

宽谱段高分辨率低温成像光谱仪制冷系统设计

张月, 张琢, 苏云, 郑国宪

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 宽谱段高分辨率低温成像光谱仪可对星际矿物成分、大气成分进行有效识别, 但由于深空探测目标温度很低, 为了抑制光谱仪自身噪声, 提高分辨率, 需要红外谱段工作在几十 K 的低温环境下, 这对制冷系统设计提出了严峻的挑战。在调研国外用于金星、彗星探测的可见/红外成像光谱仪(VIRTIS)制冷技术的基础上, 对宽谱段高分辨率低温成像光谱仪制冷系统进行了设计与仿真分析, 仿真结果显示 M 和 H 探测器部件温度梯度非常小, 约为 4×10^{-2} K; 探测器工作温度 ≤ 70 K; M 和 H 部件壳体温度为 130 ± 1 K; 框架温度为 200 ± 1 K, 符合制冷系统设计的要求。研究成果对在深空探测领域具有通用性的低温高光谱成像系统中制冷系统的研制具有一定的指导意义。

关键词: 成像光谱仪; 宽谱段; 高分辨率; 制冷系统

中图分类号: V423.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0323001

Cooling system design for cryogenic imaging spectrometer with wide spectrum and high resolution

Zhang Yue, Zhang Zhuo, Su Yun, Zheng Guoxian

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Cryogenic imaging spectrometer with wide spectrum and high resolution can be used to detect interplanetary mineral component and atmospheric composition. Due to the temperature of detected target in space exploration is very low, the infrared spectra in imaging spectrometer has to work in cryogenic environment to limit the noise from the imaging spectrometer itself to promote its spectral resolution. That is a challenge for the design of cooling system. Based on survey results about the cooling system of VIRTIS for Venus and Comet, the cooling system for cryogenic imaging spectrometer with wide spectrum and high resolution was designed and simulated. The simulation results show the temperature gradient of M and H detector is only 4×10^{-2} K. Detector temperature is less than 70 K. The shell temperature is 130 ± 1 K and frame temperature is 200 ± 1 K. All the results demonstrate the designed cooling system meets the design requirements. The results are significant for cooling system design in cryogenic imaging spectrometer, which is used widely in space exploration.

Key words: imaging spectrometer; wide spectrum; high resolution; cooling system

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-09

作者简介: 张月(1984-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事光学遥感器热控方面的研究。Email: yue3723302@126.com

0 引言

在深空探测中,为了提高对星际矿物成分、大气成分的识别能力,需要光谱仪具备宽谱段探测和高光谱分辨率成像能力,如金星探测器(Venus Express)和彗星探测器(Rosetta)上搭载的可见/红外成像光谱仪(VIRTIS),工作谱段为 0.25~5.03 μm ,光谱分辨率分别为 2 nm(0.25~1.0 μm)、10 nm(0.95~5 μm)、3 nm(2.03~5.03 μm)^[1];火星探测器(Mars Express)上搭载的可见/红外矿物制图光谱仪(OMEGA)工作谱段为 0.35~5.09 μm ,352 个通道,光谱分辨率分别为 7.5 nm(0.35~1.05 μm)、14 nm(0.93~2.69 μm)、23 nm(2.52~5.09 μm)^[2]。

中波红外谱段的光谱应用可以极大提升对矿物的识别能力,但由于深空探测目标的温度大部分都很低,信号强度弱,中波红外光谱仪自身辐射会成为最主要的噪声,从而制约光谱仪高光谱分辨率成像能力,影响光谱仪性能提升。采用低温光学技术可以减小光谱仪自身噪声、获得高信噪比,从而在更宽的谱段范围内获得更高的光谱分辨率,得到更高精度的物质组成图谱。因此开展基于低温光学技术的超高光谱成像技术研究具有必要性^[3]。

VIRTIS 光谱仪 0.25~1 μm 谱段工作温度要求为 155 K,0.95~5 μm 和 2.03~5.03 μm 谱段的工作温度要求为 70~75 K^[1]。OMEGA 光谱仪 2.52~5.09 μm 谱段的工作温度要求为 77 K^[2],这对制冷系统的设计提出了挑战。

文中在调研国外 VIRTIS 光谱仪低温制冷技术的基础上,通过对宽谱段高分辨率低温成像光谱仪工作热环境分析以及不同工作温度部分热负荷分析,进行了低温制冷系统设计,给出了低温制冷系统设计方案,并通过仿真分析确定了宽谱段高分辨率低温成像光谱仪低温制冷系统设计结果的正确性。

1 国外相关技术现状

2004 年和 2005 年,欧空局分别发射了 Rosetta 和 Venus Express,其上搭载了一台可见/红外成像光谱仪(Visible Infrared Thermal Imaging Spectrometer, VIRTIS)。VIRTIS 包括 VIRTIS-M(VIRTIS-Mapping)和 VIRTIS-H(VIRTIS-High)两个通道,其中

VIRTIS-M 用于中光谱分辨率成像,VIRTIS-H 用于高分辨率光谱分析,系统指标如表 1 所示。

表 1 VIRTIS 指标参数

Tab.1 Parameters of VIRTIS

Parameter	VIRTIS-M		VIRTIS-H
	VIS	IR	IR
Spectral range/ μm	0.25~1.0	0.95~5	2.03~5.03
Spectral resolution/nm	~2	~10	~3
Working temperature/K	155	70~75	70~75

为减少自身辐射噪声,VIRTIS 红外焦平面必须被冷却到 70 K 左右,其制冷系统如图 1 所示,采用的制冷技术如下。

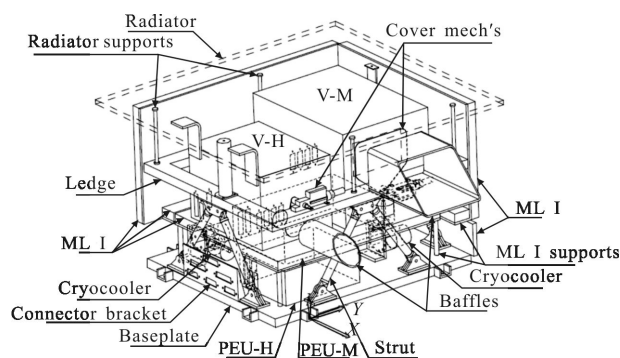


图 1 VIRTIS 制冷系统

Fig.1 Cooling system of VIRTIS

(1) VIRTIS 利用四对钛支架将光学舱与卫星热隔离,并利用隔热材料包裹光学舱,减少辐射换热。

(2) 光学舱主要用于为 VIRTIS 光学子系统提供机械支撑,并维持系统工作温度 175 K 以及焦面工作温度 70 K。光学舱分为上下两个功能区,上部分布置两个冷盒,用于存放 VIRTIS-M 和 VIRTIS-H,下部分用于放置主动制冷子系统(一对闭环式斯特林制冷机),冷指穿过上下部分之间的隔热板对 VIRTIS-M 和 VIRTIS-H 进行制冷。

(3) 冷盒上方安装了 0.34 m^2 辐冷器,可向冷空间散发 2 W 左右的热量。冷盒内预留一部分空间,以保证足够的辐射散热面积^[4-5]。

(4) 光学舱下方的基板上装有制冷机和其他电子设备,基板必须耗散掉 15 W 热量,其中约 13 W 传

导入卫星, 剩余的 2 W 通过处于低温的仪器直接辐射掉。

文中借鉴 VIRTIS 光谱仪低温制冷系统的设计思想, 针对宽谱段高分辨率低温成像光谱仪系统的特点进行了低温制冷系统设计。

2 热负荷分析

2.1 宽谱段高分辨低温光谱仪工作环境

宽谱段高分辨率低温光谱仪可以在较宽谱段内获得更高的空间分辨率和光谱分辨率, 可对火星土壤层特性、表面物质成分、中性大气主要成分和垂直结构等进行探测。一个火星年中, 火星附近的太阳辐射强度变化约±19%。火星的反照率在赤道附近约为 0.25~0.28, 随着纬度增加, 反照率增大。火星表面最高温度为 27℃, 最低温度为-123℃, 平均温度为-62℃。火星表面存在大气, 且火星自转较快(每个火星日约 24h)。因此, 火星热环境模型可采用类似地球热环境的模型: 即平均红外辐射强度为 589 W/m² (NASA 热控手册), 平均反照率约为 0.08~0.4 的球体^[6]。

对于不同的工作环境, 宽谱段高分辨率低温光谱仪的工作温度稍有差别, 但均采用被动制冷, 且都在 190 K 以下; 红外探测器均采用主动制冷, 工作温度较低。

2.2 宽谱段高分辨低温光谱仪温度要求

宽谱段高分辨低温光谱仪结构示意图如图 2 所示。与 VIRTIS 结构相似, 分为 M 和 H 两个通道, 红外工作谱段分别为 0.95~5 μm 和 2.03~5.03 μm, 光谱分辨率分别为 10 nm 和 3 nm^[7]。

如图 2 所示, 低温光谱仪结构主要包括基座、框架、八个框架支撑、七个框架制冷管、四个辐射屏支撑、三个 M 部件支撑、M 部件、M 部件的制冷管、H 部件、H 部件的制冷管以及三个 H 部件的支撑。

整个低温光谱仪安装在温度为 300 K 的基座上, 基座上安装了 200 K 的钛框架, 框架外表面有铜条, 用于延长制冷管。8 根钛管组成的支撑将温度水平为 200 K 的框架连接到 300 K 的基座上。

光学部件 M 和 H 温度水平为 130 K, 各借助三个支撑安装到框架上。M 部件内部红外光电探测器温度水平为 70 K, H 部件内部红外光电探测器温度水平也为 70 K。具体制冷要求如表 2 所示。

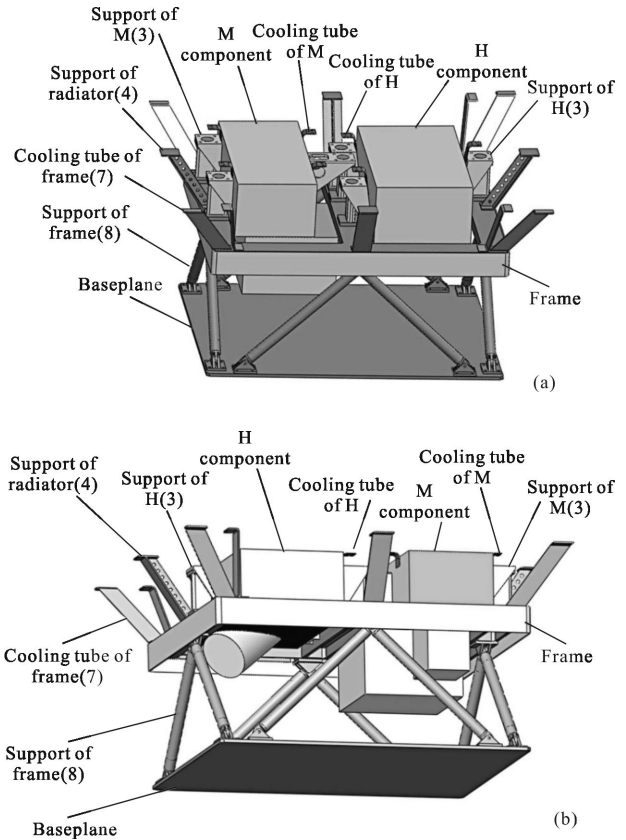


图 2 低温光谱仪结构示意图

Fig.2 Structural schematic diagram of cryogenic imaging spectrometer

表 2 低温光谱仪制冷系统设计要求

Tab.2 Cooling requirements of cryogenic imaging spectrometer

	M channel		H channel		M/H box
	Detector	Optical lens	Detector	Optical lens	
Working temperature	≤ 70 K	130 K	≤ 70 K	130 K	200 K

2.3 70 K 热负荷分析

M 和 H 探测器被制冷到 70 K, 主要热流有来自 130 K 环境的辐射热流、通过支撑结构导入的热流、M 和 H 探测器自身发散的热流以及线路工作散出的热流。

70 K 温度下主要的热负荷组成如下:

$$Q_{70K} = Q_{1,70K} + Q_{2,70K} + Q_{3,70K} + Q_{4,70K} \quad (1)$$

式中: $Q_{1,70K}$ 为来自 130 K 环境的辐射热流; $Q_{2,70K}$ 为来自支撑结构的热流; $Q_{3,70K}$ 为 H/M 探测器自身发热; $Q_{4,70K}$ 为来自工作线路的热流。

来自 130 K 环境的辐射热流 $Q_{1,70\text{K}}$ 用下式计算:

$$Q_{1,70\text{K}} = \varepsilon \sigma F_{M/H} (T_{130\text{K}}^4 - T_{70\text{K}}^4) \quad (2)$$

式中: ε 为发射率; $T_{130\text{K}}$ 和 $T_{70\text{K}}$ 为环境温度和制冷器件温度, σ 为斯忒潘-玻耳兹曼常数; $F_{M/H}$ 为 M 和 H 探测器的面积。 $Q_{1,70\text{K}}$ 约为 18.7 mW, M 和 H 组件两个共为 37.4 mW。

来自支撑结构的热流 $Q_{2,70\text{K}}$ 用下式计算:

$$Q_{2,70\text{K},M} = 3(T_{B,O,M} - T_{B,I,M}) / 2R_B \quad (3)$$

$$Q_{2,70\text{K},H} = 3(T_{B,O,M} - T_{B,I,M}) / (R_B + R_{CT}) \quad (4)$$

式中: $T_{B,O}$ 、 $T_{B,I}$ 分别为轴承内部和外部温度; R_B 为轴承热阻。 R_B 的计算公式为:

$$R_B = (2d_m 10^4) / (\pi \lambda_B (D-d) B K_m) \quad (5)$$

式中: d_m 为钢珠直径; d 为轴承直径; D 为轴承外径; B 为轴承宽度; K_m 为钢珠数量; λ_B 为钢珠材料的导热系数。

M 有三个支撑, 每个支撑有两个轴承, 所以由公式(3)可得 $Q_{2,70\text{K},M} = 11.2 \text{ mW}$ 。

用于 H 系统光电探测器的支撑有三个支柱, 一个是贯穿轴承, 其他的是特氟纶衬套, 所以 $Q_{2,70\text{K},H}$ 用公式(4)计算。 $R_{CT} = L_{CT} \lambda_{CT} / F_{CT}$ 为特氟纶衬套热阻, λ_{CT} 为支撑材料的导热系数, L_{CT} 为支撑长度, F_{CT} 为支撑截面积。 $Q_{2,70\text{K},H} = 22.4 \text{ mW}$ 。

M/H 探测器自身放热量约为 $Q_{3,70\text{K}} = 100 \text{ mW}$, 线路热流 $Q_{4,70\text{K}} = 30 \text{ mW}$ 。

由公式(1)可得 M 系统的全部热负载约为 160 mW; H 系统的全部热负载约为 170 mW。

考虑到可能的计算误差, 在 70 K 水平, 用于每个探测器制冷系统的制冷能力应不小于 200 mW。

2.4 130 K 热负荷分析

M 和 H 光学组件制冷到 130 K, 主要热流有来自 200 K 环境的辐射热流、通过隔热层进入的热流、通过支撑结构导入的热流、M 系统自身热流、以及线路传输热流。

130 K 温度下主要的热负荷组成为:

$$Q_{130\text{K}} = Q_{1,130\text{K}} + Q_{2,130\text{K}} + Q_{3,130\text{K}} + Q_{4,130\text{K}} + Q_{5,130\text{K}} \quad (6)$$

式中: $Q_{1,130\text{K}}$ 为来自 200 K 环境的辐射热流; $Q_{2,130\text{K}}$ 为来自隔热层的热流; $Q_{3,130\text{K}}$ 为来自支撑结构的热流; $Q_{4,130\text{K}}$ 为 H/M 系统自身放热; $Q_{5,130\text{K}}$ 为来自线路的热流。

系统两侧面环境温度为 200 K, 上表面为辐冷板, 来自 200 K 环境的辐射换热用下式计算:

$$Q_{1,130\text{K}} = \varepsilon_1 \sigma F_1 (T_{200\text{K}}^4 - T_{130\text{K}}^4) \quad (7)$$

式中: F_1 为 H 和 M 系统光学组件面积, 则 $Q_{1,130\text{K}} = 0.56 \text{ W}$, H 和 M 两个系统总和为 1.125 W。

通过隔热层的热流的计算公式为:

$$Q_{2,130\text{K}} = \lambda_2 F_2 (T_{2,i} - T_{2,x}) / \delta_2 \quad (8)$$

式中: λ_2 为隔热层导热系数; F_2 为下表面面积或侧面积为隔热层面积; $T_{2,i}$ 和 $T_{2,x}$ 为隔热层两侧温度; δ_2 为隔热层厚度。

通过上下两个隔热层进入的热流约为 40 mW, 通过侧面进入的热流约为 134 mW, 单个系统约为 170 mW, H 和 M 系统一共为 340 mW。

通过支撑结构的导热热流计算公式为:

$$Q_{3,130\text{K}} = \lambda_3 F_3 (T_{3,t} - T_{3,x}) / L_3 \quad (9)$$

式中: λ_3 为支撑材料的导热系数; F_3 为支撑面积(M 和 H 系统各有三个支撑); $T_{3,t}$ 和 $T_{3,x}$ 为支撑热端和冷端的温度; L_3 为支撑结构长度。计算每个系统支撑的热流为 $Q_{3,130\text{K}} = 95 \text{ mW}$, 两个系统为 190 mW。

系统 M 自身产生的放热为 $Q_{4,130\text{K}} = 50 \text{ mW}$, 系统 H 自身产生的热流为 20 mW; 每个系统线路产生的热流为 $Q_{5,130\text{K}} = 30 \text{ mW}$, 两个系统就是 60 mW。

130 K 水平下全部的热负载为: $1.125 \text{ W} + 340 \text{ mW} + 190 \text{ mW} + 50 \text{ mW} + 20 \text{ mW} + 60 \text{ mW} \approx 1800 \text{ mW}$ 。

这些热流可以近似地平均到 M 和 H 系统上。考虑到可能的计算误差, 在 130 K 温度水平下, 用于光学组件制冷系统的制冷能力应不小于 2 W。

2.5 200 K 热负荷分析

M/H 外壳制冷到 200 K, 主要热流有来自钛支管的导入热流、通过隔热层面进入的热流、M 和 H 系统支撑结构的逆向热流、以及 300 K 环境的辐射热流。

钛支撑结构热流:

$$Q_{Ti} = \lambda_{Ti} F_{Ti} (T_{Ti,H} - T_{Ti,L}) / L_{Ti} \quad (10)$$

式中: λ_{Ti} 为钛支管的导热系数; L_{Ti} 为钛支管的长度; $T_{Ti,H}$ 为钛支管热端温度; $T_{Ti,L}$ 为钛支管冷端温度; F_{Ti} 为钛支管截面面积。八个钛支管的总热流为 $Q_{Ti} = 2.36 \text{ W}$ 。

通过隔热层进入的热流为 70 mW, M 和 H 系统支撑结构的逆向热流为 250 mW, 300 K 环境的辐射热流为 1 W, 具体计算方法可参考 2.2 节和 2.3 节。

因此, 在 200 K 水平的全部热流大约为 2.36 W-

70 mW–250 mW–1 W ≈ 1 W。

3 制冷系统设计

3.1 制冷系统设计难点

宽谱段高分辨率低温光谱仪制冷系统设计难点如下:(1) 70 K@200 mW 难以实现,70 K 工作温度与四周环境存在辐射换热、结构导热,需要加强隔热;(2) 系统热负荷较大,所需散热面与可用散热面存在较大差距,需要进行合理优化。

3.2 制冷系统方案

根据低温光谱仪成像特点,结合第 1 节调研结果和第 2 节热负荷分析结果,文中提出了以下制冷系统方案:(1) 70 K 温度水平依靠高性能低温制冷机来实现;(2) 130 K 和 200 K 温度水平靠被动辐射制冷来实现;(3) 尽量利用较小的散热面面积满足散热需求。

3.3 70 K 制冷系统设计

为保证 70 K 温度水平,当热负载为 200 mW 时,采用与 VIRTIS 相同的低温制冷器 RICOR K508^[8]。RICOR K508 是一种非常可靠的回转式低温制冷器,适合在空间飞行条件下工作,且工作寿命不小于 10 000 h,并已在轨应用。

低温制冷器冷指和探测器外壳之间的热连接借助冷管来实现,冷管两端的温度分别为红外光电探测器的工作温度和低温制冷器的出口温度。冷管截面积可用下式计算:

$$F_{LG,70K} = \frac{Q_{LG,70K} L_{LG,70K}}{\lambda_{LG,70K} \Delta T_{LG,70K}} \quad (11)$$

式中: $Q_{LG,70K}$ 为最大热流; $\lambda_{LG,70K}$ 为冷管材料的导热系数; $F_{LG,70K}$ 为冷管的截面积; $\Delta T_{LG,70K}$ 为冷管两端的温差; $L_{LG,70K}$ 为冷管的长度。

当热流为 200 mW 时,允许温差 1 K、冷管长度 60 mm,计算所需优质铜片的截面积不小于 24 mm²;当温差 0.5 K 时,优质铜片的截面积不小于 48 mm²。

低温制冷器的制冷效率约为 4%,两个制冷机都达到 200 mW 的制冷能力时,全部排热功率应有 10 W,则所需的散热面积应为 0.04 m²。

3.4 130 K 和 200 K 制冷系统设计

根据第 2 节的计算结果,在 130 K 温度水平时被动系统的制冷能力应该不小于 2 W,在 200 K 温度水平时被动系统制冷能力应该不小于 1 W。

散热面积计算公式为:

$$S_{SRQ} = \frac{Q_{SRQ}}{\epsilon_{SRQ} \sigma T_{SRQ}^4} \quad (12)$$

式中, S_{SRQ} 为散热面面积; T_{SRQ} 为散热面温度; Q_{SRQ} 为散热量; ϵ_{SRQ} 为发射率; σ 为斯忒潘-玻耳兹曼常数。考虑制冷器单位制冷能力与工作温度的关系(如图 3 所示^[9]),散热面的面积在 130 K 水平约为 0.24 m²,在 200 K 水平约为 0.12 m²。

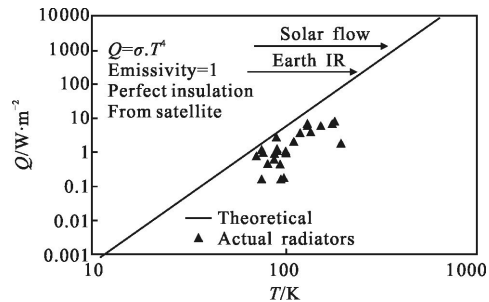


图 3 制冷器的单位制冷能力与工作温度的关系

Fig.3 Relationship between cooling capability of cooling engine and working temperature

利用具有优良导热性能的冷管通过散热面排出来自光学系统 M 和 H 的热流,计算冷管所用公式为:

$$F_{LG} = \frac{Q_{LG} L_{LG}}{\lambda_{LG} \Delta T_{LG}} \quad (13)$$

式中: Q_{LG} 为最大热流; λ_{LG} 为冷管材料的导热系数; F_{LG} 为冷管的截面积; ΔT_{LG} 为冷管两端之间的温差; L_{LG} 为冷管的长度。

当热流为 2 W 时,用允许的温差 1 K、冷管的长度 50 mm 以及优质铜片计算在 130 K 水平所需的所有冷管截面积应不小于 200 mm²;当冷管长度为 20 mm 时,冷管截面积应不小于 80 mm²。

在 200 K 水平做类似的计算,当冷管长度为 100 mm 时截面积应不小于 200 mm²。

4 仿真分析

文中利用 ANSYS 13.0 软件开展制冷系统仿真分析,以验证制冷系统设计结果,满足设计要求。

由于低温光谱仪的实际结构较为复杂,计算中如果采用实际的实体模型将会使得计算中需要考虑的因素增多。考虑到计算机的计算能力以及计算模型与真实情况的符合程度,在计算前需要对结构作

出合理的简化, 故作出如下假设:(1) 忽略焦面探测器内部细小结构件对模型导热、辐射遮挡的影响, 将小部件的局部特征简化处理;(2) 将 M 和 H 外形简化为方形壳体。

在仿真分析中, 根据第 2 节确定的热负荷和第 3 节确定的制冷管长度、散热面面积等, 利用 ANSYS 13.0 软件中的热分析模块设定成像系统的辐射边界条件、组件间的热耦合等, 选定瞬态积分控制方法及计算时间, 对低温成像光谱仪制冷系统进行详细的仿真分析。

4.1 70 K 仿真计算结果

70 K 水平计算用模型如图 4 所示, 其中 1 为探测器部件、2 为带器件的探测器、3 为低温制冷器的制冷管、4 为支撑(三个)、5 为带导线的回路。计算所用原始数据如表 3 所示。

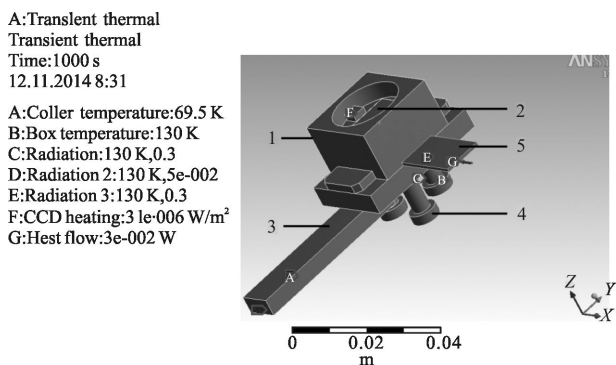


图 4 探测器热计算模型

Fig.4 Thermal simulation model for detector

表 3 仿真条件

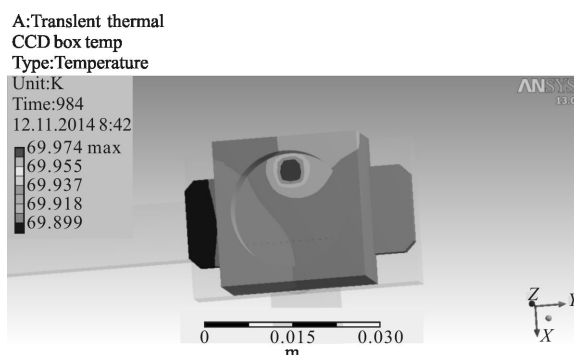
Tab.3 Simulation conditions

Requirements	Parameters
Cooler temperature	69.5 K
Box temperature	130 K
Radiation 1	130 K, $\epsilon=0.3$
Radiation 2	130 K, $\epsilon=0.05$
Radiation 3	130 K, $\epsilon=0.3$
CCD heating	$3.1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$
Heat flow	0.03 W

探测器部件 1 内部放置探测器 2, 探测器温度应不超过 70 K, 温度梯度不超过 0.5 K。在指定发射率为 0.3 的情况下, 辐射热流从 130 K 环境流向所有表面。支撑 4 放置在 130 K 部件上, 将热流传导给探

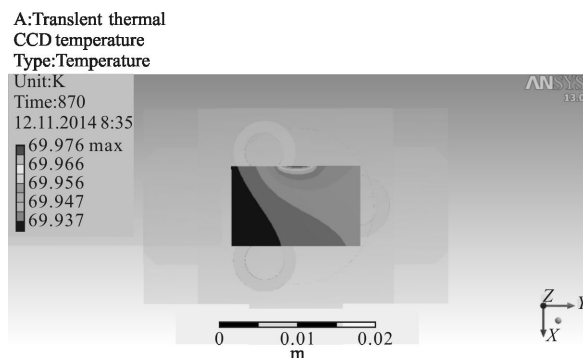
测器。沿导线回路 5 的热流设定为 30 mW, 探测器自身放热 100 mW。通过制冷管进行冷却, 制冷管末端(与低温制冷器冷指连接)温度设定为 69.5 K。制冷管表面的发射率设定为 0.05(用冷屏包围)。

仿真计算结果如图 5 所示。图 5(a)中制冷管触点温度为 69.89 K, 探测器集中发热处温度为 69.974 K。图 5(b)中探测器的温度从发热处到最接近制冷管处逐渐变小。温度梯度约为 $4 \times 10^{-2} \text{ K}$, 平均温度略微低于 70 K。仿真结果显示, 沿探测器部件和探测器器件的温度梯度非常小, 器件的工作温度符合设计要求($\leq 70 \text{ K}$)。



(a) 主视图

(a) Front view



(b) 侧视图

(b) Side view

图 5 探测器部件中的温度分布

Fig.5 Temperature distribution of detector

4.2 130 K 仿真计算结果

130 K 水平包括两个光学部件(M 和 H), 这两个部件用被动辐射系统冷却, 该系统用制冷管道与部件连接。

M 部件仿真结果如图 6 所示, M 部件与辐冷器

制冷管连接处温度为 128.16 K, M 部件壳体距离制冷管最远部分温度为 130.16 K。

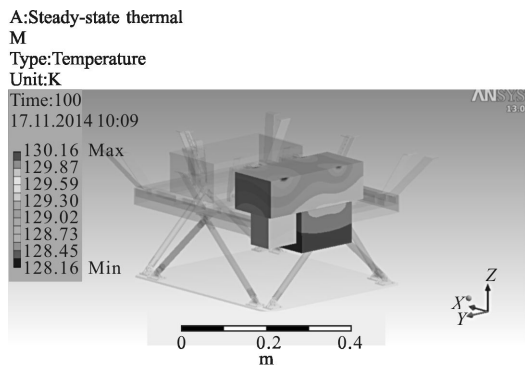


图 6 M 部件温度分布

Fig.6 Temperature distribution of M

H 部件仿真结果如图 7 所示,蓝色为 H 部件与辐冷器制冷管连接处,温度为 130.71 K,红色为 H 部件壳体距离制冷管最远部分,温度为 131.71 K。

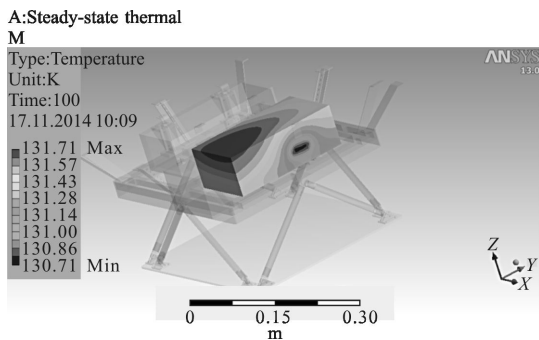


图 7 H 部件温度分布

Fig.7 Temperature distribution of H

4.3 200 K 仿真计算结果

200 K 水平包括仪器框架、框架用辐冷器制冷。仿真计算结果如图 8 所示,框架与制冷管连接处

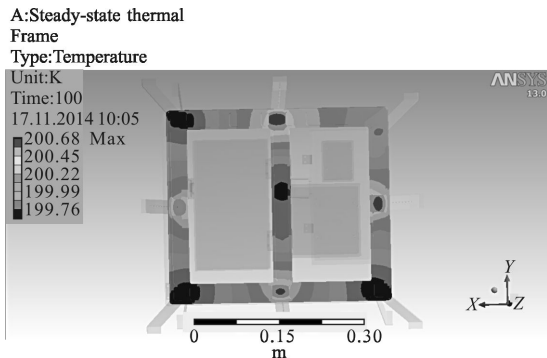


图 8 200 K 水平温度分布

Fig.8 Temperature distribution of 200 K

温度最低为 199.64 K, 框架支撑位置温度为 200.45~200.68 K。

4.4 130 K 与 200 K 连接部分仿真计算结果

图 9 所示为低温成像光谱仪整体温度分布,基板温度为 300K, M 和 H 部件温度为 130K, 框架温度为 200 K。

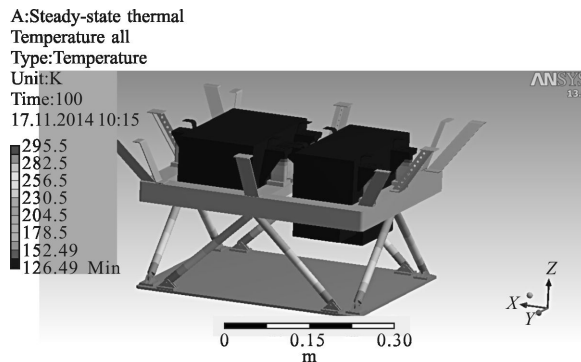


图 9 低温成像光谱仪整体温度分布

Fig.9 Temperature distribution of cryogenic imaging spectrometer

图 10 所示为钛支管从 200~300K 的温度分布。

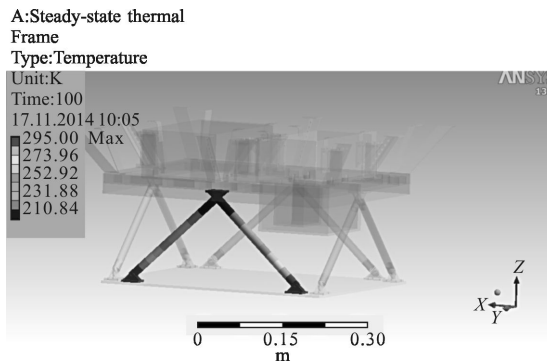


图 10 沿钛管支架的温度分布

Fig.10 Temperature distribution of Ti tube

从仿真分析结果可见,沿部件的温度梯度在 ± 1 K 范围内, 而平均工作温度符合 200 ± 1 K 和 130 ± 1 K 的设计要求。在后续原理样机阶段,通过真空低温试验可对制冷系统设计结果进行验证。

5 结论

文中解决了宽谱段高分辨率低温光谱仪制冷系统制冷温度低、热负荷较大的难题。通过数学分析确定了低温成像光谱仪分别在 70、130、200 K 温度的热负荷; 利用热负荷计算结果对制冷系统进行了初步设计, 并建立仿真模型; 利用 ANSYS 13.0 软件对

制冷系统设计结果进行仿真分析。仿真结果显示,探测器部件温度梯度非常小,探测器工作温度 $\leq 70\text{ K}$,M和H部件壳体温度为 $130\pm 1\text{ K}$,框架温度为 $200\pm 1\text{ K}$,符合制冷系统设计要求,充分说明制冷系统设计结果的正确性。所设计的制冷系统可有效抑制低温光谱仪自身热辐射引入的噪声,提高光谱探测能力。同时,可为基于低温光学的超高光谱成像技术研究提供制冷技术支持,为国内在火星、金星、小行星等系统矿物的探测能力提升奠定技术基础。

参考文献:

- [1] Coradini A, Capaccioni F, Drossart P, et al. VIRTIS: An imaging spectrometer for the ROSETTA mission [J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128: 529–559.
- [2] Guillaume Bonello, Jean-Pierre Bibring, Francois Poulet, et al. Visible and infrared spectroscopy of minerals and mixtures with the OMEGA/MARS-EXPRESS instrument [J]. *Planetary and Space Science*, 2004, 52: 133–140.
- [3] Gabriele E, Pierre D, Giuseppe P, et al. Venus atmospheric and surface studies from VIRTIS on Venus Express [C]// *Infrared Remote Sensing and Instrumentation*, SPIE, 2011, 8154: 1190–1193.
- [4] Coradini A, Capaccioni F, Drossart P, et al. VIRTIS: the imaging spectrometer of the ROSETTA mission [J]. *Adv Space Res*, 1999, 24(9): 1095–1104.
- [5] Saggin B, Angrilli F, Debei S, et al. Thermal design of VIRTIS: A thermal mapper for the ROSETTA mission [C]// 48th International Astronautical Congress, 1997.
- [6] Ouyang Ziyuan, Xiao Fugen. The mars and its environment [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29 (6): 591–601. (in Chinese)
欧阳自远,肖福根. 火星及其环境 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29(6): 591–601.
- [7] Ren Qifeng, Shen Mangzuo, Liao Sheng, et al. Design and analysis on dual-temperature zone of cryogenic optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (2): 312–315. (in Chinese)
任栖峰,沈忙作,廖胜,等. 低温光学系统两级温区的设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 312–315.
- [8] Bonsignori R, Coradini A, Drossart P, et al. VIRTIS: visual and infrared imaging spectrometer for the ROSETTA mission [C]//48th International Astronautical Congress, 1997.
- [9] Collaudin B, Rando N. Cryogenics in space: a review of the missions and of the technologies [J]. *Cryogenics*, 2000, 40: 797–819.