

· 四川大学精品立项教材 ·

水力机组辅助设备

S HUILI JIZU FUZHU SHEBEI

主 编 杜 敏

副主编 桂 林 董克青



四川大学出版社

水力机组辅助设备

S HUILI JIZU FUZHU SHEBEI

主 编 杜 敏

副主编 桂 林 董克青



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞
责任校对:蒋 玟
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

水力机组辅助设备 / 杜敏主编. —成都:四川大学出版社, 2013. 12

四川大学精品立项教材

ISBN 978-7-5614-7378-8

I. ①水… II. ①杜… III. ①水力机组—辅助系统—高等学校—教材 IV. ①TV735

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 290531 号

书名 水力机组辅助设备

主 编	杜 敏
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
书 号	ISBN 978-7-5614-7378-8
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	12.75
字 数	304 千字
版 次	2014 年 9 月第 1 版
印 次	2014 年 9 月第 1 次印刷
定 价	25.00 元

版权所有◆侵权必究

◆读者邮购本书,请与本社发行科联系。

电话:(028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

◆网址:<http://www.scup.cn>

序

《水力机组辅助设备》是能源与动力工程专业（水利水电动力工程方向）的专业课，该课程直接面向工程实际，为水电站辅助设备的设计、生产、安装、运行、维护提供理论基石，对其他能源动力部门也有借鉴作用。本课程涉及面广，综合性强，各章的最终落脚点是让学生学会设计方法，并能在实际中灵活运用基本概念、原理、方法去分析和解决实际问题。

教材是根据教学大纲所规定的内容及教学法的要求，以简明扼要的文字、图表，系统阐明一门学科的知识。教材是教师和学生学习的知识载体，一般具有科学性、先进性、适用性，但由于一门教材在投入使用的期间，该学科也在发展进步，故教材内容与学科的发展会存在一定的差距。随着水电建设的发展，一批巨型电站开始投产，水力机组辅助设备的功能也日益完善，性能和自动化水平逐步提升，适应水力机组辅助设备技术发展的本科教材深感缺乏。

作为专业课教材，全书系统地论述了水力机组辅助设备与监测装置的工作原理、设备选择计算和自动操作系统的组成，考虑了我国大容量水力发电机组的实际，更新了专业知识，新加入了大量近年投产大电站的油气水系统图；同时介绍了圆筒阀（国外早已采用，具有明显的优越性，目前国内很少采用）的结构和操作过程，以扩大学生视野。全书结合教学实践与需要，合理编排了章节次序与内容，保证了教材具有较强的实用性，介绍了先进技术和理论在该专业领域的应用及其发展趋势，体现了教材的先进性。

陈德新

2014年6月15日

前 言

本书是按照能源与动力工程专业（水利水电动力工程方向）培养目标的要求而编写的。全书共分7章，包括油系统、压缩空气系统、技术供水系统、排水系统、水轮机进水阀及其操作系统、辅助设备系统的设计以及机组水力参数的测量。

全书由杜敏担任主编。其中第1、3、5章由四川大学杜敏编写，第4、7章由四川大学桂林编写，第2、6章由中水北方天津院董克青编写。全书由杜敏统稿。

华北水利水电学院陈德新教授审阅了本书，提出了很多中肯的修改意见，在此表示衷心的感谢！

在编写本书的过程中，有关科研、设计和运行单位以及兄弟院校为我们提供了许多参考资料和宝贵的意见，得到了四川大学教务处和四川大学出版社的大力支持与帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中不妥或错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2013年11月

目 录

第 1 章 油系统	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 油的基本性质	(2)
1.3 油的劣化和净化处理	(9)
1.4 油系统的任务、组成和系统图	(13)
1.5 油系统的计算和设备选择	(21)
1.6 油系统布置设计及防火要求	(29)
第 2 章 压缩空气系统	(32)
2.1 水电站压缩空气的用途	(32)
2.2 活塞式空气压缩装置	(33)
2.3 机组制动供气	(39)
2.4 机组调相压水供气	(45)
2.5 风动工具、空气围带和防冻吹冰用气	(51)
2.6 油压装置供气	(56)
2.7 热力干燥法	(59)
2.8 水电站压缩空气的综合系统	(61)
第 3 章 技术供水系统	(69)
3.1 概述	(69)
3.2 用水设备对供水的要求	(74)
3.3 水的净化	(83)
3.4 水源、供水方式及设备配置方式	(87)
3.5 技术供水系统	(94)
3.6 技术供水系统设备及管道选择	(101)
3.7 技术供水系统水力计算	(113)
第 4 章 排水系统	(119)
4.1 排水系统的分类和排水方式	(119)
4.2 渗漏排水	(120)
4.3 检修排水	(123)
4.4 排水系统图	(125)
第 5 章 水轮机进水阀及其操作系统	(130)
5.1 进水阀的作用及设置条件	(130)

5.2 进水阀的形式及其主要构件	(131)
5.3 进水阀的操作方式和操作系统	(144)
第6章 辅助设备系统的设计	(149)
6.1 辅助设备系统设计的任务	(149)
6.2 设计阶段及其内容	(149)
6.3 设计基本资料	(151)
6.4 方案拟定和比较	(152)
6.5 设计成果	(155)
第7章 机组水力参数的测量	(157)
7.1 概述	(157)
7.2 电站水位和水头的测量	(158)
7.3 水轮机引、排水系统的监测	(164)
7.4 水轮机流量的测量	(170)
7.5 水力量测系统的设计	(188)
参考文献	(193)

第 1 章 油系统

1.1 概述

1.1.1 水电厂用油种类

在水电厂调速器的操作中，机组及其辅助设备的润滑，以及电气设备的绝缘、消弧等，都是用油作为介质完成的。由于设备的工作条件和要求不同，故用油的种类和作用也不同。水电厂用油主要分为润滑油和绝缘油两大类。

1. 润滑油

润滑油分为以下几种：

(1) 透平油：供机组轴承润滑及液压操作作用（包括调速系统、进水阀、调压阀、液压操作阀等）。

(2) 机械油：供电动机、水泵轴承及起重机等润滑用。

(3) 压缩机油：供空气压缩机润滑用。

(4) 润滑脂（黄油）：供滚动轴承润滑及小型机组导水叶轴承润滑用，并对机组部件起防锈作用。

2. 绝缘油

绝缘油主要用于水电厂电气设备中，其绝缘性能远比空气好，不仅可以吸收和传递电气设备运行时产生的大量热量，还可以将油开关截断负载时产生的电弧熄灭。

绝缘油分为以下几种：

(1) 变压器油：供变压器及电流、电压互感器用。

(2) 开关油：供油开关用。

在水电厂用油中，用量最大的是透平油（又称为汽轮机油）和变压器油（又称为绝缘油）。大型水电站每年用油量达数百吨乃至数千吨，中、小型水电站也有数十吨到百余吨。为了保证如此大量的油处于良好状态，以完成其各项任务，需要有油供应维护设备组成的油系统。

1.1.2 油的作用

1. 透平油的作用

透平油在设备中的作用主要是润滑、散热和液压操作。

润滑作用：在轴承间或滑动部分间造成油膜，以润滑油内部摩擦代替固体干摩擦，

从而减少设备的发热和磨损，延长设备寿命，保证设备的功能和安全。

散热作用：设备转动部件因摩擦所消耗的功转变为热量，使它们的温度升高，这对设备和润滑油本身的寿命、功能有很大的影响，因此必须设法散出其热量。根据油的润滑理论，润滑油在流动作用下将热量传出，再经过油冷却器将其热量传导给冷却水，从而使油和设备的温度不致升高到超过规定值，保证设备的安全运行。

液压操作：在水电站中有许多设备，如调速系统、进水阀、调压阀以及管路上的液压阀等，都必须用高压油来操作。透平油可以作为能量传递的工作介质。

2. 绝缘油的作用

绝缘油在设备中的作用主要是绝缘、散热和消弧。

绝缘作用：由于绝缘油的绝缘强度比空气大得多，用油作绝缘介质可以大大提高电器设备的运行可靠性，缩小设备尺寸。同时，绝缘油还对棉纱纤维等绝缘材料起一定保护作用，提高其绝缘性能，使之不受空气和水分的侵蚀，而不致很快地变质。

散热作用：变压器运行时因线圈通过强大电流将产生大量的热量，此热量若不及时散发，温度过高将损害线圈绝缘，甚至烧毁变压器。绝缘油吸收了这些热量，在油流温差作用下利用油的流动作用将热量传出，再通过油冷却器将热量传给水流而往外散发，保证变压器的功能和安全。

消弧作用：当油开关切断电力负荷时，在触头之间会产生电弧。电弧的温度很高，如果不设法快速地将热量传出，使之冷却，弧道分子的离子化运动就会迅速扩展，电弧也就会不断地发生，这样就可能烧坏设备。此外，电弧的继续存在还可能使电力系统发生振荡，引起过电压，击穿设备。绝缘油在受到电弧作用时，会发生分解，产生约含70%的氢。氢是一种活泼的消弧气体，它一方面在油被分解的过程中从弧道带走大量的热；另一方面也直接钻进弧柱地带，将弧道冷却，限制弧道分子的离子化，并使离子结合成不导电的分子，使电弧熄灭。

1.2 油的基本性质

水电厂用油要起到前述作用，保证设备正常运行，其基本性质至关重要。下面介绍润滑油和绝缘油最重要的性质。

1.2.1 黏度

当液体质点受外力作用而相对移动时，在液体分子间产生的阻力称为黏度，即液体的内摩擦力。油的黏度表示油分子运动时阻止剪切和压力的能力。油的黏度分为动力黏度、运动黏度和相对黏度。动力黏度和运动黏度也合称为绝对黏度。

动力黏度：液体中有面积都为 1 cm^2 、相距 1 cm 的两层液体，当它们以 1 cm/s 的速度作相对移动时液体分子间产生的阻力即为此液体的动力黏度，以 μ 表示，单位为帕斯卡秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) 或毫帕秒 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)。 $1\text{ Pa} \cdot \text{s} = 1000\text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。在 CGS 制中，动力黏度以泊 (P) 或厘泊 (cP) 表示。 $1\text{ P} = 0.1\text{ Pa} \cdot \text{s}$ ， $1\text{ cP} = 1\text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

运动黏度：在相同的试验温度下，液体的动力黏度与密度之比称为运动黏度，以 ν

表示, $\nu = \mu / \rho$, 单位为平方米每秒 (m^2/s) 或平方毫米每秒 (mm^2/s)。在 CGS 制中, 运动黏度以斯 (St) 或厘斯 (cSt) 表示。1 cSt = $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

相对黏度 (或称为比黏度): 任一液体的动力黏度 μ 与 20.2℃ 水的动力黏度 μ_0 的比, 称为该液体的相对黏度, 以 η 表示, $\eta = \mu / \mu_0$ 。 η 是无量纲的。

工业上常用恩格拉尔 (Engler) 黏度计来测定液体的黏度, 故也称为恩氏黏度, 以 $^{\circ}\text{E}$ 表示。 $^{\circ}\text{E}$ 是无量纲的。温度 t 时 200 mL 的油从恩氏黏度计中流出的时间 (T_t), 与同体积的蒸馏水在 20℃ 时从同一恩氏黏度计流出的时间 (T_{20}) 之比 ($^{\circ}\text{E} = T_t / T_{20}$), 就是该油在温度 t 时的恩氏黏度。其中, 时间 T_{20} 称为恩氏黏度计的“水值”, 以标准仪表校验, 其数值应在 50~52 s 范围内。

将恩氏黏度 ($^{\circ}\text{E}$) 换算为运动黏度时, 可按如下的乌别洛德近似公式计算:

$$\nu = \left(0.0731^{\circ}\text{E} - \frac{0.0631}{^{\circ}\text{E}} \right) (\text{cm}^2/\text{s})$$

油的黏度并不是一个常数值, 它是随着温度变化而变化的, 所以表示黏度数值时, 总是说在什么温度下的黏度。图 1-1 表示油的黏度与温度的关系。

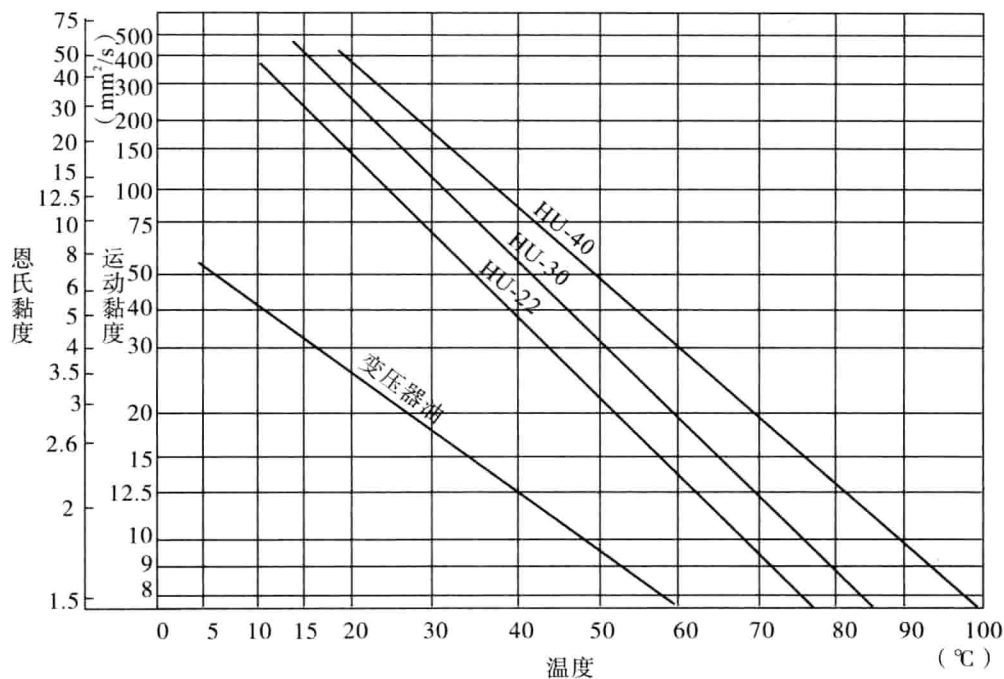


图 1-1 油的黏度与温度的关系

在实际工作中, 油品的黏度并不是一般在实验室里所测得的黏度, 而是随工作温度和压力变化的一种暂时黏度。

油品的黏度和黏度性质主要取决于它的组成。组成油品的三族烃——烷烃、环烷烃和芳香烃, 在碳原子数相同时, 芳香烃的黏度最高, 烷烃的黏度最低, 但不论哪族烃, 其黏度都随着分子量和沸点的增加而逐渐增大。因此, 组成不同的油品其黏度随压力的变化大小各有不同, 但一般油品的黏度都是随着该油当时的温度上升或所受压力下降而

降低,温度下降或所受压力上升而增高。

油的黏度是油的重要特性之一。对变压器中的绝缘油,黏度宜尽可能地小一些,因为变压器的绕组是靠油的对流作用来进行散热的,黏度小则流动性大,冷却效果更好。开关内的油也有同样的要求,否则在切断电路时,电弧所形成的高温不易散出,并降低消弧能力而损坏开关。但是当油的黏度降低到一定限度时,闪点也随之降低,因此绝缘油需要适中的黏度,规定在 50℃ 时,黏度不大于 1.8 (恩氏黏度)。

对于透平油,当黏度大时,易附着金属表面不易被压出,有利于保持液体摩擦状态,但会产生较大阻力,增加磨损,使散热能力降低;当黏度小时,则性质相反。一般在压力大和转速低的设备中使用黏度较大的油;反之,用黏度较小的油。规定在 50℃ 时,对新透平油,轻质的黏度不大于 3.2 (恩氏黏度),中质的不大于 4.3 (恩氏黏度)。透平油和绝缘油的黏度一般在正常运行中随着使用时间的延长而增加。

1.2.2 闪点

油品都是极易着火的物质,因此研究它们与着火、燃烧和爆炸有关的性质——闪点,对于油品的生产、储运和使用有着很重要的意义。

闪点是保证油品在规定的温度范围内储运和使用上的安全指标,也就是用以控制其中轻馏分含量不许超过某规定的限度,同时这一指标也可以控制它的储运和使用中的蒸发损失,并且保证在某一温度(闪点)之下,不致发生火灾和爆炸。对于变压器,闪点还可预报内部故障。

闪点是在一定条件下加热油品时,油的蒸气和空气所形成的混合气,在接触火源即呈现蓝色火焰并瞬间自行熄灭(闪光现象)时的最低温度。如果继续提高油品的温度,则可继续闪光,且生成的火焰越来越大,熄灭前所经历的时间也越来越长。并不是任何油气与空气的混合气都能闪光,其必要条件是混合气中烃或油气的浓度有一定的范围,低于这一范围油气不足,高于这一范围则空气不足,均不能闪光,这一浓度范围称为闪光范围。据研究,当混合气中油品蒸气的分压达到 40~50 mmHg^① 时,不会闪光,因此油品的闪光与其沸点或蒸气分压有密切关系,沸点越低,闪点也越低。

对于运行中的绝缘油和透平油,在正常情况下,一般闪点是升高的,但是若有局部过热或电弧作用等潜伏故障存在,则会使油品因高温而分解导致油的闪点显著降低。

油品的闪点不仅取决于化学组成,如含石蜡烃较多的油品闪点较高,而且与物理条件有关,如测定的方法、仪器、温度和压力等。油气和空气形成混合气的条件——蒸发速度和蒸发空间,对闪点的测定也有影响。闪点是在特殊的仪器内,于一定的条件下测定的,是条件性的数值。因此,没有标明测定方法的闪点是毫无意义的。新透平油的闪点用开口式仪器测定,不小于 180℃;新绝缘油的闪点用闭口式仪器测定,不小于 135℃。在测定闪点时,无论是开口式仪器还是闭口式仪器,油面越高,蒸发空间越小,越容易达到闪点浓度,闪点也越低。

^① 压强单位,1 标准大气压=760 mmHg=1.013×10⁵ Pa。

1.2.3 凝固点

各种油都可能在低温下使用，例如在冬季或在北方，水轮机启动时的油开关的温度基本上与环境温度相同。因此，油品在低温时的流动性就成为评价油品实用性能的重要指标，同时对于油品的装卸或输送也有很大的意义。如果油品失去流动性，则对于变压器和开关的工作都是不利的。

油品在低温时失去流动性或凝固的含义有两种情况：一种情况是对于含蜡很少或不含蜡的油品而言，当温度降低时，其黏度很快上升，待黏度增加到一定程度时，变成无定形的玻璃状物质而失去流动性，此种情况称为黏温凝固。油品刚刚失去流动性时的温度称为凝固点。另一种情况是由于含蜡的影响，当温度逐渐下降，油品中所含的蜡到达它的熔点时，就逐渐结晶出来，起初是少量的极微小的结晶，使原来透明的油品中出现云雾状的混浊现象。若进一步使油品降温，溶质与溶质相互作用，则使结晶大量生成，靠分子引力连接成网，形成结晶骨架，由于机械的阻碍作用和溶剂化作用，结晶骨架便把当时尚处于液态的油包在其中，使整个油品失去流动性，此种情况称为构造凝固。此时的温度也称为凝固点。

油的凝固点还受到油品中水分和苯等高结晶点的烃类影响，如油品中若含有千分之几的水，即可造成凝固点上升。油中若含有胶质、沥青质，则能降低凝固点，因为胶质妨碍石蜡结晶的长大，并破坏石蜡结晶的构造，使其不能形成网状骨架，从而使凝固点有所降低。

油品作为一种有机化合物的复杂混合物，没有固定的凝固点。它是在一定的仪器中，在一定的试验条件下，油品失去流动性时的温度。所谓失去流动性，也完全是条件性的，即当油品冷却到某一温度，将储油的试管倾斜 45° ，经过一分钟的时间，若肉眼看不出试管内液面有所移动，则此时油品就被看作凝固了。产生这种现象的最高温度就是该油品的凝固点。

一般润滑油在凝固点前 $5^\circ\text{C} \sim 7^\circ\text{C}$ 时黏度已显著增大，因此，一般润滑油的使用温度必须比凝固点高 $5^\circ\text{C} \sim 7^\circ\text{C}$ ，否则启动时必然产生干摩擦现象。一般规定：轻质新透平油的凝固点不大于 -15°C ，中质透平油不大于 -10°C ，绝缘油为 $-45^\circ\text{C} \sim -35^\circ\text{C}$ 。室外开关油，在长江以南可采用凝固点为 -10°C 的 10 号开关油，而东北地区则需要采用凝固点为 -45°C 的 45 号开关油。25 号绝缘油用于变压器内时，可不受地区气温限制，能在全国各地使用。

1.2.4 透明度

透明度测定在于判断新油及运行中的油的清洁和被污染的程度。如油中含有水分和机械杂质等，油的透明度要受影响；若胶质和沥青质含量越高，油的颜色越深，一般要求油呈透明橙黄色。

1.2.5 油中的水分

油中水分的来源有两种：一是外界侵入，二是油氧化而生成的。水在油中存在的状

态有三种：①游离水，当油劣化不严重时，外界侵入的水和油不发生什么变化，能很快分开，即油和水是两相的，这种水很容易除去，危害性不大；②溶解水，即水溶于油中，水和油是均匀的单一相，这种水能急剧地降低油的耐压，在高度真空下采用雾化方能除去；③结合水，是油初期老化的象征，因油氧化而生成，乳化状态的水以极其细小的颗粒分布于油中，这种水很难从油中除掉，其危害性很大。

油中含有水分会助长有机酸的腐蚀能力，加速油的劣化，使油的耐压降低。当含水量在 0.003% 以下时对油的绝缘水平影响不大，0.005% 以上方会影响绝缘水平，超过 0.01%~0.02% 时，油的绝缘强度则降低到最小值（0.1 kV），使油的介质损失角增大。此外，水分也会加速绝缘纤维的老化。

油中水分的测定方法分定性和定量两种，且都是条件性的。定性法测定时，将试油注入干燥的试管中，当加热到 150℃ 左右时可以听到响声，而且油中产生泡沫，摇动试管变成混浊，此时即认为试油含有水分，否则认为不含水分。定量法测定则是利用低沸点的无水溶剂携带水分的蒸馏方法测定油中的水分含量，结果用百分数表示。规定不论新油或运行油都不允许有水分存在。

1.2.6 油中的机械杂质

机械杂质是指在油中以悬浮状态而存在的各种固体，如灰尘、金属屑、纤维物、泥沙和结晶性盐类等。测定方法是将 100 g 油用汽油稀释，再用已干燥和称量过的滤纸过滤。滤纸上的残留物用汽油洗净，然后再将滤纸烘干称量，得到机械杂质重量，一般用占油重量的百分数表示。机械杂质有的是在地下油层中固有的，有的是开采时带上的，有的是加工精制过程中遗留下来的，也有的是在运输、保存和运行中混入的。如果机械杂质超过规定值，润滑油在摩擦表面的流动便会遭受阻碍，破坏油膜，使润滑系统的油管或滤网堵塞，使摩擦部件过热，加大零件的磨损率等。此外，机械杂质还促使油劣化，减低油的抗乳化性能。

1.2.7 油中的灰分

油中矿物性杂质，如溶解在油中的各类盐类、环烷酸的钙盐和钠盐等，当试油在坩埚内灼烧时，剩下的不能燃烧的无机矿物质的氧化物，即油的灰分。一般用残余物重量占试油重量的百分比来表示灰分的含量。透平油含有过多灰分时，油膜不均匀，润滑作用不好。作灰分测定可以判断新油的炼制质量，对运行中的油可以判断是否受了无机盐等影响，以及油劣化的程度、机械杂质的含量等。

1.2.8 酸值

油中游离的有机酸含量称为油的酸值（酸价）。酸值是用以中和 1 g 油中所含的酸性组分，以氢氧化钾的毫克数来表示。酸值是保证储运容器和使用设备不受腐蚀的指标之一。

新油中酸性组分是油品在精制过程中由于操作不善或精制不够，而残留在油中的酸性物质，如无机酸、环烷酸等；使用中的油品则是由于氧化而产生的酸性物质，如脂肪

酸、羟基酸和酚类等。因此，油品在使用过程中一般酸值是逐渐升高的，习惯上常用酸值来衡量或表示油的氧化程度。

一般规定：新透平油和新绝缘油的酸值都不能超过 0.05 KOH mg/g ；运行中的绝缘油不能超过 0.1 KOH mg/g ；运行中的透平油不能超过 0.2 KOH mg/g 。

1.2.9 水溶性酸或碱

油在精制过程中若处理不当，很可能有剩余的无机酸或碱存在，它们存在与否，是根据水抽出液的酸性或碱性反应来确定的。酸碱的存在使接触部件的金属表面和油管剧烈腐蚀，酸作用于铁和铁的合金，碱作用于有色金属，并且会加快油的劣化。水或乙醇溶液的抽出液对于酚酞不变色时，认为试油不含水溶性碱；抽出液对于甲基橙不变色时，认为试油不含水溶性酸。按规定，无论新油或运行中的油都要求是中性，无酸碱反应。

1.2.10 绝缘强度

绝缘强度是评定绝缘油电气性能的主要指标之一。在绝缘油容器内放一对电极，并施加电压。当电压升到一定数值时，电流突然增大而产生火花，这便是绝缘油的“击穿”。这个开始击穿的电压称为“击穿电压”。绝缘强度以在标准电极下的击穿电压表示，即以平均击穿电压 (kV) 或绝缘强度 (kV/cm) 表示。质量好的油的击穿电压要比质量差的油大得多，也就是由击穿电压的大小去大致判断绝缘油的电气性能的好坏。

击穿电压的大小取决于很多因素，如电极的形状和大小，电极之间的距离，油中的水分、纤维、酸和其他杂质，压力，温度，所施加电压的特征等。在提及击穿电压时，一定要注明其电极形式和极间距离。

绝缘油的电气强度是保证设备安全运行的重要条件，运行中很多因素都会降低其绝缘强度，严重时会发生电气设备击穿现象，造成重大事故。因此，对新油、运行油、再生油皆要做击穿电压试验，并合乎一定的要求。

1.2.11 油的介质损失角

根据高电压技术的试验研究，对于任何一种绝缘介质，在施加交流电压 U 时，可画出如图 1-2 所示的介质损失等值电路和矢量图。图中 I_c 是电容电流，滞后电压 90° ； I_κ 是电阻电容电流，相位滞后电压，但超前电容电流 I_c ； I_R 是电阻电流，与电压同相位。

当绝缘油受到交流电作用时，就要消耗某些电能而转变为热能，单位时间内这种消耗的电能称为介质损失。造成介质损失的原因有两个：一是因为绝缘油中包含有极性分子和非极性分子。极性分子是由于本身内部电荷的不平衡，或由于电场作用而引起的，它是偶极体，在交流电场中，由于不断变化电场的方向，使极性分子在电场中不断运动，因而产生热量，造成电能的损失。这种原因消耗的电流称为吸收电流 I_κ 。二是电流穿过介质，即泄漏电流，也造成电流损失，称为传导电流 I_R 。如无上述原因造成介

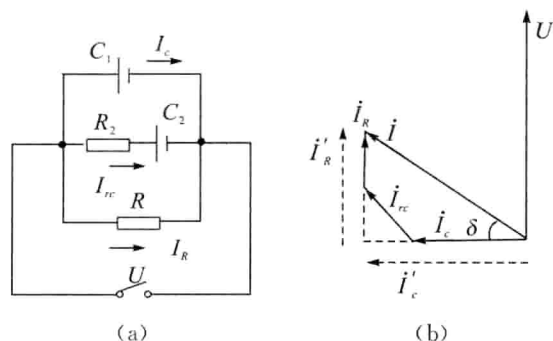


图 1-2 介质损失等值电路和矢量图

质损失，则加于绝缘油的电压 U 和通过绝缘油的电流 I 的相角将准确地等于 90° 。但由于绝缘油有介质损失，电流和电压的相角总小于 90° 。 90° 和实际相角之差，称为介质损失角，以 δ 表示。介质损失角是绝缘油电气性能中的一个重要指标，通常以 $\tan\delta$ 表示，而不以 δ 表示。如图 1-2 (b) 所示， $\tan\delta = \frac{I'_R}{I'_c}$ ，式中， I'_R 是通过绝缘油电流 I 的有功分量，会变为热能损耗掉； I'_c 是通过绝缘油电流 I 的无功分量，无损耗，用于建立电场。绝缘油之所以能绝缘，是因为虽然上述无功分量不大，但是有功分量相对无功分量来说就更小，小到可忽略不计。因此，优质绝缘油 $\tan\delta$ 是很小的。 $\tan\delta$ 越大，电能损失即介质损失越大。对判断变压器油的绝缘性质来说， $\tan\delta$ 是一个很灵敏的数值，它可以很灵敏地显示出油的污染程度。油质的轻微变化在化学分析试验尚无从辨别时， $\tan\delta$ 试验却能明显地发生变化。这种试验作为油的检查和预防性试验，效果是显著的。它比油的其他指标能较早地发出信号。当然这绝不是说明 $\tan\delta$ 可以代替油的其他性质指标。

1.2.12 抗氧化性

使用中的油在较高温度下，抵抗和氧发生化学反应的性能称为抗氧化性。由于油氧化后，沉淀物增加，酸价提高，使油质劣化，并引起腐蚀和润滑性能变坏，不能保证安全运行。因此，要求油的抗氧化性能高。按规定，油在规定条件下氧化后的酸价不大于 0.35 KOH mg/g ，沉淀物不大于 0.1% 。目前我国电厂普遍采用添加“721”抗氧化剂，根据各电厂的使用情况，这是油延长使用时间的一项有效措施。

1.2.13 抗乳化度

在一定条件下，使油与水混合形成乳化液，并达到完全分层所需的时间，称为抗乳化度，以 min 表示。透平油的耐用期要求不少于 2 年，一般希望能连续使用 4~8 年或更长。但水轮机使用的透平油都难免与水直接接触，故易形成乳化液。一旦油被乳化，其摩擦将增大，润滑性能将降低。为了保证设备润滑良好与正常运行，必须要求油品储存在循环系统中的油箱里，使油水完全分离，并定期将水排除，以利于循环使用。因此，要求透平油具有良好的抗乳化度，一般要求不超过 8 min。由于黏度小的油抗乳化

度好，因而在允许的范围内，一般采用黏度小的透平油；同时，黏度小的油抗氧化性也好，有利于酸值的控制。

油与水混合形成乳化液的能力，取决于油中是否存在能降低油品表面张力的物质，如易溶于水的酚环烷酸、有机酸，以及易溶于油的胶质、沥青等，这些统称为表面活性物质。一旦乳化液形成，这些表面活性物质将聚积在油和水之间的界面上，形成牢固的包着每个水滴的薄膜，阻碍着各个水滴的融合，从而使油水分离性能变差。此外，水和固体颗粒越分碎，越容易形成稳定的乳化液。

1.3 油的劣化和净化处理

1.3.1 油的劣化

1. 定义

油在运行或储存过程中，经一段时间之后，会因潮气侵入而产生水分，或因运行过程中的各种原因而出现杂质，酸价增高，沉淀物增加，使油的性质发生变化，改变了油的物理、化学性质，以致不能保证设备的安全、经济运行，这种变化称为油的劣化。

2. 危害

油劣化将造成酸价增高，闪点降低，颜色加深，黏度增大，胶质状和油泥沉淀物析出，影响正常润滑和散热作用，腐蚀金属和纤维，操作系统失灵等危害。

3. 原因

油劣化的根本原因是油和空气中的氧起了作用，油被氧化了。促使油加速氧化作用的因素有水分、温度、空气、天然光线和电流等。

1) 水分

水使油乳化，促进油的氧化，增加油的酸价和腐蚀性。水分是从以下几个方面进入油中的：油放置在空气中能吸收大气中的水分；随着空气温度和油温的变化（这两个温度都是随设备运行情况变化的），空气在低温油表面冷却而凝结出水分；设备安装检修不好，设备联结处不严密而漏水，或因油冷却器破裂漏水，如某电站下导轴承油冷却器有砂眼，水漏入油中；变压器和储油罐的呼吸器中干燥剂失效或效率低会带入空气中的水汽；从油系统或操作系统中混入水分。

2) 温度

油温升高，吸氧速度加快，也就是加速氧化，因此油劣化很快。实践证明，在正常压力下，油温为 30℃ 时氧化很慢；一般在 50℃~60℃ 开始加速氧化。因此，规定透平油不得高于 45℃，绝缘油不得高于 65℃。油温升高的原因是由设备运行不良造成的，如过负荷、冷却水中断，以及设备中油膜被破坏产生干摩擦等故障或局部产生高温。

3) 空气

空气中含有氧和水分，其影响同上所述。空气会引起油的氧化，空气中沙粒和灰尘会增加油中的机械杂质。油和空气除直接接触外，还有泡沫接触，泡沫接触面越大，氧化速度越快。泡沫产生的原因有以下几个方面：运行人员补油时速度太快，因油的冲击

带入空气；离心泵搅动剧烈时产生泡沫；油回到油槽时，由于排油管设计不正确或速度太快而产生泡沫；油在轴承中被搅动时产生泡沫。

4) 天然光线

紫外线对油的氧化有触媒作用，会促使油质劣化。经天然光线照射后的油，再转到无照射之处，劣化还会继续进行。

5) 电流

穿过油内部的电流会使油分解劣化。如发电机转子铁芯的涡流通过轴颈然后穿过轴承的油膜时，可较快地使油的颜色变深，并生成油泥沉淀物。

6) 其他因素

其他因素包括金属的氧化作用，检修后清洗不良，储油容器用的油漆不当，不同品种油的不良作用等。

4. 预防措施

根据上述因素采取的相应的预防措施如下：

(1) 消除水分侵入，如将设备密封防止漏水，保护呼吸器的性能良好。

(2) 保持设备正常工况，如不过负荷、冷却水正常供应、保持正常油膜等，主要使油和设备不过热。

(3) 减少空气接触，防止泡沫形成，如在储油槽中设呼吸器，在油槽上部设抽气管，用真空泵抽出油槽内的湿空气等。

(4) 设计安装油系统时，供排油管伸入油内避免冲击或设子网来冲击泡沫，供排油的速度不能太快，以防止泡沫产生。

(5) 避免阳光直接照射，如将储油槽布置在厂房北面阴凉处。

(6) 有油设备检修后采用正确的清洗方法。

(7) 选用合适的油漆，如亚麻仁油、红铅油、白漆即氧化铝等。

尽管采取了许多有效措施，但在长期运行中，油的性质仍然会发生不同程度的劣化，一般可采取净化的处理方式恢复。

1.3.2 油的净化处理

根据油被污染程度的不同，可分污油和废油。污油是指轻度劣化或被水和机械杂质污染了的油，经过简单的机械净化方法处理后仍可使用。废油是指深度劣化变质的油，不能用简单的机械净化方法恢复其原有性质，只有采用化学法或物理化学方法才能使油恢复原有的物理、化学性质，此法称为油的再生。下面介绍几种常用的机械净化方法。

1. 沉清

若油长期处于静止状态，油中的机械杂质和水分会随时间而逐渐沉降下来。沉降的速度与悬浮颗粒的密度和形状以及润滑油的黏度有关，颗粒的密度和形状越大，润滑油的黏度越小，机械杂质和水分的沉降速度越快。沉清的优点是设备极其简单、便宜，对油没有伤害；其缺点是所需时间很长，净化不完全，有些酸质和可溶性杂质等不能除去。

2. 压力过滤

压力过滤是使油加压通过滤纸，利用滤纸的毛细管的吸附及阻挡作用使水分、机械