

# 新型柔性抓取机械手的设计方法

韩泽光,徐向鑫,郝瑞琴,白晓天

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 提出一种新型柔性抓取机械手,解决当前抓取机械手结构复杂、驱动单元多、抓取目标物形状和材料受限的问题,确定末端执行元件——柔性片的最佳结构形状。**方法** 根据输入输出运动特征和实际工作条件完成抓取机械手的原理方案和结构设计,采用悬臂梁的大挠度变形来等效机械手末端执行元件的力学模型,用 MATLAB 软件中的 ode45 函数对其进行力学性能求解,并用 ANSYS 有限元分析软件对倒梯形柔性片进行强度验算。**结果** 完成了柔性抓取机械手的原理方案设计和结构设计,静力学分析得到末端最大变形量的数值结果满足精度要求,确定了机械手末端执行元件的最佳结构形状为倒梯形。**结论** 在同等条件下,倒梯形柔性片具有更好的弯曲性能,为机械手的抓取提供了更好的柔顺自适应能力;以该结构充当末端执行元件不仅能实现机械手更大的抓持范围,还能更大限度地节省材料。

**关键词** 抓取机械手;倒梯形;柔性片;结构设计

中图分类号 TH122 文献标志码 A

## A New Design Method of Flexible Grasping Manipulator

HAN Zeguang, XU Xiangxin, HAO Ruiqin, BAI Xiaotian

(Shenyang Jianzhu University, School of Mechanical Engineering, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** A new type of flexible grasping manipulator is proposed to solve the current grasping manipulator's complex structure, multiple drive units, grasping target shape and material limitations, and determine the best structural shape of the end effector-flexible sheet. According to the input and output motion characteristics and actual working conditions, the principle scheme and structure design of the grasping manipulator are completed. The large deflection deformation of the cantilever beam is used to equivalent the mechanical model of the end effector of the manipulator. The ode45 function in MATLAB software is used to solve the mechanical properties, and the ANSYS finite element analysis software is used to check the strength of the inverted trapezoidal flexible sheet. The principle scheme design and structural design of the flexible gripping manipulator have been completed, and the optimal structural shape of the end effector of the

收稿日期:2020-08-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51909357)

作者简介:韩泽光(1967—),男,教授,博士,主要从事人工智能、机器人技术等方面研究。

manipulator has been determined to be an inverted trapezoid. Under the same conditions, the inverted trapezoidal flexible sheet has better bending performance, which provides better flexibility for the gripping of the manipulator. Using this structure as an end-effector can not only achieve a larger gripping range of the manipulator, but also save material to a greater extent, which provides a reliable basis for the design of the manipulator.

**Key words:** grasping manipulator; inverted trapezoidal; flexible sheet; structural design

为满足对大小不一、形状不规则、易碎或脆(软)性物体的抓取需要,柔性抓取装置近年来得到广泛应用,目前该装置的研究主要集中在与目标物接触的末端结构设计和驱动机构两个方面。熊强、章军等<sup>[1-6]</sup>以活页铰链和弹簧作为关节骨架实现了对形状规则的包装盒的抓取;刘佳等<sup>[7]</sup>选用橡胶材料制作柔顺构件,实现了对草莓等浆果的柔顺抓取;李秋苹<sup>[8]</sup>选用丝杆螺母带动驱动板的结构形式实现对轻小圆柱形或球形物体的抓取;田颖等<sup>[9]</sup>设计了具有良好弯曲性能的变截面片簧柔顺关节,效果较好;董增雅等<sup>[10]</sup>利用气囊推动三角形手指来实现对轻小农产品的采摘;魏星、耿德旭等<sup>[11-12]</sup>则是利用环状柔性关节的弹性变形来实现对目标物体的抓持。上述研究所用驱动机构和末端结构复杂,难以满足实际抓取需求。

基于此,笔者提出一种新型柔性抓取机械手,基于状态空间的方法对机械手进行原理方案及结构设计,确定双螺旋机构传动的最佳方案;并通过力学分析与仿真对机械手末端元件的变形进行解算,确定执行元件最佳结构形状为倒梯形,实现机械手驱动机构和末端结构简单适用的目标。

### 1 新型柔性抓取机械手的方案设计

柔性抓取机械手的方案设计就是求出满足抓取功能需求的原理运动方案。

#### 1.1 柔性抓取机械手的运动功能需求

抓取机械手要实现的是物料的抓取,因此其执行端运动方式通常有摆动、移动,驱动端运动方式通常是转动,对应的输入输出端运动总功能需求为转动→移动或转动→摆动。

为保证总功能能够顺利求解,需要将其分解为功能元,此处仅从串联系统分解为单级或多级传动。具体的分解方法见图1所示。



图1 二级系统功能分解方法

Fig. 1 Function decomposition for the secondary system

#### 1.2 原理运动方案求解

众所周知,系统学的观点求解运动方案的原理是先构集实现功能元的解法目录,然后用形态学矩阵或创新技法求解<sup>[13]</sup>。

##### 1.2.1 功能元解法目录的构集

运动特征下功能元的解法目录即为实现功能元的基本机构方案目录。考虑到每个机构均具有输入输出端的运动方式、运动的连续/间歇性、体积空间大小、质量、制造成本及可靠性等特征,为便于标识,这些特征可统一用如下的状态方程表示。

$$\begin{bmatrix} R_{x0} \\ R_{y0} \\ R_{z0} \\ T_{x0} \\ T_{y0} \\ T_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{xi} \\ R_{yi} \\ R_{zi} \\ T_{xi} \\ T_{yi} \\ T_{zi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)等号左边为输出特征矢量,等号右边第二项为输入特征矢量,等号右边第一项为状态变换矩阵,表示基本机构的运动特征,存储在目录库(45种基本结构)中<sup>[14]</sup>。为方便计算机存储,以 $c_i v_j j_i$ 的排列顺序按位表示成三位二进制数 $(c_i v_j j_i)_2$ , $c$ 表示线性运动, $v$ 表示非线性运动, $j$ 表示间歇运动,三者

的下标  $i$  表示基本机构序号。

### 1.2.2 运动方案的求解

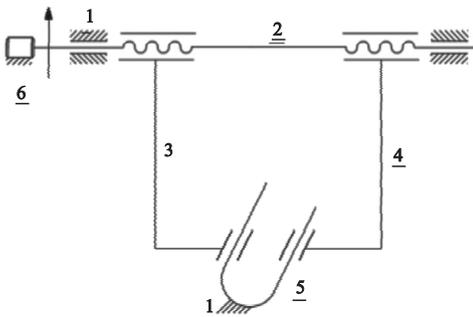
将总功能的运动特征  $cvj$  按式(2)进行分解,寻找目录库中对应的解法,然后排列组合就可获得柔性抓取机械手的运动方案解集。

$$(cvj)_2 = (c_1 v_1 j_1)_2 | (c_2 v_2 j_2)_2 | \dots | (c_m v_m j_m)_2. \quad (2)$$

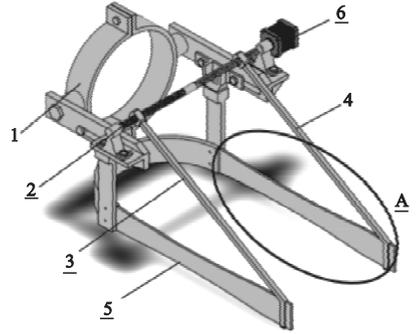
式(2)求得的方案数量庞大,需要结合实际需求经过恰当的评价方式获得可实施的中意方案。由于运动链越长,机构方案越复杂,故障率越高,累积误差越大,因此该处只能寻找满足特征要求的单级方案。按输入输出运动特征转动→移动,在常用的45种基本机构求得的方案集为[螺旋机构,齿轮齿条机构,

摩擦轮机构,摩擦圆盘无级变速机构]。

在实际抓取装置中,为保证结构简单,目标物两侧的执行构件通常是一端固定,另一端运动。这些装置存在抓取效率低、与目标物是点接触、接触载荷较大的缺陷,不能胜任不规则、脆(软)性物体的抓取工作。为此,笔者通过前述方法按多点接触、接触载荷小、效率高和能胜任不规则、脆(软)性物体抓取的标准对方案进行集中评价后确定的实施方案如图2所示。图中,两段反向螺纹的双螺旋传动轴2与动臂3、4组成复式螺旋传动,驱动尾端与机架1固结的U型变截面柔性片5的开合,进而完成对目标物的抓取。



(a)机构简图



(b)实体结构

1. 机架;2. 双螺旋传动轴;3. 动臂;4. 动臂;5. U形变截面柔性片;6. 电机。

图2 柔性抓取机械手的原理方案

Fig. 2 The principle scheme of flexible grasping manipulator

## 2 末端-U形变截面柔性片的结构设计

### 2.1 末端常用结构

由图2可知,抓取动作的执行部分为U形柔性片,其结构对抓取效果的好坏起到至关重要的作用。柔性片结构需满足结构简

单,受力均匀,易于制造、节能环保和强度达标等要求。结合实际制造技术和结构设计特征,确定纵向截面为矩形、抛物线形和倒梯形3种结构进行分析研究,择优选用。由于U形柔性片为对称结构,进行力学分析时可取一半结构(图2(b)中的圈A部分)进行研究,因此,该结构的等厚度  $h$  下的几何结构模型如图3所示。



(a)矩形



(b)抛物线形



(c)倒梯形

图3 柔性片的结构

Fig. 3 The structure of flexible sheet

### 2.2 柔性片的驱动载荷与原动机载荷间的关系

在图2中,原动机采用无刷直流电机<sup>[15]</sup>,其电磁转矩与电流的关系为

$$T_e = K_T i. \quad (3)$$

式中: $T_e$ 为电磁转矩, $N \cdot m$ ;  $K_T$ 为电机转矩系数,  $(N \cdot m)/A$ ;  $i$ 为稳态时的绕组相电流,  $A$ 。

在双螺旋机构中,扭矩  $T$  与柔性片所受的轴向推力  $F_x$  的关系为

$$T = \frac{F_x S \times 10^{-3}}{2\pi\eta}. \quad (4)$$

式中: $T$ 为螺杆扭矩, $N \cdot m$ ;  $F_x$ 为柔性片受到的轴向推力, $N$ ;  $S$ 为螺纹导程, $mm$ ;  $\eta$ 为螺旋机构的综合传动效率。

忽略转子转动惯量、黏滞摩擦系数<sup>[16]</sup>,则螺旋机构的轴向输出力  $F_x$  和无刷直流电机电流  $i$  的关系为

$$F_x = \frac{2\pi\eta}{S \times 10^{-3}} K_T i. \quad (5)$$

### 2.3 柔性片的力与变形关系

U形柔性片的结构是对称的,因此力学分析时取一半进行,因此柔性片(以倒梯形为例)的力学模型如图4所示。以原点  $O$  建立坐标系,  $F_x$  为在柔性片自由端施加的集中力在  $x$  轴方向的分力,  $l$  为柔性片工作长度(受力点到固定端的距离),  $\theta$  为转角位移。假设:①螺旋机构的轴向作用力以力和力偶形式作用在柔性片上,各运动副的摩擦阻力忽略不计;②柔性片外的其他零件为刚体;③忽略所有零件的重力与惯性力;④柔性片的工作弧长变形前后不变。

图4中,  $O$  点、 $A$  点分别为等效悬臂梁的固定端和自由端,  $b$ 、 $h$  分别为柔性片两端的宽度和厚度,  $l_A$  为变截面部分的长度。则梁上任一位置  $x$  处的弯矩为

$$M(x) = F_x(l-x). \quad (6)$$

式中: $x$ 为柔性任意位置到固定端点  $O$  的距离。将式(5)代入式(6)得:

$$M(x) = \frac{2\pi\eta}{S \times 10^{-3}} K_T i(l-x). \quad (7)$$

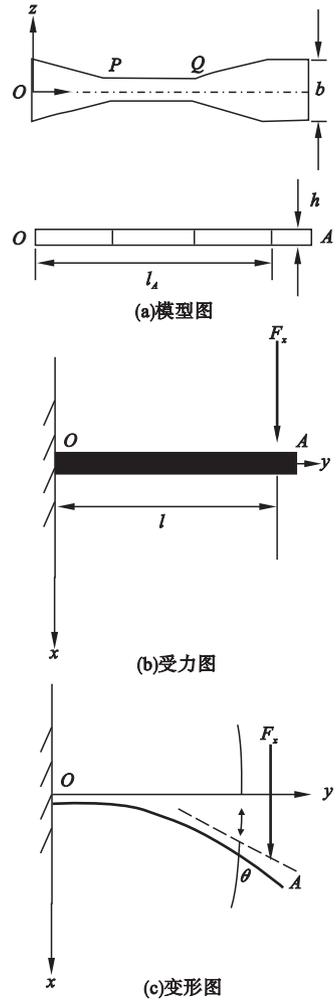


图4 倒梯形柔性片的力学模型

Fig. 4 The mechanical model of inverted trapezoid flexible sheet

当柔性关节片为倒梯形时,关节片的边缘线是一次线性函数,设上边缘线依次经过点  $(0, \frac{b}{2})$ ,  $P(\frac{l_A}{m}, \frac{b}{n})$ ,  $Q(l_A - \frac{l_A}{m}, \frac{b}{n})$ ,  $(l_A, \frac{b}{2})$ 。其中,  $m$ 、 $n$  为大于2的自然数,分别控制柔性片中等截面段的长度与宽度。根据一次函数表达式  $y = ax + b$  可得到柔性片上边缘线的表达式为

$$y = \begin{cases} \frac{(2-n)mb}{2nl_A}x + \frac{b}{2}, & 0 \leq x \leq \frac{l_A}{m}; \\ \frac{(n-2)mb}{2nl_A}x + \frac{b[n-m(n-2)]}{2n}, & l_A - \frac{l_A}{m} \leq x \leq l_A. \end{cases} \quad (8)$$

设  $c$  为柔性片上任意位置  $x$  处的宽度, 则片簧受力弯曲时  $c = 2y$ , 所以主惯性矩为

$$I = \frac{ch^3}{12} = \begin{cases} \frac{h^3}{12} \left[ \frac{(2-n)mb}{nl_A} s + b \right], & 0 \leq s \leq \frac{l_A}{m}; \\ \frac{h^3}{12} \left[ \frac{(n-2)mb}{nl_A} s + \frac{b[n-m(n-2)]}{n} \right], & l_A - \frac{l_A}{m} \leq s \leq l_A. \end{cases} \quad (9)$$

根据伯努利方程<sup>[17]</sup>可知梁上任意位置的曲率  $\rho$  与该位置弯矩  $M$  间的关系为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{M}{EI} \quad (10)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $I$  为主惯性矩;  $s$  为弧长;  $\theta$  为任意位置的转角位移。

将式(7)、式(9)代入式(10), 得到柔性关节片的大变形挠曲线。

$$\frac{d\theta}{ds} = \begin{cases} \frac{24\pi\eta K_T i(l-x)}{S \times 10^{-3} \times Eh^3 \left( \frac{mb(2-n)}{nl_A} s + b \right)}, & 0 \leq s \leq \frac{l_A}{m}; \\ \frac{24\pi\eta K_T i(l-x)}{S \times 10^{-3} \times Eh^3 \left( \frac{mb(n-2)}{nl_A} s + \frac{b[n-m(n-2)]}{n} \right)}, & l_A - \frac{l_A}{m} \leq s \leq l_A. \end{cases} \quad (11)$$

式(11)对弧长  $s$  求导以减少参数个数, 得到二阶导数关系式( $s$  取值范围同上)。

$$\frac{d^2\theta}{ds^2} = \begin{cases} \frac{1}{\frac{(2-n)mb}{nl_A} s + b} \left[ \frac{-24\pi\eta K_T i \cos\theta}{S \times 10^{-3} Eh^3} - \frac{d\theta}{ds} \cdot \frac{mb(2-n)}{nl_A} \right], & 0 \leq s \leq \frac{l_A}{m}; \\ \frac{1}{\frac{mb(n-2)}{nl_A} s + \frac{b[n-m(n-2)]}{n}} \left[ \frac{-24\pi\eta K_T i \cos\theta}{S \times 10^{-3} Eh^3} - \frac{d\theta}{ds} \cdot \frac{mb(n-2)}{nl_A} \right], & l_A - \frac{l_A}{m} \leq s \leq l_A. \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知, 柔性关节片上任意位置的转角位移  $\theta$  是其弧长  $s$  的二阶导数。以  $0 \leq s \leq \frac{l_A}{m}$  区段为例, 因柔性关节片产生大挠度变形<sup>[18-19]</sup>, 所以有微分关系式:

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = \cos\theta; \\ \frac{dy}{ds} = \sin\theta. \end{cases} \quad (13)$$

联立式(12)、式(13)得到方程组:

$$\begin{cases} \frac{d^2\theta}{ds^2} = \frac{1}{\frac{(2-n)mb}{nl_A} s + b} \left[ \frac{-24\pi\eta K_T i \cos\theta}{S \times 10^{-3} Eh^3} - \frac{d\theta}{ds} \cdot \frac{mb(2-n)}{nl_A} \right]; \\ \frac{dx}{ds} = \cos\theta; \\ \frac{dy}{ds} = \sin\theta. \end{cases} \quad (14)$$

求解方程组(14)即可得到柔性关节片弯曲变形时任意位置的转角位移和坐标位移, 这里采用 ode45 阶函数将方程组转化成初值题进行求解。由图4可知初值条件为

$$\begin{cases} s = 0; \\ \theta = 0; \\ x = 0; \\ y = 0. \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(11)得到柔性关节片固定端  $O$  点角位移的一阶导数值:

$$\begin{cases} \theta = 0; \\ \frac{d\theta}{dx} = \frac{24\pi\eta K_T i l}{BESh^3 \times 10^{-3}}. \end{cases} \quad (16)$$

求解方程组(14)时, 首先对其进行降阶处理, 令  $\theta = y_1, \frac{d\theta}{ds} = y_2, x = y_3, y = y_4$ , 得到方程组:

$$\begin{cases} y_1' = y_2; \\ y_2' = \frac{1}{\frac{(2-n)mb}{nl_A} s + b} \times \left[ \frac{-24\pi\eta K_T i \cos y_1}{ESh^3 \times 10^{-3}} - y_2 \frac{mb(2-n)}{nl_A} \right]; \\ y_3' = \cos y_1; \\ y_4' = \sin y_1. \end{cases} \quad (17)$$

初始条件为

$$\begin{cases} y_1(0) = 0; \\ y_2(0) = \frac{24\pi\eta K_T il}{bESh^3 \times 10^{-3}}; \\ y_3(0) = 0; \\ y_4(0) = 0. \end{cases} \quad (18)$$

求解方程组(17)即可得到柔性关节片弯曲变形时任意位置的转角位移和坐标位移。

倒梯形柔性片另一变截面区段的分析方法与上述同理,而对抛物线形柔性片的处理只需在其边缘线上取点带入到二次函数抛物线公式  $y = ax^2 + bx + c$  中即可,这里不再赘述。

## 2.4 柔性片最佳结构的确定

柔性片的结构形状对其变形是否灵活、驱动电机动力能否减小,节能环保起着决定性的作用。因此,结合第二节的理论,编制了相应的 MATLAB 程序,分别对同等载荷下三种不同截面形状的柔性片进行了位移-转角关系数值求解,用以确定柔性片的最佳结构。

考虑到强度条件,这里应用 ANSYS 软件建立了柔性片的几何模型,应用三角形单元对模型进行网格划分,并对截面变化区域的边缘部分进行网格细化处理,添加相应的约束条件,进行应力分析验算,确保该结构的最大应力小于许用应力,即  $\sigma \leq [\sigma]$ 。

## 3 实例分析

选用无刷直流电机的转矩系数  $K_T = 0.08 \text{ (N}\cdot\text{m)/A}$ ;螺旋机构传动效率  $\eta = 0.3$ ,

螺纹导程  $S = 2 \text{ mm}$ ;U形变截面弹簧片骨架材料为60Si<sub>2</sub>MnA,两端宽  $b = 12 \text{ mm}$ ,厚度  $h = 1 \text{ mm}$ ,工作长度  $l = 120 \text{ mm}$ ,变截面段长度  $l_A = 100 \text{ mm}$ ,弹性模量  $E = 20.5 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,  $n = 3$ ,  $m = 2$ ,变截面柔性片的长度和最大宽度与文献[20]中的矩形截面片弹簧相等。

利用 MATLAB 的 ode45 函数对式(17)等在  $i = 40 \text{ mA}$ ,  $80 \text{ mA}$ ,  $120 \text{ mA}$ ,  $160 \text{ mA}$  时进行求解,得出 U 形柔性片矩形、抛物线形、倒梯形变截面下的位移-转角数值解,部分分析结果如表 1 所示。限于篇幅,文中仅保留倒梯形柔性片的转角位移随弧长的变化曲线及变形情况,如图 5 所示。

表 1 三种柔性片 A 点数值计算对比表

Table 1 Comparison results of three flexible sheet at A point

$i/\text{mA}$	柔性片形状	$\theta_A/\text{rad}$	$x_A/\text{m}$	$y_A/\text{m}$
0.04	等截面	0.244 19	0.118 46	0.008 92
	抛物线形	0.288 17	0.118 24	0.009 37
	倒梯形	0.347 16	0.118 14	0.013 47
0.08	等截面	0.474 27	0.115 54	0.015 46
	抛物线形	0.516 41	0.115 32	0.016 49
	倒梯形	0.574 13	0.114 86	0.021 58
0.12	等截面	0.621 54	0.114 29	0.025 61
	抛物线形	0.664 53	0.113 46	0.027 48
	倒梯形	0.738 28	0.112 10	0.035 72
0.16	等截面	0.774 15	0.111 14	0.040 19
	抛物线形	0.812 16	0.108 63	0.043 76
	倒梯形	0.899 35	0.107 31	0.051 73

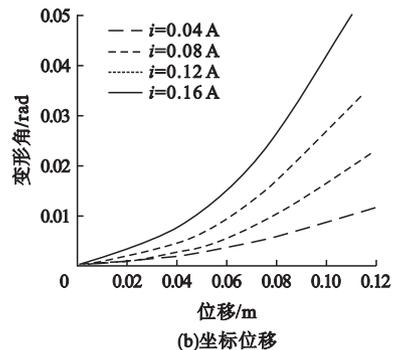
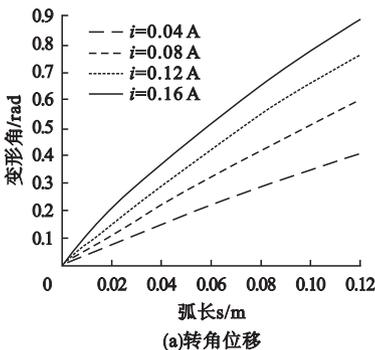


图 5 倒梯形柔性片的转角、位移变化曲线

Fig. 5 Angle and displacement curves of the inverted trapezoid flexible sheet

由表1可知,在相同电流的连通下,变截面柔性片比等截面片具有更大的弯曲变形角与纵坐标变形量,其中倒梯形柔性片的表现更为出色,弯曲性能更佳;从图2可知该形状更加节省材料,从实际应用和绿色环保的角度上来看该结构具有更大的推广应用价值。

对倒梯形柔性片结构用 ANSYS 进行分析,变形云图和应力云图如图6所示。由图

6(a)可知,倒梯形柔性片在自由端A点处存在最大变形量为51.070 mm,与数值解法的结果比较误差为1.3%,误差较小;由图6(b)可知,倒梯形柔性片结构的最大应力 $\sigma_{\max} = 1\,069.4\text{ MPa}$ ,查手册知该材料的许用应力 $[\sigma] = 1\,166.67\text{ MPa}$ , $\sigma_{\max} < [\sigma]$ ,说明该结构满足强度要求。

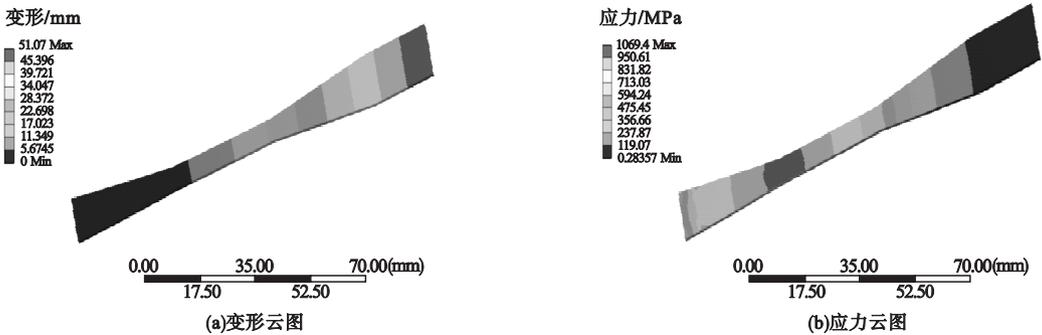


图6  $i=0.16\text{ A}$ 时倒梯形簧片的ANSYS分析结果

Fig. 6 The ANSYS analysis results of inverted trapezoid reed at  $i=0.16\text{ A}$

## 4 结论

(1)笔者所提出的柔性抓取机械手方案具有结构简单、驱动单元少、具有较好柔顺自适应能力和抓取效率高的优点。

(2)为了更好地实现柔顺性能,对机械手末端执行元件——U形柔性片进行力学分析,根据分析结果确定了倒梯形结构为柔性片的最佳结构,可为实现更大的抓持范围、更多样的抓取目标物结构和节材节能机械手的设计提供依据,具有较高的理论和实际应用价值。

## 参考文献

- [1] 熊强,章军,王芳,等. 抓取梯形包装盒的柔性机械手结构优化设计[J]. 包装工程,2014,35(11):80-83.  
(XIONG Qiang, ZHANG Jun, WANG Fang, et al. Structural optimization of flexible manipulator for grabbing trapezoidal packaging boxes [J]. Packaging engineering, 2014, 35(11): 80-83.)
- [2] 熊强,章军,朱飞成. 通用梯形包装盒柔性抓持机械手结构[J]. 轻工机械,2014,32(3):56-59.

- (XIONG Qiang, ZHANG Jun, ZHU Feicheng. Structure analysis of universal trapezoidal package flexible grasping manipulator [J]. Light industrial machinery, 2014, 32(3): 56-59.)
- [3] 史晓斐,章军,王城坡. 电-气复合驱动柔性机械手的设计与研究[J]. 包装工程,2019,40(3):156-161.  
(SHI Xiaofei, ZHANG Jun, WANG Chengpo. Design and research of electrical composite driven flexible manipulator [J]. Packaging engineering, 2019, 40(3): 156-161.)
- [4] 李秋苹,章军,崔军. 一种欠驱动柔性机械手的抓取力研究[J]. 轻工机械,2018,36(3):14-17.  
(LI Qiuping, ZHANG Jun, CUI Jun. Grasping force study of underactuated and flexible manipulator [J]. Light industry machinery, 2018, 36(3): 14-17.)
- [5] 刘光元,章军,朱飞成,等. 变载荷作用下柔性关节板弹簧的大变形分析与强度计算[J]. 机械科学与技术,2013,32(1):111-115.  
(LIU Guangyuan, ZHANG Jun, ZHU Feicheng, et al. Large deformation analysis and strength calculation of plate spring with flexible joint under varying load [J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2013, 32(1): 111-115.)
- [6] 章军,王芳,刘光元. 一种变截面片弹簧骨架柔顺关节的变形研究[J]. 机械设计,2016,33(12):31-36.  
(ZHANG Jun, WANG Fang, LIU Guangyuan.

- Deformation analysis of the compliant joint with variable section lead spring skeleton [J]. Journal of machine design, 2016, 33(12): 31-36.
- [7] 刘佳, 李娜, 郝子岩, 等. 柔性机械手设计与夹取力动态特性仿真分析[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 119-125. (LIU Jia, LI Na, HAO Ziyang, et al. Design of the flexible manipulator and dynamic characteristics analysis of clamping force [J]. Journal of Hebei university (natural science edition), 2018, 38(2): 119-125.)
- [8] 李秋苹. 双电机驱动柔性机械手的抓持力分析与结构设计[D]. 无锡: 江南大学, 2018. (LI Qiuping. Grasping force analysis and structure design of the compliant manipulator driven by dual motor [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.)
- [9] 田颖, 张明路, 张建华. 三杆柔性机械手运动学分析及仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2012(12): 174-176. (TIAN Ying, ZHANG Minglu, ZHANG Jianhua. Kinematics analysis and simulation of three flexible manipulator within the plane [J]. Machinery design & manufacture, 2012(12): 174-176.)
- [10] 董增雅, 高谦, 高国华, 等. 柔性吞咽机械手的结构与样机试验[J]. 机电工程, 2018, 35(12): 62-67. (DONG Zengya, GAO Qian, GAO Guohua, et al. Structure design and prototype test of flexible swallowing manipulator [J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2018, 35(12): 62-67.)
- [11] 魏星, 于萍, 周安明. 一种液动柔性机械手手腕结构的设计与分析[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(1): 48-51. (WEI Xing, YU Ping, ZHOU Anming. Design and research of hydraulic flexible manipulator wrist [J]. Machine design and research, 2010, 26(1): 48-51.)
- [12] 耿德旭. 双向主动弯曲气动柔性关节及其在机械手中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2011. (GENG Dexu. Research on bidirectional bending pneumatic flexible joint and its application in robot hand [D]. Changchun: Jilin University, 2011.)
- [13] 韩泽光. 机械设计[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016. (HAN Zeguang. Mechanical design [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016.)
- [14] 韩泽光, 郝瑞琴, 王德伦, 等. 机械系统全寿命创新设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018. (HAN Zeguang, HAO Ruiqin, WANG Delun, et al. Life cycle innovative design method of mechanical system [M]. Beijing: Science Press, 2018.)
- [15] ZHANG J, ZHANG Q J. Bending of flexible joint driven by linear expandable artificial muscle [J]. International journal of modelling and simulation, 2011, 31(1): 1-5.
- [16] BANERJEE A, BHATTACHARYA B, MALLIK A K. Large deflection of cantilever beams with geometric non-linearity: analytical and numerical approaches [J]. International journal of non-linear mechanics, 2008, 43(5): 366-376.
- [17] LIANG Z F, TANG X Y. Analytical solution of fractionally damped beam by Adomian decomposition method [J]. Applied mathematics and mechanics, 2007, 28(2): 219-228.
- [18] 钱伟长. 宁波甬江大桥的大挠度非线性计算问题[J]. 应用数学和力学, 2002(5): 441-451. (QIAN Weichang. Nonlinear calculation of large deflection of Ningbo yongjiang bridge [J]. Applied mathematics and mechanics, 2002(5): 441-451.)
- [19] 李海燕, 张宪民, 彭惠青. 大变形柔顺机构的驱动特性研究[J]. 机械科学与技术, 2004(9): 1040-1043. (LI Haiyan, ZHANG Xianmin, PENG Huiqing. Research on the actuation characteristics of a large-deformed compliant mechanism [J]. Mechanical science and technology, 2004(9): 1040-1043.)
- [20] 王红军, 黄国钢, 陈佳鑫, 等. 香蕉采摘机械手结构设计及样机试验[J]. 机械设计, 2013, 30(6): 13-17. (WANG Hongjun, HUANG Guogang, CHEN Jiabin, et al. Structural design and prototype test of banana picking manipulator [J]. Journal of machine design, 2013, 30(6): 13-17.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)