

传感器

西北工业大学301教研室

一九八八年元月

TN79/20 TP21/20

传 感 器

§ 1 综述

§ 2 传感器的基本特性

§ 3 热敏传感器

§ 4 辐射检测

§ 5 光敏传感器

§ 6 光纤传感器

§ 7 气敏传感器

§ 8 湿敏传感器

§ 9 磁敏传感器

§ 10 电感式传感器

§ 11 力敏传感器

§ 12 压电式传感器

§ 13 电容式传感器

§ 14 数字式传感器

§ 15 智能传感器

§ 16 测量电桥

§ 17 基电桥放大电路

• 第七章 传感器

§ 7—1 综 述

在科研、生产和现实生活当中，人们广泛接触各种物理参量、化学参量和生物参量。这些参量大致可分为电参量和非电参量，而非电参量和人们的活动有着密切广泛的关系，它所涉及的种类和门类远远超过电参量。测量和控制各种非电量，最重要的手段就是依靠传感器将它们转换成电量，然后通过电的方法进行精确测量和控制。人们常常把计算机比喻为人的大脑，称电脑，那么传感器便可比喻为人的感官，称电感官。由电感官取得信息并转换成电量，再由电脑对信息进行分析处理，便形成完整的自动测试系统和智能化仪表。

因此可以说传感器是实现信息检测、转换和传输的元器件。

传感器 (transducer) 和敏感元件 (sensor) 的区别是，前者是指测量装置，后者是指测量装置中感受信息的元件。但是目前传感器正向简单化、集成化、智能化、一体化、多维化方向发展，所以两者界限将愈来愈模糊。而变送器 (transmitter) 则指输出为标准信号的传感器。

传感器的应用领域广阔，种类繁多。如按原理分，传感器可分为结构型和物性型两类。物性型是由敏感材料的各种效应决定其变换原理，如 敏、气敏、湿敏、光敏、压敏、声敏等，它直接将非电量转换成电量。结构型采用的是间接变换原理，一般要经两次变换，第一次先将被测参数转换成电、容、电感、电阻等电参数，然后利用检测电路再将电参数转换成电量输出。

现代的传感器不但能完成人类感官的一般功能，而且还能检测出

类五官不能感觉到的红外、超声等信息，也能检测能量远远超出人能接受的高温、高压等现象。但现代传感器还有许多方面不如人感的，例如人眼在一瞬间就可判断物体的形状、颜色以及所在的方向和远近，但要光传感器轻易的实现，目前还有困难。但随着大规模集成和微处理机的发展，目前已有智能传感器（Intelligence transducer）出现，将检测转换技术与信息处理和判断控制等有机地结合起来，大大地丰富了传感器的功能，有效地提高了传感器的性能。美国霍尼韦尔公司（Honeywell）推出的DSTJ3000智能式差压、压力变送器就是一例。（Smart Transmitter 1500\$）

传感器的发展涉及各种新机理、新材料、新工艺、新效应和新用途。人们期待着的味觉传感器就是一个很有意义的新课题。四化离不开传感器，传感器是人类进化的支柱。医学、环保、空间、预报、海洋、仿生节能等领域的开发都要求传感器首先不断飞跃。

§ 7—2 传感器的基本特性

一个传感器的质量通常是用一些性能指标来评价的，而这些性能指标则是通过传感器特性来得到的。传感器特性包括静态特性和动态特性。

一、静态特性 它表示传感器工作在稳定状态下也就是当输入量为恒定值而且不随时间变化时，其相应输出量亦不随时间变化，此输出量与输入量之间关系为静态特性。这种关系一般根据物理、化学、生物学的“效应”、“反应”定律得到，具有各种函数关系。如果得到的函数能展开级数而且能收敛的话，那么可用马克劳林级数表示：

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n \quad (7-1)$$

式中 y —— 传感器输出量（相对值）

x ——传感器输入量(相对值)

a_0 ——零位输出

a_1 ——传感器线性灵敏度

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性待定系数。

在某些情况下不能用上述解析法表达时,可用实验曲线表示,然后用回归分析法求出其经验公式。

解析法便于对传感器进行理论分析,并为设计提供依据,而图形法便于传感器标定。

基于传感器静态特性有如下主要性能指标:

1. 精确度 (ACCURACY) 在实验和标定工作中得到的数据与真实值并不完全一致。为了表达指示值与真实值的偏差程度,引入精度概念,偏差程度小精度高,反之精度低,一般用最大相对误差表示。

$$A = \frac{\text{最大误差}}{\text{量程}} \times 100\%$$

式中最大误差为最大或然误差 3σ (σ 为均方根误差)。

2. 灵敏度 (SENSITIVITY) 表示传感器在稳定工作状态下输出变化与引起此变化的输入变化的比值,即对 (7-1) 式微分:

$$S = dy/dx$$

$$= a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + \dots + na_nx^{n-1} \quad (7-2)$$

由 (7-2) 式看出 S 是 x 的函数,它是静态特性曲线下某点斜率。

3. 最小检测量 (DISCRIMINATION THRESHOLD) 是传感器能确切反映被测量的最低破限量。最小检测量愈小表明传感器检测微量能力愈高,所以又称灵敏度阈或鉴别力阈,它与传感器噪声、灵敏度有关,其表达式为

$$M = KN/S$$

(7-3)

式中 K ——系数(一般取 $1 \sim 5$)

N ——噪声电平

4. 线性度(LINEARITY) 传感器特性,大多数是非线性,而在设计制造传感器时希望刻度均匀,有利于调整和制造,为此引入线性度概念。它是表示传感器特性曲线(一般用标定曲线)与刻度直线的偏离程度。其表达式为

$$L = \frac{\text{最大线性偏差}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (7-4)$$

拟合直线可用如下方法得到:

(1) 用最小二乘法,此方法可以做到线性偏差很小,称独立线性度。但是计算复杂,适用在特性方次不高情况(图7-1中a)。

(2) 用端基法,将测量原点与量大测量点联成直线为拟合直线,称端基线性度。这种方法应用普遍(图7-1中b)。

(3) 用切线法,从原点或某点作切线为拟合直线。一般理论分析传感器线性度时,从原点作切线即为 $y = a_1 x$, 因此适用在输入变化量取小的情况(图7-1中c)。

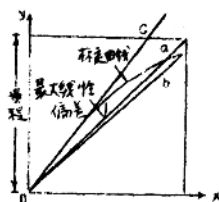


图7-1 传感器特性曲线

5. 零漂(POINT DRIFT) 表示在规定工作条件下,传感器下限值在规定时间内输出的变化值。

6. 迟滞(hysteresis) 迟滞特性表示传感器正(输入量增加)反(输入量减小)行程的输出输入特性不重合的程度,如图
~174~

7—2 所示。

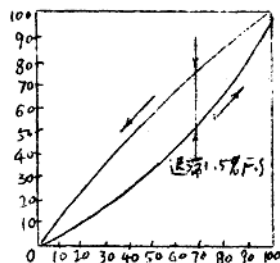


图 7—2 迟滞特性

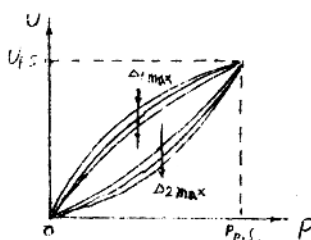


图 7—3 重复性

7. 重复性 (Repeatability) 重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次重复变动时所得特性曲线不一致的程度，如图 7—3 所示。根据 Δ_{max} 与满量程输出 $U_{F.S.}$ 之比可求得重复性误差为：

$$\epsilon_z = \pm \frac{\Delta_{max}}{U_{F.S.}} \times 100\% \quad (7-5)$$

更合理的求法是根据标准偏差来计算，即：

$$\epsilon_z = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{U_{F.S.}} \times 100\% \quad (7-6)$$

误差完全服从正态分布， σ 前的系数取 2 时，置信概率为 95%，取 3 时，为 99.73%。标准偏差可根据贝塞尔公式来计算，即：

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (7-7)$$

8. 量程 (span) 与动态范围 (dynamic range) 量程是指测试装置最低和最高的工作界限, 动态范围是指能够正确测的的最大与最小输入的比值, 常以分贝 (dB) 表示之。

9. 稳定性 (STABILITY) 表示当所有工作条件保持不变时, 在规定时间内传感器输出保持不变的能力。

10. 可靠性 (RELIABILITY) 可靠性是一个重要指标。一般用两种方法表示:

(1) 可靠度 指传感器在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率。用 $R(t)$ 表示。

(2) 平均无故障时间 (MTBF) (MEAN TIME BETWEEN FAILURE)。

二、动态特性

动态特性可以从时域和频域两个方面采用瞬态响应和频率响应法来分析。传感器的动态特性分析和动态标定, 经常采用的输入信号为单位阶跃输入和正弦输入。

采用单位阶跃输入时, 传感性的动态特性常用上升时间 t_{rs} 、响应时间 t_{st} 、过冲量 σ 等参数来综合描述, 如图 7—4 所示。上升时间是指从终值的 $a\%$ 上升到 $b\%$ 所需要的时间, 通常取 $a\%$ 为 5% 或 10% , 取 $b\%$ 为 95% 或 90% 。响应时间 t_{st} 是指从输入量开始起作用到输出指示值进入稳定值允许误差范围内所需要的时间, 例如 $t_{st} = 5s (\pm 2\%)$ 。过冲量 σ 是指输出第一次超出稳定值而出现的最大偏差, 常用对最终稳定值的百分比来表示。

用正弦稳态响应来研究动态特性时, 常使用幅频特性和相频特性。频带宽度简称带宽是一个描述动态特性的重要指标, 带宽是指增益变化不超过某规定的 $\pm K$ 分贝时的频率范围, 例如某传感器的带度

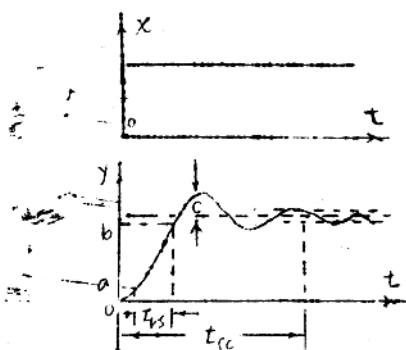


图 7—4 阶跃瞬态响应

$\Delta f = (80 \sim 1500) \text{ Hz } (\pm 3\text{dB})$ ，是指输出变化 $\leq 3 \text{ dB}$ 时，输入正弦信号频率从 80 Hz 变到 1500 Hz 。

§ 7—3 热敏传感器

固体热敏元件可分为利用电阻变化的，利用热电效应的，利用半导体特性的，利用热释电效应的等。热敏传感器自 50% 多是利用电阻变化的，约 17% 是利用热电效应的。

一、热电阻

纯金属有正的温度系数，温度每升高 1°C 电阻约增加 $(0.4 \sim 0.6)\%$ 。热电阻传感器的变换原理就是利用纯金属的电阻系数随温度而变化的效应。几种纯金属的比电阻与温度变化的关系曲线如图 7—5 所示。由图可见，铂的线性度最好，但仍为非线性。铜银次之，铁、镍较差。

铂丝的电阻值与温度之间的关系，在 $(0 \sim 660)^\circ\text{C}$ 范围内，

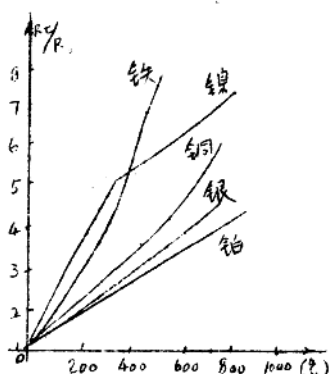


图 7—5 几种纯金属之比电阻与温度变化关系曲线

可用下式 (7—8) 表示

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (7-8)$$

式中 R_t ——当温度为 t °C 时的电阻值；

R_0 ——当温度为 0 °C 时的电阻值；

A 、 B ——为常数，

$$A = 3.940 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}, B = -5.8 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}^2$$

在 (0 ~ 190) °C 范围内，铂电阻与温度的关系为

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3]$$

式中 $C = -4 \times 10^{-12} / ^\circ\text{C}^3$

二、热敏电阻

热敏电阻是用半导体材料制作的。其工作原理与热电阻相同，但由于热敏电阻的温度系数比纯金属大 (10 ~ 100) 倍以上，所以

它的灵敏度很高，能检测出 10^{-6}°C 温度变化值，而且体积小，动态特性好，特别适用在 $(-100 \sim +300)^{\circ}\text{C}$ 之间测温，并广泛应用在自动控制和电子线路的温度补偿。

大部分半导体热敏电阻是由各种氧化物按一定比例混合经高温焙烧而成。常用的材料有： $\text{CuO}+\text{MnO}_2$ ； $\text{MgO}+\text{Tl}_2\text{O}_3$ ； $\text{Tl}_2\text{O}_3+\text{CuO}$ ； $\text{NiO}+\text{MnO}_2+\text{Co}_2\text{O}_3$ 等混合物。热敏电阻的形状多种多样，常见的有柱形、玻璃珠形和园片形，如图

7—6 所示。

半导体材料的温度系数有正、负之分，因此有负温度系数 (NTC) 和正温度系数热敏电阻 (PTC) 以及临界温度电阻 (CTR) 三种，其特性曲线如图 7—7 所示。NTC 和 PTC 都为指数曲线，CTR 有突变。

NTC 热敏电阻可用下式 (7—9) 表示

$$R_T = R_0 \cdot b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

(7—9)

式中 R_T —— 温度为 T 时的电阻值；
 R_0 —— 温度为 T_0 时的电阻值；

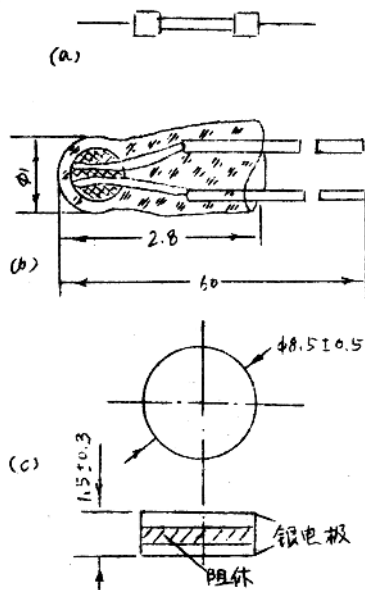


图 7—6 热敏电阻
 (a) 柱形 (b) 玻璃珠形 (c) 片形

b——与半导体物理性能有关的常数。

NTC型热敏电阻还可以测量流速和流量。

三、热电偶

两种不同导体(或半导体)A与B串接成一闭合回路,如图7—8所示,如果两结点1、2的温度不同,在回路中就有电流产生,这种由于温度不同而产生温差电势的现象称为热电效应(Thermoelectric effect),上述温差现象是1823年由塞贝克发现的,所以又称塞贝克电势。这两种不同导体的组合称为热电偶

(Thermocouple), 导体A、B

称为热电极。测温时,结点1置于被测的温度场中,称热端;结点2处在某一恒温下,称参考端(或冷端)。当1、2两端温度相同时,无温差,热电势为零。有温差时热电偶闭合回路中产生的总电势为

$$E_{AB} = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \ln \frac{N_A}{N_B} dt \quad (7-10)$$

式中 k ——波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/C}$;

e ——电子电荷, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

T 、 T_0 ——热端和冷端的绝对温度;

N_A 、 N_B ——导体A、B的电子密度。

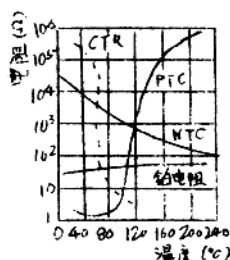


图7—7 热敏电阻特性曲线

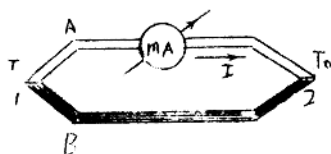


图7—8 热电效应示意图

热电偶的结构简单、精确度高、测量范围宽($-180 \sim +2800$) $^{\circ}\text{C}$ ，因此炉温测试和控温经常采用。常用的标准化热电偶有 LB—3、LL—2、EU—2、EA—2 等。

§ 7—4 辐射检测

辐射分热辐射和核辐射。

自然界中任何物体，当温度高于绝对零度(-273.15°C)时，都将有一部分能量以波动的方式向外辐射，辐射的波长范围很宽，但以波长为($0.8 \sim 4$) μm 为红外线和波长为($0.4 \sim 0.8$) μm 的可见光为最强，一般称这部分能量辐射为热辐射。辐射温度计多用于 800°C 以上的高温和可见光范围，图 7—9 表示其工作原理。

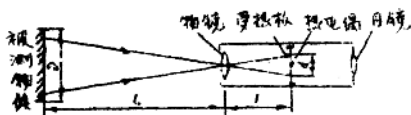


图 7—9 辐射温度计工作原理

红外探测器是将红外辐射能转换为电能的一种传感器，它有光子探测器和热探测器，前者是利用光敏性质，后者是利用热敏作用，图 7—10 所示就是一种热敏电阻探测器，红外辐射技术已经广泛用于

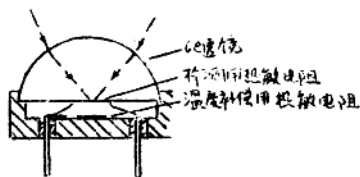


图 7—10 热敏电阻探测器

生产、科研、军事、医学、空间和遥感技术。

在现代测量技术中，广泛地应用各种核辐射特性来测量不同的物理参数。它的工作原理是基于被测物质对射线的吸收、散射规律或射线对被测物质的电离作用、穿透能力而工作的。一般在被测物的一侧安装探测器，可以实现对材料厚度、气体成分、物质密度、器材内伤等进行测量。

经常采用的辐射源有 α 、 β 、 γ 和 x 射线管。 α 射线是带正电荷的高速粒子流； β 射线是带负电荷的高速电子流； γ 射线不带电，是一种光子束，以光速运动； x 射线则是原子受激发而放出的一种电磁波。

由于核辐射测量是一种非接触式测量，其特性往往不受化学、物理性能的影响，所以它可以在高温、强光、剧毒、爆炸性、强腐蚀的、强电磁场等恶劣条件下工作， β 射线测厚仪， γ 射线探伤仪， x 射线衍射仪等都是典型的检测装置。由于核辐射线对人体有害，所以设计和应用时，必须注意安全，必须有可靠的防护措施和监测手段。现已应用的有比例计数器、气体放电计数器、闪烁计数器等。

§ 7—5 光敏传感器

使半导体内载流子数目增加的一种方法，就是用光照射它。这种因光照而使半导体电导率增加的现象，称光电效应。

应用光电转换元件检测时，就是先将其它物理量转换为光量，再通过光电元件的光电效应转换为电量。光电转换元件主要有光敏电阻、光电池、光敏管等。

光敏电阻又称光导管，其工作原理是基于半导体材料的内光电效应，这种现象的实质是由于在光量子的作用下，物质吸收了能量，使载流子密度或迁移率增加，从而使电导率增加，电阻值减小，光敏电

阻没有极性，是一个电阻器件，使用时可加直流偏压也可以加交流电压。图7—11表示它的工作原理。

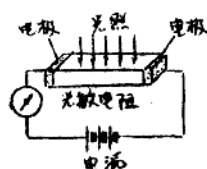


图7—11 光敏电阻（光导管）的工作原理图

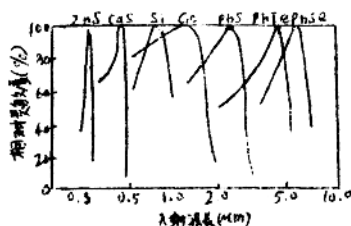


图7—12 光敏电阻材料的感光特性

光量子的能量与光的波长有关，其大小等于频率乘以常数 h ， $h = 6.624 \times 10^{-34}$ 焦秒，称为普朗克常数。因此光敏电阻阻值的变化与光的波长有关，不同材料的光谱特性也不同，如图7—12所示。一般应根据入射光波长选择材料。硫化镉 (CdS)、硒化镉 ($CdSe$) 等适用于可见光范围；氯化锌 (ZnO)、硫化锌 (ZnS) 等适用于紫外线域；硫化铅 (PbS)、硒化铅 ($PbSe$)、碲化铅 ($PbTe$) 等适用于红外线域，而锑化铟 ($InSb$) 则是红外光探测器件的好材料。

半导体光电池利用光生伏特效应可以直接将光能转换成电能，当光照射时，可直接输出电势。图7—13表示其工作原理，它有一个大面积的PN结。当光照射时，光生载流子，在PN结电场作用下（电场的方向由N区指向P区），产生漂移运动，结果，在N区就聚积了负电荷，在P区就聚积了正电荷，二者之间产生了电位差。若用导线联结即可构成光电池，电流方向由P区经外电路流向N区。一般常用的光电池有硒、硅、化镉、硫化镉的PN结。其中广泛使用的是硅

光电池，其光谱范围为 $(0.4 \sim 1.1) \mu\text{m}$ ，灵敏度为 $(6 \sim 8) \text{ nAmm}^{-2}/\text{x}^{-1}$ ，响应时间为数 μs 至数十 μs 。适用于可见光的转换，常用作太阳电池。

具有反向偏压的PN结便构成了光敏二极管，如图7—14所示。光敏三极管与光敏二极管很类似，不过它具有二个PN结。图7—15表示其结构原理。当光照射在c—b结上时，就会在结附近产生电子空穴对，形成光电流，输入到共发射极三极管的基极，使电流放大 $(1+\beta)$ 倍，它与普通三极管不同的是基极往往不接引线。

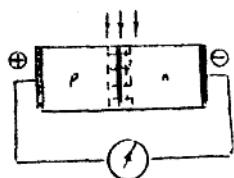


图7—13 光电池工作原理

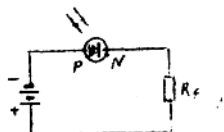


图7—14 光敏二极管

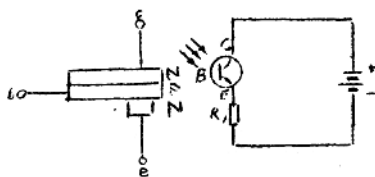


图7—15 光敏三极管

光电元件的灵敏度高、体积小、重量轻、性能稳定、价格便宜，因此民用工业和国防科学中得到了广泛的应用。

日本夏普公司 1979 年研制的色敏传感器如图 7—16 所示。在一块半导体表面附近和较深处各形成一个光敏二极管 PD_1 和 PD_2 。由于 PD_1 在表面形成 PN 结，故对短波灵敏度高，而 PD_2 在硅片内部形成 PN 结，故对较长波灵敏度高。当两极管反向连接时，它的输出电流之比和光波长（即相应于颜色信号）的关系如图 7—17 所示。

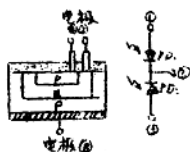


图 7—16 色敏传感器

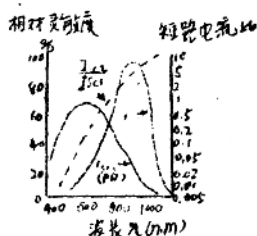


图 7—17 输出特性曲线

此传感器可判别色纸的颜色，调节彩色胶片的颜色，平衡调整电视机的颜色。在可见光区，目前已能分别 12 种颜色，这在印刷印染、燃烧监视、火灾报警等方面大有作为。

又例如日本浜松电视公司研制并已商品化的光位置检测器 (PSD)。其原理如图 7—18 所示。它的表面是电阻层，同时在 PN 结处形成光电二极管。当光射到图 7—18 所示位置时，产生光电流 I_a 、 I_b ，若电阻层均匀制造，则 $I_a/I_b = y/x = R_2/R_1$ ，所以检测出 I_a 、 I_b 就可以知道光的位置。对于二维位置检测只要在四边各设一个电极就可以检测（图 7—18b），传感器具有小型简单的优点，商品化尺寸为 $13 \times 13 \text{ mm}^2$ ，这可用在 CCD 型图像传感器作扫描用。

自 1970 年美国发表 CCD 器件以来，光图像传感器发展很快，