

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.06.12

微波叶尖间隙测量传感器的计算分析

谢兴娟, 吴娅辉

(中航工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要: 介绍了利用微波相位法测量短距离位移的工作原理, 建立了一种基于此原理的谐振腔结构微波传感器模型, 并完成了模拟计算。分析了微波传感器测量发动机叶尖间隙的能力, 和高温环境对传感器性能的影响。结果显示此传感器能够在高温环境下完成 0~6 mm 范围内的高精度位移测量, 可以很好的应用于航空发动机叶尖间隙的测试。

关键词: 微波传感器; 叶尖间隙; 相位; 高温

中图分类号: TB92; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)06-0047-04

Analysis and Simulation of Microwave Tip Clearance Measurement Sensor

XIE Xingjuan, WU Yahui

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration,
Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The method of using microwave phase to measure short displacement was presented in this paper. A resonance cavity structural microwave sensor model based on this principle was established and simulated. The ability for measure blade tip clearance on aircraft engine and the effect of high temperature for the sensor were analyzed. The result shows a high accuracy measure ability of the sensor in 0~6mm clearance under high temperature environment, and verifies a good application in blade tip clearance measurement on aircraft engine.

Key words: microwave sensors; blade tip clearance; phase; high temperature

0 引言

航空发动机叶尖间隙, 即发动机内部转子叶片的叶尖与机匣之间的最小径向距离。合理的降低叶尖间隙值, 可以增加发动机的耗油率, 提高发动机的效率, 提高稳定性^[1-2]。如果叶尖间隙减小过渡, 则容易引起旋转的叶片和发动机机匣内壁之间发生摩擦, 降低安全性^[3]。因此, 需要对航空发动机叶尖间隙进行更加合理的设计, 才能进一步提高现代发动机的工作效率。设计合理的叶尖间隙的技术前提为有一种有效实现发动机叶尖间隙的实时测量的传感器^[4-5]。

一般情况下, 航空发动机中高压压气机内的燃油温度可以达到几百摄氏度, 高压涡轮机中的可以达到上千摄氏度, 其中还有燃油、燃烧产物和其它污染物的存在。目前, 如何在这种高温、高污染的环境中正常工作, 并保持很好的耐受性和测试精度, 是影响航

空发动机叶尖间隙测量传感器发展的主要障碍^[6]。

关于发动机叶尖间隙的测量技术, 人们先后研究了放点探针法、电涡流法、电容法、激光法等各种原理和方法。但是面对发动机中的高温和燃油等污染的工作环境, 这些测量方法的测量准确度或稳定性均受到很大影响^[7]。由于微波的波长范围在 1 mm ~ 1 m, 介于可见光和无线电之间, 所以其具有一些特殊的特性, 如定向传输性能和金属边界易反射^[8]。基于微波原理工作的微波传感器信号能够穿透发动机中的燃油和其他污染物, 同时基于相位的工作原理使其不受传输电缆长度和振动的影响。由此大致判断微波传感器适用于航空发动机叶尖间隙的测量。

本文建立了一种工作在 24 GHz 左右的基于微波相位法的谐振腔结构微波传感器模型, 用于航空发动机叶尖间隙的测试。通过模拟计算, 分析了传感器测量发动机叶尖间隙的能力, 和环境温度升高对传感器性能的影响。结果显示此微波传感器能够实现高温环境下 0~6 mm 范围内的高精度位移测量, 非常适用于航空发动机中叶尖间隙的测试。

收稿日期: 2016-10-10

作者简介: 谢兴娟(1985-), 女, 工程师, 博士, 从事发动机测试方面的研究工作。

1 微波传感器工作原理

图1为微波传感器的测量原理示意图,所设计的微波传感器基于微波相位法测量叶尖间隙。下面介绍其测试原理:微波传感器安装于发动机机匣内壁中,工作在连续波模式,当旋转叶片的叶尖端面经过传感器端口时,信号源发射的微波信号被金属的叶尖端面反射回来。

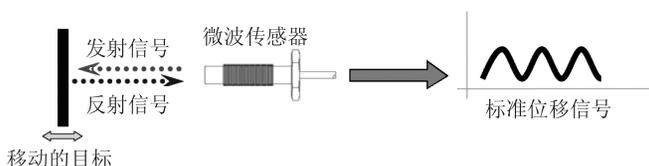


图1 微波传感器测量原理示意图

如图1所示,传感器的发射信号和接收的反射信号之间的相位差随间隙的不同而改变。因此可以通过测量此相位差来计算叶尖间隙。通过计算可知,微波传感器信号传输过程引起的总相位变化 $\Delta\varphi$ 由式(1)所示。

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{2R}{\lambda} = 4\pi R/\lambda \quad (1)$$

式中: R 为传感器信号源到被测叶尖之间的距离; λ 为工作波长。测试过程中,微波信号的发射和反射经过被测距离的双重路径。因此可得间隙距离的计算公式为

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \lambda \quad (2)$$

根据式(2)可知,在实际测试中,只要选定微波的工作频率,则根据硬件电路采集计算回波信号与参考信号的相位差,即可求出测量距离。

微波信号在传输过程中,相位以波长为周期进行变化。当传输距离超过一个波长时,式(2)将受到相位模糊的影响。由于传感器测试过程中,微波信号经过传感器到叶尖之间的双程路径,因此为了避免相位模糊的影响,要求测试距离在工作频率的半波长范围内。本文中选择的微波传感器工作频率约为24 GHz,其工作半波长为6.25 mm,因此要求传感器测试范围在6 mm以内。

微波传感器工作时,通过探头发射微波信号,并接收来自叶片叶尖的反射信号。本文中的传感器探头采用谐振腔结构,示意图见图2所示。传感器探头的具体形式为:由金属壳体形成圆柱型谐振腔,谐振腔一端连接同轴电缆,同轴电缆内导体伸进谐振腔中进

行馈电,谐振腔另一端开放正对被测目标,为了保护传感器内部结构和提高其抗环境污染性能,在传感器开放端口焊接一个陶瓷介质窗片。传感器工作时,为了保证尽量多的微波能量面向叶片叶尖传输,选择谐振腔工作模式为TE₁₁₁模,可以通过建模和优化计算确定具体工作频率下的传感器内部尺寸。

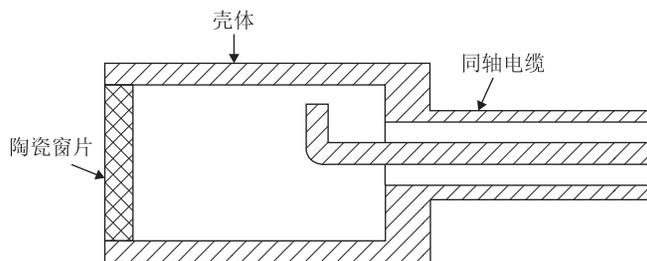


图2 微波传感器结构示意图

微波传感器用于发动机叶尖间隙测量时,传感器探头插入发动机机匣上的开孔中,在机匣外壁密封安装,开放的端口正对发动机内叶片叶尖方向。为了防止叶片旋转过程中与传感器探头发生碰撞,将探头回缩在机匣中。为了使传感器适应发动机中的高温工作环境,其探头部件全部采用耐高温材料,同样与探头连接的电缆也采用耐高温电缆。

2 微波传感器的建模和计算

对微波传感器的建模利用了三维电磁场计算软件CST-MWS,其三维计算模型如图3所示。

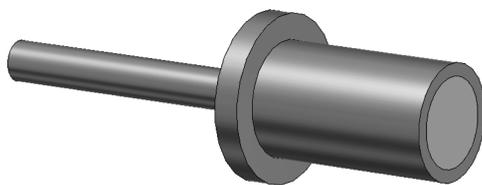


图3 微波传感器三维计算模型

模型的工作频率初步设计目标为24 GHz,通过尺寸优化计算后最终得到探头外径尺寸10 mm,长17 mm。为了保证传感器的耐高温性能,模型中传感器的所有结构全部采用耐高温金属和介质材料。

对图3中的微波传感器模型进行优化计算,得到其端口反射系数幅值频率曲线见图4所示,可见在横坐标24.128 GHz处,反射系数幅值最低,为-48.15 dB(0.0039),此数值表示,在频点24.128 GHz处,传感器内部结构引起的反射信号幅值为发射信号幅值的0.39%,其功率占输入信号总功率的0.0015%,此能量非常小。因此选择传感器的实际工作频点应为

24.128 GHz。在此工作频点, 信号源发射的大部分能量都通过探头向外辐射, 有利于精确的监测叶尖间隙。此外, 由于所设计微波传感器基于相位原理工作, 因此传感器实际工作频点的变化不影响传感器的测试精度, 只需在计算过程中将实际工作波长带入公式(2)即可。

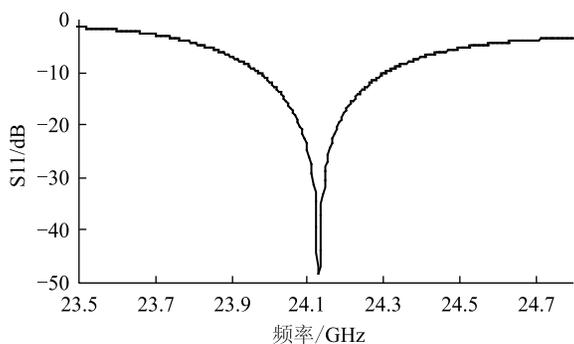


图4 微波传感器端口反射系数(S11)幅值频率曲线

图5为利用此微波传感器模拟发动机叶尖间隙测试的计算模型, 模型中传感器探头回缩在模拟机匣中, 探头前端面与机匣内壁之间相距0.5 mm。为了简化计算模型, 设置模拟叶片叶尖端面为矩形。由于传感器探头微波辐射方向为线极化, 因此在传感器安装时要求被测叶片叶尖端面长边方向与探头极化方向一致, 这样才能保证发射的微波信号最大程度的被叶尖端面反射。在计算模型中, 改变叶尖端面与模拟机匣内壁之间距离调节标准叶尖间隙值。由于传感器工作频点为24.128 GHz, 为了避免相位模糊, 选择校准范围小于工作频率的半波长6.21 mm, 取校准范围为0~6 mm。

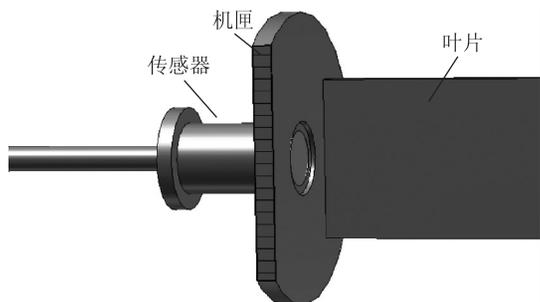
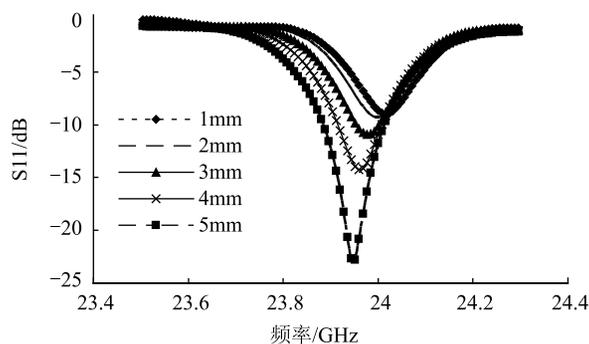


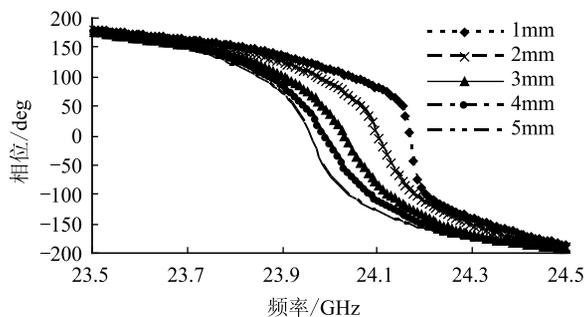
图5 模拟叶尖间隙测试计算模型

针对图5中的计算模型, 在0~6 mm范围内改变标准间隙值, 计算得到不同间隙距离下电缆端口反射系数(S11)幅值和相位随频率变化曲线分别见图6(a)和6(b)所示。由图6(a)可见, 随着间隙距离的增大, 反射系数幅值明显减小。这是因为传感器探头发出的

微波信号在自由空间中开始衰减, 间隙距离越大, 衰减越大, 传输到达叶尖端面的微波信号能量越小, 因此反射回传感器的微波能量也越小, 使得反射系数幅值明显降低。由图6(b)可见, 在传感器工作频率点周围, 随着间隙距离的增大, 传感器端口反射系数相位明显降低。而在远离工作频点的频段, 相位随间隙距离增大的变化不明显。这是因为只有在传感器工作频点周围, 才有微波信号顺利通过探头向叶尖辐射, 使得反射系数相位随间隙距离改变, 而在远离工作频点的频段, 微波信号还没有穿过传感器探头, 就已经在电缆与探头连接处被反射回来, 因此不受间隙距离变化的影响。此结果正好与图4中计算结果相对应。同时可见, 在工作频点附近, 传感器测量相位随叶尖间隙变化明显, 符合理论设计, 证明此传感器可用于发动机叶尖间隙距离的测量。



(a) 幅值变化曲线



(b) 相位变化曲线

图6 不同间隙距离下传感器电缆端口反射系数幅值和相位随频率变化曲线

图7为通过模拟计算得到的工作频点24.128 GHz处, 微波传感器的校准曲线, 其中纵坐标为传感器的测量距离, 由传感器直接测量的相位差值带入公式(2)计算得到。从图中可见, 传感器测量值随标准间隙距离的增大而增大, 校准曲线单调增大, 与理论分析一致。整条曲线可以拟合为一个三次多项式。在0~6 mm的校准范围内, 测量距离值从0.293 mm增大到5.037

mm, 相对变化 4.744 mm, 表现了很好的分辨力。其中测量距离小于标准距离的原因主要是空间滤波效应, 其次还由于叶片很薄, 不能全部反射传感器发射的微波信号, 漏掉了部分能量。进一步观察可见, 在小间隙位置, 传感器测量值的变化略平缓, 这是因为传感器探头天线存在感应近场和辐射近场, 在距端口近的小间隙位置为感应近场, 其特点为电场分布受到被测叶片形状和位置的影响, 使得反射信号能量减弱。

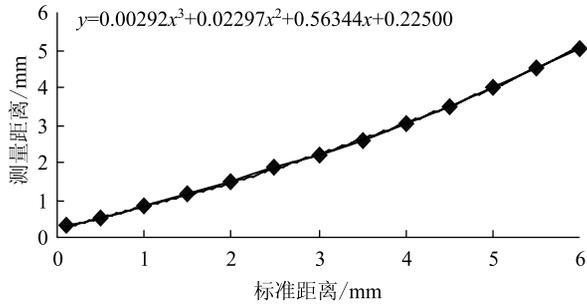


图7 微波传感器校准曲线

传感器在环境温度升高时, 受到材料的热膨胀和材料性能在高温下改变的影响, 使得微波信号的传输状态发生改变, 影响传感器的叶尖间隙测试性能。高温下传感器中介质电性能的改变是影响传感器的叶尖间隙测试性能的最主要因素。因此在计算模型中, 改变介质的介电常数值, 模拟传感器环境温度的改变。图8为传感器模型的最终耐高温性能计算结果, 为反射系数幅值频率曲线随介质介电常数改变的变化情况。其中介电常数以 0.5 为步长左右改变 1。

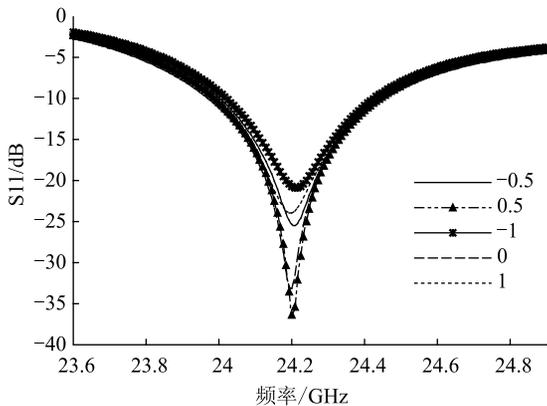


图8 传感器模拟环境温度升高时的端口反射系数幅值频率曲线

图8中可见, 随着介电常数的偏移, 反射系数幅值最低峰值逐渐增大, 这是因为偏移介电常数后的传感器探头偏离了原来的谐振条件, 增大了微波信号的衰减。同时可见, 在整个温度变化过程中, 曲线最低峰值始终保持在 20 dB 以下, 说明传感器在高温下依然保持很好的微波传输性能, 进行叶尖间隙距离的测试。

3 结论

本文建立了一种工作在 24 GHz 左右的基于微波相位法的谐振腔结构微波传感器模型, 用于航空发动机的叶尖间隙测试。利用 CST-MWS 建立了微波传感器模型, 并完成了相应的优化计算。模拟计算并分析了利用传感器进行发动机叶尖间隙测试的能力, 和高温环境下传感器性能的改变。结果显示: 此微波传感器能够承受航空发动机中的高温环境, 实现 0~6 mm 范围内的高精度叶尖间隙测试。

参考文献

- [1] Wiseman M W, Guo T H. An investigation of life extending control techniques for gas turbine engines [C]. American Control Conference, Arlington, 2001.
- [2] Goel N, Kumar A, Narasimhan V, et al. Health risk assessment and prognosis of gas turbine blades by simulation and statistical methods [C]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2008.
- [3] Lattime S B, Steinetz B M. Turbine engine clearance control systems: Current practices and future directions [C]. 38th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, 2002.
- [4] 毕思明. 燃气轮机叶尖间隙测量技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [5] 曹素芝. 发动机叶片叶尖间隙非接触检测技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [6] Huang M, Yang J, Wang J. Microwave sensor for measuring the properties of a liquid drop [J]. Measurement Science and Technology, 2007(5): 1934-1940.
- [7] Wenger J, Noweck M, Stotz M. An Mmic-based microwave sensor for accurate clearance measurements in aircraft engines [C]. 27th Microwave Conference, European, 1997: 1122-1126.
- [8] 李宗谦, 余京兆, 高葆新. 微波工程基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.