主动拉杆电磁作动器性能计算与试验验证*

柯兆伟[1] 上官文斌[1] 胡盛杰[2] 沈东明[2] 卢仲康[3]

（1.华南理工大学机械与汽车工程学院，广州 510641；2.宁波拓普集团有限公司，宁波 315800；3.广州华工机动车检测技术有限公司，广州 510640）

【摘要】为建立适用于汽车主动拉杆悬置的动铁式电磁作动器仿真模型，采用有限元电磁仿真与台架试验相结合的方法，开展建模仿真、性能计算与试验验证。搭建电磁作动器性能测试平台，获取不同电流与频率下的作动力试验数据；利用电磁仿真软件建立作动器仿真模型，计算对应工况下的电磁力输出，并将仿真结果与试验结果进行对比。结果表明：该电磁作动器固有频率约为30 Hz，在50~100 Hz工作频段内输出稳定，作动力幅值与电流有效值呈良好的线性关系；仿真所得作动力与激励电流周期一致，仿真与试验结果相对误差控制在13%以内，验证了模型的准确性与可靠性。

关键词：主动拉杆 电磁作动器 有限元仿真 作动力

中图分类号：U463.1 **文献标志码：**A **DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260043

Performance Calculation and Experimental Verification of Electromagnetic Actuator for Active Tie Rod

Ke Zhaowei[1], Shangguan Wenbin[1], Hu Shengjie[2], Shen Dongming[2], Lu Zhongkang[3]

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641; 2. Ningbo Tuopu Group Co., Ltd., Ningbo 315800; 3. Guangzhou Huagong Automobile Inspection Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640)

【Abstract】 To establish a simulation model of the moving-iron electromagnetic actuator applied to automotive active tie rod mounts, a combined method of finite element electromagnetic simulation and bench test is adopted to conduct modeling simulation, performance calculation and test comparison analysis. A performance test platform for the electromagnetic actuator is built to obtain the test data of actuating force under different currents and frequencies. A simulation model of the actuator is established via electromagnetic simulation software to calculate the electromagnetic force output under corresponding working conditions, and the simulation results are compared with the test results for verification. The results show that the natural frequency of the electromagnetic actuator is about 30 Hz, and it outputs stably within the operating frequency range of 50~100 Hz. The actuating force amplitude presents a good linear relationship with the effective current value. The actuating force obtained by simulation is consistent with the excitation current in period, and the relative error between simulation and test results is controlled within 13%, which verifies the accuracy and reliability of the established model.

Key words: Active tie rod, Electromagnetic actuator, Finite element simulation, Actuating force

【引用格式】 柯兆伟, 上官文斌, 胡盛杰, 等. 主动拉杆电磁作动器性能计算与试验验证[J]. 汽车工程师, 2026(8): 13-16+24.

KE Z W, SHANGGUAN W B, HU S J, et al. Performance Calculation and Experimental Verification of Electromagnetic Actuator for Active Tie Rod[J]. Automotive Engineer, 2026(8): 13-16+24.

1 前言

为改善汽车动力总成传递至副车架的振动，通常在两者之间安装防扭拉杆[1-2]，但在特定频段，防扭拉杆可能发生共振，而在防扭拉杆中增加作动器可以有效抑制振动并减小共振峰。作

*基金项目：国家自然科学基金项目（12272137）。

通信作者：卢仲康（1977—），男，工程师，主要研究方向为汽车及零部件检测技术，tonylzk@126.com。

动器需满足响应速度快、体积小、结构简单、输出稳定的要求，小型电磁作动器[3-4]控制精准、响应快速，在半导体制造、航空航天和汽车领域应用广泛[5]。

国内外学者对作动器的研究主要集中在其结构优化与控制算法方面。作动器主要分为动圈式、动磁式与动铁式3种。在动圈式作动器中，永磁体作为定子固定，线圈作为动子进行往复运动[6]，张弓等[7]研究了高频动圈式永磁直线电机，其采用沿外磁场磁力线方向磁化和8片瓦型海尔贝克（Halbach）阵列的新型永磁体结构，具有高频响、高线性度和快速动态响应的特性。在动磁式作动器中，线圈作为定子固定，动子为永磁体且多为永磁体阵列，在通电线圈产生的磁场中往复运动[8]，Li等[9]分析并设计了一种以单侧永磁体作为动子的直线作动器，其将一侧永磁体和线圈组件固定作为定子，将另一侧永磁体作为动子，该结构避免了动子与电源线相连，提高了作动器工作时的稳定性，同时可减轻动子质量，提高推力密度。动铁式作动器的定子由线圈、固定铁芯组成，动子由高磁导率的铁磁性材料构成并进行往复运动[10]，Muragishi[11]设计了一种线性作动器，由永磁体与线圈协同驱动动子，并采用钢板弹簧使动子在运动后自动复位，无需复杂控制，该作动器同时具备与螺线管相当的高推力密度和与音圈电机相近的良好线性度，表现出高控制精度、快速动态响应特性及高机械鲁棒性[12]。

本文研究一种基于主动拉杆的动铁式电磁作动器，分析其工作原理和减振原理，为便于后续仿真计算，对作动器结构进行合理简化，建立了简化仿真模型，并采用有限元方法分析其磁路和作动力，结合试验结果进行对比分析，验证作动器建模与仿真的有效性，从而为主动拉杆设计提供有效的建模思路。

2 主动拉杆电磁作动器的结构与工作原理

2.1 主动拉杆与电磁作动器结构

如图1所示，主动式防扭拉杆包括大衬套、小衬套、连接二者的拉杆支架及其内部的电磁作动器。电磁作动器工作时沿轴向运动，以抵消拉杆支架产生的轴向振动。

本文研究的电磁作动器为动铁式作动器，基本结构如图2所示，主要由磁轭、质量块、弹簧片及线圈4个部分组成。作动器的质量块、磁轭与弹簧片采用多层叠压结构，与传统一体式结构不同，该结构可显著增大等效电阻，线圈通电时可降低感应电动势，从而减小涡流损耗。

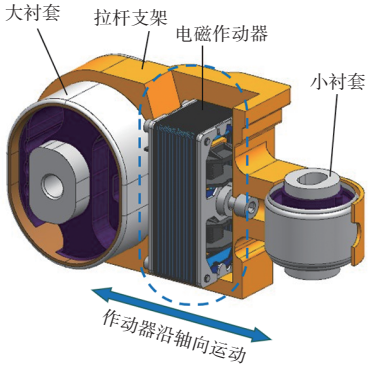
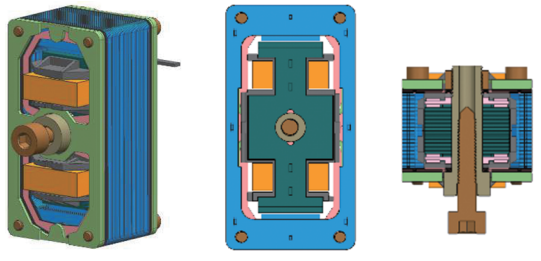
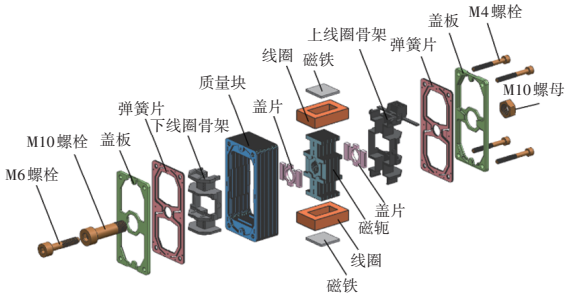


图1 主动拉杆结构与工作原理



（a）正等轴测图 （b）垂直剖面图 （c）水平剖面图

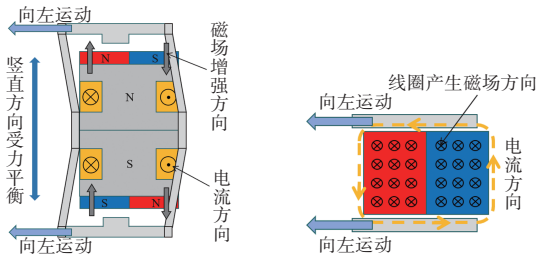


（d）爆炸图

图2 电磁作动器结构

2.2 电磁作动器工作原理

电磁作动器的工作原理如图3所示：初始状态下，电磁作动器线圈未通电流，质量块仅受永磁体磁场提供的磁吸力，由于结构对称，另一端永磁体的磁场也提供大小相等的磁吸力，质量块处于平衡状态；当线圈通入电流时，磁轭产生的磁场与永磁体的磁场叠加，质量块沿轴向运动；当电源断开时，质量块受弹簧片的回复力作用返回初始状态；当线圈内通反向电流时，质量块反向运动。电磁作动器所产生的惯性力可以完全抵消外界激励对防扭拉杆的影响，从而抑制防扭拉杆振动。



（a）侧视图　　（b）俯视图

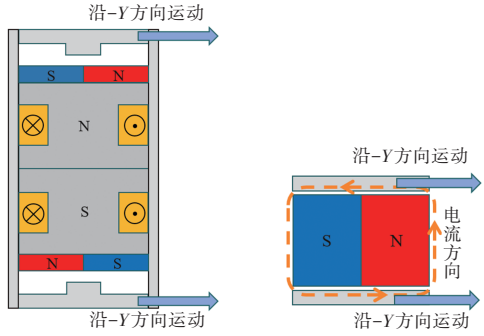
图3　电磁作动器工作原理

3　电磁作动器模型建立与性能计算

3.1　电磁作动器模型的建立

作动力作为电磁作动器的主要性能参数，直接影响其减振效果，因此需对电磁作动器进行建模分析。本文基于UG软件建立电磁作动器的三维几何模型，为兼顾仿真精度与计算效率，对作动器结构进行针对性合理简化，将模型划分为以质量块为主体的动子结构和由永磁体、磁轭与线圈构成的定子结构。建模过程中，对温升特性与涡流损耗等次要影响因素不作重点考虑，故将质量块与磁轭的层叠拼装结构等效为整体实体结构，既规避了叠片复杂结构带来的网格冗余与求解耗时问题，又在不影响电磁力及动力学仿真精度的前提下，有效降低了模型复杂度和仿真计算成本。

将电磁作动器三维模型导入JMAG中进行仿真计算。设置磁轭与质量块为软磁材料硅钢50JN600，永磁体材料设置为钕铁硼，牌号为N45，径向充磁，线圈材料为铜，模型其余区域材料均定义为空气。为保持质量块可随电流变化轴向运动，设置上、下线圈的电流方向为同向，永磁体磁极方向与线圈中电流的方向如图4所示。在JMAG中搭建电路，使上、下线圈串联，并通入交流电。采用四面体结构对模型进行网格划分，同时在永磁体与气隙处进行网格加密，仿真模型如图5所示。



（a）侧视图　　（b）俯视图

图4　永磁体与线圈方向

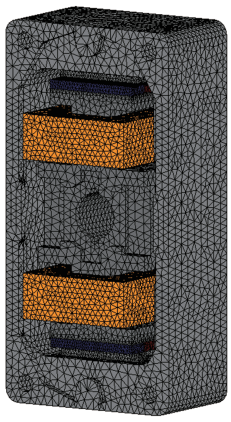


图5　作动器仿真模型

3.2　电磁作动器作动力的计算

在仿真中，输入频率为60 Hz、大小为3 A的正弦激励电流，作动力仿真结果如图6所示。电磁作动器的作动力周期与输入电流的周期相对应，相位相反。永磁体与线圈方向设置见图4，当输入电流为正值时，磁轭产生的磁场方向向上，永磁体N极附近的磁场强度增大，质量块受到-Y方向的电磁吸力并向该方向运动。当输入电流为负值时，永磁体S极附近的磁场强度增大，质量块受到Y方向的电磁吸力并向该方向运动。因此，电磁作动器在通入交变电流时，质量块可以在轴向往复运动。

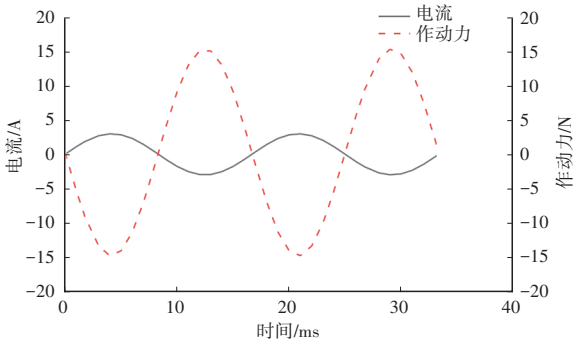


图6　电流与作动力周期对比

4　主动拉杆电磁作动器仿真模型试验验证

电磁作动力直接影响电磁作动器对防扭拉杆支架振动的抑制效果。电磁作动力测试系统包括电磁作动器、力传感器、功率放大器及LMS数据采集系统，其测试原理如图7所示。LMS数据采集系统产生正弦激励信号，经功率放大器放大后向线圈输入交变电流，驱动电磁作动器工作。力传感器通过专用螺栓与电磁作动器连接，用于实时测量电磁作动器产生的作动力，测试现场如图8所示。

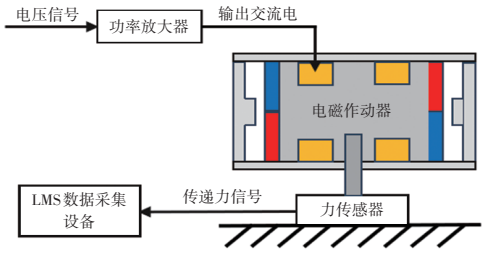


图7　电磁作动器作动力测试原理

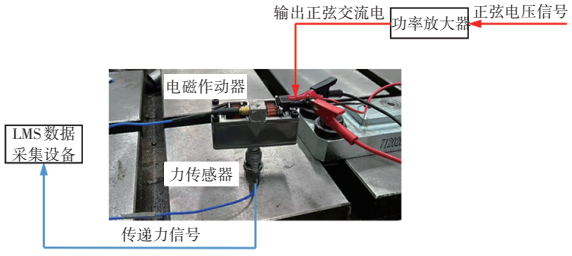


图8　电磁作动器作动力测试现场

4.1　试验步骤

a.将电磁作动器的固定螺栓与力传感器的一端粘接在一起,力传感器的另一端与地面粘接;LMS数据采集系统通过力传感器采集电磁作动力。

b.调节LMS系统的输出信号,使其以10 Hz的频率向功率放大器输入10~100 Hz的正弦信号,并在各频率段调节功率放大器输出的电流幅值,输出电流的幅值范围为1.0~4.0 A。

c.记录力传感器采集到的数据。

4.2　试验与仿真结果对比分析

不同电流与频率下的作动力测试结果如图9所示。由图9可知:在30 Hz附近作动器发生共振,导致作动力急剧增大并达到峰值,可以判断电磁作动器的固有频率在30 Hz附近;随着频率增大,电磁作动器的作动力趋于稳定;随着输入电流增大,作动力幅值与激励电流幅值存在增大趋势,表明电流是调控作动力的直接有效参数;为保证作动力输出的稳定性,应控制作动器的工作频率在50~100 Hz区间内。

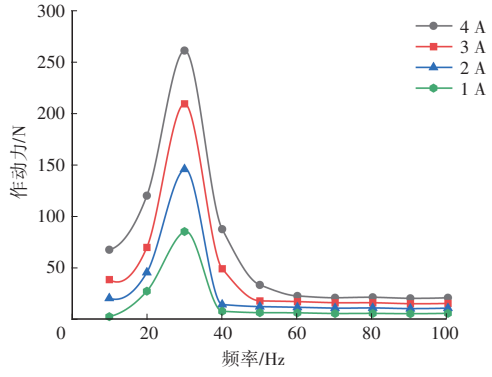


图9　不同电流下作动力与频率的关系

在输入频率为60 Hz的条件下,以0.5 A为步长,测试电流大小为1.0~4.0 A时电磁作动器的作动力,并与仿真结果进行对比,仿真与试验结果如图10所示。由图10可知,仿真结果与试验结果趋势一致,电磁作动力均随电流增大而增大,且电磁作动力与电流呈近似线性关系。

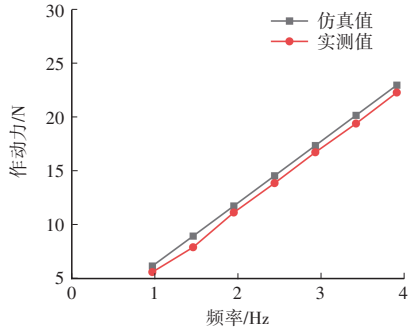


图10　电磁作动力与电流的关系

对模型的准确性进行分析验证,以电磁作动器在频率为60 Hz、电流为1.0~4.0 A条件下的电磁作动力作为参考,对比仿真结果与试验结果,如表1所示。由表1可知,仿真模型在电流为1.0 A与1.5 A时的相对误差控制在13%以下,电流大小为2.0~4.0 A时的相对误差控制在6%以下,说明所建立的计算模型具备较好的准确性,可用于后续电磁作动器的结构优化。

表1　作动力仿真与试验结果对比

电流/A	作动力/N		相对误差/%
	试验结果	仿真结果	
1.0	5.61	6.17	9.97
1.5	7.89	8.91	12.99
2.0	11.07	11.67	5.45
2.5	13.76	14.44	4.94
3.0	16.59	17.20	3.70
3.5	19.22	19.97	3.91
4.0	22.06	22.74	3.09

5　结束语

本文以主动拉杆动铁式电磁作动器为研究对象,建立了JMAG电磁仿真模型,搭建台架测试平台获取试验数据,并通过仿真与试验对比验证模型的准确性。结果表明,该作动器固有频率约为30 Hz,在50~100 Hz频段输出稳定,作动力与电流呈良好的线性关系;仿真与试验结果趋势一致,相对误差控制在13%以内,证明所建立的仿真模型可靠、计算方法有效,可直接用于后续结构优化与性能预测。

(下转第24页)

KANG G Q, LU L H. Sealing Design for New Energy Vehicle Wading Test Standards Improvement[J]. Automotive Digest, 2021(7): 42-45.

[10] 李建华, 张磊涛, 付志军, 等. 新能源汽车上海地方法规涉水检测经验浅析[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(20): 138-140+146.
LI J H, ZHANG L T, FU Z J, et al. The Experience of New Energy Vehicles Wading Test According to Shanghai Local Regulations[J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(20): 138-140+146.

[11] 黄志春. 越野汽车维修性试验评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
HUANG Z C. Research on Maintainability Test Evaluation for Off-Road Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

[12] 杨刚, 尚志诚, 钟欣. 电动汽车绝缘电阻测量方法仿真与试验分析[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(23): 5-7.
YANG G, SHANG Z C, ZHONG X. Simulation and Test Analysis of Insulation Resistance Measurement Methodfor Electric Vehicles[J]. Automobile Applied Technology, 2020, 45(23): 5-7.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年2月11日。

（上接第16页）

参　考　文　献

[1] OANA Y, ENOMOTO T, KUWATA T, et al. NVH Development of a High Torque SUV Using a Novel Active Torque Rod System[J]. SAE Technical Paper 2018-01-0685, 2018.

[2] SHANGGUAN W B. Engine Mounts and Powertrain Mounting Systems: A Review[J]. International Journal of Vehicle Design, 2009, 49(4): 237-258.

[3] YANG L, ZHOU Y Z, LI Z, et al. Research on Design Method of Radial Magnetized Linear Voice Coil Motor[C]// The Proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society. Singapore: Springer, 2022: 1150-1156.

[4] ZHANG W, ZHANG H, MU J R, et al. Design of a Single-Sided, Coreless, Flat-Type Linear Voice Coil Motor[J]. Actuators, 2023, 12(2).

[5] ZHU Z J, XIAO Y, LI Y Q, et al. Design and Optimization of a High Thrust Density Voice Coil Motor with Auxiliary Enhanced Magnetic Circuits[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2025, 40(2): 1215-1224.

[6] SHIN B H, LEE J W, SHIM H H, et al. Design of Electromagnetic Moving-Coil Type Voice Coil Motor for Scanning Mirror of Barcode Reader[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 2016, 40(1): 17-22.

[7] 张弓, 于兰英, 柯坚. 新颖高频动圈式永磁直线电机的研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(4): 456-461.
ZHANG G, YU L Y, KE J. Study of a Novel High Frequency Moving Coil Permanent Magnet Linear Motor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(4): 456-461.

[8] WU S, JIAO Z X, YAN L, et al. Development of a Direct-Drive Servo Valve with High-Frequency Voice Coil Motor and Advanced Digital Controller[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3): 932-942.

[9] LI L Y, MA M N, KOU B Q, et al. Analysis and Design of Moving-Magnet-Type Linear Synchronous Motor for Electromagnetic Launch System[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 121-126.

[10] ABDALLA I I, IBRAHIM T, MOHD NOR N. Optimization of Iron-Cored Linear Motor with Trapezoidal Magnet Using Finite-Element Analysis[C]// 2014 5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2014: 1-6.

[11] MURAGISHI Y. Active Damper Unit Driven by "RECIPROCATING-MOTOR" [J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2007, 73(4): 414-417.

[12] BU Y G, RYOTA A, MIZUNO T. Examination of Vibration Control of Linear Oscillatory Actuator[J]. Electrical Engineering in Japan, 2012, 178(4): 55-62.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年3月9日。