

# EAST 红外 CCD 诊断系统的图像采集与处理

王晓琼<sup>1</sup>, 舒双宝<sup>2</sup>, 甘开福<sup>1</sup>, 龚先祖<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**受控核聚变能是最有希望成为下一代清洁能源的形式,在磁约束核聚变托卡马克装置中,长时间放电情况下等离子体与壁相互作用易造成壁材料损伤,影响装置的安全和使用寿命。EAST 大视场红外内窥镜系统,可同时监测上下偏滤器、低杂波天线和活动限制器的表面温度。文中主要介绍 EAST 大视场红外 CCD 诊断系统的图像采集与处理,详细介绍了该系统的总体结构和软、硬件设计,包括图像存储、视频回放、格式转换以及基于 TCP 的远程传输。本系统已在 EAST 实验装置中成功运行,数据采集及服务系统性能稳定,运行可靠。它为加热功率的主动控制和等离子体位形控制提供了条件,为装置的安全运行提供了保障,充分满足了等离子体放电实验诊断的要求。

**关键词:**EAST;图像存储;回放;TCP 远程传输

中图分类号:TP302.1

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)08-0179-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.08.038

## Image Collecting and Processing of Infrared CCD Diagnosis System in EAST

WANG Xiao-qiong<sup>1</sup>, SHU Shuang-bao<sup>2</sup>, GAN Kai-fu<sup>1</sup>, GONG Xian-zu<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Controlled nuclear fusion is the most promising clean energy resource of next generation. In magnetic confinement fusion Tokamaks, plasma-wall interactions cause damage to materials during long-time plasma discharge easily, which makes a great influence on safety and operation life of the instrument. The infrared endoscope in EAST that has a wide field of view can monitor the temperatures of upper and lower divertors, LHW antenna and movable limiter. In this paper, the image collecting and processing of the infrared CCD diagnostic system in EAST during plasma discharge, and overall structure of the system, hardware and software design are introduced in detail, including image storage, playback, format conversion and remote transmission based on TCP protocol. Besides, the data acquisition and service system has been run successfully and stably in EAST, which provides relevant information for active control of heating power and plasma shape control, and further provides the safeguard for safe operation of the equipment, and it well satisfies all requirements of the experimental diagnosis.

**Key words:** EAST; image storage; playback; TCP remote transmission

## 0 引言

先进实验超导托卡马克实验装置<sup>[1]</sup>, EAST<sup>[2-3]</sup> (Experimental Advanced Superconducting Tokamak), 又被称为“人造太阳”, 是中国科学院等离子体物理研究所自行研制的世界上首个全超导非圆截面托卡马克实验装置, 其最终目的是建立核聚变电站。它主要由

超高真空室、纵场线圈、极向场线圈、外真空杜瓦、内外冷屏、支撑系统六大部件组成。在托卡马克实验中, 等离子体中的能量无论是通过欧姆加热、辅助的波加热还是聚变反应产生, 都会经过一系列的输运过程如辐射、热传导、热对流等最终沉积到第一壁表面。稳态长脉冲等离子体放电是 EAST 的主要目标之一, 长时间

收稿日期: 2014-10-06

修回日期: 2015-01-13

网络出版时间: 2015-07-21

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2014GB101002); 国家自然科学基金资助项目(11105028)

作者简介: 王晓琼(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为 EAST 红外诊断系统的图像实时处理和自动控制; 龚先祖, 研究员, 研究方向为等离子体稳态运行及其相关物理与技术和等离子体与壁相互作用。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150721.1453.078.html>

的等离子体与壁相互作用<sup>[4]</sup>使第一壁材料表面温度急剧上升导致材料的腐蚀、融化及蒸发。这一方面将污染等离子体而影响等离子体的约束特性,另一方面将缩短装置的运行寿命甚至危害装置的安全。为实现托卡马克的稳态运行,需要在等离子体放电时进行红外诊断。

EAST 红外 CCD 诊断系统的图像采集与处理程序是在 Windows 操作系统、VC2008 环境下编写的。实验开始前,先要校准红外相机的发射率、透射率等系数,然后等待外部触发信号触发图像采集系统。为了精确地比较采集到的红外数据与实验其他一些诊断数据,需要保证它们在时间上的统一,这就需要对各个采集信号的初始采集时刻进行统一定位。由于软件触发响应速度太慢、精度太差,无法满足高精度采集的需要,所以本系统选择接收中央定时器向各采集子系统发送的开始时刻的硬件触发信号。等离子体放电时在大屏幕上实时显示温度图像,这样实验人员可以及时了解 EAST 的运行状态,从而做出相应决策。图像存储之后在放电间隙回放显示以便进一步查看等离子体的放电过程。

此外,随着聚变装置功率和等离子参数的提高,研究偏滤器热负荷的规律,用可行有效的手段(杂质充气、改变磁位形、磁拓扑结构)减少第一壁热负荷以及如何有效延长靶板的使用寿命成为实现托卡马克稳态运行的关键问题之一。利用有限差分程序 DFLUX<sup>[5]</sup>可以由温度图像得到热负荷<sup>[5-6]</sup>分布,为研究偏滤器的热负荷特性提供了条件。将存储的红外数据导入数据服务系统,能够提供图像的查看、下载和共享等服务功能,便于实验人员进行分析和处理。

## 1 系统总体设计

### 1.1 红外 CCD 诊断系统布局

对于全超导托卡马克,需要尽可能地监测第一壁结构的温度。EAST 早期的观察方式—从水平窗口直接观测,不能有效地监测第一壁的表面温度,所监测的范围也非常有限,只能监测下偏滤器,高场侧内壁,并且这种方式容易被其他诊断所遮挡。随着 EAST 参数的不断提高,这样的观测方式将不能为 EAST 实验的安全运行提供一个有效的监测手段,并且不利于热流的分析和研究。

针对 EAST 复杂的机械结构,需要采用切向的方式,并结合内窥镜系统<sup>[5]</sup>进行观测。升级后的 EAST 红外内窥镜系统将可见光路与红外光路集成一体化,减小了系统尺寸并且提高了分辨率。内窥镜前端与主等离子体的距离大于 30 cm,视场 47°×58°,空间分辨率为 4 mm(偏滤器靶板处)。内窥镜所放窗口为  $k$  窗

口,该系统可同时监测上下偏滤器,  $N$  窗口低杂波天线以及位于  $M, N$  窗口之间的限制器,如图 1 所示。

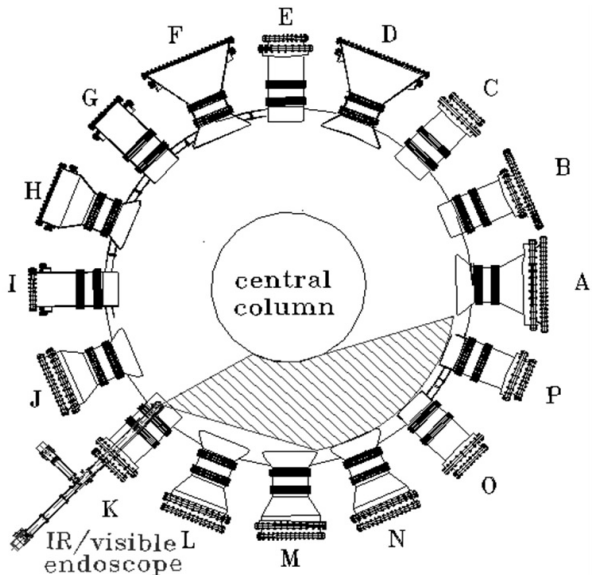


图 1 EAST 装置的可见/红外内窥镜系统视场

实验时红外相机需要外加铁盒防磁干扰。对于 EAST 以长脉冲高参数运行目标的装置,监测第一壁的温度至关重要,而红外热像仪是监测第一壁温度以及分析第一壁热负荷最主要的诊断。

温度高于绝对温度零度的物体会不断地向外发射辐射能。因此,从原理上讲,只要收集并且探测到这些辐射能,就可以通过重新排列来自探测器的信号形成与景物辐射分布相对应的热图像。红外热像仪的测温原理就是根据黑体辐射原理:

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} - \frac{1}{e^{hc/kT} - 1}$$

其中,  $\lambda$  为波长;  $T$  为黑体的绝对温度,单位为  $k$ ;  $h$  是普朗克常数,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $k$  是玻耳兹曼常数。

上式表述的是物体在波段为  $\lambda$ 、温度为  $T$  时的辐射率,单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ 。对波长积分就得到黑体辐射功率:  $M_b = \delta T^4$ 。其中,  $\delta = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。但实际物体并不是黑体,而是灰体,只能接收入射到它表面的辐射能量的一部分,其他被反射和透射,红外发射系数  $\varepsilon + r$  (反射) +  $t$  (透射) = 1。灰体辐射公式为  $M_e = \varepsilon \sigma T^4$ ,可以看出,辐射功率与温度的四次方成正比,其中  $\varepsilon$  在红外测量标定温度时需要准确标定。

### 1.2 红外内窥镜系统光学设计

红外内窥镜系统的光学设计必须与红外探测器  $F$  数( $F$  数为 3)匹配,其设计波段为  $2 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 。内窥镜前端决定内窥镜视场,其口径为 180 mm,系统采用离轴设计,扩大了视场范围,使暗斑在非重要成像区域。为了保证红外波段系统的全口径使用,通过 ZnS 分色平板,透过全口径的红外波段,反射全口径的可见

波段。此方案的优点是可避免红外系统的中心遮拦,又可以使可见系统做到与红外基本相同的性能,升级后的内窥镜系统以分光镜代替卡式系统,有利于可见的高速采集,其光学设计图如图 2 所示。内窥镜要偏离中平面 145 mm,以光轴正对窗口顺时针旋转 5° 安装。

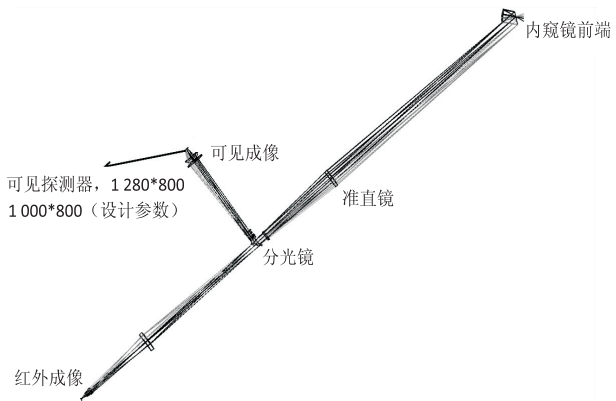


图 2 内窥镜系统光学设计图

1.3 红外数据采集与处理系统

托卡马克装置是一个复杂的实验装置系统。为了使装置能够安全稳态运行,需要具有能够实时采集和处理数据的诊断系统<sup>[7]</sup>,它可以接收总控系统的触发信号、准确获得数据、保存数据以及远程传输炮号。EAST 红外诊断系统所使用的相机是 Flir SC7700BB,该热像仪为满足科研、无损检测领域要求的热分析而设计,速度快,分辨率高,非常适合要求精确测温的应用领域。由于 EAST 长脉冲放电,数据采集时间较长,实验人员对数据在线分析与实时显示的需求也相应增加。数据实时采集<sup>[8]</sup>是最基础的部分,它为科研人员提供可靠的数据,以便分析和处理。当出现过热点时,可以对加热功率和等离子体位形实施相应的反馈控制<sup>[9-10]</sup>,以减少对第一壁的损伤,而回放图像使实验放电过程更加清晰可视。

为了使实验人员能够实时监控装置的运行情况,红外图像需要在控制室内的大屏幕上实时显示,系统总体结构如图 3 所示。

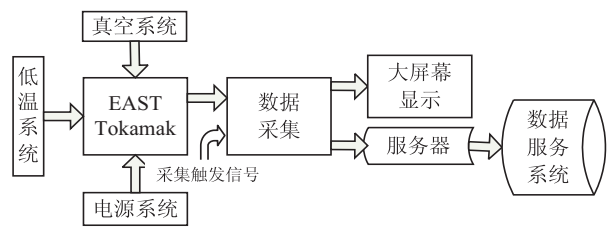


图 3 数据采集与处理系统总体结构

数据采集是本系统的关键部分,它主要完成数据的采集与存储。由于采集速率较高,存储的视频文件比较大,保存速度在不同的计算机上会有所不同,太快的话可能会出现丢帧现象,因此,在采集时选择了配置

较高的服务器。另外,为了实现数据共享,服务器先对视频数据格式转化并压缩,然后远程发送炮号,客户端接收之后,通过磁盘映射对数据进行处理,建立数据共享服务系统。

2 系统软件流程

EAST 托卡马克装置红外 CCD 诊断系统的数据采集与处理主要分为两个模块:图像采集与回放模块和图像处理模块。以 Microsoft Visual Studio 2008 为开发工具,开发了满足自身需要的视频采集与处理程序,主要包括采集初始化<sup>[11]</sup>、数据采集、格式转化、图像压缩与 TCP 远程传输等过程。采集之前,首先启动程序,界面会显示红外相机是否已经连接上,然后设定它的各个参数,红外相机通过接收中央定时器发来的触发采集和结束信号,作为每炮放电相机工作的起止信号。在等离子体放电的间隔时间还可以通过专用的红外视频播放软件 Altair 在大屏幕上播放保存过的视频文件,并能显示每帧对应的放电时刻,为实验人员查看等离子体放电过程提供方便。

2.1 图像采集与处理

图像采集程序是利用红外相机的 SDK 开发出来的,EAST 中央定时器统一发送触发信号,表明实验放电开始,红外热像仪收到触发信号后开始采集图像。采集到的数据存储到服务器中以供物理实验人员在实验结束后对数据进行离线分析,程序流程图如图 4 所示。

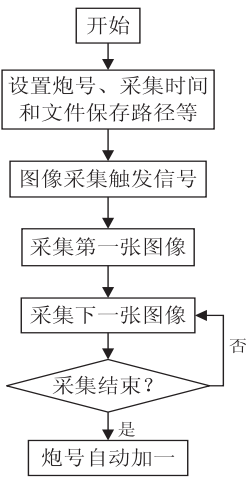


图 4 数据采集流程图

具体介绍如下:

- (1)采集初始化:对红外相机初始化,包括驱动连接,校准发射率、透射率等系数,设置当天的初始炮号、采样率(大多为 100 Hz,也可根据实际需要调节)、采集时间(稍长于放电持续时间)、图像高度和宽度以及图像的存储路径等等。
- (2)采集触发:采用硬件触发,中央定时器统一发



出触发信号,当收到触发信号后相机根据当前状态判断开始采集还是采集结束,触发状态时自动采集当前炮号的红外数据,存储状态时结束当前炮号的数据采集。

(3)数据采集:采用连续采集图片的方式,先采集第一幅图像,然后不断地采集下一张红外图像,直到该炮放电结束,最后生成格式为 PTW 的红外视频文件,保存在服务器所设置的路径(以日期命名每天创建一个文件夹)中,完成这一炮的数据采集。之后炮号自动加一,采集触发后继续下一炮数据的采集与存储,以此循环。

为使放电过程直观可视,红外图像在控制室内的大屏幕上显示。图像回放程序是采用面向对象的 Vis-

ual C++程序设计语言进行编写并使用 MFC 类库来实现的,实时采集并存储红外视频后,用遍历文件的方法查找刚刚保存的数据,在实验放电间隙自动回放该炮等离子体放电图像,然后炮号自动加一,继续等待下一炮的数据采集,存储完成后继续进行下一炮红外视频的回放。

## 2.2 图像格式转换与炮号的远程传输

实验中将实时采集到的原始数据存储在服务器中,然后对数据进行相应的格式转换和压缩处理,由于压缩文件仍然比较大,所以由服务器端向客户端远程传输炮号,客户端接收炮号之后,通过磁盘映射对数据进行处理,建立数据共享服务系统。

程序流程图如图 5 所示。

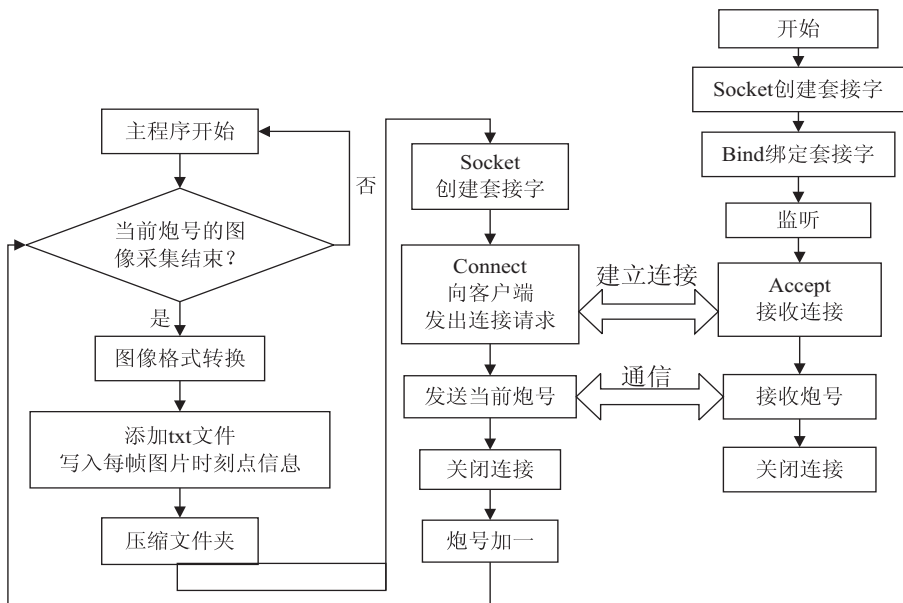


图 5 程序流程图

(1)等离子体放电时采集到的红外图像格式是 PTW,是一种非通用的图像格式,常见的播放器不能打开。为了使红外图像与可见图像都能在 EAST VOD Website 上查看,实现数据共享,需要对其进行格式的转换。

(2)图像采集结束后,读取 PTW 格式的源文件数据,将其 14 位的像素数据转换成 8 位的像素数据,然后创建 BMP 文件<sup>[12]</sup>,配置 BMP 文件的文件头、信息头、颜色表等信息,再将 8 位像素数据写入文件。注意判断 BMP 文件每行像素值所占的字节数是否为 4 的倍数,如果不是 4 的倍数则需在后端补 0,凑足为 4 的倍数。在像素存储区首先存放的是图像的最后一行像素数据,最后存放图像的第一行像素数据,但对于同一行的像素,则是按照从左到右的顺序存放。转化后的 BMP 图像层次感分明、图像清晰,为红外图像的分析 and 处理提供了便利。

(3)将转换后的图片全部转移到一个文件夹(以

炮号命名)中,然后在此添加 txt 文件,其中对应写入每一帧图片的采集时刻点信息,由于文件夹比较大,因此需要压缩,程序中通过调用 7za.exe 压缩此文件夹。

(4)TCP/IP 网络协议<sup>[13]</sup>在客户端和服务端彼此交换数据前,双方之间必须建立一个 TCP 连接,之后才能传输数据,由于是面向连接的,具有较高的安全性。所以本实验采用 TCP/IP 协议在图像采集结束后,由服务器端向客户端远程传输炮号。

服务器端:

- (1)socket 创建套接字;
- (2)connect,向客户端发出连接请求;
- (3)与客户端建立连接后,向客户端发送当前炮号;
- (4)关闭套接字,炮号自动加 1。

客户端:

- (1)socket 创建套接字;
- (2)调用 bind 函数将套接字绑定到地址和端

- 口上;
- (3) 将套接字设置为监听模式, 准备接收服务器请求;
- (4) 当服务器端请求到来后, 接收连接请求, 返回一个新的对应于此连接的套接字;
- (5) 用返回的套接字和服务端通信, 接收服务器端发送过来的炮号;
- (6) 关闭套接字。

客户端接收炮号之后, 通过磁盘映射对数据进行处理, 把 BMP 红外图像文件转换成 flv 格式的红外视频, 并添加到 EAST VOD Website, 提供实验数据的浏览 (逐帧查看或连续播放)、下载和共享等服务功能, 以便实验人员查找、分析和处理相关的实验数据。然后如此循环, 继续等待下一炮数据的采集, 进行图像格式转换与炮号的远程传输。

3 结束语

EAST 红外 CCD 诊断系统的图像采集与处理已完成硬件搭建和程序设计, 并结合其他诊断系统进行了相关调试, 目前已成功应用于 EAST 装置的放电实验中。结果表明, 图像清晰, 程序稳定, 实现了等离子体放电过程中的实时显示、存储、回放, 同时满足了实验中安全性、采集和传输高速性的要求。物理实验人员可以及时了解装置的运行情况, 实施相应的保护措施<sup>[14]</sup>, 保障其安全稳态运行。基于 TCP/IP 协议, 采用典型的 C/S (客户机/服务器) 模式远程传输炮号, 为建立数据共享服务系统奠定了基础, 在实际应用中有重要意义。

参考文献:

[1] 邓 玮, 胡晓燕. HL-2A 实验装置等离子体图像采集及回放的实现[J]. 成都航空职业技术学院学报, 2005, 21(1):

(上接第 178 页)

[7] 徐 凯, 陈小平. 一种多足步行机器人行走状态分析模型[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2170-2180.

[8] 李 震, 宋淑然, 洪添胜, 等. 基于颜色特征和聚类的马氏距离图像分割法[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(8): 1352-1353.

[9] 朱伟冬, 胡剑凌. 基于马氏距离的稀疏表示分类算法[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(11): 27-30.

[10] Hirano S, Okuzaki T, Hatal Y, et al. A rough set-based clustering method with modification of equivalence relations[C]//Proc of PAKDD. [s. l.]: [s. n.], 2001.

[11] Younis K, Karim M, Hardie R, et al. Cluster merging based on

50-52.

[2] 张 卡, 黄勤超, 肖炳甲. EAST 长时间数据采集及远程实时显示系统[J]. 微计算机信息, 2007, 23(1-1): 115-117.

[3] Wang Fumin, Gan Kaifu, Gong Xianzu, et al. Temperature distribution and heat flux on the EAST divertor targets in H-mode[J]. Plasma Science and Technology, 2013, 15(3): 225-229.

[4] 朱大焕. 面对等离子体钨/铜功能梯度材料优化及性能研究[D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2012.

[5] 甘开福. EAST 与 NSTX 偏滤器热负荷研究[D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2012.

[6] Gao Yu, Gan Kaifu, Gong Xianzu, et al. Study of striated heat flux on EAST divertor plates induced by LHW using infrared camera[J]. Plasma Science and Technology, 2014, 16(2): 93-98.

[7] 奚维斌. EAST 装置技术诊断数据采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2006, 29(2): 86-87.

[8] 黄礼华, 庄 革, 张 明, 等. J-TEXT 托卡马克数据采集系统设计[J]. 微计算机信息, 2009, 25(6-1): 74-76.

[9] Gasilov N. A method for calculating active feedback system to provide vertical position control of plasma in a Tokamak[J]. Pramana, 2007, 68(4): 591-602.

[10] Alves D, Felton R, Jachmich S, et al. Vessel thermal map real-time system for the JET Tokamak[J]. Review of Modern Physics, 2012, 15(5): 054701.

[11] 舒双宝, 罗家融, 薛二兵, 等. HT-7 托卡马克装置高速 CCD 成像系统的研究[J]. 微计算机信息, 2011, 27(1): 6-8.

[12] 苏义鑫, 李 鹏. VC 在红外热波图像源文件可视化转换中的应用[J]. 激光与红外, 2007, 37(9): 809-811.

[13] 高程希, 吴成东, 张云洲, 等. 基于 TCP/IP 协议的远程图像/数据传输研究[J]. 机电工程, 2011, 28(9): 1102-1105.

[14] Arnoux G, Devaux S, Alves D, et al. A protection system for the JET ITER-like wall based on imaging diagnostics[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83: 1-3.

weighted mahalanobis distance with application in digital mammograph[C]//Proc of aerospace and electronics conference. [s. l.]: [s. n.], 1998.

[12] Masalazu I, Shin-Ichiro O, Hirotomo A. Character recognition with Mhalanobis distance based on between-cluster information[R]. [s. l.]: [s. n.], 1998.

[13] Jain A K, Flynn P J. Image segmentation using clustering[M]//Advances in image understanding: a festchrift for azriel rosenfeld. Piscataway: IEEE Press, 1996.

[14] Gelbard R, Goldman O, Spiegler I. Investigating diversity of clustering methods: an empirical comparison[J]. Data & Knowledge Engineering, 2007, 63(1): 155-166.


作者:

[王晓琼](#), [舒双宝](#), [甘开福](#), [龚先祖](#), [WANG Xiao-qiong](#), [SHU Shuang-bao](#), [GAN Kai-fu](#), [GONG Xian-zu](#)

作者单位:

[王晓琼, 甘开福, 龚先祖, WANG Xiao-qiong, GAN Kai-fu, GONG Xian-zu\(中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥, 230031\)](#), [舒双宝, SHU Shuang-bao\(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥, 230009\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#)

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2015(8)

引用本文格式: [王晓琼](#). [舒双宝](#). [甘开福](#). [龚先祖](#). [WANG Xiao-qiong](#). [SHU Shuang-bao](#). [GAN Kai-fu](#). [GONG Xian-zu](#)

[EAST红外CCD诊断系统的图像采集与处理](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(8)