

一种脉宽调制的高稳定连续可调直流电压源

王 刚^{1,3}, 兰 江^{2,3}, 陈 乐¹, 李正坤³, 王 农⁴

(1. 中国计量学院, 浙江 杭州 310018; 2. 清华大学, 北京 100084;

3. 中国计量科学研究院, 北京 100013; 4. 河北大学质量技术监督学院, 河北 保定 071002)

摘要:介绍了一种以深埋齐纳电压基准元件 LTZ1000A 主电路为基础,结合脉宽调制技术实现的在 0 ~ 10 V 范围内连续可调的高稳定直流电压源。选用精密电阻并采用适当的保温与隔离措施,实现了电压基准主电路输出高稳定 7 V 电压,其短期稳定性达到 1.7×10^{-8} 。利用具有相同温度系数和阻值的精密电阻组成比例升压电阻网络,使输出 10 V 电压的短期稳定性为 2.4×10^{-8} 。同时利用脉宽调制并经 DC-DC 转换电路及滤波电路得到 0 ~ 10 V 的电压输出,短期稳定性可在 10^{-7} 量级左右。

关键词: 计量学; 直流电压源; 脉宽调制; 连续可调; 高稳定

中图分类号: TB971

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2014)02-0169-04

A Consecutively Adjustable and High Stable DC Voltage Source with PWM Chopped Modulator

WANG Gang^{1,3}, LAN Jiang^{2,3}, CHEN Le¹, LI Zheng-kun³, WANG Nong⁴

(1. China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China;

4. College of Quality and Supervisor Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract: A continuously adjustable high stable DC voltage reference based on subsurface Zener reference LTZ1000A is presented and PWM technique is adopted to output voltages between 0 ~ 10 V. With selecting high precise resistors and using appropriate measures to insulate and isolate, the short-time relative stability of 7 V output voltage provided by LTZ 1000 is 1.7×10^{-8} . The voltage of 10 V is increased up by a network, composed by high precise resistors with the same temperature coefficient, and its short-time relative stability is 2.4×10^{-8} . The voltage of 0 ~ 10 V generated by PWM technique and suitable DC-DC conversion-filter circuit are measured and the short term relative stabilities are about 10^{-7} .

Key words: Metrology; DC voltage source; PWM; Continuously adjustable; High stable

1 引 言

在数据转换器、线性稳压器、电压检测器等电路及精密测量仪表中,电压参考是不可缺少的重要部分,直接决定了整个系统的工作性能。然而,市场上能提供高精度、高稳定参考电压的器件大都为恒压输出,不能满足电路设计中连续可调电压的需求;而能提供连续输出电压的器件稳定性通常只有 10^{-5} 量级左右,不能满足对稳定性要求

高的需求。

针对上述要求,本文提出了一种以深埋齐纳电压基准元件 LTZ1000 A 主电路为基础,结合脉宽调制(PWM)技术实现的在 0 ~ 10 V^[1] 范围内连续可调的高稳定直流电压源,其主要技术特征为:

(1) 基准电路输出的 7 V 电压和升压网络输出的 10 V 电压,短期(0.5 h)相对标准差均达到 10^{-8} 量级。

(2) 可输出 0 ~ 10 V 连续可调电压,短期(0.5 h)相对标准差在 10^{-7} 左右。

收稿日期: 2012-02-22; 修回日期: 2013-12-23

作者简介:王刚(1988-),男,河南新乡人,中国计量学院研究生,从事精密电磁测量研究。wywanggang163@163.com

2 设计原理

使用电压基准芯片与优化匹配的外部电路、升压网络得到高稳定的 10 V 电压,在此基础上,本文采用 PWM 调制技术得到 0~10 V 连续可调电压,原理如下。

PWM 信号表达式为

$$f(t) = \begin{cases} V_H & kNT \leq t \leq nT + kNT \\ 0 & kNT - (N-n)T \leq t \leq kNT \end{cases} \quad (1)$$

式中, $V_H = 10$ V; T 为单片机 (micro-programmed control unit, MCU) 的机器周期; N 为 1 个周期内机器周期的总数; n 为高电平的机器周期总数。

其傅里叶级数的系数分别为

$$a_k = 2V_H \frac{n}{N} \frac{\sin k \frac{n}{N} 2\pi}{k \frac{n}{N} 2\pi}$$

$$= \begin{cases} 2V_H \frac{n}{N}, & k = 0 \\ 0, & k = \frac{1}{2} \frac{N}{n}, \frac{N}{n}, \frac{3}{2} \frac{N}{n}, \dots \\ \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$b_k = \frac{V_H}{k\pi} \left(1 - \cos 2\pi \frac{n}{N} k \right)$$

$$= \begin{cases} 2 \frac{V_H}{k\pi}, & k = \frac{1}{2} \frac{N}{n}, \frac{3}{2} \frac{N}{n}, \frac{5}{2} \frac{N}{n}, \dots \\ 0, & k = \frac{N}{n}, 2 \frac{N}{n}, 3 \frac{N}{n}, \dots \\ \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

可知,当 $k=0, \frac{1}{2} \frac{N}{n}, \frac{N}{n}, \frac{3}{2} \frac{N}{n}, 2 \frac{N}{n}, \dots$ 时,

$$f(t) = \frac{n}{N} V_H + 4 \frac{V_H}{\pi} \frac{n}{N} \sin\left(\frac{\pi}{nT} t\right) +$$

$$\frac{4}{3} \frac{V_H}{\pi} \frac{n}{N} \sin\left(\frac{3\pi}{nT} t\right) + \frac{4}{5} \frac{V_H}{\pi} \frac{n}{N} \sin\left(\frac{5\pi}{nT} t\right) +$$

$$\frac{4}{7} \frac{V_H}{\pi} \frac{n}{N} \sin\left(\frac{7\pi}{nT} t\right) + \dots \quad (4)$$

而当 k 为其他值时, $f(t)$ 中会有更多的正弦及余弦谐波分量。

如果滤除了所有的谐波分量与纹波,调节占空比 n/N ,理论上就可以得到 0~10 V 之间连续的电压。

3 设计方案

为得到 0~10 V 连续可调电压,设计的系统总体结构框图见图 1,主要包括直流恒压基准电路、升

压网络和调压电路 3 部分。

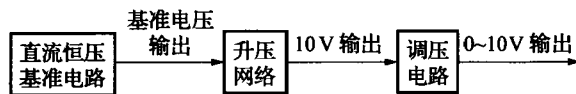


图1 直流电压参考系统框图

3.1 直流恒压基准电路的设计

直流恒压基准电路的关键部件是电压基准芯片,其有 3 个关键指标:温度漂移、低频噪声和年稳定性,而年稳定性是最重要的指标。市场上能直接输出 10 V 的电压基准芯片,如 VRE 100、AD587L 等,年稳定性均大于 10×10^{-6} ,噪声峰峰值均大于 3 μ V,而 LTZ1000A 年稳定性优于 1×10^{-6} ,噪声峰峰值仅 1.2 μ V^[2],输出典型值电压为 7.0~7.5 V,只要配以合理的外部电路就能得到 10 V 电压,并使输出电压具有优越的性能指标,故本系统采用 LTZ1000A 作为基准电压芯片。

为了得到稳定的输出,还应考虑 3 个方面的因素:(1)器件本身固有的 0.1~10 Hz 噪声对输出电压的影响;(2)散热不均匀及接触热电势对输出的影响;(3)图 2 所示外部电路中电阻稳定性对输出电压的影响,主要体现在工作电流由外部电阻 R_1 设定,运放输入正向端电压直接受 $R_2 \sim R_3$ 的影响,片内集成的温度传感器和加热丝则由电阻 R_4 与 R_5 的比值来设定等^[2]。

为此,首先挑选输出最为稳定的电压基准芯片 LTZ1000A 为主电路芯片^[3]。其次,为了尽可能减小接触热电势与气流的影响,设定 LTZ1000A 内部温度略高于外部环境温度,并做好保温处理与电磁隔离。最后,电路中的 $R_1 \sim R_5$ 等关键电阻优选了高精密度金属膜电阻器,其他电阻均采用了精密线绕电阻,运算放大器则优先选用了电流噪声、温度漂移和失调电压等参数均较小的 LT1013^[3,4]。

3.2 升压网络的设计

得到恒压基准后,需要电阻升压网络使其升至 10 V,为此可采用同一种类、同一批次、具有相同温度系数和阻值的高精密电阻组成的电阻网络来实现,其优点是电阻稳定性变化不会导致其在整个网络中的比例变化。

升压网络原理结构图见图 3,其中 $R_1 \sim R_{10}$ 为高精密度线绕电阻,具有相同的阻值和温度系数, R_7 处为 7 V 基准电压的输入端, R_{10} 处为 10 V 电压的输出端, R_{11} 为微调电阻,用来调节 10 V 输出电压的偏差。

3.3 调压电路的设计

根据设计原理,本文采用 PWM 技术对上节得

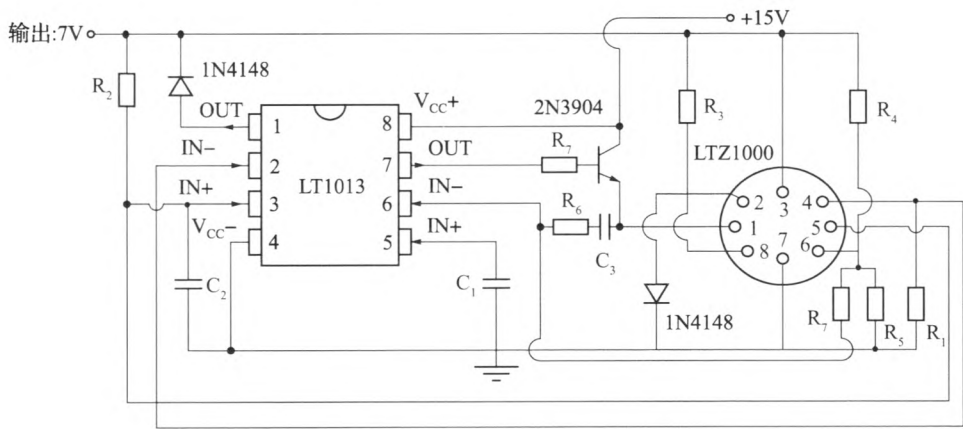


图 2 输出高稳定 7 V 电压的电路

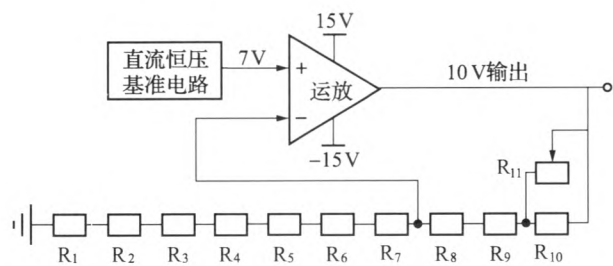


图 3 升压网络原理结构图

到的高稳定 10 V 电压进行调制来实现 0 ~ 10 V 电压连续可调输出。

(1) PWM 调制信号的产生

图 4 为 PWM 信号输出原理结构图,用两路相位相反的信号控制 2 个模拟开关。为了隔离 MCU 对模拟开关的高频串扰,在 MCU 与模拟开关之间采用了光隔离技术。

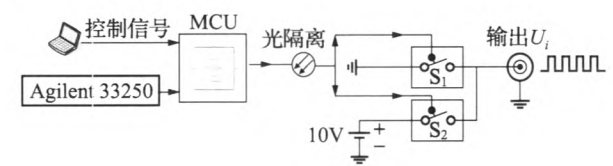


图 4 PWM 信号输出原理结构图

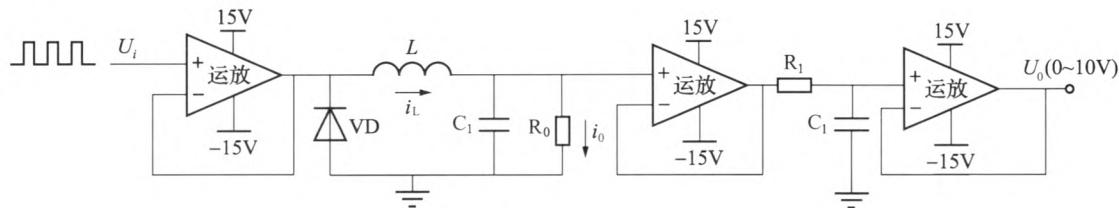


图 5 DC-DC 转换电路

为了使前后两级滤波器的阻抗相匹配,在两级之间用精密运算放大器作了隔离。为了降低系统的输出阻抗,提高驱动负载的能力,在 RC 滤波电路后

(2) DC-DC 转换电路

由设计原理可知,只有滤除 PWM 信号中的谐波和纹波,才能得到高稳定的电压。本文采用 DC-DC 转换电路来实现这一目的。

DC-DC 转换电路主要包含 LC 与 RC 的滤波电路,见图 5。实验证明只有 LC 滤波电路并不能把所有的纹波滤除,为了得到更好的输出特性,本文增加了一级 RC 低通滤波电路。而滤波电路的参数可根据式(4)中的一阶分量的频率来设计。

由于本系统是通过调节占空比 n/N 来控制电压输出,为了简化设计滤波电路,根据输出电压来调整 MCU 工作频率。为更好地滤除谐波分量,取 f_L 为 $2/f_1$ 的 $1/10 \sim 1/5$ ^[5],其中 f_1 为使输出最小分辨率电压 (V_H/N) 纹波最小的工作频率; f_L 为滤波器截止频率。另外,PWM 信号在滤波电路中会产生谐波电流,较大的电容会增大谐波电流,过大的电流会加剧电感和电容发热^[5],影响系统输出稳定性。如果两者的参数不匹配,还有可能发生谐振,对电路产生严重影响^[6]。选择参数时,应在不引起谐振的前提下,增大电感值。

加了跟随电路。

3.4 运算放大器的选择

运算放大器的性能是影响本系统输出稳定性的

重要因素之一,选用运算放大器时应重点考虑运放的失调电压及其漂移、噪声、共模抵制比等因素,根据文献[7]中的相关方法,综合各个因素本系统选用的运算放大器为 OPA177GP。

3.5 稳定直流供电的设计

为了给整个系统提供一个良好的供电环境,本系统采用蓄电池直流供电,经三端稳压芯片为后续电路提供电压,输出的 $\pm 15\text{ V}$ 电压温漂为 $1.8\text{ mV}/^\circ\text{C}$,噪声 $40\text{ }\mu\text{V}$,满足了后续电路对电压的需求。

3.6 数据采集

为更合理地考查系统的输出特性,且防止人为因素的干扰,采取了计算机 LABVIEW 程序控制 Agilent 3458A 型 8 位半数字电压表自动采集的方法记数,测量结果由计算机直接显示并记录下来。

4 测量结果

本文针对系统的 5 V 、 7 V 、 8 V 和 10 V 等电压进行测量,其中 7 V 为直流恒压基准电路输出的基准电压, 10 V 则是经升压网络输出的电压, 5 V 和 8 V 是由可调电路输出的电压,测量结果见图 6~图 9,测试结果的平均值及相对标准差见表 1。

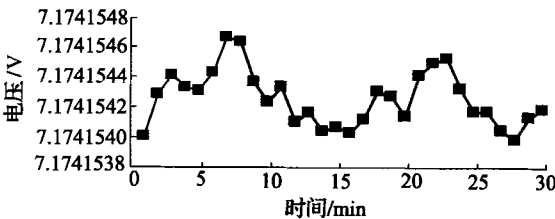


图 6 7 V 电压输出曲线图

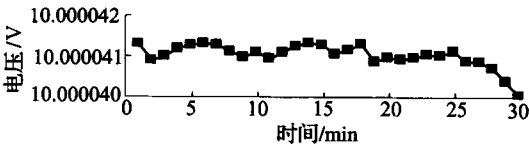


图 7 10 V 电压输出曲线图

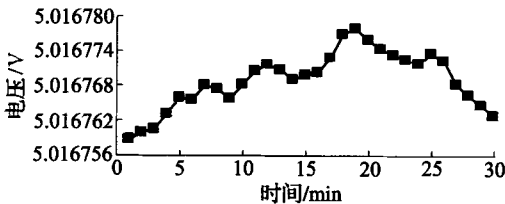


图 8 5 V 电压输出曲线图

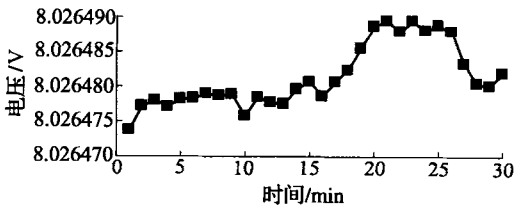


图 9 8 V 电压输出曲线图

表 1 所测电压平均值及相对标准差

电压/V	平均值/V	相对标准差
7	7.17415426	2.54×10^{-8}
10	10.00004102	2.78×10^{-8}
5	5.01676894	9.91×10^{-7}
8	8.02648136	5.75×10^{-7}

5 结 论

通过优选性能突出的外围器件与采用合理的电路结构,直流恒压基准电路输出的 7 V 电压短期稳定性为 1.7×10^{-8} ;通过升压网络得到 10 V 电压的短期稳定性可达 2.4×10^{-8} ;可调电路输出的 $0 \sim 10\text{ V}$ 连续可调电压的短期稳定性可达到 10^{-7} 量级,均满足了设计指标的要求。

在后续的研究中,拟设计电路以更有效地消除纹波和谐波信号且减小电路中有用信号的损耗,以进一步提高经脉宽调制输出电压的稳定性。

[参 考 文 献]

[1] 冯占岭,胡衍瑞,张力力. 10 伏电压标准及其量值传递[J]. 计量学报,1987,8(1): 42-45.

[2] Spreadbury P J. The Ultra-Zener-a portable replacement for the Weston cell[J]. Meas Sci Technol, 1990, 4: 687-690.

[3] Field B M. An improved transportable DC voltage standard[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 1989, 38(2): 324-329.

[4] 胡毅飞,周庚如,王路,等. 10V 直流电压标准研究[J]. 计量学报,1999,21(3): 205-208.

[5] 宋强,刘文华,严干贵,等. 大容量 PWM 电压源逆变器的 LC 滤波器设计[J]. 清华大学学报,2003, 43(3): 345-348.

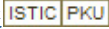
[6] 夏廷君. 有源电力滤波装置中 LC 滤波器改进设计的研究[D]. 长春: 哈尔滨理工大学,2010.

[7] 王农,韩冰,贺青,等. 普朗克常数 h 测定系统中磁场线圈稳流源研究[J]. 电测与仪表,2011,48(547): 1-6.

一种脉宽调制的高稳定连续可调直流电压源

作者: [王刚](#), [兰江](#), [陈乐](#), [李正坤](#), [王农](#), [WANG Gang](#), [LAN Jiang](#), [CHEN Le](#), [LI Zheng-kun](#),
[WANG Nong](#)

作者单位: [王刚, WANG Gang\(中国计量学院, 浙江杭州310018; 中国计量科学研究院, 北京100013\)](#), [兰江, LAN Jiang\(清华大学, 北京100084; 中国计量科学研究院, 北京100013\)](#), [陈乐, CHEN Le\(中国计量学院, 浙江杭州, 310018\)](#), [李正坤, LI Zheng-kun\(中国计量科学研究院, 北京, 100013\)](#), [王农, WANG Nong\(河北大学质量技术监督学院, 河北保定, 071002\)](#)

刊名: [计量学报](#) 

英文刊名: [Acta Metrologica Sinica](#)

年, 卷(期): 2014, 35(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jlxb98201402016.aspx