

馈能型车辆主动悬架技术*

喻凡¹ 张勇超²

(1. 吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室, 长春 130025; 2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

【摘要】 在车辆底盘悬架系统中, 馈能型车辆主动悬架的发展已受到关注, 其功能是在提高车辆行驶平顺性的同时尽可能地回收由不平路面激励引起的悬架系统振动能量, 以减少主动悬架的能耗。本文首先对近年来馈能型车辆主动悬架的发展和研究进行了全面回顾, 然后着重对电磁式馈能悬架进行了总结, 最后对电磁式馈能悬架的核心问题进行了分析。随着电磁技术的日趋成熟, 电磁式馈能悬架将会具有良好的发展前景。

关键词: 车辆 主动悬架 平顺性能 馈能性能

中图分类号: U461 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)01-0001-06

Technology of Regenerative Vehicle Active Suspensions

Yu Fan¹ Zhang Yongchao²

(1. State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130025, China

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

The regenerative vehicle active suspensions have become more and more attractive to many automotive researchers and engineers in recent years. The main benefits of a regenerative vehicle active suspension are the possible improvement of ride comfort and the regeneration of vibration energy with decreasing the energy consumption of active suspension. Above all, the state of the art on regenerative active suspension is reviewed. Then the electromagnetic suspension is summarized as the main type of regenerative suspension. In the end, the key problems in the development of the electromagnetic suspension are analyzed. With the improvement of electromagnetic technology, the electromagnetic regenerative suspension may become one of promising trends of vehicle active suspension.

Key words Vehicle, Active suspension, Ride comfort, Energy regeneration

引言

目前在汽车上广泛使用的仍然是被动悬架, 由于弹簧刚度和减振器阻尼系数不可调, 不能随外部路面状况而改变, 设计时只能保证在某种特定行驶工况下达到良好减振性能, 而难以适应不同的道路状况, 因而减振性能有限。采用主动悬架可实现在不同的行驶条件下悬架性能最优, 显著改善车辆的行驶平顺性和操纵稳定性。但由于主动悬架需要消耗大量的能量来抑制不平路面造成的冲击, 因此使用成本较高。当前节能是汽车设计中重点考虑的问题之一, 解决主动悬架高能耗问题势在必行, 而能量回馈是减低能耗和减少使用成本的一个重要手段。因此, 馈能型主动悬架应运而生, 其目标就是回收由不平路面激励引起的振动能量, 供以主动减振之用。本文将回顾近几十年来国内外馈能型车辆主动悬架的发展状况, 探讨馈能型主动悬架的发展趋势。

1 馈能型车辆主动悬架的发展

馈能型悬架首先需要解决的关键问题是可回收 (也可称作回馈或再生) 的悬架振动能量的数量和回收途径。自 20 世纪 70 年代末, 学者们开始从理

收稿日期: 2009-03-17 修回日期: 2009-04-21

* 国家自然科学基金资助项目(50875163, 50575141) 和汽车动态模拟国家重点实验室开放基金资助项目(20071110)

作者简介: 喻凡, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆动力学研究, E-mail: fanyu@sjtu.edu.cn

论上分析研究车辆悬架的振动能量和回收可行性。加利福尼亚大学戴维斯分校 (University of California, Davis) 的 Karnopp^[1~3] 在车辆悬架系统能耗和主动悬架的研究中理论分析了车辆被动悬架阻尼器的能量损失机理,揭示了悬架系统的能量耗散过程,指出回收悬架系统可减低整车驱动功率,对电动车辆尤为有利。Velinsky^[4] 基于四自由度后轴悬架模型,通过测量悬架阻尼器和轮胎之间的相对速度分析了悬架系统的能量耗散。Segel^[5] 分析了悬架系统能量耗散对抑制不平路面振动的影响,计算得到某乘用车在颠簸路面上以 13.4 m/s 的速度行驶时,4 个被动阻尼器的能量耗散功率约为 200 W。Hsu^[6] 以 GM Impact 为例,估算了某车辆在高速道路上以 16 m/s 的车速行驶时,平均每个车轮可回收能量功率为 100 W,相当于车辆驱动功率的 5%。喻凡^[7] 理论计算了汽车主动悬架的耗能情况和回馈路面振动能量潜能。此外,Browne^[8] 对某轿车阻尼器的能量耗散进行了定量测量,试验结果表明,在典型城市道路上,4 个阻尼器的能量耗散功率约为 40 ~ 60 W。

自 20 世纪 80 年代末,国内外开始对馈能型主动悬架进行更实际的研究开发和工程应用,研究重心从机械式馈能悬架逐步转移到电磁式馈能悬架。尽管到目前为止,还没有一款真正意义上的商业化产品推向市场,但是馈能型悬架,尤其是电磁式馈能悬架,得到了许多学者和企业的关注,并已进入样机试验与应用验证阶段。

在机械式馈能悬架方面,再生泵装置,机械式可变线性传动装置以及再生作动器是比较典型的例子,虽然在馈能性能上,有些只适合某种特殊工况,但是在设计理念上已经着重突出了使用回收的能量来抑制振动或维持车身姿态的功效。

由于电机转换能量方面的优势,永磁电机被应用在馈能悬架上,电磁式馈能悬架开始迅速发展起来。日本、美国、葡萄牙以及中国等学者都开展了电磁式馈能悬架的研究。比较有代表性的例子有:茨城大学 (Ibaraki University) 的 Okada 提出的电磁式能量再生系统和东京大学 (University of Tokyo) 的 Suda 提出的自供电式主动悬架控制系统。此外,德克萨斯大学奥斯汀分校 (University of Texas, Austin) 的 Beno, 北伊利诺伊大学 (Northern Illinois University) 的 Gupta, 阿尔加维大学 (University of Algarve) 的 Martins, 塔夫斯大学 (Tufts University) 的 Goldner 以及上海交通大学的喻凡在电磁式馈能减振器方面都进行了理论和试验研究,取得了一些有价值的成果。

在研究电磁式馈能悬架方面,最有代表性的企业是 Bose 公司,其 2005 年研发出的直线电机电磁悬架系统表现出较好的减振效果和转弯姿态控制效果。

2 馈能型悬架的分类

馈能型悬架在实现途径上主要有机械式馈能和电磁式馈能两种。机械式馈能的原理是通过适当的机械传动结构将车轮和车身的振动能量传递给液压或气压储能装置,以液压能或气压能的形式进行存储,在适当的时候释放储能,用以抑制振动,减小能耗。电磁式馈能的原理是用电磁作动器替代传统的减振器,当车轮和车身相对运动时,电机的线圈切割磁力线,向外输出电压,将机械振动能量转化为电能,存储到储能装置。

2.1 机械式馈能悬架

1991 年,Wendel^[9] 针对液压式低频慢主动车辆悬架提出了一种再生泵装置,该装置能够对车辆内侧和外侧悬架之间液流的能量进行回收利用。由于再生泵对泵的制造工艺要求较高,在实际车辆上应用有一定难度。

1993 年,Fodor 和 Redfield^[10] 提出一种机械式可变线性传动装置 (VLT) 将振动能量传送到储能装置——液气蓄能器。理想的 VLT 可将所有被动耗散能量储存到蓄能器,并为车辆悬架系统提供一定阻尼。

1997 年,Jolly^[11] 提出一种由能量转换器、能量储存单元、能量管理装置、控制器和传感器组成的再生作动系统,并介绍了这一再生作动系统在液压机构上的实现方式。Jolly 将该系统应用于汽车座椅悬架中,并设计了控制策略来回收振动能并控制座椅的垂向振动,试验结果表明再生系统的减振性能优于被动系统,且可以回收一定的能量。

1999 年,Noritsugu^[12] 将能量再生控制应用于空气悬架,将气缸排出的部分废气回收储气罐中重复利用,降低了空气供给的能量需求。

机械式馈能悬架的优点是它可在现有液压或空气悬架上,增加液或气形式的馈能装置,通过调整控制策略,减小了主动悬架的能耗。但其缺点是响应频率较低,响应速度较慢。

2.2 电磁式馈能悬架

从 20 世纪 80 年代起,国外学者开始尝试将直线电机和旋转电机应用到车辆悬架系统中,最初只是实现半主动控制,其功能是将机械能转化成电阻热能,通过改变阻尼器的外接电阻来改变阻尼系数。Karnopp^[13] 和 Ryba^[14] 最先对电磁阻尼器进行了理

论研究,结果表明直线电机式传动效率较高,但质量较大、磁场强度不足,而旋转电机式电磁阻尼器则较好地弥补了前者的缺点。Gupta^[15~16]先后设计和试制了这两种类型的电磁阻尼器,通过台架试验和实车试验,测量了在正弦激励和脉冲激励下的馈能功率,旋转电机式的馈能功率明显超过直线电机式,试验结果验证了 Karnopp 和 Ryba 的结论。

后来,电磁阻尼器发展成用于主动力输出的电磁作动器,同时也可用作被动阻尼器。电磁作动器在结构上可分为两类:直线电机式和旋转电机式。

2.2.1 直线电机式馈能悬架

1995年,Okada等^[17~20]提出的电磁式能量再生系统以直线直流电机作为作动器,利用双向电压充电电路回收作动器高速运动时产生的电能,向蓄电池充电。但该系统在低速运动时,由于死区的存在,作动器电压小于蓄电池电压,不能向蓄电池充电,且无法提供作动力。

1998年,Suda^[21~22]提出的自供电式主动减振控制系统使用两个直流直线电机,一个直线电机(再生阻尼器)安装于初级悬架,利用继电器开关将再生的振动能量传递到储能电容器。当阻尼器被短接时,作为普通被动阻尼器使用。另一个直线电机(主动作动器)置于次级悬架,作动器使用电容器中的储存能量进行主动力控制。

1999年,Nakano和Suda等^[23]将这种自供电式主动减振控制系统应用于载重卡车驾驶室,回收卡车底盘悬架的振动能量,并存储在电容或蓄电池中,供给置于驾驶室底部的主动作动器,以抑制驾驶室的振动。系统无需外界供能,且改善了驾驶室的乘坐舒适性。2003年,Nakano等^[24]提出的自供电式主动隔振控制系统,利用一个直线式直流电机作动器来实现主动抑制振动功能和馈能功能,其原理是将电机电枢高速运动时的再生能量用于电枢低速运动时驱动电机。

2006年,Martins等^[25~26]研制了圆筒型永磁直线作动器,设计了基于天棚阻尼原理的闭环主动控制系统,仿真分析了作动器在低频和低频正弦激励下的作动力特性,并在台架上测试了作动器随动状态下的作动力特性和减振效果,试验验证了仿真结果的正确性。该系统的主要缺点是质量和体积比相应的液压作动器大。

2005年,Bose公司^[27]特别设计了车辆用直线电机式电磁作动器,其功能可显著减小车辆转弯时的车身侧倾,刹车时的车身前倾和越障时的车身振动。装在每个车轮和底盘上的加速度测量计实时测量车辆行驶情况,估计路面信息,中央控制器实时地

控制功放装置作为作动器提供能量,作动器能在2 ms内响应,使悬架支柱依车身和车轮的相对位置的不同而伸张或收缩。当作动器以发电机模式工作时,将回收的能量储存在蓄电池或其他装置中,从而降低能耗,系统的耗能功率为车载空调功率的1/3。

2.2.2 旋转电机式馈能悬架

1995年,Beno等^[28]为美国军用战车设计了电磁式主动悬架系统,该系统利用齿轮齿条机构将旋转电机的转矩转化成悬架主动力输出,提出了“近似恒力”控制策略,通过仿真和台架试验研究了该系统的性能。之后,Beno等^[29]对该系统的能量需求与被动系统和纯主动系统进行了对比研究,验证了回收悬架系统振动能量的有效性。

1996年,Suda^[30]也提出使用旋转直流电机结合齿轮齿条机构作为主动作动器的悬架系统。然后,他们试制出旋转直流电机结合滚珠丝杠机构的电磁阻尼器样机^[31],并通过实车试验考察了该样机的馈能性能,以及车身的振动频率特性和抗侧倾性能。

2004年,Suda等^[32]对旋转直流电机结合滚珠丝杠机构的电磁阻尼器进行了改进,增加了行星齿轮机构,并试验分析了阻尼特性。同年,Nakano和Suda^[33]将这种电磁阻尼器应用到载重卡车驾驶室上,原理与文献[23]相似,回收卡车底盘的振动能量,供给驾驶室作动器抑制驾驶室的振动。

2007年,Kawamoto和Suda对这种电磁阻尼器做了定量能量分析^[34],仿真结果表明,当车辆以80 km/h速度行驶在C级路面上时,系统的总能量回收功率为15.3 W。系统的能量频谱图显示当振动频率超过2 Hz时,系统回收能量,频率小于2 Hz时,系统消耗能量。

2005年,喻凡等^[35]针对某轿车后悬架结构,开发出永磁直流电机结合滚珠丝杠机构的电磁作动器,并对其进行了特性试验,初步验证了作动器的可行性。之后,又对该作动器进行了整车台架试验^[36],对减振性能和馈能性能进行了验证。

3 馈能型悬架的核心问题

近年来,馈能型悬架的研究重心集中在降低能耗,有效回收能量以及协调减振和馈能性能等方面。

3.1 将悬架系统的能耗降到最低

如何降低能耗一直是主动悬架系统备受关注的问題,电磁式馈能悬架为降低能耗提供了有效途径,利用回馈能量供以主动控制,减少外界能量输入。

Suda等^[22]针对自供电式主动悬架提出了能耗控制策略,研究了再生阻尼器、作动器与储能电容之间的协调控制机理。该系统无需外界能量输入,主

动控制的能量由储能电容供给,储能电容的电能来自再生阻尼器回馈的电能,有效抑制了簧载质量的垂向振动。

Nakano 等^[24]针对使用单个直线式直流电机作动器的自供电式主动悬架系统进行了能量平衡分析,通过调节天棚控制器阻尼可以使平均电能消耗功率为负值,即实现自供电功能,还理论分析了作动器的运行状态,即驱动状态、再生状态和制动状态,按照不同状态的切换条件,设计了控制电路切换策略。

3.2 将较低的馈能电压进行储存

由于车辆路况不同,当悬架系统运行时,带动电磁装置进行发电的功率也不同,电机转速较低,则馈能电压较低,而储能装置往往有电压阈值,超过此阈值才能进行充电。因此,必须将较低的馈能电压进行放大,才能进行储存,最大程度地回收电能,提高馈能效率。

Kim 和 Okada^[37]在双向电压充电电路中引入脉宽调制升压斩波电路,通过电感的作用,将电流从低反电动势输入电压相对较高的电池,实现低速运动过程中的能量回收。

Graves^[38-39]在旋转直流电机结合齿轮齿条机构的电磁馈能装置上,利用升压型 DC-DC 转换器设计了控制电路,解决了低速时馈能电压较小无法充电的问题,并定量研究了传动比和电机旋转质量对馈能效率和悬架动态性能的影响。

3.3 量化和提高馈能效率

对于馈能型悬架来讲,馈能效率是非常重要的数据,它反映了该馈能系统的工作效率和能耗情况。在现有文献中,馈能效率的计算基准不尽相同,有的仅考虑悬架系统内部的效率,有的则把悬架馈能功率与整车功率进行比较计算。

在 Suda^[21]设计的自供电式主动减振控制系统中,电磁阻尼器回馈的能量储存在电容中,为电磁作动器提供能量,平均馈能效率是 15%。

Suda^[30]对混合式悬架系统的馈能效率进行了理论计算,馈能效率为外接电阻耗散的能量占内阻和外接电阻总耗散能量的比例,回馈的能量可转化成热能,用于供暖。加大外接电阻可提高馈能效率,但阻尼系数降低,减振性能下降。在综合考虑馈能和减振性能基础上,文献中给出的理论最大效率为 25%。

Goldner^[40-41]对电磁阻尼器进行了台架试验研究,利用转轮来模拟路面,测量电磁阻尼器在三角形路面脉冲激励下的馈能功率,可达到 1 915 ~ 17 400 W。以某 1 134 kg 重的车辆在 20 m/s 的速度行驶在

平坦路面上的驱动效率 7 500 W 作为耗散功率,计算得到馈能效率可达到 20% ~ 70%。该数据的正确性值得怀疑,因为传统被动阻尼器的平均耗散功率的数量等级并没有达到 KW 级。

不论馈能效率如何计算,这只是个相对值,提高馈能功率才是主要的。电磁装置的结构和控制系统的参数都与馈能功率有密切联系,提高电磁装置的能量转化效率,适当选择控制系统的参数才是提高馈能功率的关键。

3.4 协调减振性能和馈能性能

提高减振性能付出的代价往往是较高的系统能量消耗,这意味着要牺牲系统的馈能性能,因此协调这两种性能对于研究馈能型悬架具有重要意义。

Okada^[19]分析了馈能悬架系统的等效阻尼比对减振性能和馈能性能的影响,该阻尼比主要由电机常数和电路电阻来决定。仿真结果显示等效阻尼比增大,减振效果改善,高频时回馈的能量增加,增大电机常数,减小电路电阻,有利于同时改善上述两种性能。

Suda^[30]分析认为电路外接电阻同时影响减振性能和馈能性能,外接电阻小,减振性能好,但馈能性能下降,反之亦然。文中建立了悬架系统的线性二次最优控制目标,分析了加权系数对减振效果和能耗的影响。因此,可通过合理选择外接电阻以及调节控制加权系统来协调两种性能。

Kawamoto^[42]基于文献[34]的电磁理论分析,定量研究了天棚和地棚阻尼增益与馈能性能、平顺性能和操控性能之间的联系,当天棚和地棚阻尼增益都较小时,有利于回馈能量,当天棚阻尼增益较大而地棚阻尼较小时,有利于提高平顺性能,当天棚和地棚阻尼增益都较大时,有利于提高操控性。对于不同的控制目标,选定与之对应的阻尼增益,可使悬架系统满足不同的性能需要。

在现有文献中,协调减振性能和馈能性能的研究成果有限,针对不同类型和不同控制系统的馈能型悬架,必须具体问题具体分析,在明确馈能机理的前提下,确定合理的系统参数并设计适当的控制策略。

4 结束语

对馈能型车辆主动悬架的背景和发展进行了回顾,并对馈能型悬架进行了分类总结,分析了研发馈能型悬架的核心问题。机械式馈能型悬架的响应频率较低,响应速度较慢,振动能量回收能力有限,而电磁式馈能型悬架转换能量方便,且利于存储和再利用,因此正在成为馈能型悬架领域的研究热点。

国内外学者和企业已围绕有效回收振动能量和保证足够的减振性能等核心问题进行了探索和尝试, 获得了一些有价值的成果, 并在样机试制和试验验证上取得了较大进展。随着电磁作动系统和电控系统

的日趋成熟以及控制策略的日益完善, 馈能型主动悬架, 特别是电磁式馈能型悬架, 将会成为主动悬架中具有发展前景的方向。

参 考 文 献

- 1 Karnopp D. Power requirements for traversing uneven roadways[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1978, 7(3): 135 ~ 152.
- 2 Karnopp D. Theoretical limitations in active vehicle suspensions[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1986, 15(1): 41 ~ 54.
- 3 Karnopp D. Power requirements for vehicle suspension systems[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1992, 21(1): 65 ~ 71.
- 4 Velinsky S, White R. Vehicle energy dissipation due to road roughness[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1980, 9(6): 359 ~ 384.
- 5 Segel L, Lu X P. Vehicular resistance to motion as influenced by road roughness and highway alignment[J]. *Australian Road Research*, 1982, 12(4): 211 ~ 222.
- 6 Hsu P. Power recovery property of electrical active suspension systems[C]//*Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Washington DC, USA: IEEE, 1996: 1 899 ~ 1 904.
- 7 Yu F, Zheng X. Study on the potential benefits of an energy-regenerative active suspension for vehicles[C]. *SAE Paper* 2005-01-3564, 2005.
- 8 Browne A, Hamburg J. On road measurement of the energy dissipated in automotive shock absorbers[C]//*Symposium on Simulation and Control of Ground Vehicles and Transportation Systems*, Anaheim CA, USA: ASME, 1986: 167 ~ 186.
- 9 Wendel G. A regenerative active suspension system[C]. *SAE Paper* 910659, 1991.
- 10 Fodor M, Redfield R. The variable linear transmission for regenerative damping in vehicle suspension control[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1993, 22(1): 1 ~ 20.
- 11 Jolly M, Margolis D. Regenerative systems for vibration control[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1997, 119(2): 208 ~ 215.
- 12 Noritsugu T. Energy saving of a pneumatic system (2). Energy regenerative control of a pneumatic drive system. Application to active air suspension[J]. *Hydraulics & Pneumatics*, 1999, 38(4): 1 ~ 4.
- 13 Karnopp D. Permanent magnet linear motors used as variable mechanical dampers for vehicle suspensions[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1989, 18(4): 187 ~ 200.
- 14 Ryba D. Semi-active damping with an electromagnetic force generator[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1993, 22(2): 79 ~ 95.
- 15 Gupta A, Mulcahy T M, Hull J R. Electromagnetic shock absorbers[C]//*Proceedings of 21th International Modal Analysis Conference* Kissimmee, FL, USA: 2003.
- 16 Gupta A, Jendrzeczyk J, Mulcahy T, et al. Design of electromagnetic shock absorbers[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2006, 3(3): 285 ~ 291.
- 17 Okada Y, Harada H. Active and regenerative control of electrodynamic vibration damper[C]//*Proceedings of the 1995 Design Engineering Technical Conference*, Boston, Massachusetts, USA: ASME, 1995: 595 ~ 602.
- 18 Okada Y, Harada H, Suzuki K. Active and regenerative control of linear DC motor type damper[C]//*Proceedings of the Third International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba: JSME, 1996: 321 ~ 326.
- 19 Okada Y, Harada H. Regenerative control of active vibration damper and suspension systems[C]//*Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan: IEEE, 1996: 4 715 ~ 4 720.
- 20 Okada Y, Harada H, Suzuki K. Active and regenerative control of an electrodynamic-type suspension[J]. *JSME International Journal. Series C, Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, 1997, 40(2): 272 ~ 278.
- 21 Suda Y, Nakadai S, Nakano K. Study on the self-powered active vibration control[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Motion and Vibration Control(MOVIC)*, Zurich, Switzerland: 1998: 91 ~ 96.
- 22 Suda Y, Nakadai S, Nakano K. Hybrid suspension system with skyhook control and energy regeneration (development of self-powered active suspension)[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1998, 29(Sup.1): 619 ~ 634.
- 23 Nakano K, Suda Y, Nakadai S, et al. Self-powered active control applied to a truck cab suspension[J]. *JSAE Review*, 1999, 20(4): 511 ~ 516.
- 24 Nakano K, Suda Y, Nakadai S. Self-powered active vibration control using a single electric actuator[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 260(2): 213 ~ 235.
- 25 Martins I, Esteves M, Pina Da Silva F, et al. Electromagnetic hybrid active-passive vehicle suspension system[C]//

- Proceedings of IEEE 49th Vehicular Technology Conference, Houston, Texas, USA: IEEE, 1999, 3: 2 273 ~ 2 277.
- 26 Martins I, Esteves J, Marques G, et al. Permanent-magnets linear actuators applicability in automobile active suspensions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1): 86 ~ 94.
- 27 Jones W. Easy ride: Bose Corp. uses speaker technology to give cars adaptive suspension [J]. IEEE Spectrum, 2005, 42(5): 12 ~ 14.
- 28 Beno J, Hoogterp F, Bresie D. Electromechanical suspension for combat vehicles [C]. SAE Paper 950775, 1995.
- 29 Hoogterp F, Beno J. An energy efficient electromagnetic active suspension system [C]. SAE Paper 970385, 1997.
- 30 Suda Y, Shiiba T. A new hybrid suspension system with active control and energy regeneration [J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 25(Sup. 1): 641 ~ 654.
- 31 Suda Y, Suematsu K, Nakano K, et al. Study on electromagnetic suspension for automobiles-simulation and experiments of performance [C] // Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor, Michigan, USA: 2000: 699 ~ 704.
- 32 Suda Y, Shiiba T, Hio K, et al. Study on electromagnetic damper for automobiles with nonlinear damping force characteristics (road test and theoretical analysis) [J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(Sup.): 637 ~ 646.
- 33 Nakano K, Suda Y. Combined type self-powered active vibration control of truck cabins [J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(6): 449 ~ 473.
- 34 Kawamoto Y, Suda Y, Inoue H, et al. Modeling of electromagnetic damper for automobile suspension [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2007, 1(3): 524 ~ 535.
- 35 曹民, 刘为, 喻凡. 车辆主动悬架用电机作动器的研制 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 224 ~ 228.
Cao Min, Liu Wei, Yu Fan. Development on electromotor actuator for active suspension of vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 224 ~ 228. (in Chinese)
- 36 张勇超, 喻凡, 顾永辉, 等. 汽车电动悬架的减振与馈能特性试验验证 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(6): 874 ~ 877.
Zhang Yongchao, Yu Fan, Gu Yonghui, et al. Isolation and energy-regenerative performance experimental verification of automotive electrical suspension [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(6): 874 ~ 877. (in Chinese)
- 37 Kim S, Okada Y. Variable resistance type energy regenerative damper using pulse width modulated step-up chopper [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2002, 124(1): 110 ~ 115.
- 38 Graves K E, Iovenitti P G, Toncich D. Electromagnetic regenerative damping in vehicle suspension systems [J]. International Journal of Vehicle Design, 2000, 24(2): 182 ~ 197.
- 39 Graves K E, Toncich D, Iovenitti P G. Theoretical comparison of motional and transformer EMF device damping efficiency [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 233(3): 441 ~ 453.
- 40 Goldner R B, Zerigian P, Hull J. A preliminary study of energy recovery in vehicles by using regenerative magnetic shock absorbers [C]. SAE Paper 2001-01-2071, 2001.
- 41 Goldner R B, Zerigian P. Electromagnetic linear generator and shock absorber: WO 02/091552 A2 [P]. 2002-11-14.
- 42 Kawamoto Y, Suda Y, Inoue H, et al. Electro-mechanical suspension system considering energy consumption and vehicle manoeuvre [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(Sup. 1): 1 053 ~ 1 063.