doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.051

Nested – LET 柔性铰链设计与性能分析

邱丽芳 刘宁宁 陈明坤 岳 鑫 (北京科技大学机械工程学院,北京 100083)

摘要:针对平面折展机构中柔性铰链在承受拉压载荷时变形大、转动精度差等问题,基于外 LET 铰链和嵌套结构的方法,提出了一种 Nested – LET 柔性铰链。设计了该铰链的结构,利用等效弹簧模型推导了其弯曲及拉压等效刚度计算公式并给出了修正系数。通过设计实例的理论计算和仿真分析,验证了理论分析的正确性和设计的可行性。比较了相同尺寸的 Nested – LET 与外 LET 铰链的弯曲性能与抗拉性能,结果表明,Nested – LET 铰链弯曲刚度增加了 1.5 倍,拉压刚度提升了 30 倍,且转动中心漂移量有所下降。最后,通过拉伸实验验证了分析的正确性。 关键词: Nested – LET 柔性铰链;等效刚度;抗拉压性能;转动精度

中图分类号: TH122 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)05-0420-07

Design and Performance Analysis of Nested – LET Flexure Hinge

QIU Lifang LIU Ningning CHEN Mingkun YUE Xin

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

Abstract: Flexibility and accuracy are two key factors that determine the performance of compliant joints, and also directly affect the application of compliant mechanisms. In fact, the two factors are mutually restricted. In order to improve the axial stiffness and rotation accuracy while maintaining good bending performance of joints in lamina emergent mechanisms (LEMs), a new type compliant joint based on the structure of lamina emergent torsional (LET) joint was proposed, and its structure was designed, named as Nested – LET. The close-form model of the Nested – LET was given, and the equivalent stiffness of bending and tensile-compressive was derived. The modified coefficients were presented to optimize the results, respectively. Comparing the result of theoretical calculation with finite element analysis (FEA), the theoretical formulas and modified coefficients were verified. Comparisons between the Nested – LET and outside LET joints with the same overall dimensions were made. The FEA results showed that bending stiffness of Nested – LET joint was 1.5 times larger, but tensile-compressive stiffness was increased by 30 times, and center-shift was reduced by 13%. Two corresponding joints were made of beryllium bronze material. Through the anti-tensile test, it can be concluded that the FEA results were in good agreement with the experimental results. The Nested – LET joint improved accuracy of the joint, and it can be used in the design of high-precision compliant joint.

Key words: Nested - LET flexure joint; equivalent stiffness; tensile-compressive performance; rotational precision

0 引言

柔顺机构主要依靠柔性单元的变形来实现全部 运动和功能,同时实现运动、力和能量的传递和转 换,为实现高速、精密、微型等对机构的高性能要求 提供了新方法^[1]。经过国内外学者多年的研究,柔 顺机构在理论设计及运动分析方面有了一定的发 展^[2],主要应用于微机电系统(MEMS)^[3]、航空航天 设备^[4]、仿生机器人^[5-6]及医疗仪器^[7]等领域。

在柔顺机构中,为实现机构的正常运动并保证 稳定性,需要依靠柔性铰链这一最小单元,可从根本 上克服传统机构中存在的固有缺陷。近年来,柔性 铰链的设计及应用得到了广泛研究。HOWELL 等^[8-10]在铰链结构上进行改善以提高性能以外,还

收稿日期: 2018-01-12 修回日期: 2018-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475037)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-GF-17-B23) 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

421

(2)

(6)

利用组合^[11]、去除材料^[12]、静态平衡^[13]等方法有效 地减少了铰链的弯曲刚度,并且使约束方向刚度增 大。LIU等^[14]对单轴柔性铰链进行拓扑优化,利用 多孔洞域结构提高其综合性能。PEI等^[15]针对 Cartwheel型柔铰提出了两个伪刚体模型,并通过有 限元分析对模型结果进行了验证。CHEN等^[16-18] 设计了多种切口形状的柔性铰链,并建立了适合各 种拐点柔性铰链的理论模型^[19]。邱丽芳等^[20-23]从 构型角度考虑,设计了Triple_LET、Deform_X型、双 C型、平面外折展(OD-LEJ)柔性铰链等。

柔性铰链的设计是影响柔顺机构应用的关键, 柔度和精度又是决定柔性铰链性能的主要因素。实 际运动过程中,铰链转角增大的同时,抗拉压性能变 差、转动轴线漂移、寄生运动等缺陷也成为了不可避 免的问题,导致机构运动精度的下降。为提高精度, 本文设计 Nested - LET 柔性铰链,推导其弯曲及拉 压等效刚度理论计算公式,并定义修正系数,加工 Nested - LET 及 LET 实物模型,通过仿真分析及拉 伸实验来验证铰链的性能,为高精度铰链的设计提 供一种新思路。

1 Nested - LET 铰链结构设计及理论分析

1.1 Nested - LET 铰链结构设计

Nested - LET 柔性铰链是基于外 LET 结构的 柔性铰链,结合嵌套思想,在外 LET 铰链内部使用 弯曲片段贯穿连接 LET 柔性片段,在其弯曲性能 下降不明显的前提下,大幅度提高了柔性铰链的 抗拉压性能。整体结构关于 *x* 轴、*y* 轴对称,在产 生弯曲变形的同时可改善外 LET 铰链由于中空结 构造成的转动中心漂移,从而提高运动精度和抗 拉压性能。Nested - LET 柔性铰链的结构及受载 情况如图 1 所示。



图 1 Nested - LET 柔性铰链结构及其受载情况 Fig. 1 Structure of Nested - LET joint and its loading condition

根据柔性片段的主要变形,分为2种扭转片段 和4种弯曲片段,其余部分视为刚性连接。在如图1 所示转矩作用下,铰链绕转轴发生弯曲变形。

1.2 Nested - LET 铰链弯曲等效刚度

基于文献[8]提出的等效法,建立 Nested - LET

柔性铰链的弯曲等效弹簧模型,如图2所示。



图 2 Nested - LET 柔性铰链弯曲等效弹簧关系示意图 Fig. 2 Corresponding spring model diagram of Nested - LET joint

根据弹簧的串并联关系可得出 Nested - LET 柔 性铰链的弯曲等效刚度为

$$k_{\rm eq, bend} = \frac{2k_{\rm t1}k_{\rm b1}}{2k_{\rm b1} + k_{\rm t1}} + \frac{2k_{\rm b2}k_{\rm b3}(k_{\rm t2} + k_{\rm b4}) + k_{\rm b3}k_{\rm b4}k_{\rm t2}}{4k_{\rm t2}k_{\rm b2} + (2k_{\rm b2} + k_{\rm t2})(2k_{\rm b4} + k_{\rm b3})}$$
(1)

式中 ku--柔性铰链扭转片段的等效刚度

 $k_{\rm ti} = \frac{K_i G}{L_i}$ (*i* = 1,2)

lu---柔性铰链扭转片段长度

G——材料剪切模量

*K*_{*i*}为与扭转片段横截面几何特征相关的参数, CHEN 等^[24]提出的 *K*_{*i*}近似方程不受截面宽厚比的 影响,能保证较高的精度,表达式为

$$K_{i} = \frac{(1.17w_{ii}^{2} + 2.191tw_{ii} + 1.17t^{2})(2t^{3}w_{ii}^{3})}{(w_{ii}^{2} + 2.609tw_{ii} + t^{2})(7t^{2} + 7w_{ii}^{2})}$$
(3)
式中 w_{ii} — 柔性铰链扭转片段宽度

----柔性铰链厚度

柔性铰链弯曲片段等效刚度用 k_{bi}表示,可将弯曲片段的变形视为受转矩下悬臂梁自由端产生的最大挠度,即

$$k_{\rm bi} = \frac{EI_{\rm bi}}{l_{\rm bi}} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \tag{4}$$

式中 E----材料弹性模量

*I*_{bi}——弯曲片段惯性矩

l_{bi}——弯曲片段长度

1.3 Nested - LET 铰链拉压等效刚度

当 Nested - LET 柔性铰链在受到如图 1 所示的 x 轴方向拉力或压力 F 时,柔性片段分别发生拉压 及弯曲变形,将拉压片段和弯曲片段分别等效为对 应的拉压弹簧和弯曲弹簧。根据弹簧的串并联关系 可得,Nested - LET 柔性铰链的拉压等效刚度为

$$k_{\rm eq,tens} = \frac{2k_{\rm t1,a}k_{\rm b1,a}}{2k_{\rm b1,a} + k_{\rm t1,a}} + \frac{k_{\rm b3,a}(k_{\rm t2,a} + k_{\rm b4,a})}{2(k_{\rm b4,a} + k_{\rm t2,a}) + k_{\rm b3,a}}$$
(5)

其中 $k_{bi,a} = \frac{Ew_{bi}t}{l_{bi}}$ (*i*=1,3,4)

w_{bi}——柔性铰链拉压力片段宽度

k_{u,a}——柔性铰链弯曲片段的等效刚度

利用自由端受力的柔性悬臂梁的伪刚体模型进行计算。伪刚体模型中扭簧的刚度系数 k_{fg}可表示为

$$k_{\rm fg} = \gamma K_{\theta} \, \frac{EI}{L} \tag{7}$$

式中 γ——特征半径系数,取0.85

K_θ——刚度系数,取2.65

I——弯曲梁惯性矩

L——弯曲梁长度

在垂直梁长度方向施加力 F, 伪刚体杆产生角 度为 Θ 的变形, 弯曲片段的挠度 d 可表示为

$$d = \gamma L \sin \Theta \tag{8}$$

分析扭簧处的受力关系,可得

$$F\gamma L\cos\Theta = k_{\rm fg}\Theta \tag{9}$$

整理得

$$\frac{\Theta}{\cos\Theta} = \frac{F\gamma L}{k_{\rm fg}} = k \tag{10}$$

因为伪刚体模型角 Θ 极小, $\Theta \approx \sin \Theta$, 则

$$\frac{\Theta}{\cos\Theta} = \frac{\sin\Theta}{\cos\Theta} = k \tag{11}$$

利用三角函数关系可得到

$$\sin\Theta = \frac{k}{\sqrt{k^2 + 1}} \tag{12}$$

综合式(7)~(12),得

$$d = \gamma L \sin \Theta = \frac{F \gamma L^3}{\sqrt{F^2 L^4 + K_{\theta}^2 E^2 I^2}}$$
(13)

由于 $F^2L^4 \ll K^2_{\theta}E^2I^2$,因此忽略 F^2L^4 ,整理 式(13),可得

$$d = \frac{F\gamma L^3}{K_{\theta} EI} \tag{14}$$

因此柔性铰链在拉压载荷作用下弯曲片段的等 效刚度 k_{u,a}可表示为

$$k_{ii,a} = \frac{F}{d} = \frac{K_{\theta} E I_i}{\gamma L_i^3} \quad (i = 1, 2)$$
(15)

式中 *I_i*——弯曲片段截面惯性矩 *L_i*——弯曲片段长度

2 实例计算与有限元分析

2.1 设计实例计算

Nested-LET 柔性铰链的尺寸示意如图 3 所示。



图 3 Nested - LET 柔性铰链尺寸示意图 Fig. 3 Dimension sketch of Nested - LET joint

本文中设计分析的铰链厚度 t 均为 0.5 mm。 所选材料为铍青铜,其弹性模量 E = 128 GPa,泊松 比 $\sigma = 0.29$,屈服强度为[s_y] = 1 170 MPa。设计 Nested – LET 柔性铰链的尺寸如表 1 所示。将铰链 尺寸参数分别代入式(1)和式(5)可得, $k_{eq,bend} =$ 0.193 2 N·m/rad, $k_{eq,tens} = 3.1475$ N·m。

表 1	Ne	sted –	LET	柔性	ŧ铰链	基本	尺寸	参数	Į
Tab.	1	Dime	nsions	of	Nesteo	d – L	ЕТ	ioint	

							•				
参数	l	l_{t1}	l_{i2}	$l_{\rm b1}$	$l_{\rm b2}$	$l_{\rm b3}$	w_{t1}	w _{t2}	$w_{\rm b1}$	$w_{\rm b2}$	$w_{\rm b3}$
数值	50	13	20.5	25	5	8	2	1	2	1	1

2.2 有限元分析

2.2.1 弯曲等效刚度的有限元分析

利用 Abaqus 有限元软件建立 Nested - LET 柔 性铰链设计实例的有限元模型(单元类型为 Shell)。 当转矩为 0.12 N·m 时,铰链转角为 0.68 rad(约为 40°)时的角位移云图如图 4a 所示,应力云图如 图 4b所示。

由图 4b 可知,此时 Nested - LET 铰链的最大应 力为 1 013 MPa,小于屈服强度[s_y] = 1 170 MPa,因 而不会发生塑性变形,满足设计要求。

Nested - LET 铰链受载情况如图 1 所示,其

力-变形关系为

$$T = k_{\text{eq head}} \theta \tag{16}$$

mm

式中 T——作用在柔性铰链上的转矩,N·m

θ——铰链扭转角理论值, rad

不同转矩作用下铰链转角仿真值、理论值曲线 如图 5 所示。设理论计算与仿真分析的相对误差为

$$\delta = \left| \frac{\theta - \theta'}{\theta'} \right| \times 100\% \tag{17}$$

式中 θ'——铰链扭转角仿真值, rad

根据式(17)可得到不同转矩下的相对误差,由 式(17)及图5得到相对误差大于5%。

因此在弯曲等效刚度中引入修正系数 α, 对



图 4 Nested - LET 柔性铰链角位移及应力云图 Fig. 4 FEA model of Nested - LET joint showing deflected position and stress under bending condition





Fig. 5 Trend curves of simulated, theoretical and corrected bending angles of Nested – LET joint under different bending moments

$$k_{\text{eq,bend}}$$
进行修正,修正后等效刚度表示为

$$k'_{\rm eq, bend} = \alpha k_{\rm eq, bend} \tag{18}$$

一般情况下,修正系数 α 会随着铰链尺寸和材料的不同而有所变化,经过大量实例分析,取修正系数 $\alpha = 0.9$ 时可保证在受转矩情况下转角误差最小。修正后,不同转矩作用下铰链转角曲线如图 5 所示。由图 5 可得,Nested – LET 铰链转角的仿真值与修正后的理论值基本一致,验证了 Nested – LET 柔性铰链弯曲等效刚度理论公式的正确性。

2.2.2 拉压等效刚度的有限元分析

与弯曲刚度的有限元分析方法类似,分别对铰

链施加不同的拉力。拉力为 100 N 时 Nested - LET 柔性铰链的位移变形量云图如图 6 所示,此时 α 方 向位移变形量为 0.037 93 mm。为保证在受拉力情 况下位移误差最小,取修正系数 $\alpha' = 0.838$,绘制不 同拉力下与位移变形量仿真值、理论值与修正值曲 线,如图 7 所示。由图 7 可看出,Nested - LET 柔性 铰链发生拉伸变形过程中产生的仿真位移变形与理 论修正位移基本重合,说明修正系数 α' 有效。



图 6 Nested - LET 柔性铰链位移变形量仿真云图 Fig. 6 Tensile deformation of Nested - LET joints obtained by FEA



图 7 Nested - LET 柔性铰链在不同拉力下位移 变形量理论值、修正值与仿真值变化曲线

Fig. 7 Trend curves of simulated, theoretical and corrected displacement deformation of Nested – LET joint under different tensions

铰链转角、位移变形仿真值均大于理论值,其误 差产生的主要原因有:①为便于分析,弯曲等效刚度 模型有部分简化。②建立拉压等效刚度求解方程 时,均使用自由端受力的柔性悬臂梁的伪刚体模型, 实际各柔性片段的边界条件存在差异性。③理论计 算时,代入公式的相应片段长度为固定值,但在运动 过程中,柔性铰链各片段连接处的变形为弯曲、扭转 及拉压载荷共同作用产生,此部分界限的模糊性造 成各片段长度为非固定值。

3 Nested – LET 铰链与外 LET 铰链性能比较

为了进一步说明 Nested - LET 柔性铰链各项性

能,将其与外形尺寸相同的外 LET 铰链进行比较。 外 LET 铰链结构尺寸示意图如图 8 所示。尺寸分别 为 $l_{b1} = 25 \text{ mm}, w_{b1} = 2 \text{ mm}, l_{u} = 13 \text{ mm}, w_{u} = 2 \text{ mm}.$





在 Abaqus 中建立有限元仿真模型,选取铍青铜 作为材料,其弹性模量 E = 128 GPa,泊松比 $\sigma =$ 0.29,屈服强度为[s_y] =1170 MPa。对 Nested – LET 及外 LET 铰链的抗拉压性能(以拉力为例)、弯曲性 能和转动中心漂移进行分析比较。

图 9 为不同拉力作用下外 LET、Nested - LET 铰链的位移变形量仿真曲线, Nested - LET 铰链位移 变形量远小于外 LET。当拉力为 100 N 时,外 LET 铰链的位移变形量为 Nested - LET 铰链的 30 倍, Nested - LET 铰链的抗拉压性能得到了大幅度提 升。图 10 为不同转矩作用下外 LET、Nested - LET 铰链的转角仿真值对比, Nested - LET 铰链弯曲刚 度增加了 1.5 倍,弯曲性能略有下降。



under different tensions

转动精度是衡量柔性铰链性能的指标之一,一般用转动中心的位置表示。Nested – LET 铰链为完 全对称型,理想状态下转动中心位置保持在对称轴 位置,但在柔性铰链发生弯曲变形的过程中,其转动 并不是集中在某一点。随着转角不断地变化转动中 心会发生漂移,漂移量的增加会影响转动精度,铰链 弯曲变形后侧视图如图 11 所示。将转动中心位置 标为(*x_e*,*z_e*),由铰链运动特性可知 *z_e* = 0, *x_e*计算









式为

$$x_c = l_{b1} + \Delta x + \frac{\Delta z}{\tan\theta}$$
(19)

式中 161 一铰链总长度

Δx——铰链转动后末端在 x 方向的位移

Δz——铰链转动后末端在z方向的位移

当铰链转角为 30°时,由式(19)可得,外 LET 柔 性铰链转动中心漂移量为 0.405 mm,Nested – LET 柔 性铰链转动中心漂移量为 0.352 mm,Nested – LET 较 好地保证了铰链在转动过程中的转动精度。

4 实验验证

为验证所设计铰链的抗拉性能,用铍青铜加工 外 LET 和 Nested - LET 柔性铰链,如图 12 所示。由 于加工制造误差,外 LET 铰链实际尺寸为24.97 mm × 49.89 mm,Nested - LET 铰链实际尺寸为 24.91 mm × 50.21 mm。使用 UTM 系列万能实验机,选择拉伸 楔形夹具将铰链两端夹紧,控制该仪器对试样一端 进行拉伸,实验速度为 0.1 mm/min。通过力传感器 实时采集试样铰链受到的拉力,结果由计算机输出。



图 12 外 LET、Nested - LET 加工实物图 Fig. 12 Fabricated prototypes of outside LET and Nested - LET joints

拉伸实验台如图 13a 所示,图 13b、13c 分别为

拉力为 30 N 时外 LET 铰链及 Nested – LET 柔性铰链的实验结果。为了更清晰地观察位移变形量, 使用数显游标卡尺测量 30 N 拉力作用下各铰链的 拉伸变形,由图 13 可得,外 LET 铰链变形量为 0.43 mm, Nested – LET铰链变形量为 0.02 mm,外 LET 变形量是 Nested – LET 的 21.5 倍。2 种铰链 在不同拉力作用下的仿真与实验结果如图 14 所 示,实测与仿真结果基本一致,验证了分析的正确 性,但也存在一定的误差,主要由加工制造误差、 设备实验误差、测量误差等各种因素造成。实测 结果进一步验证了 Nested – LET 铰链的抗拉性能 得到了大幅度改善。







图 14 外 LET、Nested - LET 仿真、实验结果对比 Fig. 14 Comparison of FEA and experimental results between outside LET and Nested - LET joints

5 结论

(1)提出了一种 Nested - LET 柔性铰链,设计了 该柔性铰链的结构,分别对其弯曲等效刚度、拉压等 效刚度进行了理论公式的推导,分析了误差产生的 原因并给出对应的修正系数。通过实例的理论计算 与有限元仿真分析验证了理论公式与修正系数的准 确性。

(2)对 Nested - LET 柔性铰链与外形尺寸相同 的外 LET 柔性铰链的性能进行了对比与分析,结果 表明 Nested - LET 柔性铰链在弯曲性能下降不明显 的情况下,拉压刚度得到很大提升,转动中心漂移量 有所下降。通过对两柔性铰链进行拉伸实验验证了 分析的正确性。因此,嵌套式构型的铰链能够有效 改善柔性铰链的抗拉压性能,缩小转动中心漂移量, 是一种精度较高的柔性铰链。

参考文献

- 1 HOWELL L L. Compliant mechanisms [M]. New York: Wiley, 2001.
- 2 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)
- 3 VEROTTI M, DOCHSHANOV A, BELFIORE N P. Compliance synthesis of CSFH MEMS-based microgrippers [J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(2):022301-1-10.
- 4 ZIRBEL S A, TOLMAN K A, TREASE B P, et al. Bistable mechanisms for space applications [J]. Plos One, 2016, 11(12): e0168218.
- 5 HOFFMANN M, SIMANEK J. The merits of passive compliant joints in Legged locomotion: fast learning, superior energy efficiency and versatile sensing in a quadruped robot [J]. Journal of Bionic Engineering, 2017, 14(1):1-14.
- 6 王国彪,陈殿生,陈科位,等. 仿生机器人研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(13):27-44.
 WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13):27-44. (in Chinese)
- 7 DODGEN E, STRATTON E, BOWDEN A, et al. Spinal implant development, modeling, and testing to achieve customizable and nonlinear stiffness [J]. Journal of Medical Devices, 2012, 6(2):021010.
- 8 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.
- 9 WILDING S E, HOWELL L L, MAGLEBY S P. 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.

10 DELIMONT I L, MAGLEBY S P, HOWELL L L. Evaluating compliant hinge geometries for origami-inspired mechanisms [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 7(1):011009.

学报

- 11 MERRIAM E G, LUND J M, HOWELL L L. Compound joints: behavior and benefits of flexure arrays [J]. Precision Engineering, 2016, 45:79-89.
- 12 MERRIAM E G, HOWELL L L. Lattice flexures: geometries for stiffness reduction of blade flexures [J]. Precision Engineering, 2016, 45:160 - 167.
- 13 MERRIAM E G, TOLMAN K A. Integration of advanced stiffness-reduction techniques demonstrated in a 3D-printable joint [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 105:260 - 271.
- 14 LIU M, ZHANG X, FATIKOW S. Design and analysis of a multi-notched flexure hinge for compliant mechanisms [J]. Precision Engineering, 2017, 48:292 - 304.
- 15 PEI X, YU J, ZONG G, et al. The modeling of cartwheel flexural hinges [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(10): 1900 - 1909.
- 16 CHEN G, SHAO X, HUANG X. A new generalized model for elliptical arc flexure hinges [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(9):095103.
- 17 CHEN G, LIU X, GAO H, et al. A generalized model for conic flexure hinges [J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(5):055106.
- 18 CHEN G, LIU X, DU Y. Elliptical-arc-fillet flexure hinges: toward a generalized model for commonly used flexure hinges [J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(8):081002.
- 19 CHEN G, WANG J, LIU X. Generalized equations for estimating stress concentration factors of various notch flexure hinges [J]. Journal of Mechanical Design, 2014, 136(3):252 - 261.
- 20 邱丽芳,印思琪,谢仲添,等. 基于串联式 Triple LET 的 LEMs 滑块机构分析 [J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6): 381-386. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160650&flag = 1. DOI: 10.6041 /j. issn. 1000-1298.2016.06.050.

21 邱丽芳, 王栋, 印思琪,等. Deform - X 柔性铰链设计与分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4):370 - 376. http:// www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170449&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017. 04.049.

QIU Lifang, WANG Dong, YIN Siqi, et al. Design and analysis of Deform - X flexure hinge [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):370-376. (in Chinese)

22 邱丽芳,黄钢,陈海翔.基于特征参数的 DCA - LET 结构设计与性能分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8):399 - 404. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170848&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.048.

QIU Lifang, HUANG Gang, CHEN Haixiang. Structure design and performance analysis of DCA - LET based on characteristic parameters [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):399 - 404. (in Chinese)

- 23 XIE Z, QIU L, YANG D. Design and analysis of outside-deployed Lamina emergent joint (OD LEJ) [J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 114:111 - 124.
- 24 CHEN G, HOWELL L L. Two general solutions of torsional compliance for variable rectangular cross-section hinges in compliant mechanisms [J]. Precision Engineering, 2009, 33:268 274.

QIU Lifang, YIN Siqi, XIE Zhongtian, et al. Analysis of lamina emergent slider mechanism based on the series Triple – LET [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):381 – 386. (in Chinese)