·农林智能装备与技术 Intelligent Equipment and Technology for Agriculture and Forestry·

基于树木摇摆的发电装置设计及仿真分析

庄善意，狄海廷*，周明
（东北林业大学 机电工程学院，哈尔滨 150040）

摘　要：针对森林监测系统的自供电难题，提出一种基于树木摇摆的发电装置，利用树木的摆动驱动能量收集器，通过电磁感应原理将机械能转化为电能。首先完成能量收集器的结构设计，分析发电装置的工作原理；其次建立树木振动微分方程，并推导树木的摆角变化与受风力矩以及树木自身参数之间的数学模型。基于树木受迫振动下能量收集器中电磁车的动力学方程，分析电磁车的位移响应。采用Ansys Maxwell软件对电磁车进行仿真，分析单侧线圈的感应电动势变化规律。动力学模型和电磁仿真结果表明，电磁车的位移响应呈现“拍振”变化规律，最大值为219.38 mm，线圈绕组产生的最大感应电动势为3.7 V，平均感应电动势为1.19 V。研究证实，基于树木摇摆的发电装置能够进行有效发电，可为森林监测的自供电系统提供思路和解决方案。

关键词：树木；振动能量收集；电磁感应；发电装置；结构设计；仿真分析；动力学；森林监测
中图分类号：S778　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.014

Design and Simulation of Power Generation Device Based on Tree Swaying

ZHUANG Shanyi, DI Haiting*, ZHOU Ming
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to solve the problem of self-power supply in forest monitoring system, this paper proposes a kind of power generation device based on tree swing, which uses the driving energy collector of trees to convert mechanical energy into electric energy through the principle of electromagnetic induction. Firstly, the structure of the energy collector is designed and the working principle of the power generation device is analyzed. Secondly, the differential equation of tree vibration is established, and the mathematical model between the change of the tree's swing angle and the wind moment and the tree's own parameters is derived. Based on the dynamic equation of the electromagnetic vehicle in the energy collector under the forced vibration of the tree, the displacement response of the electromagnetic vehicle is analyzed. Using Ansys Maxwell software to simulate the electromagnetic vehicle and the change law of the induced electromotive force of the single-sided coil. The dynamic model and electromagnetic simulation results show that the displacement response of the electromagnetic vehicle presents a "beating" change law, with a maximum value of 219.38 mm, the maximum induced electromotive force generated by the coil winding is 3.7 V, and the average induced electromotive force is 1.19 V. This study confirms that the power generation device based on tree swing can generate electricity effectively, which provides ideas and solutions for the self-power supply system of forest monitoring.

Keywords: Tree; vibration energy collection; electromagnetic induction; power generation equipment; structure design; simulation analysis; dynamic; forest monitoring

0　引言

人类生活环境与森林息息相关，对森林环境进行监测保护是十分必要的。随着半导体材料和集成电路的发展，芯片和电子元器件朝着低功耗、小尺寸和高效能化的方向发展，无线传感器也逐渐成为对森林环境

收稿日期：2026-01-13
基金项目：黑龙江省自然科学基金项目(LH2019F003)；大学生创新训练项目(S202510225299)。
第一作者简介：庄善意，本科生。研究方向为森工机械与装备。E-mail：1472055791@qq.com
***通信作者：**狄海廷，博士，高级实验师。研究方向为林业装备与信息化、传感器技术。E-mail：dht@nefu.edu.cn
引文格式：庄善意，狄海廷，周明. 基于树木摇摆的发电装置设计及仿真分析[J]. 森林工程，2026，42(5)：1033-1040.
Zhuang Shanyi, Di Haiting, Zhou Ming. Design and simulation of power generation device based on tree swaying[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 1033-1040.

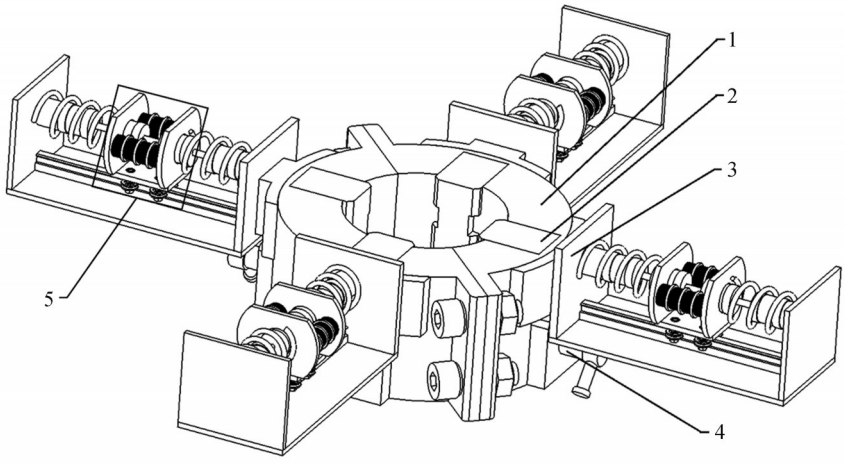
进行监测的重要手段[1]。无线传感器组成的森林监测系统相比“3S”卫星遥感技术、直升机巡航、激光雷达和无人机探测等森林监测方式更具有实时性[2]，而供电保障环节则是制约该系统稳定长效运行的关键所在。蓄电池供电存在容量限制和更换成本高的问题，林间太阳能效率又比较低，活立木生物电能输出弱且不稳定[3]。风能发电是目前新能源发电的主要形式[4-7]，但受限于林冠层风廓线难以应用。而振动能量在自然界中广泛分布，森林中的树木在风力作用下经常发生摇摆现象，如果将树木摇摆的机械能转化为电能并加以收集，便能为森林监测系统提供电力支持。

目前振动发电技术主要包括压电式、摩擦纳米式和电磁式3种类型。压电式基于压电材料的力-电耦合效应[8]，采用悬臂梁结构接收振动形变发电，如He等[9]设计一种非接触磁耦合压电能量采集器，该能量收集器包括永磁铁、压电梁和摆杆，压电梁和摆杆的悬空端均设有永磁铁，在水流的作用下摆杆发生摆动从而引起压电悬臂梁的振动。压电式能量收集器通常适用于高频环境，对低于5 Hz的树木低频振动难以有效收集。尽管可通过增加压电悬臂梁长度及设置低频俘能机构以降低其谐振频率，但这将导致器件体积增大，并提升设计复杂度。摩擦纳米式通过接触分离式、单电极式、横向滑动式及独立摩擦电层式4种模式发电。如Feng等[10]设计的阵列平行组装摩擦电纳米发电机，属于接触分离式摩擦纳米发电机；Zhao等[11]设计的高伸缩性绳状摩擦电纳米发电机，属于单电极式摩擦纳米发电机；Kim[12]等设计的基于机械弹簧放电的多柱摩擦纳米发电机，属于横向滑动式摩擦纳米发电机；Qu等[13]设计的非接触式偏心纳米发电机，属于独立摩擦电层式摩擦纳米发电机。但这4种模式发电在不同程度上存在介电材料磨损、电荷时效性需人工干预以及需额外防裂设计等问题。电磁式是基于电磁感应原理的一种传统发电方式，按驱动形式可分为直接驱动和间接驱动。直接驱动电磁式振动能量器中的动子与外界激励源的变化一致，如Peng等[14]设计的应用于收集道路减速带的压电-电磁式机电耦合的振动能量收集器；间接驱动电磁式振动能量收集器中的动子在拾振机构的作用下发生振动，其振动变化与外界激励源存在差异，如丁志强等[15]设计的一种球形永磁阵列振动能量收集器。与压电式和摩擦纳米式振动能量采集器相比，电磁式振动能量采集器具有结构设计灵活、适用恶劣环境和工作频带宽等优点，但目前大多数电磁式振动能量采集器磁能利用率低，发电效能不高。针对上述现状，开发基于树木摇摆的发电装置，旨在为森林监测系统提供一种新型自供电解决方案。

1 树木摇摆发电装置的结构设计

1.1 树木摇摆发电装置的整体结构设计

树木摇摆发电装置的整体结构示意图见图1，包括电磁车能量收集器、夹具基座、夹臂和夹臂进给杆；夹具基座为半圆环结构，2个夹具基座通过螺栓连接成圆环形结构，可装夹在树干上；夹具基座上加工有工字滑槽，夹臂位于工字滑槽内。夹臂进给杆穿过夹具基座上的螺纹孔与夹臂通过轴承连接，轴承可将夹臂进给杆的旋转运动转化为夹臂在工字滑槽内的直线运动，用于夹紧树干；4个能量收集器均布在夹具基座的



1. 夹具基座；2. 夹臂；3. 能量收集器；4. 夹臂进给杆；5. 电磁车

1. fixture base；2. clamp arm；3. energy collector；4. clamp arm feed rod；5. electromagnetic vehicle

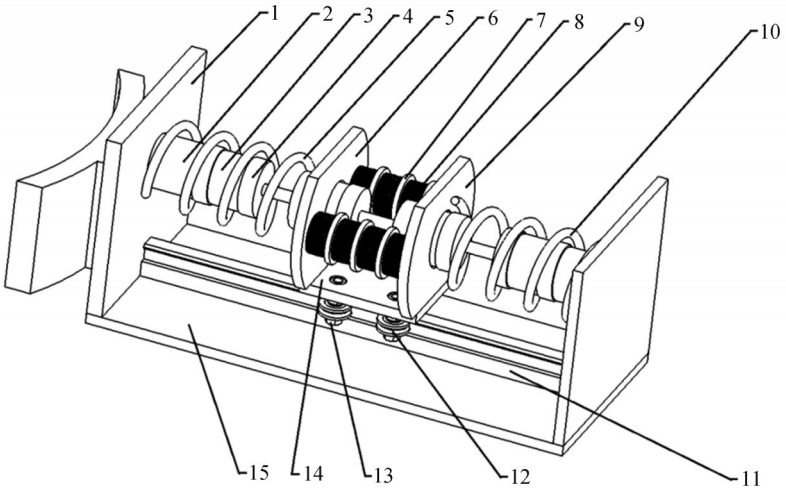
图1 树木摇摆发电装置整体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall structure of the tree swing power generation device

圆周方向上,每个能量收集器上各布置一个电磁车,当树干发生摇摆时,各电磁车产生相应的位移,能够有效收集树干任意方向振动所产生的能量。

1.2　能量收集器的结构设计

能量收集器的结构示意图见图2。电磁车由内侧挡板、外侧挡板、碳钢柱、线圈和滑轮组成,碳钢柱为带有3个轴肩的轴。滑轨固定在收集器外壳上,电磁车通过弹簧1和弹簧2实现在滑轨上滑动,滑轨约束了电磁车的移动路径并提供抵抗侧向载荷的能力。为减小能量收集器的尺寸空间,磁铁固定杆呈“两端粗,中间细”的杆状结构,穿过弹簧1、弹簧2及内侧挡板和外侧挡板上的通孔,两端分别与收集器底座和收集器外壳固定连接。永磁铁的两端附有碳钢片,数量为4个,均布固定在磁铁固定杆的中间细段。当电磁车在滑轨上移动时,其上的线圈与固定在磁铁固定杆上的永磁铁产生相对位移,线圈内部的磁通密度发生变化,从而产生感应电动势。



1. 收集器底座; 2. 磁铁固定杆; 3. 永磁铁; 4. 碳钢片; 5. 弹簧1; 6. 内侧挡板; 7. 碳钢柱; 8. 线圈; 9. 外侧挡板; 10. 弹簧2; 11. 滑轨; 12. V型滑轮; 13. 螺栓; 14. 收集器外壳; 15. 滑轮平台

1. collector base; 2. magnetic fixing rod; 3. hollow annular permanent magnet; 4. carbon steel sheet; 5. spring 1; 6. inner baffle; 7. carbon steel column; 8. copper coil; 9. outer baffle ;10. spring 2; 11. rail; 12. v-shaped pulley; 13. bolt; 14. collector housing; 15. pulley platform

图2　能量收集器的结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the structure of the energy collector

1.3　树木摇摆发电装置的工作原理

通过夹具将能量收集器固定在树干上,能量收集器随着树木的摇摆而运动。当树木刚发生摇摆时,由于收集器外壳、磁铁固定杆和永磁铁与夹具基座为刚性连接,将会随树木的摇摆而运动;而弹簧的惯性,电磁车处于静止状态,此时永磁铁与电磁车上的线圈产生相对位移导致线圈内的磁通量密度发生变化,根据电磁感应原理,线圈产生感应电动势。随着树木持续地摇摆,永磁铁与线圈之间相对位置的持续变化导致线圈内磁通量密度持续发生变化,从而在线圈内持续产生感应电动势。

当树木停止摆动时,收集器外壳和永磁铁停止运动,但由于弹簧对能量的蓄能,会继续带动电磁车在滑轨上进行衰减往复运动,从而使线圈产生感应电动势,直至弹簧将能量全部释放,电磁车达到静止状态。至此,完成了树木的单次摇摆发电过程。

2　树木摇摆发电装置的数学模型

2.1　能量收集器的振动系统分析

通过分析图1,可将电磁车等效为二自由度振动系统,见图3。图3中,M1为简化后的电磁车,M2为树木,K1+K2、C1+C2分别表示电磁车与树木之间相互作用的弹簧元件和阻尼元件,在风力F_{in}作用下电磁车产生位移$x(t)$、树木产生振动输出响应$y(t)$。

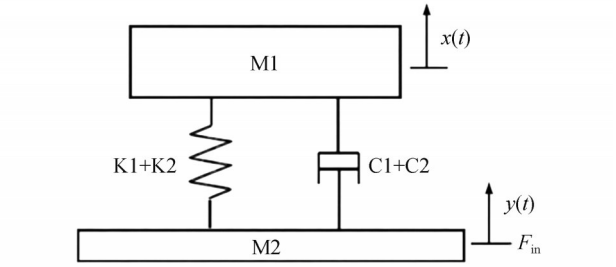


图3　二自由振动系统简图

Fig. 3　Diagram of two-degree of freedom vibration system

2.2 风致树木摇摆的动力学模型

本研究基于 Flesch 等[16]利用三维螺旋风速仪和双轴倾斜传感器测得树木摇摆的相关参数进行分析，建立树木振动微分方程并采用牛顿第二定律进行电磁车的振动分析。

若树干的直径为 d，树冠受到的风力矩呈余弦函数变化[16]，在风力作用下树木摇摆的动力学方程为

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta_x}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}\theta_x}{\mathrm{d}t}+k\theta_x-\frac{1}{2}GZ\sin\theta_x=W_x\cos\left(\omega t+\Omega_{(\omega)}\right)。\tag{1}$$

式中：J 为树干的转动惯量，$J=mZ^2/3$，kg·m^2，m 为树干的质量，kg；Z 为树的高度，m；c 为振荡阻尼，N·s/m；k 为等效盘状弹簧的弹性系数，N/m；W_x 为树木所受的风力矩，N·m；G 为树木的重力，N；θ_x 为树木的摆动角度，rad；ω 为风的频率，Hz；$\Omega_{(\omega)}$ 为风力的初始相位，rad。

通常树木的摆动角度 θ_x 较小，此时 $\sin\theta_x\approx\theta_x$。在式(1)的两边同除 J，并定义 $N=(k-GZ/2)$，将式(1)改写成为

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta_x}{\mathrm{d}t^2}+2\varepsilon\omega_n\frac{\mathrm{d}\theta_x}{\mathrm{d}t}+{\omega_n}^2\theta_x=\frac{W_x}{N}\cos\left(\omega t+\Omega_{(\omega)}\right)。\tag{2}$$

式中：ω_n 为树木的固有频率，${\omega_n}^2=N/J$，Hz；ω 为风的频率，Hz；ε 为树木摆动的衰减系数，$\varepsilon=c/(2J\omega_n)$；风力的初始相位 $\Omega_{(\omega)}=\arctan(2\varepsilon\lambda_0/[1-{\lambda_0}^2])$，$\lambda_0$ 为风的频率与树木的固有频率之比，$\lambda_0=\omega/\omega_n$。经式(2)求解可得树木的摆角 θ_x 关于时间 t 的变化规律，公式为

$$\theta_x=\frac{W_x}{N}\left|G_{(\omega)}\right|\cos(\omega t)。\tag{3}$$

式中，$\left|G_{(\omega)}\right|$ 为动力放大系数，$\left|G_{(\omega)}\right|=\sqrt{\dfrac{1}{\left(1-\left(\omega/\omega_n\right)^2\right)^2+\left(2\varepsilon\omega/\omega_n\right)^2}}$。

由式(3)可知，树木摆角 θ_x 与树木所受风力矩 W_x、树木的固有频率 ω_n 和树木摆动的衰减系数 ε 有关。

2.3 树木摇摆发电装置的动力学模型

在能量收集器的工作状态下，电磁车受到树木振动作用于弹簧的惯性力，因此电磁车的振动微分方程为

$$\ddot{x}+{\omega_0}^2x={\omega_0}^2y_1。\tag{4}$$

式中：x 为电磁车的位移，mm；ω_0 为电磁车固有频率，Hz；y_1 为收集器外壳关于时间 t 的运动函数，可表示为

$$y_1=\frac{\pi W_x h}{180N}\left|G_{(\omega)}\right|\cos(\omega t)。\tag{5}$$

式中，h 为能量收集器固定在树干上的高度，m。

式(4)为非齐次二阶常系数线性微分方程，其解 $x(t)$ 由对应齐次方程的通解 $x_1(t)$ 和非齐次方程的特解 $x_2(t)$ 线性叠加。由于能量收集器中电磁车的初始运动速度和位移均为零，因此方程(4)的特解 $x_2(t)$ 即为在树木摇摆激励下电磁车的响应 $x(t)$。设方程(4)的特解为

$$x_2(t)=F\cos\omega t。\tag{6}$$

式中，F 为位移响应的稳态幅值，mm。

将式(5)和式(6)代入式(4)中，可得在树木摇摆激励下电磁车的响应 $x(t)$，公式为

$$x(t)=\begin{cases}\dfrac{\pi hW_x\left|G(\omega)\right|}{180N\left(1-\gamma^2\right)}\left(\cos\omega t-\cos\omega_0 t\right),\gamma\neq1\\[2ex]\dfrac{\pi hW_x\left|G(\omega)\right|}{360Nk}\omega_0 t\sin\omega_0 t,\gamma=1\end{cases}。\tag{7}$$

式中，$\gamma=\omega/\omega_n$。

通过上述方程的推导，建立了风力 $W_x\cos(\omega t+\Omega_{(\omega)})$ 与电磁车位移 $x(t)$ 之间的耦合关系。依据傅里叶展开式可知，随机的风力可看成多个呈余弦变化的风力线性叠加，因此对余弦风力下电磁车的位移响应进行分析，就可以解决在随机风力工况下电磁车的位移响应问题。当风速 v=8 m/s、风频 ω = 0.6 Hz、能量收集器固定在树干上的高度 h=10 m 时，能量收集器中收集器外壳的运动函数 y_1=69.84cos(0.6t)mm，结合式(7)可得到电磁车的位移响应曲线，见图4。

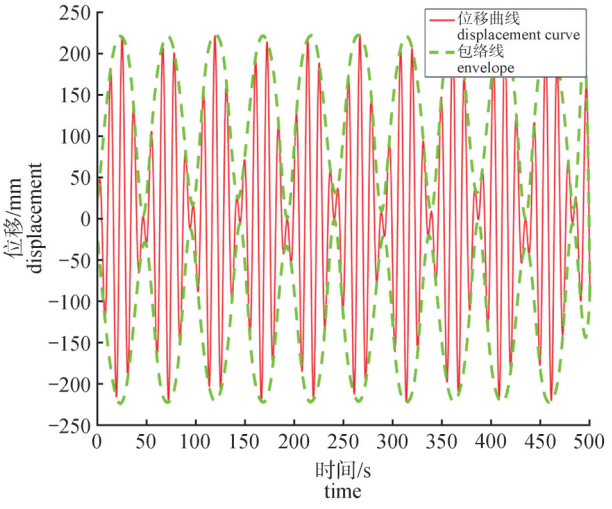


图4 电磁车的位移响应曲线

Fig. 4 Displacement response curve of electromagnetic vehicle

由图4可知，电磁车的位移响应曲线呈“拍振”变化规律，且最大值为219.38 mm，为收集器外壳运动距离最大值的3.14倍。

3　能量收集器的电磁仿真分析

Ansys Maxwell软件可仿真解算出低频直线振动下线圈产生的感应电动势[17],因此本研究采用 Ansys Maxwell的2D模式对电磁车单侧碳钢柱上的4个线圈绕组(分别标记为 Winding1、Winding2、Winding3 和 Winding4)产生的感应电动势大小及变化规律进行仿真分析。仿真过程中,主要部件的材料属性和尺寸等参数设置分别见表1和表2。

表1　主要部件的材料属性

Tab. 1　Material properties of main components

部件 component	碳钢柱 carbon steel column	碳钢片 carbon steel sheet	永磁铁 hollow annular permanent magnet	线圈 copper coil
材料属性 material property	steel_1008	steel_1008	NdFe35	Copper

表2　主要部件的参数设置

Tab. 2　Parameter setting of main components

线圈 copper coil		电磁车 electromagnetic vehicle	永磁铁 hollow annular permanent magnet		弹簧 spring			
线径/mm wire diameter	匝数 number of turns	速度/(mm·s^{-1}) speed	厚度/mm thickness	直径/mm diameter	自由长度/mm free length	中径/mm pitch diameter	线径/mm wire diameter	圈数 number of turns
0.165	150	10	6	10	33	15	1.5	4

在仿真中设置计算时长为5 s,步长为0.01 s。图5为运行时间3.2 s时电磁车所处位置的磁力线分布。

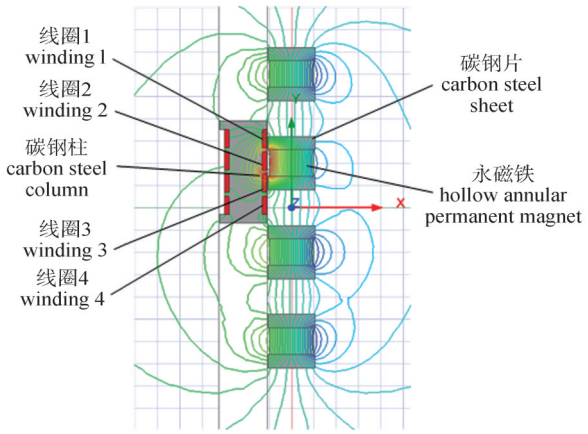


图5　磁力线分布

Fig. 5　Magnetic field lines

由图5可知,磁力线通过碳钢片-线圈-碳钢柱组成磁通回路,因为碳钢材料的相对磁导率较大,磁力线在碳钢柱上的分布较空气中密集。由于在仿真中设定电磁车的速度为定值,在此仅对电磁车几何模型的位移和受力曲线变化进行分析,见图6。

由图6可知,电磁车模型以10 mm/s的恒定速度由Y轴-24 mm的位置向24 mm位置直线移动。依据楞次定律,当线圈内磁通密度发生变化时,线圈的受力方向为阻碍内部磁场密度变化的方向。以图6中的时间0.5 s(此时,受力F=0)为参考点,结合电磁车几何模型的运动过程对其受力进行分析。图7为电磁车几何模型分别在时间为0.3、0.4、0.5、0.6 s时所处位置的磁力线分布。

当电磁车几何模型在0.3 s所处位置向0.4 s所处位置移动的过程中,由于固定在碳钢柱上半部分线圈内的磁力线密度逐渐增大,下半部分线圈内的磁力线密度逐渐减小,且下半部分线圈内磁力线密度的变化幅度较上半部分线圈内磁力线密度的变化幅度大,电磁车几何模型整体所受合力的方向为Y轴负半轴;当电磁车几何模型在0.4 s所处位置向0.5 s所处位置移动的过程中,电磁车几何模型整体受到向上的力逐渐与向下的力平衡;当0.5 s时电磁车几何模型整体所受合力为零;当电磁车几何模型在0.5 s所处位置向0.6 s所处位置移动的过程中,电磁车几何模型上半部分线圈内的磁力线密度增大幅度较下半部分线圈内磁力线密度减小幅度大,电磁车几何模型整体所受合力的方向为Y轴正半轴。通过上述对电磁车局部运动过程的分析,所得结果与电磁车几何模型的受力曲线和位移曲线变化的规律相一致。

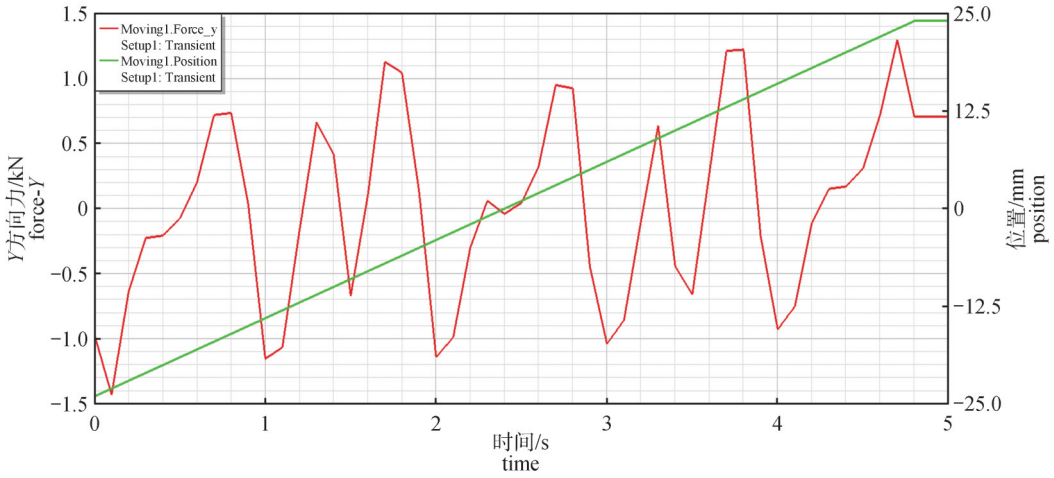
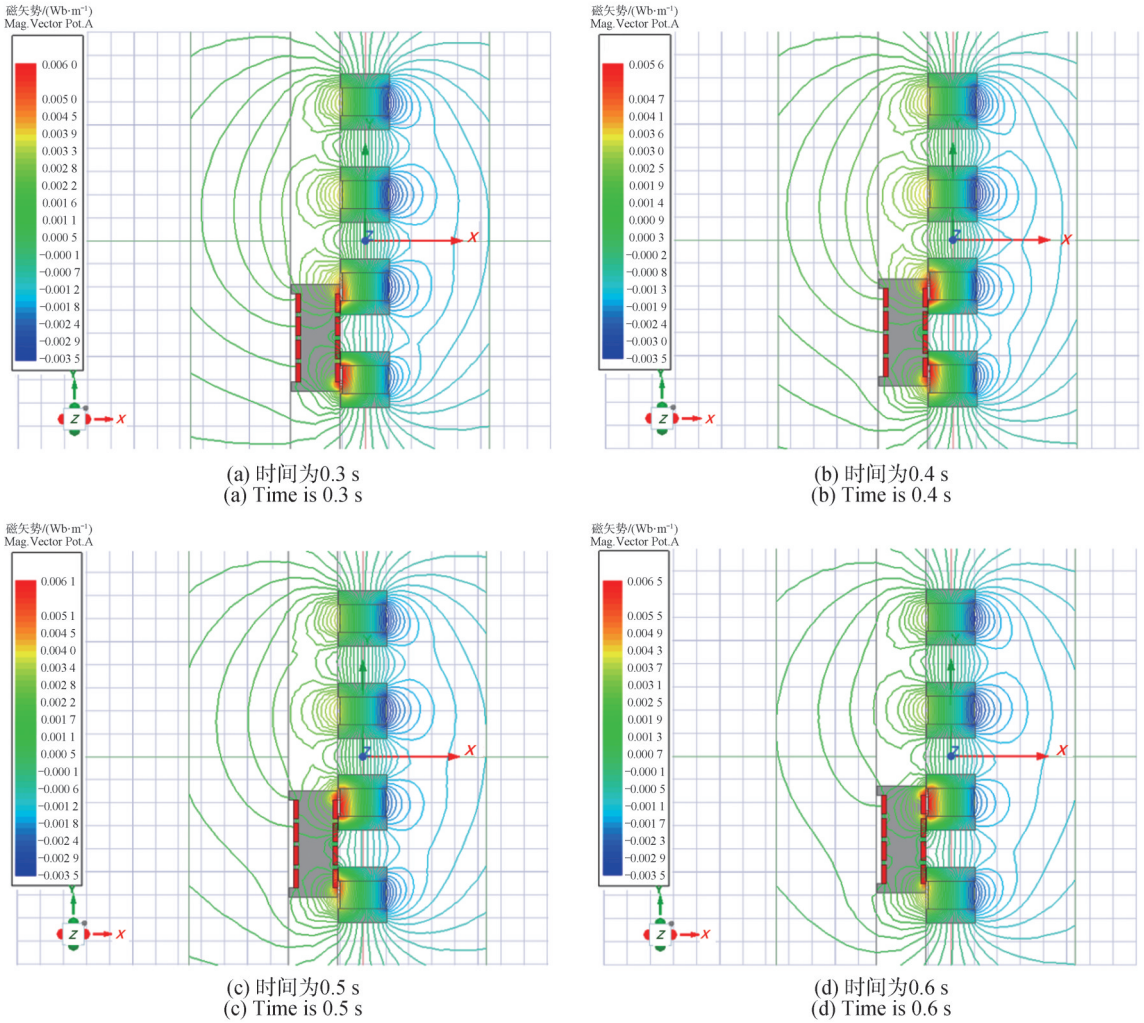


图 6 电磁车的位移和受力曲线

Fig. 6 Displacement and force curve of electromagnetic vehicle



(a) 时间为0.3 s
(a) Time is 0.3 s

(b) 时间为0.4 s
(b) Time is 0.4 s

(c) 时间为0.5 s
(c) Time is 0.5 s

(d) 时间为0.6 s
(d) Time is 0.6 s

图 7 电磁车几何模型的磁场分布

Fig. 7 Magnetic field distribution diagram of electromagnetic vehicle geometric model

图 8 为线圈绕组 Winding1 产生的感应电动势变化曲线。由图 8 可知，线圈绕组 Winding1 产生感应电动势的波形呈交流变化，最大感应电动势为 3. 7 V，平均感应电动势为 1. 19 V。

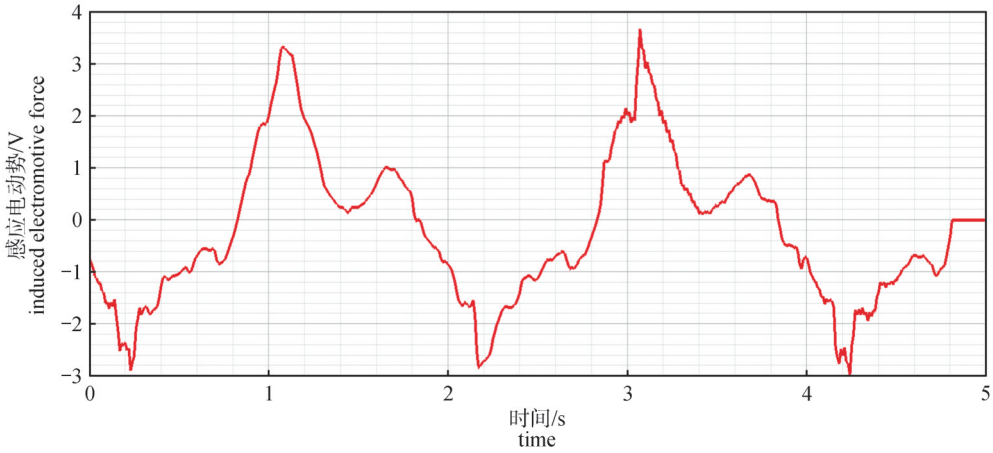


图 8　线圈绕组 Winding1 的感应电动势变化曲线

Fig. 8　Induced electromotive force variation curve of copper coil winding Winding1

4　结论

1)针对森林监测系统的自供电难题,提出一种基于树木摇摆的发电装置。该装置由能量收集器和夹具构成,通过将能量收集器固定于夹具并集成压缩弹簧、永磁铁等核心组件,利用电磁感应原理将树木摆动转化为电能。

2)建立树木振动微分方程,并推导出树木的摆角变化与受风力矩以及树木自身参数之间的数学模型,揭示了风致树木摆动规律;建立树木受迫振动下能量收集器中电磁车的动力学方程,并对电磁车的位移响应进行了仿真分析,仿真结果表明其位移响应呈现“拍振”变化规律,且最大值为 219. 38 mm,为收集器外壳运动距离的 3. 14 倍。

3)采用 Ansys Maxwell 软件对电磁车单侧线圈绕组产生的感应电动势进行了仿真分析,仿真结果显示,线圈绕组产生的最大感应电动势为 3. 7 V,平均感应电动势为 1. 19 V,证明了本研究所提出的树木摇摆发电装置的有效性和可行性。

参　考　文　献

[1] 佟素娟,薛同来,王宿仲,等. 无线传感器网络在现代环境监测中的应用[J]. 工业控制计算机,2023,36(12):116-117,123.
Tong Sujuan, Xue Tonglai, Wang Suzhong, et al. Application of wireless sensor network in modern environmental monitoring [J]. Industrial Control Computer, 2023, 36(12):116-117,123.

[2] 李文彬,庞帅,阚江明. 森林监测无线传感器网络自供电技术研究进展[J]. 森林工程,2015,31(5):56-61.
Li Wenbin, Pang Shuai, Kan Jiangming. Review on self-powered technology of a wireless sensor network in forest monitoring[J]. Forest Engineering,2015,31(5):56-61.

[3] 高珊,赵志伟,艾梦瑶,等. 活立木生物电产生功率及其生境因子影响[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(1):173-180,190.
Gao Shan, Zhao Zhiwei, Ai Mengyao, et al. Effects of the habitat factors on bioelectric power generated by standing trees[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(1):173-180,190.

[4] Tao J X, Viet N V, Carpinteri A, et al. Energy harvesting from wind by a piezoelectric harvester [J]. Engineering Structures,2017,133:74-80.

[5] Liu L, He L P, Liu X J, et al. Design and experiment of a low frequency non-contact rotary piezoelectric energy harvester excited by magnetic coupling [J]. Energy, 2022, 258:124882.

[6] Li J, Han X X, Rui X B, et al. Design and analysis of the piezoelectric-electromagnetic energy harvester based on magnetically coupled structures [J]. Ceramics International,2023,49(22):35597-35607.

[7] Li S, Feng Z Q, He X F, et al. An in-plane omnidirectional flutter piezoelectric wind energy harvester[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2023,200:110637.

[8] Ali A, Ali S, Shaukat H, et al. Advancements in piezoelectric wind energy harvesting: a review[J]. Results in Engineering,2024,21:101777.

[9] He L P, Wang S J, Zheng X T, et al. Based on a low-frequency non-contact magnetic coupling piezoelectric energy harvester[J]. Energy,2022,258:124844.

[10] Feng L A, Wang Z L, Cao X, et al. Accordion-inspired parallelly assembled triboelectric nanogenerator: for efficient biomechanical Energy harvesting and Music re-

sponding[J]. Nano Today, 2023, 49: 101760.

[11] Zhao C, Liu D H, Wang Y W, et al. Highly-stretchable rope-like Triboelectric nanogenerator for self-powered monitoring in marine structures[J]. Nano Energy, 2022, 94: 106926.

[12] Kim D, Heo D, Cha K, et al. Mechanical spring discharge-based multipillar Triboelectric nanogenerator with enhanced power output [J]. Nano Energy, 2023, 107: 108130.

[13] Qu Z G, Huang M K, Dai R, et al. Using non-contact eccentric nanogenerator to collect energy continuously under periodic Vibration [J]. Nano Energy, 2021, 87: 106159.

[14] Peng L H, Wang Y, Qi Y B, et al. A hybrid Piezoelectric-electromagnetic energy harvester used for harvesting and detecting on the road[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139052.

[15] 丁志强, 陈仁文, 章飘艳, 等. 球形永磁阵列振动能量收集器设计与优化[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 212-217.
Ding Zhiqiang, Chen Renwen, Zhang Piaoyan, et al. Design and optimization of spherical magnet arraystructure of energy harvesting system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 212-217.

[16] Flesch T K, Wilson J D. Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. Ⅱ. Relating measured tree sway to wind statistics[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 93(4): 243-258.

[17] 刘苗苗, 胡攀, 韦虹. 基于Ansys Maxwell的气隙边缘效应对电感参数的影响[J]. 变压器, 2024, 61(1): 35-39.
Liu Miaomiao, Hu Pan, Wei Hong. Influence of air gap edge effect on inductor parameters based on Ansys Maxwell[J]. Transformer, 2024, 61(1): 35-39.