

文章编号:1000-8055(2012)12-2836-06

小型柔性接头推力矢量性能试验

张晓光¹, 刘 宇¹, 任军学¹, 杨敬贤², 杨 威²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 上海航天技术研究院 上海航天动力技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 设计了结构尺寸相同, 弹性件材料分别为天然橡胶和硅橡胶的小型柔性接头, 测试了容压作用下的轴向压缩位移, 考察了弹性比力矩随温度($-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)、容压的变化情况。另外, 为检验应力估算经验公式对小型柔性接头的适用性, 测试了增强件内侧环向压缩应力。结果表明: 柔性接头轴向压缩刚度随容压升高呈现一定程度的非线性增大趋势; 弹性比力矩在 $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 摆角范围内基本恒定, 不同柔性接头弹性比力矩随容压升高呈现不同变化趋势; 天然橡胶弹性件柔性接头弹性比力矩在低温下显著增大, 硅橡胶弹性件柔性接头弹性比力矩在 $-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区稳定; 由燃烧室压强引起的增强件环向压缩应力经验公式估算值过大, 不适用于小型柔性接头。

关 键 词: 柔性接头; 推力矢量; 弹性件; 增强件; 弹性力矩

中图分类号: V435⁺. 23

文献标志码: A

Experimental investigation of miniature flexible joint thrust vector characteristics

ZHANG Xiao-guang¹, LIU Yu¹, REN Jun-xue¹,
YANG Jing-xian², YANG Wei²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute,

Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Two miniature flexible joints which have the same structure but different elastomer materials (natural rubber and silicone rubber, respectively) were designed. Axial deflection variation due to vessel pressure was tested. Spring torque at various temperatures ($-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) and vessel pressures were also studied. In addition, the reinforcement hoop compressive stress at the inner radius was measured to examine the applicability of existing empirical formulas for miniature flexible joints. Results show that the axial compressive stiffness increases slightly nonlinearly with the vessel pressure, while the spring rate keeps almost constant over the vector angle range from 0° to 6° . Spring rates of different flexible joints experience different variations as the vessel pressure increases. The temperature shows a pronounced effect on the spring rate. For the natural rubber elastomer flexible joint, the spring rate increases significantly at low temperatures. However in the silicone rubber elastomer case, the spring rate remains stable throughout the temperature range

收稿日期: 2012-06-28

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2836_029.html

作者简介: 张晓光(1986—), 男, 山西原平人, 博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

E-mail: zhangxiaoguang1986@126.com

from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. The stress empirical formula which would cause give much higher stress due to pressure is not applicable to the miniature flexible joint.

Key words: flexible joint; thrust vector; elastomer; reinforcement; spring torque

符号说明

a 接头球半径
 β 接头角
 β_1 接头内角
 β_2 接头外角
 φ 接头锥角
 n_e 弹性件层数
 n_r 增强件层数
 t_e 弹性件厚度

t_r 增强件厚度
 G 切变模量
 p 容器压强
 p_c 燃烧室压强
 p_a 环境压强
 σ_{p_c} 由 p_c 引起的增强件内侧环向压缩应力
 k_r 对增强件锥角的修正系数

柔性接头是固体火箭发动机柔性喷管推力矢量控制系统的核心部件,它由若干同心环状球壳的橡胶弹性件与金属或复合材料增强件交替黏接而成,并通过前、后法兰连接喷管固定部分与摆动部分.柔性接头轴向压缩刚度很大,而弯曲刚度(弹性比力矩)很小,因此在受到很大燃烧室压强作用时,仅产生很小的轴向位移,而在较小的侧向作用力作用下,可产生较大的摆角.

柔性接头最早被用在战略导弹及运载助推器上.近年来,随着战术导弹尤其是防空和反导弹机动性、操纵性以及垂直发射后快速转弯等要求的不断提高,对柔性接头提出了小型化的应用需求^[1-5],并已有型号应用,如 SM-3 第 3 级发动机 Mk 136 TSRM(third stage rocket motor)^[6], Terrier LEAP 第 3 级发动机 STAR 12GV^[7], Aster 15/30 助推器^[8-10]等.

防空和反导弹固体发动机空间尺寸有限、燃烧室压强较高、全天候工作,决定了柔性接头除须达到通常的要求外,还面临许多新的关键问题需要解决,如轻质小力矩设计、结构应力特性、宽温域使用等.以色列 Rafael 公司^[11]为 160 mm 直径战术导弹固体发动机研发的柔性接头($a = 75.1\text{ mm}$, $\beta_1 = 48^{\circ}$, $\beta_2 = 68^{\circ}$, $\varphi = 15^{\circ}$, $t_r = t_e = 0.6\text{ mm}$, $n_e = 8$)采用低模量宽温域硅橡胶($G = 0.15\text{ MPa}$)制造弹性件,弹性比力矩在室温和 $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下分别为 $21\text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 和 $24\text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$.该柔性接头在燃烧室压强 16 MPa 作用下未失效,由 ANSYS 计算的 Von Mises 应力最大值为 520 MPa ,但由美国国家航空航天局(NASA)给出的应力估算经验公式(1)(来自接头直径 $20.3\sim 55.9\text{ cm}$ 柔性接头试验结果)^[12-13]计算的增强件环向压缩应

力却为 1036 MPa ,远大于屈服强度 740 MPa ,表明现有经验公式对小型柔性接头不适用.

$$\sigma_{p_c} = \frac{4087 p_c}{n_e - 1} k_r \Omega \quad (1)$$

式中

$$\Omega = \frac{a^{2.4} \cos \beta}{3283 t_r^3 + t_r \cos^2 \beta [a^2 (\beta_2 - \beta_1)^2 - 3283 t_r^2]}$$

本文开展了结构尺寸完全相同、弹性件材料分别为天然橡胶(NR)和硅橡胶(SR)的小型柔性接头 Joint-NR 和 Joint-SR 的推力矢量性能对比试验,测试了各柔性接头在容压作用下的轴向压缩位移及增强件内侧环向压缩应力,考察了弹性比力矩随温度($-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)、容压的变化情况.研究结果可为柔性接头小型化应用提供参考.

1 柔性接头

图 1 为设计的冷试试验用小型前摆心柔性接头,由弹性件、增强件、前法兰、后法兰组成.结构尺寸: $a = 80\text{ mm}$, $\beta_1 = 40^{\circ}$, $\beta_2 = 60^{\circ}$, $\varphi = 15^{\circ}$, $t_r =$

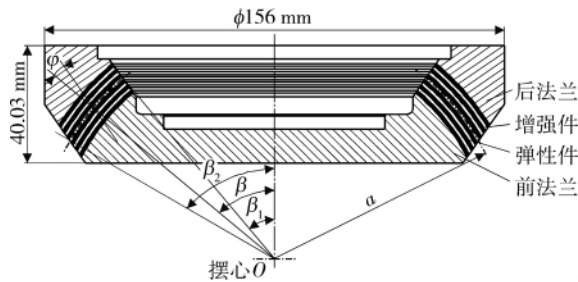


图 1 冷试柔性接头

Fig. 1 Bench-test flexible joint

1. 2 mm, $t_e=1.0$ mm, $n_e=6$. 增强件及前后法兰由高比强度的 30CrMnSiA 材料制造. 弹性件材料

各项力学性能的测试结果见表 1, 与天然橡胶相比, 硅橡胶硬度较低, 模量及强度也较低.

表 1 弹性件材料力学性能
Table 1 Elastomer material mechanical properties

柔性 接头	弹性 件	色 泽	硬度 (邵氏 A)	拉伸 强度/ MPa	拉断伸 长率/ %	拉断永 久变形/ %	与 30CrMnSiA 黏合				
							扯离		剪切		
							扯离强度/ MPa	破坏 形式	切变模量/ MPa	剪切强度/ MPa	破坏 形式
Joint-NR	天然橡胶	黑	30	13.51	880	6	2.61	橡胶内聚+ 胶黏剂内聚	0.31	3.66	橡胶内聚
Joint-SR	硅橡胶	绿	27	6.47	2000	9	2.33	橡胶内聚	0.18	1.29	橡胶内聚

2 试验系统

图 2 为柔性接头冷试试验系统. 压力容器充填高压氮气以模拟燃烧室压强环境, 电动伺服机构用于产生柔性接头摆动所需作动力矩. 倾角传感器或 2 个水平安装的位移传感器用于测试柔性接头摆角, 铅垂安装的位移传感器用于测试柔性接头在容压下的轴向压缩位移, 拉压力传感器用于测试伺服机构作动力. 由于增强件最大应力分量为内侧环向压缩应力, 因此仅在增强件内侧沿圆周方向黏贴了电阻应变片.

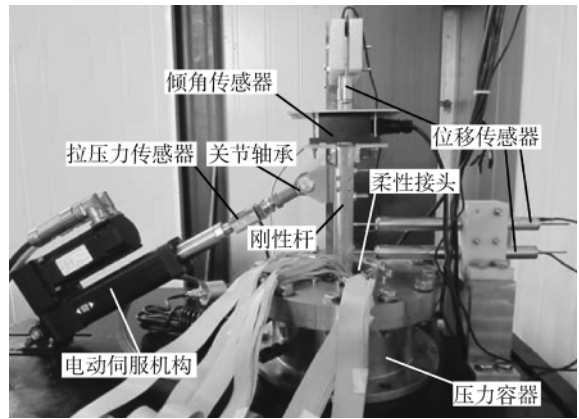


图 2 柔性接头冷试试验系统
Fig. 2 Flexible joint bench test fixture

3 试验结果及分析

3.1 轴向压缩位移

图 3 为柔性接头在容压作用下的轴向压缩位移. 图中曲线并非完全线性, 而是呈现出一定程度的非线性特征, 且在压强较高时尤为明显, 曲线斜

率随容压升高而减小, 表明柔性接头轴向压缩刚度随容压升高而增大. 比较各柔性接头的轴向压缩刚度, Joint-NR 大于 Joint-SR, 这与表 1 中橡胶硬度、模量的大小关系一致.

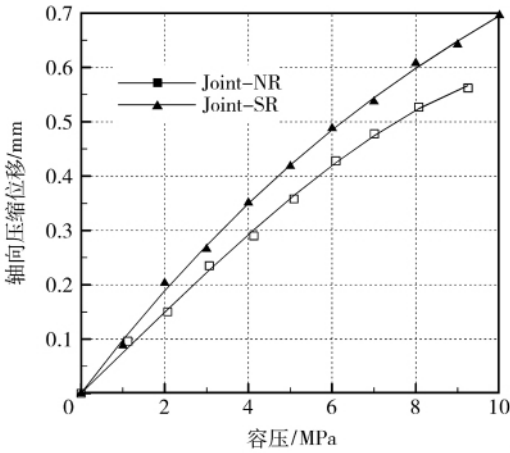


图 3 轴向压缩位移-容压曲线
Fig. 3 Axial deflection vs. vessel pressure

另外, 试验发现: 在容压升高过程中, 柔性接头的自偏转可以忽略, 表明设计的柔性接头整体稳定性良好.

3.2 弹性力矩

在室温条件下, 由伺服机构驱动刚性杆进行不同容压下的柔性接头摆动试验, 得到弹性力矩-摆角曲线, 见图 4. 试验数据线性度较好, 反映了在特定容压下, 在 $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 摆角范围内, 弹性比力矩基本恒定; 而 Joint-SR 因弹性件切变模量较小 (表 1), 摆动相同角度所需力矩也较小.

图 5 为各柔性接头弹性比力矩随容压升高的变化情况. 可见, 随容压升高, Joint-NR 弹性比力

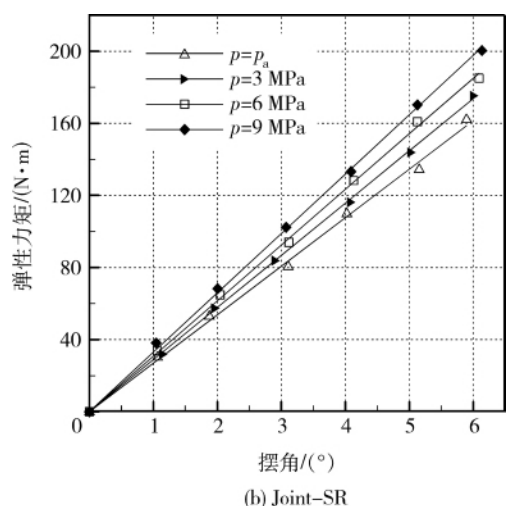
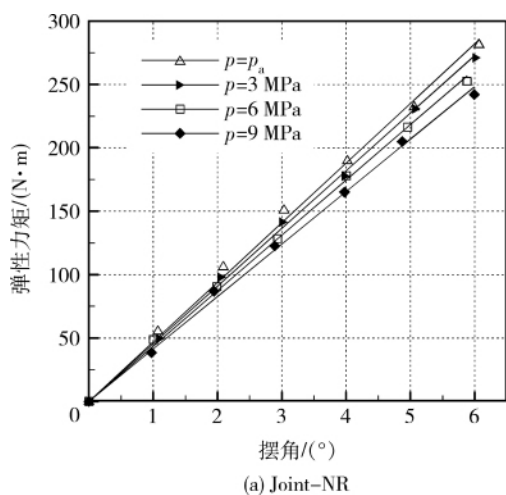


图 4 弹性力矩-摆角曲线

Fig. 4 Spring torque vs. vector angle

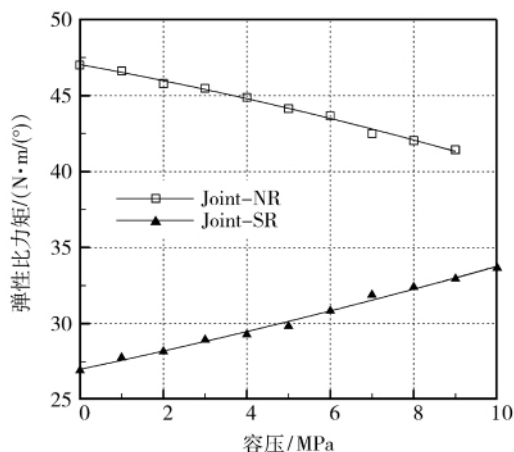


图 5 弹性比力矩-容压曲线

Fig. 5 Spring rate vs. vessel pressure

矩不断下降,而 Joint-SR 弹性比力矩逐渐增大. 柔性接头弹性比力矩随压强的变化是一个很复杂的问题,迄今仍没有明确、统一的结论,一般认为应从以下两个方面进行分析^[12]:

1) 橡胶弹性件力学性能随压强的变化

主要考虑切变模量随压强的变化. 传统的四板黏合试样压缩剪切联合加载试验,由于材料已不处于简单剪切变形状态,因此仍按简单剪切计算方法得到的切变模量并不是材料的真实切变模量^[14]. 另外,四板黏合试样中橡胶层仅在上下黏合平面承受压强作用,侧面并不受压,并不完全符合柔性接头弹性件的真实受力状态.

2) 柔性接头增强件、弹性件环状球壳结构

主要考虑结构形式对应力分布的影响,包括增强件、弹性件的长厚比;增强件、弹性件的厚度比;接头角、锥角等;形状系数;因制造偏差导致的弹性件不同层、同层不同位置厚度不均匀;增强件的刚度及屈曲变形. 这些因素与弹性比力矩随容压的变化关系,目前还没有定量数据.

3.3 高低温性能

开展了柔性接头的高低温性能试验,在 $-50 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度区间内考察了工作温度对柔性接头弹性比力矩的影响. 其中,低温下弹性比力矩的测试是重点,其数值直接决定作动力矩和伺服功率,并最终决定柔性接头能否用于战术导弹发动机推力矢量控制.

图 6 为不同试验温度,Joint-NR 在不同容压下摆动的弹性比力矩. 由图可知:

1) 在 $10 \sim -50^\circ\text{C}$ 的低温区,弹性比力矩大致呈现随温度降低而迅速增大的趋势,表明天然橡胶弹性件发生结晶,但直至 -50°C 仍处于高弹态区,并未玻璃化.

2) 在 $30 \sim 70^\circ\text{C}$ 的高温区,弹性比力矩数值基本稳定,变化不明显.

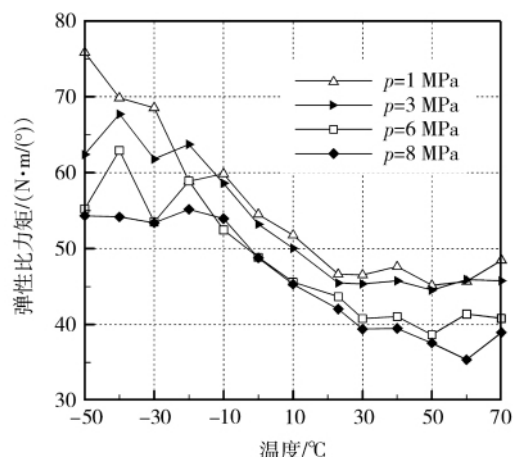


图 6 Joint-NR 弹性比力矩随温度、容压的变化

Fig. 6 Joint-NR spring rate due to various temperatures and vessel pressures

3) 弹性比力矩随压强升高而减小,且温度越低,该现象越明显.以 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,在容压 1 MPa 时弹性比力矩为 $75.82\text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$,这是室温、 1 MPa 条件下弹性比力矩 $46.62\text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 的 1.63 倍;而 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 8 MPa 时弹性比力矩 $54.34\text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 则仅为室温、 8 MPa 时弹性比力矩 $42.03\text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 的 1.29 倍.这一现象说明:战术导弹发动机高燃烧室压强($p_c>10\text{ MPa}$)对如 Joint-NR 高低温性能的柔性接头宽温域应用是有利的.

图 7 为不同试验温度,Joint-SR 在不同容压下摆动的弹性比力矩.与图 6 相比,可明显看出宽温

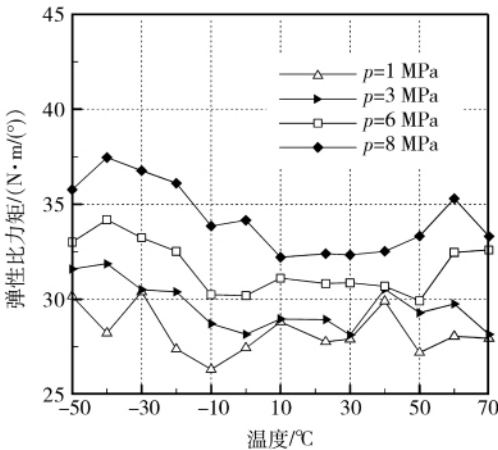


图 7 Joint-SR 弹性比力矩随温度、容压的变化
Fig. 7 Joint-SR spring rate due to various temperatures and vessel pressures

域低切变模量硅橡胶弹性件柔性接头的优势:在 $-50\sim70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间弹性比力矩稳定且数值较小,完全能够满足战术导弹宽温域使用要求,且可大幅降低作动力矩和伺服功率需求.

另外,图 7 反映了 Joint-SR 弹性比力矩随容压升高而增大,这与 Joint-NR 不同,相关说明参见 3.2 节.

3.4 增强件应力

表 2 为容压作用下各柔性接头增强件内侧环向压缩应力测试值、有限元计算值及经验公式(1)估算值的比较.有限元计算基于 ANSYS 结构分析软件建立柔性接头三维模型,由 Mooney-Rivlin 应变能函数表征弹性件材料超弹性力学行为,结合载荷增量法和 Full Newton-Rapson 方法进行求解,详见文献[15].

由表 2,有限元计算值与试验值吻合较好,而经验公式估算值远大于试验值,表明由接头直径在 $20.3\sim55.9\text{ cm}$ 之间柔性接头试验结果得到的应力经验公式不适用于小型柔性接头,若仍沿用,则设计结果将太过保守;增强件厚度将偏大,柔性接头体积、质量随之增加,不利于小型化应用.另外,相同容压下,Joint-SR 增强件环向压缩应力大于 Joint-NR.由于柔性接头结构尺寸完全相同,可知产生该现象的原因在于弹性件材料不同,低模量的弹性件可能导致更大的增强件应力,而经验公式中增强件应力与弹性件无关.

表 2 容压作用下增强件内侧环向压缩应力

Table 2 Reinforcement hoop compressive stress at the inner radius due to vessel pressure

容压 p/MPa	燃烧室压强 p_c/MPa	σ_{p_c}/MPa				式(1)
		Joint-NR		Joint-SR		
		试验	ANSYS	试验	ANSYS	
1	1.37	2.88	9.20	12.04	11.64	63.55
2	2.74	18.11	18.13	23.43	22.90	127.10
3	4.11	29.22	25.80	32.63	33.70	190.65
4	5.48	35.19	35.51	44.67	44.06	254.20
5	6.85	41.16	44.16	54.96	54.05	317.75
6	8.22	48.77	50.71	65.25	63.72	381.30
7	9.59			74.23	73.13	444.85
8	10.96			81.67	82.33	508.40
9	12.33			88.46	91.35	571.95
10	13.70			96.79	100.21	635.50

4 结 论

1) 小型柔性接头轴向压缩刚度并非定值,而是随容压升高呈现一定程度的非线性增大趋势,且在容压较高时尤为显著。

2) 小型柔性接头弹性比力矩在 $0^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 摆角范围内基本恒定。Joint-NR, Joint-SR 弹性比力矩随容压升高分别减小和增大。

3) Joint-NR 弹性比力矩在 $30 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 高温区保持稳定,在 $10 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 低温区迅速增大; Joint-SR 弹性比力矩在 $-50 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 温度区间稳定且数值较小,可满足战术导弹宽温域、小力矩使用需求。

4) 基于接头直径 $20.3 \sim 55.9\text{ cm}$ 柔性接头试验结果的燃烧室压强作用下增强件内侧环向压缩应力经验公式不适用于小型柔性接头。该公式估算值过大,将导致保守的增强件厚度设计,且未考虑弹性件的影响。

参考文献:

- [1] 林培基,高峰. 推力矢量对防空导弹作战效能的影响[J]. 飞航导弹,2009(1):56-57,64.
- [2] 吉礼超,宋贵宝. 防空导弹控制方法的研究现状及展望[J]. 战术导弹技术,2009(3):54-59.
JI Lichao, SONG Guibao. Current study status and future prospect of control mode of air-defense missile[J]. Tactical Missile Technology, 2009(3):54-59. (in Chinese)
- [3] Herbst W B. Dynamics of air combat[J]. Journal of Aircraft, 1982, 20(7):594-598.
- [4] Danielson A O, Dillinger R B. Investigation of thrust vector control for high-alpha pitchover[R]. AGARD CP-451, 1988.
- [5] Wassom S R, Faupell L C, Perley T. Integrated aerofin/thrust vector control for tactical missiles[J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(3):374-381.
- [6] Caveny L H, Geisler R L, Ellis R A, et al. Solid rocket enabling technologies and milestones in the United States[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6):1038-1066.
- [7] Olsen K E, Walsh J J, Thomas E L. Navy Terrier LEAP third-stage propulsion[R]. Monterey, CA: AIAA Missile Sciences Conference, 1994.
- [8] Uhrig G, Roussille C. Design drivers and technologies for solid propulsion of interceptors[R]. Arcachon, France: 1st AAAP International Conference on Missile Defense, 2003.
- [9] Avio. Aster 30[EB/OL]. [2012-03-28]. http://www.aviogroup.com/files/catalog/pdf/motore_per_aster_30_25.pdf.
- [10] Avio. Tactical propulsion[EB/OL]. [2012-03-28]. http://www.aviogroup.com/en/catalog/space/propulsione_tattica.
- [11] Shani S, Putter S, Peretz A. Development of a high-performance flexible joint for thrust vector control[R]. AIAA-95-3017, 1995.
- [12] Woodberry R F H, Zeamer R J. Solid rocket thrust vector control[R]. NASA SP-8114, 1974.
- [13] Woodberry R F H. Flexible joint for thrust vector control[R]. AIAA-75-1221, 1975.
- [14] 叶蔚嫔. 桥梁板式橡胶支座剪切模量测试方法研究及抗压弹性模量测试系统刚度分析[D]. 杭州:浙江工业大学, 2005.
YE Weichang. The study for the shear test method of the elastomeric bearings for bridge and stiffness of testing system[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [15] ZHANG Xiaoguang, LIU Yu, REN Junxue, et al. Nonlinear finite element analysis of the SRM flexible joint[R]. AIAA 2012-1453, 2012.