

文章编号 1004-924X(2025)24-3814-09

用于太阳辐射监测仪间接比对的大动态标准 探测器定标方法研究

衣小龙^{1*}, 王 哲^{1,2}, 贾瑞栋¹, 周 军¹, 叶 新¹, 杨东军¹, 方 伟¹, 徐 楠³,
刘志伟³, 董 航^{1,2}, 兰 亮^{1,2}, 邢倡基^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要:溯源至国家辐射功率基准的传递探测器动态范围小于 1 mW, 远低于太阳辐射监测仪测量目标功率, 无法检验太阳辐射监测仪的绝对精度。为扩展辐射功率标准动态范围, 研制动态范围 10 mW 的比对探测器, 研究了传递探测器对
比对探测器的高功率定标方法, 解决了缺少高功率辐射功率标准的问题。首先, 以中国国家计量院低温绝对辐射计为基
准, 在 0.5 mW 量级下对传递探测器的功率响应度进行高精度定标。其次, 通过构建可溯源至 SI 的标准传递链路, 在小
功率量级下用传递探测器测量标准传递链路分束比, 测量重复性达到 0.009 5%。然后, 在大功率量级下, 利用标准传递
链路和传递探测器, 标定比对探测器响应度。最后, 进行比对探测器的线性度、面均匀性、角均匀性、真空空气一致性等
误差的实验检测及分析, 合成得到高功率辐射功率标准的不确定度。实验结果表明: 比对探测器在 10 mW 量级的响应
度为 0.508 43 A/W, 测量重复性达到 0.003 1%, 在 9.7~10.4 mW 范围内响应度变化不超过 0.01%, 合成不确定度为
0.031%, 从而可通过比对探测器可建立 10 mW 量级的辐射功率标准, 满足太阳辐射监测仪的比对验证需求。本研究不
仅解决了太阳辐射监测仪等大动态辐射测量仪器的精度验证及比对定标难题, 也为统一辐射标度提供关键技术基础, 为
气候变化、辐射收支及太阳能高效开发等研究领域提供支撑。

关键词: 辐射定标; 陷阱探测器; 太阳总辐照度; 绝对辐射测量

中图分类号: TH691.9 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253324.3814

CSTR: 32169.14.OPE.20253324.3814

Research on the calibration method of large dynamic standard detectors for indirect comparison of solar radiation monitors

YI Xiaolong^{1*}, WANG Zhe^{1,2}, JIA Ruidong¹, ZHOU Jun¹, YE Xin¹, YANG Dongjun¹, FANG Wei¹,
XU Nan³, LIU Zhiwei³, DONG Hang^{1,2}, LAN Liang^{1,2}, XING Changji^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

* Corresponding author, E-mail: yxl19880603@126.com

收稿日期: 2025-08-30; 修订日期: 2025-09-30.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFB3903200, No. 2022YFB3903203)

Abstract: The dynamic range of the transfer detector, which traces back to the national radiation power standard, is less than 1 mW, far below the target power of the solar radiation monitor, making it impossible to verify the absolute accuracy of the solar radiation monitor. To expand the dynamic range of the radiation power standard, a comparison detector with a dynamic range of 10 mW was developed. The high-power calibration method of the transfer detector to the comparison detector was studied, solving the problem of the lack of high-power radiation power standards. Firstly, the power response of the transfer detector was precisely calibrated at the 0.5 mW level using the low-temperature absolute radiometer of the National Institute of Metrology of China as the reference. Secondly, by constructing a standard transfer chain traceable to the SI, the beam splitting ratio of the standard transfer chain was measured at the low-power level using the transfer detector, with a measurement repeatability of 0.009 5%. Then, at the high-power level, the response of the comparison detector was calibrated using the standard transfer chain and the transfer detector. Finally, the linearity, surface uniformity, angular uniformity, and vacuum-air consistency errors of the comparison detector were experimentally detected and analyzed, and the uncertainty of the high-power radiation power standard was synthesized. The experimental results show that the response of the comparison detector at the 10 mW level is 0.508 43 A/W, with a measurement repeatability of 0.003 1%, and the response change within the range of 9.7-10.4 mW does not exceed 0.01%. The combined uncertainty is 0.031%. Thus, a 10 mW-level radiation power standard can be established through the comparison detector, meeting the comparison and verification requirements of solar radiation monitors. This research not only solves the problem of accuracy verification and comparison calibration for large-dynamic-range radiation measurement instruments such as solar radiation monitors, providing a key technical basis for unifying radiation scales, but also supports research fields such as climate change, radiation balance, and efficient solar energy development.

Key words: radiometric calibration; trap detector; solar irradiance monitor; environmental consistency

1 引言

气候变化是当今世界面临的巨大挑战之一,科学界正致力于研究气候变化机制。太阳作为地球气候系统的能量之源,太阳总辐射照度(Total Solar Irradiance, TSI)是驱动地球辐射能量收支、光合作用、光化学反应、气象和水文过程的核心外部能源,对人类及地球生物健康至关重要,且为气候模型的关键参量,长期精准监测可为气候变化预测、环保政策制定和“双碳”背景下的太阳能资源开发提供科学依据,全球气候观测系统(Global Climate Observing System, GCOS)与国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)强调实现TSI可溯源至国际单位制(SI)是提升气象数据质量的核心挑战^[1-7]。

太阳辐射的首次系统测量始于1902年Smithsonian高山研究所的地面监测,持续至1962年,但因地球大气层的反射、吸收和散射干

扰,不同时间与地点的直射辐照度存在显著差异,即使经仪器修正仍无法满足精度要求。自1978年,欧美及我国先后开展空间TSI监测实验,雨云7号卫星(Nimbus-7)首次搭载地球辐射收支仪(Hickey-Frieden)执行在轨测量,随后SMM/ACRIM, SOHO/VIRGO, SORCE/TIM及我国风云卫星/太阳辐射监测仪等多颗卫星实现长期连续监测,建立了40余年的观测链,揭示了11年的变化周期,以及短期变化规律。^[8-9]太阳辐射监测仪是“风云三号气象卫星”主要系列载荷之一,先后搭载风云三号(A, B, C, E, F)卫星执行空间TSI长期连续监测任务^[10],填补我国在气候研究领域这项重要数据测量的空白。

TSI定标是提升空间TSI遥感仪器绝对精度的关键。我国太阳辐射监测仪一直采用传统的溯源至世界辐射基准(World Radiation Reference, WRR)的外场定标方法^[11]。伴随仪器设计及辐射定标等技术提升,目前各国TSI在轨数据

在 0.3% 以内一致,但气候变化研究、辐射收支等领域,需要绝对精度 0.1% 甚至 0.05% 的空间 TSI 数据作为支撑。这对发射前的辐射比对验证提出了新挑战。低温辐射计是目前国际公认的辐射定标基准,中国科学计量研究院、安徽光机所、长春光机所等单位逐步开展溯源至低温辐射计的辐射功率、辐照度等比对定标技术攻关^[12-14]。

辐射功率测量比对验证是太阳辐射监测仪测量不确定度评定的关键环节。以陷阱探测器作为比对用标准器,通过太阳辐射监测仪与中国计量科学研究院低温辐射基准的间接比对,实现高精度的辐射功率测量精度验证。国家计量院的低温绝对辐射计(CAR)测量结果作为实验室最高功率基准,已实现 0.02%^[14]的测量不确定度,但只能在 1 mW 功率以下进行基准传递,而太阳辐射监测仪测量的太阳辐照度的功率高达数十毫瓦,远超功率基准可用区间,缺少相应高功率量级下的辐射标准^[15]。因此,扩展可溯源至 SI 的辐射功率标准动态测量范围已成为亟待解决

的问题。

本文构建了国际单位制(SI)可溯源的完整量值传递链路,通过研制了动态范围扩展辐射标准传递装置,在 10 mW 量级下实现探测器响应度高精度定标,并进行不确定度分析。研究成果不仅解决了太阳辐射监测仪等大动态辐射测量仪器的精度验证及比对定标难题,也为统一辐射标度提供关键技术基础,为气候变化、辐射收支及太阳能高效开发等研究领域提供支撑。

2 辐射功率标准传递及扩展机理

由于低温辐射计整套系统结构复杂且难以搬运,通常采用间接比对方式:首先以中国国家计量院辐射计为辐射基准,利用中国国家计量院辐射计对传递探测器的功率响应度进行高精度定标,再通过传递探测器作为工作标准进行量值传递。本文采用与传递探测器相同结构的陷阱探测器作为比对探测器,通过比对探测器的响应度进行定标实现辐射标准的传递。图 1 为比对探测器响应度定标的原理图。

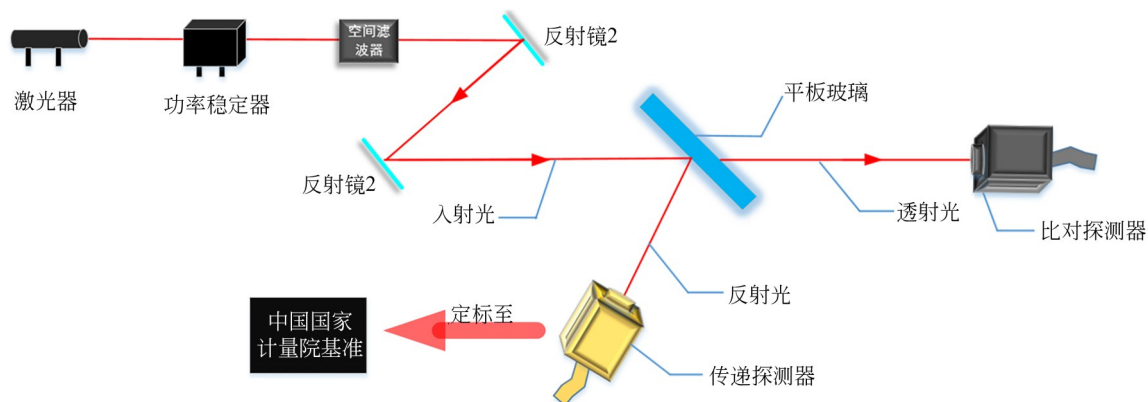


图 1 比对探测器响应度溯源链路图

Fig. 1 Comparison of the traceability chain for detector responsivity

基准传递过程平板玻璃将入射激光分为反射光与入射光两部分,且透射光功率比反射光功率高一个量级。通过可溯源至 SI 的量值传递路径测量出平板玻璃的分束比,将传递探测器分别安装在透射光路与反射光路中,测量出反射光信号与透射光信号,反射光背景信号与透射光背景信号。即可通过式(1)得到平板玻璃的分束比:

$$r = \frac{V_t - V_{tb}}{V_f - V_{fb}}, \quad (1)$$

其中: V_t 为透射光测试信号, V_{tb} 为透射光背景信号, V_f 为反射光测试信号, V_{fb} 为反射光背景信号。再结合比对探测器的测量信号,即可得到比对探测器在高功率测试点下的响应度,如式(2)所示,进而实现辐射基准的传递:

$$S = \frac{I_t - I_{tb}}{P_t} = \frac{I_t - I_{tb}}{r * P_f} = \frac{I_t - I_{tb}}{r * \frac{I_f}{S_c}} = \frac{I_t - I_{tb}}{(V_f - V_{fb})} = \frac{(I_t - I_{tb}) * R_f * S_f}{r * (V_f - V_{fb})}, \quad (2)$$

$$r * \frac{R_f}{S_f}$$

其中: I_t 为比对探测器测量的透射光信号, I_{tb} 为比对探测器测量的透射光背景光信号, R_f 为传递探测器阻值, S_f 为传递探测器响应度。

3 响应度定标实验

为实现比对探测器高辐射功率响应度定标,需要根据第2节所述,建立动态范围扩展辐射标准传递装置,包括高稳定光源和分束比组件。激光光源经过功率稳定器、空间滤波器到达平板分束镜。该链路的核心在于,采用平板分束镜作为分光装置,通过传递探测器和分束比,将计量院的辐射功率基准在10 mW量级下传递至比对探测器,建立高功率辐射标准。

3.1 分束比测量

分束比的测量精度是决定量值传递准确性的核心制约因素。

分束比测量装置如图2所示,为测量平板玻

璃的分束比,将传递探测器(采用计量院标准陷阱探测器)分别置于透射光路与反射光路中,并确保入射光在两种位置下均垂直入射至探测器中心。通过交替切换传递探测器在透射光路与反射光路中的安装位置,多次测量透射光信号和反射光信号。随后关闭快门,分别测量透射与反射光路的背景信号。分束比(r)通过公式(3)计算:

$$r = \frac{V_t - V_{tb}}{V_f - V_{fb}}, \quad (3)$$

其中: V_t 为透射光测试信号, V_{tb} 为透射光背景信号, V_f 为反射光测试信号, V_{fb} 为反射光背景信号。分束比测量结果如表1所示,比对探测器反复安装7次,7次测量结果的相对标准差为0.009 5%,最终分束比取7次测量结果的算术平均值。

表1 分束比测量结果

Tab. 1 Beam splitter ratio measurement results

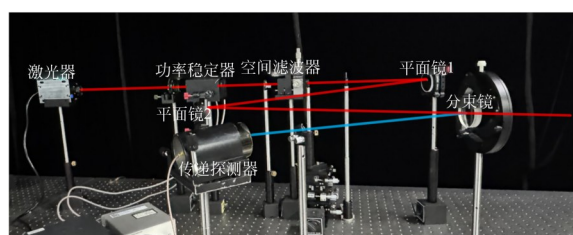
测量次数	分束比
1	11.716 6
2	11.717 0
3	11.719 5
4	11.717 1
5	11.716 5
6	11.717 0
7	11.718 3
均值	11.717 7
标准差	0.001 115
相对标准差	0.009 5%

3.2 传递探测器放大增益系数测试

为准确测试传递探测器放大增益系数,需要将传递探测器放置于高光源稳定性的光路中,并确保入射光垂直入射至探测器中心。多次测量入射光电流信号与电压信号。随后关闭快门,测量入射光电流信号和电压信号。放大增益系数 R_f 通过公式(4)计算:

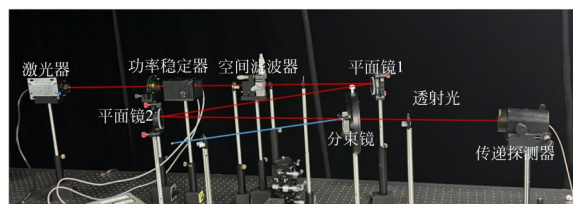
$$R_f = \frac{V_f - V_{fb}}{I_f - I_{fb}}, \quad (4)$$

其中: V_f 是入射光电压信号, V_{fb} 是入射光电压背景信号, I_f 是入射光电流信号, I_{fb} 是入射光电流背景信号。放大增益系数测量结果如表2所示。



(a) 反射光信号测量

(a) Reflected optical signal measurement



(b) 透射光信号测量

(b) Transmitted optical signal measurement

图2 分束比测量装置

Fig. 2 Beam splitter ratio measurement setup

表 2 放大增益系数测量结果

Tab. 2 Amplification gain factor measurement results

测量次数	放大增益系数
1	9 999. 186 604
2	9 999. 420 632
3	10000. 209 36
4	9 999. 884 797
5	10 000. 170 39
6	9 998. 225 563
7	9 998. 055 818
均值	9 999. 307 595
标准差	0. 880 900 868
相对标准差	8. 809 62E-05

表 3 响应度测量结果

Tab. 3 Responsiveness measurement results

测量次数	入射光功率/mW	响应度
1	9. 70	0. 508 432
2	9. 82	0. 508 412
3	9. 96	0. 508 447
4	10. 07	0. 508 412
5	10. 21	0. 508 435
6	10. 31	0. 508 446
7	10. 42	0. 508 412
均值		0. 508 428
标准差		0. 000 016
相对标准差		0. 003 1%
峰峰值偏差		0. 006 9%

3.3 响应度定标及非线性测试

获取平板玻璃分束比后,即可由第 2 节所述通过传递探测器对比对探测器进行响应度定标,获取高功率辐射基准,实验装置如图 3 所示。

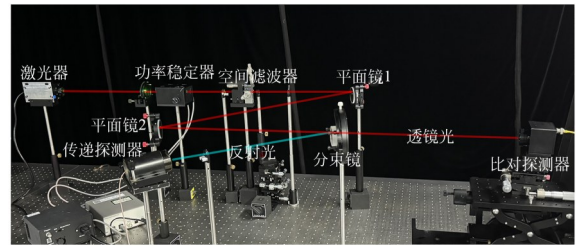


图 3 比对探测器响应度定标装置

Fig. 3 Comparison setup for detector responsivity calibration

实验过程中,传递探测器用于测量反射光路中的低入射光功率,而比对探测器则用于测量透射光路中的高入射光功率。基于公式(1)和公式(2)可计算比对探测器的响应度。需特别注意的是:陷阱探测器的响应度线性工作区间通常为 $10\text{ }\mu\text{W}\sim 1\text{ mW}$,在此范围内其输出信号与入射光功率呈严格线性关系;

当入射光功率超出该范围时,测得的响应度仅对该功率点附近有效。因此本文在比对探测器响应度定标功率附近调整入射光功率,测量比对探测器在不同入射光功率下的响应度,从而确保在该功率范围内,比对探测器的响应度基本保持一致。测量结果如表 3 所示。

由测量结果可知,比对陷阱探测器在 $9.7\sim 10.4\text{ mW}$ 范围内,响应度变化不超过 0.01% ,以

测量均值作为比对探测器在高功率点下的响应度,峰峰值偏差作为响应度非线性。

4 不确定度分析

动态范围扩展辐射标准传递装置的主要误差来源于探测器的面响应不均匀性和角度响应不均匀性以及环境适用性。针对主要误差来源需要进行测试分析。

4.1 响应不均匀性测试

在实际应用中,由于光学系统的安装误差和测量条件的限制,入射光难以始终保持垂直入射至探测器中心位置。为确保测量数据的可靠性,必须对探测器的面响应不均匀性和角度响应不均匀性进行系统性测试与评估。这项测试旨在量化分析探测器在不同入射角度和光斑位置条件下的响应特性变化,从而为后续测量结果的修正和仪器性能优化提供依据,最终保证测量系统的准确性和长期稳定性。

不均匀性测量装置的构成(从上至下依次为):固定安装于位移平台上的比对探测器、用于调整角度的旋转平台以及提供线性位移的一维位移平台。测量时,激光首先垂直入射至探测器中心位置。

空间响应不均匀性评估:调整一维位移平台,使比对探测器沿特定方向进行线性移动(实现单轴扫描),从而在探测器的有效工作面上进行单轴扫描。通过分析扫描过程中探测器的输

出信号,评估其空间响应不均匀性。

角度响应不均匀性评估:调整旋转平台以改变光束的入射角度(或探测器的朝向)。通过比较探测器在不同入射角度下输出信号的峰峰值偏差,评估其角度响应不均匀性。

扫描结果如表 4 和表 5 所示,由测量结果可

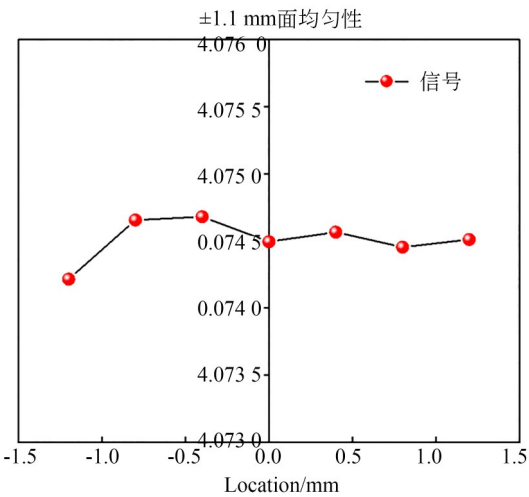


图 4 一维扫描
Fig. 4 One-dimensional scanning

表 4 位置均匀性测量结果
Tab. 4 Position uniformity measurement results

位置	位置均匀性
−1.2	4.074 214 091
−0.8	4.074 654 545
−0.4	4.074 679 091
0	4.074 493 043
0.4	4.074 564 545
0.8	4.074 452 273
1.2	4.074 460 455

表 5 角度均匀性测量结果
Tab. 5 Angular uniformity measurement results

角度	角度均匀性
−1.2	4.070 972 5
−0.8	4.071 104 091
−0.4	4.071 248 182
0	4.071 193 636
0.4	4.071 133 478
0.8	4.071 342 381
1.2	4.071 517 391

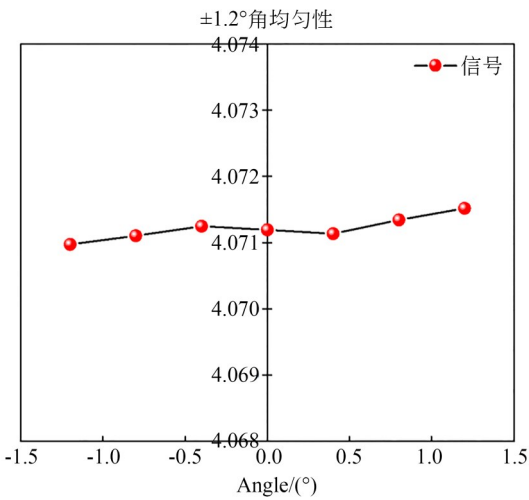


图 5 角度扫描
Fig. 5 Angle scanning

知:对于面响应不均匀性,在±1 mm 的扫描区间内,峰峰值偏差为 0.011%;对于角度响应不均匀性,在±1.2°的扫描区间内,峰峰值偏差为 0.013%。

4.2 真空空气等效测试

获取比对探测器在高功率下的响应度定标数据后,需特别关注其环境适用性:响应度定标通常在大气环境下完成,而太阳辐射监测仪的基准验证必须在真空环境中进行。为确保跨环境测量结果的可比性,需通过对照实验,系统测试比对探测器在真空与大气条件下的响应度差异,来验证结果的准确性和可靠性。

比对探测器固定于真空罐内部,入射光通过真空窗口进入探测器。实验开始时,首先在真空机组关闭状态下,于常温常压环境中测量初始入射光信号;随后,启动真空机组,逐步将环境调整至真空条件,真空度达到 0.024 Pa,再次测量同一入射光信号。通过对比空气与真空条件下的测量结果,评估二者输出信号间的差异,从而验证比对探测器在不同环境下的响应一致性。

为确保真空空气等效性测试结果的可靠性,进行了多次实验。通过对比不同实验条件下的数据,可以验证比对探测器在空气与真空环境下响应度的一致性,确保最终比对结果的精确性。归一化实验结果汇总如表 6 所示,可以看到真空—空气环境下探测器响应度没有显著变化,通过多组实验间的最大偏差来评估比对探测器在

真空与空气环境下的响应不等效性。

表 6 真空空气下比对测量结果

Tab. 6 Comparison measurement results under vacuum atmosphere

测量次数	空气下输出信号/A	真空下输出信号/A	偏差/%
1	0.000 422 685	0.000 422 705	0.004 7
2	0.000 422 744	0.000 422 749	0.001 3
3	0.000 422 724	0.000 422 725	0.000 3
4	0.000 422 744	0.000 422 754	0.002 4
5	0.000 422 681	0.000 422 686	0.001 3
6	0.000 422 721	0.000 422 731	0.002 3

4.3 不确定度合成

表 7 总结了比对探测器辐射功率响应度定标的误差来源并合成得到测量结果的不确定度,合成不确定度为各个不确定度分量的均方根。其中,测量重复性通过多组实验下响应度定标结果的相对标准偏差表征,反映实验结果的稳定性;传递探测器响应度不确定度直接来源于低温辐射计的定标结果,确保传递探测器的精确性;比对探测器响应不均匀性由 4.1 节可知,通过各实验的最大偏差来表征探测器响应的空间均匀性;分束比的不确定度由分束比测量结果的相对标准偏差表征,反映分束过程中引入的误差;比对探测器响应非线性通过定标功率区间内响应度的最大偏差来表征,确保探测器在不同功率条件下的线性响应特性;真空空气不等效由多组测试

表 7 不确定度测量结果

Tab. 7 Measurement result with uncertainty

	分量	不确定度
1	测量重复性	0.003 1%
2	传递探测器响应度	0.02%
3	面响应不均匀性	0.011%
4	角度响应不均匀性	0.013%
5	分束比	0.009 5%
6	响应非线性	0.006 9%
7	真空空气不等效	0.005 2%
8	放大增益系数	0.008 8%
9	传递探测器输出电流	0.001 9%
10	比对探测器输出电流	0.001 4%
合成不确定度		0.031%

实验间的最大偏差表征,确保在真空与空气条件下的响应一致性。最终得到比对探测器在高功率测试点的响应度的合成不确定度为 0.03%,高精度的量值传递过程为后续太阳辐射监测仪的比对功率真值验证提供了可靠的技术支撑。

5 结 论

本研究创新性地研制了动态范围扩展的辐射标准传递装置,实现了对十毫瓦级(9.7~10.4 mW)高功率辐射标准的精确传递。实验结果表明,比对陷阱探测器在该功率范围内的响应度为 0.508 428 A/W,测量重复性相对标准差为 0.003 1%,响应度变化峰峰值 0.006 9%,并对影响比对探测器响应度定标精度的关键因素:探测器响应不均匀性与真空空气响应等效性进行测试与评估。最终确定响应度的合成标准不确定度为 0.031%。为确保大动态范围标准比对探测器与传递探测器的测量精度维持在国家最高计量标准水平,课题组建立了严格的周期性溯源与校准机制。由于探测器在长期使用过程中会受材料老化、环境波动及电子元件性能变化等因素影响,不可避免地出现时间漂移(包括零点漂移与灵敏度漂移),导致测量结果逐渐偏离标准值。为系统性抑制漂移误差的积累,课题组坚持定期将探测器送至中国计量科学研究院(国家级最高计量权威机构)进行直接校准或间接比对。本研究实现了可直接溯源至国际单位(SI)的十毫瓦级辐射功率标准,不仅解决了大动态太阳辐射监测仪向国家辐射基准溯源的难题,还通过奠定太阳辐射高精度测量关键技术基础,为气候监测预测、农业精准指导及太阳能高效开发等科学领域提供支撑,促进全球辐射标度统一。

作者贡献声明:

王哲、董航:测量方法的提出,论文构思和撰写;

兰亮、邢倡基:测量实验的设计及数据整理和分析;

衣小龙、叶新、杨东军:论文审核与编辑写作;

徐楠、刘志伟、贾瑞栋:测量实验数据分析。

参考文献:

- [1] 张一凡,蒋耿明. FY-3D MWHS-II在轨交叉辐射定标[J/OL]. 电波科学学报, 2025: 1-12. (2025-05-30). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DBKX20250522001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
ZHANG Y F, JIANG G M. FY-3D MWHS-II on-orbit cross radiation calibration [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2025: 1-12. (2025-05-30). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DBKX20250522001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [2] 叶新,方伟,胡秀清,等. 溯源于空间低温绝对辐射计的太阳反射波段基准载荷研究进展(特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(18): 108-121.
YE X, FANG W, HU X Q, *et al.* Progress in development of radiometric benchmark payload of solar reflected waveband traced to space cryogenic absolute radiometer (invited) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(18): 108-121. (in Chinese)
- [3] 孙青,金东臣,申琦琦,等. 溯源至SI基本单位的200 kW超高功率光纤激光器功率测量[J]. 中国激光, 2025, 52(3): 210-213.
SUN Q, JIN D C, SHEN Q Q, *et al.* Power measurement of 200 kW ultrahigh-power fiber laser traceable to SI basic unit [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(3): 210-213. (in Chinese)
- [4] 谢艳清,刘明珍,张立国,等. HY-1D/COCTS太阳反射波段的辐射定标及陆地气溶胶反演应用[J/OL]. 光学学报, 2025: 1-20. (2025-05-20). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GXXB20250519004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
XIE Y Q, LIU M Z, ZHANG L G, *et al.* Radiometric calibration of HY-1D/COCTS solar reflection band and its application in land aerosol retrieval [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2025: 1-20. (2025-05-20). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GXXB20250519004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [5] 郑小兵,李新,胡秀清,等. 风云气象卫星光学遥感器场地辐射定标技术发展综述(特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(18): 64-88.
ZHENG X B, LI X, HU X Q, *et al.* Review on development of site radiometric calibration technology for optical remote sensors of Fengyun meteorological satellites (invited) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(18): 64-88. (in Chinese)
- [6] 刘双奎. 内陆水体高光谱遥感反射比测量技术研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2025.
LIU S K. *Study on Reflectance Measurement Technology of Inland Water Body by Hyperspectral Remote Sensing* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2025. (in Chinese)
- [7] 杨东军,方伟,叶新,等. 星载太阳辐射监测仪的高精度太阳跟踪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2483-2490.
YANG D J, FANG W, YE X, *et al.* High precision Sun-tracking of spaceborne solar irradiance monitor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2483-2490. (in Chinese)
- [8] 杨东军,方伟,叶新,等. 星载太阳辐射监测仪的太阳程控跟踪精度[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1813-1821.
YANG D J, FANG W, YE X, *et al.* Program-controlled Sun-tracking precision of spaceborne solar irradiance monitor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1813-1821. (in Chinese)
- [9] 兰晨伟,伽丽丽,朱思峰,等. 基于深对流云的DPC/GaoFen-5在轨辐射定标[J/OL]. 光学学报, 2025: 1-23. (2025-05-20). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GXXB2025051900Q&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LAN C W, QIE L L, ZHU S F, *et al.* On-orbit radiation calibration of DPC/GaoFen-5 based on deep convective clouds [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2025: 1-23. (2025-05-20). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GXXB2025051900Q&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [10] 谢艳清,刘明珍,张立国,等. HY-1D/COCTS太阳反射波段的辐射定标及陆地气溶胶反演应用[J/OL]. 光学学报, 2025: 1-20. (2025-05-20). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GXXB20250519004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
XIE Y Q, LIU M Z, ZHANG L G, *et al.* Radiometric calibration of HY-1D/COCTS solar reflection band and its application in land aerosol retrieval [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2025: 1-20. (2025-05-20). <http://kns.cnki.net/KCMS/>

- detail/detail.aspx? filename=GXXB20250519004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ. (in Chinese)
- [11] 余杰玲, 董航, 衣小龙, 等. 太阳辐照度测量中孔径光阑衍射效应[J]. 光学精密工程, 2024, 32(15): 2363-2373.
- YU J L, DONG H, YI X L, *et al.* Aperture stop diffraction effect of solar irradiance measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(15): 2363-2373. (in Chinese)
- [12] 叶新. 可作为在轨光谱辐射基准的空间低温辐射计研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- YE X. *Investigation on Space Cryogenic Radiometer Used as Spectrum Radiation Standard on-Orbit* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [13] 杨振岭, 方伟, 宋宝奇, 等. 真空环境中太阳辐照度绝对辐射计腔温响应的变化及其影响[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 193-198.
- YANG Z L, FANG W, SONG B Q, *et al.* Variation of solar irradiance absolute radiometer cavity temperature response in vacuum and its effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 193-198. (in Chinese)
- [14] HANS V H. High-precision measurement of absolute temperatures using thermistors [J]. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Engineering*, 2007, 13(4): 379-383.
- [15] FANG Y X, LEI K Z, ZHANG Q F, *et al.* A High-Precision Temperature Measurement System Based on Noise Cancellation[C]. 2013 *IEEE International Conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013)*. October 22-25, 2013, Xi'an, China. IEEE, 2013: 1-4.
- [16] SONG B Q, FINSTERLE W, YE X, *et al.* Calibration and parameter corrections for the new generation of the TSI monitor on the FY-3E satellite [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2021, 366(3): 27.

通讯作者:



衣小龙(1988—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2011年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,2016年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间低温辐射计、总辐照度定标方面的研究。
E-mail: yxl19880603@126.com

作者简介:



王哲(2000—),男,吉林四平人,硕士研究生,2022年于长春理工大学获得学士学位,现就读于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,主要从事辐射定标,辐射计杂散光检测方面的研究。E-mail: 1305103118@qq.com