



ALTANOVA

A DOBLE COMPANY



道波 (Doble) 电力变压器故障诊断策略及案例分析

丁洪志博士

道波 (Doble) 英国电力试验公司电力变压器技术专家

Transformer Specialist and Principal Engineer

Doble Engineering Company

United Kingdom Office

hding@doble.com

丁洪志 博士



- 道波 (Doble) 英国电力试验公司电力变压器技术专家
- 1995 获北京理工大学工学博士学位
- 1999-2001 德国爱尔兰根—纽伦堡大学 洪堡研究学者
- 2001-2008 英国曼彻斯特大学从事科学研究工作。
- 2004 加入英国国家电网高电压研究中心致力于电力变压器老化问题研究
- 2008 加入道波英国电力试验公司
- 国际大电网组织 (CIGRE) A2. 40, A2. 45, A2/D1. 46, A2. 64 工作组成员
- 2004年以来已完成对数百台交流和高压直流电力变压器、分接开关、套管、互感器、避雷器、电池的法医调查

道波 (Doble) 公司发展历史



- 道波工程公司 **Doble Engineering Company**, Boston, USA
 - 由 Frank Doble 于 1920 年创立
 - 美国有影响力的独立咨询服务公司
 - 为电力行业生产优质测试和测量设备而享誉全球
 - 以客户支持和组织会议的形式提供全面的技术支持
- 道波英国电力试验公司 **Doble PowerTest Ltd**, Guildford, UK
 - 成立于 2002 年 4 月
 - 变压器、发电机和电机测试
 - 2002 年 11 月扩大
 - 为英国供电行业提供独立高压测试和工程咨询服务

道波 (Doble) 公司发展历史

100 YEARS OF SERVICE TO THE ELECTRIC UTILITY INDUSTRY



道波(Doble)/阿尔塔诺娃(Altanova)集团发展史



1938

I. S. A. 自动化系统有限公司在意大利泰诺成立
I. S. A. Istrumentazioni Sistemi Automatici
S.r.l. is established in Taino ITALY

1999

特因普 TECHIMP 从意大利博洛尼亚大学衍生
TECHIMP was born as a spin-off from the
University of Bologna ITALY.

2017

I. S. A. 和 TECHIMP 合并诞生了 ALTANOVA 集团
I. S. A. and TECHIMP merge giving birth to the
ALTANOVA GROUP

2019

INTELLISAW 加入 ALTANOVA 集团
INTELLISAW joins ALTANOVA GROUP

2021

ALTANOVA 集团加入 ESCO 科技集团并加入道波 (Doble) 工程公司，成为公用事业
解决方案集团 (USG) 部门的一部分 ALTANOVA GROUP becomes part of ESCO
Technology Group and joins the Doble Engineering Company, as part of
the USG (Utilities Solutions Group) division.



道波(Doble)/阿尔塔诺娃(Altanova)集团现状



100
COUNTRIES



12 GLOBAL
FACILITY
LOCATIONS



150+
EMPLOYEES



150+
SALES PARTNERS



5550+
CUSTOMERS GLOBALLY



Part of ESCO
Technologies' Utility
Solutions Group

PRODUCT BRANDS



我们的解决方案



电气测试设备

对电气资产的日常维护测试至关重要。在资产生命周期的特定阶段有用：采购、制造 - 高压测试实验室、操作、维护、退役。

专业服务

根据电气资产生命周期提供多样化的报价：安装和调试、诊断测试、数据分析、咨询/取证、训练。

监控系统

从基于时间的维护转变为基于状态的维护。
专注于预测性维护，并将重点从电力资产价值成本转移到网络中断成本。
电力行业数字化趋势强劲演进。



电力变压器

- 昂贵的
- 通常可靠、耐用
- 故障有时会发生并且确实会发生
由事件发起，例如闪电、瞬变、短路
- 难以诊断
- 维护和目视检查价值有限
- 维修通常不经济
- 失败可能是灾难性的
- 需要适当的监控和管理



电力变压器运维可靠性压力

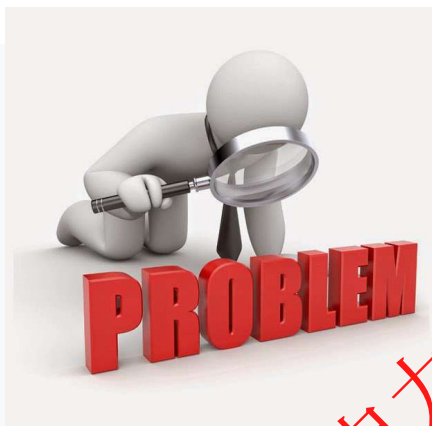
- 设备老化
- 来自未知制造商的新设备
- 负载增加
- 故障级别增加
- 减少维护
- 劳动力减少（尤其是专家）
- 电价上涨

CPEM全国电力设备管理网
CPEM微信公众号

对变压器故障诊断和
状态评估的兴趣增加

电力变压器资产管理任务

- 故障诊断
- 维护
- 监控
- 评估
- 维修
- 替代品
- 风险评估
- 费用



电力变压器资产寿命

- 假定变压器的使用寿命为 40 年
- 但为什么所有的变压器 有相同的预期寿命?

影响变压器寿命的因素:

- 设计
- 制造
- 材料
- 应用
- 利用率 - 负载、基本负载与循环
- 环境 - 温度、闪电、瞬变

电力变压器设计

- 相同应用变压器的不同预期寿命
- 对于英国变压器，预期寿命从 30 年到 80 年不等
- 有些设计远远好于设想的 40 年
- 其它变压器有弱点，例如：
 - ☐ 短路强度差
 - ☐ 漆包第三绕组
 - ☐ 相间绝缘不足
 - ☐ 绕组热点和接头问题
 - ☐ 铁芯/框架到油箱循环电流

电力变压器应用、使用、环境

- 负荷影响老化
- 异常系统和环境事件（短路、雷击、开关过电压）可能引发故障
- 需要对每一台变压器进行单独故障诊断

CPEN中国电力设备管理网
微信号: CPEN

电力变压器故障模式

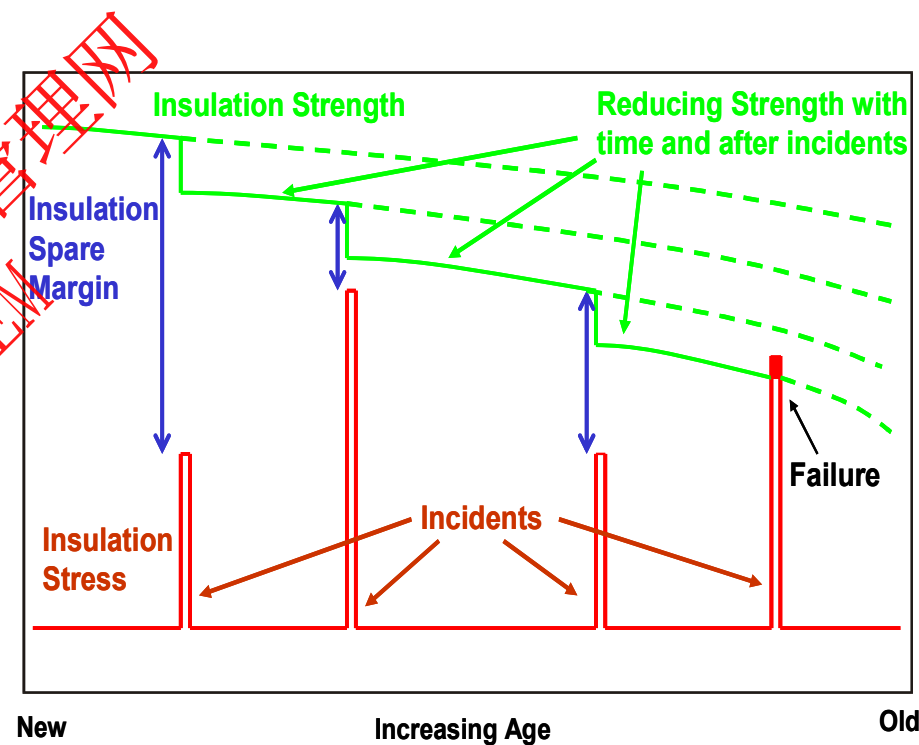


电力变压器故障模式

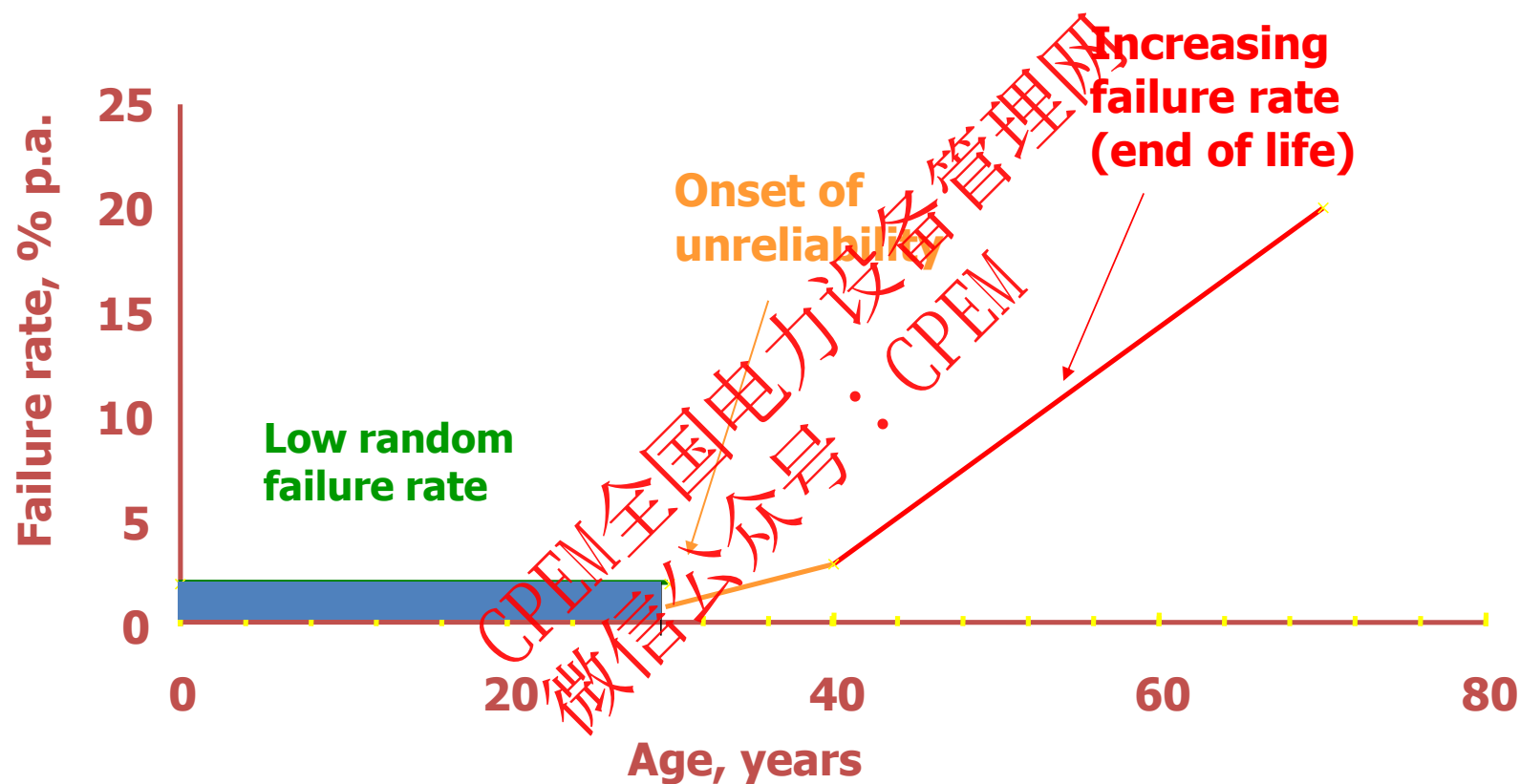


电力变压器故障模型

- ❑ 当变压器部件或结构不再能够承受运行期间施加在其上的应力时，就会发生故障。
- ❑ 在其使用寿命期间，电力变压器在正常和瞬态负载条件下一直承受着热、机械、化学、电气和电磁应力的影响。变压器的状况从一开始就逐渐恶化，导致
 - 介电强度降低（承受雷电和开关脉冲的能力）；
 - 机械强度降低（承受任何贯穿故障的能力）；
 - 载流电路的热完整性降低（承受过载的能力）；
 - 电磁完整性降低（在特定条件下传输电磁能量的能力，包括过励磁和过载）。
- ❑ 当变压器相对于上述关键特性之一的耐受强度被操作应力超过时，最终会发生故障。



电力变压器开始不可靠

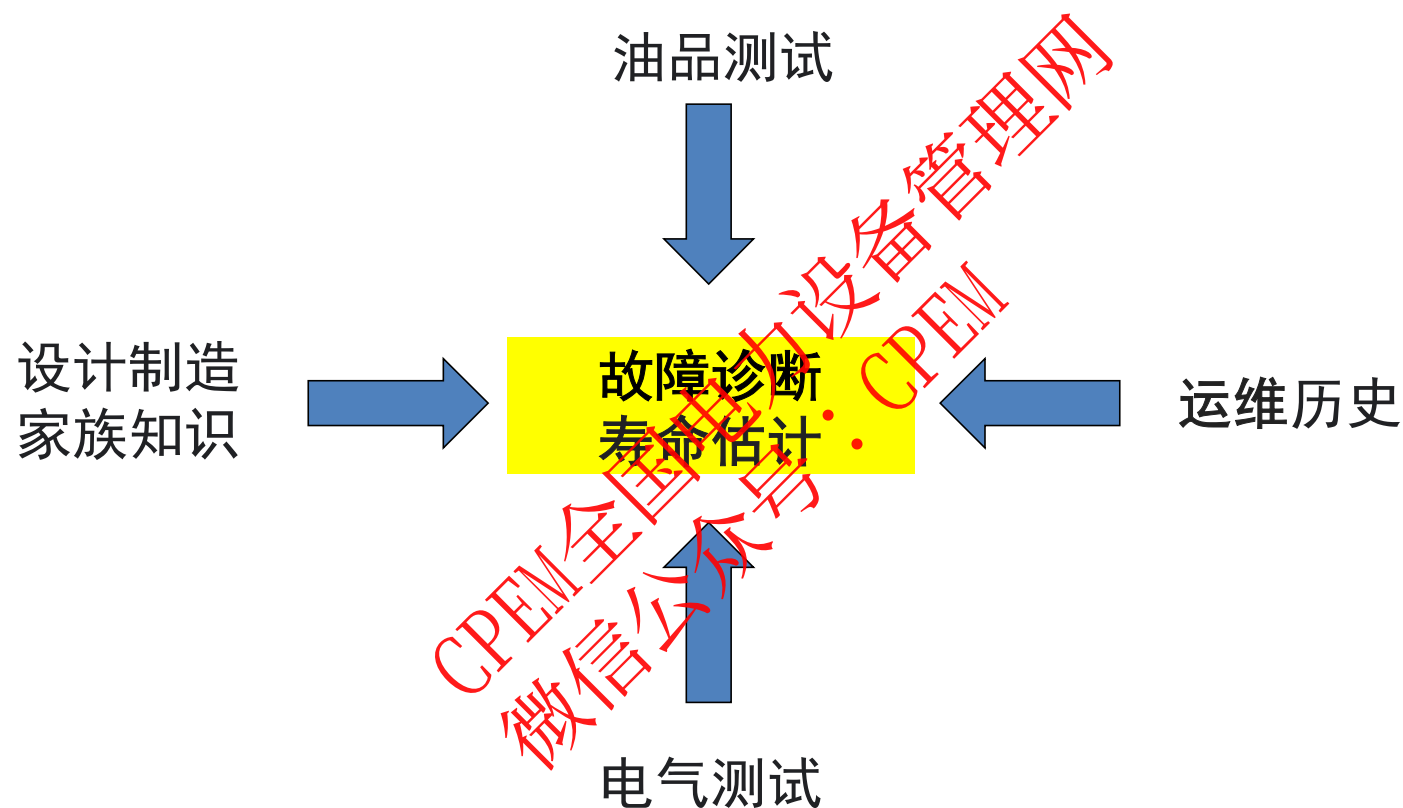


电力变压器故障诊断和健康审查目标

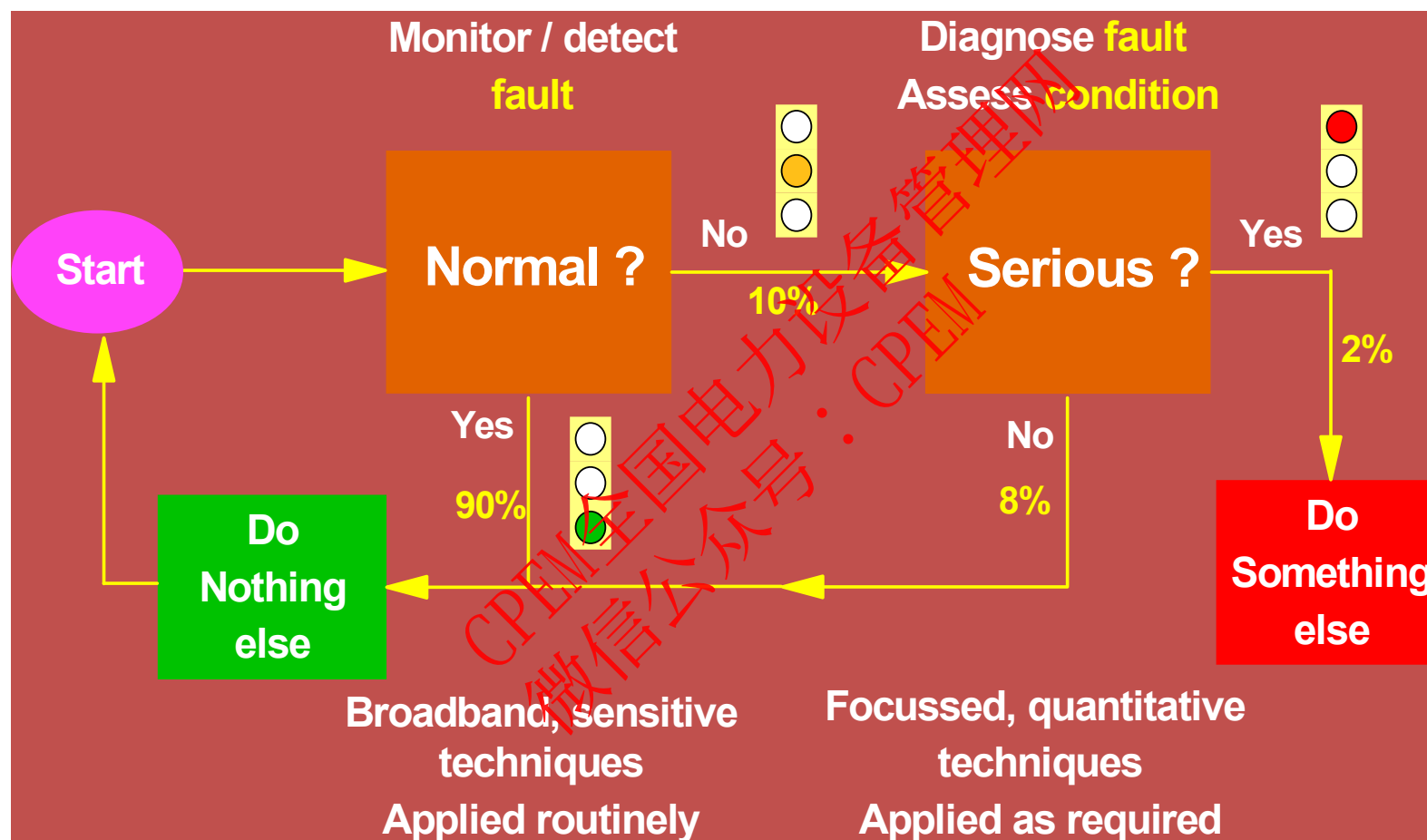
- ❖ 查明故障
- ❖ 查明技术风险最大的地方
- ❖ 提供资产寿命的最佳估计
- ❖ 计划和优先考虑活动
 - 维护
 - 翻新
 - 替代

CPEM全国电力设备管理网
微信公众号：CPEM

电力变压器故障诊断和健康审查数据来源



电力变压器故障诊断和健康审查策略



电力变压器故障诊断和健康审查策略

阶段 1 状态监测/人口审查

简单诊断、无创、在线
检查和调查
油测试，红外，RFI

阶段 2 故障诊断/状况评估

离线调查，“高级”诊断
C和PF，SFRA，绕组电阻、局部放电

阶段 3 决定

维护、修理、翻新、更换

电力变压器故障诊断和健康审查策略

阶段 1 状态监测/人口审查

简单诊断、无创、在线
检查和调查
油测试，红外，RFI

创建一个变压器资产登记清单：

- 功能参数：电压、MVA、阻抗等
- 设计参数：制造商、家庭、年份
- 运行历史：使用寿命，负载
- 事件历史：故障、系统事件
- 监控数据：DGA、电测数据

所有单元的现有知识和测试数据的概述

目标：确定优先单位

电力变压器故障诊断和健康审查策略

溶解气体分析 (DGA)

□ 理想状态监测技术

- 在线、灵敏、全面、集成、廉价

□ 诊断

- 重点是根据气体比率/特征来诊断故障
- 不善于区分正常和**异常**
- 非活动故障和脱气后的问题

□ 正常和行动水平

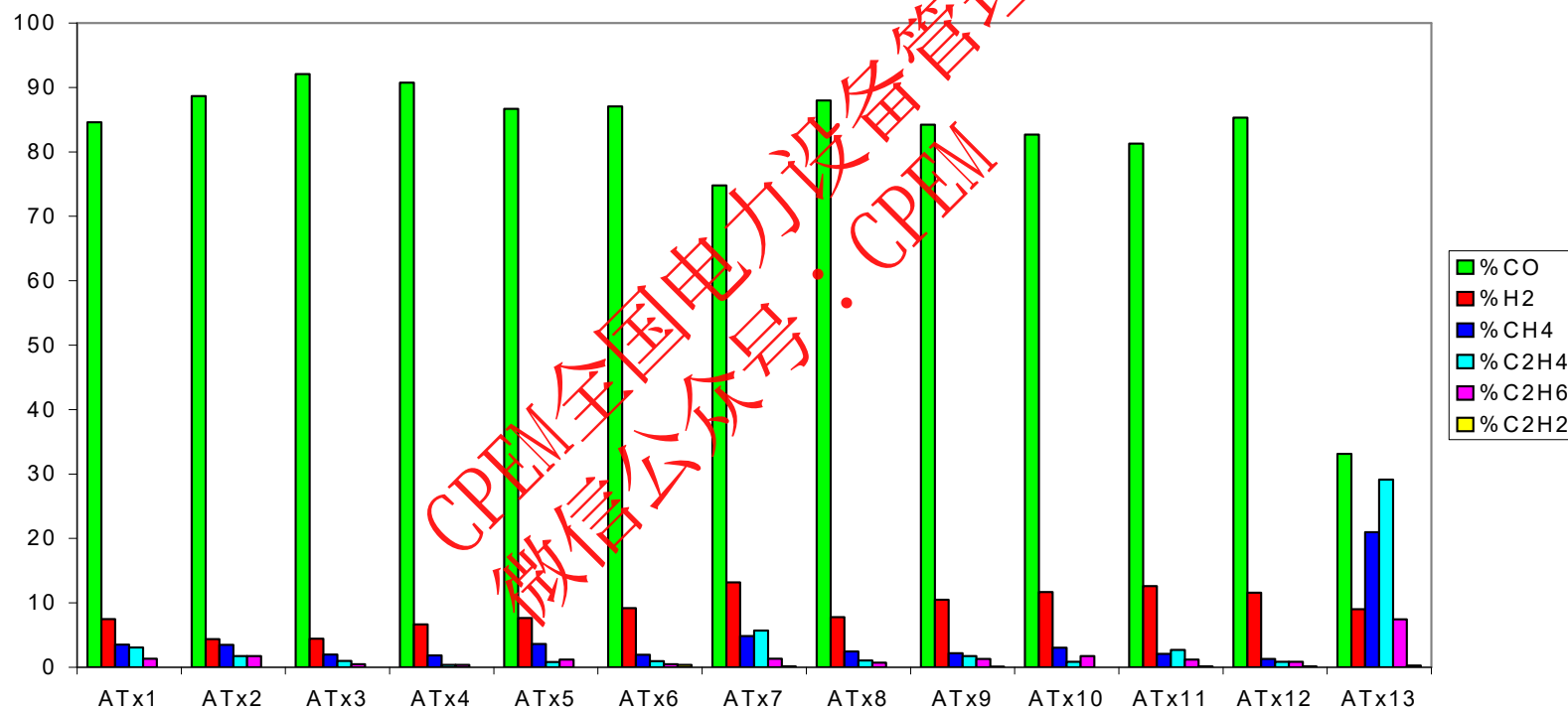
- 识别“不寻常”而不是“不健康”的结果

□ DGA评分系统 - 由道波(Doble)英国电力试验公司开发用于筛选出正常结果

电力变压器故障诊断和健康审查策略

溶解气体分析 (DGA) 人口审查

DGA for Population



电力变压器故障诊断和健康审查策略

阶段 2

故障诊断/状况评估

离线调查，“高级”诊断

C和PF, SFRA, 绕组电阻、局部放电

故障诊断
和健康审
查重点



电介质
热/老化
机械的
绝缘油
分接开关
套管
外部的

目标是识别老化状态和任何故障 – 从而评估故障风险

电力变压器故障诊断和健康审查策略

阶段 3 决定 维护、修理、翻新、更换

Transformer Condition Summary

Site	SGT	HV	LV	MVA	T No.	Manf	Design	Year	Service	Rep Age	Rank	Overall	Dielectric	Ageing	Mechanical	Report
SGT3	400	132	240	T5533	PPT	F06	1968	36	37	1	1	180	100	70	10	
SGT2	400	132	240	T5435	AEI	A04	1967	36	55	1	1	151	100	50	100	
SGT2	275	132	180	T3544	HHE	H08	1962	42	47	2a	1	130	100	30	100	
SGT3A	400	275	500	T4175	CAP	C03	1965	38	40	1	1	110	100	10	10	
SGT1	275	132	120	T2471	FER	F08	1958	45	48	1	1	110	30	70	10	
SGT3	275	132	120	T2843	FER	F08	1959	44	50	1	1	110	30	70	10	
SGT1	275	66	120	T3139	AEI	A10	1960	43	55	1	1	103	100	3	10	
SGT2	275	132	120		FER	F08						100	30	70	10	
SGT1	275	132	120	T2808	FER	F08	1958	46	467	1	1	90	30	50	10	
SGT2	275	132	120	T2807	FER	F08	1957	46	467	1	1	90	30	50	10	
SGT3	275	132	120	T2521	FER	F08	1953	45	55	2c	1	80	10	70	10	
SGT2	400	132	240	T5581	AEI	A04	1967	36	55	2b	1	80	10	70	10	
SGT4A	275	132	150	T2844	FER	F07	1959	44	50	2b	1	110	10	100	10	
GRT1	66	22	40	T3227	YET		1958	46	55	2b	1	71	1	70	10	
GRT2	66	22	40	T3229	YET		1958	46	55	2b	1	71	1	70	10	
SGT1	400	132	240	T6847	PPT	P08	1990	13	55	4	1	4	1	3	10	
SHR2	275		100	R006	AEI	A12	c 1966	'not known'	55	27	1	71	1	70	10	
SGT2	275	132	240	T5423	GEC	G14	1967	37	55	1	1	70	30	30	10	
SGT3	275	132	240	T4974	GEC	G14	1965	38	55	1	1	70	30	30	10	
SGT2A	275	132	120	T2472	FER	F08	1959	45	47	1	1	70	30	30	10	
215Y	132		15	R170					55	4	1	70		70		
K1Y	275		97	R167	EEC	E19	c 1964	40	55	4	1	70		70		
K2Y	275		97	R166	EEC	E19	c 1964	40	55	4	1	70		70		
SGT2A	275	132	120	T3120	HHE	H09	1959	45	55	4	1	70		70		
SHR1	275		100	R031	EEC	E18	c 1970	34	55	4	1	70		70		
SHR2							1969	35				70		70		
SGT5A	400	275	900	T5009	EEC	E02	1967	36	42	2c	1	60	30	30		
SGT4	400	132	240	T6424	PPT	P07	1974	29	55	2b	1	60	30	30		
SGT4	400	132	240	T6636	FER	F04	1980	24	25	2a	1	60	30	30		
QB3SE	400	400	2000	T6967	PPT	P12	2000	4	55	2a	1	60	30	30		
SGT1	275	132	240	T5829	AEI	A07	1968	36	55	2c	1	60	30	30		
SHR1	400		200	R126	GEC	G10	c 1978	26	55	2c	1	60	30	30		
SHR1	400		200	R127	GEC	G10	c 1978	'not known'	55	2c	1	60	30	30		
SHR2	400		200	R116	GEC	G10	c 1975	29	55	2c	1	60	30	30		
SGT1	275	132	240	T5016	PPT	P13	1968	36	55	2a	1	60	30	30		
SGT2	400	132	240	T5887	HHE	H05	1971	32	55	2b	1	60	30	30		
SGT2	400	132	240	T5007	EEC	E07	1967	37	55	3	1	60	10	50		
SGT5A	400	275	750	T4671	FER	F01	1969	35	55	2b	1	54	1	50	3	
SGT1B	400	132	180	T4072	FER	F06	1964	40	55	4	1	53	3	50		
SGT1	275	132	180	T3575	CAP	C07	1962	41	55	4	1	53	3	50		

Serious partial discharge fault in main tank.

High FFA (until last sample). Oil in poor condition.
Oil in poor condition. Very high FFA.
High FFA.
High FFA.
High FFA (1.67) is believed to result from contamination.

High FFA

Rewound in 2000. Suspected thermal fault.

Intermittent arcing/sparking fault in main tank.

Suspected localised thermal fault.
High FFA. Oil in poor condition.

High FFA.

每一台变压器都被列出并评分为红色/琥珀色/绿色

电力变压器风险管理策略

□ 风险评估：

- 故障概率
- 主油箱破裂风险
- 电网战略重要性

□ 风险管理：

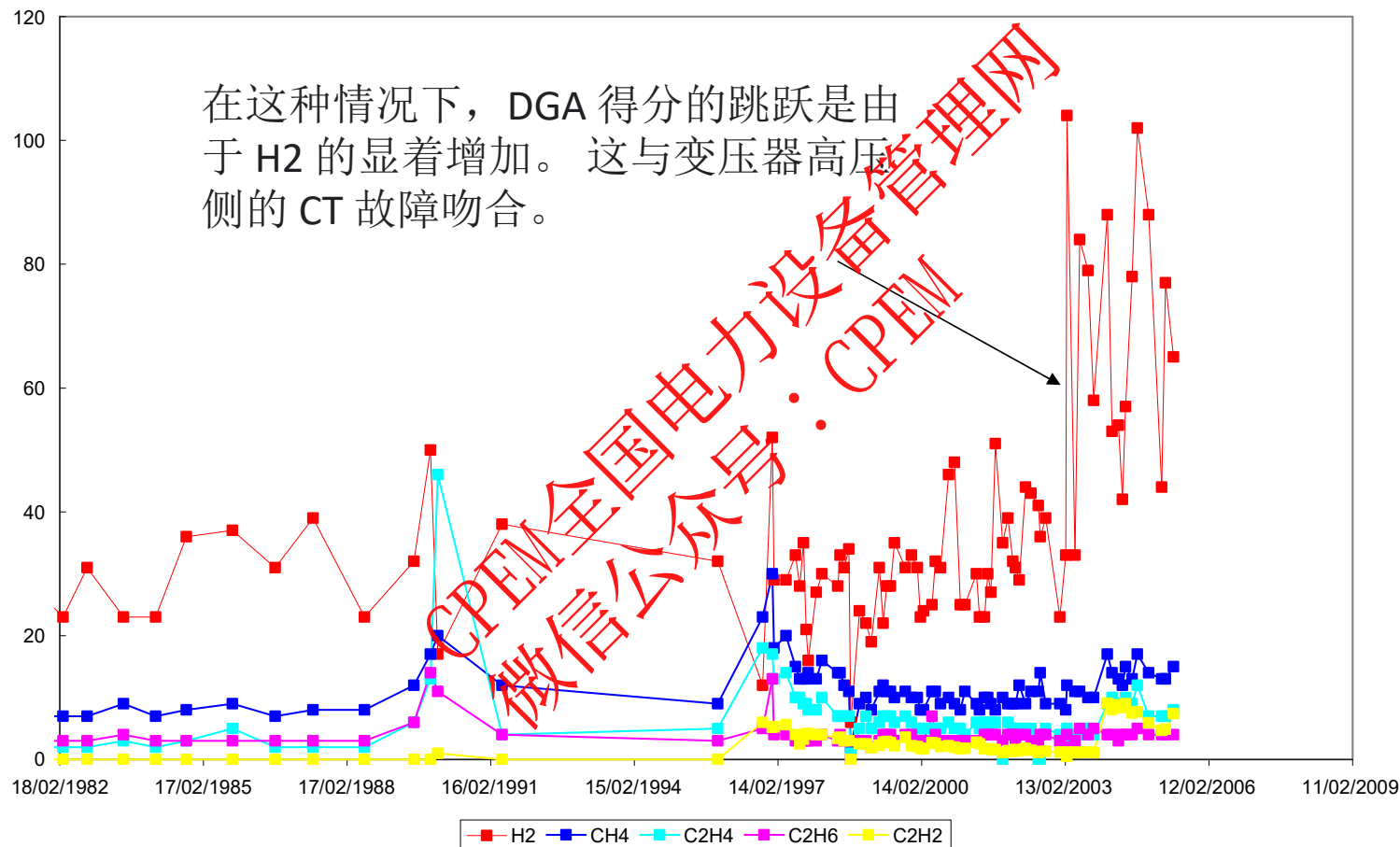
- 远程访问的在线 DGA 监控
- 放电 (RFI) 检测
- 风险管理区
- 从服务中删除

案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器

- 400/275 kV 750 MVA 自耦变压器
- 38岁
- 无保护指示
- DGA 评分系统在 2003 年发现开发问题
- 2005 年底进行的状态评估测试
- 另一个变电站的姊妹变压器的参考结果证实了一个严重的问题
- 进行了内部检查



案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器

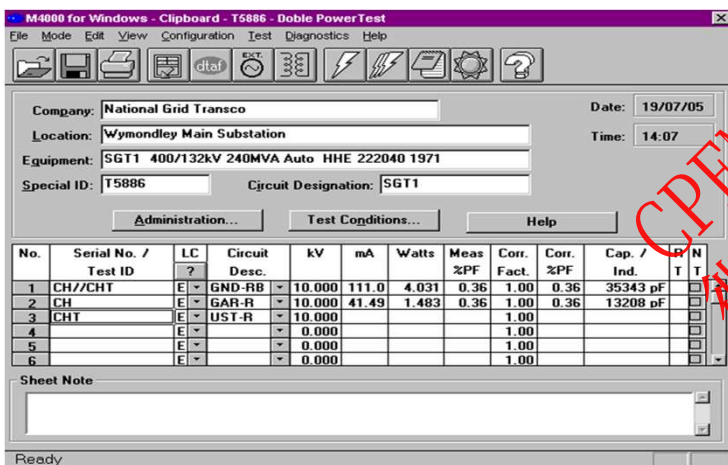


案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器

Gas	T4971 31/12/03 (peak)	IEEE C57.104	CIGRE JWG 15/12-01- 11
H2	88	≤ 100	50 – 150
CO	227	≤ 350	400 – 600
CO2	1,051	$\leq 2,500$	3,800 – 14,000
CH4	17	≤ 120	30 – 130
C2H4	9	≤ 50	60 – 280
C2H6	4	≤ 65	20 – 90
C2H2	9.1	≤ 2	2 - 20

根据 IEEE 和 CIGRE，这是一个很好的变压器！

案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器

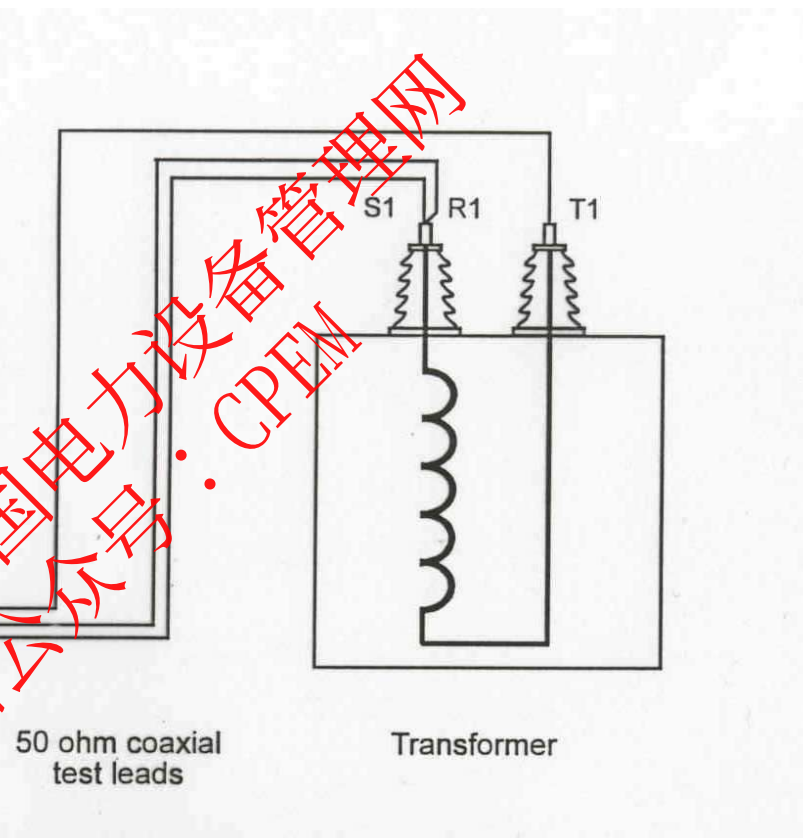


绝缘测试

案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器

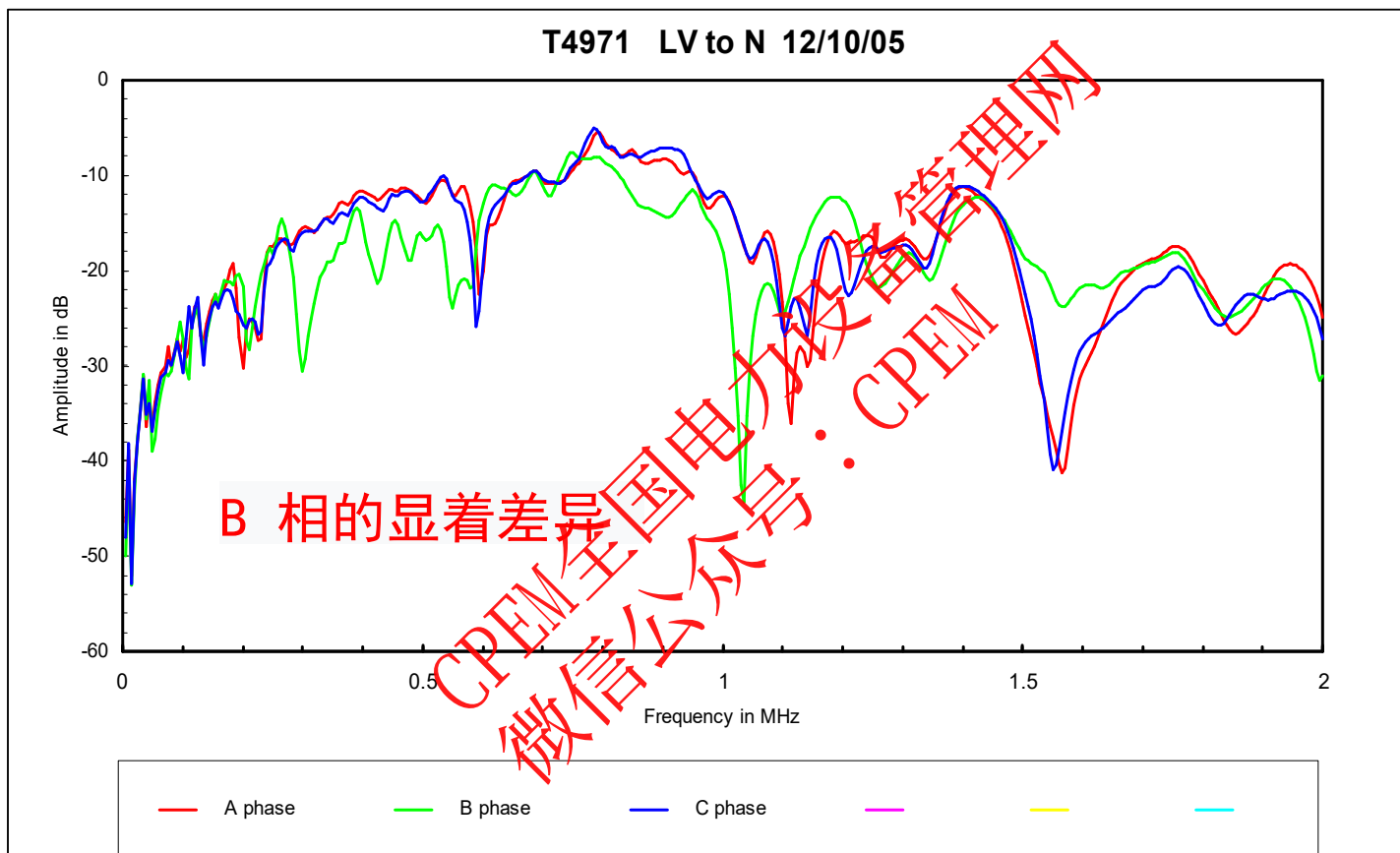
T4971			
	A phase	B phase	C phase
Main windings to earth, CH	4,246 pF 0.75 %	3,368 pF 0.51 %	4,273 pF 0.62 %
Main windings to tertiary, CHT	8,277 pF 0.42 %	5,775 pF 1.91 %	9,030 pF 0.54 %
Tertiary winding to earth, CT	20,668 pF 0.46 %		

案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器



SFRA测试

案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器



案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器



B相内部检查

案例1-通过有效的诊断发现损坏的变压器



B相绕组损坏

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器

Voltage	400/132 kV
Rating	240 MVA
Victor Symbols	YN, aO
Impedance	HV/LV 19.1% Impedance volts on position 11 at 75°C
Phases	3
Frequency	50 Hz
Type of Cooling	ONAN/OFAP (ONAN rating at 120 MVA)
Insulation Level	1425 (HV)/550 (LV)
Year of Manufacture	1996
Maker's Serial No.	961061
Manufacturer	XXX Power Transformers Limited

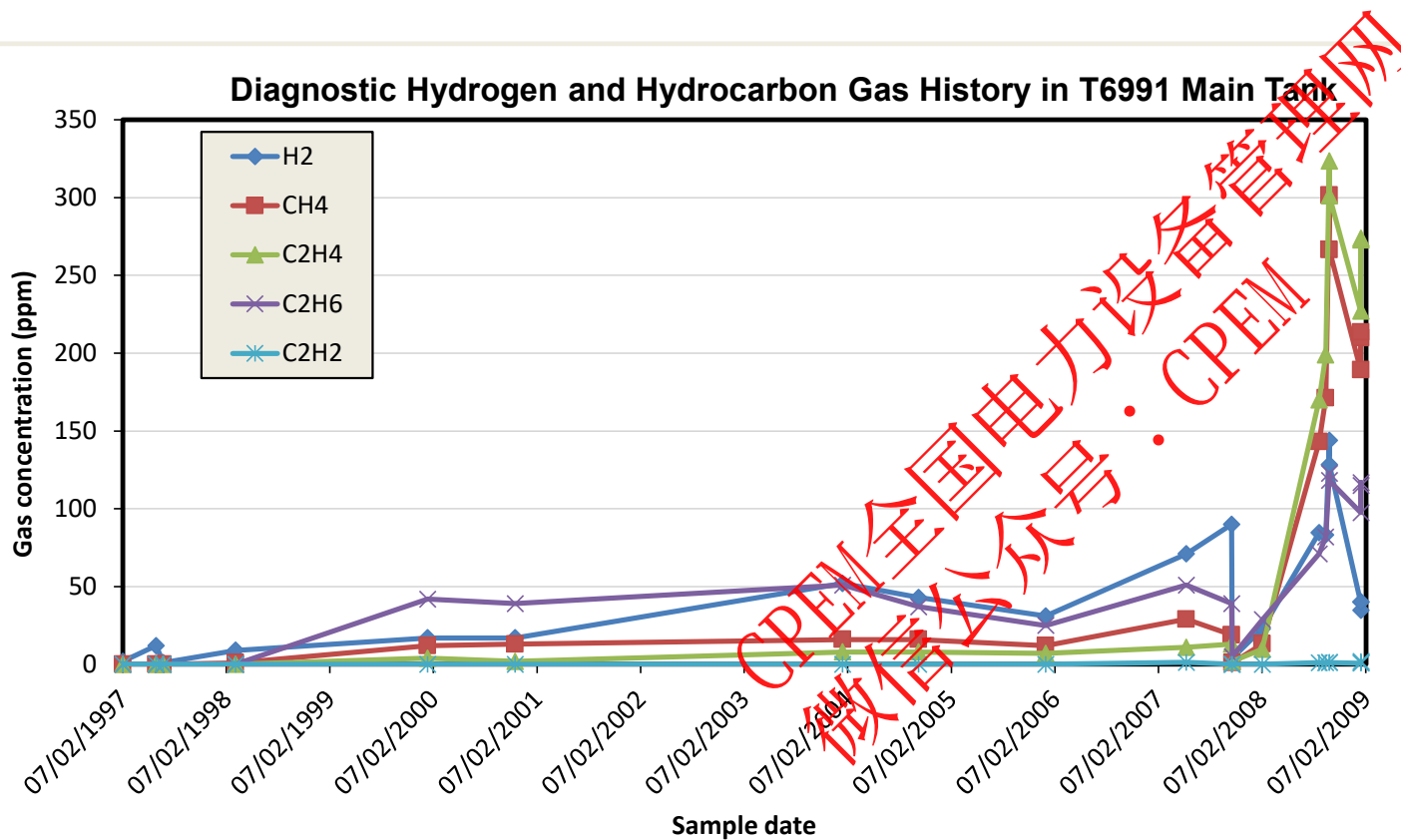
案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



故障发生前

- 主变压器正常运行方式为1、2号主变压器并列运行。
- 2号主变压器1996年出厂及交接试验数据均无异常。
- 2号主变压器安装投运后12年各项监督试验结果均无异常。

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



- 2008 年使用 12 年后开始放气。
- 7 月份产气率迅速增加，
- 乙烯从 10 ppm（2 月）增加到 96 ppm（7 月 16 日）； 182ppm（7 月 25 日）和 228ppm（7 月 31 日）。
- DGA 表明正在发生高温热故障。
- 决定进行电气测试以进行故障调查。

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器

由于 GIS 连接，有限的电气测试：

- 绕组电阻，用于检查电气连续性；
- 铁芯和框架绝缘电阻，用于检查铁芯、框架和油箱中的循环电流。

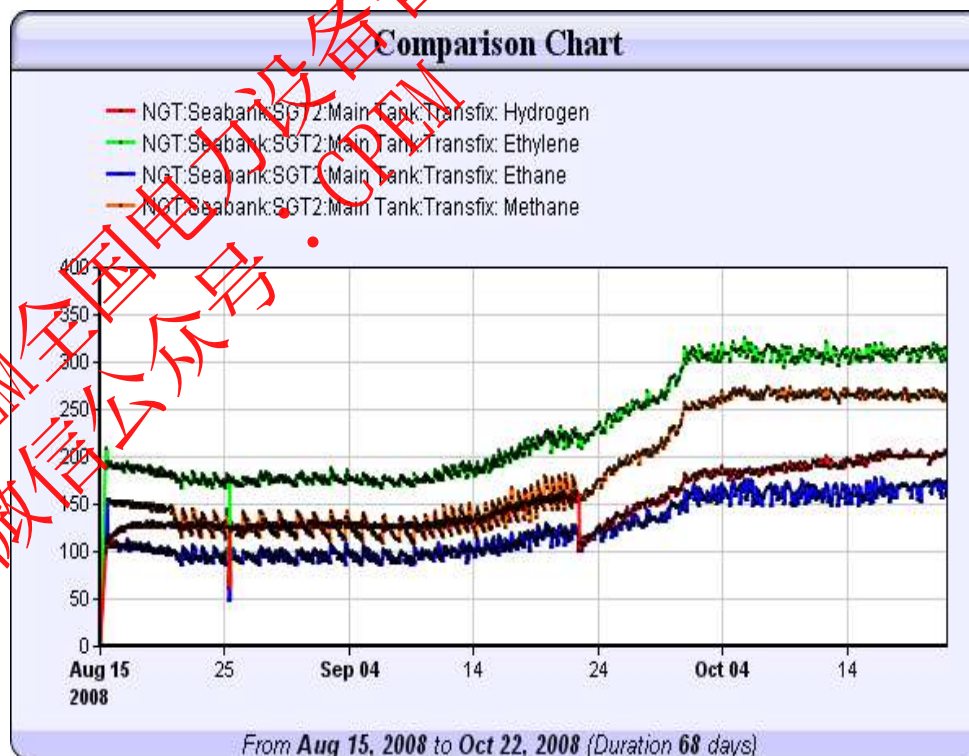
结果表明：

- 绕组电阻测量没有给出任何问题的明确指示。
- 铁芯和框架绝缘检查提出铁芯螺栓出现问题的可能性。这是该制造商的一个已知问题。在某些情况下，这已通过将电阻器连接到框架接地电路中来“修复”，这将任何循环电流的值限制为不会造成损坏的值。

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器

决定安装：

- 框架接地电路中的电阻器，以期“修复”故障。
- 远程访问的在线 DGA 监控, 用于监控基于电阻器的“修复”是否成。



案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器

- 主油箱继续放气 - 安装的框架接地电阻器没有停止放气。
- 检查表明电阻值正确且连接正确。
- 得出的结论是，可疑的热故障不是由铁芯/框架/主油箱中的循环电流引起的。
- 决定：断开 GIS 并重复进行电气测试以进行故障调查。

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器

重复电气测试

- 磁化电流，以检查短路匝数和严重铁芯损坏。
- 绕组电容和功率因数，检查绝缘状况。
- 套管电容和功率因数，检查套管绝缘。
- 绕组频率响应，检查机械状况。
- 绕组电阻，用于检查电气连续性。
- 绕组绝缘电阻，检查绝缘状况。
- 铁芯和框架绝缘电阻，以检查可能的循环电流路径。
- 框架接地电阻检查。

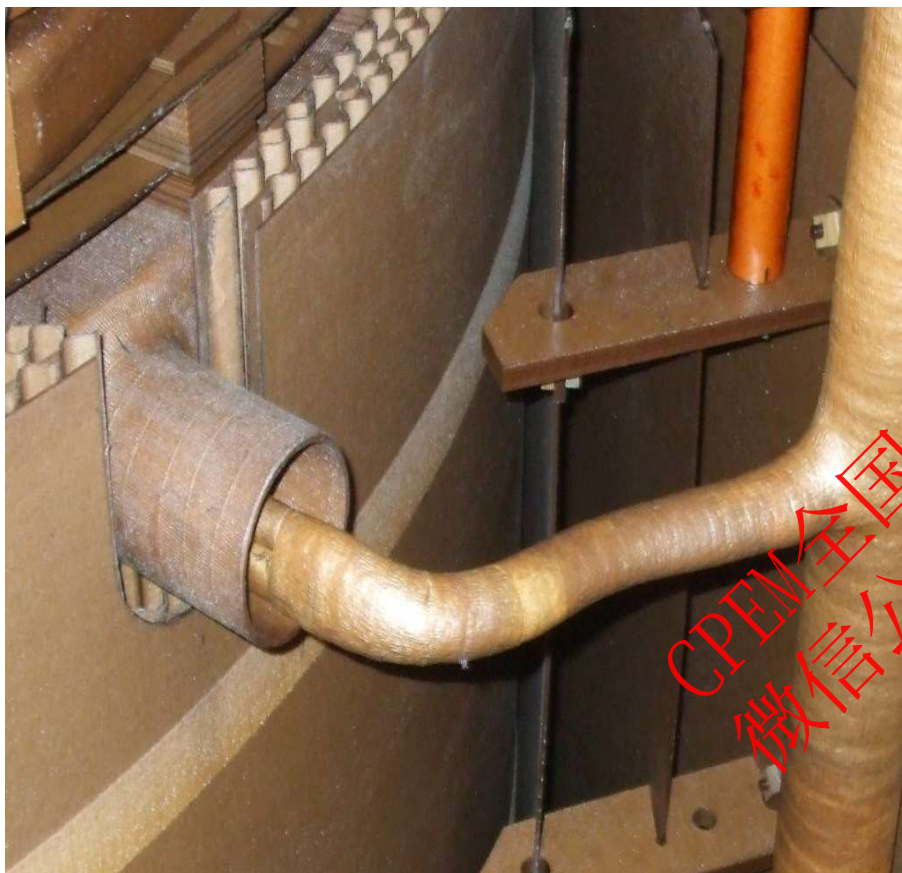
案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



- 重复的电气测试证实，有问题的变压器在主油箱中存在热故障。
- 重复绕组电阻测量确认存在连续性问题，并且连续性问题确实在 C 相公共绕组或相关引线中。
- 决定排油进行内部检查。

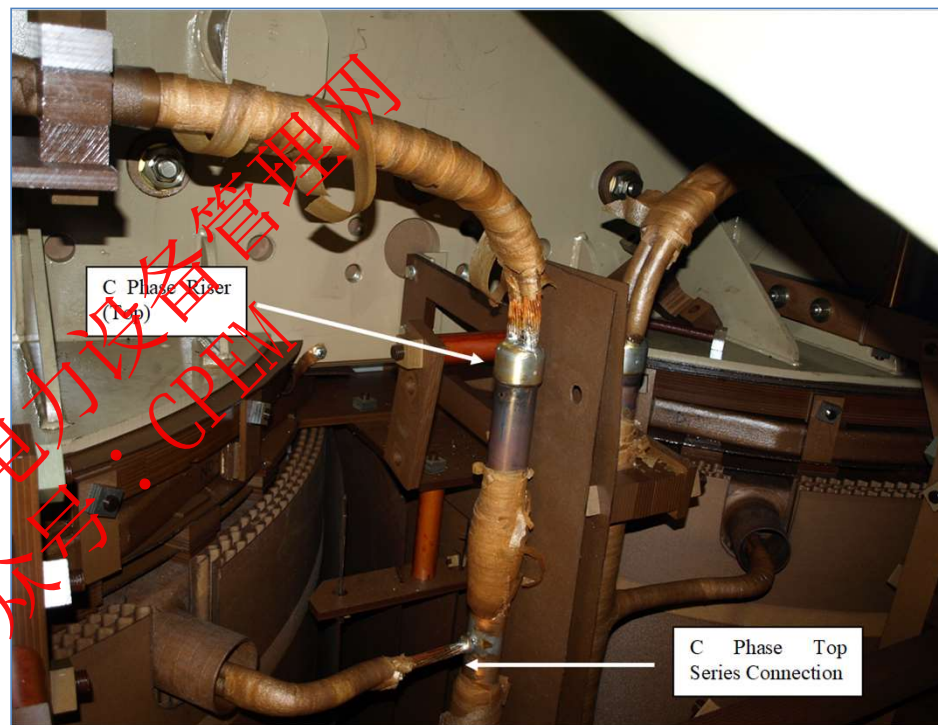
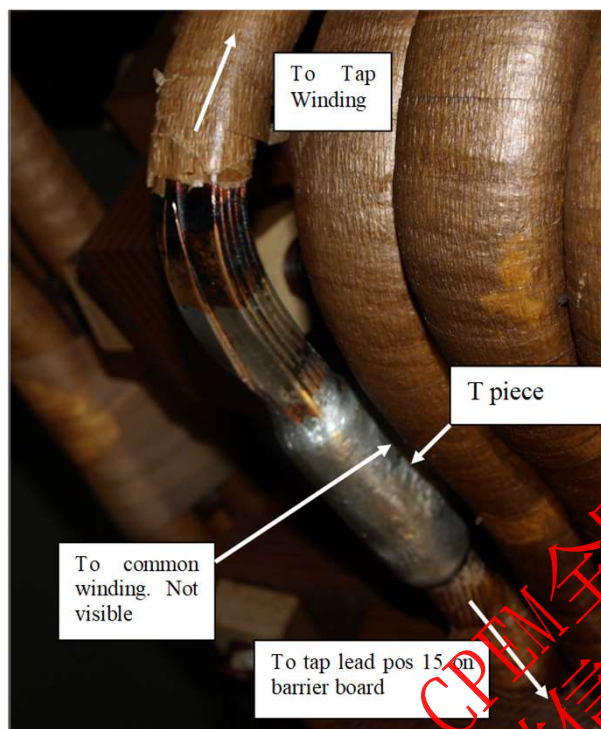
CPEN全国电力设备管理网
微信公众号：CPEN

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



- 内部检查未能找到 C 相公共绕组引线中的任何不良接头。
- 似乎任何不良接头都在绕组组件本身中。
- 绕组组件中的任何不良接头都无法在现场修复，只能在制造商的工厂进行修复。
- 决定进行内部取证检查。

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



- 检查了绕组组件外部的 LV 端子和抽头绕组顶部之间的所有接头是健康的。
- 热故障必须在绕组组件内，因此如果不拆卸绕组就无法接近。

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



最终决定

- 该变压器无法在现场维修。
- 考虑到该公司还有 26 台采用这种设计的变压器在使用中，存在未知的潜在风险。最终决定是报废变压器并进行彻底的拆解调查，以确定产生气体的根本原因。这些知识可用于规划剩余 26 台在役变压器的管理。

CPEN 全国电力设备管理网
微信公众账号: CPEN

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器

解体检查 - 套管



干式GIS套管

案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器

解体检查 - 低压 (LV) 侧概览



案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器

解体检查 - 有载分接开关



- 分接开关状况良好，没有已知问题。
- 回收的分接开关作为国家备件 (National Spare) 保存。

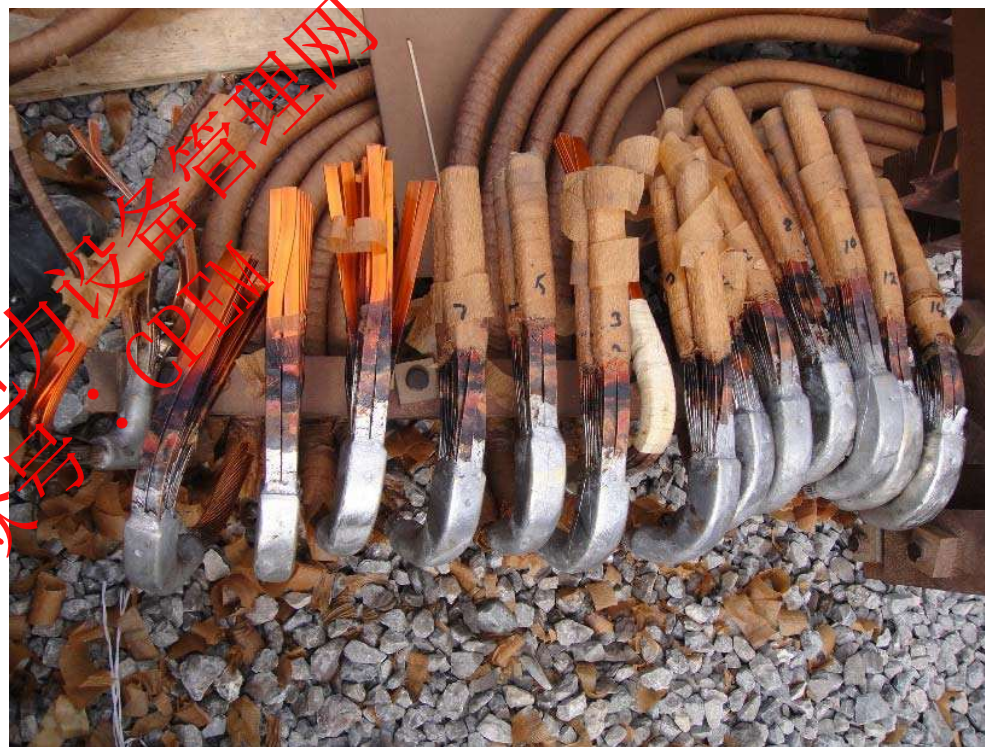
案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



案例 2-通过有效的诊断发现损坏的变压器



发现产气的根本原因是从 C 相公共绕组顶部开始的第 73 个圆盘中的导体被腐蚀。
这还没有发展成匝间短路。

结论

可以进行有效的电力变压器故障诊断和健康审查管理, 但需要对故障诊断和状态评估能力进行投资:

- ❖ 有效的诊断技术
- ❖ 复杂的解释方案
- ❖ 故障前状态评估测试
- ❖ 报废变压器的法医检查
- ❖ 经验丰富的人员