技 术 方 案 白 皮 书

极小漏率氦漏孔计量装置

技术方案白皮书

从 10^{-11} 到 10^{-16} · 六个数量级全量程溯源链

上海睿米仪器仪表有限公司

RealMeter Instruments (Shanghai)

V1.0 正式版 · 2026 年 10 月

本白皮书给出覆盖 1×10^{-11} ~ 1×10^{-16} Pa·m³/s（纯氦，23 ℃）六个数量级的氦标准漏孔计量装置的完整技术方案：一条溯源链（静态膨胀 SE 原级标准 + 分流毛细管 C_0/C_1）与两档测量级（A：10 mL 小体积直测；B：1 L 双室 + 取样压缩 + 联合回归），含不确定度预算、验证关口 G1~G10、验收判据、BOM 与建设里程碑，依据 JJF 1833—2020、JJF 1059.1 等规范编写，可供评审、采购与施工直接引用。

版本：V1.0 正式版，2026 年 10 月。

编写说明：本白皮书依据 JJF 1833—2020《真空氦漏孔校准规范》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》等规范编写；所有设计参数均附计算依据与验证关口，不确定度预算逐分量列出。

使用声明：本文件用于技术评审与施工依据的交流；验收以双方确认的证书与合同工况为准。引用转载请注明出处。

目　　录

摘要 3

第 1 章　总则 4

第 2 章　总体架构与工作原理 6

第 3 章　溯源级设计：静态膨胀 SE + 分流毛细管 C_0 8

第 4 章　测量级 A：10 mL 小体积直测单元（10^{-11}~10^{-14}） 11

第 5 章　测量级 B：1 L 双室 + 取样压缩 + 联合回归单元（10^{-15}~10^{-16}） 13

第 6 章　标准漏孔本体与供气系统 17

第 7 章　真空获得、烘烤与本底抑制工艺 21

第 8 章　控制与数据采集系统 22

第 9 章　不确定度评定 23

第 10 章　验证关口与验收判据 25

第 11 章　主要设备清单（BOM）与建设里程碑 27

第 12 章　参考文献 30

第 13 章　合规路径与运维保障 31

附录 A　编号公式汇总 35

结　论 37

摘　要

本白皮书给出覆盖 **1×10^{-11} ~ 1×10^{-16} Pa·m³/s**（纯氦，23 ℃）六个数量级的氦标准漏孔计量装置的技术方案。装置由一条溯源链（静态膨胀 SE 原级标准 + 分流毛细管 C_0/C_1）与两档测量级（A：10 mL 小体积直测；B：1 L 双室 + 取样压缩 + 联合回归）构成：

- **A 段（10^{-11}~10^{-14}）**：预期扩展不确定度 U=10.0%/10.2%（k=2），优于 JJF 1833-2020 比较法基线（U=20%）近 2 倍，不确定度预算、验证关口 G1~G10、防堵与单点冗余、设施与软件要求齐备，**具备放行施工条件**；
- **B 段（10^{-15}~10^{-16}）**：预期 U=16.0%（k=2），受本底抑制与溯源验证途径限制，**建议暂缓采购施工**，待 M2/M3 关口实测确认后放行；
- **溯源与合规**：SE 原级（p/V/T 基本量）+ 分流比架构与国家基准同构；10^{-12}~10^{-14} 三个锚点流量点可校验比较法链路并标定 QMS 响应非线性；10^{-15}/10^{-16} 档当前出研究性测量报告，附外部一致性核查支撑；
- **物理地基**：流导系数与气体动理学第一性原理零偏差，温度系数取保守值，失效模式经 FMEA 定量化，两项最高风险均有对应验证关口；
- **建设计划**：A 段里程碑 12 个月，B 段待 M2/M3 关口实测确认后放行，另计 12~18 个月（§11.2）。

第 1 章　总则

1.1　范围

本方案书规定一套覆盖 **1×10^{-11} ~ 1×10^{-16} Pa·m³/s**（纯氦，23 ℃ 基准）六个数量级的氦标准漏孔计量装置的总体架构、关键单元设计参数、真空与工艺要求、控制数采、不确定度预算、验证关口与验收判据。装置任务是对该量程的氦漏孔出具**带不确定度、有溯源链**的计量定值，而非产线检漏。

1.2　规范性引用文件

文件	用途
JJF 1833-2020《真空氦漏孔校准规范》	比较法装置基线 U=20%（k=2）；附录 C 极小量级预期区间 12%~26%（适用范围 1×10^{-10}~1×10^{-4}，本装置 10^{-16} 档低于其下限 6 个数量级，仅作预期参照）
JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示	GUM 方和根合成、有效自由度与包含因子
GB/T 3163 / GB/T 6070 等真空技术术语与法兰标准	术语、CF 法兰接口

1.3　术语

静态累积：漏孔气体在密闭容积 V 内累积，测压强斜率 k，Q=V·k（式 1-1）。**比较法**：以标准漏孔 Qs 为参照比对定值；**绝对法**：以静态膨胀标准流量直接定值。**测量级**：读出被测漏率的功能段；**溯源级**：产生并缩小标准流量的功能段。**移除比 f**：单次取样占累积库存的份额。**整机包氦检漏**：将整机（或区段）置于 1 atm 纯氦包壳中、真空法测总漏率的验收方式。

1.4　设计输入

项目	取值	来源/依据
工质	纯 He（≥99.999%）	质谱检漏惯例，m/z=4
基准温度	23 ℃（296.15 K，kT=4.09×10^{-21} J）	JJF 1833 口径
目标量程	10^{-11}~10^{-16} Pa·m³/s	应用需求（器件微小漏率、航天、半导体）
不确定度目标	A 段　U=10.0%/10.2%　、　B 段 U=16.0%（k=2）	第 9 章预算；正式指标建成后实测评定申报
本底红线	B 段等效 He 本底 ≤10^{-17} Pa·m³/s	0.1×最小被测漏率；**按三项按件累加预算验收（§5.3）**

大气氦分压	0.531 Pa（5.24 ppm × 101 325 Pa）	大气氦体积分数标准值；折算系数 $\alpha=5.24\times10^{-6}$（式 5-2）

第 2 章　总体架构与工作原理

2.1　量级分段判决（设计公理）

累积斜率 k=Q/V。取 V=10 mL：10^{-13} 档 100 s 即达 10^{-6} Pa（QMS Faraday 杯直读区——对应离子流 $I=S\cdot I_e\cdot p=10^{-12}$ A，1 s 积分 SNR≈10^{3}、10 Hz 逐点 ≈3×10^{2}，信号远够）；而 10^{-16} 档需 28 h，且撞上三堵墙——

障碍（10^{-16} 用小体积）	定量结果
① QMS 连续直供饱和	饱和压强 $p_{ss}=Q\cdot e/(S\cdot I_e\cdot kT)\approx4\times10^{-9}$ Pa（式 2-2），增益归零
② 统计样本库存不足	分立读数每点耗库存 ~2.5%，20 点耗半，回归统计不成立
③ 本底为绝对值指标	≤10^{-17} 不随 V 缩小，小室面积/容积比恶化 4.6 倍

结论：**量级决定架构**。10^{-11}~10^{-14} 走 10 mL 小体积直测（测量级 A）；10^{-15}~10^{-16} 走 1 L 双室+取样压缩+调制可辨识+联合回归（测量级 B）；两级共用同一 SE+C_0 溯源链。

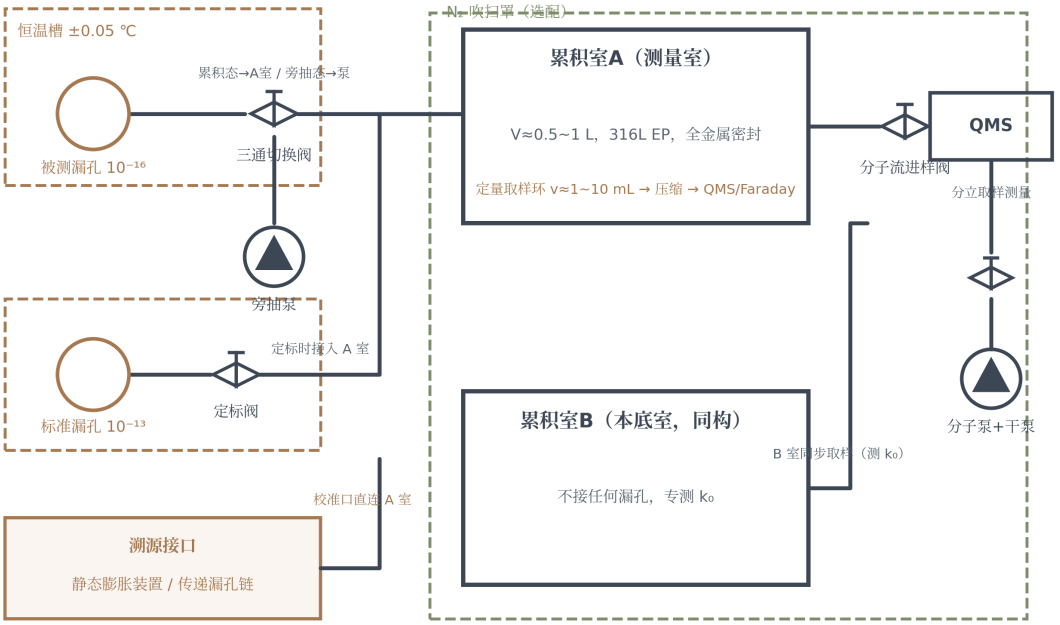


图 2-1　装置总体架构（溯源级 + 两档测量级）

两级三档难度与不确定度梯度

环节	测量级 B ｜ 10^{-16}（旗舰，暂缓）	测量级 A ｜ 10^{-14}	测量级 A ｜ 10^{-13}
本底要求	≤10^{-17}（红线判据）	≤10^{-15}	≤10^{-14}（常规可达）
累积室	1 L 双室（配对同炉）	10 mL 小体积	10 mL 小体积
压缩级	必需：压缩比 ρ=20，0.5 mL 微型室直读	取消	取消
测量模式	取样压缩 + 调制联合回归（日内 8 次循环）	分立直读，12 点 OLS 回归	分立直读，12 点 OLS 回归
累积时间	有效 5 d	约 17 min（单次循环）	100~1000 s
溯源	距 10^{-14} 锚点 2 个数量级外推，外部一致性核查（G9）	SE×C_0 锚点直达	SE×C_1/C_0 双路锚点直达
不确定度	U≈16.0%（k=2，设计目标）	U=10.2%（k=2，设计目标）	U=10.0%（k=2，设计目标）
单件周期	周级（含 ≥8 次复测循环）	2~3 h	0.5~2 h

注：不确定度均为设计目标；正式指标在装置建成后按实测评定申报。

图 2-2　两级三档难度与不确定度梯度

2.2　容积下限（施工硬约束）

电离消耗时间常数 τ=eV/(S·I_e·kT)（式 2-3）：V=10 mL 时 τ=392 s，单次 5 s 读数耗库存 1.27%——**前提：QMS 限流小孔流导 C_s ≤1×10^{-9} m^3/s（C_s 与电离抽速 2.55×10^{-8} m^3/s 并联，实际 τ=V/(S_ion+C_s)；C_s=1×10^{-7} 时 A 段 τ 掉到 80 s、5 s 耗 6.3%，本段所有消耗数随之失效；小孔流导列入 BOM 第 1 项验收）**；V=1 mL 时 τ=39 s、单点耗 12%、全程 ~78%，读数窗口内即失真。**直测取样器容积固定 10 mL 档**，更小容积不可施工。**适用范围**：本约束的前提是"秒级读数窗（5 s/点）"——B 段压缩后的 0.5 mL 微型测量室改用 **0.326 s 短窗**，消耗问题不复存在，不受本条约束（§5.2）；A 段直测仍严格执行 10 mL 档。

第 3 章　溯源级设计：静态膨胀 SE + 分流毛细管 C_0

3.1　静态膨胀标准流量

由压力、体积、温度三个基础量产生标准流量：$Q_{SE}=V_0\cdot dp/dt$ 或定容变压法 $Q_{SE}=p\cdot\Delta V/t$（式 3-1）。成熟区间覆盖 10^{-8}~10^{-10} Pa·m³/s，不确定度 1.0%~2.0%。末级驱动压力须 ≥10× 累积背压（式 3-2），末级限流元件采用 10 μm×10 mm 长毛细管。

> **末级毛细管流态说明**：10 μm×10 mm 毛细管流导 $C=326\cdot d^3/L\approx3.3\times10^{-11}$ m³/s；在 SE 高端输出 10^{-8} 时其上流压力约 307 Pa，$\lambda\approx4.4\times10^{-5}$ m、Kn≈4.4，落在过渡流区，分子流公式在该点有数个百分点偏差（10^{-9} 档 Kn≈44、10^{-10} 档 Kn≈444 均在分子流区）。该毛细管在链中仅作限流元件、其流导不直接进入定值（定值由 SE 的 p/V/T 给出），影响限于驱动压力裕度核算，与 SE 整体 U≤2% 不冲突。

3.2　分流毛细管 C_0 与溯源下延边界

C_0 为 20 mm 微通道毛细管，分子流流导 $C=326\cdot d^3/L$（式 3-3——系数 326=(π/12)·$\bar{v}$，$\bar{v}=\sqrt{(8RT/\pi M)}=1245$ m/s@293 K，与气体动理学第一性原理**零偏差**；温度系数通道项 0.3%/℃ 为理论值 1/(2T)=0.169%/℃ 的 1.77 倍保守取值，渗透项 3.5%/℃ 对应活化能 25.5 kJ/mol、与石英渗 He 文献值 25~30 自洽），与主路流导比分流约 10^4。**溯源链下延边界**：SE 最低标准流量 10^{-10} × 分流比 10^{-4} = **10^{-14} 为绝对法直达的最低点**；10^{-15}/10^{-16} 档的绝对法交叉验证在物理上无法直接闭合（两级分流总比 10^6 需级间恒抽速稳压，列为探索性研究、不入施工范围）。**10^{-15}/10^{-16} 档以比较法为报告值，绝对法 E_n 比对仅在 10^{-14}/10^{-15} 点进行**。

> **绝对法直达区间**：锚点 = 该点量值由"SE 原级实测量（p/V/T 定值）× 分流比 R"得到——"直达"是相对方法学外推而言；R 为比值量，其在使用点的取值依赖"分子流流导与压力无关"这一假设（该假设有理论支撑并由三点互证检验，但认识论上属**带现场检验的外推**，非零外推）。SE 成熟区间 10^{-8}~10^{-10}（U≤2%）经 C_1（~10^{-3}，§4.3）覆盖 10^{-13}~10^{-11}、经 C_0（~10^{-4}）覆盖 10^{-14}~10^{-12}，**直达区间 = 10^{-11}~10^{-14} 全段（A 段 4 个量级全部是锚点）**，逐档对应：

目标档	经 C_1 需 SE 输出	经 C_0 需 SE 输出	可达路径	判定
10^{-11}	1×10^{-8}（SE 上限）✓	超上限	C_1	✓ 锚点
10^{-12}	1×10^{-9} ✓	1×10^{-8} ✓	**C_1+C_0 双路**	✓ 锚点（可内部互验）
10^{-13}	1×10^{-10} ✓	1×10^{-9} ✓	**C_1+C_0 双路**	✓ 锚点（可内部互验）
10^{-14}	低于下限	1×10^{-10}（SE 下限）✓	C_0	✓ 锚点（最深点）
10^{-15}/10^{-16}	✗	✗	—	需外推，比较法为报告值

结合 §13.1（全量程 10^{-11}~10^{-16} 在国家基准与 JJF 1833 覆盖之外）：**10^{-11} 即是越界之后仍有绝对法支撑的第一个点，10^{-14} 是最深点——整个 A 段越界且全段有锚点**。锚点不确定度：u(Q_SE)=U_SE/2=1.0%，u(锚点)=√(u(Q_SE)²+u(R)²)，u(R)=0.5%/1%/2% 时 U(k=2)=**2.24%/2.83%/4.47%**——远优于 A 段报告值 U=10.0%/10.2%，故锚点用途为**验证 + 标定**：(a) 检验比较法链路系统偏差（E_n 分母 √(2.8²+10.0²)=10.4%，相对偏差 >10.4% 时 E_n>1 可检出）；(b) **直接标定 QMS 在 10^{-12}/10^{-13}/10^{-14} 三档的响应非线性、建立修正曲线**——文献[8] 发现该区间非线性但当时无该量级独立已知流量而无法修正，本方案锚点恰好提供（这是区别于纯比较法装置的核心能力，G10 执行）。锚点不替代报告值。边界必须写实：10^{-15}/10^{-16} 从 10^{-14} 锚点起仍有 2 个数量级外推、未经绝对法验证；锚点是内部自洽的最强证据，**不替代外部比对（G6/G9）**。分流比三点标定与常数性互证见关口 G10（§10）。

锚点成立的待证前提：① **SE 下限 1×10^{-10}@U≤2% 低于已发表 NMI 原级最低点**（NIST 2023：4.92×10^{-10}；PTB：2×10^{-9}；NIM 定容分流：5×10^{-9}）——属设计目标，由 G1 验收实测评定，锚点能力以 G1 实测为准；② **R 标定 u=0.5%~2% 同为设计目标**——R 无法在使用点（10^{-12}~10^{-14}）被 SE 直接标定（该流量恰在 SE 下限之下），须由流导比值法获得（C_0 为 0.25 μm 通道，上游 >10^3 Pa 时 Kn<1 脱离分子流，标定只能在低压微小流量端进行），其不确定度由 G10 实测评定；③ **三点检验是两条独立原级链互证**（SE×R vs 10 mL 累积 V·dp/dt），非单链自证——互证通过给一致性证据，不排除两链共有系统误差（可能性低但不可逻辑排除）；④ **SE 不达标降级方案**：若 G1 实测 SE 仅达 5×10^{-10}，则 C_0 直达下界退至 5×10^{-14}，**10^{-14} 档脱出锚点区、改比较法**（10^{-12}/10^{-13} 锚点仍成立），§9.1 该档预算须按比较法重评。

稀释法下延选项：C_0 上游改用 **1% He/Ar 有证混合气**，工作点总压从 0.227 Pa 抬到 22.7 Pa（133 Pa FS CDG 的 17%，CDG 选型难题消失），输出 Q_He=C_He·x_He·p_total 仍为 10^{-16}（复算：$4.401\times10^{-16}\times0.01\times22.7=9.99\times10^{-17}$ ✓）。代价 u(x_He)≈1%~2%，B 段 U 由 16.0% 升至 16.2%。**作业指导书红线（式 3-4）**：分子流下各组分独立流动，分离因子 √(M_Ar/M_He)=3.16，下游 He 富集约 2.6 倍——定值必须按 Q_He=C_He×p_He(上游分压) 计算，**绝不能按"下游总流量×上游浓度"反算**，否则引入 3.16 倍系统误差。漏孔本体（产品侧）不用混气——客户要的是"氦漏率"，且混气不解决壁渗透（R_perm 与浓度无关，分压抵消）。

C_0 管壁渗透修正：C_0（20 mm、输出 10^{-13} 时 p·L=4.54 Pa·m）的壁渗透/通道流比，按局部压力算法（全长暴露 ∫p dx=p_1L/2）为 **0.227**（恒定 p_1 简化口径为 0.45）——两项皆正比于 p，被流量法标定一并吸收、不破坏压力不变性；代价是温度系数由 0.3%/℃ 抬升至 **0.89%/℃**（式 6-11 加权，R=0.227），±0.1 ℃ 等温对应 0.089%，已计入不确定度预算。

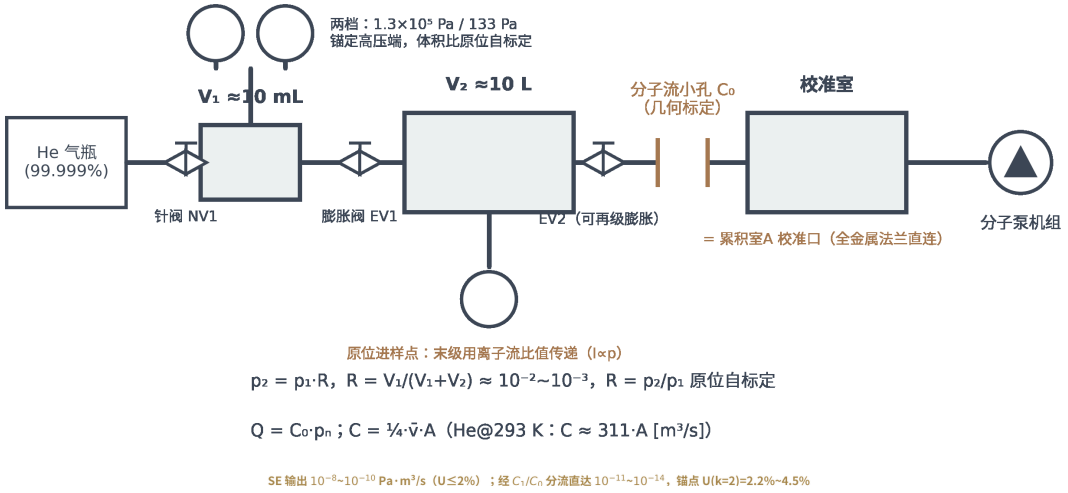


图 3-1　静态膨胀级结构与膨胀链

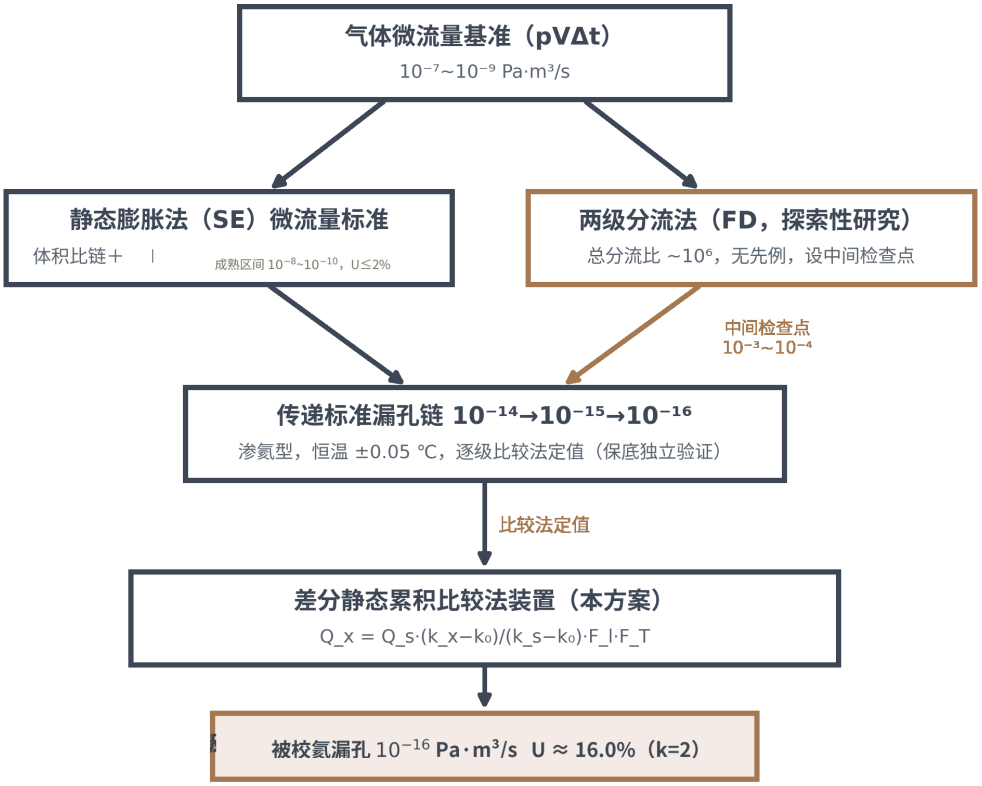


图 3-2　溯源链全图（SE → C_0 → 两档测量级 → 报告值）

3.3　溯源级验收

第 4 章　测量级 A：10 mL 小体积直测单元（10^{-11}~10^{-14}）

4.1　单元结构与参数

- 测量室 A：**V=10 mL**，内表面电解抛光，抽速为主室 1/10，p/QMS 进气口径 6 mm 加角度挡板；
- 压强测量：分流式 QMS 专用小体积取样器；**微流区供气用 CDG：量程 13.3 Pa FS（2 Pa 工作点对应 15% 量程，不得用 1.33 Pa FS 规格），采购条款写明精度口径为 % of reading**；
- 温度测量：四线制铂电阻贴壁，±0.05 ℃；
- 标定支路：标准漏孔连接腔独立配 V_K 阀门。

4.2　时序（一次循环）

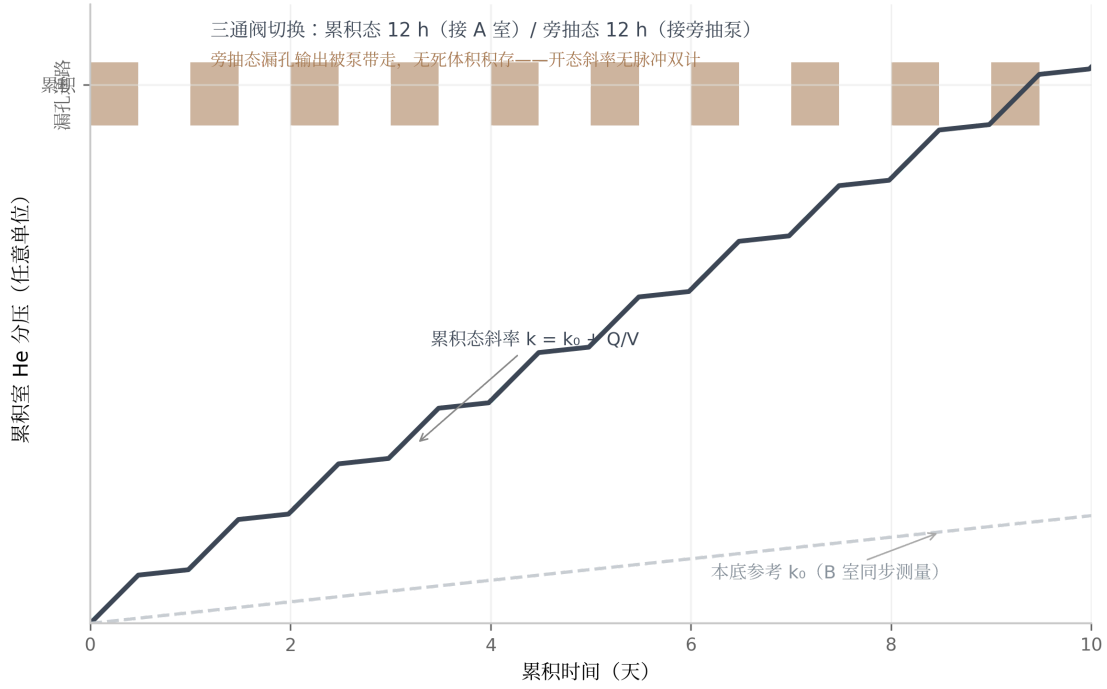


图 4-1　A 段测量时序（拷贝归零 → 隔离累积 → 逐点回归）

1. **拷贝归零**：10 s，室 A 连通泵，p 归零；
2. **隔离累积**：阀门关，开始累积，12 个采样点，点间隔按量级自适应（10^{-13} 档 20 s、10^{-14} 档 5 min、10^{-15} 档 30 min）；
3. **统计回归**：最小二乘拟合 k，报告 R^2 与置信区间；同时记录温度读数序列用于 V·k·δT/T 修正（式 4-2）。

4.3　分流标定与微型参考源

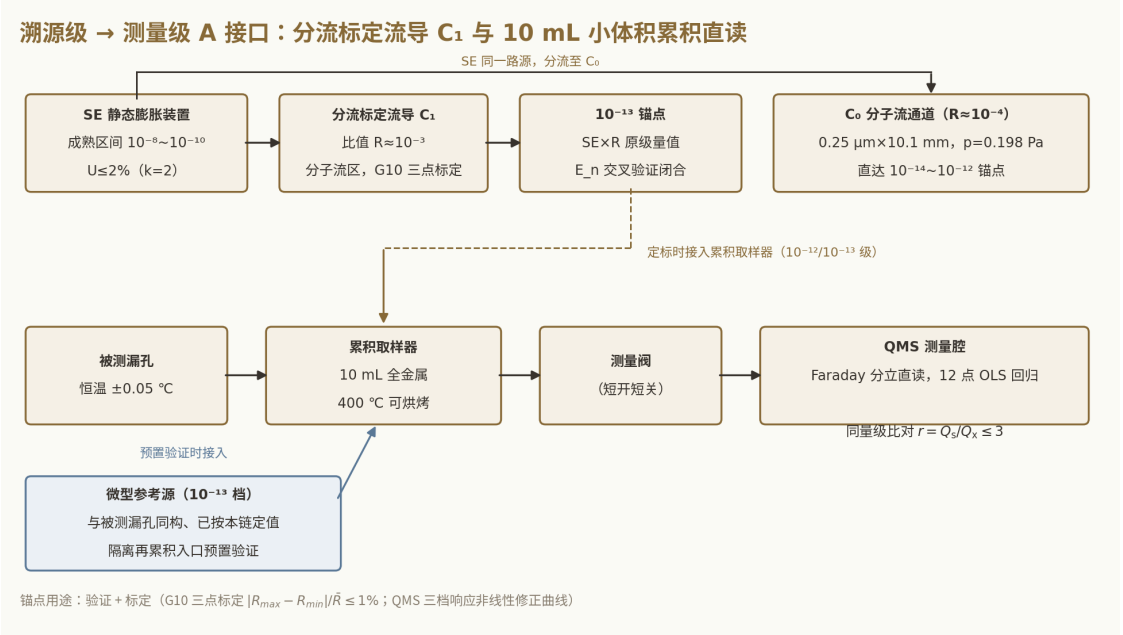


图 4-2　溯源级 → 测量级接口（分流标定流导 C_1）

4.4　量级分档与验收

档位	不确定度	累积时间（单次循环）	统计要求	单件全流程工时
10^{-11}~10^{-13}	U=10.0%	分钟级	12 点 OLS 回归 + R^2	0.5~2 h（拷贝归零 10 s + 累积 5~30 min + 回归 + 换件抽气，不含烘烤）
10^{-14}	U=10.2%（u_c=5.10%，加本底扣除残差 1%——本底占比达 10%，√(24.98+1)=√25.98；若本底项取 u=3% 则 U=11.7% 超分档内控线 11%，须以 §5.3 按件累加本底预算压实）	~17 min（1.2×10^{-13} Pa 起步）	12 点 OLS	2~3 h（累积 ~17 min + 12 点 ×5~15 min，含换件与回归报告）

验收判据：累计 5 支以上参考漏孔（含 10^{-13}/10^{-14} 档各 ≥1 支）E_n 全部 ≤0.3；日内重复性 ≤3%。

第 5 章　测量级 B：1 L 双室 + 取样压缩 + 联合回归单元（10^{-15}~10^{-16}）

5.1　双室配对累积

测量室 A、B **V=1 L**，同炉配对制造（同批 316L、同道电解抛光、同批清洗烘烤），本底配对一致；A 累积、B 拷贝同步，QMS 用 A/B 轮换开关测差分斜坡——**A/B 轮换抑制的是 QMS 灵敏度漂移、电子学零点漂移等仪器共模项（对应 §9.2 交叉修正 k_x）；两室各自的本底为独立随机量，相减反而放大 √2，不能靠差分抑制，须靠调制可辨识与联合回归分离（对应 §9.2 本底漂移残差 k_0）**。室体与管路全金属，直径 90 mm、长 150 mm。

5.2　取样压缩法（核心工序）

取样体积 V_s=10 mL，压缩比 ρ=20。**首次取样目标被测量级压缩，再进入 V_c=0.5 mL 微型测量室直读**——把"不可能放大"转化为"压缩一次再快读"。

压缩后读数方式：压缩后若注入 10 mL 单元，分压被稀释回接近原值，**压缩白做**、SNR 掉到 26，12 点回归不成立——该路径不可取。正确做法是**保压缩、换读数窗**；且 **V_c 取 0.5 mL（较 0.1 mL 全面改善**——增益—带宽与压缩余隙两项风险同步消解）：

量	取值	依据
压缩后体积 V_c（专用微型测量室，可接受区间 0.2~0.5 mL）	**0.5 mL**	压缩比 ρ=20 出口体积
压缩后分压（1 L@28 h 累积、Q=10^{-16}）	2.0×10^{-7} Pa	pV 守恒
τ = eV_c/(S·I_e·kT)，S·I_e=1×10^{-6} A/Pa（μA 档）	19.6 s	式 2-3
单点读数窗（12 窗总耗 ≤20%）	**0.326 s/窗**	τ×0.2/12
单点 SNR	**≈115 ✓（G2a 门槛 ≥100）**	SNR=0.0816/√V_c
QMS 采样率	**B 段 ≥4 Hz**（3.1 Hz 需求取整，常规 QMS 即可；A 段 10 Hz 不变）	0.326 s/窗
压缩机构余隙容忍	**≤0.1 mL（1%，常规定制）**	0.1 mL/0.1% 超常规（常规 1~5%）

两条纪律（不变）：① **绝不注入 10 mL 单元**；② **绝不降发射电流换长 τ**——τ 与 SNR 都正比于 S·I_e，降电流把 SNR 等比例赔进去。每窗电子数 4.1×10^{5} 与 V_c 无关（p∝1/V_c 与窗长 ∝V_c 抵消），小容积的收益只是把瞬时信号抬到电磁计本底之上并压缩工时——**SNR 115 已远高于回归所需，无须把 V_c 压到 0.1 mL 去追 258**。备选②：V_c=1 mL（τ=39.2 s、单窗 0.653 s、SNR=82）保留为退路；备选③（无压缩、10 mL 直读 SNR=26、须累积 280 h）不满足效率要求，不列入方案。

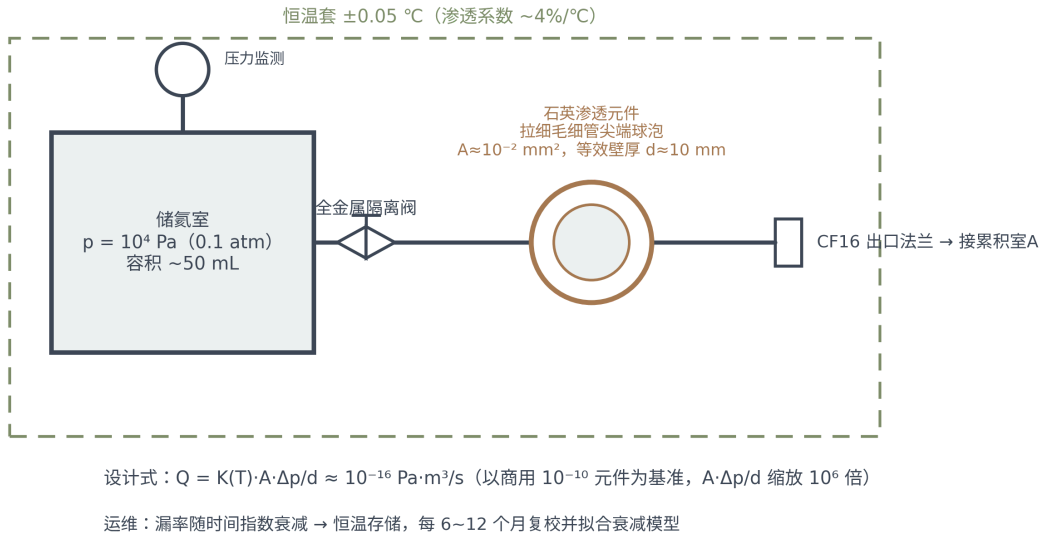


图 5-1　B 段双室+取样压缩+时序架构

5.3　本底抑制与本底预算

B 段本底采用**三项按件累加预算表 + 整机包氦折算验收判据**：

（1）大气氦真漏：焊缝/密封件按氦检额定漏率折算大气氦渗透率。折算系数（式 5-2）：$\alpha = q_{大气氦}/q_{氦检额定} = 0.531\ Pa / 1.013\times10^{5}\ Pa = \mathbf{5.24\times10^{-6}}$。以焊缝判据 1×10^{-10} Pa·m³/s 为例：单界面大气氦渗透 5.24×10^{-16}，20 个界面合计 1.05×10^{-14}；阀门按厂家指标 5×10^{-12} 折算单阀 2.62×10^{-17}，12 阀合计 3.14×10^{-16}；**按件累加总计 $\mathbf{1.08\times10^{-14}}$**。氦检额定漏率只是工艺通过判据，**不是**大气氦渗透率；原稿的 $5\times10^{-20}/5\times10^{-19}$ 为无法验证的假设值，删除。

（1′）预算与判据的弥合：按件累加 1.08×10^{-14} 折合整机包氦口径为 2.06×10^{-9} Pa·m³/s，与 G4 判据 $\le1.9\times10^{-12}$ **差 1084 倍**——按现件级指标施工，装置必然不满足 G4。氮吹扫单独不够：吹扫 53 倍（外部 He $<10^{-2}$ Pa）后仍超 21.6 倍，吹扫 500 倍（外部 He $<10^{-3}$ Pa）后仍超 2.16 倍——**且氮吹扫存在物理上限——气源 He 杂质 0.1~10 ppm 决定吹扫至多 0.5~52 倍，500 倍不可达，③采用夹套差分抽气 ≤10 Pa（降 1×10^{4} 倍）。弥合路径（须全部落地）**：

措施	定量效果	口径
① 焊缝判据由 1×10^{-10} 提到 $\le\mathbf{1\times10^{-11}}$（焊缝占累加值 97%，是主要矛盾）	累加降至 2.6×10^{-10}（额定）	采购/焊接工艺条款
② **减少界面数量**：B 段真空侧焊缝 ≤4 个（整体成形/减少分段）	焊缝额定 4×10^{-11}+ 其余 $6\times10^{-11}=1.0\times10^{-10}$；叠加后见下表——**它是把裕度从 1.23 倍拉到 3.20 倍的关键，且为结构设计项，后期改不了**	结构设计条款（必做）

③ **夹套差分抽气（氮吹扫物理上不可达：商业 5N~6N 氮的 He 杂质 0.1~10 ppm 把夹套 He 分压钉在 0.01~1 Pa，降 500 倍需 He<10 ppb，气源本底无解且 He 不可被 PSA/深冷脱除）**：漏孔区与外部接缝区外套密闭夹套，干泵连续抽气维持 **≤10 Pa**（He 分压 5.2×10^{-5} Pa，相对大气降 **1.0×10^{4} 倍**，比原 500 倍要求富裕 20 倍）；充氮仅作粗置换辅助，不得作为达标手段	见下表两行	关口 G4a（RGA 取样实测，M3）

①/②/③叠加后的定量结果：

组合	大气氦本底（×α/500 后）	对红线 1×10^{-17} 裕度	对含 3 倍裕度判据 3.35×10^{-18} 裕度
仅①（焊缝 $\le10^{-11}$）+ 夹套抽气 ≤10 Pa	2.7×10^{-18}	3.67 倍	**1.23 倍（薄）**
①+②（焊缝 ≤4 个）+ 夹套抽气 ≤10 Pa	**1.05×10^{-18}**	**9.54 倍**	**3.20 倍（可接受）**

注：上表数值按降 500 倍保守沿用——夹套抽气 ≤10 Pa 实际降 1.0×10^{4} 倍，叠加后本底更低，裕度实为更厚；保留 500 倍口径是为与前几轮判据可比。

A/B 段分界定量表：

段	本底红线	按件累加 1.08×10^{-14} 相对红线	达标条件
A 段（10^{-14} 档）	1×10^{-15}	超 10.8 倍	夹套抽气 ≤50 Pa（He $<2.6\times10^{-4}$ Pa，降 2×10^{3} 倍）即可，常规能力 ✓
B 段（10^{-16} 档）	1×10^{-17}	超 1079 倍	夹套抽气 ≤10 Pa（降 1×10^{4} 倍）+ 焊缝 $\le10^{-11}$ + 界面 ≤4 个叠加，叠加后裕度 3.20 倍

这张表把"A 段放行、B 段暂缓"从定性判断变为定量判据：A 段本底需求在工程能力之内；B 段需超常规密封指标与吹扫上限叠加，①+②+③ **全部到位后裕度 3.20 倍（可接受但无余量挥霍）**——M3 以 G4a 实测为准，实测不达标则 B 段继续暂缓。

（2）包壳渗透：玻璃绝禁；金属壁厚 ≥2 mm 时渗透通量可忽略；无金属壁位置全部以金属盲板/垫片封闭。

（3）内部除气：双室 400 °C×48 h 高温烘烤 + 电解抛光；QMS 残余谱 m/z=4 分压 $\le10^{-17}$ Pa·m³/s 等效，且 **m/z=4 除气份额 $\le4\times10^{-6}$**（按 NIST 同工艺总除气 10^{-15} mol/s 的 He 份额上限反推，式 5-4）。

（4）A 段本底预算：A 段 10 mL 室本底红线 = 0.1×10^{-14} = **1×10^{-15} Pa·m³/s**；同一按件累加口径下需外部 He 降 ≥100 倍达标——由**夹套抽气 ≤50 Pa（He $<2.6\times10^{-4}$ Pa，降 2×10^{3} 倍）**实现；除气与真漏预算按 B 段同法编制、指标按红线同比放宽 100 倍。

（5）压缩机构本底条目：压缩机构（BOM 第 17 项）是 B 段新引入部件，其**死体积（≤0.01 mL）、吸附、微泄漏全部计入本底预算**——等效漏率与死体积须以 G2a 实测验证并纳入 B 段本底预算，实测超标则压缩机构判不合格、B 段继续暂缓。

验收路径：- **整机包氦折算判据（关口 G4）**：整机 1 atm 纯 He 包壳真空法检漏，实测总漏率 ≤1.9×10^{-12} Pa·m³/s（整机含 A+B 双室及全部界面，含 3 倍裕度后 ≤6.4×10^{-13}）⟺ 等效大气氦渗透 ≤10^{-17}；该判据须与弥合路径①②③联合执行，单独采购验收无法达到；- **夹套 He 分压实测**：夹套抽气状态下 RGA 取样实测 He 分压 **<1×10^{-4} Pa**（对应夹套压力 ≤20 Pa）；A 段 **<1×10^{-3} Pa**（对应 ≤50 Pa）；- **密闭夹套 + 干泵连续抽气**：漏孔区与外部接缝区外套密闭夹套，干泵维持 B 段 ≤10 Pa、A 段 ≤50 Pa，He 分压以 G4a 实测为准；干燥氮吹扫仅作粗置换辅助，**不得作为达标手段**（氮气 He 杂质 0.1~10 ppm 决定其物理上限仅 0.5~52 倍）；与 §6.2 差抽保护腔同一机构复用，不增加硬件配置。

5.4　统计与联合回归（调制可辨识）

A/B 室交替累积→取样→压缩→测量，QMS 记录调制信号，联合回归分离被测斜坡与缓变漂移本底（式 5-3）。回归给出 k、置信区间与调制谱检验。**交叉验证**：绝对法 E_n 比对仅在 10^{-14}/10^{-15} 点进行；10^{-16} 档报告值以比较法为准——**该档与 10^{-14} 锚点之间相隔 2 个数量级外推，其正确性未经绝对法验证；外部验证依赖 G9（514 所双边比对），未通过/未做比对则按 §13.1 只出研究性报告**。

第 6 章　标准漏孔本体与供气系统

6.1　本体结构与量程组合

微通道型圆截面通道（B 段本体 0.25/0.3 μm，突破常规 0.5 μm 加工下限），出口压力低、分子流，$Q=326\cdot d^3\cdot p/L$（式 6-1）。**量程组合**：$10^{-11}/10^{-12}$ 档双支冗余（一支工作、一支备份互校）；**10^{-13}~10^{-16} 档同样每档 ≥2 支（SPOF，单支失效即该档停摆，§13.2）**。

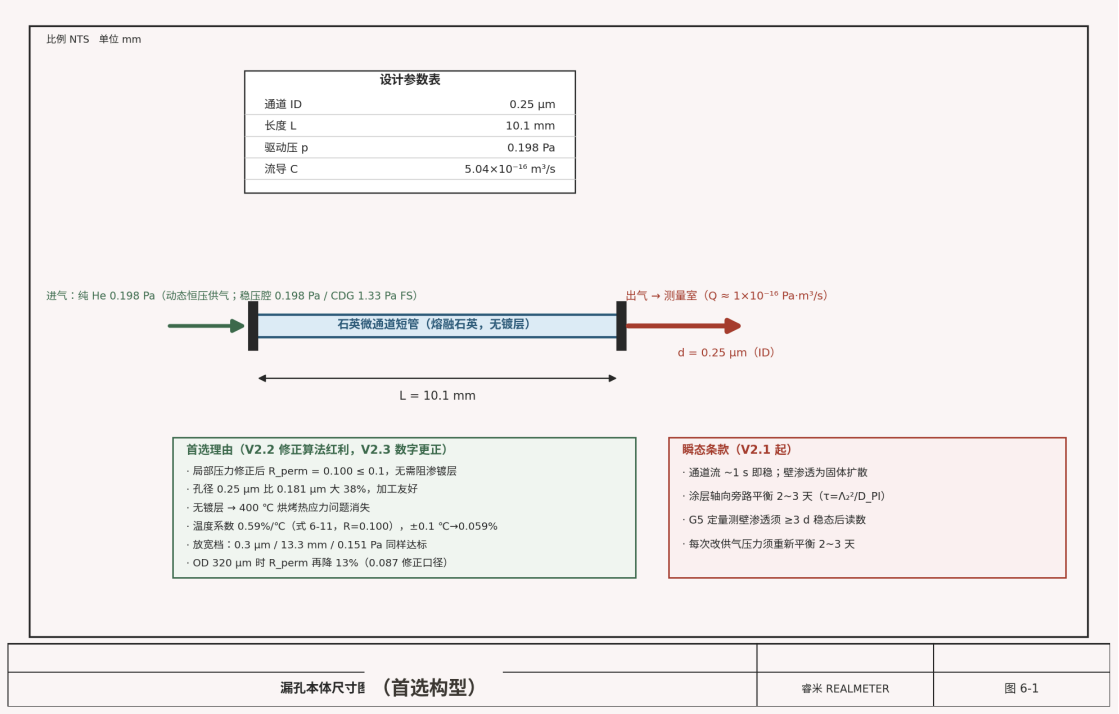


图 6-1　漏孔本体尺寸图

6.2　首选构型：石英短管 d=0.25 μm / L=10.1 mm / p=0.198 Pa（无需镀层）

构型选型依据：① 金属毛细管路线不可行——金属拉拔工艺内径下限约 10 μm，整条金属路线在 10^{-16} 量级受制造极限约束：d=10 μm（商用下限）、L=50 m（盘管上限）、p=0.0665 Pa（CDG 5% 量程下限）三极限齐推也只有 $Q_{min}=4.34\times10^{-16}$（式 6-4），达不到 10^{-16}；② 石英短管路线按局部压力壁渗透算法（式 6-7）核算，难度可控；③ 达标条件为真值 R_perm ≤0.1，**孔径不必压到 0.181 μm**。在 $Q=326\cdot d^3\cdot p/L=10^{-16}$ 与 R_perm≤0.2 的约束下，d=0.25 μm 是加工友好性与量程占位的最优点。

首选方案参数表——靠短管+低压把壁渗透占比压到判据以内，**不需要任何阻渗镀层**，400 °C 烘烤热应力问题随之消失：

量	数值	判定
通道流导 $C=326\cdot d^3/L$（d=0.25 μm、L=10.1 mm）	5.04×10^{-16} m³/s	—

R_perm	**0.100（守恒算法 0.067）**	≤0.1 ✓（壁渗透与通道流同正比于 p，被流量法标定一并吸收；代价：温度系数按式 6-11 加权为 **0.59%/℃**，±0.1 ℃ 控温对应 0.059%，仍远小于 A 段 0.3% 温度分量，已计入预算）
供气压力占位	0.198 Pa = **1.33 Pa FS 的 14.9%**	CDG 量程好 ✓
Kn（λ=69 mm）	2.8×10^{5}	深度分子流 ✓
储气寿命（1 L 气室 @0.198 Pa，式 6-5）	6.2×10^{4} 年	✓

放宽档：d=0.3 μm / L=13.3 mm / p=0.151 Pa（1.33 Pa FS 的 11.3%）同样满足修正后 R_perm ≤0.1——若 0.25 μm 加工良率不足，可先上 0.3 μm 档。**工艺攻关主线为 0.25 μm 级（退路 0.3 μm）**。紧凑备选（0.181 μm/4.4 mm/0.227 Pa）同样达标。

> **外径口径**：本参数表 R_perm 按式 6-2 隐含 OD/ID≈500（OD=125 μm）计，为保守取值。若实际采用项目方构型 **OD 320 μm（OD/ID=1280）**，壁厚增加使渗透更小：R_perm = **0.087（守恒算法 0.058）**，温度系数 0.56%/℃。**加工图必须注明实际 OD**，R_perm 按实际 OD 重算入账。

备选方案：差抽保护腔 + 金属引出管（保留 0.3 μm×180 mm 原参数）：石英微通道段整体置于抽空保护腔内，外壁渗透的氦被保护腔抽走（$p_{guard}=10^{-3}$ Pa 时抽速仅需 3.6×10^{-12} m³/s）；两端金属引出管（如 ID 100 μm×10 mm，流导比石英段大 9 个数量级，流阻贡献 ~10^{-9} 可忽略）穿出腔壁。**G5 堵头实验装置本质就是差抽腔，两者合并施工**——先搭差抽腔，再用它实测首选构型样机的实际壁渗透。

降为研究项：① 阻渗镀层（Ni/Au 镀石英——热应力严格解 $\sigma=E\cdot\Delta\alpha\cdot\Delta T/(1-\nu)$：400 ℃ 烘烤 **1415 MPa**（含 $1/(1-\nu)=1.45$ 因子，超化学镀 Ni 屈服 ~500 MPa 的 2.8 倍）、200 ℃ 仍 659 MPa，**石英基底上任何烘烤制度均不可行**；仅 PI 基底 + ≤200 ℃ 剩边缘窗口 339 MPa，仍脆弱）；② 金属毛细管（上述制造极限）。NIST 2023 采用不锈钢烧结元件（C≈50 nL/s）作流导，但其流导比本方案大 6 个数量级、不可照搬，仅作"全金属+全烘烤+除气 <10^{-15} mol/s"路线的可行性佐证。

> **壁渗透算法口径**：① 壁渗透驱动压为**局部压力 p(x)** 而非入口压力 p_1——分子流稳态 p 沿程线性下降，出口端暴露段的积分修正因子为 L_exp/(2L)（式 6-7），按恒定 p_1 简化算法将高估 4 倍；② 涂层轴向旁路同样按局部分界压力 p(x_b) 计（修正系数 0.797，式 6-8）；③ 寄生气体若取自被计量气流本身，存在守恒修正 ≈2/3（式 6-9；耦合迭代解与一阶解析吻合 0.02%）。按修正后算法，项目方新构型（ID 0.2 μm/OD 320 μm/PI 涂层 20 μm/L 10 mm/1 bar）入口浸 He 情形 R_eff=3.7%、全真空情形 8.9%——**本体工艺难度经复算可控**；但 1 bar 供气输出 2.7×10^{-11}（常规 10^{-11} 级），做 10^{-16} 仍须低压供气（0.227~0.383 Pa）。

瞬态约束：通道流 ~1 s 即稳，但壁渗透是固体扩散——石英壁径向 0.5~4 h，**涂层轴向旁路 $\tau=\Lambda_2^2/D_PI$=0.2~6.2 天（推荐 D=3×10⁻¹¹ m²/s 时 2.07 天）**。三条规则：① G5 堵头实验 10 分钟只能判有无，**定量测壁渗透须等 ≥3 天稳态**；② 每次改变供气压力后重新平衡 2~3 天，测量排程计入；③ 稳态诊断：读数持续爬升=旁路仍在建立（聚合物扩散），快速平稳=以石英径向渗透为主；稳态时旁路/(主渗透+旁路) 比值应与构型计算一致（如 20 μm 涂层构型 ≈31.5%），可作"是否到稳态"校验。

6.3　供气与储气单元

且"储氦寿命 6×10⁵ 年"隐含 1 L@2 Pa 气室（V=T·Q/p≈0.95 L，式 6-5），而毛细管自身容积微乎其微——首选构型（0.25 μm×10.1 mm）管内容积仅 **0.49 pL，无气室时 1.0 秒耗尽**——储气室不可缺。

纯度寿命判决：储气室空气渗入 q_air=q_He_rated/2.65，t(10%)=δ·pV/q_air 与 p 成正比：

供气压力	**q_rated=1×10⁻¹⁰（常规密封）**	**q_rated=1×10⁻¹³**
2 Pa（A 段工作点）	0.17 年（61 天），不可行	170 年
0.198 Pa（B 段首选）	**0.0166 年（6 天）**	**16.6 年**

结论：① **动态恒压供气在 B 段不是"首选"，而是唯一可行方案**——常规密封（q_rated~1×10⁻¹⁰ 量级，12 阀厂家指标 5×10⁻¹² 属此量级附近）下静态储气仅 6 天；② 静态退路在 B 段从"170 年"缩到 **16.6 年**，仍可行，但**必须年度复校**（与下条"年度复校"恰好匹配）。

首选（B 段唯一可行）：动态恒压供气（15 MPa→0.198 Pa 降压比 7.6×10⁷，商业精密压力控制器最低控制压力 ~100 Pa 量级，单级不可达）——高压氦瓶（40 L、15 MPa）→ 一级减压 + **~1 kPa 中间稳压腔** → **微流量针阀/压电阀**（高压侧补给流量仅 2.5 pL/s 量级）→ 精密压力控制器→ **稳压腔工作压力双档（"档"指工作压力档位而非 CDG 满量程）：B 段本体 0.198 Pa（1 L，配套 CDG 1.33 Pa FS，占 14.9%）、A 段本体 2 Pa（1 L，配套 CDG 13.3 Pa FS，占 15.0%）；原单一 2 Pa 稳压腔下 0.198 Pa 仅占 10% 量程，精度与稳定性不够** → 高流阻旁路连续抽气（F≈1000×q_air≈3.8×10⁻⁸ Pa·m³/s，由纯度要求决定、两档相同；**旁路抽速 S=F/p 按档选取：A 段 2 Pa → 1.9×10⁻⁸ m³/s，B 段 0.198 Pa → 1.9×10⁻⁷ m³/s（0.19 L/s），大 10.1 倍——两档不可共用同一限流流阻，各经独立高流阻小孔接前级**）。连续气流冲刷使渗入空气被即时带走，纯度不受密封漏率限制；年耗氦约 1.9 mg，经济性可忽略。**静态退路**：若采购不到合适压力控制器，则静态储气 + 密封件 ≤1×10⁻¹³ Pa·m³/s + 年度复校（A 段 t(10%)≈170 年、B 段 ≈16.6 年）。

6.4　堵头装置（与差抽保护腔合并）

见 §6.2：G5 堵头与差抽保护腔合并施工，堵头动作在保护腔内完成，避免大气氦直接冲击通道。

6.5　温度控制

C_0 恒温 ±0.1 ℃（渗透温度系数按修正口径 **0.89%/℃**→0.089%，式 6-11；漏孔本体首选构型温度系数 **0.59%/℃**→0.059%）；漏孔区 23±0.5 ℃；测量室温度梯度 ≤0.2 ℃。

第 7 章　真空获得、烘烤与本底抑制工艺

7.1　抽气机组

主泵：分子泵（≥200 L/s）+ 干式前级；极限真空 ≤10^{-7} Pa；测量室极限压强 ≤10^{-8} Pa（红线）。

7.2　整机密封与验收

- **焊缝**：A 段氦检 ≤1×10^{-10} Pa·m³/s；**B 段真空侧焊缝 ≤1×10^{-11} 且界面 ≤4 个**（焊缝占按件累加值 97%，是主要矛盾；氦检值为工艺通过判据，非大气氦渗透率）；
- **B 段界面清单（原按件累加只列"20 焊缝+12 阀"，施工时会漏项）**：1 L 双室系统全界面约 30 个，逐项指标如下——室体焊缝 4 个（≤1×10^{-11}，弥合路径②）、阀门 12 台（≤5×10^{-12} 厂家指标，逐台氦检）、真空计接口 4、泵口 2、QMS 接口 2、漏孔口 1、取样/压缩口 1、电馈通 2、备用口 2（均按 ≤5×10^{-12} 选件）；**非焊缝界面合计 ≈1.3×10^{-10}（额定）**，与弥合表"其余 6×10^{-11}"同量级——**结论不推翻，但采购与氦检须按本清单逐项销号**；
- **阀门**：按厂家指标 5×10^{-12} Pa·m³/s 选件，逐台氦检留档；
- **整机包氦折算验收（G4，式 5-2）**：总漏率 ≤1.9×10^{-12}（含 3 倍裕度 ≤6.4×10^{-13}）⟺ 大气氦渗透 ≤10^{-17}；
- **真空计选型**：测量区全部真空计采用**全金属/陶瓷封装、无玻璃泡**结构（BA 规金属壳、CDG 金属膜盒），违反此条即违反 §5.3 禁玻璃红线；
- **密闭夹套 + 干泵连续抽气**：漏孔区与外部接缝区外套密闭夹套，干泵连续抽气维持 **B 段 ≤10 Pa（He 分压 5.2×10^{-5} Pa，降 1×10^{4} 倍）、A 段 ≤50 Pa（降 2×10^{3} 倍），以 G4a 夹套 RGA 取样实测为准**；干燥氮仅作粗置换辅助——氮吹扫物理上限由气源 He 杂质（0.1~10 ppm）钉死在 0.5~52 倍，**氮吹扫 500 倍在物理上不可达，本底抑制不采用氮吹扫**。

7.3　烘烤与表面处理

双室 400 ℃×48 h（1 L 真空室，全金属构型）；**漏孔本体（含 PI 涂层的供气侧元件）单独定为 ≤250 ℃**——PI 长期耐温 250~300 ℃，两者不共用同一规程；内壁电解抛光 Ra≤0.4 μm；清洗流程：碱洗→酸洗→超纯水→无水乙醇→烘干。烘烤系统 BOM：加热带、温控器、K 型热电偶（§11.1）。

> **垫片口径**：关于"无氧铜 200~300 ℃ 再结晶、400 ℃ 反复烘烤退火软化"的质疑，结论：CF 刀口密封靠垫圈塑性变形实现，无氧铜垫圈 400~450 ℃ 反复烘烤是 UHV 行业惯例（NIST 同类装置即如此），且垫圈本就**一次性使用、拆卸必换**——退火软化威胁的是铝垫圈/弹性密封，不适用于 CF 铜垫圈。**维持 400 ℃×48 h**；同时采纳其合理内核：① BOM 注明垫圈材质（无氧铜 CF，一次性）；② **300 ℃×72 h 列为降风险选项**（除气 ∝exp(−E/RT)，延时可部分补偿降温），工艺验证阶段对比两档除气数据后定稿。

第 8 章　控制与数据采集系统

8.1　硬件架构

- PLC 控阀门时序；QMS 数字输出；温度巡检仪（±0.05 ℃）；CDG 0~10 V 模拟采集；
- 工控机运行采集软件（Python/自研），采样率 **A 段 10 Hz / B 段 ≥4 Hz**（V_c=0.5 mL 后单窗 0.326 s，需求 3.1 Hz，常规 QMS 即可；；QMS 与温度同步）。

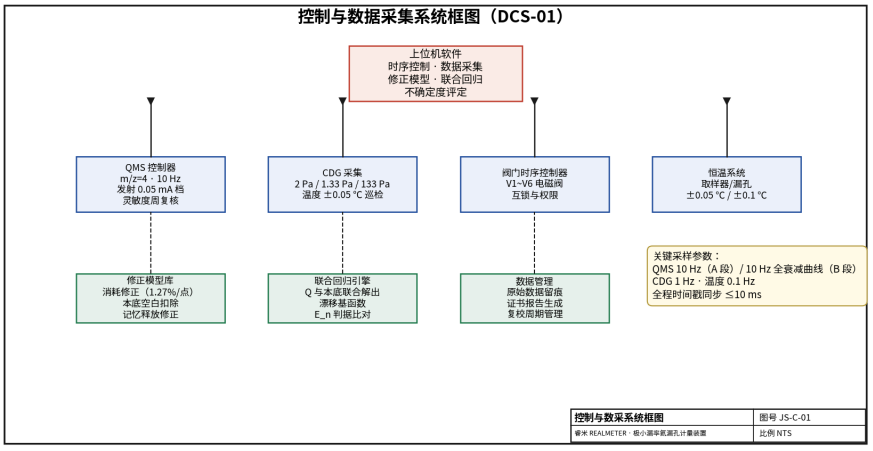


图 8-1　控制与数采系统框图

8.2　软件功能

时序自动执行（拷贝归零/累积/取样/压缩/回归）、实时显示 p-t 曲线与回归直线、自动生成报告（含 k、R^2、不确定度、E_n）、原始数据存档（CSV + 审计日志）。

第 9 章　不确定度评定

9.1　A 段（10^{-11}~10^{-14}）分量表

分量	类型	标准不确定度	依据
标准流量 Q_s（SE+C_0）	B	2.5%	SE≤2% + C_0 标定链
累积斜率回归	A	3.0%	**单次循环内** 12 点 OLS 残差
体积测量 V	B	0.8%	三维测量+称重法
温度修正 δT/T	B	0.3%	±0.1 ℃ 恒温下的综合估计（含梯度与测量不确定度，非 0.3%/℃×0.05 ℃ 连乘）
重复性	A	3.0%	**循环间**散布，含换件、重装、抽气历史差异（日内 **8 次循环**）——与回归项的边界在此划清：回归=单次内残差，重复性=循环间含重装，二者物理独立，**不合并**（若合并 u_c=4.00%、U=8.0%，本方案从严不取）
本底扣除残差	B	1.0%（仅 10^{-14} 档）	本底占比 10% 时的扣除不确定度
QMS 响应非线性	B	**0.5%（同量级比对 r=Q_s/Q_x≤3）；跨量级 r≥10 取 1%~2% 且须实测**	冯天佑等文献[8]：静态累积法 <7.66×10^{-12} Pa·m^3/s 起标准流量与离子流上升率呈明显非线性（最大偏差 6.8%），测量下限 1.69×10^{-14}——A 段 $10^{-12}/10^{-13}/10^{-14}$ 三档均在该非线性区（10^{-14} 档甚至低于其测量下限）。回归项只覆盖单次循环内随机残差，不能吸收跨量级响应非线性（系统偏差），故显式列项；残余经 G10 锚点三点实测修正曲线压实

合成：10^{-11}~10^{-13} 档 $u_c=\sqrt{(2.5^2+3^2+0.8^2+0.3^2+3^2+0.5^2)}=\sqrt{}$**25.23=5.02%**，U=**10.0%**（k=2，10.05% 按位取舍）；10^{-14} 档 $u_c=\sqrt{}26.23=$**5.12%**，U=**10.2%**（k=2，10.24%）。**k 因子声明**：k=2 为 JJF 1059.1 允许的约定值；按 Welch-Satterthwaite 严格解——$\nu_{eff}=u_c^4/\Sigma(u_i^4/\nu_i)$（A 类：回归 ν=10、重复性 ν=7；B 类 ν 取 50~∞）≈**32**，k(95%, ν=32)=**2.04**，严格解 U=10.2%（10^{-14} 档 ν_{eff}≈34、U=10.4%，仍低于 11% 分档线）——约定值与严格解差异 ≤0.2 个百分点，出证时按 JJF 1059.1 声明"k=2 约定"并附本注。**内控线（分档）**：10^{-11}~10^{-13} 档 U≤10%，10^{-14} 档 U≤11%（10.2% 仍优于 JJF 1833 比较法基线 U=20% 近 2 倍；若本底项恶化到 u=3% 则 U=11.7% 超分档线，须以 §5.3 按件累加预算+夹套抽气 ≤50 Pa 压实本底）。

9.2　B 段（10^{-15}~10^{-16}）分量表

分量	类型	标准不确定度	硬件映射
标准流量 Q_s（比较法参考源）	B	2.5%	SE+C_0 链
衰减修正	B	1.0%	取样压缩比 ρ=20 标定
本底漂移残差 k_0（主导项）	B	**6.0%**	双室配对一致性 + 调制回归残差；**压此项靠 §5.3 双闸门**
交叉修正 k_x	B	2.0%	A/B 轮换差分
拷贝修正 k_s	B	1.5%	拷贝归零残留
流导修正 F_l	B	2.0%	C_0 温度系数
灵敏度漂移	B	1.0%	QMS 日内漂移
取样体积 δ_{samp}	B	0.3%	10 mL 取样器称重标定
温度 F_T	B	0.3%	同 A 段
重复性	A	3.0%	日内 5 次
读数 SNR 统计	A	0.3%	0.5 mL 微型室单窗 0.326 s、SNR≈115 → 单点 ~0.9%，12 点回归后 ~0.25%，取 0.3%
混合气浓度 $u(x_{He})$	B	1.5%	1% He/Ar 有证混合气典型水平

合成：$u_c=\sqrt{(6.25+1+36+4+2.25+4+1+0.09+0.09+9+0.09)}=\sqrt{}63.77\approx$**7.99%**，$\nu_{eff}$≈315（Welch-Satterthwaite，k_0 主导），k=2 对应 U=**16.0%**。**启用稀释法时**：$u_c=\sqrt{(63.68+1.5^2)}=\sqrt{}65.93=$**8.12%**，U=**16.2%**。落在 JJF 1833 附录 C 预期区间（12%~26%）内。

第 10 章　验证关口与验收判据

关口	内容	判据	阶段
G1	烘烤后本底	QMS 残余谱 m/z=4 等效 $\le 10^{-17}$ Pa·m³/s，且 m/z=4 除气份额 $\le 4\times10^{-6}$	M1 真空达成后
G2	配对本底一致性	s ≤30%（同炉配对双室残余本底标准偏差）	M2 双室联调
G2a	压缩—读数链路验证	用 10^{-13} 档已知样品（1 L 累积 100 s 即达同分压 2×10^{-7} Pa，无需新增硬件）走一遍"取样→压缩 ρ=20→0.5 mL 微型室 0.326 s 短窗直读"全流程，**SNR 门槛 ≥100**（预期 ≈115）与 12 窗总耗 ≤20%；同时实测压缩机构等效漏率与死体积（纳入 §5.3(5) 预算）	B 段阶段起点（A 段验收后另计）
G3	C_0 流导不变性	分子流区间流导-压力线性验证，$R^2 \ge 0.999$，残差留档	M2
G4	整机包氦折算	1 atm 纯 He 包壳真空法总漏率 $\le 1.9\times10^{-12}$（含裕度 $\le 6.4\times10^{-13}$）⟺ 大气氦渗透 $\le 10^{-17}$；**须与 §5.3 弥合路径（焊缝 $\le 10^{-11}$、界面 ≤4 个、夹套抽气 ≤10 Pa）联合执行**	M3 整机联调
G4a	夹套 He 分压实测	夹套抽气状态下 RGA 取样实测：**B 段 He 分压 $<1\times10^{-4}$ Pa（夹套 ≤20 Pa）、A 段 $<1\times10^{-3}$ Pa（夹套 ≤50 Pa）**；氮吹扫不作判据（气源 He 杂质决定其物理上限仅 52 倍）	M3 整机联调

G5	堵头/差抽保护腔动作	差抽腔内氦分压 $<10^{-2}$ Pa，堵头动作 100 次无卡涩；**定量测壁渗透须稳态后进行，10 分钟快测仅判有无**	M3
G6	E_n 交叉验证	$10^{-14}/10^{-15}$ 点比较法 vs 绝对法 E_n≤0.3（严于 ISO 13528 判据 1 三倍；按锚点 U=2.8%~4.5% 核算，实际检出阈 ~3%，15% 系统偏差必检出）	M4 验收
G7	期间核查（越晚补越贵，与 A 段同步启动）	10^{-13} 档参考漏孔**每月**核查，控制图存档；含堵塞判据 Q 突降 >20%（§13.2）	M2 起持续
G8	稳定性考核	连续 **6 个月**核查数据绘控制图，数据不足不得申报计量标准考核	A 段验收前完成
G9	**514 所双边一致性核查**	$10^{-15}/10^{-16}$ 量级与 514 所标准气体流量计（5×10^{-16}）双边比对，判据 **	Δ
G10	**分流比三点标定 + QMS 响应标定**	SE 在 $1\times10^{-8}/1\times10^{-9}/1\times10^{-10}$ 三点原级输出，产生 **$10^{-12}/10^{-13}/10^{-14}$ 三档已知流量**：(a) 分别实测 C_0（及 C_1）分流比 R，分子流下三点 R 应相同，判据 **	R_max−R_min

第 11 章　主要设备清单（BOM）与建设里程碑

11.1　BOM

序号	设备	规格要点	数量
1	四极质谱计 QMS	分流式，Faraday 杯，最小可检分压 ≤10^{-14} Pa；**限流小孔流导 ≤1×10^{-9} m^3/s（≪电离抽速 2.55×10^{-8} m^3/s），随 QMS 一并验收**（C_s 与电离抽速并联，1×10^{-7} 时 A 段 τ 从 392 s 掉到 80 s）；B 段采样率 ≥4 Hz 常规可达	2（A/B 段各一）
2	分子泵	≥200 L/s，极限 ≤10^{-7} Pa	2
3	干式前级泵	无油，极限 ≤1 Pa	2
4	电容薄膜规 CDG	**三档配置：1.33 Pa FS（B 段本体供气 0.198 Pa，占 14.9%）、13.3 Pa FS（A 段 2 Pa，占 15.0%）、133 Pa FS（稀释法 C_0 22.7 Pa，占 17.1%；纯 He C_0 227 Pa 用 1333 Pa FS）**；精度口径 % of reading 写入采购合同	各 1~2
5	真空计（测量区）	**全金属/陶瓷封装、无玻璃泡**（BA 规金属壳）	4
6	测量室 A/B	1 L，316L 电解抛光 Ra≤0.4，同炉配对	2
7	直测取样器	10 mL，称重标定	1
8	静态膨胀 SE	10^{-8}~10^{-10} 区间，U≤2%	1
9	分流毛细管 C_0	20 mm 微通道，比值 10^4	1

10	漏孔本体（首选构型）	**石英短管 d=0.25 μm / L=10.1 mm，p=0.198 Pa，无需镀层**（放宽档 0.3 μm/13.3 mm/0.151 Pa；备选=差抽保护腔+0.3 μm×180 mm 石英段；镀层与金属毛细管降研究项）。**R_perm/温度系数按实际 OD 双口径入账：OD/ID≈500 保守取值 0.100 / 0.59%/℃；OD 320 μm 实测构型 0.087 / 0.56%/℃——加工图必须注明实际 OD**	按档配置
11	**供气与储气单元**	氦瓶 40 L/15 MPa + **一级减压 + ~1 kPa 中间稳压腔 + 微流量针阀/压电阀（单级减压 7.6×10⁷ 倍不可达）** + 精密压力控制器+ **稳压腔双工作压力：0.198 Pa 1 L（B 段，配套 CDG 1.33 Pa FS 占 14.9%）+ 2 Pa 1 L（A 段，配套 CDG 13.3 Pa FS 占 15.0%）** + 高流阻旁路（F≈3.8×10⁻⁸，两档相同）；静态退路密封件 ≤1×10⁻¹³（B 段仅 16.6 年，须年度复校）	1 套
12	**烘烤系统**	加热带 400 ℃、温控器、K 型热电偶，48 h 程序	1 套
13	**密闭夹套 + 夹套干泵**	漏孔区与接缝区密闭夹套 + 干泵连续抽气（B 段 ≤10 Pa、A 段 ≤50 Pa）；干燥氮置换装置仅作粗置换辅助，不作达标手段	1 套
14	阀门	CF 全金属，厂家指标 ≤5×10⁻¹² Pa·m³/s，逐台氦检	12
15	恒温系统	C_0 ±0.1 ℃、漏孔区 ±0.5 ℃	1 套
16	**B 段微型测量室（B 段核心工序硬件，随 B 段暂缓采购但需提前排产）**	**0.5 mL（可接受区间 0.2~0.5 mL，压缩比 ρ=20 出口体积）**，全金属 316L、可 400 ℃ 烘烤、电解抛光 Ra≤0.4、配 QMS 接口；**容积称重法标定到 ≤0.3%**	1 （B 段，暂缓）
17	**B 段压缩机构**	无油金属波纹管/活塞式，**压缩比 ≥20；余隙 ≤0.1 mL（1% 行程，常规定制可达——0.01 mL/0.1% 超出常规 1~5% 余隙能力，已放宽）、全金属、无聚合物密封**；动作次数纳入 G2a/G5 循环考核；**其等效漏率与死体积以 G2a 实测验证并纳入 B 段本底预算（§5.3）**	1 （B 段，暂缓）
18	**防堵过滤与洁净装件**	供气侧 **0.1 μm 气体过滤器** + 被测件接口过滤器 + **≥ISO 7 洁净台** + 通道口正压氦保护装置	各 1~2
19	**设施改造**	**±0.1 ℃ 恒温间/恒温箱**（C_0）、减振台、电磁屏蔽 + 单点接地、洁净区改造	1 项
20	**备件与耗材**	QMS 灯丝备件 1 套、分子泵维保合同（轴承 3~5 年）、CF 无氧铜垫圈（一次性耗材）、**供气压力控制器第 2 台（1+1 并联自动切换，必做）**	按清单

11.2　里程碑

里程碑按段分列（"12 个月建成含 B 段的 10⁻¹⁶ 装置"过于激进，国际同类装置通常 3~5 年；B 段依赖焊缝 ≤10⁻¹¹、界面 ≤4 个、夹套抽气、压缩机构等定制工艺，均需迭代）：

- **A 段（12 个月）**：M1（T0+3 月）真空达成，G1 本底；M2（T0+6 月）双室联调，G2/G3；M3（T0+9 月）整机联调，G4/G4a/G5；M4（T0+12 月）E_n 交叉验证（10⁻¹⁴/10⁻¹⁵ 点），A 段验收。
- **B 段（A 段验收后另计 12~18 个月）**：B-M1 起点 **G2a**（压缩—读数链路验证，含压缩机构漏率/死体积实测）；B-M2 焊缝/界面工艺迭代 + 夹套抽气联调；B-M3 B 段整机 G4/G4a 复测与 E_n 延伸；B-

M4 B 段验收。B 段暂缓期间定制件（微型室、压缩机构、QMS）按 §11.1 提前排产。

第 12 章　参考文献

[1] JJF 1833-2020. 真空氦漏孔校准规范. [2] JJF 1059.1. 测量不确定度评定与表示. [3] GB/T 3163. 真空技术 术语. [4] Eckel S, Barker D S, Fedchak J, Newsome E, Scherschligt J, Vest R. A primary standard for ultralow leak rates. Metrologia, 2023. DOI: 10.1088/1681-7575/ac7927（PMID 36733422）. [5] 主报告：he-leak-1e-16-proposal.md. [6] CCM.P-K12 国际关键比对（气体小漏率/真空漏孔），Metrologia 50, 07001（对标依据）. [7] 卢耀文、李得天、齐京、查良镇 等：《一种下限为 5×10^{-16} Pa·m³/s 的高精度超灵敏度检漏装置》，《真空科学与技术学报》2019，DOI 10.13922/j.cnki.cjovst.2019.01.01；《超灵敏度真空检漏技术进展》，同刊 2021，DOI 10.13922/j.cnki.cjvst.202108018（514 所标准气体流量计部分）；王汐月、卢耀文、齐京 等：《超灵敏度检漏仪校准技术进展》，同刊 2023, 43(5)（514 所对标与 G9 比对依据）. [8] 冯天佑、成永军、陈联、赵澜、孙冬花、张瑞年：《基于静态累积法的极小气体流量测量研究》，《宇航计测技术》2021, 41(1): 43-47，DOI 10.12060/j.issn.1000-7202.2021.01.08（静态累积法 <7.66×10^{-12} Pa·m³/s 非线性警示与 G10 QMS 响应标定依据）.

第 13 章　合规路径与运维保障

13.1　量程对标与合规路径（决定证书能不能出）

国内外能力对标（外部依据。2462 Pa·m³/mol@23 ℃ 换算复算一致）。严格区分【源端】（提供已知流量的参考标准，可用于定值溯源）与【接收端】（最小可检漏率，探测能力，不可用于定值溯源，两类能力参数不可互相推断）：

源端（能提供已知流量的参考标准）：

机构/装置	方法	漏率下限（Pa·m³/s）	计量层级	备注
CCM.P-K12 传递标准 L1	渗氦型传递漏孔	9.85×10^{-8}	传递标准	11 个 NMI 参加
CCM.P-K12 最低点 L2	同上	1.97×10^{-10}	传递标准	仅 6 个 NMI 有能力
NIST 2023 原级标准（文献[4]）	恒压式流量计	4.92×10^{-10}	**原级**	2×10^{-13} mol/s
NIST 恒压式二代 / PTB 恒压式	恒压式	2×10^{-8} / 2×10^{-9}	**原级**	—
NIM 定容+分流（分流比 5×10^{-3}）	定容分流	5×10^{-9}（U=9%）	**原级+分流**	国家基准
LIP（510 所）/514 所 正压漏孔校准装置（2018）	气体取样+累积	1×10^{-10}	参考标准	"给漏孔定值"口径
JJF 1833-2020 适用范围下限	—	1×10^{-10}	规范	§1.2 已注明，本表为汇总
514 所 标准气体流量计（2021/2023，文献[7]）	**固定流导法+混合气稀释**	**5×10^{-16}**	**次级**（固定流导法：10^{-16} 段流导从 ~10^{-8} 标定点外推 7.3 个数量级，溯源链非原级直达）	$C\approx1\times10^{-10}$ m³/s × p_He 低至 1×10^{-6} Pa，自洽；检漏结果 u_c ≤15%
本方案目标下限 C_0	**微通道小流导+可测压**	**1×10^{-16}**	**原级 SE+分流**（SE 静态膨胀由 p/V/T 定值；R 标定 u 为待证设计目标，§3.2 待证前提）	$C=4.4\times10^{-16}$ m³/s × 0.227 Pa

接收端（最小可检漏率，非参考标准，仅供对照）：INFICON Pernicka 700H 4×10^{-15}；清华大学超灵敏度检漏仪 1×10^{-15}；514 所+清华超灵敏度检漏装置（2019）5×10^{-16}。**检漏仪能测到 1×10^{-16}，恰恰说明该量**

级缺的是"可定值的漏孔实物标准"而不是探测能力——本方案走的正是对探测端不作文章、专攻源端的路线。

> **对外对标表述（限定口径）**：分两层：① **对国际 NMI 公开体系**（CCM.P-K12 L2=1.97×10^{-10}、NIST=4.92×10^{-10}、PTB=2×10^{-9}），本方案 1×10^{-16} 低 5~6 个数量级 ✓；② **对国内 514 所**（5×10^{-16} 源端参考），本方案**仅低 5 倍——不得宣称"国内领先 6 个数量级"**。
>
> **类别差异即定位**：514 所的是**气体流量计装置**（固定实验室原级参考，不可作为传递量具分发）；本方案造的是**可传递的实物标准漏孔**——两者不是竞品，是互补。514 所原文给出的研制理由正是本项目的最强旁证："取代偏差较大的传统标准漏孔"——"采用标准漏孔的方法是使用当前下限仅为 1×10^{-11} Pa·m³/s 的漏孔作为参考标准……在小于 1×10^{-14} Pa·m³/s 范围的检漏结果偏差可达一个数量级"（文献[7]）。**即 1×10^{-11} 以下的标准漏孔实物量具是公认空白，权威计量机构不得不造流量计来取代它——本项目补的正是这个被公开承认的缺口。**
>
> **技术路线对称性**：514 所/NIST 走"大流导（~1×10^{-10} m³/s）+ 混合气稀释极低分压（~5×10^{-6} Pa）"；本方案走"亚微米微通道小流导（4.4×10^{-16} m³/s）+ 可测压力（0.227 Pa）"。流导差 2.3×10^{5} 倍 × 分压差 2.2×10^{-5} 倍 ≈ 1，同一流量两种独立实现——并佐证 §4.4④ 混合气稀释法（514 所正是靠配置混合气使 1×10^{-6} Pa 的 He 分压可测可稳）。
>
> **不确定度口径警示**：514 所给出的是"检漏结果 u_c ≤15%（k=2，U≤30%）"，本方案 B 段是"漏孔定值 u_c=7.98%→U=16.0%"——**被测量不同（检漏仪 vs 漏孔），只能说量级相当，不可宣称"优于 514 所"**。
>
> **关键外部事实**：本装置**整个量程（10^{-11}~10^{-16}）都在国家基准（1×10^{-10}）与 JJF 1833 覆盖范围之外**。这是**规范覆盖问题**（不再是"无人能做"——514 所源端已达 5×10^{-16}），合规路径必须按下表设计。

分段合规路径：SE 是原级标准（p/V/T 基本量），原级标准无需上级标准、可直接声称溯源 SI——路径合法；但 CNAS-CL01/CIPM MRA 要求原级标准经比对证明等效性，10^{-16} 量级无国际比对（CCM.P-K12 最低 1.97×10^{-10}），**但国内有 514 所 5×10^{-16} 标准气体流量计可作双边比对对象（量级重叠 5 倍，同属气体微流量溯源体系）**。据此：

量级	可溯源/可验证方式	可出具文书
10^{-8}~10^{-10}	与 NIM/LIP 基准重叠，双边比对直接验证	CNAS 校准证书（路径清晰）
10^{-11}~10^{-14}	在 10^{-10} 点比对验证 SE，向下靠分流/稀释方法学外推并如实声明	校准证书（证书须注明外推区间与不确定度来源）
10^{-15}~10^{-16}	无国际比对；可申请与 514 所流量计双边比对（G9），但 514 所装置为固定流导法**次级标准**（流导外推 7.3 个数量级，自身溯源链非原级直达），**只能作一致性核查，不构成溯源验证**	**只出研究性/探索性测量报告**；G9 一致性核查结果作为支撑材料附于报告。若日后出现原级/国际比对途径再评估升级

定位声明：本装置 A 段为工作标准（对外校准服务），B 段为科研装置；授权签字人与人员授权按 CNAS-CL01 另行任命；证书不确定度按档给出实测评定值（不以 U=10.0% 设计指标直接出证）。

13.2　失效模式：防堵与单点冗余

微通道防堵（FMEA 头号项）：通道 ID 0.25 μm，一颗 >0.25 μm 颗粒即完全堵死；$Q \propto d^3$，有效内径减半 Q 降到 12.5%；大气尘埃典型 0.5~10 μm，装件暴露即风险。强制条款： 1. 供气侧 **0.1 μm 级气体过滤器**； 2. **被测件接口同样过滤 + 装件前吹扫**（客户漏孔可能带颗粒）； 3. 装/拆件在 **≥ISO 7 洁净台**内进行，通道口非操作时保持**正压氦保护**； 4. **堵塞判据：Q 突降 >20% 即判堵塞**，纳入 G2a 与日常核查（G7）。

FMEA 定量化（IEC 60812，RPN=S×O×D）：微通道堵塞 RPN=315（首要，防堵四条款落地后 O 由 5→3 降为 189，仍为首位）、B 段本底漂移超红线 RPN=210（对应 G4a 夹套实测）、定标漏孔温漂 96、分流比漂移 84、供气控制器失效 72、恒温失控 72、QMS 灯丝 40——两项 RPN≥200 均有对应关口，无失控项。

单点故障（SPOF）处置：① **供气压力控制器 1+1 并联自动切换**（B 段唯一可行方案，失效即停摆，必做）；② 漏孔本体 **10^{-13}~10^{-16} 每档 ≥2 支**（1 工作 1 备份，原仅 10^{-11}/10^{-12} 双支）；③ QMS 灯丝备件 1 套（寿命 1~2 年）、分子泵备件或维保合同（轴承 3~5 年）；④ 恒温系统报警 + 全程记录，失控时段该批数据判无效。

13.3　期间核查与稳定性考核（越晚补越贵，与 A 段同步启动）

JJF 1033 计量标准考核要求：**G7 期间核查**与 **G8 稳定性考核**（连续 6 个月核查数据绘控制图）——见 §10。稳定性数据只能靠时间积累，建成后再补要等半年以上，**故与 A 段放行同步启动，不等 B 段**。能力验证/实验室间比对计划：A 段 10^{-11}~10^{-14} 档每年 ≥1 次与 NIM/LIP 比对；B 段因绝对法不闭合，只能以比对待机——**比对对象已明确：514 所标准气体流量计**。

13.4　设施与环境

项	要求	现状缺口
C_0 恒温 ±0.1 ℃	普通/精密空调均不满足	**独立恒温箱或恒温间（±0.1 ℃）**，或油槽恒温
洁净度	微通道防堵必需	**≥ISO 7 洁净台**（§13.2）
振动	分子泵振动隔离	减振台/独立泵组地基
电磁/接地	小信号测量	屏蔽 + 单点接地设计
大气氦背景	α 取 5.24×10^{-6} 恒定，室内氦累积会抬高本底	通风 + 氦背景定点监测

设施改造（恒温间 + 洁净/减振/屏蔽）与 BOM 同步列入实施计划。

13.5　软件与数据完整性（CNAS 计算机化系统要求）

§8 软件功能之外补：**审计追踪、权限分级、原始数据不可篡改（只读归档 + 哈希校验）、算法验证**（回归与不确定度算法用已知算例/第三方验证后冻结版本）；CSV + 审计日志长期保存（≥6 年）。

13.6　安全与耗材

安全规程：15 MPa 氦瓶（固定、防倒、减压阀定期校验）、400/300 ℃ 烘烤（防烫、超温联锁断电）、真空系统承压部件（烘烤升温时压力联锁）、氦/氮惰性气体窒息（密闭间氧浓度监测 + 通风）。**耗材清单**：氦瓶（年耗 ~1.9 mg 氦气，瓶耗按补给周期）、CF 无氧铜垫圈（一次性，拆卸必换）、QMS 灯丝（1~2 年）、分子泵轴承（3~5 年）。**复校周期**：B 段静态退路年度复校（已有）；A 段标准漏孔复校周期 1 年（随 G7 月度核查数据调整）。

附录 A　编号公式汇总

式号	公式	用途
式 1-1	Q = V·k	静态累积定义
式 2-2	p_ss = Q·e/(S·I_e·kT)	QMS 饱和压强
式 2-3	τ = eV/(S·I_e·kT)	电离消耗时间常数
式 3-1	Q_SE = V_0·dp/dt	静态膨胀标准流量
式 3-2	p_drive ≥ 10×p_back	末级驱动压力裕度
式 3-3	C = 326·d^3/L（20 ℃ He 分子流）	毛细管流导
式 3-4	Q_He = C_He·x_He·p_total；分离因子 √(M_Ar/M_He)=3.16	稀释法定值口径（禁止下游反算）
式 4-2	Q_corr = Q·(1+δT/T)	温度修正
式 5-2	α = q_ 大气氦 /q_ 氦检额定 = 0.531/1.013×10^5 = 5.24×10^{-6}	大气氦真漏折算系数
式 5-3	p(t)=k_0+k·t+Σ调制项	联合回归模型
式 5-4	f_He = q_He/q_total ≤ 4×10^{-6}	m/z=4 除气份额上限（NIST 反推）
式 6-1	Q = 326·d^3·p/L	微通道漏孔流量
式 6-2	R_perm = 3.06×10^{-17}·L^2/d^3（隐含 OD/ID≈500、ln(OD/ID)=6.215；备选构型渗透比）	玻璃+镀层渗透比
式 6-3	σ ≈ E_Ni·(α_Ni−α_glass)·ΔT = E_Ni×12.85×10^{-6}×380 ≈ 0.98~1.4 GPa	镀层热应力（镀层降研究项的依据）
式 6-4	Q_min = 326·d^3·p/L = 4.34×10^{-16}（d=10 μm 商用下限、L=50 m、p=0.0665 Pa 三极限）	金属毛细管制造极限（金属路线降研究项的依据）
式 6-5	V = T·Q/p ≈ 0.95 L（T=6×10^5 年、Q=10^{-16}、p=2 Pa）	储气室容积反推
式 6-6	t(δ) = δ·pV/q_air，q_air=q_rated/2.65	供气纯度寿命
式 6-7	Q_perm = g·∫p(x)dx；出口端暴露段 ∫p dx = p_1·L_exp²/(2L)，修正因子 L_exp/(2L)	壁渗透局部压力修正（恒定 p_1 简化算法高估 4 倍）
式 6-8	Q_by = g·Λ_2·p(x_b)·tanh(L_cov/Λ_2)，Λ_2=√(P_PI·A_c/g)	涂层轴向旁路（局部压力+半无限修正）

式 6-9	真实超出额 = ∫w(x)(1−x/L)dx ≈ (2/3)·Q_perm(朴素)	守恒修正（寄生取自被计量气流时）
式 6-10	$\tau_{by} = \Lambda_2^2/D_{PI} \approx 0.2\sim6.2$ d（$D=3\times10^{-11}$ 时 2.07 d）	旁路瞬态平衡时间
式 6-11	T_coef = (0.3 + 3.5·R_perm)/(1 + R_perm)（通道项 0.3%/℃、渗透项 3.5%/℃ 加权；R=0.100→0.59%/℃、R=0.227→0.89%/℃）	壁渗透/通道流混合温度系数

QMS 量程注：QMS 1 mA 档用于拷贝归零与粗测段，可将电离时间常数 τ 降至约 0.2 s，避免大信号失真；精确回归仍用 μA 档。

结 论

1. **A 段（10^{-11}~10^{-14}）具备放行施工条件**：预期 U=10.0%/10.2%（k=2 约定值，GUM 严格解 10.2%/10.4% 见 §9.1 声明），优于 JJF 1833 比较法基线（U=20%）近 2 倍；不确定度预算、验证关口（G1~G10）、防堵与冗余、设施与软件要求均已落实。**建议批准 A 段施工与采购启动**，里程碑 12 个月（§11.2）。
2. **B 段（10^{-15}~10^{-16}）建议暂缓采购施工**：本底抑制、工序自洽性（G2a）、压缩机构定制件等尚待 M2/M3 关口实测确认，且 10^{-15}/10^{-16} 当前无外部溯源验证途径（只能出研究性测量报告）。B 段验收后另计 12~18 个月（§11.2）。
3. **合规路径已明确**（§13.1）：10^{-8}~10^{-10} 与 NIM/LIP 比对出证；10^{-11}~10^{-14} 外推声明出证；10^{-15}~10^{-16} 出研究性报告并附 514 所一致性核查（G9）支撑材料。
4. **锚点能力为独有优势**（§3.2）：10^{-12}~10^{-14} 三个独立已知流量点可校验比较法链路（E_n 检出阈 ~3%）并直接标定 QMS 响应非线性；其前提（SE 10^{-10} 档指标、分流比标定不确定度）由 G1/G10 实测评定确认。
5. **物理地基经第一性原理验证**：流导系数 326=(π/12)·$\bar{v}$ 与气体动理学零偏差；温度系数取值为理论值的保守倍率；失效模式经 FMEA 定量化（IEC 60812），两项 RPN≥200 风险均有对应验证关口。

睿米 REALMETER · RM-WP-2026-001 · V1.0 正式版 · 2026-10-10 · 技术方案白皮书