

基于COMSOL的SMA-电机复合驱动夹持器仿真分析

张迎伟,李懿

(西安航空学院 机械工程学院,陕西 西安 710077)

摘要:针对机器人末端执行器的位置精度控制要求,设计基于形状记忆合金和电机复合驱动的夹持器及其结构,建立电机和形状记忆合金的本构模型,利用COMSOL软件研究电机驱动和形状记忆合金相变对夹持手指位移的影响。仿真结果表明:采用复合驱动的夹持器,发挥了电机和形状记忆合金的优点,实现了机器人末端执行器的精准位置控制。

关键词:机器人;复合驱动;夹持器;COMSOL

中图分类号:TP241.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)02-0116-04

Simulation and Analysis of Gripper Composite Driven by SMA-motor

ZHANG Yingwei, LI Yi

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to meet the position accuracy control requirement of the robot end effector, a gripper and its structure based on shape memory alloy and driven by SMA-motor are designed. The constitutive model of the motor and shape memory alloy is constructed. The effects of motor drive and shape memory alloy phase transformation on the displacement of the gripping fingers are analyzed by COMSOL. The simulation results show that the gripper with compound drive gives full play to the advantages of motor and shape memory alloy, which realize the precise position control of the robot end effector.

Keywords: robot; compound drive; gripper; COMSOL

0 引言

夹持器在工业中应用广泛,其驱动装置是核心部件之一。随着工业自动化的发展,对于体积小、驱动力大、位置控制精确的夹持器需求越来越广泛。利用智能材料在外界物理场驱动下产生运动是智能材料在软体机器人等领域一种新的应用^[1],在微型机器人和夹持器领域具有很广阔的前景。其中新型材料之一的形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)具有功重比大、输出力大、机械结构简单等特点^[2],在仿生领域应用广泛。LIN H T等^[3]将SMA合金作为驱动嵌入到硅胶里面,研发了一种仿毛虫机器人并研究了利用SMA合金运动的机理。SHEPHERD R F等^[4]研究了一种利用SMA和软材料制成章鱼机器人,实现了水中行走和抓取各种形状的物体。在国内,基于SMA的驱动器和机器人也是热点研究之一。王扬威等^[5]提出一种SMA丝驱动的仿生波动鳍,柔性鳍两侧SMA合金交替通电和断电,模拟鱼类鳍的波动弯曲,从而实现柔性运动。YANG Y等^[6]研究了一种SMA合金和气动柔性驱动单元相结合的柔性软体手爪,在一定范围内可变刚度。在执行器方面,李明军等^[7]提出一种利用SMA合金驱动的仿尺蠖钩爪式末端执行器,具有相当于自质量10倍的驱动力,可依附于不同的表面。徐森鑫等^[8]设计了一种柔性加持的软体手指,并建立了数学模型。由此可

见,采用新型材料之一的形状记忆合金驱动可以实现加持手指、仿生鳍、软体手爪等执行器的柔性运动,在机器人领域具有较好的应用前景。另一方面,形状记忆合金做功过程中时滞非线性也是需要解决的问题之一。罗天洪等^[2]将模糊控制应用于SMA的驱动电压控制中,提高了机器人仿生关节的运动精度;石海洋等^[9]通过金相显微镜、热分析及试验相结合的方法研究了冷轧和退火态TiNi形状记忆合金的相变及超弹性,得到了Ti-50.8Ni-0.4V合金表现为超弹性的相变区域。因此,研究形状记忆合金的相变、位移、弹性变形区以及非线性等问题,对提高合金相变驱动力及其精度具有重要的意义。

直流电机输出位移大,定位和可靠性较好,但是功重比较低。形状记忆合金功重比高,但存在时滞非线性^[2]等不足。本文结合形状记忆合金和电机特点设计复合驱动的夹持器,通过仿真的方式研究SMA和电机驱动时形变、位移以及应力等情况,进而提高夹持器的位置精度。

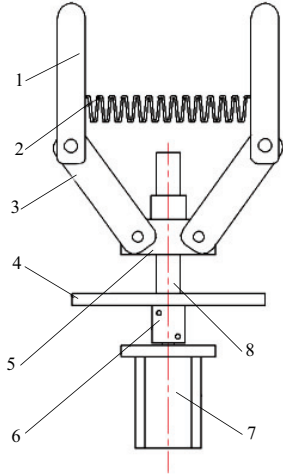
1 复合夹持器结构设计

为了提高夹持器的驱动效率和反应速度,提出直流电机和形状记忆合金共同驱动的复合驱动形式。复合夹持器结构示意图如图1所示,电机通过丝杠驱动螺母移动,带动连杆转动,驱动加持手指移动,SMA合金采用V型结构构成驱动弹簧,当给合金加热时发生相变,带动手指移

基金项目:陕西省科技厅2020年重点研发计划项目(2020GY-126);西安航空学院科研基金项目(2018KY1220)

第一作者简介:张迎伟(1985—),男,河北保定人,工程师,硕士,研究方向为机电一体化技术及智能制造。

动,实现复合驱动。当电机不接通时,由于螺母的自锁作用 SMA 弹簧无法驱动加持手指,需要通过 SMA 合金的回程相变和电机共同作用下复位,实现夹持器的精确位置控制。驱动过程中,包括 SMA 合金弹簧的驱动力和电机驱动力,加持手指移动时对弹簧进行压缩。



1—加持手指;2—V型SMA弹簧;3—连接杆;4—固定壳体;
5—移动螺母;6—联轴器;7—直流电机;8—丝杠。

图1 SMA-电机复合夹持器模型

2 SMA-电机夹持器有限元模型

复合驱动夹持器的驱动力主要包括电机通过丝杠施加到手指的驱动力和 SMA 相变时施加到手指的拉力。因此,夹持手指上的驱动力可简化为 V 型 SMA 弹簧拉力和作用在一侧的电机驱动力。由于 SMA 弹簧结构的对称性,可分析其结构一侧相变时相应拉力和相应位移。图 2 为其中一个 SMA 弹簧结构示意图。

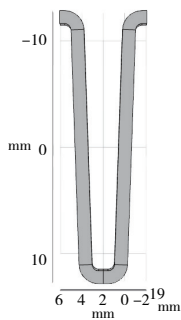


图2 V型SMA弹簧
简化模型

2.1 SMA 本构模型

形状记忆合金采用应用较为广泛的 TiNi 合金,查询相关文献,本文采用本构模型为 Liang-Rogers 型。将 SMA 看作弹性模量可变的弹簧,得到应力、应变、温度间微分关系为^[10]

$$\dot{\sigma} = [E_A + \xi(E_M - E_A)] \dot{\varepsilon} + \xi(T)(E_M - E_A) \dot{T} \varepsilon \quad (1)$$

式中: E_A 为纯奥氏体弹性模量; E_M 为纯马氏体弹性模量; ξ 为马氏体体积分数; ε 为应变; T 为温度。

通过对形状记忆合金加热的方式对其进行驱动,合金两端加载电压和温度之间的关系为

$$\dot{T} = [R_s U^2 / (R_s + r_s)^2 - Ah(T - T_2)] / mc_p \quad (2)$$

式中: R_s 为 SMA 的电阻; U 为加载电压; r_s 为通电导线电阻; A 为表面积; h 为对流换热系数; T 为加热温度; T_2 为环境温度; m 为 SMA 合金的质量; c_p 为 SMA 的电阻。

2.2 电机

系统采用直流电机驱动丝杠螺母移动,通过连杆驱动夹持器的运动。直流电机的电磁转矩正比于电枢绕组的电流为

$$d = k_m i_a \quad (3)$$

式中: d 为电动机轴上输出的电磁转矩; k_m 为磁性材料的磁导率函数; i_a 为电枢回路的等效电流。

当电枢转动时,电机产生的感应电势 e 为

$$e = k_e \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

式中: θ 为电动机输出轴转角; k_e 为感应磁导率函数。

电枢回路为

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e = u_a \quad (5)$$

式中: L_a 、 R_a 分别为电枢回路的等效电感和电阻; u_a 为电枢输入电压。

2.3 SMA 弹簧模型及网格划分

在 COMSOL 几何模块建立模型,V 型弹簧截面宽 2 mm,厚 1.2 mm,整体高 24 mm,倾斜弧度为 2°。取一侧 SMA 合金弹簧模型,划分网络如图 3 所示,划分后的单元包括 3 120 个域单元、1 904 个边界单元和 336 个边单元。

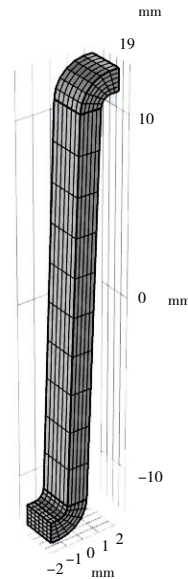


图3 一侧V型
弹簧模型

COMSOL 软件提供两种最常见形状记忆合金本构模

型 Lagoudas 和 Souza-Auricchio, 本文选用 Lagoudas 模型。形状记忆合金材料属性如表 1 所示, 利用 COMSOL 模块里的分段函数模拟奥氏体和马氏体的相变。

表 1 材料属性表

属性	值
泊松比	0.33
密度/(kg/m ³)	6 500
热膨胀系数/(1/K)	22×10 ⁻⁶
比热容/(J/kg·K)	400
奥氏体弹性模量/GPa	55
马氏体弹性模量/GPa	46
奥氏体开始温度 A _s /°C	-3
奥氏体结束温度 A _f /°C	16
马氏体开始温度 M _s /°C	-28
马氏体结束温度 M _f /°C	-43

2.4 施加约束和载荷

V 型弹簧附在加持手指上, 电机通过连杆驱动加持手指水平移动, 夹持器做功时在电机作用下先对低温状态下的 SMA 弹簧进行压缩。此时马氏体体积发生变化, 当对合金加热时发生马氏体逆向变, SMA 弹簧形变产生位移进而对加持手指产生拉力。

添加约束: 将 y 方向的两个面设置为约束面, 水平方向 x 方向指定为自由运动, 并在 y 方向添加位移为 0 的约束, 实现弹簧的拉伸位移, 防止弹簧沿着 y 方向发生滑移。

添加载荷: 在水平运动 x 方向弹簧侧面上施加载荷, 此载荷可将电机作用力推动合金移动到指定位移, 对弹簧进行压缩。

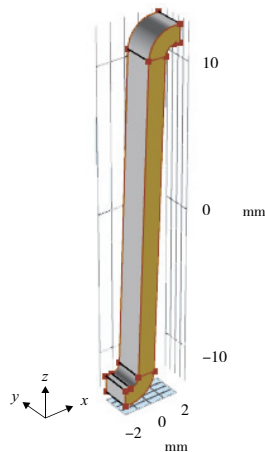
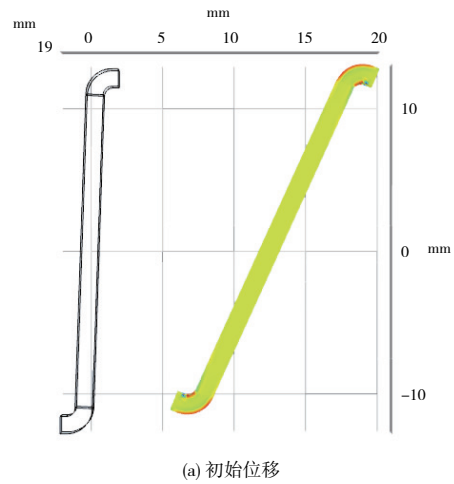


图 4 SMA 弹簧约束和载荷图

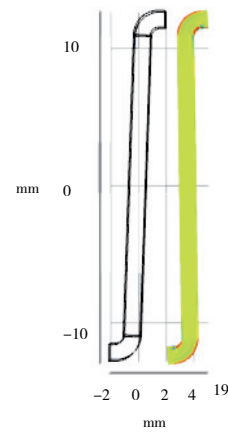
3 复合驱动器静力学分析

通过电机对弹簧施加指定位移, 单个弹簧压缩 15 mm, 压缩后的位移和应力如图 5、图 6 所示。从图 5 中可以看出, 弹簧从 20 mm 压缩到 5 mm, 产生位移, 并在 z 方向产生位移, 在此过程中发生马氏体变化。从图 6 中可

以看出, 应力集中发生在圆角处。



(a) 初始位移



(b) 压缩位移

图 5 SMA 弹簧位移图

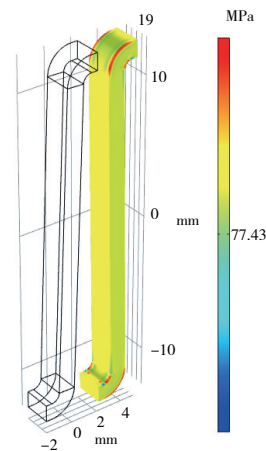


图 6 SMA 弹簧应力图

通过分段函数对 SMA 合金进行加热, SMA 发生奥氏体相变, 如图 7 所示。可以看出, 合金通过相变发生了轻微的位移, 从而产生拉力, 带动加持手指产生位移。因此, 通过控制电机的行程和 SMA 相变的温度, 可以实现两者的复合位移, 从而实现复合驱动。

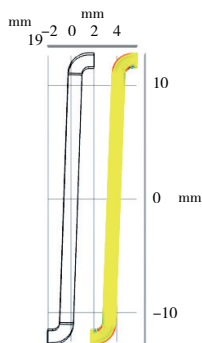


图7 SMA 弹簧相变图

4 结语

结合机器人位置精度要求,本文对夹持器驱动方式和结构进行了研究,设计了一种 SMA 和电机复合驱动的末端执行器,构建了有限元模型,并对电机和 SMA 本构模型进行了研究,利用 COMSOL 进行了仿真分析。仿真结果表明:本文所设计 SMA-电机复合驱动器结构合理,通过电机驱动和 SMA 合金相变复合控制加持手指的位移,实现了机器人末端执行器的精准控制。

参考文献:

- [1] 王田苗,郝雨飞,杨兴帮,等. 软体机器人:结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报,2017,53(13):1-13.

- [2] 罗天洪,郭园,梁爽,等. SMA-电机复合驱动仿生肘关节的控制策略与仿真[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(7):117-122.
- [3] LIN H T, LEISK G G, TRIMMER B. GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot [J]. Bioinspiration & Biomimetics,2011,6(2):026007.
- [4] SHEPHERD R F, ILIEVSKI F, CHOI W, et al. Multigait soft robot[J]. PNAS,2011,108(51):20400-20403.
- [5] 王扬威,于凯,王振龙. 形状记忆合金丝驱动仿生波动鳍推进器设计与实验研究[J]. 中国机械工程,2015,26(8):1010-1014.
- [6] YANG Y, CHEN Y H, WEI Y, et al. Novel design and three-dimensional printing of variable stiffness robotic grippers [J]. Journal of Mechanisms and Robotics,2016,8(6):061010.
- [7] 李明军,曾翔,谢荣臻,等. 基于 SMA 驱动的仿尺蠖爪式软体末端夹持器研究[J]. 机械工程与自动化,2018(5):35-37.
- [8] 徐森鑫,李小宁,郭钟华. 新型柔性夹持装置软体手指的数学模型研究[J]. 机械制造与自动化,2016,45(5):99-102.
- [9] 石海洋,张青来,韩伟东,等. 冷轧 Ti-50.8Ni-0.4V 形状记忆合金相变和超弹性研究[J/OL]. 热加工工艺, [2020-09-12]. <http://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20192497>.
- [10] 李贺,董二宝,许旻,等. 基于 SMA 的混合驱动器设计[J]. 机电一体化,2011,17(4):56-59,93.

收稿日期:2021-01-18

(上接第 110 页)

采用均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均百分比误差(MAPE)对健康评估结果进行评价,结果见表4。MDML-SVR的RMSE、MAE、MAPE分别为0.047 3、0.027 8、0.036 4,均优于其他方法。综合以上分析,本文所提健康评估方法效果优异,可以有效提高行星齿轮箱健康评估准确率。

表4 健康评估误差比较

方法	R_{MSE}	M_{AE}	M_{APE}
MDML-SVR	0.047 3	0.027 8	0.036 4
MD-SVR	0.061 5	0.044 1	0.064 8
ED-SVR	0.096 2	0.064 0	0.081 8
GMM-SVR	0.113 4	0.096 0	0.242 2
MDML-Logistic	0.101 4	0.090 9	0.187 6

5 结语

提出一种基于图谱特征与度量学习的行星齿轮箱健康评估方法,通过实验结果分析,得出结论:

- 1) 图谱特征作为故障特征参数,在表征故障严重程度方面优于常用的时域、频域特征。
- 2) 将单调性与相关性作为度量学习准则,可以减小不同故障严重程度下马氏距离的波动,提高健康评估指标的单调性、准确性。
- 3) 基于 MDML-SVR 的行星齿轮箱健康评估方法评

估结果更准确。

参考文献:

- [1] 孙灿飞,王友仁. 直升机行星传动轮系故障诊断研究进展[J]. 航空学报,2017,38(7):20892.
- [2] 张龙,黄文艺,熊国良,等. 基于多域特征与高斯混合模型的滚动轴承性能退化评估[J]. 中国机械工程,2014,25(22):3066-3072.
- [3] 赵帅,黄亦翔,王浩任,等. 基于拉普拉斯特征马氏距离的滚珠丝杠健康评估[J]. 机械工程学报,2017,53(15):125-130.
- [4] 乔美英,刘宇翔,陶慧. 一种基于信息熵和 DTW 的多维时间序列相似性度量算法[J]. 中山大学学报(自然科学版),2019,58(2):1-8.
- [5] RAI A, UPADHYAY S H. Intelligent bearing performance degradation assessment and remaining useful life prediction based on self-organising map and support vector regression[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2018,232(6):1118-1132.
- [6] 张云超,王友仁,李加兴. 基于 ABAQUS 的圆柱直齿轮齿根裂纹扩展与寿命估计[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):54-56.
- [7] ZHANG J, JIANG N, LI H K, et al. Online health assessment of wind turbine based on operational condition recognition [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(10):2970-2981.
- [8] 高艺源,于德介,王好将,等. 基于图谱指标的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 航空动力学报,2018,33(8):2033-2040.

收稿日期:2021-02-08