

新一代运载火箭氢氧模块 动力系统试验风险分析

卜 玉, 刘瑞敏, 梁怀喜, 高婉丽
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 针对新一代运载火箭氢氧模块动力系统试车试验台进行了风险分析。分析方法采用基于元件的系统级 FMECA 和基于工艺流程的过程 FMECA 相结合的方法, 引入“发生可能性”和“严酷度”两个指标, 建立 FMECA 工作表, 实现了风险因素量化分析与控制, 并引入“风险指数”对风险事项排序。通过分析共识别 I、II 类单点故障模式 45 项, 提出了试验台在设计、生产、使用和操作中应采取的控制措施, 使系统可靠性得到了增长。该方法有效拓展了大型地面试验风险管理的思路。

关键词: 动力系统试验; 试验台; 风险分析; FMECA

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 01-0066-05

Risk analysis of LOX/LH₂ module power system test for a new generation launch vehicle

BU Yu, LIU Ruimin, LIANG Huaixi, GAO Wanli

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In this paper, the risk analysis on the testbed for LOX/LH module test of power system in a new generation launch vehicle is carried out. The combination of the failure model effect and criticality analysis (FMECA) based on components in system stage and the process FMECA based on technological process is adopted in the analysis method. In the analysis process, the FMECA table is established to realize quantitative analysis and control based on taking possibility and severity factors into account. And also the risk index is imported to rank the risk items. Forty-five single point failure modes are found in the analysis. The control measures in the aspects of design, production, use and operation process are put forward, by which the reliability of the system is increased. These method can effectively widen the thought in risk management, and provide a reference for the reliability management in aerospace field.

Keywords: power system test; testbed; risk analysis; failure model effect and criticality analysis (FMECA)

收稿日期: 2015-11-12; 修回日期: 2015-12-10

基金项目: 航天支撑技术项目(617010403)

作者简介: 卜玉 (1985—), 女, 工程师, 研究领域为火箭发动机试验技术

0 引言

新一代运载火箭动力系统试验台承担共计 8 个模块的 12 次动力系统试验任务。其中, 氢氧模块动力系统试验是试验台建成以来首次使用液氢/液氧作为推进剂, 相对液氧/煤油, 试验风险和危险性更高, 一旦出现严重故障, 对火箭产品、试验台及辅助设施的破坏性更大。某模块动力系统试验是我国迄今为止最大规模的低温动力系统地面试验, 爆炸当量达到 23.1 t, 规模最大, 风险最高。试验台为满足氢氧动力系统试验需求, 建设了液氢加泄系统, 多贮罐大流量加注等多项技术均首次应用, 各系统接口关系需全面考核。这对动力系统试验风险分析工作提出新的挑战。

本文以某氢氧模块动力系统试验为背景, 根据试验台工艺系统自身特点, 采用基于元件的系统级 FMECA 和基于工艺流程的过程 FMECA 相结合的方法进行风险分析。

1 风险分析方法和评估准则

1.1 分析方法

故障模式及影响分析 (FMECA) 是目前航天型号研制中广泛使用的一种风险定量分析方法。FMECA 有两种基本方法: 系统级 FMECA 和过程 FMECA。动力系统试验规模大、元件多、系统复杂, 任务剖面多层化, 存在的失效模式众多。若只用系统级 FMECA, 不能清楚地理解试验过程中的风险因素; 若只用过程 FMECA, 又不如系统级 FMECA 可反映整个系统内所有设备潜在的故障。因此, 较好的方法是将系统级 FMECA 和过程 FMECA 两者结合, 互相补充, 密切联系, 构成一个整体分析方法。

针对氢氧模块动力系统试验特点, 采用系统级 FMECA 和工艺流程 FMECA 相结合的方法, 侧重系统全面性和系统关联性, 从模块转换及试验准备阶段发现各种缺陷和薄弱环节, 提高地面参试系统可靠性。两种方法对比介绍见表 1, FMECA 分析步骤见图 1。

表 1 分析方法对比表

Tab. 1 Comparison of analysis methods

研制阶段		模块转换及试验阶段	
方法	系统级 FMECA	工艺流程 FMECA	
侧重点	面向全系统, 着眼点在于不漏掉一种可能的失效模式	侧重分系统间的耦合和关联	
目的	普遍分析每一个组成部分可能发生的失效对系统的影响, 为系统适应性改造方案的制定和可靠性提升提供依据	研究试验准备及试验过程, 各个工艺流程的薄弱环节对试验进展及其对产品的影响, 为工艺流程的优化和应急预案的制定提供依据	

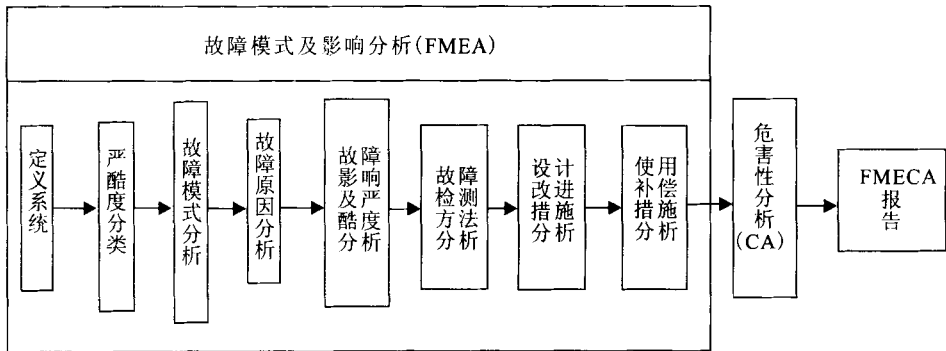


图 1 FMECA 分析步骤

Fig. 1 Procedure of FMECA

1.2 评估准则

依据 GJB/Z1391-2006 《故障模式、影响及危害性分析指南》，评估指标为严酷度类别和发生可能性等级。故障模式的发生概率等级分为五级，分别为：A 经常发生，B 有时发生，C 偶然发生，D 很少发生和 E 极少发生。严酷度分为四级，分别为：

- 1) I 类：灾难的，即人员伤亡，火箭爆炸或毁坏，整箭需要返厂维修，地面设施毁坏。
- 2) II 类：严重的，即试验当天推迟点火，试验任务失败或中断，未获取有效数据；对试验产品产生不良影响，进箭指标不满足总体要求；严重拖延试验进度。

3) III 类：轻度的，即人员轻度受伤，现场处理后可继续执行试验任务，延缓进度，获得部分数据。

4) IV 类：轻微的，即轻于 III 类的故障后果。

2 试验台风险分析

2.1 系统级 FMECA

2.1.1 定义系统

氢氧模块动力系统试验台由 10 个分系统组成，如图 2 所示。

试验台对 10 个分系统逐一开展风险分析。液氢加注系统为氢氧模块新建系统。以该系统为例，阐述风险分析过程。

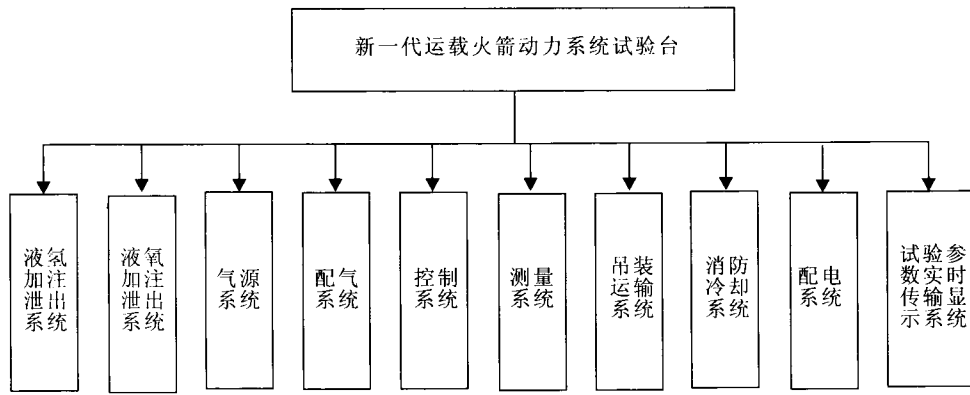


图 2 新一代运载火箭氢氧模块动力系统试验台系统组成框图

Fig. 2 System composition of LOX/LH module power system testbed for the new generation launch vehicle

2.1.2 液氢加注泄出系统风险分析

液氢加注泄出系统由液氢贮罐、铁路槽车、液氢加注管路、箭上贮箱排气管路、预冷排放管路、液氢库配气系统等组成。液氢加注泄出系统按试车准备、试车过程、试后处理三阶段进行 FMECA 风险分析，其中试验过程指试验当天推进剂加注至点火阶段，试验阶段 FMECA 略表见表 2。

液氢加注泄出系统 30 个元件中，共梳理故障模式 63 项，其中 I、II 类单点故障模式 5 项，产品种类包括上加注阀、下加注阀、超声波流量计、加注过滤器和真空管路，均难以实现冗余设计。其中，上、下加注阀为气手双控设计，一旦气控操作出现故障可改为手动操作。真空管路设计时进行了强度分析计算，确保强度余量。通过冷调和过流试验，在生产、试验、检

测等其他环节也采取了相应控制措施。加注过滤器为多层滤网结构，落实维护保养规程中过滤器的使用、更换和检查的具体要求，经过液氮过流强度测试。

2.2 工艺流程 FMECA

2.2.1 工艺流程

某氢氧模块动力系统试验主要工艺流程为：箭体吊装及对接、箭地接口连接、箭地接口检查、箭地各分系统测试、箭地系统间匹配测试、紧急关机综合测试、程序关机综合测试、紧急断电综合测试、信号联调、气瓶充气、液氧/液氢加注及补加、供气、射前增压、试车点火、试车后处理、数据判读、箭体状态恢复和箭体返厂。

2.2.2 工艺流程 FMECA

工艺流程风险分析过程，主要侧重分系统间

表 2 液氢加注泄出系统 FMECA(试车阶段)

Tab. 2 FMECA (in test stage) of liquid hydrogen fill and drain system

序号	产品名称	数量	故障模式	故障最终影响	严酷度	可能性	控制措施
1	贮罐出口低温手阀	5	打不开/关不上, 泄漏	推迟加注	Ⅲ	D	1.选择成熟产品,严格控制加工质量,严格出厂验收;2. 提前进行调试和考核验证,确保试车过程管路不超压;3.做好故障应急预案,保证上加注阀后管路与库区液氢贮罐连通
2	上加注阀	1	打不开/关不上, 泄漏	排除故障、推迟加注、严重时终止试验	Ⅱ	D	1.选择成熟产品,多层过滤网;2.严格控制多余物,保证管路洁净度;3.提前液氮过流强度测试;4.制定维护保养规程,按规程定期检查过滤器
3	加注过滤器	1	过滤器堵塞,连接处泄漏	影响加注流量	Ⅲ	D	1.选择成熟产品;2.使用前进行流量校验;3.加强耐受力学、振动环境设计;4 采用德国制造的专业夹具进行固定
...
23	超声波流量计	7	无流量或流量显示不准	无法监测加注流量	Ⅱ	D	1.焊缝按Ⅰ级 100% X 光检查,且经酸洗、钝化处理;2.严格控制多余物,安装前进行气密试验和过流试验;3. 制定应急处理预案;4. 加注口附近设置氢浓度报警仪
24	箭地对接软管或真空管路	若干	泄漏	严重时终止加注	Ⅱ	D	1.选择成熟产品;2.使用前进行流量校验;3.加强耐受力学、振动环境设计;4 采用德国制造的专业夹具进行固定

的耦合和关联。按照工艺流程,识别各工艺过程中可能对人员、产品、系统造成损伤的风险和隐

患,共识别故障模式 55 项,对识别的风险逐一进行 FMECA 风险分析(见表 3)。

表 3 工艺流程 FMECA 分析略表

Tab. 3 Simple list of technological process FMECA

工序名称	故障模式	可能性	严酷度	控制措施
工序 1	吊装过程箭体和塔架结构干涉	D	Ⅱ	1 实测产品凸起物;2 实测吊车有效吊高、塔架大门宽度、吊装场坪尺寸等
	箭体吊装运输过程划蹭,损伤箭体	D	Ⅱ	1 严格规定吊具移动、翻转速度;2 制定操作规程,并讨论评审
工序 2	试验过程,出现自动紧急关机	C	Ⅲ	1 严格制定自动紧急关机判据; 2 程序确定后进行联调;3 纳入点火规程
	发生起火、爆炸危及试验安全的事件	E	Ⅰ	1 试验现场布置消防设施;2 成立紧急情况应急小组;3 制定重大事故应急处理救援预案
	测控系统供电故障,进入 UPS 供电状态	E	Ⅱ	1 电源系统冗余; 2 UPS 供电
	水泵启动后,导流槽或喷水降噪环不出水	D	Ⅱ	1 根据导流槽路水泵具体情况减少水泵数量; 2 启动备用水泵;3 严格按水泵操作规程操作
...

通过某氢氧模块动力系统试验工艺流程风险分析工作,共识别I、II类单点故障模式30项,过程覆盖箭体进场后的全过程。

2.3 风险排序及FMECA分析结果

2.3.1 风险排序

为比较各风险事项的危害程度,评估风险的重要性及易发性,依据严酷度类别和发生可能性等级计算风险指数,用来定量评估风险事项。其中,风险指数值越小显示风险越大。风险指数1~5定义为风险水平为高,不可接受。6~9定义为风险水平严重,不希望发生在系统中。10~17风险水平为中,可接受但需要制定预案。18~20风险水平为低,可接受^[1]。

2.3.2 FMECA 研究结果分析

据此对某模块45项风险事项排序,可以看出,风险指数 ≤ 9 的仅有一项,为液氢贮罐露点超标一项风险。项目组开展技术攻关,研制了负压除冰工艺,并且综合利用静置、复温、抽空、置换、优化选择充气/放气口部位、对比化验等控制措施可有效规避风险。10<风险指数<17的风险有44项,均制定了详细的控制措施,满足评价准则“可接受但需制定应急预案”。

针对识别出的45项I、II类单点故障模式,采取具体可行的控制措施,分析如下:

1) 故障原因为系统设备/元件故障的有24项。据此,试验台在设计阶段继承成熟产品方案,合理保留裕度,确保产品可靠性;在产品加工过程严格工艺保证与检查覆盖,确保整个过程质量受控;在日常使用过程,加强设备维修与维护管理;在试验调试阶段,强化测试覆盖性,加强测试提前调试;提供充足的备品备件,确保元件发生故障时可及时更换。

2) 故障原因为工艺流程不合理或操作失误的有10项,例如吊装或箭地对接过程划蹭箭体,发动机后处理吹除过程泵腔压力超压,加注流量不稳定大幅波动等。采取措施为:在系统调试阶段固化工艺参数,固化操作流程,并不断细化操作规程,加强操作规程的培训工作,在实施过程对操作过程严格把关。同时,制定吊装过程、操作过程等关键步骤的应急预案并演练。

3) 故障原因为设计差错的有3项:接口结构不匹配,设计能力不覆盖,进箭指标不满足总体要求。采取措施为:提升技术攻关能力,合理设计,严格技术状态控制,组织设计方案及技术状态评审,提前进行接口试对接确保接口匹配,提前进行分系统调试确保进箭指标满足总体要求。

4) 故障模式为现场突发情况的有8项,例如发动机局部出现小火,加注管道泄漏,水泵启动后不出水,供电故障,现场起火,爆炸,危及正常试验设施安全的事件等。采取措施为:制定详细应急处置预案并演练,成立紧急情况应急小组,加强安全性分析和安全距离核算,严格控制极端危害。

3 技术要点与验证

3.1 技术要点

相对于前期液氧/煤油模块动力系统试验,氢氧模块动力系统试验风险分析与控制工作主要技术要点如下:

1) 基于FMECA的工艺流程风险分析更完善试验准备的各个阶段,各分系统均存在功能上的交联,区别于系统级FMECA,工艺流程风险分析更注重分系统间的耦合和关联。通过不断优化分析方法,“回头看”历次试验的经验和教训,重新识别故障模式,逐步实现面向试验全过程的风险识别和评估。

2) 风险控制措施更有效可行

重点关注应对措施的有效可行,将风险分析与识别和试验系统设计、工艺流程设计、操作规程编制、试验流程掌控有机结合,为制定合理可行、有效的故障应急预案奠定基础,进一步提高设计正确性和试验可靠性。

3) 评估方法实用性强

在风险分析基础上,将系统级FMECA和过程FMECA有机结合,对照标准开展了风险事项排序,并依据风险评价指数,将氢氧模块动力系统试验评估结果和相应评估准则对标,得出评估结论,采取了防范措施,取得了良好效果。

(下转第82页)

掺混工质得到更高的极限真空度,同时单台蒸汽发生器的引射能力大幅提高,为采用水掺混的3倍。

当带有二次流的超超引射,二次流一致时,2种方式的压缩比相当,但液氮掺混工作范围更宽。单台蒸汽发生器引射能力的提高,能够减小大规模引射工质供应系统中蒸汽发生器的数量,提高系统的可靠性。

参考文献:

- [1] RYAN J E. An Overview of follow-on testing activities of the A-3 subscale diffuser test project, AIAA, 2009-5009 [R]. USA: 2009.
- [2] 郭敬,孔凡超,胡旭坤,等. 蒸汽发生器泵压供水方式试验研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2011 (6): 57-60.
- [3] 周伟勇. 低浓度酒精燃气发生器燃烧性能试验与仿真研究[D]. 国防科技大学, 2007.
- [4] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [5] 陈健,王振国,吴继平,等. 等截面超一超引射器流场结构及引射性能[J]. 2012, 24(6): 1301-1305.
- [6] DUTTON J C, MIKKELSEN C D. A theoretical and experimental investigation of the constant area supersonic-supersonic ejector[J]. AIAA journal, 1982, 20(10): 1392-1400.
- [7] MANIKANDA K R, VIVEKANAND P K, SUNDARARAJAN T. Analysis of diffuser and ejector performance in a high altitude test facility, AIAA, 2009-5008 [R]. USA: 2009.

(编辑: 马 杰)

(上接第 70 页)

3.2 试验验证

文中的研究内容直接应用于氢氧2个模块4次动力系统试验风险分析,在此期间,试验团队风险分析能力不断增强,技术支撑日益显现,试验台工艺系统可靠性持续提高,为氢氧模块动力系统试验的圆满完成提供了技术保障。

4 结论

动力系统试验规模大、技术复杂、风险高、持续时间长,需要在不同阶段针对不同模块的特点高度重视风险管控,进行风险分析与控制。本文结合氢氧模块动力系统试验特点,构建了试验台技术风险评估的方法流程,运用基于元件的系统级 FMECA 和基于工艺流程的过程 FMECA 相结合的方法,科学识别风险项目,在此基础上从设计、生产、试验、工艺保证、质量控制等方面制定并落实了一系列风险控制措施,从而确保氢氧模块动力系统试验的圆满完成。同时,为促进型号研制过程风险分析与控制的科学化、合理化,减少技术和管理不足带来的风险,提供借鉴与参考。

参考文献:

- [1] 郭海波,肖洪,南向谊,等. 复合预冷吸气式火箭发动机热力循环分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(3): 15-20.
- GUO Hai-bo, XIAO Hong, NAN Xiang-yi, et al. LU Wan-ruo, Analysis on thermodynamic cycle characteristics of synergistic air-breathing rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(3): 15-20.
- [2] STAMATIS D H. 故障模式影响分析 FMEA 从理论到实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] 韩宗真,向平. 船舶保障系统 FMEA 分析[J]. 舰船科学技术, 2012(6): 129-131.
- [4] 孙有朝. 某新研轻型飞机副翼操纵系统 FMEA[J]. 机械设计与制造, 2001(6): 6-8.
- [5] 方群. 适用于流程工程工业的改进风险优先数方法及应用[J]. 工业技术创新, 2014(06): 42-45.
- [6] 刘志全,宫颖. 航天产品 FMEA 工作有效性的思考[J]. 航天器工程, 2011(1): 142-146.
- [7] 陈红,孙志礼. 工艺 FMEA 系统的设计[J]. 机械与电子, 2010(8): 78-80.
- [8] 刘正高,李福秋. 工艺 FMEA 技术应用研究[J]. 质量与可靠性, 2005(1): 42-48.

(编辑: 王建喜)