

基于涡激振动的微型风能采集研究

陈远晟¹, 黄勤斌², 赵荪翀², 王浩², 王舟²

(1. 盐城工学院机械工程学院, 江苏盐城 224051; 2. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏南京 210094)

摘要: 由于体积大、污染环境、需要定期更换, 传统电池供能方式已不能适应当前外场工作的需求. 涡激振动的微型风能采集装置将风能转换成电能, 能够对无线传感节点等微型电子设备直接供电. 基于经典 Buck-Boost 电路, 提出了一种适用于涡激振动微型风能采集的能量接口电路. 通过理论与仿真分析, 所设计的能量接口电路存在最优占空比, 及其对应的最大功率点. 基于 LabVIEW 平台设计了控制程序, 实验结果表明, 所设计的电路与程序能够对占空比进行自动寻优, 保持微型风能采集装置以最大功率输出.

关键词: 压电陶瓷; 风能回收; 接口电路; 涡激振动; 微型发电; 最大功率点

中图分类号: TN384; TK81 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1237-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200346

Micro-wind Energy Harvesting by Vortex-Induced Vibration

CHEN Yuan-sheng¹, HUANG Qin-bin², ZHAO Sun-chong², WANG Hao², WANG Zhou²

(1. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: Due to the large size, environmental pollution and requirement of periodically replacement, the classic batteries are no longer suitable for field work nowadays. Micro-wind energy harvesting by vortex-induced vibration can harvest the wind energy, and power the micro electric equipment such as wireless sensor nodes. Derived from the Buck-Boost circuit, a new energy interface circuit is designed for the micro-wind energy harvesting device. After theoretical analysis and simulation, there is an optimal duty cycle in the proposed circuit, which corresponds to the maximum output power. A control algorithm is developed with LabVIEW platform. Experimental results show that the proposed circuit and control algorithm can achieve the optimal duty circle, and keep the micro-wind energy harvesting outputs at its maximum power.

Key words: piezoelectric ceramics; wind energy harvesting; interface circuit; vortex-induced vibration; micro power generation; maximum power point

1 引言

在外场工作环境中, 传统化学电池体积大、污染环境、需定期更换. 通过采集环境能量, 减少化学电池的使用, 成为未来能源发展的一个重要方向. 因此, 越来越多的研究人员开始研究利用风能^[1,2]、振动能、热能、机械能等自然环境中获取能量^[3]. 其中风能因其清洁型、蕴量大、分布广, 而受到广泛关注. 目前常用微型风能回收装置根据其采集电能的原理, 可分为三种: 压电式采集器^[4]、电磁式采集器以及静电式采集器^[5-7], 其中压电式采集器因其结构简单、能量密度较高、不发热且不会受到电磁干扰而应用最广. 压电微型风能采集的原理

是将风能变成振动能后, 通过压电效应将振动能转化为电能. 压电微型风能采集器适用于低功耗设备, 在外场工况中, 可将环境中的能源转换成电能, 直接为无线传感节点等微型电子设备供电. 微型涡激振动发电系统因其结构简单而被广泛应用于微型风能回收中, 但其具有固有频率过高, 能量回收效率低的缺点^[8]. 接口电路是微型风能回收的重要一环^[9], 常用的能量采集电路有经典电路、同步电荷提取接口电路 (SECE)^[10]、同步开关电感电路 (SSHI)^[11] 及双同步开关电路 (DSSH)^[12].

本文将具有最大功率点追踪得电路用于微型风能回收, 对其进行了理论分析, 并使用 Multisim 进行了仿

真. 仿真结果和实验验证表明, 不同负载下, 都能使负载处于最大功率点处.

2 涡激振动发电原理分析

当风流过钝体开关的质量块时, 会在钝体后方产生交替脱落的漩涡. 由于悬臂梁是弹性体, 因此钝体会发生周期性的振动, 这一流固耦合现象也被称为涡激振动^[13]. 当涡流振动频率和物体的固有频率接近时, 钝体的振幅将急剧增加, 这种现象称为共振, 悬臂梁的振动达到最大幅值. 因为涡激振动的运动形式与简谐振动的运动形式相似, 所以简谐涡激力模型中最主要的假设便是涡激振动所产生的压力与升力系数成正比^[14].

根据上述假设, 简谐涡激力模型的振动方程为:

$$m(\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u) = \frac{1}{2}\rho v^2 HC_L \sin(\omega_s t + \varphi) \quad (1)$$

其中, m 是钝体质量, u 是钝体振动幅度, ξ 是结构阻尼比, ω_n 是漩涡脱落频率, ρ 是空气密度, v 是来流风速, H 是钝体高度, C_L 是钝体的升力系数, ω_s 是钝体振动频率, φ 是初相位.

由单自由度受迫振动原理可得:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = \frac{P}{m} \sin(\omega_s t) \quad (2)$$

其中 P 是涡激力振动幅值.

当 $\omega_n = \omega_s$ 即涡激振动发生共振时, 可得到涡激振动在共振时的系统最大幅值为:

$$u_{\max} = \frac{HC_L \rho v^2}{4m\xi\omega_n^2} \quad (3)$$

当风速增大到发生共振时的风速, 悬臂梁的振动幅值将增大到最大值; 若风速继续增加时, 悬臂梁的振动幅值将开始减小. 尽管简谐涡激力模型并不能完整地反映涡激振动发电系统的振幅与风速的变化关系, 但已经可以满足通常情况下的实验研究.

3 微型风能回收电路的介绍与仿真

3.1 微型风能回收电路

根据涡激振动发电系统的特征, 在经典 BUCK-BOOST 电路的基础上, 提出了一种微型风能回收电路, 该电路能够更加有效的收集压电陶瓷片上的能量, 如图 1 所示. 由涡激振动发电装置产生电能, 通过改变控制信号的占空比, 使负载一直处于最大功率点处收集能量.

根据开关 Q_1 导通情况, 对该电路分三种情况进行分析:

情况 1 开关 Q_1 导通, 二极管 D_1 关断, 压电片上的夹持电容及电容 C_2 与电感 L_1 发生谐振, 能量由电容转

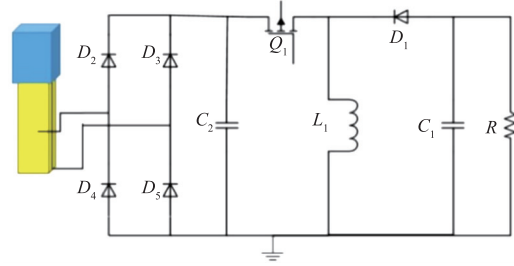


图1 微型风能回收电路

移到电感上.

根据基尔霍夫电流定律, 电流在 A 点处流入与流出的大小相同:

$$i_p(t) = C_2 \cdot \frac{dU_2(t)}{dt} + i_L(t) \quad (4)$$

式(4)两边同乘以 L 后对时间 t 进行求导, 可得:

$$U_2(t) = L \cdot \frac{di_p(t)}{dt} - LC_2 \cdot \frac{d^2 U_2(t)}{dt^2} \quad (5)$$

求解微分方程式(5)得:

$$U_2(t) = A_1 \cdot \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L}\sqrt{C_2}}\right) + A_2 \cdot \sin\left(\frac{t}{\sqrt{L}\sqrt{C_2}}\right) + \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C_2}} \left(\int \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L}\sqrt{C_2}}\right) di_p(t) dt \right) \sin\left(\frac{t}{\sqrt{L}\sqrt{C_2}}\right) - \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C_2}} \left(\int \sin\left(\frac{t}{\sqrt{L}\sqrt{C_2}}\right) di_p(t) dt \right) \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L}\sqrt{C_2}}\right) \quad (6)$$

在实际工程应用中, Q_1 开关频率远高于振动频率, 涡激振动发电结构的特性决定了 $i_p(t)$ 在 Q_1 导通时间内的变化很小, 因此可以忽略, 得到:

$$U_2(t) = A_4 \cdot \sin\left(\frac{t}{\sqrt{L}\sqrt{C_2}} + \frac{\pi}{4}\right) - \frac{LA_3 \sin(\omega t)}{LC_2 \omega^2 - 1} \quad (7)$$

情况 2 开关 Q_1 导通时, 电感 L_1 两端电压低于电容 C_1 两端电压, 当电压差值达到二极管 D_1 的导通电压时, 二极管 D_1 会出现导通的情况, 此时电容 C_1 上的部分电能转移到电感 L_1 上, 这是应当避免的故障状态.

情况 3 开关 Q_1 关断, 二极管 D_1 导通, 电感 L_1 上的电能转移到负载上. 由基尔霍夫定律电流定律, 可得:

$$i_L(t) = C_1 \cdot \frac{dU_R(t)}{dt} + \frac{U_R(t)}{R} \quad (8)$$

对式(8)两边同乘与 L 后再对 t 求积分, 可得:

$$U_L(t) = LC_1 \cdot \frac{d^2 U_L(t)}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot \frac{dU_L(t)}{dt} \quad (9)$$

求解式(9)解微分方程, 得到:

$$U_L(t) = A_1 \cdot e^{-\frac{(L + \sqrt{4CLR^2 + L^2})}{2LRC_1} t} + A_2 \cdot e^{-\frac{(L - \sqrt{4CLR^2 + L^2})}{2LRC_1} t} \quad (10)$$

则电感转移至负载上的功率:

$$P = (A_1 \cdot e^{-\frac{(L + \sqrt{4CLR^2 + L^2})}{2LRC_1} t} + A_2 \cdot e^{-\frac{(L - \sqrt{4CLR^2 + L^2})}{2LRC_1} t})^2 / R \quad (11)$$

由于式(11)计算功率相对复杂,因此采用软件仿真分析回收功率与电阻的关系。

3.2 微型风能能量回收电路仿真

Multisim 是一种电路仿真软件,具有操作界面直观、元器件丰富及易学习等优点。根据文献[14],在仿真环境中,压电片可用电流源 I_1 和电容 C_3 代替,分别取值 0.565mA 和 246nF ,二极管均选择型号为 BAT86 的肖特基二极管,可控开关 Q_1 选择的型号为 IRF3205,电容 C_1 、 C_2 取值为 $100\mu\text{F}$,电感 L_1 取值为 100mH ,电阻 R_1 取值为 $50\text{k}\Omega$ 。

仿真结果表明,负载和风速不变的情况下,随着占空比的增大,回收功率先增大后减小。显而易见,电路中存在一个最优占空比,使得回收功率达到最优。因此,选择合适的占空比对微型风能回收电路至关重要。

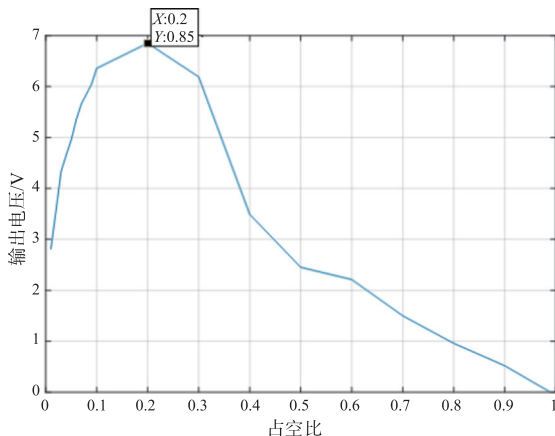


图2 仿真结果

4 实验

4.1 实验方案

涡激发电装置位于风机出风口 20cm 处,风速选取 22m/s ,通过所设计的微型风能回收电路收集能量。开关控制的 PWM 先由信号发生器产生,通过测量不同占空比下的输出功率,可得最优占空比。基于 LabVIEW 平台设计对最大功率点跟踪控制算法,对控制信号 PWM 的占空比进行寻优。最后比较两种方法得到的最优占空比,验证 LabVIEW 控制方法的有效性。

4.2 实验结果与分析

实验 1 在电路负载不变的条件下,用信号发生器产生 PWM 波,并改变占空比,测量并比较负载回收的功率,得到最优占空比。

结果表明,风速 22m/s 下,当占空比一定时,输出功率随着电阻的增大先增大后减小,负载为 $70\text{k}\Omega$ 时最大输出功率达 0.3486mW 。当阻值一定时,随着占空比的增大,输出功率先增大后减小,最优占空比在 $0.14 \sim 0.2$ 之间波动。当负载阻值为 $10\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对

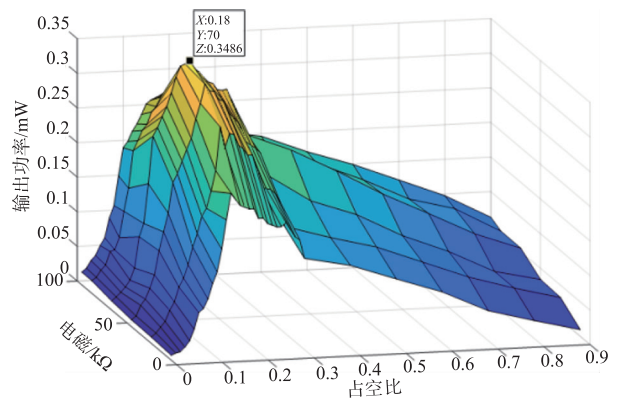


图3 实验1实验结果

应的占空比为 0.14 ,当负载阻值为 $30\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.16 ,当负载阻值为 $50\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.17 ,当负载阻值为 $70\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.18 。当负载阻值为 $90\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.19 ;当负载阻值为 $100\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.2 。

实验 2 基于 LabVIEW 平台的设计对最大功率点跟踪控制算法,对控制信号 PWM 的占空比进行寻优。

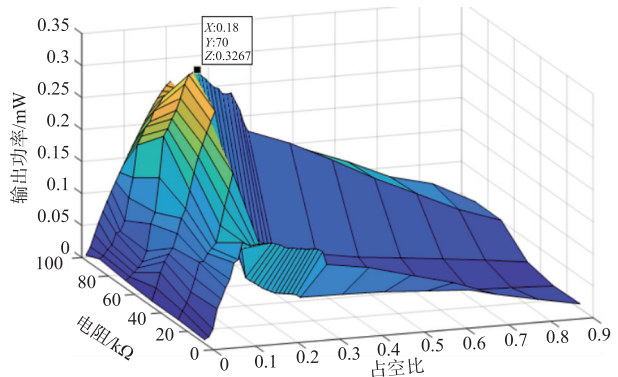


图4 实验2实验结果

结果表明,风速 22m/s 下,当占空比一定时,负载两端的输出功率随着电阻阻值的增大呈现先增大后减小的趋势,在负载阻值为 $70\text{k}\Omega$ 时输出功率可达最大值 0.3267mW ,最优占空比为 0.18 。当电阻阻值一定时,随着占空比从 0 开始逐渐增大至 0.9 ,负载两端的输出功率呈现先增大后迅速减小的趋势,并且随着负载阻值的增加,最大输出功率对应的占空比在 $0.11 \sim 0.21$ 之间波动。当负载阻值为 $10\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.11 ;当负载阻值为 $30\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.14 ;当负载阻值为 $50\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.16 ;当负载阻值为 $70\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.18 ;当负载阻值为 $90\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.2 ;当负载阻值为 $100\text{k}\Omega$ 时,最大输出功率对应的占空比为 0.21 。

表 1 电阻阻值与对应的最优占空比

电阻/k Ω	实验 1(占空比)	实验 2(占空比)
10	0.14	0.11
30	0.16	0.14
50	0.17	0.16
70	0.18	0.18
90	0.19	0.20
100	0.20	0.21

由表 1 可知,不同负载情况下,信号发生器控制的最优占空比与基于 LabVIEW 控制方法的最优占空比基本相同,因此,证明了 LabVIEW 控制方法的正确性。

5 结束语

涡激振动发电系统因其结构简单、可靠性较高而受到了广泛运用。通过对能量回收接口电路的理论分析与仿真研究,发电系统存在着一个最优占空比,使得输出功率达到最大。实验结果表明,所设计的微型风能回收电路与控制方法能够在不同负载条件下追踪到最大功率点。

参考文献

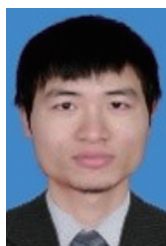
- [1] Ren X, Fan H, Wang C, et al. Coaxial rotatory-freestanding triboelectric nanogenerator for effective energy scavenging from wind [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(6):065016.
- [2] Ren X, Fan H, Wang C, et al. Wind energy harvester based on coaxial rotatory freestanding triboelectric nanogenerators for self-powered water splitting [J]. *Nano Energy*, 2018, 50:562–570.
- [3] 马天兵, 吴晓东, 邹莉君, 陈南南. 无线传感器网络的压电能量收集技术研究[J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(06): 59–61, 65.
- [4] Ren X, Fan H, Zhao Y, et al. Flexible lead-free BiFeO₃/PDMS-based nanogenerator as piezoelectric energy harvester. [J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(39): 26190–26197.
- [5] Yang Z, Zhou S, Zu J, et al. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications [J]. *Joule*, 2018, 2(4):642–697.
- [6] Liu H, Zhong J, Lee C, et al. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: materials, mechanisms, and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(4):041306.
- [7] 陈文艺, 孟爱华, 刘成龙. 微型振动能量收集器的研究现状及发展趋势[J]. *微纳电子技术*, 2013, 50(11):715–720.

- [8] Izadgoshasb I, Lim Y Y, Lake N, et al. Optimizing orientation of piezoelectric cantilever beam for harvesting energy from human walking [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 161:66–73.
- [9] 付尧. 基于 PZT 的悬臂梁式俘能器建模仿真及能量回收电路设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2018.
- [10] Huguet T, Lallart M, Badel A. Bistable vibration energy harvester and sece circuit: exploring their mutual influence [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 97(1):485–501.
- [11] Li S, Roy A, Calhoun B H. A piezoelectric energy-harvesting system with parallel-ssh rectifier and integrated mppt achieving 417% energy-extraction improvement and 97% tracking efficiency [A]. Takeuchi K. 2019 Symposium on VLSI Circuits [C]. New Jersey, USA: IEEE, 2019. C324–C325.
- [12] Li T, Zhang Y, Geng X. An Adaptive Self-powered Piezoelectric Energy Harvesting Circuit and Its Application on Bridge Condition Monitoring [EB/OL]. Preprints 2017, 2017010062 (doi:10.20944/preprints201701.0062.v1).
- [13] 阚君武, 富佳伟, 王淑云, 张忠华, 陈松, 蒋永华, 王鸿云. 涡激振动式微型流体俘能器的研究现状与展望 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(06):1502–1512.
- [14] 郭家豪. 基于压电能量回收的涡激振动发电装置研究 [D]. 南京: 南京理工大学能动学院, 2018.

作者简介



陈远晨(通信作者) 男, 1982 年生于江苏南通。博士, 南京理工大学讲师。主要研究方向为传感与驱动技术、精密定位、微型风能采集研究。
E-mail: chenys@njjust.edu.cn



黄勤斌 男, 1996 年生于浙江嘉兴。现为南京理工大学能动学院硕士研究生。主要研究方向为基于涡激振动的微型风能采集研究。
E-mail: qinbinhuang319@gmail.com



赵荪舫 男, 1995 年生于浙江杭州。现为南京理工大学能动学院硕士研究生。主要研究方向为基于 MPPT 电路的微型风能采集。
E-mail: sunchong.zhao@jsleasing.cn