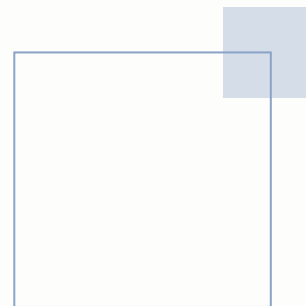




技术文章 · 取样几何

RGA 接在哪里， 读数就是哪里

取样几何对 RGA 测量的系统影响
——构型、位置与方位的三层效应

作者 刘宁 谢放平

出品 上海睿米仪器仪表有限公司 RealMeter Instruments (Shanghai)

版本 V1.0 2026-09-17

目录

摘要3

1. 引子：一个思想实验4

2. 两种基本构型（以及第三种）5

3. 核心物理：分压谱与通量谱6

4. 流导、沿程压差与有效抽速8

5. RGA 自身出气：串联构型的高本底9

6. 动态响应：时间轴上的几何10

7. 可凝蒸气：几何效应的放大器11

8. 间接陷阱：当谱形本身都变了12

9. 文献中的几何意识13

10. 工程判据与数据发布纪律14

11. 结语15

参考文献16

摘要

同一台残余气体分析仪（RGA）、同一支标准漏孔、同一个真空腔体，仅仅把 RGA 从"与泵并联"改为"与泵串联"，测得的谱图就会在成分权重、本底水平、信噪比和动态响应上产生系统性差异——而许多现场操作者不认为这会改变任何读数。本文论证：取样几何不改变被测气体的碎裂图样（谱的"骨架"），但改变被测量的定义本身（谱的"血肉"）。并联构型测的是腔体静态分压谱（经 $1/S_i$ 加权，轻气体富集），串联构型测的是流道通量谱（接近进气流量配比）；流导限制、RGA 自身出气积累、响应时间常数差异、可凝蒸气的全通量暴露，逐一产生可量化甚至破坏性的影响。在极端情况下，几何通过移动头部压力区间间接改变碎裂比本身。据此提出：完整的 RGA 定量测量链必须固定五个变量——气体、仪器个体、运行参数、日期、**安装几何**；任何定量数据发布均应声明取样构型。

关键词：残余气体分析仪；四极质谱；取样几何；分压测量；分子泵；流导；可凝蒸气；数据发布纪律

1. 引子：一个思想实验

考虑一只最普通的真空腔体，壁上有三个接口。

接法一：三个口分别接 RGA、分子泵组、标准漏孔。漏孔放出的气体进入腔体、充分混合，一部分被 RGA 采样，大部分被泵抽走。

接法二：封闭一个口，另外两个口一个接标准漏孔，一个接"RGA 在前、分子泵在后"的串接组件。漏入气体的唯一出路，是穿过 RGA 所在的流道进入泵。

现在问：两种接法下，RGA 记录的谱图一样吗？

多数现场工程师的直觉是"应该差不多"——同一台仪器、同一支漏孔、同一个腔体，能差到哪里去？这个直觉错得相当远。两种接法测到的**不是同一个物理量**：一个是腔体内的状态，一个是流向泵的流量。两者的差异不是误差级别的扰动，而是定义级别的分歧，并且对不同气体、不同工况、不同时间尺度的影响方向和大小各不相同。

更有意思的是另一个反向问题：如果两种接法下谱图"完全不一样"——连主峰的相对强弱次序都颠倒——问题出在哪？答案往往不是几何，而是几何把仪器推过了某道非线性门槛。这个区分，正是处理现场"仪器不一致"争议时最值钱的一项判断。

本文以下分八节展开：第 2 节定义构型；第 3 节给出核心物理（分压谱与通量谱）；第 4-6 节逐项量化流导、自身出气与动态响应三项效应；第 7 节专门讨论可凝蒸气这一被几何放大得最厉害的体系；第 8 节分析"谱形都变了"的间接陷阱；第 9 节看文献中的几何意识；第 10 节给出工程判据与数据发布纪律。

2. 两种基本构型（以及第三种）

构型 A：并联取样。 RGA 与泵组分别接在腔体的独立接口上，RGA 浸在腔体气氛中，不承载净流量。这是过程监控与定量分析的常规接法。

构型 B：串联取样。 RGA 接在腔体与泵之间的流道上，全部气体流经 RGA 头部所在区域后进入泵。常见于小腔体、接口有限的系统，或为"让 RGA 看得更清楚"而有意为之的检漏布局。

实践中还存在**构型 C：差分取样**——RGA 置于经小孔或细管与主腔相连的差分抽气支腔内，自有小泵维持其工作压力。它广泛用于高压工艺腔（CVD、刻蚀）的在线监测。构型 C 引入了小孔的物种依赖透射与压力降，本文不展开，但其全部效应均可归入下述框架：几何决定"RGA 面前的气体"与"你想知道的气体"之间的变换关系，定量工作的第一步是知道这个变换是什么。

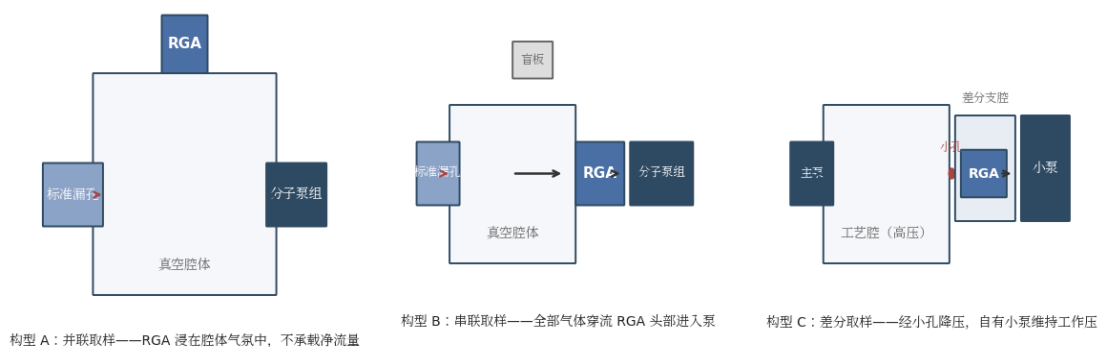


图1 三类基本取样构型。构型 A（并联）：RGA 与泵并列，浸在腔体气氛中，不承载净流量；构型 B（串联）：RGA 位于腔体与泵之间的唯一流道上，全部气体穿流其头部；构型 C（差分）：经小孔降压，自有小泵维持工作压。

3. 核心物理：分压谱与通量谱

3.1 并联构型测什么

构型 A 中，稳态下每种气体满足流量守恒，其腔体分压为：

$$p_i = \frac{Q_i}{S_i}$$

其中 Q_i 是该组分的入气速率， S_i 是泵组对该组分的有效抽速。RGA 浸在腔体中，测到的成分正比于 p_i ——即经 $1/S_i$ 加权后的成分。

关键在于 S_i 不是常数。涡轮分子泵的压缩比随分子量急剧变化：对 H_2 、He 等轻气体压缩比低、返流明显，有效抽速显著小于对 N_2 、Ar 等重气体的抽速。后果是**轻气体在腔体内相对富集**：同样的漏入流量， H_2 的稳态分压可以是重气体的数倍。换言之，构型 A 中 RGA 看到的氢、水峰相对权重被系统性放大——这不是仪器误差，是被测量本身的性质。

3.2 串联构型测什么

构型 B 中，RGA 头部位于唯一流道上，采样的是正在流向泵的**通量**。稳态下流道中各组分比例接近其流量配比 Q_i ，不经 $1/S_i$ 加权。

于是一个朴素但常被忽视的事实出现了：**同一瓶标气、同一支漏孔、同一台 RGA，并联安装读到的轻气体/重气体比，高于串联安装**。两者都不“错”——一个测量腔内的状态，一个测量流出的流量。错的是把两组数当成同一个量去比较，比如用串联构型下标定的响应系数去解释并联构型下的过程监控数据。

3.3 定向流与分子束效应

构型 B 的流道中存在净流量方向。若漏孔或进气口正对 RGA 取样方向，分子流态下的气体不发生充分混沌化，RGA 读数会带上方位依赖——分子束效应（molecular beaming）。这一效应在高水平计量工作中被明确防范：Daresbury 实验室在其 11 台 RGA 比对实验中，特意将注气管路与各 RGA 及参考规成直角布置，“以避免任何分子束效应”[1]。构型 A 中气体在腔体内多次碰壁、充分混沌化，方位依赖被自然抹平——这是并联构型一个很少被提起、却非常实在的优点。

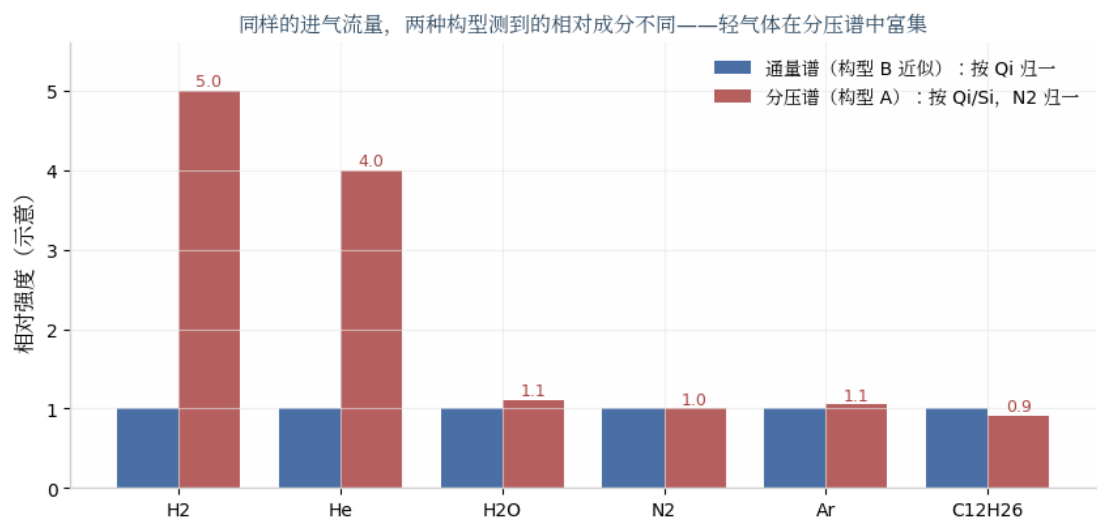


图2 分压谱与通量谱的成分差异（示意）。同样的进气流量，并联构型测到经 Q_i/S_i 加权的分压谱，轻气体显著富集；串联构型测到接近通量配比。数值为量级示意，具体取决于泵型与工况。

4. 流导、沿程压差与有效抽速

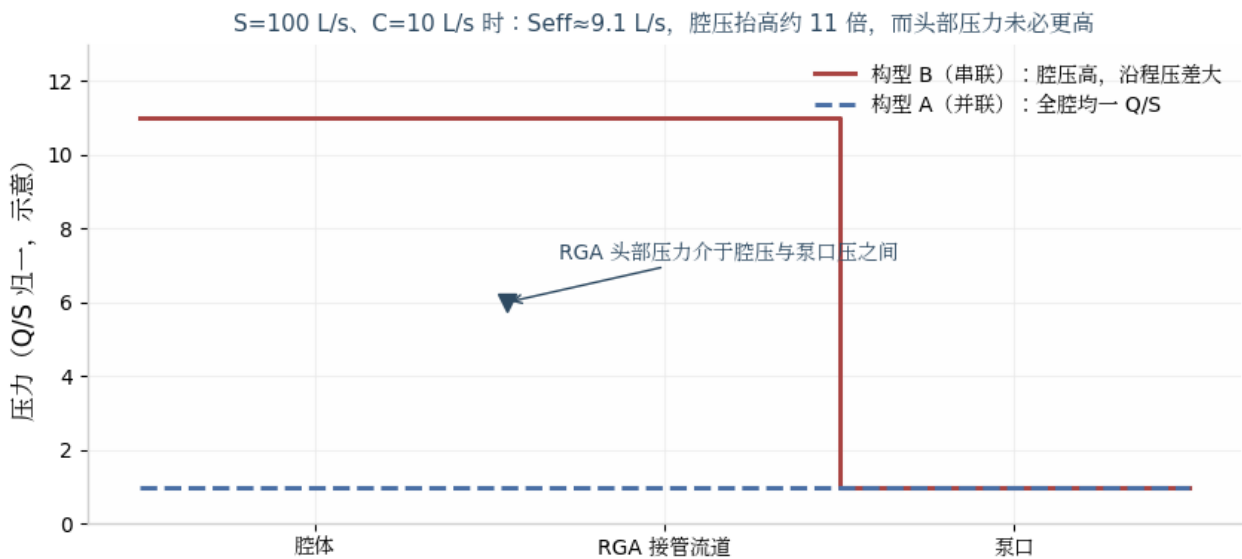
构型 B 中，泵口与腔体之间隔着 RGA 接管的流导 C 。腔体感受到的有效抽速降为：

$$S_{\text{eff}} = \frac{C \cdot S}{C + S}$$

取典型值 $S = 100 \text{ L/s}$ （小型分子泵）、 $C = 10 \text{ L/s}$ （DN40 短管量级），则 $S_{\text{eff}} \approx 9.1 \text{ L/s}$ ——**泵的九成能力被流导截留**。由此引出一组反直觉的事实：

1. 串联构型中，腔压升高到 Q/S_{eff} ，比并联构型高一个数量级；
2. 但 RGA 头部位于流道下游侧，其局部压力介于腔压与泵口压 Q/S 之间，**可能反而低于并联构型中直接浸在腔压里的探头**；
3. 因此同一支漏孔，两种接法下“漏孔信号/本底”的比值可以相差数倍——方向也未必如直觉预期。

任何把两种构型下测得的绝对信号直接对比的做法，都是在比较两个不同流场节点的压力。



做漏率标定、响应系数传递时尤其要警惕：标定在哪一种构型下完成，系数就只在那一种构型下成立。

5. RGA 自身出气：串联构型的高本底

RGA 不是无源的观察者。灯丝热脱附持续放出 H_2 、 CO 、 H_2O ，探头材料、电极与焊点亦各有其出气率。这部分“仪器自己的气体”去了哪里，取决于几何：

- **构型 A**：自身出气汇入腔体，被泵组全速抽走，在探头处几乎不积累；
- **构型 B**：自身出气只能经接管流导排走，稳态分压被流导成比例抬升。

效果是：串联安装的谱图本底更“脏”—— m/z 2、18、28 的本底峰相对更高，检测限相应变差。这与被测气体无关，是仪器自身出气在不同几何下的权重差异。由此得到一条发布纪律的推论：**报检测限而不报安装几何，等于隐瞒了检测限定义的一半。**

6. 动态响应：时间轴上的几何

腔体-管路系统对阶跃流量的响应时间常数为：

$$\tau = \frac{V}{S_{\text{eff}}}$$

构型 B 的有效抽速被流导压缩后， τ 成比例拉长；且 RGA 位于沿程压差的下游侧，其响应比腔体真实变化更滞后。开关漏孔、阶跃进样、漏率标定、工艺拐点捕捉这类依赖升降沿的测量，在两种构型下**不可直接互换**。一个常见的现场误判由此而来：同一台设备换过一次管路后，"RGA 变得迟钝了"——仪器没变，几何变了。

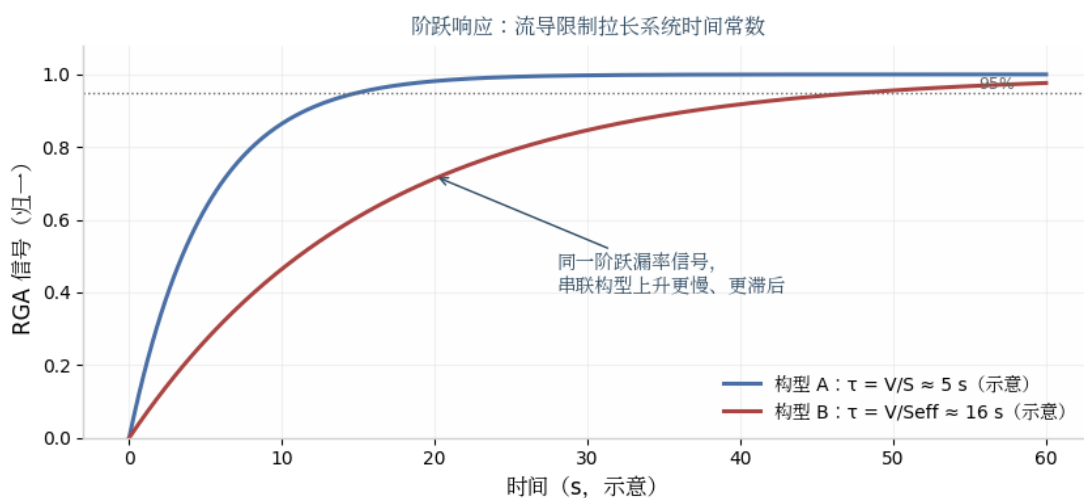


图4 阶跃响应差异（示意）。同样的阶跃漏率信号，并联构型按 $\tau=V/S$ 快速跟随，串联构型按 $\tau=V/S_{\text{eff}}$ 缓慢爬升且更滞后。

7. 可凝蒸气：几何效应的放大器

对有机蒸气（碳氢污染物、光刻胶出气、泵油返流、工艺副产物），几何效应被进一步放大，并带有破坏性。以正十二烷为例（我们曾以此介质完成一组受控对照实验，详见 [2]）：

并联构型中，蒸气进入腔体后大部分被分子泵直接分流——重分子在分子泵中压缩比高、抽速接近名义值，平衡分压低，RGA 只采样其分压，离子源暴露剂量小，记忆效应轻，谱的升降沿干净。

串联构型中，全部蒸气穿流 RGA 头部所在流道。离子源区域承受**全通量暴露**：源壁吸附、凝结、谱峰记忆拖尾、乃至灯丝污染导致发射状态漂移，逐一出现。同样的介质、同样的仪器参数，串联安装下谱的时间行为完全不同——开漏孔后上升变慢，关漏孔后拖尾拉长，“稳态”可能根本等不到。更隐蔽的是，吸附在源壁的有机膜会缓慢再释，污染此后数小时甚至数天的其他测量。

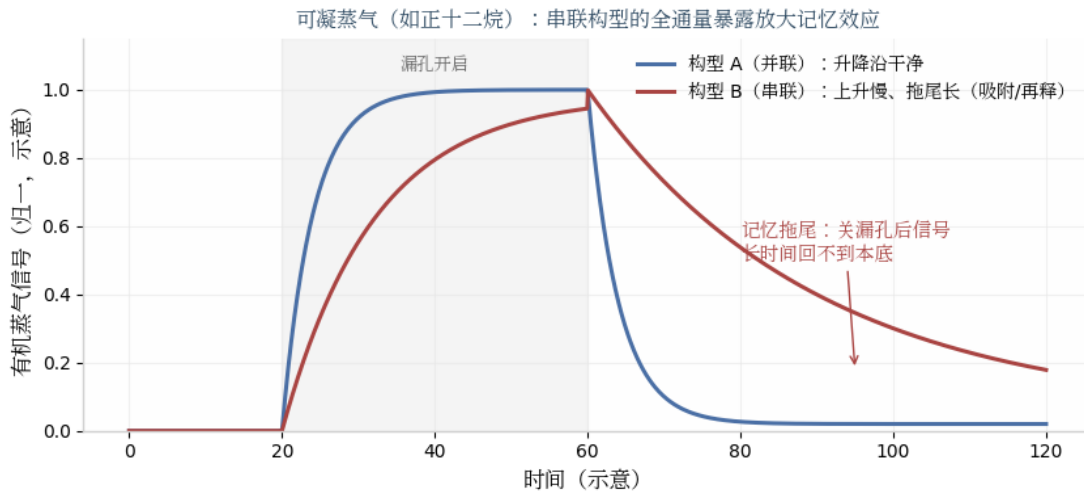


图5 可凝蒸气的记忆效应（示意）。同样的漏孔开关序列：并联构型升降沿干净；串联构型上升慢、拖尾长，关漏孔后信号长时间回不到本底——源壁吸附与再释所致。

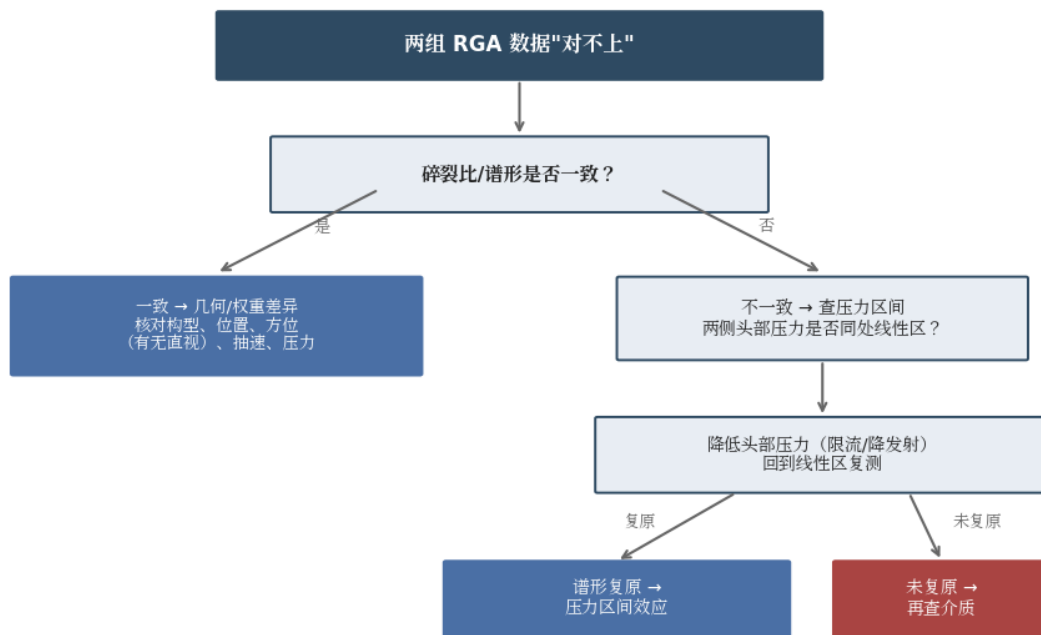
由此给出明确的工程建议：**有机蒸气的 RGA 测量优先采用并联构型；现场若只能串联，须记录 RGA 头部压力并验证其处于线性区，且不应将两种构型下采集的谱直接比对。**

8. 间接陷阱：当谱形本身都变了

到目前为止，讨论的所有效应都不改变介质的碎裂图样——同一气体在同一仪器、同一参数下， m/z 43 与 57 的比值不因安装方式而变。谱形由“仪器 × 参数”决定，这是我们用正十二烷受控实验证明过的命题 [2]。

但几何有一条间接路径可以碰到谱形：**移动头部压力的工作区间**。串联流导受限、腔压抬升，若 RGA 头部压力进入非线性区（ 10^{-5} mbar 量级，视仪器与发射电流而定），空间电荷效应与检测器非线性登场——此时碎裂比本身开始漂移，谱的“骨架”真的变了。

这制造了一类极具迷惑性的现场争议：两种构型下谱图连峰强次序都不同，各方争执“介质问题”还是“仪器问题”，实际上根因是**几何把仪器推过了非线性门槛**——与“高发射电流改变碎裂比”同族 [2]。判别方法也由此而来：把头部压力降回线性区，若谱形复原，则争议定位为压力区间效应；不复原，才需要往介质方向追。



先对齐构型与位置，再对齐压力区间，最后才轮到介质——顺序不能反

图6 RGA 数据争议排查流程。第一问永远是谱形是否一致：一致，则差异在几何与权重层，按“构型—位置—方位”核对；不一致，先查头部压力区间，降压复测后再决定是否往介质方向追。顺序不能反。

这反过来强化了一条我们反复强调的纪律：报谱必须连同压力区间、发射电流等条件一起报——现在还要加上一条，连同安装几何一起报。

9. 文献中的几何意识

几何作为受控变量，在高水平工作中反复出现，只是从未被命名。

正面例子来自 Daresbury 实验室 2025 年发表的 11 台 RGA（MKS 与 HIDEN 三个型号、共 21 组校准）比对研究 [1]：除第 3.3 节所引的直角注气外，他们还把两台 RGA 与参考电离规布置在同一腔体的同一赤道面上、抽气口与该面垂直，并按 ISO 3569 的构型描述执行——几何标准化是其台间比对有效性的隐含前提。他们的结论“RGA 灵敏度系数台间不可互用、必须原位校准”[1] 因此应补一个注脚：那些比对是在**几何已被严格固定**的前提下完成的；若连几何都不固定，离散只会更大。

反面的证据散布在大量现场经验里：许多“仪器不一致”争议复盘到最后一层是几何差异——一台探头浸在主腔、一台缩在差分抽气的支管里，两台仪器各自诚实地测量了各自面前的气体。先把构型对齐，争议往往自行消解。

10. 工程判据与数据发布纪律

表 1 汇总两种构型的差异与选型判据。

表 1 取样构型对照与工程判据

项目	构型 A：并联取样	构型 B：串联取样
被测量	腔体静态分压谱 (Q_i/S_i 加权)	流道通量谱 (近似 Q_i 加权)
轻气体 (H_2/He) 权重	富集 (S_i 小则 p_i 大)	接近进气流量配比
分子束方位依赖	被腔体混沌化抹平	存在，须注意进气方位
腔压 / 头部压力	Q/S / 同腔压	Q/S_{eff} / 介于腔压与 Q/S 之间
漏孔信号/本底	由泵速 S 决定	由 S_{eff} 与沿程压差决定，可差数倍
RGA 自身出气	被腔体抽速稀释	受流导限制积累，本底更高
响应时间常数	V/S	V/S_{eff} ，显著拉长
可凝蒸气	大部分被泵分流，记忆效应轻	全部穿流离子源，吸附/拖尾/污染重
典型适用	过程监控、定量分析 (推荐)	检漏、小腔体、无独立 RGA 口时

据此，我们倡议在 RGA 定量数据的发布纪律中增列一条——**安装几何随数据发布：**

1. 声明取样构型（并联 / 串联 / 差分取样）；
2. 声明取样口、进气口与泵口的相对方位；
3. 给出接管流导或有效抽速的估计；
4. 记录 RGA 头部压力，并声明其处于线性区；
5. 跨构型的数据对比须先完成构型修正，否则对比无效。

11. 结语

RGA 测量的从来不是"气体"，而是"其头部所在位置、所在流路上的气体状态"。安装几何决定这个位置是什么。它不改变碎裂图样，却改变被测量的定义、各组分的权重、本底的构成、响应的速度；它放过永久气体的谱形，却会放大可凝蒸气的记忆，并在极端情况下经由压力区间间接改写谱形本身。

从完整测量链看，一次可复现、可比对的 RGA 定量测量必须同时固定五个变量：**气体、仪器个体、运行参数、日期、安装几何**。前四个已逐渐进入行业共识；第五个——几何——是本文希望补上的一元。下一次当你看到两组"对不上"的 RGA 数据，在怀疑介质、怀疑仪器之前，不妨先问一句：它们各自接在哪里？

参考文献

- [1] MARSHALL E, MALYSHEV O B, LUFF R. Comparison of residual gas analyser sensitivity coefficients in high to ultra-high vacuum [J]. Vacuum, 2025, 241: 114668. DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114668.
 - [2] 刘宁, 谢放平. RGA定量化白皮书 Part II: 有机蒸气——碎裂比的条件依赖性与"指纹"的边界 [R]. RealMeter Instruments (睿米), 2026 (V0.5 初稿) .
 - [3] 刘宁, 谢放平. RGA定量化白皮书 Part I: 从指纹分析到可溯源测量 (第 7 章: 取样几何) [R]. RealMeter Instruments (睿米), 2026 (V1.3) .
 - [4] ISO 3569:2011. Vacuum technology — Vacuum gauges — Calibration by direct comparison with a reference gauge [S]. 2011.
 - [5] JOUSTEN K. Handbook of Vacuum Technology [M]. Wiley-VCH, 2016. (分子泵压缩比的物种依赖性与流导计算)
-

© 2026 RealMeter Instruments (睿米)。本文可自由转发，转载请注明出处。