

文章编号:1671-251X(2021)10-0077-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020120019

基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型

郝秦霞^{1,2,3}, 汪连连¹, 张金锁⁴

- (1. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054;
2. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;
3. 西安科技大学 能源经济管理研究中心, 陕西 西安 710054;
4. 延安大学 经济与管理学院, 陕西 延安 716000)



扫码移动阅读

摘要:现有的顶板支护决策方法或片面分析安全因素,或对指标客观赋予权重,未能有效分配权重系数,不能满足高维多目标顶板案例决策的需求。针对该问题,对顶板来压指标进行分析,提出了一种基于 R2 指标的差分高维多目标进化(R2-MOEA/D)算法的顶板支护决策模型。首先针对来压状态定义指标属性,建立顶板指标知识库,利用层次分析法和熵值法对知识库中的条件指标进行计算,得到指标的主观权重和客观权重;然后在确定主观、客观权重的基础上引入权重矩阵,构建基于 R2-MOEA/D 算法的顶板多目标决策模型;最后基于 R2-MOEA/D 算法将多目标问题分解成多个子问题,利用切比雪夫函数作为 R2 指标排序标准进行个体选择,得到收敛性和多样性较好的 Pareto 最优解,即相似度最高的条件指标顶板案例,其对应的结果属性为事故案例的决策提供了支护方案。实验结果表明:R2-MOEA/D 算法与 NSGA2 算法、NSGA3 算法、RVEA 算法相比,在数据集的收敛性和分布性上整体效果最优,改善了高维空间中的搜索能力。通过山西霍州三交河煤矿 2-6011 巷道和 10-4151 巷道对基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型进行可行性评定,结果表明:由 R2-MOEA/D 算法检索出的解决方案符合该矿的实际支护情况。

关键词:巷道支护;顶板来压;顶板支护;顶板指标知识库;R2-MOEA/D 算法;综合权重法;条件指标;结果属性

中图分类号:TD327.2 文献标志码:A

Decision model of roof support based on R2-MOEA/D algorithm

HAO Qinxia^{1,2,3}, WANG Lianlian¹, ZHANG Jinsuo⁴

- (1. College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Research Center of Energy Economics and Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
4. School of Economics and Management, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: The existing roof support decision methods either analyze safety factors one-sidedly or assign weights to index objectively, fail to assign weight coefficients effectively, and cannot meet the demand of high-dimensional multi-objective roof case decision. In order to solve this problem, a decision model of roof support based on R2 index differential high-dimensional multi-objective evolution (R2-MOEA/D) algorithm is proposed by analyzing the roof weighting index. Firstly, the model defines the index attributes for the roof weighting state, establishes the roof index knowledge base, and calculates the

收稿日期:2020-12-09;**修回日期:**2021-06-28;**责任编辑:**张强。
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0808301);国家自然科学基金青年基金项目(51804248)。
作者简介:郝秦霞(1980—),女,陕西西安人,副教授,博士,研究方向为物联网应用、数据决策分析等,E-mail:haoqinxia@xust.edu.cn。通信作者:汪连连(1997—),女,陕西安康人,硕士研究生,研究方向为数据决策分析,E-mail:2284015992@qq.com。
引用格式:郝秦霞,汪连连,张金锁. 基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型[J]. 工矿自动化,2021,47(10):77-84.
HAO Qinxia, WANG Lianlian, ZHANG Jinsuo. Decision model of roof support based on R2-MOEA/D algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(10): 77-84.

conditional index in the knowledge base using analytic hierarchy process and entropy method, and obtains the subjective and objective weights of the index. Secondly, the model introduces the weight matrix on the basis of determining the subjective and objective weights to construct the roof multi-objective decision model which based on R2-MOEA/D algorithm. Finally, based on the R2-MOEA/D algorithm, the multi-objective problem is decomposed into multiple sub-problems, and the Chebyshev function is used as the R2 index ranking criterion for individual selection to obtain the Pareto optimal solution with better convergence and diversity, i. e., the conditional index roof case with the highest similarity. And its corresponding result attributes provide the support scheme for the decision of the accident case. The experimental results show that the R2-MOEA/D algorithm has the best overall effect in terms of the convergence and distribution of the data set compared with the NSGA2 algorithm, NSGA3 algorithm and RVEA algorithm, and improves the search capability in high-dimensional space. The feasibility evaluation of the decision model of roof support based on R2-MOEA/D algorithm is carried out through the roadway 2-6011 and roadway 10-4151 in Sanjiaohe Coal Mine, Huozhou, Shanxi. The results show that the solution retrieved by R2-MOEA/D algorithm is in line with the actual support situation of the coal mine.

Key words: roadway support; roof weighting; roof support; roof index knowledge base; R2-MOEA/D algorithm; comprehensive weight method; conditional index; result attribute

0 引言

在矿井深部开采中,顶板来压会造成岩层裂变,严重影响矿井安全生产^[1]。顶板来压受顶板强度、底板强度、煤体强度等多条件指标影响,因此,需要根据实际情况分析指标特征,建立顶板支护案例库,并对顶板来压的条件指标和结果属性进行形式化定义,以节省存储空间。为了实现顶板支护决策多指标的最优化,可以使用高维多目标优化算法对各项指标进行优化,构建巷道支护决策方案。

国内外许多学者对煤矿顶板安全支护决策进行了研究,并取得了一定的成果。I. Shafii 等^[2]提出了 CMRR(Coal Mine Roof Rating)指标,用于对顶板单元的水分敏感性、轴向强度和径向强度进行表征。J. Coggan 等^[3]对水平应力与煤矿顶板之间的关系进行了数值模拟计算。王志强等^[4]根据侧帮锚杆作用机理提出了联合支护技术。侯朝炯等^[5]提出了深部巷道破裂围岩浅孔封隙止浆和深孔减隙加固的注浆技术,使用该技术后巷旁充填体表面位移降低了 38%,围岩应力降低了 17.9%,水平应力偏移了 60°。王志强等^[6]采用 FLAC3D 数值模拟软件研究分析了上区段沿顶巷道侧帮锚索参数对侧向煤体应力分布和力学性质的影响,确定了合理的侧帮锚索和沿底巷道顶板支护参数。薛黎明等^[7]通过二维云发生器绘制出了围岩稳定性分级的二维云图,并通过 Apriori 算法进行关联挖掘,得到了围岩稳定性的综合等级决策表,建立了围岩稳定性的岩体及地质因素和工程因素二维分级指标体系。

刘海雁等^[8]采用正交数值模拟方法设置影响巷道稳定性的锚杆长度、顶角锚杆安装角度和预紧力的影响权重分别为 51.7%,45.8%和 2.5%,采用所提方法得到的优化支护方案应用效果良好。冯友良等^[9]基于 RSM-BBD 试验设计与离散元法研究了巷帮失稳关键因素及其控制技术,实验结论表明单一因素及其各自之间交互作用都会影响巷帮稳定性,并且 RSM-BBD 试验设计与离散元法可显著改善巷帮煤体失稳问题。煤矿顶板支护系统已有初步模型^[10],但现有的支护方法效果却不尽如人意,主要存在以下问题:

(1) 顶板来压受复杂因素的相互影响、相互制约,现有决策方法或片面分析安全因素,或引用专家意见,或对指标客观赋予权重,不同指标对顶板事故的影响程度未能分配有效的权重系数。

(2) 顶板案例库涉及事故指标多样,进行案例决策属于高维多目标问题,而现有决策结果不能满足实际需求。

针对以上问题,笔者对顶板来压的指标进行分析,构建了基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型,并进行了案例相似度计算,为顶板事故快速决策提供有效方法。

1 顶板来压指标选取

以《煤矿支护手册》设定的巷道支护形式与参数选择为基础,结合《回采巷道支护形式与参数合理选择专家系统》建立顶板来压指标知识库 M ,见表 1。 $M=\{m_1, m_2, \cdots, m_n\}$, $m_i(i=1, 2, \cdots, n, n$ 为指标个数)表示案例的第 i 个指标。顶板指标知识库 M 包

含顶板来压条件指标和结果属性 2 个部分,事故案例是以条件指标作为判断依据,以结果属性作为顶板支护方案。在案例决策中匹配相似度最高的案例

时,仅以条件指标值作为多目标决策的相似度计算依据,将匹配相似度最高的条件指标值所对应的结果属性值作为顶板支护方案。

表 1 顶板指标知识库 M
Table 1 Roof index knowledge base M

条件指标													结果属性									
m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}	m_{15}	m_{16}	m_{17}	m_{18}	m_{19}	m_{20}	m_{21}	m_{22}	
顶板强度	煤体强度	底板强度	直接顶初次垮落步距	巷道埋深	巷道高度	巷道宽度	顶高比	护巷煤柱宽度	最大水平主应力	采高	煤层倾向	巷道底板距煤层底板距离	支护方式	顶锚杆长度	顶锚杆直径	顶锚杆间距	顶锚杆排距	帮锚杆长度	帮锚杆直径	帮锚杆间距	帮锚杆排距	

2 基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型构建

2.1 模型构建

为实现顶板支护案例决策结果的最优化,首先利用层次分析法和熵值法对知识库中的条件指标进行计算,分别得到指标的主观权重和客观权重,在确定主观、客观权重的基础上引入离差函数,得到各项指标的混离差权重;接着优化差分进化算法,提出 R2-MOEA/D 算法,应用切比雪夫公式将多目标问题分解成多个子问题,每个子问题在邻域范围内交叉、变异,利用切比雪夫函数作为 R2 指标排序标准来进行个体选择,得到收敛性和多样性^[11-12]较好的 Pareto 最优解,即相似度最高的条件指标顶板案例,其对应的结果属性为事故案例的决策提供了支护方案。基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型的整体流程如图 1 所示。

2.2 权重分配

条件指标权重一般是通过客观权重或主观权重确定,但客观权重未根据实际情况考虑现场专家的意见,主观权重仅考虑专家意见,未考虑以往的历史经验。因此,本文在此基础上引入离差函数来平衡主观、客观条件指标值,得到指标的综合权重。综合权重算法步骤如下:

(1) 通过熵值法得到指标的客观权重,熵值越小,信息的不确定性也就越小,权重越大。第 i 个条件指标的权重 v_i 的计算公式为

$$v_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \tag{1}$$

$$H_i = -\frac{1}{\ln c} \sum_{t=1}^c \frac{x_{ti}}{\sum_{i=1}^c x_{ti}} \ln \frac{x_{ti}}{\sum_{i=1}^c x_{ti}} \tag{2}$$

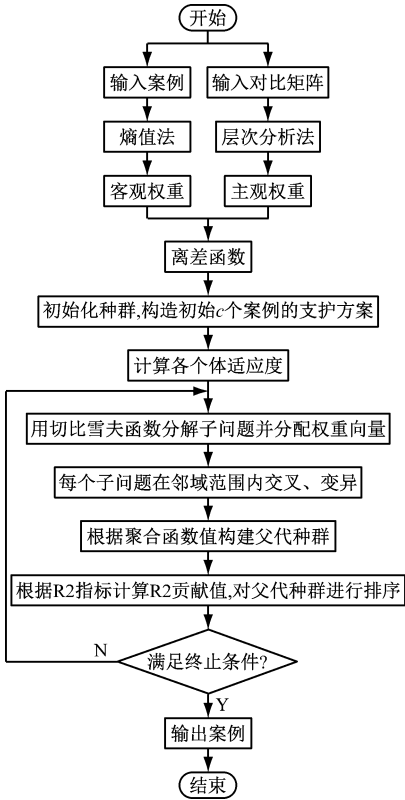


图 1 基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型流程
Fig. 1 Flow of decision model of roof support based on R2-MOEA/D algorithm

$$x''_{ti} = \frac{x_{ti} - \min(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ci})}{\max(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ci}) - \min(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ci})} \tag{3}$$

式中: H_i 为第 i 个条件指标的信息熵; c 为案例个数; x_{ti} 为第 $t(t=1, 2, \dots, c)$ 个案例的第 i 个属性指标值; x''_{ti} 为经过归一化后的第 t 个案例的第 i 个属性指标值。

(2) 利用层次分析法求得条件指标的主观权重^[13],构造判断矩阵 A ,判断矩阵 A 由 a_{pi} 构成, a_{pi} 为第 $p(p=1, 2, \dots, P, P$ 为专家人数)个专家对

第 i 个指标赋予的权重,按照《数值的设定标准群》^[13]构造,计算一致性比例 CR,当 CR 小于 0.01 时,CR 的最大特征值 $\gamma_{\max}$ 对应的特征向量 $\mathbf{u}_i$ 就是指标的权重值。CR 计算公式为

$$\text{CR} = \frac{\gamma_{\max} - n}{(n - 1) \times \text{RI}} \tag{4}$$

$$\gamma_{\max} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \frac{\sum_{j=1}^n a_{ji} u_i}{u} \tag{5}$$

表 2 RI 数值
Table 2 RI values

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

为了充分考虑主观、客观因素,将熵值法和层次分析法得到的权重引入离差信息得到条件指标的综合权重: $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, w_i 表示第 i 个条件指标的权重。综合权重与主观、客观权重总的离差和最小,说明主观、客观因素考虑越充分,因此构造混合离差函数模型:

$$\begin{aligned} F = \min_{\mu} & \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n [(\mathbf{w}_i - \mathbf{u}_i) x_{ij}]^2 + \\ & (1 - \mu) \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n [(\mathbf{w}_i - \mathbf{v}_i) x_{ij}]^2 \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0, i \in n \end{aligned} \tag{7}$$

式中 μ 表示离差函数的偏好因子,为主观权重占比, $(1 - \mu)$ 为客观权重占比。

2.3 R2-MOEA/D 算法

R2-MOEA/D 算法利用非支配解指导种群的进化,首先在目标空间中随机产生 h 个初始种群 $\{x_1, x_2, \dots, x_h\}$,并生成 N 个均匀分布参考权重向量 $\lambda, \lambda \in [0, 1]$,根据 R2-MOEA/D 算法对父代种群进行变异、交叉等一系列操作,产生子代种群,将子代种群与父代种群合并,在合并种群中,引入 R2 指标进行环境选择,利用 R2 贡献值进行 R2 排序,从合并种群中选择 h 个个体 x 进入下一代,进行多次迭代后或者满足算法结束条件后所得到的解就为最终的顶板支护决策方案,即相似度最高的条件指标顶板案例所对应的结果属性值,其详细步骤如下:

(1) 首先在目标空间中随机产生 h 个初始种群 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_h\}$,并生成 N 个均匀分布参考权重向量 λ ,引入切比雪夫公式,将高维多目标优化问题分解成多个单目标子问题。切比雪夫公式为

$$\begin{aligned} \min g^w(x \mid \lambda, w^*) &= \max_{1 \leq i \leq n} \{\lambda_i \mid f_i(x) - w_i^*\} \\ \text{subject to } &x \in \Omega \end{aligned} \tag{8}$$

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_{pi}}{\sum_{p=1}^P a_{pi}}}{\sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^n \frac{a_{pi}}{\sum_{p=1}^P a_{pi}}} \tag{6}$$

式中 RI 为平均随机一致性指标,可通过查询表 2 获得。

$w^* = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\}$,对于 $\wedge i = 1, 2, \dots, n$, 都有 $w_i^* = \min \{f_i(x) \mid x \in \Omega\}$ (Ω 为任一实数), $f_i(x)$ 为第 i 个目标优化的子问题,所有单目标优化子问题的最优解的集合可以看作是多目标优化问题 Pareto 解集的近似,只要改变 λ 的值,就能得到不同单目标问题的最优解^[14-15],也即对于每一个 Pareto 最优解 w^* ,总存在一个权重向量 λ 使得式(8)的解是一个 Pareto 最优解。

(2) 利用欧氏距离选取距离权重向量最近的 T 个权重向量, $D(d) = \{d_1, d_2, \dots, d_T\}$,随机从 $D(d)$ 中随机选取 2 个序号 k, l 作为父代种群,利用遗传算子产生一个新解 y 为子代,并将子代与父代进行合并,引入 R2 指标来判定 2 个个体 x_1, x_2 的优劣,计算个体的 R2 贡献值,保留 R2 贡献值较大的个体进入下一代循环,保证种群的数目为 h ,以便引导种群的进化。

个体 x_1 的 R2 指标公式为

$$\text{R2}(x_1, \lambda, w^*) = \frac{1}{|\lambda_i|} \sum_{i=1}^n (\min \{ \max_{i \in 1, 2, \dots, n} \lambda_i \mid f_i(x_1) - w_i^* \}) \tag{9}$$

个体 x_1 的 R2 的贡献值为

$$C_{R2}(x_1, \lambda) = \text{R2}(x_1, \lambda, w^*) - \text{R2}(X / \{x_1\}, \lambda, w^*) \tag{10}$$

(3) 将最优解 w^* 对应的 w_i 代入相似性公式中进行全局搜索,得到相似度最高的条件指标顶板案例。相似性公式为

$$\begin{aligned} F_2 = \min & \sqrt{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n w_i (x_{ij} - x'_{ij})^2} \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0, i \in n \end{aligned} \tag{11}$$

3 实验与结果分析

3.1 评价指标

为了检验 R2-MOEA/D 算法的性能,本文使

用目前主流的NSGA2、NSGA3、RVEA算法分别与R2-MOEA/D算法进行收敛性和多样性的分析,评价方法选择了GD(Generational Distance,世代距离)和IGD(Inverted Generational Distance,反转世代距离)^[16]。将收敛性和综合性作为评价标准,GD用于检验算法在优化过程中种群收敛的能力,表示解集中的每个点到参考集中点的平均最小距离,GD值越小,说明收敛性越好。IGD表示每个参考点到最近解的距离的平均值,IGD值越小,说明算法综合性能越好,整体效果更好。

3.1.1 测试函数

DTLZ1—DTLZ7 是用于评价高维 MOEAs 性

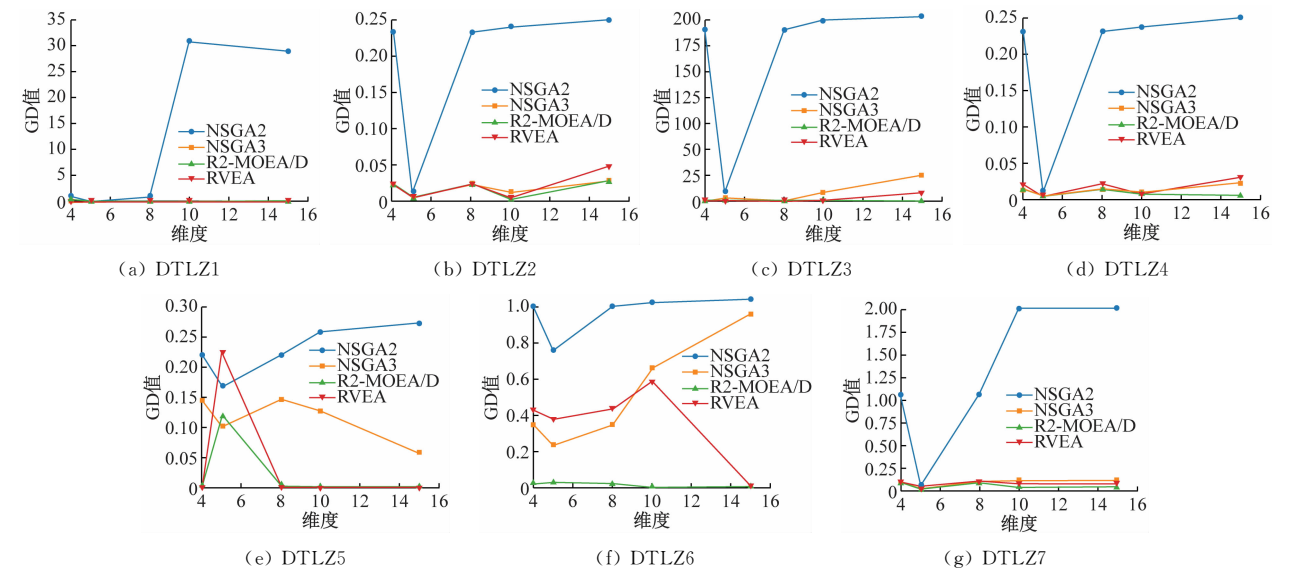


图2 测试函数为DTLZ1—DTLZ7时4种算法的GD值比较

Fig. 2 GD values comparison of four kinds of algorithm when the test function is DTLZ1-DTLZ7

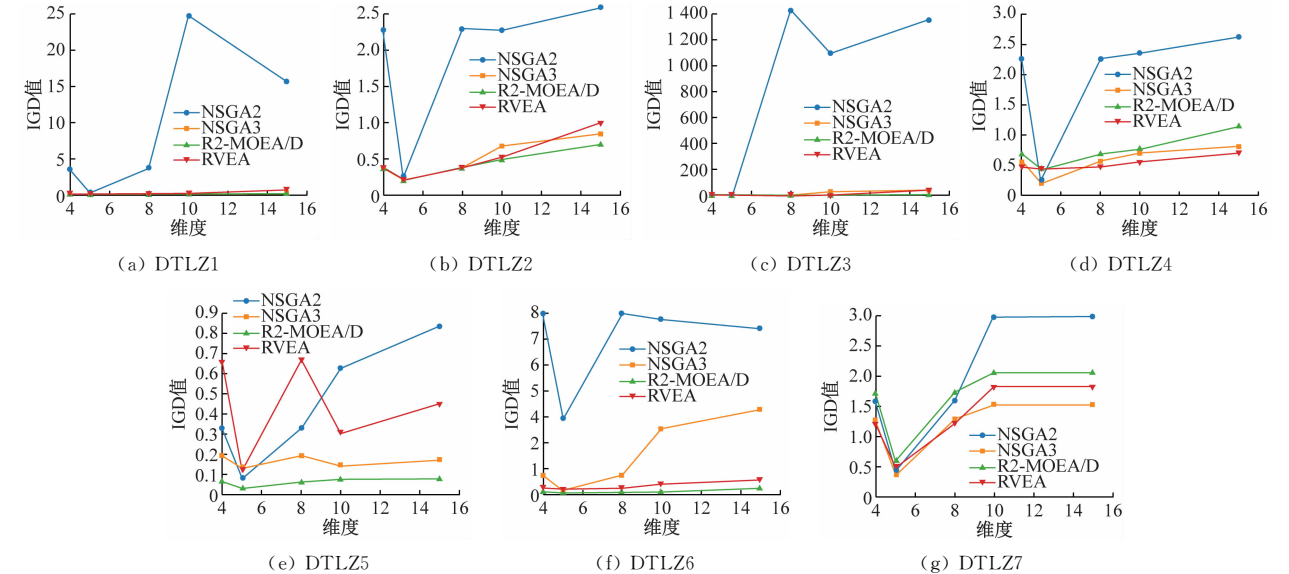


图3 测试函数为DTLZ1—DTLZ7时4种算法的IGD值比较

Fig. 3 IGD values comparison of four kinds of algorithm when the test function is DTLZ1-DTLZ7

从图2可看出,在测试函数DTLZ1—DTLZ7上,随着维度的增加,NSGA2、NSGA3、RVEA算法

能最广泛的测试集之一,目标个数可以任意设置,并且具有线性、凸凹面、多峰性、退化性及连续、非连续性等特征^[17],因而,实验采用DTLZ1—DTLZ7进行算法对比分析。在一个给定的M目标测试中,测试问题划分为4,5,8,10,15目标时,即 $m \in \{4, 5, 8, 10, 15\}$,为保证算法的公正性,按照文献^[18]对实验参数进行设置。

3.1.2 结果对比分析

为了直观地比较各算法的性能,在4,5,8,10,15维下,采用测试函数DTLZ1—DTLZ7,将NSGA2、NSGA3、RVEA算法与R2-MOEA/D算法进行对比,其GD值、IGD值比较如图2、图3所示。

的GD值也不断增加,算法的收敛性能降低,R2-MOEA/D算法的GD值随着维度的变化而缓

慢变化,其 GD 值在同一维度下的同一测试函数上低于其他 3 种算法,并且当测试函数为 DTLZ1、DTLZ5、DTLZ7 时,R2-MOEA/D 算法在 10,15 维上的 GD 值最小,其数据的收敛性最优,在维度为 5 时,其性能仅次于最优;当测试函数为 DTLZ2、DTLZ3、DTLZ4 和 DTLZ6 时,R2-MOEA/D 算法在 5,10,15 维上拥有最小的 GD 值,其数据的收敛性最优。总体来看,R2-MOEA/D 算法的收敛性能优于其他 3 种算法。

从图 3 可看出,在测试函数 DTLZ1—DTLZ7 上,随着维度的增加,NSGA2、NSGA3、RVEA 算法的 IGD 值也不断增加,算法的收敛性和多样性降低。R2-MOEA/D 算法的 IGD 值随着维度的变化而缓慢变化,并当测试函数为 DTLZ1、DTLZ3、DTLZ5、DTLZ6 时,R2-MOEA/D 算法在 5,10,15 维上 IGD 值均最小,表明 R2-MOEA/D 算法的多样性表现最优;当测试函数为 DTLZ2 时,R2-MOEA/D 算法在 10,15 维上有最小的 IGD 值,当数据维度为 5 时,NSGA3 算法有最小 IGD 值,算法的多样性最优,R2-MOEA/D 算法仅次于 NSGA3 算法;当测试函数为 DTLZ4 和 DTLZ7 时,R2-MOEA/D 算法性能稍差,其 IGD 值与最小

IGD 值相差不大。总体来看,R2-MOEA/D 算法的性能优于 NSGA2、NSGA3 和 RVEA 算法。

3.2 实例分析

通过山西霍州矿区三交河煤矿 2-6011 巷道和 10-4151 巷道来综合评定模型的可行性。具体建模步骤如下:

(1) 收集来自山西霍州矿区三交河煤矿、辛置煤矿、李雅庄煤矿,河北邯郸矿业云驾岭煤矿,山西汾西矿业新柳煤矿的地质信息,提取其中的条件指标数据和结果属性指标数据^[19],构建顶板支护知识库,采用 R2-MOEA/D 算法对条件指标进行组合赋权并进行知识库案例检索,得到适合当前案例的解决方案。

(2) 通过熵值法得到各条件指标的权重,见表 3。

(3) 通过层次分析法得到各条件指标的权重,见表 4。

(4) 引入 R2-MOEA/D 算法对综合权重进行优化并检索出适合当前案例的解决方案,通过选取 R2-MOEA/D 中的 6 条最优解得到各指标的权重,见表 5。

表 3 熵值法指标权重

Table 3 Index weight of entropy method

m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}
0.090 2	0.012 0	0.074 1	0.024 3	0.604 0	0.003 5	0.004 4	0	0.120 6	0.031 2	0.009 1	0.021 2	0.005 3

表 4 层次分析法指标权重

Table 4 Index weight of AHP

m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}
0.047 3	0.094 5	0.047 3	0.094 5	0.015 8	0.110 5	0.110 5	0.110 5	0.022 6	0.094 5	0.110 5	0.047 3	0.094 5

表 5 R2-MOEA/D 指标权重

Table 5 Index weight of R2-MOEA/D

μ	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}
0.590 5	0.064 9	0.060 7	0.058 7	0.065 1	0.262 5	0.067 7	0.065 6	0.064 0	0.063 7	0.068 2	0.069 1	0.036 3	0.057 2
0.282 9	0.717 8	0.078 0	0.035 6	0.066 4	0.044 1	0.437 7	0.033 4	0.034 8	0.030 9	0.093 0	0.049 2	0.037 8	0.028 5
0.554 9	0.066 3	0.057 7	0.059 2	0.063 2	0.277 7	0.062 9	0.063 3	0.061 3	0.066 6	0.066 7	0.065 2	0.035 7	0.054 5
0.798 7	0.055 9	0.077 3	0.052 9	0.081 3	0.134 1	0.086 7	0.089 3	0.087 9	0.042 3	0.081 8	0.090 1	0.041 3	0.079 3
0.758 1	0.058 0	0.074 5	0.053 6	0.077 5	0.158 1	0.084 6	0.084 4	0.083 8	0.046 2	0.079 2	0.086 0	0.041 0	0.073 1
0.794 7	0.056 0	0.079 1	0.052 6	0.081 8	0.136 3	0.088 4	0.089 7	0.087 4	0.042 2	0.081 2	0.089 2	0.041 8	0.075 3

(5) 选取 R2-MOEA/D 权重的第 1 行,即当主观权重与客观权重所占整体权重的比例为 0.590 5:0.409 5 时所得到的综合权重,利用 R2-MOEA/D 算法得到 2-6011 巷道和 10-4151 巷道的支护方案,见表 6、表 7。

将所得支护方案与实际支护情况比较可知,由 R2-MOEA/D 算法检索出的解决方案符合当前案例的支护情况,证明了基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型的可行性。

表 6 2-6011 巷道锚杆支护情况

	Table 6 Bolt support of 2-6011 roadway								m
	m_{14}	m_{15}	m_{16}	m_{17}	m_{18}	m_{19}	m_{20}	m_{21}	m_{22}
锚杆支护	2.0	18	0.9	1.2	1.0	14.6	1.1	1.5	
锚杆支护	2.5	20	0.9	1.2	2.5	20	0.9	1.2	
锚杆支护	2.5	20	0.9	1.2	2.5	20	0.9	1.2	

表 7 10-4151 巷道锚杆支护情况

	Table 7 Bolt support of 10-4151 roadway								m
	m_{14}	m_{15}	m_{16}	m_{17}	m_{18}	m_{19}	m_{20}	m_{21}	m_{22}
锚杆支护	2.0	18	0.8	1.00	2.0	18	0.8	1.00	
锚杆支护	2.5	20	0.9	1.00	2.5	20	0.9	1.00	
锚杆支护	2.5	22	0.9	0.95	2.5	22	0.9	0.95	

4 结论

(1) 提出了一种基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型。首先对顶板来压的指标进行分析,构建顶板指标知识库,使用熵值法确定客观权重,层次分析法确定主观权重;然后为平衡主观、客观权重对指标选择的影响,引入离差函数设计混离差权重矩阵,差分高维多目标进化算法,在引入混离差权重后,对高维多目标问题进行分解,对进化算子进行交叉、变异;最后利用 R2 指标对结果集进行排序,得到收敛性与多样性分布较好的 Pareto 解集,即匹配度高的实时顶板支护决策方案。

(2) 回采巷道支护方式受许多因素影响,而不同因素对支护效果影响不同,通过组合赋权法,引入离差函数确定指标权重,综合考虑客观因素和主观因素的影响,能够给每个条件指标赋予不同的权重,使不同条件指标对煤矿回采巷道支护效果的影响占据不同的权重,使实验结果更加合理准确。

(3) 将 R2-MOEA/D 算法与 NSGA2、NSGA3、RVEA 算法进行比较,使用 GD 值和 IGD 值对收敛性和多样性进行评判,结果表明:R2-MOEA/D 算法能够得到更优的 Pareto 解集。

(4) 在案例检索时,使用 R2-MOEA/D 算法计算其适应度值,在全局范围内检索满足适应度条件的解决方案,通过三交河煤矿 2-6011 巷道和 10-4151 巷道对基于 R2-MOEA/D 算法的顶板支护决策模型进行可行性评定,结果表明:该模型可根据顶板指标建立实时、有效的顶板支护决策方案,由 R2-MOEA/D 算法检索出的解决方案能够符合目标案例的支护情况,证明了该模型的可行性。

参考文献 (References):

[1] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京:科学出版

社,2000.

FENG Xiating. Introduction to intelligent rock mechanics[M]. Beijing:Science Press,2000.

[2] SHAFII I, OSOULI A. Reliability of coal mine roof rating in mining applications [C]// IFCEE 2015, Geotechnical Special Publication;2058-2067.

[3] COGGAN J, GAO F, STEAD D, et al. Numerical modelling of the effects of weak immediate roof lithology on coal mine roadway stability [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 90-91: 100-109.

[4] 王志强,苏越,苏泽华,等. 外错式区段间相邻巷道锚杆联合支护作用机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021,38(1):58-67.

WANG Zhiqiang, SU Yue, SU Zehua, et al. Mechanism of combined support by bolts for adjacent roadways in the external-staggered split-level panel layout [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021,38(1):58-67.

[5] 侯朝炯,王襄禹,柏建彪,等. 深部巷道围岩稳定性控制的基本理论与技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021,50(1):1-12.

HOU Chaojiong, WANG Xiangyu, BAI Jianbiao, et al. Research on basic theory and technology of stability control of surrounding rocks in deep roadways [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2021,50(1):1-12.

[6] 王志强,苏越,苏泽华,等. 区段间相邻巷道锚杆-锚索联合支护协调作用机理研究[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(6):1152-1161.

WANG Zhiqiang, SU Yue, SU Zehua, et al. Coordination mechanism of bolt-cable combined support between adjacent roadway sections [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6):1152-1161.

[7] 薛黎明,李长明,郑志学,等. 基于二维云模型和 Apriori 算法的围岩稳定性分级研究[J]. 铁道学报, 2020,42(6):121-128.

XUE Liming, LI Changming, ZHENG Zhixue, et al. Classification of stability of surrounding rock based on two-dimensional cloud and Apriori [J]. Journal of the China Railway Society,2020,42(6):121-128.

[8] 刘海雁,左建平,刘德军,等. 基于正交矩阵分析的巷道锚杆支护优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1):84-93.

LIU Haiyan, ZUO Jianping, LIU Dejun, et al. Optimization of roadway bolt support based on orthogonal matrix analysis [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(1):84-93.

- [9] 冯友良,鞠文君. 基于 RSM-BBD 的煤巷开挖帮部失稳关键因素与控制技术离散元分析[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(4):707-714.
- FENG Youliang, JU Wenjun. Discrete element analysis of the key influence factors and control technology of coal roadway sidewall instability for excavation based on RSM-BBD design [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(4):707-714.
- [10] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(1):1-30.
- KANG Hongpu. 70-year development and prospect of surrounding rock control technology in coal mine roadway in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(1):1-30.
- [11] CAMPELO F, BATISTA L S, ARANHA C. The MOEADr package:a component-based framework for multiobjective evolutionary algorithms based on decomposition[J]. Journal of Statistical Software, 2020,92(6). DOI:10.18637/jss.v092.i06.
- [12] LI H, ZHANG Q. Multi-objective optimization problems with complicated pareto sets,MOEA/D and NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2009,13(2):284-302.
- [13] 李俊杰,程婉静,梁媚,等. 基于熵权-层次分析法的中国现代煤化工行业可持续发展综合评价[J]. 化工进展,2020,39(4):1329-1338.
- LI Junjie, CHENG Wanjing, LIANG Mei, et al. Comprehensive evaluation on sustainable development of China's advanced coal to chemicals industry based on EWM-AHP [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2020,39(4):1329-1338.
- [14] 赵辉,王天龙,刘衍舟,等. 基于分解和支配关系的超多目标进化算法[J]. 电子与信息学报,2020(8):1975-1981.
- ZHAO Hui, WANG Tianlong, LIU Yanzhou, et al. Decomposition and dominance relation based many-objective evolutionary algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020(8):1975-1981.
- [15] TAN Y Y, JIAO Y C. MOEA/D with uniform design for solving multiobjective knapsack problems [J]. Journal of Computers,2013,8(2):302-307.
- [16] ZHANG Qingfu, LI Hui, DIETMAR M, et al. MOEA/D with NBI-like tchebycheff approach for portfolio management [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Barcelona, 2010:1-8.
- [17] 刘元,郑金华,邹娟,等. 基于邻域竞赛的多目标优化算法[J]. 自动化学报,2018,44(7):1304-1320.
- LIU Yuan, ZHENG Jinhua, ZOU Juan, et al. Evolutionary algorithm based on neighborhood competition for multi-objective optimization[J]. Acta Automatica Sinica,2018,44(7):1304-1320.
- [18] LI L, UMBACH D M, TERRY P, et al. Application of the GA/KNN method to SELDI proteomics data[J]. Bioinformatics,2004,20(10):1638-1640.
- [19] 廖敬龙,蔺增元,杨波,等. 大断面层状顶板巷道冒顶事故分析及支护措施[J]. 煤矿安全,2012,43(10):195-197.
- LIAO Jinglong, LIN Zengyuan, YANG Bo, et al. Roof fall accidents analysis and support countermeasure in large section bedded roof roadway[J]. Safety in Coal Mines,2012,43(10):195-197.