

比例电磁阀的特性分析与试验研究

王晓罡, 陈文曲, 唐妹芳, 魏 青
(上海空间推进研究所, 上海 200233)

摘 要: 变推力液体火箭发动机可以为航天器的推进与控制提供可控动力, 是航天器动力系统的理想选择。其中流量调节技术是变推力发动机的核心技术之一, 是变推力发动机研究的热点和难点。本文在对变推力发动机技术进行总结的基础上, 对比例电磁铁静态吸力特性、电磁阀阀口流量特性和比例电磁铁动态响应特性进行了深入研究。通过对比例电磁阀系统全面研究, 证明了该技术的可行性, 为今后设计提供理论支撑。

关键词: 变推力发动机; 比例电磁阀; 比例电磁铁; 异型阀口; 动态响应

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 02-0052-08

Testing and characteristics analysis of proportional solenoid valve

WANG Xiao-gang, CHEN Wen-qu, TANG Mei-fang, WEI Qing
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai, 200233, China)

Abstract: Variable thrust LREs (Liquid-Propellant Rocket Engines) which can be used for thrust modulation is an ideal choice for space propulsion. Flux controlling technology which is the core technology of variable thrust LREs is also the emphases and difficulties on the research of variable thrust LREs. Based on the conclusions of variable thrust LREs's technology, the pivotal technology related to proportional solenoid actuator, valve port and dynamic characteristics are analyzed. It proves the feasibility of the technology through the comprehensive research, and will provide an important technical support for future application.

Keywords: variable thrust LRE; proportional solenoid valve; proportional solenoid actuator; shaped valve port; dynamic response

0 引言

变推力液体火箭发动机可以为航天器的推进

与控制提供可控动力, 是航天器动力系统的理想选择。其中流量调节技术是变推力发动机的核心技术之一, 是变推力发动机研究的热点和难点。大多数液体双组元火箭发动机, 都通过改变质量

收稿日期: 2010-10-15; 修回日期: 2010-12-16

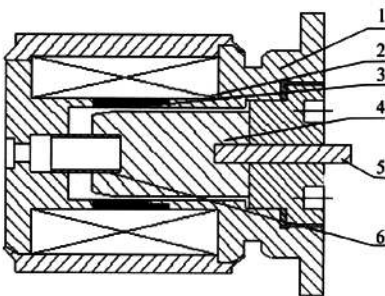
作者简介: 王晓罡 (1984—), 男, 硕士研究生, 研究领域为阀门设计

流量的方法改变推力, 包括阿波罗登月舱主发动机和航天飞机主发动机等。以 MOOG 为例, 用于流量调节的阀门主要包括比例控制阀和电液伺服阀两种。比例电磁阀作为比例控制阀的一种, 具有无级流量调节, 结构简单, 易于维护、成本较低等优点。近年来, 国内各行业都逐步展开了对比例电磁阀的研究, 比例电磁阀基于比例电磁铁技术, 通过改变输入电流改变阀门的开度, 从而实现流量的无级调节。

1 比例电磁铁磁场有限元分析

1.1 比例电磁铁原理介绍

比例电磁铁的铁芯位置取决于电信号的强度。它可以停在两个极限位置中间任意一个位置上。比例电磁铁的组成 (如图 1 所示) 与普通电磁铁基本一致, 都由线圈、衔铁、壳体等部分组成。它们的主要区别在于磁路不同: 普通电磁铁在铁芯移动时气隙变化, 电磁吸力大小随铁芯位置的改变而改变; 比例电磁铁通过磁路的特殊分配, 使电磁吸力在阀芯移动过程中基本保持恒定。比例电磁铁的磁路, 在工作气隙附近被分为两部分: ①和②, 如图 2 所示。其中①沿轴向穿过工作气隙进入极靴, 产生轴向推力 F_1 (表面力); 而②则穿过径向间隙进入导套前端, 产生轴向附加力 F_2 (斜面力)。



1-壳体组件; 2-线圈; 3-隔磁环; 4-衔铁;
5-固定轴; 6-导向套环

图 1 比例电磁铁结构图

Fig. 1 Structure of proportional solenoid actuator

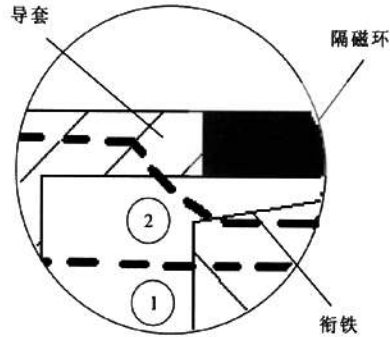


图 2 局部磁路放大图

Fig. 2 Magnified diagram of part magnetic path

F_1 随行程变化构成表面力曲线, 表面力 $F_1 = \frac{1}{2} \mu_0 U_b^2 \frac{1}{\delta^2} S$, F_1 与 δ^2 成反比, F_1 随着 δ 的减小而

增大, 当 δ 减小到一定程度时, F_1 随着 δ 的减小迅速上升, 但随着 δ 的减小, 磁通 Φ 增大, 磁感应强度 B 增大, 衔铁磁阻增加, 气隙磁势 U_b 下降, 减弱了 F_1 的增加趋势。 F_2 随行程变化构成斜面力曲线, F_2 取决于两个因素: ①衔铁与导套之间的电磁吸力 $F_2 = \frac{1}{2} \mu_0 U_b^2 \frac{1}{\delta_{\text{侧}}^2} S_{\text{侧}}$; ② F 的轴向倾

角 φ , 斜面力 $F_2 = F \cos \varphi$, 随着 δ 的减小, $\delta_{\text{侧}}$ 减小, $\delta_{\text{侧}}$ 增加, F 增加, 与此同时 φ 增大, $\cos \varphi$ 减小, 当气隙 δ 较大时, 衔铁与导套之间的磁阻迅速减小, F 增加比 $\cos \varphi$ 减小作用明显, 斜面力 F_2 随着 δ 的减小而增加, 当气隙减小到一定程度时, $\cos \varphi$ 减小比 F 增加作用明显, 斜面力 F_2 随着 δ 的减小而减小。通过结构参数调节, 使 F_1 与 F_2 合理匹配, 互相补偿, 就能使得它们的合成作用力 F (等于 F_1 加 F_2) 出现不受工作气隙 δ 影响的水平段。具有这种水平段形状的控制电磁铁才能满足比例阀的要求。二者综合得到比例电磁铁的位移-力特性, 如图 3 所示。

1.2 比例电磁铁结构参数分析

就该比例电磁铁的结构而言, 有三个尺寸会对吸力水平特性产生明显影响:

1) 初始工作气隙 δ ; 2) 侧向气隙 $\delta_{\text{侧}}$; 3) 衔铁前部倒角。

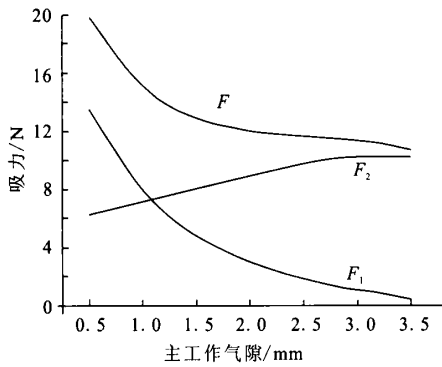


图 3 位移-力特性

Fig. 3 Displacement versus force

匝，线圈电阻 $41.5\ \Omega$ ，工作行程 $2\ \text{mm}$ 。

首先分析初始工作气隙 δ 对吸力水平特性的影响。曲线 1: $\delta=3$; 曲线 2: $\delta=2.5$; 曲线 3: $\delta=4$ 。计算结果如图 4 所示。

计算表明，初始工作气隙不同会对吸力水平特性产生较大影响。初始气隙小，在衔铁靠近端面时表面力 F_1 吸力迅速上升，曲线头部上翘；初始气隙大，在衔铁开始运动时衔铁前部倒角与导套之间磁阻偏大，斜面力 F_2 较小，曲线尾部吸力降低。在隔磁环前部端面附近，存在一个最优位置，使吸力在整个工作段基本保持不变。

接着分析侧向气隙 δ_b 对吸力水平特性的影响。曲线 1: $\delta_b=0$; 曲线 2: $\delta_b=0.4$; 曲线 3: $\delta_b=0.8$ 。结果曲线如图 5 所示。

比例电磁铁输入电压 $20\ \text{V}$ ，线圈匝数 1600

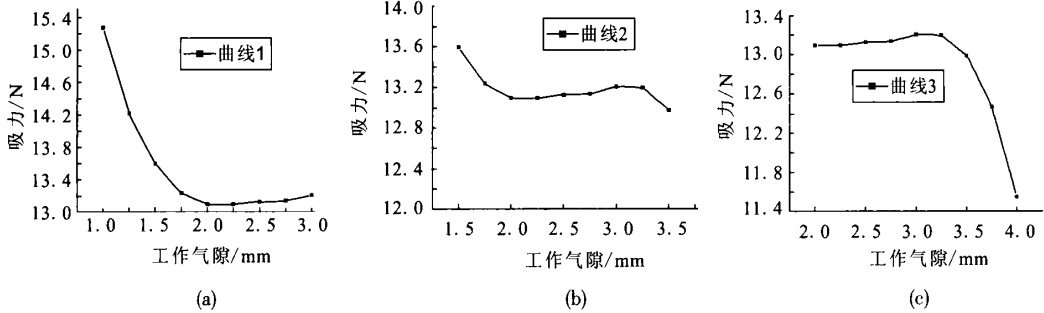


图 4 初始工作气隙对吸力水平特性的影响

Fig. 4 Influence of initial gap on suction characteristic

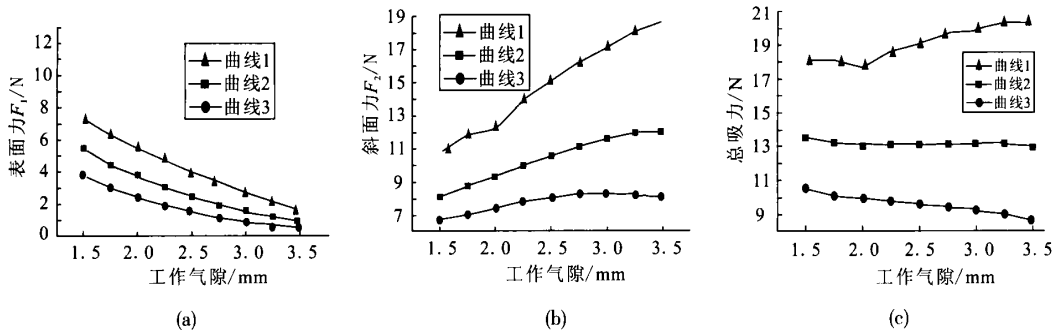


图 5 不同侧向气隙时的吸力比较

Fig. 5 Influence of side gap on suction characteristic

计算结果表明侧向气隙小时，总磁阻小，吸力大；侧向气隙大时，总磁阻大，吸力小。结果还表明，侧向气隙小时，随着工作气隙的变大，斜面力 F_2 增大趋势比 F_1 减小趋势强，总吸力随

着工作气隙的增大缓慢上升；当侧向气隙大时，随着工作气隙的变大，斜面力 F_2 增大趋势比 F_1 减小趋势弱，总吸力随着工作气隙的增大缓慢下降。造成这一现象的主要原因是倒角面产生分力

轴向倾角的变化率不同, 侧向气隙小时, 轴向倾角变化率大, 斜面力 F_2 上升斜率大; 侧向气隙大时, 轴向倾角变化率小, 斜面力 F_2 上升斜率小。

最后分析衔铁前部倒角对吸力水平特性的影响。曲线 1: 无倒角; 曲线 2: 倒角适中; 曲线 3: 倒角大。结果曲线如图 6 所示。

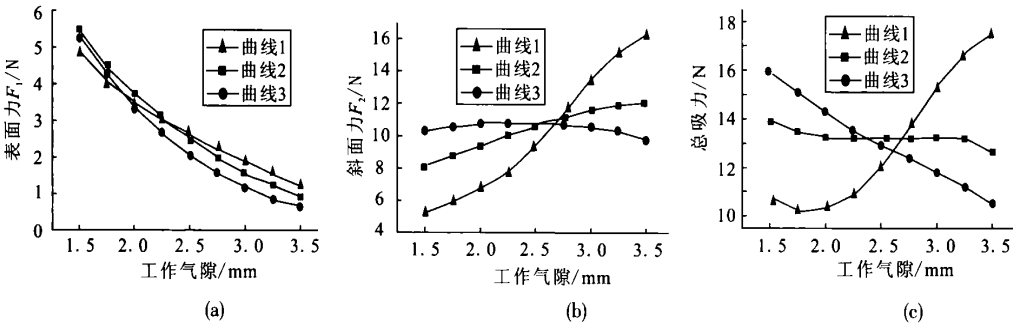


图 6 不同倒角时的吸力比较
Fig. 6 Influence of different chamfers on suction characteristic

计算结果表明, 前部倒角会对斜面力 F_2 产生比较明显影响, 倒角小, 倒角面磁阻小, 磁通大, 运动开始阶段斜面力 F_2 大, 但随着衔铁的运动, 倒角面吸力轴向倾角迅速减小, 斜面力 F_2 显著减小; 倒角大, 倒角面磁阻大, 磁通小, 开始运动阶段斜面力 F_2 小, 但随着衔铁的运动, 轴向倾角基本不变, 斜面力 F_2 保持稳定; 倒角选择适当时, 斜面力 F_2 随衔铁运动缓慢下降, 正好与表面力 F_1 上升相抵消, 总吸力在整个工作段基本保持不变。

通过有限元分析, 掌握了比例电磁铁中一些重要参数对性能的影响。这些结构参数之间又有一定对应关系, 需要综合考虑, 进行优化设计。

线圈电阻显著提高, 从而造成线圈工作电流的减小, 电磁吸力的减小, 行程的减小。

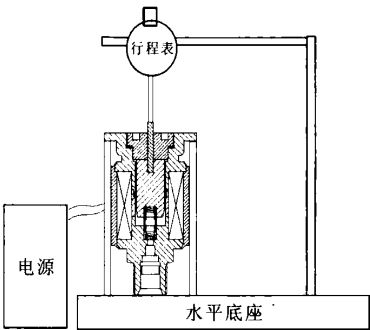


图 7 测试装置图
Fig. 7 Diagram of testing equipment

2 比例电磁铁试验件行程测试与分析

为了更好地掌握比例电磁铁特性, 按图 1 所示的结构进行加工, 并对行程进行测试 (测试装置如图 7 所示)。

用稳压电源和行程表对试验件行程进行测试, 试验结果如表 1 所示。

从试验结果可以发现, 行程偏小, 且随着电压的升高, 偏差有逐渐加大的趋势。分析原因, 行程的偏差主要由于线圈的温升造成, 随着电压的升高, 工作时间的延长, 线圈温度逐步升高,

为了减小温升的影响, 对实验件进行定点调压 (先将电压调节到工作点, 再与电磁阀接通, 缩短线圈发热时间), 试验结果如表 2 所示。

基本消除温升影响, 但由于稳压电源内部电阻存在, 实际分配到线圈两端电压略小于输出电压, 造成试验结果偏小, 为影响行程主要原因。

用稳流电源对结果进行验证, 所用稳流电源最大工作电压 30 V, 因此只能取部分工作点进行验证, 结果如表 3 所示。

结论: 试验行程与仿真计算结果基本一致, 阀芯往复运动过程中重复精度较高。

表 1 稳压调节
Tab. 1 Adjustment of voltage stabilization

电压/V	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
实测值/ μm	240	410	550	670	750	850	920	990	1040	1080	1120	1150
仿真值/ μm	380	560	700	850	950	1040	1130	1200	1270	1320	1370	1430

表 2 定值稳压调节
Tab. 2 Fixed adjustment of voltage stabilization

电压/V	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
实测值/ μm	310	490	660	770	860	970	1050	1110	1170	1230	1310	1380
仿真值/ μm	380	560	700	850	950	1040	1130	1200	1270	1320	1370	1430

表 3 稳流调节
Tab. 3 Adjustment of stable current

稳定电流 /A	0.43	0.48	0.53	0.58	0.63
等效电压 /V	18	20	22	24	26
开启过程实测值 / μm	390	510	660	810	950
关闭过程实测值 / μm	380	560	710	830	950
仿真值 / μm	380	560	700	850	950

3 阀口设计

3.1 研究目的

由于流经节流口的流量除取决于节流口的通流面积外，还与节流口前后的压差有关。比例电磁铁只实现了位移-电流的线性转化，但当节流口的通流面积发生变化时，分配到节流口的压差也会发生变化，因而不能实现流量-位移的线性转化。此外，在比例电磁铁行程测试中只考虑了电磁吸力和弹簧力，实际工作过程中阀芯的位置还会受液压力的影响。因此，需要对阀口进行合理的结构设计。

3.2 结构设计

为了满足功能需求，设计了如图 8、图 9 所示的结构。

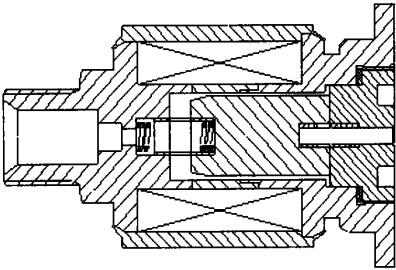


图 8 比例电磁阀整体结构图
Fig. 8 Structure of proportional solenoid valve

这种结构在功能上有四大特点：1) 阀口处结构变化剧烈，在进出口压差恒定的情况下，使压力损失主要集中在阀口处；2) 阀口形状随行程变大有一定程度的扩张，弥补阀口压差的下降，使流量随行程变化保持线性；3) 阀芯靠阀

座端有很大的卸荷面积, 减小了阀芯所受的液动力; 4) 很好的取代了固定轴的导向功能, 提高了阀芯的对中性能。

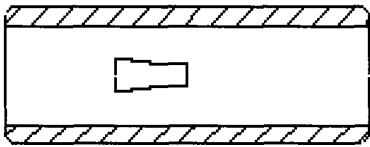


图 9 阀口局部放大图
Fig. 9 Magnified diagram of part valve port

3.3 结构仿真计算

为验证结构的合理性, 用 FLUENT 软件对结构进行了数值计算。通过动网格模型对比例电磁阀进行的计算表明, 阀芯移动过程中分布阀口的压降基本保持不变, 随阀芯移动至全开, 阀口压降从 0.05 MPa 降至 0.042 MPa。由于阀口开度与压降的变化, 使经过阀口的流量趋于稳定。其流量的变化曲线见图 10 所示。

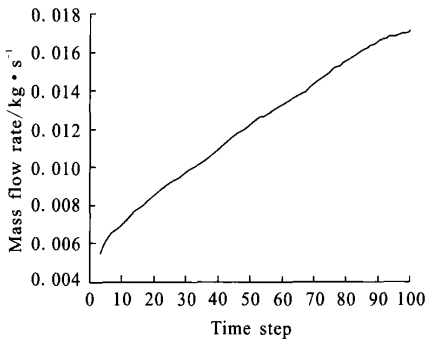


图 10 出口流量曲线图
Fig. 10 Curve of outlet flux

流量曲线表明, 当开度在 0.5~2 mm 的变化过程中, 流量和开度变化基本成正比, 阀口尺寸设计得较为合理, 在进出口压差恒定的前提下, 流量在 4.3~17.4 g/s 之间变化。

对阀芯边界的压强积分, 即可求得阀芯所受液动力合力, 如图 11 所示。

图 11 表明, 在整个阀芯的动作过程中, 液压力始终维持在一个比较低的值, 如果要想实现精确控制, 可适当减小弹簧刚度, 使弹簧力和液压力的合力与原弹簧力一致。通过以上仿真可以验

证, 该阀芯结构合理, 工艺简单, 功能满足实际需要。

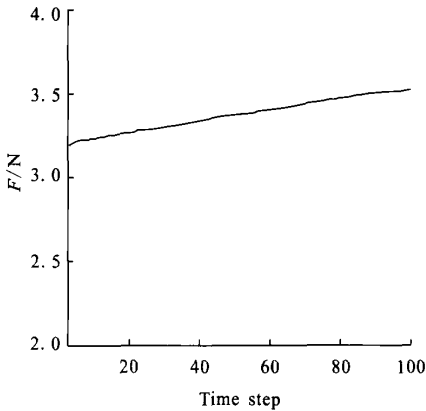
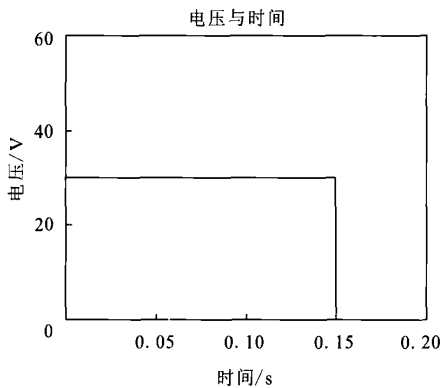


图 11 阀芯液动力变化曲线
Fig. 11 Diagram of liquid drive in valve

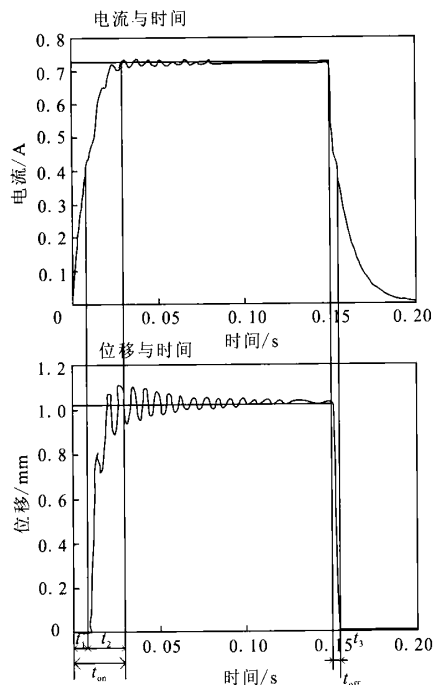
4 电磁铁动态特性

4.1 比例电磁铁动态特性

比例电磁铁和普通电磁铁不同, 除关闭和完全开启两个位置外, 还存在一系列中间位置, 比例电磁铁的行程和电流成正比, 最终停留位置和输入电压有关, 根据需要的开度, 结合吸力曲线和弹簧特性, 算出所需工作电压大小, 利用有限元瞬态场计算工具对比例电磁铁模型进行动态分析, 取工作电压 30 V, 弹簧刚度 8.95 N/mm, 弹簧预压力 7.77 N, 阀芯质量 0.018 kg, 结果曲线如图 12 所示:



(a) 阶跃电压曲线



(b) 电流曲线与行程曲线对照图

图 12 比例电磁铁计算响应曲线

Fig. 12 Response characteristics of proportional solenoid actuator

4.2 比例电磁铁动态特性的影响因素分析

改变工作电压，分析电压对动态特性的影响，为了使行程保持一致，根据电压选取合适的弹簧，利用 transient 进行计算，结果如表 4 所示。

改变预压力，分析预压力对动态特性的影响，根据弹簧预压力和工作行程确定工作电压，利用 transient 进行计算，结果如表 5 所示。

改变阀芯质量，分析阀芯质量对动态特性的影响，利用 transient 进行计算的结果如表 6 所示。

综合比较，工作电压对响应时间影响最为明显，但工作电压大时，阀芯运动速度比较快，阀芯晃动较为剧烈，但在实际动作中，由于摩擦力、流体粘性等阻尼的存在，晃动会被削弱很多；相同行程下，减小预压力对吸合触动时间影响不大，预压力越大，响应时间反而越短；阀芯质量对响应时间影响不是很明显，但阀芯质量小时，运动反电动势引起的阻尼较大，稳定时间较短。释放时间都比较短，不同参数下变化不明显。

表 4 不同工作电压下响应时间对照表

Tab. 4 Response time at different voltages

电压/V	弹簧刚度/ (N/mm)	预压力/N	行程/mm	吸合触 动时间/ms	吸合运 动时间/ms	固有吸 合时间/ms	固有释 放时间/ms
19	3	7.77	1.06	19	55	74	5
24	6	7.77	1.04	12	33	45	4
30	8.95	7.77	1.03	8	21	29	4

表 5 不同弹簧预压力下响应时间对照表

Tab. 5 Response time under different spring pre-loads

弹簧刚度/ (N/mm)	预压力/N	电压/V	行程/mm	吸合触 动时间/ms	吸合运 动时间/ms	固有吸 合时间/ms	固有释放 时间/ms
8.95	3	19	1.03	7	46	53	5
8.95	6	24	1.03	9	29	38	5
8.95	7.77	30	1.03	8	21	29	4

表 6 不同阀芯质量下响应时间对照表

Tab. 6 Response time with different masses

阀芯质量/ kg	弹簧刚度/ (N/mm)	预压力/N	电压/V	吸合触动时间/ ms	吸合运动 时间/ms	固有吸 合时间/ms	固有释放时 间/ms
0.006	8.95	7.77	30	8	26	34	5
0.012	8.95	7.77	30	8	24	32	4
0.018	8.95	7.77	30	8	21	29	4

5 结束语

流量调节技术是变推力发动机系统研究的重点和难点, 对变推力发动机的发展有着重大影响。比例电磁阀作为一种理想的流量调节方案, 在未来将得到广泛应用。本文通过对比比例电磁阀的吸力特性、流量特性和动态响应特性等方面进行探索和研究, 摸清了比例电磁阀工作的基本规

律, 为今后的设计提供了理论依据。

参考文献:

[1] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下) [M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
[2] 廖湘恩. 航天电器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
[3] 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.

(编辑: 王建喜)

(上接第 51 页)

参考文献:

[1] FARIBORZ Saghaei, AFSHIN Banazadeh. Co-flow fluidic thrust vectoring requirements for longitudinal and lateral trim purposes, AIAA 2006-4980 [R]. USA: AIAA, 2006.
[2] JEFFREY D F. Experimental study of a nozzle using fluidic counter-flow for thrust vectoring, AIAA 1998-3255 [R]. USA: AIAA, 1998.
[3] JEFFREY D F, KAREN A D. Design enhancements of the two-dimensional dual throat fluidic thrust vectoring nozzle concept, AIAA 2006-3701 [R]. USA: AIAA, 2006.
[4] KENRICK A W, KAREN A D. Experimental and computational investigation of multiple injection ports in a convergent-divergent nozzle for fluidic thrust vectoring, AIAA 2003-3802 [R]. USA: AIAA, 2003.
[5] 邓远灏, 钟梓鹏, 宋文艳. 收敛-扩张喷管中运用次流推

力矢量控制技术的计算研究 [J]. 固体火箭技术, 2004, 28 (1): 29-32.
[6] 乔渭阳, 蔡元虎. 基于次流喷射控制推力矢量喷管的试验及数值研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16 (3): 273-278.
[7] 吴雄, 吴敏, 张健, 等. 飞行参数对射流矢量喷管内流场影响的数值模拟[J]. 推进技术, 2009, 30 (2): 234-239.
[8] 吴雄. 固体发动机燃气二次喷射理论与试验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2007.
[9] 孙得川. 二次射流干扰流场及其控制参数研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2000.
[10] 刘辉, 邢玉明, 额日其太. 气体二次喷射矢量喷管三维流场计算[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 1174-1178.
[11] 刘大有. 两相流体动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.

(编辑: 王建喜)