

# 离轨帆弹性桅杆力学性能分析

李媛媛 贾敏涛 王震 肖燕妮 赵长喜

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

**文 摘** 采用有限元分析软件ABAQUS分析弹性桅杆几何参数对其力学性能的影响,为离轨帆弹性桅杆设计提供一定的理论依据。结果表明:增加壳体厚度、保持弧长不变,减小曲率半径以及增大壳体截面圆心角都能有效提高离轨帆自动展开能力及弹性桅杆支撑刚度;弹性桅杆的弯曲内部应力只与材料属性、曲率半径、缠绕半径以及壳体厚度有关;曲率半径减小、壳体厚度增加都会增大弹性桅杆的弯曲内部应力,有可能会导导致弹性桅杆在缠绕时发生塑性变形。因此,在对弹性桅杆设计时,需综合考虑弹性桅杆几何参数对其展开能力以及缠绕性能的影响。

**关键词** 弹性桅杆,展开弯矩,支撑刚度,弯曲内应力

中图分类号:V414

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.02.003

## Analysis of Mechanical Properties of the Elastic Boom of Drag Sail Device

LI Yuanyuan JIA Mintao WANG Zhen XIAO Yanni ZHAO Changxi

(Beijing Spacecraft, Beijing 100094)

**Abstract** The finite element analysis software ABAQUS was used to analyze the influences of geometric parameters of the elastic boom on the mechanical properties, which provides a theoretical basis for the design of the boom of drag sail device. The results show that the automatic unfolding capacity of the drag sail device and the support stiffness of the boom are improved by increasing the shell thickness, decreasing the radius of curvature while keeping the arc length unchanged and increasing the central angle of shell cross section. The internal bending stress of the boom is only related to material properties, radius of curvature, and winding radius as well as shell thickness. The internal bending stress of the boom increases as the radius of curvature decreases and shell thickness increases, which leads to a plastic deformation when the elastic boom is winding. Therefore, the influence of the geometric parameters of the boom on the unfolding capacity and winding property should be taken into account comprehensively when designing the elastic boom.

**Key words** Elastic boom, Bending moment, Support stiffness, Internal bending stress

### 0 引言

随着航天科技的发展,小卫星逐渐成为引领航天技术发展的引擎之一,小卫星数量在最近几年呈爆炸性增长,如果不对这些完成任务的小卫星进行处理,近地轨道上的航天器在未来200年将会比现在超出500%,这将严重威胁到未来的航天活动<sup>[1-2]</sup>。为了减缓空间碎片的增长,IADC建议航天器在完成任任务后25年内或入轨后30年内应脱离轨道<sup>[3]</sup>。目前,针对研制成本低、周期短、功能密度大的微小卫星,在设计时增加一个无需消耗推进剂的离轨装置成为

一个发展趋势<sup>[4-5]</sup>。离轨帆主要是在卫星寿命末期,利用自身储存的机械能带动帆面展开,从而提高卫星在轨飞行过程中受到的大气阻力,加快卫星离轨。整个装置质量轻、结构简单、成本低,不耗费燃料,不需要姿态控制,特别适用于近地轨道的微小卫星<sup>[6-8]</sup>。制动帆的展开是通过释放一对卷绕在中心轴上的弹性桅杆来实现的。这种弹性桅杆需要具有独特的力学性能,它可利用收拢时存储的弹性势能为制动帆的展开提供动力,也能够利用自身刚度为展开后的制动帆提供支撑<sup>[9-10]</sup>。因此,弹性桅杆的力

收稿日期:2020-06-02

第一作者简介:李媛媛,1987年出生,博士研究生,研究方向为空间可展开机构及离轨帆离轨技术等。E-mail: renenglyy@163.com

学性能是决定离轨帆能否成功展开的关键因素之一。2000年,SEFFEN等<sup>[11]</sup>对弹性桅杆在弯曲过程中的弯矩进行了研究,得到弯矩和簧片曲率的关系,提出临界弯矩和稳态弯矩的近似表达式。2011年,GUINOT等<sup>[12]</sup>提出一种具有弹性薄壁圆弧截面的二维平面杆模型,并通过此模型解释了单簧片在弯曲和展开过程中弯曲出现的位置,弯曲位置沿长度方向的移动等现象。2007年,SOYKASAP<sup>[13]</sup>通过实验对簧片弯曲过程中的弯矩随转角变化情况进行了研究。

弹性桅杆在弯曲过程中积聚的弹性应变能是其自动展开的动力源泉。在折叠过程中外力功转化为弹性桅杆的弹性应变能,在展开过程中,弹性应变能又转化为动能。桅杆展开弯矩是系统展开的驱动力矩,其大小直接决定系统的展开性能。本文以C形弹性桅杆为例,分析了几何参数对其应变能及展开弯矩的影响,为离轨帆弹性桅杆设计提供一定的理论依据。

### 1 展开弯矩数学模型

弹性桅杆各项几何要素包括厚度 $t$ ,包角 $\theta$ ,曲率半径 $r$ 和长度 $L$ 。这些几何要素都会影响带状弹簧的力学性能,如图1所示,力学性能相关的材料属性包括弹性模量 $E$ 和泊松比 $\nu$ 。

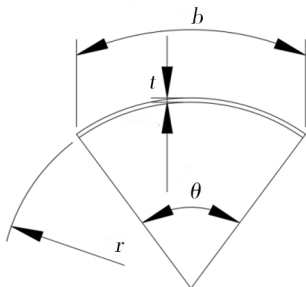


图1 C形弹性桅杆横截面及相关几何参数

Fig. 1 Geometric parameters of the c-type boom section

带状弹簧正向与反向展开的驱动弯矩分别为 $M_+$ 和 $M_-$ ,根据弹性力学薄壳弯曲理论,薄壳单位弧长上的弯矩:

$$\begin{aligned} M_x &= D(\Delta k_x + \nu \Delta k_y) \\ M_y &= D(\Delta k_y + \nu \Delta k_x) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\Delta k_x$ 和 $\Delta k_y$ 分别是带状弹簧横向和纵向上的曲率变化; $D$ 是薄壳的弯曲刚度,即:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

带状弹簧正向弯曲时截面曲率从 $\frac{1}{r}$ 变为0,而沿长度方向曲率从0变为 $\frac{1}{R}$ ,如图2所示。

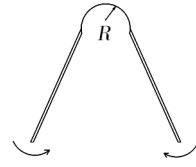


图2 带状弹簧弯曲示意图  
Fig. 2 Bending diagram of the boom

则此时,

$$(\Delta k_x, \Delta k_y) = \left( -\frac{1}{R}, \frac{1}{r} \right) \quad (3)$$

同理可得,带状弹簧反向弯曲时:

$$(\Delta k_x, \Delta k_y) = \left( \frac{1}{R}, \frac{1}{r} \right) \quad (4)$$

而弯曲区域的应变能为:

$$U = \frac{1}{2} DA \left[ (\Delta k_x)^2 + (\Delta k_y)^2 + 2\nu(\Delta k_x \Delta k_y) \right] \quad (5)$$

式中, $A$ 为弯曲区域面积, $A = Rr\alpha\theta$ , $\alpha$ 为带状弹簧弯曲角度。

将式(3)式(4)代入式(5),可以得到带状弹簧弯曲时应变能为:

$$\begin{aligned} U_+ &= \frac{r\alpha\theta}{2} D \left( \frac{1}{R} + \frac{R}{r^2} + \frac{2\nu}{r} \right) \\ U_- &= \frac{r\alpha\theta}{2} D \left( \frac{1}{R} + \frac{R}{r^2} - \frac{2\nu}{r} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

带状弹簧反向和正向弯曲的展开弯矩分别为:

$$\begin{aligned} M_+^* &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} (1+\nu) \frac{b}{r} \\ M_-^* &= -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} (1-\nu) \frac{b}{r} \end{aligned} \quad (7)$$

本文分析的弹性桅杆材料为铍铜合金,其弹性模量为128 GPa,泊松比为0.35,屈服强度为1 GPa,为了减少计算时间,本文取长度为150 mm的C型簧片进行分析。针对C型簧片的临界弯矩未知的情况,采用直接施加位移的方式,固定端约束 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴方向的移动以及 $y$ 、 $z$ 轴方向的转动,自由端约束 $x$ 、 $y$ 轴方向的移动以及 $y$ 、 $z$ 轴方向的转动,给定 $x$ 轴方向角位移,用来模拟簧片90°纯弯曲的情况,见图3。

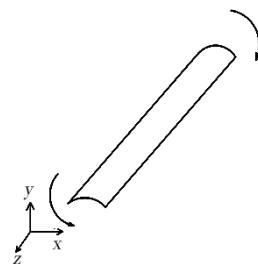


图3 正向弯曲示意图

Fig. 3 Diagram of positive bending

## 2 弹性桅杆几何参数对其弯曲性能的影响分析

### 2.1 簧片厚度对其弯曲性能的影响

簧片长度  $L = 150 \text{ mm}$ , 包角  $\theta = 72^\circ$ , 曲率半径  $r = 15 \text{ mm}$ , 上述参数保持不变, 改变壳体厚度  $t$ , 通过有

限元方法分析其弯曲情况, 其弯曲应力云图如图4所示, 其应变能和展开弯矩随壳体厚度  $t$  的变化趋势如图5所示, 并将模拟分析与理论结果进行对比, 以验证模拟分析方法的正确性。

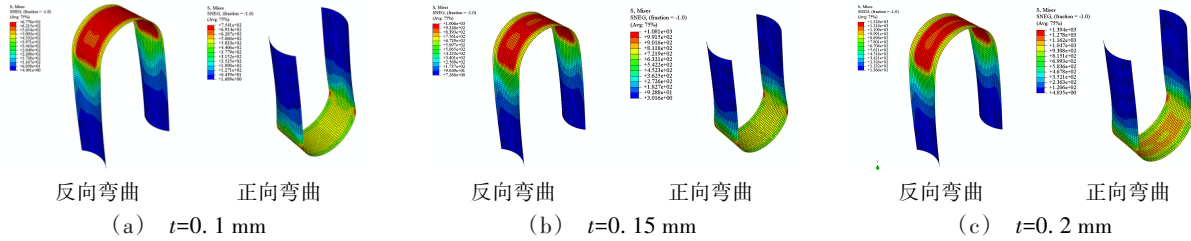


图4 不同壳体厚度  $t$  时, 簧片弯曲应变图  
Fig. 4 Stress contours of the boom at different  $t$

由图5可知, 其弯曲应变能和展开弯矩数值模拟分析与理论计算值差别不大, 计算结果较好的与理论值相吻合, 说明该数值模拟方法可信。由分析结果可知, 随着壳体厚度的增加, 壳体应变能和展开

弯矩有较大的增加, 可知壳体厚度是影响应变能和展开弯矩的敏感因素。增加壳体厚度能有效地增加展开弯矩, 提高其自动展开能力。

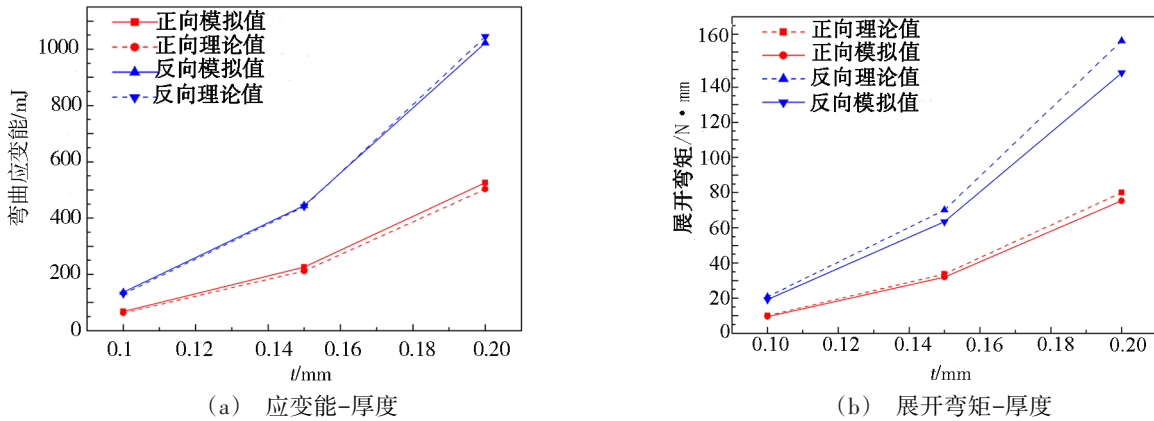


图5 应变能和展开弯矩随壳体厚度的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of strain energy and unfolding moment with thickness

### 2.2 角包 $\theta$ 不变, 曲率半径 $r$ 对其弯曲性能的影响分析

$L = 150 \text{ mm}$ ,  $\theta = 72^\circ$ ,  $t = 15 \text{ mm}$ , 上述参数保持不变, 改变  $r$ , 分析  $\theta$  不变时 (这时弧长  $b$  会发生改变),  $r$

对其弯曲性能的影响, 结果如图6所示。可知, 在  $L$ 、 $\theta$ 、 $t$  保持不变的情况下, 随着壳体曲率半径的增加, 其应变能和展开弯矩变化不大, 说明曲率半径对其应变能和展开弯矩的影响不大。因此, 如果保持  $L$ 、

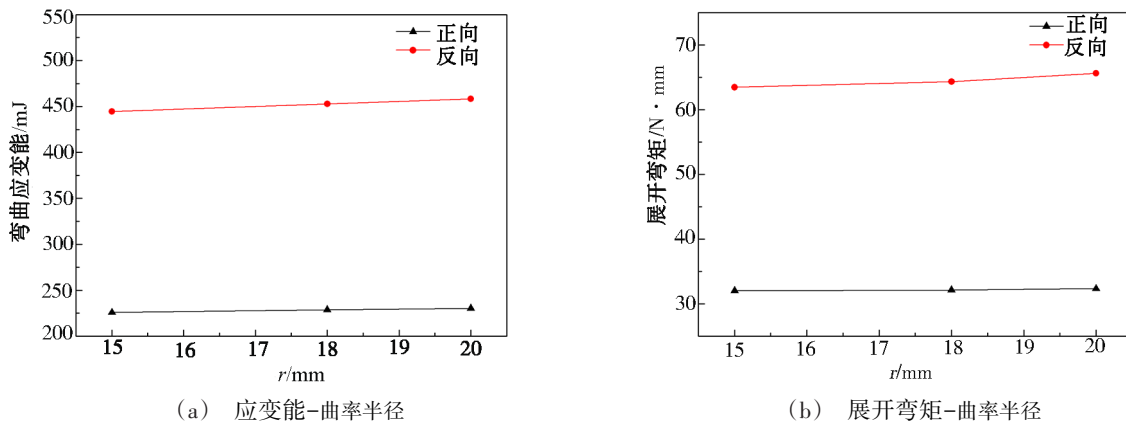


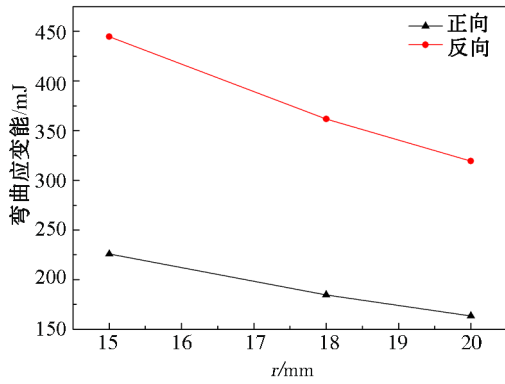
图6 保持包角  $\theta$  不变, 应变能和展开弯矩随曲率半径  $r$  变化曲线

Fig. 6 Curves of strain energy and unfolding moment change with  $r$  when the  $\theta$  remains unchanged

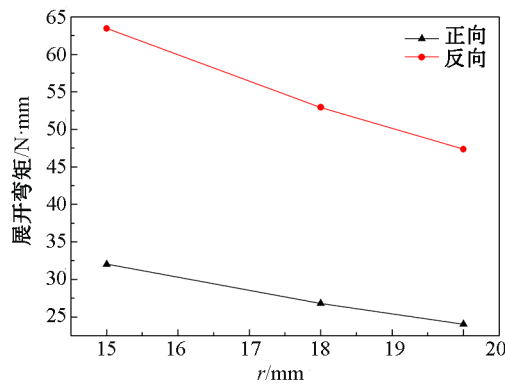
$\theta$ 、 $t$ 不变,只改变其曲率半径,并不能明显改变其展开性能。

### 2.3 弧长 $b$ 不变,曲率半径 $r$ 对其力学性能的影响模拟分析

$L = 150 \text{ mm}$ ,  $b = 19 \text{ mm}$ ,  $t = 15 \text{ mm}$ ,上述参数保持不变,改变壳体 $r$ ,分析 $b$ 不变时(这时 $\theta$ 会发生改变), $r$ 对其弯曲性能的影响,结果如图7所示。



(a) 应变能-曲率半径



(b) 展开弯矩-曲率半径

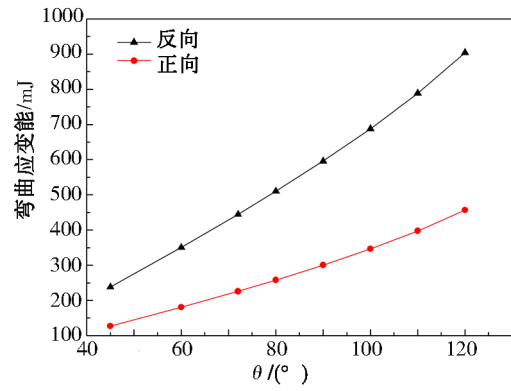
图7 保持弧长 $b$ 不变,应变能和展开弯矩随曲率半径 $r$ 的变化曲线

Fig. 7 Curves of strain energy and unfolding moment change with  $r$  when the  $b$  remains unchanged

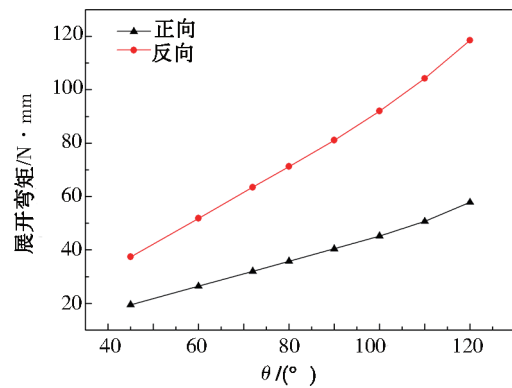
由图7可知,在 $L$ 、 $b$ 、 $t$ 保持不变的情况下,随着壳体曲率半径的增加,其应变能和展开弯矩逐渐减小。因此,保持 $L$ 、 $b$ 、 $t$ 不变,其曲率半径越小,对弹性桅杆展开越有利。

### 2.4 曲率半径 $r$ 不变,包角 $\theta$ 对其弯曲性能的影响模拟分析

$L = 150 \text{ mm}$ ,  $t = 0.15 \text{ mm}$ ,  $r = 15 \text{ mm}$ ,上述参数保持不变,改变壳体包角 $\theta$ ,分析包角对其弯曲性能的影响,结果如图8所示。可知,在 $L$ 、 $r$ 、 $t$ 保持不变的情况下,随着 $\theta$ 的增加,其应变能和展开弯矩显著增大;因此,在 $L$ 、 $r$ 、 $t$ 保持不变的情况下,可以通过增大壳体截面圆心角来提高其展自动开能力。



(a) 应变能-包角



(b) 展开弯矩-包角

图8 应变能和展开弯矩随壳体包角 $\theta$ 的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of strain energy and unfolding moment with  $\theta$

### 3 弹性桅杆几何参数对其支撑刚度的影响

离轨装置制动帆的展开通过释放一对缠绕在中心轴上的弹性桅杆来实现的。不仅可利用它收拢时存储的弹性势能为制动帆展开提供动力,也能够利用自身刚度为制动帆展开后提供支撑。弹性桅杆展开过程拉动制动帆一起展开,制动帆对弹性桅杆有个反作用力,弹性桅杆除了满足展开过程中所需要的动力,还需具有一定的刚度,满足展开过程中以及展开完成后的支撑作用。铍铜合金弹性模量 $E = 128 \text{ GPa}$ ,泊松比 $\nu = 0.35$ ,密度为 $\rho = 8.26 \text{ g/cm}^3$ 。以 $L = 180 \text{ mm}$ ,弧长 $b = 19 \text{ mm}$ , $r = 18 \text{ mm}$ , $t = 0.15 \text{ mm}$ 的带簧为例,分别在正反方向上施加 $1 \text{ N}$ 的力,分析带簧正向弯曲和反向弯曲位移,分析位移云图如图9所示,正反向位移曲线如图10所示。

由以上分析结果可知,当施加同样的径向力时,正向弯曲的位移远大于反向弯曲的位移,说明正向弯曲刚度远小于反向弯曲刚度,对于离轨帆弹性桅杆,除了具有展开能力,还需具有一定的支撑刚度,因此,在桅杆和帆面连接时,桅杆需反向连接,帆面对桅杆的反作用力使桅杆反向弯曲。在下面分析几何参数对其支撑刚度的影响时,只考虑其反向支撑的弯曲位移。

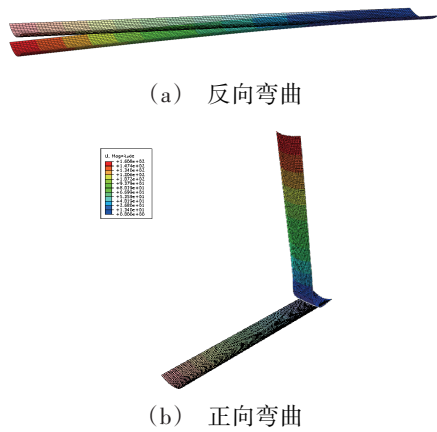


图9 反向弯曲和正向弯曲位移云图  
Fig. 9 Displacement contour of positive bending and reverse bending

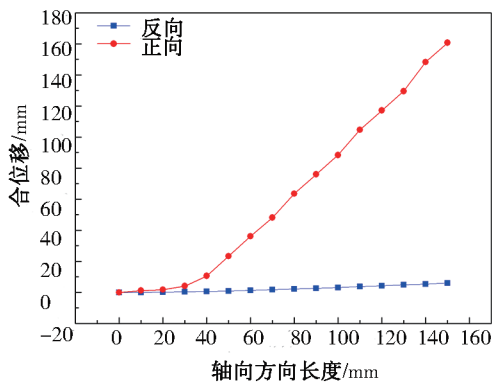


图10 径向力正反向位移曲线  
Fig. 10 Curve of displacement of bending process with radial force

### 3.1 簧片厚度 $t$ 对其支撑刚度的影响模拟分析

$L = 150 \text{ mm}$ ,  $\theta = 72^\circ$ ,  $r = 15 \text{ mm}$ , 上述参数保持不变, 改变  $t$ , 分析壳体厚度对弹性桅杆支撑刚度的影响, 分析结果如图 11 和图 12 所示。

由以上分析结果可知, 当保持  $L = 150 \text{ mm}$ ,  $\theta =$

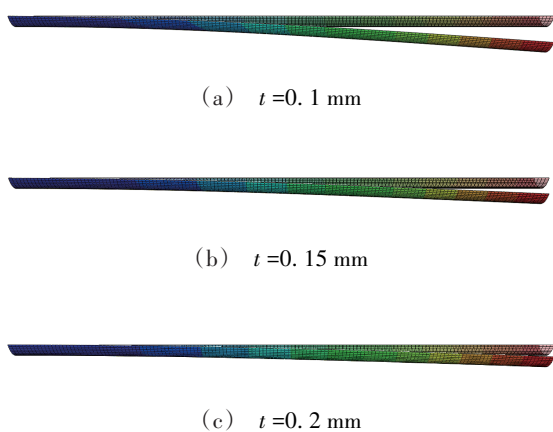


图11 不同  $t$  时, 径向力位移云图

Fig. 11 Displacement contour of positive bending at different  $t$

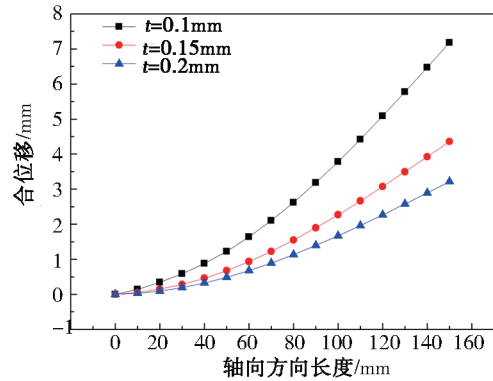


图12 位移随簧片厚度  $t$  的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of displacement with  $t$

$72^\circ$ ,  $r = 15 \text{ mm}$  不变时, 当施加相同的径向力时, 随着簧片厚度的增加, 弹性桅杆变形位移逐渐减小, 说明在保持弹性桅杆长度、包角、曲率半径不变的情况下, 增加弹性桅杆厚度可增加其支撑刚度。

### 3.2 包角 $\theta$ 不变, 曲率半径 $r$ 对其支撑刚度的影响分析

$L = 150 \text{ mm}$ ,  $t = 0.15 \text{ mm}$ ,  $\theta = 72^\circ$ , 上述参数保持不变, 改变簧片曲率半径, 分析曲率半径对弹性桅杆支撑刚度的影响, 结果如图 13 所示。

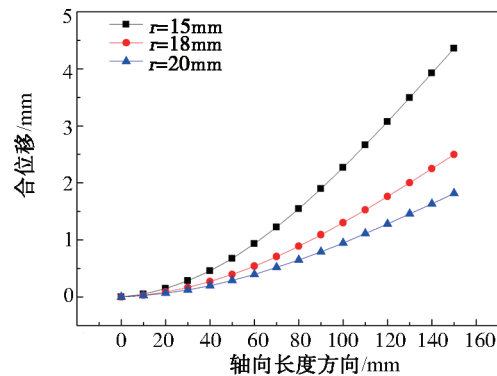


图13 保持  $\theta$  不变, 位移随曲率半径  $r$  的变化曲线

Fig. 13 Variation curves of displacement with  $r$  while keeping the  $\theta$  constant

由以上分析结果可知, 当保持  $L = 150 \text{ mm}$ ,  $\theta = 72^\circ$ ,  $t = 0.15 \text{ mm}$  不变时, 当施加相同的径向力时, 随着曲率半径的增加, 弹性桅杆变形位移逐渐减小, 说明在保持弹性桅杆长度、包角、厚度不变的情况下, 增加弹性桅杆曲率半径可增加其支撑刚度。

### 3.3 弧长 $b$ 不变, 曲率半径 $r$ 对其支撑刚度的影响分析

$L = 150 \text{ mm}$ ,  $t = 0.15 \text{ mm}$ ,  $b = 19 \text{ mm}$ , 上述参数保持不变, 改变簧片曲率半径, 分析曲率半径对弹性桅杆支撑刚度的影响, 结果如图 14 所示。可知, 当保持  $L = 150 \text{ mm}$ ,  $b = 19 \text{ mm}$ ,  $t = 0.15 \text{ mm}$  不变时, 当施加相同的径向力时, 随着曲率半径的增加, 弹性桅杆变形位移逐渐变大, 说明在保持弹性桅杆长度、弧长、厚度不变的情况下, 增加弹性桅杆曲率半径反而会减

小其支撑刚度。

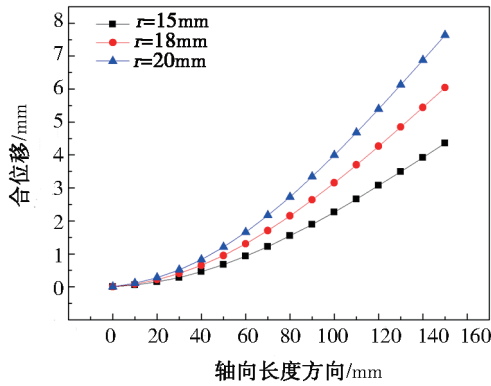


图 14 保持  $b$  不变,位移随曲率半径  $r$  的变化曲线

Fig. 14 Curves of displacement changes with  $r$  when the  $b$  remains unchanged

### 3.4 曲率半径 $r$ 不变,包角 $\theta$ 对其力学性能的影响模拟分析

$L = 150 \text{ mm}$ ,  $t = 0.15 \text{ mm}$ ,  $r = 15 \text{ mm}$ , 上述参数保持不变,改变簧片包角,分析包角对弹性桅杆支撑刚度的影响,结果如图 15 所示。分析可知,当保持  $L = 150 \text{ mm}$ ,  $r = 15 \text{ mm}$ ,  $t = 0.15 \text{ mm}$  不变时,当施加相同的径向力时,随着簧片包角的增加,弹性桅杆变形位移逐渐减小,说明在保持弹性桅杆长度、曲率半径、厚度不变的情况下,增加弹性桅杆包角会增加其支撑刚度。

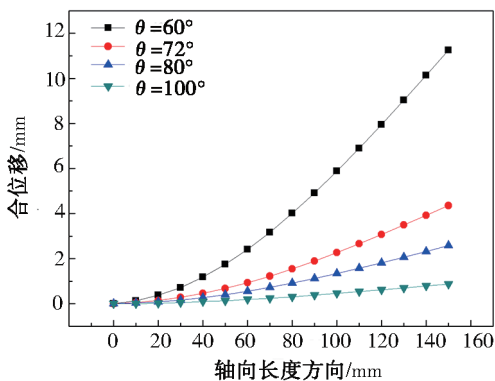


图 15 位移随簧片包角  $\theta$  的变化曲线

Fig. 15 Variation curves of displacement with  $\theta$

## 4 弹性桅杆缠绕性能分析

根据以上弹性桅杆几何参数对其弯曲性能的影响分析可知,在  $L$ 、 $b$ 、 $t$  不变的情况下,可通过减小  $r$  来增加其应变能及展开弯矩以提高其展开能力。但弹性桅杆在满足其展开能力的前提下,还需考虑其几何参数对其缠绕时的内应力的影响,防止弹性桅杆缠绕后发生塑性变形。

为保证弹性桅杆在缠绕时,不发生塑性变形需要满足:

$$\begin{cases} \sigma_{x-} < \sigma_s \\ \sigma_{y-} < \sigma_s \\ \sigma_{x+} < \sigma_s \\ \sigma_{y+} < \sigma_s \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\sigma_{x-}$  和  $\sigma_{y-}$  是弹性桅杆正向弯曲时的内部应力,  $\sigma_{x+}$  和  $\sigma_{y+}$  是弹性桅杆反向弯曲时的内部应力。

弹性桅杆正向弯曲时,其内部应力为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_{x-} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{t}{d_0} \cdot \left( \frac{d_0}{d} - \nu \right) \\ \sigma_{y-} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{t}{d_0} \cdot \left( 1 - \nu \frac{d_0}{d} \right) \end{cases} \quad (9)$$

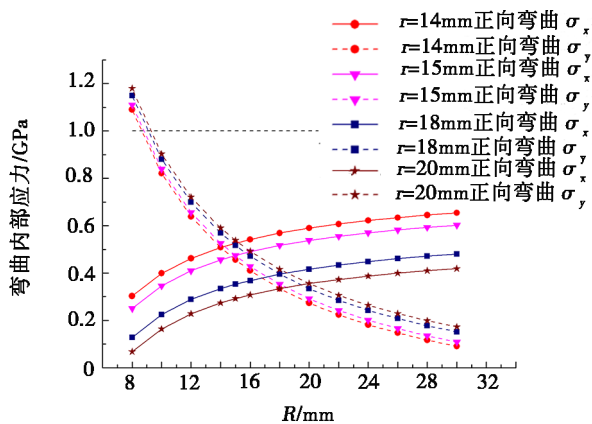
弹性桅杆反向弯曲时,其内部应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{x-} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{t}{d_0} \cdot \left( \frac{d_0}{d} + \nu \right) \\ \sigma_{y-} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{t}{d_0} \cdot \left( 1 + \nu \frac{d_0}{d} \right) \end{cases} \quad (10)$$

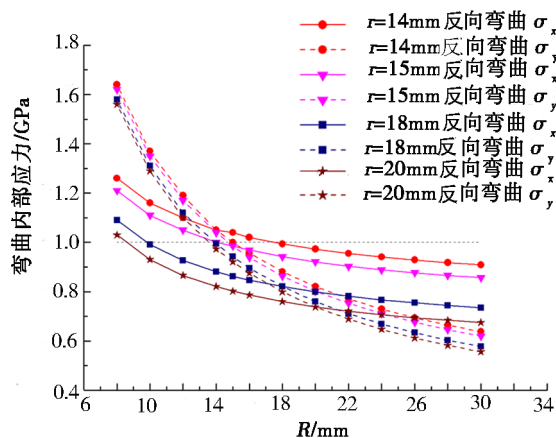
式中,  $E$  是桅杆弹性模量,  $\nu$  是泊松比,  $t$  是桅杆厚度,  $d_0$  是桅杆曲率直径,  $d$  是桅杆缠绕直径。

从公式(9)及(10)可知,弹性桅杆缠绕式其弯曲内应力与材料属性以及弹性桅杆的厚度及曲率半径有关。对于同一种材料,其材料属性不变,选铍铜合金作为弹性桅杆的制备材料,铍铜合金弹性模量  $E = 128 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.35$ , 屈服强度  $\sigma_s = 1 \text{ GPa}$ 。现分析弹性桅杆厚度及其曲率半径对其弯曲内应力的影响,结果如图 16 及图 17 所示。

图 16 分析了弹性桅杆正反向弯曲时,曲率半径对其弯曲内部应力的影响,由分析结果可知,正向弯曲时,对于同一缠绕半径,随着弹性桅杆曲率半径的增加,其  $x$  方向的弯曲内部应力逐渐减小,而  $y$  方向的弯曲内部应力逐渐增大( $x$  为横向,  $y$  为纵向,即轴向方向);对于同一曲率半径,随着缠绕半径的增加,其  $x$  方向的弯曲内部应力逐渐增大,而  $y$  方向的弯曲内部应力逐渐减小。反向弯曲时,对于同一缠绕半径,随着弹性桅杆曲率半径的增加,其  $x$  方向和  $y$  方向的弯曲内部应力都是逐渐减小的;对于同一曲率半径,随着缠绕半径的增加,其  $x$  方向和  $y$  方向的弯曲内部应力也都是逐渐减小的。图 17 描述了缠绕半径  $R$  和弹性桅杆曲率半径  $r(15 \text{ mm})$  相等时,桅杆厚度对其弯曲内部应力的影响。当缠绕半径  $R$  和桅杆曲率半径  $r$  相等时,缠绕时,其  $x$  方向和  $y$  方向的弯曲内部应力相等。当曲率半径  $r$  一定时,随着桅杆厚度的增加,其正向弯曲和反向弯曲时的内部应力都是增加的,由分析结果可知,对于曲率半径  $r = 15 \text{ mm}$ , 缠绕半径  $R = 15 \text{ mm}$  的弹性桅杆,当其厚度增加至  $0.16 \text{ mm}$  时,其反向弯曲内部应力已经大于材料屈服强度,缠绕时会发生塑性变形。



(a) 正向弯曲



(b) 反向弯曲

图16 正向及反向弯曲时,弯曲内部应力随曲率半径变化曲线

Fig. 16 Variation curves of internal bending stress with  $r$  of reverse bending and positive bending

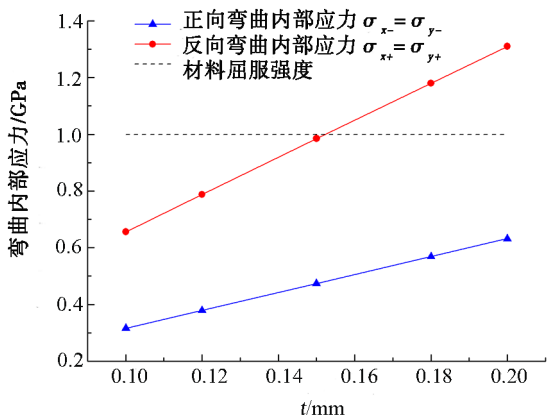


图17 弹性桅杆弯曲时,弯曲内部应力随厚度的变化曲线

Fig. 17 Variation curves of internal bending stress with bending process

## 5 结论

本文研究了桅杆厚度,截面圆心角及曲率半径对其力学性能的影响规律。研究表明:

(1)通过增加壳体厚度 $t$ ,减小曲率半径 $r$ ,增大壳体截面圆心角都能有效增大展开弯矩,并随着 $t$ 的

增加,其应变能和展开弯矩有较大增加,可知,壳体厚度是影响弹性桅杆展开性能的敏感因素;

(2)弹性桅杆的弯曲内部应力只与材料属性,曲率半径 $r$ ,缠绕半径 $R$ 以及壳体厚度 $t$ 有关。为避免壳体缠绕时发生塑性变形,需综合考虑弹性桅杆几何参数对其展开能力以及缠绕性能的影响。

## 参考文献

[1] VINCENT T, GRANT B, REBERT Z. Deorbit analysis of a tumbling sailcraft[C]. The 4S Symposium 2014-V, Tarantini.

[2] 李云,陈建光,王聪. 小卫星蓬勃发展为当前航天管理体系带来挑战[J]. 国际太空, 2016, 448:55-58.

LI Y, CHEN J G, WANG C. A new challenge to space management systems brought by small satellites [J]. Space International, 2016, 448:55-58.

[3] THOMAS M G. Sail, development, and imaging technology for a nanosatellite deorbit system demonstration on CanX-7[D]. Toronto: University of Toronto, 2014.

[4] JESSE H. Mechanical design and development of a modular drag sail for the CanX-7 nanosatellite mission [D]. Toronto: University of Toronto, 2014.

[5] MALCOLM M. Advances in solar sailing [M]. German: Springer, 2014.

[6] HARKNESS P, MCROBB M. Development status of AELODOS-A deorbit module for small satellites[J]. Advances in Space Research, 2014, 54(1): 82-91.

[7] CHRIS B, TOMAS S. Light sail1 solar sail design and qualification[C]. Proceedings of the 41<sup>st</sup> Aerospace Mechanisms Symposium, 2012.

[8] ALEXANDER R S, TIFFANY R L. Design and development of NEA scout solar sail deployer mechanism [C]. Proceedings of the 43<sup>rd</sup> Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Ames Research Center, May 4-6, 2016.

[9] HIROKATA S, OSAMU M, NOBUK-ATSU O, et al. Mission report on the solar power sail deployment demonstration of IKAROS [C]. 52<sup>nd</sup> AI-AA/ASME/ASCE-/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2011.

[10] JERMY A. B, THOMAS W. M. Synchronous deployed solar sail concept demonstration [C]. 49<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2008.

[11] SEFFEN K A, YOU Z, PELLEGRINO S. Folding and deployment of curved tape springs[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(10): 2055-2073.

[12] GUINOT F, BOURGEOIS, COCHELIN B, et al. A planar rod model with flexible thin-walled cross-sections[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(1): 73-86.

[13] Soykasap O. Analysis of tape springs hinges [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49 (7) : 853-860.

[14] RIMROTT F, FRITZSCHE G. Fundamentals of STEM mechanics [J]. IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, 2000(80):321-333.