

◎ 徐秋云 著

光谱辐亮度和辐照度响应度 系统级定标方法研究

RESEARCH OF SYSTEM-LEVEL METHOD FOR
SPECTRAL RADIANCE AND
IRRADIANCE RESPONSIVITY CALIBRATIONS

在国内率先研制外部导入可调谐激光的积分球光源，包括辐亮度光源和辐照度光源。激光-积分球光源与传递标准探测器相结合，建立了光谱辐亮度和辐照度响应度定标系统。该系统主要应用于太阳辐射计CIMEL CE318-2的实验室定标。对于同一台太阳辐射计，定标系数与美国GSFC的相对偏差在 $\pm 1.4\%$ 以内，说明了新型定标技术的可行性。

东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金青年科学基金项目(项目负责人:徐秋云;项目批准号:11603052;

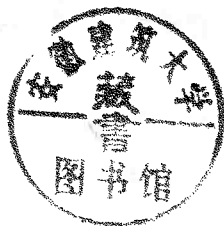
项目名称:基于计算全息的长焦距离轴非球面镜面形检测研究)

江苏省文化创意协同创新中心项目(项目负责人:张兵;项目编号:XYN1704;

项目名称:用于大型游乐园仿生机器人特种电机研究与应用)

光谱辐亮度和辐照度响应度 系统级定标方法研究

徐秋云 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书从实际应用需求出发,在国内首次研制外部导入宽可调谐激光的积分球光源,包括辐亮度光源和辐照度光源。为了提高积分球出射光场的稳定性和均匀性,设计球内旋转漫射板方法去除激光相干性产生的散斑。对辐亮度光源和辐照度光源的辐射特性进行了详细研究。建立溯源于低温辐射计的光谱辐亮度和辐照度响应度传递标准。传递标准为光谱辐通量响应度溯源于低温辐射计的硅陷阱探测器(Trap)。定标光源和传递标准组成光谱辐亮度和辐照度响应度定标系统,主要应用于太阳辐射计 CIMEL CE318-2 的实验室定标。最后对影响太阳辐射计定标精度的各个不确定性因素进行了详细评估。本书可作为研究生光学、光电检测等专业的参考书,对相关领域的工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

光谱辐亮度和辐照度响应度系统级定标方法研究 /

徐秋云著. — 南京:东南大学出版社,2018.5

ISBN 978-7-5641-7757-7

I. ①光… II. ①徐… III. ①光谱辐射亮度测量—研究 ②辐照度—光学测量—研究 ③光辐射—光学测量—研究
IV. ①O432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 085917 号

光谱辐亮度和辐照度响应度系统级定标方法研究

出版发行 东南大学出版社

出版人 江建中

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

经 销 全国各地新华书店

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 700 mm×1000 mm 1/16

印 张 7.75

字 数 152 千字

版 次 2018 年 5 月第 1 版

印 次 2018 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-7757-7

定 价 33.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

前 言

光辐射探测器光谱响应度的定标是光辐射测量领域的主要研究内容之一,也是定量化光学遥感和环境监测等应用领域的基础性关键技术。对探测器进行高精度光谱表征和定标要求定标光源具有以下特征:①较高的光谱分辨率;②大面积的均匀、准朗伯光源用于辐亮度响应度定标;③辐照度空间均匀;④较高的光谱辐通量水平。传统光源,包括光谱辐射照度标准灯、内置灯积分球光源和灯-单色仪系统等,由于其自身的限制均不能完全满足上述要求。

作者在国内率先研制外部导入可调谐激光的积分球光源,包括辐亮度光源和辐照度光源。可调谐激光自身的特点决定了新型定标光源具有单色性好、光谱辐通量水平高以及可以在宽波段范围内调节波长等优点。积分球是形成均匀、准朗伯光源的最佳装置,广泛应用于光辐射测量系统中。因此可调谐激光和积分球的有效结合形成的定标光源可以同时满足以上四种要求。

激光-积分球光源与传递标准探测器相结合,建立光谱辐亮度和辐照度响应度定标系统。硅陷阱探测器(Trap)的光谱辐通量响应度溯源于低温辐射计,有效缩短了标准传递链。由视场光阑、孔径光阑和 Trap 组成的标准辐亮度探测器用于定标辐亮度光源的绝对光谱辐亮度;由孔径光阑和 Trap 组成的标准辐照度探测器定标辐照度光源在某一参考平面上的绝对光谱辐照度。该系统不仅可以对各种波段式滤光片辐射计进行系统级定标,还可以作为绝对精度更高的一种技术验证已有的定标手段。

系统研制成功后主要应用于太阳辐射计 CIMEL CE318-2 的实验室定标,其中光谱辐亮度响应度定标系统定标 CE318-2 的天空散射和日晕

观测模式,光谱辐照度响应度定标系统定标 CE318-2 的太阳直射观测模式。对于同一台太阳辐射计,定标系数与 GSFC(美国 NASA 戈达德航天中心)的相对偏差在 $\pm 1.4\%$ 以内,说明了新型定标技术的可行性。

本书的撰写过程得到了我的研究生导师中科院安徽光学精密机械研究所郑小兵研究员的大力支持,得到了常州工学院张兵教授的关心和帮助,在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于作者学识与水平所限,书中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正。

徐秋云
常州工学院
2018 年 3 月

目 录

1	引言	(1)
1.1	辐射定标的作用	(1)
1.2	两种辐射标准传递方法	(3)
1.2.1	溯源于黑体、基于标准辐射源法	(3)
1.2.2	溯源于低温辐射计、基于标准探测器法	(4)
1.2.3	基于标准探测器法在卫星传感器实验室定标中的应用	(5)
1.3	光电探测器的响应度	(6)
1.4	探测器响应度定标方法总结	(8)
1.4.1	光谱辐通量响应度定标方法	(8)
1.4.2	辐照度响应度定标方法	(10)
1.4.3	辐亮度响应度定标方法	(12)
1.5	一种新型的光谱辐照度和辐亮度响应度定标方法	(14)
1.6	本书的主要工作	(15)
2	光谱辐亮度和辐照度响应度定标系统设计与实现	(18)
2.1	光谱辐亮度和辐照度响应度定标系统总体设计方案	(18)
2.2	光谱辐亮度响应度定标系统	(19)
2.2.1	外部导入激光的积分球光源的研制	(20)
2.2.2	积分球及主要部件实物图	(28)
2.3	光谱辐亮度响应度定标系统的标准传递方法	(29)
2.3.1	标准辐亮度探测器	(30)
2.3.2	标准探测器的辐亮度响应度	(32)
2.3.3	标准探测器定标激光-积分球光源的辐亮度	(33)

2.4	光谱辐照度响应度定标系统	(34)
2.4.1	辐照度光源设计	(34)
2.4.2	标准传递方法	(37)
2.5	散斑去除理论分析	(38)
2.6	定标系统中主要仪器介绍	(41)
2.6.1	可调谐激光器系统	(41)
2.6.2	激光功率控制器	(44)
2.6.3	波长计	(45)
2.6.4	电机选型	(46)
3	外部导入激光的积分球光源辐射特性测量	(48)
3.1	辐亮度光源辐射特性研究	(48)
3.1.1	辐亮度非稳定性	(50)
3.1.2	辐亮度平面非均匀性	(53)
3.1.3	辐亮度角度非均匀性	(55)
3.1.4	积分球光源辐射特性测量软件	(57)
3.1.5	偏振度表征	(60)
3.1.6	散斑去除效果定量分析	(63)
3.2	辐照度光源辐射特性研究	(68)
3.2.1	实验原理	(68)
3.2.2	准直调节方法	(69)
3.2.3	实验结果	(71)
4	光谱辐亮度响应度定标系统的应用	(72)
4.1	太阳辐射计光谱辐亮度响应度定标方法	(73)
4.1.1	光谱响应度定标方法	(73)
4.1.2	定标系数计算与比对	(75)
4.1.3	计算通道中心波长和带宽	(76)

4.2 传递标准探测器的光谱辐亮度响应度	(76)
4.2.1 Trap 的光谱辐通量响应度	(76)
4.2.2 光阑直径和两光阑之间距离的测定	(76)
4.2.3 传递标准探测器的光谱辐亮度响应度	(77)
4.2.4 标准探测器的观测面积	(78)
4.3 太阳辐射计天空散射观测模式定标	(79)
4.3.1 本底信号	(79)
4.3.2 监视探测器的输出信号	(79)
4.3.3 绝对光谱辐亮度响应度	(79)
4.3.4 响应度的线性	(80)
4.3.5 计算定标系数并与 GSFC 进行比对	(81)
4.3.6 通道中心波长和带宽	(82)
4.3.7 比较光谱响应度与滤光片光谱透过率	(82)
4.4 光谱辐亮度响应度定标不确定度分析	(84)
4.4.1 标准探测器光谱辐亮度响应度定标不确定度	(84)
4.4.2 定标光源辐射特性	(86)
4.4.3 CE318 稳定性	(87)
4.4.4 标准探测器稳定性	(88)
4.4.5 合成标准不确定度	(89)
4.5 太阳辐射计日晕观测模式定标	(90)
4.5.1 日晕模式的绝对光谱辐亮度响应度	(90)
4.5.2 计算定标系数并与 GSFC 进行比对	(91)
4.6 定标结果验证和比对	(91)
4.6.1 利用灯照明积分球光源验证定标结果	(91)
4.6.2 天空散射模式四次定标结果比对	(93)
5 光谱辐照度响应度定标系统的应用	(95)
5.1 太阳辐射计传统定标方法	(95)

5.2 太阳辐射计光谱辐照度响应度定标方法	(97)
5.2.1 光谱响应度定标方法	(97)
5.2.2 CE318 参考平面的确定	(98)
5.2.3 定标系数计算与比对	(99)
5.3 传递标准探测器的光谱辐照度响应度	(100)
5.3.1 Trap 的光谱辐通量响应度	(100)
5.3.2 传递标准探测器的光谱辐照度响应度	(101)
5.4 确定定标距离	(101)
5.4.1 Trap 等效光路	(102)
5.4.2 定标距离	(103)
5.5 太阳辐射计的相对光谱辐照度响应度	(103)
5.5.1 CE318 的输出信号	(103)
5.5.2 相对光谱辐照度响应度	(105)
5.6 相对光谱辐照度响应度定标不确定度分析	(106)
5.7 讨论	(108)
6 总结和进一步的考虑	(110)
参考文献	(112)

本书围绕光谱辐亮度和辐照度响应度定标系统的研制和实际应用展开研究,包括定标光源的设计和辐射特性研究、辐射标准传递链的建立、定标不确定度分析以及定标结果与以往定标方法的比对。系统主要用于定标太阳辐射计的绝对光谱响应度,其中光谱辐亮度响应度定标系统定标太阳辐射计的日晕和天空散射观测模式,光谱辐照度响应度定标系统定标太阳辐射计的太阳直射观测模式。

本书研究的意义在于利用新一代基于标准探测器的辐射定标技术,实现可溯源到初级辐射标准低温辐射计的绝对光谱辐亮度和辐照度响应度定标。定标方式为系统级,即对待测仪器整机进行定标,定标状态与仪器使用时的状态完全保持一致,有效缩短标准传递链,减少不确定度来源,提高光谱辐亮度和辐照度的测量精度。

在具体介绍本书的研究内容之前,先简单回顾一下辐射定标的作用、发展历程,从而引出本书研究的必要性。

1.1 辐射定标的作用

遥感(Remote Sensing)是20世纪60年代兴起并迅速发展起来的一门综合性探测技术,它是在航空摄影测量的基础上,随着空间技术、信息技术、电子计算机技术等当代高新技术迅速发展,以及地学、环境等学科发展的需要,逐步形成发展的一门新兴交叉科学技术^[1]。遥感技术具有客观性、时效性、宏观性、综合性与经济性的优点。

20世纪80年代以来,发达国家相继开展空间对地观测计划,以长期、实时和大范围地观测地球的资源、气候和环境的变化。我国自1970年4月发射第一颗人造卫星以来,相继发射了数十颗不同类型的人造卫星。与太阳同步的“风云一号”和与地球同步的“风云二号”遥感卫星的发射与回收,使我国开展宇宙探测、通信、科学实验、气象观测等研究有了自己的信息源。

为了保证测量结果的定量化水平和可利用价值,对空间传感器的辐射定标精度要求越来越高。空间遥感的实现不仅取决于传感器的设计和性能,也决定于其观测数据的定量化水平,即由原始数据产品反演地球物理参数的水平。

光辐射是光学遥感信息的基本载体。各种平台上光学传感器的几何和光谱分辨能力都与其光辐射的准确测量能力直接相关。经过 20 世纪 70~90 年代相关技术的发展和积累,我国航天器平台和星载传感器本身的技术已渐趋成熟。近年来的一个重要发展趋势是力图实现由光辐射数据反演地面目标和环境的定量特性参数,并由此建立相应的识别和测算数值模型。在此遥感信息定量化的过程中,辐射定标是不可替代的关键技术之一。

光辐射定标的目的是确定光电探测器的输出(电流、电压等)与入射绝对光通量的定量关系。定标工作常常是一项十分困难和复杂的任务,这种困难性和复杂性是和定标光源以及环境背景辐射在光谱、空间、时间、偏振特性的多变性相联系的。仪器的定标值应当和定标光源以及用它进行测量的待测光源等的特性无关,而只是它自身各种响应特性的客观度量。

辐射定标的作用体现在^[2]:① 保证探测器的精度能够满足应用需求;② 保证探测器的输出反映被测量的真实变化,校正探测器性能的自然衰变对测量结果的影响;③ 通过共同的标准保证不同平台上不同探测器在不同时间对同一观测目标观测结果的可比较性。目前一般认为空间传感器的辐射定标由三个方面构成:实验室定标、星上定标和场地替代定标。实验室定标的主要作用是确定传感器的响应并评估其不确定度;星上定标则长期地监测传感器响应的衰变;在轨阶段的替代定标可以验证传感器的辐射响应并进行多个传感器的交叉定标。任何一种定标手段和设备都不是绝对准确的,都存在无法消除的系统误差。为了提高定标精度,近年来多数的卫星传感器同时利用以上三个独立的定标手段相互验证和比较,降低和消除单次定标实验和单个定标设备本身的系统误差,以保证卫星数据的质量。

辐射定标可分为绝对定标和相对定标两种方式^[3]。绝对定标是对目标作定量的描述,即指用光谱辐通量、光谱辐亮度或光谱辐照度等来说明目标,必须用二级标准源进行直接可比较的测量。卫星发射前在地面实验室或试验场要进行绝对定标,用遥感器观测辐射亮度已知的标准辐射源以获得定标数据。通常在可见-近红外波段内采用出光口径较大的积分球或漫反射板,在热红外波段则用黑体辐射源。卫星发射后,探测器元件老化或者工作温度变化都会影响遥感器的响应,因此也需要星上绝对定标。通常在可见光和反射红外区用电光源和太阳光作为高温的标准辐射源,在热红外区以卫星上的标准黑体作为高温的标准辐射源,以宇宙空间作为低温标准辐射源。

相对定标只需得出目标中某一点辐亮度与其他点的相对值。因为一般来说,并不需要知道场景辐射的绝对值,而只需知道一个场景象元辐射率和其他场景象元辐射率的相对数值,或知道在不同时间内测量的同一场景象元的相对辐射率,或一谱段的光谱辐射率和另一谱段光谱辐射率的相对值就可以了。这些差值测量所

得的精度远远超过定标源的辐射精度,这意味着其随时间的稳定性和重复性要比和已知源的一致性重要得多。总之,相对辐射定标因其精度更高,常被用于遥感器短时间内(如几天时间内)响应变化的定标,而绝对定标与相对定标相结合具有更高的长时间稳定性,因而可用于表征遥感器响应在长时期内的变化。

1.2 两种辐射标准传递方法

辐射定标是通过建立标准和传递标准来实现的,即用较高级的标准逐级定标较低级的标准,直至用户传感器。光辐射定标和标准传递有两种基本方法,一种是基于标准辐射源法,其初级标准是根据普朗克定律确定的黑体辐射,可见-短波红外的传递标准是各种级别的标准灯。这种方法已经发展了一个多世纪,目前仍然是应用最广的辐射定标方法。20 世纪 80 年代末以来,在定量化空间遥感需求的推动下,另外一种基于标准探测器的辐射定标方法逐步发展起来,其初级标准是利用电替代测量原理建立的低温绝对辐射计,在可见-短波红外采用高稳定的半导体探测器作为传递标准。下面分别介绍这两种辐射标准传递方法。

1.2.1 溯源于黑体、基于标准辐射源法

黑体辐射标准基于普朗克定律,其准确度取决于构成黑体的材料、腔形、发射率、温度的精确测量和控制以及背景辐射的抑制等。目前在辐射定标中普遍采用的 $0.25\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 辐射传递标准(如 1 000 W 标准辐照度溴钨灯、标准辐亮度灯)均是通过国家计量院所持有的“金点”黑体基准传递的。标准传递实际上是一个测量比对过程,自然也是引入测量误差的过程,目前 $1\%\sim 5\%$ 的不确定度仍是该类辐射传递标准较高的指标^[4]。图 1.1 是溯源于黑体、基于标准辐射源法的标准传递链。图 1.1 右侧是各级标准的不确定度。

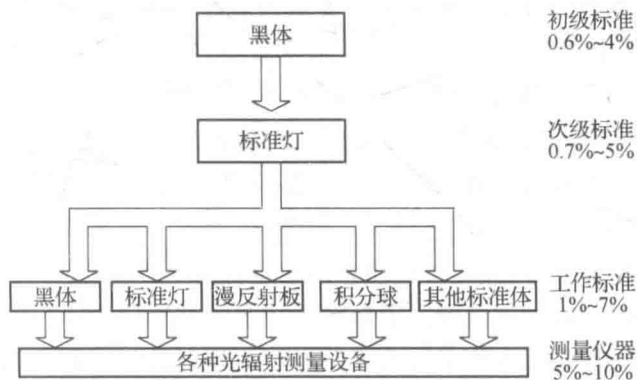


图 1.1 基于辐射源的标准传递链

1.2.2 溯源于低温辐射计、基于标准探测器法

近 10 年来光谱辐射测量的原理和方法正在经历着具有突破性的发展过程,具有代表意义的是低温绝对辐射计取代了传统的黑体成为辐射度学的新型初级标准,而基于探测器的标准传递链正逐步取代传统的基于辐射源(如标准灯)的标准传递链。

低温辐射计利用电替代原理测量光辐射的绝对功率,入射光使辐射计内部接收腔的温度升高,达到热平衡后挡住入射光,用电加热产生同样温升所需要的电功率即等于实际的人射光功率,其中温度和电加热功率分别用铂电阻和电桥精密测量。图 1.2 为低温辐射计测量激光绝对功率的实验系统示意图^[5]。

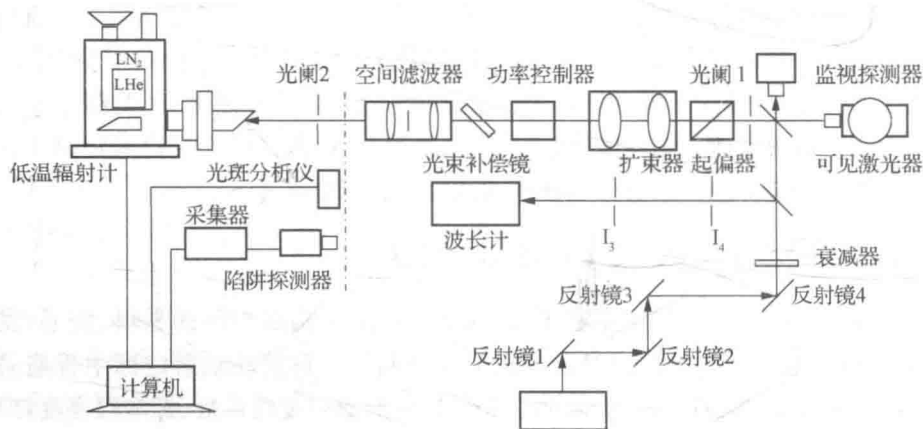


图 1.2 低温辐射计测量激光绝对功率的实验系统

对于传递标准探测器的要求是:响应度高、响应波段宽、线性范围大以及温度系数小。为了减小反射损失对精度的影响,光敏面的反射率应当尽量小。在可见-近红外波段,硅光电二极管是满足上述要求的最好选择,它的制造工艺成熟,性能稳定而价廉。单个光电二极管的窗口反射率较高,约为 30%,并且容易受到灰尘、湿度的影响,不利于高精度辐射测量。硅陷阱探测器(Trap)是由多个硅光电二极管按一定的空间方位组合起来,经过多次反射和吸收,入射到器件内部的光基本上全部被吸收,反射光仅占入射光的十万分之几,达到完全可以忽略的程度,因此也称这种器件为全吸收的光陷阱器件^[6]。另外,硅光电二极管组成的陷阱探测器还具有体积小,操作方便等优点,使它成为传递标准探测器的最佳选择。目前许多国家的标准化研究机构,例如美国国家标准和技术研究所(NIST)^[19]、英国国家物理实验室(NPL)和德国 PTB 等正致力于低温绝对辐射计的高精度辐射标准和标准传递研究工作。

图 1.3 即为新型的溯源于低温绝对辐射计、基于探测器的高精度辐射标准传递链。图 1.3 右侧为各级标准的不确定度。

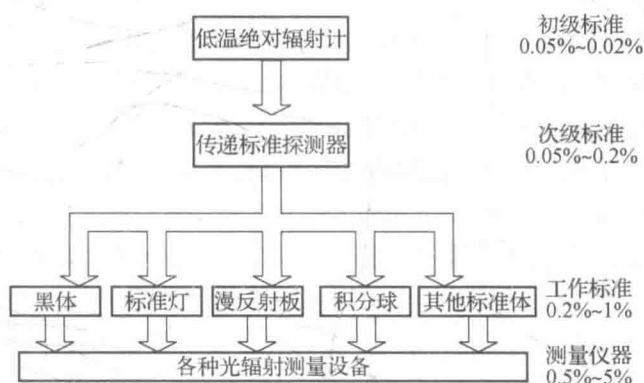


图 1.3 基于探测器的标准传递链

1.2.3 基于标准探测器法在卫星传感器实验室定标中的应用

为了把溯源于低温辐射计、基于探测器的高精度辐射测量标准应用到卫星传感器的发射前定标, NIST 受 NASA 卫星传感器定标计划的支持和赞助研制了多种便携式多通道辐亮度探测器作为传递辐射计, 比如 VXR(可见光波段传递辐射计)、TXR(热红外传递辐射计)。这些传递辐射计在 NIST 进行定标, 然后运至卫星传感器发射现场, 用来验证 EOS(地球观测系统)定标光源的辐亮度标准^[7]。这一过程可以描述为“低温辐射计→辐亮度/辐照度标准探测器→末级积分球→星载传感器”。

图 1.4 是 VXR 的结构示意图。VXR 滤光片的中心波长与搭载在 EOS Terra 平台上的 MODIS、ASTER 和 MISR 等卫星的可见-近红外的某些通道相同。

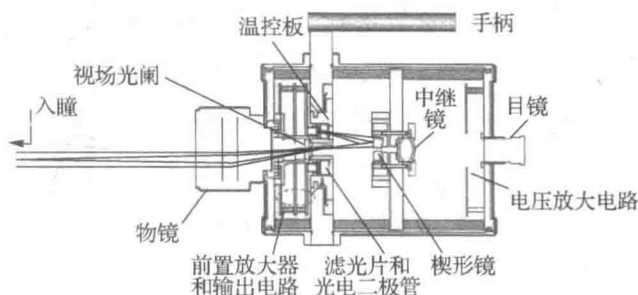


图 1.4 VXR 结构示意图

1.3 光电探测器的响应度

光辐射探测器中的光电探测器主要有光电管、光电倍增管、光伏型探测器(PV)和光导型探测器(PC)等。光电探测器主要是利用下列效应实现对光辐射量的探测:① 外光电效应;② 光伏效应;③ 光电导效应。

测量光辐射度量所用的探测器的响应度是探测器工作性能中最重要的一个参数^[8]。根据探测器输出电压(或电流值)对应入射辐射度量的不同,响应度可以分成辐通量响应度、辐照度响应度、辐亮度响应度。它们分别定义为:

$$\left. \begin{aligned} \text{辐通量响应度} \quad R_{\Phi} &= \frac{U}{\Phi} \\ \text{辐照度响应度} \quad R_E &= \frac{U}{E} \\ \text{辐亮度响应度} \quad R_L &= \frac{U}{L} \end{aligned} \right\} \quad (1.3.1)$$

式中: U ——探测器的输出电压;

Φ 、 E 、 L ——探测器入瞳处的辐通量、辐照度和辐亮度。

响应度的定标就是要建立起探测器入瞳处辐射度和输出信号之间的定量关系。

至于探测器用什么辐射度量的响应度则取决于仪器测量的要求,也和定标源在仪器视场中所占的大小有关。如果光源不能充满探测器的视场,那么由探测器的输出电压信号就不能正确地求得它的辐亮度响应度。在图 1.5 中,光源只占探测器测量视场很小的一部分,由探测器和光学头部所决定的视场要比探测器对光源所张的视场角大得多,这时探测器接收到的光通量除了来自光源外,还来自光源周围相当大范围内的背景辐射能,也就是说探测器输出信号是光源和背景辐亮度贡献的总和。探测器入瞳处不是定标光源的辐亮度值,而是视场内定标光源辐亮度和背景辐亮度的权重平均辐亮度。

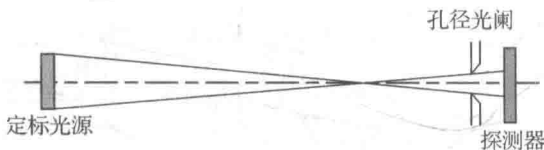


图 1.5 定标光源不能充满探测器的视场

可以设想在探测器视场内当光源的尺寸发生变化(例如变大)而定标光源的辐亮度值不变时,探测器输出电压信号无疑会增加(设光源辐亮度大于背景辐亮度),结果式(1.3.1)的辐亮度响应度将增大。这说明定标光源不能充满仪器测量视场

时无法得到确定的探测器辐亮度响应度。

在这种情况下可以用探测器的辐照度(或辐通量)响应度来表征。因为在这种情况下探测器入瞳处的辐照度是均匀的(设定标光源距探测器足够远)。辐照度值可以由定标光源的辐亮度、光源尺寸、探测器入瞳尺寸及光源到探测器的距离来求得。更普通的方法是用已知定标光源的辐射强度和光源到探测器的距离来求得。设想当定标光源尺寸发生变化时,进入探测器视场的辐通量,或探测器入瞳处的辐照度也成比例地变化,探测器输出电压信号随之变化,这样由式(1.3.1)探测器的辐通量响应度或辐照度响应度将和光源的几何尺寸无关,从而唯一地建立起探测器输出电压信号和探测器入瞳处辐照度或进入探测器辐通量的关系。

反之,当定标光源充满探测器视场(见图 1.6),光源尺寸的增加不会对探测器输出信号有贡献(不考虑杂散光的影响),探测器测的是它响应视场内光源的平均辐亮度。这时用辐亮度响应度就能正确地建立定标光源在探测器视场内平均辐亮度和输出电压信号之间的关系,用辐照度响应度则是没有意义的。设想定标光源的尺寸增大,这时探测器入瞳处的辐照度值将增加,但是探测器上物像尺寸的增加并不能使探测器的输出信号增加,因为尺寸增加的部分在探测器有效探测面积之外,仪器的输出信号并不改变。

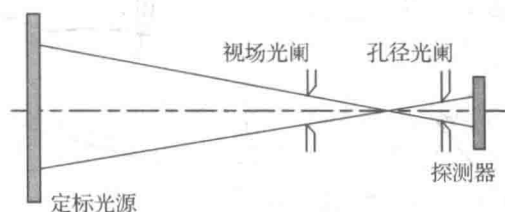


图 1.6 定标光源为面光源,充满探测器的视场

和光度、色度测量仪器不同,客观测量光辐射度量的仪器要求在所测量的谱段范围内有近似平的光谱响应。由于待测光源具有各不相同的光谱特性,测量系统的非理想光谱响应将在不同程度上给测量结果带来误差。探测系统的光谱响应由该系统各光学、色散元件的光谱透射、反射、色散特性和探测器的光谱响应共同决定。要使系统的光谱响应度接近理想的平响应是困难的。考虑到探测器的光谱响应特性,我们把公式(1.3.1)改写成下面的形式:

$$\left. \begin{array}{l} \text{光谱辐通量响应度} \\ \text{光谱辐照度响应度} \\ \text{光谱辐亮度响应度} \end{array} \right\} \begin{array}{l} R_{\Phi}(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{\Phi(\lambda)} \\ R_E(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{E(\lambda)} \\ R_L(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{L(\lambda)} \end{array} \quad (1.3.2)$$

式中: λ ——定标光源的波长。

1.4 探测器响应度定标方法总结

探测器的光谱响应度通常采用光谱替代法^[9]进行定标。所谓替代法就是将标准探测器的响应度标准传递到待定标探测器,用公式表示如下:

$$Y_{\text{std}}(\lambda) = R_{\text{std}}(\lambda) X(\lambda) \quad (1.4.1)$$

$$Y_{\text{DUT}}(\lambda) = R_{\text{DUT}}(\lambda) X(\lambda) \quad (1.4.2)$$

式中: $Y_{\text{std}}(\lambda)$ ——标准探测器的输出信号;

$R_{\text{std}}(\lambda)$ ——标准探测器的光谱响应度;

$Y_{\text{DUT}}(\lambda)$ ——待测探测器(Detector Under Test, DUT)的输出信号;

$R_{\text{DUT}}(\lambda)$ ——DUT 的光谱响应度;

$X(\lambda)$ ——探测器的输入信号,这里假设两探测器的输入信号相同。

DUT 的光谱响应度用式(1.4.3)计算:

$$R_{\text{DUT}}(\lambda) = \frac{Y_{\text{DUT}}(\lambda)}{Y_{\text{std}}(\lambda)} R_{\text{std}}(\lambda) \quad (1.4.3)$$

1.4.1 光谱辐通量响应度定标方法

1) 直接溯源于低温辐射计

利用如图 1.2 所示的定标系统,将待定标探测器直接与低温辐射计进行比对,低温辐射计测量激光的绝对功率。根据式(1.3.2)中的第一式,只要测量探测器的输出信号就可以得到探测器的光谱辐通量响应度。

2) 利用传递标准探测器进行定标

如图 1.7 所示的光谱辐通量响应度定标方法为实验室常规方法,直接采用次级标准源作为标准。定标测量方程用式(1.4.3)表示。

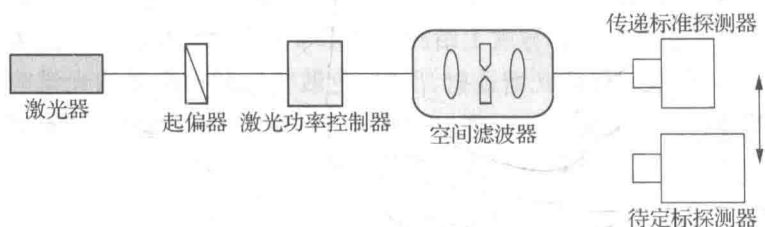


图 1.7 基于传递标准探测器的辐射定标系统

采用第 1.2 节所述的方法传递标准探测器直接溯源于初级辐射标准低温辐射计,通常其不确定度优于 0.035% ^[10]。这与传统的次级标准($0.7\% \sim 5\%$)相比有明显提高。另外,传递标准探测器还具有体积小、操作简单、维护容易等优点,完全