



ZPW-2000 移频信号检测实验仪的设计与实现

康耀军¹, 李建国^{2*}

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司 郑州设计院, 郑州 450007; 2. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

摘要: 依据周期测频法设计了以 FPGA 为核心器件的 ZPW-2000 移频信号检测实验仪。该实验仪采用 8 个计数器实现移频信息的检测, 其中, 边频检测采用 2 个计数器分别检测计数信号上下跳沿, 通过选择 2 组计数值中较大值, 使计数误差降低至 0-1 个计数信号周期, 在 200 MHz 计数信号下, 边频检测误差可控制在 0.07 Hz 以内; 低频检测采用 6 个异步计数器, 分别实现移频信号中低频成分的获取及低频频率的检测计算, 低频频率计数器通过设置前 N 个状态进行低频计数, 第 $N+1$ 个状态进行计数值锁存分析的方式, 有效降低了低频获取引起的误差。分析发现, 当 $N \geq 10$ 时, 最大误差可降至 0.029 Hz 以下。实验仪实测证明, 边频、低频检测误差均能满足铁道标准 TB/T 3532—2018 中移频信号上下边频误差 ± 0.15 Hz、低频误差 ± 0.03 Hz 的要求; 检测实验仪能准确解算出基于 FPGA 的 ZPW-2000 移频信号发码实验仪移频信息, 解决了 ZPW-2000 系列轨道电路移频信号教学及实验任务必须采用铁路专用设备的限制, 结合发码实验仪可为学生更直观地展示轨道电路发码与检测过程, 使学生更加深入地理解移频轨道的电路原理。

关键词: 检测仪; 移频信号; 轨道电路; 实验仪器

中图分类号: U284.28

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20220226](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20220226)

Design and Implementation of ZPW-2000 Frequency Shift Signal Coding and Detection Instrument

KANG Yaojun¹, LI Jianguo^{2*}

(1. Zhengzhou Design Institute, China Railway Engineering Design Consulting Group Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China;

2. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A signal detection experimental equipment using the ZPW-2000 frequency shift signal detection method is designed, which is based on the cycle frequency measurement method. The experimental track circuit frequency shift signal detection apparatus has an field programmable gate array(FPGA) at its core. The side frequency detection method uses two counters to detect the upper and lower jumping edges of the counting signal, and the counting error is reduced to 0-1 counting signal cycle by choosing the larger value of the two sets of counting values. The side frequency detection error can be controlled within 0.07 Hz under the counting signal of 200 MHz. The detection method uses eight counters to realize the detection of shifted frequency information. In order to achieve the acquisition of low-frequency components in the frequency-shifted signal as well as the detection and calculation of low-frequency frequency, the low-frequency detection employs six asynchronous counters, respectively. The experimental instrument measurement demonstrates that the side frequency and low-frequency detection error can meet the requirements of the railway standard TB/T 3532—2018 in the frequency shifted signal up and down the side frequency error of ± 0.15 Hz and low-frequency error of ± 0.03 Hz. The experimental instrument can accurately calculate the shifted frequency information, which is based on the FPGA ZPW-2000 frequency shifted signal generator. The experimental equipment breaks the limitations of specialized equipment in teaching and experiment, and help students better understand how track circuits are coded and detected.

Key words: detector; frequency shift signal; track circuit; experimental instrument

ZPW-2000 系列轨道电路为无绝缘轨道电路, 29.0 Hz, 以 1.1 Hz 间隔递增)代表不同的行车速度
采用自动闭塞制式^[1], 采用 18 个低频频率(10.3~ 控制列车运行, 为避免带通特性对低频信号的影

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2023-10-12

基金项目: 教育部 2021 年产学研合作协同育人项目(202101023013); 四电 BIM 工程与智能应用铁路行业重点实验室
开放基金课题项目(BIMKF-2021-06); 兰州交通大学 2022 年实验教改重点项目(2022005)。

作者简介: 康耀军(1996-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事铁路信号方面的工作。

* 通信作者: 李建国(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事交通信息控制工程和智能交通方面的研究。E-mail:

lijianguo@mail.lzjtu.cn

响^[2], 选用 8 个较高频率(1 701.4、1 698.7、2 001.4、1 998.7、2 301.4、2 298.7、2 601.4、2 598.7 Hz)作为中频信号, 以 11 Hz 为频偏, 按照相位连续频移键控方式^[3], 实现低频信息搬移到高频段并通过带限信道传输的目的。

要确定轨道电路移频信息必须对轨道电路中信号进行检测。检测参数主要有: 载频信号上边频(简称上边频)、载频信号下边频(简称下边频)、载频信号中频(简称中频)和低频频率^[4]。在移频信息检测分析方面, 文献[5]提出了利用小波变换对轨道移频信号进行分析和研究, 用不同的小波基对铁路移频信号进行了仿真, 结合快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法得到移频信号的有关参数。文献[6]依据锁相环数字解调原理和选频技术, 设计了由单片机控制的在线测试轨道电路参数测试仪。文献[7-8]针对 FFT 后有频谱泄露问题, 讨论了产生频谱泄露的本质原因, 采用频域内插算法求出了真实频率和其相邻离散频点的插值。

上述检测方法, 从理论和实践不同角度对移频信号的检测提取做了工作, 取得了一定成果。但采用现场可编程门阵列(FPGA)实现检测仪时, 算法复杂度越高, 功能实现难度越大, 为方便实现检测仪功能, 本文利用周期测频法设计了检测移频信号的方法。

周期测频法通过在给定的闸门信号中对周期性脉冲计数信号进行计数, 从而算出闸门信号的频率^[9-11]。因闸门信号与周期脉冲计数信号时钟不同步, 周期测频法存在 0~2 个计数脉冲误差^[12], 可采用锁相环倍频技术, 提高计数信号频率^[13], 以降低计数脉冲引来的误差。

文献[14-15]对移频信号的生成从软件和设备不同角度做了详细介绍, 本文在 Quartus II 平台编程实现了移频信号检测实验仪代码实验设计工作, 并利用文献[15]中发码实验仪作为信号源, 对基于 Altera FPGA 芯片 EP4CE10F 的 ZPW-2000 移频信号检测实验仪性能和精度进行了板载验证与测试分析。

1 检测方法设计

周期测频法以脉冲计数为基础, 将周期性脉冲计数信号 T_1 确定为一个频率较大的基准信号, 然后转换测量信号作为闸门信号, 在闸门时间

T_2 内记录基准脉冲频率的周期数目^[16-17], 其原理图如图 1 所示。

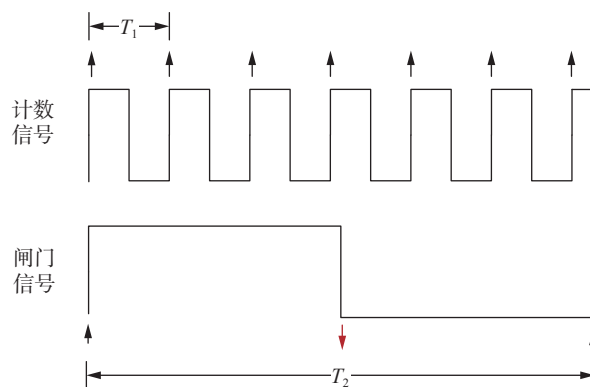


图 1 周期测频法原理图

用 N 表示计数值, T_1 表示计数信号周期, 则可计算测量信号频率为:

$$f_{T_2} = \frac{1}{T_1 N} \quad (1)$$

检测仪采用 7 个计数器异步计数, 实现上边频、下边频、中频以及低频频率的检测, 检测方法框架图如图 2 所示。

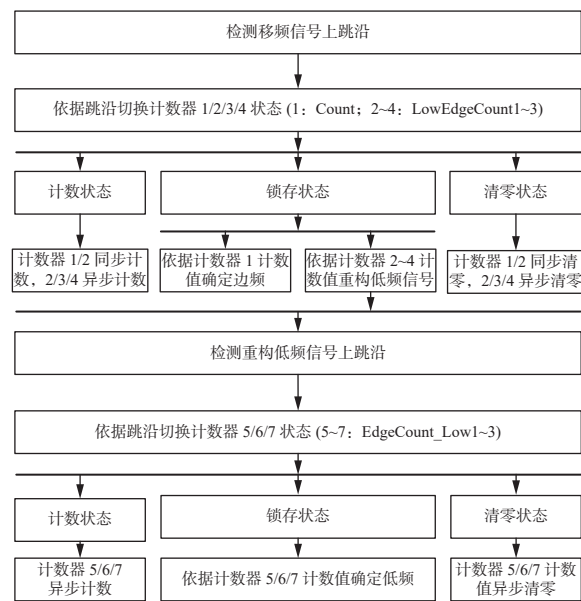


图 2 检测方法框架图

载频计算原理如图 3 所示。锁存计数值 Count 存在 3 种不同的值, 分别为上、下边频和边频切换计数值。所有计数值中, 下边频计数值最大, 依据该特点筛选最大计数值, 确定下边频频率值。上、下边频之间频率之差为 22 Hz, 且上边频计数值最小, 结合以上两特点确定上边频计数值, 完成上边频的计算, 中频可在确定上下边频后, 通过求均值的形式实现中频频率值的计算。

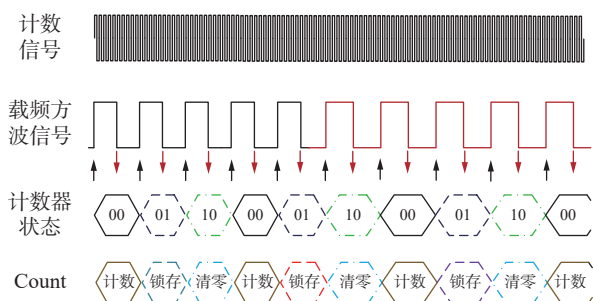
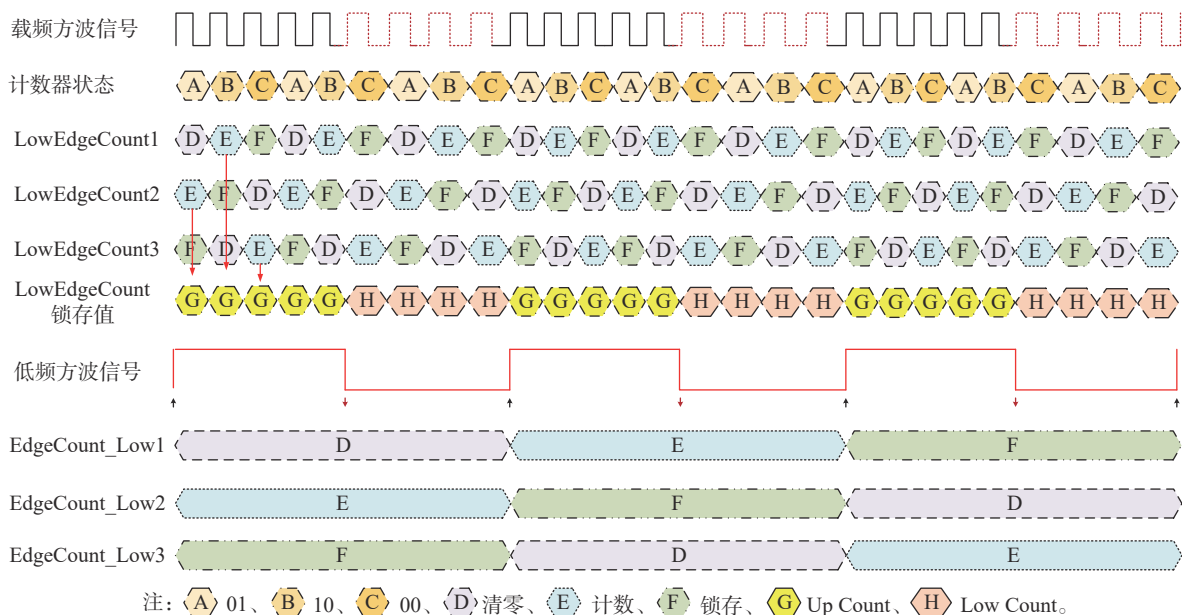


图3 载频计数器计数原理图

低频信号获取与计算原理图如图4所示, 为提高检测速率、降低检测误差, 低频方波信号

获取采用3个计数器异步计数方式实现计算, 通过分析3个载频方波信号计数值 LowEdgeCount1~EdgeCount_Low3 的大小判断低频方波信号高低电平切换时机, 当载频计数值大于中频计数值时, 将低频方波信号电平置为低电平, 其余计数值时, 将低频方波信号电平置为高电平, 通过该方式从移频信号中获取低频方波信号。对低频方波信号采用3个计数器(EdgeCount_Low1~EdgeCount_Low3)计数实现低频频率的计算。



注: (A) 01、(B) 10、(C) 00、(D) 清零、(E) 计数、(F) 锁存、(G) Up Count、(H) Low Count。

图4 低频获取及计数器计数原理图

2 方法可行性分析与改进

2.1 载频误差分析与方法改进

依据前述方法进行边频频率求解, 存在:

1) 闸门信号刚开始未检测到计数信号上跳沿, 待检测到上跳沿开始计数时, 已产生小于1个计数信号周期的误差;

2) 在闸门信号结束时, 闸门信号跳沿与计数信号跳沿不同步, 将产生小于1个计数信号周期的误差。两种误差现象如图5误差类型1、2所示。因此, 实现边频频率计算时, 计数器计数值存在小于2个计数信号周期的误差, 载频信号边频误差范围为:

$$0 \leq f_{\text{Error}} < \frac{1}{T_1 (\text{rounddown}(1/(f_{\text{SidFre}} T_1)) - 2)} - f_{\text{SidFre}} \quad (2)$$

式中: T_1 为计数信号周期, $\text{rounddown}(\cdot)$ 为向下取整算子, f_{SidFre} 理想边频频率。

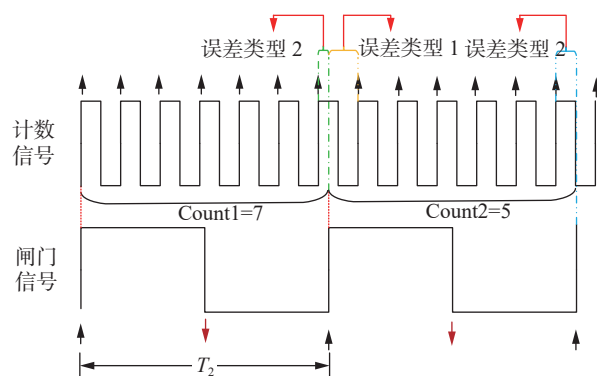


图5 载频计数器计数误差分析图

利用式(2)在计数信号频率分别为50、100、200 MHz时计算各边频值, 可见最大检测误差随着计数信号频率的增大逐渐减小, 当采用计数信

号频率为 200 MHz 时, 最大误差为 0.10 Hz。误差曲线图如图 6 所示。

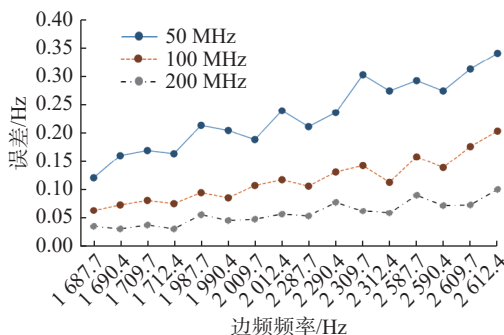


图 6 不同计数信号频率时各边频最大误差曲线图

因器件物理特性和工作稳定性限制, 计数信号频率不可能无限提升, 既无法实现也无必要, 需从算法设计上对检测仪误差进行改进, 以满足精度要求。

分析图 5, 在判断到闸门信号开启后, 只检测计数信号上跳沿时, 存在小于 2 个计数周期的计数误差。为提高检测精度, 将边频检测计数方式改为双计数器异步计数方式, 增加一个计数器(检测方法由 7 个计数器异步计数改为 8 个计数器异步计数), 在计数器闸门开启后, 2 个计数器分别检测计数信号上跳沿和下跳沿, 待闸门关闭后, 对比分析 2 个计数器中计数值的大小, 选择较大计数值作为当前闸门信号对应频率计数值, 该方法可以将计数误差由 0-2 个计数周期误差降低至 0-1 个计数信号周期。

改进前后 200 MHz 计数信号下, 误差对比图如图 7 所示。改进后检测误差有了显著降低, 检测误差控制在 0.07 Hz 以内, 检测精度有了进一步提高。

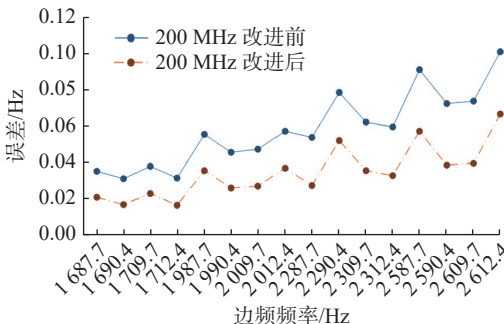


图 7 计数方式改进前后误差对比图

2.2 低频误差分析与方法改进

低频信号获取过程中, 存在:

1) 上、下边频过渡区锁存值 Count 使低频方波信号占空比不等于 50%;

2) 下、上边频过渡区锁存值 Count 引起小于一个下边频周期的误差。两种误差现象如图 8 所示, 其中误差类型 3 和 4 位于方波信号下跳沿处, 低频方波信号作为闸门信号时, 只需检测方波信号上跳沿, 误差类型 3 和 4 对低频频率计算不造成影响, 但误差类型 5 和 6 将严重影响低频信号频率的正确性。

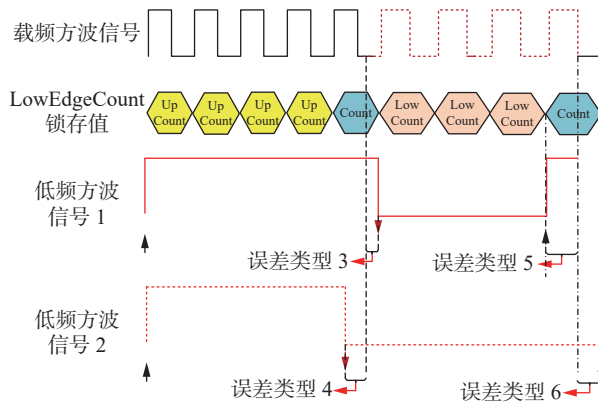


图 8 低频计数器误差分析图

综合上述分析, 低频频率计算公式有:

$$\begin{cases} f_{\text{LowError}} \geq \frac{1}{T_1 (N_{\text{Low}} + N_{\text{Sid}})} - f_{\text{LowFre}} \\ f_{\text{LowError}} \leq \frac{1}{T_1 (N_{\text{Low}} - N_{\text{Sid}} - 1)} - f_{\text{LowFre}} \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{\text{Low}} = \text{rounddown}(1/(f_{\text{LowFre}} T_1))$$

$$N_{\text{Sid}} = \text{rounddown}(1/(f_{\text{SidFre}} T_1))$$

式中: f_{LowFre} 为理想低频频率, T_1 为计数信号周期。

分析式(3), 当载频为 1700-2 时, 其理论误差最大, 各低频信号最大误差曲线图如图 9 所示。

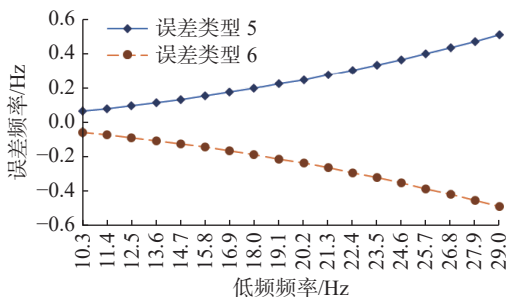


图 9 各低频在 1700-2 载频条件下最大误差曲线图

低频信号检测误差随低频逐渐增大而增大, 所有误差均大于 0.05 Hz, 不满足检测仪检测精度要求。为解决误差现象, 将低频计数器设置为 $N+2$ 个不同的状态, 前 N 个状态计数器 EdgeCount_Low1/2/3 进行异步计数, 第 $N+1$ 个状态进行计数值锁存, 并求均值得每一个低频方波信号计数值, 再根据计数值求得低频信号。

通过该方法可以将图9中误差类型5、6引起的误差均分至各个低频方波信号计数值中,使 N 个低频方波信号只引入一个误差类型5或误差类型6,有效降低低频误差,提高了低频检测精度。部分低频在1700-2载频条件下,不同 N 值低频检测最大误差曲线图如图10所示。

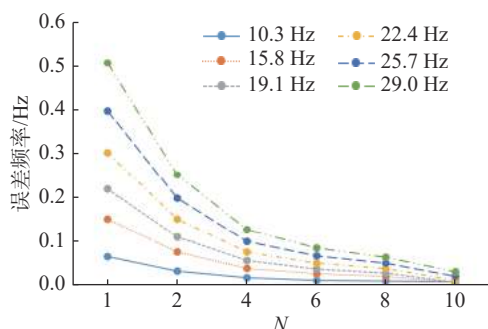


图10 改进后不同 N 值产生的最大误差曲线图

由图10可以看出,随着 N 值的不断增大,其最大误差值逐渐减小,当 $N=10$ 时,最大误差为0.029 Hz,满足铁道标准要求,实际设计中将 N 值确定为10。

3 检测仪设计与测试

3.1 检测仪设计总体方案

检测仪整体结构如图11所示。该检测仪硬件部分主要由ALTERA公司的Cyclone IV E系列芯

片EP4CE10F和ATK-4.3 RGBLCD触摸屏组成,电源采用5 V直流稳压电源。

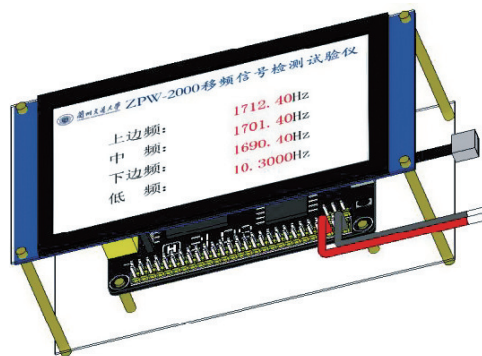


图11 ZPW-2000 移频信号检测仪整体结构

检测仪寄存器传输级(register-transfer level, RTL)原理图如图12所示,代码设计部分主要由移频信号频率计算模块、时钟模块、ATK-4.3 RGBLCD驱动显示模块、信号毛刺消除模块及二进制数转BCD码模块组成,核心模块为移频信号频率计算模块和时钟模块,其功能如下:

- 1) 移频信号频率计算模块主要完成8个计数器的计数以及移频信息频率的计算;
- 2) 时钟模块利用锁相环IP核提供各模块不同时钟频率,包括:200 MHz时钟信号用作计数信号、33.3 MHz时钟信号用于ATK-4.3 RGBLCD显示屏时钟。

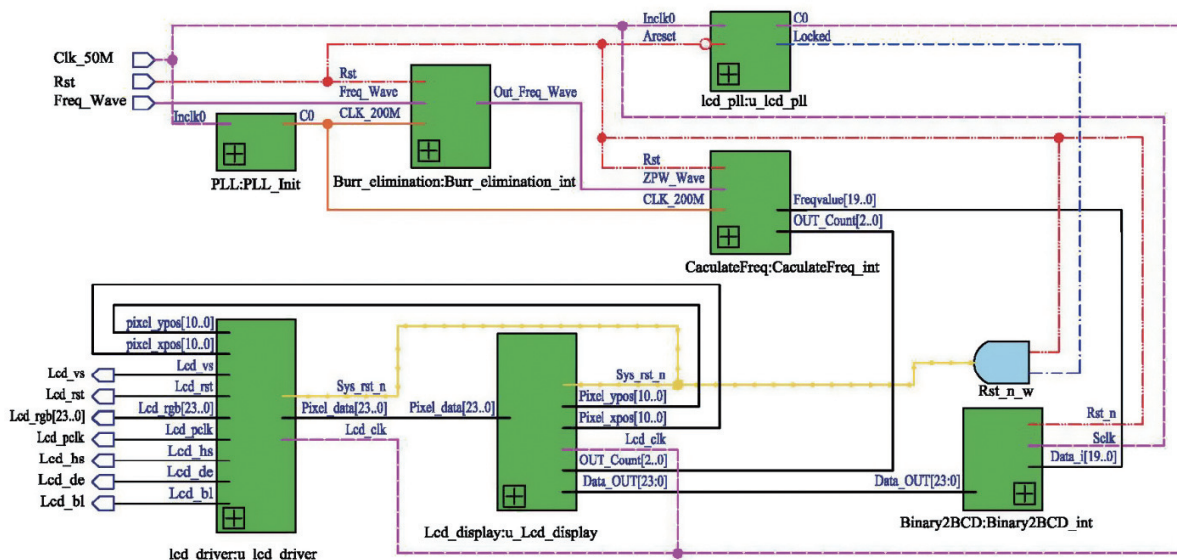


图12 ZPW-2000 移频信号检测仪寄存器传输级原理图

3.2 移频信号频率计算模块软件

移频信号频率检测计算模块采用8个计数器

异步计数,其中计数器状态设置采用寄存器的形式实现,状态设置通过检测输入移频信号上跳沿

进行计数, 状态值从 2'b0 开始, 当检测到移频信号上跳沿时, 状态值+1, 当状态值等于 2'b10 时, 状态值清零, 通过该方式实现 3 个不同状态, 采用两段式编程的状态值设置代码如下:

```
//-----判断 ZPW 信号上跳沿, 根据上跳沿计数-----//
reg [1:0] EdgeCount;
reg [1:0] EdgeCount_N;
always @ ( negedge RST_N or posedge
ZpwWave)
begin
if (!RST_N)
begin EdgeCount_N <= 2'b00; end
else
begin
if (EdgeCount == 2'b10)
begin EdgeCount_N <= 2'b0; end
else
begin
EdgeCount_N <= EdgeCount_N +
1'b1;
end
end
end
always @(*)
begin
EdgeCount <= EdgeCount_N;
end
//-----//
```

8 个计数器计数严格按照图 3 和图 4 中逻辑时

序进行计数操作, 其中计数值的使用按照计数器状态进行, 所有计数值均使用锁存状态的计数值。在确定各频率计数值后, 其频率计算按照式(1)进行, 为节约资源程序中所有除法操作均采用移位操作实现。

3.3 检测仪板载测试与分析

检测仪移频信号检测的准确性通过对同一信号测试结果与轨道电路综合测试仪(ME2000H)测试结果进行对照方式进行。

检测硬件环境如图 13 所示。图中信号源发送信号为: 载频 1700-1, 低频 10.3 Hz。本文设计检测仪检测结果为: 上边频 1712.44 Hz, 中频 1701.43 Hz, 下边频 1690.43 Hz, 低频 10.3055 Hz。检测仪测试结果与 ME2000H 测试结果在 ME-2000H 检测精度范围内相同, 但检测仪精度更高, 其中边频能够精确到小数点后 2 位, 低频能够精确到小数点后 4 位。ZPW-2000 所有移频信号检测结果如表 1 与表 2 所示, 检测仪检测结果符合误差分析结果。



图 13 检测仪检测验证硬件环境图

表 1 检测仪低频检测结果

理论频率/Hz	检测仪检测结果/Hz		ME2000H 检测值/Hz	理论频率/Hz	检测仪检测结果/Hz		ME2000H 检测值/Hz
	最小值	最大值			最小值	最大值	
10.3	10.2992	10.3055	10.30	11.4	11.3960	11.4037	11.39
12.5	12.4922	12.5013	12.49	13.6	13.5867	13.6006	13.60
14.7	14.6929	14.7056	14.70	15.8	15.7979	15.8112	15.81
16.9	16.8961	16.9128	16.91	18.0	17.9833	18.0002	18.00
19.1	19.0963	19.1118	19.10	20.2	20.1869	20.2008	20.19
21.3	21.2938	21.3201	21.31	22.4	22.3896	22.4102	22.39
23.5	23.4799	23.5012	23.51	24.6	24.5891	24.6213	24.60
25.7	25.6912	25.7009	25.70	26.8	26.7912	26.8209	26.79
27.9	27.8900	27.9290	27.89	29.0	28.9808	29.0246	29.00

表2 检测仪载频检测结果

载频类型	理论值/Hz	检测仪 检测结果 最大值/Hz	检测仪 检测结果 最小值/Hz	ME2000H 检测值/Hz
1700-1	1712.4	1712.44	1712.43	1712.4
	1701.4	1701.43	1701.40	1701.4
	1690.4	1690.43	1690.41	1690.4
1700-2	1709.7	1709.75	1709.73	1709.8
	1698.7	1687.71	1687.70	1698.7
	1687.7	1687.70	1687.69	1687.7
2000-1	2012.4	2012.39	2012.37	2012.3
	2001.4	2001.40	2001.39	2001.4
	1990.4	1990.41	1990.40	1990.4
2000-2	2009.7	2009.64	2009.62	2009.7
	1998.7	1998.71	1998.70	1998.7
	1987.7	1987.73	1987.72	1987.8
2300-1	2312.4	2312.45	2312.43	2312.3
	2301.4	2301.40	2301.39	2301.4
	2290.4	2290.42	2290.38	2290.5
2300-2	2309.7	2309.68	2309.65	2309.6
	2298.7	2298.71	2298.70	2298.8
	2287.7	2287.74	2287.68	2287.7
2600-1	2612.4	2612.43	2612.33	2612.5
	2601.4	2601.41	2601.40	2601.4
	2590.4	2590.42	2590.40	2590.4
2600-2	2609.7	2609.73	2609.60	2609.7
	2598.7	2598.72	2598.70	2598.8
	2587.7	2587.71	2587.71	2587.7

4 结束语

本文详细介绍了基于FPGA的ZPW-2000移频信号检测实验仪的设计与实现,实验仪能够准确地解算出ZPW-2000移频信号中移频信息,检测结果载频误差小于等于0.07 Hz、低频误差小于等于0.03 Hz。实验仪采用一片FPGA实现,设备具有体积较小、携带方便等特点,可用于轨道交通信号与控制专业课堂教学,使学生能够全面深刻地了解移频信号解码过程,同时降低ZPW-2000轨道电路模拟仿真实验平台建设的成本,对学生掌握ZPW-2000轨道电路理论知识具有重要意义,对科研及工程应用也有一定借鉴意义。

实验仪满足了教学要求,在实际工程实现时还需要考虑干扰处理能力与电磁兼容等技术要素。

参考文献

- [1] 刘小春,张蕾,刘三帅. ZPW-2000型移频信号检测技术研究[J]. 仪表技术与传感器, 2014(12): 114-117.
- [2] 刘安波. ZPW-2000型轨道电路频率干扰典型案例的分析与处理[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(S1): 16-20.
- [3] 冯庆胜,黄朋. ZPW-2000轨道电路移频信号调制解调优化方法的研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2018, 33(2): 72-77.
- [4] 黄春雷,禹建丽. ZPW-2000R轨道电路列车运行数据特征分析和识别方法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(S1): 90-94.
- [5] 孙刚,魏学业,程荫杭. 基于小波变换的铁路移频信号分析[J]. 铁道学报, 2000(2): 42-44.
- [6] 刘杰,姜德谭,姜华,等. 移频轨道电路参数测试仪的研制[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003(2): 29-32.
- [7] 樊文侠,孙景峰. 基于MATLAB轨道移频信号检测的仿真分析[J]. 西安工业大学学报, 2008(5): 475-478.
- [8] 樊文侠,马静. 频域内插算法的铁路移频键控信号分析及仿真[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(2): 136-141.
- [9] 周培孝,刘吕娜,严结实. 基于可编程芯片实现半周期精确测频及其在小水电站测频稳速中改造的应用[J]. 电气技术, 2019, 20(11): 77-81.
- [10] 任建新,于训全,何文娟. 基于软件算法的电子化高压脉冲轨道电路接收器的研究与实现[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2020, 29(3): 53-60.
- [11] 苟铭泽,崔少辉,魏保华. 一种优化周期测频法数字频率计的设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(23): 175-178.
- [12] 徐清,徐敏,王子旗. 测宽法在移频频率检测中应用[J]. 电子测量技术, 2001(1): 42-43.
- [13] 张俊涛,王帅. 基于FPGA与Qsys的宽带高精度频率计的设计与实现[J]. 陕西科技大学学报, 2018, 36(6): 163-169.
- [14] 李建国,康耀军,张鑫奎. ZPW-2000型移频信号原理性分析软件的设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(10): 138-143.
- [15] KANG Y J, LI J G, ZHANG Z G. Design and realization of experimental instrument for ZPW-2000 frequency-shift signal generator[C]//2021 IEEE 15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Nanjing: IEEE, 2021.
- [16] 朱明辉,司斌,张从霞,等. 一种基于FPGA的并行结构瞬时测频方法[J]. 测控技术, 2017, 36(5): 42-45.
- [17] 黎山峰,杨雷,孙建军. 基于Nios II的FPGA频率计设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2016(8): 105-108.

编辑 张俊