

以全新的方式读书看报

——电子纸技术简介

崔晴宇 郭小军

文字的出现是人类社会进入文明时代的重要标志之一，而文字的传播意味着信息的传播，需要某种媒介作为承载，往往这种媒介越简单易得，信息传播就越便捷。在中国，从甲骨文到铭文，从丝织帛书到竹简篆书，人们一直在寻求更为简单的文字传播媒介。直到中国古代四大发明中造纸术及印刷术的出现，使得文字传播与文明传承变得熠熠生辉。

纸张柔韧，可弯曲折叠，获取及使用方便，它的出现已有上千年的历史，人们已经习惯于纸上文字的视觉表现。但是，随着现代科学技术的飞速发展，信息量的激增，长期以来作为信息传播主要方式的纸张，其弊端日益显现。首先，现代社会快节奏的生活方式要求我们传播知识与获取知识的速率也要提升，图书报纸承载的信息量有限，传播速率也不够快。再有，纸张的生产与加工都会给环境带来损害，比如当前我国一年的用纸量约为 2000 多亿印张，这意味着 500 多万吨纸，消耗 1000 万立方米的木材，砍伐 10 年生树木 2 亿株，产生 656 亿吨污水，消耗 250 万吨煤，长期这样下去，我们的环境必然不堪承受。

现代电子信息技术的发展使人们很早就提出了“无纸化办公”的理念，并在政府机关企事业单位大力推广，但事实上，用纸量并没有减少；再有，尽管我们可以通过现代电子显示技术，如液晶显示（liquid crystal display, LCD）来获取大量的信息，但是我们还是会经常将资料打印出来读。可以看出，我们很难摆脱对于传统纸张的特性及视觉感受的依赖，所以我们需要开发一种新的信息传播的媒介，它拥有纸张的特性，同时还可以快速更新信息。

在这种趋势下，电子纸技术应运而生。

曙光初现——电子纸的特性及发展概述

首先，纸的特性是反射特性，不主动发光，也就是说，环境光照射在纸上，经反射入眼后，我们才看到纸上所印的信息；然后是彩色化、对比度与分辨率的提高，这带来的是显示质量的提升；然后是柔韧，可弯曲折叠，方便涂写，就是说可以方便

地展开与收起，随时用笔在上面涂写；再后就是它的廉价特性，用过后可以扔掉，廉价意味着成本低，意味着潜在的大规模实用化，当然这还需要内容供应商的支持。

电子纸的发展开端是从最容易实现的反射特性开始，就是实现一种可以刷新、重复显示反射式黑白电子纸。早在 20 世纪 70 年代，施乐（Xerox）公司的研究员尼克·舒尔德（N.K. Sheridan）率先提出电子纸与电子墨水的概念。他提出的概念是旋转球技术（在下一节会有详细介绍），小球带有电荷，一面是白色的，一面是黑色的，变化所加电场使其旋转显示黑或白。

目前的彩色电子纸已经不是稀奇的事物了。提到具体的实现方法，我们可以在黑白显示的技术基础上加滤光片，使每个像素实现红、绿、蓝三个子像素达到彩色显示，还可以本身就使用红、绿、蓝三色染料实现彩色显示，当然也可以使用光学干涉原理来达到显示彩色的目的。

至于类纸的柔韧性能，目前电子纸还不能实现跟纸一样的柔韧，现在确实有很多公司与大学的研究机构以柔性塑料及金属薄膜为基板，来制备电子纸以便实现弯曲的特性，有些可以卷曲，但还不能像纸一样地折叠，但这毕竟是一个我们理想的方向。

当材料能够廉价地获得，同时也能够实现大规模地制备，那么每个人都可能拥有一个电子纸产品，甚至一个电子纸产品本身就像现在报纸一样，我们每天可以打开它随时看看最新的消息，自由调整文字，重复使用。

目前已有的电子纸产品整机一般在 A5 纸大小，屏幕在 A6 纸大小。由于电子纸显示时近似是双稳态显示，仅在刷新屏幕的时候有功耗，所以一般来讲，电子纸产品功耗很低。为了能迅速地更新电子纸显示的内容，多数产品都集成了无线上网的功能，当然也可以通过 USB 或存储卡等设备来更新数据。

下面以亚马逊网站出售的 Kindle（图 1）为例来大致说明一下电子纸产品的规格。Kindle 显示屏

尺寸为 6 英寸，整机厚度约 0.8 厘米，与一般杂志厚度相仿，机身重量 289 克，集成了 3G 无线上网功能，可以在 60 秒之内下载一本书，产品本身可以容纳 1500 本书，USB 充电，开启无线支持 4 天，关闭无线可以支持 2 周时间，有内置的 PDF 文件阅读软件。

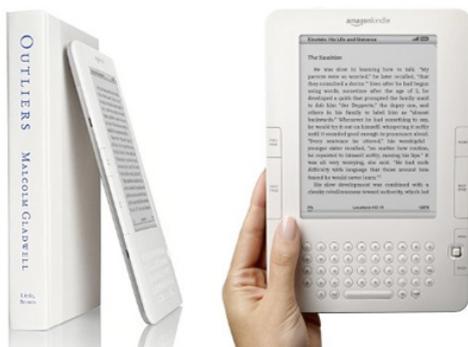


图 1 亚马逊电子纸产品 Kindle

群雄逐鹿——各种电子纸技术简介

从 20 世纪 70 年代电子纸概念被提出，20 世纪 90 年代末 E-ink 公司成立，电子纸迎来新的发展时期，到现在，30 多年过去了，已有很多新的电子纸技术被提出来。

1. 旋转球技术

旋转球技术是 1975 年施乐的帕洛阿尔托研究中心 (PARC) 研究员尼克·舒尔德 (图 2) 率先提出的电子纸和电子墨水的概念。所提出的电子纸技术是基于旋转球技术，最早是美国 Gyricorn Media Corp. 的独家技术，基本原理是利用外加电场来转动一个直径小于 $100\mu\text{m}$ 的塑胶球 (图 3)。这个球是由两个颜色不同的半球组成，一半是黑色一半是白色 (图 4)。黑色部分带有正电，而白色部分带有负电。将这些小球填入存在上下两个透明电极的充满液体的凹槽中 (图 5)，当上下电极不同时，小球在电场的作用下会进行旋转，来达到黑白显示的功能。



图 2 旋转球技术提出者尼克·舒尔德

向面板，就可以实现多彩色显示。如果小球中心部位是透明的，两侧有颜色，那么我们就可以实现透明的显示，用于设计室内装饰，如电子窗帘等。同样道理，通过改进小球设计，加上不同方向的电场驱动，可以实现加法色全色显示，或减法色全色显示等功能。可以看出通过改进可以实现彩色显示已经不是问题，其主要缺点是显示的亮度偏低，同时，也不能实现高分辨率。



图 3 旋转球颗粒及显示效果

(图引自 <http://www.corbisimages.com/Enlargement/AAEH001285.html>)

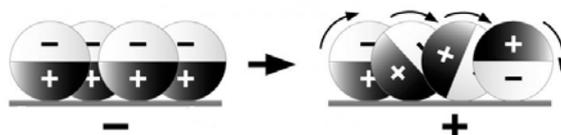


图 4 旋转球技术原理

(图引自 http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bolas_de_gyricorn.jpg)

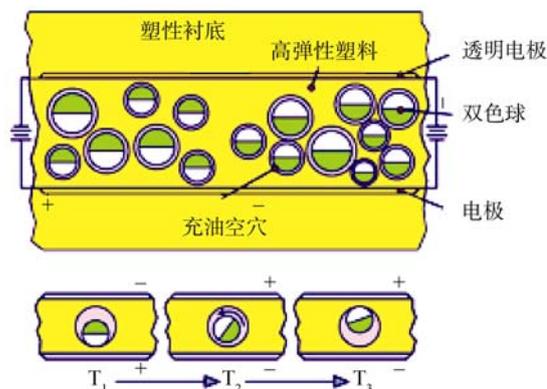


图 5 旋转球技术原理

(图引自 <http://spie.org/x26551.xml?highlight=x2408&ArticleID=x26551>)

2. 电泳显示技术

比较成熟的电泳显示技术主要有电子墨水技术、微杯型电泳显示技术、电子流粉体技术，下面对各个电泳显示技术分别加以介绍。

电子墨水 (E-Ink) 此技术最早是由美国麻省理工学院 Media 实验室研发出来, E-Ink 公司致力于此技术的商品化。目前诸多电子纸产品都基于这种电子墨水的技术, 比如中国的汉王, 前面提到的亚马逊的 Kindle, 还有 SONY 的 eReader(图 6), 以及 Plastic Logic 的 QUE (图 7) 等都是用的这种技术。

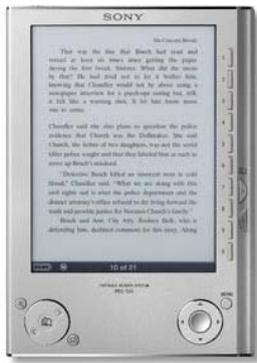


图 6 SONY eReader



图 7 Plastic Logic QUE

下面就介绍一下这种技术。如图 8 所示, 在一个细胞大小的微胶囊 3 中有两种颜色的颗粒, 一般情况下是白色与黑色的颗粒, 这些颗粒与微胶囊中透明溶液混合, 两种颗粒分别带不同的电荷, 白色颗粒 4 带有正电, 而黑色颗粒 5 带有负电。图中 2 与 7 分别是透明的顶电极与底电极, 顶电极是公共电极, 而底电极则需要图形化形成像素电极; 当底电极为正时, 带负电的黑色颗粒受到电场力的吸引会向微胶囊的底部移动, 而带正电的白色颗粒则会向顶部移动, 这样该像素就会显示白色, 如图 8 中 9 与 10 所示, 9 是入射光, 10 是反射光; 而当底电极为负时, 此像素就会显示黑色, 如图 9 与 11 所示, 9 是入射光, 11 是反射光, 其实 11 的光强很弱, 因为入射光经过黑色颗粒反射, 大部分光是已经被吸收掉了。

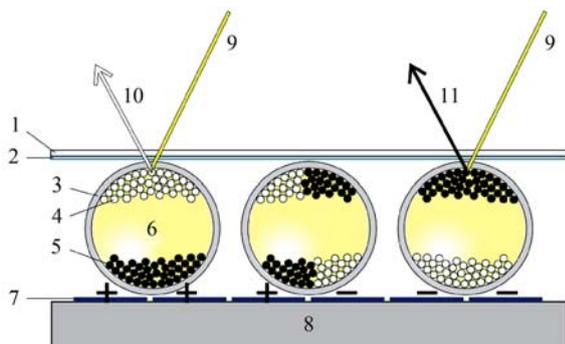


图 8 E-Ink 原理图

[图引自 [http://zh.wikipedia.org/zh/File: Electronic_paper_\(Side_view_of_Electrophoretic_display\).PNG](http://zh.wikipedia.org/zh/File:Electronic_paper_(Side_view_of_Electrophoretic_display).PNG)]

如果外加彩色滤光片 (图 9) 也可以实现彩色显示功能。

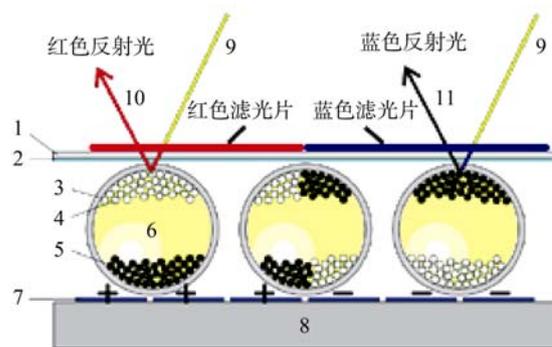


图 9 E-Ink 彩色显示原理图

这种技术的主要问题还在于响应速度比较慢, 在 100ms 左右, 不能达到视频显示中连续播放的要求。

E-Ink 技术大大推动了电子纸技术的发展, 目前商业化生产的电子纸、电子书产品基本上都是基于这一种技术。这项技术研发及商用也给其他基于电泳原理的电子纸技术很大的启发。

微杯型电泳显示 (Micro-cup) 微杯型电泳显示技术与前面所讲的电子墨水电子纸技术有些类似, 只是将微胶囊换成了微杯结构 (图 10), 这样会带来更简单的工艺过程。其实这就是利用压印技术制造出一个个有一面开口的微小腔体 (图 11), 每一个腔体就是一个微杯结构; 这样, 如果腔体开口的一面被一层薄膜覆盖上, 这个腔体就形成了封闭的结构, 也就是类似于上文所述的电子墨水中的微胶囊结构。

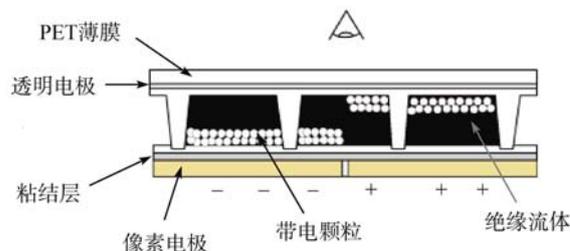


图 10 微杯型电泳显示原理图
(引自 <http://www.sipix.com>)

下面简要介绍一下微杯型显示原理。如图 10 所示, 每个微杯中有带正电荷的白色颗粒, 这个白色颗粒分散于黑色的溶液中。然后微杯上下是两层电极, 上层是透明的公共电极, 而下层是图形化的像素电极。当下面的像素电极加负电时, 微杯中的白色颗粒受到加负电的像素电极的吸引, 会向微杯

的底部运动，使微杯的顶部被黑色的溶液覆盖，那么这个像素就显示黑色；反之，如果像素电极加正电，微杯中的白色颗粒受到带正电的像素电极的排斥，会向微杯的顶部移动，那么这个像素就显示的是白色。

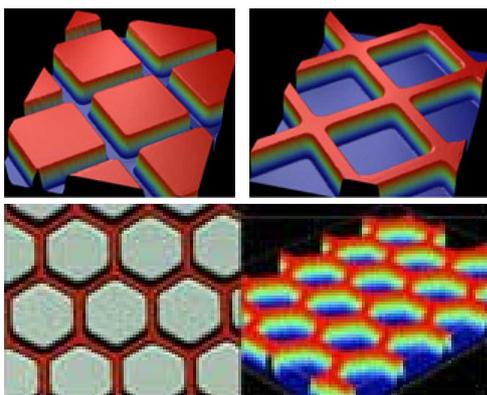


图 11 压印模板及微杯
(引自 <http://www.sipix.com>)

其实也可以很容易地实现彩色化，除了在顶部加彩色滤光片外，还可以在微杯中分配注入彩色溶液（比如红、绿、蓝三色溶液）和白色的带电颗粒，如图 12 所示。这样，每一个微杯就构成一个子像素，红、绿、蓝三个子像素组成一个彩色像素。

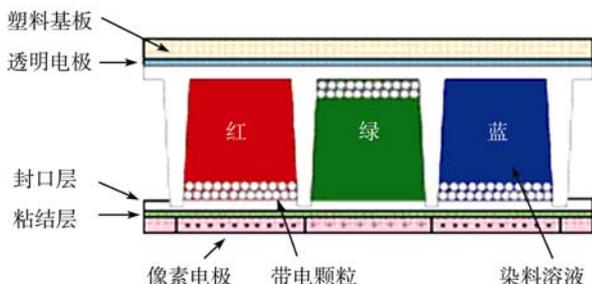


图 12 微杯彩色显示原理
(图引自 http://www.mem.com.tw/seminar_history.asp?sn=0910140001)

图 13 及图 14 是台湾友达公司基于 Sipix 的微杯技术制造的两个系列产品，其实只要开拓思路就可以找到很多电子纸的应用。图 13 是智能卡产品，上面可以显示即时生成的密钥，可以显示传输的数据量，也可以用于显示还剩多少金额等。图 14 是电子书产品，与前面所提的 Kindle 及 eReader 功能类似。

电子流粉体技术（QR-LPD） 这种技术是日本普利司通（Bridgestone）的专利技术，QR-LPD 是快速反应液态粉状显示器的意思，即 Quick Response Liquid Powder Display，也称电子流粉体。这

种技术不用液体为介质，其显示是将树脂经过纳米级粉碎处理后，产生黑色粉末与白色粉末，这两种粉末带有不同电荷，再将这两种粉末填充于空气介质的微杯封闭结构中，利用上下电极来使黑白粉末在空气中发生电泳现象。



图 13 智能卡



图 14 电子书应用

其基本原理与上面两种电子纸技术类似，也是基于电泳原理（图 15）。简单的黑白电子纸所用的粉末是两种类型的流粉体，带正电的黑色粉末与带负电的白色粉末。当上电极加正电压时，白色粉末移动到前面基板处，此时此像素显示白色；当加负电压时，黑色粉末移动到前面顶板处，此时此像素显示黑色。图 16 是 QR-LPD 黑白双色显示效果图。

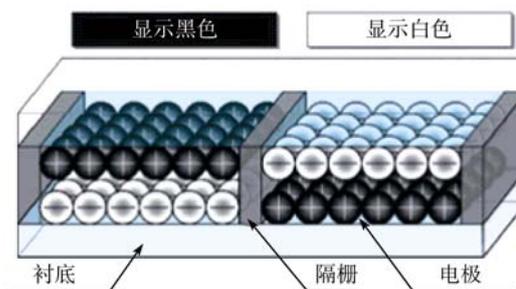


图 15 电子流粉体技术原理
(图引自 <http://www.funddj.com/kmdj/wiki/wikiviewer.aspx?keyid=edbcfa46-995f-40fe-b7c9-54862b30b471>)



图 16 QR-LPD 黑白双色显示

这种显示技术的优点是反应速度很快，为 $200\mu\text{s}$ ；但是其驱动电压很高，在 $40\sim 70\text{V}$ 左右，如此高的驱动电压不适合与薄膜晶体管背板的集成，即不太可能实现有源驱动。

QR-LPD 技术实现彩色化，除了面板上贴彩色滤光片方法以外，可以在相邻的三个像素中分别填充不同颜色的带电粉末。比如在相邻的三个像素中都填充带正电的黑色粉末，同时分别填充带有负电的红、绿、蓝粉末，那么就实现了红、绿、蓝三个子像素，继而实现了彩色显示功能。

3. 用“水”实现的电子纸技术

用“水”实现的电子纸技术实际上是利用极性电解质溶液、油性溶液与疏水性介质的亲和性不同来实现的显示技术，主要有两种：电湿润技术 (Electrowetting)、电流体技术 (Electrofluid)。这种技术的主要优点是刷新速率高，加载电压低。

电湿润技术 (Electrowetting) 电湿润电子纸技术现在有几个研发团队在着力研发，有 Liquavista、台湾工研院 (ITRI) 等。在 2010 年国际信息显示学会显示技术展会 (SID2010) 上，展出了多种电湿润显示产品，可实现彩色显示，同时有的产品也可以实现视频显示，展示了电湿润技术高刷新速率的优势。

电湿润技术原理如图 17 所示。一般情况下，演示电湿润基本原理通常是在一个底电极上制备一层疏水介电层，然后在疏水介电层上滴一些极性电解质溶液，由于表面张力的作用，电解质液滴、空气与介电层三相交界处的溶剂分子受力平衡后，极性电解质溶液自然会呈现收缩状态，与疏水性绝缘层有一个很大的接触角[图 17 (a)]，使系统的自由能最低。电解质液滴与一个电极接触，权且称其为顶电极。如果通过在底电极与顶电极上加电压，则在介电层上下出现电荷分布，如图 17 (b) 所示；以加正电压为例，在极性电解质液滴中与介电层接触的部分会聚集正电荷，同时在底电极中会聚集负电荷。这样，正负电荷的相互吸引会让电解质液滴、空气与介电层三相交界处的溶剂分子有一个水平向外的力的作用，张力重新平衡后，液滴与介电层的接触角变得更小，从外部表现上看就是液滴在介电层上摊开来，表面积变大。当驱动电压越大时，接触电解质溶液的接触角会越小；而接触角变化相同角度时，所加电压的大小与介电层的厚度、介电常数大小以及各界面间表面张力的大小有很大关系。

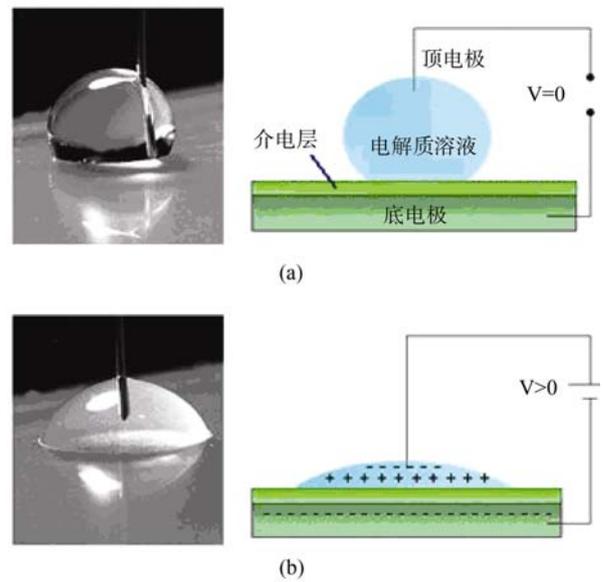


图 17 电湿润原理

(图引自 http://physicaplus.org.il/zope/home/en/1185176174/water_elect_en)

图 18 是利用电湿润技术显示的原理。油性液滴中溶解有染料，所以油性液滴显示一定的颜色，而电解质溶液是透明无色的。当在电解质溶液与底电极中没有加电压时，由于油性液滴的表面张力更小，与疏水性的介电层的亲和性更好，会自然在介电层上摊开，如图 18 (a) 所示，而此像素自然呈现油性液滴的颜色；但当在电解质溶液与底电极上加电压时，由于电湿润原理，电解质溶液与介电层的亲和性更好，会将油性液滴压到一个角落，那么此像素自然呈现的是衬底的颜色，如图 18 (b) 所示。当然通过精巧的结构设计，可以实现双稳态的电湿润显示，这样会进一步节省电能。图 19、图 20 分别为 Liquavista 与 ITRI 公司研发的产品。

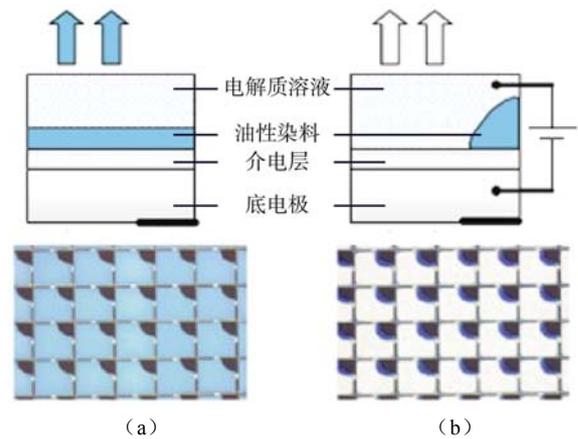


图 18 电湿润显示原理

(图引自 http://www.printedelectronicworld.com/articles/progress_with_electrowetting_displays_00001461.asp)



图 19 Liquevista 公司产品



图 20 ITRI 研发的电湿润显示器

电流体技术 (Electro-fluid) 电流体技术原理与上文的电湿润技术原理类似。这个技术由美国辛辛那提大学以及 Sun Chemical 和 Gamma-Dynamics 两家公司合作开发，并于 2009 年 5 月在《自然—光电子学》杂志上报道了该电子纸技术。

这种电子纸的主体是由疏水性材料制成的六角形像素，每个像素的中心是一个被称为蓄液池，用于储存水性染料溶液的微小容器。当电极施加电压时，染料溶液扩散到蓄液池的外部，让像素显示颜色；停止施加电压时，扩散的染料溶液会在表面张力的作用下返回蓄液池中。这个施加电压与去掉电压的过程如图 21 所示，而显示的效果如图 22 所示。

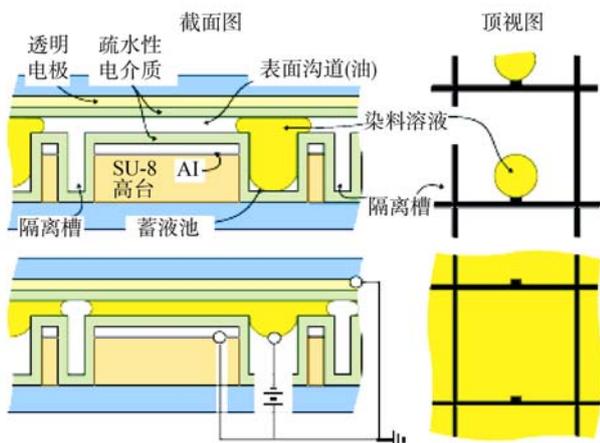


图 21 电流体显示原理

(图引自 http://www.3dnews.ru/editorial/it_electrofluidic_display)

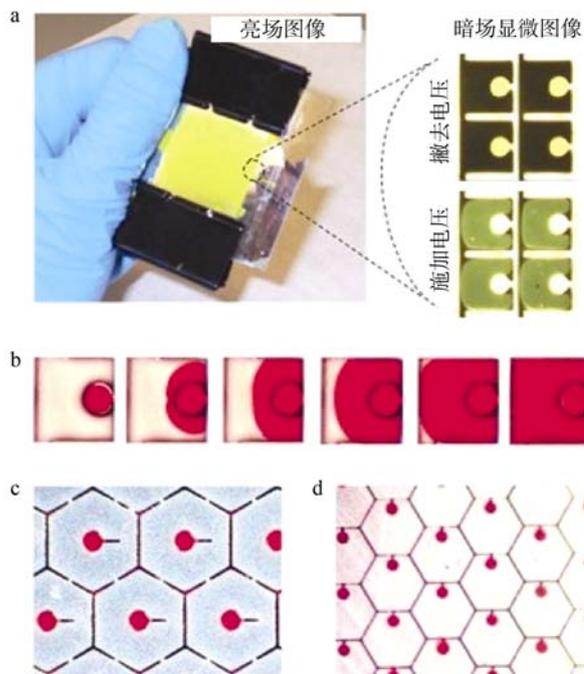


图 22 电流体显示效果

(图引自 http://www.3dnews.ru/editorial/it_electrofluidic_display)

电流体显示技术与电湿润显示技术共有的特点是可以控制彩色颜料的“可见”与“隐藏”，而这两种显示状态可以快速切换，所以这两种显示技术在彩色动态影像显示方面有固有的优势。电流体显示技术与电湿润显示技术都可以获得较高的光反射效率，其反射率有望超过 85%，所以能够实现很高的显示亮度和对比度。由于像素显示结构是立体的，电流体显示技术可以实现比电湿润显示技术更小的像素，这有助于实现厚度更小的器件。

4. 反射式液晶显示技术

反射式液晶显示技术中一个鲜明的特点是双稳特性，与电泳显示有相似性，也就是说功耗可以降低至很低的水平，仅是在刷新图像的时候需要很低的功率消耗。

反射式液晶显示技术主要有三种：胆甾型液晶显示技术，向列型双稳态液晶显示技术，以及取向双稳态技术。下面对各个技术做一介绍。

胆甾型液晶显示技术 这个技术主要是由 Kent Displays 公司在商用化生产，其他有很多研发团队也在研发，比如肯特大学液晶研究所 (Kent Liquid Crystal Institute)、ITRI 等。

胆甾型液晶的分子呈螺旋状排列，具有独特的光反射选择特性。掺入了适当添加剂的胆甾型液晶材料只能反射特定波长的色光，采用不同的添加剂

配方可以配制成分别反射红、绿、蓝三种基色光的胆甾型液晶材料。

胆甾型液晶材料还具有独特的光电特性，如图 23 所示。在外加电压的作用下，其分子的螺旋状态会发生变化，进而导致光反射率改变；如果加强电压脉冲，使胆甾型液晶材料呈平面螺旋排列，会出现布拉格反射状态，反射特定波长的光，像素呈现亮态；如果减弱电压脉冲，则会使胆甾型液晶材料呈比较混乱的自由螺旋排列，不会反射光，光通过液晶层会产生弱散射现象，像素呈现暗态。并且在外加电压消失后胆甾型液晶材料仍能保持这种状态，具有双稳态特性。

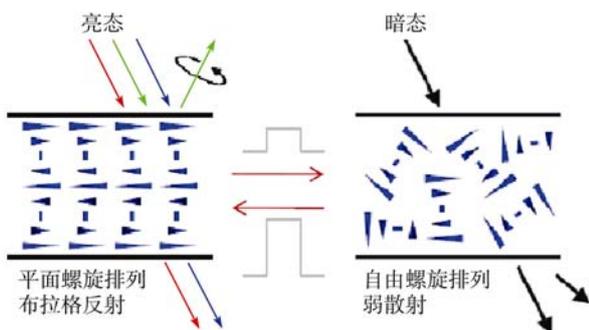


图 23 胆甾型液晶反射式显示原理

胆甾型液晶电子纸为多层结构，每个像素由分别能反射红、绿、蓝三基色光的 3 层胆甾型液晶材料堆叠构成，最底层是光吸收层，每层胆甾型液晶材料都处于两个透明电极的夹层中。当驱动电压分别加载到 3 个反射层的电极时，各反射层对环境光中 3 种基色光的反射率相应改变，所反射的 3 种适当强度的基色光按照加法混色规律就可以混合成所需的某种颜色，从而实现彩色显示，如图 24 所示。

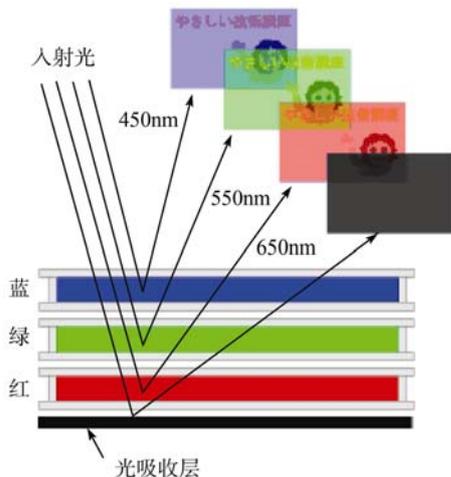


图 24 胆甾型液晶彩色显示原理

然而，平面螺旋排列与自由螺旋排列这两种状态的转换也可以不全通过加电来实现，如图 25 所示。胆甾型液晶材料自由螺旋排列转换到平面螺旋排列可以通过压力来实现，施加压力时，面板表面凹陷，液晶分子向两侧移动，撤去压力时，液晶会移动回来，呈现平面螺旋结构，出现布拉格反射。这样就完成了暗态到亮态的转换，不需要电能；但是，亮态到暗态的转换则需要电能，通过上下两层电极，可以使整个面板都转换到亮态。这种技术耗电非常低，一块手机电池的电量可以刷新面板 50000 次。基于此原理，Kent Displays 公司开发出了手写板 Boogie Board，价格是 30 美金（图 26）。

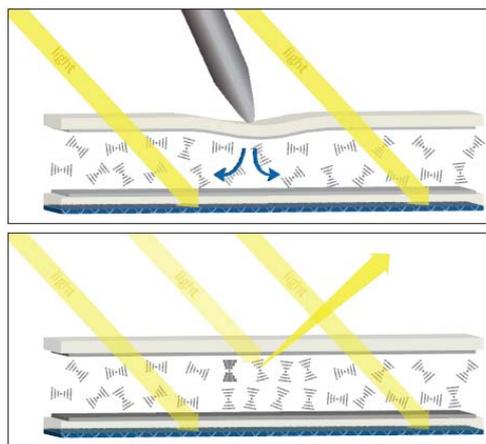


图 25 压力改变胆甾型液晶取向原理
(图引自 <http://www.kentdisplays.com>)



图 26 Kent Display 手写板产品
(图引自 <http://www.kentdisplays.com>)

向列型双稳态液晶显示技术 Nemoptic 公司在向列型双稳态液晶显示技术方面研发实力较强。基本原理如图 27 所示，U 表示均一态 (Uniform

State), T 表示扭转态 (Twisted State)。当液晶层处于均一态时, 入射光透过顶偏振片, 通过液晶层经底反射型偏振片反射后, 光不会通过顶偏振片再反射出来, 此时像素呈现暗态; 而当液晶层处于扭转状态时, 由于液晶分子从上到下排列呈现 180 度扭转, 所以经底部反射偏振片的光会经顶偏振片反射出来, 像素呈现亮态。

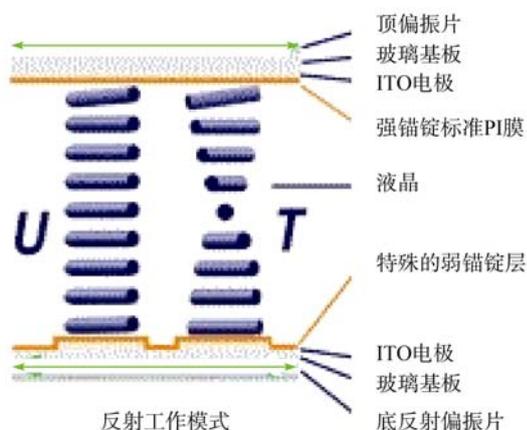


图 27 向列型双稳态液晶工作原理
(图引自 <http://www.nemoptic.com>)

如图 28 所示, 扭转态与均一态之间的转换只需要施加一定的电压脉冲就可以了。其中, 扭转态向均一态转换时, 电压脉冲的下降沿斜率要小, 电压下降要相对缓慢; 而均一态向扭转态转换时, 电压脉冲的下降沿斜率要大, 电压下降沿要相对陡峭。

取向双稳态液晶显示技术 这项技术主要由 ZBD 公司在研发, 主要用于电子标签领域。与前面两个技术的不同之处是, 这项技术使用的是特殊的液晶取向结构, 这种结构中两个斜率不同的坡, 使液晶在电压作用下呈现不同角度的螺旋状态, 从而使其反射或不反射光, 达到反射式显示的目的, 如图 30 所示。图 31 是 ZBD 公司的电子标签产品。

5. 其他电子纸技术

前文所述的是比较典型的几种电子纸技术, 当然还有很多技术正在研发中, 各有特点, 也可以看出电子纸技术百花齐放的状态。下面简要介绍几种其他的电子纸技术:

基于 MEMS 干涉显示 这项技术主要是高通公司 (Qualcomm) 在研发, 基于光学干涉的原理, 可称之为干涉测量调制 (Interferometric Modulator,

IMOD) 技术, 实现彩色显示是其固有优势。据说 IMOD 技术的灵感来源于蝴蝶翅膀能产生绚丽色彩的自然现象, 如图 32 所示。

高通公司推出的 Mirasol 系列电子纸产品采用了 IMOD 显示技术 (图 33)。如图 34 所示, IMOD 像素的基本结构有涂敷了一层半透射反光薄膜 T 的玻璃基板, 一层导电反光隔膜 M, 隔膜 M 与薄膜 T

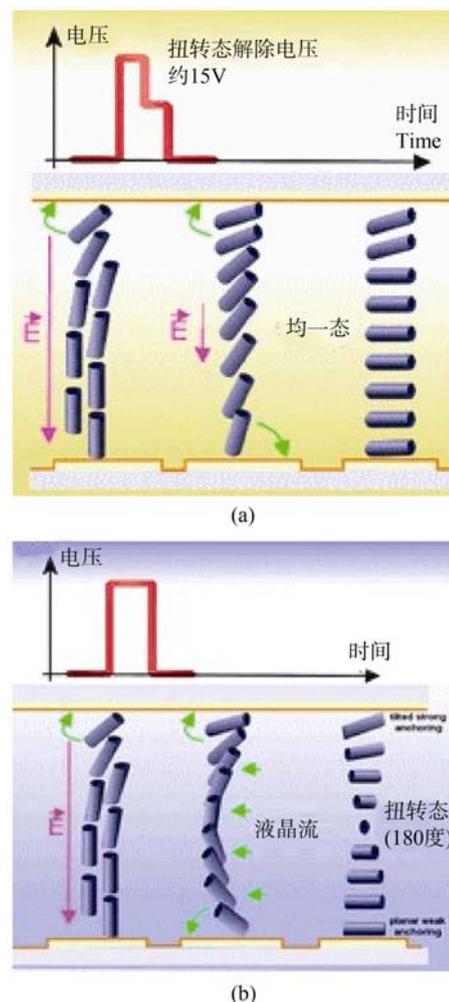


图 28 (a) 扭转态向均一态转换过程; (b) 均一态向扭转态转换过程
(图引自 <http://www.nemoptic.com>)



图 29 NEMOPTIC 公司向列型双稳态液晶显示产品
(图引自 <http://www.nemoptic.com>)

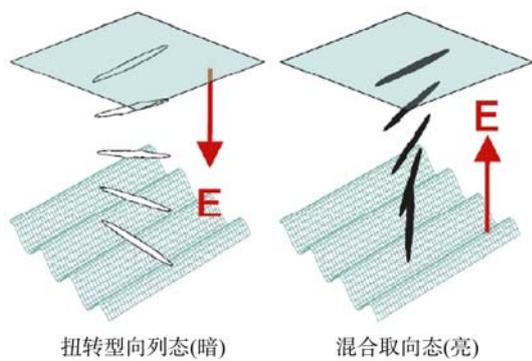


图 30 取向双稳态液晶显示原理
(图引自 SID 07 Digest 40.1)



图 31 ZBD 公司电子标签产品
(图引自 SID 07 Digest 40.1)

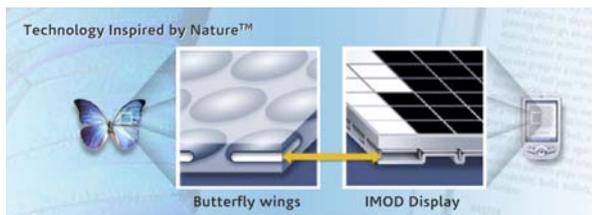


图 32 IMOD 显示技术原理
(引自 <http://www.mirasoldisplays.com>)



图 33 高通公司 Mirasol 电子纸产品
(引自 <http://www.mirasoldisplays.com>)

之间有一个很小的空气间隙，IMOD 技术主要是利用了两个表面之间的空气间隙中光反射形成干涉

的原理。当在隔膜 M 与薄膜 T 之间加载较高的电压时，隔膜 M 就会在静电引力的作用下向玻璃基板靠近，此时空气间隙减小，使可见光出现相互抵消的干涉，所以像素显示为黑色，这种状态称作“关态” (Close State)；当在隔膜 M 与薄膜 T 之间加载低电压时，隔膜 M 还原其固有的位置，此时入射光可在较大的空气间隙中形成干涉，所产生的彩色光使像素显示一个明亮的色点，这种状态称作“开态” (Open State)。

由于 IMOD 像素结构本身能够形成高亮度的彩色光，所以能直接实现彩色显示。此外，IMOD 技术还利用“微机械系统” (MEMS) 的原理实现了双稳态特性，像素中的反光隔膜是一种弹性膜，可以像弹簧一样产生弹性机械力，这种弹力能够使像素在没有外加电压时保持开态或关态。

光子晶体显示技术 Opalux 公司首创的光子晶体显示技术，商用名为“光子墨水” (Photonic Ink, P-Ink)，利用光子晶体特性。因为不同折射率的材料周期性排列就形成了光子晶体，而不同周期的光子晶体会出现不同的禁带，就是反射特定波长的光。Opalux 公司通过电压来调节光子晶体的周期，从而反射不同颜色的光，实现彩色显示技术，如图 35 所示。

电化学反应显示 电化学反应显示的基本原理是利用电化学反应中银的析出与溶解作用来显示图像。它由透明电极、银电极以及在两电极之间封入的一层白色乳胶状固体电解质而形成的一种类似“三明治”的结构。

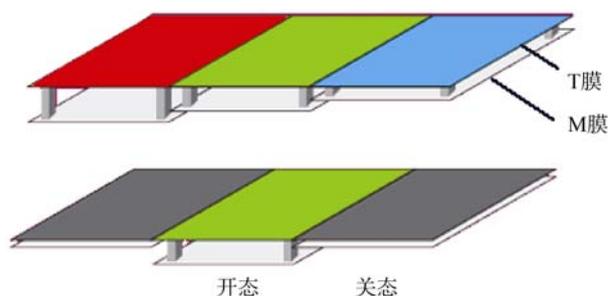
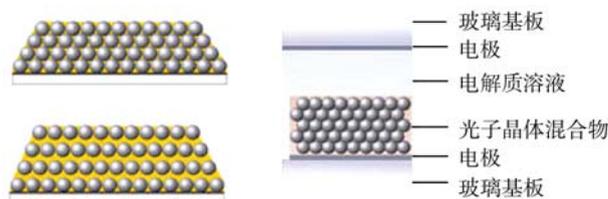
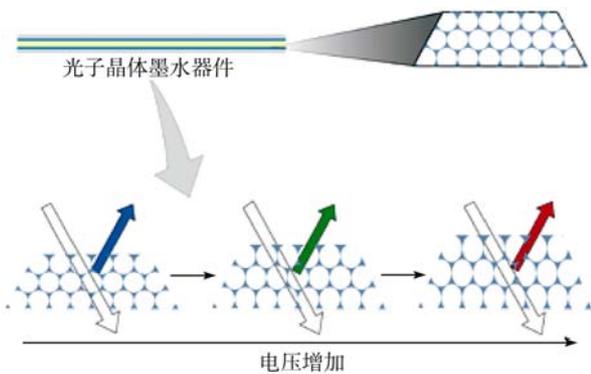


图 34 IMOD 显示技术原理
(引自 <http://www.mirasoldisplays.com>)



(a) 光子晶体显示器件基板结构 (引自 <http://www.opalux.com>)



(b) 光子晶体显示技术原理 (引自 <http://www.opalux.com>)
图 35

工作时，电化学反应使溶解在电解质中的银离子还原为银而析出在透明电极上，看起来呈黑色；反之，如果把析出的银溶解到固体电解质中，即可直接看到白色乳胶状固体电解质，而显示白色。

电致变色技术 电致变色显示技术的基本原理，是利用一些有机材料在电解过程中发生氧化-还原反应，导致其对环境光中不同波长色光的反射-吸收特性发生变化，从而产生可逆性颜色改变的电致变色现象。像素的基本结构包括固态的有机电解质、电致变色材料以及柔性的塑料或纸质衬底，大、小两块电致变色材料同时也作为像素的驱动电极使用。

路在何方——电子纸技术未来展望

总体来说，基于电泳原理的电子纸技术是目前商用化电子纸产品的主流技术，有不错的视觉表现，但是共同的问题就是驱动困难，为实现不同的灰度级而编写的驱动逻辑时序复杂，没有实现彩色显示固有的优势，要想实现全彩色显示通常是要采取外面加滤光片的方法。再有，就各个技术而言，电子墨水技术的主要问题是响应速度较慢，不能实现动态视频显示；而 Sipix 的微杯型技术，尽管有制程工艺简单的优势，但究其技术原理与电子墨水类似，是固体颗粒在液体中的移动，所以也有电子墨水响应速度的问题；而电子流粉体技术 (QR-LPD)，由于是带电颗粒在空气中移动，尽管有快速响应的优势，但是其驱动电压过高，难以与薄膜晶体管背板技术集成，难以实现有源驱动，这一方面会影响寿命，另一方面也难以实现大面积的显示。

用“水”实现的电子纸技术主要的优点是响应速度快，可以实现动态视频显示，但是难以实现很好的双稳态显示，这意味着对于显示静态的图像也

需要一定的功耗维持，更不用说显示动态视频了，这也就意味着整体的功耗比较高。其中电流体技术比电湿润技术更好的地方在于它的像素结构是三维的，可以实现更小的像素面积，达到更高的分辨率，但是制备三维像素结构显然要比二维的像素结构更为困难。利用不同颜色的染料可以实现全彩色显示，由于通过驱动的精微控制可以实现灰度级的连续控制，即可以拥有更高的灰度级。但是由于像素“隐藏”与“显示”时，染料液滴总会占据像素一部分面积，只是比例大小的问题，所以这会导致显示效果不够完美，对比度不够理想。

对于反射式液晶显示技术而言，它的制备更为容易，因为这种技术可以与传统的液晶显示器的工艺流程兼容。由于液晶在 LCD 应用中可以满足动态视频的响应速度，所以基于反射式胆甾型液晶显示具有动态视频显示的固有优势，同时也具有全彩色显示的固有优势。因此，三星电子讲“电子纸技术最终将收敛于胆固醇液晶”。而前面所述的两种双稳态液晶显示只在刷新图像时需要功率消耗，所以本身具有低功耗的特点，但是它不具有全彩色显示的固有优势，显示的灰度级也有限，对比度也不够高。

基于 MEMS 的显示技术目前来看还不是主要的研发热点，尽管这种技术有固有的彩色显示的优势，也有很高的响应速度，驱动电压也可以与 TFT 背板兼容，但是它的制备工艺相对复杂，目前还不具有柔性显示的能力。对于光子晶体显示技术而言，这种技术很新颖，但仅有加拿大的一家公司在做相关技术研发，还没有成品出现，所以这种技术还不够成熟，光子墨水的制备还相对困难。对于电化学反应技术而言，之前仅有索尼公司做相关技术的研发，但是这种技术在寿命、稳定性及色彩显示方面都没有明显优势。电致变色技术也有同样的问题，它是基于有机材料的电解，作为化学或生物实验的表征倒是很好的技术，但是还远达不到显示产品对于色彩、稳定性的要求。

就显示性能来说，电子纸将来的发展必将是向现有的液晶显示器的性能靠近，即将向大尺寸、高分辨率、全彩色、动态视频显示方向发展；就机械性能上来看，也会向类似纸张的轻薄柔性发展。最终，电子纸必将拥有目前纸张的柔韧特性和视觉效果，同时也会拥有至少像目前液晶显示器的显示性能。

作者介绍

崔晴宇，男，吉林长春人。2009年在上海交通大学电子工程系获电子科学与技术专业学士学位。2008年底免试直升为上海交通大学电子工程系硕士研究生，进入 TFT-LCD 关键材料及技术国家工程实验室研究学习。目前从事柔性电子与显示技术方面的研究。

郭小军，男，江苏如皋人。2002年在吉林大学电子工程系获学士学位，随后一年在清华大学电子工程系从事超大规模集成电路方面的研究工作。2003年至2008年在英国 Surrey 大学 Advanced Technology Institute 从事非晶硅、多晶硅以及有机薄膜电子和新型平板显示技术的研究工作。2007年获得博士学位，并以 Research Fellow 继续工作一年。2008年加入英国剑桥 Plastic Logic 公司，从事印刷有机电子、柔性电子纸显示的研究和产业化工作。2009年被引进上海交通大学电子工程系，聘为研究员，并获聘上海市东方学者特聘教授，入选 2009 年国家教育部新世纪优秀人才计划。

主要研究领域：新型显示技术、印刷电子与系统集成。近 5 年，以第一作者的身份在国际知名刊物包括 *Science*, *IEEE Transaction on Electron Devices*, *IEEE Electron Device Letters*, *Applied Physics Letters* 以及相关国际会议上发表论文近 30 篇。

我们看到多种多样的电子纸显示技术已经被研发出来。目前来看，电子纸技术的发展方兴未艾，可以预见其产生的重要影响。目前从亚马逊的 Kindle, 索尼的 eReader 等电子阅读器的热卖可以看出，基于电子纸技术的电子书阅读器正在悄然地改变着人们的阅读习惯，改变着人们获取信息的方式，也给传统的图书报刊出版带来了新的活力。

电子纸的特性给了人们很多想象的空间，促使人们开发出多种应用，比如未来的电子标签、电子皮肤、服装点缀、建筑外观装饰等，都可以见到廉价绚丽的电子纸技术的身影。

可以说，不论在模拟传统阅读方式，还是在人们生活的方方面面，电子纸技术必然会有很广泛的应用，这也促进了电子纸技术的发展。

我们期待着那样的一天，在公园中休憩的时候，打开透明的塑料薄膜，瞬时这个塑料薄膜动态地显示时事新闻，通过它我们悠闲地浏览着网络；要走的时候，把它折叠起来放到公文包中；走在街上，两旁的商场广告动态地显示着产品信息，建筑物上也有绚丽可变的装饰；进入商场，可以看到商品的标签在某一时间同时刷新；回到家中，拉开一个窗帘一样的电视，欣赏电视节目；……。

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 200240)



科苑快讯

遥远行星上的超级风暴

天文学家最近观察到 150 光年远处的一颗行星上刮起了时速高达 1 万千米的炽热风暴。这一切源于它过分靠近主恒星，并围绕其同步旋转。该行星编号为 HD 209458b (如图)，它与主恒星的距离是水星到地球距离的 1/8，远比水星距太阳近得多。



HD 209458b 位于飞马座方向，自 1999 年被发现以来，一直作为日外行星的典型代表，是首个以行星凌日方式观测

到的行星，因为它在掠过主恒星时观测到恒星光度略有下降。天文学家分析了这颗日外行星的大气成分——氢、氧、甲烷、一氧化碳、二氧化碳、水蒸气。最近荷兰莱顿天文台 (Leiden Observatory) 副教授斯内伦 (Ignas Snellen) 又在《自然》上发表了一氧化碳的精细光谱分析结果，发现有证据表明，超级暴风正以每小时 5000~10000 千米的速度吹过其表面。风暴的产生原因在于其表面存在巨大温差——恒星照耀一侧的温度高达 1000℃，足以将铜熔化。但是黑暗一侧却非常寒冷。HD 209458b 的天气报告，对于日外行星的研究具有里程碑意义。

(高凌云编译自 2010 年 6 月 24 日澳大利亚广播公司科技新闻)