

# 微间隙气体放电特性分析中的 不同真空压力精密控制解决方案

## Different Precise Control Solutions of Vacuum Pressure in the Analysis of Gas Discharge Characteristics Across Micro-Gap

摘要：针对微间隙气体放电特性分析中需要对不同真空压力进行精密控制的要求，本文提出了相应的解决方案。解决方案采用了双路调节技术，由真空计、电控针阀和真空压力控制器组成进气和排气控制回路，可实现真空度1Pa~101kPa全量程范围内优于±1%的控制精度。同时，此解决方案适用于多种气体混合后的真空压力控制，还可进行更高真空度、更高正压压力和增加湿度等环境变量控制的拓展，更广泛适用于各种气体放电特性研究。

### 1. 项目背景

微间隙气体放电是一种电极距离在微米或纳米量级的放电形式，由于电极距离极小，微间隙放电通常表现出不同于传统规模放电的击穿特性，从而导致低电压击穿的风险。此外，微间隙放电过程中所产生的微等离子体具有高压稳定性、非热平衡、高电子密度、高激发效率等优点，在工业和生活中有着广泛的应用。总之，微间隙气体放电特性的研究引起了的极大关注。

在微间隙气体放电特性研究中，微间隙中气体的种类和真空压力是重要的环境条件。最近有客户对这种微间隙中的气体种类，特别是对真空压力的精密控制提出了明确要求，其目的是研究不同气体和不同真空压力下微间隙的气体放电特性。为此本文提出了微间隙气体压力的精密控制解决方案，以实现微间隙气体放电特性分析过程中的全量程的真空压力高精度自动控制。

### 2. 解决方案

解决方案是在原有的微间隙气体放电特性测试设备上增加高精度真空控制系统，以实现在绝对压力1Pa~101kPa范围内的精密控制，全量程真空度控制精度小于±1%。整个装置的结构如图1所示。

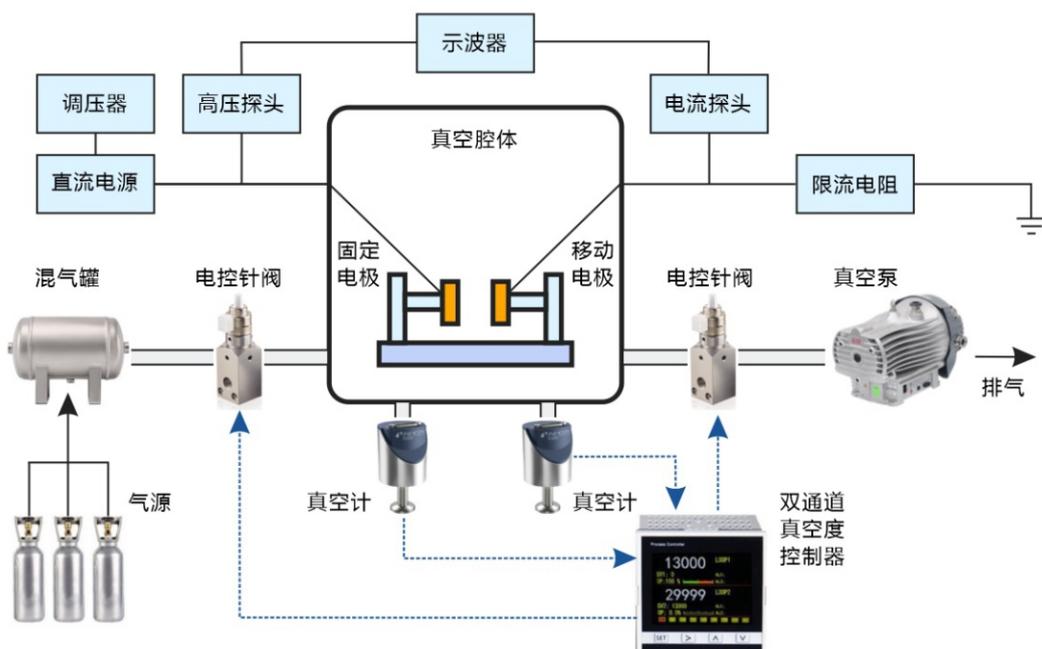


图1 微间隙气体放电试验装置及其真空压力控制系统

如图1所示，真空压力控制系统主要由气源、混气罐、电控针阀、真空计、真空压力控制器和真空泵组成，其功能和性能指标如下：

(1) 气源：气源主要由高压气瓶提供，可采用不同气体的气瓶实现气体混合，以实现混合气体环境下的微间隙气体放电性能研究。混合气体中的各种气体比例可以通过相应的气体质量流量控制器进行调节。当然，也可以采用单一气体，如果是气体是空气可采用气泵作为气源。

(2) 混气罐：提供气体的充分混合，混气罐内的压力要高于一个大气压。

(3) 电控针阀：解决方案中采用了两个NCNV系列电控针阀，电控针阀采用步进电机高速调节并具有极好的调节精度和线性度，全开和全闭动作时间小于1秒。一个电控针阀用于调节进气流量，以进行低压高真空范围内的控制；另一个针阀用于调节排气流量，以进行高压低真空范围内的控制。在实际应用中可根据真空腔体尺寸大小选择不同孔径的电控针阀，更大的真空腔体排气时可将排气用电控针阀更换为电控球阀，以提高排气流量和真空度调节控制速度。

(4) 真空计：解决方案中采用了两个电容真空计，一个真空计的最大量程为10Torr，另一个真空计的最大量程为1000Torr，由此两真空计可覆盖整个真空度范围。选择电容真空计是因为这种真空计具有较高的测量精度和信号的线性输出，在全量程任意真空度点上的测量精度都可以保证小于0.25%。当然，真空计也可以选择全量程型的皮拉尼计，但其测量精度只能达到15%，且信号输出呈现严重的非线性，会严重影响真空度控制精度。

(5) 真空压力控制器：为了保证全量程范围的真空度控制精度，选择了VPC2021-2型号的双通道真空压力控制器，每个通道与对应的真空计和针阀组成独立的闭环控制回路，其中一个通道用于控制高真空，另一个通道用于控制低真空。此双通道真空压力控制器具有24位AD、16位DA和0.01%最小输出百分比，结合电容真空计和电控针阀可实现全真空度范围优于 $\pm 1\%$ 的控制精度。另外，此控制器具有PID自整定功能和自带计算机软件，便于进行过程参数的设置、运行、显示和存储。

(6) 真空泵：由于需要采用微机械装置进行精密位移调节，真空泵选用干泵以避免对真空腔室内部件的污染。在具体应用中需根据真空腔体的大小和真空度范围选择相应抽速的干泵。

### 3. 总结

本文针对微间隙气体放电特性分析中所需的真空压力精密控制要求，提出了全量程真空压力高精度的解决方案，可完全满足客户在微间隙气体放电特性研究中需要。另外，此解决方案还具有很强的可拓展性和适用性，主要有：

(1) 还可进行多种气体混合气氛条件下的真空度精密控制。

(2) 除了上述低压真空度范围内的精密控制之外，还可进行量程的扩展，如向高真空和超高真空方向拓展，如向高压一个大气压的正压方向拓展。

(3) 除了气体气氛环境的精密控制之外，还可增加湿度等环境变量的精密控制。

总之，本解决方案可推广应用到多种环境变量的自动控制中，以满足各种形式和规格的气体放电特性的研究和分析。