

三棱柱伸展臂超弹性铰链的力学建模与分析

杨 慧^{1,2}, 郭宏伟², 王 岩³, 刘荣强²

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 合肥 230601; 2. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家实验室, 哈尔滨 150080;
3. 中国电子科技集团 38 所, 合肥 230031)

摘 要: 针对对向多层超弹性铰链展开状态的稳定性问题, 分别基于铁木辛柯屈曲理论和欧拉梁屈曲理论建立对向多层超弹性铰链折叠峰值力矩模型。搭建实验平台, 分别对 12 种规格对向单层、双层超弹性铰链进行实验研究, 发现理论值与实验值偏差不大于 7.73%, 偏差均值不大于 4.93%, 偏差标准差不大于 4.97%, 验证了基于欧拉梁屈曲理论建模的准确性。对对向多层超弹性铰链进行参数研究, 发现半径、中心角、厚度和层数与屈曲力矩正相关, 而长度则是负相关的。

关键词: 三棱柱伸展臂; 超弹性铰链; 屈曲; 实验研究

中图分类号: V214.3+6

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2016)03-0275-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.03.005

Mechanical Modeling and Analysis for Hyperelastic Hinge in a Triangular Prism Deployable Mast

YANG Hui^{1,2}, GUO Hong-wei², WANG Yan³, LIU Rong-qiang²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

3. China Electronics Technology Group Corporation No. 38 Research Institute, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on Timoshenko and Gere buckling theories and classic Euler beam buckling theory, two different theoretical models are established to analyze the stability of deployment status for the multi-layer equal tape-spring hinge. Twelve different single-layer and double-layer equal tape-spring hinges are tested. The relative errors of the folded peak moment between theoretical results and experimental results are no more than 7.73%, the average relative errors are no more than 4.93%, and the standard deviation is no more than 4.97%, which demonstrates the accuracy of the nonlinear mechanical model for the multi-layer equal tape-spring hinge. Parametric study shows that the greater section radius, central angle, thickness or layer number is, the greater the folded peak moment is. However, longitudinal length has a negative correlation with the folded peak moment.

Key words: Triangular prism deployment mast; Hyperelastic hinges; Buckling; Experimental research

0 引 言

可伸展机构中采用的传统机械式铰接铰链质量大、体积大及摩擦易卡死的缺点。超弹性铰链, 是一种圆柱壳体结构, 能够在 5% 弹性应变范围内实现 180° 大挠度弯曲, 并依靠自身变形存储

的弹性势能实现展开, 集驱动、旋转、锁定于一体, 不含移动部件、不存在摩擦, 并具有轻质、低能耗特点, 能够解决航天器发射体积有效性问题^[1]。超弹性铰链主要存在三种结构形式: 单带簧、多带簧和整体开缝式超弹性铰链。对于多带簧超弹性铰链, 若带簧横截面圆弧的曲率方向相

同,称为对向超弹性铰链;若圆弧的曲率方向相反,则称为背向超弹性铰链。超弹性铰链已成功应用于移动卫星系统的波音回弹反射器^[2]和火星快速航天器^[3]。

超弹性铰链在展开状态的稳定性直接影响到整个可折展机构的稳定性,若超弹性铰链两端的载荷超过屈曲临界载荷,则结构屈曲产生突然翻转而失稳。Mansfield^[4]基于壳体大变形理论和变分法对无限长带簧超弹性铰链弯曲进行分析,得到壳体理论基本方程。Calladine^[5]利用弹性壳体理论对无限长各向同性带簧超弹性铰链进行非线性力学特性分析,建立了峰值力矩模型。Mallikarachchi等^[6-8]通过实验研究了双缝圆管超弹性铰链展开过程的冲击。Yang等^[9-10]利用实验和有限元仿真法对整体式双缝和对向超弹性铰链的准静态力学性能分别进行了多目标优化,以降低铰链展开的过冲、并降低应力集中现象,提高使用次数。Kim等^[11]提出一种与路径相关的路径定义法,用于研究超弹性铰链非线性展开性能。吴耀鹏^[12-13]基于能量原理对构成超弹性铰链的复合材料进行了双稳态力学性能研究,改进了壳结构力学模型。祝恩淳等^[14]采用非线性有限元法和实验研究了在局部轴向压力作用下圆柱壳屈曲过程。李瑞雄等^[15]采用ABAQUS对由各向同性材料构成的透镜式缠绕肋片压扁进行了数值研究。冷劲松等^[16]提出一种可应用于空间可展开结构上的纤维增强形状记忆复合材料,通过实验研究了具有记忆功能超弹性铰链展开太阳能电池阵的性能。

Seffen等^[17-19]基于有限元仿真法得到样本点,利用单值分解法拟合出有限长带簧超弹性铰链非线性力学特性模型。Pellegrino等^[20]采用铁木辛柯理论分析对向超弹性铰链屈曲特性。浙江大学王俊等^[21-22]基于薄壳弯曲理论和最小势能原理建立单带簧超弹性铰链展开稳定力矩模型,向单层超弹性铰链屈曲力矩进行了有限元仿真与实验研究。然而,对于多层超弹性铰链的临界屈曲力矩鲜少有理论研究。

本文基于铁木辛柯屈曲理论和欧拉梁屈曲理论分别建立对向多层超弹性铰链屈曲力矩模型。搭建实验平台,分别对12种不同规格对向超弹性铰链进行实验研究,验证折叠峰值力矩理论模型的准确性,并进行参数研究。

1 对向超弹性铰链屈曲模型的建立

对向超弹性铰链展开状态的稳定性直接决定整个三棱柱伸展臂展开状态的稳定性。以哈尔滨工业大学设计的空间伸展臂(见图1)为研究对象,对其中的对向多层超弹性铰链屈曲力矩进行研究。

1.1 基于经典欧拉梁屈曲理论建模

图2为对向多层超弹性铰链结构示意图。将对向超弹性铰链两端力矩转化为施加在带簧横截面中性轴上的力偶 F_e ,每个带簧均绕着超弹性铰链横截面对称轴 oo' 旋转,并认为沿纵向总长度范围内均参与受力。

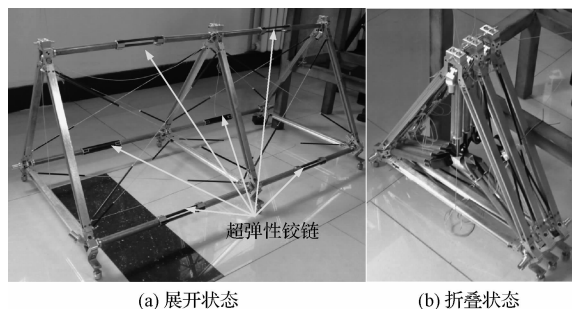


图1 含超弹性铰链的2单元三棱柱伸展臂

Fig. 1 Two-modulus triangular prism with hyperelastic hinge

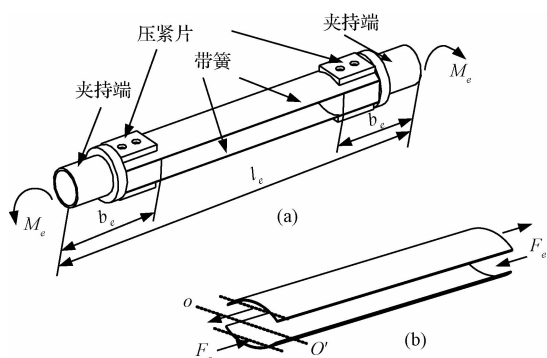


图2 对向超弹性铰链受力简化图

Fig. 2 Loading of the equal tape-spring hinge

基于欧拉梁屈曲理论的对向多层超弹性铰链折叠临界屈曲载荷 F_{cr}^{el} 为

$$F_{cr}^{el} = \frac{\pi^2 EI}{l_e^2} \quad (1)$$

式中: l_e 为带簧长度; I 为横截面惯性矩。

图3为对向超弹性铰链横截面几何示意图。带簧的横截面圆心至中性轴的距离 d 为

$$d = \frac{2R}{\beta} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (2)$$

式中: β 为带簧横截面中心角; R 为带簧横截面半径。

对向多层超弹性铰链横截面惯性矩 I 为

$$I = \frac{nR^3 t \beta}{2} \left[1 + \frac{\sin \beta}{\beta} - 8 \left(\frac{\sin \beta / 2}{\beta} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: t 为对向多层超弹性铰链单个带簧厚度; n 为带簧个数, ($n=2, 4, 6$)。

基于欧拉梁屈曲理论, 折叠峰值力矩 M_e^1 为

$$M_e^1 = F_{cr}^{e1} \cdot s_e \quad (4)$$

式中: s_e 为对向超弹性铰链横截面带簧峰点 A 和点 B 之间的距离。

将式(1)~(3)代入式(4), 得到基于经典欧拉梁屈曲理论建立的对向多层超弹性铰链折叠峰值力矩模型为

$$M_e^1 = \left[1 + \frac{\sin \beta}{\beta} - 8 \left(\frac{\sin \left(\frac{\beta}{2} \right)}{\beta} \right)^2 \right] \cdot \frac{2\pi^2 E n \beta R^3 t}{l_e^2} \cdot \left(\frac{s_e}{2} - R + \frac{2R}{\beta} \sin \frac{\beta}{2} \right) \quad (5)$$

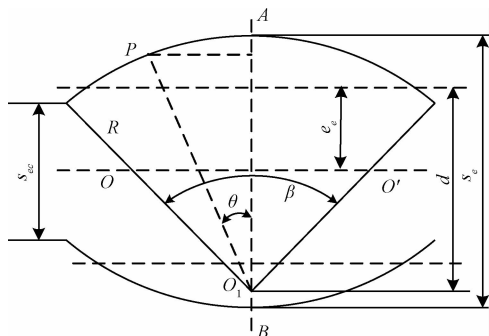


图3 对向超弹性铰链横截面几何示意图

Fig. 3 Section diagram of the equal tape-spring hinge

1.2 基于铁木辛柯屈曲理论建模

根据弹性稳定理论, 对向多层超弹性铰链发生弯曲时, 位于内侧的带簧产生反向弯曲, 处于压缩状态; 外侧带簧产生对向弯曲, 处于拉伸状态。结构中处于压缩纤维的应力比拉伸纤维应力增长更快, 当压缩应力达到屈曲应力时整个铰链结构将产生屈曲或者突然翻转。因此, 对向多层超弹性铰链屈曲载荷由处于内侧带簧决定。

采用铁木辛柯理论分析其屈曲特性, 等效为简支圆柱板受压屈曲, 此时结构中压缩临界屈曲应力 σ_{cr} 为

$$\sigma_{cr} = \frac{Et}{R \sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (6)$$

式中: E 为铰链材料弹性模量, MPa; ν 为泊松比。

对向多层超弹性铰链结构中任意点应力 σ_e 为

$$\sigma_e = F_e \left(\frac{1}{A} + \frac{w_e y_e}{I} \right) \quad (7)$$

式中: F_e 为超弹性铰链横截面载荷; A 为超弹性铰链横截面面积; y_e 为横截面上任意点至旋转轴的距离; w_e 为载荷作用点至旋转轴的距离。

基于 Bazant 结构稳定理论求得载荷作用点到横截面旋转中心的距离 w_e 为

$$w_e = e_e \cdot \sec \sqrt{\frac{F_e l_e^2}{4EI}} \quad (8)$$

式中: e_e 为对向超弹性铰链横截面带簧中性轴与对称轴之间距离。

屈曲时位于内侧带簧压缩纤维距离旋转轴的距离 y_e 为

$$y_e = e_e + R - d \quad (9)$$

若对向超弹性铰链结构中处于压缩状态的微元应力达到临界应力, 该结构将产生屈曲, 此时的临界载荷 F_{cr}^{e2} 可通过式(6)~(9)得到

$$\left(\frac{1}{F_{cr}^{e2}} \cdot \frac{nEt^2 \beta}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} - 1 \right) \cdot \frac{R^2}{s_e \left(\frac{s_e}{2} + d - R \right)} = \frac{1}{\cos \left(\frac{l_e}{2} \cdot \sqrt{\frac{F_{cr}^{e2}}{EI}} \right) \cdot \left[1 + \frac{\sin \beta}{\beta} - 8 \left(\frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\beta} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

对向超弹性铰链由水平状态开始弯曲, 产生屈曲时的折叠峰值力矩为

$$M_e^2 = F_{cr}^{e2} \cdot 2w_e \quad (11)$$

利用 Matlab 对式(10)和式(11)进行数值求解, 即可求出基于铁木辛柯屈曲理论的对向多层超弹性铰链折叠峰值力矩。

图4为基于铁木辛柯屈曲理论和欧拉梁屈曲理论建立的对向单层超弹性铰链折叠峰值力矩模型的对比曲线。分析发现基于铁木辛柯屈曲理论推导的对向超弹性铰链折叠峰值力矩计算值较小。

2 理论模型实验校验

为了验证超弹性铰链弯曲力矩的理论模型准确性, 搭建实验平台对弯曲力矩进行实验。图5是对向和背向超弹性铰链实物图, 分别加工出12种不同规格的超弹性铰链。带簧片材料均为 Ni36CrTiAl, 带簧纵向长度统一为126 mm。不同规格对向超弹性铰链的夹持端结构和尺寸相同, 夹持端外部伸出

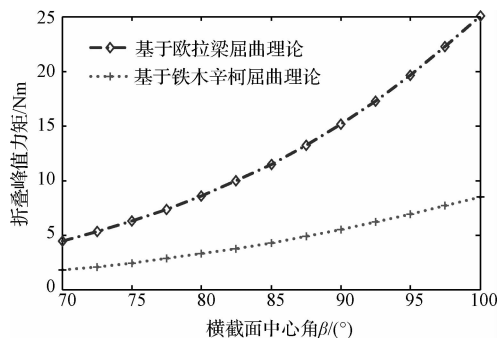


图4 对向超弹性铰链折叠峰值力矩计算模型对比

Fig. 4 Comparison between two theory models

的圆管长度为 22 mm, 纵向总长度 $l_0 = 170$ mm。图 6 为超弹性铰链弯曲力矩实验平台。

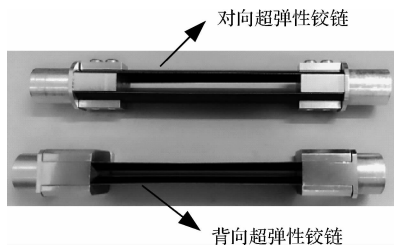


图5 超弹性铰链实物图

Fig. 5 Physical maps of hyperelastic hinges

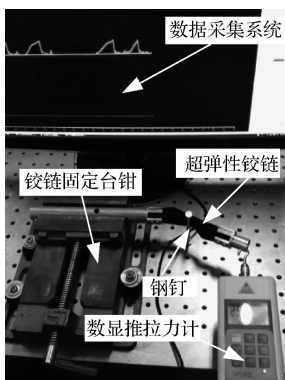


图6 超弹性铰链弯曲力矩实验平台

Fig. 6 Test rig of folding peak moment for hyperelastic hinges

超弹性铰链一端连接刚性圆管, 通过台钳固定在精密光学平台上。在铰链自由端通过艾德堡数显推拉力计施加垂直于铰链纵向的拉力, 通过计算机采集超弹性铰链发生屈曲时的拉力。实验中在超弹性铰链中央固定一个钢钉, 使超弹性铰链绕其旋转, 确保能够实现对称弯曲。由于发生屈曲时铰链旋转角度较小, 可以认为拉力与铰链依然垂直。因此, 超弹性铰链中间位置所承受的力矩等于拉力乘以铰链

总长度的一半。由于对铰链进行多次折叠会在中央折叠区域引入缺陷, 使结构刚度迅速下降, 从而影响折叠峰值力矩值, 所以分别对每种规格的超弹性铰链分别进行两次实验, 取均值计算力矩。

为了便于区分, 采用不同字母表示 4 种不同结构的超弹性铰链, “ES”代表对向单层, “ED”代表对向双层。通过实验结果对比发现, 基于欧拉梁屈曲理论建立的模型与实验值较为接近。因此, 在以下分析中选用基于欧拉梁屈曲理论建立的模型进行分析。表 1 是对向单层超弹性铰链展开峰值力矩理论值与实验值对比。表 2 是对向双层超弹性铰链折叠峰值力矩理论值与实验值对比。

根据表 1 中的数据, 计算出对向单层超弹性铰链折叠峰值力矩实验值与理论值: 偏差范围为 $-6.82\% \sim 7.65\%$, 偏差均值为 2.21%, 偏差标准差为 4.97%。根据表 2 中数据, 计算出对向双层超弹性铰链折叠峰值力矩理论值与仿真值: 偏差范围为 $-3.76\% \sim 7.73\%$, 偏差均值为 4.93%, 偏差标准差为 3.44%。

通过对比发现, 12 种不同规格对向单层和双层超弹性铰链折叠峰值力矩, 理论值与实验值偏差不大于 7.73%, 偏差均值不大于 4.93%, 偏差标准差小于 4.97%, 表明基于欧拉梁屈曲理论建模的准确性。

3 参数研究

不同结构参数, 使超弹性铰链具有不同的稳定性, 有必要进行参数研究。以式(5)为基础, 对向超弹性铰链折叠峰值力矩的结构参数影响进行分析。图 7 至图 11 为不同结构参数对对向超弹性铰链折叠峰值力矩的影响曲线。

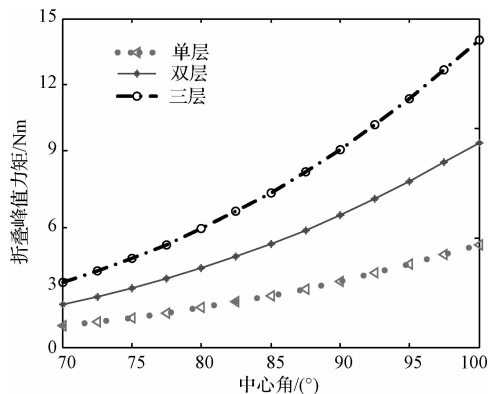


图7 中心角屈曲力矩的影响

Fig. 7 Influence of section central angle

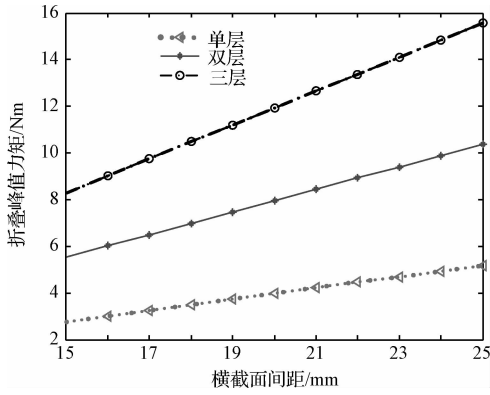


图8 间距屈曲力矩的影响

Fig. 8 Influence of separation

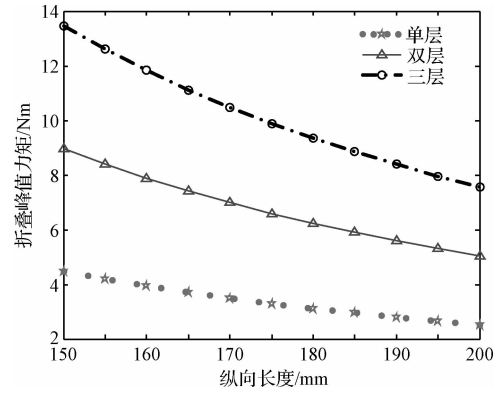


图10 长度对屈曲力矩的影响

Fig. 10 Influences of longitudinal length

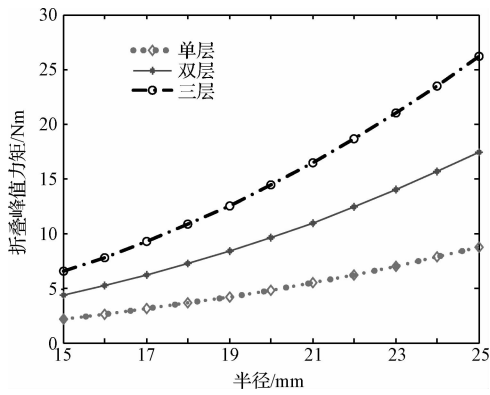


图9 半径屈曲力矩的影响

Fig. 9 Influence of section radius

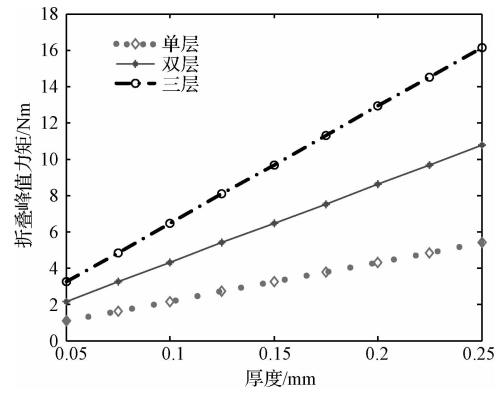


图11 厚度对屈曲力矩的影响

Fig. 11 Influence of thickness

表1 对向单层超弹性铰链折叠峰值力矩理论值与实验值对比

Table 1 Comparison between experimental and theoretical fold peak moment of equal single-layer hyperelastic hinges

型号	两次实验拉力 /N			折叠峰值力矩/Nmm		RE /%
	1 st	2 nd	均值	理论值	实验值	
ES17814 -75	14.5	15.2	14.85	1348.3	1262.25	-6.82
ES17814 -85	29.1	30.2	29.65	2351.3	2520.25	6.70
ES17814 -95	44.5	44.7	44.6	3781.2	3791	0.26
ES20514 -75	24.3	25.2	24.75	2002.1	2103.75	4.83
ES20514 -85	43.1	44.5	43.8	3457	3723	7.14
ES20514 -95	61.3	60.9	61.1	5490.3	5193.5	-5.71
ES17816 -75	17.4	17.5	17.45	1540.9	1483.25	-3.89
ES17816 -85	32.1	33.7	32.9	2687.2	2796.5	3.91
ES17816 -95	55.3	54.8	55.05	4321.4	4679.25	7.65
ES20516 -75	28.5	27.4	27.95	2288.2	2375.75	3.69
ES20516 -85	50.7	49.4	50.05	3950.8	4254.25	7.13
ES20516 -95	76.7	73.4	75.05	6274.6	6379.25	1.64

表2 对向双层超弹性铰链折叠峰值力矩理论值与实验值对比

Table 2 Comparison between experimental and theoretical fold peak moment of equal double-layer hyperelastic hinges

型号	两次实验拉力 /N			折叠峰值力矩 /Nmm		RE /%
	1 st	2 nd	均值	理论值	实验值	
ED17814-75	34.1	33.4	33.75	2696.6	2868.75	6.01
ED17814-85	59.5	57.2	58.35	4702.6	4959.75	5.18
ED17814-95	90.1	89.8	89.95	7562.4	7645.75	1.09
ED20514-75	51.3	52.1	51.7	4004.2	4394.5	8.88
ED20514-85	87.5	86.7	87.1	6914	7403.5	6.61
ED20514-95	123.5	125.5	124.5	10980.6	10582.5	-3.76
ED17816-75	38.7	37.5	38.1	3081.8	3238.5	4.84
ED17816-85	68.9	67.7	68.3	5374.4	5805.5	7.43
ED17816-95	109.1	108.7	108.9	8642.8	9256.5	6.63
ED20516-75	57.3	59.4	58.35	4576.4	4959.75	7.73
ED20516-85	101.5	98.3	99.9	7901.6	8491.5	6.95
ED20516-95	148.4	151.7	150.05	12549.2	12754.25	1.61

通过分析可以看出:随着横截面半径、中心角、间距、厚度或者层数任意一个结构参数的增大,对向超弹性铰链折叠峰值力矩均会增大,但是折叠峰值力矩随着长度的增大而减小。

产生以上规律的主要原因如下:(1)横截面半径、中心角、厚度和带簧层数的增加,均会导致横截面面积和惯性矩增大,从而使对向超弹性铰链抵抗外界载荷的能力增大。(2)带簧横截面间距的增大,会使等效力偶的力臂增大,从而使折叠峰值力矩增大。(3)而纵向长度的增大,会使对向超弹性铰链结构的长细比增大,抵抗外界载荷的能力下降。

折叠峰值力矩的增大会使对向超弹性铰链结构的稳定性增大,因此,为了提高对向超弹性铰链直线状态的稳定性,应在满足横截面几何约束的基础上,增大横截面半径、中心角、厚度或者层数,同时要保证纵向长度尽可能短。

4 结论

1) 基于铁木辛柯屈曲理论和欧拉梁屈曲理论,分别建立了对向多层超弹性铰链屈曲力矩模型。

2) 对12种不同规格对向单层、双层超弹性铰链进行实验,验证了基于欧拉梁屈曲理论建立的模型的准确性。

3) 基于欧拉梁屈曲理论模型,对向多层超弹性铰链进行参数研究,得到:横截面半径、中心角、厚度、层数的增大引起屈曲力矩增大,而长度的增大则

会导致折叠峰值力矩下降。

参 考 文 献

- [1] Block J, Straybel M, Wiedemann M. Ultralight deployable booms for solar sails and other large gossamer structures in space [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(7-8): 984-992.
- [2] Anon. Hughes graphite antennas installed on Mast-2 craft [N]. *Space News*, Nov. 1994.
- [3] Adams D S, Mobrem M. Lenticular jointed antenna deployment anomaly and resolution onboard the Mars Express Spacecraft [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2009, 46(2): 403-410.
- [4] Mansfield E H. Large-deflexion torsion and flexure of initially curved strips [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1973, (334): 279-298.
- [5] Calladine C R. Love centenary lecture: The theory of thin shell structures [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 1988, 202(42): 1-9.
- [6] Mallikarachchi H M Y C, Pellegrino S. Design of ultrathin composite self-deployable booms [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, 51(6): 1811-1821.
- [7] Mallikarachchi H M Y C, Pellegrino S. Deployment dynamics of ultrathin composite booms with tape-spring hinges [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, 51(2): 604-613.
- [8] Mallikarachchi H M Y C, Pellegrino S. Quasi-static folding and deployment of ultrathin composite tape-spring hinges [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2011, 48(1): 187-198.
- [9] Yang H, Liu R Q, Wang Y, et al. Experiment and multiobjective optimization design of tape-spring hinges [J].

- Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51(6): 1373-1384.
- [10] Yang H, Deng Z Q, Liu R Q, et al. Optimizing the quasi-static folding and deploying of thin-walled tube flexure hinges with double slots [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(2): 279-286.
- [11] Kim K W, Park Y J. Solar array deployment analysis considering path-dependent behavior of a tape spring hinge [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(5): 1921-1929.
- [12] 吴耀鹏. 双稳态薄壳结构的边界效应研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(2): 266-271. [Wu Yao-peng. Study boundary effects on bi-stable thin shell structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 266-271.]
- [13] 吴耀鹏. 基于能量原理的双稳态各向同性柱壳力学特性研究 [J]. 应用力学学报, 2011, 28(3): 243-249. [Wu Yao-peng. Study on mechanical behavior of bi-stable isotropic cylindrical shell based on the principle of minimum strain energy [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(3): 243-249.]
- [14] 祝恩淳, Calladine C R. 圆柱薄壳在局部轴向压力作用下的屈曲 [J]. 工程力学, 2003, 20(4): 168-170. [Zhu En-chun, Calladine C R. Buckling of the cylindrical shells under locally axial compression [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 168-170.]
- [15] 李瑞雄, 陈务军, 付功义, 等. 透镜式缠绕肋压扁缠绕过程数值模拟分析 [J]. 宇航学报, 2011, 32(1): 224-231. [Li Rui-xiong, Chen Wu-jun, Fu Gong-yi, et al. Numerical simulation of flattening and wrapping process of lenticular wrapped-rib [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(1): 224-231.]
- [16] 冷劲松, 兰鑫, 刘彦菊, 等. 形状记忆聚合物复合材料机器在空间可展开结构中的应用 [J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 950-956. [Leng Jin-song, Lan Xin, Liu Yan-ju, et al. Shape memory polymers composites and their application in deployable structures [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(4): 950-956.]
- [17] Seffen K A, You Z, Pellegrino S. Deployment dynamics of tape springs [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1999, 455(1983): 1003-1048.
- [18] Seffen K A, Pellegrino S. Folding and deployment of curved tape springs [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42: 2055-2073.
- [19] Seffen K A, Pellegrino S. Deployment of a rigid panel by tape-springs [R]. Department of Engineering, University of Cambridge, Report CUED/D-STRUCT/TR168, 1997.
- [20] Scholer T, Pellegrino S. A bi-stable structural element [J]. Proceedings of the iMechE, Part C: Journal of Engineering Sciences, 2008, 222: 2045-2051.
- [21] 王俊, 关富玲, 周志刚. 空间可展结构卷尺铰链的设计与分析 [J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 720-726. [Wang Jun, Guan Fu-ling, Zhou Zhi-gang. Design and analysis of tape hinge for deployable structures [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(3): 720-726.]
- [22] 王俊. 可展结构新型铰链的设计与分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006. [Wang Jun. Design and analysis of a new type of hinge for deployable structures [D]. Hangzhou, Zhejiang University, 2006.]

作者简介:

杨慧(1986-),女,博士,航空宇航制造工程,研究方向为宇航空间折展机构、超弹性铰链、非线性力学分析、多目标优化设计等。

通信地址:安徽省合肥市经开区九龙路111号(230601)

电话:(0551)63861905

E-mail: huiyang_0431@163.com

(编辑:张宇平)