

文章编号: 1002-1582(2005)02-0179-03

# 基于 FPGA 的数字相位计在煤矿提升机 激光测距系统中的应用\*

周孟然<sup>1,2</sup>, 刘文清<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>, 魏庆农<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽理工大学 电气工程系, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 介绍了用于矿井提升机红外激光位置跟踪系统中的一种新型数字鉴相器的研究方法。该方法是基于现场可编程门阵列(FPGA)器件,并运用快速傅里叶变换(FFT)算法完成的。阐述了在实时高速测量场合运用 FPGA 器件的优势,并给出了这种新型数字鉴相器的基本原理和具体实现过程。结果表明:数字相位计在应用于矿井提升机的位置跟踪时,不仅可以保证测量精度,而且在很大程度上简化了电路的复杂程度和消耗,具有良好的应用价值。

**关 键 词:** 矿井提升机; 红外激光; 数字鉴相器; FPGA; FFT

**中图分类号:** TN249; TP391 **文献标识码:** A

## The research of digital phasometer based on FPGA in laser range system of mine hoister

ZHOU Meng-ran<sup>1,2</sup>, LIU Wen-qing<sup>1</sup>, LIU Jian-guo<sup>1</sup>, WEI Qing-nong<sup>1</sup>

(1. Anhui Institute of Optic and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

(2. Department of Electric Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** A new type of digital phasometer applied to the infrared laser position-tracking system of mine hoister is introduced, which is based on FPGA and FFT algorithm. The unique advantage of FPGA in the course of real time and high speed measurement is described, and the theory and realization process of phasometer are described. The measurement result shows this phasometer has high potential of application.

**Key words:** mine hoister; infrared laser; digital phasometer; FPGA; FFT

## 1 引 言

在煤矿中,矿井提升机作为地面与井下物质或人员流通的运输工具,对操作安全性和控制精度等方面都有很高的要求。为了便于准确地操作提升机,方便物质或人员的上下,防止冲罐、坠罐等恶性事故的发生,精确测得提升机箕斗(罐笼)任一时刻在井中的位置和运行速度这两个数据指标具有十分重要的意义。红外激光位置跟踪系统在矿井提升机中能实时测量矿井提升机与地面的距离及其运行速度。这种激光测量无传递误差,无需辅助校正开关,能准确地显示提升机的实际位置,通过鉴相技术可获得理想的位置控制信号,实现对提升机速度的数字化控制。红外激光测距是通过测量连续的幅度调制光波在待测距离上往返传播所产生的相位差来间

接的测量光波的传播时间的,从而求得被测距离。因此,信号相位测量的精度决定了测距的精度。

相位法是一种常用的信号检测技术。相位检测有模拟相位差计、自动数字测相和信号频谱分析等。应用信号频谱分析的相位检测原理是利用 DFT(离散傅里叶变换)的选频特性得到所测信号的相位信息,从而测得信号的相位差。由于 DFT 所需要的运算量相当大,计算时间较长,所以必须借助于 FFT(快速傅里叶变换)算法。

本文介绍了一种基于 FPGA(现场可编程门阵列)的新型数字鉴相器,它将数字信号处理和信号傅里叶变换引入鉴相系统,利用 FPGA 实时高速的数据处理能力对采集信号进行快速傅里叶变换,计算出采样信号的初始相位,进而解算出测距系统中测量信号与参考信号之间的相位差。相对于传统的

\* 收稿日期: 2004-06-01 E-mail: mrzhou@ aust.edu.cn

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(2002kj273)

作者简介: 周孟然(1965-),男,安徽理工大学教授,硕士,中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生,主要从事计算机控制及激光应用方面的研究。

DSP 处理器而言,大容量、高速度的 FPGA 芯片在数据的大吞吐量和数据的纯硬件处理方面有独特的优势。虽然传统的 DSP 处理器具有诸多难以克服的技术瓶颈,但也有了突破性的应用。在各种 DSP 的应用场合,FPGA 具有全硬件的用户可定制性以及重配置性,即根据需要可随时通过改变 FPGA 中构成 DSP 系统的硬件结构来改变系统的功能和技术指标。可以预见,FPGA 有进一步取代 DSP 处理器的趋势。

## 2 数字相位计的原理

在红外激光位置跟踪系统中,为了保证鉴相的精度和分辨率,采用了基于 FFT 算法的相位检测原理。它在信号处理系统中具有重要应用,其鉴相精度和稳定性均高于模拟或模拟数字混合式相位鉴别系统。在本系统中,DSP 鉴相的实现是以高速 A/D 两路混频信号的数字化为前提,串行输出的 18 位数据和逻辑处理器接口把运算放大器缓冲的信号进行数字化。DSP 是以 FPGA 器件为硬件,是通过采用 VHDL 语言编程来实现的,并采用了快速傅里叶变换。在完成离散傅里叶变换循环卷积运算后,形成一个新的离散序列,通过差分运算就可得到序列的相位差,即所需要测量的两信号的相位差;然后再把这一数字化量送给单片机,通过简单的运算即可得到所需测量的距离值。

对单一频率的 FFT 而言,一般情况下,在离散谱上会出现两条谱线,只有满足式(1)的条件,在功率谱上才能正好对应于一条谱线。

$$f = n \cdot \Delta f \quad (1)$$

式中, $f$ 为信号频率; $\Delta f$ 为频率分辨率。假设 A/D 的采样频率为  $f_s$ ,作  $N$  点的 FFT,则频率分辨率为

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2)$$

如果功率谱最大值出现在第  $n$  个频率上,则代入式(1)得

$$f = n \cdot \Delta f = \frac{nf_s}{N} \quad (3)$$

然后只需在幅度谱上取其相应的第  $n$  个频谱值的实部  $\text{Re}$  和虚部  $\text{Im}$ ,按照式(4)就可以得到输入信号的初始相位。

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\text{Im}}{\text{Re}} \right) \quad (4)$$

在实际的数字相位计中,为了简化计算,通过合理选择采样频率  $f_s$  和 FFT 的点数  $N$ ,对参考信号和测量信号分别作 FFT 变换,其结果在频率上必定表

现为单一的谱分布,这时就可以很方便的求得两信号的初始相位,从而得到参考信号和测量信号的相位差,也就是说,完成了数字相位计的实现。

## 3 FFT 的算法分析

$N$  点的离散傅里叶变换(DFT)可以表示成为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

式中, $W_N = e^{-j2\pi/N}$  为蝶形因子。

FFT 算法将长序列的 DFT 分解为短序列的 DFT。由于时间抽取 FFT(DIT)是将  $N$  点的输入序列  $x(n)$  按照偶数和奇数分解为偶序列  $y(n) = x(2n)$  和奇序列  $z(n) = x(2n+1)$  两部分,因此  $x(n)$  的  $N$  点 FFT 可以表示成为

$$X(k) = Y(k) + W_N^k Z(k) \quad 0 \leq k \leq \frac{N}{2} - 1 \quad (6)$$

$$X\left(k + \frac{N}{2}\right) = Y(k) - W_N^k Z(k) \quad \frac{N}{2} \leq k \leq N-1 \quad (7)$$

对于  $N = 4^Y$  来说,基 4-DIT 具有  $\log_4 N = Y$  次迭代运算,每次迭代包含  $N/4$  个蝶形单元。式(8)为基 4 蝶形单元运算的一般表达式,其信号流程图

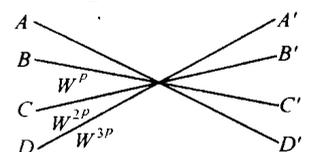


图 1 基 4-DIT 蝶形单元信号流程图

如图 1 所示。

$$\left. \begin{aligned} A' &= (A + CW^{2P}) + (BW^P + DW^{3P}) \\ B' &= (A - CW^{2P}) - j(BW^P - DW^{3P}) \\ C' &= (A + CW^{2P}) - (BW^P + DW^{3P}) \\ D' &= (A - CW^{2P}) + j(BW^P - DW^{3P}) \end{aligned} \right\} (8)$$

式中, $A, B, C, D$  和  $A', B', C', D'$  均为复数; $W = e^{-j2\pi/N}$ 。从式(8)可以看出,完成一次需要进行 3 次复数乘法和 8 次复数加法运算。如果采用实数来表示,则需要进行 12 次实数乘法和 22 次实数加法运算。整个过程是顺序输入,反序输出。

下面从四个方面对基 4-DIT 算法流程的特点予以说明:

(1) 同址运算。从式(8)可以看出,每个蝶形单元涉及四个输入数据( $A, B, C, D$ )和四个输出数据( $A', B', C', D'$ ),一旦这四个输出数据计算出来后,四个旧的数据就无用了,新数据可以占用旧数据的存储单元。因此,基 4-DIT 算法是一种同址运算。

(2) 地址运算。一个蝶形单元涉及四个节点,其间距  $\Delta = N/4^m$  ( $m$  为迭代次数)。若结点  $A$  的地址为  $a$ ,则结点  $B$  的地址  $b = a + \Delta$ ,结点  $C$  的地址  $c = b + \Delta = a + 2\Delta$ ,结点  $D$  的地址  $d = c + \Delta = a + 3\Delta$ 。

+ 3 $\Delta$ 。

(3) 整序。由于基 4FFT 是同址运算,因而当输入数据是自然顺序时,其输出结果就是倒序状态。若输出结果按频率自然顺序排列,则必须经过一次整序操作。也就是说,将输出结果的序号(存储器地址)按四进制数作倒序排列。

(4)  $W^p$ 。在一个基 4 蝶形单元中,由于包含有  $W^p, W^{2p}, W^{3p}$  三个旋转因子,因而只需确定一个  $p$  值就可以确定三个旋转因子。每次迭代开始时,  $p$  总是 0。在一个蝶形组内  $p$  值不变。每当一个蝶形组计算完毕而转入下一个蝶形组时,  $p$  值改变一次。其变化的顺序恰好是  $(\gamma - 1)$  位四进制数顺序加 1 的倒序输出。

#### 4 基于 FPGA 的 FFT 算法的实现

在认真研究 FFT 的算法结构后,在 FPGA 器件中,其硬件需考虑采用并行处理的方法。所谓并行处理,是一级运算中的  $N/4$  个蝶形单元,即用  $N/4$  个运算单元进行并行运算。这样的并行处理不仅提高了数据的吞吐率和处理速度,而且也保证了测相的实时性和精度。

系统整体模块框图如图 2 所示。工作流程是:外部数据送入 RAM 后,控制器开始工作,并由地址发生器产生一系列寻址 RAM 和 ROM 的数据地址。把 RAM 和 ROM 中的数据送入蝶形运算器进行蝶形运算,并将计算结果送回到 RAM。溢出检测电路发出溢出检测信号,以便控制定标电路以及对下一级蝶形运算的溢出进行移位操作。经过四级运算得到最终的运算结果。

电路具有以下特点:

(1) 蝶形运算电路。蝶形运算电路是本系统的核心部分,采用了并行处理的运算方式。每个蝶形单元的计算结果存储在原来相同的 RAM 单元中,同时由进位寄存器输出进位数据,用于溢出检测。

(2) 数据存储。RAM 是存储输入数据及中间运算结果的单元。每个蝶形运算的输入和输出数据均要经过 RAM 的读写操作。因此,RAM 的频繁读

写操作速度对 FFT 的处理速度影响很大。内置 RAM 是 FPGA 及其功能模块、I/O 模块和布线资源之后的一种新增资源。当把 RAM 设置在 FPGA 不存在驱动和 pad 延时,不仅速度极快,而且控制简单,不需占用片外电路面积,可提高系统的可靠性。

(3) 溢出检测和调整。在每级蝶形运算中,以上一级最大位增长数为标准,寻找每位数据为增长数与最大值之间的差值,采用强制调整,即可达到统一的格式。同时还应该把最大值送入累加器,记录这一级数据整体调整的位数。

#### 5 结 论

由 FPGA 芯片构造的数字相位计是在完成 FFT 算法的基础上实现的。本设计采用流水线工作方式,内置 RAM 和 ROM 单元,加快了系统的总体速度,使存取数据、蝶形计算、溢出检测工作能协调一致,有效地避免了“瓶颈”。将该数字相位计应用于矿井提升机位置跟踪系统中,不仅可以保证位置测量精度,而且提高了系统的稳定性,在很大程度上简化了电路的复杂程度和功耗,具有良好的应用前景。

该系统已应用于淮南矿业(集团)有限责任公司潘集第三煤矿。经过一年多的运行,可得到以下几个方面的效益:(1)不需要校正点开关,可节省 15 万元维修费用(因老系统一年花在购买、维修元件上的费用大致为 10 万元);(2)通过采用精确的激光定位系统,提高了系统的可靠性及生产效率;(3)老系统在校正点开关时易损坏,在更换元器件和校准位置时既费时又费工,按照每次误工影响产量 6 千吨计算,一年下来影响产量达 10.8 万吨,即 2376 万元;(4)可提供速度值、加速度值、速度图形、速度仪表盘显示及提升机箕斗在井筒中的动态图形显示,系统显示直观、准确,便于司机操作和监视,提高了系统的安全性和可靠性,同时也减轻了劳动强度,节省了劳动力的经济开支,估算可减少开支 18 万元。因此该研究成果在煤矿中具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 周孟然. 基于红外激光定位技术的矿井提升机位置跟踪系统的研究[J]. 煤炭学报, 2002, (6): 658~660.
- [2] 周孟然, 刘文清, 等. 激光测距系统中高速并行数据接口的研究[J]. 量子电子学报, 2003, (4), 477~481.
- [3] 戴明桢. 数字信号处理的硬件实现[M]. 北京: 航空工业出版社 1998.
- [4] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [5] 黄正瑾. 系统可编程技术[M]. 合肥: 东南大学出版社, 1999.
- [6] 朱明程. FPGA 原理及应用设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.

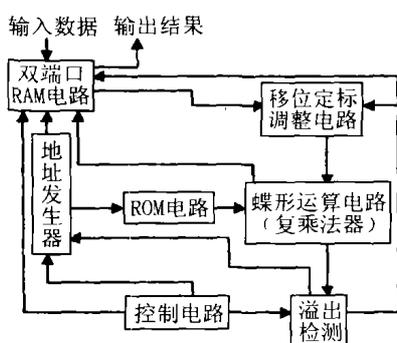


图 2 FFT 处理器整体模块结构