

磁矩的量子溯源标定研究取得突破

磁矩，是磁铁或载流体提供磁场能力的一种度量，得自其中所有闭合电流与回路面积相乘并矢量求和。关注和用好磁矩，事关我们手机中的时钟更加精准(让原子钟的磁矩不受干扰)，事关我们更早且更加清晰的看到体内发生的病变(核磁共振成像)，事关我们用上更加绿色高效的电动车与发电机(高性能稀土永磁电机)，事关我们从源头获知太阳与地球的演化规律并对灾害进行预测与防范(行星磁天气)……。由于未发现直接关联磁矩的量子效应，磁矩未被2019年颁布的新国际单位制列入量子基准序列，而且世界现行的磁性测量设备中参考的磁矩标准仍然完全依赖于镍球等实物。为了建立跟磁矩的重要性相匹配的计量手段，解决实物磁矩标准随温度、压力等环境影响的固有问题，一方面继续探索让磁矩关联磁矩的量子效应；另一方面应当尽快建立磁矩溯源标准的间接关联。

自20世纪50年代以来，振动样品磁强计(VSM)被开发并广泛用于研究物质磁性，尤其是尺寸形态受限材料的基本磁性，与磁天平和超导量子干涉仪(SQUID)等设备相比，VSM在磁矩测量范围、操作方便性和环境兼容性方面具有巨大优势，故而已成为表征磁性材料特性的标准仪器，其测量的精度和可靠性提高对于磁性材料产业升级至关重要。

美国国家技术研究所(NIST)曾引入比较法和斜率法两种不确定度约为0.5%的VSM校准方法，比较法使用标准镍球等实物的饱和磁矩点作为参考对象来标定设备磁矩；斜率法使用磁导率2000以上磁性材料，通过磁矩与磁场的线性依赖曲线实现磁矩和外部磁场的关联标定。原则上VSM也可以在没有任何标准参考的情况下运用非线性探测线圈的结构系数进行校准，然而除了无法溯源以及线圈系统的制造和组装过程偏离理想设计之外，内标非线性探测线圈的均匀磁区比标准VSM小得多，对样品位置和振幅敏感也导致较大的不确定性。美国材料测试标准委员会(ASTM)等组织也曾经建议使用过线圈进行宽范围磁矩的标定，但标定不确定度以及如何准确溯源到量子基准，并未清晰描述。因此，宽范围、高精度且不依赖于实物可独立溯源的磁矩标定是VSM计量校准中的一个重要问题。

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心磁学国家重点实验室长期围绕我国稀土磁性材料产业升级过程中对测量设备的迫切需求，致力于提升材料磁性测量的精度和一致性，同时攻克磁矩不能量子溯源等基础难题。公共技术组陆俊副主任工程师长期从事精密磁性测量研究，运用高灵敏与大鞍区的振动样品磁强计探测线圈阵列的研发、锁相放大器等关键技术积累，与M03组许志一副主任工程师以及计量院张志高与贺建高工合作，在部件完全国产的振动样品磁强计中，磁矩量通过电流线圈进行量子溯源。为了实现首次建立磁矩测量与量子基准的路径，让磁矩量不依赖于线圈的材质、匝数、温度与磁场的环境影响，线圈绕组匝数和直流电流分别使用磁通计和量子电流标准进行原位标定；磁通计分别通过伏秒发生器和核磁共振(NMR)对磁通量和磁场进行标定，从而容易地溯源到量子基准；此外，电流磁矩的标定以电流差值引起磁矩变化作为依据，原位扣除掉材质等背景影响，以避免线圈材质磁性及外场对静态磁矩的影响。

为了确保大范围磁矩标定的稳定性和复现性，一方面要绕制尺寸较小同时载流能力较大的磁矩线圈，更重要的是设计并实现专门用于量子溯源标定的VSM探测线圈阵列。国内外商用的VSM的通常1%均匀区范围不超过2毫米，远不能满足让磁矩线圈获得跟NIST镍球标准可比拟的精度，这在很大程度上制约了前述利用电流磁矩线圈进行量子溯源难题的解决。磁巧，陆俊对于VSM探测线圈系统的设计已有多年的研究积累，他根据互易原理设计并系统优化四线圈VSM探测阵列，从Biot-Sarvart定理出发逐层建构线圈阵列的灵敏度因子对应的磁场梯度分布仿真平台。通过分析检测线圈的结构和配置中的五个主要参数：主直径、垂直间距、水平间距、径向绕组数和绕层数，寻出逐步收敛的方式优化多参数，实现纵向8毫米内0.1%不均匀度的鞍区设计指标。

通过线圈磁矩标定系统的设计制作调试与在VSM中反复验证，陆俊与张志高、许志一、以及贺建合作，将0.3%不确定的鞍区尺度提高到8毫米，使得磁矩微线圈以低不确定度标定，最终实现磁矩量在宏观磁性测量设备中的突破；设计并验证可溯源到量子基准的磁矩线圈不仅能在四个数量级范围内进行标定，不受外加磁场变化与温度波动干扰，而且在2.5~3.7微安平方米之间的精度达到0.3%(优于不确定度为0.5%的NIST镍球标准)，在计量标准源头解除我国磁性测量设备对国外的依赖，且有助于国际磁性测量标准的改进。

国际单位制的变迁反映人类认知客观世界的整体水平的逐步提升，磁矩在电磁量纲体系中仍然处于短板地位，一定程度上制约着电磁学的总体认知。为了深入磁矩的测量，磁学实验室将继续发挥自身基础研究的职责优势，跟国内外同仁一道，进一步通过系统降低测量不确定度来提高磁矩量子溯源的水平，同时不断探索直接关联宏观效应与微观磁矩的量子效应。

宽范围磁矩溯源量子基准的标定研究，应用于振动样品磁强计的详细进展，近期发表于IEEE仪器与测量专刊【IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 71 (2022) 1006009】。本工作的资助先后获国家自然科学基金(批准号：51327806、12174425)、中国科学院青年创新促进会(批准号：2018009)、中国科学院重点研究计划项目(批准号：ZDRW-CN-2021-3)、以及科技部重点研发计划(批准号：2018YFF0212603、2021YFF0701000)。

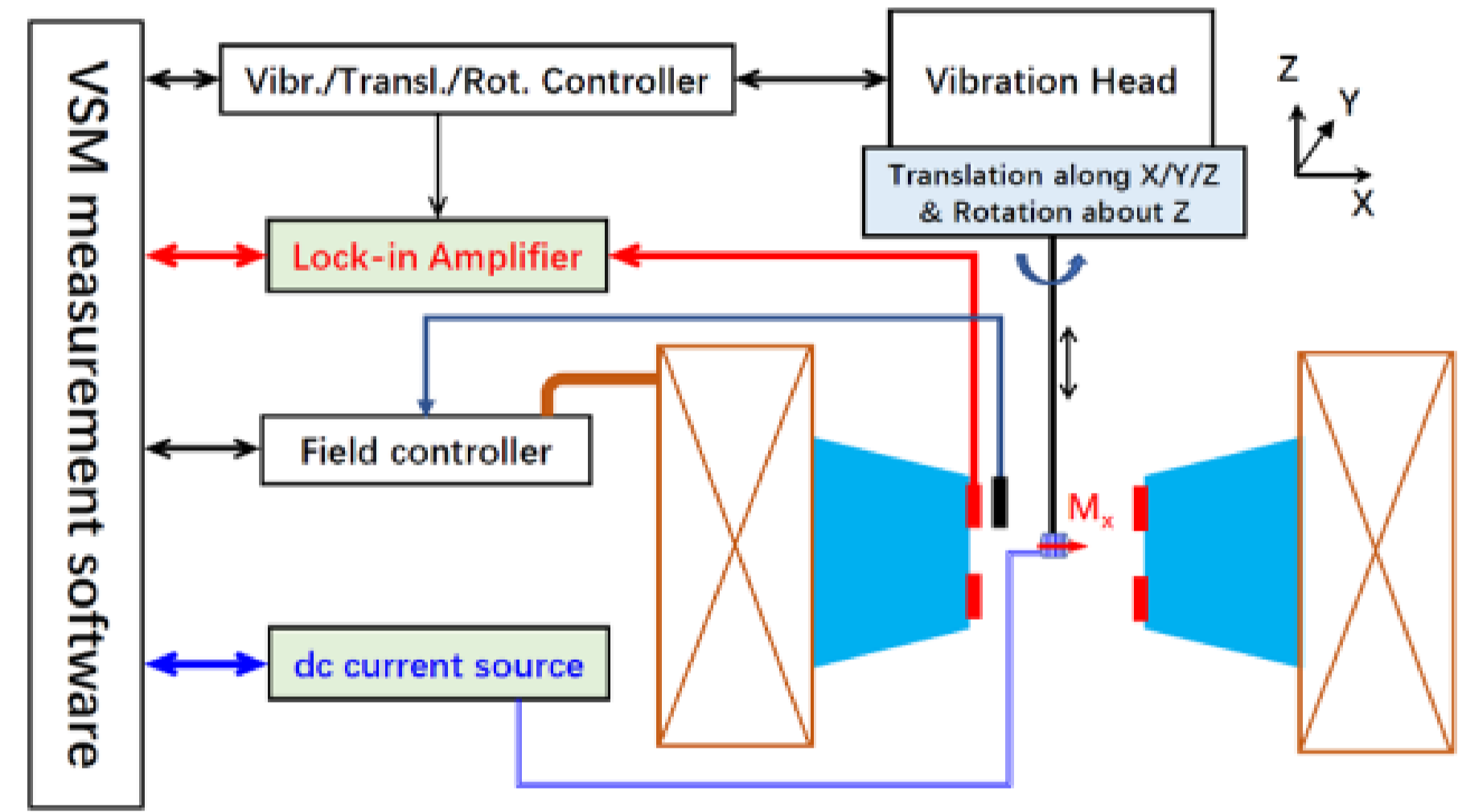


图1 运用电流量子溯源的磁矩线圈在振动样品磁强计中进行磁矩标定的仪器结构图

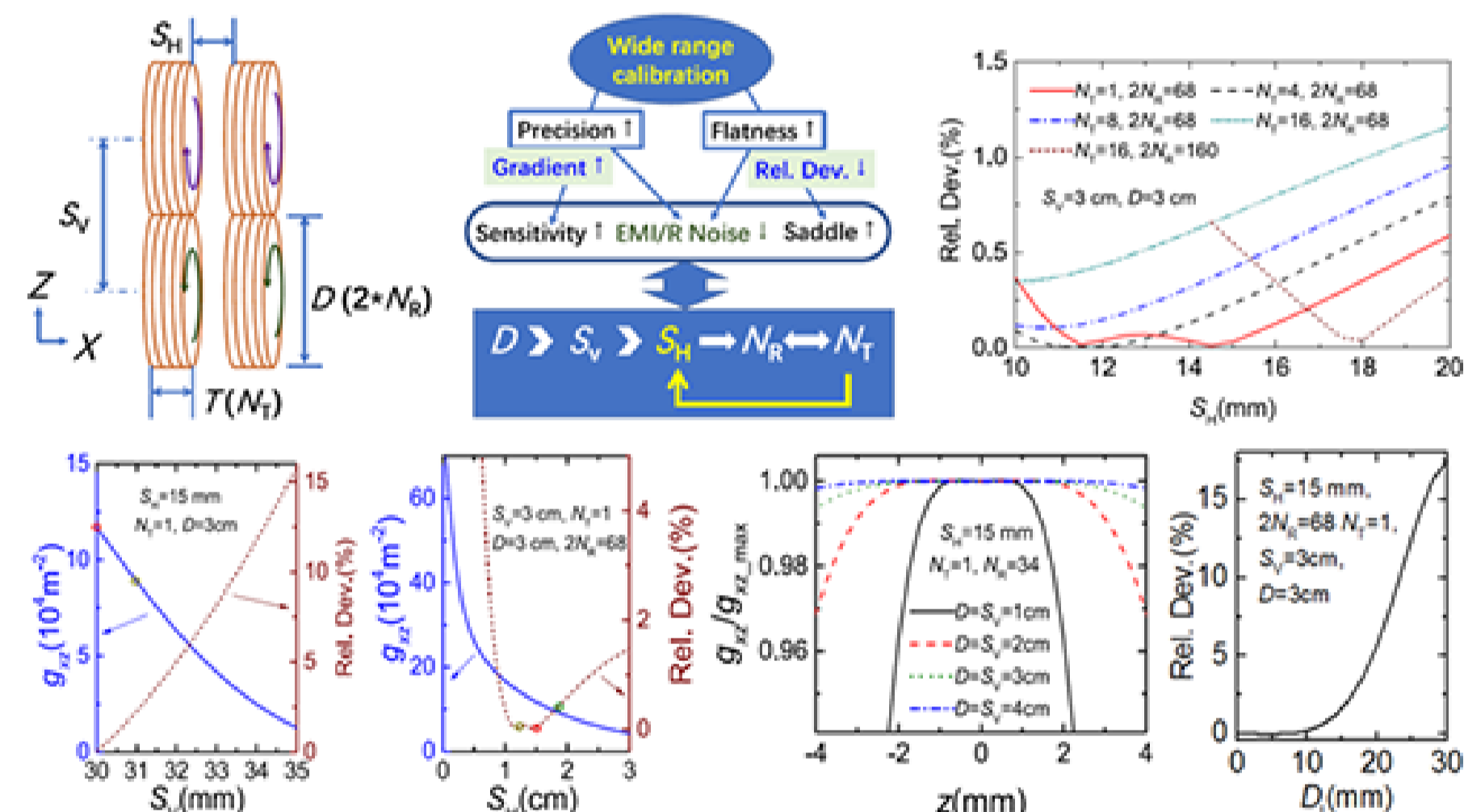


图2 振动样品磁矩探测线圈阵列的多参数系统设计与优化过程分析数据曲线图集

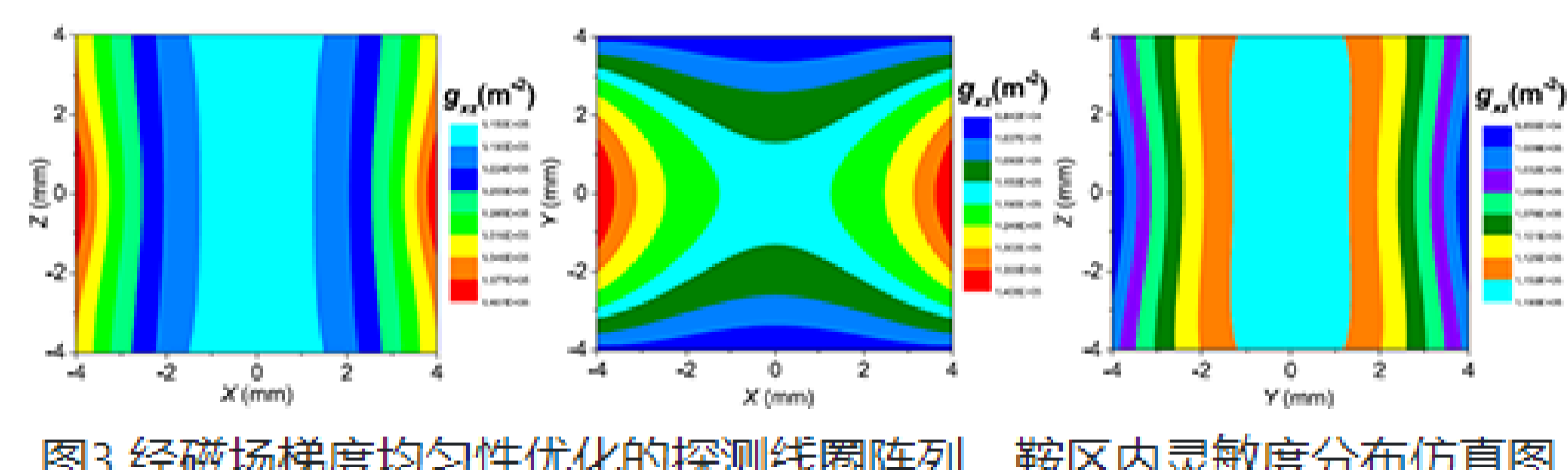


图3 经磁场梯度均匀性优化的探测线圈阵列，鞍区内灵敏度分布仿真图

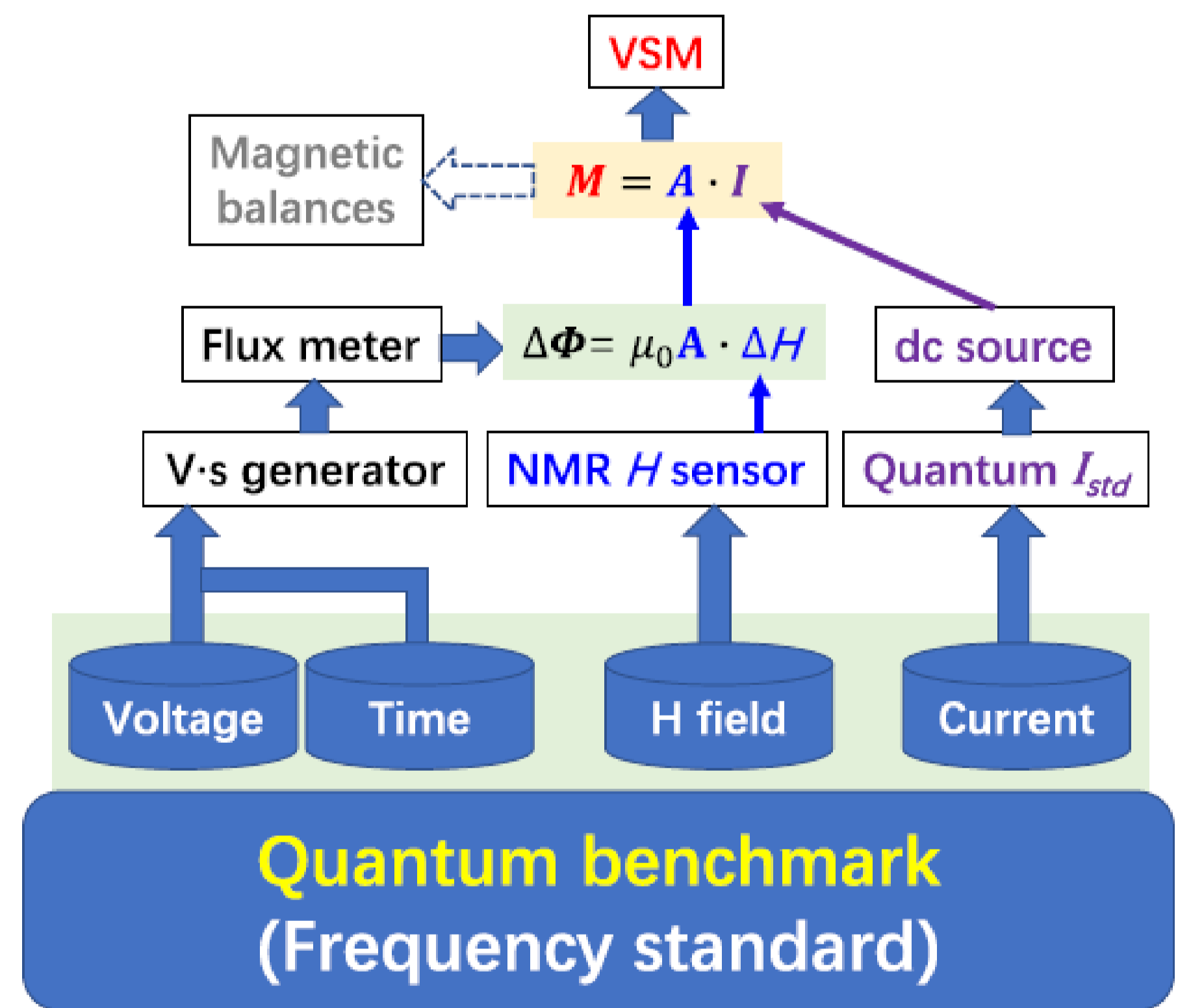


图4 振动样品磁强计中用磁矩线圈标定的量子溯源路径示意图

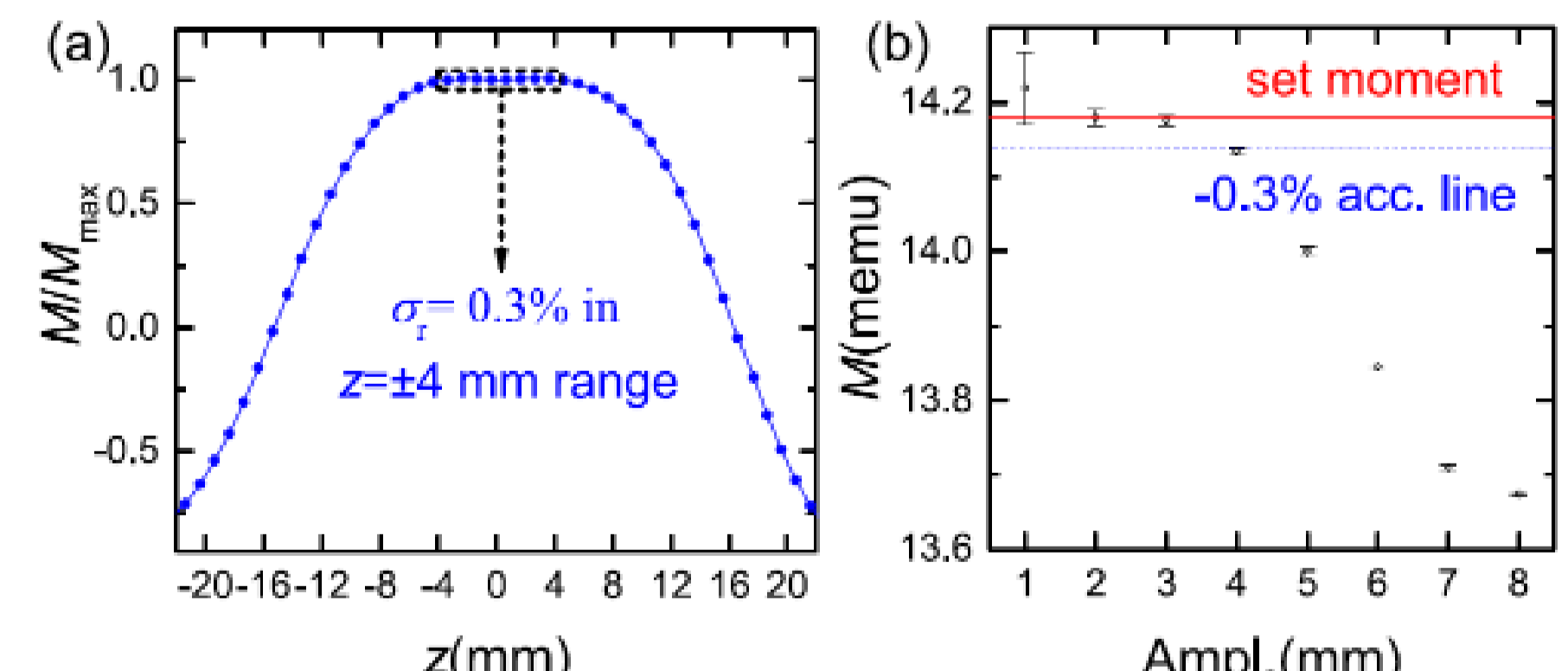


图5 实测的均匀区范围以及磁矩测量准确性随振动幅度依赖曲线

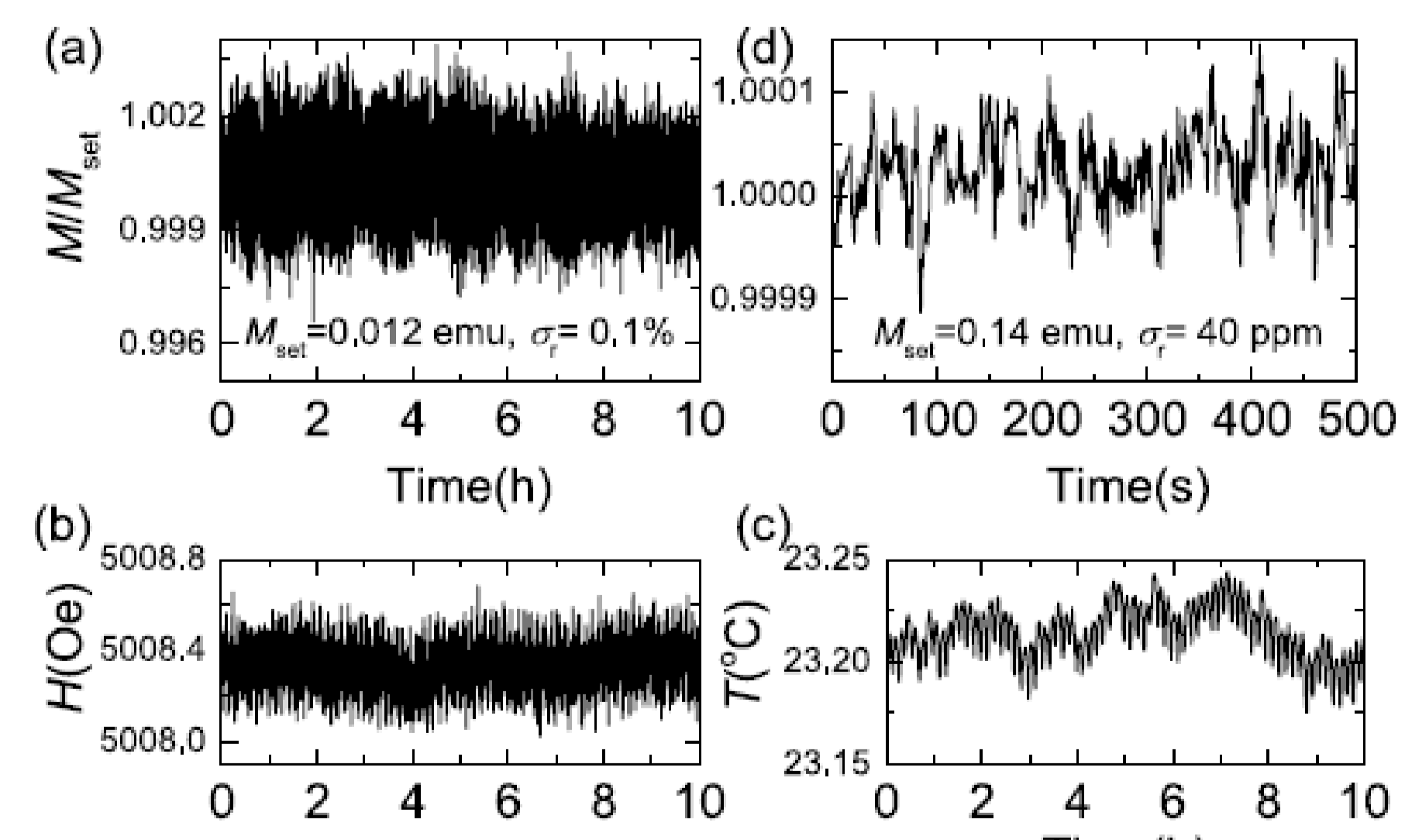


图6 量子溯源标定线圈的磁矩稳定性曲线

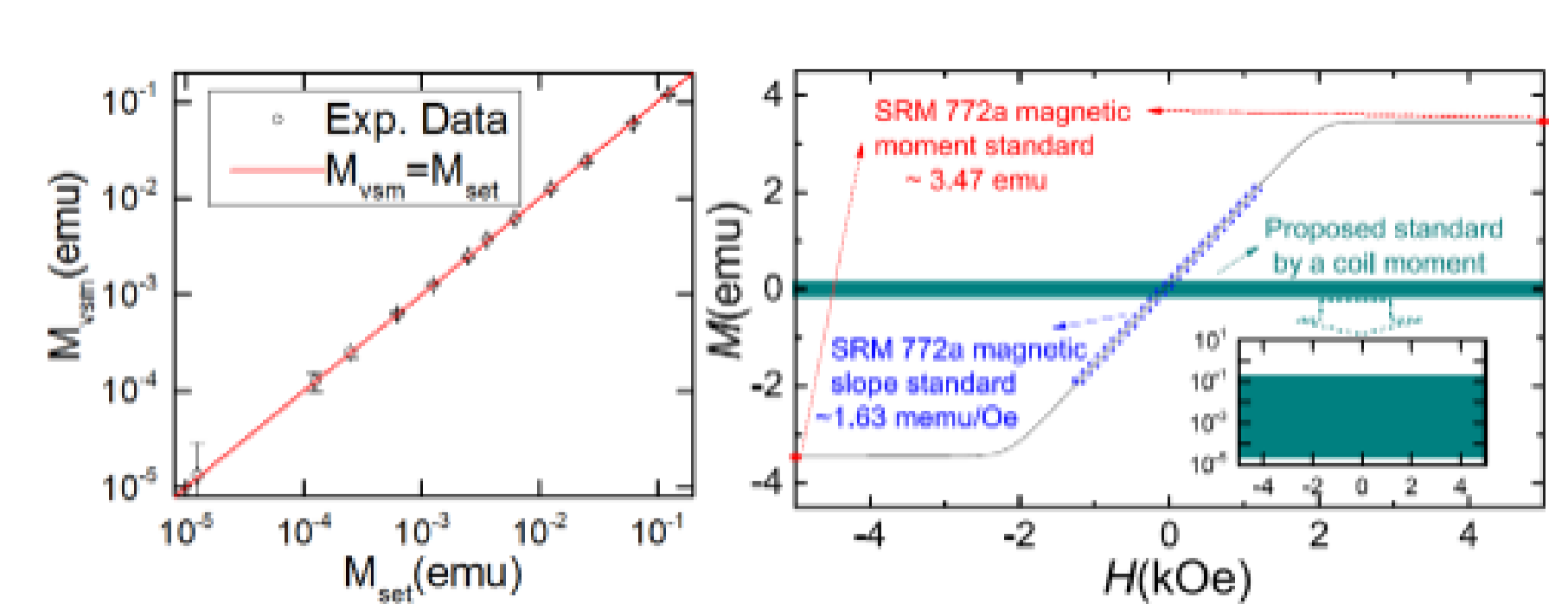


图7 量子溯源标定线圈的磁矩量值跨四个数量级准确性以及跟NIST现有标准性能对照曲线