

汽车悬架同步振动抑制与能量收集综述与展望*

陈仲生^{1*} 曹军义² 秦朝烨³ 陈志文⁴ Yeping Xiong⁵

(1. 常州工学院汽车工程学院 常州 213032;

2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710048;

3. 清华大学机械工程系 北京 100084;

4. 湖南工业大学电气与信息工程学院 株洲 417002;

5. Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Southampton, Southampton SO16 7QF, UK)

摘要: 悬架是汽车中的核心关键部件,具有承载和减振的双重功能。传统的悬架系统采用粘性液体或干摩擦阻尼器将振动能量转化为热量耗散出去实现减振,造成能量浪费,这尤其对新能源汽车不利。近十年来,既能抑制振动又能收集电能的新型悬架系统受到了高度关注和广泛研究。为了全面掌握汽车悬架同步振动抑制与能量收集技术领域的最新进展,回顾汽车悬架的发展历程,总结汽车悬架从路面激励中可收集的振动能量,重点梳理汽车能量回收悬架技术研究现状,探讨当前面临的技术挑战并对未来发展方向进行了展望。该研究有助于国内同行快速准确地掌握本领域的技术现状,有望为国内新型汽车悬架技术的发展提供重要参考。

关键词: 汽车悬架; 同步振动抑制与能量收集; 能量回收悬架; 展望

中图分类号: U463

Simultaneous Vibration Suppression and Energy Harvesting of Vehicle Suspension Systems: Status and Prospects

CHEN Zhongsheng¹ CAO Junyi² QIN Zhaoye³ CHEN Zhiwen⁴ XIONG Yeping⁵

(1. College of Automotive Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032;

2. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710048

3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

4. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 417002

5. Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Southampton, Southampton SO16 7QF, UK)

Abstract: Suspension is one of key components in vehicles, which has the dual functions of load bearing and vibration suppression. As for traditional suspension systems, viscous liquid or dry friction damper is always used to convert vibration energy into heat which is dissipated to achieve vibration reduction. In this case, electric energy is wasted, which is especially unfavorable for new energy vehicles. In the past decade, novel suspension systems that can both suppress vibration and harvest electrical energy have received high attention and extensive research. In order to comprehensively know the latest progress in synchronous vibration suppression and energy harvesting (SVSEH) of vehicle suspensions, this paper reviews the development history of vehicle suspensions and summarizes the potential energy that can be collected from road excitations by vehicle suspensions. Then the research status on energy-regenerative suspensions is focused on. In the end, current technical challenges of SVSEH of vehicle suspensions are presented and future directions are discussed. The contribution of this paper is to help domestic researchers to quickly and accurately grasp current status of this field and provide important ideas for the development of new vehicle suspensions.

Key words: vehicle suspension; simultaneous vibration suppression and energy harvesting; energy-regenerative suspension; prospect

* 国家自然科学基金资助项目(51577189、51911530202)。2022xxxx 收到初稿, 2022xxxx 收到修改稿

0 前言

随着汽车工业和国民经济的快速发展,汽车早已进入千家万户成为主要的现代交通工具之一。国家统计局数据表明,2021年末全国民用汽车保有量达到3.02亿辆,其中绝大部分仍是燃油汽车,新能源汽车保有量约为784万辆,占汽车总量的2.60%。根据国际标准ISO-8608,路面不平度可以表示为A~H共七种类型^[1]。在汽车行驶过程中,路面的不平整性不可避免地会对汽车车轮输入外部激励导致整个车身产生振动。这类振动不仅增加额外能耗、造成机械部件损伤,同时在很大程度上影响舒适性、行驶质感等。为了衰减由路面不平度引起的车身振动和轮胎形变,要求汽车对路面不平度具有良好的隔振特性。特别是对电动汽车来说,它依靠电池组提供动力,而振动引发的颠簸、挤压、碰撞、高温等情况很容易影响电池组的正常使用,轻则降低电池的使用寿命和续航能力,重则会因温度过高起火导致严重安全事故。因此,实现有效减振是汽车设计中的关键一环。

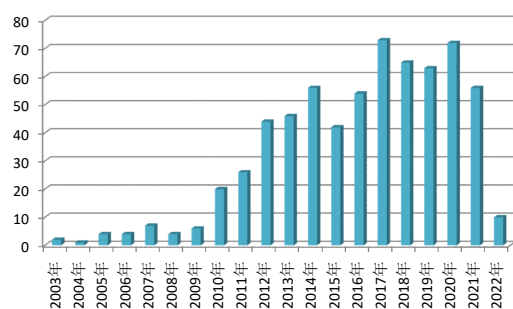
汽车减振一般包括轮胎、悬架和座椅三个环节,其中起主要作用的是悬架系统,它由弹性元件、减振器、导向机构等组成,弹性元件起缓冲作用,减振器具有消振功能,导向机构负责导向,共同实现车身和车轮之间的力传导。由此可见,悬架是汽车结构内部的关键部件之一,不仅承担着支撑车身的作用,更关键的是要实现减振功能,它的性能是影响汽车乘坐舒适性、操纵稳定性和行驶平顺性的重要因素。传统的悬架结构常常采用粘性液体或干摩擦阻尼器将振动能量转化为热量耗散出去,以达到减振的目的。这类被动式的悬架结构设计参数往往是固定的,减振的适应能力一般,难以应对不同剖面的路面振动激励,尤其是从汽车能量消耗的角度来看,它造成了明显的能量浪费。根据公开文献,对于燃油汽车,燃油产生的全部能量中只有10%~16%的能量用于驱动汽车,而大部分的能量都被各种摩擦力、悬架系统以及热排放等方式耗散掉^[2,3];对于纯电动汽车,80%~90%的电池能量能直接被用于驱动汽车,但其中仍有约20%的能量会被悬架系统耗散掉^[2],造成电池电能的浪费。因此,设计既能减振又能减少能量耗散的新型悬架系统是当前汽车行业的热点之一。

从实际需求来看,如果在实现振动抑制的同时又能将振动能量高效收集起来转化为电能,不仅能

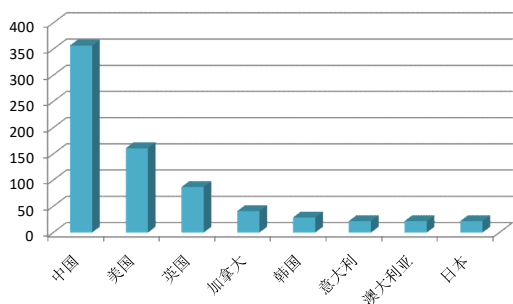
保证悬架的动力学性能,还可以对车载电子设备和电池组进行充电,这在延长电池组使用寿命、提升续航能力等诸多方面均具有十分重要的应用价值。为此,研究人员已经开展了大量研究,该领域称作同步振动抑制与能量收集或同步振动控制与能量收集。特别是针对汽车悬架系统,公开文献中的相关技术术语包括能量收集阻尼器、能量回收阻尼器、能量回收减振器等,国内代表性高校有上海交通大学^[4]、西安交通大学^[5]、湖南大学^[6]、吉林大学^[7]、武汉理工大学^[8]、江苏大学^[9-10]等,不再一一赘述。根据这三个关键词在Web of Science中对近20年公开发表论文进行检索,结果如图1所示,可以看出:该领域在近十年兴起,中美均开展了大量研究。迄今为止,有少数文献从不同角度对已有研究进行了归纳总结。2020年,吉林大学LV等^[7]归纳了含能量回收功能的液压式汽车悬架研究现状,按照不同的能量回收方法进行了分类,并分析了影响悬架系统振动抑制和能量回收性能的因素;2019年,江苏大学YU等^[10]对汽车刹车制动、悬架振动和排放废热的能量收集进行了综述;2020年,国防科技大学张鹏等^[11]对能量回收减振器的基本结构进行了归纳,主要包括静液蓄能、电磁线圈、滚珠丝杠、齿轮齿条、线性电机等;2018年,武汉理工大学ABDEKAREEM等^[8]对基于能量收集的汽车悬架技术进行了综述,重点回顾了汽车能量回收悬架的理论研究成果,比较了各自的优点和缺点;2018年,墨尔本皇家理工大学ZHANG等^[12]比较了不同类型能量回收减振器的阻尼性能,并评估了不同电路和控制算法的电能输出特性。综合来看,这些综述尚未涵盖近两年的研究进展且对未来发展缺乏深入的探讨。

随着我国汽车保有量的不断提升,减少汽车行业碳排放是实现“碳中和、碳达峰”战略目标的重要举措之一,无论是燃油汽车还是电动汽车,环境污染和能源消耗均是当前和未来汽车行业面临的两个重要挑战,研究和应用实现同步振动抑制与能量收集功能的新型悬架系统将是下一代汽车设计重点关注的发展方向之一,具有十分重要的经济和社会效益。为了全面掌握汽车悬架同步振动抑制与能量收集技术领域的最新进展,将回顾汽车悬架的发展历程,总结汽车悬架从路面激励中可收集的振动能量,重点梳理汽车能量回收悬架技术研究现状,探讨当前面临的技术挑战并对未来发展趋势进行展望。该研究有望为国内新型汽车悬架技术的研究提供重要参考,同时有助于国内同行快速、准确地掌握本领域

域的技术现状。



(a) 按时间分布



(b) 按国家分布

图1 Web of Science 检索结果

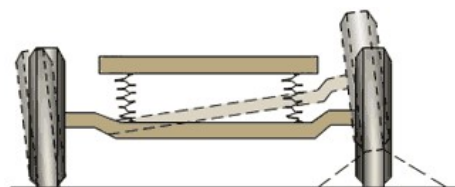
1 汽车悬架分类及其建模方法

1.1 汽车悬架发展历程与分类

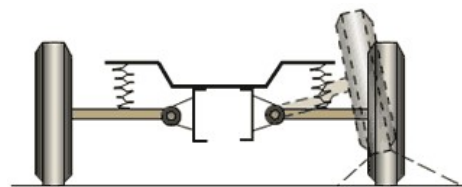
汽车在道路上行驶过程中，由于路面存在凹凸不平整性，这使得汽车和乘客往往要承受六个自由度的运动：一是绕左右轴的横向运动和纵摇运动、二是绕前后轴的横向运动和横摇运动、三是绕上下轴的垂直运动和旋转运动。当这些运动超过一定阈值时，乘客就会感觉不舒适。因此，自从汽车诞生之日起，人们对乘坐舒适性和安全性的要求不断提高，这也促使研究人员持续不断地研究新的汽车悬架系统。经过近百年的发展，现代汽车悬架系统种类较多、结构差异较大。从结构形式上，汽车悬架系统可分为非独立悬架和独立悬架两大类。非独立悬架的结构特点是两侧车轮通过整体式车桥刚性相连且共同运动，如图2a所示^[13]，它具有结构简单、成本低、强度高等优点，但其乘坐舒适性和操纵稳定性相对较差；独立悬架的结构特点是指汽车每侧车轮都单独地通过弹性悬架与车架连接，如图2b所示^[13]，两侧车轮可以单独运动互不干涉，有利于提高汽车的平顺性、稳定性和乘坐舒适性，不足是结构复杂、成本高。

从减振理论角度不难看出，悬架系统的性能与其阻尼、刚度直接相关。因此，依据阻尼和刚度是否随行驶条件动态变化，传统的悬架系统可以划分

为被动式悬架、半主动式悬架和主动式悬架三种类型。1934年，世界上首次出现了由螺旋弹簧组成的被动式悬架^[14]，其刚度、阻尼等参数依据经验或优化设计来确定，但在汽车行驶过程中保持不变，难以适应各种复杂路况，减振的效果较差。随着汽车车速的提高，为了更好地兼顾乘坐舒适性和操纵稳定性，1954年美国通用汽车公司率先提出了主动悬架的新概念^[15]，它增加了可调节悬架刚度或/和阻尼的控制装置，使得车身高度、悬架刚度和减振器阻尼大小能随行驶速度、路面状况等变化而自动调节，从而提高了乘坐舒适性，但存在结构复杂、技术难度大、成本高等缺点，且仍存在关键技术问题没有得到很好的解决。作为折衷，1973年CROSBY等^[16]首次提出了半主动式悬架，其基本思想是在行驶过程中通过传感器感知路面状况和车身姿态，采用合适的控制策略来自动调节悬架的阻尼系数，较好地权衡了乘坐舒适性和操纵稳定性。



(a) 非独立悬架示意图



(b) 独立悬架示意图

图2 汽车非独立和独立悬架结构示意图

汽车悬架系统结构可以简化为由簧上质量 m_s (车身)、非簧上质量 m_u (车轮总成)、弹簧和阻尼器组成，如图3所示^[17]。当车轮在路面上转动时，地面不平整度会对车轮产生一个位移激励输入，再经过轮胎传递到车身产生不同方向的振动，弹簧和阻尼器的作用就是抑制传递到车身的振动，从而提高驾驶员和乘客的乘坐舒适性；同时，弹簧和阻尼器还要承载车身的重量。因此，悬架系统的设计要考虑承载能力、乘坐舒适性和操纵稳定性三个主要性能指标，但在理论上这些指标之间是相互冲突的，这对汽车悬架系统的设计提出了挑战，难以使所有参数均达到最优，比如位置更低、刚度更大的弹簧有利于汽车转弯操控，但同时会降低乘坐舒适性。当前工程设计时只能权衡不同的技术指标、车辆类型、轮胎类型、路面类型等参数，这也是汽车悬架

系统设计领域的难点之一。

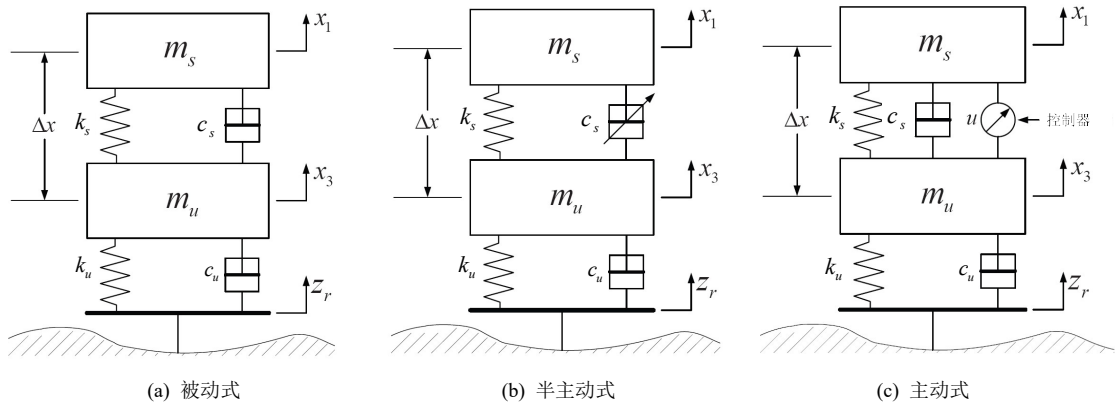


图3 三种传统的汽车悬架结构简化示意图

1.2 汽车悬架建模方法

对汽车悬架设计和评估来说,首要的是构建悬架系统的动力学模型。在汽车行驶过程中,悬架的运动是车身和车轮之间的相对运动,因此六个自由度运动中与之相关的是垂直运动、横摇运动和纵摇运动三个方向的运动,且悬架模型需要包含车身质量、车轮总成质量、减振器阻尼和刚度、轮胎阻尼和刚度。根据不同的简化需求,公开文献中已有的汽车悬架模型主要分为 1/4 悬架模型、1/2 悬架模型和整车悬架模型三类,示意图如图 4 所示^[18],这三类模型对被动式悬架、半主动式悬架或主动式悬架都是适用的(其中 m, k, c, z 分别表示等效质量、等效刚度、等效阻尼和路面激励,下标 s, u, r 分别表示簧上、非簧上和路面,下标 sr, ur, sf, uf, rr, rf 分别表示后轮簧上、后轮非簧上、前轮簧上、前轮非簧上、后轮路面和前轮路面,下标 $srl, url, srr, urr, sfl, ufl, sfr, ufr, rrl, rrr, rfl, rfr$ 分别表示左后轮簧上、左后轮非簧上、右后轮簧上、右后轮非簧上、左前轮簧上、左前轮非簧上、右前轮簧上、右前轮非簧上、左后轮路面、右后轮路面、左前轮路面和右前轮路面, I_x, I_y 分别表示簧上质量沿 x 轴和 y 轴方向的转动惯量, I_f, I_r 分别表示簧上质量前后部分的转动惯量, ϕ, θ 分别表示簧上质量沿 x 轴和 y 轴方向的转动角度)。目前的研究现状可以归纳为表 1 所示,其中 1/2 悬架模型构成一般是指前后两个车轮及悬架。同时,为了逼近真实的车辆运动,针对考虑不同的运动维度研究人员提出了不同自由度的动力学模型,既有线性模型也有非线性模型,建模的方式主要是动力学模型和 Matlab/ Simulink 模型,这些模型为悬架系统设计提供了重要技术手段,HERMAN 等^[19]利用实际采集的车辆数据对三类悬架

模型的动态响应进行了比较分析。

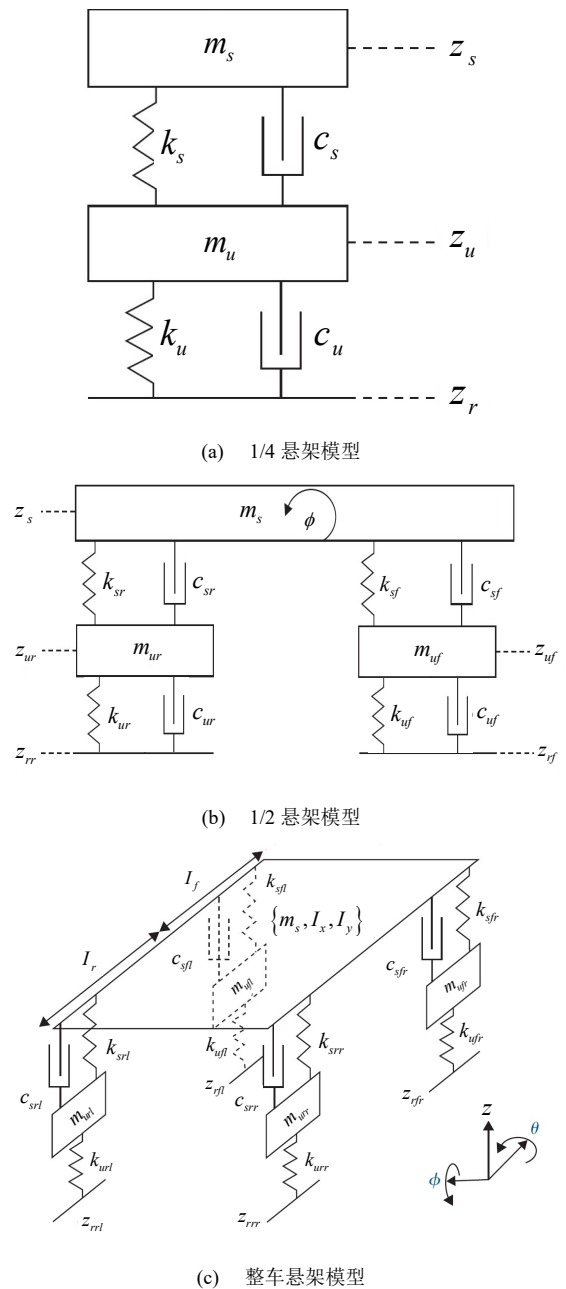


图4 三类汽车悬架模型示意图

表 1 三类汽车悬架模型示例

模型类型	模型构成	模型属性
1/4 模型	1/4 车身、单个悬架、单个车轮	两自由度: VAISHNAV 等 ^[20] (线性)、MANTARAS 等 ^[21] (线性), 等; SHELKE 等 ^[22] (非线性)、NAIK 等 ^[23] (非线性), 等。
1/2 模型	1/2 车身、两个悬架、两个车轮	两自由度: IHSAN 等 ^[24] 、BHAVE 等 ^[25] ; 四自由度: GANDHI 等 ^[26] 、SARDER 等 ^[27] 、YANG 等 ^[28] (非线性); 五自由度: GUO 和 Zhang ^[29] ; 六自由度: KIRLI ^[30] ; 等等。
整车模型	整个车身、四个悬架、四个车轮	七自由度: KUMAR 等 ^[31] (线性)、MONTAZERI-Gh 和 AZAD ^[32] (非线性)、KUMAR 等 ^[33] ; 八自由度: RIZVI 等 ^[34] ; 九自由度: SMITH 等 ^[35] 、MORADI 等 ^[36] (线性和非线性); 等。

基于上述不同的汽车悬架模型, 人们可以估算悬架系统的几个关键技术指标^[37-38]: ① 乘坐舒适性, 用簧上质量加速度的均方根值来度量; ② 操纵稳定性, 用轮胎动静态变形的比值来度量; ③ 悬架占用空间, 用悬架位移的均方根值来度量, 从而为汽车悬架结构与控制优化提供重要分析手段。反过来, 这些指标又可以用于评估不同模型的性能。

2 汽车悬架优化与控制方法

由图 3 可以看出, 被动式、半主动式和主动式三种悬架之间的区别主要在于阻尼的实现方式, 接下来分别对被动式、半主动式和主动式阻尼器的实现结构及其优化研究进展进行阐述。

2.1 被动式阻尼器及其参数优化

被动式阻尼器被广泛应用于汽车悬架系统中, 主要通过流体摩擦或干摩擦来耗散振动能量, 其参数一般通过权衡承载能力、乘坐舒适性和操纵稳定性三个性能指标来确定, 且是固定不变的。汽车工业中常用的被动式阻尼器主要是液压阻尼器, 包括单管和双联管两种基本结构形式, 如图 5 所示^[2], 上部与簧上质量连接, 下部与非簧上质量相连。单管液压阻尼器由带阀门活塞和密封柱形管组成, 其中密封柱形管空间又可以分解为压缩油腔、扩展油腔和空气腔, 其产生阻尼力的大小取决于活塞上阀门孔的大小。双联管液压阻尼器也含有压缩油腔、扩展油腔和空气腔, 但它的结构比单管液压阻尼器更复杂, 由内外两个油管组成, 压缩油室与空气腔相连。与单管液压阻尼器不同, 双联管液压阻尼器不仅在活塞上有阀门, 而且在内油管底部也有阀门, 活塞上和油管底部阀门孔的大小共同决定了产生阻尼力的大小。进一步, 单管和双联管液压式阻尼器的优缺点对比如表 2 所示。

表 2 单管和双联管液压式阻尼器优缺点对比

被动式阻尼器类型	优点	缺点
单管液压式阻尼器	● 结构简单, 易于定制; ● 活塞直径大, 允许更低的工作压力; ● 允许双向安装。	● 长度更大, 安装空间受限; ● 油管容易产生损伤; ● 活塞密封可能产生泄露。
双联管液压式阻尼器	● 通过活塞位置可以调节行驶特性; ● 路面和负载变化时调节响应更快; ● 增强操控性同时不会降低舒适性。	● 结构更复杂; ● 只能沿一个方向安装。

汽车被动式悬架大部分采用的线性弹簧和阻尼, 虽然结构简单, 但在实际应用中也存在很多不足, 典型的乘坐舒适性、操纵稳定性和悬架系统三个指标之间相互制约, 使得提升汽车的行驶特性受限。针对这些不足, 研究人员研究了非线性被动式阻尼器, 目的是提高汽车的行驶性能。ELMADANY 等^[39]研究发现前向冲程的阻尼大于返回行程的阻尼能够有效提升汽车的车辆行驶性能和乘坐品质, 并探讨了非对称型、二次型和加速度敏感型三种不同非线性被动式阻尼器的设计方法; KALYAN 等^[40]提出采用锥形管来替代被动式阻尼器中的传统柱形管, 构造了一种非线性被动式阻尼器, 可以实现不同的前向冲程阻尼和返回行程阻尼, 仿真结果表明, 与线性被动式阻尼器相比, 该非线性阻尼器能获得更好的行驶性能; KALYAN 等^[41]引入控制策略提出了一种非线性被动式阻尼器, 其阻尼系数能随着活塞往复运动快速改变; AJIT 等^[42]利用 Matlab/Simulink 建立了考虑非线性刚度和阻尼的二自由度 1/4 车辆模型, 对线性和非线性被动式阻尼器的性能进行了仿真比较。

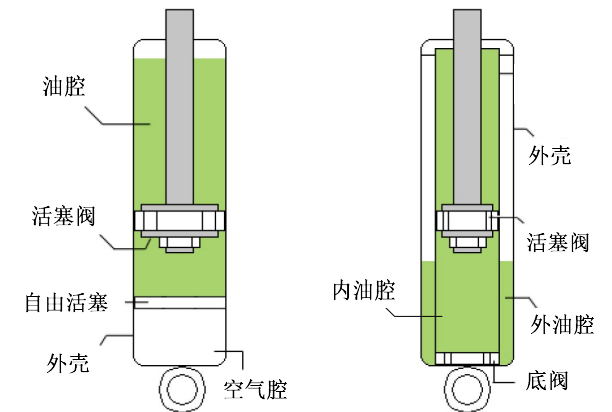


图 5 单管(左)和双联管(右)液压式阻尼器示意图^[2]

无论是线性还是非线性被动式阻尼器, 为了改善悬架的性能, 需要对被动式阻尼器的参数进行优化, 为此人们研究了不同的优化算法。MITRAA 等^[43]利用 Matlab/Simulink 建立了四自由度 1/4 车辆悬

架模型, 提出采用遗传算法对线性被动式悬架的弹簧刚度、阻尼系数、簧上质量、非簧上质量以及轮胎刚度进行优化, 目标是提高乘坐舒适性。实际中除了优化乘坐舒适性、操纵稳定性等单个指标之外, 更应该权衡考虑操纵稳定性、悬架行程等多个约束指标, 因此悬架参数的优化是一个多目标优化问题, 常用的优化算法是遗传算法、进化算法等。比如, SHIRAHATTI 等^[44]以簧上质量加速度、座椅加速度、操纵稳定性、悬架行程等作为优化目标, 提出了基于遗传算法的客车悬架多目标优化方法, 并对优化前后的结果进行了对比分析; GUNDOGDU^[45]综合悬架位移、轮胎变形、头部加速度及其峰值因子定义了多目标函数, 并采用遗传算法进行优化, 以获得期望的操纵稳定性和乘坐舒适性; GADHIA 等^[46]建立了五自由度 1/2 车辆悬架模型, 以驾驶员座椅和前后悬架的刚度和阻尼系数共六个参数作为设计变量, 定义了乘坐舒适性、前轮胎稳定性和后轮胎稳定性三个目标函数, 构造了一个多目标优化问题, 并分别采用非支配排序遗传算法^[47]、Pareto 强度进化算法^[48]和基于 Pareto 包络的选择算法进行优化求解^[49]; KUO 等^[50]针对非线性被动式悬架系统设计问题, 研究了一种基于进化规划参数优化方法, 以提升悬架的性能, 并实现乘坐舒适性、操纵稳定性和悬架行程三个指标之间的权衡; 2022 年, ISSA 等^[51]综合乘坐舒适性、操纵稳

定性等不同指标定义了新的归一化多目标函数, 提出了基于哈里斯鹰优化算法的被动式悬架参数优化方法, 并采用 1/4 和 1/2 车辆悬架模型将该算法与经典的粒子群优化算法^[52]、遗传算法^[53]和萤火虫优化算法^[54]进行了比较, 结果表明该算法在寻优性和鲁棒性上更优。

2.2 半主动式阻尼器及其控制策略

与被动式阻尼器的阻尼系数固定不同, 半主动式阻尼器的基本工作原理是通过不同的控制方式改变阻尼系数以获得期望的阻尼力, 包括调节阀门的位置和改变液体的粘度。目前, 半主动式阻尼器主要采用三种阻尼系数电控制技术, 如图 6 所示^[55]。第一种是电动液压技术, 它是利用电磁阀改变孔的大小来调整阻尼力, 当电源接通时阀门打开, 阻尼力减小; 而当电源断开时阀门关闭, 阻尼力增加。比如, CODECA 等^[56]建立了电动液压半主动阻尼器的非线性模型, 分析了其阻尼特性。第二种是磁流变技术^[57-62], 它是利用磁流变液在外部磁场作用下能改变其粘度, 磁场强度越大, 液体的粘度越大, 从而产生更大的阻尼力。第三种是电流变技术^[63-68], 它是利用电流变液在外部电场作用下能改变其粘度, 电场强度越大, 液体的粘度越大, 从而产生更大的阻尼力。可以看出, 半主动式阻尼器具有较强非线性, 无论是建模分析还是参数优化均比被动式阻尼器要更加复杂。

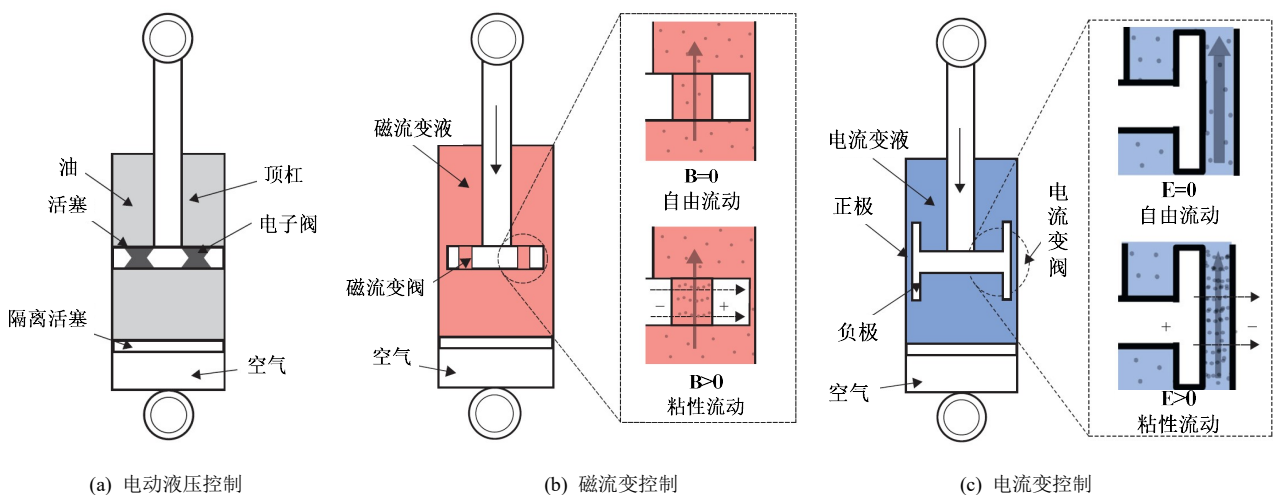


图6 三种不同控制方式的半主动阻尼器示意图

半主动式阻尼器的性能与其控制策略紧密相关, 迄今人们研究提出了大量的控制算法, 大致可以归纳为四类。第一类是面向舒适性的控制策略, 最经典且使用广泛的是 Skyhook(SH)思想^[69], 包括两状态离散 Skyhook 控制策略(SH-2)^[70]和线性逼近连续 Skyhook 控制策略^[71]; 后来, SAVARESI 等^[72]提出了加速度驱动的阻尼控制策略 (Acceleration-driven damper, ADD), 并综合 SH-2 算法和 ADD 算法的特性, 进一步提出了

SH-ADD-1^[73]和 SH-ADD-2^[74]两种新算法。第二类是面向稳定性的控制策略, 相对于 Skyhook 思想人们提出了 Groundhook 控制策略, 分为两状态离散 Groundhook 控制策略 (GH-2)^[75]和连续 Groundhook 控制策略^[76]。Skyhook 控制策略提高了舒适性, 但降低了稳定性; 而 Groundhook 控制策略则提高了稳定性, 但降低了舒适性。DÍAZ-CHOQUE 等^[77]针对 Skyhook 和 Groundhook 控制策略分别建立了相应的设计原则, 可以指导设

计人员开发最优的半主动式悬架系统。为了同时权衡舒适性和稳定性，人们研究了第三类混合控制策略，比如 AHMADIAN 等^[78-79]将常用的 Skyhook 和 Groundhook 控制策略组合起来，提出了一种混合半主动控制方法。第四类是近些年提出的不同现代控制策略，比如限幅控制^[80-81]、 H_∞ 控制^[71,82]、神经网络控制^[83]、预测性控制^[84]等。

2.3 主动式阻尼器及其控制策略

与被动式、半主动式阻尼器不同，主动式阻尼器本质上是一个含反馈控制的致动器，利用外部电能连续控制车身和车轮的运动，能实现同时提高舒适性和稳定性的目的。它主要由传感器、反馈控制器和致动器三部分组成，传感器信号输入到反馈控制器产生控制信号来驱动致动器动作，构成了一个闭环控制系统。其中：传感器包括加速度传感器、力传感器、位置传感器等；致动器的实现方式包括机电式^[85]、液压式^[86]、气动式^[87]和电磁式^[88]等几种。RIDUAN 等^[89]对液压式、气动式和电磁式三种主动式悬架系统进行了比较分析。

与半主动式阻尼器类似，主动式阻尼器的性能取决于选用合适的控制策略，但同时主动式阻尼器具有更大的控制自由度。目前，主动式阻尼器控制策略可以归纳为线性和非线性两大类控制策略。在线性主动式阻尼器控制策略方面，早期主要是优化控制算法^[90]，代表性的是线性二次型高斯 (Linear quadratic Gaussian, LQG) 控制算法，比如 ULISOY 等^[91]利用两自由度 1/4 车辆悬架模型，研究了主动式悬架线性二次型高斯控制器的设计方法。为了进一步提升主动式悬架的控制性能，YAMASHITA 等^[92]针对舒适性、稳定性和鲁棒性，率先提出了基于状态反馈的主动式阻尼器控制策略，仿真和实验结果表明该方法优于 LQG 算法。但是实际的汽车悬架系统往往存在非线性和不确定性，采用线性模型及其控制策略难以准确地进行表征，为此人们研究了非线性主动式阻尼器控制策略，比如滑模控制算法^[93]、自适应控制算法^[94]、反演控制算法^[95]等。

综合以上情况，三种传统的汽车悬架阻尼器的优缺点可以归纳为表 3 所示，可以看出传统的汽车悬架设计主要关注乘坐舒适性、操纵稳定性等指标，振动能量则通过阻尼耗散掉，降低了能效。目前，燃油汽车大多采用被动式阻尼器，而电动汽车则实现了从被动式阻尼器、半主动式阻尼器到主动式阻尼器的减振结构，其中半主动式阻尼器开始得到推广应用，而主动式阻尼器因为成本高、技术难度大，仍是未来需要重点突破的难点领域。特别是，主动式阻尼器需要外部提供大量的能量来实现减振。因此，高效收集悬架耗散的振动能量既可以抑制振动，又能为主动式阻尼器提供能量，这也使得能回收振动能量的主动式汽车悬架成为未来重要发展方向。

表 3 三种传统的汽车悬架阻尼器优缺点对比

类型	优点	缺点
被动式阻尼器	<ul style="list-style-type: none"> ● 结构简单； ● 可靠性高； ● 无需外部能量； ● 制造成本低。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 刚度和阻尼不可调； ● 减振适应性差； ● 适应性和稳定性不能兼顾； ● 存在能量耗散。
半主动式阻尼器	<ul style="list-style-type: none"> ● 兼顾被动式和主动式的优点； ● 可靠性高； ● 成本较低 ● 共振频率低； ● 动态变形小； ● 高速动态响应； ● 路面适应性强。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 存在能量耗散； ● 需要外部能量。
主动式阻尼器		<ul style="list-style-type: none"> ● 存在能量耗散； ● 需要外部能量； ● 存在安全隐患。

3 汽车悬架可收集的振动能量

汽车悬架的振动激励来自于路面位移激励，因此路面不平度与悬架可收集的振动能量大小紧密相关。公开文献中采用的路面不平度激励可以归纳为三类：第一类是确定型激励，比如正弦激励^[96]、方波激励^[97]等，常用于对实际路面激励进行近似表示，存在一定的误差；第二类是随机离散型激励^[98]，比如减速带、路面坑等；第三类是随机连续型激励^[99]，更接近于实际的路面形状，常用位移功率谱密度来表征，也即路面谱。国际标准化组织制定了路面不平度分类标准 ISO8608，将路面不平度分为 A~H 级，如表 4 所示^[1]，根据 ISO8608，路面谱的一般表达式为： $\Phi(\Omega) = \Phi(\Omega_0)(\Omega/\Omega_0)^{-2}$ ，其中 $\Omega_0 = 1 \text{ rad/m}$ 表示参考波数， $\Phi(\Omega_0)$ 为 Ω_0 对应的功率谱密度值，不同等级路面的 $\Phi(\Omega_0)$ 值如表 4 所示^[1]。在理论研究中，可以根据上述定义来仿真产生不同类型的路面不平度激励，并作为图 3 所示悬架模型的输入，进而对汽车悬架系统的性能及其耗散的能量进行分析。

表 4 ISO8608 的路面谱分类

路面等级	路面不平度表征		
	$\Phi(\Omega_0) / 10^{-6} \text{ m}^3 (\Omega_0 = 1 \text{ rad/m})$		
	下限值	几何平均值	上限值
A	—	1	2
B	2	4	8
C	8	16	32
D	32	64	128
E	128	256	512
F	512	1024	2048
G	2048	4096	8192
H	8192	16384	—

能量回收汽车悬架的目的是要将传统悬架减振器耗散的振动能量收集起来转化为电能，因此汽车悬架可以回收的最大电能可以用被动式阻尼器耗散的能量来度量。ZUO 等^[100]率先总结出汽车悬架中可收集的潜在振动能量范围为 46~7 500 W；

PETER^[101]对基于 1/4 悬架模型估算的减振器耗散能量进行了综述, 并采用九自由度整车悬架模型估算了不同车速、不同路面下耗散的能量。综合公开文献可见, 研究人员分别采用数值仿真、模拟实验测试和实际路面测试三种方式对汽车悬架耗散/收集的能量进行了估算, 如表 5 所示。

表 5 公开文献中汽车悬架耗散能量研究

估算方式	代表性文献	估算环境	耗散/收集能量值/W
数值仿真	文献[100]	1/4 车辆悬架模型, C 类路面, 速度 96.6 公里/小时	100
	文献[103]	1/4 车辆悬架模型, A 类路面, 速度 108 km/h	40~42
	文献[104]	1/4 车辆悬架模型, C 类路面, 速度 50 km/h	45
	文献[105]	1/2 车辆悬架模型, 2Hz 正弦激励, 幅值 10mm	64
	文献[106]	1/2 车辆悬架模型, 10Hz 正弦激励, 幅值 5mm	305
	文献[101]	整车悬架模型, 实际沥青混凝土路面, 速度 60 m/s	23.6~25.9
	文献[107]	整车悬架模型, C 类路面, 速度 20 m/s	18 (中型客车) 93 (公交车) 149 (开车)
	文献[108]	轿车, 四轮 20Hz 正弦激励, 幅值 5mm	880 (Bounce) 786 (Roll) 741 (Pitch)
	文献[109]	模拟实验台, 模拟路面激励, 幅值 10mm	11 (高速路面) 27 (城市路面)
	文献[110]	模拟实验台, 1Hz 正弦激励, 幅值 25mm	260
模拟实验测试	文献[111]	SUV, 校园路面, 速度 48 km/h	54.1
	文献[112]	轻型车, 乡村路面, 速度 40~50 km/h	50
实际路面测试		重型车, 乡村路面, 速度 60~70 km/h	120

根据做功原理, 汽车悬架收集的瞬时电能等于减振器瞬时阻尼力 $F_s(t)$ 与瞬态相对速度的乘积, 如式(1)所示^[102]

$$P_h(t) = F_s(t) [\dot{x}_s(t) - \dot{x}_u(t)] \quad (1)$$

式中, $x_s(t)$ 和 $x_u(t)$ 分别是簧上质量、非簧上质量的振动位移。进一步, 瞬时阻尼力 $F_s(t)$ 又可以表示为

$$F_s(t) = c_s(t) [\dot{x}_s(t) - \dot{x}_u(t)] \quad (2)$$

因此, 汽车悬架收集的瞬时电能估算大小如式(3)所示

$$P_h(t) = c_s(t) [\dot{x}_s(t) - \dot{x}_u(t)]^2 \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 汽车悬架可以收集振动能量的大小与路面不平度、车速、车型(包括簧上质量、非簧上质量、减振器阻尼、轮胎刚度、轮胎阻尼)等诸多因素密切相关^[11]。

进一步, 从已有公开数据可以看出, 汽车悬架中可以收集的潜在振动能量估算范围比较宽, 从几十瓦到几千瓦, 这主要是因为采用的悬架模型、输入激励、车速等估算环境有较大差别, 但充分验证了汽车悬架振动能量收集的巨大潜力和应用价值。同时, 需要指出的是, 已有数值仿真或实验测试中采用的路面激励很多是频率和幅值固定的正弦激励, 并不符合实际的路面激励形式, 这也是未来汽车能量回收悬架研究需要关注的一个重要问题。

4 汽车能量回收悬架研究进展

4.1 汽车悬架振动能量收集实现原理

从能量流的角度来看, 振动能量收集在将振动能转化为电能的同时, 也是在降低振动, 故车辆悬架就是振动抑制与能量收集较早的重要应用领域之一^[113]。根据振动-电能转换机理的不同, 迄今人们分别研究了静电式^[114]、压电式^[115]、摩擦式^[116]和电磁式^[117]四种振动能量收集方式, 其基本原理分别如图 7 所示。

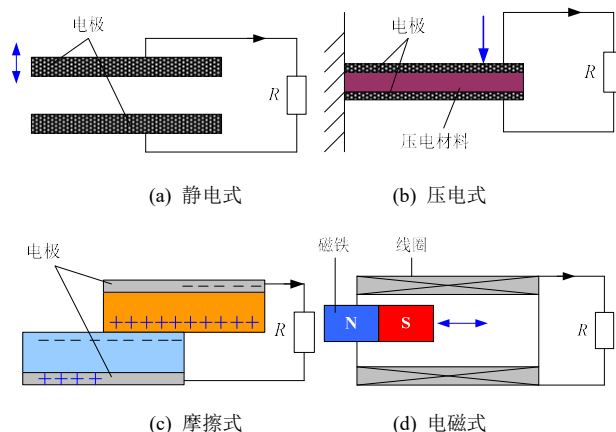


图 7 四种振动能量收集原理示意图

静电式振动能量收集的基本原理是采用一对薄板构成电容结构并施加初始电压, 当外界环境振动引起薄板间距离变化时, 电容中储存电荷量也会发生改变, 从而在外部回路中形成电流, 由此将振动能量转化为电能。在已有文献中, 用于振动能量收集的电容结构主要包括无驻极体和有驻极体两种, 其中无驻极体变电容结构需要外部提供启动电压, 而在变电容薄板上敷设驻极体后自动极化, 不需要外部提供电压。静电式振动能量收集的优点是输出电压高、机电耦合系数可调、体积小。NAITO

等^[118]针对汽车胎压传感器供电问题,设计了一种驻极体静电 MEMS 振动能量收集器,在速度 60 km/h 情况下输出功率达到 60 W。但是根据文献调研,尚未发现静电式振动能量收集应用于汽车悬架领域,可能的原因是其工作频率较高、承载能力较差等。

压电式振动能量收集的基本原理是基于压电材料的正压电效应,即压电材料在外部振动激励下产生变形时表面会产生电荷,从而在外部回路中形成电流,由此将振动能量转化为电能。在已有文献中,振动能量收集压电结构主要采用 3-3 和 3-1 两种工作模式。XIAO 等^[119]探讨了在二自由度 1/4 车辆悬架模型中添加压电式能量收集器的可行性;LEE 等^[120]在减振器中加入压电元件,研究利用活塞运动引起的流体压力变化进行发电;XIE 等^[121]研究了一种压电棒用于汽车悬架振动能量收集,并讨论了几何尺寸、激励速度和路面不平度对输出功率的影响特性;BENHIBA 等^[122]建立了含压电堆的 1/4 汽车悬架 Simulink 模型,仿真分析了不同速度不同颠簸激励时的输出电压和功率;CABAN 等^[123]探讨了利用压电片收集燃油发动机悬挂系统振动能量的可行性,并在转速 800 r/min、1 000 r/min、1 500 r/min 下分别进行了测试。压电式振动能量收集的优点是输出电压高、机电耦合系数大、能量密度高、占用空间小等,但汽车悬架这类大位移、重载荷的振动环境对其可靠性和使用寿命是一个巨大挑战,迄今实际工程应用极少。

摩擦式振动能量收集目前最具代表性的是王中林院士课题组 2012 首次提出的摩擦纳米发电机 (Triboelectric nanogenerator, TENG)^[124],它是建立在摩擦起电与静电感应效应理论基础上的一种新型能量收集技术,其基本原理是两种不同的摩擦电材料之间进行接触滑动时会产生电子传输或者垂直接触再分离时会在材料表面产生静电荷,从而在外部回路中形成电流,由此将振动能量转化为电能。RATHORE 等^[125]对 TENG 进行了综述,总结了影响 TENG 发电效率的因素及规律,并归纳了增加表面电荷密度的方法。TENG 用于振动能量收集的优点是工作原理简单、结构易于设计、输出较大功率等,近两年来研究人员开始探索基于 TENG 的汽车悬架振动能量收集。ASKARI 等^[126]针对汽车领域自供电传感需求探讨了基于 TENG 的振动能量收集可行性及其概念设计,并提出了一种电磁式-摩擦式混合汽车悬架能量回收减振器原型设计;KANG 等^[127]针对汽车悬架系统设计了一种自支撑型的 TENG 结构(图 8),分析了影响输出性能的参数并进行了优化,实验测试表明外接 66 欧姆负载时的最优输出功率密度为 $4.90 \mu\text{W}/\text{cm}^2$;HU 等^[125]提出了一种基于滑动式 TENG 和电磁式发电机的复合振动发电结构

(图 9),用于收集汽车悬架的振动能量,实验测试表明该发电结构能在 60 s 内将 $4.7 \mu\text{F}$ 电容电压充电到 18.05 V。可以看出,TENG 用于汽车悬架仅有少数文献公开发表,目前仍处于初步尝试阶段。

电磁式振动能量收集的基本原理基于法拉第电磁感应定律,它利用磁铁与线圈之间的相对运动将振动能量转化为电能,其输出功率大小与磁铁/线圈的结构、布局以及相对运动速度等因素密切相关。目前已经研究的电磁式能量回收减振器可以归纳为线性直线电磁发电机和旋转电磁发电机两种结构形式。电磁式振动能量收集的优点包括输出电流大、使用寿命长、成本不高等,尤其是它主要利用固体磁铁和线圈之间相对运动,故抗恶劣环境能力强、可靠性高,非常适合于汽车悬架,得到了学术界和工业界的大量研究,其结构可以归纳为直线型、旋转型和复合型三类,下一节将重点阐述。

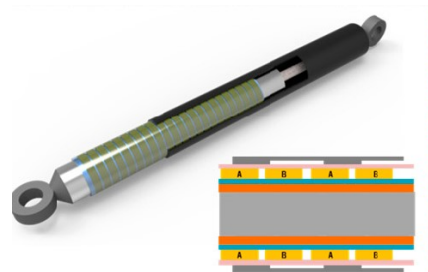


图 8 自支撑 TENG 结构

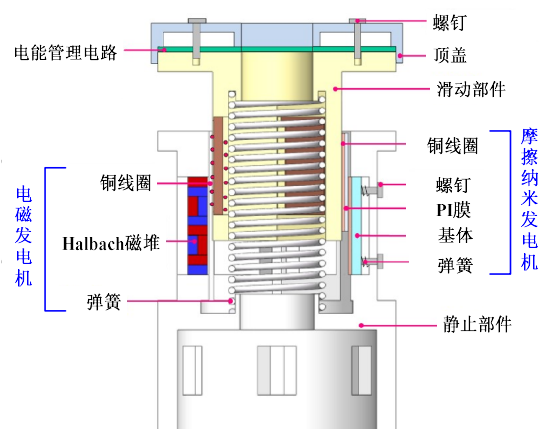


图 9 TENG 和电磁式复合发电结构

4.2 电磁式能量回收悬架基本结构

根据法拉第电磁感应定律,电磁式振动发电输出功率的大小与磁铁/线圈的结构、布局以及相对运动速度等因素密切相关。针对汽车悬架系统,目前已经研究的电磁式能量回收减振器可以归纳为直接型、旋转型和复合型三种结构形式。特别要指出的是,美国弗吉尼亚理工大学 Lei Zuo 教授(ASME Fellow)、日本东京大学 Suda 教授等课题组在电磁式能量回收减振器领域开展了大量开创性的研究工作。

4.2.1 直线型电磁式能量回收减振器

直线型电磁式能量回收减振器结构示意图如图 10 所示^[129], 它一端与车身相连, 另一端与轮轴相连, 在路面激励下磁铁与线圈之间直接产生相对直线运动, 且相对运动速度大小与车速、路面不平度密切相关。为了提高直线型电磁式减振器的输出功率, 研究的焦点主要是优化磁铁和线圈的布局。针对磁铁的布局, 很多学者通过增加磁铁的数目来获得更大的磁通量。GUPTA 等^[130]提出了一种多磁铁组合结构的悬架能量回收减振器, 采用同心的内外环形磁铁堆布局; ZUO 等^[131]采用永磁铁和高渗透磁环设计了一种四相数直线型电磁式减振器, 实验测试表明悬架振动速度均方根值在 0.25~0.5 m/s 范围内时能输出 16~64 W 的电功率; EBRAHIMI 等^[132]同样采用了一种同心内外环形磁铁堆布局, 如图 11 所示, 研究表明在环形磁铁之间放置垫片可以进一步增加输出功率; CHEN 等^[133]集成直线型电磁发电机首次提出了一种自感知自供电磁流变减振器。不过增加磁铁数量或层数的方法最大的不足就是会增加能量回收减振器的体积和重量, 不利于实际应用。

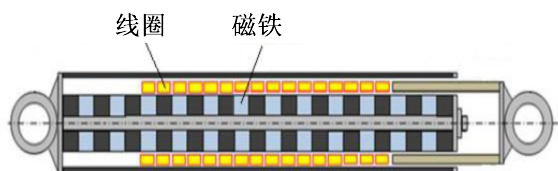


图 10 线性电磁发电机结构示意图^[129]

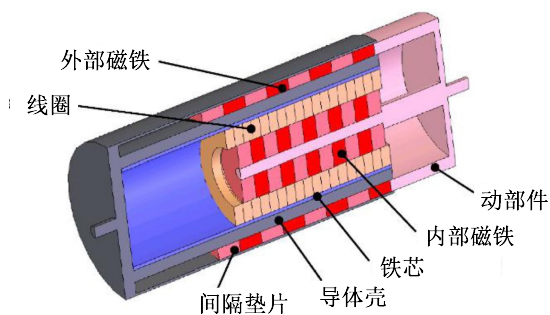


图 11 多层磁铁布局的线性电磁发电机^[132]

为了克服传统磁铁结构的不足, 1985 年 HALBACH^[134]提出了一种新的磁铁堆排列布局, 与传统磁铁堆不同, 该磁铁堆中相邻磁铁的磁化方向夹角为 90° , 这使得一侧的磁场强度得到大大增强, 而另一侧的磁场强度接近于 0, 从而在小体积下获得较大的磁场强度, 常称之为 Halbach 磁铁堆, 其空间布局包括平面和环形两种, 如图 12、13 所示。英国南安普顿大学 ZHU 等^[135-136]首次研究了基于平面状 Halbach 磁铁堆的振动能量收集方法, 仿真结果表明单层和双层 Halbach 磁铁堆分别提高了输出功率 40% 和 88%; LONG 等^[137]采用 Halbach 磁铁堆设计了一种悬架减振器, 获得了较好的阻尼性能; Kim 等^[138]

利用 Halbach 磁铁堆设计了一种六自由度主动式减振系统, 获得更大的控制制动力, 提高了减振器的能效; PRZYBYLSKI 等^[139]利用环形 Halbach 磁铁堆设计了一种可控的多层磁流变弹性体隔振器, 阻尼力增加了 148.72%。不过, Halbach 磁铁堆用于汽车悬架能量回收减振器的研究还较少。ZHANG^[140]尝试将 Halbach 磁铁堆引入到能量回收减振器的设计中, 采用有限元仿真分析了 Halbach 磁铁堆的布局对振动能量收集性能的影响; DUONG 等^[141]提出了一种新的 Halbach 磁铁堆, 并以此为基础设计了一种高性能的电磁式减振器, 在不增加体积的条件下输出功率提高了约 59.7%。另外, 对线圈布局而言, 线圈的匝数、层数、相位等对系统共振频率和品质因子也有直接影响, 进而影响阻尼性能和能量收集功率输出。TANG 等^[142]研究指出线圈相数越大, 产生的电能也越高。由以上可以看出, Halbach 磁铁堆在提高磁场强度和振动能量收集性能方面潜力很大, 如何结合汽车悬架振动环境开展其结构创新和优化设计仍值得继续深入研究。

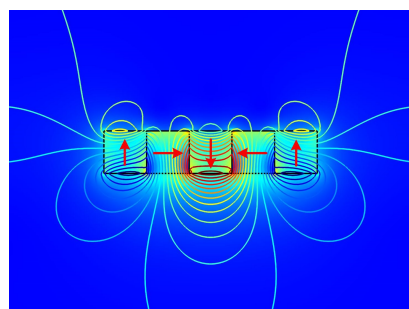


图 12 平面状 Halbach 磁铁堆示意图

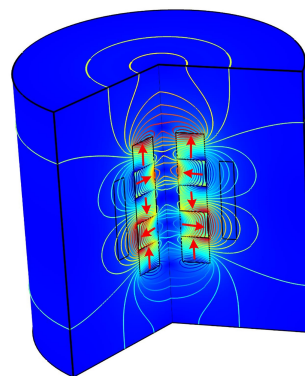


图 13 环形状 Halbach 磁铁堆示意图

对于直线型电磁式能量回收减振器来说, 实际应用中受空间和重量的限制, 通过优化磁铁和线圈的布局来增加其输出功率仍受到较大的局限性, 尤其是磁铁和线圈之间的相对运动速度主要依赖于车速和路面不平度, 导致在小幅低频路面激励下能量收集输出功率并不理想。

4.2.2 旋转型电磁式能量回收减振器

针对直线型电磁式能量回收减振器的不足, 人们研究了旋转型电磁式能量回收减振器, 它不是直接将

路面激励转化为磁铁和线圈之间的相对直线运动，而是采用不同的机理将直线运动转化为旋转运动，再驱动直流或交流发电机输出电能。旋转型结构最大的优点就是实现了运动放大功能，可以放大路面的输入激励，增加磁铁和线圈之间的相对速度，从而提高发电输出功率。目前，已有文献中提出的减振器运动转换机理主要包括液压式和机械式两种方式。

液压式运动转换器的基本原理是路面激励驱动减振器活塞上下运动将振动能转化为液压能，再通过液压调节放大机构驱动液压马达单向旋转并带动发电机工作。1990年，AOYAMA等^[143]率先研究了一种液压式主动悬架，使用油泵作为动力源产生压力来平衡路面激励力，被称之为能量回收减振器的雏形；美国麻省理工学院基于液压传动机理研制了一种能量

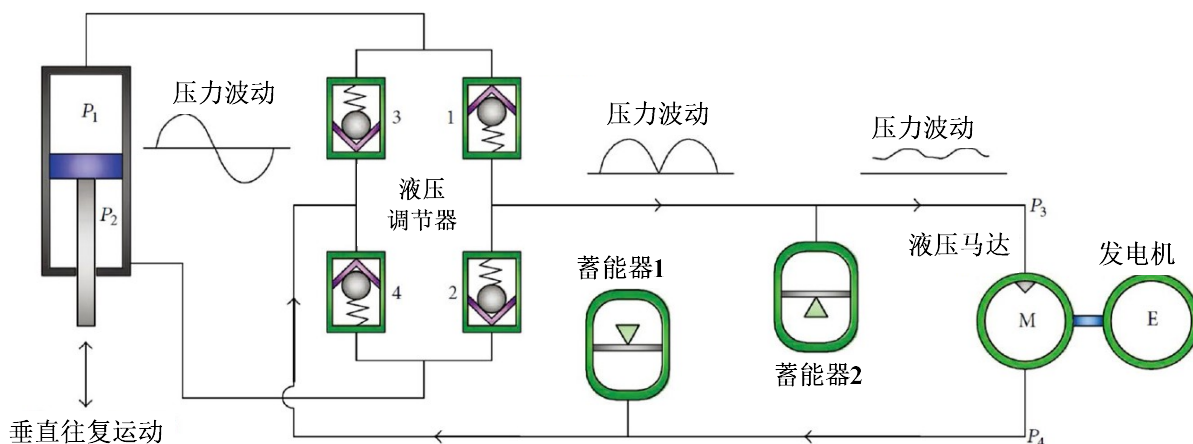


图 14 液压式运动转换器结构示意图

机械式运动转换器的基本原理是利用合适的机械结构将上下运动转换为单向的旋转运动并带动发电机工作，目前主要包括齿轮齿条、滚珠丝杆及其改进型结构。1996年，SUDA等^[148]率先提出了一种能量回收主动式悬架的概念，采用齿轮齿条结构将减振器直线运动转化为旋转运动，但是该结构并不合适用于汽车悬架；2013年，Zuo教授课题组^[149-150]采用齿轮齿条结构创新地提出了一种悬架能量回收减振器（图15），它采用锥齿轮离合器将路面激励引起的减振器双向振荡运动转化为单向的旋转运动，驱动直流发电机发电，该结构的最大优点是能放大路面位移激励，测试结果表明车速为15 km/h时能输出15 W的电能；GUO等^[151]和ZHANG等^[152]分别采用双超越离合器对文献[145]中齿轮齿条结构进行了进一步优化改进，使得可以同时实现激励放大和运动转换。另一种机械式运动转换器采用滚珠丝杆结构，如图16所示。2004年，Suda课题组利用滚珠丝杆结构设计了一种电磁式悬架减振器，并建立三自由度1/4汽车悬架模型对其频响特性进行了分析^[153-155]；FUKUMORI等^[156]基于滚珠丝杆结构研究了一种耦合式电磁悬架减振器，可以对悬架的平动和转动分别进行独立调

回收减振器，将汽缸往复运动转化为单向流体运动来驱动液压马达和直流发电机产生电能^[144]；WENDEL等^[145]研究了一种基于液压式能量回收减振器的汽车悬架，并对其振动阻尼和能量收集特性进行了仿真分析；FANG等^[146]设计并试制了一种液压式能量回收减振器（图14），分析了它的阻尼特性和能量收集特性，测试结果表明在幅值3 mm、频率10 Hz正弦激励下能收集200 W的电能；WANG等^[147]建立了正弦激励的液压式能量回收减振器的模型，对其性能进行了仿真分析和实验测试，结果表明在幅值25 mm、频率1 Hz正弦激励下能收集260 W的电能。液压式运动转换器的不足在于响应时间延迟大、液压回路体积较大、对密封的要求高等。

节；ZHANG等^[157]将滚珠丝杆结构与直流无刷电机相结合，设计了一种能量回收主动式悬架；LIU等^[158]使用一个滚珠丝杆结构和两个单向离合器提出了一种新的机械运动转换器，并以此为基础设计了能量回收减振器来替代传统的汽车悬架阻尼器，承担了能量收集器和可控阻尼器的双重角色。

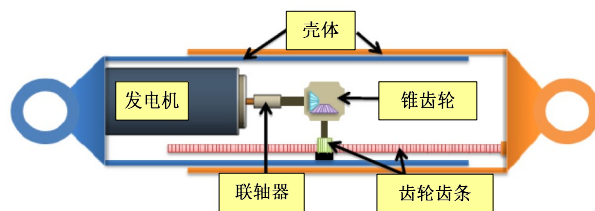


图 15 齿轮齿条能量回收减振器^[146]

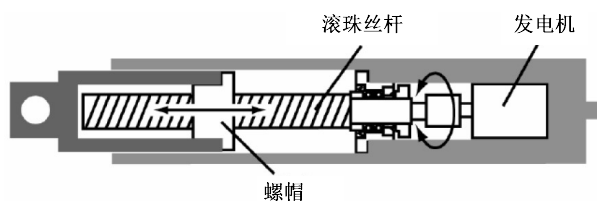


图 16 滚珠丝杆能量回收减振器

ERIKSSON 等^[159]对采用齿轮齿条和滚珠丝杆这两类能量回收减振器进行了比较,指出滚珠丝杆结构更简单使得减振器体积可以更小,且传动效率更高,因而更适合用于汽车悬架能量回收减振器。综合来看,旋转型电磁式能量回收减振器的不同运动转换机理对比如表 6 所示,液压式运动转换器抗冲击性更强、可靠性更高、承载能力更高,但传动效率较低、响应延迟较大;而机械式运动转换器传动效率更高、响应速度更快,但存在机械磨损、承载能力受限。

表 6 旋转型电磁式能量回收减振器对比

对 比	液压式运动转换	机械式运动转换	
		齿轮齿条	滚珠丝杆
优 点	可靠性较高; 抗冲击鲁棒性高; 承载能力较高。	传动效率较高; 响应速度较快; 体积适中。	低频传动效率较高; 响应速度较快; 结构更简单。
缺 点	传动效率不高; 响应延迟较大; 体积较大。	存在机械磨损; 长期可靠性一般; 承载能力受限。	高频传动效率较低; 存在机械磨损; 长期可靠性一般; 承载能力受限。

4.2.3 复合型电磁式能量回收减振器

为了集成不同类型电磁式能量回收减振器的优点来提高性能和可靠性,近年来人们开始研究复合型电磁式能量回收减振器。XIE 等^[160]研究了一种复合型能量回收减振器以产生足够的阻尼力来抑制振动,它由一个液压阻尼器和一个齿轮齿条电磁式发电机组成,如图 17 所示,工作原理是路面激励引起主活塞运动,产生的液体压力驱动次活塞上下运动,再通过齿轮齿条结构转化为旋转运动驱动发电机输出电能,它的优点是既提高了承载能力又具有较高转换效率;SATPUTE 等^[161]集成流体阻尼器、放大缸和电磁式发电机提出了一种复合型能量回收减振器,它的特点是利用流体放大运动来提高收集的电能,不需要齿轮;DEMETGUL 等^[162]集成液压式旋转型电磁式发电机和直线型电磁式发电机设计了一种复合型能量回收减振器,如图 18 所示,它的优点是既可以收集液压流体运动的能量,也可以收集直线运动的能量;SATPUTE 等^[163]集成液压式阻尼器和直线型电磁式发电机设计了一种新型的复合型能量回收减振器,它的优点是不使用齿轮就可以实现运动放大;TAGHAVIFAR^[164]将电磁式发电机与液压阻尼器并联研究了以种复合型能量回收减振器,通过 Monte Carlo 仿真估算出车速为 54 km/h 时能产生 48 W 的电能;KIDDEE^[165]还研究了能同时收集悬架和刹车系统振动能量的复合型电磁式能量回收减振器。可以看出,目前汽车悬架复合型能量回收减振器的研究处于起步阶段,公开发表的文献还比较少,未来仍有较大

的探索空间。

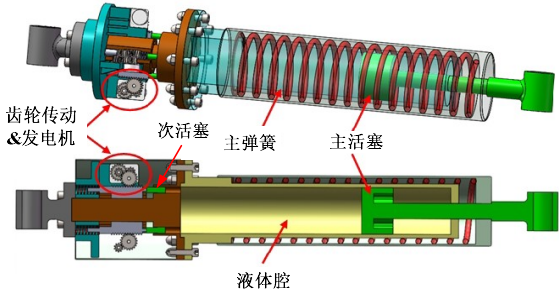


图 17 文献[160]复合型减振器示意图

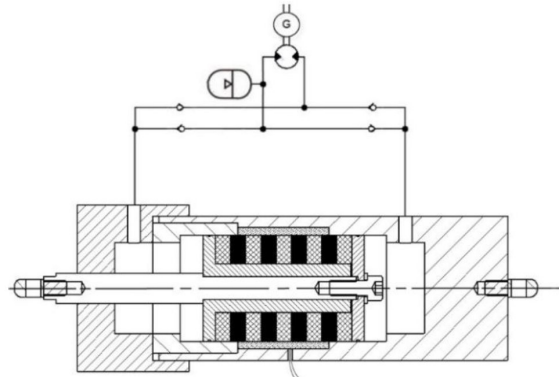


图 18 文献[162]复合型减振器示意图

4.3 汽车悬架振动抑制与能量收集协同控制

对传统汽车悬架来说,减振器阻尼力越小,乘坐舒适性和操纵稳定性会提高,但减小阻尼力的同时又会降低收集的电能,因此汽车悬架振动抑制与能量收集之间在性能上是相互冲突的。针对该问题,人们研究了相应的协同控制策略及其电路,目前主要是权衡协同控制,它的思想是使悬架振动抑制和能量收集这两个性能之间取得最优平衡,不能实现同时达到最优指标。

根据文献调研,已有的权衡协同控制策略可以概括为四大类。第一类是最优感应电能控制(Maximum induced power control, MIPC)策略,CASAVOLA 等^[166]针对能量回收悬架参数多目标优化问题,提出了一种 H_{∞} 控制策略使得能量收集性能达到最优,同时没有降低乘坐舒适性和操纵稳定性;进一步,CASAVOLA 等^[167]将能量回收悬架参数多目标优化问题转化为一个线性矩阵不等式,在此基础上提出了一种 MIPC 策略,并通过整车悬架模型验证了该方法较好地实现了能量收集与动力学特性之间的平衡,并在文献[168]中对 MIPC 策略进行了改进。第二类是半主动控制策略,DING 等^[169]研究了能量收集与振动抑制之间的关联关系,在此基础上提出了一种改进 Skyhook 控制策略,仿真分析和实验结果验证了该控制策略能有效实现能量收集与振动抑制之间的权衡;SHI 等^[170]综合 Skyhook 和 Groundhook 控制算法构建了一种半主动控制策略,设计了相应的控制电路,仿真结果表明该

方法在随机路面激励时能较好地平衡能量收集、乘坐舒适性和操纵稳定性三个指标。第三类是预测性控制策略, CLEMEN 等^[171]针对能量回收主动式悬架研究了两种模型预测性控制策略, 并采用 1/4 悬架模型进行了验证, 结果表明在能量收集、乘坐舒适性和操纵稳定性三个指标之间取得了最佳平衡; HAJIDAVALLOO 等^[172]提出了一种随机线性化预测控制方法, 使得保持乘坐舒适性和操纵稳定性的同时提高悬架能量收集的效率。第四类是模式开关(mode switch)控制策略, ZHENG 等^[173]针对电磁式能量回收悬架系统提出了一种电机和能量收集两模式开关控制方法, 仿真结果表明该策略较好地平衡了能量收集与乘坐舒适性; HSIEH 等^[174]设计了一种开关模式整流器, 能生成正阻尼比和负阻尼比, 并以此为基础提出了 Skyhook 控制策略, 使得在能量耗散、乘坐舒适性和操纵稳定性之间实现较好平衡; WU 等^[175]提出了一种新的智能多模式开关控制策略, 仿真结果表明该策略能显著改善乘坐舒适性, 同时也能收集较大的能量。

5 汽车悬架同步振动抑制与能量收集

未来展望探讨

5.1 当前面临的挑战分析

近二十年来, 以能量回收悬架为代表的汽车悬架同步振动抑制与能量收集无论在理论还是在工程方面均取得了快速发展, 但仍然面临很多技术挑战。特别是, 未来新能源汽车逐步替代燃油汽车将是大势所趋, 而新能源汽车的悬架结构特点也对同步振动抑制与能量收集提出了新的需求。综合起来, 汽车悬架同步振动抑制与能量收集面临的技术挑战可以概括为以下几点。

(1) 减小体积并提高收集能量/重量比。目前能量回收悬架大部分采用的是电磁式, 为了提高收集的电能, 对直线型电磁式能量回收减振器来说, 需要采用更复杂的线圈和磁铁布局; 而对旋转型电磁式能量回收减振器来说, 则需要增加运动转换机构。这些措施均明显增大了汽车悬架的体积和重量, 增加了额外能量消耗, 导致其自身收集能量/重量比较低, 这将限制能量回收悬架的商业推广应用。尤其是新能源汽车对悬架的体积和重量提出了更严格的要求, 迫切需要发展紧凑、高效率的能量回收悬架。

(2) 适应宽带低频路面激励。目前能量回收减振器在结构上很多是线性的, 研究中采用的振动激励也往往是正弦激励。线性能量回收减振器的不足在于它的共振频率窄, 且仅能在共振频率处才能收集最大的电能。而正弦激励并不符合真实的路面激励, 实际测

试数据表明路面激励频率范围一般为 1~30 Hz^[6], 具有典型的宽带低频特性; 特别是, 在 4~8 Hz 范围内人的内脏器官容易产生共振, 在 8~15 Hz 范围内, 人的脊椎系统容易受损伤。因此, 能量回收悬架迫切需要在宽带低频路面激励下具有良好性能。

(3) 自适应不同类型的路面激励。目前能量回收减振器的结构设计及其参数优化很多是基于给定的路面振动激励, 比如正弦激励或随机激励, 这就意味着优化后能量回收减振器仅能对单一或少数类型的路面激励才能发挥最佳性能, 然而实际中车辆行驶通过的路面可能是随机、多变的, 在这种情况下它难以保持良好的同步振动抑制与能量收集性能。因此, 能量回收悬架迫切需要能自适应不同的路面激励类型。

(4) 长期可靠且成本低。悬架是汽车的关键部件, 轻则影响乘坐舒适性, 重则影响行驶安全, 长期可靠运行是悬架系统的首要前提条件。实际中汽车经常在路上行驶, 其悬架需要长期承受不同类型路面的冲击, 特别是悬架减振器中使用的机械式运动转换器包含有齿轮、齿条等机械部件, 在周期性运动过程中会产生磨损, 可能引发裂纹、卡死等故障, 不仅影响能量收集效率, 更影响行驶安全。另外, 对于主动式悬架来说, 控制策略失效也可能导致阻尼力丧失, 带来安全隐患。因此, 迫切需要发展长期安全可靠且成本低的能量回收悬架。

(5) 独立协同控制。目前能量回收悬架在理论分析和结构优化中, 均认为振动抑制与能量收集之间是相互冲突的, 所采用的控制方法大多属于权衡协同控制策略, 这导致振动抑制与能量收集难以同时达到最优。为此, 能量回收悬架迫切需要能对振动抑制与能量收集进行独立协同控制, 使得能量收集输出电能最大的同时也能获得最佳的乘坐舒适性和操纵稳定性等。

5.2 未来可能发展方向探讨

为了应对上述挑战, 随着非线性理论、动力学建模、新型材料结构、新概念发电、自适应控制等领域的快速发展, 汽车悬架同步振动抑制与能量收集未来的发展方向可能包括以下六个方面。

(1) 非线性能量回收悬架。针对宽带低频的路面激励, 线性能量回收悬架已经表现出明显的不足, 引入非线性机理可以拓宽能量收集频带或提升频率来提高收集的电能, 尤其适合于随机路面振动激励。在理论上, 悬架的非线性主要来自于非线性阻尼或/和非线性刚度, YANG 等^[176]对非线性能量收集和非线性振动抑制分别进行了综述。近些年来, 一些新颖的非线性阻尼和非线性刚度思想在同步振动抑制与能量收集领域开始崭露头角。在非线性阻尼方面, 人们发现在传统调谐质量阻尼器中引入压电效应或电磁耦合可以同时实现振动抑制与能量收集, 比如,

GONZALEZ- BUELGA 等^[177]用电磁结构替代调谐质量阻尼器中的耗散阻尼,研究了一种具有能量收集和调频控制能力的电磁式减振器。但调谐质量阻尼器的不足在于有效工作频带很窄,且往往需要增加整体质量来提升性能,为此研究人员进一步在调谐质量阻尼器结构中引入惯容(Inerter)单元有效改善上述不足,比如,GIARALIS^[178]研究了一种基于惯容的动态减振器,能同时增强宽带随机激励下的振动控制和能量收集性能。在非线性能量阱的能量收集系统既可以抑制结构振动又可以收集结构的振动能量^[179-181]。尤其是近两年,准零刚度(Quasi-zero stiffness, QZS)在低频振动抑制与能量收集方面表现出强大应用潜力^[182-183],正成为研究热点。上述新的非线性刚度和非线性阻尼思想用于非线性能量回收悬架研究还很少^[184],值得深入研究。

(2) 超材料结构用于能量回收悬架。近些年来,超材料结构在减振降噪领域备受关注,它具备负刚度、负质量、负泊松比等特性,而且能产生振动带隙,可以广泛用于增强振动、噪声、电磁等能量的收集,CHEN 等^[185]也在国际上率先对基于超材料结构的能量收集进行了综述与展望。从理论角度来看,超材料结构与能量转换机理相结合为同步振动抑制与能量收集提供了新的技术途径,尤其是适合宽带低频振动。比如,ANIGBOGU 等^[186]设计了一种磁-机超材料结构用于同步振动抑制与能量收集,其晶胞单元由悬臂梁和永磁铁组成;BUKHARI 等^[187]研究了基于非线性超结构的同步振动抑制与能量收集;LU 等^[188]采用非线性能量收集器阵列设计了一种超材料结构,能实现用于同步振动抑制与能量收集。由此可见,超材料结构也有望用于研究能量回收悬架,尽管目前尚未见公开文献发表,但未来值得关注。

(3) 完整悬架-负载电路耦合建模。如前所述,目前汽车能量回收悬架的研究绝大多数是基于 1/4 悬架模型,仅考虑单个悬架的振动抑制与能量收集特性,且路面激励采用正弦假设。对实际汽车来说,这种简化无论是对振动抑制还是对能量收集都会引入较大偏差,这是因为单个悬架的动力学特性与其它悬架并不是独立的,仅用较少的自由度难以表征它们之间的强耦合关系。为此,未来的能量回收悬架优化分析更应该采用多自由度完整悬架模型,特别是还要考虑能量收集的电负载特性(比如动力电池充电),这使得构建“路面-车辆-悬架-电路”一体化集成模型将是一个重要研究方向。

(4) 振动抑制与能量收集双优化。如前所述,目前汽车能量回收悬架的研究将振动抑制和能量收集看成两个相互冲突的指标,主要工作聚焦在理论建模、控制算法、数值仿真、实验测试等方面^[189],通过分别牺牲振动抑制和能量收集的性能达到一种权

衡优化。因此,未来实现振动抑制与能量收集两个指标的双优化将是一个重要方向,可以考虑从以下三个方面去入手:一是机理研究,需要揭示同一悬架结构内部振动抑制和能量收集之间存在什么内在关联关系、振动抑制和能量收集性能如何受到结构约束等;二是构建复合型能量回收悬架结构,需要在揭示振动抑制和能量收集性能关联机理的基础上,从结构上实现振动抑制和能量收集的(准)解耦,设计新颖的复合型能量回收悬架;三是探索新的控制策略,实现悬架振动抑制与能量收集两个性能的独立协同控制。

(5) 路面预瞄自适应预测控制。如前所述,目前优化后能量回收减振器主要适用于单一或少数类型的路面激励,而对于未知路面激励难以发挥预期的最佳性能,因此研究能自适应路面激励的能量回收悬架是一个重要方向,可能的技术途径就是通过传感器提前获取路面的不平度信息,将其反馈给能量回收悬架系统以调整相应的控制策略参数。近年来,人们基于路面预瞄研究了主动式悬架系统,常采用相机或激光雷达实时采集路面信息。比如,CALISKAN 等^[190]评估了不同路面预瞄技术的准确性,并较早讨论了路面预瞄在悬架控制中的应用潜力;PAPADIMITRAKIS 等^[191]利用激光雷达传感器提前获取路面的不平度,针对主动式悬架系统提出了一种路面预瞄非线性模型预测控制策略。未来路面预瞄可以拓展用于研究能量回收悬架以自适应未知的路面^[192],特别是与 5G 技术相融合,有望催生出“云-端协同预测性控制”这一新的控制策略,值得后续深入研究。

(6) 轻量化小型化工程设计。纯电动汽车重量每降低 10 kg,续航里程可增加 2.5 km,因此汽车轻量化技术已经成为新能源汽车工业发展的重要方向之一。作为关键部件之一,未来的能量回收悬架工程设计也必须遵循轻量化小型化原则,可能的途径包括:一是探索和应用新的轻量化材料;二是要突破新机理,不断提高能量回收悬架的体积能量密度(单位体积收集的电能)。

6 结论

汽车悬架同步振动抑制与能量收集不仅可以有效抑制振动获得良好的乘坐舒适性和行驶平顺性,而且可以收集振动能量转化为电能反馈给汽车使用,对提高汽车的舒适性、安全性和能效等具有重要研究价值和应用前景,尤其是在新能源汽车领域大有用武之地。**该文**的主要贡献在于:① 回顾汽车悬架的发展历程,系统整理了汽车悬架分类及建模方法;② 系统归纳了被动式、半主动式和主动式三类悬架的优化方法和控制策略,分析了各自的优缺点;③ 系统梳

理了直接型、旋转型和复合型三种结构的电磁式能量回收减振器的研究进展, 分析了各自的优缺点; ④ 重点归纳了当前面临的五个技术挑战, 并提出了未来需要关注的六个可能发展方向。该文研究有助于国内同行快速准确地掌握本领域的技术现状, 有望为国内新型汽车悬架技术的发展提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] ISO8608. Mechanical vibration-road surface profiles-reporting of measured data[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1995.
- [2] ZHANG P S. Design of electromagnetic shock absorbers for energy harvesting from vehicle suspensions[D]. New York: Stony Brook University, 2010.
- [3] LAFARGE B, CAGIN S, CUREA O, et al. From functional analysis to energy harvesting system design: Application to car suspension[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2016, 10(1): 37-50.
- [4] 张勇超, 郑雪春, 喻凡, 等. 馈能式电动悬架的原理与试验研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(1): 48-52.
ZHANG Yongchao, ZHENG Xuechun, YU Fan, et al. Theoretical and experimental study on electrical energy-regenerative suspension[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(1): 48-52.
- [5] 郜浩楠, 徐俊, 蒲晓晖, 等. 面向新能源汽车的悬架振动能量回收在线控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4): 19-26.
GAO Haonan, XU Jun, PU Xiaohui, et al. An online control method for energy recovery of suspension vibration of new energy vehicles[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 19-26.
- [6] 周创辉, 文桂林. 基于改进型天棚阻尼控制算法的馈能式半主动油气悬架系统[J]. 振动与冲击, 2018, 37(14): 168-174.
ZHOU Chuanghui, WEN Guilin. Hydraulic-electrical energy regenerative semi-active hydro-pneumatic suspension system based on a modified skyhook damping control algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(14): 168-174.
- [7] LV X Y, JI Y J, ZHAO H Y, et al. Research review of a vehicle energy-regenerative suspension system[J]. Energies, 2020, 13: 441.
- [8] ABDELKAREEM M A A, XU L, ALI M K A, et al. Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review[J]. Applied Energy, 2018, 229: 672-699.
- [9] 陈士安, 何仁, 陆森林. 新型馈能型悬架及其工作原理[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 177-182.
CHEN Shian, HE Ren, LU Senlin. New reclaiming energy suspension and its working principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 177-182.
- [10] YU W, WANG R C, ZHOU R Z. A comparative research on the energy recovery potential of different vehicle energy regeneration technologies[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2543-2548.
- [11] ZHENG P, WANG R C, GAO J W. A comprehensive review on regenerative shock absorber systems[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2020, 8: 225-246.
- [12] ZHANG R, WANG X, JOHN S. A comprehensive review of the techniques on regenerative shock absorber systems[J]. Energies, 2018, 11: 1167.
- [13] 如何区分独立悬架和非独立悬架? [EB/OL]. 搜狐网站, 2021年11月4日. https://www.sohu.com/a/499144866_120012578.
- [14] OLLEY M. Independent wheel suspension—its whys and wherefores[J]. Society of Automotive Engineers Journal, 1934, 34(4): 73-81.
- [15] FEDERSPIEL-LABROSSE J M. Contribution of l'Etude et au Perfectionnement de la Suspension des Vehicules[J]. J. de la SIA, FISITA, 1954: 427-436.
FEDERSPIEL-LABROSSE J M. Contribution of the study and perfection of the suspension of vehicles[J]. Journal of the SIA, FISITA, 1954: 427-436.
- [16] CROSBY M, KARNOPP D. The active damper—a new concept in shock and vibration control[J]. Shock and Vibration Bulletin, 1973, 43: 119-133.
- [17] PAN H H. Nonlinear control for vehicle active suspension systems [D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2018.
- [18] EMANUELE G, TUDOR S, CHARLES W S, et al. Semi-active suspension control-improved vehicle ride and road friendliness[M]. London: Springer-Verlag, 2008.
- [19] HERMAN A H, SCHALK E. A comparison of quarter, half and full vehicle models with experimental ride comfort data[C]//Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 2015, DETC2015-47180.
- [20] VAISHNAV A, SARVAIYA M, DHABALIYA P, et al. Mathematical modelling and comparison of two degree of freedom suspension system of quarter car[J]. Imperial Journal of Interdisciplinary Research, 2016, 2(11): 128-137.
- [21] MANTARAS D A, LUQUE P. Ride comfort performance of different active suspension systems[J]. International Journal of Vehicle Design, 2006, 40(1-3): 106-125.
- [22] SHELKE G D, MITRA A C, VARUDE V R. Validation of simulation and analytical model of nonlinear passive vehicle suspension system for quarter car[J]. Materials Today-proceedings, 2018, 5(9): 19294-19302.
- [23] NAIK R D, SINGRU P M. Stability of a nonlinear quarter-car system with multiple time-delays[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2015, 20(2): 90-94.
- [24] IHSAN S I, AHMADIAN M, FARIS W F, et al. Ride performance analysis of half-car model for semi-active system using RMS as performance criteria[J]. Shock and

- Vibration, 2009, 16: 593-605.
- [25] BHAVE S Y, RAZDAN S. Optimization of air suspension system considering a half car model[C]//Proceedings of 6th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery, 2010: 780-789.
 - [26] GANDHI P, ADARSH S, RAMACHANDRAN B K I. Performance analysis of half car suspension model with 4 DOF using PID, LQR, FUZZY and ANFIS controllers[J]. Procedia Computer Science, 2017, 115: 2-13.
 - [27] SARDER M M, HOSSEIN M Z, CHOWDHURY H A, et al. Investigation of vibration on vehicle suspension system using half-car-model[J]. Advanced Materials Research, 2011, 199-200: 831-834.
 - [28] YANG Z Y, LIANG S, SUN Y S, et al. Vibration suppression of four degree-of-freedom nonlinear vehicle suspension model excited by the consecutive speed humps[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(6): 1560-1567.
 - [29] GUO L X, ZHANG L P. Vehicle vibration analysis in changeable speeds[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010: 802720, DOI: 10.1155/2010/802720.
 - [30] KIRLI A. Design and application of an active suspension system on a 6 DOF half vehicle model[C/CD]//Proceedings of the XXV International Conference on Information, Communication and Automation Technologies, 2015.
 - [31] KUMAR H, SHAMANTH V, GANGADHARAN K, et al. Study the dynamic behaviour of seven DOF of full car model with semi-active suspension system[J]. International Journal of Vehicle Performance, 2021, 7(1/2): 21-40.
 - [32] MONTAZERI-GH M, AZAD M K. Simulation of intelligent fuzzy-based active suspension system[C/CD] //Proceedings of the 13th European Simulation Symposium on Simulation in industry, 2001.
 - [33] KUMAR S, MEDHAVI A, KUMAR R. Modeling of an active suspension system with different suspension parameters for full vehicle[J]. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 2021, 28(2): 55-63.
 - [34] RIZVI S M H, ABID M, KHAN A Q, et al. H_{∞} Control of 8 degrees of freedom vehicle active suspension system[J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2018, 30(2): 161-169.
 - [35] SMITH W A, ZHANG N, HU W. Hydraulically interconnected vehicle suspension : Handling performance[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(1-2): 87-106.
 - [36] MORADI A, M NAFCHI A, GHANBARZADEH A, et al. Optimization of linear and nonlinear full vehicle model for improving ride comfort vs. road holding with the Bees Algorithm[C/CD]//Proceedings of IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering, 2011.
 - [37] HUANG B. An energy-regenerative vehicle suspension system- development, optimization, and improvement[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2016.
 - [38] GUO S J, LIU Y L, XU L, et al. Performance evaluation and parameter sensitivity of energy-harvesting shock absorbers on different vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(7): 1-25.
 - [39] ELMADANY M M, EL-TAMIMI A. On a subclass of nonlinear passive and semi-active damping for vibration isolation[J]. Computers & Structures, 1990, 36: 921-931.
 - [40] KALYAN RAJ A H, ANAND S, DHANUSHKODI D M. Engineering a passive non-linear automobile suspension [C]//Proceedings of International Conference on Computer Aided Engineering, 2007: 1-16.
 - [41] KALYAN RAJ, C PADMANABHAN A H. A new passive non-linear damper for automobiles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2009, 223: 1435.
 - [42] AJIT G M, ANIRBAN C M. Development of linear and non-linear vehicle suspension model[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5: 4317-4326.
 - [43] MITRA A C, DESAIB G J, PATWARDHAN S R, et al. Optimization of passive vehicle suspension system by genetic algorithm[J]. Procedia Engineering, 2016, 144: 1158-1166.
 - [44] SHIRAHATTI A, PRASAD P S S, PRAVIN P, et al. Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2008, 30(1): 66-76.
 - [45] GUNDOGDU O. Optimal seat and suspension design for a quarter car with driver model using genetic algorithms[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007, 37: 327-332.
 - [46] GADHVIA B, SAVSANI V, PATEL V. Multi-objective optimization of vehicle passive suspension system using NSGA-II, SPEA2 and PESA-II[J]. Procedia Technology, 2016, 23: 361-368.
 - [47] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6: 182-197.
 - [48] ZITZLER E, LAUMANN S, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization[C]//Proceedings of the EUROGEN'2001, 2001: 95-100.
 - [49] CORNE D W, JERRAM N R, KNOWLES J D, et al. PESA-II : Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization[C]//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2001, 1-8.
 - [50] KUO Y P, PAI N S. Design of nonlinear passive suspension system using an evolutionary programming[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 96: 012092.
 - [51] ISSA M, SAMN A. Passive vehicle suspension system optimization using Harris Hawk Optimization algorithm[J]. Mathematics and Computers in Simulation,

- 2022, 191: 328-345.
- [52] CHEN D N, ZHANG R X, YAO C Y, ZHAO Z Y. Dynamic topology multi force particle swarm optimization algorithm and its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(1): 124-135.
- [53] 陈无畏, 王启瑞, 朱婉玲. 基于遗传算法和 H_∞ 控制的悬架系统集成设计[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 143-148.
CHEN Wuwei, WANG Qirui, ZHU Wanling. Integrated structure-control design for a suspension system based on genetic algorithm and H_∞ control[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(2): 143-148.
- [54] 程美英, 倪志伟, 朱旭辉. 萤火虫优化算法理论研究综述[J]. 计算机科学, 2015, 42(4): 19-24.
CHENG Meiyang, NI Zhiwei, ZHU Xuhui. Overview on glowworm swarm or firefly algorithm[J]. Computer Science, 2015, 42(4): 19-24.
- [55] SAVARESI S M, POUSSOT-VASSAL C, SPELTA C, et al. Semi-active suspension control design for vehicles[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010.
- [56] CODECA F, SAVARESI S M, SPELTA C, et al. Identification of an electro-hydraulic controllable shock absorber using black-block non-linear models[C/CD] //Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, 2008.
- [57] YAO G Z, YAP F F, CHEN G, et al. MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system[J]. Mechatronics, 2002, 12(7): 963-973.
- [58] YU M, LIAO C R, CHEN W M, et al. Study on MR semi-active suspension system and its road testing[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(8-9): 801-806.
- [59] YANG J, NING D, SUN, et al. A semi-active suspension using a magnetorheological damper with nonlinear negative-stiffness component[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107071.
- [60] JUAN C T M, DIANA H A, LUIS A B, et al. Magneto-rheological dampers-model influence on the semi-active suspension performance[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(10): 28 105030.
- [61] OH J S, JEON K G, KIM G W, et al. Dynamic analysis of semi-active MR suspension system considering response time and damping force curve[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2021, 32(13): 1462-1472.
- [62] TRIKANDÉ M W, RAJAMOHAN V. MR damper characterization for implementation of semi-active suspension control[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2016, 9(30): 1-11.
- [63] SALUNKHE H P, SADALE S B, THIKANE S. Mathematical modeling of electrorheological damper in semi-active suspension[J]. Mathematical Sciences International Research Journal, 2018, 7(5): 67-74.
- [64] PETEK N K, ROMSTADT D J, LIZELL M B, et al. Demonstration of an automotive semi-active suspension using electrorheological fluid[J]. SAE Transactions on Journal of Passenger Cars, 1995, 104: 987-992.
- [65] WU X M, WONG J, STURK M, et al. Simulation and experimental study of a semi-active suspension with an electrorheological damper[J]. International Journal of Modern Physics B, 1994, 8(20): 2987-3003.
- [66] SUH M S, YEO M S. Development of semi-active suspension systems using ER fluids for the wheeled vehicle[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(9): 743-747.
- [67] ZHAO X, ZHANG Y X. Electrorheological damper and its application for semi active suspension system[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2007, 16(1): 9-12.
- [68] WONG J Y, WU X M, STURK M, et al. On the applications of electro-rheological fluids to the development of semi-active suspension systems for ground vehicles[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 1993, 17(4B): 789-800.
- [69] EMURA J, KAKIZAKI S, YAMAOKA F, et al. Development on the semi-active suspension system based on the sky-hook damper theory[J]. SAE Transactions on Journal of Passenger Cars, 1994, 103(6): 1110-1119.
- [70] KARNOPP D, CROSBY M J, HARWOOD R A. Vibration control using semi-active force generators[J]. Journal of Engineering for Industry, 1974, 96(2): 619-626.
- [71] SAMMIER D, SENAME O, DUGARD L. Skyhook and control of active vehicle suspensions: Some practical aspects[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 39(4): 279-308.
- [72] SAVARESI S M, SILANI E, BITTANTI S. Acceleration-driven-damper (ADD): An optimal control algorithm for comfort-oriented semiactive suspensions[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2005, 127(2): 218-229.
- [73] SAVARESI S M, SPELTA C. Mixed sky-hook and ADD: Approaching the filtering limits of a semi-active suspension[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2007, 129(4): 382-392.
- [74] SAVARESI S M, SPELTA C. A single-sensor control strategy for semi-active suspensions[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(1): 143-152.
- [75] KOO J. Using magneto-rheological dampers in semiactive tuned vibration absorbers to control structural vibrations[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [76] KOO J, AHMADIAN H, SETAREH M, et al. In search of suitable control methods for semi-active tuned vibration absorbers[J]. Journal of Vibration and Control, 2004, 10(2): 163-174.
- [77] DÍAZ-CHOQUE C S, FÉLIX-HERRÁN L C, RAMÍREZ-MENDOZA R A. Optimal skyhook and

- groundhook control for semiactive suspension: A comprehensive methodology[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: Article ID 8084343.
- [78] AHMADIAN M. A hybrid semiactive control for secondary suspension applications[C]//Proceedings of the 6th ASME Symposium on Advanced Automotive Technologies, 1997, IMECE1997-0464.
- [79] AHMADIAN M, VAHDATI N. Transient dynamics of semiactive suspensions with hybrid control[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(2): 145-153.
- [80] DYKE S J. Acceleration feedback control strategies for active and semi-active systems: modelling, algorithm development and experimental verification[D]. South Bend: University of Notre Dame, 1996.
- [81] BREZAS P, SMITH M C, HOULTB W. A clipped-optimal control algorithm for semi-active vehicle suspensions: Theory and experimental evaluation[J]. Automatica, 2015, 53(3): 188-194.
- [82] DU H, SZE K, LAM J. Semi-active H_∞ control with magneto-rheological dampers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3-5): 981-996.
- [83] ANTON G, ALEXANDER S. Neural network controller for semi-active suspension systems with road preview[D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2019.
- [84] GIORGETTI N, BEMPORAD A, TSENG H, et al. Hybrid model predictive control application toward optimal semi-active suspension[J]. International Journal of Control, 2006, 79(5): 521-533.
- [85] JONASSO M, ROOSC F. Design and evaluation of an active electromechanical wheel suspension system[J]. Mechatronics, 2008, 18(4): 218-230.
- [86] GAY F, COUDERT N, RIFQI I, et al. Development of hydraulic active suspension with feedforward and feedback design[J]. SAE Transactions on Journal of Passenger Cars, 2000, 109(6): 115-122.
- [87] GRAF C, KIENEKE R, MAAS J. Pneumatic push-pull actuator for an active suspension[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(18): 606-613.
- [88] GYSEN B L J, JANSSEN J L G, PAULIDES J J T, et al. Design aspects of an active electromagnetic suspension system for automotive applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1589-1597.
- [89] RIDUAN A F M, TAMALDIN N, SUDRAJAT A, et al. Review on active suspension system[J]. SHS Web of Conferences, 2018, 49: 02008.
- [90] HROVAT D. Applications of optimal control to advanced automotive suspension design[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1993, 115(2B): 328-342.
- [91] ULISOY A G, HROVAT D, TSENG T. Stability robustness of LQ and LQG active suspensions[J]. Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1994, 116(1): 123-131.
- [92] YAMASHITA M, FUJIMORI K, HAYAKAWA K, et al. Application of H_∞ control to active suspension systems[J]. Automatica, 1994, 30(11): 1717-1729.
- [93] KIM C, RO P I. A sliding mode controller for vehicle active suspension systems with non-linearities[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 1998, 212(2): 79-92.
- [94] HUANG Y B, NA J N, WU X, et al. Adaptive control of nonlinear uncertain active suspension systems with prescribed performance[J]. ISA Transactions, 2015, 54: 145-155.
- [95] YAGIZ N, HACIOGLU Y. Backstepping control of a vehicle with active suspensions[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(12): 1457-1467.
- [96] KLOCKIEWICZ Z, SLASKI G. The method of estimating kinematic road excitation with use of real suspension responses and model[J]. Vibrations in Physical Systems, 2019, 30: 2019214.
- [97] ABID H J, CHEN J, NASSAR A A. Equivalent air spring suspension model for quarter-passive model of passenger vehicles[J]. International Scholarly Research Notices, 2015: 974020. doi: 10.1155/2015/974020.
- [98] MITRA A C, RAJPUT A, SATISHV, et al. Development and analysis of passive suspension model with half sine wave road bump for different suspension parameters[J]. AIP Conference Proceedings, 2022, 2469: 020023.
- [99] MELCER J. Numerical simulation of random profile of the road surface[J]. AIP Conference Proceedings, 2020, 2293: 130004.
- [100] ZUO L, ZHANG P S. Energy harvesting ride comfort and road handling of regenerative vehicle suspensions[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2013, 135(1): 1-8.
- [101] PETER M. Energy harvesting potential of automobile suspension[J]. Vehicle System Dynamics, 2016(54): 12, 1651-1670.
- [102] ZHANG Y X, GUO K H, WANG D, et al. Energy conversion mechanism and regenerative potential of vehicle suspensions[J]. Energy, 2017, 119: 961-970.
- [103] KHOSHNOUD F, ZHANG Y, SHIMURA R, et al. Energy regeneration from suspension dynamic modes and self-powered actuation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2513-2524.
- [104] SULTONI A I, SUTANTRA I N, PRAMONO A S. Modeling, prototyping and testing of regenerative electromagnetic shock absorber[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 493: 395-400.
- [105] WEI C, TAGHAVIFAR H. A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system: Half vehicle model[J]. Energy, 2017, 134: 279-288.
- [106] LAFARGE B, CAGIN S, CUREA O, et al. From functional analysis to energy harvesting system design: Application to car suspension[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2016, 10(1): 37-50.
- [107] ABDELKAREEM M A A, XU L, GUO X, et al. Energy harvesting sensitivity analysis and assessment of the

- potential power and full car dynamics for different road modes[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 110: 307-332.
- [108] KHOSHNOUD F, ZHANG Y, SHIMURA R, et al. Energy regeneration from suspension dynamic modes and self-powered actuation[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, 2015, 20(5): 2513-2524.
- [109] HUANG B, HSIEH C Y, GOLNARAGHI F, et al. Development and optimization of an energy regenerative suspension system under stochastic road excitation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 357: 16-34.
- [110] WANG R, GU F, CATTLEY R, et al. Modelling, testing and analysis of a regenerative hydraulic shock absorber system[J]. *Energies*, 2016, 9(5): 386-410.
- [111] LI Z J, ZUO L, LUHRS G, et al. Electromagnetic energy-harvesting shock absorbers: design, modeling, and road tests[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(3): 1065-1074.
- [112] GILL C, KNIGHT C, MCGARRY S. Measured power dissipation of shock absorbers on light and heavy commercial vehicles[J]. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2014, 7(2): 718-725.
- [113] MOHAMED A A A, XU L, ALI M K A, et al. Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 672-699.
- [114] ALJADIRI R T, TAHA L Y, IVEY P. Electrostatic energy harvesting systems: A better understanding of their sustainability[J]. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2017, 5(5): 409-416.
- [115] LIANG H T, HAO G B, OLSZEWSKIA O Z. A review on vibration-based piezoelectric energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331: 112743.
- [116] WANG Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 9533-9557.
- [117] IBRAHIM P, ARAFA M, ANIS Y. An electromagnetic vibration energy harvester with a tunable mass moment of inertia[J]. *Sensors*, 2021, 21: 5611.
- [118] NAITO Y, UENISHI K. Electrostatic MEMS vibration energy harvesters inside of tire treads[J]. *Sensors*, 2019, 19(4): 890.
- [119][112] XIAO H, WANG X, JOHN S. A dimensionless analysis of a 2DOF piezoelectric vibration energy harvester[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 58: 355-375.
- [120] LEE H, JANG H, PARK J, et al. Design of a piezoelectric energy-harvesting shock absorber system for a vehicle[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2013, 141(1): 32-44.
- [121] XIE X, WANG Q. Energy harvesting from a vehicle suspension system[J]. *Energy*, 2015, 86: 385-392.
- [122] BENHIBA A, BYBI A, ALLA R, et al. Investigation of vibrations energy harvesting from passive car suspension using quarter car model under bump excitation[C] // *Proceedings of International Conference on Energy and Green Computing*, 2022: 00053.
- [123] CABAN J, LITAK G, AMBROŹKIEWICZ B, et al. Possibilities of energy harvesting from the suspension system of the internal combustion engine in a vehicle[J]. *Communications*, 2021, 23(2): 106-116.
- [124] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1: 328-334.
- [125] RATHORE S, HARMAS S, SWAIN B P, et al. A critical review on triboelectric nanogenerator[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 377: 012186.
- [126] ASKARI H, HASHEMI E, KHAJEPOUR A, et al. Towards self-powered sensing using nanogenerators for automotive systems[J]. *Nano Energy*, 2018, 53: 1003-1019.
- [127] KANG M, KIM T Y, SEUNG W, et al. Cylindrical free-standing mode triboelectric generator for suspension system in vehicle[J]. *Micromachines*, 2019, 10(1): 17.
- [128] HU Y Q, WANG X L, QIN Y C, et al. A robust hybrid generator for harvesting vehicle suspension vibration energy from random road excitation[J]. *Applied Energy*, 2022, 309: 118506.
- [129] 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: 637-646.
- [130] GUPTA A, JENDRZEJCZYK J A, MULCAHY T M, et al. Design of electromagnetic shock absorbers[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2006, 3: 285-291.
- [131] ZUO L, SCULLY B, SHESTANI J, et al. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19: 045003.
- [132] EBRAHIMI B, BOLANDHEMMAT H, KHAMESEE M B, et al. A hybrid electromagnetic shock absorber for active vehicle suspension systems[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2011, 49: 311-332.
- [133] CHEN C, LIAO W H. A self-powered, self-sensing magnetorheological damper[C/CD]// *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2010.
- [134] HALBACH K. Permanent magnets for production and use of high energy particle beams[C/CD]// *Proceedings of the 8th International Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications*, 1985: 16085755.
- [135] ZHU D, BEEBY S, TUDOR J, et al. Vibration energy harvesting using the halbach array[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21: 075020.
- [136] ZHU D, BEEBY S, TUDOR J, et al. Increasing output power of electromagnetic vibration energy harvesters using improved halbach arrays[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 203: 11-19.

- [137] LONG Z, HE G, XUE S. Study of EDS & EMS hybrid suspension system with permanent-magnet halbach array[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47: 4717-4724.
- [138] KIM M H, KIM H Y, KIM H C, et al. Design and control of a 6-DOF active vibration isolation system using a halbach magnet array[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(4): 2185-2196.
- [139] PRZYBYLSKI M, SUN S S, LI W H. Development and characterization of a multi-layer magnetorheological elastomer isolator based on a Halbach array[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(10): 105015.
- [140] ZHANG P S. Design of electromagnetic shock absorbers for energy harvesting from vehicle suspensions[D]. New York: Stony Brook University, 2010.
- [141] DUONG M T, CHUN Y D, HONG D K. Design of a high-performance 16-slot 8-pole electromagnetic shock absorber using a novel permanent magnet structure[J]. Energies, 2018, 11(12): 3352.
- [142] TANG X, LIN T, ZUO L. Design and optimization of a tubular linear electromagnetic vibration energy harvester[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19: 615-622.
- [143] AOYAMA Y, KAWABATE K, HASEGAWA S, et al. Development of the full active suspension by Nissan[R]. SAE Technical Paper 901747, 1990.
- [144] AVADHANY S N. Analysis of hydraulic power transduction in regenerative rotary shock absorbers as function of working fluid kinematic viscosity[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [145] WENDEL G R, STECKLEIN G L. A regenerative active suspension system[R]. SAE Technical Paper 910659, 1991.
- [146] FANG Z, GUO X, XU L, ZHANG H. Experimental study of damping and energy regeneration characteristics of a hydraulic electromagnetic shock absorber[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 5: 943528.
- [147] WANG R, GU F, CATTLEY R, et al. Modelling, testing and analysis of a regenerative hydraulic shock absorber system[J]. Energies, 2016, 9: 386.
- [148] SUDA Y, SHIIBA T. A new hybrid suspension system with active control and energy regeneration[J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 25(1): 641-654.
- [149] LI Z, ZUO L, KUANG J, et al. A motion rectifier based energy harvesting shock absorbers[C/CD]//Proceedings of the 2012 Design Engineering Conference, 2012.
- [150] LI P, ZUO L. Assessment of vehicle performances with energy-harvesting shock absorbers[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2013, 6(1): 18-27.
- [151] ZHANG Z, ZHANG X, CHEN W, et al. A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle[J]. Applied Energy, 2016, 178: 177-188.
- [152] GUO S, LIU Y, XU L, et al. Performance evaluation and parameter sensitivity of energy-harvesting shock absorbers on different vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54: 918-942.
- [153] NAKANO K, SUDA Y. Combined type self-powered active vibration control of truck cabins[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(6): 449-473.
- [154] KAWAMOTO Y, SUDA Y, INOUE H, et al. Modeling of electromagnetic damper for automobile suspension[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2007, 1: 524-535.
- [155] KAWAMOTO Y, SUDA Y, INOUE H, et al. Electro-mechanical suspension system considering energy consumption and vehicle manoeuvre[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46: 1053-1063.
- [156] FUKUMORI Y, HAYASHI R, MATSUMI R, et al. Study on independent tuning damping characteristic by coupling of electromagnetic dampers for automobiles[R]. SAE Technical Paper 01487191, 2015.
- [157] ZHANG Y, HUANG K, YU F, et al. Experimental verification of energy-regenerative feasibility for an automotive electrical suspension system[C/CD]//Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2007.
- [158] LIU Y, XU L, ZUO L. Design, modeling, lab and field tests of a mechanical-motion-rectifier-based energy harvester using a ball-screw mechanism[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22: 1933-1943.
- [159] ERIKSSON J, PIROTI S. Review of methods for energy harvesting from a vehicle suspension system[R]. Royal Institute of Technology in Stockholm, 2016.
- [160] XIE L, LI J, CAI M. Design of a hybrid energy-harvesting shock absorber[C/CD]//Proceedings of the International Forum on Energy, Environment Science and Materials, 2015.
- [161] SATPUTE N V, SATPUTE S N, JUGULKAR L M. Hybrid electromagnetic shock absorber for energy harvesting in a vehicle suspension[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(8): 1500-1517.
- [162] DEMETGUL M, GUNEY I. Design of the hybrid regenerative shock absorber and energy harvesting from linear movement[J]. Journal of Clean Energy Technologies, 2017, 5(1): 81-84.
- [163] SATPUTE N, IWANIEC M, RAMESH N, et al. Energy harvesting shock absorber with linear generator and mechanical motion amplification[J]. Vibrations in Physical Systems, 2020, 31: 2020104.
- [164] TAGHAVIFAR H. A novel energy harvesting approach for hybrid electromagnetic-based suspension system of off-road vehicles considering terrain deformability[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 106988.
- [165] KIDDEE K. Hybrid energy harvesting system based on regenerative braking system and suspension energy

- harvesting for middle electric vehicle[J]. Journal of Engineering and Technology, 2020, 8(2): 29-38.
- [166] CASAVOLA A, IORIO F DI, TEDESCO F. A multiobjective H_∞ control strategy for energy harvesting in regenerative vehicle suspension systems[J]. International Journal of Control, 2018, 91: 741-754.
- [167] CASAVOLA A, TEDESCO F, VAGLICA P. H_2 and H_∞ and optimal control strategies for energy harvesting by regenerative shock absorbers in cars[J]. Vibration, 2020, 3: 99-115.
- [168] CASAVOLA A, DI IORIO F, TEDESCO F. Gain-scheduling control of electromagnetic regenerative shock absorbers for energy harvesting by road unevenness[C/CD]//Proceedings of the 2014 IEEE American Control Conference, 2014.
- [169] DING R, WANG R C, MENG X P, et al. Study on coordinated control of the energy regeneration and the vibration isolation in a hybrid electromagnetic suspension[J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(11): 1530-1539.
- [170] SHI D H, CHEN L, WANG R C, et al. Research on energy-regenerative performance of suspension system with semi-active control[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2019, 7: 465-475.
- [171] CLEMEN L, ANUBI O M, MARGOLIS D. On the regenerative capabilities of electrodynamic dampers using bond graphs and model predictive control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2016, 138: 051006.
- [172] HAJIDAVALLOO M R, COSNER J, LI Z J, et al. Simultaneous suspension control and energy harvesting through novel design and control of a new nonlinear energy harvesting shock absorber[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, DOI: 10.1109/TVT.2022.3159734, 2022.
- [173] ZHENG X C, YU F, ZHANG Y C. A novel energy-regenerative active suspension for vehicles[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 13: 184-188.
- [174] HSIEH C Y, HUANG B, GOLNARAGHI F, et al. Regenerative skyhook control for an electromechanical suspension system using a switch mode rectifier[J]. Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9642-9650.
- [175] WU H, ZHENG L. A novel and intelligent multi-mode switching control strategy for active suspension systems with energy regeneration[J]. Vibration Engineering for Sustainable Future, 2020: 21-28.
- [176] YANG T, ZHOU S X, FANG S T, et al. Nonlinear vibration energy harvesting and vibration suppression technologies: Designs, Analysis, and Applications[J]. Applied Physics Reviews, 2021, 8: 031317.
- [177] GONZALEZ-BUELGA A, CLARE L R, NEILD S A, et al. An electromagnetic vibration absorber with harvesting and tuning capabilities[J]. Structural Control Health Monitoring, 2015, 22: 1359-1372.
- [178] GIARALIS A. An inerter-based dynamic vibration absorber with concurrently enhanced energy harvesting and motion control performances under broadband stochastic excitation via inertance amplification[J]. Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, 2021, 7(1): 010909.
- [179] KREMER D, LIU K. A nonlinear energy sink with an energy harvester: Harmonically forced responses[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 410: 287-302.
- [180] XIONG L, TANG L, LIU K, et al. Broadband piezoelectric vibration energy harvesting using a nonlinear energy sink[J]. Journal of Physics D, 2018, 51: 185502.
- [181] PENNISI G, MANN B P, NACLERIO N, et al. Design and experimental study of a nonlinear energy sink coupled to an electromagnetic energy harvester[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 437: 340-357.
- [182] WANG K, OUYANG H J, ZHOU J X, et al. A nonlinear hybrid energy harvester with high ultralow-frequency energy harvesting performance[J]. Meccanica, 2021, 56: 461-480.
- [183] YANG T, CAO Q J, HAO Z F. A novel nonlinear mechanical oscillator and its application in vibration isolation and energy harvesting[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 155: 107636.
- [184] ZENG Y C, DING H, DU R H, et al. A suspension system with quasi-zero stiffness characteristics and inerter nonlinear energy sink[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(1-2): 143-158.
- [185] CHEN Z S, GUO B, YANG Y M, et al. Metamaterials-based enhanced energy harvesting: A review[J]. Physica B: Condensed Matter, 2014, 438: 1-8.
- [186] ANIGBOGU W, BARDAWEEL H. A metamaterial-inspired structure for simultaneous vibration attenuation and energy harvesting[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 4063025.
- [187] BUKHARI M, BARRY O. Simultaneous energy harvesting and vibration control in a nonlinear metastructure: A spectro-spatial analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 473: 115215.
- [188] LU Z Q, ZHAO L, DING H, et al. A dual-functional metamaterial for integrated vibration isolation and energy harvesting[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 509: 116251.
- [189] WANG J Q. Simultaneous vibration suppression and energy harvesting: Damping optimization for performance limit[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132: 609-621.
- [190] CALISKAN K, HENZE R, KUCUKAY F. Potential of road preview for suspension control under transient road inputs[J]. IFAC-Papers on line, 2016, 49(3): 117-122.
- [191] PAPADIMITRAKIS M, ALEXANDRIDIS A. Active vehicle suspension control using road preview model

predictive control and radial basis function networks[J]. Applied Soft Computing, 2022, 120: 108646.

- [192] 陈长征, 王 刚, 于慎波. 考虑时变输入时滞及频段约束的车辆主动悬架预瞄控制[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 124-131.

CHEN Changzheng, WANG Gang, YU Shenbo. Preview control of vehicle active suspensions with time-varying input delay and frequency band constraints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 124-131.

作者简介: 陈仲生(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 特聘教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为振动能量收集、状态监控与故障诊断等。

E-mail: chenzs@czu.cn

曹军义, 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为振动能量俘获的智能结构与非线性动力学、智能柔性机构与仿生机器人的精密驱动与控制等。

E-mail: caojy@mail.xjtu.edu.cn

秦朝烨, 男, 1980 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为振动分析与控制、旋转机械动力学与故障诊断、航天器动力学与缓冲设计、振动能量俘获等。

E-mail: qinzy@tsinghua.edu.cn

陈志文, 男, 1998 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为非线性电磁式振动能量收集。

E-mail: 932024625@qq.com

Yeping Xiong, 女, 1959 年出生, 博士, 副教授, 博士生导师。主要研究方向为非线性振动分析、流固耦合分析、振动能量收集等。

E-mail: Y.Xiong@soton.ac.uk