

随机环境下新能源汽车能量回收装置的研究

张恩惠, 赵洪星

(东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:对于高耗能且现在数量不断增长的新能源汽车来说,如何确定随机情况下汽车各部分具体的振动情况,从而合理的选择与压电能量回收装置进行配合来回收振动能量成为前沿研究课题,应用强大的动力学分析软件,采用白噪声输入激励,对整车进行随机路面行驶仿真分析,得到当汽车行驶在 H 级国际标准路面时,汽车左前悬下悬臂的振动较强,最大振幅为 3.5 mm,应用经典压电悬臂梁进行有限元分析得出当在自由端输入 3 mm 的位移载荷时,压电片最高可产生 3 V 电压。合理设计压电悬臂梁与汽车左前悬下悬臂的结合。振动回收的电足够为汽车小型低功率用电器供电。

关键词:新能源汽车;随机振动;压电材料;动力学分析;路面功率谱密

中图分类号:TM910;TH16

文献标识码:A

Research on Energy Recovery Device of New Energy Vehicles in Random Environment

ZHANG Enhui, ZHAO Hongxing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: For new energy vehicles, the high energy consumption is growing, how to determine the vibration of each parts of a car and perform a reasonable choice for cooperating the piezoelectric energy recovery device to reclaim vibration energy has become a hot research topic. By using the strong dynamics analysis software and the white noise input, the random vehicle road simulation analysis was carried out. When the vehicle is running at the H level of international standard road, the car left front suspension under the vibration of the cantilever is strong, the maximum amplitude is up to 3.5 mm. The classical finite element analysis of the piezoelectric cantilever shows that when the input displacement is 3 mm of load at the free end, the piezoelectric plate can produce 3 V voltage. By reasonable design of the combination of the piezoelectric cantilever and the cantilever of the left front of the vehicle, the vibration recovery of electric energy is enough for the car small power low power supply.

Key words: new energy vehicles; random vibration; piezoelectric materials; dynamic analysis; road surface power spectrum density

0 引言

当前新能源汽车的数量和性能处于高速发展中,研究和应用新能源汽车也是保护环境和实行可持续发展的重要举措,而随着压电材料正压电效应的发现,使得回收新能源汽车在行驶过程中所伴随的振动成为可能,也是当下国内外学者前沿研究课题之一。Lin Jitzuoh 等^[1]提出了一种提高随机状况下压电悬臂梁输出电压的方法,采用磁力耦合力和压电悬臂梁的有机结合使输出电压提高 50%;Amini Y 等^[2]构建了在随机环境下,压电功能悬臂梁在时域和频域两种

情况下振动的有限元仿真建模;龚俊杰等^[3]提出了一种新型的回收振动能量的方式,设计了一种多层压电悬臂梁,说明了应用压电材料回收振动能量的可行性。文献[4]推导了压电悬臂梁计算公式,并分析了将压电振子放在轮毂和发动机两个位置的发电能力,得到放在轮毂时的发电能力较好。

车载环境下,汽车行驶时内部的振动是随机的,而由于压电材料属于脆性材料,所以车载环境下,如何确定合理安装位置,避免压电悬臂梁在剧烈振动时发生脆性断裂。分析和确定车载环境下汽车内部具体的振

收稿日期:2016-05-09

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(E201025)

作者简介:张恩惠(1965-),男,河北海兴人,副教授,博士后,主要从事新能源装备、生物质能源利用技术的研究。

动幅度情况,找到可以和压电悬臂梁合理结合的安装位置,使在保证压电悬臂梁耐久度的情况下振动能量回收最大化是当下学者的前沿性研究课题之一。

1 路面随机激励数学模型

1.1 路面功率谱密度

对于车载的压电悬臂梁能量回收装置来说,其输入的激励来自于汽车行驶时的路面不平度,引入路面功率谱密度来描述输入激励的统计特性,国际和国内均建议路面空间频率的功率谱密度^[5]为

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-W} \quad (1)$$

式中: n 为空间频率; $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 为参考空间频率; $G_q(n_0)$ 为参考 n_0 下的路面功率谱密度值,称为路面不平度系数; W 为频率指数,是双对数坐标上斜线的频率,决定路面功率谱密度的频率结构。国际标准化组织在文件 ISO/TC 108/SC2N67 中和国内长春汽车研究所制定的 GB 7031 都提出按照路面功率谱密度把路面不平度分为 8 级,表 1 为当 $W=2$ 时,各级 $G_q(n_0)$ 的几何平均值。

表 1 路面功率谱密度

路面等级	A	B	C	D
$G_q(n_0)/(10^{-6} \text{ m}^3)$ $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$	16	64	256	1 024
路面等级	E	F	G	H
$G_q(n_0)/(10^{-6} \text{ m}^3)$ $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$	4 096	16 384	65 536	262 144

在考虑汽车行驶中的振动时,除了需要了解路面不平度,还需要研究车速对振动的影响。

$$f = vn \quad (2)$$

式中: v 为汽车车速; f 为等效的空间频率。

当 $W=2$ 时,综合式(1)、(2)可得时间频率路面功率谱密度为

$$G_q(f) = \frac{1}{v} G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-2} = G_q(n_0) n_0^2 \frac{v}{f^2} \quad (3)$$

进而

$$G_q(\omega) = (2\pi)^2 G_q(n_0) n_0^2 \frac{v}{\omega^2} \quad (4)$$

式中 $\omega = 2\pi f = 2\pi vn$,从而得到含有截止频率 ω_0 的表达式为

$$G_q(\omega) = (2\pi)^2 G_q(n_0) n_0^2 \frac{v}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (5)$$

假设式(5)为一阶线性系统的响应, $H(j\omega)$ 为频率响应函数,则有

$$H(j\omega) = \frac{2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v}{\omega_0 + j\omega} \quad (6)$$

因此可得系统的微分方程为

$$2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v \cdot \omega(t) = \omega_0 q(t) + \dot{q}(t) \quad (7)$$

式中: $\omega(t)$ 为时域信号; $q(t)$ 为激励。从而得到状态方程:

$$\dot{q}(t) = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v \cdot \omega(t) - \omega_0 q(t) \quad (8)$$

由于 $2\pi n_0 v = \omega_0$, 所以得到最终状态方程:

$$\dot{q}(t) = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v \cdot \omega(t) - 2\pi n_0 v q(t) \quad (9)$$

式中: n_{00} 为下截止空间频率;考察路面不平度还应考虑两物理量速度功率谱密度 $G_{\dot{q}}(f)$ 和加速度功率谱密度 $G_{\ddot{q}}(f)$, 二者与时间频率路面功率谱密度 $G_q(f)$ 的关系为

$$G_{\dot{q}}(f) = (2\pi f)^2 G_q(f) = 4\pi^2 G_q(n_0) n_0^2 v^2 \quad (10)$$

$$G_{\ddot{q}}(f) = (2\pi f)^4 G_q(f) = 16\pi^4 G_q(n_0) n_0^2 v^2 f^2 \quad (11)$$

1.2 随机路面的生成

采用白噪声随机路面生成法,在一个随机过程,其功率谱密度函数在某一个频带内是常量,那么我们称为白噪声,应用 matlab/simulink 功能模块,图 1 为采用白噪声激励输入,搭建仿真模型图。

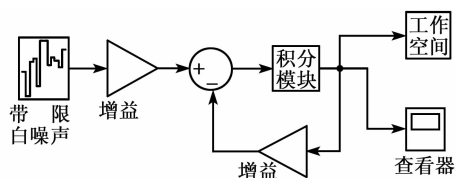


图 1 随机路面生成模型

采用 C、D 级路面的功率谱密度进行仿真,即 $G_q(n_0) = 256 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 和 $G_q(n_0) = 1024 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, 其中 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$, $n_{00} = 0.011 \text{ m}^{-1}$, 输入的车速为 40 km/h, 得到基于白噪声激励的路面不平度曲线分别如图 2、3 所示,其中, $q(t)$ 为路面的相对高程。

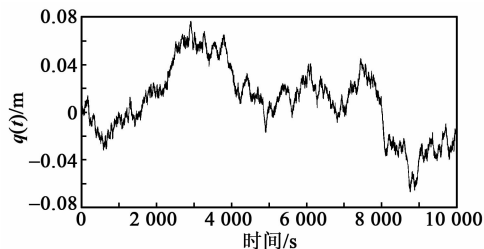


图 2 C 级路面不平度

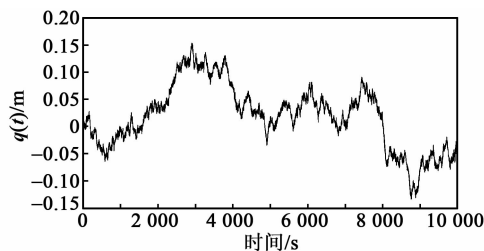


图 3 D 级路面不平度

由图2可知,C级路面在垂直方向 ± 0.08 m的距离内做随机振动,而图3的D级路面不平度可得到路面在垂直方向 ± 0.15 m的距离内做随机振动。因为汽车的轮毂与路面隔着轮胎,而在轮胎胎压正常的情况下轮胎的弹性较减震器的弹性不明显,导致路面不平度的变化可近似轮毂的垂直位移变化,对于压电悬臂梁与轮毂的配合,选取悬臂梁材料的尺寸应适当增加,以适应轮毂行驶在路面上的剧烈振动。

2 汽车在随机路面行驶分析

2.1 整车动力学建模

运用动力学分析软件分析模块建立整车仿真分析,调用的整车模型包括车身、悬架、轮胎、转向机构、发动机。由于汽车转向机构与前悬配合,运动方式较后悬复杂,因此选取汽车前悬作为振动分析对象。Adams/car中融合了汽车轮胎的创建模块,可通过Adams/Tire工具生成公路等级为A~H的国际标准路面。值得注意的是由于模型需要输入动力变量,因此整车载入需要发动机Powertrain模块,用于仿真。

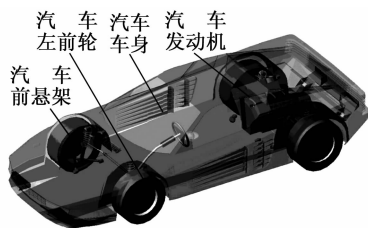


图4 整车仿真模型

2.2 整车动力学分析

采用Adams/car中Course Events模块进行仿真分析,对输入车速为40 km/h的等级为D、E、H的3种路面进行仿真得到汽车左前悬下悬臂相对于垂直方向位移 h 的曲线如图5~7所示。

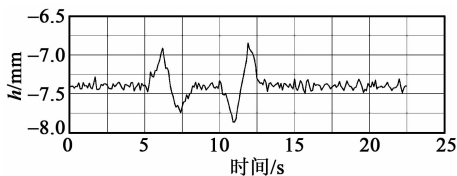


图5 D级路面左前悬下悬臂的振动

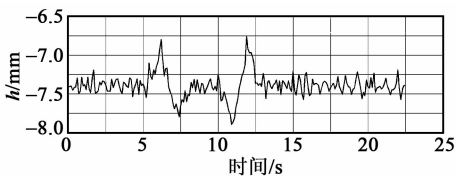


图6 E级路面左前悬下悬臂的振动

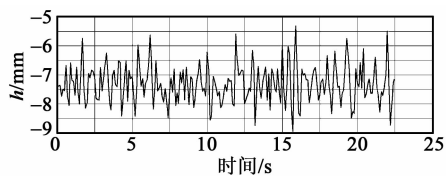


图7 H级路面左前悬下悬臂的振动

通过分析图5、6可知,在8 s和15 s附近左前悬下悬臂有明显的跳动,这是因为汽车在这两时刻分别做左、右转向动作,所以汽车左前悬下悬臂相对位移变化较明显,当在道路等级为H的路面上行驶时,由于路面不平度较高,汽车整体处于大幅度振动状态,所以由转向带来的悬臂的位移变化不显著。我国的高等级路面谱等级基本上都在A、B、C三级范围内,其中B、C等级的路面所占比重较大^[6],而对于现实生活中,由于汽车行驶环境的复杂性,路面等级也在不断地变化,所以综合上述3个路面等级的路面,得到汽车左前悬下悬臂相对位移在1 mm左右的振动幅度下振动,这也为后续压电悬臂梁发电能力做准备。

3 振动能量回收装置

3.1 振动能量回收装置模型

图8为含有两压电片的单层压电悬臂梁三维模型,其中负载是悬臂梁的自由端,由于压电材料属于脆性材料,所以不能直接将压电材料做成的压电片直接与振源相接,采用将压电材料安装于弹性适合的基板上(见图8),避免压电材料的脆性断裂。

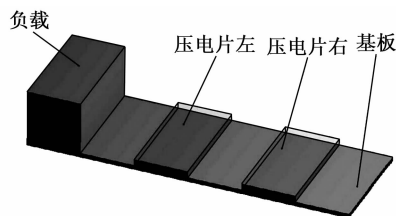


图8 压电悬臂梁三维模型

3.2 发电能力分析

应用有限元分析软件Ansys进行压电材料发电能力分析^[7],在自由端分别输入1 mm和3 mm的位移载荷,固定端设置固定约束,压电材料和基板材料参数如表2所示。

表2 压电材料和基板的参数

	基板	压电片
材料	铍铜	PZT-5H
长度/mm	30	5
宽度/mm	10	10
厚度/mm	0.4	0.6

续表

	基板	压电片
弹性模量/GPa	128	62
密度/(kg/m ³)	8 300	7 500
泊松比	0.42	0.32

通过仿真得到电压云图如图 9、10 所示。

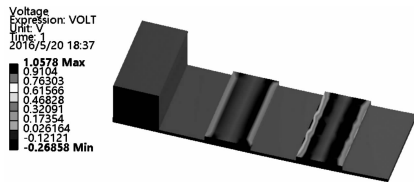


图 9 1 mm 载荷时电压云图

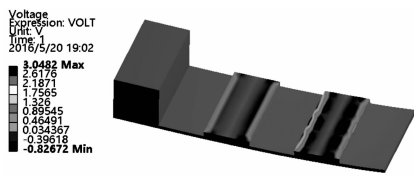


图 10 3 mm 载荷时电压云图

由图 9、10 所得到的仿真结果可知,当在自由端分别输入 1 mm 和 3 mm 的位移激励时,压电片可分别产生 1 V 和 3 V 的电压,而在图 9、10 中的压电材料边缘产生电压高的原因是压电材料的发电能力与由于材料弯曲而产生的应力大小有关,压电悬臂梁弯曲变形时,两压电片的边缘产生的应力较大,所以产生的电能比压电片中间部位高;又因为压电片右与固定端位置靠近,所承受的应力较高,所以压电片右边缘所产生的电压要比压电片左高。

4 结论

1) 应用动力学分析软件 adams/car 进行整车仿真,仿真得出汽车分别在公路等级为 D、E、H 的路面行驶时的汽车左前悬下悬臂的振动情况,振动位移在 0.5~3.5 mm 之间。

2) 通过有限元分析软件建立了单层双压电片悬臂梁模型,目的是为了研究压电片安装在不同位置时的发电能力,从结果可看出,压电片安装与固定端位置越近,发电电压越高。

3) 应用有限元分析软件对传统压电悬臂梁的自由端输入 1 mm 和 3 mm 的位移载荷时,压电片最多可以分别产生 1 V 和 3 V 的电压。且这些电压

足够供应汽车低功率用电设备的直接供电,也可以直接跟电瓶配合,为电瓶充电。

参考文献:

- [1] LIN J T, ALPHENAAR, BRUCE. Enhancement of energy harv-ested from a random vibration source by magnetic coupling of a piezoelectric cantilever[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(13):1337-1341.
- [2] AMINI Y, FATEHI P, HESHMATI M, et al. Time dom-ain and frequency domain analysis of functionally graded p-iezoelectric harvesters subjected to random vibration; Finite element modeling[J]. Composite Structures, 2016, 136(1):384-393.
- [3] 龚俊杰,阮志林,李康超,等. 新型多层悬臂梁压电发电装置发电性能研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 135-140.
GONG Junjie, RUAN Zhilin, LI Kangchao, et al. Study on the performance of a new type of multilayer cant-il-ver beam piezoelectric generator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5):135-140.
- [4] 穆飞,傅波. 车载环境下悬臂梁压电振子的发电能力[J]. 振动. 测试与诊断, 2013, 33(suppl. 2):72-76.
MU Fei, FU Bo. The power generation capacity of a cantilever beam under the vehicle environment [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2013, 33(suppl. 2):72-76.
- [5] 陈杰平,陈无畏,祝辉,等. 基于 Matlab/Simulink 的随机路面建模与不平度仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3):11-15.
CHEN Jieping, CHEN Wuwei, ZHU Hui, et al. Modeling and Simulation on stochastic road surface irregularity based on M-atlab/Simulink[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):11-15.
- [6] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [7] 黄秀峰,崔洪宇,洪明,等. 振动控制中压电元件优化配置研究进展[J]. 压电与声光, 2015, 37(5):768-779.
HUANG Xiufeng, CUI Hongyu, HONG Ming, et al. Research progress on optimal configuration of piezoelectric elements in vibration control[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5):768-779.