

## 辐射测量中的成像效应\*

程晓航<sup>†</sup> 辛成运 王鲁平 张忠政

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230027)

(2013年1月2日收到; 2013年2月18日收到修改稿)

明确了辐射的非成像测量和成像测量之间的差异并给出数学表述, 才能够把已经成熟的非成像辐射测量方法推广至成像测量. 本文从辐射测量的基本公式以及成像下目标微元与传感阵列像素的对应关系出发, 分别建立了关于辐射的非成像和成像测量式. 根据成像面的存在不会改变辐射传输的事实, 比较非成像测量式和成像测量式后, 可得到成像效应的数学表述. 把成像效应与针孔和透镜两种成像技术结合后的分析指出: 成像效应的主因是成像光轴角, 辅因是测量天顶角; 辅因作用的大小取决于测量天顶角与发射天顶角的差异度.

关键词: 辐射测量, 辐射测温, 成像效应

PACS: 07.20.Ka, 06.20.-f, 42.79.Pw

DOI: 10.7498/aps.62.120702

## 1 引言

辐射测量在大气测量<sup>[1,2]</sup>、工业产品探伤<sup>[3,4]</sup>、辐射强度测量<sup>[5]</sup>、高光谱探测<sup>[6-9]</sup>、CCD 图像测温<sup>[10-14]</sup>和传统辐射测温<sup>[15-20]</sup>等领域具有广泛应用. 辐射测温法是一种重要而广泛应用的非接触测温方法, 基于 Planck 辐射定律, 通过物体表面的热辐射信息来反演温度<sup>[10-23]</sup>, 而热辐射测量是辐射测温的基础. 测量辐射可以采用非成像方式, 也可以采用成像方式. 这两种测量方式既有相同之处——把辐射转换成测量信号, 也有不同之处——所谓非成像测量, 是指目标发射的辐射直接到达传感器表面的测量现象; 所谓成像测量, 是指目标发射的辐射先到达成像面, 再经由成像面传送至传感器表面的测量现象. 若在成像面上使用成像元件(针孔或透镜), 就能在像面上获得被测目标的清晰影像, 否则只能获得模糊影像. 在成像面上, 又有针孔和透镜这两种成像技术可供使用.

在光学成像和光电传感器阵列两种技术相结合并形成数码影像产品的今天, 如果能够回答以下两个问题, 则数码影像技术就能够发展成为一种新的测量技术. 这两个问题是: 1) 与非成像测量相比,

如果把因成像面的存在而引发的测量差异称为成像效应, 那么这种差异如何进行数学表述? 2) 就针孔和透镜这两种成像技术而言, 测量中的成像效应又有何差异?

显然, 只要能够就辐射测量中的成像效应给出相应的数学表述, 就可以把已经发展成熟的非成像辐射测量方法推广至成像测量.

## 2 辐射能流测量

目标表面的辐射会向周围空间发出, 经空间(本文仅讨论真空环境)传输后形成到达传感器表面的辐射能流, 传感器把辐射能流转换为测量信号, 这就是辐射测量的基本描述.

由光谱辐射强度  $I(\lambda, \theta, \phi)$  的定义<sup>[24]</sup> 可得目标微元面  $dA$  在  $(\theta, \phi)$  方向上微元立体角  $d\omega$  内的光谱辐射能流  $dq(\lambda)$ ,

$$dq(\lambda) = dA \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi \times I(\lambda, \theta, \phi). \quad (1)$$

可用光电传感器对辐射能流进行测量. 其转换函数被称为绝对光谱响应度  $\eta(\lambda)$ . 在传感器的光谱响应波段  $\Delta\lambda$  内, 绝对光谱响应度  $\eta(\lambda)$  是一系列波长  $\lambda$  下单色光谱响应度  $\eta_\lambda$  的集合,

$$\eta(\lambda) = \{\eta_\lambda; \lambda \in \Delta\lambda\}. \quad (2)$$

\* 国家自然科学基金(批准号: 50976112)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: xfcheng@ustc.edu.cn

选择波长  $\lambda$  进行测量, 且设光学系统的透过率为  $\tau(\lambda)$ , 于是有如下光谱辐射能流测量方程,

$$dV(\lambda) = \tau(\lambda) \eta(\lambda) dq(\lambda) = F(\lambda) dq(\lambda), \quad (3)$$

其中,  $dV(\lambda)$  为光谱辐射测量信号,  $F(\lambda) = \tau(\lambda) \eta(\lambda)$  为辐射测量仪器光谱响应度. (1) 式是由辐射能流计算辐射强度的基本公式, 而 (3) 式是由测量数据计算辐射能流的基本公式.

### 3 辐射测量

辐射有两种测量方式: 一种是非成像测量, 即传感器表面直接接收来自于目标表面的辐射能流, 这种方式无法针对目标微元的辐射强度实施测量; 另一种是成像测量, 即先由成像面把来自于目标表面的辐射能流接收下来, 再把接收到的辐射能流送达至位于像面上的传感器, 这种方式可在成像面上使用某些技术手段, 把来自于目标表面不同微元面积上的辐射能流送达到像面上不同位置处的传感器.

若在成像面上使用了成像技术——针孔成像或透镜成像, 则成像面接收的辐射能流就能够全部地送达到像面上某一指定的位置 (传感器像素), 否则只能有部分的送达. 再结合像面上光电传感器阵列的使用, 就能够实现目标表面各微元面积与传感器阵列各像素微元的一一对应, 从而可实施目标辐射强度场的测量.

本文只讨论在成像面上使用成像元件的辐射测量. 显然, 成像面的引入将对测量数据产生影响, 把这种影响定义为成像效应. 为了把成像面引发的成像效应甄别出来, 采用如下的研究方法:

1) 把传感器置于成像面上, 考察关于目标微元辐射强度的测量数据, 称这种测量为非成像测量, 尽管在测量实践中并不真实存在这种测量;

2) 再把传感器置于像面上, 写出位于像面不同位置处对目标相应微元辐射强度的测量数据, 显然这时的测量就有了成像面的影响;

3) 把上述两种测量表述中的相似部分识别出来, 剩下的便是成像效应了.

#### 3.1 非成像测量

若把光电传感器放置在发射微元  $dA$  的发射立体角内进行测量 (以下标 “1” 来标识), (1) 式代

入 (3) 式, 可得到关于发射微元  $dA$  在微元立体角  $(d\theta, d\phi)$  内的光谱辐射强度测量式:

$$dV_1(\lambda) = dA \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi \times F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi). \quad (4)$$

在波段  $\Delta\lambda$  内实施积分, 得到关于发射微元  $dA$  在微元立体角  $(d\theta, d\phi)$  内的波段辐射强度测量式:

$$\begin{aligned} dV_1 &= \int_{\Delta\lambda} dV_1(\lambda) d\lambda \\ &= dA \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi \\ &\quad \times \int_{\Delta\lambda} F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda. \end{aligned} \quad (5)$$

进一步地, 在有限立体角  $(\Delta\theta, \Delta\phi)$  内实施积分, 可获得更大的测量信号:

$$\begin{aligned} V_1 &= \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\phi} dV_1 d\theta d\phi \\ &= dA \int_{\Delta\phi} \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\lambda} \cos \theta \sin \theta F(\lambda) \\ &\quad \times I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda d\theta d\phi. \end{aligned} \quad (6)$$

上述三式可统称为非成像测量式.

#### 3.2 成像测量

有序排列的光电传感器面阵, 可以对辐射强度场进行测量. 面阵上的每一个光电传感器, 称为像素微元, 具有  $dA_s$  的表面积.

辐射强度场测量的关键是, 首先要建立起发射微元  $dA$  与像素微元  $dA_s$  的一一对应关系. 为建立这种对应, 必须引入成像面, 并把发射微元  $dA$  与像素微元  $dA_s$  分别置于成像面的物距  $u$  侧和像距  $v$  侧 (见图 1).

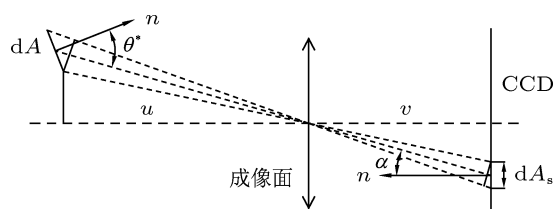


图 1 成像测量示意图

把发射微元  $dA$  和像素微元  $dA_s$  以直线相连, 该连线与成像面相交的点称为成像光轴中心, 连线与发射微元表面法线的夹角为  $\theta^*$  (简称测量天顶角), 与像素微元表面法线的夹角和成像光轴的夹角同为  $\alpha$ ,  $\theta^*$  和  $\alpha$  取值范围均为  $[0, \pi/2]$ . 由几何学可以建立成像面两侧两个微元面积之间的数学关系:

$$\frac{dA \cos \theta^*}{u^2} = \frac{dA_s \cos \alpha}{v^2}. \quad (7)$$

以成像光轴中心为圆心, 连续改变发射微元  $dA$  和像素微元  $dA_s$  间连线与成像光轴的夹角  $\alpha$  (简称成像光轴角), 就可以利用有序排列的传感器阵列, 对辐射强度场进行二维测量, 亦即成像测量.

到达像素微元  $dA_s$  的辐射能流, 其实就是发射微元  $dA$  在发射立体角内由成像面接收并向像素微元传递的辐射能流. 若在成像面上采用针孔成像, 则对应着 (4), (5) 两式的微元立体角 ( $d\theta, d\phi$ ) 测量; 若在成像面上采用透镜成像, 则对应着 (6) 式的有限立体角 ( $\Delta\theta, \Delta\phi$ ) 测量. 于是, 关于非成像的辐射强度测量式 (4)—(6), 虽然同样适用于关于成像的辐射强度测量表述, 但因为测量式中没有成像光轴角  $\alpha$ , 所以还不能称为成像测量式.

根据 (7) 式所提供的发射微元和像素微元之间的数学关系, 把 (4)—(6) 三式中的发射微元  $dA$  替换为像素微元  $dA_s$ , 其测量信号不会有任何改变, 但测量却从非成像状态转变为成像状态, 于是得到成像辐射强度测量式 (以下标 “2” 来标识):

$$dV_2(\lambda) = \left(\frac{u}{v}\right)^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \theta^*} dA_s \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \times F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi), \quad (8)$$

$$dV_2 = \left(\frac{u}{v}\right)^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \theta^*} dA_s \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \times \int_{\Delta\lambda} F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda, \quad (9)$$

$$V_2 = \left(\frac{u}{v}\right)^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \theta^*} dA_s \int_{\Delta\phi} \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\lambda} \cos \theta \sin \theta \times F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda d\theta d\phi. \quad (10)$$

以上三式可统称为成像测量式, 因为测量式中有了成像光轴角  $\alpha$ , 通过它的改变, 就能够实现成像测量了.

## 4 成像效应

不论采用非成像测量还是成像测量, 惟一的关注点就是测量信号与辐射强度之间的对应关系. 当测量从非成像方式转变为成像方式时, 我们关心的是这种对应关系是否发生了变化, 如果发生了变化, 显然完全是因为成像而引发, 把引发这种变化的因素称为成像效应.

### 4.1 对应关系的改变及其成像效应

令

$$\frac{\cos \alpha}{\cos \theta^*} = 1, \quad (11)$$

这时成像测量式 (8)—(10) 可分别写成 (以下标 “3” 来标识),

$$dV_3(\lambda) = \left(\frac{u}{v}\right)^2 \times dA_s \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \times F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi), \quad (12)$$

$$dV_3 = \left(\frac{u}{v}\right)^2 \times dA_s \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \times \int_{\Delta\lambda} F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda, \quad (13)$$

$$V_3 = \left(\frac{u}{v}\right)^2 \times dA_s \int_{\Delta\phi} \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\lambda} \cos \theta \sin \theta F(\lambda) \times I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda d\theta d\phi. \quad (14)$$

把 (12)—(14) 三式与 (4)—(6) 三式相比较, 两者有相似的数学表述. 这表明: 满足  $\cos \alpha / \cos \theta^* = 1$  的成像测量, 其测量信号场与辐射强度场的对应关系, 和非成像测量下测量信号与辐射强度的对应关系相似, 即并未因为成像的引入而引发测量信号与辐射强度对应关系的变化.

把 (12)—(14) 三式描述的成像测量称为 “理想成像测量”. 显然, 满足理想成像测量的条件是  $\alpha \equiv \theta^*$ , 这种条件表现为发射面和传感器阵列面均为平面, 且成像光轴是这两个平面的共同法线.

当  $\alpha \neq \theta^*$  时, 改变  $\alpha$  虽然也使成像测量得以实施, 但此时获得的测量信号场与理想成像测量信号场相比, 存在着  $\cos \alpha / \cos \theta^*$  倍的差异. 鉴于在成像光轴角  $\alpha$  改变的过程中始终难以找到  $\cos \alpha / \cos \theta^* = \text{const.}$  的条件, 由此导致成像测量信号场与理想成像测量信号场出现了不一致, 因此在  $\alpha \neq \theta^*$  的成像测量下, 其测量信号与辐射强度之间的对应关系显然不同于非成像测量, 这就是成像效应.

于是,  $\cos \alpha / \cos \theta^*$  就是成像效应的表达式. 由此式可见, 成像光轴角  $\alpha$  和测量天顶角  $\theta^*$  都是引发成像效应的原因.

### 4.2 成像效应的三种特例

令成像光轴角  $\alpha$  和测量天顶角  $\theta^*$  取特定的数值, 可出现成像效应的三种特例.

1) 理想成像

这个特例已经讨论过了, 这时没有成像效应.

2) 测量天顶角  $\theta^*$  成像

令  $\alpha = 0$ , 有

$$\frac{\cos \alpha}{\cos \theta^*} = \frac{1}{\cos \theta^*}. \quad (15)$$

这时有成像效应, 并且完全是由发射微元所处的测量天顶角  $\theta^*$  而引发.  $\alpha = 0$  的条件, 对应的是各个像素微元的法线均指向成像光轴中心. 这种条件下传感器阵列可得到最大的测量信号场, 但这样的传感器阵列存在着制作困难.

3) 成像光轴角  $\alpha$  成像

令  $\theta^* = 0$ , 有

$$\frac{\cos \alpha}{\cos \theta^*} = \cos \alpha. \quad (16)$$

这时有成像效应, 并且完全是由像素微元所处的成像光轴角  $\alpha$  而引发. 与  $\theta^* = 0$  对应的状况是各个发射微元的法线均指向成像光轴中心. 通常发射面的法向上有最大的辐射强度, 因此这种条件下成像面上可得到最大的辐射能流, 但在测量实践中, 具有这种表面的辐射发射面通常是不可能存在的.

### 5 不同成像技术下的成像效应

虽然可以用  $\cos \alpha / \cos \theta^*$  来统一地描述成像效应, 但对针孔和透镜这两种不同的成像技术, 其成像效应还是有差别的.

#### 5.1 针孔成像下的成像效应

针孔成像下, 测量天顶角  $\theta^*$  就是发射天顶角  $\theta$ , 即  $\theta^* = \theta$ , 如图 2 所示. 因此针孔成像测量式实则应为,

$$dV_2(\lambda) = dA_s \left(\frac{u}{v}\right)^2 \cos \alpha \times \sin \theta d\theta d\phi \times F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi), \quad (17)$$

$$dV_2 = dA_s \left(\frac{u}{v}\right)^2 \cos \alpha \times \sin \theta d\theta d\phi \times \int_{\Delta\lambda} F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda. \quad (18)$$

在针孔成像测量下, 发射天顶角  $\theta$  的存在抵消了测量天顶角  $\theta^*$  的成像效应, 因此我们只能看到成像光轴角  $\alpha$  的成像效应  $\cos \alpha$ .

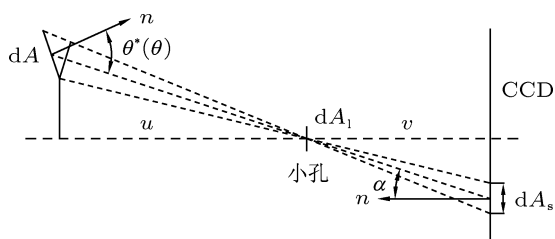


图 2 小孔成像

#### 5.2 透镜成像下的成像效应

对透镜成像测量式 (10) 式应用广义积分中值定理 [25], 可以写为

$$V_2 = dA_s \left(\frac{u}{v}\right)^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \theta^*} \int_{\Delta\phi} \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\lambda} \cos \theta \sin \theta \cdot F(\lambda) \times I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda d\theta d\phi = dA_s \left(\frac{u}{v}\right)^2 \cos \alpha \left(\frac{\cos \theta^{**}}{\cos \theta^*}\right) \int_{\Delta\phi} \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\lambda} \sin \theta \times F(\lambda) I(\lambda, \theta, \phi) d\lambda d\theta d\phi \quad (\theta^{**} \in \Delta\theta). \quad (19)$$

与针孔成像测量相比, 透镜成像测量下不仅有成像光轴角  $\alpha$  的成像效应  $\cos \alpha$ , 而且还会有测量天顶角  $\theta^*$  与发射天顶角  $\theta$  不一致时所引发的成像效应  $(\cos \theta^{**} / \cos \theta^*)$ , 依据积分中值定理,  $\theta^{**}$  为  $\Delta\theta$  内的某个特定天顶角, 并不一定等于测量天顶角  $\theta^*$ , 如图 3 所示.

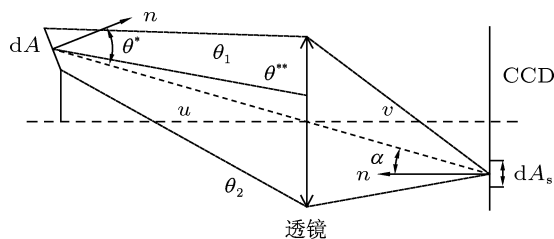


图 3 透镜成像

#### 5.3 成像技术改变下的成像效应规律

由上面的推导可以清晰地看到, 成像效应表现为两大部分: 一是由成像光轴角而引发的成像效应, 这是成像效应的主因, 因为不论采用何种成像技术, 始终存在着成像光轴角引发的成像效应; 另一是由测量天顶角引发的成像效应, 构成了成像效应的辅因, 针孔成像时因为  $\theta^* = \theta$ , 因此没有测量天顶角的成像效应, 透镜成像时会出现  $\theta^* \neq \theta$  的情况, 测量天顶角的成像效应才会表现出来, 并且测量天顶角  $\theta^*$  与发射天顶角  $\theta$  之间的差异越大, 这种成像效应的影响就越大.

### 6 结论

从成像面上的一个测量点, 分别观察位于物距侧的发射辐射面进行非成像测量时获得的非成像测量信号, 以及位于像距侧的光电传感阵列在使用

成像技术时获得的成像测量信号场, 通过比对其数学表述, 得到成像效应  $\cos \alpha / \cos \theta^*$ .

在针孔和透镜这两种不同的成像技术下分析成像效应, 更看到: 成像光轴角是引发成像效应的

主要因素, 存在于针孔及透镜这两种成像测量中; 测量天顶角所引发的成像效应, 只有当测量天顶角与发射天顶角存在有差异时, 才会表现出来.

- [1] Aplin K L, McPheat R A 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 106107
- [2] Garnier A, Pelon J, Dubuisson P, Faivre M, Chomette O, Pascal N, Kratz D P 2012 *J. Appl. Meteorol. Clim.* **51** 1047
- [3] Jones R, Krishnapillai M, Cairns K, Matthews N 2010 *Fatigue Fract. Eng. Mater.* **33** 871
- [4] Gao P T, Zhang Q C, Fu S H, Hu Q, Gao Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 458 (in Chinese) [曹鹏涛, 张青川, 符师桦, 胡琦, 高云 2010 物理学报 **59** 458]
- [5] Asatryan R S, Epremian R A, Gevorkyan H G, Mkrtchyan A G, Msryan G K, Sardaryan T V, Skvortsov Y E, Vardumyan Z A 2003 *Int. J. Infrared Milli.* **24** 1035
- [6] Barducci A, Benvenuti M, Bonora L, Castagnoli F, Guzzi D, Marcoionni P, Pippi I 2006 *Ann. Geophys.* **49** 305
- [7] Ghulam A, Li Z L, Qin Q M, Tong Q X, Wang J H, Kasimu A, Zhu L 2007 *Sci. China D* **50** 1359
- [8] Zhang L, Zhang B, Chen Z C, Zheng L F, Tong Q X 2009 *Acta Oceanol. Sin.* **28** 1
- [9] Oppelt N, Mauser W 2004 *Int. J. Remote Sens.* **25** 145
- [10] Fu T R, Zhao H, Zeng J, Wang Z, Zhong M H, Shi C L 2010 *Appl. Opt.* **49** 5997
- [11] Li W H, Lou C, Sun Y P, Zhou H C 2011 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **35** 416
- [12] Fu T R, Yang Z J, Wang L P, Cheng X F, Zhong M H, Shi C L 2010 *Opt. Laser Technol.* **42** 586
- [13] Zhang X Y, Cheng Q A, Lou C, Zhou H C 2011 *P. Combust. Inst.* **33** 2755
- [14] Fu T R, Wang Z, Cheng X F 2010 *J. Heat Trans. T. ASME* **132** 051602
- [15] Coates P B 1981 *Metrologia* **17** 103
- [16] Saunders P 1997 *Metrologia* **34** 201
- [17] Sun X G, Dai J M, Cong D C, Chu Z X 1998 *J. Infrared Millim. W.* **17** 221 (in Chinese) [孙晓刚, 戴景民, 丛大成, 褚载祥 1998 红外与毫米波学报 **17** 221]
- [18] Tschudi H R, Schubnell M 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 2719
- [19] Yang C L, Dai J M, Hu Y 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1685
- [20] Zhang Y C, Qi Y D, Fu X B 2011 *Spectrosc. Spectr. Anal.* **31** 3236 (in Chinese) [张玉存, 齐艳德, 付献斌 2011 光谱学与光谱分析 **31** 3236]
- [21] Fu T R, Cheng X F, Yang Z J 2008 *Appl. Opt.* **47** 6122
- [22] Fu T R, Zhao H, Zeng J, Zhong M H, Shi C L 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 124903
- [23] Xin C Y, Cheng X F, Zhang Z Z 2012 *Spectrosc. Spectr. Anal.* **32** 2735 (in Chinese) [辛成运, 程晓舫, 张忠政 2012 光谱学与光谱分析 **32** 2735]
- [24] Incropera F P, DeWitt D P, Bergman T L, Lavine A S (Translated by Ge X S, Ye H) 2007 *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th Ed.) (Beijing: Chemical Industry Press) p445 (in Chinese) [Incropera F P, DeWitt D P, Bergman T L, Lavine A S 著 (葛新石, 叶宏译) 2007 传热和传质基本原理 (第六版) (北京: 化工出版社) 第 445 页]
- [25] Department of Mathematics of ECNU 2010 *Mathematical Analysis* Vol. 2 (4th Ed.) (Beijing: Higher Education Press) p230 (in Chinese) [华东师范大学数学系 2010 数学分析 (下册) (第四版) (北京: 高等教育出版社) 第 230 页].

# The imaging effect in radiation measurement\*

Cheng Xiao-Fang<sup>†</sup> Xin Cheng-Yun Wang Lu-Ping Zhang Zhong-Zheng

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

(Received 2 January 2013; revised manuscript received 18 February 2013)

## Abstract

The determination and mathematical descriptions of the difference between the imaging radiation measurement and the non-imaging radiation measurement which is of maturity are necessary for extending the radiation measurement from non-imaging technology to imaging technology. In this paper, the mathematical descriptions of the imaging and non-imaging radiation measurement are deduced based on the basic equations of radiation measurement and the correspondence between the infinitesimal planes of the target and sensor array. Because the imaging plane does not change the radiation transfer between the target and sensor, the mathematical descriptions of the imaging effect can be obtained by comparing the two mathematical descriptions. A concrete analysis of the imaging effect based on pinhole imaging and lens imaging is carried out. The results show that the primary cause of the imaging effect is the imaging optical axis angle while the subsidiary cause is the imaging zenith angle, and the influence of the subsidiary cause is determined by the difference between the imaging optical axis angle and the imaging zenith angle.

**Keywords:** radiation measurement, radiation thermometry, the imaging effect

**PACS:** 07.20.Ka, 06.20.-f, 42.79.Pw

**DOI:** 10.7498/aps.62.120702

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50976112).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xfcheng@ustc.edu.cn