



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

真空技术 真空计 磁悬浮转子真空计的 规范、校准和测量不确定度

Vacuum technology— Vacuum gauges — Specifications, calibration and
measurement uncertainties for spinning rotor gauges

(ISO 24477:2022, IDT)

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目次

前言.....	II
介绍.....	错误!未定义书签。
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	2
4 符号及缩略语.....	5
5 磁悬浮转子真空计的原理.....	5
6 磁悬浮转子真空计的规范.....	6
7 磁悬浮转子真空计的附加（可选）规范.....	8
8 校准.....	8
9 使用时的测量不确定度.....	8
参考文献.....	12

前言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件等同采用ISO 24477:2022《真空技术 真空计 磁悬浮转子真空计的规范、校准和测量不确定度》。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国真空技术标准化技术委员会（SAC/TC 18）归口。

本文件起草单位：兰州空间技术物理研究所、东北大学、兰州文理学院、沈阳真空技术研究有限公司、北京卫星环境工程研究所、中国计量学科研究院、中核第七研究设计院有限公司、合肥工业大学、沈阳汇真真空技术有限公司。

本文件主要起草人：李得天、习振华、张虎忠、刘坤、李亚丽、郭美如、贾文杰、王玲玲、李刚、王永军、任正宜、孙立臣、于红燕、王子圣、毕海林。

引言

在描述磁悬浮转子真空计(SRGs)的特征、将其用于校准或用作标准真空计时,本文件是对ISO 3567和ISO 27893的补充。

磁悬浮转子真空计可用于测量高真空和中真空的压力。使用此类真空计进行压力量值传递和测量中、高真空压力,建议给出本文件中规定的相关参数、校准结果和不确定度。

真空技术 真空计 磁悬浮转子真空计的技术规范、校准和测量不确定度

1 范围

本文件界定了磁悬浮转子真空计（SRGs）相关的术语，规定了SRGs所需参数，详细描述了在使用这些真空计时的校准步骤和所需不确定度分量。本文件适用的压力上限为2 Pa。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

ISO 3529-1 真空技术 术语 第1部分：基础术语 (Vacuum technology — Vocabulary — Part 1: General terms)

注：GB/T 3167-2007 真空技术 术语 (ISO 3529:1981, MOD)

ISO 3529-3 真空技术 术语 第3部分：全压和分压真空计 (Vacuum technology — Vocabulary — Part 3: Total and partial pressure vacuum gauges)

注：GB/T 3167-2007 真空技术 术语 (ISO 3529:1981, MOD)

ISO 3567 真空技术 真空计 与标准真空计直接比较校准 (Vacuum technology — Vacuum gauges — Calibration by direct comparison with a reference gauge)

注：GB/T 34873-2017 真空计 与标准真空计直接比较校准 (ISO 3567:2011, IDT)

ISO 27893 真空技术 真空计 与标准真空计直接比较校准结果的不确定度评定 (Vacuum technology — Vacuum gauges — Evaluation of the uncertainties of results of calibrations by direct comparison with a reference gauge)

注：GB/T 34876-2017 真空技术 真空计 与标准真空计直接比较校准结果的不确定度评定 (ISO 27893:2011, IDT)

ISO/IEC Guide 98-3 测量不确定度 第3部分：测量不确定度表示指南 (GUM: 1995) [Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)]

注：GB/T 27418-2017 测量不确定度的评定与表示 (ISO/IEC Guide 98-3, MOD)

ISO/IEC Guide 99 国际计量学词汇 基本和通用概念及相关术语 (VIM) [International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)]

IEC 60050(300-311) 国际电工词汇 电工电子测量和仪器仪表 第311部分：测量的通用术语 (International Electrotechnical Vocabulary — Electrical and electronic measurements and measuring instruments — Part 311: General terms relating to measurements)

注：GB/T 2900.77-2008 电工术语 电工电子测量和仪器仪表 第1部分：测量的通用术语 [IEC 60050(300-311):2001, IDT]

IEC 60050(300-312) 国际电工词汇 电工电子测量和仪器仪表 第312部分：电测量的通用术语
(International Electrotechnical Vocabulary — Electrical and electronic measurements and measuring instruments — Part 312: General terms relating to electrical measurements)

注：GB/T 2900.89-2012 电工术语 电工电子测量和仪器仪表 第2部分：电测量的通用术语 [IEC 60050(300-312):2001, IDT]

IEC 60050(300-313) 国际电工词汇 电工电子测量和仪器仪表 第313部分：电测量仪器仪表的类型
(International Electrotechnical Vocabulary — Electrical and electronic measurements and measuring instruments — Part 313: Types of electrical measuring instruments)

注：GB/T 2900.79-2008 电工术语 电工电子测量和仪器仪表 第3部分：电测量仪器仪表的类型 [IEC 60050(300-313):2001, IDT]

IEC 60050(300-314) 国际电工词汇 电工电子测量和仪器仪表 第314部分：各类仪表的特殊术语
(International Electrotechnical Vocabulary — Electrical and electronic measurements and measuring instruments — Part 314: Specific terms according to the type of instrument)

注：GB/T 2900.79-2008 电工术语 电工电子测量和仪器仪表 第4部分：各类仪表的特殊术语 [IEC 60050(300-314):2001, IDT]

3 术语和定义

ISO 3529-1, ISO 3529-3, ISO 3567, ISO 27893, ISO/IEC Guide 98-3, ISO/IEC Guide 99, IEC 60050-300 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 部组件术语

3.1.1

转子 rotor

依靠磁力悬浮在真空中的旋转部件。

注：任何磁性元件都能用于制作转子。然而，考虑到现实原因，本文件只以球体作为旋转部件。球形转子可能显示偶极子磁场，但也可能显示高阶磁场。

3.1.2

套管 thimble

真空管 finger

转子 (3.1.1) 在其中受磁力悬浮的管道。

注 1：套管材料最好是非磁性不锈钢。

注 2：电导率高的材料不适用。

3.1.3

悬浮头 suspension head

测量头 measuring head

传感头 sensing head

安装在**套管**（3.1.2）上，用于在真空条件下悬浮、稳定、加速**转子**（3.1.1），并检测与转子产生的磁信号同步信号的设备。

3.1.4

控制单元 controller

〈磁悬浮转子真空计中〉用于控制**悬浮头**（3.1.3），显示**转子**（3.1.1）衰减速率，以及通过设置参数（如转子直径、转子密度、气体种类、温度和有效传递传递系数）得到的相应压力值的设备。

3.1.5

法兰组件 flange assembly

安装在真空容器上，带有**套管**（3.1.2）、**悬浮头**（3.1.3）安装轨道、夹子和固定螺丝的法兰。

3.2

物理参数术语

3.2.1

传递系数 accommodation factor

$$\sigma$$

在分子流条件下，与撞击转子表面的气体分子的切向动量传递系数成比例的参数。

注 1：如果转子是一个理想球体，表面完全光滑，且转子的直径和密度值精确可知，假设气体分子的平均自由程远大于套管的直径，则传递系数等于切向动量传递系数。在这种情况下，传递系数小于或等于1。然而，如果是表面粗糙的转子， σ 大于1。考虑到表面粗糙度，每个转子的 σ 通过校准来确定。

注 2：在一些文献中，传递因子（accommodation coefficient）表达与引处定义的传递系数相同的概念。

注 3：当压力低于30 mPa时，传递系数与压力无关。

3.2.2

有效传递系数 effective accommodation factor

$$\sigma_{\text{eff}}$$

仅有转子直径和密度的标称值时，对每个**转子**（3.1.1）校准所得的参数。

3.2.3

残余阻尼 residual drag

$$RD$$

$$\alpha_{RD}$$

与压力无关的转子（3.1.1）衰减速率。

注 1：残余阻尼是在转子的旋转磁场和转子的温度变化作用下，使转子自身、套管和悬浮头内产生涡流而引起的。后一种作用源于所谓的旋转效应，该效应与因热膨胀导致的球体直径变化有关。有时，该效应不包含在残余阻尼中，而是单独计算。如果转子的热膨胀系数和转子的温度漂移（ $\Delta T/\Delta t$ ）已知，能有益于此。该效应通常不为人所知，因此本文件定义的残余阻尼包含了温度变化效应。

注 2：通常，残余阻尼与转子的旋转频率有关。

注 3：测量前，能在一个低于SRG测量下限的压力点处测定其残余阻尼。

3.2.4

偏置 offset

p_{offs}

与残余阻尼（3.2.3）相对应的，气体等效压力值。

3.2.5

衰减速率 deceleration rate

DCR

在一定时间间隔内，转子频率变化量的绝对值除以该间隔内转子平均频率。

注：转子衰减速率是由残余阻尼和气体分子撞击引起的。

3.2.6

采样时间 sampling time

采样间隔 sampling interval

用于确定衰减速率（3.2.5）的时间间隔。

注 1：合适的采样时间设置取决于测量所需的准确度和压力范围。

注 2：采样时间与连续磁悬浮转子真空计信号输出的时间间隔相同。

3.2.7

预热时间 warm-up period

从转子悬浮和加速的瞬间，到磁悬浮转子真空计显示出具有指定测量不确定度的压力值的瞬间，二者之间的时长间隔。

注 1：磁悬浮转子真空计的预热时间一般是3h~6h，具体取决于指定的测量不确定度。

3.2.8

内部容积 internal volume

套管（3.1.2）一直到连接端口的密封面所包含的空间。

3.2.9

测量范围 measurement range

满足某一指定的预期测量不确定度的压力范围。

3.2.10

长期不稳定性 long-term instability

在明确指定周期的情况下，表征磁悬浮转子真空计的传递系数（3.2.1）随时间产生的典型变化的相对量。

注：通常亦称作长期稳定性（long term stability）。

4 符号和缩略语

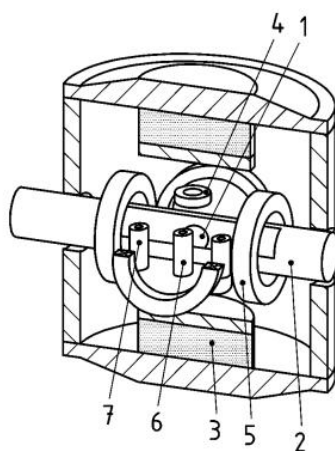
符号和缩略语	说明	单位
d	球形转子的直径	m
DCR	衰减速率	s^{-1}
f	频率	Hz
p	压力	Pa
p_{offs}	偏置	Pa
α_{RD}	残余阻尼	s^{-1}
T	温度	K
t	时间	s
ρ	转子的密度	kg/m^3
σ	传递系数	1
σ_{eff}	有效传递系数	1
$\sigma_{\text{eff},0}$	压力趋近于 0 时的有效传递系数	1
ω	角速度	rad s^{-1}
\bar{c}	气体分子的平均热速度	m s^{-1}
SRG	磁悬浮转子真空计	
UUC	待校仪器	

5 磁悬浮转子真空计的原理

磁悬浮转子真空计是一种用气体分子降低在真空中磁力悬浮的转子的旋转角速度 (ω) 的设备 (见图1)。气体分子撞击转子表面, 停留一段时间并在获得一定的转子表面附加速度后离开。气体分子的这个附加动量是从转子的动量中获得的, 从而降低了转子频率。对于球形转子, 能通过公式 (1) ^[8] 计算压力值。在实际应用中, 也能用公式 (2) 计算。

$$p = \frac{\pi \bar{c} \rho d}{20 \sigma} \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} - \alpha_{RD} \right) \quad (1)$$

$$p = \frac{\pi \bar{c} \rho d}{20 \sigma} \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} \right) - p_{\text{offs}} \quad (2)$$



标引序号说明:

- 1——转子;
- 2——套管;
- 3——带有软铁衔铁的永磁体;
- 4——用于垂直稳定的两个线圈;
- 5——四个驱动线圈;
- 6——两个信号感应线圈;
- 7——用于水平稳定的四个线圈。

图1 磁悬浮转子真空计的功能部件

6 磁悬浮转子真空计规范

6.1 转子的直径和密度

应给出转子的直径和密度。如果使用了标称值, 应明确说明。

6.2 转子和套管材料

应给出转子和套管材料。

6.3 套管连接法兰

应给出用于连接真空系统的套管法兰的尺寸和密封类型。

6.4 带有法兰的套管的漏气率

可给出带有法兰的套管的漏气率。

6.5 悬浮头定位

应给出调整悬浮头位置的步骤。

6.6 转子频率限制

应规定转子旋转频率的上限和下限。如果更改了上下限值，则应给出范围。

6.7 预热时间

应规定预热时间。

6.8 烘烤温度

应规定装有或去除悬浮头时的最高烘烤温度。

6.9 测量范围

应给出使用氮气测量时，磁悬浮转子真空计满足某一指定的预期测量不确定度的测量范围。压力范围单位应为 Pa。也能使用其他单位。

6.10 采样时间

应给出采样时间。如果更改了时间，则应给出范围。

6.11 内部容积

应给出套管的内部容积。

6.12 控制单元的接口和插脚连接

应给出与计算机的通讯协议。应给出接口类型和插脚连接（引出线）的功能。

6.13 悬浮头和控制单元的尺寸及质量

应采用 SI 单位，给出用外形图表示的悬浮头和/或控制单元尺寸，以及它们的质量。可用宽度、深度和高度（W×D×H）表示。也能使用其他单位（如英寸）。

6.14 显示和信号输出

在控制单元上，应用 SI 单位帕斯卡（Pa）显示压力值。也能使用其他压力单位（如毫巴）。应显示衰减速率的原始信号，单位为 s^{-1} 。

6.15 标称运行（环境）条件

应规定悬浮头和控制单元能够工作的温度和相对湿度范围。

6.16 储运条件

应规定避免真空计损毁或损坏的储存和运输条件。比如，用于固定转子的方法、温度和相对湿度。振动和冲击条件可选。

6.17 电源输入及其要求

应规定电压（交流或直流）、电流、频率及其要求。应给出功耗。

7 磁悬浮转子真空计的附加（可选）规范

7.1 长期不稳定性

长期不稳定性宜使用应用一定周期内（如一年）传递系数的百分比来表征（见 ISO 20146:2019, 3.2.1）。宜使用稳定的或可重复的压力值开展此类测量，且真空计在正常条件下运行。可给出典型量值。

7.2 预期测量不确定度

宜给出 SRG 的预期测量不确定度。单位应使用 Pa 或传递系数的百分比。宜给出获得该预期测量不确定度所需的测量条件（如温度、气体成分）。

可在校准证书上给出单个真空计的校准不确定度（见 8.4）。

因为测量误差已被修正，且不写入校准证书中，所以单个真空计的校准不确定度能显著低于同类设备的预期测量不确定度。

7.3 悬浮头和转子之间的兼容

宜给出转子对应的悬浮头的类型或型号。

7.4 检验记录和校准证书

磁悬浮转子真空计的检验记录可以增加用户对读数的信心。如果有校准证书，应包含真空计如何溯源到国家级真空标准的信息。宜说明能否提供检验记录和/或校准证书。

7.5 允许振级

宜给出磁悬浮转子真空计稳定运行的允许振级。

7.6 电缆长度

宜给出通常提供的电缆长度。也宜给出按需提供的最长电缆长度。

注：较长的电缆可能对电磁干扰敏感。

7.7 图片

应给出电脑绘图、照片或悬浮头的图片以获得清晰的轮廓和细节。建议给出控制单元的前面板、后面板（接口端）。

8 校准

8.1 待校准参数

两项待校准的参数：

- a) 与压力无关的传递系数 ($\sigma_{\text{eff},0}$)；或
- b) 读数误差。

如果校准读数误差，应先测定传递系数，而且应在控制单元里设置相应的 SRG 输入参数。10 mPa 以下的压力，为了获得更高的准确度，建议每个校准点之间都测量 RD。

建议校准传递系数 ($\sigma_{\text{eff},0}$)。

8.2 校准步骤

8.2.1 概要

已知校准压力能由基准或 ISO 3567 所规定的真空系统附加一个标准真空计来产生。如果使用标准真空计，宜使用另一个已校准的 SRG，或者对于压力大于 100 mPa 的情况，宜使用满量程为 133 Pa 或更低压力的已校准电容薄膜真空计。一个独立的真空计，通常是电离真空计，应安装在系统上以测量系统的基础压力。该压力加上真空计的扩展不确定度 ($k=2$) 不应超过 10^{-5} Pa。

校准前，应测定 RD。在校准时应从信号中减去该值，其与压力或者 DCR 使用同一单位。

根据其测量原理可知，SRG 的示值对振动敏感。（见 ISO 3567:2011, B.8）

在校准过程中，SRG 能连接不间断电源（UPS）。对于读数误差的校准，尽管除 8.1 b) 之外不用进一步解释。但是，有两种方法，A 和 B 能用于校准与压力无关的传递系数 ($\sigma_{\text{eff},0}$)。方法 A 相对简单，操作便捷，但是无法给出高于 30 mPa 后与传递系数 (σ_{eff}) 与压力的相关性。方法 B 则要做更多的工作，但是给客户提供了 $\sigma_{\text{eff},0}$ 的同时，还额外提供 σ_{eff} 在 2 Pa 以内与压力的确切关系。

8.2.2 $\sigma_{\text{eff},0}$ 校准方法 A

在控制单元中将传递系数设定为 1。转子应暴露在 10 mPa 到 30 mPa 之间的一个固定压力 p_{cal} 下，同时应对 SRG 示值压力 (p_{ind}) 至少进行 5 次重复测量，每次采样时间为 30 s。校准 $\sigma_{\text{eff},0}$ 时建议进行三组循环测量，每次循环之间抽至残余压力并重新充入校准气体。在采样时间间隔内，压力 p_{cal} 应保持 0.2% 的稳定性。为估计 RD 的变化，应在每次测量后重新测定 RD 值。如果变化显著，应使用测量前后两次测量结果的平均值。

即

$$\sigma_{\text{eff},0} = \frac{p_{\text{ind}}}{p_{\text{cal}}} \quad (3)$$

或者，也能用 DCR 值按照公式 (1) 或公式 (2) 计算 p_{ind} 。

8.2.3 $\sigma_{\text{eff},0}$ 校准方法 B

在控制单元中将传递系数设定为 1，并将黏度设为 0。在 80 mPa~2 Pa 间，转子应至少暴露在 3 个校准压力 (p_{cal}) 下，其中最高压力和最低压力之比大于等于 10。每一个校准压力 (p_{cal}) 下，应对 SRG 示值压力 (p_{ind}) 进行 5 次重复测量，每次采样时间为 10 s。

将采样时间应减少至 10 s。因为在高压下，再加速会加热转子和套管，时间过长会引起显著的偏移。同理，在高压下仅应进行 5 次重复测量。

对于每一校准压力可得：

$$\sigma_{\text{eff}}(p_{\text{cal}}) = \frac{p_{\text{ind}}}{p_{\text{cal}}} \quad (4)$$

通过外推法至零点压力计算与压力无关的 $\sigma_{\text{eff},0}$ ：

$$\sigma_{\text{eff},0} = \sigma_{\text{eff}}(p_{\text{cal}}); p_{\text{cal}} \rightarrow 0 \quad (5)$$

如果使用这种方式进行校准，建议同时确定斜率 (m):

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{eff},0} + m(p_{\text{cal}}) \quad (6)$$

以及修正斜率

$$f_{\text{corr}} = -\frac{m}{\sigma_{\text{eff},0}} \quad (7)$$

通过后一个值，压力大于 10 mPa 时，SRG 使用者能通过公式 (8) 修正它的读数 (和有效传递系数):

$$p = p_{\text{ind},\sigma_{\text{eff},0}} (1 + f_{\text{corr}} \cdot p_{\text{ind},\sigma_{\text{eff},0}}) \quad (8)$$

其中，如果使用者在控制单元中将 σ 设定为 $\sigma_{\text{eff},0}$ 的值， $p_{\text{ind},\sigma_{\text{eff},0}}$ 代表示值压力。然而，如果使用过程中将 σ 设定为 1， $p_{\text{ind},\sigma_{\text{eff},0}} = \frac{p_{\text{ind}}}{\sigma_{\text{eff},0}}$ 。

8.3 校准不确定度

应按照 ISO 27893 来评估 SRG 的校准不确定度。

校准 SRG 不确定度的各贡献分量如下:

- 标准压力的不确定度;
- 测量 RD 的不确定度;
- RD 的漂移;
- 示值的标准偏差;
- 外推至零点压力的不确定度;
- 气体纯度;
- 温度。

8.4 校准证书

应按照 ISO 3567 编制 SRG 的校准证书。

如果校准的是读数误差，建议给出读数相对误差。

如果按照 8.2.3 的步骤进行校准，可给出修正公式 (8)。

应给出校准时在控制单元内输入的转子直径和密度值。

宜给出校准时的残余阻尼或偏置。

9 使用时的测量不确定度

如果测量低于 10 mPa 的压力，宜在低于 SRG 分辨率极限的残余压力下测定 RD 及其与频率的相关性 $RD(\omega)$ 。SRG 分辨率用残余阻尼的标准偏差表示。在低于 10 mPa 压力的测量过程中，宜记录 ω ，并减去相应的 $RD(\omega)$ 。

虽然某些测量不确定度分量在校准过程中不重要，但在以后实际应用过程中会产生影响，例如：作

为标准真空计时。

下面大致列出了一些测量不确定度的来源，作为对 8.3 的补充：

- 长期不稳定性；
- 环境温度漂移及测量；
- 真空计接触的气体的洁净程度；
- 气体成分和气体种类。

参考文献

- [1] ISO 20146:2019, Vacuum technology — Vacuum gauges — Specifications, calibration and measurement uncertainties for capacitance diaphragm gauges.
- [2] Fremerey J. K., Spinning rotor vacuum gauge, *Vacuum*, 32 (1982), 685-690.
- [3] Fremerey J. K., The spinning rotor gauge, *J. Vac. Sci. Technol*, A 3 (1985), 1715-1720.
- [4] Fedchak J. A., Arai K., Jousten K., Setina J., Yoshida H., Recommended practices for the use of spinning rotor gauges in inter-laboratory comparisons, *Measurement*, 66 (2015) 176-183.
- [5] Lindenau B. E., Fremerey J.K., Witthauer K., Spinning rotor gauge for operation at free spatial orientation, *Vacuum*, 46 (1995), 835-837.
- [6] Jousten K., Temperature corrections for the calibration of vacuum gauges, *Vacuum*, 49 (1998), 81-87.
- [7] Chang R.F., Abbott P.J., Factors affecting the reproducibility of the accommodation coefficient of the spinning rotor gauge, *J. Vac. Sci. Technol.*, A 25 (2007) 1567-1576.
- [8] Jousten K., (Ed.): Handbook of vacuum technology, Wiley-VCH, Weinheim, 2008 and 2nd Ed. 2016.
- [9] Wuethrich C., Arai K., Bergoglio M., Fedchak J. A., Jousten K., Hong S. S., Guzman J. T., Final report on the key comparison, CCM.P-K15 in the pressure range 1.0×10^{-4} Pa to 1.0 Pa, *Metrologia*, 54 (2017),07003.
-