

北京图书馆藏

36234

3

钻井采油的井下检测

(第二次补充修订版)

—全国石油钻采机械行业技术情报网组织翻译—

兰州石油机械研究所

钻井采油的井下检测

[苏] Ю.Б. 格拉切夫 著
Б.П. 瓦尔拉莫夫

华东石油学院
东北石油学院 译校
兰州石油机械研究所

1973 兰州



A 793062

内 容 提 要

本书论述了钻井过程中井下参数的自动检测问题,论述了将信号传递到地面的有导线和无导线通信道的问题。

研究了带水力的和带有导线的通信线路的涡轮转速计。

说明了采油过程中井下参数自动检测的问题。

书中有 6 个表, 186 张图, 106 篇参考文献。

Ю.В.Грачев

В.П.Вирламов

Автоматический контроль в скважинах при бурении и эксплуатации

2-е издание исправленное и дополненное

Издательство «Недра» Москва 1968

*

钻井采油的井下检测

兰州石油机械研究所出版

(兰州市七里河区敦煌路125号)

燃料化学工业出版社印刷二厂 印刷

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $13 \frac{1}{2}$ · 字数 310 千字

印数: 1,500 定价: 1.60 元

引 言

在钻井和采油过程中,通常要对那些表示油井状况或油井内各种工艺过程的所谓井下参数进行测定和检测方面的研究工作。

钻井时必须检测油井的方向、钻头转数、钻头的轴向压力(钻压)、钻头的转矩、井底钻具和钻井用动力机的状况,必须弄清所钻岩石的地质特性。

采油时通常要测定地层压力和井底压力,井中液体的动液面、温度和比重,以及其他井底参数,而且还要检测深井泵设备的状况。

到目前为止,检测钻井状况主要是根据测量地面参数——大钩上钻具的重量、泵管线内的压力、钻井用动力机的电流及其他——的仪表的读数来进行,所以常常不能反应出井底钻井参数的真实值,特别是当钻井深度增加时以及井发生倾斜时更不能反应出井底钻井参数的真实值。

目前采用的直接测量井下参数的方法,是要周期地将特殊的测量装置下入井中,所以,不得不使钻井过程暂停下来,并从井中提起钻井工具,这样就会花费很多的时间和资金。周期性地进行井下测量,不能够对工艺状况进行连续的检测。

石油、天然气、煤炭和金属矿藏开发速度的增长势必要钻超深井和方向井,同时要在复杂的条件下钻井。在这种情况下,必须在钻井和采油的整个工艺周期内对井下参数进行连续的和自动的检测。井很深时,有时根本不可能用电缆把普通的测量装置下放到井中。由于要钻到深达15000~18000米的地壳表部,自动检测井下参数有特别重要的意义。这个具有很大科学意义和国民经济意义的问题要求改进整个钻井技术。自动检测井下参数和在钻井过程中进行地球物理的研究,是钻这种深井的基本技术条件之一。

如果说在发展的第一阶段,由于采用了功率更大的装备和对繁重的工作进行了机械化而使钻井与采油技术已经得到了改进的话,那末近来对钻井与采油过程的控制的改进就具有头等重要的意义。

不自动检测井下参数,就不可能实现钻井和采油过程自动化。目前已研究出井工业生产几种钻井时用的钻头给进调节器。然而,实验表明,调节器不能保证钻井状况的全面自动化,因为调节器记录的地面参数只是间接反应井底的真实钻井状况。如果在调节器内采用井底参数的信号,就能大大提高钻井自动调节器的质量和扩大其使用范围。

要自动检测井下参数,势必研制包括装在井底钻具中的井下仪表在内的特殊装置。井下仪表能测定井下参数,将这些参数转换为测量信号,然后沿井底与地面间的通信线路传递到地面。在地面上,信号由二次仪表接收、整形以便于肉眼观察或记录;或者传输给自动控制装置或者沿地面通信线路传输给调度站。

研制这种检测装置时,最困难的是制造特殊的井下测量仪器和建立井底与地面间的通信线路。测量仪器和通信线路应保证遥测到的井下参数具有必要的而且常常是很高的精确度。在整个工作过程中测量仪器和通信线路还要可靠。钻井和采油时,井下仪器和通信道都处在特别复杂的条件下。建立通信线路是首要的任务,因为通信道的类型及其参数决定遥测装置电路的选择和井下与地面仪表的结构。

1947~1948年,里沃夫综合技术学院、乌克兰机械学和自动学研究所与苏联科学院自动学和运动学研究所一起开始研究井下测量用的通信线路并研制所需用的设备[53, 54, 98, 99]。这些工作以后由全苏石油和天然气炼制及人造液体燃料科学研究所继续进行,而后全苏钻井工艺研究所和国立石油机械制造科学研究设计院又进行了研制测定涡轮钻具转速的涡轮转速计的工作。与此同时,也制成了装在钻杆内的电力有线通信线路[64, 102]。

全苏钻井工艺研究所协同乌克兰科学院机械学和自动学研究所以及莫斯科石油及天然气工业学院(莫斯科石油学院)对用来传输井底钻井参数信息的油井水力通信道作了大量的实验研究与理论研究工作。

目前,全苏钻井工艺研究所已研制了在涡轮钻深井(4000~5000米)过程中检测钻头转动速度的低频水力涡轮转速计。

1950~1951年,在当时的电钻井实验管理处(在巴库)和当时的石油工业部设计一局研制和试验了在电钻井进并用电钻电缆传输信号的井中测定井斜方向和井斜角度的AOCV装置[74, 90]。

在阿塞拜疆以阿吉兹别科夫命名的石油与化学研究所(阿塞拜疆石油与化学研究所)对以电动沉没泵馈电线作为油井中通信线路的问题进行了研究[3, 22]。同时对于在电钻井过程中进行电测问题、检测电钻井状态的若干参数问题以及检测井底动力机状态若干参数问题也进行了研究[2, 8, 21, 92]。

古比雪夫石油工业科学研究所研究了电钻井时测量钻压的井底仪器。

如果对沉没式井底电动设备来说已经有了现成的通信线路,而问题只在于研制遥测装置的话,那末对涡轮钻井和转盘钻井,以及对自喷、气举、深井泵抽油和其他方法采油的井来说,通信线路还没有研究出来。

最近几年,对于沿管柱和管柱周围的岩石传输电信号的无线导通信线路进行了研究[42, 43, 63, 99, 105]。对于这种通信线路(流电路)进行理论与实验研究后得出的数据,能用来解决研制井底变送器和遥测系统方面的一些个别的技术问题。

与此同时,先在阿塞拜疆阿吉兹科夫石油与化学研究所,而后又在古比雪夫石油工业科学研究所研究并研制了安装在钻具中的带感应式连接器的有线电通信线路[44a]。这些组织与石油及化学工业自动化科研设计院一起研制了用在电钻井时自动检测整套井下参数的系统。

自动检测井下参数的研究在国外也有发展。在钻井和采油中建立通信道和井底设备的研究工作也在进行[105, 106]。

考虑到研制井下参数自动检测系统的重要意义,作者想在本书第二版中系统地 and 较全面地叙述现有的自动检测井下参数方面的实际经验和理论研究结果,提出这方面进一步发展的方向与途径。

本书的内容,主要根据作者指导和直接参加的研究工作的材料,以及科研机构的技术总结材料和发表在出版物上的材料。

本书叙述了有关研制适用于油井具体工作情况下的遥测系统的基本问题,叙述了与各种井内通信道相适应的井下变送器和地面设备问题。着重叙述井上已试验成功的或者已在工业上推广了的那些检测系统,以及有前景的实验性研制工作。

第一章的第二、三节，第二章的第一、三节和第四章是Ю. В. 格拉切夫编写的。

第一章的第一、四节，第二章的第二节和第三章是 В. П. 瓦尔拉莫夫编写的。

“沉没式电动机绝缘的电阻检测”部分是作者共同编写的。

在这个第二版书中，作者考虑了第一版中所发现的缺点，因而部分材料的编写改动很大。本书增加了有关研制新型井下参数自动检测仪表及其实验使用方面的材料。

目 录

引言	(4~6)
第一章 井底与地面间的通信道	(1~48)
第一节 井底与地面间信号传输的基本知识	(1~10)
遥测系统的建立, 信息的传输, 信号	(1)
自动检测井下参数的遥测系统的特性	(6)
井底与地面间信号传输的可能方法	(9)
第二节 利用沉没式电动装置引线的有线通信道	(10~27)
井内沉没式电动装置及其引线	(10)
测量通信道与供电道的划分	(12)
高频通信道的电路	(14)
高频通信道参数的计算公式	(17)
电缆、沉没式电动机和供电变压器绕组的高频特性	(22)
测量信号频率的选择	(26)
第三节 装设在钻具上的有线通信线路	(28~43)
在管柱内装设有线通信线路的原则	(28)
按钻杆分段组装的电阻联接式有线通信线路	(32)
按钻杆分段组装的电感联接式有线通信线路	(34)
电感接触式投入型有线通信线路	(36)
第四节 井内无导线通信道	(43~48)
井内水力通信道及用水力通信道通信的基本原理	(43)
用管柱作为电力通信线路	(44)
井内机械通信线路	(47)
第二章 采用井内有线通信线路对钻井过程进行自动检测的装置	(49~100)
第一节 电钻钻井时井下参数自动检测装置	(49~86)
AOCY定向仪	(49)
脉冲测斜仪的第一批试验产品	(52)
三参数脉冲测斜仪 ИИЗ 及 ИИЗa	(56)
测量井身方向和定向器方向的无触点变送器	(59)
无触点变送器测斜仪 ИИ2Ф	(62)
钻压变送器	(65)
钻压自动检测装置	(67)
用于电钻钻井的井下综合参数自动检测系统	(71)
检测电动钻具发动机的遥测变送器	(76)
沉没式电气设备绝缘的检测与绝缘检测仪 АКИ	(80)
用高频电流检测沉没式电动机绕组的绝缘情况	(82)

一相接地时检测绝缘·····	(83)
用自耦变压器给沉没式电动机供电时绝缘情况的检测·····	(84)
电气设备短时地与电网切断后检测绝缘的情况·····	(85)
第二节 钻具内专设有线通信线路的电动涡轮转速计·····	(86~91)
电动转数变送器(转速变送器)·····	(86)
电动涡轮转速计的接收器·····	(87)
电动涡轮转速计的实验研究工作·····	(87)
第三节 采用ЗИЛС-1型有线通信线路的井下参数自动检测装置·····	(91~100)
遥测系统·····	(91)
检测钻压的装置·····	(93)
ЗДОТ-1型涡轮钻具井下转数变送器·····	(96)
井向检测装置·····	(97)
第三章 利用无导线的油井通信道对钻井过程进行自动检测的装置·····	(101~182)
第一节 油井水力通信道的研究·····	(101~127)
干扰源与干扰电平·····	(101)
干扰的实验研究·····	(104)
油井水力通道内信号通行情况的实验研究·····	(110)
油井水力通信道遥测系统的误差问题·····	(121)
用强度法检测涡轮钻具轴转数·····	(124)
油井水力系统的模拟·····	(125)
第二节 带水力通信线路的ГТТ型涡轮转速计·····	(128~133)
ТД型水力转速变送器·····	(128)
ГТТ水力转速变送器的地面测量装置·····	(129)
ГТТ-1000的试验·····	(133)
第三节 低频水力涡轮转速计·····	(133~149)
ТДН-5型转速变送器·····	(138)
带水力放大器的转速变送器·····	(138)
地面测量设备的作用图(简图)·····	(143)
水力信号的接收转换器·····	(144)
信号过滤器·····	(145)
信号的谐振放大器·····	(147)
第四节 ГТН-2型低频水力涡轮转速计·····	(149~156)
仪器的作用·····	(149)
ТДН-8型转速变送器的结构·····	(150)
РД型水力阻尼器与ИД-5型张线式变送器·····	(152)
БНП-1型地面仪表组·····	(152)
ТДН-8型转速变送器的操作规程·····	(153)
ГТН-2曲线图记录带的整理·····	(155)
第五节 ГТН-3型低频水力涡轮转速计(全苏钻井工艺研究所设计的系统)·····	(156~167)

	转速计的作用与动作原理.....	(156)
	АЭФ-1 型有源电子 信号 过滤器.....	(157)
	转数指示器.....	(159)
	应用水力涡轮转速计的经验.....	(164)
第六节	钻压遥控仪表.....	(168~173)
	二参数的井底变送器.....	(168)
	井底钻压 指示 器 (ЗИН).....	(169)
	对带水力通信道的遥测系统进行改进的前景.....	(171)
第七节	无导线的油井仪表.....	(173~180)
	实验研究.....	(173)
	ЭБТ-1 型无导线 电动 涡轮 转速计.....	(176)
	带超低频信号的ЭБТ-1И型无导线电动涡轮转速计.....	(177)
	石油化学自动化科研与设计院设计的无导线电动涡轮转速计.....	(178)
	油井无导线电力通信道遥测系统的发展远景.....	(179)
第八节	钻井参数的井下 (独立) 记录器.....	(180~181)
第九节	国外遥测油井井下参数研究工作的简述.....	(181~182)
第四章	采油过程中井下参数的自动检测.....	(183~202)
第一节	采用沉没式电动泵的油井中井下参数的检测.....	(183~198)
	采用沉没式电动泵时检测井下参数的遥测装置的线路图.....	(183)
	检测井底动压的遥测装置.....	(186)
	检测电泵电动机壳体内余压的遥测装置.....	(189)
	测量整套井下参数的遥测装置.....	(190)
第二节	自喷井和深井泵抽油井的井下参数遥测仪表.....	(198~202)
	通信电缆.....	(198)
	УДГМ-1型遥测井下压力计.....	(199)
	自喷井井下参数遥测电子仪表(喀山大学制).....	(200)
结束语		(202~203)
参考文献		(203~208)

第一章 井底与地面间的通信道

第一节 井底与地面间信号传输的基本知识

遥测系统的建立, 信息的传输, 信号

根据信息论可正确地设计遥测系统及其自动装置, 因为信息论是控制论中的重要部分。信息论能够确定已定通信线路中信息传输的效率, 即能够选择出充分利用线路传递特性并保证信息传输系统抗干扰性好的信号参数。

我们所感兴趣的, 主要是把被测参数变换成相应的信号并在线路中传递, 即信息的传输和处理。代表被测值的信号参数就是信息载体。信号的特征、性质应该保证通信线路上信号的传递既方便, 又可靠。

所谓通信线路是指专门的装置或自然的物理介质, 通过它能够把信息由发送器传到接收器。如果只需要对某一个被检测的参数进行信息传输时, 通信线路上就要有一定的通信道。如同时对好几个被检测参数的信息进行同时传输或依次传输时, 则是沿一定或一条通信线路进行多道通信的概念。所以, 通信线路和通信道的概念是不同的, 各有其定义。

下面将讨论的井下参数遥测系统可以用方框简图概示如下, 见图 1。被检测的某一参数, 由信息源 1——如某种运转着的机构——送到发送器 2, 发送器测出该信息并转换成适于在线路 3 上传输的信号 C_1 。在线路中通常总存在着与信号物理性质相同的干扰 (干扰源 6), 所以线路末端的信号 C_2 总有一定程度的失真。在信号接收器 4 中, 进入的信号又转变成信息的形态而传到信息接收器 5。最后, 控制信号经环节 7 传到被检测的对象 (以校正其工作)。在这一整个过程中, 应特别重视的是通信系统 (信息的转变, 传递和处理系统) 的抗干扰性能。

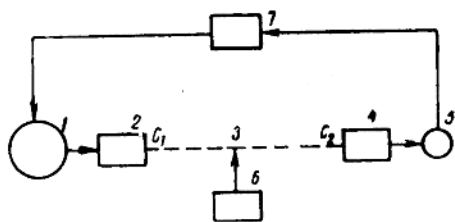


图 1 遥测系统的简图

在信息传输中, 信号可以是连续的, 也可以是一个接一个的 (断续信息)。在后一种方式中, 被检测参数是一个连续函数, 其数值是按照一定的时间间隔或当参数变化到给定数值时进行传送的。

已定通信道上传送的信息容量取决于许多条件。信号频率愈高, 信号传递时间愈长, 信号功率同干扰功率的比值愈大, 则单位时间内被传递的信号容量就愈大。

除信号容量外, 信号传输系统还有许多特征。信息论的原理在专门著作中有详细论述 [见参考文献 19, 25, 65, 87], 读者需要时可自行查阅。

设置井内通信道所需的条件同建立一般地面自动装置和运动装置通信道的条件大不相同。

遥测井下参数时，可使用各种形式的通信道。自井底进行信号传递可使用电信号，通过深井电动机（电钻，电动泵）的电缆，管柱及其井壁岩层，或井内专设的有线通信线路来进行；也可通过洗井液使用水力信号；通过管子金属或液体使用声波信号；以及使用电磁场等等来进行。

在设计井下遥测系统时，最重视前四种通信道的使用。通信道可采用四端网络的形式。现实的无源四端网络具有小于1的传输系数，即输出信号的功率 U_2 小于输入信号的功率 U_1 。通信道中信号的衰减通常是线性关系，即：

$$U_2 = U_1 e^{-\beta l}$$

式中： β ——衰减系数；
 l ——通信线路的长度。

确定了 β 值后，就不难选定必要的 U_1 值，使得在接收端的信号 U_2 超过干扰级 U_n 。如不使用专门的复杂的译码方法而进行信号的传输和接收，就必须使信号大大地超过干扰级。

从保证信息的传输充分可靠来看，误差不应超过预定的许可值 δ （通常是均方值）。以函数形式 $f(t)$ 进行连续信息传输时，根据 B. A. 柯捷尔尼可夫定理没有必要把大量的逐次值全部传送，而只要把一定时间间隔内算出的数值传出即可。

$$\Delta t = \frac{1}{2F_m}$$

因为连续函数常可表示为含有有限频谱的傅里叶级数形式，故式中 F_m 为函数 $f(t)$ 的谱带中的最高频率。这时，在时间 T 内连续变化的被检测参数每隔 Δt 时间应有 m 个读数，即 $m = \frac{T}{\Delta t} = 2F_m T$ （所谓函数的时间整量化），或在参数 U 的整量化时，每当参数级变化 ΔU 就应有 m' 个读数。参数 ΔU 整量化的间距不应超过在相应于 ΔU 的时间内检测参数变化时的允许误差 $U\delta$ 的两倍。为保证测量准确，读数的数量 m 应约等于 $m' \approx \frac{1}{2\delta}$ 。

连续函数的分散传输只有当所有真实的物理过程（工作对象的温度变化，涡轮钻具的转数变化或钻进中钻头轴向载荷变化等等）保持某种惯性时才能够实现。因此，在反映真实过程的连续函数图上，全部相邻点都是密切相关的。

信息具有一种可以比较各种通信方式的定量估值。每一个连续函数（可测参数）可以取 n 个值。假设这许多数值的或然率是相同的，即等于 $1/n$ ，则显然，当 n 的数值愈大，信息的数量就愈多。由此可知，由被检测对象所产生的最初信息的数量理应同数值 n 成比例。在信息论中，取信息量 I 同 $\log n$ 成比例，以利于信息处理仪的各种条件的对比。例如，假设一条信息处理通道能进行 n 次不同状态组合，那么两个类似的装置就可提供 n^2 次这样的状态组合。若将两个装置合在一起，就能够处理两倍多的信息，即

$$I = k \log n^2 = 2k \log n$$

式中， k ——比例系数，它取决于运算时所采用的单位制；对数的底数决定信息量的测量单位。

如采用二进制（彼特）测定信息量，则对数的底选为 2，这样有一定的好处，因为信息处理仪中所用的许多元件都是有两种稳定状态的。按二进制单位，在 T 时间内连续信号

中所包含的信息量等于:

$$I = 2F_m T \log \frac{1}{2\delta} \text{ 二进制单位}$$

信息传输的平均速度为:

$$C = \frac{I}{T} = 2F_m \log \frac{1}{2\delta} \frac{\text{二进制单位}}{\text{秒}}$$

上述两式中, 对数的底都等于 2。

每一条通信道都有一定的通频带宽度(F_k), 由此还可得到 $\frac{p_c}{p_n}$ 的必要比值。通道的通过能力为:

$$C_k = F_k \log \left(\frac{p_c}{p_n} + 1 \right) \frac{\text{二进制单位}}{\text{秒}}$$

式中 p_c 和 p_n ——分别为信号功率和干扰功率。

在实际使用中, 应保持这样的条件, 即 $C_k > C$ 和 $F_k > F_m$, 这时信息传输中的误差就不会超过允许值。

由以上各式可以看出, 为保持信息量而缩小通信道的频率范围时, 就应在保持原有误差 δ 的情况下增加传输时间; 如 $F_k < F_m$ 的值不大时, 通信道的通过能力 C_k 就会降低, 这样就等于增加了信息传输的误差。在通信道中, 信号的衰减通常是具有 β 值随信号频率增加而升高的这种与频率有关的特征。因此, F_k 的降低可以通过 $\frac{p_c}{p_n}$ 的增高来补偿。通过降低 F_m 来延长通信距离最为有利, 这样一来, 或者是损失信息传递时间, 或者是损失信息量。

在通信道中用来传递信息的信号, 表现为每隔一段时间 (周期) T 而相继出现的单个 (单位) 脉冲, 它具有在选择信号形式和研究信号在井内通信道中传播时必须考虑的许多性质。每个脉冲是用脉冲宽度 t_n 和在其频谱基本部分内的频带 Δf 来表征的。频谱的基本部分集中了脉冲能量的绝大部分。脉冲的频谱是连续的, 其频谱密度可用傅里叶积分求得:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega t} f(t) dt$$

假设井内通信道具有与频率相关的性质, 则从频谱位置出发才能最正确的评价记录下的信号。例如, 某一任意形状的脉冲很短, 且宽度 $\tau \rightarrow 0$, 则数值 $e^{\pm j\omega \frac{\tau}{2}} \approx 1$, 从而

$$S \approx \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} f(t) dt = q$$

即等于由脉冲面积决定的一个常数。实际上当 $\omega \frac{\tau}{2} \ll 1$, 也就是 $\tau \ll T = \frac{2\pi}{\omega}$ 时, 这一条件才能成立。

如考虑到根据脉冲振幅值来估计脉冲极为简便, 则有时特别是当脉冲的前沿较陡或频带密集时, 按振幅值来估计脉冲是许可的。

脉冲信号随着它的形状和宽度 t_n 的不同, 在主要能量集中的脉冲部分可以有各种频带, 脉冲的主要能量可以由下面傅里叶积分式(1)求出。对于各种形状的短时间脉冲, 其宽度 t_n 同频带的乘积是一个固定值, 并接近于1, 即 $\Delta f \Delta t_n \approx 1$ 。这个频带应是在频率轴上被自变量首次等于零时的点所限定的脉冲部份内。在相应的时间 Δt 内脉冲能量的主要部分是由下式确定的:

$$\int_{t_n - \frac{\Delta t}{2}}^{t_n + \frac{\Delta t}{2}} f^2(t) dt = \eta \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt = \eta A_t \quad (1)$$

式中系数 $A_t = \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt$ 同脉冲的全部能量成比例; $\eta < 1$ ——在时间 $\Delta t < t_n$ 内的脉冲全部能量的相应部分。

式(1)用求积仪易于解出。同时, 对于脉冲信号的记录, 特别是在井内试验水力通信道时所取得的信号记录, 也可根据上述各项原则进行整理。

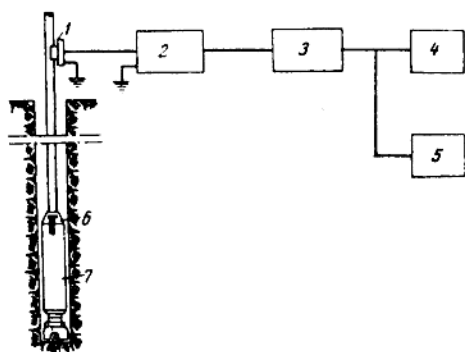


图2 水涡轮转速计方框图

1—信号接收器(转换器); 2—信号放大器; 3—波带滤波器; 4—示波器; 5—转数指示器(频率计); 6—水力变速器; 7—涡轮钻具。

在研究用什么形状的脉冲来传递井内信息时, 最好是考虑使用 $\Delta f \cdot \Delta t$ 乘积值最小的那些脉冲。这样能够获得频带 Δf 密集的脉冲, 从而使形成脉冲时消耗的能量较小, 这样可以保证在使用窄带通信道时有较好的抗干扰性能。

$\Delta f \cdot \Delta t$ 乘积值最小的脉冲有锥形的(0.22), 余弦形的(0.43)和三角形的(0.46)。矩形和叠峰形的脉冲的 $\Delta f \cdot \Delta t$ 值较大(分别为0.73和1.13)。

在遥测时, 例如运用水力通信道传递信息而对涡轮钻具轴的转数进行遥测时, 遥测系统可按图2的方框图来装备。

井底装有转换器, 它把原始信息转变成信号。检测涡轮钻具的转数时, 这种装置应该把转数转换成液压脉冲。这时, 脉冲的任一参数(宽度、频率、幅度、相位等等)都能反映出转数的现时数值。但在选择该参数时, 就必须考虑到把检测值变成参数是否方便和能否保证该信号在通信道中传送时不失真[见参考文献32、49、50、93、101]。

图3是矩形脉冲信号的形状。其中所传输的信息(此处是转数)可以用相应的脉冲调制, 即脉冲的任一参数的变化来反应: 幅度 $U = f(n)$ (图3), 宽度 $t_n = f(n)$ (图4), 脉冲的跟踪频率 $\omega_n = f(n)$ 。在后一种情况下, 如果 t_n 有固定值, 则脉冲之间的间隔也就相当于被测量的各值。

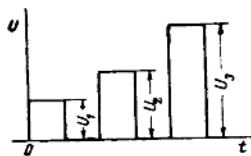


图 3 脉冲信号的调幅

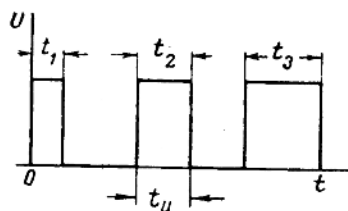


图 4 脉冲信号的宽度调制

除矩形脉冲外，也可以使用其它形状的脉冲，如余弦式的 ($a = A_m \cos \omega t$) 或 n 为正整数的正弦曲线 ($a = A_m \sin \Omega t$) 组成的脉冲。

如果连续出现的脉冲的宽度 t_n 可以同跟踪周期 T 相比，则这种信号就叫做周期信号。当 $t_n \ll T$ 时，信号则是非周期的。

任何形状和特征的周期性振荡是由正弦振荡的无穷级数所组成。非周期信号的频谱则是无穷多个任意频率振荡的总和。信号的频谱有着重要的意义。因为井内的水力通信道本身就是一种独特的低频滤波器，所以这时就不希望有大量的和高频成分电平很高的信号。

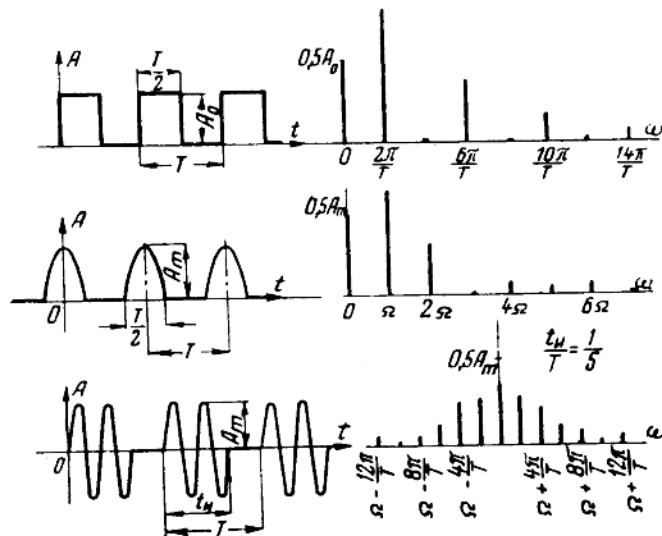


图 5 周期脉冲及其频谱

图 5 所示为三种形状的周期脉冲：矩形的，余弦式和由正弦式信号组成的脉冲。图中也列出了具有线状特征的频谱。

矩形脉冲和余弦式脉冲的特征是 A_0 分量等于常数， t_n 愈接近于 T ， A_0 值愈大。正弦式振荡的特征是随着每次振荡幅度的增加，一次谐波分量也增强，而其它谐波则减弱。例如，当 $\omega = \Omega$ 时，基频的幅度 $A_\Omega = A_m \frac{t_n}{T}$ ； $t_n = T$ 时，振荡即变成单频的。

图 6 为这种单频的然而非周期信号脉冲的频谱，其特点是频谱连续。

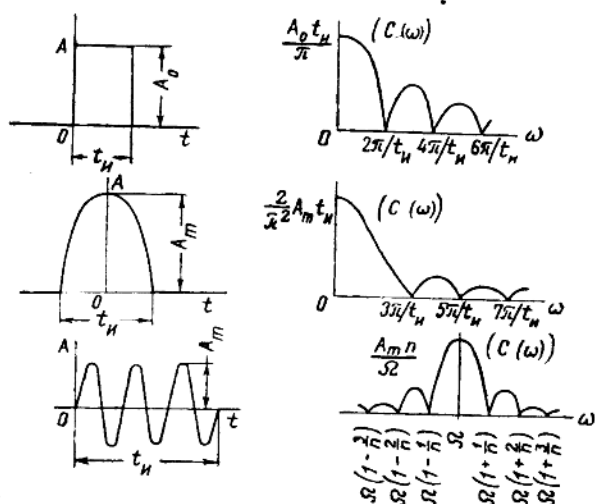


图 6 非周期(单位)脉冲及其频谱

$$c(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega t} a(t) dt \quad (2)$$

为了正确地传输和重现这类脉冲需要有能够通过宽频带的系统。值得我们重视的是余弦式脉冲和正弦式振荡。非周期信号的余弦式脉冲同样具有 A_0 分量等于常数的特点。信号宽度 t_n 愈大, 脉冲的大部分能量就愈集中于低频部位。由宽度 $t_n = n \frac{2\pi}{\Omega}$ 的 n 个正弦组成的非周期性频率, 其特点是具有 $\Omega(1 \pm \frac{k}{n})$ 频率出现多次最大值的连续频谱。当 $0 < t < t_n$ 时, $k=1, 2, 3 \dots n$ 。

如果大大地增加脉冲的宽度, 则其连续频谱实际上将转变成频率为 Ω 的基波非线性频谱。

当脉冲的宽度 t_n 同跟踪周期 T 可相比时, 单个的脉冲转变成连续周期, 这一点在傅里叶级数中已叙述过。这时较规则的脉冲有最大的一次谐波 ω_1 (跟踪脉冲的基频 $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$), 该谐波用装有滤波器的接收器可以收到。

下面将叙述一些具体的遥测系统, 主要是自动检测涡轮钻井方式的遥测系统, 所采用的信号是 $t_n \ll T$ 和 $t_n \approx \frac{T}{2}$ (在低频涡轮转数计中)。

自动检测井下参数的遥测系统的特性

下面以自动检测涡轮钻的具体遥测系统为例说明如何确定自动检测井下参数的遥测系统的一般特性。

严格地讲, 任何一个动力学系统的参数应该是表征该系统性质的一种量。

代表一系统中物理过程的各种变量应包括在描述该动态系统的方程式中。方程式中的系数通常就是系统的参数（如机械系统中的质量、摩擦系数、转动惯量等；电力系统中的电感、电容、电阻）。

在实际过程中，特别是在研究钻井过程中，参数的概念就容许有某种程度的扩大。比如，在谈到钻井方式时，所谓参数就应包括以下这些变量，即机械钻速或行程钻速，各种地面参数或井下参数，其中有钻压、涡轮钻轴的转速或扭矩。

把钻井过程和钻井系统作为自动检测的对象时，所谓系统的参数就应该理解为通常描述钻井过程时使用的那些概念。

遗憾的是，到目前为止还没有对钻井工艺过程进行完备的研究并得出具体的结论，以便制订出调节钻井过程的合适标准，并对遥测系统提出要求。在实际的钻井过程中，常常会遇到各式各样的影响钻进的情况，因而要预先准确地提出并维持一种最有效的钻井方式是很困难的，且往往是不可能的。井底参数的遥测方法应该有助于研究和制订调整钻井方式的相应的标准。在制订自动检测涡轮钻的遥测系统的一般要求时，可以以下述的钻井过程动力学及其实验研究结果为根据[见参考文献 9、17、18、36、97]。

涡轮钻的主要参数——轴的转数 n ，轴上扭矩 M ，和效率 η 互成函数关系。这些参数数值的大小取决于通过涡轮钻具液体的排量 Q 。涡轮钻具轴的转速 n 是涡轮钻最有代表性的参数。当涡轮轴扭矩为制动值时， $n_r = 0$ ；相应的 $M_r = 0$ ，涡轮空转的转数 $n_r = n_{xx}$ ，它们的数值取决于涡轮钻具的结构。对单级涡轮钻具来说，一般 $n_{xx} = 1200 \sim 1600$ 转/分，而对多级或高扭矩涡轮钻具来说， $n_{xx} = 700 \sim 1000$ 转/分。效率 η 的最大值一般是出现在涡轮钻具的工作转数部分（约为 $\frac{n_{xx}}{2}$ 左右）。采用滚珠止推轴承的涡轮钻具扭矩 $M_r = f(n)$ 的变化是线性的。

在钻井中， M_r 的数值是由破碎岩石的工具（钻头）所受的载荷来决定，作用在钻头上的轴向力为 P_a （钻压），它是由井内钻柱的部分重量造成的。在地面上， P_a 是通过间接的方法由液压式指重表来测定，它等于全部钻柱在游动系统大钩上的悬重 P_n 与钻头在井底支撑时那部分钻柱重 P_k 之差。用上述的方法测得的 $P_a = P_n - P_k$ 的差值，误差是很大的。这不仅是由于指重表的精度低，而且更主要的是由于井内钻杆的摩擦和局部悬空，这时它们充当了测量 P_a 值的传递环节，换言之，它们也就是地面指重表与井下造成钻头压力的钻具之间的一种特殊的机械的通信线路。试验结果表明，这样所测得的 P_a 值误差很大，有时可达真实的 P_a 值的 40~70%。

由地面向井内给进时，钻具的上悬点可以以 $v_n \leq v_0$ 的速度移动。式中 v_0 ——钻头吃入井底岩石的速度。根据钻井方式研究的结果，大钩上重量的变化接近于指数关系。

$$P_k \approx P_{k,n} + (P_n - P_{k,n}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (3)$$

式中 $P_{k,n}$ ——大钩上重量的初值；

T ——在下钻停止后（ $v_n = 0$ ），由任何一个初值 $P_{k,n}$ 起按 $P_k = f(t)$ 变化的指数的时间常数。 T 值取决于涡轮钻具——钻头——井底这些参数的函数关系的特点。

图 7 所示为涡轮钻的各参数 n_r 、 P_a 、 v_0 随时间而变化的曲线，其条件为钻具的上悬点已停止移动（给进），即 $v_n = 0$ ，井深为 2~3 公里，起始时间 $t = 0$ 。由曲线图可以看出，

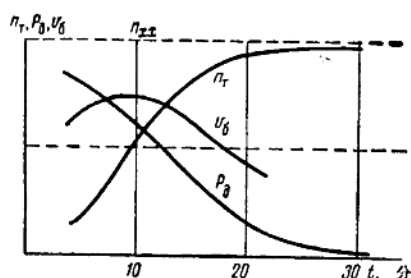


图 7 停止给进钻具后涡轮钻具轴(钻头) 转数 n_r 、钻压 P_d 和钻速 v_d 的变化曲线

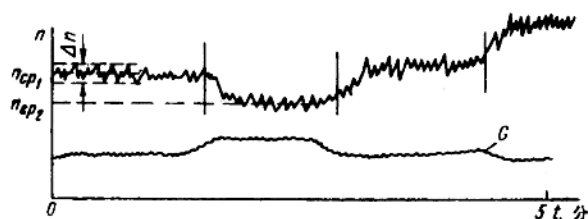


图 8 在钻井过程中钻压 G 为不同 值时涡轮钻具轴转速变化曲线

P_* 恢复到规定的数值, 使 $P_{*cp} = \text{常数}$ 。

$$v_{n_{cp}} = \frac{1}{T_n} \int_t^{t+T_n} v_n(t) dt \quad \text{应等于}$$

$$v_{v_{cp}} = \frac{1}{T_n} \int_t^{t+T_n} v_v(t) dt$$

假定上述的关于大钩上重量 $P_* = f(t \cdot T)$ 的变化规律是正确的, 同时根据经验数据取 T 值为 $250 \sim 1250$ 秒, 则可求出 $\frac{\Delta P_*}{\Delta t}$ 。例如, 采用涡轮钻钻中硬度岩石, 牙轮钻头的转数 $n_{xx} = 1000$ 转/分, $M_{yx} = 10$ 公斤/ T , $T = 600 \sim 800$ 秒时, 在指数突变部分(当 t 值很小时)单位时间内 P_* 的变化近似 $\frac{\Delta P_*}{\Delta t} = 25 \sim 35$ 公斤/秒。由此可见, 由司钻看到的 $\Delta P_* = 1 \sim 2$ 吨可以根据公式 $\Delta P_* = P_* \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$ 计算出来, 时间间隔为 $T_n = 30 \sim 70$ 秒。随后, 于下一个给进周期来校正钻井过程中钻柱重量的变化。

ΔP_* 变化的上述数值相当于轴向载荷平均变化 $8 \sim 10\%$, 也和 M 和 n_r 的变化相类似。当 $n_r = \frac{n_{xx}}{2}$ 时, 在同一个 T_n 时间内, 转数的变化等于 $n_{1cp} - n_{2cp} = \Delta n_r = 40 \sim 50$ 转/分。

图 8 为转数 $n_r(t)$ 和钻压 $P_*(t)$ 的变化曲线, 图中表明在各种钻压下钻进的不同井

各参数的变化过程是很单调的。

如果不考虑钻柱同井壁间摩擦力的变化并设其它参数(岩石的硬度、钻头情况、洗井液的排量等)是稳定的, 则转数的变化(如图 8 所示, $n_r = f(t)$ 有几个平均值和几次突然变化)同样也是接近于指数关系 $n_r \approx n_{xx} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$ 。

在钻井过程中, 司钻应保持规定的钻压 P_n , P_n 值主要是根据实验资料而定的。采用上述这种检测钻井过程的方法, 其效果在很大程度上取决于司钻的经验和判断能力。司钻是根据液压指重表上 P_* 的变化情况送钻的, 指重表能指示出在一定时间内 ΔP_* 在 $1 \sim 2$ 吨的变化, 此后司钻又将