

文章编号:1005-4642(2023)08-0029-07

专  
题



## 电阻热噪声测量玻尔兹曼常量的教学探索

李佳明, 申玉宽, 张浩毅, 王 媛, 何振辉

(中山大学 物理与天文学院, 广东 珠海 519082)

**摘 要:**玻尔兹曼常量是连接微观热运动与宏观物理现象和规律的重要物理量, 基于电阻热噪声的玻尔兹曼常量测量实验可应用于大学物理实验教学. 本文利用锁相放大器 OE1022, 设计了电磁屏蔽更好的样品盒, 可以在室温至液氮温度间测量热噪声, 拓展了宽频谱段的测量, 展现电阻热噪声的特性, 并计算出玻尔兹曼常量. 对 2 个年级采用不同的实验方案进行教学, 为有限课时内多人参与的实验室环境下测量玻尔兹曼常量提供教学参考.

**关键词:**玻尔兹曼常量; 电阻热噪声; 锁相放大器; 遥测

**中图分类号:**G642.423; O414.1

**文献标识码:**B

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.08.004

电阻热噪声的测量不仅有助于学生深入理解热噪声的本质及其统计特征, 体验降低热噪声的方法, 并进一步通过噪声功率谱密度计算玻尔兹曼常量(连接微观热运动与宏观物理现象和规律的重要物理常量); 还有助于了解噪声温度计的工作原理. 随着玻尔兹曼常量被用于热力学温度的定义, 其在物理学教学中的重要性明显, 基于电阻热噪声的玻尔兹曼常量测量已进入大学实验教学. 中山大学利用了研制的首款锁相放大器(OE1022), 采用将电阻器和 BNC 接头直接集成到小型 PCB 板的方案, 开发了电阻热噪声测量实验<sup>[1]</sup>; 玛希隆大学<sup>[2]</sup>、圣克莱门特奥特里德大学<sup>[3]</sup>也先后推出类似的实验装置, 并进行了教学实践, 获得的实验结果都与国际数据委员会(CODATA)公布的结果接近( $k_B = 1.380\ 648 \times 10^{-23}$  J/K, 以下称精确值)<sup>[4]</sup>. 这些方案侧重常温及其附近热噪声和玻尔兹曼常量的测量, 未提供通过低温降低热噪声功能; 也未从实验上充分展示热噪声及其频谱特征. 为此, 本文设计了可降低温度的教学实验<sup>[5]</sup>, 该实验对测量装置的电磁屏蔽能力以及锁相放大器的测量输入方式进行了改进<sup>[6]</sup>, 获得了较好的测量结果. 本文介绍了用锁相放大器测量电阻热噪声及玻尔兹曼常量的教学实践, 比较了 2 个年级不同实验方案的教学效果.

### 1 实验设计

#### 1.1 测量原理与方案

电阻热噪声功率谱密度  $S_T$  与电阻值  $R$ 、电阻的热力学温度  $T$  和玻尔兹曼常量  $k_B$  成正比:

$$S_T(f) = \frac{n_T^2(f)}{\Delta f} = 4Rk_B T, \quad (1)$$

其中,  $n_T^2$  为热噪声强度,  $\Delta f$  为低通滤波器等效带宽. 锁相放大器可以测量输入电压的  $X$  分量  $v_{RX}(t)$ , 对足够多的测量样本  $M$  求方差即可得到

该分量的噪声强度  $n_{RX}^2 = \sum_{i=1}^M [v_{RX}(t_i) - \overline{v_{RX}}]^2 / M$ .

再对输入带宽引入的系统误差进行修正, 并扣除包括来自于锁相放大器前级(输入、模拟放大器)噪声在内的本底噪声强度  $n_{BX}^2$  ( $50\ \Omega$  短接, 输入带宽引入的不确定度约为  $5 \times 10^{-6}$ , 可忽略不计), 得到  $X$  分量的热噪声强度为

$$n_{TX}^2 = n_{RX}^2 [1 + (\omega R_{in} C_{in})^2] - n_{BX}^2, \quad (2)$$

其中,  $R_{in}$  和  $C_{in}$  分别为锁相放大器输入端的等效电阻和等效电容. 然后利用低通滤波器的等效噪声带宽 ( $f_{ENBW} = \Delta f / 2$ ) 求得噪声功率谱密度为

$$S_T(f) = \frac{n_{TX}^2(f)}{f_{ENBW}}, \quad (3)$$

其平方根定义为噪声谱密度<sup>[5]</sup>.

**收稿日期:**2023-01-13; **修改日期:**2023-02-10

**基金项目:**2022 高等学校教学研究项目(No. DWJZW202238zn)

**作者简介:**李佳明(1988—), 男, 江西万载人, 中山大学物理与天文学院副教授, 博士, 研究方向为超冷原子和精密测量实验. E-mail: lijiam29@mail.sysu.edu.cn

**通信作者:**何振辉(1963—), 男, 广东顺德人, 中山大学物理与天文学院教授, 博士, 研究方向为空间科学实验. E-mail: stshzh@mail.sysu.edu.cn

## 1.2 技术方案

为抑制环境噪声的干扰,重新设计了屏蔽性更好的样品盒,并且采用差分输入测量方式,甚至采用在实验室人员活动少的时间段进行远程测量(遥测)的技术方案<sup>[6]</sup>. 实验仪器包括双锁相放大器(OE1022E、OE1022I 或 OE1022D,带 LabVIEW 操作界面),测温仪(MS6514)配 T 型温差电偶,通过 USB 连接到 PC 机,如图 1 所示. 低温环境通过液氮提供,电阻温度可通过调节样品盒与液氮面的距离被动控制.

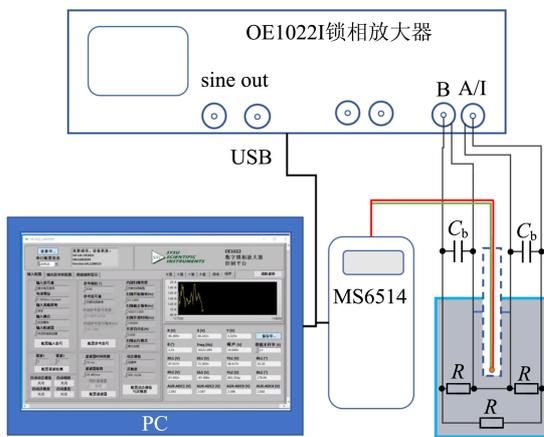


图 1 电阻热噪声测量差分输入接线图

### 1.2.1 样品盒的结构

变温测量要求安装待测电阻的样品盒具有良好的换热和测温功能,而又不会额外引入环境噪声,其关键点包括:a. 电阻完全置于铝制样品盒内,除上、下 2 个  $\phi 2$  小孔外,样品盒密封;b. 温差电偶设置在样品盒外的黄铜芯内,通过该黄铜芯与电阻保持良好的热接触,从而避免温差电偶引入环境噪声(结构原理如图 1 右下方蓝线包围的阴影部分所示,其中  $C_b$  为单根电缆的电容). 样品盒可直接插入液氮,获得约 78 K 的低温,亦可以通过调节离液氮面的距离,获得室温以下的某个温度.

为尽量抑制环境噪声的影响,测量选用差分(A-B)输入,电缆 BNC 接头分别连接在锁相放大器的 A 端和 B 端. 相应地,样品盒采用 3 个  $\frac{1}{8}$  W 的阻值为  $R$  的色环电阻,以“三角”对称连接方式解决因锁相放大器输入电阻所带来的输入带

宽变窄的问题,其等效电阻为  $\frac{2}{3}R$ ;影响输入带宽的  $R_{in}$  约为  $\frac{2}{3}R$ ,  $C_{in}$  约为电缆电容(室温下约为 96 pF/m)、锁相放大器输入电容(25 pF)与包括连接器和样品盒在内的电容(约为 15 pF,串联后其值的一半约 68 pF). 实验要求用数字多用表直接测量锁相放大器输入端的“三角”连接组合电阻在当前温度下的电阻值.

### 1.2.2 仪器参量

为减少放大后的模数转换为噪声的影响,应尽量提高前置放大器的增益;对 OE1022, 1 V 以下满量程灵敏度的模数转换噪声一样<sup>[7]</sup>,因此,灵敏度应选为  $1 \mu\text{V}$ ;另一方面,由于热噪声幅值小,因此动态储备应选“Low Noise”.

时间常量  $\tau$  和陡降 Slope 共同决定滤波器的等效噪声带宽  $f_{ENBW}$ . 而  $\tau$  也影响有效采样频率. 为保证所采集的数据彼此独立,采样时间间隔应不小于  $10\tau$ . 当选  $\tau$  为 100 ms, Slope 为 24 dB/oct 时,  $f_{ENBW}$  为 25/32 Hz, 则要求采样时间间隔  $\geq 1$  s. 若以该时间间隔采 1 000 个样本,并保证启动测量或改变频率后至少等待 10 s(100 倍的时间常量)的采样被认为有效,每个频率用时至少 20 min. 有关滤波器带宽对噪声测量的影响和动态储备,见文献[8].

以 98 k $\Omega$  电阻在 6 666 Hz 的噪声测量为例,说明采样时间间隔与滤波器参量( $\tau=1$  s, 陡降为 24 dB/oct)对数据的影响. 从  $t_s=0.1$  s 的数据中分别每隔 1, 3, 5, 10 s 选出 1 000 个数据样本,就 X 与 Y 相关性、Y 相邻数据的相关性以及 Y 分布作图(见图 2),可见随着采样时间间隔变长,邻近数据从正相关(相关系数  $r=1$ )过渡到无关. 表 1 给出了对应的在采样时间间隔  $t_s$  为不同的  $\tau$  的倍数时的室温噪声测量强度、X 及 Y 分量噪声电压相关系数  $R_{XY}$ 、Y 分量噪声电压自相关系数  $R_Y$  以及对正则分布的简化卡方. 当  $t_s=10\tau$  时,无论是 X 或 Y 分量还是某单分量的噪声电压是无关系的;  $t_s \geq 3\tau$  时,数据服从正则分布,噪声电压强度与  $t_s=10\tau$  时的相对不确定度小于 2.2% (噪声电压强度的理论比值标准差).

出于降低环境噪声影响(见图 3, A/I 输入,  $\tau$  为 100 ms, 陡降为 24 dB/oct)的考虑,本文提供远程桌面控制数据采集(遥测)选项.

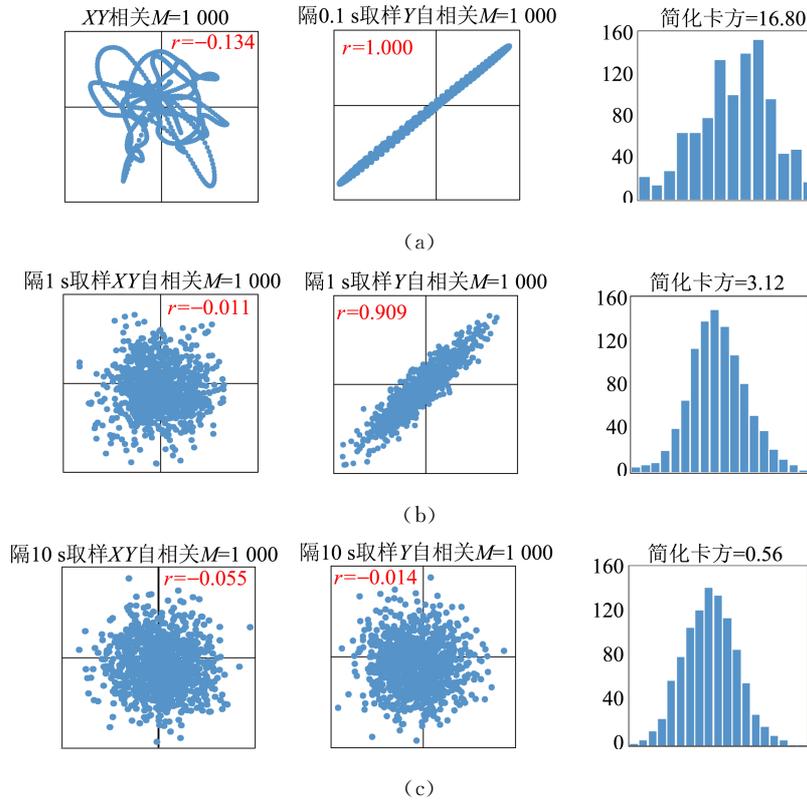


图 2 采样时间间隔为 0.1 s 时不同相关性对数据独立性的影响

表 1 不同采样时间间隔  $t_s$  的噪声测量强度、相关性、正则分布符合度

$t_s$	$n_X/nV$	$E_{n_X}$	$n_Y/nV$	$E_{n_Y}$	$n_{XY}/nV$	$E_{n_{XY}}$	$r_{XY}$	$r_Y$	简化卡方
$0.1\tau$	9.4	-14.1%	7.8	-29.0%	8.7	-21.3%	-0.134	1.000	16.80
$\tau$	10.3	-5.7%	10.8	-1.8%	10.6	-3.7%	-0.011	0.909	3.12
$3\tau$	11.2	2.3%	10.9	-1.3%	11.1	0.5%	0.070	0.500	1.52
$5\tau$	10.9	-0.3%	10.8	-1.8%	10.9	-1.0%	0.026	0.176	0.58
$10\tau$	11.0	0	11.0	0	11.0	0	-0.055	-0.014	0.56

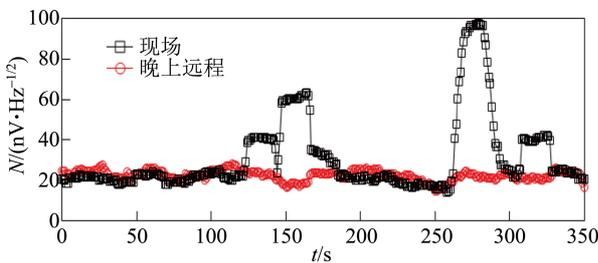


图 3 样品盒改进前,100 kΩ 电阻器热噪声谱密度频谱

## 2 教学方法及教学效果

### 2.1 教学内容与课程安排

锁相放大器与弱信号测量实验共 8 学时,先学习锁相放大器测量原理和基本操作<sup>[9-10]</sup>,了解

锁相放大器参数的含义及与测量原理的关系;再讲解锁相放大器的应用,本方案为 2 选 1 内容,2 人 1 组. 课堂前 1.5 h 现场准备,后 2 h 可进行测量. 基本要求是在 2 个温度环境下分别测量 2 个不同频率下的噪声谱密度和玻尔兹曼常量.

### 2.2 教学实践

分别对 2019 级和 2020 级物理专业学生开展教学实验. 2019 级实验使用改进前的测试杆,A 端输入,出于设计性实验考虑,未提供具体的实验指引,锁相放大器参量设置没有约束. 2020 级实验使用改进后的样品盒<sup>[6]</sup>,教师提供了实验指引,特别是限定参量取舍和选择范围,指定差分输入,指定用测量值计算噪声谱密度和给各实验组指定

不同的频率. 通过以上措施使学生对实验目的、测量过程更为了解, 设计目标更为明确.

### 2.2.1 2019级学生测量结果及分析

2019级共有20组学生选了电阻热噪声与玻尔兹曼常量测量实验, 要求采用遥测方式, 学生可以拓展更多的温度和频率点, 每组学生所选的频率不能重复. 约有10组学生通过直接测量值计算玻尔兹曼常量. 他们最多的测量了10个 $k_B'$ , 最少测量2个 $k_B'$ , 但结果分散度大. 为便于观察, 无论该组测量多少个 $k_B'$ 值, 取其平均 $\overline{k_B'}(j)$ , 其分散度仍然不低(如图4的直方图所示), 有6组测量平均值偏离精确值30%以上, 有7组在精确值10%范围内. 最后取20组 $\overline{k_B'}$ 的算术平均值 $\overline{k_B} = 1.75 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , 比精确值偏大27%; 离散系数(标准差/平均值)为64%.

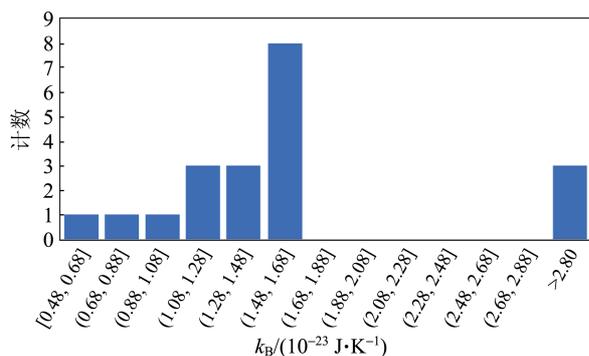


图4 2019级学生测量 $k_B$ 各组内平均值分布

测量值与精确值之差大的原因主要有:

1) 硬件和测量方案上对环境噪声的屏蔽能力不足<sup>[6]</sup>;

2) 参量设置或操作不合理<sup>[5]</sup>, OE1022锁相放大器提供噪声谱密度( $N$ )的直接测量, 但其内部固定了 $N$ 值算法(样本量为1024个), 受限于滤波器带宽, 所测的1024个样本未必是独立无关的, 当学生直接用测量值作为噪声谱密度时, 容易造成较大的测量误差, 滤波器带宽太大, 而频率设置又比较接近环境噪声频率时, 会引入环境噪声从而使电磁屏蔽能力不足的问题更突出;

3) 数据处理不当, 如高频点没有做输入带宽修正.

不合理的大偏差情况往往对应于记录或/和数据处理过程不完整, 无法判断其误差原因.

### 2.2.2 2020级学生测量结果及分析

2020级共有40组学生选了玻尔兹曼常量测

量实验, 其中遥测是鼓励学生选做的. 每次实验有5~6组学生参加, 分别使用6个不同电阻值的样品(6.6, 13.7, 41.0, 66.7, 98.0, 144.0 k $\Omega$ )和6台单通道锁相放大器, 教师每次实验指定之前提供未使用过的、3个不同的频率供学生选择. 要求学生通过测量值计算噪声强度, 独立处理和数据分析本组测量数据, 不要求定量表征热噪声特性.

玻尔兹曼常量测量结果共229个, 1组最多测量了12个, 最少3个,  $k_B$ 测量值比较集中(见图5). 在不合理的偏离结果中, 存在不同程度的数据处理不规范问题, 例如没有做输入带宽修正、先扣本底后做输入带宽修正, 未计算功率谱密度或算错等效噪声带宽、测温时选择了默认的K型而非实际使用的T型温差电偶, 等等. 教师抽取了3份错误严重但实验记录清晰的原始数据按规范重新处理, 修正后的 $k_B$ 值在合理范围内, 说明原始数据可用. 出于工作量的考虑, 对可被发现、相对简单的错误进行了直接修正. 用修正后的玻尔兹曼常量加上原本正确的共172个 $k_B$ 值做直方图(见图5修正), 无论是 $k_B$ 平均值还是数据分散度(表2第1行数据), 都低于2019级的结果. 在修正后的结果中提取遥测值共37个, 其平均值为 $\overline{k_B} = 1.44 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , 离散系数为16%, 均优于总体(主要是现场测量)数据.

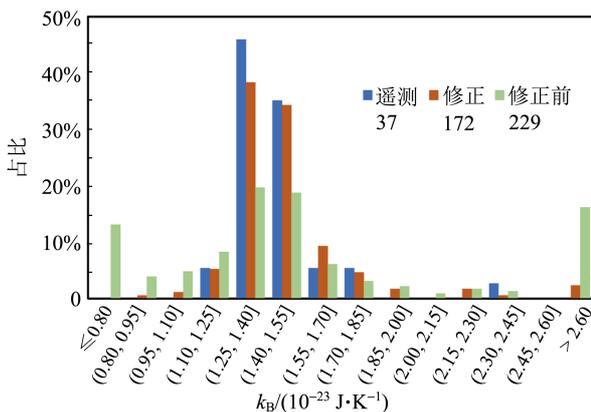


图5 上、下限以3倍标准差筛选的2020级 $k_B$ 测量值分布直方图

大多数数据修正并非使用原始数据从头计算, 不排除隐含着与组及测量场景相关的错误. 就现场室温、现场液氮温度、遥测室温、遥测液氮温度4个细分场景, 算出各组的平均值 $\overline{k_B}$ (列于表2第2至5行). 尽管细分后各场景的样本量偏少, 但数据统计差异仍然可信: a. 室温下的测量结果较

液氮下测量结果偏离精确值小;b. 遥测的数据虽然很少,但其离散系数比现场测量的更小(见表 2 第 6 行和第 7 行).

表 2 单个测量值  $k_B$  和在不同场景下的组内平均值  $\bar{k}_B$

场景	数量	$k_B / (10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1})$	离散系数	相对精确值偏差
个体	172	1.53	48.6%	10.6%
现场室温	28	1.43	8.2%	3.5%
遥测室温	4	1.44	3.0%	4.3%
现场液氮	27	1.67	38.1%	20.7%
遥测液氮	11	1.46	12.2%	5.7%
现场	28	1.54	21.2%	11.9%
遥测	12	1.46	11.7%	5.6%

对每个频率下测量的  $k_B$  求平均  $\bar{k}_B(f)$ , 其值基本不随频率变化,与扫频测量结果一致,如图 6 所示,前者误差棒表示测量标准差,后者表示基于样品量的标准差.

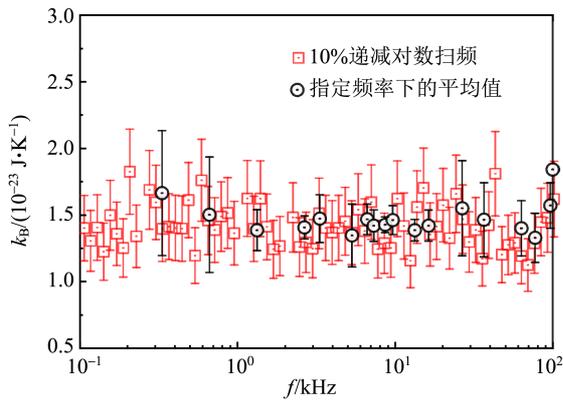


图 6 指定频率下的平均值  $\bar{k}_B$  (黑) 与 66.7 kΩ 样品扫频测量结果 (红) 比较

2.2.3 误差分析

参考文献[5]的误差分析得到  $k_B$  值的比值不

确定度采用了保守估计,即

$$\frac{\delta k_B}{k_B} \leq 2 \frac{\delta n_{TX}}{n_{TX}} + \left| \frac{\delta R}{R} \right| + \left| \frac{\delta T}{T} \right|, \quad (4)$$

其中,电阻与温度的测量随机误差远小于 1%,可忽略,这里只考虑系统误差:设手持多用表测量电阻最大不确定度  $\delta R = 1 \Omega$ ,测温仪在室温和液氮下测温最大不确定度  $\delta T$  为 0.3 K 和 2 K;噪声电压的比值不确定度包括噪声测量本身的统计性不确定度、锁相放大器的电压测量不确定度和数据处理过程中模型假设带来的不确定度,因此

$$\frac{\delta n_{TX}}{n_{TX}} \leq \frac{\sigma_{n_{TX}}}{n_{TX}} + \left| \frac{\delta v}{v} \right|. \quad (5)$$

测量电压为输入电压与增益的乘积:  $v = \alpha v_{in}$ ,  $\delta v = v_{in} \delta \alpha + \alpha \delta v_{in}$ , OE1022 手册<sup>[7]</sup> 给出  $\delta \alpha / \alpha \leq 1\%$ , 标准为 2%). 信号在输入端的误差  $\delta v_{in}$  主要受输入带宽和未被完全屏蔽的环境噪声影响. 假定在输入带宽修正后其影响可忽略,而环境噪声的影响  $\delta v_{en}$  最不确定,为了便于分析,先假设  $\delta v_{en} = 0$ , 并取热噪声测量 3 倍标准差  $3\sigma_{n_{TX}}$  (置信度 99.7%) 计算玻尔兹曼常量测量的最大不确定度为

$$\frac{\delta k_B}{k_B} = 3 \sqrt{\left(1 + 2 \frac{n_{BX}^2}{n_{TX}^2}\right) \frac{2}{M-1} + \left| \frac{\delta R}{R} \right| + \left| \frac{\delta T}{T} \right| + 2 \left| \frac{\delta \alpha}{\alpha} \right|}. \quad (6)$$

结果如表 3 所示,其中学生使用的 6 台锁相放大器的本底噪声  $n_{BX}$  分别测量后代入式(6),  $n_{TX}$  按电阻取理论值,个体测量的样本量  $M = 1000$ ,组内平均的样本量  $M = 3000$ .

按 3 倍标准差置信度计算,应该只有不大于 1 个测量值的比值不确定度超出表 3 所示的最大值(约 28%),而实际上有 4 个测量值超出. 尽管不能完全排除未发现误操作的可能性,但测量得到的平均值比精确值偏大,与环境噪声的影响相符( $\delta v_{en} / v_{in} \neq 0$ ).

表 3 基于热噪声测量 3 倍标准差的  $k_B$  测量值比值不确定度计算结果

R/kΩ	$\delta k_B / k_B$					
	个体 室温	个体 液氮	组内平均 遥测室温	组内平均 遥测液氮	组内平均 现场室温	组内平均 现场液氮
6.6	18.0%	28.7%	9.6%	15.2%	10.6%	17.8%
13.5	17.8%	28.2%	8.9%	13.1%	10.5%	17.5%
41.0	17.7%	28.0%	10.4%	17.2%	10.4%	17.4%
66.7	17.3%	26.8%	9.6%	15.1%	10.2%	16.7%
98.0	15.6%	22.1%	8.4%	11.1%	9.2%	14.0%
144.0	14.2%	17.6%	8.9%	13.1%	8.4%	11.4%

### 1) 液氮下测量的偏差大

表 2 所示的液氮下测量的  $k_B$  偏差大,  $\delta T/T$  随  $T$  下降增加和热噪声随  $T$  下降变小可以解释部分原因, 但液氮下测量值的比值标准不确定度约为室温下的 4 倍, 明显高于按式(6)计算的结果(约 1.5 倍). 在式(5)的讨论中, 式(2)的输入带宽修正项被假设为确定无误差, 然而同轴电缆中的介质介电常量随  $T$  降低而下降, 导致输入电容的下降  $\delta C_{in}$ , 输入带宽修正也会给测量电压带来比值不确定度  $\delta v_{BW}/v_{BW}$ , 具体表示为

$$\frac{\delta v_{BW}}{v_{BW}} = \left(1 + \frac{n_{BX}^2}{n_{TX}^2}\right) \frac{(\omega R_{in} C_{in})^2}{1 + (\omega R_{in} C_{in})^2} \left(\frac{\delta R_{in}}{R_{in}} + \frac{\delta C_{in}}{C_{in}}\right). \quad (7)$$

用阻抗分析仪(GWINSTEK LCR-8105G)测量 2 m 长电缆分别在室温和一半在室温一半在液氮罐内的电容值, 后者下降了约 30%, 对应式(7)中的  $\delta C_{in}/C_{in} \approx -26\%$ . 由于样品电阻在液氮温度下需重新测量, 且电缆电阻相对于样品电阻很小, 因温度变化导致的  $\delta R_{in}/R_{in}$  可以忽略. 式(7)给出的输入带宽修正量在不同测量频率下和对不同样品电阻造成修正过度的程度不同, 可解释液氮下  $k_B$  测量值的离散系数大.

### 2) 现场测量的误差大

现场测量的本底噪声比遥测高, 已能说明环境噪声的影响. 按基于每台锁相放大器本底噪声获得标准差计算的现场测量预计不确定度在室温和液氮温度下分别是遥测的 1.7 倍和 2.3 倍, 而表 2 所示的实际现场测量值的离散系数分别约为遥测的 2.4 倍和 3.1 倍. 需要指出的是, 有遥测数据的实验报告也存在实验记录不完整, 数据处理不规范而需要修正等问题.

从实验报告结果来看, 无需修正、可直接简单修正以及不能直接简单修正的测量约各占 1/3, 教学效果尚有较大提升空间. 2/3 的学生参与了调查反馈, 其中 53% 的学生反映在实验上花费的时间超过 10 h, 说明大多数学生需要更多的时间去做好该实验.

## 3 结束语

用锁相放大器测量电阻热噪声, 是“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”建议实验内容之一<sup>[11]</sup>. 本文教学实践不仅展现了热噪声的特

性和锁相放大器参数的深刻含意, 而且扩展到玻尔兹曼常量的测量, 其实验设计可以满足自主学习热噪声特性和在环境噪声相对复杂的环境下进行玻尔兹曼常量测量的要求, 但需要在较为复杂的数据处理上提供更详细的指引、延长实验时间等方面做更多改进. 也可以考虑将热噪声特性表征分出来做为另一项实验内容, 以及将精确测量玻尔兹曼常量作为高阶实验内容, 在可提供更长测量时间的第二课堂开展实验.

## 参考文献:

- [1] 贾莲莲, 贺子芸, 曾迪昂, 等. 基于数字锁相放大器测量电阻热噪声[J]. 物理实验, 2018, 38(12): 1-5.
- [2] Pruttivarasin T. A robust experimental setup for Johnson noise measurement suitable for advanced undergraduate students [J]. European Journal of Physics, 2018, 39(6): 065102.
- [3] Mishonov T M, Serafimov N S, Petkov E G, et al. Set-up for observation thermal voltage noise and determination of absolute temperature and Boltzmann constant [J]. European Journal of Physics, 2022, 43(3): 035103.
- [4] Fischer J. Low uncertainty Boltzmann constant determinations and the kelvin redefinition [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2015, 374(2064): 20150038.
- [5] 何振辉. 锁相放大器噪声测量原理与教学实验设计 [J]. 大学物理, 2022, 41(11): 22-27.
- [6] 申玉宽, 何振辉. 不同温度下电阻热噪声测量方案与电磁屏蔽的改进 [J]. 大学物理实验, 2023, 36(2): 54-58.
- [7] OE1022 说明书 [Z]. (2022-06-18) [2023-01-01]. <https://www.ssi-instrument.com/download.html>.
- [8] 郑远, 姚星星, 郭红丽, 等. 基于数字锁相放大器的电阻噪声特性研究 [J]. 物理实验, 2021, 41(10): 11-18.
- [9] 陈泽宁, 王自鑫, 贺子芸, 等. 数字锁相放大器中相敏检波检测技术的基本原理实验 [J]. 物理实验, 2018, 38(1): 22-28.
- [10] 王自鑫, 陈泽宁, 蔡志刚, 等. 基于数字锁相放大技术的强噪声背景下检测微弱信号教学实验 [J]. 物理实验, 2016, 36(3): 1-4.
- [11] 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会. 理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2023年版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2023: 44.

## Teaching practice of Johnson noise measurement on Boltzmann constant determination

LI Jiaming, SHEN Yukuan, ZHANG Haoyi, WANG Yuan, HE Zhenhui  
(School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

**Abstract:** Boltzmann constant is an important physical constant bridging the micro thermal motion and macro physical phenomena and laws, and Boltzmann constant measurement experiment based on Johnson noise can be applied to university physics experiment teaching. By developing a sample box with better electromagnetic shielding that make possible measurement of Johnson noise from room temperature to liquid nitrogen temperature, the OE1022 lock-in amplifiers was used to measure the Johnson noise in a wide frequency spectrum, exhibit the characteristics of the Johnson noise, and obtain the Boltzmann constant. The different experimental schemes were adopted for the teaching of the two grades, which offered the references to Boltzmann constant measurement in the cases of limited class hours and being performed by more students.

**Key words:** Boltzmann constant; Johnson noise; lock-in amplifier; remote measurement

[编辑:郭 伟]

(上接 12 页)

- [62] Takhtamyshyan V, Babichev R K. Simulation of a band-stop filter based on coplanar waveguide [C]//Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW),2017:376-379.
- [63] Courrèges S, Yuan L, Zhao Z, et al. A Ka-band electronically tunable ferroelectric filter [J]. IEEE

Microwave & Wireless Components Letters, 2009,19(6):356-358.

- [64] Arabi E, Ghaffar F A, Shamim A. Tunable band-pass filter based on partially magnetized ferrite LTCC with embedded windings for SoP applications [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2015,25(1):16-18.

## Microwave devices based on ferroic materials and the related simulation

XUE Mingzhu, WANG Aiji, ZHANG Jinxing  
(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** With the development of wireless communication technology, the research on the integrated, chip-based, and array-based microwave devices have become intending directions. Understanding the basic physical properties of materials, and simulating the related devices can help to promote the understanding on the atomic scale and then the macroscopic devices, as well as the prediction of the properties of microwave devices, as is key to promoting the development of microwave technology. Starting the basic materials of microwave devices, and the basic physical properties of ferromagnetic, ferroelectric and multiferroic composite materials and their applications in microwave devices are discussed mainly. The simulation software of microwave devices were introduced.

**Key words:** microwave devices; magnetic materials; ferroelectric materials; multiferroic materials; simulation

[编辑:赵辰一]