

一种微调晶振频率的软件实现方法

刘 虹, 庞佑兵, 何开全, 李 科

(中国电子科技集团公司 第二十四研究所, 重庆 400060)

摘 要: 提出一种实用的基于软件和硬件相结合的晶振频率微调方法。该方法能够对晶振输出频率进行精确调节, 实现对系统晶振频率的在线校准, 无需拆卸系统硬件, 能够极大地提高频率校准的效率。该方法的频率校准精度较高, 由校准软件和硬件带来的误差可低至 1.5×10^{-13} , 能够满足大部分通信系统的使用要求, 可广泛用于通信、雷达、频率合成器等领域。

关键词: 晶振; 频率微调; 软件实现

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1004-3365(2014)05-0647-04

A Software Method for Calibrating Crystal Oscillator Frequency

LIU Hong, PANG Youbing, HE Kaiquan, LI Ke

(Sichuan Institute of Solid-State Circuits, China Electronics Technology Group Corp., Chongqing 400060, P. R. China)

Abstract: A usable, software and hardware based method of calibrating crystal frequency was introduced. The output frequency can be tuned exactly by this method, so that the system crystal frequency can be calibrated online without hardware disassemble. The method had improved the efficiency of frequency calibrating. The calibration system was very precise, calibration error caused by calibration software and hardware was 1.5×10^{-13} , which can satisfied most communication system. This method can be applied broadly in communication, radar, frequency synthesizer, and so on.

Key words: Crystal oscillator; Frequency calibration; Software implement

1 引 言

晶振是频率综合电路的核心元件, 是通信系统中的时钟基准。晶振的频率准确度决定了整个通信系统的时钟准确度, 对系统的正确通信起着决定性作用。目前的问题是晶振的输出频率会随着使用时间产生漂移, 为了满足使用要求, 必须定期对系统的晶振输出频率进行校准。目前采用的方法包括通过补偿电路在线自动调整和通过晶振的调谐端对输出频率进行手动调节^[1,2]。采用补偿电路的方法需要根据晶振的物理特性进行补偿, 电路复杂, 长期使用还是会面临频率漂移的情况。手动调节的方式一般采用电位器调节晶振的压控电压, 由于电位器长期可靠性不高, 在高可靠的应用场合, 手动调节往往不能满足要求, 有些场合也无法进行手动调节。本文

提出一种基于软件和硬件相结合的方法, 对输出频率进行调节, 能够实现对系统晶振频率的在线校准, 无需人工手动调节, 极大地提高了频率校准的效率。

2 系统性能要求及组成

系统由单片机、数控电位器、基准电压模块、串口通信模块和压控晶体振荡器等几部分组成, 其结构如图 1 所示。由于晶振是精密控制电路, 其输出频率与输入控制电压之间为线性关系, 故必须保证控制电压的精度, 才能保证输出频率的精度。本文采用基准电压源来获得高精度的基准电压, 并通过数控电位器对基准电压进行分压, 得到晶体振荡器的控制电压。系统接收来自串口的控制字, 根据控制字的内容对数控电位器进行控制, 产生相应的基准电压, 控制晶体振荡器产生相应的频率, 最终达到

收稿日期: 2013-08-30; 定稿日期: 2013-12-15

作者简介: 刘 虹(1981—), 男(汉族), 硕士研究生, 工程师, 主要从事频率综合电路设计和研究。

对晶体振荡器输出频率进行微调的目的。

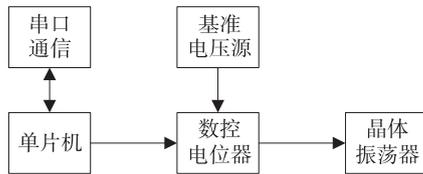


图1 系统结构图

本系统需要达到的性能指标为:输出频率标称值,20 MHz;输出频率精度, 5.0×10^{-8} ;压控范围, ± 5 Hz;压控步进, ≤ 0.125 Hz;控制电压, $0 \sim 3$ V。

2.1 单片机系统

单片机系统包括单片机和串口通信两部分,实现对外部控制命令的接收和处理,输出相应的数控电位器控制信号,实现对最终校准数据的保存。由于单片机为数字系统,工作时会产生较大的数字开关干扰,故在本设计中,单片机系统只参与控制字的接收、运算、控制等数字工作,并不直接参与模拟电压输出。实验证明,这种设计能够非常好地隔离数字电路干扰,使得模拟控制信号非常稳定,噪声非常低。根据项目需要,选择具有高速串口功能的接口,能满足高速近距离的通信需求。本系统采用了SiLabs公司的型号为C8051F330的单片机,利用单片机的在线编程功能,可以实现校准数据的非易失性存储,不需要增加额外的非易失性存储器,节约了系统的体积、成本和功耗。单片机集成了SPI总线,利用该总线能够完成对数控电位器的高速控制。

2.2 基准电压源

本系统要求达到极高的频率精度,因此控制电压带来的误差必须控制在更低的量级。本系统选择的晶体振荡器的频率精度为 2.0×10^{-8} ,压控范围为20 Hz,控制电压为 $0 \sim 5$ V,由此可知其压控灵敏度(K_V)为4 Hz/V。控制电压步进与频率控制精度的关系式为:

$$\Delta V_i = \Delta f / K_V \quad (1)$$

式中, ΔV_i 为控制电压步进, Δf 为频率控制精度。要达到0.125 Hz的频率控制精度,控制电压步进应为0.03125 V。输出频率与控制电压的关系式为:

$$f_{OUT} = K_V \times V_i \quad (2)$$

式中, f_{OUT} 为输出频率, V_i 为控制电压。

本系统选择的晶振的输出频率精度为 2.0×10^{-8} ,对应的频率误差为0.4 Hz。系统要求的最终输出频率误差为 5.0×10^{-8} ,对应的频率误差为1 Hz,留给系统校正电路的误差还有0.6 Hz。由(2)

式可知,0.6 Hz的频率误差对应压控电压变化为0.15 V,需要选择合适的基准源以满足要求。本方案中选择的基准电压源为ADI公司的ADR444,其输出电压标称值为4 V,温度系数为 $3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,在整个 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim +85 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境温度范围内电压变化值为1.5 mV。该值对应的频率变化为0.006 Hz,引起的相对频率误差为 3×10^{-10} ,该误差即为频率精度,能够满足系统要求。

2.3 数控电位器

控制压控晶振的电压数据由串口输入,需要将数据转换为模拟电压,以控制晶振输出频率。可以选择的方案包括DAC和数字电位器等。考虑到DAC可能带来数字噪声,本系统采用数字电位器直接对基准电压进行分压,由于数字电位器是电阻分压,不会引入数字干扰,能够对数字电路产生的干扰进行有效隔离。

本系统要求压控步进为0.125 Hz,0.125 Hz的频率变化对应的压控电压变化为31.25 mV。选用抽头数为128的数控电位器可以达到31.25 mV的电压分辨率。本系统选用MAXIM公司的型号为MAX5481的数控电位器,其总电阻为10 k Ω ,具有10位的控制精度,抽头数为1 024,能够达到约3.9 mV的控制电压精度,对应的频率控制精度为0.0156 Hz,满足0.125 Hz的要求。

图2所示为控制电压产生电路的原理图。 R_T 为数控电位器。 R_1 和 R_2 用于调整数控电位器输出电压范围,可使数控电位器输出电压正好满足晶体振荡器的控制要求。通过这一方法,数控电位器的10位控制位全部得到有效利用,提高了控制分辨率,有效降低了控制误差。

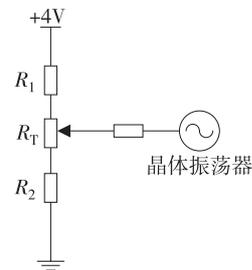


图2 控制电压产生电路

3 软件设计

系统的程序流程图如图3所示,包括主程序流程图和串口中断处理程序流程图。主程序上电初始化完成之后,输出存储在单片机内部Flash中的频

率控制字。串口中断处理程序在接收到有效校频指令之后,输出相应的数控电位器控制码,并将最新控制码存储在单片机内部 Flash 中。

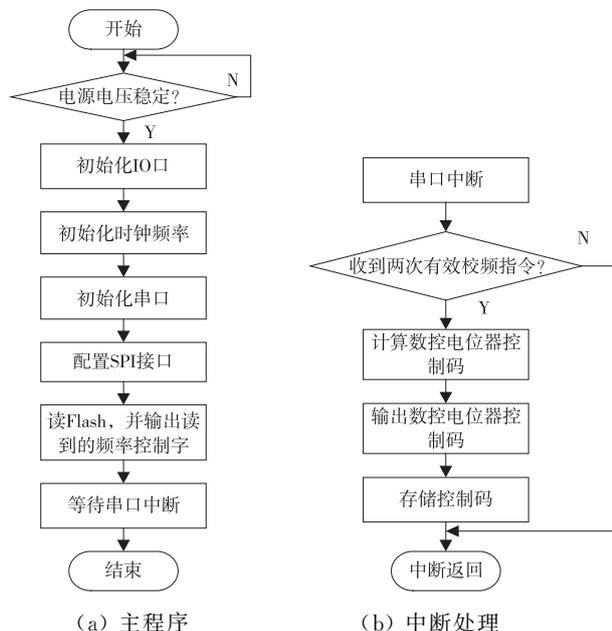


图 3 程序流程图

由于晶振输出影响整个系统的时钟,为了降低出错概率,提高程序的可靠性,在软件中设计了简单的容错处理。对输入控制命令进行二次判断,如果连续两次接收到相同的控制指令,则执行,否则不执行。实验证明,本方法能够有效减少程序误动作。

控制逻辑算法(串口中断部分)软件编码 C 语言描述如下:

```
void UART0(void) interrupt 4
{
    unsigned char temp;
    unsigned int buff_cal_dat;
    EA=0;
    temp= SBUF0; // 接收串口数据
    RI0 = 0;
    if(cal_data == temp) // 第二次收到相同数据
    {
        cal_data=0xFF;
        buff_cal_dat = ref_cal[temp]; WR_MAX5481
(buff_cal_dat);
        FLASH_PageErase(0x1BFE);
        FLASH_ByteWrite(0x1BFE,temp);
    }
    else
    cal_data=temp;
    EA=1;
}
```

4 误差分析

整个系统的误差包括控制字量化误差、基准电压源误差、数控电位器误差等三个误差源。由系统结构图与控制电压产生电路图可知,输出频率与各误差源的关系式为:

$$f_{OUT} = \frac{K_V \times V_{ref}}{R_1 + R_2 + R_T} \times \left(R_2 + \frac{R_T \times FTW}{1024} \right) \quad (3)$$

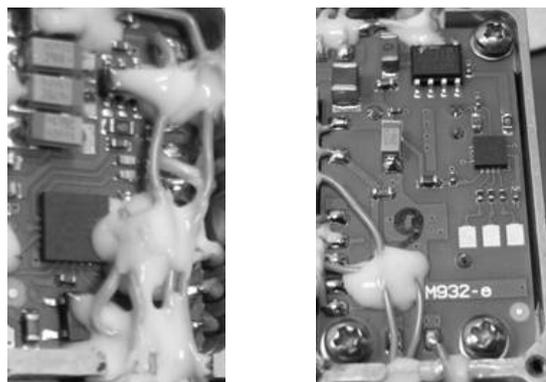
式中, V_{ref} 为基准电压源输出电压, FTW 为控制字, R_T 为数字电位器误差。

量化误差为 1, 基准源误差为 $3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 数控电位器的总电阻误差为 $3.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 比例误差为 $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

按照误差计算公式重写(3)式,可得:

$$\Delta f_{OUT} = \frac{K_V \times \Delta V_{ref}}{R_1 + R_2 + \Delta R_T} \times (R_2 + \Delta R'_T) \quad (4)$$

其中, $\Delta R'_T$ 为数控电位器比例误差。根据实际电路调试值,取 $R_1 = R_2 = 5.1 \text{ k}\Omega$, 在大多数情况下可满足使用要求。由各误差项的温度系数计算出校准系统在全温范围($-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim +85 \text{ }^\circ\text{C}$)内的误差,约为 $3 \times 10^{-6} \text{ Hz}$, 相对误差为 1.5×10^{-13} 。



(a) 单片机 (b) 晶振及控制电压产生电路

图 4 控制系统实物图

5 测试结果

按照图 1 系统结构图设计了实际电路。由于晶振以及控制电压产生电路为模拟电路,对噪声极其敏感,单片机为数字电路,工作期间容易干扰其他电路,故将整个电路分单片机、晶振及控制电压产生电路两部分进行布局。控制线采用高温导线进行连接,有效隔离单片机对晶振电路的干扰。单片机、晶振及控制电压产生电路实物图如图 4 所示。晶振为背面安装。按照图 3 所示的系统程序流程图编写了

控制软件,进行了三温测试,测试结果如表1所示。由测试结果可知,本系统的性能指标能够满足要求,并且,由于本系统的高低温误差和量化误差相对于晶振本身的误差而言非常小,对晶振的输出频率精度几乎没有影响。

表1 测试结果

参数	设计值	测试值
输出频率精度	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-8}
压控范围/Hz	± 5	± 5
压控步进/Hz	0.125	0.02
控制电压/V	0~3	0~3

6 结论

通过软件和硬件相结合的方式,给出了一种微调晶振频率的软件实现方法。重点对各单元电路关键参数的选择作了分析,给出了提高数控电位器分辨率的方法及其控制程序流程图。对系统的误差做了分析,微调精度达到了 1.5×10^{-13} 。晶振的频率精度一般为 10^{-9} 量级,微调精度可满足晶振频率校

准的需求,能够应用在各种通信系统中,满足在线频率校准的要求,具有较强的实用价值。目前该电路已经批量应用于某频率综合电路中,实现了晶振频率的在线调节。本方案可以推广应用到其他的需要精细调节电压的场合,因系统的噪声极低,尤其适合应用于对噪声要求较高的模拟电路中。

参考文献:

- [1] 徐维涛,郝晓弘,杨新华. 恒温晶振(OCXO)精密恒温箱温度控制电路分析[J]. 仪表技术与传感器, 2005, 8(8): 41-43.
- [2] 王佳斌,戴在平. 温补晶振的一种实现方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007, 4(4): 376-378.
- [3] 张迎新,雷文,姚静波. C8051F系列SOC单片机原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [4] 潘琢金,施国君. C8051Fxxx高速SOC单片机原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002.
- [5] 张国晨. 基于数字电位器的直流偏置技术[J]. 电子科技, 2011, 24(7): 10-15.
- [6] 陈富安,张莹. C8051F35X单片机内部Flash存储器的擦写方法[J]. 电子设计工程, 2010, 18(2): 105-106.

(上接第646页)

5 结论

本文提出了一种基于Buck拓扑双模控制功率管分段驱动电路。通过负载电流变化,优化功率管大小,从而提高转换效率,尤其在极轻负载下,系统自动切换至PSM控制模式,进一步提高了效率。整个电路基于标准的 $0.13 \mu\text{m}$ CMOS工艺进行设计与仿真,仿真结果表明,与传统不分段转换器相比,本文提出的双模控制分段驱动电路在15 mA负载时效率提升5.3%,并在轻负载下效率保持在70%以上。

参考文献:

- [1] TRESCASES O, NG W T, NISHIO H, et al. A

digitally controlled DC-DC converter module with a segmented output stage for optimized efficiency [C] // IEEE Int Symp Power Semiconductor Devices and IC's, Naples, Italy. 2006:1.

- [2] LUO M, LUO P, MO Yi-Kun. An adaptive segment output stage for PWM DC-DC converter[C] // IEEE 11th Int Conf Sol Sta Integr Circ Techn, Xi'an, China. 2012: 1-3.
- [3] 罗萍,李肇基,熊富贵,等. 开关变换器的跨周期调制模式[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(1): 984-988.
- [4] ERICKSON R W, MAKSIMOVIC D. Fundamentals of power electronics [M]. New York: Springer Press, 2001.
- [5] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计(修订版) [M]. 北京:电子工业出版社, 2004.