文章编号：1672-8785(2018)06-0008-07

一种透射式低温光学系统的设计与验证

王兆利[1,2] 梁惊涛[1] 赵密广[1] 陈厚磊[1] 王 娟[1]

(1. 中国科学院理化技术研究所空间功热转换技术重点实验室，北京 100190；
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘 要：由于能够减小系统自身的热噪声和提高系统信噪比，低温光学是实现高灵敏度红外探测的必要手段。提出了一种将脉冲管制冷机用作冷源的透射式低温光学系统。这种新型低温光学系统可用于体积和重量受限而又需要进行高灵敏度红外探测的场合。从光学设计、光机结构设计和内部热噪声分析等方面说明了透射式低温光学系统的设计过程。搭建了用于对脉冲管制冷机冷却光学系统的可行性进行验证的试验系统，并从系统内部热噪声的角度对低温光学的有效性进行了验证。实验结果表明，经过 3 h，透镜温度由 300 K 降至设计温度 150 K，继续降温则可达到最低温度 105 K。测试过程中，透镜保持完好，验证了将脉冲管制冷机用作冷源的可行性。用黑体和 320×256 元碲镉汞探测器对光学系统自身的热噪声进行了测试。结果表明，当光学系统的温度从 300 K 降至 215 K 时，其自身热辐射减少了 75%。这与理论分析结果一致，验证了低温光学降噪的有效性。

关键词：低温光学；脉冲管制冷机；内部热噪声；红外成像

中图分类号：TN216 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2018.06.002

Design and Verification of a Cryogenic Refractive Optics

WANG Zhao-li[1,2], LIANG Jing-tao[1], ZHAO Mi-guang[1], CHEN Hou-lei[1], WANG Juan[1]

(1. *Key Laboratory of Space Energy Conversion Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Since cryogenic optics can reduce thermal noise and improve the signal-to-noise ratio of detection systems, it is the necessary way to implement high sensitivity infrared detection. A cryogenic refractive optics which uses a pulse tube cryocooler as its cold source is proposed. This new cryogenic optics can be used in the occasions where volume and weight are limited and high-sensitivity infrared detection is required. The design process of the cryogenic optics is described in the aspects of optical design, opto-mechanical structure design and internal thermal noise analysis. A test system for verifying the feasibility of cooling optics by pulse tube cryocoolers is built and the effectiveness of the cryogenic optics is verified in the aspect of the thermal noise in

收稿日期：2018-03-14

基金项目：中国科学院国防创新基金项目(CXJJ-17-M133)；科技部重点研发计划项目(2016YFB05500501)

作者简介：王兆利(1988-)，男，博士生，主要从事空间制冷及低温光学方面的研究。

E-mail：wangzhaoli@mail.ipc.ac.cn

the detection system. The experimental results show that the temperature of the optical components drops to 150 K from room temperature in three hours and can further drop to the lowest temperature 105 K. In the test process, the lens is well preserved, which verifies the feasibility of using a pulse tube cryocooler as the cold source. A blackbody and a 320× 256 pixel HgCdTe array detector are used to test the thermal noise of the optical system. The results indicate that the thermal radiation is decreased by 75% when the temperature of the optical system drops from 300 K to 215 K. This is in good agreement with the theoretical analysis result. It demonstrates the effectiveness of reducing noise for cryogenic optics.

Key words: cryogenic optics; pulse tube cryocooler; internal thermal noise; infrared imaging

0 引言

在红外探测领域，通过降低光学系统的温度可明显减小系统内部的热噪声，进而有效提高系统的探测灵敏度。作为一种新型的特殊光学系统，工作在低温条件下的光学系统在设计、制造和检测上与常规的光学系统有很大的不同。在抑制光学系统内部的热噪声方面，冷却光学系统是一种最直接和最有效的方法[1-3]。

低温光学在红外探测系统中发挥了重要作用，特别是在地基和天基红外望远镜和光谱仪中有着广泛应用。在地基红外探测方面，西班牙 3.5 m 望远镜中的新型大视场红外相机被液氮冷却至 77 K[4]；双子星光谱仪(Gemini Planet Imager，GPI)中的透射式光学系统被机械制冷机冷却至 80 K[5]；欧洲南方天文台的新型超大望远镜干涉仪(Very Large Telescope Interferometer，VLTI)中的红外仪器被闭式循环制冷机冷却至 40 K[6]。在空间应用中，红外望远镜基本都采用了低温光学系统，比如空间红外天文望远镜(Infrared Telescope in Space，IRTS)被其携带的液氦冷却到 4 K[7]；詹姆斯·韦伯空间望远镜(James Webb Space Telescope，JWST)中的近红外相机(Near Infrared Camera，NIRCam)被辐射制冷器冷却至 35 K[8]；日本 ASTRO-F 红外天文卫星中的整个望远镜系统被由超流氦和机械制冷机组合的制冷方式冷却到 5.8 K[9]。

低温冷源是上述低温光学系统中的重要组成部分。该系统中常用的制冷方式包括低温制冷剂、辐射制冷器和机械制冷机。与低温制冷剂用作冷源相比，机械制冷机用作冷源的光学系统可以极大地减小重量和体积。随着低温技术的不断发展，一种新型机械制冷机——脉冲管制冷机的制冷能力越来越强，使其冷却光学系统成为可能。此外，其冷头没有运动部件，可大大减少振动对光学系统的影响，因此是一种新型的低温光学系统冷源。透射式光学系统具有结构紧凑、视场大等优点，如果结合脉冲管制冷机做成一种透射式低温光学系统，那么该系统将会在体积和重量受限而又需要高灵敏度红外探测的领域具有重要的应用价值。但我们有必要对这种新型低温光学系统的可行性进行验证。

1 光学和光机结构设计

目前，国内大多数的低温光学系统均为反射式系统。该系统的光学元件和支撑结构可以用相同材料制成，由温度变化引起的热胀冷缩对光学系统的影响也更易控制，但该系统一般较大，适用于地基和天基平台。而折射式光学系统则具有体积小、视场大以及装调简单等特点，可用于体积和重量受限的场合，因此结合脉冲管制冷机便可做成小型化的透射式低温光学系统。本文设计的透射式光学系统(见图 1)为一个基于长波红外探测器的成像镜头。采用像元尺寸为 30 μm×30 μm、探测波段为 8～12 μm的 320×256 元 HgCdTe 红外焦平面探测器。光学系统的工作温度为 150 K，对角线视场角为 8.8°。该系统由三块分别由锗、硫化锌和锗材料制成的透镜组成，使其在成像波段内的色差较小。系统的通光口径为 70 mm。透镜表面均镀增透膜以提高光学性能。本文系统中，除了透镜 1 的第一表面为非球面之外，其

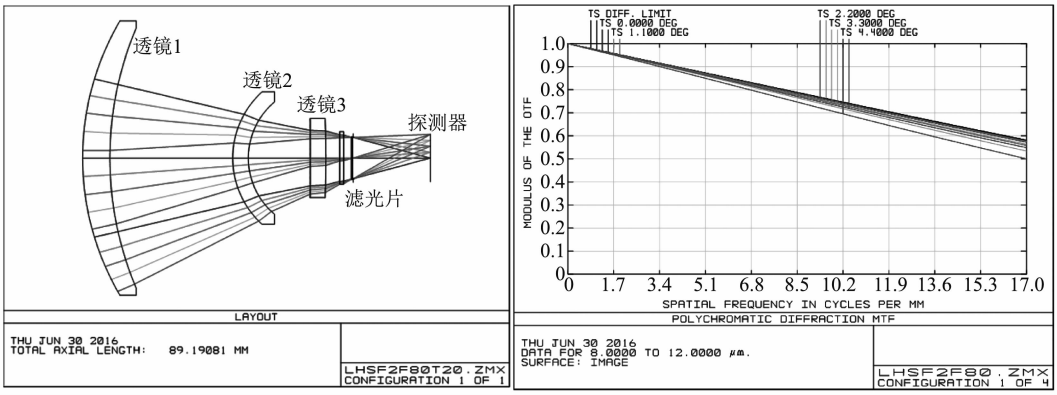


图 1 光学系统设计图和 MTF 值

他表面均为球面。光学设计时，在中心波长 10 μm 处进行了优化，全视场 MTF 值超过 0.5，接近衍射极限。在低温光学设计中并非采用传统的光学无热化设计方法，而是直接在工作温度 150 K 处进行设计，优先保证低温时的成像质量。此外，缺少红外材料在低温下的折射率数据是透射式低温光学系统设计的一大难点。借鉴文献[10]中的方法，假定折射率随温度线性变化，采用常温下的温度折射率系数计算出低温下的折射率，但需在光学设计时给折射率 30%的容差来保证低温下的像质。折射率变化对光学系统的主要影响是会引起焦距变化，这在原理验证阶段可以通过调焦找到准确的焦面。在缺少材料低温折射率数据的情况下，原理样机设计便采用了这种近似处理方法，但在需要进行精确设计的场合，准确的材料低温折射率数据是必不可少的。

透镜材料采用锗和硫化锌，而支撑材料采用导热好且易于加工的铝。由于两者的线胀系数相差一个数量级，当温度从室温降至 150 K 时，透镜和支撑结构的收缩量不同，容易造成透镜位置变化以及光学表面变形。为了保证光学系统在低温下的成像质量，需设计一种合理的支撑结构。图 2 所示为本文设计的透镜弹性支撑结构。该结构由镜筒、透镜、压圈、间隔、调整垫圈、径向支撑、轴向支撑和聚四氟乙烯(Poly Tetra Fluor Ethylene，PTFE)垫圈组成，可在温度变化时提供恒定的预紧力。间隔

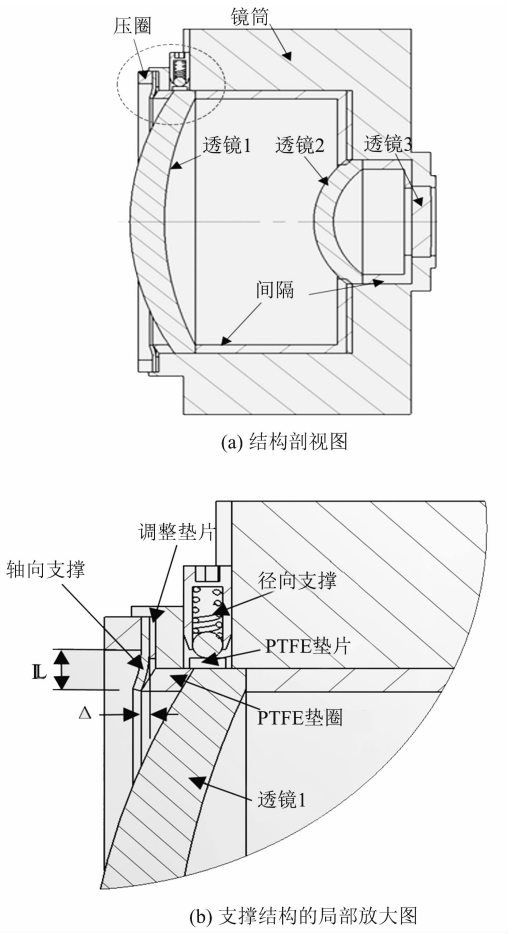


图 2 透镜安装结构图

与透镜的接触界面采用球形表面，以增加接触面积，减小两者之间的接触应力。

径向支撑由 3 个周向均布的弹簧螺钉组成。图 3(a)所示为弹簧组件的细节情况。与传统的弹性支撑相比，该支撑具有结构简单、成本低等优点。径向支撑的预紧力由其弹簧提

供，可在装配时根据需要进行调整来使透镜保持在中心位置上。在此设计中，理想情况下透镜的径向支撑仅由 3 个弹簧螺钉提供，且镜筒在降温过程中不应对光学元件产生应力。为此，透镜与镜筒之间的径向间隙应设计在合理范围内。以透镜 1 为例，其材料为锗，镜筒材料为铝，此时温度下降会导致镜筒沿径向往透镜边缘收缩，两者之间的径向间隙会减小。如果温度继续下降，那么镜筒内径将会与透镜外径接触并产生径向应力；如果径向间隙太大，那么透镜装调的难度就大。考虑到制造和装配条件，透镜与镜筒的径向间隙取为 0.1 mm。

如图 3(b)所示，轴向支撑采用一个用 Be-Cu 材料制成的环形弹簧片。在其内侧沿径向切割成 8 个独立的悬臂式弹簧。这些弹簧的偏转将透镜预紧到镜筒的肩部。弹簧偏转量的大小可由弹簧与镜筒之间调整垫片的厚度来调节，从而便于根据需要提供不同的轴向预紧力。本文设计中，弹簧厚度为 0.3 mm，弹簧偏转量为 1 mm。随着温度的降低，弹簧的变形量很小，可保持稳定的轴向预紧力。

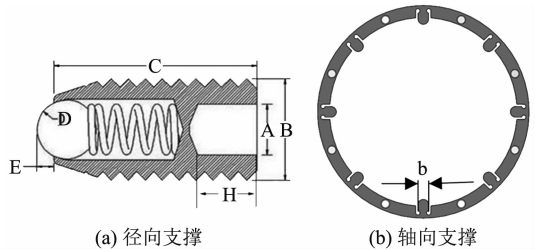


图 3 透镜的支撑结构

2 光学系统的内部热噪声分析

内部热辐射是影响红外弱目标与远距离探测系统性能的关键因素。对于可见光成像系统，透镜的透射率通常很高，因此与其他元件相比，它们的辐射几乎可以忽略不计。然而，在红外光学系统中，由于红外光学材料的折射率大且透镜表面的反射率高，透镜产生的热辐射可以到达探测器表面，进而降低系统的信噪比。在设计红外光学系统时，分析和预测透镜自身的热辐射显得非常重要。

图 4 所示为该光学系统的内部热辐射分析模型。其中，透镜 3 的辐射直接入射到探测器的表面上。透镜 3 的温度为 T_3，发射率为 ε_3；透镜 3 产生的辐射强度可以表示为 $\varepsilon_3 E(T_3)$，其中 $E(T_3)$为温度 T_3下理想黑体的光子辐射强度。透镜 2 产生的辐射需经过透镜 3 才能到达探测器。假设透镜 3 的透射率为 τ_3，透镜 2 的温度和发射率分别为 T_2和 ε_2，到达探测器的透镜 2 的光子辐射强度可以表示为 $\tau_3\varepsilon_2 E(T_2)$。透镜 1 的辐射通过透镜 2 和透镜 3 后到达探测器表面。到达探测器的透镜 1 的光子辐射强度可以表示为 $\tau_2\tau_3\varepsilon_1 E(T_1)$，其中 T_1和 ε_1分别为透镜 1 的温度和发射率，τ_2为透镜 2 的透过率。

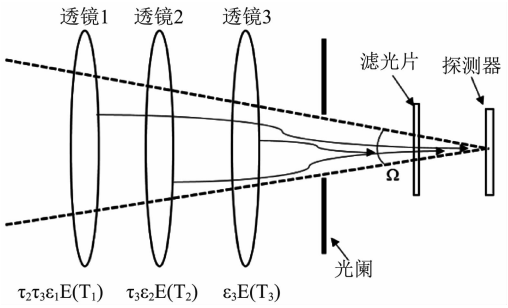


图 4 光学系统内部辐射特性分析模型

若用 Ω_1、Ω_2和 Ω_3表示每块透镜与探测器之间的立体角，则可计算出光学系统到达探测器的光子辐射强度：

$$E=\tau_2\tau_3\varepsilon_1 E(T_1)\Omega_1+\tau_3\varepsilon_2 E(T_2)\Omega_2+\varepsilon_3 E(T_3)\Omega_3 \tag{1}$$

为了简化计算，可以假设所有透镜的发射率和透射率相同且温度和立体角也相同，则式(1)可简化为

$$E=(1+\tau+\tau^2)\varepsilon E(T)\Omega \tag{2}$$

可以看出，辐射强度取决于透镜的透射率、发射率、温度和立体角。而透射率、发射率和立体角通常又由系统特点决定，因此可通过降低透镜温度来减小光学系统的辐射强度。立体角 Ω 可由式(3)获得：

$$\Omega=\frac{A_s}{r^2}=\frac{\pi D_0}{4f^2}=\frac{\pi}{4F^2} \tag{3}$$

式中，f 为焦距，D_0为光学系统的口径。如果

光学系统的成像波段为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$，那么由普朗克公式便可计算出温度为 T 的理想黑体的光子辐射强度为

$$E(T) = \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \frac{c_1'}{\lambda^{-4}(e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} \mathrm{d}\lambda \qquad (4)$$

式中，$c_1' = 1.88 \times 10^{23}/\mathrm{s} \cdot \mathrm{cm}^2 \cdot \mu\mathrm{m}^3$，$c_2 = 1.4388 \times 10^{-2}\mathrm{m} \cdot \mathrm{K}$。通过将式(3)和式(4)代入式(2)，可得光学系统到达探测器的总光子辐射强度：

$$E = (1 + \tau + \tau^2)\varepsilon \frac{\pi}{4F^2} \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \frac{c_1'}{\lambda^{-4}(e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} \mathrm{d}\lambda \qquad (5)$$

可以看出，辐射强度只与成像波段以及光学系统的温度有关。基于当前的光学系统，当 $\tau = 0.95$、$\varepsilon = 0.05$、$F = 1.1$ 时，不同温度下与 300 K 温度下的辐射强度比值随温度的变化情况如图 5 所示。其中以温度为 300 K 时的光子辐射强度为基准。为了便于将其与下文中的试验结果进行对比，我们选取了几个具有代表性的温度值。

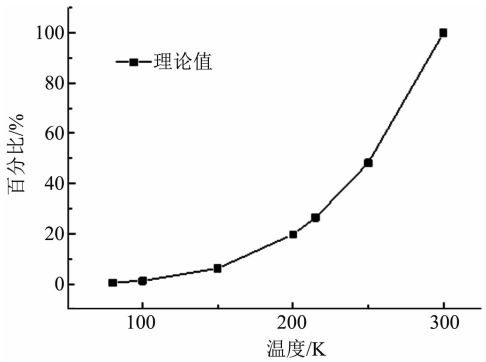


图 5 辐射强度百分比随温度的变化情况

从图 5 中可以看出，温度越高，光学系统的辐射强度越大。当光学系统的温度为 210 K 时，其辐射强度仅为 300 K 时的 1/4。随着温度的下降，热辐射随温度降低的比例减小，且与其呈非线性关系。当温度低于 150 K 时，曲线斜率快速变小；随着温度的进一步下降，继续冷却光学系统所取得的降噪效果不再明显。

为了更加形象地表示光学系统内部热辐射到达像面的情况，我们用 Tracepro 杂散辐射分析软件对系统的内部热噪声进行了仿真(结果见图 6)。可以看出，透镜 3 的热辐射是热噪声的主要来源，这是由于它离探测器最近且热辐射直接照射像面，而透镜 1 和 2 的热辐射必须穿过透镜 3 才能到达像面。通过对系统的内部热噪声进行分析，可以帮助我们找出辐射占比最高的光学元件。在冷量有限的情况下，优先冷却辐射贡献最大的元件。结合上面分析的辐射随温度的变化规律，还可方便地确定光学系统所需的工作温度。

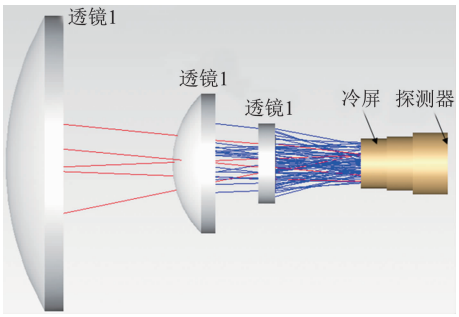


图 6 内部热噪声的分布图

3 实验测试

图 7 所示为光学系统的低温冷源。与传统的回热式制冷机相比，脉冲管制冷机的冷端没有任何运动部件，消除了制冷机冷指中的磨损，而且振动和电磁干扰都大大降低，对光学系统的干扰小。由于具有寿命长、可靠性高、体积小、质量轻和振动小等特点，脉冲管制冷机是用来冷却上述光学系统的最佳选择。本文系统中，用于冷却透镜的脉冲管制冷机在 150 K下具有 25 W 的制冷量，工作时冷指温度最低且与光学系统连接来实现制冷。

在光学系统和光机结构装配完成后，搭建了专门用于验证脉冲管制冷机冷却光学透镜的可行性的试验系统，并对光学系统的内部热噪声进行了测量。图 8 为该试验系统的组成图。测试系统由光学系统、脉冲管制冷机、真空箱体、黑体以及红外探测器组成。光学系统的热量由柔性导热带传递到脉冲管制冷机。由于低温冷量有限，需要采用多种措施来减少漏热，比如在光学系统与真空箱体之间采用绝热支撑以减少导热漏热，同时在光学系统的外部包裹

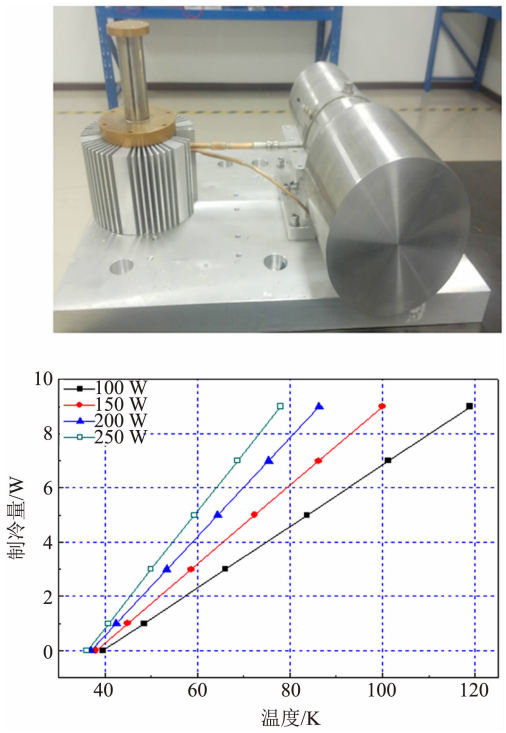


图 7 透镜制冷用脉冲管制冷机

绝热多层材料以减少辐射漏热。

在光学系统中，透镜 1 的口径最大且位于镜头的最前端，其温度最能代表整个光学系统的温度，因此将透镜 1 作为测试对象。光学系统被安装在真空箱体后，脉冲管制冷机开始工作，透镜将被冷却。在冷却过程中，用 12 个 PT100 温度传感器监测透镜以及制冷机冷指的温度。其中，温度计 1、2、3、4、5 被固定在透镜 1 的第一表面上，温度计 7、8、9、10、11 被固定在第二表面上。温度计 6 和 12 分别被固定在镜筒和制冷机冷指上。图 9 所示为光学系统的降温曲线。经过 3 h，透镜温度从室温降至 150 K。尽管光学系统的设计温度为 150 K，但是为了验证用制冷机冷却透镜时所能达到的最低温度，我们冒着透镜碎裂的风险将透镜继续降温，最终达到 105 K 的最低温度。透镜在降温过程中没有碎裂，从而验证了用脉冲管制冷机冷却光学系统的可行性。降温试验中，黑体及冷却黑体的脉冲管制冷机没有工作，处于常温状态。

为了评估内部热噪声与温度之间的关系，用黑体和 HgCdTe 红外焦平面探测器进行了测量。测量时黑体、镜头和红外探测器的相对位置如图 8 所示。由于测量时隔绝了外部的杂散光噪声，探测器的输出信号仅包括黑体辐射、镜头热噪声和暗电流噪声。其中，探测器的暗电流噪声为恒定值，黑体温度保持在 314±0.1 K的范围内，透镜透过率为 0.6，积分时间为 0.4 ms。图 10(a)所示为镜头热辐射部分的探测器输出信号随温度的变化情况。可以看出，红外探测器所探测到的热辐射噪声与透镜温度密切相关。当光学系统的温度从 300 K 降至 215 K 时，热辐射噪声降低了 75%，这与之前的理论分析结果基本一致，如图 10(b)所示。镜头温度没有继续下降，这主要是因为镜头正对温度为 314 K 的黑体，两者之间的辐射换热大，所以制冷机的制冷能力只能将透镜冷却至 215 K。结果表明，在此温度范围内，低温光学系统具有大幅降噪的优点。

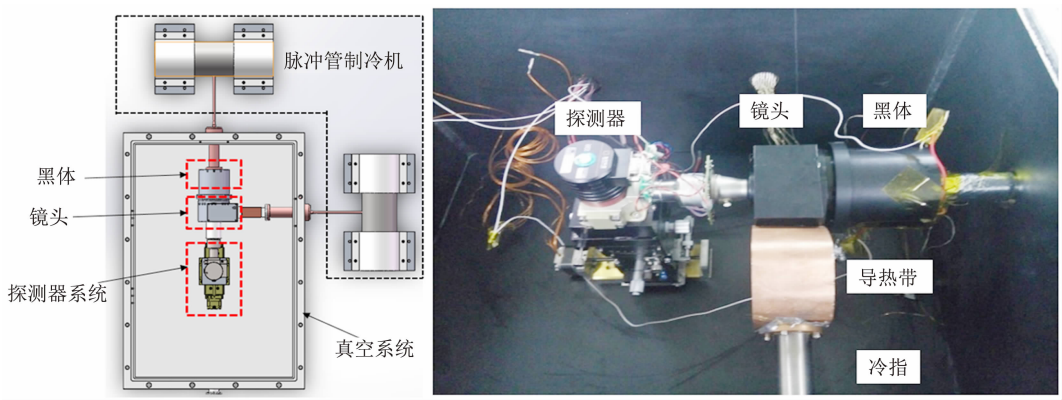


图 8 试验系统的组成图

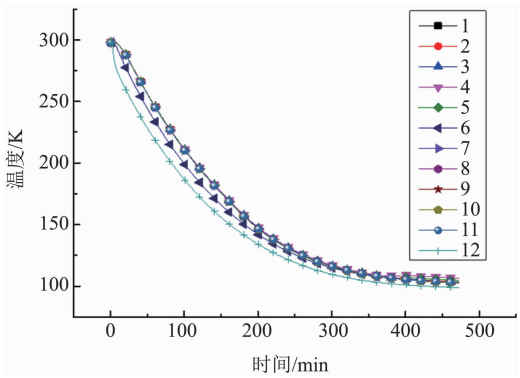
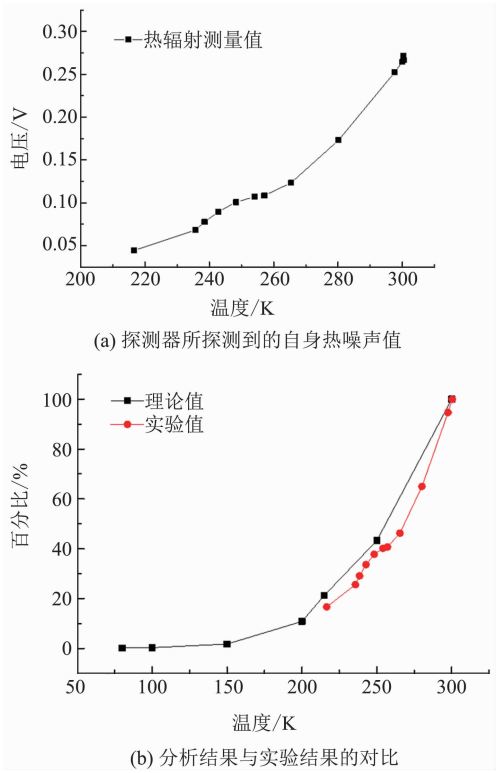


图 9 降温曲线



(a) 探测器所探测到的自身热噪声值

(b) 分析结果与实验结果的对比

图 10 内部热噪声的测试结果

4 结束语

低温光学能够显著降低光学系统的热噪声并提高信噪比，是实现远距离、弱目标探测的必要手段。针对国内低温光学系统大都采用全反射式设计的现状，首次实现了一种将脉冲管制冷机用作冷源的透射式低温光学系统。脉冲管制冷机能使光学系统的温度降至工作温度 150 K，验证了用脉冲管制冷机冷却光学系统的可行性。本文设计的光机支撑结构能够使透镜经受住从室温到 105 K 的温度变化；建立的内部辐射分析模型可用于指导确定光学系统中需冷却的关键部件和工作温度；此外，对内部热辐射噪声进行了定量测量，从实验角度说明了低温光学的有效性，为基于脉冲管制冷机的透射式低温光学系统的发展奠定了基础。

参考文献

[1] 任栖锋，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.

[2] 李春来，吴刚，刘银年，等. 低温光学系统辐射特性研究 [J]. **激光与红外**，2006，**36**(12)：1146-1148.

[3] 沈忙作，马文礼，廖胜，等. 低温光学系统的研制 [J]. **光学学报**，2001，**21**(2)：202-205.

[4] Baumeister H，Bizenberger P，Bayler-Jones C A L，et al. Cryogenic Engineering for Omega2000：Design and Performance [C]. *SPIE*，2003，**4841**：343-354.

[5] Thibault S，Vallée P，Artigau E，et al. GPI — Cryogenic Spectrograph Optics Performances [C]. *SPIE*，2010，**7735**：250-262.

[6] Rohloff R R，Laun W，Graser U，et al. Cryo Design for the VLTI MIDI Instrument [C]. *SPIE*，2000，**4006**：277-288.

[7] Thibault S. Recent Development in Cryogenic Optical and Mechanical Design [C]. *SPIE*，2013，**8720**：308-314.

[8] Greene T，Beichman C，Gully-Santiago M，et al. NIRCam：Development and Testing of the JWST Near-Infrared Camera [C]. *SPIE*，2010，**7731**：176-183.

[9] Kaneda H，Onaka T，Nakagawa T，et al. Optical Performance of the ASTRO-F Telescope at Cryogenic Temperatures [C]. *SPIE*，2003，**4850**：230-240.

[10] Thibault S. Cryogenic Lens Design Case Study：Gemini Planet Imager Spectrograph [C]. *SPIE*，2011，**8128**：802-812.