

聚醚多元醇脱色精制工艺的研究

李硕

河南科技大学应用工程学院, 中国·河南 三门峡 472000

摘要: 聚醚多元醇是重要的化工原料, 广泛应用于聚氨酯塑料、轻工、日化、生物材料、航空航天等众多工业领域, 传统聚醚多元醇基本上采用无机碱引发, 属阴离子聚合和链式反应, 聚合过程中伴随副反应, 形成数量可观的丙烯醇碱金属盐, 这些盐影响聚醚多元醇后期产品的功能性质。因此, 本研究采用旋蒸、过滤、水洗吸附脱色结合对产物进行脱色精制后处理, 去除金属离子、水分、醛酮等小分子物质, 提高聚醚多元醇的透明度, 以此实现粗聚醚的初步精制。分别考察吸附剂添加量、水的添加量、脱色温度、脱色时间等因素对聚醚多元醇脱色效果的影响; 结果表明: 在吸附剂添加量 4%、水的添加量 10%、脱色温度 80℃、脱色时间 2h 下, 可有效降低聚醚多元醇色度。

关键词: 聚醚多元醇; 水洗吸附; 色度 (APHA); 正交实验

Research on the Decolorization and Refining Process of Polyether Polyols

Shuo Li

College of Applied Engineering, Henan University of Science and Technology, Sanmenxia, Henan, 472000, China

Abstract: Polyether polyols are important chemical raw materials and are widely used in polyurethane plastics, light industry, daily chemicals, biomaterials, aerospace and many other industrial fields. Traditional polyether polyols are basically initiated by inorganic bases, which belong to anionic polymerization and chain reactions. During the polymerization process, side reactions occur, forming a considerable amount of acrylonitrile alkali metal salts, which affect the functional properties of the final polyether polyol products. Therefore, in this study, rotary evaporation, filtration, water washing and adsorption decolorization were combined to carry out post-treatment of the products to remove metal ions, moisture, aldehydes, ketones and other small molecules, and improve the transparency of polyether polyols, thereby achieving the preliminary refining of crude polyether polyols. The effects of adsorbent dosage, water dosage, decolorization temperature and decolorization time on the decolorization effect of polyether polyols were investigated respectively. The results showed that under the conditions of 4% adsorbent dosage, 10% water dosage, 80 °C decolorization temperature and 2 h decolorization time, the color value of polyether polyols could be reduced to APHA 30.

Keywords: polyether polyols; water washing and adsorption; color value (APHA); orthogonal experiment

0 前言

聚醚 (Polyether polyol, 又名聚醚多元醇, 英文缩写为 PPG) 是一种链段上羟基由醚键连接的端羟基大分子聚合物^[1-2]。大多数聚醚多元醇的合成均是在均相催化剂催化作用下, 以含活泼氢的醇类或胺类化合物为起始剂, 通过低级环氧化合物如氧化丙烯开环聚合完成的。其中主要包括金属氢氧化物^[3-4]、双金属氰化络合物 (DMC)^[5-6]、磷腈盐类 (PZN)^[7-8]。该方法的优点在于技术成熟, 催化剂价格低廉; 但同时也存在许多缺点, 均为均相催化剂、反应后与产物分离困难、后处理会产生大量盐^[9]。残存的这些催化剂活性组分会影响聚氨酯材料的使用性能、结构性能以及产品稳定性^[10], 所以常使用酸碱中和^[11]、过滤^[12]、吸附^[13]、汽提^[14]、旋转蒸发^[15]、精馏^[16]、减压精馏^[17]、萃取精馏等^[18-19]精制工艺对聚醚多元醇进行精制后处理^[20]。针对聚醚多元醇的精制工艺, 国内外已有很多专利进行报道, 方法各异。

张婧元等^[21]采用中和吸附法对粗聚醚的精制工艺进行

研究, 通过添加中和剂 (磷酸)、晶种、晶粒增长剂 (自制) 以及吸附剂来实现粗聚醚的精制。该精制方法为依次向粗聚醚中加入 1.16%~1.24% 的磷酸中和剂、0.2%~0.3% 的 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 晶种、0.4% 的自制晶粒增长剂和, 促进钾离子形成难溶于体系的磷酸二氢钾水合物晶体, 再向体系中加入 0.6% 的吸附剂继续吸附微量游离态金属钾离子, 过滤分离, 最后制得金属离子含量低于 5ppm 的聚醚精品。

申宝兵等^[22]采用水洗精制法对聚醚多元醇的精制工艺研究。该工艺将粗品聚醚置于反应釜中, 添加 0.5%~1.2% 的自制精制剂后氮气负压吹扫 2~3 次, 于 110℃ 搅拌 1h 再降低温度至 90℃, 后加入 5%~8% 的去离子水搅拌 2h, 真空状态下升温至 120℃ 继续搅拌, 当聚醚水分小于 0.08% 时, 过滤除去聚醚吸附剂得到聚醚精品, 该方法聚醚醛值含量低至 3ppm。

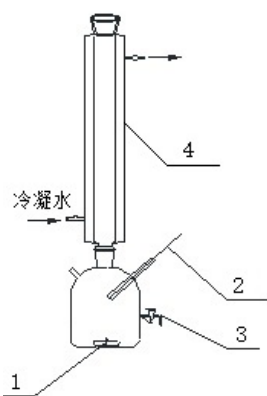
吴亚青等^[23]采用连续减压精馏法对初步精制后的聚醚多元醇进行进一步处理研究, 连续减压精馏工艺将水分含量

为 0.12%、甲醛含量为 28.4ppm、乙醛含量为 35.1ppm、丙烯醛含量为 55.70ppm 且气味较浓的粗聚醚精制后处理为水分含量为 0.03%、甲醛含量为 0.17ppm、乙醛含量为 0.16ppm、丙烯醛含量为 0.10ppm 且无色无味的聚醚精品，大幅度降低了粗聚醚的气味和醛值、水分含量。本实验探讨聚醚多元醇的脱色精制工艺条件，以期提高聚醚多元醇的透明度。

1 实验步骤及方法

1.1 实验仪器

本脱色精制实验采用自制装置进行粗聚醚精制工艺，装置结构如图 1 所示。



1—磁子；2—温度计；3—取样口；4—提升管。

图 1 脱色精制实验装置图

1.2 实验步骤

①首先将带有催化剂的反应产物于 30℃、真空度 0.065MPa 条件下旋蒸脱去未反应的原料环氧丙烷，然后对产物进行过滤脱去催化剂：第一步采用单层 30~50μm 中速定性滤纸过滤，实现催化剂和聚醚多元醇的初步分离。第二步采用双层 1~3μm 慢速定性滤纸过滤，实现催化剂和聚醚多元醇的最终分离，得到粗聚醚多元醇。

②建立如图 1 所示的实验装置，向设有搅拌器的烧瓶中加入上述粗聚丙二醇，搅拌状态下加热至吸附温度，后滴加一定配比的蒸馏水和吸附剂，恒温吸附若干时间后，停止搅拌，迅速过滤出吸附剂。然后将脱色后的聚醚多元醇冷却恢复至室温，取样进行样品色度测定。

1.3 色度 APHA 分析测定

采用 APHA 标准色标标准，将 100mL 样品置于色标管中，排去样品中的气泡，打开色标管口的塞子，下部垫一张白纸，去相近色标标准打开塞子，和样品并列置于白纸上，自上而下观察色度，确定样品色度值，并记录^[24-25]。

2 结果与分析

2.1 吸附剂添加量对脱色精制实验的影响

依据文献，设定脱色温度 T=80℃、时间 t=2h、去离子水添加量 W_{H2O}=8%，考察吸附剂硅藻土的添加量对样品色度的影响。实验结果如图 2 所示，随吸附剂硅藻土添加量的

增加，样品色度逐渐降低；当硅藻土的添加量高于 4% 时，再随硅藻土添加量的增加，样品色度无明显降低趋势，综合考虑吸附剂硅藻土添加量最佳为 4%。

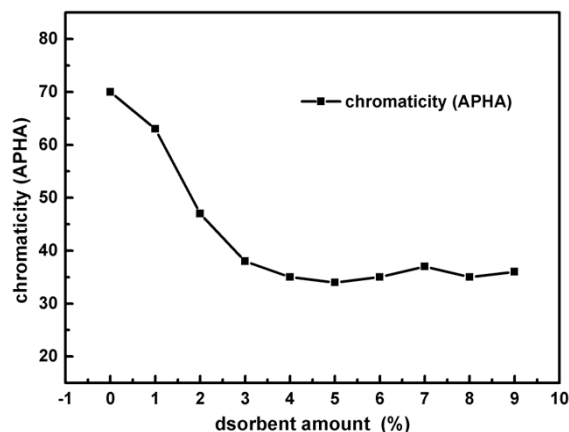


图 2 吸附剂添加量的影响

2.2 水的添加量对脱色精制实验的影响

设定脱色 T=80℃、t=2h、W_{ds}=4%，考察水的添加量对样品色度的影响。实验结果如图 3 所示，随着样品中去离子水添加量的增加，产品色度呈现先增加后降低的趋势。这是由于当水添加量过高时，降低了吸附剂的浓度，影响吸附效果；当水添加量过低时，样品粘度过高，吸附剂与样品不能充分接触。因此，吸附过程中水的添加量最佳为 10%。

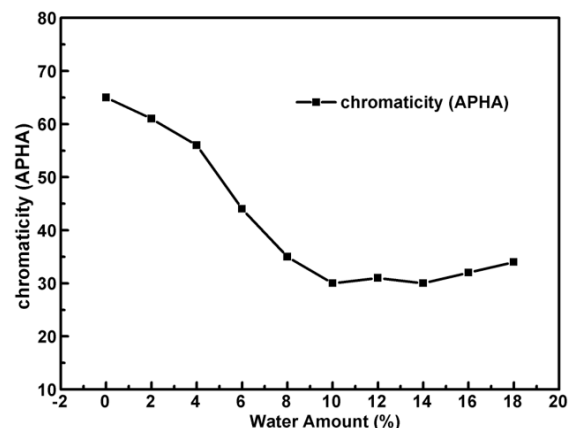


图 3 去离子水添加量的影响

2.3 脱色温度对脱色精制实验的影响

设定脱色 t=2h、W_{ds}=4%、W_{H2O}=10%，考察脱色温度对样品色度的影响。实验结果如图 4 所示，当温度过低时，样品粘度过高，吸附剂被包裹在样品中，样品的色度偏高；随温度的升高，样品色度逐渐降低，当温度高于 80℃时，色度基本不变。综上吸附过程中最佳的脱色温度为 80℃。

2.4 脱色时间对脱色精制实验的影响

设定脱色 T=80℃、W_{ds}=4%、W_{H2O}=10%，考察脱色时间对样品色度的影响。实验结果如图 5 所示，在时间为 2h，样品色度较低，后随时间增加，色度基本不变。

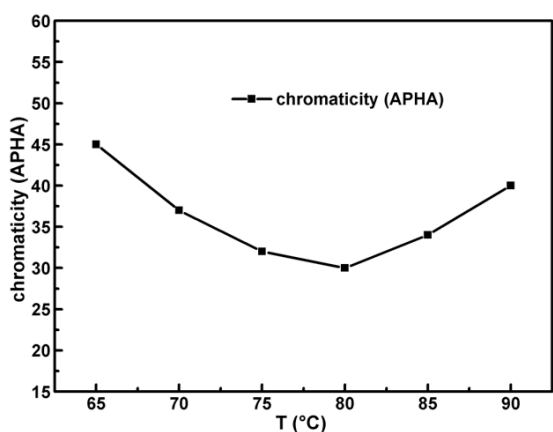


图 4 吸附温度的影响

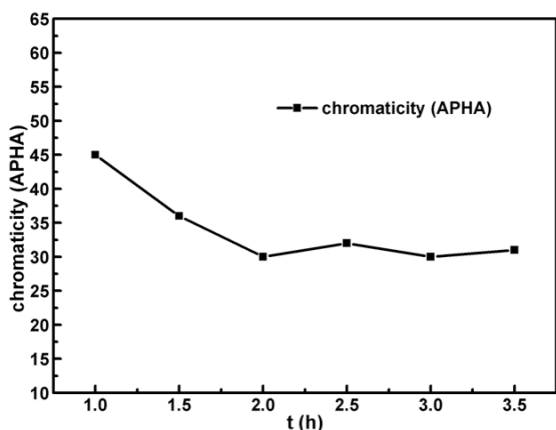


图 5 吸附时间的影响

2.5 正交实验优化

根据单因素实验研究结果,以聚醚多元醇样品色度为目标,对吸附剂添加量、水的添加量、脱色温度和时间四个因素进一步优化,设计 $L_9(4^3)$ 正交实验表。实验条件、方差分析及结果见表 1。

表 1 $L_9(4^3)$ 正交实验条件和结果

水平	因素				X_{APHA}
	A	B	C	D	
1	1 (3)	1 (8)	1 (75)	1 (1.5)	42
2	1 (3)	2 (10)	2 (80)	2 (2)	34
3	1 (4)	3 (12)	3 (85)	3 (2.5)	39
4	2 (4)	1 (8)	2 (80)	3 (2.5)	38
5	2 (4)	2 (10)	3 (85)	1 (1.5)	40
6	2 (4)	3 (12)	1 (75)	2 (2)	33
7	3 (5)	1 (8)	3 (85)	2 (2)	35
8	3 (5)	2 (10)	1 (75)	3 (2.5)	39
9	3 (5)	3 (12)	2 (80)	1 (1.5)	41

表 1 中 A、B、C 和 X_{APHA} 分别代表吸附剂硅藻土添加量(%)、水的添加量(%)、C- 吸附温度(°C)和样品色度(APHA)。精馏脱水工艺中的塔釜温度,原料进样量,回流比以及塔釜样品水分含量。以样品色度为依据,各因素

影响的分析结果如表 2 所示。

表 2 以 X_{APHA} 为依据的正交实验结果分析

项目	因素				
	A	B	C	D	
α	K1	38.333	38.333	38.000	41.000
	K2	37.000	37.667	37.667	34.000
	K3	38.333	37.667	38.000	38.667
	极差	1.333	0.666	0.333	7.000
优水平	A_2	B_2	C_2	D_2	
优组合	$A_2B_2C_2D_2$				

由表 2 可知,以聚醚多元醇样品色度 X_{APHA} 为实验依据,通过正交优化结果可得到最优组合为 $A_2B_2C_2D_2$ 。

综上所述,在最优精制脱色条件吸附剂添加量 4%、水的添加量 10%、脱色温度 80°C、脱色时间 2h 条件下,可有效降低聚醚多元醇色度。

3 结论

设计了聚醚多元醇脱色、脱醛、除水的精制实验方案和装置,优化精制聚醚多元醇条件。综合上述精制实验可得出以下结论:采用硅藻土为吸附剂,在特定条件下对聚醚多元醇粗品进行脱色精制,具有良好的脱色效果。脱色实验最优条件为:吸附剂添加量 4%、水的添加量 10%、脱色温度 80°C、脱色时间 2h。该条件下样品为淡黄色透明粘稠液体,可有效降低聚醚多元醇色度。

参考文献:

- [1] Yan Z R, Wu L C, Yang S Y, et al. Synthesis of DMC polyether polyols with small molecular regulators[J]. Polymeric Materials Science & Engineering,2004,20(3):57-58.
- [2] 王淑兰.ABS用聚丙二醇的研制[D].大庆:大庆石油学院,2005.
- [3] Yu J K, Zhang J L, Lv G H, et al. Novel phosphazanium type catalysts and their applications in synthesis of polyether polyols[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials,2016,14(4):12-18.
- [4] Kiyono S, Kouno M, Mizutani K, et al. Phosphazanium salt and preparation process thereof, and process for producing poly(alkylene oxide): EP, EP0791600[P].1997-08-27.
- [5] Yang B. Progress of the Polyether Polyols Synthesis[J]. Guangdong Chemical Industry,2009,36(12):78-80.
- [6] 钮庭树.粗聚醚多元醇精制工艺的研究[J].聚氨酯工业,2003,18(3):29-31.
- [7] 郑直.聚醚组分微量水分脱除新技术及其在RIM-PUE中的应用[D].洛阳:河南科技大学,2012.
- [8] 闫鸿敏,邓爱华,施晓秋,等.降低高活性聚醚多元醇中醛含量的改进措施[J].化学推进剂与高分子材料,2016,14(2):42-45.
- [9] 刘益军.聚氨酯原料及助剂手册[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [10] 邓强,孟祥交,徐敬芳,等.玉米油的精制工艺研究[J].石油化工应用,2012,31(4):75-78.

- [11] 占礼万.酸碱再生颗粒活性炭对麸酸脱色的影响[J].福建工程学院学报,2020,18(1):92-96.
- [12] 王慧君,邢晓杰,罗铭.聚碳酸酯聚醚多元醇纯化精制工艺[J].广州化工,2024,52(20):27-29.
- [13] 柴湘君,徐庆涛,高俊杰,等.废油精制用脱色吸附剂聚硅酸镁制备和测试[J].广州化工,2013,41(8):7-9.
- [14] 于涵,郑晓宇,陈海玲,等.棉籽油脂肪酸甲酯的提纯及组成分析[J].中国油脂,2014(12):80-83.
- [15] 连续减压侧线精馏制备氨基聚醚工艺[J].能源化工,2021(3).
- [16] 李松,苏复,顾正桂,等.连续减压侧线精馏精制200号聚醚胺的模拟与实验研究[J].南京师范大学学报(工程技术版),2019,19(4):106-112.
- [17] 孙思莹,宋丹丹,佟玥仪,等.硅藻土矿提纯改性制备聚醚吸附剂的工艺研究[J].辽宁化工,2021,50(7):974-976+979.
- [18] 李学苗.油酸甲酯的清洁合成工艺研究[D].石家庄:河北科技大学,2016.
- [19] Tran C H, Pham L T T, Lee Y, et al. Mechanistic insights on Zn(II)-Co(III) double metal cyanide-catalyzed ring-opening polymerization of epoxides[J]. Journal of Catalysis,2019(372): 86-102.
- [20] Yang B. Progress of the Polyether Polyols Synthesis[J]. Guangdong Chemical Industry,2009,36(12):78-80.
- [21] 张婧元,孔凡贵,贺德福,等.聚醚多元醇的精制[J].当代化工研究,2007(7):13-14+3+6.
- [22] 俞中锋,申宝兵,张丽君,等.一种降低聚醚多元醇中VOC含量及气味的精制方法:CN107586383A[P].2018-01-16.
- [23] 吴艳琦,顾正桂,曹晓艳,等.一种减压热氮夹带脱轻的精馏装置:CN201721469667.1[P].2018-06-05.
- [24] Mohammed T J. Application of Response Surface Methodology for analysis and optimization of the operational parameters for turbidity removal from oily wastewater by electrocoagulation process[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering,2018,454(1):1-12.
- [25] GB/T 605-2006.化学试剂色度测定通用方法[S].中国石油和化学工业联合会,2006.
- 作者简介:李硕(1994-),女,回族,中国河南商丘人,硕士,助教,从事绿色化工及环境科学研究。

基于反向学习策略的萤火虫算法用于瞬变电磁反演

李朋汕

江西财经大学软件与物联网工程学院, 中国·江西 南昌 330013

摘要: 瞬变电磁反演由于非线性、多解性和病态特性导致传统优化算法(如粒子群算法、差分进化算法), 作为地球物理勘探的关键技术, 在局部最优、反演精度不足的情况下, 很容易陷入困境。为解决该问题, 论文提出基于萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)与反向学习(Opposition-Based Learning, OBL)的瞬变电磁联合反演方法。该方法通过反向学习策略优化萤火虫种群初始化, 利用反向解的随机性与遍历性提升初始解的多样性, 有效拓展全局搜索空间; 同时, 结合萤火虫算法的动态吸引度机制与自适应步长策略, 平衡算法的全局探索与局部开发能力, 降低早熟收敛概率。

关键词: 瞬变电磁反演; 萤火虫算法; 反向学习; 反演

An Analysis of the Opposition Learning Strategy Based on Opposing Learning for Transient Electromagnetic Inversion

Penshan Li

School of Software and Internet of Things Engineering, Jiangxi University of Finance and Economics, NanChang, Jiangxi, 330013, China

Abstract: Transient electromagnetic(TEM)inversion, as a key technology in geophysical exploration, suffers from nonlinearity, non-uniqueness, and ill-posedness, which cause traditional optimization algorithms (such as particle swarm optimization and differential evolution algorithm) to easily fall into local optima and exhibit insufficient inversion accuracy. To address this issue, this paper proposes a joint TEM inversion method based on the Firefly Algorithm (FA) and Opposition-Based Learning (OBL). Using the OBL strategy to optimize the initialization of the firefly population, the randomness and ergodicity of opposing solutions are taken into account in order to increase the diversity of initial solutions and successfully increase the global search space. Meanwhile, by combining the dynamic attractiveness mechanism and adaptive step-size strategy of FA, it balances the global exploration and local exploitation capabilities of the algorithm, reducing the probability of premature convergence.

Keywords: transient electromagnetic inversion; firefly algorithm; opposition-based learning; inversion

0 前言

瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)是一种研究地下电导率分布的时域人工源电磁法, 具有非侵入性、纯二次场观测、对导电目标敏感等优点^[1-2]。随着瞬变电磁仪在工程勘探、矿产勘探、浅层地球物理勘探、地质填图等领域的广泛应用, 瞬变电磁反演越来越受到人们的重视^[3-4]。目前, 瞬变电磁反演的主流方法主要是一维线性化技术, 涵盖了共有梯度法, 最小阻尼二乘法, 高斯-牛顿法, 自适应正则化反演和 OCCAM 反演法等^[5-9]。如 Irawand 等提出的导引随机搜索算法, 在准二维地电模型反演和实际地热田数据处理中得到了成功的应用^[10]; OgayaX 等实现了地下电阻率变化监测, 借助大地电磁响应^[11]; EgbertG.D 和 KelbertA 通过构建计算机雅克比矩阵, 完成二维和三维大地电磁数据的反演计算^[12]; 圆锥形场源的优化反演^[13]是杨海燕等以减震最小二乘法为基础进行的。

值得注意的是, 反演问题本质上属于非线性病态参数估计问题(nonlinear discovery production)。现有线性反演算法多通过线性逼近处理非线性问题, 不仅严重依赖初始参数的选取^[14], 且极易陷入局部最优解^[15]。随着勘探目标的复杂化及反演精度要求的提升, 非线性反演方法已成为地球物理学者的重点研究方向。

Yang^[16]提出了一种新的群体智能算法—萤火虫算法(FA)。它是一种群体智能和随机算法, 具有鲁棒强和快速等优点。FA 已被用于多个领域, 例如解决非凸经济调度问题^[17]和设计各向同性源的线性阵列^[18]。FA 算法首先由 Zhou 等人^[19]引入到瑞利波反演中。Wang^[20]将该技术用于大地电磁测深数据反演。

但是, 早期的成熟、缓慢的收敛速度和较低的计算精度, 这些都是传统的 FA 算法所不能做到的。其原因是种群个体的位置分布比较集中, 缺乏随机性, 导致粒子易陷入局部最优。鉴于上述问题, 论文在 FA 中引入了反向学习的思想,

提出了一种基于反向学习策略的萤火虫算法 (OFA), 并给出了算法具体实现的流程, 然后对算法的可行性进行层状电模型的建构验证。

1 基于反向学习策略的萤火虫算法

1.1 传统的萤火虫算法

FA 算法是一种模拟萤火虫群体行为的群体优化算法。标准 FA 算法的思想是, 每只萤火虫的位置代表待解问题的一个解, 萤火虫的亮度代表待解问题的目标函数值。目标函数值越好, 亮度越强。暗淡的萤火虫会被明亮的萤火虫吸引并向它们移动。

他们随着迭代的进行, 萤火虫群中微弱的萤火虫不断向较亮的萤火虫移动, 最终大部分萤火虫会聚集在最亮的萤火虫周围。最亮的萤火虫的位置是问题的最优解。FA 算法有两个因素, 亮度和吸引力。亮度表示每个萤火虫位置的上级, 与目标函数的取值有关。吸引力决定了每只萤火虫移动的距离。

萤火虫算法的数学模型描述如下:

$$I = I_0 \cdot e^{-\gamma r_{ij}} \quad (1)$$

式中: I_0 为初始亮度, 参数 γ 为亮度的损失因素, r_{ij} 为萤火虫 i 和 j 之间的欧氏距离, 计算公式如下:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{n=1}^d (x_{in} - x_{jn})^2} \quad (2)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为萤火虫 i 和 j 在空间中的位置; d 为模型参数的数目。萤火虫的吸引力为:

$$\beta_{ij} = \beta_0 \exp(-\gamma r_{ij}^2) \quad (3)$$

在式 (3) 中, β_{ij} 为萤火虫 i 和 j 之间的吸引力; β_0 为最大吸引力, 通常取 1。当微弱的萤火虫移动到最亮的萤火虫时, 其位置更新为:

$$x_j^{k+1} = x_j^k + \beta_{ij} (x_i^k - x_j^k) + \alpha(R-1/2)\epsilon \quad (4)$$

式中: α 为步长因子; 为 $[0, 1]$ 内的随机数; ϵ 为在参数范围内随机生成的位置矢量。

1.2 萤火虫算法反向学习策略优化原理

问题搜索空间的特性是左右萤火虫算法搜索行为的关键要素, 这是已被认知的传统结论。反演初期, 尤其是缺乏有效引导时, 算法倾向于对搜索空间广泛探索; 反演后期, 则侧重对优质区域开发以逼近最优解。然而, 萤火虫算法应用于瞬变电磁反演时, 主要挑战在于搜索进程中难以把控种群多样性, 易出现过早收敛, 使反演陷入局部最优, 无法精准刻画地电结构^[21]。这类问题可通过嵌入反向学习 (Opposition-Based Learning, OBL) 策略有效缓解, OBL 能在初始化阶段生成解的“反向”个体, 拓宽对地电模型可行域的覆盖, 强化初始种群多样性, 助力算法更全面遍历可能的地电参数组合。当遗传算法 (GA)、粒子群算法 (PSO) 等智能算法被用于地球物理反演时, OBL 已经被证实能够

提高性能。受此启发, 将 OBL 引入萤火虫算法初始化环节, 优化初始种群分布, 增强其在瞬变电磁反演中的全局搜索能力。给定地电模型参数解 x_i (如电阻率、层厚等构成的向量), 其反向解 x_{oi} 按如下方式计算 (以参数取值在 $[LB, UB]$ 区间为例):

$$x_{oik} = LB_k + UB_k - x_{ik} \quad (5)$$

其中, $k=1, 2, \dots, D$ 和 $i=1, 2, \dots, Npop$ 。另外, 相反的解计算采用上限值 UB_k 和下限值 LB_k 。

1.3 萤火虫算法反向学习优化步骤

为了克服 FA 算法容易过早收敛, 而且迭代后期种群多样性差, 容易陷入局部最优解的问题, 论文采用基于反向学习策略的萤火虫优化算法 OFA, 在保留 FA 算法求解收敛快的优点的前提下, 增加了种群个体的多样性, 提高了解全局最优值的概率, 论文对 FA 算法进行了深入的研究, 并对 FA 算法进行深入的研究。整体算法的步骤是:

- ①初始化参数: 设置种群规模 $Npop$ 、最大吸引力 β_0 、光吸收系数 γ 、步长因子 α , 以及最大迭代次数 M 。
- ②初始化种群: 随机初始化萤火虫位置。
- ③反向学习策略更新种群: 根据 5 生成逆向种群: 将原种群和逆向种群合并, 在这个迭代的初始种群中选择一半的适应度更好。
- ④以各自的绝对亮度计算目标值并进行倒数。
- ⑤计算吸引度和移动方向: 移动方向的确定, 要根据萤火虫的亮度, 对相对亮度和吸引力进行测算。
- ⑥位置更新与亮度重算: 萤火虫空间位置的更新。萤火虫的亮度是根据更新的位置重新测量的。
- ⑦迭代更新与收敛检查: 检查是否达到最大迭代次数。若满足, 进入下一步; 否则, 增加当前迭代次数, 返回步骤 3 继续迭代搜索。
- ⑧输出结果: 输出全局最优解。

2 模型反演

2.1 目标函数定义

目标函数: 取垂直磁场在反演中的相对误差为:

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(H_{si} - H_{ci}) / H_{ci}]^2} \quad (6)$$

其中, H_{si} 为第 i 个时间道处响应的实测值, H_{ci} 为第 i 个时间道的瞬变响应理论值, N 为采样时间道的个数。为了克服由校正关断时间带来的计算误差, 提高 TEM 资料处理的精度, 论文直接采用斜阶跃响应下的理论响应作为式 (6) 中的理论值对式建立层状地电模型, 应用优化算法对三层 H 型、K 型地电模型分别进行 15 次独立反演计算, 取 15 次结果的平均值作为地电模型的参数估计值。

2.2 三层 H 形和 K 形地电模型

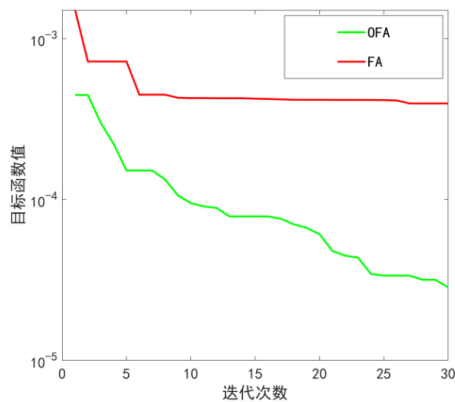
中心回线瞬变电磁法的各项理论参数设置如下: 发射线圈半径 $r=100m$, 发射电流为斜阶跃响应, 关断时间

为 $1\mu\text{s}$ ，幅值为 1A 。反演中种群规模为 100，最大迭代次数为 30。H 形地电模型各层电阻率分别为 $100\Omega\cdot\text{m}$ 、 $50\Omega\cdot\text{m}$ 、 $100\Omega\cdot\text{m}$ ，第一、二层厚度分别为 100、200m，第三层厚度为无穷；K 形地电模型各层电阻率分别为 $20\Omega\cdot\text{m}$ 、 $100\Omega\cdot\text{m}$ 、 $20\Omega\cdot\text{m}$ ，第一、二层厚度分别

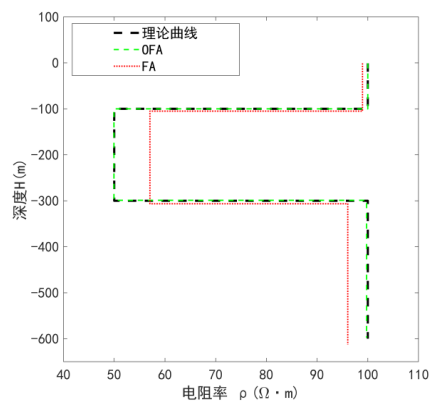
为 50m、100m，第三层厚度为无穷。反演模型参数的取值范围为理论值模型参数的 $\pm 50\%$ ，H 型地电模型反演结果如表 1 所示，H 型和 K 型地电模型拟合曲线（随机选取 15 次中一次）如图 1 (a) 和图 2 (a) 所示，得到的反演曲线如图 1 (b) 和图 2 (b) 所示。

表 1 三层 (H 型) 地电模型反演结果

三层 (H 型) 地电模型反演结果对比型	$\rho_1 (\Omega\cdot\text{m})$	$\rho_2 (\Omega\cdot\text{m})$	$\rho_3 (\Omega\cdot\text{m})$	$h_1 (\text{m})$	$h_2 (\text{m})$	总相对误差
理论值	100	50	100	100	200	--
搜索范围	50~150	25~75	50~150	50~150	100~300	--
FA	98.958	57.043	96.052	105.086	201.403	
FA 相对误差 (%)	1.042	14.086	3.948	5.086	0.522	24.684
OFA	100.002	49.944	99.761	100.077	198.859	
OFA 相对误差 (%)	0.002	0.112	0.239	0.77	0.571	1.455

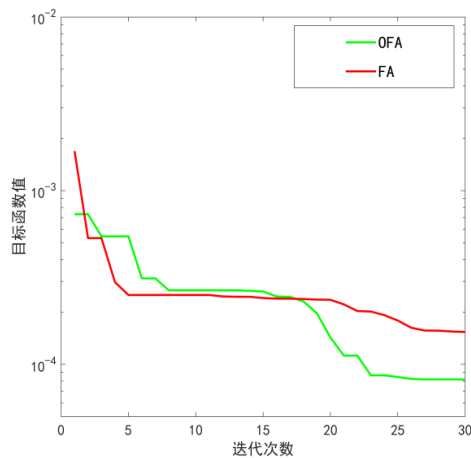


(a) 目标函数随迭代次数变化曲线

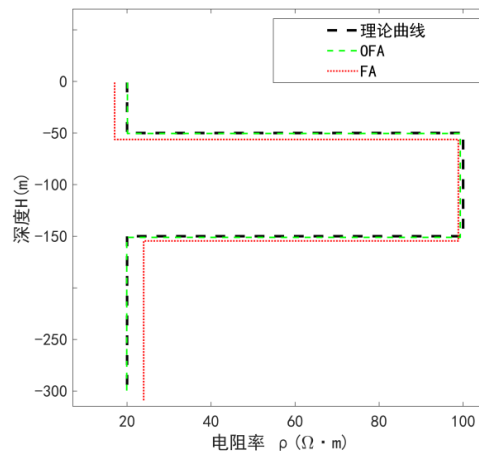


(b) 反演曲线

图 1 三层 (H 型) 地电模型反演结果



(a) 目标函数随迭代次数变化曲线



(b) 反演曲线

图 2 三层 (K 型) 地电模型反演结果

从表 1 可以看出，OFA 算法得到的反演结果与真实值基本一致，且 OFA 算法的反演精度和寻优能力比传统的 FA 算法要好，经过 30 次迭代后的反演结果相对误差绝对值最大为 1.455%，两者的感应电动势拟合程度也很好，证明了反演算法的有效性，因此 OFA 算法反演精度和寻优能力比

传统 FA 算法要好。

从图 1 (a) 和图 2 (a) 可以得知，OFA 算法的收敛速度在较小迭代次数下较快，且目标函数值最优，有效提高反演精度。由图 1 (b) 和图 2 (b) 可知，OFA 和 FA 两种算法得到的反演结果基本与真实值相符，只是 FA 算法反演的

精确度稍低, OFA 反演的精确度更高, 与曲线基本重合。随着层状地电模型参数的增加, 相应的反演变得更加困难, 但进一步证明该算法的有效性的是, OFA 算法得到的反演结果基本与真实值相符, 并且反演稳定性更好。

3 结论

论文采用反向学习策略对传统的 FA 算法进行优化改进, 提出了一种基于反向学习策略的萤火虫算法 (OFA), 旨在解决传统优化算法在瞬变电磁反演中易陷入局部最优且反演精度不足的问题。通过反向学习策略优化萤火虫种群, 利用反向解的随机性与遍历性提升初始解的多样性, 有效拓展全局搜索空间。我们将该方法应用于瞬变电磁反演研究中, 论文将传统的 FA 算法和改进的 FA 算法 (OFA) 对 H 型和 K 型地电模型进行反演, 反演结果表明, OFA 反演算法计算精度较高、稳定性较好、抗干扰能力强, 且不易陷入局部最优, 降低了“早熟收敛”的概率, 优于传统萤火虫算法 FA。上述结果表明, 基于反向学习策略的萤火虫算法反演程序具有较强的适应性和稳定性, 且精度较高, 对于解决非线性、多参数、多极值的地球物理瞬变电磁反演问题是有效的。

参考文献:

- [1] Raiche A P. Transient electromagnetic field computations for polygonal loops on layered earths[J]. *Geophysics*,1987(52): 785-793.
- [2] Ward S H, Hohmann G W. Electromagnetic theory for geophysical exploration *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics* ed N Nabighian (Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysics),1991:121-223.
- [3] Xue G Q, Bai C Y, Yan S. Deep sounding TEM investigation method based on a modified fixed central-loop system[J]. *Geophys*, 2012(76):23-32.
- [4] Smith J T, Booker J R. Rapid inversion of two- and three-dimensional magnetotelluric data[J]. *Journal of Geophysical Research*,1991(96):3905-3922.
- [5] Constable S C, Parker R L, Constable C G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth model from electromagnetic sounding data[J]. *Geophysics*,1987,52(2):289.
- [6] Wang G F, Zhao X Y, Ye J C. A regularized conjugate gradient method for wave field transformation of transient electromagnetic field[J]. *University politechnica of bucharest scientific bulletin series c-electrical engineering and computer science*,2019,81(2)189-202.
- [7] Meng C, Han D P, Wang P, et al. Detection of Shallow Strata Using Transient Electromagnetic Method in Case of Mine Goaf[J]. *Coal Mine Machinery*,2017,38(1):120-122.
- [8] Zaslavsky M, Druskin V, Abubakar A, et al. Large-scale Gauss-Newton inversion of transient controlled-source electromagnetic measurement data using the model reduction framework[J]. *Geophysics*,2013,78(4):161-171.
- [9] Cassiano Antonio Bortolozzo, Oleg Bokhonok, Jorge Luis Porsani, et al. Objective function analysis for electric soundings (VES), transient electromagnetic soundings (TEM) and joint inversion VES/TEM[J]. *Journal of Applied Geophysics*,2017:146.
- [10] Irawan D, Grandis H, Sumintadireja P. Quasi-2D resistivity model from inversion of vertical electrical sounding (VES)[J]. *Data using guided random search algorithm Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*,2015,47(3):269-280.
- [11] Ogaya X, Ledo J, Queralt P, et al. A layer stripping approach for monitoring resistivity variations using surface magnetotelluric response[J]. *Journal of Applied Geophysics*,2016(132):100-115.
- [12] Egbert G D, Kelbert A. Computational recipes for electromagnetic inverse problems[J]. *Geophys. J. Int*,2012(189):167-251.
- [13] Yang H Y, Li F P, Chen Shen-En, et al. An inversion of transient electromagnetic data from a conical source[J]. *Applied Geophysics*, 2018,15(Z1):545-555+570.
- [14] Wei C. Quantum annealing and its application to inversion of acoustic impedance[D]. *China University of Geosciences*,2015.
- [15] Bortolozzo C A, Jorge Luis Porsani, Fernando Acácio Monteiro dos Santos, et al. VES/TEM 1D joint inversion by using Controlled Random Search (CRS) algorithm[J]. *Journal of Applied Geophysics*,2015:112.
- [16] Yang X S. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*[M]. Beckington: Luniver Press,2008:79-90.
- [17] X-S Yang, S S Sadat Hosseini, A H Gandomi. Firefly algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect[J]. *Appl. Soft Comput*,2012,12(3):1180-1186.
- [18] B Basu, G K Mahanti. Fire fly and artificial bees colony algorithm for synthesis of scanned and broadside linear array antenna[J]. *Prog. Electromagn. Res. B*,2011(32):169-190.
- [19] T-F Zhou, G-X Peng, T-Y Hu, et al. Rayleigh wave nonlinear inversion based on the firefly algorithm[J]. *Appl. Geophys.*, 2014,11(2):167-178.
- [20] P Wang. Improved firefly algorithm and its application for magnetotelluric sounding data inversion[J]. *Prog. Geophys*,2019:1-11.
- [21] M A Al-Betar, M A Awadallah, A A Heidari, et al. Survival exploration strategies for Harris Hawks Optimizer, *Expert Syst*[J]. *Appl*,2021(168).

作者简介: 李朋汕(2004-), 男, 中国江西赣州人, 本科, 从事智能算法、电磁反演研究。