

基于磁激励和信号无线传输的旋转叶片模态参数测试技术研究

赵寿根, 李 涛, 王新虎, 栗 宁

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 航空发动机叶片的动态特性关系到航空发动机乃至整个飞机的运行安全, 对叶片在旋转状态下进行在线动力学参数测试是确保其安全性的有效手段之一。针对旋转状态的叶片提出了采用非接触磁激励作为激励力, 采用 WiFi 无线传输方式实现叶片振动信号的在线测量和传输的方法。在此基础上, 设计出一套可以测量旋转状态叶片动力学参数的非接触磁激励-无线传输的动力学参数测试系统, 并进行了相应的试验验证, 结果表明该系统使用方便, 测量精度高。

关键词: 模态试验; 旋转叶片; 动力学参数; 非接触磁激励; 无线传输

中图分类号: O329; V232.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)04-0963-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.04.009

引 言

航空发动机是一种极其精密而又复杂的热-力机械, 它能够为航空飞行器提供推力, 是航空飞行器的动力枢纽和“心脏”, 是航空工业的“皇冠上明珠”^[1]。航空发动机的研制水平是一个国家航空科技水平的重要体现, 更是一个国家国防、科研、经济实力的重要衡量标准。叶片的结构强度问题是航空发动机研制过程中遇到的最复杂且最重要的问题之一。尽管 ANSYS, ABAQUS 等有限元分析软件可以对叶片进行动力学仿真, 但由于叶片复杂的运行环境, 仿真结果和实际仍存在不小的差距。为了保证航空发动机叶片在高速旋转过程中可以安全可靠地运行, 对叶片在旋转状态下进行动力学参数测试至关重要。

旋转叶片与静态结构的振动性能参数测试方法的不同主要表现为激励方法与振动测量方法的差异。静态结构常用的激励方法有: 拉绳预载突然释放、锤击、激振器和振动台等, 而旋转类的结构由于对象状态和位置实时变化的特点, 这些常用的激励方法均不适用而需要新的方式或者改进传统的激励方式。振动测试方法的不同更主要的还是体现在振动信号获取的途径不同。目前旋转叶片的模态参数

测量主要采用以下几种方法:

(1) 接触式电阻应变片法^[2]: 该方法是在叶片上粘贴电阻应变片, 利用集流器装置或安装在轴上的无线发射装置将应变信号传送到旋转机械外部, 经过前置放大处理, 进行分析记录。该技术测量精度高, 但是在众多的叶片上粘贴应变片很烦琐, 布线复杂, 可靠性差, 且应变式传感器的工作寿命较短。

(2) 激光多普勒法^[3-5]: 根据迈克尔逊干涉原理, 光波经振动体表面反射后与参考光的频差会对光强产生调制作用, 调制频率与反射面振动速度成比例。调制频率经过 90° 相移, 由正、余弦波信号进行频率调制, 形成单边带压缩载波, 输出信号经频率解调后, 即可得到原模拟量的速度信号。该技术精度高, 但一般只能测量叶片测点处的振动响应, 经数据处理后只能得到频率参数, 且系统结构复杂, 抗振动性能差, 光学探头易被污染, 成本高。

(3) 间断相位法^[6-7]: 测试中当叶片不振动时, 示波器上出现规则的波形。当叶片振动时, 传感器输出的信号将出现相位差, 反映到示波器上的射线长度就会改变, 由此可以判断叶片振动的大小。该技术测量方法简单: 根据传感器接收到的扫描宽度确定叶片振幅大小, 沿旋转方向叶片为最大位移时叶片进入传感器扫描区, 同时沿旋转反方向达到最大位移时离开传感器扫描区, 这时会产生最大扫描宽

度。从其测试机理可以看出该方法数据后续处理非常复杂,且只适用于低频情况下振动的测量,数据经处理后同样只能得到叶片频率参数。

(4)叶尖定时法^[8-13]:叶尖定时测量的原理实质上是对叶片的端部相对位移进行间断测量,根据所测量的断续的数值“还原”为叶片的原始振动过程,并且对叶片整个振动过程的参数进行分析。该方法和间断相位法思路类似,但测试频率范围更宽,可适用于高频振动的测量,振动真实数据还原的后续处理比较复杂,一般用于事后处理,难以做到实时性,且只能得到叶片频率参数和阻尼参数。

从以上学者的研究成果可以看出,这些测试方法由于原理的特点可以比较方便地得到叶片测量点的振动响应,进而得到测量对象的固有频率和阻尼比,但无法得到固有频率对应的振型;这些方法中,没有实时测量外激励信号,也不是通过测量传递函数来识别模态参数,而是采用测量得到的振动响应通过FFT分析来识别,因此只能得到一阶固有频率;多采用静止的传感器测量旋转叶片响应,得到不连续的调制信号,再通过信号的拼接和解调获得叶片频率信息。对于旋转叶片通过求取传递函数来识别其动力学参数从原理上讲最为可靠和有效。因此,外激励的施加和测量、旋转叶片振动响应的测量方法、振动信号的无线实时传输方法成为难点。本文在充分调研和总结前辈们科研成果的基础上,从方式、方法上进行探索和尝试,提出采用非接触磁激励作为旋转叶片激励力、采用WiFi无线传输方式实现振动响应信号和外激励信号的实时测量、传输,设计了一套非接触磁激励-无线传输旋转叶片动力学参数测试系统,并用试验验证了其便捷性和有效性。

1 旋转叶片模态参数测试方案

结构的动力学参数测试系统一般包含激振系统^[14]、振动量测量系统、振动信号传输系统。激振系统给结构施加一定的激励以激起结构振动响应;振动量测量系统利用各种传感器测量结构的激振力、加速度、位移等振动参量;振动信号传输系统采集传感器传出的信号并且将其传输到计算机以进行振动信号数据分析与处理。

最为经典的动力学参数测试系统采用锤击法对结构施加激励、采用传感器采集振动参量、通过同轴电缆进行信号的采集和传输。对于旋转叶片动力学参数测试,无法采用锤击法施加激励,更无法通过电缆把旋转的振动参量传输出来,激励的施加方式和

振动信号的传输方式成为难点,这就需要设计一套适应于旋转叶片的专属动力学参数测试系统。

本文提出了非接触磁激励-无线传输旋转叶片模态测试系统的总体设计方案,如图1所示。该方案采用非接触式的磁激振器作为激振设备,ICP传感器作为振动参量的测量设备,激振器和传感器跟随叶片同步旋转,并采用无线传输方式进行振动信号的采集和传输。下面按照激振系统、振动量测量系统、振动信号传输系统三部分详细阐述非接触磁激励-无线传输旋转叶片动力学参数测试系统的设计原理。

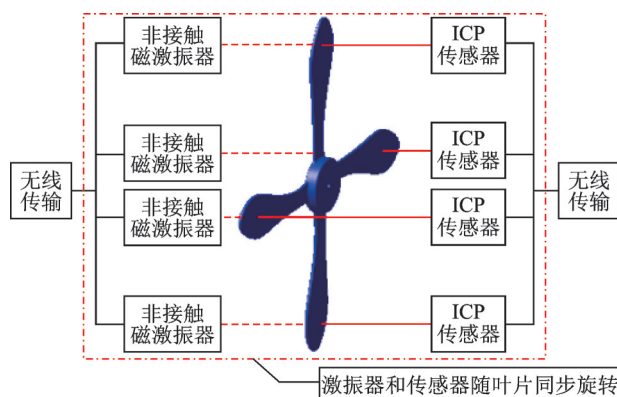


图1 非接触磁激励-无线传输旋转叶片动力学参数测试系统总体设计方案

Fig.1 Overall design scheme of non-contact magnetic excitation-WiFi wireless transmission dynamic parameters test system for rotating blades

2 激振系统

本文选取的非接触磁激振器本质上是由绕有线圈的铁芯封装而成的,给线圈通电即可产生磁力。其原理如图2所示。

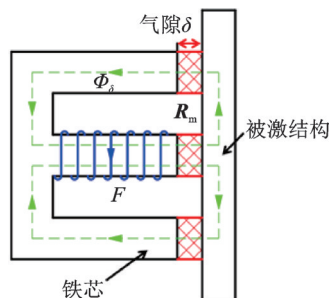


图2 磁激振器原理图

Fig.2 Schematic diagram of magnetic shaker

根据能量守恒定律可以导出磁激振器吸力 F 的表达式为^[15]:

$$F = \frac{B_0^2 S_0}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中 B_0 为气隙中磁感应强度,单位:T; S_0 为气隙面积,单位: m^2 ; μ_0 为空气磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

而气隙中的磁感应强度为:

$$B_0 = \frac{\Phi_\delta}{S_0} \quad (2)$$

式中 Φ_δ 为气隙中的磁通。

忽略漏磁通,若通入电流 i ,则:

$$\Phi_\delta = \frac{iN}{R} \quad (3)$$

式中 iN 为磁路总磁动势; R 为磁路总磁阻。总磁阻 R 为铁芯磁阻 r_m 和气隙磁阻 R_m 之和,即:

$$R = r_m + R_m \quad (4)$$

由于空气的磁阻比铁芯磁阻大几千倍,因而磁动势主要落在气隙磁阻 R_m 上(如图2所示), r_m 可忽略不计,即:

$$R = R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S_0} \quad (5)$$

式中 δ 为气隙的间距。因而有:

$$B_0 = \frac{\Phi_\delta}{S_0} = \frac{iN}{RS_0} = \frac{iN}{\frac{\delta}{\mu_0 S_0} S_0} = \frac{iN\mu_0}{\delta} \quad (6)$$

综合以上各式,可得磁激励器吸力为:

$$F = \frac{B_0^2 S_0}{2\mu_0} = \left(\frac{iN\mu_0}{\delta} \right)^2 \cdot \frac{S_0}{2\mu_0} = \frac{i^2 N^2 \mu_0 S_0}{2\delta^2} \quad (7)$$

即:

$$F = \frac{i^2 N^2 \mu_0 S_0}{2\delta^2} \quad (8)$$

由此可见吸力 F 与气隙间距的平方 δ^2 成反比,与励磁电流的平方 i^2 、线圈匝数的平方 N^2 、气隙面积 S_0 成正比。

模态试验的激励信号形式主要有脉冲激励、白噪声激励、正弦扫频激励等,为了使得磁激励器能够产生模态试验所需要的信号,需给予其相应的励磁电流。首先以正弦励磁电流为例进一步推导吸力 F 的角频率与励磁电流角频率的关系。若通入正弦励磁电流信号 $i = I \sin(\omega t)$,则:

$$\Phi_\delta = \frac{iN}{R} = \frac{IN \sin(\omega t)}{R} \quad (9)$$

$$F = \frac{i^2 N^2 \mu_0 S_0}{2\delta^2} = \frac{I^2 N^2 \mu_0 S_0}{2\delta^2} \sin^2(\omega t) = \frac{I^2 N^2 \mu_0 S_0}{2\delta^2} \cdot \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} = \frac{K}{2} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (10)$$

即:

$$F = \frac{K}{2} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (11)$$

$$\text{式中 } K = \frac{I^2 N^2 \mu_0 S_0}{2\delta^2}。$$

由此可见,当磁激励器中通入正弦励磁电流 $i = I \sin(\omega t)$ 时,吸力 F 简谐变化,其角频率为正弦励磁电流角频率的2倍。

由于任意信号均可展开为三角级数:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)] \quad (12)$$

这就意味着,励磁电流为任意信号时,吸力 F 的角频率总是励磁电流角频率的2倍。可根据吸力公式在 MATLAB-Simulink 中建立仿真模型,如图3所示。仿真获得励磁电流 i 与吸力 F 的曲线如图4~7所示。

从图4~7可以看出,磁吸力 F 的频率是励磁电流 i 的2倍。励磁电流能够激发出各种形式的磁激励信号:脉冲激励、正弦扫频激励、白噪声激励等,且激发出的磁激励信号可以包含很宽的频率成分。

通过激振法测试结构模态需要激励的频率成分包含待测结构的固有频率成分,通过以上仿真分析,由励磁电流触发的磁吸力满足激振力的要求,可以

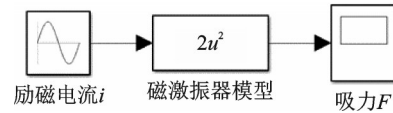


图3 磁激励器 Simulink 模型

Fig. 3 Simulink model of magnetic shaker

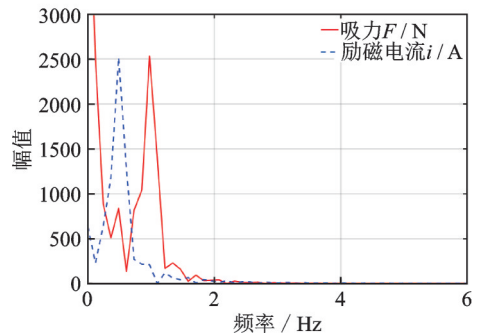
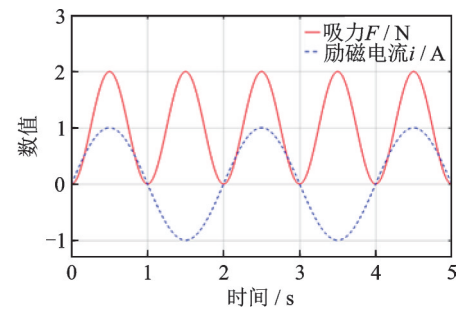


图4 励磁电流 i 为正弦信号时吸力 F 的时域图和频谱图
Fig. 4 Time domain diagram and spectrum diagram of magnetic force F when excitation current i is sinusoidal signal

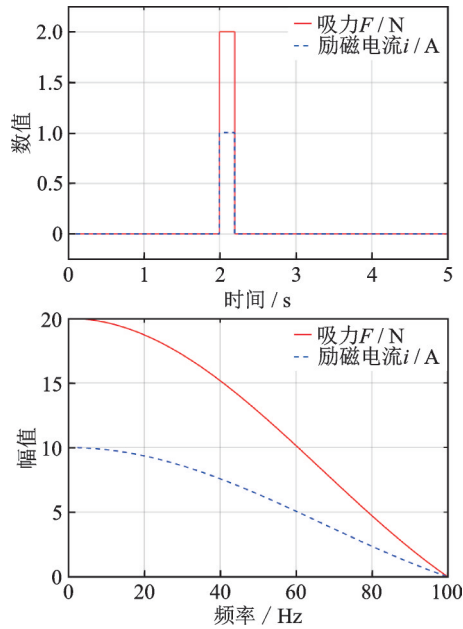


图5 励磁电流*i*为脉冲信号时吸力*F*的时域图和频谱图
Fig.5 Time domain diagram and spectrum diagram of magnetic force *F* when the excitation current *i* is the pulse signal

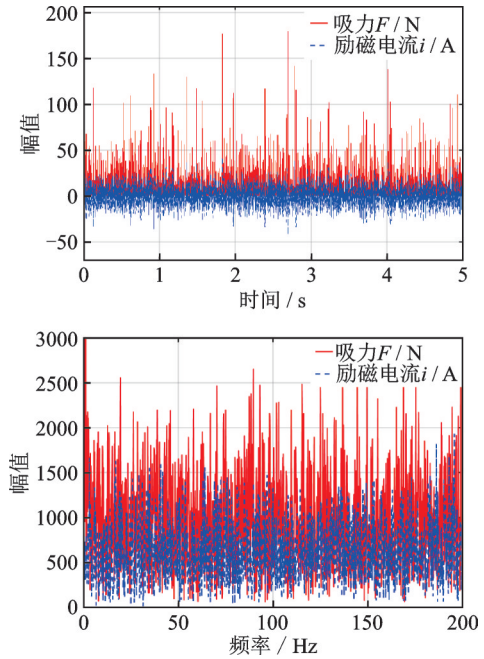


图7 励磁电流*i*为白噪声信号时吸力*F*的时频图
Fig.7 Time domain diagram and spectrum diagram of magnetic force *F* when excitation current *i* is white noise signal

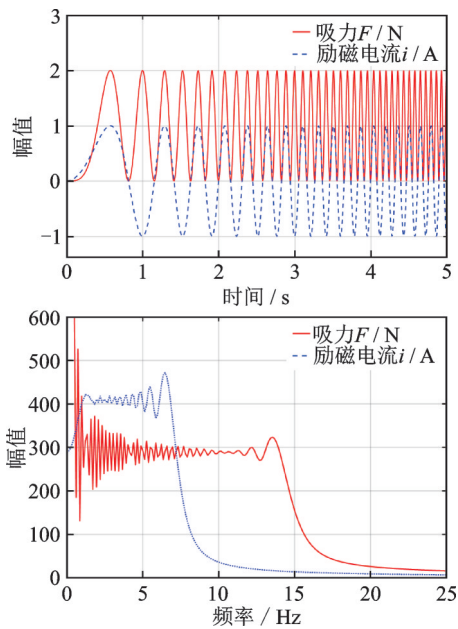


图6 励磁电流*i*为正弦扫频信号时吸力*F*的时域图和频谱图
Fig.6 The time domain diagram and spectrum diagram of magnetic force *F* when the excitation current *i* is sinusoidal frequency sweeping signal

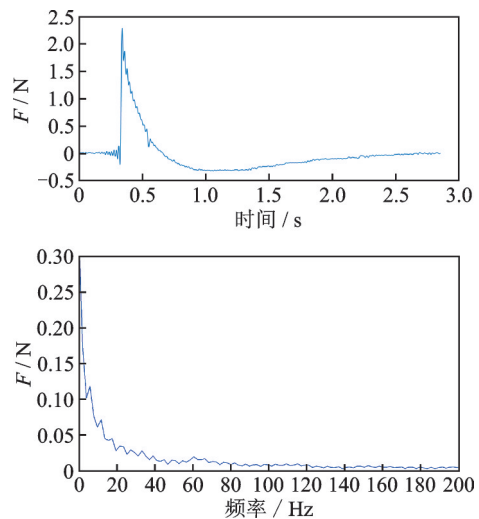


图8 实际测得的磁激振器脉冲信号时域和频域曲线
Fig.8 The measured time and frequency curve of the magnetic shaker pulse signal

通过实际需求设计通入的励磁电流信号形式,从而达到产生不同类型的磁激励信号的目的。由于本文设计的激振系统需要独立的干电池供电,故通过开关的导通与断开即可产生脉冲激励,简洁又方便。采购常州市尼西电气有限公司生产的型号为NX-P50/27的电吸盘作为磁激振器,供电电压为DC 12 V,实际测得的脉冲信号的时域图如图8所示。

3 振动信号传输系统

振动信号的传输方式分为有线传输和无线传输。有线传输方式有着信噪比高,抗干扰能力强,价格低廉等优点。有线传输方式有着广泛的应用范围,但对于旋转叶片,采用有线的形式传输振动信号会存在电缆缠绕的问题。若将无线传输技术应用到旋转叶片的振动信号采集上,则将信号传输问题变得简单且具有创新性。

目前主流的无线传输的方式有:WiFi,蓝牙,

ZigBee, UWB 等, 几种方式的性能如表 1 所示。综合对比各个无线传输手段的性能及优缺点, 结合旋

转叶片振动信号传输的需求, 本文选用 WiFi 技术作为无线通信手段。

表 1 主流无线传输技术性能及优缺点对比

Tab. 1 Comparison of performance, advantages and disadvantages of mainstream wireless transmission technologies

传输方式	传输距离/m	传输速度/(MB·s ⁻¹)	频段/GHz	功耗/mW	优点	缺点
蓝牙	<15	<1	2.4	<20	体积小、使用方便	距离短、速率慢
WiFi	<100	可达 54	2.4	<50	速率快、距离远	功耗高
ZigBee	<20	<250	2.4	5	功耗低	距离短、速率低
UWB	<10	<1	10.6	10	速率快、功耗低	距离短

旋转叶片的振动参量通过 ICP 传感器采集, ICP 传感器将物理参量信号变为电压模拟信号传出, 想要电压模拟信号无线传输至上位机 PC 端, 需要经过信号调理、A/D 转换、D/A 转换、数据发送、WiFi 无线传输等步骤, 这些步骤的实现都离不开微控单元 (Microcontroller Unit, 简称为 MCU) 的控制。图 9 是以 MCU 为核心模块的 WiFi 无线传输系统总体设计方案。

根据需求选用 STM32F103 芯片作为微控处理器。

信号调理是将 ICP 传感器采集的信号进行放大、滤波等处理, 其调理的最终目的是将传感器传出的信号放大, 并按比例变换到 0~3.3 V, 以便微控单元进行采集。

WiFi 模块负责将 MCU 采集的信号以无线的形式发送至上位机, 本文选用 ESP8266 模块作为 WiFi 模块。

电源模块负责为各个模块的正常运行提供电源。

ICP 传感器的信号经过信号调理电路, 由 STM32F103 微控芯片进行采集并通过串口发送至 WiFi 模块, 最后由 WiFi 模块无线传输至上位机。整个无线传输的流程需要通过烧写在单片机内部的程序控制, 程序设计是实现无线传输功能的核心步骤。

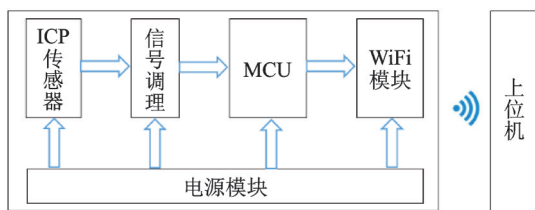


图 9 振动信号无线传输总体设计方案

Fig. 9 Overall design scheme of wireless transmission of vibration signals

微控单元是将内存 (Memory), 计数器 (Timer), USB, A/D 转换, UART, PLC, DMA 等周边接口, 甚至 LCD 驱动电路都集成在一起, 形成的芯片, 也称为单片机。MCU 类似于计算机的 CPU, 主要负责信号的采集、A/D 转换、存储、D/A 转换、发送等任务, 调控指挥各个模块有序运行, 是微型电路设计的大脑, 是电路设计必不可少的核心部件。本文

STM32F103 微控芯片程序的设计可在 Keil5 软件中进行。Keil5 软件 (如图 10 所示) 是美国 Keil Software 公司出品的可以兼容 51 系列以及 STM 系列等主流单片机的基于 C 语言的 MCU 开发工具, 包含丰富全面的库函数和功能强大的集成调试工具, 可以完成编辑、编译、连接、调试、仿真等整个开发流程。

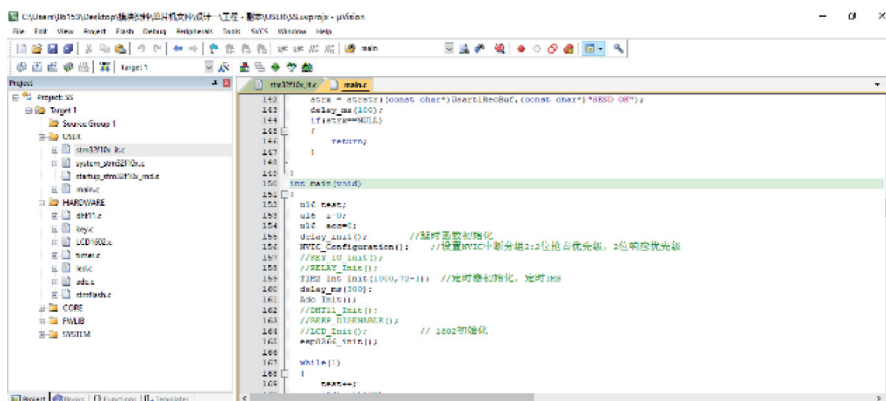


图 10 Keil5 开发环境软件界面

Fig. 10 Software interface of Keil5

本文为实现振动信号的无线传输功能,设计程序的流程图^[16]如图 11 所示。

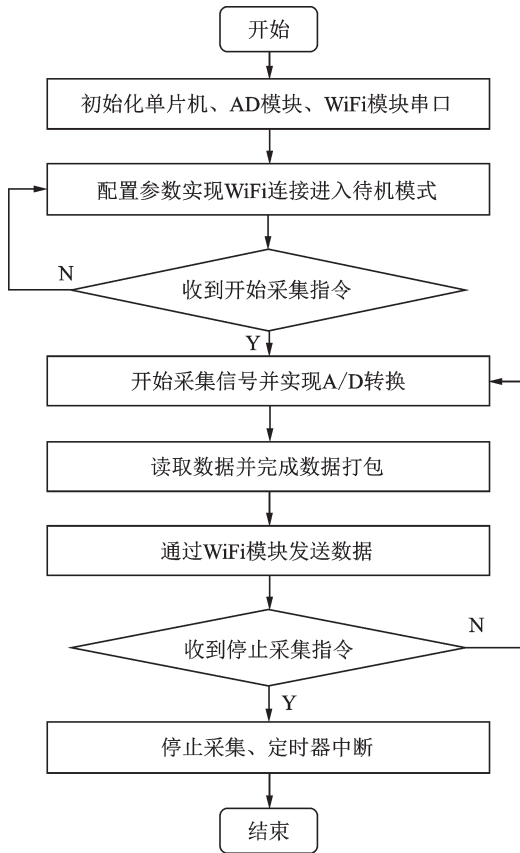


图 11 无线传输程序设计流程图

Fig. 11 Flow chart of wireless transmission programming

将无线传输程序采用串口通信烧写至 STM32 芯片和 WiFi 模块,就可以进行相关性能测试了。

将设计好的各个模块按照对应的引脚依次连接,得到整个无线传输系统的模块连接图如图 12 所示。

实物图如图 13 所示。

如图 14 所示,无线传输系统采集的数据可在上位机数据接收平台中查看,并可以输出成 TXT 格式的数据文档,供后续处理。经无线传输系统采集并输出的信号都是以数字信号量化表示的,本文选用的 STM32 芯片中 ADC 的分辨率为 12 位,因而量化输出的数值范围是 $0 \sim 2^{12} - 1$, 即 $0 \sim 4095$, 又因 ADC 只能采集 $0 \sim 3.3 \text{ V}$ 的电压信号,因而 0 V 电压对应数值 0, 3.3 V 电压对应数值 4095。

以下用直流电压加以测试,在 ADC 采集端口 PA1 引脚分别输入 0 V 直流电压和 3.3 V 直流电压,在 PC 端数据接收平台可以得到结果如图 14(a) 和 (b) 所示。

这就说明 ADC 的采集精度为:

$$\Delta U = \frac{3.3}{2^{12}} = 0.8 \text{ mV} \quad (13)$$

输出量化数值 D 和采集到的模拟信号 u_a 之间的关系为:

$$u_a = D \cdot \Delta U = \frac{3.3}{2^{12}} D \quad (14)$$

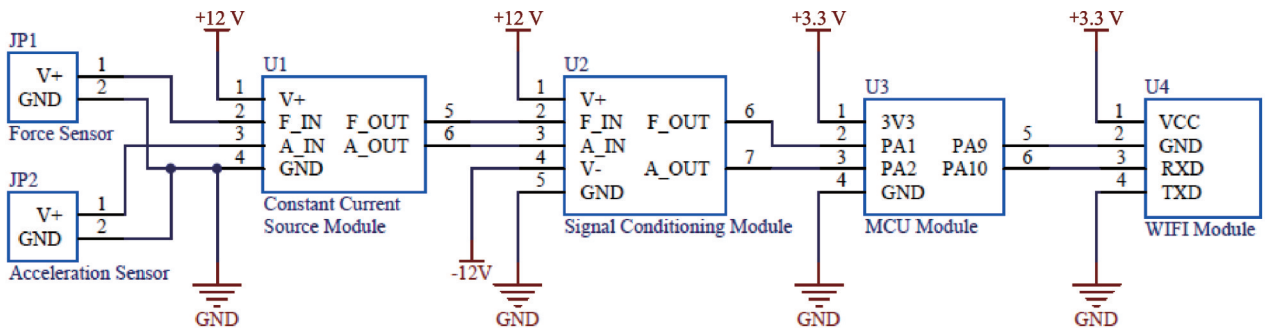


图 12 无线传输系统各模块引脚及连接示意图

Fig. 12 Pins and connection diagram of each module of wireless transmission system

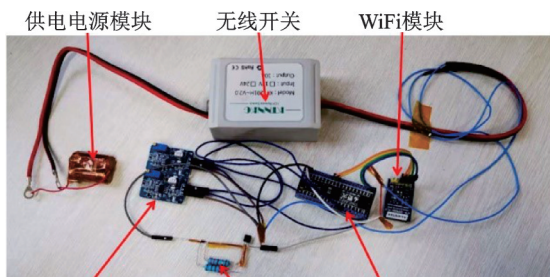


图 13 无线传输系统各模块连接实物图

Fig. 13 Physical picture of connection of each module of wireless transmission system

式(13)表明,ADC 可以分辨 0.8 mV 的电压波动。由于传感器信号经信号调理模块会放大 100 倍,因此,ADC 可以采集传感器信号的精度为 0.008 mV 。本文使用的两种 ICP 传感器灵敏度系数为:

$$K_u = 2.2 \text{ mV/N}, K_u = 12 \text{ mV/N} \quad (15)$$

远大于 0.008 mV ,这就说明 ADC 的采集精度足够高,采集到的信号可以真实地体现原信号特性。振动参量 X 和数据接收平台接收到的量化数值 D 之间的最终换算关系为:

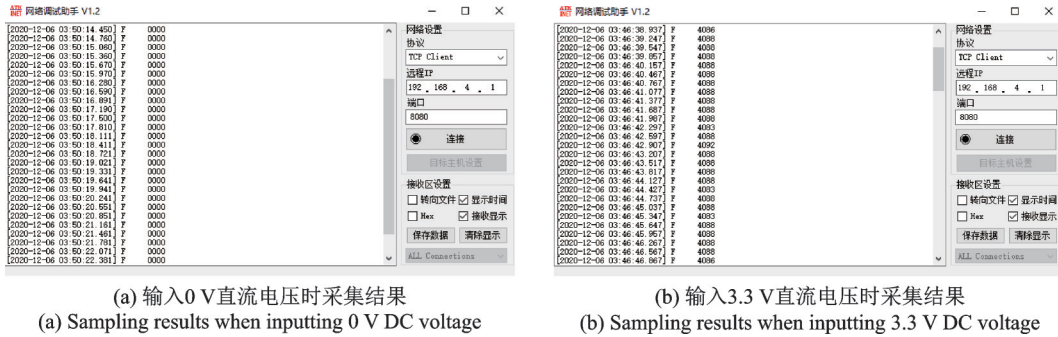


图 14 无线传输系统上位机数据接收平台

Fig. 14 Host computer data receiving platform of wireless transmission system

$$X = \frac{3.3}{2^{12}} D + 898.3 \quad K_u \quad (16)$$

经过上述分析以及测试表明,STM32F103 芯片的采集精度可以达到 0.008 mV,又根据官方手册,STM32F103 芯片的采样频率可以达到 1 MHz,因此本文设计的无线传输系统可以保证将传感器传输的振动信号高质量采集出来,满足试验需求。

4 旋转叶片模态试验

搭建如图 15 所示的试验平台。磁激励器、ICP 力传感器和无线传输系统均固定于与叶片平行的固支平板上,ICP 加速度传感器固定在叶片上。整个系统的细节布置如图 16 所示。

试验时布置 4 个测点,采用单输入多输出法进行模态试验。磁激励器以及 ICP 力传感器固定于测点 1 不动,依次按照 1,2,3,4 测点移动 ICP 加速度传感器进行 4 次激励试验,将测得的输入输出信号通

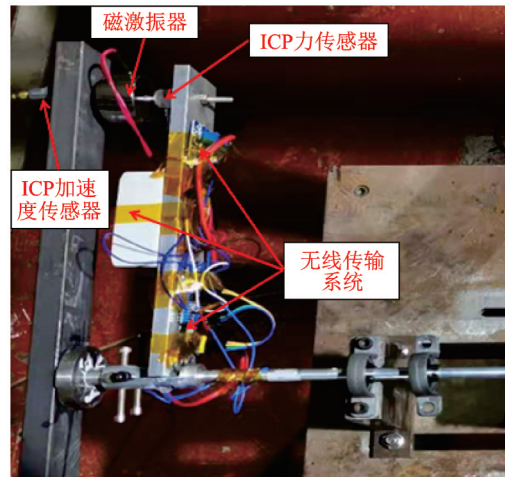


图 16 磁激励器及无线传输系统细节图

Fig. 16 Detail of magnetic exciter and wireless transmission system

过无线传输系统传输至上位机即可进行数据分析处理。试验测点布置如图 17 所示。

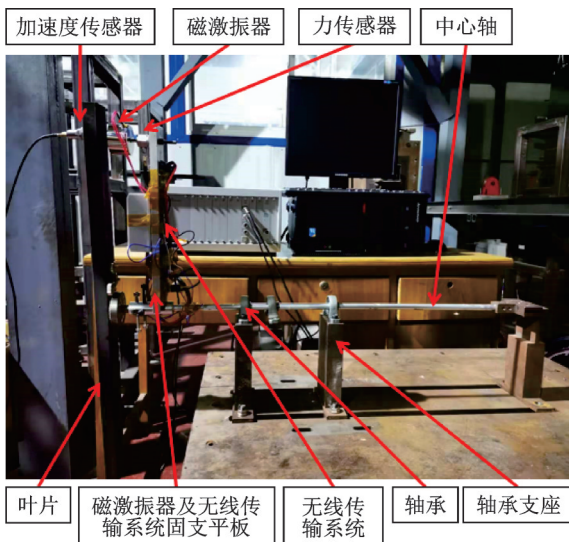


图 15 非接触磁激励-无线传输旋转叶片试验平台

Fig. 15 Non-contact magnetic excitation-WiFi wireless transmission rotating blades test platform

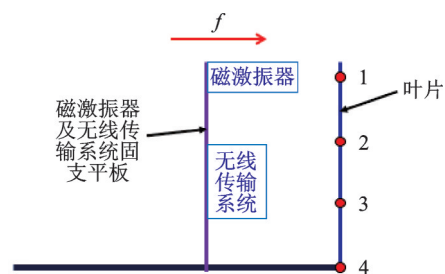


图 17 测点布置示意图

Fig. 17 Distribution of measuring points

上位机中得到的输入输出信号是等时间间隔、等长度的数值信号序列,按照模态参数识别方法进行编程即可提取模态参数。本文采用共振法进行模态参数识别,对输入输出信号无需进行特殊处理。

试验测得转速为 0 时测点 1 的磁激励信号以及响应信号如图 18 所示。

本文对不同转速下的旋转叶片进行了试验,并进行了模态参数识别。图 19 为转速为 0, 100, 200,

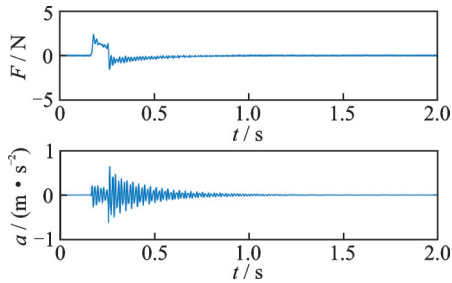
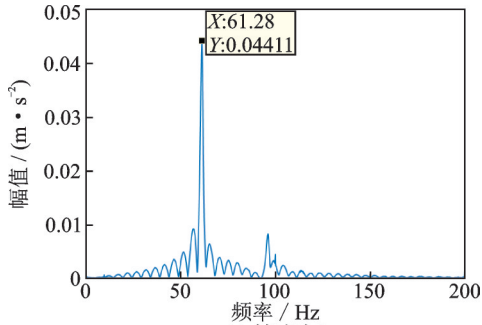
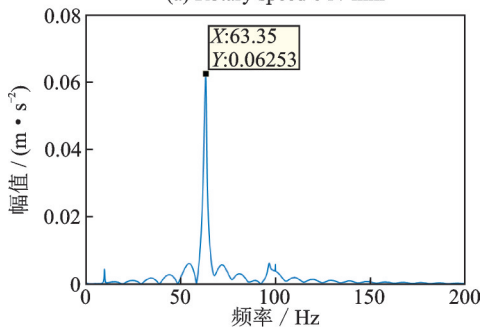


图18 叶片端部激励信号与响应信号曲线

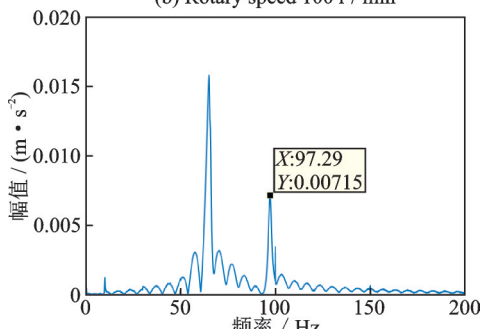
Fig. 18 Excitation and response signal of blade end



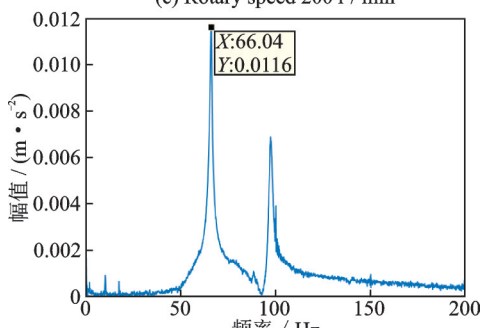
(a) 转速为0
(a) Rotary speed 0 r/min



(b) 转速为100 r/min
(b) Rotary speed 100 r/min



(c) 转速为200 r/min
(c) Rotary speed 200 r/min



(d) 转速为300 r/min
(d) Rotary speed 300 r/min

图19 不同转速下的传递函数幅频特性曲线

Fig. 19 Amplitude-frequency curve of frequency response function at different rotational speeds

300 r/min时的传递函数幅频特性曲线,表2~4为转速为0, 100, 200, 300 r/min时模态参数的识别结果。

表2 不同转速下叶片的固有频率(单位:Hz)

Tab. 2 Natural frequency of blade at different speeds (Unit: Hz)

阶次	转速/(r·min ⁻¹)			
	0	100	200	300
1	61.28	63.35	65.06	66.04
2	96.07	96.80	97.29	97.41

表3 不同转速下叶片的阻尼比

Tab. 3 Damping ratio of blade at different speeds

阶次	转速/(r·min ⁻¹)			
	0	100	200	300
1	5.75%	6.91%	8.23%	9.19%
2	5.37%	6.88%	7.53%	9.20%

表4 不同转速下叶片的振型

Tab. 4 Vibration shape of blade at different speeds

阶次	转速/(r·min ⁻¹)			
	0	100	200	300
1	1	1	1	1
	0.29	0.37	0.43	0.48
	0.18	0.19	0.21	0.22
2	0	0	0	0
	1	1	1	1
	-0.45	-0.44	-0.42	-0.40
	-0.22	-0.23	-0.21	-0.19
	0	0	0	0

为了验证结果的正确性,采用锤击法对静止状态的叶片进行了模态试验,并进行了结果对比,如表5所示。

表5 锤击法与磁激励-无线传输法试验结果对比

Tab. 5 Comparison of test results between hammering method and magnetic excitation-wireless transmission method

阶次	锤击法			磁激励-无线传输法		
	固有频率/Hz	阻尼比/%	振型	固有频率/Hz	阻尼比/%	振型
1	63.18	7.67	1	61.28	6.75	1
			0.38			0.29
			0.23			0.18
			0			0
2	97.60	6.91	1	96.07	6.37	1
			-0.66			-0.55
			-0.31			-0.29
			0			0

本试验采用本文提出的新方法:非接触磁激励-无线传输法对旋转叶片的模态参数进行了测试,取得了良好的效果。本试验测得了不同转速下叶片的固有频率、阻尼比和振型,与锤击法测试结果相吻合,说明非接触磁激励-无线传输法是一种行之有效的方法,可以作为旋转叶片的模态测试方法。

本试验测量了转速为0,100,200,300 r/min时叶片的模态参数,通过分析试验数据发现,随着转速的增加,叶片的固有频率呈增大趋势,转速每增加100 r/min,叶片的一阶固有频率增加约1.7 Hz,叶片的二阶固有频率增加约0.5 Hz。这与含有离心力的结构产生动力刚化效应所呈现的结果是相符的,即转速增加,结构的固有频率增大。这是因为叶片旋转时会产生离心力,离心力会使叶片“刚化”,离心力使得叶片抗弯曲的能力变强,从而固有频率增大。

5 结 论

本文提出了一种非接触磁激励-无线传输旋转叶片模态参数测试方案,并对其涉及的激振技术、振动信号传输技术等关键问题进行了研究,通过试验验证了其便捷性和有效性。得出的结论主要有:

(1)非接触磁激振器可以产生脉冲激励、白噪声激励、正弦扫频激励等激振力,满足振动测试激振要求。

(2)无线传输系统可以高质量地采集并传输激振力、加速度等振动信号。

(3)本文设计的非接触磁激励-无线传输旋转叶片模态参数测试系统可以准确测量旋转叶片的模态参数。

本文设计的测试系统重在验证测试方法和手段的可行性,限于实验室的条件,所搭建的测试平台比较简单。若应用于工程测试中,则可针对具体旋转叶片设计相应的测试工装,安装固定磁激振器以及无线传输系统,使得该系统和叶片同步旋转。另外,本文的无线传输系统可进行封装,采用集成技术变为体积更小的模块,使系统进一步工程化。

参考文献:

[1] 余国强. 涡轮空心叶片振动特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
She Guoqiang. Vibration characteristics analysis of hollow turbine blades [D]. Harbin: Harbin Institute of

Technology, 2014.
[2] 王仲博, 张永宁, 袁平, 等. 660 mm叶片振动特性测试与分析[J]. 热力发电, 1994(6): 36-40.
Wang Zhongbo, Zhang Yongning, Yuan Ping, et al. Measurement and analysis of vibration feature of 660 mm blades[J]. Thermal Power Generation, 1994(6): 36-40.
[3] Leon R L, Trainor K. Monitoring systems for steam turbine blade faults[J]. Sound and Vibration, 1990, 24(2): 12-15.
[4] Zucca S, Di Maio D, Ewins D J. Measuring the performance of underplatform dampers for turbine blades by rotating laser Doppler Vibrometer[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 32: 269-281.
[5] Gwashavanhu Benjamin, Oberholster Abrie J, Stephan-Heyns P. Rotating blade vibration analysis using photogrammetry and tracking laser Doppler vibrometry [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 76-77: 174-186.
[6] 萨勃洛斯基, 柯罗斯杰列夫, 谢鲍夫. 涡轮机叶片振动的非接触测量[M]. 吴士祥, 郑叔琛, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986.
[7] 孙宝东, 黄文虎, 张嘉钟. 用单片机实施旋转机械叶片振动监测的间断相位法研究[J]. 振动与冲击, 1995, 14(4): 9-12.
Sun Baodong, Huang Wenhua, Zhang Jiazong. Study on the discontinuous phase method for vibration measurement on the blades of rotating machinery [J]. Journal of Vibration and Shock, 1995, 14(4): 9-12.
[8] 滕丽娜. 汽轮机叶片动频的转子调频非接触测量法[J]. 振动与冲击, 2001, 20(1): 52-54.
Teng Lina. The measurement of frequency of turbine blades by regulating the revolving frequency of the rotor [J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(1): 52-54.
[9] 王宇华. 高速旋转叶片振动叶端定时测量方法和系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
Wang Yuhua. Research of measuring method and system using tip-timing for high-speed rotating blade vibration [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
[10] 欧阳涛. 旋转叶片振动性能参数测试技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
Ouyang Tao. Research on rotating blade vibration performance parameters testing technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
[11] Wu S M, Zhao Z B, Yang Z B, et al. Physical constraints fused equiangular tight frame method for Blade Tip Timing sensor arrangement [J]. Measurement, 2019, 145: 841 - 851
[12] Bornassi S, Fironne C M, Berruti T M. Vibration pa-

- rameters estimation by Blade Tip-Timing in mistuned bladed disks in presence of close resonances [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17):5930.
- [13] Bornassi S, Berruti T M, Firrone C M, et al. Vibration parameters identification of turbomachinery rotor blades under transient condition using Blade Tip-Timing measurements[J]. Measurement, 2021, 183: 109861.
- [14] 刘军, 高建立, 穆桂脂, 等. 改进锤击法试验模态分析技术的研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(3): 174-177.
- Liu Jun, Gao Jianli, Mu Guizhi, et al. An improved experimental analysis system with hammering method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(3): 174-177.
- [15] 雷剑锋. 基于磁吸力的电磁激振器研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- Lei Jianfeng. Study on the electromagnetic vibrator based on magnetic attraction force [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [16] 刘英杰, 毛敏. 基于 WIFI 技术的振动信号监测分析系统设计[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(7): 1448-1453.
- Liu Yingjie, Mao Min. Design of vibration signal monitoring and analysis system based on WIFI technology [J]. Computer and Digital Engineering, 2017, 45(7): 1448-1453.

Research on modal parameter testing technology for rotating blade based on magnetic excitation and wireless signal transmission

ZHAO Shou-gen, LI Tao, WANG Xin-hu, LI Ning

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The dynamic characteristics of aero-engine blades is related to the safe operation of aero-engines and even the entire aircraft. Therefore, it is one of effective means of ensuring security to conduct online dynamic parameters testing of rotating blades. Aiming at such special research object of rotating blades, in this paper, non-contact magnetic excitation is proposed as the exciting force for rotating blades, and WIFI wireless transmission is used to realize the online vibration signals measurement and transmission. On this basis, a dynamic parameters measurement system of non-contact magnetic excitation-wireless transmission is designed to measure dynamic parameters of rotating blades, and the corresponding verification tests show that the system is convenient to use and has high measurement accuracy, which indicates its high engineering application value.

Key words: modal test; rotating blades; dynamic parameters; non-contact magnetic excitation; wireless transmission

作者简介: 赵寿根(1973—)男,博士,副教授。电话:13681274188;E-mail:zshougen@buaa.edu.cn。