

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904982

压电自供能智能车轮的结构设计与实验研究^{*}

李一博¹, 郑晓雷¹, 芮小博¹, 刘悦¹, 陈曦^{1,2}

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司 天津 300300)

摘要:为了解决智能车轮中的无线传感器的自供能问题,提出一种压电自供能智能车轮,增强了现有车轮能量收集技术的实用性和安全性。压电悬臂梁固定于轮辐中,利用旋转中自由端质量块的重力作用产生周期性激励,为了避免直接对辐条产生碰撞,设计了安全限幅结构。通过建立系统的机电动力学模型,针对R16尺寸的轮辋进行了装置的参数设计,搭建实验平台进行负载优化并研究了限幅间距对收集性能的影响。为了全面评估压电自供能智能车轮的性能,在实车上进行了样机实验。结果表明,本收集装置在50~70 km/h可获得64.3~866.0 μW 的能量,为建立无需维护的自供能智能车轮系统提供了可能。

关键词:智能车轮;轮辐;压电;自供能

中图分类号: TH825 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Structure design and experiment study of piezoelectric self-powered intelligent wheel

Li Yibo¹, Zheng Xiaolei¹, Rui Xiaobo¹, Liu Yue¹, Chen Xi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd, CATARC, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to solve the self-powering problem of wireless sensors in intelligent wheels, a piezoelectric self-powered intelligent wheel is proposed, which enhances the practicality and safety of existing wheel energy harvesting technology. The piezoelectric cantilever beam is fixed in the spoke, which generates periodic excitation with the gravity effect of the free end mass block in rotation. In order to avoid direct collision with the spoke, a safety limiting structure is designed. Through establishing the electromechanical dynamics model of the system, the parameters of the device are designed for the R16-sized rim. An experiment platform was built to achieve the load optimization and study the influence of the limiting pitch on the harvesting performance. In order to fully evaluate the performance of the piezoelectric self-powered intelligent wheel, a prototype experiment was carried out on a real vehicle. The results show that the harvesting device designed in this paper can obtain the energy of 64.3~866.0 μW at 50~70 km/h, which provides the possibility of establishing a self-powered intelligent wheel system without maintenance.

Keywords: intelligent wheel; spoke; piezoelectric; self-powering

0 引言

近年来,随着微机电(micro-electro-mechanical system, MEMS)传感器和超大规模集成电路(very large scale integration, VLSI)技术的快速发展,以及汽车制造业的不断变革,汽车产业已经进入了全面的智能化发展时代^[1]。车轮作为车辆控制系统和外部环境之间的接口,

不仅影响着汽车的操控性与平顺性,而且直接影响着行驶安全。因此,相关研究人员提出了实时获取轮胎多种参数的智能车轮的概念^[2-3],智能车轮的关键技术是信号采集处理和数据传输,即配备相关无线传感器实时监测轮胎气压^[4]、应变^[5]、温度^[6]、加速度^[7]和轮力信息^[8]等影响汽车安全性和可靠性的重要因素,对相应参数进行无线传输并实现及时反馈。

目前,智能车轮技术发展的瓶颈在于如何解决供电

难题。传统的有线传感器不适合在高速运转的车轮上应用,车轮结构的打孔走线还会产生应力集中,降低车轮寿命。轮载的无线传感器依然主要利用化学电池供电,由于电池的容量有限且在车轮中不宜经常更换,很大程度上限制了智能车轮技术的应用与功能拓展。然而,一种能量收集技术(energy harvesting technology, EHT)受到了极大的关注^[9],该技术可以收集环境中的能源并为低功耗器件供电。由于车轮在运行的过程中存在着丰富的机械能来源,能量收集技术具有解决智能车轮供能问题的巨大潜力。一旦形成成熟的能量收集方案,将形成完全无需维护的自供能智能车轮,会大大的推动汽车行业尤其是自动驾驶领域的发展。目前,适用于车轮的自供能能量收集技术主要分为变形能型和冲击能型。

变形能型是指利用汽车轮胎因道路外力和车身重力而产生的变形。例如 Lee 等^[10]将压电复合材料直接贴附于汽车轮胎内衬上,可获得 $1.37 \mu\text{W}/\text{mm}^3$ 的收集效率。Maurya 等^[11]及 Ende 等^[12]也对该方案进行了深入的研究。该方案的优点是安装设计简单,需要使用具有韧性的压电纤维复合材料(macro fiber composite, MFC)以提高使用寿命,其主要问题在于汽车轮胎内衬上贴附压电材料会对轮胎本身的性能产生一定的影响,车轮在高速运行中产生的相对大幅度的高温会影响压电材料,且压电材料的寿命问题依然需要进一步探讨。

冲击能型是指利用车轮在接触地面时的冲击力产生的瞬时加速度。例如 Tornincasa 等^[13]提出了一种圆柱式的电磁式能量收集装置,安装在轮毂踏面与轮胎之间,当车轮接触地面时的冲击能使收集装置中的磁铁与线圈产生相对位移从而发电。Deng 等^[14]为了解决胎压监测装置的供能问题,提出了将一个三角形悬臂梁安装在轮毂踏面与轮胎之间,利用冲击力来激励悬臂梁振动并使压电材料产生形变的方案,在 $40 \sim 120 \text{ km/h}$ 的速度范围内可获得 $42 \sim 437 \mu\text{W}$ 的能量。该方案与变形能型相比,结构得到了简化,易于获得更高的能量,但对低速响应不理想,且装置普遍体积较大,尚不具备实用性。

以上所述的大部分收集装置安装于轮胎内与轮胎踏面中,在汽车高速运行时易对轮胎本身的运动性能产生影响,且一旦脱落将会造成爆胎等危险事故,实用性和安全性值得商榷。因此,一些学者将车轮振动能量收集的研究方案应用到了轮辋上,例如, Zhang 等^[15]提出了把带有双磁铁的双稳态悬臂梁安装在汽车轮辋上,在 40 km/h 的行驶速度下可收集 $61 \mu\text{W}$ 的能量,但方案中对磁铁的应用会对本身车轮的磁电式传感器的正常使用造成影响,且容易吸附路面上的铁磁性物品。Wang 等^[16]提出利用带有弹簧的梯形悬臂梁安装在汽车轮辋上,利用离心力控制弹簧的弹力进而改变梁的位置,在 $20 \sim 90 \text{ km/h}$ 的范围内获得了 $107.4 \mu\text{W}$ 的能量,但离心力因在提高

梁的刚度从而增大了共振频率的同时降低了能量的输出。以上两种方案均从能量收集效果最优化的角度进行了讨论,由于没有针对汽车结构进行单独的设计,其外置式结构的实用性依然需要进一步研究。

针对以上所述车轮能量收集技术的不足,本文提出了一种压电自供能智能车轮,将压电悬臂梁安装于车轮轮辐中,利用车轮旋转过程中压电悬臂梁自由端质量块的重力作用产生周期性激励。压电悬臂梁为能量收集技术中的常用结构,其易于设计加工且收集效率高^[17-18]。压电悬臂梁在振动能量收集中应用较多,但用于旋转场合的应用研究较少。本文将其应用于狭小的辐条中,难点在于有限体积内的尺寸设计及旋转应用中的建模。该收集器将质量块置于车轮旋转中心以规避离心力的影响,考虑到悬臂梁将在狭小辐条中进行往复运动,为了避免直接对辐条产生碰撞,加入了安全限幅结构。该收集装置安装于轮辐内,无需在传统车轮外部或轮胎内附加结构,易于与车轮集成化和一体化,具有良好的应用前景。

由于辐条内空间狭小,收集装置尺寸受到了限制,本文以 R16 型号车轮为例进行了详细的参数设计。为了进行设计与参数优化,基于集总参数法建立了该收集装置的理论模型。根据仿真与实验,针对限幅结构的不同间距对收集性能的影响进行了研究。为了全面评估该装置的性能,在实车上进行了样机实验。

1 工作原理及理论建模

1.1 工作原理

本文提出的压电自供能智能车轮的结构如图 1 所示。在车轮辐条内安装压电能量收集装置,主要由 4 部分组成:固定基座、主悬臂梁(压电梁)、止动梁 1 和止动梁 2。作为能量转换核心部件的压电复合材料贴附于主悬臂梁上,质量块放置于主悬臂梁自由端。装置的激励由自由端质量块的重力产生,车轮旋转时悬臂梁的方向发生周期性变化,而重力方向不变,因此将会产生与车轮旋转频率一致的周期性激励。主悬臂梁因受到周期性激励而产生振动时,会产生弯曲变形,贴附在主悬臂梁上的压电材料受到弯曲应力,可以将振动能量通过压电效应转换为电能。

Gu 等^[19]的研究表明离心力可以拓宽旋转的压电能量收集装置的频带,但由于离心力导致梁刚度的增大而提高了共振频率,且降低了振幅,影响了能量的输出。本文中,考虑到日常市区行车速度所对应的旋转频率一般 10 Hz 以下,为了获得较低的共振频率且尽量获得最大的能量输出,将收集装置的自由端的质量块的位置与车轮旋转中心重合,最大限度地避免离心力的影响。

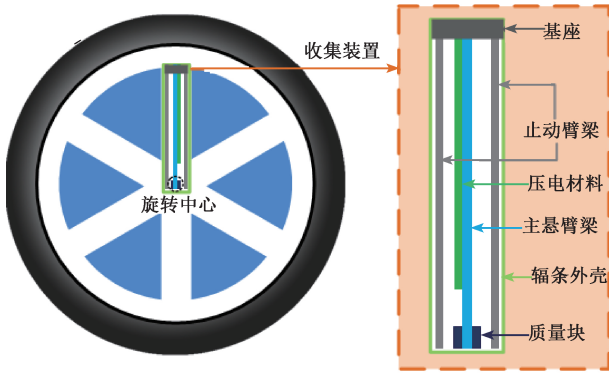


图1 压电自供能智能车轮的结构

Fig.1 The structure of the piezoelectric self-powered intelligent wheel

考虑到在狭小有限的辐条空间中,主悬臂梁可能会与边界碰撞,频繁的碰撞将会使辐条产生变形与疲劳,影响行车安全。而且,大振幅会使主悬臂梁基底及压电材料易产生损伤,尤其是对于锆钛酸铅压电陶瓷(piezoelectric ceramic transducer, PZT)等脆性压电材料。因此,压电自供能智能车轮设计了安全限幅结构,在主悬臂梁两侧设置高刚度止动梁,避免主悬臂梁与辐条产生撞击的同时,提高了收集装置的寿命。同时,这种限幅结构在一些研究中已有所提及,但通常只设置在一侧,用于作为一种通过碰撞而拓宽频带的方法^[20-21]。而本文所述的限幅结构中止动梁的目的在于限制收集装置振动幅度,使其适合于辐条内部狭小空间的应用。

1.2 理论建模

为了便于对压电自供能智能车轮进行性能分析与参数设计,利用集总参数法建立数学模型,对建模过程进行简要讨论。

该收集装置主体为安装在车轮辐条内的主悬臂梁,在不考虑限幅结构时可以简化为一个质量块与旋转中心重合的单轴平面旋转模型,如图2所示。

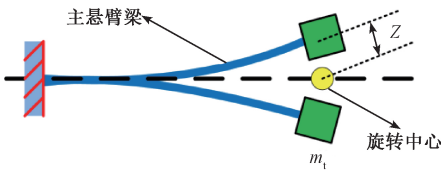


图2 单轴平面旋转模型

Fig.2 Uniaxial plane rotation model

Guan 等^[22]基于小振幅假设,已经对该模型进行了简化和理论分析,其动力学的集总参数方程如式(1)所示。

$$M_{eq} \ddot{Z} + C_1 \dot{Z} + (K_1 - M_{eq} \omega^2) Z = M_{eq} g \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中:主悬臂梁等效质量为: $M_{eq} = m_t + (33/140)m_b$, m_t

为自由端质量块质量, m_b 为主悬臂梁质量; K_1 为主悬臂梁的等效刚度系数; C_1 为等效机械阻尼系数; ω 为车轮旋转的角速度; Z 为集总参数下主悬臂梁与基座的相对位移。模型没有考虑压电材料的逆压电效应对主悬臂梁的应力影响,也没有考虑机电耦合效应,无法得到输出电压,不能直接对结构的性能进行预测与评价,因此需要在模型中加入了机电耦合项,可得集总参数模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} M_{eq} \ddot{Z} + C_1 \dot{Z} + (K_1 - M_{eq} \omega^2) Z + \Theta_p V = M_{eq} g \cos(\omega t) \\ \Theta_p \dot{Z} - C_p \dot{V} = \frac{V}{R_L} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Θ_p 为压电耦合系数; V 为输出电压; C_p 为压电材料的等效电容; $C_p \dot{V}$ 为经过等效电容的电流; R_L 为负载电阻。式(2)得到了未考虑安全限幅结构的收集装置的机电耦合集总参数模型。限幅结构从力学角度可认为是一个分段线性压电能量收集结构,通过引入止动件产生非线性机械力。

为了更好地达到限幅效果,两个止动梁均设计为大刚度梁,为了方便理论建模,两梁的设计参数一致。质量块与两个止动梁的间隙距离均为 e ,由于止动梁的刚度较高,止动梁相对于固定基座的位移可忽略不计,可假设止动梁与基座固定为刚体结构。主悬臂梁与止动梁的相对位移 $Z < e$ 时,不会发生碰撞;当 $Z > e$ 时,将会发生碰撞。因此,该系统每个周期的运动状态分为碰撞前和碰撞后两个阶段,整个系统呈现出分段线性振动状态。

假设止动梁1和止动梁2的等效刚度系数为 K_2 ,等效机械阻尼系数假定相同为 C_2 。当 $-e < Z < e$ 时,不发生碰撞,系统的等效刚度系数为 K_1 ,等效机械阻尼系数为 C_1 ;当 $Z \geq e$ 时,主悬臂梁会与止动梁1发生碰撞,当 $Z \leq -e$ 时,主悬臂梁会与止动梁2发生碰撞,在碰撞过程中,主悬臂梁自由端的质量块会驱动止动梁一起振动,此时系统的等效刚度系数为 $K_1 + K_2$,等效机械阻尼系数为 $C_1 + C_2$ 。系统的非线性运动方程如式(3)所示。

$$\begin{cases} M_{eq} \ddot{Z} + C_1 \dot{Z} + (K_1 - M_{eq} \omega^2) Z + \Theta_p V + G(\dot{Z} + Z) = M_{eq} g \cos(\omega t) \\ \Theta_p \dot{Z} - C_p \dot{V} = \frac{V}{R_L} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中, } G(\dot{Z} + Z) = \begin{cases} C_2 \dot{Z} + K_2(Z - e) & (Z \geq e) \\ 0 & (-e < Z < e) \\ C_2 \dot{Z} - K_2(Z + e) & (Z \leq -e) \end{cases}$$

$$L_0 = \begin{cases} 1 & (Z \geq e) \\ 0 & (-e < Z < e) \\ 1 & (Z \leq -e) \end{cases}, \text{ 则 } G(\dot{Z} + Z) = L_0 C_2 \dot{Z} + L_0 K_2(|Z| - e),$$

系统的非线性运动方程可变形为式(4):

$$\begin{cases} M_{eq}\ddot{Z} + C_1\dot{Z} + (K_1 - M_{eq}\omega^2)Z + \Theta_p V + \\ L_0 C_2 \dot{Z} + L_0 K_2(|Z| - e) = M_{eq}g\cos(\omega t) \\ \Theta_p \dot{Z} - C_p \dot{V} = \frac{V}{R_L} \end{cases} \quad (4)$$

以上可得压电自供能智能车轮的集总参数模型,该非线性常微分方程可用 Runge-Kutta 法进行快速的数值求解,便于对结构的性能进行预测和评价,后文将利用该模型对收集装置进行详细的参数设计。

2 参数设计

在参数设计之前,对 10 种家用汽车辐条参数进行了调研分析,调研结果如图 3 所示。结果表明所调查的车型辐条长度平均值为 197 mm,辐条宽度平均值为 45 mm,辐条深度平均值为 27 mm。因此,根据图 1 所示结构,本文所设计的收集器的长度应小于辐条长度,宽度应小于辐条深度,限幅结构间距应小于辐条宽度。Aboulfotoh 等^[23]在分析悬臂梁几何参数对最大功率的影响时,建议在限制范围内选用最大长度与宽度。因此,综合考虑基座长度及辐条内的安装空间,选取铝合金(6061T)为主悬臂梁材料,长宽参数为 150×20 mm。

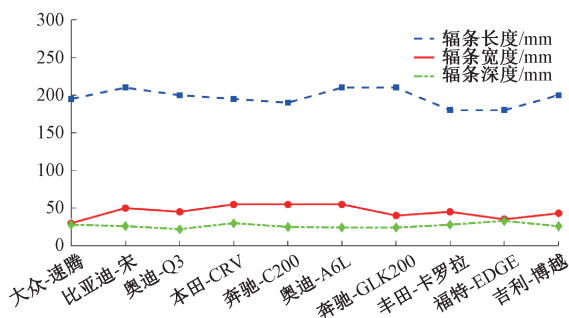


图 3 不同车型辐条长度、宽度和深度调研数据

Fig.3 Survey data diagram of the spoke length, width and depth of different vehicle types

对于主悬臂梁厚度与质量块参数,应根据共振频带进行选择。本文根据 205/55R16 尺寸的轮胎进行理论计算,可得其在 0~120 km/h 范围内对应的频率为 0~16.8 Hz。考虑到在市区快速路常用的车速为 60~80 km/h,首先针对该范围进行频带设计。梁的厚度越薄,将会获得更低的共振频率与更高的振幅,但更易于发生金属疲劳与断裂。Aboulfotoh 等^[23]提出自由端质量块质量的增加会提高整个系统的输出功率,建议在设计过程中最大化自由端质量块的质量,但需注意的是自由端质量块与悬臂梁之间的质量比不应超过 2.5。综合考虑

以上因素并进行了多次数值仿真,最终确定主悬臂梁厚度设计为 0.5 mm,自由端质量块设计为 10 g。

对于压电振动能量收集来说,应用较多的压电材料主要有锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)、有机压电聚合物薄膜(polyvinylidene fluoride, PVDF)和压电纤维复合材料(MFC)。PZT 的压电性能好,但其柔韧性较差且易碎;PVDF 柔韧性很好,但压电常数偏低;而 MFC 在具有高机电耦合能力的同时,具有很好的柔韧性;综合考虑本研究所用的压电材料的应用场景与上文所提尺寸,最终选择了具体型号为 MFC-8514-P2 的 MFC。

对于限幅的止动梁,需要高刚度与耐用性,因此本文选择了杨氏模量为 200 Gpa 的碳钢(Q235)材料,止动梁的尺寸与主悬臂梁保持一致。综上所述,本文所设计的压电自供能智能车轮的具体物理参数如表 1 所示。

表 1 实验装置物理参数

参数	数值
主悬臂梁长度×宽度×厚度($l_1 \times b_1 \times t_1$)/mm ³	150×20×0.5
止动梁 1(止动梁 2)长度×宽度×厚度($l_2 \times b_2 \times t_2$)/mm ³	150×20×2
自由端质量块质量 m_i /g	10
MFC 压电复合材料长度×宽度×厚度($l_3 \times b_3 \times t_3$)/mm ³	101×20×0.29
主悬臂梁质量 m_b /g	5.1
等效电容 C_p /nF	84.04

以上提到的系统的非线性运动方程中的具体仿真参数获取方式如下: Θ_p 是系统的机电耦合系数,与 d_{31} 成正比,可通过短路电流实验法^[24]得到; C_1 和 C_2 可以通过对数衰减实验法得到^[24]; K_1 和 K_2 可以通过材料力学的公式计算得来^[25]。具体仿真参数如表 2。

表 2 实验装置仿真参数

参数	数值
主悬臂梁的等效刚度系数为 K_1 /Nm ⁻¹	60.59
止动梁 1(止动梁 2)的等效刚度系数为 K_2 /Nm ⁻¹	2 370.37
主悬臂梁的等效机械阻尼系数 C_1 /kgs ⁻¹	0.038 62
止动梁的等效机械阻尼系数 C_2 /kgs ⁻¹	0.043 26
主悬臂梁等效质量 M_{eq} /g	11.3
系统的机电耦合系数 Θ_p	1.43×10^{-4}

3 实验室实验设计及结果

3.1 实验平台设计

压电自供能智能车轮实验平台如图 4 所示。平台的激励部分选取直流无刷电机,用直流电机驱动器和转速

表实时控制电机转速,连接电机旋转导电滑环实现旋转导电及信号传输。实验平台的收集结构的整体部分由亚克力材料制作,主悬臂梁选用铝合金(6061T)材料制作,止动梁选用碳钢(Q235)材料制作,主悬臂梁上贴附压电纤维复合材料(MFC)(Smart Material:MFC-M8514-P2),并选用特别推荐的环氧树脂粘合剂(3 M:DP460)将压电材料与主悬臂梁粘合,通过螺栓组将收集装置的主体固定在亚克力圆盘上。

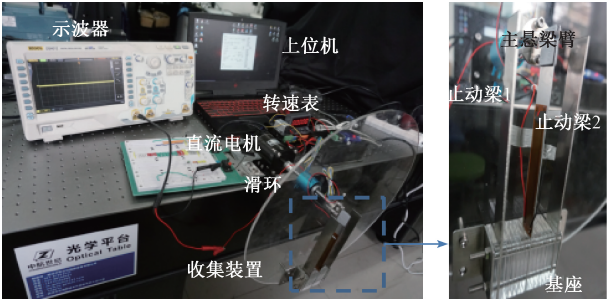


图4 实验室实验平台设置

Fig.4 The laboratory experiment platform setup

3.2 负载优化

收集装置外接的负载电阻不同,其收集功率会发生显著变化本节所选取的实验条件未加入止动梁,在8 Hz激励下进行,通过调节电路板上可调电位器来改变电路的负载电阻大小,在不同负载下收集装置得到的输出电压及功率的峰值曲线如图5所示。实验与仿真结果表明,随着负载电阻的不断增大,输出电压随之增大,输出功率先达到一个最优值接着逐渐减小,实验结果与仿真结果趋势大致达成了一致。在负载为220 kΩ时,负载功率取得最大值。因此,在后续研究中选用220 kΩ为负载电阻值。

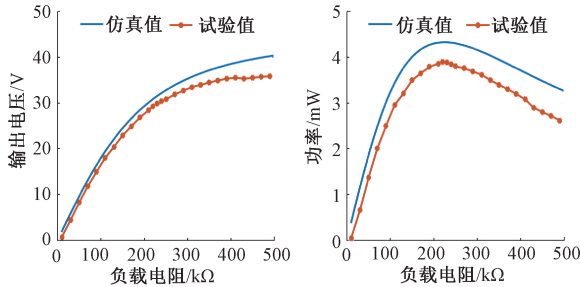


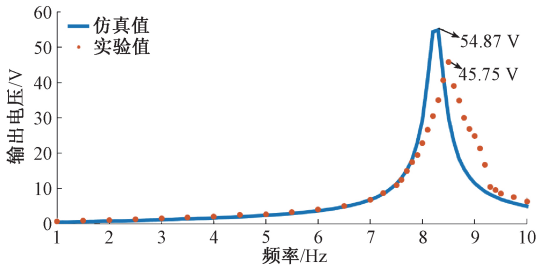
图5 不同负载下的电压与功率曲线

Fig.5 The curves of voltage vs. power under different loads

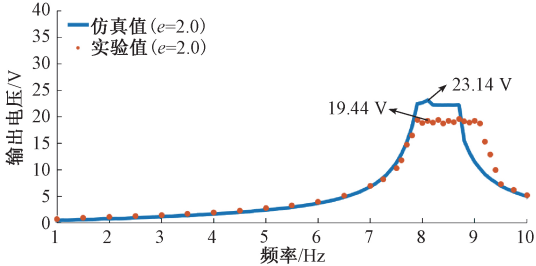
3.3 不同间距研究

主悬臂梁与止动梁的间距大小直接影响了收集装置的体积与收集效率。实验中,通过改变主动梁与止动梁之间的亚克力块的数量调节主悬臂梁和止动梁之间的间

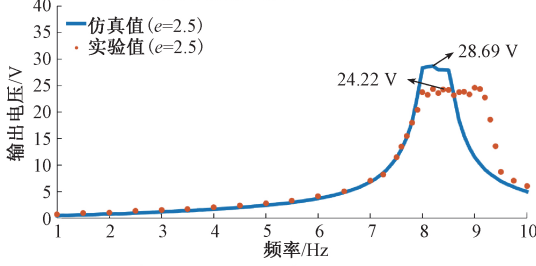
隙距离 e ,研究间距对系统输出性能的影响。在无安全限幅结构和间隙距离 e 分别为2.0、2.5和3.0 cm时,通过直流电机驱动器调节激励频率从1 Hz向10 Hz逐步增大进行扫频实验,输出电压由数字示波器测得,所得理论仿真与实验的输出峰值电压幅频特性曲线如图6所示。



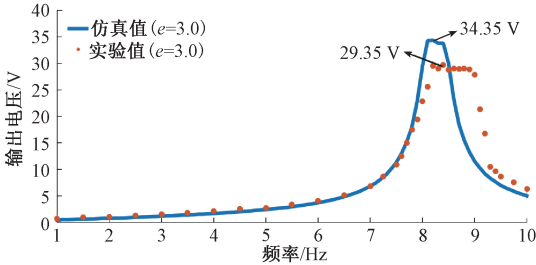
(a) 无安全限幅结构时输出峰值电压幅频特性曲线
(a) The output peak voltage amplitude-frequency characteristic curve without safety limiting structure



(b) 输出峰值电压幅频特性曲线 ($e=2.0$ cm)
(b) The output peak voltage amplitude-frequency characteristic curve ($e=2.0$ cm)



(c) 输出峰值电压幅频特性曲线 ($e=2.5$ cm)
(c) The output peak voltage amplitude-frequency characteristic curve ($e=2.5$ cm)



(d) 输出峰值电压幅频特性曲线 ($e=3.0$ cm)
(d) The output peak voltage amplitude-frequency characteristic curve ($e=3.0$ cm)

图6 输出峰值电压幅频特性曲线

Fig.6 The output peak voltage amplitude-frequency characteristic curves

结果表明,收集装置在止动梁的作用下产生了一段平坦的峰值。实验与仿真的趋势保持一致,实验的峰值

略低,峰值带宽稍大。实验数据如表 3 所示,从 3 个不同间距的数据结果来看,增大间隙距离 e ,系统的输出电压平坦峰值在一定程度上减小,而峰值频带宽度增加,但平坦峰值以外的各输出峰值电压基本保持不变。从图 6 中明显可以看出,峰值频带宽度的增加是由于峰值的减小,并没有增加实际的带宽。从实验数据的角度来看,与有限幅结构的结果相比, $e=3.0$ 的平坦峰值段电压降低 35.19%; $e=2.5$ 的平坦峰值段电压降低 47.06%; $e=2.0$ 的平坦峰值段电压降低 57.51%。

从实际应用角度来看,幅值或频带的提高均不是性能良好的保障,结构的设计需要从需求入手。收集装置必须满足的条件就是确保能为传感器网络提供充足的能量供应。例如 Kubba 等^[26]提出了胎压监测装置(tire pressure monitoring system, TPMS)传输速率为每 1 次/1 s 时,功耗为 450 μW ,胎压监测装置法规(FMVSS138)要求传输速率满足 1 次/10 min 即可,在这种情况下,胎压监测装置功耗降至仅 60.65 μW 。根据 220 k Ω 的电阻,本文的实验室实验结果输出峰值电压为 5.16 V 以上即可满足需求。从图 6 的结果来看,3 种间隙距离 e 的输出峰值电压满足大于 5.16 V 的带宽分别为 3.5、3.8 和 3.9 Hz,幅值不会发生明显变化。根据第 2 节的结论来看,所述的辐条宽度均值为 45 mm,2.0 cm 的间隙距离符合平均值的要求。

表 3 实验数据结果
Table 3 The experiment data results

间隙距离 e/cm	(平坦)峰值电压/V	
	仿真值	实验值
无限幅结构	54.87	45.75
2.0	23.14	19.44
2.5	28.69	24.22
3.0	34.35	29.35

4 实车实验设计及结果

4.1 实验设计

为了对所设计的压电自供能智能车轮的能量收集情况进行评估,选取了具备 R16 尺寸轮辋大众速腾轿车进行了实车实验,实验选择在平坦的柏油路面上进行。在实验中,汽车分别以 10、20、30、40、50、55、60、65 及 70 km/h 的速度在开阔路段匀速直线行驶,并使用汽车的定速巡航功能以保证速度的稳定性。压电自供能智能车轮的实车实验样机如图 7 所示。

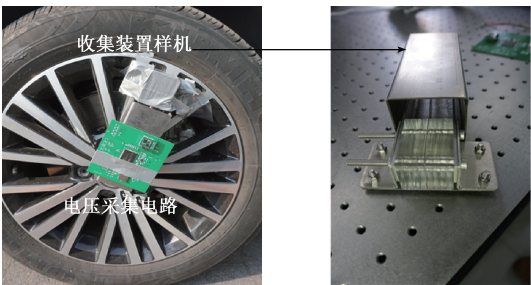


图 7 压电自供能智能车轮实车实验样机
Fig.7 The experiment prototype of the piezoelectric self-powered intelligent wheel real vehicle

样机中收集装置结构使用与图 4 相同的安装方法,并运用螺栓组将收集器主体固定在铝合金(6061T)外壳框架上,将框架固定在汽车辐条外侧,并使质量块中心与车轮中心重合。在框架外固定了一个电压采集电路板,目的是对收集装置的输出电压及加速度信号进行记录。采集电路使用 STM32 单片机系统,搭载了 MPU9250 型九轴加速度传感器,可以对车轮周向的振动加速度进行检测,且具有 ADC 电压采集功能,利用电阻分压对压电自供能智能车轮的输出电压数据进行测试,并将加速度数据与电压数据记录在 SD 储存卡内,方便后续的数据分析。

4.2 实验结果

首先对系统的时域信息进行分析,在统计及分析的过程中,通过加速度信号判断并选取速度达到稳定一段时间后的稳态响应信号进行分析,图 8 所示为在 40、60 km/h 的部分输出电压时域信号。从图 8(a)中可以看出,在车速为 40 km/h 时主悬臂梁与止动梁无碰撞过程,输出电压呈现明显的正弦特征。输出电压的正弦曲线上具有一定的噪声,考虑主要来源于路面的不平整及汽车悬架的振动,但依然可以认为是符合理论假设的。

主悬臂梁与止动梁是否发生碰撞直接影响收集装置的能量输出性能,从图 8(b)中可以看出,主悬臂梁与止动梁已经发生了碰撞,同时因为更接近结构的共振频率,输出的峰值与 40 km/h 相比得到了大幅提高。另外,从时域图像上来看,由于发生了碰撞,在高峰值处产生了尖峰,该尖峰可以认为是碰撞中产生的冲击激励造成的,由于尖峰保持的时间非常短,在后续的电电压值分析中,依然选取正弦部分的峰值作为实验结果进行统计,以保证数据的可对比性。与图 8(a)相比,除了产生尖峰外,输出的正弦曲线具有更大的波动性,产生了轻微的变形。

针对不同车速的实验结果进行统计,选取速度平稳时的系统输出峰值电压作为统计结果,结果如图 9 所示。将该结果与实验室、仿真结果进行对比,可看出具备近似的频谱特征,该理论模型可以较为准确的预测结构性质,可用于该装置的参数集成化设计。

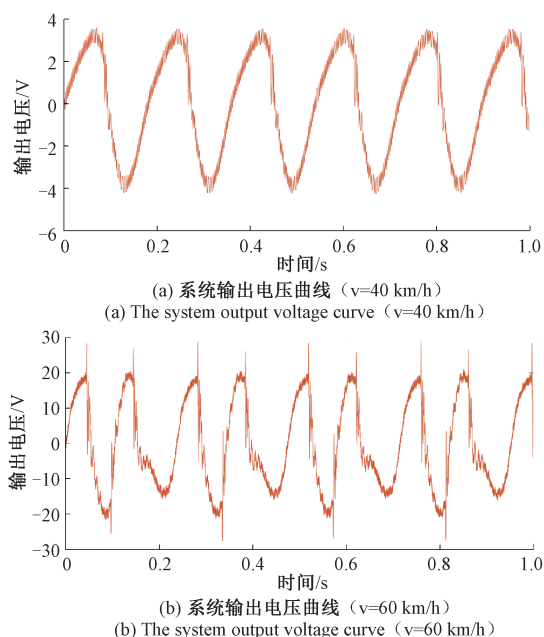


图8 不同车速下系统输出电压曲线

Fig.8 The system output voltage curves at different vehicle speeds

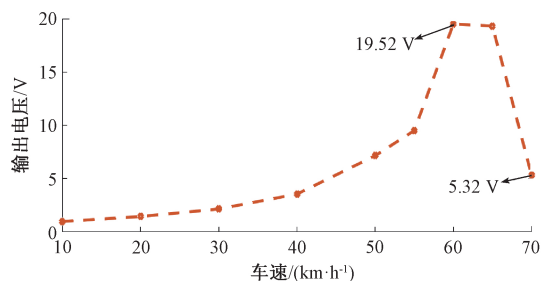


图9 不同车速时系统输出电压结果曲线图

Fig.9 The system output voltage result curves at different vehicle speeds

按照以上实车实验输出峰值电压结果计算出车速为 60 km/h 时,整个系统的获得了最高输出电压 19.52 V,有效输出功率约为 866.0 μ W;以上文所述的 60 μ W 为标准,车速在 50~70 km/h 区间时,压电自供能智能车轮有效功率输出约为 64.3~866.0 μ W,能满足胎压监测装置等一些低功耗电子元器件的功耗需求,具有一定的应用前景。

4.3 讨论

通过仿真及实验结果,可看出该能量收集装置能满足胎压监测装置等一些低功耗电子元器件的功耗需求,具有开发自供能式智能车轮的应用前景。

从设计结果来看,所设计的收集装置可放置在 45 mm 宽、25 mm 深的辐条中,符合一般辐条的尺寸。与

现有的收集装置相比,该收集器可以不用外部或轮胎的附加结构,具有很强的实用性。

虽然止动梁间距的减小会降低系统的输出峰值,但可以减小收集装置整体的体积,可获得更狭小的辐条尺寸,在实际应用中,应根据实际的能源需求进行设计,而不必追求能量的最大化。

压电自供能智能车轮在主悬臂梁上下两侧设置止动梁作为限幅结构,可以降低主悬臂梁的振幅,以加强辐条及收集装置的使用寿命。在后续的研究中,将利用软体材料进一步加强对结构的保护。从理论上来看,软体材料的碰撞将不会产生冲击激励,其阻尼将会吸收部分能量,可能会降低收集器的收集效果。

考虑到对于多个智能车轮中的微型传感器能量供应不足的问题,可在主悬臂梁上下两侧分别贴合压电材料实现双晶片供能,实现能量收集的最大化。

虽然本结构所得到的带宽有所限制,但考虑到辐条在同一个车轮中可以设置多个,在应用中可以将收集装置阵列式排布,通过每个收集装置的不同参数设计,达到覆盖完整车速范围的功能。

5 结 论

为了实现智能车轮中的无线传感器自供能,提出了一种压电自供能智能车轮,解决了现有车轮能量收集装置的实用性差的问题,沿着辐条中的长度方向安装压电悬臂梁,并通过限幅结构提高装置的使用寿命。基于理论模型的数值模拟,对 R16 尺寸的车轮进行了详细的参数设计,得到 180×45×25 mm 的收集装置尺寸,满足一般辐条尺寸要求。为了检测所设计的收集装置效果,搭建了基于压电复合纤维材料的实验室实验平台,确定了最佳负载为 220 k Ω ,着重研究了间隙距离 e 对系统输出电压的影响,间隙距离 e 的减小,将降低系统的峰值输出,但会减小收集装置的尺寸。选取了 e 为 2.0 cm 进行了收集装置样机的加工及实车实验,实验结果表明车速在 50 km/h~70 km/h 区间时,该压电自供能智能车轮有效功率输出约为 64.3~866.0 μ W,能满足胎压监测装置等一些低功耗器件的功耗需求,有很大潜力可以成为智能车轮的供能方式问题的解决方案。

参考文献

- [1] 张艳辉,徐坤,郑春花,等. 智能电动汽车信息感知技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 794-805.
- ZHANG Y H, XU K, ZHENG CH H, et al. Advanced research on information perception technologies of intelligent electric vehicles [J]. Chinese Journal of

- Scientific Instrument, 2017,38(4):794-805.
- [2] LEE H, TAHERI S. Intelligent tires? A review of tire characterization literature [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(2):114-135.
 - [3] RYOSUKE M, AKIRA T. Wireless monitoring of automobile tires for intelligent tires[J]. Sensors, 2008, 8(12):8123-8138.
 - [4] DAVID BLAŽEVIĆ, KAMENARE, SAŠAZELENKA. Load optimised piezoelectric generator for powering battery-less TPMS[C].SPIE Microtechnologies. 2013.
 - [5] SERGIO M, MANARESI N, TARTAGNI M, et al. On road tire deformation measurement system using a capacitive-resistive sensor [J]. Smart Materials & Structures, 2006, 15(6):1700-1706.
 - [6] ZHANG X W, WANG F Y, WANG ZH X, et al. Intelligent tires based on wireless passive surface acoustic wave sensors[C].The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2004:960-964.
 - [7] POHL A, SPRINGER A, REINDL L, et al. New applications of wirelessly interrogable passive SAW sensors[C]. Microwave Symposium Digest, 1998 IEEE MTT-S International, 1998(2):503-506.
 - [8] 冯李航, 王东, 徐扬, 等. 运动-力解耦的多维轮力传感器研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (5): 1240-1248.
FENG L H, WANG D, XU Y, et al. Motion-force decoupling wheel force transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(5):1240-1248.
 - [9] BIANCO S, CHIODONI A, GERBALDI C, et al. Nanostructures for energy [M]. Springer Netherlands, 2012.
 - [10] LEE J, CHOI B. Development of a piezoelectric energy harvesting system for implementing wireless sensors on the tires [J]. Energy Conversion & Management, 2014, 78(78):32-38.
 - [11] MAURYA D, KUMAR P, KHALEGHIAN S, et al. Energy harvesting and strain sensing in smart tire for next generation autonomous vehicles [J]. Applied Energy, 2018, 232:312-322.
 - [12] VAN DEN ENDE D A, VAN DE WIEL H J, GROEN W A, et al. Direct strain energy harvesting in automobile tires using piezoelectric PZT-polymer composites [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(1):015011.
 - [13] TORNINCASA S, REPETTO M, BONISOLI E, et al. Energy harvester for vehicle tires: Nonlinear dynamics and experimental outcomes [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(1): 3-13.
 - [14] DENG L, QI J, FANG Y, et al. Design and optimization of a trapezoidal beam array energy harvester with operating wide speed rang for TPMS application [J]. Microsystem Technologies, 2018:1-11.
 - [15] ZHANG Y, ZHENG R, NAKANO K, et al. Stabilising high energy orbit oscillations by the utilisation of centrifugal effects for rotating-tyre-induced energy harvesting[J]. Applied Physics Letters,2018, 112(14): 143901-1-143901-5.
 - [16] WANG Y J, CHUANG Y Y, YU J H. Design and kinetic analysis of piezoelectric energy harvesters with self-adjusting resonant frequency [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(9):095037.
 - [17] YANG Z, ZHOU S, ZU J, et al. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications[J]. Joule, 2018, 2(4): 642-697.
 - [18] TOPRAK A, TIGLI O. Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges [J]. Applied Physics Reviews, 2014, 1(3): 031104.
 - [19] GU L, LIVERMORE C. Passive self-tuning energy harvester for extracting energy from rotational motion[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(8): 081904.
 - [20] ZHAO D, WANG X, CHENG Y, et al. Analysis of single-degree-of-freedom piezoelectric energy harvester with stopper by incremental harmonic balance method[J]. Materials Research Express, 2018, 5(5): 055502.
 - [21] ZHAO L, YANG Y. An impact-based broadband aeroelastic energy harvester for concurrent wind and base vibration energy harvesting[J]. Applied Energy, 2018, 212:233-243.
 - [22] GUAN M, LIAO W H. Design and analysis of a piezoelectric energy harvester for rotational motion system[J]. Energy Conversion & Management, 2016, 111:239-244.
 - [23] ABOULFOTOH N, TWIEFEL J. On developing an optimal design procedure for a bimorph piezoelectric cantilever energy harvester under a predefined volume[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,

2018, 106: 1-12.

- [24] TANG L, YANG Y. A nonlinear piezoelectric energy harvester with magnetic oscillator [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(9): 094102.
- [25] RUI X, LI Y, LIU Y, et al. Experimental study and parameter optimization of a magnetic coupled piezoelectric energy harvester [J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2609.
- [26] KUBBA A E, BEHROOZI M, OLATUNBOSUN O A, et al. Modeling of strain energy harvesting in pneumatic tires using piezoelectric transducer [J]. Tire Science & Technology, 2014, 42(1): 16-34.

作者简介



计量技术等。

李一博(通信作者),2004 年于天津大学获得博士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授。主要研究方向为智能传感器自供能技术、非线性超声无损检测技术、水下多参数传感机器人和水运工程

E-mail: slyb@tju.edu.cn

Li Yibo (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2004 from Tianjin University. Now, he is an associate professor in School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University. His main research interests include intelligent sensor self-powered technology, nonlinear ultrasonic nondestructive testing technology, underwater multi-parameter sensing robot and water transport engineering measurement technology.



郑晓雷,2017 年于长春理工大学获得学士学位,现为天津大学硕士研究生,主要研究方向为压电能量收集技术。

E-mail: zxl940214@tju.edu.cn

Zheng Xiaolei received his B. Sc. degree in 2017 from Changchun University of Science and Technology. Now, he is a master degree candidate in Tianjin University. His main research interest is piezoelectric energy harvesting technology.