

集成热电阻的石英谐振露点传感器

白雪松, 温连鹏, 王国华, 聂晶

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 露点温度测量方法作为最精确的湿度测量方法, 被广泛应用于武器装备的生产研制中; 石英晶体因其具有高品质因数和高质量负载效应, 被用于新型谐振式精密露点仪的研制中; 针对传统石英谐振露点传感器由于无法直接测量其表面温度而引入的系统误差问题, 提出了一种集成热电阻的石英谐振露点传感器; 通过微机电系统工艺, 在石英晶体表面集成了铂热电阻, 实现了对石英晶体表面温度的直接测量, 从而消除了系统误差; 采用理论计算和有限元分析, 对传感器结构参数进行了优化设计, 并通过实验验证了所设计的石英谐振露点传感器的性能; 实验结果表明, 集成热电阻的石英谐振露点传感器的测量精度可达 $\pm 0.08\text{ }^{\circ}\text{C DP}$, 重复性小于 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C DP}$, 显著提高了传统石英谐振露点传感器的测量精度。

关键词: 露点传感器; 石英谐振; 有限元分析; 微机电系统; 系统误差

Quartz Crystal Resonant Dew Point Sensor with Integrated Thermal Resistance

BAI Xuesong, WEN Lianpeng, WANG Guohua, NIE Jing

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Dew point temperature measurement method, as the most accurate method for humidity measurement, is widely used in the production and development of weapon equipment; Quartz crystals, due to their high quality factor and highly sensitive mass-loading effect, are used in the development of new resonant precision dew point meters; Aiming at the system error introduced by traditional quartz resonant dew point sensors due to their inability to directly measure their surface temperature, A quartz resonant dew point sensor integrated with a thermal resistor is proposed; Through micro-electro-mechanical system (MEMS) technology, a platinum thermal resistor is integrated on the quartz crystal surface, directly measuring the quartz crystal's surface temperature, thereby eliminating the system error; The structural parameters of the sensor are optimized and designed using theoretical calculations and finite element analysis (FEA), and experiments verify the performance of the designed quartz resonant dew point sensor; Experimental results show that the measurement accuracy of the quartz resonant dew point sensor integrated with a thermal resistor reaches up to $\pm 0.08\text{ }^{\circ}\text{C DP}$, with a repeatability of less than $0.11\text{ }^{\circ}\text{C DP}$, significantly improving the measurement accuracy of traditional quartz resonant dew point sensors.

Keywords: dew point sensor; quartz crystal resonant; FEA; MEMS; systematic error

0 引言

湿度在工业制造、医疗、农业生产等领域中均发挥重要作用^[1-5]。湿度不是一个独立的参数, 其受环境温度、大气压力等参数的影响, 且参数之间存在复杂的耦合关系, 因此湿度是常规环境监测中最难测量的参数之一。湿度物理量包含比湿、绝对湿度、水蒸气摩尔分数、相对湿度、露点温度(DP, dew point)等多种参数。露点温度是在气体压力不变的情况下, 气体达到饱和时的温度, 露点温度测量方法被认为是最精确的湿度

测量方法, 国际上把露点温度作为湿度的量传标准^[6]。如果水蒸气冷凝时的温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 水蒸气会凝结为液态水, 此时的温度称为露点温度; 如果低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 水蒸气会凝华成固态霜, 此时的温度称为霜点温度。但是在实际条件下, $-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间水蒸气的状态是不确定的, 可能是液态水, 可能是固态霜, 也可能是两者的混合, 因此在这一范围内的温度一般称为云点^[7]。

露点传感器可以分为直接测量型和间接测量型^[8]。间接测量型露点传感器通过测量相对湿度和环境温度, 经 Magnus 公式换算为露点温度^[9], 由于不是对露点温

收稿日期:2025-04-15; 修回日期:2025-05-05。

作者简介:白雪松(1997-),男,博士研究生。

通讯作者:聂晶(1985-),男,博士,副研究员,博士生导师。

引用格式:白雪松,温连鹏,王国华,等.集成热电阻的石英谐振露点传感器[J].计算机测量与控制,2025,33(6):305-312.

度的直接测量,因此其测量精度相对较低,一般在 $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C DP}^{[10]}$ 。直接测量型露点传感器基于露点温度的基本定义实现,通过测量气体中水分子在湿度敏感器件表面冷凝时的温度作为露点温度,因此具有最高的测量精度,一般在 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C DP}^{[11]}$ 。目前,直接测量型露点传感器包括谐振式露点传感器、光学式露点传感器、电学式露点传感器等。本文主要关注于谐振式直接测量型露点传感器。

谐振式直接测量型露点传感器的露点测量基本原理为通过对谐振器件制冷,主动控制谐振器件的温度,测量器件的输出值(一般为频率)。当谐振器件的温度达到露点温度时,被测气体中水分子在谐振器件表面发生冷凝,使得器件的输出值发生变化,器件输出值变化那一刻的温度值即可作为露点温度。因此,谐振式直接测量型露点传感器的关键技术在于对水分子冷凝时的湿度敏感器件表面温度的测量,但对于谐振器件来说,直接在其表面安装温度传感器测量其表面温度会影响其谐振特性,严重时甚至无法产生谐振。此外,谐振器件的几何尺寸一般都较小,将常规的温度传感器安装在其表面是非常有挑战性的任务。因此传统谐振式直接测量型露点传感器只能通过测量传冷部件的温度来近似谐振器件表面温度,这使得测量结果不可避免地引入了系统误差。文献[11]提出了一种采用圆形和悬臂梁型的MEMS谐振露点传感器,使用半导体制冷器对传感器制冷,传感器输出频率突变点时刻的温度作为露点温度,采用分段拟合的方法对频率-温度曲线进行拟合,结露前采用3次多项式拟合,结露后采用线性函数拟合,分段点即为露点,实验结果表明露点测量精度为 $\pm 0.29\text{ }^{\circ}\text{C DP}$ 。这种方法虽然使用分段拟合法确定结露点,但通过测量传冷部件的温度作为MEMS谐振器件的温度,并未直接测量谐振器件表面温度,引入了系统误差。文献[12]提出了一种使用薄膜压电硅谐振器的露点传感器,通过半导体制冷器对谐振器制冷,由于谐振器具有负温度频率系数,温度降低会导致其谐振频率增加,当谐振器温度达到被测气体露点时,器件表面形成液态薄膜,由于质量负载效应,导致器件谐振频率发生负方向突变,因此谐振频率会在结露处达到最大值,将最大值处对应的温度值作为露点。实验结果表明,传感器测量精度可达 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C DP}$ 。该方法使用薄膜K型热电偶测量制冷平面的温度,将其作为谐振器件的表面温度,尽管测量精度已经非常高,但是仍然属于对器件表面温度的间接测量。

石英晶体拥有极高的品质因数,且具有质量负载效应,因此石英谐振露点传感器被认为是测量精度和灵敏度均非常高的露点传感器^[13]。为了精确获得石英晶体的表面温度,研究人员采用了许多方法。文献[14]提

出通过引入参考石英晶体去近似测量石英晶体的表面温度,即将一个石英晶体作为湿度敏感器件,用于检测水蒸气冷凝,另一个石英晶体作为参考器件,在其表面安装工业PT100温度传感器,由于湿度敏感石英晶体和参考石英晶体处于同一测量环境,因此可以将参考石英晶体的表面温度作为湿度敏感石英晶体的表面温度,从而实现对湿度敏感石英晶体表面温度的间接测量,实验结果显示使用参考石英晶体的露点传感器测量精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C DP}$ 。这种方式由于需要保证两个石英晶体所处的测量环境一致,因此反而引入了更多的不确定因素,使得测量精度较低。文献[15]提出通过补偿算法来获得石英晶体的表面温度,具体实现为在传感器实际测量之前,通过实验对石英晶体表面温度和其传冷部件温度映射关系做标定,通过数据拟合的方式,得到表面温度和传冷部件温度之间的补偿方程,然后通过具体的补偿算法和传冷部件温度结合,实现对石英晶体表面温度的测量,实验结果表明,露点测量精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C DP}$ 。文献[16]中主要通过优化传感器的传冷部件材料、结构等方面,以求最大程度降低传冷部件和石英晶体表面温度之间的温差,从而通过测量传冷部件温度来近似石英晶体表面温度,实验结果表明,通过优化传感器结构方法的露点传感器测量精度为 $\pm 0.44\text{ }^{\circ}\text{C DP}$ 。上述这些方法虽然能在一定程度上降低石英晶体表面温度的测量误差,但仍属于对石英晶体表面温度的间接测量,无法从根本上消除系统误差。

本文提出了一种集成热电阻的石英谐振露点传感器,采用微机电系统(MEMS, micro-electro-mechanical system)工艺,将铂热电阻集成在石英晶体表面,从而实现对石英晶体表面温度的直接测量,从根本上消除了由于无法直接测量石英晶体表面温度带来的系统误差。通过理论计算和有限元仿真相结合,对包括石英基底、电极几何参数、电极厚度、MEMS铂电阻几何参数和加工位置在内的传感器结构参数进行了最优化设计,并搭建了实验系统,对传感器的露点测量误差和测量重复性进行了实际测试。

1 传感器最优参数设计

1.1 传感器理论参数设计

集成热电阻的石英谐振露点传感器的结构如图1所示,传感器结构包括石英基底、金电极、电极引线 and MEMS铂电阻。石英基底设计为方形基底,相较于广泛运用的圆形基底,方形基底能够提供更大的制冷夹持区域,为露点测量过程提供更高的制冷效率,更符合露点测量的需求。MEMS铂电阻设计位于与金电极中心对称位置,保证铂电阻和金电极的温度梯度一致。厚度剪切石英晶体谐振频率主要决定于石英基底的厚度,因

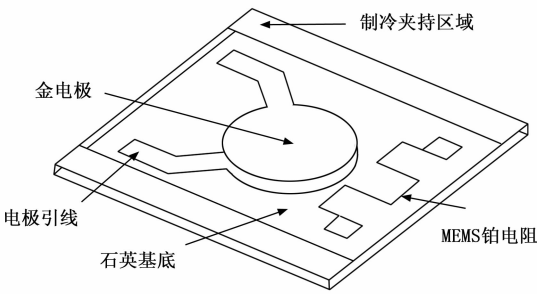


图 1 集成热电阻的石英谐振露点传感器结构示意图

此，要根据实际需要的石英晶体谐振频率范围来确定石英基底的厚度。石英谐振露点传感器使用的频率范围一般在 1 ~ 10 MHz 之间，谐振频率越小，石英基底越厚，石英晶体的机械强度越高，便于存放和使用，后续信号处理的难度越低；谐振频率越大，石英晶体的质量因数越高，质量负载效应引起的频率变化量越大，测量灵敏度越高。基于上述考虑，本设计中石英晶体的基频确定为 4 MHz，石英晶体基频与基底厚度之间关系如式 (1) 所示：

$$e = \frac{N_{AT}}{f_0} \tag{1}$$

其中： N_{AT} 为 AT 切型石英晶体常数 ($N_{AT} = 1\,664\text{ m/s}$)^[17]； f_0 为石英晶体基频； e 为石英晶体基底厚度。根据式 (1)，可计算出基频为 4 MHz 的石英晶体基底厚度为 416 μm 。MEMS 铂电阻采用方形薄膜电阻设计^[18]，并遵循工业测温广泛采用的 PT100 标准，铂电阻阻值与其几何参数之间的关系如式 (2) 所示：

$$L = \frac{R_0 \times \omega \times h}{\rho_0} \tag{2}$$

其中： L 为铂电阻长度； R_0 为铂电阻 0 $^{\circ}\text{C}$ 时的阻值； ω 为铂电阻的宽度； h 为铂电阻高度； ρ_0 为铂电阻在 0 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻率 ($10.5 \times 10^{-8}\text{ }\Omega \cdot \text{m}$)。本设计中，考虑到 MEMS 工艺参数要求，铂电阻几何参数设计为宽 60 μm ，高 200 nm，根据式 (2) 可以计算得出铂电阻长度为 11.5 mm。受限于石英晶体基底尺寸，MEMS 铂电阻采用蛇形结构在石英基底表面加工，用真空沉积薄膜技术把铂溅射在石英基底上，再用玻璃烧结料把引线固定，经激光调阻制成薄膜元件集成在石英晶体表面^[19]，以准确测量石英晶体表面的温度。

1.2 传感器参数有限元仿真

集成热电阻的石英谐振露点传感器设计参数中，除石英基底厚度和 MEMS 几何参数之外的设计参数很难通过理论计算确定，因为这些参数会显著影响石英晶体的振动特性、模态耦合及测温精度，因此需要通过有限元仿真来确定最优参数。传感器参数的有限元仿真使用 COMSOL MULTIPHYSICS 6.3 软件完成。仿真分别对金电极厚度、金电极几何尺寸及 MEMS 铂电阻对石英

晶体的模态耦合影响进行分析，仿真石英材料选用 COMSOL 材料库中的 Quartz LH (1949 IRE)，通过终端和接地边界条件在石英晶体上下表面施加 0.1 V 的电位差，由于电极和铂电阻具有较大的纵横比，为了保证有限元分析结果的准确性，将电极及铂电阻设置为壳结构，在石英晶体表面使用自由三角形网格，大小为软件内置的极细化网格，在此基础上对整个谐振器件有限元模型进行扫略，扫略层数为 6 层。此外，还对传感器表面的温度分布进行仿真以确定 MEMS 铂电阻的最优加工位置，保证测温精度。

在有限尺寸的谐振器中，石英基底的形状同样是影响模态耦合的重要因素。AT 切型的石英晶体谐振器一般设计为矩形平板或圆形平板形状。为了研究不同石英基底形状对谐振器振动特性的影响，对直径为 12 mm 的圆形晶体基底、长度为 12 mm 的正方形晶体基底，厚度均为 0.416 mm 的石英基底对谐振器振动特性的影响进行有限元仿真，仿真使用的物理场为固体力学场与静电场，为了简化模型，在固体力学场中施加大小为 1.1×10^{-5} 的各向同性机械损耗，振动位移如图 2 所示。图中 $u(x)$ 为厚度剪切模态振动位移， $u(y)$ 和 $u(z)$ 为寄生模态振动位移， $u(x)$ 值越大， $u(y)$ 和 $u(z)$ 值越小，表明模态间的耦合越弱。从仿真结果来看，无论是方形基底还是圆形基底，由于能陷效应，石英晶体振动位移集中分布在电极区，且在方形基底中，振动能量更加集中。方形基底的厚度剪切位移略低于圆形基

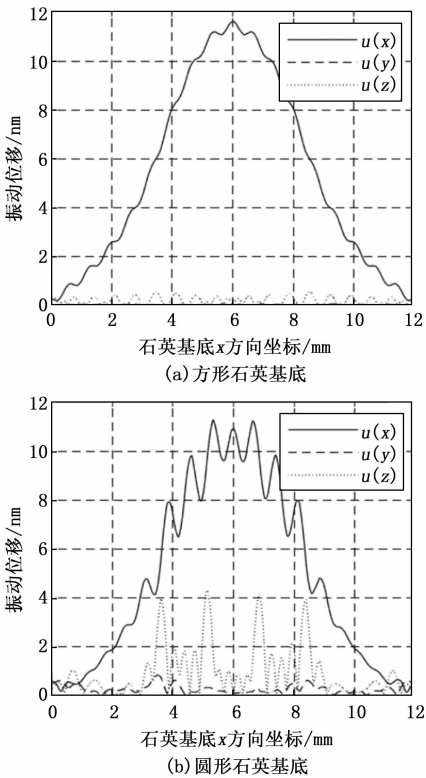


图 2 不同形状石英基底对谐振特性影响

底,但是圆形基底的寄生模态位移远高于方形基底,因此综合考虑下,方形基底具有比圆形基底更优异的谐振特性。

石英晶体的各向异性属性导致石英晶体的振动模态极为复杂。理想情况下,无限大的 AT 切型石英晶体工作在厚度剪切谐振模态,但在实际情况下,石英晶体不会无限大,石英晶体的边界会导致一些寄生模态存在,例如厚度弯曲模态和表面剪切模态^[20]。AT 切型石英晶体谐振器的设计关键在于避免模态耦合,厚度剪切模态与寄生模态的耦合会显著降低谐振器的振动稳定性。石英晶体的模态耦合问题受到众多因素的影响,石英基底的长厚比(直径厚度比)是最主要的因素,其直接影响着模态间的耦合强弱。对于 AT 切型的石英晶体,过小的长厚比会导致频率和厚度的乘积(N_{AT})不是常数,这是由于厚度剪切模态和其它模态的低阶泛音之间耦合,严重干扰了振动频率,甚至会导致温频特性曲线发生变化。为了最大程度降低耦合模态的影响,AT 切型石英晶体的石英基底长厚比要大于 20^[21]。考虑到这些条件和实际应用要求,本设计中石英晶体确定为长宽均为 12 mm 的方形薄板,在厚度为 416 μm 条件下,其长厚比为 28.85,石英晶体谐振频率的有限元分析结果如图 3 所示,仿真采用固体力学场与静电场,采用 AWE 渐进波算法进行频率扫描,频率扫描范围为 3.97 ~ 3.99 MHz,步长 1 Hz,仿真结果表明,基于所设计的参数,石英晶体在 3.978 MHz 处获得最大厚度剪切位移,这与理论值 4 MHz 接近,由于石英基底表面镀有金电极,因此仿真的谐振频率略低于理论值。

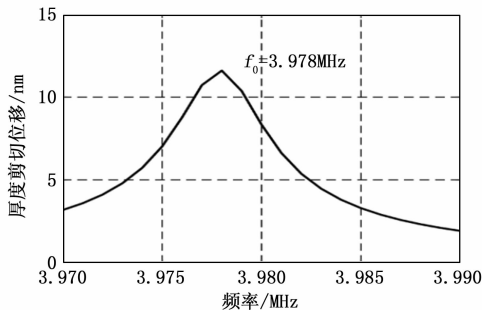


图 3 石英晶体谐振频率有限元分析结果

能陷效应是确定石英晶体电极最佳尺寸和厚度的主要参数,波在石英晶体上传播时,存在一个截止频率 ω_c ,只有频率高于 ω_c 的波才可以在石英晶体上自由传播。石英晶体电极区截止频率 ω_1 略小于非电极区的截止频率 ω_2 ,则频率在 $\omega_1 < \omega < \omega_2$ 范围内的波可以在电极区自由传播,而在非电极区迅速衰减,波的能量大多集中在电极区。石英晶体能量占比可用式(3)描述。更大的能量占比 E 表明石英晶体的振动能量集中分布在电极区域,而分布在非电极区的振动能量很小,即石英

晶体具有良好的能陷效应。当石英晶体的振动位移集中分布在电极区时,在非电极区集成 MEMS 铂电阻以及对传感器进行夹持安装,能够对石英晶体的振动影响降到最低:

$$E = \int_{x=-1/2 d_e}^{x=1/2 d_e} |u_x| / \int_{x=-1/2 d_q}^{x=1/2 d_q} |u_x| \quad (3)$$

其中: d_e 为石英晶体的金电极直径; d_q 为石英晶体的几何尺寸; u_x 为石英晶体在 x 方向的剪切振动位移。利用有限元分析的方法进行 AT 切型石英晶体的电极设计需要对电极区进行参数等效。由于石英晶体电极层的厚度要远小于石英基底的厚度,在实际的有限元仿真操作中,若对电极区域直接建模就会因为单元尺寸太小使得计算量太大,而在整个仿真分析中之所以考虑电极是因为它会降低石英晶体的基频,为了使系统很好的表现出能陷效应,要尽可能保证模型对基频的影响不变。图 4 为石英晶体电极半径为 2.0~3.0 mm,间隔为 0.2 mm 的厚度剪切振动位移仿真结果;图 5 中石英晶体电极厚度为 100~400 nm,间隔为 100 nm 的厚度剪切振动位移仿真结果。图 4 仿真结果表明,随着电极半径和厚度的增加,石英晶体的厚度剪切振动位移逐渐增大,即电极半径和厚度的增加能够加强石英晶体电极区的能陷效应。为了确定最佳电极参数,利用式(3)计算能量分布图,如图 6 所示。结果表明,当电极半径为 3.0 mm、厚度为 300 nm 时,石英晶体获得最大能量占比 80.43%。能量占比超过 80% 时,可认为石英晶体具有优异的能陷效应。

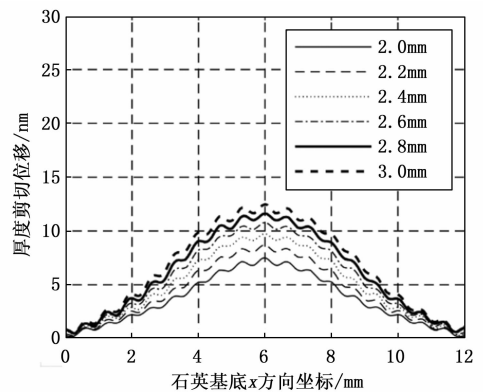


图 4 不同石英晶体电极半径下厚度剪切振动位移仿真结果(电极厚度 200 nm)

质量负载效应指当石英晶体表面带有负载时,会使其谐振特性发生变化, MEMS 铂电阻集成在石英晶体表面相当于在石英晶体表面施加了刚性负载。为了研究 MEMS 铂电阻集成至石英晶体表面对其振动模态的影响,对石英晶体表面有无 MEMS 铂电阻条件下,在 $x(u)$ 、 $y(v)$ 和 $z(w)$ 方向上的厚度剪切振动位移进行仿真,仿真结果如图 7 所示。 $x(u)$ 方向上振动位移越

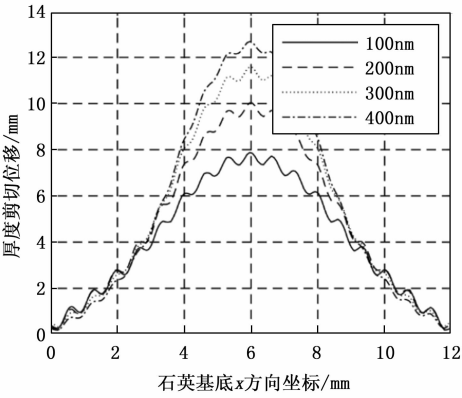


图 5 不同石英晶体电极厚度下厚度剪切振动位移仿真结果（电极半径 2.4 mm）

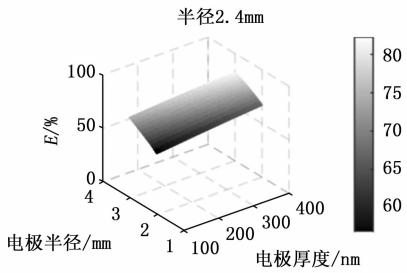


图 6 石英晶体能量占比

大且 $y(v)$ 、 $z(w)$ 方向振动位移越小，表明石英晶体振动模态间的耦合越弱。根据图 7 有限元仿真结果，石英晶体表面集成 MEMS 铂电阻几乎不会使 $x(u)$ 方向的厚度剪切位移衰减，同时不会增强 $y(v)$ 和 $z(w)$ 方向寄生模态的振动位移。因此，将 MEMS 铂电阻集成在非电极区，对其振动模式的影响可以忽略不计，这也同时说明由于石英晶体的能量 80.43% 分布在电极区，因此在非电极区加工 MEMS 铂电阻对石英晶体的振动特性的影响非常小。

石英谐振露点传感器进行露点测量的基本原理是：通过测量被测气体中水蒸气在石英晶体表面发生冷凝时的表面温度，该温度即对应于露点温度。因此，准确测量石英晶体表面温度对于传感器的测量精度至关重要。铂电阻是通过铂材料在温度变化时的电阻特性的变化来进行温度测量的，铂电阻的电阻值会随着外界温度的变化而变化，具有很好的稳定性和可重复性，因此将其用作温度传感器具有很好的稳定性，可以应用在较宽的温度范围内。在不影响石英晶体振动特性的前提下，将 MEMS 铂电阻集成于石英晶体表面可以直接测量其表面温度，从而消除系统误差。为了确定 MEMS 铂电阻的最优加工位置，提高测温精度，对石英晶体在制冷过程中的温度场分布进行有限元仿真。根据实际应用需求，石英晶体的制冷夹持区域设计为距离石英基底边界

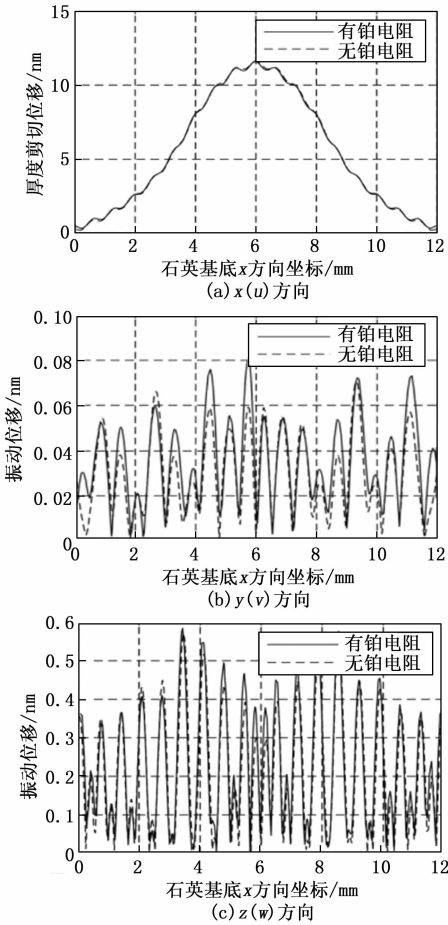


图 7 MEMS 铂电阻对石英晶体厚度剪切振动位移影响

1.5 mm 的矩形区域。仿真在固体力学场和静电场基础上，增加固体传热场，仿真条件设置石英晶体上下表面以及垂直边界的散热类型为自然对流，制冷区域温度维持在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 8 为石英晶体表面的温度场分布云图。

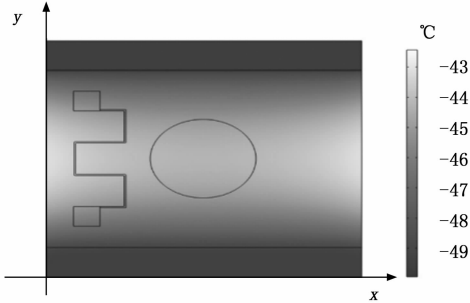


图 8 石英晶体表面温度场分布云图

根据图 8 仿真结果，石英晶体的温度场呈垂直对称分布，因此将 MEMS 铂电阻加工在 $y=6\text{ mm}$ 的位置（即石英基底垂直方向上的中心位置），可以更准确地测量电极区域的温度，从而最大限度地降低测量误差。石英晶体在 $y=6\text{ mm}$ 处各位置温度与电极中心温度的温

差曲线如图 9 所示。根据图 9 可得, MEMS 铂电阻靠近石英基底中心, 与电极区的温差越小。因此, 为确保温度测量的准确性, MEMS 铂电阻应尽可能靠近电极中心位置 ($x=6, y=6$) 加工。在本设计中, MEMS 铂电阻距离电极中心 4 mm, 距离电极边缘 0.6 mm, 保留有足够的加工裕度。在 4 mm 距离范围内, 且冷却温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, MEMS 铂电阻与电极中心之间的温差不会超过 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外, 当水蒸气在石英晶体电极边缘发生冷凝时, 传感器的输出信号就会发生变化, 从而识别到冷凝现象, 而铂电阻与电极边缘距离为 0.6 mm, 温差仅有 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此对于露点测量来说, 由于铂电阻加工位置无法与电极中心重合带来的温差可以忽略不计。

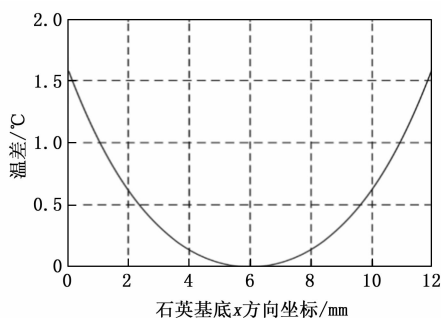


图 9 石英晶体在 $y=6\text{ mm}$ 处各位置温度与电极中心温度的温差曲线

2 露点测量装置与实验系统设计

露点测量装置采用考毕兹振荡电路驱动石英晶体, 通过监测谐振电路振荡的停止来检测水蒸气的冷凝。考毕兹振荡电路输出信号的瞬态变化对应着石英晶体表面负载的气液相态, 当石英晶体表面产生液态负载时, 考毕兹振荡电路输出信号的幅值发生变化; 当石英晶体表面为气态负载时, 考毕兹振荡电路输出信号幅值又回到原始信号幅值。将考毕兹振荡电路的输出信号的瞬态变化通过信号调理技术转换为脉冲触发信号, 输出信号幅值未发生改变对应于高电平, 发生变化对应于低电平, 则可以通过脉冲触发信号电平的识别来确定毕兹振荡电路输出信号幅值的瞬态变化, 从而实现对石英晶体表面负载的气液相态识别, 通过精确识别负载气液相态转换点, 这一时刻的石英晶体的表面温度即可作为露点温度。

图 10 为露点测量装置的示意图, 包含集成热电阻的石英谐振露点传感器、PCB、半导体制冷器、散热器、传冷部件和 O 型密封圈。传感器和 PCB 通过邦定线进行电气连接, PCB 上制作有考毕兹振荡电路, 用于驱动石英晶体, 输出正弦信号。半导体制冷器和散热器之间填充聚氨酯泡沫, 可以最大程度减少制冷器冷量流失, 并起到固定作用。气室外壳和 PCB 之间通过 O

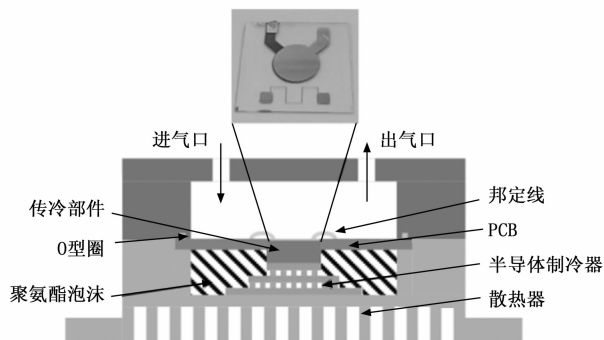


图 10 露点测量装置示意图

型圈密封, 进气口和出气口使用四分之一卡套接头, 保证气密性。

实验系统组成如图 11 所示, 包括标准湿度发生器、空气压缩机、MICHELL S4000 精密露点仪、Agilent 4294A 阻抗分析仪、露点测量装置、信号调理电路和上位机。MICHELL S4000 常作为实验室条件下露点测量的标准计量仪器, 测量精度可达 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 为实验提供露点标准值。安捷伦 4294A 阻抗分析仪用于测量石英晶体的导纳—频率特性, 进而可计算出石英晶体的质量因数。标准湿度发生器产生稳定露点的标准湿度气, 为实验系统提供被测气源, 发生器精度为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C DP}$ 。空气压缩机将环境空气泵入标准湿度发生器中, 发生器通过干湿配比法生成标准湿度气。信号调理电路将露点测量装置输出的正弦信号调制为脉冲信号, 并通过 RS232 接口将数据传输至上位机。上位机分别通过 RS232 和以太网与 S4000 精密露点仪和 Agilent 4294A 通信, 获取标准露点值和石英晶体导纳数据。

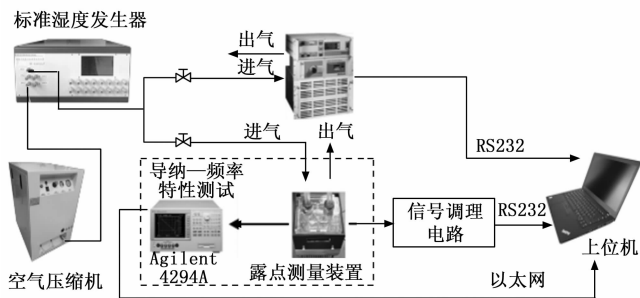


图 11 实验系统示意图

3 实验结果与分析

3.1 传感器振荡特性测试

石英晶体的振动特性可以通过质量因数和谐振频率来评估。质量因数用于描述石英晶体的能量耗散, 质量因数越高 (大于 1 000), 表明石英晶体振动特性越好。质量因数可用式 (4) 计算:

$$Q = \frac{f_{\text{res}}}{\Delta f} \quad (4)$$

其中: Q 为质量因数; f_{res} 为石英晶体的谐振频率; Δf 为带宽, 定义为导纳—频率曲线的半峰全宽 (FWHM, full width at half maxima)。图 12 为传感器石英晶体的导纳—频率实测曲线。根据图 12 测量结果, 石英晶体的特征频率为 3.998 94 MHz, 带宽为 55 Hz。根据式 (4) 计算得出所设计的石英晶体的质量因数为 72 708, 这表明其能量耗散率极低, 具有优良的厚度剪切振动特性。

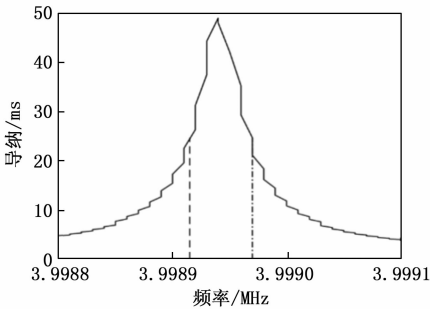


图 12 石英晶体导纳—频率实测曲线

3.2 MEMS 铂电阻测温校准

在进行露点测量实验之前, 对所设计的 MEMS 铂电阻进行了校准。校准数据在 Matlab 中采用四阶多项式拟合, 拟合曲线如图 13 所示。根据 IEC 60751 标准, 得到的 Callendar-Van Dusen 方程的拟合多项式由式 (5) 描述。该多项式拟合的 R 方值为 1, 表明拟合非常完美:

$$R = R_0 \cdot \{1 + AT + BT^2 + (CT^3) \cdot (T + D)\} \quad (5)$$

其中:

$$R_0 = 187.588;$$

$$A = 1.9 \times 10^{-3};$$

$$B = -5.331 \times 10^{-7};$$

$$C = -4.322 \times 10^{-11};$$

$$D = 62.3643;$$

由于加工工艺的原因, 所设计的 MEMS 铂电阻在 0 °C 时的电阻值偏离了理论值 100 Ω。但是其表现出优异的线性度, 因此对温度测量精度的影响可以忽略。

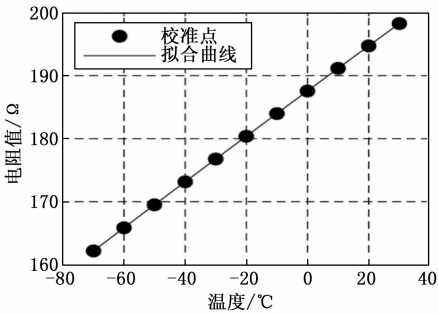


图 13 MEMS 铂电阻校准拟合曲线

3.3 露点测量结果

基于上述测量原理和实验系统, 对所设计的集成热

电阻石英谐振露点传感器的测量精度和重复性进行了测试。实验露点测试范围为 -20 ~ +20 °C DP, 每隔 10 °C DP 取一个测量值, 通过与 S4000 精密露点仪的测量值对比, 测试传感器的测量精度。每个测试点连续测量 7 天, 以评估传感器的重复性。实验在环境温度为 15 ~ 30 °C、相对湿度低于 80% RH、气压为 101 kPa 条件下进行。传感器测量误差实验结果如图 14 所示, 结果表明, 在 -20 ~ +20 °C DP 范围内, 传感器的测量精度可达 ±0.08 °C DP, 并且传感器在低于 0 °C DP 的露点值下也能保持与 0 °C DP 以上一致的精度, 这说明, 所设计的露点传感器能够消除传统石英谐振传感器无法直接测量表面温度所引起的系统误差问题, 显著提高了石英谐振露点传感器的测量精度。传感器的重复性测试结果如图 15 所示, 实验采用标准差作为重复性的评价指标, 实验结果表明, 集成热电阻的石英谐振露点传感器的测量重复性小于 0.11 °C DP。

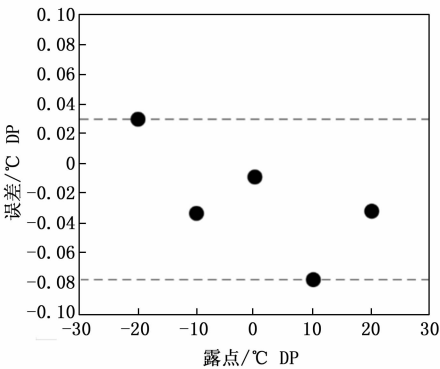


图 14 集成热电阻的石英谐振露点传感器测量误差

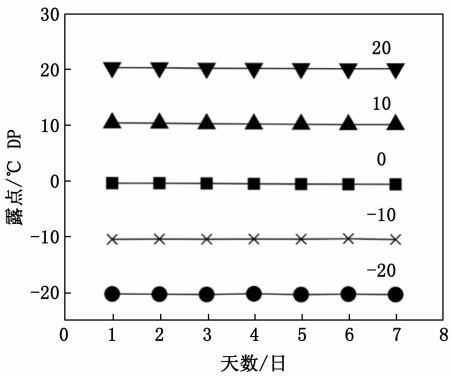


图 15 集成热电阻的石英谐振露点传感器重复性

本研究所设计的集成热电阻的石英谐振露点传感器与现有部分谐振式直接测量型露点传感器的性能对比如表 1 所示。从对比结果来看, 集成热电阻的石英谐振露点传感器的测量精度与重复性均优于目前现有的谐振式直接测量型露点传感器, 这得益于本研究对系统误差的有效消除, 但由于设备制冷功率所限, 没有在更宽露点范围内对所设计的传感器性能进行测试。

表 1 传感器性能对比 ℃ DP

类型	测量精度	重复性	测量范围
集成热电阻的石英谐振露点传感器	±0.08	0.11	−20~+20
MEMS 悬臂梁谐振露点传感器 ^[11]	±0.29	0.18	+10~+20
薄膜压电硅谐振露点传感器 ^[12]	±0.10	未给出	−50~+20
双石英晶体型露点传感器 ^[14]	±0.50	未给出	−5~+20
宽温范围石英晶体露点传感器 ^[15]	±0.10	未给出	−90~+15

4 结束语

针对谐振式精密露点仪研制中石英谐振露点传感器由于无法直接测量石英晶体表面温度从而引入系统误差问题，提出了一种集成热电阻的石英谐振露点传感器；通过理论计算和有限元仿真，确定了传感器基底和电极结构的最优设计参数，对所设计的传感器结构温度场分布进行了仿真计算，确定了 MEMS 铂热电阻的最佳布局位置，采用 MEMS 工艺实现了集成铂热电阻的石英谐振露点传感器的制备；通过实验对所设计的石英谐振露点传感器性能进行了实验验证，使用 Agilent 4294A 阻抗分析仪对石英晶体的导纳—频率特性进行测量，得出品质因数达到 72 708，表现出优异的厚度剪切模式，在 −20 ~ +20 ℃ DP 范围内对传感器的露点测量精度和重复性进行了测试，实验结果表明，集成热电阻的石英谐振露点传感器的测量精度可达 ±0.08 ℃ DP，重复性小于 0.11 ℃ DP，所设计的传感器结构实现了对石英谐振器件表面温度的直接测量，从而消除了传统石英谐振露点传感器的系统误差，显著提高了露点测量精度，为实现谐振式精密露点仪国产化样机的研制提供了重要的支撑。

参考文献:

[1] CHA D, CHOI M G, JEON H R, et al. Negative solvatochromism of merocyanine dyes: application as water content probes for organic solvents [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2011, 157: 14–18.

[2] BLANK T A, BELIKOV K N. Recent trends of ceramic humidity sensors development: a review [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2016, 228: 416–442.

[3] CASALBORE G, CHEN Y S. Prompt responsive sensors for water detection in organic solvents [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2006, 119: 577–582.

[4] 宫海波, 徐 茜, 张振华. 飞行试验湿度参数测试技术研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22 (9): 2733–2735.

[5] 石良喜. 露点仪自动检定系统的开发与设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26 (3): 14–17.

[6] NIE J, LIU J, MENG X F. A new type of fast dew point sensor using quartz crystal without frequency measurement [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2016, 236: 749–758.

[7] 范秋风, 巩银苗, 李 琪. 基于冷镜式原理的高精度露点温度检测系统设计 [J]. *仪表技术与传感器*, 2018, (8): 36–38.

[8] NIE J, LIU X. Dew point sensors: Recent advances and future development: a review [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2024, 417: 136115.

[9] GAO B, COON E T. Improving the estimation of atmospheric water vapor pressure using interpretable long short-term memory networks [J]. *Agricultural & Frost Meteorology*, 2024, 347: 109907.

[10] TARAPATA G, MARZECKI M, SELMA R, et al. Novel dew point hygrometer fabricated with inkjet printing technology [J]. *Sensors & Actuators: B. Physical*, 2016, 247: 641–646.

[11] WANG T, GUAN Y Y. An accurate dew point sensor based on MEMS piezoelectric resonator and piecewise fitting method [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2022, 370: 132411.

[12] MAHDAVI M, MEHDIZADEH E. Piezoelectric MEMS resonant dew point meters [J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2018, 276: 52–61.

[13] NIE J, MENG X F, LIN L W. High-accuracy quartz crystal resonance DP instrument [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67: 8026–8033.

[14] NIE J, LIU J, LI N, et al. Dew point measurement using dual quartz crystal resonator sensor [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2017, 246: 792–799.

[15] KWON S Y, KIM J C, CHOI B I. Accurate dew-point measurement over a wide temperature range using a quartz crystal microbalance dew-point sensor [J]. *Measurement Science & Technology*, 2008, 19: 115206.

[16] LI N, MENG X F, NIE J, et al. Structure Optimization and performance evaluation of dew point sensors based on quartz crystal microbalance [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18: 1016–1022.

[17] LIANG J X, ZHANG J, ZHOU W X, et al. Development of a flow injection based high frequency dual channel quartz crystal microbalance [J]. *Sensors*, 2017, 17: 1136.

[18] 侯智昊, 刘旭辉, 龙 军, 等. 一种基于铂电阻的硅基 MEMS 热式流量传感器芯片研制 [J]. *微处理机*, 2023, 44 (3): 11–14.

[19] 何晓韬, 罗筠龙, 潘子常, 等. 退火温度对 HiPIMS 沉积铂热电阻薄膜 TCR 系数的影响 [J]. *传感器世界*, 2024, 30 (10): 1–6.

[20] 杨 梅, 李 辉, 龙 利, 等. 新型结构压电石英晶片去耦效应的研究 [J]. *传感器与微系统*, 2023, 42 (1): 23–29.

[21] NIE J, MENG X F. Dew point and relative humidity measurement using a quartz resonant sensor [J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20: 1311–1315.