

【武器装备理论与技术】

# 氮气投放系统中超高压电磁阀的可靠性研究

张素萍

(郑州飞机装备有限责任公司 悬挂发射系统控制技术研究室, 郑州 450005)

**摘要:**以高压冷气为弹射能源的氮气作动系统具有清洁、使用维护方便、成本低、使用寿命长等优点。通过对氮气投放系统中超高压电磁阀的故障模式影响及危害性进行分析,找出了影响超高压电磁阀可靠性的因素,并分析其机理,从设计、工艺、装配、使用等方面采取措施,提高了电磁阀的可靠性。

**关键词:**氮气投放系统;超高压;电磁阀;可靠性

中图分类号:TJ760;V271.4

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)01-0024-04

## Research on Reliability of Superhigh Pressure-Solenoid Valve for Launch Equipment with Nitrogen Resource

ZHANG Su-ping

(Zhengzhou Airline Equipment Co. Ltd., Zhengzhou 450005, China)

**Abstract:** Launch system based on nitrogen resource is involved in the airborne ejection process due to its low cost, maintainability and long life cycle. The superhigh pressure-solenoid valve is a key part in the whole system and its reliability is critical. In this paper, the fault model and its influence and harmfulness of superhigh pressure-solenoid valve during the airborne ejection process with nitrogen resource is analyzed so that the influence factor of reliability of superhigh pressure-solenoid valve is obtained. The underlay law is also given. Based on the results, the improvable method for reliability is proposed according to the design, process planning, and assembly as well as work aspects. The reliability for superhigh pressure-solenoid valve can be improved due to those analysis results.

**Key words:** launch equipment with nitrogen resource; superhigh pressure; solenoid valve; reliability

以高压冷气为弹射能源的氮气作动系统具有清洁、使用维护方便、成本低、使用寿命长等优点,欧美等军事发达国家及国内不断致力于高压冷气作动技术的研究,并已在部分先进飞机悬挂发射装置中推广应用<sup>[1]</sup>。而燃气作动系统中的抛放弹因其在使用过程中存在烧蚀、积炭、残渣现象导致产品使用性能下降、综合保障水平较低,正逐步被取代。

近年来,随着对弹射装置要求越来越高,小型化超高压弹射作动系统扮演了越来越重要的位置,而对其核心部件—小型化超高压气体电磁阀的性能要求也就越来越高。通过对小型化超高压气体电磁阀的结构原理及性能研究,目前已解决超高压气体电磁阀在氮气投放技术中的应用问题<sup>[2]</sup>。超高压气体电磁阀已在国产某型飞机上配套的悬挂装置上得以应用。随着氮气投放技术的推广,以超高压电磁阀为核心的氮气投放装置将代替使用燃气作投放能源的悬挂装置。

超高压电磁阀是氮气作动系统的核心部件,其可靠性关系到机载悬挂装置的可靠性<sup>[3]</sup>。本文通过对超高压电磁阀的可靠性分析,找出电磁阀的薄弱环节,采取改进措施,提高电磁阀的可靠性,对氮气投放系统的发展、应用具有重要意义。

### 1 超高压电磁阀的故障模式分析 FMEA (CA)

电磁阀的 FMEA(CA)故障模式及危害性分析是产品可靠性设计、分析工作的一部分<sup>[3-4]</sup>。旨在通过对电磁阀的故障模式及危害性分析,找出各部件、组件和零件的所有潜在故障模式对产品可能产生的影响;找出设计上的薄弱环节,尤其是影响安全的单点故障和影响任务完成的故障,从而为产品改进设计或采取补救措施提供资料,以便把失效降低到

收稿日期:2012-10-20

作者简介:张素萍(1966—),女,高级工程师,主要从事悬挂系统发生控制研究。

最低限度,提高产品的可靠性<sup>[5]</sup>。

1) 分析级别、范围 FMEA(CA)分析级别为组件级,即电磁阀组件。该电磁阀的分析范围包括电磁阀产品图样中所有影响功能的零部件。

## 2) 分析方法

采用硬件法对电磁阀进行 FMEA(CA)分析。

## 3) 产品故障严酷度分类

按照产品故障对系统性能影响的程度,严酷度分类见表1。

表1 产品故障对系统性能影响的严酷度分类

| 类别  | 严酷度 | 具体特征                         |
|-----|-----|------------------------------|
| I   | 灾难性 | 会引起人员死亡或飞机毁坏                 |
| II  | 致命的 | 会引起人员的严重伤害、重大经济损失或导致任务失败     |
| III | 临界的 | 会引起人员的轻度伤害、一定的经济损失或导致任务延误或降级 |
| IV  | 轻度的 | 导致计划外的维护和修理                  |

## 4) 产品定义

### a) 功能定义

超高压电磁阀,即工作压力大于 21MPa 的电磁阀,本研究中的超高压电磁阀为瓶阀一体的常闭型开关电磁阀,额定工作压力为 35MPa,在环境温度为 +70℃ 时,电磁阀的工作压力达到 43MPa。超高压电磁阀在氮气作动系统中的功能为将电信号转换为机械能,控制气路的开与关,从而为挂弹钩的弹射投放提供动力。

### b) 任务剖面

该电磁阀主要任务是当电磁阀通电时打开气路,断电时关闭气路。

### c) 环境剖面

环境温度(-55~+70)℃。

### d) 失效判据

① 电磁阀通电时气路打不开;② 电磁阀断电时气路关不上;③ 电磁阀漏气。

## 5) 电磁阀的故障模式及危害性分析

电磁阀的典型功能模式对应的功能框图及可靠性框图见图1、图2。表2为电磁阀的故障模式及危害性分析表。

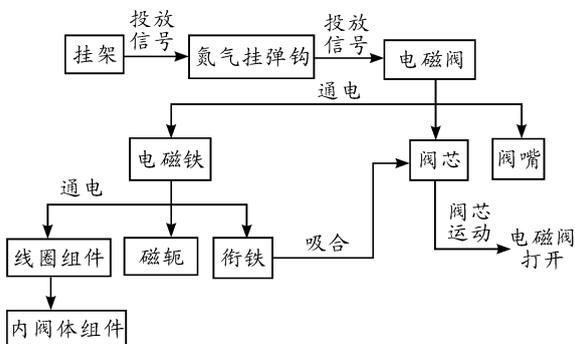


图1 电磁阀功能方框图

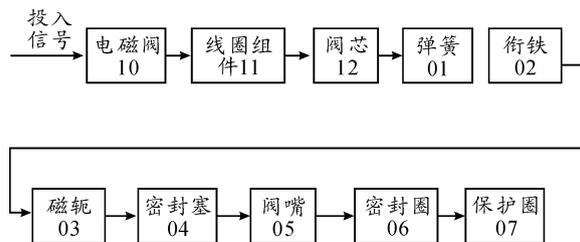


图2 电磁阀可靠性框图

将表2内容填入危害性矩阵见图3。

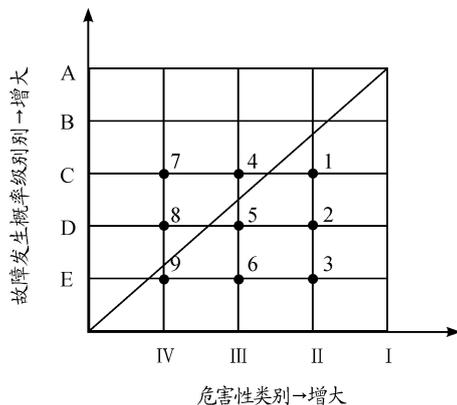


图3 危害性矩阵

说明:点1包括10-01;点2包括10-03、12-03;点3包括11-04、11-05、11-06、11-08、01-07、02-06、03-06、04-08、06-09、05-08;点6包括10-02、07-09

从图3可以看出,对产品危害性最大的失效模式为10-01即电磁阀打不开。其次是10-03电磁阀漏气、12-03阀芯漏气。

## 2 电磁阀可靠性影响因素分析

产品在方案阶段主要从设计上采取了优化结构、参数化设计、降额设计等措施来保证可靠性。进入研制阶段以后,还要从工艺、零件加工、产品装配以及产品制造过程的质量控制等方面采取措施<sup>[7]</sup>。

### 2.1 工作气隙的影响

工作气隙是电磁阀的重要参数之一。工作气隙的大小影响着电磁吸力的大小,从而影响电磁阀的动作可靠性。其次,工作气隙的大小决定着电磁阀的流量,从而决定挂弹钩的弹射分离速度。在装配过程中,应严格控制电磁阀的工作气隙。

### 2.2 磁性零件磁性能的影响

磁性零件的磁性能包括磁感应强度  $B$ 、最大磁导率  $\mu_m$  及矫顽力  $H_c$ ,其中,磁感应强度及磁导率决定着电磁铁的吸力特性,从而决定着电磁阀能否可靠作动。矫顽力与磁性零件的剩磁有关,矫顽力越大,剩磁也越大,若剩磁大于一定量值,电磁阀断电时衔铁有可能不复位<sup>[7-8]</sup>。

### 2.3 装配环境的影响

由故障模式影响及危害性分析可知,对产品危害性最大的故障模式为电磁阀打不开,电磁阀打不开的故障原因是阀芯卡滞,若装配环境不洁,多余物会造成阀芯卡滞或进气孔堵塞。且固体颗粒会附在阀体及阀芯表面,使密封圈等磨损,产生新的固体颗粒。降低了产品的性能及寿命。这就对电磁阀的装配提出了严格的清洁要求。当产品批量生产时,更是如此。没有洁净的装配环境,超高压电磁阀不可能批量生产。目前,专业的高压电磁阀生产厂家均使用了洁净室。

### 2.4 气源的影响

气源对产品的危害主要是固体微粒和水分的污染,固体颗粒的危害在上面已介绍过,为有效地消除固体颗粒,氮气作动系统内,电磁阀前端必须安装过滤器。过滤器的精度一

般应不大于  $14\ \mu\text{m}$ 。

水分进入系统主要有2方面的危害:①水分滞留在产品中会使产品生锈;②水分结冰造成阀芯卡滞。因此,气源的露点也是影响超高压电磁阀可靠性的因素之一。35 MPa 高压氮气的压力露点应不高于  $-35^\circ\text{C}$ 。

气源质量不良是气动系统故障的重要影响因素,它使气动系统的可靠性和使用寿命大大降低。

### 2.5 弹簧力的影响

由故障模式影响分析可知,弹簧的作用是使阀芯复位,当弹簧力偏小时,弹簧力可能克服不了阀芯与内阀体的摩擦,而使阀芯不能复位,导致电磁阀充不上气或漏气。在保证电磁吸力足够的情况下,应适当增大弹簧力。

表2 电磁阀 FMEA 故障模式及影响分析

初始约定层次:挂弹钩

任务:悬挂、运载、投放

约定层次:电磁阀

| 代码 | 产品或功能标志    | 功能                                 | 故障模式       | 故障原因        | 任务阶段    | 故障影响    |          |               | 严酷度类别 | 故障率概率 |
|----|------------|------------------------------------|------------|-------------|---------|---------|----------|---------------|-------|-------|
|    |            |                                    |            |             | 工作模式    | 自身影响    | 对上级影响    | 最终影响          |       |       |
| 10 | 电磁阀        | 将电能转换为机械运动,控制气路的开与关,为挂弹钩的弹射投放提供动力。 | 01 打不开     | 阀芯卡滞        | 投放,运载   | 丧失功能    | 失效       | 悬挂物投不下来       | II    | C     |
|    |            |                                    | 02 关不严     | 密封结构失效或阀芯卡滞 | 投放后     | 功能降低    | 挂钩弹射杆回收慢 | 影响不大          | III   | E     |
|    |            |                                    | 03 漏气      | 密封结构失效或有多余物 | 投放,运载   | 可能丧失功能  | 失效       | 悬挂物投不下或分离速度不够 | II    | D     |
|    |            |                                    | 04 短路或绝缘不好 | 绝缘材料老化      | 投放,运载   | 丧失功能    | 失效       | 悬挂物可能投不下来     | II    | E     |
| 11 | 线圈组件(含内阀体) | 将电能转换成磁能构成磁路、承压、限位                 | 05 断路      | 漆包线断路       | 投放,运载   | 丧失功能    | 失效       | 不投放           | II    | E     |
|    |            |                                    | 06 磁性能降低   | 磁性材料老化      | 投放,运载   | 功能降低    | 可能开不了钩   | 可能不投放         | II    | E     |
|    |            |                                    | 08 断裂或变形   | 焊接强度不够      | 投放,运载   | 丧失功能    | 失效       | 不投放           | II    | E     |
| 12 | 阀芯         | 密封                                 | 03 漏气      | 密封材料变形或老化   | 起飞前,运载中 | 功能降低    | 功能降低     | 悬挂物投不下或分离速度不够 | II    | D     |
| 01 | 弹簧         | 复位                                 | 07 疲劳      | 强度不够        | 投放,运载   | 漏气或充不上气 | 失效       | 悬挂物投不下或分离速度不够 | II    | E     |
| 02 | 衔铁         | 构成磁路、吸合                            | 06 磁性能降低   | 材料老化        | 投放      | 丧失功能    | 失效       | 悬挂物投不下或分离速度不够 | II    | E     |
| 03 | 磁轭         | 构成磁路                               | 06 磁性能降低   | 材料老化        | 投放      | 可能丧失功能  | 失效       | 悬挂物可能投不下      | II    | E     |
| 04 | 密封塞        | 密封                                 | 08 断裂或变形   | 强度不够        | 投放,运载   | 漏气      | 功能降低     | 悬挂物投不下或分离速度不够 | II    | E     |
| 05 | 阀嘴         | 密封                                 | 08 变形      | 强度不够        | 投放,运载   | 漏气      | 功能降低     | 悬挂物投不下或分离速度不够 | II    | E     |
| 06 | 密封圈        | 密封                                 | 09 老化或磨损   | 材料性能不好      | 投放,运载   | 漏气      | 功能降低     | 悬挂物投不下或分离速度不够 | II    | E     |
| 07 | 保护圈        | 保护密封圈                              | 09 老化或磨损   | 材料性能不好      | 投放,运载   | 漏气      | 功能降低     | 可能不投放         | III   | E     |

其中,故障发生概率等级划分如下:A.经常发生;B.很可能发生;C.偶然发生;D.很少发生;E.极少发生。

## 2.6 润滑脂的影响

阀芯与内阀体间的密封结构为内部滑动密封,摩擦力的影响大小直接影响阀芯运动的灵活性,因而是否采用润滑以及润滑效果的好坏是影响电磁阀可靠性的重要因素。电磁阀使用的润滑脂不仅要耐高温、而且要耐低温,还不能腐蚀密封件。另外,因本文所研究的超高压电磁阀结构的特殊性,电磁阀是免维护、不可维修产品,润滑脂不能定期补充,还要与产品同寿命。选用性能优良的润滑脂不仅可以减小摩擦,使阀芯运动灵活,而且可以减少密封件的磨损,以防泄露。良好的润滑对延长电磁阀的使用寿命、提高可靠性是非常有好处的。目前,超高压电磁阀使用的7805抗化学密封脂是经多方面调研找到的,能够满足以上要求的润滑脂。

## 3 超高压电磁阀外部电路对氮气投放系统的影响

以上论述了超高压电磁阀本身的可靠性影响因素,超高压电磁阀在氮气投放系统中应用时,其外部供电线路的可靠性,直接影响着氮气投放系统的可靠性<sup>[9-10]</sup>。由于受挂弹钩体积、空间的限制,氮气投放系统只使用了一个电磁阀,且电磁阀只有一组线圈,也就是说,从可靠性角度分析,无论是电磁阀本身还是氮气投放系统,都没有并联系统,无冗余设计,这就要求氮气投放线路中的每一个环节的可靠性必须提高,如接插件的对接质量、投放线路中焊点的焊接质量,特别是与电磁阀引出线对接的挂弹钩击针处的接触电阻的大小等,这些环节对氮气作动系统的可靠性功能来说,都与电磁阀串联,即使电磁阀的可靠性很高,如果这些小的环节出了故障,整个氮气投放系统就会出故障,从而导致任务延误或失败,切不可因小失大。

## 4 电磁阀外部气路系统的影响

前面2.3条及2.4条介绍了装配环境不洁净及气源质量不好对电磁阀的影响,其机理主要是固体颗粒使电磁阀产生了故障。同理,如果电磁阀进气部分的管路及气瓶内部不洁净或锈蚀,同样会产生多余物,所以,电磁阀外部的进气管路及气瓶要有较好的抗腐蚀性,且在装配前要进行清洁处理,避免产生多余物。

## 5 结束语

本研究以瓶阀一体化超高压电磁阀为例,对超高压电磁

阀的故障模式进行了分析。确定了影响超高压电磁阀可靠性的主要因素,提出了改进方法,并采取了改进措施。超高压电磁阀是精密的压力元件,从产品的设计、零件加工到产品装配以及使用,每一个环节、每一个细节做不到位,都会使电磁阀的可靠性降低或造成产品故障。相反,如果这些细节做好了,产品的可靠性就会大大提高。我单位以前的产品中,超高压电磁阀用得不多,人们习惯于加工结构尺寸较大的挂弹钩、挂架。随着氮气投放技术的发展,超高压电磁阀的应用会越来越多,本文通过分析电磁阀的可靠性影响因素,呼吁大家在超高压电磁阀的设计、制造及使用中增强质量意识,注重细节,提高产品的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 张涛,王涛,廖振强. 基于氮气驱动的悬挂发射装置数理建模分析[J]. 现代防御技术,2012(4):159-162.
- [2] 戴龙成,宣益民,尹健. 氮气弹射系统动特性实时动态仿真[J]. 弹导学报,2000,12(4):18-24.
- [3] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2000.
- [4] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [5] 马建伟. 发射器关键零件疲劳可靠性分析[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [6] 李建国. 某潜器沉浮系统电磁阀故障分析[J]. 舰船科学技术,2012,34(10):106-108.
- [7] 路海晋. 微型高可靠性超高压电磁阀技术解析[J]. 阀门,2012(2):16-18.
- [8] 姜路亮,王海洲. 电磁阀设计中电磁力的工程计算方法[J]. 导弹与航天运载技术,2007(1):40-45.
- [9] Tao G Chen, HY He ZB. Optimal design of the magnetic field of a high-speed response solenoid valve[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1-3):555-558.
- [10] 刘成立. 复杂结构可靠性分析及设计研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.

(责任编辑 杨继森)