

# Research on Measures of Prevention Turbine Oil in Service from Deterioration for Offshore Floating Nuclear Power Plant

Xiaoli Ye, Haijun Sun, Shan Gao, Lei Qiao

Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan Hubei  
Email: 172513406@qq.com

Received: Aug. 18<sup>th</sup>, 2017; accepted: Sep. 1<sup>st</sup>, 2017; published: Sep. 5<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Significant physical and chemical indexes which affect the properties of turbine oil in service are summarized. Then according to the characteristics of the environment of offshore floating nuclear power plant, the causes of quality deterioration of turbine oil in service are analyzed. Several measures are put forward to prevent the degradation of turbine oil, and some suggestions are put forward to maintain the performance of turbine oil and prolong its service life.

## Keywords

Offshore Floating Nuclear Power Plant, Turbine Oil in Service, Deterioration

---

# 海上浮动核电站运行汽轮机油劣化防止措施研究

叶小利, 孙海军, 高山, 乔磊

武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉  
Email: 172513406@qq.com

收稿日期: 2017年8月18日; 录用日期: 2017年9月1日; 发布日期: 2017年9月5日

---

## 摘要

本文总结了影响运行汽轮机油性能的主要理化指标。根据海上浮动核电站使用环境的特点, 对造成电站

运行汽轮机油性能劣化的因素进行了分析,提出了防止运行汽轮机油劣化的措施,从而为保持运行汽轮机油性能及延长其使用寿命提出建议。

## 关键词

海上浮动核电站, 运行汽轮机油, 劣化

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

海上浮动核电站是小型核反应堆与船舶工程的有机结合,其典型结构示意图如图 1,它可在不同海域灵活部署并提供能源补给,长期系泊于远离海港的海域,工作环境较恶劣,安全性要求比一般民用船舶和陆基核电站高,对设备的安全性可靠性要求高。海上浮动核电站汽轮机的工作环境和条件与电站汽轮机不同,它安装在易变形的船体基座上,还经常受到船体摇摆、冲击的影响,它的正常运转直接关系到电站的安全,因而对可靠性要求更高,此外体积、重量也受到严格限制。汽轮机油(亦称透平油)主要用于润滑汽轮机组的滑动轴承、减速齿轮与调速器以及用作液压系统的工作介质,起润滑、散热与冷却的作用,并参与调速工作。汽轮机油广泛应用于蒸汽轮机油、燃气轮机油、石化企业和船舶。汽轮机油的运行寿命一般要求达到 5~15 年,维护好运行汽轮机油使其保持良好性能,对保证设备的安全运行非常重要。汽轮机油在使用过程中不可避免地受到高温、氧气、水分、杂质等的影响而劣化。因此本文根据海上浮动核电站自身特点分析其劣化因素,提出了几条防止运行汽轮机油劣化的建议。

## 2. 汽轮机油性能评价指标

目前,我国运行汽轮机油质量监控标准根据行业特点制定了不同的标准。舰艇汽轮机油一般采用 68 号油,换油标准参考 GJB3714-1999《舰艇主要润滑油换油指标》;石化行业根据油的黏度等级设定了对应的指标要求,换油标准参考 NB/SH/T 0636-2013《L-TSA 汽轮机油换油指标》;电力行业对运行油的要求参考 GB/T7596-2008《电厂运行中汽轮机油质量》及 GB/T14541《电厂运行中汽轮机用矿物油维护管理导则》,主要指标参数范围见表 1。



Figure 1. Typical structure of offshore floating nuclear power plant

图 1. 海上浮动核电站典型结构示意图

**Table 1.** Quality supervision criteria of turbine oils in service  
**表 1.** 运行汽轮机油质量监控标准

项目	GJB3714(68 <sup>#</sup> )	NB/SH/T 0636(68 <sup>#</sup> )	GB/T 7596		GB/T14541
外观			透明		透明
颜色					无异常变化
运动黏度(40℃) mm <sup>2</sup> /s	与新油原始值 相差 < ±10%	与新油原始值 相差±10%	32 <sup>#</sup> 46 <sup>#</sup>	28.8~35.2 41.4~50.6	与新油原始值相差 < ±10%
酸值, mgKOH/g	≤0.2	≤0.3	未加防锈剂 ≤0.2 加防锈剂 ≤0.3		未加防锈剂 ≤0.2 加防锈剂 ≤0.3
水分, mg/L	≤0.2	≤0.1	≤100		氢冷机组 ≤80 非氢冷机组 ≤150
破乳化度, min	≤60	≤60	≤30		≤30
闪点(开口杯), °C			≥180, 且比前次测量值 不低 10°C		与新油原始值相比 不低于 15°C
机械杂质			200 MW 以下, 无		
洁净度(NAS), 级		报告	200 MW 及以上 ≤8		≤8
液相锈蚀		小于轻锈(船舶设备)	无锈		无锈
起泡沫实验, mL			≤500/10		200 MW 及以上 ≤500/10
空气释放值, min			≤10		200 MW 及以上 ≤10
旋转氧弹值, min		60	报告		

## 2.1. 黏度

黏度反映油品的内摩擦力, 是汽轮机油的一项重要性能指标。它决定着油液的润滑性、流动性、承载性等使用性能。汽轮机油黏度太低可能产生干摩擦, 黏度过高则导致能量损失。油的黏度值并不是恒定的, 其值随着温度的升高而降低。为保证机组在不同的温度下都能得到可靠的润滑, 要求油的黏度随温度的变化越小越好, 即黏温性能好。

## 2.2. 抗氧化性能

抗氧化性能是汽轮机油抵抗空气中氧的氧化作用而保持性能不变的能力, 是表征汽轮机油使用寿命的重要性能。评价汽轮机油抗氧化性能主要使用酸值增值和旋转氧弹值。酸值表示中和 1 g 汽轮机油所需的氢氧化钾的毫克数, 其单位是 mgKOH/g, 汽轮机油中的酸一般指的是有机酸, 通常是环烷酸、脂肪酸、酚和硫化物等。但是, 很多添加剂本身就是酸值比较高的化合物, 因此新油的酸值不一定越低越好, 而是必须达到一定的数值, 并在今后的使用过程中通过酸值增值来判断汽轮机油质量的变化。旋转氧弹值可反映油品的氧化安定性及残余氧化寿命。运行油酸值和氧化性能的对对应关系表示当酸值增加值大于 0.1 mgKOH/g 时, 旋转氧弹值可以较好保持, 当酸值增加值大于(0.2~0.3) mgKOH/g 时, 旋转氧弹值接近 60 min。因此, 可用酸值来简单反映旋转氧弹值。

## 2.3. 抗乳化性能

抗乳化性是指油品在含水的情况下抵抗水乳化液形成的能力, 其能力的大小用破乳化值表示。汽轮机油破乳化值越低表示油品的分水性能越好。具有良好分水性能的油在油箱中通过静置分出大部分水,

可以减轻分离器的工作负担，延长过滤除水装置的使用寿命。

## 2.4. 洁净度

油液污染的程度可用洁净度来定量地表示。目前大多数电厂采用自动颗粒计数器来监测油品的清洁度，大都使用 NAS 标准分级，即按 100 mL 油中 5~15  $\mu\text{m}$ ，15~25  $\mu\text{m}$ ，25~50  $\mu\text{m}$ ，50~100  $\mu\text{m}$ ，和大于 100  $\mu\text{m}$  这 5 个尺寸范围内最大允许颗粒数将洁净度分为 12 个等级。

## 2.5. 空气分离性能

空气释放值是指在标准规定情况下，试样中雾沫空气的体积减少到 0.2% 时所需的时间，以分(min)计。通常汽轮机油中会加入酸性防锈剂，若被强碱性物质污染，相互作用生成不溶性皂类物质，增加气泡稳定性，将使油品的空气分离性能会变差。

## 2.6. 抗泡沫性能

抗泡沫性能是评价油中形成泡沫的倾向及其稳定性。汽轮机油在滑油系统中是强迫循环的，其中空气剧烈搅动，油面上会产生泡沫，油中也会产生气泡和泡沫，可使油泵油压上不去而影响油的循环，破坏油膜，发生磨损，油压不稳，有时还造成油系统出现假油位，严重时泡沫由油箱顶部外溢，威胁机组运行。

## 2.7. 抗锈性能

一般通过液相锈蚀试验来间接判断汽轮机油的抗锈性能。目前使用的汽轮机油中一般含有防锈剂，但在油品使用过程中，防锈剂会因吸附于金属表面、设备进水等情况而消耗。当消耗到一定程度时，防锈性能会下降，失去对设备的保护作用。当液相锈蚀试验不合格时，应补充专用防锈剂。

# 3. 汽轮机油劣化因素分析

## 3.1. 水分

据资料介绍[1]，矿物油的饱和吸水度为(500~600) mg/kg，随着油品老化，其饱和吸水度将会增加 3~4 倍。汽轮机油中含 1%(质量分数)的水分可以使轴承寿命减少 90%。汽轮机油乳化需要三个条件：一是水分含量超过该温度下的饱和吸水量；二是存在乳化剂；三是有剧烈搅拌。水分主要来源于潮湿空气和外界侵入，如汽轮机组轴封不严，致使蒸汽漏入汽轮机油中凝结成水，即构成了油质乳化的第一个条件；新油炼制过程中残留的天然乳化剂和油在运行过程中老化时产生的环烷酸皂、胶体，以及从外界引入的污染物如清洗油系统残留的清洗剂等都是乳化剂，即构成了油质乳化的第二个条件；汽轮机油在运转和回油过程中都受到搅拌作用，即构成了油质乳化的第三个条件。三个条件同时存在时，油质乳化就难以避免[2]。

汽轮机油本身是无腐蚀性的，但在运行中不可避免地或多或少漏入蒸汽或水，引起油系统产生锈蚀，严重时可引起调速系统卡涩、机组振动、磨损等。腐蚀产生的金属离子，尤其是铜离子会加速油品的氧化[3]。此外，汽轮机油中的水还会造成添加剂流失加速影响抗锈性能，与氧化产物形成酸，加剧油品氧化速度。

## 3.2. 空气

运行汽轮机油处于强迫循环状态，与大量空气接触而被氧化，此外温度、水分、金属催化剂和其他各种杂质都会加速油品氧化，主要的氧化产物有酸性物质，其他氧化物或油泥等。实践表明，使用两

年以上的汽轮机油有 75% 的污染来源于油品的氧化[4] [5]。这些有机酸的存在使油液劣化加剧, 以致油液的颜色变深, 有酸臭味, 并对设备造成腐蚀, 在有水存在时, 腐蚀更严重。当酸性物质积累过多时, 会腐蚀金属零件, 并形成盐类而加速汽轮机油的继续氧化以及降低汽轮机油的抗乳化性能, 氧化沉淀还会降低滑油冷却器的工作效率, 油泥可堵塞泵吸入口的滤网, 影响控制精度等, 沉积在轴承表面使其温度升高, 造成设备损坏[6]。舰船汽轮机油系统回油部分处于微负压状态, 为空气进入创造了条件。空气可破坏油品的连续性和不可压缩性, 严重时会造成汽轮机油系统断油事故。当夹带气泡的油到达高压区域时, 气泡瞬间破碎, 对金属表面造成冲击并产生气蚀, 同时产生 500℃ 以上的高温, 造成油品的热分解。

### 3.3. 机械杂质

现代汽轮机制造精度高, 轴承和轴之间的间隙一般在(10~20)  $\mu\text{m}$ , 而液压控制伺服阀的间隙只有(3~5)  $\mu\text{m}$ , 油液受到固体颗粒污染是引起润滑和液压系统故障的主要原因, 固体污染物入侵系统后, 不仅加速元件的磨损, 而且堵塞元件的间隙和孔口, 使控制元件动作失灵而引起系统故障。有研究资料表明, 机械设备的功能失效 50% 归于磨损, 液压元件失效 70%~85% 归因于油液污染。

### 3.4. 温度

影响汽轮机油使用寿命的重要因素之一是温度。汽轮机油的寿命和使用条件有关, 如温度, 油的循环速率、压力和维护保养等, 蒸汽轮机组高端温度可达 200℃, 出口平均温度在 60℃ 左右, 在这样的温度下, 油品易变质。通常温度每升高 10℃, 氧化速率至少增加一倍。当机组润滑系统出现局部过热点时, 会加速氧化, 而且当温度达到 100℃ 以上时, 生成的油泥会进一步碳化形成焦炭粒杂质。

### 3.5. 使用环境

海上浮动核电站长期海洋环境中, 摇摆、倾斜可能会影响汽轮机油回油速度, 流速过大, 会使油箱中的油飞溅, 形成泡沫, 同时激烈搅拌还可能加剧乳化。在回油系统设计时应核算各种环境条件油速, 避免回油流速过大。此外空气湿度、盐雾等对汽轮机油的性能均有影响, 据调研渤海绥中海域空气湿度范围为 28%~94%, 湿空气凝结进入润滑系统可增加系统水分含量。

### 3.6. 辐射影响

核电站所用汽轮机油会受到不同程度辐射的影响, 发生变化是不可逆的。受辐射破坏的表现有: 气体析出, 黏度增大, 氧化安定性和防腐蚀性能下降, 颜色变深, 出现油泥, 酸值增加, 产生难闻气味等。一般辐射剂量超过  $10^6 \text{ J/kg}$  才显示出来[7]。

## 4. 防止运行汽轮机油劣化的措施建议

### 4.1. 油箱设计

油箱不仅用于储存系统用油, 还起着分离油中水分、空气和杂质的作用, 所以油箱容量及结构的设计对油品性能有一定的影响。如油箱设计过小, 必然增加循环次数, 油在油箱的滞留时间就会相应缩短, 起不到分水、析气及分离杂质的作用。根据 GJB4000-2000《舰船通用规范》, 主汽轮机组的滑油系统的循环滑油舱的有效容量应不小于系统中滑油泵额定排量下 4 min 的供应量。根据 GB14541-2005《电厂用运行矿物汽轮机油维护管理导则》, 油在主油箱内的滞留时间至少要有 8 min。海上浮动核电站空间紧凑, 对油箱容积有所限制, 油在油箱的滞留时间较电厂短, 对汽轮机油分水性能要求较高。在设计时应优化油箱结构设计, 如加折流板等尽量延长油在油箱的滞留时间。

## 4.2. 油的流速

滑油系统通常依靠重力回油,但也应保持一定的流速(约 0.5~1.5 m/s),海上浮动核电站的摇摆、倾斜可能会影响汽轮机油回油速度,流速过大,会使油箱中的油飞溅,形成泡沫,同时激烈搅拌还可能加剧乳化。在回油系统设计时应核算摇摆、倾斜条件对油速的影响,避免回油流速过大。

## 4.3. 油净化处理

油净化处理在于随时清除油中颗粒杂质和水分等污染物,保持运行油性能指标在合格水平。目前火力发电厂汽轮机油净化处理方法主要包括重力分离法,过滤法、离心分离法、真空法、吸附法、聚结分离法,不同型式的油净化装置都有各自的局限性。聚集分离法能同时滤除汽轮机油中的固体杂质和水分等污染物,虽运行费用较高,但处理能力强,能耗低,振动小,故障少,维修方便,适用于空间小、远离海港的海上浮核电站。油净化系统的配置方式常用全流量净化和旁路净化。旁路净化虽效率不如全流量净化,但易于安装,可连续使用,不受运行限制。海上浮动核电站连续运行工况特点比较适合选用旁路净化。

## 4.4. 油系统运行管理

新机组投运前,系统管路存在的焊渣、碎片、砂粒等杂物,应彻底清理干净,否则可能造成轴承磨损和调速器卡涩等问题,还可能导致油的物理化学性能降低。机组启动前应对油系统进行彻底检查和清理,然后对系统采用大流量油冲洗,并采用旁路净化系统将油净化到规定范围内。运行过程中应定期检测油质,重点监督将汽轮机轴封和油箱上的油气抽出器以及多有与大气相通的门、孔、盖等。检修时油系统放油后应对油箱、油管道、滤油器、油泵、冷油器等内部的污染物进行检查和取样分析,查明污染物成分和可能的来源,提出应采取的措施。

## 4.5. 油品添加剂

油中添加一定量的抗氧化剂和防锈剂可提高抗氧化和防锈性能。但抗氧化剂和防锈剂具有一定的酸性,量不足时达不到相应效果,过量时可能对设备造成酸性腐蚀。因此要适量加入,尽可能减少酸性物质对设备的危害。目前,我国公认比较有效的抗氧化剂为 2,6-二叔丁基甲酚(T501),防锈剂为十二烯基丁二酸(T746),GB/T 7596-2008《电厂运行中汽轮机油质量》中规定运行油中抗氧化剂 T501 应不低于 0.15%,而防锈剂 T746 则应根据液相锈蚀试验进行及时补加,其添加量为油量的 0.02%~0.03%。

## 5. 结束语

汽轮机技术发展促使机组检修周期延长,要求汽轮机油具有更长的使用寿命。影响运行汽轮机油性能的主要原因为水分、空气、机械杂质等,运行中汽轮机油性能主要是由这些因素决定的。控制措施归结为三点:防止污染物进入、防止系统内部生成污染物、及时清除污染物。做好以上三点可以有效保持运行汽轮机油性能并延长其使用寿命。本文总结了汽轮机油性能评价指标要求,分析了海上浮动核电站运行汽轮机油劣化因素,并提出了防止运行汽轮机油劣化的措施建议,对提高机组运行的稳定性和可靠性具有参考意义。

## 参考文献 (References)

- [1] Barnes, M. (2001) Water—The Forgotten Contaminant. Noria Corporation. <http://www.maintenanceworld.com/Articles/barnesm/waterthe.html>
- [2] 李焯峰. 运行汽轮机油乳化和污染问题研究[J]. 热力发电, 2000(6): 50-53+1.

- [3] 王建华, 张博. 从美军汽轮机油标准变化看舰船汽轮机油发展趋势[J]. 润滑油, 2015(4): 48-52.
- [4] Gatto, V.J, Ryan, H. and Iyer, R.N. (2001) Turbine Oils with Excellent High Temperature Oxidative Stability. US Patent 6,326,336. 2001-12-4.
- [5] Attwood, N. and Milsom, J. (2000) Experience of Conditioning of Oils in Power Generation & Distribution. Power-Gen Europe 2000. Helsinki, 6.
- [6] Chasan, D.E., Difrancesco, S.R., Ribeaud, M., *et al.* (2006) Oxidation Testing of Long-Life Turbine Oil Fluids. Can We Do Better? *Journal of Astm International*, **3**, 9.
- [7] 孟玉婵, 刘文凯, 徐平. 我国运行汽轮机油标准的发展与现状[J]. 润滑油, 2006(5): 1-9.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)