

关于确定基于 Q-RPT 的产品的压力测量不确定度的指南

Michael Bair
2009 年 8 月 7 日

前言

本文分析了基于 Q-RPT 的产品的不确定度，其中包括 PPC3、PPC4、PPCH、PPCH-G、RPM4 和 E-DWT。

关于 RPM4-AD (一款基于 Q-RPT 的空气数据校准参考) 的不确定度分析，请参见文献 7020TN10¹。

上文中列出的产品采用 Q-RPT 测量压力。Q-RPT 为一款石英参考压力传感器，该传感器的原理是将压力转换为频率输出。尽管 Q-RPT 属于可用的最精密压力测量仪器，但是作为传递标准，它也必须进行校准，从而输出正确的压力值。本指南重点说明使用的校准参考装置、Q-RPT 复现参考输出的能力，以及在规定校准间隔内维持这种复现性的能力。

本文分为三个主要部分。第一部分通过列出了全部的不确定度分量及其灵敏度和不确定度应用背后的深层原因，进而提供了完成典型压力测量不确定度分析的全部信息；第二部分检测了基于 Q-RPT 的产品的不同测量模式；最后一部分介绍 PPC4 的不确定度设置。在本文末尾提供了表格，其中列出了在不同测量模式、是否使用自动调零功能，以及是否并联使用条件下，不同等级的 Q-RPT 的不确定度分量及其值。

在本文中，Q-RPT 的测量指标根据“测量不确定度评定指南”²的建议进行了不确定度分析。分别讨论了所有影响，以帮助使用 Q-RPT 产品的计量人员来评估不确定度是否适用于其具体应用。本文的最后部分将全部的不确定度按照量程、模式和等级在表格中进行了汇总。

值得注意的是，尽管这一不确定度分析适用于主流的 Q-RPT，但是个别 Q-RPT 的不确定度很可能小于整体的不确定度。希望本文能够成为使用基于 Q-RPT 产品的用户计算个别 Q-RPT 不确定度的一个参考。在阅读本文时，可从 DHI 索取一份能帮助用户的 Excel 电子表格。

不确定度分量

由于使用和校准可能存在差异，所以有必要定义影响 Q-RPT 最终不确定度的限制条件。

- 工作模式
- 流体介质
- 环境
- 方向

- 参考不确定度
- 校准和自动调零的频率
- 控制精度
- 驻留时间

工作模式

本不确定度分析适用于以下工作模式：

- 绝压
- 表压
- 负表压
- 并联/差压

工作模式对本文所列的最终不确定度具有一定的影响。对于绝大多数情况而言，最终不确定的差异很小，但不可忽略。

流体介质

用来传递压力的介质对 Q-RPT 的最终不确定度计算具有一定的影响。这主要是由于 Q-RPT 用户采用流体柱高度修正引起的。Q-RPT 使用的流体有：

- 氮气
- 空气（清洁、干燥）
- 氦气
- 癸二酸酯
- 水
- 其它

以上所列的流体可从 Q-RPT 产品的菜单中进行选择。对于液压 RPM4 和 PPCH，介质类别“其它”中可以是除癸二酸酯或水之外的液体。对于 RPM4，液体可以是与 RPM4 内部压力组件兼容的任何液体。对于 PPCH，由于控制依赖性的原因，则必需是 DHI 推荐的液体。

在本项不确定度分析中，假设使用的介质为氮气或癸二酸酯。就空气、氦气或水而言，这些不确定度偏差并不明显。

环境

只要湿度不致于产生凝结，那么仅有的限制要求就是振动、温度及温度变化速率。本次不确定度分析的温度限制如下：

- 温度：10 ~ 40 °C
- 温度变化：小于 5 °C/小时
- 振动：满足 MIL-T28800D 标准

请注意，大多数基于 Q-RPT 的产品的的工作温度范围为 15 ~ 35 °C。由于 E-DWT 规定的范围为 10 ~ 40 °C，并且其它产品由于范围扩展而引起的不确定度增大并不明显，所以分析时采用了 10 ~ 40 °C。

方向

Q-RPT 只要经过校准，并且在相同的位置使用，就对方向并不敏感。尽管没有量化，但是认为由于方向而可能引起的变化是能够通过使用自动调零功能消除的一个偏移量。

参考不确定度

在本项分析中选择使用的参考不确定度倾向于尽量保守，使仪器管理人员能够灵活选择可用的参考。然而，还是假设使用一个活塞式压力计作为参考。

也可以选择其它装置作为 Q-RPT 的参考，例如水银压力计，但是由于活塞式压力计能够校准所有的 Q-RPT 量程，以及考虑到其固有的重复性，所以推荐使用。在使用活塞式压力计的很多情况下，即使与 Q-RPT 的指标相比，其相对不确定度可能较高，但是其重复性和线性度要好得多。这就使得在曲线拟合及分析 Q-RPT 的一致性时具有较高的置信度。

校准和自动调零频率

本项分析中假设校准间隔为 1 年。对定期使用自动调零(频率足以消除 Q-RPT 的零位漂移)和校准间隔内不使用自动调零的两种情况均进行了评估和不确定度分析。对表压模式，总是认为使用自动调零功能。

控制精度

对于压力自动控制产品，例如 PPC3、PPC4、PPCH 和 PPCH-G，可考虑在控制精度中包括一个附加不确定度。只有当控制器处于动态控制模式及操作者仅使用前面板显示屏，或者当目标压力被用于测量时，才需要这种附加不确定度。当通过远程查询时，无论在何种控制模式下，控制器返回的压力值均为实测压力，而不是设置的压力。

驻留(短期稳定度)

所有的压力系统和组成部分都需要一个固有时间才能达到平衡或稳定。对于高压校准应用来说，这点尤其重要，并且也正是建议在设置压力和比对之间等待一个驻留时间的原因。在使用 Q-RPT 的情况下，当发生任何明显的瞬时压力变化后，都需要 30 秒的稳定时间，以确保 Q-RPT 及被比对系统的稳定度位于规定的不确定度范围之内。对于手动压力控制，若控制时间足够，建议在设置压力之后，等待 30 秒的驻留时间再读取读数。

Q-RPT 分级

Q-RPT 最初是用活塞式压力计来进行特征化的，从而确定并尽可能修正线性度偏差。根据特征化获得的不确定度结果对 Q-RPT 进行分级。Q-RPT 可用的等级和及不确定度如下：

- 特级(p 级): $\pm(0.008\%$ 读数, 或 0.0024% 自动量程, 取大值)
- 标准级(s 级): $\pm(0.01\%$ 读数, 或 0.003% Q-RPT 量程, 取大值)
- 标准级-中量程 (s 级): $\pm(0.013\%$ 读数, 或 0.0039% Q-RPT 量程, 取大值) A20M~A140M
- 标准级-高量程(s 级): $\pm(0.018\%$ 读数, 或 0.0054%Q-RPT 量程, 取大值) A200M 和 A280M
- 量程级(f 级): $\pm(0.015\%$ 自动量程)
- EDWT (e 级): $\pm(0.02\%$ 读数, 或 0.002%Q-RPT 量程, 取大值)

特级和量程级的不确定度适用于所有 Q-RPT 的 30-100% 范围内的自动量程。只有 BG15K 和 G15K 量程级例外，其不确定度适用于低至 Q-RPT 量程的 10% 的自动量程。特级 BA100K QRPT 不会自动调节量程至低于 Q-RPT 的 100% 量程。

RPM4 参考压力测量仪可利用两个 Q-RPT 测量相同的压力。这种工作模式被称为并联模式，Q-RPT 不确定度未被修正，并且以 2 的平方根为系数减小。并联模式下的产品不确定度低于独立 Q-RPT 时的产品不确定度。

不确定度分量

本节定义了所有影响 Q-RPT 的不确定度分量。简要介绍了每项不确定度、 $k = 2$ 时的扩展不确定度及其对压力的敏感度、分布类型，还介绍了 $k = 1$ 时的标准不确定度。

参考

参考引起的压力不确定度取决于 Q-RPT 量程。表 1 列出了所有量程下所需的参考不确定度清单。在 DHI 进行校准时的参考不确定度通常优于表 1 所列的值，但是表 1 中的所列值被扩展至能够使用其它参考，而无需修改计算的不确定度。

对于特级和量程级 Q-RPT，本文末尾的 Q-RPT 不确定度表中所列的绝对不确定度以自动量程的百分比(%)表示。为保守起见，表 1 中所列的绝对不确定度为适用的最小自动量程的不确定度，也就是说，对于所有特级和所有量程级 Q-RPT，为 Q-RPT 量程的 30%，对于量程级 BG15K 和 G15K 为 Q-RPT 量程的 10%。

不确定度类型：相对和绝对

灵敏度： 1% 读数/% 读数, 或 1 Pa/Pa

分布： 视为正态分布

标准不确定度： 参见表 1

Q-RPT	相对 @ 95% [% 读数]	绝对 @ 95% [Pa]	相对 K=1 [% rdg]	绝对 K=1 [Pa]
A280M、 A200M	0.005	100	0.0025	50
A140M、 A100M、 A70M	0.004	50	0.002	25
A40M、A20M	0.004	25	0.002	12.5
A14M、 A10M、A7M、 A3.5M	0.003	20	0.0015	10
A2M、A1.4M	0.003	3	0.0015	1.5
A700K、 A350K	0.003	1	0.0015	0.5
A200、 A160K、 A100K、 BA100K	0.003	0.2	0.0015	0.1
G200K、 G100K	0.003	0.1	0.0015	0.05
BG15K、 G15K	0.003	0.005	0.0015	0.0025

表 1. 参考不确定度

线性度、迟滞和重复性 (精度)

Q-RPT 作为传递标准的最重要特性之一就是精度。精度是线性度、迟滞和重复性的组合。不含重复性的线性度和迟滞的组合被称为一致性。在本项不确定度分析中，一致性作为 Q-RPT 的调整技术指标独立于重复性单独列出。精度通常包括分辨率特性，但是 Q-RPT 的分辨率不会限制最终合成的不确定度。

线性度

线性度是 Q-RPT 的实际输出偏离理论直线而引入的不确定度分量。利用活塞式压力计作为参考对 Q-RPT 进行全面特征化，根据特征化结果并利用一个专用的数学模型对 Q-RPT 的线性度进行了调整。同时，根据特征化结果中每个 Q-RPT 的线性度，对 Q-RPT 进行分级。考虑到特征化测试中使用的数据量很大，并且该模型具有“解决”非线性能力的，所以认为大多数 Q-RPT 具有相似的线性度。然而，量程下的重复性、迟滞以及不可检测的非线性部分会限制得到的线性度水平。

值得注意的是，线性度对不确定度贡献的评估是在被特征化量程的起点和终点再加上其上和其下各 0.5 % Q-RPT 量程范围内进行的。例如，如果在 10 ~ 350 kPa (1.25 ~ 50 psi) 的范围内对 A350K QRPT (350 kPa [50 psi] 绝压量程) 进行特征化，那么如果不经参考验证，则并不能保证低于 8.25 kPa (1.2 psi) 绝压时在技术指标范围之内。绝大多数情况下，特征范围与 DHI 出具的校准报告上所列的校准范围相同。会存在一定的偏差，例如一个

A700K Q-RPT 就被特征化至 800 kPa 绝压，以便于用于表压模式。

Q-RPT 量程	校准量程	校准量程
----- ---	[kPa]	[psi]
A280M	ATM - 280000	ATM - 40000
A200M	ATM - 200000	ATM - 30000
A140M	ATM - 140000	ATM - 20000
A100M	ATM - 100000	ATM - 15000
A70M	ATM - 70000	ATM - 10000
A40M	ATM - 40000	ATM - 6000
A20M	ATM - 20000	ATM - 3000
A14M	ATM - 14000	ATM - 2000
A10M	ATM - 10000	ATM - 1500
A7M	ATM - 7000	ATM - 1000
A3.5M	70 - 3500	10 - 500
A2M	70 - 2000	10 - 300
A1.4M	35 - 1400	5 - 200
A700K	18 - 700	2.6 - 100
A350K	350 - 10	50 - 1.5
A200K	200 - 10	30 - 1.5
A160K	160 - 6	23 - 0.9
A116K	116 - 6	16.8 - 0.9
A100K	110 - 6	16 - 0.9
BA100K	70 - 110	10 - 16
G200K	0 - 200	0 - 30
G100K	0 - 100	0 - 14.5
G15K	0 - 15	0 - 2.2
BG15K	-15 - 15	-2.2 - 2.2

表 2. Q-RPT 的校准范围

表 2 列出了 Q-RPT 在 Fluke-DHI 的校准范围。注意，这些量程是当前程序上的指导，可根据用户的指标要求或将来改善进行修改。

各个 Q-RPT 的线性度被认为是独立的，但是单个 Q-RPT 在校准期间的线性度是一致的。Q-RPT 的线性度可能会随着 Q-RPT 的老化而变化，但是在 5 年之内不会很普遍。DHI 一直以来都在校准 Q-RPT。如果线性度发生了变化，任何时候均可重复特征化过程。当温度发生大的变化时，线性度可能会发生变化。然而在 10~40°C 温度范围内只要温度稳定，预计就不会很明显。如果预计到 Q-RPT 将在明显不同于被校准温度的温度下工作，则可能有必要为线性度增加附加不确定度。

重复性

重复性是 Q-RPT 在相同的压力和条件下复现某个压力的能力。重复性只能通过以相同的方式多次复现某个测试点来进行测量。这通常意味着按照相同的方式执行完整的压力循环，在整个校准范围内的个体点测量重复性。和线性度一样，Q-RPT 的重复性是在特征化期间评估的，并用来对 Q-RPT 分级。

迟滞

迟滞是一种受 Q-RPT 的机械记忆，以及压力变化的方向、持续时间和幅度的影响而产生的不确定度。由于依赖于 Q-RPT 在测试期间所受压力变化幅度的原因，迟滞被认为是可伸缩的。这就意味着，对于 Q-RPT 来说，迟滞效应的幅度通常与校准周期内压力变化的总量有关。与线性度不同，迟滞并不总是一致的。然而，若再次执行相同的测试，它通常是一致的。有些 Q-RPT 对压力变化以及不同的驻留时间更为敏感。与线性度及重复性相同，迟滞也是在 Q-RPT 的特征化期间测试的。该项测试包括测量总迟滞，以及 Q-RPT 迟滞的伸缩性。

组合精度特征

表 3 列出了用来描述各等级下的精度指标的信息。在该表中，迟滞和线性度被组合在一起，被称为一致性。重复性被独立出来作为一项不确定度，但是并未被包括在一致性技术指标中，且在校准 Q-RPT 时也不被用于校准允差。由于一致性在校准 Q-RPT 之后被作为校准允差，所以能够确保交付的 Q-RPT 中接近 100% 在该项指标范围之内。然而，并未强调符合技术指标的具体 Q-RPT 的偏差概率密度。这就意味着一致性技术指标是在 $k = 3$ 的条件下给出的，并且均匀分布。为了表述 $k = 1$ ，允差（一致性）被除以 6 的平方根（近似为 2.5）。量程能力指的是不确定度与 Q-RPT 量程相同时的最小自动量程，以 Q-RPT 量程的百分比表示。表 3 中最后一栏的下限为读数的百分比，读数百分比此时变为一个固定的 Q-RPT 量程或自动量程(可变量程 Q-RPT)百分比。

Q-RPT 等级 [均为 $k=1$ 时的值]	一致性 (容差)	一致性 ($k=1$)	重复性 ($k=1$)	范围度	下限
特级 [%读数 ±]	0.005	0.0020	0.0015	30%	30%
标准级 [%读数 ±]	0.008	0.0033	0.002	100%	30%
标准级, MID [%读数, ±]	0.012	0.0050	0.003	100%	30%
标准级, HI [%读数, ±]	0.015	0.0060	0.004	100%	30%
满度 [%自动量程, ±]	0.010	0.0041	0.003	30%	100%
满度 (BG15K 和 G15K) [%自动量程, ±]	0.010	0.0041	0.003	10%	100%
EDWT [%读数, ±]	0.020	0.0082	0.004	100%	10%

表 3. 精度不确定度、允差， $k=1$ 时

例如，对于 A700K 特级 Q-RPT，其量程为 700 kPa，可自动量程至 210 kPa，也就是 700 kPa 的 30%，此时可认为一致性技术指标与 700 kPa 时相同。在这种情况下，下限(读数的百分比指标变为固定值)即为 210 kPa 的 30%，或者说是 63 kPa。为方便起见，采用以下的表示方法：

$\pm(0.005\% \text{ 读数, 或 } 0.0015\% \text{ 自动量程, 取大值})$ ，*特级*

对于那些量程不可调的 Q-RPT，例如标准级和 E-DWT 级，相同的规则也适用于下限，表示方法变为：

$\pm(0.008\% \text{ 读数, 或 } 0.0024\% \text{ Q-RPT 量程, 取大值})$ ，*标准级*

或者：

$\pm(0.018\% \text{ 读数, 或 } 0.0018\% \text{ Q-RPT 量程, 取大值})$ ，*E-DWT*

对于后者，请注意，下限为 Q-RPT 量程的 10%，而标准级则为 30%，但是在表达式的第二部分稍有不同 (0.0018% Q-RPT 量程 相对于 0.0024 % Q-RPT 量程)。

标准不确定度 0.5 mm

不确定度类型: 相对和绝对

灵敏度: 1

分布: 一致性为平均分布, 重复性为正态分布

标准不确定度: 参见表 2.

温度

利用一个板载的测温装置对 Q-RPT 进行了温度补偿。但是补偿也存在一个不确定度, 在 $k = 2$ 时等于或小于 Q-RPT 量程的 $\pm 0.0001\%$ 。该值是根据厂家提供的适用于所有 Q-RPT 的技术指标得出的, 认为是一个估算值。由于该值为经验数据, 所以分布是平均分布, 主要以 Q-RPT 量程的百分比应用, 少部分是以读数的百分比应用。由于温度变化引起的不确定度值的适用范围为 $10 \sim 40^\circ\text{C}$ 。如果一个 Q-RPT 是在 25°C 下进行校准和/或自动调零的, 那么, 该不确定度适用的最大温度变化范围为 $\pm 15^\circ\text{C}$, 或者说不确定度在 $k = 2$ 时为 Q-RPT 量程的 $\pm 0.0015\%$ 。增加一个附加不确定度, 在 $k = 2$ 时为读数的 $\pm 0.001\%$, 以体现由于温度在 $10 \sim 40^\circ\text{C}$ 范围内变化引起的斜率。然而, 如果温度稳定, 并且 Q-RPT 被自动调零, 该不确定度的常数部分则减小为温度总变化为 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的影响, 这是在校准期间或自动调零期间总温度变化保守估计值。

温度不确定度只有在 Q-RPT 已经足够稳定时才适用。达到稳定所需的时间与温度变化量有关。粗略估计, 大概每变化 5° 留出一个小时的时间。针对不预留温度稳定时间的情况, 并没有一个量化的不确定度。如果温度变化很大, 并且没有预留出 Q-RPT 产品达到稳定所需的时间, 不确定度可高达 Q-RPT 量程的 0.01% 。

温度不确定度: 绝对和相对

灵敏度: $1\%/Q-RPT$ 量程或读数

分布: 平均分布

标准不确定度: 0.0005% 读数、 0.00075% Q-RPT 量程(自动调零功能关闭)、 0.00025% Q-RPT 量程(自动调零功能打开)

流体高度 (气柱高度/液柱高度)

可以使 Q-RPT 校准装置与被校 Q-RPT 处于相同的参考水平面。正是因为这一原因, 并未将该不确定度纳入典型的压力测量不确定度。不过在特定 Q-RPT 或校准不确定度的支持下, 此处进行了简要说明, 并在 Q-RPT 的不确定度表中保留了流体高度一项。

流体高度引起的不确定度与被测介质的高度、所使用的介质类型, 以及介质的密度准确度有关。无论装置使用的是油还是气体, 高度测量引起的不确定度分量应该是相同的, 但是考虑到密度不同, 其影响将不同。

若高度测量中的不确定度在 $k = 2$ 时为 $\pm 1\text{mm}$, 则气体的不确定度大约为所测压力的 $\pm 0.1 \times 10^{-6}$; 若介质为油, 那么相同高度不确定大约为 $\pm 0.008\text{ kPa}$ 。这既考虑了高度不确定度, 也考虑了计算密度的 Q-RPT 产品所使用的密度。

不确定度类型 绝对(油)或相对(气体)

灵敏度: 9 Pa/mm (油)和 0.1×10^{-6} (气体)

分布: 平均分布

管路压力

关于管路压力引起的压力不确定度涉及到两种配置。在 RPM4 的差压模式下, 并联的双 Q-RPT 测量管路差压。此外, G15K 和 BG15K Q-RPT 对大气压力的变化具有适度的灵敏度。

对于并联的 RPM4 Q-RPT, 不确定度来自于差压测量中低压侧的重复性。附加不确定度在表 3 中以重复性列出。G15K 和 BG15K Q-RPT 对 70 至 110 kPa 内的管路压力进行了补偿。当 G15K 或 BG15K 被调零时, 大部分的管路压力影响被消除, 然而管路压力仍然存在轻微影响, 在 $k = 2$ 时为读数的 $\pm 0.002\%$ 。

不确定度类型: 相对

灵敏度: 1% 或读数/ $\%$ 读数

分布: 正态分布

标准不确定度: 0.001% 读数

稳定度

以两种独立的类别定义稳定度: Q-RPT 斜率变化和偏移变化。偏移变化可通过自动调零功能或校准进行修正。斜率变化则只能通过校准进行修正。在并联模式下, 两个量程相同的 Q-RPT 读取相同的压力, 偏移和斜率变化的影响都会降低。

在考虑偏移变化时, 有三种独立的不确定度。使用自动调零功能时的不确定度(对于全部的表压和差压模式相同)、不使用自动调零功能时采用一个 Q-RPT 读取绝压时的不确定度, 以及不使用自动调零功能而采用并联模式读取绝压时的不确定度。

当在表压和差压模式下打开自动调零功能时, 除在表压模式下使用的绝压 Q-RPT 外, 没有必需的附加不确定度。

在这种情况下, 由于气压计被用来检测自 Q-RPT 上次被调零以来大气压力的变化, 所以要考虑内部气压计的分辨率和重复性引起的不确定度。内部气压计的分辨率为 0.1 Pa , 重复性为 $\pm 1\text{ Pa}$, 包含因子为 2。这种不确定度被认为是平均分布的。由于这一不确定度的单位为压力, 而不是读数或量程的百分比, 所以在不确定度表格中并未将其包括在内。影响将随 Q-RPT 或自动量程的变化, 但在使用 A100K 的最坏情况下, 当 $k = 2$ 时为大约为 $\pm 0.001\%$ 。当测量绝对压力的绝压 Q-RPT 的自动调零功能被打开时, 不确定度为用来确定偏移及自动调零期间的偏移变化的参考的不确定度。自动调零参考总是具有更低不确定度的 Q-RPT。在本例中, 参考不确定度是为该 Q-RPT 确定的不确定度。若使用一个活塞式压力计作为自动调零参考, 请参见表 1 中的不确定度。

一个 Q-RPT 的一年期斜率稳定度的不确定度为读数的 $\pm 0.005\%$ 。在并联模式下, 一年期不确定度为读数的 $\pm 0.0035\%$ 。由于偏移变化引起的一年期不确定度(关闭自动调零功能)在包含因子为 2 时对单 Q-RPT 为 Q-RPT 量程的 $\pm 0.005\%$, 并联模式下为 Q-RPT 量程的 $\pm 0.0035\%$ 。对于所有的 Q-RPT, 可扩展由于稳定度引起的不确定度, 从而延长校准间隔周期。推荐的一种方法是对于绝压

Q-RPT 使用一个自动调零参考, 仅扩展稳定度的相对不确定度。

- 不确定度类型: 相对或绝对
- 灵敏度: 1 %读数/ %读数, 或 %量程/ %量程
- 分布: 平均
- 标准不确定度: 0.0029%读数, 或 0.0029% Q-RPT 量程

内部气压计

- 不确定度类型: 绝对
- 灵敏度: 1 Pa/Pa
- 分布: 平均
- 标准不确定度: 0.58 Pa

控制精度

对于基于 Q-RPT 的压力控制产品, PPC3、PPC4、PPCH 和 PPCH-G, 动态控制时可包括一个附加不确定度。对于大多数情况, 这并非必需, 因为只有在使用前面板显示时才适用, 而并不适用于通过控制器远程输出压力值的情况。

在动态控制模式下的附加压力不确定度仅与压力保持设置有关。默认设置为当前量程的 0.004% (对于 PPCH 和 PPCHG 为当前量程的 0.01%), 但是可以增大或降低。由于当控制器处于保持限值范围之内时显示指定的压力值, 而操作人员也并不知道压力实际上处于限值范围内的什么位置, 所以该不确定度可被作为分辨率进行对待。由于保持限值被应用为加或减, 所以意味着这是等同于两倍的保持限值设置的平均分布。

测量模式相关事项

所有的绝压 Q-RPT 均可被用于测量表压。双绝压和表压 Q-RPT 还可测量管路的差压, 而非大气压力(表压)。然而, 由于表压 Q-RPT 的量程不大于 200 kPa, 所以通常只有绝压 Q-RPT 被用于测量差压。只能使用气体的绝压 Q-RPT 若具有足够低的量程, 可用于在表压和负表压模式下测量差压, 但是由于可用的绝压量程的原因, 可能量程会受限。在有些情况下, 产品的不确定度指标可能不太直观。本节介绍如何针对 A350K、A200K、A160K 和 A100K Q-RPT, 以及表压和负表压模式下低于 700 kPa 的特级 Q-RPT、差压模式下所有 Q-RPT 应用产品不确定度指标, 以及所有 Q-RPT 在并联模式下测量表压、负表压和绝压的用法。

绝压 Q-RPT 测量表压

所有基于 Q-RPT 并使用绝压 Q-RPT 的产品都有一个板载气压计来监测大气压变化, 并对绝压 Q-RPT 进行补偿。这就使其在测试过程中当大气压力发生变化时无需重新调零即可实时测量表压。

对于所有量程从 700 kPa 或更高开始的 Q-RPT, 绝压、表压和负表压之间的量程没有区别。而所有 Q-RPT 的绝压和负表压之间的量程没有区别。当负表压模式下的 A350K、A200K、A160K 和 A100K Q-RPT 采用自动量程时, 输入的值认为是表压模式, 并加上大气压力来完成负表压量程。表压和负表压之间并非是不对称量程。例如负

表压模式下使用的 A350K Q-RPT, 表压为 250 kPa, 而负表压为 100 kPa。若自动量程至 50 kPa, 表压量程为 50 kPa, 负表压量程仍然为 100 kPa。这意味着负表压模式采用与绝压模式相同的量程结束。若非在绝压 Q-RPT 被用于表压或负表压模式时一定会进行自动调零, 那么负表压模式的不确定度与绝压模式严格相同。与绝压模式相比, 重复性、线性度和迟滞的组合方式不同。主要区别在于对这些量程下的 Q-RPT 进行自动调零时, 在绝压下的重复性和迟滞都是相同的, 而由于线性度在零表压下非常精确, 在所有其它压力下不在符合最小二乘拟合, 所以线性度是变化的。线性度引起的不确定度, 以及斜率随时间变化的不确定度变化将随压力远离零表压而增大。而以重复性表示的不确定度, 并且根据以迟滞表示的压力序列不确定度, 将与绝压下完全相同。对于绝压模式下采用已经在大气压下对这些量程进行了自动调零的 Q-RPT 的情况, 也存在相同的情形。

为负表压模式下的特级 Q-RPT 计算产品不确定度的难点在于每个可用自动量程下的结果都不同。图 1 和图 2 所示为 A100K 和 A200K 特级 Q-RPT 在绝压、表压和负表压模式下的不确定度差异。计算时假设大气压为 100 kPa, 刻度以与 Q-RPT 的绝压量程相对应的表压表示。如图中所示, 在较低的绝压或负表压压力下, 负表压的不确定度大于绝压。因此, 通常应该采用绝压测量不确定度。图 3 所示为 A700K 特级 Q-RPT 的相同计算。该图显示, 当使用自动调零功能时, 表压和负表压模式下的不确定度是非常相似的。

注意, 在图 3 中, 量程实际上为 800 kPa 绝压。实际应用中, A700K Q-RPT 被特征化至 800 kPa 绝压, 但仅校准至 700 kPa。由于特征化范围的原因, 处于表压模式下时, 不认为 100 kPa 的外推是明显的不确定度源。

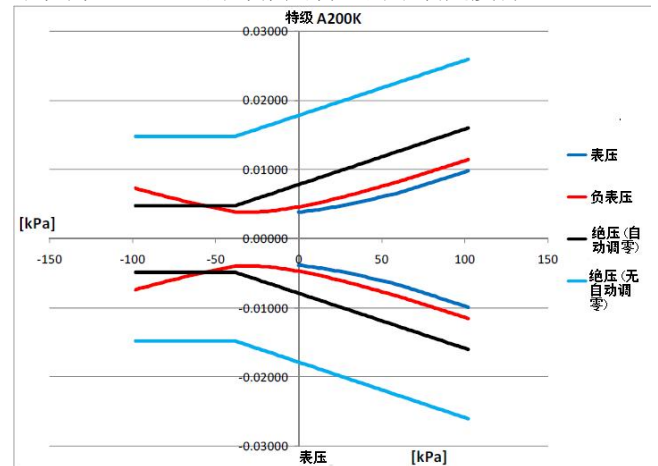


图 1——图中所示 A200K 特级 Q-RPT 计算得到的表压和负表压不确定度与绝压模式下典型测量不确定度相比的对比关系。

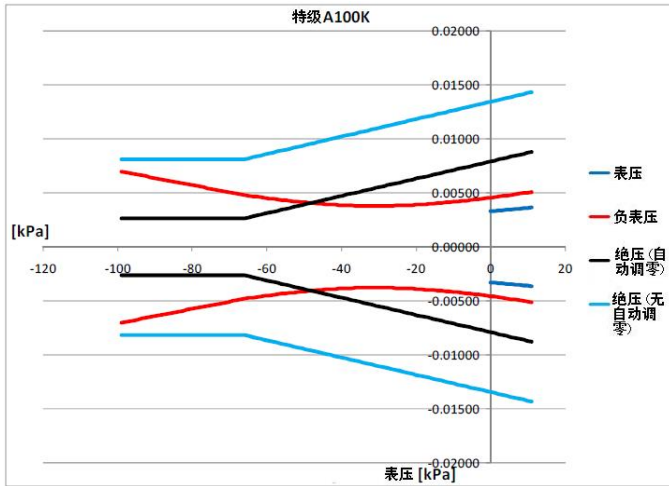


图 2——图中所示为 A100K 特级 Q-RPT 计算得到的表压和负压压不确定度与绝压模式下的典型压力测量不确定度对比关系。

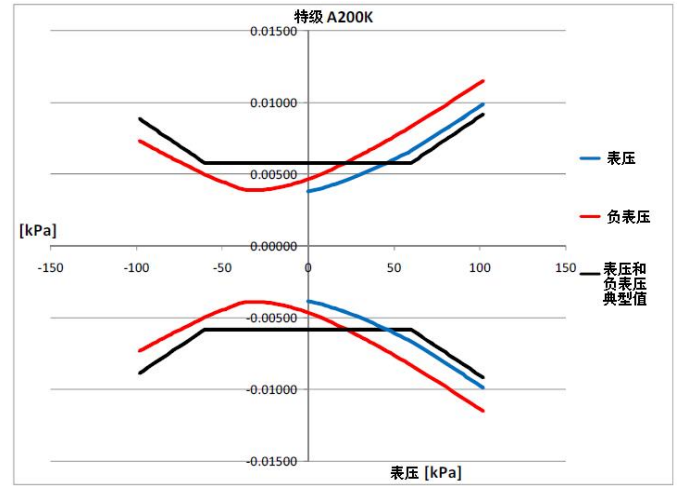


图 4——图中所示为 A200K 特级 Q-RPT 计算得到的表压和负压压不确定度与表压和负压压模式下典型压力测量不确定相比的差异。

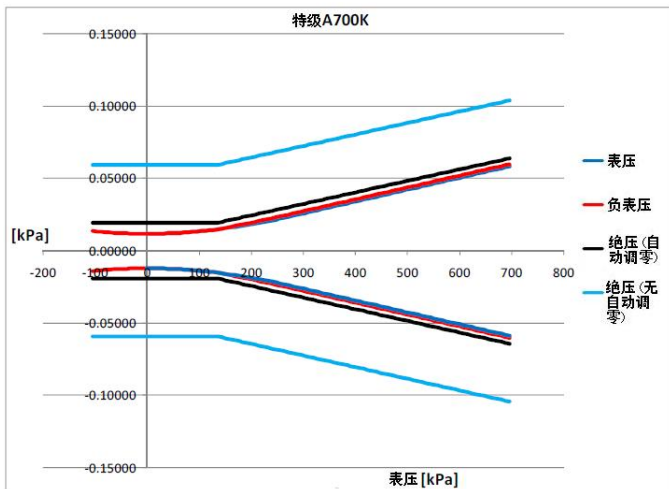


图 3——图中所示为 A700K 特级 Q-RPT 计算得到的表压和负压压不确定度与绝压模式下的典型压力测量不确定度相比的对比关系。

保守估计绝压 Q-RPT 测量表压或负压压时的典型压力测量不确定度，读数的百分比指标乘以表压(或负压压)绝对值，并且受限于绝压模式下使用自动调零功能时的门限不确定度。以图 1 为例，A200K 特级 Q-RPT 的绝压门限不确定度在自动量程至 200 kPa 绝压时为 $\pm 4.8 \text{ Pa}$ 。表压模式下的不确定度在 $\pm[(\text{示值绝对值的 } 0.008\% \text{ 或 } 4.8 \text{ Pa, 取大值}) + 1 \text{ Pa}]$ 用于动态大气压补偿。

图 4 中以图表方式标出了典型的压力测量不确定度与计算值的比较。

PRM4 的双绝压 Q-RPT 测量差压

PRM4 的特性之一就是能够测量高架管路压力的差压。这仅适用于具有相同量程 Q-RPT 的 RPM4。

和负压压模式一样，由于在给定管路压力配衡的原因，不确定度并非直观，也不等于绝压技术指标，由于管路压力/差压的组合如此之多，所以定义差压模式下的典型测量不确定度不太现实。保守估计为读数百分比指标，并受限于绝压模式下的 Q-RPT 在定期使用自动调零功能时的门限不确定度。例如，用一个 7M 标准在 3500 kPa 管路压力下测量 100 kPa 差压。门限不确定度为 $\pm 0.21 \text{ kPa}$ (Q-RPT 量程的 0.003%)，或者大约为 100 kPa 差压的 $\pm 0.21\%$ 。

在以上的相同例子中，仅改用一个特级 Q-RPT，可保证技术指标的自动量程为管压加上差压。在本例中，自动量程为 3600 kPa，门限不确定度为 $\pm 0.08 \text{ kPa}$ 。

RPM4 并联模式下的双 Q-RPT

具有相同量程的 2 个 Q-RPT 可用来并联读取相同的表压或绝压。在这种情况下，所有随机分布的非关联不确定度以 2 的平方根为系数减小。认为非关联的不确定度有：

- 重复性
- 一致性
- 温度
- 稳定度

本文末尾的技术数据部分的典型压力测量不确定度包括了一个并联模式表格，其中列出的影响以 2 的平方根 (1.414) 为系数减小。

有一点非常重要，这就是一致性、温度和偏移稳定度的随接特性是与整体 Q-RPT 相关的，也就是说，单个 Q-RPT 的这些参数是一致的，部分程度上是对称的，不同 Q-RPT 之间的这些影响是无关的。关于降低这些影响量的不确定的原理已经在验证并联测量模式下的 RPM4-AD

A160Ka/A160Ka 中的 Q-RPT 外延量校准^[1]中进行了深入的证明。在[3]中也随双气压计量程提供了这一信息。

保护带 Q-RPT 校准

保护带是一种可调节容差，最小化或消除错误接受的风险，并帮助改善可靠性。在校准 Q-RPT 时，采用一致性容差作为校准后数据的机制实际上就是一种保护带方法。若仅仅用一致性来确定符合性，那么不确定度则会被遗漏。参考、重复性和温度将被用来计算校准不确定度，这将被用于确定错误接受风险或 TUR（测量不确定度比）。所以，只要所有点位于一致性容差范围之内，并且参考和环境温度要求符合本文中的指导原则，那么可靠性就等于使用满一年期压力测量不确定度作为容差并应用反保护带时能够达到的可靠性。

建议在每次进行校准时，只要使用的参考具有足够的性能特性，例如活塞式压力计，则按照最小二乘拟合调整 Q-RPT。在仅具备表压模式的 Q-RPT 情况时，建议将最小二乘拟合强制为零。然而，只要测试点位于一致性容差范围之内，则不必进行调整。然而，根据经验，只有在调整后才会出现这种情况。关于校准点和步骤的建议请参阅相应 Q-RPT 产品的使用手册。

计算 PPC4 的实时不确定度

上几节介绍了适用于采用 Q-RPT 的所有产品的技术指标和不确定度。这对标准化基于 Q-RPT 的产品是非常重要的。同时还提供了需要进行其它不确定度分析时所需的信息。本节使用上几节的信息并简要介绍输入 PPC4 可用的不确定度参数的步骤。

PPC4 压力不确定度的可用参数有：

- 相对不确定度
- 门限不确定度
- 比例因子
- 流体高度
- 零点稳定度
- 控制不确定度

相对不确定度

相对不确定度以百分比值输入，然后在“准备好”条件确定相对不确定度时乘以当前压力值。相对不确定度的默认值由本文末尾典型压力测量不确定度表格中的上部内容确定。对于量程级(f) Q-RTP，该值总为零，产品不确定度由下文中的门限不确定度确定。

门限不确定度

门限不确定度定义了产品不确定度变为一个常数而不再是实测压力百分比时的限值。该不确定度由典型压力测量不确定度表下半部分的不确定度或者量程级的不确定度组成，单独输入的零点不确定度除外。它与相对不确定度一起形成基本的产品不确定度，其中总是使用两者中的大值。

比例因子

比例因子是产品不确定度的范围度，以 Q-RPT 量程的百分比输入。有两种默认的比例因子，对于特级(p)和量程级(f)为 30%，对于 BG15K 和 G15K 量程级为 10%。当比例因子小于 100%时，假设等于或大于变比因子的自动量程设置的产品不确定度等于不确定度表中所列的值。设置低于该百分比的自动量程的不确定度将低于由比例因子与门限不确定度的乘积定义的限值。注意，表 2 中用于符合特性的范围度遵循相同的默认指导原则。

流体高度

流体高度只不过是以流体修正高度表示的不确定度，单位为厘米或英寸。PPC4 将利用高度并结合气体密度计算来提供一个以压力表示的不确定度。

零点稳定度

可为两种情况输入零点稳定度：自动调零打开和自动调零关闭。零点稳定度是不可缩放的，它是 Q-RPT 量程的百分比。对于自动调零功能打开的情况，在表压和负压模式的不确定度为零；在绝压模式下，是参考为自动调零时的不确定度与修正期间预测漂移量(Z_{offset})的组合。对于自动调零功能关闭的情况，为校准间隔期间的预测零点漂移。

控制不确定度

至此为止，所有的成分计算的都是实测压力不确定度。PPC4 可以显示实测压力不确定度，亦可显示输出压力不确定度。

输出压力不确定度包括了实测压力不确定度和控制设置及/或压力稳定度。若被设为动态压力模式下的输出压力不确定度，显示的不确定度将为实测压力不确定度与保持限值的方和根。

保持限值的一个标准不确定度为保持限值除以 3 的平方根。这是因为，在动态模式下，只要压力处于保持限值范围之内，就只显示指定的压力值，所以就无从得知实测压力处于设置压力减去保持限值至设置压力加上保持限值这一范围的哪个位置。

当选择了输出不确定度，并且处于静态模式时，不确定度则为实测压力不确定度与基于压力刷新之间的变化至得到的压力稳定度计算值的方和根。

计算

压力测量不确定度：

$$U_{meas} = 2 \times \sqrt{\left(\frac{U_{prod}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{head} \times \rho_{gas} \times g_{std}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{AutoZ} \times S_{QRPT}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

式中：

U_{meas} : 压力测量不确定度。

U_{prod} : 产品不确定度 = Max [($U_{read} \times P_{curr}$) , ($U_{span} \times$ 自动量程)]。

P_{curr} : 当前测量压力。

U_{span} : 门限不确定度分量。允许的比例由“Scale”定义，它规定了不确定度可缩小范围的程度。

U_{head} : 流体柱高度测量不确定度，以 cm 或 inch 为单位。

ρ_{gas} : 测试气体的密度。在表压模式下用($\rho_{gas} - \rho_{air}$)代替，其中 ρ_{air} 为标准空气密度，1.2 kg/m³。

g_{std} : 标准重力, 9.80665 m/s²。

$U_{自动调零}$: 与 Q-RPT 零点偏移相关的不确定度, 根据自动调零打开和关闭分别独立指定。

S_{QRPT} : Q-RPT 量程。

输出压力不确定度:

$$U_{del} = 2 \times \sqrt{\left(\frac{U_{meas}}{2}\right)^2 + \left[\left(\frac{HL}{\sqrt{3}}\right)^2 \text{ 或 } \left(\frac{U_{Stab} \times S_{pdateRate}}{\sqrt{12}}\right)^2\right]}$$

式中:

U_{del} : 输出不确定度。

HL: 动态模式保持限值。

P_{Stab} : 当前压力稳定度。

$U_{pdateRate}$: 以秒为单位的固定值。

产品不确定度表

下表中列出所有类型 Q-RPT 及所有测量模式下上节内容所定义的不确定度。每种不确定度都被分类为相对或绝对不确定度, 并列为一个标准不确定度。然后对各个不确定度求方和根来组合得到不确定度。

以读数百分比表示的值与以 Q-RPT 量程或自动量程百分比表示的值是单独计算的。最后, 然后相对和绝对不确定度分别乘以包含因子 2, 并列。

注意, 若在进行不确定度分析时需要计算 95% 的置信度, 则必须获得每个标准不确定度的有效自由度的更多信息。然而, 应该注意到, 由于所有平均分布都是保守选择的, 认为有高的有效自由度; 并且主要的标准不确定度大多认为具有正态分布, 包含因子为 2 ($k = 2$) 足以近似 95% 的置信水平。

参考

- 1) *M. Bair, M. Girard, Guide To Determining Pressure Measurement Uncertainty Defined By An RPM4-AD For Air Data Calibrations, 18 Sep 2007.*
- 2) *ISO/TAG4/WG3, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.*
- 3) *M. Bair, Evaluating the Contribution of Stability in the Measurement Uncertainty of Resonant Quartz Pressure Transfer Standards, NCSLI 2005 Workshop & Symposium.*
- 4) *Fluke, DH Instruments 分布, PPC4™ 压力控制器/校准器操作和维护手册。*

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度：G100K、G200K、BA100K、A100K、A160K、A200K、A350K、A700K、A1.4M、A2M、A3.5M、A7M、A10M 和 A14M – 特级

±(0.008%读数，或 0.0024%自动量程，取大值) ， 定期进行自动调零

±[(0.008%读数，或 0.0024%自动量程，取大值) + 0.005% Q-RPT 量程]，不使用自动调零功能

变量或参数	分布	特级 – 绝压，使用自动调零	特级 – 绝压， 不使用自动调零	特级 – 表压
(相对不确定度)		% 读数	% 读数	% 读数
参考	正态	0.0015	0.0015	0.0015
一致性	平均	0.0020	0.0020	0.0020
重复性	正态	0.0015	0.0015	0.0015
温度	平均	0.0006	0.0006	0.0006
稳定度	平均	0.0029	0.0029	0.0029

组合		0.004%读数， 或0.0008%自动量程	(0.004%读数， 或0.0008% 自动量程) +0.003% Q-RPT量程	0.004%读数， 或0.0008% 自动量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.008%读数， 或0.0016%自动量程	(0.008%读数， 或0.0015% 自动量程) +0.006% Q-RPT量程	0.008%读数， 或0.0016% 自动量程
(绝对不确定度)	-----	% 自动量程	% 自动量程	% 自动量程
参考	正态	0.00003	0.00003	0.00003
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003
精度	正态	0.0008	0.0008	0.0008
			% Q-RPT 量程	
温度	平均	0.0003	0.0009	0.0003
稳定度	平均	0.0000	0.0029	0.0000

注：由于特级 BA100K Q-RPT 的有限量程(70~110 kPa)的原因，自动量程总是认为与 Q-RPT 量程相同。

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度：G100k、G200k、BA100K、A100k、a160K、A200K、A350K、A700K、A1.4M、A2M、A3.5M、A7M、A10M 和 A14M
 – 标准级

±(0.01%读数, 或 0.003% Q-RPT 量程, 取大值), 定期进行自动调零

±(0.01%读数, 或 0.007% Q-RPT 量程, 取大值), 不适用自动调零功能

变量或参数	分布	标准 – 绝压, 使用自动调零	标准- 绝压, 不使用自动调零	标准 – 表压
(相对不确定度)		%读数	%读数	%读数
参考	正态	0.0015	0.0015	0.0015
一致性	平均	0.0033	0.0033	0.0033
重复性	正态	0.0020	0.0020	0.0020
温度	平均	0.0006	0.0006	0.0006
稳定度	平均	0.0029	0.0029	0.0029

组合		0.005%读数, 或 0.0012% AutoRanged 量程	(0.005 %读数, 0.0032% 自动量程)	0.005%读数, 或 0.0012% 自动量程
组合 & 扩展		0.010%读数, 或 0.0024% 自动量程	(0.010%读数, 或 0.0065% 自动量程)	0.010%读数, 或 0.0024% AutoRanged 量程
(K=2)时				
(绝对不确定度)	-----	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程
参考	正态	0.00003	0.00003	0.00003
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003
精密	正态	0.0012	0.0012	0.0012
温度	矩形	0.0003	0.0009	0.0003
稳定度	平均	0.0000	0.0029	0.0000

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度：G100k、G200k、BA100K、A100k、a160K、A200K、A350K、A700K、A1.4M、A2M、A3.5M、A7M、A10M 和 A14M – 特级– 并联模式

$\pm(0.006\%$ 读数, 或 0.0018% 自动量程, 取大值), 定期进行自动调零

$\pm[(0.006\%$ 读数, 或 0.0018% 自动量程, 取大值) + 0.004% Q-RPT 量程], 不使用自动调零

		并联模式		
变量或参数	分布	特级 – 绝压, 使用自动调零	特级 – 绝压, 不使用自动调零	特级 – 表压
(相对不确定度)		%读数	%读数	%读数
参考	正态	0.0015	0.0015	0.0015
一致性	平均	0.0014	0.0014	0.0014
重复性	正态	0.0011	0.0011	0.0011
温度	平均	0.0004	0.0004	0.0004
稳定度	平均	0.0021	0.0021	0.0021

组合		0.003%读数, 或 0.0006% 量程	(0.003%读数, 或 0.0005% 自动量程) + 0.0019% Q-RPT 量程	0.003%读数, 或 0.006%量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.006%读数, 或 0.0011%量程	(0.006%读数, 或0.0011% 自动量程) + 0.0004% Q-RPT 量程	0.006%读数, 或 0.0012% 量程
(绝对不确定度)	-----	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程
参考	正态	0.00003	0.00003	0.00003
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003
精度	正态	0.0005	0.0005	0.0005
			% Q-RPT 量程	
温度	平均	0.0002	0.0006	0.0002
稳定度	平均	0.0000	0.0018	0.0000

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度：G100K、G200K、BA100K、A100K、A160K、A200K、A350K、A700K、A1.4M、A2M、A3.5M、A7M、A10M 和 A14M – 标准级 – 并联模式

±(0.008%读数, 或 0.0024% Q-RPT 量程, 取大值), 定期进行自动调零

±(0.008%读数, 或 0.005% Q-RPT 量程, 去大值), 不使用自动调零

		并联模式		
变量或参数	分布	标准 – 绝压, 使用自动调零	标准 – 绝压, 不使用自动调零	标准 – 表压
(相对不确定度)		% 读数	% 读数	% 读数
参考	正态	0.0015	0.0015	0.0015
一致性	平均	0.0023	0.0023	0.0023
重复性	正态	0.0014	0.0014	0.0014
温度	平均	0.0004	0.0004	0.0004
稳定度	平均	0.0021	0.0021	0.0021

组合		0.004%读数, 或 0.0008%量程	(0.004%读数, 或 0.0020% 量程)	0.004%读数, 或 0.008% 量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.008% 读数, 或 0.0017% 量程	(0.008% 读数, 或0.0041%量程)	0.008%读数, 或 0.0017% 量程
(绝对不确定度)	-----	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程
参考	正态	0.00002	0.00002	0.00002
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003
精度	正态	0.0008	0.0008	0.0008
			% Q-RPT 量程	
温度	平均	0.0002	0.0006	0.0002
稳定度**	平均	0.0000	0.0018	0.0000

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度: BG15K¹、G15K¹、G100K、G200K、A100K、A160K、A200K、A350K、A700K、A1.4M、A2M、A3.5M、A7M、A10M 和 A14M – 量程级

±(0.015%自动量程), 定期进行自动调零

±[(0.015%自动量程) + 0.005% Q-RPT 量程], 不使用自动调零功能

变量或参数 (相对不确定度)	分布	F 级 – 绝压, 使用自动调零, 表压 % 自动量程
参考	正态	0.0015
一致性	平均	0.0041
重复性	正态	0.0030
管压	正态	0.0005
温度	平均	0.0003
稳定度	平均	0.0043

组合	0.0069% 自动量程
组合 & 扩展 (K=2)时	0.014% 自动量程

1. 比例因子为 Q-RPT 量程(BG15K 为 30kPa)的 10%, 其它所有 Q-RPT 的比例因子为 Q-RPT 量程的 30%。

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度：G15K、BG15K – 特级和标准级

±(0.008%读数，或 0.0024%自动量程，取大值)，特级

±(0.006%读数，或 0.0018%自动量程，取大值)，并联模式下的特级

±(0.01%读数，或 0.003% Q-RPT 量程，取大值)，标准级

±(0.008%读数，或 0.0024% Q-RPT 量程，取大值)，并联模式标准级

				并联模式	
变量或参数	分布	特级 (p)	标准级 (s)	特级 (p)	标准级 (s)
(相对不确定度)		% 读数	% 读数	% 读数	% 读数
参考	正态	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015
一致性	平均	0.0020	0.0033	0.0014	0.0023
重复性	正态	0.0015	0.0020	0.0011	0.0014
管压	正态	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
温度	平均	0.0006	0.0006	0.0004	0.0004
稳定度	平均	0.0029	0.0029	0.0021	0.0021

组合		0.004%读数， 或 0.0008% 自动量程	0.005%读数， 或0.0012% Q-RPT 量程	0.003%读数， 或 0.0006% 自动量程	0.004%读数， 或 0.0008% Q-RPT 量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.008%读数，或 0.0016% 自 动量程	0.010%读数，或0.0024% Q-RPT量程	0.006%读数，或 0.0011% 自动量程	0.008%读数，或 0.0017% Q-RPT 量程
(绝对不确定度)	-----	% 自动量程	% 自动量程	% AutoRanged 量程	% 自动量程
参考	正态	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
精度	正态	0.0008	0.0012	0.0005	0.0008
管压	正态	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
温度	平均	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002
稳定度**	平均	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

1. 对于 GB，量程为最低和最高压力之差。

Fluke Corporation, DH Instruments Division

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度: A20M、A40M、A70、A100M、A140M

$\pm(0.013\%$ 读数, 或 0.0039% Q-RPT 量程, 取大值), 定期进行自动调零

$\pm(0.013\%$ 读数, 或 0.007% Q-RPT 量程, 取大值), 不使用自动调零功能

变量或参数	分布	标准级 - 绝压, 使用自动调零	标准级 - 表压模式	标准级 绝压, 不使用自动调零
(相对不确定度) 参考		% 读数	% 读数	% 读数
	正态	0.0020	0.0020	0.0020
一致性	平均	0.0049	0.0049	0.0049
重复性	正态	0.0025	0.0025	0.0025
温度	平均	0.0006	0.0006	0.0006
稳定度	平均	0.0029	0.0029	0.0029

组合		0.007%读数, 或 0.0017% Q-RPT 量程	0.007%读数, 或 0.0017% Q-RPT 量程	0.007%读数, 或 0.0034% Q-RPT 量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.013%读数, 或 0.0034% Q-RPT 量程	0.013%读数, 0.0034% Q-RPT 量程	0.013%读数, 或 0.0069% Q-RPT 量程
(绝对不确定度)	-----	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程
参考	正态	0.00002	0.00002	0.00002
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003
精度	正态	0.0017	0.0017	0.0017
温度	平均	0.0003	0.0003	0.0009
稳定度	平均	0.0000	0.0000	0.0029

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度：A20M、A40M、A70、A100M、A140M

±(0.01%读数，或 0.003% Q-RPT 量程，取大值)，定期进行自动调零

±(0.01%读数，或 0.005% Q-RPT 量程，取大值)，不使用自动调零

		并联模式		
变量或参数	分布	标准级 – 绝压，使用自动调零	标准级 – 表压模式	标准级 – 绝压，不使用自动调零
(相对不确定度)		% 读数	% 读数	% 读数
参考	正态	0.0020	0.0020	0.0020
一致性	平均	0.0035	0.0035	0.0035
重复性	正态	0.0018	0.0018	0.0018
温度	平均	0.0004	0.0004	0.0004
稳定度	平均	0.0021	0.0021	0.0021

组合		0.005%读数， 或 0.0012% Q-RPT 量程	0.005%读数， 或0.0012% Q-RPT量程	0.005%读数， 或 0.0024% Q-RPT 量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.010%读数， 或 0.0024% Q-RPT 量程	0.010%读数， 或0.0024% Q-RPT量程	0.010%读数， 或 0.0049% Q-RPT 量程
(绝对不确定度)	-----	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程	% Q-RPT 量程
参考	正态	0.00002	0.00002	0.00002
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003
精度	正态	0.0012	0.0012	0.0012
温度	平均	0.0002	0.0002	0.0006
稳定度	平均	0.0000	0.0000	0.0021

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度：A200M 和 A280M

±(0.018%读数，或 0.0054% Q-RPT 量程，取大值)，定期进行自动调零

±(0.018%读数，或 0.008% Q-RPT 量程，取大值)，不使用自动调零

		并联模式		
变量或参数	分布	标准级 – 绝压，使用自动调零	标准级 – 表压模式	标准 – 绝压，使用自动调零
(相对不确定度)		% 读数	% 读数	% 读数
参考	正态	0.0025	0.0025	0.0025
一致性	平均	0.0060	0.0060	0.0060
重复性	正态	0.0050	0.0050	0.0050
温度	平均	0.0006	0.0006	0.0006
温度	平均	0.0029	0.0029	0.0029

组合		0.009%读数， 或 0.0024% Q-RPT 量程	0.009%读数， 或0.0024% Q-RPT量程	0.009%读数， 或 0.0038% Q-RPT 量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.017%读数， 或 0.0047% Q-RPT 量程	0.017%读数， 或0.0047% Q-RPT量程	0.017%读数， 或 0.0077% Q-RPT 量程
(绝对不确定度)	-----	%量程	%量程	%量程
参考	正态	0.00002	0.00002	0.00002
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003
精密	正态	0.0023	0.0023	0.0023
温度	平均	0.0003	0.0003	0.0009
稳定度	平均	0.0000	0.0000	0.0029

Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度：A200M 和 A280M

±(0.013%读数，或 0.0039% Q-RPT 量程，取大值)，定期进行自动调零

±(0.013%读数，或 0.006% Q-RPT 量程，取大值)，不使用自动调零

		并联模式		
变量或参数	分布	标准级 - 绝压，使用自动调零	标准级 - 表压模式	标准 - 绝压，不使用自动调零
(相对不确定度)		% 读数	% 读数	% 读数
参考	正态	0.0025	0.0025	0.0025
一致性	平均	0.0042	0.0042	0.0042
重复性	正态	0.0035	0.0035	0.0035
温度	平均	0.0004	0.0004	0.0004
稳定度	平均	0.0020	0.0020	0.0020

组合		0.006%读数，或 0.0017% Q-RPT 量程	0.006%读数，或 0.0017% Q-RPT 量程	0.006%读数，或 0.0027% Q-RPT 量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.013%读数，或 0.0033% Q-RPT 量程	0.013%读数，或 0.0033% Q-RPT 量程	0.013%读数，或 0.0054% Q-RPT 量程
(绝对不确定度)	-----	% 量程	% 量程	% 量程
参考	正态	0.00002	0.00002	0.00002
分辨率	平均	0.00003	0.00003	0.00003
精度	正态	0.0017	0.0017	0.0017
温度	平均	0.0002	0.0002	0.0006
稳定度	平均	0.0000	0.0000	0.0021

E-DWT-H、Q-RPT 量程的典型压力测量不确定度： : A7M、A14M、A20M、A40M、A70M、A100M、A140M、A200M、A280M

±(0.02%读数, 或 0.002% Q-RPT 量程, 取大值), 1 年期

±(0.025%读数, 或 0.0025% Q-RPT 量程, 取大值), 2 年期

变量或参数	分布	仅限表压(2 年)	仅限表压(1 年)
(相对不确定度)		% 读数	% 读数
参考	正态	0.0025	0.0025
一致性	平均	0.0082	0.0082
重复性	正态	0.0040	0.0040
分辨率	平均	0.0029	0.0029
温度	平均	0.0009	0.0009
稳定度	平均	0.0075	0.0038

组合		0.0124%读数, 或 0.0010% Q-RPT 量程	0.01%读数, 或 0.0010% Q-RPT 量程
组合 & 扩展 (K=2)时		0.025%读数, 或 0.0021% Q-RPT 量程	0.002%读数, 或 0.0021% Q-RPT 量程
(绝对不确定度)	-----	% 量程	% 量程
参考	正态	0.0003	0.0003
分辨率	平均	0.0003	0.0003
精度	正态	0.0009	0.0009
温度	平均	0.0003	0.0003