

航空发动机数控系统的板级协同仿真

江澄^{1,2}, 孙健国¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院 南京 210016; 2. 中国航空动力控制系统研究所 江苏 无锡 214063)

【摘要】从工程应用的角度出发,结合航空发动机数控系统核心电路的特点,提出了数控系统处理器模块板级协同仿真的方法。建立了80386EX模型和特殊器件的高精度逻辑器件仿真模型,使模型与实际芯片特性相符,并具有可升级能力。编写处理器控制语言程序,结合软件算法模型,解决了板级仿真模型完备性与运行效率的矛盾。通过核心机控制器CPU模块仿真过程,讨论了现代板级仿真方法在付诸实施时面临的问题及解决方法。仿真的处理器模块在实际运用中验证了所采用的设计思路的合理性及具体实施细节的正确性。

关键词 板级; 协同仿真; 数控系统; 处理器; 处理器控制语言; 高精度逻辑器件仿真模型
中图分类号 V233.7 **文献标识码** A

Board-Level Collaborative Simulation of Aero-Engine Electronic Control System

JIANG Cheng^{1,2} and SUN Jian-guo¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016;

2. Aviation Motor Control System Institute Wuxi Jiangsu 214063)

Abstract A method for aero-engine electronic control system's CPU board-level collaborative simulation based on Smartmodel is presented. This method is tied in CPU module's characteristic and the project application. The models of 385EX and some peculiar component which are compatible with actual chip's property, and have escalate ability are built. The contravention of intactness and operation efficiency in board-level simulating model is figured out by PCL program, associate with software arithmetic model. The method are discussed from the simulate process of CPU module of aeroengine controller. The simulation results confirm that the method presented is concrete and effective.

Key words board-level; collaborative simulation; control system; CPU; PCL; smartmodel

在航空发动机控制领域,数字式控制系统的功能与控制品质要求有较大的提高,数字电子控制器设计技术发展迅速。为了降低开发成本,缩短开发周期,在板级产品设计过程中需要改变以前先做试验板,调试修改后再做正式板的“两板模式”,力图做到一次投板成功。通过建立板级仿真环境进行仿真,是达到一次投板成功的关键手段。

传统的仿真方式根据不同的仿真软件,大致可分为PCB仿真和FPGA仿真^[1-2]。当面对的是含有处理器以及高阶外设功能的典型嵌入式应用产品时,其电路结构中所特有的复杂性和元器件的特殊性使得传统的仿真方式不再可行^[3-4],本文提出了一种新的电子控制器CPU模块板级协同仿真的方法。

1 板级协同仿真方式

数字电子控制器中需要进行仿真的对象是以

80386EX和FPGA为核心,包括A/D、D/A、F/D、RAM、ROM等外围器件以及板外读写控制,具有高阶外设的典型嵌入式产品的数字核心部分。需要验证的是CPU与FPGA逻辑的互操作、CPU对模数/数模转换器件的访问、CPU通过FPGA产生片选访问RAM、ROM和读写程序区等操作、80386EX对的初始化操作等。

正是由于板级模型的完备性与运行效率之间的矛盾,要想对由处理器、FPGA以及高阶外设功能构成的一个完全嵌入式系统进行仿真,实现高效优质的系统级设计,就必须有一种全新的思路和方法。通过研究分析,本文在FPGA平台上借鉴PCB仿真的经验,确立了协同仿真的路线:采用基于Smartmodel仿真库,由PCL语言/C语言控制的协同仿真。

在线路板级设计时,本文引入比传统HDL设计

流程所要求的更抽象的概念：将元件放置入原理图中，并进行布线以设定整个系统的连接性，将现有的电路板级嵌入式系统设计知识直接应用于可编程部件的开发之中，集原理图和HDL流程两者的优点以实现系统级的设计开发。通过建立SPICE、VHDL、Verilog或C代码描述的模拟和数字器件协同模型将电路的功能性单元(元件)看作是“黑盒子”，实现电路板上所有器件的仿真^[5-6]。仿真过程与真实的测试过程相同，协同仿真的基本流程如图1所示。

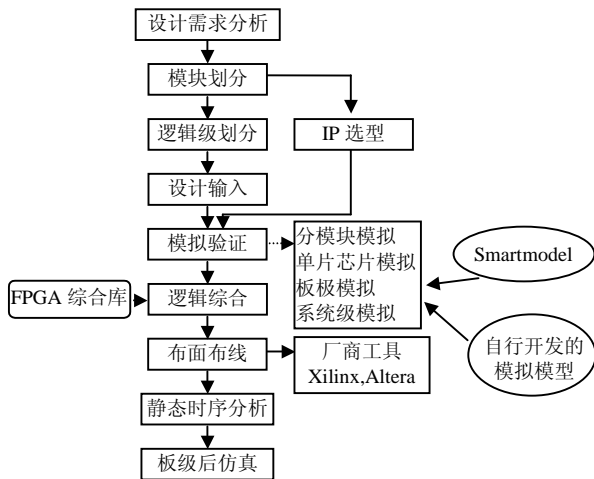


图1 协同仿真流程图

设计中的FPGA作为用在较大系统中的单一用途元件，具备复杂的大规模数据转换功能，是与其他采用分立、现成元件的主要功能块一起工作。

在将整个电路中的功能块连接在一起时，HDL的效能低于图形工具。因此采用原理图输入方式，将FPGA作为整个系统的一个组成部分以及原理图输入过程中所需的部件被随时调用^[7-8]，FPGA只是一些简单的低阶布尔门栅。另外还有很多不同的复杂处理器内核和高阶外部器件，如80386EX、A/D器件、计时器以及存储元件等也同FPGA一样，以IP内核(虚拟元件)的形式在原理图上构建一个与之相对应的器件型号或内核，作为一个“可即用”元件。

将各种处理器内核和外设部件封装入预先合成的模块之中，不仅能够降低系统集成工作的复杂程度，还提供了能直观反映与工程技术人员目前所采用的基于元件的设计方式相类似的设计流程^[9]。

2 协同仿真的工程实现方法

通用自顶向下的数字逻辑设计和板级仿真方法在实际应用到工程实践时需要着重考虑如下问题：

(1) 通用器件模型的建立。充分利用现有的单独验证过的IP核，以提高建模效率，并保证模型正确性。

(2) 设计代码质量的控制。实行统一严格的设计代码风格可以极大地提高仿真调试效率，降低出错率。

(3) 仿真模型完备性和运行效率的权衡。

2.1 模型建立

Smartmodel仿真库是主流的高精度逻辑器件仿真模型库，提供经验证的各种逻辑器件的时序功能模型以及控制CPU模型运行的处理器控制语言(PCL)，通过编写PCL程序，可以控制CPU在总线上完成各种动作。

2.1.1 CPU模型的建立

本文对80386EX的手册进行了深入的分析，选择实际应用所需要的功能进行建模。以Smartmodel中提供的386SX、8254、8259、8237等已有的器件模型，根据386EX手册中描述的互联关系将这些器件组合起来，并用VHDL对80386EX的外部访问接口进行建模描述。而80386EX中的16450可编程控制器，则利用了可综合的16450IP库。整个模型具备了80386EX主要的内部功能模块和外部的总线功能，较好地再现了80386EX仿真特性。

2.1.2 AD、DA器件及被控系统模型

对于AD、DA器件，根据手册对它们的数字口进行了建模，包括读写的功能操作和信号时序过程和时序检查，做到可以通过CPU进行操作，从而使整个板级仿真模型比较完整。

为了反映被控系统的实时动作情况，本文用C语言开发了被控系统的简单模型。该模型以数字化方式与AD/DA器件接口，按预设的规则进行动作。

2.1.3 FPGA模型的建立

为了提高CPU效率，实现控制器小型化，本文设计了一片FPGA，完成对AD采样的管理、地址译码、测量频率、复位逻辑等功能。采用VHDL进行FPGA逻辑设计的流程如图2所示。

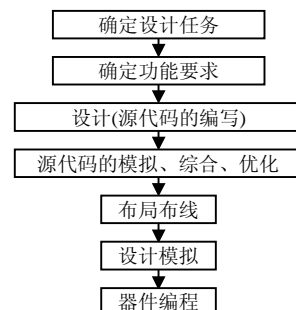


图2 FPGA设计流程

本文设计的流程可以分为7个步骤，限于篇幅不再详述，仅给出如图3所示的在FPGA中设计的自适应分频的频率采集模块仿真结果。

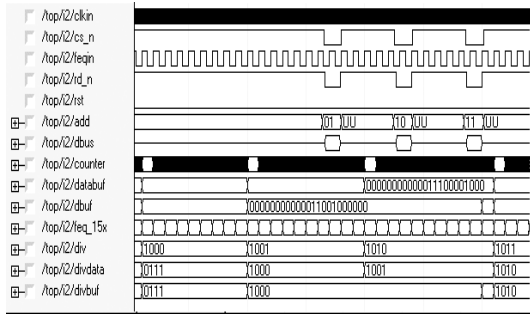


图3 FPGA内部部分工作仿真时序

在完成FPGA芯片级仿真后，将其模型作为一个单一芯片组合在整个功能模块电路中，可以直接利用其仿真结果中的输入、输出特性运行板级仿真，而不必再去考虑其内部逻辑。这种方法大大地降低板级仿真算法的复杂程度，保证协同仿真得以进行。

2.2 利用PCL编制仿真程序

Smartmodel提供了控制CPU模型运行的处理器控制语言(PCL)。通过编写PCL程序，可以控制CPU在总线上完成各种动作，包括存储器读写、输入输出操作、中断、DMA等。本文利用PCL编制的程序验证了CPU与FPGA逻辑的互操作、CPU对模数/数模转换器件的访问、CPU通过FPGA产生片选访问RAM、ROM和读写程序区等操作，还验证了386EX对异步串口、DMA控制器、定时器、中断控制器等的初始化操作。

Smartmodel库中对可编程逻辑器件提供了“smart circuit”机制，可以将利用厂商布局布线工具处理运行后的结果jed文件加载到可编程逻辑器件模型中，在运行过程中直接“看”到器件的内部时序状况，为可编程逻辑器件的后仿真提供了有力手段。Smartmodel库中包含了本项目实际应用选用的FPGA器件XC2S150PQ208，对该器件加载利用xilinx工具生成的jed文件后，就形成了FPGA逻辑精确的时序功能模型。

2.3 结合核心控制算法运行板级仿真

为了解决软硬件联合调试带来的困难，建立了如图4所示模型，将C语言写的算法模型用VHDL语言按接口要求包装后纳入到仿真环境中运行，这样基于C语言算法可以以宿主机的速度运行。

通过利用386EX多余的中断控制线、IO线及寻址空间实现软件算法模型与CPU模型的通讯。在该寻址空间中设立两个缓冲区域以暂存需要交换的数据，即设立两个通讯信箱。当386EX接收到FPGA送来的数据时，经过判断(用PCL实现)可以识别是否需要由软件算法处理，若需要则将数据写到缓冲中，

并触发IO线激活软件算法模型从缓冲中取数后开始处理；当软件模型需要通过386EX访问外部设备时，先将数据写到指定缓冲区，通过控制386EX中断线向PCL控制程序发中断。中断服务程序(PCL)可以将缓冲数据读出，根据简单的报文协议解释出需要控制哪一个设备，然后进行指定操作。

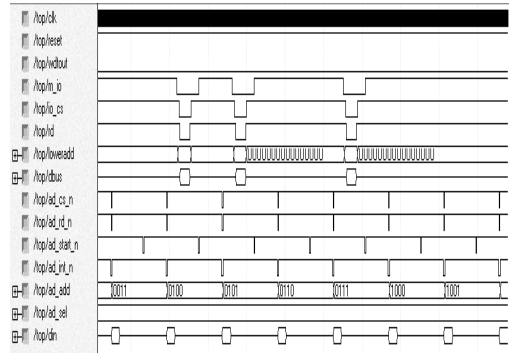


图4 针对本文设计构造的模型

这种软硬件模型的接口方法符合软件的层次化结构^[9-10]：由PCL完成类似于软件驱动的功能，由软件算法模型完成应用层操作，解决了板级仿真模型完备性与运行效率的矛盾，使得在仿真环境中可验证核心软件算法与FPGA逻辑设计的动态互操作。对于FPGA完成A/D自动采样管理及处理器读取FPGA内部存储的采样数据功能，其仿真结果如图5所示。

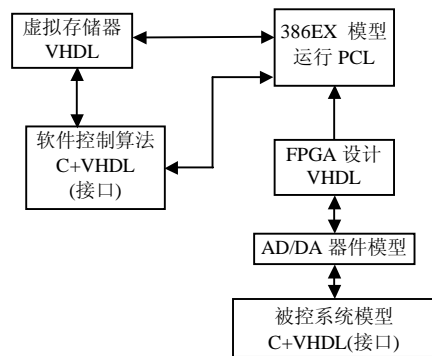


图5 A/D采样及FPGA内部存储的仿真时序

3 结论

运用所建立的器件模型和板级仿真环境，本文进行了对由处理器、FPGA以及高阶外设功能构成的一个完全嵌入式系统进行的协同仿真。仿真结果表明，该航空发动机数字式电子控制器主模块的核心部分未有错误，达到了“一次投板、一次成功”的设计要求。在环境试验、半物理模拟试验、地面台架和高空台试车中未有任何故障和改动，这些运用结果验证了本文所采用的设计思路是正确的。

运用所建立的板级仿真环境可以深入地研究被

控系统的输入响应模型, 将板极模型放到更为真实完备的系统级模型中进行验证, 可以逐步建立系统级的验证环境。

参 考 文 献

- [1] FELIX T S, CHAN H K. Design of a PCB plant with expert system and simulation approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2005, (3): 409-423.
- [2] RICCI F, HOANG L H. Modeling and simulation of FPGA based variable-speed drives using simulink[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2003, (3): 183-195.
- [3] CHADHA B, WELSH J. Architecture concepts for simulation-based acquisition of complex system[C]//*Summer Computer Simulation Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2000.
- [4] WAITE W F. High level architecture for simulation based acquisition system-engineering automation[C/CD]. *Proceedings of the Simulation Interoperability Workshop*. [S.l.]: [s.n.], 1999.
- [5] WILCOX A P, BURGER A G, HOARE P. Advanced distributed simulation: a review of developments and their implication for data collection and analysis[J]. *Simulation Practice and Theory*, 2000, (8): 201-231.
- [6] 徐 辉, 王祖强. 软硬件协同设计和系统级仿真探索[J]. *中国工程科学*, 2006, (4): 61-65.
XU Hui, Wang Zu-qiang. Co-design and co-simulation on the system level[J]. *Engineering Science*, 2006, (4): 61-65.
- [7] 缪云青, 李永刚. FPGA器件在嵌入式系统中的配置方式的探讨[J]. *微计算机信息*, 2006, (11): 101-106.
MIAO Yun-qin, LI Yong-gang. Research on method of FPGA configuration in embedded system[J]. *Microcomputer Information*, 2006, (11): 101-106.
- [8] 贾荣珍, 王行仁. 协同仿真环境体系结构[J]. *系统仿真学报*, 2001, (6): 5-10.
JIA Rong-zheng, WANG Xin-ren. The architecture of collaborative simulation environment[J]. *Journal of System Simulation*, 2001 (6): 5-10.
- [9] 谢海斌, 张代兵. 基于MATLAB/SIMULINK与FLUENT的协同仿真方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, (8): 86-90.
XIE Hai-bing, ZHANG Dai-bin. Collaborative simulation based on MATLAB/simulink and fluent[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, (8): 86-90.
- [10] WILLIAM D B, WAYNE M L. A heterogeneous environment for hardware/software cosimulation[C]//*Simulateion 30th Annual Symposium*. New York: [s.n.], 1997.

编辑 黄 莘

(上接第 892 页)

参 考 文 献

- [1] YOU Yu-li, KAVEH M. A regularization approach to joint blur identification and image restoration[J]. *IEEE Trans Imag Processing*, 1996, 5(3): 417-428.
- [2] LIU Chun-sheng, LI Ming. A novel atmospheric turbulence-degraded image restoration algorithm based on support vector regression[C]//*Sitxh International Symposium on Instrumentation and Control Technology*. Beijing, China: International Society for Optical Engineering, 2006.
- [3] KILMER B M, MILLER M E. Wavelet domain image restoration with adaptive edge-preserving regularization[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2000, 9(4): 597-608.
- [4] HUANG Hong-hua, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Restoration of image degraded by the atmospheric turbulence[C]//*Proceedings of SPIE*. Bellingham: SPIE, 2005, 5981: 1-9.
- [5] 洪汉玉, 喻九阳, 陈以超, 等. 红外目标湍流退化图像的优化复原算法[J]. *应用光学*, 2006, 27(6): 510-515.
HONG Han-yu, YU Jiu-yang, CHEN Yi-chao, et al. Optimization restoration algorithm for infrared object turbulence-degraded image[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(6): 510-515.
- [6] 张逸兴, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 176-182.
ZHANG Yi-xin, CHI Ze-ying. Optical wave propagations and imaging in an atmospheric turbulence[M]. Beijing: China National Defence Industry Press, 1997: 176-182.
- [7] 张逸新, 朱 拓, 陶纯堪. 湍流大气成像系统分辨率的研究[J]. *光学与光电技术*, 2004, 2(4): 1-4.
ZHANG Yi-xin, ZHU Tuo, TAO Chun-kan. Study of the optical resolution of imaging system in turbulence[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(4): 1-4.
- [8] MICHAL H, STANISLAVA S. Probabilistic model based restoration of short-exposure astronomical images[C]//*Sixth IASTED International Conference on Signal and Image Processing 2004*. Honolulu, HI, USA: Acta Press, 2004: 619-624.
- [9] 张逸兴. 湍流大气中激光传输波前扭曲规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
ZHANG Yi-xin. Wave front twist of a laser beam propagation in an atmospheric turbulence[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [10] 姚 敏. 数字图像处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 103-105
YAO ming. Digital image processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 103-105.

编辑 黄 莘