MKS集成式压力控制器的技术分析及其国产替代解决方案

Technical Analysis of MKS Itegrated Pressure Controller and Its Domestic Alternative Solution

摘要：目前的MKS系列集成式压力控制器本质上是一种流量调节和测量装置，无法直接用来进行准确的压力控制，而且MKS压力控制器还存在测量精度不高、压力控制范围有限和对工作介质洁净度要求很高的不足。为此，为了弥补这些不足，特别是为了实现国产替代，本文为提出了相应的解决方案，特别是针对不同的应用场景提出一系列的国产替代的配套解决方案，这些解决方案已经在推广使用并可实现满意的压力控制效果。

1. MKS集成式压力控制器概述

1.1 种类和功能分析

真空压力控制器在众多领域内有着极其广泛的应用，美国MKS公司在10~5000Torr的绝对压力范围内（从真空到正压）有一系列的相应产品，这些产品的主要技术指标如图1所示。

指标 \ 型号	PPCA	GPCA	PPCMA	GPCMA	PDPCA	DPC	640B/641B	649B
压力计	电容	扩散硅	电容	扩散硅	电容	电容	电容	电容
控制器	有	有	有	有	双	双	有	有
比例阀形式	单	单	单	单	双	双	单	单
流量计	无	无	有	有	双	双	无	有
软件	有	有	有	有	有	有	无	无
绝压范围 Torr	10~1000	500~5000	5~1000	500~5000	20~100	10~100	10,100,1000, 3000,5000	10,20,50,100, 1000
压力测量精度	读数的 ±0.5%	压力分辨率 0.1Torr	压力分辨率 0.1Torr	读数的 ±0.5%	读数的 ±0.5%	读数的 ±0.5%	读数的 ±0.5%	读数的 ±0.5%
压力控制精度	±1.0% 读数 (≥10% 满量程) ±0.2% 满量程 (<10% 满量程)	±1.0% 读数(≥ 10% 满量程) ±0.2% 满量程 (<10% 满量程)	±1.0% 读数(≥ 10% 满量程) ±0.2% 满量程 (<10% 满量程)	±1.0%读数 >20%满量程 ±0.2% 满量程 (<20%满量程)	±1.0% 设定点	±1.0% 设定点	±0.2% 满量程	±0.2% 满量程
控制方式	上游或下游	上游或游	下游	下游	下游	下游	上游或下游	下游
流速 Sccm (孔径)	50,200,1000, 5000, 10000, 20000, 30000, 50000	50,200,1000, 5000, 10000, 20000, 30000, 50000	5,10,20, 50,100,200, 500,1000, 2000,5000	5,10,20,50,100, 200,500,1000, 2000,5000, 10000,20000, 30000,50000	20,50,100	10,20, 50,100	50,200,1000, 5000,10000, 20000,50000	50,200, 1000,5000

图1 MKS集成式压力控制器的各种型号和主要技术指标

从图1所示的技术指标可以看出各种MKS压力控制器的相互关系及其各自的功能特点，用关系图（图2）进行更直观的描述，主要包括以下几方面的内容：

（1）如果按照产品推出先后来进行分类，所有MKS集成式压力控制器基本可以分为两个大类，一类是常规型号，主要包括PPCA、GPCA、PPCMA、GPCMA、PDPCA和DPC；另一类是根据新技术迭代和应用发展情况推出的新型号产品，主要包括640B、641B和649B。为了主观的区分这两类压力控制器，常规型号的外观主色为蓝色，而新型号的外观主色为白色。

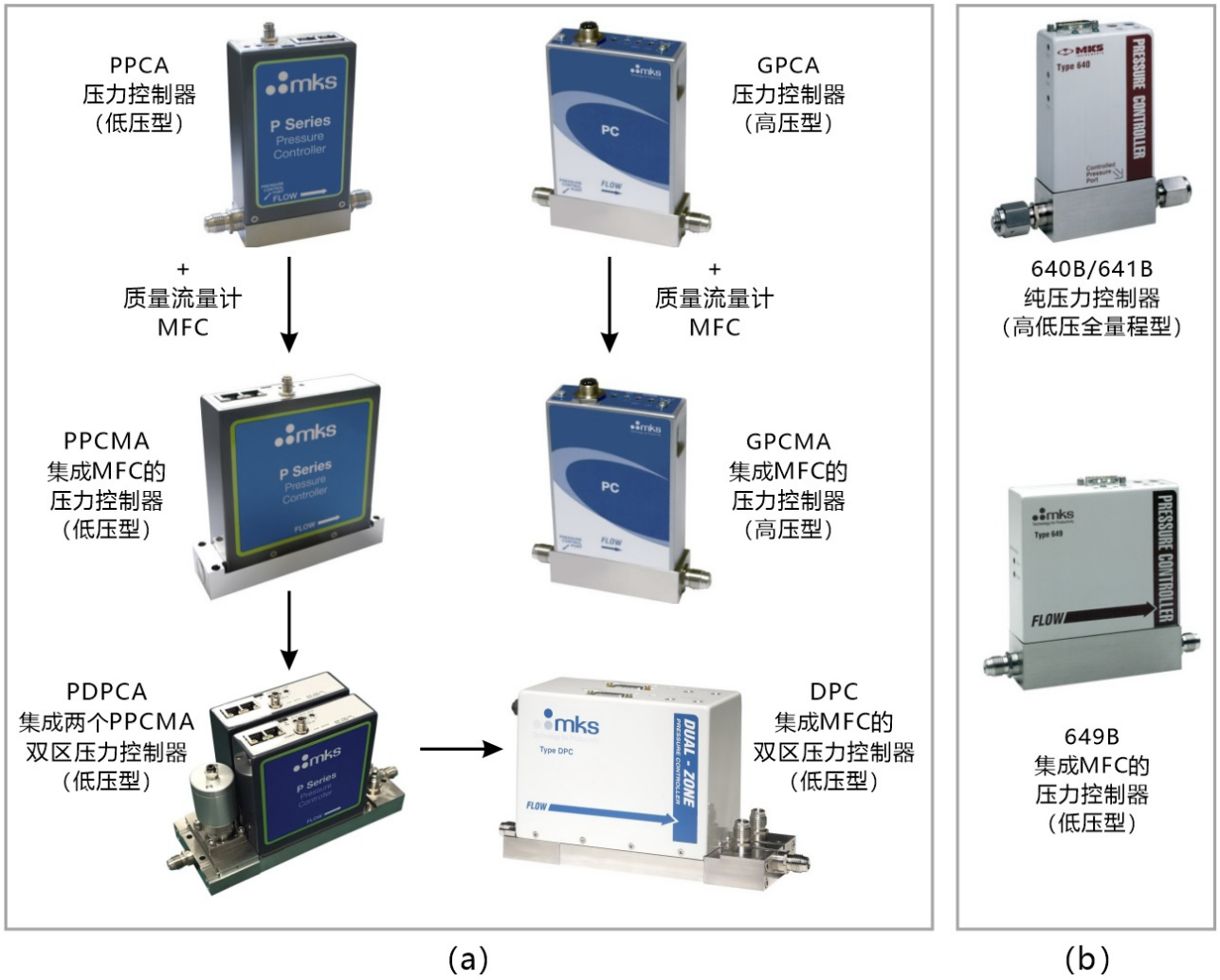

图2 各种MKS压力控制器的相互关系及其功能：（a）常规型号；（b）新型号

（2）按照压力控制覆盖范围来分类，MKS集成式压力控制器可分为低压型和高压型两类。低压型一般是指可覆盖5~1000Torr范围的绝对压力控制，高压型一般是指可覆盖500~5000Torr区间的绝对压力控制。其中也有通用型压力控制器，其压力控制可以覆盖整个低压和高压全量程，如640B和641B控制器的压力控制覆盖范围为10~5000Torr。在压力控制器选型时要十分注意，所有压力控制器都有一个实际压力控制区间，其实际最小压力控制下限一般为最大标称压力值的2%~5%。如标称满量程为1000和5000Torr的压力控制器，其实际可控最小压力分别只能达到20Torr和100Torr，因此要根据相应控制器给出的控制范围技术指标来具体确定最小可控制压力。

（3）按照是否集成了质量流量计来分类，MKS集成式压力控制器可分为有无集成质量流量计两大类。MKS对集成式压力控制器产品的布局一般是先推出纯压力控制器，然后在此压力控制器上再集成质量流量计作为另外一个新型号产品推出。

（4）按照被控压力对象与压力控制器的位置关系，MKS压力控制器可分为（Upstream）上游和（Downstream）下游两类。上游控制器用来调节进气流量来实现压力控制，而下游控制器则是用来调节出气流量以实现压力控制。

（5）按照压力控制对象数量来分类，MKS集成式压力控制器一般分为单区和双区压力控制两类。单区意味着只能控制一个对象的压力，而双区则可以同时控制两个对象达到不同压力。

总之，MKS压力控制器基本都是按照压力控制范围、是否集成流量计、上下游控制模式和单双区这四项功能进行各种搭配组合形成各种型号的压力控制器，以满足不同应用要求。

1.2 技术分析

纵观所有MKS集成式压力控制器，其核心技术特征可以归纳为以下两点：

（1）标准的压力控制器技术和结构。

（2）在标准压力控制器中集成了质量流量计。

为了清晰了解上述特征，图3展示了MKS压力控制器的内部典型结构。

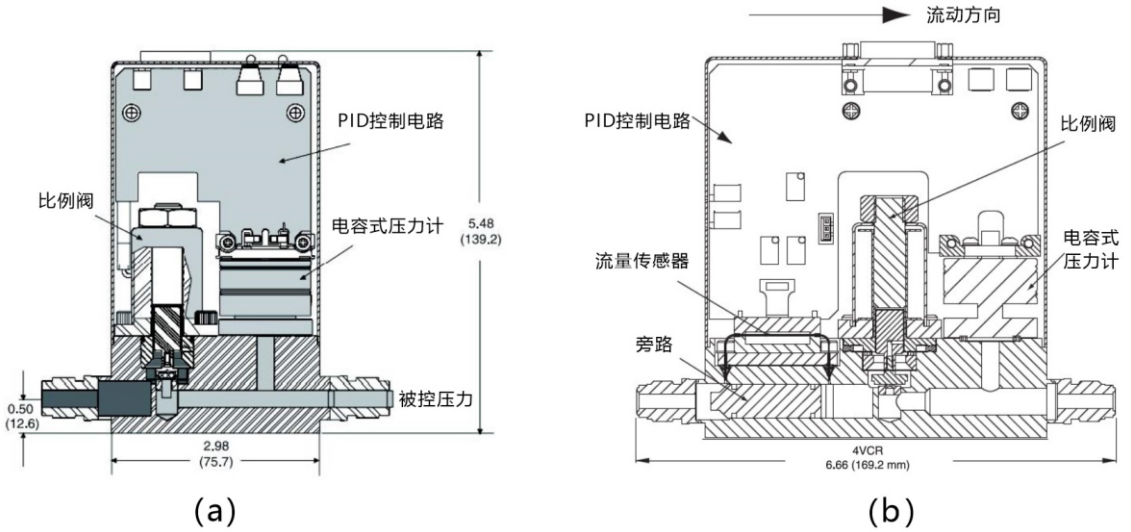

图3 两种MKS集成式压力控制器的典型结构：（a）标准结构；（b）集成流量计结构

从图3可以明显看出，MKS集成式压力控制器的标准结构是将电容式压力计、比例阀和PID控制电路进行了集成，而通过再集成质量流量传感器对功能进行了进一步的拓展。

在实际应用中选择MKS集成式压力控制器时要特别注意的一点是，尽管MKS标称是压力控制器，但本质和实际功能则是对流动介质流量的调节，并不能直接用来控制压力，这点可以从图4所示的MKS压力控制工作原理明显看出。

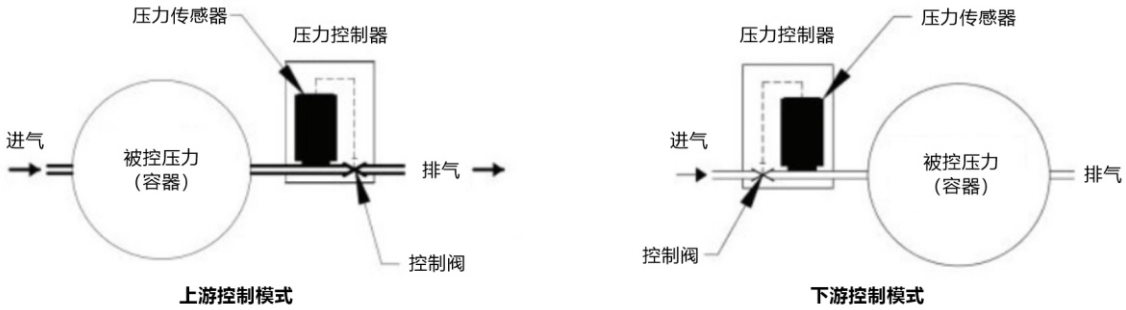

图4 MKS集成式压力控制器的压力控制工作原理

如图4所示，在对容器进行压力控制时，可以采用上游和下游两种控制模式。但无论采用哪种控制模式，MKS所谓的压力控制器只是起到一个进气或排气流量的调节。在所有容器的压力控制，无论是上游还是下游控制模式，都必须使得进气和排气流量达到一种平衡才能真正实现压力的准确控制。所以在使用MKS集成式压力控制器时，首先要明确被控压力容器的进气或排气流量大小，然后再根据这些流量大小来选择相应的MKS压力控制器，否则很难实现准确的压力控制。

另外，从图1所示的技术指标可以看出，所有的MKS压力控制器的压力测量精度基本都为读数的±0.5%（这是典型的电容式压力计测量精度），而控制精度一般则为读数的±1%。由此可说明在MKS压力控制器所采用的PID控制电路中，其AD和DA的精度并不高。

1.3 MKS集成式压力控制器存在的不足

根据上述技术分析，可以发现MKS集成式压力控制器存在以下几方面的不足：

（1）MKS集成式压力控制器实际上起到的是流量调节功能，并不能直接用来进行容器的压力控制，特别是对低漏率的密闭容器压力控制，仅使用一个MKS压力控制器无法实现压力控制，虽然可以使用两个MKS控制器分别调节进气和排气流量来准确控制压力，则这种配置的性价比极差，整体成本较高。

（2）同样，在压力控制器中集成质量流量计也是一种严重浪费。一方面，压力控制器用来调节流量来进行压力控制，但在调节过程中流量始终处于动态变化过程，此时测量流量值没有任何意义和作用。另一方面，在采用两个MKS集成式压力控制器进行压力控制时，尽管可以人工设定控制器的进气和排气流量恒定，此时流量计可以读出恒定流量值，但直接采用一个质量流量计就能实现流量测量功能，无需配备复杂价高的MKS集成式压力控制器。

（3）MKS集成式压力控制器的控制精度并不高，仅为读书的±1%，这种控制精度并未充分发挥电容真空计测量精度高的优势，并不适用于很多高精度真空压力控制场合。

（4）MKS集成式压力控制器的低压控制范围非常有限，绝对压力（真空度）最低控制范围仅为0.1Torr~5Torr（13Pa~665Pa），无法满足更低压力（高真空度）的控制需要。

（5）MKS集成式压力控制器采用的比例阀和质量流量计，要求工作介质要非常干净，特别是在下游控制模式中更是要求工作介质无粉尘和颗粒，否则非常容易发生堵塞现象，而这些控制器根本无法进行拆卸清理。所以MKS集成式压力控制器基本无法在复杂气氛环境中使用。

本文基于MKS集成式压力控制器的上述问题，提出了相应的解决方案，特别是提出一整套国产替代的解决方案。

2. 替代方案的基本原理和特点

替代方案的主要目的是对各种容器（低漏率和高漏率）实现准确的压力控制，压力控制可覆盖从0.1Pa的高真空至1MPa的高压范围，控制精度至少要达到0.1~0.2%。

无论是高真空还是高压控制，替代方案所采用的控制原理是经典的动态平衡法，如图5所示，即同时调节进入和排出密闭容器的介质流量，通过快速达到不同的动态平衡状态，实现高精度压力控制。

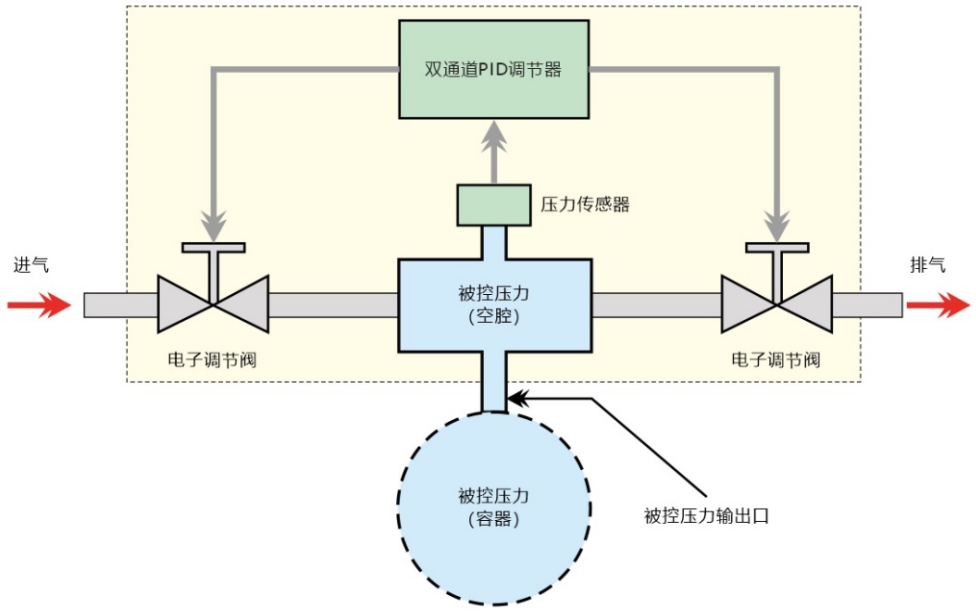

图5 替代方案中的压力控制工作原理

此解决方案有如下特点：

（1）是一种真正的真空压力控制方法，可直接用来进行真空压力控制而无需再配套其他进气和排气流量调节装置。

（2）可覆盖高真空至高压的大区间控制。高压控制时，进气端可配置高压源；高真空控制时，排气端可配置真空泵。并可采用两个压力传感器覆盖整个真空压力范围的测量，两个压力传感器可同时接入调节器。

（3）通过同时调节进气阀和排气阀的开度大小实现真空压力控制。具体控制方法为分程法，在高真空控制时，以调节进气阀为主，在高压控制时，以调节排气阀为主。而且从高真空至高压的整个范围内，真空压力可以连续控制。

（4）具有很强的适用性。这种解决方案适用于所有容器的真空压力的高精度控制，无论容器是低漏率还是高漏率。如果容器内部装配了容易使气压发生变化的高低温装置，这种真空压力控制方法也非常适用。

（5）可实现小型化集成结构。集成结构是将图5中黄色方框内的两个电子调节阀、双通道PID控制器、压力传感器和空腔进行集成封装为一体结构，空腔留出被控压力输出口，由此形成有三个接口的真正的真空压力控制器，这就是一个典型的电气比例阀。由此可以看出，电气比例阀的这种集成式结构同样与MKS集成式压力控制器有着小巧的体积，但在技术上是一种拓展，是在MKS控制器上增加了一个电子调节阀，并将PID控制器升级为双通道功能。灵巧结构电气比例阀的优势是可以控制低真空至高压的宽泛区域压力，但最大问题是无法进行高真空控制。

（6）可实现分立结构。分立结构就是如图5所示的形式，只是图中的被控压力空腔直接就是被控压力容器，而两个电子调节阀和压力传感器直接安装在真空压力容器上，外置形式的双通道PID控制器采集压力传感器信号来控制两个电子调节阀。

根据上述特点可以看出，解决方案的压力控制形式具有很大的灵活性，可根据具体真空压力控制场景选择集成结构或分立结构。

3. 替代方案的具体内容

根据上述替代方案的工作原理和特点，替代方案可具有多种形式，可适用于多种应用中真空压力的高精度控制。

3.1 采用集成式结构的真正压力控制解决方案

从上述技术分析可知，MKS集成式压力控制器并不能直接用来进行压力控制。为此，我们提出采用集成式结构的电气比例阀来直接进行压力控制的解决方案。方案的整体结构如图6所示。

在此解决方案中，可通过高压进气或真空泵抽气方式，通过单独的电气比例阀即可实现密闭容器内的真空压力准确控制。需要注意的是，对于真空度的控制，可采用真空型电气比例阀并开启真空泵。而对于高于标准大气压的高压控制，可选用高压电气比例阀，并开启高压气源。

从图6可以看出，一个比例阀对应于一个被控压力，那么采用多个比例阀，则可实现双区和多区的真空压力控制。

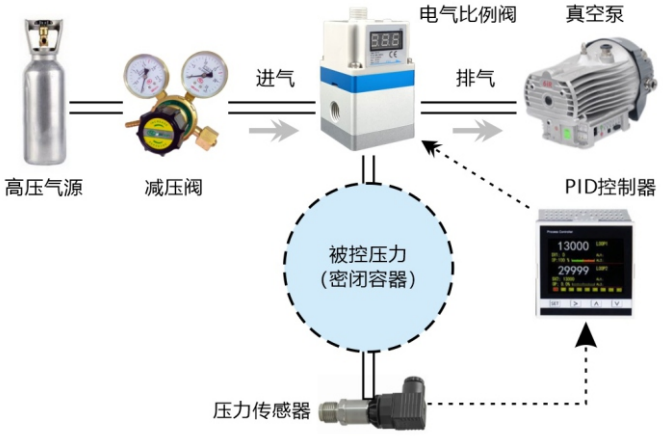

图6 串级控制法的真空压力控制方案结构示意图

此外，对于较大体积或长管件形式的密闭容器，可采用外置压力传感器和PID控制器构成串级控制回路进行控制，可实现真实准确的真空压力控制。

3.2 采用分离结构的真正压力（真空度）控制解决方案

上述采用电气比例阀集成结构和串级控制回路的真空压力控制方案，其不足是无法进行高真空区间的控制。为此本文提出采用分离结构形式的真空度控制解决方案，其结构如图7所示。

图7所示的真空度控制解决方案可现实全真空范围内的准确控制，但在具体实施过程中需要注意以下几点：

（1）为了保证真空度的控制精度，传感器采用了电容真空计，但一般需要两只真空计才能覆盖全真空范围（0.1Pa~0.1MPa）。

（2）若要实现全真空范围的控制，需同时调节进气阀和出气阀。高真空控制时需设定排气阀开度仅进行进气阀调节，低真空控制时则需设定进气阀开度仅进行出气阀调节。若真空腔体较大，则需抽速较大的真空泵，并需更换电子球阀进行大流量调节。

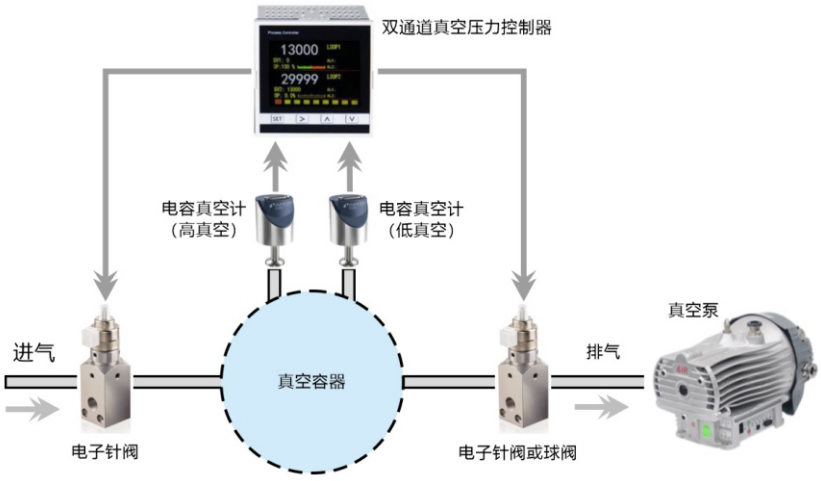

图7 分立结构真空度控制系统结构示意图

（3）由于需要对进气阀和排气阀进行同时调节，所以必须配备两通道的PID调节器。另外，为了保证真空度控制精度，除了采用高精度的电容真空计和电子针阀/球阀之外，还需保证PID调节器同样具有较高精度。本方案采用的PID调节器为24位AD和16位DA，且具有0.01%的最小输出百分比，经过大量试验和使用验证，此方案的真空度控制精度可达到读数的0.5%，与MKS控制器比精度提高了一倍。

（4）此解决方案除具有真空度准确控制功能之外，也可以进行高压控制，只是在进气端需要如图6中所示配备高压气源。这种分立结构的高压控制尽管也能达到很高的压力控制精度，但由于电子针阀/球阀的响应速度仅为1秒左右，使得在控制速度上比电气比例阀高压控制要慢。

4. 总结

通过MKS集成式压力控制器的技术分析，本文有针对性地提出了改进和国产替代的解决方案。此解决方案的技术成熟度很高，并已在众多真空压力控制领域得到了应该。对标MKS集成式压力控制器，总结此改进和国产替代的解决方案，所体现出的主要优势有以下几个方面：

（1）真正实现真空压力的直接控制，而不是MKS集成式压力控制器那样仅能进行流量的调节，这使得具体应用更加的简便和降低成本，无需使用人员再进行其他辅助配置的设计和选型。

（2）在真空压力控制范围和精度方面，都超过了MKS集成式压力控制器的技术指标。

（3）解决方案有很强的适用性和灵活性，小型化集成结构和分立结构两种形式可供选择，可满足几乎绝大多数领域对高精度真空压力控制的需要。

（4）解决方案还具有可扩展性，如可单独增加流量传感器进行流量测量。

总之，本文提出的解决方案具有宽泛的真空压力控制范围，较高的控制精度和性价比，完全能够替代MKS集成式压力控制器。