

# 具有加速度传感器的能量回馈式汽车智能电磁减振器

## 设计说明书

设计者:杨明煜 员江洋 高晗 康恺 金砚秋

指导教师: 杨明

(山东大学 电气工程学院 山东 济南 250002)

## 作品内容简介

汽车在动力装置驱动下的行驶过程中, 由于路面不平和加速、制动、转向等原因, 会造成车体的振动和俯仰、侧倾等一系列运动形式。这些运动的能量来源于动力装置, 最终大部分被悬架减振器吸收并转化为热能耗散在空气中, 造成了能量的浪费。本作品是针对这一问题, 以电磁感应原理和永磁直线发电机技术为基础, 设计了一款带陀螺仪和加速度传感器的能量回馈式汽车智能电磁减振器。与传统的液压筒式减振器相比, 我们设计研发的这款新型汽车减振器能够实现以下功能:

1) 利用电磁感应原理与直线发电机技术对汽车行驶过程中减振器的运动能量和俯仰、侧倾等运动形式的能量进行回收并存储于蓄电池, 减少了动力装置的能量消耗和污染物的排放;

2) 根据路面状况和汽车的行驶工况迅速、适当地调节阻尼, 在路面等级较差的情况下仍然可以获得良好的减振效果, 并且回收的能量更多, 提高减振性能的同时解决了俯仰和侧倾问题, 大幅度提高了汽车的乘坐舒适性和操纵稳定性;

3) 结构适应性强, 容易改装, 实现了汽车悬架系统的电动化, 能够与混合动力和纯电动等新能源汽车实现对接。

### 技术路线

1) 利用电磁感应原理产生电能并形成减振器的阻尼, 通过整流电路和稳压电路实现能量的回收;

2) 利用安装在车身上的**加速度传感器**监测路面情况, 利用安装在车身上的**陀螺仪传感器**监测车体的俯仰和侧倾运动。

3) ECU 接收加速度传感器和陀螺仪传感器的信号, 处理后将阻尼调节电信号发送给能量回收控制电路, 实现减振器定子线圈绕组数的调节, 从而调节馈能功率, 改变减振器的阻尼, 衰减车身振动并矫正俯仰和侧倾运动。

4) 利用 MATLAB 的 Simulink 模块建立数学仿真模型; 制作样机实验验证馈电效能。

关键词: 能量回馈 电磁减振器 智能 陀螺仪传感器 加速度传感器 汽车

联系人: 杨明煜 联系电话: 17753893399

## 1. 研制背景及意义

### 1.1 背景

#### 1.1.1 节能减排背景

1) 截至目前, 我国已成为世界上最大的石油消费国和最大的石油进口国, 而汽车占整个石油消耗量的 55%以上;

2) 目前我国汽车保有量 2.17 亿辆, 平均年耗油量为 1.6 吨/辆。汽车发动机所产生的能量只有 10%-16% 被有效利用, 其中悬架系统的损耗占总损耗的 17.2%以上, 而减振器是悬

架系统中的主要耗能部件<sup>[1]</sup>；

3) 在能源危机和环境污染的双重压力下，各国纷纷将新能源汽车的发展提升至国家战略层面。目前我国新能源汽车保有量占全球 50%以上，而进一步提高续航里程是新能源汽车亟待解决的核心问题。

### 1.1.2 传统减振器的发展现状

目前汽车悬架系统所采用的减振器以筒式液压减振器为主，其阻尼通常不可调节，随着人们节能环保意识的增强以及对汽车乘坐舒适性和操纵稳定性要求的提高，这种传统减振器的弊端也逐渐凸显：

1) 筒式液压减振器无法对车体的运动能量进行回收，造成了能量的浪费；

2) 筒式液压减振器无法根据路况和行驶工况实时调节阻尼，难以解决汽车在路面不平和加速、制动、转向时的振动、俯仰和侧倾问题，加剧了零部件的磨损，限制了乘坐舒适性和操纵稳定性的提高。

### 1.2 作品意义

本产品利用电磁感应原理和永磁直线发电机技术实现运动能量的有效回收，可根据汽车的行驶工况及路面状况实时进行阻尼调节，抑制车体的振动和俯仰、侧倾运动。有效减少了汽车行驶过程中的能量浪费，解决了传统减振器难以根据路况和行驶工况进行参数调节的问题。该减振器的结构紧凑，工作原理清晰，能量回收效果显著，符合悬架系统的电动化和智能化设计趋势以及汽车的节能减排要求，具有良好的实际应用前景。

## 2. 设计方案

### 2.1 设计思路

具有陀螺仪和加速度传感器的能量回馈式汽车智能电磁减振器主要包括减振器主体、陀螺仪传感器、加速度传感器、电子控制单元、蓄电池、能量回收控制电路等部分。该减振器的两端分别通过吊耳安装在车身和悬架上，线圈绕组则通过导线与外界的控制系統联系。当汽车行驶时，路面不平度激励使车轮发生垂向跳动，带动减振器活塞杆以及永磁体相对于定子线圈绕组往复运动，高密度的永久磁体形成的强磁场不断切割定子线圈，根据电磁感应原理在定子线圈中产生感应交流电，经整流稳压电路处理后转换成直流电，输送并存储在车载蓄电池中。

能量回馈式汽车智能电磁减振器有三种工作状态：1) 汽车正常行驶时，减振器具有稳定的减振发电效果；2) 路面不平度等级变化时，电子控制单元发送指令给能量回收控制电路迅速改变定子线圈绕组数小幅度调节阻尼，衰减车体的振动；3) 车辆加速、减速和转向时，电子控制单元发送指令给能量回收控制电路迅速改变定子线圈绕组数大幅度调节阻尼，抑制车体的俯仰和侧倾运动。在上述三种工况下，减振器均持续向电池回馈电能，并且路面不平度越高，加速、制动和转向时的加速度越大，减振器回馈的电能越多；同时，在上述三种工况下，陀螺仪传感器和加速度传感器实时监测车身垂向加速度信号和车身角度信号，实现系统的闭环反馈控制。减振器的控制流程图如图 1 所示。

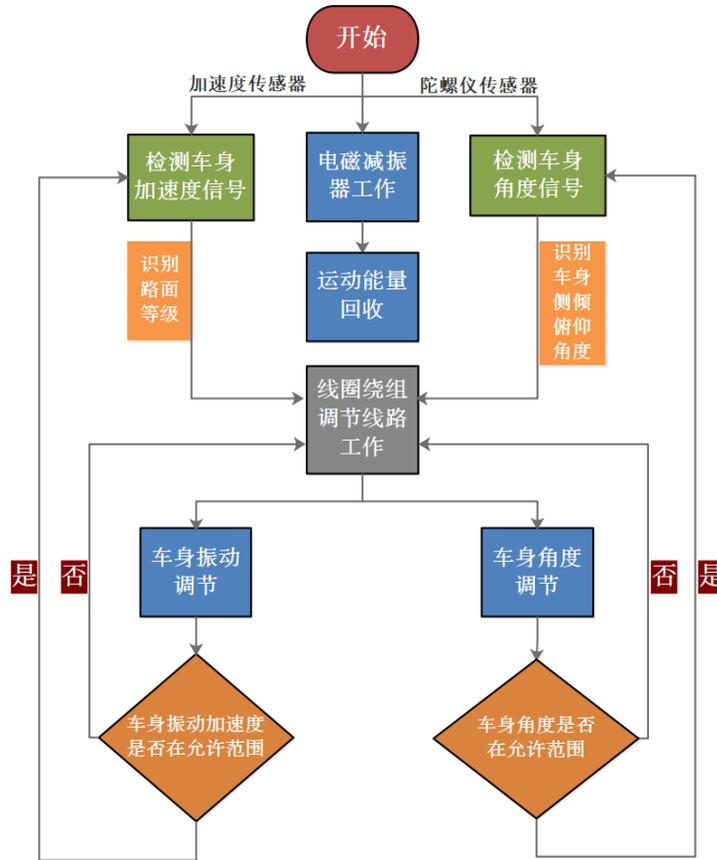


图 1 控制流程图

## 2.2 机械结构设计

基于结构适应性考虑，该产品采用与筒式液压减振器相似的结构，主要由定子线圈绕组，定子外筒，活塞杆，永磁体，磁轭以及紧固件、密封件等组成。作为定子的外筒上布置有 18 个饼式线圈绕组，每个线圈绕组内的线圈数为 16 匝，并且分四层排放。动子由活塞杆，永磁体及磁轭组成，活塞杆采用质量较轻的非导磁材料，永磁体采用钕铁硼材料作为发电系统的磁源，磁轭采用软磁材料用来导磁。永磁体与定子外筒之间留有适当的间隙，定子线圈绕组固定在定子外筒上，其主要机械运动为动子（活塞杆）相对于定子（线圈）的平动。图 2 为作品结构示意图。

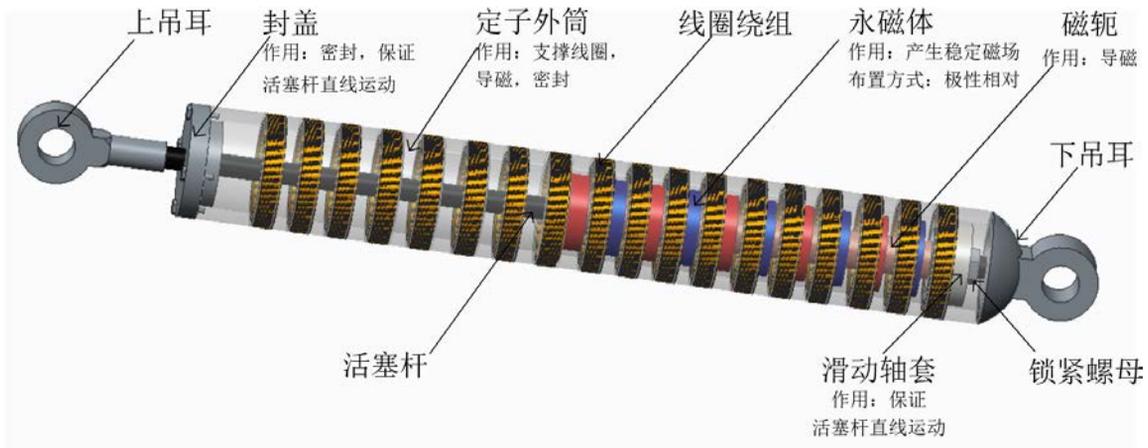


图 2 作品机械结构示意图

### 2.3 控制系统设计

该减振器的控制系统结构框图如图 3 所示。

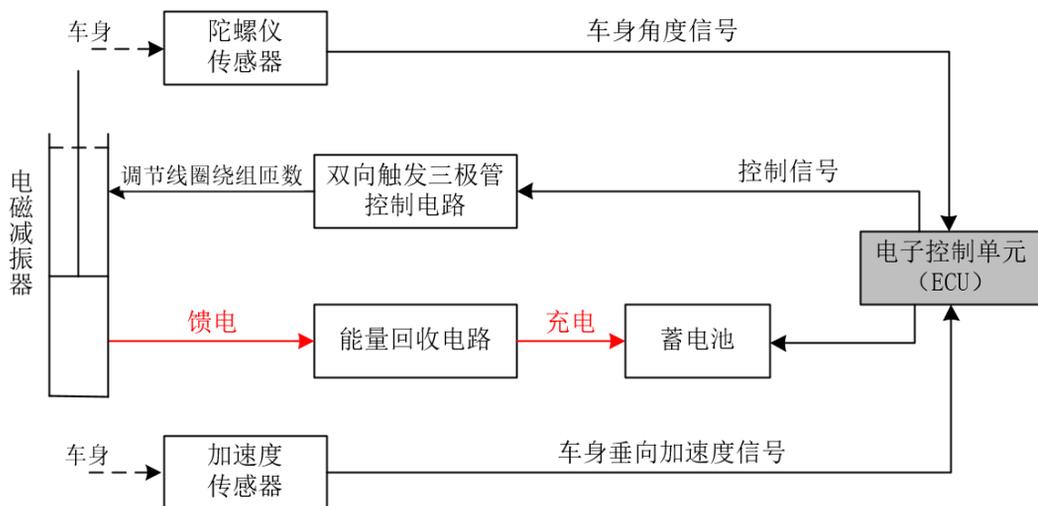


图 3 电磁减振器控制系统结构框图

本产品接入电路中定子线圈绕组的匝数可以根据路面情况和行驶工况实时调节。根据电磁感应原理，定子线圈绕组的工作匝数越多，动子活塞杆受到的电磁阻力越大，对应的减振器的阻尼越大。当汽车在不同等级的路面上行驶时，ECU 依据车身加速度传感器的信号计算得到减振器的最佳阻尼，并发送指令给双向触发三极管控制电路，通过给双向触发三极管的栅极输入高低电位控制线圈绕组的接入与断开，以改变接入能量回收电路中的定子线圈匝数，实现悬架减振性能的最优化，提高汽车的乘坐舒适性。当汽车在行驶过程中加速、制动和转向时，ECU 根据车身陀螺仪传感器的信号调节减振器的阻尼，抑制车体的俯仰和侧倾运动，提高汽车的操纵稳定性。图 4 所示为用于调节定子线圈匝数及能量回收的控制电路。

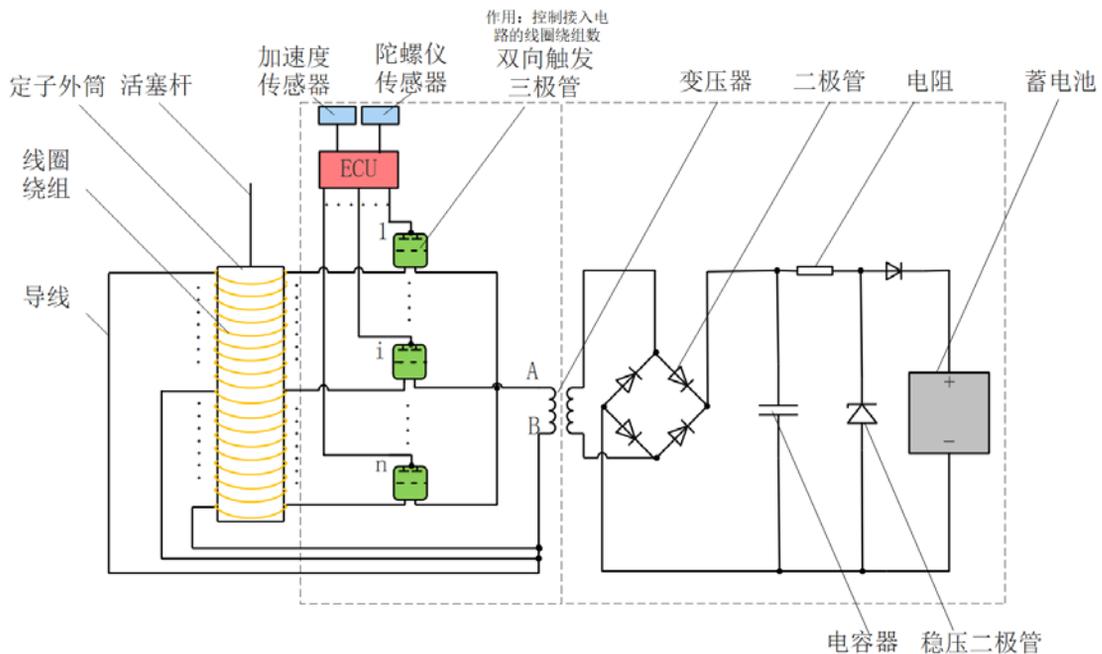


图 4 控制电路

### 2.4 电力后处理环节设计

经振动能量回馈式电磁减振器发出的瞬时单相交变电势需要存储在蓄电池中，所以要引入整流和稳压环节，在电路设计上可以采用单相桥式整流电路（图 5）以及二极管稳压电路（图 6）实现。将整流后的低脉冲直流电用于蓄电池充电，完成电能的“产—整—储”过程，即发电、整流、储存电能的过程。

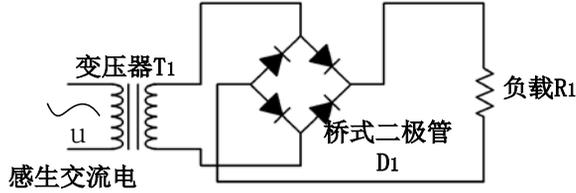


图 5 单相桥式整流电路

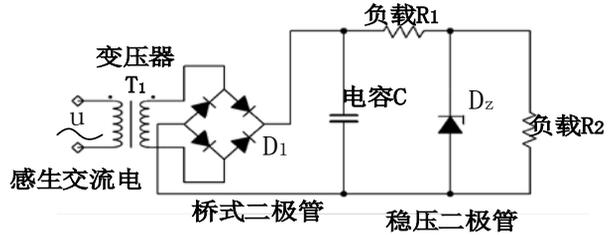
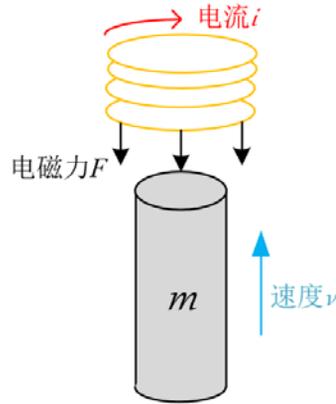


图 6 稳压二极管稳压电路

### 3 理论设计计算

#### 3.1 动力学模型

减振器动子活塞杆的运动与受力状态简化模型如图 7 所示， $m$  为活塞杆的质量， $v$  为活塞杆往复运动的瞬时速度， $i$  为定子线圈中产生的瞬时感应电流。



记定子线圈单匝长度  $l_0 = \pi d = 0.19m$ ，总匝数  $n = 18 \times 16 = 288$ ，实际接入电路中的线圈匝数与线圈总匝数的比值记为负载率  $k$ ，则接入电路线圈匝数为  $n \times k = 576k$ ，定子线圈中总电阻为  $R_0$ ，瞬时电磁力（阻尼力）为  $F$ 。根据动子永磁体的材料查得钕铁硼磁体表面剩磁的磁感应强度约为 0.8-1.4 特斯拉，此处取定子绕组处等效磁感应强度为 1.2 特斯拉。线圈总电阻  $R_0 = \rho l / S$ ，代入铜的电阻率  $\rho = 1.75 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$ ，则线圈总长

$$l = \pi d n k = 54.72k \quad (1)$$

导线截面积  $S = 2.25 \times 10^{-6} m^2$ ，可以得到  $R_0 = 0.85k (\Omega)$ 。减振器瞬时产生的阻尼力与活塞杆的瞬时速度有如下关系：

$$F = \frac{B^2 l^2}{R_0} v = 4844.68k v \quad (2)$$

其中  $F = \frac{B^2 l^2}{R_0} v$  为线圈切割磁场产生的安培力， $v$  为活塞杆的速度。平均阻尼力  $\bar{F}$  可由平均速度  $\bar{v}$  得出  $\bar{F} = 4844.68k \bar{v}$ ，则阻尼系数

$$C = \frac{\bar{F}}{\bar{v}} = 4844.68k \quad (3)$$

设磁场方向与线圈平面垂直，线圈回路中产生的电动势  $u = Blv = 65.66k v$ ，则电磁减振器的馈

能功率<sup>[2]</sup>

$$P = \frac{u^2}{R_0} = 4844.68k \cdot v^2 \quad (4)$$

### 3.2 负载分析

当负载率  $k$  分别取 100%, 75%, 50% 时, 接入电路中的实际线圈匝数分别为 288, 216 和 144, 根据式 (1)、(3) 可以计算得到对应的线圈总长和减振器的阻尼系数值 (表 5)。可以看出, 接入电路中的实际线圈匝数越多, 减振器的阻尼越大。

表 1 减振器阻尼随负载率变化情况

$k$	$l/m$	$C/(N \cdot s/m)$
100%	54.72	4844.68
75%	41.04	3633.51
50%	27.36	2422.34

由以上数据可以看出, 该减振器可以随路况和车况的变化对阻尼进行实时在线调节, 从而有效改善汽车在不同路面上和不同工况下行驶时的乘坐舒适性和操纵稳定性。

## 4 工作原理及性能分析

### 4.1 馈能发电工作原理

该产品的馈能发电系统基于 Halbach 永磁直线发电机技术, 是以电磁感应—“磁生电”原理为基础设计的一种可以将直线运动的动能转化为线圈绕组中的电势能的能量转换装置<sup>[3]</sup>。图 8 为 Halbach 永磁直线发电机的原理图。按照图示方向, 在动子运动过程中, 线圈绕组内会产生磁通量的变化形成感应电动势, 周而复始的运动将会在电路中产生单相的交变电流, 从而达到发电的目的。

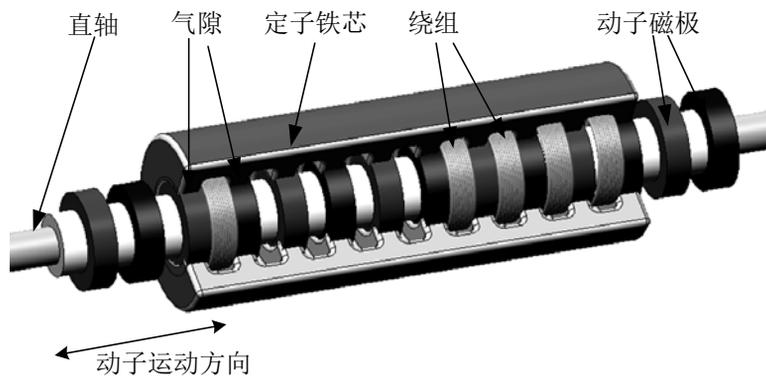


图 8 halbach 永磁直线发电机原理图

### 4.2 系统 Simulink 仿真及性能分析

#### 4.2.1 仿真参数的选择

本次仿真计算所采用的馈能式减振器的阻尼取  $k=100\%$  时的阻尼系数  $C=4844.68N \cdot s/m$ 。同时以采用筒式液压减振器的悬架模型作为对比, 参考某国产乘用车的参数, 阻尼系数取  $C_2=2546.5N \cdot s/m$ 。

仿真时将路面激励输入取为有限带宽白噪声, 模拟车速  $20m/s$ , A、B、C、D 级路面时的实际路面特性, 经积分得到仿真路面。有限带宽白噪声的功率谱为

$$G_q(f) = 4\pi^2 G_q(n_0) n_0^2 v \quad (5)$$

其中, 车速  $v=20\text{m/s}$ , 参考空间频率  $n_0=0.1\text{m}^{-1}$ , 不同等级路面的  $G_q(n_0)$ 和  $G_q(f)$ 如表 2 所示<sup>[4]</sup>。

表 2 不同等级路面的  $G_q(n_0)$ 和  $G_q(f)$

路面等级	$G_q(n_0)/10^{-6}\text{m}^3$	$G_q(f)$
A	16	0.000125
B	64	0.0005
C	256	0.002
D	1024	0.008

#### 4.2.1 Simulink 模型

在 MATLAB 的 Simulink 模块中建立仿真模型<sup>[5]</sup>, 经过计算分别得到采用馈能式减振器和筒式液压减振器在 0-45s 内的车身振动位移、速度和加速度曲线。为了得到馈能功率, 也计算了馈能式减振器活塞杆的运动速度曲线。仿真模型及结果曲线见附件一。图 9 为各等级路面上电磁减振器与筒式液压减振器的车身振动位移对比。从图中可以看出, 采用了电磁减振器后, 汽车在各等级路面上行驶时, 车身的振动位移均有显著降低。

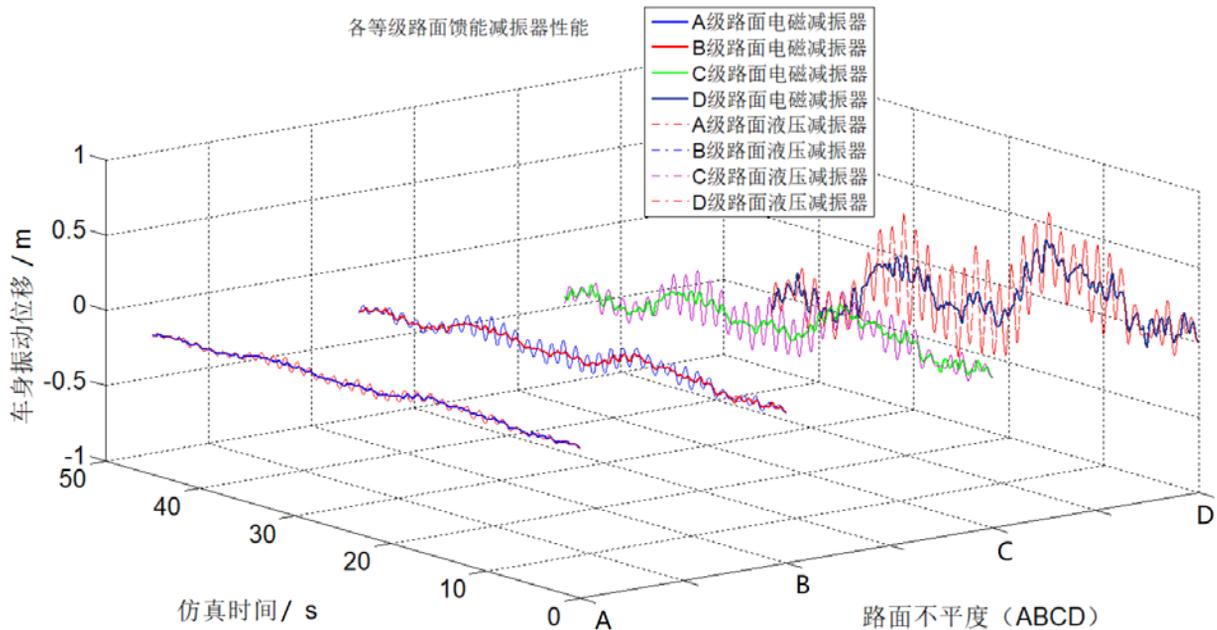


图 9 各等级路面的车身振动位移

#### 4.2 馈能功率计算与比较

从仿真计算结果可以看出, 在采用了馈能式电磁减振器之后, 汽车车身的位移、速度和加速度水平均有明显降低, 运动能量被减振器吸收并转化为电能。以 C 级路面为例, 利用 (4) 式可以计算得到该馈能电磁减振器的能量回收功率。利用减振器活塞杆瞬时速度曲线, 在 0-45s 内求其均方值作为计算依据, 可以得到平均速度  $v=0.085\text{m/s}$ , 则单个减振器在 C 级路面平均馈能功率  $P$  为 77.23W。同样的方法计算得到了 A, B 和 D 等级路面上的平均馈能功率 (表 3)。可以看出, 随着路面等级的降低, 平均馈能功率增加, 减振器可以回馈更多的能量。

表 3 A、B、C、D 四级路面能量回收功率

路面等级	A	B	C	D
单个减振器能量回收功率 $P$ (W)	4.96	19.31	77.23	304.69

### 5 节能减排效益分析

## 5.1 节能性能

随着路面不平度的增加，本产品节能效果越显著，各项节能参数如表 4 所示。

表 4 各等级路面节能参数对照表

类别	路面等级	振动回馈功率 (W)	工作每小时发电量(Kw·h)	汽车工作每小时节约的发电油耗 (g/h)
本产品/传统筒式液压减振器	A	19.84/0	0.02/0	5.56/0
	B	77.24/0	0.08/0	21.65/0
	C	308.92/0	0.31/0	86.61/0
	D	1218.76/0	1.22/0	341.71/0

## 5.2 减排性能

将该减振器回馈的电能换算成汽车发电消耗燃油质量，按照我国排放标准 GB18352.5-2013 计算可获得表 5 排放物的减少指标，分析数据可见本产品具有良好的减排效果。该产品的应用将对环境保护产生积极的作用。

表 5 排放物减少指标

污染物种类	本产品年均省油量(g/年)	年均减排量(克/年)/单位汽车	年均减排量(吨/年)/全国汽车
一氧化碳(CO)		124.00	26900
总碳氢化合物(THC)		4.96	1080
氮氧化物(NO <sub>x</sub> )	8660	12.40	2690
氨气(NH <sub>3</sub> )		310.00	67300
颗粒物(PM)		0.31	67.3

## 5.3 经济性对比与成本分析

表 6 列出能量回馈式汽车智能电磁减振器的产品造价表。

表 6 产品造价表

项目	活塞杆	铁芯筒	防尘罩	滑动轴承	永磁体	磁轭
费用*个数	18*1	25*1	12*2	12.5*2	8*10	20*1
项目	吊耳	吊环	螺栓螺母	线圈	控制电路总成	传感器
费用*个数	13*1	13*1	1.6*8	20*1	11*1	40*1
总计	301.8 元					

采用该减振器，乘用车每 100 公里平均可省油 86.6 克，按照正常车辆一年行驶 10000 公里，油价按均价 7 元/L，预计可在 3.5 年内收回成本。商用车回收的能量更多，可在 2 年内收回成本。按我国汽车保有量 2.17 亿辆计算，每年经济效益可达

$$(86.6 \times 100) / 780 \times 7 \times 2.17 \text{ 亿} = 50.5 \text{ 亿}$$

## 6 创新点及应用前景

## 6.1 创新点

1) 提出电磁感应发电的方案, 解决了汽车振动能量耗散的问题, 提高了燃油经济性。

2) 设计出反馈控制系统, 使得该减振器可以根据路况进行实时阻尼调节, 将振动产生的发动机附加功率损失回馈收集起来, 同时提高了不同路面的乘坐舒适性。

3) 利用线圈绕组调节电路调节汽车加速、减速和转向时的俯仰和侧倾姿态, 大幅度提高了汽车操纵稳定性。

## 6.1 应用前景

该减振器是在传统的汽车减振器上升级而来, 故与目前的汽车底盘完全适用, 且改装简单, 成本低廉, 在目前汽车上均可采用, 可以显著提高汽车的乘坐舒适性和操纵稳定性。其良好的馈电功能, 能够与混合动力和纯电动等**新能源汽车**实现对接, 大幅度延长续航里程, 拥有良好的应用价值和广阔的市场前景。

### 参考文献

[1] 喻凡, 张勇超. 馈能型车辆主动悬架技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):1-6.

[2] 黄勇刚. 馈能型车辆主动悬架技术的研究[J]. 车辆与动力工程, 2017, 10(1): 135-137.

[3]张静, 刘旭明, 陈琦, 黄磊. 圆筒型 Halbach 永磁单相直线发电机的设计与分析[J]. 微特电机, 2014, 42(8): 20-22

[4] 于长淼, 王伟华, 王庆年. 电磁馈能式悬架方案设计与节能分析[J]. 汽车技术, 2010(2):21-25.

[5]周长城. 汽车液压筒式减振器设计及理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012: 58-88.