

一种新型 Bang-Bang 电磁阀的研制

王立君^{1,2}, 柳珊^{1,2}, 唐妹芳^{1,2}

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘要:针对系统提出的轻质长寿命、氙气工作介质的要求, 特别设计了一种新型 Bang-Bang 电磁阀。该电磁阀采用“弹簧+单簧片”的设计方案, 通过对 5.70~6.72 MPa 密封比压、0.12~0.14 mm 配合间隙、0.20 mm 行程等参数的合理选取, 阀门顺利地通过了振动试验、最大量级 1 600 g 的冲击试验、20 g 加速度试验、(10~75)℃ 热真空试验和 (-10~+75)℃ 热循环等环境试验的考核以及 100 万次的寿命试验验证, 试验前后阀门漏率及响应时间等参数稳定, 满足了系统要求。

关键词: Bang-Bang 电磁阀; 漏率; 长寿命

中图分类号: V432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2019)01-0048-05

Development of a new Bang-Bang solenoid valve

WANG Lijun^{1,2}, LIU Shan^{1,2}, TANG Meifang^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: According to the long-life, light-weight and xenon working medium requirements proposed by the system, a new type of Bang-Bang solenoid valve was specially designed. By adopting the design scheme of “Spring and S-spring” and selecting the proper parameters of sealing pressure (5.70~6.72 MPa), matching gap (0.12~0.14 mm), spool stroke (0.20 mm) and others, the Bang-Bang solenoid valve has successfully passed the assessment of environmental tests such as vibration, shock (the maximum magnitude 1 600 g), acceleration (20 g), thermal vacuum (10~75℃) and thermal cycle (-10~+75℃) as well as a million times of life test verification. The parameters such as leak rate and response time of the valve were stable before and after the experiment, which greatly met the system requirements.

Keywords: Bang-Bang solenoid valve; leak rate; long-life

0 引言

随着卫星寿命以及推力精度等要求的提高, 与传统的冷气推进、化学推进相比, 电推进的优势越来越明显。由于电推进比冲高, 完成相同卫星平台

推进系统工作需要的推进剂重量比化学推进系统大大减少, 有利于满足新一代大型卫星有效载荷尺寸大、质量大、寿命长、速度增量需求大的要求。

Bang-Bang 调压方式与传统的减压阀调压方式相比具有调压精度高、输出压力稳定、输出压力可

收稿日期: 2017-12-25; 修回日期: 2018-03-30

基金项目: 国家航天支撑技术项目 (617010409)

作者简介: 王立君 (1987—), 女, 工程师, 研究领域为阀门设计

调等优点,广泛应用于电推进系统的压力调节单元。Bang-Bang 压力调节单元主要由 Bang-Bang 电磁阀、缓冲气瓶及低压传感器等组成,主要工作方式:工作时通过低压传感器监测缓冲气瓶的压力;当压力低于给定的压力下限时开启 Bang-Bang 电磁阀,当压力超过给定的压力上限时关闭 Bang-Bang 电磁阀,从而保持缓冲气瓶的压力稳定在要求的范围内^[1-3]。

由于电推进系统的使用寿命长(要求阀门寿命 100 万次以上),工作介质主要为氙气且流量小,因此系统对 Bang-Bang 电磁阀的要求比一般电磁阀高。传统电磁阀由于通径小,密封面尺寸小,导致零组件加工困难,密封面加工不均匀、密封副的相对转动极易造成压痕错位,加上气体介质不容易带走多余物,磨损产生的大量多余物堆积在密封面,造成产品漏率不稳定,易超差,一般寿命次数小于 10 万次,很难满足 Bang-Bang 电磁阀长寿命和气体工作介质的要求。

本文主要介绍了一种新型 Bang-Bang 电磁阀的研制情况,该电磁阀采用“弹簧+单簧片”结构,该结构的阀门顺利通过了 100 万次、介质为氙气的寿命试验,满足 Bang-Bang 压力调节单元对电磁阀的要求。

1 方案选择

1.1 性能要求

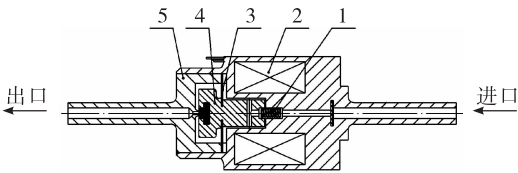
Bang-Bang 电磁阀为常闭电磁阀,通电打开,断电关闭,其主要性能参数如表 1 所示。

表 1 Bang-Bang 电磁阀的主要性能参数表
Tab. 1 Main performance parameters
of Bang-Bang solenoid valve

项目	性能参数
工作介质	氙气
工作电压/V	15±2
工作压力/MPa	0~0.8
响应时间/ms	≤15
工作次数/万次	≥100
阀门通径/mm	≥0.2
内漏率/(Pa·m ³ ·s ⁻¹)	≤5×10 ⁻⁶
外漏率/(Pa·m ³ ·s ⁻¹)	≤1×10 ⁻⁷
单件质量/kg	≤0.10

1.2 结构特点

为了满足阀门轻质、长寿命的要求,设计了“弹簧+单簧片”结构的 Bang-Bang 电磁阀,设计方案如图 1 所示。主要特点:采用“弹簧+单簧片”结构。弹簧加工性能稳定,用来提供一定的密封比压,同时增加结构的稳定性;簧片用于固定阀芯组件,阻止阀芯组件在壳体内腔的转动,同时减少磨损产生的多余物。



1-弹簧;2-线圈;3-簧片;4-阀芯组件;5-阀座

图 1 电磁阀的工作原理图

Fig. 1 Working principle of Bang-Bang solenoid valve

在电磁阀未通电时,靠工作介质的压力、弹簧力和簧片力将阀芯组件压紧在阀座上,在电磁阀内腔流道上形成密封副,工作介质被截断。当给线圈通以开启电压时,由软磁合金材料构成的磁回路被磁化,对阀芯组件产生轴向吸力,吸引阀芯部件向右运动,直至电磁吸力克服弹簧力、簧片力和工作介质压力,使电磁阀完全开启,实现工作介质的供给^[4-6]。

1.3 关键技术

Bang-Bang 电磁阀关键技术主要有两个:

1)低刚度长寿命簧片设计。与普通电磁阀相比,Bang-Bang 电磁阀引入了簧片用来夹持衔铁,要求簧片刚度小、寿命大于 100 万次。已成熟应用的簧片由于刚度大,不适用于本电磁阀,因此需要重新设计簧片^[7]。目前,簧片的设计没有可依据的公式,需要根据经验初步设计簧片的形状和参数,并通过 ANSYS 软件计算得到的应力和刚度结果进行调整,确定簧片的形状以及参数,并通过后续的试验进行考核,以最终确定簧片的技术状态。

2)低磨损结构设计,满足 100 万次寿命要求。普通阀门由于密封副的相对转动和磨损严重不能满足寿命要求,双簧片电磁阀完全无摩擦,但尺寸及重量方面不能满足系统要求,因此新型 Bang-Bang 电磁阀采用“弹簧+单簧片”的方案,但如何选

取合适的配合间隙、行程等参数,以最大限度地减小摩擦仍是一个很大的难点。

2 关键参数的确定

2.1 簧片

需要根据阀门的包络尺寸、阀门吸力及响应时间等设计簧片形状以及性能参数。簧片厚度 0.2 mm,簧片外形以及通过 ANSYS 软件计算得到的应力分布情况如图 2 所示^[8],应力和刚度计算结果如表 2 所示。

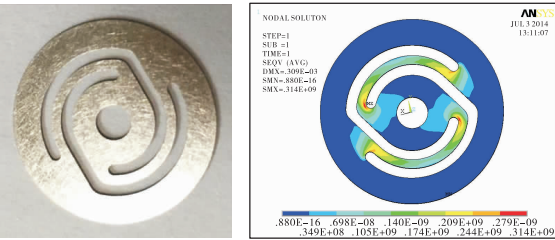


图 2 簧片结构以及应力分布图
Fig. 2 S-spring structure and its stress distribution

表 2 簧片参数计算结果
Tab. 2 Main calculation results of S-spring

位移/mm	簧片力/N	应力/MPa	平均刚度 /(N·m ⁻¹)
0.1	0.16	100	1.62
0.3	0.49	314	1.62

2.2 密封结构

阀门密封副设计为软密封,非金属采用 F46,为防止百万次工作后阀门行程过大,设计上选用了较低的密封比压以及阀座圆弧刃口。考虑到零件的加工性能,阀门通径为 0.5 mm,弹簧力为 1.17 N,密封比压为 5.70~6.72 MPa,满足 F46 的需用密封比压,也可满足阀门的密封要求。在刃口设计上,根据以往经验,相比平面刃口,圆弧刃口具有更好的密封效果以及长寿命的行程稳定性,因此,电磁阀刃口采用圆弧刃口。

2.3 响应时间

由于 Bang-Bang 电磁阀的主要作用是保持缓冲气瓶的压力稳定,因此对启动时间和关闭时间的要求比较低。根据工作电压的要求以及选取的弹簧

力和簧片力,通过软件仿真进行修正^[9-10],确定阀门的电磁场。计算得到阀门开启时间为 5.8 ms,关闭时间为 8.4 ms^[11],满足使用要求,且有一定的工作裕度。阀门响应特性仿真曲线如图 3 所示。

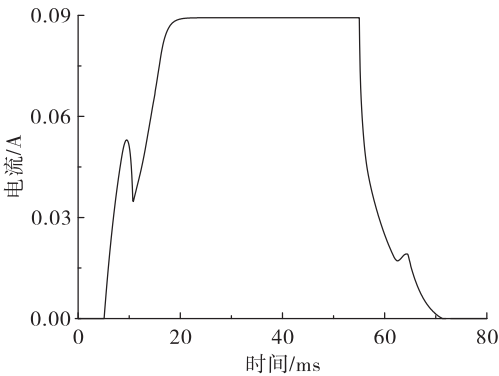


图 3 阀门响应特性仿真曲线
Fig. 3 Response characteristic curve of valve

2.4 配合间隙

阀门的配合间隙是影响磨损的关键性因素,Bang-Bang 电磁阀只有一片簧片,主要起夹持作用,防止因阀芯组件的转动造成压痕错位导致产品漏率超差,不能阻止阀芯组件与内孔的摩擦,因此依然是有摩擦的阀门。阀门通电后,由于簧片刚度较小,不能克服圆周方向上分布不均匀的电磁吸力,因此,阀芯组件会向侧向吸力较大的方向偏移。如果产品行程大,配合间隙小,阀芯组件先与内孔侧面吸合,再被轴向电磁吸力拖拽至阀芯组件与内孔底部接触。配合间隙大、行程小时,阀芯组件直接与内孔底部吸合,吸合时速度更快、接触面积更小,磨损更严重。因此,Bang-Bang 电磁阀选用较小配合间隙,约 0.12~0.14 mm。后期的试验也证明,此配合间隙产生的磨损多余物最少。

3 试验验证

3.1 簧片力

对簧片进行了簧片力测试,分别测试位移为 0.2 mm、0.4 mm 和 0.6 mm 下的簧片力,得到簧片刚度数据,如表 3 所示。簧片刚度实测值 1.45~1.62 N/mm,与仿真计算结果相符合。

3.2 常规性能试验

对 Bang-Bang 电磁阀的常规性能数据进行测

试,主要包括响应时间、动作裕度、漏率及单件质量等,实测性能数据如表 4 所示,满足使用要求。

表 3 簧片性能参数
Tab. 3 Performance data of S-spring

簧片组 件编号	位移 /mm	力/N	刚度/(N·mm ⁻¹)
1#	0.2	0.30	1.50
	0.4	0.60	1.50
	0.6	0.93	1.55
2#	0.2	0.30	1.50
	0.4	0.62	1.55
	0.6	0.97	1.62
3#	0.2	0.29	1.45
	0.4	0.61	1.53
	0.6	0.97	1.62

表 4 Bang-Bang 电磁阀的实测性能
Tab. 4 Measured performance results of
Bang-Bang solenoid valve

项目	要求值	簧片编号			
		1#实测值	2#实测值	3#实测值	
响应时间	开启时间≤15	4.3	5.8	4.3	
/ms	关闭时间≤15	6.8	7.1	7.2	
动作裕度/V	开启	8.9	8.8	8.1	
	关闭	4.4	4.8	4.9	
内漏率/ (Pa ³ ·m ³ ·s ⁻¹)		≤5×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁷	9.0×10 ⁻⁸	1.0×10 ⁻⁷
外漏率/ (Pa ³ ·m ³ ·s ⁻¹)		≤1×10 ⁻⁷	7.8×10 ⁻⁸	8.4×10 ⁻⁸	8.5×10 ⁻⁸
单件质量/kg	≤0.10	0.060 8	0.061 2	0.060 9	

表 6 寿命试验漏率数据
Tab. 6 Leak rate of life test

寿命 /万次	1#漏率		2#漏率		3#漏率	
	0.2 MPa 内漏	0.5 MPa 内漏	0.2 MPa 内漏	0.5 MPa 内漏	0.2 MPa 内漏	0.5 MPa 内漏
10	9.0×10 ⁻⁸	1.2×10 ⁻⁷	9.2×10 ⁻⁸	2.0×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷	2.1×10 ⁻⁷
50	8.4×10 ⁻⁸	2.0×10 ⁻⁷	9.2×10 ⁻⁸	1.9×10 ⁻⁷	9.7×10 ⁻⁸	1.7×10 ⁻⁷
100	9.2×10 ⁻⁸	1.5×10 ⁻⁷	9.4×10 ⁻⁸	3.1×10 ⁻⁷	5.1×10 ⁻⁷	8.7×10 ⁻⁷

3.3 环境试验

Bang-Bang 电磁阀顺利通过了振动、冲击、加速度、热真空和热循环等环境试验考核。其中,正弦振动试验量级:9.375 mm(7~20 Hz),15 g(20~100 Hz),随机振动量级:0.2(20~1 000 Hz),-6 dB/oct(1 000~2 000 Hz),最大冲击量级 1 600 g,加速度 20 g,热循环-10~+75 ℃(10.5 次),热真空 10~75 ℃(6.5 次),试验前后阀门性能参数稳定,漏率合格,如表 5 所示。

表 5 环境试验后性能参数
Tab. 5 Performance data after environmental test

项目	要求值	簧片编号		
		1#实测值	2#实测值	3#实测值
响应时间	开启时间≤15	5.8	5.3	5.7
/ms	关闭时间≤15	7.2	7.1	8.6
内漏率	≤5×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁷	1.7×10 ⁻⁷	2.0×10 ⁻⁷
(Pa ³ ·m ³ ·s ⁻¹)				
外漏率	≤1×10 ⁻⁷	7.8×10 ⁻⁸	8.4×10 ⁻⁸	8.5×10 ⁻⁸
(Pa ³ ·m ³ ·s ⁻¹)				

3.4 寿命试验

阀门负载 0.5 MPa 氮气、15 V DC,以每秒工作次数不超过 4 次连续工作 100 万次,试验过程中复测产品在 0.2 MPa 和 0.5 MPa 下的内漏率。试验后复测产品响应时间。3 台 Bang-Bang 电磁阀均通过了 100 万次寿命试验考核。试验数据如表 6 和表 7 所示。试验前后 3 台产品的漏率稳定,均在 1E-7 量级,证明了配合间隙及簧片参数选取合理,寿命试验前后的响应时间基本无变化,证明了密封结构以及响应时间选取合理。

表 7 寿命试验前后响应时间数据
Tab. 7 Response time before and after life test

状态	项目	簧片编号		
		1#实测值	2#实测值	3#实测值
试验前	开启时间	5.8	5.3	5.7
	关闭时间	7.2	7.1	8.6
试验后	开启时间	5.4	5.4	5.6
	关闭时间	7.8	7.5	8.2

对试验后的产品进行分解,检查零组件的磨损及多余物等情况,分解结果如图 4 所示。图 9 中分别为 F46 密封面、阀芯组件外圆以及线圈内腔的照片。从分解结果来看,100 万次寿命试验后,阀门磨损产生的多余物较少,仅阀芯压痕中有一点状多余物,证明单簧片结构、0.12~0.14 mm 的配合间隙的 Bang-Bang 电磁阀产品可满足 100 万次气体介质的工作要求。



图 4 试验后阀门分解情况
Fig. 4 Disassembled valve after life test

4 结束语

通过“弹簧 + 单簧片”的结构设计和合理的参数选取,新型 Bang-Bang 电磁阀顺利通过了力学及热学环境试验的考核以及 100 万次的寿命试验验证,阀门各项性能参数均满足 Bang-Bang 压力调节单元对电磁阀的要求。

参考文献:

[1] SALIM A A. In-orbit performance of Lockheed Martin’s electrical power subsystem for A2100 communication satellites; AIAA 2000 – 2809[R]. Reston; AIAA,2000.

[2] 王辉,彭维峰,魏鑫,等. XX – 3B 卫星平台电推进分系统及地面验证[C]//第十一届中国电推进技术学术研讨会文集. 北京: 中国宇航学会,2015.

[3] 康小录,杭观容. 霍尔电推进技术的发展与应用[J]. 火箭推进,2017,43(1):8-17.

KANG X L, HANG G R. Development and application of Hall electric propulsion technology[J]. Journal of Rocket Propulsion,2017,43(1):8-17.

[4] 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社,1993.

[5] 赵元修,吴守生. 液体推进剂火箭发动机设计[M]. 北京: 宇航出版社,1973.

[6] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京: 宇航出版社,2005.

[7] 黄爱清,曹明,唐妹芳,等. 一种无摩擦簧片式电磁阀的研制[J]. 火箭推进,2015,41(6):41-45.

HUANGA Q, CAO M, TANG M F, et al. Development of non-friction S-spring valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015,41(6):41-45.

[8] 许闯,王强. 悬空衔铁式电磁阀中 S 形簧片的研制[J]. 火箭推进,2017(5):58-62.

XU C, WANG Q. Development of S-shape spring insuspended armature solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion,2017(5):58-62.

[9] 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.

[10] 王扬彬,徐兵. 基于 Ansoft 及 AMESim 的电磁铁动态特性仿真分析[J]. 机床与液压,2008,36(9):104-108.

[11] 廖湘恩. 航天电器[M]. 北京: 国防工业出版社,1981.

(编辑:马 杰)