

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.06.09

微波间隙测量系统研究

吴娅辉, 谢兴娟, 孙浩琳

(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: 针对航空发动机恶劣的现场测试环境, 分析了基于微波法进行间隙测量的优点, 并描述了微波间隙测试系统的组成和采用微波相位法进行间隙测量的原理, 最后, 通过对微波叶尖间隙测量系统进行的实验验证, 证实了测量系统的有效性, 同时分析了测量中的主要影响因素, 有助于航空发动机实际测试的应用。

关键词: 微波; 间隙测量; 相位法; 航空发动机; 动态测试

中图分类号: TB92; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)06-0037-03

Research on Measurement System for Blade Tip Clearance Based on Microwave

WU Yahui, XIE Xingjuan, SUN Haolin

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

Abstract: In the context of the harsh measurement conditions of aeroengine, this thesis analyzes the advantage of microwave sensors for the blade tip clearance measurement, and the basic structure of the blade tip clearance measurement system based on microwave is described followed by its principle of the measurement. Finally, the effectiveness of the system is proved on the dynamic experimental system, and the main influence causes are analyzed in detail. It can help the practicality application on the aeroengine test.

Key words: microwave; blade tip clearance; phase; aeroengine; dynamic measurement

0 引言

随着新一代战斗机配套动力装备的发展, 现代飞机对高机动性飞行要求不断提高, 高推重比已成为航空推进系统主要的发展方向, 相应地对压气机和涡轮的设计也提出了更高的效率以及更宽的工作稳定度的要求。叶尖间隙是影响航空发动机性能的重要参数之一, 间隙的大小对于压气机和涡轮的效率有很大的影响。发动机在正常工作状态下, 为了使压气机叶片与机匣间不发生碰撞, 在转子叶片和外机匣之间通常会留有一定间隙。间隙距离增大, 转子运转的安全性会相应提高, 但是大的间隙容易造成叶尖泄漏, 发动机部件的效率会随着气体损失的增大而下降。英国 Rolls-Royce 公司对涡轮发动机间隙系统的研究表明, 叶尖间隙每增加叶片长度的 1%, 发动机的效率约降低 1.5%, 耗油率约增加 3%^[1]; GE 公司对 CF5-50 发动机的研究发现, 叶尖间隙对耗油率的影响约占叶型与间隙密

封总损失的 67%^[2]。减小发动机转子部件的间隙, 可以降低工作介质的泄漏造成的效率损失, 提高发动机工作的气动稳定性, 进一步提高发动机的性能和推重比。虽然降低叶尖间隙可以提高发动机性能, 但叶尖间隙过小, 会导致叶尖与机匣发生碰摩的可能性增大, 影响发动机的安全运转。因此, 通过合理手段将叶尖间隙控制在合适的范围内, 对提高发动机性能、保证飞行安全具有非常重要的研究意义。

航空发动机工作在高温、高压、高转速等恶劣的条件下, 各部件所承受的温度、受力和变形等情况也不相同。同时由于转子和静子之间相对复杂的运动情况, 其运转过程中的叶尖间隙是动态变化的, 特别是过渡态时更为复杂。总的来说, 各种载荷、温度以及过渡状态转速的变化是影响发动机叶尖间隙变化的主要原因, 其中, 温度和过渡状态转速的变化对叶尖间隙的影响最为明显。但是由于实际工作环境的复杂性, 叶尖间隙的大小靠理论方法准确计算还有一定的困难, 因此必须在试验中进行实时监控测量^[3-4]。

半个多世纪以来, 为了达到测试间隙从而控制间隙的目的, 国外航空发动机公司和研究机构不断开发、

收稿日期: 2016-10-10

作者简介: 吴娅辉(1980-), 女, 河北邯郸人, 高级工程师, 博士, 研究方向为微波间隙测量技术。

完善不同的叶尖间隙测试技术和测试手段,在发动机叶尖间隙测试和应用上积累了大量经验。目前,国外常用的间隙测量方法主要有电容法、电涡流法、光学法和微波法等。其中,基于微波法的间隙测量传感器在测试时只有传感器前端的耐高温陶瓷材料暴露在燃气通道中,最高可耐温度达到 1100℃。微波传感器凭借其独特的环境特性、优越的电气性能及较高的测量分辨力,测试中能够承受一级高压涡轮的高温,不受火焰、气体及气流的影响;适用于机载设备,可用于叶尖间隙主动控制环节等优势,在实际测试中得到了越来越广泛的应用。该方法相对传统的叶尖间隙测量方式,具有突出的优点^[5-6]。

1 微波间隙测量系统组成

基于微波法的叶尖间隙测试系统主要由微波探头、测量电路系统及间隙信号软件监测系统三大部分组成,其系统结构如图 1 所示。

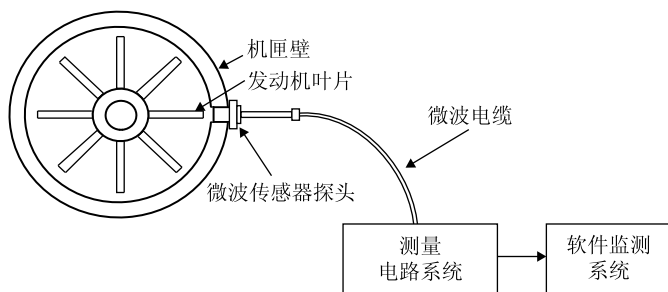


图 1 微波法叶尖间隙测量系统结构图

微波探头主要用于发射和接收微波信号。发动机工作时,微波探头发出连续微波信号,当叶片经过时,将微波信号反射回来,回波信号通过探头和微波电缆送入后端的测量电路系统中。测量电路系统主要包括微波信号收发设备和用于回波信号处理的硬件电路和回波信号处理等部分。微波信号收发设备主要用于将能量传输到微波天线并且接收叶片返回的能量信息,接收设备为零差接收机。回波信号处理部分主要用于回波信号的滤波、整形、放大和处理,通过 AD 转换器将模拟信号转换为数字信号,并采用数据处理算法从复杂回波信号中进行间隙信号的提取,可以由微处理器或者 DSP 来实现。数字信号被处理后,最终通过以太网等连接方式与后端的计算机进行通讯,测试数据通过计算机接口最终传送至外设输出。在外设中可以对接信号进行下一步的分析,编制相应的间隙信号处理软件,结合发动机提供的转速信号对接信号进行定位,确定各叶片对应的间隙值,实现航空发动

机叶尖间隙的监控。

2 基于微波法的间隙测量原理

微波传感器与雷达测试系统的工作原理相似,其基本工作原理见图 2 所示。

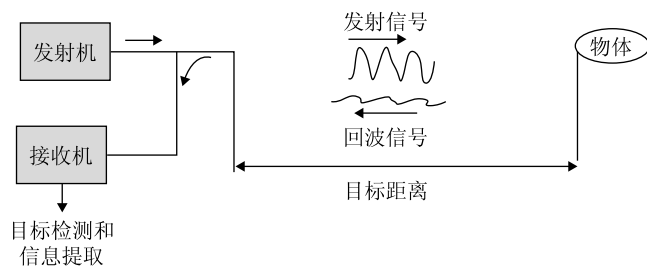


图 2 雷达测试基本原理

测量系统的发射机生成微波信号,通过天线辐射到被测目标上。辐射出的信号一部分发射到目标上,并向许多方向再辐射,再辐射的雷达信号会被天线接收形成回波信号,并通过一定的传输路径送回到接收机。在接收机中,回波信号被处理,从而检测目标的存在并且确定其具体位置。本系统所采用的微波测距原理区别于传统的雷达测距原理,它是基于相位差的原理,从而精确地测量短距离。

设微波发射机与目标的距离为 R ,则在微波达到目标并且返回天线的双向路径中,波长 λ 的总数为 $2R/\lambda$,每个波长对应 2π 的相位变化,双向传播路径的总相位 φ 的变化如式(1)所示。

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

如果叶尖相对于传感器运动, R 和 φ 都会随着时间发生变化。将内部参考信号作为基准信号,与回波信号混频,从而求解出相位。反射信号能量取决于雷达横截面积,同时随着相位的增大其能量幅值也相应地减小。回波信号可由一个矢量表示,随着矢量相位的增加,矢量幅值减小。

为了避免相位模糊的影响,测试距离要求小于微波工作频率的半波长范围,因此回波信号与参考信号的相位差可以推导出式(2)。

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{2R}{\lambda} \cdot 2\pi \quad \left(\frac{2R}{\lambda} < 1\right) \quad (2)$$

式中: φ_0 为内部参考信号的初相位,依赖于传感器本身。由式(2)可推导出距离 R 的计算式(3)。

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2\pi} \right) \lambda \quad (3)$$

根据式(3)可知,在实际测试中,只要选定微波工

作频率,参考信号的初相位和波长已知,则根据电路采集信息计算回波信号与参考信号的相位差,即可求出测量距离 R 。

3 微波间隙测量实验

3.1 测试系统搭建

按图 3 所示,将按要求设计加工的叶盘安装在实验台电机中轴上,传感器探头安装于模拟机匣壁的孔中,通过调整传感器安装座调节探头在机匣壁中的回缩值。为了保证动态测试条件下叶片的有效区分,在转盘上设置标记叶片。调整位移平台,使传感器探头正对于测试叶片中心,微调三维齿轮齿条平移装置,使得叶尖端与机匣壁表面紧贴,默认为零间隙值,标准间隙由电动位移台给出。微波叶尖间隙传感器电缆端口接矢量网络分析仪用于相位的测量,然后将位移机构控制器、电源模块、计算机连接起来,完成系统搭建。

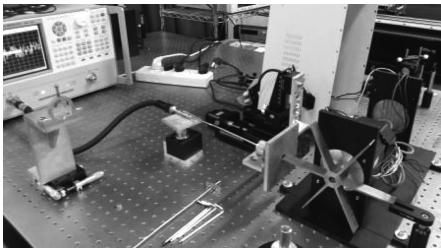


图 3 微波叶尖间隙传感器测试实验台

实验所用微波传感器如图 4 所示。

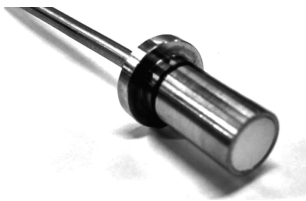


图 4 微波传感器实物图

3.2 实验分析

3.2.1 微波传感器的动态校准

设置电机转速 200 rpm,控制电动位移台改变标准叶尖间隙距离,在 0.5~6 mm 范围内每间隔 0.5 mm 取 1 个点,共取 12 个点作为校准点,针对标记叶片进行微波传感器的动态校准试验,得到的校准曲线如图 5 所示。

3.2.2 传感器的动态测试

在不同间隙条件下分别测试各叶片对应的相位大小,下图给出以 3 mm 为例条件下的动态测试结果,图中“*”位置为通过软件算法得到的叶尖位置。

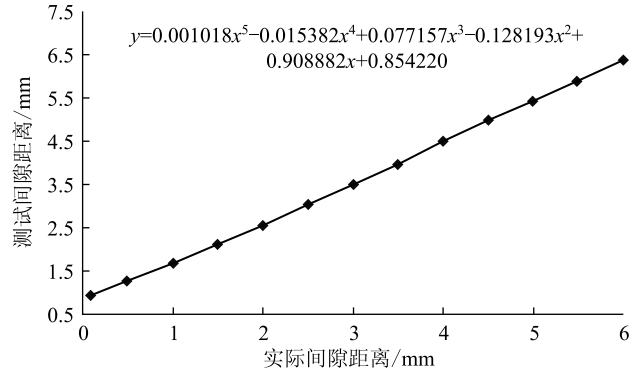


图 5 微波传感器针对标记叶片校准曲线

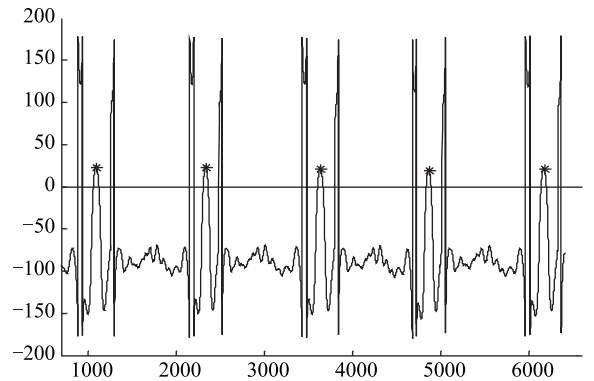


图 6 标准间隙 3mm 下的动态测试相位波形图

对不同标准间隙值下的测试波形进行处理,将得到六个叶片对应相位值,再利用微波传感器的动态校准结果,即可得到对叶盘上的所有的六个叶片的实际测试间隙值,表 1 给出了标记叶片对应的测量结果。

表 1 传感器测试数据

距离值	测量值	测量偏差
0.5	0.518	0.018
1	0.984	0.016
1.5	1.487	0.013
2	2.006	0.006
2.5	2.508	0.008
3	2.993	0.007
3.5	3.496	0.004
4	3.994	0.006
4.5	4.503	0.003
5	5.002	0.002
5.5	5.498	0.002
6	6.002	0.002

通过表 1 的数据分析结果可见,在不同的间隙条件下,针对同一测量叶片,测量的最大偏差为 0.018 mm。其中误差主要来源于三个方面:

(下转第 42 页)

式(2), 硬度值和试验力存在换算关系, 最后计算出所对应的试验力示值误差。试验力校准结果数据统计情况示例如表1所示。

表1 试验力校准数据统计表示例

校准点 /HA	试验力 标称值 /mN	测量值/mN			平均值 /mN	试验力 重复性 /mN	试验力 示值误 差/mN
		1	2	3			
10	1300	1330	1345	1350	1342	20	-42
20	2050	2060	2075	2080	2072	20	-22
40	3550	3570	3580	3596	3582	26	-32
60	5050	5078	5090	5093	5087	15	-37
80	6550	6580	6595	6598	6591	18	-41
100	8050	8085	8090	8100	8092	15	-42

4 试验结果分析

根据 ASTM D2240-2015 技术规范, 结合对邵氏硬度计校准试验力的高要求以及利用校准新方法对多台邵氏硬度计试验力校准的试验数据分析, 邵氏硬度计试验力的校准新方法满足 ASTM D2240-2015 技术规范

(上接第39页)

1) 传感器自身方面: 由于微波传感器存在空间滤波效应, 传感器实际处理微波信号为此端口圆面上各点接收微波信号矢量和。这是由传感器自身结构和原理决定的, 不能消除, 只能通过对传感器的校准消除其对实际测试产生影响。此外, 由于实际加工传感器样件与理论设计误差的存在, 会造成一定的内部微波信号反射, 此反射信号与传感器接收叶尖反射信号一起进入后续处理电路, 影响相位的测量精度。

2) 位移台自身精度: 实际校准过程中, 微波传感器和模拟机匣壁安装在电动位移台上, 通过控制位移台的移动, 改变叶尖间隙的距离, 提供叶尖间隙标准值。同时在校准过程中, 位移台控制叶尖间隙在量程范围内反复移动多次。位移台的精度直接影响标准值的精确程度, 这种误差同样也会进入到传感器的校准和测试过程中。

3) 数据处理引起的误差: 此部分误差包括信号采集数据处理过程带来的误差, 以及校准曲线的拟合计算误差。

4 结论

总的来说, 基于微波的间隙测量传感器具有耐高温、精度高、体积小等优点, 因此非常适合用于发动

中规定的各校准点最大允许误差 ± 75 mN的要求, 试验结果较理想。

5 结论

本文对邵氏硬度计试验力校准技术新方法进行了研究, 阐述了校准新方法的测量原理, 并根据测量原理设计出校准过程示意图。校准技术新方法和以往传统试验力校准方法不同, 加载机构更加稳定, 加载控制更加准确, 有效提高了试验力校准的准确度, 确保邵氏硬度计试验力参数的准确性和可靠性, 为橡胶产品的质量提供了有力的计量保障。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 304-2003 A 型邵氏硬度计[S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.
- [2] The American association of test materials. ASTM D2240-15 Standard Test Methods for Rubber Property - Durometer Hardness [S]. 2015.
- [3] 国防科工委科技与质量司组织编写. 力学计量(上册)[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.

机现场的间隙测量, 可以为发动机的测试提供准确的数据。通过有效检测并控制发动机叶尖间隙, 一方面可以验证发动机设计, 为改进优化提供数据依据, 达到全飞行包线的最佳叶尖间隙设计目标; 另一方面, 可以对发动机叶尖间隙工作状态进行实时监测, 对可能出现的故障进行分析并及时发出警告, 保证航空发动机的飞行安全。但目前微波间隙测量系统的研究在我国还处于起步阶段, 在校准和测试的过程中还有许多地方需要进一步完善, 这些都将在后续的工作中继续开展研究。

参考文献

- [1] 黄春峰, 侯敏杰. 航空发动机叶尖间隙测量技术研究[J]. 测控技术, 2008, 27: 27-32, 39.
- [2] 张娜, 黄春峰. 航空发动机叶尖间隙测量技术[J]. 航空制造技术, 2010(13): 41-45.
- [3] 邱立新, 王振华. 航空发动机叶尖间隙测量研究[J]. 航空发动机, 2001(4): 26-29.
- [4] 马玉真. 旋转叶片叶尖间隙测量的关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [5] Thomas Arthur Holst. Analysis of Spatial Filtering in Phase-based Microwave Measurements of Turbine Blade Tips [M]. Georgia Institute of Technology, 2005.
- [6] Mark R Woike, James W Roeder, Christopher E, etc. Testing of a Microwave Blade Tip Clearance Sensor at the NASA Glenn Research Center[J]. AIAA, 2009.