

光电检测原理及应用

(下 册)

秦积荣 编著

归绍升 主审

国防工业出版社

内 容 简 介

本书分上、中、下三册出版。上册主要介绍光电传感器的原理、组成、计算及光电检测的基本方法；中册介绍几何量和机械量的光电检测；下册介绍温度、浓度、成份等的光电检测及光电器件在其他方面的应用。

光电检测目前已广泛应用于工业各部门，它能使检测自动化、数字化、无接触化，并能与微型计算机相结合，因而在生产中起着越来越重要的作用。

本书可供从事检测工作的工程技术人员参考，亦可作为高等院校有关专业的选修课教材。

光电检测原理及应用

(下册)

秦积荣 编著

归绍升 主审

责任编辑 崔金泰

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张12 318千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

ISBN 7-118-00182-1/P·2 定价：7.20元

出版说明

秦积荣副教授从事教学数十年，有较丰富的实践经验。为编写本书，他早在六十年代初期就广泛收集了光电检测方面的素材。在十年动乱期间，他继续收集了美、日、苏各国及国内有关工厂、高等院校和科研单位在这方面的材料，并参加了某些光电检测的科研项目，从而为编著本书奠定了基础。本书初稿曾在有关院校的光学仪器、计量仪器等专业作选修课教材试用，效果较好。

在本书的审稿会上，五所院校的教师一致认为本书内容丰富全面，安排合理，层次清楚，文字通俗易懂，弥补了国内在光电检测专业书籍方面的空白。

本书对学习和研究检测技术有一定参考价值。它既可作为高等院校有关专业的选修课教材，也对高等院校、工厂有关人员进行科研和技术革新有一定参考、启发作用。

前 言

随着生产率和自动化程度的提高，在工农业和国民经济各领域中，光电检测的应用越来越广泛。近年来智能机器人的迅速发展，对电子视觉系统——光电检测提出更高的要求。然而全面和系统叙述这方面的书还很少见。因此，编著这本书，一方面可部分满足读者的急需，另一方面可借以推动光电检测技术的进一步普及和发展。

本书涉及面广，为了压缩篇幅，尽量避免与其它书的内容重复，是按下述原则取材的：

1. 力求对生产有实际的参考价值；
2. 一般书上没有涉及到的内容；
3. 由于产品和电子元件在不断更新，着重介绍各种光电检测装置的基本原理和方法；
4. 照顾到光电检测本身的完整性、系统性和理论性。

叙述力求概念清楚，文字通俗易懂。但阅读本书需具有一定的电子技术和光学的基础知识。

本书由上海交通大学归绍升教授担任主审，并有副教授方德政、顾立簏、曹余庚、方志成、孙希鲁，讲师张志练、楼维照、叶章光、郑友琴、陈离等参加审稿。对他们提出的许多宝贵意见，在此表示谢意。在编写过程中，还得到有关领导和同志们的关心和支持，甚为感激。

由于本人水平有限，缺点和错误在所难免，敬希读者批评指正。

秦积荣

1985年5月

目 录

第六章 温度的光电检测	1
§ 6-1 概述	1
§ 6-2 部分辐射光电高温计的理论基础	5
§ 6-3 部分辐射光电高温计	10
§ 6-4 光电亮度高温计的理论基础	21
§ 6-5 光电亮度高温计	26
§ 6-6 光电比色高温计的理论基础	36
§ 6-7 光电比色高温计	41
§ 6-8 光电器件作为二次传感器测量和调节温度	48
§ 6-9 温度的光电程序控制	51
§ 6-10 光电扫描温度计（热像仪）	60
§ 6-11 安全防火及灭火保护装置	68
主要参考资料	86
第七章 浓度及成份等的光电检测	89
§ 7-1 光电装置在发射光谱分析中的应用	89
§ 7-2 光电装置在原子吸收光谱分析中的应用	107
§ 7-3 光电分光光度计	127
§ 7-4 用光电比色法测定溶液的浓度	147
§ 7-5 光电比色气体分析器	160
§ 7-6 用浊度分析法测量溶液的浊度、灰尘和烟的浓度	170
§ 7-7 用光电荧光法测量溶液的浓度	180
§ 7-8 利用化学发光法分析气体	192
§ 7-9 用折射法检测和调节溶液的浓度	206
§ 7-10 用偏振分析法测量溶液的浓度	217
§ 7-11 光电湿度计	231
§ 7-12 粘滞性的光电检测	237
主要参考资料	242

第八章	光电器件在其他方面的应用	246
§ 8-1	光电器件在安全保护中的应用	246
§ 8-2	光电程序控制	254
§ 8-3	光电器件在计数装置中的应用	268
§ 8-4	光量的测量及曝光量的自动控制	276
§ 8-5	根据颜色自动分选、编织及描稿的光电装置	287
§ 8-6	光电器件在函数运算和分析中的应用	300
§ 8-7	光电器件在逻辑电路及调制器中的应用	305
§ 8-8	光电器件在电影上的应用	310
§ 8-9	光通信	315
§ 8-10	光电耦合器件	323
§ 8-11	路灯的光电自动控制	344
§ 8-12	太阳电池	352
	主要参考资料	367

第六章 温度的光电检测

§ 6-1 概 述

一、光电高温计的优点^[1]

利用物体的辐射作用测量温度的高温计有如下优点:

1) 这种测量方法无需接触被测介质, 因而一方面被测物体的温度场不会被扰乱, 另一方面可延长仪表的使用寿命和提高其工作可靠性;

2) 在测温过程中, 光电器件不必和被测介质达到热平衡, 所以仪表的滞后小, 测量速度快(可快到几个毫微秒), 因而能准确无情性地测量热体的温度, 检测温度的迅速变化过程(例如电焊, 高频淬火, 温度变化速度达 $1000^{\circ}\text{C}/\text{s}$), 并能测量运动热体的温度(例如在轧制过程中测量轧件或金属块的温度);

3) 能自动测量、记录、调节温度, 以及读数可远距离传送, 有利于温度的集中检测;

4) 测温范围广。温度计的感受元件不必与被测物体达到同样的温度值, 因而从理论上说仪表的测温上限是不受限制的; 至于下限, 如果采用红外接收器件, 国外已可测至 -170°C ;

5) 测量距离可近可远。近者可达几厘米, 甚至更小; 远者可达近百公里;

6) 可测小面积的目标。目前可测出直径小至 $7.5\mu\text{m}$ 的目标温度;

7) 测量对象以黑体最合适, 但也可测量一般物体。

由于光电高温计具有上述特点, 所以它在各工业部门得到了广泛的应用。例如在冶金工业中, 用来远距离检测金属熔化温

度，控制浇钢、轧钢温度或者热处理温度。在电力工业中，用来监测高速运转的发电机温度、架空的电气设备或输电线的接头温度。在棉纺和化纤物的染色工艺过程中，用来自动控制温度，及检测的确凉等人造纤维的拉丝、定型等温度。在造纸工业中，控制纸张的加工温度。在农业上，测出农作物两个波段的辐射量，可估计其产量。在气象上，可用于天气预报和监测大气污染。在化学工业中，用于遥测反应釜内物质的反应温度，检测感光胶片涂膜温度，特别适合于测量腐蚀性强的溶解物。在煤矿中，监测煤的自燃和预防火灾。在机械加工中，用于监测焊接温度，传动部件或轴承的发热情况，运动齿轮接触面的温度，高速运转的刀具以及加工件的温度等。利用红外扫描显微镜可检查集成电路或大功率管各部分的发热情况及过热点，为集成电路或大功率管的设计和鉴定提供可靠的依据。在红外摄影中，可用来拍摄地面温度的分布，测量土壤、岩石、水、动物、植物等各种物体的表温，并可用于探矿、农业研究和军事情报侦察，以及拍摄人体皮肤温度分布等。此外，在测温仪探测头部配上光学纤维，可以测量物体或零件难于直接观察到的部位温度。

二、作用原理

辐射高温计是以发射体的辐射强度和光谱成份来确定热体温度的仪表。作为辐射能接收器，一般有两大类：（1）热探测器，例如热电偶、热电堆、热敏电阻及热释电探测器等。低温（ 200°C 以下）的测量一般用热探测器；（2）光电器件，在高温（ 1000°C 以上）和中温一般用光电器件作为接收器。本书着重叙述光电高温计，因而以光电器件作为辐射能接收器。

最简单的辐射高温计原理示于图 6-1-1。由热体 1 发出的辐射能量，经透镜 2 照射于光电器件 3。热体的温度越高，它发出的辐射能量越多，光电器件 3 的参数（例如光电池的 光 生 电 势 等）改变越多，经放大器 4 放大后由测量仪表 5 测出，因而从仪表 5 可测得热体的温度。

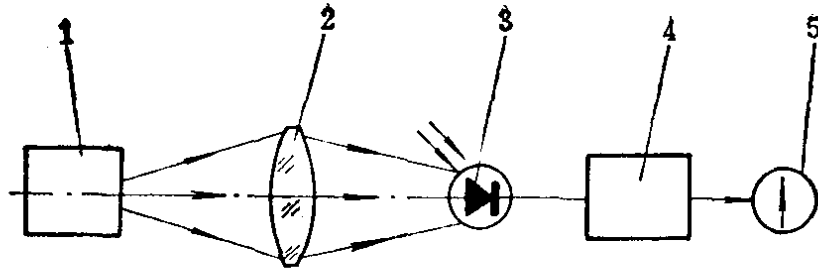


图6-1-1 光电辐射高温计的原理图

用光电高温计测量时，产生的误差可能来自被测物 1、背景 2、辐射途径 3 或高温计 4（图 6-1-2）^{〔2〕}。测量时应注意以下

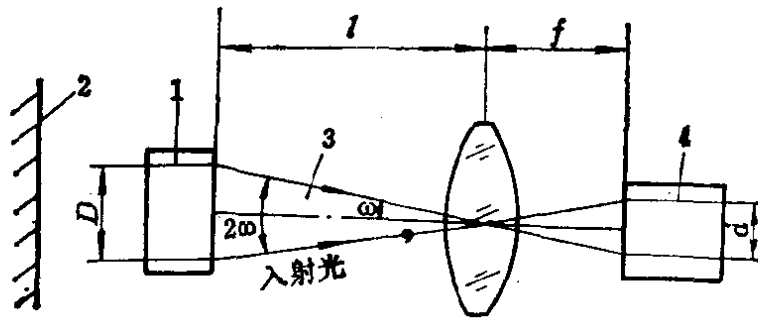


图6-1-2 使光电高温计产生误差的来源

几点：

1. 被测物体的黑度系数要影响测量的精度（原因见 § 6-2 节的说明）

2. 背景的影响

被测物的周围，如有太阳光、电灯光或较强的热源时，应注意测温仪的置放位置，使仪器的视场内，无被测物以外的直射或反射辐射能量，必要时需在仪器上加上遮光套筒以避免杂散光和背景辐射。

3. 在辐射路径中的影响

（a）对辐射路径的状况应有所了解。如果测温的距离较远，大气中的水蒸气、二氧化碳及臭氧等会吸收红外辐射能，造成测量误差。水蒸气、二氧化碳及臭氧吸收红外线的典型曲线如图 6-1-3 所示。仪器所选择的工作波段应避开上述气体的吸收光谱

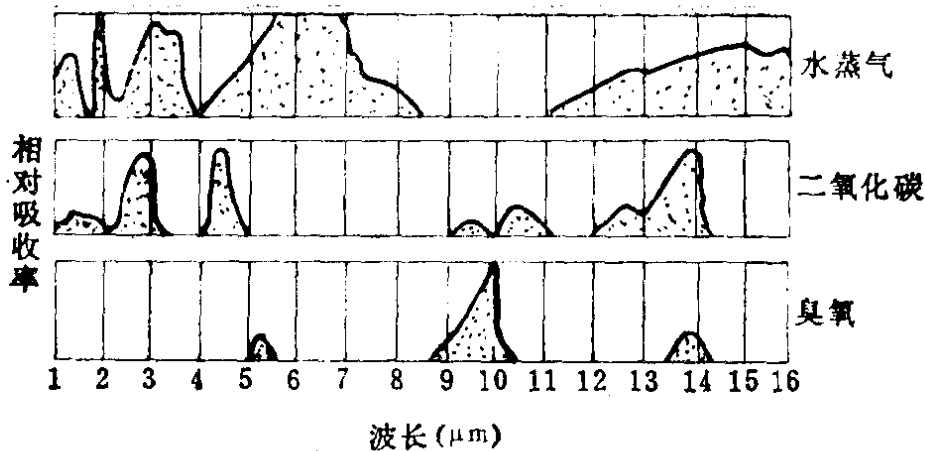


图6-1-3 水蒸气、二氧化碳及臭氧吸收红外线的典型曲线

范围，以保证仪器正确地工作。

(b) 若在辐射路径中有尘埃等微粒子，则要散射和遮住部分辐射能量，这时最好吹去尘埃，净化空气或采用光学纤维，使尘埃不能进入辐射路径中。利用光学纤维还可减少背景和杂散光的影响，可使高温计远离高温区域和被测物，使高温计更有利地工作^[8]。

4. 辐射高温计的影响

(a) 辐射高温计一般都具有光学聚焦系统。测量时，放置辐射高温计的位置，必须满足以下关系：

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \quad (6-1-1)$$

式中 l 为物距， s 为像距， f 为光学系统的焦距。

有些仪器，本身具有像距或焦距调整系统，通过调整可使仪器满足一定距离（物距）的测量要求。

(b) 辐射高温计的重要指标之一是视场角 2ω ，可由图6-1-2 求出。

当物距远大于焦距时，像距近似等于系统的焦距 f ，角度

$$\omega = \text{tg}^{-1} \frac{d/2}{f} \quad (6-1-2)$$

式中 d 为接收元件的线度或直径，在小角度时

$$\omega = \frac{d}{2f}$$

即
$$2\omega = \frac{d}{f} \quad (6-1-3)$$

此视场就是检测元件通过光学系统物体被检测到的角度值。为了与扫描视场相区别，有时也将上述视场称为瞬时视场。视场单位有：(a) 度、分、秒制；(b) 毫弧度制（或称千分制）

$$1 \text{ mrad} = \frac{360}{2\pi} \times 10^{-3} = 3.4' \quad (6-1-4)$$

对于以后要讨论的部分辐射和亮度法测温仪，必须使被测物充满视场，满足被测物的线度 D （直径）等于 $2\omega l$ ，其中 l 为物距。因此，辐射高温计对 $\frac{l}{D}$ 或 $\frac{D}{l}$ 有一定的要求， $\frac{l}{D}$ 称为距离系数，测量时应满足仪表指出的距离系数，否则会引起较大的误差。

(c) 环境温度改变时，由于光电器件的性能和滤光片的透过率发生变化等原因，会造成测量误差，特别是在环境温度较高时更为严重。在此情况下，最好加上水冷套或其他补偿装置。

上面叙述了影响测量精度的几种可能因素，测量时应根据现场条件进行分析和判断，然后采取不同的措施，使仪器正确、可靠地工作。

目前光电高温计的类型较多^[4,5]，按作用原理可分为五类：(1) 部分辐射法；(2) 亮度法；(3) 比色法；(4) 三色测温法；(5) 最大波长法。后面两种的应用较少，一般的辐射测温仪均属前三种^[6]，故对前三种方法在下面分别加以叙述。

§ 6-2 部分辐射光电高温计的理论基础

热体的温度，可通过测量其所发出的辐射能来求得。

如果有一物体，它在任何温度时对射到它上面的任何波长的辐射都能全部吸收，则称它为绝对黑体。在自然界中，绝对黑体

是不存在的，所有实际的物体，对辐射能不可能全部吸收，即实际物体吸收辐射能的能力都小于绝对黑体。

根据斯忒藩-波尔兹曼定律，绝对黑体在单位时间内单位面积上，波长从 0 到 ∞ 所射出的总辐射能 E_0 与热力学温度 T 有如下关系式

$$E_0 = \sigma T^4 \quad (6-2-1)$$

式中 σ 为斯忒藩-波尔兹曼常数。

对于不同的物体，在相同温度下的热辐射能力不同。所以如果要根据辐射能的方法求得物体的温度，首先必须知道该物体的热辐射能力。为此，在了解光电辐射高温计之前，首先介绍一下与热辐射能力有关系的黑度系数。

一、黑度系数 ε ，亦称比辐射率或相对辐射能力

它用分数表示，是指某物体由辐射作用所放出的热能 E 与绝对黑体在相同温度下所放出热能 E_0 之比，即

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{E}{\sigma T^4} \quad (6-2-2)$$

E 为一定温度下，单位时间内由某物体单位表面上，波长从 0 至 ∞ 之间所放射出去的辐射总能量，其单位为 $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{(7)}$ 。

用 ε_λ 代表物体的单色辐射黑度系数，仿照前面所述可得：

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0\lambda}} \quad (6-2-3)$$

式中 E_λ 和 $E_{0\lambda}$ 各表示某物体和绝对黑体，对于波长由 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 的辐射放热能力，它属于所讨论的波长范围 $d\lambda$ ，也就是说：

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad (6-2-4)$$

数值 E_λ 叫做单色辐射强度，它的单位是 $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \mu\text{m}$ 。

对于所有的实际物体而言， $E < E_0$ 和 $E_\lambda < E_{0\lambda}$ 。也就是说， $0 < \varepsilon < 1$ 和 $0 < \varepsilon_\lambda < 1$ ，不论是 E 和 E_λ ，或是 ε 和 ε_λ ，都随物体的物质和它的表面情况而定。

实际物体辐射能力的不定性，即 ε 随各物体的特性而异，所以供测量一种物体温度用的辐射高温计，不能用于测量其他物体的温度。因此，辐射高温计通常按绝对黑体的辐射强度刻度，其方法如下：

当绝对黑体的总辐射能与非黑体（实际物体）的总辐射能相等时，此时绝对黑体的温度叫做非黑体的辐射温度（黑体温度）。根据辐射温度的定义，非黑体在真实温度 T 时的总辐射能 E 等于黑体在温度 T_0 时的总辐射能，即

$$E = \varepsilon \sigma T^4 = \sigma T_0^4 \quad (6-2-5)$$

由此得非黑体的真实温度 T 与辐射温度 T_0 的关系如下：

$$T = T_0 \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (6-2-6)$$

式中 ε 为与物体温度有关的黑度系数。由于一切物体的辐射能力都低于绝对黑体的辐射能力，即 $\varepsilon < 1$ ，用波长 0 至 ∞ 全辐射测出的辐射温度 T_0 永远低于被测物体的真实温度 T 。例如，将黑度系数为 0.8 的铁加热到 500°C 时，用黑体定标的仪器读出的辐射温度（黑体温度）

$$T_0 = \sqrt[4]{\varepsilon} T = \sqrt[4]{0.8} \times (500 + 273) - 273 = 457^\circ\text{C}$$

由上述可知，要根据物体的辐射作用来测量它们的温度，首先测出它们的辐射温度（黑体温度），然后再在所测出的辐射温度上，乘上随物体黑度系数而变的修正值，以便求出物体的真实温度。

二、部分辐射光电高温计

黑体在各绝对温度时的单色辐射强度与波长的关系，见图 6-2-1。在波长 λ 从零到无穷大的整个光谱范围内，以测其辐射功率来确定温度的仪器，称为全辐射测温仪。如果用热电堆（为许多热电偶的串接组合）作为辐射接收器，它对所有波长的热辐射都能吸收，所以这类测温仪属于全辐射型（仪器的原理与光电器件作为接收器相似，但热电堆作为接收器不属于本书讨论范

围)。考虑到所用光电器件的光谱响应，光学系统的光谱透过率等因素，利用光电器件接收不可能成为全辐射型。例如测量 1000°C 的目标，多用石英透镜，它只透过 0.2 到 $4\mu\text{m}$ 的辐射，这部分能量约占全波长辐射能量的 65% 。若再采用 PbS 光敏电阻，由于它的光谱响应范围只占某一波段，能使它起响应的辐射能更小。设光谱波长从 λ_1 到 λ_2 之间的光线能透过光学系统，光电器件较灵敏，见图 6-2-1，因它的灵敏区仅为波长 $\lambda = 0$ 至 ∞ 的一部分，故称它为部分辐射光电高温计。在这类高温计中，一般不用滤光片，来自热体辐射的辐射能，经物镜后直接投射至光电器件上。

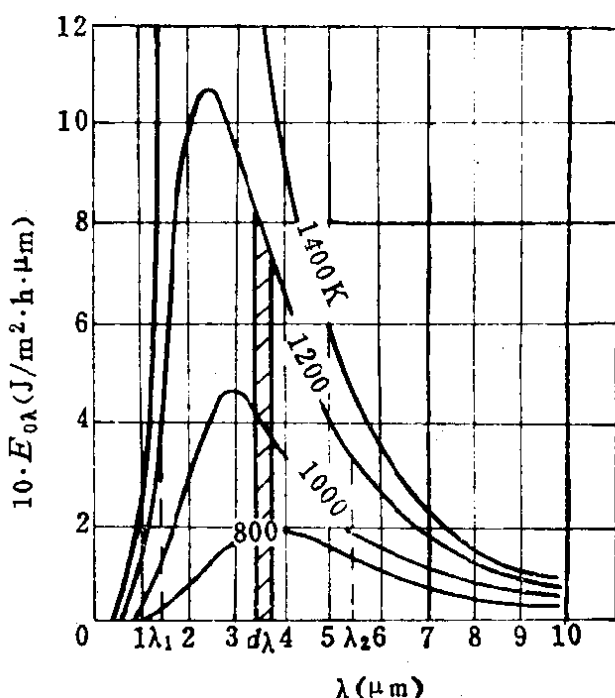


图6-2-1 黑体在各种绝对温度时的辐射强度与波长的关系

器件较灵敏，见图 6-2-1，因它的灵敏区仅为波长 $\lambda = 0$ 至 ∞ 的一部分，故称它为部分辐射光电高温计。在这类高温计中，一般不用滤光片，来自热体辐射的辐射能，经物镜后直接投射至光电器件上。

欲根据绝对黑体对高温计进行刻度时，必须知道该光电器件的光电流与绝对黑体的温度之间的关系。光电器件的光电流与黑体的辐射功率有如下关系：

$$I_0 = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{0\lambda} \cdot s_\lambda d\lambda \quad (6-2-7)$$

式中 I_0 ——当绝对黑体温度等于 T 时，光电器件的光电流值；

K ——随构造而定的高温计的常数；

$E_{0\lambda}$ ——当温度为 T 和波长为 λ 时，绝对黑体的单色辐射强度；

s_λ ——光电器件相应于波长为 λ 的光谱灵敏度；

λ_1 和 λ_2 ——光谱范围的上、下限，在这范围内，光线能透过光

学系统，光电器件的光谱灵敏度较高。

从图 6-2-1 可知，当波长 λ 一定时， $E_{0\lambda}$ 由温度决定；当温度升高时， $E_{0\lambda}$ 随着增加。因此，可从光电流的大小决定绝对黑体的温度。在 6-2-7 式中，光电器件的光谱灵敏度 s_λ 由于某种原因改变时，光电流的大小与温度之间的数值关系也要改变，因而引起高温计的示值误差。

6-2-7 式表示绝对黑体辐射时在光电器件上产生的光电流。实际物体辐射时所产生的光电流如下：

$$I = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda E_{0\lambda} s_\lambda d\lambda \quad (6-2-8)$$

式中新引入的 ε_λ 为被测物体在温度 T 时，对于波长为 λ 的单色辐射黑度系数。单色辐射黑度系数 ε_λ 除了与温度 T 和波长 λ 有关外，还与物体的表面性质有关。增加物体表面的粗糙度会使它的黑度系数增加；金属表面的氧化程度不同，也会使物体的黑度系数发生变化，因而也不便于求出物体的黑度系数。

前面已经述及，光电式高温计的指示值可用来决定黑体的温度或实际物体的辐射温度，但是要将这种光电式高温计的指示值换算成实际物体的真实温度有一定的困难，因为必须知道 ε 或波长由 λ_1 到 λ_2 之间的 ε_{λ_1} 和 ε_{λ_2} 的数值。在目前，对于大多数物体来说，缺少 ε 或 ε_λ 的数值资料。目前对于 ε 的测定和校正方法，由于受生产现场使用条件的限制，这些方法的使用受到一些限制。因此，在需知道温度真实值的光电高温计中，黑度系数 ε 的校正及其影响的消除，仍是一个需待解决的重要问题⁽⁸⁾。

在实际测量中，可以采用装窥测管的办法⁽⁹⁾，人为地创造黑体辐射的条件。窥测管 2 由涂黑的金属管或陶

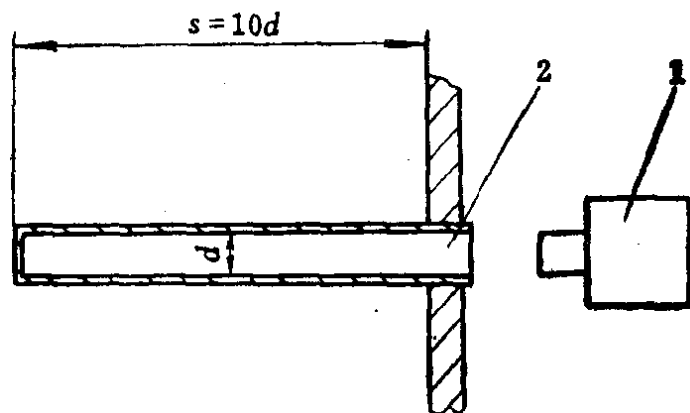


图 6-2-2 窥测管及辐射高温计的安装

瓷管等耐火材料制成，它的一端封闭，一端开口，如图 6-2-2 所示。当将窥测管插入被测介质中，使其封闭端受热，并以辐射高温计 1 瞄准其内腔端底，这个端底近似黑体， $\varepsilon \approx 1$ ，当管子底部与被测介质达到热平衡时，用光电高温计 1 测量管子底部的温度就较接近于被测介质的真实温度，但这样做不方便，有可能干扰被测对象的温度场。

部分辐射光电高温计虽不易测量真实温度，但在自动检测系统和自动调节系统中，能够很有效地作为对象温度偏离给定值的信号传感器，因这时毋需知道其真实温度。

它的主要优点是：投射在光电器件上的总光通量要比后面讲的亮度高温计强得多（在亮度高温计中，由于装上传光片，使投射在光电器件上的总光通量减少很多），因此在部分辐射高温计中，所用的放大器要比亮度高温计的要求低。

在工业生产中，小零件的热处理，大部件的局部淬火，以及高温炉中对温度的监视，都需要有控制温度的设备，以保证产品的质量，特别是温度迅速变化的场合，例如火焰或感应法表面淬火等，由于热惯性，一般的高温计不能反映温度的迅速变化，因而光电高温计在工业上应用得较广泛。

§ 6-3 部分辐射光电高温计

图 6-1-1 示出直接作用的高温计原理，当温度升高时，放大器 4 输出的信号增大，由测量仪表 5 直接测出温度。这种仪表的优点是简单，响应速度快，缺点是当环境温度变化时，光电器件和放大器参数、放大倍数要改变，直接影响读数。为避免这些缺点，实用上经常采用与标准辐射源比较的高温计。

由于直流放大器有零点漂移的缺点，往往先对辐射通量进行调制，然后采用交流放大器。如果采用选频放大器，还可减少杂散信号对仪表的干扰，因此在下面讨论有光调制和标准辐射源的高温计。

一、采用光调制盘和标准辐射源的光电高温计⁽¹⁾

1. 工作原理

根据 (6-2-7) 和 (6-2-8) 两式, 部分辐射光电高温计是通过热体在波长 λ_1 至 λ_2 范围内的辐射能来测量热体的表面温度的。

上节已经指出, (6-2-8) 式中的黑度系数 ε_λ 与物体的材料、表面状况及物体所处的温度等有关, 为方便和统一起见, 仪表按 $\varepsilon_\lambda = 1$ 的绝对黑体进行分度。

由于测量物体辐射的绝对能量比较麻烦, 一般使被测物体的辐射能量和一个标准辐射体的能量进行比较, 如图 6-3-1 所示⁽¹⁰⁾, 这个标准辐射体一般为钨丝灯泡。

来自被测物 1 的辐射能量 ϕ_1 通过保护玻璃 2, 物镜 3, 孔径光阑 4, 调制盘 6, 元件屏盖进光孔 8 后入射到硫化铅 (PbS) 光敏电阻或硅 (Si) 光电池 9 上; 来自标准灯 21 的辐射通量 ϕ_2 也入射到光敏电阻或光电池 9 上。通过由电动机 7 带动的调制盘的调制作用, 这两束辐射通量交替地入射到光敏电阻或光电池上。预先调整好, 使 ϕ_1 和 ϕ_2 的相位相差 180° 。 ϕ_1 和 ϕ_2 的差值 $\Delta\phi$ 经光敏电阻或光电池变成电信号, 经前置放大器 10 和主放大器 12 放大后送至相敏检波器 15。同时, 由同步信号发生器 13 来的同步信号, 经同步放大器 14 放大后, 也送至相敏检波器, 它的相位与 ϕ_1 (或 ϕ_2) 同相。将放大后的差值信号进行全波相敏检波, 再经滤波器 16 后的直流信号送到显示仪表的放大器 17, 放大器输出的功率足以使可逆电动机 18 转动。可逆电动机通过传动机构带动显示仪表 19 的指针和滑线电阻 20 的滑动臂, 从而改变了标准灯泡的电流, 也即改变了标准灯的辐射通量 ϕ_2 , 使 $\Delta\phi$ 减小。当 $\Delta\phi = 0$ 时, 前置放大器的输入为零, 相敏检波器也无输出, 显示仪表的放大器无功率输出, 可逆电机停止转动, 系统到达平衡, 滑线电阻的触点停留在一定位置, 使灯泡的电流维持一定, 此时被测辐射通量 ϕ_1 等于灯泡的辐射通量 ϕ_2 ,