

工业应用中0.1%超高精度PID控制器的实现及其关键指标分析

Realization of 0.1% Ultra-high Precision PID Controller in Industry and Analysis of Its Key Parameters

摘要：本文主要针对在工业应用中使用的集成式PID控制器仪表，从工程实际应用角度，介绍实现优于0.1%的超高精度控制以及所涉及的几项关键技术指标，以此来帮助超高精度PID控制器的选型和工业应用中实现超高精度的工艺过程控制。

一、背景介绍

在工业领域中，往往会需要对温度、真空压力和流量等工艺参数进行超高精度的控制。工业领域中的控制精度划分为高精度（1%）和超高精度（0.1%），而在高等级实验室和计量校准中往往会需要比0.05%更高的控制精度。

对于一个完整的PID控制系统，典型的控制回路是一个闭环形式，如图1所示。

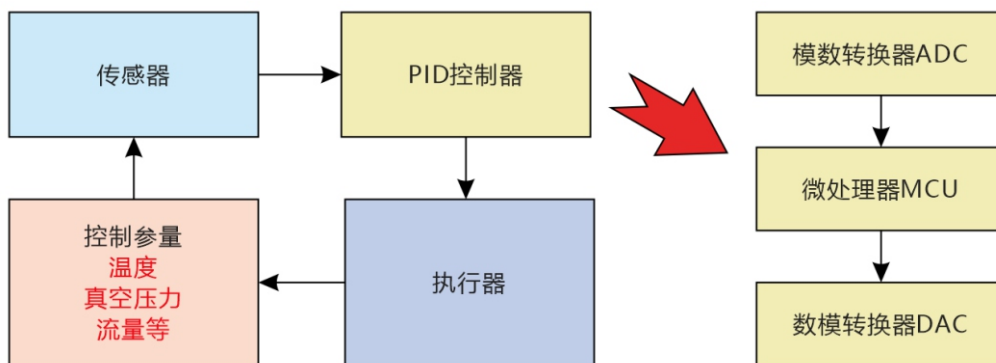


图1 典型闭环形式PID控制系统结构及其PID控制器结构示意图

如图1所示，在闭环形式的PID控制系统中，传感器和执行器基本都是外置形式，可根据不同的控制参量和精度要求进行选配。在工业应用中，基本都要求PID控制器是独立的控制仪表，即工业用PID控制器基本都集成了如图1所示的模数转换器ADC、微控制器MCU、数模转换器DAC和显示器等部件，并设有连接外置传感器、执行器和通讯等功能的接口。从工业应用中集成式的PID控制器结构可以看出，PID控制器的控制精度主要由ADC、MCU和DAC的精度所决定。

在一些更高精度的测控场合，如计量校准领域，为了进一步提高PID控制器的精度，一般会采用分立结构的PID控制系统，即将图1中PID控制器的模数转换器ADC、微控制器MCU、数模转换器DAC采用更高精度的专用仪器来代替，如模数转换器ADC采用六位半（甚至七位半）数字电压表来代替、微控制器MCU采用计算机或单片机来代替、数模转换器DAC采用六位半的数控源表来代替。尽管这样构件的PID控制系统可以有效的提高控制精度，但整体造价和体积都大幅度的提升，并不适合工业应用中的控制。

本文主要针对在工业应用中使用的集成式PID控制器仪表，从工程应用角度介绍实现0.1%超高精度控制所涉及的几项关键技术指标，以此有助于工业应用中超高精度工艺控制过程的实现和PID控制器的选型。

二、超高精度PID控制器中的关键技术指标分析

从图1所示的PID控制器结构可以看出，构成PID控制器的核心部件是ADC、MCU和DAC三部分。为了实现PID控制器具有优于0.1%的超高精度控制，必须要求这三个部件达到相应的技术指标和功能要求，以分别实现高精度的测量、运算和控制功能。

(1) 测量精度

PID控制器的测量精度，主要是指控制器对外置传感器输出信号的采集精度，即模数转换器ADC的转换精度。一般ADC的精度分为8位、12位、16位和24位等几个档次，位数越高，采集精度越高。因此，PID控制器测量精度的关键技术指标，就是此ADC位数。

我们以PID控制器信号输入量程为0~10V的直流电压为例，图2列出了不同ADC位数所对应的最小可测电压。

ADC位数 (bit)	最小可测电压 (mV)
8	3.906E+01
10	9.766E+00
12	2.441E+00
14	6.104E-01
16	1.526E-01
18	3.815E-02
20	9.537E-03
22	2.384E-03
24	5.960E-04

图2 不同ADC位数对应的最小可测电压值 (mV)

模拟量信号 (mV)	0.1%测量精度的电压值 (mV)	所需ADC位数 (bit)
10000	1.00E+01	10
5000	5.00E+00	12
1000	1.00E+00	14
500	5.00E-01	16
100	1.00E-01	18
50	5.00E-02	18
10	1.00E-02	20
5	5.00E-03	22
1	1.00E-03	24

图3 不同电压值达到0.1%测量精度所需的ADC位数

根据图2所示的不同ADC位数所具有的最小可测电压能力，可计算出针对不同传感器信号电压值要实现0.1%测量精度需要配备的ADC位数，如图3所示。

另外，ADC位数的选择，可以根据实际控制的精度要求来确定，满足技术要求极可，毕竟AD位数越高，精度越高，但PID控制器仪表的价格越贵，且相应的采集速度也就越慢（一般而言，精度和速度是一对矛盾）。

(2) 控制精度

PID控制器的控制精度，主要是指控制器对外部执行器的模拟量输出精度，即数模转换器DAC的转换精度。与ADC一样，一般DAC的精度分为8位、12位和16位等几个档次，位数越高，采集精度越高。由此，DAC的位数也是PID控制器的关键技术指标。

同样，图2所示的不同ADC位数对应的最小可测电压值同样可以用来描述不同DAC位数所能输出的最小控制电压值。

(3) 浮点运算精度

测试精度和控制精度涉及的是PID控制器硬件部分的精度，要真正保证PID控制器整体控制精度，还包括控制器所用的微处理器单元MCU的软件计算精度，即所谓的浮点运算精度。如PID控制器中的输出百分比，还是以图2所示为例，8位浮点运算时的最小输出百分比为1%，10位和12位浮点运算的最小输出百分比为0.1%，如果要实现总的控制精度优于0.1%，势必要求采用14位和16位的浮点运算使得最小输出百分比为0.01%。也就是说，浮点运算位数越多，输出百分比越小，控制输出量越精细，相应的控制精度就越高。

三、压力控制案例分析

下面我们以一个压力控制案例来演示DAC控制精度对控制效果的影响。

在此案例中，我们的实验目的是精密控制0~6bar（表压）范围内的压力，实现0.1%的控制精度。整个实验装置的结构如图4所示。

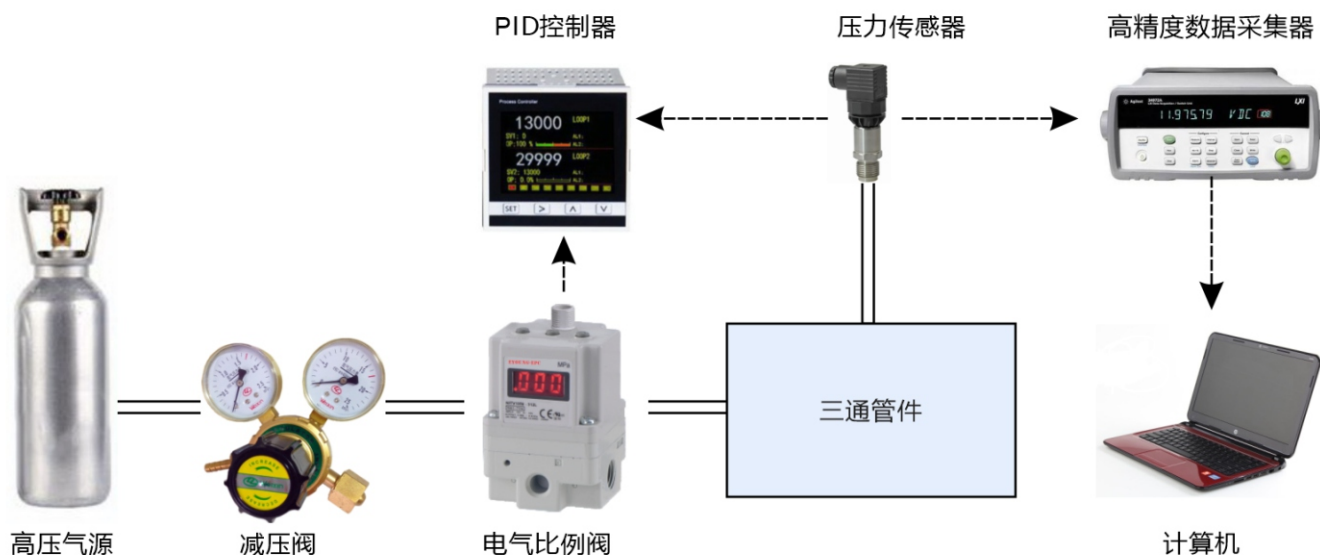


图4 超高精度压力控制考核实验装置结构示意图

为了实现0.1%的压力控制精度，我们在图4所示的压力控制实验装置中进行了以下配备：

- (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12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。

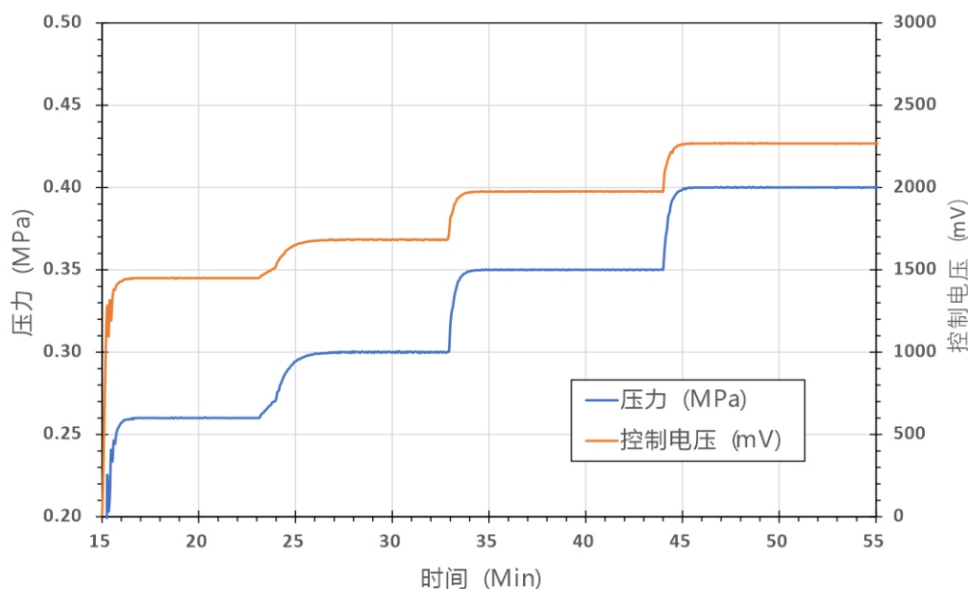


图5 四个压力设定点的恒定控制试验曲线

基于以上配置，在图4所示的实验装置上对0.26、0.3、0.35和0.4 MPa的四个压力设定点进行了恒定控制试验。在进行PID自整定后，得到以上各个压力设定点下的控制试验曲线，如图5所示。

为了对控制精度的影响因素有直观的了解，采用高精度的34972A多通道数据采集器分别对PID控制器的ADC测量端和DAC控制端进行测量，以直观了解控制压力和控制信号的微小变化及其波动性。

为了直观了解四个压力设定点下的压力控制精度，对图5所示的测量曲线进行局部放大，四个压力控制点处的放大结果如图6所示。

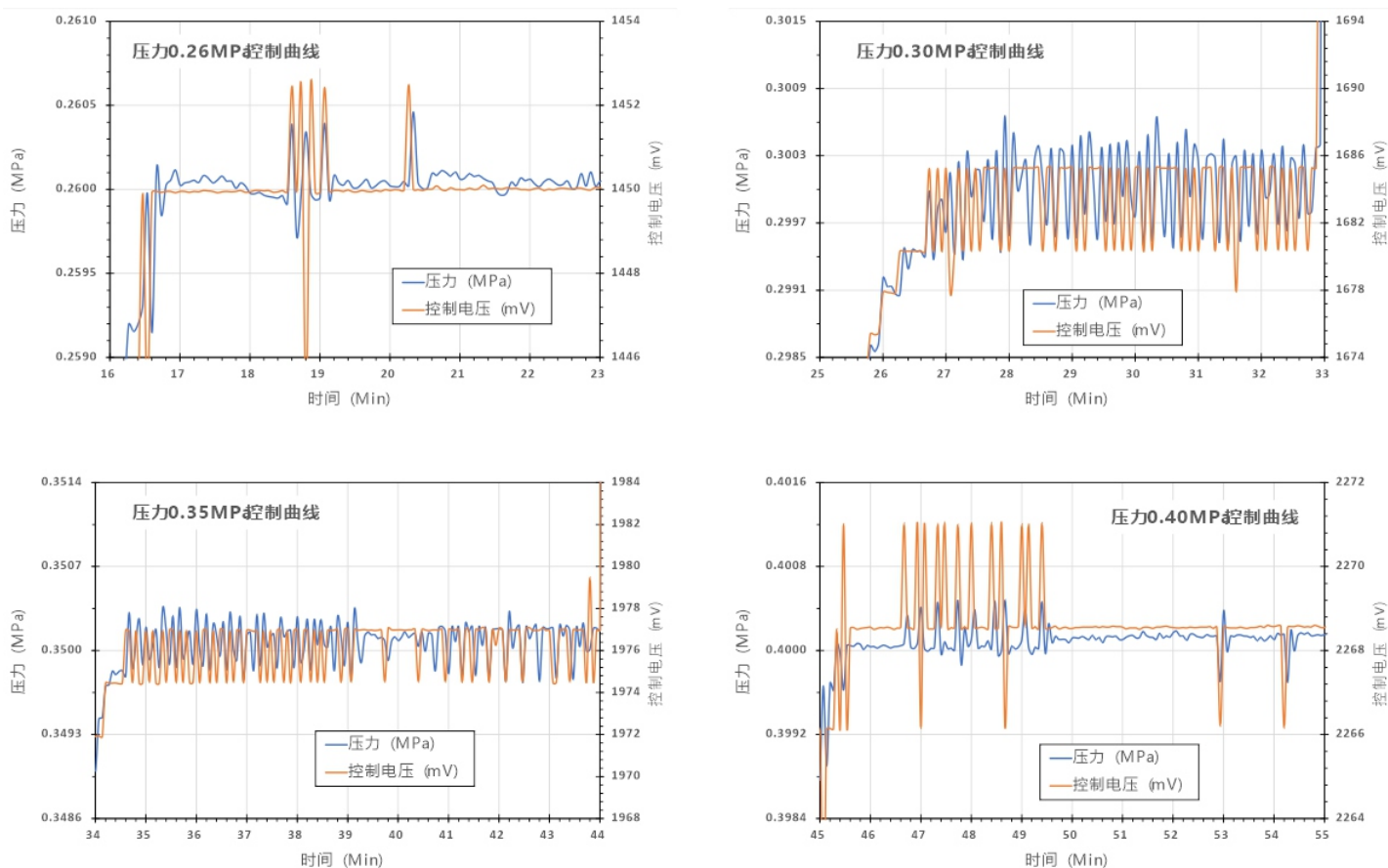


图6 四个压力恒定控制和控制电压波动变化试验结果

从上述短时间考核试验结果，可以发现以下现象：

(1) 在全量程范围内，压力恒定控制的波动性完全可以控制在 $\pm 0.2\%$ 以内，但要将其波动性控制在 0.1% 以内则非常勉强。

(2) 在大部分控制时间内，压力恒定波动性总是大于 0.1% 的主要原因是PID控制器12位DAC的控制精度还是偏低。在压力稳定后，PID控制器的输出百分比基本也趋于恒定，其恒定后的变化量为 0.1% 。而此 0.1% 的恒定控制输出百分比的变化量，对应不同控制压力点时呈现出的控制电压变化量为 $2\sim 5\text{mV}$ 。

四、结论

通过上述分析和压力控制案例的实验验证，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 $0.01\%\sim 0.05\%$ 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。