

文章编号: 1007-4627(2019)03-0388-06

基于 EPICS 的颗粒传热实验测控系统应用研究

宋海声¹, 刘聪^{1,2}, 赵强^{2,3}, 强成文^{2,3}, 李龙^{2,3}, 王飞^{2,3}, 张艳斌^{2,3}, 张雪莹^{2,3}

1. 西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730000;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
3. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 颗粒传热实验测控系统是为颗粒换热平台设计的测控系统。该系统基于分布式系统 EPICS 架构设计, 通过对 NI 硬件平台、红外热像仪设备以及 Oracle 数据库进行集成, 实现了颗粒换热平台实验的在线采集、监测、控制与实时存储。由于红外热像仪具有灵敏度高、测温范围广、非接触测温等优点, 因此在该测控系统中用于测量颗粒在换热器出口处的温度。本文使用 SDK 将其集成到 EPICS 系统中, 利用红外图像更加直观地呈现出颗粒的实时温度分布, 并提取红外图像中的数据, 与热电偶的测量数据对比, 进一步检测利用红外热像仪作为一种颗粒实时温度测量设备的可行性。实验结果表明, 集成后的红外热像仪操作软件能够实时提取并存储红外图像中的温度数值, 并且采用 EPICS 架构设计、开发的颗粒传热实验测控系统完全可以满足颗粒换热平台的数据采集与存储需求。

关键词: 颗粒传热; EPICS; 红外热像; 数据库; 测控系统

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.03.388

1 引言

颗粒体系内热量传递现象普遍存在于自然界中, 同时, 也广泛存在于能源、化工、制药等工业生产中。深入分析和掌握固体颗粒间传热机理和传热规律, 对于提高相关工业过程的系统效率具有积极意义^[1]。诸多学者在不同领域开展了颗粒体系内传热的相关研究, 加速器驱动次临界系统(ADS)中的散裂靶便是其中之一。ADS 是 20 世纪核科学技术发展中两大工程——加速器和反应堆的“结合体”, 它能将长寿命高放核废料嬗变成短寿命核废料, 被认为是最有效的核废料处置技术方案。散裂靶作为加速器和次临界堆芯的耦合部件, 是 ADS 系统中最重要的部分之一^[2-3]。目前国际上主要使用固体散裂靶和液态散裂靶, 但两种靶各有不足之处。因此, 一种新型的颗粒流靶的概念被提出, 这种流体化的固体颗粒靶结合了固体靶和液态靶的主要优点, 可承受的束流功率高于现有靶型^[4]。ADS 在运行过程中, 靶区会产生极大的功率密度, 必须将沉积的能量有效导出以保证系统的安全性^[5], 因此需要对颗粒流靶在靶区中的流动和换热特性进行研究。

颗粒换热平台旨在测试颗粒流靶的换热性能, 如图 1 所示。颗粒换热平台主要由加热料罐、板式换

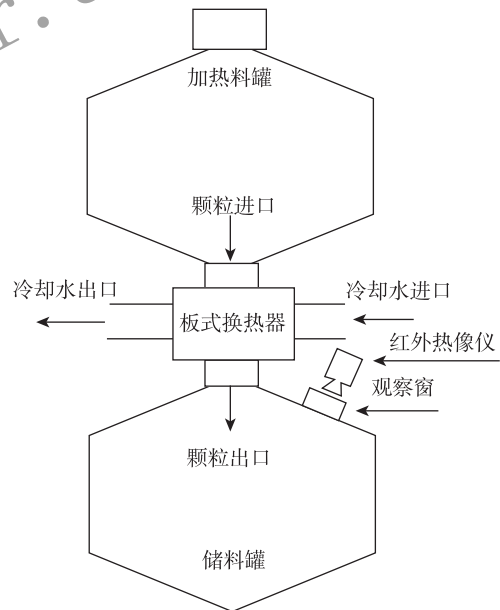


图 1 颗粒换热平台结构简图

器、储料罐、观察窗以及冷却水回路组成。实验中使用的固体颗粒为直径 1 mm 钨合金颗粒。通过测量冷却水和钨合金颗粒在板式换热器处的进出口温度, 从而计算得到换热器的换热效率。颗粒传热实验测控系统是为该换热平台设计的测控系统, 该系统使用 NI 硬件平台和

收稿日期: 2019-06-28; 修改日期: 2019-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11664036, 11605258); 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA21010202)

作者简介: 宋海声(1964-), 男, 甘肃兰州人, 副教授, 从事计算机测量与控制研究; E-mail: songhs@nwnu.edu.cn.

红外热像仪实现对换热平台的测量和控制，使用 Oracle 数据库完成数据的实时存储。相较于热电偶，红外热像仪为非接触测温，有很多测温优势，但是红外热像仪没有现成的 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)驱动程序，无法直接与 EPICS 系统集成。本文通过 SDK(Software Development Kit)实现对红外热像仪的实时访问，同时加入串口通讯功能间接实现了红外热像仪与 EPICS 的集成，如图 2 所示，该软件可以对红外热像仪拍摄到的红外图像进行处理，从数据量较大的红外图像中提取并存储所需数值。此外，由于红外热像仪集成到了 EPICS 控制系统中，颗粒传热实验测控系统也可以实现一些红外温度作为反馈信号的控制过程。

2 基于 EPICS 的颗粒传热实验测控系统架构

本文考虑到 ADS 高功率靶的控制系统是基于分布式实时控制软件 EPICS 架构开发的，因此颗粒传热实验测控系统也基于 EPICS 控制系统设计和开发。EPICS 即实验物理学与工业控制系统，是一种用于对粒子加速器、天文望远镜等大型实验设施构建分布式控制系统并对其进行操作的软件构架。其采用了分布式控制系统具有的标准模型，具有运行稳定、系统结构灵活、开放性好、可扩展性好、国际交流协作方便等诸多优点^[6]。EPICS 由三部分组成，包括运行在客户端的操作员接口模块 OPI(Operator Interface)、运行在服务器端的输入输出控制模块 IOC(Input Output Controller)和网络通讯模块 CA(Channel Access)。

图 2 是基于 EPICS 的颗粒传热实验测控系统架构，图中总控制界面使用 LabVIEW 软件作为 OPI 与 EPICS 连接，它实时接收并显示各项实验数据并按照实验所需完成控制指令的发送。NI 硬件平台

在 NI 设备机箱上运行，通过共享内存方法与 EPICS 控制系统集成；为了将红外热像仪与 EPICS 兼容，本文特为红外热像仪配备了一台 PC 机，红外热像仪通过网线与 PC 机连接，PC 机上运行有利用二次软件开发包(SDK)开发的操作系统。PC 机通过串口与 LabVIEW IOC 完成数据交互，并最终集成到 EPICS 控制系统中；Oracle 数据库运行在 Linux 操作系统下，本文利用 EPICS Base 自带的软 IOC，实现了与 EPICS 的集成。并通过 EPICS 提供的库函数与数据库接口函数实现了实验数据的存储记录功能。

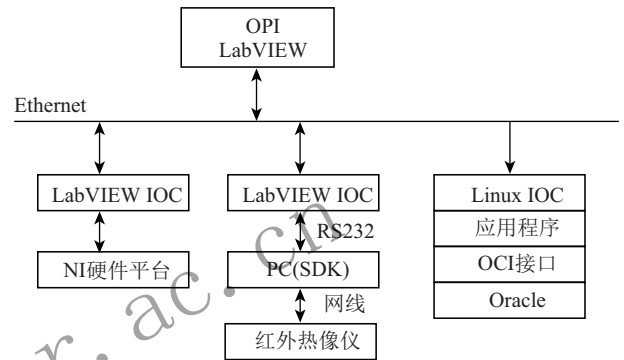


图 2 颗粒传热实验测控系统架构

2.1 NI 硬件平台与 EPICS 的集成

总控制系统中 NI 硬件平台使用 LabVIEW 编程工具软件通过 NI 设备板卡 PXI-6238、PXI-6259、PXIe-4353 及其接线设备分别连接电动球阀、电加热棒、电磁流量计、轮辐式压力传感器、温度变送器、轮辐式称重传感器以及热电偶。如图 3 所示，图中 CB-37F-HVD、SCB-68、TB-4353 为三个 NI 板卡对应的接线盒。通过电加热棒、电动球阀、继电器和外接电源等设备实现对加热料罐中钨合金颗粒的加热控制与冷却水回路中阀门的控制，并对热电偶与冷却水回路中的各类传感器测量数据进行采集。

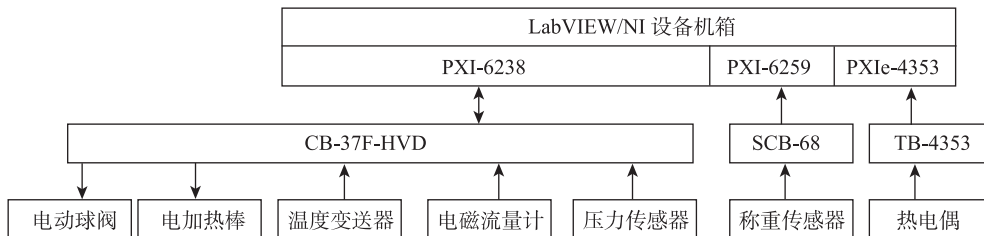


图 3 NI 硬件平台部分设备结构图

LabVIEW 是一个功能强大的图形化编程环境，它的开发主要是为了方便仪器控制以及数据采集和分析。用 LabVIEW 创建的应用程序称为虚拟仪

器(VIs)，VI 源代码是使用图形编程语言在一个称为框图的窗口中创建的。LabVIEW 实现了一种数据流范式，在这种范式中，代码不被编写，而是被

绘制或以类似流程图的图形形式表示^[7-8]。本文采用由美国散裂中子源(SNS)开发的共享内存(Shared Memory)^[9]，通过其提供的LabVIEW-EPICS接口与LabVIEW实时模块(Real-Time 14.0.0)提供的I/O服务器实现了LabVIEW与EPICS的集成。每个过程变量(PV)绑定一个网络共享变量，使用LabVIEW客户端VI和服务器VI实现对网络共享变量的读取和写入。LabVIEW先将需要交互发送的数据写入到对应的网络共享变量中，然后通过对应的接口按照EPICS控制系统的网络协议格式发送出去。

2.2 红外热像仪与 EPICS 的集成

换热实验大多使用热电偶进行温度采集，本文选择红外热像仪测量颗粒在换热器出口处温度的原因主要有：①热电偶只能测量局部位置处的温度，而红外热像仪则可以通过红外成像和算法处理得到某一区域内的温度；②热电偶通过与颗粒直接接触测温，由于热传导的影响，其精度较高但响应性较慢，而红外热像仪通过红外成像可以直接并快速得到该区域的温度场，其灵敏度高，响应性快，可以实现温度作为反馈信号的控制过程；③通过算法处理，可以得到集成后的红外热像仪所测得的红外图像中目标区域温度数据的标准差，据此可以判断颗粒温度的均匀性。

红外热像仪配套的商用软件是一款独立运行的软件，无法集成到EPICS中。本文利用二次软件开发包提供的库函数，在PC机上自主开发了红外热像仪的操作软件，实现了温度场中最大值、最小值、平均温度、标准差以及最大值、最小值的位置坐标等数值的实时显示。该操作软件还开发有串口通讯功能，从而实现与LabVIEW IOC间的数据传输，并完成了与EPICS控制系统的集成。图4为红外热像仪操作软件的流程图。软件启动时会首先搜索并完成动态库文件的加载，同时完成对红外热像仪设备各项参数的初始化。所有初始化进程完成之后，软件会建立并运行两个进程，其中一个进程会周期性的对红外热像仪进行实时访问，对红外热像仪的实时参数进行读取，并根据上级控制界面的指令完成对红外热像仪的操作；另一个进程则周期性的对串口进行数据通讯，协同LabVIEW IOC完成与EPICS系统中其它设备的数据交互。

2.3 远程数据库存储

为了方便实验人员对实验数据的后续处理和分析，颗粒换热平台测控系统将测量的实时实验数据存储到远程数据库中。考虑到Oracle数据库在数据存储

方面具有十分卓越的性能，该实验最终选择Oracle作为远程数据库。该功能选择在Linux系统下开发，这样，一方面可以简化该功能作为一个IOC与EPICS平台的兼容与互联，另一方面，可以充分利用针对数据库开发的OCI接口函数实现所需的功能。本文在Linux操作系统下编写应用程序，利用CA提供的接口函数读出IOC实时数据库中的数据，并使用Oracle数据库的OCI编程接口，将数据存入到数据库相应的表中。

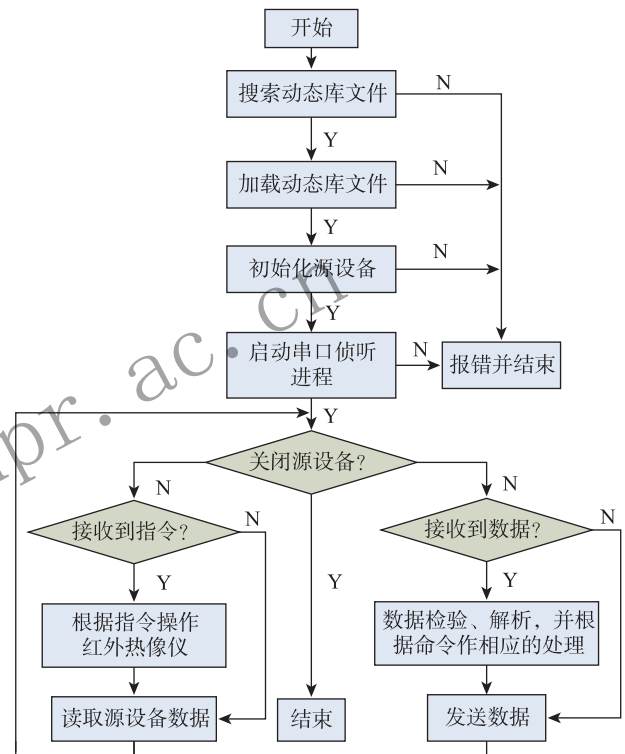


图 4 红外热像仪操作软件流程图

为了检测在数据传输与处理的过程中是否存在丢失数据现象，每一组实验数据都被赋予唯一的一个编号，一方面可以通过检测编号是否连续来判断是否出现数据丢失。另一方面编号也可以在处理分析时作为实验数据的时间，即 $t_n = t_0 + n\Delta t$ ，其中： t_n 是第 n 条记录的时间； t_0 是实验的开始时间； Δt 是相邻两条记录间的时间间隔。本文在 EPICS 控制系统下使用 LabVIEW 来生成并发送带有编号的测试数据，同时在另一侧 Linux IOC 下接收测试数据，通过与上一次接收到的测试数据的编号进行对比，判断是否存在数据丢失并进一步计算得到数据的丢失率。经过测试，在无数据丢失的情况下传输并存储数据的速率最高可以达到 20000 个/s，完全可以满足此换热平台的数据存储要求。另外，由于 Oracle 通常处理数字的速度比任何其他数据类型更快，因此将 ID 字段设置为数字编号，而不是时间戳来

进行检索，可以大大提高检索效率。

3 现场测试

本实验红外热像仪采用德国 InfraTec 公司生产的 HD 680 测温红外热像仪，采样频率为 60/120/240 Hz 探测波长为 7.5~14 μm。在观察窗处拍摄钨合金颗粒下落过程中的红外图像，并通过红外图像得到钨合金颗粒换热器出口处温度及其温度场分布。由于 ADS 中靶的运行温度为 200~450 °C，因此本次实验中，在加热料罐中将钨合金颗粒加热至平均温度为 300 °C。通过调研文献得知，红外热像仪的聚焦程度对其输出值影响较大^[10]，而且实验过程中钨合金颗粒处于流动状态，颗粒的堆积高度在不断增大，因此在实验开始前对红外热像仪进行了对焦和调试，其中对焦过程是在综合考虑颗粒堆积的最低位置和最高位置区间内的成像效果后探寻一个理想焦距值，使得红外热像仪对目标区域的成像效果最优化。

图 5 为调试过程中拍摄到的红外图像，通过调节所显示温度值的区间，可以得到色彩对比更为鲜明的红外图像。从图中可以清晰地看到从换热器出口向下流动的钨合金颗粒束，以及下落后钨合金颗粒散落在储料罐中的温度场分布。其中下落过程中的钨合金颗粒束温度较高，下落后的钨合金颗粒由下落到储料罐内壁，温度逐渐降低，外围浅蓝色以及深蓝色的区域为观察窗外部的温度，与实验室内环境温度接近。

图 6 为实验过程中截取的红外热像仪集成后的用户操作界面，如图所示，此界面可以显示红外热像仪拍摄到的红外图像，提取温度场中的温度最大值和最小值并显示其二维坐标位置，还能够计算并显示目标区域温度

场的平均温度和标准差。通过对实验数据中最高温度二维坐标位置进行分析得到，温度场中最高温度集中在图中矩形框区域 2，即向下流动的钨合金颗粒与散落在储料罐底部中心的钨合金颗粒碰撞的区域，这是因为处于加热料罐中心的钨合金颗粒离电加热棒距离更近，温度更高，而靠近加热料罐外壁处的钨合金颗粒温度相对较低，颗粒向下流动时温度较低的钨合金颗粒会包裹温度较高的钨合金颗粒，导致在矩形框区域 1 中红外热像仪拍摄不到温度最高的钨合金颗粒，矩形框区域 2 内钨合金颗粒由于相互碰撞散落开，便于红外热像仪测量钨合金颗粒束内最高温度。由于储料罐内为真空密闭环境，热电偶测量点为换热器出口，换热器出口到下落点(图 5 中所示的矩形区域)的距离为 1 m，钨合金颗粒从热电偶测温点到达红外热像仪测温区域只需 0.45 s，在这段时间内钨合金颗粒与储料罐内气体对流换热较小，因此本实验将矩形框内最高温度近似视为钨合金颗粒换热器出口处最高温度。

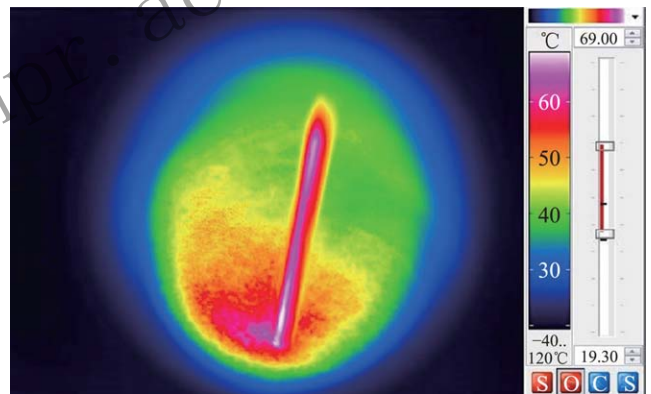


图 5 (在线彩图)带有温度刻度的红外图像

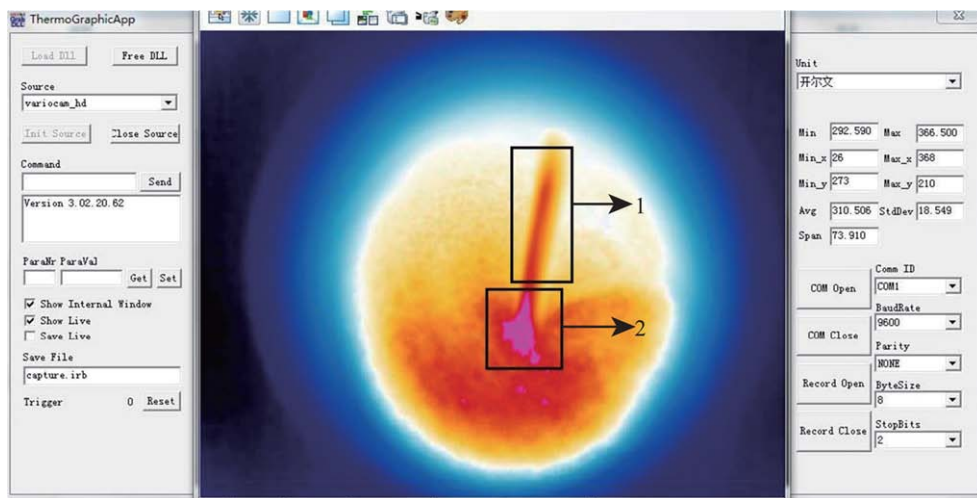


图 6 (在线彩图)红外热像仪用户操作界面
1-向下流动的颗粒束区域；2-颗粒相互碰撞区域。

图 7 为热电偶与红外热像仪测得的钨合金颗粒的温度曲线。图中虚线表示在换热器出口处用热电偶测量的颗粒的最高温度，圆圈表示利用红外热像仪测量到的实际温度值，实线表示对实际温度值拟合后的温度曲线。从图中可以看出，拟合曲线整体比热电偶测量温度较低，这是由于实验装置的原因，红外热像仪测量位置与热电偶测量位置存在一定的落差，进而导致颗粒热量存在一定程度的损失所致。从整体趋势来看，两条曲线较为吻合。矩形框区域内热电偶测量的温度值与拟合温度曲线更加接近，差值小于 5°C ，误差在 2.8% 到 4.9% 之间。而矩形区域两侧，二者的差值和误差都更大，这是因为本实验中颗粒球体处于流动下落状态，颗粒堆积的高度会实时由小到大变化，进而导致红外热像仪的测量位置(图 6 中矩形框区域 2，即颗粒堆积的最高点)与红外热像仪镜头之间的距离也由大到小实时变化，距离的变化直接导致了测量误差的产生，即焦距一定时，距离最佳成像区域越远(相对距离)，误差就越大。从图 7 可以看出，相比于热电偶，红外热像仪灵敏度更高，响应性更快。并且热电偶固定于板式换热器下方，与流动的钨合金颗粒直接接触，容易损坏且不易更换。红外热像仪为非接触测温，能根据拍摄到的红外图像得到其温度场分布，相比于热电偶具有很多优势。

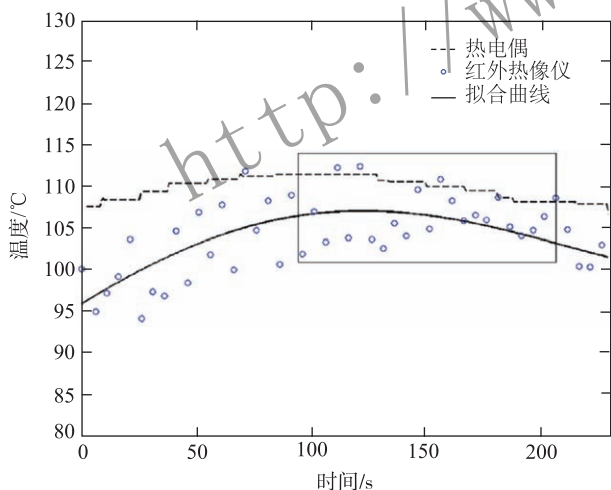


图 7 (在线彩图)热电偶与红外热像仪所测钨合金颗粒出口温度曲线

4 总结与展望

本文采用 NI 硬件设备、红外热像仪、PC 及网线接口，建立了颗粒换热平台的测控系统，通过 LabVIEW 编程软件，实现了对换热平台中加热料罐内的加热控制、冷却水回路阀门的控制以及热电偶与冷却水回路中各类传感器的数据采集，使用 SDK 将红外热像仪

与 EPICS 集成，并自主开发了操作软件，对红外图像中的温度数据进行提取与显示，通过应用程序和 OCI 接口将不同设备采集到的实验数据在同一时序下完整地存储到 Oracle 数据库中。经过实验测试，在颗粒换热平台运行过程中无数据丢失，颗粒传热实验测控系统完全可以满足颗粒换热平台数据采集与存储需求。根据存储的红外图像中的最高温度值得到红外热像仪测温拟合曲线，通过与 NI 硬件平台采集到的热电偶测温曲线对比和分析，本文认为红外热像仪测温精度基本可以满足实验要求。在测试实验的结果中发现，由于热电偶与红外热像仪测量位置的不同以及颗粒堆积的高度的不断变化导致了测量结果的精度较差，因此，后续的实验在设计时应考虑最大程度地减小这些因素的影响。

参考文献:

- [1] BU Changsheng, CHEN Xiaoping, LIU Daoyin, *et al.* *CIESC Journal*, 2012, **63**(03): 698. (in Chinese)
(卜昌盛, 陈晓平, 刘道银, 等. *化工学报*, 2012, **63**(03): 698.)
- [2] ZHAN Wenlong, XU Hushan. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 2012, **27**(3): 375. (in Chinese)
(詹文龙, 徐珊珊. *中国科学院院刊*, 2012, **27**(3): 375.)
- [3] WANG Zhiguang, YAO Cunfeng, QIN Zhi, *et al.* *Engineering Sciences*, 2019, **21**(01): 39. (in Chinese)
(王志光, 姚存峰, 秦芝, 等. *中国工程科学*, 2019, **21**(01): 39.)
- [4] LI Chenxi, WEN Yan, GUO Kailun, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, **52**(08): 1431. (in Chinese)
(李晨曦, 文彦, 郭凯伦, 等. *原子能科学技术*, 2018, **52**(08): 1431.)
- [5] HU Liang, ZHANG Yapei, SU Guanghui, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, **51**(06): 1002. (in Chinese)
(胡亮, 张亚培, 苏光辉, 等. *原子能科学技术*, 2017, **51**(06): 1002.)
- [6] ZHAO Jijiu, YIN Zhaosheng. *Particle Accelerator Technology [M]*. Beijing: Higher Education Press, 2005: 429. (in Chinese)
(赵籍九, 尹兆升. *粒子加速器技术[M]*. 北京: 高等教育出版社, 2005: 429.)
- [7] DING Jianjun, QIAN Tonghui. *The Reconstruction of Crack in Surface Based on Virtual Instrument[C]*// International Conference on Information Engineering & Computer Science. IEEE, 2009.
- [8] GIANNONE L, EICH T, FUCHS J C, *et al.* *Fusion Engineering and Design*, 2011, **86**(6): 1129.
- [9] LIU Jia, WANG Chunhong. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2009, **29**(01): 128. (in Chinese)
(刘佳, 王春红. *核电子学与探测技术*, 2009, **29**(01): 128.)
- [10] LI Zhong, HAO Zhenghui, WANG Gao, *et al.* *Infrared Technology*, 2019, **41**(03): 245. (in Chinese)
(李众, 郝争辉, 王高, 等. *红外技术*, 2019, **41**(03): 245.)

Application Research on Measurement and Control System of Particles Heat Transfer Experiment Based on EPICS

SONG Haisheng^{1,1)}, LIU Cong^{1,2}, ZHAO Qiang^{2,3}, QIANG Chengwen^{2,3}, LI Long^{2,3},
WANG Fei^{2,3}, ZHANG Yanbin^{2,3}, ZHANG Xueying^{2,3}

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The measurement and control system of particles heat transfer experiment was designed for the particles heat exchange platform. Based on the EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) architecture design, this system integrates NI hardware platform, infrared thermal imager equipment and Oracle database to realize the online collection, monitoring, control and real-time storage of particles heat exchange platform. The infrared thermal imager was applied to measure the temperature of particles at the outlet of heat exchanger in the measurement and control system for its advantages in high sensitivity, wide range of temperature measurement and non-contact measurement. In this paper, the SDK (Secondary Development Kit) was employed to integrate infrared thermal imager into the EPICS system. Infrared images and the data were obtained to present the real-time temperature distribution of the particles more intuitively. By comparing the data with the measured results of the thermocouple, the feasibility of using the infrared camera as a real-time temperature measuring device for particles was further tested. The experimental results show that the integrated infrared camera operating software can obtain and store the temperature values of the infrared image in real time. And the measurement and control system of particles heat transfer experiment designed and developed by EPICS architecture can fully meet the data acquisition and storage requirements of the particles heat exchange platform.

Key words: particles heat transfer; EPICS; infrared thermal image; database; measurement and control system

Received date: 28 Jun. 2019; **Revised date:** 17 Jul. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11664036, 11605258); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA21010202)

1) E-mail: songhs@nwnu.edu.cn.