文章编号： 1671-7449(2025)05-0599-08　　J. Test Measur. Technol., 2025, 39(5): 599-606.

面向车辆动态监测的低频振动能量收集器

郭家栋[1]，宋晓光[2]，何　剑[2*]

（1. 中国航天科技集团有限公司，北京 100048；
2. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室，山西 太原 030051）

摘　要： 在环境中捕获宽带随机振动能量为车辆上的各类传感器和监控设备供电是一种潜在的有效途径。然而，传统能量采集器难以实现稳定的输出，这给能量管理电路的设计带来了挑战。提出了一种面向车辆动态监测的低频振动能量收集器，包括配重单元、齿轮箱和发电机组成。配重单元有效感知低频微弱振动，通过齿轮箱的内嵌和外嵌收紧储能系统实现能量储存与释放，最终由发电轮系实现能量的定量释放，从而实现振动能向电能的高效转化，为传感系统提供持续供电。实验表明，该采集器能够有效采集3～18 Hz范围内的宽频振动，在谐振频率为6 Hz时，采集器单次释放的最大平均功率为34.9 mW，输出能量为58 mJ，能将22 mF的电容在100 s内充电至10.95 V。此技术在车辆运行过程中能够高效收集低频振动能量，对微能源采集技术的发展具有深远的指导意义。

关键词： 低频随机振动；宽频振动；定量释放；能量采集器；动态监测系统
中图分类号： TM619　　**文献标识码：** A　　**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025061
引用格式： 郭家栋，宋晓光，何剑. 面向车辆动态监测的低频振动能量收集器[J]. 测试技术学报，2025，39(5)：599-606.
GUO Jiadong，SONG Xiaoguang，HE Jian. Low-frequency vibration energy harvester for vehicle dynamics monitoring [J]. Journal of Test and Measurement Technology，2025，39(5)：599-606.

Low-Frequency Vibration Energy Harvester for Vehicle Dynamics Monitoring

GUO Jiadong[1], SONG Xiaoguang[2], HE Jian[2*]

(1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;
2. State Key Laboratory of Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrumentation for Extreme Environments, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Harvesting wide-band random vibration energy in the environment to power various types of sensors and monitoring devices in vehicles is a potentially effective way. However, conventional energy harvesters struggle to achieve a stable output, which poses a challenge to the design of energy management circuits. In this paper, a low-frequency vibration energy harvester for vehicle dynamic monitoring is proposed, including a counterweight unit, gearbox, and generator. The counterweight unit effectively senses the low-frequency weak vibration, and realizes energy storage and release through the embedded and externally-embedded tightening energy storage system of the gear box, and finally realizes the steady-state release of energy by the

收稿日期： 2025-01-11
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(62171414, 52175554)
作者简介： 郭家栋(1984－)，男，高级工程师，硕士，主要从事信息采集与处理技术研究。E-mail：guojiadong1984@163.com。
*** 通信作者：** 何　剑(1985－)，男，教授，博士，主要从事MEMS智能微纳器件及系统集成等研究。E-mail：drhejian@nuc.edu.cn。

generator wheel system, to realize the efficient conversion of the vibration energy to electric energy, and provide continuous power supply for the sensing system. Experiments show that the harvester can effectively harvest wind-band vibration in the range of 3~18 Hz, and when the resonant frequency is 6 Hz, the maximum average power released by the harvester is 34.9 mW. with an output energy of 58 mJ, which can charge a 22 mF capacitor to 10.95 V in 100 s. This technology can efficiently harvest low-frequency vibration energy during vehicle operation, which has far-reaching guiding significance for the development of micro-energy harvesting technology.

Key words: low frequency random vibration; wide-band vibration; steady-state release; energy harvester; dynamic monitoring system

0 引 言

随着物联网技术的发展，传感器技术[1]已成为车辆动态监测系统的核心部分，广泛应用于数据采集、路径规划和安全预警。这些传感器需要长期稳定运行，但车辆内部空间有限，为其提供持续可靠的电源成为一个挑战。然而，传统化学电池的使用寿命有限、污染环境，且需要定期更换电池，这限制了这些设备的大规模应用[2]。有效的解决方案是将环境中的可再生能源转化为电能。太阳能[3]和风能[4]受气候影响较大，难以持续获取，而振动能[5]因其广泛存在且受环境影响小，能持续提供能量，因此，科研人员已开发出多种基于摩擦电[6]、压电[7]和电磁感应效应[8]的振动能量采集器。摩擦纳米发电机的输出功率低，且存在摩擦失效[9]问题，难以满足电子设备供电需求。压电式采集器[10]依赖外部压力发电，但在反复冲击下容易出现机械疲劳，缩短使用寿命。相比之下，电磁式采集器[11]具备高灵敏度和大输出功率，成为将振动能转化为电能，为传感器提供稳定电源的可靠解决方案。

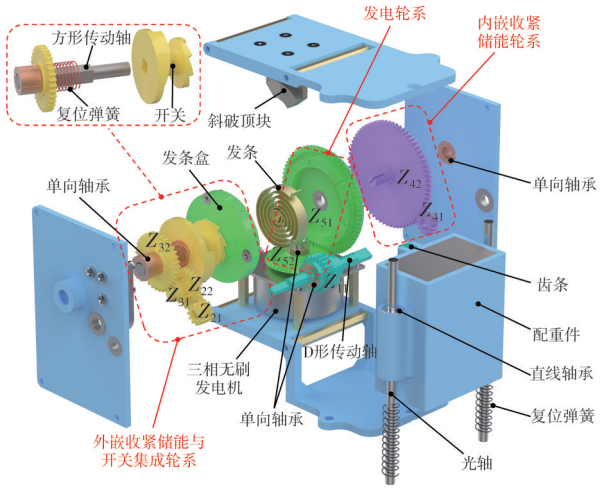
在车辆运行环境中存在多种振动源，这些振动源表现出随机性，振动幅度各异，通常频率较低，具有宽频特性[12]。然而，传统的振动能量采集器只能在特定频率下实现高功率输出，无法有效满足车辆动态监测中低频振动能量采集的需求。另外，在低频随机振动下，能量采集器输出的能量较低且不稳定，使得后端能源管理设计的难度大，增加了成本，降低了能量转换效率。目前，许多国外学者积极研究低频和宽频振动能量采集器，取得了显著成果。其中，Cao等[13]提出了基于塔式弹簧的全向混合摩擦电-电磁纳米发电机，该装置能够收集0.4~10 Hz的宽带振动。牟方晓等[14]提出了一种回折梁结构低频压电能量采集器，可以在3.5~8.5 Hz范围内产生大于5 V的电压。上述方法成功实现了低频、宽频能量采集，但不能实现能量的定量释放，使得能源管理电路设计困难。为了解决这个问题，一些用于实现定量释放的结构设计相继提出。Bhatia等[15]提出了一种采用螺旋弹簧储能和飞轮调速的垂直分离式摩擦纳米发电机(Triboelectric Nanogenerator, TENG)可预测性振动能量采集器，该装置实现了能量的定量释放，然而由于体积太大，需要手动操作开关去释放能量，难以推广使用。

本文提出了一种面向车辆动态监测的低频振动能量收集器，用于高效收集多场合下的宽频随机振动能量。该采集器通过高灵敏的配重单元响应低频和宽频振动，并利用齿轮箱的内嵌与外嵌收紧储能轮系进行双向储存能量，同时，通过开关与发条盒的端面棘轮离合系统实现能量的储存与释放，最终通过发电轮系实现能量的定量释放。这一技术能够适应车辆运行环境中的宽频带和随机振动特性，推动微能源采集技术在车辆监测领域的应用，为实现传感器自供电提供了重要支持。

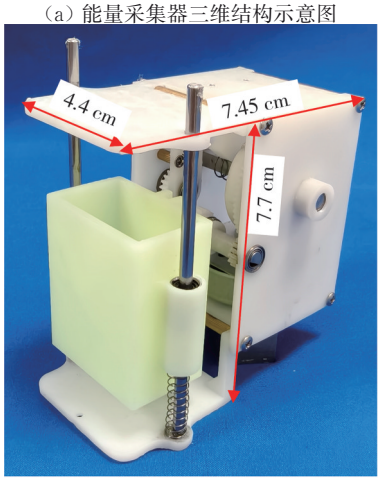
1 结构设计与理论分析

本文针对低频振动能量采集与定量释放的需求，提出了一种面向车辆动态监测的低频振动能量收集器。如图1所示，该能量采集器主要由配重单元、齿轮箱和发电机三部分组成。配重单元由配重件、直线轴承、光轴、复位弹簧和齿条组成。它通过两根光轴安装于上下壳体之间，以齿轮箱将配重件上下振动能量转换为旋转能量。齿轮箱由内嵌收紧储能轮系、外嵌收紧储能与开关集成轮系和发电轮系组成。内嵌轮系的传动比N_{g1}为5∶1，用于增大扭矩实现向内收紧高强度的发条，外嵌轮系的传动比N_{g2}为6∶1，用于增大扭矩，

使棘轮开关向外收紧发条，发电轮系传动比 N_{g3} 为 1∶1.7，用于提高发电机的转速。在该系统中，齿条与齿轮 Z_{11} 啮合，齿轮 Z_{11} 中心装有单向轴承，两者固为一体，单向轴承仅在单向自由转动，反向则锁定。其内部装有D形传动轴，齿轮 Z_{21} 与齿轮 Z_{41} 中心开设有D形孔以适配D形传动轴，D形传动轴依次穿过齿轮 Z_{21}、Z_{11} 和 Z_{41}。当配重件向下运动时，3个齿轮实现同轴转动，将能量传递至内嵌和外嵌轮系。其中，内嵌轮系中的齿轮 Z_{42} 通过发条内端实现逆时针收紧发条，同时，外嵌轮系中的开关可沿方形传动轴轴向往复运动，配合发条盒端面棘轮实现能量的储存与释放。最终通过发电轮系实现机械能向电能的高效转换。



（a）能量采集器三维结构示意图



（b）能量采集器实物图

图 1　能量采集器三维结构及实物图

Fig. 1　Three-dimensional structure and physical diagram of energy harvester

图 2 展示了该齿轮箱的工作原理。当配重单元的齿条向下运动时（阶段Ⅰ），齿轮 Z_{11} 内部的单向轴承为锁紧状态，开关与发条盒的端面棘轮处于咬合状态，由于齿轮 Z_{11}，Z_{21} 和 Z_{41} 为同轴转动，分别向外嵌收紧储能与开关集成轮系和内嵌收紧储能轮系传递能量。此时，外嵌轮系的开关顺时针收紧发条，而内嵌轮系的齿轮 Z_{42} 逆时针旋转收紧发条。当齿条向上运动时（阶段Ⅱ），齿轮 Z_{11} 内部的单向轴承为脱离状态，仅齿轮 Z_{11} 逆时针旋转，其余齿轮保持静止。由于齿轮 Z_{32} 与齿轮 Z_{42} 的轴上都装有单向轴承。当轮系静止时，起到了防止外嵌轮系和内嵌轮系倒转的作用。经过多个阶段Ⅰ和阶段Ⅱ后，开关进入新的位置（阶段Ⅲ），发条被进一步收紧。随着更多阶段Ⅰ和阶段Ⅱ的循环，开关与斜坡顶块的斜坡凸台在轴向位置越来越厚，开关将压缩复位弹簧向后移动，使开关与发条盒的端面棘轮处于分离状态，发条盒被释放（阶段Ⅳ）。此时，发条试图恢复原状，从而产生驱动发电轮系旋转的动力。在发电轮系中，齿轮 Z_{52} 中心装有单向轴承，两者固为一体。当发电轮系开始运转时，单向轴承驱动三相无刷发电机同轴旋转。当开关与斜坡顶块的轴向位置变薄时，复位弹簧将开关复位，使开关与发条盒的端面棘轮重新咬合，齿轮 Z_{52} 和单向轴承停止旋转。然而，由于单向轴承自身的特性，发电机因惯性会继续旋转一段时间，并不随着发条盒被卡住而停止运转，从而实现能量的充分释放。

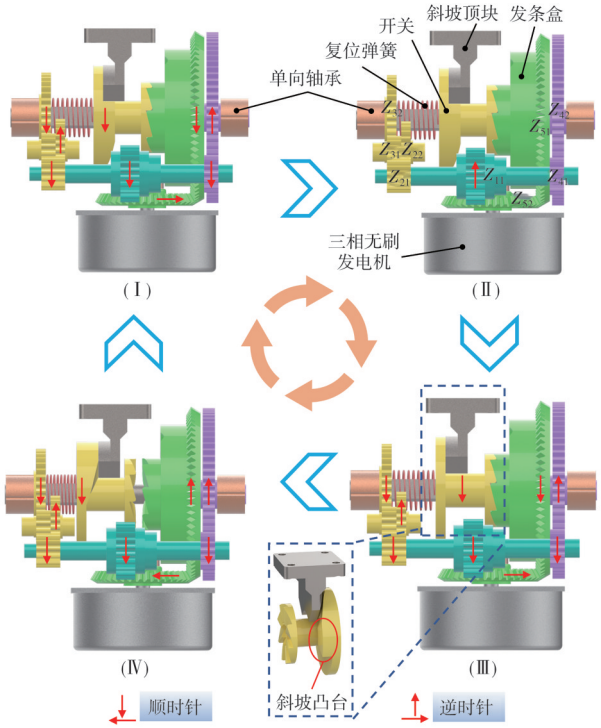


图 2　能量采集器工作原理

Fig. 2　Working principle of energy harvester

我们研究了配重单元向下运行时，对内嵌轮系与外嵌轮系转动角度的影响，建立的振动模型如图 3 所示。

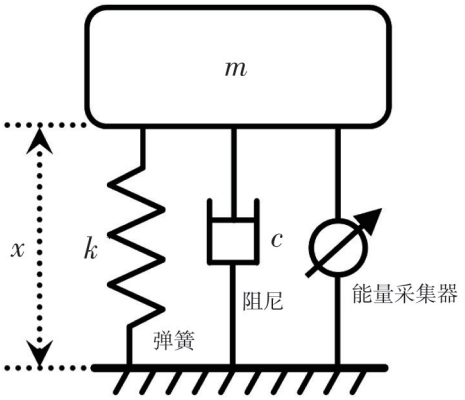


图 3 能量采集器的振动模型

Fig. 3 Vibration model of energy harvester

通过牛顿第二定律可推导出来系统的运动方程为

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=0, \tag{1}$$

式中：m为配重块的质量；x为在配重向下运动产生的位移；c为机械阻尼；k为弹簧刚度。又由于$k/m=\omega^2$，$c/m=2\omega\zeta$，其中，ω为系统的角频率，ζ为阻尼比，代入式(1)中可得

$$\ddot{x}+2\zeta\omega\dot{x}+\omega^2x=0。 \tag{2}$$

由式(2)求解得到的相对位移为

$$x=\mathrm{e}^{-\zeta\omega t}(C\cos(\omega\sqrt{1-\zeta^2}\,t)+\Phi), \tag{3}$$

式中：C和Φ为由初始条件决定的常数。又由于$\theta_i=x/r$，其中，θ_i为齿轮Z_{11}在一次上下振动转过的角度，r为齿轮Z_{11}的半径，所以内嵌轮系与外嵌轮系在一次振动过程中转过的角度分别为

$$\theta_s=\theta_i/N_{g1}, \tag{4}$$

$$\theta_c=\theta_i/N_{g2}, \tag{5}$$

式中：θ_s和θ_c分别为内嵌轮系与外嵌轮系一次上下振动转过的角度。

由于开关轮系的齿轮Z_{32}只需转动一周就可以将开关打开，根据内嵌轮系与外嵌轮系的传动比计算可以得出发条在开关打开时转动的弧度为3.85π。

发条储存的能量E由弹性势能决定，计算公式为

$$E=\frac{1}{2}k_c\theta^2, \tag{6}$$

式中：k_c为扭矩刚度；θ为扭转角度。又由于$k_c=Gbt^3/3L$，其中，G为弹性模量，b为宽度，t为厚度，L为长度，所以可以得出发条的能量计算综合公式为

$$E=\frac{1}{2}\frac{Gbt^3}{3L}\theta^2。 \tag{7}$$

为了模拟真实的低频振动场景，搭建了一套振动测试系统，如图 4 所示。激振台(JZQ-200 Vibration Exciter)通过信号发生器(AFG-2225 Waveform Generator)和功率放大器(YE5872A Power Amplifier)提供的电信号模拟不同频率和加速度。通过静电计(Keithley 2611B System Electrometer)测试采集器的输出电压和电流，并使用加速度传感器获取加速度，将电压、电流和加速度数据上传到计算机。

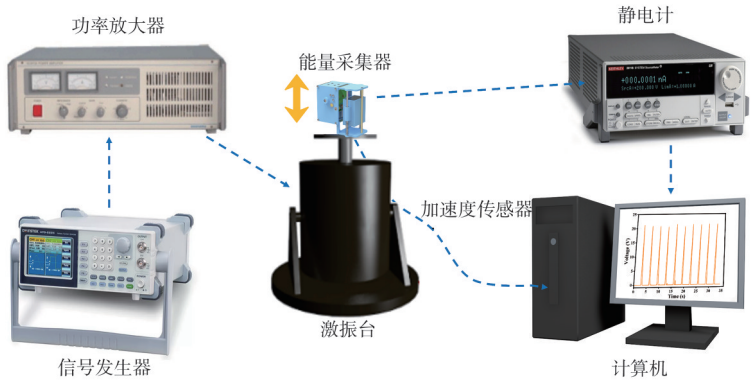


图 4 振动测试系统

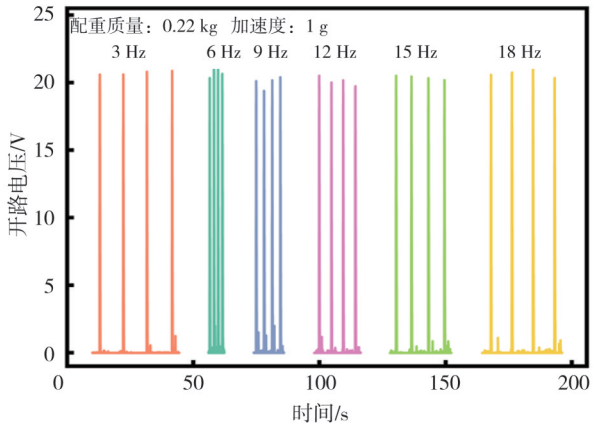
Fig. 4 Vibration test system

2 结果与讨论

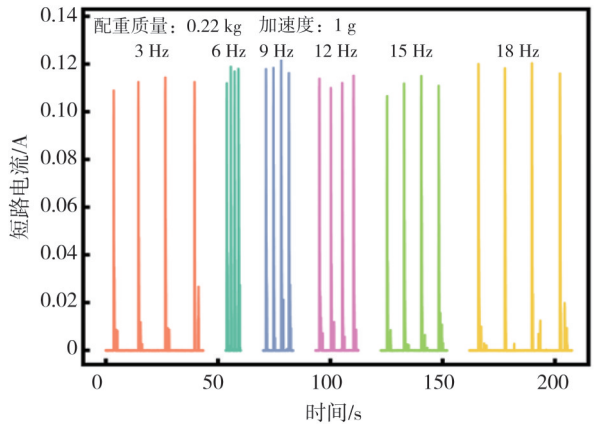
2.1 能量采集器的输出性能

在研究过程中，采用开路电压、短路电流、储能时间和释放时间等参数对该采集器的输出性能进行了测试和分析。在图 5(a)、(b)中，当加速度为 1 g，配重为 0.22 kg 的情况下，激励频率从 3 Hz 增加到 18 Hz，开路电压始终保持在 19.39～21.37 V 的范围内，短路电流始终保持在 0.106～

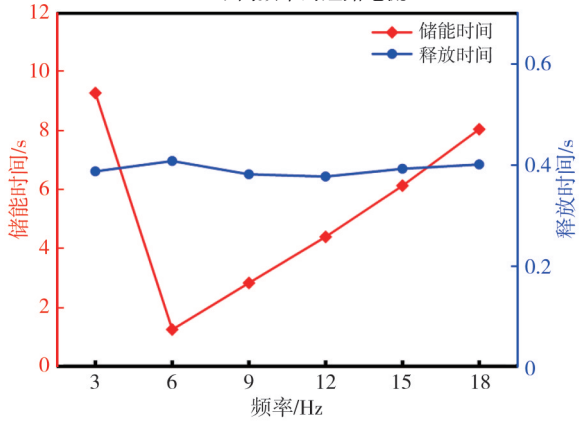
0.121 A 的范围内。在图 5（c）中，释放时间的变化范围为 0.376～0.407 s，无明显的变化，储能时间的变化范围为 1.251～9.283 s，在 6 Hz 时储能时间最小，说明配重单元在 6 Hz 时出现共振现象，系统的振动幅值将达到最大值。其中，由于发条每次存储的能量相同，因此开路电压、短路电流和释放时间不受激励频率的影响，而只对储能时间有影响。



（a）不同频率的开路电压



（b）不同频率的短路电流



（c）不同频率的储能时间与释放时间

图 5　能量采集器在不同频率下的性能测试

Fig. 5　Performance test of energy harvester at different frequencies

图 6 为采集器的阻抗匹配测试。将激励频率固定为 6 Hz，加速度固定为 1 g，配重固定为 0.22 kg，当外部电阻从 10 Ω增加到 10^6 Ω，测试外部电阻两端的峰值电压，通过计算得到相应的峰值功率。当外部电阻为 80 Ω时采集器的峰值功率达到了最大值（为了进行定值测量，以下所有测试的外部电阻均固定为 80 Ω）。

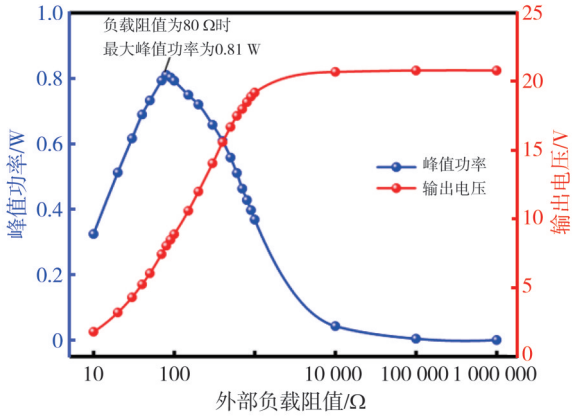


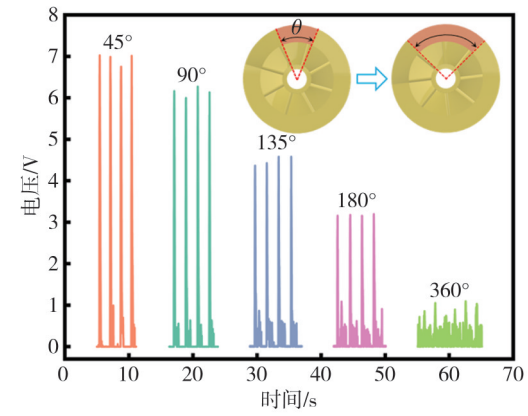
图 6　阻抗匹配测试

Fig 6　Impedance matching test

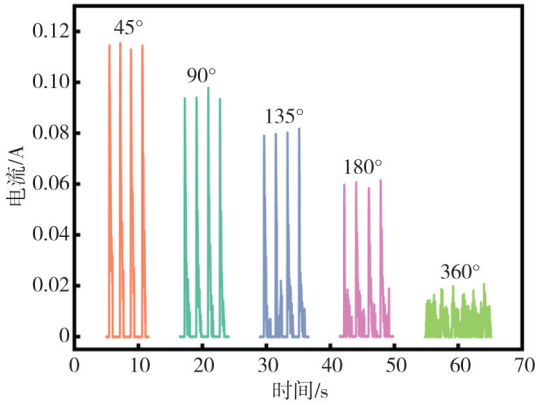
为了优化采集器的结构，分析了开关角度 θ 对采集器输出性能的影响。图 7（a）、（b）展示了在不同开关角度下，采集器的输出电压和电流，并附有开关角度 θ 变化示意图。

随着开关角度 θ 从 45°增大到 360°（开关始终处于开启状态），电压从 7.025 V 减小到 1.033 V，电流从 0.115 A 减小到 0.016 A。如图 7（c）所示，随着开关角度 θ 从 45°增大到 180°，储能时间从 1.40 s 减小到 0.59 s，释放时间从 0.25 s 增大到 1.25 s，其中，平均功率随着开关角度增大而减小，从 35.1 mW 减小到 1.1 mW。实验表明，开关角度为 45°～180°之间时，采集器能够有效地将机械低频不规则输入能量转换为规则的输出能量。而当开关角度在 360°时，尽管开关能够持续输出，但输出能量呈现不规则波动，不利于能源管理电路的控制及管理。其中，随着开关角度增大，平均功率逐渐下降，表明较小的开关角度能储存更多能量。但小角度开关意味着发条释放时间较短，且采集器的开关需要旋转一周才能完全打开。小角度下，有限的释放时间可能导致能量无法完全释放，未释放的能量会在下一周期积累，增加发条释放的能量需求。当输入能量无法满足需求时，储能过程将中断，导致开关无法正常开启。由图 7（a）、（b）可见，45°开关下电压与电流输出

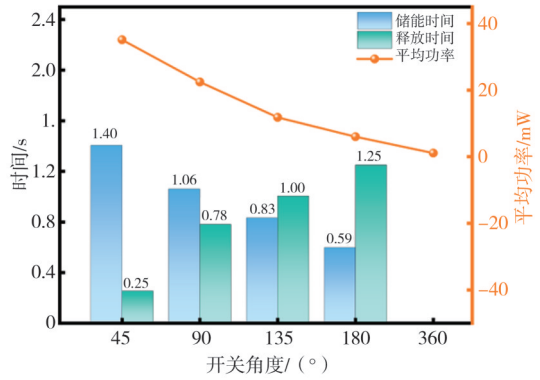
一致，表明其能完全释放能量，确保采集器的正常运行。因此，选用45°作为后续测量的标准值。



（a）不同开关的输出电压



（b）不同开关的输出电流



（c）不同开关储能时间、释放时间和平均功率

图 7 能量采集器在不同开关下的性能测试

Fig. 7 Performance test of energy harvester with different switches

2.2 能源管理电路的简化设计

由于能量采集器的稳态输出，避免了电压过高击穿后端用电设备，电压过低无法维持后端设备正常工作。为了高效采集能量采集器输出的电能，选用LT8494作为稳压电路的核心芯片，静态工作电流低于7 μA，设计外围电路将芯片配置为SEPIC模式，电源输入引脚与滤波电容相连用于降低电源纹波，电源输出引脚、反馈引脚和电源地三者间连接分压电阻实现输出电压的可调设置。

经过直流电源对能源管理电路进行电学测试，在12 V恒定电压输入条件下改变负载电阻，利用数字源表监测能源管理电路实时输入输出功率，记录结果如表1所示，稳压效率最大约为72%，且在不同输入功率下稳压效率均可稳定在60%以上，满足了不同电子负载适用环境下的稳定性需求。

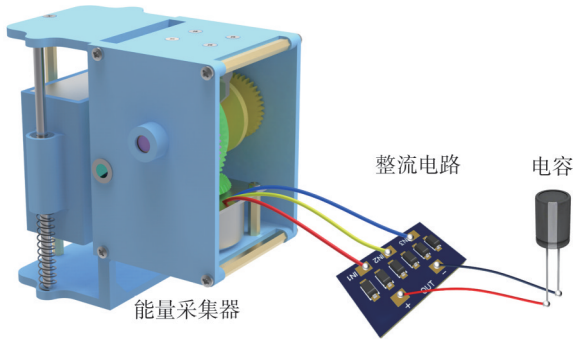
表 1 不同输入功率下的稳压电路效率

Tab. 1 Efficiency of voltage regulator circuit at different input powers

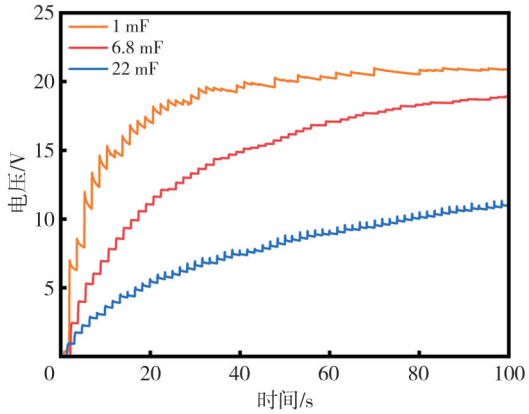
输入功率/W	输出功率/W	稳压效率/%
0.331	0.234	70.695
0.408	0.291	71.324
0.534	0.387	72.472
0.632	0.457	72.310
1.164	0.828	1.134
1.692	1.180	69.740
2.496	1.676	67.147
3.768	2.364	62.739

2.3 电容充电测试

该能量采集器的充电过程如图8(a)所示，首先，发电机输出的三相交流电通过全桥整流电路转换为直流电，随后该直流电被施加至电容两端进行充电。为验证采集器对电容的充电效率，图8(b)展示了随着时间的推移，输出电压持续上升的趋势。在100 s内，采集器能够分别将容量为1、6.8和22 mF的电容充电至20.86、19和11.43 V。根据实验结果可以推测，在相同工作条件下，电容值的增加导致输出电压呈现负相关关系，即电容值较大时，输出电压相对较低。



（a）能量采集器充电原理图



（b）不同电容充电曲线

图 8　能量采集器在的电容充电测试

Fig 8　Capacitor charging test of energy harvester

3　能量采集器的应用

电容充电测试结果说明，该能量采集器具备出色的能量收集效率。为了进一步验证其在实际应用中的表现，我们将其用于为温湿度计、GPS 模块等传感设备供电。如图 9 所示，通过电容作为储能和缓冲单元，采集器能够在 1 min 内将 0.22 F 的电容从 0 V 充电到 1.5 V，确保温湿度计在没有外部电源的情况下持续运行超过 1 h。图 10 展示采集器安装在人体上的应用场景，采集器通过稳压电路将收集到的能量转化为恒压输出，为 GPS 定位器、主控芯片和通信模块供电。GPS 定位器将实时采集人的位置信息，并通过主控芯片和通信模块传输至上位机，实现对位置数据的实时监测。这一实际应用进一步证明了该采集器在多种传感设备供电场景中的出色性能和广泛应用潜力。

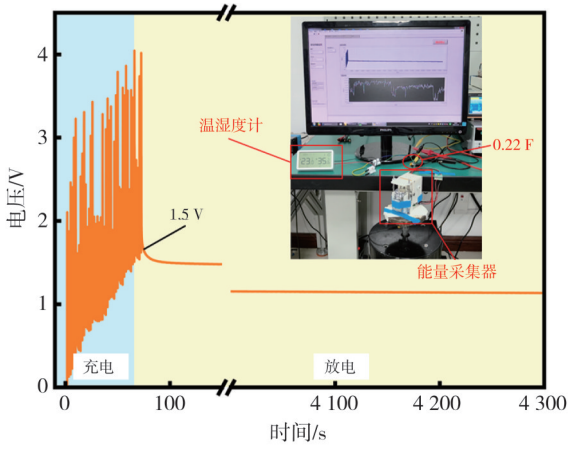


图 9　电容充电与温湿度计供电测试

Fig 9　Capacitor charging and hygrograph power supply test

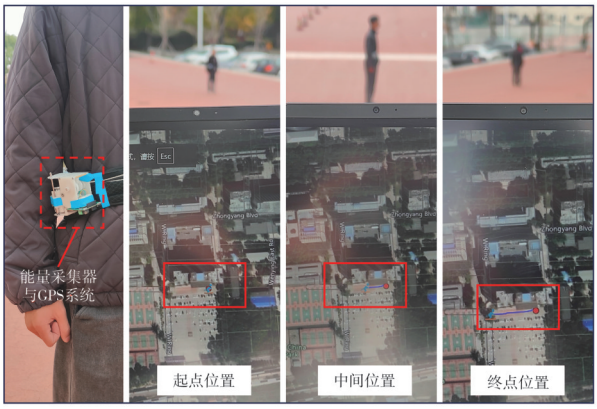


图 10　人体可穿戴与 GPS 实时定位示意图

Fig 10　Schematic diagram of human wearable and GPS real-time positioning

为了充分展示采集器的性能，下表总结了近年来一些类似设备的性能指标。从表 2 可以清楚地看出，采集器在功率密度和宽带采集方面的性能明显优于其他器件。

表 2　本文与其他文献中电磁能量收集器参数对比

Tab. 2　Comparison of electromagnetic energy harvester parameters between this paper and other literatures

来源	频宽/Hz	平均功率/mW	体积/cm^3	体积功率密度/($mW•cm^{-3}$)
文献[16]	0.6	12.3	67.3	0.182
文献[17]	1	1.4	50	0.028
文献[18]	20	0.01	1.85	0.0054
文献[19]	10	10.4	59.7	0.174
文献[20]	—	10.7	98.16	0.109
文献[21]	12	13.37	100.5	0.133
本文	**15**	**35.1**	**77.66**	**0.452**

4　结　论

本文提出了一种面向车辆动态监测的低频振动能量收集器。该采集器通过高效收集车辆运行时的宽频随机振动能量，成功解决了传感器持续供电的难题。其核心在于采用了高灵敏度的配重单元，能够有效捕捉微小的振动能量，并通过齿轮箱的内嵌和外嵌轮系实现能量的储存与释放。最终，通过发电轮系实现能量的高效转换与稳定输出，简化了能源管理电路的设计。实验结果显示，该采集器在 3～18 Hz 的宽频振动范围内表现出色，能够将收集到的振动能量以稳态形式储存于电容中，为温湿度计、GPS 系统等大功率传感设备提供供电，展现出显著的实用价值和广泛的应用前景。

参考文献：

[1] 何海龙，李祎，陈赦，等. 面向电力装备自供电传感

的微纳能源收集技术[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3387-3402.
HE Hailong, LI Yi, CHEN She, et al. Micro energy harvesting technologies for self-powered sensing of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3387-3402. (in Chinese)

[2] HALIM M A, RANTZ R, ZHANG Q, et al. An electromagnetic rotational energy harvester using sprung eccentric rotor, driven by pseudo-walking motion[J]. Applied Energy, 2018, 217: 66-74.

[3] KHAN D, OH S J, YEO S, et al. A high-efficient wireless power receiver for hybrid energy-harvesting sources[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11148-11162.

[4] GU G, GU G, SHANG W, et al. The self-powered agricultural sensing system with 1.7 km wireless multi-channel signal transmission using a pulsed triboelectric nanogenerator of corn husk composite film[J]. Nano Energy, 2022, 102: 107699.

[5] XU Z, LI D, WANG K, et al. Stomatopod-inspired integrate-and-fire triboelectric nanogenerator for harvesting mechanical energy with ultralow vibration speed [J]. Applied Energy, 2022, 312: 118739.

[6] 姚永杰, 张鹏, 王登旭, 等. 基于摩擦纳米发电机的波浪能采集系统的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2022, 59(2): 107-117.
YAO Yongjie, ZHANG Peng, WANG Dengxu, et al. Research progress of wave energy collection system based on the triboelectric nanogenerator[J]. Micronanoelectronic Technology, 2022, 59(2): 107-117. (in Chinese)

[7] LIU Y, DING L, DAI L, et al. All-ceramic flexible piezoelectric energy harvester [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(52): 2209297.

[8] KURT E, ISSIMOVA A, MEDETOV B. A wide-band electromagnetic energy harvester [J]. Energy, 2023, 277: 127693.

[9] YAR A. High performance of multi-layered triboelectric nanogenerators for mechanical energy harvesting [J]. Energy, 2021, 222: 119949.

[10] GUO H, LI L, WANG F, et al. Mitigating the negative piezoelectricity in organic/inorganic hybrid materials for high-performance piezoelectric nanogenerators [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(30): 34733-34741.

[11] FANG Z, TAN X, LIU G, et al. A novel vibration energy harvesting system integrated with an inertial pendulum for zero-energy sensor applications in freight trains[J]. Applied Energy, 2022, 318: 119197.

[12] TAN P, ZHENG Q, ZOU Y, et al. A battery-like self-charge universal module for motional energy harvest[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(36): 1901875.

[13] CAO Z, YUAN Z, HAN C, et al. Hybrid triboelectric-electromagnetic nanogenerator based on a tower spring for harvesting omnidirectional vibration energy [J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(8): 11577-11585.

[14] 牟方晓, 王淇, 刘景全. 一种回折梁结构低频压电能量采集器[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 93-96.
MOU Fangxiao, WANG Qi, LIU Jingquan. A low-frequency piezoelectric energy harvester with folded beam structure [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(1): 93-96. (in Chinese)

[15] BHATIA D, LEE J, HWANG H J, et al. Design of mechanical frequency regulator for predictable uniform power from triboelectric nanogenerators[J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(15): 1702667.

[16] FAN K, CAI M, WANG F, et al. A string-suspended and driven rotor for efficient ultra-low frequency mechanical energy harvesting[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111820.

[17] TAN Q, FAN K, TAO K, et al. A two-degree-of-freedom string-driven rotor for efficient energy harvesting from ultra-low frequency excitations[J]. Energy, 2020, 196: 117107.

[18] ZHANG Y, LUO A, WANG Y, et al. Rotational electromagnetic energy harvester for human motion application at low frequency[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(5): 053902.

[19] LIU H, HOU C, LIN J, et al. A non-resonant rotational electromagnetic energy harvester for low-frequency and irregular human motion [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(20): 203901.

[20] WANG W, CAO J, ZHANG N, et al. Magnetic-spring based energy harvesting from human motions: design, modeling and experiments[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 132: 189-197.

[21] NAMMARI A, CASKEY L, NEGRETE J, et al. Fabrication and characterization of non-resonant magneto-mechanical low-frequency vibration energy harvester[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 102: 298-311.