

文章编号: 1672-8785(2007)06-0007-04

空间污染对黑体定标系统的影响分析

万继敏, 卢春莲, 周彦平, 常国龙

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 本文从典型的黑体定标系统出发, 分析了空间系统由于直接暴露于轨道真空和热环境中, 空间污染物对黑体定标系统的光学表面的污染, 导致空间黑体定标系统的性能发生改变的成因; 建立了一套空间黑体定标系统污染损伤分析模型, 并初步计算了污染对黑体定标系统的影响参数。通过对空间污染源进行分类, 讨论了内、外污染源对空间黑体定标系统的影响诸要素, 提出了保护空间黑体定标系统的一些建议。

关键词: 黑体定标; 空间污染; 光谱传输率; 光谱损伤函数; 污染源

中图分类号: V520 **文献标识码:** A

Analysis of the Affection of Contamination on Blackbody Calibration System

WAN Ji-min, LU Chun-lian, ZHOU Yan-ping, CHANG Guo-long

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In this paper, the reason why the performance of space blackbody calibration systems are changed is analyzed. The space blackbody calibration system is exposed to the orbital vacuum and thermal environment, so its optical surface is easy to be contaminated by the contaminant sources in space. An analysis model for describing the damage of the blackbody calibration system due to contamination is established and the contamination influence parameters of the blackbody calibration system are calculated preliminarily. By sorting the space pollution sources, the affection of inner or external sources on the space blackbody calibration system is discussed and some suggestions on protecting the space blackbody calibration system are offered.

Key words: blackbody calibration; space contamination; spectral transmittance; spectrum damage function; pollution source

1 引言

空间黑体定标系统工作在外层空间, 黑体定标系统的光学表面直接暴露于空间环境, 工作环境较为恶劣, 在工作期间会受到各种空间环境的干扰, 特别是空间污染物质的干扰作用, 使黑体定标系统的光学表面受到污染而降低了黑体的有效发射率, 从而影响黑体定标系统的定标质量。污染物质污染到黑体定标系统的光

学表面会造成如下影响: (1) 光强衰减——其物理机制是污染物对光的吸收, 使得系统的反射率、透过率下降; (2) 污染物对光的衍射影响成像质量。由于空间污染对光学镜面的影响不容忽视, 因此有必要对黑体定标系统中光学系统的污染损伤进行分析^[1-6]。本文通过研究光学系统受空间污染物质的影响, 建立起一套黑体定标系统光学表面污染损伤模型^[7], 并通过分析内、外污染源对几类主要光学系统的影响, 提

收稿日期: 2007-01-30

作者简介: 万继敏(1983—), 男, 山东省单县人, 光学工程专业硕士研究生, 研究方向为空间光电信息技术。

出了设计时要考虑的一些问题。

2 黑体定标模型

定标黑体是按照标定需求设计的温度可精确控制的黑体,是标定空间背景测量系统的主要设备。

黑体辐射源作为标准辐射源,被广泛地用作红外设备的绝对标准。密闭空腔中的辐射就是黑体辐射。通常由于有小孔的空腔很接近黑体,就把它称作黑体辐射源或标准黑体辐射源,它可以作为一种标准来校正其他辐射源或红外整机。

利用黑体的基本辐射定律计算其辐射量是通过物体的发射率概念来实现的。所谓物体的发射率,或叫比辐射率和热辐射率,就是该物体在指定温度时的辐射量与同温度黑体的相应辐射量的比值。显然,这个比值越大,则表明该物体的辐射特性与黑体辐射越接近,通过某物体的发射率,即可计算出该物体的辐射规律或计算出其辐射量。

黑体定标是指星载黑体作为星上定标的标定源。黑体的光谱辐射量和温度之间存在着精确的对应关系,用其作为标准源,就可以提高定标的精度。采用黑体作辐射源的红外定标系统的示意图如图 1 所示。

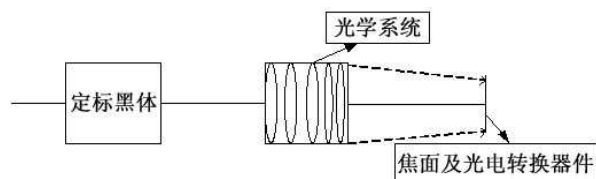


图 1 红外黑体定标系统示意图

3 空间黑体定标系统的污染损伤分析模型

当空间污染物质沾染到红外黑体定标系统中的光学镜面时,会造成光学表面的传输率发生变化,使经过红外黑体定标系统传输到焦面的光谱辐照度下降。为了研究红外黑体定标系统经光学系统传输后到达焦面的光谱辐照度的变化,需要建立红外黑体定标系统的污染损伤模型^[6]。

3.1 光源污染

设黑体系统污染前的光谱辐照度为 $\varepsilon_0(\lambda)$, 污染后为 $\varepsilon'(\lambda)$, 其中,

$$\varepsilon'(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \times D'(\lambda) \quad (1)$$

$D'(\lambda)$ 为光学系统受污染影响后的光谱传输率的影响因子或称为损伤因子。

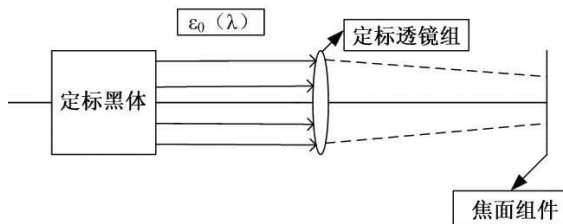


图 2 简化的红外黑体定标系统示意图

3.2 镜面污染物的质量厚度

以图 2 为例,设黑体定标系统中的光学镜头表面受污染的面积 s , 在表面上沾染了厚度为 l 、质量为 m 的物质,定义质量厚度为 D , 即在单位质量面积上所沾染的质量,单位为 mg/cm^2 。则

$$D = \frac{m}{s} = \frac{dv}{s} = \frac{dls}{s} = dl \quad (2)$$

因此有

$$D = d \times l \quad (3)$$

式中, d 为污染物质的密度, v 为污染物质的体积。

3.3 污染前光学系统的光谱传输率

对于图 1, 设黑体定标系统中有 n 个光学元件, 定义受污染影响前的光谱传输率为

$$D(\lambda) = \prod_{i=1}^n D_i(\lambda) \quad (4)$$

式中, $D_i(\lambda)$ 为第 i 个元件的光谱传输率。

$$D(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (5)$$

式中, $I_0(\lambda)$ 为光学系统入口处的初始光谱辐照度, $I(\lambda)$ 为经过光学系统传输后到达焦面的光谱辐照度。

3.4 污染后光学系统的光谱传输率

定义光学系统受污染影响后的光谱传输率为

$$D'(\lambda) = \prod_{i=1}^M D'_i(\lambda) \prod_{j=1}^{n-m} D_j(\lambda) \quad (6)$$

设光学系统受到污染的面为 m 个, 未受到污染的面为 $n - m$ 个, $D'_i(\lambda)$ 表示第 i 个污染面的光谱传输率, $D_j(\lambda)$ 表示第 j 个未污染面的光谱传输率

$$D'(\lambda) = \frac{I'(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (7)$$

式中, $I'(\lambda)$ 为经过受污染的光学系统传输后到达焦面的光谱辐照度。

考虑到污染对黑体光源的影响, 定义 $D_0(\lambda)$ 为 $\varepsilon_0(\lambda)$, $D'_0(\lambda)$ 为 $\varepsilon'(\lambda)$ 。

3.5 光学系统的光谱损伤函数

定义光学系统的光谱损伤函数为

$$\partial(\lambda) = \prod_{i=1}^m \partial_i(\lambda) \quad (8)$$

$$\partial(\lambda) = \frac{D'(\lambda)}{D(\lambda)} \quad (9)$$

$$\partial_i(\lambda) = \frac{D'_i(\lambda)}{D_i(\lambda)} \quad (10)$$

3.6 焦面处的光谱分布

受污染后光学系统焦平面处的光谱分布为

$$\begin{aligned} I'(\lambda) &= I_0(\lambda)D'(\lambda) = I_0(\lambda)D(\lambda)\sigma(\lambda) \\ &= I_0(\lambda) \prod_{i=1}^m D'_i(\lambda) \prod_{j=1}^{n-m} D_j(\lambda) \\ &= I_0(\lambda) \prod_{i=1}^m D_i(\lambda)\sigma_i(\lambda) \prod_{j=1}^{n-m} D_j(\lambda) \end{aligned} \quad (11)$$

以上从能量的角度建立了一套黑体定标的光学系统污染损伤模型, 用于计算受污染后光学系统传输到焦面上的光能, 进而定量确定对光学系统成像的影响, 进一步确定对黑体定标系统的影响。

3.7 污染材料的光谱吸收率分析

由光学系统污染后的光谱传输率可求出污染物的吸收率 $\alpha(\lambda)$ 为

$$\alpha(\lambda) = 1 - D'(\lambda) = \frac{I_0(\lambda) - I'(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (12)$$

4 计算实例

从查取的空间环境效应实验数据来看^[2], 在通常情况下, 黑体的发射率系数一般为 0.95, 光学系统的反射系数为 0.97, 透射系数为 0.95;

受污染后, 黑体的发射率系数通常变为 0.75 左右, 光学系统的反射系数变为 0.7, 透射系数变为 0.6。

图 3 中的虚线为污染前的光谱能量密度, 实线为经过一段时间受污染后的光谱能量密度, 显然, 光谱能量密度在污染后有了一定的下降。

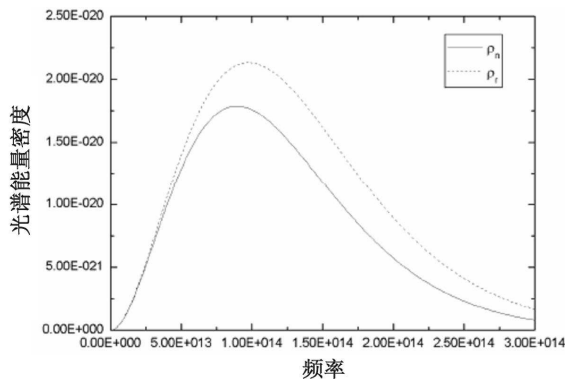


图 3 光谱能量密度 ρ 随频率 ω 的变化曲线示意图 (其中 ω 的单位为 Hz, ρ 的单位为 $J \cdot m^{-3} \cdot Hz^{-1}$)

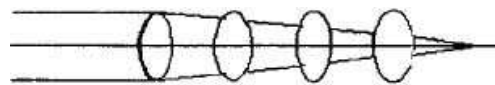


图 4 全折射式系统示意图

以采用类似图 4 所示的全折射式系统的黑体定标系统为例, 黑体定标系统未受污染时, 到达焦面上的能量系数为 $0.95 \times 0.97 \times 0.95 = 0.87$, 而受污染后应为 $0.75 \times 0.7 \times 0.6 = 0.315$, 显然 $\frac{0.875 - 0.315}{0.875} = 0.64 = 64\%$ 。

从数值的变化来说, 污染对黑体定标系统的影响很大, 污染后到达焦面的能量减小了 64%, 从而造成整个黑体定标系统的灵敏度降低。

5 空间污染对黑体定标系统的影响

空间污染对黑体定标系统的影响主要包含三个方面^[7]: (1) 对黑体光源本身的影响, (2) 对黑体定标系统中光学系统的影响, (3) 对整个系统的综合影响。

在空间环境中, 根据污染源所处的位置可分为内污染源和外污染源。

5.1.1 内污染源

内污染源是指污染源在系统内部, 可分为以下几种:

(1) 在系统结构内使用的材料中有可凝性挥发物的污染,许多非金属材料(特别是一些树脂基复合材料)在空间真空和热环境条件下,会释放出可凝挥发物(真空出气),这些气体物质在相对较冷的背景物上可能出现凝结。若凝结在光学元件表面,就会影响光学系统的传输率和成像质量。

(2) 一些具有多微孔结构的材料(如复合材料)在一定湿度条件下吸水,在空间高真空环境条件下水汽释放,也会造成在轨卫星中光学系统表面的水汽污染。

对于在空间工作的相机来说,其内污染源主要为材料出气;假定相机材料为均匀出气,则在相机内部出现污染的空间,光学系统将出现均匀污染,此时涉及的镜面将污染一定厚度的污染物,使得到达焦面的光谱辐照度下降;随着出气时间加长,污染物质的厚度进一步增加,到达焦面的光谱辐照度会出现进一步下降。

5.1.2 外污染源

外污染源是指来自相机以外的污染源,大致可分为两类。

一类是来自卫星平台的污染源,主要是来自卫星平台材料的出气。材料出气会对搭载在卫星平台上的相机光学系统造成影响。这些污染源的出现可能是在卫星设计阶段对星上使用的材料,特别是非金属材料没有严格按防污染要求进行严格筛选所致,即在选择材料时,误选了一些出气率高、挥发性大的材料,卫星入轨后,这些材料在宇宙空间高真空环境条件下释放污染物;或是由于卫星长期在轨运行过程中受到宇宙空间环境的影响,一些材料的性能发生了退化,出现剥离或粉尘污染到光学系统表面的情况;或是由于航天器推进剂储箱漏气所致。这种污染危害比较严重,即使只有 100nm 的污染物质堆积在光学镜面上,它的传输率就可能出现明显下降。这时只是暴露在表面的光学镜面受到污染,因此只需对其表面进行污染分析。

另一类污染源是来自卫星以外的物体,如空间环境中的污染分子或其它因素,污染源使得暴露于空间的镜面出现污染,造成光学系统

的传输率下降。因此,要对不同系统中不同污染面所受到污染的具体情况进行分析。

6 结论及防护建议

由以上讨论可知,黑体定标系统中的光学系统受内、外污染源的影响很大,内、外污染源的影响会直接使得光学系统的传输率下降,因此要对光学系统的可能污染源加以严格控制;相机设计中首先应严格控制内污染源,同时对卫星平台上的可能污染物提出控制要求。

对于几种典型光学系统,如开放式全反射系统,受到的污染面是全部反射面,因此要严格控制内、外污染源;折反式系统会同时受到内污染源和外污染源的影响,因此要严格控制内污染源和外源中的卫星平台材料对光学镜面的影响,并对开放的反射镜和第一折射镜采取相应的防护措施,以防止受到其它外污染源的污染;对于全折射系统,同样要严格控制内污染源和外污染源中的卫星平台材料对光学镜面的影响,并对第一折射镜采取相应的防护措施,以防止受到其它外污染源的污染。

黑体定标系统常常会由于受到空间污染环境的影响而使其性能发生改变,因此必须对黑体定标系统中的光学系统采取污染防护;消除光学系统内部的污染源和卫星平台的污染源是确保光学系统免受污染的重要技术措施之一。为了去除光学系统内部和星体内部的污染源,就要对卫星上应用的材料进行严格选择。选用材料的原则为:出气率低、挥发性小;一般要求材料质量损失和挥发性可凝物均小于 1%,同时具有尽可能低的水汽回吸率。禁止使用出气率高、挥发性大的材料,例如某些橡胶和粘接剂等,严格控制相机中的内源和卫星平台材料中的外源^[1,5]。

参考文献

- [1] 郭晴, 斐云天. 可凝性气体对低温光学元件表面污染的测试设备 [J]. 中国空间科学技术, 1995, (2): 53-59.
- [2] 薛大同, 张景钦. 中国星船材料空间效应数据手册 [M]. 北京: 航天工业总公司 510 研究所, 1998, 1-13.

(下转第 48 页)