



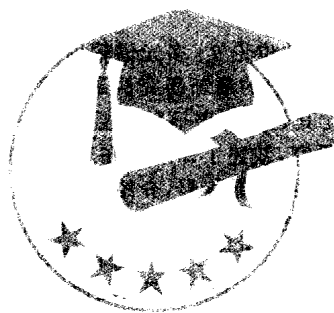
多光谱辐射测温理论与应用

Theory and Practice of Multi-spectral Thermometry

戴景民 等著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



多光谱辐射测温理论与应用

Theory and Practice of Multi-spectral Thermometry

戴景民

著

孙晓刚

卢小冬

丛大成



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书是在戴景民教授的博士学位论文《多光谱辐射测温技术研究》的基础上,融入了近年来他领导课题组在多光谱测温领域的最新研究成果编写而成的.全书共分5章:第1章绪论,主要综述了辐射测温技术,尤其是多光谱辐射测温技术的发展概况和研究情况;第2章多光谱辐射测温法的理论及实验研究,叙述了课题组在三类数据处理方法方面的研究成果,并进行了实验论证;第3章多光谱辐射测温仪器,介绍了课题组近年来研制的棱镜分光式多波长高温计、6点8波长高温计、红外多光谱辐射温度计和精密(标准)多波段高温计的情况;第4章多光谱辐射温度计标定技术研究,介绍了基于波长函数的辐射温度计的一点标定法及其精度校验的理论研究成果以及辐射温度计波长函数自动测量装置、多光谱辐射温度计标定实验和实用型金属凝固点黑体炉的研制情况;第5章多光谱测温仪的应用,介绍了烧蚀材料真温及发射率的多光谱法测量实验,以及固体火箭发动机羽焰温度的多点多光谱测量试验.

本书适合于精密仪器及机械、自动化测试与控制学科专业的高年级本科生、研究生阅读,亦可以作为相关专业科研人员的参考读物.

图书在版编目(CIP)数据

多光谱辐射测温理论与应用/戴景民等著. —北京:
高等教育出版社, 2002

ISBN 7-04-010313-3

I. 多... II. 戴... III. 光谱高温计:辐射温度计
—研究 IV. TH811.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 065440 号

多光谱辐射测温理论与应用

戴景民 等著

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16

印 张 13

版 次 2002 年 4 月第 1 版

字 数 230 000

印 次 2002 年 4 月第 1 次印刷

插 页 1

定 价 21.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

作者简介



戴景民 男,汉族,1963年生于辽宁新民,哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授,博士生导师。1995年12月毕业于哈尔滨工业大学精密仪器系,获工学博士学位。1991年4月至1994年1月前后三次赴意大利罗马大学、意大利国家计量院(IMGC)作访问学者。曾任教研室主任,《哈尔滨工业大学学报》编委,第四届国际电子测量大会程序委员会主席等职;现任国家自然科学基金信息学部评委,大庆市龙凤区政府高级顾问,五常市东亚集团高级顾问。

多年来一直从事工业自动化仪表专业的教学与科研工作,参加和主持科研项目30余项,其中国家自然科学基金5项(2项为申请者),获省部级科技进步奖5项,获国家级新产品称号1项,专利2项,转让产品2个系列,成立2个企业,发表学术论文60余篇。科研专长是多光谱辐射测温技术的研究:在仪器制造方面,成功地研制了国际首创棱镜分光式多波长高温计和6目标8波长高温计,研制了系列无干涉滤光片的工业用辐射温度计;在理论研究方面,首次提出了光谱发射模型自动识别的设想,并成功地将神经网络技术应用于多光谱理论,取得了很好的结果;在应用研究方面,成功地解决了烧蚀材料及固体火箭发动机羽焰温度测量问题,近期在动态加热材料热物性测量方面,获得了较大的基金资助,并且已经取得了阶段性成果。

戴景民教授培养硕士生20余名,博士生7名。

导师简介



强锡富 男,汉族,1932年生于江苏溧阳,哈尔滨工业大学教授,精密仪器及机械学科博士生导师。曾任教研室主任、系主任,中国计量测试学会几何量委员会委员,全国精密仪器专业教学指导委员会副主任委员,国防科工委计量测试专业委员会成员等职;现任中国仪器仪表学会理事,《仪器仪表学报》编委等职。曾参加我国精密仪器专业的创建工作,建立了哈工大精密仪器与机械学科博士点,多年来一直从事精密仪器专业的教学与研究工作,主持完成科研项目11项,其中“大型圆柱度仪研制”获1996年航天工业总公司科技进步一等奖、1997年国家科技进步三等奖,“表面粗糙度三维测量系统”获1987年部级科技进步二等奖,另获部级科技进步二等奖1项,三等奖3项。发表学术论文120余篇,获专利2项。出版著作与主编教材8部,其中《长度测量自动化》获1978年全国科学大会奖、1982年全国优秀图书一等奖,《几何量电测量仪》获1987年机电部优秀教材一等奖、国家级优秀教材奖,《传感器》获1991年机电部优秀教材二等奖。培养硕士生40名,博士生44名。



褚载祥 男,汉族,1936年生于上海,哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授,博士生导师。曾任第十届欧洲热物性大会执行主席,国防计量测试委员会委员,哈尔滨市政协科技委常委委员等职;现任国家自然科学基金信息学部评委,《红外与毫米波学报》编委等职。

褚载祥教授是我国黑体空腔理论研究及多波长辐射测温技术研究的发起人,在国内外具有较高的知名度,主持完成国家自然科学基金、国防科工委及航天工业总公司等纵向及外协课题20余项,获省部级科技进步奖5项,国家级新产品1项,转让产品2个系列,发表学术论文100余篇。培养硕士生20余名,博士生10名。

前 言

本书是在我的博士学位论文《多光谱辐射测温技术研究》的基础上,融入了我课题组近年来在多光谱测温领域的最新研究成果编写而成的。

棱镜分光式多波长高温计的研制是由哈尔滨工业大学褚载祥教授与意大利罗马大学 Ruffino 教授共同倡导的国际合作项目,曾先后得到哈尔滨工业大学校基金、国家自然科学基金(69247001,69777020)和意大利罗马大学国际合作基金的资助。

本书中所有仪器的光学系统都是由哈尔滨工业大学康松高教授设计的,陈文贤教授设计了部分机械结构。第2章的工作是孙晓刚博士、副教授在作者博士学位论文的基础上进一步研究的成果,此章亦由他编写;固体火箭发动机羽焰温度场的测试工作,以及6目标8波长高温计的研制工作是由卢小冬博士在我的指导下完成的,本书采用了他的博士学位论文中的部分内容;红外多波长辐射温度计的研制吸收了丛大成博士学位论文的部分内容。

辐射温度计波长函数自动测量系统的研制工作曾得到航天基金的资助,在研制过程中得到了罗马大学 Ruffino 教授及 Coppa 博士的指导和帮助,肖玉明硕士制作了步进电机细分驱动系统。

多波长高温计的性能测试和定点炉标定实验是在意大利罗马大学实验室及意大利国家计量院 IMGC 实验室内完成的,得到了 Ruffino 先生、Righini 博士及 Coppa 博士的指导和帮助。

烧蚀材料及固体火箭发动机羽焰温度场的测试研究工作是与航天科技集团44所合作进行的,44所范传新总工程师给予了大力支持和帮助,石义国硕士、卢小冬博士、孙晓刚副教授及丛大成博士参加了主要工作。

在本书撰写过程中,范毅博士、孙炳月、施思寒、张丽宏、张昱及郭江等硕士做了大量的绘图及打字工作。

本书的文字编校工作由孙晓刚副教授负责,褚载祥教授对本书进行了审核。在本书出版之际,谨向以上帮助过本研究成果取得及本书出版的机构和个

人表示最衷心的感谢. 谨以此书献给我最敬爱的导师——已故的意大利罗马大学 Ruffino 教授.

由于作者水平有限, 书中难免有错误和不妥之处, 恳请读者提出批评并指正.

戴景民

2001 年 1 月

责任编辑	董洪光
封面设计	于文燕
责任绘图	郝林
版式设计	史新薇
责任校对	殷然
责任印制	韩刚

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 辐射测温技术发展概述	1
1.2 多光谱辐射测温技术研究现状	6
1.3 本书的内容及章节安排	9
第 2 章 多光谱辐射测温法的理论及实验研究	10
2.1 多光谱辐射测温法数学模型的建模方法	10
2.1.1 基于检定常数的数学模型	10
2.1.2 基于亮度温度的数学模型	11
2.1.3 基于参考温度的数学模型	12
2.1.4 不同数学模型计算结果比较	13
2.2 基于固定发射率假设模型的数据处理方法	14
2.2.1 基于现有方法的发射率与波长假设模型的校验	14
2.2.1.1 线性最小二乘法	15
2.2.1.2 非线性最小二乘法	17
2.2.2 求解方程法	21
2.2.3 基于二次测量的数据处理方法	22
2.3 基于可变发射率假设模型的数据处理方法	25
2.3.1 基于自动寻阶法的数据处理方法	25
2.3.2 基于逐步回归法的数据处理方法	28
2.4 基于神经网络的数据处理方法	37
2.4.1 神经网络基本的学习机理	37
2.4.2 BP 网络在多光谱测温中的应用	39
2.4.2.1 BP 网络基本原理	39
2.4.2.2 网络的结构与设计	43
2.4.2.3 输入数据的设计与准备	44

2.4.2.4	检验与产品数据的设计	46
2.4.2.5	网络的初始化	47
2.4.2.6	网络的训练	48
2.4.2.7	仿真实验分析	49
2.4.2.8	随机噪声的影响	49
2.4.2.9	基于神经网络的实用的数据处理方法	52
2.5	多光谱辐射测温理论的实验验证	54
2.5.1	实验方案设计	54
2.5.2	多波长高温计有效波长的标定	55
2.5.3	实验结果分析	56
第3章	多光谱辐射测温仪器	63
3.1	典型仪器介绍	63
3.1.1	滤光片阵列分光式多波长高温计	63
3.1.2	光导纤维束分光式多波长高温计	63
3.1.3	半反半透分光式多波长测温装置	64
3.2	棱镜分光式多波长高温计研制	66
3.2.1	光学系统设计	66
3.2.1.1	取样系统	67
3.2.1.2	分光系统	68
3.2.1.3	多波长高温计光学系统设计	70
3.2.2	电路系统设计	71
3.2.2.1	系统组成框图	71
3.2.2.2	方案选择	71
3.2.2.3	指标核算	74
3.2.3	软件设计	77
3.3	棱镜分光式多波长高温计的性能测试	77
3.3.1	杂光影响	77
3.3.2	距离系数	78
3.3.3	目标尺寸影响	78
3.3.4	动态特性试验	79
3.4	6点8波长高温计研制	81
3.4.1	引言	81
3.4.2	光学系统设计	82
3.4.3	电子电路	84
3.4.3.1	前置放大电路	84

3.4.3.2	同步数据采集系统	84
3.4.4	高速、同步数据采集系统性能测量实验	85
3.4.4.1	传统有效位测量方法分析	86
3.4.4.2	拟合测量方法原理	87
3.4.4.3	测量实验	88
3.4.4.4	信号源与待测量系统的指标关系	89
3.4.4.5	测量通道间的时延测量	89
3.5	红外多光谱辐射温度计	90
3.5.1	引言	90
3.5.2	低温目标红外辐射温度计的研究现状	91
3.5.3	中红外多光谱辐射温度计系统	92
3.5.3.1	光学系统设计	92
3.5.3.2	前置级及数据采集系统	94
3.5.3.3	相干检测——锁定放大器	94
3.6	精密(标准)多波段高温计	98
3.6.1	引言	98
3.6.2	高温计的主要技术指标	99
3.6.3	光学系统设计	100
3.6.4	电气线路设计	100
3.6.5	恒温槽设计	101
第 4 章	多光谱辐射温度计标定技术研究	104
4.1	引言	104
4.2	基于波长函数的辐射温度计的一点标定法	105
4.2.1	一点标定法	105
4.2.2	一点标定法误差的 Monte - Carlo 法估计	105
4.2.2.1	误差源分析	105
4.2.2.2	Monte - Carlo 法估计	106
4.2.2.3	小结	108
4.3	辐射温度计波长函数自动测量装置的研制	109
4.3.1	测量方法	109
4.3.2	测量装置	109
4.3.2.1	总体框图	109
4.3.2.2	步进电机激步驱动装置研制	110
4.3.3	测量实验及数据处理	111
4.3.3.1	单色仪输出功率 MOP 的测量	111

4.3.3.2	多波长高温计输出信号测量及其波长函数求定	112
4.3.4	误差分析	115
4.4	多光谱辐射温度计的标定实验	116
4.4.1	定点炉标定实验	116
4.4.2	高温黑体炉标定实验及数据分析	119
4.5	实用型金属凝固点黑体炉研制	122
第 5 章	多光谱测温仪的应用	125
5.1	烧蚀材料真温及发射率的多光谱法测量	125
5.1.1	引言	125
5.1.2	地面模拟烧蚀系统	126
5.1.3	烧蚀试验及数据分析	127
5.1.3.1	烧蚀试验	127
5.1.3.2	温度数据分析	128
5.1.4	小结	131
5.2	固体火箭发动机羽焰温度的多点多光谱测量	132
5.2.1	固体火箭羽焰的辐射特性研究	132
5.2.1.1	火焰辐射的特点和分类	133
5.2.1.2	固体火箭推进剂羽焰的辐射特性	134
5.2.2	测量实验与数据采集	138
5.2.2.1	推进剂药条模拟试验	138
5.2.2.2	地面搭载试验	139
5.2.2.3	6 目标 8 波长高温计的全过程数据采集技术	141
5.2.2.4	仪器运行程序的其他相关设计	147
5.2.2.5	地面搭载试验记录结果	149
5.2.3	固体火箭发动机羽焰温度及其分布的测量结果与 分析	150
5.2.3.1	理论绝热火焰温度计算	150
5.2.3.2	测量数据预处理	151
5.2.3.3	固体火箭羽焰温度的多光谱分析	152
5.2.3.4	测量结果精度分析	154
5.2.4	小结	155
附录 1	F 分布的理论临界值	156
附录 2	实验一测量结果	157
附录 3	实验二测量结果	162
附录 4	试验一光谱温度	171

附录 5 试验二光谱温度.....	172
附录 6 试验一多光谱温度	174
附录 7 试验二多光谱温度	175
参考文献	177

第1章 绪论

1.1 辐射测温技术发展概述

温度是确定物质状态的最重要参数之一,它的测量与控制在国防、军事、科学实验及工农业生产中具有十分重要的作用.尤其是高温测量,在航天、材料、能源、冶金等领域中占有极重要的地位.

温度的测量方法大致可分为两种:接触法和非接触法.在接触测温法中,热电偶和热电阻温度计应用最为广泛,该方法的优点是设备和操作简单,测得的是物体的真实温度,其缺点是动态特性差,由于要接触被测物体,故对被测物体的温度分布有影响,且不能应用于甚高温测量.目前非接触测温法仍以辐射测温法为主,在过去相当长的时间里,辐射测温法的可靠性和抗干扰性都不太高,而且测量范围往往仅限于较高的温度.但近二十多年,由于电子技术的飞快发展,半导体材料的进步及计算机技术的发展与应用,又由于辐射温度计具有无测量上限,响应速度快及不接触被测对象,因而不影响被测温场等特点,辐射测温技术得到了长足的进步和发展.辐射测温仪器的制造水平、性能指标已有了显著提高,辐射真温测量研究、标定技术研究及应用技术研究亦取得了丰硕成果.

在仪器制造方面,辐射温度计的发展经历了以下几个阶段:隐丝式光学高温计^[1~3]阶段;用光电倍增管作为检测器的光电高温计^[4,5]阶段;以及用硅光电二极管作为检测器的光学测量和光电精密测温^[6~11]阶段.

隐丝式光学高温计出现在20世纪初,直到现在仍在高温(800℃以上)测量领域内被使用.1927年,国际温标采用此种高温计作为金点以上的温度复现及传递标准器.它的工作原理是在峰值为650 nm并在尽可能小的带宽内,使目标与钨灯灯丝的亮度平衡,灯丝消隐在目标中.由于需要人眼来比较亮度平衡,手

动调节灯丝电流,因此人为误差大,不适用于自动控制系统。

20 世纪 60 年代中期,出现了用光电倍增管作为检测器的光电高温计。它是以光电倍增管替代隐丝式光学高温计中的人眼来作亮度比较,具有较高的灵敏度和精度,且不需要人参与,因而被美国标准局 NBS 等国家实验室用来复现国际实用温标。我国也曾采用此种检测元件研制成比较式的基准光电比较仪及高温计式的标准光电高温计,用以复现金点以上的国标温标及传递 $800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温实用温标。

在 20 世纪 70 年代初,Witherell 和 Faulhaber^[12] 指出:硅光电探测器稳定性、线性度及灵敏度优良、结构牢固、寿命长且价格适中,适合于精密光度测量,同时 Ruffino^[13] 在噪声和检测数据方面证明了硅光电二极管应用到高分辨率温度计的可能性。不久,意大利国家计量院 IMGC 制成了用硅光电二极管作为检测元件的高精度光电高温计。

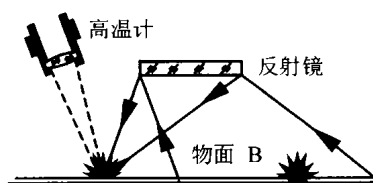
与此同时,辐射温度计的工作波长亦从单波长逐步发展为两色(比色)和多色,仪器的功能亦逐步丰富和智能化。仪器的测量精度、响应速度、稳定性、分辨率都达到了相当高的水平^[14,15],测温范围亦从以往的中高温延伸到室温或更低温度^[16,17]。

但遗憾的是,目前人们经常使用的单波长光学(电)高温计、比色温度计及全波长辐射温度计等,测得的不是物体的真实温度,只是分别为亮度温度、颜色温度及辐射温度等。必须知道物体的另一参数——材料发射率(黑度系数),才可以求得物体的真实温度。众所周知,物体的材料发射率不仅与物体的组份、物体表面状态及考察波长有关,还与它所处的温度有关。一般不宜在线测量^[18],且易随表面状态改变而改变,因此,用辐射法测量物体真温是辐射测温领域中重要而困难的研究课题,其研究状况亦成了表征辐射测温技术发展的一个重要方面。

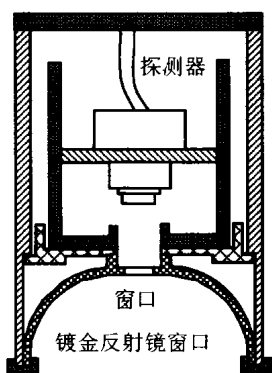
辐射法测量物体真温是各国学者一直关心的问题,从辐射温度计诞生时开始,至今还在大力开展相关研究。目前比较成功的方法有 6 种,下面依次做简要介绍。

第 1 种方法:发射率修正法^[19],该方法需事先利用其他设备测得物体的材料发射率,再将高温计结果据此发射率数据进行修正而得到物体真温。由于发射率在线变化及随温度不同而改变,因此该方法的精度不高。

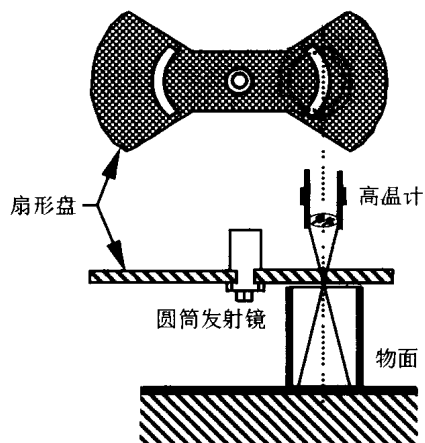
第 2 种方法:减小发射率影响法(或逼近黑体法),该方法即利用一定措施使被测表面的有效发射率增加且接近 1。常用的方案如图 1-1 和图 1-2 所示。图 1-1 为收集辐射反射法^[20-27],它适用于大平板物体,如轧板等。但它要靠近被测物体,粉尘、水汽影响较大,亦不适用于过高的温度。图 1-2 为特制试样法^[28],常常用于科学实验中,由于要破坏试样,不适用于生产过程。



(a) 平板反射镜法



(b) 半球反射镜法



(c) 圆筒反射镜法

图 1-1 收集辐射反射法

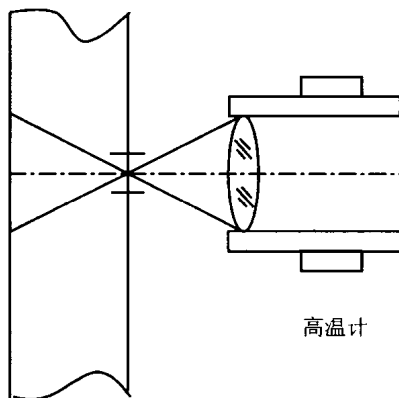
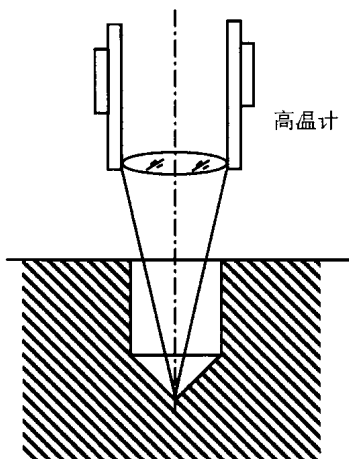


图 1-2 特制试样法

第3种方法:辅助源法(或测量反射率法)^[29-30],该方法在线向目标投射一辐射照射,测量反射或散射信息,进而得到物体发射率和温度,图1-3为 Gardner 典型仪器 图1-3中由石英碘灯发出的光线被调制后(频率为 f)以 10° 入射角入射到目标上,其镜反射光线和目标辐射光线一起通过调制盘外圈光阑变成 $2f$ 调制光,经滤光片后到达硅光电二极管探测器 光电二极管信号通过相敏检测电路分离获得目标辐射和镜反射信息,而碘灯的能量分布曲线由图中虚线部分事先测得,经过计算得到物体的反射率和物体的温度 但此方法仅适用于抛光金属表面

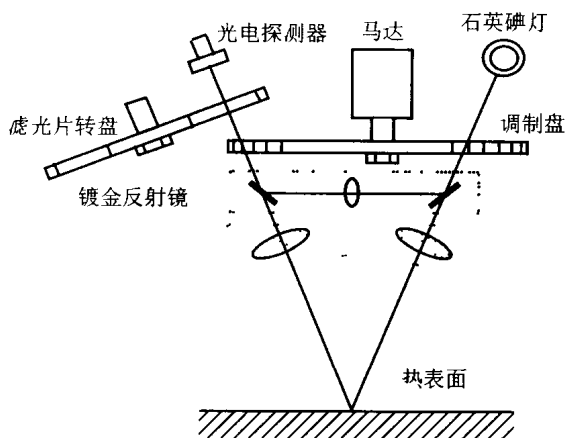


图 1-3 辅助源法(测量反射率法)

第4种方法:偏振光法^[31],该方法是应用抛光金属表面纯镜反射时两个偏振分量强度比与物体反射率的关系^[32]:

$$\frac{I^p}{I^n} = 1 + \rho_s^n \quad (1-1)$$

式(1-1)中 p 、 n 分别表示光线的水平和垂直偏振分量, I 为光线强度, ρ_s^n 为物面垂直分量的镜反射率 测量两个偏振分量的强度比,即可获得被测物体的反射率,从而得到物体的发射率和温度. Murray^[33]等的仪器如图1-4所示,此方法亦仅适用于抛光金属表面

第5种方法:反射信息法,该方法利用特殊的光学结构获取多次反射信息,进而得到发射率信息,最后得到真实温度^[34]

第6种方法:多光谱辐射测温法,该方法在一个仪器中制成多个光谱通道,利用多个光谱的物体辐射亮度测量信息,再经数据处理,得到物体的温度和材料光谱发射率 与前5种方法相比,该方法不需辅助设备和附加信息,对被测对象亦无特殊要求,因而特别适合于高温、甚高温目标的真温及材料发射率的同时测