

电磁阀泄漏故障分析及改进

高 曼, 王志永, 李小明

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:针对某电磁阀在试车及关机后出现的阀座密封性不稳定现象, 梳理出两种故障模式。基于此开展了电磁阀结构强度、动态特性、流场仿真计算。结合相关试验验证情况, 分析了装配应力及运动过程对产品密封性能的影响, 给出了阀座密封性不稳定的主要原因是装配应力使阀座密封面发生不均匀变形, 造成泄漏量增大; 电磁阀断电打开时的撞击及侧向流体力可能导致密封块偏斜, 进而造成阀座漏量增大。据此, 提出了相应的改进措施并得到热试车验证。

关键词:电磁阀; 泄漏; 仿真计算; 改进措施

中图分类号: V432-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2018)05-0043-05

Analysis for leakage fault of solenoid valve and its improvement

GAO Man, WANG Zhiyong, LI Xiaoming

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

Abstract: In view of the sealing instability of the solenoid valve seat, which occurred in the engine test and after its shutdown, two fault modes were found out. Simulation calculation for structural strength, dynamic characteristics and the flow field of the solenoid valve is carried out. In combination with the relevant test results, the effect of assembly stress and movement process on the sealing performance of the product is analyzed. It is found that the main reasons for the instability of the solenoid valve seat seal is the inappropriate assembly stress which causes uneven deformation of the sealing surface of the valve seat, and the impact and lateral fluid strength which lead to a deviation of the sealing block after outage of the solenoid valve, resulting in leakage increase of the seal. Accordingly, the corresponding improvement measures are put forward and verified by hot-fire test.

Keywords: solenoid valve; leakage; simulation calculation; improvement measure

0 引言

某电磁阀用于控制发动机介质供应, 工作过程要求其可靠动作及密封, 为发动机关键组件之一。

该阀阀座采用金属-金属密封结构, 在发动机安装及工作过程中受力复杂, 易产生密封副变形、阀芯偏斜, 进而影响产品工作及密封可靠性。

在发动机工作过程中曾出现电磁阀阀座密封

收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2018-04-12

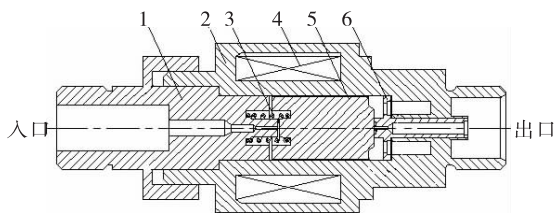
作者简介: 高 曼(1987-), 女, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计

泄漏异常情况。针对此次故障,共梳理出电磁阀装配应力过大带来的结构变形、试车过程中阀芯组件密封块偏斜两种故障模式。本文对这两种故障模式开展相应的结构强度及动态过程仿真计算及分析,试图找出电磁阀密封性异常的主要原因。

1 故障现象及分析

某次试车过程中,发动机点火正常,但试车监控录像发现,发动机关机后电磁阀尾部出现明火;试车后检查发现,与电磁阀尾部相连管路中存留的推进剂较多,远多于以往试车,说明试车过程中电磁阀尾部泄漏量异常增大。

电磁阀主要由入口壳体、阀芯、阀座、弹簧、线圈等组成,结构如图 1 所示,其中,阀芯包含密封块。断电状态下,阀芯与阀座密封;通电后,阀芯与入口壳体密封,切断入口介质通路。



1 - 入口壳体;2 - 骨架;3 - 弹簧;4 - 线圈;5 - 阀芯;6 - 阀座

图 1 电磁阀结构简图

Fig. 1 Structure sketch of solenoid valve

对于电磁阀阀座密封性不稳定的异常现象,经分解检查已排除多余物因素,初步分析是试车过程阀芯密封块发生偏斜所致。梳理电磁阀整个装配使用过程,密封块偏斜存在以下两种模式:发动机装配过程带来电磁阀结构变形;试车时电磁阀断电打开运动过程浮动式密封块发生偏斜卡滞。针对这两种模式开展相应的结构强度及动态过程仿真计算及分析,试图找出电磁阀阀座密封性不稳定的主要原因。

2 仿真计算及分析

2.1 结构强度计算及分析

2.1.1 计算模型及分析

基于 ANSYS 软件对电磁阀进行结构强度计算。

考虑到阀座与阀芯对计算结果影响较大,对相关密封副接触面进行了局部细化,其他部位网格采用自适应的四面体自动划分。根据实际情况,固定产品与卡箍贴合面,在各接口施加拧紧力矩,具体边界约束见图 2 所示。



图 2 电磁阀边界约束

Fig. 2 Boundary constraints of solenoid valve

电磁阀在发动机拧紧力矩作用下,阀座变形计算结果见图 3。通过计算可知,阀座密封面所受最大应力 137.5 MPa,最大变形量 0.03 mm,且沿圆周方向变形不均匀。由于电磁阀装配发动机后,阀座存在不均匀变形,造成阀芯密封性变差;试车过程中由于振动环境作用,电磁阀所受各项应力重新分布。

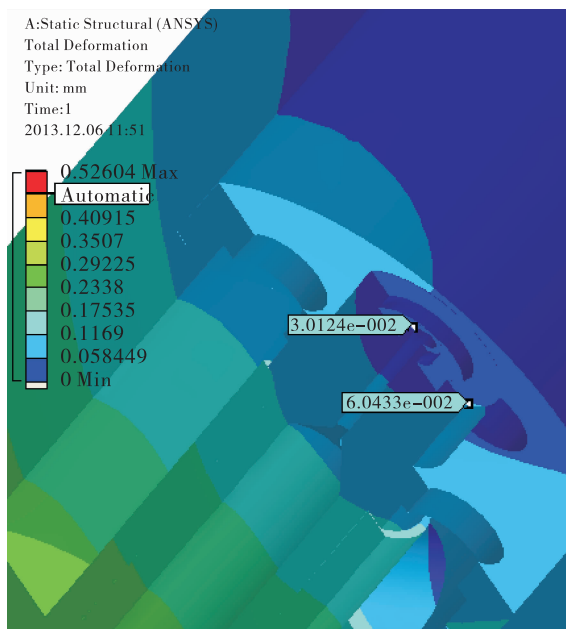


图 3 电磁阀阀座应变云图

Fig. 3 Strain nephogram of solenoid valve seat

2.1.2 试验验证

为确定发动机装配过程对电磁阀密封性的具体影响,开展了相关试验验证。

电磁阀安装到发动机的具体过程:先将壳体用卡箍固定在旁边一个大组件上,入口与管路连接,出口导管通过较长管路固定在推力室上。发动机点火导管安装时入口与该大组件相连,拧紧力矩较大,产生的应力变形会传至电磁阀,所以电磁阀受力较复杂。对比点火导管安装前后的泄漏量数据,见表 1。结果表明,点火导管安装后电磁阀阀座泄漏量明显增大;以产品 1 为例,安装点火导管后泄漏量相对装配前泄漏量增大了 7.5 倍。安装卡箍前后的试验结果见表 2。产品 3 与产品 4 在安装卡箍后的泄漏量分别增大 33.3% 与 4.7%,说明安装卡箍对电磁阀阀座泄漏量影响程度远小于安装点火导管。

表 1 点火导管安装前后电磁阀泄漏量数据

Tab. 1 Leakage data of solenoid valve before and after installation of ignition conduit

电磁阀	泄漏量/(泡/3 min)	
	未安装点火导管	安装点火导管并拧紧
产品 1	14	119
产品 2	44	68

表 2 卡箍安装前后电磁阀泄漏量数据

Tab. 2 Leakage data of solenoid valve before and after installation of clamp

电磁阀	泄漏量/(泡/3 min)	
	未安装卡箍	安装并拧紧卡箍
产品 3	12	16
产品 4	430	450

2.1.3 小结

通过仿真分析及试验验证可知,发动机装配过程产生的应力使电磁阀阀座密封面产生不均匀变形,导致密封性变差,其中安装点火导管产生的装配应力是造成电磁阀阀座泄漏量增大的主要因素之一。

2.2 动态过程仿真及分析

2.2.1 动态过程计算及分析

试车过程中电磁阀断电打开,阀芯在介质压力及弹簧力作用下迅速将阀座关闭,关闭过程中阀芯的密封块与阀座碰撞,并在弹簧力和介质力作用下与阀座贴合保持密封。如果密封块碰撞后未正常复位就会导致泄漏增大,为确定阀芯组件运动过程中密封块的运动状态,基于 AMESim 软件建立了电磁阀的动态仿真模型,如图 4 所示。参数设置为 0.02 s 电磁阀断电打开,入口介质压力 19 MPa,仿真计算时间为 0.1 s。

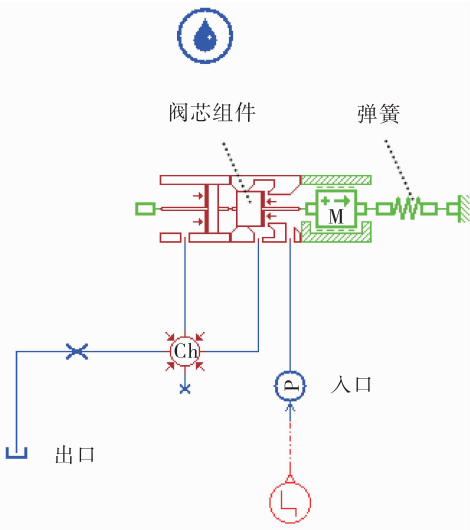


图 4 电磁阀动态仿真模型

Fig. 4 Dynamic simulation model of solenoid valve

动态计算结果见图 5。可以看出,0.02 s 后阀芯运动速度逐渐增大,运动到限位时速度为 4.97 m/s。

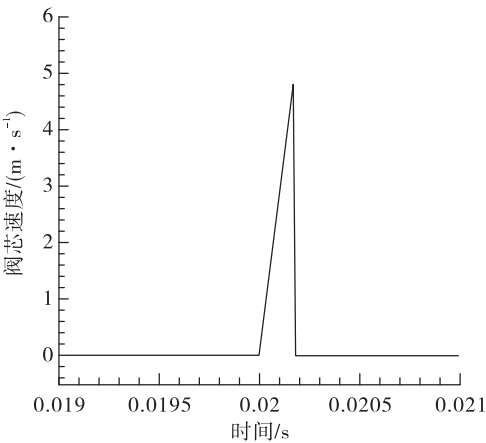


图 5 阀芯速度曲线

Fig. 5 Speed curve of valve core

按式(1)计算出密封块碰撞阀座瞬间所受冲击力为 8.9 N,大于密封块上弹簧安装负荷,密封块会发生反弹;反弹后密封块借助弹簧力复位,过程中可能由于侧向不平衡力作用出现偏斜卡滞,造成密封性变差。

$$F = mv/t \tag{1}$$

式中: F 为密封块碰撞阀座所受冲击力, N; v 为阀芯速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; m 为密封块质量, 0.001 8 kg; t 为密封块碰撞所用时间, 0.001 s。

2.2.2 流场计算及分析

由于密封块反弹复位动态过程受力计算较复杂,本文仅通过稳态流场计算密封块偏斜后受力情况来分析故障模式的主要因素。三维模型及网格见图 6,网格划分采用自适应的四面体网格,密封块进行局部加密。边界条件:入口流量边界,出口压力边界。

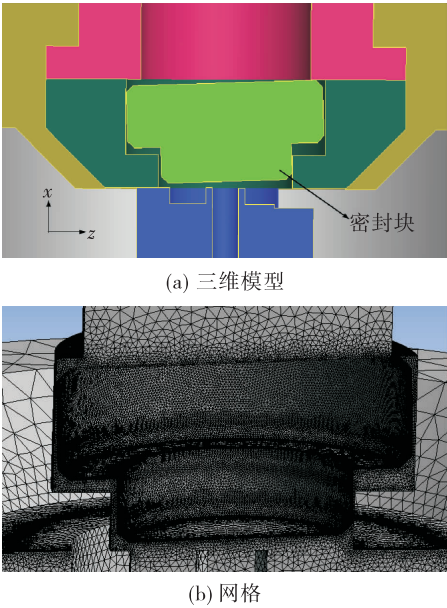


图 6 偏斜状态下的阀芯三维模型及网格划分
Fig. 6 Three - dimensional model and mesh generation of deflective valve core

根据不同入口流量下内腔压力分布,选取密封块各方向在垂直方向上有投影面积的表面,进行压力积分计算密封块受力情况,具体见表 3。分析可知,密封块偏斜时主要受向下轴向力 F_x ,侧向合力

F_{yz} 较小,方向水平面向右(如图 6),不利于密封块偏斜后复位,且随着出口泄漏流量增大而增大。

表 3 密封块受力计算结果

Tab. 3 Calculation results of force on sealing block

入口流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	出口流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	F_x/N	F_y/N	F_z/N	F_{yz}/N
44.2	32.9	-5.66	-0.51	0.47	0.69
30	26.9	-3.91	-0.38	0.33	0.5
20	17.8	-1.75	-0.18	0.15	0.24
15	13.6	-1.01	-0.11	0.09	0.14
10	8.9	-0.43	0.05	0.04	0.06

2.2.3 小结

发动机试车时电磁阀断电打开,阀芯的密封块碰撞阀座反弹复位过程中可能出现偏斜,而侧向流体力不利于密封块复位,导致阀座密封性变差。

3 改进措施

通过电磁阀结构强度、动态特性、流场仿真计算及试验验证可知:装配应力、电磁阀断电打开时撞击及侧向不平衡力可能导致的密封块偏斜均有可能造成阀座泄漏。为了保证产品工作及密封可靠,提出以下改进措施:

1)调整安装顺序。发动机装配时,应先安装点火导管等大管路再装电磁阀;更换点火导管时先将电磁阀连接管路松开,尽量减少电磁阀的安装应力,降低对电磁阀密封性的影响;安装点火导管后,增加电磁阀阀座密封性检查,确保在发动机最终状态下电磁阀阀座密封性能合格。

2)增大弹簧安装负荷。计算密封块碰撞阀座产生的冲击力大于弹簧安装负荷,密封块反弹在复位过程中若出现偏斜卡滞且介质流动无法使其自动复位,将会影响密封性。为此增大弹簧安装负荷,避免密封块反弹出现偏斜,提高密封稳定性。

采取以上措施后,后续多次热试车过程中发动机均工作正常。

4 结论

针对电磁阀阀座密封性不稳定现象梳理出两

种故障模式。通过电磁阀结构强度及动态过程仿真计算、分析,并结合试验验证结果,找出了阀座泄漏量增大的主要原因,提出了相应的改进措施,得到以下结论:

1) 发动机装配应力可使电磁阀阀座密封面发生不均匀变形,并造成电磁阀阀座泄漏量增大。建议优化发动机装配流程,先安装点火导管再装电磁阀,减小装配过程对电磁阀密封性的影响。

2) 增大弹簧安装负荷,使密封块碰撞阀座后避免反弹出现偏斜,提高密封稳定性。

参考文献:

- [1] 王建平,徐广辉,李旭东,等. 不同装配方法导致滚轮销变形的有限元分析[J]. 船舶工程, 2007, 29(2): 99 - 102.
 - [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] 袁洪滨,张民庆,孙彦堂. 基于 AMESim 的直动式电磁阀动态仿真研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(5): 30 - 35.
 - [4] 李庆. AMESim 系统建模和仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
 - [5] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
 - [6] 陈亮,梁国柱. 基于 AMESim 的电磁阀阀柱过程动态特性建模与仿真[J]. 导弹与航天运载技术, 2014, 332(3): 49 - 54.
 - [7] 张育林,刘昆. 液体火箭发动机动力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
 - [8] 阎耀保,李洪娟. 液压调速阀流场分析[J]. 流体传动与控制, 2013, 61(6): 1 - 4.
 - [9] 吴盟,熊庆辉,王浚哲,等. 电磁阀开启过程动态响应特性有限元仿真研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 117 - 120.
 - [10] 王跃飞,张振涛,张波,等. 利用声发射的往复空压机环状阀泄漏故障诊断试验[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(9): 26 - 30.
 - [11] 黄其殷,白旭东,李妙婷. 软金属密封结构密封性能数值仿真研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(3): 29 - 33.
- YUAN Hongbin, ZHANG Mingqing, SUN Yantang. AMESim - based simulation analysis of dynamic characteristics of direct - acting solenoid valve [J]. Journal of rocket propulsion, 2011, 37(5): 30 - 35.
- HUANG Qiyin, BAI Xudong, LI Miaoting. Numerical simulation of soft metal sealing performance [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(3): 29 - 33.

(编辑:陈红霞)