

石英灯和石墨加热器结构热试验装置中的 低气压控制解决方案

Solution of Low Pressure Control In Structure Thermal Test Device of Quartz Lamp and Graphite Heater

摘要：为解决结构热试验和热真空试验中的低气压真空压力精密控制问题，本文基于动态平衡法和上下游控制模式，提供了相应的解决方案。解决方案中的低气压真空压力控制系统主要是采用电控针阀、电控球阀和双通道真空压力控制器组成上下游两个闭环控制回路，在低气压至超高真空的全量程范围内可彻底解决结构热试验和热真空试验中真空压力的自动控制问题，并可实现很高的控制精度和响应速度，同时还可提供低气压交变控制的强大功能。

1. 问题的提出

结构热试验或热真空试验是指通过地面模拟试验的方法，观察和研究航天飞行器单机(部件)、分系统结构和航天器整体在飞行气动加热、发动机燃气流加热、内部设备发热、真空低气压、太阳辐射等气氛环境、热环境和力学环境作用下，结构的承载能力及热学特性，试验过程中需要对温度、真空压力、热流密度、气动冲刷和振动等环境参数进行动态实时模拟。这些试验参数的模拟实现往往需要根据不同的环境参数范围选择不同的技术手段，对于温度、热流和冲刷烧蚀的模拟手段主要包括石英或石墨加热器、氧乙炔火焰、发动机火焰和风洞等。

目前地面模拟试验应用最多的是石英灯和石墨加热器形式的结构热试验系统，典型的石英灯和石墨加热器热真空结构热试验系统如图1所示。目前这些试验设备在低气压控制方面还十分简陋，主要存在以下几方面的问题：

(1) 大多地面模拟设备缺乏低气压准确控制技术手段，无法模拟不同高度下的准确气压值。

(2) 对于空间环境的超高真空度的控制基本无能为力，基本都是仅靠采用真空机组进行粗略的量级级别的控制，无法进行精细调节和控制。

(3) 对于热流和温度已经实现了不同气动加热过程的动态模拟，而对于气压环境的动态模拟，还基本无法实现。

(4) 对于加热或冷却过程对环境气压和真空度的影响，还无法做到快速响应。

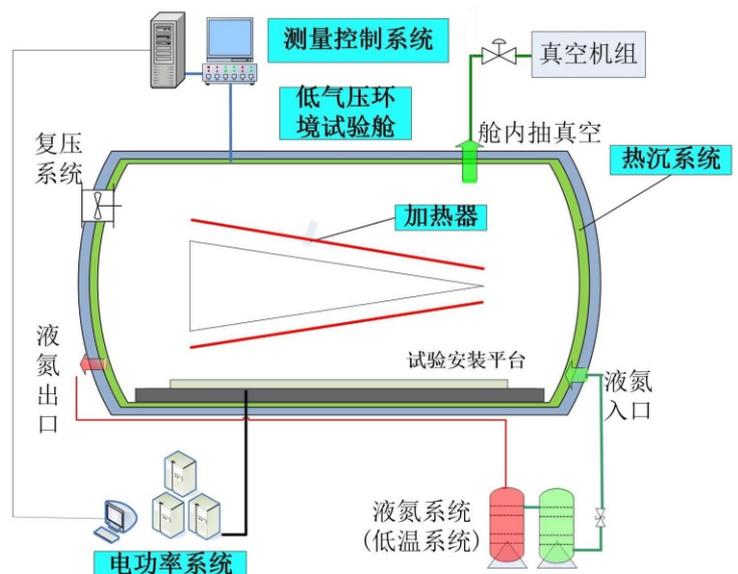


图1 低气压环境下结构热试验系统结构示意图

针对上述存在的问题，本文将基于动态平衡控制技术提出快速和准确的低气压控制解决方案，以期此解决方案不仅可以应用到石英灯和石墨加热器形式的结构热试验系统，也可以在其他形式的结构热真空试验系统中得到使用。

2. 解决方案

针对结构热试验和热真空装置中的真空密闭形式的低气压环境试验舱，真空压力控制的基本原理是基于气体流量动态平衡法，即采用真空压力传感器、高速电动阀门和高精度PID控制器组成的闭环控制回路，使真空舱的进气流量和排气流量达到不同的动态平衡状态，从而快速控制真空压力达到设定值。基于动态平衡法的真空低气压控制系统结构如图2所示。

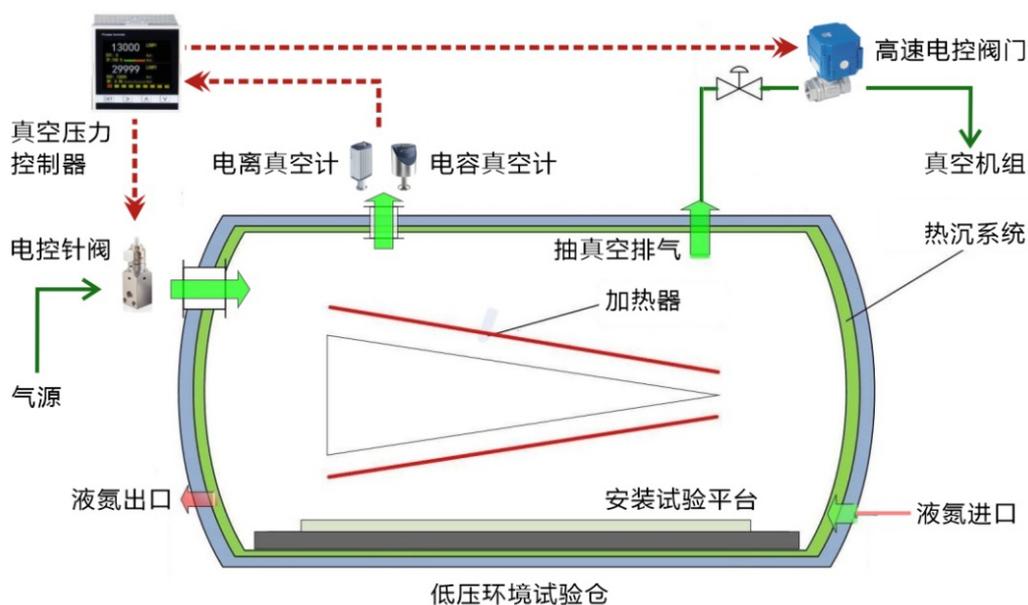


图2 热结构试验低气压控制系统结构示意图

在图2所示的低气压控制系统中，真空计、电控针阀、高速电控阀门和真空压力控制器构成闭环控制系统，它们各自的功能和特点如下：

(1) 根据真空压力范围选择相应的真空计，如对于高精度控制，可以在 $0.1 \sim 1000$ Torr低气压范围内选择薄膜电容真空计；对于在 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-4}$ Torr高真空范围的高精度测量，可选择热阴极真空计；对于 $1 \times 10^{-4} \sim 760$ Torr 范围内全量程真空压力的15%左右精度的测量，可选择皮拉尼真空计等。无论是选择哪一种真空计，要求真空计最好的模拟量信号且信号大小最好与真空压力呈线性关系，以便于控制器转换和直观显示。

(2) 解决方案中采用了具有真空型低漏率NCNV系列的电控针阀，此系列电控针阀响应速度快，具有1s以内的开合时间，并具有磁滞率滴、线性度和重复精度高的特点，采用0~10V模拟电压信号可直接对电控针阀进行快速驱动。电控针阀可与相应的气源连接，如空气、氮气、二氧化碳等高压气瓶，由此可充入不同气体来模拟不同的星际空间气氛环境。可根据试验舱容积大小来选择电控针阀的流量大小以便于实现快速控制。电控针阀可以直接用于低气压的准确控制，如果需要进行超高真空度的控制，还需在电控针阀和气源之间增加一个微流量阀，降低进气流量。

(3) 解决方案中采用了具有真空型低漏率LCV-DS系列的电控球阀，此系列电控球阀响应速度快，具有1s以内的开合时间，电控球阀选择较快的响应速度是为了应对热试验过程中的快速温度变化和大量的气体挥发。此电控球阀可采用0~10V模拟电压信号直接驱动，电控球阀的最大通径为20mm，对于较大空间尺寸的试验仓可安装并联多个电控球阀同步运行以便于快速控制。

(4) 解决方案中的真空压力控制器选择了VPC2021系列超高精度PID控制器，此PID控制器具有24位AD、16位DA和0.01%最小输出百分比，可充分发挥真空计和电控阀门高精度和快速响应的优势。同时此系列PID控制器还具有独立双通道控制、PID自整定、RS485通讯接口、串行控制和计算机软件等高级功能，便于进行调试以及上位机通讯。另外，此真空压力控制器还提供远程设定点功能，可通过外接周期信号发生器实现低气压的自动交变控制。

在解决方案的具体实施过程中，采用VPC2021-2型号的2通道真空压力控制器。控制器的第一通道作为下游排气控制通道，连接电容真空计和电控球阀，进行低气压10Torr~760Torr范围内的真空压力控制。控制器的第二通道作为上游进气控制通道，连接薄膜电容真空计（或其他真空计）和电控针阀，进行高真空 1×10^{-8} Torr~760Torr范围内的控制。

在真空压力控制过程中，具体操作还需要注意以下三点：

(1) 在低气压下游控制模式时，第一通道设置为自动控制状态，第二通道设置为手动状态，即手动设置电控针阀为某一开度值并保持不变，通过第一通道电控球阀开度的自动调节实现低气压范围内的自动控制。

(2) 在高真空上游控制模式时，第二通道设置为自动控制状态，第一通道设置为手动状态，即手动设置电控球阀为100%开度并保持不变，通过第二通道电控针阀开度的自动调节实现高真空范围内的自动控制。

(3) 在低气压交变试验过程中，可将一个周期信号发生器连接到真空压力控制器，通过参数设置可将发生器的周期信号转换为周期变化的低气压设定值，控制器可根据此周期性设定值对真空压力进行自动控制，并形成相应的交变低气压。

3. 总结

综上所述，通过此解决方案所使用的电控针阀、电控球阀和真空压力控制器，结合动态平衡控制方法和上下游控制模式，可彻底解决结构热试验和热真空试验中真空压力的自动控制问题，并可实现很高的控制精度和响应速度，同时还可提供低气压交变控制的强大功能。