

# 保持冷却：SRON 开发用于外太空望远镜的热校准系统

观察和分析外层空间中产生新恒星和行星的区域天生需要极其灵敏的探测器。辐射和过热会导致这些探测器失效。通过使用多物理场仿真，SRON 的一支团队正在开发可与这种脆弱设备一起工作的成像光谱仪的校准源。

作者：LEXI CARVER

在外层太空，特别是对于为检测热辐射而要求极低温度的低温系统，热管理具有独特的地位。这是 SRON 荷兰空间研究所的工程团队在设计 Spica 远红外线仪器 (SAFARI) 时面临的一个挑战，该仪器是测量每像素点完整远红外光谱的红外相机。SAFARI 将应用于日本的宇宙

学与天体物理空间红外望远镜 (SPICA)。

SPICA 的太空观测深度超出了之前的任何太空望远镜。由于 SAFARI 具有冷却到略高于绝对零度的超灵敏探测器，所以与之前的空间相机相比，它可以捕获更弱的远红外线辐射。精确的地面和空间校准对于传感器的精度和太空

任务的成功至关重要。为了设计和优化这些校准系统，SRON 的团队借助于 COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> 仿真来为他们提供指导。

## 克服望远镜校准系统中的发热

SAFARI 的校准源包含一个黑体空

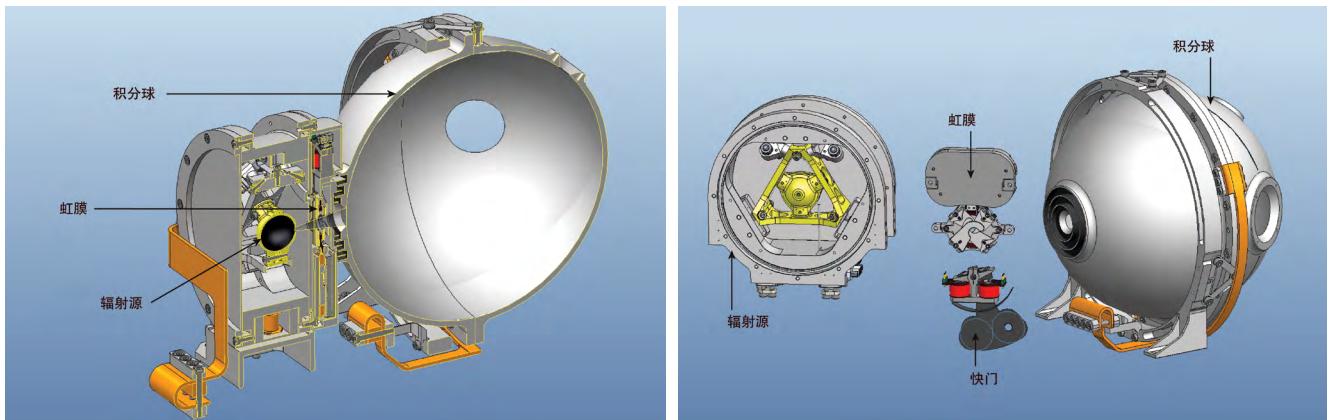


图 1：左：SAFARI 校准系统的截面。右：各个硬件组成部分。

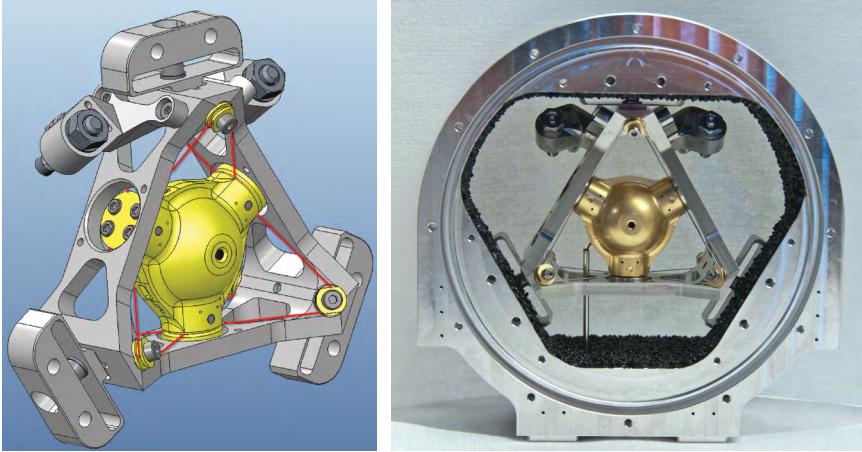


图 2：左：具有不锈钢悬架钢丝（以红色突出显示）的辐射源的 CAD 绘图。右：实际的硬件。

“COMSOL 使我们可以快速研究不同的几何形状，这在其它情况下是难以分析的。”

“辐射源温度可以设置在 95 和 300 K 之间产生辐射 — 这会在辐射源和 4.5 K 环境之间产生很大的温差，而这些温度下的可用冷却功率只有几十毫瓦，” de Jonge 解释说：“考虑到这一点，我们需要设计热绝缘的悬架系统。” SRON 团队需要具有高谐振频率的硬悬架，防止热从辐射源传到设备的其余部分，同时保护它免受不希望的扰动。

腔或辐射源，该辐射源提供辐射光谱仅依赖于源温度，这使它成为一个非常可靠和精确的校准器。“然而，SAFARI 的探测器太过于敏感，辐射源产生的功率超过了其承受的一百万倍，必须使用光圈和积分球进行光学稀释，” SRON 的设计工程师 Chris de Jonge 说道：“经过积分球之后，具有正确功率和光谱分布的辐射会在 SAFARI 的探测器阵列上重新成像，进行校准。”在积分球与辐射源

之间是机械快门和虹膜机构（见图 1）。快门用于打开和关闭到辐射源的光圈，虹膜则用于微调调制输出功率。

热管理至关重要：该系统置于 4.5 开尔文 (K) 的“超暗”环境中，以降低来自设备自身的背景辐射。探测器基本温度的变化、背景辐射（受航天器方向影响）和由光圈和快门机构耗散的功率等因素都会扰乱校准。

### 设计热绝缘的悬架系统

使用 COMSOL 仿真，de Jonge 评估了通过悬架的热载荷，并对具有不同形状和材料的悬架概念模型进行了模态分析，寻求机械刚度和热载荷之间的折衷。“COMSOL 使我们可以快速研究不

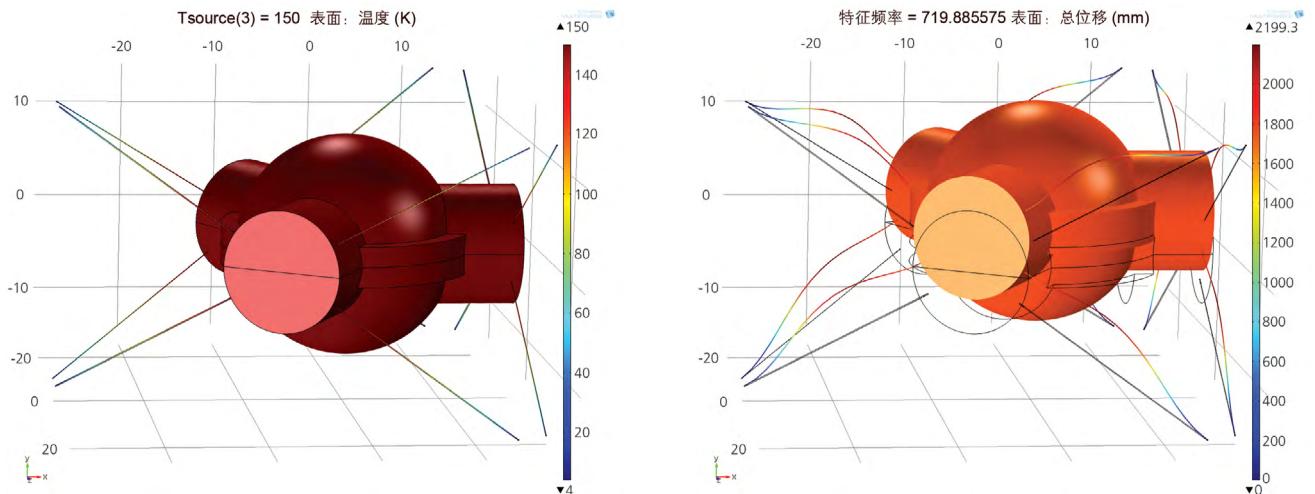


图 3：左：辐射源系统的热模型，具有 (1) 不锈钢悬架钢丝，(2) 辐射源主体，(3) 悬架台和 4.5 K 周围环境之间的界面。右：辐射源的模态分析，显示的谐振频率为 720 Hz。

同的几何形状，这在其它情况下是难以分析的，” de Jonge 评论道：“由于支架上的温度梯度很大，并且热属性会按温度函数的形式发生快速变化，所以必须实现随温度变化的材料属性。最终，我们选择了对机械刚度和热绝缘有最佳组合的解。”基于仿真结果，该团队设计并优化了一种采用细 (100  $\mu$ m) 不锈钢钢丝将辐射源支撑在三角形框架中的构型 (见图 2)。

由于不锈钢在低温下的热导率很低，并且钢丝的截面极小，通过钢丝的热传导会受到限制，这得到了仿真结果的证实 (见图 3)。对于 150 K 的辐射源温度，实验分析表明产生了 10.17 mW 的传导热。仿真结果密切吻合，精确到了 0.01 mW。此外，该设计的谐振频率为 720 Hz，足以确保辐射源的正常工作。

### 优化虹膜和快门以实现最高效率

接下来，de Jonge 优化了线圈驱动的虹膜和快门机构 (见图 4)。虹膜通过音圈致动器驱动，包含四个围绕无摩擦轴承旋转的不锈钢叶片。快门是一个磁性闭锁装置。

De Jonge 使用 COMSOL 来优化虹膜线圈和外壳几何 (仿真结果如图 5 所

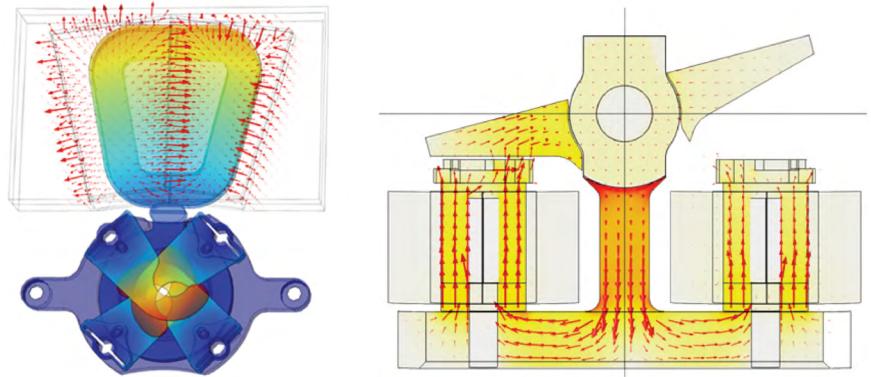


图 5：左：虹膜机构的模型，分别显示了叶片和线圈的总位移（表面图）和磁通密度（箭头）。使用多体动力学模块和 AC/DC 模块来执行仿真。几何使用 COMSOL LiveLink™ for Creo™ Parametric 导入几何。右：快门机构的模型。研究了磁场力与线圈电流和锚角的函数关系。

示)，目的是最大程度降低驱动期间的电流和耗散热量。通过对关于气隙和线圈绕组组的主要设计参数执行参数化扫描，该团队开发了最佳的线圈设计，具有 38 mA 低驱动电流，功率耗散仅为 1.6 mW。

### SRON 的热稳定深空遥感系统正在准备中

由于 SAFARI 具有灵敏的探测器，并需要低温系统中的耗散机制，所以保持可控的热环境对完成 SPICA 太空任务至关重要。COMSOL 使 de Jonge 和

SRON 的团队可以优化他们的设计，获得极低温度下可能的最佳传热、材料和结构条件。SAFARI 校准源的第一次测试验证了 COMSOL 仿真的准确性。SPICA 预计将在 2022 年发射到太空轨道，届时 SAFARI 将帮助我们揭开太阳系以外太空的新的神秘现象。■

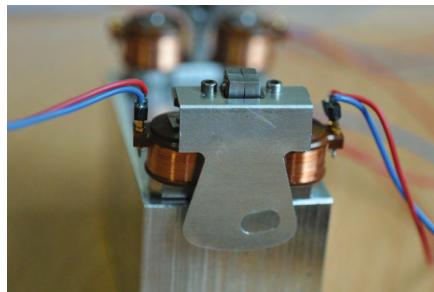
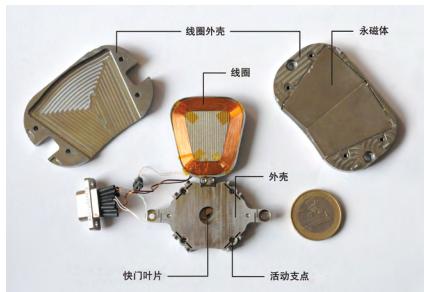


图 4：左：虹膜装配体的元件，包括线圈、绕组和外壳。通过光圈中心可看到叶片的边缘（内部）。右：快门机构。



SRON 的设计工程师 Chris de Jonge 正在研制 SAFARI 校准系统。