

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2022.03.019

张恩齐, 孔令胜, 郭俊达, 等. 基于Retinex理论的低照度图像对比度增强算法 [J]. 机电工程技术, 2022, 51 (03): 95-98.

基于Retinex理论的低照度图像对比度增强算法

张恩齐^{1,2}, 孔令胜^{1*}, 郭俊达¹, 刘虹良¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 低照度图像的对比度增强是图像处理领域中的热点问题, 但图像对比度增强的同时难以有效保持图像的纹理及细节, 图像的质量得不到保证。为了解决这个问题, 将图像分解、亮度转化函数及Retinex理论相结合, 提出了一种简化的基于Retinex理论的低照度图像对比度增强算法, 可对单张低照度图像进行处理。首先, 基于低秩纹理先验的结构-纹理图像分解模型对图像进行分解, 提取原始图像的纹理图, 再对原始图像进行初始照射图估计、照射图纹理去除、边缘清晰及亮度增强等处理; 然后利用增强后的照射图和Retinex理论, 得到原始图像的反射图像; 最终, 将反射图与纹理图相结合得到最终融合图像。实验结果表明, 所提出算法的自然统计特性 (NIQE) 评价值更低, 可同时降为1.82和1.89, 具有更好的图像质量, 较其他方法表现出更好的增强效果, 证明了该算法在图像对比度增强的同时保证了图像的纹理以及细节。

关键词: 图像分解; 亮度转化函数; Retinex理论; 图像增强

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492 (2022) 03-0095-04

Low Illumination Images Based on Retinex Theory Contrast Enhancement Algorithm

Zhang Enqi^{1,2}, Kong Lingsheng^{1*}, Guo Junda¹, Liu Hongliang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Low illumination image contrast enhancement is a hot issue in the field of image processing, but it is difficult to effectively maintain the texture and details of the image during contrast enhancement, and the image quality can not be guaranteed. In order to solve the problem, combining image decomposition, brightness conversion function and Retinex theory, a simplified low illumination image contrast enhancement algorithm based on Retinex theory was proposed, which can process a single low illumination image. Based on the low rank texture transcendental structure-texture image decomposition model of image decomposition, the texture map of the original image was extracted, and then the original image was processed by initial irradiation image estimation, irradiation image texture removal, edge clarity and brightness enhancement. Then the reflection image of the original image was obtained by using the enhanced irradiation image and Retinex theory. Finally, the final fusion image was obtained by combining reflection image with texture image. Experimental results show that the NIQE value of the proposed algorithm is lower, which can be reduced to 1.82 and 1.89 simultaneously. The proposed algorithm has better image quality and better enhancement effect than other methods, which proves that the proposed algorithm can enhance the image contrast while ensuring the texture and detail of the image.

Key words: image decomposition; luminance conversion function; Retinex theory; image enhancement

0 引言

由于光照不足, 光源来源复杂, 光照强度不均, 使得摄像机拍摄的图像经常是亮度值低、对比度低, 或者局部光照很强, 而其他区域亮度值低, 图像的细节信息无法清晰地显示, 这些低质量、低对比度的图像会对人们的实际生活产生影响, 如夜晚监控、车辆识别、人脸识别和故障检测等^[1]。在现实生活中, 无法避免在这种复杂环境下拍摄图像, 因此, 对低照度条件下的图像进行图像对比度增强是图像处理领域中的一个热点问题,

并得到广泛地研究。

随着图像增强算法不断地研究, 很多算法取得了不错的进展, 其中最常见的是直方图均衡化, 该方法直接对图像的直方图进行处理, 从而增强图像对比度, 但该方法改变图像的灰度级, 会使图像局部过度增强, 从而丢失细节。近年来, 基于视网膜-大脑皮层Retinex理论的算法, 渐渐成为图像增强领域的研究热点。基于Retinex理论^[2]的算法主要是将原始图像分解为照射图以及反射图, 其算法认为原始图像中的反射图像反应图像

收稿日期: 2021-11-24

的本质特征,从而着重于消除照射图在原始图像中的影响。

较为常见的Retinex算法:单尺度Retinex算法(Single-Scale Retinex, SSR)^[3];多尺度Retinex算法(Multi-Scale Retinex, MSR)^[4];具有色彩修复的多尺度Retinex(Multi-Scale Retinex with Color Restoration, MSRCR)^[5];可同时对反射图和光照图进行处理的加权变分模型算法(Simultaneous Reflectance and Illumination Estimation, SRIE)^[6];非均匀弱光图像增强算法(Naturalness-Preserving Enhancement, NPE)^[7];基于照明映射评估的低亮度图像增强方法(Low-light Image Enhancement, LIME)^[8];多偏差融合算法(Multi-deviation Fusion method, MF)^[9]等。这些算法都可以对低照度图像进行图像增强,提升图像对比度,但其中MSR、MSRCR算法容易对图像亮度过于提升,容易得到亮度失真的结果图,其余算法都不可避免地损失一定程度的原始图像的细节及纹理信息。

本文提出了一种简化的基于Retinex理论的低照度图像对比度增强算法,可对单张低照度图像进行处理,在图像对比度增强的同时保证图像的纹理以及细节。主要工作包括:基于低秩纹理先验的结构-纹理图像分解模型于对图像进行分解,提取原始图像纹理图;然后对原图像进行初始照射图估计,对初始照射图进行中值滤波处理,迭代引导滤波处理,将初始照射图的纹理去除并且保留其边缘信息;利用亮度变化函数对处理后的照射图像进行亮度提升,利用增强后的照射图和Retinex理论得到原始图像的反射图,最终将反射图与纹理图相融合得到最终融合图像。实验结果表明该算法增强图像全局对比度的同时,还有效地保持了图像自然度和细节特征。

1 相关工作

1.1 图像分解

图像基于各种方法可分为不同图像层,可以基于频域的方法将图像分为高频和低频信号,基于Retinex算法将原始图像分解为照射图以及反射图。本文需要原始图像的纹理信息,所以将图像分为两部分结构层和纹理层,利用算法将图像的纹理信息提取出来。图像分解的方法有很多,可以使用图像滤波器进行滤波,也可以采用基于TV(Total Variation)全变分模型^[10],彩色纹理图像分解的VO(Ves-Osher)模型^[11]等方法。

本文采用基于低秩纹理先验的结构纹理图像分解模型^[12]的方法,该模型以总变分范数和全局核范数分别表征结构和纹理成分。其分解模型不仅非常简单,而且对于全局模式良好的图像也非常有效,与其他模型相比,该模型可以恢复更干净的纹理及细节。可以将原图像充

分提取纹理信息的同时尽量避免提出结构图像的边缘信息,这样得到的纹理图像细节更多。

1.2 简化Retinex模型

Retinex理论是一种自适应图像增强理论。该理论认为映入人眼中的光是由环境照射分量以及物体反射分量组成,其中反射分量为物体的本质。简单而言该理论是将原图像视为带有噪声的图像,和图像去噪目的类似,基于Retinex理论合理地消除噪声得到的图像便为增强图像,公式可表示为:

$$I(x) = I_L(x) \cdot I_R(x) \quad (1)$$

式中: $I(x)$ 为原始图像; $I_L(x)$ 为照射图像; $I_R(x)$ 为反射图像。

Retinex理论的思想是减少照射图像对视觉效果的影响,保留反射图像,实现图像增强。具体方法为:将式(1)转换为对数域。采用滤波等方式对照射图像 $I_L(x)$ 进行估计,整体亮度提升后再从对数域还原,从而得到代表了图像中物体的内在特性反射图像 $I_R(x)$ 。如图1所示。

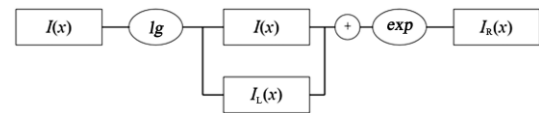


图1 Retinex原理图

1.3 亮度变化函数

对于图像亮度的提升,常常用到的是非线性函数对图像进行处理,常见的有伽马校正。

近年来,Ying^[13]提出了新的模型:Beta-Gamma的相机响应模型,该模型是在伽马校正的基础上进行了改变,在伽马校正之前对图像的像素进行了放大,得到了新的亮度变化函数 $g(I(x), k)$ 。

$$g(I(x), k) = \beta I(x)^\gamma \quad (2)$$

$$\beta = e^{b(1-k^a)} \quad (3)$$

$$\gamma = k^a \quad (4)$$

式中: $g(\cdot)$ 为亮度变换函数; k 为曝光率; β 和 γ 是和曝光率 k 相关的两个参数; u 为常数防止曝光率无穷大。

其中,曝光率 k 计算公式如下:

$$k = \min\left(\frac{1}{I(x)}, u\right) \quad (5)$$

最后可得,亮度变化函数如下:

$$g(I(x), k) = e^{b(1-k^a)} \cdot I(x)^{k^a} \quad (6)$$

经大量实验数据得知: $a = -0.3293$; $b = 1.1258$ 。这种亮度变换函数具有双参数,更能对图像的亮度进行有效提升。

1.4 图像增强算法

本文设计了一种简化的Retinex模型,从而提高低照

度图像的对比度。首先, 基于低秩纹理先验的结构-纹理图像分解模型, 将原图像分解为结构图像和纹理图像, 如式 (7) 所示, 本文只需纹理图像信息。

$$I(x) = I_S(x) + I_T(x) \quad (7)$$

式中: $I_S(x)$ 为结构图像; $I_T(x)$ 为纹理图像; $I(x)$ 为原始图像。

然后, 对 $I(x)$ 原图像进行处理, 基于 Retinex 理论, 将原图像分为照射图以及反射图, 如下所示:

$$I(x) = I_L(x) \cdot I_R(x) \quad (8)$$

式中: $I(x)$ 为原图像; $I_R(x)$ 为反射图像; $I_L(x)$ 为照射图。

根据 Retinex 理论, 本文需要求取 $I_L(x)$ 照射图, 从而得到 $I_R(x)$ 反射图像。

初始照射图可采用 Max RGB 技术, 得到原始图像中最亮的通道:

$$I_M(x) = \max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) \quad (9)$$

式中: (r, g, b) 为图像的 3 个通道; $I(x)$ 为原图像; $I_M(x)$ 为初始照射图。

采用 Max RGB 技术是由于得到的 $I_M(x)$ 保留了输入的 $I(x)$ 结构信息, 更利于后续操作。

本文需要得到的照射图边缘清晰, 纹理模糊, 所以需将该照射图进行处理, 将图中的纹理细节进一步地平滑掉, 本文选用中值滤波器进行处理:

$$I_P(x) = M(I_M(x)) \quad (10)$$

其中, $M(\cdot)$ 为中值滤波; 处理后的照射图 $I_P(x)$ 能保持图像中各个物体的边缘信息, 又可以尽可能的去除细小的纹理信息, 但只经过中值滤波后, $I_P(x)$ 的纹理和边缘信息还会有一定程度的模糊, 为了使照射图边缘尽可能清晰, 本文采用自迭代多次引导滤波方法对照明图 $I_P(x)$ 进行处理, 引导滤波具有细节平滑的同时保持边缘的优点, 相较于双边滤波器^[14]其时间复杂度更低。

不同于传统的引导滤波, 本文将每一次滤波后的图像都将作为下一次引导滤波的引导图, 如式 (11) 所示。这种迭代式的引导滤波方法, 可以有效细化照射图像, 得到更为清晰的边缘信息, 以及光滑的纹理信息。

$$I_P(x_{i+1}) = GIF(I_P(x_i)) \quad (11)$$

$$I_N(x) = I_P(x_{i+1}) \quad (12)$$

本文经试验迭代 4 次左右效果最佳, 本文采用亮度变换函数对图像 $I_N(x)$ 的亮度进行处理, 其亮度转换函数为:

$$I_L(x) = g(I_N(x), k) = \beta I_N(x)^\gamma \quad (13)$$

其中, $\beta = e^{b(1-k^a)}$; $\gamma = k^a$; $g(\cdot)$ 为亮度变换函数; 经实验得知 $a = -0.3293$, $b = 1.1258$; k 为曝光率; β 和 r 是和曝光率 k 相关的 2 个参数; u 为常数防止曝光率无穷大, 公式如下:

$$k = \min\left(\frac{1}{I_N(x)}, u\right) \quad (14)$$

最终经亮度变换函数后, 照射图 $I_L(x)$ 为:

$$I_L(x) = e^{b(1-k^a)} \cdot I_N(x)^{k^a} \quad (15)$$

根据 Retinex 理论, $I_R(x) = \frac{I(x)}{I_L(x) + \varepsilon}$, $I_R(x)$ 为反射图

像, 其中 ε 为常数, 根据实验一般设置为 0.01 或 0.02, 但本文经实验结果分析, 经亮度变化函数变化后的图像, 无需加此常数并且效果更好。

经本文图像对比度增强算法, 得到低照度原图像的反射图像 $I_R(x)$ 为:

$$I_R(x) = \frac{I(x)}{I_L(x)} \quad (16)$$

最后, 本文将增强的反射图像和纹理层融合在一起得到最终的结果:

$$I_f(x) = I_R(x) + I_T(x) \quad (17)$$

算法流程图如图 2 所示。

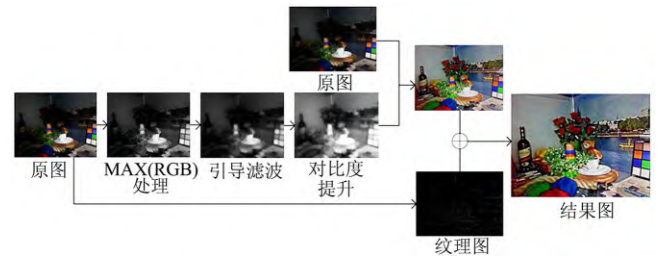


图2 本文算法流程

2 实验结果及分析

2.1 主观评价

为了验证本文方法, 本文利用公开的 DICM 数据集以及 LIME 数据集进行实验, 实验环境为: i5-6300HQ CPU @ 2.30 GHz, Matlab 2018a。并将近年来 6 种图像增强算法与本文算法进行对比, 这 6 种算法分别为图像去雾 (Dehazing-based, Dong)^[15]算法、亮度增强 (Illumination Estimation-based Method, LIME) 算法、多尺度 Retinex 融合 (Multiscale Retinex, MSR) 算法、多偏差融合 (Multi-deviation, Fusion, MF) 算法、非均匀弱光图像增强 (Naturalness Preserved Enhancement, NPE) 算法、基于加权变分模型图像增强 (Simultaneous Reflection and Illumination Estimation, SRIE) 算法作为实验对比算法。

图 3 所示为本实验在数据集 DICM 选取的图像, 原图为室外低照度图, 峡谷两侧为背光。Dong 算法过于区分峡谷和天空的分界处, 边缘轮廓过于清晰; LIME 算法对局部区域有过增强; MSR 算法处理后的图像亮度有些失真; MF 算法对局部区域有欠增强; NPE 算法对图像有着较好的亮度增强, 但是峡谷区域有些不清晰, 细节模糊; SRIE 算法对峡谷两侧有些欠增强; 而本文算法没有局部欠增强和过增强现象, 细节清晰, 起到了图像增强的效果。

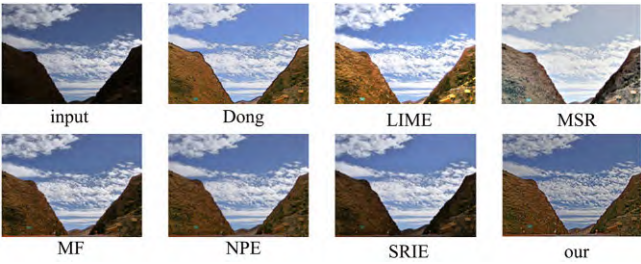


图3 实验对比结果1

图4所示为本实验在数据集LIME选取的图像,原图
为室内低照度图像。Dong算法局部细节不是很清晰;
LIME算法对局部区域有过增强;MSR算法处理后颜色亮
度失真;MF算法处理后图像对比度得到了明显增强,但
丧失了一定的细节信息;NPE算法处理后图像的整体自
然度较高,但细节光照没有得到很好补偿;SRIE算法处
理后图像整体偏暗;而本文算法在对整体对比度有效增
强的同时,保持了局部细节。

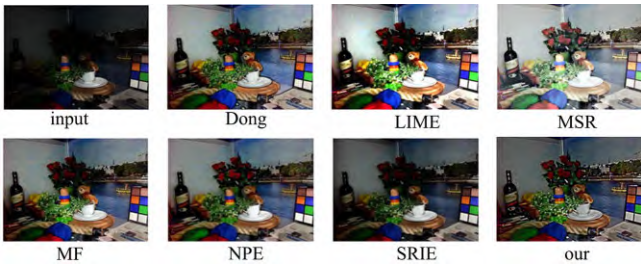


图4 实验对比结果2

2.2 客观评价

为了更好地评价图像质量,本文使用视觉信息保真度 (Visual Information Fidelity, VIF)、自然统计特性 (Natural image quality evaluator, NIQE) 来对结果图进行评估,表1和表2分别为图3和图4对应的客观评价数据。视觉信息保真度VIF的测量标准为图像VIF值高,证明图像质量越好,但图像VIF值过高,图像则会的过亮。如LIME、MSR算法处理图像,图像亮度会过大,本文算法的VIF值低于LIME、MSR算法,但高于其余算法证明图像亮度得到提高,同时保持住了图像质量。

表1 视觉信息保真度 (VIF)

	Dong	LIME	MSR	MF	NPE	SRIE	our
图2	3.603 6	6.713 4	4.651 3	3.223 1	3.119 4	2.417 4	3.944 5
图3	1.422 1	2.075 2	1.522 1	1.300 3	1.304 9	1.224 8	1.529 1

表2 自然统计特性 (NIQE)

	Dong	LIME	MSR	MF	NPE	SRIE	our
图2	2.888 2	2.242 8	2.628 3	2.240 5	2.199 0	2.306 2	1.824 3
图3	2.765 6	1.992 1	2.540 4	2.236 8	2.297 6	2.140 0	1.894 4

自然统计特性NIQE值越低,图像质量越好。本文
算法的NIQE值在所有方法中是最低的,表明本文方法
在增强图像对比度的同时细节保持较好,整体效果略好
于其他方法。

3 结束语

为了对低照度图像进行图像增强,并且保持细节,
本文将图像分解、亮度转化函数及Retinex理论相结合,
提出了一种简化的基于Retinex理论的低照度图像对比度
增强算法。首先基于低秩纹理先验的卡通-纹理图像分
解模型对图像进行分解,提取原始图像纹理图,对原图
像进行初始照射图估计,对初始照射图进行中值滤波处
理,迭代引导滤波处理,将照射图的纹理去除并且保留
其边缘信息,以及利用亮度变化函数对处理后的照射图
像进行亮度提升,基于Retinex理论得到原始图像的反射
图,最终将反射图像与纹理图相融合得到最终融合图像。

实验结果表明,本文所提出算法具有更好的图像质
量,证明了本文算法在图像对比度增强的同时保证图像
的纹理以及细节。相较于近年来各种图像增强算法,本
文算法自然统计特性NIQE值更低,在低照度图像对比度
增强方面有优越的性能。

参考文献:

[1] 杨爱萍,白煌煌.基于Retinex理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法[J].激光与光电子学进展,2017,54(4): 041002.

[2] Parihar AS,Singh K.A study on Retinex based method for image enhancement[C]//international conference on Inventive Systems and Control,India,2018.

[3] Brainard DH,Wandell BA. Analysis of the Retinex theory of color vision[J]. Journal of the Optical Society of America A,1986, 3 (10): 1651-1661.

[4] Jobson DJ,Rahman Z, Woodell GA. A multiscale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.

[5] Petro AB, Sbert C, Morel JM. Multiscale Retinex[J]. Image Processing on Line, 2014(4): 71-88.

[6] Fu XY, Zeng DL, Huang Y, et al. A weighted variational model for simultaneous reflectance and illumination estimation[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV, USA. 2016.

[7] Wang SH, Zheng J, Hu HM, et al. Naturalness preserved enhancement algorithm for non-uniform illumination images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(9):3538-3548.

[8] GuoXJ, Li Y, Ling HB. LIME: Low-light image enhancement via illumination map estimation[J]. IEEE Transactions on Image

不能一直增大,当卡定器深度超过设定值时,井口压力难以恢复,反而会影响柱塞气举。

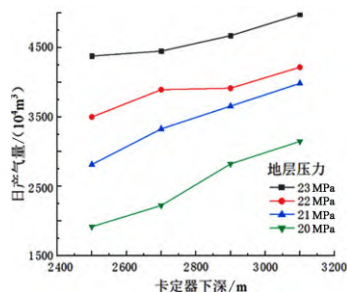


图4 卡定器下入深度与日产气量的关系

Fig.4 The relationship between the depth of the stopper and the daily gas production

3 结束语

本文通过建立柱塞的动态模型,计算各个因素变化下柱塞气举其他各参数的变化,从单因素分析可以得出气液比、地层压力与周期举升液量、日产气量、循环时间成正比,与周期举升液量成反比;井斜角与周期举升液量;产业指数、分离器压力与日产气量成反比。

从多因素方面分析对柱塞气举的影响,可以得到为了让柱塞气举正常运行,气液比和地层压力须高出最小值,气井深度和分离器压力不能超过某一最大值,只有对柱塞气举的多种因素综合考虑,才能保证柱塞气举正常运行,并且根据不同时刻下参数变化,及时调整柱塞运行制度,可以延长柱塞工作时间和气井的成产寿命。

参考文献:

- [1] 何顺利,吴志均.柱塞气举影响因素分析及优化设计[J].天然气工业,2005(6):97-99.
- [2] 刘华敏,李牧,刘乔平,等.涪陵页岩气田柱塞气举工艺研究与

(上接第98页)

- Processing, 2017, 26(2): 982-993.
- [9] Fu XY, Zeng DL, Huang Y. A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images[J]. Signal Processing, 2016(129): 82-96.
- [10] Xu L, Yan Q, Xia Y, et al. Structure extraction from texture via relative total variation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6):1.
- [11] Gong Q, Zhu M, Wang N. Improvement of Image Decomposition for Cartoon-Texture Based on the VO Model[M]. Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [12] Zhang Z, He H. A customized low-rank prior model for structured cartoon-texture image decomposition[J]. Signal Processing Image Communication, 2021, 96(8):116308.
- [13] Ying Z, Li G, Ren Y, et al. A New Low-Light Image Enhance-

ment Algorithm Using Camera Response Model[C]. International conference on computer vision, 2017.

- [3] 李庭玉.自启式柱塞优化设计及其连续排水采气工艺研究[D].西安:西安石油大学,2018.
- [4] 何顺利,吴志均.柱塞气举影响因素分析及优化设计[J].天然气工业,2005(6):97-99.
- [5] 曹银平.大斜度井柱塞气举排水采气模拟与优化[D].成都:西南石油大学,2018.
- [6] 贾敏,李隽,李楠.柱塞气举排水采气技术进展及应用[J].西部探矿工程,2015,27(7):25-28.
- [7] 刘苗.苏西区块柱塞气举排水采气合理工艺参数研究[D].西安:西安石油大学,2018.
- [8] 杨康.柱塞气举影响因素分析[J].化工管理,2017(11):7.
- [9] 冯笑雅.柱塞气举工艺设计及举升能力分析[D].荆州:长江大学,2020.
- [10] 张婷,唐寒冰,朱鹏,等.低压深井柱塞气举排水采气技术研究及应用[J].钻采工艺,2021,44(6):124-128.
- [11] 张晓锋.四川威远区块页岩气水平井排水采气工艺技术优选[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(10):205-206.
- [12] 殷庆国,刘方,贺杰新,等.柱塞气举排水采气工艺技术研究与应用[J].石油机械,2018,46(9):69-74.
- [13] 韩强辉,黄志龙,杨焕英,等.水平井柱塞气举排液技术在长庆气田的应用[J].石油钻采工艺,2018,40(2):210-214.
- [14] 刘华敏,李牧,刘乔平,等.涪陵页岩气田柱塞气举工艺研究与应用[J].石油钻探技术,2020,48(3):102-107.
- [15] 郑道明,贺绍华,徐武举,等.大牛地气田智能柱塞气举工艺技术[J].油气井测试,2020,29(3):19-26.
- [16] 黄琦,周光亮,黄力,等.ZC气田须二气藏排水采气工艺跟踪评价及优化[J].钻采工艺,2017,40(5):117-120.

第一作者简介:鲁小东(1995-),男,硕士研究生,研究领域为井下柱塞排水采气。(编辑:刁少华)

- ment Algorithm Using Camera Response Model[C]. International conference on computer vision, 2017.
- [14] Tseng Y C, Hsu P H, Chang T S. A 124 Mpixels VLSI Design for Histogram-Based Joint Bilateral Filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(11):3231-3241.
- [15] Dong X, Pang Y, Wen J. Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video[J]. ACM SIGGRAPH 2010 Posters. Los Angeles, CA, USA. 2010:1-6.

第一作者简介:张恩齐(1995-),男,博士,研究实习员,研究领域为图像处理、深度学习。

※通讯作者简介:孔令胜(1983-),男,河南人,博士,副研究员,研究领域为三维成像、虚拟现实和增强现实方向。

(编辑:刁少华)