

多带簧组合铰链的设计与分析

韩泽光¹,董丽青¹,张赵威²,张伟²,郝瑞琴¹

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国科学院沈阳自动化研究所,辽宁 沈阳 110016)

摘要 目的 研究带簧的空间布局及弯折方式对多带簧组合铰链展开过程弯矩的影响,设计一种多带簧组合铰链,解决该类铰链在展开过程存在死点的问题. 方法 利用 ABAQUS 分析软件首先分析单根带簧的弯折性能,输出其弯折过程的弯矩-转角图,进而完成三根带簧组合铰链的设计和弯折性能分析. 结果 通过单根带簧反向弯折的有限元分析结果与理论计算和实验结果进行对比,证明了有限元模型的正确性;笔者设计的组合铰链实现了其展开过程平稳且不存在死点的目标. 结论 通过设计多带簧的空间布局和弯折方式可以解决该类铰链在展开过程中存在死点这一问题.

关键词 组合铰链;带簧;稳态弯矩;临界弯矩;太阳帆板;死点

中图分类号 TU35

文献标志码 A

Design and Analysis of Combined Hinges Using Multi-Tape Spring

HAN Zeguang¹, DONG Liqing¹, ZHANG Zhaowei², ZHANG Wei², HAO Ruiqin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110016)

Abstract: The influence of tape spring's space layout and bending mode on the bending moment of tape spring hinges in unfolding process has been researched. A kind of multi-tape spring combined hinge is designed, which solves the problem of the dead point of this kind of hinge in the development process. The bending performance of a single tape spring is analyzed by using ABAQUS analysis software, and the bending moment-angle diagram of the bending process is outputted. Based above mentioned, the combined hinge with three springs is then designed and its bending performance has also been analyzed. The finite element analysis results of reverse bending of single tape spring are compared with the theoretical and experimental results, and the correctness of the finite element model is proved. A more reasonable combination hinge is designed to achieve the goal that the expansion process is stable and there is no dead point. The result has shown that the problem about dead point in the tape spring unfolding process can be solved by adjusting its space layout and bending mode.

收稿日期:2017-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51105258)

作者简介:韩泽光(1967—),男,教授,博士,主要从事工程机械系统设计、智能设计与计算等方面研究.

Key words: combined hinge; tape spring; steady bending moment; critical moment; solar array; dead point

随着航天事业的发展,有关航天方面的研究也在不断地面临着新的挑战,航天任务变得越来越复杂,应用于航天工程的在轨结构也趋于大型化、复杂化。然而,由于运载火箭容积的限制,能够发射到太空的非折展结构体的尺寸无法满足任务的需求,因此各种类型的宇航空间折展机构得到了快速发展和应用。通过折展机构,在卫星发射之前,一些空间体积比较大的结构可以折叠起来收拢于整流罩内,在卫星在轨后,通过动力装置作用展开至工作状态。在空间折展机构中,传统的铰链只具有回转功能,需要附加驱动及锁定装置,这使得展开锁定机构结构复杂,质量和体积都比较大。因此,研制质量轻、体积小的空间折展机构成为当前的一项热门研究课题。

带簧是一种形状类似于钢卷尺的单层开口柱面壳结构^[1],具有特殊的力学性能,可以依靠其弯折后积聚的应变能实现自动展开,并依靠其固有的临界弯矩实现自动锁定,不需要额外设置锁定装置,这使得带簧在航空航天方面备受青睐^[2-4]。由多根带簧组合而成的多带簧组合铰链已广泛应用于大型航天可展机构中,如太阳帆板的展开、空间可展天线、空间展开望远镜、展开平台等。带簧铰链在展开过程中有很强的非线性,为了准确地分析带簧铰链的特性,KYUNG Won Kim等^[5]提出了一种路径识别方法,并对太阳电池阵的展开进行了分析。关富玲^[6]利用 ADAMS 对应用于空间可展天线的带簧铰链进行了建模,并采用数值分析的方法模拟了天线的展开。采用带簧铰链的空间望远镜展开结构也种类繁多,有四支撑杆、八支撑杆等^[7],解决了大型机构在卫星发射前占用空间太大的问题。左玉弟^[8]等人设计的基于带

簧弹簧的新型空间望远镜自展开机构实现了高精度、高可靠性展开。针对传统铰链结构复杂、成本高、体积大等问题,笔者基于带簧特殊的力学性能,设计了一种适用于太阳能帆板展开的关节铰链,并利用 ABAQUS 软件对展开过程进行了分析;研究表明:该铰链集展开与锁定功能于一体,展开过程不存在死点,在航天工程上有一定的应用价值。

1 带簧铰链的类型

目前,带簧主要应用于两种形式的空间可展铰链:单带簧铰链和多带簧组合铰链。图 1(a)所示的单带簧铰链^[9]由单根带簧构成,是柔性铰链最基本的结构形式,是研究的基础^[10-11]。多带簧组合铰链由多根带簧组合而成,如图 1(b)、(c)所示,多带簧组合铰链的展开及锁定性能比单带簧铰链有很大的提升^[12],应用于太阳帆板展开的多为多带簧组合铰链。可以根据工程要求对多带簧组合铰链的结构进行灵活设计。

Chiappetta^[13]提出图 1(b)所示由两根开口方向相对的带簧组合而成的组合铰链,其刚度高,但展开末端存在冲击现象;Pellegrino^[14]在 Chiappetta 的基础上,提出增设一对相互啮合的滚轮的组合铰链(见图 1(c)),具有展开路径可以控制和回转精度高的优点,并在帆板的侧面增加了泡沫块^[15],用来减小铰链展开后的末端冲击,但该结构的体积和质量较大。

为了解决多带簧组合铰链 1 和 2 的末端冲击较大、质量大、结构复杂以及某些铰链展开过程存在死点等问题,笔者对由三根带簧组成的多带簧组合铰链进行了分析,并获得了其最佳空间布局组合,为太空用太阳能帆板展开机构设计奠定了基础。

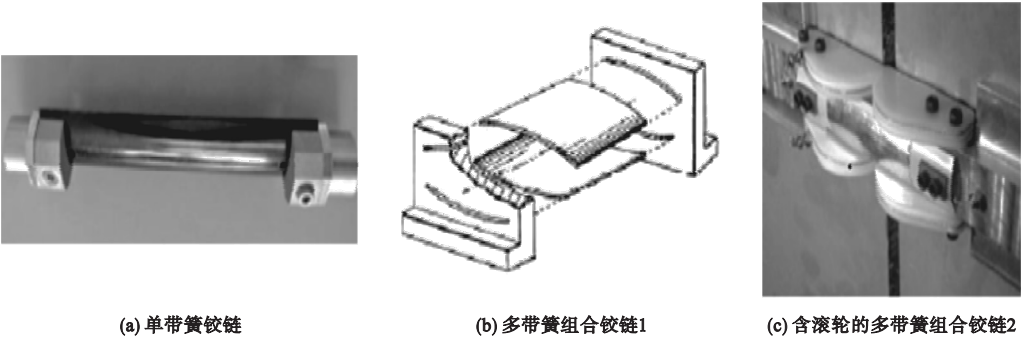


图1 带簧在空间可展铰链中的应用

Fig. 1 Application of tape spring in space deployable hinge

2 单根带簧的仿真与验证

2.1 带簧弯折过程

带簧的弯折可分为两种情况:正向弯折和反向弯折.正向弯折,即带簧的弯折方向与其开口方向相同;反向弯折,即带簧的弯折方向与其开口方向相反.英国剑桥大学的 Pellegrino 教授^[16-17]对单根带簧弯折过程研究后表明:带簧弯折过程的弯矩-转角关系图大致如图2所示,横坐标为带簧的弯折角度 α ,纵坐标为带簧弯折过程产生的弯矩 M .反向弯折时,弯矩值先线性地增加到最大值 M_+^{\max} ,然后突跳到稳态弯矩 M_+^* ;与反向弯折类似,正向弯折时,弯矩值则先线性地增大到最大值 $|M_-^{\max}|$,然后线性地减小到稳态弯矩 $|M_-^*|$,并保持该值不变^[18-20].

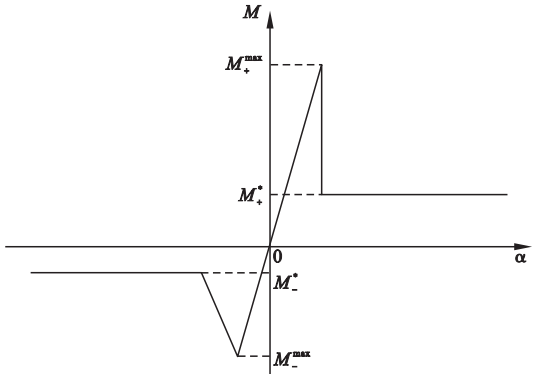


图2 单根带簧的弯矩-转角关系

Fig. 2 Relationship between bending moment and bending angle of single tape spring

带簧弯折前后几何结构示意图如图3所示.

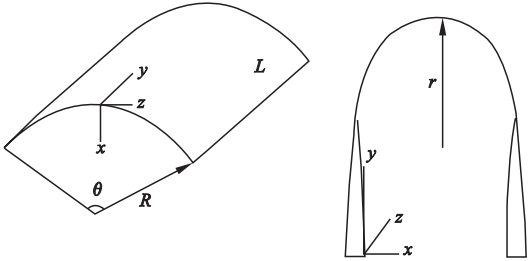


图3 带簧弯折前后几何结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geometric structure before and after bending

图中, R 为横截面圆弧的半径, L 为带簧长度, θ 为横截面圆弧的角度.假设弯折后弯折区域的形状接近于圆柱面,则弯折区域横截面的曲率从 $1/R$ 变为 0 ,长度方向的曲率从 0 变为 $1/r$,且 $r=R^{[18-20]}$.

所以, $\Delta\kappa_x = \pm 1/R, \Delta\kappa_y = \pm 1/R$.

$\Delta\kappa_x$ 和 $\Delta\kappa_y$ 分别为两个方向的曲率变化;当带簧正向弯折时, $\Delta\kappa_x = -1/R$,当带簧反向弯折时, $\Delta\kappa_x = 1/R$.

单位长度的弯矩与纵向和横向的曲率变化有关.

$$M = D(\Delta\kappa_x + \mu\Delta\kappa_y).$$
 (1)

根据弹性力学的薄壳理论,

$$M_x = D(\Delta\kappa_x + \mu\Delta\kappa_y),$$
 (2)

$$M_y = D(\Delta\kappa_y + \mu\Delta\kappa_x).$$
 (3)

式中: M_x 和 M_y 分别为 x 和 y 方向的弯矩; $D = Et^3/12(1 - \mu^2)$, E 为带簧材料的弹性模量, μ 为泊松比, t 为带簧的厚度.将 $\Delta\kappa_x$ 和 $\Delta\kappa_y$ 的值代入到(2)中可以得

$$M_x = D(\pm 1/R + \mu \times 1/R).$$
 (4)

单根带簧展开过程的稳态弯矩公式^[18]为

$$\begin{cases} M_+^* = \frac{Et^3(1+\mu)\theta}{12(1-\mu^2)} \\ M_-^* = \frac{Et^3(\mu-1)\theta}{12(1-\mu^2)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: M_+^* 为带簧反向弯折的稳态弯矩; M_-^* 为带簧正向弯折的稳态弯矩。

2.2 有限元分析

影响单根带簧弯折及展开性能的因素主要有两个方面:

- (1) 带簧的各项几何参数, 包含带簧的长度 L , 带簧横截面圆弧半径 R , 带簧横截面圆弧角度 θ , 带簧的厚度 t ;
- (2) 带簧的材料属性, 包含弹性模量 E , 泊松比 μ 。

借鉴工程实例, 选取 $L = 90 \text{ mm}$, $R = 20 \text{ mm}$, $\theta = 75^\circ$, $t = 0.15 \text{ mm}$, $E = 135.8 \text{ GPa}$, $\mu = 0.35$ 。

笔者首先分别对单根带簧的正向弯折和反向弯折做了分析。由于要得到带簧弯折及展开过程的弯矩值, 所以采取施加转角位移的加载方式, 在带簧的两端分别施加 90° 的转角位移, 实现其弯折至两端平行, 然后卸载实现带簧的自由释放, 进而完全展开。

利用 ABAQUS 软件对单根带簧的弯折和展开过程进行有限元分析得到单根带簧正反向弯折^[3]状态图如图 4 所示。

正向弯折和反向弯折后展开过程弯矩随转角变化的关系如图 5 所示。横坐标为带簧的展开角度 θ , 纵坐标为带簧展开过程的弯矩 RM_1 。以反向弯折为例, 可以看到, 在带簧完全展开之前, 整个展开过程的弯矩值比较平稳, 即稳态弯矩 M_+^* 。在带簧即将完全展开的瞬间, 弯矩值突然增大到一个极限值, 即带簧的临界弯矩 M_+^{\max} , 这与前文提到的 Pellegrino 教授的研究结果相吻合。对比单根带簧正反向弯折的弯矩 - 转角图可知, 带簧反向弯折的稳态弯矩值和临界弯矩值均大于正向

弯折, 反向弯折后驱动带簧展开的能力更大, 展开未了的锁定能力也更大。单根带簧反向弯折的性能要优于正向弯折。

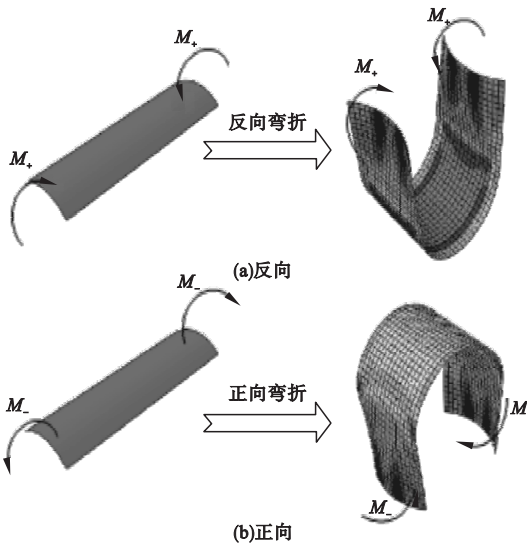


图 4 单根带簧展开及弯折状态图
Fig. 4 The bending and unfolding state diagram of single tape spring

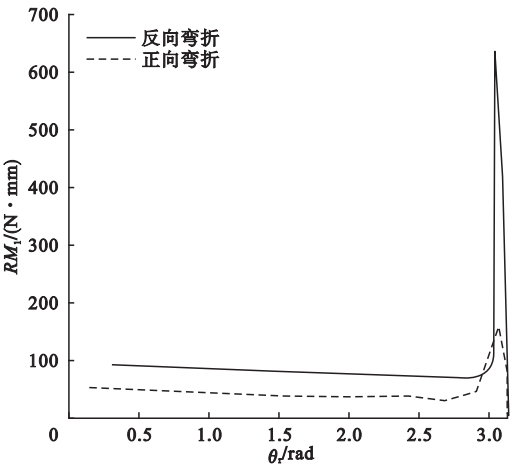


图 5 正反向弯折对比
Fig. 5 Comparison between forward bending and reverse bending

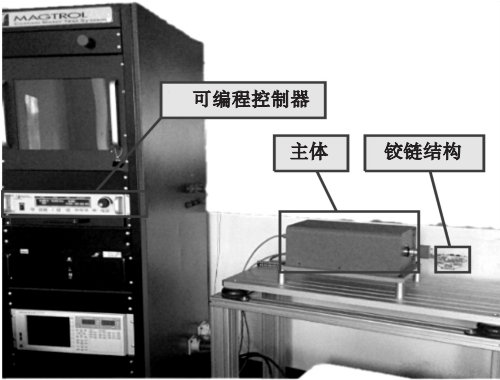
2.3 实验验证

为了进一步验证有限元模型的正确性, 用图 6 所示的试验装置对单根带簧反向弯折进行了实验。该装置为 Magtrol 测功机, 主要包含磁粉刹车器、扭矩传感器和可编程控制器 DSP7002 - 1 - 0 三大部分, 其中, 磁粉刹车器和扭矩传感器是主体。铰链结构通过连

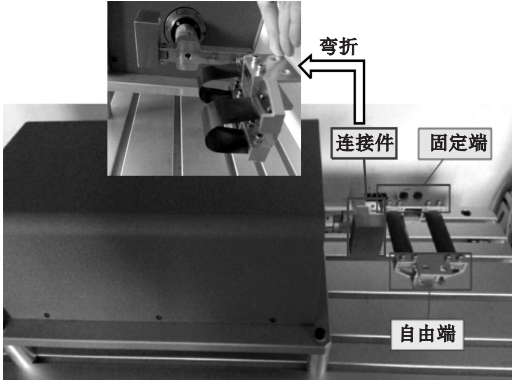
接件、联轴器与主体相连。

图 6 所示的实验装置图中,铰链的一端为固定端,另一端为自由端,即施加转角位移

的一端.手动拨动铰链的自由端使其弯折 180°,此时,铰链的两个端面位于同一个竖直平面,然后缓慢释放实现铰链的展开。



(a) 实验装置总图



(b) 实验示意图

图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental device

由于对单根带簧进行测量时,其弯折及展开过程容易发生与带簧长度方向相垂直方向的扭转,所以,此处为了减小单根带簧的测量误差和不稳定性,选择先进行双根带簧构成的组合铰链弯折及展开过程弯矩的测量,记录实验数据;然后求平均值得到单根带簧弯折及展开过程的弯矩值,进而得到弯矩与转角之间的关系。

实验结果、有限元分析结果与理论计算结果的对比如图 7 所示。

为 $M_{\pm}^* = 76.5 \text{ N} \cdot \text{mm}$,同时,将该带簧的各项参数代入式 (5) 得理论计算值 $M_{\pm}^* = 77 \text{ N} \cdot \text{mm}$. 结合图 7 可以观察到,理论计算结果、有限元分析结果和实验结果的吻合度很高,表明建立的有限元分析模型是正确的。

3 组合铰链的设计与仿真

3.1 组合铰链的设计

由于单根带簧的刚度较差,展开过程的驱动能力和展开后的锁定能力也较弱,在工程中一般都使用由多根带簧组合而成的多带簧组合铰链,这样一方面可以提高组合铰链的展开驱动能力,另一方面可大大提高铰链展开之后抵抗末端冲击的能力^[21-25]。

基于此,笔者设计了一种由三根带簧组合而成的组合铰链,如图 8 所示,该组合铰链中带簧的几何参数与前文一致. 两侧两根带簧的开口方向相同,中间一根带簧的开口方向与两侧两根相反,三根带簧由两个夹持结构固定,夹持机构将与太阳帆板相连. 由于单根带簧正向弯折和反向弯折时的性能有差异,文中的结构可以很好地将正向弯折与反向弯折结合起来,使铰链有更高的刚度和抵抗末端冲击的能力。

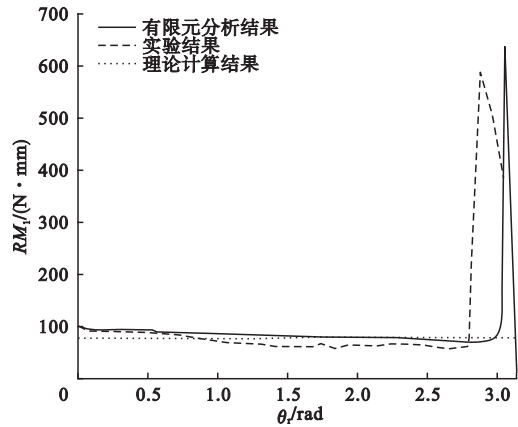


图 7 结果对比图

Fig. 7 Comparison of the results

图中横坐标为带簧的展开角度 θ , 纵坐标为带簧展开过程的弯矩. 有限元分析结果

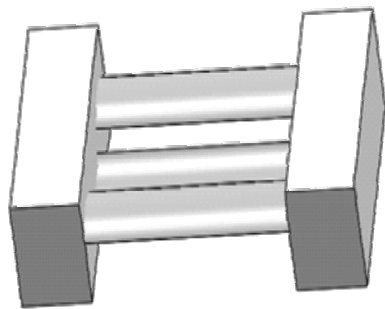


图8 多带簧组合铰链

Fig. 8 Multi-tape spring combined hinge

由于该铰链在工作过程中只有三根带簧发生大变形,所以在 ABAQUS 中可以将模型简化,建立等效模型后进行三根带簧的力学分析.单根带簧的几何参数和材料性能为长度 $L=90\text{ mm}$,横截面半径 $R=20\text{ mm}$,横截面圆弧角度 $\theta=75^\circ$,厚度 $t=0.15\text{ mm}$,材料的弹性模量 $E=135.8\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.35$,三根带簧的空间布局如图9所示.

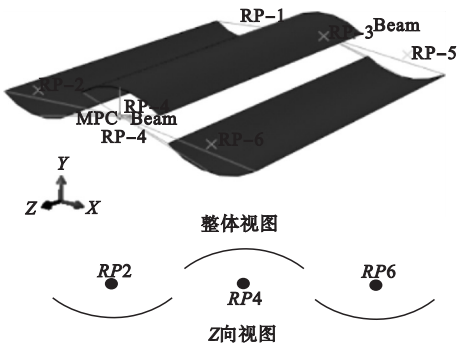


图9 等效模型

Fig. 9 Equivalent model

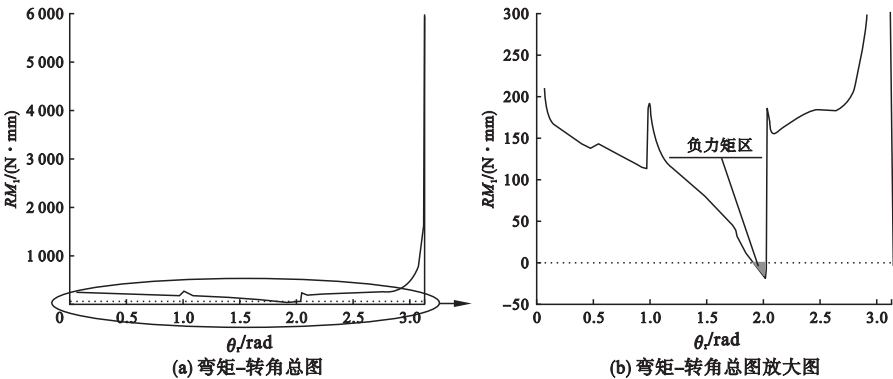


图11 组合铰链弯矩-转角图

Fig. 11 Moment-angle diagram of combined hinge

建立 MPC 节点使 $RP4$ 与一端三个横截面耦合,使 $RP3$ 与另一端的三个横截面耦合,从而可以通过在 $RP3$ 、 $RP4$ 上施加约束来实现对三根带簧的同步约束,实现铰链的弯折和展开.分别在 $RP3$ 、 $RP4$ 上施加绕 X 旋转的 90° 转角位移,实现两侧两根带簧正向弯折,中间一根带簧反向弯折.三根带簧的最终弯折状态如图10所示.

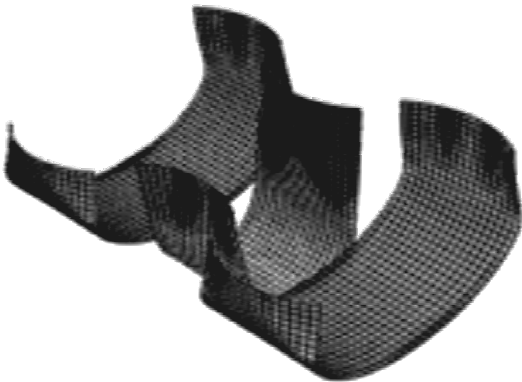


图10 弯折状态图

Fig. 10 The diagram of bending state

图11(a)为该铰链展开过程的弯矩-转角图,图11(b)为图11(a)中靠近 X 轴部分的放大图.由图11(b)可以看到,与单根带簧相比,组合铰链的临界弯矩和稳态弯矩更大,但展开过程存在负力矩,即铰链展开过程的驱动力矩为负,这不利于组合铰链的展开,在铰链上体现为存在一个死点,导致组合铰链展开到死点位置后不再继续展开.鉴于此,需要对组合铰链进行空间布局研究.

3.2 组合铰链的空间布局和弯折方式

多带簧组合铰链在展开过程存在负力矩,导致组合铰链展开过程存在死点,这造成太阳帆板不能完全展开.在单根带簧的数量、材料和形状一定的情况下,影响多带簧组合铰链展开过程弯矩的因素主要有两个:带簧的空间布局和弯折方式.基于3.1节所设计的多带簧组合铰链,若改变三根带簧的空间布局和弯折方式,将可能会获得消除展开过程的负力矩,使组合铰链有更好的展开及锁定性能的一种更为合理的空间布局和弯折方式.

三根带簧有两种空间布局组合方式,如图12所示.除前文提到的弯折方式外,相对应还存在其他三种弯折方式,具体描述如下.

弯折方式1:在空间布局a的基础上,两侧两根带簧反向弯折,中间一根带簧正向弯折(见图13(a));

弯折方式2:在空间布局b的基础上,两侧两根带簧反向弯折,中间一根带簧正向弯折(见图13(b));

弯折方式3:在空间布局b的基础上,两侧两根带簧正向弯折,中间一根带簧反向弯折(见图13(c)).

对于该类组合铰链,为方便表述,将“两侧两根带簧反向弯折,中间一根带簧正向弯折”的情况定义为“反向弯折”;将“两侧两根带簧正向弯折,中间一根带簧反向弯折”的情况定义为“正向弯折”.

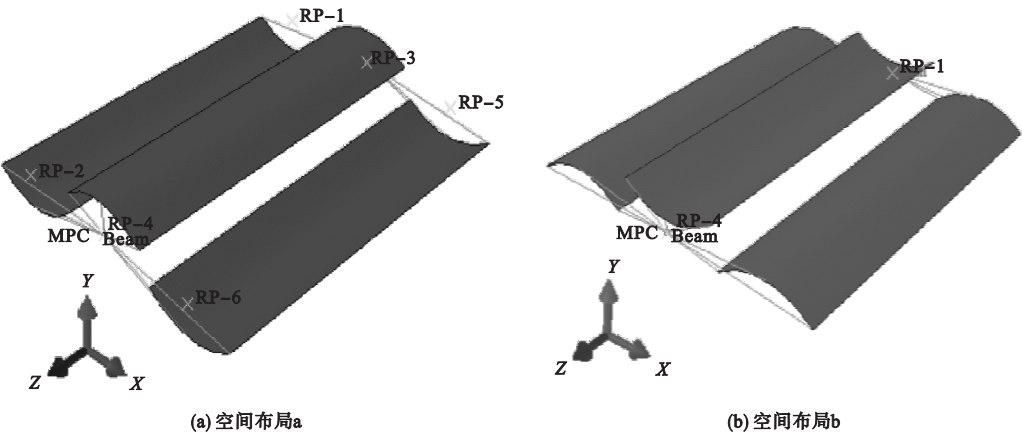


图12 组合铰链的空间布局

Fig. 12 The space layer of combined hinges

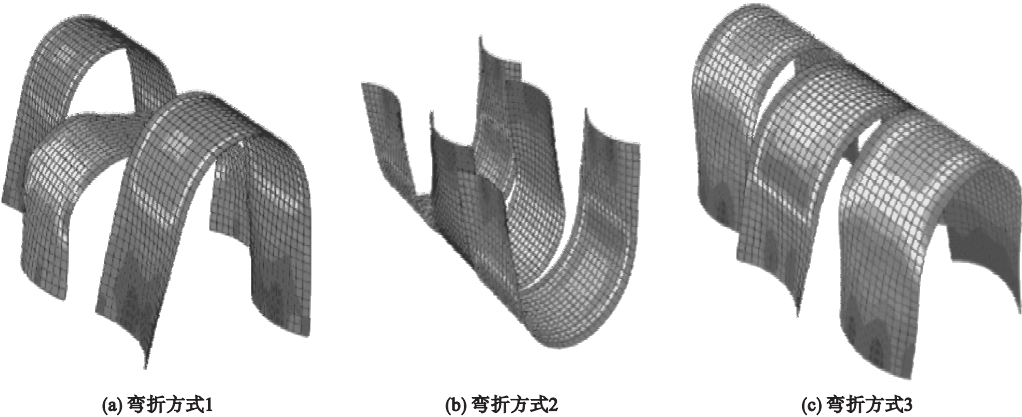


图13 组合铰链三种弯折方式的云图

Fig. 13 Cloud diagram of three bending modes of combined hinges

4 组合铰链的有限元分析实例

按照2.1节中组合铰链的结构参数和材料性能对三种弯折方式建模并分析后的结果

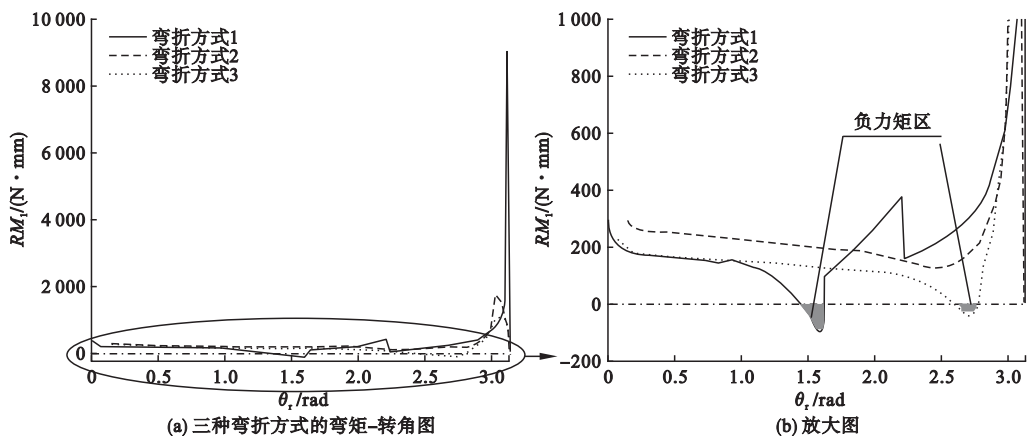


图14 组合铰链的有限元分析

Fig. 14 FEM analysis of combined hinge

从图14可以看出:①在弯折方式1的铰链中,临界弯矩(9 040 N·mm)较大,说明该超弹性铰链的自锁能力更强。但纵观整个展开过程,其弯矩值不够稳定,且在展开角度 $85.5^\circ \sim 93^\circ$ 时弯矩为负值,最小为 -98.114 N·mm,对于组合铰链的展开是非常不利的。②在弯折方式2的铰链中,临界弯矩(1 764 N·mm)较小,且展开过程的弯矩值在三种弯折方式中最为平稳,这与理论分析的“稳态弯矩”吻合,且展开过程不存在负弯矩。③在弯折方式3的铰链中,临界弯矩(1 119 N·mm)最小,且展开过程弯矩值比弯折方式1平稳些。但在展开角度为 $155^\circ \sim 160^\circ$ 同样存在负弯矩,最小为 -50 N·mm。

5 结论

(1)多带簧组合铰链的弯折及展开性能要远远好于单根带簧。

(2)在单根带簧的数量、材料和形状一定的情况下,影响多带簧组合铰链展开过程弯矩的因素是带簧的空间布局和弯折方式。

(3)空间布局方式a的多带簧组合铰链的自锁能力更强,空间布局方式b的多带簧

如图14所示。图14(a)、图14(b)是展开过程弯矩-转角关系对比图,其中图14(b)为图14(a)中靠近X轴部分图像的放大图。

组合铰链的展开过程更为平稳,且基于空间布局b的组合铰链反向弯折时展开过程平稳且不存在死点,是一种更为优化的结构形式,具有较大的工程应用价值。

参考文献

- [1] 翁智远,王远功. 弹性薄壳理论[M]. 北京:高等教育出版社,1986.
(WENG Zhiyuan, WANG Yuangong. Elastic thin shell theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 1986.)
- [2] SOYKASAP O. Deployment analysis of a self-deployable composite boom [J]. Composite structures, 2009, 89(3): 374-381.
- [3] 杨慧,郭宏伟. 三棱柱伸展臂超弹性铰链的力学建模与分析[J]. 宇航学报, 2016, 37(3): 275-281.
(YANG Hui, GUO Hongwei. Mechanical modeling and analysis for hyperelastic hinge in a triangular prism deployable mast [J]. Journal of astronautics, 2016, 37(3): 275-281.)
- [4] MEHRAN M, DOUGLAS A. Deployment analysis of the lenticular jointed antennas on-board the mars express spacecraft [J]. Journal of spacecraft and rockets, 2009, 46(2): 394-402.
- [5] 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.

- [6] ZHANG Tianhao, WU Minger, GUAN Fuling. Deployment study on a single-layer deployable truss structure driven by elastic components [J]. Journal of the international association for shell and spatial structures, 2016, 57(4): 285 – 294.
- [7] 李创, 王伟, 樊学武. 基于带状弹簧的空间望远镜精密展开技术进展[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 85 – 90.
(LI Chuang, WANG Wei, FAN Xuewu. Advance in precision deployment techniques for space telescopes based on tape springs [J]. Chinese journal of optics and applied optics, 2009, 2(2): 85 – 90.)
- [8] ZUO Yudi, JIN Guang, XIE Xiaoguang, et al. Design of the spontaneous deployable mechanism for space telescope based on lenticular tape springs [J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(5): 0518002 – 1 – 0518002 – 6.
- [9] 杨慧. 超弹性铰链的力学建模及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
(YANG Hui. Research on mechanics modeling and experiment of hyperelastic hinges [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [10] JEFFERY D G, MARTIN M M. A new low cost unfurlable beam for small spacecraft applications [R]. University of Colorado: Boulder, 1994.
- [11] 楚中毅, 雷宜安. 主被动复合驱动空间探测柔性伸杆机构的参数匹配[J]. 航空学报, 2014 (1): 268 – 278.
(CHU Zhongyi, LEI Yian. Parameter matching of flexible rod mechanism for active and passive compound drive space detection [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2014 (1): 268 – 278.)
- [12] JIMENEZ O F. Stable device for intervertebral distraction and fusion; US, US8628577 [P]. 2014.
- [13] KAUSAR A. Review on technological significance of photoactive, electroactive, pH-sensitive, water-active, and thermoresponsive polyurethane materials [J]. Journal of macromolecular science: part d-reviews in polymer processing, 2016, 56(6): 606 – 616.
- [14] JIMÉNEZ F L, PELLEGRINO S. Folding of fiber composites with a hyperelastic matrix [J]. International journal of solids & structures, 2012, 49(3): 395 – 407.
- [15] HEALD J, MONTMINY S, MARCOUX E, et al. Ground characterisation of tape-spring deployment mechanism [C]. Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2013.
- [16] DEWALQUE F, COLLETTE J P, BRÜLS O. Mechanical behaviour of tape springs used in the deployment of reflectors around a solar panel [C]. International conference on mechanics and materials in design, 2015.
- [17] MIYAZAKI Y. Deployable techniques for small satellites [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(3): 471 – 483.
- [18] SOFIYEV A H. The vibration and stability behavior of freely supported FGM conical shells subjected to external pressure [J]. Composite structures, 2009, 89(3): 356 – 366.
- [19] GUINOT F, BOURGEOIS S, COCHELIN B, et al. A planar rod model with flexible thin-walled cross-sections. Application to the folding of tape springs [J]. International journal of solids and structures, 2012, 49(1): 73 – 86.
- [20] HOFFAITA S, BRULSA O, GRANVILLE D, et al. Dynamic analysis of the self-locking phenomenon in tape-spring hinges [J]. Acta astronautica, 2010, 66(7/8): 1125 – 1132.
- [21] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
(XU Zhilun. Brief course on elasticity [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.)
- [22] 魏玉卿, 尚仰宏. 空间铰链用卷尺弹簧弯曲过程的有限元分析 [J]. 机械电子工程, 2011, 27(1): 29 – 32.
(WEI Yuqing, SHANG Yanghong. Finite element analysis on bending processes of the tape spring used in space hinges [J]. Electro-mechanical engineering, 2011, 27(1): 29 – 32.)
- [23] MALLIKARACHCHI H M Y C, PELLEGRINO S. Quasi – static folding and deployment of ultrathin composite tape – spring hinges [J]. Journal of spacecraft & rockets, 2011, 48(1): 187 – 198.
- [24] GUINOT F, BOURGEOIS S, COCHELIN B, et al. A planar rod model with flexible thin – walled cross – sections. Application to the folding of tape springs [J]. International journal of solids and structures, 2012, 49(1): 73 – 86.
- [25] MIYAZAKI Y. Deployable techniques for small satellites [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(3): 471 – 483.