文章编号:1674-2974(2024)08-0091-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024281

面向个性化需求的燃料电池测试台价值评估方法

钟频[1†],闫浩鹏[2],袁小芳[2],谭伟华[2]
(1. 中南林业科技大学 涉外学院,湖南 长沙 410211;
2. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:针对不同个性化需求的燃料电池测试台(fuel cell test bench, FCTB)难以评价和量化评估的问题,提出一种基于改进和声搜索算法的FCTB价值评估方法.针对不同FCTB的个性化需求,建立了FCTB综合评估指标体系;结合用户的个性化需求,采用模糊层次分析法分配指标权重,构建价值定量评估模型,将权重求取问题转换为约束优化问题;提出一种改进和声搜索算法对问题进行求解,通过设计解向量生成机制和参数自适应调整策略,用于提高传统和声搜索算法的求解效率和搜索能力.仿真结果表明,本文方法在计算效率和精度方面具有优势,并能够根据不同的需求特性实现对FCTB方案做出定量的价值评估.

关键词:燃料电池测试台;价值评估;改进和声搜索算法;模糊层次分析法
中图分类号:TP274 **文献标志码**:A

Value Evaluation Method of Fuel Cell Test Bench for Personalized Customization

ZHONG Pin[1†], YAN Haopeng[2], YUAN Xiaofang[2], TAN Weihua[2]
(1. Swan College, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410211, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To address the difficulty in evaluating and quantifying the value of personalized customized fuel cell test bench (FCTB), a method is proposed to establish a comprehensive evaluation index system of FCTB, based on the principle of FCTB technology and the actual production process. The fuzzy hierarchical analysis method is used to assign weights to the indexes, taking into account the user's personalized customization needs. This creates a quantitative value evaluation model, which converts the weighting problem into a constrained optimization problem. An improved harmonic search algorithm is then proposed to solve this problem. By designing a solution vector generation mechanism and a parameter adaptive adjustment strategy, the algorithm improves the solution efficiency and search capability of the traditional harmonic search algorithm. Simulation results show that the proposed method has obvious advantages in terms of computational efficiency and accuracy. It is able to achieve quantitative value assessment of different FCTB scenarios according to the user's personalized needs.

* **收稿日期**:2023-11-06
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB4003800), National Key R&D Program of China (2022YFB4003800)
作者简介:钟频(1981—),女,湖南长沙人,中南林业科技大学副教授
† 通信联系人,E-mail:38224176@qq.com

Key words: fuel cell test bench; value evaluation; improved harmony search algorithm; fuzzy analytic hierarchy process

针对环境污染、能源消耗等问题,燃料电池的发展对于环境改善及能源转型具有重要意义[1].为了实现燃料电池多应用场合的功能和测试,需要建立不同个性化需求的燃料电池测试台(fuel cell test bench,FCTB)价值评估体系,提出FCTB价值评估方法,依据当前研究基础[2],确定个性化需求的价值评估指标体系以及评估流程,满足不同需求下的FCTB价值量化和评估难题.

目前,FCTB评估相关的理论方法研究仍处于探索阶段.姚健等[3]根据FCTB原理及特征,分析氢燃料电池测试需求,设计气体检测方法,确定了测试流程,为燃料电池测试台评估指标构建提供了理论基础.Gadducci等[4]通过对实际测试平台进行燃料电池静态性能和动态性能测试,确定了燃料电池在特定场景下的运行负载情况及曲线,并且提出了影响燃料电池性能的相关指标.Gadducci等[5]在特定环境中对燃料电池管理系统运行测试试验,建立了近似真实情况下的燃料电池测试方法,同时提供了燃料电池性能评估方法.目前的研究虽然对FCTB进行了多角度的评估,但多针对某个具体环节或场景,没有考虑多环节、个性化的评估方法,指标体系比较单一,指标覆盖环节较少,因此需借鉴工业内其他领域的价值评估方法,形成一套FCTB多环节的个性化需求价值评估方法.

模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process,FAHP)是一种决策指标权重的分析方法,被广泛应用于复杂工业对象的评估中[6-7].施端阳等[8]系统地研究了综合评估方法,提出通过明确评估主体和评估对象,科学地选取评估方法,构建评估指标体系.Mathew等[9]按照定性分析和定量分析相结合的原则,论述了FAHP适用于方案评估等应用领域,形成了比较完整的评估模式.Kumar等[10]结合FAHP多目标决策分析感性与理性两方面评估的特点,研究了客户价值评估过程,并建立了评估系统应用框架.Luc等[11]利用模糊层次分析法,将确定性权重改为模糊性权重,保留指标之间的重要度关系,更加高效地计算指标权重.以上研究体现出了FAHP方法受主观因素影响的特点,适用于与用户个性化定制相结合.

结合上述评估方法研究与应用背景,提出了一种基于FAHP的指标权重分配方法,将权重求取问题转换为约束优化问题,利用改进和声搜索算法(improved harmony search,IHS)对问题进行求解.针对FCTB的4个常见环节建立价值评估指标体系,构建了定量评估的价值评估模型;在实际过程中,通过采集用户对燃料电池测试台的各指标偏好,经过量化后形成指标间的重要程度关系,以此为基准,通过模糊层次分析法构建模糊判断矩阵,对模糊判断矩阵求解得到满足用户个性化需求的指标权重;为保证模糊判断矩阵的一致性,提出了一种改进和声搜索算法对评估指标权重进行优化.根据不同的用户偏好,设计了6种不同个性化需求的FCTB方案并进行定量评估,获得了符合实际要求的评估结果.

1 FCTB价值评估指标体系构建

要实现对不同需求的FCTB价值评估,第一步是要构建个性化需求的评估指标体系.首先,明确评估指标体系的构建原则;然后,根据评估体系构建原则选取FCTB评估指标;最后,根据评估指标,建立FCTB评估模型,定量评估FCTB价值.

1.1 评估指标体系构建原则

个性化需求是指根据个别用户的需求和功能,通过个性化的设计、生产和服务流程,为用户提供量身定制的产品和服务[12].传统的生产模式是大规模生产标准化产品,而个性化定制则要求生产流程能够根据用户的不同需求进行灵活调整[13].个性化定制需求下,有的用户要求控制成本,有的用户要求时间限制,有的用户要求产品质量,其分别代表了FCTB生产管理中的成本、时间、质量(cost,time,quality,CTQ)三种维度.因此,评估指标应选取能分别代表成本、时间、质量三种维度的指标,即在满足用户需求下能最大化提高其他指标的生产方案通常被认为具有更高的价值.

FCTB涉及多个环节,每个环节细分为多项数据指标.为了能够确保所建立的价值评估指标体系的

合理性,在进行评估指标体系建立时应遵循科学性、全面性、独立性、适应性及可行性五项原则[14],应从多个角度出发,选取具有代表性的评估指标,各层指标之间不应存在交叉、包含、重叠以及因果等关系,应尽量选取可以量化的指标数据.

1.2 FCTB评估指标选取

决定FCTB具体实施工作的主要环节有四个,分别为:设计环节(A)、配件供应环节(B)、装配调试环节(C)以及运维服务环节(D).针对每一个环节,从成本、时间、质量三个基础属性出发,结合工业标准下的燃料测试台技术指标,分别选取具有代表性的评估指标用于FCTB的价值评估.针对设计环节,分别选取了如下评估指标:设计成本、设计工时、研发能力;针对配件供应环节,分别选取了如下评估指标:配件成本、配件数量、配件齐套率、供应时间;针对装配调试环节,分别选取了如下评估指标:装配成本、调试精度、控温范围、控制器精度、测试时间、设备利用率;针对运维服务环节,分别选取了如下评估指标:运维成本、平均解决时间、平均响应时间、用户满意度.

1.3 FCTB价值评估指标体系

根据以上各环节及定义的评估指标建立价值评估指标体系,假设FCTB的价值评估值为S,则

$$S = \omega_A f_A + \omega_B f_B + \omega_C f_C + \omega_D f_D \tag{1}$$

式中:f_A,f_B,f_C,f_D分别代表4个环节的评估值,ω_A,ω_B,ω_C,ω_D分别代表每个环节的权重.每个环节的评估值由评估指标加权求和获得,表达式为

$$f_{A\sim D} = \sum_{i=1}^{n} \omega_i f_i \tag{2}$$

式中:n为对应环节评估指标个数,i表示第i个评估指标,f_i为第i个评估指标数据,ω_i为第i个评估指标权重,$\sum_{i=1}^{n}\omega_i = 1$.FCTB价值评估指标体系如图1所示.

2 基于FAHP的指标权重分配方法

根据图1所示的FCTB价值评估指标体系可知,若想求得FCTB价值评估值,要分别求得4个环节对应的价值评估值,而4个环节对应的价值评估值要由评估指标加权获得,因此,价值评估的过程实际是权重求解的过程,为了获得各指标权重,同时在权重分配过程中满足用户的个性化定制需求,提出一种基于FAHP的指标权重分配方法.

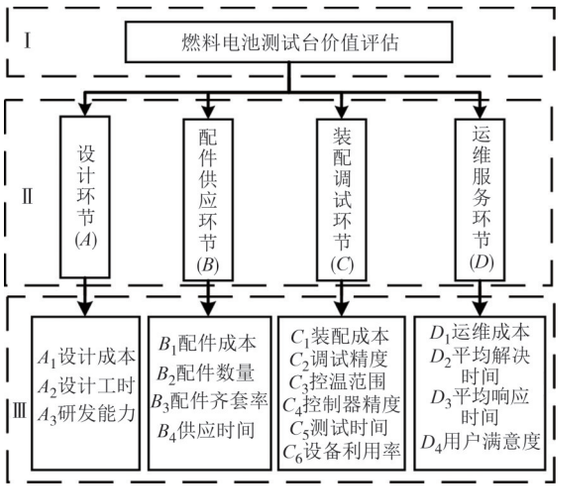


图1　FCTB价值评估指标体系

Fig.1　Value evaluation index system for fuel cell test bench

2.1 模糊层次分析法(FAHP)构建模糊判断矩阵

由于FCTB价值评估指标体系具有层次结构,因此可以通过模糊层次分析法求解评估指标权重[15].FAHP方法是基于AHP方法的改进,将AHP的确定性权重改为模糊权重,降低了权重求解过程的计算复杂度.模糊层次分析法通过构建多层次的决策因素模型,从而用户可以评估各种指标的相对重要性,同时,相对于其他权重计算方法,模糊层次分析法能够处理复杂多级层次结构,并且考虑了不同指标之间的关系,将用户对不同指标的个性化定制需求进行量化,以此为基准构建各环节模糊判断矩阵.以FCTB层次模型中某环节A为例,与该环节相关联的第Ⅲ层有n项评估指标,则第Ⅱ层环节A所建立的两两相比较的关系如表1所示.

表1　环节A指标比较关系表

Tab.1　Segment A indicator comparative relationship

A	A_1	A_2	…	A_n
A_1	r_{11}	r_{12}	…	r_{1n}
A_2	r_{21}	r_{22}	…	r_{2n}
⋮	⋮	⋮		⋮
A_n	r_{n1}	r_{n2}	…	r_{nn}

r_{ij}表示第Ⅲ层评估指标A_i和第Ⅲ层评估指标A_j在第Ⅱ层环节A中相比较时,评估指标A_i比评估指标A_j重要多少程度的模糊关系,r_{ij}的取值采用0.1~0.9标度法.具体说明如表2所示.

以此基准构建的模糊判断矩阵基本性质如下.

1)单位性:$r_{ii} = 0.5, i = 1, 2, \cdots, n$;

2)互补性:$r_{ij}=1-r_{ji}, i, j = 1, 2, \cdots, n$;

3)一致性条件:$r_{ij}=r_{ik}r_{jk}, i, j, k = 1, 2, \cdots, n$.

表2 数量标度及含义

Tab.2 Quantity scale and its meaning

标度	含义
0.5	表示A_i与A_j同等重要
0.6	表示A_i比A_j稍微重要
0.7	表示A_i比A_j一般重要
0.8	表示A_i比A_j明显重要
0.9	表示A_i比A_j极端重要
0.1,0.2,0.3,0.4	表示反比较,若元素A_i与A_j相比得r_{ij},则元素A_j与A_i相比得r_{ji}=1−r_{ji}

采用表2所示的数量标度做定量描述,由此可以构建出环节A的模糊判断矩阵$\boldsymbol{M}_A$.

$$\boldsymbol{M}_A=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

一般情况下,人们通过主观判定或专家打分的机制去确定模糊判断矩阵$\boldsymbol{M}_A$中的各个元素值.当矩阵中所有代表模糊关系的元素值确定后,要对模糊判断矩阵进行一致性检验,只有通过一致性检验的模糊判断矩阵才可以求得最大特征值对应的特征向量,进一步确定评估指标权重,否则需要调整模糊判断矩阵中的元素值直到通过一致性检验.根据模糊判断矩阵的定义,当模糊判断矩阵$\boldsymbol{M}_A$具有完全一致性时,模糊判断矩阵$\boldsymbol{M}_A$中的元素值满足

$$r_{ij}=0.5+a(\omega_i-\omega_j)\quad i,j=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

式中:n为评估指标个数,$\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n$为评估指标权重,$a$表示人们对评估对象之间重视程度的差异性,取值大小与评估指标的数量和评估指标之间的差异程度相关,一般地$0<a\leqslant 0.5$,评估指标的数量越多或指标之间的差异性越大,a的取值越大,反之则越小.鉴于评估指标过多且指标之间关联复杂,将a统一取值为0.5.

随着模糊判断矩阵维度的增加,设置模糊判断矩阵元素值过程中难以得到较好的一致性,因为修改一个元素值可能引起全局评估指标重要性关系的改变,于是需要经过多次修改才能通过一致性检验,此过程耗费的时间以及求解的难度过大.于是引入智能优化算法[16-18]结合FAHP原理优化求得评估指标权重.

2.2 优化目标函数

由式(4)可知,具有完全一致性的模糊判断矩阵满足下式条件[19].

$$\mathrm{CIF}=\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}\left|0.5+a(\omega_i-\omega_j)-r_{ij}\right|=0$$

$$i,j=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

式中:CIF代表模糊判断矩阵的一致性,当CIF = 0时,说明模糊判断矩阵具有完全一致性,当CIF < 0.1时,说明模糊判断矩阵具有较为满意的一致性,以此求解出的权重是较为客观的[20].所以以式(5)为基础构建目标函数,并将模糊判断矩阵的一致性条件作为优化目标的一部分,构建的目标函数表达式为

$$f(\boldsymbol{x})=\min\frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij}-\bar{y}_i)^2}+\mathrm{CIF}}{n} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{x}=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n,r_{23},\cdots,r_{34},\cdots,r_{3n},\cdots,r_{(n-1)(n)})$为优化向量,共$0.5(n-1)(n-2)+n$维.$y_{ij}=r_{1j}-r_{ij},r_{1j}$为原模糊判断矩阵$\boldsymbol{M}_A$的第一行元素,根据用户的个性化需求进行设置,作为目标函数中的已知参数.r_{ij}修正后的模糊判断矩阵的第i行第j列元素$\bar{y}_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_{ij}$为模糊判断矩阵$\boldsymbol{M}_A$第一行元素与第$i$行元素之差的平均值.

3 基于IHS的指标权重求解方法

3.1 改进和声搜索算法(IHS)优化评估指标权重

和声搜索算法[21-22]可以通过全局随机搜索避免陷入局部最优值,这使得它可以在高维空间中搜索最优解,同时保证搜索结果的全局最优性.和声搜索算法的解生成过程可以参考解集空间中的所有解向量,而不仅仅是小部分解向量,这使得和声搜索算法可以全面考虑解空间中的信息,避免被一些偏差解所影响,从而提高权重计算的准确性和稳定性.此外,相较于其他算法,和声搜索算法具有参数少、结构简单、易扩展等特点,便于改进提升算法性能.这些特性使其可以有效地解决模糊层次分析法中的权重计算问题.

和声搜索算法的流程如下:

步骤 1 初始化和声库(harmony memory,HM).设置HM为一个$50\times m$的二维矩阵,并按公式分别初始化HM中的50组解向量,初始化解向量的表达式为

$$x_{i,j}=L_a+(L_b-L_a)\times\mathrm{rand}() \tag{7}$$

式中:$x_{i,j}$为第i组解向量的第j个变量,分别对应优化向量$\boldsymbol{x}$中的每个元素,$L_a=0.1$为变量的下界,$L_b=0.9$为变量的上界,rand()为产生0~1之间随机数的函数.

分别将HM中的50组解向量代入公式(6)中,得

到50个目标函数值,将其中最小的目标函数值用$f_{\min}$表示,并将$f_{\min}$对应的解向量设置为最佳解向量$\boldsymbol{x}_{\text{best}}=(x_{(\text{best},1)},x_{(\text{best},2)},\cdots,x_{(\text{best},m)})$.

步骤 2 设置参数.分别设置和声记忆库取值概率(harmony memory considering rate,HMCR)、微调概率(pitch adjusting rate,PAR)、音调微调带宽、迭代次数.在解向量的定义域范围内依照HMCR和PAR的概率产生新的解向量$\boldsymbol{x}_{\text{new}}=(x_{(\text{new},1)},x_{(\text{new},2)},\cdots,x_{(\text{new},m)})$,生成新的解向量具体实现为:

a)生成一个 rand() 函数,若 rand() < HMCR,则在HM库中得到一组解向量,否则在定义域内生成一组解向量;

b)若解向量是在库中得到的,则需要进行微调,生成一个 rand() 函数,若 rand() < PAR,则以微调带宽BW对解向量进行调整,得到一组新的解向量;

c)将新的解向量加入并更新和声记忆库HM.

步骤 3 将新的解向量计算的目标函数值f_{new}与$f_{\min}$进行比较,若$f_{\text{new}}<f_{\min}$,则更新和声库$f_{\text{new}}=f_{\min}$,$\boldsymbol{x}_{\text{best}}=\boldsymbol{x}_{\text{new}}$,将新的解向量加入HM库中,并剔除HM库中目标函数值最大的解向量以此更新HM库,重复上述步骤2,直到迭代次数达到预设值.

通过分析和声搜索算法的流程,对基础和声搜索算法做出如下改进.

3.1.1　自适应概率参数调整

分析迭代过程可知,在迭代前期,和声记忆库中解向量数值较为随机,生成解的质量不高,库中的解向量需要大量调整,于是应采取高HMCR、低PAR的迭代策略,加强每代解向量的差异性,从而使库中生成靠近最优解的解向量;在迭代后期,库中解向量均靠近最优解,不同解向量之间误差较小,此时应采取低HMCR、高PAR的策略,降低生成新解向量的概率,并对库中解向量频繁进行微调以此达到最优解[23].HMCR和PAR的取值与迭代次数之间的关系可表示如下:

$$\begin{cases}\text{HMCR}=\text{HMCR}_{\max}\cdot\exp\left(\dfrac{t}{T_{\max}}\lg\dfrac{\text{HMCR}_{\min}}{\text{HMCR}_{\max}}\right)\\ \text{PAR}=\text{PAR}_{\min}+\left[1-\exp\left(\dfrac{t}{T_{\max}}\lg\dfrac{\text{PAR}_{\min}}{\text{PAR}_{\max}}\right)\right]\cdot\text{PAR}_{\max}\end{cases}\tag{8}$$

式中:$\text{HMCR}_{\max}$、$\text{HMCR}_{\min}$、$\text{PAR}_{\max}$和$\text{PAR}_{\min}$分别代表HMCR和PAR取值的上下界,t为当前迭代次数.

3.1.2　改进解向量生成机制

通过生成新的解向量流程可知,rand() < HMCR时,新的解向量从HS库中选取,进一步判断是否需要微调.当 rand() > PAR 时,解向量不需要微调.因此本次迭代HS库中解向量并没有得到更新,浪费了一次迭代次数,故引入改进的解向量机制.

若 rand() < HMCR,从HS库中随机选取n组解向量组成$n\times n$解向量矩阵$\boldsymbol{X}$,n代表解向量的维数,取矩阵$\boldsymbol{X}$对角线的元素构成新的解向量供后续步骤微调,改进解向量的公式为

$$\boldsymbol{x}^{\text{new}}=\text{diag}(\boldsymbol{X})\tag{9}$$

式中:diag()表示矩阵的对角线的元素.通过此解向量生成机制生成的新解向量可以继承n个原库中解向量的和声特征,且在迭代前期生成的解向量分布较为随机的情况下,可以保证新的解向量与库中已有解向量不重复,提高了每次迭代的质量.改进和声搜索算法流程如图2所示.

3.2　计算FCTB价值评估值

运用改进和声搜索算法-模糊层次分析法分别求得设计环节(A)、配件供应环节(B)、装配调试环节

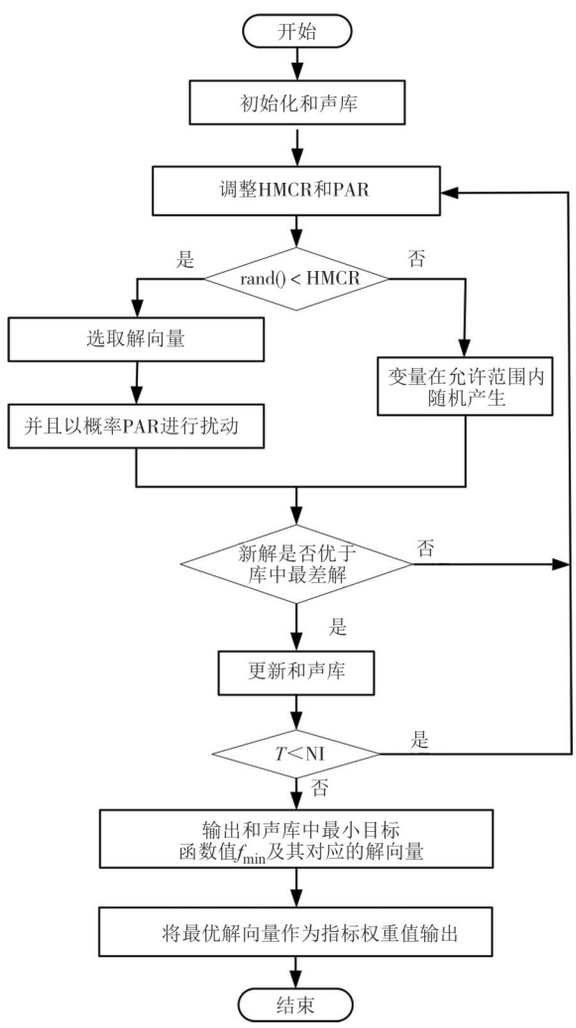


图2　改进和声搜索算法流程图

Fig.2　Improved harmony search algorithm flowchart

(C)以及运维服务环节(D)的评估指标权重值,再求得总流程对于每个环节的权重值,根据公式(1)、公式(2)加权计算FCTB价值评估值S.

4 仿真实验

4.1 实验数据描述

4.1.1 评估指标数据集

评估指标数据根据实际项目及参考论文实验指标数据进行设计,经处理后设计6种不同执行方案数据,选取的6种方案涵盖不同类型的燃料电池测试台,分别能够代表高、中、低端测试台型号,根据用户的个性化需求评估后能产生明显的差异性,便于评估结果的对比.得到燃料电池测试台指标原始数据集如表3所示.

由于不同的评估指标数据具有不同的量纲,不能对不同的数据直接进行数值上的线性求和,例如在不同环节时间指标中,有单位为天的评估指标,有单位为件的评估指标.因此,需要将评估指标数据进行归一化处理[24],选择均值法归一化数据,公式如下:

$$f'_{ki}=\frac{6f_{ki}}{\sum_{k=1}^{6} f_{ki}} \tag{10}$$

式中:k表示第k种方案,i表示第i个评估指标,f'_{ki}是f_{ki}归一化后的评估指标值.采用均值法归一化后的数据分散在数值1的左右,归一化后的数据仍保留原数据的比例关系,更适用于加权计算.

表3 燃料电池测试台评估指标原始数据集

Tab.3 Fuel cell test bench evaluation indexes original data set

对应环节	评估指标	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
设计环节	设计成本/万元	28.5	31.7	22.9	35.6	32.8	27.7
	设计工时/d	40	40	60	25	30	50
	研发能力/件	11	12	16	6	8	13
配件供应环节	配件成本/万元	278.8	317.8	264.5	310.9	320.7	230.6
	配件数量/件	137	145	127	198	124	164
	配件齐套率/%	96	93	90	91	95	98
	供应时间/d	14	13	22	32	18	27
装配调试环节	装配成本/万元	22.6	21.7	20.5	30.8	28.4	25.4
	调试精度/%	95	96	90	91	90	99
	控温范围/℃	100	110	95	105	100	110
	控制器精度/%	89	95	90	93	90	91
	测试时间/d	120	124	60	109	83	96
	设备利用率/%	88	91	98	94	95	91
运维服务环节	运维成本/万元	10.3	15.6	13.2	17.8	18.9	13.7
	平均解决时间/d	7	12	8	6	5	4
	平均响应时间/d	15	12	20	18	26	31
	用户满意度/分	8	7	6	10	7	9

上文定义的各项评估指标,可分为正向指标与负向指标两类.正向指标代表指标数据越大,评估的效果越好;负向指标代表指标数据越小,评估的效果越好.以设计成本为例,实际要求设计成本越少评估效果越好,所对应的评估值应越大,所以设计成本为负向指标.以此类推,正向指标有:研发能力、配件数量、配件齐套率、调试精度、控温范围、控制器精度、设备利用率、用户满意度;负向指标有:设计成本、设计工时、配件成本、供应时间、装配成本、测试时间、运维成本、平均解决时间、平均响应时间.因此需将所有评估指标数据与评估方向统一,将所有负向指标求倒数,取倒数可以保留均值法归一化后数据的比例关系,并使其与评估方向统一.经过正负指标统一后,得到的实验数据集如表4所示.

4.1.2 模糊判断矩阵求解权重

根据用户的个性化需求构建模糊判断矩阵,假设以成本>时间>质量的用户需求构建模糊判断矩阵,根据前文介绍的改进和声搜索算法-模糊层次分析法,只需设定模糊判断矩阵第一行中评估指标的相对重要程度,经优化得到的层次模型中第Ⅱ层各环节关于第Ⅲ层评估指标的模糊判断矩阵以及评估指标权重如表5~表8所示.

表 4　正负指标统一后数据集

Tab.4　Unified data set of positive and negative indicators

对应环节	评估指标	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
设计环节	设计成本/万元	1.048 0	0.942 2	1.304 2	0.839 0	0.910 6	1.078 2
	设计工时/d	1.020 8	1.020 8	0.680 6	1.633 3	1.361 1	0.816 7
	研发能力/件	1.000 0	1.090 9	1.454 5	0.545 5	0.727 3	1.181 8
配件供应环节	配件成本/万元	1.030 2	0.903 8	1.085 9	0.923 8	0.895 6	1.245 5
	配件数量/件	0.918 4	0.972 1	0.851 4	1.327 4	0.831 3	1.099 4
	配件齐套率/%	1.023 1	0.991 1	0.959 1	0.969 8	1.012 4	1.044 4
	供应时间/d	1.500 0	1.615 4	0.954 5	0.6563	1.166 7	0.777 8
装配调试环节	装配成本/万元	1.101 8	1.147 5	1.214 6	0.808 4	0.876 8	0.980 3
	调试精度/%	1.016 0	1.026 7	0.962 6	0.973 3	0.962 6	1.058 8
	控温范围/℃	0.967 7	1.064 5	0.919 4	1.016 1	0.967 7	1.064 5
	控制器精度/%	0.974 5	1.040 1	0.985 4	1.018 2	0.985 4	0.996 4
	测试时间/d	0.822 2	0.795 7	1.644 4	0.905 2	1.188 8	1.027 8
	设备利用率/%	0.947 9	0.980 3	1.055 7	1.012 6	1.023 3	0.980 3
运维服务环节	运维成本/万元	1.448 2	0.956 2	1.130 1	0.838 0	0.789 2	1.088 8
	平均解决时间/d	1.000 0	0.583 3	0.875 0	1.166 7	1.400 0	1.750 0
	平均响应时间/d	1.355 6	1.694 4	1.016 7	1.129 6	0.782 1	0.655 9
	用户满意度/分	1.021 3	0.893 6	0.766 0	1.276 6	0.893 6	1.148 9

表 5　设计环节(*A*)模糊判断矩阵及权重值

Tab.5　Design process (*A*) fuzzy judgment matrix and weight values

A	A_1	A_2	A_3	ω_A	CIF
A_1	0.5	0.7	0.8	0.433 3	
A_2	0.3	0.5	0.6	0.333 3	$8.177\ 1\times10^{-6}$
A_3	0.2	0.4	0.5	0.233 4	

表 6　配件供应环节(*B*)模糊判断矩阵及权重值

Tab.6　Parts supply process (*B*) fuzzy judgment matrix and weight values

B	B_1	B_2	B_3	B_4	ω_B	CIF
B_1	0.5	0.8	0.7	0.7	0.34 99	
B_2	0.2	0.5	0.6	0.4	0.216 5	$3.178\ 4\times10^{-4}$
B_3	0.3	0.4	0.5	0.3	0.150 4	
B_4	0.3	0.6	0.7	0.5	0.283 2	

表 7　装配调试环节(*C*)模糊判断矩阵及权重值

Tab.7　Assembly and commissioning process (*C*) fuzzy judgment matrix and weight values

C	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	ω_C	CIF
C_1	0.5	0.7	0.8	0.8	0.6	0.8	0.246 7	
C_2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.4	0.6	0.166 7	
C_3	0.2	0.4	0.5	0.5	0.3	0.5	0.126 7	0.002 9
C_4	0.2	0.4	0.5	0.5	0.3	0.5	0.126 7	
C_5	0.4	0.6	0.7	0.7	0.5	0.7	0.206 4	
C_6	0.2	0.4	0.5	0.5	0.3	0.5	0.126 8	

由于本实验设置用户需求首要考虑成本,而各环节均只有一个关于成本的指标,于是定义层次模型中第Ⅰ层关于第Ⅱ层的重要程度相同,直接设定第Ⅰ层关于第Ⅱ层的模糊判断矩阵如表 9 所示即可.

表 8　运维服务环节(*D*)模糊判断矩阵及权重值

Tab.8　Operation and maintenance process (*D*) fuzzy judgment matrix and weight values

D	D_1	D_2	D_3	D_4	ω_D	CIF
D_1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.349 9	
D_2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.283 4	$2.917\ 1\times10^{-4}$
D_3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.216 7	
D_4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.150 0	

表 9　总流程模糊判断矩阵及权重值

Tab.9　Overall process fuzzy judgment matrix and weight values

S	*A*	*B*	*C*	*D*	ω_S	CIF
A	0.5	0.5	0.5	0.5	0.250 0	
B	0.5	0.5	0.5	0.5	0.250 0	0
C	0.5	0.5	0.5	0.5	0.250 0	
D	0.5	0.5	0.5	0.5	0.250 0	

4.2　实验结果与分析

根据表 5~表 9 得到的评估指标权重与归一化数据集经过式(1)、式(2)加权计算,燃料电池测试台价值评估值为:方案 1 的价值评估值为 1.104 2,方案 2 的价值评估值为 1.039 8,方案 3 的价值评估值为 1.083 4,方案 4 的价值评估值为 0.9620,方案 5 的价值评估值为 1.0125,方案 6 的价值评估值为 1.0581.

将6种方案的燃料电池测试台价值评估值按从大到小进行排序,得分最高的方案为方案1.

从图3和图4中得知,方案4获得最高的价值评估值的原因大部分来源于其在成本方面表现出的优势,方案4在成本指标的评估值明显领先于其他方案,并且方案4在各生产环节部分的评估值也处于中上阶段,且在预设条件中,也以成本作为第一用户需求进行求解.由此可知,方案1在整体的成本控制方面做得比较好,相比之下整个生产过程中的质量控制就略差于其他方案,因此可以判断出方案1在实际生产中对应的燃料电池测试台应当属于较为经济实惠的测试台型号,或者对应一些用于实验中只需具有简单功能性的测试台型号.

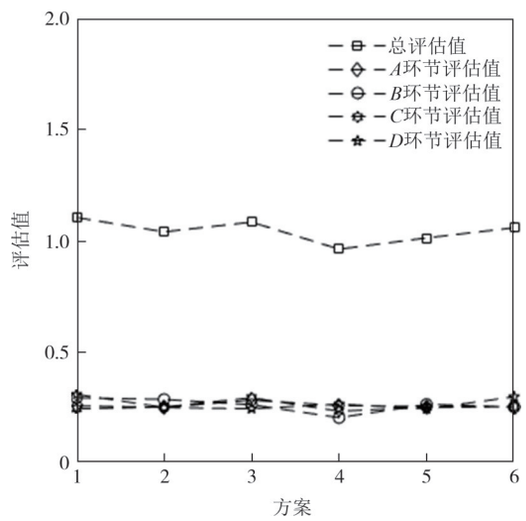


图3 总体及各环节评估值散点图

Fig.3 Scatter plot of overall and each link evaluation value

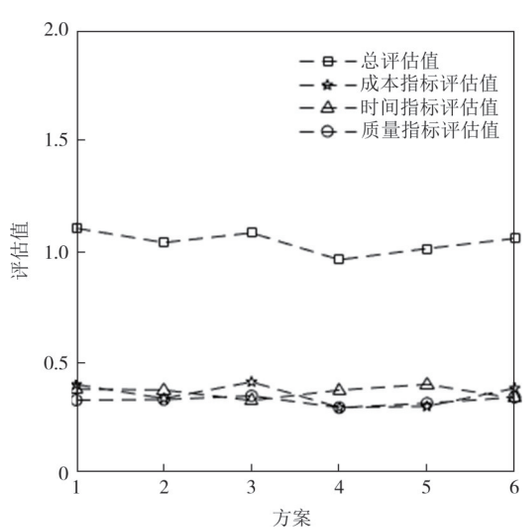


图4 总体及各属性指标评估值散点图

Fig.4 Scatter plot of evaluation values for overall and various attribute indicators

为了验证方法的通用性,分别更改用户需求为质量>时间>成本以及时间>成本>质量,重新设置模糊判断矩阵并重复上述实验流程,更改用户需求后得到的各指标权重如表10~表11所示,得到的评估结果如表12所示.

表10 质量>时间>成本时各指标权重

Tab.10 Indicators weights when quality > time > cost

指标	权重值	指标	权重值	指标	权重值
ω_{A1}	0.046 7	ω_{A2}	0.066 7	ω_{A3}	0.086 7
ω_{B1}	0.040 0	ω_{B2}	0.093 3	ω_{B3}	0.075 6
ω_{B4}	0.057 8	ω_{C1}	0.033 2	ω_{C2}	0.073 3
ω_{C3}	0.060 0	ω_{C4}	0.060 0	ω_{C5}	0.060 0
ω_{C6}	0.060 0	ω_{D1}	0.030 0	ω_{D2}	0.057 3
ω_{D3}	0.042 7	ω_{D4}	0.070 0		

表11 时间>成本>质量时各指标权重表

Tab.11 Indicators weights when time > cost > qualityt

指标	权重值	指标	权重值	指标	权重值
ω_{A1}	0.088 9	ω_{A2}	0.115 5	ω_{A3}	0.062 2
ω_{B1}	0.075 5	ω_{B2}	0.057 8	ω_{B3}	0.040 0
ω_{B4}	0.093 3	ω_{C1}	0.055 1	ω_{C2}	0.044 5
ω_{C3}	0.033 8	ω_{C4}	0.033 8	ω_{C5}	0.065 8
ω_{C6}	0.033 7	ω_{D1}	0.046 7	ω_{D2}	0.060 1
ω_{D3}	0.060 1	ω_{D4}	0.033 4		

表12 不同用户需求下评估结果

Tab.12 Evaluation results under different user needs

方案	用户需求	
	质量>时间>成本	时间>成本>质量
1	1.061 2	1.035 6
2	**1.083 8**	1.057 2
3	1.051 8	1.067 9
4	0.974 1	0.996 8
5	1.014 7	**1.092 4**
6	1.042 7	1.039 2

结果表明,更换了用户需求后,最佳方案也有所变化.当用户要求质量>时间>成本时,最佳方案为方案2;当用户要求时间>成本>质量时,最佳方案为方案5.分析实验数据可知得到的评估结果均具有合理性,提出的方法能够有效地根据用户的个性化需求对燃料电池测试台价值做出评估.

4.3 算法性能分析

使用提出的IHS算法与遗传算法、粒子群算法[25]和未改进的HS算法进行对比,得到各算法的模糊判断矩阵一致性CIF值收敛过程如图5所示.

上述结果表明,相比于其他三种方法,IHS算法

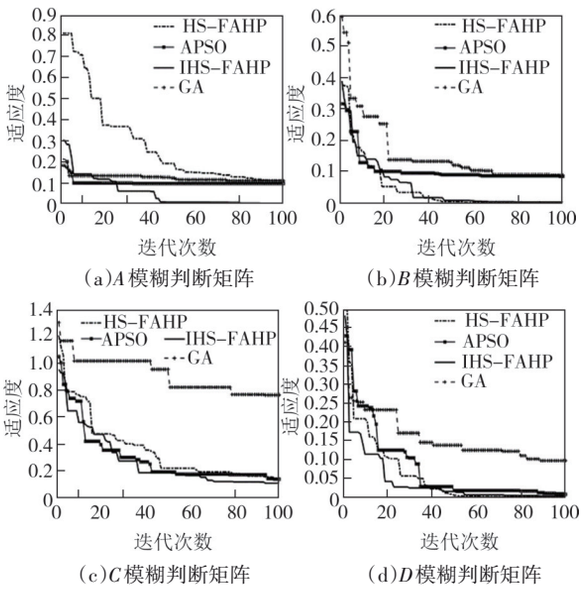


图5　各环节CIF值迭代过程

Fig.5　The iterative process of CIF values in each process

的收敛速度最快,并且相同迭代次数下IHS算法的收敛精度最高.同时,遗传算法和粒子群算法在维度升高时,均出现不同程度的寻优能力下降问题,而提出的IHS算法可以对概率参数进行自适应修整,增强全局寻优能力,在不同的维度下均可以实现稳定收敛.相较于传统HS算法,IHS算法因其具有改进的解向量生成机制,在迭代初始阶段的收敛速度较快,具有更好的寻优能力.基于上述结果分析可知,IHS通过对概率参数进行自适应调整以及改进解向量的生成机制,拥有更好的收敛速度、寻优能力和求解稳定性,优化得到的模糊判断矩阵一致性更好,更符合用户的个性化需求.

5　结 论

针对个性化需求下FCTB价值评估方法匮乏的问题,从评估指标体系构建、评估指标权重分配、评估指标权重求解等多个方面进行研究,基于模糊层次分析法实现指标权重分配方法,将权重求解问题转变为约束优化问题,利用改进和声搜索算法实现问题求解.在考虑用户的个性化需求的条件下,模糊层次分析法受主观因素影响,通过构建模糊判断矩阵反映用户倾向信息.在FCTB的应用背景下,模糊层次分析法能够有效分配指标权重,满足用户个性化需求.

提出的改进和声搜索算法,通过优化解向量生成机制和自适应参数调整策略,提高传统和声搜索算法的求解效率和搜索能力.仿真实验表明,与传统的优化算法相比,改进和声搜索算法收敛性更好,且优化后的模糊判断矩阵一致性更优.

实验仿真及结果表明提出的方法可以针对不同的用户需求获取不同的评估结果,能为用户选取FCTB方案提供参考,弥补了FCTB价值评估领域的空缺,为后续的研究提供理论支持.

参考文献

[1] 李宁. 燃料电池电堆测试台控制系统设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2022.
LI N. Design of fuel cell stack test bench control system[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2022.(in Chinese)

[2] 刘海明. 氢燃料试验室建设方案规划难点分析[C]//2023中国汽车工程学会年会暨展览会.北京: 机械工业出版社, 2023: 5.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.070534.
LIU H M. Analysis of the difficulties in planning the construction program of a hydrogen fuel laboratory [C]//2023 Annual Conference and Exhibition of the Chinese Society of Automotive Engineering. Beijing: China Machine Press, 2023: 5. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.070534.(in Chinese)

[3] 姚健,范伟军,郭斌,等. 氢燃料电池性能检测系统设计[J]. 电源技术,2023,47(7):914-917.
YAO J, FAN W J, GUO B, et al. Design of hydrogen fuel cell performance test system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023,47(7):914-917.(in Chinese)

[4] GADDUCCI E, LAMBERTI T, RIVAROLO M, et al. Experimental campaign and assessment of a complete 240-kW proton exchange membrane fuel cell power system for maritime applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2022, 47(53):22545-22558.

[5] GADDUCCI E,LAMBERTI T,BELLOTTI D,et al. BoP incidence on a 240 kW PEMFC system in a ship-like environment, employing a dedicated fuel cell stack model[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(47):24305-24317.

[6] ZHAO K X, DAI Y P, JI Y, et al. Decision-making model to portfolio selection using analytic hierarchy process (AHP) with expert knowledge[J]. IEEE Access,2021,9:76875-76893.

[7] ZHANG B W, LI C C, DONG Y C, et al. A comparative study between analytic hierarchy process and its fuzzy variants: a perspective based on two linguistic models[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2021,29(11):3270-3279.

[8] 施端阳,林强,胡冰,等. 综合评估方法研究综述[J]. 中国科技信息,2022(22):124-127.
SHI D Y, LIN Q, HU B, et al. A summary of research on comprehensive evaluation methods [J]. China Science and

Technology Information,2022(22):124-127.(in Chinese)

[9] MATHEW M, CHAKRABORTTY R K, RYAN M J. Selection of an optimal maintenance strategy under uncertain conditions: an interval type-2 fuzzy AHP-TOPSIS method [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2022, 69(4): 1121-1134.

[10] KUMAR R, KHAN A I, ABUSHARK Y B, et al. An integrated approach of fuzzy logic, AHP and TOPSIS for estimating usable-security of web applications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 50944-50957.

[11] LUC M H, NGUYEN Q V, DO Q H, et al. Evaluation of an apartment selection model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS[J]. International Journal of Fuzzy System Applications, 2022, 11(1): 1-22.

[12] 蔡磊,李文锋,罗云. 个性化定制车间生产-物流协同调度框架与算法研究[J]. 机械工程学报,2022,58(7):214-226.
CAI L, LI W F, LUO Y. Framework and algorithm of customized workshop production-logistics collaborative scheduling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 214-226. (in Chinese)

[13] 秦龙,陈志峰. 基于工业云平台的个性化定制技术要求标准解读[J]. 信息技术与标准化,2023(4):69-71.
QIN L, CHEN Z F. Standard interpretation of technical requirements for the personalized customization based on industrial cloud platform [J]. Information Technology & Standardization, 2023(4): 69-71. (in Chinese)

[14] 彭谱牙. 配电网网格化规划综合评价指标体系的构建与应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
PENG P Y. Construction and application of comprehensive evaluation index system of distribution network planning based on grid[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022. (in Chinese)

[15] 刘江南,杜文轩. 领域特色创新方法优选决策模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(4):105-113.
LIU J N, DU W X. An optimal decision model for selection of innovation methods with domain characteristics [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(4): 105-113. (in Chinese)

[16] ZHENG Y, LI J X, JIAO Y H. Distribution network planning and comprehensive investment evaluation based on Bayes-Entropy weight-Fuzzy analytic hierarchy process [C]//2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA). Shenyang: IEEE, 2021: 477-481.

[17] ZHANG B W, PEDRYCZ W, FAYEK A R, et al. A differential evolution-based consistency improvement method in AHP with an optimal allocation of information granularity [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(7): 6733-6744.

[18] CONNETT B, O'HALLORAN B M, POLLMAN A G. Advancing the use of an analytical hierarchy process and improved random indexes for making prioritized decisions in systems [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2022, 69(6): 2791-2805.

[19] WANG Z J. A novel triangular fuzzy analytic hierarchy process [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(7): 2032-2046.

[20] HUANG J T, QIAN W B, VONG C M, et al. Multi-label feature selection via label enhancement and analytic hierarchy process [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2023, 7(5): 1377-1393.

[21] 张耀庭,刘勇,沈杰,等. 结构动力时程分析的地震动选择方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(7):29-39.
ZHANG Y T, LIU Y, SHEN J, et al. Research on ground motion selection method for time-history analysis of structure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(7): 29-39. (in Chinese)

[22] 袁小芳,刘晋伟,陈秋伊,等. 并行混沌与和声搜索的多目标混合优化算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(4):96-103.
YUAN X F, LIU J W, CHEN Q Y, et al. A multi-objective hybrid optimization algorithm based on parallel chaos and harmony search [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(4): 96-103. (in Chinese)

[23] GUPTA S. Enhanced harmony search algorithm with non-linear control parameters for global optimization and engineering design problems[J]. Engineering with Computers, 2022, 38(4): 3539-3562.

[24] 胡进军,刘巴黎. 基于不同归一化参数的单自由度体系残余位移比离散性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(7):71-78.
HU J J, LIU B L. Study on variability of residual displacement ratios based on different normalized parameters for SDOF systems [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(7): 71-78. (in Chinese)

[25] 于桂芹,李刘东,袁永峰. 一种结合自适应惯性权重的混合粒子群算法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(3):49-53.
YU G Q, LI L D, YUAN Y F. A hybrid particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(3): 49-53. (in Chinese)