

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.019

# 双线圈超磁致伸缩换能器三维磁场分析与优化<sup>\*</sup>

许岳峰<sup>1,2</sup>, 黄文美<sup>1,2\*</sup>

(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130;

2. 河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130)

**摘要:**针对超磁致伸缩换能器工作性能以及磁场环境问题,对超磁致伸缩换能器磁场强度、漏磁以及超磁致伸缩材料(GMM)棒磁场均匀率进行了研究,并基于 GMM 设计了一种双线圈换能器。在分析了 GMM 特性以及超磁致伸缩换能器工作原理的基础上,提出了以增大 GMM 棒磁场强度、减少漏磁和提高磁场均匀率为设计原则,将 GMM 棒轴线方向上磁场强度作为评价标准,采用 COMSOL Multiphysic 有限元仿真软件对双线圈超磁致伸缩换能器进行三维磁场仿真,分析了超磁致伸缩换能器在工作过程中上下导磁体和导磁回路的结构参数对磁场均值大小和磁场均匀率大小的影响规律。研究结果表明:随着导磁体半径的增加,GMM 棒磁场均匀率先增加然后增幅缓慢趋于平衡,磁场均值先不变,然后大幅降低;随着导磁回路相对磁导率增加,GMM 棒磁场强度均值大幅增加,当相对磁导率达到 1 500 时,磁场强度均值基本趋于平衡,经过优化,磁场均匀率从 59.7% 提高到 90.5%,增幅为 30.8%。

**关键词:**超磁致伸缩换能器;双线圈;有限元分析;三维磁场;Terfenol-D

中图分类号:TM27

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)05-0544-05

## Optimization of 3D magnetic field of double coil giant magnetostrictive transducer

XU Yue-feng<sup>1,2</sup>, HUANG Wen-mei<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Aiming at the performance of giant magnetostrictive transducer and its magnetic field environment, the magnetic field intensity, magnetic leakage and magnetic field uniformity of giant magnetostrictive material (GMM) rod of giant magnetostrictive transducer were studied. Based on GMM, a double-coil transducer was designed. On the basis of analyzing the characteristics of GMM and the working principle of giant magnetostrictive transducer, the design principles of increasing the magnetic field intensity of GMM rod, reducing magnetic leakage and improving the uniformity of magnetic field were put forward. The magnetic field strength in the direction of the rod axis was used as the evaluation standard. The three-dimensional magnetic field simulation of the double-coil giant magnetostrictive transducer was performed by COMSOL Multiphysic. The influence of the structure parameters of the upper and lower magnets and the magnetic conduction loop on the mean value and the uniformity of the magnetic field of the giant magnetostrictive transducer was analyzed. The results indicate that with the increase of the radius of the magnetizer, the uniformity of the magnetic field of the GMM rod increases first and then the amplitude increases slowly. The average value of the magnetic field first changes and then decreases sharply. With the increase of the relative permeability of the magnetic circuit, the magnetic field strength of the GMM rod significantly increased, when the relative magnetic permeability reaches 1 500, the average value of the magnetic field strength tends to be balanced. After optimization, the uniformity of the magnetic field is increased from 59.7% to 90.5%, an increase of 30.8%.

**Key words:** giant magnetostrictive transducer; double coil; finite element analysis; 3D magnetic field; Terfenol-D

收稿日期:2018-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777053)

作者简介:许岳峰(1991-),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事磁致伸缩换能器电磁计算方面的研究。E-mail:228988002@qq.com

通信联系人:黄文美,女,教授,博士生导师。E-mail:huzwm@hebut.edu.cn

# 0 引言

作为一种新型的智能材料,稀土超磁致伸缩材料(GMM)具有磁致伸缩系数大、能量密度高、机电耦合系数大、响应速度快、输出力大和可靠性高等诸多优点,能实现大振幅超声震动输出<sup>[1-4]</sup>。

具有磁致伸缩特性的材料被称为磁致伸缩材料<sup>[5]</sup>,其中,稀土金属间化合物磁致伸缩材料被称为稀土超磁致伸缩材料。磁致伸缩材料利用其磁致伸缩效应和逆效应,在磁场作用下,其长度发生改变所产生的位移做功或在交变磁场作用下发生反复伸缩所产生的振动或声波,将电磁能转换成机械能,相反地将机械能转换成电磁能。它是重要的能量与信息转换的功能材料,在传感器、水声换能器技术、电声换能器技术等技术领域有着广泛的应用前景<sup>[6-9]</sup>。

目前,国内相关研究大部分是针对单线圈换能器的<sup>[10-11]</sup>,对双线圈超磁致换能器的磁场分析研究较少,本文将基于磁路设计理论和磁致伸缩原理设计一种双励磁线圈结构的超磁致伸缩换能器。

# 1 原理和模型

换能器的励磁线圈通入电流,根据磁路欧姆定律可得磁动势:

$$F = \varphi R = HL \quad (1)$$

式中: $L$ —磁路的有效长度; $H$ —励磁线圈产生磁场的强度; $\varphi$ —磁路上的磁通; $R$ —磁路的总磁阻。

磁路中的磁动势由左右励磁线圈提供,即:

$$F = NI \quad (2)$$

式中: $N$ —线圈匝数; $I$ —单匝线圈电流。

磁路的磁阻为:

$$R_i = \frac{l_i}{u_i A_i} \quad (3)$$

式中: $R_1$ —导磁材料的磁阻; $R_2$ —GMM棒的磁阻; $l$ —导磁材料的有效长度; $A$ —导磁材料的截面积; $u$ —磁路中导磁材料的磁导率。

根据磁通的定义有:

$$\varphi = BA = \mu HA \quad (4)$$

式中: $B$ —磁感应强度; $A$ —磁路的截面积。

根据磁通的连续性有:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (5)$$

式中: $\varphi_1$ —导磁材料上的磁通; $\varphi_2$ —GMM棒上的磁通。

GMM棒上的磁势为:

$$F_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} F \quad (6)$$

将式(2,3)代入式(6)中,可得到GMM棒中的磁场强度为:

$$H_2 = \frac{F_2}{l_2} = Ni \frac{l_1 u_2 A_2}{l_2 l_1 u_2 A_2 + l_2^2 u_1 A_1} \quad (7)$$

线性压磁方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^H} + d_{33} H \quad (8)$$

$$B = d_{33} \sigma + \mu^\sigma H \quad (9)$$

式中: $\varepsilon$ —材料应变; $\sigma$ —材料所受应力; $d_{33}$ —压磁系数; $E^H$ —磁场强度为某常量时磁致伸缩材料的杨氏模量; $H$ —磁场强度; $B$ —磁感应强度; $\mu^\sigma$ —应力为某常数时材料的磁导率。

由压磁方程(8,9)可知:GMM棒的位移输出分为弹性形变和磁控变形两类,以磁控变形为主,该类变形与GMM所处的磁场平均强度有关。如果GMM棒各处的磁场强度 $H$ 不同,磁畴微元之间将会产生不同的应变 $\varepsilon$ ,相邻微元之间因应变大小及方向不同而导致材料本身拉压特性不一致,严重破坏材料的力学性能<sup>[12]</sup>,因此提高GMM棒处磁场强度的均匀率是必要的。

GMM棒上磁场的均值为:

$$M = \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{N} \quad (10)$$

GMM棒上的磁场均匀率为<sup>[13]</sup>:

$$\eta = \frac{M}{H_{\max}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $M$ —GMM棒的磁场均值; $N$ — $H_i$ 的总体例数。

本文总体例数 $N$ 取11,轴向每间隔3mm取一点,当 $\eta$ 越接近于1,磁场均匀性越好。双励磁线圈换能器的结构示意图如图1所示。

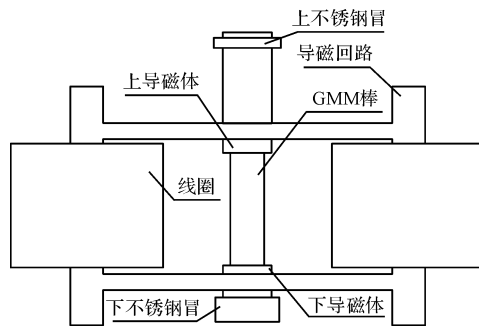


图1 双励磁线圈换能器的结构示意图

上下不锈钢冒均为钢材料,相对磁导率为200,左右励磁绕组都由线径为1mm的漆包圆铜线绕制,且均为525匝,GMM棒采用直径为10mm,长度为30mm的Terfenol-D棒,相对磁导率为5.3。该换能器使用双励磁绕组的并联方式,通过导磁回路将两个并联励磁绕组产生的同向磁场叠加在一起导入到GMM棒中。

相比于传统的单线圈换能器,双线圈换能器能够为 GMM 棒提供 stronger 的磁场从而使得 GMM 棒产生更大的应变来输出机械能。

## 2 电磁场的三维建模与仿真

本文使用 COMSOL Multiphysics 软件平台对双励磁线圈换能器进行三维建模与有限元动态磁场分析计算。相比于二维仿真,三维物理模型不必是轴对称,模型修改起来简单方便,计算结果接近实际,仿真结果直观且立体感更强。将 GMM 棒进行网格细化,增加网格数,从而使仿真结果更加精准。将 GMM 棒网格超细化,将空气网格粗化。网格划分完后网格顶点总数为 10 069。激励条件为左右线圈频率均为 50 Hz,幅值为 2 A 的同相位正弦电流,电流密度为 2.55 A/mm<sup>2</sup>。

当时间为 0.006 s 电流大小为 1.9 A 时的三维空间磁场分布如图 2 所示。

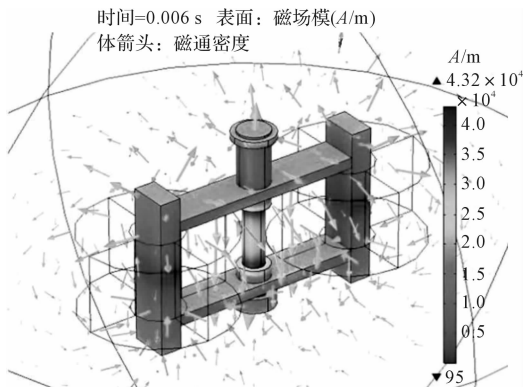


图 2 双励磁线圈换能器的三维空间磁场分布

从仿真结果可知:换能器外部磁通流动为上部流出底部流入,导磁回路尖角处磁场较大,左励磁线圈与右励磁线圈产生的磁场通过导磁回路汇集到了 GMM 棒中,GMM 棒中的磁场值明显大于导磁回路,棒两头磁场大于中间磁场。

## 3 上下导磁体的设计及优化

### 3.1 上下导磁体结构优化设计

双线圈超磁致伸缩换能器的导磁体不仅是输出端,也是将导磁回路里的磁场输入到 GMM 棒中的重要部件。作为输出端需要高结构强度和导磁率的材料,该换能器采用导磁性钢材料,相对导磁率为 200。GMM 棒的相对磁导率为 5.3,空气的相对磁导率为 1,GMM 棒的相对磁导率接近于空气的相对磁导率,所以很容易在导磁体与 GMM 棒接触处产生到空气中的漏磁。为了减少漏磁,提高磁场均匀率,有必要研究导磁

体的结构参数变化对 GMM 棒磁场的影响。以 GMM 棒轴线方向上磁场强度为目标变量,以导磁体的半径  $r$  为变量,经过三维有限元仿真分析得到在导磁体半径为 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm、8 mm 下的 GMM 棒轴线方向磁场强度分布,如图 3 所示。

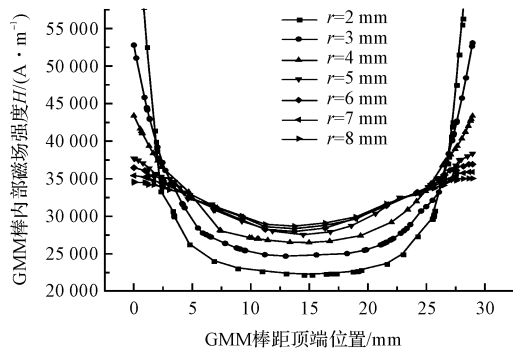


图 3 GMM 棒轴线方向磁场强度分布

由图 3 可知:GMM 棒的最顶端和最低端对应的磁场强度最大,在中心处的磁场强度最小,GMM 棒距顶端 5 mm~25 mm 的范围内,磁场强度分布相对均匀。当导磁体半径为 2 mm 时,GMM 棒轴线方向磁场强度曲线弧度最大,GMM 磁场最大值与最小值也相差最大。

通过式(1)计算得出导磁体磁场均匀率,当导磁体半径为 2 mm 时磁场均匀率仅为 59.7%,当导磁体半径为 2 mm~5 mm 时,磁场均匀率的增加近似线性增加,当导磁体半径为 5 mm 时,磁场均匀率为 90.5%,增加了 30.8%,当导磁体半径大于 5 mm 时,磁场均匀率增加缓慢。

GMM 棒磁场强度均匀率变化曲线如图 4 所示。

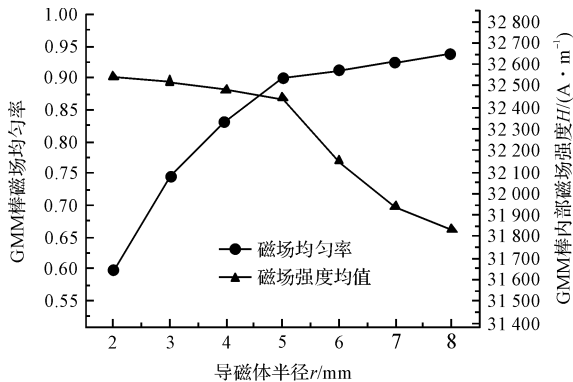


图 4 GMM 棒磁场强度均匀率变化曲线和 GMM 棒磁场强度平均值变化曲线

由图 4 可知:GMM 棒顶部和底部的磁力线聚集在了与导磁体接触面内,使得 GMM 棒顶部与底部的磁场值比中部的磁场值要大很多,导致磁场均匀率低。

磁力线分布如图 5 所示。

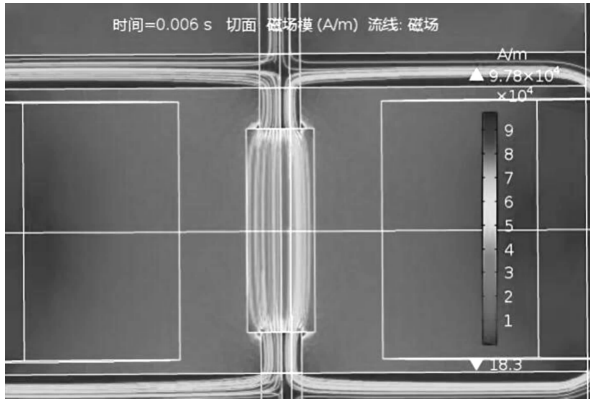


图5 磁力线分布

图5显示:当导磁体半径由2 mm增大到5 mm时,GMM棒磁场强度均值  $M$  变化缓慢,半径继续增大,磁场强度均值近似线性减少。这是由于GMM棒相对磁导率仅为空气的两倍,且比导磁体相对磁导率低很多,当导磁体半径大于GMM棒时,导磁体的端面并没有全部接触在GMM棒上,而是一部分与空气接触,以致导磁体内的磁场并没有全部输入到GMM棒中,一部分以漏磁形式传输到空气中。

由上述优化分析可知:当导磁体半径等于GMM棒半径5 mm时,磁力线分布均匀,漏磁场很小,磁场均匀率为90.5%,磁场均值为32 443 A/m,符合设计要求。

### 3.2 导磁回路的优化设计

导磁回路所用的导磁材料的相对磁导率是系统换能效率的决定性因素,当导磁回路选用不同相对磁导率的材料时,GMM棒轴线方向磁场强度分布如图6所示。

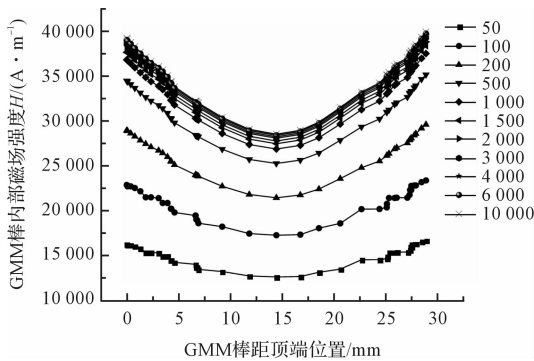


图6 GMM棒轴线方向磁场强度分布

图6中,曲线表示导磁回路相对磁导率在50 ~ 10 000之间变化时的磁场强度,随着相对磁导率增加,磁场均匀率几乎不变,而GMM棒的磁场强度均值大幅增加,但当导磁回路的相对磁导率大于1 500后,GMM棒的磁场强度均值几乎不变。

GMM棒磁场强度均匀率变化曲线和平均值变化曲线如图7所示。

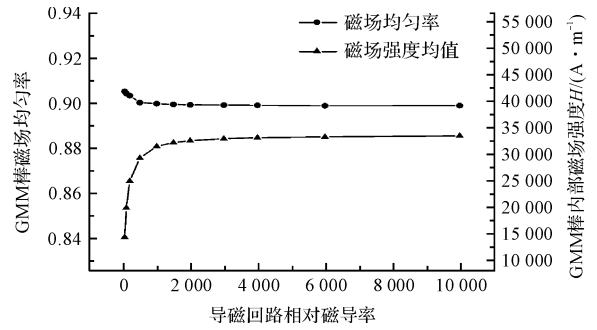


图7 GMM棒磁场强度均匀率变化曲线和GMM棒磁场强度平均值变化曲线

所以本换能器导磁回路选用由40片0.5 mm厚的冷轧硅钢片组成,相对磁导率为1 500。

## 4 换能器磁场实验及分析

当导磁体的半径为5 mm,磁回路相对磁导率为1 500时,将其设计成双线圈超磁致伸缩换能器。双励磁线圈换能器实验平台如图8所示。

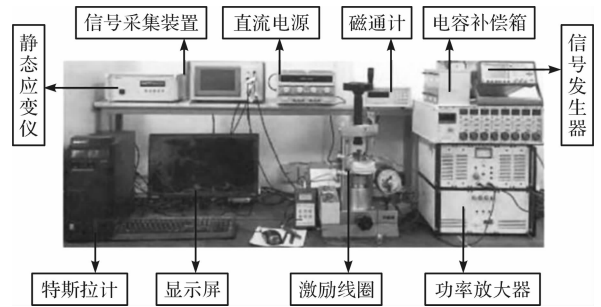


图8 双励磁线圈换能器实验平台

本研究通过实验测得了在电流频率50 Hz幅值1.6 A和2.0 A时GMM棒轴线方向的磁场强度,将其与有限元仿真计算数据进行对比。

GMM棒轴线方向磁场强度分布如图9所示。

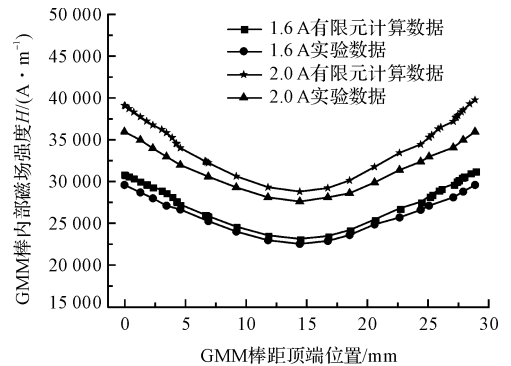


图9 GMM棒轴线方向磁场强度分布

通过对比得出:有限元计算的结果要略大于实验测得磁场强度,但两者变化趋势基本相同;从GMM棒中间到两端,轴线方向磁场强度逐渐增大。

## 5 结束语

针对超磁致伸缩换能器工作性能以及磁场环境问题,本研究对双线圈超磁致伸缩换能器进行了三维有限元仿真,分析了换能器的动态磁场分布,得到结果如下:

(1)GMM 棒两端的磁场强度最大,棒中间的磁场强度最小,导磁回路的尖角处磁场强度偏大;

(2)当导磁体半径小于 GMM 棒半径时,随着导磁体半径的增加,磁场均匀率大幅提高,磁场均值基本不变;当导磁体半径大于 GMM 棒半径时,随着导磁体半径增加,磁场均匀率基本不变,而磁场均值大幅减小,且漏磁增大;当导磁体半径等于 GMM 棒半径时,磁场均匀率最大;

(3)随着导磁回路相对磁导率增加,GMM 棒的磁场均匀率几乎不变,但磁场强度均值大幅增加,当相对磁导率大于 1 500 时,GMM 棒的磁场均值增幅缓慢,大小几乎不变;导磁回路的相对磁导率对 GMM 棒的磁场均匀率影响不大,当相对磁导率超过 1 500 时,对 GMM 棒磁场均值影响不大。

### 参考文献 (References):

[1] 袁惠群,李莹,李东,等.超磁致伸缩微致动车削系统建模与控制[J].振动、测试与诊断,2014,34(2):351-355.

[2] CHEN C, SHI Y L, ZHANG J, et al. Novel linear piezoelectric motor for precision position stage[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2016,29(2):378-385.

[3] 刘红军,刘洁,叶芳.用于超磁致伸缩作动器的一种改进的控制方法[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(9):91-95.

[4] LIU Jing-hua, JIANG Cheng-bao. Giant magnetostrictive materials[J]. **Journal of Applied Physics**, 2015,55(5):1319-1326.

[5] 王博文.超磁致伸缩材料制备与器件设计[M].1版.北京:冶金工业出版社,2003.

[6] 梅德庆,浦军,陈子辰.用于超精密隔振的稀土超磁致伸缩致动器设计[J].仪器仪表学报,2004,25(6):766-769.

[7] WANG W J, WANG T Q, TANG J, et al. Design of thin low-frequency smart material based on giant magnetostrictive actuator[J]. **Materials Research Innovations**, 2014,115(17):299-303.

[8] HIROYUKI W, MUNEO M. New magnetostrictive type torque sensor for steering shaft[J]. **Sensors and Actuators**, 2001,91(1):103-106.

[9] ZHU Y C, LI Y S. Development of a deflector-jet electrohydraulic servo-valve using a giant magnetostrictive material[J]. **Smart Materials and Structures**, 2014,11(23):1-19.

[10] 高晓辉,刘永光,裴忠才.超磁致伸缩作动器磁路优化设计[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(9):145-150.

[11] 蔡万宠,张建富,郁鼎文,等.超磁致伸缩超声振动系统的机电转换效率研究[J].机械工程学报,2017,53(19):52-58.

[12] CLARK AE. Ferromagnetic material[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing company, 1980.

[13] 李鹏阳,刘强,周玲霞.超磁致伸缩超声换能器设计分析[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(5):1065-1075.

[编辑:周昱晨]

### 本文引用格式:

许岳峰,黄文美.双线圈超磁致伸缩换能器三维磁场分析与优化[J].机电工程,2019,36(5):544-548.

XU Yue-feng, HUANG Wen-mei. Optimization of 3D magnetic field of double coil giant magnetostrictive transducer[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019,36(5):544-548.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 505 页)

[6] WESTHUIZEN V, FRANCOIS S, SCHALK E. Slow active suspension control for rollover prevention[J]. **Journal of Terramechanics**, 2013,50(1):29-36.

[7] DAHLERG E, STENSSON A. The dynamic rollover threshold of commercial vehicles sensitivity study[J]. **International Journal of Vehicle Design**, 2006,40(3):228-250.

[8] COOPERRIDER N K, THOMAS T M, HAMMOUD S A. Testing and analysis of vehicle rollover behavior[J]. **Sae Transactions**, 1990,(SP-814):125-134.

[9] 刘敬忠,冯燕,赵燕伟.悬架扭杆和稳定杆刚度对车辆转向灵敏度的影响分析[J].机电工程,2012,29(6):

654-661.

[10] 李志魁,吴晓涛.考虑衬套影响的横向稳定杆侧倾刚度计算方法及其应用[J].设计开发,2016(4):13-21.

[11] 刘一夫,朱茂桃,陈阳,等.横向稳定杆对整车侧倾及纵倾特性的影响[J].机械设计,2013,30(2):92-96.

[12] 梁毅,黄桥.稳定杆布置对不足转向分析[J].装备制造技术,2016(4):187-189.

[编辑:张豪]