

文章编号 1004-924X(2015)10-2733-07

低温辐射计斜底腔吸收比测量

衣小龙^{1,2}, 杨振岭¹, 叶新¹, 王凯¹, 方伟¹, 王玉鹏^{1*}

(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)

摘要:考虑在轨绝对辐射定标基准辐射计(ARCPR)要求其测量太阳总辐照度(TSI)的 TSI 腔的吸收比优于 0.999 9, 同时测量不确定度在 0.001% 以下, 本文提出采用在空间和低温环境下性能优越的圆柱形斜底腔作为标定太阳总辐照度的黑体腔, 并对斜底腔吸收比进行了测量与研究。介绍了斜底腔的特性, 分析了低温辐射计多使用斜底腔作为黑体腔的原因。阐述了替代法测量腔体吸收比的原理, 增加了参考光路用于监测激光功率, 以提高测量重复性和准确性。通过测量信号与参考光路信号的比值计算了斜体腔的吸收比, 并对测量结果进行了不确定度分析。测试实验显示, 斜底腔吸收比为 $0.999\ 928 \pm 0.000\ 005$, 优于 ARCPR 对标定黑体腔的要求, 验证了将斜底腔作为测量太阳总辐照度的 TSI 腔的可行性。实验还表明: 计算信号电压与参考电压比值, 通过比值计算腔体吸收比的方法可以提高测量结果的不确定度, 适用于测量超高吸收比腔体的吸收比。

关键词:低温辐射计; 太阳总辐照度; 斜底腔; 吸收比测量; 替代法

中图分类号: P414.5; P422.1 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20152310.2733

Absorptance measurement for sloping bottom cavity of cryogenic radiometer

YI Xiao-long^{1,2}, YANG Zhen-ling¹, YE Xin¹, WANG Kai¹,

FANG Wei¹, WANG Yu-peng^{1*}

(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)*

* *Corresponding author, E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn*

Abstract: The Total Solar Irradiance (TSI) cavity in an Absolute Radiance Calibration Primary Radiometer(ARCPR) for space remote sensing should have an absorptance more than 0.999 9 and the measurement uncertainty superior to 0.001%. Therefore, a cylindrical sloping bottom cavity was used as a receiver cavity for calibration of the TSI because of its superior performance in the space and cryogenic environments. Then, the absorptance of the cylindrical sloping bottom cavity was measured. The characteristics of the cylindrical sloping bottom cavity were introduced, and why the cavity was used as the receiver cavity in cryogenic radiometer was analyzed. Furthermore, the principle of the ab-

收稿日期: 2015-01-09; 修订日期: 2015-03-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41227003)

sorptance measured by a substitution method was expounded. A reference light path was added to monitor the stability of a laser to improve the measurement repeatability and accuracy. Finally, the absorptance of sloping bottom cavity was measured using this method, and the uncertainty of measurement results was analyzed. Experimental results indicate that the absorptance of sloping bottom cavity is $0.999\ 928 \pm 0.000\ 005$, superior to that of the calibration standard of the blackbody cavity, which verifies it is feasibility to use the sloping bottom cavity as the TSI cavity for measuring the TSI. The experiments also verify that the ratio of single voltage and reference voltage could be used to calculate the cavity absorptance, and could improve the uncertainty of measurement result. This method is fit for measuring the absorptance of an ultra high absorptance cavity.

Key words: cryogenic radiometer; total solar irradiance; sloping bottom cavity; absorptance measurement; substitution method

1 引言

中科院长春光机所对地面常温辐射计及在轨太阳总辐照度测量的研究工作已开展了 20 多年^[1-3]。为了建立更高精度的星上定标辐射基准,课题组鉴于地面定标和标准传递路线的发展趋势提出了在轨绝对辐射定标基准辐射计(Absolute Radiance Calibration Primary Radiometer for Space Remote Sensing, ARCPR)项目。ARCPR 是工作于低温环境(20 K)的电替代辐射计,包含用于测量太阳总辐照度的总太阳辐照度(Total Solar Irradiance, TSI)腔和用于定标太阳光谱辐照度的 HS(High Sensitivity, HS)腔。吸收比是光功率计算过程中的重要参数,该项目要求 TSI 腔具有 0.999 9 以上的超高吸收比,因此吸收比测量的不确定度是整个系统的不确定因素之一^[4]。另外,TSI 腔的测量不确定度要低于 0.02%,吸收比测量的不确定度要低于 0.001%。

在研制阶段,采用带斜底面的圆柱形腔(以下简称斜底腔)作为 TSI 腔。为了验证斜底腔确有 0.999 9 以上的超高吸收比,同时其测量不确定度在 0.001% 以下,本文测量和研究了斜底腔吸收比。首先介绍了斜底腔的特性,分析了低温辐射计多使用斜底腔作为黑体腔的原因。阐述了替代法测量腔体吸收比的原理,并在此基础上增加参考光路监测激光功率,通过测量信号与参考光路信号的比值计算吸收比。最后应用该方法测量斜底腔吸收比,并对测量结果进行了不确定度分析,以证明将斜底腔作为 TSI 腔的可行性。

2 斜底腔特性

斜底腔比圆锥腔体积大,结构更简单,便于加工,如图 1 所示。除此之外,斜底腔还具备以下两个特点:首先,斜底腔的内表面积与开口面积比大,即高吸收率是依靠光线在斜底面附近多次反射、吸收得到的,受黑漆性质的影响较小^[4]。在从地面到在轨的环境变化下,虽然黑漆吸收率、镜面反射成分可能发生很大变化,但对斜底腔整体吸收率的影响很小,所以它适用于在轨测量;其次,在低温环境下,腔体材料的热容量与热导率特性能够得到大幅改善,使得大体积高吸收率腔也可以具备小时间常数^[5-6]。因此,低温辐射计多采用斜底腔作为黑体腔,如美国国家标准技术研究院(NIST)研制的高精度低温辐射计(High Accuracy Cryogenic Radiometer, HACR),英国国家物理实验室(NPL)的低温绝对辐射计(Cryogenic Absolute Radiometer, CAR)等^[5-9]。鉴于以上两个特点,ARCPR 采用斜底腔作为 TSI 腔。

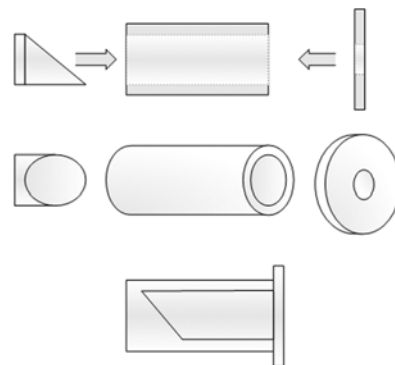


图 1 斜底腔结构图

Fig. 1 Structure of sloping bottom cavity

3 替代法测量原理

入射到腔体的光辐射功率(P_0),一部分(P_a)被腔体吸收,另一部分(P_r)从入口反射到腔体之外。 P_a 与 P_0 的比值为腔体吸收比 α (简称吸收比),即 $\alpha=P_a/P_0$; P_r 与 P_0 的比值被称为腔体反射比 ρ (简称反射比),即 $\rho=P_r/P_0$ 。常用的腔体吸收比测量方法有替代法、互换法等^[10]。这里从积分球内辐照度和积分球因子的角度阐述了替代法的测量原理。如图 2 所示,光辐射功率从积分球入光口入射,垂直照射到样品区中央,将探测器置于探测区。首先将标准白板(反射率 $\rho_s \approx 0.9$)置于积分球样品区,探测器输出感应信号 V_s ;再将斜底腔(反射比 ρ_c)置于积分球样品区,探测器输出感应信号 V_c ;样品区空置,光辐射功率从样品区出射,探测器输出背景光 V_b 。

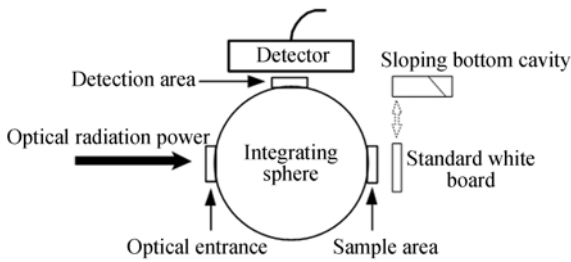


图 2 替代法测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of substitution method

积分球内表面的辐照度为:

$$E_s = \frac{\phi_i}{\pi A_s} \times M, \quad (1)$$

其中: ϕ_i 为入射辐通量, A_s 为积分球内表面积, M 为积分球因子。 M 的表达式为:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \rho_w(1 - \sum_{i=0}^n f_i) - \sum_{i=0}^n \rho_i f_i}, \quad (2)$$

其中: ρ_0 是样品区反射率或反射比, ρ_w 是积分球内壁的反射率, ρ_i 是全部开口中第 i 个开口的反射率, f_i 是第 i 个开口的面积比。

在替代法测量腔体吸收比的实验中,标准白板置于样品区时,式(2)中 ρ_0 为标准白板反射率 ρ_s ;腔体置于样品区时,式(2)中 ρ_0 为腔体吸收比 ρ_c 。全部开口包括样品区、入射区和探测区,由于

各开口的面积远小于积分球内表面积,即 $f_i \ll 1$,

从而得到 $\rho_w(1 - \sum_{i=0}^n f_i) \gg \sum_{i=0}^n \rho_i f_i$,因此将标准白板和腔体置于样品区时,上述两个测量状态下式(2)的分母近似相同。由于探测器输出的感应信号正比于积分球内表面的辐照度,所以由式(1)、(2)得:

$$\frac{U_c - U_b}{U_s - U_b} = \frac{E_c}{E_s} = \frac{M_c}{M_s} = \frac{\rho_c}{\rho_s}, \quad (3)$$

整理得到腔体反射比为:

$$\rho_c = \frac{U_c - U_b}{U_s - U_b} \times \rho_s, \quad (4)$$

因此吸收比为:

$$\alpha_c = 1 - \rho_c = 1 - \frac{U_c - U_b}{U_s - U_b} \times \rho_s. \quad (5)$$

4 测量装置

4.1 光路与设备

斜体腔吸收比测量装置如图 3 所示。使用波长为 532 nm 的半导体激光器(稳定度为 0.1%)作为光源,由半透半反镜将经过起偏系统、衰减系统、准直系统和功率稳定器的激光分成测量光路和参考光路,分别进入积分球 1 和积分球 2。积分球 1 的探测区使用光电二极管 S1406,输出测量光路的感应信号电压 U_1 (以下简称信号电压);积分球 2 的探测区使用光电二极管 S1227,输出

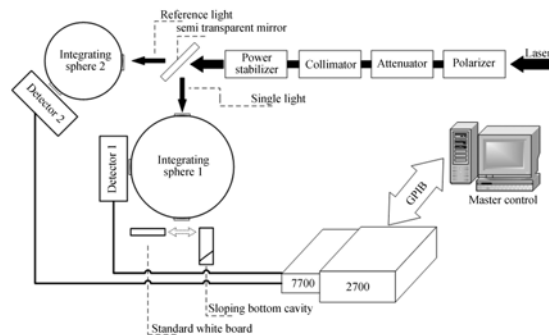


图 3 低温辐射计斜底腔吸收比测量装置

Fig.3 Measurement equipment for absorptions of sloping bottom cavity of cryogenic radiometer

参考光路的感应参考电压 U_2 (以下简称参考电压), 监测激光功率的稳定性。使用吉时利六位半数字多用表(2700)和扫描卡(7700)交替测量信号电压和参考电压(时间间隔为 120 ms), 并通过通用接口总线(GPIB)通信系统将数据上传到计算机, 采集系统及通信系统由 LabView 编写的上位机程序来控制, 如图 4 所示。采集系统每 1 s 采样一次, 连续采样 200 s。



图 4 控制软件

Fig. 4 Control program

4.2 参考光路

为了得到可靠的吸收率测量结果, 在测量过程中激光光源应具有较高的长期稳定性。通过半透半反镜将光源分为参考光路和测量光路, 再通过测量参考光路的信号电压监测激光稳定性。

如表 1 所示, 在测量斜底腔、标准白板、背景光时, 激光感应电压的相对标准差均约为 0.01%; 经过激光功率稳定器的激光稳定性较好, 都在 $\pm 3\delta$ 内, 如图 5 所示。

表 1 激光稳定性

Tab. 1 Stability of laser

	激光平均值/V	标准差/V	相对标准差
斜底腔	2.806 46	0.000 26	9.1×10^{-5}
白板	2.807 00	0.000 28	0.000 10
背景光	2.806 65	0.000 24	8.4×10^{-5}

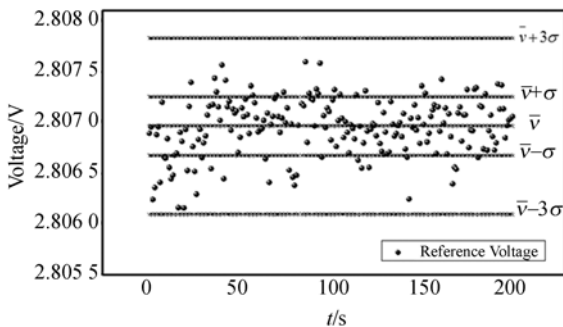


图 5 200 s 内的激光稳定性

Fig. 5 Laser stability in 200 s

4.3 利用信号电压与参考电压比值计算吸收率

由激光漂移导致的随机误差的变化趋势对于测量光路和参考光路是相似的, 将信号电压与参考电压作比值, 即 $N=U_1/U_2$, 通过 N 计算腔体吸收比, 可以降低测量结果的随机误差。如表 2 所示, 比值标准差小于信号电压标准差。使用比值 N 替代信号电压, 由式(5)得到:

$$\alpha_{cN} = 1 - \rho_{cN} = 1 - \frac{N_c - N_b}{N_s - N_b} \times \rho_s, \quad (6)$$

其中: N_c, N_s, N_b 分别为腔体、标准白板、背景光的比值。因此可以根据式(6)计算腔体反射比 ρ_{cN} 和吸收比 α_{cN} 。

5 实验结果

依次测量斜底腔、白板和背景光的信号电压, 同时监测激光光源的稳定性, 得到斜底腔、白板、背景光的信号电压 U_c, U_s, U_b 以及比值 N_c, N_s, N_b , 平均值和标准差如表 2 所示。

根据公式(6), 通过比值计算得到斜底腔吸收率的平均值为:

$$\alpha_{cN} = 0.999\ 928\ 5.$$

同理, 根据公式(5), 通过信号电压计算得到:

$$\alpha_{cV} = 0.999\ 928\ 8.$$

表 2 实验结果

Tab. 2 Results of experiment

	\bar{V}/V	σ_V	\bar{N}	σ_N
斜底腔	0.002 83	1.0×10^{-5}	0.001 007	5.5×10^{-6}
白板	3.579 8	0.000 49	1.275 3	0.000 18
背景光	0.002 557	8.6×10^{-6}	0.000 911	3.1×10^{-6}

6 不确定度分析

6.1 不确定度计算

由式(6)得:

$$\alpha_{cN} = 1 - \rho_{cN} = 1 - \frac{U_c/V_c - U_b/V_b}{U_s/V_s - U_b/V_b} \times \rho_s, \quad (7)$$

其中: U_c, U_s, U_b 分别为斜底腔、标准白板、背景光的信号电压, V_c, V_s, V_b 分别为斜底腔、标准白板、背景光的参考电压。

由式(7)可得:

$$\frac{\partial \alpha_{cN}}{\partial U_c} = \frac{1}{U_s/V_s - U_b/V_b} \cdot \frac{\rho_s}{V_c}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \alpha_{cN}}{\partial U_s} = -\frac{U_c/V_c - U_b/V_b}{(U_s/V_s - U_b/V_b)^2} \cdot \frac{\rho_s}{V_s}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \alpha_{cN}}{\partial U_b} = \frac{U_c/V_c - U_s/V_s}{(U_s/V_s - U_b/V_b)^2} \cdot \frac{\rho_s}{V_b}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \alpha_{cN}}{\partial \rho_s} = \frac{U_c/V_c - U_b/V_b}{U_s/V_s - U_b/V_b}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \alpha_{cN}}{\partial V_c} = \frac{-1}{U_s/V_s - U_b/V_b} \cdot \frac{U_c \rho_s}{V_c^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \alpha_{cN}}{\partial V_s} = \frac{U_c/V_c - U_b/V_b}{(U_s/V_s - U_b/V_b)^2} \cdot \frac{U_s \rho_s}{V_s}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \alpha_{cN}}{\partial V_b} = \frac{U_s/V_s - U_c/V_c}{(U_s/V_s - U_b/V_b)^2} \cdot \frac{U_b \rho_s}{V_b^2}, \quad (14)$$

合成不确定度为:

$$u(\alpha_{cN}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_s}{\partial U_c}\right)^2 u^2(U_c) + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial U_s}\right)^2 u^2(U_s) + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial U_b}\right)^2 u^2(U_b) + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_s}\right)^2 u^2(\rho_s) + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial V_c}\right)^2 u^2(V_c) + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial V_s}\right)^2 u^2(V_s) + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial V_b}\right)^2 u^2(V_b)}. \quad (15)$$

6.2 不确定度分量

6.2.1 信号电压的不确定度

信号电压的不确定度主要包括:重复测量的不确定度、数字电压表的不确定度、放大器的放大倍数及探测器的线性度引入的误差。其中,放大器的放大倍数和探测器线性度引入的误差很小,可以忽略^[10]。

重复测量的不确定度(u_{11})包括光源稳定性和重复测量对结果的影响^[10-12],属于 A 类不确定度,重复测量的不确定度等于信号电压的标准差:

$$u_{11} = \sigma(X), \quad (16)$$

其中: X 包括 $U_c, U_s, U_b, V_c, V_s, V_b$ 。

数字电压表的不确定度(u_{12})属于 B 类不确定度。由于待测电压属于不同的量程范围,测量时为了避免由不同量程引入的线性度,将 2700 电压量程设置为固定的 10 V。根据吉时利六位半数字多用表(2700)手册,电压表不确定度为读数 Y 的 10^{-5} 与量程 l 的 4×10^{-6} 之和,即:

$$u_{12} = (Y \times 10 + l \times 4) \times 10^{-6}, \quad (17)$$

其中: Y 分别为 $U_c, U_s, U_b, V_c, V_s, V_b$ 的平均值, l 为量程。

所以信号电压的不确定度:

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2} = \sqrt{\sigma^2(X) + (Y \times 10^{-5} + l \times 4 \times 10^{-6})^2}. \quad (18)$$

6.2.2 白板反射率的不确定度

标准白板在长春光机所应用光学国家重点实验室进行标定,其结果是 $\rho_s = 0.95$, 不确定度 $u_2 = 0.05$, 属于 B 类不确定度。

6.3 不确定度计算

不确定度分量如表 3 所示。根据不确定度分量和式(15)计算得到斜底腔吸收率测量的不确定度为 0.000 005, 满足 TSI 腔的不确定度要求。使用斜底腔作为 ARCP 的 TSI 腔^[13,15], 从而成为系统真正的辐射基准探测器。

白板的信号电压、参考电压、反射率的合成因子都较小,说明白板的反射率及不确定度对实验结果的影响比较小。

表 3 不确定度分量

Tab. 3 Components of measurement uncertainty

	平均值/V	u_{11}	u_{12}	u_1	u_2	合成因子
斜底腔信号电压 U_c	0.002 83	1.0×10^{-5}	4.0×10^{-6}	1.1×10^{-5}		0.265 6
斜底腔参考电压 V_c	2.806 4	0.000 27	6.8×10^{-5}	0.000 27		-0.000 267
白板信号电压 U_s	3.579 8	0.000 49	7.6×10^{-5}	0.000 50		-1.99×10^{-5}
白板参考电压 V_s	2.806 9	0.000 28	6.8×10^{-5}	0.000 29		2.54×10^{-5}
背景光信号电压 U_b	0.002 557	8.6×10^{-6}	4.0×10^{-5}	9.5×10^{-5}		-0.265 6
背景光参考电压 V_b	2.806 7	0.000 24	6.8×10^{-5}	0.000 25		0.000 242
白板反射率 ρ_s	0.95				0.05	7.49×10^{-5}

7 结 论

本文介绍了斜底腔的两个优点:在轨环境和地面环境下,吸收比变化小;低温环境下,大腔体可具有小时间常数。所以,斜底腔适合用于在轨测量的 ARCPR 探测器。阐述了替代法测量腔体吸收比原理,并在此基础上增加了参考光路,监测激光稳定性,计算信号电压与参考电压的比值,通

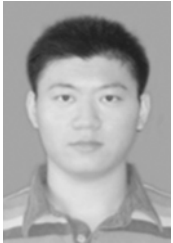
过比值计算腔体吸收比。实验测得斜底腔吸收比为 $0.999\ 928 \pm 0.000\ 005$,说明斜底腔具有超高的吸收率,可以作为 ARCPR 的 TSI 腔,成为系统真正的辐射基准探测器。实验结果表明,信号电压与参考电压比值的标准差比信号电压标准差小,因此这种利用比值计算腔体吸收比的测量方法可以提高测量结果的不确定度,适用于超高吸收比腔体的测量。

参考文献:

- [1] 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(4):406-411.
FANG W, JIN X F. Development of a compensate cavity absolute radiometer[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1992, 13(4):406-411. (in Chinese)
- [2] WANG H R, WANG Y P. Spaceborne radiometers for measuring total solar irradiance[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):555-565.
- [3] 方伟,禹秉熙,姚海顺,等.太阳辐照绝对辐射计与国际比对[J].光学学报,2003,23(1):112-116.
FANG W, YU B X, YAO H SH, *et al.*. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1):112-116. (in Chinese)
- [4] PROKHOROV A V, HANSENANSEN L M. Effective emissivity of a cylindrical cavity with an inclined bottom; I. Isothermal cavity[J]. *Metrologia*, 2004,41:421-431.
- [5] GENTILE T R, HOUSTON J M, HARDIS J E, *et al.*. National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer[J]. *Applied Optics*, 1996, 3(7):1056-1068.
- [6] FANG Q Q, FANG W, WANG Y P, *et al.*. New shape of blackbody cavity: conical generatrix with an inclined bottom [J]. *Optical Engineering*, 2012,51(8):086401-1-086401-5.
- [7] PEARSON D A, ZHANG Z M. Thermal-electrical modeling of absolute cryogenic radiometers [J]. *Cryogenics*, 1999,39:299-309.
- [8] HOUSTON J M, RICE J P. NIST reference cryogenic radiometer designed for versatile performance [J]. *Metrologia*, 2006, 43:31-35.
- [9] DOKTORWURDE. *Metrology of Solar Irradiance* [D]. Zur,Universitat Zurich,2011.
- [10] 白山.基于低温辐射计的探测器光谱响应度相关测量技术研究[D].北京:中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所,2012.
BAI SH. *Research on the Measurement Techniques of Detector Spectral Response Based on Cryogenic Radiometer*[D]. Beijing: National Institute of Metrology, P. R. China, 2012. (in Chinese)
- [11] 黄强先,余夫领,宫二敏,等.零阿贝误差的纳米三坐标测量机工作台及误差分析[J].光学精密工程,2013,21(3):664-671.
HUANG Q X, YU F L, GONG E M, *et al.*. Nano-CMM stage with zero abbe Error error and its error analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):664-671. (in Chinese)
- [12] 石照耀,张宇,张白.三坐标机测量齿轮齿廓的不确定度评价[J].光学精密工程,2012,20(4):766-770.
SHI ZH Y, ZHANG Y, ZHANG B. Uncertainty evaluation of CMM measurement for gear profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(4):766-770. (in Chinese)
- [13] 冉旭,吴丹,陈炳德,等.最佳估算加不确定性分析方法及其应用研究[J].核动力工程,2013,34(3):120-123.
RAN X, WU D, CHEN B D, *et al.*. Best estimate plus uncertainty method and its application [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2013, 34(3):120-123. (in Chinese)

- [14] 夏桂锁,廖城,伏燕军. 平行双关节坐标测量机的标定及不确定度评价[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5):1227-1234.
XIA G S, LIAO CH, FU Y J. Calibration and uncertainty evaluation of double parallel-joint coordinate measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1227-1234. (in Chinese)
- [15] 田志辉,史振广,刘伟奇,等. 曲率半径的高精度测量及其不确定度[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10):2495-2501.
TIAN ZH H, SHI ZH G, LIU W Q, *et al.*. High-accuracy measurement for radius of curvature and its uncertainties [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2495-2501. (in Chinese)

作者简介:



衣小龙(1988—),男,吉林长春人,博士研究生,2011年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,主要从事低温辐射计测量方法的研究。E-mail: yxl19880603@126.com

导师简介:



方伟(1965—),女,辽宁朝阳人,博士,研究员,博士生导师,1987年于山东大学获得学士学位,1997年、2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事太阳辐射,绝对测量,辐射定标等方面的工作。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn.

通信作者:



王玉鹏(1972—),男,山东沂水人,博士,副研究员,1994年于吉林工业大学获得学士学位,2002年于兰州理工大学获得硕士学位,2008年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间遥感仪器研制与绝对辐射测量及标定的研究。E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn.

(版权所有 未经许可 不得转载)