

文章编号 1004-924X(2014)05-1183-07

空间相机成像参数配置功能检验

顾莹迎^{1, 2*}, 沈湘衡¹, 马 军¹, 霍金明^{2, 3}, 李静秋¹, 葛欣宏¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春大学 光华学院, 吉林 长春 130000)

摘要:介绍了空间相机成像参数配置的基本组成和作用, 讨论了成像参数配置功能缺陷对相机成像质量的影响, 应用数学方法分析了成像参数配置功能抽样检验的测试风险。基于自动测试系统, 提出了一种空间相机成像参数配置功能全面检验的方法来解决测试覆盖性和测试效率之间的矛盾。应用本文提出的测试系统和检验方法对空间相机成像参数配置功能进行了全面检验。结果表明: 本方法实现了成像参数配置功能的 100% 覆盖检验; 每条参数测试判读时间缩短为 40 ms; 完成相机成像参数全面检验的测试时间大约为 50 min。该方法能够有效测试出成像参数配置功能故障, 满足了空间相机高效测试、零质量缺陷的要求。

关键词:空间相机; 成像参数配置; 功能检验; 抽样测试

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142205.1183

Verification of setting function for imaging parameters of space camera

GU Ying-ying^{1, 2*}, SHEN Xiang-heng¹, MA Jun¹, HUO Jin-ming^{2, 3}, LI Jing-qiu¹, GE Xin-hong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guanghua College, Changchun University, Changchun 130031, China)

* Corresponding author, E-mail: 18686681605@163.com

Abstract: The basic composition and functions of imaging parameters of a space camera were introduced. The impact of defective imaging parameter values on the imaging quality was analyzed and the risk of sampling test method for imaging parameter setting was analyzed by applying the mathematical method. On an automatic testing system, a method and a system to achieve a comprehensive verification for setting imaging parameters were proposed to solve the contradiction between test coverage and test efficiency. The method and the system were used to verify the functions of imaging parameter setting of the space camera. Experiment result shows that the proposed method can realize a comprehensive verification for setting imaging parameters of the camera, the test time is shortened to 40 ms for each test case and that is about 50 min for all systems. The method is able to effectively verify the function of setting imaging parameters and can meet the test requirements of zero quality defects.

Key words: space camera; imaging parameter setting; function verification; sampling test

收稿日期: 2013-10-21; 修订日期: 2013-12-15.

基金项目: 中国科学院创新基金资助项目 (No. YZ200904)

1 引言

空间相机是搭载在卫星等航天平台上的利用光学手段获取地面或空间感兴趣目标图像信息的综合性光机仪器^[1]。目前,国内外高分辨率相机多为以时间延时积分(Time Delay Integration, TDI)CCD 为探测器的光电传输型相机^[2-3]。这种相机的优点在于成像系统的体积和重量小,信噪比高、动态范围大、不需要相机回收就可以得到图像信息等^[4-6]。另外,为了提高成像质量,扩大动态范围以及增大信噪比,相机的成像参数,如积分级数、行转移时间、增益、偏置等通常都可调^[7-10]。这种灵活的成像参数配置能力有利于空间相机研制调试中的试验和定标^[11]。

空间相机的成像参数配置是否合理直接决定相机成像质量的好坏,因此它成为空间相机质量控制的关键检验点之一。空间相机成像参数配置的检验主要涉及两方面内容:一是空间相机的成像参数在预定的参数范围内是否能够正确配置到相机控制器中;二是相机控制器能否根据故障策略识别非预期成像参数,并拒绝配置参数。长期以来,由于空间相机可配置的成像参数较多且范围较大,如何兼顾检验效率和检验质量是检验成像参数配置的难点。传统的成像参数检验方法主要依据国家标准《计数抽样检验程序》,根据待检相机成像参数的数量设计抽样检验方法,人工发送相机成像参数配置命令,对抽出的成像参数逐条测试。然而,对于高成本、高可靠性要求的空间相机来说,这种抽样检验方法存在很大的检验风险,而且成像参数配置故障将导致相机成像异常,严重影响相机的成像质量。为解决这一问题,必须研究空间相机集成测试技术^[12]。

本文介绍了空间相机成像参数的基本组成,讨论了成像参数配置故障对空间相机成像质量的影响,应用数理统计原理分析了抽样检验方法的检验风险,并详细给出了基于自动测试系统的成像参数配置检验方法及其系统实现。

2 空间相机成像参数检验

2.1 成像参数的组成及作用

空间相机的成像参数配置一般由积分级数、

行转移时间、增益、偏置等参数组成,如图 1 所示。其中,积分级数和行转移时间两个参数用于控制 TDI CCD 芯片的特性;增益和偏置参数用于控制图像信号处理器的特性。积分级数为 TDI CCD 对某个物点曝光叠加的次数,一般的 TDI CCD 器件有 96 个级数。空间相机通过调整级数可以实现低照度目标的成像,提高相机的信噪比。行转移时间用来匹配像移速度,最终形成清晰的延迟积分图像。调节增益参数可以使 CCD 信号在不同的光照强度下仍然处在模数转换的量程范围内,避免图像太暗或者饱和^[13]。偏置参数用来调整经相关双采样后 CCD 模拟信号的直流分量水平。

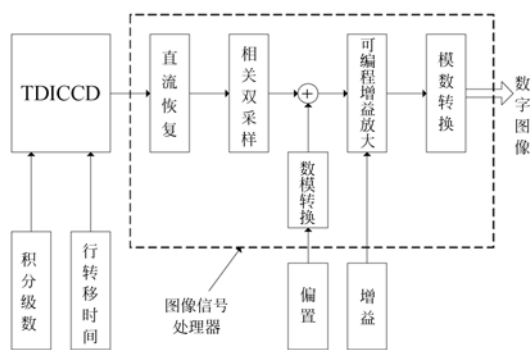


图 1 TDI CCD 相机的成像参数配置

Fig. 1 Block diagram of imaging parameter setting for TDI CCD cameras

2.2 成参数配置故障对相机成像质量的影响

在相机研制过程中,如不对空间相机的成像参数配置进行充分的检测验证,将给相机在轨成像带来严重的影响,主要表现在以下两个方面:

(1) 预期成像参数值不能被相机控制器解析注入,使成像质量下降。如图 2 所示,左侧为在最

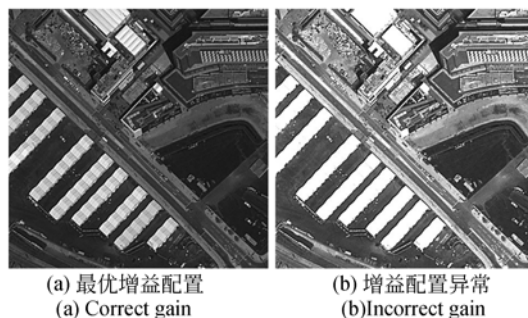


图 2 最优增益设置前后成像质量的比较

Fig. 2 Comparison of imaging qualities between correct and incorrect setting optimum gains

优增益值上的遥感图像, 右侧为增益成像参数配置功能异常, 导致最优增益值不能配置给相机时的遥感图像。

(2) 预期成像参数值被相机控制器错误解析注入, 使成像状态与预期不符。这一问题将影响相机的控制功能, 给用户操作带来困难。如图 3 所示, 图 3(a) 为某相机地面定标时某片 CCD 的行转移时间参数解析错误产生的图像, 其灰度与其他 CCD 不一致; 3(b)、3(c) 分别为某相机在轨成像时某个视频处理器偏置参数、增益参数解析错误时拍摄的遥感图像。

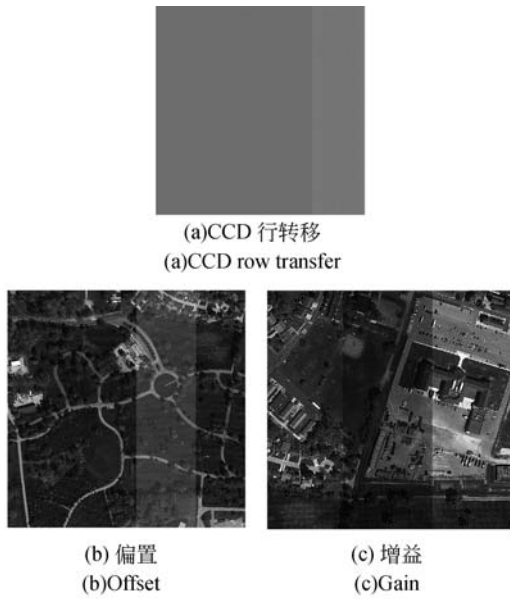


图 3 某片 CCD 不同错误方式解析的在轨图像

Fig. 3 On orbit images captured by CCD with different incorrect interpretations

2.3 成像参数测试约束

将成像参数的测试集记为:

$$A = \{a \mid a = 2^n - 1\}, \quad (1)$$

其中: n 为成像参数配置的占用位宽。

成像参数可配置集记为:

$$O = \{o \mid \text{可设置的成像参数值}\}. \quad (2)$$

成像参数不可配置集记为:

$$N = \{n \mid \text{无效参数值}\}. \quad (3)$$

则成像配置参数集 A, O, N 满足如下关系:

$$\begin{cases} A = O \cup N \\ O \cap N = \Phi \\ A \supseteq O \\ A \supseteq N \end{cases}. \quad (4)$$

相机的成像参数配置应满足如下约束关系:

(1) O 中所有的可设置参数值 o 均可被相机正确配置解析;

(2) N 中所有的无效参数值 n 不能被相机配置解析。

2.4 成像参数配置检验

成像参数配置的检验方法主要有两种, 即全面检验和抽样检验^[14]。全面检验要求对成像参数测试集 A 中的每个参数值逐一测试验证, 确保每个参数值均满足测试约束关系。该方法可以实现成像参数配置功能的无遗漏检验, 但是需要人工注入测试用例, 其效率太低, 难以满足检验周期的要求。因此常用抽样检验方法验证空间相机成像参数的配置功能, 即选取一定样本的成像参数值进行检验, 根据样本测试结果判定成像参数配置是否合格。

设一批待检的成像参数状态总数量为 N , 有问题的参数值数量为 m , 则有问题的参数值占全部参数值的比率 $p = m/N$ 。抽样测试的参数值数量为 n , 在 n 中发现了 k 个有问题的参数值。当 k 不大于检验合格接收判定数 A_c 时, 判定成像参数配置合格。判定合格的概率 $L(p)$ 服从超几何分布^[15]:

$$L(p) = P(k \leq A_c) = \sum_{k=0}^{A_c} P(X = k) = \sum_{k=0}^{A_c} \frac{C_m^k \cdot C_{N-m}^{n-k}}{C_N^n} = \sum_{k=0}^{A_c} \frac{C_{Np}^k \cdot C_{N-Np}^{n-k}}{C_N^n}. \quad (5)$$

式(5)表明, 抽样检验方法中, 当其他参数不变时, 判定成像参数配置为合格的概率与成像参数中实际的不合格参数值比率具有函数关系。图 4 所示为某待检成像参数状态总数量为 1 000, 抽取 40 个参数值进行检验的抽样特性曲线。如果有一个参数值不满足测试集约束, 就判定其成像参数配置不合格。从图 4 可以看出, 待检成像参数状态值中不符合要求的参数值比例 p 越高, 成像参数配置被判定为不合格的概率就越大。

显然, 抽样检验成像参数配置的方法不能满足空间光学遥感设备零质量缺陷的要求。当大量的成像参数状态值中只有极少数状态值不符合要求时, 应用抽样检验方法很难发现相机成像参数的错误配置, 误判的风险很大。一旦这些极少数的成像参数状态值配置到相机中, 将发生配置故障, 严重影响空间相机的成像质量。因此本文提

出了基于自动测试系统的空间相机成像参数配置的全面检验方法。

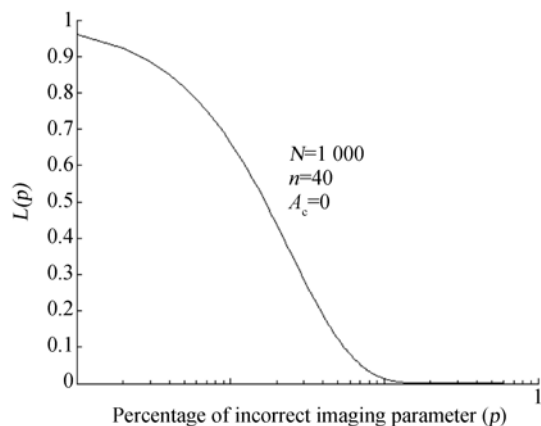


图 4 某批成像参数测试抽样特性曲线

Fig. 4 OC curve of a batch of imaging configuration parameters

3 系统设计

3.1 成像参数测试范围

空间相机成像参数的配置一般利用某种通信总线按照特定的通信协议,由主控计算机将参数注入相机控制器。通信帧通常包括帧头、指令、成像参数、校验和帧尾等,如图 5 所示。成像参数配置的全面检验就是要对参数占用位宽范围内的全部参数进行测试,有效参数相机控制器应能正确配置参数,无效参数和无效位宽上的参数相机控制器均不予响应。

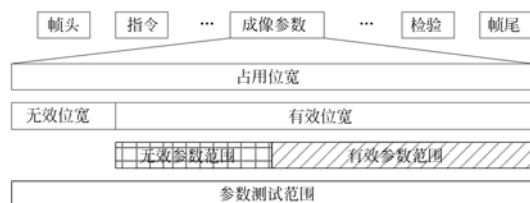


图 5 参数配置通信帧结构

Fig. 5 Communication frame for parameter setting

3.2 测试系统

如图 6 所示,测试系统由光源目标、相机、图像快视、相机控制器、电源系统、总线转换器和主控计算机组成。其中总线转换器和主控计算机是测试设备,其他为参试设备。空间相机常用的通讯总线有 CAN、1553B、422、485 等,为了提高测

试系统的通用性,总线转换器可以实现相机控制器与主控计算机间灵活的总线转换。主控计算机用来实现相机成像参数注入、已配置成像参数的遥测和数据判读、文件存储等功能。

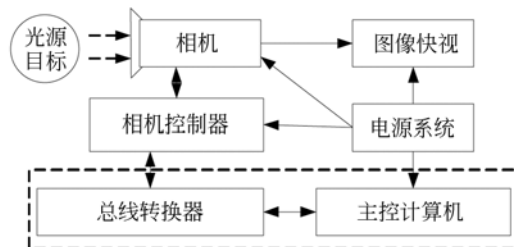


图 6 成像参数配置测试系统

Fig. 6 Test system for image parameter setting

测试系统的主控计算机的通讯接口为 RS 232,通讯比特率设置为 38 400 bps,每个字节共传输 10 bit 数据,其中 1 bit 起始位,8 bit 数据位,1 bit 停止位。总线转换器选用 Moxa 的 TCC-100I,可以实现 RS 232 与 RS 422 间的双向转换,工作比特率为 50 bps~921.6 Kbps,光电隔离保护为 2 kV,ESD 保护为 15 kV。系统为主从通讯方式,主控计算机为主机,相机控制器为从机,成像参数的配置验证总是由主控计算机发起,相机控制器进行响应。

3.3 通信协议

测试系统的通信协议需要同相机控制器的通讯协议保持一致,以确保主控计算机与相机控制器能够正常通信。测试系统具有通信协议配置功能,能够快速配置出与相机控制器一致的通信测试协议。

通信协议主要包括帧头、指令、数据、校验、帧尾以及每个元素的字节长度信息等。利用这些元素可以按照通信协议快速组成通信帧,从而完成相机成像参数配置的测试,如图 7 所示。本测试系统的通信帧主要有成像参数配置通信帧,成像参数查询通信帧和成像参数返回通信帧 3 种。成像参数配置检验的系统通信过程如图 8 所示,选择一个待测试的成像参数状态值,配置一条成像参数配置通信帧并发送给相机控制器,相机控制器配置成像参数;然后配置一条成像参数查询通信帧,向相机控制器查询当前的成像参数值;相机控制器将一条成像参数返回通信帧,主控计算机接收成像参数返回通信帧并解析出成像参数值;

最后比较返回的成像参数值与设置的成像参数值之间的关系是否满足配置预期,判定该成像参数状态值是否合格。

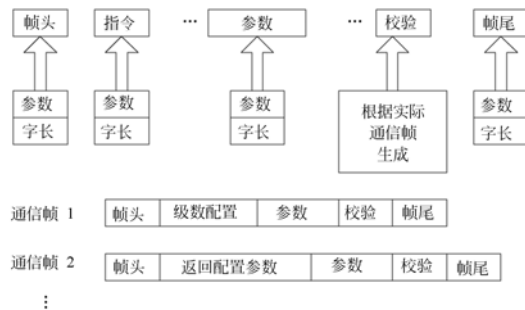


图7 通信帧元素配置

Fig. 7 Element setting for communication frames

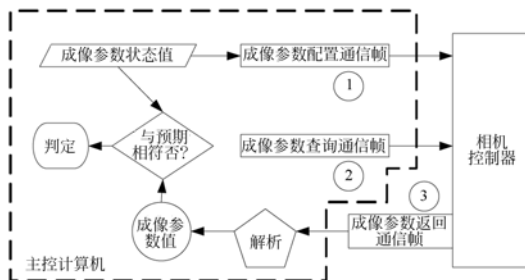


图8 系统通信流程图

Fig. 8 Flow chart of system communication

3.4 系统软件

设计测试系统软件时,要充分利用计算机高效的数据通信、处理、判读能力,以实现空间相机成像参数配置的全面检验。软件根据输入的测试参数范围,自动完成成像参数测试集中每个元素成像配置的测试,记录和解析测试中相机控制器收发的通信帧,完成每个元素测试的判读工作,软件流程图如图9所示。

软件的初始输入控制参数包括:定时时间、成像参数类别、成像参数测试的起始值和结束值、成像参数增长步长、通信比特率等。其中定时时间是系统测试的关键输入参数,它是系统给予的测试一条成像参数值的有效时间;定时一到系统即进入下一条成像参数值的测试工作。为保证系统可靠、高效地检验成像参数配置,定时时间 t 可估算为:

$$t = 2 \times (t_1 + t_2 + t_3), \quad (6)$$

式中: t_1 为帧通信时间, t_2 为帧数据记录时间, t_3 为帧数据解析、判读时间。

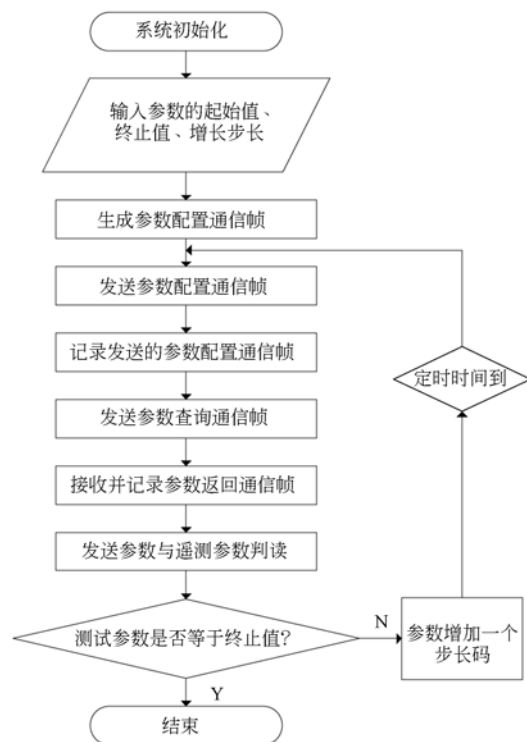


图9 软件流程图

Fig. 9 Flow chart of software

4 实验与结果

本文设计的测试系统已应用于某相机的成像参数配置检验中。该相机具有积分级数、行转移时间、增益、偏置的设置功能,各个成像参数配置的占用位宽、有效位宽、有效码值范围以及测试码值范围如表1所示。由表可知,完成该相机成像参数配置的全面测试需要进行73 984次测试。

表1 成像配置参数

Tab. 1 Imaging configuration parameters

成像参数	占用位宽/bit	有效位宽/bit	有效码值范围(十进制)	覆盖测试码值范围(十进制)
积分级数	8	8	孤点:17,34,68,136,170	0~255
行转移时间	16	16	0~65 535	0~65 535
增益	12	10	0~767	0~4 095
偏置	12	10	0~1 023	0~4 095

测试时,通讯波特率设置为 38 400 bps,测试一条用例的定时时间设置为 40 ms,这样完成相机成像参数全面检验的测试时间大约为 50 min,实现了空间相机成像参数配置高效、全面的测试。本文的检验方法与抽样检验方法的测试覆盖率,完成一条测试用例所需时间的数据详见表 2。

表 2 测试方法对比

Tab. 2 Comparison between proposed and sampling test methods

测试方法	测试码值覆盖率	单次测试时间
全面测试	100%	40 ms
抽检测试	<0.06% (抽取 40 个数据)	30 s

本文提出的全面测试方法还可以测试成像参数占用位宽的全部参数值,不但能完成成像参数有效值的测试,而且对占用位宽范围内的无效值也可以进行测试(即故障模式测试)。

参考文献:

- [1] 陈世平,杨秉新,王怀义,等.空间相机设计与试验[M].北京:中国宇航出版社,2003.
CHEN SH P, YANG B X, WANG H Y, *et al.*. *Design and Test for Space Camera*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [2] 马天波,郭永飞,李云飞.科学级 TDICCD 相机的行频精度[J].光学精密工程,2010,18(9):2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):2028-2035. (in Chinese)
- [3] 李洪法,薛旭成,郭永飞,等.双抽头 CCD 图像整合优化设计[J].中国光学,2012,5(1):42-47.
LI H F, XUE X CH, GUO Y F, *et al.*. Optimization design of image conformity for double-tap CCD [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5 (1):42-47. (in Chinese)
- [4] 朱宏殷,郭永飞,司国良.多 TDICCD 拼接相机成像非均匀性实时校正的硬件实现[J].光学精密工程,2011,19(12):3034-3042.
ZHU H Y, GUO Y F, SI G L. Real-time correction of imaging nonuniformity for multi-TDICCD mosaic camera on hardware[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):3034-3042. (in Chinese)
- [5] 余达,郭永飞,周怀得,等.面阵 CCD KAI-0340DM 高速相机的设计[J].光学精密工程,2011,19(11):2791-2799.
YU D, GUO Y F, ZHOU H D, *et al.*. Design of high speed camera system with area-CCD KAI-0340DM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2791-2799. (in Chinese)
- [6] 徐伟,朴永杰.从 Pleiades 剖析新一代高性能小卫星技术发展[J].中国光学,2013,6(1):9-19.
XU W, PIAO Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on the Pleiades[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6 (1):9-19. (in Chinese)
- [7] HOLST G C. *CCD Arrays, Cameras, and Displays* [M]. 2nd ed. USA:JCD Publishing, 1998.
- [8] HOLST G C. *Electro-Optical Imaging System Performance*[M]. USA:JCD Publishing, 2008.
- [9] 李新峰.轨道姿态误差对 TDICCD 相机行周期及偏流角的影响分析[J].空间科学学报,2008,28(3):254-259.
LI X F. Effect analysis of orbital and attitude parameter error on TDICCD's line-shift frequency and veer angle[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, 28(3):254-259. (in Chinese)
- [10] 邓湘金,郭强,饶炜.月球探测器 TDI-CCD 相机

上述实验表明,本文提出的成像参数配置全面检验方法的测试效率高、覆盖率可达 100%,实现了成像参数占用位宽的有效值和无效值的测试,全面有效地验证了空间相机的成像参数配置功能。

5 结 论

本文论述了空间相机成像参数的基本组成和作用以及成像参数配置功能对相机成像质量的影响。应用数理统计原理分析了抽样检验成像参数配置的测试风险,提出了一种全面检验成像参数的自动测试系统并给出了系统的设计实现,从而解决了空间相机的成像参数配置全面检验的问题。实验结果表明,该测试方法测试一条用例的时间仅为 40 ms,实现了 100%的成像参数配置功能验证,能够满足空间相机高效测试、零质量缺陷的要求。

- 成像质量影响因素分析[J]. 航天器工程, 2010, 19(5):70-75.
- DENG X J, GUO Q, RAO W. Factors affecting the TDI-CCD camera image quality in the lunar orbiter[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(5): 70-75. (in Chinese)
- [11] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1420-1428.
- WANG W H, HE B, HAN S H L, *et al.*. Real-time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1420-1428. (in Chinese)
- [12] 谢明明, 沈湘衡, 贺庚贤, 等. 空间相机仿真测试数据自动判读系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(6):1277-1279.
- XIE M M, SHEN X H, HE G X, *et al.*. Design of data automatically diagnostic system for simulation test with space camera[J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(6):1277-1279. (in Chinese)
- [13] 薛旭成, 李云飞, 郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1191-1195.
- XUE X CH, LI Y F, GUO Y F. Design of analog front end of CCD imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1191-1195. (in Chinese)
- [14] 刘宏. 统计抽样检验的质量控制与管理[J]. 电子质量, 2011(6):43-45.
- LIU H. Quality control and management for statistical sample inspection[J]. *Electronics Quality*, 2011(6):43-45. (in Chinese)
- [15] 范晓冬, 孙蕾. 计数抽样检验方案批接收概率的计算方法[J]. 渤海大学学报: 自然科学版, 2005, 26(2):102-104.
- FAN X D, SUN L. Calculation methods for probability of acceptance with sampling plan for inspection by attributes[J]. *Journal of Bohai University: Natural Science Edition*, 2005, 26(2):102-104. (in Chinese)

作者简介:



顾营迎(1984—), 男, 天津人, 博士研究生, 助理研究员, 2007 年于重庆大学获得学士学位, 2009 年于天津大学获得硕士学位, 主要从事空间载荷电子学系统测试技术与测试理论方面的研究。E-mail:18686681605@163.com

导师简介:



沈湘衡(1952—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 1977 年于吉林工业大学获得学士学位, 主要从事光电测量设备精密检测技术的研究。E-mail:shenxiangheng@yahoo.com

(版权所有 未经许可 不得转载)