

基于 SAW 技术的压力传感器设计研究^①

包宋建¹, 陈文波^{1,2}, 杨文耀^{1,2}

1. 重庆文理学院 电子电气工程学院, 重庆 永川 402160;

2. 重庆市高校新型储能器件及应用工程研究中心, 重庆 402160

摘要: 将声表面波(SAW)传感原理引入无源无线压力传感器设计,以新型材料硅酸镓铜作为压电基片材料,将 2 个反射栅的相位差作为压力传感器的输出信号,从而部分消除了环境温度变化带来的影响.设计较高的声表器件中心频率(433.92 MHz 附近),从而提高了传感器的灵敏度.叉指换能器(IDT)的叉指对数设计既满足抑制旁瓣的要求,又满足声表面波激发能量的要求.对 SAW 压力传感器件的结构进行理论分析,采用计算机软件进行了建模和仿真.实验结果表明:以新型材料作为基片,以相位差作为输出信号,以 433.92 MHz 作为中心频率,并选择合适的叉指对数设计的压力传感器具有温度性能好、灵敏度高、测量误差小和压力相位差特性好的优点.

关键词: SAW 技术; 相位差; 中心频率; 叉指换能器; 压电基片

中图分类号: TP212

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2020)11-0066-07

近年来,我国对声表面波压力传感器的研究有了长足的发展,但是与西方发达国家相比还有一定的差距.目前,我们的研究大部分还在实验室阶段,距实用化还有一段距离.困扰声表面波压力传感器研究进一步发展的原因主要有:①在设计理论方面,目前尚无一套完整的设计体系.在传感器灵敏度分析时,能采用实验的方法获取应力系数,缺乏理论指导^[1-4].②在压电材料的选择方面,新型材料的选择应用不足,目前还主要集中在对传统压电材料的应用范畴.③在波动模式方面,应用比较单一,主要选择的是瑞利波.声表面波的其他许多波动模式,都可供压力测量选择^[5].

目前,对压力传感器的分类大致可以分为延迟线型压力传感器和谐振器型压力传感器两大类^[6].谐振型压力传感器的基本工作原理是 SAW 谐振器在受到外界压力作用时,其谐振频率会随着外界压力的变化而变化.通过测试频率的变化就可以得到谐振频率偏移与外界压力之间的关系,从而达到测量压力的目的^[7].对于延迟线型的 SAW 传感器,其工作原理是由于外界压力的影响,使得压电材料的参数发生变化,从而使声表面波的速度发生变化,通过测量传播时间 T 的变化或者是相位的变化来建立与外界所受压力大小的关系,从而达到测量外界压力的目的^[8].

1 SAW 压力传感器的敏感机理

单端口 SAW 延迟线型谐振器的结构如图 1 所示.

单端口 SAW 延迟线型谐振器的叉指换能器(IDT)直接与天线相连,接收和发射信号,实现器件的无

① 收稿日期: 2019-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11804038),重庆市博士后科研项目(Xm2017051);重庆市高校新型储能器件及应用工程研究中心开放课题(KF20180204).

作者简介: 包宋建(1974—),男,硕士,高级实验师,主要从事视频编码与传感器技术研究.

源化^[9]. 右边的反射栅用来发射声表面波, 设第 i 根反射栅与 IDT 的距离为 l_i . 当 SAW 在传播过程中收到被测量的调制时, 其波速会发生改变, 同时 l_i 也会改变, 其最终的结果会导致延迟时间 t 的变化, 通过 t 的变化就可以估算外界压力的变化.

对于实际的器件, 其体积较小, 因而 l_i 也比较小, 这样就使得 t 的变化量较小, 为了提高测量的精度, 一般不直接测量延长时间 t , 而是把延迟线作为正反馈元件介入振荡电路, 其结构如图 2 所示^[10]:

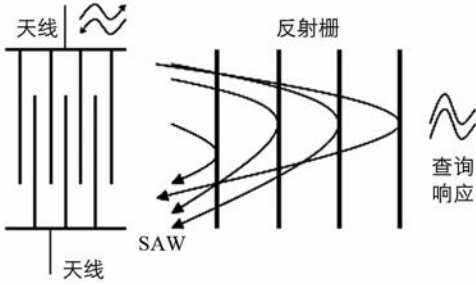


图 1 单端口 SAW 谐振器结构图

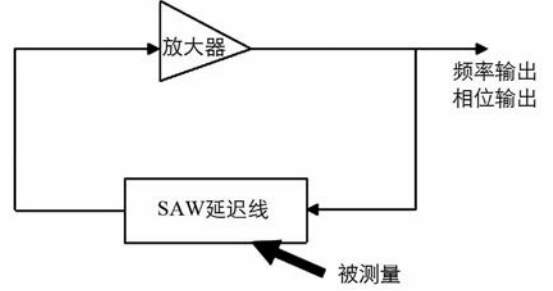


图 2 应用于传感器的振荡回路

对于图 2, 为了能正常工作, 必须满足相位和有足够大的反馈 2 个条件. 谐振时的相位条件是

$$2\pi f_0 \frac{l}{v} + \varphi_E = 2n\pi \quad (n \text{ 为整数}) \quad (1)$$

式(1)中 f_0 为振荡频率, φ_E 为放大器引起的附加相移, 为常数. 上式可以改写为

$$f_0 = \kappa \frac{v}{l}, \quad \kappa = n - \frac{\varphi_E}{2\pi} \quad (2)$$

κ 为常数, 对式(2)微分得

$$\Delta f = \kappa \left(\frac{\Delta v}{l} - \frac{\Delta l}{l^2} v \right) \quad (3)$$

进一步可以用延迟相位 φ 来表示式(3)所示的关系

$$\Delta \varphi = \omega_0 \left(\frac{\Delta l}{v} - \frac{\Delta v}{v^2} l \right) \quad (4)$$

其中, ω_0 为振荡角频率. 可以通过相位或者频率的改变来检测被测量的变化量. 本设计采用图 1 所示的原理设计 SAW 压力传感器.

3 条反射栅阵反射回来的信号分别为反射信号 1、反射信号 2 和反射信号 3, 而主信号为叉指换能器激发的信号. 假设第 i 个 ($i = 1, 2, 3$) 反射栅到 IDT 的距离为 l_i , 那么第 i 个反射栅所反射的脉冲信号的时延 τ_i 为

$$\tau_i = \frac{2l_i}{v} \quad (5)$$

式(5)中 v —基片上的 SAW 速度;

l_i —第 i 个反射栅到 IDT 的距离.

对基片施加压力(或压强)时, SAW 的速度 v 以及间距 l_i 都会发生改变, 从而使反射信号的时延 τ_i 发生变化. 通过对 τ_i 变化的测量, 可以得知外界所施压力的大小. 在具体测量时, 由于环境温度等其他因素的变化也会引起 τ_i 的变化, 为了解决这一问题, 一般在基片上设置多个反射栅, 例如本设计设置了三个反射栅^[11]. 通过式(5)可以得到第 i 个反射栅到第 k 个反射栅之间的时延 τ_{ik} 为

$$\tau_{ik} = \frac{2l_{ik}}{v} \quad (6)$$

式(6)中 l_{ik} —反射栅 i 与反射栅 k 之间的距离.

在实际的测量中, 测量中心频率 f_0 的变化一般只应用于有线系统中, 而用于无线测量时, 其测量系统

的组建十分复杂,这就限制了其应用范围.基于此情况,本文将实验重点放在了反射栅方式的压力传感器上.

2 SAW 压力传感器各部分的设计

SAW 延迟线式压力传感器的设计主要包括:基底材料的选择、IDT 的周期 λ 、叉指对数 N 、声孔径 W 、反射栅的金属化比率等.本文仅对基底材料的选择和 IDT 设计中的指条对数 N 作较详细介绍,其他几部分省略.

2.1 基底材料的选择

基底材料的好坏直接影响到器件的质量,所以在选择基底材料时一定要慎重.由于频率增大有助于分辨率提高,而 SAW 器件的谐振频率与 SAW 在基底材料中的传播速度有直接关系,所以选择的材料应该具有较快的波速.一般来讲,压电性越强,传播速度越快.但是,随着频率进一步增大,基底噪声也会加大,会影响器件的检测能力,同时衰减也与频率成正比,所以频率的选择不宜太高.此外,高频率就意味着精细的指条,这样就需要更改加工工艺,增加了制作难度.由于器件的温度稳定性很重要,所以选择材料时,要选用温度稳定性较好的材料.温度稳定性与 TCF (频率温度系数)、 TCD (延迟温度系数)、 TCV_p (相速温度系数)、 TCV_g (群速温度系数)有关.目前最关注的是频率温度系数 TCF ,一般来讲,机电耦合系数越高,基底材料越容易受到干扰,温度稳定性越差^[12].

基底材料的介电常数能影响 IDT 的阻抗,为了与外电路的阻抗相匹配,一般把 IDT 的阻抗设计为 $50\ \Omega$.

本设计所选用的基底材料是 128°LiNbO_3 和硅酸镓钽 2 种材料,方便进行对比.

2.2 IDT 的设计

IDT 的设计主要包括叉指对数 N 、金属化比率 η 以及声孔径 W 这 3 个部分.本文仅对 IDT 的指条对数进行介绍.

目前一般的 IDT 都采用均匀的 IDT,它的频率响应公式为

$$H(f) = \left| \frac{\sin\left[N_p\left(1 - \frac{f}{f_0}\right)\pi\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}\left(1 - \frac{f}{f_0}\right)\pi\right]} \right| \quad (7)$$

式(7)中 N_p 是 IDT 的指条对数.

从 IDT 的仿真等效电路模型可知,在中心频率附近叉指换能器的辐射电导为

$$G_a = \frac{4}{\pi} \kappa^2(\omega_0 c_s) N^2 \frac{\sin^2\left(N\pi \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right)}{\left(N\pi \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right)^2} \quad (8)$$

由于 $G_a(\omega)$ 的大小和叉指换能器的辐射功率成比例关系,所以在 $G_a - \omega$ 的关系曲线上, $G_a(\omega)$ 从最大值下降到最大值一半处时,两点间的频率间隔等于叉指换能器频率响应的 3 分贝带宽 Δf_{-3dB} . 它们之间的关系为

$$\frac{\Delta f_{-3dB}}{f_0} = \frac{0.884}{N} \quad (9)$$

根据辐射电导的计算式,可以求出叉指换能器的第一零点出现在

$$\frac{f - f_0}{f_0} = \pm \frac{1}{N} \quad (10)$$

叉指换能器的第一个旁瓣极点在

$$\frac{f - f_0}{f_0} = \pm \frac{1.5}{N} \quad (11)$$

延迟线的带宽取决于 IDT 的叉指对数. 为了保证 SAW 器件的正常工作, 必须要使延迟线的带宽大于传感器工作时的频率变化范围. 目前常见的 SAW 传感器振荡频率的变化范围一般为(0.1 ~ 0.8) MHz, 所以在设计时就必须使 3 分贝带宽超过这个范围, 达到 MHz 这个数量级. 但是 IDT 的数量不是越小越好, 因为尽管这样会使其带宽加大, IDT 数量过小会在振荡时引起其他的波动模式, 从而增大插入损耗.

针对上述设计, 表 1 总结了 SAW 压力传感器敏感单元的结构参数. 它包括了所选用的基底材料、IDT 的周期、IDT 的叉指对数、声孔径等一系列参数.

表 1 SAW 压力传感器的敏感单元结构参数

参数名称	数值或内容	参数名称	数值或内容
基底材料	128° LiNbO3/硅酸镓镧	声孔径	690.749 4 μm
金属材料	Al	反射栅条数	3
IDT 的周期	8.941 7 μm	反射栅长度	717.574 7 μm
叉指对数	20.5	第一根反射栅距 IDT 的距离	3 880.0 μm
铝模厚度	1 000 Å	第二根反射栅距 IDT 的距离	4 850.0 μm
金属化比率	0.5	第三根反射栅距 IDT 的距离	5 820.0 μm

3 SAW 压力传感器性能分析及仿真

3.1 叉指换能器的仿真

通过矢量网络分析仪 HP8753 对叉指换能器的导纳进行理论计算推导, 在 2 个谐振角频率之间器件特性呈感性, 谐振角频率之外则呈容性. 由于仿真参数存在一定的误差, 所以谐振频率发生了一定的偏移. 在谐振频率 ω_r (433.92 MHz 附近) 上的电导 G 取得最大值, 在比谐振频率略高的反谐振频率 ω_a 上电阻 G^{-1} 取得最大值^[13].

对于上述的传感器振子, 其阻抗特性用矢量网络分析仪进行测量, 在谐振频率(433.92 MHz)附近, 谐振器在谐振频率时, 电阻最接近 50 Ω, 这与外电路相匹配, 减少了与外电路匹配过程中的损耗, 提高了器件性能.

3.2 LABVIEW 虚拟软件平台电路实现

利用 LABVIEW 软件平台去替代实际电路, 在实现电路功能的基础上简化了工作量.

3.3 SAW 压力传感器的压力试验

对 SAW 压力传感器进行信号采样和处理, 由于设计了 2 种不同材料的压力传感器, 在进行信号的采样处理的时候, 信号的强度和时延等都不一样.

通过对 128°LiNbO3 和硅酸镓镧 2 种不同材料采样信号的比较发现, 应用新型压电材料硅酸镓镧时, 能够降低多次反射信号, 减少信号干扰, 故其损耗低于传统的锂酸锂材料.

在对压力传感器施加压力时, 不同的压力变化会有不同的输出改变, 根据不同的输出可得到传感器所受的外界压力(或压强)大小. 压力传感器的压力实验是在室温 23 ℃ 进行的, 整个试验过程基本都在恒温环境中进行, 但是为了消除其他因素的影响, 试验采取了用 2 个反射栅相位之差的方法来进行, 分别对 2 种材料的压力传感器进行了压力试验.

在这个试验中, 用 LABVIEW 虚拟软件平台进行信号采样处理. 当压力递增时, 相位逐渐增大, 并且相位的变化与压力的变化有良好的线性关系, 说明本文设计的传感器在实际应用中具有可行性.

不同的压力对应不同的相位变化, 试验数据如表 2 所示.

图 3 和图 4 分别为 128°LiNbO3 材料和硅酸镓镧材料压力传感器的压力——相偏曲线. 其中压力递增曲线为压力递增时相偏与压力的关系; 压力递减曲线为回程曲线, 即压力递减时相偏与压力的关系.

表 2 压力传感器压力试验

压力 (MPa)	(锂酸锂材料)相位变化		(硅酸镓铜材料)相位变化	
	压力递增	压力递减	压力递增	压力递减
0	1 324.256	1 324.256	1 957.646	1 957.609
0.5	1 324.287	1 324.342	1 957.792	1 957.725
1.0	1 324.320	1 324.372	1 957.928	1 957.848
1.5	1 324.351	1 324.401	1 958.061	1 957.971
2.0	1 324.408	1 324.427	1 958.201	1 958.097
2.5	1 324.437	1 324.450	1 958.339	1 958.218
3.0	1 324.463	1 324.475	1 958.475	1 958.354
3.5	1 324.493	1 324.501	1 958.611	1 958.473
4.0	1 324.515	1 324.528	1 958.742	1 958.609
4.5	1 324.551	1 324.556	1 958.884	1 958.742
5.0	1 324.576	1 324.581	1 959.022	1 958.878
5.5	1 324.601	1 324.605	1 959.156	1 959.008
6.0	1 324.626	1 324.626	1 959.384	1 959.184

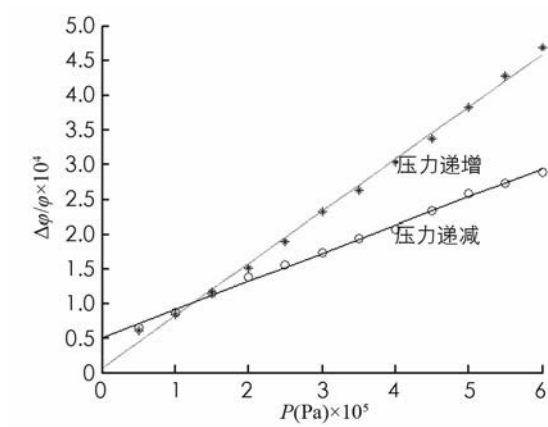


图 3 128° LiNbO3

压力传感器的压力——相偏曲线

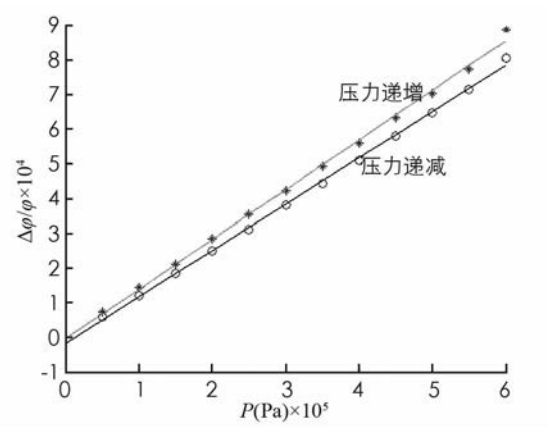


图 4 硅酸镓铜

压力传感器的压力——相偏曲线

通过图 3 和图 4 可以看到, 2 种材料的压力传感器都存在回程误差, 即相位偏移有一定的滞后性. 回程误差是由于施加在基片上的应力不能完全释放, 在压力卸载之后还存在残余应力, 这些应力使得传感器的相位偏移量不能完全减为零.

从图 3 和图 4 中还可以看出, 压力传感器的相位偏移与压力的变化呈比较好的线性关系, 充分说明利用测量传感器的相位偏移量来测量压力在原理上可行. 试验数据计算得到 128°LiNbO3 压力传感器的灵敏度为 $7.51 \times 10^{-10} \left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi} \right) / P$, 硅酸镓铜压力传感器的灵敏度为 $14.31 \times 10^{-10} \left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi} \right) / P$ (压力——相偏曲线更陡峭), 硅酸镓铜压力传感器的灵敏度比 128° LiNbO3 压力传感器的灵敏度要高, 能更好地检测出外界压力的变化.

3.4 SAW 压力传感器的温度试验

硅酸镓铜压力传感器在温度为 -10℃, 0℃, 50℃ 和 80℃ 这 4 种情况下, 分别对 13 个标准压力 (以 20℃ 测试压力作为标准压力) 递增和递减的方式进行压力偏差率测试, 设测量压力偏差率为 η , 其定义为

$$\eta = \frac{|\text{标准压力} - \text{测量压力}|}{\text{标准压力}} \times 100\%$$

(12)

测试结果如表 3 所示. 由表 3 可见, 环境温度变化对压力的检测虽然会带来一定的影响, 但是其影响较

小,这是因为使用了 2 个反射栅的相位差作为压力传感器的输出信号,从而部分消除了环境温度变化带来的影响.

表 3 压力传感器温度试验

压力(MPa)	压力递增偏差率/%				压力递减偏差率/%			
	-10 ℃	0 ℃	50 ℃	80 ℃	-10 ℃	0 ℃	50 ℃	80 ℃
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
2.500	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
3.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
3.500	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
4.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
4.500	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
5.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001
5.500	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
6.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

4 结 语

经过理论和实验结果分析与对比得出以下结论:①在信号处理过程中,以 2 个反射栅的相位差作为输出信号,可以部分消除环境温度变化带来的影响;②较高的声表器件中心频率(433.92 MHz 附近),提高了传感器的灵敏度;③本文设计的叉指换能器(IDT)的叉指对数兼顾了抑制旁瓣的要求和满足声表面波激发能量的要求;④选用新型材料硅酸镓铜作为压电基片材料和目前常用的材料(如 128° LiNbO3)进行性能比较,结果表明以新型材料作为基片的压力传感器采样信号干扰小,相位偏移与压力的变化呈现出较好的线性关系,灵敏度约为以 128° LiNbO3 为基片的压力传感器的 2 倍.

参考文献:

[1] CULLEN D E, REEDER T M. Measurement of SAW Velocity Versus Strain for YX and ST Quartz [C]//1975 IEEE International Ultrasonics Symposium. Los Angeles: IEEE, 1975.

[2] REEDER T M, CULLEN D E, CILDEN M. SAW Oscillator Pressure Sensors [C]// 1975 IEEE International Ultrason-ics Symposium. Los Angeles: IEEE, 1975.

[3] CULLEN D E, MONTRESS G K. Progress in the Development of SAW Resonator Pressure Transducers [C]//1980 IEEE International Ultrasonics Symposium. Boston: IEEE, 1980.

[4] RISCH M R. Precision Pressure Sensor Using Quartz Saw Resonators [J]. Sensors and Actuators, 1984, 6(2): 127-133.

[5] TRELE N, CHOUJAA A, HAUDEN D, et al. Lamb Wave Pressure Sensor Using an AlN-Si Structure [C]//1993 IEEE International Ultrasonics Symposium. Baltimore: IEEE, 1993.

[6] MOULZOLF S C, BEHANAN R, LAD R J, et al. Lngasite SAW Pressure Sensor for Harsh Environments [C]//2012 IEEE International Ultrasonics Symposium. Dresden: IEEE, 2012.

[7] 王 靖. 声表面波气体传感器系统集成设计与仿真 [D]. 西安: 西安科技大学, 2017.

[8] 唐浚峰. 声表面波无源无线压力传感器研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

[9] LUO W, FU Q Y, DENG J F, et al. An Integrated Passive Impedance-loaded SAW Sensor [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 187: 215-220.

[10] 武少南. 声表面波压力传感器的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2014.

- [11] 陈高丁, 李红浪, 柯亚兵, 等. 高灵敏度硅酸镓镧声表面波压力传感器研究 [J]. 压电与声光, 2016, 38(4): 519-522.
- [12] 向 龙, 秦廷辉, 蒋平英, 等. 声表面波压力传感器的仿真与设计 [J]. 压电与声光, 2015, 37(2): 201-204.
- [13] BORRERO G A, BRAVO J P, MORA S F, et al. Design and Fabrication of SAW Pressure, Temperature and Impedance Sensors Using Novel Multiphysics Simulation Models [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 203: 204-214.

On Pressure Sensor Design Based on SAW Technology

BAO Song-jian¹, CHEN Wen-bo^{1,2}, YANG Wen-yao^{1,2}

1. School of Electron and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China;

2. Chongqing Engineering Research Center of New Energy Storage Devices and Applications, Chongqing 402160, China

Abstract: The principle of surface acoustic wave (SAW) sensor is introduced into the design of passive wireless pressure sensor. A new material, lanthanum gallium silicate is used as the piezoelectric substrate material. The phase difference between two reflecting gratings is used as the output signal of the pressure sensor. The effect of ambient temperature change is partly eliminated. A higher center frequency (around 433.92 MHz) is designed to improve the sensitivity of the sensor. The interdigital logarithm design of interdigital transducer (IDT) meets the requirement not only of suppressing sidelobes, but also of excitation energy of surface acoustic wave. The structure of SAW pressure sensor is theoretically analyzed. Computer software is used for modeling and simulation. The experimental results show that the pressure sensor designed with the new material as substrate, phase difference as output signal, 433.92 MHz as center frequency and suitable interdigital logarithm has the characteristics of high sensitivity, small error and good pressure phase difference.

Key words: SAW technology; phase difference; central frequency; inter digital transducer(IDT); piezoelectric substrate

责任编辑 夏 娟