

导弹武器装备维修性定量指标的评估验证

中国运载火箭技术研究院总体设计部 王 静

摘 要 阐述了导弹武器系统维修性参数的选择及指标确定与分解的方法,探讨了如何从研制试验中积累维修性数据,以及导弹武器装备维修性定量指标的评估验证方法。

关键词 导弹武器装备 维修性 指标 评估

引言

维修性是“产品在规定的维护和修理级别,使用规定的程序和资源,当具有规定的技能水平的人员进行维修时,保持或恢复到规定状态的能力。”我们说维修性是一个设计参数,是由产品设计赋予的使其维修简便、迅速和经济的一种固有特性,因为尽管经过强化培训的人员和快速反应的后勤保障体系,有助于保持系统不工作时间为一个绝对小量,系统的固有维修性才是这个绝对小量的决定因素。改善维修人员的培训程度和保障系统并不能有效地补偿一个设计低劣(对维修性而言)的产品对可用度所造成的损害。因此,系统设计的高可靠和可维修才是减少系统保障费用、提高其可用度的最好途径。

我国新一代武器装备都提出了严格的战备完好性指标要求,有的还直接提出了维修性定量指标要求。但是,相对于可靠性工作,型号中的维修性设计、分析、试验、验证等维修性保证工作要薄弱得多,本文阐述了导弹武器系统维修性参数的选择及指标确定与分解的方法,给出了如何从研制试验中积累维修性数据,从而完成对导弹武器装备维修性定量指标的评估验证。

1 导弹武器系统维修性参数的选择及指标确定

1.1 常用的维修性指标参数

由于产品的战备完好性、任务成功、维修人力或保障系统等目标的不同,而对其维修性参数的选

择和指标的规定也有所不同。维修性参数有维修时间参数、工时参数及测试性参数等类别。一般而言,导弹武器系统最重要的维修性参数有如下几个(见表1)。

表1 导弹武器系统主要的维修性参数

指标名称、数学符号	说 明
平均修复时间 ($MTTR, \bar{M}_{ct}$)	系统维修活动(不包括预防性维修)的维修周期时间的算术平均值。
平均预防性维修时间 ($\bar{M}_{pt}$)	系统预防性维修活动(周期性检查、校准、有计划更换等等)的维修周期的算术平均值。
平均维修时间($\bar{M}$)	维修(预防性和修复性)需用的平均时间,不包括后勤和管理延误时间。
平均停机时间 (MDT)	系统因修理或预防性维修而引起的不工作时间的平均值,包括后勤和管理延误时间。
最大修复时间 ($\bar{M}_{max}$)	维修引起的系统最大不工作间值。主要针对对数正态分布,必须规定某一给定的百分位点,通常取90%或95%。

这些参数要根据装备类型的特点选择,一般确定1~2个进行定量指标的确定、验证和评估。

还有一些严重影响维修性的测试性的参数指标,包括:

1) 故障检测率:用规定的方法正确检测到的故障数和故障总数之比,用百分数表示。

2) 故障隔离率:用规定的方法将检测到的故障正确隔离到不大于规定模糊度的故障数与检测到的故障数之比,用百分数表示。

3) 虚警率:在规定的时间内发生的虚警数和同一时间内的故障指示总数之比。

在合同或研制任务书中规定的维修性指标,称为维修性合同指标,一般而言,维修性合同指标应给出规定值和最低可接受值。

1.2 系统维修性定量指标的确定与分解

一个系统的维修性由构成系统的各部分的维修性及其接口特性决定。若系统由 n 个可修项目组成,每个可修项目的平均故障率和相应的平均修复时间为已知,则系统的平均维修时间为

$$\bar{M}_{ct} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{M}_{cti}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (1)$$

式中: λ_i 为第 i 个项目的故障率 (1/h); $\bar{M}_{cti}$ 为第 i 个项目的故障平均修复时间,单位为小时 (h)。

设定某导弹武器系统由弹头系统、控制系统、发动机系统、末修动力装置、分离系统、结构系统、地面发射系统等组成。其任务剖面包括贮存、技术准备、待机准备、发射准备、导弹飞行 5 个阶段,相关的可靠性、维修性指标包括:贮存可靠性 R_c 、贮存完好率 A_c 、技术准备完好率 A_j 、技术阵地平均修复时间 $MTTR_j$ 、待机准备完好率 A_d 、待机阵地平均修复时间 $MTTR_d$ 、飞行可靠性 R_f 。假定各分系统为串联关系,产品维修为现场级,各分系统维修难度存在差异。则技术准备失效率 λ_j 由 (2) 式预测确定:

$$\lambda_j = \frac{1 - A_j}{(MTTR)_j A_j} \quad (2)$$

第 i 个分系统技术准备平均修复时间分配值由公式 (3) 确定:

$$(MTTR)_i = \frac{1 - A_i}{\lambda_j A_i} \quad (3)$$

式中: A_i 为第 i 个分系统技术准备完好率的分配值; λ_j 为第 i 个分系统技术准备失效率的分配值。

待机准备失效率、各分系统待机准备平均修复时间的分解方法同上。

2 维修性试验与评价的几种类型

维修性试验与评价是通过相应的手段,及时检验、证明产品实际具有的维修性水平是否满足要求。评价包括定性要求的维修性设计评价和利用试验结果的定量评价。维修性试验与评价的目的首先

是发现和鉴别维修性设计缺陷,通过改进设计或改善保障条件来提高维修性,实现维修性增长;其次是考核、检验产品满足维修性定量与定性要求的程度,作为产品鉴定或验收的依据。

维修性试验验证是通过维修性试验考核产品是否符合规定的维修性要求而进行的定量验证。试验是目前最可靠的验证的方法,凡是有维修性定量要求且具备条件的产品都应进行维修性试验验证。表 2 列出了维修性试验的几种类型和目的。

表2 维修性试验的几种类型

试验类型	目 的
功能	验证产品或产品功能,例如状态监控和机内测试 (BIT),是否起到预知的作用。这类试验典型地包括将已知的激励或一组激励加到测试产品上,并将产品的响应与已知的响应或一组响应作比较。
性能	验证产品功能的性能水平是否满足要求。维修性性能试验的特殊类型是 BIT 和诊断试验。
验证	产品研制全过程中连续进行验证,以确定从工程分析中获得的分析数据的准确性并对其进行更新。验证通常在任何计划的验证或评估试验之前进行,为产品维修性可以达到和演示提供保证。注意收集各种类型的试验数据,诸如从诊断的功能试验中收集,数据应当用于维修性分析和要求的验证。
演示	通常是一个正式的由产品设计者和最终顾客实施的过程,以确定规定的维修性要求是否已经达到。这些试验将包括一个用规定的分析方法编制的正式试验计划,以便确定一致性。
评估	在维修和产品设计的所有级别,确定使用、维修和保障环境对产品维修性参数的影响。这类试验应包括在产品的实际使用环境下进行规定的维修作业。

用于维修性试验验证的受试品应当从参加设计定型试验的产品中选取。维修性验证试验应根据受试产品的特点确定试验场地和环境,应确保维修保障资源 (如设备、工具、资料、设施、备件等) 符合维修保障方案。进行维修作业要按照维修操作规程完成故障诊断、更换或修复、安装、校正、检验等一系列作业活动,分别记录这些作业所花费时间。

3 维修性数据

一些潜在的维修性数据源包括类似产品的历史数据、产品设计或生产数据、产品维修性演示时记录的数据、现场使用数据,但最主要的是研制数据

和现场数据两类。

研制数据包括修理数据和 BIT 有效信息。故障检测和隔离数据包括隔离时间、排故注意问题、模糊水平和耗费资源等都是记录的重点。修理活动的数据包括修理时间、资源等。研制数据的一个重要来源是 FRACAS, 为了将 FRACAS 用于维修性数据采集, 维修性数据字段必须纳入 FRACAS 数据采集表格。

现场维修性数据包括使产品保持在或恢复到使用状态的手动和自动操作的所有使用信息, 这些数据包括修理时间、所需人数及其技能水平、环境条件及故障处理 (例如未发现故障、关联故障、独立故障等等)。这些信息还应该按照所采取的维修性活动来分类 (即预防性的或修复性的)。在设计现场数据采集系统或改进现行系统时, 重要的是要使采集数据的人为偏差最小。因此, 应加强对产品使用者和维修者的数据采集与管理知识的培训, 使其充分认识到维修性现场数据的积累, 对跟踪产品性能、识别问题和提高产品保障特性具有重要的意义。

4 对维修性定量指标的评估计算

维修性指标的验证主要是对对数正态分布维修性模型参数的验证。对数正态分布在维修性建模中经常使用, 被认为是大多数维修时间分布的代表, 适用于大多数维修作业和维修活动。国内外对以往大量系统数据的分析表明, 多数复杂系统和设备的维修时间是对数正态分布, 其概率密度函数 (pdf) 由 (4) 式给出, 图 1 为对数正态分布的曲线。

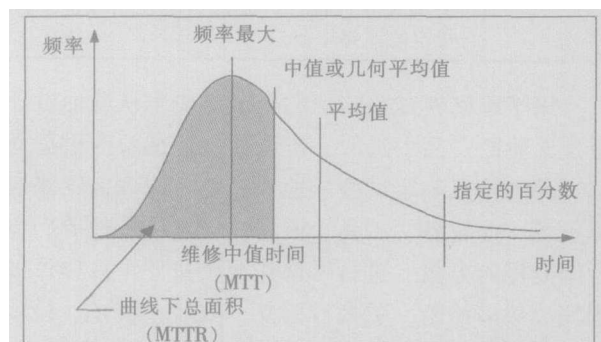


图1 对数正态分布曲线

$$g(t=M_{ct}) = \frac{1}{t\sigma_i\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t'}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (4)$$

式中: $t=M_{ct}$, 每个故障的维修时间;

σ_i (维修时间对数的标准差) =

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln M_{ct_i})^2 - \left[\sum_{i=1}^N (\ln M_{ct_i})\right]^2 / N}{N-1}}, \quad N \text{ 为维修活动}$$

次数;

$$t' = \ln M_{ct} = \ln t;$$

$$\bar{t}' = \ln \bar{M}_{ct} = \frac{\sum t'_i}{N}.$$

最大维修时间由 (5) 式得到:

$$M_{\max} = \exp\left[\bar{t}' + z(t'_{1-\alpha})\sigma_i\right] \quad (5)$$

5 示例——某系统平均修复时间评估计算

某地面系统为可修系统, 规定的维修性指标为现场级条件下的平均修复时间不大于 50min。

该系统主要由 20 个单机串联组成, 任何一个单机故障, 将导致系统故障。控制系统各单机在研制过程中的工程试验主要有验收试验、例行试验、可靠性增长试验、电磁兼容试验、系统综合匹配试验、系统联试、合练测试等。不同单机在不同试验中出现故障后的维修作业时间如表 3。

表3 系统各单机在各类试验中的维修作业时间

试验名称	故障单机数目	检测诊断时间 (min)	修理或更换时间 (min)	调校时间 (min)	检验时间 (min)	合计时间 (min)
例行试验	2	10	20	10	5	45
		10	20	10	5	45
验收试验	1	10	15	5	5	35
可靠性增长试验	1	10	20	10	5	45
电磁兼容试验	1	15	10	10	10	45
系统综合匹配试验	1	10	10	15	5	40
系统联试	1	15	10	10	5	40
合练测试	3	5	15	10	5	35
		5	10	5	5	25
		5	20	10	10	45

修复时间服从对数正态分布, 修复时间对数方差 σ^2 由历史数据得到的估计值 $\hat{\sigma}^2$ 代替。

平均修复时间 μ 的单侧置信上限 μ_U 由 (6) 式

算得:

$$\mu_0 = \exp \left(\bar{y} + \frac{\sigma^2}{2} - Z_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) \quad (6)$$

式中: $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$ 为修复时间对数样本均值; $Z_\alpha = Z_{1-\gamma}$ 为标准正态分布 α 分位数, γ 为置信度; N 为修复作业次数; σ^2 为修复时间对数方差, (本例用 $\sigma^2=0.16$ 代替)。

将表 3 数据代入 (6) 式, 算得:

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \ln x_i = 3.674$$

$$Z_{0.1} = -Z_{0.9} = -1.28$$

$$\mu_0 = \exp \left(3.674 + \frac{0.16}{2} + 1.28 \times \sqrt{\frac{0.16}{10}} \right) = 50.2 \approx 50 \text{min}$$

即在置信度 0.9 之下控制系统平均修复时间不超过 50min, 基本符合规定指标不大于 50min 的要求。

转发中质协“第三届中国质量学术论坛论文集征集通知”

为进一步提升我国质量管理的理论水平, 倡导质量文化, 引导和激励更多的人投身于质量管理理论、方法和技术的应用和研究。在政府有关部门的领导和支持下, 中国质量协会于 2003 年发起设立了“中国质量学术论坛”, “第三届中国质量学术论坛”将于 2008 年 4 月在厦门市举行。

本届论坛将继续举办“优秀论文评选活动”, 以表彰质量领域的专家、学者及广大质量工作者在质量管理理论研究、质量技术创新和质量管理实践方面取得的成就。论坛设一等奖 3 名、二等奖 6 名、三等奖 12 名、特别奖 1~3 名及优秀论文奖若干名。获奖者将获得由赞助单位提供的奖金, 其中一等奖 5000 元; 二等奖 3000 元; 三等奖 1000 元。本次评选活动还增设了青年学生论文奖。另外, 获奖论文将被安排在“第三届中国质量学术论坛”上发表, 部分优秀论文还会被推荐到《数理统计与管理》、《工业工程与管理》和《中国质量》等国家级核心期刊上发表。会议征集的论文将由主办方汇编成册或制作成光盘出版。

为便于各界专业人士参与本次活动, 现将论文征集有关事宜通知如下:

一、论坛主题: 质量——价值创造的源泉与动力

二、论文征集范围 (并不仅限于此范围):

- 卓越绩效模式·质量竞争力
- 顾客满意·供应链质量管理·服务质量管理
- 精益生产·六西格玛管理·统计技术在质量管理中的应用
- 工业工程与管理·信息与知识管理·质量与可

靠性

- 质量改进活动·现场管理·质量成本与循环经济
 - 组织发展与社会·零缺陷·质量文化
 - ISO90002000、ISO14000、OHSAS18000、SA8000
 - 管理体系整合·标准化·产品质量认证·食品安全
- 三、论文要求

1. 立意明确, 针对性强, 论据充分, 文字精炼, 图文并茂;
2. 论文应能体现创新意识, 理论与实践的紧密结合, 一般不超过 4000 字;
3. 论文内容应包括: 标题、作者姓名、作者联系方式、内容摘要、关键词、正文、参考文献等;
4. 论文应附有英文标题及不超过 300 字的英文摘要。

四、论文提交

论文征集截止日期为 2007 年 10 月 31 日。征集论文经评审委员会评审后, 活动主办方将于 11 月 15 日前发出论文录取通知, 并告知修改意见和论文编辑格式。

欲了解详细情况, 请浏览中国质量网 (www.caaq.org.cn) 或与中国航天工业质量协会联系。

通信地址: 北京市海淀区阜成路 8 号

邮 编: 100830

电 话: 010-68372317

传 真: 010-68768932

联系人: 赵永利

E-Mail: caaq@caaq.org.cn