



# 将电送入千家万户

## 在制造变压器、隔离器和高压开关过程中的真空

电力变压器被用于将能源从发电厂或公共电力网络传输给消费者。它们调节电压并向上和向下流动，从而以成本效率更高的方式传输能源，并提供必要的电压。在这些变压器的制造过程中，生产工艺的不同阶段需要都真空技术：

用于干燥绕组、变压器绝缘油脱气以及在注油过程之前和期间排空变压器箱和膨胀箱。

### 干燥绕组

绕组干燥的目的是由将水、单宁酸和乙酸从纸和木材中除去，并将聚合物和蜡从绝缘纸中除去。在高性能变压器中，由于存在飞狐的可能性，因此残留水分含量不得超过 0.1 - 0.3%。这样便可防止飞狐发生。结果便是，电损耗被减小到最小，并且绝缘电阻得到改善。在  $0.1 - 10^{-2}$  hPa 的真空范围内，绝缘电阻在实际应用中处于理想水平。使用罗茨泵和旋片泵的组合便可产生绕组干燥所需的真空。如果应用是洁净的，则将干泵用作罗茨泵的前级泵。绕组干燥可以采用不同的泵组。最有效的方法是气相干燥 (VPD)。

生产阶段	工艺	所需真空度
绕组干燥	蒸气干燥	$< 10^{-2}$ hPa
在注入绝缘油之前和期间调节箱和冷凝室	通过冷凝去除湿气(水)和污染物	$5 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ hPa
绝缘油的脱气	通过冷凝去除油中的湿气/污染物	$< 0.5$ hPa

表 1：变压器生产中的真空干燥工艺

### 气相干燥 (VPD)

普发真空在 20 世纪 60 年代开发了这种干燥工艺。即使在今天，它仍然是绕组干燥最有效的方法。

气相干燥利用了喷到干燥室的煤油或酒精的导热系数以及绝缘材料的均匀加热。注入的煤油具有与绝缘油类似的化学性质。由于该工艺在真空下进行，因此解聚因子显著降低。这大大延长了绝缘材料的寿命。

煤油具有特有的特定表面张力。除此之外，由于其密度极低，它可以渗入最细小的裂缝。考虑到这些特性，该干燥工艺比使用其它方法（例如热空气法）要快 50 - 60%。使用气相干燥，绕组在几天内便可干燥，最多一周，没有例外。这样便能通过提高效率提高了产量并优化成本。

### 在气相干燥中会发生什么？

1. 根据尺寸，可选择将整个变压器或仅纸绝缘铜绕组滑入轨道系统上的干燥室中。如今，所建造的干燥室的体积可达到 1,000 m<sup>3</sup>。
2. 为了加速除湿过程，将干燥室加热至约 105°C 至 110°C。
3. 当室内温度不低于 105°C 时，可获得所需的绝缘温度。
4. 煤油已经由 JET 蒸发器注入并且与加热模块一起加热。现在，真空/冷凝器模块通过将压力稳定地降低到约 20 hPa 从而逐步除去煤油。
5. 然后关闭与蒸发器和冷凝器模块的所有连接。
6. 真空泵组被接通，以开始精抽过程。一旦获得  $< 10^{-2}$  hPa 的真空条件，该过程便结束。
7. 残留水分含量不得超过 0.3%。对于高端变压器，这一数字是 0.1%。真空泵排气口处的实际残余水分通过露点测量设备精确地测定。
8. 在真空条件下，箱内充满脱气的绝缘油。在此，必须使用溢流保护装置来保护真空泵免受液锁。只有这种保护才可以防止绝缘油在真空泵运行时进入真空泵。尤其是罗茨泵可获得保护，不受潜在的损坏风险困扰。
9. 煤油在中等真空过程期间在蒸馏模块中被回收，并储存在单独的收集罐中，用于进一步使用。

### 排空变压器箱

在变压器制造期间不允许存在水分，例如由冷凝产生的水或污染物。所以，彻底清除这些水分极为重要。因此，针对这种特定应用需要精确定制的移动式真空系统。排空变压器箱时，必须考虑精确定义的标准：例如，变压器箱上排空口的标准尺寸为 80 毫米。在  $< 1$  hPa 的地方，这个相对较小的开口会导致显著的导流损失。结果真空泵组的泵送速度会显著降低。同时，该标准也对抽空时间产生不利影响：抽空时间变长，从而降低生产量。使用较大的真空泵无法作出任何改进 - 它只会增加生产成本。

考虑到公称通径的限制，移动式真空设备的连接位置应尽可能靠近 80 毫米开口。使用短真空进气软管可以限制导流损失。通常，这些软管长度为四至五米。

### 测定残余水分

可以使用真空单元排气口或真空计处的露点测量装置测量残余水分。只有电容式测量计才能用于真空测量。它们高度精确且耐腐蚀，并且测量不依赖于所使用的气体类型。残留水分读数仅仅是基于真空的指示。因此，要确保真空测量装置极为精确极为重要。只有这样才能确保残留水分不超过规定的限度。廉价的皮拉尼真空表在低测量范围内仅能获得 +/- 15% 和  $> 1$  hPa 的精度。因此，偏差可以达到 30% 或更多。

### 绝缘油回收

此外，必须去除绝缘油内的所有水分和污染物以防止出现内部飞狐。为此必须精确定义要维持的油纯度。这种纯度通过对绝缘油使用脱气工艺来实现。

在脱气过程中，在将绝缘油注入变压器之前，要把水分、空气和其它污染物从油中除去。因此，必须获得  $<1 \text{ hPa}$  的真空条件。为此，要使用三级罗茨或旋片泵组（抽速：罗茨泵为  $1000/500 \text{ m}^3/\text{h}$ ；单级旋片泵为  $100\text{--}200 \text{ m}^3/\text{h}$ ）或泵送速度为  $250 \text{ m}^3/\text{h}$  的两级旋片泵和中间冷凝器。

#### 高压开关和隔离器

六氟化硫 ( $\text{SF}_6$ ) -是一种无臭、惰性和非临界气体，可以用作中压和高压开关和系统 (GIS) 以及气体绝缘管道 (GIP) 中的绝缘气体，用于电压范围为  $5\text{--}1000\text{kV}$  的完全密封系统。此外，这种气体还被用于在切换高压开关时使电弧放电。

六氟化硫的电弧中断性能是空气和氮气的三倍。考虑到这些性质及其低介电损耗， $\text{SF}_6$  是用于所述特定用途的理想选择。为了保持绝缘性能，气体压力为  $5$  至  $10 \text{ bar}$ 。压力升高后，电子的平均自由程降低。降低的目的是防止电子加速太猛并过早地与  $\text{SF}_6$  分子碰撞。

将要注入  $\text{SF}_6$  绝缘油的高压开关也必须事先在真空中进行干燥。与变压器工艺一样，这些干燥和填充过程也需要  $<10^{-2}\text{hPa}$  的真空条件。

#### 现场使用中的现场维护

必须定期维护才能确保变压器、高压开关和隔离器的良好工作状态和安全运行。通过任何现有裂口逐渐渗入的水分可能导致内部闪络。所定义的维护计划指定了何时必须排空变压器箱并测试泄漏，然后再注入绝缘油或  $\text{SF}_6$  气体。



图 1：普发真空干燥泵组

真空泵和填充设备放在卡车上，以进行现场维护。电源由柴油发电机提供。

#### 用于保证质量的检漏测试

无论是在生产过程中还是在现场维护中，泄漏测试对于质量保证来说都至关重要。

## 信息框

#### 导流损失影响泵组性能

- 直接连接到干燥室的三级泵组的泵送速度由图表的蓝线表示。然而，这种配置不能很好地转化为实际运用
- 80 毫米进口端口对三级泵组泵送速度的影响如图中红线所示。如果真空条件  $5 \cdot 10^{-3}$  占主导地位，则泵送速度仅为  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ ，其中安装容量为  $3,200 \text{ m}^3/\text{h}$
- 泵送速度的差异原因是在  $<1\text{hPa}$  的压力范围内由进气管的公称口径小导致的导流损失
- 通过将标准改为例如 100 毫米的公称口径，可以显著改善泵速并减少抽空时间。

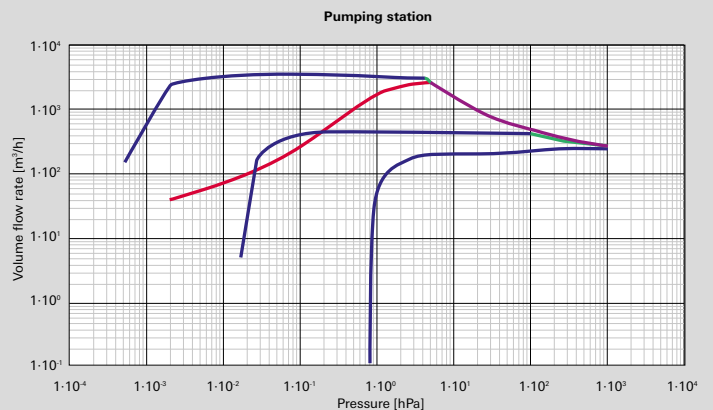


表 2：导流损耗对泵组性能的影响



图 2：普发真空 DuoLine 旋片泵的泵速范围为 1.25 至 1,920 m<sup>3</sup>/h

压力升高方法仅适用于检测泄漏率为 10<sup>-1</sup> hPa m<sup>3</sup>/s 的大泄漏。如果需要更高的密封性，则必须使用氦气检漏仪。它们能准确可靠地测量泄漏。在变压器生产中使用重达 25 公斤的移动式和便携式泄漏检测器，因为它们也可以在现场使用。

#### 旋片泵还是干式泵作为前级泵？

干式泵越来越受欢迎。但是当涉及到气相变压器干燥或绕组干燥等应用时，旋片泵的技术性能使其成为理想的选择。在气镇阀打开的旋片泵中，油的工作温度为 80-85°C。相比之下，由于通过内部压缩积聚热量，干式泵的气体温度可达到 150° 和 180°C 之间。

使用干式泵时，如果在蒸汽干燥过程中存在聚合物和蜡，则它们会在热转子上燃烧。这会留下一个黑色涂层，使泵在关闭后无法再次启动，并且需要全方位清洁。

然而，如果使用旋片泵，则聚合物和液体蜡会留在油中，并且在换油时被排出。这让泵能够再次注入新鲜的油并立即重新投入使用。因此，油的处置是必须考虑的唯一措施。

#### 普发真空的解决方案

普发真空拥有正确的解决方案，既能产生必要的真空条件，又能通过移动式泄漏检测器进行泄漏测试。广泛的产品组合包含以下适用于变压器和高压开关生产过程的解决方案：

- 单级和两级旋片泵，泵送速度范围为 1.25 至 1,920 m<sup>3</sup>/h，尺寸紧凑
- 罗茨泵具有高压缩比和低运行成本，可灵活适应特定应用
- 最大重量为 25 公斤的便携式检漏仪功能强大，能可靠地发现每处泄漏。

我们的专家准备就绪，随时都能帮助您为您的特定用途配置理想的真空解决方案。请随时与我们联系！



图 3：带磁耦合的普发真空 OktaLine 罗茨泵





图 4：普发真空 CombiLine 罗茨泵组



图 5：普发真空便携式氦气检漏仪 ASM 310



图 6：普发真空便携式氦气检漏仪 MiniTest 及便携箱



## 我们提供一站式真空解决方案

普发真空代表着为客户在世界范围内提供创新的、定制化的真空解决方案，完美的技术，全方位的支持和可靠的服务。

## 完整的产品线

从一个配件到复杂的真空系统：  
我们是唯一能提供完整的产品线和技术服务的供应商。

## 理论与实践的完美结合

得益于我们的专业技术和完善的培训体系！  
我们提供给您完整的生产技术提升方案和全球统一的一流的现场服务。

您是否正在寻找  
完美的真空解决方案？  
请联系我们：

普发真空技术（上海）有限公司  
Pfeiffer Vacuum  
(Shanghai) Co., Ltd.  
T +86 (21) 3393 3940  
info@pfeiffer-vacuum.cn

Pfeiffer Vacuum GmbH  
德国总部  
T +49 6441 802-0

[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)