

# 电磁阀磁路结构对动作寿命的影响

许 闯, 尤 罡  
(上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘 要:** 针对某发动机电磁阀寿命故障问题, 分析了电磁阀衔铁卡滞的原因, 确定了由于衔铁在壳体部件腔体内上下受力不均匀, 产生了扭转力矩, 导致在运动过程中的局部剧烈摩擦是故障的根本原因, 基于此, 提出了电磁阀的改进方案, 验证结果表明改进磁路结构有效解决了寿命失效问题。

**关键词:** 电磁阀; 动作可靠性; 寿命试验

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2013) 05-0070-05

## Influence of magnetic structure of solenoid valve on its motion life

XU Chuang, YOU Gang  
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** A solution to eliminate the life failure of an engine solenoid valve is introduced in this paper. The reason that the armature in solenoid valve gets stuck is analyzed. The cause of the failure is that the armature in the bushing of the valve gets a non-uniform force, which results in the roll-torque and violently local friction in movement process. The improvement scheme and test results of solenoid valve are presented in this paper.

**Keywords:** solenoid valve; reliability of motion; life test

## 0 引言

某发动机采用双密封电磁阀作为控制阀, 其动作次数要求为 5 万次, 可靠性要求为 20 万次以上。该电磁阀在前期研制过程中, 两轮试验分别进行到 1.5 万次~3.5 万次和 6 万次~8 万次时, 电磁阀发生卡滞、不能正常动作的现象。通过对结构的理论分析、软件仿真和反复试验验证, 最

后通过改进电磁阀壳体部件的磁路结构, 解决了问题, 改进后电磁阀通过了 40 万次寿命试验考核。

## 1 工作原理

电磁阀为双密封螺线管式直动阀, 采用单线圈双密封副结构, 其结构见图 1 所示。

收稿日期: 2012-12-04; 修回日期: 2013-02-04

作者简介: 许闯 (1985—), 男, 助理工程师, 研究领域为阀门设计

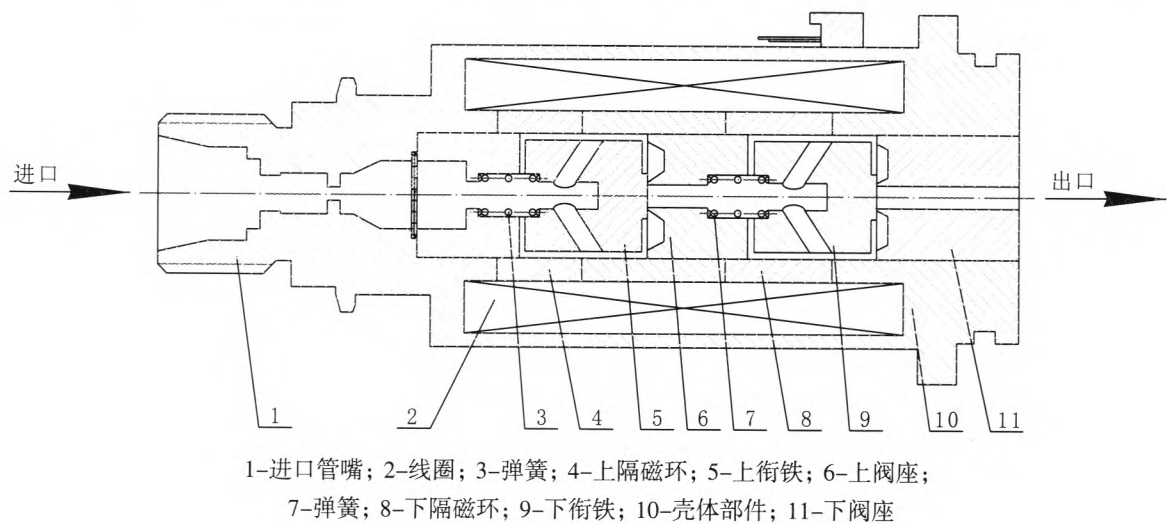


图 1 电磁阀结构简图

Fig. 1 Structure of solenoid valve

电磁阀主要由壳体部件、上下阀座、上下衔铁、上下隔磁环、线圈和弹簧等组成,电磁阀内腔有两套相对独立的阀芯阀座,构成两道串联排列的密封副,上、下阀芯均采用压缩弹簧作为复位机构。该电磁阀在线圈未通电时,靠介质压力及上、下弹簧预压力,将上、下阀芯(与衔铁连成一体)压紧在各自对应的阀座上,在电磁阀内腔流道上形成两道串联的密封副。当给线圈通以一定电压时,由软磁合金材料构成的壳体部件、

上下衔铁、基座和罩壳被磁化,围绕线圈构成磁回路,对衔铁产生轴向吸力,吸引上下衔铁同时向左运动,直至电磁吸力克服弹簧力和介质压力,阀门完全开启。只要线圈持续通电,阀门就一直保持开启状态,直到电信号切断,电磁吸力下降到不足以克服弹簧力和介质压力的合力时,阀芯复位,阀门关闭。电磁阀的上下阀芯在同一线圈作用下独立开启和关闭,互不干涉,工作状态见图 2。

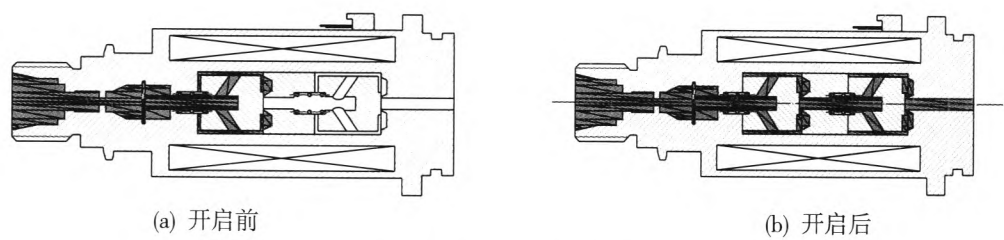


图 2 电磁阀工作原理图

Fig. 2 Operation principle of solenoid valve

2 故障分析

在试验过程中通 2 MPa 压力氮气,电磁阀开启时的驱动力为电磁吸力,阻力为弹簧力、气压力和摩擦阻力,关闭时的驱动力为弹簧力和衔铁间气体压差,阻力为摩擦阻力。电磁阀工作电压

29 V 的负载开启电流比为 0.72~0.75,动作过程均正常开启关闭,发生卡滞后将工作电压由 29 V 提高至 35 V 后,电磁阀在进行到 11 万次后卡死。在电磁阀动作过程中,对电磁阀温度进行检测,无明显上升,测试衔铁试验前后行程,无明显变化,因此,电磁阀的电磁吸力特性不会发生明显变化,不是影响寿命的关键因素。分解电磁

阀, 检查试验后弹簧性能无明显变化, 因此, 也不是影响寿命的关键因素。在寿命试验过程中, 电磁吸力、弹簧力和气压力均未发生明显变化, 只有摩擦力会随着接触表面的磨损而发生变化, 是导致故障的原因。

电磁阀衔铁与壳体部件存在  $0.06\sim 0.07\text{ mm}$  (单边  $0.03\sim 0.035\text{ mm}$ ) 的间隙, 且均为轴对称结构, 但在实际工作时, 衔铁动作时不可能做到完全对称, 会随机略偏向一边, 导致一边磁隙减小, 磁阻减小; 而另一边磁隙和磁阻增大, 造成两边侧向力不平衡, 使衔铁进一步靠向一边, 与壳体部件直接接触, 见图 3 所示。摩擦对衔铁和壳体部件表面造成磨损, 使接触面变得粗糙和局部变形, 导致摩擦力增大, 当摩擦力与气压力大于等于电磁吸力时, 衔铁不能正常动作, 电磁阀不能开启。

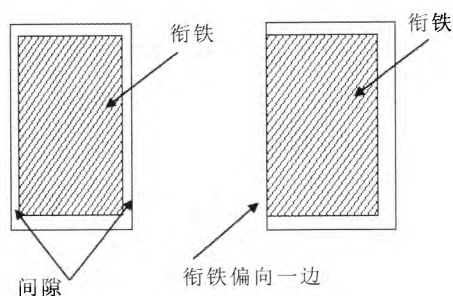
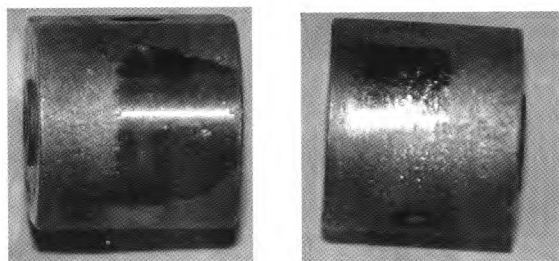


图 3 衔铁工作模式图

Fig. 3 Working mode of gag bit

分解后衔铁下端表面状态磨损严重, 见图 4, 表明寿命试验过程中摩擦力显著变化。因此, 摩擦导致的磨损程度是电磁阀动作寿命的决定因素。



(a) 上阀衔铁

(b) 下阀衔铁

图 4 电磁阀衔铁表面磨损情况

Fig. 4 Surface abrasion of gag bit in solenoid valve

决定摩擦状态的因素有: 阀芯与壳体部件表面的粗糙度和形位公差, 弹簧偏斜, 衔铁局部剧烈摩擦, 材料硬度和摩擦面积等。

通过一系列对比分析和试验验证, 排除了阀芯与壳体部件表面的粗糙度和形位公差, 弹簧偏斜, 材料硬度和摩擦面积等因素。

不能排除的主要是衔铁局部剧烈摩擦因素, 为分析电磁阀故障机理, 采用 Ansoft 软件对电磁阀磁路进行仿真, 仿真结果见图 5。由于下阀芯衔铁与壳体部件导磁面积较小, 在衔铁下部形成了局部磁饱和, 磁通主要通过衔铁下部很小的一部分。

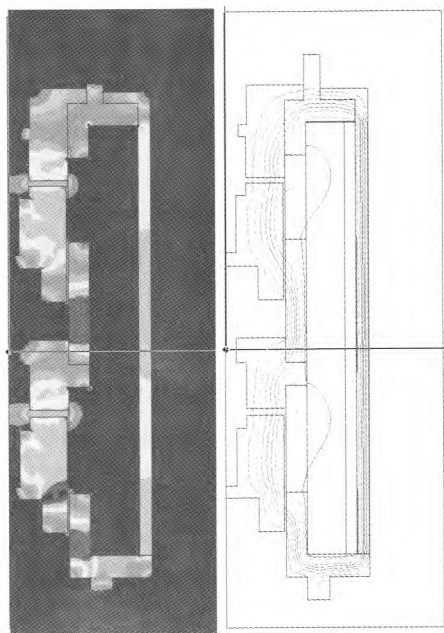


图 5 电磁阀磁路仿真图

Fig. 5 Simulation of magnetic field of solenoid valve

电磁阀磁通在通过衔铁进入壳体部件的部位主要集中在衔铁下部。由于两侧不完全对称, 衔铁一般偏向一边, 因此通电时会产生侧向吸力, 而衔铁中部和上端由于对应隔磁环位置, 不会产生这种趋势。因此, 磁通主要通过衔铁下部很小的一部分, 侧向吸力主要作用在下部, 在衔铁上下端之间形成了一个扭转的力矩, 见图 6, 造成衔铁摩擦集中在下端。下端与壳体部件接触压强远高于平均压强, 局部剧烈摩擦, 而局部摩擦损耗远远大于均匀作用的摩擦, 造成衔铁下端

磨损程度远远超过其它部位, 增加了衔铁整体运动阻力, 显著降低了电磁阀动作寿命。因此, 壳体结构不合理导致产生的扭转力矩, 使衔铁下端压强变大, 造成的局部摩擦是造成卡滞而寿命失效的根本原因。

3 设计改进和试验验证

通过分析确定了寿命失效的原因, 对电磁阀磁路进行微调, 调整壳体部件和隔磁环的面积, 增加与衔铁对应壳体部件导磁部分长度, 增加面积, 减小隔磁环长度和面积, 见图 7。

对更改后结构磁路进行仿真, 磁路对比见图 8, 衔铁通磁面积由更改前集中于下端改为基本均匀分布于各部分, 只有上端一小部分没有分布, 衔铁上端与弹簧位置接近, 通过弹簧对中微调。改进后结构的衔铁扭转力矩显著降低, 局部压强降低, 改善了局部摩擦。按此状态生产的电磁阀顺利进行了 40 万次可靠性试验, 结果满足要求。

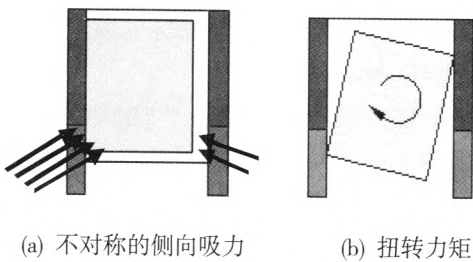


图 6 摩擦原理图

Fig. 6 Principle of friction

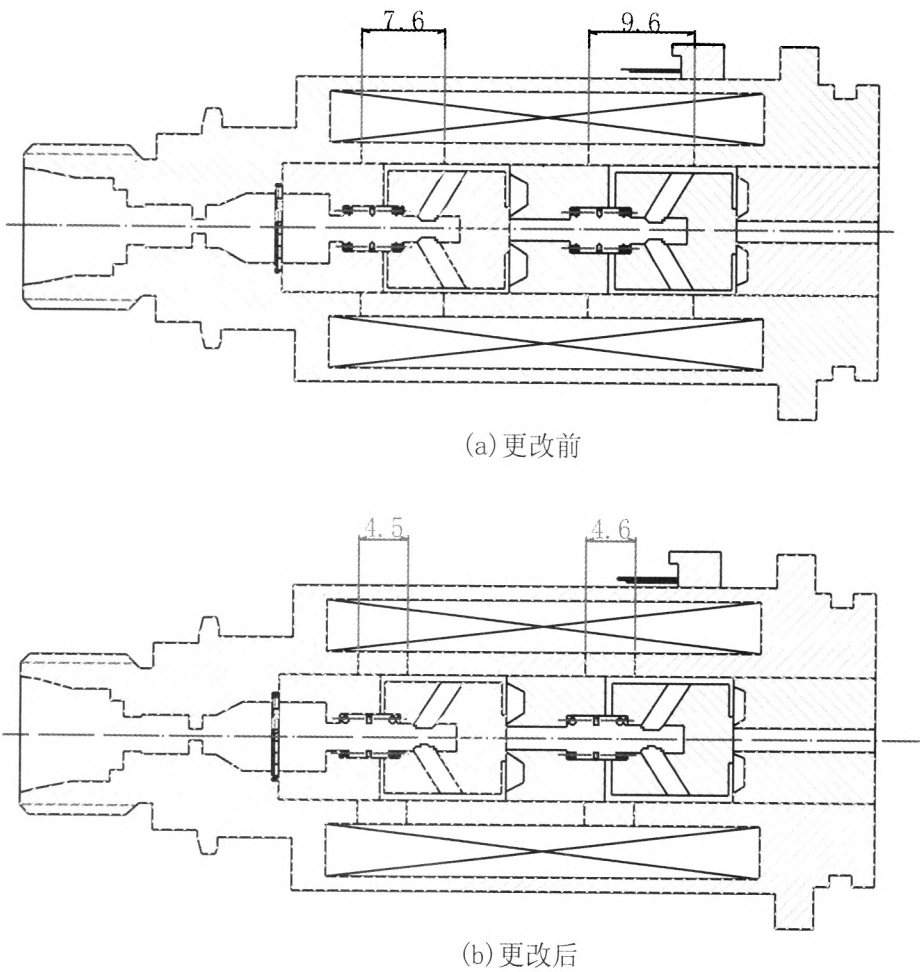


图 7 更改前后结构图

Fig. 7 Structures of solenoid valve before and after modification

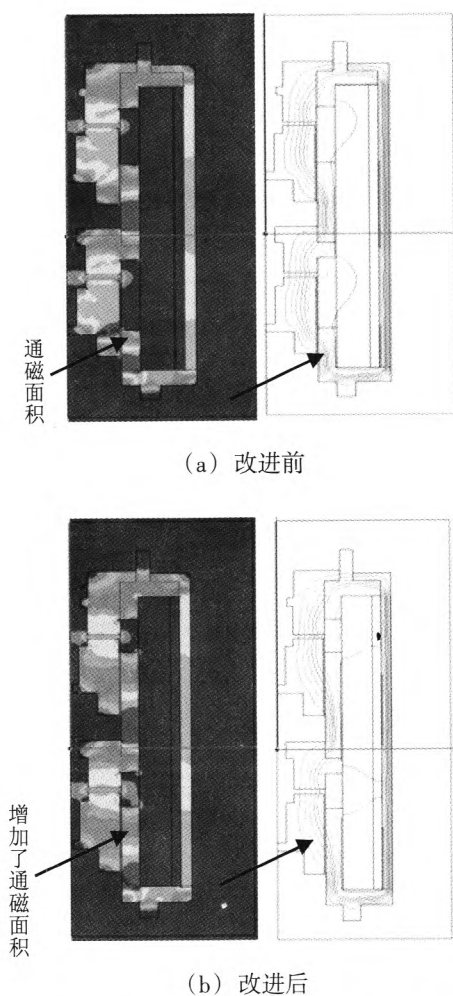


图8 电磁阀改进前后磁路仿真对比图

Fig. 8 Contrast of magnetic paths of solenoid valve before and after modification

## 4 结论

通过对结构的理论分析、软件仿真和试验验证,确定电磁阀卡滞的根本原因是壳体结构导致的扭转力矩,造成衔铁局部剧烈磨擦;在改进了电磁阀壳体部件的磁路结构后,解决了电磁阀衔铁卡滞而寿命失效的问题。

## 参考文献:

- [1] 廖湘恩. 航空电器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [2] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [3] 赵博. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [4] 刘国强. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [6] 张永振. 材料的干摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] KANNEL J W, DUFRANE K F. Rolling element bearings in space, NASA CP-2423[R]. US: NASA, 1986.
- [8] JONES W R Jr, JANSEN M J. Space tribology, NASA/TM-2000-209924 [R]. US: NASA, 2000.
- [9] 刘佐民. M50 高速钢高温摩擦磨损特性的研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 38-44.
- [10] 董祥林. 磁场对金属摩擦磨损影响的研究与展望[J]. 材料科学与工程, 2000, 18(1): 116-120.
- [11] 摩尔. 摩擦学原理及应用[M]. 黄文治等, 译. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [12] 宋宝玉, 古乐, 邢恩辉. 真空条件下 GCr15 钢摩擦磨损性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(2): 238-241.
- [13] 杨洪涛, 张炜, 张晶, 等. 基于 LabVIEW 的高精度电磁阀控制系统设计[J]. 工具技术, 2012, 46(1): 31-34.
- [14] 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.
- [15] 王丽丽, 王启增, 胡小安, 等. 基于 PIC18F6527 的电磁继电器控制系统 [J]. 电子设计工程, 2011 (12): 178-180.
- [16] 徐承韬, 何利源, 蔡胜年, 等. 电磁阀动作寿命试验系统设计[J]. 流体机械, 2012, 40(10): 58-61.
- [17] 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): 32-37.

(编辑: 陈红霞)