

超导重力仪器中的超高精度温度 (0.1mK) 和气压控制解决方案

Ultra-High Precision Temperature (0.1mK) and Pressure Control Solutions in Superconducting Gravity Instruments

摘要：超低重力仪器中要求液氦池温度恒定，为实现小于0.1mK的波动度，气压控制的波动度要小于10Pa。为此本文提出了相应技术方案，核心内容是实现缓冲罐的气压精密控制，采用了双向控制模式，并使用了万分之一精度的气压传感器、电动针阀和PID控制器。

一、问题的提出

超导重力仪器有超导重力仪和超导重力梯度仪，都是用来对重力信号进行精密测量的仪器。超导重力仪器需要在低温条件对极微弱信号进行测量，所以对低温温度恒定有很高的要求，即要求液氦池温度波动在0.1mK以内。

对于液氦池温度的精密控制可以通过控制液氦池内的气压来实现，这就要求气压的测量和控制达到极高水平。本文将针对超导重力仪器中液氦池内气压的高精密控制问题，提出相应的解决方案。此方案的优势是液氦池温度的控制精度主要受压力传感器精度的影响，选择超高精度的压力传感器，并通过精密数控针阀和高精度PID控制器，采用下游抽气流量控制模式，可使液氦温度的波动稳定控制在0.1mK以内。

二、技术方案

液氦温度的精密控制原理是基于液氦饱和蒸气压与对应温度的关系。根据液氦饱和蒸气压与温度的对应关系，液氦温度要控制在4K左右，并要求温度波动小于0.1mK，则要求液氦上部气压控制在100kPa左右时，气压的波动要小于10Pa以内。

为了实现上述气压控制精度，本文提出的技术方案具体包括以下几方面的内容：

(1) 液氦池上部的气压控制可以抽象为一个密闭容器内的压力控制。对于密闭容器的压力控制需要增加一个缓冲罐，通过缓冲罐的压力控制实现液氦池的压力控制，结构如图1所示。

(2) 缓冲罐的压力控制采用了上下游双向控制模式，通过调节进气和抽气流量进行控制。

(3) 整个控制系统包括缓冲罐、气压传感器、PID控制器、数字针阀和真空泵。

(4) 如果气压控制在100kPa并要求波动小于10Pa，则要求气压的测量和控制要有 $10/100k=0.0001$ (万分之一) 的精度，由此需要配备万分之一精度的气压计和PID控制器。

总之，本文所述的技术方案，其控制精度主要受气压传感器和PID控制器精度的限制，结合步进电机驱动的小流量电动针阀，通过高精度传感器和控制器，可以实现超导重力仪液氦温度的精密控制，温度波动可以控制在0.1mK以内，且不受外部环境温度变化影响。

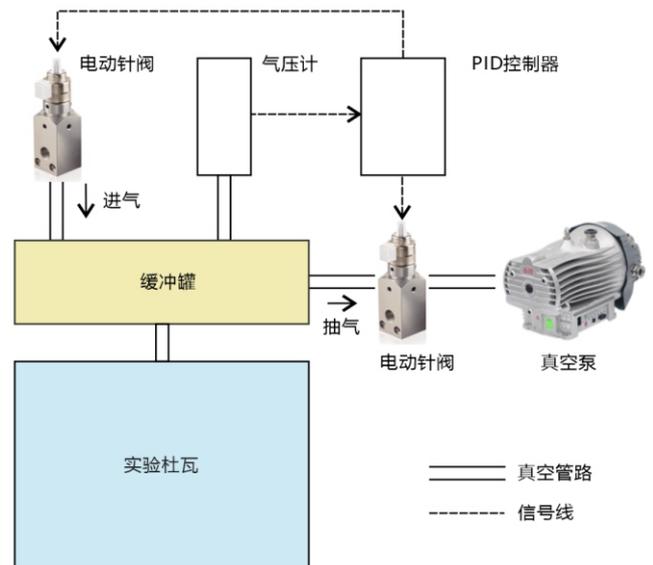


图1 高精度气压控制系统结构示意图