DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.02.053

六级杆离子传输系统射频电源控制设计

任标^{*},张超凡^{*},贺飞耀^b,赵世平^{*} (四川大学 a. 制造科学与工程学院; b. 生命科学学院,四川 成都 610065)

摘 要:设计一种基于 AB 类推挽功放原理的射频线性电源,可调频率为 1~6 MHz, 电压≥900 V。由 ARM 控制器通过检波电路检测输出峰峰值构成闭环控制来稳定输出电压。 通过串口设定输出频率、电压以及实时显示电压。实验测得 1.420 MHz、3.086 MHz 和 5.347 MHz输出电压分别为 2 020 V、1 960 V 和 928 V;在 3.094 MHz 测得电压和频率稳定性分 别为 0.44%和 0.096%。该电源已用于质谱仪射频六级杆离子传输且运行稳定。
关键词:射频线性功放;射频电源;射频六级杆
中图分类号:TM919 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2020)02-0221-04

Development of Radio Frequency Power Supply Control for Hexapole Ion-guide System

REN Biao^a, ZHANG Chaofan^a, HE Feiyao^b, ZHAO Shiping^a

(a. College of Manufacturing Science & Engineering and

b. College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A radio frequency linear power supply based on the principle of class AB push-pull power amplifier is developed. Its adjustable frequency range is 1~6 MHz, and its output RF voltage is not less than 900V. The ARM controller is used to detect the output peak-to-peak value, and formed a closed-loop control to stabilize the output voltage. The output frequency, voltage, and real-time display voltage are set via the serial port. When the resonant frequencies are at 1.420 MHz, 3.086 MHz and 5.347 MHz, the output voltage peak-to-peak values with the opposite phases are 2 020 V, 1 960 V and 928 V, which meet the voltage and frequency requirements of the RF hexapole ion-guide. The measured voltage and frequency stability at 3.094 MHz are 0.44% and 0.096%, respectively. This RF power supply is stable, it can be used for the RF hexapole ion-guide.

Keywords: RF linear power amplifier; RF power supply; RF hexapole ion-guide

0 引言

质谱仪具有高灵敏度、快速、微量和可靠等优点,在生 命科学、食品安全和环境检测等领域应用广泛[1-4]。在质 谱仪器中,多级杆离子传输是较为成熟的技术,其中包括四 级杆、六级杆和八级杆^[5-7]。射频六级杆实物图如图1所 示。射频电源对六级杆传输至关重要,本文射频六级杆离 子传输对电源频率要求为1~6 MHz,幅值≥900 V。对比发 现商用射频电源具有体积庞大、价格高昂、输出阻抗不易更 改等缺点,不能满足射频六级杆对电源特殊的要求。在国 内,李延录等^[1-2]对四级杆射频电源在 2.7648 MHz 输出电 压为2568V时,采用模拟闭环控制以稳定输出电压,其缺 点是调试复杂;使用直流 DC±215V 供电,对供电要求较 高。李凯等^[8]对四级质谱仪射频电源控制采用 ARM 和 FPGA 完成控制和数据采集,以减小系统体积和功耗并提 高数据采集速度,其缺点是设计成本较高,不利于商品化。 谢春光等[1,4]研制出飞行时间质谱仪传输区射频电源可调 频率为150~900 kHz 和1~2 MHz。输出频率和电压通过电 位器调节并使用开环控制,其缺点是没有实现自动调节并

对使用环境要求较高。张龙^[9]研制离子阱射频电源通过调 节 PWM 来改变供电电压,以达到调节和稳定输出电压,但 需要独立设计供电电路。为满足六级杆对射频电压和频率 要求,采用 AB 类射频推挽功放拓宽频率范围和提高功率 并采用闭环控制稳定输出电压。



图1 射频六级杆实物图

1 射频电源控制原理

射频电源控制原理图如图 2 所示,本文采用直接频率 合成器(direct digital synthesizer, DDS)作为射频信号源并 通过模拟乘法器与数模转换器相乘来自动调整射频信号 幅值和频率。首先,射频信号通过宽频运算放大器输出一 定功率射频信号,然后通过末级 AB 类射频功放进一步提

基金项目:国家自然科学青年基金(21605107)

第一作者简介:任标(1993—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为传感器原理及应用。

高输出功率,最后通过升压变压器输出高压射频电压用于 射频六级杆离子传输。为了提高射频电源输出稳定性,采 用负反馈闭环控制。控制器采用某公司 STM32F103C8T6 作为主控芯片,模数转换器实时采集射频输出电压并与设 定电压比较,自动调节提高射频电源输出稳定性。射频电 源实物图如图 3 所示。



图 2 射频电源控制框图



图 3 射频电源实物图

1.1 射频电源幅值自动调节模块

本文通过乘法器实现射频电源幅值和频率的自动调节。 通过 DDS 和 ADC 生成不同频率和幅值信号,然后通过乘法 器相乘实现输出频率和电压可调射频信号源用于自动调节 射频电源输出。幅值自动调节原理框图如图 4 所示。



图 4 幅值自动调节原理框图

DDS采用某公司生产的 AD9835,最高时钟频率为 50 MHz,当 AD9835采用 25 MHz 时钟时,输出频率范围 0 ~12.5 MHz,分辨率为 0.005 82 Hz。为了提高输出频率稳 定性,采用 25 MHz 有源晶振。DAC8562 是 16 位高精度数 模转换器,精度为 4 LSB,内部具有 4 ppm /℃、2.5 V 参考 电压,可以配置为 0~5 V 输出用于对射频输出电压准确 设定。控制器可以通过改变幅值给定电压改变射频输出 电压。MPY634 是一款宽带、高精度、四象限模拟乘法器,最高带宽 10 MHz。允许用户配置乘法器、平方电路、倍频 器和其他功能电路,同时保持±0.5%高精度。控制器可 以通过改变幅值给定电压改变射频输出电压。

1.2 射频功率放大模块

射频信号源输出信号十分微弱,需要多级功率放大才 能输出足够大功率。本文首先通过高速缓冲器放大然后 由 AB类推挽再次放大。最后通过升压变压器提高射频 输出电压。如图 5 所示,BUF634 是一款高速开环单位增 益缓冲器,具有 2000 V/μs 压摆率和 30 MHz 带宽,最大输 出电流 250 mA,宽供电范围(±2.25 V~±18 V),满足射频 信号源放大要求。



在电源设计中为提高输出效率多采用推挽结构。射频 功率放大器采用 AB 类推挽放大电路。AB 类推挽结构具 有良好的线性度和较高的输出电路效率。如图 6 所示,Q1、 Q2 采用 HEXFET 功率场效应管 IRF640。其主要电路参数 为:Vds=200 V,I_d=17 A,Pd=200 V,供电电压为 150 V,工作 频率 30 MHz,输出功率 150 W。本设计射频电源供电 15 V, 工作频率 1~6 MHz, T1 是输入耦合变压器,T2 是输出耦合 变压器,T3 是两路输出变压器和检测线圈。电感 L2 是高 频扼流电感,电容 C13、C14 为滤波电容。



1.3 射频电源幅值检测模块

射频电源幅值检测是闭环控制重要环节,其精度直接 影响其控制精度。射频电源幅值检测模块如图 7 所示。 首先由检测线圈检测出六级杆上交流信号,然后通过整流 电路输出直流信号,最后通过高精度模数转换器检测直流 信号并送 ARM 控制器做处理。本文模数转换器采用 ADS8689 高精度模数转换器。ADS8689 是 16 位、 100 ksps,内部集成低温漂 4.096 V 参考源,输入电压配置 为 0~12.288 V,以提高检测精度。

| 六 极 极 中 和DC → ADC → ARM |
|-------------------------------|
|-------------------------------|

图 7 射检波电路原理图

检波电路如图 8 所示,检波线圈输出信号经电容 C6 滤除直流成分,二极管 D1 向电容 C9 充电直至最大电压, 二极管截止时,电容 C9 缓慢放电,模数转换器通过采集 电容 C9 电压来反映射频输出电压。考虑到射频输出频 率 1~6 MHz,采用反向恢复时间短的 1N4148。



1.4 射频电源诵信模块

本射频电源通过串口与用户计算机通信来设置射频 输出电压和频率。串口通信波特率采用 115 200,数据位 8 位,停止位 1 位。本文采用某公司 MAX232 RS-232 收 发器。该芯片采用 3.3 V 供电,电流低至 10 nA,速度高达 1 Mbps。电路设计如图 9 所示,串口调试界面如图 10 所 示。





图 10 串口调试界面

2 射频电源控制软件设计

射频电源软件设计采用 C 语言编写,主要内容包括 各芯片初始化程序、输出频率和电压设置程序、射频输出 峰峰值检测程序和 PID 控制程序等组成。射频电源控制 软件流程图如图 11 所示。



图 11 射频电源程序流程图

在多数电源设计中为提高电压稳定性采用 PID 控制。 本文为了提高射频电源输出稳定,采用增量式 PID 控制。 增量式 PID 控制表达式推导如式(1)-式(3)所示。

$$u_{k} = k_{p} \left[e_{k} + \frac{T}{T_{I}} \sum_{j=0}^{k} e_{j} + \frac{T_{D}}{T} (e_{k} - e_{k-1}) \right] + u_{0} \quad (1)$$

$$u_{k-1} = k_p \left[e_{k-1} + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^{k-1} e_j + \frac{T_D}{T} (e_{k-1} - e_{k-2}) \right] + u_0 (2)$$

$$\Delta u_k = k_p \left[e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_I} e_k + \frac{T_D}{T} (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \right]$$

(3)

其中: k_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数;T为采样周期; e_k 为控制输入; u_k 为控制输出。经过优化确定 k_n =5 时,射频电源控制效果满足设计要求。

3 实验结果与分析

3.1 射频电源峰峰值和对称性测试

如图 12-图 14 所示,固定 DDS 信号源输入频率并调 节幅值给定电压,从六级杆两组电极上测得射频的电压峰 峰值。从图中可以看出共振频率点在 1.420 MHz、3.086 MHz、5.347 MHz 时峰峰值分别为 2020 V、1960 V、928 V, 满足射频六级杆对电源输出相位要求。





图 13 射频电源 3.086 MHz 输出电压波形



图 14 射频电源 5.347 MHz 输出电压波形

3.2 射频电源频率输出特性测试

射频电源频率输出特性表明频率对输出电压的影响, 本实验通过改变电感参数来设置不同谐振频率。如图 15 所示,谐振频率于 1.420 MHz、3.086 MHz、5.347 MHz 时峰 峰值分别为 2020 V、1960 V、928 V。实验中可看出频率改 变使输出电压值急速下降,射频电源只有工作在谐振点才 能达到最大电压输出。



图 15 射频电源输出频率特性

3.3 射频电源稳定性测试

射频电源稳定性是在可靠散热(散热片面积为 15 cm×12 cm,风扇功率为10W)和电路良好屏蔽(采用金 属铝盒屏蔽)条件下测试,测试时间为连续15h。在 3.094 MHz测得电压和频率稳定性分别为0.44%和0.096% (图16)。本设计满足射频六级杆对稳定性要求。



4 结语

本文设计一种基于 AB 类推挽功放结构射频线性电源。通过串口通信设定射频输出频率和电压并通过增量式 PID 控制以提高输出电压稳定性。实验测得在3.094 MHz 时测得电压和频率稳定性分别为 0.44% 和 0.096%;在 1.420 MHz、3.086 MHz、5.347 MHz 时峰峰值分别为 2020 V、1960 V、928 V,满足六级杆对射频电源要求。射频 电源已用于六级杆实验中并稳定运行。

参考文献:

- [1] 孙明超, 俞建成, 邵千钧, 等. 基于 E 类功放质谱射频的电源 设计与优化[J]. 传感器与微系统, 2016(11):109-112.
- [2] 李延录,安卫东,承学东,等. 一种小型四极杆射频电源技术 研究[J]. 分析仪器,2015(1):11-17.
- [3] 许华磊. 微波等离子体炬质谱仪离子传输系统的研制与应用 [D]. 吉林:吉林大学,2016.
- [4] 谢春光,郭长娟,王姜,等. 飞行时间质谱仪传输区射频电源 的研制[J]. 分析测试学报,2012(8):922-927.
- [5] JIAN H, QUAN Y, LINGFENG L, et al. Characteristics and comparison of different radiofrequency – only multipole cooling cells [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2008 (20): 3327-3333.
- [6]杨继伟,李纲,钱隆.基于射频控制的离子传输装置中离子传输效率的研究[J].现代科学仪器,2017(3):11-15,20.
- [7] JR J G, HIEFTJE G M. Characteristics of a rf-only hexapole ion-guide interface for plasma-source time of flight mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2001, 16(8): 781-792.
- [8] 李凯,李明,唐兴斌,等. 直接数字频率合成技术在四极质谱 仪射频电源中的应用[J]. 冶金分析,2014(2):20-24.
- [9] 张龙. 离子阱电源系统的研制[D]. 武汉:中南民族大学, 2015.

收稿日期:2019-01-15