

文章编号 1004-924X(2007)11-1662-06

# 双锥腔互补型绝对辐射计

王玉鹏<sup>1,2</sup>, 方伟<sup>1</sup>, 弓成虎<sup>1</sup>, 禹秉熙<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**介绍了一种双锥腔互为补偿的新型绝对辐射计(DCICAR)。采用和导热帽檐一体成型的锥腔,微型铂电阻作温度传感器,双锥腔肩并肩放置,面对相同的视场和热环境,且一直维持相同的温度,传导、对流和热耗散情况相同,以互为补偿方式工作。测量结果表明:测量重复性可达0.05%,用参加2005年在世界辐射中心(WRC)举办的第十届国际日射计比对IPC-X的SIAR-2c作为传递基准,本文研制的DCICAR的A#通道相对世界辐射参考(WRR)的校正因子为0.99973,B#通道的校正因子为0.99917,均与WRR在0.1%以内相符。该仪器提高了双腔补偿效果,且灵敏度高,时间常数小,双腔测量结果可相互比对验证,降低了绝对辐射计的测量不确定度。

**关键词:**辐射测量;双锥腔互补;绝对辐射计;比对

**中图分类号:**TP73 **文献标识码:**A

## Dual cavity inter-compensating absolute radiometer

WANG Yu-peng<sup>1,2</sup>, FANG Wei<sup>1</sup>, GONG Cheng-hu<sup>1</sup>, YU Bing-xi<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China;*  
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A new type absolute radiometer, named Dual Cavity Inter-Compensating Absolute Radiometer(DCICAR) was constructed. A conical cavity of DCICAR is fabricated as a whole body by combined the conical part with the cap brim for heat conduct and a Pt resistance is used as temperature sensor. The DCICAR works in a mode of inter-compensated when the two cavities are put side by side and faced the same field of view(FOV), also kept the same states of heat conducting, convection, dissipation and heat sink in the same temperature environment. The two cavities are always heated in the same temperature through the whole measurement process. Experimental results show that the repetition of DCICAR is better than 0.05%. By taking the SIAR-2c (Solar Irradiance Absolute Radiometer) as transfer standard demonstrated in the Tenth International Pyrheliometer Comparisons (IPC-X) organized by World Radiation Center (WRC) at Switzerland in 2005, the correct factor of channel A of DCICAR relatively to World Radiation Reference(WRR) is 0.99973, and the channel B of 0.99917. So DCICAR can be well coincident with WRR in 0.1%. It concludes that the compensation effect of

收稿日期:2007-08-21;修订日期:2007-09-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40675083)

DCICAR is improved with a short time constant and high sensitivity. The measurement results from two cavities could be compared and validated with each other.

**Key words:** radiation measurement; Dual Cavity Inter-Compensation (DCIC); absolute radiometer; comparison

### 1 引言

在卫星上监测太阳辐照度及其变化对研究全球环境与气候变化有重要意义。为此,欧美一些国家已开发了在空间以遥测方式工作的绝对辐射计<sup>[1-2]</sup>。随着全球环境变化与气候变迁研究需求的增加,精确测量太阳辐照度并长期监测其微小变化趋势对改进和提高绝对辐射计性能提出了更高要求。多年来,本课题组已研制开发了太阳辐照绝对辐射计(SIARs)系列<sup>[3-7]</sup>,并搭载于神舟三号飞船成功地测量了太阳常数值<sup>[8]</sup>。SIARs 还作为风云气象卫星的观测仪器<sup>[9-10]</sup>,将为我国的气象预测与预报做出贡献。

SIARs 是双腔背靠背补偿型绝对辐射计。它有两点不足:(1)双腔在光照情况下面对的环境不同,使补偿效果不理想;(2)腔同热沉的导热性差,因此时间常数长。为了改善这些特性,降低绝对辐射计测量不确定度,需要在腔的导热方式、温度传感器和腔的排列结构上进行改进,研制同 SIARs 辐射计不同的新型绝对辐射计。为此本文研制了一种用锥腔和导热帽檐一体成型的双锥腔肩并肩放置,以互为补偿方式工作,采用微型铂电阻温度传感器的新型绝对辐射计,称为双锥腔互补型绝对辐射计(Dual Cavity Inter-Compensating Absolute Radiometer,DCICAR)。

### 2 DCICAR 结构

双锥腔互补型绝对辐射计(DCICAR)结构如图 1 所示,DCICAR 由两个制作工艺完全相同的锥腔构成双腔对称结构。一个腔为工作腔时,另一个腔则为参考腔。工作腔接收光辐射,参考腔和工作腔相互补偿,以抵消热沉温漂的影响。

图 2 是 DCICAR 零件爆炸图。双锥腔采用纯银电镀而成,双腔结构性能完全一致,采用导热帽檐一体成型技术提高热传导系数,进而缩短时间常数;把 850 Ω 左右的康铜电加热丝埋带入银锥

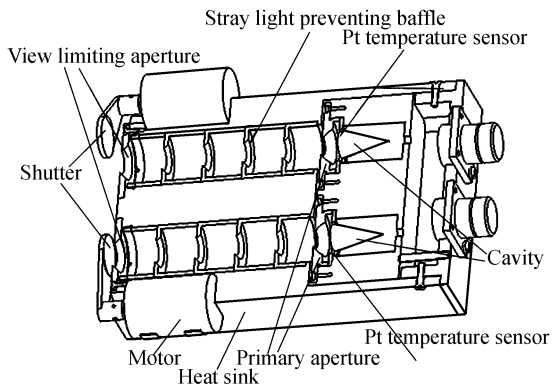


图 1 DCICAR 结构示意图  
Fig. 1 Diagram of DCICAR

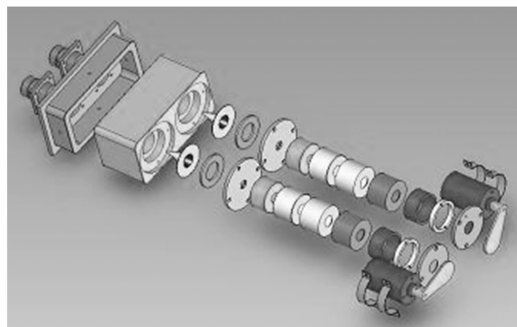


图 2 DCICAR 零件爆炸图  
Fig. 2 Exploring diagram of DCICAR

腔壁内,使辐射加热和电加热时的热耗散几乎等效,提高了绝对精度;锥腔内表面涂一层很薄的镜反射黑漆,锥顶尖呈牛角形光陷阱,经测试腔反射率在 0.2~50 μm 内无选择性,锥腔吸收率为 0.999 6~0.999 7<sup>[3,11]</sup>;双腔开口处贴 Pt500 薄膜铂热敏电阻温度传感器,构成的电桥输出变化可反映锥腔温度变化;在双腔前放面积约为 0.5 cm<sup>2</sup> (已事先测准面积)的主光阑,主光阑和视场光阑之间放消杂光光阑;视场光阑前置有快门,快门双面镀高反射率膜,由步进电机带动。

一般的绝对辐射计在工作腔的前面置有快门,把参考腔的前面封死,参考腔接收热沉的辐射;由于工作腔、参考腔与热沉和外界环境的热传导、对流状态不同,导致两个腔热平衡不完全一

致,参考腔对工作腔的补偿不完全,致使辐射计的测量精度降低。本文研制的 DCICAR 是一种采用对称结构提高补偿效果和提高测量精度的新型双锥腔互补的绝对辐射计。在参考腔前面也置有快门,工作腔和参考腔面对相同的视场和快门,当辐射计受光照射时,两腔、两快门和两腔附近的热沉温度向同一方向漂移,使工作腔、参考腔与热沉和外界环境的热传导、对流状态相同,改善双腔的对称性,保证两个腔热平衡一致,进一步增强了参考腔对工作腔的补偿效果,从而使辐射计的测量精度提高。工作腔和参考腔可以互换,尤其是在空间航天器上作为测量太阳辐照度的仪器,由于空间环境恶劣,运动部件容易出现冷焊等问题,一旦工作腔的快门打不开,把参考腔作为工作腔,工作腔作为参考腔,可延长仪器使用寿命。另外,双腔也可以交替测量光辐射,测量数据可以相互对比、验证,以便提高测量精度。

### 3 DCICAR 工作原理

绝对辐射计电子学自动测量控制系统由热电信号放大电路、电功率校准电路、数据采集电路、快门控制电路、通讯电路、单片机电路、二次电源组成。见图 3。

锥腔 A 上的热敏电阻 1、锥腔 B 上的热敏电阻 2 和热沉上的热敏电阻 3、4 这四个温度传感器构成电桥,电桥输出信号经差分放大后传给数据采集系统,功率驱动电路用于控制与调节锥腔加热丝所加的电压。数模与模数转换器为 16 bit。为保证测量精度,由缓冲放大器输出端到锥腔加热丝设有专用的电流馈送回路;同时,将锥腔加热丝两端直接选作电压取样端,由该电压取样端用专用引线将电压信号馈送到数据采集电路,即所谓四线法,用以避免加热丝电路引线电阻的影响。选用一个精密基准电压源作为系统的基准,参考电压 6.87 V 左右,温度系数  $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,长期稳定性  $20 \times 10^{-6}$ 。对每次测量结果都要用基准电压进行标定,以确保测量结果的可靠性。

传统的绝对辐射计(如 SIAR)测量方法在测量过程中参考腔不接收光辐射,加热丝也不加热,所以在整个测量过程中参考腔与热沉维持在相同的温度上,而工作腔由于一直接接收光或电加热而维持在高于热沉的温度上,结果工作腔和参考腔

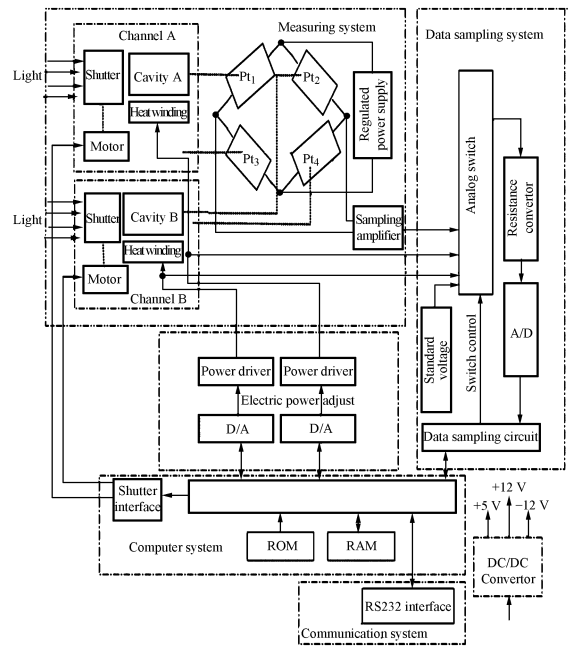


图 3 DCICAR 电路原理示意图

Fig. 3 Block diagram of DCICAR

一直处于不同的温度,所以补偿效果不好。DCICAR 测量过程中参考腔也一直加热,在整个测量过程中参考腔与工作腔一直处于相同的温度,维持在一个高于热沉的温度上,工作腔和参考腔处于更接近的环境与状态,电桥的输出可快速达到热平衡,缩短测量周期,提高补偿效果,即提高了测量精度。

测量过程如下:关闭快门,工作腔和参考腔的电加热丝上都加一个较高的电功率  $P_H$  (电校准阶段),经一固定时间平衡后记录下所加功率温度传感器输出值的大小;然后,打开快门,太阳光入射绝对辐射计(观测阶段),调节工作腔电加热丝上所加电功率的大小,使经一固定时间平衡后温度传感器输出值与电校准阶段温度传感器输出值相等,测出工作腔电加热丝上所加电功率  $P_L$ ,设观测阶段工作腔接收的光辐射功率为  $P_0$ ,因此观测太阳的时间内工作腔接收的总功率为  $P_0 + P_L$ ,由式:

$$P_0 + P_L = P_H, \quad (1)$$

即可求得入射的光辐射功率:

$$P_0 = P_H - P_L, \quad (2)$$

光辐射功率  $P$ 。除以主光阑面积  $A$  就可得出入射的光辐照度:

$$E_0 = P_o/A = (P_H - P_L)/A \quad (3)$$

由于测量出的太阳辐照度值与所需要的最终日地平均距离的太阳常数值有一定差距,还需要加上各种能影响测量准确度的校正因子,由于

$$P_H = \frac{V_H^2}{R}, P_L = \frac{V_L^2}{R}$$

式中  $V_H$  为电校准阶段加热丝上所加电压,  $V_L$  为观测阶段加热丝上所加电压,  $R$  为加热丝电阻。

所以式(3)可写为:

$$(E \cdot F_{AU} - E_S) F_T \cdot F_\theta \cdot F_{DG} \cdot F_{DF} = \frac{V_H^2 - V_L^2}{A \cdot \epsilon \cdot R} \quad (4)$$

式中,  $\epsilon$  为工作腔吸收率;  $E$  为测量出的太阳辐照度经各项校正后的最终太阳常数值;  $E_S$  为视场同冷空间环境的辐射交换;  $F_{AU}$  为校正到日地平均距离的校正因子;  $F_T$  为热沉温度漂移时的校正因子;  $F_\theta$  为太阳跟踪偏离的校正因子;  $F_{DG}$  为黑吸收率下降导致测量结果长期下降倾向的校正因子;  $F_{DF}$  为衍射校正因子。

式(4)就是 DCICAR 的热力学平衡方程。式(4)中的各项校正因子测量的准确与否直接影响 DCICAR 测量的准确性,所以仪器研制出来后首先对各项校正因子进行计算与测定,然后才能由下式准确计算出太阳常数值:

$$E = \frac{1}{F_{AU}} \left( \frac{V_H^2 - V_L^2}{A \cdot \epsilon \cdot R \cdot F_T \cdot F_\theta \cdot F_{DG} \cdot F_{DF}} + E_S \right) \quad (5)$$

### 4 DCICAR 测量实验结果

仪器研制出以后最重要的工作是对其性能指标进行测试。首先对本文研制出的 DCICAR 的测量重复性进行了测定,在光源、环境等均稳定的实验条件下,测量 A#、B# 绝对辐射计的辐照度,结果填入表 1,从表中可以看出测量重复性为 0.05%。

评价绝对辐射计不确定度的最好办法就是比对,用新研制出的 DCICAR 同世界标准比对。SIAR-2c 参加了 2005 年 9~10 月在瑞士达沃斯世界辐射中心(WRC/PMOD)举办的第十届国际日射计比对(IPC-X)<sup>[12]</sup>,同世界辐射基准(WRR)

表 1 重复性测试结果

Tab.1 Data repeativity

测量次数	A# (W/m <sup>2</sup> )	B# (W/m <sup>2</sup> )
1	1 206.0 <sub>80</sub>	1 209.6 <sub>97</sub>
2	1 205.5 <sub>92</sub>	1 209.0 <sub>87</sub>
3	1 204.9 <sub>54</sub>	1 210.4 <sub>77</sub>
4	1 206.8 <sub>52</sub>	1 210.5 <sub>15</sub>
5	1 206.0 <sub>66</sub>	1 210.3 <sub>09</sub>
6	1 206.3 <sub>25</sub>	1 210.2 <sub>03</sub>
7	1 205.7 <sub>77</sub>	1 210.0 <sub>13</sub>
8	1 204.6 <sub>64</sub>	1 210.0 <sub>64</sub>
9	1 206.1 <sub>64</sub>	1 210.6 <sub>26</sub>
10	1 205.9 <sub>81</sub>	1 210.2 <sub>75</sub>
11	1 206.4 <sub>54</sub>	1 210.2 <sub>58</sub>
12	1 206.0 <sub>74</sub>	1 211.1 <sub>43</sub>
13	1 206.1 <sub>87</sub>	1 210.6 <sub>37</sub>
14	1 206.6 <sub>82</sub>	1 210.9 <sub>57</sub>
15	1 205.7 <sub>25</sub>	1 210.8 <sub>80</sub>
16	1 204.7 <sub>74</sub>	1 209.8 <sub>96</sub>
平均值	1 205.9 <sub>0</sub>	1 210.3 <sub>0</sub>
误差范围(1σ)	0.05%	0.04%

进行了比对,给出了它对 WRR 的校正因子为 1.000 016,修正系数的定标不确定度(1σ)为 0.093 3%。将 SIAR-2c 作为传递基准,DCICAR 的二通道分别与 SIAR-1 比对,比对结果分别列入表 2、3。

表 2 A# 通道与 SIAR-2c 比对

Tab.2 Comparison of channel A# with SIAR-2c

测量次数	A# (W/m <sup>2</sup> )	SIAR-2c (W/m <sup>2</sup> )	比率
1	866.79 <sub>5</sub>	870.69 <sub>0</sub>	0.995 5 <sub>3</sub>
2	841.97 <sub>6</sub>	849.74 <sub>8</sub>	0.990 8 <sub>5</sub>
3	850.29 <sub>5</sub>	845.29 <sub>6</sub>	1.005 9 <sub>1</sub>
4	843.19 <sub>6</sub>	832.28 <sub>2</sub>	1.013 1 <sub>1</sub>
5	825.86 <sub>3</sub>	830.45 <sub>7</sub>	0.994 4 <sub>7</sub>
6	827.95 <sub>7</sub>	823.26 <sub>8</sub>	1.005 7 <sub>0</sub>
7	826.43 <sub>3</sub>	818.83 <sub>6</sub>	1.009 2 <sub>8</sub>
8	823.04 <sub>1</sub>	822.96 <sub>2</sub>	1.000 1 <sub>0</sub>
9	823.00 <sub>3</sub>	833.62 <sub>3</sub>	0.987 2 <sub>6</sub>
10	839.91 <sub>3</sub>	839.33 <sub>7</sub>	1.000 6 <sub>9</sub>
平均比率 A# / SIAR-2c			1.000 2 <sub>9</sub>

DCICAR 的 A# 通道相对 SIAR-2c 的校正因子 0.999 7<sub>1</sub>

DCICAR 的 A# 通道相对 WRR 的校正因子 0.999 7<sub>3</sub>

表 3 B# 通道与 SIAR-2c 比对

Tab. 3 Comparison of channel B# with SIAR-2c

测量次数	B# (W/m <sup>2</sup> )	SIAR-2c (W/m <sup>2</sup> )	比率
1	846.49 <sub>8</sub>	846.94 <sub>9</sub>	0.999 4 <sub>7</sub>
2	847.01 <sub>2</sub>	844.23 <sub>4</sub>	1.003 2 <sub>9</sub>
3	869.74 <sub>4</sub>	873.47 <sub>9</sub>	0.995 7 <sub>2</sub>
4	856.50 <sub>3</sub>	854.98 <sub>1</sub>	1.001 7 <sub>8</sub>
5	857.59 <sub>6</sub>	853.43 <sub>5</sub>	1.004 8 <sub>8</sub>
6	863.72 <sub>6</sub>	861.47 <sub>2</sub>	1.002 6 <sub>2</sub>
7	849.34 <sub>8</sub>	847.03 <sub>1</sub>	1.002 7 <sub>4</sub>
8	849.15 <sub>4</sub>	851.04 <sub>3</sub>	0.997 7 <sub>8</sub>
9	852.24 <sub>3</sub>	852.72 <sub>9</sub>	0.999 4 <sub>3</sub>
10	851.17 <sub>7</sub>	850.51 <sub>3</sub>	1.000 7 <sub>8</sub>
平均比率 B# / SIAR-2c			1.000 8 <sub>5</sub>
DCICAR 的 B# 通道相对 SIAR-2c 的校正因子			0.999 1 <sub>5</sub>
DCICAR 的 B# 通道相对 WRR 的校正因子			0.999 1 <sub>7</sub>

其中 A# 通道与 SIAR-2c 比对的平均比率为 1.000 29, 相对于 SIAR-2c 校正因子为 0.999 71, 递推到相对世界辐射参考 WRR 的校正因子为 0.999 73; B# 通道与 SIAR-2c 比对的平均比率为 1.000 85, 相对于 SIAR-2c 的校正因子 0.999 15, 递推到相对世界辐射参考 WRR 的校正因子则为 0.999 17。

## 参考文献:

- [1] RICHARD C W. Active cavity radiometer type IV[J]. *Appl. Opt.*, 1979, 18(2): 179-188.
- [2] ROBERT W B. Absolute radiometer(PMO6) and their experimental characterization [J]. *Appl. Opt.*, 1986, 25: 4173-4180.
- [3] 方伟, 金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制[J]. *太阳能学报*, 1992, 13(3): 406-411.  
FANG W, JIN X F. Development of a compensate dual-conical cavity absolute radiometer[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica.*, 1992, 13(3): 406-411. (in Chinese)
- [4] 方伟, 禹秉熙, 姚海顺. 太阳辐照绝对辐射计(SIAR-1)与国际比对[J]. *光学学报*, 2003, 23(1): 112-116.  
FANG W, YU B X, YAO H SH. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1): 112-116. (in Chinese)
- [5] 禹秉熙, 方伟, 王玉鹏. 卫星宽视场绝对辐射计太阳越过视场时入射光变化与腔温响应函数[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 353-358.  
YU B X, FANG W, WANG Y P. Radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 353-358. (in Chinese)
- [6] 禹秉熙, 姚海顺, 方伟. 绝对辐射计预测辐射电补偿的快速测量方法[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 786-790.  
YU B X, YAO H SH, FANG W. Radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer

## 5 结 论

影响绝对辐射计测量不确定度的最重要因素是工作方式及仪器结构, 进而涉及到腔型的结构、温度传感器的选用、测量方法、电子学自动控制系统的优化。本文打破传统的补偿型绝对辐射计工作腔只能作为工作腔, 参考腔只能作为参考腔的惯例, 并考虑工作腔和参考腔处于不同的热辐射环境、工作腔面对视场与快门、参考腔面对热沉等一系列因补偿效果不好导致测量精度不高的弊端, 研究成功了一种用锥腔和导热帽檐一体成型的双锥腔肩并肩放置来互为补偿方式工作的采用微型铂电阻温度传感器的新型绝对辐射计 DCICAR, 工作腔和参考腔面对相同的视场和快门, 且一直维持相同的温度, 当辐射计受光照射时, 两腔、两快门和两腔附近的热沉的温度向同一方向漂移, 使工作腔、参考腔与热沉和外界环境的热传导、对流热耗散情况相同, 从而提高了双腔的对称性, 保证两个腔热平衡一致, 补偿效果好, 辐射计的测量重复性达到 0.05%, 与 WRR 在 0.1% 以内相符。DCICAR 灵敏度高、时间常数小。由于采用双锥腔互补, 一台辐射计能起到两台辐射计交替测量的效果, 两通道可互为备份, 且测量结果可相互比对验证, 节省了航天器上的宝贵资源。

- with wide field of view mounted on the satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005,25(6) : 786-790. (in Chinese)
- [7] 禹秉熙,方伟,王玉鹏. 卫星上绝对辐射计观测太阳时同太空背景的辐射交换[J]. *光学学报*,2005,25(8) :1048-1052.
- YU B X, FANG W, WANG Y P. Radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005,25(8) :1048-1052. (in Chinese)
- [8] 禹秉熙,方伟,姚海顺. 神舟 3 号飞船上太阳辐射测量[J]. *空间科学学报*,2004,24(2) : 119-123.
- YU B X, FANG W, YAO H SH. Solar irradiance measurement on shenzhou-3 spacecraft[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004,24(2) :119-123. (in Chinese)
- [9] 方伟,禹秉熙,姚海顺,等. 星载太阳辐照度监测仪(STIM)[C]. 第十一届全国遥感技术学术交流会论文集,1999: 65-66.
- FANG W, YU B X, YAO H SH, *et al.*. STIM on satellite[C]. *The eleventh national symposium on remote sensing technology*,1999:65-66. (in Chinese)
- [10] FANG W, YU B X, YAO H SH, *et al.*. Development of STIM[J]. *SPIE*,2003,4895:218-224.
- [11] FANG W, WANG Y P, YU B X. The full hemisphere integrating measurement of the reflectance of black cavity [J]. *SPIE*,2006,6033: 60330G-1-8.
- [12] PMOD/WRC. International Pyrheliometer Comparison[C]. *Davos;WMO/TD*,2006.

**作者简介:**王玉鹏(1972—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在职博士研究生,主要从事绝对辐射测量技术,光学空间遥感等方面研究。E-mail:wangyu-peng@sina.com

**通讯作者:**方伟(1965—),女,工学博士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主任设计师,研究员,主要从事绝对辐射测量技术、航天光学遥感仪器等方面的研究。E-mail:fangw@ciopm.ac.cn.