

一款新型太阳辐射测量仪的结构设计与热仿真

韦 博^{1,2}, 林冠宇¹, 段民征^{2,3}, 李继峰^{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. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 近年来由于人类生产活动日益加剧,引起的大气气溶胶和臭氧等大气粒子含量的变化对全球气候变化有着重要影响。为了监测上述大气粒子含量,在总结国内外研究现状的基础上,提出使用合理的温控结构来设计制造一款新型多波段太阳辐射测量仪,用来适应国内纬度跨越大、温差大的工作环境。新型太阳辐射测量仪涵盖可见-红外波段,采用九个带通滤光片分别对应两个光电探测器的结构,可以避免探测器相互定标引起的定标误差并减少定标工作量。经 ANSYS Workbench 热-力耦合仿真,上述太阳辐射测量仪所采用的温控结构在两个极端温度条件下的变形量满足设计要求。

关键词: 气溶胶; 辐射测量; 温控; 热-力耦合

中图分类号: TP391.9; TH74; P412 **文献标识码:** B

Structural Design and Thermal Simulation for a New Type of Solar Radiation Measuring Instrument

WEI Bo^{1,2}, LIN Guan-yu¹, DUAN Min-zheng^{2,3}, LI Ji-feng^{1,2}

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

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

3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: In recent years, due to human production activities, the content of atmospheric particles such as aerosols and ozone has changed, which has an important impact on global climate change. In order to monitor the above-mentioned atmospheric particle content, based on summarizing the research status around the world, this paper proposed a method for designing and manufacturing a new multi-band solar radiation measuring instrument with a reasonable temperature control structure. And the measuring instrument could adapt to the working environment with large latitudes and large temperature differences in our country. The solar radiation measuring instrument uses 9 filters to obtain 9 spectral channels within visible-infrared bands and receives radiation through visible and infrared photo-detectors respectively, which can avoid calibration errors caused by the mutual calibration of the detectors and reduce the workload. The thermal-force coupling analysis by ANSYS Workbench shows the temperature control structure of the solar radiation measuring instrument meets the design requirements in two extreme temperature conditions.

KEYWORDS: Aerosol; Radiation measurement; Temperature control; Hot-power coupling

1 引言

太阳辐射提供了地球上人类发展活动所需的大部分能

量,对人类的生产和生存环境有着深刻的影响,太阳辐射的高精度监测也符合可持续发展的需要,将有助于太阳能源的合理有效利用^[1]。气溶胶是大气中一种固液态粒子组成的混合相体系,其可以通过对大气外层太阳辐射和地面反射太阳辐射的吸收、反射和散射对全球能量收支产生影响^[2]。

太阳辐射测量仪是一种基于地球表面测量太阳光谱特

基金项目: 吉林省科技厅重点科技攻关项目(20170204019SF); 吉林省科技发展计划重点攻关项目(20160204064GX)

收稿日期: 2019-12-06 修回日期: 2019-12-19

性的仪器,通过辐射数据反演计算出监测指标的数值,如气溶胶光学厚度、大气水柱含量、臭氧含量等等。国外很早就开始了对太阳辐射研究,早在 1837 年法国人 Pouillet 就设计制造出了世界上第一台测量太阳辐射的仪器。经过 100 多年的发展,国外已经发展出了多款功能齐全、性能优异的测量太阳辐射的设备,如法国 CIMEL 公司生产的 CE318 系列太阳光度计,全球著名的 AERONET 监测网就是采用该仪器进行测量,中国的 SONET、CSHNET 等监测网也应用了该仪器。除此之外,日本 PREDE 公司的 POM 系列太阳光度计和美国 Solar Light 公司的 MICROTOPSHI 型光度计也是商用很广的两款仪器。国内太阳光度计发展起步晚,自 1980 年以来,国内长春光机所、安徽光机所等科研院所陆续发展出了几款测量太阳辐射的仪器,但是都没有发展成为成熟的商用产品^[3-5]。目前,国内该类型的产品都需要进口,除了费用高昂外,进口仪器在温控方面也存在一些问题^[6]。从中国最北的漠河到西北的吐鲁番,仪器需要在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 范围内

正常工作。因此有必要研制出一款具有良好温控能力的新型国产太阳辐射测量仪。

本文主要介绍了一款最新研制的具有温控能力的新型太阳辐射测量仪的总体结构、探测器头部结构设计和探测器头部关键部位的热力学仿真。通过软件仿真为仪器的温控设计提供必要的依据。

2 太阳辐射测量

2.1 测量原理

本文设计的太阳辐射测量仪是一种地基测量设备,主要用来反演大气气溶胶光学厚度、粒度谱和相函数等大气气溶胶光学特性,以及对大气水汽含量和臭氧含量进行观测,可以为研究环境污染和气候变化提供必要的技术支持^[7]。测量时,仪器将采集到的辐射信号通过光电探测器转变成电信号,然后对电信号进行相应处理来对目标物理量进行观测。该太阳辐射测量仪的观测原理如图 1 所示。

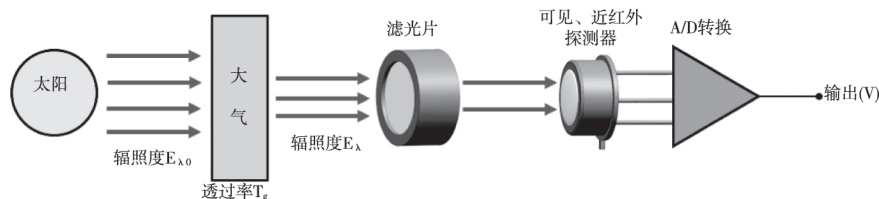


图 1 太阳辐射测量仪观测原理示意图

太阳辐射在到达地面之前,会受到大气中各种气体和粒子的吸收和散射,因此,作为一种地基测量设备,其测得的大气光学厚度为总的光学厚度。根据 Bouguer 定律,在特定波长上测得的地面直射太阳辐射为:

$$E_{\lambda} = E_{\lambda 0} R^{-2} \cdot \exp(-m\tau) T_g \quad (1)$$

其中

$E_{\lambda 0}$ 日地平均距离上的大气外界的太阳辐照度;

R 测量时刻的日地距离;

m 大气质量数,与太阳高度角有关, $\tau = 1/\cos \theta$ (θ 为太阳天顶角);

τ 大气总的垂直光学厚度;

T_g 吸收气体透射率。

光电探测器在将地面太阳辐射 E 转换为电信号时,输出电压 V 与 E 成正比,则上式可改写为

$$V = V_0 R^{-2} \cdot \exp(-m\tau) T_g \quad (2)$$

其中 V_0 是仪器的定标常数。天气晴朗时 T_g 为 1,对上式取对数可得

$$\ln V + \ln R^2 = -m\tau + \ln V_0 \quad (3)$$

由上式可知,仪器输出电压 V 是关于 m 的函数,可将测得的数据画成直线,则由直线的斜率可得到垂直光学厚度 τ ,直线的截距可求得 V_0 。大气总的垂直光学厚度是由分子散射、气体(臭氧、水汽等)吸收消光和气溶胶散射三部分组

成,即

$$\tau = \tau_r + \tau_g + \tau_a \quad (4)$$

其中分子散射光学厚度 τ_r 可由地面气压值计算出来,本仪器的波段范围集中在可见光和近红外波段,在这个波长范围内,气体吸收消光主要是臭氧和水汽的吸收消光。在没有气体吸收消光 τ_g 可以忽略的通道,式(4)中的第二项可以消去,那么气溶胶的光学厚度就可以计算出来。

2.2 工作模式

该太阳辐射测量仪主要有以下两种工作模式。

1) 太阳直接辐照度工作模式

在该工作模式下测量仪头部通过太阳位置跟踪模块对准太阳,依靠滤光片轮的转动切换带通滤光片,依次测量各个通道的太阳直射辐照度。

2) 天空辐亮度工作模式

在此工作模式下,太阳辐射测量仪有两种观测方式,一种是等太阳方位角观测,如图 2,即测量时探测器方位角与太阳方位角保持一致,探测器以此时太阳位置为零点,仪器高度角在 $-6^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内变化;一种是等太阳高度角观测,如图 3,即测量时探测器高度角与太阳高度角保持一致,探测器以此时太阳位置为零点,探测器方位角在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内变化。

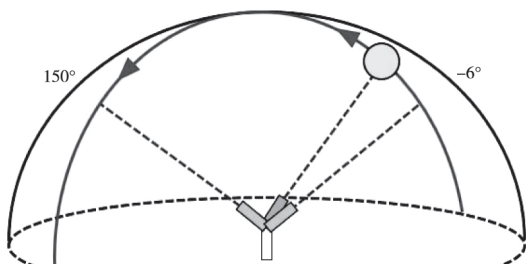


图2 等太阳方位角测量

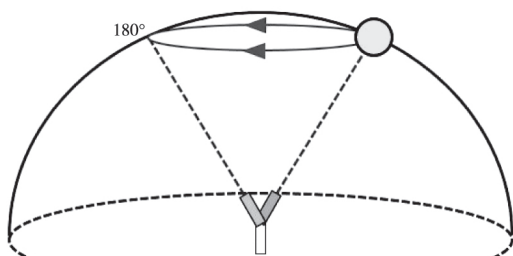


图3 等太阳高度角测量

3 整机设计

该太阳辐射测量仪使用9通道带通滤光片分光,硅光电探测器和锗铟砷光电探测器分别接收可见和近红外波段太阳辐射的方式进行测量,相对于类似仪器每个滤光片对应一个探测器的测量结构,该结构可以避免由探测器相互定标引起的误差。仪器的主要性能参数如表1。高精度太阳辐射测量仪的整机结构主要由三部分组成,包括负责响应太阳直射辐照度和天空辐亮度的光机头部部分、负责带动光机头部运动的二维转台部分以及负责通信、控制和供电的控制电箱部分,太阳辐射测量仪总体设计如图4所示。测量开始前,首先控制电箱依据时间和仪器所处位置的经纬度数据计算出太阳理论位置,然后控制二维转台运动,使光机头部运动至太阳理论位置,之后依靠手动调节和光电四象限仪反馈的数据使光机头部找到准确的太阳位置。测量时,光经过由遮光筒、光学镜片和滤光片组成的光学系统到达相应的光电探测器,探测器将采集到的光信号转换为电信号传输到控制电箱,经由控制电箱对信号进行放大处理后经通信模块将数据回传,经由数据处理之后,获得所需要的光学数据。图5是太阳辐射测量仪的实物图。

表1 太阳辐射测量仪主要性能参数

性能	指标
中心波长/nm	9个通道: 340, 380, 440, 500, 676, 870, 940, 1020, 1650
光谱带宽/nm	10
跟踪精度/°	0.1
视场角/°	1.3
温控温度/°C	25 ± 1

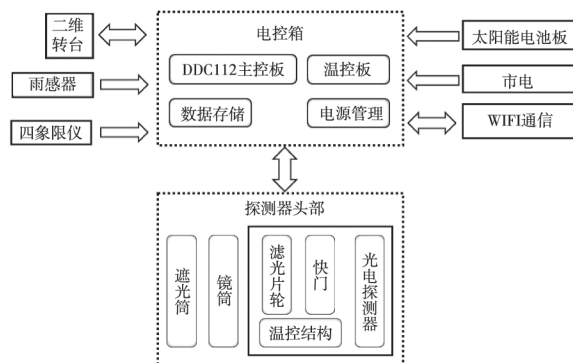


图4 太阳辐射测量仪总体模块图



图5 太阳辐射测量仪实物图

3.1 光学头部结构设计

太阳辐射测量仪的光学头部主要由三部分组成: 光学结构、机械结构、温控结构。其中,光学结构和机械结构是探测器头部的主体结构,两者的设计制造水平影响仪器的基本性能;温控结构是在以上两个结构的基础上进行的优化设计,合理的温控结构将提升仪器的测量性能。

太阳辐射测量仪的光学头部结构如图6,在光学结构的最前端是由石英镜片组成的遮光筒,石英镜片起到防护的作用,遮光筒是用来限制视场;石英镜片依靠螺纹压圈固定在遮光筒上,遮光筒和后端机械壳之间依靠螺纹固定,两者之间有O型橡胶圈,起到密封防水的作用。遮光筒之后是由两个光学镜片和消杂光光阑组成的光学镜筒,起到聚光的作用。在光学镜筒之后是由9个不同波段的带通滤光片沿圆周排布组成的滤光片轮,滤光片轮安装在步进电机轴上,通过控制步进电机运动达到准确切换带通滤光片的目的。在滤光片轮之后是快门组件,通过程序控制在其后的探测器的曝光时间,可以延长探测器的使用寿命,同时还可以通过测

量每个通道的暗噪声来提高仪器的测量性能。探测器分为可见光探测器和近红外探测器,用于响应到达其像面上的太阳辐照度和天空辐亮度,将光信号转换为电信号,传输给控

制电箱进行数据处理。温控结构位于探测器和滤光片所在的主光学室内,工作时对主光学室内的温度进行调节。

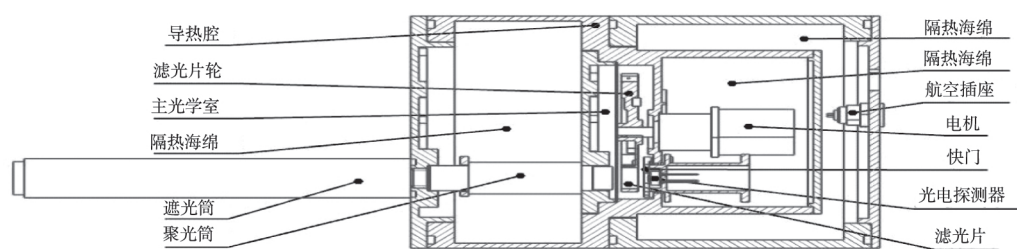


图6 光学头部结构示意图

3.2 太阳位置跟踪设计

太阳辐射测量仪的测量精度要求设备能够准确找到太阳位置,本设备依靠程序和四象限仪形成太阳位置对准反馈闭环,通过这种闭环设计不断提高对准太阳的精度。图7是其反馈闭环流程图。

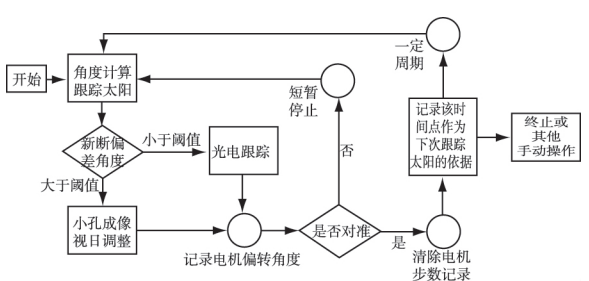


图7 太阳辐射计跟踪太阳流程图

设备通过GPS和网络获得所在位置的地理和时间信息,通过这些数据计算出太阳理论位置,控制电箱通过采集到的转台位置计算出光学头部当前位置相对太阳的角度差,若大于光电四象限仪的接收范围,手动调整探测器光学头部对准太阳;反之,光电四象限仪开始工作,依据太阳光斑在光电四象限仪像面的位置可以不断修正光学头部的位置,直至对准太阳。通过这种设计,能够控制定位误差在 $\pm 0.1^\circ$ 之内。

4 温控结构设计和热-力耦合有限元仿真

4.1 温控结构设计

太阳辐射测量仪作为比较精密的测量仪器,环境温度对其测量精度的影响主要体现在以下方面:①滤光片中心波长会随温度变化产生偏移,探测器响应度会随温度的变化而变化(如图8所示),会增加仪器的系统误差^[8];②仪器的关键部件变形,如固定探测器像面的探测器壳、安装九通道滤光片的滤光片轮等。因此需要合理的温控结构保证仪器的测量精度。温控结构应满足探测器的性能要求,将控制温度设置在 25°C ,控制误差不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

依据以上要求,仪器温控结构主要有安装九通道滤光片

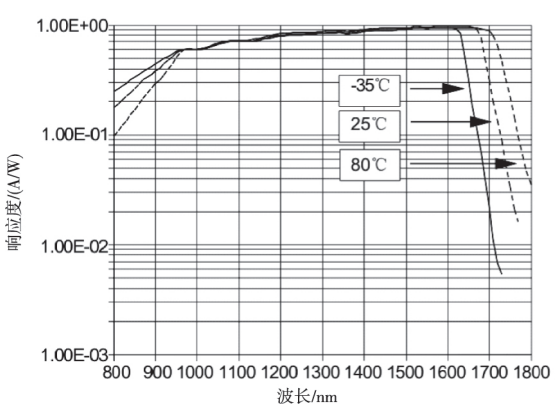


图8 锑钾碲红外探测器响应度变化曲线

的滤光片轮、探测器、减少热对流的隔热腔、隔热海绵、热电制冷片、聚酰亚胺加热膜以及实时记录内部温度变化的温度传感器。其中,热电制冷片是一种P-N结器件,其依据热释电效应一面制冷,另一面散热,使用时将散热的一面用导热硅脂贴在主光学室的导热安装板上,其平面尺寸是边长为20mm的正方形,厚度为2mm,功率初步选用10W。聚酰亚胺加热膜是将金属丝热合入聚酰亚胺薄膜中的绝缘电热薄片,其具有绝缘性好、发热均匀、热转换效率高的优点,且一面自带背胶,可直接粘在被加热物体上,使用方便,尺寸为 $40\text{mm} \times 30\text{mm}$,厚度可忽略不计,功率初步选用10W。

热电制冷片和聚酰亚胺加热膜均贴合在主光学腔内的导热安装板上,导热安装板和仪器外壳一体,起到热传导的散热作用,其材料采用航空级的2A12铝合金,具有良好的导热性和较高的强度。除了主光学室,其余空间均用隔热保温棉填充,起到隔热的作用。探测器工作时,温度传感器实时监测主光学腔体内的温度,若温度过高,则控制电箱控制热电制冷片工作,起到降低温度的效果,热量通过与之贴合的导热安装板传至探测器外壳,探测器外壳通过空气对流散热;若温度过低,则聚酰亚胺加热膜工作,产生热量使主光学腔内温度升高。通过以上设计,形成主光学室-热电制冷

片/聚酰亚胺加热膜-导热安装板-探测器外壳-空气这一单一传热途径,使主光学室内的温度保持在可控范围内。

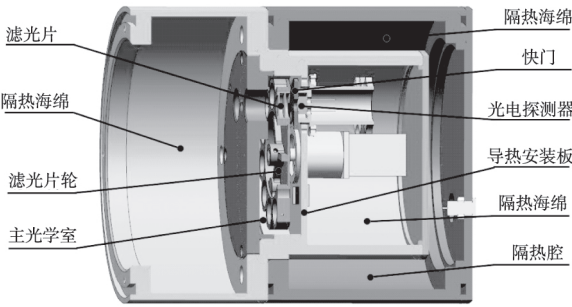


图9 温控结构模型图

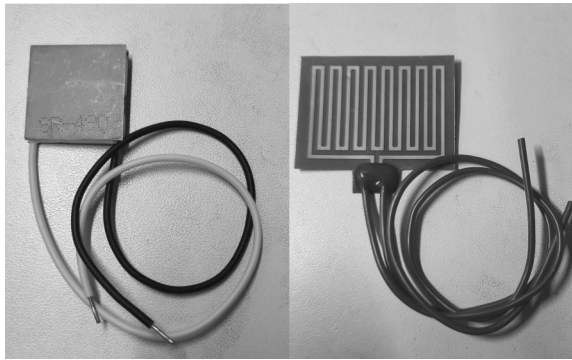


图10 热电制冷片

图11 聚酰亚胺加热膜

4.2 主光学室热-力耦合有限元仿真

为了验证热控结构的是否满足设计要求,本文采用 ANSYS Workbench 热分析模块对热控结构模型进行热力学仿真。ANSYS Workbench 是一款功能强大,操作简便的协同仿真平台,其上集成的 Thermal-Stress 模块可以很好的满足主光学室需要的导热和结构应力之间的热-结构耦合分析的要求,而且使用 NX 软件构建的模型可以很方便的导入到 ANSYS Workbench 软件中。本文分析流程如图 12 所示。

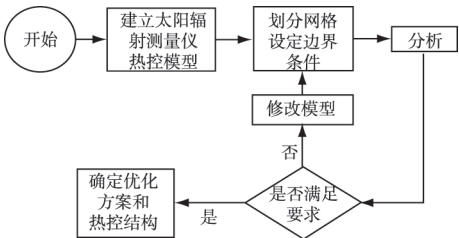


图12 热-力耦合分析流程图

太阳测量仪的光学头部在进行野外测量时,需要具有在-40℃~70℃这两个极端温度范围内稳定工作的能力,虽然主光学室的温控设计可以保证主要光学和测量器件的工作温度稳定在 25℃,但是在将主光学室内的温度由两个极端温

度向工作温度调节的过程由于热胀冷缩会产生一定的变形,在主光学室中光电探测器接收到的光学信息对光学器件的相对位置变化比较敏感,因此需要对主光学室内关键部件因温度变化而引起的变形进行定量分析。

主光学室内主要分布着安装 9 通道滤光片的滤光片轮、快门、光电探测器等光学和机械构件,其中安装 9 通道滤光片的滤光片轮和安装光电探测器的导热安装板的热变形对仪器测量能力影响比较大,因此主要对这两个结构进行热力学分析。滤光片轮和导热安装板的材料均为铝合金 2A12,其材料性能如表 2。

表2 铝合金 2A12 材料属性

材料	密度/(g·cm ⁻³)	泊松比
铝合金 2A12	2.75	0.33

表2(续) 铝合金 2A12 材料属性

导热系数 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热变形系数 /(10 ⁻⁶ ·K)	弹性模量 /Gpa
140	20	75

使用 Thermal-Stress 模块对这两个构件进行热力学分析时要先进行材料属性设置,主要是材料的密度、热膨胀系数和热导率,然后进行网格划分、添加温度载荷和添加边界条件的操作,温度载荷的添加要模拟构件温度由两个极端温度稳定到 25℃的情况。

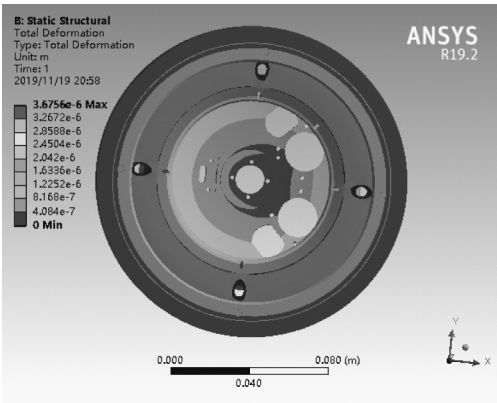


图13 导热安装板-40℃~25℃热变形仿真图

图 13 是极端温度从-40℃升至 25℃时导热安装板的热变形图;图 14 是极端温度从 70℃降至 25℃时导热安装板的热变形图;图 15 是极端温度从-40℃升至 25℃时滤光片轮的热变形图;图 16 是极端温度从 70℃降至 25℃时滤光片轮的热变形图。由上图分析结果可知,主光学腔在两个极端温度变化过程中最大变形量小于 0.0036756mm,滤光片轮在两个极端温度变化过程中最大变形量小于 0.0013079mm,而主光学腔中安装探测器的导热安装板和安装 9 通道滤光片的滤光片轮均有 ±0.1mm 的设计余量,最大变形量小于设计余

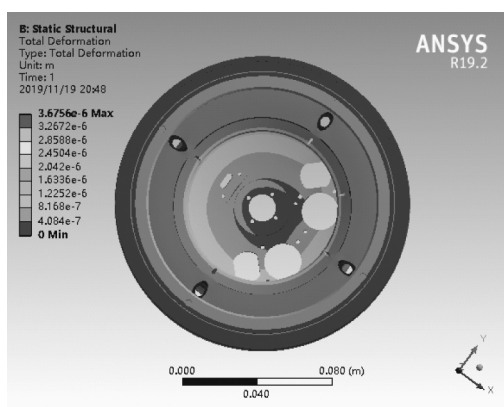


图 14 导热安装板 70℃~25℃热变形仿真图

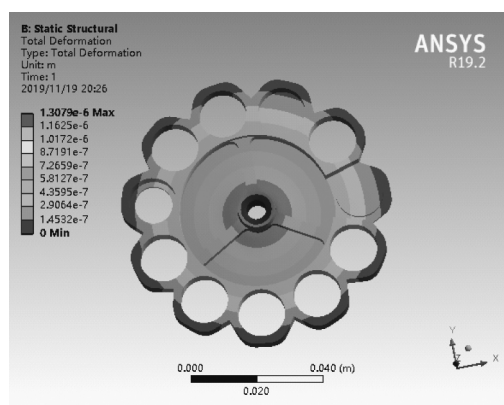


图 15 滤光片轮 -40℃~25℃热变形仿真图

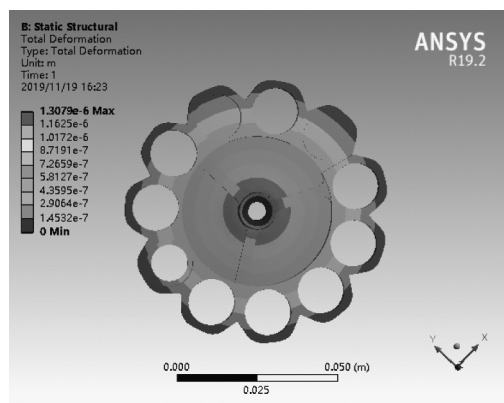


图 16 滤光片轮 70℃~25℃热变形仿真图

量,该结构满足热控设计的结构要求。

4.3 外场温度测试

为了验证温控设计的合理性,对太阳辐射测量仪在实际工作的温控能力进行了初步验证。本次验证选取吉林省长春市 2019 年 9 月 25 日 9:00~16:00 的实测环境的温度数据与实测温控系统的温度数据进行比对,图 17 是环境温度和温控温度的变化趋势,从中可以看出,当天测量时间段内环

境温度温差约 8℃,太阳辐射测量仪的温控温度始终在 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 这一设计要求内,由以上初步测量可知,本测量仪的温控系统工作稳定,满足设计和使用要求。图 18 为室外实验图。

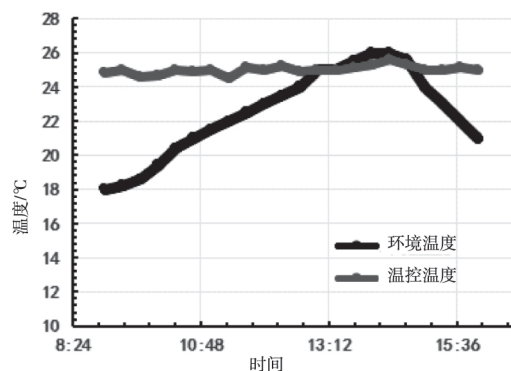


图 17 环境温度和温控温度

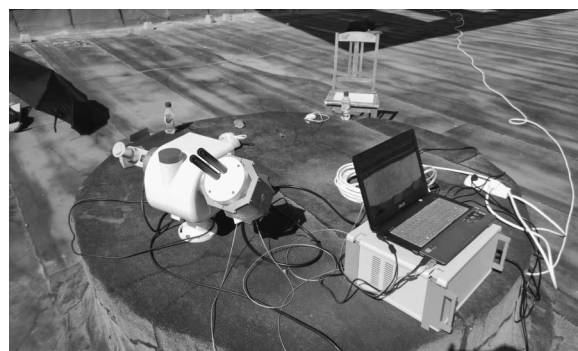


图 18 室外实测实验

5 结论

本文对一款新型多波段太阳辐射测量仪的观测原理、工作模式、结构设计进行了阐述,对该太阳辐射测量仪的温控结构设计进行了介绍,并对关键部位进行了热力学仿真。太阳辐射测量仪的研制主要包括光机头部设计和太阳跟踪方式设计,除了上述设计,该太阳辐射测量仪创新的对探测器关键部位进行温控设计来提高其观测精度,克服了传统此类仪器测量精度容易受到温度影响的缺点。通过使用 ANSYS Workbench 对温控模型进行热力学仿真和对仪器进行初步的室外实测实验,可知该新型太阳辐射测量仪的温控系统工作稳定,满足设计、使用要求。

参考文献:

- [1] 赵志刚. 太阳辐射计 [J]. 红外, 2006, 17(6): 35~40.
- [2] 翟薇, 赵艳霞, 王春乙, 吴则金. 大气气溶胶变化对农业影响的研究进展 [J]. 气象科技, 2006, 34(6): 705~710.
- [3] 王浩. 便携式带通太阳光度计的系统设计 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [4] 李伟. 太阳辐射计视场角测量方法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

(下转第 287 页)



作者简介

吴 晗(1992-),女(汉族),河南省驻马店市人,硕士研究生,主要研究领域为电机系统及其控制技术研究。

(上接第234页)

参考文献:

- [1] 田卓璟,黄震春,张益农.云计算环境任务调度方法研究综述[J].计算机工程与应用,2021,(2):1-11.
- [2] 魏勇,赵开新,张松青,等.基于改进蚁群算法的云计算任务调度研究[J].火力与指挥控制,2017,42(5):130-133.
- [3] 周墨颂,董小杜,陈衡,等.一种云环境中的动态细粒度资源调度方法[J].软件学报,2020,31(12):3981-3999.
- [4] 郭琪瑶,朱范德.基于蚁群算法和蛙跳算法的云计算资源调度算法[J].科技通报,2017,33(5):167-170.
- [5] 吕燕兵,王静宇,吴金明.云计算资源负载均衡调度优化算法研究[J].内蒙古科技大学学报,2017,36(2):181-186.
- [6] 尚志会,张建伟,蔡增玉,等.云桌面环境下基于蚁群算法的作

业调度方法[J].计算机工程与设计,2017,38(6):1668-1672,1680.

尚志会,张建伟,蔡增玉,等.云环境下基于动态蚁群遗传算法的调度方法研究[J].自动化与仪表,2016,31(11):11-15.

罗斯宁,王化龙,李弘宇,等.基于改进蚁群算法的云计算用户任务调度算法[J].电信科学,2020,36(2):95-100.

金鹏,马铭优,曲叶舟.基于CBPSO算法的云计算任务调度研究[J].自动化技术与应用,2020,39(10):34-36,74.

业调度方法[J].计算机工程与设计,2017,38(6):1668-1672,1680.

尚志会,张建伟,蔡增玉,等.云环境下基于动态蚁群遗传算法的调度方法研究[J].自动化与仪表,2016,31(11):11-15.

罗斯宁,王化龙,李弘宇,等.基于改进蚁群算法的云计算用户任务调度算法[J].电信科学,2020,36(2):95-100.

金鹏,马铭优,曲叶舟.基于CBPSO算法的云计算任务调度研究[J].自动化技术与应用,2020,39(10):34-36,74.

作者简介



李 萌(1986.1-),女(汉族),陕西西安人,硕士研究生,讲师,研究方向:电子与通信工程。

刘 鑫(1982-),男(汉族)湖南衡阳人,博士,副教授,研究方向:大数据,机器学习,自然语言处理。

(上接第250页)

- [1] Liu Y, Saputra A A, Wang J, et al. Automatic polyhedral mesh generation and scaled boundary finite element analysis of STL models[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2017,313: 106-132.
- [2] Ming Zhou. Convergence estimates of nonrestarted and restarted block - Lanczos methods[J]. Numerical Linear Algebra with Applications, 2018,25(5): 223-227.
- [3] 蒋新新,李建波,林皋,等.利用ANSYS瞬态分析直接进行结构静-动力分析的一种方法[J].计算机应用,2014,(S1): 338-340.

作者简介



王海雄(1975-),男(汉族),湖南邵阳人,博士,副教授,主要研究领域为材料成形工艺及装备。

王成安(1996-),男(汉族),安徽六安人,硕士研究生,主要研究领域为材料成形仿真。

黄增祥(1996-),男(汉族),广西南宁人,硕士研究生,主要研究领域为材料成形仿真。

王军力(1995-),男(汉族),山西太原人,硕士研究生,主要研究领域为装备控制系统。

(上接第256页)

- [1] 杨久春.太阳辐射计视场角有限步长扫描定标方法研究[J].合肥工业大学,2017.
- [2] 张权,李新,张艳娜,等.自动多波段太阳辐射计光机设计及热力学有限元分析[J].光子学报,2019,48(4).
- [3] Kazadzis S, Kouremeti N, Diémoz H, et al. Results from the 4th WMO filter radiometer comparison for aerosol optical depth measurements[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2018,18:3185-3201.
- [4] Salim S G R, Fox N P, Theocharous E, et al. Temperature and nonlinearity corrections for a photodiode array spectrometer used in the field[J]. Applied Optics, 2011,50(6):866-875.

作者简介



韦 博(1993-),男(汉族),安徽省阜阳市人,硕士研究生,主要研究领域为大气辐射测量仪器研究。

林冠宇(1976-),男(汉族),吉林省长春市人,研究员,博士研究生导师,主要研究领域为紫外光学遥感仪器研究。

段民征(1968-),男(汉族),河北省定州市人,研究员,博士研究生导师,主要研究领域为大气成分的高光谱反演技术研究。

李继峰(1994-),男(汉族),黑龙江省伊春市,博士研究生,主要研究领域为大气辐射测量仪器研究。