

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.055

S-LET 复合型柔性铰链设计与性能研究

邱丽芳 庞大千 陈家兴 阳建宏

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 综合 LET 型铰链与 S 型铰链结构性能特点, 提出了一种 S-LET 复合型柔性铰链, 设计了该铰链的外形结构, 并对其等效刚度进行分析, 推导出铰链弯曲时的等效刚度计算公式。通过对不同尺寸 S-LET 复合型铰链弯曲等效刚度的分析, 得出弯曲等效刚度修正系数, 并验证了该系数的有效性。最后, 通过对 S 型、LET 型及 S-LET 复合型铰链弯曲变形及扭转变形的有限元仿真结果的比较, 得出 S-LET 弯曲变形能力在 S 型与 LET 型铰链之间, 而扭转变形则是三者中最小。

关键词: 平面折展机构; S-LET 复合型铰链; 等效刚度; 修正系数

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0408-05

Design and Performance Analysis of Lamina Emergent Mechanisms S-LET-shaped Flexure Hinge

Qiu Lifang Pang Daqian Chen Jiaying Yang Jianhong

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Flexure hinges are significant components for achieving the action of lamina emergent mechanisms (LEMs). It has always been a challenge to design the suitable flexure hinges. The key problem is how to design and accomplish the flexible hinges with fine performance and high accuracy. Analysis on bending deformation of S-shaped flexible hinge and LET-shaped flexure hinge was compared to find a higher precision flexure hinge which was more stable in working status. A new type of flexure hinge was designed which combined the features of LET-shaped hinge with S-shaped hinge. It was named as S-LET-shaped flexure hinge. The structure of the S-LET-shaped flexure hinge was designed and the bending stiffness equivalent was presented. According to the characteristics of the bending stiffness, the bending stiffness equivalent correction coefficient of S-LET-shaped flexure hinge was proposed. By analyzing of bending equivalent stiffness for different dimensions of S-LET-shaped flexure hinges, the correction coefficient of bending equivalent stiffness was obtained and the effectiveness of bending equivalent stiffness was verified. Finally, the results of the finite element simulation of hinge bending deformation and torsion deformation were compared among S-shaped, LET-shaped and S-LET-shaped hinges. The bending deformation capacity of S-LET-shaped hinge was between S-shaped and LET-shaped hinges and the torsional deformation capacity of S-LET-shaped hinge was the smallest among the three kinds of hinges.

Key words: lamina emergent mechanisms; S-LET-shaped flexure hinge; equivalent stiffness; correction coefficient

收稿日期: 2015-07-27 修回日期: 2015-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475037)

作者简介: 邱丽芳(1966—), 女, 教授, 主要从事机械设计及理论和柔顺机构研究, E-mail: qlf@ustb.edu.cn

通信作者: 阳建宏(1978—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事机械设备状态评价研究, E-mail: yangjianhong@me.ustb.edu.cn

引言

柔顺机构是以柔性铰链代替传统机构运动副,以柔顺元件的弹性变形传递或转换运动和力的一种机构^[1-2]。相比传统的刚性机构,柔顺机构具有体积小、无机械摩擦、无间隙、运动灵敏度高、导向精度高等诸多特点,因此在精密机械和微机械等领域得到广泛应用^[3-4]。柔顺机构的变形主要取决于柔性铰链,而柔性铰链结构特性参数对其变形和性能有重要的影响,为此国内外学者对其做了大量的研究^[5-7]。平面折展机构(Lamina emergent mechanisms, LEMs)是在同一材料平面内加工完成,并实现在平面外运动的柔顺机构^[8-9]。它属于全柔顺机构的范畴,相比柔顺机构具有简化加工工序等优点^[10]。可以实现如四杆机构、滑块机构^[11-12]这些比较简单的运动,还可以实现球面机构^[13]、斯蒂芬森机构^[8]等复杂运动。

柔顺机构的研究重点之一是柔性铰链的研究^[14]。用柔性铰链来替代传统的运动副,可提高机构的运动精度^[15],文献[8,16]用不同形式的 LEMs 的铰链模拟刚性机构的转动副和移动副,文献[17]对部分 LEMs 铰链进行了理论分析,而文献[18]则对这些 LEMs 铰链进行了总结归纳。文献[19]提出了一种梳齿型柔性铰链,在此基础上,文献[20]将其改进并优化得到 S 型柔性铰链,虽然 S 型铰链可实现大角度弯曲变形,但其扭转变形也较大,本文综合 LET 柔性铰链^[21]以及 S 型铰链两者的优点,提出一种复合型柔性铰链,使其具有较大弯曲变形能力的同时其扭转变形较小。

1 S-LET 复合型柔性铰链结构设计

基于 LET 型柔性铰链及 S 型柔性铰链的特点设计了 S-LET 复合型柔性铰链,其结构如图 1 所示,设计的 S-LET 复合型铰链厚度为 h ,总宽度为 w_0 ,总长度为 l_0 。

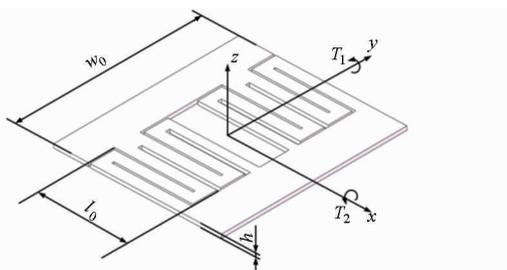


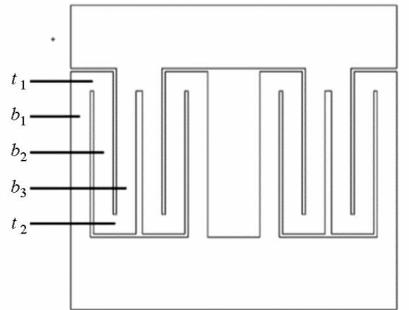
图 1 S-LET 复合型铰链结构尺寸示意图

Fig. 1 Dimension labels for S-LET-shaped flexure hinge

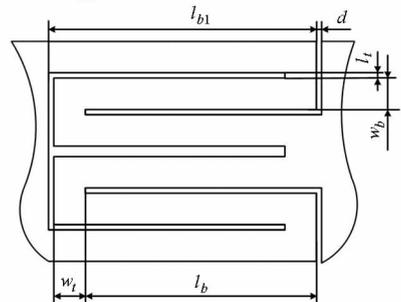
S-LET 铰链在载荷 T_1 作用下变形时,柔顺片段对于不同的应力方向可分为弯曲片段和扭转片

段,用 $b_i (i = 1, 2, \dots, 12)$ 表示弯曲片段,用 $t_j (j = 1, 2, \dots, 8)$ 表示扭转片段,如图 2a 所示。

由于整个铰链以及铰链左右两部分都关于 x 轴对称,所以取铰链的 1/2 作为研究对象。弯曲和扭转片段的尺寸示意如图 2b 所示,除连接柔性杆件的弯曲片段 b_1 长度不同外,其他各个弯曲和扭转片段完全相同。取弯曲片段 b_1 长度为 l_{b1} ,宽度为 w_b ,其余弯曲片段的长度为 l_b ,宽度为 w_b ,扭转片段的长度为 l_t ,宽度为 w_t 。根据几何关系,有 $l_{b1} = l_b + w_t + d$, $l_0 = l_{b1} + d$ 。铰链 x 方向间隙为 d ,如图 2b 所示。



(a) 铰链弯曲与扭转片段示意图



(b) 铰链弯曲与扭转片段尺寸示意图

图 2 S-LET 复合型铰链弯曲扭转片段尺寸示意图

Fig. 2 Dimension labels for bending and torsion segments of S-LET-shaped flexure hinge

2 S-LET 复合型柔性铰链弯曲等效刚度分析

2.1 弯曲等效刚度

利用等效法^[21],将 S-LET 复合型铰链扭转片段和弯曲片段分别等效为相应的扭转弹簧和弯曲弹簧,如图 3 所示。根据弹簧的串并联关系,即可得出整个铰链的弯曲等效刚度 $k_{eq,bend}$,即

$$k_{eq,bend} = \frac{1}{\frac{1}{k_{b1}} + \frac{1}{k_{t1}} + \frac{1}{k_{b2}} + \frac{1}{k_{t2}} + \frac{1}{k_{b3}} + \frac{1}{k_{t3}} + \frac{1}{k_{b4}} + \frac{1}{k_{t4}} + \frac{1}{k_{b5}} + \frac{1}{k_{t5}} + \frac{1}{k_{b6}} + \frac{1}{k_{t6}} + \frac{1}{k_{b7}} + \frac{1}{k_{t7}} + \frac{1}{k_{b8}} + \frac{1}{k_{t8}} + \frac{1}{k_{b9}} + \frac{1}{k_{t9}} + \frac{1}{k_{b10}} + \frac{1}{k_{t10}} + \frac{1}{k_{b11}} + \frac{1}{k_{t11}} + \frac{1}{k_{b12}} + \frac{1}{k_{t12}}}$$

(1)

由于扭转片段 t_1, t_2, \dots, t_8 形状完全相同,故其

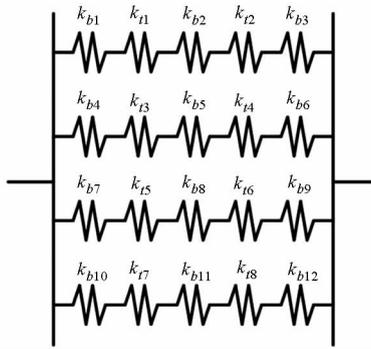


图3 S-LET复合型铰链的等效弹簧刚度示意图

Fig. 3 Associated bending spring schematic of S-LET-shaped flexure hinge

等效刚度也相同记作 k_i 。同理,弯曲片段 b_2, b_3, \dots, b_{12} 的形状完全相同,故其等效刚度也相同,记作 k_b 。代入式(1)化简后得

$$k_{eq, bend} = \frac{4}{\frac{2}{k_b} + \frac{2}{k_t} + \frac{1}{k_{b1}}} \quad (2)$$

其中

$$k_{b1} = \frac{Ew_b t^3}{12l_{b1}} \quad k_b = \frac{Ew_b t^3}{12l_b}$$

$$l_{b1} = l_b + w_t + d$$

$$k_t = w_t t^3 \frac{G}{l_t} \left[\frac{1}{3} - 0.21 \frac{t}{w_t} \left(1 - \frac{t^4}{12w_t^4} \right) \right]$$

式中 G ——剪切模量 E ——弹性模量

2.2 S-LET复合型铰链实例计算与仿真分析

S-LET复合型铰链受到如图1所示 y 轴方向的转矩 T_1 时,有

$$T_1 = k_{eq, bend} \theta_1 \quad (3)$$

式中 T_1 ——作用在柔性铰链上的转矩

θ_1 ——铰链的弯曲角度, rad

选取铍青铜作为 S-LET 复合型铰链的材料,其弹性模量 $E = 128 \text{ GPa}$,泊松比 $\sigma = 0.29$,屈服强度为 $[s_y] = 1170 \text{ MPa}$ 。铰链整体尺寸设定为 $26 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,即铰链长度为 $l_0 = 26 \text{ mm}$,铰链宽度为 $w_0 = 50 \text{ mm}$,铰链厚度为 $h = 0.5 \text{ mm}$,为避免铰链弯曲时铰链片段之间产生干涉现象,选取 $d = 0.5 \text{ mm}$ 。

将参数代入式(2)得到 $k_{eq, bend}$,再将 $k_{eq, bend}$ 代入式(3),得到不同转矩 T_1 所对应的转角 θ_1 ,如表1所示。

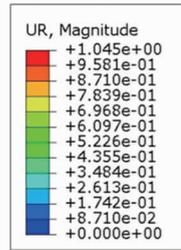
为验证理论计算的正确性,在 ABAQUS 中建立其有限元仿真模型,分别对铰链施加不同的转矩,所得仿真转角值及其与理论计算值的相对误差如表1所示。铰链转角为 $\pi/3$ 时的变形如图4a所示,应力云图如图4b所示。由铰链的应力云图可知,此时铰链的最大应力为 710 MPa ,约为许用应力 $[s_y] = 1170 \text{ MPa}$,因而不会发生塑性变形,符合设计要求。

设转角理论值和仿真值的相对误差为

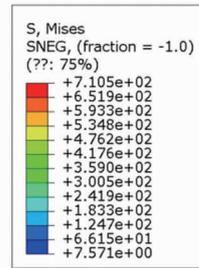
$$\delta_1 = \frac{\theta'_1 - \theta_1}{\theta'_1} \times 100\%$$

式中 δ_1 ——修正前相对误差, %

θ_1 ——转角理论值 θ'_1 ——转角仿真值



(a) 铰链角位移云图



(b) 铰链应力云图

图4 S-LET复合型铰链的角位移及应力云图

Fig. 4 FEA model of S-LET-shaped flexure hinge showing deflected position (radians) and stress under bending condition

由于相对误差大于5%,且均在8%~9%之间,变化较小,并且仿真值与理论值变化趋势基本一致,呈线性关系,因此在铰链的弯曲等效刚度中引入修正系数 a ,对 $k_{eq, bend}$ 进行修正,修正后等效刚度用 $k'_{eq, bend}$ 表示,即

$$k'_{eq, bend} = k_{eq, bend} a$$

则

$$\theta''_1 = \frac{T}{k'_{eq, bend}} \quad \delta'_1 = \frac{\theta'_1 - \theta''_1}{\theta'_1} \times 100\%$$

式中 θ''_1 ——修正后转角理论值

δ'_1 ——修正后相对误差, %

a ——修正系数

修正后的理论转角值与误差如表1所示。可以看到修正后的相对误差均小于1%,说明修正系数 a 有效。一般情况下尺寸不同的 S-LET 复合型铰链会有不同的 a 。经过大量不同尺寸 S-LET 复合型铰链实例计算分析,得到 l_0 在 $20 \sim 30 \text{ mm}$ 区间内 S-LET 复合型铰链的修正系数基本一致,因此选取 $a = 0.931$ 。

为了进一步验证修正系数的有效性,重新选取 $l_0 \times w_0$ 为 $20 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、 $25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 以及 $30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 3种不同尺寸的 S-LET 复合型铰链,铰链材料不变,铰链厚度不变,利用 ABAQUS 进行力学仿真计算,对3种铰链分别施加 $T = 100 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 的转矩,得到不同长度铰链的等效刚度如表2所示。

表 1 铰链转角仿真值、理论值以及误差与修正

Tab. 1 Theoretical and finite element simulated values of bending rotation angle, and their error and correction

参数	转矩/(N·mm)							
	20	40	60	80	100	150	200	300
转角理论值 θ_1/rad	0.088 4	0.176 8	0.265 2	0.353 6	0.442 0	0.663 1	0.884 1	1.320 0
转角仿真值 θ'_1/rad	0.095 9	0.191 9	0.287 8	0.383 7	0.479 7	0.719 4	0.959 1	1.438 0
修正前相对误差 $\delta_1/\%$	8.62	8.63	8.61	8.63	8.62	8.58	8.58	8.96
修正后转角理论值 θ''_1/rad	0.095	0.190	0.285	0.380	0.475	0.713	0.950	1.425
修正后相对误差 $\delta'_1/\%$	0.97	0.99	0.97	0.96	0.97	0.96	0.93	0.90

表 2 铰链刚度理论值、仿真值以及误差与修正

Tab. 2 Theoretical and finite element simulated values of stiffness, and their error and correction

参数	铰链长度 l_0/mm		
	20	25	30
仿真刚度 $k_m/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	0.272 4	0.216 9	0.180 2
理论刚度 $k_{eq,bend}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	0.303 0	0.236 2	0.193 4
修正后理论刚度 $k'_{eq,bend}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	0.282 0	0.219 9	0.181 0
修正前相对误差 $\delta_2/\%$	10.1	8.1	6.8
修正后相对误差 $\delta'_2/\%$	3.4	1.3	0.4

从表 2 可以看出修正后,理论等效刚度与仿真刚度非常接近,说明修正系数 a 对 l_0 为 20~30 mm 的 S-LET 复合型铰链等效刚度的计算有效。

3 S-LET 复合型铰链与 S 型及 LET 型铰链性能比较

为了比较 S 型柔性铰链、LET 型柔性铰链和 S-

LET 复合型铰链的性能优势,对外形尺寸相同的 3 种柔性铰链进行仿真分析。

在 ABAQUS 中建立有限元仿真模型,选取铍青铜作为 3 种柔性铰链材料,其弹性模量 $E = 128 \text{ GPa}$,泊松比 $\sigma = 0.29$,屈服强度为 $[s_y] = 1170 \text{ MPa}$ 。3 种铰链的整体尺寸均设为 $26 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,厚度 $t = 0.5 \text{ mm}$,如图 5 所示。对 3 种铰链加载 y 轴方向的转矩(图 1),所得仿真数据如表 3 所示。加载 x 轴方向的转矩(图 1),所得仿真数据如表 4 所示。

由表 3 可以看出,S-LET 型复合铰链在加载 y 轴方向转矩时的弯曲变形介于 S 型与 LET 型之间,由表 4 可得到,S-LET 型复合铰链在加载 x 轴方向转矩时的扭转变形最小。因此,从扭转变形最小的角度考虑,S-LET 型复合铰链的弯曲变形性能较优。

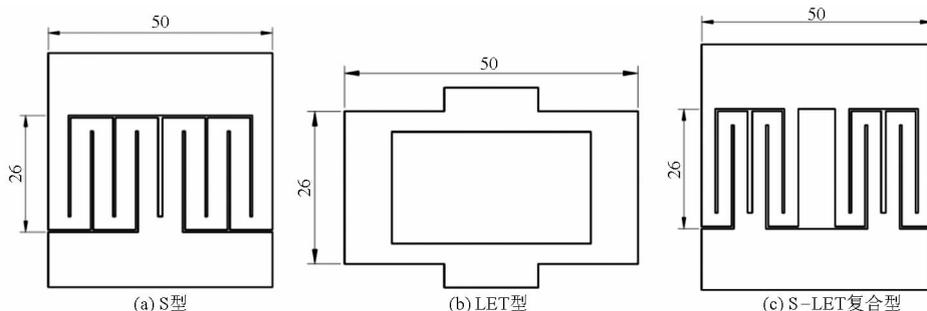


图 5 S 型、LET 型、S-LET 复合型柔顺铰链示意图(单位:mm)

Fig. 5 Schematics of S-shaped, LET-shaped and S-LET-shaped flexure hinges

表 3 3 种铰链弯曲性能比较

Tab. 3 Performance comparison of three flexure hinges under bending condition

参数	转矩/(N·mm)							
	20	40	60	80	100	150	200	300
S-LET 型转角仿真值/rad	0.096 8	0.193 5	0.290 2	0.387 0	0.483 7	0.725 4	0.967 1	1.450 0
S 型转角仿真值/rad	0.217 0	0.434 1	0.651 1	0.868 1	1.085 0	1.626 0	2.167 0	3.244 0
LET 型转角仿真值/rad	0.066 5	0.133 0	0.199 3	0.216 9	0.265 6	0.496 7	0.661 1	0.988 2

表 4 3 种铰链扭转性能比较

Tab. 4 Performance comparison of three flexure hinges under torsion condition

参数	转矩/(N·mm)							
	20	40	60	80	100	150	200	300
S-LET 型转角仿真值/rad	0.022 0	0.043 6	0.064 6	0.084 8	0.104 5	0.152 1	0.198 7	0.290 2
S 型转角仿真值/rad	0.071 2	0.142 0	0.212 0	0.281 1	0.349 5	0.517 4	0.680 9	0.993 7
LET 型转角仿真值/rad	0.031 3	0.062 2	0.092 4	0.121 5	0.150 1	0.219 1	0.278 1	0.381 2

4 结论

(1) 设计了一种柔性铰链——S-LET 复合型铰链,并对铰链的弯曲等效刚度进行分析,推导了弯曲等效刚度的计算公式,并对实例进行了理论计算和有限元仿真分析。通过对不同尺寸 S-LET 复合型铰链的仿真分析得到弯曲等效刚度的修正系数,

并验证了该修正系数的有效性。

(2) 通过有限元仿真分析,对 S 型、LET 型、S-LET 型 3 种铰链进行了弯曲性能和扭转性能的比较。S-LET 型复合铰链的弯曲能力介于 S 型与 LET 型之间,而扭转变形则是 3 种铰链中最小的,说明 S-LET 型复合铰链在保证大弯曲变形的同时,其扭转变形较小,达到了设计目的。

参 考 文 献

- 胡俊峰,徐贵阳,郝亚洲. 基于动态特性的复合桥式微动平台优化设计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 306-312.
Hu Junfeng, Xu Guiyang, Hao Yazhou. Optimization design of a compound bridge-type micro-platform based on dynamic characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 306-312. (in Chinese)
- Howell L L. Compliant mechanisms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- 黄则兵. 柔顺机构的研究现状及其在仿生领域的应用的展望[D]. 西安:西北工业大学, 2005:1-4.
Huang Zebing. Present state of compliant mechanism and its future application in bionics [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005:1-4. (in Chinese)
- Rajesh Loharuka, Peter J Hesketh. Design of fully compliant, in plane rotary, bistable micromechanisms for MEMS applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 134(28): 231-238.
- Wu Y F, Zhou Z Y. Design calculations for flexure hinge[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(8): 3101-3106.
- Yong Y K, Lu T F, Handley D C. Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations[J]. Precision Engineering, 2008, 32(2): 63-70.
- Midha A, Howell L L, Norton T W. Limit positions of compliant mechanisms using the pseudo-rigid-body model concept[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(1): 99.
- Jacobsen J O, Howell L L, Magleby S P. Components for the design of lamina emergent mechanisms [C] // ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition(IMECE 2007), 2007:165-174.
- Jacobsen J O, Winder B G, Howell L L, et al. Lamina emergent mechanisms and their basic elements[J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2010, 2(1): 011003-011003-9.
- 王雯静,余跃庆,王华伟. 柔顺机构国内外研究现状分析[J]. 机械设计, 2007, 24(6): 1-4.
Wang Wenjing, Yu Yueqing, Wang Huawei. Analysis on the research status of compliant mechanism at home and abroad[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(6): 1-4. (in Chinese)
- Gollnick P S, Black J D, Savage E E, et al. A preliminary study of actuation approaches for lamina emergent mechanisms[C] // ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2011: 191-202.
- Aten Q T, Zirbel S A, Jensen B D, et al. A numerical method for position analysis of compliant mechanisms with more degrees of freedom than inputs[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2011, 133(6): 061009-061009-9.
- Wilding S E, Howell L L, Magleby S P. Spherical lamina emergent mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 49: 187-197.
- 于靖军,裴旭,毕树生,等. 柔性铰链机构设计方法的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 2-13.
Yu Jingjun, Pei Xu, Bi Shusheng, et al. State-of-arts of design method for flexure mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 2-13. (in Chinese)
- 田浩,余跃庆. 柔顺关节并联机器人动力学建模与控制研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 278-283.
Tian Hao, Yu Yueqing. Dynamics and control of parallel robot with compliant joints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 278-283. (in Chinese)
- Winder B G, Magleby S P, Howell L L. A study of joints suitable for lamina emergent mechanisms[C] // ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2008, 2: 339-349.
- Samuel E Wilding, Larry L Howell, Spencer P Magleby. Introduction of planar compliant joints designed for combined bending and axial loading conditions in lamina emergent mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 56: 1-15.
- Isaac L Delimont, Spencer P Magleby, Larry L Howell. Evaluating compliant hinge geometries for origami-inspired mechanisms [C] // ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference(IDETC/CIE), 2014, 5B:34376.
- 邱丽芳,孟天祥,张九俏,等. 梳齿形柔性铰链的设计与分析[J]. 东北大学学报, 2014, 35(9): 1316-1320.
Qiu Lifang, Meng Tianxiang, Zhang Jiuyao, et al. Design and analysis of comb-shaped flexure joint[J]. Journal of Northeastern University, 2014, 35(9): 1316-1320. (in Chinese)
- 邱丽芳,孟天祥,张九俏,等. 平面折展机构 S 形柔性铰链设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 324-328.
Qiu Lifang, Meng Tianxiang, Zhang Jiuyao, et al. Design and test of lamina emergent mechanisms S-shaped flexure hinge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 324-328. (in Chinese)
- Jacobsen J O, Chen G, Howell L L, et al. Lamina emergent torsional (LET) joint [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(11): 2098-2109.