

DOI: 10.3901/JME.2015.01.069

一种基于变胞变换的柔顺剥线钳*

达选祥 勾燕洁 陈贵敏

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

摘要: 剥线钳是一种用于剥去电线绝缘皮的手持工具。现有的剥线钳结构复杂、成本高、容易磨损。考虑到剥线钳在运动过程中自由度会发生变化, 将变胞变换的思想引入剥线钳的设计中, 基于柔顺五杆机构得到一种新型的柔顺剥线机构。利用伪刚体模型法对柔顺剥线钳的不同工作状态进行建模, 给出了相应的运动静力学模型; 根据剥线钳的设计要求建立优化目标函数, 并采用粒子群算法完成了优化设计。参照优化结果加工的样机对不同规格的电线进行剥线测试, 证实该新型柔顺剥线钳具有较好的剥线效果, 可大幅降低现有剥线钳的成本, 便携且具有结构简单、工作可靠等优点。

关键词: 剥线钳; 柔性机构; 变胞变换; 粒子群算法

中图分类号: TH122

Compliant Wire Stripper Based on Metamorphic Transformation

DA Xuanxiang GOU Yanjie CHEN Guimin

(School of Mechatronics, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract: A wire stripper is a hand-held device used to strip the electrical insulation electric wires. The existing wire strippers are complicated, costly and easy to wear. Considering that wire strippers change their degrees-of-freedom during their motion, a new stripper design based on a compliant 5-bar mechanism utilizing metamorphic transformation is presented for wire stripping. The pseudo-rigid-body method (RPBM) is applied to solve the kinetostatic behaviors of the mechanism in different working phases. The objective function is established for optimizing the design and an optimal design is obtained using a particle swarm optimizer (PSO). Finally, based on the optimization results, a prototype is fabricated, which shows good performances in wire stripping. This compliant wire stripper is low cost, portable, simple in structure and reliable.

Key words: wire stripper; compliant mechanism; metamorphic transformation; particle swarm optimizer

0 前言

剥线钳是一种用于剥去电线绝缘覆皮的手持工具。常用的剥线钳如图1所示。在剥覆皮过程中, 使用者用力夹持钳柄, 使钳头的前后两部分相向平移直至相互接触, 夹紧电线并切断覆皮; 由于接触后平移运动受限, 使得钳头沿电线长度方向分离成两部分并相对转动, 从而剥离覆皮; 操作完成后剥线钳依靠弹簧的弹性回复力回到初始位置。由于包含零件多、结构复杂, 这种剥线钳成本较高; 此外, 由于构件之间是刚性连接的, 工作过程中存在摩擦和磨损, 需要经常清理和润滑。



图1 常用剥线钳

剥线钳在工作过程中钳头先平移再转动, 运动特性发生了改变, 具有变胞机构的运动特点。变胞机构^[1]是一类能够根据环境和工况的变化, 以及不同的任务需求, 通过改变自身拓扑结构和自由度, 进行自我重组和重构, 实现不同功能的新型机构。变胞机构由戴建生等^[1]在1998年提出, 引起了国内外学者的广泛关注。戴建生和李端玲等对变胞机构

* 国家自然科学基金(51175396)、中央高校基本科研业务费专项(K5051204021, K5051304023)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0689)资助项目。20140105收到初稿, 20140915收到修改稿

的判定条件^[2-3]、变胞方式^[4]及构态表示方法^[5]进行了探索, 金国光^[6]通过建立全构态运动学方程对刚性变胞机构的结构学、运动学和动力学进行了研究, 初步形成了变胞机构的理论体系。此外, 由戴建生发起的两届 ReMAR 会议(International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots)从机构综合、设计及应用等多个方面促进了变胞机构的发展, 相关的研究成果已广泛应用于工程实际, 例如用于微创手术的变胞机械手^[7], 用于按摩、医疗康复领域的变胞并联机械^[8-9]等。

柔顺机构是一种利用柔顺构件本身的弹性变形来实现运动、力、能量的传递和转换的新型机构, 具有装配容易, 摩擦磨损少, 维护方便, 可靠性高等优点。将变胞变换的思想引入到柔顺机构的设计中, 可以简化机构设计过程, 降低成本和提高效率。CARROLL 等^[10]提出平面柔顺机构在简单装配后通过变胞变换可以使机构运动至空间的不同构态, 大大减少机构占用的空间; 杨毅等^[11]利用杆件的柔性实现机构的构态变化而得到一种柔性折叠雨伞。ZIRBEL 等^[12]设计的带有变胞变换的全柔顺恒力纳米注射器, 可将 DNA 等生物大分子准确地植入小鼠受精卵。CHEN 等^[13]将变胞变换思想引入到柔顺五杆机构中, 成功设计了一种柔顺三稳态机构。

变胞变换与柔顺机构的结合融合了两者的优点, 具有重要的研究价值和广阔的应用前景。本文基于两者的融合进行剥线钳设计, 得到一种结构简单、便于维护的新型剥线钳。

1 柔顺变胞剥线钳的设计

本文设计的新型柔顺剥线钳如图 2 所示, C 和 F 是夹紧端, F 端装有破坏电线绝缘覆皮的刀具。该新型柔顺剥线钳结构对称, 可以完成以下三个阶段的工作: ① 夹紧电线, 切割覆皮; ② 拉断、剥离覆皮; ③ 回复原位。其中第一和第二阶段的工作示意图见图 3。

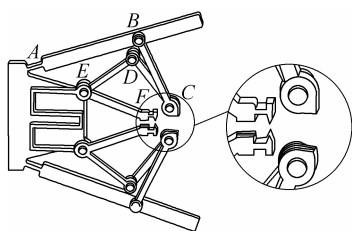


图 2 一种新型柔顺剥线钳

用伪刚体模型法^[14]对本文设计的新型柔顺剥线钳进行分析计算。因结构对称, 取柔顺剥线钳的

一半分析(简称剥线机构), 建立伪刚体模型如图 4 所示。该结构可简化为平面五杆机构, 除机架 AE 外, 包含 AB 、 BC 、 CD 、 DEF 四个杆件, A 、 B 、 C 、 D 、 E 五个铰链(与图 2 对应), 其中 A 是短臂柔铰, B 、 C 、 D 、 E 是刚性转动副。杆件 DEF 在 E 处有一个连接上下两部分的“弓”字形柔性构件, 该柔性构件变形后产生的弹性回复力可以使剥线钳剥离覆皮后能自动回复原位。

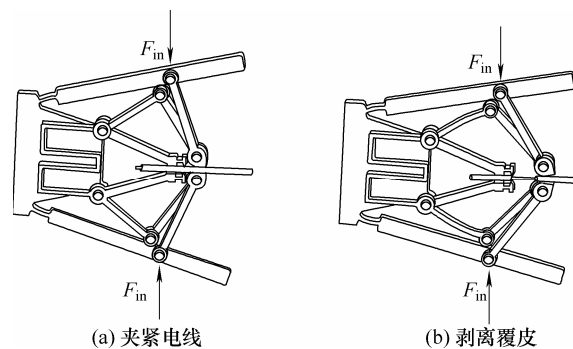


图 3 新型柔顺剥线钳工作示意图

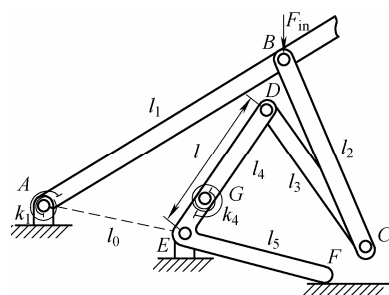


图 4 柔顺变胞剥线机构的伪刚体模型

在初始状态下, 剥线钳中的柔顺构件无变形, 可视作刚性构件, 因此整个机构的自由度为 0。柔顺剥线钳工作时, 电线按图 3a 所示位置放置于 F 端。第一阶段夹持电线时, 手施力于图 4 中的杆件 AB , 迫使短臂柔铰 A 发生角变形而成为转动副, 杆 BC 的 C 端向 F 端靠近直至 C 端接触到电线。由于 F 端夹紧电线并破坏绝缘覆皮后静止不动, 故仍可将杆件 DEF 视为机架, 机构以四杆机构的形式运动(构态一), 自由度为 1。第二阶段中继续对杆 AB 施力, 由于 EF 段受到电线的阻挡仍然静止, 而铰链 D 处受力迫使杆 DE 发生弯曲变形。此时的杆 DE 可视为自由端受力的柔性悬臂梁, 其伪刚体模型是固定-铰接片段, 其末端轨迹可以用由铰链 G 来连接的 DG 和 GE 这两段伪刚体杆来描述, 铰接点 G 处的扭簧体现出梁的抗变形能力^[14]。因此剥线机构的伪刚体模型变胞变换成为五杆机构(构态二), 自由度为 2。杆 DG 绕 G 点顺时针转动使夹持电线的 C 端水平向右移动, 拉断电线覆皮。剥除电线覆皮后, 撤掉输入力, 所有柔性构件储存的弹性变形能

使柔顺剥线钳回复原位。

当剥线机构从四杆机构变化为五杆机构, 再回到初始状态时, 剥线钳完成夹持电线、剥除绝缘覆皮和回复原位的工作过程, 其拓扑结构变化如图 5 所示, 图中的 0、1、2、3、4、5 分别代表机架、杆 AB 、 BC 、 CD 、 DG 和 GEF 。

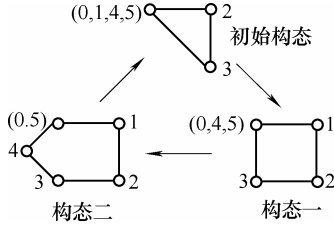


图 5 拓扑结构变化示意图

1.1 柔顺剥线钳夹持过程运动分析

如前所述, 在第一阶段夹持电线时, 剥线机构为四杆机构, 杆件 DEF 静止, 机架为 AD 。杆件 AB 在输入力 F_{in} 的作用下转动使 C 端向 F 端靠近直至 C 端碰到电线, 剥线机构完成夹持过程。第一阶段结束时剥线机构的伪刚体模型如图 6 所示。

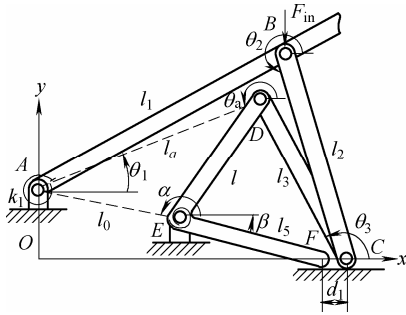


图 6 剥线机构构态一结构示意图

剥线机构的位置闭环方程为

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 + l_a \cos \theta_a = 0 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 + l_a \sin \theta_a = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 l_a ——机架 AD 的长度;

θ_a ——机架 AD 的角度。

$$l_a = \sqrt{l_{ax}^2 + l_{ay}^2} \quad (2)$$

$$\theta_a = \pi + \arctan(l_{ay} / l_{ax}) \quad (3)$$

$$l_{ax} = l_1 \cos \theta_{10} + l_2 \cos \theta_{20} + l_3 \cos \theta_{30}$$

$$l_{ay} = l_1 \sin \theta_{10} + l_2 \sin \theta_{20} + l_3 \sin \theta_{30}$$

式中, θ_{10} 、 θ_{20} 和 θ_{30} 是初始状态杆 AB 、 BC 和 CD 的角度。

当图 6 中机构的各个参数已知时, 对于不同的输入角度 θ_1 , 求解式(1)可得到对应的杆 AB 和杆 BC 的角度 θ_2 和 θ_3 , 进一步求得两个夹持点 F 、 C 之间

的距离

$$d_1 = l_1 \cos \theta_{11} + l_2 \cos \theta_{21} - (l_3 \cos \beta - l_0 \cos \alpha) \quad (4)$$

式中, θ_{11} 、 θ_{21} 和 θ_{31} 为第一阶段结束时杆 AB 、 BC 和 CD 的角度; α 、 β 为 AE 和 EF 与水平方向的夹角。

1.2 柔顺剥线钳剥线过程运动分析

第二阶段剥离覆皮时, 因杆 EF 的转角及 E 点的铰链刚度都很小, 故忽略不计, 杆 EF 仍视作机架。 C 端夹住电线后沿 y 轴方向运动受限, 不能再绕 D 转动而改为沿 x 轴方向平移, 迫使固定-铰接杆 DE 自由端受力发生变形, D 端轨迹可用伪刚体杆 DG 绕铰接点 G 的转动来描述。第二阶段结束时夹持点 C 右移一段距离到与 F 相距 d_2 处以拉断电线覆皮。第二阶段中剥线机构为五杆机构, 机架为 AG , 机构的伪刚体模型如图 7 所示。

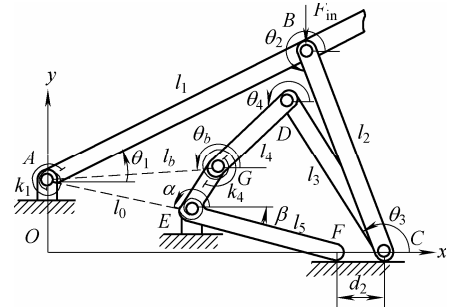


图 7 剥线机构构态二结构示意图

图 7 中, 设 l 是杆 DE 的长度, 用 l_4 表示伪刚体杆 DG 的长度, 则 $l_4 = \gamma l$, γ 是特征半径系数, GE 的长度为 $(1-\gamma)l$ 。

剥线机构的位置闭环方程为

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 + l_4 \cos \theta_4 + l_b \cos \theta_b = 0 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 - l_1 \sin \theta_{11} - l_2 \sin \theta_{21} = 0 \\ l_3 \sin \theta_3 + l_4 \sin \theta_4 + l_b \sin \theta_b + l_1 \sin \theta_{11} + l_2 \sin \theta_{21} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, l_b 和 θ_b 分别是机架 AG 的长度和角度, 可按以下两式计算

$$l_b = \sqrt{l_0^2 + [(1-\gamma)l]^2 + 2(1-\gamma)l_0 l \cos(\theta_{40} - \alpha)} \quad (6)$$

$$\theta_b = \theta_{40} - \arccos \frac{l_b^2 + [(1-\gamma)l]^2 - l_0^2}{2(1-\gamma)l_b l} \quad (7)$$

式中, θ_{40} 为初始状态杆 DG 的角度。

根据已知的机构设计参数及输入角 θ_1 可求解得到杆 BC 、 CD 和 DG 的角度 θ_2 、 θ_3 和 θ_4 。

由于剥线时主要依靠摩擦力剥离遭破坏的电线绝缘覆皮, 所以机构在设计时要考虑摩擦力。取

F 端和 C 端的摩擦因数 $\mu_1=\mu_2=0.2$, 机构中各个杆件的受力情况如图 8 所示。

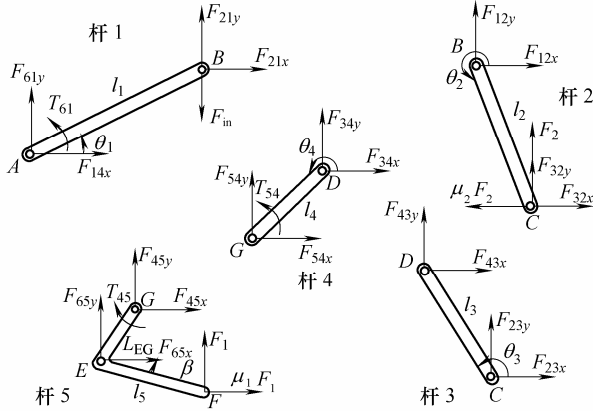


图 8 机构的自由体图解

对图 8 中的杆 1~5 分别列力矩和力平衡方程

$$\begin{cases} T_{61} + (F_{21y} - F_{in})l_1 \cos \theta_1 - F_{21x}l_1 \sin \theta_1 = 0 \\ (F_{32y} + F_2)l_2 \cos(2\pi - \theta_2) + (F_{32x} - \mu_2 F_2)l_2 \sin(2\pi - \theta_2) = 0 \\ -F_{43x}l_3 \cos(\pi - \theta_3) - F_{43y}l_3 \sin(\pi - \theta_3) = 0 \\ T_{54} - F_{54y}l_4 \cos(\theta_4 - \pi) + F_{54x}l_4 \sin(\theta_4 - \pi) = 0 \\ -T_{45} + F_{45y}l_{EG} \cos(\theta_{40} - \pi) - F_{45x}l_{EG} \sin(\theta_{40} - \pi) + \\ F_1 l_5 \cos \beta + \mu_1 F_1 l_5 \sin \beta = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} F_{12x} + F_{32x} - \mu_2 F_2 = 0, F_{12y} + F_{32y} + F_2 = 0 \\ F_{43x} + F_{23x} = 0, F_{43y} + F_{23y} = 0 \\ F_{54x} + F_{34x} = 0, F_{54y} + F_{34y} = 0 \\ F_{65x} + F_{45x} + \mu_1 F_1 = 0, F_{65y} + F_{45y} + F_1 = 0 \\ F_{61x} + F_{21x} = 0, F_{61y} + F_{21y} - F_{in} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, 柔性铰链 A 的弯矩^[14]和铰接点 G 处的扭簧扭矩^[14]分别为

$$T_{61} = -k_1(\theta_1 - \theta_{10}) = -\frac{Etb^3}{12a}(\theta_1 - \theta_{10}) \quad (10)$$

$$T_{54} = -k_4(\theta_4 - \theta_{40}) = -\gamma K_\theta \frac{Etb_4^3}{12l}(\theta_4 - \theta_{40}) \quad (11)$$

式中 E ——材料的弹性模量;

a ——短臂柔铰在平面内的长度;

b ——短臂柔铰在平面内的宽度;

t ——短臂柔铰在平面外的厚度;

γ ——伪刚体模型特征半径系数, 常取 0.85;

K_θ ——刚度系数, 常取 2.65;

b_4 ——柔性连杆在平面内的宽度;

l ——柔性连杆 DE 的长度。

作用在由铰链连接的两杆件上的力大小相等但方向相反, 即有

$$\begin{cases} F_{21x} = -F_{12x} & F_{21y} = -F_{12y} \\ F_{32x} = -F_{23x} & F_{32y} = -F_{23y} \\ F_{43x} = -F_{34x} & F_{43y} = -F_{34y} \\ F_{54x} = -F_{45x} & F_{54y} = -F_{45y} \end{cases} \quad (12)$$

设 $F_{61x}=F_x$, $F_{61y}=F_y$, 化简整理得方程组

$$\begin{cases} -k_1(\theta_1 - \theta_{10}) - F_y l_1 \cos \theta_1 + F_x l_1 \sin \theta_1 = 0 \\ (F_{in} - F_y)l_2 \cos \theta_2 + F_x l_2 \sin \theta_2 = 0 \\ (F_{in} - F_y - F_2)l_3 \cos(\pi - \theta_3) + (\mu_2 F_2 - F_x)l_3 \sin(\pi - \theta_3) = 0 \\ -k_4(\theta_4 - \theta_{40}) - (F_{in} - F_y - F_2)l_4 \cos(\theta_4 - \pi) + \\ (\mu_2 F_2 - F_x)l_4 \sin(\theta_4 - \pi) = 0 \\ -k_4(\theta_4 - \theta_{40}) + (F_{in} - F_y - F_2)l_{EG} \cos(\theta_{40} - \pi) + \\ (\mu_2 F_2 - F_x)l_{EG} \sin(\theta_{40} - \pi) + F_1 l_5 \cos \beta + \mu_1 F_1 l_5 \sin \beta = 0 \end{cases} \quad (13)$$

剥线机构的输入力 F_{in} 、机架在铰链 A 处对杆 1 的作用力 F_x 、 F_y 、 F 端夹持力 F_1 和 C 端夹持力 F_2 五个参数为未知量。

剥线结束两个夹持点的距离

$$d_2 = l_1 \cos \theta_{12} + l_2 \cos \theta_{22} - (l_5 \cos \beta - l_0 \cos \alpha) \quad (14)$$

式中, θ_{12} 和 θ_{22} 为第二阶段结束时杆 1 和杆 2 的角度。

2 柔顺剥线钳的优化设计

2.1 优化目标函数

选取 D 点和 E 点的坐标 D_x , D_y , E_x , E_y 以及柔性梁 DE 的宽度 b_4 为优化设计变量对机构进行优化, 优化目标有三个。

(1) 同一时刻 F 端夹持力 F_{1i} 和 C 端夹持力 F_{2i} 应相等, 描述为

$$\min f_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{1i} - F_{2i})^2}{n F_{1n}} \quad (15)$$

式中 F_{1n} ——剥线结束时机构的 F 端夹持力;

n —— θ_1 从 θ_{10} 变化到 θ_{12} 的总步数。

(2) 夹持阶段结束时两个夹持点靠近, 剥线阶段完成后两个夹持点远离。描述为

$$\min f_2 = \frac{d_1}{d_2} \quad (16)$$

(3) 剥线过程中柔性杆 DG 的转角要小, 即

$$\min f_3 = \psi_4 = \theta_{40} - \theta_{42} \quad (17)$$

这是多目标优化问题, 确定最后的优化目标函数为

$$\min f = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 \quad (18)$$

式中, w_1 、 w_2 和 w_3 为权重系数^[15], 根据经验取

$w_1=100$ 、 $w_2=10$ 和 $w_3=1$ 。

柔顺剥线机构的优化问题规划为

find $[D_x, D_y, E_x, E_y, b_4]$

$\min f = \sum_{i=1}^3 w_i f_i$

s.t. $30 \text{ mm} < E_x < 45 \text{ mm}$

$10 \text{ mm} < E_y < 20 \text{ mm}$

$45 \text{ mm} < D_x < 60 \text{ mm}$

$30 \text{ mm} < D_y < 40 \text{ mm}$

$2 \text{ mm} < b_4 < 5 \text{ mm}$

$S_i > 5 \text{ mm}, i=1, 2$

$d_1 \geq 5 \text{ mm}$

$\theta_{21} > 280^\circ$

$F_{in} < 200 \text{ N}$

(19)

约束条件中为避免机构装配时杆件之间相互干涉, 限定了 D 和 E 点的坐标范围、柔性梁 DE 的宽度范围、 D 点到杆 AB 的距离 S_1 、 D 点到杆 BC 的距离 S_2 和两个夹持点距离 d_1 的最小值以及机构最大输入力。此外, 夹持阶段结束时, 杆 BC 的角度 $\theta_{21} > 280^\circ$ 才能使 C 端在剥线过程中水平向右运动。

2.2 优化结果

设 l_i 为各杆长度, b_i 为各杆平面内宽度, θ_{i0} 为各杆初始角度($i=1, 2, \dots, 5$), A_x 和 A_y 为柔性铰链 A 的中心坐标。柔顺剥线机构的已知设计参数如表 1 所示。

表 1 柔顺剥线机构已知设计参数

参数	数值
杆 1 长度 l_1/mm	62
杆 1 宽度 b_1/mm	8
杆 1 初始角 $\theta_{10}/(^{\circ})$	18
杆 2 长度 l_2/mm	46.3
杆 2 宽度 b_2/mm	8
杆 2 初始角 $\theta_{20}/(^{\circ})$	299.8
杆 3 宽度 b_3/mm	8
杆 5 宽度 b_5/mm	4
柔性铰链长度 a/mm	2
柔性铰链宽度 b/mm	10
第二阶段结束杆 1 转角 $\theta_{12}/(^{\circ})$	8
A 点 x 坐标 A_x/mm	0
A 点 y 坐标 A_y/mm	26
F 点 x 坐标 F_x/mm	70
F 点 y 坐标 F_y/mm	0
弹性模量 E/GPa	1.4
平面外厚度 t/mm	6

基于表 1 中的参数, 采用粒子群优化算法^[16]对柔顺剥线机构进行优化设计。计算过程中取 40 个粒

子, 每个粒子为 5 维矢量, 将最大迭代步数设置为 1 000。设计参数优化结果如表 2 所示。

根据优化结果求出柔顺剥线机构在工作中 $d_1=5 \text{ mm}$, $d_2=22.2 \text{ mm}$; 剥线机构工作过程中输入力的变化情况如图 9 所示; 电线所受 F 、 C 两端夹持力 F_1 , F_2 与输入角 θ_1 的变化关系如图 10 所示。

表 2 柔顺剥线机构设计参数优化结果

参数	数值
D 点 x 坐标 D_x/mm	57.233 4
D 点 y 坐标 D_y/mm	32.246 0
E 点 x 坐标 E_x/mm	30.040 3
E 点 y 坐标 E_y/mm	12.136 0
杆 4 宽度 b_4/mm	2.520 2
目标函数值 f	2.708 0

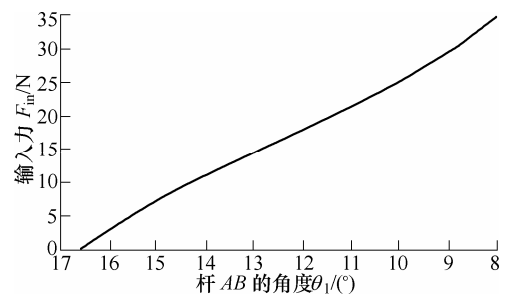


图 9 输入力变化曲线

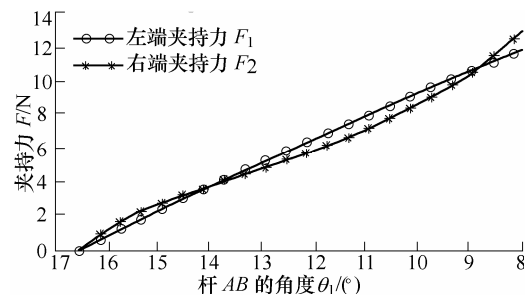


图 10 夹持力变化曲线

由优化结果可知, 优化后的模型在不同构态运动时夹持点的距离 d_1 和 d_2 相差较大, 可以满足剥离电线覆皮的要求; 机构的输入力 F_{in} 在人手可以承受的范围内; 剥线过程中 F 端夹持力 F_1 和 C 端夹持力 F_2 趋于一致, 剥线结束时的夹持力都较大。

根据优化后的机构参数加工得到柔顺剥线钳样机, 对电线进行剥线测试, 如图 11 所示。经多次测试, 用聚丙烯材料加工得到的样机, 可以成功地夹紧电线、剥离电线表面的绝缘覆皮再回复原位。

3 结论

(1) 将变胞变换的思想引入柔顺机构而提出一种全新的柔顺变胞剥线机构构型。

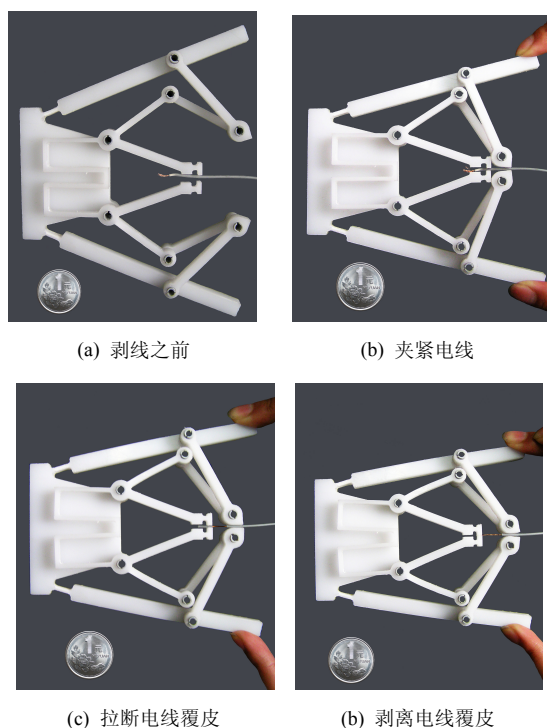


图 11 剥线钳剥线过程

(2) 通过对柔顺剥线机构建立伪刚体模型进行分析, 列出多目标优化函数, 并采用粒子群优化算法计算得到能满足实际需要的柔顺剥线机构参数。

(3) 用聚丙烯材料加工的样机对电线进行剥线测试, 具有较好的工作性能。

参 考 文 献

- [1] DAI Jiansheng, REES J. Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds[J]. Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design, 1999, 121(3): 375-382.
- [2] 戴建生. 变胞机构研究中的几个问题[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(增 1): 276-278.
DAI Jiansheng. Characteristics of metamorphic mechanisms [J]. Machine Design and Research, 2004, 20(Suppl.1): 276-278.
- [3] ZHANG Liping, DAI Jiansheng. Metamorphic techniques and geometric reconfiguration principles[C] // ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, June 22-24, 2009, London, United Kingdom. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009: 32-40.
- [4] 李端玲, 张忠海, 戴建生, 等. 变胞机构的研究综述与展望[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 14-21.
LI Duanling, ZHANG Zhonghai, DAI Jiansheng, et al. Overview and prospects of metamorphic mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 14-21.
- [5] DAI Jiansheng. Metamorphic mechanisms and their configuration models[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 13(3): 212-218.
- [6] 金国光. 变胞机构结构学、运动学及动力学研究[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
JIN Guoguang. Research on structure theory, kinematics and dynamics of metamorphic mechanism[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.
- [7] 王树新, 罗海风. 腹腔微创外科手术机器人用变胞工具手: 中国, 101584594A [P]. 2009-11-25.
WANG Shuxin, LUO Haifeng. The metamorphic manipulator used in celiac minimally invasive surgery. China, 101584594A [P]. 2009-11-25.
- [8] DAI Jiansheng. The metamorphic robotic hand: UK, GB04/09548.1 [P]. 2003-04-10.
- [9] DAI Jiansheng, ZHAO Tieshi, NESTER C. Sprained ankle physiotherapy based mechanism synthesis and stiffness analysis of rehabilitation robotic devices[J]. Autonomous Robots, 2004, 16(2): 207-218.
- [10] CARROLL D, MAGLEBY S, HOWELL L, et al. Simplified manufacturing through a metamorphic process for compliant ortho-planar mechanisms[C]//ASME IMECE, Orlando, FL, USA, 2005: 389-399.
- [11] 杨毅, 丁希仑, 戴建生. 一种伞式可折叠柔性变胞机构的设计分析研究[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 1014-1017.
YANG Yi, DING Xilun, DAI Jiansheng. Design and analysis of an umbrella foldable compliant metamorphic mechanism[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 1014-1017.
- [12] ZIRBEL S, ATEN Q, EASTER M, et al. Compliant constant-force micro-mechanism for enabling dual-stage motion[C]//ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2012: 191-198.
- [13] CHEN Guimin, LIU Yi, GOU Yanjie. A compliant 5-bar tristable mechanism utilizing metamorphic transformation[C]//Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I, Springer, London, 2012: 233-242.
- [14] HOWELL L. Compliant mechanisms[M]. New York: John Wiley & Sons Press, 2001.
- [15] CHEN Guimin, DU Yunlei. Double-Young tristable mechanisms[J]. Journal of Mechanisms and Robotics,

2013, 5(1): 011007.

[16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.

勾燕洁, 女, 1980 年出生, 博士研究生, 讲师。主要研究方向为柔顺机构学。

E-mail: yanjiegou@126.com

陈贵敏(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密仪器设计、柔顺机构学、MEMS 和群集智能方法。

E-mail: guimin.chen@gmail.com

作者简介: 达选样, 男, 1987 年出生。主要研究方向为柔顺机构学。

E-mail: 361145862@qq.com



国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度结题项目简介

基于太赫兹超常媒质谐振型 NEMS 生物传感器的基础研究*

项目负责人: 贺训军(E-mail: hexunjun@hrbust.edu.cn)

依托单位: 哈尔滨理工大学

项目批准号: 51005001

1. 项目简介

近年来, 利用超常媒质的超常规电磁特性实现新型的生物传感技术, 获得了广泛的关注。然而, 受电场能量聚集、生物分子或溶液有效吸附以及吸收损耗的限制, 无法实现微量生物物质的检测和识别。本项目针对尖型开口微纳谐振环结构的太赫兹超常媒质实现微量生物分子或溶液检测和识别的生物传感器展开研究。首先, 采用理论分析与数值仿真相结合的方法分析太赫兹超常媒质实现微量生物分子或溶液检测和识别机理; 其次, 对实现微量生物分子或溶液检测和识别的太赫兹超常媒质 NEMS 生物传感器进行结构设计和优化分析; 最后, 分析器件的集成加工技术的兼容性以及测试方法, 制备出能够探测生物样品的太赫兹超常媒质谐振型 NEMS 生物传感器, 并进行试验测试和性能分析。本项目的预期成果有望解决目前微量生物传感信号输出变化微弱的缺点, 实现了对微量生物分子或溶液的无标记、非侵入、高灵敏以及实时监视的检测和识别, 并促进有实用价值的超常媒质生物分子传感器的研究。

2. 主要创新点及其主要研究进展

(1) 设计了基于 MEMS 元件的多开口谐振环超常媒质结构单元, 根据传输线理论和电磁波理论建立了 MEMS 元件在不同工作状态下多开口谐振环超常媒质的等效电路模型和有效参数提取模型, 并采用数值方法分析 MEMS 元件在不同工作状态下多开口谐振环超常媒质的电磁特性和有效参数, 系统地探讨各开口对超常媒质的电磁分布、表面电流分布、散射参数以及磁导率的影响。

(2) 在传统开口谐振环传感机理基础上提出了嵌套式开口谐振环结构, 该结构不仅增加探测生物分子或薄膜的传感单元和提高传感器的灵敏度, 而且明显地降低器件的工作频率和缩小器件的尺寸。

(3) 提出了由两纳米槽结构构成的互补型超常媒质生物传感器, 总结了纳米槽尺寸对电磁场分布和生物传感灵敏影响的规律, 并在此基础上实现了易于填充生物分子的高灵敏度生物传感器。

(4) 设计和制备了可用于生物传感的双带超常媒质电磁波吸收器, 当生物分子吸附在超常媒质的表面上时双吸收带都发生明显的偏移, 实现传感探测生物分子的存在。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上作为候选项目推荐参加“国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目”的评选。