

文章编号:1673-5005(2010)02-0052-04

基于正交试验方法的流动成像测井传感器优化设计

王晓星, 吴锡令, 王滨涛

(中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

摘要:以电磁流动成像测井传感器的数值模拟为基础,在已有的正演仿真平台上,采用正交试验方法对传感器进行优化设计。根据对试验结果的统计分析和方差分析,得到传感器几何和材料参数对目标函数即全水/全油电压值变化的影响程度依次为管壁厚度>管壁介电常数>电极径向插入深度>电极张角,按优化后参数组合计算,在置信度为95%的情况下性能参数指标可达到原来的3.6301~5.8741倍。结果表明,正交试验方法可以有效地解决电磁流动成像测井传感器优化设计问题。

关键词:流动成像测井;优化设计;正交试验;方差分析

中图分类号: TP 212.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.010

Optimization design of flow electromagnetic tomography transducer based on orthogonal test

WANG Xiao-xing, WU Xi-ling, WANG Bin-tao

(School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Orthogonal test was used to the optimization design on the basis of numerical simulation of flow electromagnetic tomography transducer. Through statistical analysis and variance analysis of the results, the influence of geometry and material parameters on the aim function which is the water-oil ratio was researched. The parameters in order of important influence are thickness and capacitance of the wall, insert depth and open angle of the pole. According to the optimal parameters combination, the target is 3.6301–5.8741 times more than its original number with 95% confidence. The results show that the optimization design of the flow electromagnetic tomography transducer can be resolved by the orthogonal test effectively.

Key words: flow electromagnetic tomography; optimization design; orthogonal test; variance analysis

流体电磁层析成像技术是一种根据流体电磁性质差异重建流动图像的非线性测量方法,已在部分工业领域得到了成功应用^[1]。吴锡令等^[2-3]针对油井多相流动的特殊情况将地面流体电磁层析成像技术推广到石油测井领域,根据油气水导电和介电性质差异,提出了电磁流动成像测井(flow electromagnetic tomography,简记为FEMT)方法,为解决多相流测量问题提供了新途径。其中,传感器的优化设计是该技术的主要难点之一,鲜有文献报道。笔者在已有的正演仿真平台上,从结构参数对测量性能的影响出发,用计算机数值模拟代替物理模型实验进行研究,将正交试验方法作为有利工具和分析手段,

寻求传感器优化设计的有效方法。

1 传感器优化目标及性能参数

FEMT传感器电极阵列结构剖面及测量模式如图1所示。16个等间距排列电极组成测量电极环,为减小小导电钢质套管对测量信号的影响,电极阵列安装在绝缘衬套上,测量时依次选择1~16号电极作为发射电极,供给激励信号,左右电极分别馈以相同信号,以起到聚焦作用,然后依次切换其余电极作为测量电极,左右电极需接地。重复上述过程,直到所有的独立测量电压都被检测。1个测量周期可得到的测量数据个数为 $16 \times (16 - 5) = 176$ 。

收稿日期:2009-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(60472019)

作者简介:王晓星(1982-),女(汉族),吉林四平人,博士研究生,主要从事开发测井方法技术研究。

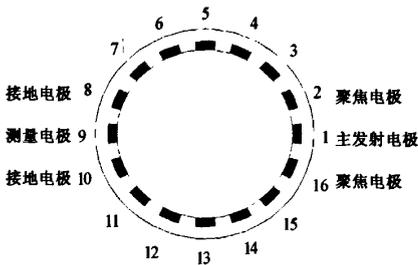


图1 传感器结构剖面及测量模式

Fig.1 Cross section of the sensor and measurement mode

从测量角度,各项结构参数对传感器性能的影响主要体现在全水/全油电压值变化^[6-8]上。全水/全油电压值代表了传感器对管道内所有单元的整体敏感度,其数值越大说明管中多相介质存在变化引起的电压变化越大,电压的测量越容易,即传感器对管道内多相流的整体灵敏度就越高,因此可作为传感器性能的一个重要指标。在测量模式一定的情况下,全水/全油电压值变化主要依赖的传感器几何和材料参数包括:绝缘层厚度 h ,绝缘层相对介电常数 ϵ ,电极径向插入深度 d 和电极张角 θ (如图2)。

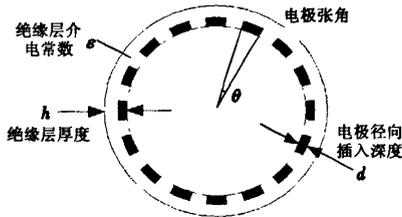


图2 结构参数示意图

Fig.2 Sketch map of structure parameters

这里的参数优化设计问题实际上是一个有约束条件的最优化问题,目标函数为

$$\begin{cases} P=f(h,\epsilon,d,\theta), \\ s.t. \text{ 制造工艺及测量技术限制构成的约束条件.} \end{cases}$$

由于目标函数与各变量的关系相当复杂,不能用解析的方法加以描述,即不能找出显函数表达式,故不能用解析方法求解,只能采用数值法。所谓正交设计就是利用正交表,科学挑选试验条件,合理安排试验。在大量试验条件中选出代表性强的少数条件,并通过对这些较少试验的分析,找出最优的条件组合,进一步得到最优条件组合对应的目标函数值的变动范围和可靠程度^[9]。本文中采用正交设计方法,通过数值试验来寻求最优解。

2 传感器结构参数的正交优化设计

首先选择合适的正交设计表来进行方案的设计,为 h, ϵ, d 和 θ 这 4 个因素确定因子水平。因子

的水平数设置得太少不能很好地反映考察指标随结构尺寸变化的规律,设置得太多则试验次数迅速增加,权衡考虑每个因子取 5 个水平,具体数值见表 1 (表中每一个变量的水平值是根据实际情况和设计经验确定的,同时在表中的位置是经过随机排序的方法确定的,避免了人为因素^[8])。

表 1 因子参数

Table 1 Factor parameters

绝缘层厚度 h/m	绝缘层相对介电常数 ϵ	电极径向插入深度 d/m	电极张角 $\theta/(^\circ)$
0.012	6	0.002	5.50
0.007	4	0.004	20.00
0.010	1	0.005	12.15
0.009	8	0.003	8.65
0.001	2	0.001	15.00

选择 $L_{25}(5^6)$ 正交表^[9],其中,第 5 列和第 6 列不为实际参数因子,只用来进行误差分析。在假设以上 4 个考察因子相互独立的前提下,将试验方案输入已编制好的有限元仿真试验平台,优化目标 P 为全水与全油条件下一个周期测量电压的平均值的比值,得到各参数组合方案对应的模拟结果见表 2。

表 2 正交试验表及试验结果

Table 2 Orthogonal test results

试验号	h/m	ϵ	d/m	$\theta/(^\circ)$	第 5 列	第 6 列	优化目标 P
1	0.012	6	0.002	5.50			4.6377
2	0.012	4	0.004	20.00			9.4356
3	0.012	1	0.005	12.15			2.5427
4	0.012	8	0.003	8.65			7.0500
5	0.012	2	0.001	15.00			2.6952
6	0.007	6	0.004	12.15			6.7383
7	0.007	4	0.005	8.65			5.2351
8	0.007	1	0.003	15.00			2.1276
9	0.007	8	0.001	5.50			5.6253
10	0.007	2	0.002	20.00			4.1997
11	0.010	6	0.005	15.00			9.4141
12	0.010	4	0.003	5.50			4.6887
13	0.010	1	0.001	20.00			2.2625
14	0.010	8	0.002	12.15			7.5995
15	0.010	2	0.004	8.65			3.3388
16	0.009	6	0.003	20.00			11.6117
17	0.009	4	0.001	12.15			4.2318
18	0.009	1	0.002	8.65			1.9858
19	0.009	8	0.004	15.00			10.8936
20	0.009	2	0.005	5.50			3.2502
21	0.011	6	0.001	8.65			4.5699
22	0.011	4	0.002	15.00			5.2784
23	0.011	1	0.004	5.50			2.2731
24	0.011	8	0.005	20.00			18.7049
25	0.011	2	0.003	12.15			3.4131

3 正交试验设计方差分析

方差分析是数理统计的基本方法之一,也是科研与生产中分析试验数据的有效工具。应用方差分析处理正交试验结果可归纳为 3 步^[10-11]。

3.1 计算偏差平方和及其自由度

主要计算列偏差平方和 $S_j(j=1,2,\dots,6)$ 及其相应的自由度。 S_j 为一个试验结果对其平均值的偏离程度(对于没有安排因子的第 5,6 列同样计算,以便于进行方差分析),表示某条件因素所引起的波动:

$$S_j = \frac{r}{n} \sum_{i=1}^r M_{ij}^2 - \frac{1}{n} T^2, i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, 6.$$

式中, M_{ij} 为第 j 列中水平数为 i 所对应的试验结果的总和; T 为试验结果的总和; r 表示各因子的水平数; n 表示总的试验次数; i 表示因子的某个水平; j 表示正交表的列号。第 j 列偏差平方和的自由度等于该列水平数减 1。通常把所有空列的偏差平方和作为试验误差的偏差平方和,其自由度也等于所有空列的自由度之和。正交试验结果统计分析见表 3。

表 3 正交试验结果统计分析

Table 3 Statistical analysis of orthogonal test results

试验号	h/m	ε	d/m	$\theta/(^\circ)$	第 5 列	第 6 列
M_1	26.3613	36.9717	23.7011	20.4751	33.0408	26.4420
M_2	23.9260	28.8696	32.6795	46.2144	29.8739	26.9828
M_3	27.3035	11.1916	39.1470	24.5254	26.8946	28.3969
M_4	31.9731	49.8734	28.8911	22.1796	25.5289	27.1688
M_5	34.2395	16.8971	18.4031	30.4089	29.4147	34.8129
S	25.4501	203.6511	51.0649	98.5814	28.8377	20.6984

3.2 显著性检验

在进行因素的显著性检验时,采用 F 检验法。统计量 F_A 是一个自由度为 (f_A, f_e) 的 F 分布随机变量, F_A 称为 A 因素的 F 比。

$$F_A = (S_A/f_A)/(S_e/f_e).$$

式中, S_A 和 f_A 为 A 因素的试验偏差平方和及自由度; S_e 和 f_e 为试验误差偏差平方和及自由度。

然后,选取显著水平 α ,由 F 分布表查得临界值 $F_\alpha(f_A, f_e)$,使得 $P[F_A \leq F_\alpha(f_A, f_e)] = 1 - \alpha$,并认为在显著性水平 α 下, A 因素的水平变动对试验指标有显著影响,这一结论的置信度为 $100(1 - \alpha)\%$ 。方差分析结果见表 4。通常把 $\alpha \leq 0.1$ 的因素称为显著因素,则本设计中 ε, d 和 θ 为显著因素, h 为不显著因素,且对 P 影响顺序为: $\varepsilon > \theta > d > h$ 。

表 4 正交试验结果方差分析表

Table 4 Variance analysis of orthogonal test results

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F 比	显著性水平 α
h	25.4501	4	6.3625	1.0275	> 0.25
ε	203.6511	4	50.9128	8.2224	0.01
d	51.0649	4	12.7662	2.0617	0.1
θ	98.5814	4	24.6453	3.9802	0.05
5	28.8377	4	7.2094		
6	20.6984	4	5.1746		
误差	49.5361	8	6.1920		

3.3 求最优组合及其置信区间

对于任何一个考察因子,它在某水平下的 M_{ij} 最大则说明其对应的水平为该因子的一个较优水平,如果仅从统计数据看,因子 h 的第 5 个水平 0.012 为最优水平,同理 ε 的第 4 水平、 d 的第 3 水平及 θ 的第 2 水平为最优水平。但从方差分析可知, h 对目标的影响不显著。所以本设计中一个较为优化的方案是 $\varepsilon = 8, d = 0.005, \theta = 20, h$ 可以根据经济、方便的原则在合理的范围内选择。

由于在相同的试验条件下存在试验误差,结果也不完全相同,因此得到了最优结构参数以后,还需要得到指标的变动范围和可靠程度,即对最优组合的试验指标进行区间估计,并同时给出区间估计的置信度。若区间估计为 $P_{\text{优}} \pm \varepsilon_\alpha$,就有 $1 - \alpha$ 的把握断定最优组合的试验指标将在 $P_{\text{优}} + \varepsilon_\alpha$ 和 $P_{\text{优}} - \varepsilon_\alpha$ 之间。

取最优组合为 $h_5 \varepsilon_4 d_3 \theta_2$, 则

$$P_{\text{优}} = \bar{P} + \hat{h}_5 + \hat{\varepsilon}_4 + \hat{d}_3 + \hat{\theta}_2,$$

$$\varepsilon_\alpha = \sqrt{F_\alpha(1, f_e + f_e')(S_e + S'_e) / \left[(f_e + f_e') \frac{n}{1 + f_e'} \right]}.$$

式中, \bar{P} 为试验结果的平均值; S'_e 为不显著因素偏差平方和之和; f_e' 及 f_e^* 分别为不显著因素和显著因素自由度。

取 α 为 0.05, 计算得: $P_{\text{优}} = 16.6386, \varepsilon_\alpha = 3.9287$, 最优组合 $h_5 \varepsilon_4 d_3 \theta_2$ 对应的目标真值在 12.7099 ~ 20.5673, 此时的置信度为 95%。

4 结果分析

从全水/全油电压值变化角度出发,为用于油/水两相流的 16 电极传感器设计出了一组合适的参数。本试验的简易试验传感器实物的绝缘衬套采用聚四氟乙烯 $\varepsilon = 2$, 管壁厚度 $h = 0.009$ m, 铜电极径向插入深度为 $d = 0.003$ m, 电极张角 $\theta = 8.65^\circ$, 其全水/全油电压值为 3.5013, 按优化后最优组合计算全水电压值增大, 全油电压值减小, 对应的全水/全油电压值在 12.7099 ~ 20.5673, 即传感器对管道内所有单元的整体敏感度对应提高大约 3 ~ 5 倍。因此, 正交试验方法可以有效地解决电磁流动成像测井传感器优化设计问题。

需要指出的是, 这里的参数设计是一个多参数输入的优化问题, 各参数的相关变化对目标输出产生影响, 但本文的设计方案对各参数之间的相互作用考虑不足, 值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 黄志尧. 层析成像在多相检测中的应用[D]. 杭州:浙江大学信息科学与工程学院,1997.
- [2] 吴锡令,景永奇,吴世旗. 多相管流电磁成像测井方法研究[J]. 地球物理学报,1999,42(4):557-563.
WU Xi-ling, JING Yong-qi, WU Shi-qi. Electromagnetic imaging logging method in multiphase pipe flow[J]. Chinese J Geophysics,1999,42(4):557-563.
- [3] 赵亮,吴锡令. 多相流动电磁波成像测井测量敏感场计算[J]. 地球物理学报,2003,46(6):870-874.
ZHAO Liang, WU Xi-ling. Calculation of sensitivity field for electromagnetic tomography in multiphase flow well logging[J]. Chinese J Geophysics,2003,46(6):870-874.
- [4] 陈德运,李谋遵,郑贵滨. 电容层析成像传感器有限元分析及参数优化设计[J]. 电子器件,2000,29(2):427-430.
CHEN De-yun, LI Mou-zun, ZHENG Gui-bin. Analysis and parameter optimizing of multi-electrode capacitance transducers based on finite element method in electrical capacitance tomography system[J]. Chinese Journal of Electron Devices,2000,29(2):427-430.
- [5] 郭红星,余胜生,冯纪先,等. 多电极电容传感器的参数优化设计[J]. 武汉大学学报:自然科学版,2000,46(5):637-640.
GUO Hong-xing, YU Sheng-sheng, FENG Ji-xian, et al. Parameter optimizing of multielectrode capacitive transducers[J]. Journal of Wuhan University(Natural Science Edition),2000,46(5):637-640.
- [6] 陈德运. 两相流电容层析成像技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院,2003.
- [7] 胡上旭,陈德钊. 观测数据的分析与处理[M]. 杭州:浙江大学出版社,2002:269-274.
- [8] 陆继东,张振顶,黄来,等. 正交试验设计法在水泥预分解炉设计中的应用[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2005,33(6):32-34.
LU Ji-dong, ZHANG Zhen-ding, HUANG Lai, et al. Application of orthogonal test design in the optimization of recliner[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech(Nature Science Edition),2005,33(6):32-34.
- [9] 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2004:418.
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2003:81-86.
- [11] 张德培,罗蕴玲. 应用概率统计[M]. 北京:高等教育出版社,2000:364-373.
- (编辑 修荣荣)
-
- (上接第51页)
- [2] 高效曾. 地层倾角测井的地面数据采集和实时处理[J]. 测井技术,1992,16(5):354-360.
GAO Xiao-zeng. Data acquisition and real time data processing of dip logs[J]. Well Logging Technology,1992,16(5):354-360.
- [3] 毛志强. 现代地层倾角测井速度校正方法[J]. 江汉石油学院学报,1991,13(1):38-43.
MAO Zhi-qiang. A method for logging speed correction in modern diplog[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute,1991,13(1):38-43.
- [4] 肖加奇,陈文荣,王哲然. 用递推最小二乘法对微电阻率扫描测井进行速度与加速度校正[J]. 测井技术,1994,18(3):204-211.
XIAO Jia-qi, CHEN Wen-rong, WANG Zhe-ran, et al. The speed and acceleration correction of micro resistivity scanner logs with recursive least square algorithm[J]. Well Logging Technology,1994,18(3):204-211.
- [5] 陈爱新,钟兴水. 卡尔曼滤波在电阻率测井数据处理中的应用[J]. 物探化探计算技术,1998,20(2):97-101.
CHEN Ai-xin, ZHONG Xing-shui. Application of Kalman filtering to the electric log data processing[J]. Computing techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,1998,20(2):97-101.
- [6] RUCKEBUSCH G A. Kalman filtering approach to natural gamma ray spectroscopy in well logging[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1981,AC-28(3):373-379.
- [7] CHEN G, CHUI C K. A modified adaptive Kalman filter for real-time applications[J]. IEEE Trans-AES,1991,28:125-129.
- [8] XIA Q J, RAO M, YING Y Q. Adaptive fading kalman filter with an application[J]. Automatica,1994,30:1331-1335.
- [9] LYLE W D, WILLIAMS D M. Deconvolution of well data innovations approach[J]. The Log Analyst,28(3):330-337.
- [10] 蒋志凯. 数字滤波与卡尔曼滤波[M]. 北京:中国科学技术出版社,1993:82-123.
- [11] 邵才瑞. 井筒数据的Akima插值重采样方法[J]. 测井技术,2004,28(2):112-114.
SHAO Cai-ru. An Akima interpolation method for borehole data resampling[J]. Well Logging Technology,2004,28(2):112-114.
- (编辑 修荣荣)