

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107318

基于涡激振动的 PVDF 压电风能采集实验研究^{*}

张智娟 霍慧文

(华北电力大学 电子与通信工程系 保定 071000)

摘要: 为提高 PVDF 压电薄膜的发电能力,研究了一种基于涡激振动机理的 PVDF 压电能量采集结构,将风能转换为电能以供低功耗电子产品使用。设计了信号调理电路将压电薄膜的电荷输出转换为电压输出,通过微型风洞实验分别研究了在不同风速下,单片、双片、3 片 PVDF 压电薄膜串联、并联的发电性能。实验结果表明,所选取的 PVDF 压电薄膜的谐振频率稳定在 50 Hz 左右;所设计的信号调理电路输出电压随着风速的增加而增加,可有效滤除高频噪声干扰;PVDF 压电薄膜并联并在电路末端接匹配负载可有效提高负载功率,3 片压电薄膜并联并在信号调理电路末端接 1.25 Ω 负载时,负载功率最高可达 36 mW。

关键词: PVDF; 涡激振动; 压电; 风能采集

中图分类号: TM60 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Experimental study on PVDF piezoelectric wind power collection based on vortex-induced vibration

Zhang Zhijuan Huo Huiwen

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: To improve the power generation ability of PVDF piezoelectric film, a PVDF piezoelectric energy collection structure based on vortex-induced vibration mechanism was explored, which converts wind energy into electric energy for micro power electronic products. A signal conditioning circuit was designed to convert the charge output of piezoelectric film into voltage output. The power generation performance of single PVDF piezoelectric film, double and three PVDF piezoelectric films in series and in parallel under different wind speeds was studied by micro wind tunnel experiment. Experimental results show that the resonant frequency of the selected PVDF piezoelectric film is stable at about 50 Hz. The signal conditioning circuit can filter out the high-frequency noise interference effectively, and the output voltage of the signal conditioning circuit increases with the increase of wind speed. The parallel connection of PVDF piezoelectric films and matching load at the end of the circuit can effectively improve the load power. The load power of 36 mW can be achieved when three piezoelectric films are connected in parallel and a 1.25 Ω load is connected at the end of the signal conditioning circuit.

Keywords: PVDF; vortex-induced vibration; piezoelectric; wind energy collection

0 引言

随着人类对煤、石油、天然气等化石能源的大肆开采,全球气候变暖、能源枯竭等问题随之而出,合理利用环境中的太阳能、风能、热能、振动能等可再生无污染能量成为解决这一问题的关键。利用环境能量收集器将各种形式的能量转换为电能并为无线传感网络、微机电系统等便捷式系统供电成为各国研究的热点^[1]。

风能在自然界中储量丰富、清洁可再生,是极具开发潜

力的资源,利用风绕流钝体产生的涡激振动能量收集技术将风能转换为电能以驱动低功耗产品,具有寿命长、无污染、价格低廉等优点^[2]。文献[3]采用弧形弹性梁结合压电换能材料设计的风致振动能量采集器,实现了多方向、宽风速范围的风能采集。文献[4]设计了基于 PVDF 压电材料的风杯式风能采集结构并对其进行结构特性分析和电路设计。文献[5]对压电悬臂梁动力学模型及耦合模型进行仿真分析,探究了不同阻流钝体对来流的升阻力变化。目前,利用涡激振动进行风能采集的研究大多是在构建理论模型

收稿日期:2021-07-19

^{*} 基金项目:河北省自然科学基金(F2016502104)项目资助

和仿真方面的,实验方面开展较少^[6]。

为了提高压电能量风能采集装置的输出特性,本文搭建了一种利用涡激振动的压电风能采集结构,研究了阻流体在不同风速下,负载阻值对压电薄膜及其电路的输出电压的影响。聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜具有良好的压电性、介电性、耐候性且造价低廉、机械强度高、较柔软、灵敏度高、不易破碎^[7-8],已被广泛应用于 MEMS 系统、太阳能电池等科技领域中^[9],也是应用于压电风能采集系统的一种理想材料。基于 PVDF 压电薄膜的涡激振荡风能采集使用 PVDF 压电薄膜作为感应端,将风能转换为振动能,再转换为电荷量,通过信号调理电路,将电荷量转换为电压量。为了提高输出电压并输出稳定的波形,研究了不同连接方式下输出电压幅值及负载输出功率等。

1 原 理

1.1 涡激振动

当气流场经过非流线型钝体时,空气流场会受阻而产生改变并在钝体后方的两侧周期性地产生交替的漩涡,这一现象被称为卡门涡街。漩涡的出现和脱落会导致空气流场中气压分布不均匀,从而在钝体的两侧周期性的产生与空气流场方向垂直的压力,当钝体本身具有一定的弹性支撑,而非完全刚性时,压力会迫使钝体产生与空气流场方向垂直的振动,这一振动称之为涡激振动^[10]。

涡街的产生与释放与雷诺数 R_e 有关, R_e 也是涡激振荡中最重要、最基本的无量纲参数^[11],其表达式为:

$$R_e = \frac{UL}{\nu} \quad (1)$$

其中, U 表示流体的来流速度(即风速), L 表示圆柱结构的直径, ν 表示运动学粘性系数,常温下 $\nu = 1.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

漩涡脱落频率 f 可以表示为:

$$f = S_i \frac{U}{L} \quad (2)$$

其中, S_i 为无量纲斯特劳哈尔数。

本文选取了 L 为 20 mm 阻流钝体在 0.5~7.3 m/s 风速下的涡激振荡,根据式(1)可得此时雷诺数 R_e 的范围为 684~10 274。根据文献^[12]中涡激振动形态表可以看出,雷诺数在 $300 \sim 1.5 \times 10^5$ 时,斯特劳哈尔数 S_i 稳定在 0.20 附近,漩涡脱落频率范围为 50~73 Hz,此时产生的涡激振动及漩涡脱落是比较稳定的。

1.2 压电能量采集理论

压电能量采集是利用压电材料的正压电效应:当给压电晶体的某一固定方向施加压力时,晶体内部产生极化的同时,在晶体表面出现正负的等量电荷,外力作用方向改变时,电荷的极性也会随之改变^[13],正压电效应是利用压电材料中的机械能转换为电能。

本文采用悬臂梁式作为 PVDF 压电薄膜的机械夹持方式,这种夹持方式可有效将压电振子的振动能转换为压电材料的应力,具有结构简单、谐振频率率低等优点,是一种

理想支撑方式,在实际工程设计中被广泛应用^[14-15]。基于涡激振动的悬臂梁式 PVDF 压电能量采集装置如图 1 所示。

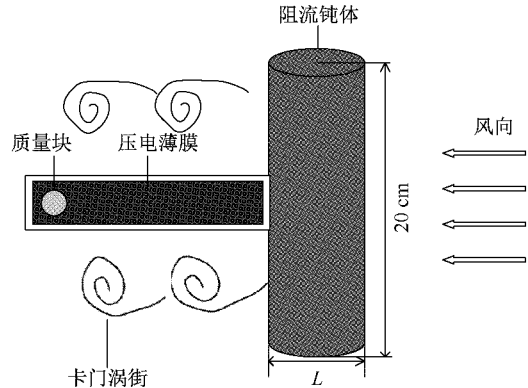


图 1 基于涡激振动的悬臂梁式 PVDF 压电能量采集结构

根据文献^[16-17],悬臂梁式压电振动传感器的迎风面受力后产生的电荷密度可以表示为:

$$\sigma_{3j} = \sum_{j=1}^3 d_{3j} T_j \quad (3)$$

其中, σ_{31} 、 σ_{32} 、 σ_{33} 为压电材料分别在长度、宽度、厚度方向上的受力产生的电荷密度; d_{31} 、 d_{32} 、 d_{33} 为压电材料分别在长度、宽度、厚度方向上的受力产生电荷的压电常数; T_1 、 T_2 、 T_3 为压电材料分别在长度、宽度、厚度方向上的外施应力分量。

压电悬臂梁一般工作在 d_{31} 或 d_{33} 模式下,即压电振子振动产生的电场垂直或平行于施加的机械应力,本文采用的为 d_{33} 模式,此时产生的电压值较大^[18]。

2 信号调理电路

由于 PVDF 压电薄膜的输出信号为电荷量,且内阻很高,其测量电路需要一个高输入阻抗的前置电荷放大器以输出电压量并防止电荷泄露,利用低通滤波器滤去信号中的高频干扰。

利用电荷放大器将 PVDF 压电薄膜的微弱电荷输出转换为电压输出并放大,并将高阻抗输入转换为低阻抗输出。如图 2 所示,选用低噪声、低漂移、低偏置电流、高输入阻抗的结型场效应管型运算放大器 LF356N,100 M Ω 的反馈电阻和 1 nF 的反馈电容构成电荷放大器,运放输入端并联电容 C_1 、 C_2 避免产生自激振荡。

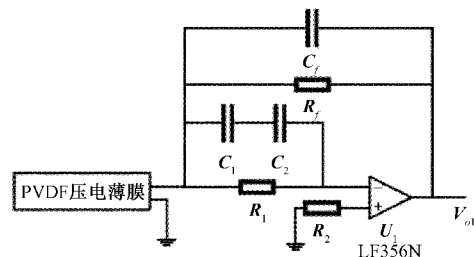


图 2 电荷放大器原理

根据文献[19],电荷放大器的低频截止频率 f_L 为:

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (4)$$

取 R_f 为 100 M Ω , C_f 为 1 nF, 则 f_L 为 1.59 Hz, 满足所选 PVDF 压电薄膜的谐振频率要求。

电荷放大器的输出电压 V_{o1} 与传感器产生电荷 Q 的关系为:

$$V_{o1} = - \frac{j\omega A Q}{(1 + \Lambda) \left(\frac{1}{R_f} + j\omega C_f \right)} \quad (5)$$

其中, A 为运放开环增益(约为 $10^4 \sim 10^6$)。

当工作频率较低时,式(5)可等价于:

$$V_{o1} \approx - \frac{j\omega Q}{\frac{1}{R_f} + j\omega C_f} \quad (6)$$

由于电荷放大器输出频率不高,选择二阶 RC 有源低通滤波器滤除信号中混杂的高频噪声,并保证信号没有相位偏移。如图 3 所示, U_2 、 R_3 、 R_4 、 C_3 、 C_4 构成截止频率为 312 Hz,带内增益为 2 的 Bessel 二阶低通滤波器。

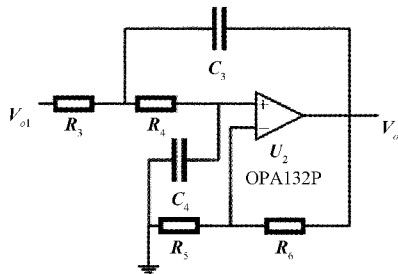


图3 低通滤波器原理

根据文献[20],低通滤波器的截止频率 f 为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_3 C_3 R_4 C_4}} \quad (7)$$

带内增益 A_{VF} 为

$$A_{VF} = \frac{V_o}{V_{o1}} = 1 + \frac{R_6}{R_5} \quad (8)$$

利用 Multisim12 对上述电路仿真,将 PVDF 压电薄膜的电荷量输出等效为正弦电压源与电容 C 的串联^[21],选定电容值为 1 nF,电压源频率为 50 Hz 来模拟 PVDF 压电薄膜的风致振动。将上述电路连接至信号发生器,比较仿真输出电压幅值与实验输出电压幅值,结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,实验输出电压与仿真电压相比,存在较大差异,这是由于实际信号调理电路 PCB 板中存在元件本身以及寄生电阻、寄生电容等的影响。

表1 仿真与实验输出对比

输入电压/V	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
仿真输出电压/V	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6
实验输出电压/V	0.8	0.9	1.2	1.5	1.7	1.9	2	2.3	2.5

3 实验及其结果分析

3.1 实验装置

本文选用的 PVDF 压电薄膜型号为 LDTM-028K,尺寸为 10.2 mm×23.5 mm×28 μ m,一端接出两个卷曲触点,一端附加 0.72 g 质量块以提高压电薄膜的灵敏度,相关参数如表 2 所示。

表2 PVDF 压电薄膜参数

参数	参数值
密度/(kg·m ⁻³)	1 780
杨氏模量/(N·m ⁻²)	3.0×10^9
弹性模量/GPa	2.5
泊松比	0.30
压电应变常数	$d_{31} = 2.3 \times 10^{-11}$ $d_{33} = 3.3 \times 10^{-11}$

实验平台装置如图 4 所示。实验平台由 200FZY6-S 轴流风机、风洞、电子调压器、涡激振动压电风能采集器、风速仪、开关电源和示波器等组成,轴流风机可提供 0.5~7.3 m/s 范围内的风速;风洞为长度 1 m 的 PVC 管道,以提供均匀气流;电子调压器通过调节风机的输入电压控制风速。

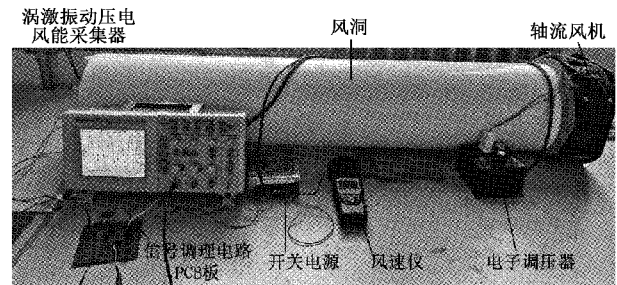


图4 实验装置

3.2 实验结果分析

将涡激振动阻流钝体和 PVDF 压电薄膜固定在风洞上,旋动电子调压器旋钮来改变风机输入电压以控制风速,将风能转换为振动能再转换为电荷量。将 PVDF 连接至信号调理电路 PCB 板,将电荷量转换为电压量,观察示波器输出波形。

电路输出电压 V 随风速 v 的增大而缓慢增大,单片 PVDF 压电薄膜连接信号调理电路空载输出电压幅值最高可达 0.26 V。两片 PVDF 压电薄膜、3 片 PVDF 压电薄膜串联时,连接信号调理电路空载输出电压幅值分别在 0.89~1.06 V、1.53~1.74 V 区间内随风速增加缓慢增大。两片 PVDF 压电薄膜、3 片 PVDF 压电薄膜并联时,其电压范围与单片 PVDF 压电薄膜相比,略有提高但相差不大。

图 5 所示为风速为 6.4 m/s 时,单片 PVDF 压电薄膜在连接电荷放大器之后滤波前后的空载电压输出波形。从

图 5 中可以看出,滤波后输出电压得到两倍放大且波形更平滑规整,有效滤除了高频噪声。

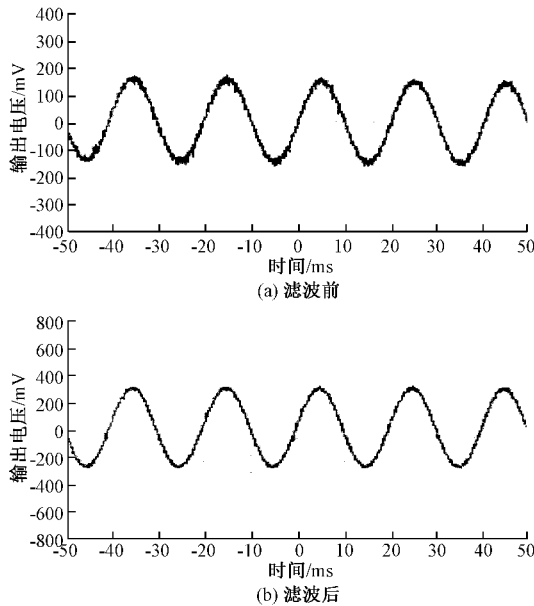


图 5 单片压电薄膜空载电压

在信号调理电路后接不同阻值的电阻,根据分压原理,可得 PVDF 压电薄膜在不同连接方式下的内阻,如表 3 所示。

表 3 不同连接方式下内阻

连接方式	内阻/ Ω
单片 PVDF	4.27
两片 PVDF 串联	10.94
3 片 PVDF 串联	17.98
两片 PVDF 并联	2.20
3 片 PVDF 并联	1.30

图 6 所示为 PVDF 压电薄膜在不同连接情况下,信号调理电路外接近似匹配负载阻值时,负载功率随风速的变化情况。从图 6 中可以看出,使用并联连接方式可以有效提高负载功率。

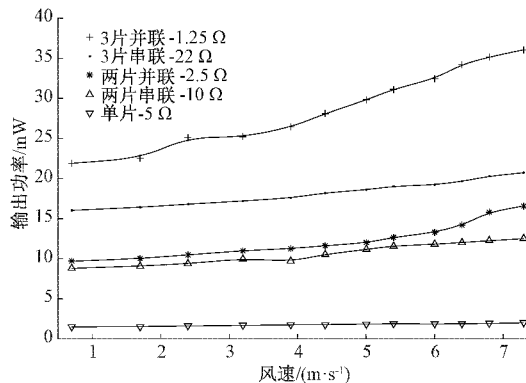


图 6 PVDF 不同连接方式下负载功率

图 7 为风速为 7.3 m/s 时,3 片 PVDF 压电薄膜并联并在信号调理电路末端接 1.25 Ω 匹配负载时的负载电压输出波形。可以看出,负载电压幅值为 0.3 V,此时负载功率为 36 mW。

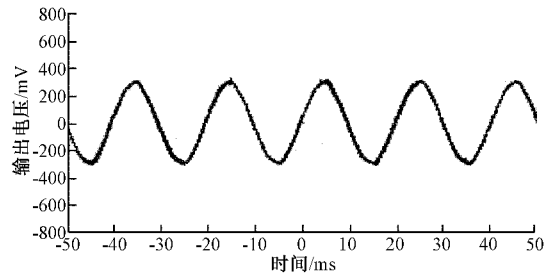


图 7 3 片压电薄膜并联接 1.25 Ω 负载输出电压波形

4 结 论

本文针对 PVDF 压电薄膜压电风能采集场景,论述了涡激振动与压电效应原理,设计并制作了可滤除高频噪声干扰的信号调理电路将电荷信号转换为电压信号,通过风洞实验研究了 PVDF 压电薄膜在不同连接方式下,输出电压、负载功率与风速的关系,实验结果表明,采用并联方式连接 PVDF 压电薄膜并在电路末端连接匹配负载时,可以有效提高负载功率。3 片 PVDF 压电薄膜并联并在电路末端接 1.25 Ω 负载时,负载功率可达 36 mW。该风能采集装置具有一定的工程实用价值,可应用于工厂废气排放等场景,为后续的无线传感网络自供电研究提供了实践基础。

参 考 文 献

- [1] 张小涵,赵俊青,张弛.基于微纳环境能量收集技术的自驱动无线传感系统[J].微纳电子与智能制造,2020,2(4):118-128.
- [2] 张昌宇,李莉,陈兆一,等.涡激振动压电能量收集技术的实验研究与分析[J].沈阳化工大学学报,2019,33(2):178-182.
- [3] 赵江信.压电式多方向风致振动能量采集器研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [4] 徐国建.基于压电式环境能量采集技术研究[D].南京:南京信息工程大学,2017.
- [5] 郭修宇.风力场中基于涡激振动的压电俘能仿真与试验研究[D].青岛:青岛大学,2020.
- [6] 赵兴强,王军雷,蔡骏,等.基于风致振动效应的微型风能收集器研究现状[J].振动与冲击,2017,36(16):106-112.
- [7] 宋国梁.基于冲击式振动的 PVDF 压电风能收集系统的研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [8] 李灵杰,韩晶,李栋.基于 PVDF 与应变模态差梁型结构裂纹检测[J].国外电子测量技术,2018,37(6):71-74.
- [9] 王欢,张瑶.基于辅助电极的静电喷雾优化[J].国外电

- 子测量技术,2019,38(11):97-101.
- [10] 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,2018.
- [11] 康辉. 涡激压电-电磁复合发电波浪能采集技术研究[D]. 青岛:山东科技大学,2020.
- [12] 张昌宇. 涡激振动压电能量收集器的设计与性能分析[D]. 沈阳:沈阳化工大学,2018.
- [13] 车晓寰. 微小型压电式风能收集器的设计与研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [14] 李一浩. 基于 PVDF 的压电电磁复合式振动能量收集器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [15] 陆颖瓚,朱宇宸,刘琪才,等. 悬臂梁压电式能量收集器方向性效率的研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(3):181-187.
- [16] 邹文,赵翠莲. 柔性压力传感器在呼吸气流检测中的性能比较[J]. 电子测量技术,2020,43(17):153-158.
- [17] 曹经錡,康健炜,袁卫锋. 柔性压电复合材料薄膜无线应变传感器研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(6):184-190.
- [18] 朱雁博. 基于 MEMS 的压电和摩擦电能量采集器的设计、加工与测试[D]. 上海:上海交通大学,2016.
- [19] 李桂磊,徐中,贺长波. 一种小型电荷放大电路设计[J]. 机电工程技术,2015,44(10):5-9.
- [20] 李照华. 压电加速度传感器前置变换电路的研究及设计[D]. 太原:中北大学,2018.
- [21] 朱培斌,许肖梅,黄身钦,等. 电荷放大器对压电式水声换能器测量的影响分析[J]. 声学及电子工程,2018(1):42-44.

作者简介

张智娟,工学博士,副教授,主要研究方向为能量采集、无线功率传输、功率变换器控制等。

E-mail:zhzhj@ncepu.edu.cn

霍慧文,在读硕士生,主要研究方向为风能采集。

E-mail:huohuiwen1@163.com