

面向燃气轮机旋转件参数测试的 双频遥测天线设计与验证^{*}

赖小皇 肖丽君 黄正伟

(中国航发四川燃气涡轮研究院 绵阳 621010)

摘要: 针对高转速、大轴向窜动及空间受限条件下透平机械多物理参数的高带宽近距离信号传输需求,提出了一种 900 MHz/2.4 GHz 双频段圆周分布发射天线组与环形接收天线设计方法,建立了接收天线与发射天线组独立与耦合求解模型。并提出了旋转变距工况下的传输可靠性评估方法,分析了微带线宽及介质介电常数对天线性能的影响,达到了限制天线频率偏移在工作频段内的目的。仿真与测试结果吻合良好:900 MHz 发射天线的阻抗带宽为 10 MHz, 2.4 GHz 阻抗带宽 ≥ 90 MHz,接收天线阻抗带宽完全覆盖 900 MHz~2.4 GHz 频段范围,发射天线与接收天线在相对旋转转速 $\leq 11\ 000$ rpm,间距在 7 ± 4 mm 范围内时,可实现透平参数的稳定、可靠传输。

关键词: 燃气轮机旋转件测试;双频遥测天线;微带贴片天线;微带行波天线;天线耦合

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design and verification of dual frequency telemetry antenna for parameter testing of gas turbine rotating parts

Lai Xiaohuang Xiao Lijun Huang Zhengwei

(Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Mianyang 621010, China)

Abstract: In response to the demand for high-bandwidth short-range signal transmission of multi-physical parameters in turbomachinery under conditions of high rotational speed, significant axial movement, and spatial constraints, this paper proposes a design approach using a 900 MHz/2.4 GHz dual-band circumferentially distributed transmitting antenna array and a ring-shaped receiving antenna. Independent and coupled solution models for the receiving antenna and transmitting antenna array were established. A transmission reliability evaluation method for rotational and varying-distance conditions was proposed. By analyzing the impact of microstrip line width and dielectric constant on antenna performance, the method thereby confines frequency deviations within the operational band. Simulation and experimental results show strong agreement; The 900 MHz transmitting antenna achieves an impedance bandwidth of 10 MHz, the 2.4 GHz antenna provides an impedance bandwidth of not less than 90 MHz, and the receiving antenna's impedance bandwidth fully covers the frequency range from 900 MHz to 2.4 GHz. When the relative rotational speed does not exceed 11 000 rpm and the spacing remains within 7 ± 4 mm, stable and reliable transmission of turbomachinery parameters can be achieved.

Keywords: gas turbine rotating component testing; dual frequency telemetry antenna; microstrip patch antenna; microstrip traveling wave antenna; antenna coupling

0 引言

燃气轮机作为现代工业动力系统的核心装置^[1],在能源动力、航空航天、船舶等关键领域占据重要地位^[2-3]。其中,透平叶片作为承受极端热力载荷的旋转部件^[4-5],其结

构可靠性直接决定机组运行安全与效率^[6-7]。为实现旋转系统关键参数的实时获取,非接触式射频遥测技术凭借其抗干扰性强、传输稳定性好等优势^[8-10],已成为转静部件间信号传输的首选方案^[11-12]。天线作为非接触连接旋转部件与静止部件的关键环节,其性能直接关系到信号传输稳定

性与可靠性。而受限于透平结构特性,遥测天线的小型化与轻量化至关重要,微带天线因其独特的低剖面特性和结构可塑性,在空间受限的遥测系统中展现出显著优势^[13]。当前,微带天线性能优化研究呈现出多维度发展趋势^[14];何存富等^[15]揭示了矩形微带贴片天线的辐射元尺寸对其固有谐振频率的影响规律;Devi等^[16]设计的2.45 GHz微带天线在短程无线传感器网络中降低了2%的回波损耗;Liu等^[17]提出了一种阻抗带宽约为40和900 MHz的双频扇形微带天线;Montisci等^[18]提出了一种辐射效率高72.3%的使用透明材料设计的弯曲微带贴片天线;陈青青等^[19]通过在环形辐射贴片上开横向槽扰动贴片上的表面电流分布实现了圆极化;周佳琪等^[20]设计的具有双扇形槽结构的2.4 GHz极化可重构微带环形天线具有低交叉极化、高增益等优点;张晓新等^[21]提出了基于声表面波温度传感器的极近场遥测天线设计方案,验证了极近场天线及其装配架构的实用性和介质覆盖方法的可行性。然而现有研究多聚焦常规环境下的性能优化,对燃气轮机转子在高速旋转且存在轴向窜动工况的系统性研究存在不足。

面对现有技术存在的问题,本文提出了一种900 MHz/2.4 GHz圆周分布的双频发射天线组与圆环形波接收天线设计方法,建立了接收天线与发射天线组独立与耦合求解模型^[22]。提出了旋转与轴向距离变化工况下的传输可靠性评估方法,可以在仿真环境下将微带线宽及介质介电常数因加工误差带来的频率偏移控制在工作频段内,并能充分评估旋转变距条件下的传输稳定性。具体来讲,本文设计了一种接收天线,其由带缺口的环形微带线及微带线末端串联一个射频电阻构成。同时设计了一种发射天线组,由4个周向间隔90°、尺寸各异的弧形微带线构成。基于ANSYS HFSS仿真平台,构建接收天线与发射天线组模型,开展了微带线宽、PCB介质介电常数对频率及带宽的影响分析,进一步地,构建了发射/接收天线耦合模型,并开展了传输系数随发射/接收天线相对旋转角度与距离变化的仿真分析。最后,通过模拟旋转验证平台与高速旋转验证平台对天线进行了测试。结果显示:仿真与测试结果吻合良好,本文为极端工况下的遥测天线设计提供了理论支撑,具有良好的工程应用价值。

1 双频遥测天线设计与仿真

本文针对燃气轮机旋转部件多物理场参数(应变、温度、压力)同步监测需求,提出如下测试方案:在旋转端构建双频段多通道数据采集模块,通过分布式传感器将旋转机械待测参数转换为电信号,经调制由双频遥测发射天线转换为射频信号发射出去;在静子端,由遥测接收天线接收遥测发射天线的信号,传输到地面站完成信号处理,如图1所示。

相较于航空发动机,燃气轮机的应用环境更为恶劣,天线设计需满足以下关键条件:1)在 7 ± 4 mm的装配间隙下

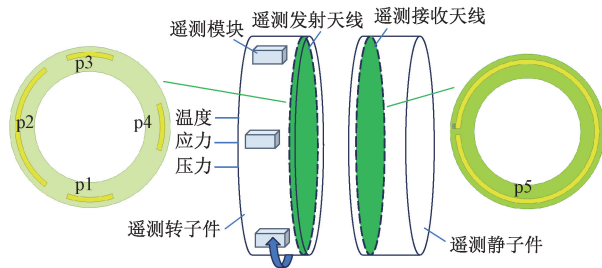


图1 遥测天线应用框图

Fig. 1 Block diagram of telemetry antenna application

实现稳定旋转耦合;2)在高度受限的安装空间内保证结构适配。为此,本文提出了一种适用于900 MHz/2.4 GHz双频天线组设计方法,能够在高速旋转及轴向距离变化的工况下,将发射天线信号有效耦合至接收天线。具体配置为:在发射天线内布置4个微带单元(p1~p4),p1工作在900 MHz频段,p2~p4工作在2.4 GHz频段,在接收天线内布置环形行波天线(p5),完全覆盖900 MHz~2.4 GHz。

本文采用基于有限元分析的高频电磁仿真软件ANSYS HFSS进行建模与分析。在发射天线与接收天线的独立求解模型中,可获取S参数、电场强度等关键性能指标。在建立二者耦合模型时,尽管发射天线实际处于高速旋转状态,但由于其机械转速远低于数据传输速率(相差若干数量级),在分析天线耦合特性时可将其近似为静止状态,从而直接研究不同旋转角度与相对位置下的传输系数。

基于上述方法,本设计在HFSS中选取900 MHz与2.45 GHz作为求解频率,并在距离模型1/4波长处设置圆柱体空间作为辐射边界条件,采用HFSS自适应网格分别构建了发射天线、接收天线的独立模型以及发射/接收天线耦合模型。以下具体论述紧凑受限机械约束条件下的双频遥测发射/接收天线设计与仿真方法。

1.1 遥测接收天线设计与仿真

鉴于接收天线需要覆盖900 MHz和2.4 GHz两个频段,对带宽要求较高。传统驻波天线虽然在谐振频点附近具有较高的辐射效率,但其电磁场呈周期性驻波分布,存在固定的电流节点。当发射天线旋转到接收天线波节时,传输性能变差,容易造成数据丢包。相比之下,行波天线通过在环形微带线末端串联匹配电阻,可有效抑制驻波形成,虽因结构紧凑、长度有限,大部分能量被电阻吸收,使其传输效率低于驻波天线,但其具备高带宽特性,且适用于近场传输条件,因而更适应高速旋转工况下的传输需求。为此,本设计接收天线采用微带行波天线,其结构由带缺口的环形微带线组成,如图2所示。

根据燃气轮机遥测安装位置几何特征,非闭合圆环接收天线的半径需满足 $R_r \leq 45$ mm,取 $R_r = 45$ mm,为使接收天线的阻抗带宽能够覆盖900 MHz和2.4 GHz两个目标频段,需对其阻抗特性的关键参数进行分析。

通过仿真获取了不同微带线宽度条件下的回波损耗曲

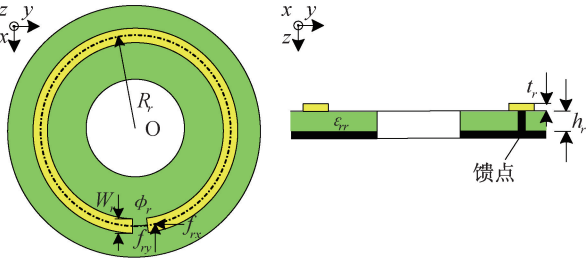


图 2 遥测接收天线

Fig. 2 Telemetry receiving antenna

线,提取其在 900 MHz 与 2.45 GHz 频点的值,可以得到接收天线回波损耗随微带线宽度的变化关系,如图 3、4 所示。

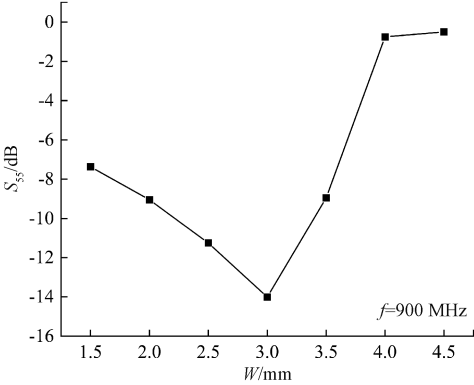


图 3 接收天线回波损耗(@900 MHz)随微带线宽度的变化关系

Fig. 3 The relationship between the return loss of the receiving antenna (@900 MHz) and the width of the microstrip line

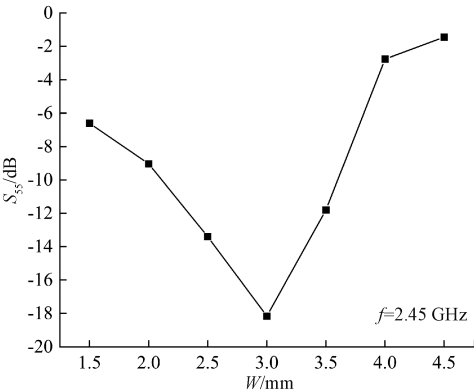


图 4 接收天线回波损耗(@2.45 GHz)随微带线宽度的变化关系

Fig. 4 The relationship between the echo loss of the receiving antenna (@2.45 GHz) and the width of the microstrip line

由图 3、4 可知,接收天线在 900 MHz 与 2.45 GHz 频点处的回波损耗随微带线宽度变化的趋势基本一致;二者均随微带线宽度增加而先减小后增大,并在宽度为 3 mm 时达到最小值。当微带线宽度超过 4 mm 时,信号已基本被完全反射,天线无法有效辐射。因此,本文选取使回波损

耗最小的微带线宽度,即 $W_i = 3$ mm,作为接收天线的最终设计值。

考虑到 PCB 加工过程中介质基板的实际介电常数可能与标称值存在偏差,本文仿真分析了介质介电常数对天线回波损耗的影响。通过提取 900 MHz 与 2.45 GHz 频点下不同介电常数对应的回波损耗值,可以得到接收天线回波损耗随 PCB 介质介电常数的变化关系,如图 5、6 所示。

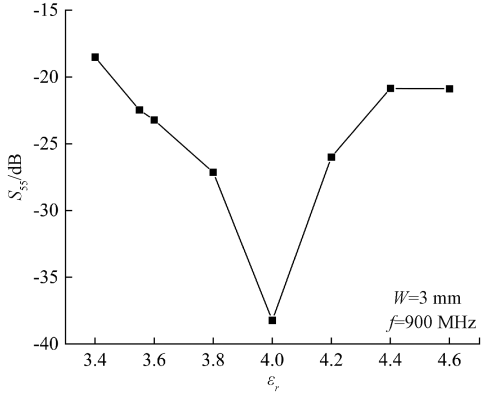


图 5 接收天线回波损耗(@900 MHz)随 PCB 介质介电常数的变化关系

Fig. 5 The relationship between the echo loss of the receiving antenna (@900 MHz) and the dielectric constant of the PCB material

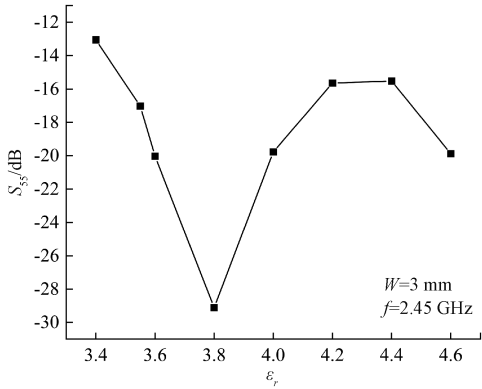


图 6 接收天线回波损耗(@2.45 GHz)随 PCB 介质介电常数的变化关系

Fig. 6 The relationship between the echo loss of the receiving antenna (@2.45 GHz) and the dielectric constant of the PCB material

由图 5、6 可知,接收天线在 900 MHz 与 2.45 GHz 频点处的回波损耗随 PCB 介质介电常数的变化趋势相似,均呈现先下降后上升的特征。在介电常数从 3.4~4.6 变化时,回波损耗 S_{11} 始终 < -10 dB,表明设计的接收天线对该范围内介质介电常数的变化不敏感。

基于以上分析,最终确定的接收天线的几何特征设计参数如表 1 所示。

上述模型中电场强度随相位变化的仿真结果如图 7 所示。

表 1 接收天线几何特征参数

Table 1 Geometric feature parameters of the receiving antenna

参数	值
ϵ_{rr}	3.55
ϕ_i /rad	0.089
R_r /mm	45
W_i /mm	3
f_{tx} /mm	45
f_{ty} /mm	3
t_i / μm	35

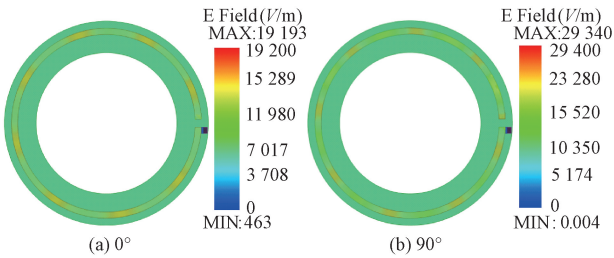


图 7 接收天线电场强度随相位的变化关系

Fig. 7 The relationship between the electric field intensity of the receiving antenna and the phase change

由图 7 可知,接收天线在 0°和 90°相位下的电场强度分布随相位改变而变化,属于行波天线类型,回波损耗如图 8 所示。

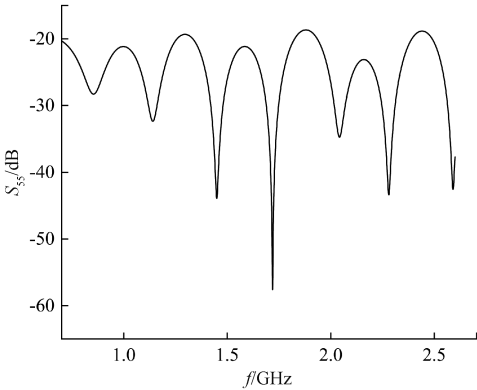


图 8 接收天线回波损耗

Fig. 8 The return loss of the receiving antenna

据图 8 可知,接收天线的阻抗带宽可完全覆盖 0.6~2.6 GHz 的频段,能够有效接收发射天线传输过来的信号。

1.2 遥测发射天线设计与仿真

传统的矩形微带天线虽然具备低剖面、体积小和重量轻等优点,但在绕中心轴旋转时,不具有轴对称性,本文通过施加特定的曲率将矩形微带天线弯曲为弧形微带天线,在与接收微带环形天线半径相同的位置设计多个弧形微带天线作为谐振天线,以保证几何特征上发射天线与接收天

线在近场范围内的良好耦合特性。发射天线采用类矩形微带天线的设计方式^[23],由多个弧形微带天线组成,几何特征如图 9 所示。

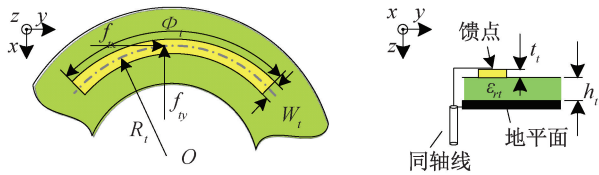


图 9 弧形微带天线

Fig. 9 Arc-shaped microstrip antenna

发射天线采用谐振式设计,工作于 900 MHz 与 2.4 GHz 两个频段。其中,压力测试采用中心频率 900 MHz 的微带天线,其阻抗带宽<100 kHz,温度和应变采用中心频率为 2.4 GHz 的微带天线,其阻抗带宽<20 MHz,以下对影响发射天线阻抗特性的参数进行分析。

通过仿真获取了不同微带线宽度条件下的回波损耗曲线,以微带线宽度为横坐标,取各微带线宽度下的中心频率及阻抗带宽作为左右两列纵坐标,绘制发射天线中心频率与阻抗带宽随微带线宽度的关系曲线。900 MHz 的结果如图 10 所示。考虑到 2.4 GHz 天线的相似性,取 p3 微带天线进行分析,结果如图 11 所示。

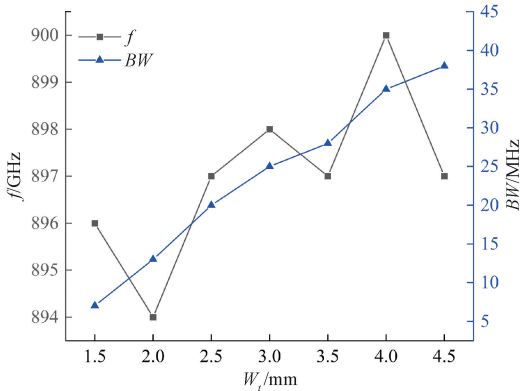


图 10 发射天线(@900 MHz)中心频率与阻抗带宽随微带线宽度的变化关系

Fig. 10 The relationship between the center frequency and impedance bandwidth of the transmitting antenna (@900 MHz) and the width of the microstrip line

由图 10、11 可知,对于 900 MHz 的发射天线,随微带线宽度的增加,中心频率在 894~900 MHz 范围内变化,阻抗带宽逐渐增大,在微带线宽度为 3 mm 时,阻抗带宽为 25 MHz;对于 2.4 GHz 发射天线,随微带线宽度的增加,中心频率由 2.5 GHz 逐渐降低至 2.439 GHz,阻抗带宽则逐渐增大,并于微带线宽度为 4 mm 时达到最大值 49 MHz。综合以上分析,选择微带线宽度为 3 mm 时,天线的中心频率与阻抗带宽均可满足设计指标要求。

同接收天线一样,PCB 介质基板的实际介电常数在加工中可能与标称值存在偏差。为此,本文进一步仿真分析

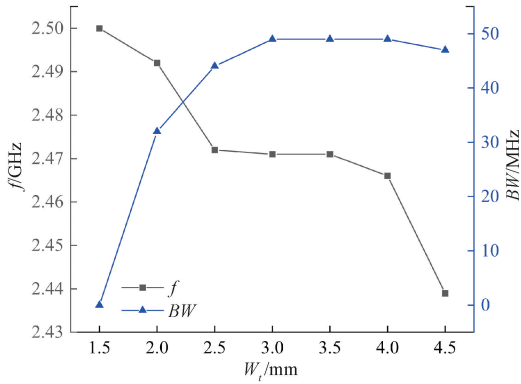


图 11 发射天线(@2.45 Hz)中心频率与阻抗带宽随微带线宽度的变化关系

Fig. 11 The relationship between the center frequency and impedance bandwidth of the transmitting antenna (@2.45 Hz) and the width of the microstrip line

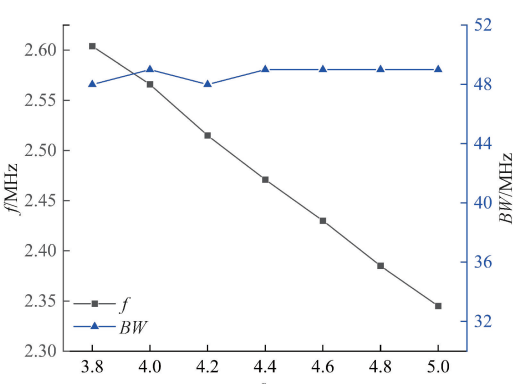


图 13 发射天线(@2.45 GHz)中心频率与带宽随介质介电常数的变化关系

Fig. 13 The relationship between the center frequency and bandwidth of the transmitting antenna (@2.45 GHz) and the variation of the dielectric constant of the medium

了介质介电常数对发射天线回波损耗的影响,并分别提取各介电常数下的中心频率与阻抗带宽的值,绘制发射天线中心频率与带宽随介质介电常数的变化关系曲线,如图 12、13 所示。

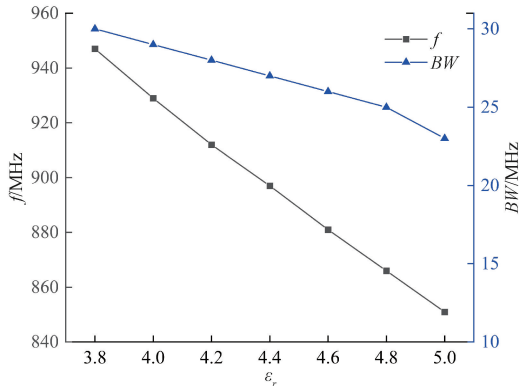


图 12 发射天线(@900 MHz)中心频率与带宽随介质介电常数的变化关系

Fig. 12 The relationship between the center frequency and bandwidth of the transmitting antenna (@900 MHz) and the variation of the dielectric constant of the medium

由图 12、13 可知,900 MHz 与 2.4 GHz 发射天线的中心频率均随介质介电常数的增大而向低频偏移,且变化较为显著。在阻抗带宽方面,900 MHz 天线随介电常数增大而逐渐减小,而 2.4 GHz 天线的带宽则基本保持稳定,在介质介电常数 3.8~5.0 内,微带天线的阻抗带宽均>20 MHz。

基于以上分析,最终确定的发射天线几何特征参数如表 2 所示。

上述模型中发射天线电场强度随相位的变化的关系如图 14 所示。

图 14 展示了发射天线在 0°、90°相位下的电场强度分布。可以看出,电场分布不随相位改变,符合驻波天线的工作特征。

表 2 发射天线几何特征参数

Table 2 Geometric feature parameters of the transmitting antenna

Patch	ϕ_r / rad	R_r / mm	W_r / mm	f_{rx} / mm	f_{ry} / mm	t_r / μm
1	0.917 3	45	3	45	8.0	35
2	0.323 6	45	3	45	2.4	35
3	0.322 0	45	3	45	2.6	35
4	0.320 4	45	3	45	2.5	35

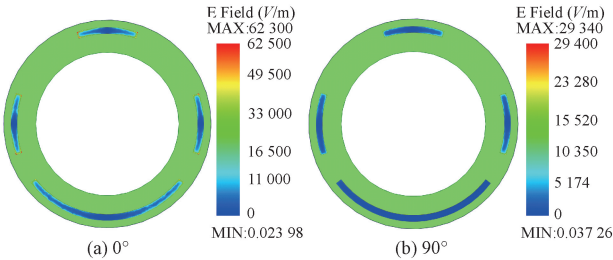


图 14 发射天线电场强度随相位的变化关系

Fig. 14 The relationship between the electric field intensity of the transmitting antenna and the phase change

基于表 2 所确定的几何参数,仿真得到的发射天线回波损耗如图 15、16 所示。

由图 15、16 可知,p1~p4 这 4 个微带天线单元的中心频率分别为 897 MHz、2.462 GHz、2.469 GHz、2.480 GHz,对应的阻抗带宽分别为 26、46、45、45 MHz,满足设计带宽要求。

1.3 遥测发射/接收天线耦合特性分析

本文依托的遥测系统发射机最大输出功率为 19.5 dBm、接收机灵敏度为-83 dBm,射频信号传输的最大允许路径损耗为-102.5 dB。考虑到 2.4 GHz 为公用 WiFi 频段,在

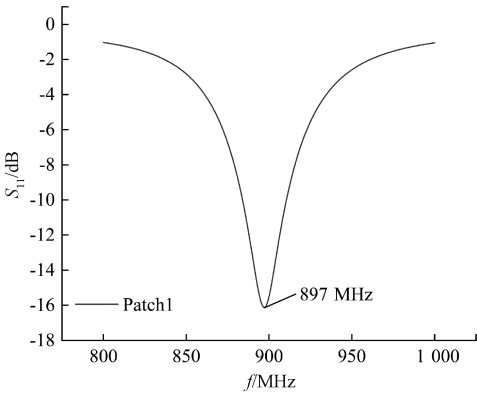


图 15 发射天线(@900 MHz)回波损耗
Fig. 15 Return loss of the transmitting antenna (@900 MHz)

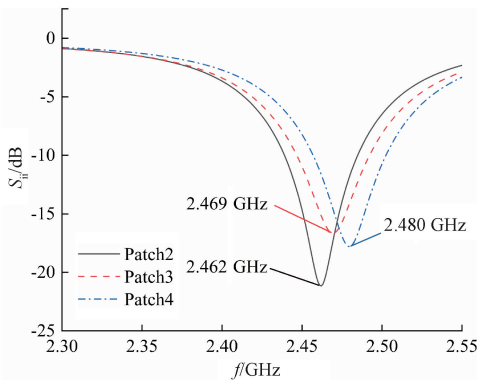


图 16 发射天线(@2.4 GHz)回波损耗
Fig. 16 Return loss of the transmitting antenna (@2.4 GHz)

此范围内的无线信号较多,容易对本设计天线产生干扰,为提升接收信号信噪比,发射/接收天线间的传输系数应满足 $S_{21} > -60$ dB。

为分析发射/接收天线在旋转及轴向距离变化工况下的耦合特性,建立了如图 17 所示的几何模型,并定义以下两个关键参数:

- 1) θ 表示发射天线相对接收天线的旋转角度,以顺时针方向为正。其基准位置($\theta = 0^\circ$)定义为发射天线阵列中各弧形微带单元与接收天线缺口对齐的状态;
- 2) h 表示发射/接收天线间的轴向安装距离。

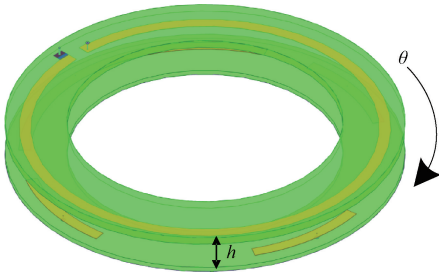


图 17 遥测发射/接收天线耦合模型
Fig. 17 Coupling model of telemetry transmitting/receiving antennas

由于发射天线中 2.4 GHz 频段的 3 个微带天线单元性能相似,取 900 MHz 的 p1 及 2.4 GHz 的 p3 在燃气轮机初始转静间距 7 mm 的典型工况进行分析。两组天线传输系数随旋转角度的变化关系如图 18、19 所示。

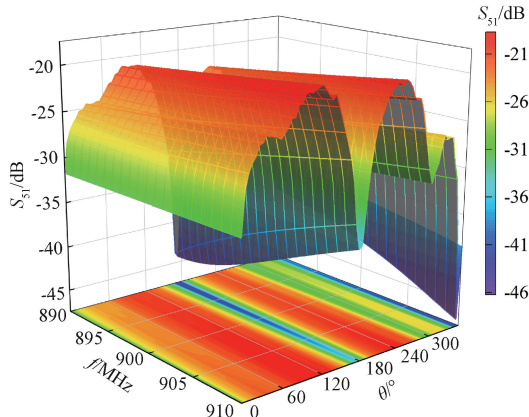


图 18 发射(@900 MHz)/接收天线传输系数(@7 mm)随旋转角度的变化关系

Fig. 18 The variation relationship of the transmission coefficient (@7 mm) of the transmitting/receiving antenna (@900 MHz) with the rotation angle

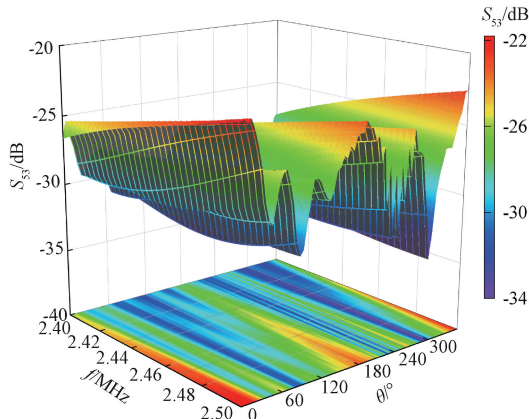


图 19 发射/接收天线(@2.4 GHz)传输系数(@7 mm)随旋转角度的变化关系

Fig. 19 The variation relationship of the transmission coefficient (@7 mm) of the transmitting/receiving antenna (@2.4 GHz) with the rotation angle

由图 18、19 可知,在目标频段范围内,接收天线与发射天线 p1 耦合时,传输系数在 0° 和 175° 时最小;与发射天线 p3 耦合时,传输系数最小值出现在 80° 和 285° ,但以上最小传输系数均 > -60 dB。因此,燃气轮机转静间距为 7 mm 时,本设计天线组可实现旋转工况下信号的稳定传输。

进一步地,基于图 18、19 中接收天线与发射天线耦合最弱时对应的角度,仿真分析了传输系数随距离的变化关系,结果如图 20、21 所示。

由图 20、21 可知,在目标频段范围内,随着转静间距的

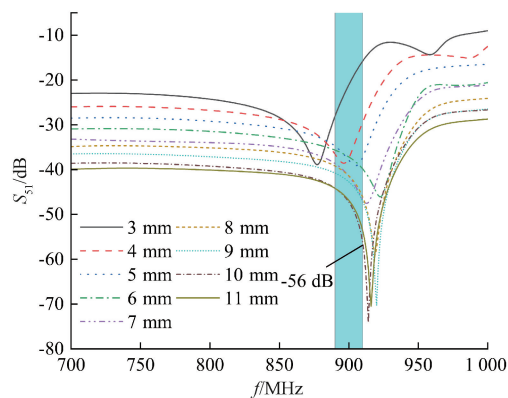


图 20 发射/接收天线(@900 MHz)传输系数
随距离的变化关系

Fig. 20 The variation relationship of the transmission coefficient of the transmitting/receiving antenna (@900 MHz) with distance

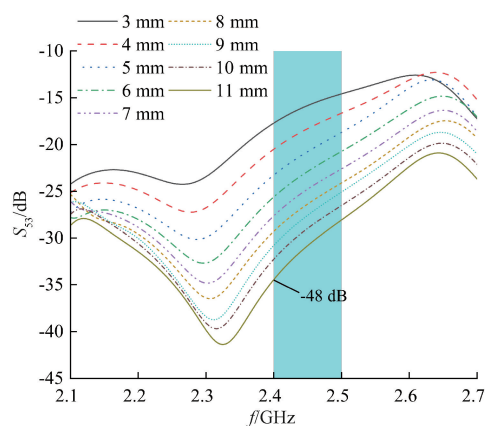


图 21 发射/接收天线(@2.4 GHz)传输系数
随距离的变化关系

Fig. 21 The variation relationship of the transmission coefficient of the transmitting/receiving antenna (@2.4 GHz) with distance

增大,接收天线与发射天线 p1(900 MHz)及 p3(2.4 GHz)耦合时的最差传输系数点均向高频方向偏移,并在间距为 11 mm 时达到最小值。相比之下,2.4 GHz 频段的中心频率偏移量 < 900 MHz 频段。综合以上分析可知,在 911 MHz 以下及 2.4 GHz 全频段范围内,上述两种耦合情况下的传输系数均不低于 -60 dB。因此,在燃气轮机转静间距在 7 ± 4 mm 范围内变化时,本设计天线组可实现变距工况下信号的稳定传输。

2 实验测试与分析

本研究形成的遥测发射/接收天线如图 22 所示,为验证其在燃气轮机上的工程可靠性,分别开展实验室及高速旋转测试试验,以下对测试情况进行说明。

2.1 实验室测试

为验证第 1 节设计的遥测发射/接收天线在不同旋转角度及轴向窜动距离下的参数变化情况,按图 23、24 所示

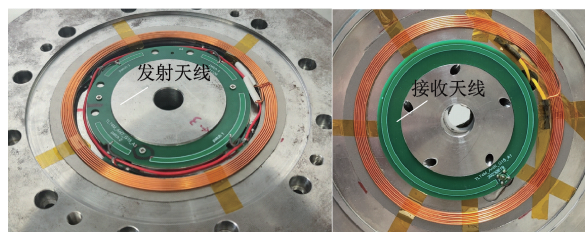


图 22 遥测发射/接收天线实物

Fig. 22 Telemetry transmitting/receiving antenna prototype

方法,将遥测发射天线和接收天线分别接入矢量网络分析仪,以测量其回波损耗与传输系数。

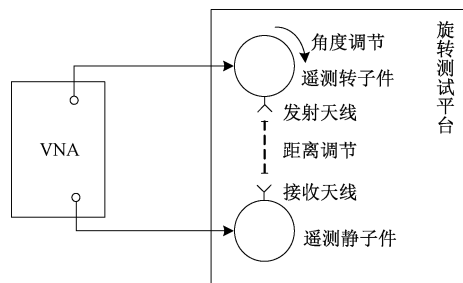


图 23 发射/接收天线回波损耗测试方法

Fig. 23 Test method for return loss of transmitting/receiving antennas

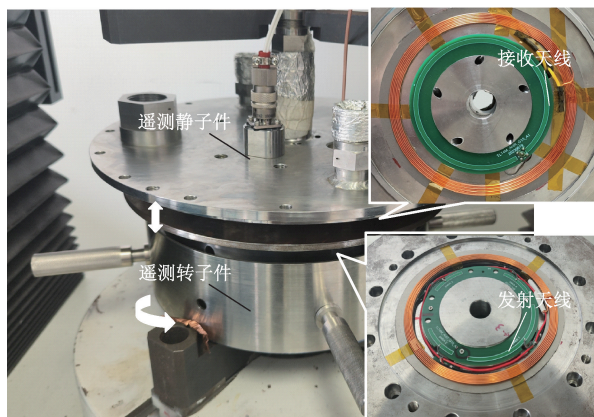


图 24 发射/接收天线回波损耗测试

Fig. 24 Return loss test of transmitting/receiving antennas

按图 23、24 所示方法,测得的发射天线与接收天线的回波损耗结果如图 25、26 所示。

根据图 25、26 的测试结果,将各发射天线单元中心频率的仿真值与实测值进行对比,对比结果如表 3 所示。p1~p3 单元的仿真与实测结果吻合良好,其偏差均在微带线加工宽度与介质介电常数的允差范围之内,而 p4 单元的实测值与仿真值存在较明显偏差,考虑到天线与遥测结构件的集成因素,推测其原因可能与侧馈过程中焊锡量偏多以及局部机械应力的影响有关。

再将遥测发射天线内各微带天线的阻抗带宽仿真值与实测值进行对比,对比结果如表 4 所示,除 p1 的的阻抗带宽较仿真值小以外,其余单元的实测带宽均优于仿真值,这

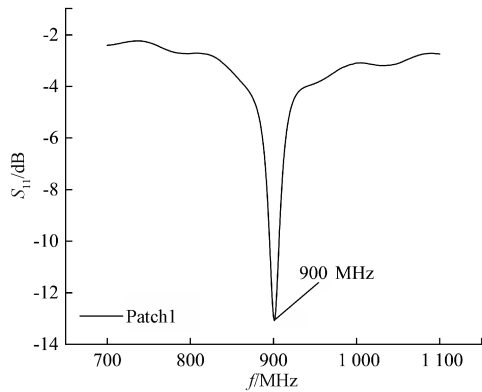


图 25 发射天线(@900 MHz)回波损耗实测结果
Fig. 25 Return loss measurement results of the transmitting antenna (@900 MHz)

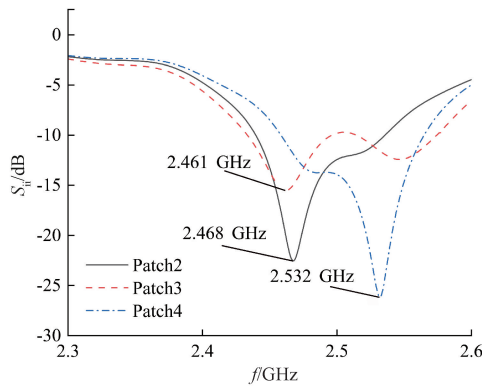


图 26 发射天线(@2.4 GHz)回波损耗实测结果
Fig. 26 Measured results of the return loss of the transmitting antenna (@2.4 GHz)

表 3 发射天线中心频率仿真值与实测值对比结果
Table 3 Comparison results of simulated and measured values of center frequency of transmitting antenna

微带天线单元	仿真值	实测值	误差/MHz
p1	897 MHz	900 MHz	+3
p2	2.462 GHz	2.461 GHz	-1
p3	2.469 GHz	2.468 GHz	-1
p4	2.48 GHz	2.532 GHz	+52

表 4 发射天线阻抗带宽仿真值与实测值对比结果
Table 4 Comparison results of simulated and measured values of antenna impedance bandwidth for transmission
MHz

微带天线单元	仿真值	实测值	误差
p1	26	10	-16
p2	46	95	+49
p3	45	119	+74
p4	45	105	+60

一差异主要源于仿真模型中未充分计入导体欧姆损耗的影响。

综合表 3 与 4 的分析结果可知,尽管发射天线的实测中心频率相较于仿真值存在一定偏移,但其阻抗带宽所覆盖的有效工作频段仍能满足系统要求,整体性能符合工程应用的需要。为验证接收天线的实际性能,对其回波损耗进行了实测,结果如图 27 所示。

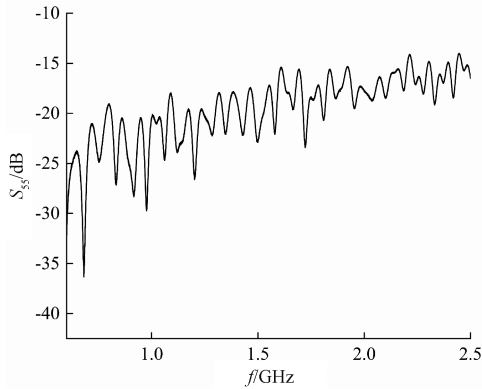


图 27 接收天线回波损耗实测结果
Fig. 27 Measured results of the return loss of the receiving antenna

由图 27 可知,接收天线的实测阻抗带宽覆盖 0.6 ~ 2.6 GHz,满足双频段接收需求。与仿真结果相比,实测回波损耗曲线整体呈现上升趋势,其主要与微带线宽与介电常数的误差相关。尽管如此,但所有频点处的回波损耗均优于-10 dB,表明接收天线可有效接收发射天线传输过来的信号。

进一步地,对发射/接收天线传输系数随角度的变化关系开展测试,测试结果如图 28、29 所示。

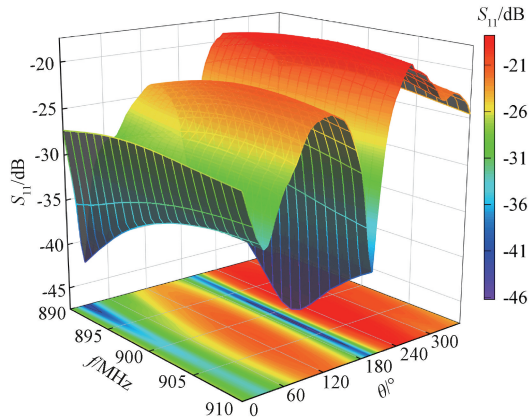


图 28 发射/接收天线(@900 MHz)实测传输系数随角度的变化关系

Fig. 28 Measured transmission coefficient of the transmitting/receiving antenna (@900 MHz) as a function of angle

根据图 28、29 的测试结果,在目标频段范围内,接收天线与发射天线 p1 耦合时,在 25°和 190°时传输系数最小;与发射天线 p3 耦合时,在 55°时传输系数最小。传输系数最

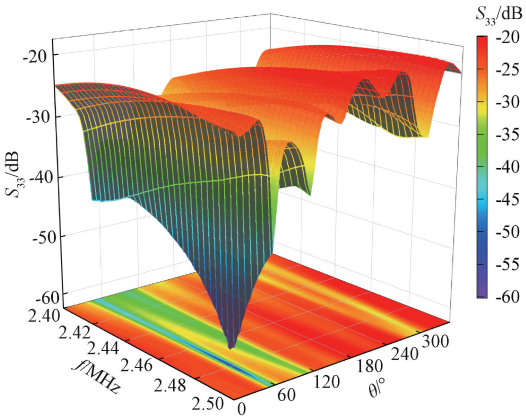


图 29 发射/接收天线(@2.4 GHz)实测传输系数随角度的变化关系

Fig. 29 Measured transmission coefficient of the transmitting/receiving antenna (@2.4 GHz) as a function of angle

小值较仿真时偏大,但整个工作频率区间内的传输系数仍大于-60 dB,此外,系统可通过信道切换策略规避传输性能较差的区间,具备在 0°~360°下稳定、可靠地进行信号传输的工程应用基础。

基于图 28、29 中传输系数最小时对应的角度,进一步测试了传输系数随轴向距离的变化关系,结果如图 30、31 所示。

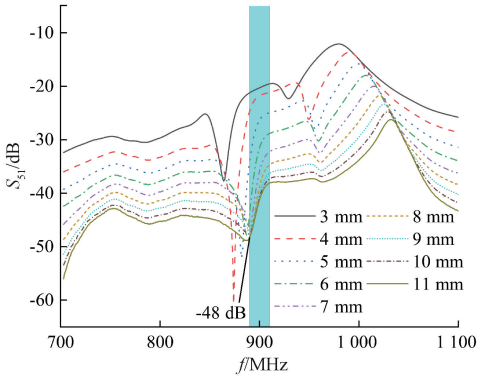


图 30 发射/接收天线(@900 MHz)实测传输系数随距离的变化关系

Fig. 30 Measured transmission coefficient of the transmitting/receiving antenna (@900 MHz) as a function of distance

由图 30、31 可知,在目标频段范围内,接收天线与发射天线 p1 耦合时,传输系数随距离的增大而减小,传输系数最差的情况随着距离的增大向高频方向偏移。与发射天线 p3 耦合时,由于高频近场耦合关系,受高频近场耦合效应影响,传输系数最差频点随距离增大呈现先向高频方向偏移再向低频方向偏移的非单调变化趋势。尽管如此,在上述所有工况下,两组传输系数均优于-60 dB,证明本研究在 3~11 mm 的轴向窜动范围内具备稳定、可靠的信号传输能力,满足工程应用要求。

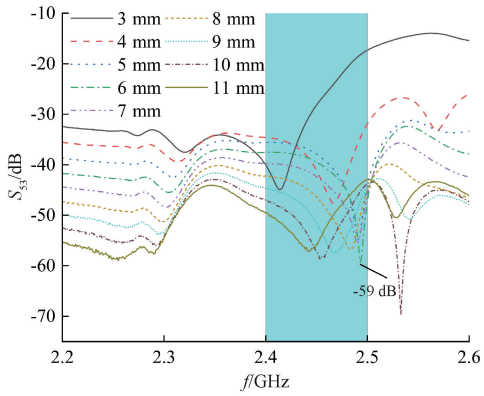


图 31 发射/接收天线(@2.4 GHz)实测传输系数随距离的变化关系

Fig. 31 Measured transmission coefficient of the transmitting/receiving antenna (@2.4 GHz) as a function of distance

2.2 高速旋转验证

为进一步验证遥测发射/接收天线在高速旋转工况下不同轴向窜动距离时的运行可靠性,将发射/接收天线集成至遥测转/静子件,并安装于高速旋转台进行测试,测试连接方法如图 32、33 所示。

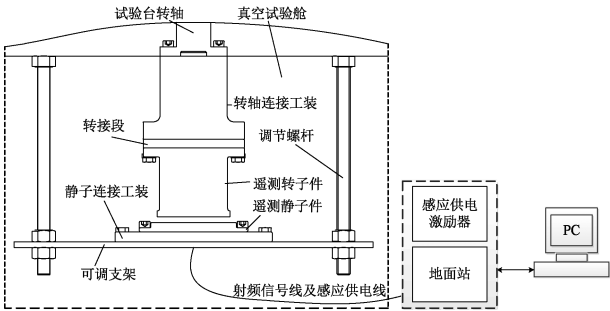


图 32 高速转台测试原理

Fig. 32 The principle of the high-speed turntable test

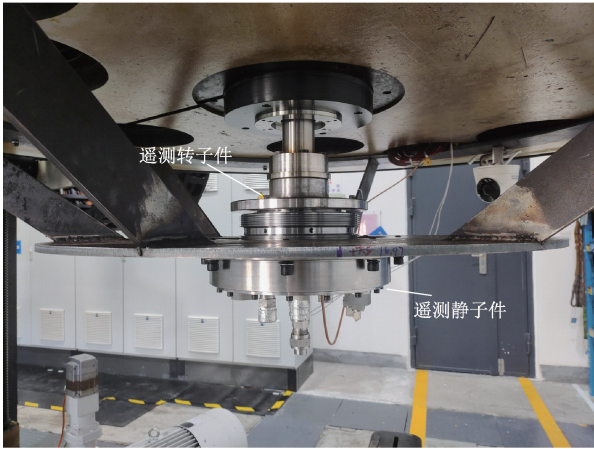


图 33 高速转台实物测试

Fig. 33 Physical test of the high-speed turntable

在旋转工况下,由于无法直接使用矢量网络分析仪进

行测量,本试验通过遥测系统监控软件实时监测接收数据的丢包率,以评估天线在动态条件下的工作性能。鉴于本设计应用的燃气轮机转速 $\geq 11\,000\text{ rpm}$,按照每个特定转速停留 $\leq 5\text{ min}$,从 $2\,000\text{ rpm}$ 到最大 $11\,000\text{ rpm}$,再依次停留每个特定转速直至停止的顺序,依次考核轴向间距从 $3\sim 11\text{ mm}$,间距步长为 2 mm ,以全面评估天线在高转速、大轴向窜动工况下的传输稳定性。经多轮重复测试,结果如表 5 所示。

表 5 遥测转/静子件丢包数量随距离变化关系
Table 5 Relationship between packet loss quantity of telemetry rotors/stationary components and distance

转速/rpm	轴向间距/mm	丢包个数
2 000~11 000~2 000	3	0
	5	0
	7	0
	9	0
	11	0

根据表 5 所示的试验结果,在最高转速不超过 $11\,000\text{ rpm}$ 、轴向窜动范围为 $3\sim 11\text{ mm}$ 的工况下,集成本所设计发射/接收天线的遥测转静子系统通信正常,未出现数据丢包现象。这表明该天线组在加工与集成过程中虽存在一定公差,但在高速旋转验证中仍表现出良好的工程重复性与信号稳定性,能够满足燃气轮机实际应用中对传输可靠性的要求。

需要说明的是,由于本研究中天线工作频段之一为 2.4 GHz ,与 Wi-Fi 频段重叠,在测试过程中应尽量远离 Wi-Fi 信号源。若干扰不可避免,可通过切换通信信道以降低干扰影响,从而保障遥测天线在复杂电磁环境下的工作稳定性。

3 结 论

针对高转速、大轴向窜动及空间受限条件下透平机械多物理参数的高带宽近距离信号传输需求,本研究提出了一种基于 $900\text{ MHz}/2.4\text{ GHz}$ 双频段的圆周分布发射天线组与环形行波接收天线的设计方法。通过建立并求解接收天线与发射天线组的独立与耦合模型,系统揭示了微带线宽与介质介电常数等关键参数对天线谐振特性与阻抗带宽的影响规律,提出了一套适用于旋转与变距工况的传输可靠性评估方法,能够在设计阶段有效抑制加工误差导致的设计失配,保障系统在旋转工况下的传输稳定性。仿真与测试结果吻合良好:设计的发射/接受天线对在转速 $\geq 11\,000\text{ rpm}$,轴向窜动 $7\pm 4\text{ mm}$ 范围内工作时,传输系数始终优于 -60 dB ,能够实现信号的稳定、可靠传输,满足燃气轮机极端工况下的测试要求。

本研究为解决旋转机械在恶劣环境下的近距离无线信

号传输难题提供了一种有效的技术途径,展现了良好的工程应用价值。建立的设计方法对航空发动机等类似旋转机械的遥测系统开发具有一定的参考价值。然而,本研究也存在一定的局限性:所采用的 2.4 GHz 频段属于公共 ISM 频段,尽管在燃气轮机测试中已通过规避环境中 2.4 GHz 信号及切换信道等方式保障传输稳定性,但在干扰不可避免的场景中仍可能对系统性能造成影响。在未来的研究中,可重点面向 5G 或专用工业频段开展遥测系统设计,以持续提升旋转部件参数测试的性能与鲁棒性。

参考文献

[1] 束国刚,余春华,沈国华,等.新时期我国重型燃气轮机发展研究[J].中国工程科学,2022,24(6):184-192.
SHU G G, YU CH H, SHEN G H, et al. Development of heavy-duty gas turbines in China in the new era[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 184-192.

[2] 焦继翔,李金星,张获,等.燃气轮机透平叶片低周疲劳寿命及可靠性分析[J].燃气涡轮试验与研究,2024,37(6):9-16.
JIAO J X, LI J X, ZHANG D, et al. Analysis of gas turbine blade low-cycle fatigue life and reliability[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2024, 37(6): 9-16.

[3] 乔琦,王红军,马康,等.基于改进的DenseNet-ViT联合网络和迁移学习的燃气轮机转子故障诊断[J].电子测量与仪器学报,2024,38(11):40-47.
QIAO Q, WANG H J, MA K, et al. Gas turbine rotor fault diagnosis based on improved DenseNet-ViT joint network and transfer learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(11): 40-47.

[4] 苏静雷,王红军,王政博,等.多通道卷积神经网络和迁移学习的燃气轮机转子故障诊断方法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(3):132-140.
SU J L, WANG H J, WANG ZH B, et al. Fault diagnosis method of gas turbine rotor with multi-channel convolutional neural network and transfer learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 132-140.

[5] 唐克鹏,王红军,钟建琳,等.基于WDCNN-SVM深度迁移学习的燃气轮机转子故障诊断方法[J].电子测量与仪器学报,2021,35(11):115-123.
TANG J P, WANG H J, ZHONG J L, et al. Gas turbine rotor fault diagnosis method based on WDCNN-SVM deep transfer learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 115-123.

[6] 王政博,王红军,张翔,等.燃气轮机深度卷积生成对抗故障样本生成研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(6):82-90.
WANG ZH B, WANG H J, ZHANG X, et al. Research on fault sample generation of gas turbine based on deep

- convolution generative countermeasures[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 82-90.
- [7] 赵运基, 危思成, 许孝卓. 基于时频滤波器和偏移注意神经网络的轴承故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(11): 48-57.
- ZHAO Y J, WEI S CH, XU X ZH. Bearing fault diagnosis based on time-frequency filter and offset attention neural network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(11): 48-57.
- [8] BARDET S M, ZWEMMER R, FAASSE P R, et al. A contactless telemetry system for a contra-rotating open rotor test campaign[C]. EVI-GTI and PIWG Joint Conference on Gas Turbine Instrumentation, 2016: 1-6.
- [9] SMALLEY A J, BALDWIN R M, QUENTIN G H, et al. Diagnostic technology for combustion turbines in power plants[C]. CISM/IFTOMM Symposium, 2014, 352: 211-240.
- [10] LUBERTI D, PATINIOS M, JACKSON R W, et al. Design and testing of a rig to investigate buoyancy-induced heat transfer in aero-engine compressor rotors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(4): 041030.
- [11] 赵江伟, 陈博, 吴正洪, 等. 航空发动机低压涡轮转子叶片动应力测量方案设计[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(6): 45-50.
- ZHAO J W, CHEN B, WU ZH H, et al. Scheme design of dynamic stress measurement for low pressure turbine rotor blades of an aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2022, 35(6): 45-50.
- [12] 戚胜宇, 马钰博, 武杰. 基于带外实时校准的多通道通信系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(11): 1-12.
- QI SH Y, MA Y B, WU J. Design of a multi-channel communication system based on out-of-band real-time calibration[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(11): 1-12.
- [13] CHRISTINA G. A review on microstrip patch antenna performance improvement techniques on various applications[J]. Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology, 2021, 3(3): 175-189.
- [14] 郁剑. 微带贴片天线模式综合设计理论及关键技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- YU J. Study on mode synthesis design theory and key technologies of microstrip patch antennas[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [15] 何存富, 闫天婷, 宋国荣, 等. 微带贴片天线应变传感器优化设计研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 361-367.
- HE C F, YAN T T, SONG G R, et al. Design and optimization of a strain sensor based on rectangular micro-strip patch antenna[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 361-367.
- [16] DEVI G G, VENI S, VIDYAVATHI T, et al. Design of a compact ISM-band microstrip slot antenna for wireless sensor nodes[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2022, 15(38): 1958-1964.
- [17] LIU X Y, LI Y X, LIANG ZH X, et al. A method of designing a dual-band sector ring microstrip antenna and its application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(11): 4896-4901.
- [18] MONTISCI G, MURA G, MUNTONI G, et al. A curved microstrip patch antenna designed from transparent conductive films[J]. IEEE Access, 2022, 11: 839-848.
- [19] 陈青青, 李建瀛, 丁宇昕, 等. 宽带高增益环形圆极化微带天线[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(6): 46-51.
- CHEN Q Q, LI J Y, DING Y X, et al. Wideband high-gain ring circularly polarized microstrip antenna[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(6): 46-51.
- [20] 周佳琪, 蔡龙珠, 邓健. 一种基于双扇形槽结构的极化可重构微带环形天线的设计[C]. 中国电子学会. 2022年全国微波毫米波会议论文集(上册). 南京: 东南大学信息科学与工程学院毫米波国家重点实验室, 2022: 380-382.
- ZHOU J Q, CAI L ZH, DENG J. Design of a polarization reconfigurable microstrip loop antenna based on double sector slot structure[C]. Chinese Institute of Electronics. 2022 National Conference on Microwave and Millimeter Wave(Volume D). Nanjing: State Key Laboratory of Millimeter Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, 2022: 380-382.
- [21] 张晓新, 程龙, 马立峰, 等. 发动机轴承的极近场遥测天线研究[J]. 电子测量技术, 2025, 48(15): 11-19.
- ZHANG X X, CHENG L, MA L F, et al. Research on the extreme near-field telemetry antenna for engine bearings[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(15): 11-19.
- [22] 赖小皇, 郭道勇, 钟明, 等. 航空发动机旋转件遥测天线研究与实现[J]. 电子器件, 2023, 46(1): 1-9.
- LAI X H, GUO D Y, ZHONG M, et al. Research and practice of telemetry antenna for aeroengine rotating parts[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(1): 1-9.
- [23] 王丽黎, 徐亚妮, 高智勇, 等. 辐射零点可控的平面滤波贴片天线[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 8-14.
- WANG L L, XU Y N, GAO ZH Y, et al. Planar filtering patch antenna with controllable radiation nulls[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 8-14.

作者简介

赖小皇(通信作者), 高级工程师, 主要研究方向为航空发动机旋转部件信号传输技术与发动机气动失稳在线检测技术。

E-mail: laixhuang@126.com