

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518015

发动机轴承的极近场遥测天线研究

张晓新¹ 程龙¹ 马立峰² 张飞凡¹

(1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院 沈阳 110136; 2. 国网河北省电力有限公司沧州供电公司 沧州 061017)

摘要: 针对在监测发动机轴承温度时,有天线安装、信号传输困难的问题,本文提出了基于声表面波温度传感器的极近场遥测天线的完整设计方案。首先通过理论分析得出极近场区的电磁场分布特性,并经过仿真优化设计出在2~3 GHz频段内具有宽频带特性的极近场天线,且带内反射系数小于-10 dB;其次提出天线保持架,合理设计装配架构;再次通过在极近场天线表面介质覆盖的方法,提升能量传递效率约14.80%,从而改善信号传输质量,减小能量传递过程中的变化速度约54.36%,由此提高后续整体遥测系统的稳定性;最后,将极近场天线安装传感器后连接到遥测系统对轴承运行时的温度进行实际测量,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。

关键词: 极近场天线;介电系数;天线保持架;微带线;介质层;声表面波温度传感器

中图分类号: TN823+.15; TN65 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Research on the extremely near-field telemetry antenna for engine bearings

Zhang Xiaoxin¹ Cheng Long¹ Ma Lifeng² Zhang Feifan¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Cangzhou Power Supply Branch, Cangzhou 061017, China)

Abstract: In monitoring engine bearing temperatures, challenges such as antenna installation and signal transmission difficulties often arise. This paper proposes a comprehensive design for an extremely near-field telemetry antenna based on surface acoustic wave temperature sensors. Firstly, the electromagnetic field distribution characteristics in the extremely near-field region are obtained through theoretical analysis, and a wideband antenna with an in band reflection coefficient of less than -10 dB is designed through simulation optimization in the 2~3 GHz frequency band. Next, an antenna cage is introduced with a rational assembly structure. Furthermore, by covering the surface of the extremely near-field antenna with a dielectric superstrate, the energy transfer efficiency is improved by approximately 14.80%, thereby enhancing signal transmission quality and reducing the rate of change during energy transfer by about 54.36%, which ultimately increases the stability of the subsequent telemetry system. Finally, after installing the sensor on the extremely near-field antenna and connecting it to the telemetry system, actual temperature measurements are conducted during bearing operation, validating the practicality of the extremely near-field antenna, its assembly structure, and the feasibility of the dielectric superstrate method.

Keywords: extremely near-field antenna; dielectric coefficient; antenna cage; microstrip line; dielectric superstrate; surface acoustic wave temperature sensor

0 引言

某型号发动机轴承在高速转动过程中,一旦出现损伤、润滑不良等问题,温度会快速升高,若不能及时发现并处理,会导致轴承服役时间缩短,甚至损坏,由此监测轴承温度就显得尤为重要。

目前国内外对轴承这类旋转部件的测温研究有,王方哲等^[1]利用热电偶传感器,附加其他电路模块,一同将其嵌

入锁紧螺母中,对滚动轴承内圈进行接触式测温。该方法测温范围较广,同时缺点也很明显,因为发动机轴承内部空间狭小,仅有2~3 mm的可操作距离,所以不适宜安装较多的电路模块。李艳超等^[2]使用红外测温仪采集数据后进行图像处理,再利用热电偶校准的方式测量温度。该测温方法易受外部环境干扰,且测量精度不高。杨顶^[3]利用光纤光栅实现分布式测温。轴承上无需为传感器供电,抗干扰性能好,不易腐蚀,能实现分布式测温,同时可以测量较

高的温度。但光纤有易碎的特点,维护成本较高;此外光纤不能随着转子转动,只能测量轴承外圈温度;发动机中的灰尘、油污可能会导致光传输损失增加、光纤光栅反射谱偏移、信号干扰等问题,所以此方法不适用于发动机轴承内部测温。陈金海等^[4]对轴承径向开槽,嵌入红外温度传感器进行测温,数据传输是采取有线通信的方式。在发动机内部,不能轻易对轴承内外圈进行改造,会导致轴承服役时间缩短,存在安全隐患;考虑实际情况里面会有灰尘、油污等可能会遮挡,衰减红外辐射,同时有线的数据传输方式会存在布线复杂、线路物理磨损的问题。Kovacs 等^[5]利用 LC 谐振网络的选频特性进行温度测量,采用电磁耦合的方式传递信号。在安装结构设计方面,根据轴承的尺寸设计了感应线圈的大小,通过添加玻璃罩子和两个铜条来为线圈提供着力点。在发动机中,外加其他铁质器件,势必会增加涡流,抵消一部分线圈的磁场,进而影响信号传输质量,同时在发动机轴承中很难找到合适的位置添加这个玻璃罩和金属铜条来支撑线圈,所以线圈的安装也是比较困难的。该方案在实验室这种较为理想的条件下有较好表现,但在实际场景中不适用。Gupta 等^[6]利用磁环的磁场随着外界温度变化而改变的这一特性,将磁环贴合于轴承内圈,再通过霍尔传感器测量出磁场强度的大小,进而映射出轴承的平均温度。磁环的磁场在一定程度上会受到周围铁磁性介质材料的影响,进而影响测量精度。此处霍尔传感器是采用有线方式传输信息,同样不适用于发动机轴承内。

针对以上研究成果应用在发动机轴承测温场景中的不完善之处,本文给出了基于 2.4 GHz 声表面波(surface acoustic wave, SAW)温度传感器的极近场遥测天线的完整设计方案。相较上述测温方法,解决了如下 3 点主要问题:1) 根据轴承的形状尺寸设计出极近场天线,采用无线通信方式,避免了信号有线传输时布线复杂、线路物理磨损的潜在问题;2) 发动机内零部件距离较近,在实时监控过程中,收发天线的间距受到限制,同时还需考虑轴承的尺寸、传感器的安装和获取温度的可行性。本文设计出天线保持架,合理规划装配架构,将极近场天线嵌入轴承中,间接反映轴承的温度,能够在不对轴承物理结构进行改造的情况下,实现在线实时监测;3) 随着 SAW 技术的成熟,SAW 测温是无线无源式测温的一个研究热点方向。SAW 温度传感器的谐振频率会根据外界温度变化而改变,该测温过程无需考虑对传感器的供电问题,且不易受到灰尘、油污的影响。

此外,研究了介质覆盖对极近场天线能量耦合的影响。通过介质覆盖的方法提升能量传递效率,增强极近场天线之间的耦合作用,改善了信号传输质量;与此同时减缓接收信号强度的变化速度,进而提高了遥测系统的稳定性和可靠性。

最后,通过试验验证极近场天线以及装配架构的实用性和介质覆盖方法的正确性、可行性,极近场天线对于发动

机轴承测温应用领域具有极大的现实意义。

1 极近场天线设计

1.1 极近场理论分析

通常把天线附近的场分为 3 个区域:感应近场区、辐射场区和远场区。相邻场区之间的边界划分标准如下:

$$R_1 = 0.62 \sqrt{D^3/\lambda} \quad (1)$$

$$R_2 = 2D^2/\lambda \quad (2)$$

式中: D 是天线的最大尺寸, λ 是电磁波的波长, R_1 是感应近场区外边界到天线表面的距离, R_2 是辐射场区外边界到天线表面的距离。设场内一点到天线表面的距离为 R ,当 $R < R_1$ 时,为感应近场区;当 $R_1 < R < R_2$ 时,为辐射场区;当 $R > R_2$ 时,为远场区。由式(1)和(2)计算出本文天线的场区划分边界,这里 $D = 13.5 \text{ cm}$, $\lambda = 12.3 \text{ cm}$,将天线最大尺寸和电磁波波长带入得到 $R_1 = 8.77 \text{ cm}$, $R_2 = 29.63 \text{ cm}$ 。本文发动机内收发天线的实际工作距离约 2~3 mm,远小于感应近场区外边界 R_1 ,为了便于表述,将本文天线所在的工作区域,记作极近场区,为得到极近场的电磁分布特性,降低分析问题的难度,用最简单的电流元来建模研究。

在分析由源产生场的这个过程中,通常引入矢量位函数来辅助分析,简化求解过程。矢量位函数分为电流源 J 的矢量位函数 A_E 和磁流源 M (磁流源是用无穷小的环形电流或者缝隙等效,实际上不存在)的矢量位函数 A_M 。结合麦克斯韦方程、矢量恒等式、洛伦兹条件进行推导得出两组场分布方程:

$$H_e = \frac{1}{\mu} (\nabla \times A_E) \quad (3)$$

$$E_e = -j\omega(A_E + \frac{\nabla \nabla \cdot A_E}{k^2}) \quad (4)$$

$$E_M = -\frac{1}{\epsilon} (\nabla \times A_M) \quad (5)$$

$$H_M = -j\omega(A_M + \frac{\nabla \nabla \cdot A_M}{k^2}) \quad (6)$$

式中: H_e 和 E_e 是由 J 产生的场, E_M 和 H_M 是由 M 产生的场。波数 $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$, ω 为频率, μ 为磁导率, ϵ 为介电系数。分别求解两个非齐次波动方程得到两个矢量位函数,这里直接给出一般形式。

$$A_E(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{J(r') e^{-jk r_1}}{r_1} dV \quad (7)$$

$$A_M(r) = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \int_V \frac{M(r') e^{-jk r_1}}{r_1} dV \quad (8)$$

式中: r_1 是源和场内一点的距离矢量, r' 是坐标原点到源的距离矢量, r 是坐标原点到场内一点的距离矢量,三者的关系为 $r_1 = |r - r'|$ 。由电磁对偶原理,只需要分析电流源或磁流源,某一种源产生的场即可,另一种源的场可以利用对偶量替换得到,下面求解电流源的场。在建模时,简化

电流元无穷小,并且长度 $l \ll \lambda$, 进而有电流密度处处相同的假设, 设为 I , 电流元的坐标退化为原点坐标, 式(7)等效成式(9):

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{I e^{-jkr}}{r} dz \cdot \mathbf{a}_z = \frac{\mu_0 I l}{4\pi r} e^{-jkr} \cdot \mathbf{a}_z \quad (9)$$

式中: r 为场内一点到坐标原点的距离, \mathbf{a}_z 是 z 轴单位方向向量。无穷小电流元的几何关系和电磁场分量如图1所示。图1中带有箭头的向量表示长度为 l 的电流元在空间内某一点沿 r 方向和 θ 方向的电场分量, 以及沿 φ 方向的磁场强度分量。

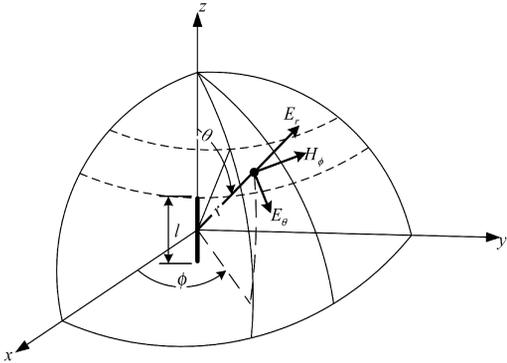


图1 无穷小电流元的几何关系及其电磁场分量

Fig.1 The geometric relationships of the infinitesimal current element and its electromagnetic field components

将式(9)、式(3)和式(4)用球坐标系表示, 并把式(9)分别带入式(3)和式(4), 得到电流元的场方程^[7]

$$H = \frac{I l}{4\pi} \sin\theta \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-jkr} \cdot \mathbf{a}_\varphi \quad (10)$$

$$E_R = \frac{\eta_0 I l}{2\pi r^2} \cos\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \quad (11)$$

$$E_\theta = j \frac{\eta_0 k I l}{4\pi r} \sin\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{k^2 r^2} \right) e^{-jkr} \quad (12)$$

式中: η_0 是真空中波阻抗, 其值为 $120\pi \Omega$, 在球坐标系中, \mathbf{a}_φ 表示沿 φ 方向的单位向量, 本文讨论的场为极近场, 根据极近场条件 $kr \ll 1$, 简化式(10)、(11)和式(12)得到:

$$H_\varphi = \frac{I l}{4\pi r^2} \sin\theta \quad (13)$$

$$E_R = -j \frac{I l}{2\pi r^3} \frac{1}{\omega \epsilon_0} \cos\theta \quad (14)$$

$$E_\theta = -j \frac{I l}{4\pi r^3} \frac{1}{\omega \epsilon_0} \sin\theta \quad (15)$$

进而求得复坡印廷矢量:

$$S = \frac{1}{2} (E \times H^*) =$$

$$\left(\frac{-j(I l \sin\theta)^2}{32\pi^2 r^5 \omega \epsilon_0} \right) \mathbf{a}_R + \left(\frac{j(I l)^2 \sin 2\theta}{32\pi^2 r^5 \omega \epsilon_0} \right) \mathbf{a}_\theta \quad (16)$$

对式(16)取实部, 有 $S_{av} = \text{Re}(S) = 0$, 不难得出极近场主要呈现出纯电抗特性, 辐射出的实功率较少, 其能量传

输以感应耦合的方式为主^[8]。因此极近场天线和传统天线的设计有较大差异, 若是参考耦合线圈的近场通信设计方案^[9], 由法拉第电磁感应定律, 在电流一定的条件下, 若要让天线线圈产生较大的磁通量, 必须增加线圈的匝数或者增大天线的面积^[10]。因发动机轴承尺寸的限制, 天线面积固定, 唯一可以改变的是线圈匝数, 同时这样会增大线圈的电感, 也增加了匹配难度, 接下来结合实例详细说明。

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L'C'}} \quad (17)$$

式中: f 为耦合线圈的工作频率, L' 为线圈的电感值, C' 为调谐电容值。根据以往设计 2.4 GHz 双菱形天线的匹配经验值, 在天线总长度约为 25 cm 时, 若将反射系数匹配到小于 -10 dB, 则需要串联 1 pF 的电容和并联 1 nH 的电感。本文的发动机轴承周长约为 39 cm, 按一匝算, 匹配到 2.4 GHz 的电容值必定小于 1 pF, 所以调谐电容的选取显得格外困难。除此之外, 在发动机中, 主轴或者其他铁质材料会因耦合线圈的磁场感应出涡流, 此时涡流产生的磁场会抵消一部分耦合线圈的磁场, 进而影响信号传输质量。结合以上理论计算和实际环境对此方案的影响分析, 确定了耦合线圈的设计方案是不可取的。

因极近场分布和发动机内部环境的复杂性, 所以接下来对于极近场天线的设计, 依旧采用设计传统天线的方法去近似分析, 再不断试验、调整、改进, 得到天线的最优参数。

1.2 极近场天线设计

由于发动机内部空间狭小, 有信号传输的困难, 所以对天线的体积大小和形状设计的灵活性有更高的要求。微带天线常被用作辐射体, 因低成本, 体积小, 适用于金属环境, 易于和其他组件集成, 可以在电路板上制造等优点被广泛应用^[11-13]。考虑轴承和天线保持架的形状、尺寸, 同时为实现能量耦合传输的最大化, 极近场收发天线均设计成环形的微带天线。

出于成本控制的目的, 文中选取阻燃型覆铜环氧玻璃布层压板 (flame retardant copper-clad epoxy glass cloth laminate, FR-4) 作为微带贴片天线的板材。该材料的损耗角正切为 0.02, 相对介电系数为 4.4。因本次试验选用哈尔滨 (Harbin, HRB) 精密深沟球轴承, 其型号为 6218, 具体尺寸参数如下: 内径 90 mm, 外径 160 mm, 厚度 30 mm。所以结合轴承和天线保持架的尺寸, 确定微带贴片天线基板的内圈半径为 57.5 mm, 外圈半径为 67.5 mm。借助微元的思想, 环形辐射单元可等效为由无数小的矩形辐射单元组成, 两者磁偶极子、电偶极子分布特性一致, 下面利用经典矩形传输线模型来近似分析环形微带贴片天线。

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (18)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (19)$$

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (20)$$

式中: ϵ_e 为等效介电系数, λ_g 为导波波长, λ_0 为自由空间波长, ϵ_r 为等效介电系数, ϵ_r 是基板的相对介电系数, 其值约为 4.4, W 是矩形微带线的宽度, v_0 为电磁波在真空中的传播速度, f_r 是谐振频率, 这里带入遥测系统工作频段的中心频率为 2.44 GHz, h 为介质基板的厚度。参考生产厂商提供的层叠结构, 微带贴片天线的选型是板厚为 1.6 mm 的印制电路板 (printed circuit board, PCB), 根据工程经验值, PCB 的介质基板厚度 h 约为 1.5 mm, 将上述数据带入式 (19) 计算得出 ϵ_e 约为 4.10, 再利用式 (18) 求出 λ_g 约为 6.07 cm。由于基板衬底很薄, 导致微带贴片向外辐射的边缘场非常小, 内部电场几乎垂直于微带贴片表面, 依据空腔模型理论, 在腔内只考虑 TM_x 模式。当环形微带天线工作在 TM_{21} 模式时, 理论上天线辐射单元的内半径 a 、外半径 b 和在该模式下工作频率 f_{21} 的关系如下^[14]:

$$\pi(a+b) = \frac{2\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} = \frac{2c}{f_{21} \cdot \sqrt{\epsilon_e}} \quad (21)$$

进而有:

$$f_{21} = \frac{2c}{\pi(a+b) \cdot \sqrt{\epsilon_e}} \quad (22)$$

式中: c 为光速。由式 (22) 可知, 如果衬底参数确定, a 和 b 的值将决定着工作频率, 当 b/a 的值越小, 天线的阻抗越大, 反之, 阻抗越小。若要实现阻抗匹配, 一般需要在馈电点和天线辐射单元中间添加阻抗变换微带线, 其阻值 $Z_L = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{in}}$, Z_0 是需要匹配到的 50 Ω , Z_{in} 是环形微带贴片天线的输入阻抗。根据上文已求出的等效介电系数 ϵ_e , 结合式 (22) 估算本文天线的 b/a 约为 1.17, 远小于 2.4 GHz 频段内常规微带贴片天线的比例尺寸, 该天线阻抗较大, 采用常规的匹配方法不容易实现, 由于辐射单元的长度大于 2.4 GHz 的电磁波波长, 所以本文利用行波天线的设计思路, 采用同样的阻抗匹配方式, 在环形辐射单元末端对地并联两个 100 Ω 电阻, 实现匹配到 50 Ω 标准阻抗的同时, 还能够吸收天线末端行波的能量, 为了防止反射波与入射波相互叠加形成驻波, 进而导致能量辐射不出去、辐射效率降低。

综合考虑轴承和天线保持架的尺寸, 利用高频仿真软件 HFSS 进行参数扫频优化分析, 得出最后天线辐射单元的内外半径结果如下所示: $a = 62.3$ mm, $b = 62.7$ mm, 因此, 极近场天线环形辐射单元的宽度 $L = b - a = 0.4$ mm, 极近场天线的几何关系结构示意图如图 2 所示。图中间部分是厚度为 h 的介质基板, 其上方是环形辐射单元, 下方是地平面, 地平面不仅用于为电流提供回路, 而且还是天线辐射结构的必要组成部分。PCB 微带天线需要接地才能正常工作, 如果接地层的面积越大, 天线的谐振频率就会越低, 并且回波损耗也会越小, 因此本文把极近场天

线的另一面全部“开窗”(厂商加工 PCB 时不加阻焊层), 以提供最大面积的地, 用于后续馈电时天线和转接头焊接能够保证最大接地条件。

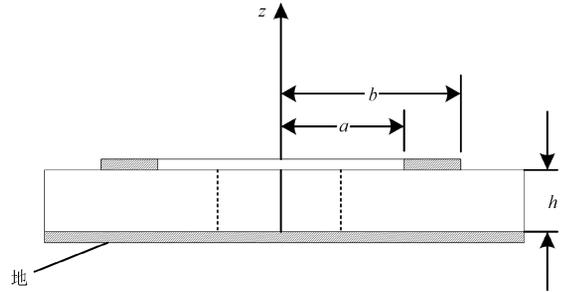


图 2 极近场天线几何关系示意图

Fig. 2 Geometric relationship diagram of the extremely near-field antenna

天线馈电是天线设计中较为重要的环节之一, 对阻抗匹配、辐射效率等性能指标均有影响。微带贴片天线有两种基本馈电方式: 1) 用微带线馈电, 优点: 制作简单, 缺点: 馈线也会引起辐射, 干扰微带天线的方向图、降低增益。2) 用同轴线馈电, 优点: 馈电位置任意选择, 便于阻抗匹配; 缺点: 不易集成, 制作麻烦。为方便操作, 选择同轴线单馈点边馈的馈电方式。本文直接给出具体的焊接方法: 将 SMA 同轴连接器 (subminiature version A connector, SMA) 与匹配电阻关于圆心对称放置, 焊接时, 用焊锡把 SMA 接头和极近场天线径直连接, 过渡圆滑自然, 长度约为 1 mm, 最后将 SMA 接头的地和天线背面的地层焊接一起。

极近场天线反射系数仿真结果和经过阻抗匹配后由 3656 A 系列微波矢量网络分析仪进行无源测量得到的参数结果如图 3 所示, 天线实物如图 4 所示。实测和理论仿真均表示在 2~3 GHz 频率范围内, 反射系数小于 -10 dB, 同时具有宽频带特性和良好的陷波特性和, 在 2.040、2.418、2.796 GHz 等频点均有不同程度的谐振现象。相较理论仿真结果, 实测产生的频偏、反射系数增大的现象, 分析主要有以下原因: 理论分析及仿真计算均基于理想的材料和边界条件, 与实际情况存在差异, 致使实测结果与仿真值略有偏差, 但总体满足试验设计要求。

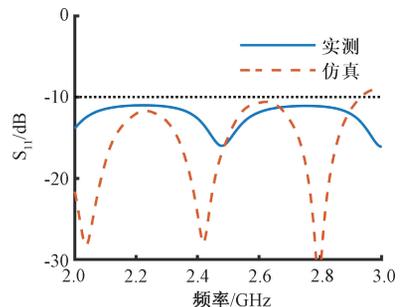


图 3 天线仿真与实测结果

Fig. 3 Antenna simulation and measurement results chart



图4 极近场天线实物图

Fig. 4 Physical diagram of the extremely near-field antenna

2 装配架构设计

2.1 天线保持架的结构设计

为解决极近场天线焊接 SAW 传感器后与轴承的安装问题,本文提出一种天线保持架,SAW 传感器可以与之接触,通过监测天线保持架的温度来间接映射轴承温度。轴承在安装固定后,依靠内外圈的高速旋转带动系统运作,若将天线保持架固定在内圈或者外圈是有困难的,因为要稳固牢靠,避免不了对内外圈进行物理改造,会严重破坏轴承结构完整性,导致其服役时间大大降低,如果将其固定在轴承保持架上,就能巧妙规避这个问题。

天线保持架的结构示意如图 5 所示。整体结构初步设计与轴承形状契合的环形柱体,其下方一体化带有 3 个方形底座(底座下方打上螺纹孔),根据 HRB 精密深沟球轴承的物理尺寸和轴承保持架凹槽之间的距离作为参考标准确定 3 个方形底座的高度和间距,为了后续在轴承另一面通过螺丝钉把天线保持架和轴承锁紧固定,将与方形底座贴合的轴承保持架上的 3 个铆钉移除,留下螺丝钉安装孔。由于 SAW 传感器是通过测量天线保持架温度来间接映射轴承内圈的温度,所以传感器该如何与天线保持架充分接触并相对精确地获得温度传感量是一个关键问题。这里可以用混合酸液将天线保持架腐蚀一部分,预留出能够容纳与传感器相同体积大小的槽孔,考虑到 SAW 传感器的物理结构会随着外界温度变化而产生微小的形变,槽孔的实际大小应该比 SAW 传感器的尺寸略大。

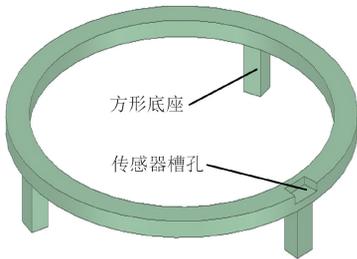


图5 天线保持架结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the antenna cage

2.2 天线保持架的安装方法

天线保持架是连接轴承和极近场天线的桥梁,只有正确安装才能确保所测温度的准确性。首先如图 6 中的步骤 1 所示,把轴承保持架上与方形底座贴合的 3 个铆钉移除;为防止有灰尘、油污等进入传感器槽孔缝隙中对温度测量造成干扰,如图 6 中步骤 2 所示,先在天线保持架的槽孔中加入高温导热胶用于提供相对密封的隔离环境,之后再接收天线用液体固定胶与天线保持架紧密粘连;接下来如图 6 中步骤 3 所示,利用 3 个方形底座贴合轴承保持架嵌入轴承中,并在另一面通过螺丝钉把两者锁紧固定;最后如图 6 中步骤 4 所示,发射天线则和连接件固定一起,通过精密滑台调整天线的位置(图中省略了连接件和精密滑台)。

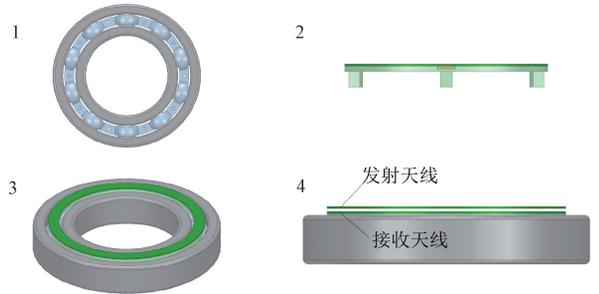


图6 安装步骤示意图

Fig. 6 Installation procedure diagram

3 试验探究

已有研究表明,在天线表面适当间距覆盖介质层,可以在特定的频段提高增益,也会导致天线方向图的变化^[15-17]。由上文理论分析及式(16)可知,极近场大部分能量是以振荡的形式存在,辐射出的实功率较少,在工作频率固定的情况下,介电系数是影响极近场能量耦合的重要因素,由于场分布的复杂性,难以给出明确的关系式,下面通过试验探究的方法研究不同介质覆盖对极近场天线的影响^[18]。

3.1 介质层的选取

电子行业领域常见的介质材料有硅橡胶、聚酰胺、聚氨酯、环氧树脂等,与其他介质材料相比,硅橡胶具有优异的高温稳定性,而且能够在高频、高温等极端环境下保持优良的性能,其加工成本相较其他材料更低,同时流淌或半流淌的液体性状方便了固化后的塑形,使其应用场景更加广泛。

由于硅橡胶的种类繁多,本文选取了介电系数相差较大且具有代表性的 3 种硅橡胶作为本次试验的研究对象。3 种介质材料分别为如图 7(a)所示的硅酮导热胶,如图 7(b)所示的 TM-441 硅橡胶和如图 7(c)所示的 705 硅橡胶,不同介质材料的详细参数介绍如表 1 所示。其中表干时间的含义为在 25℃ 的室温条件下,硅橡胶由流淌状态变为固体的固化时间,后续所有试验均需要在介质材料固化完成,性状稳定的前提下进行。

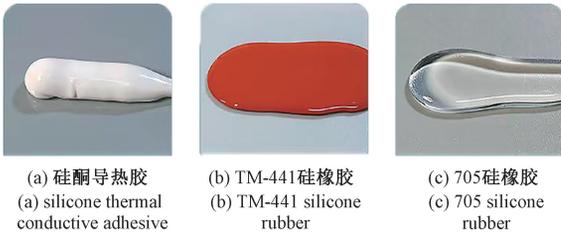


图 7 介质层性状图例

Fig. 7 Legend of dielectric superstrate properties

表 1 不同介质材料详细参数表

Table 1 Detailed parameter table of different dielectric materials

| 型号 | 颜色 | 形态 | 表干时间 (25°C·min ⁻¹) | 使用温 度/°C | 介电 系数 |
|------------|----|----|-----------------------------------|-------------|----------|
| 硅酮导热胶 | 白色 | 流淌 | 03~30 | -60~250 | 2.5 |
| TM-441 硅橡胶 | 红色 | 流淌 | 10~60 | -60~300 | 3.0 |
| 705 硅橡胶 | 透明 | 流淌 | 05~25 | -50~200 | 3.7 |

3.2 试验设计与测试结果讨论

为研究介质覆盖对极近场天线能量耦合的影响,在室温条件下,将上文所选的 3 种介质材料分别在 3 对收发天线表面均匀涂覆 0.1 mm 厚,并静置 60 min 左右,直至介质材料固化完毕,性状稳定。基于图 8 所示的试验平台,将收发天线分别连接虚拟频谱仪 RSA306B 和射频信号发生器 N9310A(输出 2.44 GHz,20 dBm 的连续正弦波信号),并且两天线正对面放置^[19]。使用手动调节精密滑台对天线的正对间距微调控制,本次试验中的可调距离范围是 0.3~3 mm,3 对介质覆盖天线以及空白对照组(没有覆盖任何介质层)天线在不同间距下测量得到接收信号强度的数据曲线如图 9 所示。

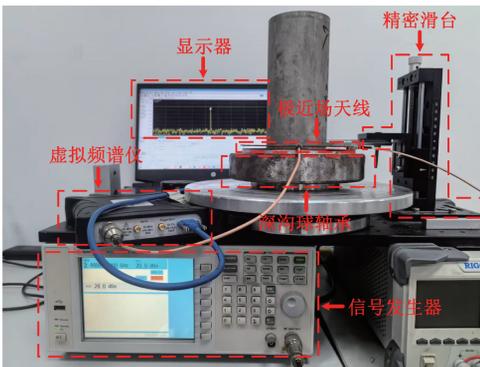


图 8 试验平台

Fig. 8 Experimental platform

为便于分析结果,对上图所得数据建立一般规律模型,显然数据总体趋势为线性递减,利用 MATLAB 中曲线拟合工具得到的拟合结果如下:

$$y_1 = -2.958x + 16.18 \quad (23)$$

$$y_2 = -1.190x + 18.30 \quad (24)$$

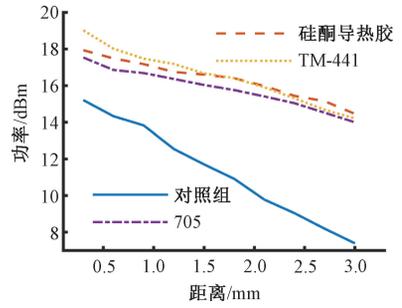


图 9 对照试验数据结果

Fig. 9 Results of the control experiment

$$y_3 = -1.651x + 19.22 \quad (25)$$

$$y_4 = -1.205x + 17.81 \quad (26)$$

式中: y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 分别为空白对照组,硅酮导热胶、TM-441 硅橡胶、705 硅橡胶涂覆极近场收发天线后接收天线获取的信号强度, x 为收发天线的正对间距。根据所测试验数据,在正对间距 x 为 0.30 mm 时,接收信号强度 $y_1 \sim y_4$ 分别为 15.21、17.94、19.03、17.54 dBm,计算出试验组的接收信号强度比对照组平均高出了约 2.96 dBm,空白对照组天线的能量传递效率为 76.05%,而对照试验组天线的平均能量传递效率约为 90.85%,相比之下提高约 14.80%。从图 9 的数据曲线中不难发现,覆盖介质层的极近场天线在不同的正对间距下,其接收信号强度均优于空白对照组,上述结果表明,覆盖介质层的设计在一定程度上减少了极近场天线的能量振荡,增强了天线之间的耦合作用,从而改善信号传输质量。

分析拟合得到的函数曲线可知,空白对照组天线的接收信号强度曲线变化率为 -2.958,即正对间距 x 每增加 1.00 mm,接收信号强度下降约 2.958 dB,与此同时对照试验组的平均接收信号强度下降约 1.350 dB,计算出试验组相较空白对照组的平均接收信号强度变化速度(变化率)减小了约 54.36%。因此在极近场天线表面覆盖介质层,一定范围内可以减缓极近场天线因正对间距改变而导致其能量传递过程中的变化速度。换言之,避免外界微小扰动(如收发天线安装时的倾斜或交错)引起接收信号强度的急剧波动,减少对接收信号误判的可能性,从而降低误码率。有相关研究也表明,介质覆盖层可以显著提高天线的增益,并对天线的回波损耗产生影响^[20]。因此,采用覆盖介质层的方法在某种程度上能够有效地提升极近场天线的性能,增强遥测系统的稳定性和自适应性。

3.3 试验验证

为验证极近场天线的实用性,并评估覆盖介质层对能量耦合效果和系统稳定性的影响,设计并实施了以下试验方案。分别将试验组和空白对照组的极近场天线安装 SAW 传感器和天线保持架后,将其连接至遥测系统进行性能测试。所选用的深沟球轴承采用常见的内圈随轴转动、外圈固定不动的工作方式。考虑到轴承在长期运行中的磨

损问题,需要添加润滑油脂,以延长轴承的使用寿命,根据相关研究并结合轴承的尺寸大小,确定注脂量约为 $2\text{ g}^{[21]}$ 。为模拟出实际的工作环境,试验中对轴承施加了径向载荷 50 kN 和轴向载荷 10 kN ,经过查阅资料,得知本文所选用的6218型号深沟球轴承的极限转速为 $5\ 300\text{ r/min}$ 。为确保轴承运行时不出现打滑现象,这里实际运行转速设置为 $4\ 500\text{ r/min}$,未超过其极限值。在试验过程中,收发天线的间距固定为 2 mm ,监测并记录了轴承内圈温度随时间变化的数据曲线。试验结果如图10所示。

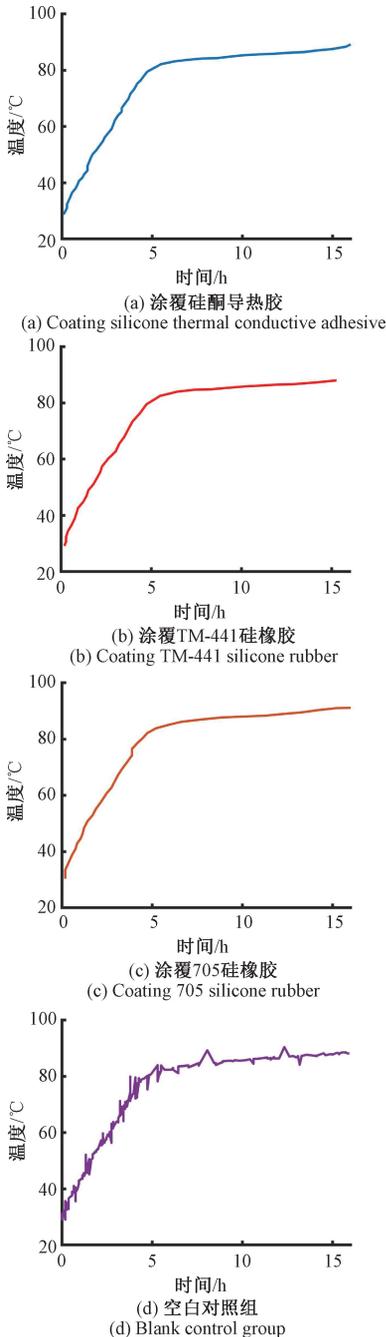
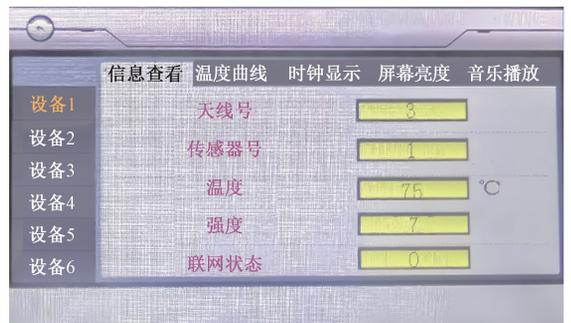


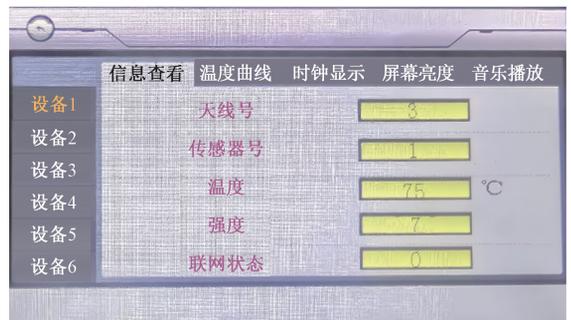
图10 轴承的内圈温度变化曲线

由图10中温度变化曲线可以得到,从轴承开始转动的5 h内,升温速度最快,5 h之后缓慢升温,大约在8 h之后趋于平稳。在轴承刚开始运行时,摩擦阻力较大,导致升温较快,经过一段时间的磨合后,润滑油脂均匀覆盖轴承,升温变缓,直至趋向平稳。对比不同试验条件下测得的数据,发现图10(d)中空白对照组天线测量出的温度大约有 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的温漂,分析造成这一现象的主要原因:由于实际安装过程中极近场天线难以实现理想状态下的精确对准,并且正对间距随电机的转动而出现微小变化,致使天线接收到的SAW传感器回波信号强度波动较大,从而引发遥测系统在解调温度信息时出现误码,最终使触摸屏显示的测量结果与真实值存在一定偏差。对极近场天线涂覆介质材料后,测量得到的温度呈现平稳变化趋势,几乎没有较大的波动,相比空白对照组的数据,遥测系统解调出的温度信息更加稳定、可靠。上图中的试验数据直接验证了通过介质覆盖的方法提高遥测系统稳定性这一结论的正确性。

遥测系统的触摸屏显示界面如图11所示,触摸屏中显示的信息有,天线号、传感器号、温度、信号强度(0~9共10个强度等级)、联网状态。从图中可以观察到,在测量相同温度时,试验组天线解调得到SAW传感器回波信号的强度等级为7,而空白对照组天线解调得到回波信号的强度等级为5。由试验数据表明,涂覆介质材料可以提高约2个强度等级,这一结果直接验证了通过覆盖介质层的方法,在一定范围内能够减少极近场天线的能量振荡,增强天线之间的耦合作用,从而改善信号传输质量的结论。

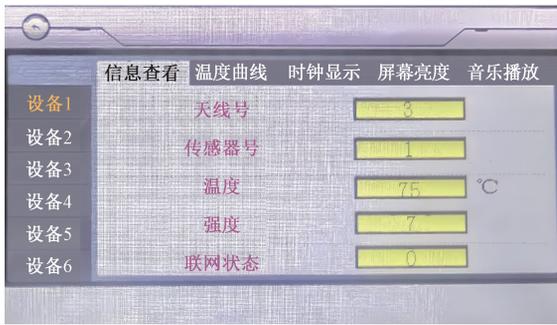


(a) 涂覆硅酮导热胶
(a) Coating silicone thermal conductive adhesive

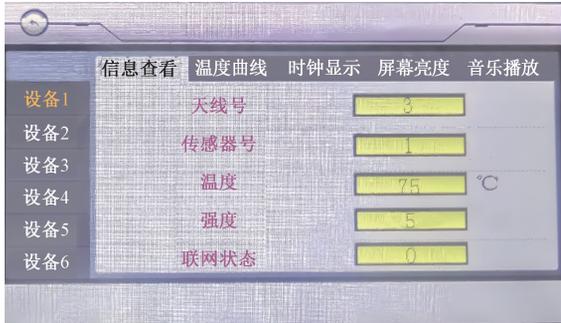


(b) 涂覆TM-441硅橡胶
(b) Coating TM-441 silicone rubber

Fig. 10 The temperature variation curve of the bearing inner race



(c) 涂覆705硅橡胶
(c) Coating 705 silicone rubber



(d) 空白对照组
(d) Blank control group

图 11 触摸屏显示界面

Fig. 11 Touchscreen display interface

4 结 论

为解决在监测发动机轴承温度时,有天线安装、信号传输困难的问题,给出了基于 SAW 传感器的极近场遥测天线的完整设计方案。经过试验测试,在极近场天线表面覆盖介质层的方法能改善信号传输质量并提高后续遥测系统的稳定性。最后经过试验验证,极近场天线可应用于基于 SAW 传感器的遥测系统,能够实际测量出发动机轴承运转时的温度,并证明了所提出的介质覆盖方法的有效性,为发动机内轴承测温研究提供了新思路。

参考文献

- [1] 王方哲,朱永生,闫柯,等. 滚动轴承内圈温度无线监测技术[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 8-14.
WANG F ZH, ZHU Y SH, YAN K, et al. Wireless monitoring technology of rolling bearing inner ring temperature[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 8-14.
- [2] 李艳超,杨兵华,刘欢,等. 基于红外技术的滚动轴承温度场测量系统[J]. 轴承, 2020(9): 63-66.
LI Y CH, YANG B H, LIU H, et al. Temperature field measurement system for rolling bearings based on infrared technology[J]. Bearing, 2020(9): 63-66.
- [3] 杨顶. 基于光纤光栅传感的主轴轴承温度场监测方法

研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2015.

YANG D. Measurement of temperature field for the spindle bearing of machine tool based on optical fiber bragg grating sensors[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.

- [4] 陈金海,张文远,罗梦婷,等. 智能滚动轴承内圈温度监测系统研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(10): 103-108.
CHEN J H, ZHANG W Y, LUO M T, et al. Research on temperature monitoring system of inner ring of intelligent rolling bearing [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(10): 103-108.
- [5] KOVACS A, PEROULIS D, SADEGHI F. Early-warning wireless telemeter for harsh-environment bearings[J]. IEEE Sensors Journal, 2007: 946-949.
- [6] GUPTA L A, PEROULIS D. Wireless temperature sensor for condition monitoring of bearings operating through thick metal plates[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(6): 2292-2298.
- [7] 高鹏程,田丰,彭书传,等. 移动通信基站电磁辐射近场特性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(11): 1563-1568.
GAO P CH, TIAN F, PENG SH CH, et al. Analysis of near-field characteristics of electromagnetic radiation from mobile communication base station[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2022, 45(11): 1563-1568.
- [8] 张雪松,朱超甫,李忠富,等. 基于微带天线的能量传输技术及其性能研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 232-235.
ZHANG X S, ZHU CH F, LI ZH F, et al. The studies of energy transmission technology and its performances based on microstrip antennas[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(1): 232-235.
- [9] 张祁梦莎,胡永建,孙成芹,等. 井下 NFC 天线的研究及仿真分析[J]. 电子测量技术, 2024, 47(1): 17-22.
ZHANG Q M SH, HU Y J, SUN CH Q, et al. Research and simulation analysis of downhole NFC antenna [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(1): 17-22.
- [10] 田锦,钱长云,孔路遥,等. 物联网感知线圈电感量设计与阻抗匹配[J]. 现代雷达, 2013, 35(5): 63-66.
TIAN J, QIAN CH Y, KONG L Y, et al. Inductance value design and impedance matching for sensing coil of internet of things[J]. Modern Radar, 2013, 35(5): 63-66.
- [11] WANG Y, XU F, DU ZH W. Reducing the effects of the

- superstrate on the microstrip omnidirectional antenna with an annular ring[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2022, 70(9): 8566-8571.
- [12] 李浩,冷文,王安国,等. 一种小型化频率可重构微带天线的设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(10): 119-122.
- LI H, LENG W, WANG AN G, et al. Design of a compact microstrip antenna with frequency reconfigurable characteristic [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(10): 119-122.
- [13] 高原,孙兆锋,彭斌,等. 表面开槽的宽带遥测微带天线设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 14-17.
- GAO Y, SUN ZH F, PENG B, et al. Design of broadband telemetry slotted-microstrip antenna [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(6): 14-17.
- [14] CHEN X, LI X, FU G, et al. CP higher-order mode annular-ring microstrip antenna for mobile satellite communication[C]. 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012.
- [15] YAMAKAWA S, YAMANAKA D, KAGAYA O, et al. A study on parallel-arranged leaky wave antenna with dielectric superstrate[C] 2024 IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT), 2024: 150-152.
- [16] SHAHZADI I, COMITE D, KUZNETCOV M V, et al. Compact dual-polarized fabry-perot leaky-wave antenna for full-duplex broadband applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(9): 2693-2697.
- [17] KHOUTAR F Z, AZNABET M, MRABET O E. Gain and directivity enhancement of a rectangular microstrip patch antenna using a single layer metamaterial superstrate [C]. 2018 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2018: 1-4.
- [18] 王晨,王超,孙荣庆. 夹杂碳纤维的天线罩蒙皮在电磁场下的失效机理研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(23): 60-65.
- WANG CH, WANG CH, SUN R Q. Research on the failure mechanism of radome with carbon fiber inclusion under electromagnetic fields [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(23): 60-65.
- [19] 胥云飞,沈文辉,王玮. 基于中继线圈的磁耦合共振无线能量传输系统[J]. 电子测量技术, 2019, 42(17): 16-22.
- XU Y F, SHEN W H, WANG W. Magnetic coupling resonant wireless power transfer system based on a relay coil [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(17): 16-22.
- [20] 郑洽,陈星,许光辉,等. 介质覆盖层对微带天线带宽的展宽作用[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(2): 326-330.
- ZHENG ZH, CHEN X, XU G H, et al. Using homogenous dielectric superstrate to enhance the bandwidth of a microstrip antenna [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science), 2016, 53(2): 326-330.
- [21] 陈磊. 深沟球轴承热特性分析及试验研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2016.
- CHEN L. Thermal analysis and experimental research of deep groove ball bearings [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2016.

作者简介

张晓新(通信作者),副教授,主要研究方向为模拟电子信息技术、航空电子信息系统。

E-mail:359192790@qq.com

程龙,硕士研究生,主要研究方向为射频与微波天线。

E-mail:2457707561@qq.com

马立峰,工程师,主要研究方向为自动化。

E-mail:373643735@qq.com

张飞凡,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统设计。

E-mail:2396430343@qq.com