

高精度、宽输出高压直流电源控制模块的设计

孙晨晨, 张 强, 徐玮巍, 高 颂, 赵 华

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 针对经典的密立根油滴实验对直流电源的高精度、宽输出等要求,进行了高压直流电源中控制模块的硬软件设计. 采用了双 12 bit 数模转换并联构成 14 bit 数模转换的方法,在不增加成本的基础上,提高了控制电压的分辨率. 采用软件补偿的方法提高控制精度,将实际控制电压的最大误差由 0.12 V 改善到了 0.000 6 V. 实验结果表明,高压直流电源的输出范围为 $-1\ 200\sim 1\ 200\text{ V}$,精度为 $\pm 0.072\text{ V}$.

[关键词] 高压直流电源,控制模块,数模转换模块,软件修正

[中图分类号] TH711 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)03-0069-05

Design of Control Module for DC Power Supply with High Precision and Output Range of Voltage

Sun Chenchen, Zhang Qiang, Xu Weiwei, Gao Song, Zhao Hua

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: This paper completes the hardware and software design of the control module in the DC power supply with high precision and output range of voltage. This design uses a double 12-bit digital-to-analog conversion to form a 14-bit digital-to-analog conversion method, which improves the resolution of the control voltage without increasing the cost. In order to improve the actual control accuracy feature, the design uses software compensation method to improve actual control voltage maximum error from 0.12 V to 0.000 6 V. Through this design, DC power supply can achieve requirements of the output range of $-1\ 200\sim 1\ 200\text{ V}$ and the accuracy of $\pm 0.072\text{ V}$.

Key words: high voltage DC power system, control module, D/A conversion module, software correction

高精度电压源由于应用广泛,近年来引发了很多研究兴趣^[1-9]. 密立根油滴实验需要用到 $-500\sim 500\text{ V}$ 内连续可调且精度为 $\pm 0.1\text{ V}$ 的高压直流电源. 但在目前的电源市场上,大部分电源输出在 200 V 以内,而输出千伏以上的电源基本都是大功率、高价位的产品,能实现输出可调的高电压的电压产品更少. 这些高压电源很难满足密立根油滴实验等应用对于高压电源高精度、连续可调且安全易用的需求.

针对以上需求,本文提出了高压直流电源的整体设计,并且完成了控制模块的软硬件设计. 文中设计的控制模块输出电压范围为 $-10\sim 10\text{ V}$,精度为 $0.000\ 6\text{ V}$,经过 120 倍放大后可在 $-1\ 200\sim 1\ 200\text{ V}$ 的宽电压输出条件下达到 $\pm 0.072\text{ V}$ 的输出精度. 在设计控制模块中,文中设计了双 12 bit 数模转换(digital to analog conversion, D/A)模块并联实现 14 bit D/A 转换电路,在不增加成本的基础上,实现了高质量的 14 bit D/A 转换. 另一方面,由于通过实际测试发现实际输出的控制电压并不能完全达到理论输出的控制电压的精度,本文分析了实际输出控制电压与理论输出控制电压值的关系,采用了补偿算法提高实际控制精度,补偿后的控制模块的电压误差由 0.12 V 改善到 $0.000\ 6\text{ V}$,为实现高压直流电源输出电压精度达到 $\pm 0.072\text{ V}$ 创造了条件.

1 高压直流电源整体结构

本文设计的高压直流电源包含了移动控制端和高压直流电源输出端两部分,其设计框图如图 1 所示.

收稿日期:2017-11-06.

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目(18KJB510020)、国家重点研发计划地球观测与导航重点专项(2017YFB0503500)、教育部产学合作协同育人项目(201702084020,201702109082).

通讯联系人:赵华,博士,副教授,研究方向:智能仪器,信号处理. E-mail:zhaohua@njnu.edu.cn

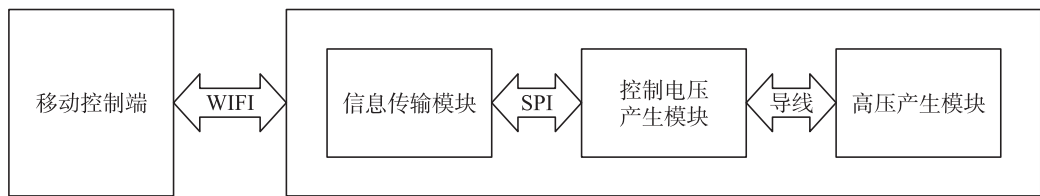


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Diagram of system structure

图 1 中,移动控制端是在移动终端上运行的应用程序,其功能是实现了人机交互、信息处理和信息传输,使得电源满足操作安全、易用的需求. 信息传输模块实现了信息传输和信息处理,同时也为电源功能的扩展创造条件. 控制电压产生模块根据移动控制端的控制指令输出对应的控制电压. 高压产生模块在控制电压作用下输出 $-1\ 200\sim 1\ 200\ \text{V}$ 电压. 其中控制电压和实际高压输出电压的关系,调节电路如图 2 所示.

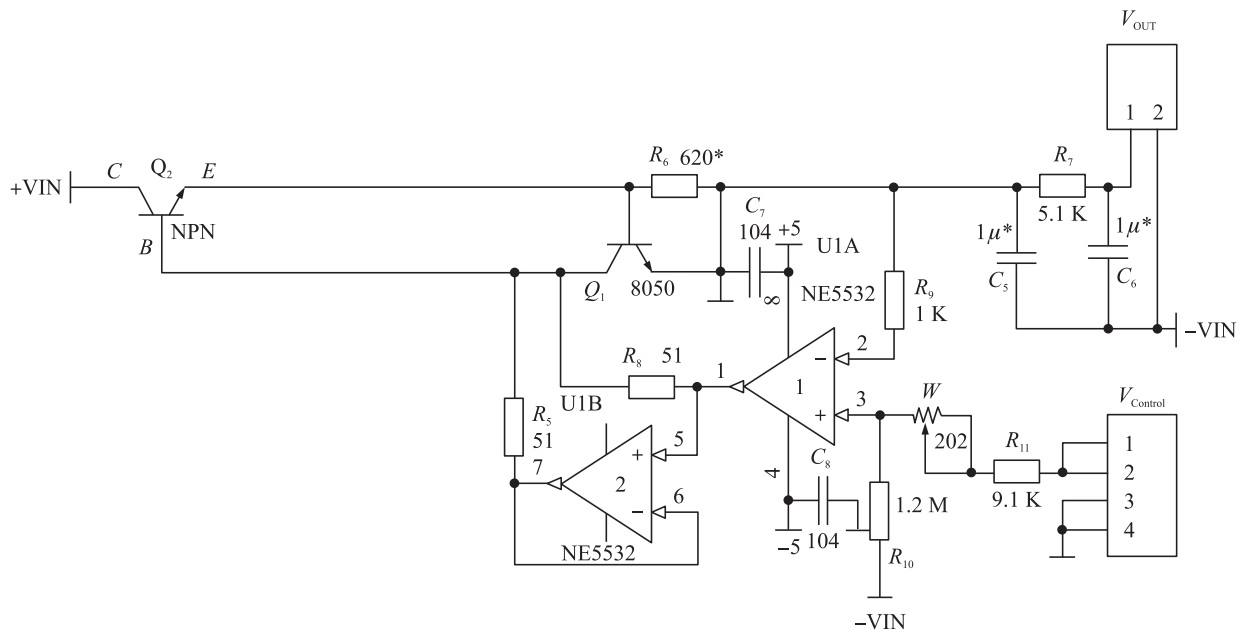


图 2 调节电路原理图

Fig. 2 Schematic of adjustment circuit

调节电路采用开关电源的设计方案,该部分根据控制模块的输出电压来调节电源输出的直流电压的公式可表示为:

$$V_{\text{OUT}} = V_{\text{Control}} \cdot R_{10} / (W + R_{11}). \quad (1)$$

式中, V_{OUT} 为高压直流电源的输出电压, V_{Control} 为控制电压. 根据设计要求, R_{10} 与 $W+R_{11}$ 的比值为 120,这样可以在 $-10\sim 10\ \text{V}$ 控制电压作用下获得 $-1\ 200\sim 1\ 200\ \text{V}$ 的高压输出. 注意上图中的滑动变阻器 W 的值在实际应用中需要进行调整,用来配合控制电压以提高高压直流电源的精度.

2 控制模块的设计

控制模块采用了 M452LG6AE 作为控制核心,通过 SPI 通信从信息转换模块获得相关参数,并且通过外围电路转换为相应的控制电压. 在控制模块的设计中,为了实现宽电压、高精度的高压直流电源,控制模块特别设计了低成本的 14 bit D/A 转换电路来提高控制电压的分辨率.

2.1 14 bit D/A 转换设计

根据设计要求,本设计使用的 D/A 转换芯片首先需要符合参考电压为 $\pm 10\ \text{V}$,并需要选用位数较高的 D/A 芯片以保障高压直流电源的精度. 由于 D/A 转换芯片的性能和芯片价格成正比,为了降低高压直流电源成本,同时能够获得更高分辨率的 D/A 转换模块,本设计采用了两个 12 bit 的 D/A 芯片,通过高精度的加法电路并联实现了 14 bit 的 D/A 转换,其原理如图 3 所示.

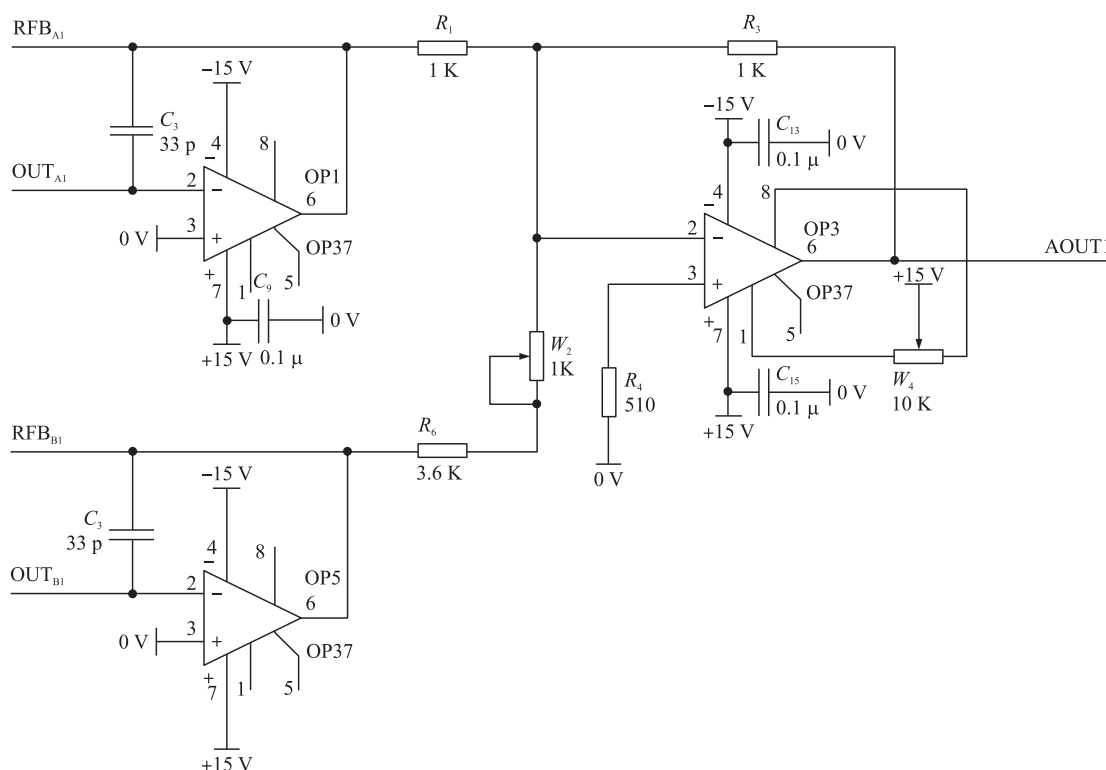


图3 并联 12 bit D/A 构成的 14 bit D/A 转换电路原理图

Fig. 3 Schematic of a 14 bit D/A conversion circuit based on parallel 12 bit D/A

为实现高精度的控制电压输出,本设计采用 OP37 作为加法电路的运放. 并联电路的设计思想是通过控制两块低精度的 D/A 转换芯片分别产生相应的电压,然后通过加法电路合并获得所需要的控制电压,转换公式如下:

$$V_0 = V_A 2^n + V_B = V_{REF} \left[\sum_{i=0}^a (D_{Ai} 2^i 2^n) + \sum_{i=0}^b (D_{Bi} \cdot 2^i) \right]. \quad (2)$$

式中, V_0 为输出的控制电压, V_A 为 A 块 D/A 转换芯片的电压值, V_B 为 B 块 D/A 转换芯片的电压值, V_{REF} 为 D/A 转换芯片的基准电压值, D_{Ai} 为 D/A 转换芯片的 A 通道数字量, D_{Bi} 为 D/A 转换芯片 B 通道数字量, a 和 b 均为 D/A 转换芯片数字量位数减 1. 根据原理图可知, 2^n 是由图 3 中电阻 $(R_6 + W_2)$ 与 R_1 的阻值比所决定. 根据以上公式,可以发现:乘以 2^n 相当于将 A 块 D/A 转换芯片的数字量向左平移 n 位,并且与 B 块 D/A 转换芯片的数字量组合可以构成具有更好精度的高数字量位数的 D/A 转换模块. 其中, A 块 D/A 转换芯片的高位部分数字量作为合成后 D/A 转换模块数字量的高位部分, B 块 D/A 转换芯片的数字量作为合成后 D/A 转换模块数字量的低位部分.

在本设计中, 12 bit D/A 转换芯片采用 LTC1590CS, 该芯片的参考电压为 ± 10 V, 其本身还是一个双通道 D/A 转换芯片, 每个通道的数字量位数均为 12 bit, 可以实现对两个通道进行同时操作. 在本设计中, 要求控制电压的精度达到 ± 0.6 mV. 计算可知, D/A 转换模块的数字量位数的要求为 14 bit. 因此, 本设计将 $(R_6 + W_1)$ 与 R_1 的比值设置为 4, 即相当于将 LTC1590CS 中芯片 A 通道高 2 bit 与 B 通道低 12 bit 通过加法电路组合成一个 14 bit D/A 转换模块.

根据上述内容完成了对 14 bit D/A 电路的制作, 并且通过对输出电压值参数进行硬编码来控制电路输出对应的控制电压值, 获得如图 4 所示的结果. 由图 4 可见, 理论控制电压与实际控制电压基本符合, 上述电路达到了设计要求.

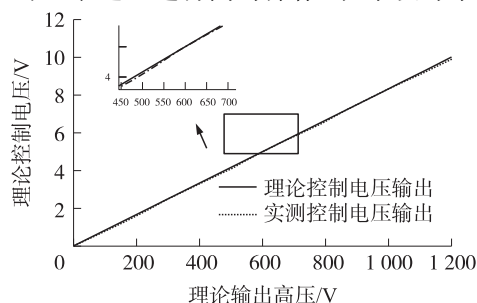


图4 理论控制电压与实际控制电压关系

Fig. 4 The relationship between the theoretical control voltage and the actual control voltage

2.2 软件补偿设计

控制电压模块的软件设计中,主要部分是将移动控制端界面中输入的电压值转换为对应的控制电压的数字量. 根据设计要求,控制电压的 0~10 V 控制直流高压的 0~1 200 V, -10~0 V 控制直流高压的 -1 200~0 V. 本文以正电压部分为例进行讨论.

根据控制电压模块的硬件设计,其理论公式:

$$D = 2^{14} (V_i / 1\ 200). \quad (3)$$

式中, D 为 D/A 转换模块所需要的数字量, V_i 为移动控制端界面输入的电压值. 但是根据式(2)计算得到的数字量 D 不一定都恰好整数,而且在实际的硬件电路中,元器件受到制作工艺、温度等因素的影响而产生误差,从而导致实际输出的控制电压差存在一定误差.

在本设计中采用了双通道 D/A 转换芯片,因此在获得相应的数字量后,需要将数字量的高 2 bit 赋值给 A 通道数字量的高 2 bit,其余位需要设置为 0,同时将低 12 bit 赋值给 B 通道的数字量. 本设计中将需要输出的正电压部分分为 4 部分,设置当高 2 bit 00 时,表示输出电压值在 0~300 V 的范围内. 当高 2 bit 01 时,表示输出电压值在 301~600 V 的范围内. 当高 2 bit 10 时,表示输出电压值在 601~900 V 的范围内. 当高 2 bit 11 时,表示输出电压值在 901~1 200 V 的范围内. 根据以上分配方法也将控制电压均分为 4 部分.

通过使用以上方法,我们在 0~1 200 V 之间,以 100 V 为步进,测试了 13 个点,得到如图 5 所示理论输出高压和控制电压偏差值的关系.

图 5 中,输出的控制电压实际值和理论值之间存在 0~0.12 V 的误差,为降低误差,文中的设计根据分段函数将电压差值从模拟值转换数字量,并且取反后补偿到原有的函数上. 如图 6 所示,在第一次补偿之后,在 0~200 V 理论高压输出部分能够得到很好的误差补偿,但其它部分的控制电压仍然存在较大的误差. 误差较大部分在经过多次补偿后,结果如图 7 所示,除了由于并联转换电路引起的失调电压,即在 300 V, 600 V 和 900 V 这 3 个点上仍然存在较大误差外,其他控制电压的误差基本上都能够被控制在 ± 0.6 mV 以内,证明软件部分控制电压的补偿起到了很好的作用.

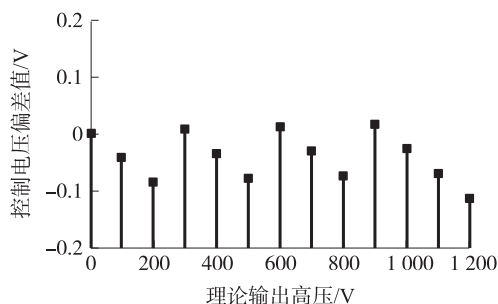


图 5 理论高压输出电压值与电压差值关系

Fig. 5 The relationship between the theoretical high voltage output voltage value and the voltage difference

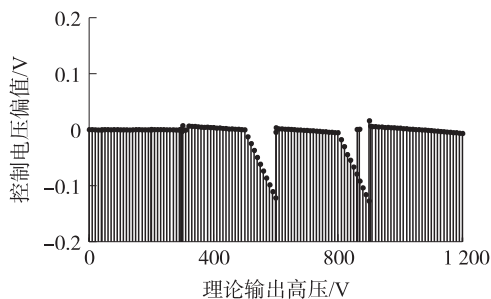


图 6 第一次补偿后数据结果

Fig. 6 Results after the first compensation

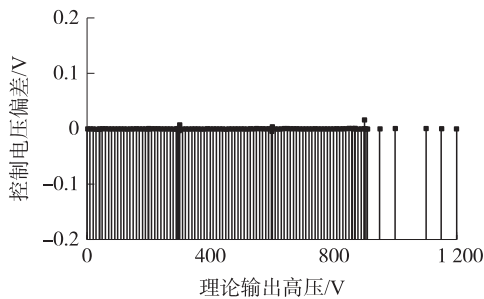


图 7 多次补偿后数据结果

Fig. 7 Results after repeatedly compensated

3 结语

针对密里根油滴实验对高压直流电源的需求,本文提出高精度、高压直流电源控制模块的设计方案,通过硬件设计和软件补偿达到了控制精度的要求,同时在该控制模块的基础上,提出了整个高压直流电源的设计方案.

在控制模块的设计中,采用了双 12 bit D/A 并联构成的 14 bit D/A 的电路设计方案,在控制设备成本的同时,提高了设备输出的分辨率. 而且在此基础上,又通过软件补偿的方法,提高该控制模块实际输出电压的精度. 该设计方案不仅可以为经典的密立根油滴实验提供一个可调高精度高压直流电源,还可以推广到其他高精度高压电路设计中.

[参考文献] (References)

- [1] 储开斌,宋长加,陈树越. 高精度连续可调高压开关电源的设计[J]. 信息安全与网络安全,2012,31(12):27-29.
CHU K B,SONG C J,CHEN S Y. The design of high precision continuous adjustable voltage switch power supply[J]. Information technology and network security,2012,31(12):27-29.(in Chinese)
- [2] 刘润. 基于 STM32 精密程控电压源系统的设计与实现[D]. 苏州:苏州大学,2013.
LIU R. STM32 precision programmable voltage source system based research and design[D]. Suzhou:Soochow University, 2013.(in Chinese)
- [3] 周松斌,林创鲁,刘洋,等. 一种高精度可调标准电压源的设计[J]. 自动化与信息工程,2012,19(2):26-29.
ZHOU S B,LIN C L,LIU Y,et al. A high accuracy adjustable standard voltage reference[J]. Automation and information engineering,2012,19(2):26-29.(in Chinese)
- [4] 乐千恺,徐静. 高精程控电压源设计与实现[J]. 现代电子技术,2008,15(12):25-26.
LE Q K,XU J. Design and implementation of high precision programmable power supply[J]. Modern electronics technique, 2008,15(12):25-26.(in Chinese)
- [5] 王蓉. 高频高压开关电源的设计[D]. 南昌:南昌大学,2008.
WANG R. The design of high-frequency and high-voltage switching power supply[D]. Nanchang:Nanchang University,2008. (in Chinese)
- [6] 孙丽飞,王法能,王宽仁,等. 0~50 V 高精度、可编程直流精密电压源[J]. 仪器仪表用户,2006,13(4):54-55.
SUN L F,WANG F N,WANG K R,et al. 0~50 V high precision resolution, programmable voltage source[J]. Electronic instrumentation customers,2006,13(4):54-55.(in Chinese)
- [7] 孟繁荣. 高压开关电源设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
MENG F R. Design of high voltage switch power supply[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2006.(in Chinese)
- [8] 张文利. 高压大功率开关电源技术的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2003.
ZHANG W L. Investigation on switching power supply with high voltage and high power[D]. Beijing:Graduate University of Chinese Academy of Sciences,2003.(in Chinese)
- [9] 牟晓磊. 5 kV 高压开关电源的设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2014.
MOU X L. The design of 5 kV high voltage switch power supply[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2014.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]