

# 低温超导测试系统中实现高精度 液氦压力控制的解决方案

## Solution of High Precision Liquid Helium Pressure Control in Low Temperature Superconducting Test System

摘要：针对目前两种典型低温超导测试系统中存在的液氦压力控制精度较差的问题，本文提出了相应的解决方案。解决方案分别采用了直接压力控制和流量控制两种技术手段和配套数控阀门，结合24位AD和16位DA的超高精度的PID真空压力控制器和压力传感器，大幅提高了液氦压力控制精度，最终实现低温超导性能的高精度测试。

### 1. 项目概述

各种超导部件如超导磁铁和超导腔体在装机前都需要在低温超导测试系统中对其性能进行测试，为了使超导部件达到低温环境则需要将被测部件浸泡在液氦介质内，并采用低温杜瓦盛装液氦介质。在整个测试过程中，对低温测试系统内的液氦压力要求极高，即要求杜瓦顶部氦气压强（绝对压力）有极好的稳定性，否则会导致测试不稳定，给测试结果带来严重误差。

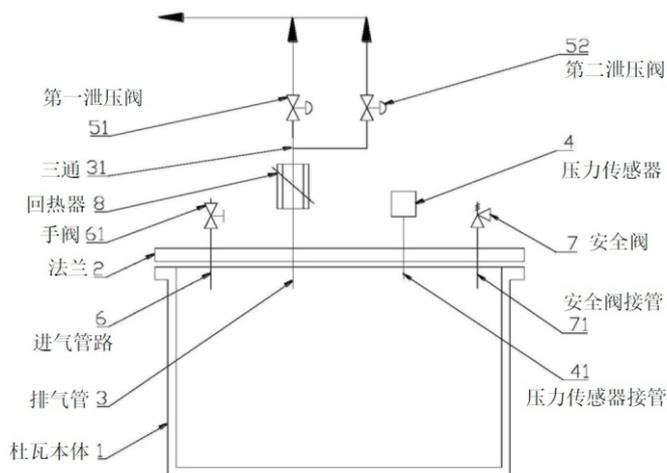


图1 低温超导测试系统液氦压力控制装置

目前国内现有的很多低温超导测试系统都存在液氦压力控制不稳定的严重问题，有些客户提出了相应的技术升级改造要求。

如图1所示的低温超导测试系统中，采用了两个不同口径的第一和第二泄压阀来粗调和细调液氦压力，但这种调节方法的液氦压力只能控制在1.2~1.6Bar范围内，对应4.39~4.74°C范围的液氦温度变化，造成0.35°C的温度波动。目前客户提出要设法将温度波动控制在0.1°C以内或更高的稳定性上，以提高超导部件性能测试精度。

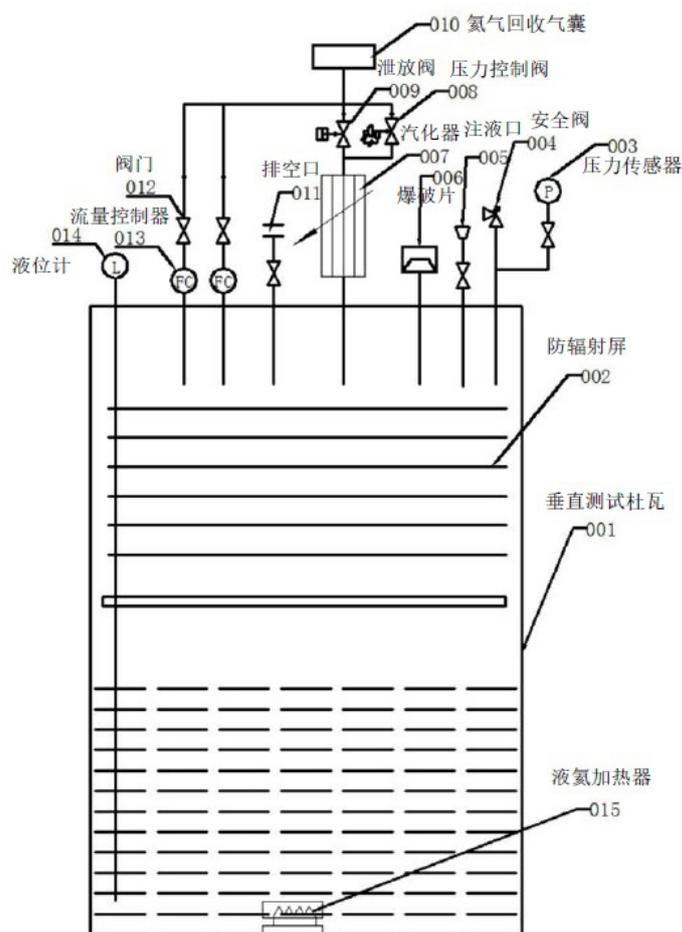


图2 高场超导磁体低温垂直测试系统

如图2所示的高场超导磁体低温垂直测试系统，其压力控制范围1~1.3Bar，尽管在图2所示系统中采用了液氮加热器来改变液氮压力，但由于压力控制阀的调节精密度不够，最终造成压力控制精度远达不到测试要求，客户也提出了技术改造要求。

针对上述两种典型低温超导测试系统中存在的液氮压力控制精度不足的问题，本文将提出相应的解决方案。解决方案将分别采用直接压力控制和流量控制两种技术手段和配套数控阀门，结合超高精度的PID真空压力控制器和压力传感器，可大幅度提高液氮压力控制精度，最终减小低温超导性能测试误差。

## 2. 解决方案

在图1和图2所示的两种典型低温超导测试系统中，它们各自的液氮压力变化起因不同，因此要实现液氮压力准确控制的技术手段也不同。以下是解决方案中对应的两种不同技术途径。

### (1) 直接压力调节法

在图1所示的低温超导测试系统中，造成液氮蒸发的因素并不可控，只能通过调节液氮上方的氮气压力来使得测试系统保持稳定。因此，为了实现液氮上方的压强控制，解决方案采用了直接压力调节法，如图3所示，即采用数控压力控制阀代替图1中的第一和第二泄压阀。此压力控制阀与高精度PID控制器和压力传感器构成闭环控制回路，实现自动泄压和高精度压力控制。

数控压力控制阀是一种数控正压减压控制阀，正好可以满足低温超导测试系统的微正压控制需求。通过氮气源和减压阀提供的驱动压力，可在控制阀出口处实现高精度的压力控制，同时还保持很小的漏气以节省氮气。

另外，此数控压力控制阀具有很高的控制精度，结合高精度的压力传感器和PID真空压力控制器，可将液氮压力控制在0.1%的高精度水平。

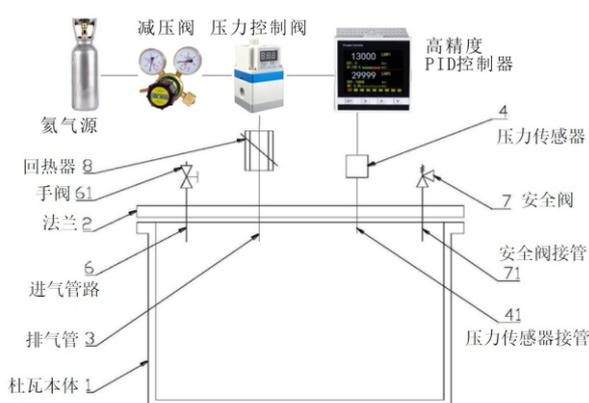


图3 直接压力调节法控制装置结构

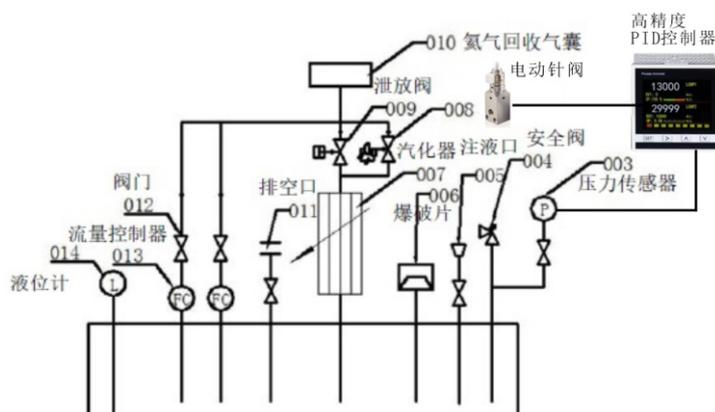


图4 流量调节法控制装置结构

### (2) 流量调节法

在图2所示的低温超低温测试系统中，其不同之处之一是具有液氮加热器，即通过液氮加热器和压力控制阀构成的控制回路可进行不同液氮压力的控制，由此实现不同液氮温度的控制。

为实现不同液氮压力的精密控制，解决方案在此采用了流量调节法。如图4所示，解决方案采用了电动针阀作为图2中的压力控制阀，电动针阀与双通道高精度PID控制器、压力传感器和液氮加热器构成闭环控制回路，可以按照任意设定值进行高精度的压力控制。

电动针阀是一种数控的微小流量调节阀，可通过PID压力控制器自动调节针阀开度，流出的液氮可通向液氮回收气囊。电动针阀同样具有很高的控制精度，结合高精度的压力传感器和PID真空压力控制器，同样可将液氮压力控制在0.1%的高精度水平。

### 3. 总结

通过上述解决方案的技术手段，可实现低温超低测试系统中液氮压力的准确控制，控制精度最高可达 $\pm 0.1\%$ 。

按照绝对压力进行计算，饱和蒸气压为1.2Bar时，液氮温度为4.4K。由此，如果压力控制精度为 $\pm 0.1\%$ ，液氮压力的波动范围为 $\pm 1.2\text{mBar}$ （相当于绝对压力 $\pm 120\text{Pa}$ ），对应的液氮温度波动范围为4.4mK，即所控的液氮温度为 $4.4 \pm 0.0044\text{K}$ 。

由此可见，通过本文所述的解决方案，仅通过采用工业级别较低造价的PID真空压力控制器和压力传感器，结合数控压力控制阀和电动针阀，就可实现很高精度的液氮压力控制，温度控制精度可达到mK量级，完全能满足绝大多数低温超导测试系统的需要。