

高压气动电磁阀可靠性改进设计

程 帆, 张 波

(北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

摘 要: 高压气动电磁阀是地面供气系统使用的关键元件, 其可靠性直接关系到运载火箭能否正常完成发射流程。本文对高压气动电磁阀的故障模式进行分析, 并对其可靠性改进设计、可靠性试验以及可靠性评估等技术进行了介绍, 通过一系列可靠性改进设计及验证试验工作, 使高压气动电磁阀可靠性有所增长, 并在大型飞行试验中得到验证。

关键词: 高压气动电磁阀; 可靠性改进; 设计

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 01-0050-05

Design for reliability improvement of high-pressure pneumatic solenoid valve

CHENG Fan, ZHANG Bo

(Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The high-pressure pneumatic solenoid valve is the key element applied to the ground gas supply system in aerospace field, whose reliability is closely related with the successful launch procedure of the launch vehicle. In this paper, the failure modes of high-pressure pneumatic solenoid valve are analyzed, and the reliability improvement, reliability test and reliability assessment techniques are also introduced. The reliability of high-pressure pneumatic solenoid valve was increased to a certain extent by a series of reliability improvement designs and validation experiments, which was also proved in large-scale flight tests.

Keywords: high-pressure pneumatic solenoid valve; reliability improvement; design

0 引言

高压气动电磁阀作为航天领域使用的流体控制元件, 已广泛应用于各型号运载火箭的动力系统。针对运载火箭的关键动力装置及结构, 地面供气系统中使用的高压气动电磁阀需要在火箭发

射前完成燃料贮箱增压、箭上活门控制以及舱间段吹除等一系列重要供气工作。高压气动电磁阀在断电关闭状态下, 需要具备密封功能, 能够避免因电磁阀内部气体泄漏而影响整个供气系统的气密性; 当电磁阀加电开启时, 要求具有快速响应能力, 并且在规定时间内实现阀门的完全开

收稿日期: 2016-06-17; 修回日期: 2016-10-20

作者简介: 程帆 (1986—), 女, 工程师, 硕士, 研究领域为地面供气系统及元件设计

启; 电磁阀再次断电时, 特别是经过长时间连续加电工作后, 仍需要其快速切换, 实现阀门完全关闭。因此, 高压气动电磁阀的可靠性设计主要集中于密封结构设计、活门往复运动设计等功能、性能稳定性的实现上^[1]。

1 高压气动电磁阀基本原理及方案

某型高压气动电磁阀采用先导式结构形式, 具有结构紧凑、工作压力高且所需电磁吸力小等特点。该电磁阀主要由电磁铁、阀体、先导活门、先导活门复位弹簧、先导活门密封元件、主活门、主活门复位弹簧、主活门密封元件等构成, 结构示意图如图 1 所示。

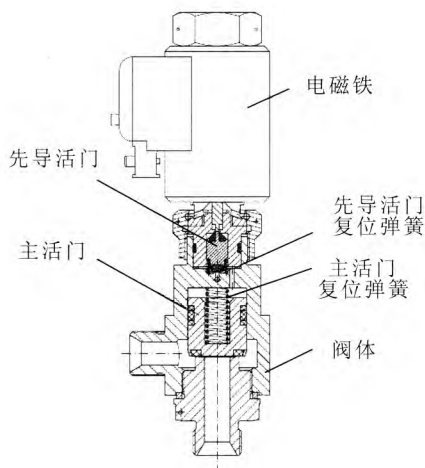


图 1 高压气动电磁阀结构图

Fig. 1 Structure of high-pressure pneumatic solenoid valve

电磁阀主要工作原理为: 初始状态断电时, 入口气体通过阀体的小通道进入电磁阀的先导部分, 由于先导部分的气动作用面积大于主活门密封面一侧受气动力的面积, 在不平衡面积气动力的作用下, 将主活门关闭, 此时电磁阀处于常闭状态。通电时, 电磁铁吸合, 将先导活门推下, 先导部分的进口被先导活门关闭, 同时先导部分的气体通过先导活门的上部出口排入大气, 先导部分放气, 电磁阀的主活门在进口气动力的作用下打开, 此时电磁阀打开供气。

高压气动电磁阀主要针对以下功能和性能进

行可靠性设计, 以满足高密度发射的高可靠性要求。

1) 高压气动电磁阀先导活门应具有良好的密封性能, 在断电关闭状态下能够保证供气系统与外部大气环境隔绝。在加电时, 应确保先导流道建压正常, 如果先导活门的密封失效或损坏, 则最终影响电磁阀的开启。因此先导活门密封功能是电磁阀的重要性能指标。

2) 高压气动电磁阀主活门需具备较高的关闭可靠性, 主活门为典型的 O 形圈动密封结构, 因此需规范设计该结构各参数, 特别是考虑电磁阀温升造成 O 形圈摩擦力增大的极端使用工况, 保证在电磁阀需断电关闭时, 主活门上方的弹簧复位力能够克服主活门 O 形圈的摩擦力, 从而避免主活门发生关闭滞后或无法关闭等故障, 保证主活门快速可靠关闭^[2]。

2 高压气动电磁阀故障模式分析

2.1 故障分类及判定准则

根据 GJB 899A-2009 《可靠性鉴定和验收试验》的规定, 试验过程中发生的故障可分为关联故障和非关联故障, 关联故障又可分为非责任故障和责任故障。

非关联故障是指已经证实是未按规定的条件使用而引起的故障, 或已经证实属于某项将不采用的设计所引起的故障。责任故障是指承制方提供的设备、在试验中出现的关联的、独立故障, 以及由此引起的任何从属故障只算作一次责任故障。它是判决受试设备合格与否的依据。而非责任故障是由非承制方提供的设备所引起的承制方受试设备故障称为非责任故障。非责任故障不应作为判决受试设备合格与否的依据。高压气动电磁阀故障判定的准则为: 在试验剖面出现不能完成规定任务的责任故障^[3]。

2.2 故障模式分析

根据以上故障判定准则, 对高压气动电磁阀故障模式进行分析, 其流程见图 2。

首先, 通过将高压气动电磁阀划分到零、部组件级别, 对其建立产品结构树。该产品结构树分为顶节点和分支节点 2 层, 顶节点为零件和部

组件,分支节点为部组件的零件。

其次,确定故障数据源。通过统计历次发射任务、大型试验、出厂试验、可靠性试验、其他使用或试验过程中出现的问题,总结历史故障模式主要关闭延迟、无法关闭、内部泄漏、外部泄漏;通过对高压气动电磁阀的功能性能要求进行分析,考虑功能丧失、性能下降、间歇性故障、非预期功能等潜在故障数据,总结高压气动电磁阀潜在故障模式。

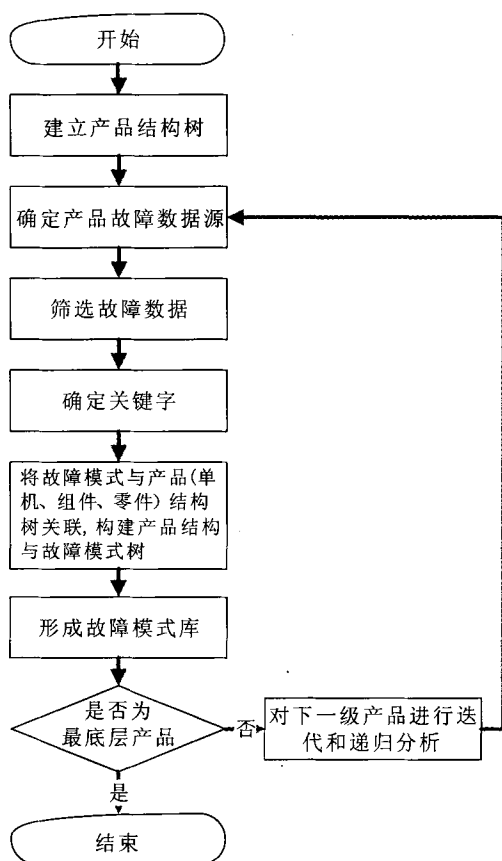


图2 故障模式分析流程图

Fig. 2 Analyzing flow chart of failure modes

再次,对上述故障数据进行分析、归类,剔除非关联故障,并将故障现象相同但是描述不同的故障数据进行统一化处理,形成唯一的故障模式。在筛选故障数据的基础上,确定故障模式的关键字为:内部泄漏、外部泄漏、无法打开、无法关闭、打开延迟、关闭延迟。

最后,将故障模式与产品结构树连接,将每个故障模式与其相关的所有顶节点相连,形成高

压气动电磁阀顶层产品结构与故障模式树,依次类推,对一级分支节点按上述步骤进行迭代和递归分析,形成一级产品结构与故障模式树。

2.3 故障模式树建立

高压气动电磁阀各级硬件按照上述步骤进行迭代分析后,形成高压气动电磁阀故障模式库,包括全部的产品结构与故障模式树。图3所示为高压气动电磁阀的顶层产品结构与故障模式树,根据此方法可得电磁阀中包括壳体组合件、主活门、先导活门在内的一级产品结构与故障模式树。分析结果表明,对于高压气动电磁阀内部、外部泄漏故障,受到先导活门结构的显著影响;对于电磁阀的启闭可靠性则与主活门结构设计息息相关。

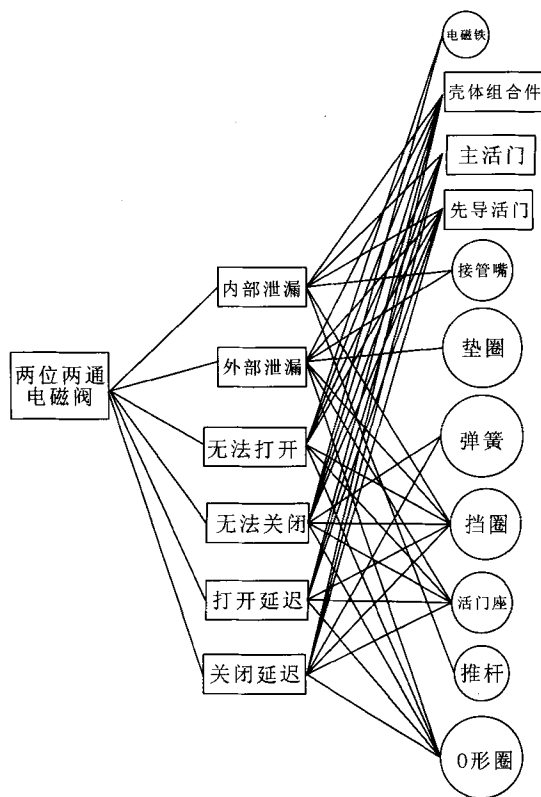


图3 高压气动电磁阀顶层产品结构与故障模式树

Fig. 3 Top product structure and failure mode tree of high-pressure pneumatic solenoid valve

3 高压气动电磁阀可靠性设计

通过梳理高压气动电磁阀故障模式清单,分析各类典型故障的机理,以系统影响最小,以确

保对外机械、电控接口不变,安装固定方式不变、操作方式不变、提升产品可靠性为更改原则,对高压气动电磁阀进行可靠性改进设计。

3.1 先导活门及相关部位零件结构可靠性设计

高压气动电磁阀先导部分的原有设计的密封性能不稳定,对先导活门、活门座、柱销三种零件的配合尺寸要求甚严,导向设计不合理,易发生密封失效问题^[4];二是原设计工艺复杂、加工难度大,且需要特殊表面处理,成本较高,加工周期长;三是原设计产品化程度低,各产品设计存在较大差异,未进行统一化设计。

先导部位改进前后主要进行以下改进设计:

1) 将活门座内孔孔径增大,倒角尺寸减小,将推杆导向(活门座处)延长,提高推杆往复运动的稳定性。

2) 去掉先导活门柱销,以及推杆下部增加顶杆设计等,可以消除先导活门密封不良的可能性,提高先导活门零部件的工艺性,提高先导部位处的密封可靠性。

3) 在不影响其工作性能的基础上,对产品的工艺可行性有了一定改善。例如,改进前先导活门毛坯件为组件,由活门壳体和柱销组成,需要装配工序,改进后将其简化为零件,可机加一体成形;改进前,先导活门的橡胶密封面硫化后,需再对柱销进行加工,由于尺寸精度要求高,难度较大,改进后取消了此项复杂的加工工序,并采用不锈钢材料替代原有材料。

以上可靠性改进设计能够消除先导活门密封不良的可能性,提高先导活门零部件的工艺性,提高先导部位处的密封可靠性。

3.2 主活门O形圈动密封结构可靠性设计

高压气动电磁阀的主活门采用活塞式往复运动结构,主要由阀体、主活门、挡圈、O形圈、主弹簧等相关零部件组成。

当电磁阀通电切换至断电,该动密封结构主要工作原理为:入口气体经过壳体先导通道进入先导管,向下的气动力和主弹簧复位力逐渐克服向上的气动力和主活门O形圈动摩擦力,推动主活门向下运动,逐渐关闭密封。在主活门开始关闭阶段,主活门上下气动力平衡,此时,如果主

活门弹簧复位力小于O形圈摩擦力,则存在主活门关闭滞后或无法关闭的风险。

为了减少O形圈摩擦力,需要调整O形圈及沟槽尺寸,从而确定适宜的O形圈压缩率、拉伸率、容积比等设计参数,避免出现因O形圈设计参数不合理,影响O形圈的装配状态,由此可能产生弯曲及扭转,导致增大主活门运动时的摩擦力。

同时,电磁阀长期加电造成电磁铁以及整体的温升,而O形圈本身采用密封橡胶材料,其体积随着温度的升高而逐渐增大^[5],因此长时间高温作用下,O形圈发生的非常规变形对活门不关闭影响也很大。以往试验结果表明,某高压23 MPa电磁阀连续通电8~60 h,电磁铁外壳温度平衡至70℃,考虑电磁阀内外温差,则可以得到:当O形圈材料温度升至80℃时,O形圈的体积变化率为2.6%,此时摩擦力增大约20 N。

根据QJA77-2011《航天型号用阀门动静密封设计规范》设计的主活门动密封结构,对O形圈的摩擦力有很大程度减小,各项设计参数均符合设计规范,提高了主活门快速关闭复位的可靠性^[6]。

4 高压气动电磁阀可靠性试验及评估

4.1 可靠性试验

对于高压气动电磁阀来讲,前文已分析其主要的失效模式可归纳为阀门无法正常启闭(或泄漏),因此根据电磁阀特点,将可靠性特征量选取为满足工作条件下正常启闭次数。

高压气动电磁阀可靠性的试验剖面是将试验件进行综合环境应力下(环境温度、工作压力、工作电压、工作时间等综合影响)的启闭试验,达到规定动作次数后,复测试验件的性能^[7]。高压气动电磁阀可靠性试验剖面设计:按100次一个循环进行试验,每100次变换综合环境应力配置方式,对每套投试产品进行4 800次综合环境应力剖面下的启闭试验。其中,结合产品对温度变化的适应能力,同时为了实施方便(产品冷、热浸的稳定时间约4 h,如果频繁变温会导致试验周期长),高、低温应力分别实施,高温、低

温情况下产品各启闭 1 000 次;工作压力按额定工作压力;工作电压按上拉偏值、额定值、下拉偏值每 100 次、200 次、100 次往复循环。

高压气动电磁阀可靠性试验项目及要求见表 1。试验设备见图 4。试验项目主要目的在于考核

电磁阀密封性和关闭可靠性。对试验件进行常温、低温、高温试验条件下的气密性检查、响应时间试验、工作性能检查、长时间通电通气试验等试验验证,电动截止阀共计进行 4 个循环,共工作 4 800 次。

表 1 高压气动电磁阀可靠性试验项目

Tab. 1 Items of reliability experiment for high-pressure pneumatic solenoid valve

试验项目	要 求
综合环境 应力试验	1. 在常温环境下,电磁阀分别在最高工作电压和最低工作电压下进行最高工作压力的启闭试验,试验次数 $t/(2w)$ 次,要求每工作 100 次(暂定),进行气密性试验(包含最低工作压力和最高工作压力两种工况)、响应时间试验、工作性能检查、长时间通电通气试验
	2. 在低温环境下,电磁阀分别在最高工作电压和最低工作电压下进行最高工作压力的启闭试验,试验次数 $t/(4w)$ 次,要求每工作 100 次(暂定),进行气密性试验(包含最低工作压力和最高工作压力两种工况)、响应时间、工作性能检查、长时间通电通气试验
	3. 在高温环境下,电磁阀分别在最高工作电压和最低工作电压下进行最高工作压力的启闭试验,试验次数 $t/(4w)$ 次,要求每工作 100 次(暂定),进行气密性试验(包含最低工作压力和最高工作压力两种工况)、响应时间试验、工作性能检查、长时间通电通气试验
	4. 重复 1-3 项试验,共计进行 w 次循环

注: t 为受试产品启闭或放气试验次数

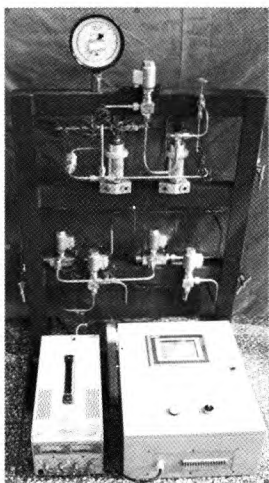


图 4 可靠性试验设备

Fig. 4 Reliability experiment devices

4.2 可靠性评估

高压气动电磁阀是多个零部件组成的整体,各个零部件的失效有独立性也有相关性,且每一零部件失效导致整个供气阀件的失效;同时,高压气动电磁阀无恒定失效率的零部件,无定期维修的零部件。鉴于以上特点,结合工程经验,选

择高压气动电磁阀的可靠性分布类型为威布尔分布^[8]。

对于可靠性特征量服从威布尔分布的产品,高压气动电磁阀的发射任务可靠度下限 $R_L(t_0)$ 由下式计算^[9]:

$$R_L(t_0) = \exp \left[- \frac{t_0^m \chi_{\gamma}^2(2r+2)}{2 \sum_{i=1}^n t_i^m} \right] \quad (1)$$

式中: $R_L(t_0)$ 为产品可靠性下限; $\chi_{\gamma}^2(2r+2)$ 为自由度为 $(2r+2)$ 的 χ^2 分布 γ 分位数,由 GB/T 4086.2-1983 中 χ^2 分布分位数表查得; t_i 为第 i 个受试产品的试验截尾次数 ($1 \leq i \leq n$, $t_i > t_0$, t_i 可以互不相同); r 为受试产品失效数。

通过试验可得,在单发射任务产品动作次数 $t_0=100$,置信度 $\gamma=0.7$,威布尔分布形状参数 $m=2$ 的情况下,可靠性评估结果为:在规定的试验条件下,六件电磁阀产品的发射任务可靠度的置信下限值 $R_L(100)=0.999\ 913$,满足某型号发射任务可靠度 0.999 9 的要求^[10]。(下转第 84 页)

过反复大量的计算验证, 确定相关发动机部位材质的辐射率, 提高了红外测温数据的准确度, 为发动机结构设计提供参考数据。

参考文献:

- [1] 邓建平, 王国林, 黄沛然. 用于高温测量的红外热成像技术[J]. 流体力学实验与测量, 2001, 15(1): 43-47.
- [2] 曾学军, 李明, 刘太奎. 用红外热图技术进行升力体模型气动热特性试验研究[J]. 空气动力学学报, 2004, 22(4): 494-498.
- [3] 祝永坚, 陈钱. 新型红外探测系统通信模块的设计[J]. 现代电子技术, 2005 (10): 4-6.
- [4] 白洪斌. 红外探测器在武器系统中的应用[J]. 航空兵器, 2001 (3): 47-48.
- [5] 钱铮铁. 一种用于红外警戒系统的被动测距方法[J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(4): 311-314.

- [6] 朱宁昌, 董锡鉴, 王新龄, 等. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1993.
- [7] 张忠利, 张蒙正, 李福云. 液体火箭发动机涡轮壳体温度偏高原因研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(2): 35-39.
ZHANG Zhongli, ZHANG Mengzheng, LI Fuyun. Investigation on reason of overheating of turbine housing in liquid rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(2): 35-39.
- [8] 李斌. 液体火箭发动机结构可靠性设计与分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [9] 徐旭常, 周力行. 燃烧技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [10] 叶伟, 徐万武, 陈健. 冲压空气涡轮泵供应系统方案设计及其特性分析[J]. 火箭推进, 2015, 41(6): 11-15.
YE Wei, XU Wanwu, CHEN Jian. Design and performance analysis on fuel feeding system for ram air turbo-pump [J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(6): 11-15.

(编辑: 王建喜)

(上接第 54 页)

5 结论

通过一系列可靠性改进设计及验证试验工作, 使高压气动电磁阀可靠性有所增长, 大大降低了影响发射任务的风险, 可避免由于单点失效导致发射任务推迟或失败而带来的巨大损失。高压气动电磁阀可靠性的提高成为确保地面发射任务高可靠的关键因素, 为日益严格的发射需求提供了根本保证和基本需求。

参考文献:

- [1] 李奋勇, 董华, 陆芯, 等. 高压气体电磁阀设计[J]. 液压与气动, 2011(1): 91-93.
- [2] 魏国俭, 陶瑞峰, 许健, 等. 航天阀门运动副卡滞故障分析及对策[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 7-13.
- [3] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [4] 张少博, 王乃世, 陈海峰, 等. 基于声压测量的阀门故障检测方法研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(4): 100-104.
ZHANG Shaobo, WANG Naishi, CHEN Haifeng, et al.

Method of valve fault detection based on sound pressure measurement [J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41 (4): 100-104.

- [5] 乔博, 赵秀英, 高悦凯, 等. 密封橡胶材料的压力-体积-温度关系的研究[J]. 高分子学报, 2012(9): 1015-1020.
- [6] 秦永涛, 曹文庆, 李党科, 等. 低温气动阀的人机环境可靠性评估方法[J]. 火箭推进, 2014, 40(2): 82-89.
QIN Yongtao, CAO Wenqing, LI Dangke, et al. The man-machine-environment reliability evaluation method of cryogenic pneumatic valve[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(2): 82-89.
- [7] 史秋明, 谢荣华. 电磁阀滑动副的设计参数灵敏度分析与可靠性研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(3): 72-78.
SHI Qiu-ming, XIE Ronghua. Design sensitivity analysis and reliability research on sliding pairs of solenoid valve [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(3): 72-78.
- [8] MARVIN R, JORN V. Reliability modeling of surface controlled subsurface safety valves [J]. Reliability engineering, 1998(61): 159-166.
- [9] 崔景芝, 修建生, 孙法国, 等. 阀门产品的可靠性评估方法[J]. 载人航天, 2011(2): 59-64.
- [10] 赵宇. 可靠性数据分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

(编辑: 王建喜)