

文章编号:1001-4179(2015)03-0094-05

水电厂汽轮机油颗粒度的超声衰减谱法研究

胡 边,张宏治,魏宇明

(湖南五凌电力工程有限公司 机电工程分公司,湖南 长沙 410004)

摘要:在湖南洪江水力发电厂2号机组检修中,采用超声衰减谱法对轴承油系统和调速器系统的汽轮机油的颗粒度进行了分析。结果表明,调速器系统中汽轮机油的颗粒度小于轴承油系统的;从粒径分布可知,调速器系统的油质符合要求,而对于轴承系统中重力油箱需考虑更换过滤器、轴承油箱需排油清污及清理管路等。与显微镜法测量结果对比,在某一范围内,观测颗粒度占比不同,显微镜法的颗粒度不够连续,而超声衰减谱法测量结果误差较小,更符合实际情况。

关键词:颗粒度;汽轮机油;油质分析;超声衰减谱法

中图法分类号:TV731

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.03.025

1 研究背景

洪江水电厂位于沅江干流湖南省怀化市洪江区上游4.5 km,是沅水干流15个梯级中的第8级水电厂,装有6台单机容量为45 MW的灯泡贯流式机组,年发电量10.17亿k·Wh,机组额定水头20 m,最高水头27 m。投产时是国内单机容量最大的灯泡贯流式机组,目前仍是水头最高的贯流式水轮发电机组。6台水轮发电机组汽轮机油年用量约30 t。

汽轮机油俗称透平油,主要用于水轮发电机组的润滑油系统和调速器系统,在水轮发电机的轴承中起润滑和冷却作用;在调速系统中起传压调速作用。汽轮机油在水轮发电机组的润滑油系统和调速系统中是一个封闭的循环系统,其质量的好坏直接影响水轮发电机组的安全经济运行,故对汽轮机油的性能(如密度、粘度、颗粒度、倾点、闪点、水分、抗乳化性、防锈性等)具有较高的要求^[1]。汽轮机油受诸多因素影响,随运行工况与时间的延续会出现老化、乳化及污染等一系列问题,这就要求分析其性能,以发现引起油质变化的原因。

运行中的汽轮机油中的颗粒一般为磨蚀颗粒、焊渣、氧化皮、金属屑、砂粒和灰尘等,颗粒的大小和软硬对机组的润滑和调速有着重要影响^[2]。汽轮机油中

若含大的、坚硬的固体颗粒,即可引起调速系统卡涩和机组转动部位(轴承、轴瓦)的磨损,严重时可引起机组飞车等事故,严重威胁机组安全运行。因此汽轮机油颗粒度的测定,对于大容量机组特别重要。对于新机组启动前或运行检修的汽轮机油系统,必须进行认真清洗或冲洗。运行中如发现油中颗粒的粒径或坚硬程度突然增大,需立即检查净化装置的过滤层;如发现腐蚀或磨蚀颗粒,应对油系统进行精密过滤处理,并查明颗粒来源,必要时应停机检查,以消除隐患。

对汽轮机油中颗粒度的技术要求,在GB 11120-2011中有明确规定,即外观质量指标为透明,试验方法为目测,清洁度/级要求不大于-18/15^[3]。在GB/T 14039-2002中,对油液固体颗粒污染等级代号也做出了规定,但只对采用自动颗粒计数器法在范围分别不小于4,6,14 μm(c),以及采用显微镜计数法在范围不小于5 μm和15 μm的颗粒数作出了要求^[4],对颗粒具体的粒径分布并没有提及,而采用超声法则能得到固体颗粒污染物的粒径分布,为判别油质优劣、油系统检修提供更加详细、准确的信息。超声技术可通过分析其衰减信号获取汽轮机油中颗粒粒径信息,且具有非侵入式、快速和在线等特点。超声衰减谱法是基于超声波在通过含有颗粒相的连续介质时所引起的依赖频率变化的衰减谱,来表征颗粒粒度分布

收稿日期:2014-06-01;修回日期:2014-11-29

作者简介:胡 边,男,工程师,主要从事水电厂设备检修与维护工作。E-mail:bian-hu@163.com

的测量技术^[5]。

2 超声测粒理论 – ECAH 模型

当超声波通过含颗粒物的介质时,会因颗粒与声波的作用而产生衰减和相位变化。这些作用包括波的扩散性、吸收、散射、反射和折射。声衰减通常是样品黏性和损失性质的特性,声衰减决定了声能够进入样品多远和对样品影响的能力。

ECAH 模型^[6-7]是由 Epstein、Carhart、Allegra & Hawley 先后建立并完善的,只适用于低浓度的分散系。这一模型在假设测量样品为球形颗粒和声单散射前提下,同时考虑了热和粘性 2 种损失机制。结合质量、动量和能量的守恒定律、应力应变关系以及热力学状态方程,可得到压缩波、剪切波和热波在弹性、各向同性、导热的固体介质以及连续相介质中的波动方程。波动方程在球坐标下求解,按照球 Bessel 函数和球谐函数的级数展开,其中包含了待定散射系数。在颗粒与介质界面运用边界条件,可以得到一个 6 阶的线性方程组。求解这一方程组即可得到与复波数有关的散射系数。

$$M[A_n, B_n, C_n, A'_n, B'_n, C'_n]^T = N \tag{1}$$

图 1 中 6 个波的振幅是相互关联的,对它们求解以确定 6 个待定系数 $A_n, B_n, C_n, A'_n, B'_n, C'_n$, 6 阶线性方程组(1)由波动方程代入边界条件得到,矩阵 M 和向量 N 中的元素可由连续介质物性参数、颗粒的物性参数以及颗粒的半径求得。求解该线性方程组得到系数 A_n ,然后按下式确定悬浮液中的复波数。

$$\left(\frac{\kappa}{k_c}\right)^2 = 1 + \frac{3\Phi}{jk_c^3 R^3} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) A_n \tag{2}$$

式中, Φ 为颗粒的体积浓度; R 为悬浮颗粒的半径; k_c 为连续介质中的波数; κ 为悬浮液中的复波数, $\kappa = \omega/c(\omega) + i \alpha(\omega)$; $j = \sqrt{-1}$ 。

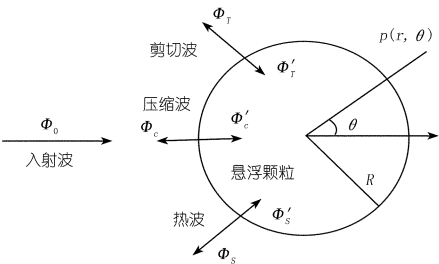


图 1 各向同性颗粒表面 3 种波的散射

3 反演算法 – ORT 算法

无论何种理论模型,最终的目的都是要得到颗粒相的粒度分布。其原理是采用理论模型预测出依赖于

超声频率和粒径的声衰减谱,并将其与实际测得的超声衰减谱比较,显然这种差距越小,表明待检颗粒两相介质与理论模型的预测越接近。

以消声模型^[8] (BLBL) 为例,考虑多分散颗粒系的声衰减方程为

$$\ln(I/I_0) = -L \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{3K_{Ext}}{4R} \left(\frac{dV}{dR}\right) dR \tag{3}$$

式中, L 为声程, dV/dR 为颗粒分布的体积频度分布表达式,它是颗粒半径 R 的函数。

式(3)为第一类 Fredholm 积分方程,目前尚没有理论解,按通常做法,可以用数值积分等式将右边离散。则

$$\ln(I/I_0) = -\frac{3L\Phi}{4} \sum V(c) \int_{\Delta R} \frac{K_{ext}(R)}{R} dR \tag{4}$$

考虑多个频率情况,可得到一个矩阵形式,即

$$\mathbf{A}\mathbf{F} = \mathbf{G} \tag{5}$$

式中, \mathbf{A} 称为系数矩阵; \mathbf{F} 为离散化的颗粒尺寸频度分布; \mathbf{G} 为不同频率下声衰减构成的向量。

必须注意到,公式(5)所示的线性方程组高度病态,表现为测量衰减谱中的误差可能引起求解的较大变化,不能按矩阵求逆直接求解,因此,实际求解中需要结合最优正则化反演算法(ORT)来求解^[9]。按照正则化方法改写,即可得

$$\begin{cases} \|(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \gamma \mathbf{H})\mathbf{F} - \mathbf{A}^T \mathbf{G}\| = \min \\ \mathbf{F} \geq 0 \end{cases} \tag{6}$$

式中, \mathbf{A}^T 表示 \mathbf{A} 的转置,矩阵 \mathbf{H} 称为光顺矩阵,本文采用了二阶算子形式,即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & & \\ -2 & 5 & -4 & \cdots & & \\ 1 & -4 & 6 & \cdots & \cdots & \\ & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & \cdots & \cdots & 6 & -4 & 1 \\ & & & \cdots & -4 & 5 & 2 \\ & & & & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

而参数 γ 则需通过最优化的方式获取,之后方程(6)可通过非负最小二乘法求解(NNLS)。

4 实验装置和测量方法

4.1 实验装置

为了模拟汽轮机油在运行中的状态并测量其颗粒粒径分布,建立了如图 2 所示的实验系统,包括超声脉冲发射接收仪(Olympus, Model 5073PR)、自动循环进样系统(丹东百特, BT-800)、一对中心频率 5 MHz 水浸式宽频直探头(Panametrics NDT, V307)、非侵入式

测量装置、恒温水槽(室温至 99℃)、双通道高速信号采集卡(NI,USB 5133,最高采样率为 100 MS/s)。实验温度为 25℃。

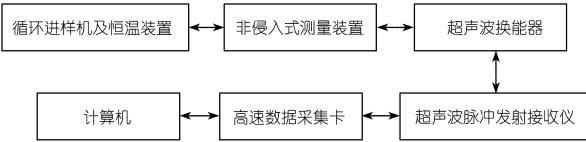


图 2 汽轮机油颗粒度的超声测量系统

4.2 实验样品

洪江水力发电厂汽轮机油使用的是中国石化长城威越系列润滑油,产品标记为 L-TSA46(A 级)GB 11120-2011。实验样品采用的是洪江水力发电厂新汽轮机油(A),使用中的汽轮机油采样点为:调速器系统中的压油槽(B)、回油箱(C)、漏油箱(D);轴承油系统中的重力油箱(E)、轴承油箱(F)。实验前超声分散 5 min。

4.3 测量方法

测量装置置于恒温水槽中,如图 3 所示。传感器和样品之间通过特别选定的低衰减材料隔离,既确保了测量的非接触特征,同时也避免了样品对传感器的污染。超声测量采用一发一收形式,发射和接收换能器的轴线在同一直线上,原理上保证了声波传播过程中的同轴性和同指向性。利用高速采集卡采集信号,并同步送入计算机,利用自行开发的 LabVIEW 程序来处理、分析超声波信号。实验中,先后对新汽轮机油和运行中的汽轮机油样品的脉冲波信号实施测量,通过快速傅里叶变换(FFT)获取频谱,依据公式 $\alpha = \ln(A_0/A_1)/L$ 计算出不同频率分量的超声衰减系数。其中, A_0 和 A_1 分别为新汽轮机油和运行中的汽轮机油测得超声波幅值, L 为传感器之间的距离。

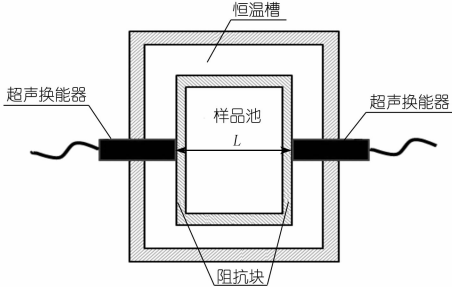


图 3 非侵入式测量装置

5 实验数据及分析

5.1 超声幅度谱

图 4 是对新汽轮机油和运行中的汽轮机油的超声

幅度谱进行拟合后得到的曲线。从图中可知,各样品的超声幅度最大值均在测量探头 5 MHz 的中心频率左右,在其左边递增,在其右边递减;新汽轮机油(A)的超声幅度和有效带宽最大,而运行中的汽轮机油的超声幅度均小于 A,这是由于油中的颗粒在超声传播的过程中,对声有吸收、散射等作用,从而导致另一侧超声探头接收到的超声能量减弱,说明运行中的汽轮机油在 2 号机组上次更换新油运行以后产生了固体颗粒污染物。由图 4 还可知,超声在调速器系统要比在轴承油系统的传播能力强,说明轴承油系统中产生了更多、更大的固体颗粒污染物,且超声的传播能力在调速器系统中为压油槽(B) > 回油箱(C) > 漏油箱(D);在轴承油系统中为重力油箱(E) > 轴承油箱(F)。

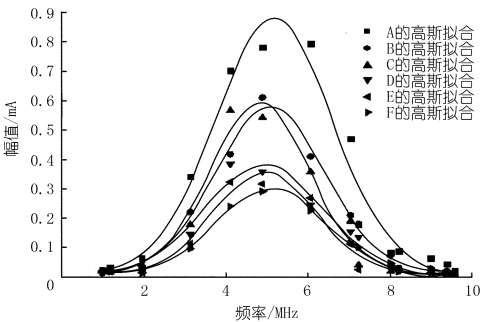


图 4 汽轮机油的超声幅度谱

5.2 超声衰减谱

计算各个分频率下超声衰减系数,得到运行中的汽轮机油的超声衰减值,对衰减曲线做一阶指数衰减拟合得到超声衰减谱,如图 5 所示。

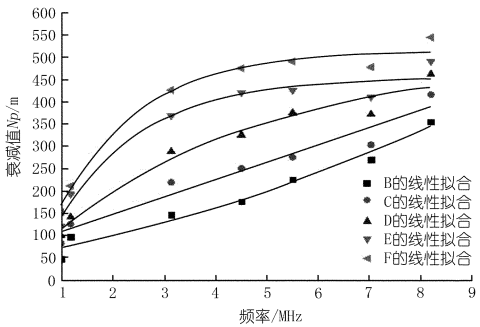


图 5 运行中的汽轮机油的超声衰减谱

从图 5 中可知,各样品随着超声频率的增加,超声衰减系数也在增加。在同一频率下,超声衰减系数 $B < C < D < E < F$,说明调速器系统中相比轴承油系统更加清洁,固体颗粒污染物较少,因为随着单位体积内的颗粒数目增加,对声波的耗散也增强,造成声衰减系数增大,衰减信号则相应增大。调速器系统中颗粒污染物为压油槽(B) < 回油箱(C) < 漏油箱(D);在轴承油系统中为重力油箱(E) < 轴承油箱(F),这与整个闭

合回路中汽轮机油流过的零部件和过滤器的布置刚好吻合,说明实验数据可靠。

5.3 颗粒粒度分布

将超声衰减谱代入理论模型并运用反演算法,即可求解出运行中的汽轮机油的颗粒粒径分布,如图 6 所示。

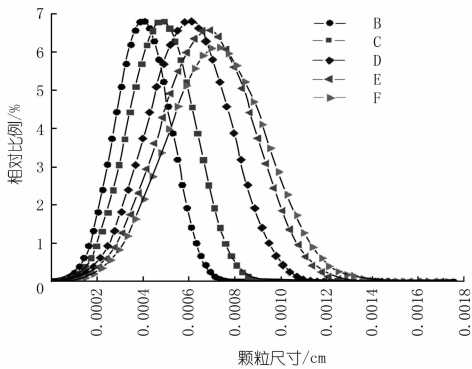


图 6 运行中的汽轮机油的颗粒粒径分布

从图 6 中可知,运行中的汽轮机油的固体颗粒污染物在压油槽中的分布为 1~7 μm 之间,在回油箱中的分布为 1~9 μm 之间,在漏油箱的分布为 1~11 μm 之间,在重力油箱中的分布为 1~13 μm 之间,在轴承油箱中的分布为 1~15 μm 之间。由以上数据可知,调速器系统汽轮机油粒径分布基本上都在允许范围($\leq 14\ \mu\text{m}$)内,轴承油系统则在 14 μm 左右。若 2 号机组不进行检修,则在平时的检修中需要考虑轴承油系统中重力油箱是否需要更换过滤器,以及应对轴承油箱排油清污,更换过滤器等。各样品的固体颗粒污染物的中位径 D_{50} (一个样品的累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的粒径)列于表 1。

表 1 超声法测量得到的气泡中位径 D_{50} μm

采样点	D_{50}	采样点	D_{50}
B	4.02	E	7.24
C	5.12	F	7.98
D	6.55		

从表 1 中可知,作为判别颗粒重要性质的 D_{50} (一般用作表示颗粒的平均粒度)是依次增加的。

为对超声衰减谱法测量结果进行对比,使用珠海欧美克公司的 PIP8.1 型颗粒图像处理仪(采用奥林巴斯生物显微镜,配以 130 万像素 CMOS 图像传感器)来测量各样品粒径的分布,测量前超声分散 5 min。图 7 为轴承油箱(F)显微镜测量结果,测量结果范围为 1~15 μm ,与 F 处超声法测量结果一致,说明超声分散较均匀,但各范围颗粒所占百分数有所不同,显微镜法在 10~15 μm 之间没有颗粒,这是由于显微镜法取样及少,样品中的颗粒数不足以反映整体粒径分布,相比超

声法而言,测量结果误差较大。

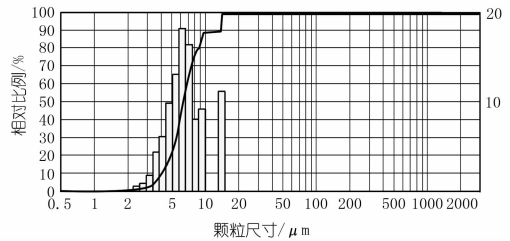


图 7 显微镜测量的 F 处汽轮机油的颗粒粒径分布

6 结 论

(1) 本文基于超声衰减谱法对洪江电厂 2 号机组轴承油系统和调速器系统的汽轮机油进行了取样测量,得到了固体颗粒污染物的粒度分布,其范围:压油槽(1~7 μm)<回油箱(1~9 μm)<漏油箱(1~11 μm);在轴承油系统中为重力油箱粒度(1~13 μm)<轴承油箱粒度(1~15 μm)。从粒径分布状况可知,调速器系统的油质符合标准要求,轴承系统中重力油箱需考虑更换过滤器,且轴承油箱需排油清污,更换过滤器以及对通油管路实施清理。

(2) 超声法与显微镜法测量结果相比,2 种方法测量的颗粒度范围一致,但在某一范围内,颗粒所占百分数不同,显微镜法显示的颗粒度不连续,不存在 10~15 μm 之间的颗粒,可能是与取样较少有关,不能反映出汽轮机整体颗粒粒径分布情况;相比而言,超声法测量结果的误差较小,更符合实际情况。

(3) 该实验测量系统可应用于水电厂在线监测油系统的清洁度,实现非接触测量,并可实时对汽轮机油油质的变化展开分析,以便在检修中制定具有针对性的措施,确保汽轮机油安全、顺利地更换。

(4) 该测量系统可实现油系统的多参数测量,除了颗粒度外,还可获取得到粘度、密度和浓度等对油品有重要影响的参数,以及各参数在不同工况时(如温度、流速等)的油质变化,可为判别油质优劣、油系统检修等提供参考,还可推广至电厂中需要测量两相流或多相流的环境中使用。

参考文献:

[1] 许守澄. 国产大机组的油系统清洁度问题[J]. 热力发电,1992, (1):25-29.

[2] 余浪. 浅谈水电厂汽轮机油与油质分析[J]. 科技创新导报,2008, (26):150.

[3] GB 11120-2011 涡轮机油[S].

[4] GB/T 14039-2002 液压传动油液固体颗粒污染等级代号[S].

[5] 蔡小舒, 苏明旭, 沈建琪, 等. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[6] Epstein P S, Carhart R R. The absorption of sound in suspensions and emulsions:I. Water Fog in Air[J]. J. Acoust. Soc. Am, 953, 25(3):

553 – 565.

[7] Allegra J R,Hawley S A. Attenuation of sound in suspensions and e-
mulsions:Theory and Experiments[J]. J. Acoust. Soc. Am,1972,51
(5):1545 – 1564.

[8] M Y e,S M Wang,Y. Lu,et al. Inversion of particle – size distribution
from angular light – scattering data with genetic algorithms[J]. Ap-
plied Optics,1999,(38):2677 – 2685.

[9] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社,1989.

(编辑:赵秋云)

Study of particle size distribution in turbine oil of hydropower plant by
ultrasonic attenuation spectrum

HU Bian,ZHANG Hongzhi,WEI Yuming

(Yuanjiang Division of Mechanical and Electrical Engineering Branch,Hunan Wuling Power Engineering Co., Ltd.,Huaihua
418200, China)

Abstract: In a overhaul of Hongjiang hydropower plant, Hunan Province, the turbine oil from bearing oil system and the gov-
ernor system was sampled and the particle size distribution (PSD) of the turbine oil was measured using a new method (ultrason-
ic attenuation spectrum) in laboratory, and the measurement results were compared with a new turbine oil to analyze the oiliness
change. The measurement results show that the particles size of turbine oil in governor system was smaller than that of the bearing
oil system; in the view of the particle size distribution, the governor system oil met the requirements, but the filter in gravity tank
of bearing system should be replaced and the oil should be released to clean the dirt and oil tube should be clear up. Meanwhile,
the measurement results are compared with the microscope observation results, and it was showed that the measured particle sizes
by two methods were consistent, but in a certain range, the percentages of particle size were different. The result of microscopic
observation was discontinuous probably due to less sampling, which could not reflect the overall particle size distribution condi-
tion. The ultrasonic measurement result is smaller in error and more in line with the actual situation than microscope observation
results.

Key words: particle size distribution (PSD); turbine oil; oiliness analysis; ultrasonic attenuation spectrum (UAS)



· 简 讯 ·

“流域水循环演变机理与水资源高效利用”成果
荣获 2014 年度国家科技进步一等奖

2015 年 1 月 9 日,国家科学技术奖励大会在人民大会堂举
行,由中国水利水电科学研究院主持完成的“流域水循环演变
机理与水资源高效利用”成果荣获 2014 年度国家科学技术进
步奖一等奖,王浩院士作为获奖代表应邀出席了颁奖大会,并
受到党和国家领导人的亲切接见。

该项成果基于国家重点基础研究 973 计划“海河流域水循
环演变机理与水资源高效利用(2006CB403400)”等项目完成。
该项目是水利部牵头的第一个国家 973 项目,在首席科学家王
浩院士的带领下,经过 5 年的技术攻关,在流域水循环、水资

源、水环境与生态演变机理以及农田与城市单元水分循环过程
与高效用水机制研究的基础上,首次提出了基于水循环的“量
- 质 - 效”全口径多尺度水资源综合评价方法、水循环整体多
维临界调控理论与模式,形成了流域水分利用从低效到高效转
化的理论和实施方案,对人类活动密集的缺水地区涉水决策与
调控管理具有重要的指导意义。研究成果已在海河流域和我
国北方地区得到广泛应用。

(长江)