



# 预先电镀，一触即发

## —基于 DMA 的油浸式电力变压器故障监测与定位

王东晖（河南省信息化电器重点实验室）

俄国有句谚语：造船时不舍得投入，修船时花费得更多。对于同船舶一样是高技术含量工业产品的油浸式电力变压器，若要提高其运行的可靠性、延长使用寿命并期待降低其全寿命周期成本，则亦须从设计理念、材料选择、制造工艺、运维方式上统筹考虑。本设计方案，对油浸式电力变压器绕组的制

造工艺进行了创新性的电镀构想，在定义“特征物质”、“DMA”及“示位金属”的基础上，提出了基于 DMA 的油浸式电力变压器故障监测与定位方法，并同原有方法进行了整合，以求充分发挥绝缘油“信息载体”的作用，即以制造环节适量的成本增加为代价，换来运行维护过程中对潜伏性故障的较高的诊断、定位精度与维修效率。

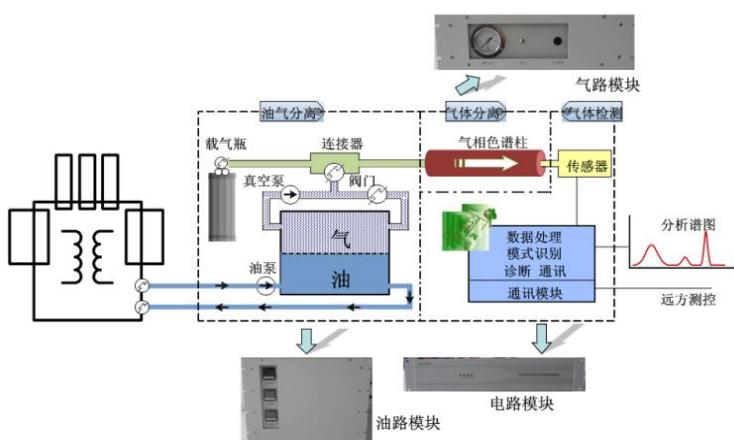


图 1 在线 DGA 系统原理图



图 2 绕组的烧蚀及变形

## A.理论铺垫

### A1.特征物质、DMA 定义的引入

若我们打破原有思维，不从“利用电磁感应原理实现电压变换及能量传递”的角度来理解油浸式电力变压器，而将它看为一座伴随着能量传递过程的“化学反应容器”，那么，我们可以将各种化学反应的生成物定义为“特征物质（Characteristic Materials）”，即：“对判断充油电气设备内部故障有价值的物质：即特征气体<sup>[1]</sup>、糠醛、金属微粒/离子、微水等”，继而由特征物质中的金属微粒/离子，来定义“油中溶解金属分析（Dissolved Metal Analysis, DMA）”如下：“通过对绝缘油中悬浮的金属微粒或溶解的金属离子进行分析，来判断充油电气设备内部潜伏性故障的故障诊断与定位方法”。

### A2.特征物质中金属微粒/离子的来源分析

作为传统的监测对象，对于绝缘油中溶解的特征气体、糠醛、

微水的来源在参考文献[2][3][4]中已有较为详尽的分析，对应的监测系统亦日趋成熟（如图 1 所示的 DGA-Dissolved Gas Analysis-油中溶解气体分析在线监测系统）因而此处仅对绝缘油中金属微粒/离子的生成机理进行分析。

#### 在非放电性故障条件下：

绝缘油中金属的最初来源主要为绝缘油运输过程金属微粒/离子（多为铜、铁微粒/离子）的混入和电力变压器箱体内金属微粒的残存。

在电力变压器的维护中，若使用活性白土对绝缘油进行净化，则难免会有蒙脱石晶层中的少量铝、镁离子溶于绝缘油中。

#### 在放电性故障条件下：

若变压器发生低能放电、高能放电或热电综合故障，则放电部位发生的烧熔或腐蚀（如图 2）会导致该部位材质（主要是铜、铁）对应的金属离子或微粒溶解或悬浮于绝缘油中。

此外，由于变压器内部绕组引线焊接时采用铜基钎料，参照其化学成分<sup>[5]</sup>，若放电性故障发生在焊点，则亦可能会有微量铜、锌、锡、镉离子溶于绝缘油中。

## B.具体方案

### B1.方案原理

由参考文献[6]中对 2004 年度国家电网公司 110kV 及以上等级变压器故障部位的分析, 可知

变压器绕组、主绝缘及引线是变压器的主要故障部位, 对应损坏台次占到总损坏台次的 81.8%, 因此创新方案中, 结合各种金属的熔点、延展性、导电性、耐腐蚀性等特性及成本因素, 做如下

设计: 对于不同相别的高、低压绕组, 采用不同的镀层材质, 如表 1 所示。

表 1 构件与镀层材料对照表

导电回路									导磁回路	其他位置
构件名称	A 相高压绕组	A 相低压绕组	B 相高压绕组	B 相低压绕组	C 相高压绕组	C 相低压绕组	引线及其焊点	铁心	铜基钎料	焊接处
镀(涂)层材料	铬	钴	镍	锆	钛	银	金(喷涂)	无	无	

这样, 在保证三相绕组电阻、电抗满足对应标准的前提下, 使镀层材料厚于普通防腐镀层, 当上述高故障风险部位发生低能放电、高能放电或热电综合故障时, 对应的镀层金属因烧熔或腐蚀, 其微粒或离子随即进入绝缘油中, 通过对绝缘油中金属类别的检测, 可对该放电性故障所在相别及绕组进行判定, 同时, 对镀层金属及铜、铁的定量检测, 对比投运前测得的绝缘油中金属含量的基值及前一次进行 DMA 监测所得数值, 则可以判断该放电性故障的严重程度及发展趋势。

我们将上述为指示放电性故障的部位而特意引入的镀层金属定义为示位金属 (Metal for Position Indication)。

### B2.示位金属的成本分析

参照一台 SF9-31500/110/11 油浸式双绕组电力变压器的设计参数, 即高压绕组一相所用纸包扁铜线长度为 850 米, 低压绕组

一相所用纸包扁铜线的长度为 100 米, 高、低压绕组所用纸包扁铜线的规格按照《GB/T 7673-2008 纸包绕组线》分别选定。那么, 若我们将镀层厚度定为  $20 \mu m$ , 结合各示位金属的密度, 则所消耗的各示位金属的质量依次为: 铬 3.121kg, 钴 0.572kg, 镍 3.867kg, 锆 0.419kg, 钛 1.956kg, 银 0.675kg。结合 2014 年 8 月份各金属的平均报价, 则可得出购置上述质量的示位金属所产生的成本合计为人民币 3799.2 元。

景的发展方向。

由于目前对绝缘油中金属含量的限定既无国家标准, 又无行业或企业标准, 在查阅文献后, 参照参考文献[7], 仅可给出部分国产新绝缘油中, 金属铜、铁的质量分数约为  $20-70 \mu g/kg$ , 对锡、锌、铝等金属的质量分数未给出参考值。

### B3.绝缘油中金属的定量方式及参考限值

对绝缘油中金属的检测目前只能经在线取样后, 在实验室中利用电感耦合等离子质谱 (ICP-MS) 或石墨炉原子分光光度计来定量检测。这些设备具有极高的检测精度, 但价格亦较高, 且样品的预处理工作需要专业人士完成<sup>1</sup>, 从取样到检测完成需一个工作日, 所以基于膜分离技术与传感器技术的绝缘油中金属在线监测装置, 依然是很有前

脚注 1:

基于目前实际, 可通过拓展运行维护单位油务班组职能或委托专业检测机构、高校、科研院所完成。

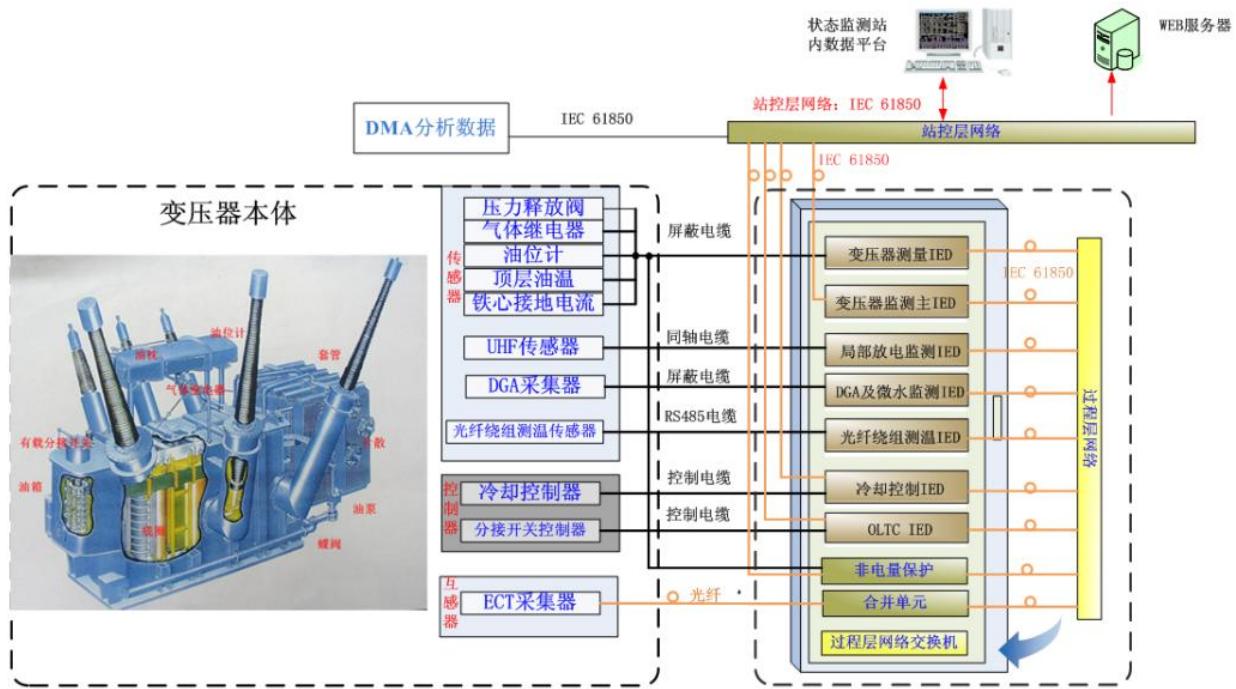


图 3 DMA 与原有监测方式的整合

### C. DMA 与既有监测方法

#### 的整合及案例

##### C1. 硬件整合

经在线取样、离线分析后所得的 DMA 结果，亦可通过通信协议传至状态监测站内数据平台、共同参与故障的诊断与定位过程，如图 3 所示。

待在线 DMA 系统成熟并投运后，则可考虑其检测周期与在线 DGA 系统的检测周期进行穿插，以进一步提高对潜伏性故障的发现概率。

##### C2. 故障诊断、定位流程的整合

DMA 与在线 DGA 系统及局部放电监测<sup>[脚注 2]</sup>系统相配合，进行故障部位判定的流程如篇末附图所示，其中橘红色部分为由 DMA 数据进行分析判断的环节；DGA

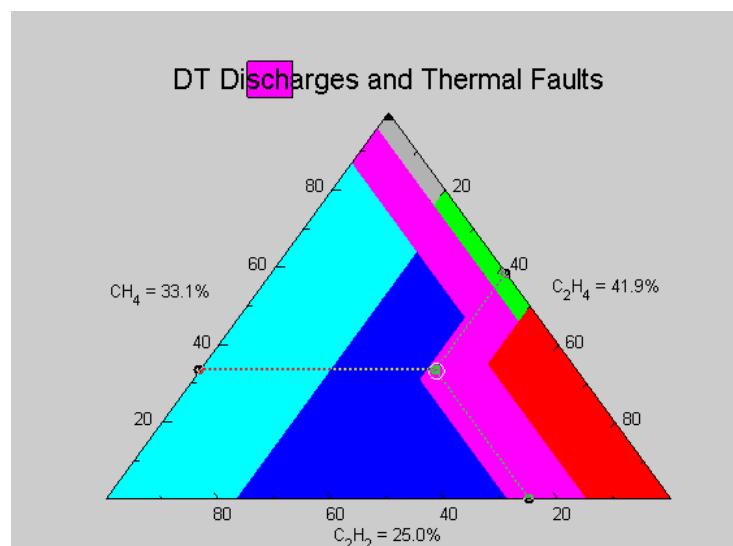


图 4 Duval 三角形法分析图形

诊断环节采用 Duval 三角形法，如图 4 所示。

##### 脚注 2：

由于多种检测手段相配合，且局部放电在线监测系统易受现场环境的干扰，此处仅需局部放电在线监测系统探测出有无放电信号即可。

### C3. 案例分析

我们结合以下案例，按照上述流程，体会进行 DMA 监测后，

在故障判定、事故处理方面的简便之处。

案例：石洞口高厂变 B 油色谱分析数据如表 2。

表 2 油色谱分析数据

气体成分	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
含量(ppm)	197	106	20	134	80	340	290	640

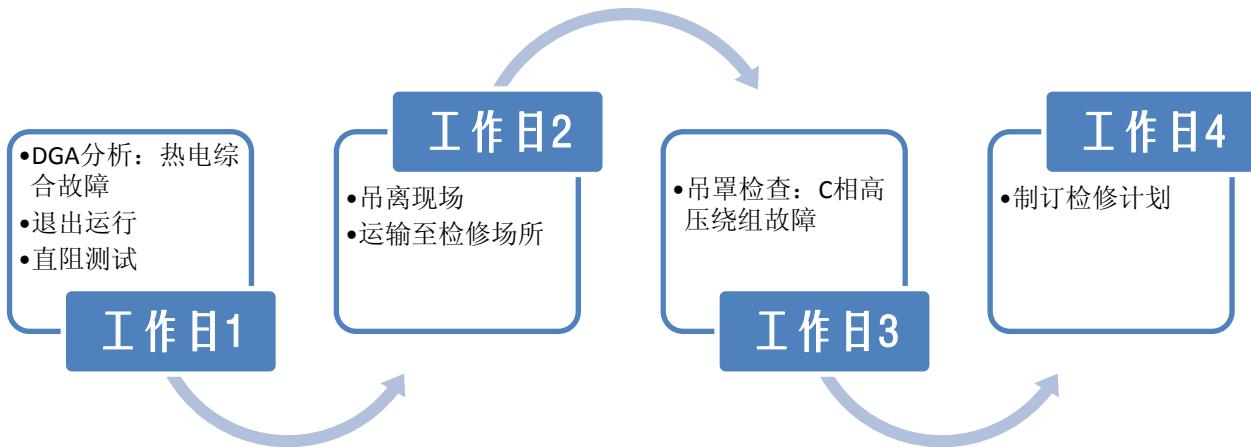


图 5 原处理流程

故障诊断、定位流程：油色谱分析结果为严重过热和火花放电综合性故障（图 4 即为分析结果），高压侧直流电阻测试结果，AO、BO、CO 三相基本平衡，即绕组尚无断线。经吊芯检查，C 相高压线圈上部有较多铜末，绕组损坏。

以“工作日”为单位，原处理方式的处理流程如图 5 所示：

仍以“工作日”为单位，设想在变压器制造过程中，各绕组预先经表 1 中对应示位金属电镀处理，并在监测环节，引入 DMA 后的处理流程如图 6 所示：

由以上对比可知：

(1). 由 DMA 对油中金属类别的分



图 6 预镀示位金属，并引入 DMA 后的处理流程

析，可省去吊芯环节，即可对故障绕组进行判别；

(2). 由 DMA 对油中金属定量分析的结果同基值的对比，即可对故障的严重程度进行判断；

(3). 在吊离、运输的过程中，即可同时制订检修计划，进而提高工作效率。

## D.结语与展望

### D1.结语：

(1).本创新设计方案，充分利用变压器中绝缘油除冷却、绝缘、保护三大功能外的信息载体的功能，即将示位金属作为未激活的故障信息源，电镀（喷涂）于绕组、绕组引线及其焊接处，上述部位发生放电性故障或热电综合性故障时，溶解或悬浮于绝缘油中的示位金属的离子或微粒即相当于被激活而释放至绝缘油中的故障信息，经 DMA 监测，旋即被运行人员所获知，继而可以进行更有针对性的保养或维护；

(2).基于不同原理的电力变压器监测方法的结合分析，不同的方法所获得的数据可以相互佐证，进而提高故障诊断、定位的整体精度，即达到 1+1>2 的效果。

### D2.展望：

(1).目前 DMA 仅能做到在线取样，检测环节还需在实验室中完成，因而 DMA 在线化是值得关注的方向；

(2).创新方案中仅提出了 6 中可能的示位金属，对于三相三绕组变压器，除寻找更多的示位金属进行电镀外，亦可从研发有 9 种示位金属掺杂的合金绕组导线这一角度寻求突破；

(3).在概念上，由 DMA 拓展到“油中溶解物质分析”(DM<sub>a</sub>A, Dissolved Materials Analysis)，即对绝缘油中溶解的物质如气体、微水、金属、糠醛、C<sub>3</sub>等进行全面的分析以进行故障诊断或状态评估，是对绝缘油信息载体这一作用更为充分的利用，应该是电

力变压器在线监测系统的一个发展方向。

作者：

王东晖

15827336583

[eastsunshine87@126.com](mailto:eastsunshine87@126.com)

2011.6 毕业于武汉大学珞珈学院，获武汉大学工学学士学位；

2011.9-2012.6 供职于河南省电力公司 清丰县供电局 输变电部；

2012.9-至今 于郑州轻工业学院 河南省信息化电器重点实验室，师从 魏云冰教授，从事电力变压器在线监测与故障诊断方面的研究。

## 参考文献：

- [1] GB/T 7252-2001, 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- [2] 凌愍. 变压器用油的析气性问题[J]. 电力设备, 2005, 6(1): 12-15.
- [3] Luiz Cheim, Donald Platts,

Thomas Prevost, Shuzhen Xu.  
Furan analysis for liquid power  
transformers[J]. IEEE Electrical  
Insulation Magazine, 2012,  
28(2): 8-21

[4] Belen Garcia, Juan Carlos  
Burgos, Angel Matias Alonso,  
Javier Sanz. A moisture-in-oil  
model for power transformer  
monitoring[J]. IEEE transactions  
on power delivery, 2005, 20(2):

1417-1422

[5] GB/T 6418-2008, 铜基钎料[S].

[6] 王梦云. 110kV 及以上变压器  
事故统计分析 [J]. 供用电,  
2006, 23(1): 1-4.

[7] 石景燕, 马慧芳, 秦拉翠.  
变压器油中的金属元素及其  
检测方法 [J]. 河北电力技术,  
2006, 25(1): 35-37.

## 标题图片

电网核心部位的大型油浸式电力变压器，对 DMA 的需求最为迫切。

