

基于 FPGA 和 PCI 总线的空间相机 温控测试电路设计

曹小涛, 胡 君, 吴伟平, 赵运隆

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为在地面精确模拟空间环境对相机主动热控电路和控制策略的影响, 测试其性能和可靠性, 设计了一种基于 FPGA 和 PCI 总线的空间相机温控测试电路。FPGA 控制 PCI9054 高速接收上位机经由 PCI 总线发送的环境温度变化信息, 经解析打包后, FPGA 控制多路并行电位计模拟热敏电阻的阻温特性, 完成实时闭环仿真测试。分析和试验结果表明, 系统能够满足空间相机主动热控的测试需求。

关键词: 空间相机; FPGA; PCI

中图分类号: TP273

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102708.0053

Detection Circuit Design of Space Camera Thermal Control based on FPGA and PCI Bus

CAO Xiao-tao, HU Jun, WU Wei-ping, ZHAO Yun-long

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to simulate the influence of space environment on the active thermal control circuit and algorithm on earth, and test the performance and reliability, a thermal control detection circuit of space camera was designed based on FPGA and PCI bus. PCI9054 was controlled to receive the temperature variables transferred by PC. The multiple parallel digital potentiometers were controlled to simulate the characteristic of temperature and resistance of thermistor, thus the real closed-loop simulation and detection were achieved. The analysis and experiment results showed that the system could satisfy the detection requirements of the space camera active thermal control.

Keywords: space cameras; FPGA; PCI

1 引言

随着空间遥感、遥测技术的不断发展,对空间相机的要求也在不断提高,空间相机的热设计和热控制技术也越来越成为研究的热点^[1-2]。一方面,由于空间相机在轨期间要长期经受空间热沉和太阳辐射等热因素的作用,相机工作温度变化范围非常大,从而对光学系统造成影响;另一方面,相机内部电子学部分等产生的热扰动也影响光学系统的光学特性^[3]。因此,必须对空间相机进行热控制。热控方法主要分为主动热控和被动热控。主动热控可根据相机内外热流的变化自动调节,极大地提高了空间相机的适应能力^[4-5]。然而,由于空间环境的复杂性,很难在地面真实模拟空间环境温度变化给相机带来的影响。同时,由于空间相机的研制时间较长,在电子学部分完成自身的分系统测试时,经常会遇到无法验证主动热控系统和热控策略正确与否的问题。因此,研制空间相机的温控测试电路,可以模拟空间环境的温度变化,可以依据热控设计参数进行测试和试验,可以对与主动热控相关的控制算法和机电系统进行检测,将会极大地缩短空间相机的研制周期。

2 系统组成及工作原理设计

空间相机的主动热控方法主要为电加热恒温装置^[6],由温度传感器、主动热控电路(包括AD转换单元、控制器、驱动电路)和电加热器3部分组成。温度传感器用来获取被控部件或设备的温度变化信号,AD转换单元将模拟的温度变化信号转换为数字信号,通过控制器内部的热控算法将获得的温度信号与设定值进行比较分析后,经由驱动电路控制电加热器的工作状态。温度传感器通常由热敏电阻组成。在地面真实模拟空间环境温度变化,需要使相机的多路热敏电阻并行实时响应如下的空间环境热平衡方程^[6]:

$$CM \frac{dT}{dt} = \sum E_i(T_i^q - T^q) + \sum D_i(T_i - T) + q_{in} + q_{out} - \varepsilon A \sigma (T^q - T_h^q) \quad (1)$$

式(1)中的参数定义详见参考文献[6]。

如图1所示,本文所设计的空间相机温控测试电路主要由PCI总线接口芯片、PCI总线控制和指令解析FPGA(FPGA1)、数字电位计控制FPGA(FPGA2)、数字电位计和同步时钟模块组成。同步时钟模块为其他模块提供时钟同步。上位机实时将预置在其中的空间环境温度变化数据经由PCI总线高速传送给空间相机温控测试电路;FPGA1控制PCI总线接口芯片高速实时接收指令信息和温度数据,同时解析指令并将解析结果传送给FPGA2;FPGA2依据得到的温度数据控制多路数字电位计并行动作,得到期望的电阻阻值。空间相机主动热控电路采集多路数字电位计的阻值,执行主动热控算法,从而构成闭环仿真测试系统。因此,可以依据上位机中预知的温度数据和热控参数监视系统采集的热控电路工作状态测试主动热控电路和算法是否正确。

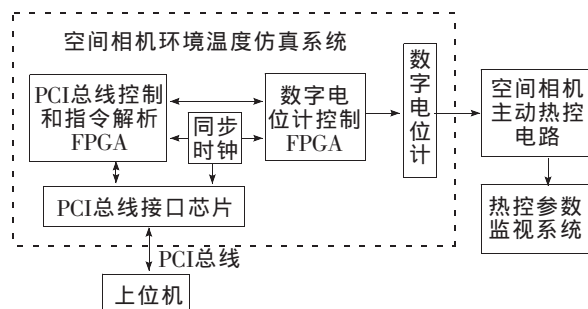


图1 温控测试电路原理图

PCI总线较好地解决了原有高速微处理器和低速总线之间的数据传输瓶颈,已经成为高速数据传输和采集的主流发展方向。由于PCI总线规范和接口定义的复杂性,常采用3种方法设计:专用ASIC、FPGA和专用接口芯片。采用专用接口芯片可以简化设计,缩短开发时间^[7]。本设计采用专用PCI总线接口芯片PCI9054。PCI总线传输率可以达到132 Mbit/s,高速数据通讯能力满足实时多路温度数据的传输需求。PCI总线控制和指令解析FPGA、数字电位计控制FPGA均选用Xilinx公司的XC3S400,便于系统调试。该芯片提供8 064个逻辑单元和高达280 MHz的频率性能,满足控制和处理的实时性需求。每路

数字电位计由两个数字电位计组成, 即X9111 和 X9C102 构成的串联电阻系统。由于热敏电阻的阻温特性和相机的工作环境温度, 要求数字电位计阻值范围为 1~50 k Ω , 精度为 $\pm 0.5\%$ 。X9111 阻值范围 0~100 k Ω , 单步可变阻值 40 Ω ; X9C102 阻值范围 0~1 k Ω , 单步可变阻值 10 Ω 。因此, 串联电阻系统满足指标要求。

3 FPGA 控制及算法实现

3.1 PCI 总线控制和指令解析 FPGA

FPGA1 主要完成两项任务: 控制 PCI9054, 接收上位机发送的控制指令和实时温度阻值数据; 解析指令并将指令和数据传输给 FPGA2。其内部逻辑由 VHDL 语言完成, 如图 2 所示, 主要由时钟管理

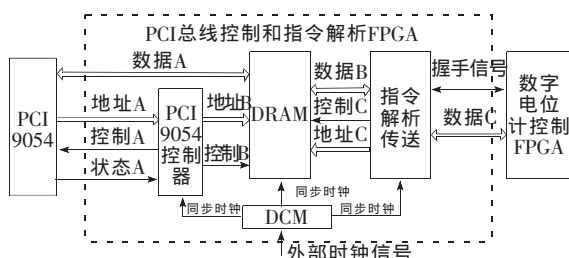


图2 FPGA1 内部功能图

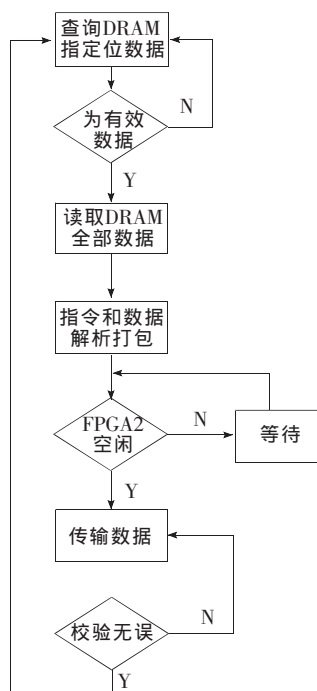


图3 解析传送模块流程图

器 DCM、PCI9054 控制器、双口 RAM (DRAM) 和指令解析传送模块组成。DCM 为系统其他模块提供同步时钟; PCI9054 控制器控制 PCI9054 工作于 C 模式, 内部逻辑采用 Moore 型有限状态机完成^[6,8], 将上位机传送的指令和数据缓冲存储于 DRAM。指令解析传送模块采用查询的方式读取 DRAM 中指定地址是否为有效数据, 如是则从 DRAM 中依次读取数据, 完成指令和数据解析并将数据附加校验码打包。由握手信号与 FPGA2 确认 FPGA2 空闲后, 经由数据线 C 并行传输给 FPGA2, FPGA2 接收完毕并校验无误后, 由握手信号与 FPGA2 确认数据传输完毕, 否则请求重发, 其工作流程如图 3 所示。

3.2 数字电位计控制 FPGA

数字电位计控制 FPGA 内部逻辑结构如图 4 所示。数据接收、控制模块接收 FPGA1 传送的数据, 依据指令和数据控制数字电位计动作到期望的阻值。X9111 的控制信号主要为使能信号 CS、控制时钟 SCK 和串行输入信号 SI。数据接收、控制模块发送 SCK 时钟信号, 并以此为基准通过 SI 向 X9111 发送阻值数据或指令。X9C102 的控制信号为使能信号 CS、增减方向控制信号 UD 和增减信号 INC。数据接收、控制模块通过 UD 控制 X9C102 阻值为增加或减小, 通过控制 INC 每变化一步使得阻值增加或减小 10 Ω 。FPGA2 内部逻辑由 VHDL 语言完成, 图 5 给出了在 ISE Simulator 软件下的仿真结果, 其中 FPGA 并行控制两个芯片的 CS 信号。仿真结果与数据手册中的时序图相吻合, 并在实际应用中得到了验证。

由于 PCI 总线传输率可以达到 132 Mbit/s, FPGA 以高速时钟传递数据和指令, 因此, 由上位机

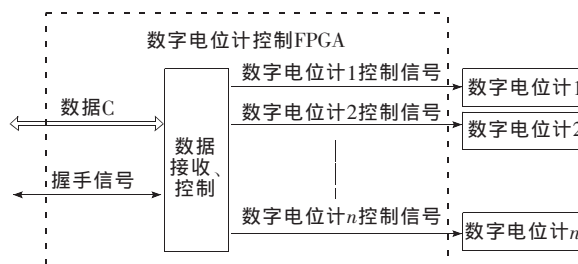


图4 FPGA2 内部功能图

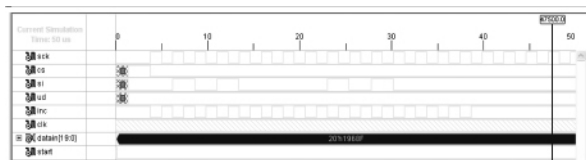


图5 数字电位计控制仿真结果

发送数据至数字电位计执行结束所需要的时间主要由数字电位计的执行时间决定。由器件手册可知, X9111 执行时间 $t_1=32t_{\text{SCK}}$, 其中 t_{SCK} 为信号 SCK 的最短允许周期, 最小值为 $0.5 \mu\text{s}$ 。X9C102 的执行时间 $t_2=nt_{\text{INC}}$, 其中 n 为增加或减小的步数, t_{INC} 为 INC 信号的周期, 最小值为 $3 \mu\text{s}$ 。由于 FPGA 并行控制两个芯片, 因此, 最快执行时间在 $16\sim 300 \mu\text{s}$ 之间。空间相机主动热控电路每隔 50 ms 采集一次温度值, 执行时间满足系统的需求。

4 试验结果

在实际应用环境 (如图 1 所示) 中对系统进行试验, 并采用某空间相机的主动热控系统, 上位机控制软件由 Visual C++ 编写。试验结果表明, 控制精度在 $\pm 0.5\%$ 之内, 响应时间在 $16\sim 300 \mu\text{s}$ 之间, 与分析结果一致。

5 结 论

本文详细给出了一种可以在地面有效地对空间相机主动热控电路和控制算法进行测试的空间温控测试电路, 介绍了系统的硬件和 FPGA 内部由 VHDL 描述的逻辑结构。分析和试验结果表明, 系统满足实时测试的需求。本系统可以极大地缩短空间相机主动热控部分的研制时间。

参考文献

- [1] 陈荣利, 耿利寅, 马臻, 等. 空间相机的热分析和热设计[J]. 光子学报, 2006, 35(1): 154-157.
- [2] 陈恩涛, 贾宏, 李劲东, 等. 空间光学遥感器光-机-热集成分析方法[J]. 宇航学报, 2005, 26(1): 66-70.
- [3] 王红, 韩昌元. 温度对航天相机光学系统影响的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 452-457.
- [4] 李积慧, 韩双丽, 王家骥, 等. 空间相机的热分析和热控制技术[J]. 光学精密工程, 1999, 7(6): 36-41.
- [5] 戚发轫, 朱仁璋, 李颐黎. 载人航天器技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [6] 金实, 胡君, 曹小涛. 航天相机主动热控测试系统设计[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 126-132.
- [7] 羌凌飞. 基于 PCI 的高速数字信号发生卡设计[J]. 电子测量技术, 2009, 32(9): 1-3, 7.
- [8] 沈洪亮, 刘金国, 吕世良. 基于 PCI 总线的多通道图像数据高速采集 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(5): 438-444.

作者简介: 曹小涛(1980-), 男, 汉族, 河南巩义人, 博士, 助理研究员, 2008年于吉林大学获得博士学位, 主要从事空间相机的地面测试技术的研究。E-mail: cxiaotao@yahoo.com.cn