

液体火箭发动机试验过程中 人的可靠性评价研究

王爱玲

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 以液体火箭发动机试验故障的统计分析为基础, 选用斯文人失误概率模型, 对试验过程中人失误进行详细分析, 通过选择重要人失误, 把复杂的试验过程简化为五个连续的操作单元, 建立人的可靠性分析事件树, 用事件树分析技术得到所求的人的可靠度, 以此对航天领域人的可靠性进行评价。

关键词: 液体火箭发动机; 试验故障; 人的可靠性

中图分类号: V434.3

文献标识码: A

文章编号: (2007) 03-0056-04

Evaluation of human reliability in liquid rocket engine testing

Wang Ailing

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on failure analyses of liquid rocket engine tests, human error was analyzed with Swan human error rate prediction technology. The complicated test process was simplified to five continuous operation elements by selecting important human errors and event tree for analyzing of human reliability was established. Reliability of human was obtained by using event tree analyzing technology and evaluation of human reliability in rocket engine testing was also given.

Key words: liquid rocket engine; testing failure; human reliability

收稿日期: 2006-02-21; 修回日期: 2006-05-15。

作者简介: 王爱玲 (1969—), 女, 高级工程师, 研究领域为试车安全管理。

1 引言

液体火箭发动机试验的可靠性要求很高, 发动机试验的难度和复杂程度也越来越高, 对试验的可靠性指标提出了更高的要求。从国内外故障致因统计分析中可以看到, 因人失误造成的故障占总故障的 68%~92.4%, 可见, 减少人失误和提高人的可靠性是提高液体火箭发动机试验可靠性的关键环节, 对试验过程中人的可靠性进行深入研究, 具有重要的现实意义。

2 评价方法的选择

人的可靠度则是定量表示人的可靠性大小的特征量, 其定义为: 人在规定的条件下和规定的时间内, 能够完成规定行为的概率。人的可靠度用下式来定量描述:

$$R=1-E \quad (1)$$

式中, R 表示人的可靠度; E 表示人失误概率。

其中人失误, 包括误操作、忘操作、违章操作及管理失误等等人为因素所造成的故障原因。人失误概率是用于定量地描述人员从事某项活动时发生人失误的难易程度。与物的故障类似, 人失误概率可以广义地表达为:

$$E(t)=1-\exp(-\int_0^t h(t)dt) \quad (2)$$

式中, $h(t)$ 为失误率函数, 表明人员从事该项活动到 t 时刻时单位时间内发生失误的比率。

人与物不同, 物发生故障后将一直处于故障状态, 除非有人修理则不会自行恢复到正常状态; 人发生失误后可能自己发现失误并改正失误, 即具有纠错能力。纠错概率可以表达为:

$$R_c(t)=1-\exp(-\int_0^t r(t)dt) \quad (3)$$

式中, e 为常数约等于 2.71828; $R_c(t)$ 为纠错概率; $r(t)$ 纠错率函数。

实际上, 影响人失误函数和纠错率函数的因素非常多, 因此确定它们是件极端困难的事情, 使得上面的这些公式无法实际应用。

关于人失误定量问题, 国内外专家已经进行了大量研究, 开发出了许多种实用的人失误概率预测模型, 主要有井口教授模型、人的认识可靠性模型 (HCR) 和人失误概率模型 (Technique for Human Error Rate Prediction, 简称 THERP) 等。井口教授模型适用于操作机械设备的人失误概率预测, HCR 模型适用于核电站诊断性操作小组的人失误概率预测。人失误概率模型 (THERP) 是在众多的人失误定量模型中最著名的, 它是斯文 (Swain) 1962 年开发出来的, 在核电站概率危险性评价中应用该技术成功地预测了人失误概率, 后来被应用于其他领域的人失误概率预测中, 特别适合于观测运转、检测和维修操作的人失误概率, 它是把一些程序化的复杂任务分解成若干连续进行的单元操作, 如从仪表上读数、按按钮、开阀门等, 分别计算各单元操作中人失误发生概率, 然后再根据各单元的从属关系计算整个任务的人的失误概率。

液体火箭发动机试验是包含发动机的运转工作、数据检测和试验系统维修等作业于一体的一个程序化的复杂操作任务, 根据这个特点, 同时考虑上述三种预测模式的各自适用范围, 通过对比, 宜采用斯文人失误概率模型 (THERP) 来定量分析液体火箭发动机试验过程中人失误概率, 然后利用公式 (1) 来定量评价液体火箭发动机试验过程中人的可靠性。

3 可靠性定量评价

3.1 人失误分析

人失误分析是人失误概率预测的基础, 包括预测人失误和选择重要人失误两个方面的工作。

3.1.1 预测人失误

预测人失误是人失误分析的第一步, 其内容是找出人员在操作过程中可能发生的人失误。通过研究国内发动机试验过程中人失误文献资料和参考国外类似发动机试验的故障案例, 得出在火箭发动机试验过程中发生人失误主要表现为以下三种形式。

(1) 遗漏或遗忘操作, 即没有按要求完成规

定的行为。在发动机试验中主要表现为：忘开或关阀门、开关，忘更换传感器等。

- (2) 做错，即错误地完成规定的行为。
- (3) 进行了规定以外的行为。

3.2 选择重要人失误

液体火箭发动机试验是一个需要多个部门、几十个岗位、上百人配合的繁杂的操作过程，人失误定量分析非常困难，详细分析所有可能出现的人失误既不可能也不必要，实际上只能选择其中一些重要的人失误进行详细分析。

(1) 决定人失误重要性的三要素

a. 人失误的后果

如果人失误直接导致故障或重大的系统故障，则该人失误重要；如果人失误必须与若干其他人失误或故障同时出现才能导致故障或重大系统故障，则该人失误不太重要。

b. 与人失误相关联的其他人失误或故障发生的概率

如果它们发生的概率大，则该人失误重要。

c. 人失误发生概率

人失误发生概率越大，则重要性越大。

(2) 故障统计分析

质量故障的统计分析是建立在大量数据积累上的，根据评价液体火箭发动机试验中人的可靠性分析的需要，现对某单位几十年来进行的液体火箭发动机试验中，发生的故障进行统计分析。经统计分析，发现因开关、阀门可靠性变差或人失误引发的故障发生率较高。

(3) 确定试验重要人失误

根据上面决定人失误重要性的三要素，以及故障发生的频率，同时考虑液体火箭发动机试验的工艺过程，参考国内外类似发动机试验系统的故障案例教训，去掉那些只有与许多其他人失误或故障同时发生才能导致故障或重大系统故障的人失误，去掉不直接影响试验成败的人失误，筛选出关系试验成败的重要人失误为：1) 开关阀门：即开关阀门误安装、误操作及忘操作等，2) 测量：即测量设备或程序误操作、忘操作等，测量数据读错等；3) 传感器：传感器接错等。

根据上面的重要人失误，把发动机试验这个

复杂过程分解成下面 5 个连续进行的单元操作：1) 安装发动机、阀门及传感器等控制检测设备；2) 启动控制程序；3) 启动测量程序；4) 关闭控制程序；5) 关闭测量程序。

选择上面 5 个单元操作，主要是考虑到这 5 个单元中比较集中地涉及到“开关阀门”、“测量”和“传感器”这三个重要人失误；另外，这样划分可以使发动机试验这个非常复杂的过程，通过采用时间这个线索来进行简化，以便于后面的评价计算。

3.2 人失误定量评价

3.2.1 建立人失误概率模型

采用斯文人失误概率预测技术 (THERP)，利用人的可靠性分析事件树，把液体火箭发动机试验 5 个单元操作连接起来，再利用事件树分析技术得到所求的人失误概率。

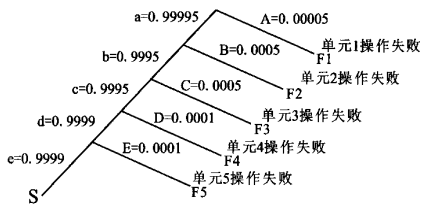


图 1 液体火箭发动机试验人的可靠性分析事件树

Fig.1 Event tree for human error in liquid rocket engine testing

在人的可靠性分析事件树中，从第一个单元操作开始，每个单元操作有成功或失误两种可能，用树的左右两个分支分别代表操作的成功与失误，并用字母 S 和 F 分别代表，逐次得到完成液体火箭发动机试验整个操作任务的事件树，如图 1 所示。图中大写字母和等号后面的数字代表单元操作失误和相应的失误概率；小写字母和等号后面的数字代表单元操作成功和相应的成功概率。

3.2.2 单元人失误概率

单元操作中人失误概率按下式计算：

$$M=kP_1P_2 \tag{4}$$

式中，M 为单元人失误概率；P₁ 为基本失误概率，取决于单元操作特征和人机匹配情况；基本失误概率可以由有关手册或数据库查出，再根据试验

系统的具体情况对数据进行修正； P_2 为失误发生后没有纠正的概率； k 为考虑操作者紧张的系数。

利用公式 (4)，考虑某型号火箭发动机试验的具体情况，查有关取值手册，在上面整个操作过程中由指挥员下达口令，各操作员进行操作，指挥员下达口令相应于纠正因素，综合考虑上述因素估算出各单元操作人失误率，列在图 1 中。

3.2.3 液体火箭发动机试验人失误概率计算

由于各单元操作由不同的人员进行，这些单元之间可看作零从属关系。5 个失误节点 F1~F5 处的故障发生概率用 P 表示，分别为：

$$\begin{aligned} P_{F1} &= 0.00005 \\ P_{F2} &= 0.99995 \times 0.0005 = 0.000499975 \\ P_{F3} &= 0.99995 \times 0.9995 \times 0.0005 = 0.00049972 \\ P_{F4} &= 0.99995 \times 0.9995 \times 0.9995 \times 0.0001 \\ &= 0.00009989 \\ P_{F5} &= 0.99995 \times 0.9995 \times 0.9995 \times 0.9999 \times 0.0001 \\ &= 0.00009989 \end{aligned}$$

液体火箭发动机试验人失误概率为：

$$E = P_{F1} + P_{F2} + P_{F3} + P_{F4} + P_{F5} = 0.0012$$

3.3 液体火箭发动机试验人的可靠度计算

利用公式(1)计算液体火箭发动机试验中人的基本可靠度为：

$$R = 1 - E = 0.9988$$

4 提高可靠性措施

从上面的评价结果 0.9988 可以看出，液体火箭发动机试验过程中人的可靠性还有待提高，通过对影响人的可靠性的起因进行分析研究，考虑行为学、人机学、管理学等方面的因素，建议采用以下的对策措施来进一步提高人的可靠性。

(1) 深入研究液体火箭发动机试验过程中的人的可靠性评价技术，针对实际工作中存在的薄弱环节进行有的放矢的治理。

(2) 在进行与“开关阀门”、“测量”及“传感器”这三个重要人失误相关工作时，选用技术能力强、责任心强、心理素质好的操作人员担任。

(3) 对“开关阀门”、“测量”及“传感器”

这三个重要人失误的工艺流程进行深入研究，细化操作规程，或通过采用新技术、新设备、新工艺等研究成果实现自动化替代人工操作，或对关键岗位的“开关阀门”及“传感器”采用冗余技。

(4) 对操作人员加强质量安全意识及液体火箭发动机试验技术知识及操作技能培训，提高他们的质量和安全意识及心理素质，使操作人员养成自觉遵守规章制度习惯，自觉杜绝“三违”现象。

(5) 加强质量管理，采取“双岗制”、“三检制”等卓有成效的管理方法。

5 结束语

人的可靠性评价研究技术，近年来越来越受到各界的关注，进行液体火箭发动机试验过程中人的可靠性研究，是实现“质量第一，预防为主”和降低火箭发动机研制经费以及缩短研制周期的重要举措。本文建立的液体火箭发动机试验人的可靠性分析事件树，相对复杂的液体火箭发动机试验过程来说是非常简单的，仅仅就人的可靠性进行了初步的粗浅探讨。以后，可以通过对各操作单元的重要人失误进行细化深入地评价分析，来进一步完善液体火箭发动机试验过程中人的可靠性评价技术。

参考文献：

[1] 全国注册安全工程师执业资格考试辅导教材编审委员会. 安全生产事故案例分[M]. 北京：煤炭工业出版社. 2005.
[2] 李进贤. 火箭发动机可靠性[M]. 西安：西北工业大学出版社，2000.
[3] 刘铁民. 安全评价方法应用指南[M]. 北京：化学工业出版社，2005.
[4] 何德芳. 失效分析与故障预防[M]. 北京：冶金工业出版社，1990.

(编辑：陈红霞)