

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416969

面向航空发动机的自供电无线振动传感系统研究*

宁云博¹ 关明杰² 柳治强¹ 陈俊¹ 祝青园¹

(1. 厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院 厦门 361102; 2. 厦门理工学院机械与汽车工程学院 厦门 361024)

摘要: 在航空发动机健康监测领域,传统的有线传感系统存在布线复杂、灵活性差、维护成本高等问题。为了解决上述问题,针对航空发动机的高频率振动信号,本文设计并实现了一种基于 Wi-Fi 技术的自供电无线传感系统。该系统分为无线传感系统与自供电装置两部分,无线传感系统将发动机的振动信号转换为电信号;采用 ESP32-S2 芯片作为下位机微控制器,利用芯片内置的 Wi-Fi 无线收发模块将振动数据传输至上位机;上位机收到数据后进行数据存储、分析和显示。实验结果表明,无线传输系统的采样率可达 250 ksp/s,幅值误差小于 3.8%,频率误差小于 1.5%。自供电装置将发动机尾喷管的废热转化为电能,其由温差发电装置与能量收集电路组成。温差发电装置通过测量温差发电片热端温度,自动调节温差发电片与尾喷管外壁之间的间距,以确保温差发电片不会因尾喷管的温度过高而损坏且输出功率维持在较高值。能量收集电路采用 BQ25504 芯片进行能量收集和管理,将多余能量储存到可充电锂电池中。实验结果表明,无线传感系统平均功耗约为 26.42 mW,而自供电装置可产生约 40 mW 的功率,可实现系统的自供电。

关键词: 无线传感系统;振动监测;自供电;热电发电;无线数据传输

中图分类号: TP277;TN92;TK115 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study of a self-powered wireless vibration sensing system for aeroengines

Ning Yunbo¹ Guan Mingjie² Liu Zhiqiang¹ Chen Jun¹ Zhu Qingyuan¹

(1. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: In the field of aeroengine health monitoring, traditional wired sensing systems have problems such as complexity in cabling, poor flexibility, and high maintenance costs. To solve these problems, this paper presents a design and implementation of a self-powered high-frequency vibration signal wireless sensing system targeted for aircraft engines. The system is divided into two main parts: the wireless sensing system and the self-powered system. The wireless sensing system converts vibration signals into analog electrical signals. An ESP32-S2 chip is used as the microcontroller of the wireless sensor node. The embedded Wi-Fi module transmits the signals to a host computer. Finally, the received signals are analyzed and shown on the host computer. Experimental results demonstrate that the system has a sampling rate of 250 ksp/s, and the system has a transmission amplitude error rate within 3.8% and a frequency error rate within 1.5%. The self-powered device harnesses waste heat from the tailpipe of the aeroengine to generate electricity, consisting of a thermoelectric power generation module and an energy harvesting circuit. The thermoelectric power generation module measures temperatures and adjusts the distance between the thermoelectric modules and the tailpipe to maintain output power at a high level without risk of overheated damage. The energy harvesting circuit employs the BQ25504 chip to harvest the power and store the extra energy in a rechargeable battery. The self-powered device can generate approximately 40 mW of power, which exceeds the system's power consumption of 26.42 mW, thus enabling self-sustained operation of the whole system.

Keywords: wireless sensing system; vibration monitoring; self-powered; thermoelectric power generation; wireless data transmission

0 引言

在航空工业的快速发展中,航空发动机作为飞机的心

脏,其性能和可靠性直接关系到飞行安全^[1-2]。振动信号作为发动机运行状态的直接反映,能够提供关于发动机内部动态行为的宝贵信息。因此,航空发动机的振动信号监测对于

收稿日期:2024-09-24

* 基金项目:国家自然科学基金(52177222)、中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2018-017)资助

发动机的运行维护和提高发动机的可靠性具有重大意义^[3]。

航空发动机振动信号监测通常采用传统的有线传感系统,但有线传感系统存在一些不足,如布线复杂、灵活性和可扩展性差、维护成本高、环境适应性差等^[4]。这些局限性促使研究者寻求更先进、更灵活的监测方案,如采用无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)方案,以克服这些问题。然而现有的无线传感系统多采用蓝牙或 ZigBee 传输方式,它们存在通信速率较慢的问题^[5]。航空发动机的高频率振动信号将产生大量的数据,要高速的将这些数据通过无线方式发送出去需要更高的通信速率,本文将采用 Wi-Fi 作为无线传输方式来解决这个问题。

另一方面,无线传感器网络主要依赖传统化学电池作为能源^[6],但这种电池的使用寿命有限,特别是在高温和高振动的恶劣环境中,其性能会迅速衰减,导致频繁更换,从而增加了维护成本和操作难度^[7]。如果将发动机自身产生的振动能或热能转化为电能,可以为 WSN 供电,从而实现自供电方式。在发动机自供电监测方面,国内外学者已经做了一些研究。2016 年,易小周^[8]研究了一种基于自供电技术的发动机振动故障监测系统,该系统利用压电振动能量收集器为无线加速度传感节点供电。研究以船舶发动机为应用对象,采用 TI 公司的 SimpliCI 无线通信协议,实现了自供电无线振动监测系统的软硬件设计。然而压电能量收集器的输出功率在 $200 \mu\text{W}$ 左右,不能满足航空发动机高频振动监测系统所需的电能。2020 年, Wang 等^[9]采用压电振动能量收集技术俘获旋转运动的动能,为航空发动机传感器供电,其样机最大输出功率为 78.87 mW 。然而该样机可适用的发动机转速最大为 $2\ 100 \text{ r/min}$,不能满足实际的航空发动机应用。考虑到实际飞机发动机尾气带走的能量约占燃料总能量的 40% ,尾气中的能量具有较高的回收利用价值。因此,如果将尾气中的废热能转化为电能,可获得更高的电功率。2021 年,王瑄^[10]研究了一种面向航空发动机的无线自供电测量传感器方案,搭建了基于 Zigbee 的无线测量系统,选用温差发电为系统供电,其不足之处在于未对发动机振动信号进行采集和无线传输,且所设计的温差发电模块并没有在实际发动机上安装测量输出功率。

本文针对发动机的高频率振动信号,目标在于设计并实现一种自供电高频率振动信号无线传感系统,采用基于温差发电的自供电方案^[11],使用航空发动机尾喷管热能转化为电能以实现自供电^[12]。

1 系统总体方案

系统主要包括无线传感系统和自供电装置。无线传感系统负责实时采集和监测发动机的振动信号。现有的无线传感系统多采用蓝牙或 ZigBee 等传输速率较慢的无线传输协议,针对高频率的航空发动机振动信号,采用较慢的传输协议会导致实时性不足、数据处理延时以及系统效率低

下等问题,故本文采用 Wi-Fi 作为无线传输方式,高速地将发动机产生的高频率振动信号进行远距离传输^[13]。自供电装置利用温差发电技术将航空发动机尾喷管的高温热能转换为电能。为确保无线传感模块在启动和运行过程中的稳定供电,特别是在启动时所需的较大瞬时功率,本文引入了能量存储单元。这样,即使在温差发电片无法提供足够即时功率的情况下,能量存储单元也能够为传感器模块供电。系统框图如图 1 所示。

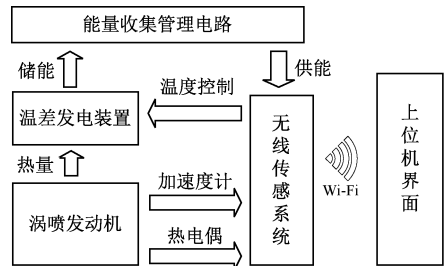


图 1 系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of proposed system

2 无线传感系统

无线传感系统的任务在于准确地将航空发动机振动信息采集并发送至上位机。本文的无线传感系统主要分为振动信号转换与采集模块、无线传输模块两部分。

2.1 振动信号转换与采集模块

通过查阅资料发现本文所使用的航空发动机最大转速可达 $46\ 000 \text{ r/min}$,为准确将航空发动机振动信号转换为电信号,需采用带宽足够高的加速度计。通过选型,最终采用 ADI 公司生产的 ADXL1005 加速度计。该加速度计提供了 23 kHz 高带宽的信号采集能力,可满足本研究对高频振动信号的高速采集需求,且其低功耗特性有助于实现传感器的自供电。

ADXL1005 加速度计能将原始的加速度信号以 25 mV/g 的比例转化为电信号并产生二分之一电源电压的直流偏置,通过查阅资料发现本文采用的航空发动机振动加速度稳态限制值为 5 g ,这表明加速度计输出的电信号峰峰值范围仅有 250 mV 。对于 $3\sim 5 \text{ V}$ 的模数转换器的供电电压来说,加速度计输出信号变化范围太小,需要先采用放大电路对信号进行放大再进行模数转换。

本文选用 AD8338 放大芯片对信号进行放大,该芯片不仅提供了高精度的增益控制,而且具备宽动态范围。而且 AD8338 的低功耗特性有助于减少功耗,其高速响应特性使得芯片能够迅速适应信号的变化。另外,AD8338 芯片具有压控增益功能,它可通过外部电平控制芯片的放大增益,范围从 $0\sim 80 \text{ dB}$ 。该功能使得本文能够根据实际的信号强度和系统需求精确地调整增益范围。

2.2 无线传输模块

无线传输模块主要分为下位机与上位机两部分。下位

机部分以 ESP32-S2 单片机为核心^[14],使用其内置的模数转换模块(analog to digital converter, ADC)采集经过 AD8338 放大后的振动信号,将其转换为数字信号后,通过单片机内置的 Wi-Fi 收发模块^[15]将其以用户数据报协议^[16-17]发送出去。单片机内置 ADC 采样率为 250 ksp/s。

上位机可以是任意一台装有 Wi-Fi 收发模块的电脑,负责接收来自下位机的无线数据并实现信号的分析 and 再现。上位机软件基于 QT Creator 软件采用 C++ 语言编写。代码包含两个核心线程:线程一专注于对这些数据进行处理和分析,并实时更新振动信号的图形界面,直观地展示信号的波形和数据;线程二专门负责接收来自下位机的无线数据流,确保数据的高效传输与处理。

软件架构通过双线程设计,提高了数据处理的效率,也优化了用户界面的响应速度,实现了上位机在数据接收、处理与可视化方面的高速并行运行。上位机软件流程图如图 2 所示,典型界面如图 3 所示,包含时域图显示窗口和频域图显示窗口,还提供了显示模式设置等功能。

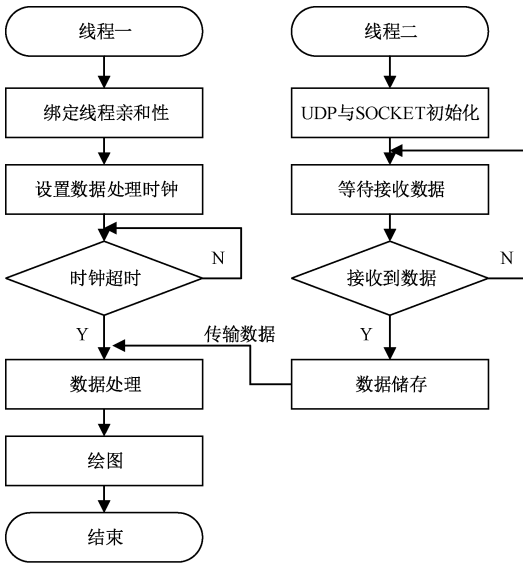


图 2 上位机软件流程图

Fig. 2 Flow chart of host computer

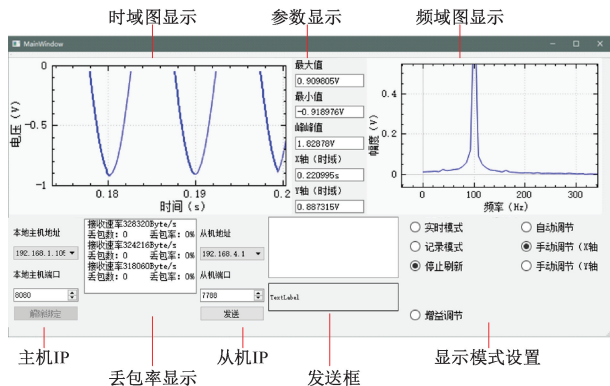


图 3 上位机界面

Fig. 3 Monitoring interface of the host computer

3 自供电装置

自供电装置包含两个部分:温差发电装置和能量收集管理电路。温差发电装置又分为机械机构部分与自适应控制模块。由于发动机尾喷管外壁的温度可以达到 500℃,而目前市面上的温差发电片的耐温只有在 250℃左右,故需要设计一个可自适应调节发电片与尾喷管外壁之间距离的结构。能量收集管理电路主要功能包括升压、能量管理、能量存储以及对系统供电。

3.1 机械结构部分

如图 4 所示,机械结构部分由温差发电片、散热片、发电框架、连杆结构以及电动推杆构成,利用电动推杆作为驱动单元,通过连杆结构调整温差发电片热端与尾喷管之间的间距。所用电动推杆外径为 8 mm,长度为 102 mm,行程为 30 mm,工作电压 3 V,工作电流 1.5 mA。所设计连杆结构使得间距可调范围为 1~15 mm。适当的间距可以保护温差发电片免受过高温度的损坏,同时又让发电片在温度容许条件下尽可能靠近热源以提高输出功率。

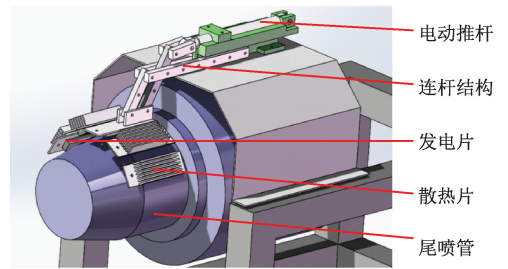


图 4 温差发电装置结构图

Fig. 4 Structure diagram of thermoelectric power generation device

3.2 自适应控制模块

自适应控制模块由微控制器、热电偶和驱动芯片组成。自适应控制模块通过监测温差发电片的热端温度,实时驱动电动推杆,控制温差发电片与热源的间距。

自适应控制软件流程图如图 5 所示。自适应控制程序负责执行温度检测和电动推杆控制。程序首先读取发电片热端温度值,经过位操作和乘法运算转换为实际的温度值;接着程序进行温度比较,将当前温度与设定的高温阈值 temp_H 和低温阈值 temp_L 进行比较;接着再根据比较结果驱动推杆。在每次驱动推杆后,程序休眠一定时间再执行下一个控制周期。这个休眠时间的设定应使系统能及时的调整间距,同时也不会因为频繁的操作而过多消耗电能。

3.3 能量收集管理电路

本文采用 TI 公司生产的 BQ25504 芯片来设计能量收集管理电路。BQ25504 电路采用最大功率点跟踪技术优化能量收集过程,提高转换效率。收集到的能量被存储在可充电锂电池中。BQ25504 还可监控和控制电池的充电状态,通过可编程的电压阈值来防止过充和过放。电路可将产生的电能供给系统,多余的电能存储到可充电锂电池

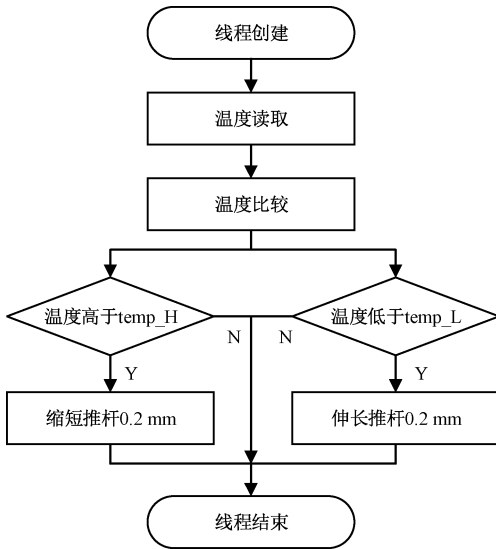


图 5 自适应控制软件流程图

Fig. 5 Flowchart of adaptive control program

中。所有电路系统安装在远离热源的位置以保证电路在安全的温度范围内运行。

4 实验结果与分析

4.1 无线传感系统数据准确率实验

为验证无线传感系统的数据传输准确率,本文设置了如图 6 所示的实验。实验过程中,本文将信号发生器产生的标准信号输入到无线传感系统的模数转换模块进行转换和无线传输,同时通过上位机实时监控和记录收到的电压信号,并与输入电压信号进行幅值和频率的对比。

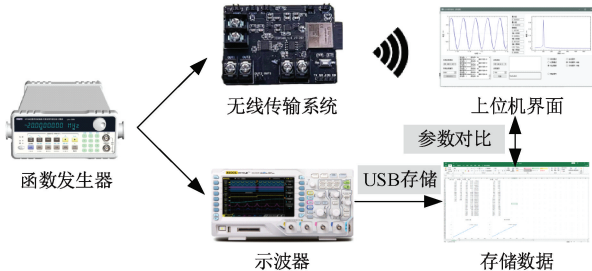


图 6 数据准确率实验框图

Fig. 6 Diagram of data accuracy rate experiment

表 1 为数据准确率实验结果。从表中可以看出,输入信号电压峰峰值 (V_{pp} 幅值) 为 50~1 000 mV, 频率为 500~5 000 Hz, 上位机接收到电压信号的幅值和频率与输入电压信号相比, 误差均保持在较低水平: 其中 V_{pp} 幅值误差在 3.8% 以内, 频率误差在 1.5% 以内, 表明无线传感系统在采样、模数转换和无线传输过程中具有较高的数据准确率。

4.2 无线传感系统发动机实验

发动机振动测试实验装置如图 7 所示, 将某型号微型

表 1 无线传输系统数据准确率实验结果

Table 1 Experimental data for the verification of wireless transmission system's accuracy rate

输入 $V_{pp}/$ V	输入 频率/ Hz	测量 $V_{pp}/$ V	测量 频率/ Hz	V_{pp} 误差/ %	频率 误差/ %
0.05	500	0.051 9	498.942	3.8	0.211 6
0.05	1 000	0.050 8	997.726	1.6	0.227 4
0.05	5 000	0.048 7	4 926.98	2.6	1.460 4
0.10	500	0.102 4	498.869	2.4	0.226 2
0.10	1 000	0.101 2	997.496	1.2	0.250 4
0.10	5 000	0.100 1	4 928.68	0.1	1.426 4
0.50	500	0.512 6	499.336	2.52	0.132 8
0.50	1 000	0.510 2	997.981	2.04	0.201 9
0.50	5 000	0.516 9	4 992.14	3.38	0.157 2
1.00	500	1.037 4	498.197	3.74	0.360 6
1.00	1 000	1.028 2	997.883	2.82	0.211 7
1.00	5 000	1.019 6	4 928.39	1.96	1.432 2

涡喷发动机固定于燃烧室内的测试台上进行实验。发动机长度 309 mm, 外径 116.8 mm。ADXL1005 加速度器固定于涡喷发动机机壳上。上位机运行于控制室中, 通过 Wi-Fi 接收燃烧室内无线传感系统发出的信号进行数据处理与显示。另外采用一个模拟式压电加速度传感器 AD100S, 也安装在发动机机壳上采集加速度, 通过有线方式连接到示波器上, 以与无线传感系统的结果进行比较。

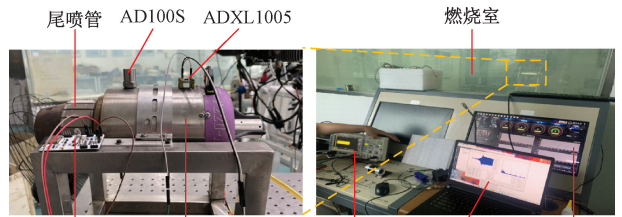


图 7 无线传感系统发动机测试实验

Fig. 7 The experimental setup for real-machine testing of the wireless sensing system

实验时, 涡喷发动机经历启动、慢车、加速、(高速)巡航、减速以及熄火 6 个工作状态。通过上位机软件平台的存储功能, 可将整个测试过程中采集的振动数据以 csv 格式保存在上位机以便后续分析使用, 同时以波形即时显示。

图 8 展示了无线监测 Wi-Fi 上位机在实际发动机测试中记录的振动波形图, 其中横轴为时间, 纵轴为振动的加速度值。从图中可以观察到, 发动机在点火后进入慢车状态, 此时的振动加速度维持在 5 m/s^2 以下。随后, 发动机经过大约 15 s 的加速过程, 进入高速状态, 并在此状态下持续运行了 155 s。高速状态期间, 振动加速度的最大值达到了 50 m/s^2 。当时间到达 200 s 时, 发动机开始执行减速程序,

经过慢车状态后,最终熄火。

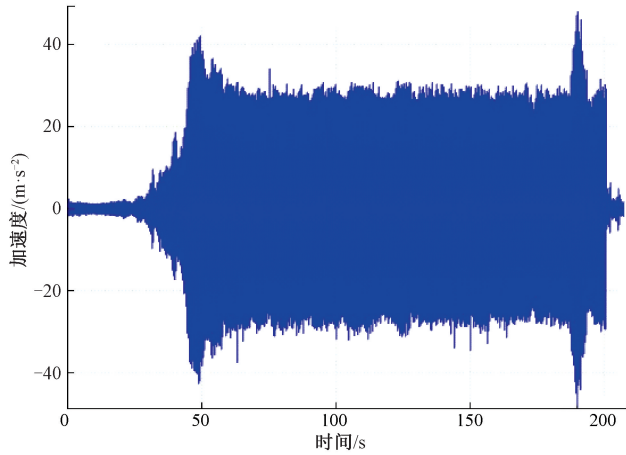


图8 发动机测试输出波形图

Fig. 8 Waveform diagram of the real-engine test output

图9为发动机处于高速巡航状态时发动机控制台与无线监测上位机的界面,其中图9(a)为发动机控制台界面,通过其转速表发现此时转速为35 200 r/min,对应频率为586.67 Hz。图9(b)为无线监测上位机的界面,其中右下角显示信号的实时频率为587.31 Hz。两者相对误差为0.1%。将无线传感系统接收到的结果与有线压电加速度传感系统的结果相比,幅值误差小于3.5%,频率误差小于1.4%。

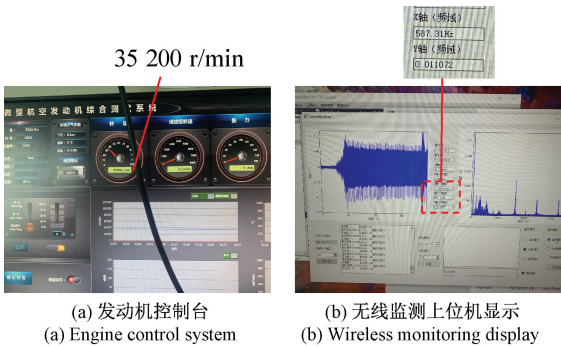


图9 发动机控制台和无线监测上位机显示

Fig. 9 Display of the engine control system and wireless monitoring host computer

4.3 无线传感系统用电性能测试

本研究对无线传感系统的功耗进行了测试,目的是评估系统的实际功耗情况,以研究自供电的可行性。实验中,采用DMM4020高精度电流表记录无线传感系统工作时电源耗电电流情况,实验结果如图10所示。

通过测量可得系统工作环节时间为0.87 s,包括完成系统初始化、数据处理、数据发送等工作,这些工作需消耗电能约为88.95 mJ。通过在工作环节后设置休眠环节,能降低整个周期的平均功耗。样机中设定周期为3.87 s,可得一个周期的平均功耗约为26.42 mW。

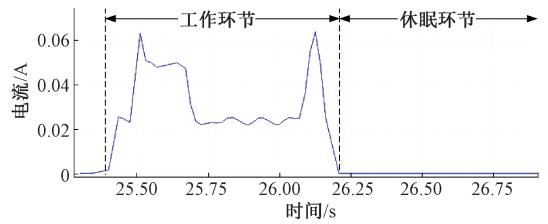


图10 单个工作环节电流波形图

Fig. 10 Current waveform of a single working cycle

4.4 自供电系统发电性能测试

将温差发电装置样机安装在发动机尾喷管上进行实验,温差发电装置样机和温差发电片如图11所示。初始时将两片温差发电片串联并置于距离尾喷管外壁约2 mm处,发电片的热端朝向尾喷管外壁。发电片的冷端连接散热片进行散热,利用多通道数据记录仪记录发电片的电压数据及温度数据。温差发电片型号为HT018087,其尺寸为0.8 cm×3.3 cm×0.4 cm,内阻为0.9 Ω。

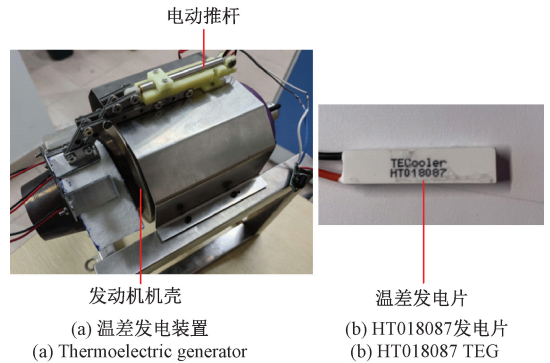


图11 温差发电装置样机和发电片

Fig. 11 Thermoelectric generator and TEG element

温差发电片输出开路电压随时间变化如图12所示。可以看出输出电压可以分为4个阶段:在阶段(I)即点火之后,尾喷管外壁温度迅速上升,而发电片冷端温度较低,温差迅速增大,此时电压增速较大,迅速上升至1.05 V左右,两片热电片输出峰值功率可达287.3 mW;在阶段(II)随着热传导的进行,发电片冷端温度逐渐升高,温差减小,电压下降;在阶段(III)即温差稳定阶段,温差保持相对稳定,且热端温度控制在安全范围内,输出电压稳定在500 mV左右,图11中可知电动推杆调整了一次,间距增大,电压下降。本文实际测试中休眠时间设定值为1 s,设置休眠环节后电动推杆部分耗能为3 mW,如未设计休眠环节该部分耗能约为30 mW。这个阶段可产生约69.4 mW的平均功率;在阶段(IV)发动机停机熄火,发动机尾喷管外壁温度迅速下降,温差迅速减小,电压迅速下降。测试过程中发电片热端温度从点火之后迅速上升至180 °C,之后通过电动推杆控制在150 °C~210 °C之间,直至发动机停机熄火后发电片热端温度缓慢下降至0 °C。

样机采用4片温差发电片串联后,温差稳定阶段可产

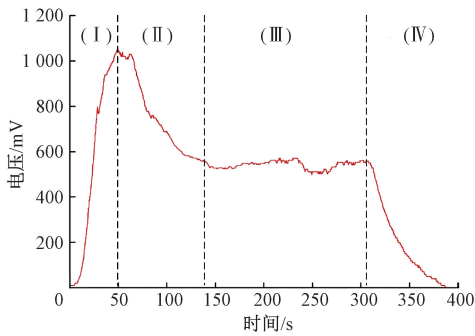


图 12 温差发电片开路电压随时间变化图

Fig. 12 Open-circuit voltage of the thermoelectric generator versus time

生约 135 mW 的功率,再采用 BQ25504 芯片对温差发电片输出进行转换和存储。根据芯片手册,BQ25504 具有 70% 以上的能量转换效率,但实际样机因线路损耗、环境温度、系统自身功耗等多种因素的影响,实际的能量收集效率约为 30%,经测量能收集到约 40 mW 的电能,仍可以满足无线传感系统约 26.42 mW 的功耗需求。多余电能将储存于可充电电池中。

5 结 论

针对现有的无线传感系统多采用蓝牙或 ZigBee 传输速率较慢的问题,本文采用 Wi-Fi 作为无线传输方式设计并实现了面向航空发动机的高频率振动信号无线传感系统。为实现系统的自供电,本文采用温差发电方式,将航空发动机尾喷管的废热能转换为电能为系统供电。实验表明,本文所设计的无线传感系统通讯速率可以达到 250 ksps,可以满足发动机高频振动信号的采样及传输速率要求。针对最高频率为 5 kHz 的振动信号,无线传输系统的 V_{pp} 幅值误差在 3.8% 以内,频率误差在 1.5% 以内,可基本满足发动机无线振动监测的精度需求。本文所设计的热电发电装置样机能产生约 40 mW 的电能,可满足无线传感系统 26.42 mW 的功耗需求,验证了自供电的可行性。

随着基于 Wi-Fi 传输方式的单片机芯片技术的发展,其内置 ADC 模块的采样率将进一步提高,无线传输系统的采样率将同步提高,可满足更高频率振动信号的采样和无线传输。另一方面,热电发电装置的结构由于包含驱动装置导致整体体积较大。体积过大的问题可以从以下两方面解决,第一,发电片驱动结构的体积可以缩小,功耗也可以进一步减小;第二,随着耐高温半导体温差发电技术的发展,一旦温差发电片可耐发动机外壁的高温,则热电发电结构可直接贴于发动机外壁而无需驱动结构来调整间距,体积将显著减小,有望实现实用性较强的航空发动机自供电无线监测系统。

参 考 文 献

[1] 刘帅,王伟,白杰,等. 面向控制规律设计的民用航空

发动机建模方法研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(1): 1-9.

LIU SH, WANG W, BAI J, et al. Research on the civil aero-engine modeling method oriented to control law design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(1): 1-9.

[2] RATH N, MISHRA R K, KUSHARI A. Aero engine health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance: An overview [J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2024, 40(s1): s279-s292.

[3] 丁小飞,廖明夫,彭丹阳,等. 航空发动机拍振问题研究与验证[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2639-2647.

DING X H, LIAO M F, PENG D Y, et al. Experimental validation of the beat vibration of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2639-2647.

[4] 胡明辉,高金吉,江志农,等. 航空发动机振动监测与故障诊断技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(4): 7-35.

HU M H, GAO J J, JIANG ZH N, et al. Research progress on vibration monitoring and fault diagnosis for aero-engine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(4): 7-35.

[5] 王楠,魏玉洁,张楠,等. 嵌入式水润滑轴承水膜压力无线传感监测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(5): 38-46.

WANG N, WEI Y J, ZHANG N, et al. Wireless sensor monitoring method for film pressure of embedded water-lubricated bearings [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 38-46.

[6] 马游春,李晋芳,李超杰,等. 舱内低功耗无线传感网络系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 15(11): 109-113.

MA Y CH, LI J F, LI CH J, et al. Design of low-power wireless sensor network system in cabin [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 15(11): 109-113.

[7] 王筱涵,任帅,王涛. 一种面向机械通气患者呼吸监测的无线传感器与系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(8): 110-116.

WANG X H, REN SH, WANG T. Design of wireless sensor and system for respiratory monitoring of patients with mechanical ventilation [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(8): 110-116.

- [8] 易小周. 基于自供电的发动机振动故障监测系统研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
YI X ZH. Research on self-power engine vibration fault monitoring system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [9] WANG Y L, YANG ZH B, LI P Y, et al. Energy harvesting for jet engine monitoring[J]. *Nano Energy*, 2020, 75: 104853.
- [10] 王瑄. 航空发动机的无线自供能测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
WANG X. Study on wireless self-powered measurement technology of aeroengine [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [11] BERETTA D, NEOPHYTOU N, HODGES J M, et al. Thermoelectrics: From history, a window to the future [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2019, 138: 100501.
- [12] ZOU Y J, SUN M ZH, ZHANG X Y, et al. A flexible, adaptive, and self-powered triboelectric vibration sensor with conductive sponge-silicone for machinery condition monitoring[J]. *Small*, 2024, 20(32): 2309759.
- [13] 蒲巧林, 陈有坤, 周牧, 等. 基于改进对比学习和并行融合神经网络的室内 WIFI 定位算法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(1): 101-110.
PU Q L, CHEN Y K, ZHOU M, et al. Indoor WiFi localization algorithm based on the improved contrastive learning and parallel fusion neural network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45 (1): 101-110.
- [14] AGHENTA L O, IQBAL M T. Low-cost, open source IoT-based SCADA system design using thinger. IO and ESP32 thing [J]. *Electronics*, 2019, 8(8): 822.
- [15] BATHRE M, DAS P K. Water supply monitoring system with self-powered LoRa based wireless sensor system powered by solar and hydroelectric energy harvester [J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2022, 82: 103630.
- [16] ATIF M, MURALIDHARAN S, KO H, et al. COVID-Beat: A low-cost breath monitoring approach for people in quarantine during the pandemic [J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2022, 9(3): 992-1006.
- [17] PRATAMA R A, FITRIANI R Z, KUAN Y D. Temperature data acquisition system for showcase refrigerator based on ESP32 and online remote display [J]. *Sensors and Materials*, 2023, 35(11): 3687-3696.

作者简介

宁云博, 硕士研究生, 主要研究方向为智能系统。

E-mail: 35120221151652@stu.xmu.edu.cn

关明杰(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为智能材料与结构和智能系统。

E-mail: mjguan@xmu.edu.cn