

 中国南方电网
CHINA SOUTHERN POWER GRID

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

变电设备在线监测技术 工程应用

贵州电网有限责任公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

 中国南方电网
CHINA SOUTHERN POWER GRID

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

变电设备在线监测技术 工程应用

贵州电网有限责任公司 组编



中国电力出版社

内 容 提 要

在线监测技术是推动输变电设备开展状态检修的重要技术措施，也是提高设备装备自动化水平要求的重要举措，在线监测技术的应用可及时发现设备的早期缺陷及隐患，进一步提升设备监测诊断、运行管理的水平，为推动变电设备在线监测技术的发展，贵州电网有限责任公司组织编写了《变电设备在线监测技术工程应用》。

本书介绍了成熟应用的变电设备在线监测技术，主要内容包括概述、各类在线监测特征量的选取原理、在线监测装置的监测方法、系统构成、性能指标和检测要求、安装调试、维护和案例分析、在线监测系统建设等相关知识。

本书可作为电力行业技术人员、高等学校电气工程专业学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

变电设备在线监测技术工程应用 / 贵州电网公司组编.
—北京: 中国电力出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5123-6864-4

I. ①变… II. ①贵… III. ①变电所—电气设备—在线监测系统—故障监测 IV. ①TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第283293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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年12月第一版 2014年12月北京第一次印刷

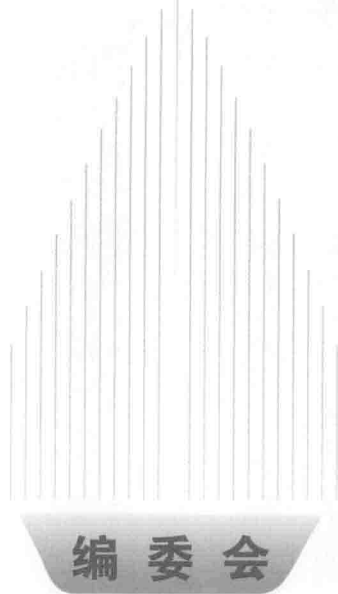
700毫米×1000毫米 16开本 16印张 269千字

印数0001—1500册 定价68.00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



编委会

主 编 赵立进
副主编 曾华荣 黄 良
参编人员 杨 涛 吴建蓉 刘 君 陈沛龙
曾 鹏 吕黔苏 丁 勇 张秋雁
吴湘黔 曹 洪

前 言

随着贵州省经济建设的快速发展，经济结构的快速转型，一方面，省内企业、商业和居民的用电负荷日益增长，国家“西电东送”战略的实施，均使贵州电网的装机容量在近几年成倍增长，贵州电网的资产规模迅速扩张；另一方面，用户对供电可靠性的要求越来越高，电网设备基于传统的周期性检修模式已经不能适应电网发展的要求，传统计划检修模式下运维人员数量少和电网资产规模迅速扩张两者之间的矛盾日益突出，迫切需要在充分考虑电网安全、环境、效益等多方面因素的情况下，研究、探索适应新形势的设备管理模式，提高设备可用系数，减少过度检修，降低生产运营成本，状态检修已成为解决当前检修工作面临问题的重要手段。

作为状态检修技术支撑之一的设备在线监测技术，经过数十年的研究和实践，已经呈现出较快发展的趋势，随着传感技术、计算机技术、网络技术等的进步，部分成熟产品正逐渐向电网设备推广和应用，基本涵盖了主要的电气设备，并取得一定的效果。2011年开始，贵州电网对变电设备在线监测技术进行了大规模的推广应用，在变压器在线监测、GIS在线监测、电容型设备在线监测、配电开关柜在线监测应用和在线监测系统建设方面积累了丰富的现场实践经验，取得了一定的应用成效。为推动变电设备在线监测工作更好地开展，贵州电网有限责任公司组织编写了《变电设备在线监测技术工程应用》一书，对贵州电网变电设备在线监测技术选型、安装调试、系统构架、数据接入、运行维护中的技术问题及典型案例

进行分析总结。

参与本书编写的人员以贵州电网在线监测技术大规模应用和系统建设的核心工程技术人员、管理人员为主，汇集了贵州电网在线监测技术调研收资、系统建设规划、技术条件书、装置测试试验等方面的资料，融入了项目组在装置选型、系统兼容性组网、系统构架设计和运行维护方面的经验，并参考国内在线监测方面的期刊和论文。希望本书能为电网企业的在线监测技术工程应用提供参考和帮助，为相关工程技术人员提供学习参考。

最后感谢贵州电网科技部组织国内知名专家为本书提供方向性指导，感谢参与贵州电网在线监测项目的各供应商在写作过程中提供的各种技术资料 and 耐心答疑。

限于编者水平，书中难免存在一些不足之处，敬请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2014年8月

目 录

前 言

第 1 章 ▶ 概 述	1
1.1 变电设备在线监测的应用现状	1
1.2 变电设备故障诊断系统	3
1.3 变电设备在线监测急需解决的问题	4
第 2 章 ▶ 油浸式变压器在线监测	7
2.1 变压器油中溶解气体及微水产生机理	7
2.2 变压器油中溶解气体及微水在线监测 装置的监测方法及系统构成	13
2.3 变压器油中溶解气体在线监测装置的技术性能要求	33
2.4 变压器油中溶解气体在线监测装置的安装调试	35
2.5 变压器油中溶解气体在线监测装置的维护	44
2.6 变压器油中溶解气体在线监测应用	46
参考文献	64
第 3 章 ▶ GIS 在线监测	65
3.1 GIS 局部放电在线监测	65
3.2 SF ₆ 气体在线监测	100
参考文献	109
第 4 章 ▶ 开关柜触头温度在线监测	110
4.1 开关柜触头发热机理	110
4.2 开关柜触头温度在线监测装置的监测方法及系统构成	120
4.3 开关柜触头温度在线监测装置的性能指标要求	129

4.4 开关柜触头温度在线监测装置的安装调试.....	130
4.5 开关柜触头温度在线监测应用.....	138
参考文献.....	142
第5章 ▶ 电容型设备绝缘在线监测	143
5.1 监测特征量的选取原理.....	143
5.2 电容型设备在线监测装置的监测方法及系统构成.....	149
5.3 电容型设备在线监测装置的性能指标要求.....	157
5.4 电容型设备在线监测装置的安装调试.....	161
5.5 电容型设备在线监测应用.....	164
参考文献.....	172
第6章 ▶ 避雷器绝缘在线监测	173
6.1 监测特征量的选取原理.....	174
6.2 避雷器在线监测装置的监测方法及系统构成.....	180
6.3 避雷器在线监测装置的性能指标要求.....	193
6.4 避雷器在线监测装置的安装调试.....	198
6.5 避雷器在线监测装置的维护.....	199
6.6 避雷器在线监测应用.....	201
参考文献.....	209
第7章 ▶ 变电设备在线监测系统建设	210
7.1 在线监测系统构架设计.....	210
7.2 网络通道.....	214
7.3 通信规约和数据格式.....	218
7.4 在线监测一级主站系统.....	233
参考文献.....	246

■ 1.1 变电设备在线监测的应用现状

随着我国超高压、特高压输电线路的不断建成投运，电力系统覆盖面越来越广阔。由于我国地域辽阔，地理环境多样化，部分线路运行环境恶劣，难以保证供电的稳定性和安全性，一旦发生故障将给人们的正常生产和生活带来巨大损失，因此，保障供电系统的稳定运行是电力部门亟待解决的问题。变电设备的在线监测主要是在设备敏感部位安装监测器，通过对运行参数的监测来反映设备状态，从而达到发现缺陷，避免事故发生的作用。

目前，在线监测已大范围开展。截至 2008 年年底，国网公司系统内变电设备在线监测装置 2282 套，在各区域网公司中，华北、华东电网的在线监测装置最多，分别为 1310、479 套，分别占 57%、21%；东北、华中和西北电网的在线监测装置分别为 122、232 和 139 套，总体占 22%。截至 2012 年，广东电网公司共有 160 座 110kV 及以上变电站已安装了在线监测装置，变电站监测覆盖率达 10.42%。共安装 12 类在线监测装置，涉及设备 2155 台，主要是变压器绝缘油中溶解气体的监测和 GIS 局部放电监测两类。2012 年广东电网在线监测装置接入率接近 90%，远程中心系统总运行率达到 99.9%，通道总运行率 95.3%，通道可用率 92.5%，各项指标均创新高。截至 2013 年底，贵州电网公司 500kV 和 220kV 变电站油色谱装置覆盖率 100%，500kV 变电站电容型在线监测装置 70%，110kV 变电站 GIS 在线监测装置 43%，在线监测覆盖面进一步提升。厦门地区变电站共有 26 个 110kV 及以上变电站安装了变电设备在线监测系统，共发现三起一类缺陷的设备，避免了因设备故障而影响电网的安全可靠运行。目前，电力系统的有关部门也在现有的经验基础上积极制订在线监测导则，来稳妥地推进输变电设备的检修工作。

传统的离线检测需对一次设备进行停电处理，而在线监测则很好地解决了这一问题。变电设备在线监测系统的应用已呈现一定规模，有效地反映设备的运行状态。随着智能电网的建设，变电设备在线监测技术将得到更广泛的应用。目前主流的监测方法有以下几种。

(1) 变压器类的在线监测。变压器类主要为充油的电力变压器，监测特征量有油中溶解气体、局部放电、绕组变形、铁芯接地电流、油中微水、高压套管的介质损耗因数和电容量等。此外，通过频率响应分析法进行变压器绕组移位及变形测试，通过瞬变振动信号获取有载分接开关工作状态，通过吸附在变压器箱壁上的振动传感器来获得系统的振动信号来判断铁芯及绕组工作状态，通过含水量、酸度及电介质强度进行绝缘油质量评估。

(2) GIS 在线监测。目前，GIS 在线监测方法集中在断路器动作监测、绝缘状态的监测、局部放电监测和 SF₆ 气体监测故障定位等方面。

(3) 电容型设备的电容量 / 介质损耗因数监测。电容型设备包括电容式高压套管、电流互感器、电容式电压互感器、电容器等，主要的监测特征量有介质损耗 $\tan\delta$ 、泄漏电流、等值电容（有些也可监测局部放电）等。

(4) 高压开关设备在线监测。高压开关设备主要是指电力系统中电压在 3kV 以上，频率 50Hz 的户内和户外交流开关设备，包括断路器、隔离开关、开关柜、接地开关、重合器、分断器、负荷开关、接触器、熔断器，以及上述元件组合而成的负荷开关—熔断器组合电器、接触器—熔断器（FC）组合电器、隔离负荷开关、熔断器式开关、敞开式组合电器。主要特征量有：绝缘气体（SF₆ 断路器）、触头温升，开断电流波形、合分闸线圈电流，操动机构的行程、速度和机械振动等。

(5) 综合在线监测系统。在应用上可引进有效的不同技术方法，当在线油中溶解气体监测系统或年度 DGA（油中溶解气体分析）监测系统初步探明变压器有潜在的故障时，可安排流动的故障诊断系统来进行密切监测。这个综合诊断系统包括在线综合 DGA、热点探测、油的含水量测量、局部放电探测、系统电流及电压以及其他有效的潜在故障探测及定位感应器，系统采集数据后发送至监控中心，专家诊断系统将自动产生分析结果、解释可疑的早期潜在故障，以及建议补救措施。

■ 1.2 变电设备故障诊断系统

早期国内变电站的状态检修系统（即故障诊断系统）处于分散监测与诊断阶段，一个系统对应一种设备，各个系统相互独立，且与计算机监控系统没有任何信息交互，是一个个信息孤岛。电力部门通过科研开发，实现了各分散系统的集成及其与计算机监控系统的融合，使状态检修的信息来源更加丰富，给设备检修决策提供了非常有利的条件，也为智能变电站建设打下了坚实基础。下面介绍国内电力领域所做的一些探索工作。

图 1-1 是运用输变电设备状态智能诊断模型，将现有的输变电设备相关的各系统数据进行深度整合，建立输变电设备在线状态分析和智能诊断系统，综合设备的历史运行数据、试验数据、在线实时监测数据等信息对设备进行诊断，进一步完善设备的故障诊断能力，提高设备故障诊断的准确性。

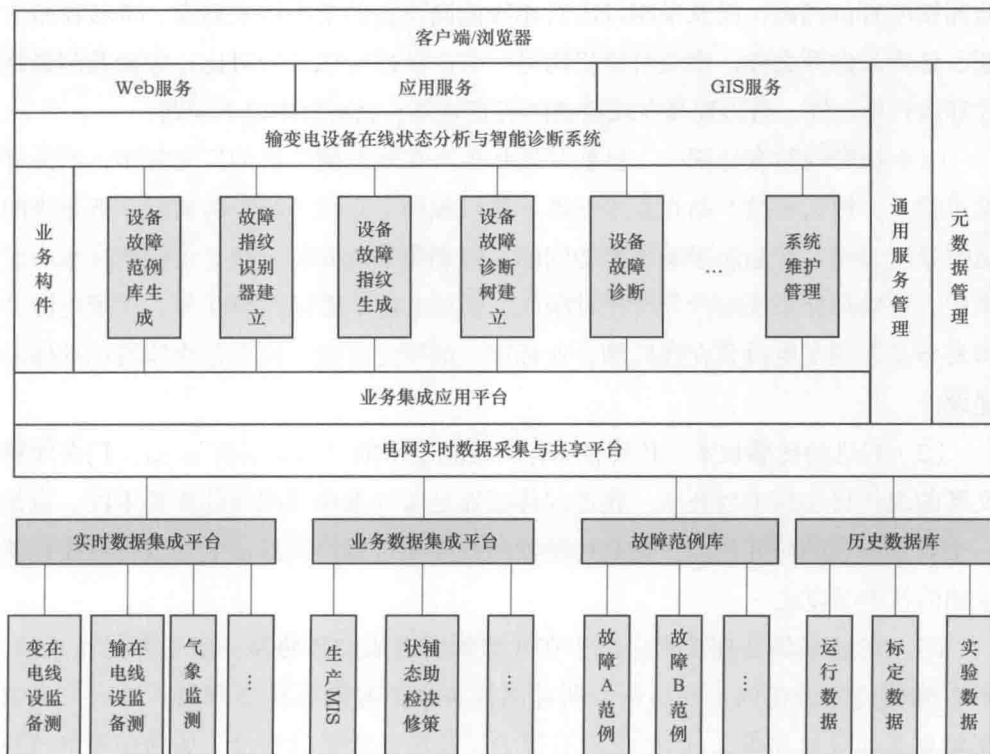


图 1-1 运用输变电设备状态智能诊断模型

随着智能电网的发展，电网公司目前正在将输变电设备在线监测技术融入电力系统的生产管理系统，系统包括在线监测、检修计划决策和管理应用三个部分。通过在线监测可以获取变电设备运行的实时状态，通过各种专家诊断算法给出设备运行状态。检修计划决策即利用上述系统给出的设备状态，运用多信息融合技术综合考虑设备历史数据、运行状况、检修工期、检修费用、检修风险等多方面因素，进行技术分析、经济比较，最后给出一个最优的检修方案并且具有分步审批与人为添加方案的功能；管理应用部分是与PMS或ERP系统中的检修工单建立联系，一旦检修方案审批下来，可以直接联系到检修工单模块，进行检修。

■ 1.3 变电设备在线监测急需解决的问题

受现场环境、传感信号、电磁干扰等因素的影响，在线监测系统的稳定性和监测精度有待提高，需及早制订出对在线监测设备的基本技术要求、考核检验方法、订货条件等文件，相应科研机构对厂家产品进行试运行对比，考验其测量精度和运行稳定性，努力提高在线监测的实施效果。急需解决以下问题：

(1) 标准规约有待统一。目前开发和生产在线监测装置的厂家较多，产品种类也较多，但大多数产品在技术标准、接口规约上存在不统一的情况。近年来的运行状况表明，产品质量暴露出的问题，特别是系统安装后缺乏足够的技术力量维护，造成部分系统运行分析相对滞后、信息上传不通畅。2011年，国家电网公司发布了九项变电设备在线监测企业标准，进一步完善变电设备在线监测标准体系建设。

(2) 先进的传感技术。传感技术作为信息技术的“感觉器官”，是一门多学科交叉的现代科学与工程。先进的传感器是实现准确预测性的重要手段，也是一个长盛不衰的研究热点。提高传感器的精度和可靠性是保证电气设备在线监测准确的技术手段之一。

(3) 信息采集处理技术。由于在线监测所选用的传感器一般是非侵入式的，不影响被监测设备的正常运行，所监测的特征信号既有状态变量，也有二次效率信息（如分解物等），因此可能有很多反映设备状态的信号，如局部放电过程中会产生电脉冲、气体生成物、超声波、电磁辐射、光、局部过热、产生微量

金属元素等现象。相应的就可监测电脉冲、气相色谱、超声波、电磁波、光、红外光、金属原子含量等信息，当然相应的传感器和处理技术差异很大。同时，由于信号在传送过程中往往受其他信号的干扰，因此传感器所测量的数据究竟采用模拟传输还是数字传输，是采用有线传输还是无线传输等问题都应深入研究。

(4) 故障诊断方法的改进。电力系统的结构和设备愈加复杂化、多样化，故障征兆与原理之间关系模糊复杂，一个故障可表现出多种征兆，多个故障起因也可能同时反映出一个故障征兆，如何准确地进行故障诊断需要新技术、新方法的介入。对于复杂的设备如变压器、大型开关柜等，故障关系较为复杂，简单的判断是不能满足实际要求的，需要大量的规则、知识，甚至还伴随着许多模糊关系。因此，需要采用将精确性向模糊性逼近的模糊集的数学方法来处理这些模糊现象。状态监测为计算机智能技术在故障诊断中的应用提供了可能，专家系统与人工神经网络系统通过监测系统的数据分析与处理，将知识、经验规则模型化，综合各类信息快速准确地诊断出故障。

(5) 大系统可靠性评价。实现输变电设备状态检修的研究与实践是一个复杂的系统工程，复杂大系统可靠性评估是智能电网在线监测技术中的关键技术，也是可靠性工程的重要组成部分，可靠性评估是根据产品的可靠性结构、寿命模型及试验信息，利用统计方法和手段，对评价产品可靠性的性能指标给出估计的过程。在可靠性评估领域，对复杂大系统的可靠性评估一直是重大难题之一。主要是由于费用和试验组织等方面的原因，不可能进行大量的系统级可靠性试验，而只能利用单元试验信息，如何充分利用单元和系统的各种信息对系统可靠性进行精确的评估是相当复杂的问题。

部分监测系统在部分省级电力公司的若干电压等级的设备已经普遍推广使用，如油中溶解气体在线监测、电容型设备介质损耗与电容量监测、氧化锌避雷器泄漏电流监测等，并取得一定的效果。在线监测系统在发现被监测主设备的缺陷方面，发挥了其他手段难以承担的作用，能及时、有效地发现设备缺陷，预防设备的突发性故障，为主设备的安全运行起到了较好的保障作用。另一方面，由于在线监测系统尚未全面纳入运行设备的管辖范围，因此在选型、检验和运行维护管理方面缺乏规范的手段和依据，部分劣质在线监测系统由于检验不严流入网内，发生误报、拒报等，给电网的运行管理带来不利影响。

截至 2014 年底，贵州电网公司 500kV、220kV 变电站在线监测覆盖率达到 100%，110kV 变电站覆盖率达到 40%，其中包含油色谱监测、GIS 局部放电监测、电容型设备绝缘监测、开关柜温度监测等。随着在线监测工作的深入推进，贵州电网公司根据《变电设备在线监测系统运行维护管理规范（试行）》，按管理规范开展在线监测系统的运维工作，在线监测装置完好率和数据有效性处于较高水平。

选择合理有效的线监测系统，可以真实灵敏地反映设备状态的监测参数。选用成熟可靠的在线监测系统，将新的监测手段与传统预试项目相结合，离线检测与在线监测相结合，继承发扬传统故障诊断的成熟经验，并在实践中研究和探索新的故障诊断方法，对电力安全生产具有重大的意义。

油浸式变压器在线监测

对于大型电力变压器而言,目前几乎都是采用油浸纸绝缘结构,用变压器的绝缘油来进行绝缘和散热。在正常运行情况下,变压器油中溶解气体的组分主要是氧气和氮气。随着运行时间的增加,变压器油与油中的固体绝缘材料在电和热的作用下逐渐发生老化和分解,会缓慢地产生少量的低分子烃类及一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)等特征气体,所产生气体形成的气泡在油里经对流、扩散,不断地溶解于绝缘油中。当变压器内部出现如伴随着局部放电、过热等潜伏性故障时,这种现象会加剧。一般来说,对于不同性质的故障,所产生的特征气体的种类、油中溶解气体的浓度、各种气体的比例关系也不相同;而对于同一性质的故障,由于发生程度不同,所产生的气体含量也会不同。因此,油中溶解气体的组分和含量在一定程度上反映出电力变压器绝缘老化和故障的程度,根据油中气体的组分和含量,可以判断故障的类型及严重程度,从而评估变压器的健康状况。

变压器油中的微量水分也会降低变压器油的绝缘性能,加速绝缘系统老化,还可导致变压器局部放电击穿及产生气泡,这不仅缩短变压器的正常使用寿命,严重时还会引发安全事故,造成巨大的损失和危害,因此变压器在投入运行以前都需要进行微水检测。

■ 2.1 变压器油中溶解气体及微水产生机理

2.1.1 变压器油中溶解气体产生机理

变压器的绝缘结构主要为油纸或油与纸板组成的绝缘结构。绝缘油是由许多不同分子量的碳氢化合物分子组成的混合物,包括烷烃、环烷烃、芳香烃、烯烃等,分子中含有CH₃、CH₂和CH化学基团并由C—C键合在一起。由于电或热故

障的结果可以使某些 C—H 键和 C—C 键断裂，从而生成少量活泼的氢原子和不稳定的碳氢化合物的自由基。这些氢原子和自由基通过复杂的化学反应迅速重新化合，形成氢气 (H₂) 和低分子烃类气体，如甲烷 (CH₄)、乙烷 (C₂H₆)、乙烯 (C₂H₄)、乙炔 (C₂H₂) 等。低能量故障通过离子反应促使最弱的 C—H 键 (338kJ/mol) 断裂，大部分氢原子将重新化合生成氢气。C—C 键的断裂需要较高的温度 (较多的能量)，然后迅速以 C—C 键 (607kJ/mol)、C=C 键 (720kJ/mol) 和 C≡C 键 (960kJ/mol) 的形式重新化合生成烃类气体，依次需要越来越高的温度和越来越多的能量。乙烯是在大约 500℃ (高于甲烷和乙烷的生成温度) 下生成的，乙炔的生成温度一般在 800 ~ 1200℃，图 2-1 反映了油分解产生特征气体随温度变化的情况。

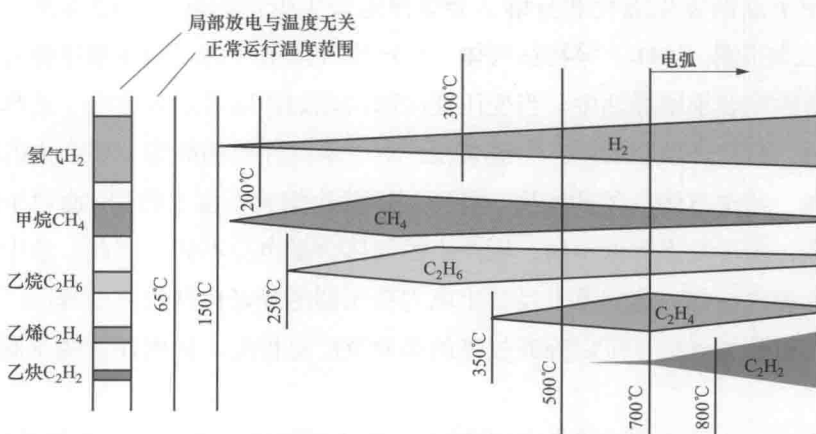


图 2-1 油分解产生特征气体随温度变化图解

绝缘油起氧化反应时伴随生成少量的 CO 和 CO₂，CO 和 CO₂ 能长期积累，达到显著数量。

绝缘纸、层压纸板等固体绝缘材料的主要成分为纤维素，其化学通式为 C₆H₁₀O₅，其结构图如图 2-2 所示。纤维素分子呈长链式，图中 N 代表长链内串接的重复单元的个数，称为聚合度。聚合度反映了纸的机械强度，当平均聚合度下降到 500 时，变压器整体绝缘处于寿命中期；当平均聚合度下降到 250 时，可认为变压器绝缘寿命已终止；当聚合度下降到 150 时，绝缘纸的机械强度几乎为零。

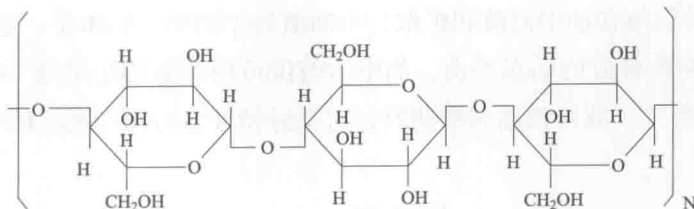


图 2-2 纤维素分子结构图

纤维素分子含有的大量无水右旋糖环和弱的 C—O 键和葡萄糖甙键，它们的热稳定性比油中的碳氢键要弱，并能在低温下重新化合。聚合物裂解的温度高于 105℃，完全裂解和碳化高于 300℃，模拟试验表明绝缘纸在 120℃ ~ 200℃ 下，生成大量的 CO 和 CO₂，且以 CO₂ 为主，在 200℃ ~ 800℃ 下，除产生大量的 CO 和 CO₂ 外，还产生氢烃类气体。CO 和 CO₂ 的形成不仅随温度而且随油中氧的含量和纸的湿度增加而增加。其中，纤维素的热分解过程如图 2-3 所示。

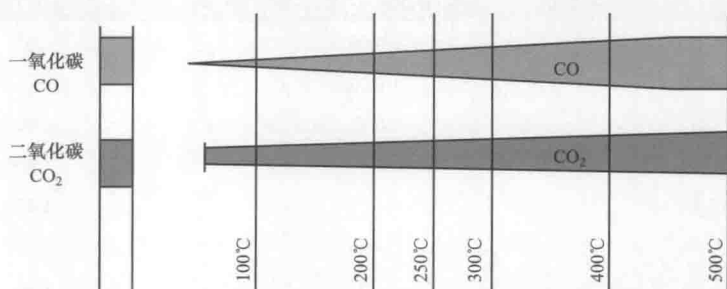


图 2-3 纤维素热分解产生特征气体随温度变化图解

国家标准 GB/T7252—2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》中，对不同故障类型产生的气体进行了总结归纳，如表 2-1 所示。

表 2-1 不同故障类型产生的气体

故障类型	主要气体组分	次要气体组分
油过热	CH ₄ , C ₂ H ₄	H ₂ , C ₂ H ₆
油 and 纸过热	CH ₄ , C ₂ H ₄ , CO, CO ₂	H ₂ , C ₂ H ₆
油纸绝缘中局部放电	H ₂ , CH ₄ , CO	C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ , CO ₂
油中火花放电	H ₂ , C ₂ H ₂	
油中电弧	H ₂ , C ₂ H ₂	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆
油和纸中电弧	H ₂ , C ₂ H ₂ , CO, CO ₂	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆