

# 低温结霜可视化实验装置的 真空压力精密控制技改方案

## Technical Transformation Scheme of Vacuum Pressure Precision Control for Low Temperature Frosting Visual Experimental Device

摘要：低温结霜可视化实验装置主要用于模拟空间环境并研究深冷表面结霜现象，客户希望对现有实验装置的真空系统进行技术升级，以实现0.001Pa~1000Pa范围内真空度的准确控制。为此本文提出了分段控制解决方案，即采用电容真空计、电动针阀、电动球阀和低真空控制器构成低真空控制回路；采用皮拉尼计、可变泄漏阀和高真空控制器构成高真空控制回路。解决方案可以很好达到技术指标要求，也可推广应用到其它真空和超高真空度控制。

### 1. 项目背景

结霜现象广泛存在于自然界和低温、制冷、航空航天等工程领域，当冷表面温度低于对应水蒸气分压下的冰点温度时，水蒸气将会在冷表面凝华成霜。以往对常压、普冷条件下的结霜现象研究较多，霜层表面与湿空气之间的传热、传质机理已比较明确，但常压下凝华成霜的机理和物性参数与真空低温条件下的差异很大，以往研究所得的结霜机理无法直接用于真空深冷环境下的凝华过程分析，因此在航天器以及航天器地面模拟试验中必须要对水蒸气遇到低温表面产生凝华结霜现象进行研究，如采用结霜可视化实验装置，针对深冷表面的结霜现象，研究不同气压条件下霜层的微观形貌和生长过程，并进行对比分析。

如图1所示，冷表面结霜可视化实验装置由低温系统、真空系统、数据采集系统和图像采集系统组成，其中低温系统和真空系统用于控制结霜环境条件，包括冷表面温度和真空度；数据采集系统记录冷表面的温度、真空度；图像采集系统用于记录和分析霜层形貌及其生长过程的图像信息。

采用可视化实验装置需要对真空容器进行不同气压值的精确控制，以模拟不同空间环境下的不同真空压力值。但目前的实验装置仅能进行250Pa左右的真空度控制，且波动性较大。

针对现有冷表面结霜可视化实验装置中真空度控制存在的问题，客户希望在现有干泵和分子泵基础上进行升级改造，并提出了相应的技术要求，具体指标如下：

- (1) 真空度控制范围：0.001Pa~1000Pa（绝对压力）。
- (2) 真空度控制精度：优于±20%（0.001Pa~1Pa），优于±1%（1Pa~1000Pa）。

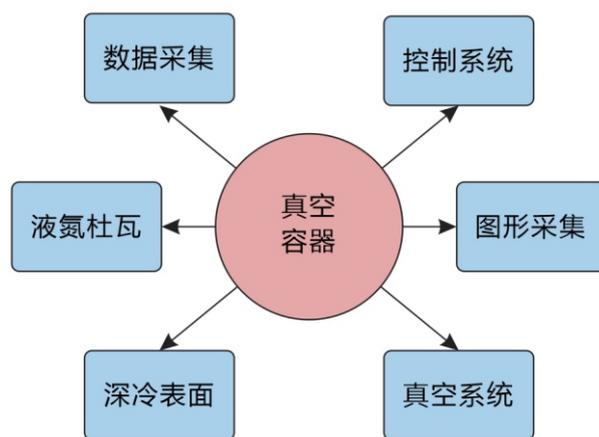


图1 冷表面结霜可视化实验装置结构示意图

针对上述客户提出的技术指标，本文介绍了相应的技术改造方案，具体内容如下。

## 2. 解决方案

针对低温结霜可视化实验装置真空环境需控制在高真空度（0.001Pa~0.1Pa）和低真空度（0.1Pa~1000Pa）范围内，本文所述的解决方案将在现有干泵和分子泵组成的抽气系统基础上，采用动态平衡控制法，使用两套控制回路分别实现低真空和高真空范围的精密控制。整个真空度控制系统结构如图2所示。

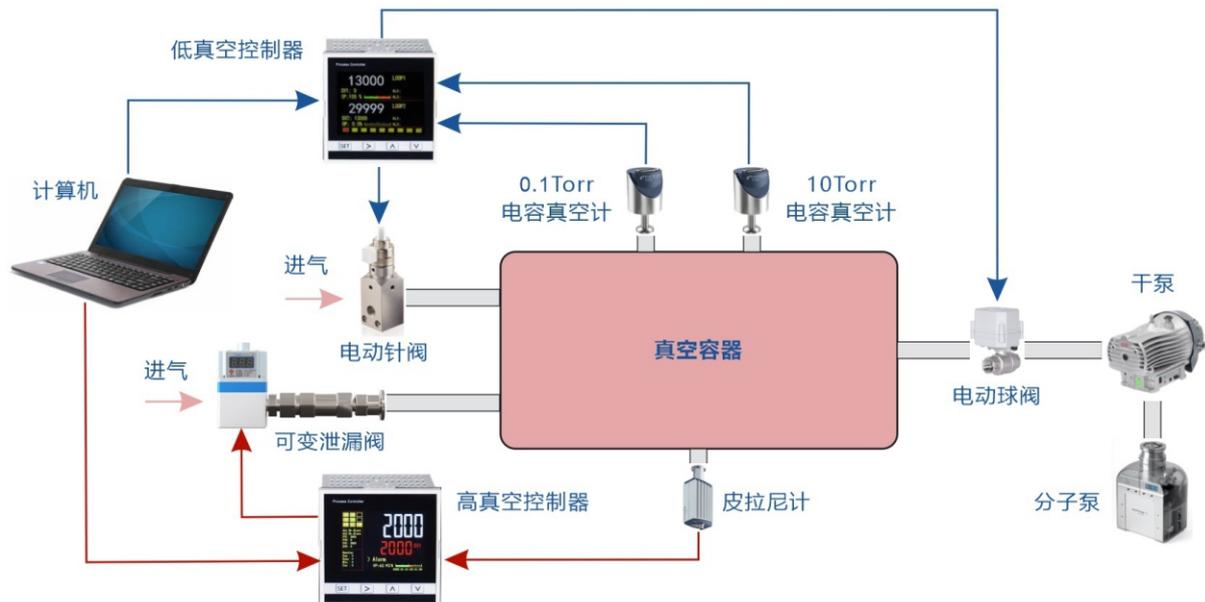


图2 可视化实验装置真空度控制系统结构

对于低真空（0.1Pa~1000Pa）范围的控制，控制回路由电动针阀、电容真空计、电动球阀和低真空控制器组成。真空度的测量使用了2只不同量程的电容真空计（0.1Torr和10Torr），并采用了双通道的低真空控制器。在10Pa~1000Pa范围内，控制器的第一通道采集10Torr真空计信号，通过自动调节电动球阀开度并恒定电动针阀进气流量，可实现10Pa~1000Pa范围内的真空度控制。在0.1Pa~10Pa范围内，控制器的第二通道采集0.1Torr真空计信号，通过自动调节电动针阀开度并保持电动球阀为全开状态，可实现0.1Pa~10Pa范围内的真空度控制。

对于高真空（0.001Pa~0.1Pa）范围的控制，控制回路由可变泄漏阀、皮拉尼计和高真空控制器组成。高真空度控制器为单通道真空压力控制器，在开启分子泵全速抽取的状态下，控制器采集皮拉尼计信号，通过自动调节可变泄漏阀的微小进气流量，可实现0.001Pa~0.1Pa范围内的真空度控制。需要注意的是，皮拉尼计输出信号有严重的非线性特征，因此所采用的真空压力控制器具有信号的线性处理功能，如采用了八点最小二乘法曲线拟合进行非线性处理，由此可很好的保证高真空度范围的测量和控制准确性。

在低真空控制过程中，高真空控制器控制可变泄漏阀为关闭状态，同时控制器采集皮拉尼计信号进行真空度显示（此显示数据精度较差）。在高真空控制过程中，需采用低真空控制器关闭电动针阀阻塞进气，并同时控制电动球阀处于全开状态。

在低温结霜可视化实验装置中，除了进行真空度控制之外，还需要使用液氮和相应温控系统进行低温温度的准确控制，而真空度控制的准确性会对温度控制精度产生明显影响，为此真空控制系统中关键部件的选择尤为重要。以下为解决方案中关键部件选择的具体说明：

(1) 真空计：为了保证真空度的测量精度，解决方案在低真空范围选择了电容真空计，在任意真空度下其测量精度可优于 $\pm 0.25\%$ ；在高真空范围内（ $0.001\text{Pa}\sim 0.1\text{Pa}$ ）选择的是皮拉尼计，其测量精度为真空度读数的 $\pm 15\%$ ，但与真空度对应的电压输出信号为指数函数。

(2) 进气和排气调节阀：调节阀的关键指标是响应速度和线性度，只有具有快速的气体流量调节能力，才能实现高精度的真空度控制。解决方案所选择的电动针阀和可变泄漏阀所具有的响应速度都小于1秒，而电动球阀具有1秒和7秒两种型号的响应速度。另外，所选择的这些调节阀门都是国产化替代产品，具有很好的线性度，试验考核证明在低真空范围内可轻松实现 $\pm 1\%$ 的控制精度，如果选用更高精度为 $0.05\%$ 的电容真空计，可实现优于 $\pm 0.1\%$ 的控制精度。

(3) 真空控制器：在真空计和调节阀满足精度要求的前提下，真空控制器的精度和线性化处理功能则是实现高精度控制的关键。解决方案所选择的VPC-2021系列真空控制器，采用了目前国际上最高精度的工业用微处理芯片，具有24位AD和16位DA，使用双精度浮点运算可使最小功能输出百分比达到 $0.01\%$ ，控制器的这些技术指标可以充分发挥上述真空计和调节阀的高精度优势。同时，VPC-2021系列真空控制器具有八点曲线拟合功能，可更好的保证皮拉尼计测量精度以及高真空范围内的控制精度，如果皮拉尼计已经进行了对数处理输出的是线性信号，控制器也可以通过参数设置功能将其转换为真实的真空度数值。另外，VPC-2021系列真空控制器具有PID参数自整定功能和随机软件，在使得自动控制更加简便的同时，更无须在进行任何编程即可搭建起计算机控制系统，通过计算机软件可快速进行控制过程的参数设置和运行控制，可对过程曲线进行显示、存储和调用。

### 3. 总结

综上所述，针对客户对低温结霜可视化实验装置真空度精密控制的技改要求，本文提出的解决方案可以达到的技术要求指标。另外，此解决方案还具有如下特点：

(1) 本文所述的解决方案是一个非常典型真空度精密控制方案，可以推广应用到空间环境模拟等各种试验装置中的真空度准确控制，特别是采用了可变泄漏阀的超高真空度控制技术，更是具有突出的技术优势。

(2) 解决方案中所采用的VPC-2021系列控制器，是具有超高精度的工业用多功能PID控制器，可采集测量多达47种传感器信号，因此VPC-2021系列控制器也常被用于温度、流量和张力等其他参数的高精度控制。同时，VPC-2021系列控制器具有多种高级控制功能，如串级控制、分程控制和比值控制功能，可实现复杂控制系统的自动控制。另外，VPC-2021系列控制器还具有远程设定功能，通过此功能可实现自动跟踪控制和外部周期信号驱动的复杂波形自动控制。