



国家电网有限公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

变压器油中溶解氢气监测技术

CPEM全国电力设备管理网
微信公众账号：CPEM

中国电科院
2022年6月



国家电网有限公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

目录

CONTENTS



一

相关背景

二

技术原理

三

应用现状

四

技术标准

CPEN全国电力设备管理网
微信公众号：CPEN



一、相关背景



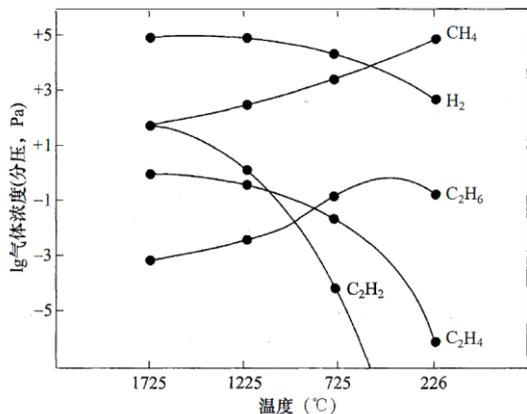
变压器油中溶解气体分析是目前评估变压器、高抗等充油设备运行状态的**最有效手段**，变压器油中溶解气体在线监测装置在电力行业已纳入**主设备**运维管理，氢气作为反映充油设备内部绝缘缺陷的重要特征气体之一，相关监测技术也受到广泛关注。

相比于传统的变压器油中溶解气体在线监测装置，变压器油中氢气监测装置具有**体积小安装方便、快速反应突发故障**的优势，近年来在大型充油设备薄弱环节监测中得到推广应用。

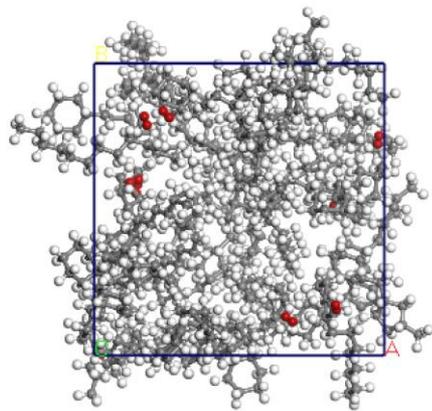
油中氢气来源

1. 变压器油分解

变压器油是由许多不同分子量的碳氢化合物分子组成的混合物，电或热故障可以使某些C-H键和C-C键断裂，伴随生成少量活泼的氢原子和不稳定的碳氢化合物的自由基，这些氢原子或自由基通过复杂的化学反应迅速重新化合，形成 H_2 。



哈斯特气体分压-温度关系图



2.其他来源

- (1) 油中含有的水可以与铁作用生成 H_2 ;
- (2) 在温度较高、油中有溶解 O_2 时, 设备中某些油漆在某些不锈钢催化下, 可能生成大量的 H_2 ;
- (3) 不锈钢与油的催化反应也可生成大量的 H_2 ;
- (4) 新的不锈钢中也可能在加工过程中吸附 H_2 或焊接时产生 H_2 ;

国网设备管理网
CPEM
国网设备管理网
CPEM

油中氢气诊断应用

含量要求/注意值	变压器和电抗器		互感器		套管	
	330kV及以上	220kV及以下	330kV及以上	220kV及以下	330kV及以上	220kV及以下
投运前	< 10	< 30	< 50	< 100	< 50	< 150
运行中	150	150	150	150/300	500	500

影响油中H₂含量的因素较多，若仅H₂含量超过注意值，但无明显增长趋势，也可判断为正常。

氢气特征气体类型	对应故障类型
主要特征气体	油纸绝缘中局部放电、油中火花放电、油中电弧、油和纸中电弧
次要特征气体	油过热、油和纸过热



国家电网有限公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

目录

CONTENTS



背景



技术原理



应用现状



技术标准

CPEN全国电力设备管理网
微信公众号：CPEN

二、技术原理

氢气传感器

氢气传感器是一种检测氢气并产生与氢气浓度成正比的电信号的传感器装置。氢气传感器与传统的氢气检测方法(气相色谱仪、质谱仪)相比,具有成本低、尺寸小、响应快的优势。近几十年来,有许多不同类型的氢气传感器已经商业化或正在研发中。

目前主要的传感原理有催化燃烧型、热导型、电化学型、半导体型、光学型等多种类型。



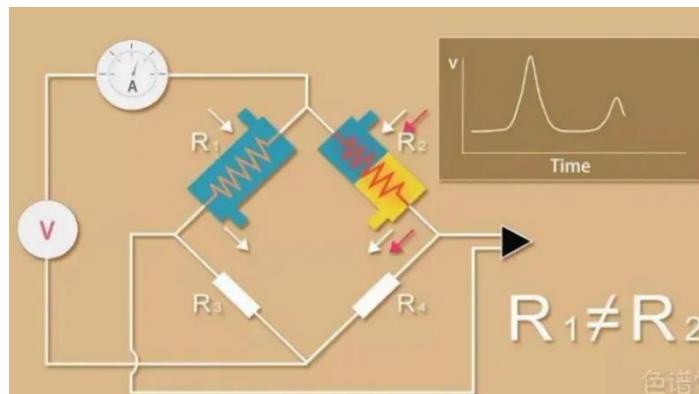
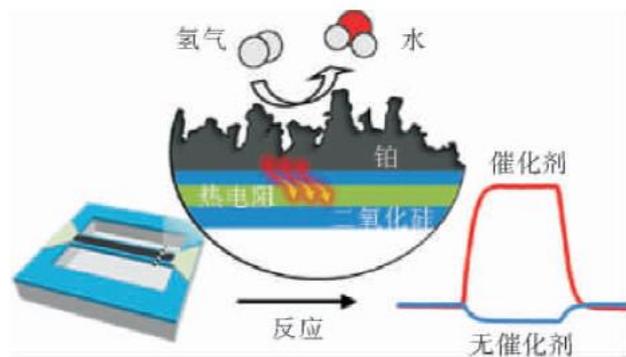
CPEN(国家电网)设备管理网
微信号:CPEN

二、技术原理



催化燃烧型传感

催化燃烧型传感器属于高温气体传感器，是利用催化燃烧产生的热效应原理。它的内部结构是检测元件和补偿元件配对组成测量电桥，当达到一定温度，可燃气体在检测元件载体表面和催化剂的共同作用下发生无焰燃烧，载体温度就相应升高，从而通过它内部的热电阻阻值也会发生相应改变，平衡电桥就失去了平衡，输出一个与可燃气体浓度成正比的电信号，实现氢气浓度的检测。



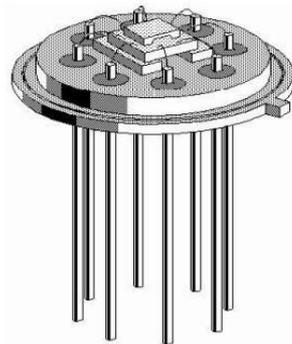
二、技术原理



热导型传感

热导型氢气传感器基于不同气体具有不同的热导系数研发，传感器的热丝具有电阻随温度变化的特性，当有电流通过热导传感器的热丝时，热丝被加热，由于载气的热传导作用使热丝的一部分热量被载气带走，热丝的温度下降。在这个动态的过程中，热丝的电阻值和热丝内部的电流发生变化，传感器便有信号输出，此时输出的电信号与载气的浓度成一定的比例关系，从而实现氢气浓度的检测与测量。

单丝热导检测器

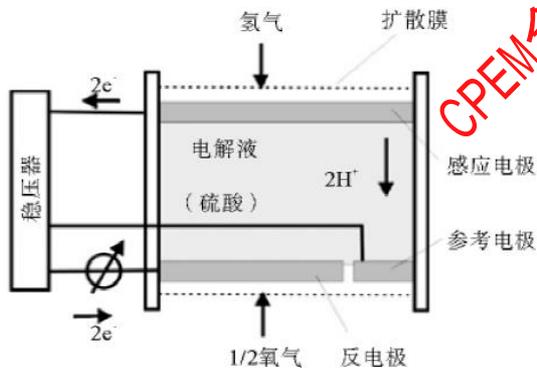


二、技术原理



电化学型传感

电化学型氢气传感器（燃料电池）由两个电极和电解质构成，测试环境中的 H_2 在工作电极和反电极上发生相应的氧化还原反应，并释放电荷形成电流或电位差，产生的电流大小或电位差与 H_2 浓度成正比，通过测试电流/电压大小即可判定氢气浓度的高低。

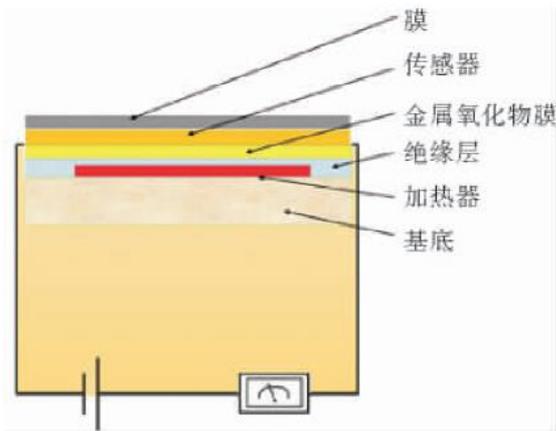
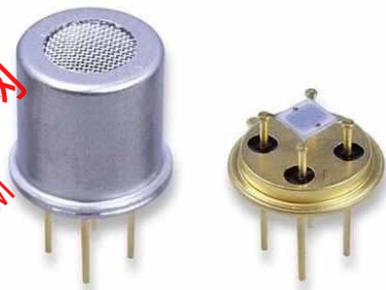


二、技术原理



半导体型传感

半导体氢气传感器的工作原理是半导体敏感材料表面会吸附 H_2 ，当氢原子被吸附到半导体表面后，会改变半导体材料的物理特性，一般是氢原子与半导体敏感材料之间发生电子转移，使半导体材料的电导率发生变化，通过测定半导体电导率的变化以达到测定氢气浓度的目的，电阻型氢气传感器一般是采用金属氧化物敏感材料制成的传感器。常用的材料包括 SnO_2 、 ZnO 和 TiO_2 等，现阶段应用最为广泛的半导体材料为 SnO_2 。

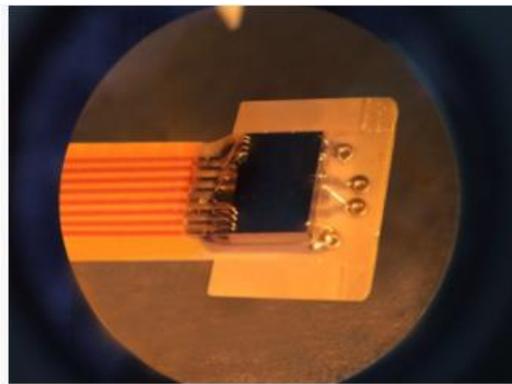
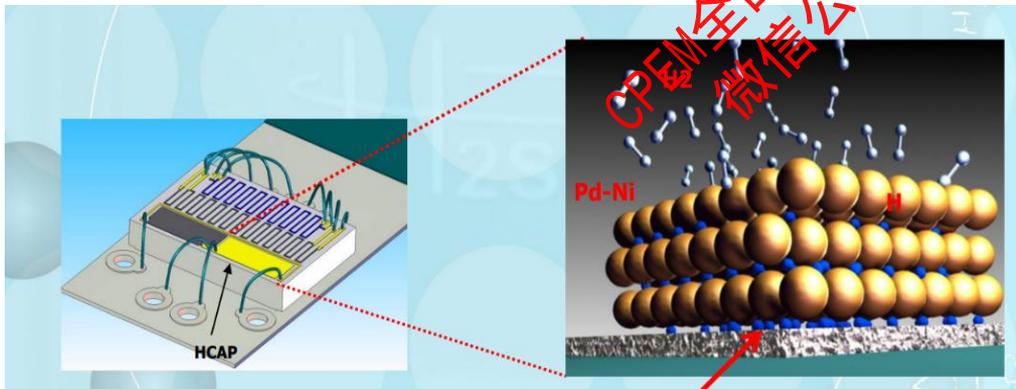


二、技术原理



钯合金薄膜型传感

钯合金薄膜型氢气传感器利用了金属Pd对H₂的专一性催化作用，使得H₂分子分解为H原子，溶解扩散至Pd薄膜晶格中，从而引起Pd金属薄膜电阻率的改变，实现氢气浓度的检测。因钯合金薄膜型氢气传感器工艺简单、成本低、灵敏度高、响应时间短及在室温下工作等优点而受到广泛研究，被认为是目前最先进的氢气传感技术。



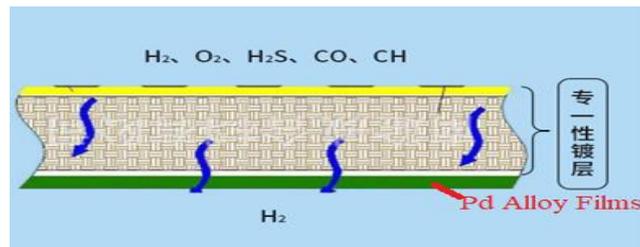
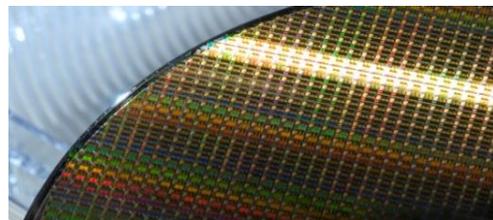
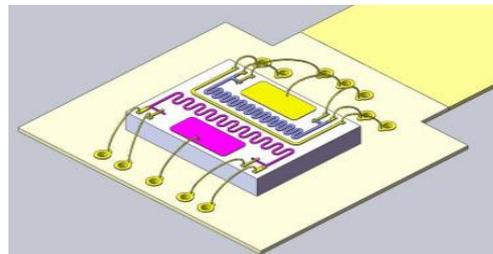
二、技术原理



钯合金薄膜型传感

技术特点:

1. 直接测量油中溶解氢气，无需油气分离；
2. ppm级到99.9%纯氢测量
3. 氢气分压的检测，不消耗 H_2 ；
4. 无交叉响应，包括： C_xH_y ， CO ， H_2S 等各种可燃气体；检测精度不受湿度影响
5. 寿命在10年以上；
6. MEMS芯片尺寸级；
7. 成本较高

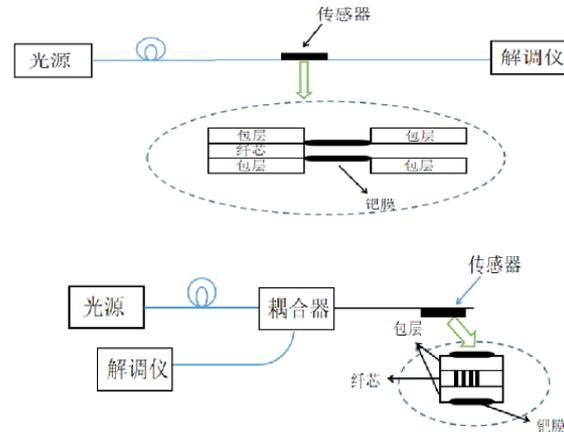
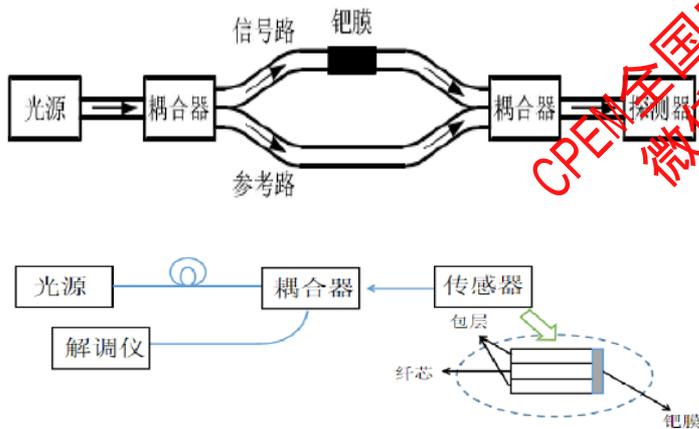


二、技术原理



光纤型传感

光纤型氢气传感器的原理是通过检测沉积在光纤上的氢敏材料与氢气发生反应后的光信号变化来测定氢气的浓度。而根据检测光信号种类的不同，可以将光纤氢气传感器分为干涉型、光强调节型、渐变场型和波长调节。

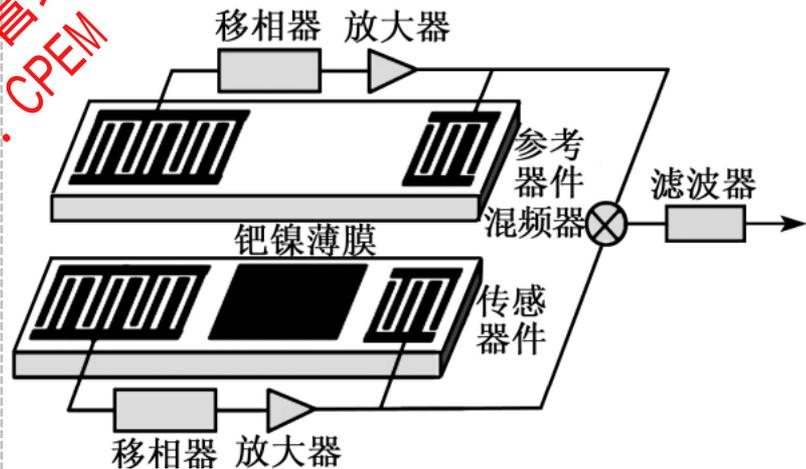


二、技术原理



声表面波光学传感

声表面波型氢气传感器的工作原理是将光学敏感材料涂覆在声波传播路径上，光学敏感材料吸附氢气后，会引起固体中声波的速度、损耗和相位随之变化，通过检测这种变化，就可以反过来检测被测对象参量的变化。根据所检测信号的不同，声表面波传感器一般可以分为振荡频率检测式、插入损耗检测式和相位检测式。





国家电网有限公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

目录

CONTENTS



背景



技术原理



应用现状



技术标准

CPEN全国电力设备管理网
微信公众号: CPEN

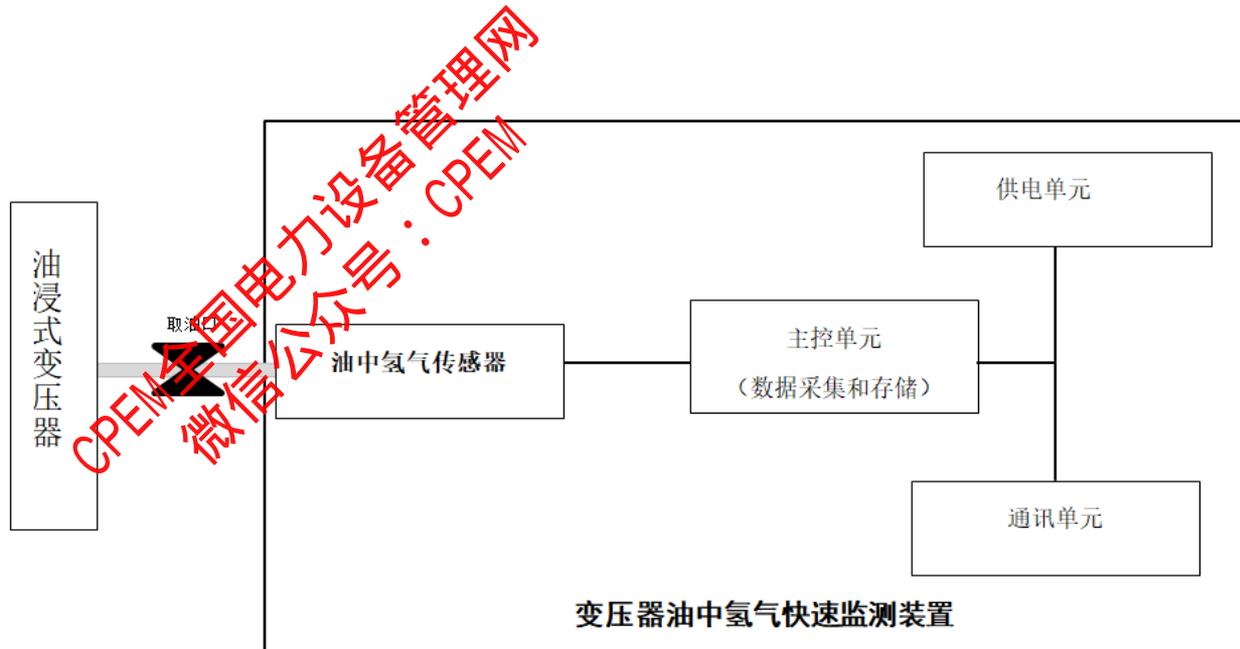
三、应用现状



油中氢气监测装置

装置组成

变压器油中溶解氢气监测装置主要由油中溶解氢气传感器、控制与数据采集、通讯及辅助模块、安装接口等部分组成。



三、应用现状

油中氢气监测装置

发展历史

1974年，加拿大SYPROTEC公司推出最早的氢气在线监测装置HYDRAN201装置；

1999年，美国GE公司收购加拿大SYPROTEC公司；

2008年，美国QUALITROL公司推出基于燃料电池技术的TM1装置；

2010年，美国WEIDMANN公司首次推出基于钽合金薄膜技术的InsuLogix H装置；

2014-2016年，QUALITROL、ABB、SIEMENS、WAISALA公司相继推出基于钽合金薄膜技术的在线监测装置；

2016年，海卓赛思推出基于钽合金薄膜技术的氢气传感器，目前是国内主流供应商；

2018-2019年，华电云通、特变新变、西变组件等公司相继推出基于钽合金薄膜技术的装置；

2020年，中国电科院组织行业内第一次油中氢气监测装置集中性能验证...



CPEM 中国电力设备管理网
微信公众号: CPEM

三、应用现状



油中氢气监测装置

常见装置



三、应用现状



安装模拟运行测试

1. 瓦斯继电器集气报警试验,
 2. 100°C油温连续通电考核,
 3. 加装单氢监测装置改造模拟试验,
 4. 联管加装监测装置振动、震动应力测试,
- 均通过



三、应用现状



厂内安装及验证

在中国电科院开展性能验证及安装模拟运行测试后，特高压直流工程中换流变套管升高座试点安装了单氢监测装置，并随本体开展全套出厂试验，进一步验证了换流变加装油中氢气监测装置的可行性。



三、应用现状



安装运行概况

截至2021年底，变压器油中氢气在线监测装置共在系统内7家单位的9个换流站共计安装140余台，装置整体运行稳定，准确度、稳定性均满足运行要求。



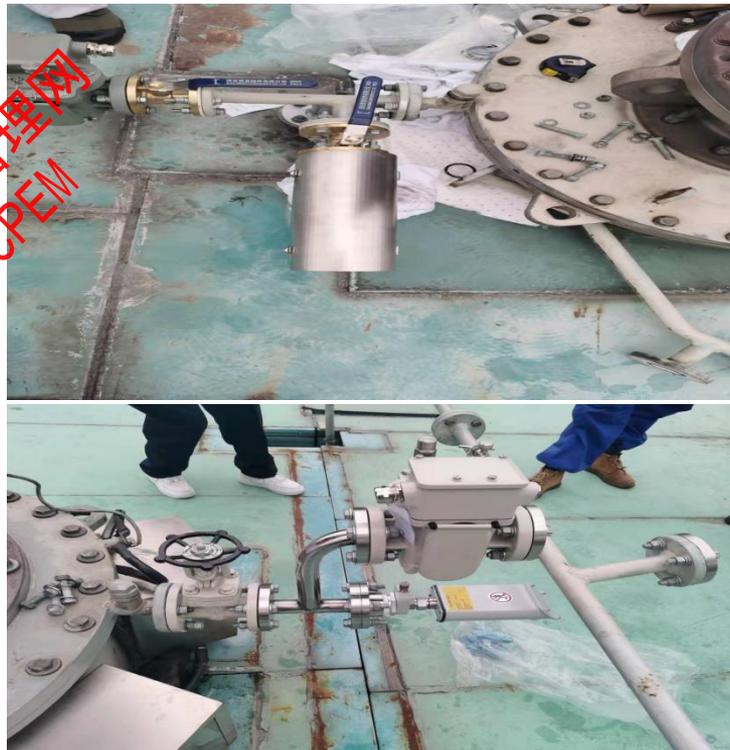
三、应用现状



某省安装运行情况

某省分别于2020年9月和2021年3月在2座 $\pm 800\text{kV}$ 换流站共安装29套变压器油中氢气监测装置，以垂直或平行方向安装于换流变网侧高压套管升高座瓦斯继电器相连的三通阀处。

截至2021年底，绝对误差在 $\pm 5\text{uL/L}$ 以内的装置有23台，占比79.31%，其余6台准确性均符合要求；氢气监测数据波动不大，24台数据都在 $\pm 10\text{uL/L}$ 以内变化，占比82.76%；均未发生误报情况。





国家电网有限公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

目录

CONTENTS



背景



技术原理



应用现状



技术标准

CPEN全国电力设备管理网
微信公众号：CPEN



四、技术标准



变压器油中氢气监测相关技术标准

序号	标准文号	标准名称	备注
1	T/CEC xxxx	变压器油中氢气快速监测装置技术规范 (报批稿)	中电联团标
2	GB/T 17623	绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法	其他相关标准
3	DL/T 722	变压器油中溶解气体分析和判断导则	
4	DL/T 1498.1	变电设备在线监测装置技术规范 第1部分：通则	
5	DL/T 1498.2	变电设备在线监测装置技术规范 第2部分：变压器油中溶解气体在线监测装置	
6	Q/GDW 10536	变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范	
7	Q/GDW11304.41	电力设备带电检测仪器技术规范 第4-1部分：油中溶解气体分析仪 (气相色谱法)	

四、技术标准



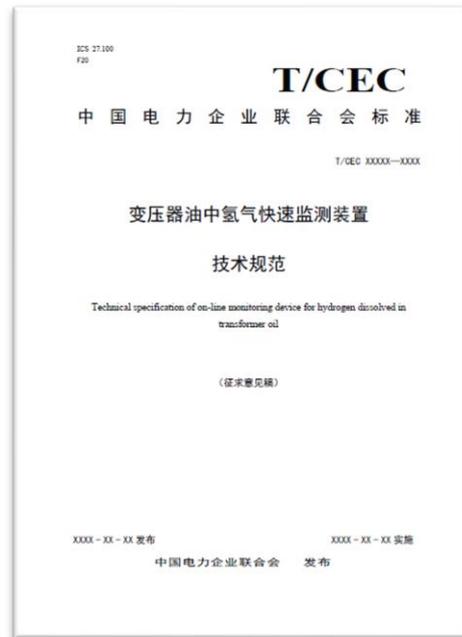
技术标准要求

- ✓ 1) 基本功能
- ✓ 2) 绝缘性能
- ✓ 3) 电磁兼容性能
- ✓ 4) 环境适应性能
- ✓ 5) 机械性能
- ✓ 6) 专项功能

监测功能、数据记录功能、报警功能、自检功能、通信功能。

- ✓ 7) 性能要求

CPEM全国电力设备管理网
微信公众号：CPEM

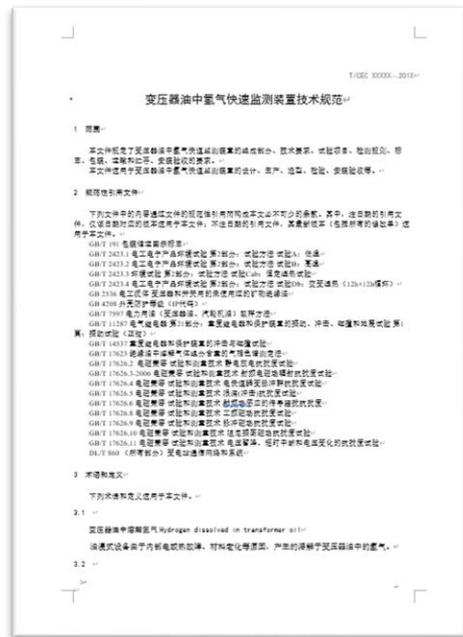
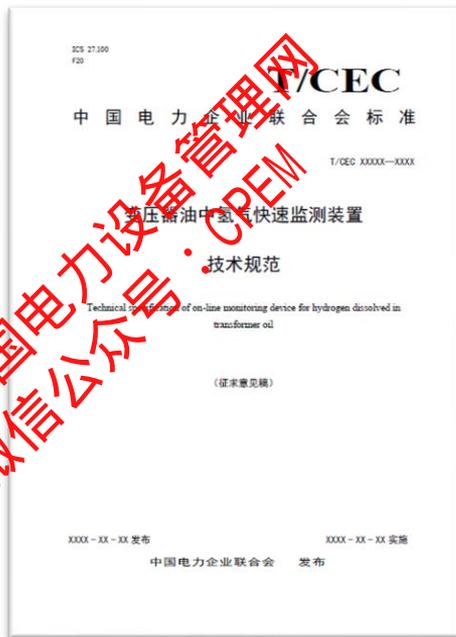


四、技术标准



技术标准核心性能指标

- ✓ 1) 检测范围与测量误差
- ✓ 2) 最小检测浓度
- ✓ 3) 最小采样间隔时间
- ✓ 4) 测量重复性
- ✓ 5) 响应时间 (T90)
- ✓ 6) 交叉敏感性
- ✓ 7) 重量



CPEM 全国电力设备管理网
微信公众号: CPEM

四、技术标准



标准性能要求

1. 检测范围与测量误差

检测范围 ($\mu\text{L/L}$)	测量误差限值 (A级)	测量误差限值 (B级)	测量误差限值 (C级)
5~150	$\pm 5\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 20\%$ ^a	$\pm 10\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 25\%$	$\pm 15\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$
150~5000	$\pm 20\%$	$\pm 25\%$	$\pm 30\%$

^a在低浓度范围内，测量误差限值取两者较大者

1. 检测范围与测量误差

(1) 基本测量误差试验

在同一样本中取两份油样，分别采用变压器油中溶解氢气监测装置和实验室气相色谱仪进行检测分析，将两者检测数据进行对比。油样的采集、脱气，油中溶解氢气的分离、检测等步骤，应按照GB/T 7597和GB/T 17623的方法执行。

合格判据为：按照公式（1）和公式（2）计算测量误差，所有浓度的测量误差应满足测量误差精度要求。

$$E_a = C_o - C_i \quad (1)$$

$$E_r = \frac{C_o - C_i}{C_i} \times 100\% \quad (2)$$

标准性能要求

1. 检测范围与测量误差

(2) 高低温下测量误差试验

配制溶解氢浓度大于 $50\mu\text{L/L}$ 的油样，然后将变压器油中氢气监测装置接入装有该浓度油样的不锈钢容器上，并一同放入高低温环境试验箱内，测试不同温度下装置的测量误差。

分别将环境试验箱温度设置为 -40°C 和 105°C ，连续运行至少6小时以上，读取装置输出 C_o ，分别取油样进行离线油色谱分析，记录结果为 C_i 。按公式(1)和公式(2)计算测量误差，应满足测量误差精度的要求。



中国电科院变压器油中溶解气体分析检测实验室

四、技术标准



标准性能要求

2.其他核心指标要求

序号	指标名称	指标参数
1	最小采样间隔时间	≤3分钟
2	取油口耐受压力	≤0.6 MPa
3	测量重复性	RSD≤3%
4	响应时间 (T90)	≤30min
5	交叉敏感	CO、CO ₂ 、C ₂ H ₂ 干扰下满足测量误差精度要求
6	重量	装置本身≤5kg

CPEM全国电力设备管理网
微信公众号：CPEM

四、技术标准



标准性能要求

2.其他指标要求

(1) 测量重复性

装置接入氢气 $\geq 50\mu\text{L/L}$ 的油样，待示值稳定后，连续6次间隔10分钟读取氢气稳定示值，重复性以氢气测量结果的相对标准偏差RSD表示，按照公式(3)计算。相对标准偏差RSD应不大于3%。

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \times \frac{1}{\bar{C}} \times 100\% \quad (3)$$

标准性能要求

2.其他指标要求

(2) 交叉敏感性试验

配制一油样，其中一氧化碳CO 含量 $> 500\mu\text{L/L}$ ，二氧化碳CO₂ 含量 $> 10000\mu\text{L/L}$ ，其他烃类含量 $> 100\mu\text{L/L}$ ，氢气H₂含量 $< 50\mu\text{L/L}$ ，在线监测装置进行油中溶解氢气含量分析。氢气H₂测量结果应满足测量误差精度要求。

(3) 响应时间

装置接入氢气 $\geq 150\mu\text{L/L}$ 的油样，待示值稳定后，读取氢气稳定示值。更换装置油路接入空白油样中，待装置显示氢气数值小于 $5\mu\text{L/L}$ 后，在当前检测周期结束立即再接入前述油样，同时启动秒表，待装置显示值到达稳定示值的90%时停止秒表，读取时间作为装置的响应时间。不超过30min。

四、技术标准



标准性能要求

绝缘性能

1. 绝缘电阻 2. 介质强度 3. 冲击电压

表1 绝缘电阻要求

额定工作电压 U_N	绝缘电阻要求
$U_N \leq 60V$	$\geq 100M\Omega$ (用 250V 绝缘电阻表测量)
$250 > U_N > 60V$	$\geq 100M\Omega$ (用 500V 绝缘电阻表测量)

注：与二次设备及外部回路直接连接的接口回路绝缘电阻采用 $250 > U_N > 60V$ 的要求。

表2 工频耐压试验电压要求

额定工作电压 U_N	交流试验电压有效值
$U_N \leq 60V$	0.5kV
$250 > U_N > 60V$	2.0kV

注：与二次设备及外部回路直接连接的接口回路试验电压采用 $250 > U_N > 60V$ 的要求。

四、技术标准



标准性能要求

电磁兼容性能

1. 静电放电
2. 射频电磁场辐射
3. 工频磁场
4. 脉冲磁场
5. 阻尼振荡磁场
6. 电压暂降
7. 电快速脉冲群
8. 浪涌
9. 射频场感应的传导骚扰

表3 在线监测装置的抗扰度要求

端口	试验项目	基础标准	试验等级	标准要求
外壳	静电放电 (ESD)	GB/T 17626.2—2006	4级	B或A
	射频电磁场辐射	GB/T 17626.3—2006	3级	A
	工频磁场	GB/T 17626.8—2006	5级	A
	脉冲磁场	GB/T 17626.9—2011	5级	A
	阻尼振荡磁场	GB/T 17626.10—1998	5级	A
交流电源	电压暂降	GB/T 17626.11—2008	3类	B或A
	脉冲群	GB/T 17626.4—2008	4级	B或A
	浪涌	GB/T 17626.5—2008	4级	B或A
	射频场感应的传导骚扰	GB/T 17626.6—2008	3级	A
直流电源	脉冲群	GB/T 17626.4—2008	4级	B或A
	浪涌	GB/T 17626.5—2008	4级	B或A
	射频场感应的传导骚扰	GB/T 17626.6—2008	3级	A
I/O 信号/控制 (包括功能接地端口的连接线)	脉冲群	GB/T 17626.4—2008	4级	B或A
	射频场感应的传导骚扰	GB/T 17626.6—2008	3级	A

四、技术标准



标准性能要求

环境适应性能

1.低温

2.高温

3.恒定湿热

试验温度 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $(93 \pm 3)\%$ ，试验时间为48h。

4.交变湿热

高温温度 55°C ，循环次数2次。

表 4 环境适应性能试验温度与严酷等级

$^\circ\text{C}$

环境温度	严 酷 等 级	
	低温温度	高温温度
-25~+45	-25	+70
-40~+45	-40	+70

国家电网设备管理网
CPEM 微信公众号: CPEM1688

四、技术标准



标准性能要求

机械性能

1. 振动

装置应能承受GB/T 11287中规定的严酷等级为I级的振动耐久试验。

2. 冲击

装置应能承受GB/T 14537中规定的严酷等级为I级的冲击耐久试验。

3. 碰撞

装置应能承受GB/T 14537中规定的严酷等级为I级的碰撞试验。

外壳防护性能

1. 防尘

室内及遮蔽场所使用的装置，应符合GB 4208中规定的外壳防护等级IP31的要求；户外使用的装置，应符合GB 4208中规定的外壳防护等级IP55的要求。

2. 防水

室内及遮蔽场所使用的装置，应符合GB 4208中规定的外壳防护等级IP31的要求；户外使用的装置，应符合GB 4208中规定的外壳防护等级IP55的要求。

CPD全国电力设备管理
微信公众号: REM

四、技术标准



其他标准要求

少组分在线监测装置：监测变压器油中溶解气体组分少于6种的监测装置，用于缺陷或故障预警。监测量为特征气体中的一种或多种，应至少包括氢气（H₂）或者乙炔（C₂H₂）。



检测参量	检测范围 ($\mu\text{L/L}$)	测量误差限值 (A级)	测量误差限值 (B级)	测量误差限值 (C级)
氢气 (H ₂)	5~50	$\pm 5\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$ ^a	$\pm 20\mu\text{L/L}$	$\pm 25\mu\text{L/L}$
	50~2000	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$

少组分在线监测装置的最小检测周期不大于36小时。



检测参量	检测范围 ($\mu\text{L/L}$)	测量误差限值 (A级)	测量误差限值 (B级)	测量误差限值 (C级)
氢气 H ₂	5~50 ^a	$\pm 5\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$	$\pm 10\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$	$\pm 15\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$
	50~2000	$\pm 30\%$	$\pm 35\%$	$\pm 40\%$

少组分在线监测装置的最小检测周期不大于12小时。

四、技术标准



中国电科院变电设备状态监测技术实验室

变电设备状态监测技术实验室是国内成立最早、试验能力最全的变电设备状态监测装置第三方检验检测机构，技术指标和检测能力国际一流，主要开展**电力设备状态监测装置、检测仪器及新型传感器的科研攻关、标准制定、技术服务、型式试验和入网把关**等任务；是本领域首家具备CNAS和CMA资质并且检测能力完备的专业检测机构；是行业内首个获得CNAS认可的**绝缘油中溶解气体组分含量PT**（能力验证提供者）资质的机构；主导制订了**变压器油中溶解气体在线监测装置**等所有状态检测装置行业、企业技术标准体系；被国家电网公司授牌为“**在线监测、带电检测、电力智能传感技术标准验证实验室**”。

