



## 旋转电机为何发生故障

旋转电机(电动机和发电机)是发电和工业应用中的重要设备。因此,电机的可靠性和可用性非常重要。过早故障可能导致意外停机,并可能损害电机,造成重大经济损失。

为制定有效的维护计划,需要准确了解有关电机部件何时需要维修或更换的状态信息。

### 旋转电机为何发生故障

目前有多种方法和算法可以对电机关键部件的状态进行评估。其中最实用的方法是对不同行业各种电机的运行人员进行的调查评估。例如, A1.10 CIGRE 工作组关于水力发电机故障的调查。调查结果如图 1a 所示。根据对世界各地共计 1,199 台水力发电机的 16 名运行人员的调查显示,最常见的电机故障原因为绝缘损坏。绝缘损坏的具体的根本原因,如图 1b 所示。我们将说明如何检测旋转电机中的这些常见问题。

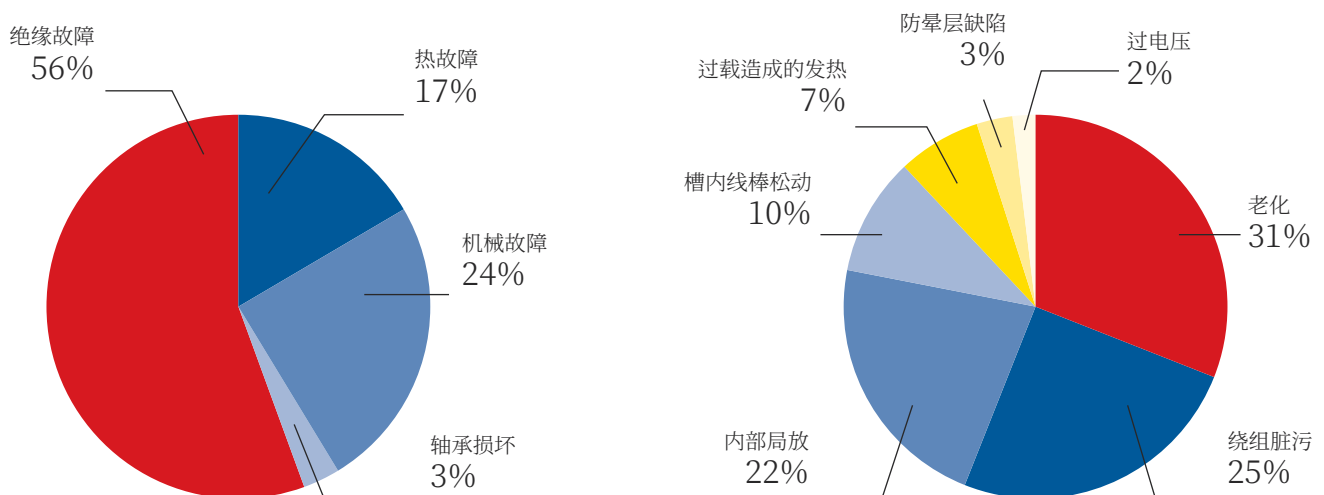


图 1a(左): 关于水力发电机故障根本原因的调查

图 1b(右): 绝缘损坏的原因

资料来源: Brüttsch 等, 《发电机绝缘故障机制》(Insulation Failure Mechanisms of Power Generators), DEIS 2008 年 7 月/8 月

### 绝缘复合应力 – TEAM

旋转电机在整个生命周期中会受到大量周期性和持续性应力的影响, 例如热应力 (Thermal Stress)、电气应力 (Electrical Stress)、环境应力 (Ambient Stress) 和机械应力 (Mechanical Stress) — 简称为 TEAM。

- > **热应力**: 大量温度变化会导致绝缘材料过早老化。
- > **电气应力**: 运行期间的电压和局部放电 (PD) 活动会不断给绝缘材料施加应力。
- > **环境应力**: 包括湿气、腐蚀性和反应性化学物质 (气体、酸) 以及异物颗粒 (金属碎屑、灰尘、碳、润滑剂)。
- > **机械应力**: 线槽和端部绕组区域的电磁力以及热膨胀程度的不同。

### 绝缘系统构成

中高电压旋转电机的绝缘系统需要在承受高电场强度、确保机械稳定性以及电机铜材与冷却系统导热之间取得平衡。因此, 制造商通常使用图 2 所示的复合绝缘系统。主绝缘或对地绝缘系统采用云母结合环氧树脂构成。这部分主要是电气应力。另外, 绝缘系统拥有一些导电或半导体层, 用于确保不同材料之间的设计电位水平。例如, 外防晕半导层确保绝缘材料表面对地电位的均衡。大型电机还有端部电位过渡, 还有内防晕半导层。

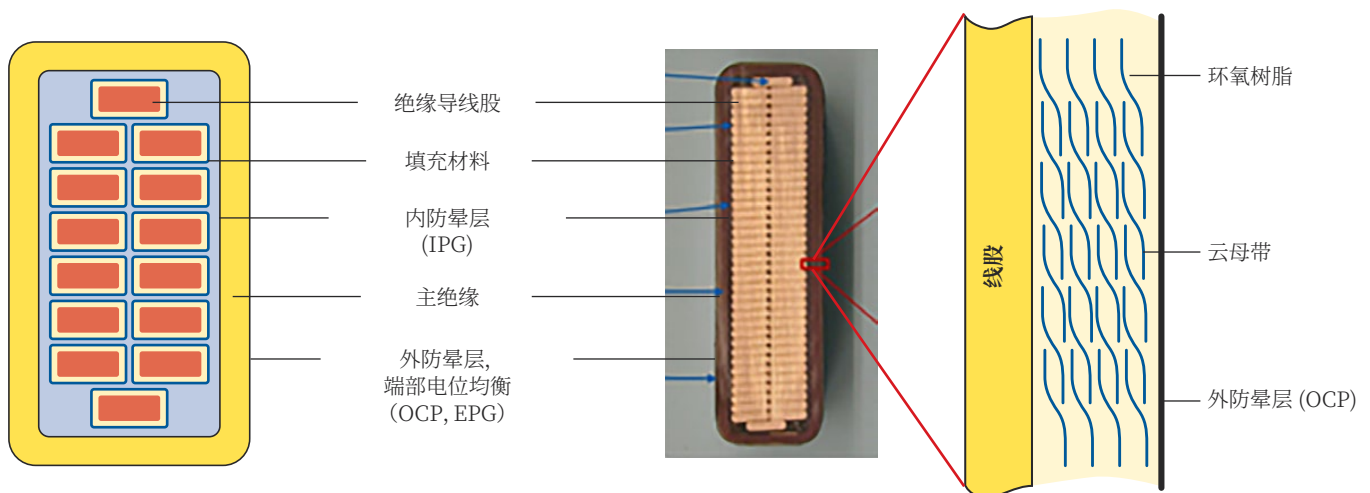


图 2: 高压电机的绝缘系统构成

### 定子绕组中最常见的对地绝缘缺陷

#### 空穴

环氧树脂/云母绝缘材料中通常会存在制造工艺导致的一定量的孔穴或空腔。由于制造商的制造工艺各不相同, 新电机中小缺陷的程度也各有不同。由于上述 TEAM 应力的影响, 随着时间的推移会产生其他的空腔。

对于制造良好的绝缘系统, 抵御这些随运行时间产生的小空穴不是问题。但是, 这些小孔洞会产生局部放电, 导致更大的绝缘缺陷。这种缺陷的形成需要很长时间, 因此应当随着时间的推移, 经常检查此类局部放电的状态。

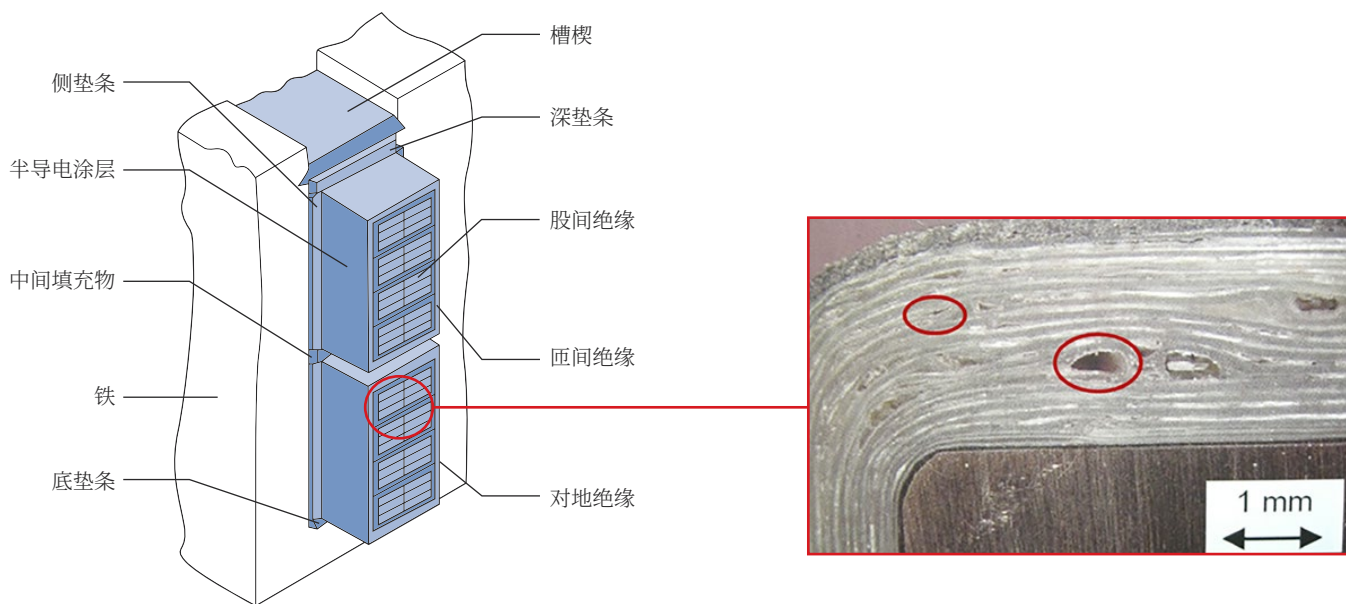


图 3: 对地绝缘的结构以及较大空穴的显微视图  
 来源: Vogelsang 等, 《高电压发电机与电动机绝缘性能测试》  
 (Performance testing of high voltage generator and motor insulation), 2005 年 12 月

### 分层

绝缘材料中的分层(也称为剥离)是由于绝缘层中的大空腔不断积累所形成的。另外,铜材与主绝缘之间也可能发生分离。

分层所导致的局部放电活动会比小空穴造成的局部放电大得多。这种剥离的原因主要是不同材料在正常运行过程中温度变化时所产生的机械张力不同。

### 线圈或线棒松动

电磁与绕组之间持续的相互作用。如果绕组固定系统随着时间的推移出现缺陷,或处理不当,绕组将会变松。这样,外防晕层将会受到磨损和伤害。如果该缺陷未能及时发现,振动还会损害主绝缘,导致电机故障。该缺陷会产生具备相应特征的局部放电现象,可通过局部放电来测量检测出来。

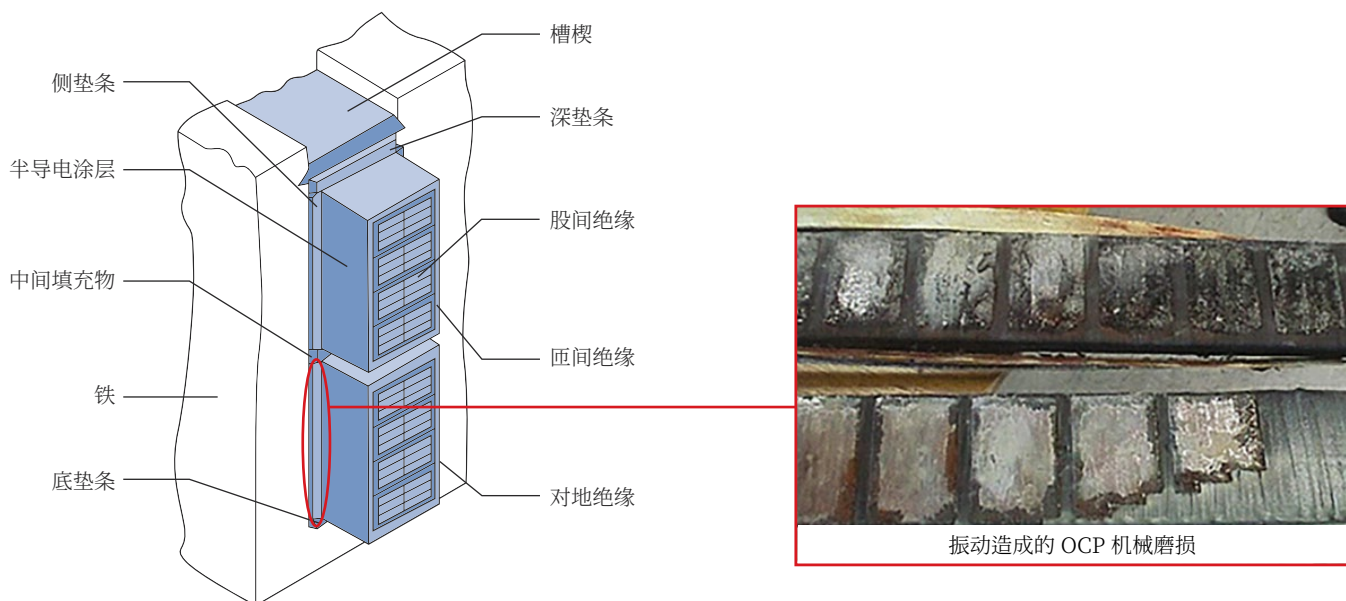


图 4: 线棒的绝缘构成及振动的常见表现。

### 端部绕组区域的脏污和间距不足

间距不足(相间)或绕组端部脏污等结构性的问题会导致端部绕组区域发生局部放电。这部分绕组的其他常见问题还包括外防晕层与端部电位过渡之间的接触不良。脏污以及其特有的局部放电现象的示例如下图所示(图 5)。

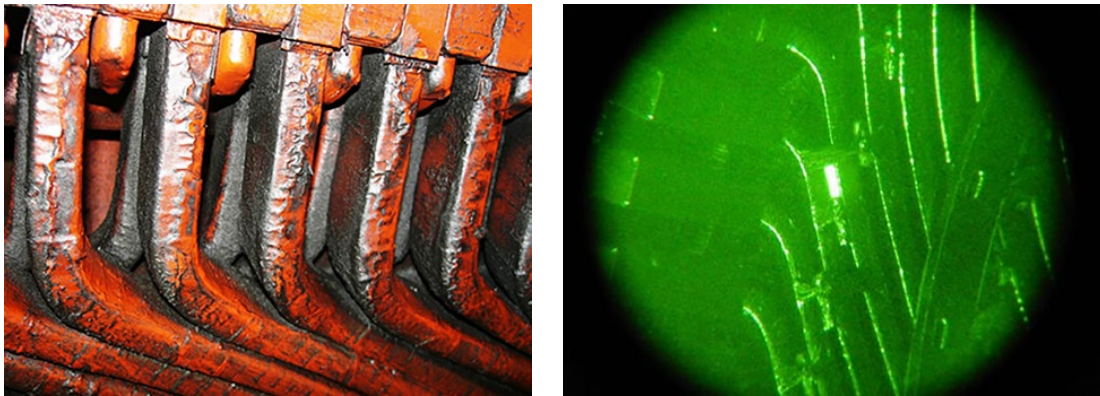


图 5:端部绕组的脏污与局放示例

上述的问题都是与主绝缘有关的。旋转电机的其他部件也会存在各种不同的问题。这些问题包括：

- > 匝间短路
- > 连接(接触)问题
- > 导体断股
- > 焊接不良

### 预期寿命延长

旋转电机与其他电网设备一样,都有着预期使用寿命。如上所述,热应力、环境应力、机械应力和电气应力等负面影响会缩短电机的寿命。

要防止电机故障和意外停机,定期维护非常重要。可以通过各种诊断测量方法进行风险评估,根据电机状况制定适当的维护计划。

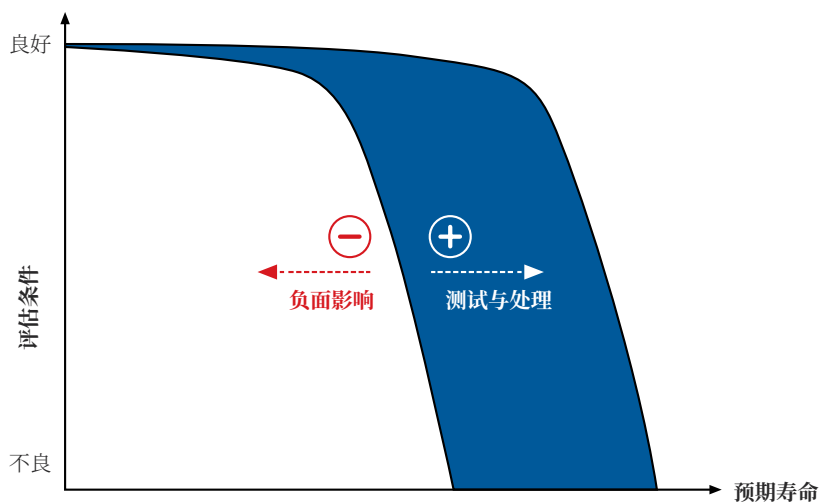


图 6:通过状态检修来延长电机寿命的示例

### 测试概览

下表对最为常见的问题以及相应的可以检测这些问题的电气试验方法做了汇总。

被测试的电机部件		测试目标											建议的电气试验										
定子绕组	局部放电 (PD)	■	■	■																			
	脏污	■	■	■					■												■		
	绝缘老化	■	■	■					■												■		
	耐压能力							■															
	绝缘完整性							■	■												■		
	接触问题														■								
	匝间故障																			■			
转子绕组	匝间故障																■		■				
	高接触电阻															■							
定子铁心	铁心缺陷																				■		

表 1: 旋转电机的常见问题以及相对应的测试方法