

低温红外系统光机结构设计

周 超

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 随着红外技术的发展, 大口径望远镜越来越多地使用了红外设备终端。红外设备需要在低温下工作, 这就给红外系统的光机结构设计带来了难度。为了解决光学部件需要安装定位精确, 又要保证在低温环境下不会因为热应力导致破坏的问题, 从理论上介绍了运动学定位的原理, 针对光学系统中用到的反射镜、透镜、滤光轮等进行了详细的结构设计, 实现了运动学安装定位。通过这些设计可以很好地解决光学件在冷却过程中的精确定位和无应力之间的矛盾, 保证光学系统的安全, 同时保证光学系统的成像质量。该研究结果对于红外光学系统的结构和热设计有一定的参考价值。

关键词: 红外系统; 低温光学; 光机结构; 运动学安装

中图分类号: TH751 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)08-2092-05

Opto-mechanical design for a cryogenic IR system

Zhou Chao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: With the development of IR technology, more and more IR instruments were used on large telescopes. A cryogenic circumstance was necessary for IR instruments operation, this sets many technical challenges for opto-mechanical design. Optical parts need accurate mounting and positioning, meanwhile they must not be cracked or broken by thermal stresses during cryogenic. In order to solve this problem, the kinematic mount theory was presented, detailed mechanical design for all reflecting mirrors, lens, filter wheels used in optical systems were proceeded and kinematic mount was realized by these designs. The conflict between firmly fixing the optics and preventing stresses within the optics during cooling was well settled via these kinematic mount designs. Optical system security and imaging quality during cooling were well ensured by these kinematic mount designs. The research results have important referential value for mechanical and thermal design for IR optics system.

Key words: IR system; cryogenic optics; opto-mechanism; kinematic mount

收稿日期: 2012-12-18; 修订日期: 2013-01-10

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新重大项目专项资金资助

作者简介: 周超(1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光机结构设计和有限元仿真方面的研究。Email:zhouchaociomp@163.com

0 引言

在地基或者空间大口径望远镜设备上,红外成像终端和红外光谱干涉仪等设备的应用越来越广泛。欧南台(ESO)1.8m望远镜VLT上的中波红外干涉仪MIDI、西班牙CAHA天文台3.5m望远镜上的近红外大视场相机Omega2000以及可用于3.5m和2m望远镜上的红外相机PANIC等都已经成功应用^[1-3]。红外设备的最终性能在很大程度上取决于减小设备的背景热辐射。同时工作在中远红外波段的探测器自身需要一个低温的工作环境。为了提高红外探测器的灵敏度和分辨率,并且降低背景热辐射以减小来自光学滤光片、冷屏及光学系统本身等的热噪声,提高最终成像质量,红外设备都需要进行制冷。一般要求温度要等于或者低于液氮温度77K^[4-9]。

由于在加工、装调和检测所处室温环境及实际工作所处低温环境的温度差异,系统会发生变化。不同材料在冷却过程中会有不同的变形和非线性。材料热胀系数(CTE)的不同会造成结构变形甚至造成破坏。同时温度变化还会引起光学材料折射率的变化,引起图像质量下降。因此,低温红外系统对光机结构设计提出了更高的要求。

文中针对用于某地基大口径望远镜的一红外成像终端,进行了低温下的光机结构设计和分析。

1 低温红外光机结构设计原则

1.1 均一性原则

如果光机结构所有部分,包括光学件和结构件采用同一材料,则对于反射光学系统,最终性能几乎不受温度的影响。尽管随着温度变化,光学系统的尺寸会变化,但反射镜表面曲线变化均匀。这种光学系统可以在室温或者低温环境下工作而不会产生性能下降。铝具有较好的光学性能,同时有较高的比刚度和热传导性以及真空适应性,因此一般被用于这种光学系统中。

但在透射式光学系统中,不可避免会有多种不同材料。均一性原则不再满足,因此,光学性能在室温和低温下会有所不同。不同材料的热胀会引起变形和内应力,导致性能下降。因此就需要对光机结构进行运动学安装设计。

1.2 不调整原则

在低温红外光机结构设计中,不调整原则是指光学系统的准直和最终性能直接通过设计精度、误差分析和材料分析等保证,而不再采用传统的修磨垫片等手段。因为每一次的降温 and 升温以及恒温器真空化都需要很长时间。并且每一次室温下的装调结果在低温工作时还会变化,而在低温下进行调整很难。虽然可以通过一些压电促动器进行低温下微调,但可靠性难以保证。因此,大多数低温红外光机结构都遵循无调整原则^[10-12]。

2 光机结构设计

此红外系统放置于望远镜的耐式焦点处,光学设计如图1所示。从望远镜轴头折出的光进入到光学系统中,经过凹面反射镜、平面镜、离轴反射镜、分色片后分成两个波段,再经过一些滤波片、折透镜等最终在两个不同面阵CCD上成像。

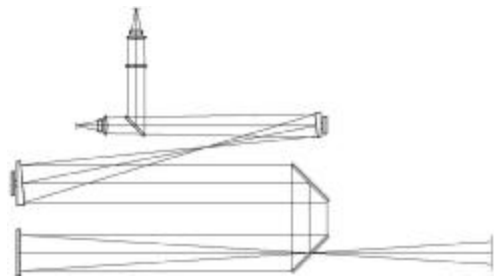


图1 光学系统示意图

Fig.1 Diagram of optical system

如上所述,为了能将红外光学系统冷却到并维持在所需温度,需要一个稳定的低温真空环境。整个光学系统处于一真空杜瓦恒温器中,如图2所示,包括有冷却液接口、真空泵接口、控制系统等。通过液氮将整个容器内的温度控制在77K。

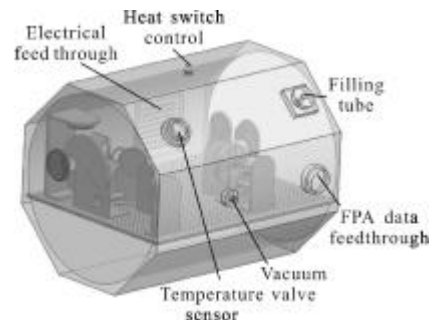


图2 恒温器及光机系统布局

Fig.2 Cryostat and opto-mechanical system layout

光学件的安装应该在任何环境下都保证位置精确,同时没有内应力。一个光学件的位置可以由 6 个自由度来确定,当 6 自由度被单独约束全部或部分,就可以进行精确定位或者精确运动。经典的运动学定位模型如图 3 所示,通过一个“圆锥、凹槽、平面”系统可以完整定义物体的 6 个自由度。

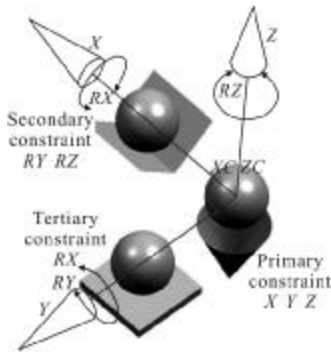


图 3 经典运动学定位模型

Fig.3 Classical kinematic mount

根据运动学安装定位原理,对不同的透镜和反射镜进行了不同的安装设计。

2.1 反射镜安装

对于系统中较小的离轴反射镜,由于其厚度不均匀,可以将镜子加工成如图 4 所示结构,采用单点安装方式固定于安装座上。



图 4 反射镜单点安装

Fig.4 Single point mounting of reflective optics

通过镜子背面基板上的中心定位孔对镜子进行精确定位,三个用于固定的螺纹孔,一个用于控制镜子旋转的定位孔通过相应的沟槽与镜子主体隔离。沟槽可以提供一定的运动自由度而不会影响镜子主体的位置和方向。同时沟槽可以隔离螺栓扭矩,温度变化引起应力等载荷,保证镜子反射面的位置和精度。

对于口径较大的平面反射镜,采用如图 5 所示的运动学安装方法。反射镜在轴向依靠三个双弹性夹片固定在光具座上,反射镜的径向自由度通过两

个切向平面和一对双弹性夹片约束。这种安装方式保证了反射镜在系统温度变化时的应力释放。

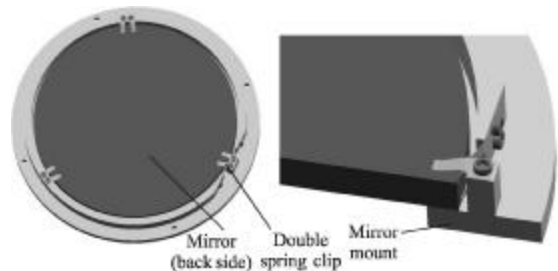


图 5 平面镜运动学安装

Fig.5 Kinematic mount of a flat mirror

2.2 透镜安装

对于透镜来说,既要满足光学设计的误差要求,又要满足在冷却过程中的应力和变形情况,如果按传统的安装方法使用带螺纹的压环进行固定,不同材料的热胀系数的不同,有可能引起透镜破坏。因此,也需要进行运动学安装设计。采用如图 6 所示的安装方法,保证了每一透镜在光轴方向上都有一定的平移自由度,以减小温度应力。

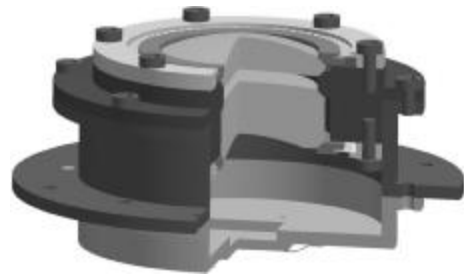


图 6 透镜运动学安装

Fig.6 Kinematic mount of lens

将所有透镜两个边缘车出 45° 倒角,一边装配到相应的锥面光具座中,另一边与相应的压环配合。压环通过一预载的特制弹簧垫圈将透镜在轴向固定。由于接触面为锥面,在冷却或者升温过程中,透镜可以实现自我准直。将倒角适当减小,有利于透镜自我准直精度,而且不会使得温度变化时的轴向力显著增加。相关文献提出采用倒角 40° 更好。

通过透镜和压圈等在接触面上相互滑动,使得在温度变化导致各部分的直径变化时产生轴向的微小位移。光具座和透镜等的冷却并不是同时进行,因为透镜是通过光具座冷却,而压环通过透镜冷却。图 7 给出一个简单冷却过程中的各部件变形示意图。

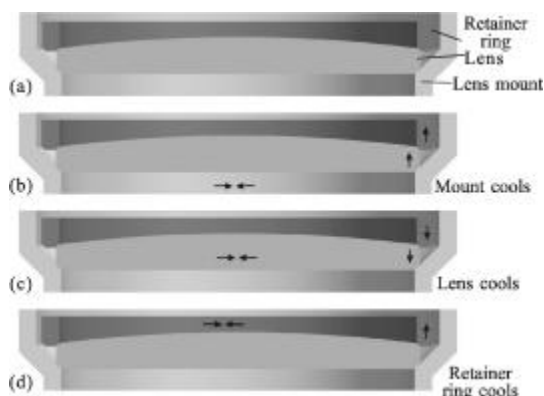


图 7 冷却过程中结构位移

Fig.7 Displacements of structures during cooling

图 7(a)为整个镜头处于室温环境下(300 K)。当恒温器开始进行液氮冷却时,光具座通过冷板开始冷却收缩,透镜和压环会沿斜面向上滑动。如图 7(b)所示。下一步如图 7(c)中,透镜开始冷却收缩,透镜和压环开始下落。最终图 7(d)中,压环冷却收缩,使得其本身沿与透镜的接触斜面向上运动。实际冷却过程要复杂得多,在一段时间后,各部件的变形同时发生。在加工过程中,要严格控制各个部件斜面的粗糙度,保证其相对运动时的平顺以及接触热传导的性能^[13]。

2.3 滤波轮设计

光学设计中需要四个滤光片进行不同波段的选择,因此,在探测器之前设计了滤波轮组件,其结构示意图如图 8 所示。

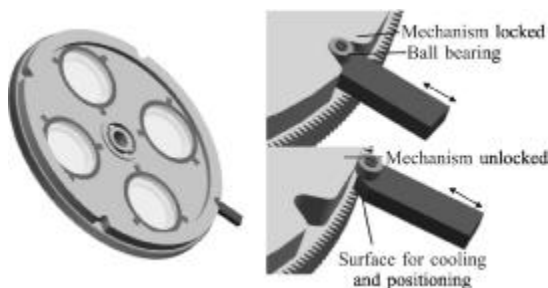


图 8 滤波轮机构

Fig.8 Filter wheel mechanism

滤波轮中心固定在一特定的低温球轴承上,可以保证在 77 K 温度下正常运转。滤波片通过类似于 2.1 节中的弹性夹片方法固定。滤波轮外圆加工为直齿轮,低温步进电机通过齿轮啮合驱动滤波轮进行旋转切换。

为了确定所需滤光片的位置,在滤波轮外圆设计了定位锁紧机构。同时由于滤波轮中心采用球轴

承,轴承环与滚珠为点接触,接触面积非常小,因此其热接触和热传导性能差,使得对滤波轮组件进行冷却需要很长时间。在滤波轮被锁定时(图 8 右上图),定位锁紧机构同时作为冷却机构,可以加快对滤波轮的冷却,缩短时间。

定位锁紧机构为一细长的矩形截面杆,一端为 V 字形,与轮外圆的四个 V 字形凹槽相配。另一端通过一压缩弹簧与其他结构相连,保证细杆可以沿径向运动。细杆末端为一球轴承,通过弹簧压紧在轮外圆滚动。当步进电机驱动滤波轮旋转到凹槽处时,电机停止,弹簧推动定位机构进入凹槽,最终两个 V 字形结构相配合保证滤波轮到达所需位置。

3 有限元分析

为了对上述的运动学安装设计进行验证,针对比较复杂的如图 6 所示的透镜安装进行了有限元分析,建立了透镜及其安装结构的详细有限元模型,如图 9 所示。



图 9 透镜结构有限元模型

Fig.9 FEM for lens mount

首先对常规的通过螺纹压环进行透镜安装的方法展开分析,此时透镜被认为是完全固定在结构件中。对系统施加对称约束,确保在降温过程中的自由膨胀。整个系统在从 293 K 到 77 K 的降温过程中的变形和应力结果如图 10 所示。

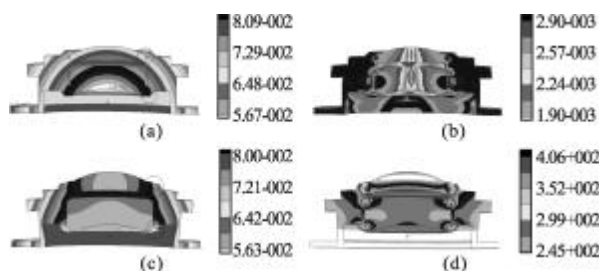


图 10 常规安装下的有限元分析结果

Fig.10 FEM results for traditional mount

图 10(a)和 10(b)为假设结构和透镜为同一种材

料下的变形和应力云图。可以看出结构各部分变形均匀,其应力基本为 0。图 10(c)和 10(d)为实际情况的变形和应力云图。透镜为 Ge 和 Si 材料,结构为 Al 材料。从图 10(c)可以看出,两个压环与透镜接触处(圆圈示意)由于热胀系数和弹性模量的不同,出现明显的变形。10(d)中,最大应力也发生在接触处,达到 406 MPa,明显会对光学和结构件造成破坏。

对透镜的运动学安装进行分析计算。透镜可以在与之相接触的结构斜面自由运动,以防止在降温过程中应力的产生。因此,其变形云图比较均匀,两个透镜的变形图如图 11 所示。

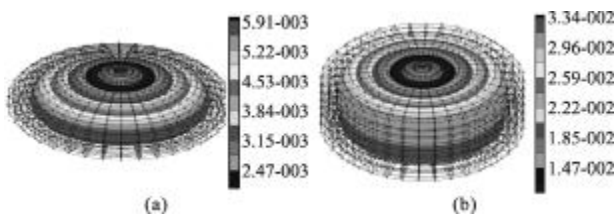


图 11 运动学安装下有限元分析结果
Fig.11 FEM results for kinematic mount

对图 11(a)透镜的下表面和图 11(b)上表面进行计算,得出其 PV 和 RMS 值如表 1 所示。可以看出:其 PV 值和 RMS 值都很小,即对透镜表面形状造成的影响很小。其刚体位移值即为图 7(c)中的透镜冷却收缩带来的位移。同时,可以计算出安装结构在收缩过程中两个斜面处的刚体位移,即图 7(b)中所示的透镜上升位移。经计算分别为 0.029 mm 和 0.028 mm。两透镜的空气间隔变化最终计算为 0.048 mm,完全满足光学设计允许的误差要求。由于整个结构中心对称,因此,冷却过程不会造成透镜偏心 and 倾斜误差。

表 1 透镜表面变形值

Tab.1 Displacement of lens surface

	PV/mm	RMS/mm	Displacement/mm
Fig.11(a)	9.16e-7	2.53e-7	1.20e-3
Fig.11(b)	8.10e-7	2.41e-7	-7.63e-3

4 结 论

光学系统中的结构设计都是在确保精确定位和阻止产生过大应力之间进行综合考虑。光机结构要保证在各种环境和条件下光学系统的稳定性,另一方面,光机结构会导致光学组件的变形和应力。尤其是在低温环境下,由于各种材料的热胀系数不同,会

在各部件内部产生应力甚至破坏。

文中针对某一低温红外光学系统,进行了光机结构设计和详细的有限元分析,解决了光学件在冷却过程中的精确定位和无应力之间的矛盾,使其能够很好的在低温环境下工作。该结果对于红外光学系统的结构和热设计有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Jan W P, Annelie W, Glazenberg K, et al. Cold optics of MIDI: the mid-infrared interferometric instrument for the VLT[C]//SPIE, 2000, 4006: 164-173.
- [2] Harald B, Peter B, Coryn A L, et al. Cryogenic engineering for Omega2000: design and performance [C]//SPIE, 2003, 4841: 343-354.
- [3] Harald B, Matthias A, Matilde F, et al. PANIC: the new panoramic NIR camera for Calar Alto[C]//SPIE, 2008, 7014: 70142R1-9.
- [4] Qu Jinxiang, Lu Yan. Design of small vacuum experiment equipment of cryogenic optics [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(4): 464-467. (in Chinese)
- [5] Chen Xiaoping. Status and trends of the cryocooler in IRFPA detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 45-49. (in Chinese)
- [6] Li Chunlai, Lin Chun, Chen Xiaowen, et al. Space-borne LWIR FPA imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2253-2260. (in Chinese)
- [7] Wang Shitao, Zhang Wei, Wang Qiang. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 484-491. (in Chinese)
- [8] Yang Linhua, Shi Reiliang, Bai Shunli. Infrared multi-spectral sensors calibration optical system analyzed and adjusted in low temperature [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2003, 20(3): 30-34. (in Chinese)
- [9] Liu Xinguang, Wu Yinong, Li Chunlai. Cryogenic system for space infrared astronomy observatory [J]. Scryogenics, 2011, (3): 50-54. (in Chinese)
- [10] Gabby K, Jan K, Ramon N, et al. Opto-mechanical design for transmission optics in cryogenic IR instrumentation [C]//SPIE, 2008, 7018: 70182D1-12.
- [11] Niels T, Florence R, Eddy E, et al. MATISSE cold optics opto-mechanical design[C]//SPIE, 2010, 7734: 77341S1-12.
- [12] Zhang Xuan, Pan Ming. Cryogenic hysteresis and creep characteristics of piezoelectric bimorph scanner[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 1064-1068. (in Chinese)
- [13] Bizenberger P, Baumeister H, Buchler C J, et al. Optical design and cryogenic mounting of the optics for a pyramid wavefront sensor working in the near infrared wavelength range[C]//SPIE, 2005, 5962: 596227_1-11.