

面向快递包裹运输的自供电环境监测系统设计和仿真

屠迪龙^{1a, 1b}, 张媛^{1a, 1b}, 朱磊^{1a, 1b}, 秦勇², 杜艳平^{1a}

(1.北京印刷学院 a.机电工程学院 b.邮政行业技术研发中心, 北京 102600;

2.北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

摘要: **目的** 针对包裹运输实时状态监测的能源和续航问题, 文中设计一种自供电物流环境监测系统以解决相应的续航问题。 **方法** 分析公路运输车辆振动分布情况; 设计一种电磁振动能量收集器和能量管理电路, 建立能量收集器的物理和数学模型; 通过仿真和实验对比文中提出的收集器的模型和实测的输出结果, 并测试能量管理电路性能以及相应阻抗匹配分析。 **结果** 收集器仿真结果和实测结果基本吻合, 输出电压的峰值均高于 1 V。文中提出的能量管理电路能够有效完成收集器输出电压的升压整流, 与收集器配合后充电效率最高可达 51.1%, 阻抗匹配在 1 k Ω 时输出效果最优。 **结论** 文中提出的数学模型有效、可靠, 且自供电物流环境监测系统方案有效提升了包裹实时监测的续航能力。

关键词: 快递包裹; 数学建模; 物流环境监测; 电磁; 振动能量收集器; 阻抗匹配

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)11-0189-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.11.025

Design and Simulation of Self-powered Environmental Monitoring System for Package Transportation

TU Di-long^{1a, 1b}, ZHANG Yuan^{1a, 1b}, ZHU Lei^{1a, 1b}, QIN Yong², DU Yan-ping^{1a}

(1. a. School of Mechanical and Electrical Engineering b. Postal Industry Technology R & D Center, Beijing Institute of Printing, Beijing 102600, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: Aiming at the energy and endurance issues of real-time status monitoring of package transportation, this paper designs a self-powered logistics environment monitoring system. an electromagnetic vibration energy harvester and energy management circuit are designed and a physical and mathematical model of the energy harvester is established by analyzing the vibration distribution of road transport vehicles; through simulation and experiment, the model of the collector proposed in this paper is compared with the measured output results, and the performance of the energy management circuit and the corresponding impedance matching analysis are tested. The simulation results of the collector are basically consistent with the measured results, and the peak value of the output voltage is higher than 1 V. The energy management circuit proposed in the article can effectively complete the boost and rectification of the collector output voltage, and the charging efficiency can reach up to 51.1% when combined with the collector. the output effect is the best when the impedance matching is 1 k Ω . The mathematical model proposed in the article is effective and reliable, and the

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金 (119A1400050)

作者简介: 屠迪龙 (1997—), 男, 北京印刷学院硕士生, 主攻自供电技术的建模和设计。

通信作者: 朱磊 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为绿色包装和智慧物流。

self-powered logistics environment monitoring system program effectively improves the feasibility of improving the endurance of real-time package monitoring.

KEY WORDS: express package; mathematical modeling; logistics environment monitoring; electromagnetic; vibration energy harvester; impedance matching

中国是世界上快递业规模最大的国家。在 2021 年上半年,国内快递业务量和收入完成分别为 493.9 亿件和 4 842.1 亿元,同比分别增长 45.8%和 26.6%,增速均为上年同期的 2 倍以上^[1]。随着快递行业的快速发展,运输过程中的快递包裹的实时状态(振动冲击、实时位置、温湿度、放置姿态等)越来越受关注,诸多企业和院所也开发了相应的快递包裹状态监测算法和装置^[2-5],但是这类监测装置大多受限于电池容量,无法完成运输全过程多传感数据的实时采集、无线传输和精准辨识。为了缓解续航压力虽然可以采用关闭部分传感器、降低采样频率、删除缓存功能等折中方式,但这又导致了数据类型不完整、数据量少、丢包严重等一系列问题。此外,随着快递包裹状态监测装置的使用量剧增,除了电池所带来的运输安全和环境污染问题之外,电池大批量的同时充电问题也尚未得到有效解决,因此,续航能力已经成为制约快递包裹在途状态精确监测的重要因素。

自供电技术指通过收集环境中各种能量并转化为电能,从而驱动低功耗设备工作的技术,因此自供电技术被认为是解决能源问题的一种有效途径。在包裹运输场景下,车辆在行驶途中始终伴随着振动,因此运输振动能量的高效收集和转化有望为解决供能问题提供新途径。在自供电技术领域,已有学者进行了机械能收集方法研究和收集器设计。按照能量转化方式的不同,主要有压电式^[6-7]、静电式^[8]、摩擦纳米发电式^[9]、电磁式^[10-11]等。压电式和电磁式是最主要的两大类研究方向,压电材料可因机械应变产生电能,其具有耐用、可靠、微小、输出功率大和电压大等特点^[12],可灵活地运用于可穿戴设备^[13]、生物医学设备^[14-17]、交通运输及环境监测设备^[18-21]、智能家居设备^[22]等,自身也可作为传感器监测^[23-24],而其电能输出极其依赖于材料属性和结构,在实际应用中成本较高。电磁式设备可将磁感应的改变转化为电能,具有无需额外电源和功能材料、输出电流大、结构多样、应用范围广^[25-26]等特点,十分适用于驱动低功耗的数字集成器件^[27]。孔令强等^[26]在单自由度磁悬浮振动能量收集器的设计基础上添加了一个线性弹簧振子,悬浮磁体与弹簧振子相互耦合成了双自由度俘能系统,在相应激励下其输出功率提高了 1.5 倍。Aouali^[27]在电磁振动能量收集器中进行非线性和能量定位调谐,非线性装置由 2 个弹性梁引导,并由排斥磁力耦合的移动磁体组成,收集器的功率和频率带宽分别提高了 19.4%和 116%。Shen 等^[28]提出了一种

基于自由运动的非共振电磁能量收集器用于收集低频振动能量,其原型机可以在 4.5 Hz 频率下和 40 mm 振幅下产生 $748 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ 的功率密度。李丹晖等^[29]提出了应用于运输包装的电磁振动能量收集器,通过同论分析法等方法进行计算分析为收集器结构优化提供理论依据。Yu 等^[30]设计了一种用于智能铁路运输的小型滚珠丝杠式电磁能量收集器,当列车以 30 km/h 车速通过时,2 个原型机的平均功率分别为 1.12 W 和 2.24 W;同年,Yu 等^[31]设计了一种用于货运轨道车的电磁能量收集器,在以 90 km/h 速度运行的轨道车上,使用 66:1 和 43:1(齿轮比)的齿轮头的收集器分别获得了 14.5 W 和 9.2 W 的平均功率。Ouyang 等^[32]设计了一种基于圆柱滚动磁铁,以及 1 个或 3 个固定磁铁的电磁振动能量收集器,可达到单稳态和三稳态势能状态,并通过减小柔性制造系统和柔性制造系统之间的垂直间隙来增强系统的非线性,带有 1 个固定磁体的收集器在 8.0 Hz 时达到最大瞬时功率(40.6 mW),带有 3 个固定磁体的收集器在 7.5 Hz 时功率达到 9.8 mW。Wang 等^[33]设计一种可安装在轮对上的紧凑型一体化转子电磁能量收集器,此款收集器增加了外部配重充当摩擦摆,在列车转速为 420~820 r/min 的情况下的功率输出性能高达 $1\,982 \text{ W}/\text{m}^3$ 。

如上所述,鉴于电磁式振动能量收集器具有寿命长、易维护、低成本、无污染等优点,文中提出采用电磁式振动能量收集和转化技术解决快递包裹运输中物流环境监测装置的续航问题。

1 自供电物流环境监测系统

自供电物流环境监测系统主要分为跟随快递包裹完成物流全过程的硬件终端和基于云服务的 Web 界面。其主要功能是根据硬件终端实时采集并无线传输至云服务器的各种状态数据进行快递包裹在途状态的精准辨识和监测。以下对硬件终端和 Web 界面分别进行简要介绍。

1.1 硬件终端

整体电路模块主要由能源采集管理模块,传感器检测模块、无线数据上传模块、主控模块等 4 部分组成,见图 1。

传感器检测模块包含三轴加速度、温湿度、地磁、GPS、陀螺仪等传感器,能够实现包裹状态和硬件终

端自身状态数据的实时采集功能。无线数据上送模块主要基于 4G 实现动态数据的无线实时传送。主控模块负责接受 Web 端发出的控制指令并负责协调各个模块有序工作。

能源采集管理模块为整个系统提供持续稳定的电能, 包含电磁式振动能量收集器、能量管理电路和锂电池。其中, 振动能量收集器将振动转化为电能后可输出交流电, 后经能量管理电路的整流升压后对锂电池进行充电, 锂电池输出稳定的直流电供给其他 3 个模块工作。文中的研究重点为自供电设备在快递包裹运输环境下的有效输出及应用。

1.2 Web 端数据管理

Web 端软件基于云服务器进行搭建, 主要负责接收硬件终端上送的实时状态数据, 并根据实时状态数据进行包裹状态的监测和辨识, 并具有监测和管理硬件终端工作情况、包裹在途状态实时可视化展示等功能, 见图 1。

2 面向快递包裹运输的振动能量收集器设计

面向快递包裹运输的实际场景, 在进行了公路运输物流车辆的振动情况分析, 并得出振动能量分布较集中的频率范围后, 有针对性地设计了电磁式振动能量收集器。

2.1 公路运输车辆的振动情况分析

振动能量收集器需要依据振动激励的频率范围和能量分布进行针对性设计, 因此文中梳理了公路运输中振动特性的相关研究成果, 整理了不同运输车辆的垂向振动情况, 见表 1 (路面统一选取混凝土路)。

由表 1 可见, 无论是钢板弹簧、螺旋弹簧还是独立悬架的车辆, 公路运输振动信号的能量均集中在 1~30 Hz 的中低频率范围。考虑载重、车型等因素, 文中确定振动能量收集器设计中需响应的主要频率范围为 8~11 Hz。

2.2 电磁式振动能量收集器的结构设计

文中提出的电磁式振动能量收集器是在圆柱型容器中放入了 3 块磁极相斥的圆柱形永磁体、2 个弹簧和 2 个垫片, 其中 2 块永磁体分别固定于容器的上下两端, 剩余 1 块磁体在上下 2 块固定磁体的排斥力作用下悬浮于容器中部, 弹簧一端粘接在固定于容器两端的永磁体上, 另一端粘接垫片, 在容器的中部缠绕了线圈, 见图 2。

相邻磁体间产生的斥力相当于一个磁力弹簧, 与机械弹簧相比, 磁力弹簧产生的是非线性作用力。

当能量收集器在激励作用下振动时, 中间悬浮磁体和容器上的线圈做相对运动, 线圈切割磁场中的磁感线, 引起磁通量产生变化, 根据法拉第电磁感应定律, 此时会在外部线圈中产生电流。

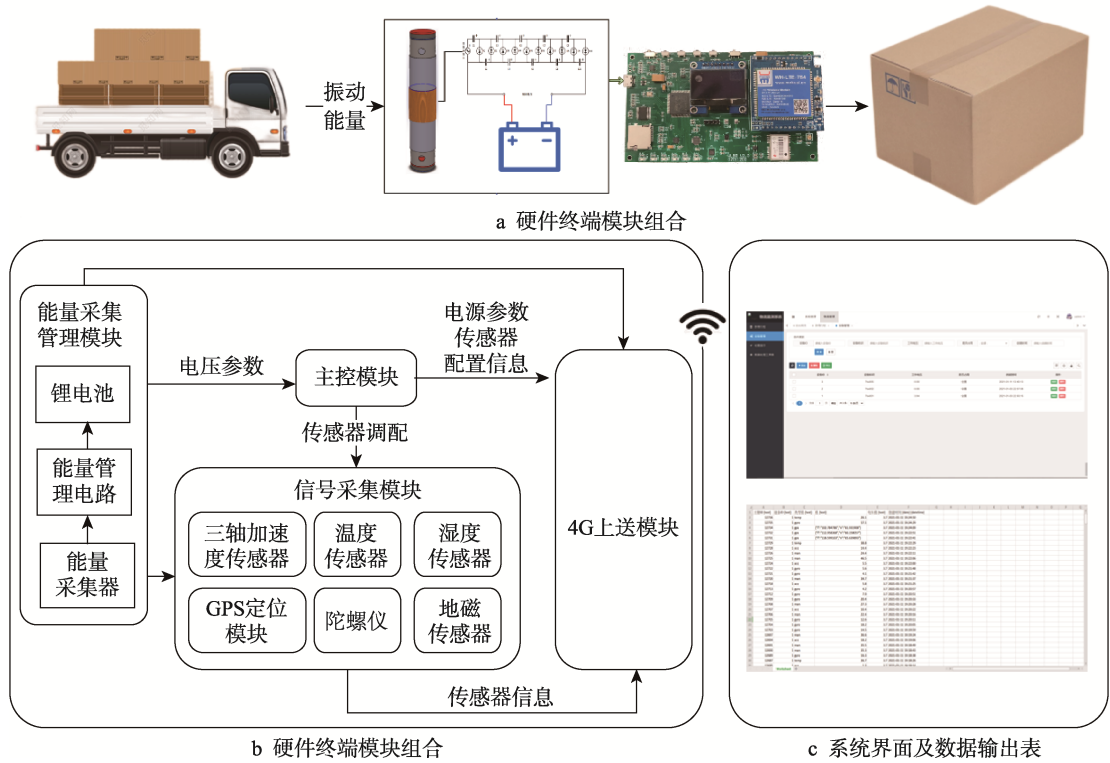


图 1 自供电物流环境监测系统
Fig.1 Self-powered logistics environment monitoring system

表 1 公路运输的振动特性分析
Tab.1 Analysis on vibration characteristics of truck transportation

文献	实验国家	车型	传感器安装位置	悬挂种类	载重	功率谱密度 (PSD) > 0.001 的输出范围/ Hz	PSD 峰值 位置/ Hz	峰值/ Hz
文献[34]	美国	福特货车	后部货物区	钢板弹簧		1~16	2~3	>0.01
		道奇货车		钢板弹簧		1~5、24~30	2~3	>0.01
		集装箱货车		钢板弹簧		1~3、13~17	2~3	>0.01
	泰国	尼桑皮卡		钢板弹簧		1~13	2~3	>0.01
		本田中型汽车		螺旋弹簧		2	2~3	=0.01
文献[35]	中国	轿车	后部货物区	独立悬架		1~3.5	2	>0.02
		重型厢式卡车		钢板弹簧		2.5~5、15~25	3~4	>0.02
		中型厢式卡车		钢板弹簧		2~4、20	3~4	>0.02
		小型面包车		钢板弹簧		1.5~4	2	>0.03
文献[36]	中国	20 t 华骏货车		钢板弹簧	正常	2.5~3 (31~60 km/h)	3~4	>0.002
						2~4 (61~90 km/h)	3~4	>0.004
		10 t 解放货车		钢板弹簧	超重	1.5~3 (31~60 km/h)	3~4	>0.001
						2 (61~90 km/h)	3~4	>0.004

注：括号内为货车相应速度范围。

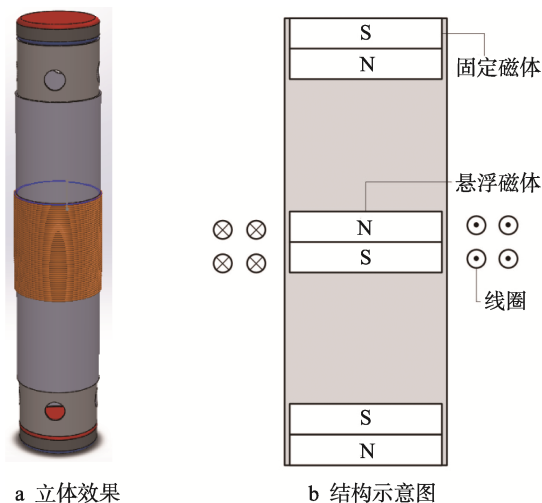


图 2 电磁式振动能量收集器结构
Fig.2 Structure diagram of electromagnetic vibration energy collector

2.3 电磁式振动能量收集器的数学模型

文中设计的电磁振动能量收集器的集总参数模型分析见图 3, x 、 y 表示悬浮磁体位移和激励位移。

其中悬浮磁体的动力学分析见图 4。上侧固定磁铁、下侧固定磁铁和悬浮磁体的系数分别为 $M_U = 0.019\ 2$ 、 $M_D = 0.019\ 2$ 、 $M_I = 0.021\ 2$ ，真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ，上侧磁体与悬浮磁体之间的间距 $d_1 = 0.015$ ，下侧磁体与悬浮磁体之间的间距 $d_2 = 0.015$ ，则悬浮磁体受到的磁力见式 (1) — (2) [26,37]。

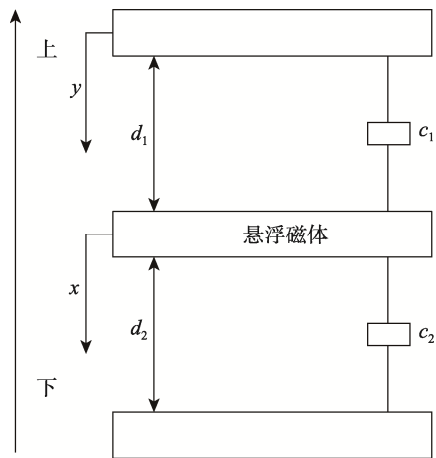


图 3 集总参数模型
Fig.3 Lumped parameter model

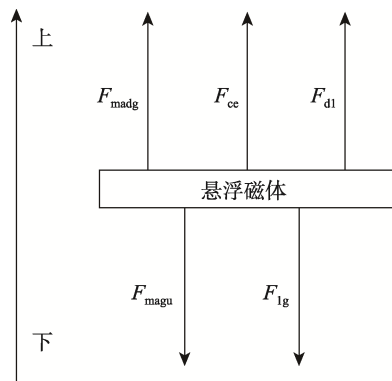


图 4 悬浮磁体的受力分析
Fig.4 Analysis of the lateral force of the suspension magnet

$$F_{\text{magu}} = \frac{3\mu_0 M_U M_l}{2\pi(d_1 + x)^4} \quad (1)$$

$$F_{\text{magd}} = \frac{3\mu_0 M_D M_l}{2\pi(d_2 - x)^4} \quad (2)$$

在激励的作用下悬浮磁体发生运动, 其中整体阻尼力计算见式 (3)。

$$F_{\text{dl}} = (c_1 + c_2)x' \quad (3)$$

式中: 悬浮磁体的振动速度为 x' 。上下固定磁体对中间悬浮磁体的阻尼系数分别为 $c_1=0.010 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 和 $c_2=0.010 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$, 线圈与悬浮磁体相对运动, 受到的电磁力见式 (4)。

$$F_{\text{ce}} = BIL_{\text{coil}} \quad (4)$$

式中: L_{coil} 为线圈的长度, $L_{\text{coil}}=400 \text{ m}$; B 为磁通量; I 为线圈电流。

根据基尔霍夫电压定律得出系统的机电耦合方程^[38]见式 (5)。

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V - I(R_w + R_l)}{L_w} \quad (5)$$

$$V = BL_{\text{coil}}x' \quad (6)$$

式中: R_w 为线圈电阻, $R_w=1.3 \text{ k}\Omega$; R_l 为负载电阻。

将式 (6) 代入式 (5), 并简化得到式 (7)。

$$\frac{dI}{dt} L_w - BL_{\text{coil}}x' + I(R_w + R_l) = 0 \quad (7)$$

式中: I' 为电流的变化率; L_w 为电感, $L_w=0.3 \text{ H}$ 。

由 2 个微分方程得出该统的控制方程见式 (8)。

$$\begin{cases} m_1 x'' - \frac{3\mu_0 M_U M_l}{2\pi(d_1 + x)^4} + \frac{3\mu_0 M_D M_l}{2\pi(d_2 - x)^4} + \\ (c_1 + c_2)x' + BIL_{\text{coil}} - m_1 g = -m_1 y'' \\ \frac{dI}{dt} L_w - BL_{\text{coil}}x' + I(R_w + R_l) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: y'' 为激励加速度; m_1 为悬浮磁体质量, $m_1=2.12 \text{ g}$ 。

电磁式振动能量收集器的功率表达式见式 (9)。

$$P = I^2 R \quad (9)$$

2.4 能量管理电路的设计

由于公路运输车辆的振动能量较集中在 5~16 Hz

频带, 频率较低, 因此, 为了提升物流环境监测系统在公路运输环境下的续航能力, 需对能量收集器的输出电压进行升压整流。文中采用 10 倍压整流电路来实现整流和升压功能, 见图 5。

理论上, 不考虑负载时, 经过 10 个晶体二级管和 10 个等值电容的连续升压后, 输出端电压应为输入端电压的 10 倍, 但是考虑高阶倍压电路的带载能力较差, 对于级数为 n 的倍压电路而言, 一般认为其 n 级压降总和为^[39]:

$$\Delta U = [n + 2n + (n-1) + 2n + 2(n-1) + \dots] \frac{I}{f \times C} \quad (10)$$

简化后见式 (11)。

$$\Delta U = \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right) \frac{I}{f \times C} \quad (11)$$

故文中采用的 10 倍压整流电路的压降为:

$$\Delta U = \left(\frac{100}{3}n^3 + 10n^2 - \frac{1}{3}n \right) \frac{5I}{f \times C} \quad (12)$$

式中: n 为倍压级数; I 为输出电流; C 为电容值; f 为输入电压的频率。

可知倍压整流电路的输出电压为:

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} - \Delta U \quad (13)$$

式中: U_{out} 为输出电压; U_{in} 为输入电压。

3 仿真及实测结果对比分析

为验证振动能量收集器的数学模型可行性和能量管理电路的性能, 实验测试了不同频率激励下的振动能量收集器的输出和仿真结果对比及其阻抗匹配分析, 并对能量管理电路的升压效果进行了仿真。

3.1 参数设置和实验环境

能量收集器的数学模型是两阶常微分方程组, 采用 Matlab 数值方法中的龙格库塔法求解磁悬浮振动能量收集器在振动情况下的运动方程。龙格库塔法的思想是根据某些点的值的线性组合构造公式, 首先将运动方程根据泰勒展开, 再与初值问题解的泰勒展开式进行对比, 按照使尽可能多的项完全相等的原则确定参数, 从而确保公式具有更高的精度。

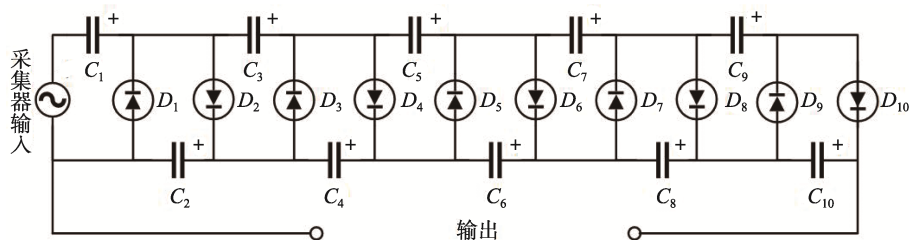


图 5 10 倍压整流电路
Fig.5 Ten times voltage rectifying circuit

选取给定的激励 $y=A\sin[(2\pi ft)/(2\pi f)^2]$, 将激励加速度作为输入, 在 Matlab 中编写振动能量收集器的振动方程, 设置系统相应的参数和初值进行数值求解。取简谐激励的频率为 7~11 Hz, 振动幅值 $A=1g=1\times 9.8\text{ m/s}^2$ 。

振动能量收集器性能测试的实验环境见图 6, 主要由信号发生器、功率放大器、加速度传感器、激振器、示波器等实验设备构成。信号发生器用于产生 8~11 Hz 内不同频率的正弦激励信号, 所产生的激励信号经过功率放大器后传输给激振器。振动能量收集器通过铝制专用夹具采用 M5 螺纹固定于激振器的振动台上。同时, 能量收集器的另一端也通过夹具和 M5 螺纹固定有加速度传感器, 用于感知振动能量收集器受到的实际激励。振动能量收集器的输出和加速度传感器的输出分别连接至示波器的 2 个通道。

信号发生器的输出为 8~11 Hz 的正弦波。在信号频率确定的基础上调整功率放大器以保证激励大小保持与数学模型振幅一致稳定在 $\pm 1g$ 。振动能量收集器的输出直连示波器探头。

振动能量收集器容器长度为 34 mm, 外径为 19 mm, 内径为 17 mm; 内部动磁铁的直径为 8 mm, 厚度为 8 mm, 上下固定磁铁的直径为 16 mm, 厚度

为 2 mm, 磁铁的材料皆为钕铁硼; 弹簧长度为 20 mm; 垫片直径为 16 mm, 厚度为 1 mm; 外部的线圈匝数为 2 500 匝, 厚度为 5 mm, 内径为 20 mm, 外径为 28.2 mm, 线径为 0.08 mm。

3.2 仿真和实测对比结果及阻抗匹配分析

振动能量收集器其数学模型和实测输出结果对比见图 7, 两者的波形基本吻合。振动能量收集器在 8~11 Hz 不同激励下的输出电压峰值均大于 1 V, 而激励频率为 9 Hz 时输出电压的峰值最大, 达到 3.12 V。因此, 在 8~11 Hz 激励下的振动能量收集器有较好的响应特性, 输出电压整体较高。

综上, 实验结果表明, 文中提出的振动能量收集器数学模型有效, 此结构也能够较好地收集快递包裹运输中的振动能量, 并能有效地完成能量转换, 其输出能够满足后续整流升压的基本条件。

针对输出功率最优化, 通过外接负载进行了阻抗匹配实验, 保持设备输出效果最优时的激振频率 (9 Hz) 不变, 在不同负载下得出电压峰值, 并计算出其有效值, 进而计算出功率, 见图 8。线圈的内阻为 1.3 k Ω , 在负载为 1 k Ω 左右时达到输出功率最优, 此时的电压峰值为 0.48 V, 功率为 11.52 μW 。

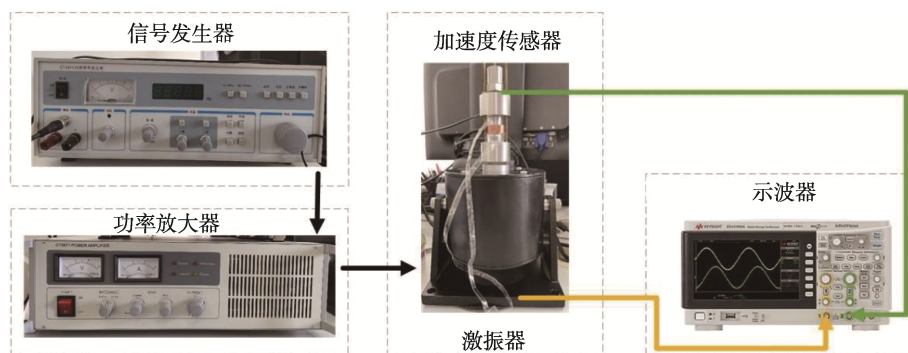


图 6 实验平台图
Fig.6 Experimental platform diagram

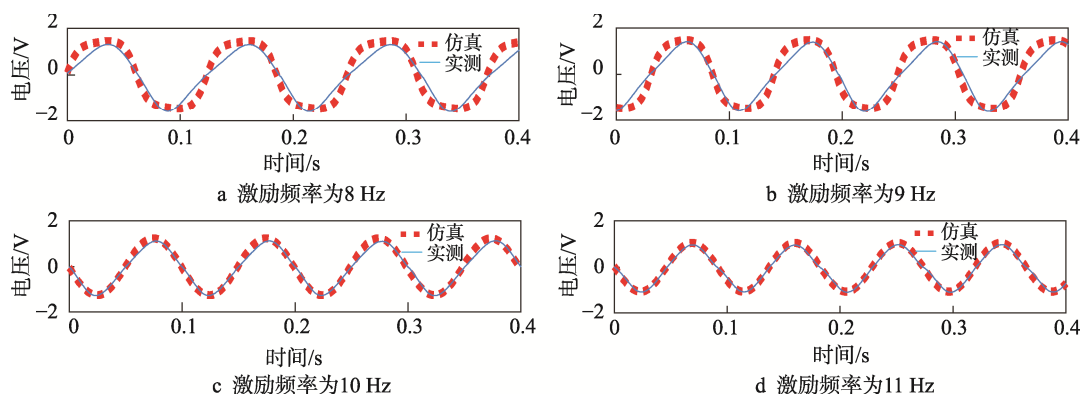


图 7 振动能量收集器的仿真和实测对比
Fig.7 Comparison between simulation and measurement of vibration energy harvester

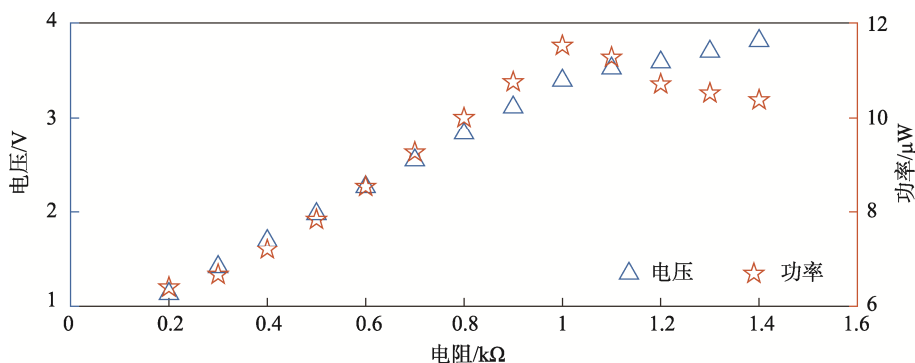


图 8 阻抗匹配实验的输出电压峰值和功率

Fig.8 Output voltage peak value and power of impedance matching experiment

3.3 能量管理电路的仿真试验和结果分析

文中采用 Multisim 14.0 进行了能量管理电路仿真。仿真试验中电源的峰峰值设为 1 V、频率为 60 Hz。分析 3.3 节中提出的倍压整流电路可知, 电容 C_1 、 C_2 、 C_3 的增大能够使输出电压增大, 而其余电容增大对输出电压影响不大, 因此, 为确定其中各电容的大小, 首先对 C_1 、 C_2 、 C_3 在不同取值下的升压效果进行了试验。 C_1 、 C_2 、 C_3 分别统一设置为 10、100、1 000 μF 时的升压情况见图 9。由图 9 可知, C_1 、 C_2 、 C_3 都为 10 μF 和 100 μF 时的效果相近且均优于 1 000 μF 时,

因此, 兼顾电容体积, 将倍压整流电路中的所有电容均设置为 10 μF 。

能量管理电路的输入和输出电压仿真结果见图 10。输入电压为蓝色曲线所示的交流电, 经过升压整流后的输出电压如红色曲线所示, 逐渐递增后稳定在 5 V 附近。可见, 振动能量收集器的输出电压经过 10 倍压整流电流后可实现有效的升压和整流效果, 满足为蓄电池充电的基本要求。可根据后端采集处理器件的不同的功耗和多样化需求来进行计算具体的续航能力提升比例。

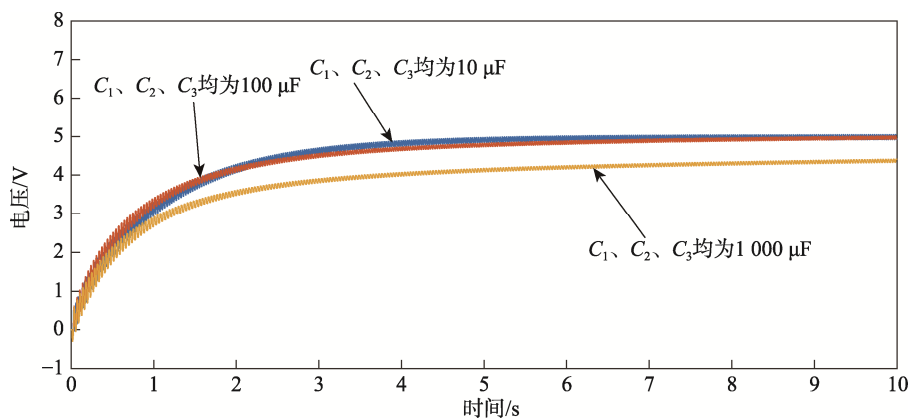
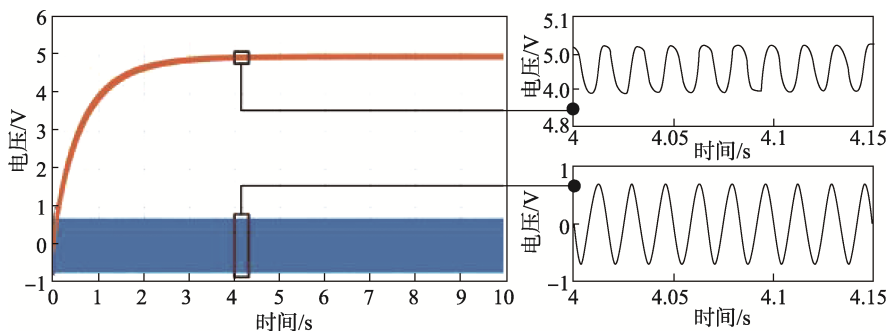
图 9 C_1 、 C_2 、 C_3 取不同值时的升压效果Fig.9 The boost effect of C_1 、 C_2 and C_3 with different values

图 10 能量管理电路的输出

Fig.10 Output of energy management circuit

4 结语

文中针对快递包裹运输的实时状态监测能源和续航问题,提出了自供电物流环境监测系统,并进行了设计实现和实验验证。分析了公路运输车辆的振动分布情况,我国公路运输车辆的主要振动能量频率约为 8~11 Hz,能量集中处的振幅约为 $\pm 1g$ 。针对快递包裹运输环境设计了振动能量收集器,进行了物理和数学建模并仿真。仿真和实测输出结果波形基本吻合。在振动激励下收集器不外接负载时输出电压的峰值均高于 1 V,外接负载为 1 k Ω 左右时输出功率最优。完成了能量管理电路的设计和仿真,实验结果表明该电路能够有效完成振动能量收集器输出电压的整流升压,与收集器配合后充电效率可达 38.7%~51.1%。

文中的后续工作将在现有基础上继续丰富应用场景,如汽车胎压监测等,优化能量收集器的结构、加宽响应频带、提升能量转化效率。此外,能量管理电路的优化集成及其与系统其他模块根据实际采集需求的能源消耗方法研究也是后续工作之一。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家邮政局. 国家邮政局关于 2021 年上半年行业经济运行情况的通报[EB/OL]. (2021-09-03) http://www.spb.gov.cn/xw/dtxx_15079/202108/t20210803_3980698.html.
The Official Website of the State Post Bureau of the People's Republic of China. The State Post Office Announced the Distribution of Transportation Industry in Recent Five Years[EB/OL]. (2019-12-04) http://www.spb.gov.cn/xw/dtxx_15079/201907/t20190725_1888075.html.
- [2] FU Hai-ling, YEATMAN E M. A Methodology for Low-Speed Broadband Rotational Energy Harvesting Using[J]. *Energy*, 2017, 125: 152-161.
- [3] FU Hai-ling, THEODOSSIADES S, GUNN B, et al. Ultra-Low Frequency Energy Harvesting Using Bi-Stability and Rotary-Translational Motion in a Magnet-Tethered Oscillator[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 101(4): 2131-2143.
- [4] DING Ao, ZHANG Yuan, ZHU Lei, et al. Recognition Method Research on Rough Handling of Express Parcels Based on Acceleration Features and CNN[J]. *Measurement*, 2020, 163: 1-11.
- [5] 丁奥, 张媛, 朱磊, 等. 基于加速度分布特征的快递暴力分拣识别方法[J]. *包装工程*, 2020, 41(23): 162-171.
DING Ao, ZHANG Yuan, ZHU Lei, et al. Recognition Method for Rough Handling of Express Parcels Based on Acceleration Distribution Features[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(23): 162-171.
- [6] XIONG Hao-cheng, WANG Lin-bing. Piezoelectric Energy Harvester for Public Roadway: On-Site Installation and Evaluation[J]. *Applied Energy*, 2016, 174: 101-107.
- [7] FRANCESCO P, KONSTANTINOS G. Piezoelectric Energy Harvesting from Vortex Shedding and Galloping Induced Vibrations inside HVAC Ducts[J]. *Energy & Buildings* 2018: 158: 371-383.
- [8] ZHANG Y, WANG T, LUO A, et al. Micro Electrostatic Energy Harvester with Both Broad Bandwidth and High Normalized Power Density[J]. *Appl Energy*, 2018, 212: 362-371.
- [9] WU Y, HU Y, HUANG Z, et al. Electret-material Enhanced Triboelectric Energy Harvesting from Air Flow for Self-Powered Wireless Temperature Sensor NetworkSens[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 271: 364-372.
- [10] SOARES D S M P, FERREIRA J A F, SIMÕES J A O, et al. Magnetic Levitation-Based Electromagnetic Energy Harvesting: A Semi-Analytical Non-Linear Model for Energy Transduction[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 18579.
- [11] CARNEIRO P, DOS SANTOS M P S, RODRIGUES A, et al. Electromagnetic Energy Harvesting Using Magnetic Levitation Architectures: A Review[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114191.
- [12] NURETTIN S, MUAMMER K. A Comprehensive Review on the State-of-the-Art of Piezoelectric Energy Harvesting[J]. *Nano Energy*, 2020, 80: 1-25.
- [13] WANG Biao, LONG Zhi-he, HONG Ying, et al. Woodpecker-Mimic Two-Layer Band Energy Harvester with a Piezoelectric Array for Powering Wrist-Worn Wearables[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106385.
- [14] MAHMUD M, HUDA N, FARJANA S H, et al. Recent Advances in Nanogenerator-Driven Self-Powered Implantable Biomedical Devices[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(2): 1701210.
- [15] ZHENG Q, SHI B, LI Z, et al. Recent Progress on Piezoelectric and Triboelectric Energy Harvesters in Biomedical Systems[J]. *Advanced Science*, 2017, 4: 1-23.
- [16] HANSEN B J, YING Liu, YANG Ru-sen, et al. Hybrid Nanogenerator for Concurrently Harvesting Biomechanical and Biochemical Energy[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(7): 3647-3652.
- [17] JIANG Lai-ming, YANG Y, CHEN R, et al. Flexible Piezoelectric Ultrasonic Energy Harvester Array for Bio-Implantable Wireless Generator[J]. *Nano Energy*, 2019, 56: 216-224.
- [18] LI Rui, YU Yi, ZHOU Bo-chao, et al. Harvesting Energy from Pavement Based on Piezoelectric Effects: Fabrication and Electric Properties of Piezoelectric Vibra-

- tor[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018, 10(5): 054701.
- [19] SONG Y, YANG C H, HONG S K, et al. Road Energy Harvester Designed as a Macro-Power Source Using the Piezoelectric Effect[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(29): 12563-12568.
- [20] BEEBY S P, O'DONNELL T. Energy Harvesting Technologies[M]. New York: Springer US, 2009: 132-135.
- [21] WANG Z L, WU W. Nanotechnology-Enabled Energy Harvesting for Self-Powered Micro-/Nanosystems[J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2012, 51(47): 1170021.
- [22] KIM K B, CHO J Y, JABBAR H, et al. Optimized Composite Piezoelectric Energy Harvesting Floor Tile for Smart Home Energy Management[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 31-37.
- [23] SNYDER D S. Vibrating Transducer Power Supply for Use in Abnormal Tire Condition Warning Systems: US, 4384482[P]. 1983-05-24.
- [24] SNYDER D S. Piezoelectric Reed Power Supply for Use in Abnormal Tire Condition Warning Systems: US, 4510484[P]. 1985-04-09.
- [25] FU H, X MEI, YURCHENKO D, et al. Rotational Energy Harvesting for Self-Powered Sensing[J]. Joule, 2021, 5(5): 1074-1118.
- [26] 孔令强, 袁天辰, 杨俭, 等. 双自由度磁悬浮式轨道车辆振动俘能器的研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 156-162.
- KONG Ling-qiang, YUAN Tian-chen, YANG Jian, et al. A 2-DOF Vibration Energy Capture Device for Magnetic Levitation Rail Vehicle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 156-162.
- [27] AOUALI K. Efficient Broadband Vibration Energy Harvesting Based on Tuned Non-Linearity and Energy Localization[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(10): 10-16.
- [28] SHEN Ye-cheng, LU Kai-yuan. Scavenging Power from Ultra-Low Frequency and Large Amplitude Vibration Source through a New Non-Resonant Electromagnetic Energy Harvester[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 222: 1-10.
- [29] 李丹晖, 王军. 包装振动能量采集器非线性拾振结构响应分析[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 28-32.
- LI Dan-hui, WANG Jun. Response of Vibration Energy Harvester's Nonlinear Vibration Pickup Structure for Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 28-32.
- [30] PAN Yu, LIN Teng, QIAN Feng, et al. Modeling and Field-Test of a Compact Electromagnetic Energy Harvester for Railroad Transportation[J]. Applied Energy, 2019, 247: 309-321.
- [31] PAN Yu, LIU Feng-wei, JIANG Rui-jin, et al. Modeling and Onboard Test of an Electromagnetic Energy Harvester for Railway Cars[J]. Applied Energy, 2019, 250: 568-581.
- [32] WANG Y, LI S, GAO M, et al. Analysis, Design and Testing of a Rolling Magnet Harvester with Diametrical Magnetization for Train Vibration[J]. Applied Energy, 2021, 300(117373): 1-15.
- [33] WANG Z X, WANG W, GU F S, et al. On-Rotor Electromagnetic Energy Harvester for Powering a Wireless[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243(114413): 1-8.
- [34] CHONHENCHO V, SINGH S P, SINGH J J, et al. Measurement and Analysis of Vehicle Vibration for Delivering Packages in Small-Sized and Medium-Sized Trucks and Automobiles[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 8(25): 31-38.
- [35] 周浩. 公路运输包装随机振动分析与模拟方法研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017: 29-38.
- ZHOU Hao. Study on Random Vibration Analysis and Simulation Method of Road Transport Packaging[D]. Guangzhou: Jinan University, 2017: 29-38.
- [36] ZHOU R, YAN L P, LI B G, et al. Measurement of Truck Transport Vibration Levels in China as A Function of Road Conditions, Truck Speed and Load Level[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(11): 949-957.
- [37] TANG Li-hua, YANG Yao-wen. A Nonlinear Piezoelectric Energy Harvester with Magnetic Oscillator[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(9): 094102.
- [38] CHEN L Q, JIANG W A. Internal Resonance Energy Harvesting[J]. Journal of Applied Mechanics, 2015, 82(3): 031004.
- [39] 柳纪虎, 刘昶丁, 刘永生. 多级倍压整流电路的设计原理及其有关参数的计算方法[J]. 半导体技术, 1992, 17(4): 46-48.
- LIU Ji-hu, LIU Chang-ding, LIU Yong-sheng. Design Principle of Multilevel Voltage Doubling Rectifier Circuit and Calculation Method of Related Parameters[J]. Semiconductor Technology, 1992, 17(4): 46-48.

责任编辑: 曾钰婵