

随钻高效电源的管理系统优化设计

张铮, 辛鹏来, 付欣, 贺洪斌

(中国科学院声学研究所超声与物理探测实验室, 北京 100190)

摘要: 根据随钻仪器的工作特点, 提供了一种对随钻电源进行管理的高效且易于实现的解决方案, 该方案从工作方式上采用间歇供电, 使得仪器在非工作状态时电能的消耗降到最低; 在工作原理上, 采用 Buck 型开关电源, 使得电能的转化效率达到最大。而根据不同电源的需求指标, 数字电源与模拟电源采用不同的芯片。对于数字电源, 利用了 TPS40200 芯片设计简单的特点, 并且在高温下可实现较大功率; 对于模拟电源, 利用了 UC3842 芯片适用性广泛的特点, 在其后添加合适变压器, 同时输出正负两路模拟电源。经过实际验证, 该方式很大程度上提高了电能的利用效率和电池的工作时间, 符合随钻高效电源的设计要求。

关键字: 随钻; 电源; 高效; 间歇供电

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-06-0556-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.06.017

The optimal control system design of high efficiency power supply in logging while drilling tool

ZHANG Zheng, XIN Peng-lai, FU Xin, HE Hong-bin

(Ultrasound and Physical Exploration Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper proposes a simple and practical method of managing power system according to the characteristics of logging while drilling tool. On working mode, this scheme adopts a method of intermittent power supply, by which the energy dissipation will be totally reduced when the tool is in the non-working state. On working principle, the Buck switching power supply is applied to maximizing the power conversion efficiency. According to the different requirements of different power supplies, both the digital power and the analog power are treated with distinct chips. For the digital one, the TPS40200 is put into application to achieve the goal of high-power and easiness in high temperature circumstance. For the analog one, the chip UC3842 is utilized to output positive and negative power simultaneously with a certain transformer. At last, numerous experimental results prove that this power system can greatly improve the energy utilization efficiency and the operation time of battery. Therefore, this design meets the requirements of high efficiency power supply in logging while drilling tool.

Key words: Logging While Drilling(LWD); power system; high efficiency; intermittent power supply

0 引言

随钻测井在钻井同时测量地层物理参数, 减少测井时间, 更能真实地反应原状地层的地质特征, 同时可以预测地层信息, 降低不确定性, 有利于及时有效的决策处理, 减少钻井风险^[1]。目前, 该技术已成为高效开发复杂油气藏的重要手段。随钻仪器电子系统包括发射电路、接收电路、采集控制电路等, 复杂且功耗较大, 同时又不能像电缆测井一起那样通过电缆供电, 只能通过电池短节供电。目前国内随钻仪器仍然采用高温锂电池供电, 额定电

流十分有限, 为了保证仪器的工作时间需要将多节电池串联起来组成电池短节供电, 然而由于钻铤空间的限制, 不能仅通过增加钻铤长度来增加电池短节的供电量, 因此设计出合理高效的电源控制系统对随钻仪器的质量和在实际工程中的使用具有十分重要的意义。

针对随钻电源系统的设计, 文献[2]提出了一种随钻声波测井仪电源控制电路, 采用间歇供电的方式以提高能效和电池使用寿命, 但没有给出具体电源的工作原理。文献[3]提出了一种可以实现自动切换的电源系统, 能够根据工作状态对电源的来源进行切换, 但是该设计只针对某种特殊的供电系统(三种供电来源), 且切换的过程是跳变的, 容易造成跳变干扰, 如果工作在临界状态时有可能产生不稳定状态。

收稿日期: 2015-01-18; 修回日期: 2015-04-16

作者简介: 张铮(1988—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 张铮, E-mail: zhangzheng10@mails.ucas.ac.cn

根据以往设计的不足以及随钻仪器电源的节能要求, 本文提供了一种简单的设计, 在工作原理上采用 Buck 型开关电源, 在工作方式上采取间歇供电方式, 且整个系统的状态由控制电路通过发送命令字控制, 不仅易于实现, 而且有效地提高了电能的使用效率^[4-11]。

1 随钻电源系统的方案选择

1.1 作业环境温度

声波测井仪器通常需要对井下数千米甚至上万米的地质结构进行信息提取, 大部分时间需要工作在高温环境下, 文献[12]提出了钻井过程中井筒-地层瞬态传热模型, 阐释了钻井液循环和停止循环期间各单元控制组件能量交换机理, 并分析了循环与非循环阶段井下温度分布规律, 给出了不同条件下井下环空温度分布, 图1为钻井液循环状态下不同时间的环空温度分布, 图2为钻井液非循环状态下不同时间的环空温度分布。

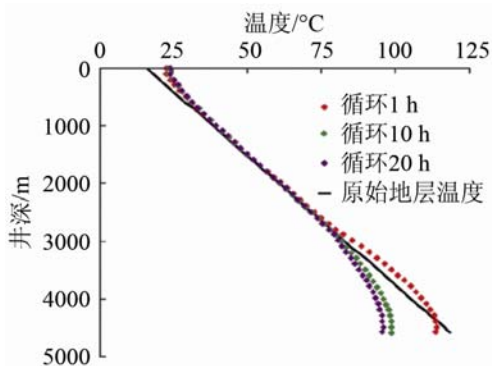


图1 循环状态下钻井液的环空温度分布图

Fig.1 The temperature distribution curve of the drilling fluid in circulatory state

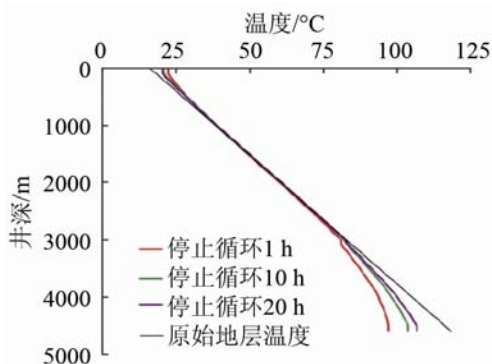


图2 非循环状态下钻井液的环空温度分布图

Fig.2 The temperature distribution curve of the drilling fluid in non-circulatory state

由图中曲线可知, 井下数千米的环境温度可以达到 120°C 以上, 因此在设计随钻电源系统时, 首

先要考虑器件的耐高温特性, 选择高温特性好的金属膜器件。

1.2 工作原理和方式的选取

从工作时间上来看, 随钻声波仪器与钻井所用时间相当, 根据不同的地质结构以及不同阶段, 钻测时间约为 1~30 天^[13], 作业时间较长。整个系统大部分由安置在钻铤壁内的电池供电, 但由于空间有限, 电池的容量不能无限制增加, 因而要满足长时间测井的需求, 电源工作原理及方式的选择就显得尤为重要。首先, 开关电源较线性电源有其突出的特点^[14]: (1) 开关电源能够实现较大的功率; (2) 开关电源不仅能够实现降压转换, 而且根据需要能够实现升压转换; (3) 相同功率下开关电源占用的空间更小; (4) 开关电源电能转化效率更高。那么在电源系统工作原理的选择上, 自然选择性能更好更能适应具体环境的开关电源。其次, 根据目前世界上最先进的随钻声波测井仪 SonicScope 475 的工作方式来看, 分为“采集”模式和“监听”模式, 并且相邻两次采集的间隔为 5~10 s^[15]。据此可推得, 在“监听”或者采集间隔的时间内, 没有必要给仪器的整个系统供电而只需为部分电路供电, 因而在设计时, 针对不同的电源给予不同的控制, 实现间歇供电的目的。

1.3 换能器的频率特性

从发射换能器的角度来看, 目前单极子测量纵波的频率在 10~20 kHz 之间, 而四极子测量横波范围低于 5 kHz^[16], 仍然以斯伦贝谢公司目前最新的仪器 SonicScope475 为例, 该仪器采用发射换能器的带宽为 1~20 kHz^[17], 哈里伯顿公司的 APX 随钻声波测井仪的发射换能器带宽为 10~18 kHz^[18]。因此在开关电源的设计上, 开关的频率应远离这些频段, 具体选择将在下文进行阐释。

2 间歇性高效电源的优化设计与实现

随钻声波测井仪电路部分包括发射电路、模拟采集电路、数字采集及控制电路、电源电路等, 其中发射电路供电电压为 200 V, 模拟采集电路采用 $\pm 12\text{ V}$ 供电, 数字及控制部分采用 +5 V 供电。用 DSP 控制除给自身供电的其他电源部分, 整个电源部分由输出相对稳定的 +22 V 的直流电池供电。由于随钻测井仪器系统的电能消耗较大, 并且要求较长的作业时间, 因而不能像传统的供电系统一样一直保持供电状态, 本设计通过 DSP 对所有电源模块进行控制, 在仪器工作间隙停止对外供电, 以求最

佳的节电效果。结构流程如图 3 所示。

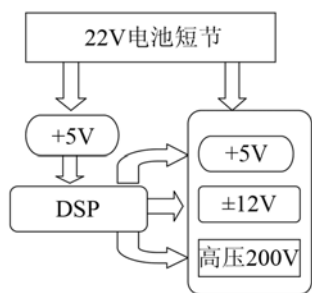


图 3 电源系统的整体结构

Fig.3 The whole structure of power supply system

2.1 5 V 电源部分

5 V 电源的设计采用 TPS40200, 该芯片输出最高驱动电流为 200 mA, 输入电压范围广, 工作频率为 35~500 kHz, 且高温特性好, 应用灵活方便。

对于该部分电源的设计, 首先要考虑到电流采样电阻的选择, 当通过采样电阻的电压降(也即 VDD 引脚与 ISNS 引脚的电压差)超过 100 mV 时, 该芯片将在 2% 的周期内立即进入停滞状态, 不再有 PWM 波的输出; 只有当电压降重新回到 100 mV 以内时, 该芯片将自动恢复到正常工作状态。同时,

由于 TPS40200 的反馈差分运放的参考电压为 700 mV, 并且输入端的正反馈补偿作用使得 PWM 波的输出已经能够达到满量程, 因而不需要再添加任何的频率补偿措施, 从而简化了电路的设计。本设计也同样充分利用了该芯片的软启动功能, 采集控制电路可以通过调节 ss 引脚的输入电压以控制芯片的工作状态(如图 4 所示)。

在本设计中(具体结构如图 5), 与芯片的 RC 引脚相连的外接电阻 R_{RC} 和外接电容 C_{RC} , 以及芯片内部的两个震荡比较器共同决定了该部分电源的工作频率。该振荡频的计算公式为

$$f_{sw} = \frac{1}{R_{RC} \times C_{RC} \times 0.105} \quad (1)$$

其中, f_{sw} 为工作频率, R_{RC} 为外接电阻值, C_{RC} 为外接电容值。

在这里, 需要注意的是, 在外接电容 C_{RC} 放电时, 流过外接电阻 R_{RC} 的电流不能超过 750 μ A, 因而在电阻选取的时候要保证其阻值足够大。

与此同时, 为了保证电源的输出电流不至于过大而造成其他电路部分的损坏, 设计在开关 MOS 管的漏极端串联一个低电感量的限流电阻, 一旦该

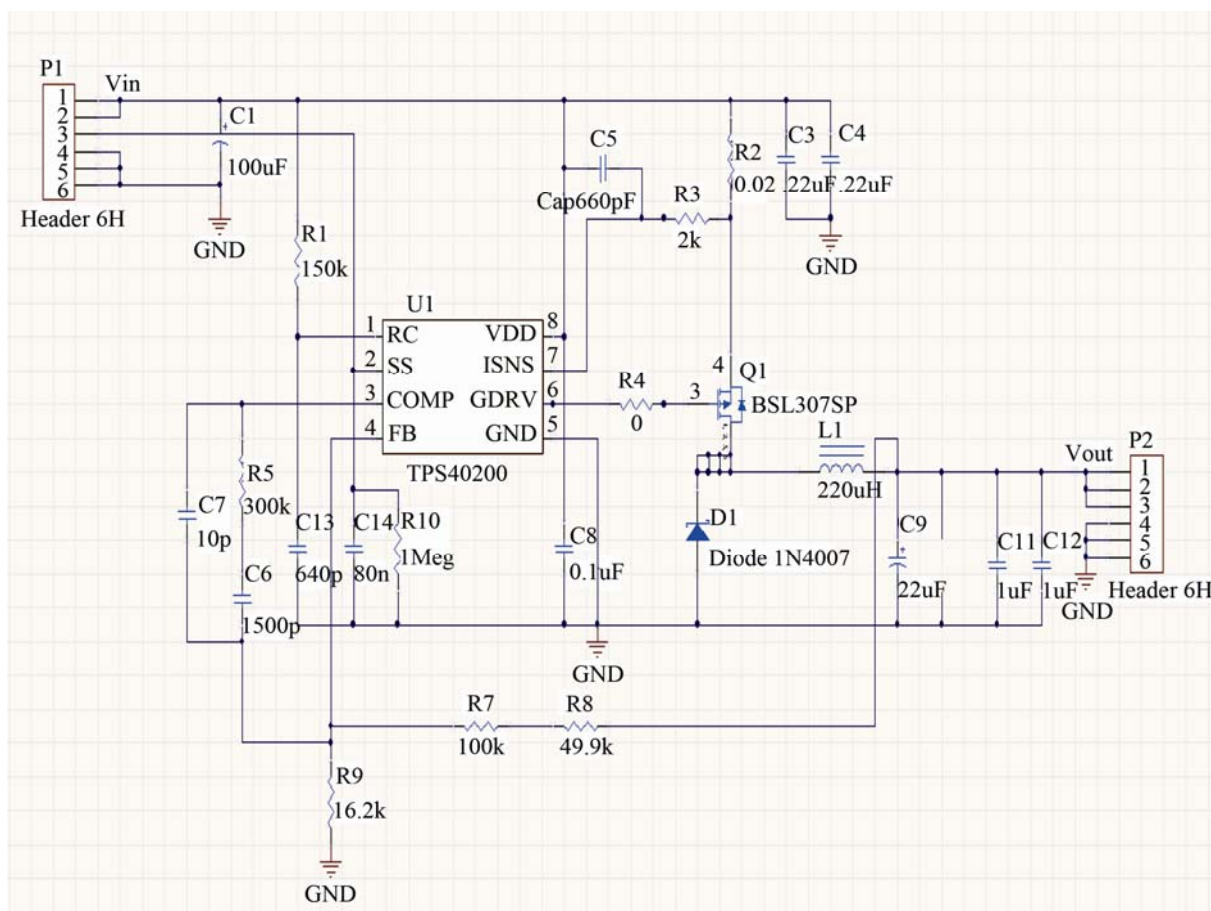


图 4 5V 电源部分电路图

Fig.4 The circuit of 5V-power supply

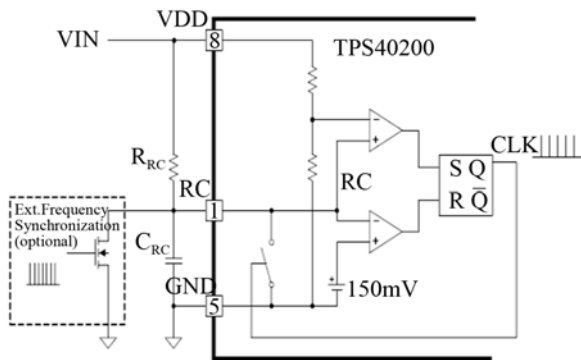


图 5 频率控制电路部分

Fig.5 The circuit of frequency controller

电阻上的压降超过 100 mV 时, 芯片将停止 PWM 波的输出, 开关 MOS 管也会一直保持关断状态, 此时软启动电容放电, 直到该电容上的电压降到 150 mV 以下时, 芯片完成复位等待重新启动。

在该电源启动过程中, 为了使芯片不产生瞬间过载, 本设计在 ss 引脚端适当加入了一个软启动电容 C_{14} , 使得突变上电过程变成一个电压逐渐加载的过程, 平滑了因瞬间上电而产生的跳变, 对芯片起到了一定的保护作用。对于具体软启动时间的控制, 可以由以下公式计算得出:

$$t_{ss} = R_c \times C_{14} \times \ln \left(\frac{V_{SST}}{V_{SST} - 1.4} \right) \quad (2)$$

其中: t_{ss} 为软启动时间, C_{14} 为软启动电容值, R_c 为固定的 105 k Ω , V_{SST} 为输入电压(最高值为 8 V)。

最后也是最关键的一步, 是对反馈电阻的选取。如图 6 所示, 理论上反馈电阻可以选取任意值, 但实际上, 较大的电阻会带来较大的热噪声, 电阻过小会使得整个电路的功耗增加效率降低, 因而在各个阻值选取的过程中要根据工作频率等实际情况进行一定的估算取值。根据芯片资料上提供的参考电压为 708 mV, 输出电压可由以下公式得出:

$$V_{out} = 0.708 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3)$$

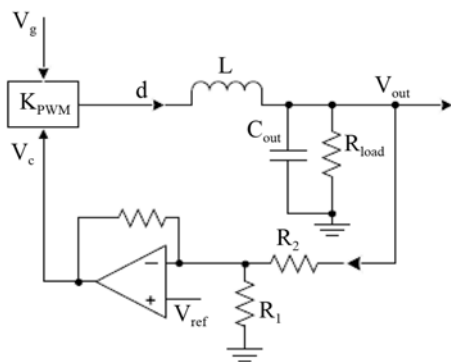


图 6 反馈电路部分

Fig.6 The feedback circuit

本电源系统放置两个相同的 5 V 电源, 其中一个主要给 DSP 供电, 另外一个给 FPGA 及其他外部电路供电, 后者的工作状态由 DSP 控制, 可以随时停止供电输出, 这样可以大幅度降低空闲状态下的耗电。

2.2 ± 12 V 电源的基本结构

± 12 V 电源部分的设计采用 UC3842 电源控制芯片, 该芯片最高工作频率达 500 kHz, 最大占空比可以达到 100%, 启动电流极低, 同样具有很好的高温特性, 采用 PWM 的控制方式控制电源的稳定输出(电路结构如图 7 所示)。

设计的过程中, 首先要考虑的是工作频率, 过高的工作频率不仅会导致系统的功耗提高, 而且在高温的环境下会进一步增加芯片的负担; 而过低的频率会使得输出电压有较大的纹波造成系统工作的不稳定。考虑的换能器的频率, 选取 100 kHz 作为工作频率。对于工作频率的控制, 与 R_1/C_1 引脚相连的电阻 R_1 和电容 C_1 共同决定了实际的工作频率, 具体计算公式如下:

$$f = \frac{1.72}{R_1 C_1} \quad (4)$$

为了避免该部分产生过大电流, 所以选取 $R_1 > 5$ k Ω 。

然后要注意的是反馈电压的控制。UC3842 内部反馈基准电压为 2.5 V, 采样电压经过分压之后的输入将与内部基准电压做比较, 当反馈电压较低时, 输出占空比将会增加, 反之, 当反馈电压较高时, 输出占空比将会减小。对于反馈电阻的选取, 仍然要考虑到热噪声、电感量以及功耗等因素。因而在本设计中, 反馈电阻阻值选取在 5~50 k Ω 之间。

由于该部分电源要同时输出 ± 12 VDC, 因而本设计引入了一个单输入、双输出的反激变压器(见图 8)。同时在次级端通过二极管检波, 产生极性相反的两路直流电源。根据反激电源的工作原理, 当开关管 S 导通时, 变压器初级 L_1 处于充电, 电流逐渐增加, 当开关管 S 断开时, 次级 L_2 感应出反向电流通过二极管 D_1 给次级电容 C_1 充电, 而此时变压器初级电流不会瞬间下降, 而是随着次级的充电过程而逐渐降低, 直到开关管 S 再次导通时, 初级 L_1 再次充电, 开始下一周期的工作。

另外, 由于变压器磁漏的存在, 当开关管 S 断开时, 变压器的初级会在开关管的漏极处产生一个高压, 如果不将其合理释放, 会对开关管造成破坏, 因此本设计在变压器的初级并联一个 RC 吸收网络以消耗漏磁电压。适当选取 RC 的阻值和容值, 使

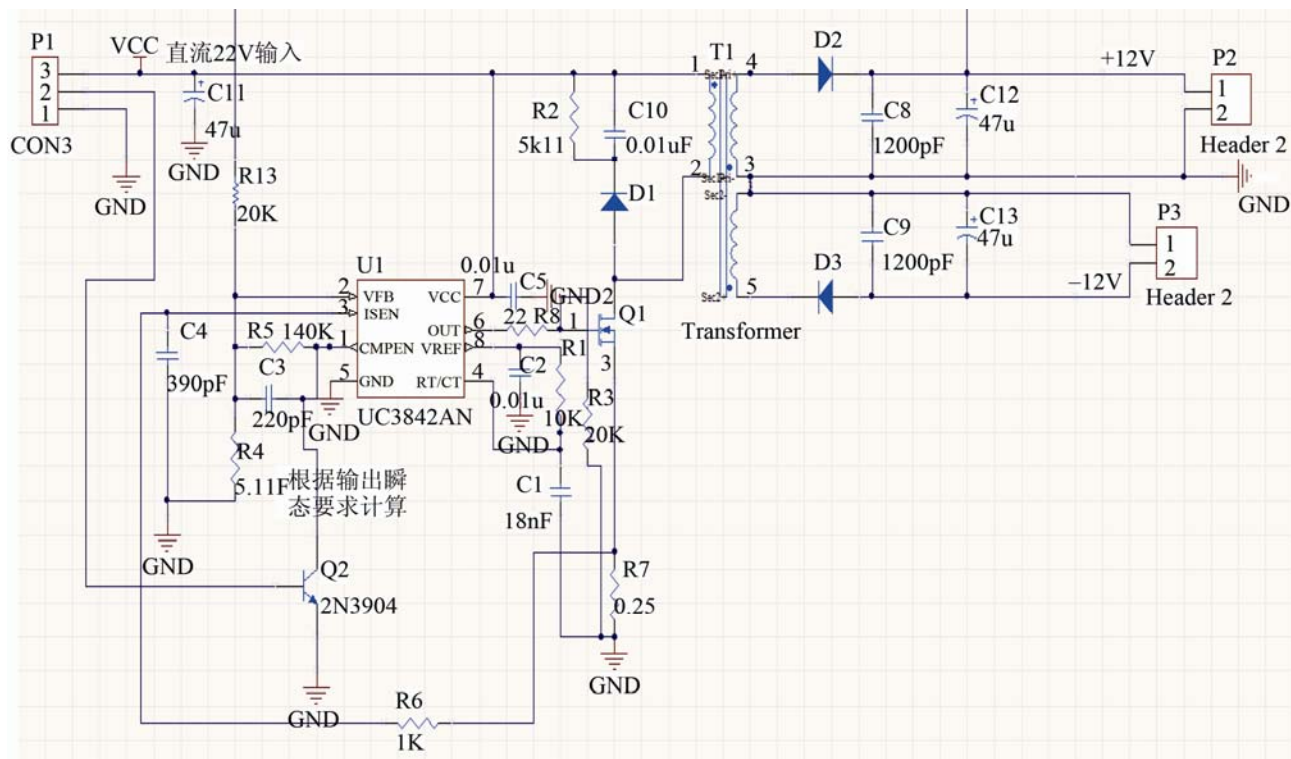


图7 ±12V 电源部分电路图

Fig.7 The circuit of ±12V-power supply

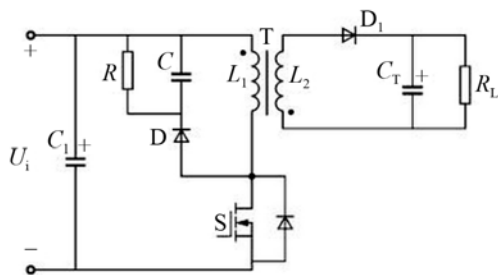


图8 反激电源电路图

Fig.8 The circuit of flyback power supply

得吸收网络不至于放电太快而造成功耗增加, 同时也要避免放电太慢而失去吸收效果。

同时, 通过控制三极管 2N3904 的通断来控制芯片的工作状态(如图 9)。当三极管关断, 芯片 CMPEN 引脚处于反馈补偿状态, 芯片正常工作;

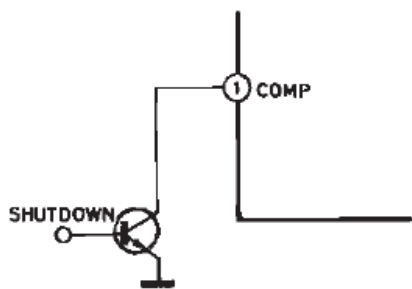


图9 通过 2N3904 控制原理图

Fig.9 The circuit of controller by 2N3904

当三极管导通, 相当于 CMPEN 和地短接, 失去反馈补偿作用, 芯片处于复位状态, 无输出电压。这样, 在空闲时段, 同样将该部分电源的消耗降到了最低。

2.3 200 V 高压电源

200 V 电源仍然采用 U3842 芯片产生 PWM 波, 同样采用三极管开关来控制芯片的工作状态, 其工作原理及电路基本与 ±12 V 模拟电源相似, 需要适当调节反馈电阻的阻值, 这里就不再重复赘述。

3 实验效果

考虑到实际随钻测井的作业环境, 要对各部分电源的性能在高温高压环境下进行严格的测试。由此, 在该部分电源测试时, 将其放置在 175 °C 的高温环境下, 并且经过两个小时以上的加温测试, 其结果显示为仍然能够正常稳定工作。

各部分电源分开测试的具体指标为: +5 V 电源输入电流为 100 mA 时高温下效率为 76%, ±12V 电源输入电流在 200 mA 时高温下的效率为 73%, 200 V 高压电源输入电流在 100 mA 时高温下的效率为 67%, 所有输出电源的纹波都在 1% 以内, 完全能够满足随钻实际测井的需要。

继续总体测试, 检验间歇工作方式的效果, 所

有电源的供电都由一个 22 V 的直流供电。在高温环境下, 整个仪器工作阶段, 当输入电流在 400 mA 以上时, 电源的效率可以达到 70% 以上, 其效率远远大于未经控制的线性电源, 符合随钻仪器的设计要求; 在仪器工作的间隙, 采用停电的方式, 使得电路的额外热损耗降到了最低, 与普通的非停电方式相比, 电能的利用效率提高了 50%, 电池的使用时间也随之提高了 30% 以上, 因而, 在实际的随钻测井过程中这种方式可以很有效地增加测井时间和测井深度, 同时在工程应用上该方式易于实现, 具有很好的实用价值。

4 结论

随钻仪器供电系统复杂, 且负载功耗较大, 提高电源的使用效率, 增加工作时间具有十分重要的意义。本文根据随钻仪器的工作特点, 设计出了一种最大化减小电能消耗的电源管理方式, 同时该方法结构简单, 性能稳定, 在工程上易于实现, 满足了随钻系统对高效电源的需求。

参 考 文 献

- [1] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 石油工业出版社, 2004.
- [2] 肖红兵, 鞠晓东, 杨锦舟. 随钻声波测井仪高效电源设计[J]. 声学技术, 2009, 5(10): 1-3.
XIAO Hongbing, JU Xiaodong, YANG Jinzhou. Design of high efficiency power supply for acoustic logging while drilling tool[J]. Technical Acoustics, 2009, 5(10): 1-3.
- [3] 仇傲, 李源, 刘西恩, 等. 随钻电源系统设计[J]. 电子测试, 2012, 1(1): 74-77.
QIU Ao, LI Yuan, LIU Xien, et al. Design of power supply for LWD[J]. Electronic test, 2012, 1(1): 74-77.
- [4] 谢应孝. BUCK 型 DC/DC 开关电源的研究与设计[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2010: 7-15.
- [5] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 16-26.
- [6] Wide Input Range Non-synchronous Voltage Mode Controller TPS40200[Z]. Texas Instruments.
- [7] Current Mode PWM Controller UC3842[Z]. STMicroelectronics.
- [8] 陈杰, 樊庆文, 邓川云. 基于 TPS40200 芯片的开关电源设计与分析[D]. 机电信息, 2010, 36(36): 130-13.
- [9] 刘涛. 一种电源设计方法: 中国, 201310028966.1[P]. 2013.01.25.
- [10] 福井薰, 栗林彻, 小川太一, 等. 电源装置及控制方法: 中国, 201210075929.1[P]. 2012.03.21.
- [11] 魏周拓, 唐晓明, 陈雪莲, 等. 一种随钻声波测井装置和方法: 中国, 201310107116.0[P]. 2013.03.29.
- [12] 杨谋, 孟英峰, 李皋, 等. 钻井全过程井筒-地层瞬态传热模型[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 366-371.
YANG Mou, MENG Yingfeng, LI Gao, et al. A transient heat transfer model of wellbore and formation during the whole drilling process[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 366-371.
- [13] 林广辉. 海洋钻井成本控制方法及钻井作业时间测算[J]. 中国海上油气(工程), 1991, 3(5): 60-70.
- [14] 杨法. 开关电源 PK 线性电源[J]. 现代通信, 2010(3): 13.
- [15] 赵平, 郭永旭, 张秋梅. 随钻测井技术新进展[J]. 国外测井技术, 2013(2): 7-13.
- [16] 李剑, 关而沫, 李亚敏. 基于有限元法的随钻声波发射、接收换能器研究[J]. 国外测井技术, 2014(1): 23-25.
- [17] SPE 128162; Journal of Petroleum Technology, Feb. 2011.
- [18] 林楠, 王敬萌, 亢武臣, 等. 最新随钻声波测井仪的技术性能与应用实例[J]. 石油钻探技术, 2006, 31(1): 73-76.
LIN Nan, WANG Jingmeng, KANG Wuchen, et al. Technical performances and applications of the newly developed sonic LWD tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 31(1): 73-76.