

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.02.005

# 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪活动部件

刘凤垒, 薛辉, 司福祺\*, 江宇, 汪世美, 周海金, 赵敏杰

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪具备对地观测、太阳光光谱定标、卤素灯探测器自检三种工作模式, 所以需要三条相应的光学系统光路。为了使得光路得到充分利用, 三条光学系统光路共用一部分光路, 故设计太阳挡板活动部件、光路切换活动部件和漫射板定标活动部件用于切换三条光路。三个活动部件进行了部件寿命试验, 而且整机进行了热真空和热平衡试验, 实验结果表明活动部件运行正常, 活动部件满足寿命要求和环境适应要求。

**关键词:** 活动部件; 工作模式切换; 寿命要求; 环境适应要求

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)02-0111-06

## Moving Parts of Spaceborne Differential Optical Absorption Spectrometer

LIU Fenglei, XUE Hui, SI Fuqi\*, JIANG Yu, WANG Shimei, ZHOU Haijin, ZHAO Minjie

(1 Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Spaceborne differential optical absorption spectrometer has three working modes: earth observation, spectrum calibration with solar, and halogen light detector self-inspection with halogen light. Therefore, three corresponding optical systems are needed. To make full use of the optical path, the three optical systems share part of the optical path. So, the solar baffle moving parts, the optical road switching moving parts, and the diffuser plate calibration moving parts are designed to switch the three optical paths. The three moving parts were tested for life, and the whole machine was tested by thermal vacuum and heat balance. The experimental results show that the moving parts are operating normally, and the moving parts meet the life requirements and environmental adaptation requirements.

**Key words:** moving parts; switching of working modes; life requirement; environment adaption requirement

## 1 引言

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪通过探测地球大气和地球表面反射、散射的紫外/可见光来解析痕量污染气体成分时空分布和变化。光谱仪具有对地观测、太阳光光谱定标和卤素灯探测器自检三种主要

**基金项目:** Dean Foundation of the Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences (中国科学院合肥研究院院长基金, YZJJ201605), National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41705016)

**作者简介:** 刘凤垒(1987-), 山西大同人, 硕士, 工程师, 主要从事光机结构设计。 **E-mail:** flliu@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2018-09-29; **修改日期:** 2018-11-29

\* **通信联系人.** **E-mail:** sifuqi@aiofm.ac.cn

工作模式, 对地观测模式接收反射自大气和地球表面的光, 太阳光光谱定标模式接收太阳的光, 卤素灯探测器自检模式的光源是光谱仪自带卤素灯, 三种模式的光源位于不同的位置, 所以设计了用于遮挡和打开太阳光入射窗口的太阳挡板活动部件、用于切换对地观测光路和定标光路的光路切换活动部件和用于漫射太阳光和卤素灯的漫射板活动部件。

## 2 活动部件总体方案和工作原理

如图 1 所示是光谱仪前置光学系统图, 光学系统分为三条光路, 分别是对地观测主光路、太阳光光谱定标光路和卤素灯探测器自检光路。对地观测光路中, 地球和大气层反射和散射的光 (光束 A) 依次经过光学箱体入射狭缝 (1)、入瞳 (2), 然后经主镜 (3) 反射, 再依次通过入射狭缝 (4)、偏振晶体 (5)、防杂光狭缝 (6), 然后再经过次镜 (7) 反射, 然后进入主狭缝 (8), 在对地观测时, 其中光路切换镜 (17) 需要旋转出主光路; 太阳光光谱定标光路中, 太阳光 (B) 通过太阳网板 (15) 照射在铝漫反射板 (10) 或者石英漫反射板 (11) 上, 反射的光照射在光路切换镜 (17) 上, 反射后的光透射过偏振晶体, 然后再经过次镜 (7) 反射照射到主狭缝 (8); 卤素灯探测器自检光路中, 卤素灯 (14) 发出的光经过准直透镜 (13) 后, 经金属反射镜 (12) 反射后, 再透射经过石英透镜 (9), 照射到光路切换镜 (17), 反射后的光透射过偏振晶体, 然后再经过次镜 (7) 反射照射到主狭缝 (8)。

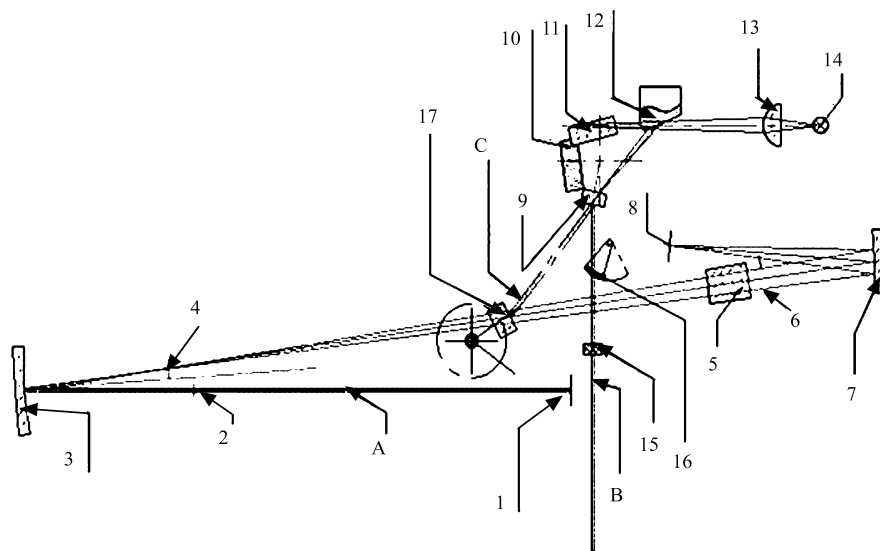


图 1 大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统图

Fig.1 Front optical system diagram of spaceborne differential optical absorption spectrometer

根据光学系统光路需要, 设计了太阳挡板活动部件, 该部件具备遮挡和打开太阳光光谱定标的窗口的功能; 设计了用于太阳光光谱定标和卤素灯探测器自检的漫反射板活动部件; 设计了用于切换对地观测光路和太阳光光谱定标光路 (或卤素灯探测器自检光路) 的光路切换活动部件。

### 2.1 太阳挡板活动部件

太阳挡板活动部件是通过步进电机驱动切换太阳挡板, 实现遮挡、打开太阳光入射孔的功能, 太阳光入射孔设计在光学箱体侧壁上。将太阳挡板活动部件与光路切换组件一起安装在转动部件安装板上, 再固定安装在光学箱体侧壁上。转动部件安装板的设计可以保证活动部件装配、测试基准与安装基准的统一。

当光谱仪工作在对地观测模式或卤素灯探测器自检模式时, 太阳挡板将光学箱体上的太阳光入射孔遮

挡; 当光谱仪工作在太阳光光谱定标模式时, 太阳挡板旋转不遮挡太阳光入射孔位置, 太阳挡板活动部件模型爆炸图和装配示意图如图 2、图 3 所示。

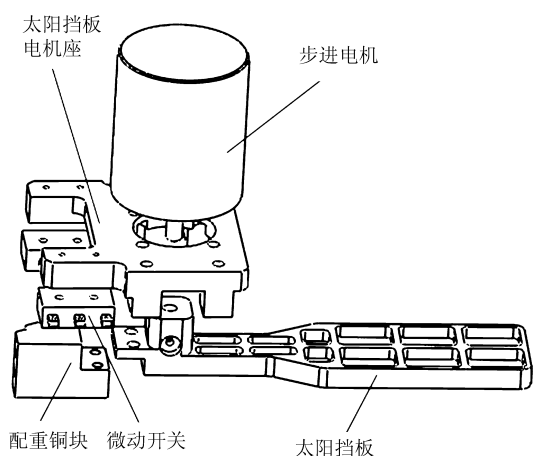


图 2 太阳挡板转动部件模型爆炸图

Fig.2 Exploded view model of the solar baffle moving parts

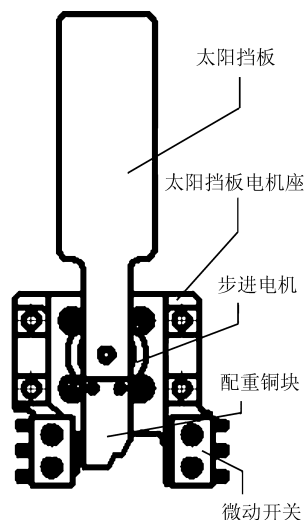


图 3 太阳挡板转动部件装配示意图

Fig.3 A schematic view of the assembly of the solar baffle moving parts

### 2.2 光路切换活动部件

光路切换镜安装在光路切换镜安装挡板上, 由电机驱动光路切换镜安装挡板实现光路切换镜切换功能。光路切换部件安装在光学箱体侧壁上(活动部件安装板)。当光谱仪工作在对地观测模式时, 凹面反射镜转到主光路以外位置; 当光谱仪工作在太阳光光谱定标模式或卤素灯探测器自检模式时, 光路切换反射镜转动入主光路, 光路切换镜安装挡板将来自主镜的地球光遮挡, 光路切换反射镜将来自漫射板组件的漫射光反射到次镜上, 实现后续测量功能。光路切换转动部件模型爆炸图和装配示意图如图 4、图 5 所示。

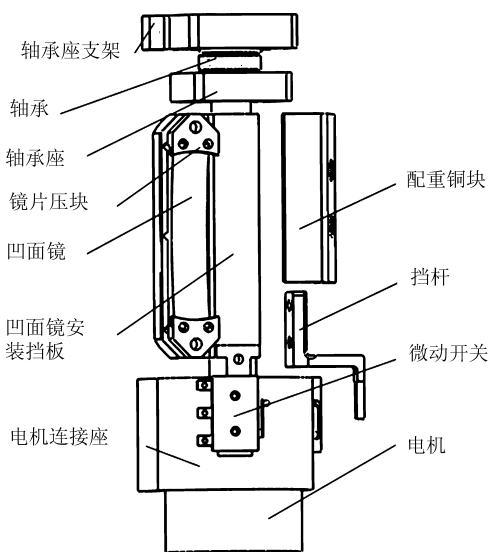


图 4 光路切换转动部件模型爆炸图

Fig.4 Exploded view model of the optical road switching moving parts

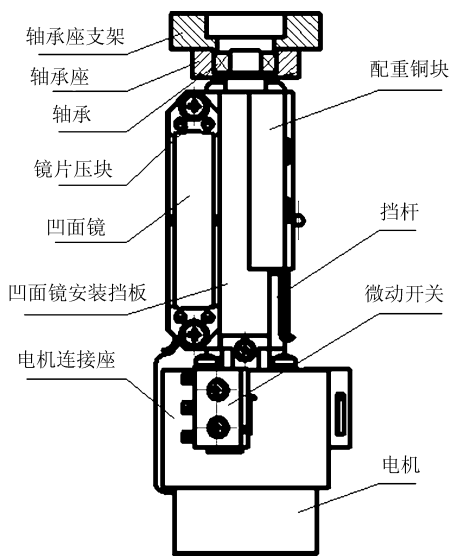


图 5 光路切换转动部件装配示意图

Fig.5 A schematic view of the assembly of the optical road switching moving parts

### 2.3 漫反射板活动部件

漫反射板活动部件上安装有石英漫透射板, 用于卤素灯探测器自检模式时卤素灯漫透射; 还安装有铝漫反射板和石英漫反射板, 用于太阳光光谱定标模式是太阳光照射后产生漫射光。三块漫反(透)射板安装在漫反射板座上, 再由步进电机带动漫反射板座转动。漫反射板活动部件模型爆炸图和装配示意图如图 6、图 7 所示。

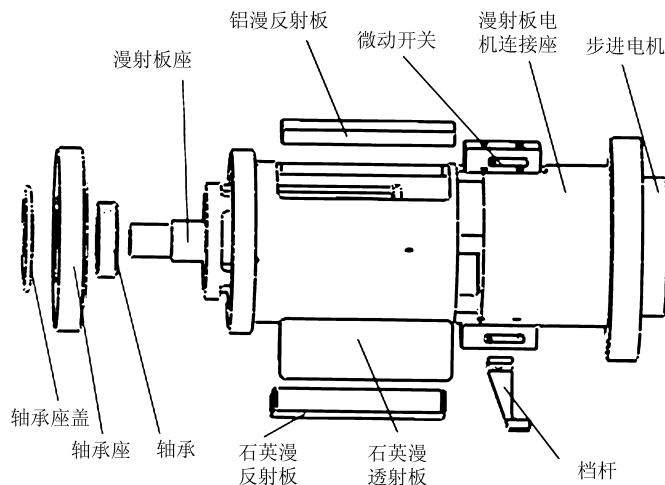


图 6 漫射板切换组件结构图

Fig.6 Exploded view model of the diffuser plate calibration moving parts

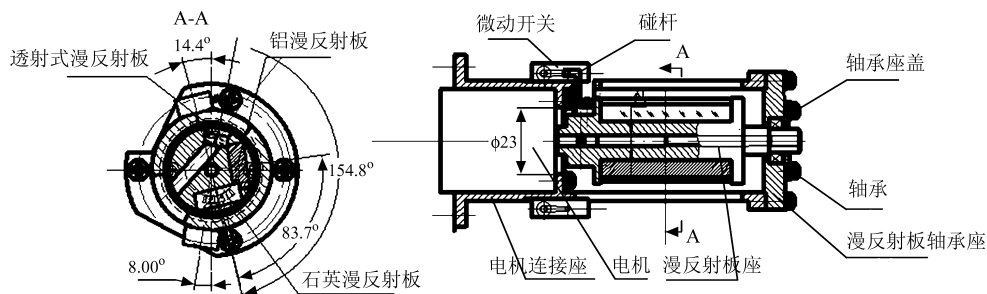


图 7 漫反射体部件模装图

Fig.7 A schematic view of the assembly of the diffuser plate calibration moving parts

## 3 旋转轴设计

依据以往空间载荷的研制经验, 轴与其安装结构的热变形不一致导致轴系受力异常, 会造成空间转动机构故障。三个活动部件都安装在光学箱体内, 光学箱体温度受控, 根据热平衡试验结果, 该温度保持在 1~20 °C 之间; 在材料的选择上, 轴与其支承结构尽量选择同种或线膨胀系数接近的材料。

活动部件中, 旋转轴选用钛合金 TC4 材料, TC4 材料具有优良的力学性能和工艺性能, 能够满足零件强度、刚度、耐磨性及制造工艺等方面的要求。钛合金材料与镜片材料、轴承的内外圈材料具有良好的匹配性, 可有效减少由于温度变化产生的结构变形量对活动部件、光学元件、轴承带来的不利影响<sup>[1]</sup>。

### 3.1 太阳挡板

太阳挡板由步进电机直接驱动, 通过 M2 螺钉、弹垫、平垫、螺母与电机轴紧固。考虑该零件无热控

措施保护, 会受到太阳光直射, 该零件选用碳纤维材料。碳纤维材料具有很好的力学性能, 包括较高的高温和低温力学性能, 抗疲劳及耐腐蚀性能均好, 并且具有较高的比强度和比模量<sup>[2]</sup>。

结构设计中, 对该零件进行了有限元热分析<sup>[3-4]</sup>, 为结构设计提供分析验证。根据光谱仪的热控温度分布结果, 太阳挡板组件的温度变化范围为 0~20 ℃。由于热真空试验条件中试验温度为最高 / 最低温度 ±10 ℃, 因此对太阳挡板部件进行了热分析, 将挡板与电机轴连接孔设为固定约束, 将 -10 ℃和 30 ℃作为稳态热条件进行分析, 得到了两个温度条件下的变形图, 如图 8 所示。

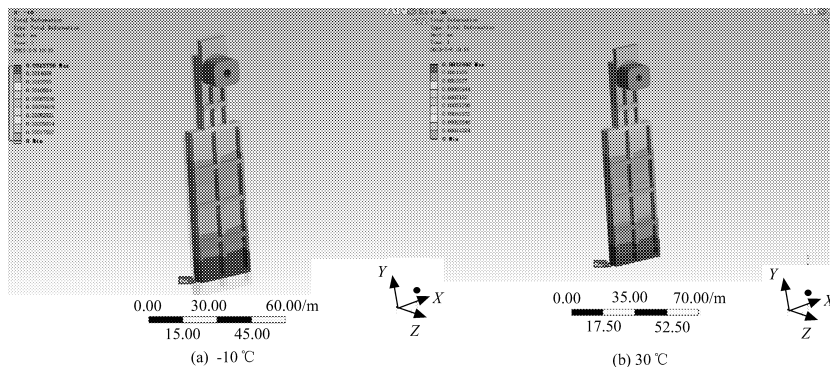


图 8 太阳挡板热载荷合位移变形图

Fig.8 Displacement and deformation with thermal load of the solar baffle

### 3.2 凹面镜安装挡板

凹面镜安装挡板由步进电机直接驱动, 通过 M2 螺钉、弹垫、平垫、螺母与电机轴紧固。该零件上面安装有光学镜片, 并且两端分别与电机轴和轴承连接, 材料也选用钛合金 TC4。对光路切换镜部件进行了热分析, 将部件与电机轴连接孔设为固定约束, 分别将 -10 ℃和 30 ℃作为稳态热条件进行分析, 得到了两温度条件下的变形图, 如图 8 所示。

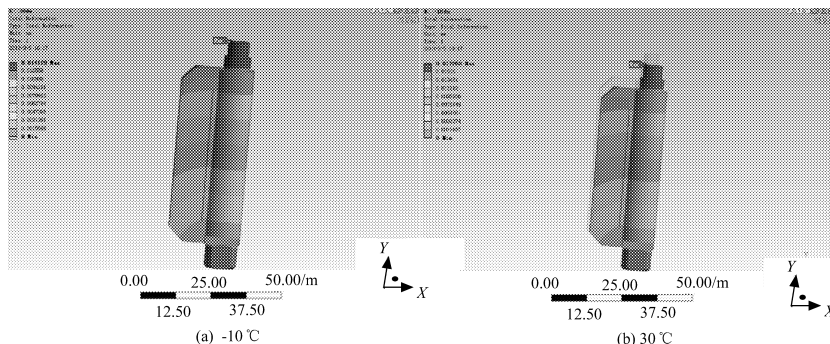


图 9 凹面镜安装挡板热载荷合位移变形图

Fig.9 Displacement and deformation with thermal load of the concave mirror mounting baffle

### 3.3 漫射板座

漫射板座由步进电机直接驱动, 通过 M2 螺钉、弹垫、平垫、螺母与电机轴紧固。该零件上面安装有光学镜片, 并且两端分别与电机轴和轴承连接, 材料也选用钛合金 TC4。对光路切换镜部件进行了热分析, 将部件与电机轴连接孔设为固定约束, 分别将 -10 ℃和 30 ℃作为稳态热条件进行分析, 得到了两温度条件下的变形图, 如图 9 所示。

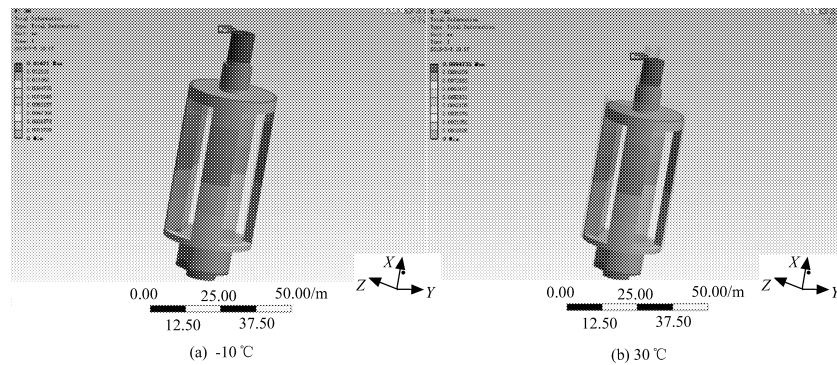


图 10 漫反射板座热载荷合位移变形图

Fig.10 Displacement and deformation with thermal load of the diffusely reflecting plate seat

## 4 结 论

星载仪器中的活动部件是整个仪器中制约仪器寿命和可靠性的关键部件，设计中需要考虑活动部件的环境适应性、可靠性，最终需要通过实验验证是否可以满足寿命要求。

### 参考文献：

- [1] Lou Guantao. Research and application status and development direction of titanium alloy [J]. *Progress in titanium industry*, 2003, 20(2): 9-13(in Chinese).  
娄贯涛. 钛合金的研究应用现状及其发展方向 [J]. 钛工业进展, 2003, 20(2): 9-13.
- [2] Li Wei, Guo Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 201-211(in Chinese).  
李 威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用 [J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-211.
- [3] Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu. *Introduction to Finite Elements in Engineering* [M]. translated by Zeng Pan, 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 8. (in Chinese).  
Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu. 工程中的有限元方法 [M]. 曾 攀, 译. 第 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2006: 8.
- [4] Zhang Hongwu, Guan Zhenqun, Li Yunpeng, et al. *FEM Analysis and the Technology of CAE* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 70-72(in Chinese).  
张洪武, 关振群, 李云鹏, 等. 有限元分析与 CAE 技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 70-72.