

·测试、试验与仿真·

## 油气井动态压力测试的温度补偿研究

张士飞<sup>1,2</sup>, 马铁华<sup>1,2</sup>, 崔春生<sup>1,2</sup>, 祖 静<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:**针对油气井压力测试存在的温漂问题,进行模拟油井高温试验,得出油井压力测试存在温度漂移的结论。射孔完井在产生高压气体脉冲的同时会释放大量的热量,使得传感器的灵敏度存在很大的不确定性。为了准确地测出井下压力信号,结合井下环境和压阻传感器温度漂移现象,需要对井下压力测试进行温度补偿。根据大量的实验数据,采用软件补偿技术实现对测试的温漂补偿。

**关键词:**油气井; 模拟油井; 传感器; 实验数据; 补偿

**中图分类号:** TP212.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2013)-06-0087-04

## Research on Temperature Compensation of Dynamic Pressure Measurement of Oil and Gas Well

ZHANG Shi-fei<sup>1,2</sup>, MA Tie-hua<sup>1,2</sup>, CUI Chun-sheng<sup>1,2</sup>, ZU -Jing<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** According to the problem of temperature drift during pressure test in oil and gas well, the high temperature test in oil well is simulated and the conclusion of temperature drift generating in the process of oil well pressure test is obtained. After perforating, much of heat is released, at the same time, the high-pressure gas pulse is generated in the well and the sensitivity of the sensor has a big uncertainty. Incorporating with downhole environment and temperature drift phenomena from piezoresistive sensors, temperature compensation shall be performed during downhole pressure test so that downhole pressure signals can be measured accurately. Software compensation technologies are used to compensate temperature drift during test process according to experimental data.

**Key words:** oil and gas well; analog well; sensor; experimental data; compensation

射孔技术(compound perforating)是利用火药或推进剂的燃烧产生高压气体脉冲压裂地层,形成连通油气井与地层的多个径向裂缝,是有效的油气田增产措施。射孔完井工艺机理极其复杂,准确获取射孔过程的动态压力信息,结合数值模型进行评价,深入分析作用规律,优化新的施工设计,为完善射孔器的设计、制定合理的施工工艺等都有决定性意义<sup>[1-2]</sup>。

然而,火药或推进剂的燃烧在产生高压气体脉

冲的同时还会释放大量的热能,射孔产生的热能会改变井下的环境,致使温度升高。在井下的高温环境中,温度是压阻式传感器的特性受影响最大的因素,压阻式压力传感器受温度影响会产生灵敏度温度漂移和零点漂移。在实际测量中,使得测试出的信号偏离真实信号。因此,需要对压阻式传感器进行温度补偿。

收稿日期:2013-07-30

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:张士飞(1988-),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要从事恶劣环境下动态测试技术研究和智能仪器研制工作;马铁华(1964-),男,教授,博士研究生导师,主要从事恶劣环境下动态测试技术研究和智能仪器研制工作。

## 1 模拟油井高温试验

模拟油井高温试验是为了验证压力测试存在温度漂移问题,先对动态压力测试仪进行参数设置<sup>[3]</sup>,然后将测试仪放入高温超高压测井釜体中,上好釜体上承压堵头。给釜体加温到90℃,将釜体内的压力调整到40 MPa,恒温恒压24 h后在10 min时间内将压力加到90 MPa,在90 MPa压力下继续恒温恒压24 h。其测井仪试验装置压力测试趋势如图1所示。



图1 测井仪试验装置压力测试趋势图

从模拟井中进行的48 h恒温加压的实验过程发现,曲线在基线处漂移。经曲线分析可知,曲线的基线为 $Y_0 = -1.8$  MPa,各阶段值分别为: $Y_1 = 41.4$  MPa,  $Y_2 = 60.9$  MPa,  $Y_3 = 89.5$  MPa。求得: $P_1 = Y_1 - Y_0 = 43.2$  MPa;  $P_2 = Y_2 - Y_0 = 62.7$  MPa;  $P_3 = Y_3 - Y_0 = 91.3$  MPa。

恒温恒压下压力曲线的基线值应该为0。但是,在90℃的高温环境中基线却偏离了实际的真实值。由此可见,石油井下动态压力测试在高温环境下确实存在温漂现象。

## 2 动态压力测试温度漂移的分析与补偿

### 2.1 传感器温漂特性

传感器作为压力测试的敏感元件,其测试精度起着关键作用,选用的是Kuliter公司的压阻传感器HKM-198-375M。如图2所示,压阻传感器是以硅片作为弹性敏感元件组成Wheatstone电桥<sup>[4-6]</sup>。

图2中, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  在外界无压力的条件下阻值相同,且将 $R_2$ 、 $R_4$  放在正应力区, $R_1$ 、 $R_3$  放在负应力区,Wheatstone电桥电路的输出为

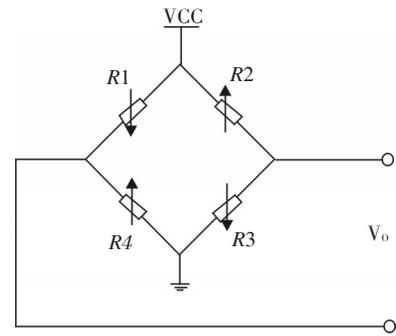


图2 压阻传感器原理图

$$V_0 = \frac{(R_2 R_4 - R_1 R_3) V_{CC}}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1)$$

当有外界压力作用在膜片上时, $R_2$ 、 $R_4$  的阻值将随之增加, $R_1$ 、 $R_3$  的阻值将随之减小,产生输出为

$$V_0 = \frac{[(R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4) - (R_1 - \Delta R_1)(R_3 - \Delta R_3)] V_{CC}}{(R_1 + R_2 + \Delta R_2 - \Delta R_1)(R_3 + R_4 + \Delta R_4 - \Delta R_3)} \quad (2)$$

理想条件下 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ,  $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$ , 当外界没有压力时满足: $R_2 R_4 = R_1 R_3$ , Wheatstone电桥电路的输出 $V_0 = 0$ 。当膜片两侧存在压力差时,则有

$$V_0 = \frac{\Delta R}{R} \quad (3)$$

#### 2.1.1 传感器的零点温漂

由于, $V_0 = \frac{(R_2 R_4 - R_1 R_3) V_{CC}}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$ , 即使没有外界压力时 $R_1 R_3 \neq R_2 R_4$ , 即使没有外界压力, $V_0$  也不为零,这就是零点输出。 $V_0$  与温度密切相关,当温度改变时, $V_0$  也会发生改变,这就是零点输出电压的温度漂移,简称为零点温漂。

零点温漂的产生原因有:一方面,由于误差是不可避免的,所以制作传感器时很难使四个桥臂上的电阻精确相等;另一方面,由于扩散工艺进行的电阻浓度掺杂很难完全一样。还要考虑的原因就是电阻工作时产生的焦耳热,热膨胀产生的应力,也会导致零点漂移;还有反向漏电流的作用也是不可忽视的。由公式可知,降低零点温漂的关键在于使各电阻的阻值和温度系数相等<sup>[7]</sup>。

#### 2.1.2 传感器的灵敏度温漂

传感器的灵敏度,即输出的增量 $\Delta y$ 与输入的增量 $\Delta x$ 之比,即 $k = \Delta y / \Delta x$ ,也是其校准线的斜率。由于

温度变化 $\Delta t$ 引起的每个电阻的总电阻变化为

$$\Delta R_i = R_0 i_a \Delta t + R_0 K_i (\mu_1 - \mu_2) \Delta t \quad (4)$$

式中,  $i$  为 1, 2, 3, 4。  $i_a$  为电阻温度系数,  $R_0$  为温度为  $t_0$  时的阻值,  $K_i$  为应变片的灵敏系数,  $\mu_1$  和  $\mu_2$  分别为应变丝和时间材料的线膨胀系数。当温度发生变化时, 灵敏度也会随之变化, 这种现象就是灵敏度温漂。灵敏度温漂的产生原因如下:

(1) 压阻式压力传感器的灵敏度与压阻系数密切相关, 压阻系数是温度的函数, 会随温度的变化而变化, 因此灵敏度温漂产生的一个重要原因是由于压阻系数是温度的函数。

(2) 衬底和扩散电阻间的热应力。扩散电阻制在氧化层上, 由于它们具有不同的热膨胀系数, 温度发生改变后, 就会产生附加的热应力, 也就产生了附加的压阻效应。

(3) 灵敏度及其温度系数与掺杂浓度的关系十分密切, 因此扩散工艺造成桥臂上四个电阻的掺杂浓度的微小差别, 也是造成灵敏度温漂的原因之一。

### 2.2 动态压力测试的温度补偿

压阻传感器的补偿方法有硬件补偿和软件补偿, 相对于硬件补偿, 软件补偿相对简单, 补偿效果明显。软件补偿有多种方法, 如查表法、曲线拟合法、和神经网络法。相比较与查表法, 文中采用曲线拟合法<sup>[8-10]</sup>。

一个理想的传感器, 它的灵敏度和零点输出值应该是恒定的, 但在实际使用中存在零点漂移和灵敏度漂移。为消除温度对传感器输出的影响, 采用曲线拟合法对曲线进行软件补偿, 首先对压力传感器进行不少于三个点实时标定, 确定输出-输入特性。算法如下: 设反非线性特性的拟合方程为

$$x(y) = \alpha_0 + \alpha_1 y + \alpha_2 y^2 \quad (5)$$

按照最小二乘法的方差最小原则, 有

$$\sum_i \left[ (\alpha_0 + \alpha_1 y_{Ri} + \alpha_2 y_{Ri}^2) - x_{Ri} \right]^2 = \varphi(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2) =$$

最小值 再由求极值的条件, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_0} = 0 \\ \frac{\partial \varphi(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_1} = 0 \\ \frac{\partial \varphi(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

也就是

$$\begin{cases} \sum_i \left[ (\alpha_0 + \alpha_1 y_{Ri} + \alpha_2 y_{Ri}^2) - x_{Ri} \right] = 0 \\ \sum_i \left[ (\alpha_0 + \alpha_1 y_{Ri} + \alpha_2 y_{Ri}^2) - x_{Ri} \right] \times y_{Ri} = 0 \\ \sum_i \left[ (\alpha_0 + \alpha_1 y_{Ri} + \alpha_2 y_{Ri}^2) - x_{Ri} \right] \times y_{Ri}^2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由此可得

$$\alpha_0 = \frac{\begin{vmatrix} T & H & L \\ U & L & R \\ V & R & S \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & H & L \\ H & L & R \\ L & R & S \end{vmatrix}}, \quad \alpha_1 = \frac{\begin{vmatrix} N & T & L \\ H & U & R \\ L & V & S \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & H & L \\ H & L & R \\ L & R & S \end{vmatrix}}, \quad (8)$$

$$\alpha_3 = \frac{\begin{vmatrix} N & H & T \\ H & L & U \\ L & R & V \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & H & L \\ H & L & R \\ L & R & S \end{vmatrix}}$$

式中,  $H = \sum_i y_{Ri}$ ;  $L = \sum_i y_{Ri}^2$ ;  $R = \sum_i y_{Ri}^3$ ;  $S = \sum_i y_{Ri}^4$ ;  
 $T = \sum_i x_{Ri}$ ;  $U = \sum_i x_{Ri} y_{Ri}$ ;  $V = \sum_i x_{Ri} y_{Ri}^2$

曲线拟合法关键是要要求出  $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的值, 需要解大量的方程, 但是相对与查表法它补偿的效果更贴近于真实的结果, 曲线拟合法能将温度的信息融合进来, 可以有效提高压力传感器的测量精度。

### 3 温度补偿后的数据

经过软件补偿以后如图3所示, 对曲线分析后可知, 曲线的基线为  $Y_0=0$  MPa, 各阶段值分别为:  $Y_1=43.2$  MPa,  $Y_2=62.7$  MPa,  $Y_3=91.3$  MPa。求得:  $P_1=Y_1-Y_0=43.2$  MPa;  $P_2=Y_2-Y_0=62.7$  MPa;  $P_3=Y_3-Y_0=91.3$  MPa。

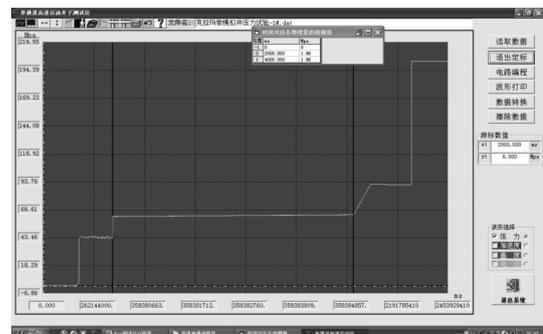


图3 修正后软界面所读取的曲线

为了验证其可靠性, 做了10次锤击实验, 通过10组实验数据表明, 曲线基线平均波动误差控制在误差要求内, 符合实验基准要求。

## 参考文献

- [1] 张继红,张惠殊,孙喜寿. 油井试井手册[M]. 北京:石油工业出版社,2008.
- [2] 黄俊钦.测试系统动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- [3] 崔春生.新型石油井下动态参数测试技术研究[D]. 太原:中北大学,2007.
- [4] 何金田,张斌.传感器原理设计与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.
- [5] 孟立凡,郑宾.传感器原理及技术[M]. 北京:兵器工业出版社,2000.
- [6] 孙以材,刘玉岭,孟庆浩.压力传感器的设计、制造与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:369-381.
- [7] 孙以材,魏占永,孙新宇,等.压阻型压力传感器的零点温漂及其补偿技术[J]. 半导体杂志,1999,24(4):40-49.
- [8] C Pramanik,T Islam, H Saha. Temperature compensation of piezoresistive micromachined porous silicon N pressure sensor by ANN[J]. Microelectronics Reliability,2006,46: 343-351.
- [9] Monica Bianchini. Learning without local minim in radial basis function networks [J]. IEEE Trans. On Neural Networks, 1995,6(3): 749-755.
- [10] 刘鹏.压阻式压力传感器温度补偿方法实现的研究 [D]. 天津:天津大学,2010.

(上接第43页)

- [8] 陈勤.基于Linux的嵌入式生化分析仪信号采集系统驱动程序设计[J]. 电子测量技术,2008(3).
- [9] 高亮.基于Linux的多参数水质监测仪的软件系统设计[D].重庆:重庆大学,2011.
- [10] 陈勤.基于ARM & Linux的嵌入式微型生化分析系统软件设计[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [11] 张洪建.基于嵌入式Linux半自动生化分析仪的研究与设计[D]. 镇江:江苏大学,2009.
- [12] Gasmin Blanchette, Mark Summerfield. C++ GUI Qt3 编程[M]齐亮. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:325-400.
- [13] 白玉霞,刘旭辉,孙肖子.基于Qt/Embedded的GUI移植及应用程序开发[J]. 电子产品世界.
- [14] 陈集,饶小桐.仪器分析[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.6: 3-41.
- [15] YY/T 0014-2005 Semi-automatic Biochemical Analyzer [S].半自动生化分析仪.

(上接第70页)

- [3] 李鸿飞. XX综合测试技术的发展与应用[C]// 第二届国防科技工业试验与测试技术发展高层论坛论文集,2008:71-75.
- [4] 张军. AVR单片机应用系统开发典型实例[M]. 北京:中国电力出版社,2005:229-248.
- [5] 王福瑞. 单片微机测控系统设计大全[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1999.
- [6] 冯健,张化光. AVR单片机在多回路数据采集器中的应用[J]. 仪器仪表学报,2005(8): 256-257.
- [7] 张斌,赵冬娥,宋涛,等. 高速密集多路光电信号的并行采集与控制[J]. 光电技术应用2011,26(1):66-69.
- [8] Bossche. A reliability technology-theory and application[J]. IEEE TransReliab,1984,R-36(2).

## 版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,加入了中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸版、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。