

文章编号: 1000-8349(2004)04-0334-10



光学 - 近红外相机 CASCAM 的机械设计

吴建文, 任诗波, 季春宏, 姚永强, 姚大志

(中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008)

摘要: 光学 - 近红外相机 CASCAM (Chinese Academy of Sciences, Camera) 采用光学 CCD 和近红外阵列 HAWAII-1 (HgCdTe Astronomical Wide Area Infrared Imaging) 探测器, 配备兴隆 2.16 m 望远镜可同时进行光学、近红外成像和偏振观测。CASCAM 的机械系统主要包括光学箱、真空箱以及致冷设计。其中光学箱是相机光学系统和探测器的载体, 同时防止来自光学箱外部的红外热辐射; 真空箱位于光学箱外部, 它是整个系统的机械支撑, 保证相机有良好的真空密封性能, 并和真空泵、冷冻机一起构成了相机的致冷系统。

关键词: 天文观测设备与技术; CASCAM; 机械设计; 致冷系统

中图分类号: P111

文献标识码: B

1 引 言

近 20 年来红外探测技术飞速发展, 红外天文观测在天体物理学研究中日益显示出重要作用。为满足我国天文研究发展的迫切需要, 国家“九五”攀登计划项目组于 1998 年提出研制红外相机方案, 以便利用地面望远镜设备开展红外天文观测。红外相机专家组综合考察了天文学课题研究的要求和目前望远镜设备的现状, 确定优先发展红外成像和偏振观测模式, 配备兴隆站 2.16 m 望远镜^[1]进行光学到近红外的天文观测。

红外相机 CASCAM (Chinese Academy of Sciences, Camera) 的研制工作始于 2001 年 3 月, 它采用近红外阵列 HAWAII-1 (HgCdTe Astronomical Wide Area Infrared Imaging) 和光学 CCD (Charge Coupled Devices) 探测器, 可同时覆盖可见光和近红外波段 (0.4~2.5 μm), 因而在提高观测效率的同时, 将在高精度测光、变源监测和短时标爆发现象等观测课题研究方面发挥重要的作用。本文作为 CASCAM 研制的技术报告之一, 重点介绍相机的机械系统设计, 包括相机系统结构设计、相机系统的真空设计和致冷设计。

CASCAM 的实物如图 1 所示。按功能, 它分为 3 部分: 真空箱、光学箱、致冷系统。真空箱体由一块长 570 mm、宽 420 mm、高 340 mm 的铝块铣出, 与上下两个盖子构成整个系统的支撑, 并实现真空绝热功能; 光学箱是系统的核心, 通过绝热支撑在真空箱里; 致冷系统由冷冻机、导冷带、绝热支撑以及温度控制部件组成。

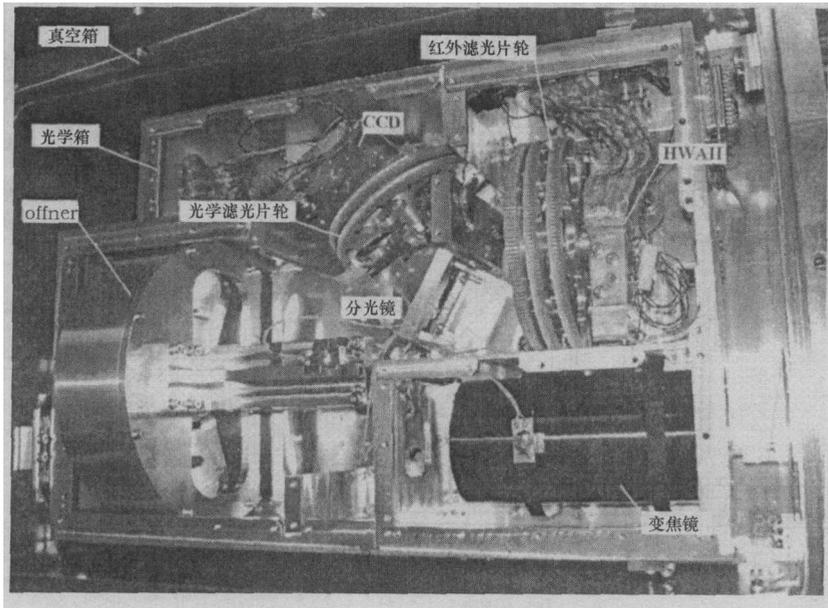


图 1 CASCAM 实物图

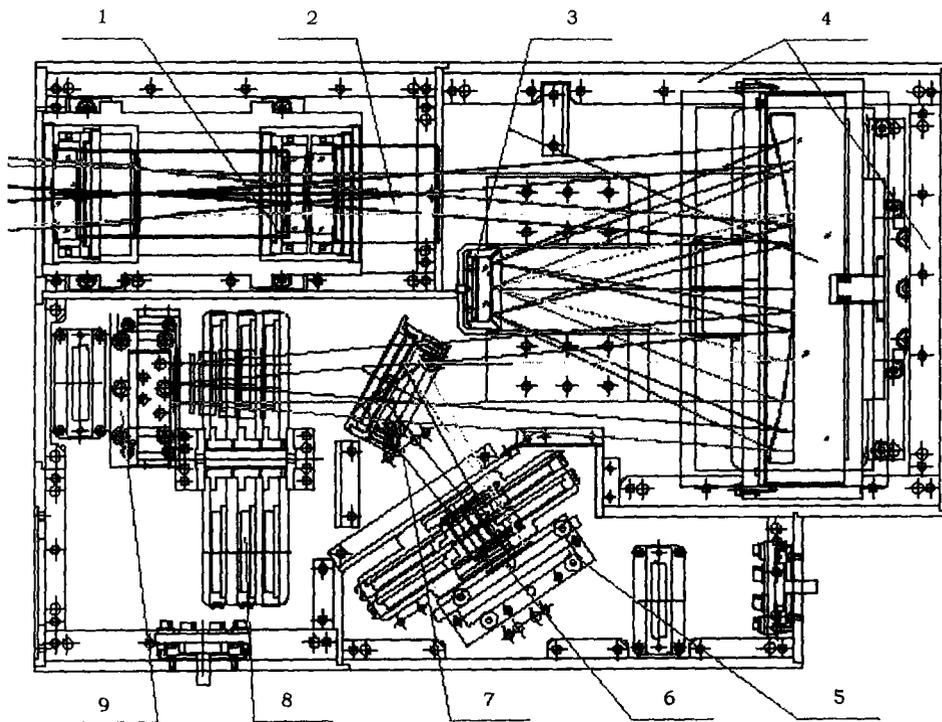
2 光学箱

CASCAM 光学箱布局如图 2(a) 所示, 图 2(b) 为系统的光学设计图。入射光由变焦镜的左侧进入, 变焦镜配合兴隆 2.16 m 和 1.26 m 望远镜实现 F/9 到 F/6 变焦。Offner 反射系统实现再成像并消除来自望远镜视场外的弥散热辐射^[2,3]。Offner 之后为分光镜, 它在 $1\ \mu\text{m}$ 附近将光分为可见光、红外两束, 经由滤光片分别成像到 HAWAII-1 和 CCD 探测器上^[4]。

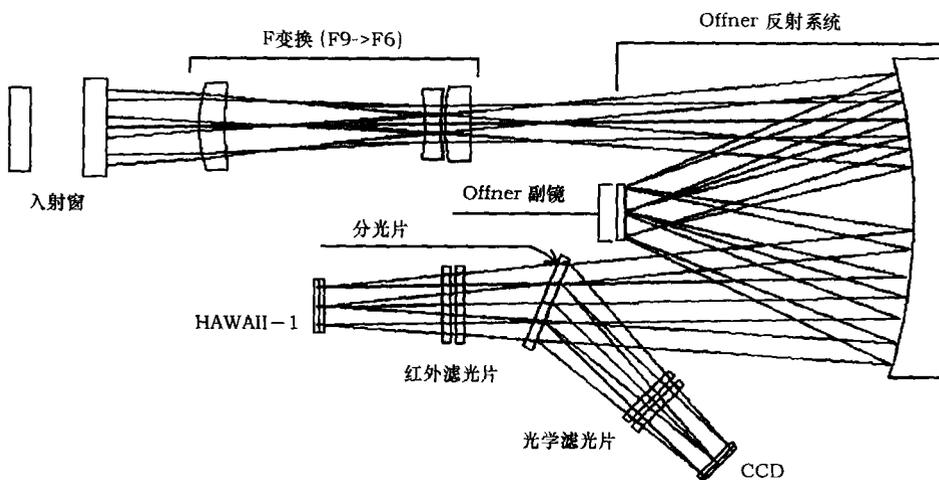
变焦镜由熔石英制的透镜组成。考虑到透镜之间的精度要求, 结构上将 3 片透镜设计安装在一个独立的圆柱形壳内, 以有效地保持各透镜之间的精度要求 (如表 1 所示)。Offner 系

表 1 CASCAM 光学系统机械设计公差

光学元件	偏轴度	偏垂直度	主副镜距离	调焦	mm
					平面度
变焦镜	0.01	0.05			
Offner	0.05	0.05	± 0.3		
分光镜		0.05			
滤光片		0.05			
探测器		0.05		± 1	
致冷板					0.05



(a)



(b)

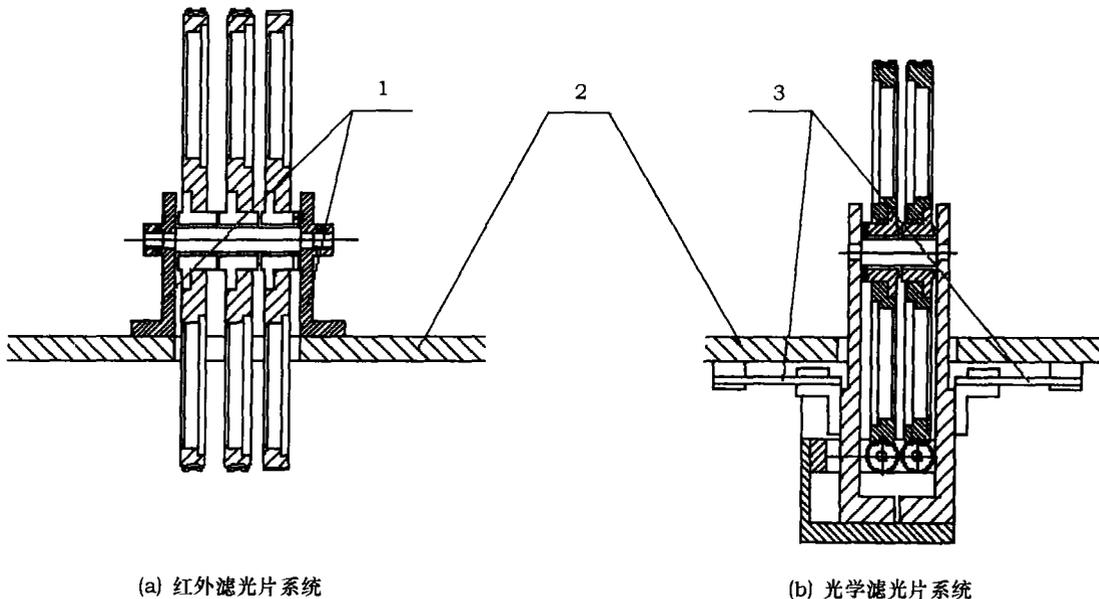
图2 CASCAM 光学箱

(a) 布局: 1—变焦镜, 2—致冷板, 3—Offner, 4—防辐射侧板, 5—光学探测器, 6—光学滤光片, 7—分光镜, 8—红外滤光片, 9—红外探测器; (b) 光学设计图。

统包括主镜和副镜两部分, 主镜部分通过圆柱销定位并安装在致冷板上, 副镜部分通过两根 L 型梁安装在主镜上, 且具有一定的调节范围, 用以调整主、副镜之间的距离和倾角。变焦镜和 Offner 系统安装在冷冻板上, 冷冻板上定位孔将保证整个系统的光学调整。

图 3(a) 所示为红外滤光片轮系统。该系统分为 3 组: 两组为滤光片轮, 可根据要求同时安装 10 片滤光片, 进行单一波段观测和宽窄波段组合观测; 一组为摆动 (dithering) 轮。CASCAM 在设计中提出用摆动轮来代替望远镜的副镜摆动, 以满足近红外的摆动观测要求。其原理是在光路中增加一楔形晶体, 通过摆动改变光程, 达到望远镜副镜摆动的效果。两组滤光片轮采用蜗轮、蜗杆传动, 可以实现滤光片的精确定位; 由于观测中摆动轮需要频繁转动, 采用齿轮传动可以有效地提高摆动轮的转动效率。我们选用 escap p430 步进电机驱动相机的滤光片轮, 在电机和传动系统之间使用波纹管联轴器柔性连接, 实现电机的扭矩传递, 减少电机的振动以及电机和蜗杆之间不共轴的影响。需要指出的是, 红外滤光片轮系统工作在低温环境下, 为确保电机在低温下正常工作, 我们对电机重新改装, 更换电机的轴承及去除电机润滑油。

图 3(b) 所示为光学滤光片轮系统, 它包含两组滤光片轮, 根据需求可同时安装 8 片滤光片。传动系统采用蜗轮、蜗杆传动, 电机和蜗杆之间同样使用波纹管联轴器柔性连接。在低温下, 光学滤光片中心波长会向短波方向移动, 严重影响观测, 因此, 我们在结构设计上使用 Glass epoxy 材料的绝缘支撑, 将整个滤光片系统悬挂在致冷盒的底板下面, 并在底板上加工出一方孔, 供滤光片轮从底板下穿过, 避免滤光片轮与致冷盒接触。与此同时, 我们使用铜丝编织的导带, 将光学滤光片轮系统和真空箱连接起来, 防止低温累积效应造成滤光片轮系统温度过低。



(a) 红外滤光片系统

(b) 光学滤光片系统

图 3 CASCAM 滤光片轮系统

1 — 红外滤光片轮 Al5052 导热材料支撑; 2 — 致冷板; 3 — 光学滤光片轮 Glass epoxy 绝热材料支撑。

图4是红外探测器盒。为了防止视场外的弥散辐射对近红外探测器 HAWAII-1 阵列成像的影响,我们将 HAWAII-1 阵列安装在光学密封盒子中,盒子的正面是通光孔,探测器信号线由盒子背面引出。冷冻机的功率通过铜制的导冷带从盒子背面的导冷板导入,以冷却探测器。探测器的温度传感器安装在盒子的顶部,与安装在盒子两侧的两个加热电阻一起构成探测器温控系统,确保探测器有精确的工作温度。探测器盒安装在可调节位置的铝板上,并由4个 Glass epoxy 材料的圆柱体绝热支撑在致冷板上。

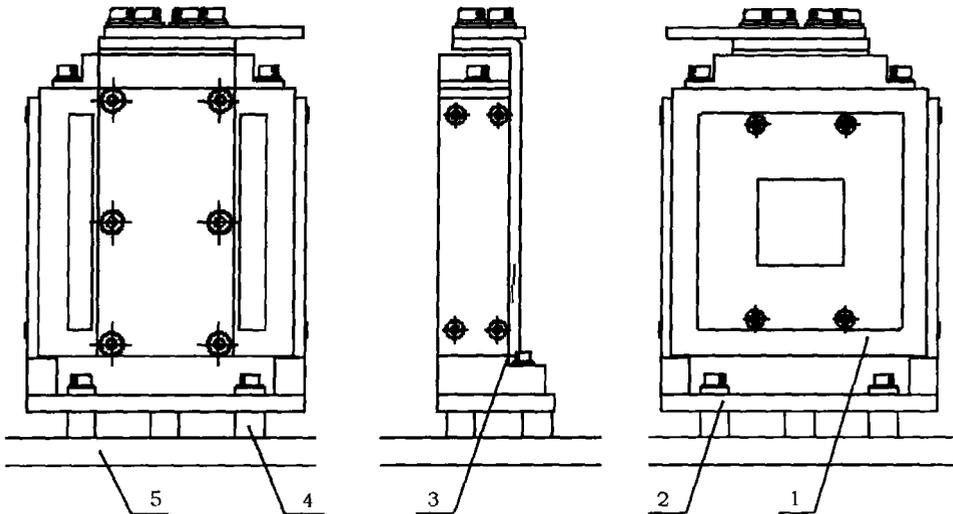


图4 CASCAM 的 HAWAII-1 探测器盒

1 — 探测器盒; 2 — 调节铝板; 3 — 导冷板; 4 — 绝热支撑; 5 — 致冷板。

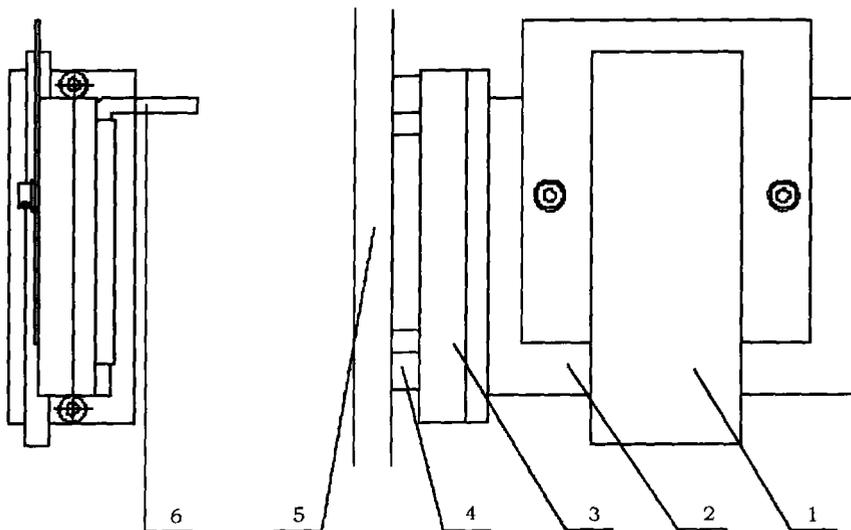


图5 CASCAM 的 CCD 支撑系统

1 — CCD; 2 — 冷冻板; 3 — 调节铝板; 4 — 绝热支撑; 5 — 致冷板; 6 — 导冷板。

图 5 是 CCD 支撑系统。CCD 芯片通过 3 个圆柱销定位, 安装在冷冻板上。在冷冻板和 CCD 芯片之间是一铜垫块, 用于调整 CCD 的面精度^[5]。冷冻机的功率通过铜导带从 CCD 冷冻板的背面导入, CCD 的温度传感器和加热电阻也安装在致冷板的背面。整个 CCD 支撑系统同样也安装在可调节位置的铝板上, 并由 4 个 Glass epoxy 材料的圆柱体支撑在制冷板上。

致冷板是光学箱的底板, 用于承载 CASCAM 的光学元部件、探测器和冷却光学元件。我们选用铝 - 镁 Al5052 作为致冷板的材料 (特性参数见表 2)。光学元部件通过圆柱销在致冷板上定位, 在设计这些定位孔时, 我们充分考虑了致冷板的低温收缩量, 并通过光学计算进行校准。为确保加工精度, 所有的定位孔均是在具有高精度的加工中心一次定型加工完成的。由于 HAWAII-1 探测器对热辐射的敏感性, 我们将光学箱设计为光学密封的长方体防辐射箱, 并在必要的部位加入遮光板, 以最大程度降低视场外弥散辐射对光学系统和探测器的影响。

由于 CASCAM 光学系统各部分元件相对独立, 我们在符合光学设计公差要求的前提下, 考虑设计简化的要求, 独立设计各个元件的机械公差 (见表 1), 不考虑前面光学元件机械公差对后面光学元件的影响而最终在焦平面上造成的累积误差, 通过调整探测器在致冷盒底板上的位置来消除这些误差。

表 2 CASCAM 系统的材料特性参数

材 料	抗拉强度 /10 ⁷ Pa	抗压强度 /10 ⁷ Pa	抗弯强度 /10 ⁷ Pa	弹性模量 /10 ⁷ Pa	泊松比	热传导率 (20 °C)
Al5052	14.5	11.0				0.50
Glass epoxy	54~64		29.5~39			
fused silicon		4.892		6.966	0.17	

3 真空箱和致冷系统

3.1 真空箱体设计

根据上述相机的光学布局, 我们把真空箱体设计成长方体, 箱体的 4 个侧面是由一长方体的铸造铝块在铣床上铣削而成的整体。箱体侧壁 (相对于光学箱的底板而言) 的厚度是由箱体材料和箱体侧壁内外压强差决定的。在满足强度要求的条件下, 我们选择 Al5052 作为相机真空箱的材料, 以便有效地减轻相机的重量。

相机工作时, 内部为真空, 压强基本为零; 外部的大气压强 (取 $P = 1.01 \times 10^5$ Pa) 可以看成是作用在箱体外表面的均匀分布载荷, 因此相机的侧面受力可以简化为两端固定受均匀载荷的直梁平面弯曲的情形, 有横向弯曲应力方程^[6]:

$$\sigma = M(x)/W,$$

其中, $M(x) = \frac{(Pb)x}{2}(L-x)$ 是侧壁在大气压强作用下产生的弯矩, $W = \frac{1}{6}bh^2$ 是抗弯截面系数, P 为压强, L 为侧面边长, b 为截面边长, x 为沿轴线变量, h 为侧壁的厚度, σ 是在 $M(x)$ 作用下产生的应力。当 $x = L/2$ 时, $M_{\max} = \frac{(Pb)L^2}{8}$, 要求 $\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} < [\sigma]$, 取

材料许用抗拉强度和许用抗压强度的较小值, 则 $[\sigma] = 110 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。由此得出 $h \geq 15 \text{ mm}$, 我们这里取 $h = 30 \text{ mm}$ 。

箱体的上、下盖板由截面为长方形的铝板加工而成。相机工作时, 盖板的受力同样可以看成是四周固定、在大气压强作用下的均匀载荷情形, 盖板所受的应力应小于盖板的许用强度。在许用应力范围内, 取上、下盖板的厚度为 20 mm 。在箱体侧壁和上、下盖板的结合面间我们加入橡胶 O 型圈 (O-ring) 以有效密封, 防止气体分子的渗漏。

真空箱体的左端是相机的入射窗口, 选用石英晶体材料制成 (相关参数见表 1), 呈柱形, 底面半径 $R = 45 \text{ mm}$, 厚度为 t , 通过压住晶体上、下底面的边缘来固定晶体, 如图 6 所示。在大气压强作用下, 晶体中心所受的应力最大, 为了防止晶体破碎, 最大应力必须满足:

$$[\sigma]_{\max} = \frac{3P(3+\nu)}{8} \quad \left(\frac{R^2}{t} \leq [\sigma] \right),$$

其中 P 是大气压强, ν 是泊松比, $[\sigma]$ 是晶体的许用抗压强度。计算得出窗口晶体的厚度 $t \geq 2.3 \text{ mm}$ 。考虑到晶体的安全, 引入安全系数 S , 推荐 $S > 3 \sim 5$, 为此, 取 $t = 12 \text{ mm}$ 。在此条件下, 晶体中心处的形变量满足:

$$f = \frac{(1-\nu)(5+\nu)}{16E} - \frac{R^4}{t^3},$$

其中 E 是弹性系数。计算得到 $f = 2.7683 \mu\text{m}$, 此形变量对于相机的光学质量影响很小, 在光学计算中可以忽略。

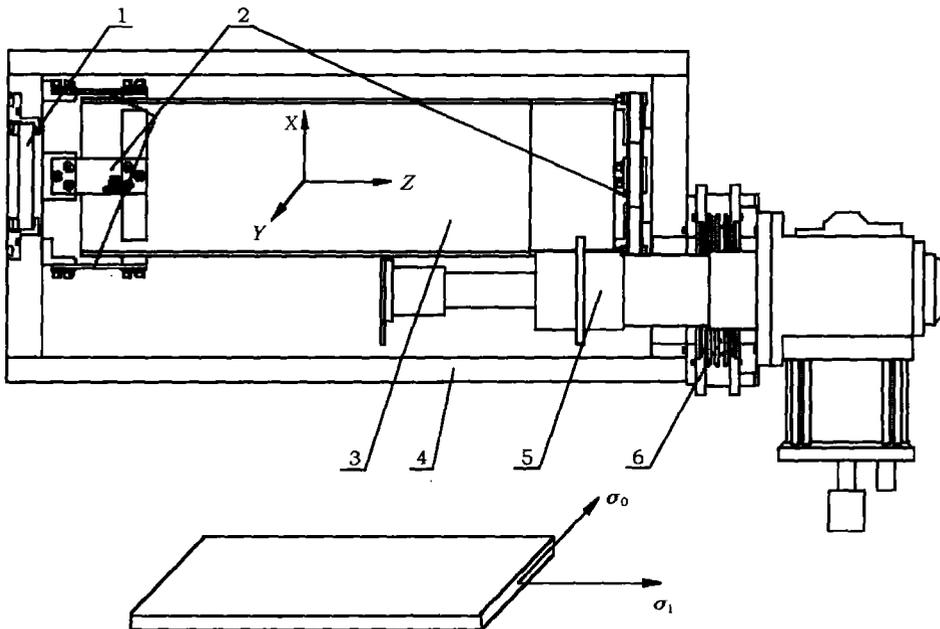


图 6 CASCAM 的侧视图

1—SiO₂ 晶体, 2—绝热支撑, 3—光学箱, 4—真空箱, 5—绝热支撑, 6—真空波纹管, 7—冷冻机。

在真空箱体的其他面上, 我们总共设计了 5 个真空插座, 用于 CASCAM 与外界通讯。其中两个插座分别用于近红外阵列 HAWII 和光学探测器 CCD; 另外 3 个用于相机系统的温度控制、马达控制以及温度传感器。

由于相机的光学箱工作在约 140 K 的低温环境下, 而真空箱工作在常温下, 两者之间存在很大的温度梯度, 所以要求支撑光学箱材料的横截面尽可能小, 以减少真空箱和光学箱之间的热传导, 降低冷冻机的功率消耗; 另一方面, 光学箱又是相机光学系统的载体, 具有一定的重量, 所以要求支撑材料具有一定的强度, 足以支撑光学箱的重量。综合考虑光学箱的重量以及真空箱和光学箱之间的温差, 我们选用绝热材料 Glass epoxy 作为光学箱的绝热支撑材料(见表 2)。在满足强度要求的前提下, 尽量减小支撑的截面积。

CASCAM 的光学箱支撑充分利用 Glass epoxy 材料纵向抗拉强度大的特性, 沿着箱体的 3 个方向巧妙布局, 在箱体两端总共设计了 5 个支撑点, 有效地增大了绝热支撑的强度。光学箱支撑结构及支撑材料强度特性如图 6 所示。由上述设计, 光学箱支撑强度分析如下:

- (1) 左端上、下绝热支撑最大受力分别为 $F_x = 2\sigma_2 A$, $F_z = 2\sigma_1 A$;
- (2) 左端前、后绝热支撑最大受力分别为 $F_y = 2\sigma_2 A$, $F_z = 2\sigma_1 A$;
- (3) 右端绝热支撑最大受力为 $F_x = 4\sigma_1 A + 4\sigma_2 A$, $F_y = 4\sigma_1 A + 4\sigma_2 A$,

其中 σ_1 为抗拉强度, σ_2 为抗压强度, A 为支撑截面积。综合计算得出: $F_{x\text{-max}} = (2.34 \sim 2.94) \times 10^5 \text{ N}$; $F_{y\text{-max}} = (2.34 \sim 2.94) \times 10^5 \text{ N}$; $F_{z\text{-max}} = (1.30 \sim 1.56) \times 10^5 \text{ N}$ 。光学箱的重量 $G < 10^5 \text{ N}$, 所以光学箱支撑的强度足以支撑整个光学箱。

3.2 热设计

CASCAM 使用冷冻机来冷却相机的光学元件和探测器, 冷冻机功率选择取决于相机系统的热流入量。影响冷冻机功耗的热流入量因素包括: (1) 入射窗口传入的热辐射; (2) 真空箱内表面的热辐射; (3) 绝热支撑传导热。对于相机内部残余气体分子的对流传热, 在真空度达到 10^{-6} Torr 时, 对流损耗的功率远低于 10^{-3} W , 可以忽略不计。以下给出影响相机诸热流入量的详细计算。

(1) 入射窗口热辐射

透过入射窗的热辐射会经过致冷盒上的入射窗口直接传入光学箱内部。热辐射公式给出

$$\dot{Q} = \sigma S(T_1^4 - T_2^4) \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2},$$

其中, Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$, S 为入射窗口的面积, T_1 是高温侧入射窗口温度 (300 K), T_2 是低温侧致冷盒内壁温度 (180 K), ε_1 、 ε_2 分别为入射窗和致冷盒内壁的辐射率。计算得到, $\dot{Q} = 2.3 \text{ W}$ 。

(2) 真空箱内表面的热辐射

真空箱内表面的热辐射主要经过致冷盒传入光学箱内部。真空箱和光学箱都是镁 - 铝合金材料 Al5052, 辐射率在 0.2~0.8 之间。由热辐射公式计算得出: ε_1 、 ε_2 均为 0.2 时, $\dot{Q}_{\text{vacuum}} = 3.7 \text{ W}$; ε_1 、 ε_2 均为 0.8 时, $\dot{Q}_{\text{vacuum}} = 15.5 \text{ W}$ 。可见, 真空箱内表面以及光学箱外表面的辐射率对整个相机的功率消耗至关重要。为降低真空箱和致冷盒之间的热辐射, 在完成光学箱加工后, 我们对真空箱的内表面和光学箱外表面进行研磨抛光, 尽量减小它们的辐射率。

(3) 绝热支撑传导热

真空箱和光学箱之间的绝热支撑材料满足热传导公式:

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT,$$

其中, T_1 为真空箱温度 (300 K); T_2 为致冷板温度 (140 K); A 为 Glass epoxy 绝热板截面面积, 光学箱支撑截面面积为 $2 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 光学滤光片轮前后支撑截面面积为 $2 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 光学滤光片轮左右支撑截面面积为 $2 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$; L 为 Glass epoxy 绝热板长度, 光学箱前支撑长度为 40 mm , 光学箱后支撑长度为 55 mm , 光学滤光片轮前后支撑长度为 16 mm , 光学滤光片轮左右支撑长度为 13 mm ; $k(T)$ 为物质的热传导率。可参照文献 [7] 得到: $\int_{300\text{K}}^{140\text{K}} k(T) dT = 1.80 \times 10^2 \text{ W/m}$ 。计算得出 $\dot{Q}_{\text{support}} = 3.87 \text{ W}$ 。

3.3 致冷系统

根据上述热设计的计算结果 (参见表 3), 我们选用了日本住友重工生产的 SRD-204 冷冻机。该冷冻机具有两段致冷头, 第一段冷却温度可达 60 K , 第二段冷却温度可达 20 K 。经低温实验评估, CASCAM 中 HAWAII-1 的最佳温度工作点为 77 K , CCD 为 120 K 。我们使用冷冻机的第一段冷冻头冷却 HAWAII-1 阵列, 第二段冷冻头分别冷却 CCD 和光学箱。假设第一段冷冻头在温度 T_1 时的冷却能力为 Q_1 , 第二段冷冻头在温度 T_2 时的冷却能力为 Q_2 , 则 T 和 Q 的关系为

$$Q(T) = 7.25\sqrt{(T - 36.8)} - 13.7.$$

当 $T = 77 \text{ K}$ 时, $Q(T) = 32.3 \text{ W}$; $T = 120 \text{ K}$ 时, $Q(T) = 52.4 \text{ W}$; $T = 140 \text{ K}$ 时, $Q(T) = 60 \text{ W}$ 。

表 3 热流入量计算结果

热流入因素	铝辐射率	
	0.2	0.8
入射窗	2.3W	2.3W
真空箱内壁	3.7W	15.5W
绝热支撑	3.9W	3.9W
合计	9.9W	21.7W

冷冻机工作时将产生一定的振动, 如果振动传入相机的焦面, 则会严重影响相机的成像质量。为此, 我们使用柔性的细铜丝编织的导带连接冷冻头和探测器, 以有效地降低冷冻机振动对焦面产生的直接影响。相机工作时悬挂在望远镜上, 与望远镜刚性连接, 相比之下作为振动源的冷冻机的质量要小得多, 这样冷冻机通过箱体间接传入焦面的振动也要小得多, 但不可忽略。为了进一步减小冷冻机振动的影响, 我们在冷冻机和相机箱体之间加了真空波纹管联轴节 (如图 6 所示)。

4 结 论

本文重点介绍了 CASCAM 相机的机械系统设计, 包括结构设计、真空设计、致冷设计。由于红外探测器对热辐射的敏感性, 需要对探测器以及相机的光学系统分别进行致冷, 使红

外阵列 HAWAII-1 和光学 CCD 工作在最佳工作温度上, 减少来自光学箱外部的热辐射以及因相机自身热辐射对红外探测器造成的影响; 同时, 由于红外观测的高大气背景辐射的影响, 为了增加信噪比, 红外观测通常采用摆动观测, CASCAM 在设计时也充分考虑了这一点, 通过在相机滤光片系统中加入一组摆动轮来代替望远镜的副镜摆动; CASCAM 可在光学和近红外波段同时成像工作, 为避免光学滤光片低温工作时中心波长向短波方向移动, 其光学箱中光学滤光片系统被设计在常温下工作。

目前 CASCAM 相机系统已完成加工、装配和真空致冷实验, 并达到了预期的效果。

参考文献:

- [1] 苏定强, 周必方, 俞新木. 中国科学 (A), 1989
- [2] 郝允祥, 陈增生, 周克平. 红外天文学导论, 北京: 北京大学出版社, 1994: 90
- [3] Irving J S, Monroe S. Infrared Technology Fundamentals, New York: Mercel Dekker, 1989
- [4] 季春红, 姚永强. 天文学报, 2003, 44(4): 390
- [5] Fumiaki N, Satoshi M, Miyazaki *et al.* CCD Mosaicing Technique for Suprime-Cam (Subaru PRIME Focus CAMera), Tokyo, The Netherlands, 2000: 133
- [6] 刘鸿文. 材料力学, 北京: 高等教育出版社, 1999: 380
- [7] 张启先. 机械设计大典, 北京: 机械工业出版社, 2002: 120

Mechanical Design of Optic-Infrared Camera CASCAM

WU Jian-wen, REN Shi-bo, JI Chun-hong, YAO Yong-qiang, YAO Da-zhi

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Optical-Near Infrared Camera CASCAM (Chinese Academy of Sciences, Camera), employing with CCD and near infrared array HAWAII-1, is designed to make imaging simultaneously at the optical and infrared wavelengths in the 2.16 m optical telescope located at XingLong station. The system mechanical design includes optical box, vacuum box and cooling system. The optical box is the platform of optics and detectors, and it prevents thermal emission from outside effectively. The vacuum box is outside of the optical box, which can keep good vacuum at a level of 10^{-6} Torr. The vacuum box, vacuum pump and a refrigerator are composed as the cooling system of the camera.

Key words: astronomical facilities and technique; CASCAM; mechanical design; cooling system