

转、静子径向间隙数字化检测技术研究

Research on Digital Detection Technology of Radial Clearance Between Rotor and Stator

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 史华勋 王志岭 宋扬
天津天士力(辽宁)制药有限责任公司 杨宁

[摘要] 随着航空发动机的不断发展,现有的间隙测量技术已经不能完全满足装配精度要求,测量技术亟待提升。利用电容式非接触测量原理研制出的同轴度检测设备,能够满足新型发动机对装配精度的要求。经试验验证,此种测量技术不仅达到了提高发动机装配过程中转、静子间隙检测精度的目的,还具有较强的适应性,可以推广到多种型号发动机上使用,为发动机数字化柔性装配奠定了基础。

关键词: 电容 叶尖间隙 检测技术 发动机

[ABSTRACT] With the continuous development of aeroengine, clearance measurement technology can't fully meet the requirements of assembly precision, so the measurement technology must be stepped up. The equipment of using capacitive measuring principle can meet the requirements of the aeroengine's assembly precision. Experiments show that the technology does not only improve the assembly precision, but also has strong adaptability. It can be extended to various types of aeroengine. Meanwhile it lays the foundation for digital flexible assembly.

Keywords: Capacitance Tip clearance Detection Aeroengine

发动机转、静子径向间隙对发动机的性能和结构安全有着重要影响。从19世纪60年代开始,随着燃气涡轮发动机的迅猛发展,发达国家就已经开展了对叶尖间隙变化规律的研究^[1]。

在国内,对某高压涡轮叶尖间隙进行检测统计,发现叶尖间隙每减小0.25mm,耗油率降低0.8%~1.0%,氢氧化物、CO、CO₂等有害气体的排放均减少^[2];马文生等人通过模拟计算得出间隙增大1%,效率会降低1.3%^[3];郭淑芬实测得到涡轮叶尖间隙每增加叶片长度的1%,效率会降低1.5%^[4];陈炳贻通过试验认为压气机转子叶尖间隙对发动机稳态性能和稳态裕度均有一定影响^[5]。由此可知,叶尖间隙过大会降低发动机性能;然而实践证明,间隙过小,将使叶尖与机匣产生碰磨,影

响发动机的整机振动和安全。

目前,国内航空发动机的转子叶尖径向间隙测量技术与国外发动机叶尖间隙测量技术有较大差距,仍沿袭二代发动机的工艺检测方法(如塞尺塞、压腊法、计算等),效率低下,不能满足新型发动机的装配精度要求。因此,研究新的测量方法,准确测量发动机转子叶尖径向间隙,缩短国内外技术差距,提升三代机装配质量,已经迫在眉睫。只有不断探索新原理、新技术,才能跟得上高性能发动机的研发^[6]。

1 数字化检测技术原理

虽然国内一些研究部门经过多年的探索,在对非接触叶片间隙测量方面已有了新突破,但在航空发动机叶尖间隙测量中的应用还不够理想。经过大量调研,截至目前为止,航空发动机叶尖间隙测量技术主要有放电探针(火花放电)法、涡电流法、激光光学法、电容法、射线法、微波法以及超声波法等^[1],它们都具有不同特点。而电容法作为一项实用的成熟叶尖间隙测量技术,在国外新型发动机上已得到广泛的应用^[7]。电容测量技术具有成本低、结构简单、灵敏度高、固有频率高、频带宽、动态响应性能好(能在数兆赫的频率下正常工作)、功率小、阻抗高等特点,完全能胜任发动机的压气机和涡轮叶尖间隙测量。

电容法是靠绝缘电极的机匣和转子叶尖之间形成的电容进行测量的,测得的电容是电极几何形状、两极间距离以及两极间介质的函数。若忽略边缘影响,测量电容与间隙的关系可以用下式表示(适用于在线测量,静态测量时传感器安装在转子叶片上原理相同):

$$C = \Delta \Delta_0 A/d,$$

式中, Δ 为电极间介质的相对介电常数; Δ_0 为真空中的介电常数; A 为电极面积; d 为电极间隔距离(间隙值)。

电容与位移的有效关系可通过试验确定。从上式可看出:假设 $\Delta_0=1$,则电容量 $C = \Delta A/d$,在一定的条件下,假设 A 固定不变为常数,即电容 C 与 d 为反比例关

系,是一个非线性量。

在实际测量中,传感器电极构成可变电容的一个极板,可变电容器的电容随着叶尖间隙变化。电容器的第二个极板是由转子叶尖或机匣构成,叶尖必须通过轴承、密封装置、齿轮系统与试验件壳体接地。传感器头部安装在直接对着待测间隙的转子叶片或机匣上。在传感器确定安装在机匣上的情况下,可忽略各叶片顶部尺寸形状的差异。假设传感器与叶尖间隙的气体的介电常数是个常量,传感器极板与叶尖间隙变化(机匣与叶尖的间隙)使电容发生变化。

据有关资料报道,目前国外常把电容法分为两类:调频式,主要用于压气机或涡轮与机匣的间隙测量;调幅式,主要用于连续变化的情况。调频式系统的工作原理是:叶尖与探头电极之间的间隙发生变化引起电容变化,进而引起震荡频率的改变,这一变化信号对原载波信号进行频率调整,调频后的信号由振荡器输出,通过电缆送到信号处理器,最后将间隙的变化变成阶梯信号输出。

电容法的主要特点:灵敏度高,固有频率高,频带宽,动态响应性能好(能在数兆赫的频率下正常工作),功率小,阻抗高等。它的精度受多方因素的影响,如测量时介质的介电常数的变化、环境干扰(磁场、电火花)、探头及机匣受热变形、校准误差等。绝缘是电容法的特殊问题,由于电容本身的内阻很高,因而对绝缘提出了更高的要求。另外,当材料性能不好时,其绝缘电阻将随温度和湿度变化,从而引起传感器输出产生缓慢的零位漂移的问题。

结合上述电容法测量技术的原理,本文以新型的发动机为依托,开发了一个测量系统,通过对选定部位的转静子间隙的测量,描绘出发动机转静子的同心度情况。

2 数字化检测技术研究方案

2.1 系统搭建方案

同轴度测量系统主要由距离传感器、同步传感器、数据采集模块、图像显示模块和虚拟装配模块 5 个部分构成。

该系统由计算机完成数据的融合,并通过软件实现图像显示,同时可以为虚拟装配提供数据。其测量技术指标包括:叶尖间隙测量范围为 0~3mm;叶尖间隙的测量误差范围为 0.05mm。

此系统中的高速数据采集部分是叶尖间隙测量的一个关键,系统必须满足以下功能要求:

(1)数据采集板具有实时高效性能,同时完成 AD 转换;

(2)具有多个数据通道,允许软件启动采集、软件复位。

其高速数据采集部分组成如下:

(1)距离传感器:测量叶尖间隙;

(2)同步传感器:用于检测转子的转动角度,并与距离传感器同步,实现误差方位的检测;

(3)图像显示系统:能够显示系统的同心度,并能够准确显示实时误差变化。

为满足上述技术指标,该测量系统选择了型号为 9001/C-P 的电容式距离传感器,其测量精度为 0.005mm,测量重复性范围为 0.01%,测量范围为 0~2mm,要求系统输出信号电压为 0~10V。

为实现数据的融合,从而通过软件实现图像显示功能,在 Labview 环境下开发了专用的传感器信息采集与

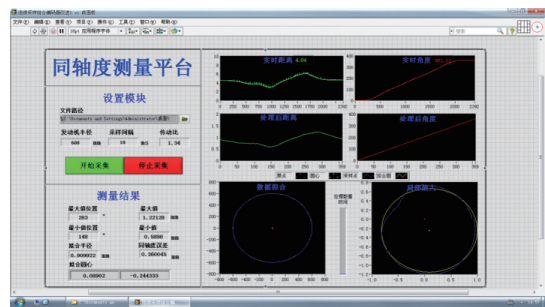


图1 数据采集软件及数据处理

Fig.1 Data acquisition software and data processing

电机驱动系统软件,实现了采集数据图像化,使得同心度误差能够图形化显示(图 1)。

2.2 系统标定检查方案

为解决传感器输出产生缓慢的零位漂移问题,该系统以高精度的螺旋测微器为基础建立了传感器标定平台,同时完成软件系统的自动标定(图 2)。

在电容式测量系统中

$$V = k_V \cdot C$$

其中, V 为输出电压; k_V 为电容和电压的系数比; C 为电容。

结合前述电容与间隙公式可得出:

$$V = k_V \cdot C = k_V \cdot \Delta \Delta_0 / d$$

由此推出,输出电压和叶尖间隙呈倒数关系。结合这一结论,将测量仪后部的接地线连接到千分尺,使传感器与千分表平面接触,将电压调整为 0;再将二者距离依次调为 0.01mm、0.02mm、0.05mm、0.10mm、0.50mm、1mm,电压相应调为 1V、0.5V、0.2V、100mV、20mV、10mV,反复调整;最后再从 0.01mm 向 1mm 调节,以 0.01mm 为增量,检查校准情况。这样就可通过电压读数直接反应间隙大小(图 2)。

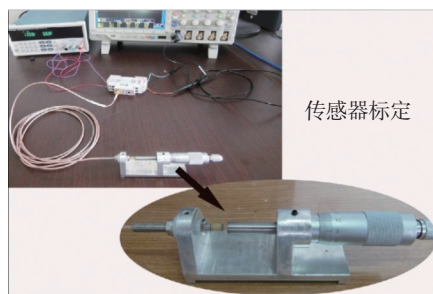


图2 标定设备
Fig.2 Calibration equipment

2.3 转静子同轴度检测及传感器安装方案

结合发动机自身结构特点,选择在发动机垂直状态下,利用电容式同轴度检测仪测量高压压气机5级和高压涡轮截面的同心度。

高压压气机5级截面同心度测量。将传感器从孔探孔装入,固定在高压5级叶片的叶尖处,将同轴电缆固定在高压5级前侧的凹槽内,顺时针缠绕1圈以上,然后安装高压上半机匣和定心夹具,保持垂直状态;进行高压5级同心度测量时,手动轻轻缓慢转动高压压气机转子,边转动边向外面拉传感器电缆。测量完成后,分解高压前机匣,清理高压压气机。期间,传感器固定安装1次,即测量1次。考虑到传感器的量程为0~2mm,而实际叶尖间隙为0~3mm,所以安装传感器时,要使其探出叶片1mm,以满足测量需要,此位置由固定传感器的夹具保证。

在完成高压涡轮传动装配后,测量叶片间隙。将传感器和同轴电缆从孔探仪孔穿入,用辅助固定用品安装到高涡叶片上,将同轴电缆沿圆周顺时针缠绕2.5圈以上,安装高涡定心夹具,保持垂直状态,测量高涡垂直状态同心度。重新安装同轴电缆,完成传动装配,直至涡轮后机匣安装完成。将发动机转至水平状态,测量同心度。测量完成后,分解至露出高涡转子,清理辅助用品。期间,传感器固定安装1次,测量2次。

3 数字化检测技术验证实例

此次测量,测得高压5级同心度误差约为0.089,拟合后的圆心为(-0.09,0.006),见图3。

此次测量,测得高涡同心度误差约为0.083,拟合后的圆心为(-0.08,0.007),见图4。

4 结论

经过实际应用得出,此种数字化检测技术检测精度能够达到0.01mm,能够实现全圆周360°不间断检查,单台份节约检测时间约6h,大大降低了劳动强度,提高了生产效率和测量准确性。

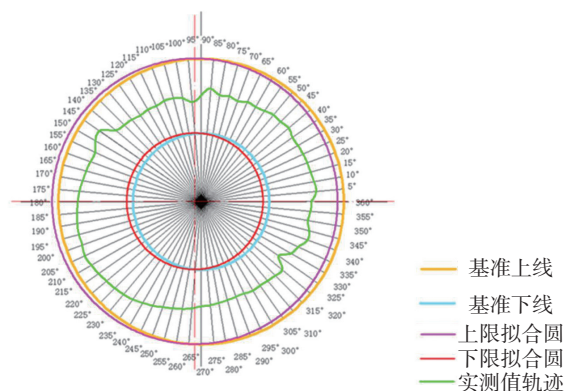


图3 发动机高压5级同心度
Fig.3 Concentricity of 5 stage high pressure

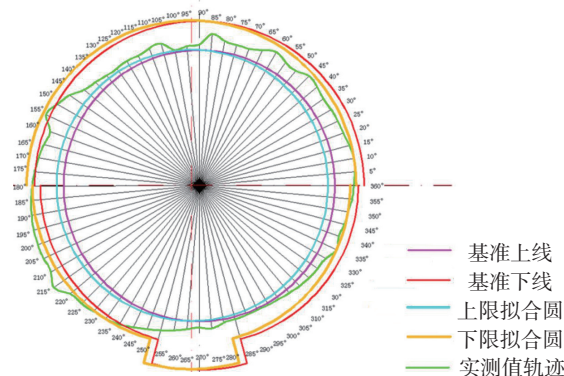


图4 发动机高涡同心度
Fig.4 Concentricity of turbine

该测试技术能够满足装配空间狭小、避免二次分解、安装便捷的要求,降低了叶片碰磨故障率,大大改善了传统测量方法效率低下、精度不高、测量方法落后的现状。该技术适应性较强,能推广到各个型号发动机的装配过程中,为发动机数字化柔性装配技术研究奠定了坚实的基础。

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.测控技术,2008,27:27-39.
- [2] 胡延清,申秀丽.航空发动机叶尖径向间隙研究进展综述.航空发动机,2014,40(1):60-67.
- [3] 马文生,顾春伟.叶顶间隙对压气机性能的影响.动力工程,2007,27(6):864-867.
- [4] 郭淑芬,徐波.涡轮叶尖径向主动间隙控制研究.航空发动机,2006,26(2):48-50.
- [5] 陈炳焰.叶尖间隙对航空发动机性能的影响和测量技术.燃气涡轮试验与研究,1996(2):40-42.
- [6] 黄春峰.21世纪新概念发动机.航空制造技术,2007(4):26-35.
- [7] 魏之平.正负阶次多项式拟合在电容式叶尖间隙测量系统中的应用.燃气涡轮试验与研究,2012,25(12):17-20.

(责编 谷雨)