

基于无线遥测系统的六模块天线设计与实现

黄正伟, 宿丕强*, 郭杰, 苏曦之, 董静

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为满足航空发动机旋转件测试设备安装空间受限情况下的多测点、多参数信号传输需求, 研发了一套基于无线遥测系统的六模块天线。基于微带天线技术开展发射和接收模块设计, 实现装置小型化。在仿真软件中建立封装后的天线模型, 分析封装胶厚度、材料介电常数、损耗角正切参数等对天线馈电端口的反射系数(S_{11})与传输系数(S_{21})的影响规律。根据仿真结果优化设计参数, 研制六模块天线并开展性能测试, 结果表明: 该天线工作频率范围为 1.3~1.7 GHz, 工作带宽不低于 40 MHz, 满足信号传输设计要求; 在转子与定子天线安装间距分别为 8 mm 和 10 mm 的条件下开展低速旋转台试验, 并在转速为 20 000 r/min 且环境温度为 80 °C 的工况下进行高速旋转台试验, 系统的数据丢包率均低于 1%。研制的六模块天线能够实现 60 个测点、多类型数据的可靠、高效传输, 为航空发动机压气机、涡轮等旋转部件性能测试提供了有力支撑。

关键词: 航空发动机测试; 多测点试验; 多参数测试; 无线遥测; 微带天线; 小型化设计; 信号传输; 多类型数据

中图分类号: V263; TN82 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2025) 05-0019-11

Design and implementation of six-module antenna based on wireless telemetry system

HUANG Zhengwei, SU Piqiang*, GUO Jie, SU Xizhi, DONG Jing

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621010, China)

Abstract: To meet the requirements of multi-point and multi-parameter signal transmission in the limited installation space of the rotating parts test equipment for aeroengines, a six-module antenna based on a wireless telemetry system was developed. The design of the transmitting and receiving modules was made based on microstrip antenna technique to achieve the miniaturization of the device. The antenna model after packaging was established in the simulation software, and the influences of the thickness of the packaging glue, the dielectric constant of the material, and the tangent of the loss angle on the reflection coefficient (S_{11}) and transmission coefficient (S_{21}) of the antenna feeding port were analyzed. According to the simulation results, the design parameters were optimized, and the six-module antenna was developed and its performance was tested. The results show that the working frequency range of the antenna is 1.3~1.7 GHz, and the working bandwidth is not less than 40 MHz, which meets the signal transmission design requirements. Low-speed rotation tests were conducted under the conditions that the installation distances between the rotor and stator antennas were 8 mm and 10 mm, respectively, and high-speed rotation tests were conducted under the conditions of a rotational speed of 20 000 r/min and an ambient temperature of 80 °C. The data packet loss rate of the system was less than 1% in both

收稿日期: 2025-05-24; 修回日期: 2025-06-30

基金项目: 中国航发集团自主创新基金资助项目(ZZCX-2023-039)

引用格式: 黄正伟, 宿丕强, 郭杰, 等. 基于无线遥测系统的六模块天线设计与实现[J]. 计测技术, 2025, 45(5): 19-29.

Citation: HUANG Z W, SU P Q, GUO J, et al. Design and implementation of six-module antenna based on wireless telemetry system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(5): 19-29.



cases. The developed six-module antenna can reliably and efficiently transmit data from 60 measurement points and multiple types of data, providing strong support for the performance testing of rotating components such as compressors and turbines in aeroengines.

Key words: aero-engine testing; multi-point test; multi-parameter testing; wireless telemetry; microstrip antenna; miniaturization design; signal transmission; multiple types of data

0 引言

旋转件参数测量是航空发动机测试领域的一项关键技术, 其贯穿航空发动机结构完整性试验和性能试验的全过程^[1-3]。航空发动机转子参数信号的高速采集与可靠传输对航空发动机转子温度、动应变试验数据的有效获取至关重要^[4-5]。目前我国科研机构主要基于滑环引电器或无线遥测实现航空发动机旋转件温度、压力、应变等参数的测量与传输。滑环引电器通过刷环与刷丝结构旋转接触的方式实现数据传输, 旋转过程中刷丝会出现磨损。无线遥测具有非接触、转子和定子不磨损的优势, 在航空发动机试验领域获得广泛应用^[6-7]。

我国科研人员针对遥测技术的工程化应用开展研究, 并取得了一定成果。目前我国应用较为成熟的遥测装置能够实现30个测点的数据信号可靠传输, 但设备体积较大, 难以应用于狭小空间条件下的测量参数信号传输。如何在遥测装置安装空间受限的情况下实现多测点、多参数信号的准确传输, 是科研人员需要重点关注的问题。

微带天线因其小型化、低剖面等优点, 被广泛应用于无线通信领域, 一般和其他电子元器件集成在发射/接收模块中^[8-10]。通过改变微带天线结构表面的金属贴片形状和尺寸, 可以实现天线辐射方向性调节^[11-13]。近年来, 微带天线技术不断发展, 为小体积通信系统研发提供了有力支撑。

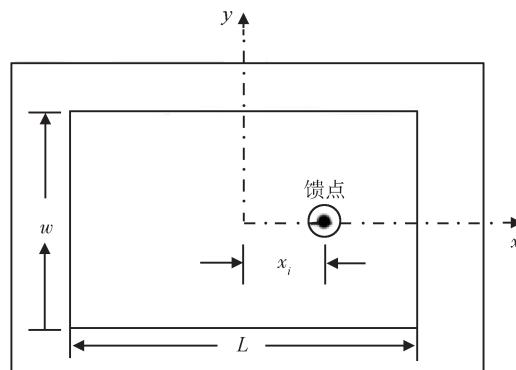
针对航空发动机旋转件测试设备安装空间受限情况下的多测点、多参数信号传输需求, 本文基于微带天线技术, 研发了一套六模块天线系统。开展天线辐射模型分析, 综合考虑装置体积、形变、使用便利性等因素, 设计转子和定子天线结构, 将六模块天线集成于无线遥测发射端, 实现60个测点、多类型参数信号高效传输, 为遥测系统的二次开发与应用奠定基础。

1 六模块天线设计与传输影响仿真分析

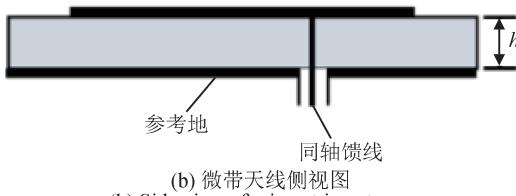
为匹配Datatel遥测发射端调制后的信号频率, 设计转子天线和定子天线的工作频率为1.3~1.7 GHz。当航空发动机转子高速旋转时, 转子天线随旋转轴做高速圆周运动。为避免多个模块发射机间的信号串扰, 将转子天线设计为由6段不同工作频率的天线贴片组成, 每个转子天线连接一个发射模块, 实现多通道数据传输。定子天线应能同时接收6段不同频率的发射天线传输的信号。将转子、定子天线分别集成在遥测系统的发射、接收端, 并采用封装胶灌封处理, 提高天线的抗离心载荷。

1.1 转子天线设计

为与旋转的六模块遥测安装结构共形, 转子天线采用圆环形基板设计, 每段天线贴片采用同轴线背馈方式分别馈电。背馈式微带天线结构如图1所示, 图1(a)中, w 为贴片的宽度, L 为贴片



(a) 微带天线俯视图
(a) Top view of microstrip antenna



(b) 微带天线侧视图
(b) Side view of microstrip antenna

图1 背馈式微带天线结构

Fig.1 Structure of back-fed microstrip antenna

天线单元的长度, x_i 为馈点横坐标距离。

介质基板的介电常数为 ε_r , 天线的工作频率为 f , 贴片的宽度 w 通过式(1)计算得到。

$$w = \frac{c}{2f} \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速。

贴片天线单元的长度 L 为

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\varepsilon_r}} - 2\Delta L \quad (2)$$

式中: ε_r 为有效介电常数, ΔL 为等效辐射缝隙长度。 ε_r 和 ΔL 的计算公式分别为

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0.412h \cdot \frac{\varepsilon_r + 0.3}{\varepsilon_r - 0.258} \cdot \frac{w/h + 0.264}{w/h + 0.8} \quad (4)$$

式中: h 为介质基板厚度。天线馈电位置 L_1 为

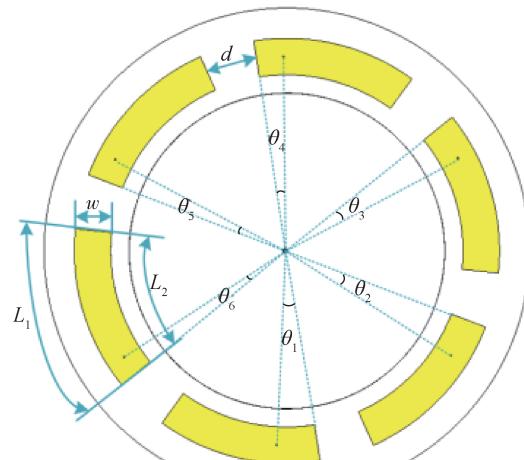
$$L_1 = \frac{L}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\xi_{re}}} \right) \quad (5)$$

式中: ξ_{re} 为馈电位置处的等效介电常数, 计算公式为

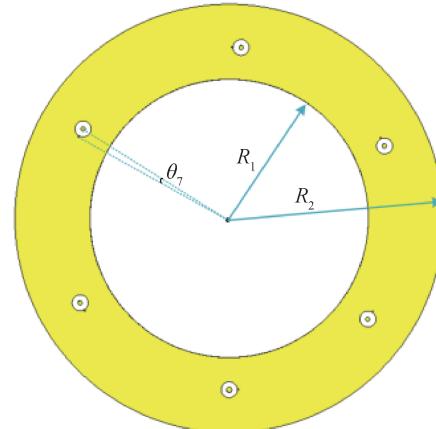
$$\xi_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{L} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

天线的介质基板为 FR4 圆环形基板, 其外径为 80 mm, 内径为 52 mm, 厚度为 2 mm, 介电常数为 4.3, 损耗角正切参数为 0.025, 单一贴片的谐振频率设计为 1.3 ~ 1.7 GHz。六模块转子天线模型如图 2 所示, 其中, w 为 6 mm, 贴片间距 d 为 8.38 mm, 贴片外圈弧长 L_1 为 27.49 mm, 贴片内圈弧长 L_2 为 22.78 mm, 角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 、 θ_7 分别为 12°、11.5°、10.5°、8°、7°、6°、3°, 介质基板内半径 R_1 为 26 mm, 介质基板外半径 R_2 为 40 mm。

转子天线与其他器件一起封装在遥测装置转子上, 因此需分析封装胶的厚度和遥测装置金属壳体对转子天线工作频率的影响。由于微波在金属表面几乎全反射, 且天线紧贴遥测壳体安装, 将遥测壳体简化为无盖的金属圆柱, 利用仿真软件进行计算分析。图 3 为金属封装外壳简易结构及反射系数曲线, 可以看出: 加载壳体后, 天线的工作频率有微小变化, 反射系数 S_{11} 增大。这说明加载壳体后, 天线馈电端口反射强度增大。



(a) 转子天线模型正视图
(a) Front view of the rotor antenna model



(b) 转子天线模型后视图
(b) Rear view of the rotor antenna model

图 2 六模块转子天线模型图
Fig.2 Model diagram of the six-module rotor antenna

利用仿真软件分析封装胶厚度、介电常数、损耗角正切参数变化对天线性能的影响规律。取封装胶的相对介电常数为 3.85, 损耗角正切参数为 0.030, 封装胶厚度为 0.5 ~ 2.0 mm。图 4 为不同封装胶厚度下的转子天线 S_{11} 曲线, 可以看出: 随着封装胶厚度的增加, 天线的谐振频率逐渐降低。在 1.3 ~ 1.7 GHz 频段下, 谐振频率处的 S_{11} 值均低于 -10 dB。

取封装胶的厚度为 1.1 mm, 损耗角正切参数为 0.030, 相对介电常数为 2.0 ~ 4.0。图 5 为不同相对介电常数下的转子天线 S_{11} 曲线, 通过计算分析可知: 随着封装胶相对介电常数的增加, 天线的谐振频率逐渐降低^[14]。

取封装胶的厚度为 1.1 mm, 相对介电常数为

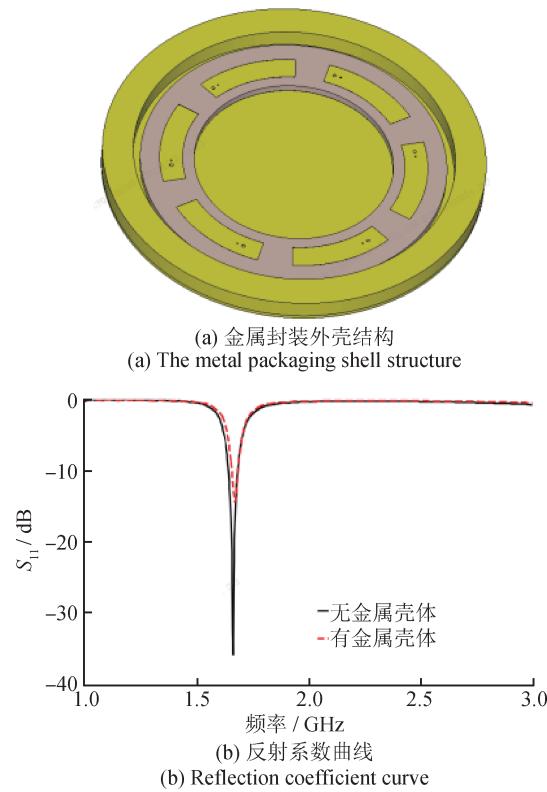
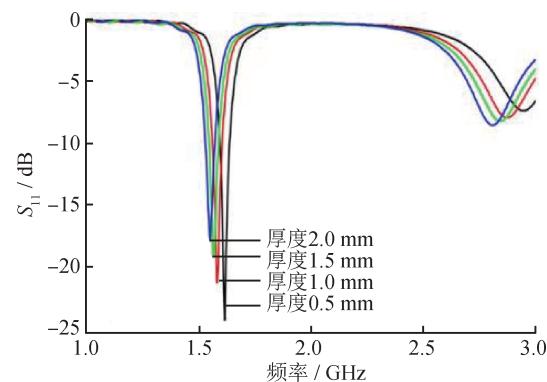


图3 金属封装外壳结构及反射系数曲线

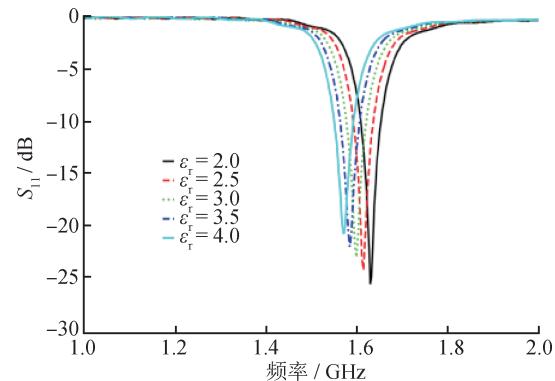
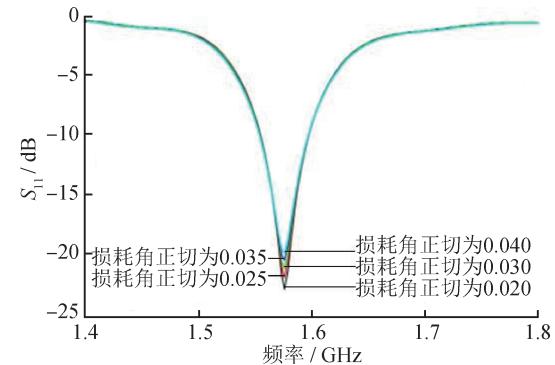
Fig.3 The metal packaging shell structure and the reflection coefficient curve

图4 不同封装胶厚度条件下天线的S₁₁曲线图Fig.4 S₁₁-parameter curves of the antenna with different package thicknesses

3.85, 损耗角正切参数为0.020~0.040。图6为不同封装胶损耗角正切参数下的转子天线S₁₁曲线, 可以看出: 随着封装胶介质损耗角正切参数的增加, 天线的谐振频率无明显变化。

1.2 定子天线设计

为实现发射信号的有效接收, 定子天线的工作频率应尽可能覆盖1.3~1.7 GHz。在开口圆环的尾

图5 不同介电常数封装胶下天线的S₁₁曲线图Fig.5 S₁₁-parameter curves of the antenna with different dielectric constant packages图6 不同损耗角正切参数封装条件下天线的S₁₁曲线图Fig.6 S₁₁-parameter curves of the antenna with different loss angle tangent packages

端焊接50 Ω吸收负载, 开口圆环的另一端与射频连接器相连, 通过射频连接器给圆环馈电。负载的另一端通过金属化过孔与天线接地结构相连, 用于吸收开口圆环尾端处的电磁能量, 减小尾端反射, 激发行波电流, 获得覆盖整个工作频段的工作带宽^[15]。为与六模块遥测接收装置安装结构共形, 定子天线采用FR4圆环形基板设计, 其外径为80 mm, 内径为52 mm, 厚度为1.2 mm。六模块定子天线模型如图7所示, 其中, R_1 为26 mm, R_2 为40 mm, 金属环外半径 R_3 为33.15 mm, 金属环内半径 R_4 为30.85 mm, 金属环过孔半径 R_5 为1 mm, 馈电端口半径 R_6 为1.5 mm, 馈电位置与过孔位置之间的角度 θ 为7.34°, 金属环缺口间隙 g_{gap} 为2 mm。

利用仿真软件分析封装胶的厚度和遥测金属壳体对定子天线工作频率的影响, 图8为定子天线反射系数曲线, 可以看出: 加载壳体后, 天线的

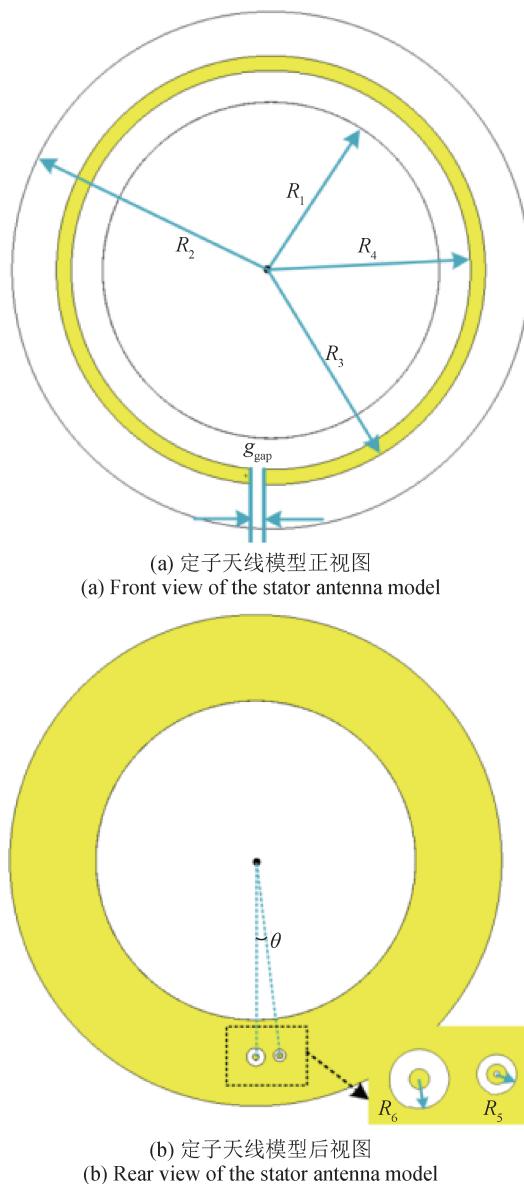


图7 六模块定子天线模型图
Fig.7 Model diagram of the six-module stator antenna

工作频率虽有微小变化，但在1.3~1.7 GHz频段下， S_{11} 的值均低于-10 dB，说明天线在该频段下能正常工作。

利用仿真软件分析封装胶厚度、介电常数、损耗角正切参数变化对天线性能的影响规律。取封装胶的相对介电常数为3.85，损耗角正切参数为0.030，封装胶厚度为0.5~2.0 mm。图9为不同封装胶厚度下的转子天线 S_{11} 曲线，可以看出：随着封装胶厚度的增加，天线的 S_{11} 曲线在坐标图中呈左移趋势。在1.3~1.7 GHz频段下，不同封装胶厚度所对应的 S_{11} 值均低于-10 dB。

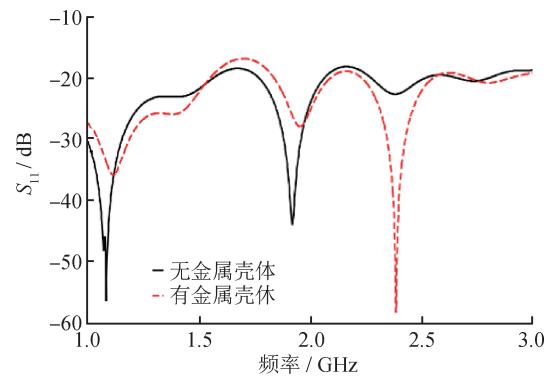


图8 定子天线反射系数曲线
Fig.8 Reflection coefficient curve of the stator antenna

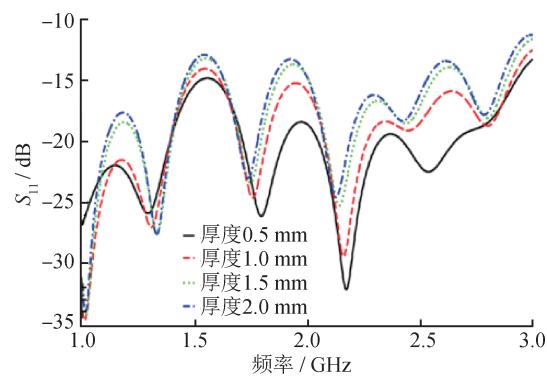


图9 不同封装胶厚度条件下天线的 S_{11} 曲线图
Fig.9 S_{11} -parameter curves of the antenna with different package thicknesses

取封装胶的厚度为1.1 mm，损耗角正切参数为0.030，相对介电常数为2.0~4.0。不同相对介电常数下的转子天线 S_{11} 曲线如图10所示，对比分析可知：随着封装胶相对介电常数增加，天线 S_{11} 曲线在坐标图中呈左移趋势。在1.3~1.7 GHz频段下，不同相对介电常数所对应的 S_{11} 值均低于-10 dB。

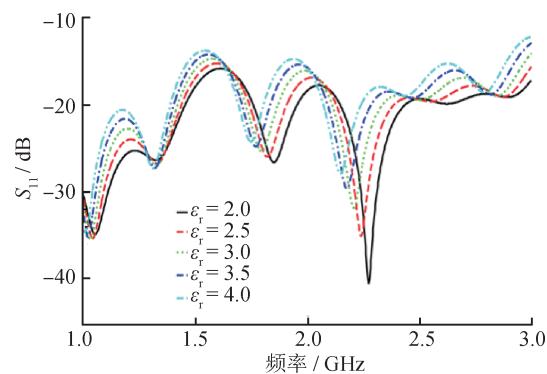


图10 不同介电常数封装条件下天线的 S_{11} 曲线图
Fig.10 S_{11} -parameter curves of the antenna with different dielectric constant packages

取封装胶厚度为1.1 mm, 相对介电常数为3.85, 损耗角正切参数为0.020~0.040。图11为不同封装损耗角正切参数下的转子天线 S_{11} 曲线, 可以看出: 随着封装胶损耗角正切参数的增加, 天线的 S_{11} 曲线无明显变化。在1.3~1.7 GHz频段下, S_{11} 的值均低于-10 dB。

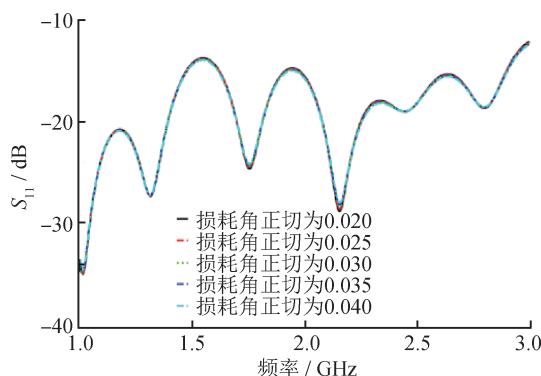


图11 不同损耗角正切参数封装条件下天线 S_{11} 曲线图
Fig.11 S_{11} -parameter curves of the antenna with different loss angle tangent packages

1.3 转子天线与定子天线间的信号传输效果分析

遥测装置在工作过程中处于高速旋转状态, 可能出现轴向振动、径向窜动等情况, 难以保证转子天线与定子天线处于同一轴线且间距相等, 这会影响测试数据传输。因此, 需利用仿真软件分析轴向振动、径向窜动对天线信号传输的影响。

天线振动、窜动位移模型如图12所示, 其中, dx 、 dy 分别为横向、纵向的振动位移, dz 为转子天线与定子天线之间的窜动位移。在初始状态下, 转子天线与定子天线正对放置, 二者间距为8 mm, 转子天线的6个端口同时馈电, 定子天线端口用于信号接收。

分析当 $dz=0$ mm时, 不同轴向振动条件下定子天线端口接收情况。图13为 dx 、 dy 在-2~2 mm变化时, 转子天线与定子天线之间传输系数 S_{21} 的变化情况, 可以看出: 在1.3~1.7 GHz频段下, 定子天线的 S_{21} 变化不明显。

保持 dx 、 dy 不变, 分析不同径向窜动条件下的定子天线端口接收情况。图14为 dz 在-2~2 mm变化时, 定子天线 S_{21} 曲线的变化情况, 可以看出: 装置发生径向窜动时, 在1.3~1.7 GHz条件下, S_{21} 的值发生变化。这是因为径向窜动等效于转子

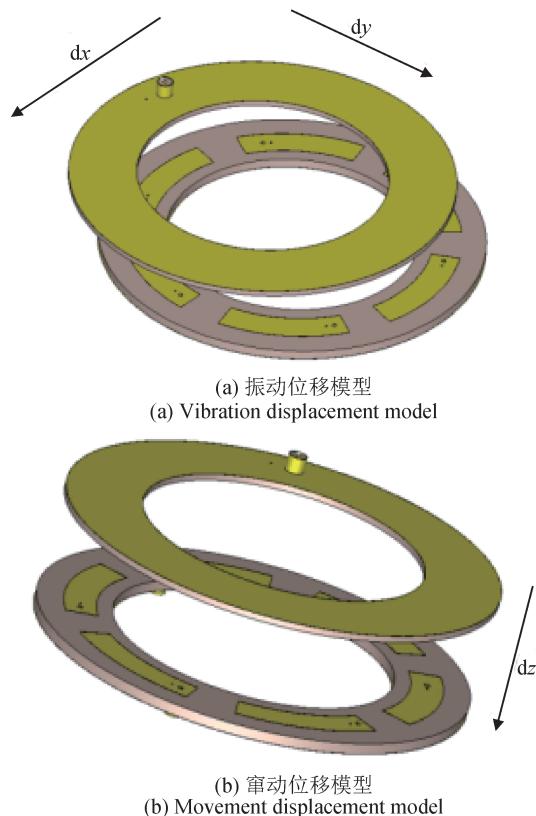


图12 天线振动、窜动位移模型图
Fig.12 Vibration/movement displacement model diagram of the antenna

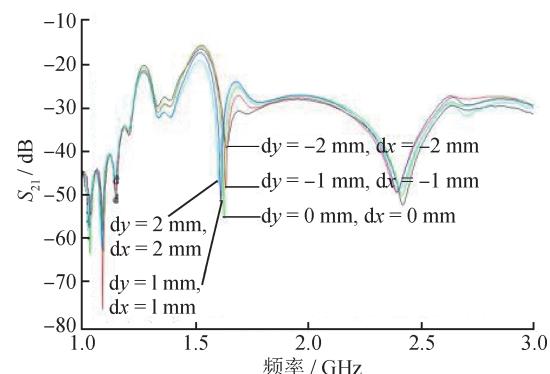


图13 不同轴向振动条件下天线 S_{21} 曲线变化情况
Fig.13 Variation of the S_{21} -parameter curve of the antenna with different lateral vibration displacements

天线与定子天线之间的距离发生变化, 当间距增加时, 转子天线辐射的电磁波在空间中不断衰减, 定子天线接收到的电磁波功率随之下降, 表现为传输系数值减小。

利用仿真软件分析转子天线旋转1周时, 定子天线端口接收情况。转子天线和定子天线的轴向距离固定为8 mm, 转子天线旋转角度为0°~360°,

每间隔 10° 进行 1 次数据测量。 S_{21} 随旋转角度 θ 的变化关系如图 15 所示。根据仿真结果可以看出：当转子天线旋转时， S_{21} 在 $-30.4 \sim -16.5$ dB 变化；在转子天线的谐振频率附近，对应的 S_{21} 达到峰值。转子天线旋转到定子天线开口位置时，转子天线发射的能量无法全部有效传输至定子天线，导致旋转至某些角度时耦合性能略微变差。

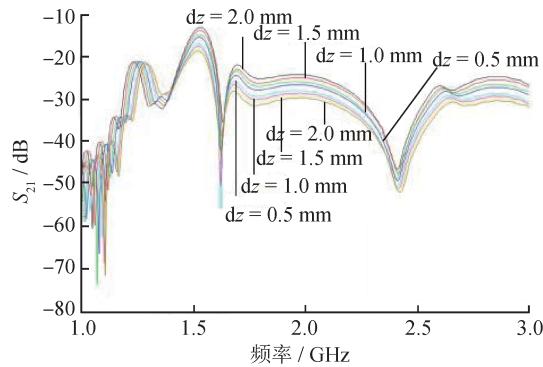


图 14 天线纵向窜动时 S_{21} 曲线变化情况

Fig.14 Variation of the S_{21} -parameter curve of the antenna when it moves longitudinally

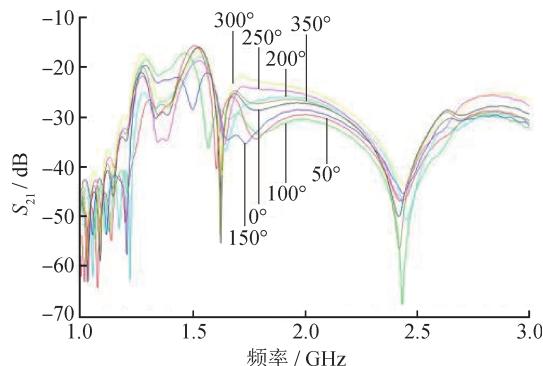


图 15 S_{21} 随不同旋转角度的变化情况

Fig.15 Variation of S_{21} with different rotation angles

利用仿真软件分析转子天线单独馈电与同时馈电时的串扰情况。不同馈电方式下，天线的 S_{11} 曲线变化情况如图 16 所示，可以看出：谐振频率和 S_{11} 均存在轻微偏移。产生此现象的原因：金属贴片间距较小，当单个端口馈电时，电磁场能量主要集中在单一金属贴片边缘并向外辐射；当 6 个端口同时馈电时，6 个金属贴片边缘均存在强辐射能量，产生电磁场耦合干扰，导致天线的谐振频率和 S_{11} 发生变化。由于反射系数幅值均在 -10 dB 以下，6 个端口同时馈电条件下，天线工

作性能所受的影响可忽略不计。

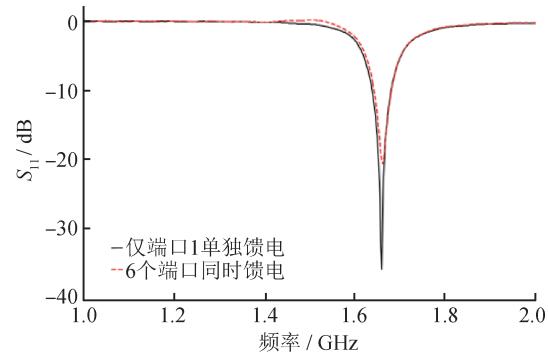


图 16 不同馈电方式下天线 S_{11} 曲线变化情况

Fig.16 Variation of the S_{11} -parameter curve of the antenna with different power supply methods

2 试验测试

2.1 天线测试试验

研制的六模块转子和定子天线如图 17 所示。采用矢量网络分析仪对天线的 S_{11} 进行测试，图 18 为每个端口依次单独馈电时，转子天线的 S_{11} 实测曲线图。表 1 为转子天线的工作频率和工作带宽统计。根据测试结果可知：在工作频率下，每个馈电端口的 S_{11} 均小于 -10 dB；6 个端口分别工作时，带宽依次为 45、30、35、20、20、15 MHz，总带宽为 165 MHz，且各端口在 $1.3 \sim 1.7$ GHz 的工作频率条件下不存在相互串扰。

图 19 为定子天线的 S_{11} 实测曲线图，在整个测试频段下，实测定子天线 S_{11} 均低于 -10 dB。根据测试数据可知：转子天线和定子天线满足工作频率为 $1.3 \sim 1.7$ GHz、阻抗带宽不低于 40 MHz 的指标要求。

图 20 为转子天线在不同间距条件下的 S_{21} 测试曲线图，可以看出：转子天线 S_{21} 峰值主要对应 $1.5 \sim 1.6$ GHz 频率区间， S_{21} 变化范围为 $-30.8 \sim -19.6$ dB，且随着间距增加， S_{21} 逐渐减小。

图 21 为转子天线旋转 1 周时，定子天线端口的 S_{21} 测试曲线图，可以看出：当转子天线旋转时， S_{21} 在 $-32.8 \sim -22.7$ dB 变化； S_{21} 在转子天线的谐振频率附近达到峰值。当旋转到 20° 左右时，转子天线正对定子天线的开口位置， S_{21} 明显降低。

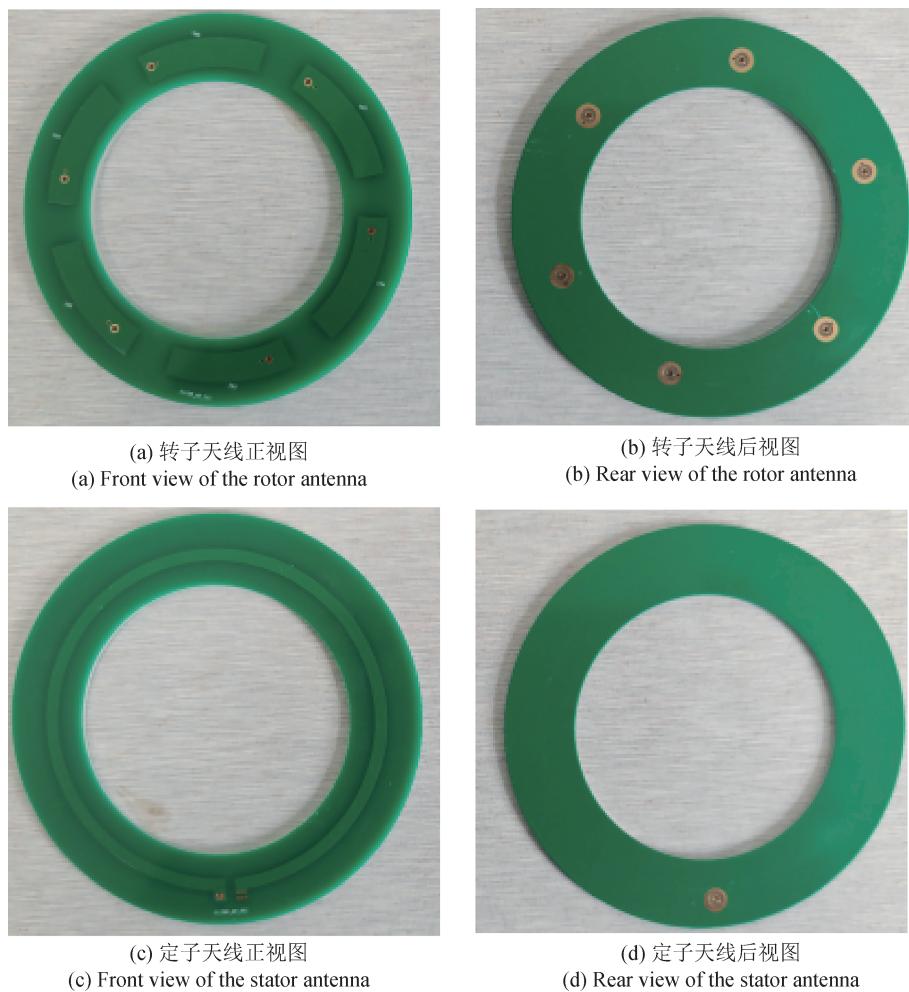


图17 六模块转子天线和定子天线实物图

Fig.17 The six-module rotor/stator antenna

表1 转子天线的工作频率和工作带宽统计表

Tab.1 Statistical table of working frequency and bandwidth of the rotor antenna

馈电端口	工作频率/GHz	工作带宽/MHz	谐振频率/GHz	谐振频率处的 S_{11} /dB
1	1.6 ~ 1.645	45	1.625	-30.00
2	1.55 ~ 1.58	30	1.565	-27.49
3	1.51 ~ 1.545	35	1.525	-24.54
4	1.465 ~ 1.485	20	1.475	-13.92
5	1.435 ~ 1.455	20	1.445	-15.28
6	1.41 ~ 1.425	15	1.415	-13.74

2.2 无线遥测低速旋转平台试验

研制的六模块遥测装置样机如图22所示。将遥测定子件与信号接收地面站连接，使用低速旋转平台进行测试，如图23所示。

通过地面站指示灯颜色显示丢包率情况，利

用PC对遥测装置转子与定子安装间距分别为8、10 mm条件下的丢包情况进行实时监测，结果如表2所示。

试验结果表明：遥测装置转子与定子数据通信可靠，数据丢包率低于1%。

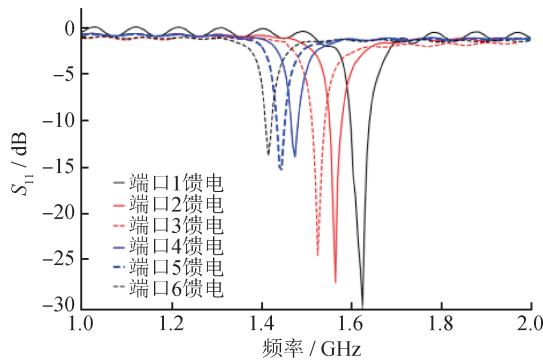
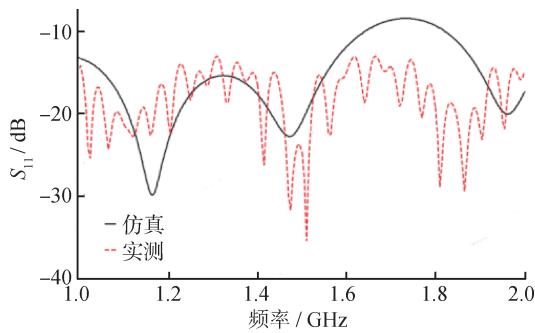
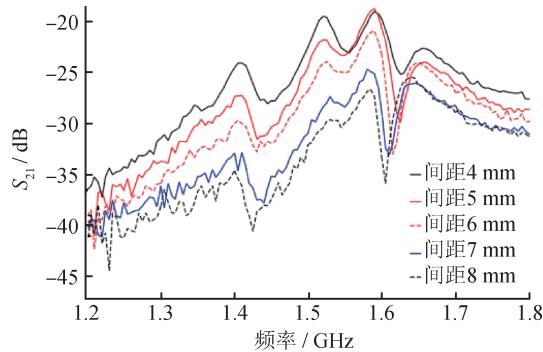
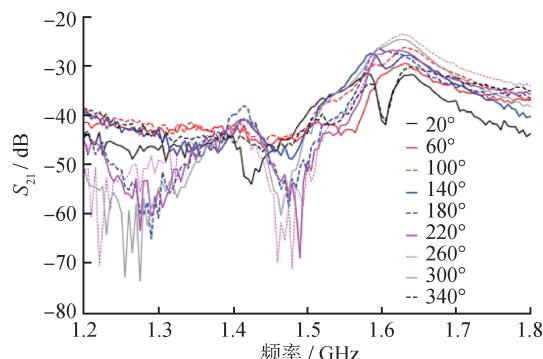
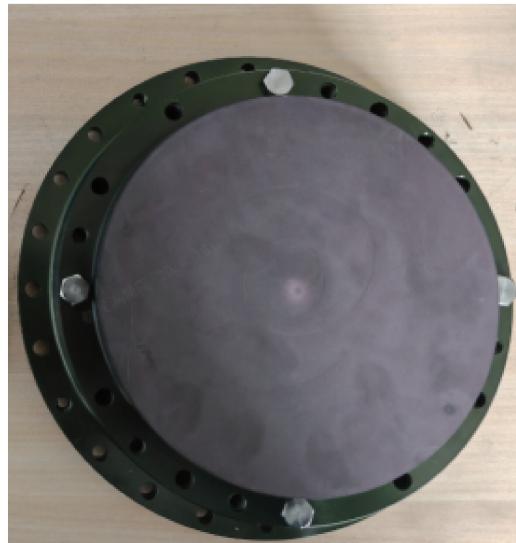
图18 转子天线 S_{11} 实测曲线图Fig.18 Measured curve of S_{11} -parameters of the rotor antenna图19 定子天线 S_{11} 实测曲线图Fig.19 Measured curve of S_{11} -parameters of the stator antenna图20 不同间距条件下的 S_{21} 测试曲线图Fig.20 Measurement curves of S_{21} with different spacings图21 不同旋转角度条件下的 S_{21} 测试曲线图Fig.21 Measured curves of S_{21} with different rotation angles(a) 遥测静子装置
(a) Telemetry stator device(b) 遥测转子装置
(b) Telemetry rotor device

图22 六模块遥测装置样机

Fig.22 Prototype of the six-module telemetry device

2.3 无线遥测高速旋转平台试验

利用高速旋转平台开展测试，分析遥测装置在高速旋转条件下的工作情况。高速旋转平台安装示意图如图24所示，测试现场如图25所示。将遥测定子件上的引线从高速旋转平台内引出并连接至PC端，以监测遥测转子与定子间的通信性能。试验过程中，设置转速为20 000 r/min，温度为80 °C，表3为不同间距条件下的数据丢包情况监测结果，可以看出：该遥测装置在高温、高速旋转环境下同样能够稳定、可靠地进行信号传输。

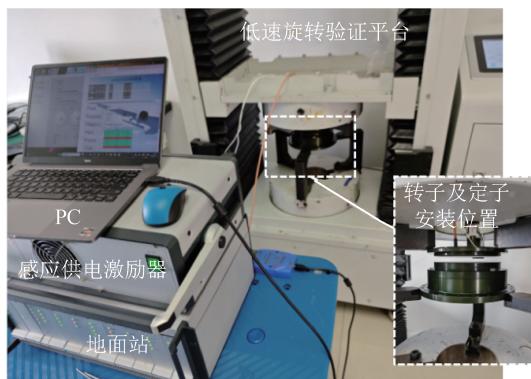


图23 低速旋转平台测试现场图

Fig.23 Test site diagram of the low-speed rotating platform

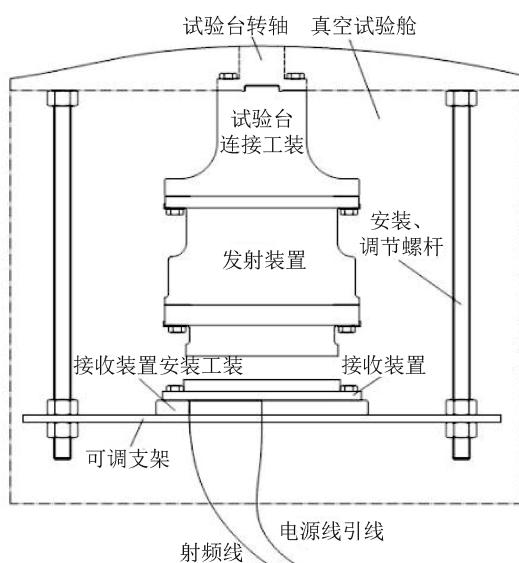


图24 高速旋转平台安装示意图

Fig.24 Installation schematic diagram of the high-speed rotating table

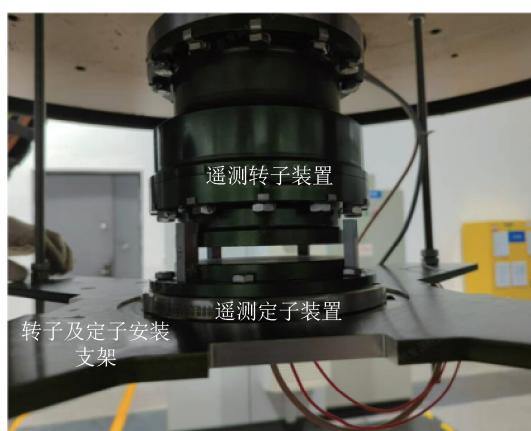


图25 高速旋转平台测试现场图

Fig.25 Test site diagram of the high-speed rotating platform

表2 无线遥测低速旋转平台试验结果

Tab.2 Test results of the low-speed rotating platform by wireless telemetry

间距/mm	指示灯颜色	丢包率/%
8	绿色	< 1
10	绿色	< 1

表3 无线遥测高速旋转平台试验结果

Tab.3 Test results of the high-speed rotating platform by wireless telemetry

间距/mm	指示灯颜色	丢包率/%
8	绿色	< 1
10	绿色	< 1

3 结论

设计了基于无线遥测系统的六模块天线，通过仿真软件分析封装胶厚度、材料介电常数、损耗角正切参数对天线信号传输效果的影响，并研究了轴向振动和径向窜动位移对天线运行的干扰、单独馈电与同时馈电工况下的串扰情况，在此基础上优化设计方案，并制造六模块天线实物。利用该天线开展性能试验，结果表明：其工作频率范围、阻抗带宽等指标均符合设计要求；无线遥测低速旋转台试验中，转子天线与定子天线安装间距分别为8 mm和10 mm的条件下，系统的数据丢包率均低于1%；无线遥测高速旋转台试验中，转速为20 000 r/min且环境温度为80 °C的工况下，系统同样能够实现稳定的信号传输。研发的六模块天线具有体积小、数据传输准确可靠等优势，为航空发动机旋转件性能试验的高效开展提供了重要保障，为推动航空设备工程化测试技术发展提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 宋振宇, 周鑫. 航空发动机测试技术发展及展望[J]. 航空发动机, 2025, 51(1): 1-11.
SONG Z Y, ZHOU X. Development and prospect of aero engine testing technology[J]. Aeroengine, 2025, 51(1): 1-11. (in Chinese)
- [2] 刘兴松, 王坤东, 巩哲. 航空发动机及测试技术研究进展[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(1): 1-6.

- LIU X S, WANG K D, GONG Z. Research progress of aero engines and testing technology [J]. *Automation & Instrumentation*, 2022(1): 1–6. (in Chinese)
- [3] 张天宏, 张宸煦. 航空发动机整机试验关键参数测试技术综述[J]. *计测技术*, 2025, 45(1): 3–20.
- ZHANG T H, ZHANG C X. Review of key parameter testing techniques for complete aircraft engine tests [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45(1): 3–20. (in Chinese)
- [4] 袁雪, 张岩松, 邱大明, 等. 航空发动机转子轴向力动态特征测试技术[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(9): 1804–1810.
- YUAN X, ZHANG Y S, QIU D M, et al. Dynamic characteristic testing technology for axial force of aeroengine rotors[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(9): 1804–1810. (in Chinese)
- [5] 刘繁, 温志勋, 杨彩霞, 等. 面向航空发动机的高精高頻动应变测量系统[J]. *测控技术*, 2024, 43(1): 63–69.
- LIU Y, WEN Z X, YANG C X, et al. High-precision and high-frequency dynamic strain measurement system for aero engines [J]. *Measurement & Control Technology*, 2024, 43(1): 63–69. (in Chinese)
- [6] 武天博. 转子叶片状态参数无线遥测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- WU T B. Research on key technologies of wireless remote measurement of rotor blade state parameters[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
- [7] 邓丽君, 黄勇. 面向旋转部件传热试验的无线遥测装置设计[J]. *电子器件*, 2021, 44(4): 1019–1024.
- DENG L J, HUANG Y. Design of wireless telemetry device for heat transfer tests of rotating components [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2021, 44(4): 1019–1024. (in Chinese)
- [8] HUANG D S, LIANG F, WANG X R, et al. A millimeter-wave dual-band antenna based on microstrip dual-loop and patch [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(10): 2825–2829.
- [9] ZHANG C, OUYANG J. A design methodology of broadband millimeter-wave conical radiating antenna based on ring-shaped microstrip line [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(7): 2239–2243.
- [10] SHI J K, HE Y J, SUN H J. Compact dual-band filtering microstrip antenna using spoof surface plasmon polaritons feed line [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(1): 127–131.
- [11] CHEN F C, LIANG Y Z, ZENG W F, et al. A series-fed slant-polarized microstrip patch antenna array [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(6): 5367–5372.
- [12] ZHANG Y J, LI P H, QIN X, et al. Dual-polarized microstrip antenna with single-dimension-constraint resonant frequency [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(11): 8365–8374.
- [13] LI K F, ZHANG Y J, LI Y. Hepta-mode terminal microstrip antenna for mobile Wi-Fi 6/6E and UWB channels 5–11 MIMO applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(9): 7048–7056.
- [14] 潘进勇, 薛团结, 孙蔓. 在相同相对介电常数情况下不同厚度的微带贴片天线设计与仿真验证[J]. *电子测量技术*, 2017, 40(11): 120–123.
- PAN J Y, XUE T J, SUN M. Design and simulation verification of microstrip patch antennas with different thicknesses under the same relative dielectric constant [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017, 40(11): 120–123. (in Chinese)
- [15] 陆潇琛, 廖斌. 基于数据传输的小型天线系统研究 [J]. *现代电子技术*, 2010, 33(24): 139–141.
- LU X C, LIAO B. Research on small antenna system based on data transmission [J]. *Modern Electronic Technique*, 2010, 33(24): 139–141. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)

第一作者: 黄正伟(2000—), 男, 助理工程师, 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试验测试技术。



通信作者: 宿丕强(1995—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为传感器设计与发动机旋转部件信号传输技术。

