

结构与可靠性

基于声表面波的内燃机连杆轴瓦测温方法及应用

张 慧, 谷 峰, 张函桥, 贺晓亮, 岳 峰

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 对几种内燃机连杆轴瓦测温方法进行了比较, 得出声表面波技术较适合用于连杆轴瓦温度的长期监测。基于声表面波技术设计了一套适用于连杆轴瓦的测温系统, 介绍了该系统设计难点, 并对该系统进行了静态温度标定和实机验证。验证结果表明: 该系统测温精度与国外同类产品相当; 在单缸机上信号稳定, 性能可靠, 满足连杆轴瓦温度长期监测的需要, 可以推广应用。

关键词: 内燃机; 声表面波; 无线无源; 连杆轴瓦; 温度测量

中图分类号: TK423.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)03-0043-05

Temperature Measuring Method of Connecting Rod Bearings of Internal Combustion Engines Based on Surface Acoustic Wave and its Application

Zhang Hui, Gu Feng, Zhang Hanqiao, He Xiaoliang, Yue Feng

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The varied methods of temperature measuring used on connecting rod bearings of internal combustion engines both at home and abroad were compared. The advantages and disadvantages of each method were analyzed and surface acoustic wave (SAW) turned out to a good choice for long-term measuring method for connecting rod bearing. The working principle of SAW resonator is briefly introduced, and a set of temperature measuring system for connecting rod bearings was designed. The difficulties in system design are introduced in detail. The static temperature calibration of this system was carried out and verified on an engine. The test results show that this system boasts equal measuring accuracy as advanced products from abroad, features stable signals on single cylinder engine, reliable performance and satisfy the requirements of temperature monitoring of connecting rod bearing, thus can be large-scale applied in this industry.

Key words: internal combustion engine; surface acoustic wave; wireless and passive; connecting rod bearing; temperature measuring

0 引言

连杆轴瓦是发动机的重要零部件之一, 其工作状态的好坏直接影响发动机的工作状态。随着柴油机燃烧性能的不断强化, 轴瓦的性能要求越来越苛刻, 其运行环境也越来越恶劣。而我国连杆轴瓦的涂层工艺一直不过关, 导致轴瓦成为故障高发件。

轴瓦故障原因^[1]通常是, 曲轴轴颈与轴瓦之

间缺少润滑油或润滑油膜遭破坏, 造成轴和轴瓦发生干摩擦, 温度上升, 导致轴瓦摩擦表面合金融化烧结, 继而出现轴瓦粘在轴颈上或轴瓦和轴颈咬合。轴瓦发生故障时, 总是伴随着轴瓦温度的上升, 因此轴瓦温度是反映轴瓦是否正常运行的最直接的参数, 监测轴瓦温度对保证柴油机的正常安全运行具有极其重要的意义。

收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2019-05-06

作者简介: 张慧(1979—), 高级工程师, 主要研究方向为柴油机测试技术, zhanghui@csic711.com。

1 几种常用的连杆轴瓦测温方法

目前能够对柴油机连杆大端轴瓦温度进行实时监测的方法较少,原因是柴油机内部工作环境恶劣,且连杆大端轴瓦为旋转机构,这导致实时监测其温度变化具有非常大的难度。

武汉理工大学曹驰^[2]提出了一种轴瓦温度无线光纤传感在线监测方法,并对该方法的无线监测机理、方法及无线信号输出特性进行了研究,目前该方法还处于平台验证阶段。陈斐明^[3]提出一种用 Pt100 铂电阻并借助碳刷和滑环装置引出温度信号,然后由温度控制器进行显示和控制的方法。陈关君^[4]设计了一种轴承温度遥测系统。该系统采用热电偶配合冷端补偿作为温度测量手段,利用感应耦合电能传输(ICPT)原理的非接触式电能接入技术和直接序列扩频数字无线通信技术,实现了对轴承温度的遥测。上述方法中的热电偶或铂电阻在柴油机运行过程中容易被拉断,且对一些测试设备零件的粘贴要求较高,在柴油机恶劣工作环境下容易脱落,可靠性较差,不能作为一种长期监测手段使用。

近年来由于 PA、PC 机出现了一些曲轴、连杆断裂等严重质量问题,国外厂商研制出 PA、PC 机曲柄销滑油温度监测系统,简称 PCOT^[5]。该系统通过设计专门的滑油飞溅收集槽,测试收集槽中的滑油温度,从而间接反映轴瓦温度。吴怡桐^[6]也对该方法进行了探索。该方法虽然可以作为一种监测手段,但由于该方法是一种间接的轴瓦运行状态监测方法,在准确性、实时性上还有欠缺。

除此之外,还有些机构利用无线技术解决连杆等运动部件的信号传输问题,但这类装置大都采用无线电波、微波、蓝牙等有源技术,都须要供电;而电池的耐温性一直都是技术难题,长期使用可能造成安全隐患,同时还须经常更换,不能用于长期监测装置中。

综上所述,目前国内这方面技术主要存在以下缺点:

(1) 可靠性差,安装复杂,不能用于连杆大端轴瓦的长期温度监测,如热电偶、PT1000 等;

(2) 准确性、实时性差,不能直接反映连杆大端轴瓦的温度变化,如 PCOT 技术;

(3) 维护性差、存在安全隐患,如光纤等采用有源的无线测温方法。

目前国外已经开始应用于柴油机连杆轴瓦测温

装置的技术主要有声表面波(surface acoustic wave, SAW)技术。

挪威 Kongsberg 公司开发的 SENTRY GB200 连杆大端轴承温度测试系统已获得船级社认证,并在低速机上广泛应用。该系统主要由传感器、固定天线、信号处理单元三个部分组成,其中传感器采用声表面波的原理设计。其外形如图 1 所示。



图1 SENTRY GB200 连杆轴瓦系统组成图

法国 CMR 公司近几年也开发了连杆轴瓦测温装置。如图 2 所示的 TB3 系列产品采用的也是声表面波原理,传感器与读取器之间的距离最远可达 800 mm。其突出的优势是一个静态天线可以兼顾两个连杆轴瓦传感器和一个主轴瓦传感器,避免了在机体内布线的难题,降低了故障发生的几率。目前该产品正在大力推广中。

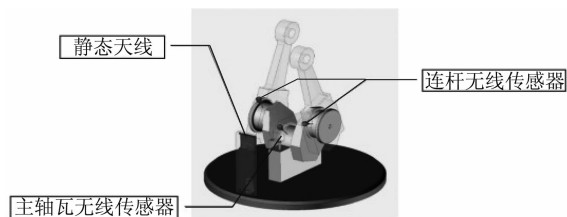


图2 TB3 系统传感器布置示意图

近十年来,SAW 传感器技术得到了很大发展。SAW 传感器具有灵敏度高、准数字输出、制作工艺简单、便于批量生产等优点。目前,采用 SAW 技术来研制力、加速度、温度、湿度、气体及电压等一系列新型传感器逐渐成热点。该类型的传感器已经在电力行业有了比较成熟的应用。

在连杆轴瓦测温技术方面,基于 SAW 原理的测温技术的最大优势是无线无源。采用无线技术可以解决线缆随连杆高速运转而容易断裂的问题,且安装方便,可靠性高;同时,因为无源,不须要更换电池,不存在电池因高温易爆炸的隐患。因此该技术比较适合作为一种长期监测手段用于连杆大端轴瓦的温度监测。

2 SAW 测温原理

SAW 测温技术是近年来新兴的一项测温技术。SAW 波速会随着外界环境因素的变化而发生改变, SAW 测温技术正是利用了 SAW 的波速会受温度影响的这种特性进行测温的。图 3 为 SAW 测温技术的原理示意。

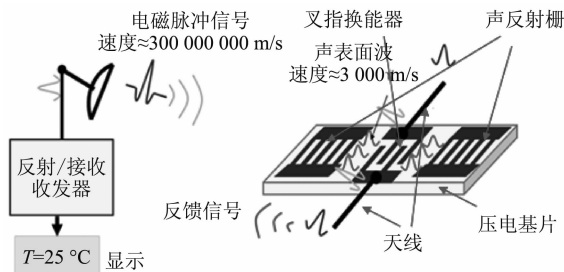


图3 SAW 测温技术原理示意图

SAW 传感器主要由压电基片、叉指换能器、反射栅及天线组成。反射栅由周期性分布的金属指条组成, 两组反射栅构成声学上的法布里谐振腔。当发射/接收收发器向 SAW 传感器发射脉冲信号后, 叉指换能器接到该脉冲后在谐振腔内激励出 SAW 谐波; 发射/接收收发器转为接收状态接收 SAW 传感器发出的带有温度信息的谐波信号, 然后进行解析并获得相应的温度信息。

3 连杆轴瓦测温系统的研制与验证

基于对 SAW 技术的详细研究, 本文根据柴油机的实际特点, 研制了一套柴油机连杆轴瓦测温系统, 并在柴油机上进行了实机验证。

3.1 测温系统设计方案

基于 SAW 的连杆轴瓦温度测试系统的核心主要包括两部分, 即运动部分和固定部分, 分别用来采集温度信号和接受温度信号。运动部分固定在连杆大端上, 主要有温度传感器; 固定部分包括静态天线、读取器和控制显示单元。当系统工作时, 外部固定的读取器通过天线向运动的传感器发射高频信号, 传感器接收到信号激励后, 反馈给固定天线一个频率信号, 而此频率信号携带着温度信息, 信号单元接收到信号后进行处理和计算, 然后将结果送到控制显示单元。

该连杆轴瓦测温系统组成如图 4 所示, 系统由传感器、静态天线、信号读取器、控制显示单元组成。各部分的功能如下, 传感器: 接收激励信号, 并反馈带有温度信息的信号; 静态天线: 发射接收无线信号; 读取器: 无线信号分析及处理; 控制显

示单元: 系统设置、信号的集中显示存储、信号通讯。

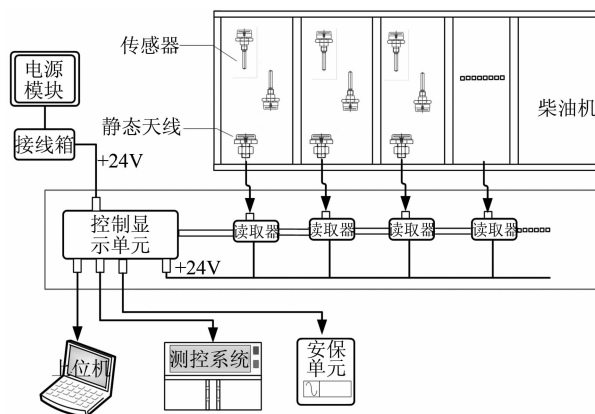


图4 测温系统组成图

3.2 测温系统设计难点

虽然 SAW 测温传感器在电力行业已经有成熟应用, 但在国内内燃机领域还没有成熟应用。相比于电力行业, 此类传感器在内燃机领域的应用有以下特点: 传感器始终在高速旋转中; 机体内属于高温、油雾密闭环境; 机体内零部件结构复杂, 导致反射波无规律可循。因此, 测温系统在设计时应注意以下三点: 传感器的封装设计; 静态天线的型式和位置选择; 及读取器的信号处理技术。

3.2.1 传感器封装设计

根据连杆高速旋转及工作在高温油雾环境下的实际情况, 传感器在封装设计时应注意以下几点:

(1) 由于连杆处于高速旋转状态, 故装在连杆上的传感器始终受离心力的作用; 而为了能够准确测量轴瓦的温度, 传感器测温面应时刻紧贴在轴瓦的背面, 这是封装设计中的一个难点。

(2) 如何固定传感器内部线缆, 防止线缆在高速旋转中磨损或在离心力作用下断裂, 是封装设计须注意的事项。

(3) 由于 SAW 传感器内没有电源, 因此反射信号非常微弱。如何在传感器有限的空间内提高反射信号的信噪比, 是封装设计的另一个难点。

(4) 由于机体内属高温、油雾环境, 传感器的封装设计必须考虑耐温、耐油的应用场合。

图 5 为本测温系统中传感器的安装示意图。封装后的 SAW 传感器与常规的热电阻或热电偶安装方法相同, 采用螺纹联接, 安装方便, 可靠性高。

3.2.2 静态天线型式和位置选择

静态天线作为射频收发系统的重要组成部分, 其性能好坏直接影响系统的工作性能。

天线的性能取决于两个方面: 一是天线类型,

二是天线电气性能。电气性能主要参数有方向图（要求发射天线尽可能只向需要的方向辐射电磁波，接收天线也只接收指定方向的来波，尽量减少其他方向的干扰和噪声）；效率和增益（表征天线将高频导波能量转化为无线电波能量的有效程度）；极化方式（天线辐射时形成的电场强度方向，极化方式影响外界对电波的干扰程度）；驻波比（反映天线和收发电路的匹配程度）等。

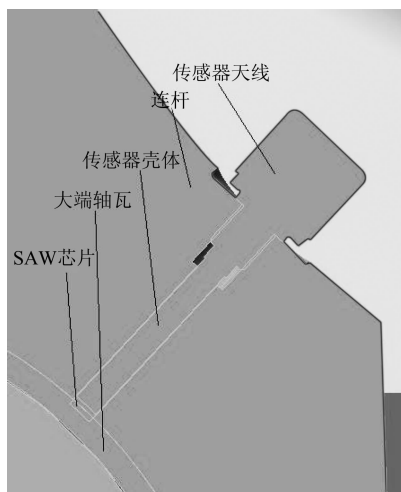


图5 传感器安装及组成图

机体内零部件结构复杂，而V型机的一个静态天线要兼顾两个传感器的信号发射与接收，因此静态天线的型式和位置选择非常重要，会直接影响测温系统的测温性能。由于每台机的内部结构不同，因此每台机具体的静态天线型式和位置须要根据实际情况进行调试。本测温系统在单缸机上进行了调试，其天线的型式及安装位置如图6所示。该天线型式简单，安装方便。

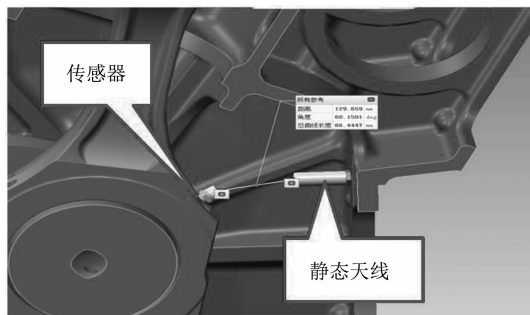


图6 静态天线安装及外形图

3.2.3 读取器信号处理技术

读取器包括发射单元、接收单元、信号处理三部分组成。在一个周期内，发射单元先发射一个询问信号，经过一段时间后，接收单元接收到 SAW 传感器的反射信号，随后由信号处理单元对该反射信号进行处理。读取器工作原理如图7所示。

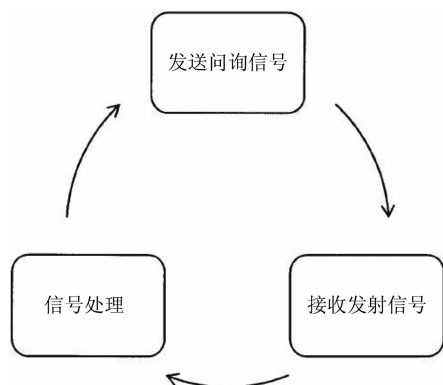


图7 读取器工作原理图

由于静态天线固定在一侧，无法保证连杆旋转一周内都能接收到发射单元的信号，因此在发动机运转一周内，必然会出现信号时有时无的情况。根据发动机的转速不同，每转所产生有效信号的时间也不相同。转速越高，能产生有效信号的时长越短。因此如何在有限的时间内完成信号的发射、接收和信号处理，保证温度信号稳定输出是读取器设计的关键。

3.3 测温系统静态标定

为了测试本测温系统的测温精度，利用温度校验炉对系统进行温度校验。

(1) 校验方法

将传感器插入温度校验炉中，对比测得的温度与校验炉的温度。由于连杆轴瓦的温度一般在 60 ~ 120 ℃ 之间，因此校验温度分别为 40、60、80、100、120 ℃。

(2) 校验设备

FLUKE 9144 干井式校验炉，测温范围：50 ~ 660 ℃，测温精度：±0.35 ℃；

(3) 校验步骤

①选择合适的插块放入校验炉中，并将传感器插入插块中的测试孔中；

②找合适的位置固定好静态天线；

③连接静态天线、读取器和显示单元线缆，并配置相关参数，使整个系统处于运行状态；

④将校验炉温度分别调至 40、60、80、100、120 ℃ 时，待测温系统测得的温度数值稳定后，分别记录温度值。

(4) 校验结果

表1为测温系统静态标定结果。由表中数据可以看出：本系统的最大测温误差为 1.5 ℃ 左右。国外 Kongsberg 公司和 CMR 公司的类似产品测温精度为 ±2 ℃，可见，本测温系统的测温精度与国外同类设备相当，满足使用要求。

表 1 测温系统静态标定结果

标准温度/℃	测试温度/℃			
	第一次	第二次	第三次	平均值
40	40.1	40.3	40.2	40.2
60	60.0	60.3	60.1	60.1
80	80.0	80.0	80.0	80.0
100	99.5	99.6	99.5	99.5
120	118.2	118.2	119.1	118.5

3.4 测温系统实机验证

为了验证该系统在实机状态下的测温效果，将本系统装到单缸机上进行实机验证。图 8 为传感器安装到柴油机连杆上的实物图。



图 8 实机状态下传感器安装图

为了验证本系统在不同工况下测量连杆轴瓦温度的稳定性，测温系统记录了不同转速、不同负荷及过渡工况下的所有数据。图 9 为测得的温度数据及功率曲线图。由图 9 可以很清楚地看出：整个温度信号比较稳定，没有出现信号丢失现象；温度的变化趋势与功率的变化趋势基本一致。因此，本测温系统能够满足实机状态下的连杆轴瓦温度测量需求。

目前本测温系统已在单缸机上累计运行了 500 多小时，信号稳定，性能可靠。现已作为保障连杆轴瓦安全运行的重要测试设备，为柴油机的可靠运行提供重要保障。

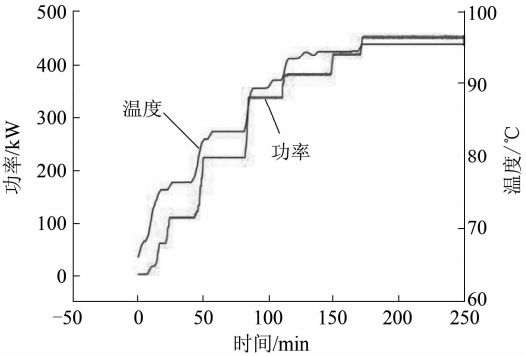


图 9 实机状态下温度随工况变化曲线

4 总结

SAW 技术是一种比较适合作为长期监测手段用于连杆轴瓦测温的技术。本文基于该技术设计了一套适用于连杆轴瓦的测温系统。实机验证结果表明：该系统测温精度与国外同类产品相当；在单缸机上信号稳定，性能可靠，能够满足监测连杆轴瓦温度的需要，可以推广应用。

参考文献

[1] 程广涛, 颜伟超. 柴油发动机轴瓦故障原因分析及预防措施 [J]. 汽车运用, 2011 (10): 43.

[2] 曹驰, 童杏林, 陈亮, 等. 往复式压缩机十字头轴瓦温度无线光纤传感在线监测机理 [J]. 中国机械工程, 2017, 28 (4): 420-424.

[3] 陈斐明, 邱川弘. 铂电阻在准确测量机械旋转加热部位温度方面的应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2002 (5): 23-25.

[4] 陈关君, 咸婉婷, 刘宗瑞, 等. 齿轮轴承温度遥测系统设计 [J]. 传感器与为系统, 2012, 31 (6): 83-86.

[5] 王德山. 船用柴油机最新监测技术 PCOT 监测系统的应用 [J]. 柴油机, 2011, 33 (2): 30-31.

[6] 吴怡桐. 柴油机连杆轴承保护措施的探讨 [J]. 内燃机. 2006 (5): 61-62.