

文章编号: 2096-1618(2019)04-0375-05

基于小型发电机的耐高温随钻测量系统设计

张斌¹, 蔡鹏飞², 何正松³

(1. 成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225; 2. 成都普洛信德科技有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 基于泥浆压力的随钻测量系统在钻井作业中, 利用井下子系统实时测量钻头的方位和钻进状态, 将数据以泥浆压力波形式传输回地面, 由地面子系统进行信号解码。井下子系统采用小型发电机供电, 与传统的电池供电相比, 可以减少因更换电池导致的施工进度减缓。为适应井下的高温环境, 设计了基于小型发电机的耐高温井下子系统。测试表明, 该系统可以在170℃的高温环境下, 连续正常工作150 h。还设计了基于水循环的系统联合测试平台, 可以完整测试系统的发电、稳压、信号编码、脉冲发送、信号检测和解码等流程。

关键词: 随钻测量; 泥浆压力脉冲; 发电机; 耐高温

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2019.04.009

0 引言

为增加油气开采产量, 钻井轨迹越来越复杂, 钻井深度不断增加。为实时控制钻井轨迹, 钻井设备必须配备随钻测量系统(measurement while drilling, MWD)^[1]。基于泥浆压力脉冲的MWD在钻头附件的钻柱内安装传感器和数据采集电路, 通过调制钻柱内的钻井液(也称泥浆)压力, 产生压力脉冲信号。压力波通过钻柱内的泥浆介质传至地面, 通过压力传感器重新转换成电信号。该信号经地面系统处理后, 即可还原井下传感器数据^[2]。

传统上, 井下子系统采用电池供电。然而, 随着钻井深度的增加, 电池的有限续航时间成为制约工程进度的重要因素。近年来, 基于小型发电机供电的MWD系统成为研究热点^[3-4]。该小型发电机呈圆柱状, 可以安装在钻柱内, 利用钻柱内的泥浆压力冲刷发电机叶片, 带动转子转动, 从而产生电能。发电机产生的交流电经整流后成为直流电。由于钻柱内泥浆压力波动很大, 导致直流电的电压不稳定, 因此需要宽范围的直流-直流(DC-DC)转换电路将其转换为电压稳定的直流电后, 才能为传感器和数据采集电路安全供电。井下子系统面临的另一个挑战是井下高温。井下子系统所处地层环境温度随钻井深度增加而升高, 因此电路必须具有优秀的耐高温性能才能保证系统的可靠性。

1 系统架构

基于泥浆压力脉冲的随钻测量系统包括地面和井下两个子系统。井下子系统安装在钻头附近的钻柱内,

如图1所示。井下子系统包括传感器、数据采集电路、泥浆脉冲发生器及其驱动电路、小型发电机、电源转换电路等。井下子系统和地面子系统之间没有电气连接。系统的工作流程如图2所示。数据采集电路采集传感器所测量到的工具面角等数据, 对数据进行编码, 形成数据帧。泥浆脉冲发生器在驱动电路的控制下, 根据编码, 产生机械动作, 改变泥浆流横截面积, 从而产生泥浆压力脉冲信号。由于钻柱是中空的, 泥浆压力脉冲信号可以经钻柱传至地面。地面子系统包括压力传感器、信号接口箱、上位机电脑和解码软件。地面子系统通过压力传感器将压力信号转换成模拟电信号。信号接口箱接收模拟电信号, 经过放大和模数转换, 产生数字信号, 通过数据线传至上位机。上位机运行解码软件, 对数据进行FIR数字滤波, 然后对滤波后的波形进行脉冲识别^[6-8]。解码软件将时间轴均匀划分成若干个时间槽(time slot), 如果一个时间槽存在脉冲, 则该时间槽位编码为逻辑“1”, 否则为“0”。对一个数据帧的信息经过进一步处理后, 即可还原井下数据。

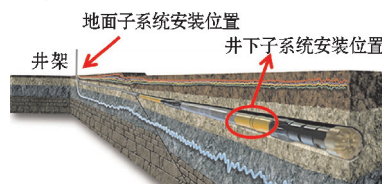


图1 MWD系统安装位置

2 地面子系统

地面子系统主要包括压力传感器、信号接口箱、上位机电脑和解码软件, 其中信号接口箱测试平台如图3所示。脉冲发生器在正常工作时, 在该测试平台中, 泥浆压力脉冲发生器在驱动电路的控制下, 按照数

据编码,使脉冲发生器的头部(脉冲头)产生机械动作,用位移传感器感知脉冲头位置,模拟泥浆压力脉冲。利用该测试平台,可以方便地研发和初步验证信号接口箱和解码软件。

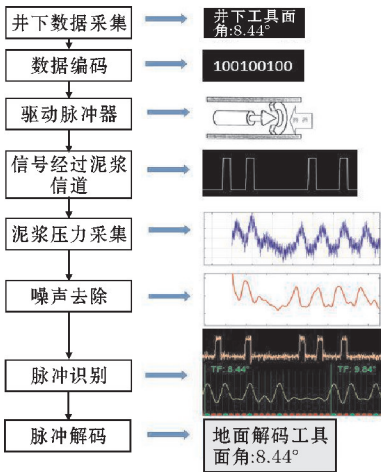


图 2 MWD 信号传输流程图(右侧是每一流程步骤)

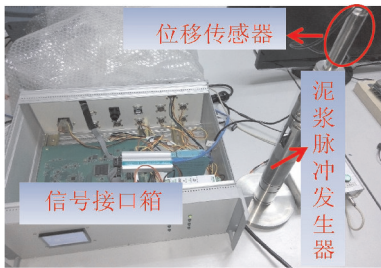


图 3 地面信号接口箱测试平台

信号接口箱内部包括防爆接口、运算放大器(用于放大输入信号和模拟滤波)、模数转换电路、数字信号处理(digital signal processing, DSP)单元、通信模块等。信号接口箱通过 RS-485 通信接口,将数字信号传输至上位机电脑。

上位机解码软件界面如图 4 所示。界面下方显示信号接口箱传输来的原始波形、经解码软件 FIR 数字滤波后的波形、以及根据波形中脉冲所在时间槽位置所得出的解码结果。界面上方左侧是根据解码结果绘出的井下工具面方位图,中间和右侧窗口显示其他实时解码数据(伽马、井深、钻头状态等)。

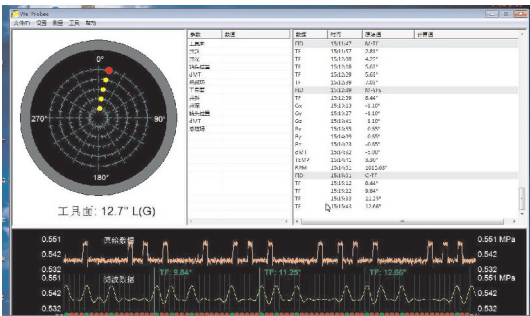


图 4 上位机解码软件图形界面

3 井下子系统

井下子系统由数据采集模块和能源供应模块构成。数据采集模块包括传感器(重力加速度计、磁通门、伽马计数器、温度传感器等)、数据采集电路、泥浆压力脉冲发生器及其驱动电路。能源供应模块包括小型发电机或耐高温电池,以及电源转换电路。

数据采集电路由一个耐高温单片机系统构成。单片机通过与传感器通信,采集实时状态信息,并将其打包编码形成数据帧,发送给泥浆压力脉冲发生器驱动电路,产生与脉冲发生器适配的驱动电信号(30 V, 1 A),控制脉冲发生器中的电磁阀产生机械伸缩运动,从而改变泥浆压力,产生压力脉冲信号。

采用耐高温电池供电是目前主流随钻测量系统的井下能源供应方案。其优势是:系统结构简单、造价低、可靠性高。缺点是:电池能量耗尽后,更换电池需要将整个钻柱从井下取出,耗时多。为了克服这一困难,在系统中,井下泥浆压力脉冲发生器和电子系统所需电能由安装在钻头附近钻柱内的小型发电机提供^[3-4]。项目研制的发电机如图 5 所示。发电机内部由线圈绕组形成定子和转子,钻柱内泥浆冲刷带动发电机叶片转动,从而产生峰值为 120 V 左右的交流电。该交流电经三相整流后,转换成电压为 120 V 左右的直流电。由于泥浆冲力变动范围很大,导致该直流电的电压波动很大,需要经宽范围输入的 DC-DC 转换电路,将其转换成电压稳定的 36 V 直流电输出(功率 100 W),才能为负载提供安全电能。DC-DC 转换电路的基本原理是将直流电压输入斩波成脉冲宽度可调的方波,再经 LC 滤波成为另一个直流电压^[9]。该 DC-DC 转换电路设计面临的挑战是:高输入电压、宽输入范围(100 ~ 150 V),大功率(100 W),耐高温(环境温度 170 ℃),体积小(16 cm×2 cm×2 cm)。目前的电源管理系统大多采用变压器降压后再进行 DC-DC 转换的方法,但系统体积大,无法在井下狭小空间安装^[10-11]。另一种方案是,不经过变压器降压,直接进行 DC-DC 转换,但系统受 DC-DC 控制芯片耐压值和耐高温性能限制,无法同时满足宽输入范围和大功率、耐高温的性能要求^[12-15]。



图 5 井下小型发电机实物图

为应对此挑战,提出采用隔离驱动方案,如图 6 所示。其中功率级包括传统降压 (Buck) 电路中的元器件:功率 NMOS 管、电感、电容等。功率级中 NMOS 管上的压降和结温 (junction temperature) 是限制电路性能和可靠性的主要因素。隔离驱动可以有效减小功率 NMOS 管上的压降,从而降低功率 NMOS 管的功耗和结温,改善电路性能和可靠性。DC-DC 电路板成品如图 7 所示。

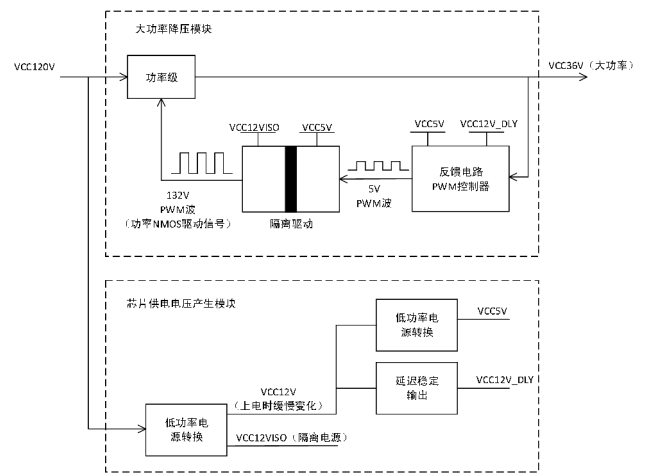


图 6 基于隔离驱动的 DC-DC 电源转换电路框图



图 7 基于隔离驱动的 DC-DC 电源转换电路实物图

为测试 DC-DC 转换电路在高温下的工作性能,将其置于高温测试箱中,在 170 ℃ 环境温度下连续工作 150 h (通常一次起下钻周期时间),如图 8 所示。功率 NMOS 管的开关性能是表征 DC-DC 转换电路是否正常工作的重要指标。NMOS 管的开关性能体现在其源极电压的上升和下降时间上。上升下降时间越短,则 NMOS 管处在开启和关断之间的中间状态时间越短, NMOS 管发热的功率越低,从而结温越低,可靠性越高。如图 9 所示的实测结果显示,在 170 ℃ 环境温度下, NMOS 管的源极电压上升和下降时间分别为 25 ns 和 100 ns,远低于 NMOS 管的开关周期 20 μs,因此 NMOS 管开启和关断时间短,结温低。

将 DC-DC 转换电路与负载 (数据采集电路和泥浆压力脉冲发生器驱动电路) 相互连接,即可为负载提供稳定输出的电能,构成完整的井下电子系统。井下电子系统测试平台如图 10 所示。将该电子系统置于高温测试箱中,在 170 ℃ 环境温度下连续工作 150 h,

结果表明系统工作正常:数据采集电路能够正确采集和编码数据,泥浆压力脉冲驱动电路能够产正确的压力驱动信号。

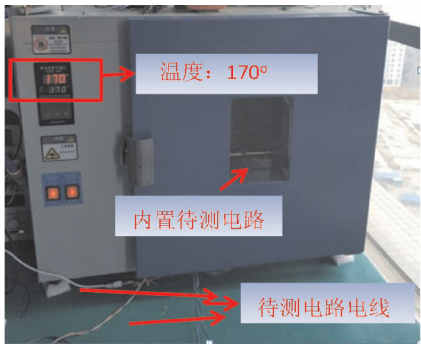
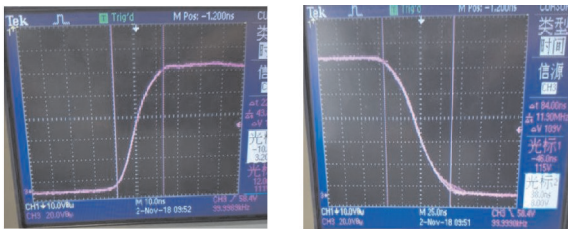


图 8 置于高温测试箱中的 DC-DC 电源转换电路



(a)开启波形 (b)关断波形

图 9 170 ℃ 环境温度下,实测的 DC-DC 转换电路中功率 NMOS 管

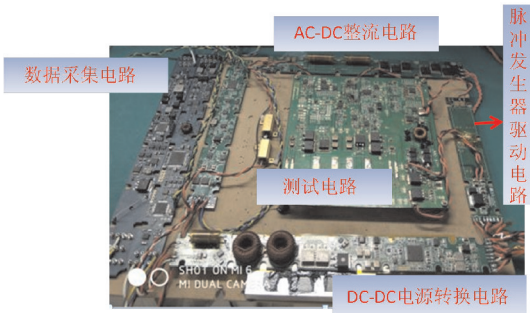


图 10 井下电子系统测试平台

4 基于水循环的系统联合测试平台

由于实际井下测试代价高昂,为了在地面联合测试井下子系统和地面子系统,设计了如图 11 所示的水循环测试平台。在该平台中,一个环形水管模拟钻井孔道,水管中的水模拟泥浆。井下子系统密封置于水管中。开动水泵,使水在水管中流动,水压设为 40 MPa,与泥浆压力大致相同,模拟泥浆的流动。水的流动冲刷发电机叶片,使其转动发电。供电正常后,井下电子系统和泥浆压力脉冲发生器开始工作,以水压力脉冲的方式发送传感器采集到的数据。模拟系统的缺陷在于:水的黏滞性比泥浆低,实际钻井中泥浆压力随井眼轨迹变化很大。但是模拟系统测试价格低

廉,便于下井实测前,快速廉价地对系统进行初步验证。为了模拟地面子系统,将压力传感器置于环形水管的另一处。压力传感器测量水压,将其转换成电信号,通过信号接口箱将数据传送到上位机电脑,由解码软件解码,如图12所示。地面子系统测量到的水压原始波形,经数字滤波后的波形,以及解码结果如图13所示。联合测试结果表明,井下子系统和地面系统能够配合完成发电、稳压、信号编码、脉冲发送、信号检测和解码等工作流程。



图11 水循环测试平台



图12 基于水循环的系统联合测试
(小型发电机和井下子系统安装在环形水管内)

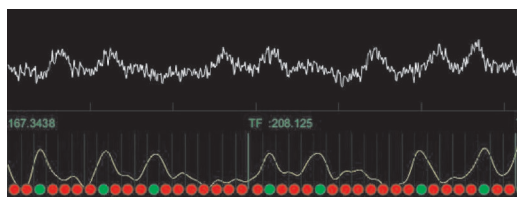


图13 基于水循环的系统联合测试(上方是地面子系统测得的原始水压波形,下方是数字滤波后的波形和解码结果)

5 结论

设计了一款基于小型发电机供电的耐高温随钻测量系统,系统基于泥浆压力脉冲传输信息,小型发电机利用泥浆冲刷力量带动叶片转动,从而产生电能。为产生稳定的直流供电,设计了基于隔离驱动的DC-DC转换电路。经150 h,170℃高温测试表明,井下子系统工作正常。还设计了水循环系统联合测试平台,在此平台上验证了系统的整体工作性能。

参考文献:

- [1] 刘树坤,汪勤学,梁占良,等. 国内外随钻测量技术简介及发展前景展望[J]. 录井工程,2008(4):32-37.
- [2] 江佩佩. 泥浆波随钻传输系统中信号处理方法的研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [3] Kotsonis S, Orban J, Hache J. Apparatus and method for generating electrical power in a borehole: U. S. Patent 7,133,325[P]. 2006-11-7.
- [4] Cooley J, Signorelli J, Lane J. Inertial energy generator for supplying power to a downhole tool: U. S. Patent 9,206,672[P], 2014-9-18.
- [5] Yang L, Xu M, Peng H. A new series hybrid DC-DC converter for wide input range with SiC[C]. IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications. 2018:154-158.
- [6] Chen W, Fang B, Wang Y. MWD drilling mud signal de-noising and signal extraction research based on the pulse-code information[C]. 2010 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. 2010:244-249.
- [7] Zhao J, Wang L, Li F, et al. An effective approach for the noise removal of mud pulse telemetry system[C]. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. 2007:971-974.
- [8] Rodney P, Gleitman D, Dudley J. Surface real-time processing of downhole data: U. S. Patent 7,999,695[P]. 2011-8-16.
- [9] 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,2004.
- [10] 张植保. 变压器原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [11] Lenk R. 实用开关电源设计[M]. 北京:北京图灵文化发展有限公司,2006.
- [12] Cuk S. Modelling, analysis, and design of switching converters[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1976.
- [13] Vicor Corporation. DCM4623xD2K17E0yzz isolated, regulated DC converter datasheet[M]. Andover: Vicor Corporation, 2017.
- [14] Texas Instruments. 50-W, 48-V input, 12-V output, isolated DC-DC converter datasheet[M]. Dallas: Texas Instruments, 2010.

[15] Kurokawa F, Yoshida R. Transient response of fast digital PID control switching power supply [C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2012:614–617.

Design of a Measurement-while-drilling System Powered by Small-sized Electrical Generator for High Temperature Applications

ZHANG Bin¹, CAI Pengfei¹, HE Zhengsong²

(1. College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chengdu Well-Probes Technology Inc., Chengdu 610041, China)

Abstract: In Measure-while-drilling (MWD) systems based on mud pressure telemetry, the down-hole subsystem measures real-time parameters such as inclination, azimuth, and tool face angles, and then it transmits the data in the form of mud pressure pulses up to the ground, where the ground subsystem decodes the information encoded in the pulses. To power the down-hole subsystem, a small-sized electrical generator is utilized, which eliminates the time due to battery-switching in the traditional battery-based powering scheme. To accommodate the need for high temperature down-hole applications, a high temperature-proof down-hole subsystem powered by small-sized electrical generator is designed and tested. Experiments show that the subsystem can work normally for 150 h under 170 °C. A unified testing platform based on water circulation is also designed and built, which can conveniently test the whole workflow of the system: power generation, voltage regulation, pulse transmission, detection and decoding.

Keywords: measurement while drilling; mud pressure pulse; generator; high temperature-proof