

CMOS 图像传感器参数自动化测试软件设计与实现

刘冰, 郑君, 董建婷

(北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094)

摘要: 针对光学遥感系统图像传感器性能评估需求, 搭建了一套图像传感器参数测试系统; 测试系统中的参数自动化测试软件对图像传感器的图像数据进行实时采集、存储和显示; 对图像传感器的主要性能参数进行实时计算分析, 对测试结果实时显示存储; 该测试软件在 DALSA 公司 Sapera LT 软件开发包的基础上, 利用 VC++ 进行二次开发, 实现了参数测试的自动化; 根据测试结果, 验证了测试方法的正确性; 软件设计过程中注意了模块化、规范化设计, 所以软件的移植性较好, 具有良好的应用前景。

关键词: 光学遥感系统; 图像传感器; 参数自动化测试; Sapera LT; VC++

Design and Implementation of Automatic Parameters Test Software for CMOS Image Sensor

Liu Bing, Zheng Jun, Dong Jianting

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to evaluate the performance of image sensors in optical remote sensing system, the image sensor parameter testing system is built. In the image sensor testing system, the automatic test software realized the collection, storage, display and parameter analysis and calculation of the test data. Based on the software development tools Sapera LT of DALSA Company, the test software is further developed with VC++, and the automatic test is realized. According to the test results, the correctness of the test method is verified. Because of the modular and standardized design, the transplanted of the software is better and has a good application prospect.

Keywords: optical remote sensing system; image sensor; Automatic test for parameters; Sapera LT; VC++

0 引言

图像传感器是航天光学遥感系统的核心器件, 其性能的优劣直接影响到系统的成像质量。为了选择一款性能优良的图像传感器, 需要对其各项性能指标进行摸底测试。

在实际使用中, 选择图像传感器时主要依据图像传感器数据手册中给出的性能指标。而数据手册中的性能指标是在特定的工作条件和工作环境下测试得到的, 并不能覆盖实际应用中的所有使用情况。为了更加全面地获取不同工作条件和工作环境下器件的性能指标, 根据应用需求来选择图像传感器, 迫切需要搭建一套图像传感器光电性能测试与评估系统。

光学遥感系统的图像传感器包括可见光图像传感器(主要包括 CCD 图像传感器和 CMOS 图像传感器)和红外图像传感器。由于 CMOS 图像传感器具有驱动简单、单电源低电压供电、集成度高等特点^[1], 以其作为研究对象搭建测试系统具有结构简单、研制周期短的优点, 因此在研发初期选择 CMOS 图像传感器作为研究对象。通过研制 CMOS 图像传感器测试系统积累经验, 为以后将自动化测试技术推广应用到 CCD 图像传感器和红外图像传感器打下基础。

1 图像传感器测试系统简介

在航天遥感应用领域, 亟需大规模、高读出速度、大动态

范围的图像传感器, 因此选择高性能、高速大面阵 CMOS 图像传感器 LUPA4000 作为研究对象, 对其性能进行测试评估。

CMOS 图像传感器测试系统包括 LUPA4000 图像传感器及外围电路、测控计算机、积分球光源等。测试系统如图 1 所示, 其中积分球提供均匀光源; 外围电路提供 LUPA4000 工作所需的时序和电压, 将光学信息转换为数字图像数据传送给测控计算机处理; 参数自动化测试软件是图像传感器测试评估系统的重要组成部分, 实现图像数据的采集、存储、显示和参数的自动化测试计算等功能。

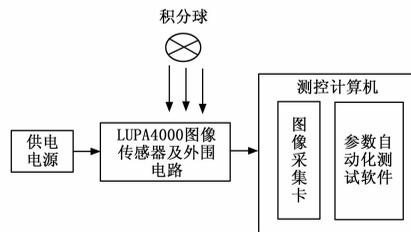


图 1 CMOS 图像传感器测试评估系统

2 参数自动化测试软件设计

2.1 设计目标

在传统的图像传感器参数测试时, 通常先采集存储图像, 再利用 MATLAB、Photoshop 等软件对图像数据进行人工分析处理。为了改进传统测试方法效率低下的缺点, 参数自动化测试软件的设计目标是通过该软件实现图像传感器图像数据的实时采集、存储和显示; 对图像传感器的主要性能参数进行实时计算分析, 对测试结果进行实时显示存储。在整个测试过程

收稿日期:2017-11-20; 修回日期:2018-01-08。

基金项目:科技部十三五重点项目(2016YFB0500500)。

作者简介:刘冰(1975-),男,河北承德人,硕士,主要从事航天光学遥感器总体设计与系统测试方向的研究。

中,用户只需选择待测参数,配置好图像传感器的工作状态和测试环境后,点击“测试开始”按钮,参数测试即可自动化进行,测试结果实时以曲线和图表显示,原始图像数据和测试结果同步存储到本地以供进一步处理分析。与传统的测试方法相比,自动化测试软件将采集图像与数据处理同步进行,大大简化了测试流程,缩短了测试时间,提高了测试效率。由于采图自动化,参数计算时的采图数量与人工采图相比可大大增加,计算样本的增加也提高了测试结果的可信度。

为了更好的实现设计目标,在设计过程中应特别注意测试参数的全面性、测试过程的自动化、参数计算方法的正确性等。同时为了软件的移植性和通用性,应注重软件编写的模块化和规范化。

2.2 需求分析

目前对图像传感器的测试, DALSA、Fairchild、E2V、ATMEL等图像传感器生产厂商,会搭建一套大型化、通用化、自动化的测试系统,适用于不同规格的图像传感器参数测试。这样的测试系统能系统全面地对探测器的性能参数进行测试,但由于其强大的通用性,带来设备庞大、造价昂贵、操作复杂等问题。

作为图像传感器的用户,不需要像专业的图像传感器生产商那样投入大量资金研发图像传感器综合参数测试评价系统。本着经济适用、自动高效、可靠稳定的设计原则,选择光学遥感系统应用中比较关注的指标参数进行测试。经过研究 CMOS 图像传感器及遥感系统的应用需求,最终选择暗信号、暗信号非均匀性(FPN)、总噪声、光响应线性度、饱和输出电压、动态范围、缺陷像元、光响应非均匀性(PRNU)、信噪比(SNR)等典型参数进行测试。

2.3 方案确定

2.3.1 选择图像采集卡

在测试系统中,CMOS图像传感器的图像时钟频率为20MHz,图像数据12bit并行输出,图像传输数据率为240Mbps。CameraLink是目前比较流行的图像数据传输协议标准,数据传输速率高达2.38Gbps(图像时钟频率为20~85MHz)^[2],满足测试系统的数据传输速率要求,因此图像传输选择CameraLink接口。

通过对CamerLink图像采集卡的调研,最终选用DALSA公司的CameraLink图像采集卡X64 Xcelera-CL PX4进行图像数据的采集。X64 Xcelera-CL PX4是一款PCI Express X4接口的CameraLink图像采集卡。该图像采集卡能接收数字视频图像数据,并且能提供相机控制信号以及串行通信信号,广泛应用于机器视觉和科学成像领域^[3]。采集卡性能指标与测试系统需求情况对比见表1。由表1可知,该采集卡满足本测试系统使用需求。

2.3.2 选择软件开发工具

DALSA公司针对图像采集卡提供了Sapera LT软件包。Sapera LT是一套用于图像采集、显示和控制的C和C++软件库,支持所有DALSA的图像采集卡,能实现多样化的相机采集控制、灵活的显示和管理功能,具有良好的可移植性和详细的开发向导,为用户根据自身需求进行二次开发提供了便捷。Sapera LT与Microsoft Visual Studio C/C++、.Net、Visual Basic 6.0和Borland C++ Builder兼容,支持Windows XP、2000和NT平台^[3]。软件开发时使用Sapera LT软

表1 X64图像采集卡Xcelera-CL PX4性能参数与需求情况对比

功能	参数	测试系统实际需求
图像接口	CameraLink接口,支持Base,Medium,Full模式,可提供相机控制信号和串口通信信号	CameraLink接口,工作于Base模式,使用串口通信信号
像素时钟	最大85MHz	20MHz
像素位数	最大64bit	12bit
采集数据规模	对于16bits/pixel,每行可采集128,000 Pixels,最多采集16,000,000 lines	采用16bits/pixel,每行2048 Pixels。一共2048行。
操作系统	XP Pro,Vista(32/64bit)	XP pro 64bit
软件库	Sapera++ LT(32/64bit)。提供基础应用类(Basic Classes)和GUI类(GUI Classes)	Sapera LT++ 64bit。基础应用类(Basic Classes)和GUI类(GUI Classes)均有使用

件包可以大大缩减软件研发时间和研发难度。以上与Sapera LT兼容的软件工具中,Visual C++是Microsoft公司推出的基于C/C++语言的功能强大的集成应用开发环境,能够开发出界面友好、执行速度快、易于维护升级的软件系统,是开发可视化窗口应用程序的主流软件^[4]。因此选择Visual Studio 2008中的VC++作为系统开发工具。

2.3.3 搭建软件总体框架

Sapera LT为用户提供的API函数,包含两大类:基础应用类(Basic Classes)和GUI类(GUI Classes)。基础应用类提供了与采集、缓存、传输、显示相关的函数。GUI类提供了许多设置对话框,用户可根据需要调用相关设置对话框,修改采集、存储、显示参数。

参数自动化测试软件主要包括图像文件模块、图像采集存储模块、图像显示模块、图像数据分析和参数自动化测试模块。各个功能模块的软件编程实现方法如表2所示。

由表2可知,图像文件模块、图像采集模块、图像显示模块等通过调用Sapera LT软件开发包提供的基础应用类和GUI类函数来实现,简单易行。参数自动化测试模块和图像数据分析模块通过Sapera LT软件库中的SapTransfer进行图像采集,利用SapBuffer获取采集缓存区的图像数据,对获取的图像数据利用VC++编程进行分析计算处理。参数自动化测试模块是整个软件系统的核心模块,下面将详细介绍该模块的设计与实现。

2.4 关键模块的设计实现

2.4.1 测试规划

参数自动化测试模块主要实现CMOS图像传感器的暗信号、暗信号非均匀性(FPN)、读出总噪声、光响应线性度、饱和输出电压、动态范围、缺陷像元、光响应非均匀性(PRNU)、信噪比(SNR)等参数的自动化测试。以上参数的测试条件如下:

1) 暗信号、暗信号非均匀性、总噪声需要在无光照的暗背景下进行测试。其中暗信号和暗信号非均匀性需要在多个积分时间下进行多帧测试;读出总噪声需要在固定的积分时间下进行多帧测试;

表 2 参数自动化测试软件功能模块实现方法

主要功能模块	子模块	实现方法
图像文件模块	图像文件打开存储设置	利用 GUI 类 CLoadSaveDlg 进行参数配置
	图像文件打开	利用基础应用类 SapBuffer 类函数 Load 将图像数据打开并加载到当前的 Buffer 中,通过显示窗口进行显示。
	图像文件存储	利用基础应用类 SapBuffer 类函数 Save 将当前 Buffer 里的图像数据按指定格式进行存储。
图像采集存储模块	采集配置	调用 GUI 类 CAcqConfigDlg 进行参数配置; 利用基础应用类 SapAcquisition 确定采集设备与相机配置文件;利用基础应用类 SapBufferWith- Trash 创建 buffer 存储图像;利用基础应用类 SapTransfer 采集图像
	单帧采集	利用 SapTransfer 类函数 Snap 实现单帧采集
	连续实时采集	根据设置的帧数,循环调用 SapTransfer 类函数 Snap 实现连续多帧帧采集
图像显示模块	显示配置	通过基础应用类 SapView 对显示图像进行配置,SapView 与 SapTransfer 保持同步,能将 Buffer 中的 数据实时通过 SapDisplay 显示到屏幕
	适应窗口显示	通过 SapView 的 GetWidth 和 GetHeight 函数获取当前缓存区 Buffer 的数据大小,并根据屏幕大 小和缓存区数据大小,对 Buffer 数据进行适应窗口显示。
	按比例缩放显示	通过调用 GUI 类 CViewDlg 对缩放比例进行设置,根据缩放比例进行动态修改显示。
图像数据分析模块	原始数据表格化显示	通过在图像显示窗口点击右键,在弹出菜单“原始图像显示”激活原始数据显示对话框。在对话框 中利用列表控件 CListCtrl 对选择区域的像元灰度值进行显示。其中选择区域的数据获取通过 SapBuffer 类的 ReadRect 函数获取。
	图像数据直方图统计	通过在菜单栏选择“直方图显示”菜单激活直方图显示对话框。对选择的图像区域进行直方图统 计,并将统计结果通过 CDC 类中的画笔进行绘制。绘制过程包括 X 轴绘制,Y 轴绘制,直方图绘 制,刻度绘制等。
	图像数据信噪比计算与 显示	设计中将图像信噪比计算显示与图像直方图统计进行绑定,对某区域图像进行直方图统计的过程 中,同时在直方图下方对该区域图像数据的信号、噪声、信噪比进行计算并显示。显示方法为静态 文本控件 CStatic。
参数自动化测试 模块	待测参数选择	将待测参数进行列表,通过选择控件 CheckBox 对参数进行选择
	串口设置	对串口的波特率、串口端口、打开或关闭串口进行选择。串口通信需要调用串口通信控 件 MSCOMM
	积分时间配置	对起始积分时间、终止积分时间、积分时间步长进行设置。通过编辑框控件 CEdit 实现。对超过积 分时间范围的设置弹出报警对话框。
	图像数据采集及参数计算	利用 SapTransfer 的 Snap 函数实现单帧采集,采集的数据通过 SapBuffer 的 GetAddress 函数获取 Buffer 地址,实现对 Buffer 进行读写操作。
	测试结果显示存储	对计算结果通过静态文本控件 CStatic 进行显示。对于中间每帧数据的信号、噪声、信噪比利用列 表控件 CListCtrl 进行实时显示。对于测试结果随积分时间的变化关系,利用图表控件 Teechart 进 行实时曲线绘制。

2) 光响应线性度、饱和输出电压、光响应非均匀性、动态范围、信噪比需要在积分球均匀光照下进行测试。其中光响应线性度、信噪比、饱和输出电压可同时进行测试计算,都要在多个积分时间下进行多帧测试计算。动态范围由饱和输出电压和总噪声的测试结果计算得到;

3) 光响应非均匀性需要在固定积分时间下,调节积分球光强,使图像传感器处于半饱和状态下进行测试;

4) 缺陷像元需要在无光照条件下、均匀光照条件下图像传感器半饱和和这两种状态下进行测试。

根据以上参数测试的特点,对参数测试条件进行分类整理,规划参数测试流程如图 2 所示。在进行软件设计时需要注意以下几点:

1) 由于参数测试时需要在不同的积分时间或固定积分时间下进行,所以软件需要设计积分时间设置模块和串口通讯模块。串口通信模块软件设计时可以通过调用 VC++ 的串口通信控件 MSComm 实现。设计时要注意模块化、通用化设计,使编写的串口发送模块适用于不同数据量、不同编码格式的数据发送。积分时间设置通过手动输入起始积分时间、终止积分

时间、积分步长实现。在启动测试前,需要人工对输入的积分时间进行确认。如果积分时间设置错误,通过 AfxMessageBox 函数弹出对话框进行提醒。

2) 从测试流程可看出,有多个参数是在相同的测试条件下进行的。所以在进行测试参数选择时,选择了某一参数进行测试,则与该参数相同测试条件的参数会被自动勾选上。如果根据参数测试选择,在某个测试条件下没有参数需要测试,则该测试条件可略过。所以在软件编程时,需要按照测试条件设计不同程序模块。在每个模块中,每次参数测试前都利用 AfxMessageBox 函数弹出对话框,对需要进行的人工操作进行提醒,并在人工操作完成后方可转到下一步骤。

3) 从测试流程可看出,大部分参数测试都需要在不同的积分时间下对图像数据进行多帧采集处理。所以将某一积分时间下的多帧采集设计为一个函数模块,供上级程序模块调用,增强程序的可读性、通用性。该程序模块的关键代码如下:

```
SapTransfer * m_Xfer= pDoc->GetXfer();
//建立与 SapTransfer 的联系
```

```
SapBuffer * m_Buffers=pDoc ->GetBuffers();
//建立与 SapBuffer 的联系
m_Xfer->Snap();
//单帧采集,根据采集帧数,多次循环调用该语句
m_Buffers->GetAddress((void * *) &.data);
//通过该语句获取采集数据
m_Buffers->ReleaseAddress(data);
//数据处理完成后,通过该语句释放缓存
```

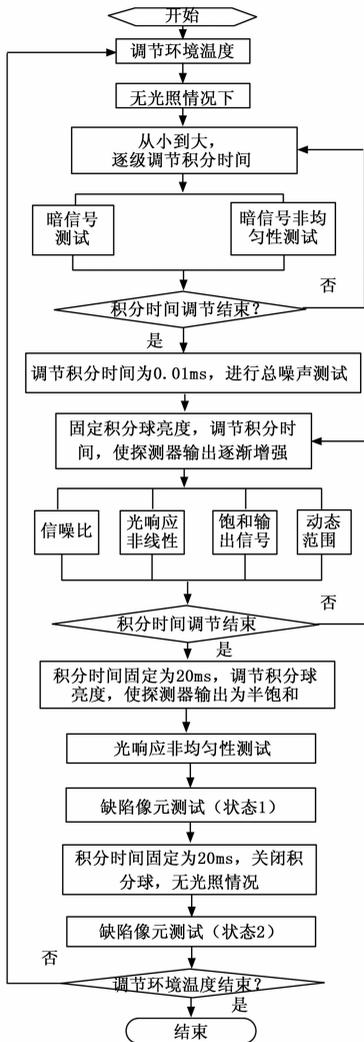


图 2 参数测试流程图

2.4.2 具体实现

具体到某一参数的测试计算, 最重要的是测试方法的正确性, 测试方法是否有据可依。由于 CMOS 图像传感器的参数测试方法无相关标准规范, 因此只能参考相关的文献[5-6]和 CCD 图像传感器的测试规范^[7], 进行改进移植, 使其适用于 CMOS 图像传感器的测试。由于对每个技术指标测试时, 测试条件、测试方法、测试步骤、数据处理都借鉴了国际先进的测试规范^[7]和方法, 测试数据的可信度、可用性大大提高。

下面以信噪比 (SNR) 测试为例说明测试方法和软件设计流程。

信噪比测试时, 在均匀光照条件下, 调节积分时间, 在不同的积分时间下采集 F 帧图像, 测试信噪比。按照公式 (1)

计算器件的信噪比 (SNR)。

$$SNR = 20 \log \frac{V_{OS}}{V_{NRMS}} \quad (1)$$

其中:

$$V_{OS} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{oi}$$

$$V_{NRMS} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (V_{oi} - V_{OS})^2}$$

式中, M 为光敏面像元数目; V_{oi} 为第 i 像元的 F 帧平均输出信号电压; V_{OS} 为器件的平均输出信号; V_{NRMS} 为输出信号的均方根偏差。

信噪比测试软件设计流程如图 3 所示。

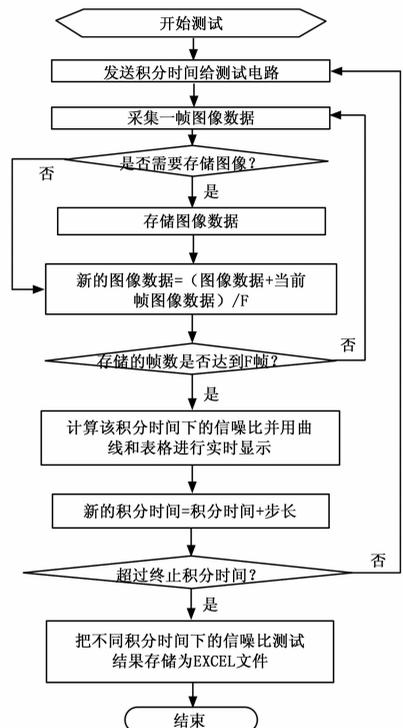


图 3 信噪比测试软件设计流程图

在进行信噪比测试软件设计过程中, 解决了以下技术难点, 如表 3。

3 测试结果

利用参数自动化测试软件对 CMOS 图像传感器 LUPA400 进行了测试。为了验证测试软件的正确性, 进行了以下验证工作。

1) 验证测试软件编写的正确性: 在利用测试软件进行参数测试的过程中, 将原始图像数据进行存储, 将存储的图像数据利用 MATLAB 软件进行计算, 将测试软件的计算结果和 MATLAB 的计算结果进行对比。通过多次对比, 测试软件的计算结果和 MATLAB 的计算结果完全一致, 因此验证了测试软件程序编写的正确性;

2) 测试方法的正确性和测试结果的可信度: 将参数计算的结果与器件数据手册的参数指标进行比对, 对比结果如表 4 所示。通过与厂家的指标进行对比, 主要参数的测试结果在厂家提供的参数指标范围内。而且测试结果与使用过程中对器件

表 3 信噪比参数测试技术难点及解决方法

技术难点	原设计方法	解决方法
数据处理速度跟不上数据采集速度,导致程序死机	利用 new SapBuffer()开辟数据缓存区	利用 new SapBufferWithTrasn()开辟数据缓存区,当数据采集速度比处理速度快时,图像被保存在 trash Buffer 中,直到能稳定输出
	利用 m_Buffers->Read()和 m_Buffers->Write()对缓存区进行读写	利用 m_Buffers->GetAddress()获取缓存区地址,对缓存区数据进行读写。并将该读写函数放在程序回调函数 XferCallback 模块中
无输入时钟和数据信号导致图像不更新时,无法识别	没有对输入的像素时钟、行有效信号、帧有效信号进行监测	利用 SapAcquisition->GetSignalStatus()获取像素时钟、行有效信号、帧有效信号状态,并在主界面状态栏进行实时显示
测试结果用曲线进行显示时,有更新不及时现象	通过调用 MFC CDC 类中的画笔进行曲线绘制。	利用 Steema 公司研发 TeeChart 控件实现测试结果曲线实时绘制

性能的使用判断结果基本一致。因此可判断测试方法正确,测试结果可信。

表 4 LUPA4000 测试结果与数据手册符合性对比

参数名称	软件测试结果	数据手册指标
暗信号	40mV/s(环境温度 22℃)	<140mV/s(21℃环境温度)
读出噪声	0.35mV(环境温度 24℃)	<0.54mV
饱和电压	882mV	>810mV
动态范围	2556:1(环境温度 24℃)	2000:1
响应非线性	6.87%	数据手册无此指标
光响应非均匀性 PRNU	2.09%	<2.5%
信噪比 SNR	30% Vsat : 22.54 dB 50% Vsat : 31.91dB 70% Vsat : 37.95dB	数据手册无此指标,但与测试过程中目视判断基本一致,成像图像噪声较大,信噪比欠佳
缺陷像元	17371 个孤立缺陷像元,占总像元数的 0.41%	数据手册无此指标,但与测试过程中目视判断基本一致,缺陷像元数目较多

4 结束语

经过多次测试验证,该测试系统运行稳定可靠、操作简单便捷、自动化程度高,大大提高了测试效率。原本需要 1~2 天才能完成的测试工作,利用该软件系统后只需半个小时即可

(上接第 61 页)

4 结论

本文提出了两种可以提高主轴回转误差分离精度的方法:采用浮频数据采集方法,确保了在不同转速下采集得到的数据的谐波分量相同,使误差分离精度不会因转速的升高而降低;为了消除环境中白噪声对误差分离精度的影响,在同一稳定转速下对主轴轮廓连续采集十个周期的数据,采用集合平均滤波方法混在测试数据中的白噪声。搭建了试验系统,利用提出的方法分离出了机床主轴不同转速下的纯回动态转误差、圆度误差和安装偏心差,验证了方法的有效性。

参考文献:

[1] Denis S A, Samuel G L. Harmonic—analysis—based method for

自动完成。图像传感器参数自动化测试软件可广泛应用于不同规模的图像传感器的性能测试评估,可用于选择图像传感器时的测试摸底、图像传感器验收时的批量评估筛选、图像传感器使用过程中的性能评估、故障定位等。由于在软件设计中采用模块化设计,程序可读性和可移植性较好,具有良好的推广应用前景。

在本阶段的测试中,主要通过手动调节积分球光强或调节积分时间来获取不同的曝光量。下一阶段的工作重点是研究如何通过测试软件对积分球的光强进行自动控制以及如何对光强进行精确标定。

参考文献:

[1] 陈必威,梁志毅,王延新,等.基于 FPGA 的高帧速 CMOS 成像系统设计 [J]. 计算机测量与控制,2012,20(5):1397-1400.
 [2] 于双江,王建宇. SerDes 器件在遥感相机系统中的应用 [J]. 航天返回与遥感,2012 33(6):93-98.
 [3] Robert Joncas. Sapera LT User' S Manual [Z]. Canada, Robert—Joncas, 2008.
 [4] 陈兵旗,孙明. Visual C++实用图像处理 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
 [5] 池国泉. 高性能 CMOS 图像传感器测试与评价系统的设计与实现 [D]. 天津:天津大学,2008.
 [6] 肖恒兵. 基于视频信号处理的 CCD 光电参数测试系统研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2006.
 [7] ESA/SCC Basic Specification NO, 25000, Electro _ optical Test Methods for Charge Couple Devices [S].
 separation of form error during evaluation of high—speed spindle radial errors, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(5):445-461.
 [2] 陈长浩. 主轴运动精度的测试与研究 [D]. 北京:北京工业大学,2010.
 [3] 雷贤卿,李言,周彦伟,等. 3 点法圆度误差分离技术的新算法 [J]. 兵工学报,2007,28(1):73-77.
 [4] 刘敏. 超精密主轴回转精度测试研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
 [5] 凌明祥,李明海,王珏,等. 空气轴承径向回转误差测量精度建模与仿真 [J]. 计算机测量与控制,2013,21(8):2068-2070.
 [6] Fujimaki K, Sase H, Mitsui K. Effects of sensor noise in digital signal processing of the three—point method, Measurement Science and Technology. 2008, 19(1):957-233.