

文章编号:1006-2467(2001)01-0064-04

一种正方体型管内仿生蠕动机器人

李明东¹, 奚汉达¹, 储金荻¹, 马培荪¹, 郝颖明²

(1. 上海交通大学 机械工程学院, 上海 200030; 2. 中国科学院 机器人学开放研究实验室, 沈阳 110015)

摘要:开发了一种微型形状记忆合金直线驱动器,驱动器可沿轴向主动收缩和舒张,并可承受一定径向力,产生弯曲变形.在此基础上,开发了一种呈正方体型的 2 in(2×2.54 cm)管内蠕动行走机构.该机构模仿腔肠动物的行走方式并采用独特的拐弯策略,可在管内向前后、左右、上下六个方向行走,可通过“L”型、“T”型管接头.

关键词:机器人;形状记忆合金驱动器;蠕动;管道;仿生

中图分类号:TP 242 **文献标识码:**A

Cubic Bionic Worming Robot in Pipe

LI Ming-dong¹, XI Han-da¹, CHU Jin-di¹, MA Pei-sun¹, HAO Ying-ming²

(1. School of Mechanical Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China;

2. Robotics Lab., Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)

Abstract: A miniature shape memory alloy (SMA) linear actuator was developed. The actuator can shrink and stretch along the axis actively and can bear some radial force and bend. At this basis, a 2-inch-in-pipe worming mechanism with a cubic form was developed. By imitating coelenterate's walking method and adopting unique turning method, this mechanism can walking in a pipe forward and backward, right and left, up and down, and can pass "L" and "T" form pipe jack.

Key words: robot; shape memory alloy actuator; worming; pipe; bionic

管内机器人已成功用于输油管道的检测和维修.近年来,随着核工业和煤气工业所用管道进入事故多发期,开发适用于该领域管道检测和维修的管内机器人已迫在眉睫.不同于输油管道,核工业和煤气工业所用管道大多为 1 in(2.54 cm)或 2 in(2×2.54 cm)的小型管,管道大多呈空间网络状,“L”型、“T”型管接头很多.管内机器人欲用于核工业和煤气工业中管道的检测和维修,防止核泄漏和煤气泄漏,微型化和提高在管道网络中的通过能力是两个必须要解决的问题^[1].本文采用创新的驱动器,开发了一种正方体型管内行走机构,该行走机构结构新颖紧凑,可采用崭新的行走方式和拐弯策略,实现了微型管内全方位运动.

1 新型 SMA 直线驱动器

管内蠕动机器人需要直线驱动器.由电机或汽缸实现的直线驱动器需要减速机构或气源^[1,2],它们不适合管内行走机构的微型化.压电材料实现的直线驱动器动作精度高、频率快,但输出位移小^[3].本文开发了一种形状记忆合金(SMA)驱动的直线驱动器,适用于要求输出位移大、动作精度和频率要求不太高的场合.

1.1 SMA 直线驱动器的结构

SMA 直线驱动器由一根普通螺旋弹簧、一根 SMA 螺旋弹簧、两个圆柱套筒和两个金属夹装配而成,如图 1 所示^[4].普通螺旋弹簧套在套筒外面,两端顶在套筒的台阶处,承受压力.SMA 螺旋弹簧自套筒内部穿过后,两端被两个金属夹夹住,承受拉力.工作时两个金属夹分别通过导线与电源的正负

收稿日期:2000-01-10

基金项目:中科院机器人学开放实验室基金课题(RL199804)

极相连,套筒的作用是防止 SMA 螺旋弹簧与普通螺旋弹簧电接触及普通螺旋弹簧被压缩后失稳,它应为绝缘材料,并有足够刚性. SMA 集传动、驱动功能于一身, SMA 螺旋弹簧、套筒和普通螺旋弹簧之间并联,由里到外分三层排列,层层相套,整个机构结构紧凑、轻巧.

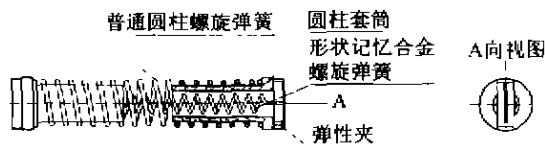


图 1 SMA 直线驱动器的结构

Fig. 1 Configuration of SMA linear actuator

1.2 SMA 直线驱动器的仿生工作机理

在自由状态(不受热、不受载)时, SMA 螺旋弹簧处于马氏体态,被普通螺旋弹簧拉伸产生一拉伸变形,普通螺旋弹簧被 SMA 螺旋弹簧压缩产生一压缩变形,两者的变形力平衡.对 SMA 螺旋弹簧通电加热使之发生逆相变变为强硬的奥氏体后,生成一较大的相变回复力,该回复力克服普通螺旋弹簧的偏置使直线驱动器收缩,输出力和位移; SMA 螺旋弹簧冷却到室温后发生相变恢复为柔弱的马氏体,相变回复力消失,输出一较小的变形力,这时普通螺旋弹簧克服 SMA 螺旋弹簧的偏置使直线驱动器舒张,反向输出力和位移.

SMA 直线驱动器内外都采用螺旋弹簧结构,驱动器动作时,其内外表面沿轴向任意两点之间都存在相对运动,整体动作由相邻弹簧圈之间的相对运动集合而成.这与生物直线驱动器的蠕动方式完全吻合.该直线驱动器处于舒张状态时,两套筒之间相隔一段距离,驱动器可在外部径向力作用下产生弯曲变形,外力消失后,变形在普通螺旋弹簧的弹性力作用下自动恢复.驱动器的这种柔性提高了它对环境的适应能力.

1.3 SMA 直线驱动器的控制策略

SMA 驱动器输出力和位移的大小与 SMA 相变和逆相变的程度相关, SMA 相变和逆相变的程度受温度控制.因此,驱动器采用通电加热驱动时,通过控制流经 SMA 的电流强度控制输入 SMA 的热量,即可达到控制驱动器输出力和位移的目的.

图 2 为该驱动器的控制电路原理图.三极管起开关和放大作用,其基极输入的是从单片机输出的 PWM 信号. PWM 信号高电平时,三极管导通, SMA 处于通电加热状态; PWM 信号低电平时,三极管截止, SMA 处于断电冷却状态.单片机按照动作所要求时序输出不同占空比的控制信号, SMA 中

就会按照相同的时序通过不同占空比的脉冲电流.

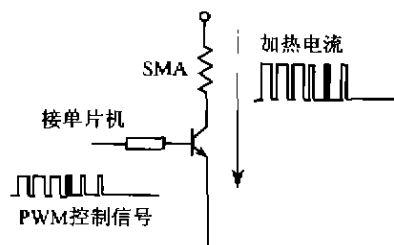


图 2 SMA 直线驱动器控制电路原理图

Fig. 2 Control circuit diagram of SMA linear actuator

1.4 SMA 直线驱动器参数确定

SMA 直线驱动器属于偏动式双程 SMA 驱动器^[5],它是基于 SMA 的形状记忆效应(Shape Memory Effect)和处于低温马氏体态时柔弱,高温奥氏体态时强硬的机械特性,并在普通弹簧等偏置元件的辅助下实现的^[6].根据文献^[6],在偏动式 SMA 驱动器中, SMA 元件与驱动器输出位移之间须满足:

$$P_H/(\delta_H G_H) = P_L/(\delta_L G_L)$$

其中: P_H 为 SMA 元件主动时(呈高温奥氏体态)所受载荷,等于弹簧的偏置阻力与驱动器输出力之和; P_L 为弹簧元件主动时 SMA 元件(呈低温马氏体态)所受载荷,等于弹簧的弹性回复力减去驱动器输出力; G_H, G_L 分别为 SMA 在高温奥氏体状态和低温马氏体状态时的切变弹性模量; δ_H, δ_L 分别为 SMA 元件主动和弹簧元件主动时驱动器的输出位移.

图 3 是正方体型 2 英寸管内蠕动行走机构所用的直线驱动器照片,其主要尺寸参数如下:①普通螺旋弹簧中径为 $\varnothing 4.5$ mm,丝径为 $\varnothing 0.5$ mm,有效圈数 18 圈,材料为 1Gr18Ni9Ti;② SMA 螺旋弹簧中径为 $\varnothing 1.5$ mm,丝径为 $\varnothing 0.35$ mm,有效圈数 19 圈,材料为 TiNiCu.表 1 为驱动器输出性能的一组实验数据.随着载荷的增加驱动器的输出位移 s 减小;在许用载荷下,动作响应时间 t 随载荷的变化不明显.若提高加热电流强度或增大加热控制信号的

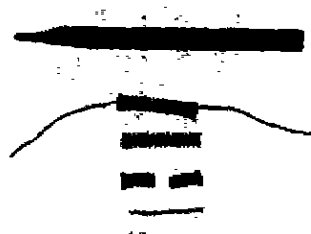


图 3 一个 SMA 直线驱动器设计实例

Fig. 3 A design example of SMA linear actuator

占空比,舒张时采用强迫冷却,动作速度会明显加快.实验中还发现,脉冲电流加热与持续电流加热比较,前者无论输出性能还是可控性都好,分析认为脉冲电流加热对克服热滞后和相变滞后有帮助.驱动器在收缩过程中速度会越来越快,这也与热滞后和相变滞后有关.

表 1 一个 SMA 直线驱动器的输出性能

Tab. 1 Output performance of an SMA linear actuator

	收缩(加热电流 750 mA, 占空比 85%)		舒张(自然冷却)	
	空载	载荷(40 g)	空载	载荷(40 g)
s/mm	7	3.5	7	6
t/s	8	8	10	10

在 20°C 环境温度下,采用 750 mA 恒流源加热,实现该直线驱动器收缩、维持、舒张三种状态控制信号的占空比分别为:85%,50%,0.控制信号的占空比小于 30%时,输入热量无法使 SMA 发生逆相变,驱动器没有输出,也达不到保温效果.增大加热电流,驱动器收缩速度变快.但电流过大,不易控制,SMA 容易因过热而丧失记忆效应,导致驱动器损坏.

2 正方体型管内全方位蠕动机器人

要提高管内机器人“L”型、“T”型管接头处的通过能力,必须采用新型行走机构和拐弯策略^[7].

2.1 正方体型行走机构

图 4 是 2 英寸管内正方体型蠕动机器人的照片.正方体型行走机构由位于正方体棱边处的 12 个尺寸相同的 SMA 直线驱动器和位于正方体顶点处的 8 个尺寸相同的支撑脚连接而成.支撑脚上与 SMA 直线驱动器相连的 3 个面互相垂直,其他部分为球面.行走机构外包络为一球面,外观呈正方体型,这种独特的机构形式是机器人实现管内全方位运动的关键.控制电路实现微型化,置于行走机构的中央,它与机器人行走机构之间采用一种柔性连接方式,既保证两者之间可靠的电连接和机械连接,又不致过于影响行走机构的蠕动幅度和行走性能.



图 4 正方体型管内蠕动机器人

Fig. 4 Cubic form in pipe worming robot

2.2 行走方式和拐弯策略

按照仿生学原理,模仿腔肠动物的行走方式,机器人在管内运动时,12 个直线驱动器中中间与管子轴向平行的 4 个并联组成一组,它们同时沿管子轴向收缩、舒张,实现腔肠动物纵走肌的功能,称之为纵走肌组;两端与管子轴向垂直的 8 个 SMA 直线驱动器,组成前后 2 组,每组 4 个串联成环状,同时沿管子圆周方向收缩、舒张,实现腔肠动物环状肌的功能,分别称之为前环状肌组和后环状肌组.通过控制流经各组驱动器内 SMA 电流的时序,控制 3 组直线驱动器交替收缩和舒张,实现机器人在直管内的前后蠕动行走.图 5 是机器人管内一个运动周期中各组驱动器的动作时序.蠕动元件可承受一定的径向力,允许产生一定弯曲变形,保证了前后两环状肌组独立地收缩和舒张,并使该管内行走机构适用于一定曲率的弯管.

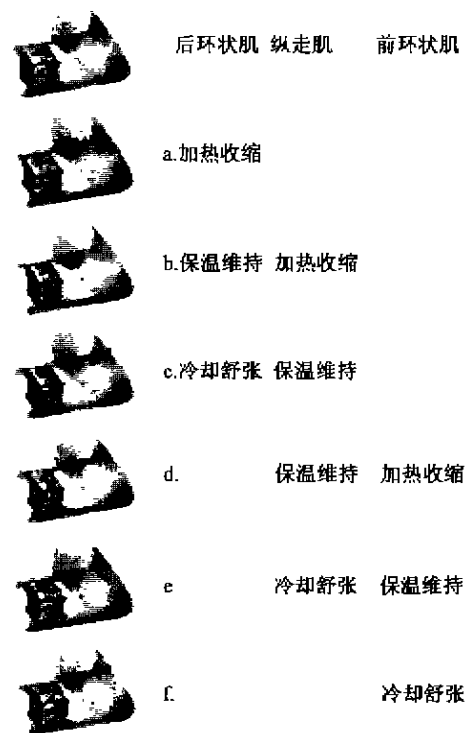


图 5 管内蠕动机器人一个运动周期的动作时序

Fig. 5 Cyclical action sequence of in pipe worming robot

图 6 是正方体型管内行走机构实现全方位行走的策略.遇到“L”型、“T”型管接头,需要改变运动方向时,改变原来纵走肌组与环状肌组的组成,将轴向与新的运动方向一致的 4 个 SMA 直线驱动器并联组成一新纵走肌组,完成行使纵走肌的功能;将与新的运动方向垂直的 8 个 SMA 直线驱动器,组成前后 2 个新环状肌组,完成行使环状肌的功能.图中斜

体字为拐弯前的分组情况,正体字为拐弯后的分组情况.蠕动机构无需调整姿态,只需调整通过各驱动器的电流时序,机器人即可在管内向前后、上下、左右各个方向任意蠕动,实现管内全方位行走,通过“L”型、“T”型管接头.

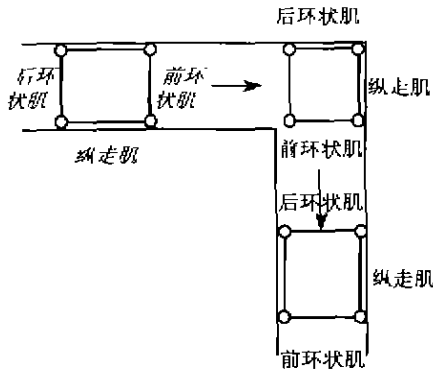


图 6 正方体型管内蠕动机构全方位蠕动策略
Fig. 6 Omnidirectional worming method of the cubic form in pipe worming mechanism

2.3 控制电路和控制策略

图 7 是机器人的控制电路原理图. PIC16C71 是 Microchip 公司开发的一种微型单片机,该单片机封装小,功耗低,便于控制电路的微型化.从单片机输出的是由软件实现的 12 路 PWM 信号.它们各自独立输出,便于机器人向不同方向运动时对各驱动器动态分组控制.如图 8 所示,不同组的驱动器通过 PWM 信号的时序不同,同组则相同,以实现机器人在管内的协调运动. PWM 信号的 3 种占空比实现驱动器加热收缩、保温维持、冷却舒张 3 种状态.通过控制各组驱动器所处 3 种状态的时序,实现机器人直管内前后蠕动,通过对 12 个驱动器动态分组控制,实现机器人管接头处运动方向的变化.

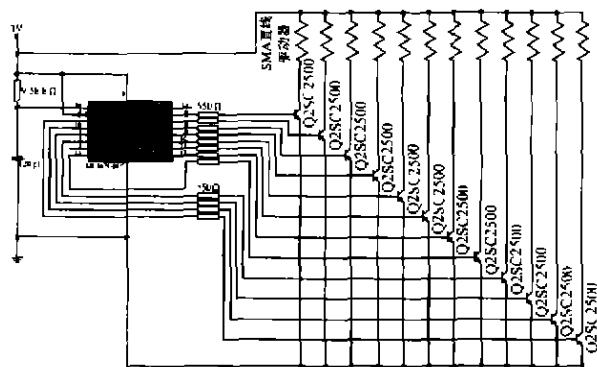


图 7 管内机器人控制电路原理图

Fig. 7 Control circuit diagram of in pipe robot

采用贴装 PIC 单片机和电子元器件,实现了控制电路的微型化.控制电路与行走机构安装在一起,减轻了控制电缆的重量,对提高管内机器人管接

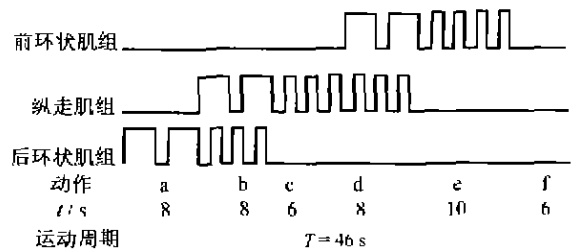


图 8 一个运动周期内控制信号与各组驱动器动作时序的关系

Fig. 8 Relationship between control signal and action sequence in a cycle

头处的通过能力有利.

机器人主要技术指标:

- (1) 体重:19.5 g(包括控制电路和行走机构);
- (2) 尺寸:身体收缩时 35 mm × 35 mm × 35 mm;
- (3) 最大速度:10 mm/min;
- (4) 适用环境:2 in(2 × 2.54 cm)管;
- (5) 通过性:直管、曲率较大的弯管、“L”型、“T”型管接头.

图 9 为机器人通过“L”型管的情形,管子旁边为 SMA 机器人通用电源箱.

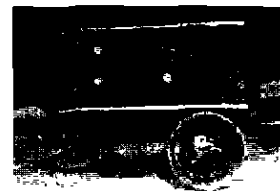


图 9 机器人通过 L 型管

Fig. 9 Robot passing through L form pipe

3 问题与讨论

所用 SMA 直线驱动器的输出性能影响管内机器人的性能,驱动器输出位移大,则管内机器人行走快,在管接头处的通过能力强.驱动器动作快,则管内机器人行走快.采用适度强迫风冷,管内机器人的速度会明显加快,管接头处的通过能力也会提高.但过度强迫风冷却对收缩性能有影响,尽管控制电路与行走机构之间采用柔性连接,连接装置仍对驱动器的收缩和舒张产生阻力,降低了驱动器的输出性能. SMA 功耗太大,目前只能采用外接电源.这是没有实现完全无缆运动的主要原因.

致谢:日本 TOKI 公司的 Naomitsu Tokieda 社长和 Da Homma 博士提供性能优良的 SMA 元件.

(下转第 71 页)

$$R' = \frac{\sqrt{2}}{2} (a^2 - c^2) (2bL_1' + b^2L_2' + y_f L_2' - 2by_f L_1' - 4bL_2' x_f) \quad (31)$$

将 L_1' 代入上式,得

$$R' = \frac{\sqrt{2}}{4} (a+c) + \frac{\sqrt{2} (a+c)}{8b(a^2+ab-b^2)} (3b^2 x_p - 3x_p y_f^2 - 6b x_f^2) \quad (32)$$

对于本文所设计的类人型机器人,取 $a=75$ mm, $b=40$ mm, $c=35$ mm 时,得

$$R' = \frac{55\sqrt{2}}{2} + \frac{11\sqrt{2}}{327200} (4800x_p + 3x_p y_f^2 - 24)x_f^2 \quad (33)$$

3 结 语

通过类人型机器人的受力平衡分析可知:传统的 ZMP 点区域并不能完全代表机器人稳定行走范围,满足 ZMP 点条件只是机器人绕 x 和 y 方向不发生翻转,还有可能发生绕 z 轴的扭滑。传统的以脚底板支撑范围定义的 ZMP 点稳定性区域中,在不满足摩擦圆半径条件的部分区域,机器人还会发生滑转。ZMP 点是类人型机器人稳定行走的必要条件,只有满足 ZMP 点要求又满足摩擦圆半径条件的脚底板支撑区域才是真正意义上的运动稳定区域。

对于典型的两足机器人脚底板,摩擦圆半径为式(32)。由式(14)可以看出:当摩擦系数尽量大、踝关节扭矩尽量小时,就可以得到小的计算半径。要踝关节扭矩尽量小,也就是要协调机器人上下身的运动。如果整个行走过程中踝关节扭矩很小,地面摩擦系数很大, $r \rightarrow 0$, $r \ll R$ 时,则机器人肯定不发生滑转和滑动。在这时用 ZMP 点表示稳定运动区域才是完整的。

参考文献:

- [1] 伍科布拉托维奇著 M. 步行机器人和动力型假肢[M]. 马培荪,沈乃熏,译. 北京:科学出版社,1983.
- [2] Takanishi A, Ishida M, Yamazaki Y, et al. The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD[A]. In Proc 1985 Int Conf on Advance Robotics[C]. Tokyo, Japan, 1985. 495~466.
- [3] Hirai Kazuo, Hirose Masato, Haikawa Yuji. The development of Honda humanoid robot[A]. Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. Belgium, May 1998. 1321~1326.

作者简介:

包志军 男,1972年生,博士生。

(上接第 67 页)

参考文献:

- [1] 周 晓,张晓华,邓宗全,等. 管内作业机器人的发展与展望[J]. 机器人,1998,20(6):471~478.
- [2] 吕恬生,宋 钰. 小口径管道内蠕动式移动机构的运动模拟和动力学分析[J]. 机器人,1995,17(1):42~47.
- [3] 杨宜民,李传芳,程良伦,等. 仿生型步进式直线驱动器的研究[J]. 机器人,1994,16(1):37~39.
- [4] 李明东. 并联偏动式形状记忆合金蠕动机构[P]. 中国专利:ZL 99 2 26926.1,2000-03-24.
- [5] 李明东,马培荪,马建旭,等. 形状记忆合金驱动器驱动方式研究[J]. 机械设计与研究,1999(3):27~29.
- [6] 舟久保,熙 康. 形状记忆合金[M]. 千东范译. 北京:机械工业出版社,1992.
- [7] 李明东. 管内机器人蠕动机构[P]. 中国专利:ZL 99 3 23688.X,1999-12-10.

作者简介:



李明东 1969年生,1992年、1997年于西安电子科技大学分别获学士、硕士学位,研究方向为电子机械CAE;2000年于上海交通大学获博士学位,研究方向为微小型机器人和智能材料驱动器。以第一作者身份在国内外核心期刊上发表文章近20篇,4项专利的第一发明人。目前在中兴通讯公司移动通讯事业部从事电子设备热系统和电磁兼容系统的研究工作。

翼汉达 1976年生,上海交通大学机械电子工程专业硕士生,主要研究方向:形状记忆合金在机器人中的应用,微小型机器人,机器人控制系统。

储金菽 1977年生,上海交通大学机械电子工程专业硕士生,主要研究方向:形状记忆合金在机器人中的应用,微小型机器人,机器人结构设计和力学分析。