

# 低温气动阀的人机环境可靠性评估方法

秦永涛, 曹文庆, 李党科, 薛 宁  
(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为了在液体火箭发动机试验过程中全面定量识别低温气动阀故障产生根源, 针对低温气动阀可靠性分析过程的动态时变问题, 首先通过引入人机环境系统工程理论, 结合低温气动阀工作原理, 从人机环境方面分析低温气动阀可靠性影响因素, 建立基于人机环境系统工程的低温气动阀时变可靠性模型; 并在此基础上, 通过从人机环境范围定量分析低温气动阀的可靠度与失效率, 对低温气动阀可靠性薄弱环节进行评估。最后通过具体的应用实例验证了该方法的有效性与准确性, 为定量分析和改进低温气动阀可靠性提供了一种方法指导, 为提高液体火箭发动机性能准确客观评价以及研制提供了支撑。

**关键词:** 人机环境系统工程; 低温气动阀; 可靠性评估

**中图分类号:** V434.3-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 02-0082-08

## The man-machine-environment reliability evaluation method of cryogenic pneumatic valve

QIN Yong-tao, CAO Wen-qing, LI Dang-ke, XUE Ning  
(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to determinate the faults source of the cryogenic pneumatic valve in the process of liquid rocket engine test and to solve the dynamic time varying problem existing in reliability analysis of cryogenic pneumatic valve, the reliability influencing factors of the cryogenic pneumatic valve were analyzed in the aspect of man-machine-environment, and the man-machine-environment-based time-varying reliability model of cryogenic pneumatic valve was constructed by means of the man-machine-environment system engineering theory and the operating principle of the cryogenic pneumatic valve. On the basis of this model, the reliability degree and fault rate of the cryogenic pneumatic valve were quantitatively analyzed in the range of man-machine-environment, and the vulnerable spots of cryogenic pneumatic valve are evaluated. Finally, this method's effectiveness and accuracy were demonstrated and validated by an example. Consequently, this method highly provided an approach for the quantitative analysis and reliability improvement of the

收稿日期: 2013-04-26; 修回日期: 2013-05-29

作者简介: 秦永涛 (1981—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭动力试验技术

cryogenic pneumatic valve, and a support for objective evaluation of liquid rocket engine performance.

**Keywords:** man-machine-environment system engineering; cryogenic pneumatic valve; reliability assessment

## 0 引言

由于液体火箭发动机试验过程的载荷、工况、应力及运行环境等参数都是动态变化的,造成其控制供应剂供应的低温气动阀门的温度、流量、压力及冲击等参数具有动态特性;同时,低温气动阀的特性数值随着时间而逐渐变化,如疲劳、磨损、腐蚀及密封等造成的机械强度降低,使试验过程阀门性能参数随时间而逐渐变化,低温气动阀性能参数表现出了动态时变的特征<sup>[1-4]</sup>。因此,低温气动阀性能参数的动态时变特性容易引起阀门温差变形、应力集中、泄漏及疲劳损坏等,造成可靠性下降,进而直接影响到推进剂的输送稳定性和流量调节的实时性等,以及影响到发动机能否准确完成规定的工作程序并保持其工作参数的稳定与协调,容易造成管道推进剂压力和流量异常波动,引起推进剂混合比失调等现象,甚至会引起局部瞬间高压以及由于瞬变降压而引起的汽蚀现象,造成管道的机械振动,引起供应系统的振荡,影响测量仪器仪表精度,进而影响到试验过程的液氧流量测量以及推力测量不确定度,同时也会引起导致管道结合部渗漏,最终影响发动机的正常工作,甚至导致启动的失败,造成发动机的损坏,最终影响到试验过程发动机与试验系统的可靠性与安全性<sup>[5-8]</sup>。

针对液体火箭发动机试验过程中低温气动阀可靠性存在着动态时变问题,国内外许多研究人员开展相关的研究工作,并取得了相应成果,例如菌阀结构的液氧主阀、建立电动气阀数学模型和气动液阀数学模型等<sup>[9-12]</sup>。但是目前大多动态可靠性的研究主要集中动态时变机械机构的设计与制造,较少关注低温气动阀,尤其是火箭发动机试验过程低温气动阀可靠性与安全性,并且很

少从人机环境角度对运行过程的可靠性与安全性进行定量分析与改进。

为解决液体火箭发动机试验过程中低温气动阀可靠性的动态时变问题,增强液体火箭发动机试验过程中低温气动阀可靠性与安全性,本文从人机环境方面分析低温气动阀可靠性影响因素,构建基于人机环境系统工程的低温气动阀时变可靠性模型,并通过从人机环境范围定量分析低温气动阀的可靠度与失效率,对低温气动阀可靠性薄弱环节进行评估。最后通过实例验证,为定量分析和改进低温气动阀可靠性提供了一种方法指导,为满足发动机工作参数测试对试验系统的要求,提升航天动力试验技术,增强液体火箭发动机性能的客观、准确评价能力,保证试验过程发动机与试验系统的可靠性与安全性提供了支撑。

同时随着我国中长期航天技术规划制定以及国外航天技术的发展,通过开展此项研究,可以缩小与国外先进国家技术差距,满足我国新一代大推力火箭“十二五”航天发射任务的要求。同时我国正在进行更大推力液氧煤油发动机前期技术论证工作,需要开展超大口径的非标低温阀门研制工作,为此开展此项研究,为更大推力液氧煤油发动机的推进剂输送、压力和流量调节奠定技术基础,对加快新一代发动机研制进度,以及我国载人航天深空探测等是十分必要和急需的。

## 1 低温气动阀时变可靠性的影响因素分析

低温气动阀时变可靠性影响因素是指在低温气动阀运行过程中影响低温气动阀运行参数的各种因素,包括与制造过程相关的各种参数如材料特性(如阀杆材料选择、紧固件材料选择及阀杆/阀芯/启闭件密封材料等),结构设计参数(如长

颈阀盖结构、阀体结构、泄压部件结构及上密封装置结构等), 低温阀门的检验 (如壳体水压强度试验、水压/气压密封试验、上密封试验及启闭和扭矩试验等), 工作介质性能 (如介质温度、压力、流量、密度、露点及泄漏量等), 人为因素 (如安装误差、转动惯性力及转动时间等), 以及环境因素 (如环境温度和振动等)。

低温气动阀时变可靠性影响因素数量多、涉及范围广、存在相互制约相互影响的错综复杂关联关系, 引起了故障的产生、增长、积累和传递, 最终可能导致低温气动阀破坏。例如介质温度过低, 需要适应低温环境的阀杆材料, 同时阀杆材料将影响阀体结构, 进而影响到人为的转动时间以及启闭试验等。因此, 需要从错综复杂的影响因素中全面定量的确定关键影响因素, 从而可以从根源避免低温气动阀的安全隐患, 保证其运行稳定性。

人机环境系统工程是由我国著名科学家钱学森提出的, 通过运用系统工程的思想方法, 揭示人、机、环境之间相互关系的规律, 确保系统最优组合的一门综合性学科。人机环境系统最大特点是把人、机、环境看作是一个系统的 3 大要素, 在深入研究 3 者各自性能的基础上, 着重强调从全系统的总体性能出发研究对象特性<sup>[13-15]</sup>。人机环境系统工程和 5M1E (Man, Machine, Material, Method, Measure, Environment) 现场质量控制方法相比, 人机环境系统工程不仅分析组成要素的单独性能, 更进一步分析研究系统中各要素的关联关系, 并通过人、机、环境间信息传递、加工和控制, 形成一个相互关联的复杂的巨系统, 并运用系统工程方法加以分析, 使系统具有“安全、高效、经济”的综合效能。

在此以人机环境系统工程为基础, 从人、机、环境 3 个主要方面对液体火箭发动机试验过程的低温气动阀时变可靠性影响因素进行全面定量识别与分析, 其时变可靠性影响因素主要包括: 一是人 (工作人员) 的影响方面, 包括如转动惯性力和转动时间等; 二是机器 (客观运行实体) 的影响方面, 包括阀杆材料选择、长颈阀盖结构及密封件等; 三是环境 (主客观环境系统)

的影响方面, 包括介质温度、压力、流量、环境温度及振动等。低温气动阀时变可靠性影响因素  $Q_p$  可以表示为:

$$\begin{aligned} Q_p &\Rightarrow PW \cup PM \cup PE \\ &\Rightarrow \{ps_1, ps_2, ps_3, \dots, ps_m\} \cup \{ps_{m+1}, ps_{m+2}, \dots, ps_r\} \cup \\ &\quad \{ps_{r+1}, ps_{r+2}, \dots, ps_n\} \\ &\Rightarrow \{px_1, px_2, \dots, px_v\} \cup \{px_{v+1}, px_{v+2}, \dots, px_u\} \cup \\ &\quad \{px_{u+1}, px_{u+2}, \dots, px_d\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $PW$  为试验过程中人 (工作人员) 的主要方面;  $PM$  为试验过程中机器 (客观运行企业实体) 的主要方面;  $PE$  为试验过程中环境 (主客观环境系统) 的主要方面;  $ps_j$  为试验过程中时变可靠性的人机环境影响事件;  $px_i$  为第  $i$  个低温气动阀时变可靠性的人机环境影响因子,  $1 < i < h$ ,  $h$  为影响因素总个数, 且有  $1 \leq i < v$ ,  $1 \leq i < u$ ,  $1 \leq i < d$ ,  $1 \leq v, u, d < h$ 。

根据人机环境系统工程, 低温气动阀时变可靠性的影响因素来自于人机环境, 并且存在错综复杂的关系, 其低温气动阀时变可靠性的影响因素相互关系如图 1 所示。

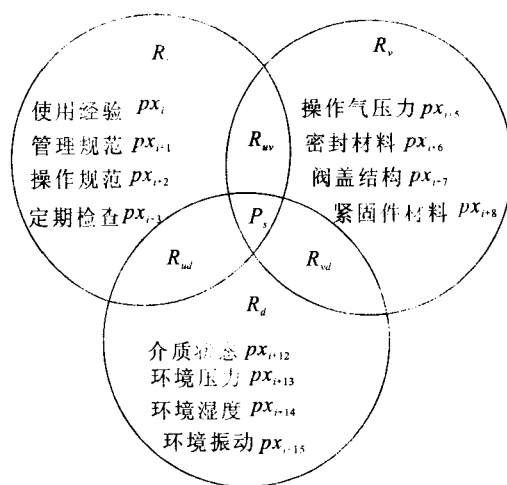


图 1 低温气动阀时变可靠性的人机环境影响因素相互关系

Fig. 1 Mutual relation among time-varying reliability man-machine-environment influencing factors of cryogenic pneumatic valve

根据低温气动阀的人机环境影响因素相互关系, 低温气动阀时变可靠性  $P_i$  可以表示为:

$$P_s = \{R_u, R_v, R_d, R_w, R_{ud}, R_{vd}\} \quad (2)$$

式中:  $R_u$  为人(工作人员)的因素间相互关系;  $R_v$  为机器(客观运行企业实体)的影响因素间相互关系;  $R_d$  为环境(主客观环境系统)的影响因素间的相互关系;  $R_w$  为人(工作人员)与机器(客观运行企业实体)的影响因素间相互关系;  $R_{ud}$  为人(工作人员)与环境(主客观环境系统)的影响因素间相互关系;  $R_{vd}$  为机器(客观运行企业实体)与环境(主客观环境系统)的影响因素

间相互关系。

## 2 基于人机环境系统工程的低温气动阀时变可靠性模型

由于火箭发动机试验过程低温气动阀的时变可靠性受人机环境方面的影响因素制约,可以划分为人员方面、机器方面及环境方面的影响,因此建立火箭发动机试验过程低温气动阀的时变可靠性模型,如图2所示。

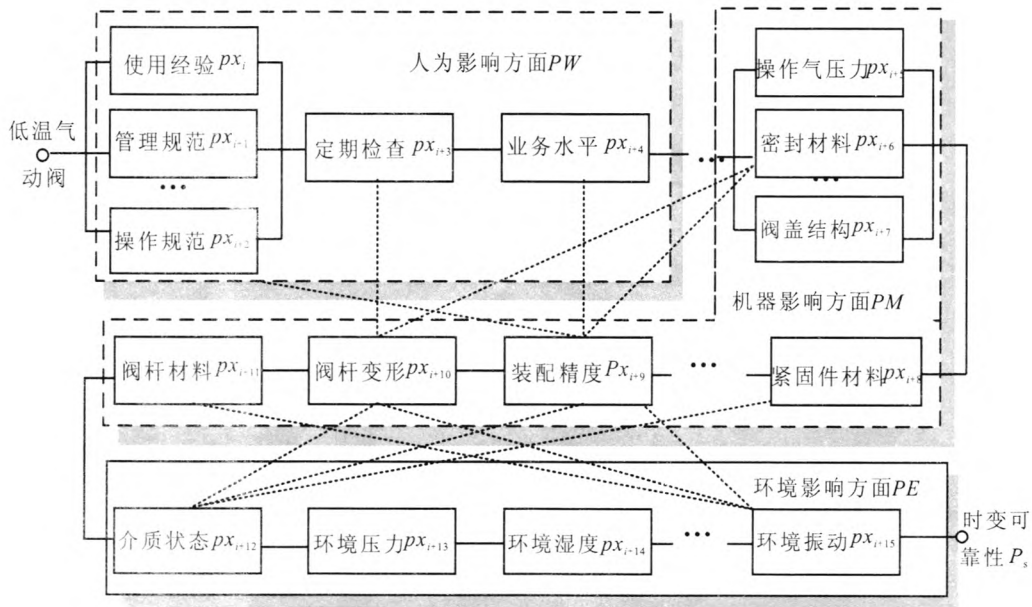


图2 低温气动阀时变可靠性模型

Fig. 2 Time-varying reliability model of cryogenic pneumatic valve

根据低温气动阀时变可靠性框图,其结构为混联形式,含有串并联单元。图2中影响因素间实线部分为串联形式,影响因素间虚线部分为并联形式。火箭发动机试验过程低温气动阀的时变可靠度  $P_s$  由其基本事件可靠度  $P_{ij}$  的乘积共同决定。设第  $i$  个单元的寿命为  $X_i$ , 其时变可靠度为  $K_i(t) = P(X_i > t)$ ,  $i=1,2,\dots,n$ , 且它们相互独立。由于系统寿命  $K$  对于各单元寿命  $X_i$  的最小值, 即  $X = \min(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ , 所以整个系统可靠性函数为<sup>[16]</sup>:

$$K_i(t) = P(X_i > t) = P[\min(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) > t] = P(X_1 > t, X_2 > t, X_3 > t, \dots, X_n > t) \quad (3)$$

则第  $j$  列子系统的可靠度为:

$$P_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - K_i(t)] \quad (4)$$

再用串联公式得到混联系统的时变可靠度:

$$P_s(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n [1 - k_j(t)] \right\} \quad (5)$$

设第  $i$  个单元失效率为  $\lambda_i(t)$ , 通过对式(5)求导, 整理得:

$$K'(t) = \prod_{i=1}^n K_i(t) \sum_{i=1}^n \frac{K'_i(t)}{K_i(t)} = -K_i(t) \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (6)$$

从而低温气动阀的失效率为:

$$\lambda(t)=-\frac{K'_i(t)}{K_i(t)}=\sum_{i=1}^n\lambda_i(t) \tag{7}$$

即低温气动阀的失效率是人机环境各独立单元的失效率之和。

假定第*i*个单元寿命服从参数为λ<sub>*i*</sub>的指数分布,即λ<sub>*i*</sub>(*t*)=λ<sub>*i*</sub>,*K<sub>i</sub>*(*t*)=*e*<sup>-λ<sub>*i*</sub>*t*</sup>,因此低温气动阀的失效率为:

$$\lambda=\sum_{i=1}^n\lambda_i(t) \tag{8}$$

低温气动阀的平均寿命为:

$$\theta=\frac{1}{\sum_{i=1}^n\lambda_i} \tag{9}$$

液氧煤油发动机的低温气动阀时变可靠性分析过程如图 3 所示。首先基于人机环境系统工程,全面分析低温气动阀的影响因素以及相互关系,然后根据人机环境因素确定低温气动阀时变可靠性模型;在此基础上,从人机环境系统方面全面定量分析低温气动阀可靠性、失效率及寿命等,分析低温气动阀可靠性的薄弱环节,制定改进措施,保证在液氧煤油发动机试验过程中安全顺利运行。

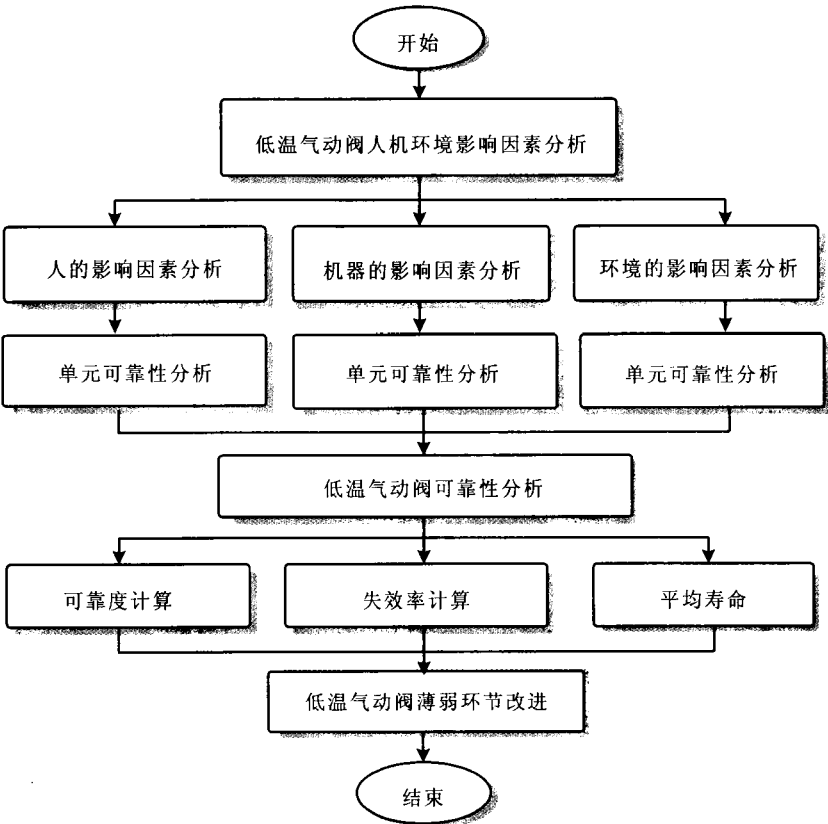


图 3 基于人机环境系统工程的低温气动阀时变可靠性分析过程  
Fig. 3 Analysis process of time-varying reliability of cryogenic pneumatic valve based on man-machine-environment system engineering

3 实例

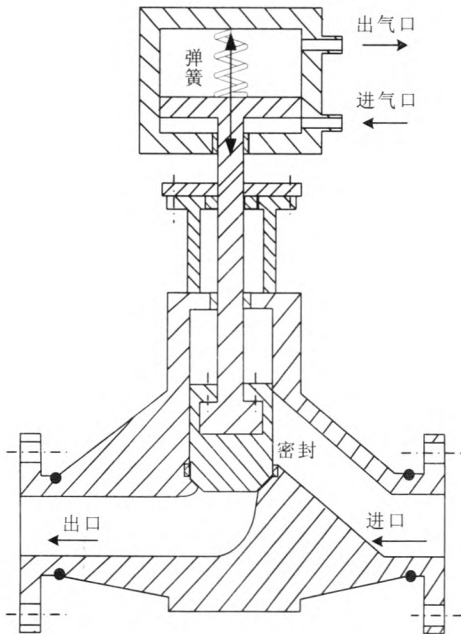
以液氧煤油发动机试验台某液氧主阀为对象,基于人机环境系统工程对时变可靠性进行分析,确保液氧主阀运行稳定可靠。

3.1 某低温气动阀的人机环境影响因素分析

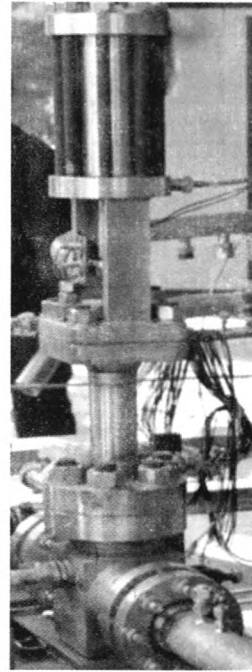
该液氧主阀用于液氧煤油发动机组件试验台的氧化剂(液氧)入口主阀,工作介质为液氧(-183℃),操作气为氦气,工作压力为23MPa。操作气有电磁阀控制,当电磁阀通电时,电磁阀

打开, 气缸通入操作气体, 操作气体作用于活塞; 在克服弹簧刚性、密封摩擦力及介质作用力等, 驱动活塞向上运动, 从而通过阀杆带动阀芯向上运动, 阀入口与出口贯通, 阀门打开。当电磁阀断电时, 电磁阀关闭, 气缸导出操作气体,

气缸泄压, 弹簧复位; 在弹簧刚性作用下, 克服密封摩擦力、介质作用力, 驱动活塞向下运动, 从而通过阀杆带动阀芯向下运动, 阀入口与出口截止, 阀门关闭。液氧主阀的结构简化图与实物如图 4 所示。



(a) 液氧主阀的结构简化图



(b) 液氧主阀的实物图

图 4 某试验台液氧主阀的结构图

Fig. 4 Structure diagram of a main liquid oxygen valve

通过初步分析, 结合试验历史数据, 从人机环境系统综合分析该液氧主阀可靠性主要影响因素包括: 人的方面 (检查周期、操作规范及操作状态共 3 个人员影响因素), 机器方面 (操作气压力、阀杆状态、阀杆材料、密封件、加工精度、装配状态及弹簧性能共 7 个机器影响因素), 环境方面 (环境振动、介质温度、介质流量及介质压力共 4 个环境影响因素), 共计 14 个人机环境影响因素, 概括为:

$$Qp \Rightarrow PW \cup PM \cup PE \Rightarrow \{px_1, px_2, px_3\} \cup \{px_4, px_5, \dots, px_9\} \cup \{px_{10}, px_{11}, \dots, px_{14}\}$$

### 3.2 液氧主阀的可靠性模型

根据该液氧主阀可靠性的 14 个人机环境影响因素, 建立该液氧主阀的时变可靠性模型, 如图 5 所示。

### 3.3 液氧主阀的可靠性分析

对液氧主阀可靠性的 14 个人机环境影响因素可靠度与失效率进行计算, 其结果如表 1 所示。

液氧主阀的可靠度为:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - k_i(t)] \right\} = 96.71\%$$

液氧主阀的失效率为:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) = 27 \times 10^{-5} \text{ h}$$

液氧主阀的平均寿命为:

$$\theta = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = 3703 \text{ h}$$

由此可知, 该液氧主阀的时变可靠性为 96.71%, 失效率为  $27 \times 10^{-5} \text{ h}$ 。液氧主阀的可靠度分布与失效率分布如图 6 与图 7 所示。

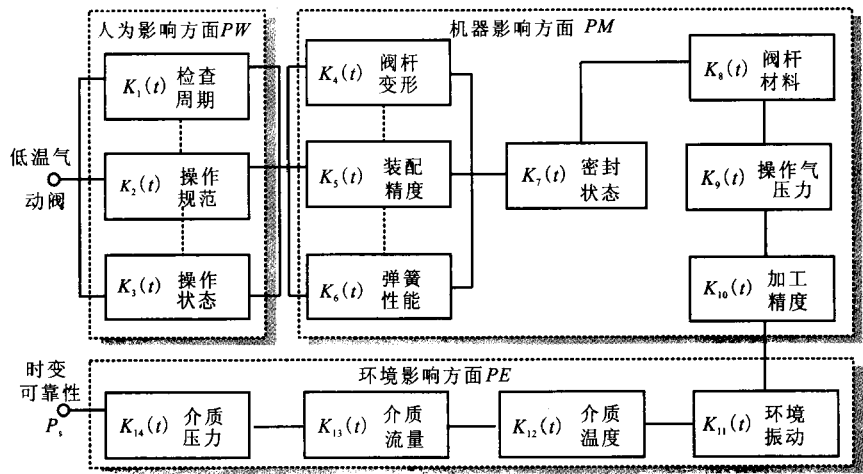


图 5 某低温气动阀时变可靠性模型

Fig. 5 Time-varying reliability model of a cryogenic pneumatic valve

表 1 液氧主阀人机环境影响因素可靠度与失效率

Tab. 1 Influencing factors on reliability degree and fault rate of main liquid oxygen valve					
影响因素	可靠度/%	失效率/h	影响因素	可靠度/%	失效率/h
检查周期	99.99	$1 \times 10^{-5}$	阀杆材料	99.99	$1 \times 10^{-5}$
操作规范	99.99	$1 \times 10^{-5}$	操作气压力	99.99	$1 \times 10^{-5}$
操作状态	99.99	$1 \times 10^{-5}$	加工精度	99.99	$1 \times 10^{-5}$
阀杆变形	99.99	$1 \times 10^{-5}$	环境振动	99.99	$1 \times 10^{-5}$
装配精度	99.99	$1 \times 10^{-5}$	介质温度	99.99	$1 \times 10^{-5}$
弹簧性能	98.65	$1 \times 10^{-4}$	介质流量	99.99	$1 \times 10^{-5}$
密封状态	98.11	$1 \times 10^{-4}$	介质压力	99.99	$1 \times 10^{-5}$

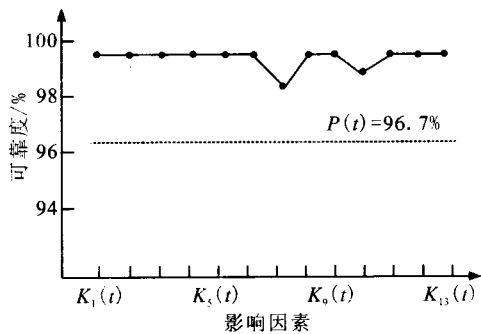


图 6 液氧主阀的可靠度分布

Fig. 6 Reliability degree distribution of a main liquid oxygen valve

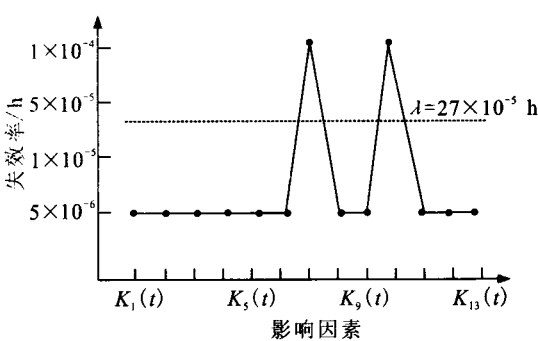


图 7 液氧主阀的失效率分布

Fig. 7 Fault rate distribution of a main liquid oxygen valve

根据图 6 和图 7 可知：由于密封失效，可能导致该液氧主阀泄漏，是影响可靠性的主要原因。针对该液氧主阀的时变可靠性，通过从人机

环境方面的分析，对密封圈性能和弹簧性能等薄弱环节进行改进，例如可以通过提高弹簧耐蚀性及疲劳强度去改善弹簧性能，通过修改密封结构



去改进O型圈密封性能等,从而增强液氧主阀的可靠性,保证液氧主阀平稳顺利运行,满足液体火箭发动机试验要求。

#### 4 结束语

结合低温气动阀的工作原理,通过引入人机环境系统工程理论,从人机环境方面分析低温气动阀可靠性影响因素,建立基于人机环境系统工程的低温气动阀时变可靠性模型;并在此基础上,从人机环境范围内对低温气动阀的可靠度定量分析,并对低温气动阀可靠性薄弱环节进行评估。最后通过具体实例的应用,验证了该方法的有效性和准确性,为实现液体火箭发动机试验过程中全面定量识别和改进低温气动阀故障产生根源提供了支撑,为解决液体火箭发动机试验过程中低温气动阀动态时变可靠性问题提供了保证,为满足发动机工作参数测试对试验系统的要求,提升航天动力试验技术,增强液体火箭发动机性能的客观、准确评价能力,保证试验过程发动机与试验系统的可靠性与安全性,缩小与国外先进国家技术差距提供了一种方法指导。

#### 参考文献:

- [1] 王永忠,王宁.低温阀在液体火箭发动机试验中的应用[J].火箭推进,2004,30(1):32-37.
- [2] 张晓东.航天器先导式开关阀的动态特性分析与试验研究[D].上海:上海交通大学,2011.
- [3] LIU Song, YAO Bin. Adaptive robust control of programmable valves with manufacturer supplied flow mapping only[C]// The 43rd IEEE Conference on Decision and Control. Nassau: IEEE, 2004: 1117-1122.
- [4] 夏胜枝,周明,李希浩,等.高速强力电磁阀的动态响应特性[J].清华大学学报,2002,42(2):258-277.
- [5] 贾光政,王宣银,吴根茂.超高压大流量气动开关阀的原理和动态特性研究[J].机械工程学报,2004,40(5):77-81.
- [6] 程亚威,李小明,陈维宇.液氧主阀的方案及设计[J].火箭推进,2007,33(2):17-19.
- [7] 石延平,刘成文.一种大流量高速开关阀的研究与设计[J].机械工程学报,2004,40(4):195-198.
- [8] 戴佳,黄敏超,余勇,等.电磁阀动态响应特性仿真研究[J].火箭推进,2007,33(1):40-48.
- [9] RAO Z, BONE G M. Nonlinear modeling and control of servo pneumatic actuators control systems technology [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2008, 16(3): 562-569.
- [10] CAVALLO P A, HOSANGADI A, AHUJA V. Transient simulations of valve motion in cryogenic systems [C]// Proceedings of the 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1-10.
- [11] 刘昆.分级燃烧循环液氧/液氢发动机系统分布参数模型与通用仿真研究[D].长沙:国防科学技术大学,1999.
- [12] LIU Kun, ZHANG Yu-lin. A study on versatile simulation of liquid propellant rocket engine systems transients, AIAA 2000-3771 [R]. USA: AIAA, 2000.
- [13] BOSNYATSKIY G P, BARINUD V B, PARSADANOV G M, et al. Optimization of inter-relations of man-machine-external environment-reserve of reliability of system[J]. Gazovaya Promyshlennost, 2001 (12): 35-40.
- [14] 龙升照.钱学森与人机环境系统工程[C]//第八届中国人机环境系统工程大会.深圳:[出版者不详],2007.
- [15] MA L H, YAN H Z. Comprehensive evaluation of fully mechanized mining face security based on unascertained-Information entropy model[C]// Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology. Beijing, China: IEEE, 2009: 268-271.
- [16] 高社生,张玲霞.可靠性理论与工程应用[M].北京:国防工业出版社,2002.

(编辑:马杰)