

第二章

温度检测与诊断技术



裴宏杰

江苏大学精密工程研究所



内容提要

- ◆ §1 测温方法
- ◆ §2 接触式测温
- ◆ §3 非接触式测温
- ◆ §4 温度诊断应用实例

1、测温方法



★ **温度是表征物体内部冷热状态的物理量。**

宏观上是建立在热平衡基础上的----两个各自处于热平衡状态的温度不同的物体相接触时，经过热交换达到新的平衡状态后温度相同；微观上是物体分子运动平均动能大小的标志。

★ **温度测量原理：**

利用物体的某一物理性质 (诸如尺寸、密度、硬度、弹性模量、辐射强度等，物理性质随温度变化的特性)，将其作成温度敏感元件，通过温度敏感元件与被测对象的热交换，测量相关的物理量，即可间接的获取被测对象的温度值。

★温度计的分类：

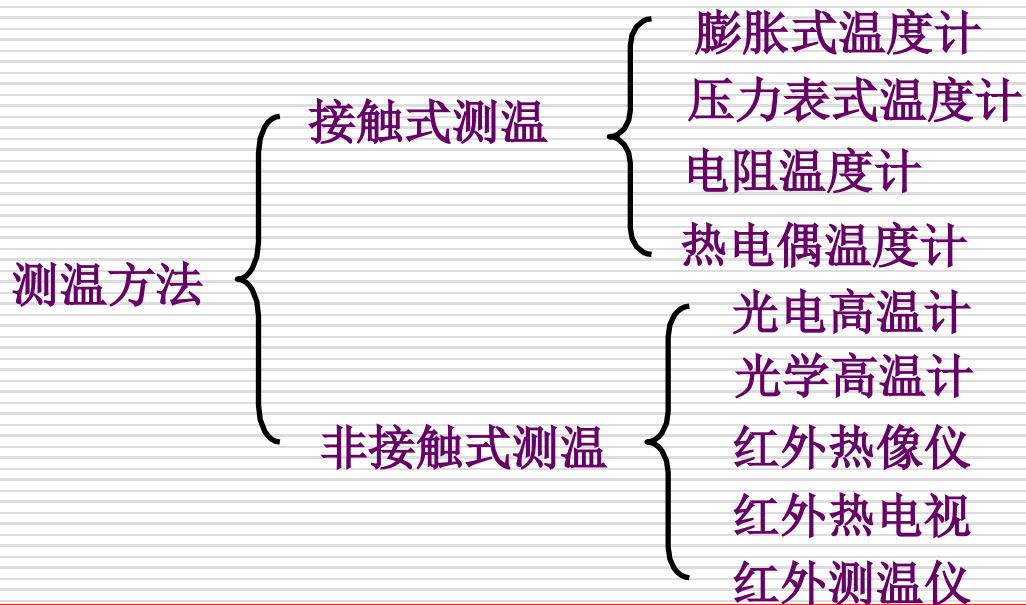
●按物理性质分：

- ❖物质的热膨胀与温度的关系—固体膨胀温度计（双金属）、液体膨胀温度计（玻璃水银）、气体膨胀温度计（压力表式）
- ❖利用金属或半导体阻值与温度的关系—热电阻（铂、铜等）
- ❖利用热电效应—热电偶（两种不同金属导体在两个端点上互相接触，当其两个接点温度不同时，回路中会产生热电势）
- ❖利用物体的辐射能与温度的关系—辐射温度计（辐射能与温度存在一定的关系，如光电高温计）

●按温度计感温部分是否与被测物体相接触分：

➤**接触式测温**：温度敏感元件与被测对象接触，依靠传热和对流进行热交换，当传热量为零时，二者温度相等。

➤**非接触式测温**：温度敏感元件不与被测对象接触，而是通过热辐射进行热交换，或者是温度敏感元件接收被测对象的部分热辐射能，由热辐射能的大小推出被测对象的温度。



测温仪表的大体测温范围

测温方式	类别	原 理	典型仪表	测温范围/℃
接触式测温	膨胀类	利用液体气体的热膨胀及物质的蒸汽压变化	玻璃液体温度计	-100~600
			压力式温度计	-100~500
		利用两种金属的热膨胀差	双金属温度计	-80~600
	热电类	利用热电效应	热电偶	-200~1800
	电阻类	固体材料的电阻随温度而变化	铂热电阻	-260~850
			铜热电阻	-50~150
			热敏电阻	-50~300
	其他电学类	半导体器件的温度效应	集成温度传感器	-50~150
		晶体的固有频率随温度而变化	石英晶体温度计	-50~120
	非接触式测温	光纤类	利用光纤的温度特性或作为传光介质	光纤温度传感器
光纤辐射温度计				200~4000
辐射类		利用普朗克定律	光电高温计	800~3200
			辐射传感器	400~2000
	比色温度计		500~3200	

➤ 接触式与非接触式测温特点比较



方 式	接 触 式	非 接 触 式
测量条件	感温元件要与被测对象良好接触；感温元件的加入几乎不改变对象的温度；被测温度不超过感温元件能承受的上限温度；被测对象不对感温元件产生腐蚀	需准确知道被测对象表面发射率；被测对象的辐射能充分照射到检测元件上
测量范围	特别适合1200℃以下、热容大、无腐蚀性对象的连续在线测温，对高于1300℃以上的温度测量较困难	原理上测量范围可以从超低温到极高温，但1000℃以下，测量误差大，能测运动物体和热容小的物体温度
精 度	工业用表通常为1.0、0.5、0.2及0.1级，实验室用表可达0.01级	通常为1.0、1.5、2.5级
响应速度	慢，通常为几十秒到几分钟	快，通常为2~3秒钟
其它特点	整个测温系统结构简单、体积小、可靠、维护方便、价格低廉，仪表读数直接反映被测物体实际温度；可方便地组成多路集中测量与控制系统	整个测温系统结构复杂、体积大、调整麻烦、价格昂贵；仪表读数通常只反映被测物体表现温度(需进一步转换)；不易组成测温、控温一体化的温度控制装置

2、接触式测温

- **热电偶**：应用最广泛的，最普遍的测温器件。
- **热电阻**：也较广泛使用，常用的有铂、铜
- **热膨胀式**：物体受热膨胀，如水银温度计
- **集成温度传感器**：半导体器件的温度特性，基极-发射极之间的正向压降随温度的增加而减少。

2.1 热电偶(thermocouple)测温

特点：应用广泛；灵敏度好；精度高；易保证单值函数关系；稳定性、复现性好；响应时间较快、材料易得到；互换性好，价格较低；测温范围宽（ $-269^{\circ}\text{C} \sim 2800^{\circ}\text{C}$ ）。

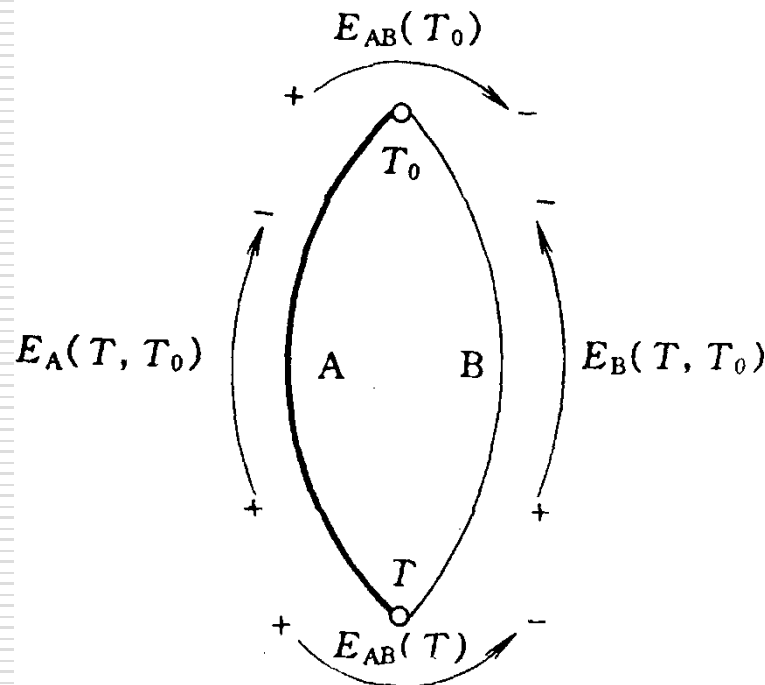
1) 测温原理

- ★ 热电效应thermoelectricity effect（或塞贝克效应）：将两种不同的导体或半导体连成闭合回路，当两个接点处的温度不同时，回路中将产生热电势的现象。
- ★ 闭合回路的热电势由两种电势组成：温差电势（同一导体）和接触电势（两种不同导体）。
- ★ 在闭合回路中，电子密度高的导体称正电极，电子密度低的导体称为负电极。

2.1 热电偶(thermocouple)测温

- ★ 两种丝状的不同导体（或）半导体组成的闭合回路称为热电偶。导体A或B称为热电极。两个接点中，置于温度为T的被测对象中的称为测量端（工作端或热端），温度为参考温度 T_0 的接点称为参比端或参考端，也叫自由端或冷端。

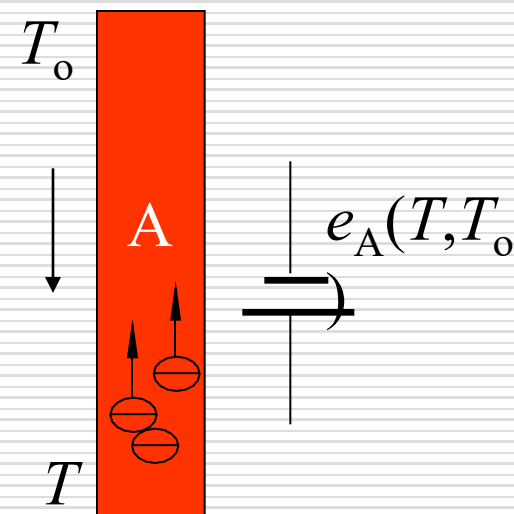
- ★ 在热电偶回路中接一毫伏表，测量发现，热电势与热电极的材料和两端的温差有关：
热电势=接触电势+温差电势



2.1 热电偶(thermocouple)测温

- 温差电势（汤姆逊电势）：
同一导体两端因温度不同而产生的电势。

温差电势： $E_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \delta_A dT$, δ_A — 温差



温差电势原理图

σ_A ——汤姆逊系数，表示导体A两端的温度差为1°C时所产生的温差电动势，例如在0°C时，铜的 $\sigma = 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

2.1 热电偶(thermocouple)测温

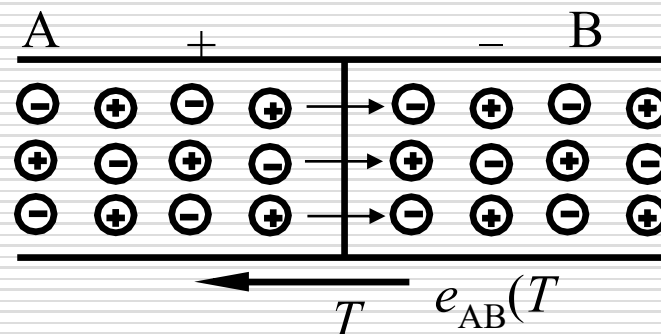
●接触电势(波尔电势)：指**两种不同的导体**相接触时，因**各自的电子密度不同**而产生电子扩散，当达到动态平衡后所形成的电势。接触电势与导体的性质和接触点的温度成正比。

$$\text{接触电势} : E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

k - 波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$)

e - 电子电荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

N_A, N_B - 金属 A, B 的自由电子密度

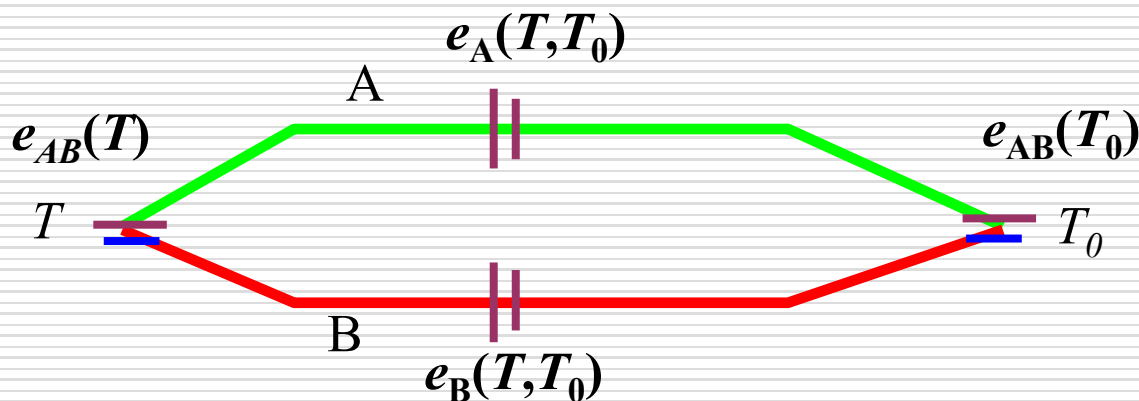


接触电势原理图

2.1 热电偶(thermocouple)测温



- 热电偶回路中总的热电势为：



总 结

- ①热电偶产生热电势的条件是：两种不同导体的材料构成回路，两端接点处的温度不同。
- ②热电势大小只与热电极材料及两端温度有关，与热偶丝（电极）的粗细和长短无关。
- ③热电极材料确定后，热电势的大小只与温度有关。只能用实验方法得到分度表。
- ④热电偶的接触电势远大于温差电势，故热电势的极性仅取决于接触电势。

K型热电偶分度表(溫度單位: °C 電壓單位: mV)參考溫度點: 0°C



溫度	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70
-200	-5.8914	-6.0346	-6.1584	-6.2618	-6.3438	-6.4036	-6.4411	-6.4577
-100	-3.5536	-3.8523	-4.1382	-4.4106	-4.669	-4.9127	-5.1412	-5.354
0	0	-0.3919	-0.7775	-1.1561	-1.5269	-1.8894	-2.2428	-2.5866
溫度	0	10	20	30	40	50	60	70
0	0	0.3969	0.7981	1.2033	1.6118	2.0231	2.4365	2.8512
100	4.0962	4.5091	4.9199	5.3284	5.7345	6.1383	6.5402	6.9406
200	8.1385	8.5386	8.9399	9.3427	9.7472	10.1534	10.5613	10.9709
300	12.2086	12.6236	13.0396	13.4566	13.8745	14.2931	14.7126	15.1327
400	16.3971	16.8198	17.2431	17.6669	18.0911	18.5158	18.9409	19.3663
500	20.6443	21.0706	21.4971	21.9236	22.35	22.7764	23.2027	23.6288
600	24.9055	25.3303	25.7547	26.1786	26.602	27.0249	27.4471	27.8686
700	29.129	29.5476	29.9653	30.3822	30.7983	31.2135	31.6277	32.041

热电偶的应用定则



(1) 均质导体定则：同种均质导体（或半导体）组成的闭合回路，不论导体的截面和长度以及温度分布如何都不能产生热电势。

（说明：一种均质材料不能构成热电偶；）

思考题：不同种材料是否需要较好的材料的均匀性？

（不同种材料组成的热电偶均匀性要好，否则热电极的温度分布会影响热电势值，越不均匀影响越大。该定则可用于检查电极材料的均匀性-两极用同一种材料）

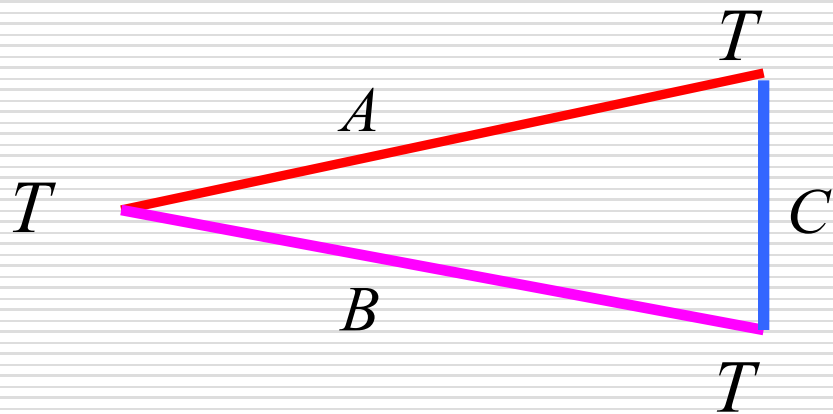
(2) 中间导体定律



一个由几种不同导体材料连接成的闭合回路，只要它们彼此连接的接点温度相同，则此回路各接点产生的热电势的代数和为零。

如图，由A、B、C三种材料组成的闭合回路，则

$$E_{\text{总}} = E_{AB}(T) + E_{BC}(T) + E_{CA}(T) = 0$$



三种不同导体组成的热电偶回路

两点结论：

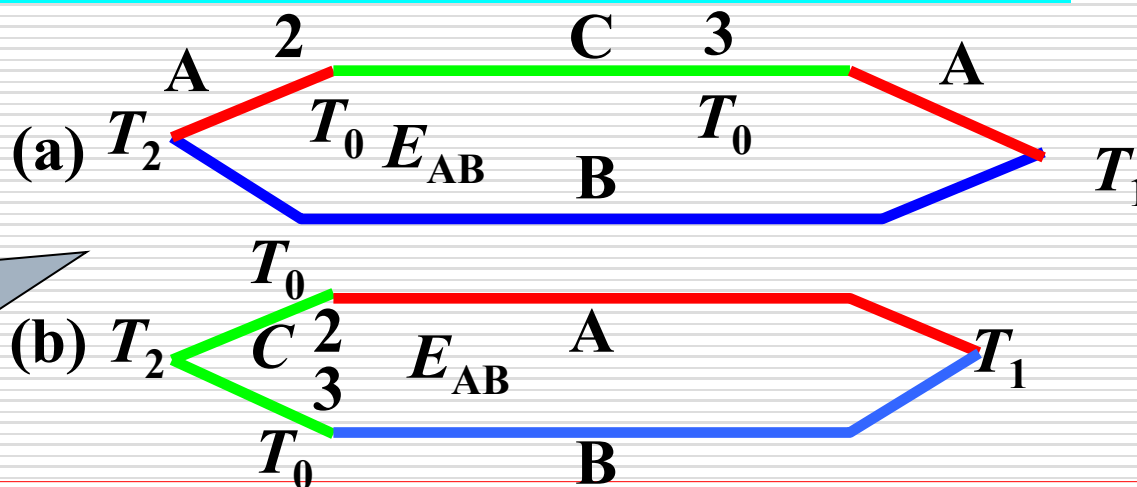
1) 将第三种材料C接入由A、B组成的热电偶回路，如图，则图a中的A、C接点2与C、A的接点3，均处于相同温度 T_0 之中，此回路的总电势不变，即

$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2)$$

同理，图b中C、A接点2与C、B的接点3，同处于温度 T_0 之中，此回路的电势也为：

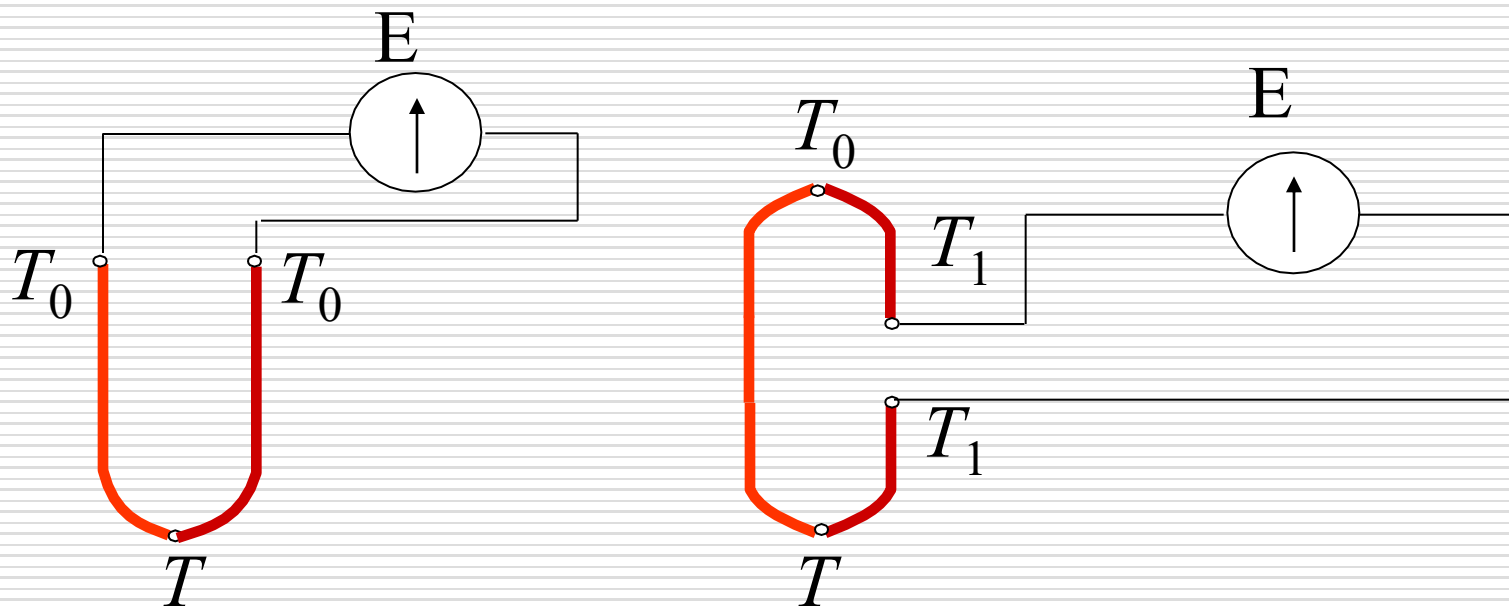
$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2)$$

第三种材料
接入热电偶
回路图



(2) 中间导体定律

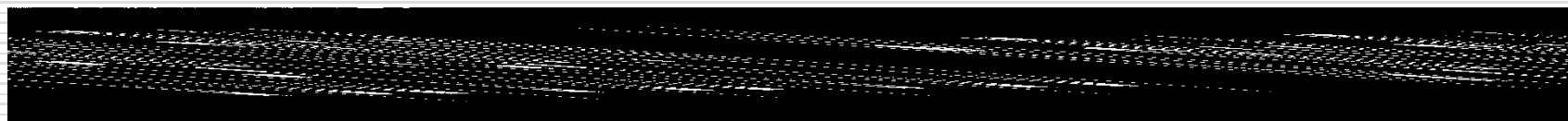
根据上述原理，可以在热电偶回路中接入电位计E，只要保证电位计与连接热电偶处的接点温度相等，就不会影响回路中原来的热电势，接入的方式见下图所示。



电位计接入热电偶回路

□ 热电偶回路中还可以加入第四、五种导体，只要加入导体的两接点温度相等，回路的总热电势就与原回路的热电势相同。

(3) 中间温度定则



□ 根据这一定则，只需根据热电偶在参比端温度为 0°C 的分度表，就可以求出参比端在其他温度时的热电势，为实际测温提供了理论基础。

例1：已知 $E_{AB}(200,0)=0.03\text{mV}$ ， $E_{AB}(100,0)=0.01\text{mV}$ ，求 $E_{AB}(200,100)$ 。

解： $E_{AB}(200,100)=0.02\text{mV}$

热电偶终端补偿

原因

- 热电偶热电势的大小是热端温度和冷端的函数差，为保证输出热电势是被测温度的单值函数，必须使冷端温度保持恒定；
- 热电偶分度表给出的热电势是以冷端温度 0°C 为依据，否则会产生误差。

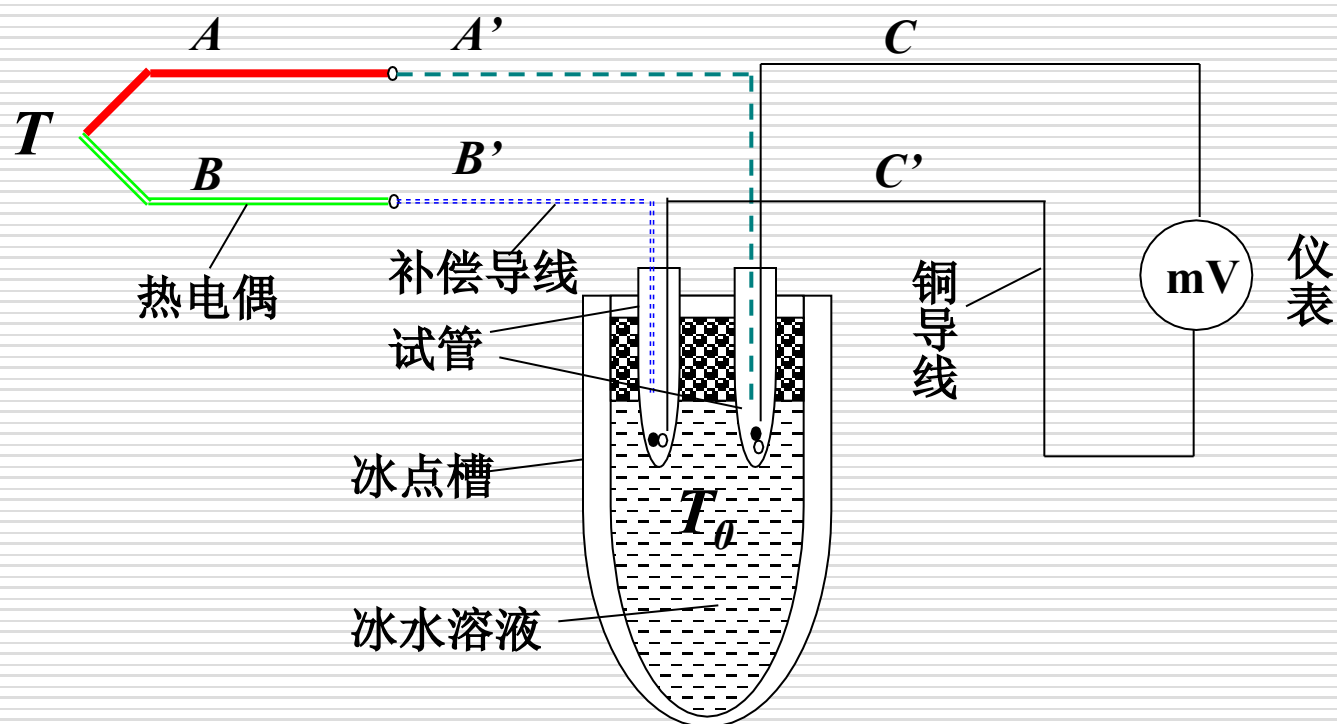
方法

- ◆ 计算修正法
- ◆ 冰点槽法
- ◆ 零点迁移法
- ◆ 补偿电桥法
- ◆ 补偿导线法

热电偶终端补偿

1) 冰点槽法

把热电偶的参比端置于冰水混合物容器里，使 $T_0=0^{\circ}\text{C}$ 。这种方法仅限于科学实验中使用。为了避免冰水导电引起两个连接点短路，必须把连接点分别置于两个玻璃试管里，浸入同一冰点槽，使相互绝缘。





热电偶终端补偿

2) 计算修正法

用普通室温计算出参比端实际温度 T_H ，利用公式计算

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_H) + E_{AB}(T_H, T_0)$$

例 用铜-康铜热电偶测某一温度 T ，参比端在室温环境 T_H 中，测得热电动势 $E_{AB}(T, T_H) = 1.999\text{mV}$ ，又用室温计测出 $T_H = 21^\circ\text{C}$ ，查此种热电偶的分度表可知， $E_{AB}(21, 0) = 0.832\text{mV}$ ，故得

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, 0) &= E_{AB}(T, 21) + E_{AB}(21, T_0) \\ &= 1.999 + 0.832 \\ &= 2.831(\text{mV}) \end{aligned}$$

再次查分度表，与 2.831mV 对应的热端温度 $T = 68^\circ\text{C}$ 。

注意：既不能只按 1.999mV 查表，认为 $T = 49^\circ\text{C}$ ，也不能把 49°C 加上 21°C ，认为 $T = 70^\circ\text{C}$ 。

热电偶终端补偿

3) 零点迁移法

应用领域：如果冷端不是 0°C ，但十分稳定（如恒温车间或有空调的场所）。

实质：在测量结果中人为地加一个恒定值，因为冷端温度稳定不变，电动势 $E_{AB}(T_H, 0)$ 是常数，利用指示仪表上调整零点的办法，加大某个适当的值而实现补偿。

例 用动圈仪表配合热电偶测温时，如果把仪表的机械零点调到室温 T_H 的刻度上，在热电动势为零时，指针指示的温度值并不是 0°C 而是 T_H 。而热电偶的冷端温度已是 T_H ，则只有当热端温度 $T=T_H$ 时，才能使 $E_{AB}(T, T_H)=0$ ，这样，指示值就和热端的实际温度一致了。这种方法非常简便，而且一劳永逸，只要冷端温度总保持在 T_H 不变，指示值就永远正确。

热电偶终端补偿

4) 补偿电桥法

利用不平衡电桥产生热电势补偿热电偶因冷端温度变化而引起热电势的变化值。不平衡电桥由 R_1 、 R_2 、 R_3 (锰铜丝绕制)、 R_{Cu} (铜丝绕制)四个桥臂和桥路电源组成。设计时，在 0°C 下使电桥平衡($R_1=R_2=R_3=R_{Cu}$)，

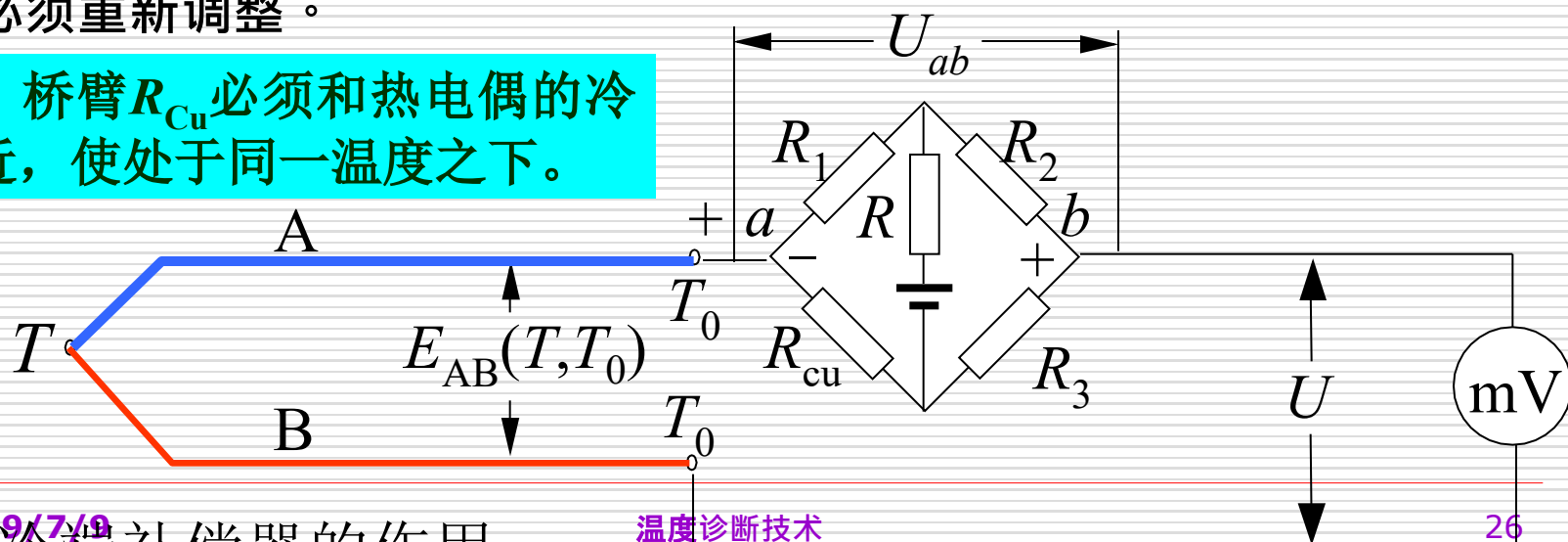
此时 $U_{ab}=0$ ，电桥对仪表读数无影响。

$$T_0 \uparrow \rightarrow U_a \uparrow \rightarrow U_{ab} \uparrow \rightarrow E_{AB}(T, T_0) \downarrow$$

供电4V直流，在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 或 $-20 \sim 20^\circ\text{C}$ 的范围起补偿作用。

注意，不同材质的热电偶所配的冷端补偿器，其中的限流电阻 R 不一样，互换时必须重新调整。

注意：桥臂 R_{Cu} 必须和热电偶的冷端靠近，使处于同一温度之下。



常用工业热电偶

□ 热电偶材料应满足：

- ◆ 物理性能稳定，热电特性不随时间改变；
- ◆ 化学性能稳定，以保证在不同介质中测量时不被腐蚀；
- ◆ 热电势高，导电率高，且电阻温度系数小；
- ◆ 便于制造；
- ◆ 复现性好，便于成批生产。

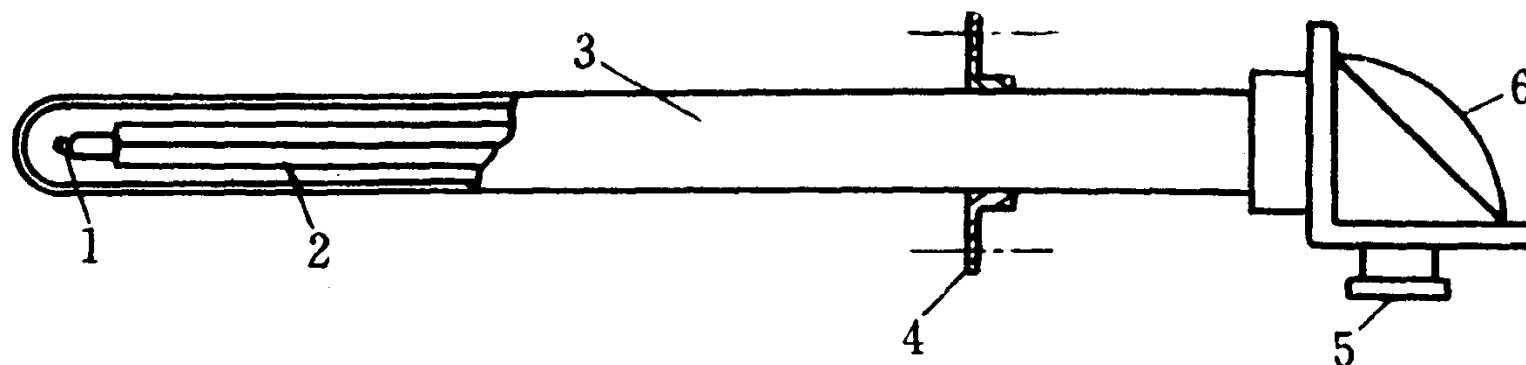
- **标准化热电偶**：目前国际上有**8种**标准化热电偶常用。
标准化热电偶已经列入工业化标准文件，具有统一的分度表，统一规定了热电极材料、热电性质和允许偏差。
- **非标准化热电偶**：由钨铼合金构成的，用于高温测量，但是均匀性和再现性较差。

常用工业热电偶

- 为保证热电偶能正常工作，通常都用绝缘物（防止热电极短路，刚玉瓷管、粘土质瓷管和高铝质瓷管等）和保护套管（保护热电极及支撑固定作用，不锈钢、石英、金属陶瓷等）将其与被测介质相隔离。热电偶的结构形式有普通型和铠装。

(1) 普通型热电偶

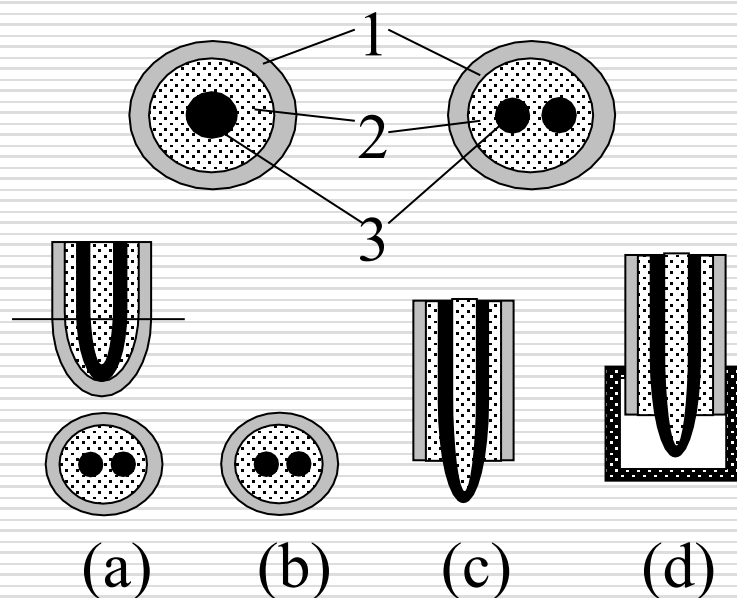
特点：热惯性大，对温度变化的响应慢



1-热电偶接点 2-瓷绝缘套管 3-不锈钢套管 4-安装固定件
5-引线口 6-接线盒

(2) 铠装热电偶

将热电偶丝、绝缘材料和金属保护套管三者组合装配后，经拉伸加工而成的一种坚实的组合体。结构形式多样：碰底型、不碰底型、露头型、帽型。



铠装式热电偶断面结构示意图

1— 金属套管；2— 绝缘材料；3— 热电极
(a)— 碰底型；(b)— 不碰底型；(c)— 露头型；(d)— 帽型

特点：

小型化（直径从12mm到0.25mm）、寿命长、热惯性小、响应快，柔软可弯曲，使用方便。

测温范围在1100℃以下的有：镍铬-镍硅、镍铬-考铜铠装式热电偶。

3、非接触式测温法

- 非接触式测温法可分为：电涡流式和辐射式两种。
- 电涡流式测温法是基于电涡流效应(eddy effect)——成块的金属置于激励线圈产生的交变磁场中，金属体内就要产生感应电流，这种电流的流线呈闭合曲线，类似水涡流形状，故称之为电涡流，这种现象成为电涡流现象。
- 电涡流式测温法是基于反射式涡流传感器而设计的。保持电涡流传感器线圈与导体间距离、导体的磁导率、线圈的几何参数和电流频率不变，使电涡流传感器的参数只随导体的电阻率变化而变化，即只随导体温度变化而变化。则测得参数就可以确定被测导体的温度。

3.1 辐射(radialization)测温



□ 测温原理

- 任何物体，其温度超过绝对零度，都会以电磁波的形式向周围辐射能量。这种电磁波是由物体内部带电粒子在分子和原子内振动产生的，其中与物体本身温度有关传播热能的那部分辐射，称为**热辐射**。
- 基于物体的热辐射能量（强度）随其温度的变化而变化的特性来检测其温度的。
- 辐射式温度计的感温元件不需和被测物体或被测介质直接接触。

辐射(radialization)测温



➤ 辐射测温的特点：

- 不会破坏被测温度场，可实现遥测和运动物体温度的测量；
- 测量元件不必与被测对象有相同的温度，测量上限可不受感温元件熔点限制；
- 不必和被测对象达到热平衡，故仪表的反映速度快，适于快速测量；
- 灵敏度高、精确度好，用于接触式测温仪表无能为力的地方。

辐射测温仪表的基本组成



✦ **基本组成**：光学系统、检测元件、转换电路和信号处理

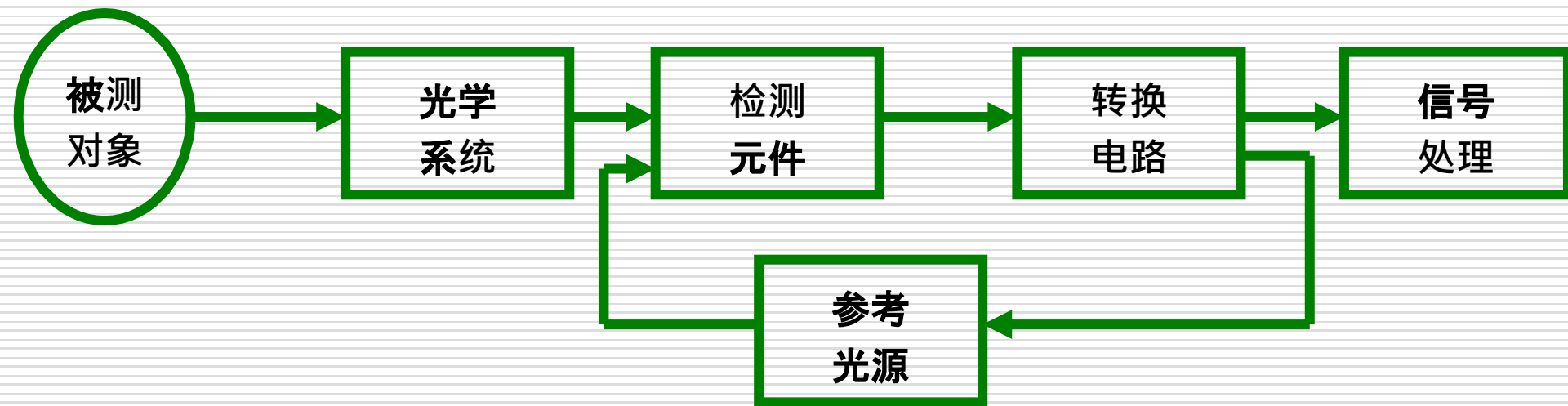


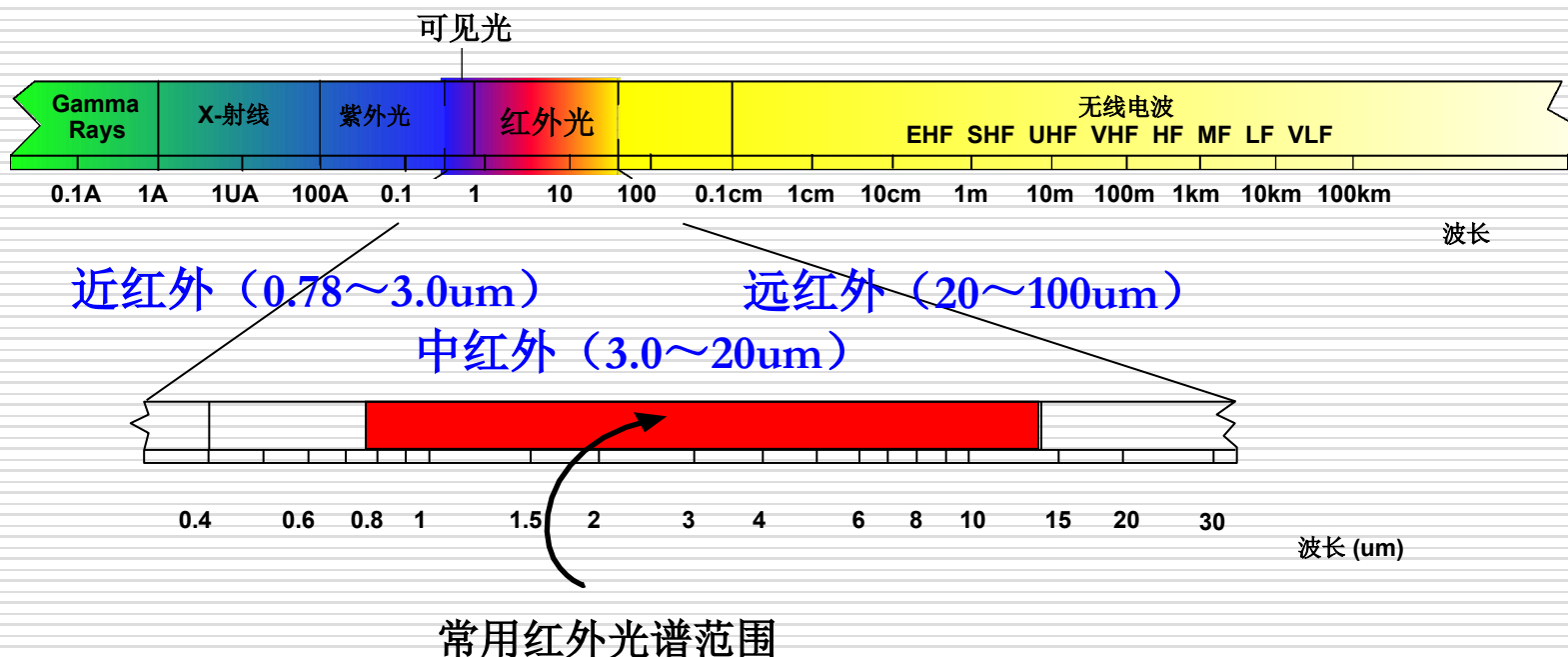
图4-11 辐射测温仪表主要组成框图

光学系统包括瞄准系统、透镜、滤光片等，把物体的辐射能量通过透镜聚焦到检测元件；**检测元件**为光敏或热敏元件；**转换电路和信号处理**系统将信号转换、放大、进行辐射率修正和标度变换后，输出与被测温度相应的信号。

3.1.1 红外线

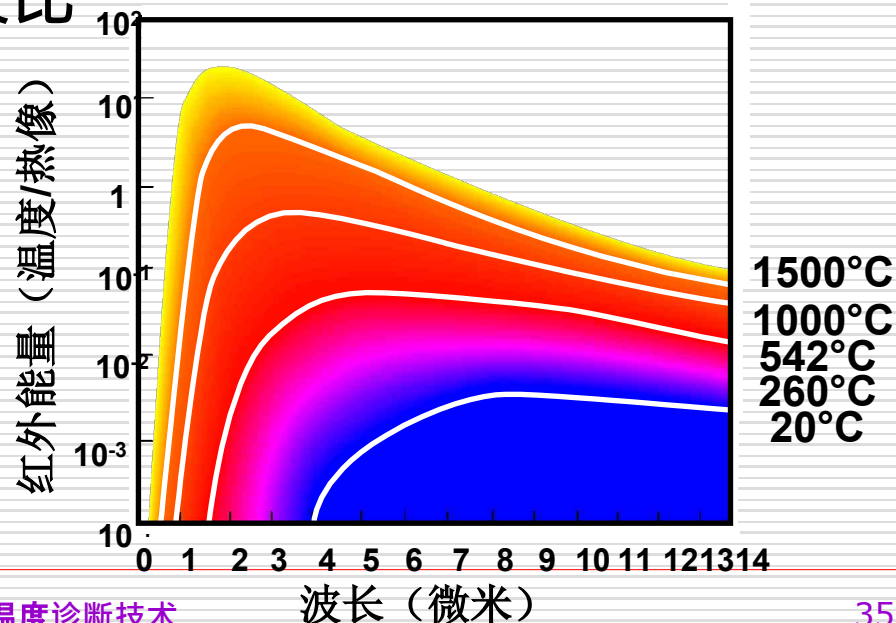
➤ 红外辐射

- ✓ 红外辐射俗称红外线，它是一种人眼看不见的光线。
- ✓ 红外辐射是电磁频谱的一部分，电磁频谱中包括无线电波、微波、可见光、紫外线、伽玛射线和X光。



1) 红外辐射的基本概念

- 红外辐射普遍存在于自然界：
 - ◆ 任何温度高于绝对零度的物体（人体、冰、雪等）都在不停地发射红外辐射
- 红外辐射的物理本质是热辐射。物体的温度越高，辐射出来的红外线越多，红外辐射的能量就越强。不同温度的辐射曲线永不会相交。随温度增加，辐射能量增大而峰值波长减小。波长与温度成反比
- 红外测温的特点：
 - ◆ 非接触测温
 - ◆ 反应速度快
 - ◆ 灵敏度高
 - ◆ 准确度较高
 - ◆ 范围广泛



1) 红外辐射的基本概念

黑体

- ◆ 黑体的红外辐射率和吸收率为1
(客观世界不存在)，其意义体现在为衡量自然物体的红外辐射和吸收能力建立一个标准。
- ◆ 实际物体辐射能力低于黑体，称为灰体。

一般物体的红外辐射率和吸收率都小于1，并且其辐射和吸收能力都与表面温度和波长有关。

假想的全部吸收和辐射红外电磁波的理想体，其红外吸收和辐射能力与温度无关。

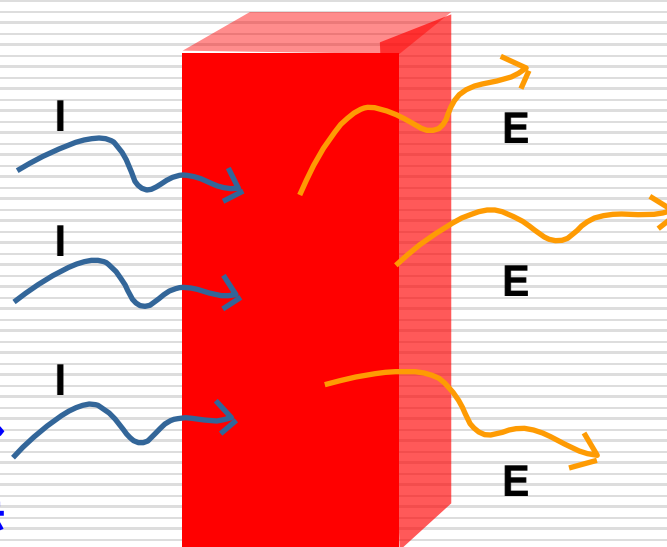


1) 红外辐射的基本概念

在理论和工程实践中，常用物体的比辐射率定量描述物体辐射和吸收红外电磁波的能力；

$$\varepsilon = \frac{I}{I_b}$$

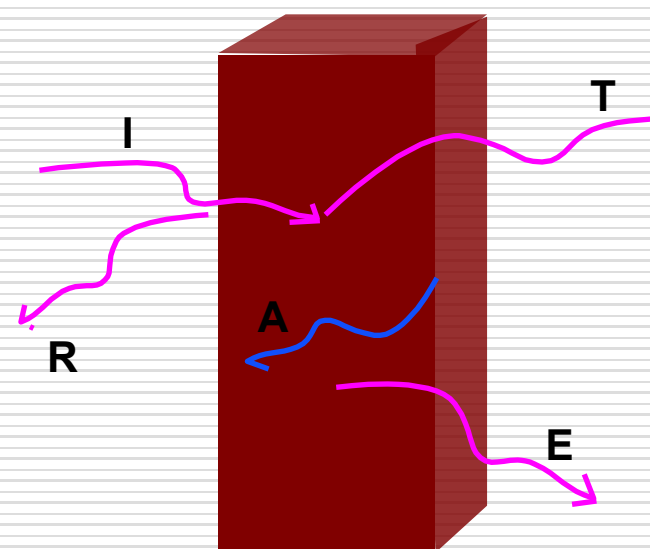
即物体的实际红外辐射与同温度下黑体红外辐射之比值，显然，物体的比辐射率都小于1。



“理想黑体”

既是完全吸收体
也是完全发射体

比辐射率=1



“实际物体”

部分能量被反射
部分能量透过

比辐射率<1

1) 红外辐射的基本概念

影响比辐射率的主要因素

- 材料种类
- 表面状况(抛光,粗糙,氧化,喷砂)
- 表面几何形状(平面,凹面,凸面)
- 表面理化结构状态
(如沉积物,氧化膜,油膜等)

- 透过率(例如塑料薄膜)
- 测量温度
- 测量角度

材 料	表面状态	温度/℃	比辐射率 ϵ
铝	抛光	100	0.05
	氧化	100	0.55
黄铜	抛光	100	0.03
	氧化	100	0.61
铸铁	抛光	40	0.21
	氧化	100	0.64
	生锈	20	0.69
钢	抛光	100	0.07
	氧化	200	0.79
砖	粗糙	20	0.93
混凝土	粗糙	20	0.92
石墨	粗糙	20	0.98
玻璃	抛光平板	20	0.94
漆	白色	100	0.92
	黑色	100	0.97
泥土	干燥	20	0.92
	水饱和	20	0.95
水	液态	20	0.96
	冰	-10	0.96
	雪	-10	0.85
木材	刨光	20	0.9
人体	皮肤	32	0.98

2) 红外辐射的三个规律

● 基尔霍夫定律

同温度物体的红外发射能力正比于其红外吸收能力；红外平衡状态时，物体吸收的红外能量恒等于它所发射的红外能量。



推论：性能好的反射体或透明体，必然是性能差的辐射体。

2) 红外辐射的三个规律

● 斯蒂芬—玻耳兹曼定律 (1879, 1884)

物体辐射的红外能量密度 W 与其自身的热力学温度 T 的4次方成正比, 并与它表面的比辐射率成正比:

$$W = \varepsilon \sigma T^4$$

$$\text{玻耳兹曼常数 } \sigma = 5.6697 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ K}^4$$

可见, 物体的温度越高, 红外辐射能量越多。

2) 红外辐射的三个规律

维恩位移定律

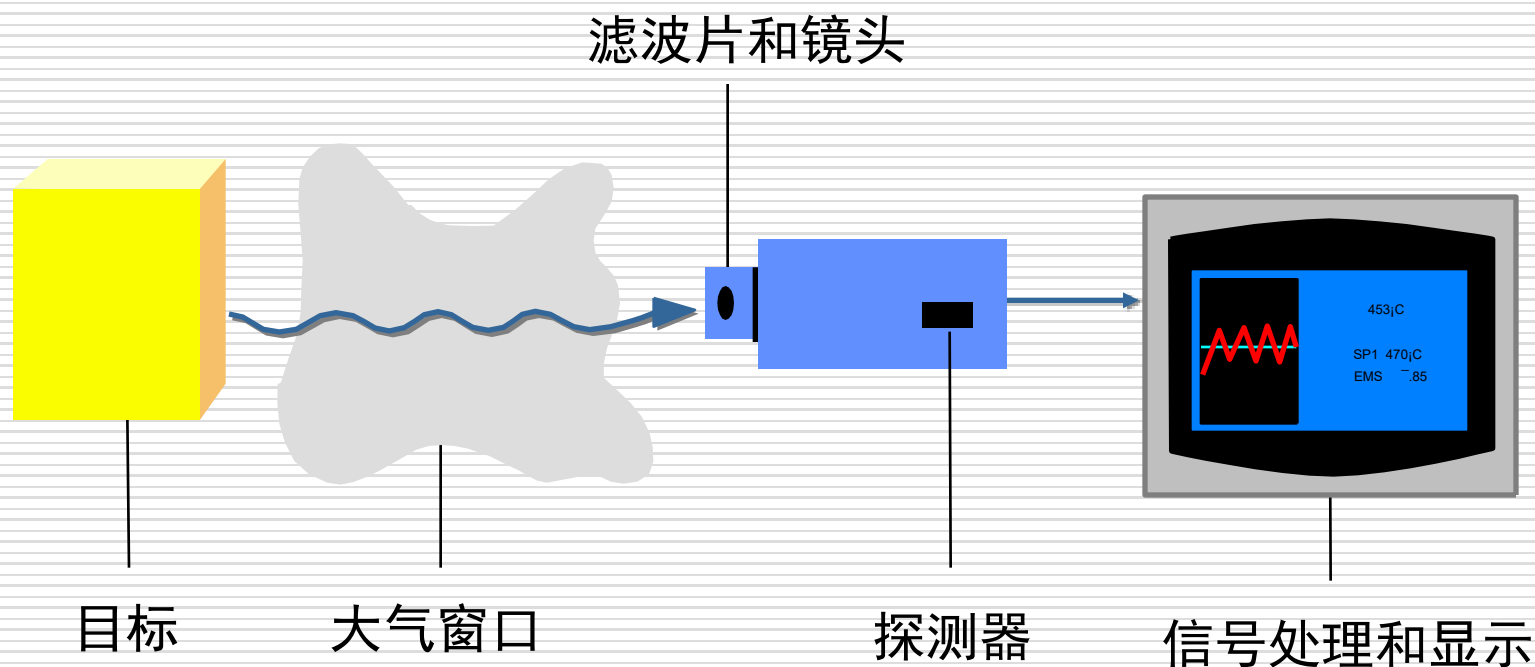
物体的红外辐射能量密度大小，随波长（频率）不同而变化。与辐射能量密度最大峰值相对应的波长为峰值波长，维恩通过大量实验得出了峰值波长和物体热力学温度之间的关系：

$$\lambda_{\max} = 2897 / T \quad (6-3)$$

 的单位是 μm ， T 是物体的绝对温度，单位是K。

3.1.2 红外探测器

红外测温仪实际上是一种非接触式辐射能量探测器，世界上所有的物体都会产生红外线辐射。而**辐射的能量则与该物体的温度成比例**，非接触式温度测量即是测量物体辐射能量的强弱，并由此得到一个与该物体温度成比例的信号。

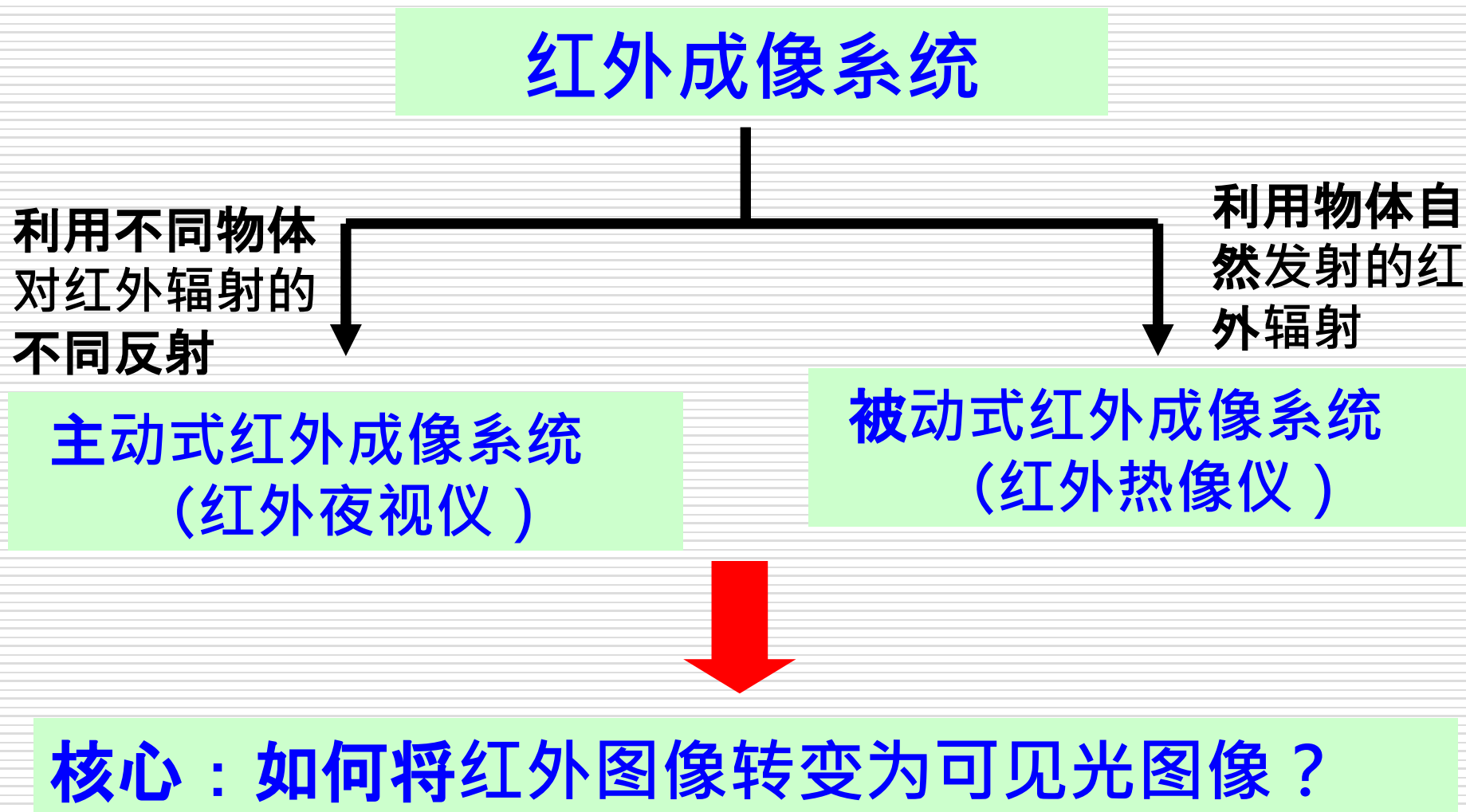


3.1.2 红外探测器

红外探测器是红外辐射能的接收器，它通过光电变换作用，将接收的红外辐射能量变为电信号，经过放大、处理，形成图像。

- ① 探测率要高，提高系统的热灵敏度；
- ② 工作波段与检测目标的辐射光谱要适应，以便接收尽可能多的红外辐射；
- ③ 用于并扫的多元探测器，各单元探测器的特性要均匀；
- ④ 探测器响应速度要快，以适应快速扫描；
- ⑤ 探测器致冷要求不宜太高（小型化）。

3.1.3 红外成像系统



1) 主动式红外成像系统

主动式红外成像系统自身带有红外光源，是根据被成像物体对红外光源的不同反射率，以红外变像管作为光电成像器件的红外成像系统。

优点：成像清晰、对比度高、不受环境光源影响；

缺点：易暴露，不利于军事应用。



装有红外夜视仪的步枪

红外夜视图像



1) 主动式红外成像系统

主动式红外成像系统的系统结构

主动式红外成像系统

光学系统

物镜组
目镜组

红外变像管

光谱转换
电子成像
亮度增强

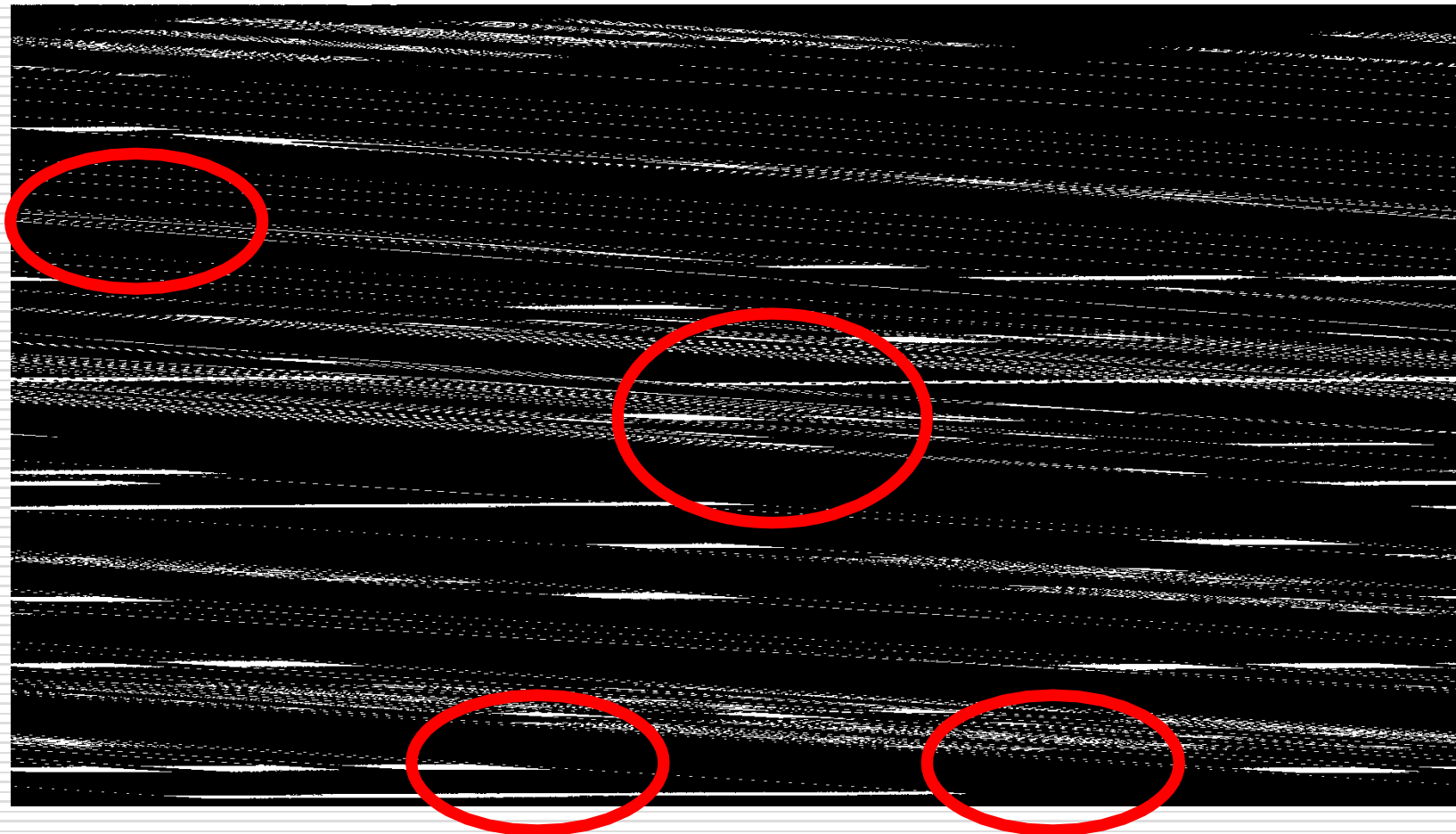
红外探照灯

红外辐射光源

高压电源

变像管电源

1) 主动式红外成像系统

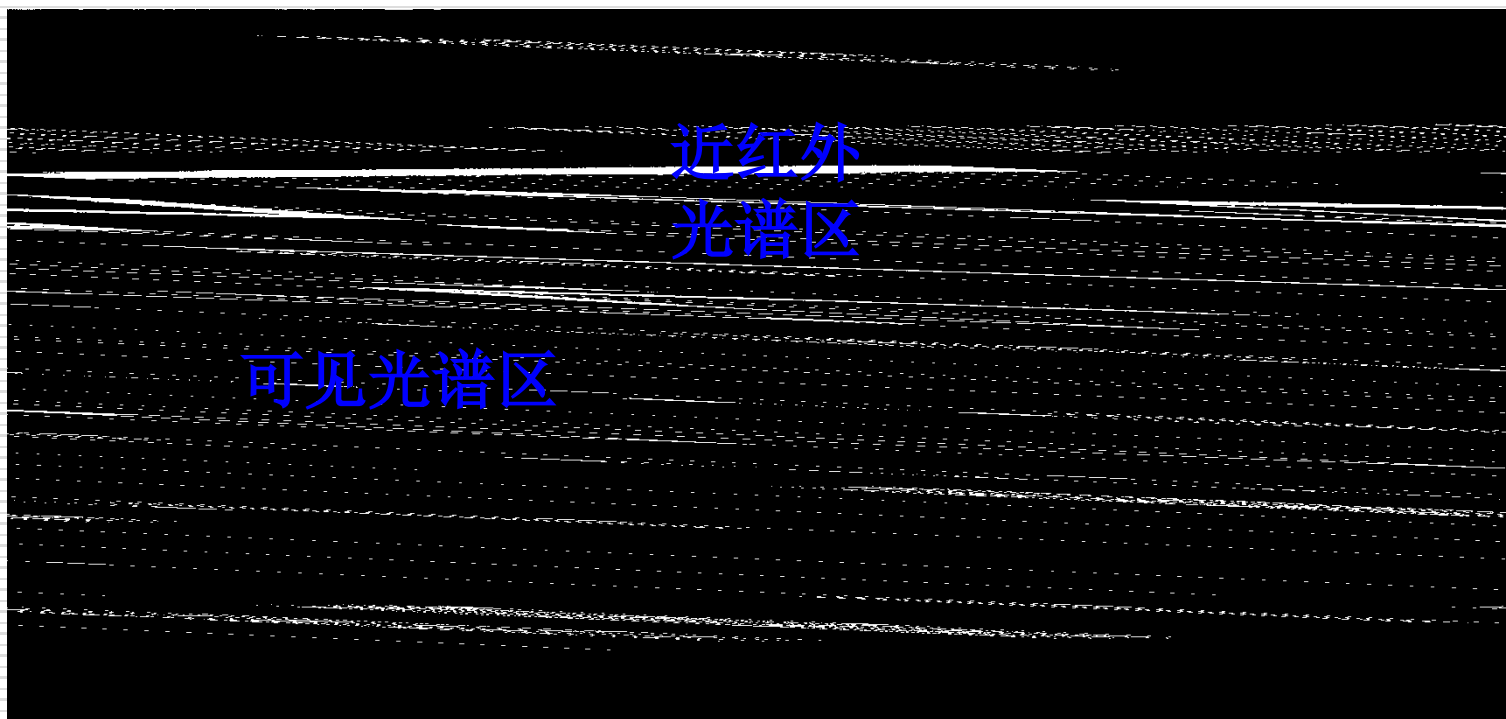


主动式红外成像系统结构

1) 主动式红外成像系统

主动式红外成像系统的特点:

- ① 能够区分军事目标和自然景物，识别伪装；



典型目标的反射曲线



1) 主动式红外成像系统

② 近红外辐射比可见光受大气散射影响小，较易通过大气层（恶劣天气除外）；

③ 由于系统“主动照明”，工作时不受环境照明影响，可以在“全黑”条件下工作。

2) 红外热成像系统

红外热成像系统是被动式成像系统。

自然界中，温度高于绝对零度的一切物体，总是在不断地发射红外辐射。收集并探测这些辐射能，就可以形成与景物温度分布相对应的热图像。

热图像再现了景物各部分温度和辐射发射率的差异，能够显示出景物的特征。

2) 红外热成像系统



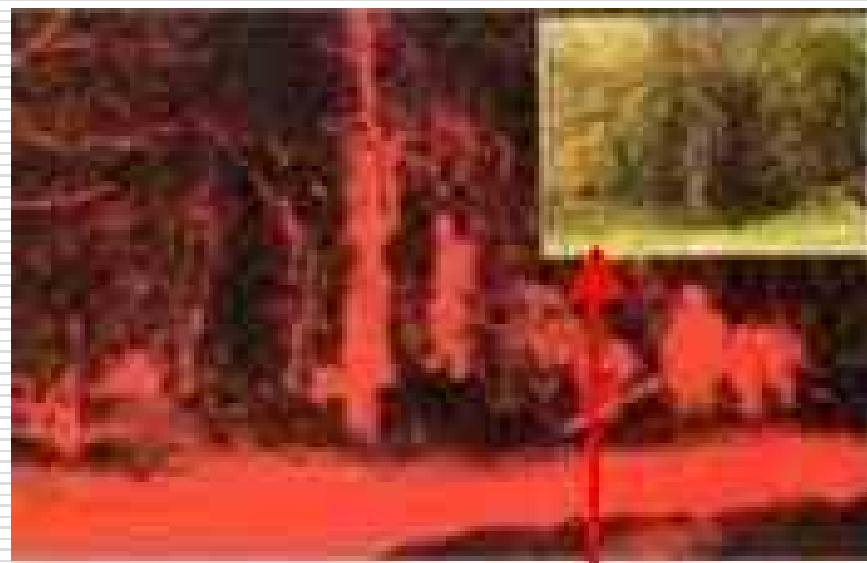
图5-5 Fluke Ti25热像仪

1-LCD显示屏 2-功能键（F1、F2和F3） 3-电池盖 4-扬声器 5-麦克风 6-自动背光传感器 7-手带 8-交流适配器/充电器输入端 9-SD存储卡卡仓 10-翻盖式镜头盖 11-可见光相机 12-热（红外）相机 13-焦距控件 14-扳机

2) 红外热成像系统



树林中人的热图像



小图是可见光图像
大图是热图像

2) 红外热成像系统



红外热成像系统



```
graph TD; A[红外热成像系统] --> B[光机扫描型]; A --> C[非扫描型];
```

光机扫描型

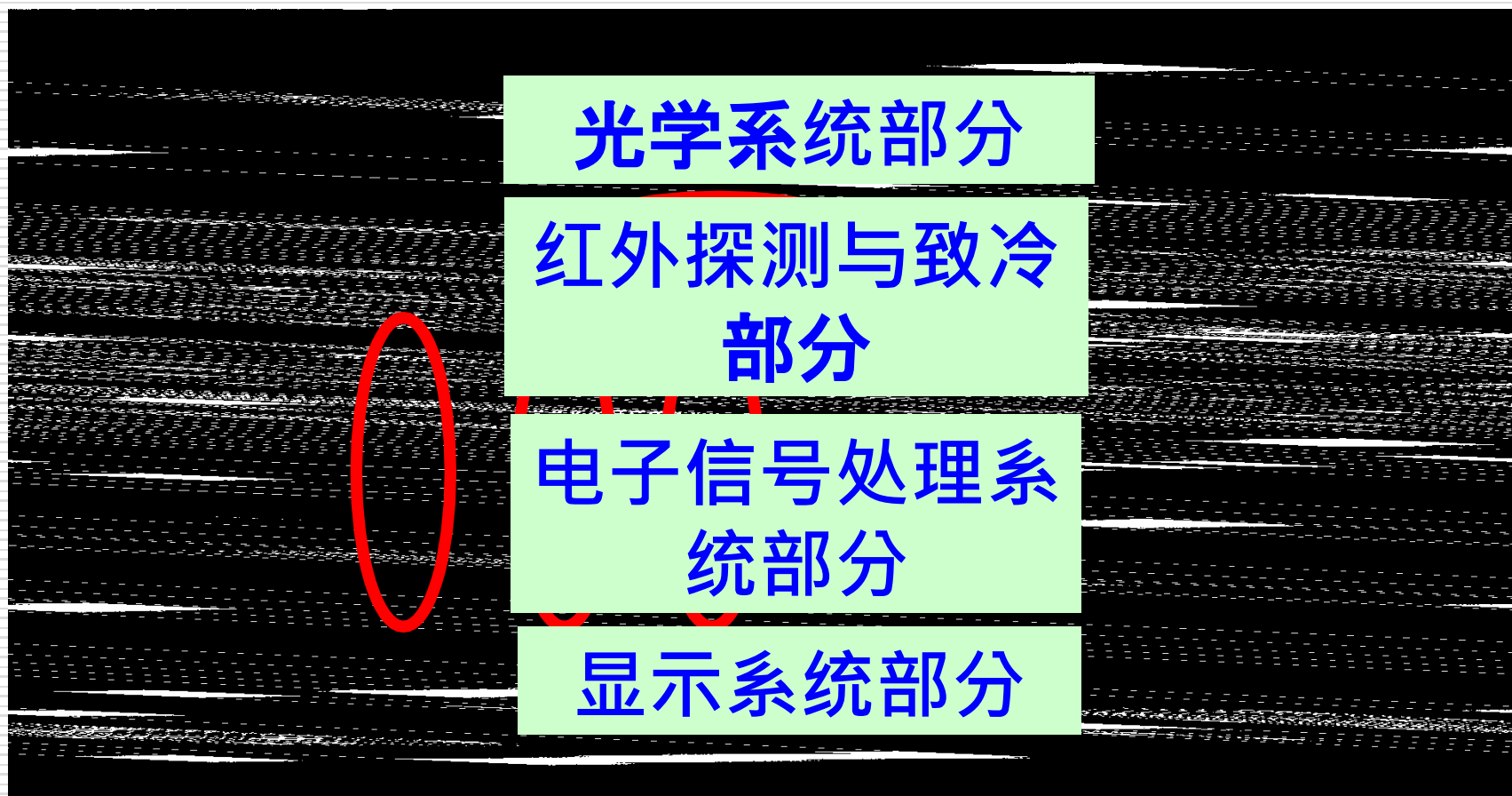
图像质量好
结构复杂
成本高

非扫描型

结构简单
图像质量
逐渐提高

2) 红外热成像系统

□ 光机扫描型红外热成像系统



2) 红外热成像系统

①光学系统

光机扫描型热成像系统以瞬时视场为单位，用光机扫描方法来覆盖总视场。

聚光光学系统

接收目标或景物
辐射，聚焦于探
测器

扫描光学系统

产生扫描光栅，使分
立探测元件能够获取
大范围景物图像

2) 红外热成像系统

汇聚光束
光谱滤波

光电转换

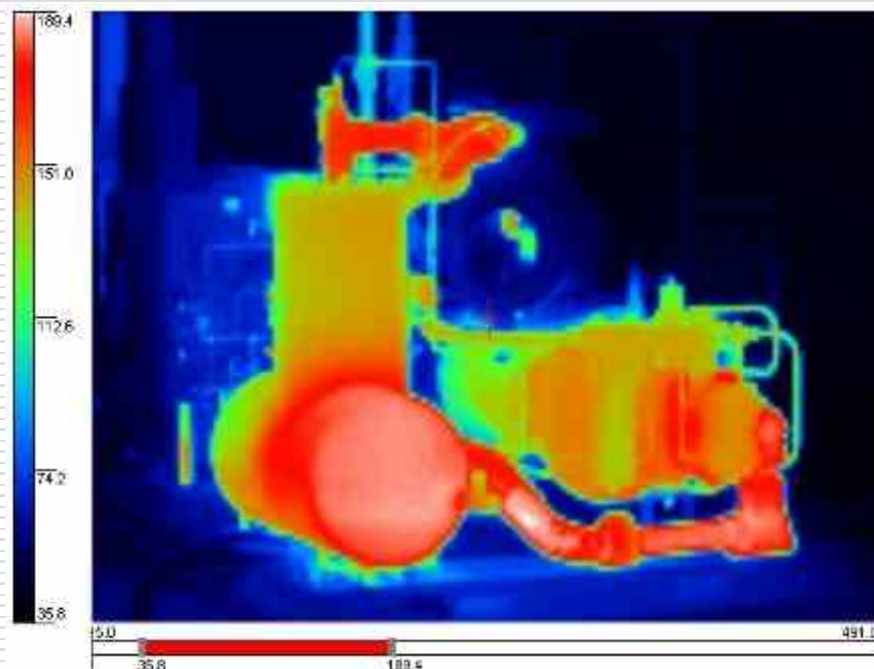
电视光栅

红外热像图

□ 红外热像仪接收目标各部位辐射的红外能量，并将其转换为温度值，用不同的颜色标示不同的温度，以热像图方式在液晶屏上显示。



可见光图



红外热像图

4、机械温度诊断应用实例

□ 4.1 接触式测温

□ 1)-流体温度检测

- ◆ 分为稳定温度检测和动态温度检测。
- ◆ 广泛使用热电偶温度计。

监测参数	监测仪器	监测部位
进气温度	热电偶温度计	总进气管
排气温度	热电偶温度计	排气管总管法兰下
进出水温度	电阻、热电偶、压力式液体温度计	冷却水管出口
润滑油温度	电阻、热电偶、压力式液体温度计	主油管内
环境温度	液体温度计	周围约1.5m

4、机械温度诊断应用实例

□ 4.1 接触式测温

□ 2)-零件温度检测

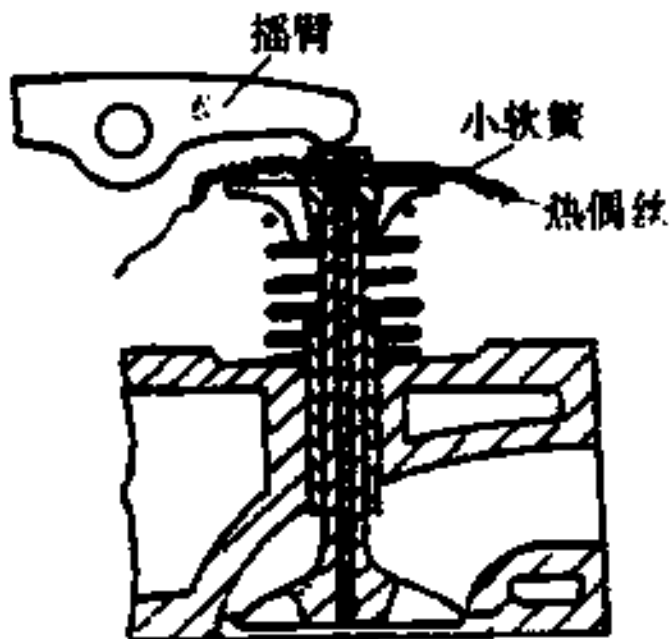


图 2-20 排气阀测温装置简图

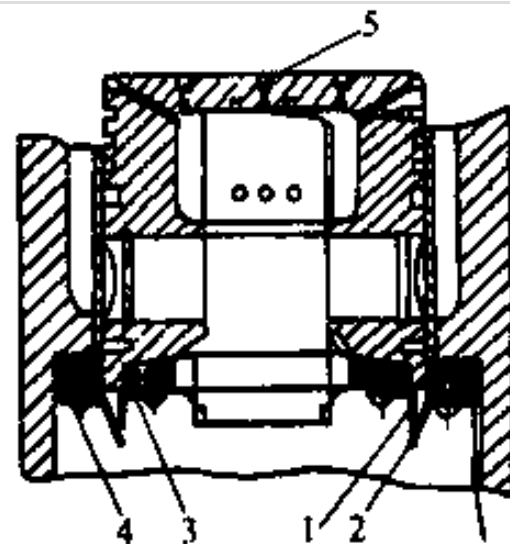


图 2-21 活塞测温装置

1—直片状动触头；2—直片状静触头；
3—动触头固定环；4—静触头固定环；
5—热电偶热接点。

4、机械温度诊断应用实例

□ 4.2 非接触式测温

□ 1)-轴承故障的红外诊断

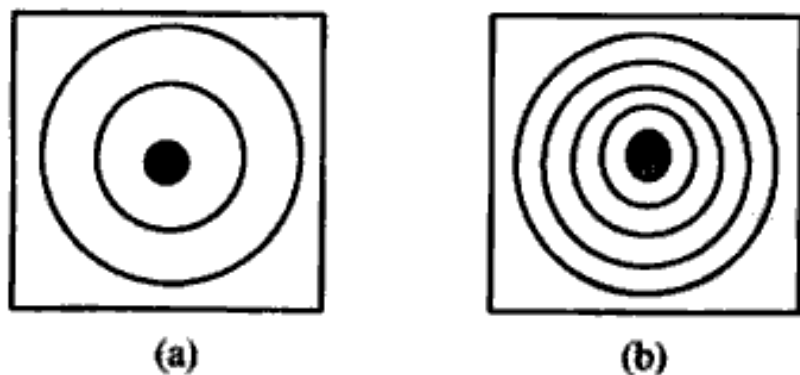


图 2-15 轴承磨损的红外诊断示意图

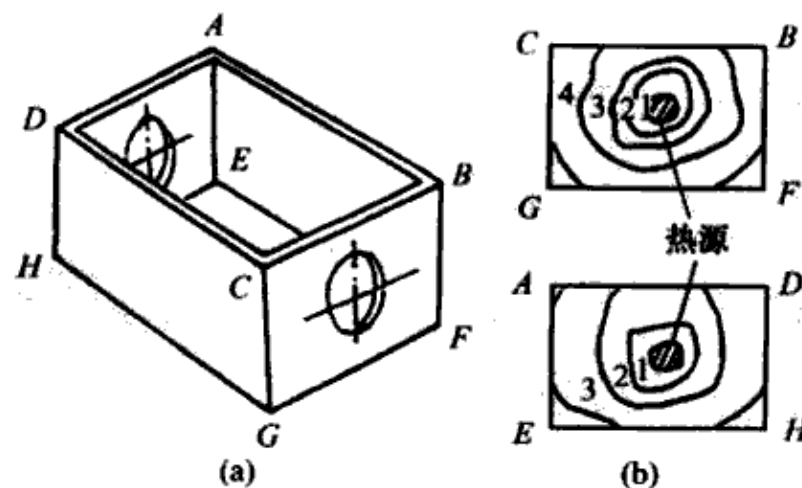


图 2-16 机床主轴箱热变形
(a) 主轴箱模型；(b) 主轴箱两端温度场。

4、机械温度诊断应用实例

□ 1)-轴承故障的红外诊断

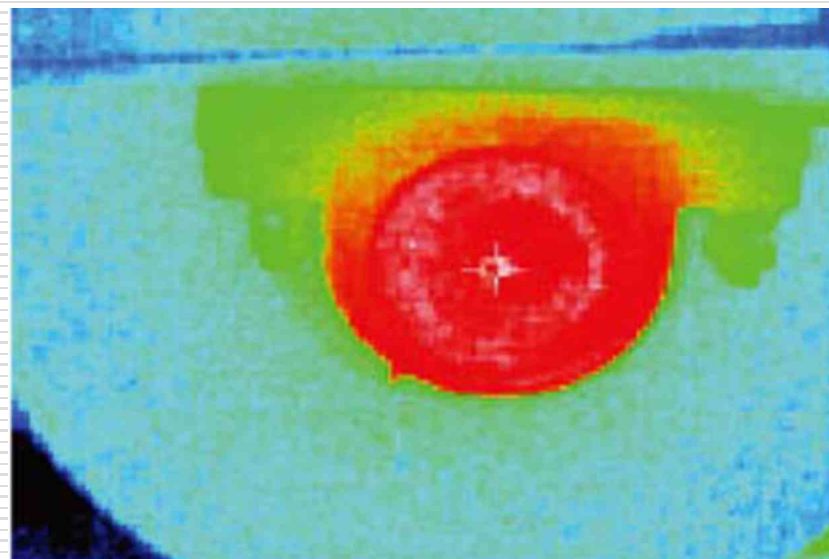
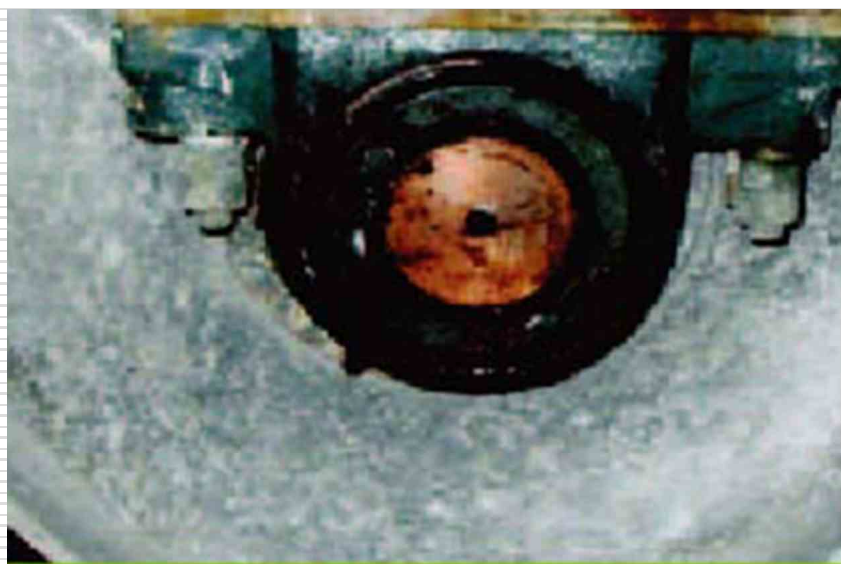


图6 过热轴承及红外热像图

4、机械温度诊断应用实例

□ 2)-材料无损探伤诊断

◆ 红外无损探伤特点：

- 加热和被测设备简单；
- 各种材料的各种缺陷都能测量；

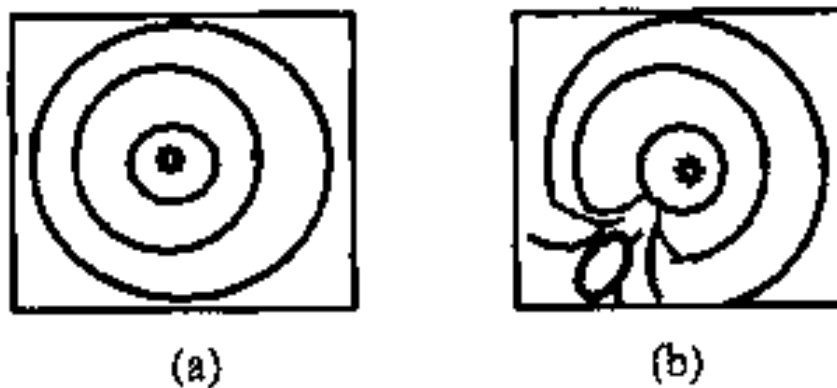


图 2-17 红外无损探伤
(a) 无缺陷；(b) 有缺陷。

4、机械温度诊断应用实例



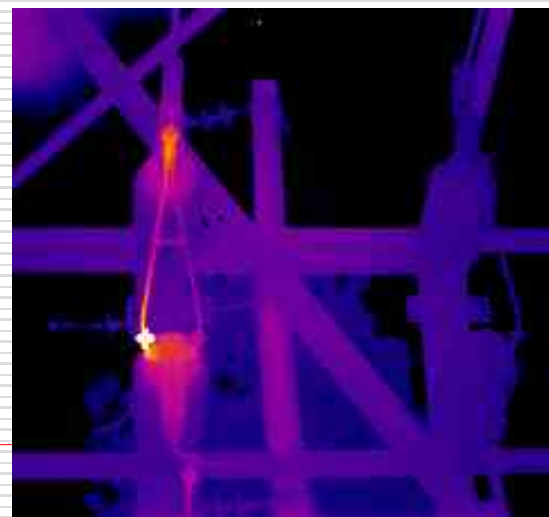
□ 3) 电力系统元件故障诊断

通常的检测部件

- 三相设备
- 电缆连接
- 变压器
- 保险丝盒
- 绝缘器
- 电容器
- 断路器
- 继电器/开关
- **UPS**电源

温度异常点产生的主要原因

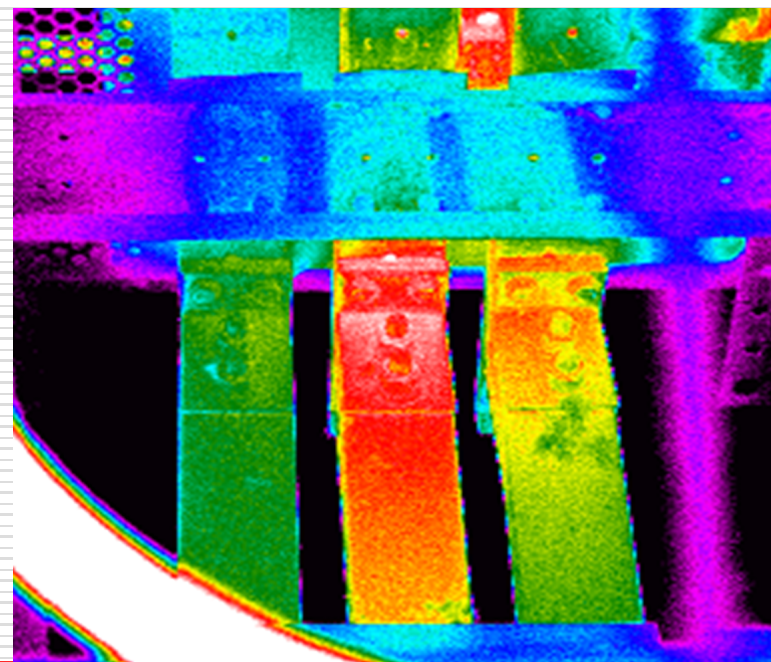
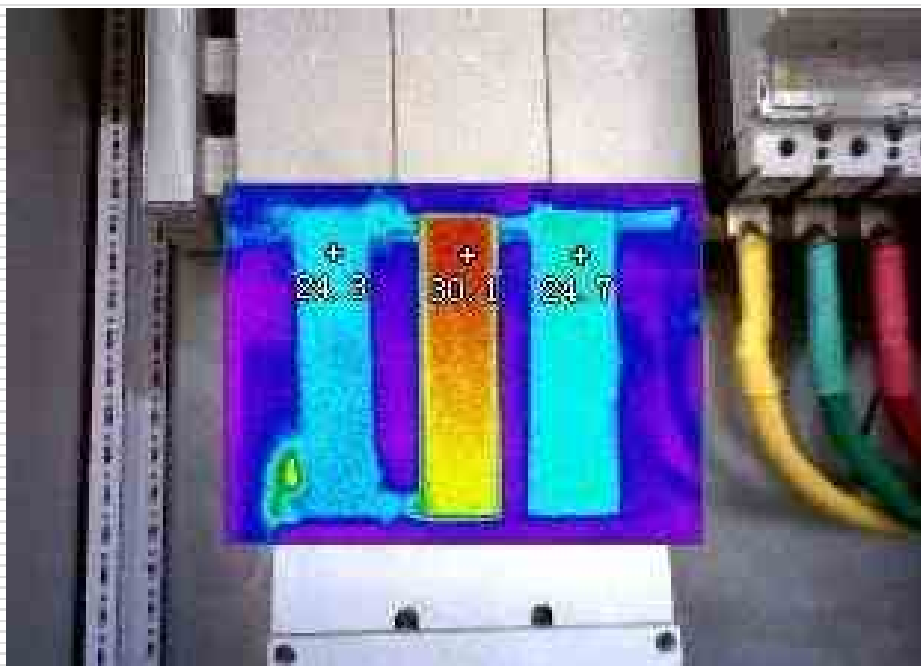
- 负载不平衡
- 谐波
- 过载/过电压
- 接头松动或者氧化导致电阻增大
- 绝缘开裂
- 部件故障
- 配线错误



4、机械温度诊断应用实例

□ 3) 电力系统元件故障诊断

- 应用点：三相接线排
- 接触点问题
- 电能质量问题
- 在正常负载下，若最大温差超过**20%**，则预示可能有隐患存在。



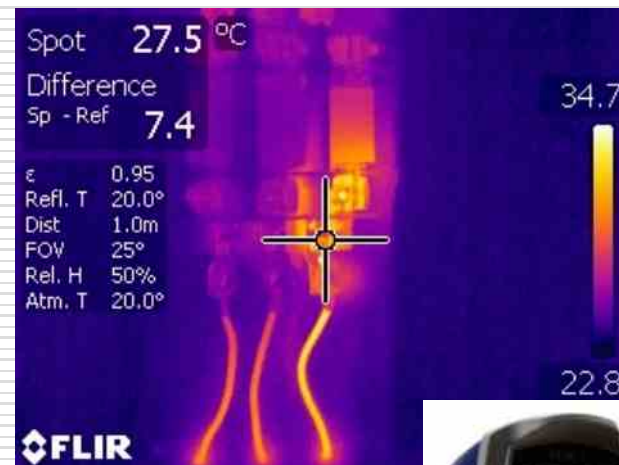
4、机械温度诊断应用实例

□ 3) 电力系统元件故障诊断

红外热像仪

红外点温仪

Spot Meter





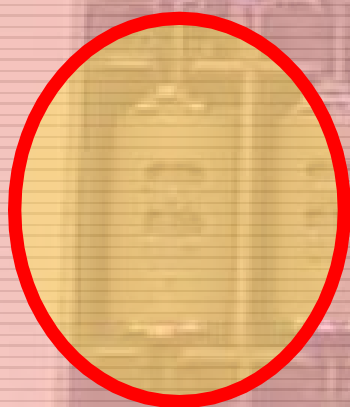
请问这里有问题吗？



70.1



请问这里有问题吗？



71.2

请问这里有问题吗？

73.3

浚海仪器 www.54535.com

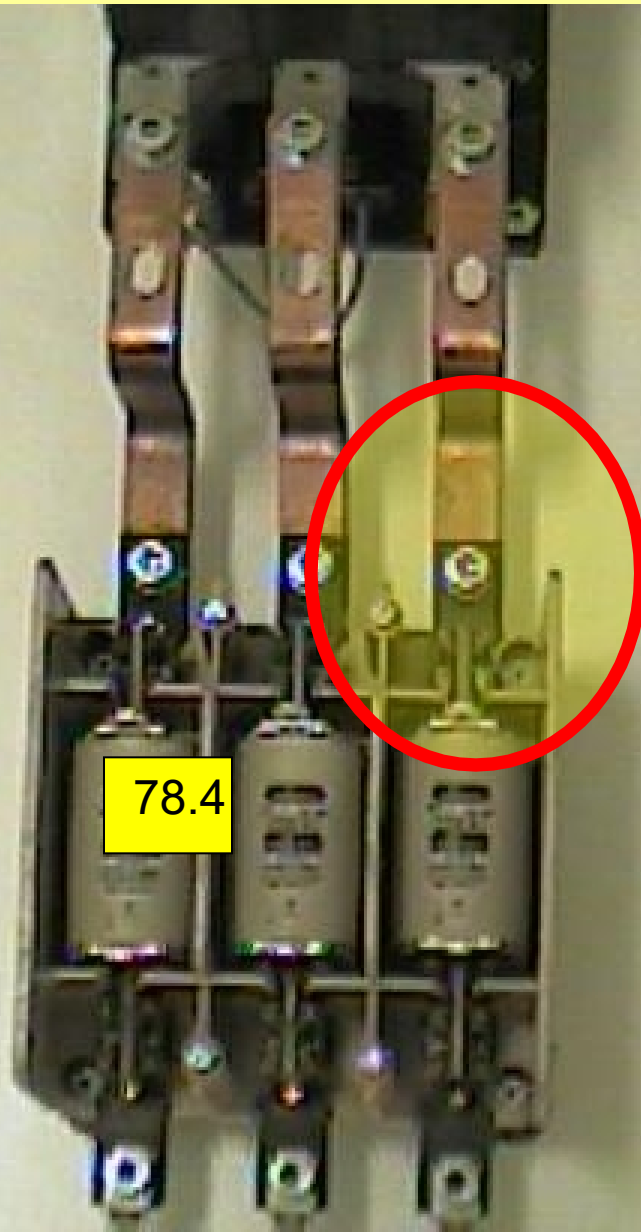


请问这里有问题吗？

75.3
浚海仪器 www.54535.com



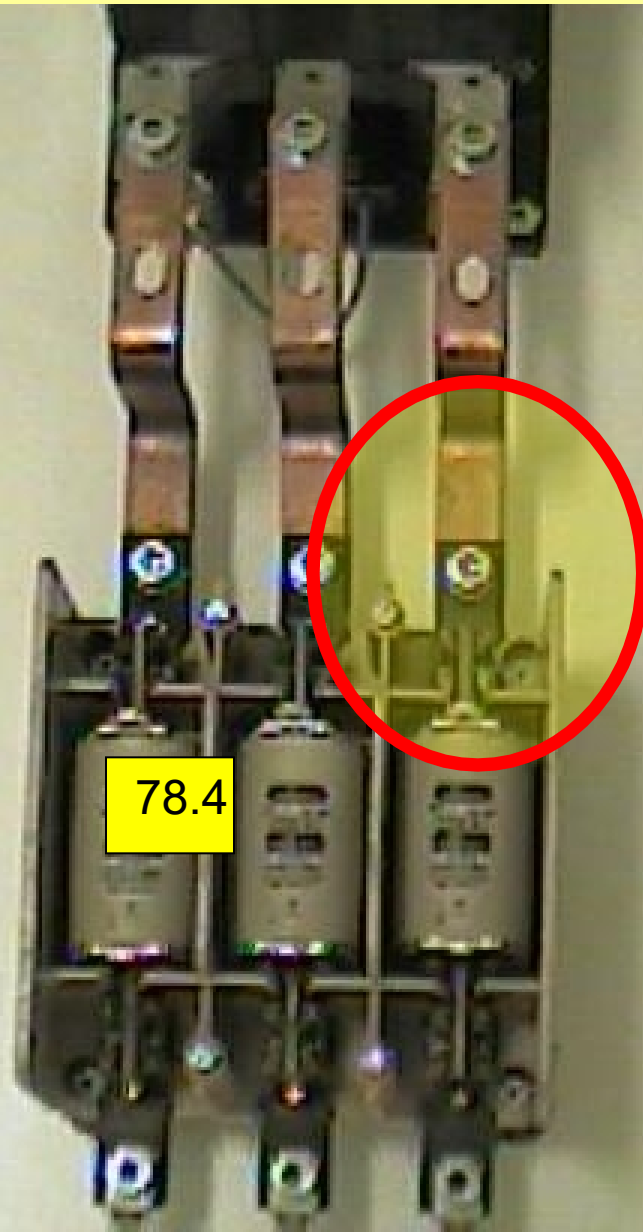
请问这里有问题吗？



78.4



请问这里有问题吗？



78.4



请问这里有问题吗？

72.3

83.1

113.2



4、机械温度诊断应用实例

□ 3) 电力系统元件故障诊断



图 7 电力线过热红外热像图

4、机械温度诊断应用实例

□ 3) 电力系统元件故障诊断



变电站过热接头

4、机械温度诊断应用实例

□ 4) 电子元件故障诊断

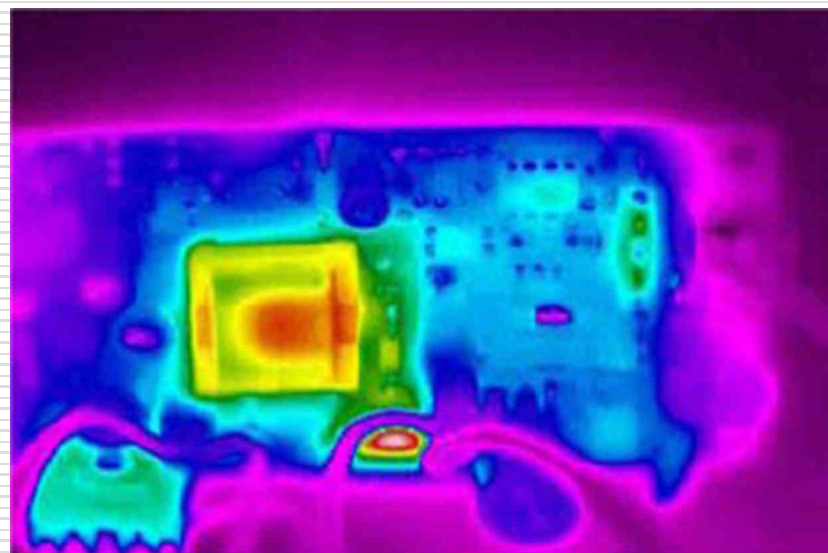


图8 电路板及红外热像图

4、机械温度诊断应用实例

□ 5) 汽车研发中的故障诊断

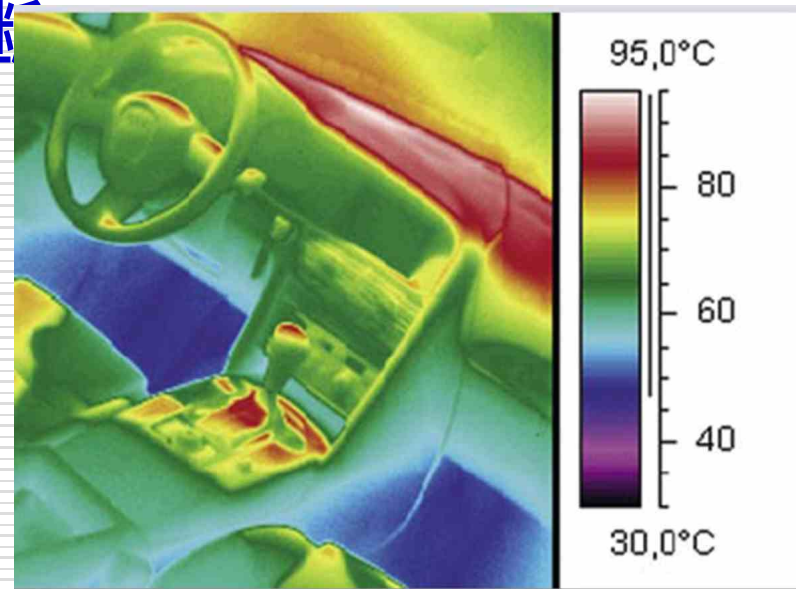
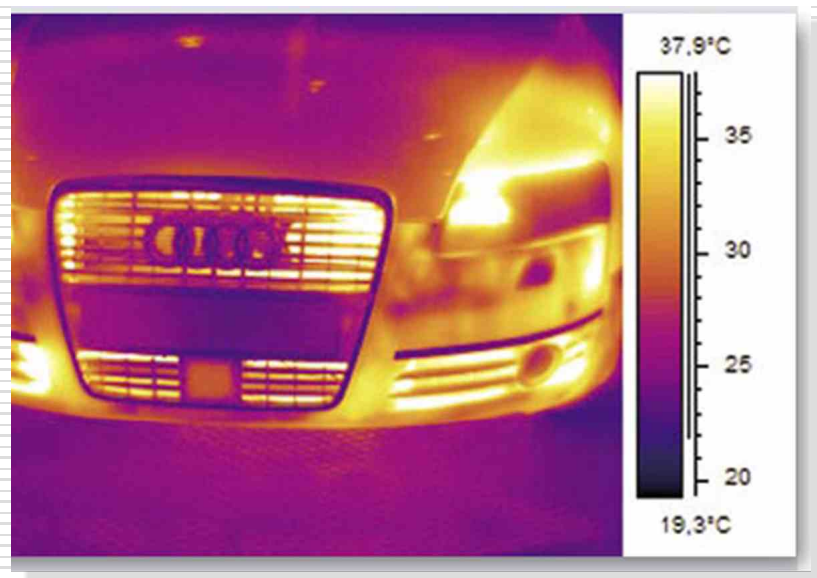


图8 汽车研发红外热像图



On the tyre testbed: infrared camera detects rolling resistance and heat development of tyre

4、机械温度诊断应用实例

□ 6) 冶金行业故障诊断

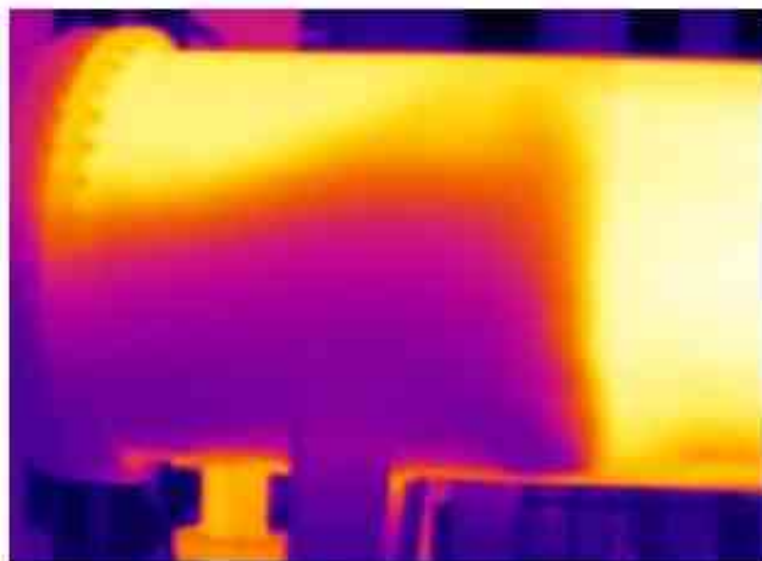


图8 钢水包及红外热像图

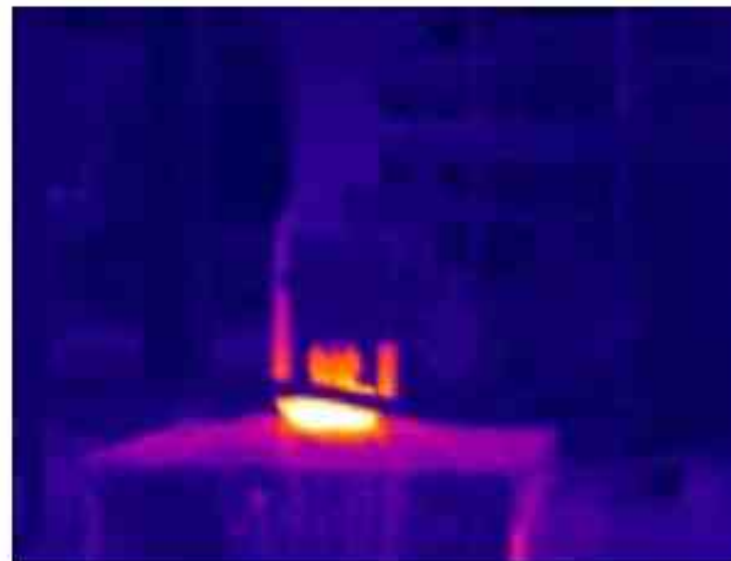
4、机械温度诊断应用实例

□ 7) 石化行业故障诊断

红外热像仪可以快速、准确地对换热器及阀门进行检测，及时发现设备的泄漏情况，以及对现场的高温点进行检测，避免因泄漏的油气遇上高温点发生爆燃。



换热器列管破裂引起温度异常



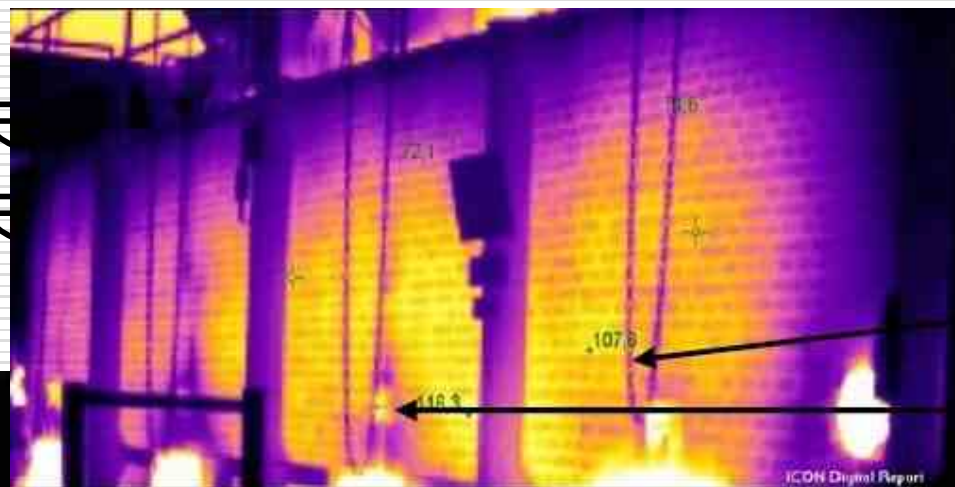
阀门泄漏

4、机械温度诊断应用实例

□ 8) 锅炉和管道热像诊断

□ 锅炉与加热炉等热损失评估

- ◆ 排烟热损失
- ◆ 气体不完全燃烧热损失
- ◆ 固体不完全燃烧热损失
- ◆ 散热损失



加热炉该处需在大修时更换耐火砖

4、机械温度诊断应用实例

□ 8) 锅炉和管道热像诊断

- 热管道的保温材料分析
- 阀门的问题



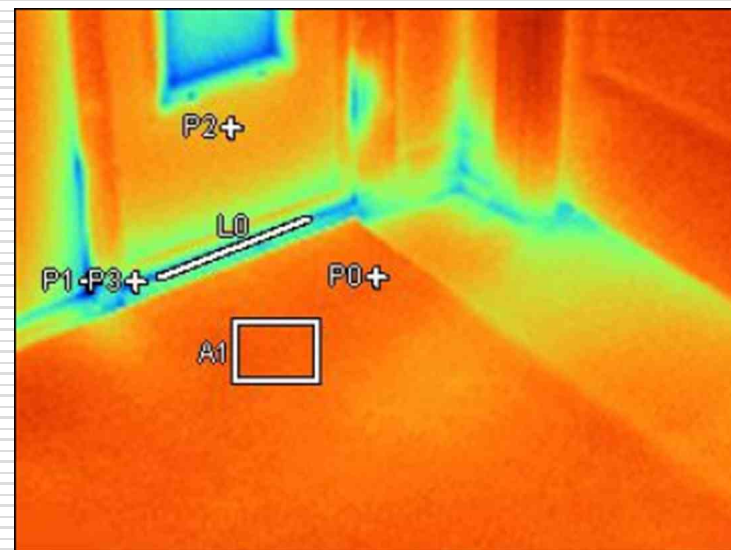
4、机械温度诊断应用实例

□ 9) 建筑热像诊断

- 隔热层缺失或损坏状况
- 寻找建筑损坏部位
- 用于屋顶及旧建筑翻修



屋顶隔热层检测



窗户、连接处等检测

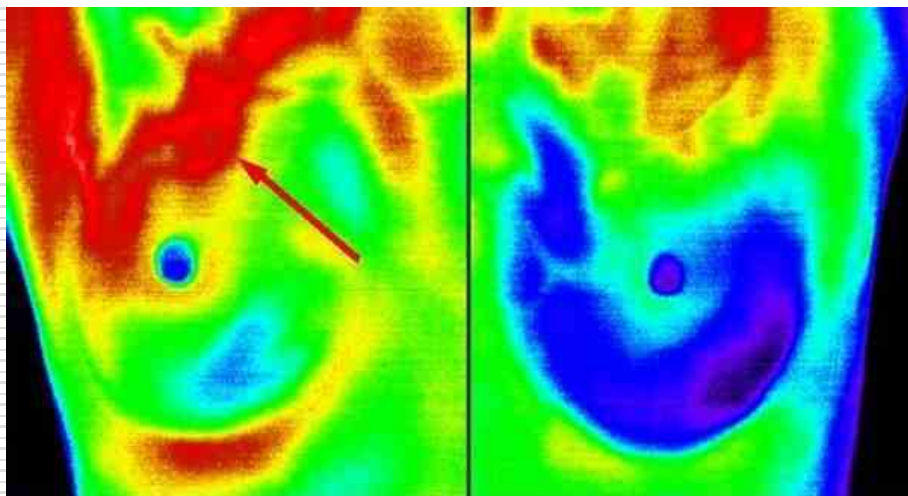
4、机械温度诊断应用实例

□ 10) 医学应用

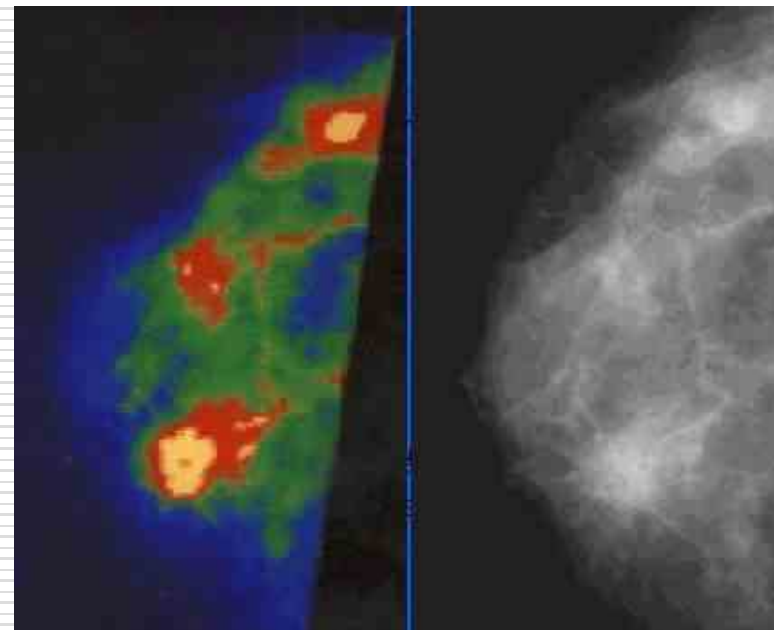
红外热图的诊断标准 ($\sim 20^{\circ}\text{C}$)

诊 断	表 现
炎症	患部温度比周围正常组织增高 $0.5^{\circ}\text{C} \sim 0.7^{\circ}\text{C}$
溃疡	患部温度比周围正常组织增高 $0.7^{\circ}\text{C} \sim 1.0^{\circ}\text{C}$
癌变	患部温度比周围正常组织增高 $\geq 1.0^{\circ}\text{C}$
低温区	病变区域与正常相比温差 $> -0.2^{\circ}\text{C}$
高温区	病变区域与正常相比温差 $> 1.2^{\circ}\text{C}$
常温区	双锁骨上、头、下腰、后颈背部、手、双腋下、肘窝、双腋腹股沟
血管影像	增粗、中断、团状 (瘤) 、扭曲 (压迫) 、卫星影像 (恶性瘤)
区形式	片状、条状 (强直性脊状炎) 、带状、次热区、点状、不规则

4、机械温度诊断应用实例



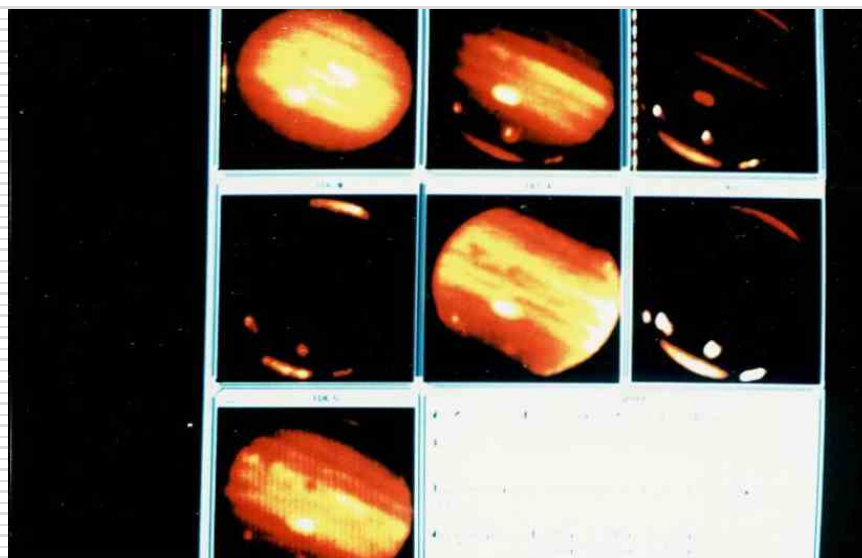
左乳确诊乳腺癌，远红外热像显示，血管明显增粗、代谢旺盛。整体温度明显高于右乳。乳窝处的热区为正常的升温。



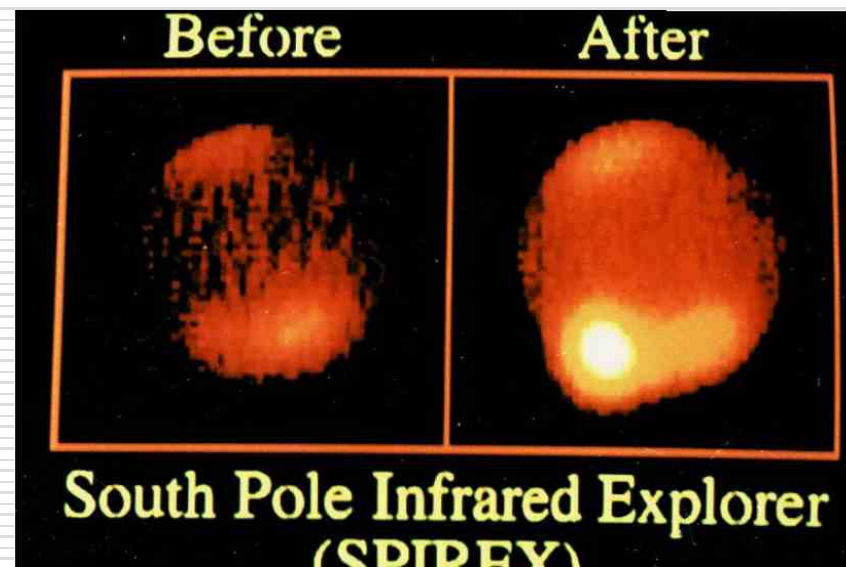
左侧热图为一乳腺癌患者，内部有明显的肿块，已经坏死，右边为X光图片，互相印证，X光中的亮的部分为已经坏死的肿瘤。

4、机械温度诊断应用实例

□ 11) 天文



地面10米望远镜用7种波长观测的彗木碰撞后的红外图像



SL-9彗核C碰撞前后的木星红外图像

4、机械温度诊断应用实例

□ 12) 军事



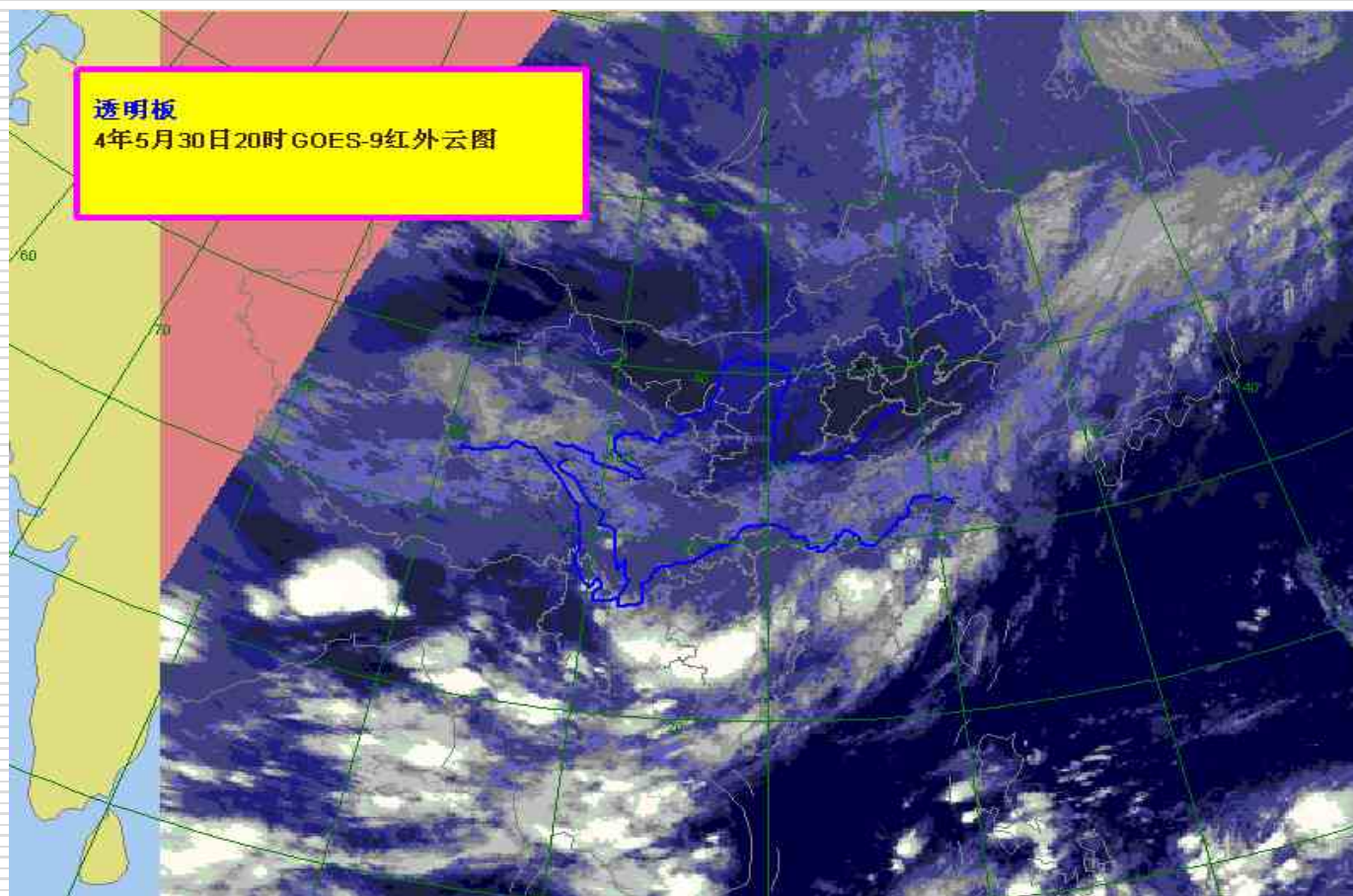
红外望远镜

红外摄像机（英军押解伊战俘）



4、机械温度诊断应用实例

□ 13) 气象预测



红外云图

4、机械温度诊断应用实例

□ 14) 艺术鉴定

Invisible radiation photography is often applied to the study of works of art as here in the painting La Madonna dell'Impannata by Raphael. Invisible radiation imaging reveals a much younger Saint John the Baptist sitting on Joseph's lap found beneath the surface of the visible painting (right). Images © Editech.