

表压0.1~0.6MPa范围内0.1%超高精度 压力控制解决方案及其考核试验结果

0.1% Ultra-High-Precision Pressure Control Solution in the Range of Gauge Pressure 0.1~0.6MPa and Its Assessment Test Results

摘要：为满足工业应用中对0.1%超高精度压力控制的需要，以及替代艾默生公司电子压力控制器TESCOM ER5000系列产品，本文介绍了相应的解决方案，同时还介绍了基于此解决方案搭建的考核试验装置以及测试结果，展示了此解决方案可实现0.1%超高精度的压力控制，特别是在较高压力区间（0.2~0.6MPa）甚至可以达到0.05%的控制精度。

一、概述

为满足工业应用中对0.1%超高精度压力控制的需要，以及替代艾默生公司电子压力控制器TESCOM Er5000系列产品，我们提出了相应的解决方案。本文对解决方案进行了详细介绍，同时还介绍了基于解决方案搭建的考核试验装置以及测试结果，以展示此解决方案对0.1%超高精度压力控制的实现效果。

二、解决方案

解决方案的核心是基于电气比例阀，而电气比例阀的压力控制精度普遍不高，因此通过外接更高精度的压力传感器和PID控制器，从而实现超高精度的压力控制。

为了验证此解决方案的可行性，特别是验证超高精度PID控制器对精密控制的影响，我们进行了相应的考核试验，考核试验装置结构如图1所示。

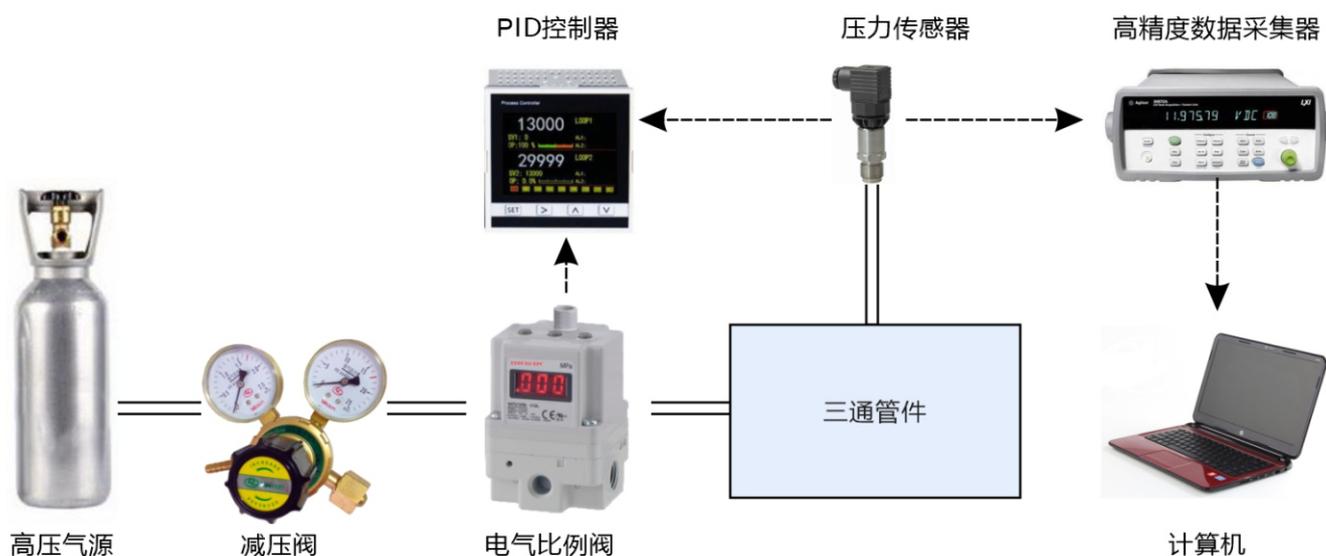


图1 超高精度压力控制考核试验装置结构示意图

考核试验装置主要包括以下几部分内容：

- (1) 压力传感器：精度0.05%，量程为绝压0.1~1MPa，对应电压输出为0~10V。
- (2) 电气比例阀：精度0.25%，量程为绝压0.1~1MPa，控制电压为0~10V。

(3) PID控制器：ADC为24位，DAC为16位，ADC量程为0~10V，DAC量程为0~10V。

(4) 多通道数据采集器：安捷伦34972A，五位半/六位半采集。

(5) 三通管件：用作压力容器，并连接压力传感器和电器比例阀。

(6) 计算机：用于与PID控制器和数据采集器进行通讯，并安装和运行相应的软件程序对PID控制器和数据采集器进行控制、数据采集、曲线显示和数据存储。

按照上述解决方案搭建的考核试验装置如图2所示。

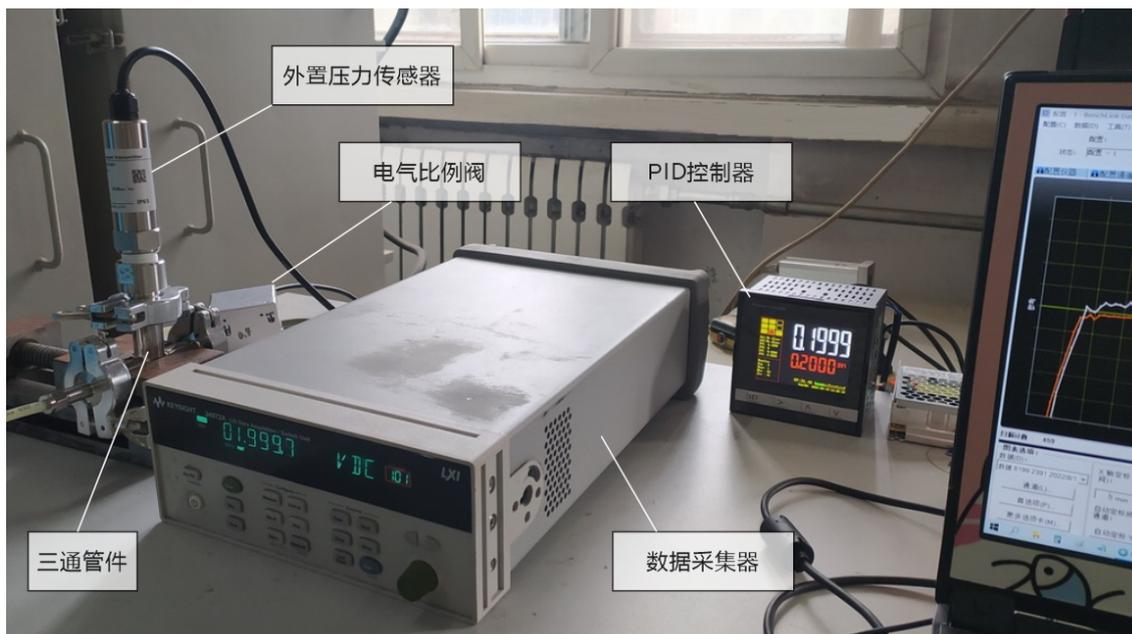


图2 超高精度压力控制考核试验装置

根据我们前期进行的考核试验以及控制过程数据分析，我们认为工业用集成式PID控制器仪表要实现0.1%的控制精度，需要满足以下几方面的技术指标：

- (1) 外置传感器要有0.1%以上的超高精度。
- (2) 外置执行器也需要具有较高的精度，但不一定要求达到0.1%的超高精度。
- (3) PID控制器的ADC位数至少需要达到16位，最佳是24位。

(4) PID控制器的浮点运算要保证输出百分比具有0.01%~0.05%的调节能力。

(5) PID控制器的DAC位数至少需要达到14位，最佳是16位。

从上述对技术指标的要求以及试验结果可以看出，为了实现超高精度压力控制，在外置压力传感器、电气比例阀和PID控制器ADC满足精度要求的前提下，PID控制器的DAC控制输出和浮点运算必须也要具有足够的精度。为此，我们采用了16位输出精度的PID控制器，并相应提高了浮点运算精度。与此改进对应的就是将控制输出的最小百分比从0.1%提高到0.01%，如图3中的红色圆圈所示，将控制输出百分比从小数点后一位提高到两位。



图3 超高精度PID控制器屏幕显示

三、考核试验结果

通过上述搭建完成的试验装置，在表压0.1~0.6MPa范围内进行了压力恒定控制试验。压力设定点分别为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5和0.6MPa，整个试验过程的测试曲线如图4所示。

为便于观察PID控制器的输出百分比和控制电压对压力恒定控制的影响以及对应关系，图4中还显示了所采集到的PID控制器的控制电压信号。

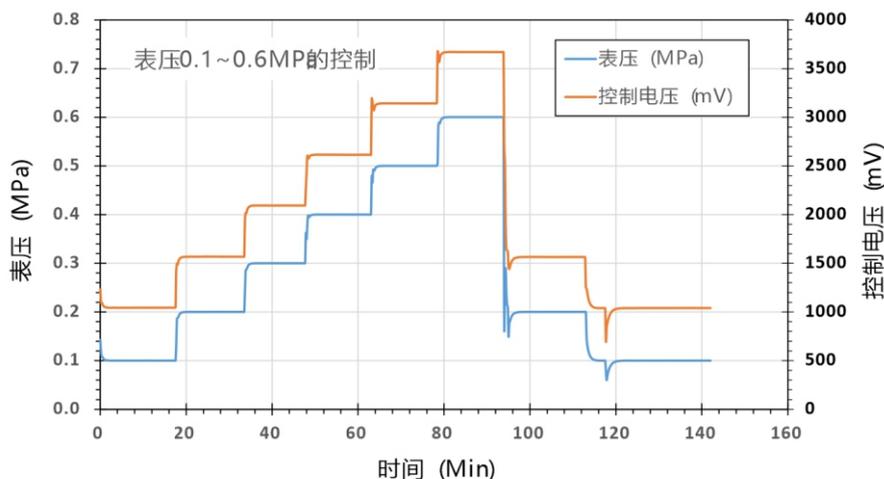


图4 超高精度压力控制考核试验曲线

为直观和准确评价上述多个压力设定点的控制精度，将图4所示的试验结果在各个压力控制点上单独的显示描述，所对应的六个压力控制点下的控制曲线如图5所示。

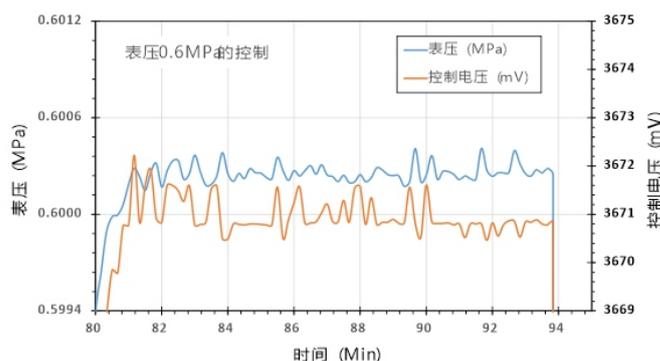
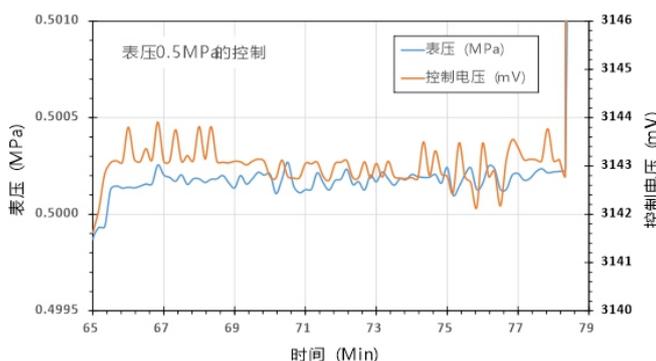
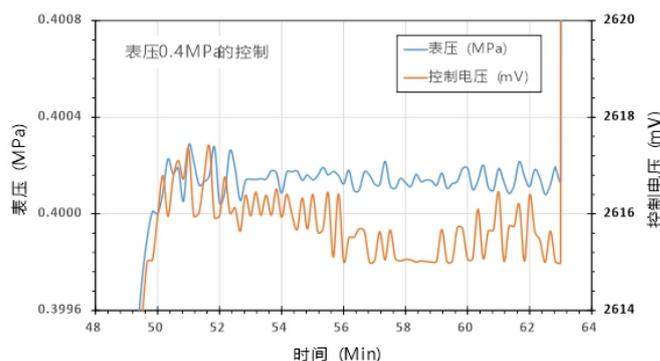
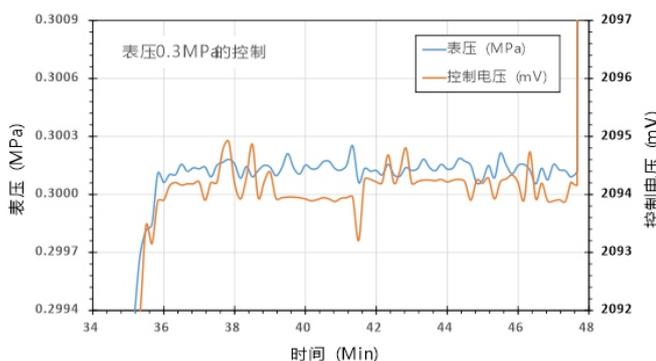
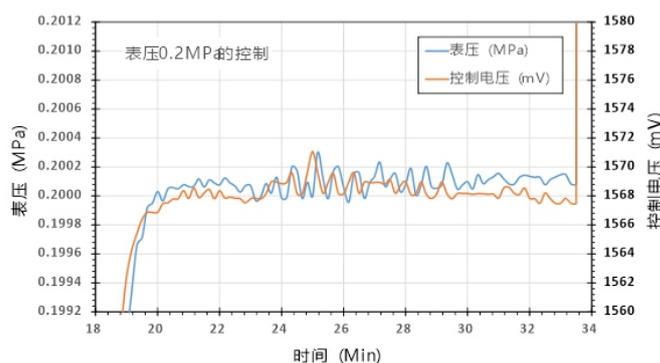
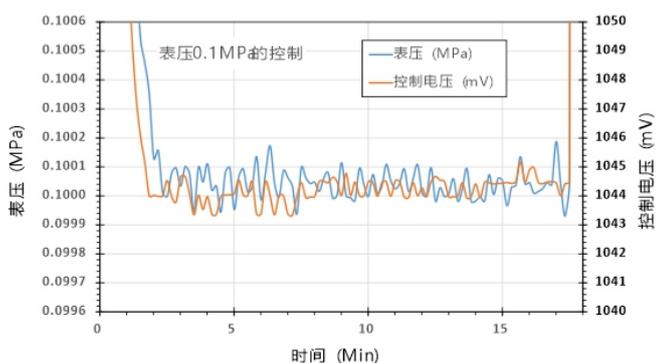


图5 不同压力设定点恒定控制时的压力和控制电压试验曲线

图5所示的考核试验曲线是仅通过控制器PID参数自整定后进行控制得到结果，从这些考核结果可以得出以下结论：

- (1) 在0.1~0.6MPa整个压力范围内，波动率都可以控制在0.1%范围内。
- (2) 特别是在0.3~0.6MPa的较高压力范围内，波动率甚至可以稳定控制在0.05%以内。
- (3) 观察整个压力范围的控制过程，可以发现在压力控制稳定后，控制器输出百分比的变化幅度基本都是 $\pm 0.01\%$ 。由此说明采用16位DAC和增加浮点运算精度对提高控制精度的效果非常明显。
- (4) 在低量程0.1~0.2MPa压力范围内，采用自整定PID参数进行控制可以达到0.1%的波动率，但如果进行控制参数的进一步优化，还可以进一步提高控制精度。

基于上述结论，我们对PID控制器参数进行了简单优化，在低量程0.1~0.2MPa压力范围内从新进行了恒压控制，得到的波动曲线如图6所示。

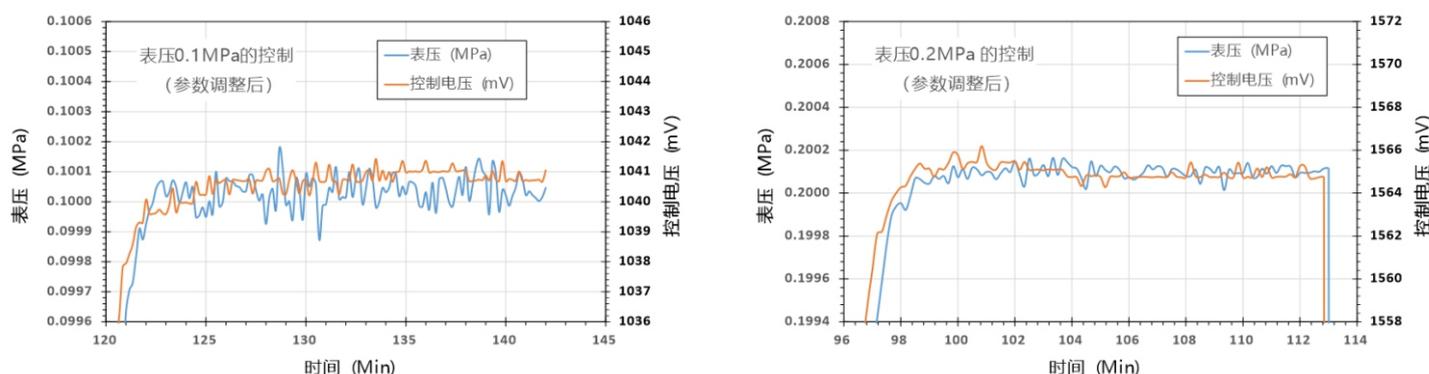


图6 控制参数调整后0.1和0.2MPa恒定控制时的压力和控制电压试验曲线

从图6试验曲线可以看出，优化控制参数后，0.2MPa设定点进行控制的波动率有效降低到了0.05%，而0.1MPa设定点进行控制的波动率还基本维持在0.1%不变，甚至偶尔还会大于0.1%。但我们通过观察控制电压曲线可以发现，在0.1MPa设定点恒压控制过程中，控制电压的波动率基本都在0.05%以内，压力波动反而变化到0.1%可能是其他外部因素的影响，如环境温度、压力传感器和电气比例阀精度的影响，毕竟在0.1MPa压力时，三通管件的内部压力更容易受环境温度的影响，而且此0.1MPa的压力也处于压力传感器和电气比例阀精度较差的区间。

四、结论

通过上述解决方案和考核试验结果，证明了此解决方案完全能够实现0.1%超高精度的压力控制，具体结论如下：

- (1) 外置超高精度的压力传感器和PID控制器，完全可以有效提高电气比例阀的压力控制精度，可实现0.1%超高精度的压力控制。
- (2) 完全达到了艾默生公司TESCOM ER5000压力调节器0.1%的技术指标，特别是在0.2MPa以上的压力范围内，甚至可以达到0.05%的更高控制精度。
- (3) 超高精度0.1%的压力控制过程中，PID控制器的测量精度、控制精度和浮点运算是决定整体控制精度的关键技术指标，本文所述解决方案中采用了24位ADC、16位DAC和高精度浮点运算0.01%的输出百分比，证明完全可以满足超高精度的控制需要。
- (4) 通过本文的解决方案和试验验证，证明了工业用0.1%超高精度PID控制器完全可以在较低造价的同时，同样能实现超高精度控制，并同时可以用来控制工业领域中的其他参数。