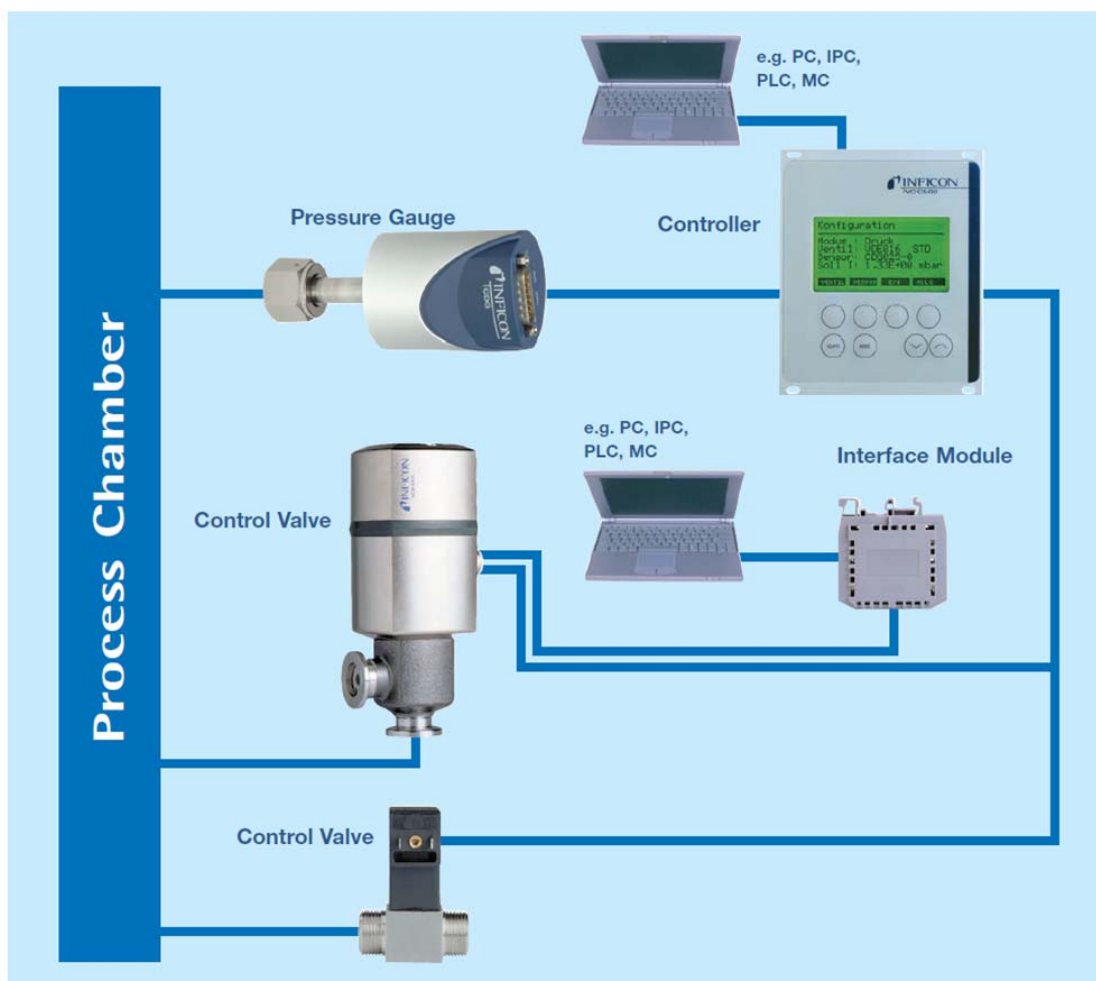


彻底讲清如何在真空系统中实现压力和真空度的准确测量和控制

Thoroughly Explain How To Realize Accurate Measurement and Control of Pressure and Vacuum Degree in the Vacuum System



摘要：本文详细介绍了真空系统中压力和真空度测量和控制的基本概念已经常用的技术指标，详细介绍了模/数转换精度应压力和真空度测量分辨率的匹配，介绍了采用不同量程电容压力计进行真空度控制的最小建议范围。

1. 问题的提出

在各种真空工艺和测试系统的真空容器中，容器内部的气体压力或真空度的准确测量控制对于保证产品品质和仪器测量精度至关重要。由此在气压或真空度控制过程中，需要根据容器内的真空度稳定性要求来确定控制方式和真空度采集精度，据此来选择合理的控制仪表，因此需要充分理解与真空度相关的基本概念，并深入了解压力和真空的测量方式以及控制器的特性和局限性。

2. 真空和压力的度量

2.1. 真空和压力的各种度量单位

在各种真空和压力测量系统中，需要清晰的了解不同压力指标的含义。

通常用于真空测量的度量单位是托 (Torr)，等于 1mmHg，它表示将汞的沉没柱高度提高 1.0mm 所需的大气压力，一个标准大气压力等于 760Torr。在一些真空系统的真空测量中使用 Torr 的衍生单位毫托或 1/1000Torr。大于 1.0 毫托的真空度通常用科学计数法表示 (例如 5.0E-06 Torr)，在欧洲和亚洲常用的真空系统中的真空和气象测量通常将条形图分为 1/1000，以产生毫巴 (mbar)。

在美国常用的压力度量标准是 psi 或“磅/平方英寸”，使用此度量标准，海平面上的大气压力测量值为 14.69psi。为了进行比较，欧洲和亚洲的压力测量将大气压力定义为 1.0bar。另一个指标是“水的英寸高度”，该指标通常用于报告美国天气预报中的气压，单位是指由大气压支撑的水下水柱的高度。使用此度量标准，大气压为 406.8 英寸水柱 (在 4°C 时)，有时此度量单位用于工业过程中的真空测量。

压力的国际单位制量度为 Pascal (缩写为 Pa)，以法国数学家和物理学家 Blaise Pascal 命名，它被定义为单位面积上的力的度量，等于每平方米一牛顿。SI 单位的大气压为 1.01325E+05 Pa。有些气压测量通常也会以千帕斯卡 (kPa) 为单位进行报告。表 2-1 列

出了最常见的压力表和真空表。

表 2-1 压力和真空的度量

Atmospheres	PSI (Absolute)	Inches H ₂ O	Bar	mbar	Torr/mm Hg	mTorr	kPa
100	1469	Not Used	100	Not Used	76,000	Not used	1.0E+04
10	146.9	4068.0	10	Not Used	7,600	Not used	1.0E+03
1	14.69	406.8	1	1,000	760	Not used	101.325
0.1	1.47	40.68	0.1	100	76	Not used	10.132
0.01	0.15	4.068	0.01	10	7.6	7,600	1.013
1.0E-03	Not Used	Not Used	1.0E-03	1	0.8	760	0.101
1.0E-04	Not Used	Not Used	1.0E-04	0.1	7.6E-02	76	0.010
1.0E-05	Not Used	Not Used	1.0E-05	1.0E-02	7.6E-03	7.6	1.0E-03
1.0E-06	Not Used	Not Used	1.0E-06	1.0E-03	7.6E-04	0.8	1.0E-04
1.0E-07	Not Used	Not Used	1.0E-07	1.0E-04	7.6E-05	7.6E-02	1.0E-05
1.0E-08	Not Used	Not Used	1.0E-08	1.0E-05	7.6E-06	7.6E-03	1.0E-06
1.0E-09	Not Used	Not Used	1.0E-09	1.0E-06	7.6E-07	7.6E-04	1.0E-07

2.2. 压力和真空传感器

压力和真空的测量一般采用传感器，这些传感器所组成的压力表和真空表根据测量原理的不同分为多种形式，这些仪表的主要类型包括：

(1) 机械规：这类仪表使用某种形式的机械联动装置或膜片装置，无需任何电子器件，仅依靠机械式的移动来指示压力或真空度。因为无需带电运行，所以这类仪表常用于压力和真空系统的安全性指示，即使在系统断电情况下也能大致了解腔体内的情况。

(2) 热导规：通常称为皮拉尼、热偶和对流表，其作用原理是气体的导热系数随压力而变化，电热丝是平衡电子电路中的传感元件。由于热丝的热损失率随气体的导热系数而变化，因此也会随着腔体内气体压力和真空度而发生改变，这种变化要求改变电路的电气特性之一（电流、电压或功率）以保持电路平衡。

(3) 应变规：这是一类基于应变的压力测量仪表，常用于正压测量。它们采用了一个薄隔膜，其背面装有应变感应电子电路。压力的变化会引起膜片偏转，从而产生应变，该应变被传感器检测到。

(4) 电容规：常用于压力/真空测量，它们依赖于隔膜和通电电极之间电容的变化。

(5) 柱规：它们使用液体，其在封闭柱中的高度会随压力而变化。

(4) 电离规：取决于周围气体分子的电离和相应离子电流的测量。离子电流与腔室内的真空压力直接相关。

表 2-2 显示了不同类型的压力/真空表的比较，从中可以看出没有一类仪表可以满足每个过程中的所有测量要求。

表 2-2 主要类型压力表的性能比较

	Mechanical Gauges	Thermal Gauges	Strain Gauges	Capacitance Gauges	Column Gauges	Ionization Gauges
Pressure/Vacuum Range (atm)	-1 to 500	10^{-8} to 1	-1 to 500	10^{-8} to 200	1 to 10	10^{-12} to 10^{-5}
Gas Sensitivity	None	High	None	None	None	High
Accuracy	Poor to Good	Fair	Fair to Good	Excellent	Good	Fair
Need for Mains Power	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Elec. Output	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Corrosion Resistance	Poor	Fair	Good	Excellent	Poor	Poor
Physical Size	Good to poor	Good	Excellent	Excellent	Poor	Fair
Overall Safety for Personnel	Fair	Poor	Fair	Good	Poor to Good	Fair
Relative Cost	Fair to Excellent	Good	Fair to Excellent	Fair	Fair	Fair

3. 压力和真空仪表常用技术指标

与其他物理量测量中存在的现象类似，很多用户对如何评价压力和真空仪表存在模糊的概念，因此这里简要说明压力和真空仪表的常用技术指标。

(1) 参考标准：一种非常准确的压力或真空测量仪器，用于校准其他此类仪器。

(2) 精确度：压力或真空仪表和用于校准的参考标准之间的绝对测量差。常用是以读数的百分比或满量程的百分比为单位来表达。

(3) 线性度：与大多数其他传感器类似，压力和真空仪表（无论是数字还是模拟形式）都以设计为线性化输出作为达到理想状况的标准。线性度是衡量电子设备完成这项任务的程度——通常指定为满量程的百分比。

(4) 重复性：衡量压力和真空仪表在多个不同过程运行期间，在相同压力下能达到相同输出的接近程度。一些仪表制造商在技术指标中包括了重复性，但并非全部都如此。如果没有特别注明，用户应要求供应商提高该指标。

(5) 分辨率：压力和真空仪表可以实际测量的最小压力和真空度。如果仪表是模拟信号输出的型号，并且需要数字输入，则几乎总是需要高分辨率的模/数转换（至少 14 位），否则 A/D 分辨率将决定压力和真空测量的分辨率，而不是压力计和真空计的分辨率。

(6) 零位和零位偏移：零位是指将压力计的输出调整为在 (a) 系统中可获得的最低

压力或 (b) 低于电容式压力计分辨率的压力下读取零时发生的情况。经过一段使用时间后, 零位置可能会发生变化, 从而改变压力表的位置并在压力计的整体输出中产生偏移, 因此必须除去这种偏移以获得可接受的精度。如果系统达到的基本压力低于压力计的分辨率, 则可以将压力计的输出调整为最小输出。但是, 如果最小系统压力高于压力计的分辨率, 则必须使用永久零偏移量来确定正确的系统压力。零偏移或零漂移的存在并不总是表明设备需要重新校准, 因为零位置的变化仅很少影响实际的压力计校准。

从表 2-2 可以看出, 电容式压力/真空计的测量准确性最高, 因此电容式真空计通常作为其他类型压力计的参考设备(即用来校准其他产品)。如对于无加热功能的 1000Torr 电容压力计的准确度指标(包括重复性)约为读数的 0.25%, 相比之下, 相同量程的皮拉尼或热偶压力计的读数精度为 5~25%, 电容式真空计的准确度是它们的 100 倍。

4. 高精度压力和真空度控制的实现

对于与真空相关的各种系统中, 在指定的压力和真空度区间内进行精确测量和控制至关重要。例如, 如果过程设定值介于 5.0~6.0mTorr 之间, 并且所需的压力读数精度为 0.5mTorr, 则所需的测量精度为读数的 10%, 或者, 对于 100mTorr 的电容压力计, 为满量程的 0.5%。如果选定的压力计或真空计不能达到这一精度水平, 则无法将真空过程控制在所需的过程区间内。

用作闭环压力和真空度控制的压力计或真空计输入信号必须具有足够的分辨率, 以辨别过程中非常小的压力变化。同时, 回路中的压力和真空度控制器和控制阀也必须具有必要的分辨率, 以便有效地利用这些数据来控制压力的微小变化。很多用户往往只重视了压力或真空计的选择和相应的技术指标, 而忽视了控制器以及控制阀的分辨率指标, 这基本是造成控制精度达不到要求或波动度较大的主要原因。

4.1. 压力计和真空计的选择

选择压力计和真空计的第一个考虑因素是满量程压力和真空度范围。为了获得良好的测量精度, 真空计范围应与待测量的预期压力或真空范围相匹配。理想情况下, 压力计范围应包含最高预期压力, 这将最大化输出信号(模拟)并提高信噪比。如考虑在 5mTorr 和 80mTorr 之间操作的真空过程, 该过程的最佳压力计(如电容压力计)的满量程范围为 100mTorr。如果采用电容压力计, 则该传感器在最小预期压力下的模拟输出为满量程的

5%，在低压下提供良好的精度和高信噪比，同时保持足够的范围来测量高系统压力。虽然满量程为 1Torr 的电容压力计也适用于这种应用，但在 5mTorr 时的模拟输出将减少 10 倍，信号强度的这种变化将大大降低信噪比，降低读数精度。

许多商品化的压力计将其输出作为模拟信号发送给主机、过程控制器或数据记录设备，输出信号有多种形式，如 0~10V 直流电、0~5V 直流电、0~1V 直流电和 4~20mA 是最常见形式。在大多数格式中，输出与压力成线性关系，使得压力计的输出易于在软件中缩放。

4.2. 压力计和真空计信号的输出和采集

各种测量原理的压力计和真空计，其信号输出一般为模拟量，大多为连续的直流电压信号。为了将这些模拟信号直接以数字信号输出，或在控制过程中用控制器和数据记录仪采集这些模拟信号，都需要根据要求对这些模拟信号有足够高的采集精度，也就是说目标压力信号的模拟/数字 (A/D) 转换必须具有足够的分辨率，以将信号与压力计的正常背景噪声区分开来。例如，压力计信号的 12 位模数转换将区分压力计满量程模拟输出 0.02% 的最小信号。对于 1Torr 全刻度压力计，这意味着不能检测到小于 0.2mTorr 的压力或压力变化。在假设压力计和真空计的模拟输出为 0~10V 直流时，表 4-1 显示了各种压力计的最小可分辨压力与模数转换精度的关系。

表 4-1 常见 (A/D) 模数分辨率下的最小可分辨压力 (满量程测量范围为 0~10V 直流)

A/D 分辨率	最小可测 信号 (mV)	最小可分辨压力			
		100 PSIA 满量程 (PSIA)	1000 Torr 满量程 (Torr)	10 Torr 满量程 (Torr)	0.1 Torr 满量程 (Torr)
8-bit	39.22	3.92E-01	3.92	3.92E-02	3.92E-04
9-bit	19.61	1.96E-01	1.96	1.96E-02	1.96E-04
10-bit	9.81	9.81E-02	9.81E-01	9.81E-03	9.81E-05
11-bit	4.90	4.90E-02	4.90E-01	4.90E-03	4.90E-05
12-bit	2.45	2.45E-02	2.45E-01	2.45E-03	2.45E-05
13-bit	1.23	1.23E-02	1.23E-01	1.23E-03	1.23E-05
14-bit	0.61	6.13E-03	6.13E-02	6.13E-04	6.13E-06
15-bit	0.31	3.06E-03	3.06E-02	3.06E-04	3.06E-06
16-bit	0.15	1.53E-03	1.53E-02	1.53E-04	1.53E-06
18-bit	0.04	3.83E-04	3.83E-03	3.83E-05	3.83E-07
20-bit	0.01	9.58E-05	9.58E-04	9.58E-06	9.58E-08

从上表可以看出，将压力计输出和所需过程测量精度与主机、数据记录器或控制器的

分辨率相匹配非常重要。例如，如果过程在满量程范围的 1.0% 下运行，压力计的满量程输出为 10.000V 直流信号，主机必须能够可靠地辨别 100mV 模拟信号。因此，A/D 数据采集系统需要至少 12 位分辨率才能在其大部分测量范围内使用压力计。更高位的分辨率允许在最低压力下提高压力计测量的分辨率。表 4-1 显示了不同 A/D 分辨率下的最小可分辨模拟信号。上海依阳实业有限公司的压力和真空度控制器都提供至少 16 位的模数转换，能够解析低至 0.4mV 的信号，也可根据需要提供更高位数的转换及相应的控制器。

4.3. 压力和真空度的闭环控制

在微小变化的压力和真空度闭环工作过程中，需要将压力计的量程选择至少要限制少整整十倍。如考虑在 5mTorr 下使用压力计控制过程的情况，100mTorr 满量程压力计是可以使用的最大压力范围。事实上，较低的满量程范围设备将是一个更好的选择，因为它们提供更高的输出信号，更容易检测 and 解决，这将提高压力控制的精度。表 4-2 给出了一些常见电容压力计真空范围的最小建议控制压力。

表 4-2 满量程压力计范围的最低控制压力

满量程 (Torr)	最小可检测压力 (Torr)	最小控制压力 (Torr)
1000	1.00 E-01	5.00
100	1.00 E-02	0.50
20	2.00 E-03	0.10
10	1.00 E-03	5.00 E-02
2.0	2.00 E-04	1.00 E-02
1.0	1.00 E-04	5.00 E-03
0.1	1.00 E-05	5.00 E-04
0.05	5.00 E-06	2.50E-04

5. 结论

压力计和真空计是许多工艺过程和测试系统应用中压力/真空测量的常用传感器，为了在准确性和精确性方面实现最大性能，必须考虑并正确选择压力计特性。这些包括压力计固有的电子特性，如量程和灵敏度。另外，使用这些压力计信号的任何系统，必须匹配合理的模/数 (A/D) 测量精度。当然，一般而言，模数精度越高，造价越高，体积越大。