

# 电动针阀和双通道控制器在真空冷冻干燥高精度压力控制中的应用

Application of Electric Needle Valve and Dual-channel Controller in High Precision Pressure Control of Vacuum Freeze Drying

**摘要：**目前真空冷冻干燥过程中已普遍使用了电容压力计，使得与电容压力计相配套的压力控制器和电动进气调节阀这两个影响压力控制精度和重复性的主要环节显着尤为突出。为解决控制精度问题，本文介绍了国产最新型的2通道24位高精度PID压力控制器和步进电机驱动电动针阀的功能、技术指标及其应用。经试验验证，上游控制模式中使用电动针阀和高精度控制器可将压力精确控制在 $\pm 1\%$ 以内，并且此控制器还可以同时用于冷冻干燥过程中皮拉尼真空计的监控，以进行初次冻干终点的自动判断。

## 一、问题的提出

压力控制是真空冻干过程中的一个重要工艺过程，其控制精度严重影响产品质量，对于一些敏感产品的冷冻干燥尤为重要。因此，为使冷冻干燥过程可靠且可重复地进行，必须在干燥室内准确、重复地测量和控制压力，这是考察冷冻干燥硬件设备能力的重要指标之一。同时因为一次干燥时的压力或真空度，直接影响产品升华界面温度，因此准确平稳的控制压力，对于一次干燥过程至关重要。但在实际真空冷冻干燥过程中，在准确压力控制方面目前国内还存在以下问题：

(1) 压力控制器不匹配问题：尽管冷冻干燥工艺和设备都配备了精度较高的电容压力计，其精度可达到满量程的0.2%~0.5%，但目前国内大多配套采用PLC进行电容压力计直流电压信号的测量和控制，PLC的A/D和D/A转换精度明显不够，严重影响压力测量和控制精度。A/D和D/A转换精度至少要达到16位才能满足冷冻干燥过程的需要。

(2) 进气控制阀不匹配问题：对于冷冻干燥中的真空压力控制，其压力恒定基本都在几帕量级，因此一般都采用上游进气控制模式，即在真空泵抽速一定的情况下，通过电动调节阀增加进气流量以降低压力，减少进气流量以增加压力。但目前国内普遍还在使用磁滞很大的电磁阀来进行调节，严重影响压力控制精度和重复性，而目前国际上很多已经开始使用步进电机驱动的低磁滞电动调节阀。

为解决上述冷冻干燥过程中压力控制存在的问题，本文将介绍国产最新型的2通道24位高精度PID压力控制器、电动针阀的功能、技术指标及其应用。经试验考核和具体应用的验证，上游控制模式中使用电动针阀和高精度PID压力控制器可将压力精确控制在 $\pm 1\%$ 以内，并且2通道PID控制器还可以同时用于冷冻干燥过程中皮拉尼真空计的监控和记录。

## 二、国产2通道24位高精度PID压力控制器

为充分利用电容压力计的测量精度，控制器的数据采集和控制至少需要16位以上的模数和数模转化器。目前我们已经开发出VPC-2021系列高精度24位通用性PID控制器，如图1所示。此系列PID控制器功能强大远超国外产品，但价格只有国外产品的八分之一。其主要性能指标如下：



图1 国产VPC-2021系列温度/压力控制器

- (1) 精度：24位A/D，16位D/A。
- (2) 多通道：独立1通道或2通道。2通道可实现双传感器同时测量及控制。
- (3) 多种输出参数：47种（热电偶、热电阻、直流电压）输入信号，可实现不同参量的同时测试、显示和控制。
- (4) 多功能：正向、反向、正反双向控制。
- (5) PID程序控制：改进型PID算法，支持PV微分和微分先行控制。可存储20组分组PID，支持20条程序曲线（每条50段）。
- (6) 通讯：两线制RS485，标准MODBUSRTU 通讯协议。

在冷冻干燥的初级冻干终点判断中，VPC-2021系列中的2通道控制器可同时接入电容压力计和皮拉尼压力计，其中电容压力计用作真空压力控制，皮拉尼计用来监视冻干过程中水汽的变化，当两个真空计的差值消失时则认为初级冻干过程结束。整个过程的典型变化曲线如图2所示。

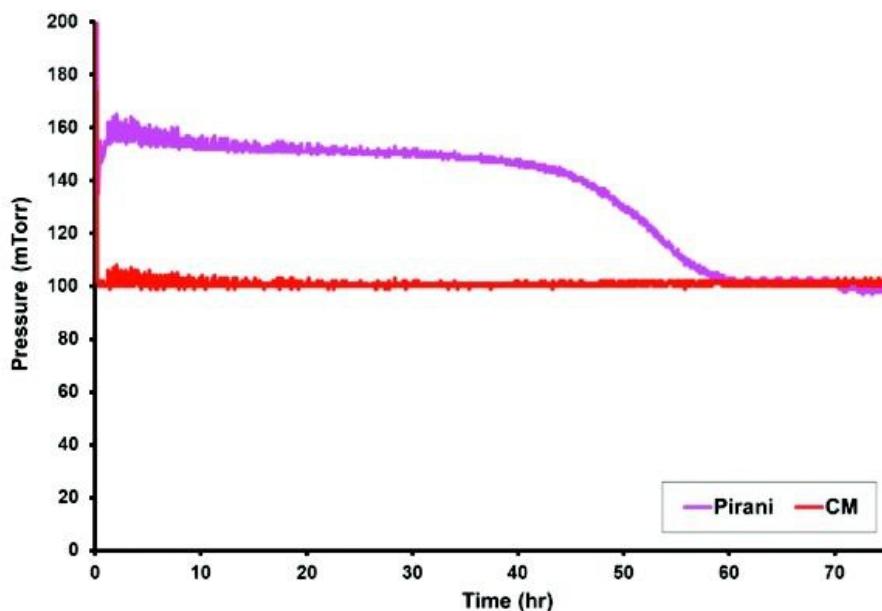


图2. 初级干燥过程中的典型电容压力计和皮拉尼压力计的测量曲线

### 三、国产步进电机驱动电子针阀

为实现进气阀的高精度调节，我们在针阀基础上采用数控步进电机开发了一系列不同流量的电子针阀，其磁滞远小于电磁阀，如图3所示，价格只有国外产品的三分之一，详细技术指标如图4所示。



图3 国产NCV系列电子针阀

型号	NCNV-20	NCNV-120	NCNV-300	NCNV-1000		
阀门类型	针阀					
阀芯节流内径	0.9mm	2.25mm	2.75mm	4.10mm		
驱动器	双极式步进电机控制					
响应时间	0.8秒 (全开到全关)					
接口口径	G 1/8"		G 3/8"			
流体	惰性气体和液体					
接触材料	不锈钢					
压力范围	-1 ~ 7 bar		-1 ~ 5 bar			
最大流量	50L/min @7bar	240L/min @7bar	290L/min @7bar	600L/min @7bar		
线性度	±2%	±0.1~1%	±0.2~5%	±11%		
重复精度 (全量程)	±0.1%					
流量分辨率 (单步长)	0.1L/min	0.1~0.2L/min	0.2~0.75L/min	1L/min		
位移分辨率 (单步长)	12.7 um	12.7 um	25.4 um	25.4 um		
使用温度范围	0~84°C					
密封	标准FKM或其他密封件可选					
控制信号	直流: 0~10V (或 4~20mA)					
工作电源	直流: 24V (≤12W)					

图4 国产NCV系列电子针阀技术指标

### 四、国产PID控制器和电子针阀考核试验

考核试验采用了1Torr量程的电容压力计，电子针阀作为进气阀以上游模式进行控制试验。首先开启真空泵后使其全速抽气，然后在68Pa左右对PID控制器进行PID参数自整定。自整定完成后，分别对12、27、40、53、67、80、93和107Pa共8个设定点进行了控制，整个控制过程中真空调度的变化如图5所示。

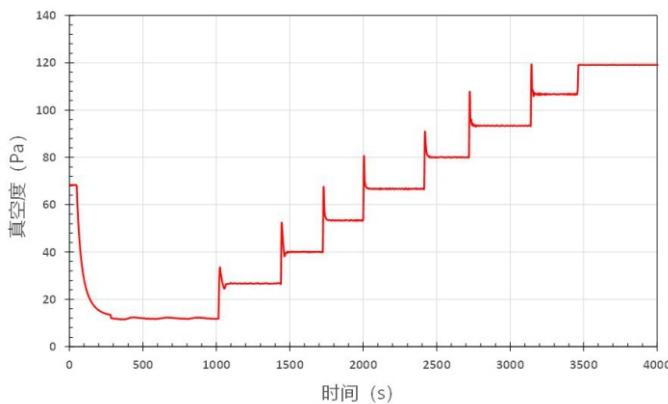


图5 多点压力控制考核试验曲线

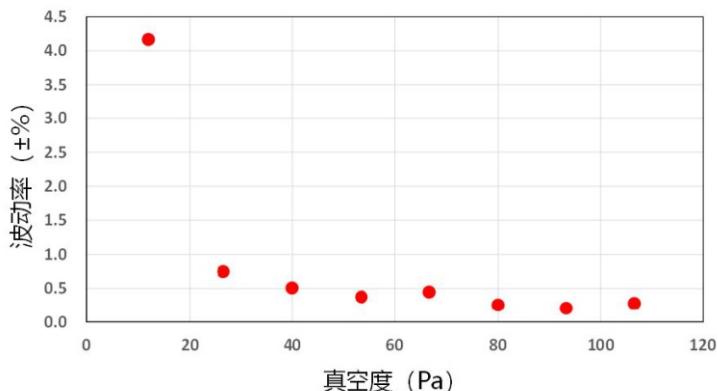


图6. 多点压力恒定控制波动率

将图5曲线的控制效果以波动率来表达，则得到如图6所示的不同真空中压下的波动率。从图6可以看出，整个压力范围内只有在12Pa控制时波动率大于1%，显然将68Pa下自整定得到的PID参数应用于12Pa压力控制并不太合适，还需要进行单独的PID参数自整定。