

序

人们周围有许许多多以电气产品为主体的机器和用具，如果仔细观看这些器具，就会不由自主地产生这样的念头：“让机器做我们人所要做的事情吧！”

现在让我们先看看照相机。新式的照相机，只要对准景物一按快门就照好了。早先，人们是用目测距离、用眼睛判断亮度来调节照相机的距离和光圈的。现在这些都由机器自动完成了。这就意味着机器执行了相当于人眼的“观看——视觉”功能，这样的机器通常称为“传感器”。照相机不过是一个简单的例子而已，其他还有电饭锅、洗衣机、现金出纳机、自动门、汽车违章超速监测仪等等，数不胜数。这些都是借助传感器的媒介作用实现自动化的。

如上所述，用电子等工程器件重现人的五种感觉（视、听、嗅、触、味）的是传感器。换句话说，五种感觉（指感官本身时最好用五官这个词，本书决定用“五种感觉”这个词）的工程模拟物就是传感器。

本书^①共分三章：第一章叙述工程模拟器件是根据什么现象、原理制造出来的，这些模拟器件与原物相比，又逼真到什么程度；第二章叙述原物（生体）^②具有怎样优异的传感器，比较一下原物和模拟器件，就会感到经过几十亿年，经历了 10^{40} 次试行错误后（据说在 10^{40} 次当中，成功的次数只

● 在本书翻译过程中，将书名改译为《信息社会的传感器》。

● 本书所说的生体主要是指有生命的入体和动物体。——译者

有 10^{15} 次)才做出来的生体的传感器和不到100年就制造出来的工程模拟器件之间仍然有着根本性的重大差异;第三章用各种实例说明我们周围使用的是什么样的传感器。

编写以上三章时考虑到读者不一定要从头看起,可以从第二章,也可以从第三章看起,所以在各章中内容有某些重复,望读者见谅。

目 录

第一章 工程传感器	1
一、什么是传感器	1
二、光（视觉）传感器	3
三、温度（触觉）传感器	9
四、磁（触觉）传感器	14
五、气体、湿度（嗅觉）传感器	16
六、压力（触觉、听觉）传感器	19
七、味（味觉）传感器	20
八、向极限挑战的传感器	21
第二章 生体的传感器	26
人体的机理	26
一、视觉的机理	26
二、听觉的机理	31
三、触觉的机理	33
四、味觉的机理	34
五、嗅觉的机理	38
生物的传感器	41
六、狗的传感器	41
七、蝙蝠的传感器	44
八、鸟的传感器	48
九、蛇的传感器	51
十、蜂的传感器	55
十一、海豚的传感器	59
十二、生物化学传感器	63

第三章 我们周围的传感器	68
一、家用电器中的传感器	68
二、钟表用传感器	89
三、照相机用传感器	94
四、测试仪器用的传感器	98
五、汽车用传感器	110
六、医用传感器	125
七、检测煤气的传感器	136
八、检测公害的传感器	139
九、火警传感器	145
十、防盗装置的传感器	152
十一、预测火山、地震活动的传感器	155
十二、鱼群探测器的传感器	161
十三、“向日葵”气象卫星的传感器	165
十四、人造卫星、航天飞机的传感器	174
参考文献	185

第一章 工程传感器

电子计算机是人脑的模拟物，而对应的工程传感器可以说是人和动物五种感觉（视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉）的模拟物。

人脑的模拟物（电子计算机）除不具有人独有的思维机能外，其他方面都已优于人脑。那么，五种感觉的模拟物（工程传感器）将来会发展成什么样子，而人们又会用什么样的方法来制造模拟物呢？在回答这些问题之前，让我们先来看看模拟物——工程传感器的发展状况。



一、什么是传感器

最近，传感器这个术语在日本相当流行。在电烹调机、空调机等家用电器中，用传感器作电子控制已成了一句很时髦的语言。可是，传感器究竟是什么样的器件呢？

如果把传感器看成是人的五种感觉的对应器件，就很容易理解什么是传感器了。人通过眼、耳、鼻、舌、皮肤五种感官感受外界的刺激，由这五种感官感受到的信息经过神经细胞传到大脑，在大脑内才辨别出物体的形状、声音、气味和味道。如果用传感器来置换人的五种感官，则如图1-1所示，代替人眼的是光传感器，与耳朵对应的是声响传感器和

磁传感器，温度传感器和压力传感器则与触觉对应。由这些传感器获得的信息，经过某种形式的运算、处理，或者变换成我们容易看懂的工程量，或者用于自动控制。总之，传感器就是一种“与人的视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉对应，既能代替人定量地测出测试对象的物理量，又能检测出人的五种感官察觉不出来的现象（物理量）的装置”。

下面，我们来看一看一般家庭使用什么样的传感器。电炉、空调机、电冰箱都用温度传感器；磁带机用磁传感器；火警用烟传感器；

带远控装置的电视机用红外传感器。无论哪一种电器产品，必带有一种以上的传感器。

除此以外，还有玻璃温度计和体重计。但是，它们能称为传感器吗？在电器中使用的传感器和玻璃温度计的根本差别仅仅在于：前者产生电信号作为输出；后者把测量的量变换成诉之于视觉，一看就清楚的工程量。当使用传感器检出信息，并用电子计算机自动控制测试对象的时候，传感器的输出必须始终是电量。目前，传感器技术之所以迅速发展是因为电子计算机之类的信息处理机的进步，人们对这个领域的关心最多。通常，传感器就是“能对应指定的被测量提供有效电量输出的装置”。这指的是狭义的传感器。广义地讲，玻璃温度计、体重计等也是传感器。

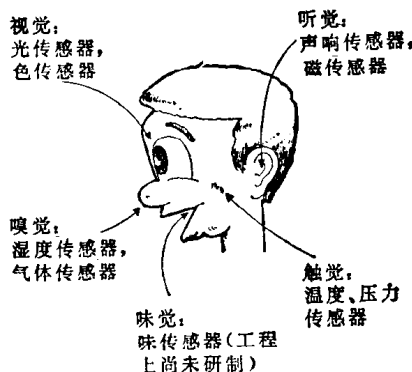


图1-1 人的五种感官和传感器

过去一提传感器，概念上只指把被测量转换成电量的检出器。最近，信号处理电路和传感器做在同一块芯片内的趋势越来越明显。具体例子将在后面介绍，这种传感器称为“集成传感器”。

将太阳能直接转换成电能的器件称为“太阳电池”。其基本结构与下一节介绍的光电二极管(光传感器)相似。太阳电池虽然应用了光电变换原理，但不能称为传感器，原因是它只作单纯的能量变换。将电能转换成超声能等以能量变换为目的的器件通称为“换能器”，以与传感器相区别(图1-2)。

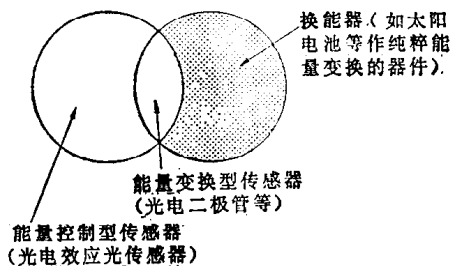


图1-2 传感器和换能器



二、光(视觉)传感器

人眼确实是经过巧妙设计的光传感器。它可以看见波长从0.37微米到0.78微米的光(可见光)，而且如果是这一波长范围内的光，还能立刻辨别它的颜色。另外，它的分辨力很高，这是因为视网膜上排列的感光细胞的数量多达近亿个。标准电视机的分辨力为 500×400 线左右，这样一比就会知道人眼的分辨力要高好几个数量级。况且，人眼能看到立体图象。

另一方面，工程传感器可以检出波长短的，如X射线、

γ 射线（波长 10^{-10} 米）到波长几百微米（ 10^{-4} 米）的光线。只是光传感器仅能测出光的强弱，还不能辨别颜色和图象。然而，对光的响应速度，光传感器快的可达 10^{-8} 秒左右，人眼的响应速度（ $\sim 10^{-1}$ 秒）是不能与之比拟的。

光传感器大多用半导体材料制成。图1-3所示的是波长 λ 的光分别照射绝缘体、半导体和金属的情况。可见光范围

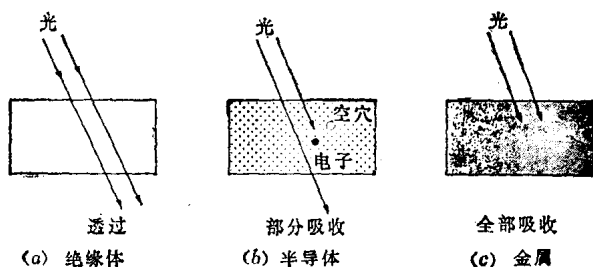


图1-3 物质和光的相互作用

的光大部分都可透过绝缘体材料，所以光和绝缘体没有相互作用。这是因为玻璃透明可见。对于半导体材料，当其被光照射时，一部分光反射了，另一部分光或被吸收，或透过。根据爱因斯坦理论，波长 λ 的光是具有 $h\nu$ （ h ：普朗特常数， ν ：频率 $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ， c ：光的速度）能量的光子流，光的能量 $h\nu$ 越大，越容易被吸收。半导体材料的物性常数通常称为“禁带宽度”（ E_g ），能量比禁带宽度 E_g 小的光可以透过而不被吸收。一旦光被吸收，就产生带正、负电荷的电子和空穴，利用这些带电粒子产生的光生伏特效应和光电效应，就可以制造出检测光的传感器。金属的禁带宽度可以说等于零，几乎所有的光都被吸收，所以在金属中观测不到光生伏特效应和光电效应。

光电效应式光传感器的基本原理如图1-4所示。无光照状态（暗状态）时，传感器的电阻大；有光照，则产生许多电子和空穴。材料的电阻率与电子、空穴的数量成反比。因此，

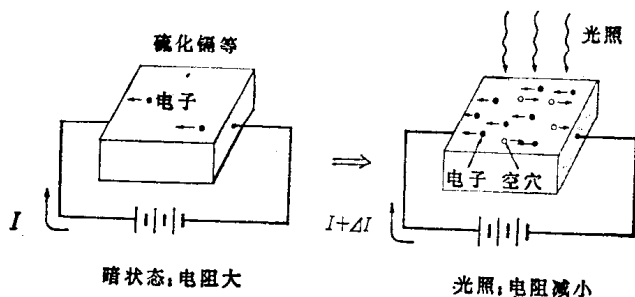


图1-4 光电效应式光传感器的基本原理

有光照，电阻就会下降，就有大电流流过。因光照而产生的电子-空穴对随时间的迁移而消失（此时间称为“寿命时间”）。为了提高对光照的灵敏度，需要设法增长寿命时间，但是增长了寿命时间，对光照的响应速度就慢了下来。常用的光电材料硫化镉和硒化镉制成的光电效应式光传感器，其响应速度慢到约 10^{-3} 秒。这些光传感器已被用作路灯的自动开关。

光生伏特效应式光传感器的原理如图1-5所示。这种光传

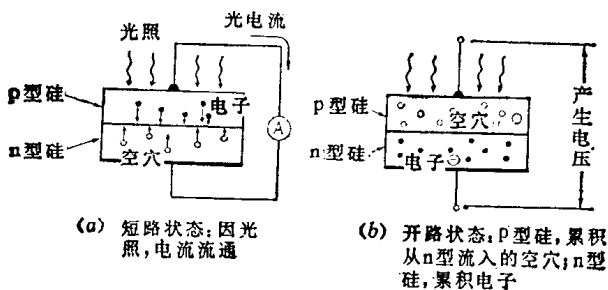


图1-5 光电二极管的基本原理

传感器的基本结构是由半导体的pn结（叫做“二极管”）组成的。P型半导体和n型半导体分别含有大量的空穴和电子，pn结一经光照就大量产生电子-空穴对，即P型半导体产生的电子向n型半导体流动，n型半导体产生的空穴则向P型半导体流动，所以，光电流从光传感器的P型端子向n型端子流动。预先将两个端子开路就会产生P侧为正、n侧为负的电压（开路电压）。利用光生伏特效应做成的pn结光传感器称为“光电二极管”。一般的硅光电二极管，在 10^{-2} 至10万勒克斯这样宽的范围内，光强与光电流是成比例的。

将光电二极管内流动的电流放大100倍以至1000倍而产生光电流的光传感器称为“光电三极管”（光电晶体管）。晶体管由n和P交错叠成三层而成，或为硅npn，或为pnp。光电三极管由于灵敏度高，应用范围很广。例如，用来控制公共汽车和电梯（升降机）的自动门，以及用于日本后乐园球场的光电记分牌等等。

象光通信那样，为了以非常快的速度检出受到调制的光分量，要使用雪崩光电二极管（APD）和PIN光电二极管。雪崩光电二极管就是利用了雪崩现象制成的，如图1-6所示。因光照产生的一个电子一旦到达pn结强电场区域，就会象雪崩那样，电子数量骤增，与此同时还以极高的速度迁移。所以，光灵敏度很高，而且可获得高速响应。

光电效应式和光生伏特效应式光传感器的波长灵敏度区域（可检出的波长范围）是由禁带宽度决定的。通常使用的硅可检出波长为1.1微米到0.4微米的光波（可见光的波长为0.37~0.78微米）。要检出除此以外波长的光波就要用除硅以外的材料。它们的典型例子如图1-7所示。

将许多光传感器按直线排列在一起的称为“一维光传感

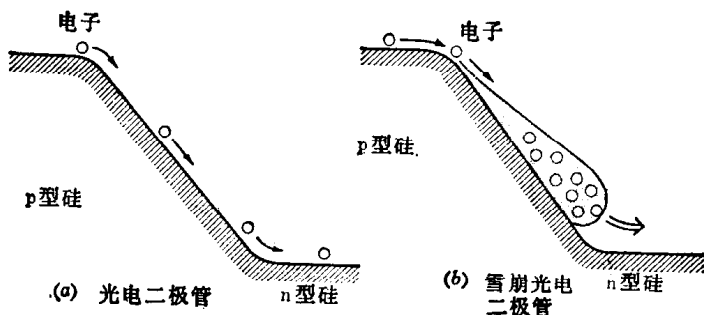


图1-6 在光电二极管中，电子从 p 型硅迁移到 n 型硅时，数量不变。在雪崩光电二极管中，电子的数量象雪崩那样骤增

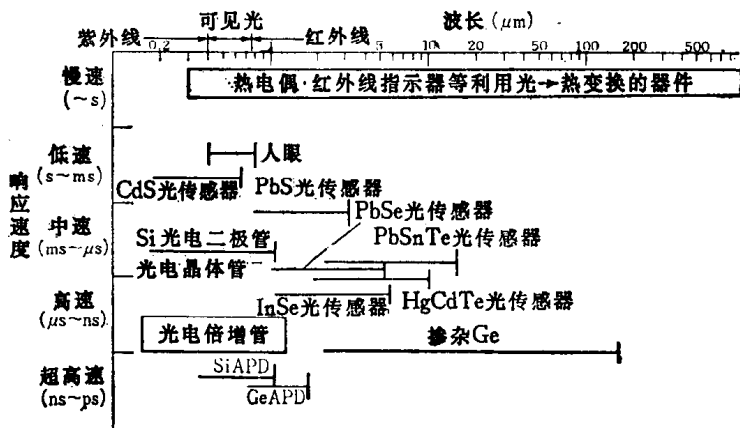


图1-7 各种不同材料的光传感器所具有的波长灵敏度区域和响应速度

器”，排列成矩阵形状的称为“二维光传感器”(图1-8)。单个光传感器只能检测出光的强弱，但是用许多光传感器排成直线或矩阵形式就能测出入射光的空间强度分布。例如，在二维光传感器的前面设置光学透镜系统就构成了电视摄影机。图1-9是用电视摄影机拍摄的图象。这里使用了光传感器阵

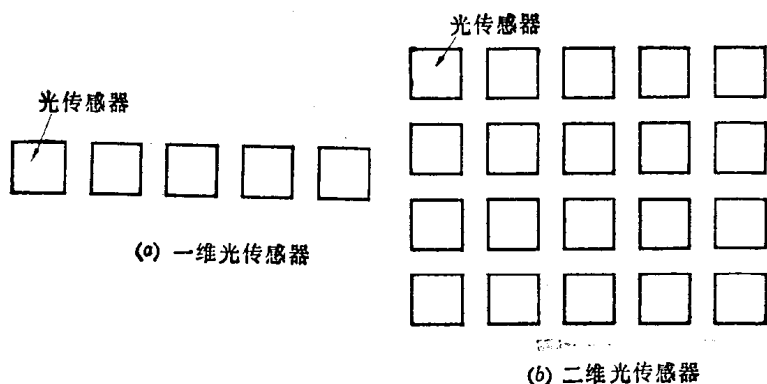


图1-8 多维光传感器的组成



图1-9 称为电荷耦合器件 (CCD) 的二维传感器阵列 (芯片尺寸1.03厘米 $\times$ 1.13厘米, 象素数506 $\times$ 404, 单位象素尺寸14.0微米 $\times$ 24.0微米) 照片 (左) 和摄影实例 (右)

列, 即在1.03厘米 $\times$ 1.13厘米的硅片上集成了506 $\times$ 404, 即20万个左右的光传感器。此种电视摄影机已装载在飞机上, 用来监视飞机的起飞、着陆。

用二维光传感器可以象电视摄影机那样拍摄出二维图象。然而, 我们的眼睛却可以摄取三维图象 (立体图象)。难道用光传感器就不能在拍摄我们所要物体形状的同时测出至

图象的距离吗？这个问题可以象我们的眼睛那样在两个位置上布置光传感器来解决。具体实例将在第三章（三、照相机用传感器）中叙述。

人对于波长为 $0.37\sim 0.78$ 微米的光波，在辨别光的亮暗的同时还能辨别出颜色来。这是因为视网膜有感受三原色细胞的缘故。然而，即使是工程上的光传感器，如果能巧妙地组合红、蓝、绿三原色的滤色片的话，也能测出入射光的颜色（图1-10）。另外，也还有不使用三原色滤色片而通过运算处理来自两个光电二极管的信号辨别出颜色的传感器。这种传感器称为“彩色传感器”。

上述的光传感器都称为“量子变换型传感器”，是利用光的粒子特性制成的器件。除此之外，还有将光能变换成热能，借温升测出入射光能量之类的传感器。例如用后述的热电偶、热敏电阻、热晶体测量因光能照射产生温升的传感器。这些传感器主要作红外线传感器使用。

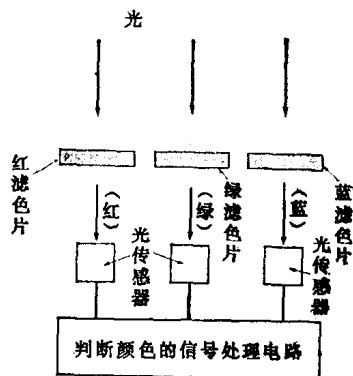


图1-10 使用彩色滤色片的彩色传感器的基本原理



三、温度（触觉）传感器

我们抚摸物体，大体能估计出温度有多少度。非常热以

至白热化的物体是不能用手去摸的，但是看看发热体的颜色就大体知道是多少度。在真空条件下加热石墨，到 80°C 左右时，它呈现红色，一超过 1000°C 就呈现灰白色。总之，测量温度既有用手摸就可弄清几度的情况，也有靠眼睛估猜的情况（图1-11）。

工程传感器也同样有两种类型：将传感器直接插入欲测气体中，或直接接触欲测物体来测量温度的称为“接触式温度传感器”；远离欲测物体，以光的形式检测出温度的称为“非接触式温度传感器”。非接触式温度传感器也是检测红外光波的光传感器。

接触式温度传感器有利用塞贝克效应的热电偶、电阻温度计和热敏电阻。其中，热敏电阻将随着家用电器电子化的发展得到越来越多的应用。国计民生常用的电炉、电烹调机、电烤箱、电剪、电褥、电驱蚊器等都广泛使用热敏电阻。

所谓热敏电阻就是“电阻值灵敏地随温度变化的电阻器”。电阻器有随温度上升而电阻值上升或下降的两种。单说热敏电阻，通常是指随温度上升而电阻值下降的热敏电阻。这种热敏电阻还特别被称为“具有负温系数（NTC）的热敏电阻”。出现负温系数这一术语是因为最近在日本出现了具



图1-11 接触式和非接触式温度传感器

有负温度系数的热敏电阻和具有正温度系数（PTC）的热敏电阻。一般的热敏电阻不大使用NTC这样的术语。

这里有个问题，为什么电阻的温度系数有正、有负？电阻的温度系数为正，表明温度越高，电阻器中的电流越难流动。例如，在自由运动的电子数多的金属中，温度一增高，构成金属的原子的振动就激烈起来，为阻止电子运动，电阻就要增大。但是，对于金属来说，电阻值的变化量较小，所以不用热敏电阻这一术语。利用铂等电阻温度特性的称为“电阻温度计”，虽然只是灵敏度低一些，但温度-输出的线性很好。所以工业部门常使用这种电阻温度计。

另一方面，半导体内的电子（空穴）数量比金属要少几个量级。随着温度越来越高，自由运动的电子（空穴）数量也越来越多，于是电流容易流动。这就是负温度系数热敏电阻的原理。

正温度系数热敏电阻在室温到 100°C 的温度范围内表现出和普通半导体相同的负温度系数特性。但是温度更高的话，电阻值就突然变化，差几个量级

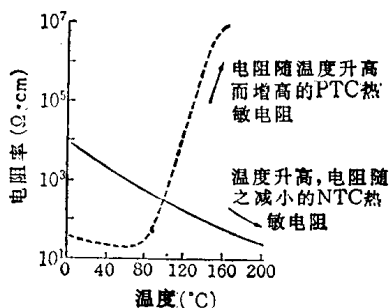


图1-12 热敏电阻的温度特性

（图1-12）。正温度系数是因为热敏电阻用强电介质的多晶体制成，且在居里点附近时结晶界面上的电子流动方向突然改变而引起的现象。图1-13是正温度系数、负温度系数特性的比喻图。

热电偶的结构很简单，只要将两种不同的细金属丝的端部连接起来就成为热电偶。如图1-14所示，金属丝两端只要

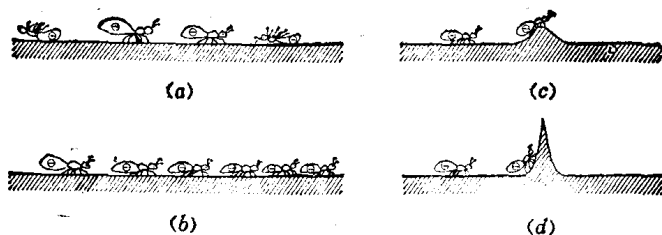


图1-13 比喻让蚂蚁搬运电子的负温系数、正温系数热敏电阻的原理

(a) 许多蚂蚁在低温时因寒冷而不能动弹；(b) 高温时蚂蚁精力充沛地搬运电子 (NTC 热敏电阻)；(c) 低温时因山低，蚂蚁能自由行动；(d) 过居里点，山陡然增高，蚂蚁前进困难 (PTC 热敏电阻)。

有温差，两端之间就会产生输出电压(塞贝克效应)。在 1000°C 的高温时用铂(铂-铑)， 1000°C 以下时用铬铝和康铜合金。

用晶体管和二极管搭接电子线路时，无论谁都要费心思的是外温引起的电子元件的特性变化。电子线路一般都希望用没有温度变化的电子元件搭成。本来，完全消除晶体管和二极管的温度特性是不可能的。然而，利用晶体管特性上的温度相依性却反而可以

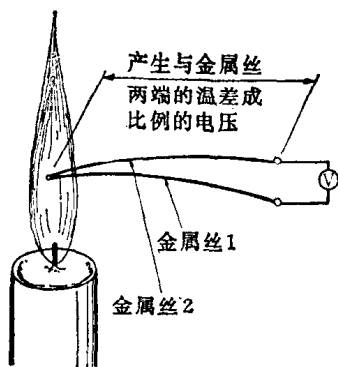


图1-14 热电偶温度传感器

做出新型的温度传感器。另外，用晶体管的话，由于基材是硅，可以在同一芯片上制作温度受感部和使温度-输出特性成线性的信号处理电路、放大电路。这种类型的温度传感器称为“集成温度传感器”，已用于室温状态的温度控制。

非接触式温度传感器主要利用物体发出的光(辐射光)。

世上万物都对应其自身的温度发出光波。光的强度和波长的分布是由物体的温度决定的，温度越高，发出波长越短，而发出的光越强（图1-15）。从我们人体也发出符合体温的红外线，只是因为眼睛看不见而不注意罢了。我们知道，物体辐射出来的全部能量与绝对温度的四次方成比例（斯蒂芬·波尔兹曼定律），测出辐射光的强度就可以知道物体的温度。

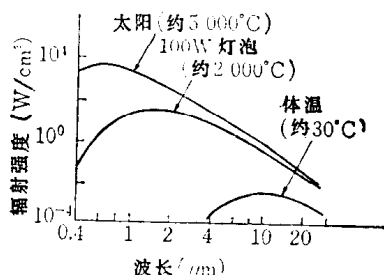


图1-15 物体温度和辐射能的分布

非接触式温度传感器按检测辐射光的方法可分成半导体式温度传感器和热电式温度传感器两种。

半导体式非接触温度传感器有如前述的红外线传感器。人体的温度分布测量和气象卫星对地面的温度分布测量，主要利用波长为 $5 \sim 10$ 微米的红外线，在此领域内可以使用 HgCdTe 、 PbSnTe 、 InSb 材料。 HgCdTe 光传感器可以非接触测量 $-10 \sim 50^\circ\text{C}$ 的温度， InSb 则可以非接触测量 $-30 \sim 2800^\circ\text{C}$ 的温度。将非接触式温度传感器和光学系统组合在一起，就组成了可以测量温度分布的红外摄影机。用红外摄影机摄取的温度分布图称为“热象图”，广泛用于工业、医疗、气象等部门。图1-16是医师使用的例子，用红外摄影机可局部地检测出身体体温下降的部分，据此可以非接触地瞬时发现乳腺癌。

半导体式红外温度计为消除热噪声必须把受感部冷却到 -196°C （液氮的温度），这是很不方便的。然而，用热电效应原理制成的温度计却具有能在室温下使用的特点。热电晶