

# 存储式井下振动测量工具的设计与室内试验

翟小强, 王 瑛, 刘 伟, 纪荣艺

(中国石油钻井工程技术研究院, 北京 100195)

**摘 要:** 钻井过程中, 如能成功地进行井下钻具的振动测量, 则有助于了解钻具的振动状态及引起钻具振动的原因, 从而采取相应的措施, 减小振动, 以减少或避免井下钻具的过早损坏、失效。因此, 研制井下振动测量工具, 对钻具的防振和保护具有很重要的意义。完成了存储式井下振动测量工具的总体设计, 提出了具体的电子测量系统实现方案, 进行了电子元器件选型、电子电路设计和控制软件开发。介绍了存储式井下振动测量工具的机械设计思路 and 过程, 完成了机械系统结构设计和强度校核。最后, 进行了存储式井下振动测量工具样机的室内试验, 应用振动分析软件回放测量数据, 试验证明, 样机设计合理, 具备现场试验的条件。

**关键词:** 钻柱振动 测量 井下工具 结构设计 强度试验 实验室试验

**中图分类号:** TE927<sup>+</sup>.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2011)04-0111-04

## Design and Laboratory Test of Memory Downhole Vibration Measurement Instrument

Zhai Xiaoqiang, Wang Ying, Liu Wei, Ji Rongyi

(CNPC Drilling Engineering Research Institute, Beijing, 100195, China)

**Abstract:** The successful downhole drilling tool vibration measurement helps to understand the drill tool vibration and the reason of vibration during drilling, thereby measures are actively taken to reduce vibration, reduce or avoid premature downhole drilling tool damage and failure. Therefore, manufacture of downhole vibration measurement instrument is important for drilling tool protection and decreasing vibration. The overall design of memory downhole vibration measurement tools was completed. A specific implementation of electronic measurement system was proposed. The selection of electronic components, electronic circuit design and control software development were conducted. This paper introduced the memory downhole vibration measurement instrument mechanical design processes and ideas. Mechanical system design and strength of the structure was verified. Laboratory experiments were carried out. Application of vibration measurement data analysis software replayed the data. The experiment proved that the design is appropriate and ready for field test.

**Key words:** drill string vibration; measuring; downhole tool; structural design; strength test; laboratory testing

钻井过程中, 钻头和钻柱在井下经常受到多种激励作用而发生振动现象, 如果不能有效控制可能损害钻头和钻柱, 并且导致钻压不能有效地施加到钻头上进行破岩, 致使机械钻速降低, 甚至可能诱发井下故障。因此, 准确了解钻头和钻柱在井下的振动状态, 预测底部钻具组合的工作动态, 对避免井底振动带来的危害具有重要意义<sup>[1]</sup>。美国 ReedHycalog 公司有成熟的产品“钻头黑匣子”, 可以测量钻柱井下振动情况; 国内井下振动测量技术与国外相比有一定的差距, 目前还没有性能可靠的井下振动测量工具。因此, 开展井下振动测量工具的研发非常必要且十分紧迫。

## 1 存储式井下振动测量工具总体设计

井下振动测量工具用来测量井下钻头和钻柱的振动情况——根据井下钻头和钻柱的振动特点, 将该工具安装在钻柱下部, 以真实地测量钻头和钻柱

**收稿日期:** 2010-04-21; **改回日期:** 2011-06-02。

**作者简介:** 翟小强(1983—), 男, 江苏泰州人, 2006 年毕业于北京理工大学探测制导与控制专业, 2008 年获北京理工大学武器系统与运用工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事控压钻井与欠平衡钻井方面的研究。

**联系方式:** (010)52781743, zhaixiaoqiangdri@cnpc.com.cn。

的振动数据。测量加速度是测量振动的关键,而且必须测量钻具在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴 3 个方向的振动,为此该工具选用三轴加速度传感器。井下振动测量工具采用存储式测量方式,在井下测量到振动信号后进行处理和存储,等工具回收后把数据传输到上位机中进行回放。存储式井下振动测量工具包括电子测量系统和机械系统两部分:电子测量系统的功能是进行数据的采集和存储;机械系统则是把电子测量系统进行密封和安装,以保证工具正常测量。存储式井下振动测量工具的结构设计成一个短节,如图 1 所示。

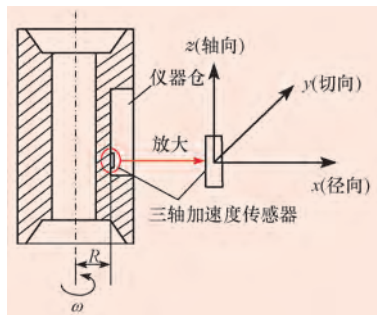


图 1 存储式井下振动测量工具总体结构

Fig. 1 Structure schematic of memory downhole vibration measurement instrument

井下工作环境非常恶劣,具有高温、高压、振动强度高和空间狭小等特点,对振动测量造成了极大困难,因此井下振动测量工具应具有可靠性高、体积小、耐高温、抗振、抗冲击、可长时间工作等特点。为此,井下振动测量工具在元器件的选型、加工等方面都必须按照井下工况来设计和加工。

## 2 电子测量系统设计

### 2.1 电子测量系统实现方案

存储式井下振动测量工具的电子测量系统主要包括三轴加速度传感器、信号调整模块、多路转换开关、模/数转换模块、微处理器、测试数据存储器、数据接口、上位机、电源及电源转换模块等,其总体方案如图 2 所示。

### 2.2 电子元器件选型

电子电路设计中,首先对电子元器件进行选型。三轴加速度传感器是整个井下振动测量工具的基础之一,也影响其他硬件的设计,因此显得尤为重要。由于低阻抗电压输出型(IEPE)压电式三轴加速度

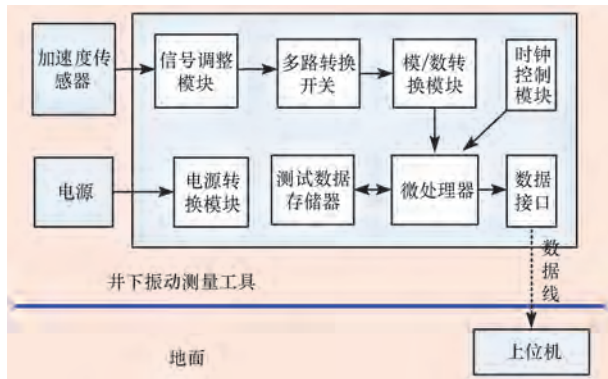


图 2 存储式井下振动测量工具电子测量系统实现方案

Fig. 2 Electronic measurement system schematic of the instrument

传感器具有体积小,质量小,结构简单,工作可靠,固有频率、灵敏度和信噪比高等优点,同时还具有测量信号质量好、噪声小、抗外界干扰能力强和可远距离测量等优点,此外 IEPE 传感器能与数字采样系统直接相连,不需要二次仪表,减少了干扰,所以系统选用 IEPE 压电式三轴加速度传感器。由国内外相关文献<sup>[2]</sup>可知,钻头最大的振动强度可达到 200g( $g$  为重力加速度),分辨率 0.1g 的加速度传感器能满足钻井工艺和振动测量的要求。考虑方向的影响,最终选用测量范围  $-200g \sim 200g$ 、分辨率 0.1g 的 IEPE 型三轴加速度传感器。

模/数转换模块采用 AD974 芯片,该芯片包括四路模拟转换开关和模/数转换,具有高通过率、低功耗、高精度等特性,完全满足三路加速度信号的转换工作。微处理器的作用是对测得的数据进行处理,对其他元器件进行控制,系统选用 STC12C2052 系列单片机作为微处理器。测试数据存储器的功能是存储测试数据,其在微处理器的控制下进行读、写、擦除等操作来实现数据储存功能。井下振动的频率有高有低,国外钻柱频谱分析图版显示,三牙轮钻头产生的振动频率可超过 200 Hz,为了分析其影响,根据采样定理和频谱分析的需要,采样率至少为 1 000 Hz,而系统采用 1 000 Hz 的测量频率时 100 h 的数据量将达到 2 GB。因此,从抗振性、存储可靠性和使用复杂程度等方面考虑,系统选用了 2 GB 的 SD 卡做为存储器。

数据接口的主要功能是井下振动测量工具通过数据接口与上位机进行通信,并将存储的数据传送到上位机上。系统已经选用单片机作为微处理器,大部分单片机都集成了 UART 异步、全双工串口,通过 RS232 串行口通讯构件可以与上位机进行串行通信,所以系统采用 RS232 接口作为数据接口。

上位机上的 COM1、COM2 接口就是 RS232 接口, 可以通过数据线与测量工具相连。存储式井下振动测量工具采用上位机<sup>[3]</sup>设置启动和关闭测量工具的时间, 工作人员预先估计工具的启动时间和关闭时间, 通过上位机把这两个时间传输到工具的时钟控制模块中。系统采用 SD2405AP 时钟芯片, 其内置晶振、充电电池和标准 IIC 接口, 具有集成度高的优点。

### 2.3 电子电路设计

存储式井下振动测量工具的电子电路主要包括单片机外围电路、模/数转换电路、数据存储电路、时钟控制电路、数据传输电路和电源转换电路等 6 部分, 主要对这 6 部分的内容进行电路设计。电子电路完全遵循整个测量工具的逻辑功能、每个电子元器件的电器特性和逻辑特性进行设计。

### 2.4 控制软件开发

存储式井下振动测量工具电路中的控制软件依靠单片机来实现, 单片机的主要软件功能模块有模/数转换模块、数据存储模块、数据发送模块和时钟控制模块 4 部分。控制软件采用汇编语言进行编程设计。

模/数转换模块中的 AD974 芯片通过控制线、数据线和时钟线与单片机<sup>[4]</sup>相连, 作为采集和转换部分。数据通过数据和时钟总线传送, 根据总线的工作原理, 按位传送, 传送过程在软件中实现。多路选择开关选一路模拟信号进入 AD974 芯片进行模/数转换, 由数据线将转换后的数据传送到单片机里并保存在一定的存储单元中供测量系统使用。数据存储模块的软件设计主要是用单片机控制 SD 卡, SD 卡采用 SPI 总线协议, 单片机对 SD 卡进行上电初始化和读写操作。数据发送模块中的单片机具有成熟的串行通信 UART 模块, 开发时只进行初始化设计和中断服务程序设计。时钟控制模块主要是单片机控制 SD2405AP, SD2405AP 通过标准 IIC 总线接收各种命令并读写数据。

## 3 机械系统设计

存储式井下振动测量工具机械系统的主要功能是对电子测量部分进行密封和安装, 以保证正常测量。机械系统设计包括结构设计和强度校核。

### 3.1 结构设计

机械系统的结构设计是把电子测量系统安装在仪器筒中, 在接头上开出安装槽, 仪器筒安装在接头

上的槽内。

存储式井下振动测量工具的仪器筒设计成 3 个器件仓, 分别安放三轴加速度传感器、电子电路和电池。因为根据井下振动测量的要求, 三轴加速度传感器的主要功能是测量振动, 不能进行减振, 所以单独固定在一个器件仓内。电子电路和电池要采取减振措施, 否则容易造成损坏。电子电路相对于电池来说体积和质量都小, 如果和电池放在一个器件仓中, 在振动情况下容易被电池撞击, 造成损坏, 所以电子电路和电池也分别放在 2 个器件仓内。因此, 三轴加速度传感器、电子电路和电池分别放在 3 个器件仓内。为了加工与在安装槽中安装方便, 3 个独立的器件仓设计成统一的内径和外径, 各仓室间使用丝堵进行连接和封闭, 以保证仓室间密封。

钻井中经常采用  $\phi 215.9$  mm 井眼, 笔者以该尺寸井眼中使用的工具为研究对象, 为了确保测量钻头振动的真实性, 以测量接头代替钻头与钻铤连接的双母接头, 从而保证井下振动测量工具离钻头最近, 同时不增加多余配合接头, 接头扣型加工成 430  $\times$  410 (NC50)。为了保证工具强度, 结合环空循环钻井液的需求, 确定测量接头外径为 177.8 mm, 内径为 57.0 mm。这种设计既不影响正常钻井施工, 又可满足测量和钻井工艺需求。井下振动测量工具采用 42CrMo 材料, 其机械总体装配如图 3 所示。

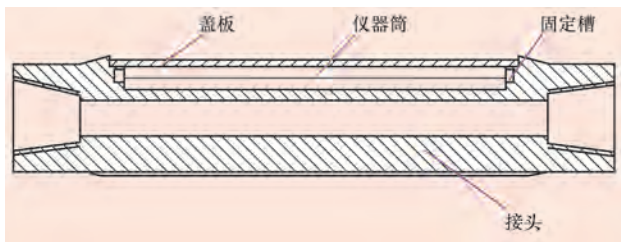


图 3 存储式井下振动测量工具机械总体装配

Fig. 3 Mechanical general assembly of the instrument

### 3.2 强度校核

#### 3.2.1 工具强度校核公式<sup>[5]</sup>

轴向应力( $\sigma_e$ ):

$$\sigma_e = p/S \quad (1)$$

弯曲应力( $\sigma_b$ ):

$$\sigma_b = Mr/J_z \quad (2)$$

轴向总应力( $\sigma_a$ ):

$$\sigma_a = \sigma_e + \sigma_b \quad (3)$$

剪切力( $\tau$ ):

$$\tau = Tr/J_p \quad (4)$$

式中： $p$  为钻柱轴向载荷，N； $S$  为钻柱横截面积， $\text{m}^2$ ； $M$  为钻柱弯矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； $r$  为钻柱截面任一点半径， $\text{m}$ ； $J_z$  为钻柱截面轴惯性矩， $\text{m}^4$ ； $T$  为钻柱扭矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； $J_p$  为钻柱截面极惯性矩， $\text{m}^4$ 。

考虑钻柱内外钻井液对工具强度的影响，可采用拉梅公式计算。

径向应力( $\sigma_r$ ):

$$\sigma_r = \frac{R_i^2 R_o^2 (p_o - p_i)}{(R_o^2 - R_i^2) r^2} + \frac{p_i R_i^2 - p_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \tag{5}$$

切向应力( $\sigma_t$ ):

$$\sigma_t = -\frac{R_i^2 R_o^2 (p_o - p_i)}{(R_o^2 - R_i^2) r^2} + \frac{p_i R_i^2 - p_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \tag{6}$$

式中： $p_o$  为钻柱外压，Pa； $p_i$  为钻柱内压，Pa； $R_o$  为钻柱外径， $\text{m}$ ； $R_i$  为钻柱内径， $\text{m}$ 。

表 1 存储式井下振动测量工具强度数据

Table 1 Strength data of the instrument

可能的危险点	距离/m	内压/MPa	外压/MPa	轴向力/kN	扭矩/kN·m	弯矩/kN·m	最大相当应力/MPa
仪器筒距钻柱中心最近点	0.046 6	35	0	300	2.5	10	156.7
仪器筒盖	0.101 6	0	35	300	2.5	10	250.5

4 室内试验

存储式井下振动测量工具样机加工出来后，进行了室内试验，测得了振动数据(见图 4)，并把数据发送到了上位机中。在上位机上利用开发的振动分析软件可以回放  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的测量数据和显示图形。室内试验表明，井下振动测量工具可以进行井下振动的测量，回放采集的数据，具备现场试验条件。

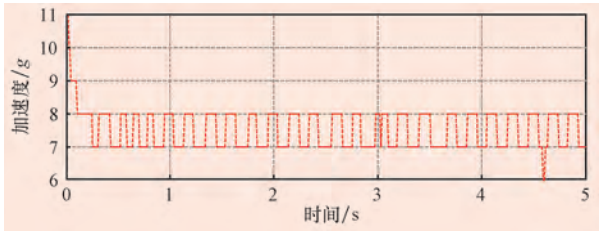


图 4 井下振动测量工具测试数据  
Fig. 4 Test data of the instrument

5 结束语

井下振动测量工具的研制，对钻具防振和保护具有很重要的意义。笔者完成了存储式井下振动测量工具的总体设计方案，设计了该工具的电子电路，达到了电路可靠性和稳定性的要求；介绍了井下振

由第四强度理论推出钻柱某一点的相当应力为：

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_a - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_a)^2 + 6\tau^2} / \sqrt{2} \tag{7}$$

3.2.2 工具强度校核计算

由井下工具相关手册获得井下振动测量工具的强度参数为：轴向力不超过  $3.0 \times 10^5$  N；扭矩不超过 2.5 kN·m；弯矩不超过 10 kN·m；钻井液静水压力不超过 35 MPa。材料强度：42CrMo 材料的最小屈服强度为 930 MPa；若安全系数取 1.5，则许用应力为 620 MPa。

根据强度校核公式计算井下振动测量工具各部分的最大相当应力(见表 1)，则各部分最大相当应力小于工具强度参数，机械设计完全符合强度要求。

动测量工具的机械设计思路和设计过程，设计中考虑了现场工艺和电子测量的要求；进行了存储式井下振动测量工具样机的室内试验，利用振动分析软件回放了测量数据，表明样机具备现场试验的条件。下一步工作是对该工具进行现场试验，以测试其可靠性和稳定性。

参 考 文 献

[1] 刘伟. 钻头、钻柱系统振动研究及应用[D]. 北京: 中国石油勘探开发研究院, 2008.  
Liu Wei. Research and application of drill bit and drillstring system vibration[D]. Beijing: Research Institute of Petroleum Exploration & Development, 2008.

[2] Zannoni S A, Cheatham C A, Chen C-K D, et al. Development and field testing of a new downhole MWD drillstring dynamics sensor[R]. SPE 26341, 1993.

[3] 湛德荣, 韩肖军. 低功耗油田井下压力温度测量仪器的设计[J]. 华北工学院测试技术学报, 2000, 14(3): 171-176.  
Chen Derong, Han Xiaojun. The design of low-power instrument for measuring pressure and temperature in oil-well[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2000, 14(3): 171-176.

[4] 郑学坚, 周斌. 微型计算机原理及应用[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2001: 374-378.  
Zheng Xuejian, Zhou Bin. Micro-computer theory and application [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 374-378.

[5] 崔学政, 管志川, 韩志勇, 等. 钻柱测量接头的机械结构设计与制造[J]. 机械设计, 2002, 19(3): 30-32.  
Cui Xuezheng, Guan Zhichuan, Han Zhiyong, et al. Structural design and manufacturing of mechniery for measuring joint of drill rod[J]. Journal of Machine Design, 2002, 19(3): 30-32.