

光电位移信号新型细分方法及系统设计

高 旭¹, 马庆林¹, 高 阳², 李舒航¹

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林长春 130022; 2. 中国石油西南油气田分公司川中油气矿, 四川遂宁 62900)

摘 要: 为提高光电轴角编码器的分辨率, 提出一种新型莫尔条纹信号细分方法并建立基于 FPGA 的光电位移信号倍频系统. 根据理想莫尔条纹光电信号的数学模型, 利用多倍角正余弦信号的函数性质, 将原始莫尔条纹信号推导为 n 倍频的高阶信号; 由幅值细分理论, 离线建立基于高阶正余弦信号的高分辨率幅值细分查找表; 根据增量式、绝对式光电编码器的不同功能, 分别阐述了应用该幅值细分查找表实现编码器高分辨力的倍频技术; 同时又指出本文细分方法应用的约束条件. 最后, 以直径为 40mm, 分辨率为 2500P/R 的欧姆龙 E6B2-CWZ6C 增量式光电编码器为实验对象, 在转速范围 200 ~ 3000rpm 的同步电机驱动下, 编码器输出波形频率范围约为 8.3kHz ~ 125kHz, 在基于频率为 10kHz 的模拟输入信号下, 采用本文细分方案设置四倍频设计实验, 该系统可以快速将频率增加到原来频率的 4 倍; 同时, 基于 4 倍频原理设计了 128 倍频实验, 并进行实验验证, 同样得到该系统可以快速增加到输入频率的 128 倍. 该设计方法及系统与传统细分方法相比较, 具有开发周期短、集成度高、模块化、速率快等特点.

关键词: 位移测量; 倍频/细分; 光电信号; 分辨率

中图分类号: TP394.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)12-2575-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.12.017

New Subdivision Method and System Design of Photoelectric Displacement Signal

GAO Xu¹, MA Qing-lin¹, GAO Yang², LI Shu-hang¹

(1. School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

2. Petro China Southwest Oil and Gas Field Branch, Suining, Sichuan 62900, China)

Abstract: In order to improve the resolution of photoelectric shaft angle encoder, a method of subdividing high frequency-doubling Moire fringe signal is proposed and a frequency-doubling system of photoelectric potential shift signal based on FPGA is established. According to the mathematic model of ideal Moire fringe photoelectric signal, the original Moire fringe signal is deduced into n -fold high-order signal by using the function property of multi-angle sine-cosine signal. The different functions of the encoder are described, and the frequency doubling technique of high resolution by using the amplitude subdivision lookup table is described respectively. Finally, an Omron E6B2-CWZ6C incremental photoelectric encoder with a diameter of 40 mm and a resolution of 2500 P/R is taken as the experimental object. Driven by a synchronous motor with a speed range of 200 ~ 3000 rpm, the output waveform frequency range of the encoder is about 8.3 kHz ~ 125 kHz. Under the analog input signal with a frequency of 10 kHz, the subdivision scheme is adopted. In the quadruplicated frequency doubling experiment, the system can increase the frequency to 4 times of the original frequency. At the same time, based on the principle of 4 times frequency, the 128 times frequency experiment is designed and verified by experiments. The system can also be quickly increased to 128 times the input frequency. Compared with the traditional subdivision circuit, the design method and system have the characteristics of short development cycle, high integration, modularization and simple modification.

Key words: displacement measurement; frequency doubling/subdivision; photoelectric signal; resolution

收稿日期: 2018-10-26; 修回日期: 2019-06-28; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No. 51505078); 吉林省科技厅优秀青年人才基金项目 (No. 20180520187JH); 中国博士面上基金 (No. 2018M641778); 吉林省教育厅“十二五”科学技术项目基金 (No. JJKH20190544KJ)

1 引言

光电编码器是一种应用广泛的位置检测装置,并且绝大多数采用光栅式结构.莫尔条纹信号细分技术是实现高精度光栅测量的核心技术,它可在不改变结构的情况下大幅度的提高其检测精度,广泛应用于数控机床、精密仪器仪表、机器人、石油化工等诸多领域^[1,2],具有重要的工程应用价值.

世界各国研制生产光电位移测量系统的厂商很多,尤以欧美、日本等发达国家处于技术领先水平,诸如德国的海德汉公司、B&L公司、尼康公司等.目前业内最为先进的光电轴角编码器为海德汉公司生产的27位增量式光电编码器,测角精度为 $0.036''$.国内中科院长春光机所、成都光电所、长春第一光学仪器厂等先后进行了编码器研制工作,其研究水平和传感器性能具有相当高的水平^[3,4].目前,工程应用领域使用的编码器80%为光栅式光电轴角编码器,根据其刻线方式不同,绝对式编码器可直接输出数字量,但因为价格高昂、信号多、体积大且制造工艺难度大等因素,其市场推广受到了很大限制,而增量式光电编码器转动一周可以输出一定数量的脉冲个数,其脉冲个数由光栅的刻线数目决定,通过求得的计数值就反映了编码器转动过的角位移^[5,6].虽然增量式编码器只能输出转动过程中的相对位置信息,一旦发生断电或中断运转等意外事故就会丢失位置信息,但其成本较低,信号检测更为简便,且平均机械寿命可在几万小时以上,抗干扰能力强,可靠性高,适合于长距离传输.这使得增量式编码器占有极其庞大的市场,随着航空航天、精密仪器仪表、自动化控制等行业的发展,对位置检测的要求越来越高,使得位置检测系统朝着高精度、大量程、高频响、高可靠性等方向发展,因此研究提高增量式编码器细分分辨力的方法尤为必要.目前,国内外学者先后提出了多种基于硬件实现或软件实现的细分方法,比如S. Balemi和H. V Hoang分别提出了正弦信号自动校准方法^[7]、优化估计信号补偿方法^[8],这些细分方法能够补偿相位偏移、幅值不均衡问题,但是不支持相位变化并且静态测量时失效;R. Hoseinnezhad提出一种改进的递推加权最小二乘法^[9],可实现实时跟踪解析参数,解决了其它优化方法静态时失效的问题,但是需要大量的计算时间(约2ms),因此输入信号的带宽受到很大限制;K. K. Tan提出基于查找表技术(LUT)的高倍细分方案,是通过求解原始信号的高阶细分信号值,再通过LUT方法查表输出预先存储的高阶细分信号,实现实时高速细分,但是需要消耗大量的内存资源;M. Benammar提出基于线性化技术的细分方法,这种方法通过简单信号处理就可以求解信号相位,并且可以有效的提高输入信号的带

宽,但是不能有效的消除噪声,在低频时也不能获得高的细分倍数^[10].锁相环技术(PLL)是数字信号处理领域一种重要的信号处理方法,其具有良好的噪声抑制能力,但是传统的锁相环输入信号频带太窄且低速时不能工作.T. Emura提出了一种正交锁相环细分方法,有效扩大了动态范围,可以解决正反向换向时的锁定问题,但是这种方法是基于硬件实现,环路参数调节困难,并且难以做到高倍细分^[11].德国海德汉公司作为行业龙头,对莫尔条纹细分产品的研发反映了相关领域的发展趋势.目前,该公司的信号细分产品分为两类:其一,细分电子电路内置在扫描光栅内,具有部件少、成本低和节省外置的细分电子电路安装空间等优点,可实现4~100倍频,输出TTL方波信号可直接与数控系统或数显装置相连,实现 $5\sim 0.1\mu\text{m}$ 的分辨率.其二,外置细分电子电路设备,输入为正弦微电流信号或正弦电压信号,输出为对应的TTL方波信号.

本文鉴于编码器光电信号直流分量误差、幅值误差、正交性误差、正弦性误差补偿技术的逐步成熟,提出一种软件倍频方法.基于原始莫尔条纹信号,推导高倍频的正余弦信号并建立信号幅值细分查找表,利用该查找表辅助实现增量式、绝对式光电编码器光电信号的细分.同时,编码器数据处理系统在细分过程中,可嵌套应用光电信号的补偿技术,进一步完善信号补偿的有效性,大幅度提高光电编码器的分辨力.在分析莫尔条纹位移测量原理和现有莫尔条纹信号细分技术的基础上,给出了一种新型细分方法,并对其使用的约束条件、方法分析及使用均做了具体的说明,同时建立了基于FPGA的增量式光电编码器的四细分系统^[12],给出一种细分分辨向电路模块,并进行了具体的实验仿真.以欧姆龙E6B2-CWZ6C增量式光电编码器为实验对象,其直径为40mm,分辨率为2500P/R,搭配使用的同步电机转速范围200~3000rpm.输出波形频率范围约为8.3kHz~125kHz.仿真与验证结果表明,采用本文细分方法,对于频率为10kHz的模拟信号,该方法可以将其频率增加到原来频率的4倍.基于4倍频原理,设计了128倍频实验并进行实验验证,得到预期实验结果.新型的设计方法与传统细分方案相比具有开发周期短、集成度高、模块化、修改简单等特点.因此在不依靠当前国内的制造技术下,研究提高位置测量精度的信号细分方法具有重要应用价值^[13].

2 光电位移细分信号软件倍频方法

2.1 倍频原理

由于光栅系统的光电系统误差、光栅副的相对位置误差及前置调理电路的缺陷都会影响编码器莫尔条纹信号的质量,使实际接收的莫尔条纹信号含有直流漂移分量、等幅性偏差、正交性偏差、正弦性偏差及噪声

分量,导致实际细分信号的李沙育图为椭圆,因此需要补偿并消除信号偏差,使信号的李沙育图为圆形,进而保证细分精度^[14].

编码器莫尔条纹光电信号的数学模型可以利用傅里叶级数的展开式表示^[9],如式(1)所示:

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 + a_1 \cos(\omega_1 t) + b_1 \sin(\omega_1 t) + a_2 \cos(2\omega_1 t) \\ &\quad + b_2 \sin(2\omega_1 t) + \dots + a_n \cos(n\omega_1 t) \\ &\quad + b_n \sin(n\omega_1 t) + \dots \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)] \\ &= a_0 + a_1 \cos(\theta) + b_1 \sin(\theta) \\ &\quad + \sum_{n=2}^{\infty} [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)] \end{aligned} \quad (1)$$

对于高精度光电轴角编码器,莫尔条纹信号中三次以上的更高次谐波系数比三次谐波系数小得多,因此,更高次谐波对细分精度的影响比三次谐波的影响小很多,通常可以略去.目前,通过补偿信号的偏差来提升莫尔条纹信号质量的方法,国内外各个相关研究单位纷纷提出了不同的方案,譬如基于李沙育图的最小二乘拟合法、基于傅里叶变换的谐波分析法等^[15,16],因此在实际细分过程中,可以采用诸类方法对信号参数进行离线求解,使用计算参数对信号补偿处理,提升细分信号的质量.该过程可以嵌套使用在高倍细分方案中.

理想莫尔条纹光电信号的归一化形式可用式(2)表示:

$$u_a(\theta) = \sin\theta, u_b(\theta) = \cos\theta \quad (2)$$

首先,根据多倍角正余弦信号的函数性质(3),可以推导出高倍频的正余弦信号 $\sin(n\theta)$ 、 $\cos(n\theta)$ ($n \in \mathbb{Z}$ 且 $n > 1$):

$$\begin{aligned} \sin(n\theta) &= n \cos^{n-1}(\theta) \sin\theta - C_n^3 \cos^{n-3}(\theta) \sin^3(\theta) \\ &\quad + C_n^5 \cos^{n-5}(\theta) \sin^5(\theta) - \dots \\ \cos(n\theta) &= \cos^n(\theta) \sin\theta - C_n^2 \cos^{n-2}(\theta) \sin^2(\theta) \\ &\quad + C_n^4 \cos^{n-4}(\theta) \sin^4(\theta) - \dots \end{aligned} \quad (3)$$

实际莫尔条纹信号的稳定性、等幅性、正交性、正弦性等信号特征存在误差,其质量指标决定倍频后信号波形的失真情况.因此,本文在假设信号指标满足要求的情况下,对信号进行软件倍频.

对于绝对式编码器,当系统获得高倍频的信号后,直接根据幅值细分原理,对倍频后的周期信号进行插值细分^[15],而对于增量式光电编码器,根据倍频信号的大小,直接与参考电压比较判断高低电平,并以脉冲的形式输出给伺服系统^[16].当倍频份数 n 较大时,该方法会加大编码器数据处理系统的计算量,因此,本文使用基于查找表的方法,快速实现莫尔条纹信号的高倍细分^[17].

2.2 细分技术的具体实现

为了简化推理过程, $\sin(n\theta)$ 与 $\cos(n\theta)$ 可以直接根

据式(3)进行事先计算,通过其结果绝对值的大小及极性来实现莫尔条纹的细分.在细分过程中,如果只利用其中的一路 $u_a(\theta)$ 或者 $u_b(\theta)$ 进行脉冲触发或正切计算,会在幅值为 1 的附近出现很大偏差.当信号幅值逐渐增大至 1 的时候,正弦曲线斜率的逐渐减小,导致幅度分割不准确.因此,必须利用差分后的两路莫尔条纹信号,共同确定幅度和相角之间的关系^[18,19].

假设在理想条件下,编码器光电接收元件的性能参数一致,则经过差分放大后编码器输出的两路相位相差 $\pi/2$ 的信号为标准正弦波.为了便于编码器数据处理系统中比较器、A/D 转换器的处理,差分放大的同时在莫尔条纹信号上加了幅值为 U_0 的直流电平.则根据两路信号的极性和大小将一个周期的信号分为八个区间,在理想情况下,八个区间为等分区间,各占 $\pi/4$,继续对每个区间的信号进行幅值分割,可以实现更高倍数的细分,如图 1 所示.例如,倍频份数 $n = 16$,在每个区间内,幅值细分份数 $m = 1024$,则信号的倍频形式如图 2 所示,其倍频信号幅值细分查找表如表 1 所示.

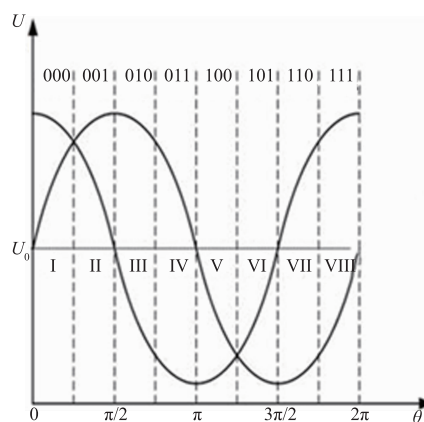


图1 细分区间示意图

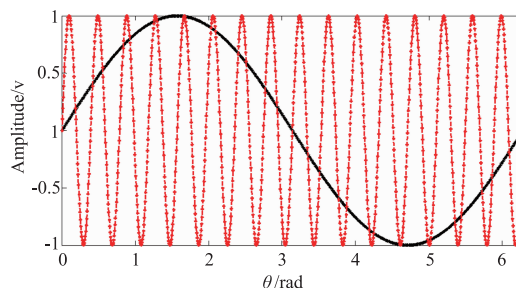


图2 倍频信号形式

对于每个区间的信号,根据正余弦信号幅值对应的细分份数来表征角度 θ 的范围,设每个区间的细分份数为 m ,正弦信号任意采样点经归一化后的幅度值对应的细分份数为 m_s ;余弦信号任意采样点经归一化后的幅度值对应的细分份数为 m_c ;细分区间边界对应的细分份数为 m_0 ,如式(4)所示.那么一个光栅周期内的角度区间细分查找表如表 2 所示.

表 1 信号幅值细分查找表

Index	1, 2, ..., m-1, m	m+1, ..., 2m-1, 2m	...	7m+1, ..., 8m
Angle Range	0 ~ $\pi/4$	$\pi/4$ ~ $\pi/2$...	$7\pi/4$ ~ 2π
Amplitude	1/m, ..., m-1/m, 1	1, ..., m-1/m, 1/m	...	-1, ..., -m-1/m, -1/m
sin(16 θ)	0.999, ..., 1.000	0.999, ..., 0.000	...	0.000, ..., 0.000
cos(16 θ)	0.016, ..., 0.000	0.023, ..., 1.000	...	1.000, ..., 1.000

$$\begin{cases} m_s = \frac{m}{0.707} \times u_a \\ m_c = \frac{m}{0.707} \times u_b \\ m_o = m \times 0.707 \end{cases} \quad (4)$$

根据角度区间细分查找表,增量式光电编码器可以直接利用倍频后的幅值分割数据通过幅值细分查找表和角度区间细分查找表获取方波脉冲,而对于绝对式光电编码器,在每个倍频信号的分周期内继续进行细分.在细分区间内,构造正切函数 ψ ,如式(5)所示.

表 2 角度区间细分查找表

Signal Amplitude value		m	Angle range	Level value
$m_c > m_o$	$m_s > 0$	m_s	0 ~ $\pi/4$	1
$m_s > m_o$	$m_c > 0$	$2m_o - m_c$	$\pi/4$ ~ $\pi/2$	1
	$m_c < 0$	$2m_o + m_c$	$\pi/2$ ~ $3\pi/4$	1
$m_c \leq -m_o$	$m_s > 0$	$4m_o - m_s$	$3\pi/4$ ~ π	1
	$m_s < 0$	$4m_o + m_s$	π ~ $5\pi/4$	0
$m_s \leq -m_o$	$m_c > 0$	$6m_o + m_c$	$5\pi/4$ ~ $3\pi/2$	0
	$m_c < 0$	$6m_o + m_c$	$3\pi/2$ ~ $7\pi/4$	0
$m_c > m_o$	$m_s < 0$	$8m_o + m_s$	$7\pi/4$ ~ 2π	0

表中, $m^* = 1111111$,"&"表示将前后两个细分值连接合并起来成为 10 位自然二进制数.

每个细分区间的函数为对应的正余切曲线,各区间线性度良好.构造角度 θ 计算公式,如式(5)所示.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A \sin \theta}{A \cos \theta} \right) \quad (5)$$

若将倍频信号后的一个分周期内细分 1024 份,则每个区间细分 128 份,那么对应每一个正切函数值有一个确定的角度信息,通过查找正切函数值表格可以得到 7 位角度精码细分值 m_i .根据正切函数 Ψ 的对称性,只需计算出 0 ~ $\pi/4$ 区间精码细分表,其它区间即可根据对应关系求出精码细分值,其角度值查找表如表 3 所示,由此输出绝对角度代码.

2.3 细分方法约束条件

编码器常应用于伺服系统中,其根据具体应用要求不同,选择不同类型的编码器,同时也导致编码器精码信

号细分约束条件不同.增量式编码器莫尔条纹信号的幅值分割细分,是直接通过用与相位有关的幅值信号去和参考电压信号进行比较,以此发出细分脉冲来确定角位移;而绝对式编码器对于系统转过的每一转角输出的是一组特定编码,该编码是唯一的,与其他位置无关,而且在掉电期间不掉数,能保留该位置信息,其莫尔条纹信号的幅值分割细分是将与相位有关的幅值信号通过正切函数来求取并输出绝对角度的代码值.

表 3 精码角度代码值细分查找表

range	value of Look-Up Table	subdivision value of precise code	subdivision value of a area	angle code
I	m_1	m_1	000	000& m_1
II	m_2	$m^* - m_2$	001	001& $m^* - m_2$
III	m_3	m_3	010	010& m_3
IV	m_4	$m^* - m_4$	011	011& $m^* - m_4$
V	m_5	m_5	100	100& m_5
VI	m_6	$m^* - m_6$	101	101& $m^* - m_6$
VII	m_7	m_7	110	110& m_7
VIII	m_8	$m^* - m_8$	111	111& $m^* - m_8$

按照本文描述的细分方法,一个光栅周期的莫尔条纹信号,经过 n 倍频,即:一个周期的莫尔条纹信号中含有 n 个分周期的信号成分.设光电编码器数据处理系统在一个光栅周期内采集莫尔条纹信号的点数最大为 n_1 ,信号经倍频后的一个分周期内采样点数最小为 n_2 ,设一个光栅周期内莫尔条纹信号的最大细分份数为 n^* ,那么则有下式(6)成立.

$$n^* = \frac{n_1}{n_2} \quad (6)$$

若编码器一个光栅周期内莫尔条纹信号的细分份数为 n^* 为 1024,而倍频后的分周期内至少的采样点数 n_2 为 8,即:在整个光栅周期内采集的莫尔条纹信号最大点数 n_1 为 128.同时,增量式光电编码器的细分极限主要受伺服系统传动速度、带宽和编码器光栅栅距约束.设编码器精码周期信号最大细分份数为 M^* ,系统传动的最大速度为 V_{\max} ,系统带宽为 B ,编码器的光栅栅距为 P ,那么则有式(7)成立.

$$M^* = \frac{B \cdot P}{V_{\max}} \quad (7)$$

因此,绝对式编码器的细分极限主要受编码器数据处理系统中的 A/D 转换器的分辨力和精度约束. 设 A/D 转换器的位数为 i , 编码器精码信号最大细分份数为 M^* , 那么它的细分主要受下式(8)约束.

$$M^* \leq 2^i \quad (8)$$

在上述约束条件下,编码器的细分精度主要与莫尔条纹光电信号质量有关. 提升条纹信号的质量对提高光电轴角编码器的分辨力具有重要作用.

3 基于 FPGA 的光电位移信号倍频系统设计

由于编码器输出信号为正余弦信号,需要将其进行调制成方波后方可输入至后续电路. 本文利用 555 定时器构成的施密特触发器对波形进行变换,将正弦波变换为方波. 倍频设计的关键在于鉴别出 A、B 信号的上升沿和下降沿. 鉴别信号上升沿和下降沿的方法很多,但其实质都一样,即:输入信号与其延时信号异或后,就可得到倍频信号^[18].

对于延时的处理方法也很多,如:微分型电路其信噪比小,抗干扰性差;积分型电路可以提高信噪比,但和微分型电路一样有致命的缺点,即:当输入信号频率高时,电容充放电不及时,导致输出信号严重变形. 对于各种倍频电路来说,电阻和电容的参数不可能完全一致,所以倍频后的各路脉冲宽度不等,而且宽度的调节也较困难.

本文利用数字型延时电路(寄存器延时)可以很好地克服以上延时电路的缺点,延时的时间和各路倍频的脉冲宽度由时钟控制,倍频后的脉冲宽度均匀一致. 在 FPGA 中设计倍频、鉴相电路一般有两种方法. 一种是两路输出:一路输出方向,一路输出脉冲;另一种也是两路输出,一路输出正向脉冲,一路输出反向脉冲. 本文采用后者,其电路图如图 3 所示.

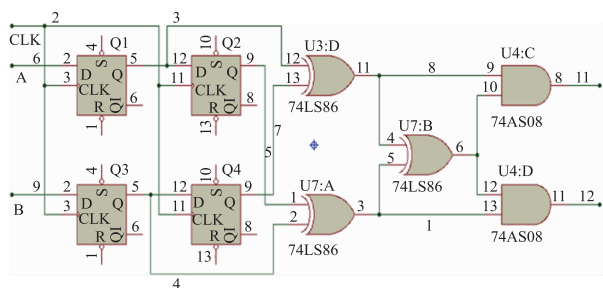


图3 四细分及辨向原理图

以 4 倍频为例,这里本文采用 4 个 D 触发器锁存输入信号 A、B 的当前状态及原状态,CLK 为周期至少小于编码器脉冲最小周期 1/4 的同步时钟,经三个异或

门和两个与门后输出的正反向四倍频脉冲 AOUT 及 BOUT. D 触发器对信号进行整形,消除了输入信号中的尖脉冲影响,在后续倍频电路中不再使用原始信号 A、B,因而提高了系统的抗干扰性能. 脉冲 AOUT 及 BOUT 的逻辑表达式为:

$$\begin{aligned} [AOUT] &= (Q_1^{n+1} \oplus Q_4^{n+1}) \& [(Q_1^{n+1} \oplus Q_4^{n+1}) \\ &\quad \oplus (Q_2^{n+1} \oplus Q_3^{n+1})] \\ [BOUT] &= (Q_2^{n+1} \oplus Q_3^{n+1}) \& [(Q_1^{n+1} \oplus Q_4^{n+1}) \\ &\quad \oplus (Q_2^{n+1} \oplus Q_3^{n+1})] \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $Q_1^{n+1} = A, Q_3^{n+1} = B, Q_2^{n+1} = Q_1^n, Q_4^{n+1} = Q_3^n$.

如前所述,这里通过这三个异或运算来实现 4 倍频,对应的两个与门用来实现鉴相. 将经过倍频、鉴相的脉冲信号通过输出端 AOUT、BOUT 输出,所得到信号就是经过四倍频后的信号.

4 系统仿真及测试

4.1 细分仿真实验

本文系统设计采用 Altera 公司的 Cyclone 系列 EP4CE6F17C8 型号的 FPGA 芯片作为开发平台. Quartus II 软件是 Alter 综合开发工具,集成了开发过程中所使用的所有组件,通过 Quartus II 软件,设计者可以新建、组织和管理自己的工程. 根据前面第 3 节所给出的电路图,运用 Verilog 语言的结构描述方法,设计流程图. 采用 Quartus II 与 Modelsim 联合调试的方法进行仿真,设置时钟信号频率为 50MHz, A、B 两方波信号频率为 6.25MHz. 编辑完成测试文件后,即可进行仿真进行功能验证,仿真波形如图 4 所示.

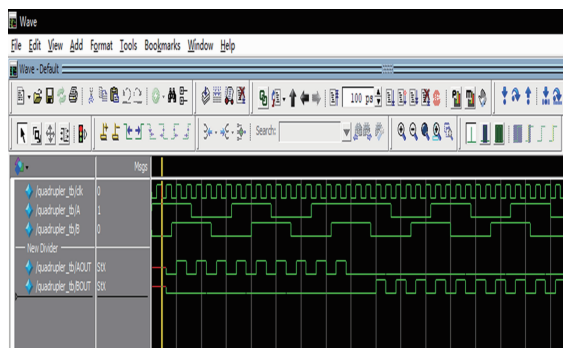


图4 仿真波形

由图 4 可知,当 A 相位超过 B 相位 90°时,AOUT 输出频率为输入方波频率的 4 倍;反之,当 A 相位滞后 B 相位 90°时,BOUT 输出频率为输入方波频率的 4 倍,可见仿真波形与设计目标相符.

4.2 实际测试验证

本课题采用的增量式光电编码器型号为欧姆龙 E6B2-CWZ6C 其直径为 40mm,分辨率为 2500P/R,可输出两列相位差为 90°的正弦波. 搭配使用的同步电机转

速范围 200 ~ 3000rpm, 则可经计算得出, 该编码器输出波形频率范围约为 8.3kHz ~ 125kHz. 其实验平台实物图如图 5 所示.

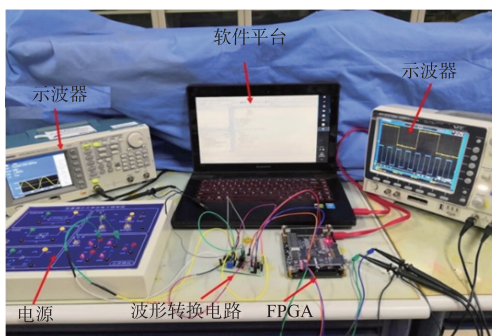


图5 实验平台实物图

以采集两列频率为 10kHz 相位差为 90° 的编码器正弦波输出信号, 其经过波形变换后, 可得到两路相位差 90° 的方波信号, 如图 6 所示, 4 倍频电路输出如图 7 所示. 基于 4 倍频原理设计并验证了 128 倍频电路输出如图 8 所示.

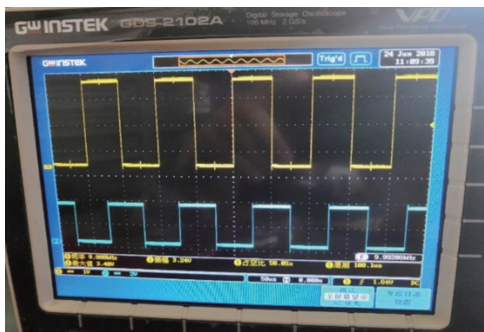


图6 波形转换图



图7 四倍频电路输出比较

从图 7 可以看出, 经过 FPGA 开发板后, 原来的方波信号被 4 细分. 从图 8 可以看出, 原来输入的方波信号被 128 细分. 说明本课题所设计的电路是可行的, 达到了预期的效果.

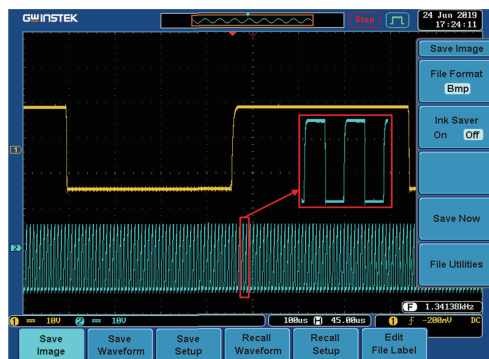


图8 128倍频实验结果

5 结论

本文提出一种新型莫尔条纹信号细分方法并建立基于 FPGA 的增量式光电编码器四细分系统. 对细分方法的具体设计、约束条件、系统功能及设计以及最后的仿真测试、实物验证等方面均做了详细的阐述, 同时在细分方法的改进及针对绝对式、增量式在伺服系统中两者不同的应用条件给出了机理分析. 采用新型的细分方法, 并将此方法中的辨向和逻辑控制功能集成在 FPGA 内, 在实现细分的同时, 提高了系统的集成度和抗干扰能力. 该系统以选取的欧姆龙增量式光电编码器 E6B2-CWZ6C 输出信号进行 4 倍频实验为例, 并基于 4 倍频原理设计了 128 倍频实验. 实验结果表明: 本文所设计的细分系统方案可行, 并且相对于其他已有方案具有一定的信号抗干扰能力.

参考文献

- [1] 高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 213-219.
GAO Xu, WAN Qiu-hua, ZHAO Chang-hai, et al. Real-time compensation of orthogonality deviation for Moire fringe photoelectric signal[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 213-219. (in Chinese)
- [2] 沈思博, 万秋华. 高精度编码器等幅性及正交性偏差补偿方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
SHEN Si-bo, WAN Qiu-hua. Research on compensation method of amplitude and phase deviation for high precision encoder[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [3] 高旭, 王仁杰, 李金环, 等. 衍射光栅空间滤波成像方法实验研究[J]. 光学学报, 2018, 38(2), 0205002: 1-10.
GAO Xu, WANG Ren-jie, LI Jin-huan, et al. Experimental-study on spatial filtering imaging method of diffraction gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2), 0205002: 1

- 10. (in Chinese)
- [4] 金勇,刘先省,黄建国,等. MIMO 声纳方位估计子空间拟合快速算法[J]. 电子学报,2013, 41(10):1964-1968.
JIN Yong, LIU Xian-xing, HUANG Jian-guo, et al. Subspace fitting DOA estimator fast algorithm by MIMO sonar [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(10):1964-1968. (in Chinese)
- [5] Hoang H V, Jeon J W. Signal compensation and extraction of high resolution position for sinusoidal magnetic encoders [A]. International Conference on Control Automation and Systems[C]. Seoul, South Korea: IEEE, 2007. 1368-1373.
- [6] Hoseinnezhad R, Bab-Hadiashar A, Harding P. Calibration of resolver sensors in Electromechanicalbraking systems: A modified recursive weighted least-squares approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1052-1060.
- [7] 苏理云,孙唤唤,李晨龙. 基于局域线性法和卡尔曼滤波的强混沌背景下正弦信号恢复的混合算法[J]. 电子学报,2017,45(4):837-843.
SU Li-yun, SUN Huan-huan, Li Chen-long. LL-P-KF hybrid algorithm for detecting and recovering sinusoidal signal in strong chaotic noise [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(4):837-843. (in Chinese)
- [8] Benammar M. A novel amplitude-to-phase converter for sine/cosine position transducers [J]. International Journal of Electronics, 2007, 94(4):353-365.
- [9] 左洋,龙科慧,刘兵,等. 非均匀采样光电编码器莫尔条纹信号分析方法[J]. 电子学报,2015, 43(10):1936-1940.
ZUO Yang, LONG Ke-hui, LIU Bing, et al. A method of analysis based on Morie fringe signals of optical encoder with non-uniform sampling [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10):1936-1940. (in Chinese)
- [10] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析 [J]. 光学精密工程,2012,20(2):379-386.
WANG Xian-jun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2):379-386. (in Chinese)
- [11] Chang Wei-Yao, Hsu Fan-His, Chen Kun-Huang, et al. Heterodyne moire surface profilometry [J]. Optics Express, 2014, 22(3):2845-2852.
- [12] Rilong Liu, Renxin Liu. Signal acquisition technology for photoelectric encoder based on FPGA [J]. Optik, 2016, 127(20):9891-9895.
- [13] Jiawei Yu, Qiang Wang, Guozhong Zhou, et al. Analysis of the subdivision errors of photoelectric angle encoders and improvement of the tracking precision of a telescope control system [J]. Sensors, 2018, 9(18):1-14.
- [14] Lin CB, Yan SH, Ding D, et al. Two-dimensional diagonal-based heterodyne grating interferometer with enhanced signal-to-noise ratio and ooptical subdivision [J]. Optical Engineering, 2018, 57(6):1-9.
- [15] Kovacs Peter, Fekete Andrea M. Nonlinear least-squares spline fitting with variable knots [J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 354:490-501.
- [16] Yeganeh Mohammad, Rasouli Saifollah. Moire fringes of higher-order harmonics versus higher-order moire patterns [J]. Applied Optics, 2018, 57(33):9777-9788.
- [17] Lin Cunbao, Yan Shuhua, Du Zhiguang, et al. High-efficiency gold-coated cross-grating for heterodyne grating interferometer with improved signal contrast and optical subdivision [J]. Optics Communications, 2015, 339:86-93.
- [18] 高旭. 莫尔条纹光电信号自动补偿技术研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
GAO Xu. Research on automatic compensation technique of Moire fringe photoelectric signal [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [19] Varun D, Mazumdar D, Kadambi GR. Second order compensation scheme for Haven's technique to annul amplitude and phase mismatch for quadrature circuits [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2019, 99(3):607-617.

作者简介



高 旭 (通信作者) 女, 1987 年 5 月生于黑龙江青冈县, 现任长春理工大学讲师, 硕士生导师. 主要研究领域为光电位移精密测量技术: 角位移、线位移测量及高精度分辨率光电轴角编码器的研制; 分布式光纤传感测震技术.
E-mail: gaox19870513@163.com



马庆林 男, 1995 年 8 月出生于黑龙江省龙江县, 现就读于长春理工大学硕士研究生. 主要研究领域为分布式光纤传感测震技术信号解调与处理.
E-mail: 1721868813@qq.com

高 阳 男, 1989 年 5 月出生于黑龙江省青冈县, 现就职于中石油西南油气田川中油气矿, 工程师. 主要研究领域为天然气开发与净化及其设备管理.
E-mail: gaoyang03@petrochina.com

李舒航 女, 1995 年 10 月出生于吉林省长春市, 现就读于长春理工大学硕士研究生. 主要研究领域为光电精密位移测量技术和光栅位移测量技术
E-mail: 306746976@qq.com