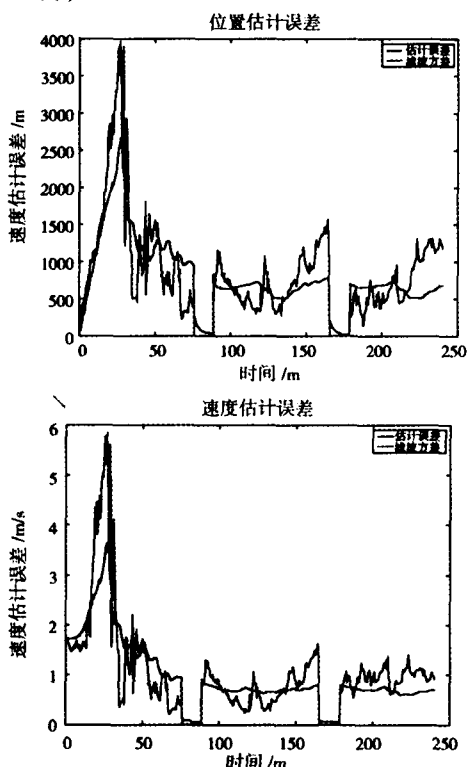


图 2 基于信息融合的 UKF 滤波估计结果

种方法的导航系统都具有更高的定位导航精度, 文中提出将直接敏感地平的天文方法和单程多普勒频移定位相融合, 利用 UKF 进行滤波既提高了导航定位精度, 又提高了系统的可靠性和容错性能。◇

参考文献

- [1] 房建成, 宁晓琳. 航天器天文导航原理与应用[M]. 国防工业出版社, 2006.
- [2] CARLSONNA. Information-Sharing Approach of federated Kalman Filter. Proceedings of National Aerospace Electronics Conference, Dayton, OH, USA, 1988.
- [3] Anthony J. Autonomous Space Navigation Experiment. Paper No. AIAA92-1701:1-22.
- [4] 房建成, 宁晓琳等. 航天器天文导航原理与方法. 国防工业出版社, 2005.
- [5] 刘林. 卫星轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [6] 宁晓琳, 房建成. 卫星自主天文导航系统中的可观测性及可观测性分析. 北京航空航天大学学报, 31(6): 673-677.
- [7] 张瑜, 房建成. 基于 Unscented 卡尔曼滤波器的卫星自主天文导航研究. 宇航学报, 2003, 24(6): 646-650.