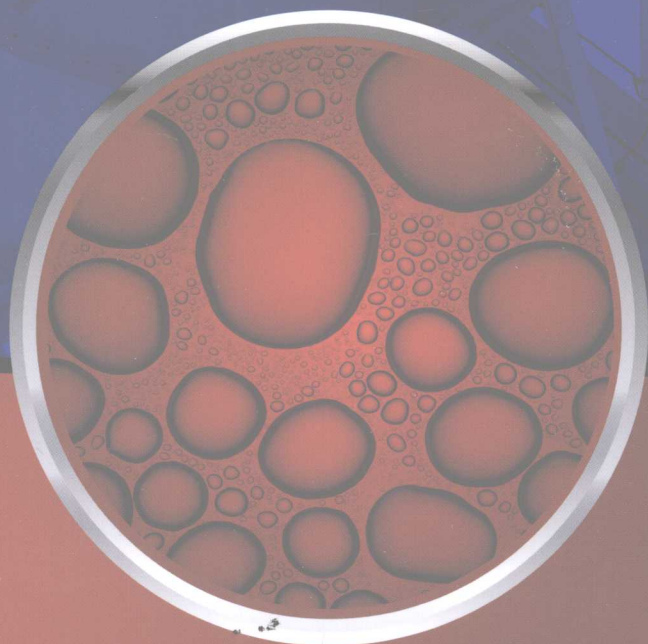


汪红梅 编著



DIANLI YONGYOU (QI)

电力用油 (气)



化学工业出版社

汪红梅 编著



DIANLI YONGYOU (QI)

电力用油 (气)

江苏工业学院图书馆
藏书章



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统叙述了电力用油的炼制工艺和化学组成,电力系统用油的物理性能、化学性能和电气性能,变压器油、汽轮机油和抗燃油的监督与维护,油浸式变压器气体监督和潜伏性故障的检测,六氟化硫绝缘气体,电力用油的净化与废油的再生,每章配有一定数量的思考题,书后附有常规的电力用油(气)分析方法,以方便读者自测和查询。

本书内容丰富,叙述条理清楚,既注重专业理论知识的系统阐述,又追求现场的可操作性和实用性,适合作为高等院校应用化学(电力化学方向)、热能动力工程、电气工程与自动化等相关专业的本科生、研究生的专业教材,也可作为电力化学、供电行业从事变压器类设备油务处理、变压器运行维护的工程人员、研究人员等的培训教材和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力用油(气)/汪红梅编著. —北京:化学工业出版社, 2008. 11

ISBN 978-7-122-03815-9

I. 电… II. 汪… III. ①电力系统-润滑油-基本知识
②电力系统-液体绝缘材料-基本知识③电力系统-气体
绝缘材料-基本知识 VI. TE626.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 153900 号

责任编辑:刘兴春 郑宇印

责任校对:边 涛

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 398 千字 2009 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着电力工业的迅速发展和技术装备水平的提高,大容量、高电压发供电用油设备和六氟化硫绝缘气体设备逐渐增多,电力用油(气)技术监督已经成为各个发供电单位的一项重要技术监督工作,对保障电力生产安全经济运行有重要的作用。

本书共分为六章,主要内容包括电力用油的基础知识;电力用油的性质;电力用油的监督与维护;油浸式变压器气体监督和潜伏性故障的检测;六氟化硫绝缘气体;油的净化与废油的再生处理。每章配有一定数量的思考题,且在书后附有电力用油(气)分析方法(节选),供读者自测和查询。

本书可作为高等院校应用化学(电力化学方向)、热动力工程、电气工程与自动化等相关专业的本科生、研究生的专业教材;也可作为从事电力化学、供电行业从事变压器类设备油务处理、变压器运行维护的工程人员、研究人员等的培训教材和参考用书。

书中引用了国内同行大量的资料,限于篇幅,不能在参考文献上一一列出,在此谨向他们致以诚挚的谢意。作者在多年专业教学、科研和本书的编写过程中得到了广东深圳大亚湾核电站肖维学高级工程师、武汉大学罗运柏教授等的指点和帮助,宁夏电科院的宋春林、万彩云等对本书内容提出了宝贵的建议,湖南益阳发电有限公司的李行工程师、湖北省孝感市恒源电力有限公司总经理任乔林、湖南省长沙电业局李季高工程师、张振华、陈坤汉、窦鹏、王宙东、陈浩、付玉、朱圣雷、张芳、杨晓焱等同志在本书的编写过程中付出了辛勤的劳动,给予了很大的帮助,在此表示衷心的感谢。

感谢长沙理工大学应用化学重点建设专业经费对本书出版的资助!

由于学识有限,书中不妥之处在所难免,恳请专家、同行和读者阅读后给予批评和指正。

编著者
2008年10月

目 录

绪论	1
第一章 电力用油的基础知识	3
第一节 石油及石油产品	3
第二节 电力用油的化学组成	11
第三节 石油的炼制及电力用油的生产工艺	14
第四节 电力用油的作用	27
习题与思考题	35
第二章 电力用油的性质	36
第一节 油品的物理性能	36
第二节 油品的化学性能	70
第三节 油品的电气性能	82
习题与思考题	97
第三章 电力用油的监督与维护	100
第一节 变压器油的监督与维护	100
第二节 汽轮机油的监督与维护	119
第三节 磷酸酯抗燃汽轮机油的监督与维护	131
习题与思考题	147
第四章 油浸式变压器气体监督和潜伏性故障的检测	148
第一节 变压器的产气故障	148
第二节 变压器油中溶解气体	154
第三节 气相色谱法分析变压器油中溶解气	164
第四节 变压器故障判断	169
第五节 油中溶解气体的在线监测	183
习题与思考题	186
第五章 六氟化硫 (SF ₆) 绝缘气体	188
第一节 SF ₆ 气体的基本特性	189
第二节 运行 SF ₆ 设备的气体管理	193
第三节 运行 SF ₆ 设备的气体检测	200
第四节 SF ₆ 设备内气体水分的检测	202
习题与思考题	204
第六章 油的净化与废油的再生处理	206
第一节 油的净化处理	206
第二节 废油的再生处理	209
第三节 废物的处理和回收	215
习题与思考题	216
附录 电力用油 (气) 分析方法 (节选)	217
参考文献	235

绪 论

电力用油（气）主要是指电力行业使用的绝缘介质、润滑介质和液压传动介质等。主要包括绝缘油、六氟化硫（ SF_6 ）气体、汽轮机油、合成抗燃油、机械油、润滑脂、电缆油等，但其中用量最大和对发、供电设备有直接影响的是绝缘油和汽轮机油。它们好比是机器中的血液，可以说没有上述油（气），发、供电设备就无法投入生产。本书重点介绍电气绝缘油（气）和润滑油两大介质的性能、作用、运行中的监督维护措施。

电力系统中所使用的油品不但种类多、数量大，而且要求油品的质量也比较严格，否则便不能发挥其应有的作用。

一、电力用油（气）种类及作用

1. 绝缘油

按电器绝缘油的使用场合，绝缘油分为变压器油、断路器油、电容器油及电缆油等。绝缘油是电力系统中重要的矿物液体绝缘介质，如变压器、断路器、电流和电压互感器、套管等中大都充以绝缘油，以起绝缘、散热冷却和熄灭电弧的作用。按电器绝缘油的使用场合，分为变压器油、断路器油、电容器油及电缆油等。因此要求绝缘油具有优良的物理化学性能及电气性能，特别是对超高压用油，更有其特殊性能要求。该类油品的用量较大，例如，一台 $300\text{MV} \cdot \text{A}$ 的主变压器约需 $30 \sim 50\text{t}$ 变压器油。近几年来，国内外某些充油电气设备已采用性能较好的合成有机绝缘液和 SF_6 绝缘气体，其主要优点是安全、设备占地面积少。

2. 汽轮机油

汽轮机油又称透平油，是电力系统中重要的润滑介质，主要用于汽轮发电机组、水轮发电机组及调相机的油系统中，起润滑、散热冷却、调速和密封等作用。该类油品的用量较大，例如，一台国产 50MW 机组一般需用 17t 左右的汽轮机油。对汽轮机油的质量无疑是有严格要求的，为了保证汽轮机组的安全运行，对 300MW 及以上机组的调速系统，已采用合成抗燃汽轮机油代替矿物汽轮机油。

3. 六氟化硫绝缘气体

SF_6 绝缘气体已广泛应用于断路器、组合式电器（GIS）中，电力变压器、高压电缆、互感器、粒子加速器、X光设备、超高频（UHF）等系统领域，在设备中起着绝缘和灭弧的作用，其优点是不燃烧，绝缘灭弧效果好，同时使电气设备的体积及占地面积大大减少。

4. 合成抗燃油

合成的抗燃油又称合成的抗燃液压油。电力行业中主要采用磷酸酯抗燃油，具有难燃性及不沿油流传递火焰的特点，甚至由分解产物构成的蒸气燃烧后也不引起整个液体的着火，主要用于大型发电机组的调节系统中，起着传递能量、调节速度的作用。

5. 机械用油

机械用油一般分为两类：一类是专用机械用油，如主轴油、织布机油、锭子油等；另一类为通用机械油。通用机械油的作用主要是润滑作用、减摩作用及冷却作用。

6. 燃料油

燃料油的主要成分是原油蒸馏后剩余的物质。根据使用场合的不同，可分为船用燃料油和炉用燃料油两大类。炉用燃料油（统称重油）是原油中最重的残渣油，在燃油电厂用作燃

料油，在燃煤电厂作为辅助燃料，如 0 号轻柴油。

二、电力用油（气）的检测、监督及管理工作的内容

电力系统油务工作的主要内容是电力用油（气）的检测监督和管理，具体工作有以下几项。

① 负责新油（包括机械油、润滑脂等）质量的验收及保管，即按相关试验方法及标准，对新油进行取样、化验、验收及保管。在购买新油时，必须有供油单位的化验单及验收单位提供的化验单，否则不应购买。

② 对运行油的监督与维护。根据试验结果研究油质存在的问题，提出处理意见，并与有关部门协作，保证不因油质问题而引起发、供电设备事故。

③ 对废油的更换、收集和再生处理。对主要设备都应有防止油质老化的技术措施，并认真做好监督维护工作，以延长油质的使用寿命。对再生油的质量应进行全面分析，以达到合格标准。

④ 设备及油系统检修时的检查和验收。在检查前有关部门不应消除设备内部的附着物 and 进行检修。对新安装的设备，应协助有关部门对将投运设备的油系统根据要求制定技术措施。

⑤ 对运行绝缘油中溶解气体进行气相色谱监督试验，根据试验结果，检测充油电气设备内的潜伏性故障，并与有关部门协作，及时消除充油电气设备内部潜伏性故障。

⑥ 对 SF₆ 绝缘气体的验收、监督及维护。

⑦ 开展相关的试验研究工作，进一步提高油质检测技术，开发更有效的防止油质劣化的措施，延长油品的使用寿命。

⑧ 建立各种油务监督、运行维护的记录、档案、图表及卡片，以掌握油质运行工况，积累运行数据，总结油质运行规律。

三、油（气）监督检测工作的作用

目前电力系统中使用的绝缘油和汽轮机油绝大多数是矿物油。由于受运行条件的影响，油在运行中不断老化，油的老化产物会损坏设备，威胁机组安全运行，严重者会造成设备事故。油务工作直接关系到电力系统用油设备的使用寿命和电力生产的安全经济运行。如果油品监督维护不当，就会使油品严重劣化，从而产生严重危害，主要危害有以下几方面。

1. 加速油品本身老化，使油品及设备的寿命缩短

油质劣化相对是一个较缓慢的过程，往往不能引起人们的足够重视而采取必要的措施，但这种缓慢的劣化过程危害也是很大的，运行油中劣化产物如不能及时排出，会加速油品自身劣化，如果不能在油品劣化过程中的“发展期”内有效阻止油品劣化，油品会很快恶化，产生酸性物质甚至油泥，使油品本身变质，从而可能酿成重大事故。

2. 造成油设备的损坏

油品经长期运行或使用不当，会产生酸性物质，当酸性物质达到一定量时，尤其是在有水存在的情况下，会对绝缘材料及油系统的其他材料产生腐蚀。油质不好时还可能乳化，造成润滑油的润滑性能不良而导致汽轮机轴承磨损，调速系统卡涩。油质严重劣化会产生油泥和沉淀物，这些沉淀物会使油通道堵塞，造成散热不好，绝缘下降等。如果运行维护不当，油中的外来杂质，如水分和固体颗粒等不仅会加速油品本身老化，同时还会使设备磨损或卡涩。

电力用油（气）包括绝缘油、汽轮机油、抗燃油、SF₆ 气体及发电机的氢冷气体等，涉及的设备有变压器、断路器、组合电器、汽轮机、发电机等多种发、供电设备，这些介质品质的好坏直接关系到电力设备的安全经济运行，因此做好电力用油（气）的检测、监督和维护管理是十分必要的。

第一章 电力用油的基础知识

本章主要介绍石油及石油产品、电力用油的化学组成及其表示方式，石油炼制及电力用油的生产工艺，电力系统中常用油（气）的分类及主要作用。

第一节 石油及石油产品

一、石油的来源

石油又称原油（petroleum），是从地下深处开采的可燃黏稠液体。原油的颜色非常丰富，有红、金黄、墨绿、黑、褐红色，甚至是透明的，其颜色是它本身所含胶质、沥青质的含量的表征，含量越高，颜色越深。一般而言，原油的颜色越浅其油质越好，透明的原油可直接加在汽车油箱中代替汽油。史上记载最早提出石油一词的是公元 977 年中国北宋 编著的《太平广记》。正式命名为石油是根据中国北宋杰出的科学家沈括（1031~1095）在所著的《梦溪笔谈》中根据这种油“生于水际砂石，与泉水相杂，惘惘而出”而命名的。在石油一词出现之前，国外称石油为魔鬼的汗珠、发光的水等，中国称为石脂水、猛火油、石漆等。

我们平时的日常生活中到处都可以见到石油或其附属品的身影，比如汽油、柴油、煤油、润滑油、沥青、塑料、液化气、纤维等，这些都是从石油中提炼出来的。

目前就石油的成因有两种说法：一是无机论即石油是在基性岩浆中形成的；二是有机论即各种有机物如动物、植物、特别是低等的动植物像藻类、细菌、蚌壳、鱼类等死后埋藏在不断下沉缺氧的海湾、潟湖、三角洲、湖泊等地经过复杂物理化学生物作用，最后逐渐形成石油。

二、石油的元素组成

石油是一种液态的，以烃类化合物为主要成分的矿产品。原油是从地下采出的石油，或称天然石油。人造石油是从煤或油页岩中提炼出的液态烃类化合物。组成原油的主要元素是碳（83%~87%）、氢（11%~14%），此外还有硫（0.06%~0.8%）、氮（0.02%~1.7%）、氧（0.08%~1.82%）及微量金属元素。其中主要元素 C、H 共占 96%~99%；次要元素 O、N、S 合计小于 1%；非金属元素包括 Cl、S、I、P 等；微量金属元素包括 Fe、Cu、Zn、Ca、Mg、K 等。石油的主要化学元素如表 1-1 所列。和煤相比，石油的含氢量较高而含氧量较低。在石油中的烃类化合物以直链烃为主，而在煤中则以芳香烃为主。至于石油中 N 和 S 的含量则因产地不同而异，如阿拉伯原油中含 S 约 1.74%，N 约 0.14%；而我国胜利油田的原油中含 S 约 0.81%，N 约 0.41%。相比之下，胜利油田的原油含硫量比较低，而含氮量较高。所以不同的原油在炼制、精制的条件和催化剂的选择等方面都是不同的。石油中的各种元素并非以单质形式存在，而是以各种不同的形式互相结合组成极为复

杂的烃类（约占 75％以上）及非烃类化合物。我国原油的一般性质和类别如表 1-2 所列。烃类的结构和含量决定了石油及其产品的性质。

表 1-1 石油的主要化学元素 单位：％（质量分数）

石油产地	相对密度	C	H	S	N	O	灰分
克拉玛依	0.8679	86.01	13.03	0.04	0.25	0.28	0.005
胜利	0.9005	86.26	12.20	0.80	0.41	—	—
大庆	0.8601	85.74	13.31	0.11	0.15	—	0.0027
大港	0.8826	85.67	13.40	0.12	0.23	—	0.018
格罗兹内(前苏联)	0.850	85.95	13.00	0.14	0.07	0.74	0.10
杜依玛兹(前苏联)	—	83.90	12.30	2.67	0.33	0.74	—
文都拉(美国)	0.912	84.00	12.70	0.40	1.70	1.20	—
宾夕法尼亚(美国)	0.810	85.80	14.00	—	0.06	—	—
埃及	0.907	85.15	11.71	2.25	0.89		—
墨西哥	0.970	83.00	11.00	4.30	1.70		—
伊朗	—	85.40	12.80	1.06	0.74		—

表 1-2 我国原油的一般性质及类别

原油 参数	大庆	长庆	任丘	中原	南阳	二连	大港	辽河	江汉	胜利	新疆	管输油
API 度	33.1	35	28.2	35.9	33	25.9	30.4	28.7	29.7	25.4	33.4	27.6
密度(20℃)/(kg/ cm ³)	855.4	845.6	882.1	841	856.2	894.9	869.7	879.3	874	898	853.8	885.2
黏度(50℃)/(mm ² /s)	20.19	6.7	43.38	10.1	24.6	83.6	10.83	17.44	21.9	74.20	18.8	34.05
凝点/℃	30	17	34	32	39	26	23	21	26	27	12	27
沥青质(C)/％	0	0	0	0	1.85	0	0	0	1.11	0.4	—	0
胶质/％	8.9	5.7	25.7	8	12.6	20.6	9.7	11.9	22	18.6	10.6	15.2
蜡含量/％	26.2	10.2	23.8	21.4	26.7	16.6	11.6	16.8	10.7	14.6	7.2	15.6
残炭/％	2.9	2.3	6.7	3.6	3.1	6.8	2.9	3.9	4.33	6.3	2.6	5.4
S/％	0.1	0.08	0.29	0.45	0.15	0.16	0.13	0.18	1.83	0.73	0.05	0.69
N/％	0.16	0.1	0.28	0.15	0.3	0.44	0.24	0.32	0.3	0.44	0.13	0.36
Ni/％	3.1	1.8	1.8	2.5	8.9	45.8	7	29.2	12	30	5.6	12.4
V/％	0.4	0.4	0.73	1.1	0.1	0.43	0.1	0.7	0.4	1.8	0.1	1.5
原油类别	低硫 石蜡基	低硫中 间石 蜡基	低硫 石蜡基	低硫 石蜡基	低硫 石蜡基	低硫 石蜡基	低硫 石蜡基	低硫中 间石 蜡基	含硫 石蜡基	含硫中 间基	低硫中 间基	含硫中 间基

三、石油的烃类组成

石油及其成品油主要是烷烃（即饱和烃，通式为 C_nH_{2n+2} ）、环烷烃（饱和烃 C_nH_{2n} ）、炔烃（不饱和烃，通式为 C_nH_{2n} ）、芳香烃（ C_nH_{2n-6} 如 C_6H_6 、 $C_6H_5CH_3$ ）等，这些烃类的组成和含量在不同的石油及其馏分中各不相同。

1. 石油馏分

石油中所含化合物种类繁多，必须经过多步炼制才能使用。主要过程有分馏、裂化、重整、精制等。石油中的烃的沸点随碳原子数增加而升高，在加热时，沸点低的烃类先汽化，

经过冷凝先分离出来；温度升高时，沸点较高的烃再汽化，再冷凝，借此可以把沸点不同的化合物进行分离，这种方法叫分馏，所得产品叫馏分。分馏过程在一个高塔里进行，分馏塔里有精心设计的层层塔板，塔板间有一定的温差，以此得到不同的馏分。分馏先在常压下进行，获得低沸点的馏分，然后在减压状况下获得高沸点的馏分。每个馏分中还含有多种化合物，可以进一步再分馏。

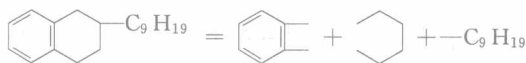
在石油炼制过程中，沸点最低的 $C_1 \sim C_4$ 部分是气态烃，来自分馏塔的废气和裂化炉气，统称石油气。在 $30 \sim 180^\circ\text{C}$ 沸点范围内可以收集 $C_5 \sim C_6$ 馏分，这是工业常用溶剂，这个馏分的产品也叫溶剂油。在 $40 \sim 180^\circ\text{C}$ 沸点范围内可以收集 $C_6 \sim C_{10}$ 馏分，这是需求量很大的汽油馏分。按各种烃的组成不同，又可以分为航空汽油、车用汽油、溶剂汽油等。提高蒸馏温度，依次可以获得煤油 ($C_{10} \sim C_{16}$) 和柴油 ($C_{17} \sim C_{20}$)。它们又分为许多品级，分别用于喷气飞机、重型卡车、拖拉机、轮船、坦克等。蒸馏温度在 350°C 以下所得各馏分都属于轻油部分，在 350°C 以上各馏分则属重油部分，碳原子数在 $18 \sim 40$ 之间，其中有润滑油、凡士林、石蜡、沥青等，各有其用途。我们将沸点小于 200°C 称低沸点馏分，如汽油；沸点在 $200 \sim 350^\circ\text{C}$ 称中高沸点馏分，如煤、柴油； $350 \sim 500^\circ\text{C}$ 称高沸点馏分或润滑油馏分。汽轮机油、变压器油等皆由润滑油馏分精制而成 (图 1-1)。

2. 烃类组成的表示法

(1) 单体烃 以单个烃的含量表示石油及其馏分中的烃类组成。此方法一般适用石油气和低沸点馏分。

(2) 族组成 用烷烃、环烷烃、芳香烃等烃化化合物的总含量表示石油和其馏分中的烃类组成。由于所用的分析方法不同，中沸点以上馏分的族组成通常以饱和烃 (烷烃和环烷烃)、轻芳香烃 (单环芳香烃)、中芳香烃 (双环芳香烃)、重芳香烃 (多环芳香烃) 等的含量表示，如表 1-3 所列。该方法简单且实用。

(3) 结构族组成 由于高沸点馏分重的烃类结构复杂、性质相近，很难定量分析出所有的单体烃，还有某些单体烃还具有混合结构，如 β -壬基四氢化萘是由环烷基、芳香基和烷基侧链所组成的混合烃，很难决定属于哪一族，无法用族组成表示。为此，提出一种具有实际意义的结构族组成表示法——结构族组成，该方法是把整个馏分 (各种烃类分子的混合物) 当作一种“平均分子”组成，并认为它是由某些“结构单位” (环烷环、芳香环和烷基侧链) 所组成，用“平均分子”中的环数以及每种“结构单位”在“平均分子”中所占的分量 (每个结构单位上的碳原子占总碳原子数目的百分数) 表示。



该化合物中碳原子的总数为 19，其中芳香环上的碳原子数为 6，环烷基侧链上碳原子为 4，烷基侧链上的碳原子数为 9。若用 C_A 、 C_N 和 C_P 分别表示芳香环、环烷环和烷基侧链上碳原子的百分数，则 C_A 为 31.6%， C_N 为 21.0%， C_P 为 47.4%；总环数 R_T 为 2，芳香环 R_A 为 1。通常测定石油及其馏分结构族组成的主要方法有色谱法、红外光谱法、n-d-v 法等。润滑油馏分脱蜡油的结构族组成如表 1-4 所示。

应注意，用结构族组成法表示烃类组成时，并不表明石油及其馏分中的每个分子都具有其结构族组成所示的那种机构，而只表示其中所有分子的平均结构，因此，环数有可能出现非整数值。

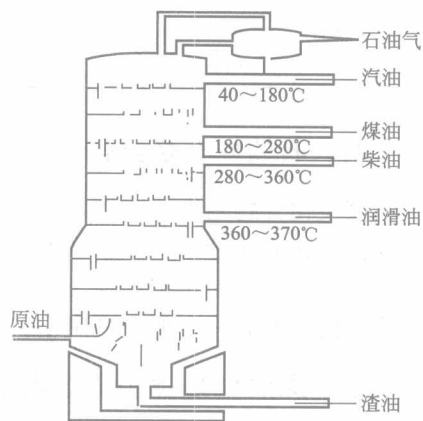


图 1-1 分馏塔示意

表 1-3 汽油馏分、减压馏分的烃类组成

原油名称	馏分	沸程/℃	族组成/%				
			饱和烃		芳香烃		
			烷烃	环烷烃	轻芳香烃	中芳香烃	重芳香烃
大庆	汽油馏分	初馏~180	57.0	40.0	3.0		
	减压馏分	350~400	86.5		7.5	2.1	2.4
		400~450	84.0		8.6	2.1	2.7
		450~500	76.2		9.9	3.8	3.2

表 1-4 润滑油馏分脱蜡油的结构族组成

原油名称	沸程/℃	结构族组成					
		C _P /%	C _N /%	C _A /%	R _N	R _A	R _T
大庆原油	350~400	62.5	23.8	13.7	1.21	0.51	1.72
	400~450	63.0	23.8	13.2	1.78	0.67	2.45
	450~500	60.5	25.0	14.5	2.10	0.92	3.02
胜利原油	350~400	66	21.8	12.2	1.0	0.5	1.5
	400~450	64	25.0	11.0	1.7	0.5	2.2
	450~500	60	27.5	12.5	2.3	0.7	3.0

四、石油中非烃类化合物

该类化合物是由氮、硫、氧元素与碳、氢元素组成的有机化合物。如含氮化合物、含硫化合物、含氧化合物，胶状及沥青状物质等，这类非烃类化合物在原油中的含量虽低，但因其化学稳定性、热稳定性及光稳定性都很差，是形成油泥沉淀的主要组分，对石油的加工和产品的使用都有一定的不良影响，应尽量除去。

五、原油中烃类和非烃类化合物的分布

原油是一种极复杂的混合物，它主要由各种烃类和含硫、氮、氧的非烃类衍生物组成。

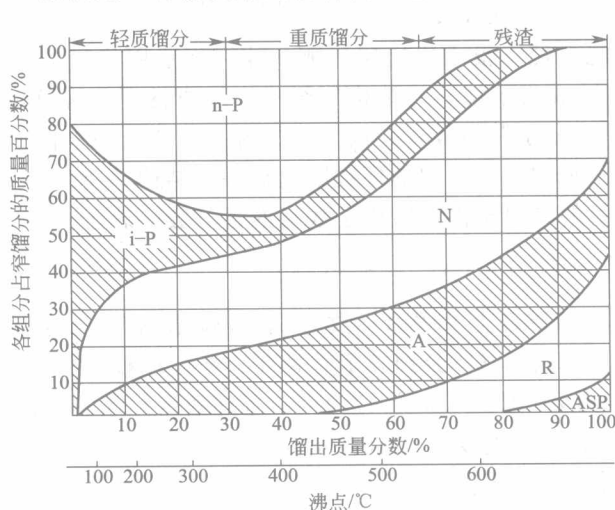


图 1-2 原油组成分布

n-P—正构烷烃；i-P—异构烷烃；N—环烷烃；
A—芳香烃；R—胶质；ASP—沥青质

烃类由烷烃、环烷烃、芳香烃和混合结构的环烷芳香烃构成；非烃衍生物主要是指含氧、硫、氮等杂原子的有机化合物，它们多以胶质、沥青质的形态存在于原油中。此外，还含有微量的元素硫、硫化氢和无机盐等。各种烃类和非烃类在原油中的分布随馏出深度（或者说随沸点的上升）而不同，图 1-2 所示的是某种原油烃类和非烃类化合物的分布情况。各种烃类所覆盖的面积和区域代表着该类烃在该原油中的总含量和分布状态，它们随原油基属和产地的不同会有差别，但就各种烃类和非烃类的分布规律来说，图 1-2 反映了一般规律，即在润滑油馏分中，含有较多的正构烷烃，

而残渣润滑油馏分中正构烷烃分布很少；异构烷烃的分布随沸点的升高变化不大；环烷烃和芳香烃主要分布在润滑油馏分中；烷烃+环烷烃——饱和烃，是润滑油馏分中的主体烃；胶质在轻质油中基本上不存在，主要分布在高沸点馏分中，且随馏出深度的增加而急剧增加；沥青质则主要分布在原油的残渣中，胶质大部分分布在原油的残渣中，成为石油沥青的主体成分。

六、石油产品的分类

标准是对工农业产品和工程建设质量、规格、检验方法、包装方法及储运方法等方面所制定的技术规范，是从事生产、建设工作、国际贸易和技术合作的共同技术依据。标准的种类很多，一般按其适用范围可分为国际标准、区域性标准、国家标准、专业标准、企业标准等。与石油产品相关的国外标准有：国际标准化组织（ISO，International Standards Organization）、国际电工委员会标准（IEC）、美国材料试验委员会（American Society for Testing and Material，ASTM）、法国（NF）、英国（BS）、前苏联（ГОСТ，OCT）等。

我国国家标准体制分三级制：国家标准、部颁标准和企业标准。同一级标准又分暂行（推荐）标准和正式标准两种。其标准代号组成为：符号+顺序号+制定年份。国家标准的代号为 GB（汉语拼音声母，即汉语拼音字头）。我国石油产品和润滑剂及其测试方法的行业标准演变了几次。20 世纪 80 年代以前为石油部标准（SY，SYB），1987~1988 年改为专业标准（ZBE），1992 年以后改为行业标准 SH 或 SH/T，原部颁标准电力系统油质试验方法（YS）、水电部（SD）和专业标准（ZBE）已作废。企业标准有中国石油总公司（IBE）、企业（Q）等。标准一般情况下是 5~10 年左右更换修订一次。

1. 石油及其产品分类

石油及其产品的分类繁多，这里仅介绍与电力用油工业有关的部分。按烃类组成的含量多少，大致可以将石油分为石蜡基油（烷烃含量超过 50%）、环烷基油（环烷烃含量超过 50%）、混合基油（含有一定数量的烷烃、环烷烃和芳香烃）。对于石油产品的分类，我国参照采用了国际标准 ISO 8681—1986（表 1-5），制定了石油产品和润滑剂的总分类标准 GB 498—1987（表 1-6）及石油产品和有关产品（L 类）的分类标准 GB 7631.1—1987（表 1-7）。参照 ISO 6743/5-88E 润滑剂、工业润滑油和有关产品（L 类）的分类标准制定了 GB 7631.10—1992 为汽轮机润滑剂的分类标准，见表 1-8。

表 1-5 ISO 8681—1986 石油产品和润滑剂的分类方法和类别的确定

类别	相应的含义
F	燃料(Fuels)
S	溶剂和化工原料(Solvents and raw materials for the chemical industry)
L	润滑剂、工业润滑油和有关产品(Lubricants industrial oils and related products)
W	蜡(waxes)
B	沥青(Bitumen)

表 1-6 GB 498—1987 石油产品和润滑剂的总分类标准

类别	F	S	L	W	B	C
含义	燃料	溶剂油化工原料	润滑油及有关产品	蜡	沥青	焦

表 1-7 GB 7631.1—1987 润滑剂和有关产品（L 类）的分类标准

组别	应用场合	组别	应用场合
A	全损耗系统	P	风动工具
B	脱膜	Q	热传导
C	齿轮	R	暂时保护防腐蚀
D	压缩机(包括冷冻机及压缩泵)	T	汽轮机
E	内燃机	U	热处理
F	主轴、轴承和离合器	X	用润滑脂场合
G	导轨	Y	其他应用场合
H	液压系统	Z	蒸汽汽缸
M	金属加工	S	特殊润滑剂应用场合
N	电器绝缘		

表 1-8 汽轮机润滑剂的分类标准（参照 ISO6743/5-88E 润滑剂、工业润滑油和有关产品（L 类）的分类）

类别	应用范围	特殊应用	更具体应用	组成和性质	品种代号
T	汽轮机	蒸汽、直接或齿轮连接到负荷	一般用途	具有防锈性和氧化安定性的深度精制的石油基润滑油	L-TSA
			特殊用途	不具特殊难燃性的合成液	L-TSC
			难燃	磷酸酯润滑油	L-TSD
			高承载能力	具有防锈性和氧化安定性和高承载能力的石油基润滑油	L-TSE
		气体(燃气)、直接或齿轮连接到负荷	一般用途	具有防锈性和氧化安定性的深度精制的石油基润滑油	L-TGA
			较高温下使用	具有防锈性和氧化安定性的深度精制的石油基润滑油	L-TGB
			特殊用途	不具特殊耐热的合成液	L-TGC
			难燃	磷酸酯润滑油	L-TGD
			高承载能力	具有防锈性、氧化安定性和高承载能力的石油基润滑油	L-TGE
		控制系统	难燃	磷酸酯控制液	L-TCD
		航空涡轮发动机			L-TA
		液压传动装置			L-TH

关于电器绝缘油的分类，国际电工学会制定了 IEC1039-1990 绝缘油的一般分类标准，IEC 1100-1992 按燃点和热值划分的绝缘油分类标准。我国等效采用 IEC1039-1990，制定了绝缘液体分类标准 GB/T 7631.15—1998（表 1-9）。每个品种由两个英文字母和数字组成的代号表示。第一个英文字母 N 表示该油品所属的组别，即绝缘液体；第二个英文字母表示该产品的主要应用范围，其中：C 表示用于电容器，T 表示用于变压器和开关，Y 表示用于电缆。

2. 石油添加剂的分类

我国石油化工有限公司标准 SHO389—1992《石油添加剂分类》中按应用场合的不同，将石油的添加剂分为润滑剂添加剂、燃油添加剂、复合添加剂和其他添加剂四种。类别名称用汉语拼音字母“T”表示。电力用油中所使用的添加剂大部分都属于润滑剂添加剂。石油添加

表 1-9 电器绝缘油分类 (GB/T 7631.15—1998)

类别	组别	IEC 出版物号	IEC 出版物小分类	参见 IEC 出版物
L	NT	296	I, II, III	IEC296, 矿物油
	NT	296	I A, II A, III A	IEC296, 加抑制剂矿物油
	NY	465	I, II, III	IEC465, 电缆油
	NC	588	C-1, C-2	IEC588, 电容器用氯化联苯
	NT	588	T-1, T-2, T-3, T-4	IEC588, 变压器用氯化联苯
	NY	867	11	IEC867, 第 1 部分, 烷基苯
	NC	867	2	IEC867, 第 2 部分, 烷基二苯基乙烷
	NC	867	3	IEC867, 第 3 部分, 烷基萘
	NT	836	1	IEC836, 硅液体
	NY	963	1	IEC963, 聚丁烯

剂的种类及分组情况见表 1-10，其名称用代号表示，名称中第一个（或前两个）阿拉伯数字表示该品种所属的组别。如我们常用的 T501 抗氧化剂，其中“T”表示类别，即石油添加剂类，“501”表示品种，即抗氧化剂和金属减活剂中的 2,6-二叔丁基对甲酚，而“5”则表示润滑剂添加剂部分中抗氧化剂和金属减活剂的组别号。再如，我们常见的汽轮机防锈剂，十二烯基丁二酸的代号为 T746，抗泡沫剂甲基硅油的代号为 T901。

表 1-10 石油添加剂的种类及分组情况

组 别		组号	组 别		组号
润滑剂添加剂	清洁剂和分散剂	1	燃料添加剂	消烟剂	20
	抗氧防腐剂	2		助燃剂	21
	极压抗磨剂	3		十六烷值改进剂	22
	油性剂和摩擦改进剂	4		清洁分散剂	23
	抗氧化剂和金属减活剂	5		热安定剂	24
	黏度指数改进剂	6		染色剂	25
	防锈剂	7	复合添加剂	汽油机油复合剂	30
	降凝剂	8		柴油机油复合剂	31
	抗泡沫剂	9		通用汽车发动机油复合剂	32
	其他润滑剂添加剂	10		二冲程汽油机油复合剂	33
燃料添加剂	抗爆剂	11		铁路机车油复合剂	34
	金属钝化剂	12		船用发动机油复合剂	35
	防冰剂	13		工业齿轮油复合剂	40
	抗氧防胶剂	14		车辆齿轮油复合剂	41
	抗静电剂	15		通用齿轮油复合剂	42
	抗磨剂	16		液压油复合剂	50
	抗烧蚀剂	17		工业润滑油复合剂	60
	流动改进剂	18		防锈油复合剂	70
	防腐蚀剂	19			

3. 电力用油的分类及名称

电力用油的分类及名称见表 1-11。我国目前生产的变压器油按其低温流动性（凝固点和倾点）分为 10 号、25 号、45 号三个牌号。10 号和 25 号变压器油的倾点分别为不高于 -7°C 和 -22°C （相当于凝固点为 -10°C 和 -25°C ），45 号变压器油的凝固点不高于 -45°C 。国内外部分变压器油品种、牌照对照见表 1-12。我国又将专门用于 500kV 变压器中的变压器油称为超高压变压器油，用在 330kV 及以下变压器中的变压器油称为普通变压器油。

表 1-11 电力用油的分类及名称

类 别	组 别	名 称
电气用油	变压器油	10 号、25 号、45 号三个牌号变压器油
	超高压变压器油	按 SH 0040—1991《超高压变压器油》标准分为 25 和 45 号两个牌号
	电容器油	按 GB 4624—1988《电容器油》将它按用途分为 1 和 2 两种牌号
	断路器油	按 SH 0351—1992《断路器油》标准只有一种牌号
	高压充油电缆油	只有企业标准一种牌号
润滑油	汽轮机油	32 号、46 号、68 号和 100 号四个牌号汽轮机油
燃料油	重油	60 号、100 号、200 号三个牌号重油
	渣油	渣油

表 1-12 国内外部分变压器油品种、牌照对照

品种	牌 号	品种	牌 号
长城	25 号、45 号	埃索	Univolt52、60, Insulating Oil HV
昆仑	CHPE T, 25K&45K, CHPE T 25L	日本能源	JOMOHS, Trans NO. 2, Trans Eletus
英国 BP	Energol, JS - A	壳牌	Shell Diala A、B、D、G、AX、BX、DX、GX
加德士	Transformer Oil, Transformer Oil BSL	道达尔	Total, Isovoltine II, Isovoltine KA 7-4
嘉实多	Castrol, Insulex, T(BS148 Class 2)		

选用变压器油依据是以极低气温不低于牌号的凝点且最靠近牌号的油品。牌号为 10 号，适用于极低气温不低于 -10°C 的地区；25 号适用于极低气温低于 -10°C ，不低于 -20°C 的地区；45 号适用于极低气温低于 -20°C 的地区。

我国目前生产的汽轮机油是具有抗乳化能力的油。按 40°C 的运动黏度的中心值划分为 32 号、46 号、68 号和 100 号四种牌号。如 32 号汽轮机油 40°C 的运动黏度的允许值为 $28.8\sim 35.2\text{mm}^2/\text{s}$ [即 $32\times(1\pm 10\%)\text{mm}^2/\text{s}$]，其 40°C 的中心运动黏度值即为 $32\text{mm}^2/\text{s}$ 。原来以 50°C 的运动黏度划分汽轮机油牌号的方法已经废止，相应的 20 号、30 号等汽轮机油也不复存在，与原来 20 号、30 号汽轮机油相对应的即是目前的 32 号和 46 号油。防锈汽轮机油是用量最大和使用最普通的汽轮机油品种。表 1-13 为不同牌号的汽轮机油的适用范围。表 1-14 是国内外防锈汽轮机油的品种牌号对比表。

表 1-13 不同牌号的汽轮机油的适用范围

牌 号	适 用 范 围
L-TSA32	$\geq 3000\text{r}/\text{min}$ 的汽轮机或 $>1000\text{r}/\text{min}$ 的水轮机组
L-TSA46	$<2000\sim 3000\text{r}/\text{min}$ 的汽轮机或 $<1000\text{r}/\text{min}$ 的水轮机组
L-TSA68	船舶汽轮机
L-TSA100	

表 1-14 国内外汽轮机油产品不同牌号的对照

长城	TSA 防锈汽轮机油 32	TSA 防锈汽轮机油 46	TSA 防锈汽轮机油 68
昆仑	TSA 防锈汽轮机油 32	TSA 防锈汽轮机油 46	TSA 防锈汽轮机油 68
统一	Monarch TB 32	Monarch TB 46	Monarch TB 68
美孚	Mobil DTE Light	Mobil DTE Medium	Mobil DTE Heavy Medium
壳牌	壳牌多宝 GT 32	壳牌多宝 GT 46	壳牌多宝 GT 68
	Turbo oil GT 32、Turbo oil T 32	Turbo oil GT 46	Turbo oil GT 68
埃索	Teresso 32	Teresso 46	Teresso 68
英国 BP	Turbinol 32	Turbinol 46	Turbinol 68
	Energol THB 32	Energol THB46	Energol THB68
	Energol TH-HT32	Energol TH-HT46	Energol TH-HT68
加德士	Regal r&o 32	Regal r&o46	Regal r&o68
	Gtas turbime 32	Gtas turbime 46	
嘉实多	Perfecto T32	Perfecto T46	Perfecto T68

第二节 电力用油的化学组成

一、电力用油的性能要求

电力系统所采用的绝缘油和汽轮机油是发、供电设备的重要绝缘介质和润滑介质，它们质量的好坏直接影响发、供电设备的安全、经济运行，所以电力系统对绝缘油、汽轮机油的质量有严格的规定和要求。

(1) 良好的抗氧化性能 绝缘油、汽轮机油一旦投入运行，受运行温度、电场、电晕和空气、金属等的影响，一般要求绝缘油能使用 10~20 年，汽轮机油使用 10~15 年，因此要求油品具有良好的抗氧化性能。

(2) 良好的冷却散热性能 变压器带负荷运行时，由于线圈和铁芯中的涡流损失和磁铁损失皆会转化为热量，若不及时散掉，将会降低变压器的出力、缩短其使用寿命，严重者会造成爆燃事故。汽轮机组金属部件相对转动，摩擦也会产生热量，这些热量主要通过油品吸收带出散掉，因此要求油品具有良好的冷却散热性能。

(3) 良好的低温流动性能 油品的低温流动性是指油品的黏度随温度的降低而增大，其流动性逐渐减小的特性。油品的低温流动性能对于生产、运输和使用都有重要意义。低温流动性差的油品不能在低温下使用。相反，在气温较高的地区则没有必要使用低温流动性好的油品，因为油品低温流动性越好，其生产成本越高。

(4) 优良的电气性能 一般评定绝缘油（变压器油、断路器油等）的电气性能的指标是击穿电压（也称绝缘强度）、介质损耗因数、体积电阻率、析气性和相对介电常数等。如达不到上述性能要求的绝缘油，根本不能采用，以保证充油电气设备的安全运行。

(5) 适当的黏度和黏温性 对汽轮机油来说，选择适当的黏度是保证机组正常润滑的重要因素。汽轮机油不但要有良好的润滑性能，而且要求黏温特性要好，即要求其黏度不随温度的急剧变化而变化。

(6) 高温安全性，环保性能好，低毒性 油品的高温安全性通常用闪点、燃点、自燃点来反映了油品的燃烧性能。闪点、燃点、自燃点愈低，油品的挥发性愈大，安全性愈小。对于 300MW 及以上的高温高压机组，要求调速系统采用自燃点高的合成抗燃汽轮机油，以提

高机组运行的安全性。为保护生态圈的健康，特别是矿物润滑油在农业作业时可能发生的潜在危害，促使人们开发和使用生物可降解的润滑油，即“绿色润滑油”。所谓生物降解润滑油，是指它们能在较短时间内被活性微生物降解为二氧化碳和水。它们是以植物油为基础的润滑油，特别是菜籽油及植物油的衍生物和合成酯类。在欧洲，生物降解性能已开始成为人们选择润滑油的一个因素，并将植物油用于液压油、链锯油、农用润滑油、森林业润滑油及建筑工业润滑油。

二、润滑油馏分的化学组成

润滑油馏分的化学组成与中、低沸点馏分有所不同：混合结构的烃增多，分子中碳原子数增多，平均相对分子质量增大，一般约为 240~500；环状化合物中的环数增多，胶状、沥青状物质含量增大，密度增大。我国几种润滑油馏分的化学组成如表 1-15 所列。

表 1-15 石油润滑油馏分（350~500℃）的化学组成 单位：%（质量分数）

石油产地	正构烷烃	异构烷烃-环烷烃	轻芳香烃	中芳香烃	重芳香烃	胶质
延长	33.0	47.8	5.1	6.4	5.5	2.1
克拉玛依	5.0	72.0	8.1	7.5	3.2	4.2
川中	49.0	39.0	4.8	3.2	3.0	0.5

从表 1-15 可知，润滑油馏分中饱和烃的含量最大，约在 60% 以上；芳香烃含量次之；胶质含量较少。经脱蜡的润滑油馏分中，其烃类含量的趋势与表 1-15 基本相似，饱和烃的含量仍最大。

三、电力用油的烃类组成

汽轮机油、绝缘油等的化学组成与润滑油馏分相似，只是除去了其中的非理想组分。润滑油馏分经过精制后，除去了其中的非烃类化合物和易凝固、易氧化以及黏温性能差的烃类组分，剩下的几乎都是性能较好的烃类化合物，因而可以认为电力用油是由各种理想的烃类组成的。

国内外几种变压器油的烃类组成如表 1-16 所列。从该表可知，变压器油的烃类结构族组成的总趋势是： C_N 和 C_P 的值最大，表明饱和烃的含量最多； C_A 的值最小，表明芳香烃的含量最少。

表 1-16 变压器油的烃类组成

产地	$C_A/\%$	$C_P/\%$	$C_N/\%$	R_A	R_N	R_T
日本	16.08	36.40	47.52	0.53	1.55	2.03
中东	16.93	42.27	40.80	0.52	1.72	2.24
兰州(DB-25)	4.46	45.83	49.71			
新疆(DB-45)	4.58	45.38	50.06			

四、电力用油的化学组成对其性能的影响

电力用油的性能、作用与其组成是密切相关的。要使电力用油在设备中发挥应有的作用，保证设备安全运行，就需要保证油品的物理性能、化学和电气性能及使用性能达到一定的要求。

1. 烃类和非烃类对油品性质的影响

电力用油中的烃类和非烃类对油品的特性起着不同的作用，如表 1-17 所列。可以看出，