

人机交互中的电磁学原理

闫皓铭

元培学院 2300017744

Autumn, 2024

1 引言

作为整合科学专业的学生，我一直试图在与生物学相关的多学科交叉的领域中，寻找一些和电磁学课程联系紧密的，有趣新颖的话题和对象，作为本次读书报告的主题。最终决定阅读和“人机交互”相关的书籍，并把我的一些收获总结在这篇报告中。

人机交互在我们的日常生活中已经非常普遍了，这里所谓的“机”，以手机、平板等电子设备为典型代表。而电子设备中，自然涉及到诸多电磁学知识作为其原理，与此同时，在不同应用场景中，展现出很大的灵活性、多样性与实用性。而人机交互也离不开人的感官和感觉。交互方式通常涉及“视觉”、“听觉”和“触觉”。为了实现更好的人机交互效果，相关电子设备的设计都基于人类的生物学特征和基本的生物学原理。

通过相关资料与书目的阅读，我对很多日常中习以为常的设备的工作原理有了更深刻的认识，对电磁学理论的应用有了更丰富的认识，对生物学相关知识有了更生动的认识。

2 视觉交互——屏幕

2.1 屏幕显示技术：侧重非主动发光显示机理

2.2 屏幕触控技术

我主要调查了解了三种触控技术：电阻式、电容式、压电式。它们的技术原理各不相同，具备的功能与应用场景也有很大差别。然而就电磁学原理的角度来看，它们主要运用了静电场和电介质的知识。

2.2.1 电阻式触控：联系静电场与直流电路部分知识

电阻式触控的基本原理是基于匀强电场，电势与位移成正比：

$$E = -\nabla\varphi = \text{定值}$$

$$\frac{\text{测量电势}}{\text{供电电压}} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{d_1}{d_2 - d_1} = \frac{\text{测量位置}}{\text{屏幕宽度}}$$

匀强电场是在上下两层电阻中形成的 [4]，参考图 1。上下两侧电场相互正交，是为了测量 (x, y) 两个坐标。上下两层的电场是交替形成的。工作机制是这样的：上层形成电场，下层进行测量；下层形成电场，上层进行测量；二者交替进行。从材料的角度看，上下两层导电层是 In 与 Sn 的氧化物，叫做 (Indium Tin Oxide, ITO)，具有透明的良好属性 [3]。导电层之间用绝缘材料隔开，只有在用力按压触摸时，才相互接触，从而可以互相测量电势，进而探测位置。

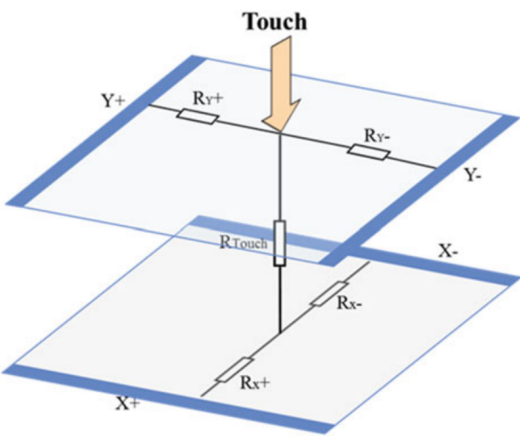


图 1: 电阻式触控原理 [4]

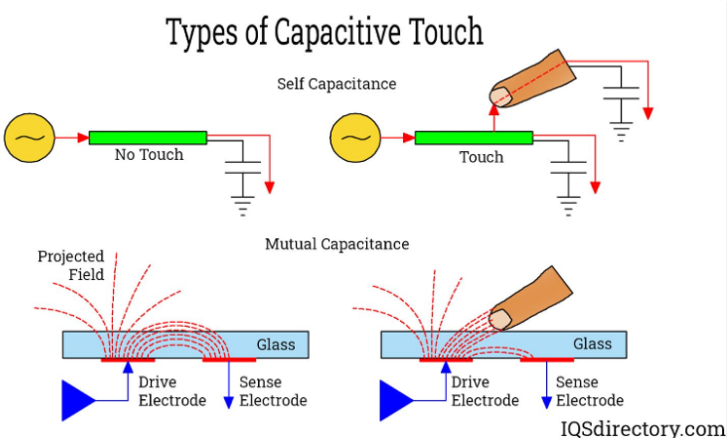


图 2: 电容式触控原理 [2]

这种电阻式的触控对于施力物体的电学性质没有要求。这既是优点，也是缺点。根据我的观察，咱们学校文史楼一些教室安装的屏幕就具有这种特点。用塑料的签字笔，便可以实现对屏幕的触控，从而可以在屏幕上写字。从而可以推断，该屏幕带概率时电阻式的触控屏。但我们的手机显然不是这样的，因为从这个原理来看，电阻式的触控屏只能支持单点触控，不能实现多点触控。此外，这会增加手机误触的风险。比如揣在兜里的手机可能会被意外触控。

2.2.2 电容式触控：联系电容器部分知识

电容式触控种类繁多，我在这里分析两类。一类是所谓“自电容”类型，另一类是“互电容”类型。它们的工作原理参考图 2。

首先可以明确的是，在这个模型中，人视作导体，并且接地。手指与极板接近，则相当于增加了一个电容。两种机制的最大区别在于，“自电容”测量的是驱动电极与大地之间的电容，而“互电容”测量的是驱动电极与接收电极之间的电容。

在“自电容”机制中，手指（此处视作导体）的接近，相当于给原本存在的寄生电容并联了一个电容。从而总电容（待测电容）增大。

而在“互电容”中，驱动电极与接收电极之间形成的电容器是开放式的，这一点与常见电容器不同。手指，作为导体的靠近，使得电场线更多地指向手指。换言之，手指改变了原本的电场分布（这个电场被称为投射电场）。从图 2 可见，这相当于减少了有效正对面积，从而手指的靠近使被测电容值（驱动电极与接收电极之间，而非总电容）减小 [2]。

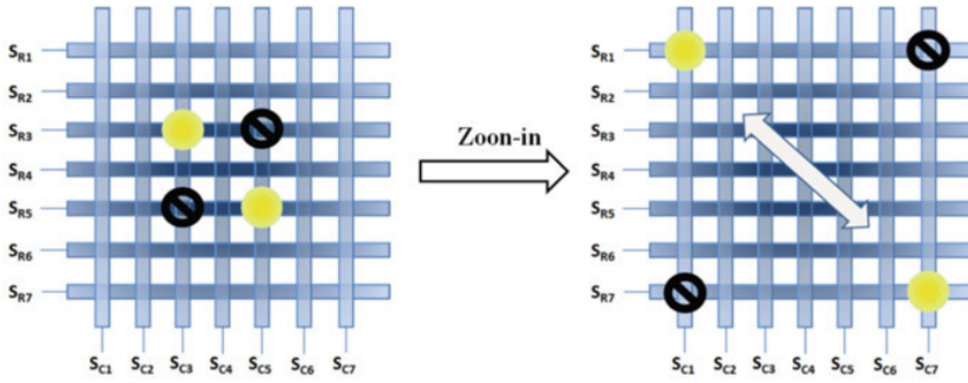


图 3: “自电容”机制中的邻顶点与对顶点不可分辨性与双指放缩操作的可行性 [4]

电容的测量涉及反复充放电的过程。而对于位置的确定，经过了对全平面多个测量子区域的反复扫描。这种扫描的时延不为我们用户所感知，但无疑是工程师考虑的重点。“互电容”因为机制复杂，所以扫描周期更长，时延更大。

一个有趣的现象是，“自电容”机制支持一点触控或两点放缩（可以双指放大或缩小页面），却也仅支持放缩操作。“互电容”则可以支持更多点的触控。

“互电容”支持多点触控相对好理解，因为它将全平面划分为多个子区域，并且彼此独立（相邻两极板间的电容），测量互不干扰。

“自电容”则不然。由于它测量的是对地的总电容，从而各个子区域并不独立。具体结构可以参考图 3 中的示意。具体来讲，各列与各列独立，但是一列之内不可区分。各行与各行独立，但是一行之内不可区分。当仅有一个触摸点的时候，取一行与一列的交点即可唯一确定位置。但是有两个触摸点的时候，两行两列形成四个交点，究竟是哪两个点？结果并不能唯一确定。有趣的是，这并不影响双指放缩的操作，因为这个操作只关心双指之间的距离，与具体位置无关。从而这一功能是可以实现的。

电容式较电阻式有明显优势，更多地被精密的屏幕所采用。但也应注意到，电容式触控只关心电学性质，而不能够探测施加的力的大小，而电阻式可以。此外，这也解释了为什么我们冬天戴手套很多操作手机。因为手套的绝缘面料阻断了这一感应机制。

2.2.3 压电式触控：联系电介质部分知识

压电现象指的是，施加压力后电介质表面产生电荷。压电现象的逆效应也被实验证实。也就是说，压电现象的正逆效应是电信号与力学信号转化的又一座桥梁（电磁感应或许是最经典的桥梁）。

与课内学习的电介质极化机制不同，压电效应的电介质极化来自于外界施加压力而非外电场。这种神奇的现象，本质上源自于分子结构缺乏中心对称性，参考图 4。电极化强度矢量由应力决定：

$$P = \tilde{d}\sigma, \sigma \text{ 表示应力}$$

电极化强度矢量决定了表面电荷密度：

$$\sigma_e = \vec{P} \cdot \vec{n}$$

电压由电荷产生：

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{\sigma_e S}{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{t}} = \frac{\tilde{d}\sigma S}{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{t}} = \frac{t\tilde{d}}{\epsilon_0 \epsilon_r} \cdot \sigma$$

而归根结底，电压是由应力决定的。

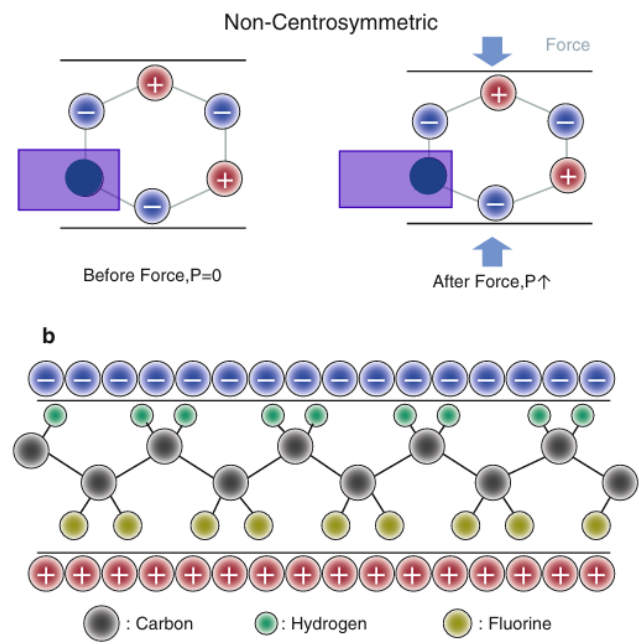


图 4: 压电效应的分子机制 (poly(vinylidene fluoride), PVDF) [4]

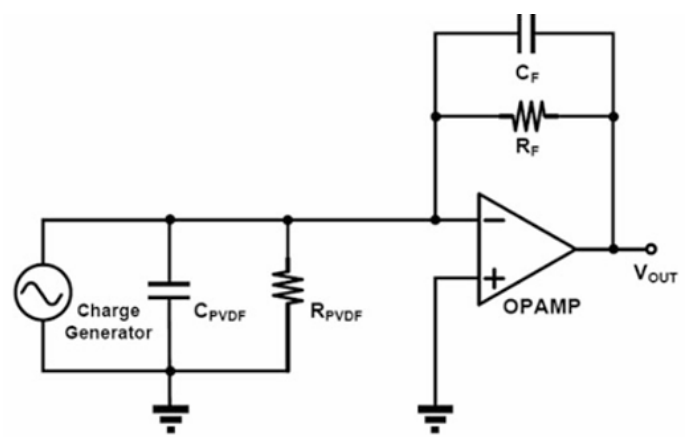


图 5: 运算放大器构成的积分器实现电荷增益 [4]

而压电效应产生的电荷与电压都是很小的。实际应用中，采用了运算放大器进行信号增益。具体来讲，使用了一个由运算放大器构成的积分器 [1]，实现对电压的积分，也就是对电荷的测量，如图 5。为了达到更好的电荷增益效果，应该选用较小的电容器 C_F 。

$$V_{out} = -\frac{1}{R_F C_F} \int V_{in} dt = -\frac{Q}{R_F C_F}$$

而由于触控是一个低频信号，所以应采用较大的电阻器 R_F ，与电容器一起构成一个低通滤波器。

$$f_{\text{cut off}} = \frac{1}{2\pi R_F C_F}$$

压电效应技术并不十分成熟，还在广泛的研究之中。但是，它和电容式的触控联合使用，可以同时实现对力学量的测量，以及多点触控等良好的控制效果。此外，由于压电效应本身并不依赖于供电电源，这使得它的功耗较低。除了显示屏幕，这种新技术也被用于可穿戴电子设备，进一步丰富了人机交互的途径。

3 触觉交互

3.1 触摸行为的生物学特质

准确刻画触摸行为的生物学特质至关重要，比如在打电话的时候要排除掉面部和手机屏幕接触引发的误触干扰。要准确的计算出触摸中心，而且计算方法应该对于成人和小孩都适用。这个过程中，除了要关注手指的几何参数（长宽以及曲率）还要关注电学参数（电导），这一点对于电阻式触控没有影响，但对电容式触控影响显著。

此外，在书写、绘画等过程中，用力的大小通常转化为线条的粗细。那么这就要求对人用力的相对值，有一个较为准确的测量方法。

与此同时，工程上还要考虑到噪音处理的问题。鉴于人的触摸频率是比较低的，在 10HZ 一下，所以实际电路中，涉及许多低通滤波器来过滤噪音。

3.2 振动的产生机制：联系电磁感应部分知识

- item 1
- item 2

参考文献

- [1] 电路分析原理. 北京大学信息科学技术学院系列教材. 清华大学出版社, 2014.
- [2] Capacitive touch screens. <https://www.iqsdirectory.com/articles/membrane-switch/capacitive-touch-screens.html>, 2024. Accessed: 2024-11-16.
- [3] Wikipedia contributors. Indium tin oxide. https://en.wikipedia.org/wiki/Indium_tin_oxide, 2024. Accessed: 2024-11-16.
- [4] Shuo Gao, Shuo Yan, Hang Zhao, and Arokia Nathan. *Touch-Based Human-Machine Interaction: Principles and Applications*. Springer International Publishing AG, Cham, 1;1st 2021; edition, 2021.