

兵工十五规划教材

红外系统

HONGWAIXITONG

石晓光 王彬 杨进华 编



兵器工业出版社

兵工十五规划教材

前言

随着科学技术的飞速发展,红外技术在军事领域中的应用日益广泛。本书是根据十五规划教材的要求,在广泛收集国内外相关资料的基础上,结合编者多年的教学经验和研究成果编写而成的。本书力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。

红 外 系 统

第一部分即第一章,主要讲述红外系统的基本概念、组成、分类及应用。第二章讲述红外探测器的基本原理、结构、性能及测试方法。第三章讲述红外成像系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第四章讲述红外制导系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第五章讲述红外识别系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第六章讲述红外通信系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第七章讲述红外对抗系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第八章讲述红外系统的发展趋势及展望。

石晓光 王 彬 杨进华 编

第二部分即第二章至第八章,主要讲述红外系统的组成、分类及应用。第三章讲述红外探测器的基本原理、结构、性能及测试方法。第四章讲述红外成像系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第五章讲述红外制导系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第六章讲述红外识别系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第七章讲述红外通信系统的基本原理、结构、性能及测试方法。第八章讲述红外对抗系统的基本原理、结构、性能及测试方法。

第三部分即第九章,主要讲述红外系统的性能指标、测试方法及应用。第十章讲述红外系统的可靠性、维修性及寿命。第十一章讲述红外系统的电磁兼容性。第十二章讲述红外系统的保密性。第十三章讲述红外系统的抗干扰性。第十四章讲述红外系统的抗辐射性。第十五章讲述红外系统的抗核辐射性。第十六章讲述红外系统的抗激光辐射性。第十七章讲述红外系统的抗微波辐射性。第十八章讲述红外系统的抗电磁脉冲辐射性。第十九章讲述红外系统的抗核电磁脉冲辐射性。第二十章讲述红外系统的抗核电磁脉冲辐射性。

本书中引用的参考文献,除在正文中注明外,另列于书后。本书在编写过程中,参考了国内外大量的文献资料,在此向有关作者表示衷心的感谢。本书在编写过程中,得到了许多同志的帮助,在此向他们表示衷心的感谢。本书在编写过程中,得到了许多同志的帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

① 第 1 章 绪论

1.1 红外系统的组成

1.2 红外系统的分类

1.3 红外系统的应用

1.4 红外系统的发展趋势

1.5 本章小结

1.6 习题

1.7 参考文献

1.8 思考题

1.9 本章小结

1.10 习题

1.11 参考文献

1.12 思考题

1.13 本章小结

1.14 习题

1.15 参考文献

1.16 思考题

1.17 本章小结

1.18 习题

1.19 参考文献

1.20 思考题

1.21 本章小结

兵器工业出版社

TN21

gh1

内 容 简 介

本书论述了红外仪器的基本原理、结构、性能以及初步设计方法。书中介绍了红外辐射测温与探测、辐射调制与调制盘、红外跟踪系统、红外搜索系统和热成像系统及红外系统的结构、工作原理、性能等。对各类系统中的典型产品进行了分析。最后讲述了红外系统的性能方程、系统设计的内容、初步设计方法和设计步骤。

本书是红外技术系列教材之一,可作为高等院校红外技术、光电技术专业本科生教材。

形 采 伐 工

能 半 批 制 淋 王 光 烈 召

图书在版编目(CIP)数据

红外系统/石晓光,王彬,杨进华编. —北京:兵器工业出版社,2005. 8

ISBN 7-80172-518-2

I. 红... II. ①石...②王...③杨... III. 红外系统 IV. TN21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 089776 号

出版发行:兵器工业出版社
发行电话:010-68962596,68962591
邮 编:100089
社 址:北京市海淀区车道沟 10 号
经 销:各地新华书店
印 刷:军事医学科学院印刷厂
版 次:2005 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
印 数:1—1350

责任编辑:莫丽珠
封面设计:李 晖
责任校对:郭 芳
责任印制:赵春云
开 本:787×1092 1/16
印 张:7.75
字 数:189 千字
定 价:14.00 元

前 言

红外系统课程旨在使学生通过学习,掌握红外系统的基本知识、系统总体设计的一般原理和基本方法,学会系统性能分析及总体结构的初步设计。

全书共分为三大部分:

第一部分即第一章和第二章从整机角度讲述了红外系统中的测温仪以及探测器方面的基础知识。由于调制技术是红外系统中的一个重要部分,且这部分内容在系列教材的其他书籍中不包括,因此本书中做了着重的讲述。

第二部分为第三章和第四章。介绍了几类红外系统的结构工作原理、性能、特点,红外跟踪、搜集系统及热成像系统的基本原理和基本参数。

第三部分即第五章,讲述了红外系统的性能方程、初步设计方法并介绍了系统的设计步骤。

书中相应的章节编入了一些国内外的有关技术资料和数据,以供设计时选用。

编 者

2005 年 6 月

第三章 红外跟踪及搜索系统

§ 3.1 红外跟踪系统的组成及其工作原理	140
§ 3.2 对导引装置跟踪系统的基本要求	142
§ 3.3 坐标变换器	147
§ 3.4 陀螺系统的跟踪原理	148
§ 3.5 红外导弹及其导引装置	149
§ 3.6 成像跟踪简介	149
§ 3.7 导引的红外对抗	150
§ 3.8 红外跟踪搜索系统	152
§ 3.9 行扫描搜索系统	161
§ 3.10 其他扫描方式或搜索系统	162
§ 3.11 红外搜索系统的探测概率和虚警概率	166

第四章 热成像系统

§ 4.1 热成像系统的组成、工作原理和基本参数	171
§ 4.2 扫描方式和扫描机构	173
§ 4.3 几种常用的光机扫描方案	175

目 录

第一章 红外辐射测温及探测	(1)
§ 1.1 红外辐射测温的基本原理	(1)
§ 1.2 全辐射测温仪	(6)
§ 1.3 亮度测温仪	(12)
§ 1.4 双波段测温仪	(14)
§ 1.5 红外探测器的特性参数	(16)
§ 1.6 红外探测器的特征数据	(20)
§ 1.7 红外探测器使用的致冷器	(23)
第二章 辐射调制与调制盘	(25)
§ 2.1 概述	(25)
§ 2.2 用调制盘提取目标的方位信息	(26)
§ 2.3 用调制盘进行空间滤波	(28)
§ 2.4 调幅式调制盘	(30)
§ 2.5 调频式调制盘	(34)
§ 2.6 脉冲编码式调制盘	(36)
§ 2.7 双色调制盘	(38)
第三章 红外跟踪及搜索系统	(40)
§ 3.1 红外跟踪系统的组成及其工作原理	(40)
§ 3.2 对导引装置跟踪系统的基本要求	(42)
§ 3.3 坐标变换器	(43)
§ 3.4 陀螺系统的跟踪原理	(44)
§ 3.5 红外导弹及其导引装置	(46)
§ 3.6 成像跟踪简介	(49)
§ 3.7 导弹的红外对抗	(50)
§ 3.8 红外跟踪搜索系统	(55)
§ 3.9 行扫描搜索系统	(61)
§ 3.10 其他扫描方式的搜索系统	(65)
§ 3.11 红外搜索系统的探测概率和虚警概率	(66)
第四章 热成像系统	(71)
§ 4.1 热成像系统的组成、工作原理和基本参数	(71)
§ 4.2 扫描方式和扫描机构	(73)
§ 4.3 几种常用的光机扫描方案	(75)

§ 4.4	摄像方式	(79)
§ 4.5	信号处理及显示	(84)
§ 4.6	红外前视仪	(86)
§ 4.7	手持式热像仪	(89)
第五章	系统分析与设计	(93)
§ 5.1	红外系统的作用距离	(93)
§ 5.2	扩展源情况下系统的信噪比方程	(97)
§ 5.3	搜索系统和跟踪系统的作用距离方程	(97)
§ 5.4	测温仪器的温度方程	(99)
§ 5.5	系统总体设计的主要内容	(101)
§ 5.6	热成像系统的设计	(109)
§ 5.7	搜索系统的设计	(114)

第一章 红外辐射测温及探测

凡是温度高于绝对零度的物体都会产生红外辐射。物体的红外辐射特性——辐射能量的大小及其按波长的分布——与它的表面温度有着十分密切的关系。因此,通过对物体自身红外辐射的测量,便能准确地确定它的表面温度,这就是红外辐射测温,简称红外测温。红外辐射测温具有测温范围宽、测量精度高、反应速度快以及不必接触被测物体等优点。因而在炼钢生产、交通运输、机械加工、电力传输以及农业生产等各方面,都有着广泛的应用。

§ 1.1 红外辐射测温的基本原理

一、定律和公式

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1-1)$$

斯忒藩—玻尔兹曼定律

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1-2)$$

维恩位移定律

$$\lambda_m T = a \quad (1-3)$$

对于实际的辐射体(非黑体),在整个波长范围内的辐射出射度(即总辐射功率)为

$$M' = \epsilon \sigma T^4 \quad (1-4)$$

式中 ϵ ——辐射体的发射率,它是光谱发射率的平均效果

$$\epsilon = \left[\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} M_{\lambda} d\lambda \right] / \sigma T^4 \quad (1-5)$$

由上可见,如果测得某温度下物体的辐射功率,即可根据上面各式确定物体的温度。

二、三种表观温度及其测量方法

在实际测量中,由于所测量的波长范围不同,而有不同的测量方法和测量仪器,而且它们所得的都不是辐射体的真实温度而是所谓表观温度。这是因为,一切辐射体都不是黑体,辐射测温将辐射体的辐射用黑体的辐射来近似表示,以最佳近似得出的黑体温度,即辐射体的表观温度。

辐射体的真实温度是用与辐射体处于热平衡的标准温度计测得的温度(K)。

下面分别介绍三种表观温度及其测量原理。

(一) 辐射温度全辐射测温

物体的辐射温度是用与它有相同总辐射功率的黑体的温度所表示的温度。

设一物体的真实温度为 T , 发射率为 ϵ , 则测量该物体的总辐射功率时, 仪器输出的电信号为

$$U_s = C\epsilon\sigma T^4 \quad (1-6)$$

式中 σ ——斯忒藩—玻尔兹曼常数;

C ——仪器的系数, 包括探测器的响应度、电子线路的增益等。

用这种仪器测量与被测物体有相同总辐射功率的黑体的温度, 设该黑体的温度为 T_r , 仪器输出的电信号为

$$U'_s = C\sigma T_r^4 \quad (1-7)$$

由于该黑体的总辐射功率与被测物体的总辐射功率相同, 所以仪器测量它们的输出电信号也应相等, 即应有 $U_s = U'_s$, 于是我们有

$$T = \frac{1}{\sqrt[4]{\epsilon}} T_r \quad (1-8)$$

或

$$T_r = \sqrt[4]{\epsilon} T \quad (1-9)$$

用此法测得的黑体的温度 T_r , 即为物体的辐射温度。它是根据测量波长从零到无限大整个光谱范围物体的总辐射功率用黑体定标的仪器所标定的温度。这种测温法称为全辐射测温, 这样用黑体定标的仪器称为全辐射测温仪。由上看出, 当用一个全辐射测温仪来测量一个非黑体的温度时, 测得的是辐射温度 T_r , 必须知道物体的发射率 ϵ 后才能换算成真实温度 T 。由于 $\epsilon \leq 1$, 所以这样读出的物体的辐射温度 T_r 总是低于物体的真实温度 T , 发射率越低, 误差越大。

将发射率为 $\epsilon_{Fe} = 0.8$ 的铁和发射率为 $\epsilon_{Al} = 0.1$ 的铝均匀加热到 500°C , 而用黑体温度定标的全辐射测温仪读出的辐射温度, 铁和铝分别为

$$\text{铁} \quad T_{r, Fe} = \sqrt[4]{0.8} \times (500 + 273) - 273 = 458^\circ\text{C}$$

$$\text{铝} \quad T_{r, Al} = \sqrt[4]{0.1} \times (500 + 273) - 273 = 162^\circ\text{C}$$

(二) 亮度温度 亮度法测温

物体的亮度温度是在给定波长附近一窄光谱范围, 用与它有相同辐射功率的黑体的温度所表示的温度。

设在测温仪器装有中心波长为 λ_0 、波长间隔为 $\Delta\lambda$ 的滤光片, 用这仪器测量物体(一般看作朗伯辐射体)温度时, 仪器所接收物体的辐射功率为 $\epsilon_{\lambda_0} M_{\lambda_0} \Delta\lambda$, 仪器输出电信号为

$$U_s = C\epsilon_{\lambda_0} M_{\lambda_0} \Delta\lambda \quad (1-10)$$

如果我们选取的波长和被测物体的温度范围满足

$$\lambda_0 T \ll c_2 \quad (1-11)$$

式中 c_2 为第二辐射常数, 则普朗克公式为

$$M_{\lambda_0} = \frac{c_1}{\lambda_0^5} e^{-c_2/\lambda_0 T} \quad (1-12)$$

于是, 式(1-9)成为

$$U_s = C\epsilon_{\lambda_0} \frac{c_1}{\lambda_0^5} e^{-c_2/\lambda_0 T} \Delta\lambda \quad (1-13)$$

用这仪器测量与被测物体有相同辐射功率的黑体的温度,设该黑体的温度为 T_b ,则仪器输出电信号为

$$U'_s = C \frac{c_1}{\lambda_0^5} e^{-c_2/\lambda_0 T} \Delta\lambda \quad (1-14)$$

按定义,式(1-12)与(1-13)相等,我们得到

$$\epsilon_{\lambda_0} = e^{\frac{c_2}{\lambda_0} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} \right)} \quad (1-15)$$

将上式两边取对数,得 T_b 与 T 的关系为

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} = \frac{\lambda_0}{c_2} \ln \epsilon_{\lambda_0} \quad (1-16)$$

于是

$$T = \frac{c_2 T_b}{c_2 + \lambda_0 T_b \ln \epsilon_{\lambda_0}} \quad (1-17a)$$

$$T_b = \frac{c_2 T}{c_2 - \lambda_0 T \ln \epsilon_{\lambda_0}} \quad (1-17b)$$

此法测得的 T_b 即为物体的亮度温度。它是根据测量给定波长 λ_0 附近一窄光谱范围的辐射用黑体定标的仪器确定的温度。这种测温方法称为亮度测温,这类用黑体定标的测温仪称为亮度测温仪。用亮度测量物体的温度必须预先知道物体在特征波长 λ_0 的光谱发射率 ϵ_{λ_0} 后才能换算成真实温度。由式(1-17)可以看出,亮度法所读出的温度 T_b 亦是低于物体表面的真实温度 T ,并且 ϵ_{λ_0} 越小,误差越大。

例 1: 仪器特征波长 $\lambda_0 = 0.66 \mu\text{m}$,并可认为测量波段非常窄。测量温度为 $T = 1500^\circ\text{C}$ 的铁水,光谱发射率为 $\epsilon_{\lambda_0} = 0.8$ 。仪器用黑体定标,读出铁水的温度为

$$T_b = \frac{1.4388 \times 10^{-2} \times (1500 + 273)}{1.4388 \times 10^{-2} - 0.66 \times 10^{-2} \times (1500 + 273) \times \ln 0.8} - 273 = 1468^\circ\text{C}$$

(三) 颜色温度 双波段测温

物体的颜色温度(简称色温)是在某两个给定波长附近的窄光谱范围测得物体的辐射功率之比,用与它有相同的辐射功率之比的黑体温度所表示的温度。

设在测量仪器中,有两个中心波长各为 λ_1 和 λ_2 、波长间隔各为 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 的滤光片,并设对所选的波长和所测量的温度范围有 $\lambda_i T = c_2$,式中 c_2 为第二辐射常数, $i=1,2$ 。用此仪器测量物体的温度,仪器输出的电信号为

$$\text{对于波长 } \lambda_1: U_{s_1} = C \epsilon_{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda_1^5} e^{-c_2/\lambda_1 T} \Delta\lambda_1 \quad (1-18)$$

$$\text{对于波长 } \lambda_2: U_{s_2} = C \epsilon_{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda_2^5} e^{-c_2/\lambda_2 T} \Delta\lambda_2 \quad (1-19)$$

仪器对这两个波长间隔测得的事体的辐射功率之比显示为输出电信号 U_{s_1} 与 U_{s_2} 之比值,为

$$U_s = \frac{U_{s_1}}{U_{s_2}} = \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \left[\exp \frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right] \left(\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_2} \right) \quad (1-20)$$

用此仪器测量黑体的温度 T_c ,得相应的两个特定波长输出电信号之比为

$$U'_s = \frac{U'_{s_1}}{U'_{s_2}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \left[\exp \frac{c_2}{T_c} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right] \left(\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_2} \right) \quad (1-21)$$

按定义,式(1-20)和式(1-21)相等,我们得到 T_c 与 T 的关系为

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln \epsilon_{\lambda_2} - \ln \epsilon_{\lambda_1}}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)} \quad (1-22)$$

于是

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) T_c}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) - T_c \ln \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}}} \quad (1-23)$$

$$T_c = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) T}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) + T \ln \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}}} \quad (1-24)$$

此法测得的 T_c 即为物体的颜色温度。它是根据测量两个给定波长 λ_1 和 λ_2 的辐射功率之比,用黑体定标的仪器所确定的温度。这种测温方法称为双色法测温或双波段测温。这类测温仪器也相应地称为双色测温仪或双波段测温仪。

由式(1-24)可见,物体的颜色温度 T_c 可低于或高于物体的真实温度(由 ϵ_{λ_1} 和 ϵ_{λ_2} 的相关大小决定)。因此,对于双色测温,只要对被测材料做一了解,选用适当的波段,使两波段的光谱发射率相差不太大,可使读出的温度非常接近于物体的真实温度。

例 2:一双波段测温仪的两个特定波长为 $\lambda_1 = 2.05 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 2.45 \mu\text{m}$, 测量温度为 424°C 的抛光铝,若铝在 λ_1 和 λ_2 的光谱发射率分别为 $\epsilon_{\lambda_1} = 0.088$ 和 $\epsilon_{\lambda_2} = 0.076$, 则用该仪器测得的抛光铝的色温为

$$T_c = \frac{1.4388 \times 10^{-2} \left(\frac{1}{2.45 \times 10^{-8}} - \frac{1}{2.05 \times 10^{-8}} \right) \times (424 + 273)}{1.4388 \times 10^{-2} \times \left(\frac{1}{2.45 \times 10^{-8}} - \frac{1}{2.05 \times 10^{-8}} \right) + (424 + 273) \times \ln \frac{0.088}{0.076}} - 273$$

$$= 492^\circ\text{C}$$

测量的绝对误差为 $\Delta T = 492 - 424 = 68^\circ\text{C}$, 相对误差为 $\frac{\Delta T}{T} = \frac{68}{424} = 0.16 = 16\%$

三、三种测温方法的比较

(一) 温度灵敏度

测温仪器的温度灵敏度 S 的定义(参看下节)为物体相对温度变化 dT/T 引起的仪器输出信号电压的变化 dU_s/U_s , 即

$$S = \frac{dU_s/U_s}{dT/T} \quad (1-25)$$

从(1-6)、(1-13)、(1-20)各式,得三种测温仪的温度灵敏度分别为

$$S_r = 4 \quad (1-26)$$

$$S_b = c_2/\lambda T \quad (1-27)$$

$$S_c = c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) / T \quad (1-28)$$

结果表明,全辐射测温仪的灵敏度 S_r 不随温度变化,而另外两种测温仪和灵敏度 S_b 和 S_c 都随温度变化。

例如,在测量亮度温度时,取 $\lambda_0 = 0.65 \mu\text{m}$; 测量颜色温度时,取 $\lambda_1 = 0.65 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.45 \mu\text{m}$,

我们有

$$S_r = 4 \quad (1-29)$$

$$S_b = 2.2 \times 10^4 / T \quad (1-30)$$

$$S_c = 9.8 \times 10^3 / T \quad (1-31)$$

将三种方法的灵敏度随温度的变化情况绘于图 1.1 中,可以看出,在不同的测温范围,三种测温仪的灵敏度不同

- (1) 当 $T < 2450\text{K}$ 时, $S_b > S_c > S_r$;
- (2) 当 $2450 < T < 5000\text{K}$ 时, $S_b > S_r > S_c$;
- (3) 当 $T > 5500\text{K}$ 时, $S_r > S_b > S_c$ 。

这样,我们可以根据测温范围来选定适当的测温方法。

如果 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ 取其他数值,上面讨论的结果将有所不同。

(二) 与真实温度的差别

三种辐射测温法,均以黑体为标准定出,由于被测物体不是黑体,因此测得的温差与物体的真实温度有差别。下面求出各方法的相对测温误差,进行比较。

令 $\Delta T_r = T_r - T, \Delta T_b = T_b - T, \Delta T_c = T_c - T$,则由式(1-9),(1-17)和(1-23)得各相对误差为

$$\frac{\Delta T_r}{T} = \sqrt[4]{\epsilon} - 1 < 0 \quad (1-32)$$

$$\frac{\Delta T_b}{T} = T_b \frac{\lambda_0 \ln \epsilon_{\lambda_0}}{c_2} < 0 \quad (1-33)$$

$$\frac{\Delta T_c}{T} = T_c \frac{\ln(\epsilon_{\lambda_1} / \epsilon_{\lambda_2})}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad (1-34)$$

从以上结果及式(1-9)、(1-17)和(1-23)看出,辐射温度 T_r ,亮度温度 T_b 总是低于物体表面的真实温度 T ,而颜色温度 T_c 可低于或高于物体表面的真实温度 T ,依在两种波长下,由物体光谱发射率的相关大小来决定。

三种方法中,以全辐射法的辐射温度 T_r 与真实温度的差别受发射率的影响最大,故在用此类仪器测温时,须做 ϵ 值影响的修正。

四、对测温仪器的基本要求

(一) 精度

对于测温仪器,要求对温度的测量有一定的精度。测温仪器的精度即是指温度的测量值对温度标准值的误差。测温仪器的测量误差是由温度灵敏度、随机误差和系统误差决定。

温度灵敏度是指被测物体的温度的微小变化时,仪器输出信号电压的变化。测温仪器的温度灵敏度受探测器噪声和电子线路噪声的限制,其极限灵敏度即噪声等效温差。

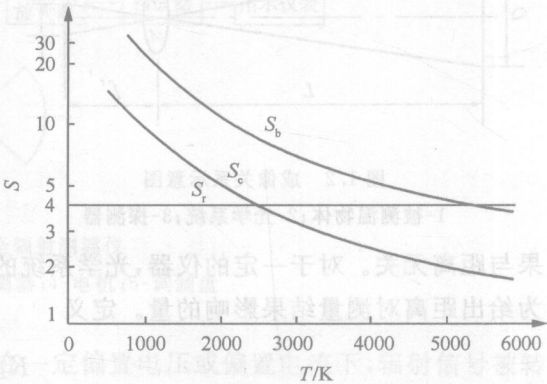


图 1.1 三种测温法的灵敏度曲线

随机误差是指由一些随机干扰因素造成的测量误差。

系统误差是由环境温度变化、被测物体发射率变化、测量距离变化等所引起的误差,以及显示机构误差的总和。系统误差可以采取不同的方法来补偿和校正。

(二) 距离系数

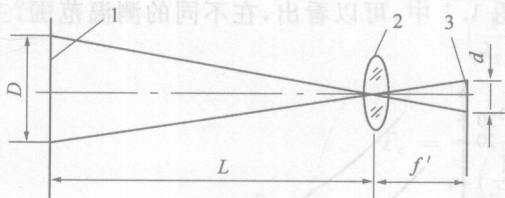


图 1.2 成像关系示意图

1-被测温物体;2-光学系统;3-探测器

如图 1.2 所示,设 L 为被测物体到测温仪光学系统的距离, D 为被测物体的直径, d 为探测器的直径, f' 为光学系统的焦距。由图可见,当 $\frac{L}{D} = \frac{f'}{d}$ 时,目标像恰好盖满探测器面积,仪器光学系统接收到的目标辐射能全部落在探测器上。当 $\frac{L}{D} < \frac{f'}{d}$ 时,仪器接收的能量不变,测量结

果与距离无关。对于一定的仪器,光学系统的焦距 f' 和探测器的尺寸 d 为一定值,比值 L/D 为给出距离对测量结果影响的量。定义

$$K_L = \frac{L}{D} \quad (1-35)$$

为测温仪的距离系数。对于一定尺寸的物体,只有在距离 $L < K_L D$ 的范围内,测量结果才与距离无关。在实际测量中,如果被测物体的尺寸和距离不满足 $L < K_L D$ 式的关系,则产生测量误差。若要得到准确读数,须对测量结果进行校正。

K_L 的值可以从几十到几百,距离系数越大,仪器制造越困难。

§ 1.2 全辐射测温仪

辐射测温仪器和其他红外系统一样,包括如下四个主要部分:光学系统、探测器、信号处理电路和显示器或记录机构。

红外辐射测温根据其原理可以测得物体的辐射温度、亮度温度或颜色温度,对应三种表观温度的测量,测量仪器的结构也有所不同。因此,相应地测量仪器也分为三类,即全辐射测温仪、亮度测温仪和双波段测温仪。本节开始我们将分别介绍它们的结构原理及性能特点。

一、简单的全辐射测温仪

图 1.3 所示为一简单的全辐射测温仪方框图。被测物体的红外辐射经光学系统(透镜或反射镜)聚焦到探测器上。当置于探测器前的调制盘(或斩波器)不遮挡光路时,探测器接收到来自目标的辐射能;当调制盘挡住光路时,探测器接收到调制盘的热辐射,即调制盘使探测器交替接收目标和调制盘的辐射功率,其差值为

$$P = \frac{1}{\pi} \tau_a \tau_0 \frac{A_o A_d}{f^2} \sigma \epsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-36)$$

式中 P ——探测器接收到的辐射功率;

T_1 、 T_2 ——被测物体和调制盘的温度;

ϵ ——被测物体的发射率;

A_o 和 A_d ——光学系统的通光孔径和探测器的面积；

τ_a 和 τ_o ——由被测物体到仪器路程的大气透射比和光学系统的透射比；

f ——光学系统的焦距；

σ ——斯忒藩—玻耳兹曼常数。

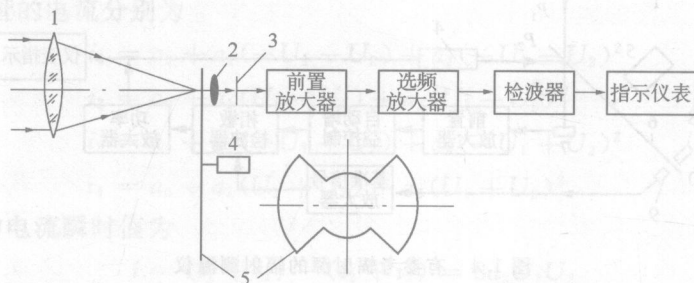


图 1.3 简单的全辐射测温仪

1-聚光物镜;2-场镜;3-探测器;4-电机;5-调制盘

探测器接收到交变辐射后,阻值发生变化。在一定偏置电压或偏置电流下,辐射信号被转换成电信号。信号处理电路包括前置放大器、选频放大器和检波器。前置放大器将探测器输出的微弱电信号进行预放大,选频放大器将给定频率的信号进行放大而抑制其他频率的信号。选频放大器输出信号的幅度与被测物体的温度相对应,检波器将此电信号变为直流信号,送至仪表显示。

这类测温仪的缺点是,调制盘的温度即环境温度(由式(1-36)可见),在同样的目标温度下,随着环境温度的改变,探测器所接收到的交变辐射功率也会改变,探测器的性能也随环境温度的改变而变化,都将会造成测量误差。此外,不同的目标发射率不同,虽然其温度相同,但仪器输出信号大小不同,也会造成测量误差。探测距离对测量结果的影响也需要校正。

二、对环境温度影响的补偿

为消除上述由于调制盘温度随环境温度变化而造成的测量误差,通常采用下面几种方法:(1)利用温度控制回路使仪器(包括调制盘、探测器、滤光片等部件)恒温,即恒温法;(2)在仪器内配置标准辐射源,把被测信号和标准信号进行比较后读数,即光学补偿法;(3)利用一外加电信号,抵消因调制盘温度变化的影响,即电气补偿法。我们介绍光学补偿和电气补偿两种方法。

(一) 光学补偿法

用一参考辐射源,如图 1.4 所示,调制盘交替地使目标辐射 P_1 直接照到探测器上和使参考源的辐射 P_2 被反射到探测器上。因调制盘的反射比很高而发射率很低,故调制盘的辐射可忽略不计。由于 P_1 和 P_2 的相位差 π ,所以探测器输出信号即为来自目标辐射 P_1 和参考源辐射 P_2 的差值 ΔP 的信号。 ΔP 经探测器转换成电信号后经前置放大、主放大和基准信号产生器产生的基准信号一起送入相敏检波器进行相敏检波。然后用检波得到的直流信号去控制参考辐射源的供电电压,使探测器接收到的参考源的辐射功率 P_2 跟随目标的辐射功率 P_1 而保持差值为零。在系统处于“零平衡”状态时 $\Delta P=0$,这时参考源上的供电电压就对应于目标

的温度,由指示仪表指示出来。

下面简单介绍基准信号的产生和相敏检波的原理。

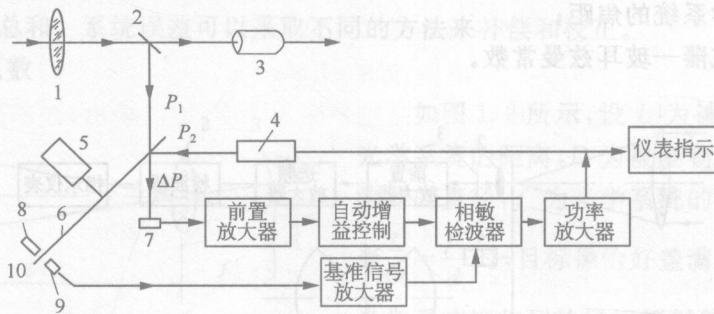


图 1.4 有参考辐射源的辐射测温仪

- 1-光学系统;2-分束镜;3-瞄准镜;4-参考辐射源;5-电机;6-调制盘
7-探测器;8-照明光源;9-硅光电二极管;10-基准信号产生器

(1) 基准信号的产生:图 1.5 所示为一种光电式基准信号产生器的原理图。基准信号产生器是由一个照明光源和一个光敏元件(如硅光电二极管)组成。照明光源和光敏元件分别置于调制盘的两侧,当调制盘旋转时,照明光源的辐射光经调制盘调制后变成交变辐射照射到光敏元件上变成交变电信号,即做为基准信号,其频率与目标辐射(或参考源的辐射)经调制盘调制后探测器所产生的电信号的频率相同。适当地选择照明光源和光敏元件的机械位置,使基准信号的相位和目标辐射(或参考源的辐射)的电信号的相位相同(或相反)。基准信号的相位和目标辐射(或参考源的辐射)的信号同步变化,故基准信号也称为相位同步信号。

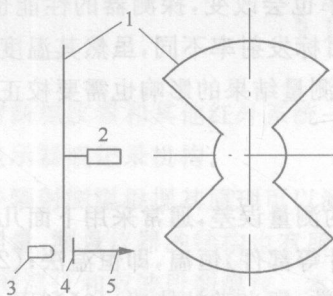


图 1.5 光电式基准信号产生器

- 1-调制盘;2-电机;3-照明光源
4-光敏元件;5-送至基准信号放大器

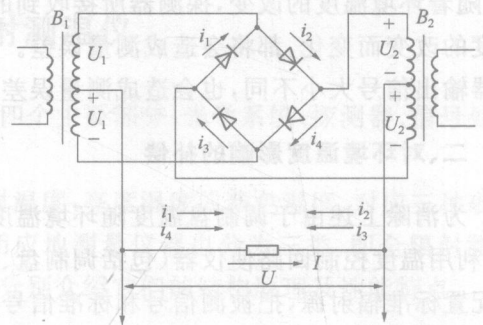


图 1.6 二极管桥式相敏检波电路

(2) 相敏检波原理:图 1.6 所示为由二极管组成的桥式相敏检波电路。四个二极管的特性完全一致,两个变压器的中心抽头准确。在二极管组成的桥路上,通过变压器分别作用有两个信号 U_1 和 U_2 ,二者频率相同但初相位不同,设分别为 φ_1 和 φ_2 则初相位差 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。二输入信号电压可写成

$$U_1 = U_{10} \sin \omega t \quad (1-37)$$

$$U_2 = U_{20} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-38)$$

设四个二极管的伏安特性可表为

$$i_j = a_0 + a_1 U_{D_j} + a_2 U_{D_j}^2 \quad (1-39)$$

式中 U_{D_j} ——加在第 j 个二极管 D_j 上的电压 ($j=1, 2, 3, 4$);

a_0, a_1, a_2 为比例系数。

则流过四个二极管的电流分别为

$$i_1 = a_0 + a_1(-U_1 - U_2) + a_2(-U_1 - U_2)^2 \quad (1-40a)$$

$$i_2 = a_0 + a_1(U_1 - U_2) + a_2(U_1 - U_2)^2 \quad (1-40b)$$

$$i_3 = a_0 + a_1(-U_1 + U_2) + a_2(-U_1 + U_2)^2 \quad (1-40c)$$

$$i_4 = a_0 + a_1(U_1 + U_2) + a_2(U_1 + U_2)^2 \quad (1-40d)$$

流过负载 R_L 中的电流瞬时值为

$$i = (i_1 + i_4) - (i_2 + i_3) = 8a_2 U_1 U_2 \quad (1-41)$$

输出电压的瞬时值为

$$\begin{aligned} U &= iR = 8a_2 R U_1 U_2 \\ &= 8a_2 R U_{10} U_{20} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1-42)$$

输出电压的平均值为

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi 8a_2 R U_{10} U_{20} \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) d(\omega t) \\ &= 4a_2 R U_{10} U_{20} \cos \varphi = U_0 \cos \varphi \end{aligned} \quad (1-43)$$

式中

$$U_0 = 4a_2 R U_{10} U_{20}$$

由式(1-43)可以看出,相敏检波器的输出直流电压 $\bar{U}$ 与两个交变输入电压 U_1 和 U_2 的幅值 U_{10} 和 U_{20} 以及它们的初相位差 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 有关。若将 U_2 作为基准电压,使它的幅值 U_{20} 保持不变, U_1 作为目标辐射或参考源辐射经调制后由探测器输出的信号电压,则此时输出直流电压 $\bar{U}$ 只与输入信号电压 U_1 的幅值 U_{10} 和二者的初相位差 φ 有关了。

由式(1-43)也可看出,相敏检波器的输出直流电压与二输入电压初相位差 φ 之间为余弦关系,当 $\varphi=0$ 或 π 时输出最大,但方向相反;当 $\varphi=\pi/2$ 或 $3\pi/2$ 时输出为零,如图 1.7 所示。

以上便是相敏检波的基本原理。以后将要讲到,红外跟踪系统中的坐标变换器即是根据相敏检波的基本原理构成的。

(二) 电气补偿法

这种方法是加一个与环境温度 T_2 有关的电信号,抵消因 T_2 变化所带来的输出电压的变化。

根据式(1-36),探测器的输出电压为

$$U_s = R \Delta P = R m (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-44)$$

式中 R ——探测器的响应度;

$m = \tau_a \tau_0 \frac{A_0 A_d}{\pi f^2} \sigma \epsilon$, 是各项常数的总和。

设放大器和检波器的总增益为 G , 则从放大器输出的信号电压为

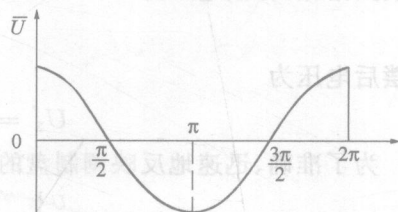


图 1.7 输出电压与二输入电压初相位差之间的关系

$$U_s' = GU_s = GR \quad m(T_1^4 - T_2^4) = K(T_1^4 + T_2^4) \quad (1-45)$$

式中 $K=GR \quad m$ 为常数。

取补偿电压

$$U_b = KT_2^4 \quad (1-46)$$

则补偿以后放大器的输出电压为

$$U_s = U_s' + U_b = KT_1^4$$

即 U_s 仅与 T_1 有关而与 T_2 无关,从而消除了环境温度 T_2 的影响,使表头直接指示目标的温度。

补偿电压可在检波前加入,也可在检波后加入,如图 1.8 所示。后者为直流补偿,仅有幅值问题比较易行;前者为交流补偿,有波形和相位问题。

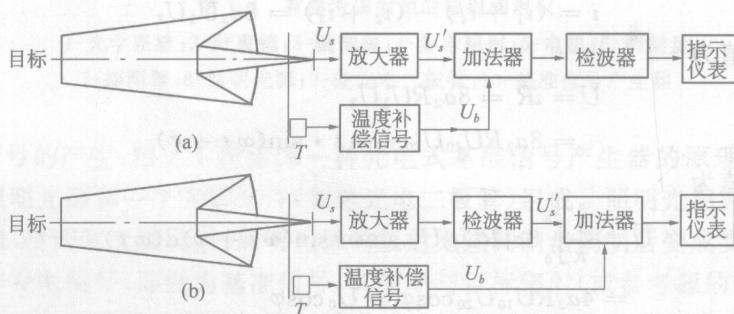


图 1.8 补偿式测温仪电原理图

(a) 检波前相加; (b) 检波后相加

U_s' 和 U_b 的关系如图 1.9 所示。由图可见,为了使表头指示摄氏温度,即 $T_1 = 273K = 0^\circ C$ 时表头指零,补偿电压为

$$U_b' = K(T_2^4 + 273^4) \quad (1-47)$$

补偿后电压为

$$U_s' = U_s' + U_b' = K(T_1^4 + 273^4) \quad (1-48)$$

为了准确、迅速地反映调制盘的温度,环境敏感元件应放在尽可能靠近调制盘的地方。

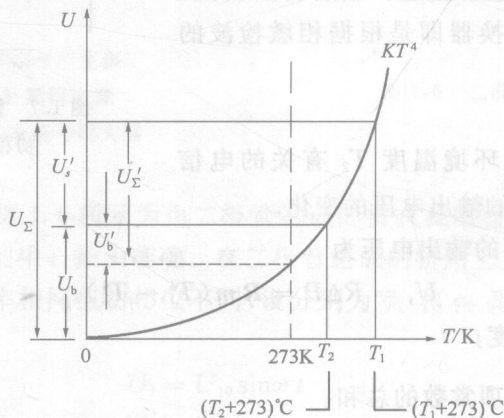


图 1.9 补偿关系示意图

以上对环境温度影响的光学补偿法和电气补偿法不仅在全辐射测温仪中采用,而且在亮度测温仪和双色测温仪中也采用。

三、目标发射率影响的校正

除仪器本身的因素之外,测温时,尚应考虑不同目标有不同的发射率 ϵ 。

由式(1-44)可知,如果发射率 ϵ 和放大器增益 G 的乘积 $G\epsilon$ 保持不变,则放大后的信号保持不变,目标发射率的影响便可得到校正。这也可通过在主放大器反馈电路中加入一组电阻,根据不同目标的发射率,改变这些电阻值来实现这种校正,如图 1.10 所示。

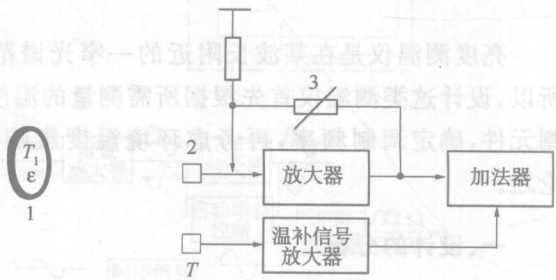


图 1.10 ϵ 校正示意图
1-目标;2-探测器;3- ϵ 校正

四、测量距离的影响

前已讲过,若目标到测温仪的距离 L 不满足 $L < K_L D$ (D 为目标尺寸、 K_L 为仪器的距离系数)时,仪器接收目标的辐射不能盖满探测器的面积,产生测量误差。

在光学系统成像为理想的条件下,距离系数由 $K_L = f'/d$ 确定,当考虑到光学系统的像差及装校误差时,实际的 K_L 值要比计算值大大减小,故 K_L 应取实测值。

距离系数对测量结果的影响,可以通过实际测量来估计。即把目标恒温,在不同的距离 L 下用测温仪测量不同口径 D 的目标,计算出距离系数 $K_L = L/D$,绘出温度指示的相对值与 K_L 的关系曲线。图 1.11 所示为一种典型的红外测温仪的距离系数曲线。从图中看出,不同的 K_L 值有不同的测量误差。每种测温仪都有自己的一条距离系数曲线,不同种类的测温仪的距离系数曲线的形状不同。

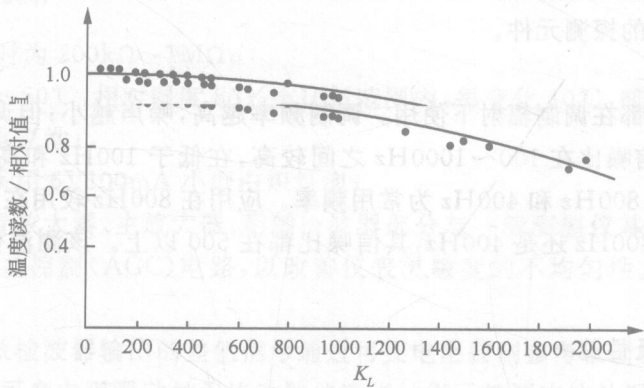


图 1.11 一种典型的红外测温仪的距离系数曲线