

刘大鹏、夏忠、王兰炜, 2016, 用于地电阻率交流电法观测的低频稳流电源研发, 中国地震, 32(4), 756~767。

# 用于地电阻率交流电法观测的 低频稳流电源研发

刘大鹏<sup>1)</sup> 夏忠<sup>2)</sup> 王兰炜<sup>1)</sup>

1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京市海淀区安宁庄路 1 号 100085

2) 江苏省地震局新沂地震台, 江苏新沂 221400

**摘要** 为了解决地电阻率观测中台站受环境干扰而影响观测等问题, 我国地震工作者正在研究和尝试基于交流电法的新型地电阻率观测系统, 这种新型观测系统主要由低频稳流电源系统和接收系统组成。本文对低频稳流电源系统的关键技术进行了分析, 并介绍了电源系统的功率变换电路和逆变输出电路等关键环节设计, 最后对研发的具有大功率可变频稳流输出性能的低频电源样机的输出性能进行了测试。测试结果表明, 该型电源样机的各项技术指标均达到了设计要求, 其输出性能良好。

**关键词:** 地电阻率观测 交流电法 SPWM 低频稳流电源

[文章编号] 1001-4683(2016)04-0756-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地电阻率观测是我国地震前兆观测领域的重要手段之一, 目前主要采用直流电法。随着国民经济的快速发展, 中国大部分地电阻率观测台站的场地都存在不同程度的电磁干扰, 尤其是城市轨道交通和电气化铁路在各地的快速扩张, 严重影响了地电阻率观测数据的质量。越来越严重的电磁干扰使一些城市附近的地电阻率台站观测工作难以进行, 不得不选择搬迁(张世中等, 2013)。

为此, 我国地震科技工作者进行了很多研究和尝试, 其中, 交流地电阻率观测方法被认为是一种较为有效的方法(桂燮泰等, 1988)。这种基于交流供电方式的新型电阻率观测系统主要由低频交流发射机(低频稳流电源)和低频交流接收机组成。发射机通过供电电极向大地发射出固定频率的低频交流信号, 接收机测量电极之间对应频率的电压及电流值, 即通过选频发射-选频接收的方式, 获得较高的信噪比, 明显提高了观测系统的抗干扰能力(罗维斌等, 2004)。

[收稿日期] 2016-01-04; [修定日期] 2016-05-23

[项目类别] 地震科技星火计划(XH14023)资助

[作者简介] 刘大鹏, 男, 1984 年生, 助理研究员, 主要从事地震电磁观测技术及计量检测技术研究。

E-mail: klroc@126.com

夏忠, 通讯作者, 男, 1968 年生, 高级工程师, 主要从事地震电磁观测技术及数据分析研究。

E-mail: jsxiazhong@sina.com

20 世纪 80 年代,中国地震局曾引进美国公司生产的 Mark 型低频交流激发极化仪成套设备(包括发射机和接收机),在河北省开滦马家沟地震台开展地电阻率交流观测方法的监测实验,结果证明了该方法的可行性(桂燮泰等,1988;马希融,1989)。

这种基于交流供电方式的新型电阻率观测系统投入实际应用的前提和基础是要有良好的信号发射源,用以提供可调控、稳流输出的大功率低频交流电。本文对这种低频稳流电源的研发与测试过程作了较为详细的阐述。这是一项基础性研究工作,为基于交流电法的新型地电阻率观测系统的应用奠定了技术基础。

# 1 理论基础与关键技术

## 1.1 地电阻率交流电法观测基本原理

在 0.01~1000Hz 频段,交流电场分布可近似地遵循欧姆定律,此时地电阻率交流测量方法与直流测量方法相同(桂燮泰等,1988;张国民等,2001)。基于低频交流电法的地电阻率观测原理如图 1 所示。

图 1 中,D、B 为供电电极,M、N 为测量电极,通过 D、B 向地下供入一定频率的稳定电流  $I$ ,同时测量由此电流产生的 M、N 间的电位差  $\Delta U$ ,可由公式(1)计算出相应的视地电阻率值。

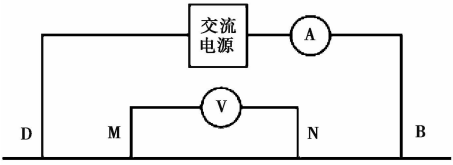


图 1 基于交流电法的地电阻率观测原理

$$\rho_s = K \frac{\Delta U}{I} \tag{1}$$

式中, $K$  为装置系数,与 D、B、M、N 电极的位置相关。

低频交流地电阻率法是人工信号源向地下发送一定频率的低频稳流信号,用高采样数据采集器同步选频接收经大地传输后对应频率的低频电流的响应信号,进而测得电极间相应频率的电压及电流值,计算出测区的地电阻率值。由于该方法采用了特定频率的信号进行观测,这样就在很大程度上规避了测区内因其它频率噪声信号引入的电磁环境干扰,从而大大地提高了测量系统的抗干扰能力(桂燮泰等,1988)。由此可见,在基于交流电法的地电阻率测量过程中,人工信号源(低频稳流电源)的输出性能将发挥至关重要的作用。

## 1.2 交流电源关键技术分析

### 1.2.1 大功率输出及电路保护

为了满足一定的信噪比要求,低频稳流电源需要具备较高的输出功率。参照中国地电阻率观测台站目前广泛采用的 ZD8 系列直流稳流电源,其供电电流有效值通常在 2A 左右。假设测量的负载为 100Ω,则输出功率约为 400W。相较直流电源输出的恒定状态,交流电源的输出波形始终处于交变状态,其对整个电路及主要器件施加的电压更高。这就需要在研制过程中对电路结构的设计、器件的选择以及安全性保护措施等给予综合考虑。

为了提高功率输出能力,电源系统内部增加了高频变压器的设计,通过提升负载电压实现大功率输出的能力。对电源系统主电路的结构设计进行了多次优化,功率器件均选用耐高压、大电流的器件,同时采取完备的电路保护措施,以保证电源系统在输出较大功率时的安全运转。

1.2.2 电流幅度及频率的稳定输出

供电电流的稳定程度直接影响地电阻率的观测精度。在实际观测中,由于大地负载的变化、电网电压的不稳定都会引起供电电流的不稳定,因此需要采取措施保证供电电流的稳定输出。此外,要求电流信号的输出频率及幅度在一定范围内可以调节。

为了实现电流的稳定输出,采用了闭环负反馈的电源系统。电源输出的取样信号,通过与基准源所产生的基准信号进行比较,得到误差信号,该信号经过调制,控制开关器件的开关,自动校正主回路的输出状态,从而可以输出幅度及频率都很稳定的电流。对电源输出频率和幅值的调控也是基于这个过程。通过改变基准信号的频率和幅值,即可通过闭环回路自动调整输出电流的频率与幅值。

1.2.3 SPWM 驱动控制信号的产生

电源系统稳定、准确地输出主要依靠 SPWM 驱动控制信号的控制,该信号的产生是通过电路及程序依靠自身调节自动快速完成的。要产生高质量的 SPWM 驱动控制信号,首先需要有一个高质量的参考基准源,本研究以单片机为核心,以 C 语言和汇编语言相结合的形式编制了基准正弦波形发生程序,以产出高质量的参考基波;此外考虑到 SPWM 驱动控制信号所含的基波频率很低(0.1~10Hz),用小型高频变压器的方法根本无法实现,因此在驱动信号的产生和加载过程需要设计新的处理环节。

2 电源的设计

2.1 基本结构

低频稳流电源系统的设计采用开关电源技术,以闭环负反馈结构通过正弦脉宽调制 (SPWM) 来实现对电源的输出控制。交流电源系统主要由输入与整流滤波电路、电压变换电路、PWM 驱动控制电路、逆变输出电路、SPWM 驱动控制电路、电压取样电路、电流取样电路等部分组成(图 2)。

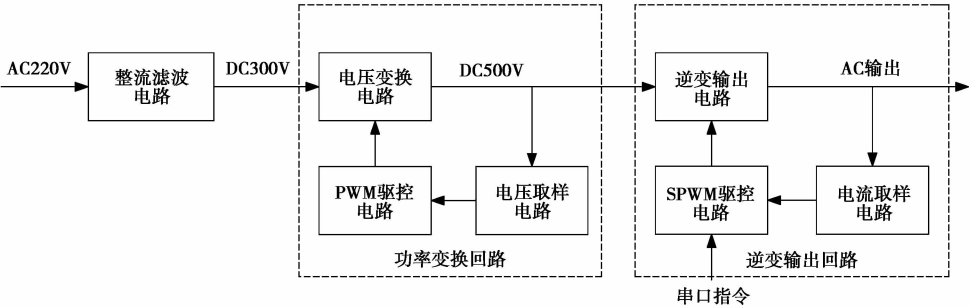


图 2 电源系统结构图

图 2 中,整流滤波电路完成将 220V 市电转换为直流电的整流转换。电压变换电路、电压取样电路与 PWM 驱动控制电路组成闭环负反馈功率变换回路系统,完成“逆变-升压-整流滤波”过程,实现提升输出功率的作用。逆变输出电路、电流取样电路与 SPWM 驱动控制电路组成闭环负反馈逆变输出回路系统,实现稳定、准确的交流电流输出。电源系统的控制环节以单片机为核心,通过接收主机的串口指令实现对电源的输出状态进行控制,使低频稳

流电源能够快速、准确地根据主机的命令来输出相应频率和幅度的交流信号。

2.2 功率变换回路

2.2.1 组成结构

功率变换回路主要由逆变开关电路、高频变压器、输出与整流滤波电路、电压取样电路及 PWM 驱动控制电路等 5 个部分组成(图 3)。其中“逆变-升压-整流滤波”环节是电压变换电路的主体,实现了 DC-AC-DC 的转变,电压取样与 PWM 驱动控制电路构成反馈控制回路,对逆变状态进行自动校正和调节。

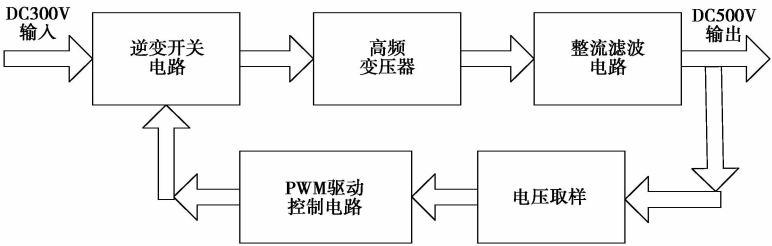


图 3 电压变换电路结构图

电压变换电路(图 4)中的  $T_1 \sim T_4$  是 4 个功率开关 VMOS 管,它们组合成了开关逆变器,主要实现 DC-AC 的转换; $TX_1$  是大功率铁氧体高频变压器,主要实现电压提升与电气隔离; $D_1 \sim D_4$  是 4 个二极管组成的全桥式整流器,主要实现 AC-DC 的整流处理; $L_1$ 、 $C_1$  组成滤波电路; $R_1$ 、 $R_2$  是 2 只精密电阻,主要实现电压取样; $R_0$  是 1 只假负载电阻; $TX_2$  是 1 组小型高频变压器,主要实现 PWM 驱动控制信号的加载以及电气隔离。

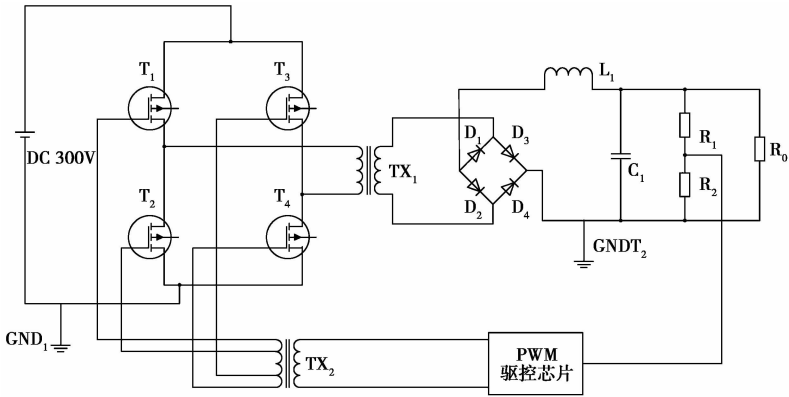


图 4 电压变换电路组成示意图

图 4 中,当 VMOS 管  $T_1$ 、 $T_4$  或  $T_2$ 、 $T_3$  在反馈回路控制下按照固定频率交替导通-关断时,逆变出来的交流电(准方波)会加载在高频变压器  $TX_1$  的原边上,变压器的副边会感应出与绕组匝数成比例的交流感应电压。该高频交流电经过全桥整流器进行整流处理,以及后面的 LC 滤波处理后,就得到了直流输出。直流输出经电压取样后输入 PWM 集成控制芯片,产生 26kHz 固定频率的 PWM 驱动控制信号,经变压器  $TX_2$  加载至 4 个 VMOS 管的栅极,控制 VMOS 管的导通-关断状态,进而实现整个功率变换闭环回路的自动调控。

2.2.2 逆变开关电路的设计

逆变开关电路是整个功率变换回路的关键环节之一,其主要功能是将直流电变换为高频交流电,供变压器进行升压。逆变开关电路由 4 个内部带高耐压二极管的功率场效应晶体管 (VMOS 管)  $T_1 \sim T_4$  组成,形成两组交替导通、截止的 H 型全桥式逆变桥臂,其中  $T_1$  和  $T_4$  为 1 组,  $T_2$  和  $T_3$  为另 1 组 (图 5)。

VMOS 开关管的栅极是控制极,当栅极电压高于导通电压时,VMOS 管的漏极和源极就处于导通状态,否则处于关断状态。两组开关管在 26kHz 高频状态下交替通断 (图 6),当开关管  $T_1$ 、 $T_4$  导通,  $T_2$ 、 $T_3$  断开时,负载电压  $U_0$  为正状态;当开关管  $T_1$ 、 $T_4$  断开,  $T_2$ 、 $T_3$  导通时,负载电压  $U_0$  为负状态。如此高频交替进行,就在负载上得到了由直流电逆变而出的近方波交流电。

闭环负反馈回路通过 SG3525 集成芯片输出 26kHz 固定频率的 PWM 驱动控制信号,加载至 VMOS 管的栅极,通过控制 4 个开关管的导通与截止,从而控制整个逆变电路的输出。逆变桥电路输出的示波器波形如图 7 所示。

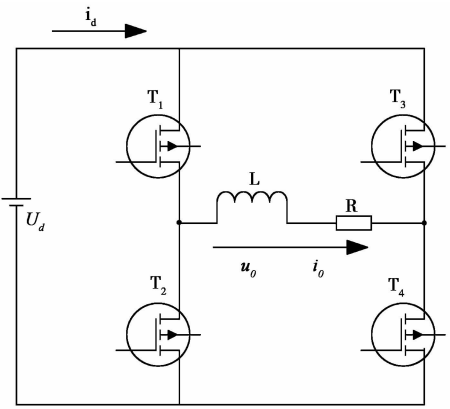


图 5 逆变开关电路结构图

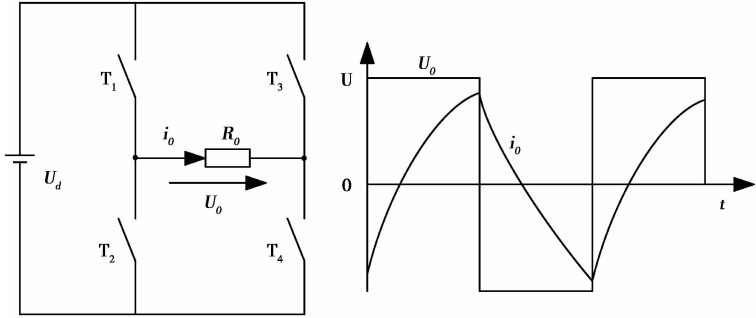


图 6 全桥式逆变等效原理图

2.2.3 高频变压器的设计

为了满足电源大功率输出的要求,在逆变开关环节引入了高频变压器。高频变压器是指工作频率超过 10kHz 的电源变压器,其主要作用是将逆变开关电路输出的高频交流电进行升压,进而实现整个系统的输出电压的提升,同时还起到电气隔离的作用。

开关电源中的高频变压器大多采用 EI 或 EE 型铁氧体磁心。本研究选用的为 EE65 型铁氧体磁心 (图 8、9)。EE65 型磁心为对称性结构,制作出的高频变压器具有窗口面积大、绕制方便、价格适中、可靠性强等特点。

本研究选用的高频变压器工作频率约为 26kHz,选择这个频率主要是考虑 2 个因素:①如果工作频率低于 20kHz,会导致变压器的体积与重量大幅度增加;②如果工作频率如果设置过高,在大功率的运转条件下,变压器的发热会比较严重。为了满足电源大功率输出的

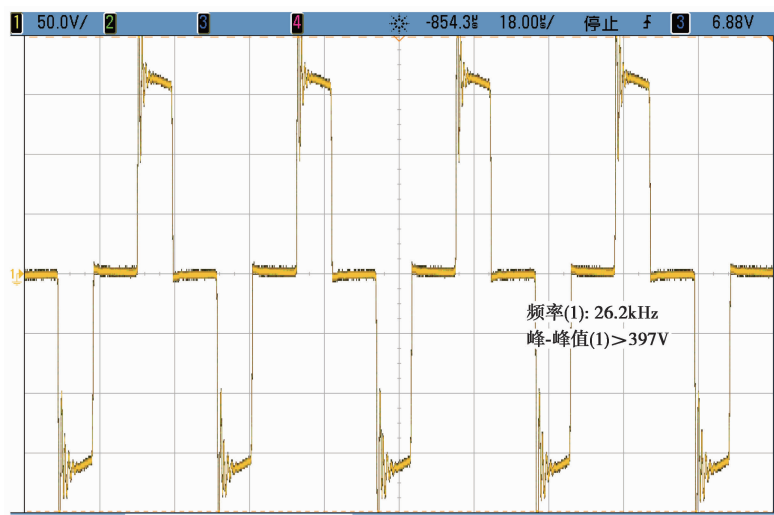


图 7 示波器显示逆变开关电路输出波形

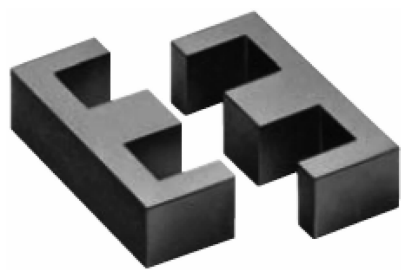


图 8 EE65 型磁心外观

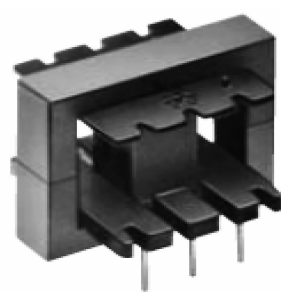


图 9 EE65 型磁心骨架

设计要求,高频变压器的原边绕组与副边绕组的匝数比为  $N_1 : N_2 = 1 : 2$ ,这样高频变压器的副边绕组会感应出约 2 倍于原边绕组电压的交流电。

2.3 逆变输出回路

2.3.1 组成结构

逆变输出电路主要由逆变开关电路、滤波输出电路、电流采样电路和 SPWM 驱动控制电路组成(图 10),主要作用是将升压后的直流电进行 DC-AC 转换,经平滑滤波处理后输出交流稳流电流。

逆变输出回路(图 11)的运转过程是:电源输出经过电流取样取得输出的电流信号,经放大器反向放大后与基准正弦波发生器输出的指定频率的基准正弦信号(通过单片机和 D/A 转换器获得)进行比较,得到误差信号  $I_e$ ,输入 SPWM 集成控制芯片。SPWM 集成控制芯片在误差信号  $I_e$  与其外设元器件的作用下生成 4 路 SPWM 驱动控制信号,分别加载至逆变输出电路的 4 个 VMOS 管的栅极,控制 VMOS 管的导通与截止,进而调节整个逆变输出电路的输出。

2.3.2 可变频稳定输出的设计

电源系统的稳定、准确输出是通过闭环反馈回路自动控制完成的。当输出电流  $I_0$  下降

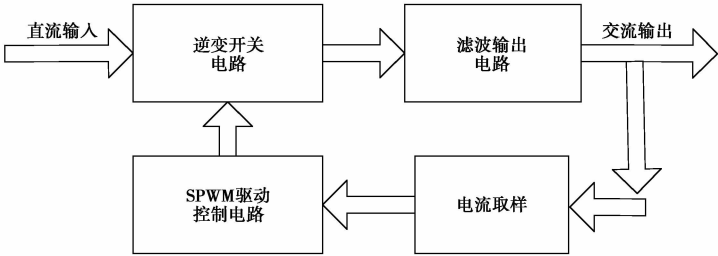


图 10 逆变输出电路

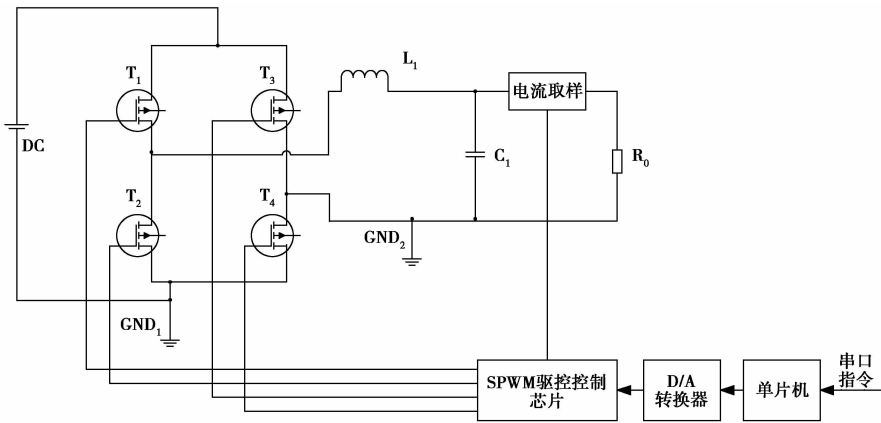


图 11 逆变驱动控制回路

时,基准正弦信号与采样电流之间的差值  $I_r$  会升高,进而会促使 SPWM 集成控制器(图 12)产生的 SPWM 脉冲控制信号的宽度变得更宽,宽脉冲会控制逆变桥 VMOS 管的导通时间变得更长,逆变出的能量会随之增多,从而引起输出电流  $I_o$  的升高。反之亦然。这样就实现了整个逆变输出回路的自动调节与修正,保证了交流电信号输出的稳定和准确。

开关电源的输出电流经过取样后与基准正弦信号进行差值计算,然后将其差值  $\Delta r$  与等腰三角载波进行比较调制,产生相应的 SPWM 驱动脉冲信号,进而控制逆变输出电路 4 个 VMOS 管的导通与关断,最终得到理想的正弦电流输出。

由上述分析可知,基准正弦信号的形态决定了输出信号的形态(图 13),通过控制基准正弦信号的频率和幅度,即可控制整个电源系统的输出状态。单片机在解析外部输出的输出状态串口命令后,结合数/模转换器共同产生 0.1~10Hz 范围内的低频标准正弦波,进而控制整个电源系统的输出状态。

2.3.3 基准正弦信号发生器的设计

基准正弦信号的质量关系到整个电源系统的输出质量,市场上的低频正弦信号发生器质量较差,因此需要专门设计。基准正弦信号发生器采用 1 片 AT89C55 单片机芯片和 2 片 MAX541 数/模转换器生成波形,结合低通滤波器及放大电路,可输出 0.1~10Hz 之间的标准正弦波。波形的频率和幅度在一定范围内可任意改变,其中,频率的改变通过串口指令控制,幅度的改变通过电位器调节实现。

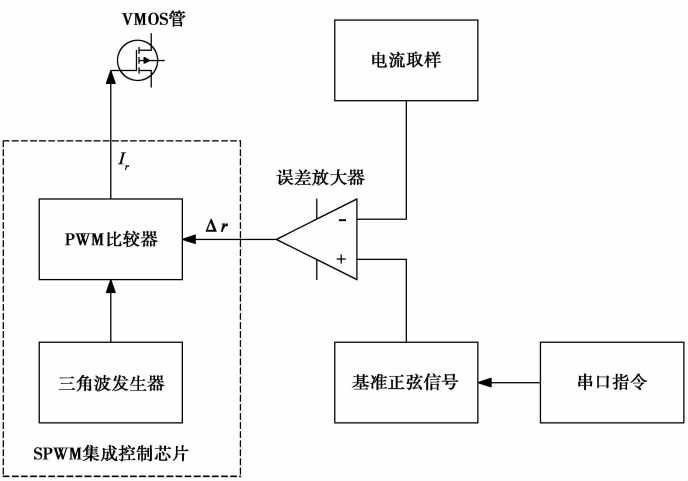


图 12 SPWM 驱动信号产生过程

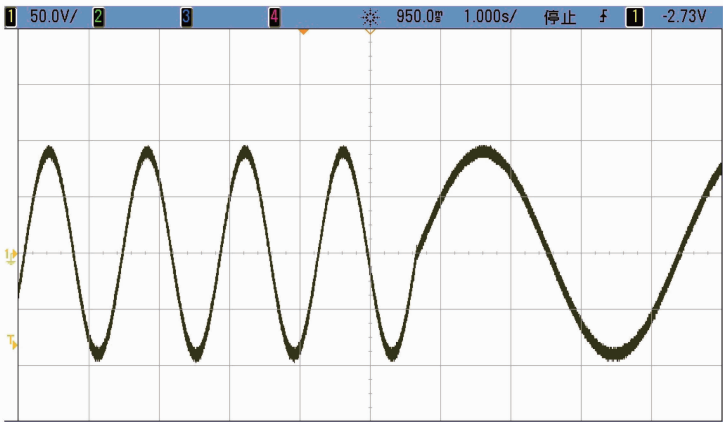


图 13 示波器显示变频输出信号的形态

单片机是整个正弦波形信号发生器的核心部分,在接收到外部串口变频控制指令后,运行存储的程序,向 2 片 D/A 转换器输出相应的数字信号,使 2 片 D/A 转换器输出 2 组相位交错的正弦正半周期波形,最后将 2 组信号叠加成 1 个完整的正弦信号。基准正弦信号的形成过程如图 14 所示。

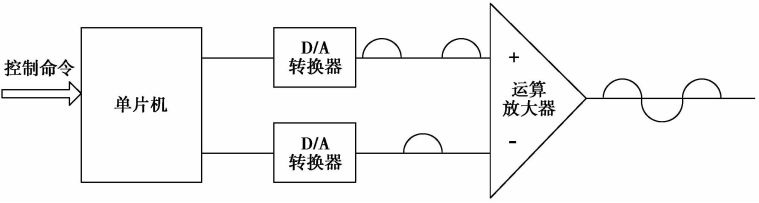


图 14 基准正弦信号输出流程



正弦波信号发生控制器的引脚如图 15 所示。其中单片机连接了上电自动复位电路,外接温补晶振的频率为 33MHz。运算放大器的外接电阻  $R_1 \sim R_4$  采用 0.01% 级高精度电阻,以保证合成正弦波的对称性。

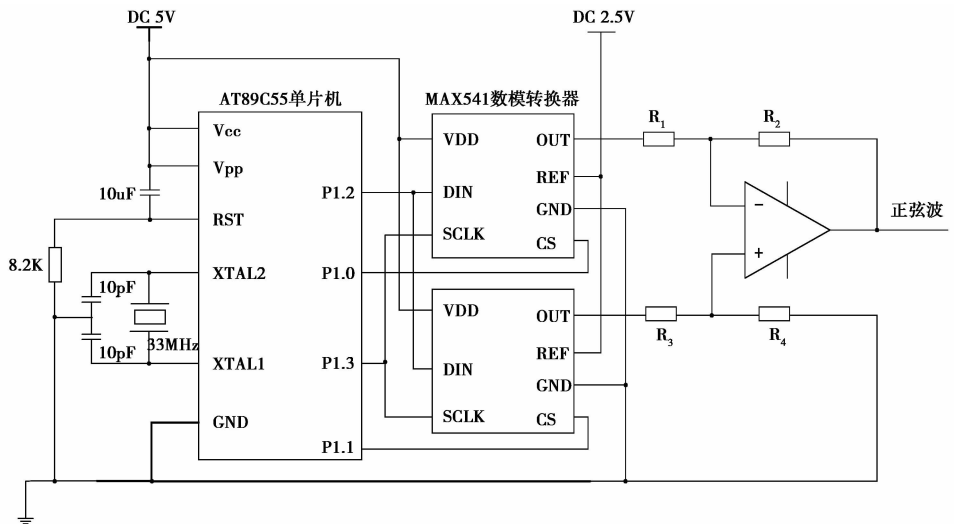


图 15 正弦波信号发生控制器的引脚连接

### 3 性能测试

经过初步分析,低频稳流电源的主要性能要求如下:

- (1) 输入电压: AC 220V $\pm$ 10% ;
- (2) 最大输出功率: 优于 400W ;
- (3) 输出频率范围: 0.1 ~ 10Hz ;
- (4) 输出频率稳定度: 优于 0.1% ;
- (5) 输出电流幅值稳定度: 优于 0.5% ;
- (6) 输出电流的幅值、频率可调。

#### 3.1 最大输出功率测试

输出功率测试方法如图 16 所示。 $R_0 = 100\Omega$ , 是大功率负载电阻,  $R_i = 0.1\Omega$ , 是取样电阻。低频稳流电源输出指定频率的交流电, 使用 MCDAU-1 型数据采集器(交流观测系统的接收机)以 1000Hz 采样率对取样电阻  $R_i$  的电压量进行数据采集。

通过对数据采集器采集的电压数据进行 FFT 处理, 计算得到交流电源在指定频率下输

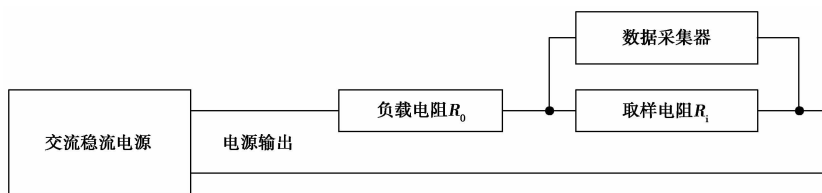


图 16 输出功率测试

出的单峰值电压值  $U_i$ 。由公式(2)可计算出电源的最大有效输出功率  $P$ ,其中  $I$  是有效输出电流值。电源最大输出功率测试结果见表 1。

表 1 电源最大输出功率测试结果

输出频率/Hz	单峰值电压/V	有效输出电流/A	有效输出功率/W
10.0	0.301	2.13	458
5.0	0.300	2.12	454
2.0	0.299	2.11	450
1.0	0.299	2.11	450
0.5	0.299	2.11	450
0.2	0.299	2.11	450
0.1	0.299	2.11	450

$$P=I^2R=\left(\frac{U_i}{\sqrt{2}R_i}\right)^2\times(R_o+R_i)$$

(2)

3.2 输出电流幅值稳定度测试

输出电流稳定度测试方法如图 10 所示。 $R_o=100\Omega,R_i=0.1\Omega$ 。低频稳流电源输出指定频率的交流电,使用 MCDAU-1 型数据采集器以 1000Hz 采样率对取样电阻  $R_i$  的电压量进行数据采集。每相隔 20 个正弦周期取 1 组正弦峰峰值数据,每个频点各按此方法取 8 组数据。

按照公式(3)和公式(4)分别计算各频点电压测值的标准差(SD)和相对标准差(RSD),其中  $N=8,X_i$  是电压测值, $\bar{X}$  是 8 组电压测值的平均值。测试结果见表 2。

$$SD=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N(X_i-\bar{X})^2}{N-1}}$$

(3)

$$RSD=\frac{SD}{\bar{X}}\times 100\%$$

(4)

表 2 输出电流稳定度测试结果

输出频率 /Hz	电压测值/ $\mu V$									标准差	相对标准差 /%
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$	$U_8$	$\bar{U}$		
10.0	487004	486960	486989	486971	486992	487013	486917	487073	486989.9	45.05	0.009
5.0	484427	484456	484479	484488	484488	484442	484458	484385	484452.9	35.01	0.007
2.0	484114	484128	484095	484044	484087	484113	484101	484043	484090.6	31.68	0.007
1.0	484181	484167	484167	484140	484215	484157	484225	484228	484185.0	33.43	0.007
0.5	483949	483940	483918	483970	483965	483958	483964	483938	483950.3	17.54	0.004
0.2	483848	483879	483877	483896	483878	483863	483850	483856	483868.4	16.81	0.003
0.1	483795	483791	483816	483779	483816	483817	483796	483825	483804.4	16.19	0.003

3.3 输出频率稳定度测试

输出频率稳定度测试方法如图 17 所示。 $R_0 = 100\Omega$ ,  $R_i = 0.1\Omega$ 。低频稳流电源输出指定频率的交流电,使用 Agilent 53132A 型频率计对取样电阻  $R_i$  的电压信号进行频率测试,每个频点读取 5 组频率测值。

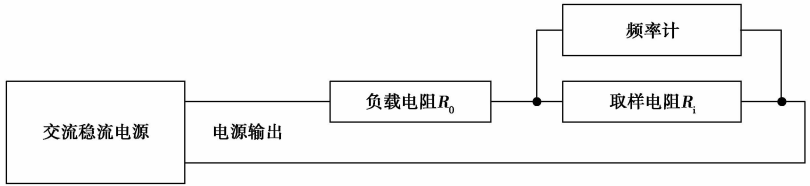


图 17 输出频率测试

表 3 输出频率稳定度测试结果

输出频率 /Hz	频率测值/Hz						标准差	相对标准差 /%
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$\bar{f}$		
10.0	9.992	9.993	9.992	9.992	9.993	9.992	0.00055	0.01
5.0	4.996	4.996	4.996	4.997	4.997	4.996	0.00055	0.01
2.0	1.9992	1.9993	1.9995	1.9992	1.9991	1.9993	0.00015	0.01
1.0	0.9995	0.9993	0.9993	0.9995	0.9995	0.9994	0.00011	0.01
0.5	0.4996	0.4998	0.4997	0.4998	0.4998	0.4997	0.00009	0.02
0.2	0.2000	0.2001	0.2001	0.2000	0.2001	0.2001	0.00005	0.03
0.1	0.10003	0.10004	0.10004	0.10004	0.10003	0.10004	0.00001	0.01

按照公式(3)和公式(4)分别计算各频点频率测值的标准差和相对标准差,其中  $N = 5$ ,  $X_i$  是频率测值,  $\bar{X}$  是 5 组频率测值的平均值(表 3)。

4 结论和讨论

本文针对应用于新型电阻率观测系统的低频稳流电源开展研究。经过测试,研制出的电源样机具有良好的输出性能,性能指标达到了初步的设计要求。样机的输出频率在 0.1~10Hz 范围内可调,最大输出功率可达 450W(100Ω 负载电阻条件下),输出电流的频率稳定度优于 0.05%,输出电流的幅值稳定度优于 0.01%,输出电流的频率和幅值可调。该型电源的研制为交流地电阻率观测研究的开展奠定了坚实的基础。

目前,基于交流电法的新型地电阻率观测系统正在江苏省江宁地震台进行场地观测实验,为该观测系统的实用化做准备。今后,该型电源还有几个技术环节需要进一步加以完善和优化:①该型电源目前的输出功率已经能够满足技术要求,但在实际观测中,电源的输出功率越大,产生的信噪比就越高,取得的观测效果就越好。所以今后还需要继续改进该型电源的电路结构及器件组成,进一步提高电源的输出功率。②继续完善和加强该型电源的安全性措施,提高其耐用性和安全性,为今后长期的场地环境观测打下基础。

## 参考文献

- 桂燮泰、戴经安、关华平,1988,低频交流电法的实验和研究,西北地震学报,**29**(2),22~28。
- 罗维斌、白宜诚、杨学顺,2004,用交流电阻率法探测煤矿导(含)水构造,物探与化探,**28**(2),139~141。
- 马希融,1989,交流地电阻率方法在马家沟地震台实验结果,地震,(3),46~51。
- 张国民、傅征祥、桂燮泰,2001,地震预报引论,241~246,北京:科学出版社。
- 张世中、石航、王兰炜,2013,地电台站受城市轨道交通干扰的测试分析与抗干扰措施研究,地震学报,**35**(1),117~124。

## Research on low frequency power supply in resistivity observation based on the AC Method

*Liu Dapeng*<sup>1)</sup>   *Xia Zhong*<sup>2)</sup>   *Wang Lanwei*<sup>1)</sup>

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Xinyi Seismostation, Earthquake Administration of Jiangsu Province, Xinyi 221400, Jiangsu, China

**Abstract** Many geoelectric resistivity observation stations have been disturbed by electromagnetic interference. In order to solve this problem, the Chinese scientists and technicians have made a lot of effort to a new observation system based on the AC power supply. The new observation system mainly consists of two parts: a low frequency transmit system and a reception system. The key technology of the transmitter system is analyzed in the paper. And we introduce the technology of SPWM and the research of high frequency voltage transformer. Finally, the transmitter system is tested in laboratory. The test results show that the transmitter provides a good output function and its specifications can meet the requirements.

**Key words:** Geo-resistivity observation; The method of alternating current resistivity; SPWM; Low frequency steady flow power supply