

FFT算法的一种基于 FPGA 器件的实现

The Design of FFT Processor Based on FPGA

(1.科学院长春光学精密机械与物理研究所;2.中国科学院研究生院 北京) 李之旺^{1,2} 张涛¹

LI Zhi-wang ZHANG Tao

摘要: 目前,基于 51 等系列单片机控制系统由于加入新算法的需求,面临着“升级”的问题。本文结合要求加入 FFT 算法的一个项目,提供了一种升级方案。同时本文给出了一种 FFT 算法的具有异步接口的实现。

关键词: FPGA; FFT; IP 核; 51 单片机

中图分类号: F416.66 **文献标识码:** B

Abstract: The paper gives a method of upgrading controlling systems based on 51 series micro-controllers. Simultaneity, The paper gives a realization of FFT Processor with Asynchronous interface Based on FPGA.

Key words: FPGA; FFT; IP Core; 51 micro- controller

1 前言

目前,在微控制系统中,基于 51 等系列单片机的应用还很广泛。随着控制问题的深入,一些新的算法被要求应用到控制系统上。在这些运算量比较大的算法面前,单片机的计算资源显得更加捉襟见肘。通常,比较直接的方法就是直接换 CPU,比如换成 TI 的 TMS320C2000 系列 DSP。但是,这样换 CPU 也带来了一些硬件修改和软件移植的双重问题,其中最主要的就是软件移植问题:一些控制精度要求比较严格的场合,软件代码用汇编语言编写,这样的情况下,代码几乎需要完全重写;即使一些代码使用的是标准的 C 语言编写的应用中,由于硬件字长的变化,以及编译器差异,在不同 cpu 上运行的结果也常常大相径庭。为此,我们提供另一种解决方案。

目前,CPLD/FPGA 器件应用已比较广泛,可以找到 51 单片机的 IP 核。如果我们将 51 单片机的 IP 核和算法的 IP 核同时下载到 FPGA 器件上,由单片机的 IP 核执行已有软件代码,而计算量比较大的算法由它的 IP 核通过硬件运算得到结果。这样就能最大限度的减少升级的工作量。

本文针对电力信号检测与控制系统中的一个项目进行系统升级,系统要求原来系统的基础上需要增加一个对信号谐波分析的 FFT 算法。

2 控制系统设计

图 1 为改进后系统设计框图。主要包括信号幅度变换电路、A/D、FPGA 及程序和数据存储器组成。FPGA 内部主要由两个 IP 核和数据宽度变换电路组成,其中,51 单片机 IP 核通过互联网下载得到,FFT 算法 IP 核由我们编写。

3 基于 FPGA 器件 FFT 实现原理分析

按照经典基-2 FFT 算法的流程,计算过程主要分为两步:倒序和蝶形运算。针对固定时间序列长度的 FFT,倒序可以用一张对应位置的表实现,在 FPGA 里更是可以用一块存储区实

现,比如以初始时间序列的序数为地址,存储的内容为倒序之后的序数。这样的做法很不通用,针对不同长度的 FFT 对应位置表是不同的,相应的有一系列移植的问题。我们注意到,FFT 蝶形运算过程与倒序过程处理元素的过程相反,只是倒序过程不需要运算,而直接把数据移到相应的位置。因此,我们得到倒序和蝶形运算有如下特点(比如长度为 2^N 的时间序列):

1. 需要倒序或计算 N 次。比如上面的 8 点 FFT 要倒序或计算 3 次。

2. 第 i 次倒序,一组数的长度为 2^{N-i} ,一共要倒序 2^i 组 ($i=0,1,\dots,N-1$)。但二者的乘积为 2^N ,即时间序列的长度。比如上面的 8 点倒序,第 1 次整体为 1 组,奇数数偶数分开,变成 02461357;第 2 次有 2 组,每组 4 个,前四个再按奇偶分开得到 0426,后四个 1537,整体变成 04261537;第三次为 4 组,每组 2 个,依次运算,结果不变。

3. 蝶形运算的形式与倒序相似,但是组的长度和组数变化规律与倒序相反。

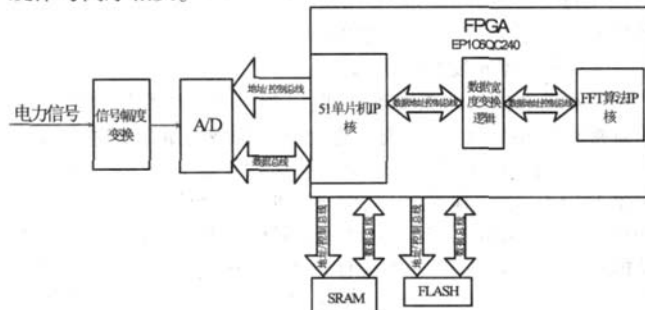


图 1 系统框图

Fig1 System Block Diagram

基于上面的特点我们设计了通用运算的状态机,即状态机本身也是根据第几次运算产生不同的地址信号输出,从而完成相应的倒序和蝶形运算。并由此得到 FFT 算法整体设计,如图 2。

具体实现 FFT 算法过程中,我们多次遇到这样两个问题,即状态机复杂程度和存储单元的数量:基于上面的分析,我们写的倒序过程不是直接用地址表对应的方法,而是用类似于蝶

形运算的、通过 N 步奇偶分开的方法, 尽管这样的实现降低了效率, 但是这样做, 同样是为了使得算法更具有意义更通用; 另外, 如果将所有中间结果都用 ram 保存, 需要的 ram 数量将是 $N \times 2^N$ (假设时间序列长度为 2^N , 这是与一般文献习惯不同的) 个存储单元 (假设实部和虚部用一个存储单元, 实际我们在设计过程中, 分别存储在两个存储单元), 当 N 比较大并且为了保证精度而用更长的字长存储的时候, 需要 ram 的数量将是难以接受的, 我们采用了一种使用比较少的 ram 的方法, 用了 2×2^N 个存储单元, 即分别用了 2^N 存储每一步计算的数据和存储结果, 为了使数据通路方向一致, 进而使状态机设计进一步简单, 我们没有采用每次交换数据流方向的方法, 而是采用每次计算结束后, 将计算结果拷贝到另一边的方法。

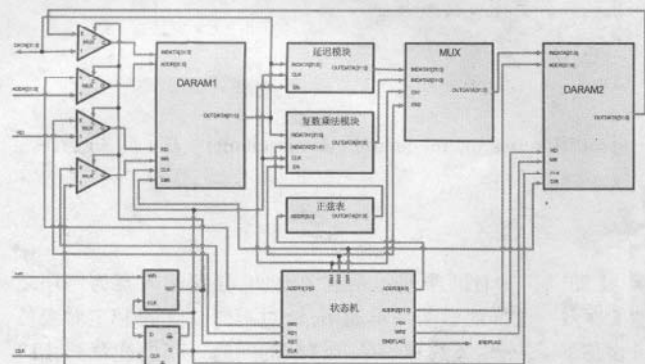


图2 FFT算法IP核设计框图
Fig2 FFT IP Core Block Diagram

4 FFT 主要组成模块的实现方法

4.1 状态机

作为算法实现的核心, 主要提供地址、读写和其他控制信号。内部主要通过具有特定意义的几个计数器实现。主要记录如下的一些状态信息:

1. FFT 算法目前得状态, 即复位、倒序、蝶形运算、完成。
2. 在倒序和蝶形运算中, 记录数据通道的方向。
3. 在倒序和蝶形运算中, 运行到第几步, 即对应前面特点分析中的 i 。

4. 每一步运算到第几个元素, 并根据运算到第几步的信息产生相应的地址、读写和其他控制信号。

4.2 乘法器及复数乘法部件

通常乘法器有两类实现方式: 一类是通过内部用线型变量的直接移位相加, 还有一类是通过寄存器型变量存储并在每一个 clk 内移位相加一次, n 位定点乘法就需要 n 个 clk。前者占用资源较大, 乘法速度较快, 但会降低整个系统能运行的最高频率; 后者占用资源较小, 乘法速度较慢, 但有利于提高整个系统能运行的最高频率, 一般设计当中应提倡使用的。但是, 后者使得状态机设计更加复杂, 出于对具体器件和复杂程度的考虑, 本算法选择了前者。

4.3 I/O 电路及时序

I/O 电路采用了与异步 SRAM 相同的时序。系统内部有一个单方向计数器 (即计数最大时就保持不变), I/O 的写信号使其清零, 并输出整个系统复位信号, 计数到最大时复位完成。

5 FFT 算法仿真验证

本文所给算法的实现在 Synplify 862 通过综合, 并用 ModelSim

SE 6.1f 上进行验证。并实际应用到了电力信号检测中。

仿真验证方法, 编写测试模块, I/O 访问采用异步 SRAM 的控制时序。

测试数据:

1. 将自然数 1、2、3、4.....64, 分别用上述 FFT 算法和 matlab 所给 FFT 计算结果计算比较。

2. 另外用一些包含正数和负数的序列分别计算比较, 验证应用到补码运算。

图 3 和图 4 是针对自然数 1、2、3、4.....64 做 FFT 的仿真波形。图 3 是写入时间序列阶段时序及部分波形, 图 4 是读出 FFT 结果阶段时序及部分波形

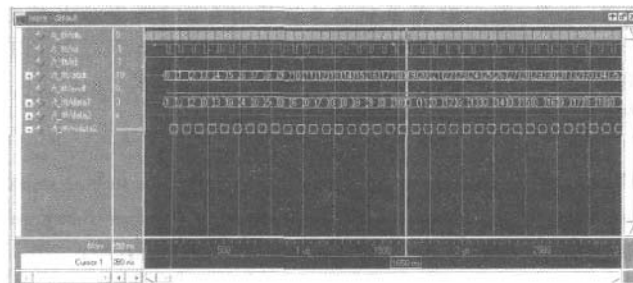


图3 系统仿真波形
Fig3 Waves of System simulation

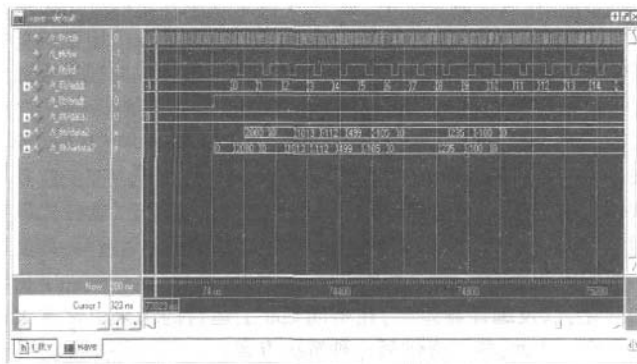


图4 系统仿真波形
Fig4 Waves of System simulation

结果与 Matlab 等软件计算结果一致, 误差主要来源于定点计算本身, matlab 是浮点运算。

6 总结

本采用的“升级”方法在满足系统设计要的情况下, 最大限度地减少了软件和硬件修改的工作量, 大幅缩短了“升级”的开发周期, 是目前已广泛应用的单片机系统理想升级方案。本升级方案顺利地应用到电力信号检测与控制系统中。

参考文献

- [1] Cyclone Device Handbook, Volume 1
- [2] 程佩清. 数字信号处理教程[M]. 清华大学出版社, 1995.
- [3] DAPENG ZHANG. Parallel computer system design for pattern recognition & image processing[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [4] 韩颖, 王旭, 吴嗣亮. FPGA 实现高速处理器的设计[J]. 电讯技术, 2003(4): 4—78.
- [5] 吴振纲, 陈虎. PLC 的人机接口与编程 [J]. 微计算机信息, 2005 8-1 21-23

(下转第 177 页)

假设第一种情境下,对作用在料带速度上的第二个执行器 M_2 在 30s 时施加一个 5% 的有效性降低,该故障对应于系数 $\alpha_2 = +0.05$ 的输入突然出现。在第二种情境下对作用于带材张力的执行器 M_1 在 80s 时施加一个 20% 的有效性降低,对应于系数 $\alpha_1 = +0.20$ 的故障输入。在两种情境下的输出残差如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,按照前面所述的方法,产生了两个直接的残差:残差 r_1 和 r_2 被设计为只对一种故障敏感而对其他的不敏感。从两个情境中得到的结果清楚地显示了两种残差检测和隔离两种故障的能力。一旦故障被隔离,对应的故障估计和补偿模块被激活来减少故障对于系统的影响。无故障状态估计被反馈到控制器,同时故障输入估计被用于产生加性控制输入,从而产生对于故障的补偿。

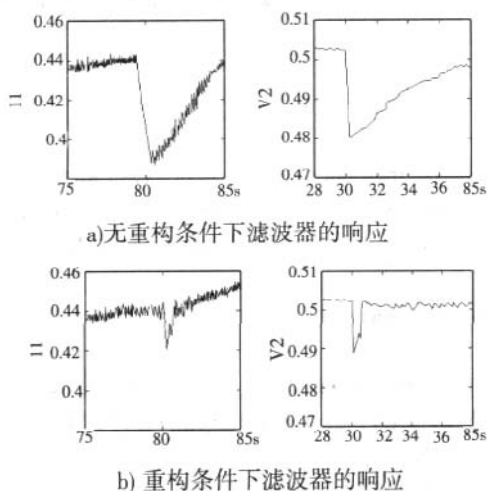


图 3 FTC 应用效果比较

图 3 给出了系统在没有重构和重构条件下系统对于故障的反应。在一些卷绕设备中,系统被要求对于出现的故障尽快地补偿。图 3 清楚地显示了 FTC 方法对执行器故障的补偿能力。从图 3 中可以看到,在没有故障补偿的条件下,带材张力在故障出现大约 7s 后才恢复到其标称值(由于一个执行器故障在系统中的作用只相当于一次微扰,即使没有补偿,系统也可能在一定时间后恢复到其标称状态);而在使用 FTC 方法补偿的条件下,只用了 1s 就恢复到了标称值。因此,容错控制方法在应用于执行器故障的检测、隔离和补偿时,具有良好的效果。

5 结论

本文对一种基于容错控制的故障补偿方法进行了研究,并将其应用到干嵌法极片制备过程中的卷绕机张力控制系统中。结果清楚地表明所提出的容错控制相较于典型控制结构的有效性。结果表明,该方法能有效地实现故障基于模糊原理的检测和隔离,很容易地降低了故障对系统的影响。一旦故障被检测和隔离,下降的性能能够在极短的时间内重新逼近标称值,过程控制重新开始。避免了系统的被迫停机,保证了系统过程的连续性。使极片卷绕整齐,满足下一工序的加工要求。

但是,当一个执行器完全失效时这一方法就有了局限性;在这一情况下,只有一种硬件冗余的容错控制是有效的,能够保证系统运行的可靠性。

本文作者创新点:对容错控制在故障补偿方面的应用进行了详细的研究和介绍,并将其应用于干嵌成型法极片制备过程

的卷绕机执行器故障补偿中。

参考文献

- [1]王常力,罗安.分布式控制系统(DCS)设计与应用实例[M].北京:电子工业出版社,2004
 - [2]Aubrun, C., Sauter, D., Noura, H., & Robert, M. (1993). Fault diagnosis and reconfiguration of systems using fuzzy logic: application to a thermal plant treatment process. International Journal of System Sciences, 24, 1945-1954.
 - [3]王仲生.智能故障诊断与容错控制[M].西安:西北工业大学出版社,2005
 - [4]刘湘崇,梁彦,程咏梅等.导弹控制系统的容错控制研究[J].控制与对策,2006,21(10):1185-1189
 - [5]Balle, P., Fisher, M., Fussel, D., Nelles, O., & Isermann, A. (1998). Integrated control diagnosis and reconfiguration of a heat exchanger. IEEE Control System Magazine, 18(3), 52-64.
 - [6]王福利.容错控制[M].沈阳:东北大学出版社,2003
 - [7]刘晓玉,方康玲,刘新海.非线性系统的模糊自适应输出反馈控制[J].微计算机信息,2006,8:35-37
- 作者简介:许波(1977-),男,河北省邢台市人,河北工业大学机械工程学院讲师,硕士,主要从事设备可靠性研究;关玉明(1957-),男,河北省沧州市人,河北工业大学机械工程学院教授,硕士生导师,主要从事机电成套设备研究开发;管啸天(1975-),男(满族),河北省承德人,河北工业大学机械工程学院讲师,主研方向:虚拟仿真;安伟(1961-),男,天津人,河北工业大学工程训练中心讲师,主研方向:工艺优化。
- Biography: XU Bo(1977-), Male, Xingtai, Hebei province, School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Master, Major in reliability of equipment.
- (300130 天津 天津市红桥区河北工业大学机械学院)许波 关玉明 管啸天 安伟
- 通讯地址:(300130 天津 天津市红桥区河北工业大学机械学院)许波

(收稿日期:2008.6.3)(修稿日期:2008.8.5)

(上接第 154 页)

作者简介:李之旺(1982-),男,辽宁省瓦房店市人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,硕士研究生,主要从事空间姿态测量方面的研究;张涛,男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 研究员

Biography: LI Zhi-wang(1982-), Male, Province, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics And Physics, Chinese Academy of Sciences, graduate student for Master degree, Measurement of Gesture.

(130033 吉林长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)李之旺 张涛

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics And Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China; Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China) LI Zhi-wang ZHANG TAO

通讯地址:(100039 北京 中国科学院研究生院)李之旺

(收稿日期:2008.6.3)(修稿日期:2008.8.5)

欢迎投稿 欢迎订阅