

多传感轨道扣件检测的数据同步采集系统设计

王梓旭, 苏圣超, 彭乐乐, 柴晓冬

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 针对轨道扣件检测的多传感数据同步采集, 首先, 在分析线阵 CCD 相机成像原理的基础上, 根据系统的要求对相机的关键参数进行了选择并设计了采集方案; 然后, 设计了传感器的信号调理电路, 包括电平调整电路以及抗混叠滤波器设计, 提高了传感器的抗干扰能力; 并通过 STM32 获取光电编码器的等间隔脉冲信息, 对各个传感器进行触发控制, 设计了线阵相机与惯性传感器的同步触发方案; 最后, 编写了上位机软件实现了数据的同步采集; 实验结果表明, 该系统能够精确采集各传感器的数据, 具有较强的抗干扰能力和稳定性。

关键词: 扣件检测; 信号调理; 同步触发; 数据采集

Design of Data Synchronous Acquisition System for Multi-Sensor Track Fastener Detection

Wang Zixu, Su Shengchao, Peng Lele, Chai Xiaodong

(College of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to realize synchronous acquisition of multi-sensor data for track fastener detection, first, based on the analysis of the imaging principle of linear array CCD camera, the key parameters of the camera are selected and the acquisition scheme is designed according to the requirements of the system. Then, the signal conditioning circuit of the sensors is designed, including the design of level adjustment circuit and anti-aliasing filter, which improves the anti-jamming capability. Equal interval pulse of photoelectric encoder is obtained through STM32 to trigger each sensor. A synchronous trigger scheme for linear array camera and inertial sensor is designed. Finally, the synchronous acquisition of data is realized by the authoring software of the upper computer. The experimental results show that the system can collect data of each sensor accurately, and has strong anti-interference ability and stability.

Keywords: fastener detection; signal conditioning; synchronous trigger; data collection

0 引言

近年来, 城市轨道交通行业在全国各地迅速发展, 许多二线城市正在申请或者建造地铁, 城市轨道交通的安全运营越来越成为人们关注的焦点。全国轨道交通安全事故也时有发生, 其中, 轨道扣件的缺失或松动将会带来非常巨大的安全隐患。轨道扣件是轨道系统中的重要组成部分, 起到固定钢轨、防止钢轨纵向和横向移动、保持钢轨间的轨距、保证轨道电路的正常工作等作用。在列车运行过程中, 轨道系统会受到强烈的振动和冲击, 有可能导致轨道扣件螺栓的松动, 严重时会造成扣件弹条的疲劳断裂。如果轨道扣件失效, 将会使钢轨难以固定、改变原有轨距、引起钢轨纵向和横向的位移, 有可能造成列车脱轨事故。因此, 轨道扣件状态检测是保证轨道交通安全运营的重中

之重。

文献 [1-3] 提出了基于线阵和面阵相机的缺陷状态检测系统, 阐述了应用线阵相机进行运动扫描获取无冗余图像的驱动控制方法, 并推导了采集频率与图像分辨率之间的约束关系; 并介绍了基于反馈控制原理的参数自动调节技术。文献 [4-5] 介绍了基于单片机的线阵 CCD 驱动电路设计, 完成了 CCD 驱动、信号采集以及计算机通讯等工作。文献 [6-8] 介绍了多传感数据采集技术, 数据采集模块利用 STM32 单片机实现了多个惯性测量单元的数据采集; 数据实时显示模块和数据存储模块完成了对多个惯性测量单元输出的加速度、角速度和姿态数据的实时显示与自动存储。

然而, 轨道扣件检测的环境复杂, 相机在拍摄过程中难免会因为列车的振动而影响图像拍摄的质量, 因此, 还需对振动产生的影响进行处理。针对上述问题, 本文基于多传感技术设计了一种轨道扣件检测数据采集系统, 主要通过线阵相机对轨道扣件状态进行实时检测。并采用惯性传感器来获取相机的振动状态, 通过惯性数据对所拍图像进行修正。实验证明, 本数据采集系统, 能够精确、稳定地采集到各传感器的同步数据, 保证相机拍摄扣件图像的质量, 为图像振动补偿算法以及扣件识别算法提供原始数据, 同时为轨道扣件检测提供一种方法。

收稿日期: 2018-07-12; **修回日期:** 2018-08-08。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478258); 上海市科委重点支撑项目(18030501300); 上海工程技术大学研究生创新项目(17KY1001)。

作者简介: 王梓旭(1994-), 男, 江苏省徐州市人, 硕士研究生, 主要从事轨道设备状态检测方向的研究。

苏圣超(1979-), 男, 江苏省启东市人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事数据驱动的故障检测方向的研究。

1 系统总体设计

轨道扣件检测数据采集系统的整体结构如图 1 所示。整个系统分为测量单元、控制单元和上位机系统三个部分。测量单元由多个传感器组成: 线阵相机、加速度计、倾角仪和陀螺仪。采用 STM32F103C8T6 作为主控芯片, 负责控制各个传感器的同步触发和数据传输。上位机系统由工控机组成, 对接收的数据实时显示并且保存。

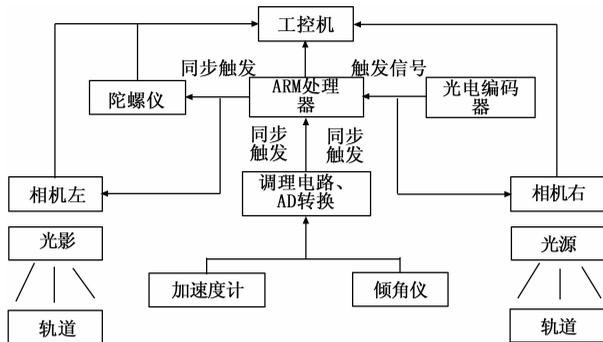


图 1 系统整体结构框图

采用线阵相机对轨道扣件进行拍摄, 横向分辨率高。采用光电编码器对相机和各传感器进行等间隔触发, 实现对测量单元的同步采集。系统采用 SPI 总线协议、TCP/IP 总线协议、以及 RS422 串口通信等实现各模块之间的相互通信。

2 硬件系统

2.1 相机的选型

工业上使用的相机一般分为面阵和线阵相机, 面阵相机横向成像范围较小, 难以达到扣件检测系统的要求。而且, 轨道检测车的速度一直在变化中, 如果使用固定的频率进行拍摄扣件, 会产生漏拍或者拍摄图像重复的情况, 不仅检测不准而且大大降低了检测的效率。线阵相机横向分辨率高, 能够保证拍摄到钢轨两边的扣件图像。根据线阵相机的工作原理, 采用线扫描的方式不会出现重复的扣件图像, 使用相机的外触发模式, 保证图片不会出现拉伸或压缩, 能够大大提高采集和处理的效率以及节省存储空间, 所以本文选用线阵相机进行拍摄。

在选择线阵相机时, 需要考虑以下几个参数:

2.1.1 分辨率

线阵相机的分辨率主要取决于芯片本身的结构, 包括像素个数、向远尺寸、像素密度等。拍摄的视场和图像的精度要求决定了相机的分辨率, 计算公式如下:

$$\text{分辨率} = \text{拍摄视野} / \text{精度要求} \quad (1)$$

潘得路扣件两端距离为 350 mm, 扣件两端轨枕预留 150 mm 距离, 设计精度为 0.6 mm, 则相机所需要的分辨率为:

$$N = \frac{(350 + 150 \times 2)}{0.6} = 1100(\text{pixel}) \quad (2)$$

因此, 选择分辨率为 2 k 及以上的相机。

2.1.2 线扫描率

相机的线扫描率即相机每秒扫了多少行数据, 与系统的速度以及图像的精度有关。系统的运行速度为 160 km/h, 图像的要求精度为 0.6 mm, 则相机线扫描率为:

$$L = \frac{\text{运行速度}}{\text{图像精度}} = \frac{160 \text{ km/h}}{0.6 \text{ mm}} = 74.066 \text{ (kHz)} \quad (3)$$

相机的线扫描率选择 80 kHz 及以上。

2.2 传感器信号调理电路

加速度计与倾角仪输出的是模拟电压信号, 模拟信号是连续的, 必须将其转换成能够使用的数字信号, 因此, 还需要对惯性传感器输出的模拟信号进行 A/D 转换。传感器输出的电压信号一般比较微弱而且与 AD 转换的输入范围不匹配、一般会混有噪声信号, 易受到干扰, 所以要对其输出的信号进行调理。

2.2.1 电平调整电路

有源电平调整电路一般有常规放大电路和差分放大电路两种形式。相比于常规的放大电路, 差分放大电路的优点是能够抑制温漂, 也就是对共模信号的抑制作用, 其原理如图 2 所示。

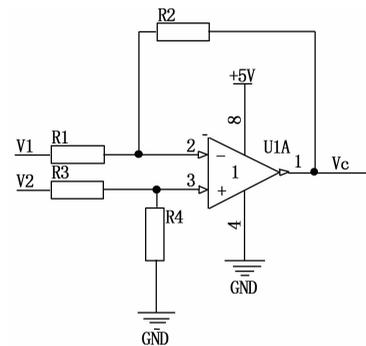


图 2 差分放大电路

根据运算放大器的“虚短”、“虚断”能够得到该差分放大电路的传递函数:

$$V_o = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (4)$$

一般将 R_1 和 R_2 、 R_3 和 R_4 设置为相同的阻值, 上式可以简化为:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (5)$$

该电路能够有效地放大差分信号, 通过调节 R_1 和 R_2 的阻值能够调节放大倍数。

2.2.2 抗混叠滤波器设计

轨道扣件检测系统中, 惯性传感器的噪声信号一般是高频信号, 抗混叠滤波器选用巴特沃斯低通滤波器, 能够有效地滤除高频噪声。巴特沃斯滤波器在其通带内的幅频特性曲线下落最为缓慢, 且曲线最为平坦, 没有起伏, 幅频特性好, 在阻带内逐渐缓慢地下降为零^[9]。

根据系统的具体要求, 计算巴特沃斯低通滤波器的阶数:

$$N = \frac{\lg \sqrt{\frac{10^{\frac{\alpha_p}{\alpha}} - 1}{10^{\frac{\alpha_s}{\alpha}} - 1}}}{\lg \lambda_s} \quad (6)$$

式中, α_s 为阻带衰减幅度; α_p 为通带衰减幅度; λ_s 为归一化后的阻带起始频率。

根据采集系统在钢轨上的振动特性, 本文低通滤波器的截止频率选为 100 Hz, 选用二阶巴特沃斯低通滤波器。通过查表法可以得到二阶巴特沃斯低通滤波器的传递函数, 进行反归一化得:

$$H(s) = H(p) \Big|_{p=\frac{s}{\Omega_c}} = \frac{\Omega_c^2}{s^2 + 1.414\Omega_c s + \Omega_c^2} \quad (7)$$

式中, Ω_c 为截止角频率; p 为归一化系数。

二阶有源低通滤波器的电路结构形式通常使用两种: 一种是压控电压源 (Voltage Controlled Voltage Source, VCVS) 型电路结构, 另一种是无限增益多路反馈 (Multiple Feedback, MFB) 型电路结构。由于设计了电平调整电路, 将滤波器的增益设为 1。MFB 型电路对元器件的参数灵敏度要求比较高, 在对元器件进行调整时, 会出现很大的变化, 一般用于增益较高的情况。所以本文选用 VCVS 型电路结构^[10]。

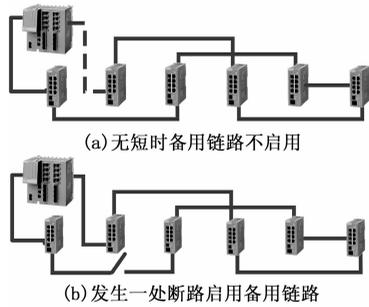


图 3 VCVS 型二阶低通滤波电路

结合二阶巴特沃斯低通滤波器传递函数和 VCVS 型电路结构, 可得:

$$\Omega_c = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (8)$$

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_5} \quad (9)$$

$$\frac{C_1}{C_2} \leq K - \frac{1}{2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} R_1 = \frac{1}{C_1 C_2 \Omega_c^2 R_2} \\ R_2 = \frac{1}{2 C_1 \Omega_c (1 + \sqrt{1 + 2(k - 1 - \frac{C_1}{C_2})})} \end{cases} \quad (11)$$

在调理电路前端加一个电压跟随器, 电压跟随器在调理电路中起到匹配阻抗的作用, 作为中间级, 它能够“隔离”前后级的相互影响, 能够使得后级电路更好的工作。调理电路原理如图 4 所示。

2.3 同步触发控制

线阵相机与面阵相机不同, 线阵相机每触发一次拍摄

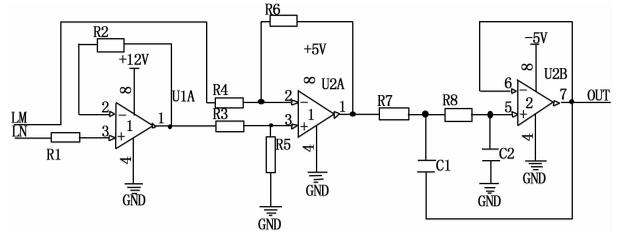


图 4 传感器调理电路

一行的图像信息, 不能形成一张完整的图像, 因此, 线阵相机与其他传感器的同步触发是需要解决的关键技术。根据线阵相机的成像原理, 可以通过设置其纵向的分辨率来确定线阵相机曝光 N 次成一张图像。因此, 可以在成一帧图像的最后一次触发时同步对惯性传感器进行同步触发, 数据同步显示在采集软件的界面上。

将光电编码器的输出接到 STM32 的 TIM 口, 主控芯片捕获到脉冲信号的上升沿对线阵相机进行触发并且计数器 +1, 当计数器累计到线阵相机设置的分辨率 N 值时, 控制芯片对惯性传感器进行触发并且清空计数器。

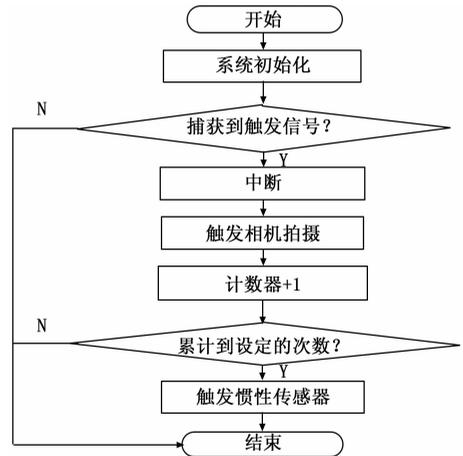


图 5 同步触发程序流程图

3 软件系统

本系统的采集软件是在 Windows 系统环境下, 采用 Visual Studio 2017 开发环境设计数据的动态显示和动态保存界面。上位机程序主要实现以下几个功能: 1) 参数的设置; 2) 数据的接收、解算和动态显示; 3) 数据的动态保存。程序流程如图 6 所示。

系统程序代码的编写是基于 C# 语言, 它是一款面向对象的编程语言, 有易维护、质量高、效率高、易扩展的优点。由于需要采集相机以及多个惯性传感器的数据, 所以采用模块化的编程思想, 易于程序的扩展及维护。相机模块的采集采用 TCP/IP 协议通信, 首先要匹配相机与工控机的 IP 地址, 相机厂家提供了 Sopera LT 开发者文档, 内部提供一套图像采集、显示和控制的 .Net 软件库, 开发者可以根据开发需要调用其中的库函数。TCP/IP 协议的数据帧格式为帧头 + IP 数据包 + 帧尾, IP 数据包包含 IP 头部 +

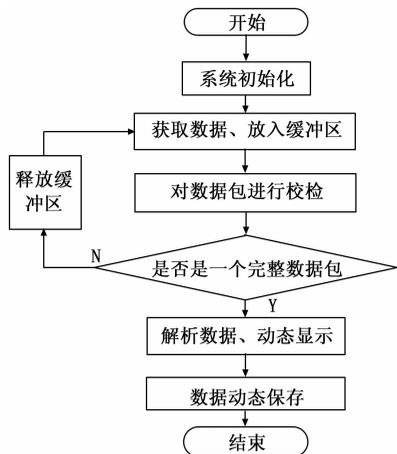


图 6 采集软件程序流程图

TCP 头部+实际数据, 通过解析数据包能够获得想要的实际数据。

惯性单元模块采用串口通信, 首先需要进行串口的初始化, 设置串口通信的波特率、数据位、停止位、奇偶校验等。打开串口后需要校验数据包以及数据包的解算, 解算代码主要任务是将收到的二进制数转换成十进制的数字。下面给出陀螺仪的解算代码示例:

$$GX = (X_MSB * 256 * 256 + X_MB * 256 + X_LSB) / \text{Math. Pow}(2, 14);$$

$$GY = (Y_MSB * 256 * 256 + Y_MB * 256 + Y_LSB) / \text{Math. Pow}(2, 14);$$

$$GZ = (Z_MSB * 256 * 256 + Z_MB * 256 + Z_LSB) / \text{Math. Pow}(2, 14);$$

经过解算, 可以得到陀螺仪三个方向上的角速度值。将各传感器解算得到的数据统一进行动态保存:

```

if(btnSave.Text == "关闭保存")
{
    datastr = ("roll:" + Roll + "\t" + "pitch:" + Pitch + "\t" + "yaw:" + Yaw + "\t" + "GX:" + GX + "\t" + "GY:" + GY + "\t" + "GZ:" + GZ + "\t" + "AX:" + AX + "\t" + "AY:" + AY + "\t" + "AZ:" + AZ + "\t" + "temp:" + Temp + "\t" + "timestamp:" + Timestamp + "\r\n");
    byte[] buffer
    = Encoding.Default.GetBytes(datastr);
    fswrite.Write(buffer,0,buffer.length);
}
  
```

4 实验结果

信号调理电路对传感器的输出信号进行电平调整、滤除噪声信号, 对传感器数据采集起到重要的作用。通过信号发生器输出的正弦波模拟传感器的输出接到电路板的输入端, 电平调整模块能够将电压范围调整至预设的范围, 并通过低通滤波器的衰减后, 能够输出连续、稳定的信号。将输入信号频率设置为 1000 Hz 时, 通过低通滤波器后, 几乎将高频信号完全滤除。测试结果如图 7 所示。

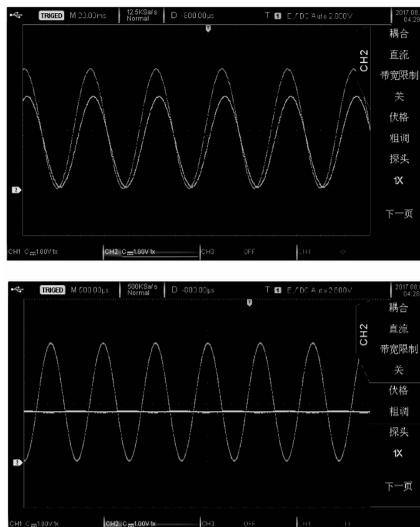


图 7 调理电路板测试波形图

由图可知, 该电路能够准确地对传感器的输出信号进行电平调整, 通过低通滤波器滤除高频噪声, 提高了传感器输出信号的信噪比和抗干扰能力, 使系统能够更加有效、稳定地工作。

图 8 为在实验室搭建的轨道扣件检测系统硬件平台, 采集设备封装于箱体中。推动轨检小车, 光电编码器同轴旋转产生脉冲信号触发相机以及惯性传感器采集数据。



图 8 数据采集设备系统

其中, STM32 和陀螺仪采用串口通信的方式将采集到的数据传输到上位机中, 通过串口转 USB 接口连接到上位机, 线阵相机通过千兆网接口与上位机连接。对连接好的系统进行上电, 打开数据采集上位机软件, 对每个模块进行初始化。配置相机的参数, 设置线阵相机的分辨率、曝光时间、行频以及触发方式等; 设置串口通信的波特率、停止位、数据位等。设置好参数后, 打开串口以及开启相机的抓取模式, 系统处于采集状态。推动检测车, 光电编码器与车轮同轴旋转, 光电编码器产生脉冲, 触发系统进行同步采集。图片与惯性单元的数据实时、动态地显示到采集软件的界面上。点击“保存数据”按钮, 能够实现数据的自动保存。线阵相机的图片实时显示在界面的上方; 倾角仪的数据显示在“数据显示”栏的第一列, 能够得到滚转角、俯仰角以及偏航角的数据; 陀螺仪的数据显示在第二列, 显示 X、Y、Z 三个方向的角速度; 加速度计的数

据显示在第三列，显示三个方向的加速度值。经过测试，系统能够稳定运行，实时地显示同步数据，为之后相机的振动补偿以及扣件状态检测打下了基础。

陀螺仪的数据波形如图 9 所示。

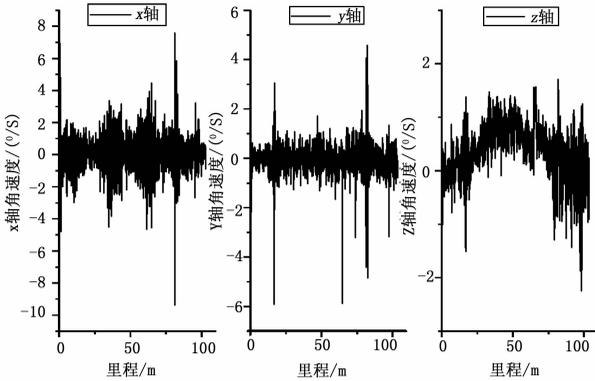


图 9 陀螺仪数据

图中惯性传感器的数据能够反映出车体的振动情况，对相机进行的振动补偿分为平移补偿和旋转补偿，使得拍摄的图像不产生畸变，提高获取的图像质量。

图 10 为上位机软件，能够进行串口设置和相机相关参数的调整，同步获取、显示相机拍摄的图像以及惯性传感器的数据。



图 10 数据采集软件界面

实验结果表明，本系统能够同步获取到相机和惯性传

感器的数据，获得高质量的扣件图像，具有较强的可靠性和稳定性。

5 结论

本文设计了一种轨道扣件检测数据采集系统，能够精确采集到相机和惯性传感器的同步数据。分析了线阵相机的成像原理，对相机的关键参数进行了选择。设计了传感器的抗混叠滤波器，研究了巴特沃斯低通滤波器的传递函数和电路拓扑结构，设计了传感器的信号调理电路。编写了上位机的采集软件，实现了各传感器的同步采集。并通过实验验证了系统能够有效工作，具有较强的稳定性和可靠性。能够精确地采集到各传感器的同步数据，为后续的研究奠定了基础。

参考文献:

[1] 戴鹏, 王卫东, 任盛伟, 等. 高速车载数字图像采集关键技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (1): 267-269.

[2] 李国宁, 刘妍妍, 金龙旭. 用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统 [J]. 光学精密工程, 2008 (3): 558-564.

[3] 吴禄慎, 朱磊, 陈华伟. 基于线阵 CCD 相机的轨道图像采集系统设计 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58 (8): 55-59.

[4] 屈少华, 陈阳, 程永进. 基于单片机的线阵 CCD 驱动及采集系统的设计 [J]. 电子技术, 2012, 39 (4): 42-44.

[5] 董亚则, 王顺. 高速数字图像采集显示系统的设计与研究 [J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 2011, 29 (6): 542-548.

[6] 彭飞, 杨雷雷. 基于 STM32 的多惯性测量单元数据采集系统设计 [J]. 仪表技术, 2016 (7): 29-33.

[7] 赵圣飞. 基于 STM32 的数据采集存储系统的设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2014.

[8] 刘广飞, 周文晖, 戴国骏. 基于 FPGA 的双目视觉同步采集系统 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2011, 31 (3): 22-25.

[9] 赵晓群, 张洁. 巴特沃斯低通滤波器的实现方法研究 [J]. 大连民族学院学报, 2013, 15 (1): 72-75.

[10] 巫华菊. 基于 AD 系列陀螺仪和加速度计信号处理及其应用研究 [D]. 漳州: 闽南师范大学, 2014.

(上接第 159 页)

[2] Bukhamsin A, Farshi M, Aziz K. Optimization of multilateral well design and location in a real field Using a Continuous Genetic Algorithm [Z]. 2010.

[3] Morales A N, Nasrabadi H, Zhu D. A new modified genetic algorithm for well placement optimization under Geological Uncertainties [J]. Management Services, 2011.

[4] Lyons J, Nasrabadi H. Well placement optimization under time-dependent uncertainty using an ensemble Kalman filter and a genetic algorithm [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2013, 109 (9): 70-79.

[5] Sampaio M A, Barreto C E A G, Schiozer D J. Assisted optimization method for comparison between conventional and intelligent producers considering uncertainties [J]. Journal of Petrole-

um Science & Engineering, 2015, 133: 268-279.

[6] 安瑶. 粒子群算法在油田布井优化中的应用研究 [D]. 1 西安石油大学, 2013.

[7] 张强, 李盼池, 刘丽杰. 基于量子混合蛙跳算法的油 1 田开发规划多目标优化 [J]. 信息与控制, 2014, 143 (1): 116-122.

[8] 张强. 基于智能计算的油田开发调整规划优化理论 11 与应用 [D]. 东北石油大学, 2015.

[9] 姜瑞忠, 刘明明, 徐建春, 等. 遗传算法在苏里格气 11 田井位优化中的应用 [J]. 天然气地球科学, 2014, 1125 (10): 1603-1609.

[10] 鲍敬伟, 李丽, 叶继根, 等. 高含水复杂断块油田加密井井位智能优选方法及其应用 [J]. 石油学报, 2017, 38 (4): 444-452.