

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.01.007

# 全自动太阳光度计温控系统设计及测试

黄冬<sup>1,2</sup>, 李新<sup>1\*</sup>, 张艳娜<sup>1</sup>, 张允祥<sup>1</sup>

(1 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征重点实验室,  
安徽 合肥 230031;  
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 针对温度效应会影响太阳光度计观测结果且温度校正系数难以获取等问题, 设计了一种基于热电制冷器(TEC)的全自动太阳光度计温控系统。介绍了自研全自动太阳光度计的整体设计, 特别是温控系统设计, 并分析了温度对探测器响应的影响。最后对该全自动太阳光度计进行了野外测试, 在合肥地区与商用仪器CE318进行了同步观测对比, 测试结果表明全自动太阳光度计反演的气溶胶光学厚度与CE318校正后的结果一致, 偏差在0.01以内; 在敦煌地区的长期测试结果表明, 在温度变化较大的长期野外观测中, 全自动太阳光度计温控系统均保持在 $(25 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 内, 验证了温控系统设计的有效性和可靠性。

**关键词:** 温控; 太阳光度计; 热电制冷器; 气溶胶光学厚度; 温度校正

中图分类号: TP79; P427

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)01-073-009

## Design and test of temperature control system for automatic sun photometer

HUANG Dong<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>1\*</sup>, ZHANG Yanna<sup>1</sup>, ZHANG Yunxiang<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

**Abstract:** According to the problems that the change of temperature can affect the observation results of sun photometer and the temperature correction coefficient is inconvenient to obtain, a temperature control system of automatic sun photometer based on thermo-electric cooler (TEC) was designed. The whole design, especially the temperature control system design, of automatic sun photometer was introduced, and the effect of temperature on detector response was analyzed. The performance of the automatic sun photometer was tested in the field. In Hefei area, China, the automatic sun photometer was compared with the commercial instrument CE318, and the results show that the aerosol optical depth retrieved by the

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFB0504600, 2018YFB0504604), 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJ2019QN5)

**作者简介:** 黄冬(1992-), 安徽桐城人, 博士研究生, 主要从事大气遥感和光学遥感定标方面的研究。E-mail: hd125014@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 李新(1975-), 安徽合肥人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事卫星遥感器辐射定标技术、自动化定标技术方面的研究。

E-mail: xli@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2020-12-21; 修改日期: 2022-02-10

\*通信作者。

automatic sun photometer is consistent with the corrected result of CE318, with the difference less than 0.01. The long-term test results in Dunhuang area show that the temperature control system of the automatic sun photometer can be kept within  $(25 \pm 0.2) ^\circ\text{C}$  for long-term field observation with large temperature changes, which verifies the effectiveness and reliability of the system design.

**Key words:** temperature control; sun photometer; thermos-electric cooling; aerosol optical depth; temperature correction

## 0 引言

大气气溶胶是地球-大气系统的重要组成部分,在地球能量平衡、全球气候变化乃至水量循环中都起着重要作用<sup>[1,2]</sup>。此外,大气气溶胶也是影响光学卫星传感器定标和遥感数据大气校正精度的重要大气参数,它对辐射的吸收和散射作用主要取决于自身的性质,因此需要进一步了解大气气溶胶的物理和光学特性,如气溶胶光学厚度、散射相函数、单次散射反照率、复折射率、不对称因子、粒子谱等参数<sup>[3,4]</sup>。

太阳光度计是最简单、最直接的大气气溶胶被动遥感观测仪器之一,在对大气气溶胶遥感监测手段中,地基太阳光度计具有较高的观测精度,它通过测量太阳直射信号和天空散射信号,不仅可以获取区域气溶胶特性,还可以用于卫星产品精度验证<sup>[5,6]</sup>。国内外已经开展了太阳光度计的研制和相关反演算法研究,如法国 CIMEL 公司生产的 CE318 是目前应用较为广泛的商业仪器,该仪器设置有 9 个通道,可以测量太阳和天空在可见光和近红外的不同波段、不同方向、不同时间的辐射信号。美国 Solar Light 公司生产的 MICROTOPS 系列便携式太阳光度计被应用于海洋大气气溶胶观测,具备较好的操作性和便携性。日本 PREDE 公司生产的 POM 系列太阳光度计也被广泛应用于地基观测网进行大气观测,其结构与 CE318 相似并对软件进行了优化。此外,美国 NASA 利用 CE318 在全球布设了 AERONET 气溶胶观测网系统,观测全球主要区域的气溶胶光学特性;国内也建立了 CARSNET、SONET 等区域性气溶胶观测网络<sup>[7]</sup>。但现有的产品设计仍存在不足之处,例如野外温度的环境变化对探测器的响应具有较大影响。研究表明,CE318 1020 nm 通道随温度有明显变化,需要利用算法进行温度校正处理,极端低温下进行 Langley 定标,如果不进行温度校正,Langley 定标系数的误差可达 2%<sup>[8]</sup>。同时,该波段是 AERONET 气溶胶物理和光学特性反演算法中的推荐波段之一,温度效应会对反演结果产生较大偏差<sup>[9]</sup>。太阳光度计的温度敏感性并不相同,每个光度计都需要通过实验室控制温度系统来计算温度校正系数,对于没有温度控制系统的用户较为不方便<sup>[8-10]</sup>。

为了解决太阳光度计在偏远地区使用时面临的环境温度变化大、工作条件恶劣等问题,本课题组研制出了一款具有温控功能的全自动太阳光度计。本文介绍了仪器的整体设计和温控模块系统的设计,并进行了仪器测试,验证分析了仪器设计的可靠性。

## 1 整体设计

全自动太阳光度计是一种能够自动完成数据测量、数据传输和数据处理的一体化自动观测设备,在地面可以测量太阳直射光和多角度天空光通量,从而实现大气气溶胶光学厚度、大气柱水汽含量、臭氧、单次散射消光比以及粒子谱分布的连续获取。如图 1 所示,太阳光度计基本构成包括光学头部、二维跟踪及控制模块、软件模块等部分。光学头部由光机部件、滤光片、光电探测器、前置电路、四象限探测器等组成,用于探测各

波段的光谱辐射信号。跟踪模块通过二维转台改变方位角和天顶角, 结合四象限定位, 带动光学头部自动精密跟踪太阳。控制模块用于发送测量数据、监测仪器状态并接收控制指令以及进行数据存储等。供电系统负责仪器的电源和供电管理, 可接入 220 V 交流电和太阳能供电; 环境传感器用于感知环境温湿度以及降水状况, 自动进行仪器保护; 通信模块实现仪器观测数据的本地和远程传输。软件模块用于接收、显示、处理测量数据, 并通过通信系统给仪器发送指令。

全自动太阳光度计覆盖可见-近红外 9 个波段, 采用固化通道设计, 每个通道包含独立的滤光片分光 and 硅/铟镓砷光电探测器。这种设计方式的好处在于能显著减少各通道测量的时间, 尤其在早晚时刻, 太阳高度角变化明显, 需要尽可能地缩短测量时间。此外, 固化设计较容易使滤光片与探测器响应相匹配, 避免各通道共用增益电阻, 便于扩大太阳光度计观测波段的动态范围。为满足探测和反演的需要, 同时为便于校准和比对, 试验中选配了与 CE318 相同的观测波段, 具体参数如表 1 所示。

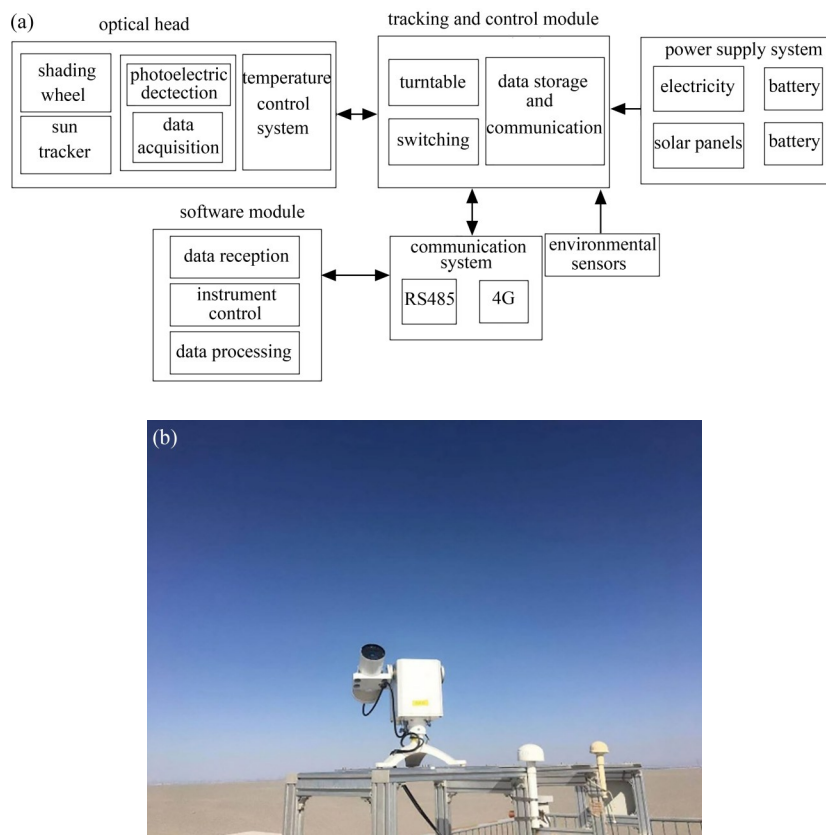


图 1 太阳光度计整体组成图 (a) 和实物图 (b)

Fig. 1 Overall composition chart (a) and physical view (b) of sun photometer

## 2 温控系统

全自动太阳光度计功能设计覆盖可见-近红外 340~1640 nm 共 9 个观测波段, 单一探测器有效响应范围难以满足观测需要, 因此根据观测波段分别采用硅和铟镓砷光电探测器。如图 2 所示, 根据《滨松产品手册》(<http://www.hamamatsu.com.cn>) 中探测器参数测试数据显示, 温度变化可以影响观测波段的信号, 甚至达到

表 1 太阳光度计主要参数  
Table 1 Main parameters of sun photometer

Parameter	Indexes
Band/nm	2 nm@340 nm; 4 nm@380 nm; 10 nm@440、500、675、870、937、1020 nm; 25 nm@1640 nm (Optional)
Field angle/(°)	≤ 1.3
Tracking accuracy/(°)	0.1
Temperature control/°C	25 ± 0.2
Environmental parameters	Temperature, humidity, pressure
Measurement	Direct-sun and sky radiance
Application	Ozone, water vapor, aerosol

0.3%/°C。为了减少温度场的变化对滤光片中心波长的偏移、探测器响应度、放大电路温漂和孔径光阑的影响,9通道主体光学器件的精密温控是保证观测数据精确的重要前提。考虑野外环境变化范围,提高加热或者吸热的效率,降低功耗,同时参考滨松探测器实验室测试数据,将温控系统的温度控制在(25 ± 0.2) °C,使其适用于野外观测环境。为了便于实时监测温控状态和测量数据的有效性,每条输出观测数据中都包含温控信息。

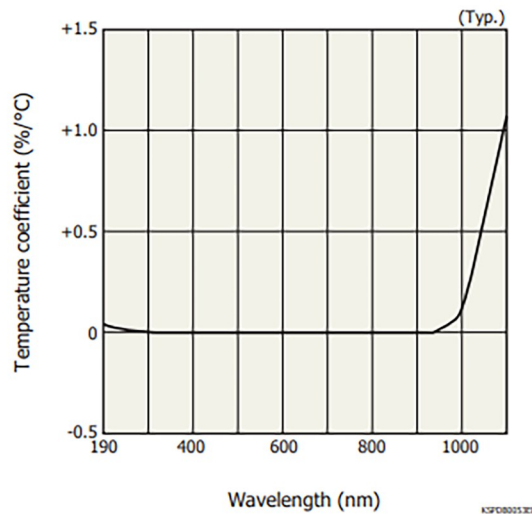


图2 探测器温度系数(源于滨松产品手册)

Fig. 2 The temperature coefficient of the detectors (from Hamamatsu product manual)

## 2.1 结构

温控系统内含热电制冷器(TEC)、滤光片、探测器、前置放大电路板等重要元器件和部件。图3(a)为温控部分的结构设计图。将滤光片、探测器和前置放大电路安装在光学主体内,外部用隔热材料包裹,形成一个恒温仓。为了在有限空间内实现恒温控制,同时满足在野外观测条件下低能耗、高续航等需求,采用体积小、功率低的TEC作为温度控制设备。

光学主体前面贴有黑色聚四氟乙烯底座和热电制冷器,热电制冷器紧贴后部外壳的导热盘,导热盘吸收热量并及时将热传递到后部外壳圆周,圆周上设计有散热槽。TEC利用半导体材料的珀尔帖效应制成。珀尔帖效应是指当电流流过由两种不同半导体材料组成的电偶对时,电偶对的一端放热而另一端吸热,如果改

变电流流入的方向, 放热端和吸热端也会随之交换, 这一点适用于既需升温又需降温的温控系统<sup>[11]</sup>。图 3 (b) 为热电制冷器的实物图, 体积为 30 mm × 30 mm × 3.15 mm。热电制冷器放置于一个绝热底座的方形槽内, 绝热底座采用绝热系数较高的黑色聚四氟乙烯材料, 起到消光、绝热、固定热电制冷器等作用。光学主体采用铝材, 并做黑色阳极化处理。保温材料采用应用广泛的高密度橡塑吸热棉材料, 这种材料具有高密度、高弹性、良好的柔韧性等性能。

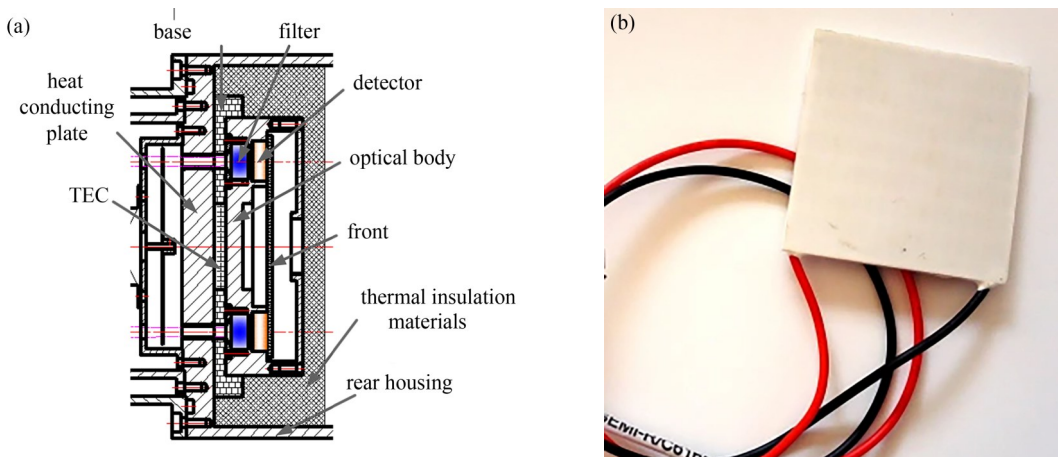


图 3 温控系统整体示意图 (a) 和 TEC (b)

Fig. 3 Schematic of temperature control system (a) and TEC (b)

### 2.2 电子学

利用数字温度传感器测量恒温仓的温度, 比较当前温度与设定温度, 将温差带入比例积分微分算法得到调整参数, 并通过控制继电器驱动 TEC 加热或者制冷。温控示意图如图 4 所示, 单片机、继电器、TEC 和温度传感器组成了一个闭环控制系统, 具体实现电路如图 5 所示。图中 HOT、COOL 为接收到的温度传感器的数据, 通过该数据可确定仪器是需要制冷或制热。TEMCTR\_HOT、TEMCTR\_COOL 为驱动端, 用于驱动温控系统进行恒温控制。

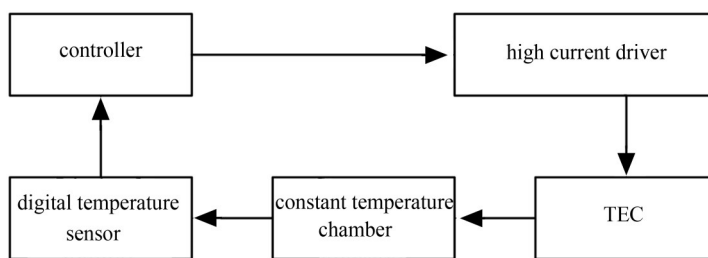


图 4 恒温控制流程图

Fig. 4 Flow chart of thermostatic control

### 3 外场试验

测试中将全自动太阳光度计与来自 SONET 观测网的太阳光度计 CE318 DP 进行同步观测。根据 Beer-



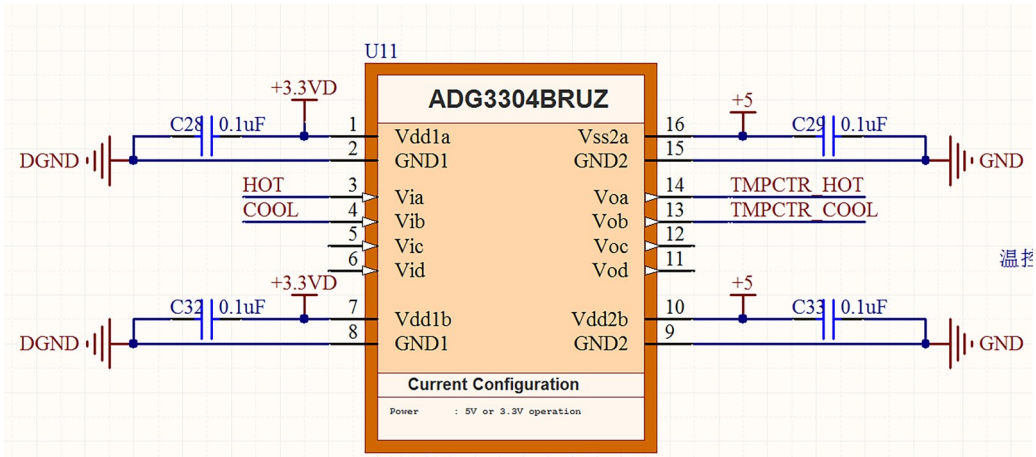


图5 温控系统电路设计

Fig. 5 Circuit design of temperature control system

Lambert-Bouguer 定律, 仪器观测信号值  $V$  为<sup>[5,6,12]</sup>

$$V = V_0 S \exp(-m\tau), \quad (1)$$

式中  $V_0$  为太阳光度计定标常数,  $S$  为日地校正因子,  $m$  为大气质量数,  $\tau$  为大气光学厚度。大气光学厚度包括瑞利散射、臭氧吸收、气溶胶吸收和散射三部分, 其具体表达式为

$$\tau(\lambda) = \tau_r + \tau_o + \tau_a, \quad (2)$$

式中  $\tau_r$  为瑞利散射光学厚度,  $\tau_o$  为臭氧吸收光学厚度,  $\tau_a$  为气溶胶光学厚度。CE318 温度校正公式<sup>[10]</sup>为

$$V' = \frac{V}{1 + C(T - 25)}, \quad (3)$$

式中  $V'$  是仪器观测信号值校正到 25 °C 时的等效信号值,  $V$  为仪器观测信号值,  $C$  为温度校正系数,  $T$  为温度。

如图 6 所示, 测试当日外界温度变化分别为 1~23 °C 和 25~40 °C, 温差较大, 全自动太阳光度计温控系统根据外界温度自动加热或散热, 恒温仓内部温度均保持在 (25 ± 0.2) °C 内。结果表明, CE318 1020 nm 通道校正前后反演的 AOD 存在差异, 温度效应明显, 温度校正前, 高温时反演气溶胶光学厚度偏小, 低温时反演气溶胶光学厚度偏大, 这主要是因为温度变化改变了探测器的响应度。

根据式(1)、(2)、(3), 在不考虑温度效应时

$$\tau_a = \frac{\ln \frac{V_0 S}{V}}{m} - \tau_r - \tau_o. \quad (4)$$

在考虑温度校正时

$$\tau'_a = \frac{\ln \frac{V_0 S}{V}}{m} + \frac{\ln[1 + C(T - 25)]}{m} - \tau_r - \tau_o. \quad (5)$$

由此可得温度校正前的偏差  $\Delta\tau_a$  为

$$\Delta\tau_a = \tau_a - \tau'_a = -\frac{\ln[1 + C(T - 25)]}{m}. \quad (6)$$

根据式 (6) 可知, 校正前气溶胶光学厚度的偏差与探测元件所处的温度差 ( $T - 25$ ) °C 有关,  $T$  高于 25 °C 时, 校正前气溶胶光学厚度偏低,  $T$  低于 25 °C 时偏高。具有温控功能的全自动太阳光度的反演结果与 CE318 校正后的结果变化趋势一致, 偏差均在 0.01 以内。

为验证温控系统长期工作的稳定性, 将全自动太阳光度计放在敦煌进行野外观测测试, 选取敦煌温度变

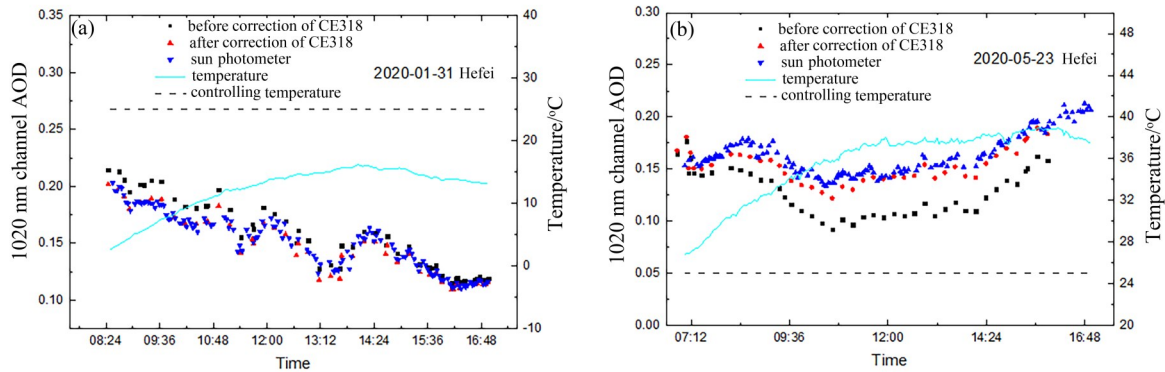


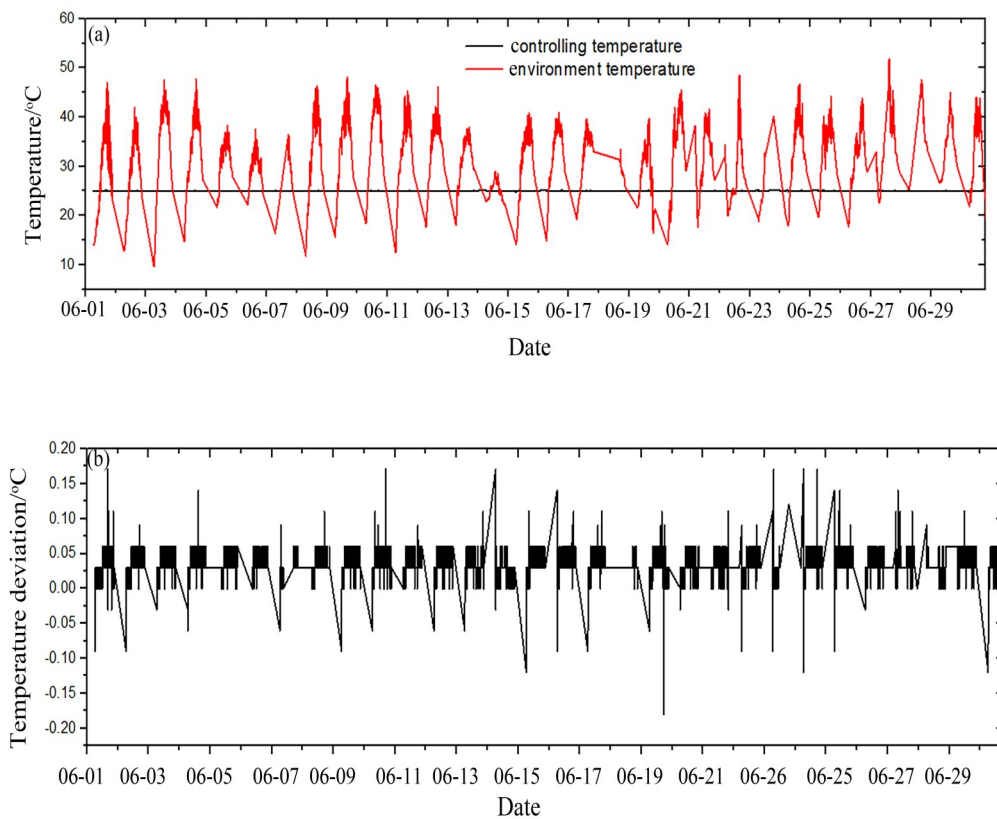
图6 全自动太阳光度计与CE318在不同工作温度下校正前后对比。(a) 温度在1~23 °C变化范围下AOD比较的结果;  
(b) 温度在25~40 °C变化范围下AOD比较的结果

Fig. 6 Comparison between sun photometer and CE318 before and after correction at different operating temperatures.

(a) Comparison of AOD results in the range of 1~23 °C; (b) comparison of AOD results in the range of of 25~40 °C

化较大的6月和12月两个月的温度数据进行长期温控精度分析, 结果如图7所示。从图中可看出, 敦煌辐射校正场在6月份的仪器环境温度变化范围为10~53 °C, 在12月份的仪器环境温度变化范围为 -21~12 °C, 仪器环境的温差变化最大达到43 °C, 但是仪器控温系统内部的温度系统始终保持在  $(25 \pm 0.2)$  °C。

由此表明, 在温差较大的野外环境中, 太阳光度计的温控系统表现出良好的稳定性, 从而也验证了温控系统设计的稳定性和可靠性。



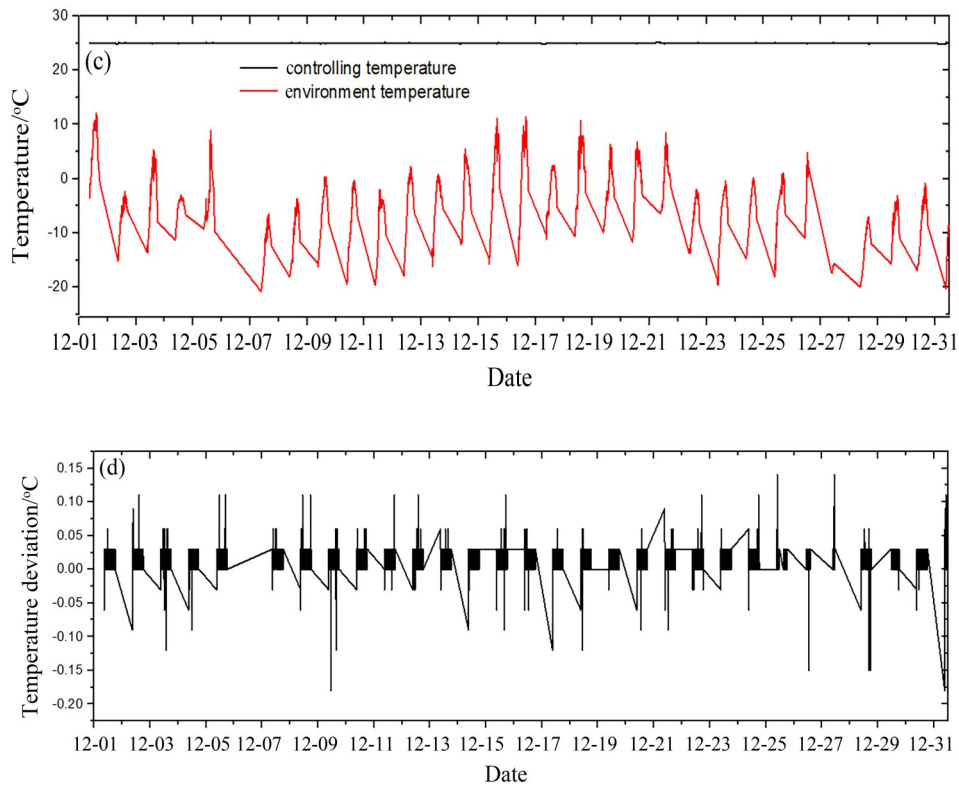


图7 6月和12月环境温度和温控系统温度变化情况。(a) 6月环境温度和温控系统的温度; (b) 6月温控系统的温度和25 °C偏差; (c) 12月环境温度和温控系统的温度; (d) 12月温控系统的温度和25 °C偏差

Fig. 7 Temperature change in July and December. (a) Environmental temperature and controlling temperature in June; (b) deviation of controlling temperature in June; (c) environmental temperature and controlling temperature in December; (d) deviation of controlling temperature in December

## 4 结 论

阐述了自研全自动太阳光度计整体设计和基于ETC的温控系统设计。在合肥将全自动太阳光度计和CE318进行了同步观测, CE318温度校正前后的观测结果存在较大差异, 全自动太阳光度计反演的气溶胶光学厚度与CE318温度校正后的结果一致, 偏差在0.01以内, 说明温控系统设计的有效性。并将其放在敦煌进行长期的野外观测, 结果表明, 全自动太阳光度计经受住了环境恶劣、温差大的野外观测测试, 温度均保持在 $(25 \pm 0.2)$  °C内, 验证了温控系统设计的可靠性, 能够在野外长期稳定运行。本系统的设计也为同类观测设备温控设计提供了一种思路。

## 参考文献:

- [1] Li Xia. *Retrievals and Analysis of Precipitable Water Vapor and Aerosol Optical Properties over Semi-Arid Area of Northwestern China* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012: 1-9.



- 李霞. 西北半干旱区大气可降水量和气溶胶光学特性的反演与分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012: 1-9.
- [2] Estellés V, Campanelli M, Utrillas M P, *et al*. Comparison of AERONET and SKYRAD4.2 inversion products retrieved from a Cimel CE318 sunphotometer [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(3): 569-579.
- [3] Gueymard C A. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance [J]. *Solar Energy*, 2001, 71(5): 325-346.
- [4] Xie Y S, Li Z Q, Li D H, *et al*. Aerosol optical and microphysical properties of four typical sites of SONET in China based on remote sensing measurements [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9928-9953.
- [5] Abesamis A C, Abrigonda M M, Privado E E, *et al*. A development of microcontroller based LED sunphotometer with sun-tracking system for measuring aerosol optical depth [C]. *Proceedings of the 2020 12th International Conference on Computer and Automation Engineering. Sydney, NSW, Australia. New York: ACM*, 2020: 140-144.
- [6] Holben B N, Vermote E, Kaufman Y J, *et al*. Aerosol retrieval over land from AVHRR data — Application for atmospheric correction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 212-222.
- [7] Li Z Q, Li D H, *et al*. Sun-sky radiometer observation network with the extension of multi-wavelength polarization measurements [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 495-519.
- [8] Li D H, Li Z Q, Bian L, *et al*. Analysis of aerosol properties using ground-based sunsky radiometer in polar region [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(3): 553-565.
- 李东辉, 李正强, 卞良, 等. 极地区域气溶胶地基遥感观测及分析 [J]. *遥感学报*, 2013, 17(3): 553-565.
- [9] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al*. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1-16.
- [10] Berjón A. Characterization of temperature sensitivity of sun photometers by field comparison with a reference instrument [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2013, 59: 1-5.
- [11] Jing Y Y. Design of a TEC temperature control system with high power [J]. *Computer Measurement & Control*, 2020, 28(11): 106-110.
- 敬奕艳. 一种大功率 TEC 温控系统的设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28(11): 106-110.
- [12] Ichoku C, Levy R, Kaufman Y J, *et al*. Analysis of the performance characteristics of the five-channel Microtops II Sun photometer for measuring aerosol optical thickness and precipitable water vapor [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D13): 4179.