

基于等精度测量原理频率计的设计与实现

陈寿法,王中鹏

(浙江科技学院 信息与电子工程学院,杭州 310023)

摘要: 以单片机为核心控制器件,采用等精度同步测量技术,设计了具有量程自动切换功能的频率计。在阐述系统工作原理和构成的基础上,对系统的测量误差进行了分析。实际测量结果表明:该频率计可以实现对频率范围 0.1 Hz~30 MHz 的信号进行频率测量,测量精度在 0.01% 以内,且不随被测信号频率的变化而变化。

关键词: 频率测量;等精度;量程自动切换

中图分类号: TM935.13

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2014)06-0409-06

Design and implementation of frequency meter based on equal precision measuring principle

CHEN Shoufa, WANG Zhongpeng

(School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,
Hangzhou 310023, China)

Abstract: A frequency meter adopting microcontroller as the core control device was designed and implemented based on the equal precision synchronal measurement. On the basis of brief introduction and analysis of this system working principle, the measurement errors of the system were analyzed. The experimental results demonstrate that the designed frequency meter can realize the frequency measurement ranging from 0.1 Hz to 30 MHz. The measurement accuracy is kept below 0.01%, which is not changed with the measurable frequency.

Key words: frequency measurement; equal precision; automatic range switching

频率是电信号的基本特性之一,工程中很多物理量的测量,如速度测量、力的测量等,都可转化为频率测量。某些场合,电压测量通过 V/F 转换,也转化为频率测量。频率计在科研、教学中都是不可缺少的测量设备。频率的测量方法有模拟法和数字法,随着测量技术的发展,模拟法逐渐被数字法所替代,数字法同模拟法相比有明显的优势:测量范围宽、精度高、显示直观等^[1]。

收稿日期: 2014-07-14

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY13F05005)

作者简介: 陈寿法(1962—),男,浙江省德清人,高级工程师,硕士,主要从事电子技术、嵌入式系统等研究。

常用的数字频率测量方法有 2 种^[2]:一种是测频法,它的原理是在一定的时间间隔 T 内测出被测信号重复变化 N_x 次,则被测信号的频率 $F_x = \frac{N_x}{T}$;另一种方法是测周法,在被测信号的一个周期内,测出标准高频信号 F_s 的个数 N ,则被测信号频率 $F_x = \frac{F_s}{N}$ 。2 种方法的共同缺点是测量精度与被测信号的频率有关。测频法测量高频信号精度比较高,而测周法测量低频信号精度比较高。随着单片机技术的发展和单片机成本的降低,出现了以单片机为系统核心控件的频率测量仪^[3-5],为了提高系统的工作频率,也出现了将单片机与 CPLD(complex programmable logic device)、FPGA(field programmable gate array)相结合的系统方案^[6-8]。为满足对频率测量更高精度的要求,新的测量方法通过不断研究而实现^[9-10]。用等精度测量频率方法,电路实现简单,测量精度高,可满足大部分频率测量应用的要求。

本设计以单片机为核心控制器件,采用多周期同步测频方法,即等精度测频方法。在同步门电路设计中,考虑到了 D 触发器对信号的延时所带来的影响,提高了系统的测量精度。在 0.1 Hz~30 MHz 测量范围内,测量精度与被测信号的频率无关,真正实现了等精度测量,做到了量纲指示自动变换,小数点位置自动移位,实现了量程自动切换。

1 测频原理及误差分析

与传统的测频方法相比,等精度测频法的实际闸门时间不是固定的,而是被测信号周期的整数倍,即与被测信号同步。因此,消除了因不同步而对被测信号计数所存在的 ± 1 个字误差。等精度测频系统的测量精度与实际闸门宽度和标准信号的精度有关,而与被测信号的频率无关。其测量原理波形图如图 1 所示。

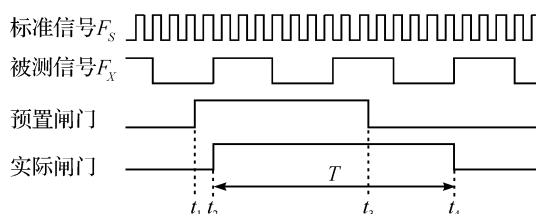


图 1 等精度频率测量原理波形图

Fig. 1 Waveform diagram of frequency measurement based on equal precision synchronal measurement

图 1 中,预置闸门时间为 $t_3 - t_1$,而实际闸门时间 $T = t_4 - t_2$ 。假定在实际闸门时间内对被测信号 F_x 的计数值为 N_x ,对标准信号 F_s 的计数值为 N_s 。则有:

$$\frac{N_x}{F_x} = \frac{N_s}{F_s}, F_x = \frac{N_x}{N_s} \times F_s \quad (1)$$

误差合成公式有:

$$\frac{\Delta F_x}{F_x} = \frac{\Delta N_x}{N_x} - \frac{\Delta N_s}{N_s} + \frac{\Delta F_s}{F_s} \quad (2)$$

式(2)中,第一项为被测信号引起的量化误差,由于实际闸门与被测信号同步,所以 $\Delta N_x = 0$,即消除了对被测信号计数所产生的 ± 1 个字的量化误差。实际闸门时间 T 不一定是标准信号周期的整数倍,实际闸门的启闭时刻对标准信号来说是随机的,即标准信号与闸门信号不相关,故对标准信号计数存在 ± 1 的误差,即 $\Delta N_s = \pm 1$ 。由此得到最大相对误差为:

$$\frac{\Delta F_x}{F_x} = \pm \left[\frac{1}{N_s} + \left| \frac{\Delta F_s}{F_s} \right| \right] \quad (3)$$

式(3)中, $N_s = T \times F_s$,式(3)说明频率测量的相对误差与被测信号的频率无关,其大小取决于闸门时间内对标准信号计数值和标准信号频率的相对误差。因而可以实现频带内的等精度测量,当合理选择闸门时间和标准信号时,既可保证测量精度,又有足够快的测量速度。

2 系统设计

频率计的设计目标是:对频率范围 $0.1\text{ Hz}\sim 30\text{ MHz}$ 的信号进行频率测量,量程自动切换,闸门时间对被测信号自适应,测量精度不随被测信号频率的变化而变化,测量精度在 0.01% 以内。测量结果用 6 位 LED 数码管和红、绿、黄 3 只发光二极管显示,其中 3 只发光二极管用于显示频率值的量纲指示。频率计构成框图如图 2 所示。

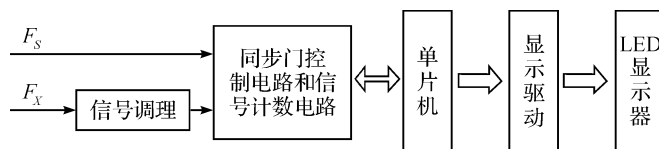


图 2 频率计系统框图

Fig. 2 System block diagram of frequency meter

2.1 系统硬件设计

系统硬件以单片机 STC15W404AS 为系统核心控制部件,由前端信号调理电路、同步门控制电路、计数电路、显示驱动电路及显示器组成,其中 STC15W404AS 单片机监控整个系统的运行、协调各部分工作,以及对数据进行计算处理。频率计完整原理图如图 3 所示, F_s 是频率为 12 MHz 、精度为 $\pm 20 \times 10^{-6}$ 的标准信号, F_x 为被测信号。

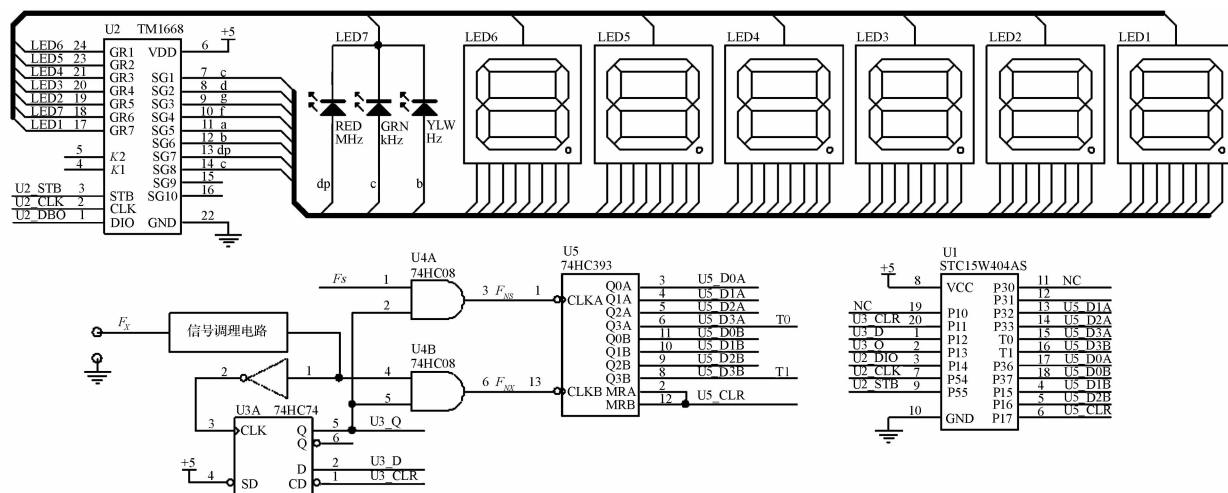


图 3 频率计原理图

Fig. 3 Schematic diagram of frequency meter

2.1.1 显示电路

显示电路由带 SPI 接口的数码管动态显示驱动器 TM1668 和数码管,以及红、绿、黄 3 只发光二极管构成,实现对测量结果的显示。红、绿、黄 3 只发光二极管在电路中组合一起由 TM1668 的一个位选信号驱动,用于指示显示频率值的量纲,红灯亮表示显示的频率值的单位为 MHz,绿灯亮表示显示的频率值的单位为 kHz,黄灯亮表示显示的频率值的单位为 Hz。数码管的显示亮度可由软件调节,测量值变化时高亮度显示,当测量值稳定一段时间后低亮度显示,省电。

2.1.2 信号调理电路

信号调理电路对被测信号进行放大、整形、电平匹配等处理。一方面要求处理后的信号为脉冲信号,电平为 TTL 电平,以便与后续的电路电平匹配;另一方面要求信号调理电路必须有高的输入阻抗,使测频时不影响被测电路的工作。

2.1.3 同步门控制电路

同步门控制电路由带预置端和清零端的上升沿触发的 D 触发器 U3、二输入与门 U4 及一个反相器构成。考虑到触发器对信号有延时,为避免产生误信号,选择被测信号的下降沿时刻去开启或关闭闸门信号。因为没有下降沿触发的 D 触发器,所以将被测信号反相后再加到 D 触发器的时钟端。

2.1.4 信号计数电路

单片机 STC15W404AS 内部有高精度的振荡器,工作频率选择 11.059 2 MHz,由于其一个时钟周期就是一个机器周期,因此,其内部计数器 T0、T1 能对频率不高于 5.529 6 MHz 的方波信号进行正确计数。实际选用 74HC393 芯片作外部计数器。它有 2 个独立的四位二进制加法计数器,分别对被测信号和标准信号进行计数,它们的计数输出再送入单片机内部计数器 T0、T1 计数,这样可以对被测信号准确计数的最高频率为 $5.529\ 6\ \text{MHz} \times 2^4 = 88.4\ \text{MHz}$ 的信号进行计数,满足频率测量最高 30 MHz 的要求。

系统的工作时序如图 4 所示。U5 的 A 组四位二进制加法计数器和单片机 T0(以下称计数器 A)对标准信号 F_S 计数。U5 的 B 组四位二进制加法计数器和单片机 T1(以下称计数器 B)对被测信号 F_X 计数。

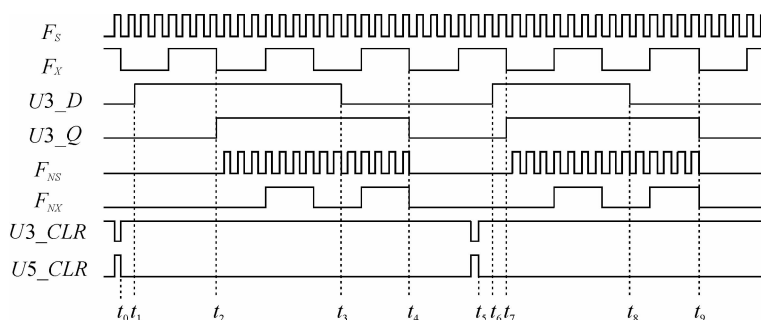


图 4 系统时序

Fig. 4 Timing diagram of system

计数器真正开始计数的时刻不是预置闸门的开始时刻 t_1 ,而是预置闸门打开后被测信号的第一个下降沿所触发的实际闸门的开始时刻 t_2 。同样,计数结束时刻不是预置闸门的关闭时刻 t_3 ,而是预置闸门关闭后被测信号的第一个下降沿所触发的实际闸门的关闭时刻 t_4 。当计数器 A 的计数值达到测量精度要求时,将预置闸门关闭(使 U3_D 为低),当下一个被测信号的下降沿到来时,实际闸门关闭。预置闸门时间为 $t_3 - t_1$,实际闸门时间为 $t_4 - t_2$,是被测信号 F_X 周期的整数倍,对被测信号计数没有 ± 1 误差。

F_{NS} 为标准信号在实际闸门时间内通过的信号,假定其计数值为 N_S 。 F_{NX} 为被测信号在实际闸门时间内通过的信号,假定其计数值为 N_X 。被测信号频率为:

$$F_X = \frac{N_X}{N_S} \times F_S \quad (4)$$

在预置信号变高前,必须先将 U5 的计数值清零(使 U5_CLR 变高),再将实际闸门 U3_Q 设为低(使 U3_CLR 变低),最后,将单片机内部计数器 T0、T1(包括溢出次数计数值)清零。

2.2 系统软件设计

系统的监控程序用汇编语言编写,流程图如图 5 所示。为了获得较高的测量精度,同时有较快的测量速度,当对频率为 12 MHz 标准信号 F_S 的计数值达到 2^{20} 时,使 U3_D 为低,等被测信号下一个下降沿到来时计数闸门关闭,接着读取对标准信号的计数值 N_S 和对被测信号的计数值 N_X ,经计算后得到被测信号的频率值。程序采用 6 字节浮点数计算,计算误差可忽略不计。

用 6 位数码管显示测量结果,量纲(即单位 MHz、kHz、Hz)自动变换,小数点位置自动移位,测量结果显示始终保持 6 位有效数字。图 6 为被测信号频率值计算及量程切换子程序的流程图。

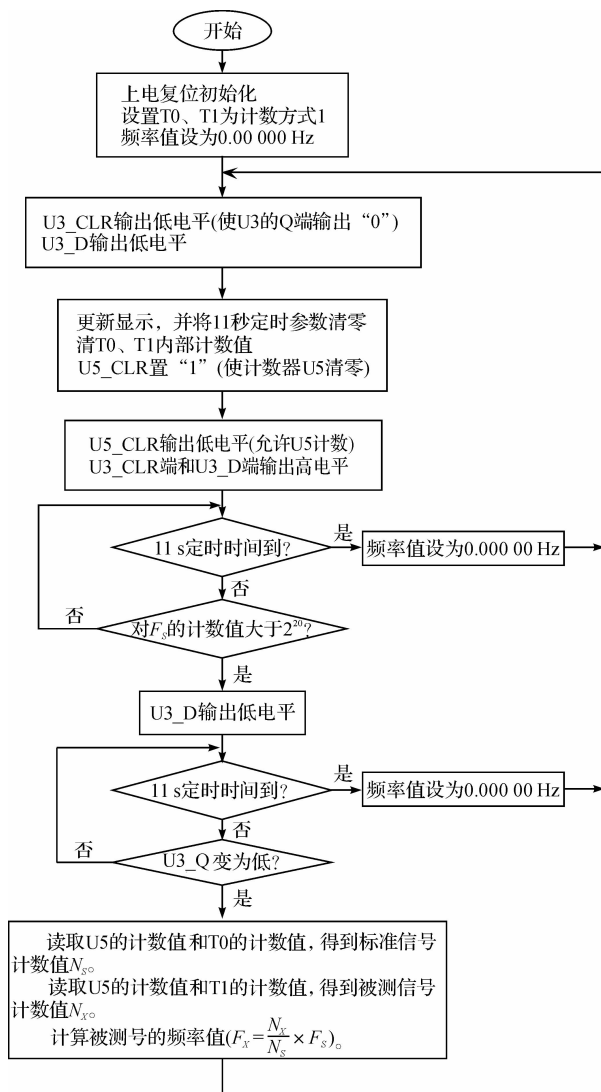


图5 主程序流程图

Fig. 5 Main program flow

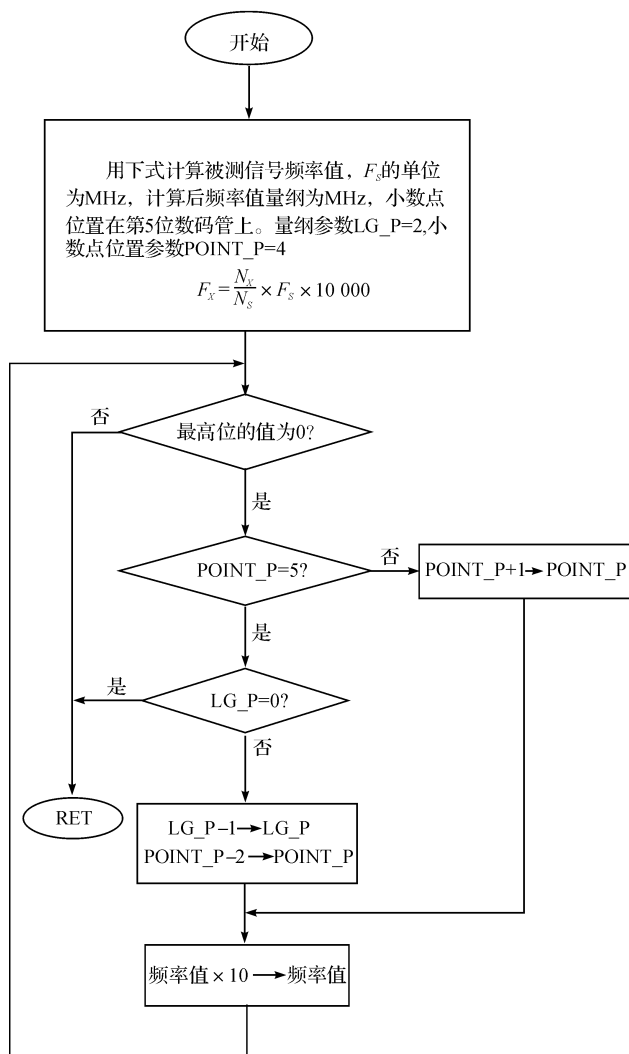


图6 被测信号频率值计算及量程切换子程序流程图

Fig. 6 Program flow of automatic range switching and calculation of frequency value

图6中, LG_P 为量纲参数, 其值为 $0 \sim 2$, 0 表示量纲为 Hz, 1 表示量纲为 kHz, 2 表示量纲为 MHz。POINT_P 为小数点位置参数, 其值为 $0 \sim 5$, 表示小数点位置在数码管的第 $1 \sim 6$ 位上, 数码管位置从右到左依次称为第 1 到第 6 位。

3 系统测试结果与误差分析

系统测试如图7所示。用 RIGOL 的 DG4062 信号发生器对频率计进行了测试, 具体测试数据如表1所示。

相对测量误差来源有两部分: 其一是 $\frac{1}{N_s}$, 这项数值大小与闸门时间和标准信号频率有关, 在闸门时间相同的情况下, 选择高的标准信号频率, 可减小该项误差; 其二是标准信号的相对误差 $\left| \frac{\Delta F_s}{F_s} \right|$ 。

由于闸门时间内对标准信号的计数值 N_s 大于 2^{20} , 对标准信号计数值 ± 1 个字误差导致的相对误差小于百万分之一。测量误差主要是由标准信号的相对误差导致

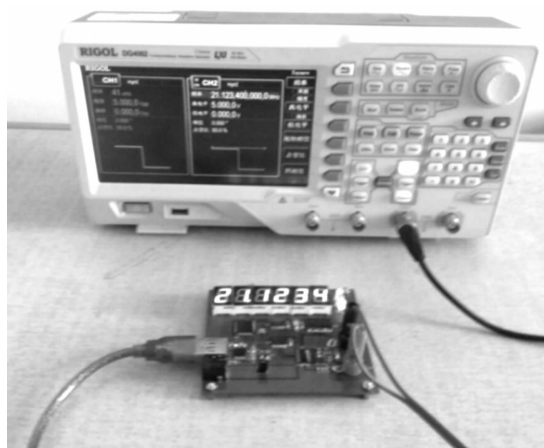


图7 系统测试

Fig. 7 System testing

的。表 1 中 e_1 是标准信号没有校正时测得频率值的相对误差, e_2 是标准信号校正后测得频率值的相对误差。标准信号经校正后, 其相对误差很小, 总的测量误差就很小。

表 1 测试数据

Table 1 Test results

被测信号 频率标准值	测量值 (标准信号未校正)	相对误差 $e_1/\%$	测量值 (标准信号已校正)	相对误差 $e_2/\%$
1.138 700 Hz	1.138 74 Hz	0.003 513	1.138 70 Hz	0.000
15.138 500 Hz	15.139 0 Hz	0.003 303	15.138 5 Hz	0.000
1.753 130 000 kHz	1.753 19 kHz	0.003 422	1.7531 3 kHz	0.000
98.687 200 000 kHz	98.690 7 kHz	0.003 547	98.687 2 kHz	0.000
815.503 000 000 kHz	815.532 kHz	0.003 556	815.503 kHz	0.000
2.215 630 000 00 MHz	2.215 71 MHz	0.003 611	2.215 63 MHz	0.000
9.719 630 000 00 MHz	9.7199 8 MHz	0.003 601	9.7196 3 MHz	0.000
13.469 800 000 0 MHz	13.470 3 MHz	0.003 712	13.469 8 MHz	0.000
20.149 600 000 0 MHz	20.150 3 MHz	0.003 474	20.149 6 MHz	0.000
30.000 000 000 0 MHz	30.001 1 MHz	0.003 667	30.000 0 MHz	0.000

从测试结果可以看出, 只要闸门时间足够长、标准信号精度足够高, 频率测量可以达到相当高的精度。当然, 闸门时间越长, 测量速度越慢。标准信号精度越高, 则成本越高。实际应用时应尽可能选择高的标准信号频率, 再根据实际测量精度和测量速度的要求, 选择合适的闸门时间和标准信号精度。

4 结 语

根据等精度频率计软硬件设计方案, 制作了等精度频率计样机并进行了测试。测试结果表明, 该系统对 0.1 Hz~30 MHz 的信号实现了等精度测量, 并且量程自动切换, 测试结果符合设计要求。该电路系统成本低, 电路简单, 性能可靠, 可应用在需要频率测量的仪器仪表中。

参考文献:

- [1] 吴文全, 束华. 基于单片机的多周期完全同步测频技术[J]. 电子技术应用, 2004, 30(4): 20-21, 24.
- [2] 郭海青. 电子计数法测频提高测量精度的分析[J]. 青海师范大学学报: 自然科学版, 2006, 22(1): 24-26, 31.
- [3] 钟飞, 姚建平, 张昌汉. 基于单片机的智能测频仪[J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(2): 1-3.
- [4] 黄涛, 王广德, 王立忠. 基于单片机的数字频率计设计[J]. 廊坊师范学院学报: 自然科学版, 2013, 13(6): 39-41.
- [5] 孔令荣. 基于 AT89C51 单片机的量程自切换频率计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(22): 168-170, 174.
- [6] 屈宝鹏, 张喜凤, 李想. 基于 VHDL 的高精度数字频率计的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2013, 36(18): 144-147.
- [7] 李国利, 刘旭明, 翟力欣. 基于 FPGA 与单片机的等精度频率计的设计[J]. 电子设计工程, 2013, 21(22): 171-173, 177.
- [8] 胡文静, 张国云, 刘翔, 等. 量程自整定高精度频率测量的 FPGA 实现[J]. 电子技术应用, 2012, 38(1): 73-76.
- [9] 刘娅, 李孝辉, 王文利, 等. 便携式精密频率测量设备研究及实现[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(1): 21-23.
- [10] 白丽娜, 周渭, 赵桀, 等. 一种和 DDS 结合的高分辨率频率计设计[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2012, 39(4): 126-130, 160.