

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005253

# DRILOG 随钻测井井下仪器系统总线接口设计\*

姜天杰 李 辉 姚文彬 刘建强 党煜蒲

(中海油田服务股份有限公司 北京 101149)

**摘要:** DRILOG 随钻测井系统是中海油田服务股份有限公司(中海油服)在十二五期间研制。由于井下特殊的高温高压环境以及仪器之间特殊连接方式,仪器之间的互联需要采用一种单芯总线,该单芯总线除了用于供电外还用于传输信号,仪器的机械钻铤外壳相连作为系统地,实现供电信号复用。重点针对单芯 TBUS(TOOL BUS)总线关键器件参数对总线带载能力的影响问题,分析并研究了关键器件参数设计选择方法。设计了一种供电和信号耦合的物理层接口,通过现场实验和 300 井次的作业测试,结果表明该物理接口设计能有效降低总线信号波形畸变,提升总线系统的带负载能力。

**关键词:** 随钻测井;供电信号复用;单芯总线;信号耦合;畸变;带载能力

**中图分类号:** TP2      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Design of bus interface for DRILOG logging while drilling downhole instrument system

Jiang Tianjie Li Hui Yao Wenbin Liu Jianqiang Dang Yupu

(China Oilfield Services Limited, Beijing 101149, China)

**Abstract:** DRILOG logging while drilling system is developed by China Oilfield Services Limited (COSL) during the 12th Five Year Plan period. Due to the special high temperature and high pressure environment and the special connection mode between the instruments, a single-core bus is needed for the interconnection between the instruments. The single-core bus is used not only for power supply, but also for signal transmission. The mechanical drill collar shell of the instrument is connected as the system ground to realize the power supply and signal multiplexing. This paper focuses on the influence of the key device parameters of the single core TBUS (TOOL BUS) bus on the bus carrying capacity. It analyzes and studies the design and selection method of the key device parameters. A physical interface of power supply and signal coupling is designed. Through field experiments and 300 well tests, the results show that the physical interface design can effectively reduce the waveform distortion of the bus signal and improve the load capacity of the bus system.

**Keywords:** logging while drilling; power supply signal multiplexing; single-core bus; transformer coupling; distortion; carrying capacity

## 0 引 言

DRILOG 随钻测井系统是中海油服在十二五期间研制的。井下高温,高压和恶劣的震动环境,对电子测量系统的稳定性有极高的要求。为了满足井下仪器的实时传输需求,需要设计一种高可靠性的总线实现各个井下仪器之间的通信。由于井下仪器特殊环境要求以及仪器之间的特殊接口,只能采用高可靠性的单总线。1553B 协议最初是由美国 SAE 委员会开发的<sup>[1]</sup>,主要应用与美国航空、航天等

军事领域<sup>[2-3]</sup>。由于其高可靠性、安全性等性能<sup>[4-5]</sup>,也逐步被应用与石油钻井领域。文献[6]提出利用 15530B 作为通信总线,仅仅将该总线应用于工控机和仪器之间的通信,采用双绞线结构,并不井下仪器之间的通信;文献[7-8]介绍了 15530B 在井下仪器之间的应用,但是多是应用到两个或者挂接仪器很少,例如应用在方位、电阻率、伽马测量 3 种仪器,并且没有实现该总线设计也没有既能通信还能够供电的复用功能。

由于 DRILOG 随钻测井系统需要通过总线既能通信

收稿日期:2020-10-22

\* 基金项目:十三五国家科技重大专项(2016ZX05058002-002)资助

还能够供电的复用功能,本文综合考虑仪器性能,在随钻测井系统中,依靠各个仪器的中心线传输信号,而中心线只能采用单总线制设计,采用了单芯总线设计,仪器的机械钻铤外壳相连作为回路地。根据设计难度和机械接口要求,设计了一种基于 1553B 协议的单芯供电和通信复用总线。通过设计,将仪器信号采用变压器耦合方式耦合到系统总线, FPGA 实现编码,并且设计了单抽头差分推挽耦合方式的物理层,通过理论和实验制定了隔离变压器和电感的选择方法,最后经过实验和现场作业表明该设计能够该总线通信效率高且安全可靠。

### 1 DRILOG 随钻测井系统单芯总线结构

DRILOG 随钻测井系统井下仪器部分包括脉冲器、定向测量探管、井下中控、自然伽马、电阻率仪器等。井下仪器充当独立节点挂在总线 TBUS(TOOL BUS)上,从总线取电,信号也通过总线接口电路耦合到总线上。井下实时工作时,井下中控 DCBC (downhole center bus controller) 按周期向 DGR 取得 Gra/Grb 数据;按照 EWR 仪器周期通知 EWR 当前时间及 EWR 采集周期,并向 EWR 取得最浅、浅、中、深电阻率相位数据、幅度数据、工作温度数据。DCBC 收到数据并对数据进行简单处理后,通过 TBUS 总线将数据有选择的传给定向测量探管,最后以一定的编码方式和速率产生脉冲信号,驱动脉冲器将数据通过泥浆传到地面。图 1 是 DRILOG 的井下仪器串的系统结构。

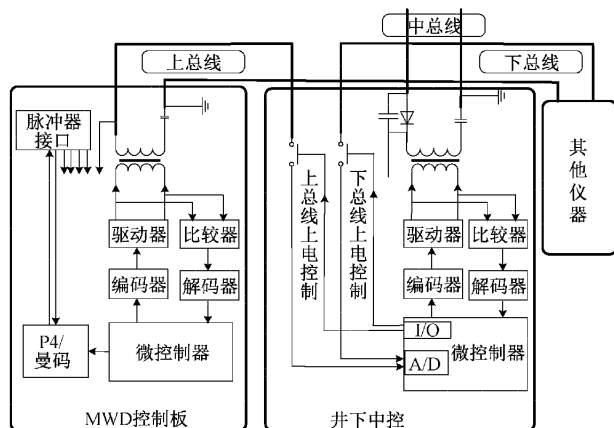


图 1 Drilog 随钻测井系统仪器串系统互联结构

### 2 系统总线的接口电路

DRILOG TBUS 的主要特点是单芯总线,采用直流供电和信号耦合传输方式。在功能上划分为数字部分和物理层两部分。图 2 为一种经典的仪器接口设计。系统总线(LWD BUS)的物理链路部分采用 1553B 总线的规范。1553B 标准规定了两种耦合方法:第 1 种采用线与与线直接连接,通常称为直接耦合;第 2 种耦合方法为变压器耦合。TBUS 采用的是变压器耦合方式。采用 FPGA 实现 1553

接口逻辑<sup>[9]</sup>。通过微控制器 I/O 口控制编码器实现编码和解码,通过驱动电路实现信号转换,然后经过隔离变压器实现信号总线转换,并且与其他仪器的连接。该种接口电路是早期仪器总线接口实现方式,早期仪器数量少,井下常用 4 条线组合<sup>[10]</sup>,驱物理层驱动能力是足够的。在图 2 电路中,总线电流从变压器线圈中流过,挂接仪器越多,线圈中通过的直流偏置越大,由于铁芯的饱和问题,这种设计将严重影响电路的带负载能力。针对该电路结构的缺点,提出了一种改进的方法,设计了一种带负载能力更强的电路,并确定了接口设计中关键设计的参数。

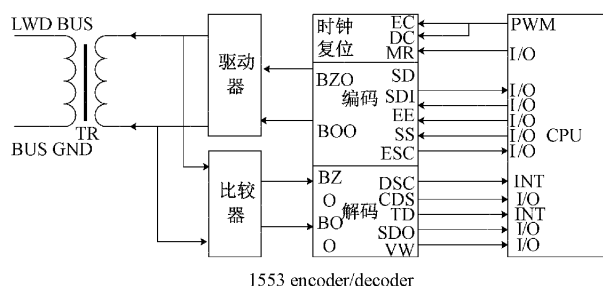


图 2 1553 接口电路

### 3 TBUS 总线物理接口设计

图 2 的结构电路是一种物理层通用设计,在实际应用中,设计了一种新的电路结构,图 3 是改进后的电路,这种设计的缺点是带负载能力较差,实验室条件下主控制器能够驱动 2 个节点,当仪器节点数目超过 2 个时,信号幅值严重衰减,通信误码率无法达到要求。

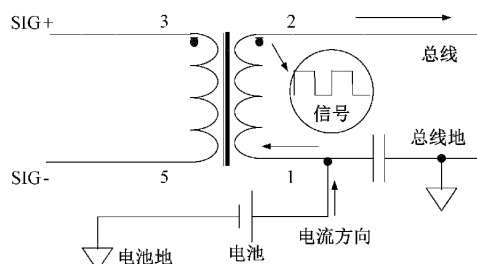


图 3 初版设计的一种物理通信电路

在图 3 设计的基础上进一步优化:1)驱动端采用推挽输出驱动;2)接收端采用差分比较输入。图 4 的设计采用了推挽驱动输出,抗干扰能力较图 3 的初版设计有显著加强。通过分析变压器参数对信号衰减的影响,确定了关键部件变压器的参数,使图 4 的电路获得了较好的节点驱动能力,目前 DRILOG 随钻测井系统大满贯作业总线仪器挂接数量超过 10 个,通信质量优良,保障了作业成功。

图 3 所示的总线电路设计带多个负载时总线信号被下拉,驱动能力不足,脉冲波形通过脉冲变压器后,波形常常产生畸变,其中脉冲顶部降落(顶降)是波形畸变的主要表

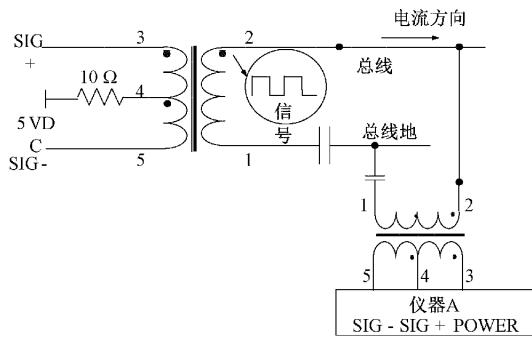


图 4 一种驱动能力更强的物理接口设计

现。脉冲变压器设计等文献资料给出了顶降定义<sup>[11-13]</sup>：脉冲顶部曲线与脉冲下降沿的交点电平和脉冲最大幅度的差值与脉冲最大幅度的百分比，如图 5 所示。

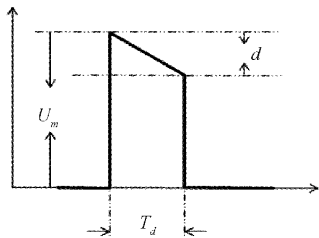


图 5 波形的顶部降落概念

顶降  $\lambda$ ：

$$\lambda = d/U_m \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\lambda$  为顶降； $d$  脉冲顶部曲线与脉冲下降沿的交点电平； $U_m$  为脉冲最大幅度。

在中控通信接口电路设计中，接收信号解码部分采用比较器输入，若经过变压器耦合的波形顶降过大，导致顶部落入比较器的阈值范围，这时将产生误判。所以，在不考虑电路其他因素的影响下，应该选择对输出信号影响最小的变压器。变压器初次级线圈工作时可以等效为下面的电路，如图 6 所示。

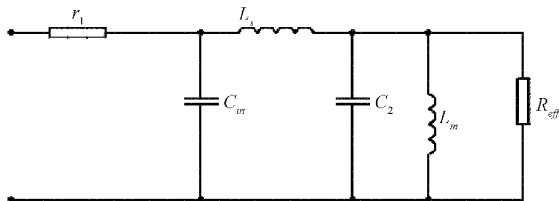


图 6 变压器工作时的等效电路

其中， $r_1$  表示变压器初级线圈内阻； $L_1$  表示初级线圈的漏感； $C_m$  表示初级线圈的分布电容； $C_2$  表示次级线圈折算到初级线圈的分布电容； $L_m$  表示初级线圈的电感； $R_{eff}$  表示折算到初级线圈的负载电阻。电容和漏感对脉冲平顶影响不大，计算脉冲顶降时，对变压器等效电路进一步简化，得到图 7 所示电路。

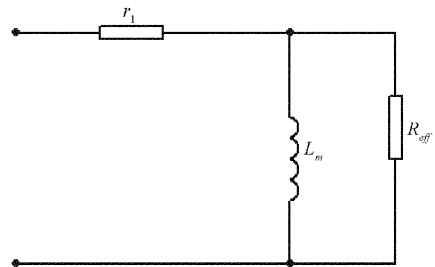


图 7 脉冲变压器顶降等效简化电路

因此，顶降计算公式：

$$\lambda = t_d \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{r_1}{R_{eff}}\right)} \cdot \frac{r_1}{L_m} \quad (2)$$

其中， $t_d$  为脉冲宽度。由式(2)可以看出，在负载一定的条件下，脉冲宽度越小，线圈内阻越小，磁化电感越大，则脉冲波形的畸变也越小。在脉冲宽度固定（信号频率，40 kHz），负载电阻远大于线圈内阻时，波形的畸变主要取决于  $r_1/L_m$ 。线圈的电感量随匝数的增加而呈平方数增加，即  $L_m \propto N_2^2$  而  $R \propto N$ ，所以电感的变化量远高于电阻的变化量，所以电感量是影响波形顶降最主要的因素<sup>[14-15]</sup>。为了选择合理的电感值进行总线实验。

#### 4 总线实验

为了找到合适的变压器和电感参数，设计了总线带载能力实验。采用普通的设计，最大只能带 2 支仪器，当超过 2 支仪器时，通讯波形畸变严重，误码率增加。图 8 是带载实验说明原理。

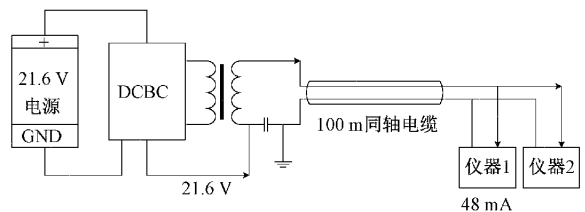


图 8 通信总线带载实验

在图 8 所示的实验中，DCBC 作为主节点驱动井下模拟仪器，连接方式为：中控—(120 m 电缆)—仪器 1—(2.5 m 电缆)—仪器 2—(2.5 m 电缆)。分别测试了 3 款变压器，分别测量了初次级线圈的电感量，如表 1 所示。

表 1 3 款变压器

| 编号 | 初级线圈电感        | 次级线圈电感 | 变比    |
|----|---------------|--------|-------|
| A  | 605 $\mu$ H   | 12 mH  | 8 : 1 |
| B  | 1 021 $\mu$ H | 56 mH  | 8 : 1 |
| C  | 6.3 mH        | 292 mH | 8 : 1 |

从电感量来分析，C 变压器线圈电感量最大，理论上对波形顶降的影响最小。在不同频率范围内测量了上述 3 款变压器产品的  $r_1/L_m$  值，结果如图 9 所示。

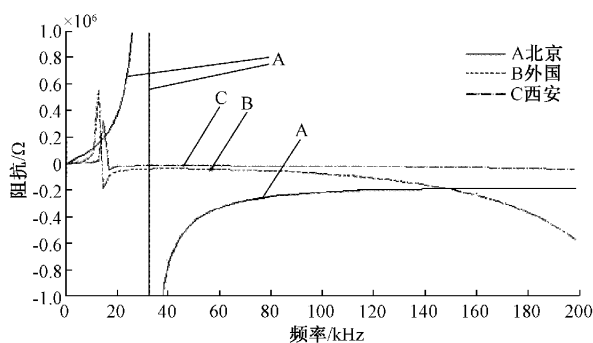


图 9 不同变压器 R/L 曲线

图 9 中 C 型变压器曲线趋势与电感测量结果趋势一致,这说明 C 型的变压器对信号波形顶降影响最小。因此,电感量越大,顶降越小。然而电感量增大,也会带来负面的影响,若电感量过大,脉冲作用完成时的电压回摆幅度也越大,信号恢复时间越长,当回摆幅度与比较门限相当时,很容易引起电路的误动作。而且恢复时间越长,也将影响通信能力。由此,电感量即影响顶降又影响回摆,实际设计中必须对两个因素进行权衡,选取合适的变压器参数。经试验,给出变压器参数的参考值,如表 2 所示。其中,L1-2,L3-4 分别是原边两个线圈,L4-5 是副边。实际波形分析,采用 C 电感的电路效果最好,A 最差。如图 10~12 所示,实际的波形质量表现和理论分析一致。

表 2 变压器参数的参考值

| 绕组     | L1-2 | L3-4 | L4-5 |
|--------|------|------|------|
| 匝比     | 1    | 8    | 8    |
| 电感量/mH | 4.5  | 290  | 290  |
| 直流电阻/Ω | <0.5 | <45  | <45  |

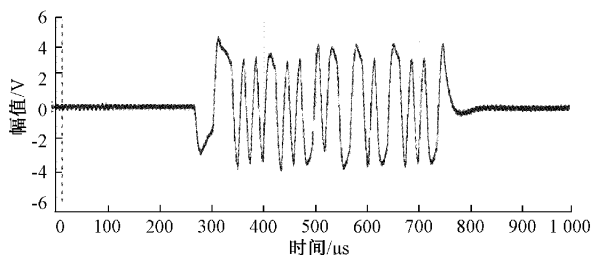


图 10 采用 A 变压器时信号质量

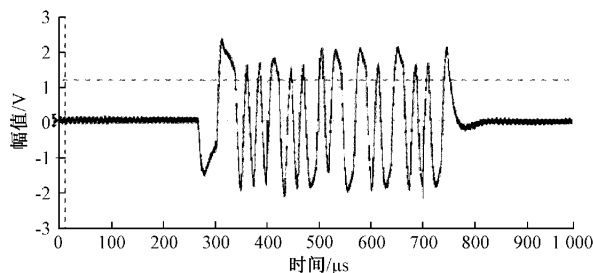


图 11 采用 B 变压器时信号质量

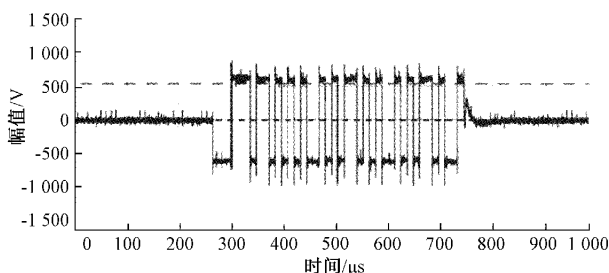


图 12 采用 C 变压器时信号质量

在变压器参数确定的情况下,试验了中控驱动电路隔离电感值与总线输出电平对应关系,如表 3 所示,从表 3 测试结果可以看出,随着电感量增加,信号的仪器 2 接入端信号的峰峰值不断增加。最终于选取隔离电感选取为 1.6 mH。

表 3 驱动电路隔离电感值与总线输出电平对应关系

| 电感量/<br>mH | 信号峰峰值/<br>mV | 测量时间(5 min)<br>错误数据/总数据 |
|------------|--------------|-------------------------|
| 0.80       | 264          | 5%                      |
| 1.00       | 300          | 2.34%                   |
| 3.00       | 306          | 1%                      |
| 4.36       | 322          | 0%                      |
| 5.60       | 322          | 0%                      |
| 2.00       | 360          | 0%                      |
| 4.00       | 380          | 0%                      |

在确定了影响总线带载能力的关键参数之后,重新做了带载通信测试,此次从通信节点数目增加到 10 个左右,如图 13 所表示。

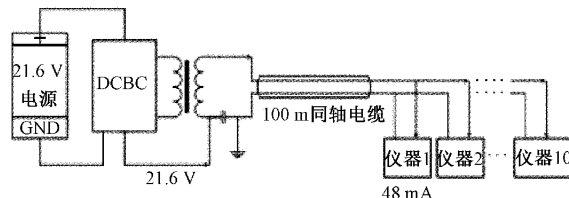


图 13 带 10 个负载总线驱动测试

表 4 所示为采用不同器件参数时通讯质量对比。调整变压器和隔直电感参数后,通信误码率在 5%左右,满足随钻测井 4 条线作业要求。而采用传统的设计,在带 2 个节点的情况下,通信误码率则达到 55%左右。总线驱动实验说明新的接口电路变压器和电感参数选择是提高总线接口的驱动能力的关键因素。

表 4 两种接口电路带负载能力比较

| 带负载能力 | 信号峰峰值/<br>mV | 测量时间(60 min)<br>错误数据/总数据 |
|-------|--------------|--------------------------|
| 2     | 264          | 55%                      |
| 10    | 2 000        | 5%                       |

## 5 结 论

DRILLOG 随钻测井系统是十二五重大专项,随着随钻测井高端仪器的不断推出,原来的常规 2 条线作业扩展到 4 条线,继而随着随钻声波,随钻测压和随钻探边电阻率等高端仪器不断推出,常规 4 条线加高端仪器的大满贯下井组合作业比例也越来越高。为适应井下多节点通讯压力,提高井下通信总节点的驱动能力,支持带多个节点的随钻大满贯作业,本文提出了一种带多个负载节点的供电和通信复合单芯总线的物理接口设计,并研究了关键核心器件参数对总线信号衰减能力的影响,最后提出了一种基于 1553 的单芯总线物理核心器件的关键参数选择方法。通过现场实验和 300 井次的作业表明,该方法有效且稳定工作的。除了本文研究的原因之外,尚有其他原因会导致信号衰减的影响,需要进一步分析和实验,不断提高总线通信效率以及可靠性安全性。

## 参考文献

- [1] 江志东,霍立平,张弟,等. 基于 SoC 芯片的 1553B 总线仿真平台设计与实现[J]. 电子设计工程, 2020, 28(24): 152-157.
- [2] 王新亮,陈凯,薛琪琪,等. 基于 1553B 总线的飞控软件测试仿真平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(11):12-15, 20.
- [3] 邢川,徐楠,冯彦君,等. 一种 1553B 总线系统的通信方法及装置: CN111431780A[P]. 2020-07-17.
- [4] 李贵娇,鲁争艳,房建峰,等. 基于 FPGA 的 1553B 总线远程终端设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5):97-101.
- [5] 修展,程永生,霍小宁,等. 一种基于 FPGA 实现 4M 1553B 总线协议的方法及系统: CN110851390A[P]. 2020-02-28.
- [6] 王海波. 基于 FPGA 的随钻仪器通讯模块设计[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2017, 35(5):475-480.
- [7] 江志东,赵冬梅,刘晓阳,等. 嵌入式多层次 1553B 总线原理实验箱设计与实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(15):94-99.
- [8] 尚捷,贾建波,朱伟红,等. 旋转导向液压驱动模块全自动测试系统研制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5): 145-149.
- [9] 张晓,胡颖毅,黄子硕,等. 基于 FPGA 的 1553B 总线接口技术研究及实现[J]. 无线互联科技, 2020, 17(6):155-157.
- [10] 尚捷,姚文彬,李辉. 随钻井下仪器总线测试系统研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(8):118-121.
- [11] 程羽. 随钻中子测井数据校正分析[J]. 科技视界, 2020(11):105-106.
- [12] 杨宁宁. D-T 孔隙度测井数据校正及实验研究[J]. 核技术, 2020, 43(4):94-98.
- [13] 大连海伏科技有限公司. 一种降低平顶跌落的方波脉冲电源: CN211352075U[P]. 2020-08-25.
- [14] 王伟平,余博嵩,王祯浩,等. 新一代天气雷达发射机相位噪声分析研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 16-21.
- [15] 倪卫宁,张卫,李新,等. 一种用于随钻测量短节的总线驱动装置: CN110894787A[P]. 2020-03-20.

## 作者简介

姜天杰,工学硕士,工程师,主要研究方向为随钻测井和旋转导向钻井仪器的研发工作等。

E-mail:jiangtj@cosl.com.cn