



主弹簧在通电加热过程中收缩,当 SMA 弹簧变为奥氏体状态时屈服应力最大,驱动器处于高温力平衡态。SMA 主弹簧在断电冷却过程中复原,弹性杆弧提供回复力,SMA 主弹簧变为马氏体状态时屈服应力最小。表 1 列出了该机器人一个运动周期内各元件的加热时序<sup>[1]</sup>,其中,A 表示加热状态,B 表示保温状态,C 表示冷却状态。

表 1 机器人各元件动作控制时序表

动作顺序	躯体 SMA	前脚 SMA	后脚 SMA	硅基	机械手
低头/抬头	C	C	C	A	C
夹持	C	C	C	B	A
抬头/低头	C	C	C	C	B
前脚抬起	C	A	C	C	B
收缩	A	B	C	C	B
后脚抬起,前脚放下	B	C	A	C	B
舒张	C	C	B	C	B
后脚放下	C	C	C	C	B
低头/抬头	C	C	C	A	B
松手	C	C	C	B	C
抬头/低头	C	C	C	C	C

驱动器及各弹簧的运动规律与周期见图 2<sup>[1]</sup>。图 2 的原点表示 SMA 弹簧 9 开始加热; $t_1$  表示 SMA 弹簧 9 加热完成并保温,此时主驱动 SMA 弹簧 6 开始加热; $t_2$  表示 SMA 弹簧 6 加热

示 SMA 弹簧 6 和弹性杆弧 5 的输出位移。

## 2 主要部件的结构及工作原理

### 2.1 机械手结构及工作原理

文献[2]研究了一种悬臂梁式电热微机械手,本文对其改进后的基本结构及尺寸见图 3。

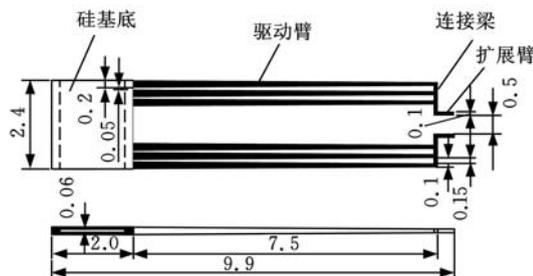


图 3 微机械手结构及尺寸

微机械手由两个夹持臂构成,每个夹持臂包括由三根平行的矩形变截面硅梁构成的驱动臂,其顶端由连接梁相连,末端为硅基板。给不同的硅梁通电可实现通电张开或通电闭合的双向夹持运动。扩展臂依据具体夹持对象设计成相适应的形状。把原型的单硅基板改为两个上下平行硅基板结构,给不同的硅基板通电可实现机械手的上下摆动。文献[2]中,三个平行梁是等截面梁,硅基底板为实心基板。本文在每个梁的体积和质量均不变的前提下,将驱动臂改为三个不等截面但轴线相互平行的三平行梁结构,改善了驱动臂的受力条件,并使驱动臂重心向基板方向偏移。在基板质量不变的前提下,调整结构尺寸将实心硅基底板改为空心基板,提高硅基板的刚度。

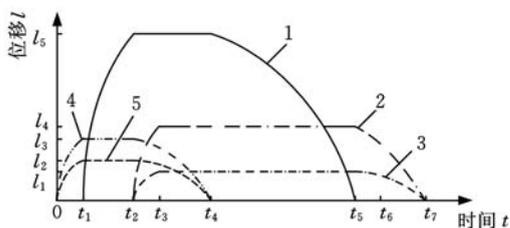
### 2.2 四杆机构结构和工作原理<sup>[1]</sup>

图 4 所示为前刚性脚上四杆机构。普通弹簧 CF 与常温的 SMA 脚弹簧 CE 保持平衡,使四杆机构为原始态。CE 弹簧加热收缩时克服 CF 弹簧阻力驱动四杆机构运动;CE 弹簧冷却时拉力逐渐减小,在 CF 弹簧作用下四杆机构逐渐回复原始态。杆 AC 与刚性脚 FE 的初始夹角为 75°,在 CE 弹簧拉力作用下先逆时针转 18°使 CD 杆触地,再继续转 57°将刚性脚 FE 抬起约 0.83mm。在三角形 ACE 中, $\angle CAE = 105^\circ$ ,由图 4 所示关系和余弦定理得

$$CE = \sqrt{AC^2 + AE^2 - 2AC \cdot AE \cos \angle CAE} \quad (1)$$

当杆 AC 的转角达到  $\theta = 75^\circ$  时, $\angle C'AE = 30^\circ$ ,由余弦定理可求 C'E 长度。因此,可以求出 SMA 脚弹簧 CE 的原始长度和被加热相变后的变量。

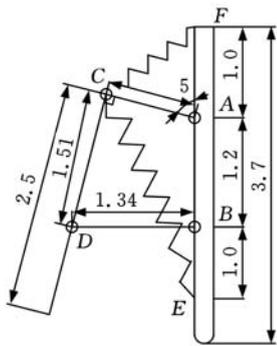
后刚性脚上四杆机构在驱动器处于伸展状态时工作,因此,后刚性脚上四杆机构某些杆长和夹



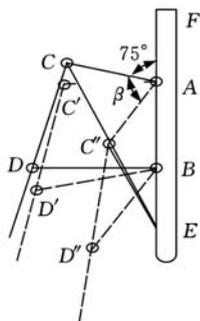
1. 主驱动(SMA)弹簧 6 的变化规律
2. 前脚上驱动(SMA)弹簧 9 的变化
3. 前脚上复位(普通)弹簧 7 的变化规律
4. 后脚上驱动(SMA)弹簧 2 的变化规律
5. 后脚上复位(普通)弹簧 4 的变化规律

图 2 微型机器人运动节拍周期图

完成并保温,此时 SMA 弹簧 2 开始加热,SMA 弹簧 9 开始冷却; $t_3$  表示 SMA 弹簧 2 加热完成并保温; $t_4$  表示 SMA 弹簧 9 冷却完成,此时 SMA 簧 6 开始冷却; $t_5$  表示 SMA 弹簧 6 冷却完成,此时 SMA 弹簧 2 开始冷却; $t_7$  表示 SMA 弹簧 2 冷却完成。在  $t_6$  时刻再次加热 SMA 弹簧 9,开始下一个运动周期。 $l_2$  和  $l_3$  分别表示普通弹簧 7 和 SMA 弹簧 9 的输出位移, $l_1$  和  $l_4$  分别表示普通弹簧 4 和 SMA 弹簧 2 的输出位移, $l_5$  表



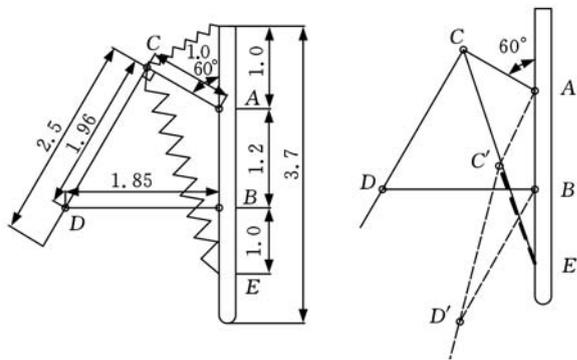
(a) 四连杆机构结构



(b) 四连杆运动状态

图4 前脚上四连杆机构及运动形式

角不同于前脚,如图5所示。后脚上杆AC与刚性脚的初始夹角为 $60^\circ$ ,在SMA脚弹簧CE加热收缩拉力作用下逆时针旋转 $75^\circ$ 后将刚性脚抬起 $0.83\text{mm}$ 。可见,后脚上杆CD触地时与地面的倾角小于前脚上杆CD触地时与地面的倾角,保证了后脚上的四杆机构有一定的传动角而机构自身不会发生传动自锁。



(a) 四连杆自锁机构 (b) 四连杆运动状态

图5 后脚上四连杆自锁机构及运动形式

### 3 机器人运动的摩擦自锁分析<sup>[1]</sup>

#### 3.1 驱动器收缩过程受力分析

收缩过程如图6、图7所示。图7中, $G$ 为机器人重力; $N$ 为法向反作用力。用 $T_1$ 、 $T_2$ 表示前后脚阻力; $f_1$ 、 $f_2$ 表示前后脚摩擦力。SMA弹簧6加热,由马氏体向奥氏体转变而收缩,驱动力 $F_{\text{SMA}}$ 渐增, $F_{\text{SMA}}$ 与 $T_i$  ( $i=1,2$ )的垂直分量很小而

水平分量大,摩擦力 $f_i$  ( $i=1,2$ )小。当 $F_{\text{SMA}}$ 水平分量大于 $T_i$ 水平分量及摩擦力 $f_i$ 时,前脚沿地面左滑移而后脚沿地面右滑移。驱动条件为

$$F_{\text{SMA}} \cos \alpha > f_i + T_i \cos \beta_i \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

式中, $\alpha$ 为SMA主弹簧作用力与水平面夹角; $\beta$ 为弹性弧杆作用力与水平面夹角。

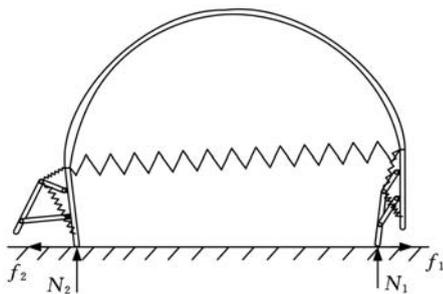
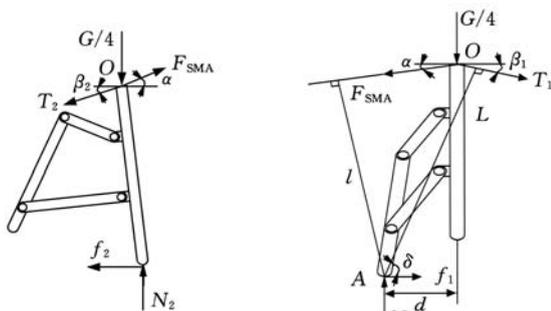


图6 收缩过程驱动器受力



(a) 后脚组件受力 (b) 前脚组件受力

图7 收缩过程刚性脚受力

SMA弹簧6加热时,前脚SMA弹簧CE也加热收缩,克服普通弹簧CF阻力驱动四杆机构,CD杆触地后使前脚抬起,此时后脚四杆机构不动。随着 $\alpha$ 和 $\beta$ 的增大, $F_{\text{SMA}}$ 与 $T_i$ 的水平分量减小而垂直分量增大,CD杆摩擦阻力 $f_1$ 增大而后脚摩擦阻力 $f_2$ 减小。当 $f_1$ 增至使CD杆绕其触地点转动而不向左滑移时,后脚在 $F_{\text{SMA}}$ 水平分量作用下克服 $f_2$ 力继续向右滑。CD杆自锁条件为

$$F_{\text{SMA}} \cos \alpha \leq T_1 \cos \beta_1 + f_1 \quad (3)$$

#### 3.2 驱动器舒张过程受力分析

舒张过程如图8、图9所示。SMA弹簧6冷却,由奥氏体向马氏体转变舒张,驱动力 $F_{\text{SMA}}$ 渐减。前脚SMA弹簧CE冷却使其CD杆抬起而前脚触地,此时后脚SMA弹簧CE被加热驱动四连杆,其CD杆触地使后脚抬起。舒张初期弹性弧杆5回复力 $T_4$ 与 $F_{\text{SMA}}$ 的垂直分量增大,当摩擦力 $f_4$ 增至使CD杆摩擦自锁时,CD杆绕触地点转动而不向左滑,受力状态为

$$f_{\text{SMA}} \cos \alpha + f_4 \geq T_4 \cos \beta_4 \quad (4)$$

此时前脚摩擦力 $f_3$ 减小,在 $T_3$ 水平分量作用下前脚向右滑移。舒张后期 $\alpha$ 角减小,后脚CD杆摩擦自锁条件被破坏,前后脚同时舒展,但后脚

向左滑移的距离小于前脚向右滑移的距离, 此时机器人整体仍是前进运动。

上述两个过程的四个滑动摩擦力可表示为

$$f_i = \mu_j (T_i \sin \beta_i \pm F_{SMA} \sin \alpha + \frac{G}{4}) \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2$$

式中,  $f_i$  为刚性脚或连杆与地面的滑动摩擦力;  $\mu_i$  为脚或杆与地面滑动摩擦阻尼系数;  $G$  为微机器人及夹持物的总重量。

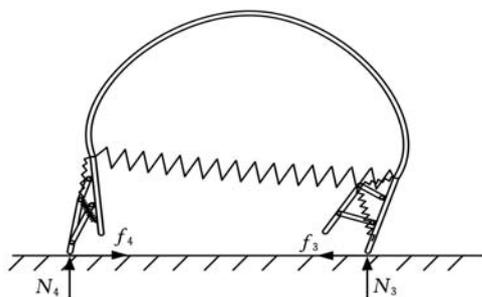
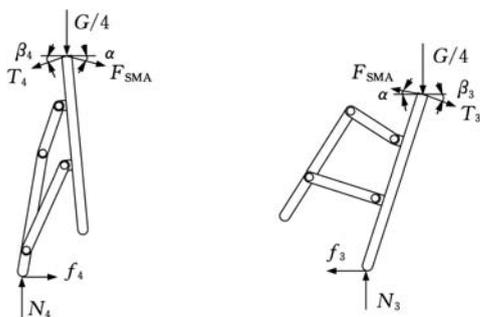


图 8 舒张过程驱动器受力



(a) 后腿分离体受力图 (b) 前腿分离体受力图

图 9 舒张过程刚性脚受力

式(5)中, 当  $i$  取 2、3 时  $j$  取 1, 当  $i$  取 1、4 时  $j$  取 2; 当  $i$  为 1、4 时取“+”,  $i$  为 2、3 时取“-”。

为增大  $CD$  杆与地面摩擦因数以利于摩擦自锁, 需在其端部镀高摩擦因数材料涂层(如橡胶<sup>[3]</sup>)。为利于脚(图 4 中  $FE$  杆)沿地面滑移, 需在脚底镀低摩擦因数材料涂层(如聚四氟乙烯)<sup>[4]</sup>。

SMA 主弹簧 6 拉力与弹性弧杆 5 变形的关系非线性, 因此, 前后脚的摩擦自锁不一定一直出现在某一特定位置状态之后的持续状态, 可能会出现某些断续状态的摩擦自锁, 但这只影响机器人步伐精度, 不影响机器人总体运动状态和前行趋势。

## 4 SMA 驱动弹簧设计

### 4.1 SMA 弹簧特性和基本参数

与普通弹簧相比, SMA 弹簧有如下特性<sup>[5]</sup>:

- ① 载荷、位移、温度三者间为复杂非线性关系;
- ② 电阻率  $\rho$  和比热容  $c$  在相变中非常数, 在完全马氏

体和完全奥氏体状态,  $c$  基本不随温度改变; ③ 在一个很窄的温度范围内, SMA 材料的弹性模量变化较大, 因此, 形状恢复的动作很突然; ④ 加载、卸载和升温、降温时存在滞后。

SMA 弹簧结构为螺旋型, 材料为 TiNi 合金, 奥氏体、马氏体时弹性模量分别为  $E_H = 108\text{GPa}$ ,  $E_L = 40\text{GPa}$ ; 高温时载荷  $F_H = 1.2\text{N}$ , 行程  $\Delta\delta = 3.5\text{mm}$ ; 作用循环次数为 20000 ~ 30000。基本设计过程如下:

(1) 确定最大剪切应变  $\gamma_{\max}$ 。对于 NiTi 合金, 令  $\gamma_L$  为马氏体时剪切应变变量;  $\gamma_{\max}$  与循环寿命成反比, 选其值为 1.5%。马氏体剪切弹性模量较小, 在同样载荷下其应变大, 则取

$$\gamma_{\max} = \gamma_L$$

(2) 确定奥氏体时剪切应变  $\gamma_H$ 。如果已知奥氏体时的弹簧位移量  $\delta_H$ , 由于  $\gamma$  正比于  $\delta$ , 此时的剪切应变  $\gamma_H$  由  $\gamma_H = \frac{\delta_H}{\delta_L} \gamma_L$  求得。若知高温、低温下的载荷, 因应变  $\gamma$  与载荷  $F$  成正比, 与弹性模量  $E$  成反比, 则奥氏体时剪切应变为  $\gamma_H = \frac{F_H E_L}{F_L E_H} \gamma_L$ ,

载荷一定时, 求得  $\gamma_H = \frac{40}{108} \times 1.05\% = 0.56\%$ 。

(3) 确定高温(奥氏体)时的剪切应力  $\tau_H$ 。由  $\tau_H = \gamma_H E_H$  得  $\tau_H = 0.56\% \times 108\text{GPa} = 0.6048\text{GPa}$ 。

(4) 选择弹簧指数  $C$ , 计算应力修整系数  $k$ 。本文选取  $C = 4$ , 则由  $k = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C}$ , 得  $k = 1.25$ 。

(5) 计算弹簧丝直径  $d$  和弹簧中径  $D$ 。弹簧丝直径为

$$d = \sqrt{8kF_H C / (\pi T_H)} = \sqrt{(8 \times 1.25 \times 1.2 \times 4) / (605\pi)} = 0.16\text{mm}$$

弹簧中径为

$$D = Cd = 6 \times 0.16 = 0.96\text{mm}, \text{取 } D = 1\text{mm}.$$

(6) 计算弹簧的有效圈数  $n$ 。由  $\Delta\gamma = \frac{d}{\pi n D^2} \Delta\delta$  得

$$n = \frac{d}{\pi \Delta\gamma D^2} \Delta\delta$$

式中,  $\Delta\delta$  为弹簧在高低温时的位移(变形)之差, 也即弹簧的有效工作行程。

将  $\Delta\gamma = \gamma_L - \gamma_H$  代入上式可求得  $n$  值。因  $\Delta\gamma = \gamma_L - \gamma_H = 1.5\% - 0.56\% = 0.94\%$ , 则得

$$n = \frac{d}{\pi \Delta\gamma D^2} \Delta\delta = \frac{0.16}{\pi \times 0.94\% \times 1^2} \times 3.5 = 19$$

同理可求: 前脚四杆机构 SMA 脚弹簧丝直

径为 0.05mm, 弹簧中径为 0.25mm, 有效圈数为 9; 后脚四杆机构 SMA 脚弹簧丝直径为 0.05mm, 弹簧中径为 0.25mm, 有效圈数为 10。

#### 4.2 SMA 弹簧的温度响应分析<sup>[1,6]</sup>

SMA 弹簧的响应时间是驱动器的重要性能参数, 通过 ANSYS 瞬态分析得到在 12V 电压作用下, SMA 弹簧的响应时间如图 10 所示。SMA 弹簧温度达到 327.7K 所需的时间为 4.7s, 也即驱动器的响应时间为 4.7s。在  $t=4.7s$  时 SMA 弹簧的温度场如图 11 所示, 温度场基本满足弹簧内部温度均匀的假设。

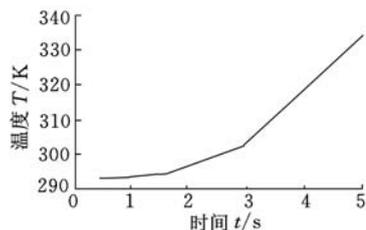


图 10 12V 电压作用下 SMA 弹簧的温度响应

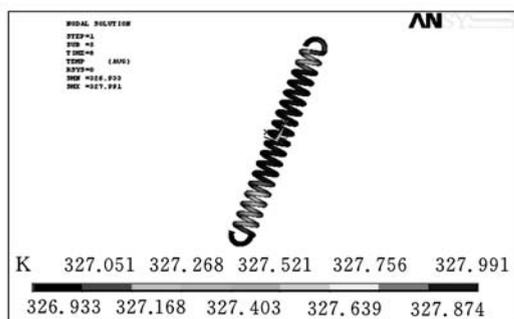


图 11 SMA 弹簧的温度场分布

由于 SMA 弹簧降温时只需降到马氏体相变结束的温度 (304.5K), 无需降到室温, 所以, 在后继的加热过程中, 考虑从马氏体相变结束温度加热到马氏体逆相变结束温度, 由图 10 可得响应时间是 1.7s。驱动电压对机器人的响应时间影响较大, 机器人响应时间随驱动电压的变化规律如图 12 所示。

SMA 弹簧冷却到马氏体相变结束温度所需的时间为 4.8s, 如图 13 所示, 也即 SMA 弹簧完成一次加热—冷却过程的时间为 9.5s。同理可求出四杆机构上 SMA 弹簧 CE 的响应时间为 2.5s。在此后的加热—冷却循环中, 微型机器人的响应时间是 6.5s。

## 5 结语

对新型尺蠖式微型机器人进行了整体结构和新型偏动式双程 SMA 驱动器设计。介绍了由 SMA 弹簧驱动的四杆机构与刚性化脚相配合产

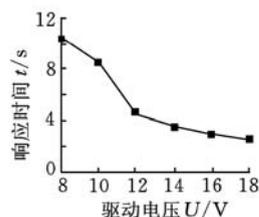


图 12 SMA 弹簧响应时间与驱动电压关系

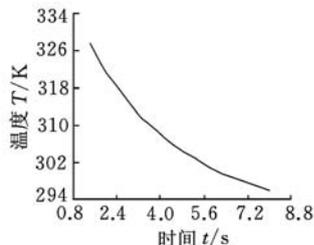


图 13 节点温度的恢复

生的交替触地运动形式, 分析了四杆机构摩擦自锁机理。确定了 SMA 弹簧的设计参数, 分析了 SMA 弹簧在加热—冷却过程的相变力学特性, 求解出微型机器人的响应时间和回复时间, 确定了微型机器人的稳态运动条件。

由于新型偏动式双程 SMA 驱动器具有输出位移大、功重比高、机构简单、驱动电压低、能以自身为回馈等特点, 使新型尺蠖式仿生机器人具有步幅大、攀爬力强、转向方便、承载力强等优势。

#### 参考文献:

- [1] 单彦霞. SMA 驱动的尺蠖式仿生微型机器人[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2009.
- [2] 李宇鹏, 阴学朴. 电热微夹持器的结构设计与数值仿真分析[J]. 机械设计, 2008, 25(11):59-61.
- [3] Kim Byungkyu, Lee Moon Gu, Lee Young Pyo, et al. An Earthworm-like Micro Robot Using Shape Memory Alloy Actuator[J]. Sensors and Actuators A, 2006, 125:429-437.
- [4] Cai Mingdong, Langford Stephen C, Wa Mingjie, et al. Study of Martensitic Phase Transformation in a NiTiCu Thin-film Shape-memory Alloy Using Photoelectron Emission Microscopy[J]. Advanced Functional Materials, 2007, 17(1):161-167.
- [5] 杨杰. 形状记忆合金螺旋弹簧的性能测试及设计方法[J]. 中国科学技术大学学报, 1992, 22(1):51-57.
- [6] 刘永红, 杨毅, 贾宝贤. NiTi 形状记忆合金弹簧电热驱动特性[J]. 机械工程材料, 2000, 24(4):27-31.

(编辑 苏卫国)

作者简介:李宇鹏,男,1958年生。燕山大学机械工程学院教授。主要研究方向为微型机械电子系统与微纳制造、基于 RE 的再创新设计、数控机床的性能分析与优化。发表论文 50 余篇。  
孙洪胜,男,1972年生。燕山大学职业技术学院讲师。单彦霞,女,1983年生。燕山大学里仁学院助教。