



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

电力用油（气）

汪红梅 编著

行业
精品



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电力用油（气）

编著 汪红梅

主审 罗运柏



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。

本书以基础知识—理论知识—应用实例的思路进行编写,全书共分为九章,主要内容包括电力用油基础知识、电力用油的性质、变压器油的监督与维护、油浸式变压器气体监督和潜伏性故障的检测、六氟化硫(SF₆)绝缘气体、汽轮机油的监督与维护、磷酸酯抗燃油的监督与维护、电厂辅机用油的监督与维护、油的净化与再生处理等。

本书重在培养学生运用理论知识解决实际问题的能力,同时兼顾油务监督和管理人员的从业特点,既注重专业理论知识的系统性,又重视现场的操作实用性。凡是开设《电力用油(气)》及相关课程学员都可以选用,既可作为高等院校应用化学(电厂化学方向)、热能动力工程、电气工程与自动化等相关专业的本科学生、研究生的专业教材;也可作为电厂化学、供配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、研究人员等学习、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:中国电力出版社, 2015. 3

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-7277-1

I. ①电… II. ①汪… III. ①电力系统—润滑油—高等学校—教材②电力系统—液体绝缘材料—高等学校—教材③电力系统—气体绝缘材料—高等学校—教材 IV. ①TE626. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 039498 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 3 月第一版 2015 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.75 印张 580 千字

定价 48.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

电力用油(气)是指蒸汽轮机、水轮机、燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环涡轮机发电机、变压器、断路器、组合电器等多种发电、供电主要设备的用油(气),还包括水泵、风机、磨煤机、空气预热器、空气压缩机等电厂辅机用油,其内容涉及电气设备制造、电力行业、冶金行业、石油化工等领域。油(气)质量直接关系到相应设备的安全经济运行,国内外各行业都十分重视对油(气)质量的监督。电力行业尤为重视油(气)监督与管理工作,历来把它纳为化学监督和绝缘监督的重要内容。

随着电力工业的迅速发展和技术装备水平的提高,以及大容量、高参数发电系统用油、供电系统用油(气)设备的投入使用,从2008年开始,国家标准化管理委员会、电力行业及石油化工行业等机构对油(气)近50个相关标准进行较大幅度的修订。为培养适应我国“十二五”电力用油(气)监督与管理人才,本书根据该课程教学大纲的要求,以培养学生运用理论知识解决实际问题的能力,兼顾油务监督和管理人员的从业特点,贯穿“理论联系实际”的编写原则,以目前最新的标准为依据,认真总结电力用油(气)教学、培训和科研中理论与实践成果编写而成。

本书主要介绍了电力用油的基础知识、性能、监督与维护 and 油的净化与油的再生处理等内容。在编写过程中力求内容的“新”和“全”,“新”体现在紧密结合电力用油(气)采样、试验方法和用油(气)设备运行中维护措施的最新方法标准和研究成果,“全”则表现在首次介绍电厂辅机用油的监督与维护,将汽轮机润滑油系统的防腐与化学清洗作为汽轮机油的监督与维护的内容。本书既对专业知识进行了系统阐述,又突出了现场操作的实用性。

本书既可作为高等院校应用化学(电厂化学方向)、热能动力工程、电气工程与自动化等相关专业的本科学生、研究生的专业教材,也可作为电厂化学、供电行业从事输变电设备运行监督维护的工程人员、研究人员等学习、培训教材和参考用书。

本书由汪红梅编著,任乔林、李行、黄云光、肖维学、朱怡霖、白彪、何维民、李霜霜、李洋、孟维鑫等参与编写。本书由武汉大学罗运柏主审,在此衷心感谢罗教授提出的宝贵意见和建议。本书在编写过程中得到了国网孝感供电公司、湖南益阳发电有限公司、广西电网公司电力科学研究院、湖南中心试验研究所、宁夏电力科技教育工程院等单位,以及上海电力学院储文玉和东北电力大学鲁敏等的帮助和指导,书中查阅和参考了国内相关的标准、书籍及期刊等文献,限于篇幅,未在参考文献上一一列出,在此谨向作者致以诚挚的谢意。

由于学识有限,书中不妥之处在所难免,恳请专家、同行和读者给予批评指正。

汪红梅

2015年1月



目 录

前言

绪论	1
第一章 电力用油基础知识	4
第一节 石油及石油产品	4
第二节 电力用油的化学组成	13
第三节 石油的炼制及电力用油的生产工艺	16
第四节 电力用油的作用	30
思考题	42
第二章 电力用油的性质	43
第一节 油品的物理性能	43
第二节 油品的化学性能	84
第三节 油品的电气性能	101
思考题	122
第三章 变压器油的监督与维护	125
第一节 绝缘油的质量标准	125
第二节 变压器油的监督	136
第三节 运行中变压器油维护管理	140
思考题	155
第四章 油浸式变压器气体监督和潜伏性故障的检测	157
第一节 变压器的产气故障	157
第二节 变压器油中溶解气体	165
第三节 气相色谱法分析变压器油中溶解气体	176
第四节 变压器潜伏性故障判断	183
第五节 变压器油中溶解气体的在线监测	204
思考题	213
第五章 六氟化硫(SF ₆)绝缘气体	216
第一节 SF ₆ 绝缘气体的基础知识	216
第二节 SF ₆ 绝缘气体的实验室检测技术	223
第三节 SF ₆ 电气设备现场检测技术	240
第四节 SF ₆ 电气设备内部故障的诊断技术	253
第五节 SF ₆ 绝缘气体的质量监督和管理	259
思考题	273

第六章 汽轮机油的监督与维护	275
第一节 涡轮机油的质量标准	275
第二节 汽轮机油的监督	288
第三节 汽轮机油的维护管理	292
第四节 汽轮机润滑油系统的防腐与化学清洗	305
思考题	314
第七章 磷酸酯抗燃油的监督与维护	315
第一节 抗燃油的基础知识	315
第二节 磷酸酯抗燃油劣化因素和机理	324
第三节 运行磷酸酯抗燃油的维护管理	328
思考题	335
第八章 电厂辅机用油的监督与维护	336
第一节 电厂辅机用油的质量标准	336
第二节 电厂辅机用油的监督与维护	345
思考题	350
第九章 油的净化与再生处理	351
第一节 油的净化处理	351
第二节 废油的再生处理	357
思考题	366
附录 电力用油（气）标准汇编	367
参考文献	371



绪 论

电力用油(气)主要是指电力行业使用的几种主要的绝缘介质、润滑介质和液压传动介质等。其主要包括绝缘油(气)、涡轮机油、合成抗燃油、电厂辅机用油等。它们好比是机器中的血液,可以说没有上述油(气),相应的发电、供电设备就无法投入生产。

一、电力用油(气)种类及作用

1. 绝缘油(气)

绝缘油是电力系统中重要的液体绝缘介质,根据油品应用的具体电气设备又分为变压器油、开关油、电缆油、电容器油等。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作用。因此要求绝缘油具有优良的理化性能及电气性能,特别对超高压用油,更有其特殊性能要求。该类油品的用量较大,例如,一台300MVA的主变压器需30~50t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SF₆绝缘气体。SF₆绝缘气体已广泛应用于断路器、组合式电器(GIS)、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。

2. 涡轮机油

涡轮机是利用流体冲击叶轮转动而产生动力的发动机。涡轮机油,也称透平油或者汽轮机油。根据流体的性质,涡轮机油又分为汽轮机油、燃气轮机油和燃气/汽轮机油。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300MW机组一般需用35t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,已采用合成抗燃油代替矿物汽轮机油。

3. 合成抗燃油

合成抗燃油又称合成的抗燃液压油。一台300MW机组电液调节系统用抗燃油量为0.8~1t。我国主要采用三芳基磷酸酯抗燃油,其具有难以燃烧及不沿油流传递火焰等性能,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。

4. 电厂辅机用油

电厂辅机用油主要包括发电厂(火力发电厂、水力发电厂及核电厂常规岛)水泵、风机、磨煤机、空气预热器、空气压缩机等设备的用油。除汽轮机油外,还包括液压油、齿轮油、空气压缩机油和液压传动油等。电厂辅机用油主要起润滑、减摩及冷却作用,借助液体的动能起传递能量等作用。

按油产品来源途径不同,燃料油分为石油基油(来自石油炼制产品)和合成油(气)。早期电力系统所用的合成绝缘油有硅油、二氯联苯(PCB)等。随着石油工业的发展,当前国内外电力系统,无论是绝缘油、润滑油都普遍使用石油基油产品。目前,电力系统设备使

用的典型合成油有磷酸酯抗燃油。六氟化硫气体也是化学工艺合成产品。

二、电力行业油务监督

电力系统的油务监督是化学监督的一项重要内容,其工作内容是坚持以“预防为主”的方针,认真贯彻国家和电力行业有关标准,广泛加强油(气)质量监督、开展气相色谱检测,以排除油(气)设备内的潜伏性故障,防止油(气)品质劣化,并围绕电力用油(气),对试验方法、新材料、新技术进行研究开发,制订和采取油(气)维护有效措施等。

1. 基建阶段的油(气)质量监管

在油(气)的储存、运输中,应特别注意油品的错混和防止水分和杂质的渗入。桶装变压器油严禁与润滑油或其他的油桶混放。对于大批量桶装到货的油品,应逐桶核对标签牌号,确认无误后才能进行采样验收;若要存放一段时间必须用防雨篷布盖住桶盖,或者将油桶倾斜,防止桶盖处聚集雨水,使水分渗入桶内。

2. 新油(气)质量的验收和运行油(气)的监督与维护

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。

定期监督运行油(气)的指标,根据试验结果研究油(气)质量存在的问题,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。

对油浸式变压器气体进行监督和潜伏性故障检测。对变压器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。

对主要设备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。

设备及油系统在检查前有关部门不应消除设备内部的附着物及进行检修。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订技术措施。

3. 油务管理与试验研究

油务管理包括油(气)的采购、储存、发放工作,防止油(气)的错用、混用及油质劣化;油库、油处理站及其所辖油区应严格执行防火防爆制度,从事接触油料工作必须注意有关保健、防护措施。

建立健全技术管理档案:

(1) 设备卡包括机组编号、容量、辅机类型、油量、油品规格、设备投运日期等。
(2) 油(气)的质量台账包括新油(气)、补充油(气)、运行油(气)、再生油(气)的检验报告等。

(3) 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(气)质量运行工况、积累运行数据、总结油(气)运行规律。

开展相关的试验研究工作,进一步提高油(气)质量检测技术,开发更有效的防止油(气)质量劣化的措施,延长油(气)的使用寿命。

三、电力行业油务监督的重要性

运行油(气)质量好坏直接地影响着设备和系统的安全运行和使用寿命;反过来设备和系统由于设计、制造、安装检修方面的原因,也会加速运行油质的劣化,形成恶性循环,从而缩短油品和设备的使用寿命。

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（气）在运行中不断老化。油（气）的分解产物会损坏设备，威胁机组安全运行，严重的会造成设备事故。油务工作直接关系到电力系统用油（气）设备的使用寿命和电力生产的安全经济运行。如果油（气）质量监督维护不当，就会使油（气）严重劣化，从而产生严重危害。

一是加速油（气）本身劣化，使油（气）及设备的寿命缩短；二是造成油（气）设备的损坏。

油品（气）质量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）质量的检测、监督和维护管理是十分必要的。

第一章 电力用油基础知识

电力系统常用的变压器油、汽轮机油、断路器油等主要由天然石油炼制而成。为了深入了解电力用油的性质及使用性能,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,石油炼制及以石油为原料电力用油的生产工艺,电力系统中常用油的分类及主要作用。

第一节 石油及石油产品

石油又称原油(Petroleum),属可燃性有机岩,由植物或动物等有机物遗骸形成的可燃性矿物质,是一种黏稠的、深褐色或暗绿色的液体。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在所著《梦溪笔谈》中这种油“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,中国称石脂水、猛火油、石漆等。

石油有“工业的血液”“黑色的黄金”等美誉。日常生活中到处都可以见到石油或其附属品的身影。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。

一、石油的元素组成

石油是一种液态的、以碳氢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碳氢化合物。石油的主要化学元素组成见表1-1。

表 1-1 石油的主要化学元素(质量百分比, Wt) %

石油产地	比重	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	0.850	85.95	13.00	0.14	0.07	0.74	0.10
杜依玛兹	—	83.90	12.30	2.67	0.33	0.74	—
文都拉(美)	0.912	84.00	12.70	0.40	1.70	1.20	—
宾夕法尼亚(美)	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	—	—

组成原油的主要元素是 C (83%~87%)、H (11%~14%)、S (0.06%~0.8%)、N (0.02%~1.7%)、O (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%；非金属元素有 Cl、S、I、P 等；微量金属元素有 Fe、Cu、Zn、Ca、Mg、K 等。石油中 N 和 S 的含量因产地不同而异，如杜依玛兹原油中含 S 约 2.67%，N 约 0.33%；而我国胜利油田的原油中含硫量比较低，约 0.80%，但含氮量较高，约 0.41%。不同的原油在炼制、精制的条件和催化剂的选择等方面各异，都有各自的特点。石油中各种元素并非以单质形式存在，而是以各种不同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。烃类的结构和含量决定了石油及其产品的性质。我国原油的一般性质及类别见表 1-2。

表 1-2

我国原油的一般性质及类别

原油名称	大庆原油	长庆原油	任丘原油	中原原油	南阳原油	二连原油	大港原油	辽河原油	江汉原油	胜利原油	新疆原油	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	846	882	841	856	895	870	879	874	898	854	885
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

二、石油的烃类组成

石油及其成品油的烃类主要包括饱和烃 [烷烃 (分子通式为 C_nH_{2n+2}) 和环烷烃 (C_nH_{2n})] 和不饱和烃 [烯烃 (C_nH_{2n})、炔烃 (C_nH_{2n-2}) 和芳香烃 (C_nH_{2n-6})] 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。石油中的烃类的沸点随碳原子数增加而升高，在加热时，沸点低的烃类先气化，经过冷凝先分离出来；温度升高时，沸点较高的烃再气化、再冷凝，借此可以把沸点不

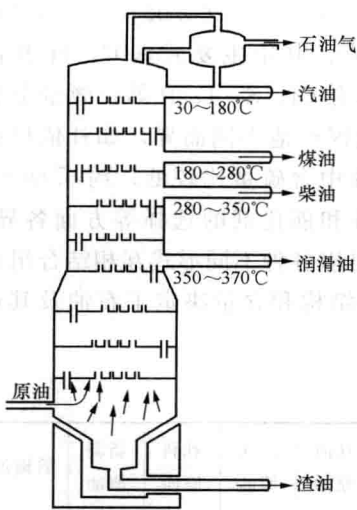


图 1-1 分馏塔示意图

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，如图 1-1 所示，分馏塔里有精心设计的多层塔板，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。石油馏分沸程分布可采用气相色谱法测定，如 SH/T 0558—1993《石油馏分沸程分布测定法（气相色谱法）》（2004 年确认）适用于常压终馏点不高于 538℃，蒸气压低到能在室温下进样和沸程范围大于 55℃的石油产品或馏分。NB/SH/T 0829—2010《沸程范围 174℃~700℃石油馏分沸程分布的测定—气相色谱法》适用于常压下初馏点高于 174℃且终馏点低于 700℃（C₁₀到 C₉₀）的石油馏分。

在石油炼制过程中，沸点最低的 C₁~C₄ 馏分在常温、常压下是气态烃，来自分馏塔的废气和裂化炉气统称石油气。在 30~180℃沸点范围内可以收集 C₅~C₆ 馏分，是工业常用溶剂，称为溶剂油。在 40~180℃沸点范围内可以收集 C₆~C₁₀ 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（C₁₀~C₁₆）和柴油（C₁₇~C₂₀），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。沸点在 350℃以下所得各馏分都属于轻油部分；在 350℃以上各馏分则属重油部分，其碳原子数在 18~40 之间，又分为润滑油、凡士林、石蜡、沥青等，各有其用途。沸点小于 200℃称低沸点馏分，如汽油；沸点在 200~350℃称高中沸点馏分，如煤、柴油；沸点在 350~500℃称高沸点馏分或润滑油馏分。变压器油和汽轮机油等皆以润滑油馏分精制而成。

2. 烃类组成的表示法

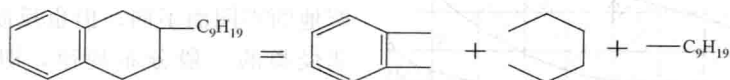
(1) 单体烃。以单个烃的含量表示石油及其馏分中的烃类组成。此方法一般适用石油气和低沸点馏分。

(2) 族组成。用烷烃、环烷烃，芳香烃等烃类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，见表 1-3。该方法简单且实用。

表 1-3 汽油馏分、减压馏分的族组成

原油名称	馏分	沸程 (℃)	族组成 (%)				
			饱和烃		芳香烃		胶质
			烷烃	环烷烃	轻芳香烃	中芳香烃	重芳香烃
大庆原油	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

(3) 结构族组成。由于高沸点馏分中烃类结构复杂、性质相近, 很难定量分析出所有的单体烃, 而且某些单体烃还具有混合结构, 如 β -壬基四氢化萘, 它是由环烷基、芳香基和烷基侧链所组成的混合烃, 很难决定属于哪一族烃, 因此无法用族组成表示。为此, 提出一种具有实际意义的结构族组成表示法。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, 即每个结构单位的碳原子占总碳原子数目的百分数来表示其组成。例如, 若测定某高沸点馏分“平均分子”为 β -壬基四氢化萘, 可将其看成由三个“结构单位”组成, 即



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, 则其结构族组成表示: 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, 环烷环 R_N 为 1。

测定石油及其馏分结构族组成的主要方法有 n-d-M 法、红外光谱法、高效液相色谱法和高分辨核磁共振法等。SH/T 0729—2004《石油馏分的碳分布和结构族组成计算方法 (n-d-M 法)》, 此标准主要通过测定折射率 (n)、密度 (d) 和分子量 (M) 计算无烯烃石油馏分的碳分布和环数; DL/T 929—2005《矿物绝缘油、润滑油结构族组成的红外光谱测定法》规定了分子量为 290~500 的矿物绝缘油和矿物润滑油结构族组成的红外光谱测定方法, 适用于新绝缘油、润滑油及其运行油结构族组成中 C_P 、 C_A 和 C_N 的测定。GB/T 7603—2012《矿物绝缘油中芳碳含量测定法》规定了相对分子质量范围为 290~500 和芳碳含量在 2%~35% 范围内的矿物绝缘油芳碳含量的红外光谱测定法。润滑油馏分脱蜡油的结构族组成见表 1-4。

表 1-4

润滑油馏分脱蜡油的结构族组成

原油名称	沸程 (°C)	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

用结构族组成表示烃类组成时, 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结构, 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。

三、石油中烃类和非烃类的分布

原油除含有由烷烃、环烷烃、芳香烃和混合结构的环烷芳香烃组成的烃类外, 还含有少量的非烃类化合物, 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

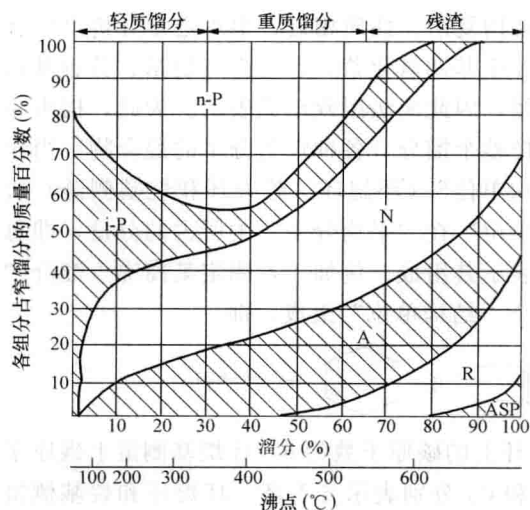


图 1-2 原油组成分布图

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

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组分。

四、石油及其产品和电力用油的分类

石油产品的分类是按照一定的标准进行的，而标准是为了在一定范围内获得最佳秩序，经协商一致制定并由公认机构批准、共同使用和重复使用的一种规范性文件。标准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。与石油产品相关的包括国际标准化组织（ISO, International Standards Organization）、国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）、美国材料试验委员会（American Society for Testing and Material, ASTM）、美国石油学会（American Petroleum Institute, API）、法国（NF）和英国（BS）等国外标准。我国石油产品和润滑剂及其测试方法的行业标准随管理部门的重组发生变化。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，原部颁标准有电力系统油质试验方法（YS）、水电部（SD）和专业标准（ZBE）。随着使用年限，标准一般情况下每隔 5～10 年更换或修订一次。

（一）石油及其产品的分类

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 ISO 8681—1986《石油产品和润滑剂 分类法 等级的定义》（见表 1-5），制定了 GB/T 498—2014《石油产品及润滑剂 分类方法和类别的确定》（见表 1-6），润滑剂和有关产品（L 类）的分类见表 1-7。

的形态存在于原油中，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。

原油组成分布如图 1-2 所示。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，它们随原油基和产地的不同而不同，但也反映了各种烃类和非烃类的一般分布规律，即在润滑油馏分中，含有较多的正构烷烃，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；饱和烃（烷烃和环烷烃）是润滑油馏分中的主体烃；胶质在轻质油中基本不存在，主要分布在高沸点馏分

表 1-5 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)

注 依据 ISO 8681—1986。

表 1-6 石油产品和润滑剂的总分类

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

注 依据 GB/T 498—2014。

表 1-7 润滑剂和有关产品 (L 类) 的分类

组别	应用场合	组别	应用场合
A	全损耗系统 (Total loss systems)	P	气动工具 (Pneumatic tools)
B	脱膜 (Mould release)	Q	热传导 (Heat transfer fluid)
C	齿轮 (Gears)	R	暂时保护防腐蚀 (Temporary protection against corrosion)
D	压缩机 (包括冷冻机及压缩泵) [Compressors (including refrigeration and vacuum pumps)]	T	汽轮机 (Turbines)
E	内燃机 (Internal combustion engine oil)	U	热处理 (Heat treatment)
F	主轴、轴承和离合器 (Spindle bearings, bearings and associated clutches)	X	用润滑脂场合 (Grease)
G	导轨 (Slideways)	Y	其他应用场合 (Miscellaneous)
H	液压系统 (Hydraulic systems)	Z	蒸汽汽缸 (Cylinders of steam machines)
M	金属加工 (Metalworking)		
N	电器绝缘 (Electrical insulation)		

注 依据 GB/T 7631.1—2008《润滑剂、工业用油和有关产品 (L 类) 的分类 第 1 部分：总分组》(IDT ISO 6743—99: 2002)。

(二) 石油添加剂的分类

我国石油化工行业标准 SH/T 0389—1992《石油添加剂的分类》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。石油添加剂的种类及分组情况见表 1-8。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，常见的汽轮机防锈剂十二烷基二酸的代号为 T746，抗泡沫剂甲基硅油的代号为 T901。

表 1-8 石油添加剂的分组和组号

项目	组 别	组号	项目	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		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	复 合 添 加 剂	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
	防冻剂	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		工业润滑复合剂	60
	流动改进剂	18		防锈油复合剂	70
	防腐蚀剂	19			

(三) 电力用油的分类

1. 矿物绝缘油的分类

对于矿物绝缘油的分类，我国根据 IEC 60296—2003《Fluids for electrotechnical applications—Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear》制定了 GB 2536—2011《电工流体 变压器和开关用的未使用过的矿物绝缘油》。该标准将矿物绝缘油分为变压器油和低温开关油两类。按抗氧化剂含量将矿物绝缘油分为三个品种：U（Uninhibited oil）类——抗氧化剂含量检测不出；T（Trace inhibited oil）类——抗氧化剂含量小于 0.08%；I（Inhibited oil）类——抗氧化剂含量在 0.08%~0.4%之间。矿物绝缘油除标明抗氧化添加剂外，还应标明最低冷态投运温度（Lowest Cold Start Energizing Temperature，LCSET）。LCSET 是指矿物绝缘油的黏度不大于 1800mm²/s，且在-40℃时，黏度应不大于 2500mm²/s 时所对应的温度。LCSET 是区分绝缘油类别的重要标志之一。应根据电气设备使用环境温度的不同，选择不同的 LCSET，以免影响油泵、有载调压开关（如果有）的启动。

与 GB 2536—1990《变压器油》相比，GB 2536—2011 取代了原变压器油按其低温流动性分类的方式（10 号、25 号和 45 号三个牌号），而是以其 LCSET 进行划分，LCSET 下变压器油的最大黏度和最高倾点与 GB 2536—1990 中牌号的对应关系见表 1-9。LCSET 比最高倾点低 10℃。

表 1-9 变压器油的 LCSET 与最高倾点、原牌号的对应关系

LCSET (℃)	最大黏度/ (mm ² /s)	最高倾点 (℃)	GB 2536—2011 标准中的牌号
0	1800	−10	10 号
−10	1800	−20	25 号
−20	1800	−30	—
−30	1800	−40	45 号
−40	2500	−50	—

变压器油产品依次标记为品种代号、最低冷态投运温度、产品名称、标准号，示例如下：

品种代号	最低冷态投运温度	产品名称	标准号
U	0℃	变压器油（通用）	GB 2536—2011
T	−30℃	变压器油（通用）	GB 2536—2011
I	−40℃	变压器油（特殊）	GB 2536—2011

国内外部分变压器油品种和牌号对照见表 1-10。我国将专门用于 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 1-10 国内外部分变压器油品种牌号对照表

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

2. 涡轮机油的分类

依据 ISO 8068—2006《润滑剂、工业用油及有关产品（L 类）—涡轮机（T 组）—涡轮机润滑油规格》（Lubricants, industrial oils and related products (class L) —Family T (Turbines) —Specification for lubricating oils for turbines, NEQ），我国制定了 GB 11120—2011《涡轮机油》，该标准规定了在电厂涡轮机润滑和控制系统，包括蒸汽轮机、水