

国外低背景红外冷舱测试系统综述

石学虎, 武晓阳, 王英瑞
(航天科工集团二院二十五所, 北京 100854)

摘要: 为了解决红外系统低背景探测性能的测试与评估问题, 需要建立一套能够模拟低背景探测环境的红外冷舱测试系统。首先, 介绍了国外低背景红外冷舱测试系统的发展概况; 重点梳理了美国空军实验室的真空冷舱系统(KVACC)的研制历程, 并介绍了KVACC的舱体、冷却系统、真空保持系统、低温准直光学系统、低温目标源及场景投影系统、低温标定系统、超洁净无尘试验室及监控系统等七大主要组成部分及各部分的功能, 总结了冷舱系统研制的关键技术; 分析了KVACC冷舱系统的发展途径及设计特点, 并对我国冷舱技术的发展提出了建议。

关键词: 红外系统; 红外探测; 冷舱; 低背景; KVACC

中图分类号: V271.4; TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0053-04

Summarization of Testing Systems for Low-Background Infrared Cryogenic Chamber

SHI Xuehu, WU Xiaoyang, WANG Yingrui
(No. 25 Institute, The Second Academy of CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to test and evaluate the performance of the infrared system in low-background, a cryo-chamber system is needed for simulating the low-background environment. First, the general situation of the cryo-chamber technologies abroad is presented. Then, the development of the Kinetic Kill Vehicle Hardware-in-the-Loop Vacuum Cold Chamber (KVACC) and the functions of each part are introduced, including the chambers, the cooling system, the vacuum system, the cryogenic optical system, the cryogenic radiometer system, the clean room environment and the monitoring system. The key technologies of the cryo-chamber system are summarized, including the cryogenic optical technology, the cryogenic electromechanical technology and the cryogenic resistor array technology. In the end, the development and design characteristics of KVACC are summarized, and a suggestion to the development of the cryo-chamber technologies at home is put forward.

Key words: infrared system; infrared detection; cryo-chamber; low-background; KVACC

0 引言

随着红外探测技术向太空领域的拓展, 对红外系统低背景探测性能测试与评估的需求越来越迫切。红外探测系统对外太空观测时, 面对的是空间低温冷背景。在室温条件下用常规的测试方法和设备对该类系统进行测试时, 难以保证被测系统工作性能的天地一致性。为了对红外探测系统的低背景探测性能进行准确的测试与评估, 需要建立一套能够模拟空间低背景探测环境的测试设备, 以保证红外系统的测试背景与实际工作背景的一致性。配有低温目标源和准直光学的冷舱测试

系统能够为红外系统提供低温背景和目標源, 可以满足红外系统低背景探测性能测试的要求, 是对红外系统低背景探测性能进行测试和评估的有效途径。

1 国外技术发展概况

国外的冷舱测试系统经过了十几年的发展和应用, 技术已经比较成熟, 对我国冷舱测试技术的发展有重要的借鉴意义。早在20世纪90年代, 美国就陆续研制了多种类型的红外冷舱测试系统, 用于红外系统低背景探测性能的测试与评估。主要包括美国空军实验室的KVACC真空冷舱系统、阿诺德工程发展中心(AEDC)的7V&10V真空冷舱系统、约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室(GSEL of JHU/APL)和林肯实验室(MIT LL)的真空冷舱系统等。这些冷舱测试系统在美国反导动

能拦截武器系统(如 GBI、SM-3 和 THAAD)的红外探测系统的研制和测试过程中起到了重要的作用^[1-6]。其中, KVACC 冷舱系统的发展主线比较清晰, 有较强的借鉴和参考价值。

2 KVACC 系统

KVACC 是美国空军实验室低温场景综合性能测试系统的核心设备, 1995 年开始投入使用。经过十多年的发展和升级, KVACC 由最初只具备低仿真能力的初级低背景测试舱, 发展为多功能综合场景低背景测试设备, 其研发途径对国内冷舱系统的研制具有较强的参考价值。

KVACC 系统主要由以下部分组成: 真空低温舱体、闭环冷却系统、真空保持系统、低温准直光学、低温目标源、低辐射标定系统和超洁净无尘试验室等^[7]。

2.1 舱体

KVACC 采用三舱设计(光学主舱、辐射源舱、待测设备舱), 3 个舱体之间采用相对独立的设计, 使得单个舱体的改动基本不会影响整个系统的结构布局。KVACC 最初只有光学主舱和辐射源舱两个舱体, 后来经过多次升级加装了待测设备舱, 并更换为更大尺寸的辐射源舱, 其最终布局如图 1 所示。

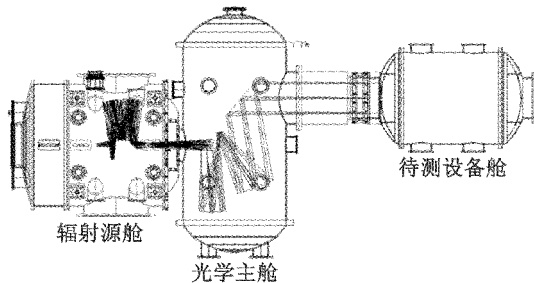


图 1 KVACC 冷舱布局图

Fig. 1 KVACC chamber layout

舱体热沉的温度低于 80 K, 用于保持舱内的低辐射背景。光学主舱的尺寸约为 $\varnothing 2.0 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$, 主光路位于光学主舱内。由于在设计之初就充分考虑了系统的可扩展性, 在历次的升级中, 主舱及主光路的结构基本没有改变。最新升级的辐射源舱的尺寸约为 $\varnothing 1.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, 目标源以及匹配光路置于辐射源舱内, 可以根据需要来选择不同类型的目标源。待测设备舱的尺寸约为 $\varnothing 0.9 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$, 待测产品置于待测舱内, 并配有调整转台, 可调整待测产品与主光路的对准。

2.2 冷却系统

KVACC 的主冷却系统最初采用的是开环液氮制冷, 之后为了应对舱体的增加(待测设备舱)带来的制冷能力的不足, 于 1997 年增加了闭环氦气冷却系统。闭环冷却系统具备在无人看护的情况下连续工作的能

力, 并将整个系统制冷时间缩短到一周左右。冷却系统包括 3 个独立的回路, 分别制冷 3 个舱体。3 个舱体之间可以通过手控阀门系统相互隔离, 以便控制单个舱体独立升温及开舱操作, 而不影响其他舱体的正常运行, 极大地缩短了测试时间。

2.3 真空保持系统

真空保持系统为冷舱系统提供了清洁的真空环境, 有效地模拟了被测红外系统工作时所处的空间环境。在冷却系统启动前舱内的真空度可以达到 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$; 在冷却系统启动后, 舱内真空度可以维持在 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 以下, 整个抽真空过程小于两天。并在设计上保证了真空保持系统不会对舱内造成挥发性污染。

2.4 低温准直光学系统

低温准直光学是冷舱系统中的核心设备之一, 整个准直光学系统都要制冷到 100 K 左右, 而且要保证光学系统在低温的环境下保持较好的像质。KVACC 的主光学采用离轴三反准直光学系统, 包括两个凹椭球面, 一个凸双曲面和两个平面镜, 主要设计参数见表 1^[8]。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Optical system design parameters

参数	设计值
口径/cm	30
焦距/cm	178
视场/(°)	1.47×1.47
$F/\#$	5.9
衍射限斑(波长 $12 \mu\text{m}$)	$73 \mu\text{rad}$
波前误差(波长 $10 \mu\text{m}$)	0.052
最大失真/%	<0.4

2.5 低温目标源及场景投影系统

KVACC 的低温目标源系统除了包含高精度的目标黑体和背景黑体外, 还配备了 512×512 规模的低温电阻阵场景投影系统和基于 PC 的场景产生器。场景投影系统可以模拟各类目标在不同距离、不同视角、不同温度下的特性, 使得系统具备了场景仿真的功能。其生成的模拟目标图像如图 2 所示^[9]。

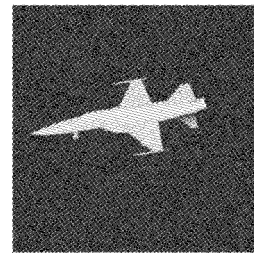


图 2 电阻阵生成的图像

Fig. 2 The resistor array generated image

随着双色红外探测系统的发展和应用, 1999 年又将电阻阵场景投影系统升级成了双波段投影系统。双波段投影系统由两个电阻阵融合而成, 两个阵面可独立控

温。表2给出了KVACC中应用的电阻阵部分参数^[9]。

表2 电阻阵参数

Table 2 Resistor array parameters

电阻阵参数	设计值
像素尺寸/ μm	51
阵列规模	512 × 512
几何填充因子/%	30
上升时间(10% ~ 90%)/ms	5.0
下降时间(90% ~ 10%)/ms	2.5
像素有效率/%	99.9
原始非均匀性/%	10
残余非均匀性/%	0.5
最大物理温度/K	900
最大表观温度(MWIR)/K	650
最大表观温度(LWIR)/K	500
衬底温度/K	80
最大数据更新率/Hz	200
工作电压/V	1.1 ~ 2.3

2.6 低温标定系统

由于KVACC的辐射源的辐射通量可以降到很低的水平,使得常规的红外辐射计无法测量到其辐射能量的大小。因此,1999年KVACC在待测设备舱增加了低温辐射成像系统(GIRS),用于系统辐射源的标定。GIRS的光学系统利用氮气制冷,可以大大降低GIRS自身热辐射的影响。同时GIRS周围设计了闭环控温的冷屏,能够有效屏蔽周围的杂散辐射,从而具备对低温辐射源精确测量的能力。

2.7 超洁净无尘试验室及监控系统

KVACC在2003年为整个冷舱系统建设了1000级洁净设备间和10000级洁净控制室。在控制室内配置了完备的监控系统,监控整个系统运行情况,包括记录舱内的气压、温度和压缩机水冷回路运行等情况。在情况发生异常时系统会自动报警。

2.8 小结

KVACC的7大组成部分是一个有机的整体,共同完成红外系统低背景性能测试,主要流程为放入产品→对准光路→抽真空、制冷→测试。

首先将产品放入待测设备舱固定,通过待测舱内的转台调整产品的姿态,实现与主光路的对准。然后,关闭舱门进行抽真空和制冷过程,当真空度和温度达到测试要求时,开始测试。测试内容包括非均匀性测试、灵敏度测试、动态性能测试等。

3 冷舱研制的关键技术

3.1 低温光学技术

低温准直光学系统要解决如下关键技术问题。

1) 镜体材料。低温光学系统工作温度较低(约100 K),要选择低温形变均匀、与光学装调平台热膨胀

系数相近的镜体材料以保证光学系统的低温像质。国外低温光学系统大都选用铝合金材料,通过合理的外形等厚设计、装卡设计和材料特性稳定化处理等方法,使反射镜不发生非均匀变形。辅以靶标轮的微调,保证光学系统的低温像质。

2) 杂散辐射屏蔽。冷舱内的黑体和被测系统工作时,其发热部件将成为很强的杂散辐射源,对系统测试产生影响。为此,在光路设计中要对杂散辐射进行分析计算,合理设置低温辐射挡板,屏蔽杂散辐射。

3) 宽视场。为了使系统兼顾性能测试和仿真试验的需求,光学系统不仅要有好的像质,还要具备一定的视场,以模拟出与待测系统视场匹配的场景。KVACC中光学系统的视场为 $1.47^\circ \times 1.47^\circ$ 。

4) 光学装调。要实现复杂长光路的精确装调,并保持在低温下结构的稳定。国外冷舱中光学平台能够通过导轨拉出,方便操作;同时配有运动机构,能够在真空低温条件下对光学镜片进行微调。

3.2 低温机电技术

在低温真空环境下的转台等运动机构存在以下关键技术。

1) 机械材料。在低温条件下,材料特性的变化会使转台等运动机构的机械结构特性发生变化,如果不采取相应的技术措施,会使运动机构的工作性能严重下降,甚至不能正常工作。需要采用耐低温材料,同时对关键部位采用高反射率保温膜进行保温处理。

2) 散热问题。在真空低背景的环境中,电机绕组等发热部位只能通过热辐射和机座的热传导散热。一方面,电机散热太慢会使电机绕组温度升高,甚至烧坏;另一方面,发热部位造成的杂散辐射会对试验环境产生不利影响。因此,需要控制电机绕组的损耗,并进行热计算和热设计,在辐射和传导散热条件下,控制电机的温升,使绕组温度在安全温度以下,能够减小电机升温对低背景的影响。

3) 轴承润滑。要求润滑剂在真空低温环境中不能凝固和挥发。固体润滑材料可以解决真空低温条件下的润滑问题,尤其是低速驱动时更适合采用固体润滑。

3.3 低温电阻阵技术

国外低温场景模拟系统多采用低温电阻阵投影技术。将电阻阵应用到冷舱中,还存在以下关键技术。

1) 控温。在冷舱环境中,电阻阵要能够工作在比较低的表观温度下,同时电阻阵的温度要能够被实时监控。常温电阻阵采用半导体制冷加循环水散热的设计,很难使其表观温度降到 0°C 以下。国外低温电阻阵系统采用导热带的方式,将电阻阵的外壳与冷舱热沉连接到一起,通过加快热交换可以将电阻阵降到比较低的温

度。另外,在电阻阵外壳上还安装了加热元件,通过控制加热元件的工作状态来改变电阻阵与热沉的热交换速度,从而加强了系统对电阻阵温度的实时控制。

2) 测量。由于电阻阵的表观温度可以降到 150 K 以下,辐射能量很小,因此需要研制类似 GIRS 的系统对电阻阵的辐射进行标定。

4 结 论

从以上介绍可以看出,KVACC 的研发思路非常清晰,采用了模块化设计,具有强大的可扩展性。国内冷舱系统的研制可以借鉴国外的发展路线,充分考虑系统可拓展性。在技术条件和资金条件受限的情况下,先搭建起具备基本测试功能的冷舱系统,然后依托相关技术的发展逐步进行系统功能的升级。

参 考 文 献

- [1] FLYNN D S, MARLOW S A. Development of a 2-color projection system for the KHILS Vacuum Cold Chamber (KVACC) [C]//SPIE, 2000, 4027:236-247.
- [2] LOWRY H S, BREEDEN M F, CRIDER D H, et al. Projection technologies for imaging sensor calibration, charac-

terization, and HWIL testing at AEDC [C]//SPIE, 2010, 7663:766303-1-766303-12.

- [3] HAYES A G, DOWNS G, GABRIELSON A, et al. The seeker experimental system at MIT Lincoln laboratory [C]//SPIE, 2006, 6208:602809-1-620809-11.
- [4] ARENDT J W, BINDUGA G E. Broadband zoom collimator for installation on a flight motion simulator at the KHILS facility [C]//SPIE 2009, 5408:66-75.
- [5] MURRER R L, THOMPSON JR R A. Developments at the kinetic-kill vehicle hardware-in-the-loop simulator (KHILS) facility [C]//SPIE, 1999, 31-47.
- [6] BASTOW M, SAYLOR D. Scene generators/ projectors and optical sensor interface issues [C]// SPIE, 2003, 1967:89-98.
- [7] GLATTKE E W, THOMPSON R A, MARLOW S A. KVACC cryogenic complex scene test capability for 1 and 2-color sensors [C]//SPIE, 2006, 6208:62080A-1-62080A-12.
- [8] LIPPERT J R, TIMMS V G. Capability and integration test of the KHILS Vacuum Cryogenic Chamber (KVACC) [C]//SPIE, 1996, 2741:150-156.
- [9] THOMPSON R A, HERALD W L, BERGIN T P, et al. Advances in cryo-vacuum test capabilities for dual-band sensors at the kinetic kill vehicle hardware-in-the loop simulation (KHILS) facility [C]//SPIE, 2004, 5408:107-117.

(上接第 43 页)

该区间最大值相对增加 2.59%。因此,融合法提纯匹配对的性能比比值法好,而且克服了比值法阈值选择模糊的缺点。

4 结 束 语

为满足 UCAV 认知导航对特征点匹配对高匹配分数和低误匹配率要求,本文在研究 SURF 算法特征点提取基础上,提出了一种特征点匹配融合方法。该方法将比值法和相关法相结合,以最近距离为标准获得粗匹配对,采用融合的阈值区间作为匹配对提纯依据。实验结果表明,该方法下匹配对有较高匹配分数和低的错误率,同时克服了比值法无先验知识时阈值选择不明确的缺点,避免了遍历式求相关系数时的耗时问题,是一种有效的特征点匹配方法。

参 考 文 献

- [1] 吴德伟,邵能建,戚君宜. 基于认知理论的 UCAV 智能导航研究新进展 [J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(4):52-57.
- [2] 邵能建,吴德伟,戚君宜. 基于改进 SIFT 的高鲁棒性特征点提取方法 [J]. 航空学报, 2012, 33(12):2313-2321.
- [3] BAY H, TUVTELLARS T, GOOL L V. SURF: Speeded up robust feature [C]//Proceedings of the European Confe-

rence on Computer Vision. Graz, Austria: University of Liubljana, 2006:404-417.

- [4] 王永明,王贵锦. 图像局部不变性特征与描述 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- [5] TORR P H S, ZISSERMAN A. MELSAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 78(1):138-156.
- [6] FISCHLER M, BOLLES R. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1981, 24(6):381-395.
- [7] MUNAWAR A, QAISAR A, EJAZ A, et al. Autonomous target detection using segmented correlation method and tracking via mean shift algorithm [C]//IEEE International Conference on Mechatronics, 2011-5-17-19:1-6.
- [8] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple feature [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001, 1:I-511-I-518.
- [9] SIMARD P, BOTTOU L, HAFFINER P, et al. Boxlets: Fast convolution algorithm for signal processing and neural networks [C]//Advances in Neural Information Processing Systems, 1999, 11:571-577.
- [10] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10):1615-1630.