

· 电路与控制 ·

## 井下压力测试系统的低功耗设计

赵 鼎<sup>1,2</sup>, 祖 静<sup>1,2</sup>, 崔春生<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘 要:** 测取射孔瞬间的动态参数对评价射孔过程具有十分重要的意义, 是研究、勘测油田不可缺少的技术。为获得射孔过程中井下的动态压力数据, 研制了一种油井测压器。该测压器采用存储测试技术, 实时记录射孔及压裂时井下环空压力的变化。测试系统依靠自带电源来保证整个测试过程供电, 由于测试系统受到体积的限制, 电池体积和容量也较小。针对实测环境对石油井下测试系统进行了低功耗设计, 其总体功耗计算和实测结果表明, 该测试系统满足井下压力测试方法的要求, 从而验证了低功耗设计的有效性。

**关键词:** 低功耗; 压力测试; 电源管理; MSP430

**中图分类号:** TP271<sup>·</sup>2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2013)-05-0061-04

## Low Power Consumption Design of Down-hole Pressure Testing System

ZHAO Ding<sup>1,2</sup>, ZU Jing<sup>1,2</sup>, CUI Chun-sheng<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Education Ministry Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Measuring instant dynamic parameters at the time of perforating is very important for evaluating the process of perforating. It is a necessary technology to research and explore oil field. For getting the down-hole dynamic pressure data in the process of perforating, a pressure tester of oil well is developed. Storage testing technology is applied in the device to record the change of down-hole annulus pressure at the condition of perforating and fracturing at real time. Self-contained power supply of the testing system is used to power during the testing process. Volume and capacity of the battery is lower for the limited volume of the testing system. According to actual testing environment, low power design is performed to the oil down-hole testing system. The total power consumption calculation and actual testing results show that the requirements of testing methods of down-hole pressure are met and the effectiveness of low power consumption design is verified.

**Key words:** low power consumption; pressure testing; power management; MSP430

随着对石油和天然气资源的需求与日俱增, 其储层的勘探工作逐渐向更深、更复杂的地层发展, 同时深地层的地质条件要求井下装置和仪器不断改善, 使之在高温、高压的恶劣环境下能够有效工作<sup>[1]</sup>。射孔是用专门的射孔枪将套管和水泥环以及部分射开, 使井筒与地层联通, 达到油气流入井筒的目

的, 是完井主要的工序之一, 每次射孔的施工效果对最大限度的提高油井的产能起到决定性的作用。因此在日渐复杂的油田勘探开发过程中, 对射孔工艺也提出了更高的要求。然而伴随着环境条件的日益苛刻, 预测井筒动态特性也变得更为迫切。研究了解射孔过程中的压力特性, 对研究油气层特征, 分析

收稿日期: 2013-06-24

基金项目: 山西省归国留学人员重点科研资助项目(2008003)

作者简介: 赵鼎(1987-), 男, 山西忻州人, 中北大学硕士研究生, 主要从事动态测试与智能仪器方向; 祖静(1933-), 男, 北京人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为仪器科学与技术、动态测试与智能仪器等。

射孔压裂的完井效果,制定合理的施工工艺,为射孔枪的系统设计提供实验依据等都有重要的现实意义。中北大学研制的一种井下压力测试系统,能够准确获取石油井下射孔/压裂过程的压力-时间曲线。但受内置电池体积和容量的限制,要保证系统的工作状态满足井下测试的要求,必须对其功耗严

格要求。针对这种情况,文中对测试系统进行了低功耗设计。

## 1 测试系统的组成及工作原理

石油井下测试系统主要由壳体、传感器及其适配电路、逻辑/时序控制电路和电源模块组成。其原理框图如图1所示。

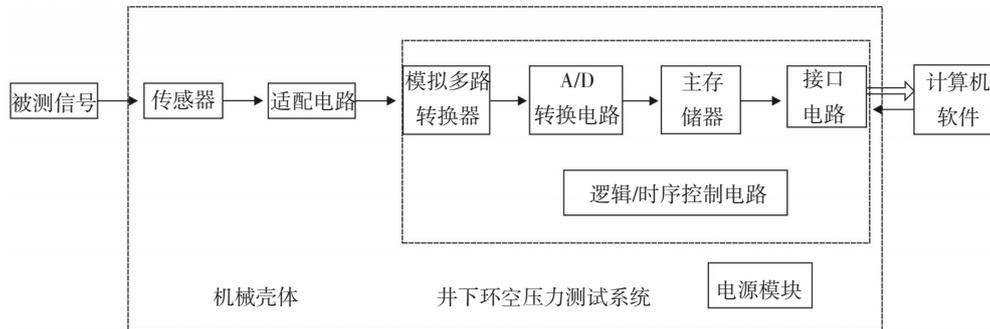


图1 井下压力测试系统原理框图

测试系统是在高温、高压、高冲击的恶劣环境下获得有效的测试数据,而且能够有效的保存。其壳体采用超高强度材料制做,密封联接,能承受射孔带来的瞬时高温、高压和高冲击对测试仪器的干扰,保护传感器及电路模块在测试射孔压力瞬间不受损失;传感器用来获取压力信号;电源模块为系统提供电能,选用耐高温锂电池,耐温要求达到140℃。控制电路完成系统逻辑功能,包括信号的AD转换、数据存储控制、电源管理等功能。计算机通过接口模块与测试电路通信。测试仪采用存储式测试方法,整套仪器是靠电池供电,降低电路功耗是新一代井下测试仪达到实用化所面临的现实问题。

## 2 低功耗设计

由于井下射孔过程中具有高冲击的影响,电源

模块必须采用焊接方式与系统相连以保证供电可靠性。因此系统就不存在完全断电的情况,所谓的“下电”也只是使系统处于极低功耗状态。故获取井下压力数据的复杂性对仪器的低功耗性能提出了更高的要求。

### 2.1 器件选择

合理选取关键器件是测试系统实现整体低功耗的重要保障,根据测试系统对低功耗和处理能力的要求,选用MSP430单片机做为主控芯片。例如在单片机的选择过程中,选用了TI公司的16位低功耗MSP430FG1611,电源电压采用3.3V,待机电流小于1μA,有6种工作模式:AM、LPM0、LPM1、LPM2、LPM3、LPM4。在不同的低功耗模式下,消耗电流仅在0.1~400μA。CPU进入低功耗模式后,用中断方

表1 主要器件筛选信息

名称	型号	功能	供电电压	温度范围	典型功耗
压阻式压力传感器	Kulite HKM-375 M-200 MPa	压力的变化量转换为电阻的变化量	2.5 V	-55~+175 °C	1.4 mA
电池	耐高温锂电池	电源	无需考虑	-55~+140 °C	无需考虑
电源管理	MAX894	提供数字和模拟电路电源	2.7~5.5 V	-40~+125 °C	17 μA
8 M晶振	SG-350-SCF8M	高频晶振源	2.7~3.6 V	-40~+85 °C	1.5 mA
MSP430单片机	MSP430F1611	控制测试系统的工作	2.7~3.6 V	-40~+85 °C	0.4 mA

式使其唤醒时间小于  $6 \mu s$ <sup>[2]</sup>。主要器件的筛选信息如表1所示。

### 2.2 分时/分区供电

在较为复杂的存储测试系统中,采用分时/分区电源管理方法能够有效控制功耗,实现电源动态管理<sup>[3]</sup>。在电路的各个工作状态中,把电路中不需要工作部分的电源关掉,尽可能把功耗控制在最低。分时/分区供电技术主要依靠“开关”的管理芯片及MCU自身活动状态转变实现。管理芯片受MCU控制分时段为不同电路模块供电<sup>[4]</sup>。

在一次油井压力过程中,测压器从接通电源到读取数据存在多个状态,而这些器件在每个系统状态都有不同的状态组合。通过控制每个器件的状态来尽可能降低其各自的功耗,从而达到降低其整个测试过程整体功耗的目的。

单片机通过控制 MAX894 完成了分时/分区供电技术,内部软件控制的低功耗模式转换、外围模块的开关完成了动态电源管理。测试系统原理图中 MAX894 芯片的应用如图2所示,第4、8管脚为低电平有效,通过控制  $\overline{ONA}$ 、 $\overline{ONB}$  的高低输入来使能/禁止输出管脚供电。其供电范围为 2.7~5.5 V,关断时消耗电流仅为  $0.1 \mu A$ ,两通道全部打开时消耗电流约为  $17 \mu A$ ,耗电曲线如图3所示。

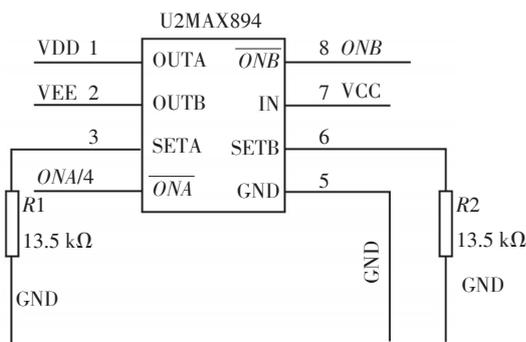


图2 电源管理芯片电路原理图

### 2.3 变频采样策略

石油井下测试系统采用编程自适应分段均匀采样策略<sup>[5]</sup>,通过事先编程确定记录过程分为若干个均匀采样阶段,每一阶段的开始时间、采样频率、存储点数是根据被测信号的变化自适应调整的一种采样

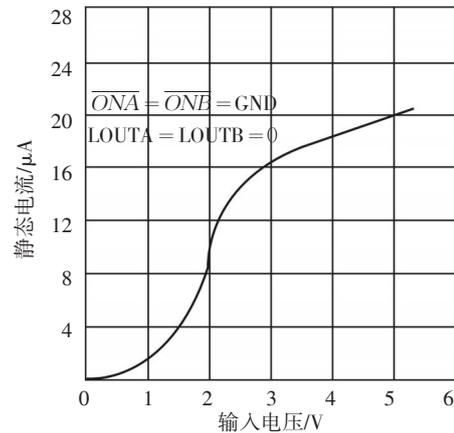


图3 MAX894耗电曲线

策略。

根据射孔信号特点,井下测试包括以下三段内容<sup>[6]</sup>。

- (1)仪器在地面及下井过程的静压渐变曲线。
- (2)射孔过程的动态压力数据。
- (3)射孔完毕后井下压力恢复过程。

具体到各个状态该电路采取的措施是:在电路连接电池后就自动进入接通电源状态,单片机处于LPM4模式。这个状态下系统仅可响应上电、下电中断,除给单片机供电外,其余电源分支均为关闭状态,电流消耗仅为  $2 \mu A$ 。系统上电后,测试系统随射孔枪下井过程中,压力变化缓慢,采用低速采样模式开始以  $1 \text{ Hz}$  频率采集数据,电流消耗为  $12.8 \text{ mA}$ 。这时采集的数据为地面压力及井下静压。当信号突变幅值满足程序中随动触发的条件时,即射孔瞬间引起压力突变时,高速记录射孔高频信号,射孔爆炸冲击波脉宽为毫秒级,采样频率为  $125 \text{ kHz}$ ,电流消耗为  $14.8 \text{ mA}$ ,记录时间约为  $1 \text{ s}$ 。射孔结束后,测试系统进

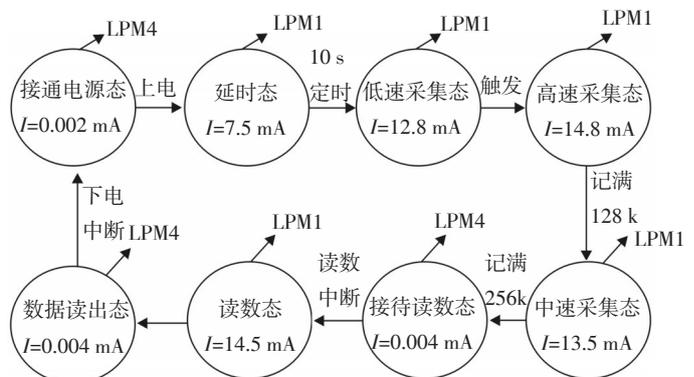


图4 系统工作状态

入中速采样阶段记录井下压力恢复过程,压力变化相对缓慢,采样频率设为 500 Hz,电流消耗为 13.5 mA。待读数态是电缆式下井低功耗设计的关键,通过采用电源管理方法使得电流消耗仅为 0.04 mA,读数阶段:过串口模块与计算机进行数据传输,电流消耗为 14.5 mA。数据读完后仅有电源管理器在工作,处于低功耗状态,这样实现微小的总功耗。

系统工作状态流程见图 4。

### 3 功耗控制总结

新概念动态测试系统<sup>[7]</sup>依靠自带电源来保证整个测试过程供电,由于测试系统受到体积的限制,电池体积和容量也较小。因而在测试系统满足测试要求的情况下,功耗尽可能低,张文栋教授就此问题提出功耗时间因子的概念<sup>[5]</sup>。在系统设计中给每种状态分配功耗限额,假定第  $i$  种状态的耗电电流为  $A_i$  (mA),持续时间为  $T_i$ ,则称

$$W_i = A_i \cdot T_i \quad (1)$$

式中,  $W_i$  为第  $i$  种状态的功耗时间因子。

由此得出测试系统所选电池容量  $W$  和最大允许电流  $\bar{A}$  与系统的功耗时间因子的关系式

$$W \geq \sum_{i=1}^l W_i = \sum_{i=1}^l A_i \cdot T_i \quad (2)$$

$$\bar{A} \geq \max\{A_i\} \quad (3)$$

从式(1)中功耗时间因子的角度来看,降低某一状态的功耗可以通过减小该状态的电流或缩短该状态的持续时间来实现。嵌入式系统中,减小状态电流主要表现为低功耗器件的选型,缩短状态持续时间的关键在于分区/分时供电设计的实现<sup>[8]</sup>。

假设实测过程下上井时间相同为 2 h,即低速采集和待读数态均保持 2 h,则仪器高速采样时间为

$$\frac{128 \times 1024 - 2 \times 3600 \times 1}{125 \text{ kHz}} \approx 0.99 \text{ s}$$

中速采样时间为

$$\frac{128 \times 1024}{500 \text{ Hz}} \approx 262.144 \text{ s}$$

表 2 为该石油井下测试系统在每个状态的持续时间以及功耗。

表 2 井下测试系统在每个状态的持续时间及功耗

测试系统	接通电源态	延时态	低速采集态	高速采集态	中速采集态	待读数态	读数态
持续时间	—	10 s	2 h	0.99 s	262.144 s	2 h	约 2 s
工作电流/mA	0.002	7.5	12.8	14.8	13.5	0.04	14.5

若不计仪器未投入使用时在接通电源态的功耗情况,由式(1)可得出该测试系统在实测过程中从上电开始直到整个井下测试过程中结束包括读数完毕在内的总功耗为

$$W_z = \sum_{i=1}^l W_i = \sum_{i=1}^l A_i \cdot T_i = 7.5 \text{ mA} \times 10 \text{ s} + 12.8 \text{ mA} \times 2 \text{ h} + 14.8 \text{ mA} \times 0.99 \text{ s} + 13.5 \text{ mA} \times 262.144 \text{ s} + 0.04 \text{ mA} \times 2 \text{ h} + 14.5 \text{ mA} \times 2 \text{ s} \approx 26.69 \text{ mAh}$$

### 4 实测结果

在保证小体积和低功耗的同时,该测试系统能够较好地完成井下压力测试,达到预期效果。图 5 为某油田井下实测压力曲线,由  $P-t$  曲线可知,射孔瞬间压力峰值约为 78 MPa,射孔过程持续时间约为 0.8 ms。此次实测试验不仅验证了该测试系统井下测试的可行性和精确性,而且验证了低功耗设计的有效性,为优化射孔提供了可靠的参数。

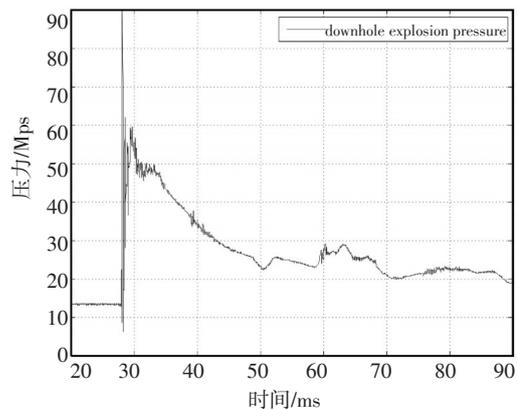
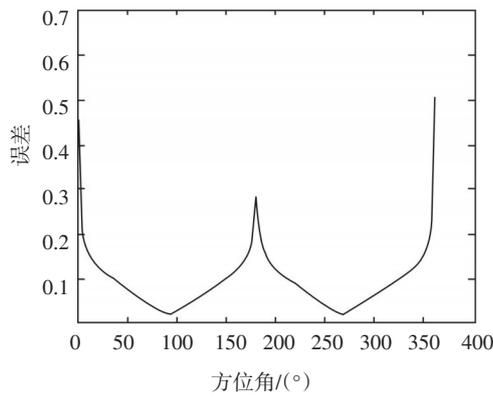


图 5 某油田井下实测压力曲线

### 5 结论

降低功耗是实现测试系统小型化的前提,通过选用 MSP430 单片机作为系统核心控件、高效的电源管理器实现分时分区供电,以及变频采样策略等几  
(下转第 77 页)



(b) 直角坐标系仿真结果

图8 仿真结果4

## 4 结论

文中给出了一种双站被动测距算法,并对该测距算法进行了定位精度误差分析。仿真结果表明,测距距离随着两个红外探测系统之间的距离加大而减小;两个红外探测系统之间的距离一定,与两个红外探测系统连线垂直方向测距距离最远;两个红外探测系统之间的距离加大,测距精度上升;两个红外探测系统之间的距离一定,方位角在某些范围可以取得较好的测距精度。

(上接第64页)

个方面来实现测试系统在井下实际环境下的低功耗设计。其总体功耗和实测结果表明,该测试系统满足井下测取射孔瞬间压力数据的要求,从而验证了测试系统低功耗设计的有效性。

## 参考文献

- [1] Predicting Pressure Behavior and Dynamic Shock Loads on Completion Hardware During Perforating[R]. Offshore Technology Conference, 2010.
- [2] Texas Instruments Incorporated MSP430x4xx family User's Guide [Z]. 2008.

## 参考文献

- [1] 郝万亮,赵剑. 基于角度和红外图像信息的弹目相对距离算法[J]. 航空兵器, 2007(1):47-50.
- [2] 陆一,王洪迅. 导弹逼近告警系统最小告警距离仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011(5):9-12.
- [3] 伍友利,方洋旺. 弹载被动系统测距算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009(7):1684-1688.
- [4] 赵忠义,邓天华. 基于运动学的机载红外被动测距算法研究[J]. 红外技术, 2012(8):482-484.
- [5] 谢邦荣. 机载红外被动定位方法研究[J]. 红外技术, 2001, 23(5):1-5.
- [6] 徐志弘,郑猛. 基于红外搜索系统的被动测距技术研究[J]. 舰船电子工程, 2005, 25(2):127-130.
- [7] 吴健飞,李范鸣. 三站红外告警系统被动测距方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4):560-564.
- [8] 陈振飞. 红外探测系统双站被动测距精度分析[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(5):842-844.
- [9] 王东,周清明. 红外告警系统被动测距方法分析[J]. 红外技术, 2008(8):440-442.
- [10] 徐志弘,郑猛. 基于红外搜索系统的被动测距技术研究[J]. 舰船电子工程, 2005, 25(2):127-130.
- [11] 潘明杰,连续. 红外搜索跟踪系统探测距离估算方法[J]. 电光与控制, 2012(9):47-49.

- [3] 张拥军,杨军. 动态时钟配置下的SOC低功耗管理[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2004(4):39.
- [4] 赵纯. 低功耗小体积石油井下压力测试系统研究[D]. 太原:中北大学, 2008.
- [5] 张文栋. 存储测试系统的设计理论及其在导弹动态数据测试中的实现[D]. 北京:北京理工大学, 1995.
- [6] 刘祖凡. 井下动态压力测试技术研究[D]. 太原:中北大学, 2012.
- [7] 祖静. 新概念动态测试[J]. 测试技术学报, 2003, 18.
- [8] 张炜,韩进. 低功耗嵌入式系统的分析与研究[J]. 计算机系统应用, 2009, 11:109-113.