

# 高速红外 TDI 图像采集系统设计

赵云峰, 韩冰, 陈忻, 马贝, 夏晖, 饶鹏

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 图像采集系统在红外时间延迟积分 (Time Delay Integration, TDI) 相机开发前期的验证与测试阶段发挥重要作用。介绍了一套以 PXI 硬件平台和 LabVIEW 软件平台为基础开发的图像采集系统。该系统采用模块化、多线程设计, 具有高速数据采集和处理的能力。实验结果表明, 系统最高达到约 120Mbps 的数据采集率, 可完成 8 级 TDI 图像的高速实时处理与显示。该系统实现了对新型 640×8 中波红外数字式 TDI 探测器的数据获取, 对新型探测器的应用有重要的技术支撑作用。

**关键词:** 红外 TDI; 图像采集; LabVIEW; PXI

**中图分类号:** TN21      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2016)11-0975-05

## The Design of a High Speed Infrared TDI Image Acquisition System

ZHAO Yunfeng, HAN Bing, CHEN Xin, MA Bei, XIA Hui, RAO Peng

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Image acquisition system plays an important role in the validation and testing phase of the early development stage of infrared Time Delay Integration (TDI) cameras. An image acquisition system based on PXI hardware platform and LabVIEW software platform is introduced in this paper. The system, adopting multi-thread and modular design, has the capability of high speed data acquisition and data processing. Experiments show that the system can achieve a data acquisition rate up to 120 Mbps, and can process and display 8-stage TDI images in real time. The system has achieved the data acquisition of a new 640×8 digital MWIR TDI detector, which provides important technical support for application of the new detectors.

**Key words:** Infrared TDI, image acquisition, LabVIEW, PXI

## 0 引言

TDI 技术具有在不牺牲空间分辨率和成像系统工作速度的情况下获得高灵敏度的特性, 在空间红外遥感领域应用广泛<sup>[1]</sup>。例如, EarthCARE 卫星上的多波段成像仪、美国的中波 TDI 多光谱成像仪 (MTIS) 以及 SBIRS HEO 等预警卫星均采用了红外 TDI 技术<sup>[2-3]</sup>。

在红外 TDI 系统开发前期的验证与测试阶段, 需要搭建图像采集系统, 以便进行各项测试与成像实验<sup>[4]</sup>。大量的测试实验和较短的开发时间要求图像采集系统需具备可靠性高、易于开发、扩展性强和灵活性高的特点。PXI 硬件平台具有高带宽低延时、可重配置和高可扩展性的优点。与 PXI 硬件平台配套的 LabVIEW 软件平台使用图形化语言编程, 界面直观

友好, 易于学习, 包含大量图像处理、数学运算和测试测量的工具包, 可方便、快速地搭建系统, 极大地提高了编程效率<sup>[5-6]</sup>。因此, 本文中的图像采集系统以 PXI 硬件平台和 LabVIEW 软件平台为基础开发。该系统可采集 LVDS 信号, 实时处理并显示 TDI 图像。

## 1 红外 TDI 测试系统简介

红外 TDI 成像测试系统的结构图如图 1 所示, 图像采集系统是整个成像测试系统的后端部分。光学镜头、红外探测器、前端电路板固定在一维扫描转台上, 图像采集系统控制转台扫描, 探测器输出信号经前端电路板转换后通过 LVDS 通道传输到图像采集系统。实验中采用的新型中波红外数字式 TDI 探测器的主要指标如表 1 所示。

收稿日期: 2015-12-02; 修订日期: 2016-05-30.

作者简介: 赵云峰 (1989-), 男, 河南焦作人, 博士研究生, 主要从事红外光电技术研究。E-mail: zhaoyf\_08@163.com.

通讯作者: 饶鹏 (1977-), 男, 湖北武汉人, 研究员, 博士, 主要从事光电系统工程方面的研究工作。E-mail: Peng\_rao@mail.sitp.ac.cn.

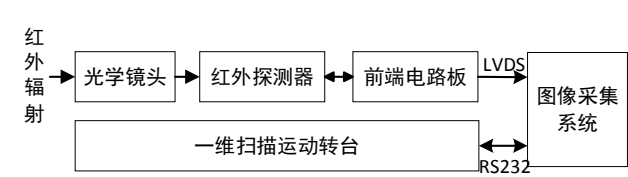


图 1 红外 TDI 测试系统  
Fig. 1 Infrared TDI testing system

表 1 探测器技术指标  
Table 1 Detector technical indexes

参数	指标
像元规模	640×8
最大帧频	1680 Hz
ADC 量化位数	14 bit
像元角分辨率	341 μrad

2 图像采集系统的硬件架构

2.1 外部接口

图像采集系统与外部有两个接口：与一维转台之间通过 RS232 接口通信，以实现扫描控制；与前端电路板之间通过 LVDS 通道传输图像数据。如图 2 所示，图像采集系统通过 6 个 LVDS 通道与前端连接，分别是 1 个 50 MHz 时钟信号 CLK，4 个并行的数据信号 DATA1~DATA4 和 1 个数据使能信号 EN。每个数据通道在 EN 有效的 14 个时钟周期内传输 1 个 14 bit 的图像数据。由表 1 得，探测器的最大输出数据率约为 120 Mbps。该接口可传输的最大数据率约为 200 Mbps，可满足探测器的采集需求。

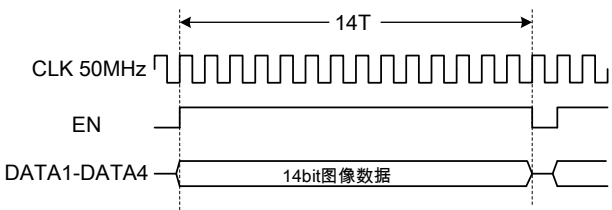


图 2 前端电路输出的 LVDS 信号  
Fig. 2 LVDS from the front-end electronics

2.2 内部架构

如图 3 所示，图像采集系统采用了 PXI 架构，包括机箱、控制器、外设模块 3 部分，控制器和外设模块均通过 PXI/PXI-e 接口连接在机箱上。该系统中，机箱是 NI PXIe-1073，控制器是装有 Windows XP 操作系统和 LabVIEW 软件的计算机，外设模块是由 NI PXI-7952R 和 NI 6583 组成的 FlexRIO 模块。该模块是一款可重新配置的高性能仪器，可通过 LabVIEW 编程，

提供灵活且可定制的输入输出接口。它提供 32 路单端和 16 路 LVDS 通道，时钟率达 200 MHz，满足了 6 路 50 MHz LVDS 输入信号的需求。同时，该模块包含了一个 Virtex-5 FPGA 和 128 MB 板载 DRAM，具有高速实时的数据处理能力，可完成部分数据采集和处理工作，减小了对控制器的运算能力需求。

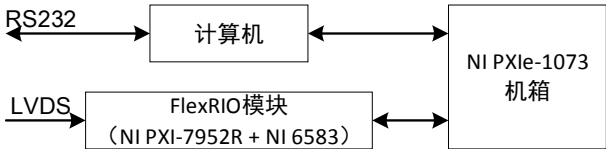


图 3 系统内部硬件架构  
Fig. 3 System hardware architecture

3 图像采集系统的软件实现

3.1 系统高速处理的需求

该图像采集系统需具备高速数据处理的能力，其原因表现在以下 3 方面：

第一，TDI 成像方式带来数据量的大幅增长。TDI 技术是使视场沿某一方向扫描，将不同时刻的同一目标所成的图像信号累加起来，以提高信噪比。因此，在相同时间分辨率、空间分辨率和扫描视场的条件下，TDI 相机的数据量是单线列扫描相机的  $N$  倍（ $N$  为 TDI 级数）。本系统的数据率达到同等条件下的 640 元单线列扫描相机的 8 倍，约为  $8 \times 640 \times 1680 \times 14 \text{ bps} = 120 \text{ Mbps}$ 。

第二，片外数字 TDI 的实现方式增加了系统的运算量。本文的 TDI 方式是片外数字 TDI。与模拟 TDI 和片上数字 TDI 不同，片外数字 TDI 的 TDI 操作在图像采集系统中完成。本系统中，每秒因此增加的加法运算量为  $7 \times 640 \times 1680 = 7.5 \times 10^6$  次。

第三，非均匀性校正、盲元补偿等操作增加了系统的运算量。本系统具备实时的非均匀性校正和盲元补偿功能，这也会导致系统运算量的增加。例如，本系统的非均匀性校正算法为两点法<sup>[7]</sup>，校正每个像素需要一次加法操作和一次乘法操作。因此每秒增加的运算量为  $8 \times 640 \times 1680 = 8.6 \times 10^6$  次加法和乘法操作。

总之，多种复杂的功能需求和高数据率对系统的处理能力提出要求，因此必须优化设计系统的软件架构。

3.2 处理逻辑流程

该系统进行图像采集的流程图如图 4 所示。

图像采集的整个流程包含多项操作，分别是：

1) 设备初始化：设置 FlexRIO 的多个参数，使其初始化。

- 2) 扫描控制: 设置扫描转台的速度和角度, 并控制其自动往复扫描。
- 3) 数据采集: 从 6 路 LVDS 中采集到图像数据, 实现从比特流到数据流的转化。
- 4) 数据存储: 将采集到的数据存储到计算机的磁盘中, 以供后续分析。
- 5) 解帧: 前端电路输出的数据中, 每帧图像数据 ( $640 \times 8$  个) 前均加入了特定的 8 个 14 bit 数据, 即帧头。解帧是指不断从图像数据中查找帧头, 实现提取出每帧图像的功能。
- 6) 图像预处理: 对已解帧的图像进行背景减除、非均匀性校正、盲元补偿等图像预处理。这里采用的两点法校正算法应用广泛, 且计算量小, 符合高速实时处理的要求。盲元补偿采用了邻域滤波补偿的方法。

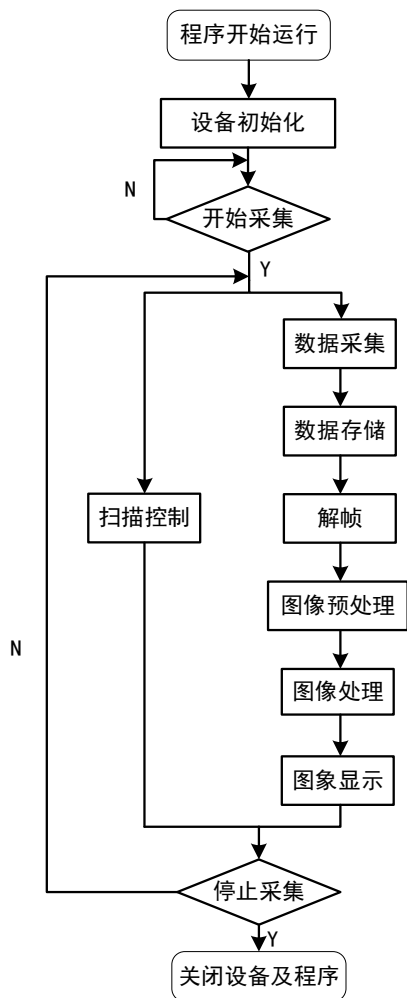


图 4 图像采集流程图

Fig.4 Image acquisition flowchart

- 7) 图像处理: 图像处理的目的是为了得到未 TDI 的图像和 TDI 后的图像。未 TDI 的图像的获取过程是, 直接对多帧图像进行图像拼接操作, 即将多帧图像的特定列数据抽取出来, 再拼成一幅图像, 拼接完成的图像就是目标的未 TDI 图像。TDI 后的图像的获

取过程是, 首先进行 TDI 处理, 然后将多列图像拼接起来。

- 8) 图像显示: 在 NI Vision 工具包的支持下, 将未 TDI 的图像和进行 TDI 的图像实时显示在程序前面板上。

3.3 多线程、模块化设计实现高速处理

为了满足系统的多种功能需求和高速数据处理能力需求, 设计了模块化、多线程的软件架构, 如图 5 所示。该系统包括两个主要的 VI, 即 FPGA VI 和 HOST VI。FPGA VI 运行在 FlexRIO 模块的 FPGA 上, 包括一个数据采集模块。HOST VI 运行在计算机上, 包括多个模块。HOST VI 的每个模块都是一个单独的循环体, 完成相应的功能。这种架构的优点有: 第一, LabVIEW 是一种自动多线程编程语言, 可把多个持续运行的循环任务分配到多个线程中, 充分利用多核计算机的并行处理能力; 第二, 每个模块只完成特定功能, 程序结构简单, 易于开发, 方便阅读和调试。值得注意的是, LabVIEW 程序运行过程中, 循环体中的数据一般只在循环结束后才能传递到循环体外。为使图像数据流在多个循环体之间传递, 采用了队列进行数据同步, 即 A 循环中产生的数据存入队列, B 循环将队列中的数据取出进行下一步处理。

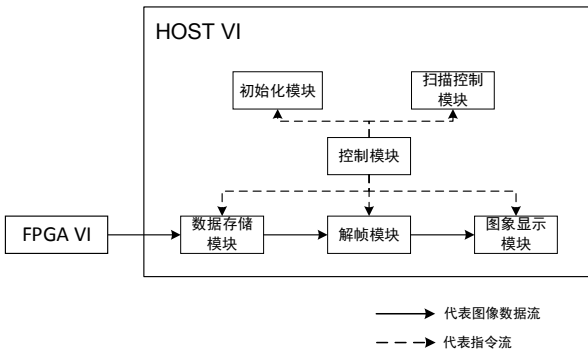


图 5 模块化、多线程的软件架构

Fig.5 Modular and multithreading software architecture

FPGA VI 上的数据采集模块 LVDS 信号的采集与传输。控制模块负责整个采集过程的流程逻辑控制, 初始化模块控制数据采集模块实现设备初始化, 扫描控制模块、数据存储模块、解帧模块分别实现扫描控制、数据存储、解帧的功能, 图像处理与显示模块实现图像预处理、图像处理和图像实时显示。

控制模块在整个系统中处于核心地位, 通过消息通知器实现指令流的传输。如图 6 所示, 它采用了循环事件结构, 完成控制其他模块运行状态的功能。循环事件结构是一种常用的 LabVIEW 程序结构, 常用于界面控制或全局控制。该模块包括多个事件分支, 程序前面板上“开始”或“停止”按钮按下的动作可

触发对应事件分支,此时向消息通知器中发出对应通知,其他模块通过查询通知器的状态做出对应的响应。

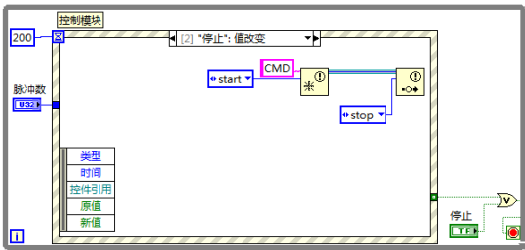


图 6 控制模块（循环事件结构）程序框图

Fig. 6 Control module (cyclic event structure) program diagram

HOST VI 中的其他模块均采用了状态机结构。状态机结构也是一个比较常用的结构模式,能够应对可能出现的多种工作状况和状态转移。例如,扫描控制模块,其程序框图如图 7 所示。该模块控制一维转台的自动连续往复扫描,并可设置转动的角度、速度和转动次数。该模块有 init、idle、run 和 stop 四个状态分支,run 分支下通过一个 for 循环完成扫描往复控制。

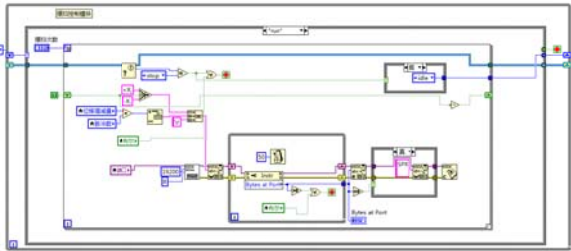


图 7 扫描控制模块（状态机结构）程序框图

Fig. 7 Scanning control module (state machine structure) program diagram

总之,该系统的软件设计采用了“循环事件结构”和“状态机结构”的基本模块,实现了模块化设计;以命令通知器传输指令流,以队列传输图像数据流,实现了各个模块间的通信与数据同步。这种模块化、多线程的软件架构能够充分满足系统复杂功能的需求,将处理负荷分解到多个线程中,充分利用了多核计算机的强大处理能力,可满足 TDI 图像采集与处理的需求,也可作为一种通用架构适用于红外与可见成像测试系统的快速开发。

4 系统成像实验及结果

利用该图像采集系统,进行了一系列成像实验,完成了图像采集系统各项功能的调试与检测,并获取了大量 TDI 成像的实验数据。实验计算机采用英特尔酷睿 2 Q8400 处理器,4GB 内存。多次实验中,该图像采集系统均可以完成数据存储、扫描控制、图像实时处理与显示的功能。当探测器采用最高帧频读出时,

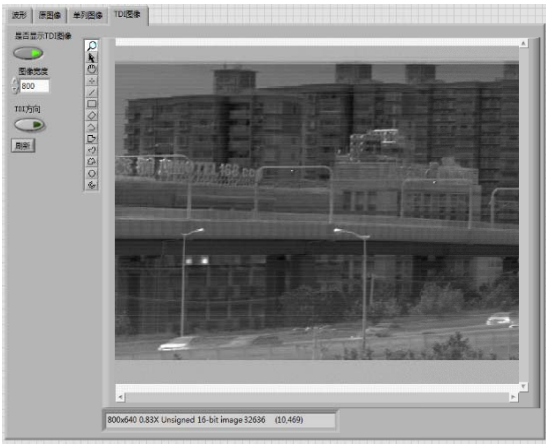
CPU 和内存占用率均不超过 50%,且未出现数据溢出等异常现象。图 8(a)和(b)是外场成像实验中对同一区域未 TDI 和 8 级 TDI 的成像结果,可以看出 TDI 运算后的图像与未 TDI 的图像相比,对比度更高,非均匀性更好,细节更清晰。对采集到的黑体辐射图像进行处理可得,TDI 处理后,探测器的非均匀性从 11% 减小到 9%,系统的噪声等效温差从 57 mK 降为 22 mK。这表明数字 TDI 可以有效降低系统噪声水平,提高系统灵敏度,同时对探测器的非均匀性也有一定改善。

但是,图中的两幅图像仍有较高的非均匀性,即图像存在较明显的横条纹,原因可能是系统采用了两点法进行非均匀性校正。两点法假定探测器输出与接收的辐射通量成线性关系,但这种线性模型过于简单,不符合实际情况。未来可采用更精确的校正算法,如多点校正法、多项式拟合校正算法以及神经网络法、卡尔曼滤波方法和高阶统计量法等基于场景的非均匀性校正方法<sup>[8-9]</sup>,进一步降低非均匀性。

总体来看,该图像采集系统运行可靠稳定,效率较高,完成了预期的各项功能。



(a) 未 TDI 的成像结果 (a) Image without TDI



(b) TDI 后的成像结果 (b) Image after TDI

图 8 外场实验中的成像结果

Fig. 8 Images from field experiments

## 5 结束语

本文从软硬件架构的角度阐述了构建一个图像采集系统的过程, 并通过成像实验验证其功能。系统中运用的“模块化、多线程”架构便于大型图像采集系统的开发, 能满足多种复杂需求。开放式的软件平台 LabVIEW 和可重配置的硬件平台 PXI 使得该系统具有易于开发, 可靠性和可扩展性高的特点和高速实时的数据采集和图像处理能力, 便于项目开发前期验证与检测阶段的大量调试工作。总之, 该系统运行平稳高效, 可满足  $640 \times 8$  中波红外数字式 TDI 探测器数据采集的各项需求。不足之处在于, 系统的非均匀性校正存在一定问题, 这也是今后进一步改进的方向。

## 参考文献:

- [1] 潘胜达. 红外 TDI 扫描相机信息处理关键技术研究[D]. 上海: 中科院上海技术物理研究所, 2013.  
PAN Shengda. Study on the information processing technology of infrared TDI scanning camera[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, 2013.
- [2] Luis Gomez Rojasa, Mark Chang, Guy Baistera. The EarthCARE multi spectral imager thermal infrared optical unit detection system design[C]//*Proc. of SPIE*, 2010, **7826**:1-9.
- [3] N S Andreas. Space-based infrared system (SBIRS) system of systems[C]//*Proceedings of IEEE*, 1997(4): 429-438.
- [4] 韩冰, 陈忻, 饶鹏, 等. ASIC 技术在长行列 TDI 红外探测器中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(6): 1733-1738.  
HAN Bing, CHEN Xin, RAO Peng. Applications of ASIC in the long array column of infrared TDI detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(6): 1733-1738.
- [5] 阮奇桢. 我和 LabVIEW: 一个 NI 工程师的十年编程经验[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.  
RUAN Qizhen. LabVIEW and I: Ten years programming experience of an NI Engineer[M]. Beijing: Beihang University press, 2012, 8.
- [6] Robert H Bishop. LabVIEW practical tutorial[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2014.  
Robert H Bishop. **LabVIEW 实践教程**[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [7] 陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002, **24**(1):1-3.  
CHEN Rui. TAN Xinquan. Study on non-uniformity correction of infrared image[J]. *Infrared Technology*, 2002, **24**(1): 1-3.
- [8] 陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势[J]. 红外技术, 2013, **35**(6): 311-318.  
CHEN Qian. The status and development trend of infrared image processing technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(6): 311-318.
- [9] 王学伟, 李珂, 王世立. 红外焦平面阵列的非均匀性研究[J]. 激光与红外, 2012(10): 1131-1134.  
WANG Xuewei, LI Ke, WANG Shili. Study of non-uniformity in infrared focal plane arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2012(10): 1131-1134.
- [14] 李唐兵, 付鹏, 朱向前, 等. 绝缘子串红外图像中绝缘子盘面和钢帽区域的自动提取方法[J]. 红外技术, 2014, **36**(8): 644-648.  
LI Tangbing, FU Peng, ZHU Xiangqian, et al. Algorithm research on automatically extracting the disks and steel caps area of insulator from infrared image of an insulator string[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(8): 644-648.
- [15] 冯玲, 黄新波, 朱永灿. 基于图像处理的输电线路覆冰厚度测量[J]. 电力自动化设备, 2011, **31**(10): 76-80.  
FENG Ling, HUANG Xinbo, ZHU Yongcan. Transmission line icing thickness measuring based on image processing[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, **31**(10):76-80.
- [16] 张闯, 迟健男, 张朝晖, 等. 基于边缘检测与双边滤波的彩色图像去噪[J]. 电子学报, 2010, **38**(8):1777-1783.  
ZHANG Chuang, CHI Jiannan, ZHANG Zhaohui, et al. Removing noise of color images based on edge detection and bilateral filter[J]. *ACTA ELECTRONICA SINICA*, 2010, **38**(8): 1777-1783.
- [17] Otsu N. A threshold selection method from gray-level Histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, **9**(1): 62-66.
- [18] 胡淋波, 姚建刚, 孔维辉, 等. 基于红外图像的高压绝缘子串自动定位方法[J]. 红外技术, 2015, **37**(12): 1047-1051.  
HU Linbo, YAO Jiangang, KONG Weihui, et al. High voltage insulator string automatic location method based on infrared image[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(12): 1047-1051.
- [19] Kauppi H, Seppanen T. An experiment comparison of autoregressive and Fourier-based descriptors in 2D shape classification[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, **17**(2): 201-207.
- [20] 付波, 周建中, 陈文清, 等. 一种基于傅里叶描述子的轴心轨迹自动识别方法[J]. 电力系统自动化, 2004, **28**(12): 40-44.  
FU Bo, ZHOU Jianzhong, CHEN Wenqing, et al. A method based on FOURIER descriptors to recognize shaft orbit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, **28**(12): 40-44.
- [21] 万玮, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 基于傅里叶描述子的高分辨率遥感图像地物形状特征表达[J]. 遥感学报, 2011, **15**(1): 73-87.  
WAN Wei, FENG Xuezhi, XIAO Pengfeng, et al. Shape feature representation of ground objects from high-resolution remotely sensed imagery base on Fourier descriptors[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, **15**(1): 73-87.

(上接第 974 页)