

QIXIANG SEPU FENXI YU  
BIANYAQI GUZHANG  
ZHENDUAN

■ 刘新良<sup>®</sup> 著

气相色谱分析与  
变压器故障诊断

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

# 气相色谱分析与变压器 故障诊断

刘新良 著

中国铁道出版社

2012年·北京

8828288

## 内 容 简 介

本书以经典的气相色谱分析理论和作者多年来的现场实际经验为基础,依次介绍了开展气相色谱分析的意义;牵引变压器的结构特点及其与故障诊断有关的部件;利用油中溶解气体含量诊断充油电气设备故障的基本原理;气相色谱分析操作中的关键技术要领;常用的故障诊断方法;几种常见设备发生故障时的典型特点;故障预报及故障处理流程等方面内容。

本书适合中、高级色谱分析人员借鉴使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

气相色谱分析与变压器故障诊断/刘新良著. —北京:中国铁道出版社, 2012. 11  
ISBN 978-7-113-15468-4

I. ①气… II. ①刘… III. ①气相色谱—化学分析—应用—电力机车—牵引变压器—故障诊断 IV. ①U264.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 234767 号

书 名: 气相色谱分析与变压器故障诊断  
作 者: 刘新良 著

责任编辑: 孙 楠 编辑部电话: (010)51873421 电子信箱: tdpres@126.com  
编辑助理: 侯跃文  
封面设计: 崔 欣  
责任校对: 胡明锋  
责任印制: 陆 宁

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)  
网 址: <http://www.tdpres.com>  
印 刷: 北京市昌平开拓印刷厂  
版 次: 2012年11月第1版 2012年11月第1次印刷  
开 本: 787mm×1092mm 1/32 印张: 5 字数: 112千  
印 数: 1~2000册  
书 号: ISBN 978-7-113-15468-4  
定 价: 20.00元

### 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。

电话: 市电(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010)63549504, 路电(021)73187

## 笔者的话

运行中变压器油的气相色谱分析，是用来发现和判断变压器等充油电气设备内部有无潜伏性故障的一种检测技术，这几乎是尽早发现变压器等设备内部潜伏性故障唯一有效的手段。目前，大型电力变压器故障诊断方面的书籍较多，但关于电力机车牵引变压器故障诊断方面的书籍市面上还没有，故急需系统介绍电力机车牵引变压器故障诊断特殊性的相关书籍，笔者应广州铁路（集团）公司机务处领导之邀，特撰写本书。

本书以经典的色谱分析理论和笔者多年来的现场实际经验为基础，引用笔者多年来现场工作所获得的完全真实的数据，力求用浅显、易懂、易记的图片和语言，详细地讲解气相色谱分离技术、色谱分析操作要领、色谱分析结果与设备故障之间的关系、故障诊断流程和方法以及故障处理基本过程等。本书重点是变压器油色谱分析操作过程及相关技术要领的经验总结，故障诊断的思路、流程和方法，变压器、潜油泵、线圈引出线、出线装置故障和变压器受潮时在色谱分析数据方面的典型特点。同时，本书也介绍了故障预报的写作特点和要求。希望对从事气相色谱分析和变压器故障诊断的有关人员有所帮助。

本书共分为六章，依次介绍了铁路有关站段开展气相色谱分析的意义；牵引变压器的结构特点及其与故障诊断有关的部件；利用油中溶解气体含量判断充油电气设备故障的基本原理；利用色谱仪分析油中特征气体含量；变压器内部潜

伏性故障诊断方法；几种常见设备发生故障时的典型实例以及故障预报报告的写作特点。本书以真实的实例讲解故障诊断的步骤、流程和方法，希望在增强色谱分析结果一致性，提高故障诊断成功率和故障处理效率等方面，对相关人员进行借鉴和帮助。

本书适合中、高级色谱分析人员借鉴使用。初学者阅读本书时遇到的关于基础知识的困难和问题，可参阅笔者于2000年编写的《铁路机务化验知识汇编》或参阅于2008年编写的《化验分析工培训教材》。

本书关于故障判定“条件论”，故障色谱分析“特点论”以及固体绝缘热分解判别等新观点或方法，是笔者在有限时间、有限范围、有限样本的条件下的归纳和总结，是否恰当、是否具有永久的可重复的科学性，有待时间、空间和广度的进一步验证，希望能与有兴趣的读者朋友共同研究和探讨。

由于时间仓促，再加上自身工作范围和工作经验的局限性，文中定有许多不妥、不当，甚至错误之处，敬请各位读者批评指正。

刘新良

2012年6月于怀化

# 目 录

第一章 铁路开展色谱分析的目的和意义	1
一、电力机务段、供电段开展气相色谱分析的意义	1
二、机务段技术部门加入故障诊断的特殊意义	3
三、非电量诊断法发现和诊断故障的基本过程	4
第二章 牵引变压器概述	11
一、牵引变压器的基本结构	11
二、几种常见机车牵引变压器的油流路径	14
三、变压器内部绝缘及其分解产气的特点	18
四、潜油泵出现故障时的显著特点	22
五、吸湿器及其出现问题时的显著特点	23
六、出线装置构造特点及其故障的色谱分析特征	25
七、诊断机车牵引变压器故障时应考虑的几个重要因素	27
八、处理机车牵引变压器故障时应把握的几个观点	29
第三章 利用油中溶解气体含量判断故障的基本原理	32
一、变压器绝缘材料的化学组成	32
二、绝缘材料分解产气的一般经验	32
三、气体在油中的溶解与奥斯特瓦尔德系数	34
四、气体的扩散、吸附与脱气后取样时机的把握	35

五、油中溶解气体含量的注意值及其使用时的 注意事项 .....	37
六、产气速率的注意值及其使用 .....	38
七、碳的氧化物含量注意值及其使用 .....	39
八、变压器内部故障类型与油中气体含量的关系 .....	40
九、气体继电器上游离气体的应用 .....	42
<b>第四章 利用色谱仪分析油中特征气体含量 .....</b>	<b>45</b>
一、分析对象及其选择 .....	45
二、取样分析时机及分析方法概要 .....	45
三、气相色谱分析原理简介 .....	47
四、适合变压器油分析的气相色谱仪的特点及 调试要点 .....	67
五、色谱分析中的操作要领 .....	71
六、色谱分析系统常见问题及处理措施 .....	80
七、填充柱的自行装配技术 .....	85
<b>第五章 变压器内部潜伏性故障诊断方法 .....</b>	<b>89</b>
一、故障诊断时用到的数据和公式 .....	89
二、故障诊断的基本步骤 .....	92
三、判定设备可能存在故障的基本条件 .....	93
四、三比值法诊断设备故障简介 .....	95
五、改良三比值法诊断设备故障简介 .....	98
六、立体图示法诊断设备故障简介 .....	99
七、大卫三角形法诊断设备故障简介 .....	99
八、固体绝缘热分解的判定与判别 .....	101
九、故障预报及其注意事项 .....	104

十、设备故障的检查方法简介·····	106
<b>第六章 变压器内部潜伏性故障诊断实例·····</b>	<b>109</b>
一、潜油泵故障诊断与处理实例·····	109
二、线圈引出线软扁线烧损故障诊断与处理实例·····	112
三、变压器受潮引起 H <sub>2</sub> 异常增加的故障实例·····	115
四、因变压器安装原因引起特征气体含量异常增加 的实例·····	120
五、出线装置接触不良或烧损故障诊断与处理实例 ·····	123
六、故障处理后的后续跟踪监控措施·····	133
<b>附录一：电力机车色谱（微水）分析油样取样方法·····</b>	<b>135</b>
<b>附录二：SS<sub>3</sub> 型 5105 号机车主变内部存在故障的预报         ·····</b>	<b>138</b>
<b>附录三：SS<sub>3B</sub> 型 5080 号机车 A 节主变压器存在引出         线松动故障的详细报告·····</b>	<b>141</b>
<b>附录四：SS<sub>3B</sub> 型 0089 号机车 B 节机车主变压器内部         可能存在较严重故障的故障预报·····</b>	<b>145</b>
<b>附录五：SS<sub>3</sub> 型 0049 号机车主变压器存在引出线松动         （或松动后小面积烧结）故障的详细报告·····</b>	<b>148</b>
<b>参考文献·····</b>	<b>151</b>



# 第一章 铁路开展色谱分析的目的和意义

## 一、电力机务段、供电段开展气相色谱分析的意义

2009年7月26日上午8时15分,兰州铁路局兰州西机务段的SS<sub>7C</sub>型0126号机车,牵引由西安开往乌鲁木齐的1043次旅客列车经由兰新铁路运行。当列车运行至打柴沟和龙沟之间乌鞘岭特长隧道内,机车主变压器突然起火,经铁路、消防等部门紧急处置,1700余名旅客徒步离开隧道,机车大火被扑灭,未造成人员伤亡,铁路行车一度中断。如图1-1所示。经调查认定,火灾系由主变压器油箱泄漏引起。

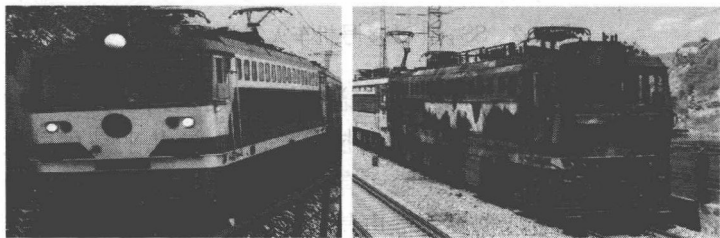


图 1-1 SS<sub>7C</sub>型 0126 号机车烧毁前后对比

2010年6月30日,一度被火车迷们戏称为“美女”的SS<sub>7E</sub>型0128号电力机车牵引T162次旅客列车,在胶济铁路济南章丘段起火,造成胶济客运专线中断行车5小时,构成行车大事故。外观设计很漂亮的“美女”立即变成了满脸疤痕的“黑妹”,该机车在事故中报废。如图1-2所示。这又是一次深刻的教训!这一次发生机车火灾大事故后,立即引起了路

内机车检修和变压器运行维护人员的高度重视,为认真吸取济教训,杜绝此类事故再次发生,铁道部运输局立即下发了《关于确保电力机车变压器可靠运用有关要求的通知》(运装机检电〔2010〕2124号)、《关于进一步开展机车专项整治工作的通知》(运装机检电〔2010〕2323号)两个电报。迅速在全路开展了规模空前的防火大检查和以电力机车主变压器、高压互感器、电线路等的质量和运行技术参数为主要内容的专项整治,至今大家仍然记忆犹新。

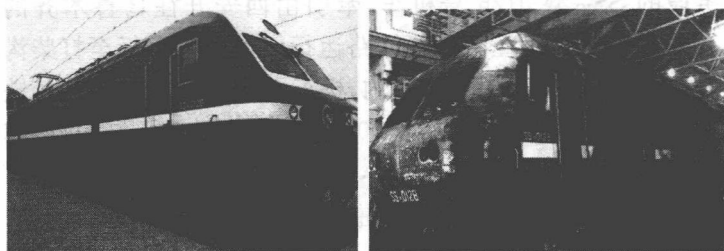


图 1-2 SS<sub>7E</sub>型 0128 号机车火灾前后对比

运行中变压器油的气相色谱分析,是用来判断变压器内部有无潜伏性故障的一种检测技术。目前,这几乎是尽早发现变压器内部潜伏性故障唯一有效的手段。

早期预测变压器等充油电气设备内部故障,是极为重要的。作为绝缘监测的手段,以前曾采用直流电阻、绝缘电阻、介损测量、交流耐压和局部放电测量等电气绝缘特性试验。但是这些试验的共同缺点是要求被试设备停运,而且只有当故障发展到一定程度才能检测诊断出来,很难检测出事故发生前的极小内部故障(潜伏性故障或“慢性病”)。后来人们在生产实践中逐步了解到,充油电气设备内部绝缘油、绝缘纸、绝缘漆等材料,在热和电的作用下,会逐渐老化或分解,同时

产生少量的各种低分子的烃类及 CO 和 CO<sub>2</sub>。若存在潜伏性过热或放电等故障时,会加快这些气体(统称故障气体或特征气体)的产生速度。进一步的研究表明,故障气体的组成及含量与故障的类型、故障的状况及故障的严重程度等有着密切的联系。因此分析变压器油中故障气体的组成及含量,就可早期掌握并及时预报变压器内部的潜伏性故障,从而防止事故于未然,保证铁路运输生产安全。单纯依靠气相色谱分析结果,并参考油品质量化验结果对变压器进行故障诊断的方法,就是变压器的非电量诊断法。

电力机务段、供电段除进行日常的变压器油理化检验外,还应开展气相色谱分析工作。对于供电段的固定式变压器可参照电力部门的经验进行管理,但对于电力机车主变压器(以后简称机车主变或主变)的气相色谱分析检测,因运行工况有很大的不同,在诊断结果的准确性上也有较大的区别。目前尚无可靠的经验,还在不断摸索之中。

气相色谱分析和故障诊断就是专门用来发现变压器内部及相关设备的“慢性病”的。目前,几乎只有这条途径是唯一有效的。对于突发性故障,本方法往往因检测周期长,难以恰好遇到故障刚刚发生就取样分析的情况,因此对于突发性严重故障,本方法就会显得力不从心。

## 二、机务段技术部门加入故障诊断的特殊意义

非电量诊断法是变压器故障诊断的“初级阶段”,其诊断的准确性具有一定的局限性,特别是在故障定位方面,即使经验丰富的专家,也还只能给出大致的范围。例如,只能给出绕组、出线装置等大致范围,还不能具体到哪个绕组、哪个接线柱等。正如一名经验丰富的外科医生,仅凭血液化验结果很难确诊病人的慢性疾病到底发生在哪个器官的哪个具体部位

一样。目前,化验室担负着机车牵引变压器状态监控的重大责任,但因历史或因色谱分析和故障诊断工作暂时还不为众人所熟知等原因,色谱分析工作一直还不太被重视,化验室开展故障诊断工作往往都是在单打独斗,即使发现了问题,进行了很周密的跟踪分析,但最终因方法的局限性,致使诊断结果的准确性受到限制,验证诊断结果和缩小定位范围的工作比较困难。甚至,因技术部门的不了解,准确的诊断结果也很难得到技术部门的信任和重视。这是目前机务段牵引变压器故障诊断与处理的现状。

变压器故障诊断的高级阶段是“综合诊断”。即综合色谱分析、变压器油常规分析、绝缘电阻测量、直流电阻测量、耐压水平测量、糠醛分析、聚合度分析、微波定位、超声波定位、变压器油温监测、外观检查、吊芯检查等,或经典、或先进的方法和技术,对变压器进行全方位检测和分析,进而准确诊断故障性质、故障部位、故障严重程度。当然,现在机务段技术部门自身并不具备这样的分析、检测和处理能力。但技术部门可以其对外的权威性,做到“借人之长、补己之短”,充分借用变压器生产厂家专业的检测技术和检修能力,实现变压器故障的综合诊断,大大提高故障诊断的准确性。技术部门同志的加入,为实现综合诊断提供了可能,将使变压器故障诊断进入一个崭新的时代,将使变压器故障诊断更为准确和有效,定位更为准确。

### 三、非电量诊断法发现和诊断故障的基本过程

#### 1. 例行气相色谱分析

铁道部 1300 号部令规定“运行机车绝缘油的气相色谱分析,每年应定期检验一次”。2009 年兰州局 SS<sub>7C</sub> 型机车主变压器火灾大事故后,铁道部运装机检电〔2010〕2124、2323 号

电报以及运装机运电〔2010〕2383号文电要求气相色谱分析每年应定期检验二次。同时对车顶高压电流互感器也做出了应进行色谱分析的要求。但因化验室人员配备不够、车顶取样作业难度较大等因素,目前,坚持对高压互感器进行色谱例行跟踪的单位并不多。

保质保量的对机车主变压器(以下简称主变)例行色谱分析,是发现可疑主变和重点跟踪机车的前提。怀化机务段自1994年正式开展色谱分析工作以来,坚持按要求,每年对所有机车变压器都进行了至少一次色谱分析,对于存在问题的机车,建立重点跟踪机车动态库,并立即加密跟踪,有的一年内甚至加密跟踪十余次。由于长期的坚持,已经形成了比较全面的原始数据库。机车主变内部气体的变化状况基本上都在色谱分析人员的掌握之中。因此,虽然对变压器内部的故障判断比较难,但我们的预报基本上是准确的。我们不仅能诊断故障的性质,还能较准确地预测到故障的部位(范围)。这得益于我们将近20年的坚持和巨量原始数据的积累。

由于色谱全密封取样作业的标准高、要求严,取样的准确性直接关系到色谱分析结果的准确性,关系到是否能及时发现和准确诊断故障。因此,在例行分析工作中,化验室色谱分析岗位上的同志要敢于挑起重担,亲自上车取样,以确保分析结果的准确性。同时,要对数据进行经常性地分析和对比,才能及时发现问题。

## 2. 加密重点跟踪分析

在例行分析的基础上,要注意对存在问题的机车,建立重点跟踪机车动态库,制定合理的加密跟踪计划,并实施加密跟踪,以确认故障的发展趋势。对于故障发展速度较快的机车,有时甚至十天半月就需要连续加密跟踪。这就要求从事色谱分析工作的人员要有吃苦耐劳、甘于寂寞、善于思考的素质和

精神。由于取样作业要求高，色谱取样人员每天蹲在机车下部(或内部)极为狭小的取样空间内，一动不能动，几台机车取样结束，往往腿都要发抖，痛上好几十分钟；辛苦跟踪一、两年的数据一般都很难发现变压器内部细小却缓慢发展的潜伏性故障，难以在短时间内出成绩，得到单位领导的重视；有时，分析数据明明显示有故障，却无法用《变压器油中溶解气体分析和判断导则》(以下简称《导则》)推荐的方法做出正确判断等，但越是这样，越要耐得住寂寞，越要严格执行好加密跟踪计划，这样才能实时掌握故障的发展趋势。

加密跟踪有时需要技术科配合或帮助，主要是在库内适时找到机车取样的问题。长时间不能履行加密跟踪计划时，化验室应该向技术科说明，技术科可以用技改、扣修等理由将机车扣在库内方便取样分析。

特别提示化验室的同仁们，要强化责任心，我们要通过各种途径，大力宣传色谱分析工作在保证机车质量，保证运输安全方面的特殊作用，并通过扎实细致、科学严谨的工作，努力为段安全生产作出贡献。

### 3. 故障诊断与故障预报

故障诊断与故障预报是一项科学、细致、严谨的工作，不仅需要大量的跟踪分析数据支持，而且对诊断人员的业务技术水平和故障诊断经验也提出了较高的要求。因此，故障诊断人员不仅要善于思考、善于学习、善于借鉴和总结，而且要胆大心细，敢于设想故障的可能情况，然后再用分析数据加以验证。实在不能下结论时，也要敢于在故障发展到一定程度时将问题及时暴露出来，以求集思广益。

技术部门对化验室出具的故障预报应有正确地认识。现在，机车变压器的潜伏性故障情况，几乎掌握在人数极少的色谱分析人员手中，从事色谱分析的技术人员担负着防止机车

牵引变压器火灾、爆炸等大事故的重大责任。因此,不要老抱着化验员只会摇瓶子,只能化验油水质量的老观念,以为仅凭在车外取点油样化验化验,不可能真正发现变压器内部的问题。或者自高自大,认为化验室只需要出数据,故障判断、查找和处理都是技术科的事,实际上对色谱技术是干什么的都不知道。这些观念理应彻底改变,因为色谱分析人员经过长期辛苦工作,最终出示的故障预报,应该得到技术部门的尊重和重视。

#### 4. 故障的查找与处理

通过周密的色谱跟踪分析,准确诊断故障,这只是解决变压器潜伏性故障的一个阶段,最终还是要通过技术措施彻底消除故障。因此化验室和技术部门要密切配合,才能最终消除故障,并不断提高故障诊断水平。

(1)化验室:化验室通过色谱分析能够发现问题。特别提示色谱分析人员在认真分析,取得大量原始数据,并科学认真地进行故障诊断后,不要怕诊断不准丢面子,对于一个复杂问题的认识都有逐渐提高的过程。要敢于暴露问题,并善于汇报问题,以求尽快得到领导和技术部门同志的重视和支持。怀化机务段化验室 2012 年 5 月集中预报 3 台机车故障后,先后在修程会、段交班会做了通报,并提出了初步检查和运行监控的重点。现在回想起来,当时在会上提出的检查和监控重点并不完全正确,也不全面,但“变压器有问题,必须尽快处理”的问题暴露了,段领导们重视了,技术部门迅速行动起来了,解决问题也就顺畅多了。

(2)技术部门:

①技术部门收到故障预报后,立即予以重视并迅速响应,指派专人负责全过程处理,并做相应的、自己能做的检查。

②以段技术部门的权威性,向变压器生产厂方提出故障

报告和派技术人员到现场检查的明确要求。如需回送,也需有明确的方案。

③厂方技术人员到现场后,检修技术员注意通知故障诊断人员,与厂方技术员协同检查,并记录检查过程的各个详细细节。

④初步检查之后,最好有段领导出面或主持,召开至少有技术科科长、检修技术员、化验室故障诊断人员以及厂方技术人员参加会诊的故障诊断分析处置会,进一步诊断故障,确定下一步处理方案。这其实就是一个“综合诊断”的过程。

⑤每一次现场检查和处理,都注意通知故障诊断人员到现场,让他们在故障处理过程中验证诊断结果,学习现场处理的方法,积累经验,提高故障诊断水平。回送厂方处理时,也尽量安排故障诊断人员出差学习和验证。

⑥技术部门应该尽快建立故障诊断预报处置程序这一基本制度。

#### 5. 故障处理后的后续跟踪监控措施

故障处理完毕,首先要做好跟踪确认工作,以判断故障是否彻底处理完毕。确认问题彻底解决了,才可转入例行分析。

##### (1) 故障处理后的其他措施

应对变压器油进行彻底的脱气处理,必要时应进行滤油或再生处理,确保变压器油达到规定的技术要求。

对已经存在或处理过程中可能产生的变压器外电路问题进行彻底处理。

##### (2) 跟踪监控途径

目前没有其他可靠途径,主要还是要依靠气相色谱跟踪分析结果进行判定。色谱分析人员应切实履行好自己的职责。

##### (3) 跟踪监控时间



一般至少需要 3 个月。因为变压器油进行脱气等措施处理后,油中的气体被脱除了,但吸附在器芯上的气体还有很多,它们会逐渐释放到油中。如果短时间内连续取样跟踪,不仅浪费人力物力,还会产生变压器内继续产气的假象。因此,脱气处理后,只要变压器油的质量达到要求,外电路也没有问题了,就可以允许先上线运行。气体释放一般 1~2 个星期达到稳定状态,这时候开始第一次取样才能较准确地反映油中气体含量的初始值,作为以后跟踪监控的依据。

3 个月内加密取样不少于 3 次,根据加密取样分析结果判定变压器故障是否彻底消除。

监控运行结束后,最好以书面报告向技术科和段领导汇报监控运行结果。

#### (4) 跟踪监控时需要其他部门配合的内容

① 加密跟踪运行中的机车,首先要在库内找到该机车。但因机车使用频率高,色谱分析人员很难在上班时间内找到。这时就需要技术科、运用科等部门及时将车扣在库内。

② 建议各段信息科将库内机车查询系统安装到化验室已经联网的计算机上,以便化验室色谱分析人员能随时查询被监控机车是否入库和在库内的位置,方便取样。

③ 化验室色谱分析人员应具备高度的责任心和耐力,预设监控取样时间快到时,一定要用心查找该监控机车是否在库内,一旦发现,立即取样。实在无法及时取样时,应及时提出,请技术部门帮助。

### 讨 论 题

1. 电力机务段、供电段为什么要大力开展气相色谱分析工作?