

高空气球太阳能电池标定球体反光影响分析及防护

张益清^{1,2}, 黄庭双¹, 李永祥¹, 杨燕初^{1,2}, 徐国宁^{1,2,*}

(1. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学 航空宇航学院, 北京 101408)

摘 要: 高空气球在太阳能电池标定领域内应用越来越广泛, 对标定精度的需求日益增加。

常规的标定方法只考虑了对日精度, 忽略了球体反射的太阳光对标定结果的影响, 导致标定结果比理论值高出约 5%。为此, 提出一种球体反光影响分析方法。使用 3 阶贝塞尔曲线拟合球体形状并建立模型; 计算试验中球体反射对标定装置接收不同波段光的影响; 提出如何进行防护及计算球体反射可能的误差原因。采用高空气球和标定设备, 在 35 000 m 的高空上对 18 片太阳能电池进行标定。试验和仿真结果表明, 球体反射对标定的影响客观存在。仿真结果显示, 球体反射导致短路电流最大增加了 9.28%; 试验数据显示, 相较于标准太阳能电池的不经过大气层的太阳光谱 (AM0) 值, 实际短路电流高出约 5.28%。最后, 根据仿真结果, 提出使用特定角度的遮光罩以避免球体反射对标定的影响。

关 键 词: 太阳能电池; 高空气球; 标定; 太阳能电池效率; 不经过大气层的太阳光谱

中图分类号: V273; V11; TB971

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)08-2767-09

太阳能电池是大多数航天器理想的一次能源^[1]。目前以砷化镓、钙钛矿太阳能电池为首的第 3 代太阳能电池具有低成本、高效率的特点^[2-6], 有望成为新型航天器能源^[7]。然而, 这些第 3 代太阳能电池在太空环境中的真实性能尚不明确, 如果不能进行准确标定, 将会直接影响到航天器的飞行安全、能量平衡和有效载荷等关键指标。

由于大气层的存在和影响, 大气顶端和地面接收到的太阳光谱存在显著差异。将经过大气层 1.5 倍厚度到达地面上的太阳光谱称为 Air Mass 15(AM1.5)。不经过大气层的太阳光谱称为 Air Mass 0(AM0)。AM0 用于理论上的太阳能电池性能评估, AM1.5 用于地面上实际使用条件下的太阳能电池性能评估。传统的地面太阳能电池标定方法, 如太阳模拟器法和差分光谱响应度 (differential spectral responsivity, DSR) 法^[8], 通过模拟 AM0 环境光并进

行外推和修正, 计算太阳能电池在 AM0 环境下的短路电流标定值。然而, 地面标定方法无法精确标定具有复杂光谱响应特性的钙钛矿太阳能电池等第 3 代太阳能电池, 甚至导致标定结果单一 (特别是 DSR 法)。因此, 为了获得太阳能电池在真实空间环境下的准确性能参数, 需要进行空间或接近空间条件下的原位太阳能电池标定, 即原位标定。能够实现原位标定的方法主要有卫星标定法^[9-10]、高空飞机标定法^[11]和高空气球标定法^[12-13]。高空气球标定法使用高空气球搭载第 3 代太阳能电池进入上层大气^[14-15]。在大约 35 km 的高度, 太阳光谱受地球大气影响较小, 环境条件接近太空, 紫外线辐射更强, 且大气压力显著降低, 因此, 近地空间试验成为通往空间应用的宝贵中间科学步骤^[16]。美国、法国等航天强国已经在太阳能电池的空间标定试验方面积累了丰富的经验, 且其相关标定方法和技术手段已

收稿日期: 2024-10-29; 录用日期: 2024-12-20; 网络出版时间: 2024-12-24 15:10

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241224.1409.002

基金项目: 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划 (YSBR-102); 国家重点研发计划 (2022YFB3903000, 2022YFB3903005)

* 通信作者. E-mail: xugn@aircas.ac.cn

引用格式: 张益清, 黄庭双, 李永祥, 等. 高空气球太阳能电池标定球体反光影响分析及防护 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (8): 2767-2775. ZHANG Y Q, HUANG T S, LI Y X, et al. Analysis and mitigation of spherical reflection effects on solar cell calibration using high-altitude balloons [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (8): 2767-2775 (in Chinese).

较为成熟。美国国家航空航天局喷气推进实验室于 1962 年首次开展了太阳电池高空气球标定试验,在该试验中,标定平台被安装在气球的顶部^[17]。美国航空航天公司开发了一种名为“航天测量单元”的太阳电池快速标定系统以解决大型高空气球标定体积大、成本高的问题。日本宇宙航空研究开发机构与美国海军研究试验室合作开发了太阳电池测量系统,并通过大型气球进行飞行试验,研发了太阳电池测量和回收系统,能够测量电流-电压特性、温度、太阳入射角等,并具备防水功能以确保海上回收。2015 年,日本宇宙航空研究开发机构使用高空气球对超薄钙钛矿太阳电池进行了首次飞行试验,飞行高度达 30 km,电池通过降落伞落海并成功回收^[18]。

中国的太阳电池空间标定技术目前已具有世界一流水平。北京东方计量测试研究所于 2006 年 7 月开展了国内首次太阳电池高空气球标定试验。此次试验中,气球飞行高度达 31 km,平飞时间为 1 h^[19]。燕山大学与合作伙伴共同开展的太阳电池高空气球标定试验中,气球飞行高度达 32 km,平飞时间为 2 h^[20]。中国科学院空天信息创新研究院与北京大学合作,国际上首次获得了钙钛矿太阳电池在 35 km 以上空间的精确参数,并研究了该电池的稳定性问题^[21]。然而,使用高空气球标定时也存在很多待解决的问题,如高空温度波动大、球体反光等。可以通过温度控制或飞行后的数据校正等方案来避免温度波动带来的误差。

目前,关于球体反光对标定影响的研究较少,且现有的太阳电池标定试验多以钙钛矿电池为主,而针对砷化镓电池的标定研究较少,特别是在应用于某些特定领域(如航空航天、卫星系统等)时,相关的标定试验相对不足。本文的主要创新点在于提出一种利用 3 阶贝塞尔曲线拟合球体模型的方法,为高空气球标定试验中的球体反射光分析提供了新的理论模型。通过分析实测短路电流数据高于理论值的现象,揭示了高空气球球体反射光对电池短路电流的影响,丰富了相关领域的认识。针对砷化镓电池和常见的单晶硅电池标定数据进行球体反射分析。此外,本文提出一种有效保护标定装置不受球体反光影响的方法。

1 高空气球太阳电池标定系统及工作原理

1.1 高空气球太阳电池标定平台

太阳电池高空气球标定系统由高空气球、切割器、降落伞、太阳电池标定装置、吊舱、测控天线、

缓冲装置和缆绳组成,如图 1 所示。其中,切割器用于结束气球飞行,降落伞在起飞前承受气球浮力产生的拉力,并在高空开伞,回收伞的大小根据回收质量和着陆速度来选择。吊舱内装有观测仪器、遥测遥控设备和电源,底部安装缓冲避震装置。缆绳连接于降落伞和吊舱之间,长度取决于球载仪器向上观测时球体是否对其造成遮挡,同时也要兼顾发放的要求。太阳电池标定装置主要由支撑板、标定板、方位步进电机、俯仰步进电机、信号采集盒、太阳跟踪控制器、导电滑环、扁带夹和舱段连接件等组成,用于标定太阳电池。系统优化后还增加了电子罗盘,以测量当前标定板的位姿,支撑视日运动轨迹跟踪。

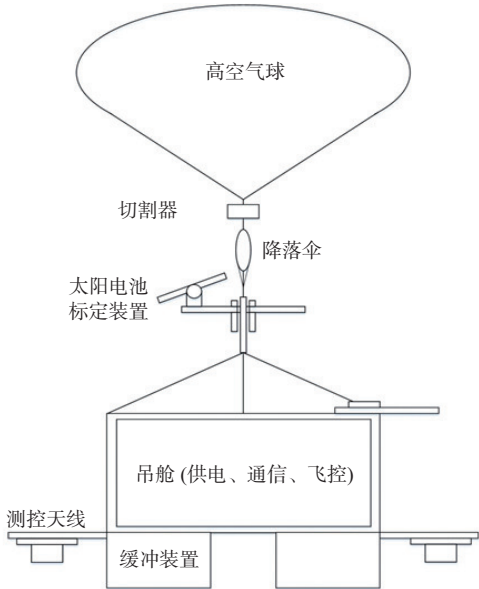


图 1 太阳电池标定飞行系统

Fig. 1 Solar cell calibration flight system

1.2 标定平台工作原理和标定原理

利用中国科学院空天信息创新研究院研发的太阳电池高空气球标定系统,成功携带了 18 片太阳电池单体,利用大型高空气球将其送至最高海拔 35 km 的临近空间,并在该高度区域实现了稳定的平飞。这一试验为太阳电池的性能评估提供了理想的高空环境。在平飞过程中,系统通过自主研发的太阳自动跟踪控制系统,精确定位和追踪太阳,确保太阳电池单体始终保持最佳的光照角度。该系统利用高精度的传感器和控制算法,控制方位步进电机和俯仰步进电机动作,实时调整标定平台的朝向,确保支撑板和标定板平面垂直于太阳入射方向,实现太阳辐射最大化接收。同时,搭载的高精度自动测试系统对 18 片太阳电池单体进行了实时的电流-电压特性曲线测量和温度监测。标定平台的工作原理主要基于对太阳电池在不同光照条件

下的电流-电压特性进行测量。将标准太阳能电池用硅单晶片(以下简称标准电池)与待测太阳能电池进行对比, 确定待测太阳能电池的效率和性能。标定过程中, 标准电池的短路电流值由计量院进行检定, 作为参考数据。通过测量该值, 可以计算出当前标定板接收到的辐照度, 并实时反映标定板对太阳的对准情况, 因此, 标定装置可以自动调整位置以实现与太阳入射光垂直。因此, 本文默认标定装置垂直于太阳入射光。

2 球体反光影响分析

2.1 基于 3 阶贝塞尔曲线的球体反光影响分析

在高空气球平飞段, 太阳能电池标定装置除受太阳直接照射外, 还受到高空球体的光反射影响, 如图 2 所示。光线 AO 表示太阳直接照射, 光线 OB 表示太阳直射光线 AO 经球体(聚乙烯)后的反射光线, 光线 $O'C$ 为反射光线在标定板方向的垂向分量, α 为太阳高度角, η 为反射光入射角, Ω 为反射光与水平面夹角。高空球体材料为聚乙烯, 根据项目组自测, 球体材料对可见光反射率为 0.104 2, 红外反射率为 0.085。高空气球在平飞段, 球体整体保持水滴型, 精确的球体建模是分析球体反射的几何基础。在现场测定的数据基础上, 选取 3 阶贝塞尔曲线拟合平飞段时的高空气球球体外形。3 阶贝塞尔曲线具有较好的平滑性和拟合精度, 能够有效描述气球的形状。此外, 3 阶贝塞尔曲线由 4 个控制点定义, 避免了高阶曲线可能引入的复杂性和振荡, 保持了计算的高效性, 其参数方程如下:

$$\begin{cases} x(t) = 3x_0t(1-t)^2 - 3x_0t^2(1-t) \\ y(t) = 3y_0t(1-t)^2 + 3y_0t^2(1-t) \end{cases} \quad (1)$$

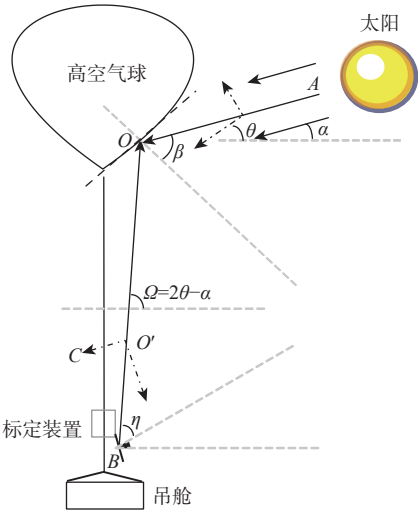


图 2 平飞过程球体反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spherical reflection during level flight

式中: t 为控制曲线在各个控制点之间位置变化的参数, 取值范围为 $0 \sim 1$; x 、 y 表示曲线形状; $x_0 = 74.5$, $y_0 = 46$, 此时曲线的横向最大宽度为 43 m, 纵向最大高度为 34.5 m, 基本符合实际高空气球尺寸。得到的球体形状如图 3 所示。

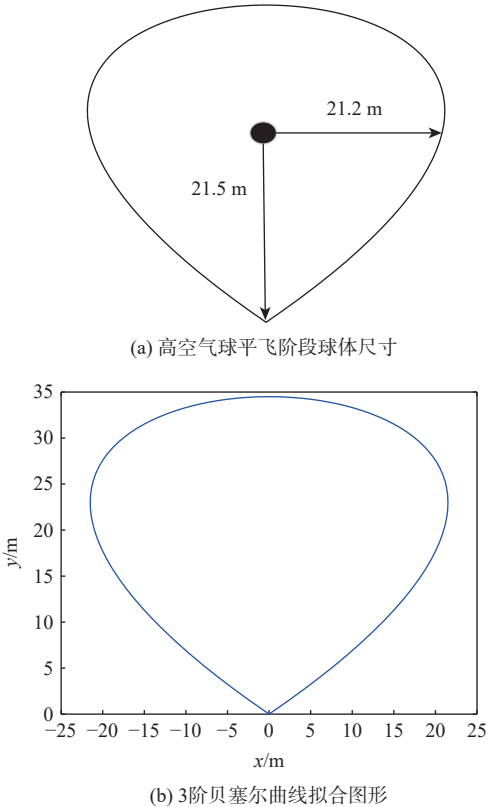


图 3 球体建模示意图

Fig. 3 Sphere modeling diagram

2.1.1 反射光线入射角的计算

高空气球底端到标定装置实测长度为 30 m, 如图 4 所示, 标定装置可简化为一个点。

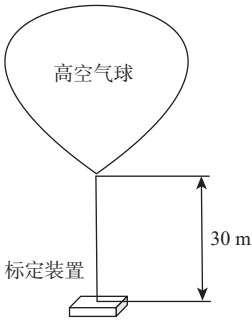


图 4 高空气球和标定装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of high-altitude balloon and calibration device

为方便计算, 将标定装置位置设为原点。设试验过程中太阳高度角为 α , 太阳光线入射至高空气球表面某点时太阳光线与该点处的法向量的夹角为 β , 该点处切线与水平面夹角为 θ 。缆绳长度为

l_s , 则可计算得到反射光入射角(反射光与标定装置法线夹角, 见图 2) η 为 $2\theta - \alpha$ 。

对贝塞尔参数方程求导:

$$\begin{cases} x(t) = 3x_0((1-t)^2 - 2t(1-t)) \\ y(t) = 3y_0((1-t)^2 - 2t(1-t)) \end{cases} \quad (2)$$

OB 可表示为

$$y = \tan(-\alpha + 2\arctan\beta)x - l_s \quad (3)$$

反射点必定同时处于 3 阶贝塞尔曲线和反射直线上, 因此, 反射点必定满足:

$$y(t) = \tan(-\alpha + 2\arctan\beta)x(t) - l_s \quad (4)$$

将反射点处 3 阶贝塞尔曲线方程对应的参数 t_{opti} 代入式 (3) 即可得到反射光入射角 η 。

2.1.2 太阳高度角的计算

太阳高度角 α 是太阳光线与水平面的夹角。太阳高度角的变化由时间和纬度决定。计算太阳高度角的表达式为

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (5)$$

式中: φ 为纬度, 北纬为正, 其取值范围为 $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$; δ 为赤纬角, 为太阳直射在当地子午线上时与赤道面的夹角, 北纬为正, 取值范围为 $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$; ω 为太阳时角。

δ 可按以下经验公式求解:

$$\delta = \alpha_{21} - \alpha_{22} \cos \theta_{\text{day}} + \alpha_{23} \sin \theta_{\text{day}} - \alpha_{24} \cos 2\theta_{\text{day}} + \alpha_{25} \sin 2\theta_{\text{day}} - \alpha_{26} \cos 3\theta_{\text{day}} + \alpha_{27} \sin 3\theta_{\text{day}} \quad (6)$$

式中: $\alpha_{21}=0.006\,918$, $\alpha_{22}=0.399\,912$, $\alpha_{23}=0.070\,257$, $\alpha_{24}=0.006\,758$, $\alpha_{25}=0.000\,907$, $\alpha_{26}=0.002\,697$, $\alpha_{27}=0.001\,480$; θ_{day} 为日角:

$$\theta_{\text{day}} = 2\pi (d_n - 1)/d_y \quad (7)$$

式中: d_y 为 1 年的总天数; d_n 为年内的天数。在普通年份, $d_y=365$, d_n 的取值范围为 $1 \sim 365$ 。闰年, $d_y=366$, d_n 的取值范围为 $1 \sim 366$ 。

太阳时角 ω 为标定装置所在位置的子午线平面与太阳子午线平面之间的夹角, 正午为 0, 早晨为正。在计算 ω 时, 需要将观测者使用的当地标准时间 h_{LST} 转换为当地视时间 h_{LAT} , 因为与 h_{LAT} 直接相关的是太阳的位置或太阳辐射入射角, 而不是 h_{LST} 。

$$h_{\text{LAT}} = h_{\text{LST}} - (L_S - L_L)/15 + E_t/60 \quad (8)$$

式中: L_S 为当地时区标准子午线的经度, ($^\circ$); L_L 为当地经度, ($^\circ$); E_t 为时间方程, 表达式为

$$E_t = 229.18(\alpha_{31} + \alpha_{32} \cos \theta_{\text{day}} - \alpha_{33} \sin \theta_{\text{day}} - \alpha_{34} \cos 2\theta_{\text{day}} - \alpha_{35} \sin 2\theta_{\text{day}}) \quad (9)$$

其中: $\alpha_{31}=0.000\,075$, $\alpha_{32}=0.001\,868$, $\alpha_{33}=0.032\,077$, $\alpha_{34}=0.014\,615$, $\alpha_{35}=0.040\,890$; E_t 可正可负。在此基

础上, 计算太阳时角 ω :

$$\omega = 15(h_{\text{LAT}} - 12) \quad (10)$$

2.1.3 球体反射对太阳能电池短路电流的影响

2022 年 10 月 2 日 9:30—11:30, 在经度 96°E 、纬度 38°N , 从 9:30 开始, 每隔 6 min 计算一次太阳高度角(平飞段为 9:32—11:32)。得到反射光入射角 η 随时间变化曲线如图 5 所示。其中, η 最大值为 46.26° , 最小值为 27.07° 。球体材料对不同波段光具有不同的反射率, 如表 1 所示, 在此基础上, 假定可见光段能量为 p_1 , 红外光段能量为 p_2 , 则可见光段反射光能量为 $0.104\,2p_1\cos\eta$, 红外光段反射光能量为 $0.085p_2\cos\eta$ 。可见光段及红外光段反射光能量与自身波段直射光能量之比分别如图 6 和图 7 所示。可以看出, 不同波段的光反射均随时间的增加而增大。

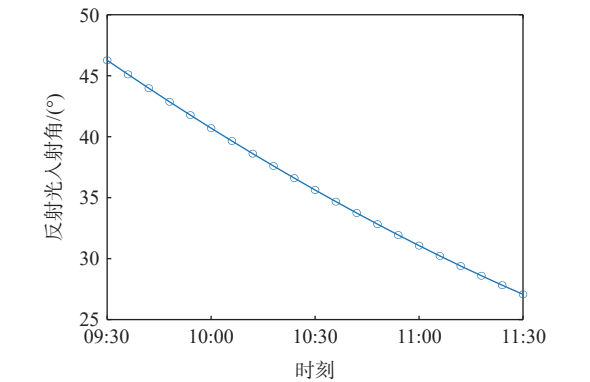


图 5 反射光入射角随时间变化曲线
Fig. 5 Curve of incidence angle changing over time

表 1 球体材料对不同波段光的反射率
Table 1 Reflectance of spherical materials for different wavelengths of light

波段	反射率
可见光390~780 nm波段	0.104 2
红外光780~1 200 nm波段(标准硅片上限波段)	0.085

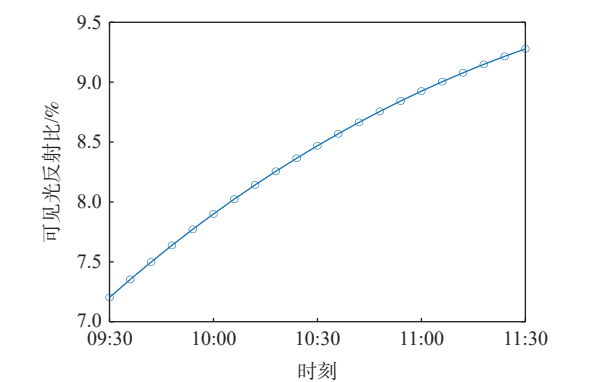


图 6 可见光反射比随时间变化曲线
Fig. 6 Curve of visible light reflectance% over time

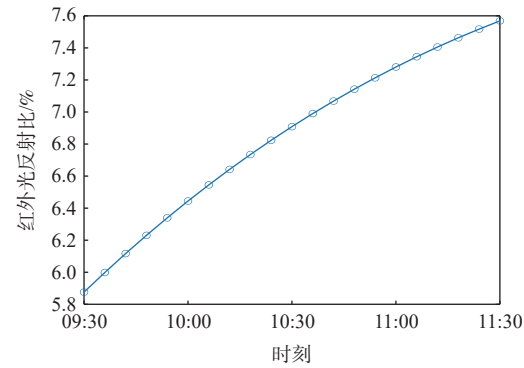


图 7 红外光反射比随时间变化曲线

Fig. 7 Curve of infrared light reflectance% over time

根据前文分析,可得球体反射产生的太阳电池短路电流计算公式:

$$I_{\text{ref}} = \tau \mu \cos \left(\arctan \left(\frac{3y_0((1-t_{\text{opti}})^2 - 2t(1-t_{\text{opti}}))}{(3x_0((1-t_{\text{opti}})^2 - 2t(1-t_{\text{opti}}))) - \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega} \right) \right) \quad (11)$$

式中: μ 为反射率; τ 为太阳电池效率。 τ 随温度变化关系为

$$\tau = \tau_{\text{ref}}(1 - \theta(T - T_{\text{ref}})) \quad (12)$$

式中: τ_{ref} 为参考温度下的效率; θ 为温度系数; T 为当前温度; T_{ref} 为参考温度。使用 MATLAB 开发计算球体反射的软件,如图 8 所示。对标准电池光谱值进行累加积分后,得到 $p_1:p_2 \approx 83:91$ 。数据经过中国计量科学研院校准,校准证书编号为

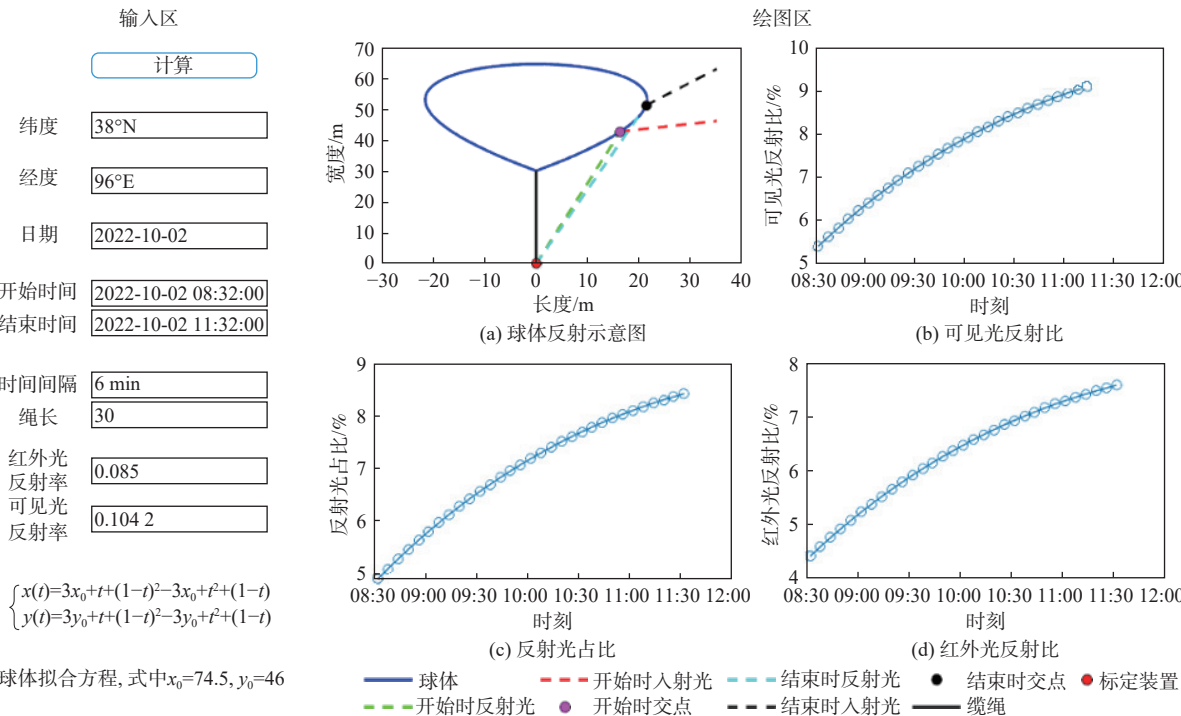


图 8 球体反射计算软件

Fig. 8 Spherical reflection calculation software

GXgf2022-02682。由此得到高空气球反射光线百分比的变化曲线,如图 9 所示。如引言所述,35 km 高度处的太阳光谱为 AM0,且标定装置具有自动对准功能,因此,反射光将直接影响标定结果。高空球体反射对标准硅电池片太阳标定值的最大影响为 8.38%。其中,可见光波段(390~780 nm)叠加最大影响为 9.28%,红外光波段(780~1 200 nm)叠加最大影响为 7.57%。

2.2 基于实测数据的球体反光影响分析验证

对 18 片被测太阳电池在平飞段的标定数据进行深入分析,累计收集了 1 800 条被测太阳电池标定数据,如图 10 所示,采集时间为 9: 30—11: 30,每 4 s 采集一条标定数据。为保证标定试验的有效性,除待测太阳电池外,标定试验还会测量一片标准电池以确定筛选条件。在此基础上,本文筛选出 18 片被测太阳电池的有效数据。筛选条件为温度接近 25 ℃,且标准电池的短路电流不低于 161.3 mA(参考标准电池在地面使用 AM0 光谱测试结果),若符合筛选条件,则认为被测太阳电池已经对准太阳,且温度、光谱已符合测试规定。经过筛选,发现有效数据主要集中在 76~96 条之间(见图 10 中小图)。在此基础上,剔除短路电流低于 161.3 mA 的标准电池和对应的被测太阳电池数据,并选择每个电池片在 24~26 ℃ 温度范围内的数据。通过标定,总结了海拔 36 km 处 18 片被测太阳电池的数据,如表 2 所示。每个已校准太阳电池的平均电流 $I=169.8$ mA,约比标准电池的 AM0 短路电流(161.3 mA)

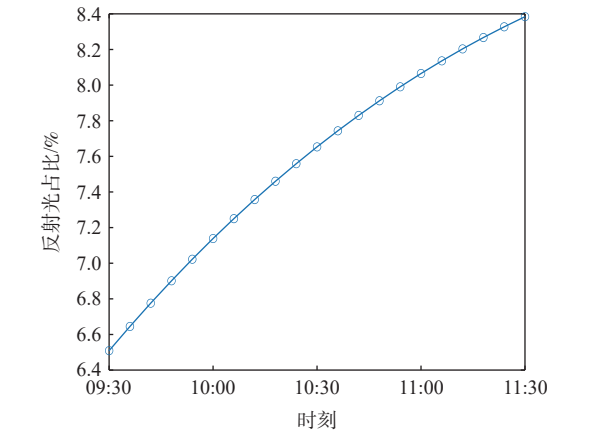


图9 反射光占比随时间变化曲线

Fig. 9 Curve of percentage of light reflectance over time

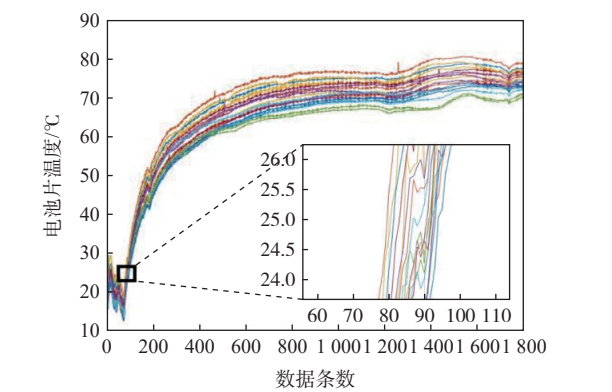


图10 平飞段待标定太阳电池温度变化曲线(4 s/条)

Fig. 10 Curve of temperature variation for solar cells during the level flight segment to be calibrated (4 s/record)

高出5%。

经过详细分析,认为有2个主要原因造成误差。首先,标定装置的自动对准太阳的功能可能存在误差,对日跟踪装置可能存在误差,太阳电池可能未与入射阳光对齐,导致直接和反射光的入射角度较大。当太阳电池与阳光的入射角不一致时,有效照射面积减小,从而导致光能捕获不足。这种错位不仅影响光的吸收效率,还可能降低电池的电流产生能力。此外,光的反射和散射会加剧这一问题,使太阳电池无法充分利用可用的太阳能。因此,确保太阳电池与阳光的最佳对齐对于提高其电流输出和整体性能至关重要。其次,当光线照射到球体表面时,反射并不是简单的反射规律,而是以随机方向散射。这种漫反射导致反射光的分布扩散到三维空间,而不是局限于单一平面。因此,反射光的方向受到球体表面微观结构的影响,使反射光向各个方向散射。由于光的入射角度较大,光线以更倾斜的角度照射球体表面。此种情况下,光与球体表面之间的交互导致更复杂的反射和散射行为,进一步增加了反射光的空间分布范围。考虑到

表2 各类型太阳电池标定数据					
Table 2 Calibration data for various solar cells					
序号	短路电流/ mA	开路电压/ mV	被测电池 温度/℃	类型	标准电池/ mA
18-04-1	84.5	1 328.6	25.0	单晶硅	171.2
18-04-2	112.7	886.9	25.3	单晶硅	171.2
18-04-3	94.55	251.8	25.6	砷化镓	170.6
18-04-4	82.2	2 542.1	24.9	单晶硅	170.6
18-04-5	56.8	1 450.2	25.5	单晶硅	170.8
18-04-6	66.4	1 052.0	25.3	单晶硅	170.8
18-04-7	58.4	793.3	25.1	单晶硅	170.0
18-04-8	69.4	240.6	24.9	砷化镓	170.6
18-04-9	58.0	3 438.3	24.5	砷化镓	166.8
18-04-10	50.6	1 548.6	24.6	单晶硅	170.7
18-04-11	47.2	1 189.7	25.0	砷化镓	165.8
18-04-12	49.2	975.1	24.6	砷化镓	170.0
18-04-13	58.5	690.2	24.5	砷化镓	161.7
18-04-14	48.1	443.8	25.1	砷化镓	170.9
18-04-15	177.1	617.4	25.0	砷化镓	171.3
18-04-16	73.3	1 457.5	25.3	单晶硅	171.6
18-04-17	76.1	1 006.1	25.0	单晶硅	171.4
18-04-18	77.6	473.25	24.8	单晶硅	170.8

注:表格中数据为符合条件数据的平均值。

以上测得的数据是从大约1 800个数据点中提取的100个数据点,根据2.2节提到的筛选条件,选择采样时间段为9:30—9:40,此时间段内温度不超过 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (见表2)。在该时间段内,反射光的影响范围在6.51%~6.78%之间。

3 球体反光影响防护

3.1 更改飞行时间、地点或绳长

合理的飞行时间和飞行地点可以有效减小甚至避免球体反射对标定的影响。由式(11)可知,球体反射取决于经纬度、太阳时角、赤纬角。这些参数共同决定了太阳光线与球体表面之间的入射角,从而直接影响反射光线的强弱,选择合适的飞行时间能够提高标定数据的准确性。此外,经纬度的选择对太阳高度角和反射光强弱也有显著影响。

不同地理位置下,太阳的运动轨迹存在差异,这意味着在某一特定时间内,不同地点的太阳高度角和赤纬角会有所不同。因此,在高空气球飞行过程中,选择低纬度地区或特定季节进行试验,可以确保反射光线的强度相对较低,进而降低对标定装置的干扰。此外,由式(4)可知,改变缆绳长度同样会影响球体对光的反射。基于2.1节分析,使用MATLAB开发分析避免球体反射的软件,如图11所示。

3.2 标定装置遮光防护

根据仿真结果,当球体表面为光滑连续时,反



图 11 球体反射分析软件

Fig. 11 Spherical reflection analysis software

射光也连续, 反射光的影响难以避免。此外, 建模使用的 3 阶贝塞尔曲线与实际球体存在一定差别, 特别是下半段球体, 对计算无反射光出现的条件影响较大。建议对标定平台进行遮光防护。

据前文对太阳高度角及反射光入射角的计算, 得到反射光与水平面夹角 Ω 为 $67.1^{\circ} \sim 67.5^{\circ}$, 如图 12 所示。而太阳高度角最大值为 40.3° , 因此, 从标定装置的太阳电池位置出发, 遮挡与水平面夹角在 60° 以上的光线, 即可实现遮挡反射光, 而不会遮挡直射的太阳光, 这是因为太阳高度角最大值为 40.3° 。遮光板、标定装置和球体的几何位置关系如图 13 所示。

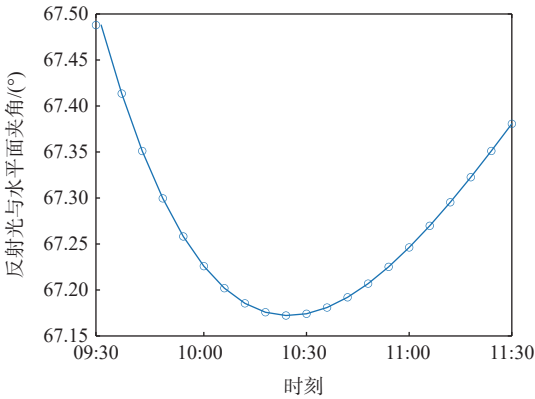


图 12 反射光与水平面夹角随时间变化曲线

Fig. 12 Curve of angle between the reflected light and the horizontal plane over time

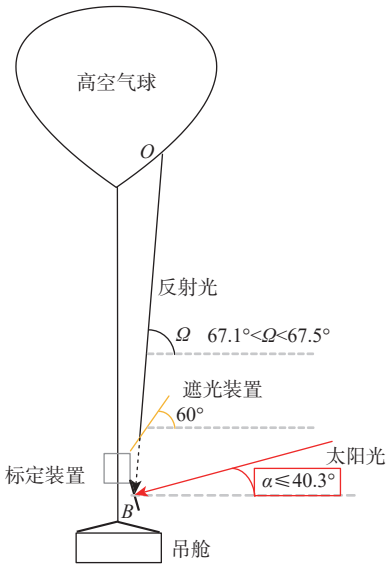


图 13 遮光板、标定装置和球体的几何位置示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the positions of the sunshield, calibration device, and spherical object

4 结 论

1) 通过仿真和试验证实了球体反射对标定结果存在显著影响。基于本文开发的球体反射计算软件显示, 球体反射导致短路电流最大增加了 8.38%; 而试验数据则显示, 相较于标准电池的 AM0 值, 实际短路电流高出约 5.28%。因此, 在使用高空气球标定时必须考虑球体反射影响。

2) 光滑球体表面导致反射光持续存在, 但可以

通过改变飞行时间、飞行地点和缆绳长度等实现某一时间段内标定装置不受球体反射影响,可根据本文开发的球体反射分析软件确定具体的飞行时间、地点和缆绳长度。

3) 如果飞行过程中太阳高度角小于反射光高度角,还可以通过遮光防护来消除球体反射对标定装置的影响。本文方法适用于各种类型的高空气球和各时间段,但仍需要对球体建模进行优化。

参考文献 (References)

[1] BRANDHORST H W, RODIEK J A. Space solar array reliability: a study and recommendations[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63(11): 1233-1238.

[2] HOU Y, DU X, SCHEINER S, et al. A generic interface to reduce the efficiency-stability-cost gap of perovskite solar cells[J]. *Science*, 2017, 358(6367): 1192-1197.

[3] SCHEIMAN D, BRINKER D, SNYDER D, et al. Summary of the 2000-2001 NASA Glenn Lear Jet AM0 solar cell calibration program[C]//Proceedings of the 17th Space Photovoltaic Research and Technology Conference. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2002: 195-201.

[4] JIANG Q, ZHANG L Q, WANG H L, et al. Enhanced electron extraction using SnO₂ for high-efficiency planar-structure HC(NH₂)₂PbI₃-based perovskite solar cells[J]. *Nature Energy*, 2017, 2: 16177.

[5] YANG W S, NOH J H, JEON N J, et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange[J]. *Science*, 2015, 348(6240): 1234-1237.

[6] DENG Y H, PENG E, SHAO Y C, et al. Scalable fabrication of efficient organolead trihalide perovskite solar cells with doctor-bladed active layers[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(5): 1544-1550.

[7] XU G N, CAI P Y, TU Y G, et al. Calibration for space solar cells: progress, prospects, and challenges[J]. *Solar RRL*, 2024, 8(6): 2300822.

[8] MÜHLEIS M, KRÖGER I, HOHL-EBINGER J. Fast and accurate short-circuit current versus irradiance determination of a spectrally nonlinear solar cell using a spectral shaping setup[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111208.

[9] THOMAS N L, CHISEL D M. High altitude calibration of solar cells using rockets[C]//Proceedings of the NASA Sounding Rocket Technology Conference. Washington, D. C. : NASA, 1975, 0085: 3-8.

[10] ZOUTENDYK J A. Space calibration of standard solar cells using high-altitude balloon flights[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1965, 2: 399-404.

[11] HOHEISEL R, WILT D, SCHEIMAN D, et al. AM0 solar cell calibration under near space conditions[C]//Proceedings of the IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1811-1814.

[12] ZHAO C X, LIU J N, LI B Q, et al. Multiscale construction of bifunctional electrocatalysts for long-lifespan rechargeable zinc-air batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(36): 2003619.

[13] ANSPAUGH B E, WEISS R S. Results of the 1987 NASA/JPL balloon flight solar cell calibration program[C]//Proceedings of the 14th Space Photovoltaic Research and Technology Conference. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 1987: 182617.

[14] CARDINALETTI I, VANGERVERN T, NAGELS S, et al. Organic and perovskite solar cells for space applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 182: 121-127.

[15] TU Y G, XU G N, YANG X Y, et al. Mixed-cation perovskite solar cells in space[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(7): 974221.

[16] REB L K, BÖHMER M, PREDESCHLY B, et al. Perovskite and organic solar cells on a rocket flight[J]. *Joule*, 2020, 4(9): 1880-1892.

[17] BAILEY S, SNYDER D, JENKINS P, et al. Standards for space solar cells and arrays[C]//Proceedings of the Seventh European Space Power Conference. Stresa: European Space Agency, 2005: 575-580.

[18] 今泉充, 梯友哉, 久木田明夫, 等. JAXA 大気球による標準太陽電池の較正実験計画[C]//大気球シンポジウム: 平成 28 年度. 相模原: 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 2016.

IMAIZUMI M, HASHIGO Y, KUKITA A, et al. Calibration experiment plan for standard solar cells using JAXA balloon-borne platforms[C]//Balloon Symposium: FY2016. Sagami-hara: Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2016(in Japanese).

[19] 杨亦强. 高空气球搭载 AM0 太阳电池标定试验初步结果[C]//中国太阳能光伏会议. 成都: 中国可再生能源学会, 2006.

YANG Y Q. Preliminary results of AM0 solar cell calibration experiment using high-altitude balloon[C]//China Conference on Solar Photovoltaics. Chengdu: Chinese Renewable Energy Society, 2006(in Chinese).

[20] 刘福才, 赵阳, 杨亦强, 等. 高空气球太阳能电池标定用太阳跟踪控制技术[J]. *航空学报*, 2014, 35(11): 3137-3144.

LIU F C, ZHAO Y, YANG Y Q, et al. Sun tracking technology for balloon flight solar cell calibration[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(11): 3137-3144(in Chinese).

[21] TU Y G, XU G N, YANG X Y, et al. Mixed-cation perovskite solar cells in space[J]. *Science China-Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(7): 974221.

Analysis and mitigation of spherical reflection effects on solar cell calibration using high-altitude balloons

ZHANG Yiqing^{1, 2}, HUANG Tingshuang¹, LI Yongxiang¹, YANG Yanchu^{1, 2}, XU Guoning^{1, 2, *}

- (1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: Accurate calibration is becoming more and more necessary as high-altitude balloons are utilized more frequently for solar cell calibration. Conventional approaches produce calibration values that are roughly 5% higher than theoretical values because they only take into account direct sunlight precision and disregard the effect of spherical reflection. This paper proposes an analysis method for spherical reflection effects, which involves fitting the sphere’s shape using a third-order Bessel curve and modeling it. The method calculates how the sphere’s reflection affects the calibration device’s reception of different light wavelengths. 18 solar cells were calibrated at a height of 35 000 m using the high-altitude balloon and calibration apparatus that are part of the experimental setup. Both experimental and simulation results confirm the impact of spherical reflection. Simulation results show that reflection can increase short-circuit current by up to 9.28%, while experimental data indicate that the actual short-circuit current is about 5.28% higher than the air mass 0 (AM0) value of standard cells.

Keywords: solar cell; high-altitude balloon; calibration; solar cell efficiency; AM0

Received: 2024-10-29; Accepted: 2024-12-20; Published Online: 2024-12-24 15:10

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241224.1409.002

Foundation items: CAS Project for Young Scientists in Basic Research (YSBR-102); National Key Research and Development Program of China (2022YFB3903000,2022YFB3903005)

* Corresponding author. E-mail: xugn@aircas.ac.cn