

摘要

SMA 车用柔性执行器性能分析及实验研究

电动化及智能化是现代汽车工业的重要发展趋势，汽车的运动部件的电机化程度越来越高，汽车正在逐渐成为驱动电机的集合体，随之而来的问题也日益明显：附加质量增加、电磁信号干扰、噪声大、结构复杂，都与现代汽车轻量化、绿色、环保、舒适的发展理念相悖。利用形状记忆合金智能材料所具有的能量密度大、结构简单可靠、无电磁干扰、能够感知外界环境变化的特点，实现车内运动部件的驱动和控制，为解决以上矛盾提供了新的方法与思路。现有形状记忆合金柔性执行机构，多采用聚四氟乙烯或金属软管进行支撑，且对于执行器的实验和仿真分析多围绕执行器的静态输出性能进行分析。本文利用 SMA 致动机理，利用镍-钛形状记忆合金丝作为驱动元件，设计一种形状记忆合金丝和均匀排布的陶瓷珠粒以及橡胶管组成的多层管状结构的车载柔性执行器，并通过理论分析和数值仿真与试验研究对执行器进行结构优化和参数优选，获取影响执行器性能的主要因素和关键参数，论文主要包括：

首先对 SMA 丝进行准静态拉伸试验，获得形状记忆合金丝在不同温度、拉伸幅值和速率下的特性曲线，搭建 SMA 油浴试验装置获得了电阻特性曲线。对比不同种柔性支撑结构的力学性能和热机械性能，选择陶瓷珠粒和橡胶管的多层管状结构。柔性执行器弯曲时会造成执行器行程损失，通过建立陶瓷珠粒的和形状记忆合金丝二维简化模型，模拟 SMA 丝弯曲时，所造成的珠粒排列变化而产生的间隙，计算以珠粒尺寸作为参数，弯曲半径为变量的数学模型，从而选择更合适的珠粒尺寸，获得了相关几何参数对执行器行程损失的影响规律。

然后利用 SMA 相变速率分布的本构模型，综合考虑显著影响 SMA 执行器驱动性能的因素，即热对流传热方程、非恒定偏置载荷（弹簧参数）以及焦耳热加热方法，设计一个基于本构模型和热力学模型可以预测 SMA 执行器的驱动应变循环频率的数值模型，并以单层无限长圆筒壁稳态传热方程为基础，建立多层管状复合结构的传热模型，分析多层复合结构的结构参数、热力学参数对 SMA 驱动元件产生热量的耗散过程，针对执行器的偏执弹簧刚度和预拉伸应变

等参数，对比分析仿真结果对执行器参数优化计算。

最后利用电阻行为特征相变检测分析方法，分析形状记忆合金阻值变化特征点与温度变化的关系，采集执行器输出力和位移，结合驱动过程中执行器形状记忆合金丝电阻变化，来验证 SMA 基于本构模型和热力学模型的执行器应变循环模型。利用数值模型计算执行器适用的工作电流，设计不同场景下变化电流，再利用试验分析设计的合理性，并分析误差出现的原因。除了电流以外影响执行器性能的因素，进行执行器动静态实验，分析 SMA 柔性执行器输出驱动速度、位移、周期变化规律。

关键词：

形状记忆合金、车用柔性执行器、柔性支撑、执行器应变循环模型

Abstract

Performance Analysis and Experimental Study on Automotive Flexible Actuator of SMA

Electrification and intelligence are essential development trends in the modern automobile industry. The motorization of the moving parts of the car is getting higher and higher, and the car is gradually becoming a collection of drive motors. The following problems are becoming more and more apparent: increased additional mass, electromagnetic signal interference, high noise, and complex structure, all of which are contrary to the development concept of the modern automobile of lightweight, green, environmental protection, and comfort. The use of shape memory alloy intelligent materials with high energy density, simple and reliable structure, no electromagnetic interference, and the ability to sense changes in the external environment to achieve the drive and control of moving parts in the vehicle provide a new approach and idea to solve the above contradictions. The existing shape memory alloy flexible actuators are supported mainly by PTFE or metal hoses, and the experimental and simulation analyses of the actuators are mostly focused on the static output performance of the actuators. In this paper, we use SMA actuator theory to design a flexible actuator with a multilayer tubular structure composed of shape memory alloy wire, uniformly arranged ceramic beads and rubber tube, using nickel-titanium shape memory alloy wire as the driving element. Through theoretical analysis and numerical simulation, and experimental research to optimize the structure of the actuator and parameter optimization, the primary factors and critical parameters affecting the performance of the actuator are obtained, the main contents of the paper.

Firstly, quasi-static tensile tests were conducted on SMA wires to obtain the characteristic curves of shape memory alloy wires at different temperatures, tensile amplitudes and rates, and resistance characteristic curves were obtained by building an SMA oil bath test device. A multilayer tubular structure of ceramic bead grain and rubber tube was selected to compare the mechanical and thermomechanical properties

of different kinds of flexible support structures. The bending of the flexible actuator causes the loss of actuator travel. By establishing a simplified two-dimensional model of ceramic beads and shape memory alloy wire, the gap caused by the change of bead arrangement when SMA wire is bent is simulated, and the mathematical model with bead size as a parameter and bending radius as a variable is calculated to select a more suitable bead size, and the influence law of relevant geometric parameters on the loss of actuator travel is obtained.

Then, using the intrinsic model of SMA phase change rate distribution, a numerical model based on the intrinsic model and thermodynamic model can be designed to predict the driving strain cycle frequency of SMA actuator by considering the factors that significantly affect the driving performance of SMA actuator, i.e., thermal convection heat transfer equation, non-constant bias load (spring parameter) and Joule heat heating method, and the steady-state heat transfer equation of single-layer infinitely long circular cylinder wall. Based on the steady-state heat transfer equation of a single-layer infinitely long cylindrical wall, a heat transfer model of the multilayer tubular composite structure is established to analyze the structural parameters and thermodynamic parameters of the multilayer composite structure on the heat dissipation process generated by the SMA actuator, and to compare and analyze the material parameters and optimize the calculation of the actuator parameters for the different thermodynamic properties of the selected materials of each layer.

Finally, the relationship between the characteristic point of shape memory alloy resistance change and temperature change is analyzed by using the phase change detection analysis method of resistance behaviour characteristics, and the actuator output force and displacement are collected, combined with the actuator shape memory alloy wire resistance change during the driving process to verify the SMA actuator strain cycle model based on the intrinsic structure model and thermodynamic model. The numerical model is used to calculate the applicable operating current of the actuator, to design the varying current under different scenarios, and then to analyze the rationality of the design using experiments and to analyze the reasons for the occurrence of errors. In addition to the factors affecting the actuator performance other than the

current, the actuator dynamic and static experiments are conducted to analyze the SMA flexible actuator output drive speed, displacement and cycle change patterns.

Keywords:

Shape memory alloys, Automotive Flexible Actuators, Flexible Supports, Strain Cycle Models

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解吉林大学有关保留、使用学位论文的规定，同意吉林大学保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吉林大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文级别： 硕士 博士

学科专业： 机械工程（车身工程）

论文题目： SMA 车用柔性执行器性能分析及实验研究

作者签名： 于倩

指导教师签名： 沈悦

2023 年 5 月 25 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 SMA 材料的研究现状及进展.....	2
1.2.2 SMA 作为驱动元件执行器研究现状	4
1.2.3 SMA 丝式偏置弹簧柔性执行器研究现状	5
1.3 本文研究内容	6
第 2 章 SMA 特性试验与本构模型	9
2.1 引言	9
2.2 形状记忆合金特性分析	9
2.2.1 形状记忆效应和超弹性	9
2.2.2 电阻特性	10
2.2.3 刚度特性	11
2.3 形状记忆合金本构模型	11
2.3.1 Tanaka 本构模型.....	11
2.3.2 Liang-Rogers 本构模型	13
2.3.3 Brinson 本构模型.....	13
2.4 形状记忆合金基本特性试验研究	15
2.4.1 拉伸速率对 SMA 丝驱动特性的影响	16
2.4.2 拉伸幅值对 SMA 丝驱动特性的影响	17

2.4.3 温度对 SMA 力学性能的影响.....	19
2.4.4 温度对 SMA 电阻特性的影响.....	20
2.5 本章小结	22
第 3 章 形状记忆合金丝的执行器设计与执行器应变循环模型研究	23
3.1 引言	23
3.2 SMA 执行器结构设计	23
3.2.1 偏置双程式执行器结构	23
3.2.2 柔性支撑结构设计	24
3.2.3 柔性支撑弯曲行程损失	26
3.2.4 柔性执行器弹簧刚度及有效圈数设计	28
3.3 基于本构模型和热力学模型的执行器应变循环模型	29
3.3.1 形状记忆合金本构模型	29
3.3.2 一维 SMA 执行器传热微分方程.....	31
3.3.3 加热过程热力学模型	33
3.3.4 散热过程热力学模型	34
3.4 执行器应变循环模型优化	35
3.4.1 电阻模型	35
3.4.2 柔性支撑热力学模型	36
3.5 执行器应变循环模型仿真分析	38
3.6 本章小结	41
第 4 章 执行器应变循环模型验证及执行器性能实验研究	43
4.1 引言	43

4.2 电阻行为特征相变检测分析	43
4.2.1 SMA 电阻测量工具.....	43
4.2.2 测量方法对比与选择.....	45
4.2.3 电阻行为特征相变检测分析	47
4.3 执行器加热电流设计	50
4.3.1 低加热电流下执行器的性能.....	50
4.3.2 高电流下执行器性能的衰减.....	51
4.3.3 不同电流下柔性支撑温度特性	52
4.3.4 执行器使用时电流设计	53
4.4 执行器性能试验	55
4.4.1 执行器的性能影响因素实验.....	55
4.4.2 执行器动态性能实验.....	57
4.5 本章小结	58
第 5 章 总结与展望.....	59
5.1 总结	59
5.2 展望	60
参考文献.....	63
作者简介及科研成果	71
致谢	73

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

道路安全、交通拥堵、能源短缺和环境污染等问题是当前汽车工业高速发展所面临的重大困难，智能网联汽车可以提供更舒适、更环保、更安全、更节能的交通模式，为解决上述难题提供了综合解决方案^[1]。随着汽车全面电动化目标在全球产业范围内的确立，由智能网联汽车与电动汽车叠加的智能网联电动汽车成为未来发展的重要方向。线控技术的飞速发展，给汽车设计带来了前所未有的革命，电磁式电机执行器逐渐替代了机械、液压或者气动的驱动方式。

但是，大量电磁驱动器被用于运行中的车辆，将带来如下问题：由于传统电磁驱动器应用时需将执行器的转动通过蜗轮蜗杆等机构进行减速并转化为直线运动，使它的重量及体积不能再缩小，电磁执行器数量众多，必然造成整车重量削减困难；今后“零碰撞，零阻塞，零伤亡”交通体系需要汽车和外界之间实时无线通讯和数据交换，大量电磁执行器所带来的电磁干扰，必然会造成汽车电子电器设备和通讯系统的不正常或者破坏，极大地影响了车辆的安全，甚至导致交通体系瘫痪等；电磁执行器在服役时，受制造装配精度的限制，各构件之间的摩擦与冲击不能得到有效地避免，使电机的噪声不能得到消除，电磁执行器数量众多，致使车内噪声水平显着提高；由于车辆内部特殊部位的运动部件所在的空间较小，传统的电磁执行器无法满足点计划驱动需求，阻碍汽车可动部件点计划水平的进一步提高。

形状记忆合金（Shape Memory Alloy, SMA）是一种具有形状记忆功能的金属材料，能够完全恢复的形变量可达6~8%，变形回复应力可达500MPa，能量密度可达10J/cm³，为普通电磁执行器能量密度的25倍，同时兼有感知和驱动两种功能。SMA具有优良的力学性能、形状记忆效应和超弹性，尤其是其形状记忆效应，是SMA材料最重要的性能之一。形状记忆合金具有温度敏感、超弹性、易于驱动控制等特点。与其他智能材料相比，其具有明显的优势：可以在较大温度范围内工作，可适用于各种特殊工作环境；可以提供较大的驱动力矩，特别适用于对执行器需要较大驱动力矩的情况；可以实现简单的控制，以满足

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/257104014154006046>