

检漏技术 及其在电力系统中的应用

曹辉玲 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

检漏技术 及其在电力系统中的应用

曹辉玲 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书由作者根据多年积累的资料和实践经验，结合国内外资料编写而成，是一本氦质谱检漏技术应用于电力系统的专著。

本书详细介绍了检漏技术的理论基础、工程检漏的实践经验、国内外检漏技术的最新发展、新仪器改制以及作者近期在大型油浸变压器的检漏工作。全书共分六章，分别为检漏技术基础，电力系统常用的检漏方法，电力系统常用的检漏仪，火力发电厂的检漏技术，核电站的检漏技术以及常见电气设备的检漏。

本书可供电力系统中从事检漏工作的工程技术人员和大专院校、科研院所从事真空检漏研究的师生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

检漏技术及其在电力系统中的应用/曹辉玲编著. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8541-9

I. 检… II. 曹… III. 质谱仪检漏器-应用-电力系统 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 027481 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 5 月第一版 2009 年 5 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 6.5 印张 157 千字

印数 0001—3000 册 定价 24.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

当人类社会跨入 21 世纪的时候，我国正进入全面建设小康社会和快速推进社会主义现代化的新发展阶段。随着科学技术的发展，产品的可靠性与自动化程度的提高，氦质谱检漏仪在商业、工业以及科学研究中的使用正在不断扩大。如在电力系统中，凝汽器真空系统、凝汽器冷却管、发电机氢冷系统、核电站反应堆一回路、核燃料元件、热交换器、蒸汽发生器、燃料杆、大容器油封变压器、真空断路器等都采用检漏技术。

汽轮机凝汽器真空差一直是发电过程中未能很好解决的问题，是火力发电机组实际供电煤耗远远高于设计值的重要因素之一，机组供电煤耗不合理升高，同时也对分析设计中凝汽器冷却面积及冷却塔面积的合理选择造成困难。因此，解决真空严密性问题，对降低火力机组供电煤耗和优化冷却系统参数都有重要的现实意义。

火电厂、核电站凝汽器真空度是发电厂运行的重要指标，提高凝汽器真空度是发电厂节能增效的主要途径之一。由于设计、安装、运行等方面原因，凝汽器真空严密性往往达不到相关标准，而且真空系统的复杂性以及检漏技术落后，使得凝汽器真空系统的查漏变得困难。而真空度低是 100、200、300、600MW 以及 1000MW 机组普遍存在的问题，必须加以解决。

提高真空严密性，火电厂将取得不可估量的经济效益。如 600MW 机组，真空度每提高 1%，汽轮机蒸汽将少损失 1%~2%，煤耗下降约 2g/kWh，增加出力约 0.8%~0.9%，即增加 5.0MW，每年至少多发电 4380 万 kWh，全年可增收约 1533 万

元。检漏方法十分重要，如 600MW 机组，如果采取传统的停机检漏，最短需要 72h，按平均负荷 480MW 计算，火电厂要损失 3456 万 kWh，即损失近 1209.6 万元；如果采用创新技术——负压采样法在线检漏，不仅可以省掉停机检漏时间和损失，而且可检测气缸结合面、轴封、安全门、防爆门等。根据以上两项估算检漏一次，火电厂最少获得效益 2742.6 万元。

油浸式电力变压器、电抗器、互感器渗漏油是变电行业长期存在的质量问题。它轻则影响设备外观，重则浪费大量能源，造成被迫停电。作者通过多年摸索、实践，从渗漏油量的概念出发，评述现行工艺从量变到质变，并解决探索气体渗透和扩散等问题，提出变电行业的检漏技术方案——氦质谱检漏技术。通过实践证明，它是行之有效的办法，是值得推广的技术。

负压采样法可以在一定程度上解决实用检漏技术的疑难问题，提高生产率、提高产品的可靠性、降低造价。它不受被检容器大小、真空度高低和工作环境、温度的影响。该法已用于火力发电厂凝汽器不停机检漏系统，并已成为必不可少的工艺手段，为国家节约几十亿元的资金。

本书可以帮助读者系统了解检漏技术在国内外电力系统的应用和范例，并重点介绍了氦质谱检漏技术在电力系统的应用，其中也包括 SF₆ 断路器、中小型全密封变压器及高压避雷器、真空灭弧室。读者可用比照观点来改善国内目前落后的常规检漏方法，所介绍的各种型号、国内外氦质谱检漏仪性能与指标可供读者选择仪器时参考。

在本书编纂过程中，欧瑞康莱宝真空公司提供了宝贵的资料、各种运行数据及产品介绍，该公司检漏仪已在各大电厂、核电站、变电站、中试所中采用，是电力系统的好伙伴，作者对此深表谢意。

“节能、减排”是国策。电力系统广大工程技术人员需要新

的技术、新的仪器来响应国家的号召。本书的出版无疑对电力系统节能、减排有很大帮助。

由于我们的工作经验有限，书中疏漏之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见！

编著者

2009年5月



前言

第一章 检漏技术基础	1
第一节 定义	1
第二节 检漏的要求	5
第三节 漏气的原因	6
第四节 漏孔的形式	8
第五节 漏孔漏量的表示	9
第六节 气体通过漏孔的时间	11
第七节 参考漏孔及漏孔测量的测定	12
第八节 电力系统检漏的意义	16
第二章 电力系统常用的检漏方法	18
第一节 压水法	18
第二节 火烛法	22
第三节 油压试漏法	23
第四节 升压法、真空度下降法	24
第五节 荧光法	26
第六节 超声法	27
第七节 真空计检漏法	29
第八节 卤素检漏法	36
第九节 氦质谱检漏法	38
第十节 负压采样法	39
第三章 电力系统常用的检漏仪	46

第一节	卤素检漏仪	46
第二节	氮质谱检漏仪	77
第四章	火力发电厂的检漏技术	121
第一节	火力发电厂凝汽器真空系统的检漏	121
第二节	凝汽器冷却管的检漏	130
第三节	发电机氢气系统的检漏	133
第四节	火力发电厂锅炉检漏	134
第五章	核电站的检漏技术	138
第一节	核电站检漏的特殊性	141
第二节	核燃料元件的检漏	142
第三节	核电站反应堆一回路检漏	151
第四节	蒸汽发生器检漏	153
第五节	密封件检漏	159
第六节	氦检漏技术在核电站安装时的应用	164
第六章	常见电气设备的检漏	167
第一节	大型油浸式变压器的氦检漏技术	167
第二节	SF ₆ 断路器的检漏技术	185
第三节	SF ₆ 变压器的检漏技术	186
第四节	中、小型全密封变压器的检漏	188
第五节	高压避雷器的检漏技术	189
第六节	真空灭弧室的检漏技术	191
结束语	194
参考文献	196



第一章

检漏技术基础

漏气是影响真空获得和真空维持的主要因素之一。凡是能造成漏气的地方统称为漏孔。由于漏孔的存在，大气通过漏孔进入真空系统后，往往会抵消真空泵的部分抽气作用，延长抽气时间，降低系统的极限真空度，或者说降低系统的极限压强，严重地影响着科研和生产的正常进行。自从真空获得方法问世以来，真空工作者每时每刻都在与真空系统的漏气打交道。将真空系统的漏孔找出来并想办法把它“堵住”，这就是检漏。

检漏技术是一门综合性的应用技术，在每一个使用真空手段的领域都会有相应的检漏技术。在发电厂、变电站有很多工程技术人员，每天都在同“泄漏”做着不懈的斗争。多年来人们创造了各种检漏方法，目前已有十余种之多，如压水法，火烛法，荧光法，超声法，卤素法和氦质谱法等。

第一节 定 义

泄漏可以定义为一个不希望存在的裂缝、孔或者是能让水蒸气或空气、氢气逸出的器壁疏松部分。在电力系统中，检漏的基本作用是在凝汽器、反应堆回路、高压断路器上确定漏孔的位置和漏量。检漏过程是一个质量控制步骤，保证系统可靠性，它是

一次性的，而且完全是非破坏性的检测。

值得指出的是，任何真空系统都存在着泄漏，即真空系统的漏气是不可避免的，是绝对的。我们通常所说的“不漏”是相对概念，它是相对于真空系统的极限压强和严密性要求而言的。

对于动态真空系统来说，即真空泵处于工作状态下，抽速 $S \neq 0$ ，只要真空系统的平衡压强能达到所要求的真空度，这时即使存在着小的漏孔，也可以认为系统是不漏的，即不需要检漏。

600MW 机组的设计热耗大约在 7555~7588kJ/kWh 之间，在循环水温为 20℃ 时，冷却水流量为 15.87m³/s，设计真空度为 95%，即额定负荷下的设计真空为 40.66mmHg，如果用国际单位制为 5246Pa，约为 5kPa。

用 S 代表真空泵对系统的抽气速率，简称抽速，用 Q 代表漏气速率，真空系统的平衡压强为 p_0 ，则有

$$p_0 = \frac{Q}{S} \quad (1-1)$$

式中 Q ——单位时间漏入真空系统的气体量，Pa·m³/s；

S ——单位时间真空泵从真空系统抽走的泵口压强下的气体体积数，m³/s 或 m³/h；

p_0 ——真空系统的平衡压强（极限压强），Pa。

因此
$$Q = p_0 S \quad (1-2)$$

这就是满足真空度要求时，真空系统所允许的最大漏气速率，称为最大允许漏量。如果系统的漏气总量超过这个最大允许漏量，则必然导致真空系统的极限压强 p_0 的上升，此时需要进行检漏和堵漏。

式 (1-2) 中的 S 是真空泵对真空系统的抽速，但不等于真

空泵的标称抽速 S_p ，如图 1-1 所示，由于任何真空泵都是通过各种不同管道与真空系统相连的，这种管道对真空泵的抽速有一定的限制作用和衰减作用，通常用式 (1-3) 表示

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C} \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad S = \frac{S_p C}{S_p + C}$$

式中 S_p ——真空泵的标称抽速， m^3/s
或 m^3/h ；

S ——真空泵对系统的实际抽速，称为有效抽速， m^3/s
或 m^3/h ；

C ——管道导通气体的能力，称为流导， m^3/s 或 m^3/h 。

在电力系统中，由于处于低真空状态，可以用黏滞流下流导公式近似计算

$$C = 1.34 \times 10^3 \frac{d^4}{L} p \quad (1-4)$$

式中 C ——管道对 20°C 空气的流导， m^3/s ；

d ——管道直径， m ；

L ——管道长度， m ；

p ——管道平均压强， Pa 。

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

式中 p_1 、 p_2 ——分别为管道两端气体压强。

在式 (1-2) 中，如果电厂的真空系统极限真空 p_0 取最佳设计真空值 (5kPa)，有效抽速 S 取 $0.28\text{m}^3/\text{s}$ ，则 $Q=5 \times 10^3 \times$

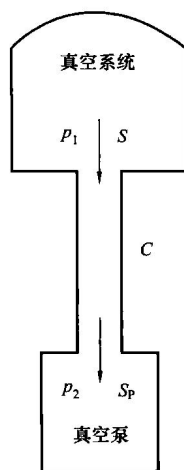


图 1-1 真空系统抽速、有效抽速和流导的关系

$0.28=1.4 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 这就是电厂最佳设计真空系统所允许的最大漏量。

对于静态真空系统来说, 即真空泵不工作, 抽速 $S=0$ (如电厂做严密性试验时就是此种情况), 如果在一定的时间间隔内, 系统的压力能维持在所允许的真空度以下, 同样也可以认为系统是不漏的。如电厂真空系统的严密性指标为 $400 \text{ Pa}/\text{min}$, 即每分钟系统内压强升高不应超过 400 Pa 。如能达到这一指标, 就可以认为该系统是不漏的, 不需要检漏。

此时, 系统所允许的最大漏量为

$$Q = V \frac{p_2 - p_1}{t} \quad (1-5)$$

式中 Q ——单位时间内漏入真空系统的气体总量, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

V ——真空系统的容积, m^3 ;

p_1 ——严密性试验初始压强, Pa ;

p_2 —— t 时间后真空系统内的压强, Pa ;

$p_2 - p_1$ ——压升;

t ——压强从 p_1 上升到 p_2 所需的时间。

如果选发电机组的真空系统容积 $V=1300 \text{ m}^3$, 则

$$\begin{aligned} Q &= 1300 \times 400 = 520\,000 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{min} \\ &= 8666 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \approx 9 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

这就是最大允许漏率。一旦真空系统的总漏率超过这一数值, 检漏工作就要开始了。

综上所述, 真空系统的漏气是绝对的, 而不漏气则是“相对”的。我们通常所说的“不漏”, 一般是指系统上存在漏孔的漏率小于最大允许漏率, 或仪器及检测方法所能达的最高灵敏度而言的。一个系统要不要检漏, 需具体问题具体分析。

✕ 第二节 检漏的要求

实际上,即使采用现代最先进的技术,也不可能制造一个完全密封的系统,检漏的基本问题是:使漏气量小于允许的最大漏率。

检漏的任务是:

- (1) 用适当的方法迅速判断某真空系统是否存在漏气。
- (2) 确定漏率,以便确定它是否在允许的范围之内。
- (3) 选择合适的检漏方法找出漏孔的确切位置,以便进行修补。

通常,把用于检漏的检测仪器统称为检漏仪,它是为了确定漏孔位置或漏量而设计的仪器或系统。

检漏仪在最佳的工作状态下所能检出的最小漏气速率,称为仪器的灵敏度。在具体检漏条件下,所能检出的最小漏气速率称为检漏灵敏度(亦称有效灵敏度)。一般来说,选择适宜的检漏条件通常是可以得到较高的检漏灵敏度的。选择检漏仪时主要是考虑它的灵敏度、可靠性和使用方便等因素。检漏仪的制造者或使用者,都要涉及检漏技术。

检漏的方法有很多,但各有各的特点和使用范围,检漏方法的选择要根据具体情况而定。譬如,所要求的检漏灵敏度、系统的结构、材料、耐压程度、现有条件(人员、设备、探索气体等)、成本等,既要满足要求,又要尽可能简单方便。理想的检漏方法应满足下述几方面的要求:

- (1) 检漏灵敏度高——可检出很小的漏孔。
- (2) 反应时间短——找出一个漏孔所用的时间要短,以便加快检漏速度。
- (3) 能定位、定量——不仅要能找出漏气的位置,还要能确

定漏率的大小，以便确定是否合乎质量要求。对于修补焊缝或更换密封圈就可以有的放矢，这对分析工艺上的原因也是很重要的。

(4) 能无损检漏——检漏时不影响运行，能安全发电，不污染、腐蚀凝汽器。

(5) 稳定性好——在足够长的时间内要求灵敏度稳定可靠，重复性好，不怕水汽、湿空气。

(6) 所用探索气体在空气中的含量要低，不腐蚀零部件，尽量无毒或少毒，不致堵塞漏孔，与水不溶解。

(7) 检漏范围宽——从大漏到小漏都能检测，以减少设备的数量和费用。

(8) 检漏仪器结构简单、轻便、移动方便、启动时间短。

✂ 第三节 漏气的原因

造成漏气的原因是多方面的，只有了解哪些因素可以造成泄漏，才能有效地进行检漏工作，实现快速、准确、省工省时的检漏。

造成真空系统漏气主要有以下几方面原因：

一、真空系统的材料有缺陷

金属真空系统的结构材料，一般有板材、管材、棒材及铸件等。这些材料在成型过程中，结构可能有缺陷，如气孔、夹渣、裂纹等。这就构成了漏气的因素。不过一般型材缺陷较少，漏气的可能性很小。而铸件产生这些缺陷的可能性大，故常用于粗真空及低真空。为此，在检漏时，型材制成的器壁（除焊缝外）一般不再检漏。型材经过切削加工的密封面，由于切削刀痕、划伤、变形等都可能导致漏气。另外还有一种材料缺陷是零件材料在冷加工中出现了裂纹，如弯管不当，就会产生微小的

裂纹。

二、焊接或封接有缺陷

原因有焊接时操作不慎，如薄壁件不小心烧穿；焊接规范选择不当；焊缝设计不合理；焊接顺序不当；起焊和收焊时搭焊太少；操作不便，如仰焊等。这些问题均会导致漏气。

三、焊接后焊缝出现裂纹

焊接后，零件会受到焊接应力的作用，有时也会使焊缝出现裂纹。另外，零件受到冷热交变的作用，以及机械振动或冲击后，也可能使焊缝产生裂纹。

四、密封缺陷

主要是真空密封面加工粗糙，有划伤；密封面清洗不干净，如有氧化皮、油污等，会使密封处产生漏气；密封圈有划伤；密封圈留出来的压缩量不够；密封法兰面不平，螺钉拧得不紧，法兰焊后变形，密封圈损坏等，均会造成漏气。

鉴于上述原因，产生漏气部位主要有焊缝、可拆卸法兰、转轴密封等，具体来讲下列部位发生漏气的可能性大。

(1) 焊缝。

- 1) 焊接时，焊枪起点及收点；
- 2) 十字交叉的焊缝交叉点；
- 3) 小的管接头、水管、低温制冷剂管与容器壳体的焊缝；
- 4) 波纹管焊接部位；
- 5) 受运动影响的钎焊部位；
- 6) 金属—陶瓷或金属—玻璃封接部位；
- 7) 常受冷热冲击的焊缝。

(2) 各种活动密封面。法兰密封、转动轴密封、直线运动轴密封等均可能产生漏气。但这些部位，如果清洗得仔细，装配合理，一般不易漏。除非使用时间过长，轴封橡胶圈磨损，波纹管由于经常运动而产生裂纹，橡胶圈老化或划伤等原因造成漏气。

(3) 各类管道。真空系统中的水管由于受水侵蚀易漏, 还有水管、各种气管的弯曲处等。

总结多年检漏工作经验可以得出以下结论: 对于经常运转的真空系统, 如果发现有漏气现象, 首先应该检查各活动部件, 如阀口、阀杆密封、传动轴密封, 然后再相继检查各种可拆卸连接部件。

新的汽轮机组、反应堆一回路、高压熔断器的漏孔通常是由于在组装时各种零件间的焊接不完善所造成的, 其中典型的包括有焊接、铜焊、锡焊、陶瓷—金属封接、O 圈和其他密封垫、组合密封连接等。

与泄漏有区别的一种假漏称为虚漏, 它不是真正的泄漏, 其来源是多方面的, 如真空系统结构材料表面的出气, 试验物或工件的出气, 系统内各种材料的蒸气, 气体通过器壁向系统内的渗透以及系统的死空间中气体的流出等。由于电力系统处于低真空, 这种虚漏的影响比较小, 我们通常可以不考虑它。相对于虚漏, 通过漏孔漏进气体可称为实漏, 在不加说明的情况下, 所说的漏气都是指实漏, 检漏工作也是针对实漏进行的。

✂ 第四节 漏孔的形式

漏孔是指当封闭的容器内部与外部的压强或浓度不同时, 可以使气体由器壁的一侧泄漏到另一侧去的小孔、缺陷、隙缝以及渗透元件或泄漏装置。一般在检漏技术中造成泄漏的漏孔是微小的, 其截面形状极不规律, 泄漏路径也各式各样, 出现的位置随机性较大, 与制造密封设备或装置的工艺水平有很大关系。

在显微镜下观察常见漏孔形式大致可分为五种, 常见的各种漏孔形式如图 1-2 所示。

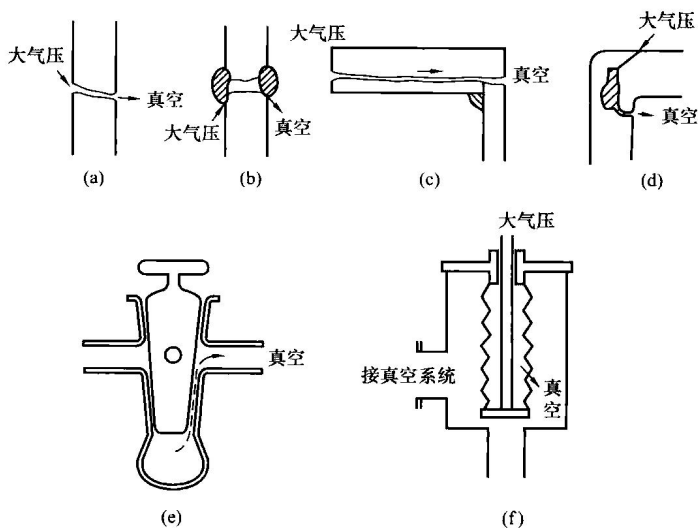


图 1-2 常见的各种漏孔形式

- (a) 细圆管状；(b) 断面十分复杂的管状；(c) 隙缝；(d) 多孔组织连在一起；
(e)、(f) 由细管或隙缝把空穴连接起来

从实用检漏的角度出发，漏孔可以分为两类，一类是直接漏孔，由高压端到低压端，漏气途径容积很小，气流通过这种漏孔很快，容易检测；另一种是混合漏孔，漏孔中间有一个或几个空穴，示踪气体的气流通过这种漏孔所需时间较长。造成这些漏孔的主要原因是材料内部缺陷，以及零件的焊接出现龟裂等。在电力系统中，检漏多数属于非破坏性检查，人们对漏孔形状难以作出准确的判断。

✂ 第五节 漏孔漏量的表示

漏孔大小的表示方法有三种。第一种为尺寸表示法。把漏孔看成或等效成直管，注明直径和长度。直径单位一般采用 μm 表