

航空发动机叶尖间隙测量技术

Measuring Technology of Blade Tip Clearance of Aeroengine

中国燃气涡轮研究院 张 娜 黄春峰



张 娜

工程师,现从事航空发动机情报和翻译工作,研究方向为国外发动机预研、试验与制造技术跟踪研究。

现代航空发动机的发展已达到很高的技术水平,先进的气动设计与试验方法使发动机的压气机和涡轮效率达到90%以上,要想进一步提高压气机和涡轮效率,除注重气流参数选择外,还应精心设计低损失叶片和减少流道中的端壁损失。实践证明,叶尖间隙(Tip Clearance, TC)损失是通道端壁损失和压气机喘振裕度损失的重要组成部分。这种损失是由动叶和机匣间的间隙造成的。虽然可用计算机模型来预测压气机和涡轮的叶尖间隙,但这种预测必须由试验数据来验证和细调。所以,在

虽然可用计算机模型来预测压气机和涡轮的叶尖间隙,但这种预测必须由试验数据来验证和细调。所以,在一台航空发动机的研制过程中,叶尖间隙是一个基本的测量参数,同时也是发动机在运转过程中主动叶尖间隙控制、健康管理和故障诊断的一个重要组成部分。

一台航空发动机的研制过程中,叶尖间隙是一个基本的测量参数,同时也是发动机在运转过程中主动叶尖间隙控制、健康管理和故障诊断的一个重要组成部分。

在现代航空燃气涡轮发动机中,叶尖间隙对压气机与涡轮效率有很大影响,尤其对高压压气机的后几级和高压涡轮的影响更为显著。英国R·R公司对现代燃气涡轮发动机研究表明,叶尖间隙每增加叶片长度的1%,效率约降低1.5%;而效率每降低1%,耗油率约增加2%。据GE公司对CF5-50发动机的分析,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%,因此,在设计中应尽量减少叶尖间隙。但叶尖间隙也不能过小,因为过小的间隙,有可能危及发动机的安全。因此,必须严格而精确地控制叶尖间隙和测量叶尖间隙,使发动机处于最佳运行状态。

目前,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、X-射线法、微波法以及超声波法等方法。

放电探针叶尖间隙测量

放电探针法也叫火花放电法,是基于火花放电原理的叶尖间隙测量系统。英国ROTADATA公司制造的Rotatip叶尖间隙测量系统主要由探针、传感器、传动装置、探针器和计算机等部件组成。其主要技术参数为:测量分辨率0.01mm,可重复性 $\pm 0.05\text{mm}$,最大工作转速5000r/min。其间隙测量系统在探针上施加高压,在执行机构的驱动下,以连续的步进逐渐伸向被测物体,当探针距被测物体只有微米量级时,发生电弧放电,控制器感受到放电后,在探针与叶尖物理接触之前,停止探针步进,并将其缩回到安全位置,同时显示叶

尖间隙测量结果。它只适用于温度 600℃ 以下、转速在 6000r/min 以上的情况,而且探针容易受到异物及油的污染而受到阻塞。由于它是接触式测量,一旦发动机紧急停车,探针缩回不到安全位置,就容易发生故障。

放电探针法的特点是原理比较简单,只要叶片是导电材料,无论叶尖端面形状如何都可以用探针法测量叶尖间隙,并且在高温高压环境下测量稳定、可靠,测量精度高,不需重复校正,可用于校准其他测量法的基准数据,是目前国外测量叶尖间隙最成熟的方法之一。但该方法只能测量转子的最小叶尖间隙,由于电压波动,工作流体的温度和压力变化,探针和叶尖端面的污损,都会改变放电的起始距离,因而会产生测量误差。探针进退的机械执行机构比较复杂,装置的操纵也必须熟练。探针法不适于作为固定设备装在定型的发动机上,适用于试验研究,可以测量各稳态状态下最长叶片与机匣的间隙值,也可用作校准其他测量方法的基准。

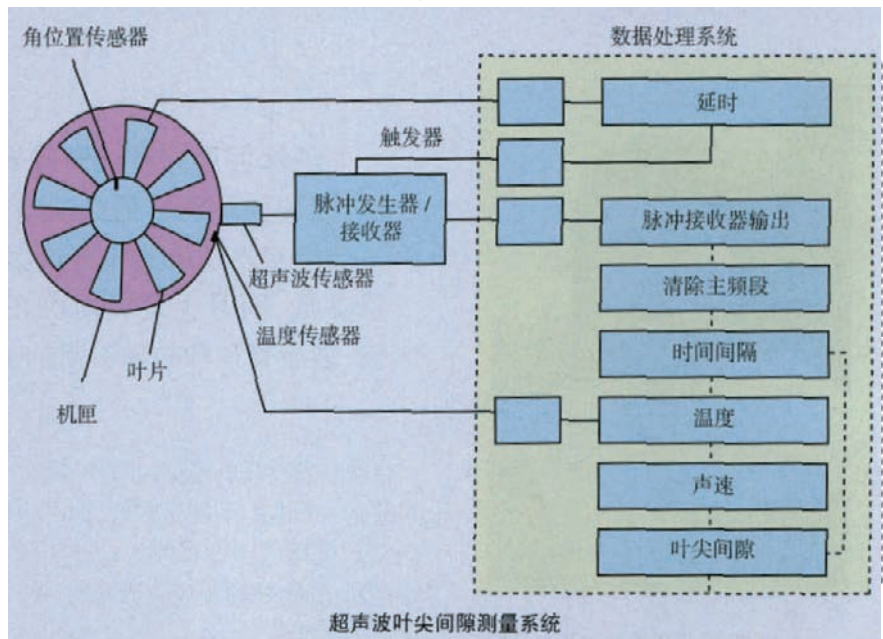
美国在一项以高压燃烧室和高压涡轮为试验目的的高温涡轮发展装置(High Temperature Turbine Developing Unit, HTTDU)试验中,采用放电探针法。在试验中,涡轮进口温度最高达到 1400℃,试验结果令人满意。据 Shear 报道,这种方法的总测量精度可达 $\pm 0.025\text{mm}$ 。

涡电流叶尖间隙测量

美国、英国和俄罗斯科学家都在致力于涡电流叶尖间隙测量研究,这是一种很有发展前途的测量方法。涡电流法是采用金属切割磁力线产生磁场变化的方法,涡电流测量叶尖间隙测量装置主要由探头和检测电路两部分构成,检测电路由振荡器、检波器及放大器等组成。在测量装置上的金属板(相当于转子叶片叶尖)上隔一定距离设置线圈,接通交

流电时,线圈产生磁束,金属板受此磁束感应产生环形电流。此电流在线圈上产生反方向磁束,最后使线圈的电抗变化。此变化量由电桥电路检出,经放大和整流后输出。

这种传感器的特点为体积小,重量轻,结构简单,不必做复杂的调整;频率响应范围宽,灵敏度高,测量范围大,抗干扰能力强。此方法受叶片材料的影响较大,叶尖端面还需要有一定的厚度。由于传感器输出是随着叶尖形状、安装状态和环境温度等



变化而变化的,因此事先需要校准,以使其适合使用环境。此外,传感器的耐热性能较差(400℃左右),目前用于涡轮高温部件尚有困难;而且由于探头直径大于 25mm,机匣开孔尺寸过大,不便安装。未来的研究方向应是着力解决小尺寸,无需冷却的探头在高温环境(>400℃)下工作的可靠性问题,研究用于涡轮等高温部件的可能性。

美国 NASA 刘易斯研究中心(LeRC)研究出的涡电流叶尖间隙测量装置,已在气动涡轮旋转试验机上进行了试验。为了在全部 114 片转子叶片当中便于比较测量值,在 10 片叶片的叶尖上焊有厚度为 0.3mm 的钢板。

X-射线叶尖间隙测量

国外科学家在载荷模拟试验器上采用 X-射线装置测量叶尖间隙。它能够观察机匣或部件的变形和位移,能够精确测量发动机承受 21g 过载时内部部件的间隙。X-射线叶尖间隙测量系统主要包括:高能量、高密度的 X 射线源;与 X 射线源相连接的高速、高分辨率的探测器;精确确定 X 射线源、探测器相对于发动机的周向和纵向位置的定位装置。

X-射线叶尖间隙测量法可用于测量萼齿封严的轴向和径向间隙,无叶冠叶片径向间隙,转子和静子间轴向间隙以及由机械和热应力引起的部件变形量。

X-射线叶尖间隙测量系统中校准 X-射线源相对探测器的位置较难、系统较昂贵,且 X-射线需要处理等问题还没得到很好的解决,这影响了其在发动机测试中的应用。

超声波叶尖间隙测量

日本国立航空航天实验室的 T.Tagashira 等人报道了使用超声波传感器来测量叶尖间隙的方法。超声波叶尖间隙测量系统主要由 4 部分组成:超声波传感器、脉冲发生器

/接收器、角位置传感器和数据处理系统。

超声波叶尖间隙测量法的原理可简述为：被传感器激励的超声波通过叶尖间隙空间并在叶尖被反射回来，传回的声波被传感器接收到，经过处理传感器输出数据可得到激励和接收信号之间的时间间隔，再依据一定的关系式便可得出叶尖间隙。

超声波叶尖间隙测量系统能直接测量叶尖间隙，并有许多优点：它适应于金属和非金属叶片，允许不接触测量，且能在恶劣环境下工作，安装使用方便。

应用超声波叶尖间隙测量法测试后发现：单超声波传感器间隙测量系统能引起主频段问题和最小可测间隙问题，但可通过使用双超声波传感器系统来避免。要实现双超声波传感器系统，则需要一个恰当的双传感器和其安装的设计。如果在轴上确定角位置的标记分布恰当，那么就可以实现每两转测量所有叶片的叶尖间隙。

该测量系统瞄准用于叶尖间隙主动控制的动态间隙测量，还可用于转子轴向位移的测量和穿过薄壁通道平均流速的测量。用它测量旋转叶片叶尖间隙的精度在 $\pm 0.05\text{mm}$ 之内。可以确定的是，对于燃气涡轮发动机的直接测量来说，超声波法是一种很有前途的技术。

微波叶尖间隙测量

美国 Richard Grzybowski 等人详细介绍了用于燃气涡轮的微波叶尖间隙测量系统。该系统能用作燃气涡轮发动机的叶尖间隙测量、密封装置磨损测量以及主动叶尖间隙控制。微波测量方法的优点有：

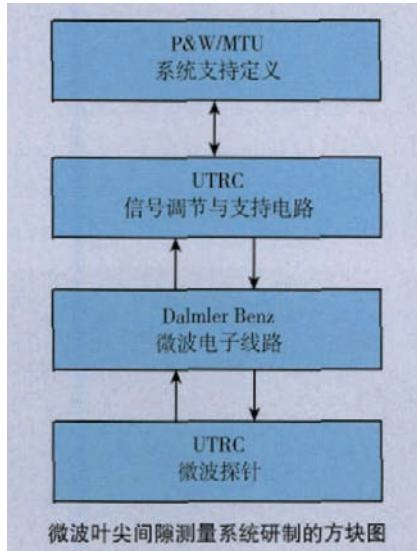
(1) 传感器具有内在自校功能，不管温度变化和旋转叶片引起的磨损情况如何，它都能准确工作；

(2) 与基于相位测量的方法不一致，这种新方法不受电缆振动及长

度变化的影响；

(3) 它不受燃油及其他发动机污染的影响，因为微波技术是基于共振频率测量原理，只有污染造成的适度损失值对它有影响。

微波叶尖间隙测量系统配置方块图见下图。正如下图所示，该系统



是由信号调节、支持电路、微波电子线路和微波探针组成的。微波探针是最重要的部件。它主要由 3 部分组成：(1) 微波谐振器，为实际的间隙传感器；(2) 一截双脊波导管，它的一端装有一对模片耦合器，并贴在空腔谐振器上；(3) 在空腔谐振器对应端面上的一对共轴波导转换管。

微波叶尖间隙测量系统技术的重点，是一个在以 TE₀₁₁ 方式下激励的装满介质的圆柱形微波空腔谐振器为基础的探针。叶尖感应信号是通过叶尖离开空腔谐振器环路开口一端，且空腔谐振器正在传输工作时获得的，即只有在谐振时，信号从输入传向输出。接近空腔谐振器暴露端的涡轮叶片，在出现或离开时影响的正是这个谐振频率。在空腔谐振器前面没有叶尖时，产生最低的频率谐振；当叶尖正中对空腔谐振器前面时，将产生最高的频率谐振。根据最高谐振频率和最低谐振频率的差值，就可得到叶尖和发动机密封件间的间隙。探针中的传感器具有

约为 24GHz 的高频率谐振。该系统在测试时只有陶瓷材料直接暴露在燃气通道中，在有效运行时，设计温度可超过 1093 °F。

在微波叶尖间隙测量系统的研究中，MTU 和 P&W 公司提供了燃气涡轮发动机方面的重要经验，Daimler Benz 研究中心负责砷化镓微波集成电路的开发，UTRC（联合技术研究中心）主要承担微波探针的研制工作。

电容叶尖间隙测量

电容法是一项实用的成熟叶尖间隙测量技术，现已广泛地用于燃气涡轮发动机叶尖间隙的测量。虽然商用的叶尖间隙测量系统可用，但它对发动机的适用性要由发动机的尺寸、几何形状、物理上的可达性以及测量区域周围的温度分布来决定。特别是当要测量旋转盘件上每一叶片的半径时，放电探针就显得不大适用；采用激光光学测量系统虽然可以测量单独叶片叶尖间隙，但系统庞大易损坏，而电容叶尖间隙测量法则无此弊端。

基于探头和叶尖之间电容频率 (FM) 测量原理工作 (如 ROTACAP) 的叶尖间隙测量系统，由电容探头 / 电缆组件、振荡器 / 防护放大器、解调器、控制系统 (线性化器、叶片分析单元和微机采集器) 等部件组成，主要功能是：

(1) 探头 / 电缆组件必须采用特殊设计，以消除高达 300PF 的电缆电容的影响。为此采用了防护放大器，使电缆的内屏蔽与导体缆芯之间处于等电位；

(2) 振荡器是将探头叶尖电容转换成频率用的；

(3) 解调器能将振荡频率的变化转换成电压的变化 (F/V, 阶梯信号)；

(4) 线性化器存有校准数据，可将电压的变化转换成以工程单位表

示的经平均化处理的线性的叶尖间隙信号;

(5)速度计模块提供 1/Rev (每转一个)脉冲用于同步触发与动态叶尖间隙数据的分析;

(6)PC 机对数据进行相应的换算、显示和存盘等处理工作。

将探头插入发动机机匣相对叶尖形成电容的一个极板,叶尖则为另一极板。其电容量大小为两极板几何尺寸、距离、介质(材料)的函数。如果极板尺寸和材料保持不变,则电容值仅为两极板间距离(即叶尖间隙)的函数。测量电容与间隙的关系可以用下式表示:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 A/d,$$

式中, ε 为电极间介质的相对介电常数; ε_0 为真空中的介电常数; A 为电极面积; d 为电极间隔。

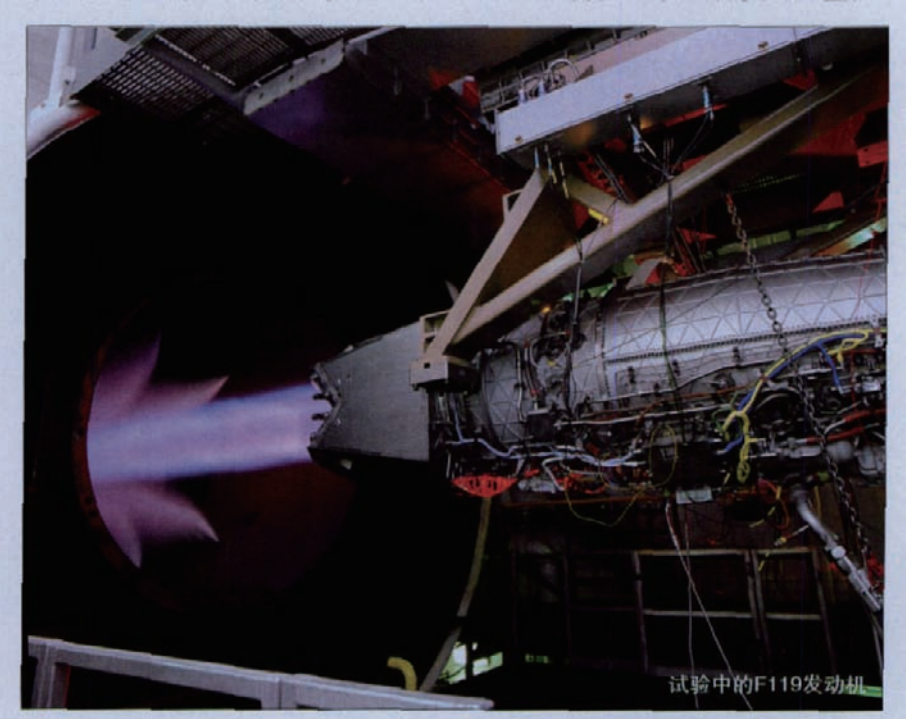
电容与位移的有效关系可通过试验确定。在上式中:假设 $\varepsilon_0=1$, 则电容量 $C = \varepsilon A/d$,在一定条件下,假设 A 为固定不变的常数,则电容 $C=K/d$,其中 K 为常数,即电容 C 与 d 为反比关系,是一个非线性量。

与 ROTATIP 不同之处在于, ROTACAP 应用数个电容传感器,同时测量多个叶片的叶尖间隙,最大可测叶尖间隙可达 5mm。电容传感器的最大工作温度可达 1300℃。一般探头端部和叶片(叶尖)之间最小覆盖面积为 5mm²,若最大间隙为 1mm,则其最小电容值仅为 0.04PF。为了精确测量此微小电容,必须将此电容纳入振荡器谐振回路中,通过振荡频率的变化(FM)来测量。

BMW Rolls-Royce GmbH 研究中心的 D.Muller 等人已成功将电容法用于发动机叶尖间隙的实际测量中。探针的开发、系统集成和校准由 Te Chniche Group Ltd 公司完成,模拟电部分由 Fylde 电气实验室完成,矿物绝缘电缆和柔性电缆由 BICC Thermoheat Ltd 公司开发。系统校准技术的开发、测试方案、系统在燃

气涡轮发动机上的测试以及数据评价由 BMW Rolls-Royce GmbH 完成。该叶尖间隙测量系统首先安装在 BR710 核心机的高压压气机(HPC)的第 4 级上。随后又在 2 台 BR710 发展型发动机上安装和使用,探针安装在高压涡轮(HPT)的第 2 级上。4 个探针大致均匀地分布在每级机匣的圆周上。

BMW Rolls-Royce GmbH 在 BR710 核心机应用及测量不确定度的评估表明:这种先进的测量系统结构简单,不受叶片厚度变化的影



响,能测出转子一排叶片中每个叶片的间隙变化;电容传感器灵敏度高,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。发动机叶尖间隙测量系统的不确定度(RSS)优于 ±0.06mm,涡轮探针经过 100h 严格试验后没有表现出明显的机械疲劳,完全能胜任发动机的压气机和涡轮叶尖间隙测量。

该方法的缺点是需要精细的校准和安装。它的精度受多方因素的影响,如测量时介质的介电常数变化、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。

中国燃气涡轮研究院在航空发动机新机 and APTD 计划中,开展了叶尖间隙测量的研究工作。由英国 ROTADATA 公司引进的 CAPLONG 叶尖间隙测量系统主要用于压气机和涡轮的转子叶尖间隙实时测量,可

以测量每个叶片的叶尖间隙,以及最大、最小和平均间隙值。该系统采用电容测量法,以绝缘电极和目标转子叶尖间的电容变化为依据,可将机匣上的探针与转子叶尖看作平行板电容器,通过测量电容来获得被测叶片的叶尖间隙。电容与间隙的位置关系可以通过校准试验来确定。技术参数为:

测量范围: 0 ~ 2.5mm; 测量精度: ±0.025mm; 探头工作温度: 650℃ (压气机), 1100℃ (涡轮)。

该套设备已经在 SB303 设备上对核心机六级压气机 I、III 级叶片的

叶尖间隙进行测量,成功解决了转速同步信号的传感器精确安装、信号干扰和放大滤波器工作匹配等问题,并建立了一套特种测试验证平台,用来校准该系统的探头。取下校准盘,将地面试验使用的FDG-58风机安装在试验台上即可进行压气机级间参数测量技术、叶尖间隙测试技术与微型探针校准技术的测试试验及验证研究;另外,还可以利用该试验台进行遥测系统试验研究。该平台由变频器、主轴电机组成试验台基本的动力系统,通过连轴器配置不同的试验件来完成不同的试验任务。

反射式光纤叶尖间隙测量

反射式光纤叶尖间隙测量的基本原理是:当光源发出的光经光纤照射到位移反射体后,被反射的光又经接收光纤输出,被光敏器件接收。其输出光强决定于反射体距光纤探头的距离,当位移变化时则输出光强作相应的变化,通过对光强的检测而得到间隙值。

该法的主要特点为具有高灵敏度、高分辨率,抗电磁干扰,超高电绝缘;结构简单,性能稳定,设计灵活,能在恶劣环境下工作,适用于静态和动态的实时检测。由于叶片表面经过高温烧蚀,反射系数降低,反射损失会造成灵敏度降低,假定反射面与光纤轴垂直,如果反射端面稍有倾斜,对灵敏度就会产生很大的影响。

激光光学叶尖间隙测量

激光光学叶尖间隙测量,又称激光近程探针测量,也是一种光纤测量方法,很早就在美国P&W、GE和莱康明公司得到应用与发展。早期的这种测量系统不能对瞬态的或单个叶尖间隙进行测量。但随着新技术、新设备的问世,这种方法又获得了新生。美国P&W公司航空部新设计的激光光学叶尖间隙系统,原理是通过光导纤维将一激光束投射到转子

叶片的叶尖上,当叶尖间隙发生变化时,由于反射的光返回路径不同,在光电接收器上的光点位置发生变化,其变化量经过计算即得出转子叶尖的间隙。它可在旋转部件试车台和整台发动机上测量转子和气封之间的单个叶片叶尖间隙及平均叶尖间隙。该系统适用于风扇、压气机及涡轮叶尖间隙测量。装在发动机上的探头特别适合在条件极端恶劣的涡轮部件工作。激光光学叶尖间隙测量系统主要由光学分系统、电子分系统以及计算和图解终端组成。

J.P.Barromger等人已将这套激光光学叶尖间隙系统用于测量和显示JT9D和F100/F410系列发动机单个及平均叶尖间隙。测量系统用典型的转子叶片,在相当于模拟转子速度达到6000r/min,叶尖速度达到610m/s以及叶尖厚度为0.79mm的条件下作了台架试验。试验表明:系统的总的测量范围为0~3.05mm,离开系统最佳校正曲线的偏差小于0.025mm,分辨率小于0.05mm,环境试验证实了探头能在邻近壁温达到1300K,燃气压力达到3MPa,且在在运行的燃气轮机中所遇到典型的振动水平下工作。

激光光学测量法的特点是:不受转子叶片本身材料的限制,各种转子叶片都可测量;适用于精度高、频响快、高温涡轮叶尖间隙测量;能在恶劣的环境下工作,适用于静态和动态的实时检测;成本低、光纤探头体积小、易安装等。但由于端面窄小,同时由于炭黑、油垢、灰尘等污损光学系统和叶尖反射面等原因,光学镜头易污染,导致精度下降,测量寿命缩短;它适宜用于试验机中的测量而不宜于长期运转的实际燃气轮机;宜测叶尖最大间隙值而不宜于单个叶尖间隙值或平均值。因此,激光光学测量法的主要技术工作是设法解决反射光量减小的问题。此外,由于运转时的高温、高压和振动,应对光学

系统和仪器采取保护措施,这对防止仪器破坏和测量精度下降颇有意义。

航空发动机叶尖间隙测量技术研究日趋活跃,迄今为止,国外研究出的各种航空发动机叶尖间隙测量方法,真正用于实际装机并纳入控制系统回路或用于监控的且已达到实际工作水平的并不多,可见叶尖间隙测量的难度。

为了提高叶尖间隙测量的实用水平,不论采用哪一种测量方法,提高高温高压条件下的传感器的耐热性、持久性和可靠性以及微型化都是技术关键。随着耐热性、持久性更好的陶瓷、金属和功能材料的出现,一定能成功开发出在苛刻测量环境下稳定工作的传感器和测量装置。

结束语

迄今为止,国外研究出的各种航空发动机叶尖间隙测量方法,真正用于实际装机并纳入控制系统回路或用于监控的且已达到实际水平的并不多,由此可见叶尖间隙测量的难度。

为了提高叶尖间隙测量的实用水平,不论采用那一种测量方法,提高高温条件下的传感器的耐久性和可靠性以及微型化都是技术关键。随着耐热性、耐久性更好的陶瓷、金属和功能材料的出现,定能成功开发出在苛刻测量环境下稳定输出的传感器和测量装置。

目前,国外航空发动机叶尖间隙测量方法的研究正方兴未艾,成绩斐然,对于提高航空发动机的性能和寿命具有重要意义。与之相比,我国发动机测试人员的素质及测试技术设备、仪器远远落后国外技术先进国家。要想提高发动机测试技术搞上去,要培养一支业务素质好、技术精的技术队伍,并不断引进先进测试手段,大力开展测试技术研究,变被动为主动,实现跨越式的发展目标。

(责编 淡蓝)