

# 基于模糊综合评价法的气藏型储气库注采方案优选研究

周军<sup>1</sup>, 彭井宏<sup>1</sup>, 孙建华<sup>2</sup>, 肖瑶<sup>1</sup>, 梁光川<sup>1\*</sup>

1 西南石油大学石油与天然气工程学院, 成都 610500

2 国家管网集团中原储气库有限责任公司, 濮阳 457000

\* 通信作者, lgcdjr@163.com

收稿日期: 2020-06-29

国家自然科学基金青年科学基金项目“离散/网络空间中油气管网设计优化方法和体系结构研究”(51704253)资助

**摘要** 储气库是天然气季节性和应急性调峰的重要设施。由于储气库的储层地质条件和注采生产工艺较为复杂,使得储气库注采方案的设计难度较大。考虑到储气库注采方案的决策受到多方面因素的影响,为了获得最优的储气库注采方案,本文提出采用模糊综合评价法对储气库注采方案进行评价和优选。首先,建立储气库注采方案模糊综合评价指标体系作为分析评价的基础。该指标体系包含注采井数量、注采井层位、注采能力、注采效率、注采能耗等指标。然后采用熵权法和层次分析法求解各指标权重。基于模糊隶属函数法,选择梯形和岭形隶属函数对评价指标进行评分。在获得各指标权重和单项得分之后,采用线性加权法计算注采方案的综合评价结果。全文重点研究了建立储气库注采方案模糊综合评价模型的方法及过程,主要包含评价指标体系的建立方法、指标权重的计算方法以及指标隶属函数的确定方法。以国内某气藏型储气库为例进行注采方案评价优选。该储气库的库容为  $5.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 工作气量为  $2.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 并含有 13 口注采井。根据储气库的注采气安排,计划年度注气量为  $2.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 年度采气量为  $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。分别对该储气库的 3 套注气方案和 3 套采气方案进行了评价和优选。结果表明,被评价的储气库注采方案的综合得分均在 70 分以上,说明各方案的应用效果都较好。其中,最优的注气方案为方案二,最优的采气方案为方案三。最后,本文所提出的评价方法能够为储气库注采生产方案的规划和管理提供参考。

**关键词** 储气库; 注采方案; 综合评价; 模糊隶属函数; 熵权法; 层次分析法

## Study of the optimization of an injection and production scheme of gas storage in depleted gas reservoirs based on a fuzzy comprehensive evaluation method

ZHOU Jun<sup>1</sup>, PENG Jinghong<sup>1</sup>, SUN Jianhua<sup>2</sup>, XIAO Yao<sup>1</sup>, LIANG Guangchuan<sup>1</sup>

1 Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 PipeChina Zhongyuan Gas Storage Co., Ltd, Puyang 457000, China

**Abstract** Gas storage is an important facility for seasonal and emergency natural gas peak shaving. The reservoir geological conditions and injection and production processes of gas storage are quite complex, which make the design of injection and

引用格式: 周军, 彭井宏, 孙建华, 肖瑶, 梁光川. 基于模糊综合评价法的气藏型储气库注采方案优选研究. 石油科学通报, 2021, 03: 494-504  
ZHOU Jun, PENG Jinghong, SUN Jianhua, XIAO Yao, LIANG Guangchuan. Study of the optimization of an injection and production scheme of gas storage in depleted gas reservoirs based on a fuzzy comprehensive evaluation method. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 494-504. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.040

production schemes of gas storage more difficult. Considering that the decision of injection and production schemes of gas storage is affected by many factors, in order to obtain the best injection and production scheme of gas storage, this paper presents a fuzzy comprehensive evaluation method to evaluate and optimize the injection and production of gas storage. Firstly, a fuzzy comprehensive evaluation index system of gas storage injection and production is established as the basis of analysis and evaluation. This index system includes the injection and production well numbers, injection and production well layers, injection and production capacity, injection and production efficiency and injection and production energy consumption. Then the entropy weight method and an analytic hierarchy process are used to calculate the index weights. Based on a fuzzy membership function method, trapezoidal and ridge membership functions are selected to score the evaluation indexes. After the weight and score of each index are obtained, a linear weighting method is used to calculate the comprehensive evaluation result of the injection and production scheme. The whole paper focuses on the method and process of establishing a fuzzy comprehensive evaluation model of gas storage injection and production, which mainly includes the establishment method of the evaluation index system, the calculation method of index weight and the determination method of the index membership function. Domestic gas storage in a depleted gas reservoir is taken as an example to evaluate and optimize the injection and production scheme. This gas storage has a storage capacity of  $5.88 \times 10^8 \text{m}^3$ , a working gas capacity of  $2.95 \times 10^8 \text{m}^3$  and an injection production well number of 13. According to the gas injection and production arrangement of the gas storage, the planned annual gas injection volume is  $2.0 \times 10^8 \text{m}^3$  and the annual gas production volume is  $1.5 \times 10^8 \text{m}^3$ . Three gas injection schemes and three gas production schemes of the gas storage are evaluated and optimized. The results show that the comprehensive scores of the evaluated gas storage injection and production schemes are all above 70 points, indicating that the application effects of each scheme is good. Among them, the optimal gas injection scheme is scheme 2, and the optimal gas production scheme is scheme 3. Finally, the evaluation method proposed in this paper can provide guidance for the planning and management of injection and production of gas storage.

**Keywords** gas storage; injection and production scheme; comprehensive evaluation; fuzzy membership function; entropy weight method; analytic hierarchy process

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.040

## 0 引言

1915年加拿大建成第一座地下储气库, 到目前为止世界地下储气库建设与运营已历经百年<sup>[1]</sup>。随着全球天然气消费量的不断增长, 地下储气库作为目前世界上最主要的天然气储存和调峰方式, 已在全球各国得到越来越广泛的应用。目前世界地下储气库的数量约有715座, 工作气量高达  $3.93 \times 10^{11} \text{m}^3$ , 占全球天然气消费量的11%<sup>[2]</sup>。随着中国天然气消费量的持续增长, 地下储气库在我国也得到了越来越广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。

储气库的运行方式主要包括注气和采气两个工艺流程, 它们是储气库运行的重要环节。因此, 在确保安全平稳储气和供气的基础上, 对储气库注采方案进行合理的优化, 提高储气库注采运行水平, 已成为储气库运行的关键。目前, 有不少学者在该方面开展了研究工作。谭羽飞等人<sup>[5]</sup>以单井注采量为优化变量, 分别以夏季压缩机能耗最小化和冬季调峰采气量最大化为目标, 对储气库注采方案进行了优化设计。崔国强等人<sup>[6]</sup>对呼图壁储气库注气方案进行了设计, 并对最佳运行方案进行了优选。刘佳宁等人<sup>[7]</sup>基于地下储气库地上地下压力系统一体化仿真模型, 应用NSGA-II算法优化了储气库注气配产方案。杨颖等

人<sup>[8]</sup>建立了储气库注气期压缩机经济运行的优化模型, 形成了利用电价峰谷错峰运行压缩机组的优化方案。然而, 储气库注采方案的优劣受多方面因素的影响, 优化方法所能优化的运行参数往往比较有限, 且在工程实际中的运用具有一定难度。因此, 必须提出一个更加全面且方便的解决方法。基于此, 本文提出采用模糊综合评价法对储气库注采方案进行评价, 并筛选出最优的注采方案。在注气方案评价优选过程中, 分别对注气井数量、注气井层位、电机负载率、压缩机效率、系统单位电耗、润滑油用量等指标进行了综合评价。在采气方案评价优选过程中, 又分别对采气井数量、采气井层位、重沸器效率、循环泵效率、三甘醇损耗等指标进行了综合评价。

## 1 国内某气藏型储气库概况

本文研究的国内某气藏型储气库设计库容  $5.88 \times 10^8 \text{m}^3$ , 其中垫底气  $2.93 \times 10^8 \text{m}^3$ , 工作气  $2.95 \times 10^8 \text{m}^3$ 。储气库地面工程包括1座注采站、5座井场、主区块13口注采井。储气库建成投产后, 在注气阶段, 经联络线管道, 输气干线中富余的天然气从分输站输送到储气库的集注站, 通过注气压缩机增压及空冷器空冷之后, 富余的天然气经集输管线输送到

注采井口,再注入地下储存。采气期,根据调峰气量的要求注采井产出的天然气经井口管线输至储气库集注站进行分离、计量及处理,处理后的天然气输送至分输站,进入输气干线管道。主区块13口注采井中2#、3#、5#、6#、8#、9#井属于高部位井,1#、4#、7#、10#、11#、12#、13#井属于低部位井。在注气过程中,构造高部位优先注气,构造低部位缓注;采气过程中,构造中低部位优先采气,以确保气库库容逐步达到设计。

## 2 储气库注采方案模糊综合评价模型

### 2.1 概述

模糊综合评价法是一种应用广泛的评价方法,该方法基于模糊数学相关理论发展而来。根据模糊数学的隶属度理论,模糊综合评价法将定性评价转化为定量评价<sup>[9]</sup>。模糊综合评价法有2个关键点,分别是寻找合适的方法确定各指标的权重向量以及选择合适的模糊隶属度函数<sup>[10]</sup>。储气库注采方案的优劣水平往往

是由多个运行技术指标来展现的,因此需要综合考虑这些运行指标,进行综合评估。本文采用模糊综合评价法对储气库注采方案进行评价的流程如图1所示。

### 2.2 模糊综合评价指标体系

储气库注采方案涉及到注采井的开井计划、注采气能力、设备运行效率和设备运行能耗等,注采方案的优劣将直接影响储气库运行过程中地面和地下系统的运行效果。对储气库注采方案的综合评价需要考虑众多的因素,因而建立储气库注采方案模糊综合评价指标体系是进行储气库注采方案模糊综合评价的前提和基础。根据地下储气库注采原则和要求,并结合储气库运行管理相关要求,建立了储气库运行过程中注气方案模糊综合评价指标体系(图2)和采气方案模糊综合评价指标体系(图3)。

从图2可以看出,储气库注气方案模糊综合评价指标体系分为3个层次,分别是目标层、一级指标层和二级指标层。目标层为储气库注气方案优劣,一级指标层为3个对储气库注气方案优劣影响较大的因素,即 $U=\{\text{注气井,注气效率,注气能耗}\}$ 。在一级指标

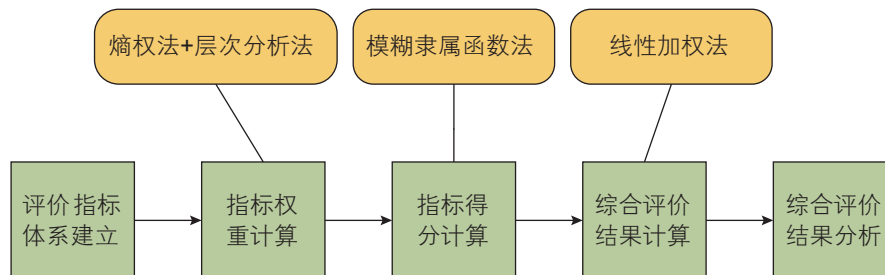


图1 储气库注采方案模糊综合评价流程

Fig. 1 Fuzzy comprehensive evaluation process of gas storage injection and production plan

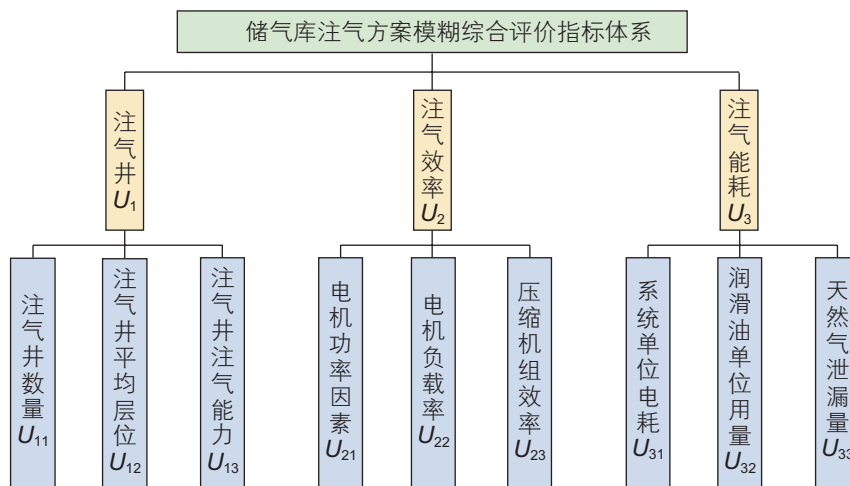


图2 储气库注气方案模糊综合评价指标体系

Fig. 2 Fuzzy comprehensive evaluation index system of gas injection scheme of gas storage

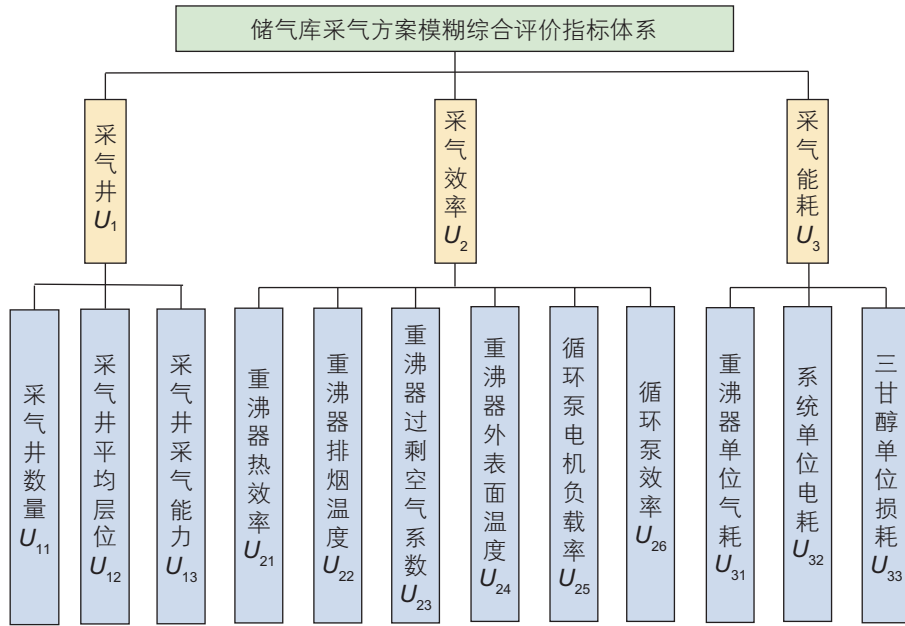


图 3 储气库采气方案模糊综合评价指标体系

Fig. 3 Fuzzy comprehensive evaluation index system of gas recovery scheme of gas storage

层之下，又含有相应的二级指标层中的指标。此外，从图 3 可以看出，储气库采气方案模糊综合评价指标体系也分为目标层、一级指标层和二级指标层 3 个层次。此评价体系的目标层为储气库采气方案优劣，其中一级指标层选择的 3 个评价指标都是对储气库采气方案的优劣具有较大影响的因素。即  $U = \{ \text{采气井, 采气效率, 采气能耗} \}$ 。

### 2.3 指标权重计算

为了体现各个指标在储气库注采方案模糊综合评价体系中的作用地位及影响程度，在建立好综合评价的指标体系之后，需要确定出每个评价指标的权重大小。由于评价指标兼具主观性和客观性，为了使评价指标的权重分配符合真实情况，本文运用主观赋权法确定一级指标主观权重，运用客观赋权法确定二级指标客观权重。主观赋权法是依据决策者的喜好与经验对指标进行赋权的赋权方法，主要依据决策者的学识与经验。常用的主观赋权法有：层次分析法、二项系数法、最小平方法等，其中使用最广泛的主观赋权法是层次分析法(AHP)。客观赋权法确定指标权重主要是根据各个指标的客观信息，客观赋权法计算出的权

重具有较强的客观性。常用的客观赋权法有：熵权法、标准离差法等。

#### 2.3.1 层次分析法计算一级指标权重

层次分析法是 Saaty 在 20 世纪 70 年代提出的一种权重计算方法，该方法简捷清晰，便于分析计算<sup>[11]</sup>。应用层次分析法确定储气库注采方案指标体系中某一级指标对上一级指标的相对重要程度(即权重)的思路如下。

##### (1) 构造判断矩阵

首先，根据各评价指标的实际值大小和评价者的主观考察经验，将评价指标进行两两比较判断，确定不同评价指标间的相对重要程度，构成比较判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中： $a_{ij}$  表示指标  $i$  对指标  $j$  的相对重要程度， $a_{ij}$  的取值按照九级标度原则(表 1)进行确定； $n$  表示该级指标的数量。

##### (2) 计算指标权重

在构建判断矩阵后，便可根据相对重要程度值  $a_{ij}$

表 1 判断矩阵九级标度

Table 1 Nine scales of judgment matrix

指标 $i$ 与指标 $j$ 对比	一样重要	稍重要	明显重要	强烈重要	极端重要	稍不重要	明显不重要	强烈不重要	极端不重要
$a_{ij}$ 取值	1	3	5	7	9	1/3	1/5	1/7	1/9



计算各指标的权重  $\omega_i$ 。本文选用方根法进行计算, 计算公式如下:

$$\omega_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (2)$$

由该式便可计算出该级全部指标的权重集合  $\omega' = [\omega_1, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n]$ 。

### (3) 一致性检验

由于储气库注采方案评价各级指标的相对重要程度是根据现场专家经验确定的, 存在较大主观性。为保证指标权重分配的合理性, 需对判断矩阵进行一致性检验。分别计算偏离一致性指标  $IC$  和平均随机一致性指标  $IR$ , 再根据两者比值获得随机一致性比率  $RC$ , 即  $RC = IC / IR$ 。

其中, 偏离一致性指标  $IC$  计算公式如下:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中  $\lambda_{\max}$  表示判断矩阵的最大特征根。

而对于 1~9 阶判断矩阵, 平均随机一致性指标  $IR$  根据表 2 进行取值。

最后, 当  $RC \leq 0.10$  时, 考虑判断矩阵  $A$  具有满意一致性, 否则就需要调整  $A$ , 直到其具有满意一致性。

### 2.3.2 熵权法计算二级指标权重

熵权法是一种客观赋权方法, 其计算原理是通过考量评价指标所含信息量的大小来计算各指标权重<sup>[12]</sup>。储气库注采系统具有较高的开放性, 并将随着位置和时间的改变而变化。因此采用传统的客观赋权方法来表示评价指标波动规律往往难度较大, 而熵权法可以较好地弥补这一不足。利用熵权法来构建判断矩阵和计算指标权重, 可有效避免计算过程中主观因素的影响, 使得计算结果更加贴近实际情况。

#### (1) 构造初始指标矩阵

假设有  $m$  个待评价注采方案,  $n$  个待评价指标, 根据各注采方案的指标值  $x_{ij}$  构成初始指标矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $x_{ij}$  表示第  $i$  个注采方案的第  $j$  个指标值。

#### (2) 标准化处理

由于储气库注采方案综合评价指标体系中各指标的量纲或数量级差异较大, 为了保证各指标具有可比性, 需进行标准化处理, 本文采用最大最小值法将各指标归一化到  $[0, 1]$  范围内的数值  $z_{ij}$ , 并构成标准化处理后的矩阵  $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 。标准化处理公式如下:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})} \quad (5)$$

#### (3) 计算指标比重

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (6)$$

式中:  $p_{ij}$  表示第  $i$  个注采方案的第  $j$  个指标的比重。

#### (4) 计算指标熵值和熵权

根据信息论的基本原理, 信息是系统有序程度的一个度量, 而熵是系统无序程度的一个度量。对于储气库注采方案评价体系中的某个指标, 其熵值  $e_j$  越小, 说明其变异程度越大, 提供的信息量越多, 在综合评价中起的作用越大, 熵权  $\omega_j$  越大。指标熵值  $e_j$  和熵权  $\omega_j$  的计算公式如下:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

$$\omega_j = (1 - e_j) / (n - \sum_{j=1}^n e_j) \quad (8)$$

式中:  $p_{ij}$  表示第  $i$  个注采方案的第  $j$  个指标的比重;  $k$  与待评价的注采方案数量  $m$  有关,  $k = 1 / \ln m$ ;  $e_j$  表示第  $j$  个指标的熵值;  $\omega_j$  表示第  $j$  个指标的熵权。

## 2.4 指标模糊隶属度计算

模糊隶属函数法就是利用隶属函数进行模糊综合评价。由于各个评价指标的度量单位存在差异, 因此需要对指标进行无量纲化处理使各个评价指标具有可比性<sup>[13]</sup>。无量纲化处理方法如下:

#### (1) 确定评价指标上下限值

确定各评价指标的下限值  $x_{\min}$  和上限值  $x_{\max}$ 。根据各指标变化趋势的不同, 其最优值的选取原则不同。对于逆向指标, 最优值为  $x_{\min}$ , 对于正向指标, 最优

表 2 平均随机一致性指标  $IR$  取值表

Table 2 Table of mean random consistency index  $IR$  value

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$IR$	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

值为  $x_{\max}$ 。

(2) 划分评价指标模糊隶属函数类型

本文分别选用梯形模糊隶属函数和岭形模糊隶属函数对指标进行无量纲化处理, 无量纲化处理是为了表示各评价指标对于某模糊子集的隶属程度<sup>[14]</sup>。各函数的表达式和适用指标如表 3 所示。

(3) 评价指标标准量化处理

在确定每个评价指标的上下限和模糊隶属函数类型之后, 便可根据各指标的实际值  $x_i$ , 计算指标的模糊隶属度值  $f(x_i)$ 。经计算得到的评价指标模糊隶属度值  $f(x_i)$  是一个 0~1 范围内的实数, 通过该值进行指标体系内所有评价指标的综合评价计算, 便可消除不同指标量纲的影响。在综合评价计算中, 常常将模糊隶属度值  $f(x_i)$  乘以 100, 得到指标的标准量化值  $F(x_i)$ , 即:

$$F(x_i) = f(x_i) \times 100 \quad (9)$$

2.5 综合评价结果计算

在计算出各评价指标的权重和标准评价值之后, 便可利用线性加权法逐级计算一级指标层和目标层的最终得分<sup>[15]</sup>。并根据目标层的最终得分对所评价方案的优劣进行判断。采用线性加权法计算储气库注采方案的最终得分, 具体计算公式如下:

(1) 一级指标的最终得分

$$F_j = \sum_{i=1}^m F_{ji} \omega_{ji} \quad (10)$$

式中:  $F_j$ ——第  $j$  个一级指标的评价值;

$F_{ji}$ ——第  $j$  个一级指标中第  $i$  个二级指标的评价值;

$\omega_{ji}$ ——第  $j$  个一级指标中第  $i$  个二级指标的权重。

(2) 被评价目标的最终得分

$$F = \sum_{j=1}^m F_j \omega_j \quad (11)$$

式中:  $F$ ——目标层指标的综合得分值;

$F_j$ ——目标层指标中第  $j$  个一级指标的评价值;

$\omega_j$ ——目标层指标中第  $j$  个一级指标的权重。

3 储气库注采方案模糊综合评价

3.1 实例介绍

3.1.1 储气库注气方案介绍

储气库注气时间安排为 4 月 1 日—10 月 31 日, 共计 214 天, 注气前库存气量为  $3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 平均地层压力为 13.8 MPa, 设计年注气量为  $2.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。现选择 3 套不同注气方案进行评价优选, 3 套方案的开井计划和运行参数如表 4 和表 5 所示。从表 4 中可以看出, 方案一分别对 1 号、4 号、6 号、8 号、10 号、

表 3 储气库注采方案指标模糊隶属函数分类

Table 3 Fuzzy membership function classification of injection and production plan indicators of gas storage

函数名称	函数方程	适用指标
升梯形分布模糊隶属函数	$f(x_i) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases}$	正向指标
降梯形分布模糊隶属函数	$f(x_i) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & a < x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases}$	逆向指标
升岭形分布模糊隶属函数	$f(x_i) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} \left[ x - \frac{a+b}{2} \right] & a < x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases}$	正向指标
降岭形分布模糊隶属函数	$f(x_i) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} \left[ x - \frac{a+b}{2} \right] & a < x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases}$	逆向指标

11号和12号井进行注气。方案二分别打开2号、3号、5号、6号、8号和9号井进行注气。方案三的开井计划涉及5号、6号、8号、9号、10号、11号和12号井。3个注气方案中,都对6号和8号高部位井进行了注气。此外,表5展示了3个注气方案的各项运行参数,包括注气井数量、注气井平均层位、注气井注气能力、电机功率因素、电机负载率、压缩机效率、系统单位电耗、润滑油单位用量和天然气泄漏量。

### 3.1.2 储气库采气方案介绍

储气库采气时间安排为11月15日一次年3月15日,共计120天,采气前库存气量为 $4.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,平均地层压力为24.25 MPa,设计年采气量为 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。现选择3套不同采气方案进行评价优选,3套方案的开井计划和运行参数如表6和表7所示。从表6中可以看出,方案一分别从1号至10号井中进行采气。方案二分别打开3号、4号、6号、8号、9号、10号、11号、12号和13号井进行采气。方案三的开井计划涉及3号、4号、5号、6号、8号、9号、12号和13号井。此外,表7展示了3个注气方案的各项运行参数,包括采气井数量、注气井平均层位、注气井采气能力、重沸器热效率、重沸器排烟温度、重沸器外表面温度、循环泵电机负载率、循环泵效率、重沸器单位气耗、系统单位电耗和三甘醇单位损耗。

与注气方案相比,采气方案的开井数量和采气井采气能力明显要略高一些。

## 3.2 指标权重计算结果

### 3.2.1 应用层次分析法计算一级指标权重

由前文可知,储气库注气和采气方案模糊综合评价指标体系均分为3个层次,分别为目标层、一级指标层、二级指标层。首先利用层次分析法计算注气和采气方案中一级指标层对目标层的权重。

根据储气库现场专家的工作经验和评估考察,构造目标层与一级指标层的判断矩阵,分别确定注气井 $U_1$ 、注气效率 $U_2$ 和注气能耗 $U_3$ 对注气方案目标层 $U_{\text{注}}$ 的重要性,确定采气井 $U_1$ 、采气效率 $U_2$ 和采气能耗 $U_3$ 对采气方案目标层 $U_{\text{采}}$ 的重要性。储气库注气过程中,压缩机耗能较大,对储气库的运行经济性影响较大,因此注气井指标和注气能耗指标同等重要。而储气库采气过程中,采气井的选择对区块地层压力和库存气量的影响较大,并且会直接影响储气库的运行安全性和稳定性,因此采气井指标比其他指标更加重要。所构建的指标间相对重要性比较矩阵如下:

$$U_{\text{注}} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

表4 储气库3套注气方案开井计划

Table 4 Well opening plan for three sets of gas injection schemes in gas storage

注气方案编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#
方案一	•			•		•		•		•	•	•	
方案二		•	•		•	•		•	•				
方案三					•	•		•	•	•	•	•	

表5 储气库3套注气方案运行参数

Table 5 Operating parameters of three sets of gas injection schemes for gas storage

运行参数	单位	方案一	方案二	方案三
注气井数量	/	7	6	7
注气井平均层位	m	-2558.17	-2514.67	-2540.86
注气井注气能力	$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$	102.4	93.8	110.4
电机功率因素	/	0.8	0.83	0.82
电机负载率	%	69	77	73
压缩机效率	%	60	63	64
系统单位电耗	$\text{kW} \cdot \text{h}/10^4 \text{ m}^3$	371.94	387.13	397.16
润滑油单位用量	$\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	0.0033	0.0036	0.0034
天然气泄漏量	L/min	3.51	3.43	3.73

表 6 储气库 3 套采气方案开井计划

Table 6 Well opening plan for three sets of gas production scheme in gas storage

采气方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
方案一	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
方案二			•	•		•		•	•	•	•	•	•
方案三			•	•	•	•		•	•			•	•

表 7 储气库 3 套采气方案运行参数

Table 7 Operation parameters of three sets of gas production schemes in gas storage

运行参数	单位	方案一	方案二	方案三
采气井数量	/	10	9	8
采气井平均层位	m	-2576.8	-2573.33	-2554.75
采气井采气能力	10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d	233.55	241.55	247.3
重沸器热效率	%	62.87	64.71	67.33
重沸器排烟温度	°C	213.41	217.2	226.92
重沸器过剩空气系数	/	1.34	1.27	1.71
重沸器外表面温度	°C	51.32	58.63	60.41
循环泵电机负载率	%	66.27	68.31	71.43
循环泵效率	%	22.87	21.84	22.38
重沸器单位气耗	m <sup>3</sup> /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	4.18	3.97	3.72
系统单位电耗	kW·h/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	5.51	5.42	5.33
三甘醇单位损耗	mg/m <sup>3</sup>	11.93	12.82	13.47

$$U_{采} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

经计算得到注气方案一级指标层 3 个指标  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  对于目标层  $U_{注}$  的相对权重为  $W_{注}=(0.429, 0.143, 0.429)^T$ ，采气方案一级指标层 3 个指标  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  对于目标层  $U_{采}$  的相对权重为  $W_{采}=(0.637, 0.105, 0.258)^T$ 。经检验，判断矩阵  $U_{注}$  和  $U_{采}$  具有满意一致性。

3.2.2 应用熵权法计算二级指标权重

前文中的表和表分别介绍了 3 套注采方案的评价指标值，通过构建初始指标矩阵、标准化处理、指标比重计算、指标熵值计算等流程，计算得到各二级指标的权重。储气库注气方案中，9 个二级评价指标  $U_{11} \sim U_{33}$  对 3 个一级评价指标  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  的相对权重分别为  $(0.471, 0.293, 0.236)^T$ ， $(0.401, 0.272, 0.327)^T$ ， $(0.296, 0.358, 0.346)^T$ 。储气库采气方案中，12 个二级评价指标  $U_{11} \sim U_{33}$  对 3 个一级评价指标  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  的相对权重分别为  $(0.328, 0.324, 0.348)^T$ ， $(0.205, 0.123, 0.180, 0.146, 0.170, 0.176)^T$ ， $(0.302, 0.334, 0.364)^T$ 。

3.3 储气库注采方案优选

3.3.1 储气库注气方案优选

根据对储气库注气工况下现场数据变化范围和变化规律的分析，确定各评价指标的下限值  $a$ 、上限值  $b$  和模糊隶属函数类型，如表 8 所示。随后，便可利用模糊隶属函数计算出各指标的标准评价值。在获得各评价指标的权重和标准评价值之后，便可利用线性加权法逐级计算储气库注气方案的最终得分。

根据所研究的气藏型储气库 13 口注采井所属地层部位和注气过程高部位井优先注气原则，注气期以满足生产要求兼顾气库达容为目标，保障储气库采气期具有最大采气能力。利用模糊综合评价法对 3 套注气方案进行评价和优选。最终，注气方案各指标得分结果如表 9 所示。从该表可以看出，各注气方案的得分差异不大。其中方案二得分最高，为 75.45 分；方案三得分为 74.43 分；而方案一的得分最低，为 71.68 分。因此，推荐采用方案二进行储气库注气作业。

3.3.2 储气库采气方案优选

根据对储气库采气工况下现场数据变化范围和变化规律的分析，确定各评价指标的下限值  $a$ 、上限值  $b$  和模糊隶属函数类型，如表 10 所示。



表 8 储气库注气方案指标评分方法

Table 8 Scoring method of gas injection program index of gas storage

评价指标	单位	下限值 $a$	上限值 $b$	模糊隶属函数类型
注气井数量 $U_{11}$	/	4	12	降梯形
注气井平均层位 $U_{12}$	m	-2750	-2430	升梯形
注气井注气能力 $U_{13}$	$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$	50	120	升梯形
电机功率因 $U_{21}$	/	0.65	0.88	升岭形
电机负载率 $U_{22}$	%	40	90	升岭形
压缩机组效率 $U_{23}$	%	30	75	升岭形
系统单位电耗 $U_{31}$	$\text{kW}\cdot\text{h}/10^4\text{m}^3$	367.37	551.05	降岭形
润滑油单位用量 $U_{32}$	$\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	0.003	0.005	降岭形
天然气泄漏量 $U_{33}$	L/min	2	6	降岭形

表 9 储气库注气方案评价指标得分结果

Table 9 Evaluation index result of gas injection scheme in gas storage

评价指标	方案一	方案二	方案三
$U_{11}$	62.5	75	62.5
$U_{12}$	59.95	73.54	65.36
$U_{13}$	74.86	62.57	86.29
$U_{21}$	73	88.79	84.13
$U_{22}$	62.43	84.23	74.09
$U_{23}$	75	83.46	85.97
$U_{31}$	99.85	97.17	93.65
$U_{32}$	94.55	79.39	90.45
$U_{33}$	68.77	71.64	60.52
总得分	71.68	75.45	74.43

表 10 储气库采气方案指标评分方法

Table 10 Index scoring method of gas production plan of gas storage

二级指标	单位	a	b	模糊隶属函数类型
采气井数量 $U_{11}$	/	6	13	降梯形
采气井平均层位 $U_{12}$	m	-2650	-2330	降梯形
采气井采气能力 $U_{13}$	$10^4\text{m}^3/\text{d}$	100	250	升梯形
重沸器热效率 $U_{21}$	%	40	75	升岭形
重沸器排烟温度 $U_{22}$	$^{\circ}\text{C}$	100	400	降岭形
重沸器过剩空气系数 $U_{23}$	/	1.1	5	降岭形
重沸器外表面温度 $U_{24}$	$^{\circ}\text{C}$	45	85	降岭形
循环泵电机负载率 $U_{25}$	%	30	90	升岭形
循环泵效率 $U_{26}$	%	10	30	升岭形
重沸器单位气耗 $U_{31}$	$\text{m}^3/10^4 \text{ m}^3$	3.47	5.21	降岭形
系统单位电耗 $U_{32}$	$\text{kW}\cdot\text{h}/10^4 \text{ m}^3$	4.61	6.91	降岭形
三甘醇单位损耗 $U_{33}$	$\text{mg}/\text{m}^3$	8	20	降岭形

根据所研究的气藏型储气库 13 口注采井所属地层部位和采气过程低部位井优先采气原则, 采气期在保障调峰与应急能力的前提下, 合理制定开井方案, 避

免边水快速推进。利用模糊综合评价法对三套采气方案进行评价和优选。最终, 采气方案各指标得分结果如表 11 所示。从该表可以看出, 方案三得分最高, 为

表 11 储气库采气方案评价指标得分结果

Table 11 Evaluation index result of gas production scheme of gas storage

评价指标	方案一	方案二	方案三
$U_{11}$	42.86	57.14	71.43
$U_{12}$	77.13	76.04	70.23
$U_{13}$	89.03	94.37	98.2
$U_{21}$	73.18	80.15	88.61
$U_{22}$	68.69	66.84	61.97
$U_{23}$	99.07	99.53	94.08
$U_{24}$	93.97	73.98	67.64
$U_{25}$	66.12	71.08	78.17
$U_{26}$	71.79	64.25	68.26
$U_{31}$	64.24	80.97	94.99
$U_{32}$	66.74	72.39	77.71
$U_{33}$	75.79	65.2	56.92
总得分	72.41	75.17	78.06

78.06 分；方案二得分为 75.17 分；而方案一的得分最低，为 72.41 分。因此，推荐采用方案三进行储气库采气作业。

## 4 结论

在储气库注采方案的制定过程中，往往需要考虑多方面的影响因素，仅凭决策者的工作经验难以制定兼顾多个技术指标的运行方案。因此，本文以国内某气藏型储气库为研究对象，利用模糊综合评价方法对该储气库的注气方案和采气方案进行评价和优选。模糊综合评价指标体系建立过程中，考虑了对储气库注

采方案优劣影响较大的各个因素。为了兼顾评价指标的主观性和客观性，提高评价指标的权重分配的合理性，分别采用熵权法和层次分析法求解指标权重。此外，利用梯形模糊隶属函数和岭形模糊隶属函数对评价指标进行无量纲处理，再采用线性加权法计算综合评价结果。基于所建立的储气库注采方案模糊综合评价方法，分别对所研究的气藏型储气库三套注气方案和三套采气方案进行了评价和优选。最后，本文所建立的储气库注采方案模糊综合评价方法和评价结果可为储气库运营部门的注采方案规划和日常操作提供一定的指导，从而使得储气库注采运行更加高效和全面。

## 参考文献

- [1] 张刚雄, 李彬, 郑得文, 等. 中国地下储气库业务面临的挑战及对策建议[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 153-159. [ZHANG G X, LI B, ZHENG D W, et al. Challenges to and proposals for underground gas storage (UGS) business in China[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 153-159.]
- [2] 郑得文, 赵堂玉, 张刚雄, 等. 欧美地下储气库运营管理模式的启示[J]. 天然气工业, 2015, 35(11): 97-101. [ZHENG D W, ZHAO T Y, ZHANG G X, et al. Enlightenment from European and American UGS operation management modes[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(11): 97-101.]
- [3] 丁国生, 魏欢. 中国地下储气库建设 20 年回顾与展望[J]. 油气储运, 2020, 39(01): 25-31. [DING G S, WEI H. Review on 20 years' UGS construction in China and the prospect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(01): 25-31.]
- [4] 张光华. 中石化地下储气库建设现状及发展建议[J]. 天然气工业, 2018, 38(08): 112-118. [ZHANG G H. Underground gas storage of Sinopec: construction status analysis and development proposals[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(08): 112-118.]
- [5] 谭羽非, 陈泉新. 天然气地下储气库优化管理的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2003, 20(5): 82-85. [TAN Y F, CHEN X Q. Simulation research of the underground gas storage optimization management[J]. COMPUTER SIMULATION, 2003, 20(5): 82-85.]
- [6] 崔国强, 王彬, 庞晶, 等. 呼图壁储气库注气方案设计数值模拟研究[C]. 贵阳: 2014 年全国天然气学术年会, 2014. [CUI G Q, WANG B, PANG J, et al. Gas injection scheme design and numerical simulation study of Hutubi gas reservoir[C]. Guiyang: 2014 National Natural Gas Academic Annual Conference, 2014.]

- [7] 刘佳宁, 刘得军, 钱步仁, 等. 基于NSGA-II的地下储气库注气节能优化运营研究[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 160-166. [LIU J N, LIU D J, QIAN B R, et al. Optimization of energy-saving operation in underground gas storage injection based on NSGA-II[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 160-166.]
- [8] 杨颖, 李世兵, 陈子玮, 等. 电驱式压缩机在地下储气库注气期经济运行的优化方案[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(03): 102-106. [YANG Y, LI S B, CHEN Z W, et al. Optimization measures to maintain economical operation of electrically driven compressor during gas injection in underground gas storage[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(03): 102-106.]
- [9] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010. [HU B Q. The basis of fuzzy theory[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010.]
- [10] 杨志超, 张成龙, 葛乐, 等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 90-94. [YANG Z C, ZHANG C L, GE L, et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flashover pollution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90-94.]
- [11] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 5(5): 148-153. [GUO J Y, ZHANG Z B, SUN Q Y. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 5(5): 148-153.]
- [12] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159+164. [OUYANG S, SHI Y L. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159+164.]
- [13] 于少伟. 基于区间数的模糊隶属函数构建[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(6): 32-35+93. [YU S W. Construction of a fuzzy membership function based on interval number[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science). 2010, 40(6): 32-35+93.]
- [14] 袁力, 姜琴. 隶属函数确定方法探讨[J]. 鄱阳师范高等专科学校学报, 2009, 29(6): 44-46. [YUAN L, JIANG Q. A study on the determination of membership function[J]. Journal of Yunyang Teachers College, 2009, 29(6): 44-46.]
- [15] 胡庆夕, 秦鹏飞. 基于线性加权-分配法的工艺方案综合评价[J]. 计算机集成制造系统, 2000, 6(1): 81-85. [HU Q X, QIN P F. Synthesis evaluation method on process plan based on linear weight and assignment method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2000, 6(1): 81-85.]

(责任编辑 王雨墨 编辑 马桂霞)