轴承腔壁面油膜厚度超声测量实验研究

钟 冲,刘振侠,胡剑平,吕亚国,郝毓雅

(西北工业大学 动力与能源学院,陕西西安 710072)

摘 要: 针对轴承腔壁面油膜厚度难测的问题,根据脉冲反射法的基本原理,建立了用于测量轴承 腔内壁面油膜厚度的超声波测量系统。测量系统主要包括硬件系统和软件系统两大部分,硬件系统主要 由数据采集卡、探头、延迟块和相应的电缆等组成;软件系统功能主要有测量参数的设置、测量波形的 实时显示、后处理等功能。然后,用所开发的测量系统测量静态条件下八种不同厚度的油膜,并将实验 结果与计算值进行对比,第八种油膜厚度下相对误差为6.9%,其余七种情况油膜厚度的相对误差均在 5%以下,满足工程实践要求。最后,进行油膜厚度动态测量实验,获得相同流量、不同转速下轴承腔 壁面的油膜厚度,经过动态测量的信号品质分析和油膜厚度变化规律分析,该测量系统能在较高精度的 要求下完成轴承腔壁面油膜厚度的测量。

关键词:油膜厚度;超声测量系统;静态测量;动态测量 中图分类号: V435.12 文献标志码: A 文章编号: 1001-4055 (2014) 08-1110-06 DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2014. 08. 014

Experimental Study of Ultrasonic Measurement of Oil Film Thickness in Bearing Chamber Wall

ZHONG Chong, LIU Zhen-xia, HU Jian-ping, LV Ya-guo, HAO Yu-ya

(College of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: It is hard to measure the oil film thickness in aero-engine bearing chamber. According to the basic principle of the pulse reflection method, software and hardware of an ultrasonic measurement system for measuring the oil film thickness in bearing chamber, are established. The hardware system mainly consists of signal acquisition card, probe, delay block and the corresponding cables. Functions as setting of measurement parameter, real-time display of measurement waveforms, post-processing and so on are included in measurement software. Then ultrasonic measurement system is applied on the eight kinds of oil film thicknesses at static conditions. Comparison between experimental data with calculated values shows that the maximum error is less than 5% at the former seven conditions except the eighth measurement error being 6.9%, meeting the actual requirements. Finally, dynamic film thickness of the wall is measured with this measurement system. Signal quality of the dynamic measurement is analyzed. And also, analysis among different oil film thickness with the same oil flow and different rotation rate is conducted. It is concluded that this measurement system can measure the oil film thickness on bearing chamber wall in relative high accuracy.

Key words: Oil film thickness; Ultrasonic measurement system; Static measurement; Dynamic measurement

 ^{*} 收稿日期: 2013-09-07;修订日期: 2013-10-09。
 作者简介: 钟 冲(1989—),男,硕士生,研究领域为航空发动机滑油系统。E-mail: zhongchong24@mail.nwpu.edu.cn

1 引 言

随着航空发动机转速越来越高,导致轴承生热 量也越来越大,同时涡轮前温度也越来越高,高温涡 轮通过结构向轴承腔壁的传热量也明显增加,当润 滑油完成对轴承润滑和冷却之后,由轴承内圈或保 持架甩出,在轴承腔壁面上形成油膜,有关研究[1~2] 表明,轴承腔壁面油膜厚度严重影响壁面换热系数, 这个问题随着航空发动机日益紧凑化的设计导致的 壁面换热面积减小而日益迫切,影响轴承腔的整体 热分析,另外,如果轴承腔壁面油膜不能即时的排出 腔体,在腔内油气两相流环境下,曾出现腔内滑油过 热和着火等问题,直接影响轴承工作性能和发动机 可靠性,已引起人们的重视^[3]。由于轴承腔内高温高 压以及轴承的高转速等恶劣的环境^[4,5],测量轴承腔 壁面上厚度难度系数非常大,随着科学技术的发展, 国外学者还是另辟蹊径,用实验的方法对轴承腔壁 面油膜厚度进行研究。Roy R P和 Jain S 等^[6]以水为 介质,对重力场中倾斜壁面上受逆向空气流作用的 水膜流动特性进行了研究分析。实验中采用电容式 探头及图像处理方法对不同工况下水膜厚度沿平板 的分布进行研究,证明了电容式探头可以应用于油 膜厚度的测量,通过实验,总结了不同空气流动、油 膜流量以及平板倾斜角度对油膜厚度的分布。Wittig S 等^[7]发展了超声波测量轴承腔内油膜厚度的方 法,该方法是根据超声波在不同介质中的传播速度 不一样来实现油膜厚度的,当声波传播到运动的油 膜时,接收器接收到不同的频率的回声,由计数器计 算超声波在油膜中传播的时间,结合声速就可以得 到油膜厚度。Gorse P, Busam S及 Dullenkopf K 等^[8] 将电容探头及LDV应用到轴承腔内的油膜厚度及速 度分布的测量中,他们首先采用角动量平衡来预估 轴承腔内空气流场的切向速度,以预估空气场对油 膜剪切的影响,结果表明,轴承腔的工况条件及几何 特征对油膜厚度及分布影响很大。

在国内,刘亚军、李斌等也对轴承腔内壁的油膜 流动进行了研究,建立了轴承腔内壁油膜流动的计 算模型^[9-11]。而将超声波用于测量厚度和距离的,国 内也有研究。《超声波测距原理及实践技术》中分析 了声波的传输特性和影响声速的因素,给出了超声 波测量的框图,作者还进行了超声波测距误差分析 和超声波测距仪的检验^[12]。郝毓雅针对平板上的液 膜厚度,开发了相应的超声测厚系统^[13]。超声波测 距已普遍应用在液位测量、移动机器人定位和避障 等领域,应用前景广阔。但是由于航空发动机转速 快,轴承腔内油膜流动复杂,所以国内的轴承腔壁面 油膜厚度测量的实验研究尚属空白。

本文开展了轴承腔壁面油膜厚度的测试研究, 建立了用于轴承腔内壁油膜厚度测量的超声波测量 系统,然后分别在静态和动态条件下对实验装置腔 内的油膜厚度进行了测量。

2 实验设备与超声测量系统

2.1 实验设备

本文在进行油膜厚度测量时的轴承腔实验件如 图1所示,即轴向矩形通道甩油旋转盘,滑油通过周 向36个均匀分布的小矩形通道中流出,矩形通道尺 寸宽为2.3mm,深为2mm,长度为25mm,整体腔室轴 向宽度为210mm。当滑油从进油口位置进入旋转件 之后,电机带动旋转件转动,滑油即从旋转件里被甩 出,打到实验件腔壁上形成油膜,当实验结束后,在 重力的作用下,腔体上的润滑油流到腔体底部,从出 油口泄出。



本文采用轴承腔内壁面油膜厚度测量系统实验 台对实验件滑油进口轴向位置方位角分别为0°与 135°点的厚度进行静态测量和动态测量,如图2所示。



Fig. 2 Schematic of bearing chamber

2.2 油膜厚度超声测量原理

超声波测量方法按原理分类,可分为脉冲反射 法、穿透法、共振法和衍射时差法,其中应用最多的 是脉冲反射法^[14]。依据测量时探头与实验件的接触 方式,又可以分为接触法与液浸法。在本文实验中, 采用的直接接触脉冲反射法。发射声波时用有压电 效应的晶体材料做的晶片,在高频电压的激励下在 产生厚度方向的伸缩,这样产生振动传出就成超声 波。当超声波越到不同介质交界面是声波被反射回 来,晶片在超声波的声压作下,在晶片两侧产生电 荷,产生一个小的电信号,经放大器放大后可识别。 本文中超声波的发射与接收是由同一个超声波探头 完成的。脉冲反射法测量的示意图如图3所示,探头 发射的超声波是脉冲波,脉冲超声波遇第一个介质 交界面(固液交界面)反射一部分超声波,这部分超 声波回到探头中转换成电信号经放大后显示,另一 部分超声波穿过该交界面继续传播,当遇到第二个 介质交界面(气液交界面)时,这部分超声波也被反 射回到探头中。该方法中轴承腔内油膜厚度 d 由下 式计算求得。

$$d = (c \times \Delta t)/2 \tag{1}$$

式中*c*为超声波在滑油中的传播速度, Δ*t* 为探 头接收两次超声波的时间差。



Fig. 3 Ultrasonic film thickness measuring device

从上图的声波反射原理可以看出,为测量轴承 腔中腔壁上油膜厚度,测试系统适合采用脉冲纵 波。纵波是指介质中指点的振动方向与波的传播方 向相互平行。由于固体介质能承受拉伸或者压缩应 力,而气体和液体能承受压应力产生容积变化,因此 气体、液体与固体均能传播纵波。而采用纵波是由 于纵波的振动持续时间很短(通常是微秒级),由于 轴承腔壁面油膜厚度为10⁻³m量级,而声波在滑油中 传播速度为10³m/s量级,因此为了保证测试的分辨 率,本测试系统的纵波的发射频率为10⁻⁸s,其分辨尺 寸为10⁻⁵m量级,可以保证轴承腔壁面油膜厚度的测 试。

2.3 硬件系统的组成及选型

本文采用的超声测量系统主要由延迟块、超声 探头、供电装置、显示装置和数据采集卡等组成,如 图4。数据采集卡,即实现数据采集功能的计算机扩 展卡,可以通过USB,PXI,PCI、以太网、各种无线网 络等总线接入个人计算机。数据采集卡中主要的电 路有:时基电路、发射电路、接收放大电路和同步电路。



Fig. 4 Ultrasonic measurement system

(1)数据采集卡

①同步电路

同步电路是一种由时间脉冲信号子电路所同步的一种时序逻辑电路。在一个同步电路中,它的元件中逻辑等级的每一个改变都是同时的。所有的转变都是遵循一个特别的同步信号,称为"时钟"(时脉)。不管逻辑的炼结有多长,时钟(时脉)以及其他部份的逻辑转变都是没有延迟的。所以在整个电路的行为可以在在任意一点任何的速度精确的被预见。通常,同步脉冲的重复频率为50Hz~10kHz。

②发射接收电路

超声波发射是利用压电效应,通过探头发射一 定压差的方波信号,电压控制其振动而发射出超声 波。等到超声波反射回来时,再通过探头感受其振 动而又由逆压电效应将声音信号转化成同频率的电 信号,再加上适当的检测电路即可检测该信号。

③放大电路

放大电路能够将一个微弱的交流小信号,通过 一个核心为三极管、场效应管的装置,得到一个波形 相似(不失真),但幅值却大很多的交流大信号的输 出。实际的放大电路通常是由信号源、晶体三极管 构成的放大器及负载组成。因此,放大电路在超声 测厚装置中十分重要。 (2)探头

超声测量中,超声波的发射和接收都是通过探头^[15]来实现的,探头的功能是实现电能声能的相互转化。探头的种类很多,结构型式也不一样。测量前应根据被测对象的形状、衰减和技术要求来选择探头。探头的选择包括探头的型式、频率、晶片尺寸和斜探头*K*值的选择等。

① 探头型式的选择

探头的种类分为直探头、斜探头、可变角探头等 等。直探头主要包括单晶片直探头、双晶片直探头 和聚焦直探头。直探头适用于探测晶片正下方与声 束方向垂直的厚度,其探测深度较大,检测灵敏度 高,适用范围较广。斜探头主要包括横波斜探头和 表面波斜探头。斜探头适合探测探头斜下方不同角 度方向的厚度,其探测深度较小。本文选用纵波直 探头,一方面因为横波不能在液体中传播,另一方面 是整体的油膜表面与探测面垂直。

② 探头频率的选择

超声波检测频率为0.5~10MHz,选择频率时应 考虑到:高频率下,脉冲宽度度小,分辨力高,半扩散 角小,声束指向性好,能量集中,检测灵敏度高。同 时,频率高,近场区长度增加,衰减增加,信噪比下 降,不利于测量。

由于轴承腔壁面油膜厚度约在 0.2~8mm,厚度 较薄,原则上采用高频有利于增强分辨率,然而由于 轴承腔壁厚以及为了保护探头所配置的延迟块的存 在,频率过高声波衰减过快。通过反复实验检测,本 文超声探头的选取 5MHz 作为发射频率。

③ 探头晶片尺寸的选择

探头晶片尺寸的增加,声波能量增加,而同时近场区长度变大,声波衰减快,鉴于本文实验测量的范围不大,选取了*φ*=10mm的晶片尺寸,通过测试后效果较好。

(3)延迟块

当温度高于 50℃时,探头的晶片可能被损坏,剪 片和保护膜的粘结可能脱落。由于轴承转速较高、 轴承腔内高温高压,所以,直接接触式测量不可取。 本文实验中加入了一个延迟块在探头前面,从而保 证能够顺利地测量油膜厚度。延迟块材料为聚酰亚 胺,长度为 62mm,直径为φ=10mm。另外,因为实验 件腔体本身有一个厚度,要测量轴承腔内壁面上的 油膜厚度,需要把探头镶入腔体,在镶入过程中很容 易损坏探头,所以在探头前面加入延迟块也方便整 个实验系统的安装。

(4)波形的显示方式

直接显示回波声压的射频显示和显示检波后的 回波声压的视频显示是显示波形的两种方式。通过 射频全波显示可以较好地了解介质中声波的传播, 有利于分析声波的相位和波形。而采用检波视频放 大显示时,声波波形易于油膜厚度的读取测量。

2.4 测试软件系统

本实验的软件系统是在LabWindows/CVI平台下 利用C语言设计开发的,该软件的主要功能有采样参 数的设置、发射模式的设置、重复频率的设置、数据 压缩模式的设置、数据存储和数据回放等功能。

3 实验结果与分析

3.1 静态测量

根据相关文献中数值计算与实验研究结果显示,航空发动机轴承腔壁面油膜厚度不会超过8mm^[16.17],因此,准确获得这两个参数对油膜厚度测量至关重要。在检验测量系统的实验中,将滑油放入静态下的实验装置,由于实验装置的几何尺寸已知,通过控制滑油的体积V,计算出不同体积下油膜厚度。本文在静态条件下一共测量了实验件8种不同的油膜厚度,实验测量值是用超声测量系统在静态测量点上对同一油膜厚度测量10次取其平均值。8种不同的油膜厚度的实验值和计算值的对比如表1所示。经分析得知,油膜厚度的实验值和计算值的对比如表1所示。经分析得知,油膜厚度的实验值和计算值得到了很好的吻合。第八种厚度下测量的油膜厚度超过了8mm,相对误差为6.9%,其余七种情况油膜厚度均低于8mm,相对误差均在5%以下,满足工程实践要求。

| Table 1 | Comparison between calculated value and |
|---------|---|
| | experimental data |

| Calculated value/mm | Experimental data/mm | Relative error/% |
|---------------------|----------------------|------------------|
| 2.69 | 2.6 | 3.3 |
| 3.58 | 3.5 | 2.2 |
| 4.48 | 4.3 | 4.0 |
| 5.37 | 5.2 | 3.2 |
| 6.27 | 6 | 4.3 |
| 7.16 | 6.9 | 3.6 |
| 7.98 | 7.7 | 2.4 |
| 8.95 | 8.33 | 6.9 |

3.2 动态测量波形图分析

由轴承腔内壁面油膜厚度测量系统的测量原理 可知,当超声波在传播的过程中,遇到两种不同介质 的界面时,一部分超声波被反射回去,另外一部分穿 透界面继续传播,当遇到下一个界面时再被反射回 去。本文实验中有两个不同界面,一个是延迟块与 油膜之间的固液界面,另一个是油膜和空气之间的 液气界面。当超声波从探头中发射后,通过延迟块 传播到第一个固液界面时,一部分被反射回探头,另 一部分穿过该界面,在油膜中传播。当剩余的超声 波遇到第二个液气界面时,一部分超声波再被反射 回去,由探头接收,一部分穿透液气界面,这时,穿透 的这部分超声波的能量已经很小了。如图5所示,是 本文在实验的过程中所采集的超声波波形图,下面 将简单分析此波形图。



Fig. 5 Measurement oscillogram of oil film

(1)延迟块引起的侧壁干涉

由图5可以看出,实验过程中的波形图并不是只 有两个界面反射回去的超声波,在两个界面反射回 去的超声波旁边会有很多杂波,下面将对此进行简 单解释。如前文所述,因为轴承腔内的高温高压等 的工作环境,探头并不能直接放入轴承腔内测量轴 承腔内壁面油膜厚度,以免探头被损坏,所以,本文 在探头前面增加了一个延迟块。因为探头的直径是 10mm,为了使延迟块和探头匹配,同时考虑实验件 的壁厚,所以设计延迟块的直径为10mm,长度为 62mm,在这个细棒中可产生纯纵波、弯曲波和扭转 波,当这些波在传播的过程中,有的会入射到延迟块 的侧壁上,经侧壁反射回去的波与直接传播的纵波 相遇产生干涉,这在油膜厚度测量中是不利的,但在 本实验中却是不可避免的。

(2)超声波在传播中的衰减

从上图所标示出的超声波峰值可以看出,在一次反射波之后,二次反射波的幅值明显的大幅度下

降,这是因为,超声波传播的过程中存在能量衰减的 情况。超声波在传播的过程中的衰减主要有三方面 引起:由声束扩散引起的衰减,由散射引起的衰减, 由吸收引起的衰减。在本文实验中,当超声波在延 迟块和油膜中传播的时候,声束会在这一过程中扩 散,单位面积上的声能会有所下降,引起衰减;当超 声波在遇到由延迟块和油膜之间的固液界面,以及 由油膜和空气之间的气液界面,由于固液气三种不 同介质的声阻抗Z分别不同,会在界面上引起散乱反 射,声能下降,造成散射衰减;至于吸收衰减,本文实 验中也是存在的,但却不是造成声能衰减的最主要 的因素。

3.3 动态测量结果

在动态测量点,测量转速 N=1.5k~3.6kr/min 工 作条件下,相同流量时实验腔内壁面的油膜厚度。 影响壁面油膜厚度的因素除了流量以外,还包括空 气的剪切,重力等力的影响,此外还有油滴与油膜的 撞击,以及油膜的脱落等因素的限制。

对轴承腔壁面油膜厚度超声波测量系统动态测 量所存储数据进行处理,在每个测试点测量多次取 平均值得到最后数据。如图6所示,是在轴承腔壁面 圆周上135°位置处,各个转速下油膜随时间的变化 过程。从图中可以看出,刚开始的时候油膜的厚度 比较厚,随着时间的推移,油膜厚度变薄,最后稳定 在一个固定值附近波动。这是因为,当转速比较低 的时候,从旋转件喷射出来的滑油没有进行充分雾 化,所以它不是以油滴的形式撞击在壁面上,而是以 油柱的形式喷射到腔体壁面上,这就导致了油膜的 形成不是以油滴累积的形式形成,而是以油柱的横 截面和轴承腔体壁面的接触直接形成油膜,然后又 由于润滑油和腔体撞击后的油滴飞溅、油膜脱落等 的相互作用,形成稳定厚度的油膜。从图中可以看 出,随着转速的增加,在刚开始的时候,形成的油膜 厚度将下降,这是由于随着旋转件转速的增加,从旋 转件里喷射出来的润滑油慢慢被雾化,将以油滴或



4 结 论

本文通过轴承腔壁面油膜厚度测量原理,建立 了轴承腔壁面油膜厚度测量的超声波测量系统,完 成了静态和动态条件下轴承腔壁面油膜的厚度的测 量,并对结果进行分析。本文得到的主要结论如下:

(1)在轴承腔处于静态条件下,当油膜表面是平面时,是轴承腔壁面油膜表面的理想状态,最大相对 误差为6.9%,在工程要求范围内。

(2)动态测量中,轴承腔壁面油膜厚度测量中干 扰波信号主要是由延迟块曲面引起的超声波反射干 扰。但总体而言,腔壁(延迟块)表面与油膜表面的 反射波波峰清晰可见,基本满足轴承腔壁面油膜厚 度测试要求。

(3)相同流量、不同转速的条件下,轴承腔内滑 油随着时间的推移逐渐雾化,腔内油膜厚度随之变 薄,最后稳定在一个固定值附近波动。

参考文献:

- Wittig S, Glahn A. Influence of High Rotational Speeds on Heat Transfer and Oil Film Thickness in Aero Engine Bearing Chambers [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1993, 116: 395–401.
- Glahn A, Wittig S. Two-Phase Air/Oil Flow in Aero-Engine Bearing Chambers: Characterization of Oil Film Flows
 [J]. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas and Turbines Power, 1996, 118(7): 578-583.
- [3] 林基恕. 21世纪航空发动机动力传输系统的展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 108-114.
- 【4】《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册 第十二分册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 429-432.

- [5] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005:99-101.
- [6] Roy R. P, Jain S. A Study of Thin Water Film Flow down an Inclined Plate Without and with Countercurrent Air Flow
 [J]. *Experiments in Fluids*, 1989, 7: 318–328.
- [7] Wittig S. Heat Transfer Analysis in Rotating Gas Turbine Components: Experimental Techniques and Non-Intrusive Diagnostics [C]. Honolulu: The 3rd International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 1990.
- [8] Gorse P, Busam S, Dullenkopf K. Influence of Operating Condition and Geometry on the Oil Film Thickness in Aero– Engine Bearing Chambers [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128: 103–110.
- [9] 刘亚军,陈国定,王 军. 低速工况下航空发动机轴承 腔壁面油膜运动分析 [J]. 机械科学与技术, 2010, 29 (7): 897-901.
- [10] 刘亚军,陈国定,王 军.高转速下轴承腔内壁油膜流动 建模[J].航空动力学报,2010,25(8):1900-1905.
- [11] 李 斌. 轴承腔内油气两相流动与换热特性研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
- [12] 李茂山,超声测距原理及实践技术 [J]. 实用测试技术, 1994(1):12-20.
- [13] 郝毓雅, 孙嘉琪, 刘振侠, 等. 轴承腔壁面液膜厚度测量
 系统的设计与实现 [J]. 航空计算技术, 2012, 42(6):
 121-124.
- [14] 胡建恺,张谦琳. 超声检测原理和方法 [M]. 安徽:中国 科学技术大学出版社, 1993.
- [15] 西拉德 J. 超声检测新技术 [M]. 北京:科学出版社, 1991.
- [16] Farral M, Simmons K, Hibberd S. A Numerical Model for Oil Film Flow in an Aero- Engine Bearing Chamber and Comparison Experimental Data [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(1): 111-117.
- Farral M, Hibberd S, Simmons K. Computational Modeling of Two Phase Air/Oil Flow within and Aero-Engine Bearing Chambers [C]. Boston: Proceedings of ASME FEDSM, 2000.

(编辑:史亚红)