

文章编号: 1001-0920(2017)01-0031-08

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.1516

混合比较区间多目标进化优化及在矿井 RFID 布局的应用

孙晓燕^{1,2}, 张鹏飞^{1†}, 陈 杨¹, 时良振¹

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008;

2. 中国矿业大学 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 高效的区间 Pareto 支配比较对于提高区间多目标进化优化算法性能至关重要. 针对现有的区间多目标进化优化采用单一区间数比较的不足, 提出基于混合比较策略的区间多目标进化优化算法. 深入分析区间数 μ 比较和可能度 P 比较策略的优劣, 提出融合这两种方法的混合比较策略和基于该混合策略的 NSGA-II 算法. 该算法在典型多目标区间函数和含区间不确定性的煤矿井下射频识别阅读器布局中的应用, 验证了所提出的混合区间比较策略的有效性.

关键词: 多目标; 进化优化; 区间不确定; 混合比较; 射频识别; 布局

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Interval multi-objective evolutionary algorithm with hybrid rankings and application in RFID location of underground mine

SUN Xiao-yan^{1,2}, ZHANG Peng-fei^{1†}, CHEN Yang¹, SHI Liang-zhen¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Jiangsu Province Laboratory of Electrical and Automation Engineering for Coal Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Ranking strategies among interval values are more critical for obtaining superior Pareto front with better spread, distribution and approximation. Most current interval evolutionary multi-objective optimizations(EMOs) adopt only one interval ranking method, which is difficult to entirely cover the interval information. Accordingly, an interval EMO with the improved hybrid ranking strategy is proposed, in which two different interval comparison metrics, i.e., μ and P are complements. Then, Pareto dominance for $\mu \oplus P$ ranking is defined and employed to the powerful NSGA-II algorithm for optimizing interval multi-objective problems. The proposed algorithm is applied to benchmark functions and then further to RFID location in underground mine circumstances, and its outstanding performance is experimentally demonstrated.

Keywords: multi-objective; evolutionary optimization; interval uncertainty; hybrid ranking; RFID; locaion

0 引 言

当优化问题的目标个数超过两个且目标间存在冲突时, 称之为多目标优化问题. 基于 Pareto 支配概念的多目标进化优化算法是解决该类问题的有效方法之一, 并已获得广泛关注^[1]. 该类算法包括矢量评价遗传算法^[2]、非被占优排序遗传算法(NSGA)^[3]、改进的 NSGA-II^[4]和基于分解的多目标进化优化算法^[5]等. 实际上, 大量多目标优化问题往往由于参数的不确定性, 使得目标含有不确定性, 此类问题即为不确定多目标优化问题. 当优化问题中因含有区间参数使

得目标取值为区间时, 该类问题称为区间多目标优化问题.

目前, 主要有两种求解上述区间不确定多目标问题的进化优化策略: 一是利用区间数端点或中点等将区间值目标转化为确定型目标, 然后采用已有多目标进化优化算法进行求解; 二是提出基于区间数优劣比较的 Pareto 支配比较方法和反映区间特性的性能指标, 设计基于上述策略和指标的多目标进化优化算法. 在将区间多目标优化转化为精确值多目标优化时, 无论利用中点还是宽度将区间不确定多目标问题

收稿日期: 2015-12-08; 修回日期: 2016-03-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473298); 江苏省六大人才高峰项目(ZNDW-004).

作者简介: 孙晓燕(1978—), 女, 教授, 博士生导师, 从事多目标优化、交互式进化优化等研究; 张鹏飞(1992—), 男, 硕士生, 从事多目标优化的研究.

†通信作者. E-mail: 1159089024@qq.com

转化成精确值确定型多目标优化问题,都会丢失区间数自身的大量信息,所得结果不能真实反映目标的不确定性^[6].基于区间 Pareto 支配比较的多目标进化优化算法可通过定义区间数大小比较的方法直接获得区间 Pareto 序关系和 Pareto 区间前沿,丢失信息相对较少.Limbourg 等针对目标函数含有噪声的多目标优化问题,利用区间表示不确定目标函数值,定义了区间向量偏序关系并用于优化解分布性、逼近性判断的超体积测度,给出了解决该类问题的进化优化方法(IP-MOEA)^[7];此外,Gong 等^[8]提出了基于拥挤距离和区间 Pareto 支配的区间参数的多目标进化优化方法;张勇等^[9]提出了一种基于概率支配的多目标微粒群优化算法,通过定义概率支配关系比较所得解的优劣.在上述算法中,如何设计区间数的比较策略至关重要.

在区间分析中已有较多区间数比较策略:第 1 类是利用区间数的中点、宽度或者端点值作为区间数大小比较准则^[10],以获得区间数之间的序关系,这类方法计算量小,比较简单,但其比较的精度较低;第 2 类是区间加权比较方法^[11],即引入加权算子计算区间端点和宽度的加权和,从而实现对区间数的比较,该类方法的计算量小,简单易懂,但是其加权系数的取值会极大地影响比较结果,具有极大的主观性和不确定性,增加了实际应用的难度;第 3 类是根据可能度、相似度或者贴进度等定义对区间数进行比较,该方法在基于区间数排序的不确定多准则决策中得到了广泛的关注和应用^[12].可能度的含义即是假设区间 $\tilde{a} = [a, \bar{a}]$ 和 $\tilde{b} = [b, \bar{b}]$ 的取值服从均匀分布,从这两区间内随机地选取 u 和 v ,那么 $u > v$ 的概率即为 \tilde{a} 大于 \tilde{b} 的可能度 $P(\tilde{a} \succ \tilde{b})$.因为基于可能度的排序方法同时考虑了区间中点和宽度信息,故其丢失的区间信息量最小,但该方法可能在有些区域无法实现对区间优劣的比较.

不同区间比较方法各有优劣,而已有区间多目标进化优化的研究均采用单一的区间数比较机制,导致信息丢失、某些区域的区分度较低等问题,从而影响了 Pareto 区间支配比较的性能,非常不利于进化搜索,极大地影响了所得优化解的性能.若能融合多种区间数比较策略,取长补短,增强比较的区分度,并结合进化优化的特点设计混合区间比较机制,则有望提高区间多目标 Pareto 支配比较的效率,改进当前区间多目标进化优化算法的性能.鉴于此,本文提出一种含混合区间比较策略的多目标进化优化方法以求解区间多目标优化问题.通过深入分析两种涵盖较多区间信息的区间数比较方法的特点,结合进化优化的特点,提出一种针对区间数的混合比较策略;将该比较方法

应用于 NSGA-II 多目标算法框架中,直接求解区间多目标优化问题;将所提出算法分别应用于典型多目标区间函数和含区间不确定性的煤矿井下射频识别阅读器布局,以验证算法的有效性.

1 两种可能度准则—— μ 准则和 P 准则对比分析

由于基于可能度定义的区间数排序得到了更多的关注和应用,本文也将重点利用两种可能度定义准则,分别称之为 μ 准则和 P 准则,并对其特性进行深入分析.

1.1 μ 准则

不失一般性,考虑如下含区间不确定性的最小化问题:

$$\begin{cases} \min \tilde{F}(X, C) = \\ \quad (\tilde{f}_1(X, C), \tilde{f}_2(X, C), \dots, \tilde{f}_m(X, C)). \\ \text{s.t. } X \in S \subset R^n; \\ \quad C = (c_1, c_2, \dots, c_l)^T, c_k = [\underline{c}_k, \bar{c}_k], \\ \quad k = 1, 2, \dots, l. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in S \subset R^n$ 为 n 维决策矢量, S 为 n 维决策空间; C 为含有 l 个元素的区间向量参数, c_k 为 C 的第 k 个分量, \underline{c}_k 和 \bar{c}_k 分别为 c_k 的下限和上限.该优化问题的第 i 个优化目标 $\tilde{f}_i(X, C)$ 由于参数向量 C 的区间特性使得该目标值为区间值,记为 $\tilde{f}_i(X, C) = [\underline{f}_i(X, C), \bar{f}_i(X, C)]$.

考虑区间数 \tilde{a} 和 \tilde{b} , 利用区间中点 $m(\cdot)$ 、宽度 $w(\cdot)$ 和 μ 准则定义下式:

$$\mu(\tilde{a}, \tilde{b}) = \begin{cases} m(\tilde{b}) - m(\tilde{a}) + 2\text{sgn}(m(\tilde{b}) - m(\tilde{a})), \\ w(\tilde{a}) + w(\tilde{b}) = 0; \\ \frac{m(\tilde{b}) - m(\tilde{a})}{w(\tilde{a}) + w(\tilde{b})} + \text{sgn}(m(\tilde{b}) - m(\tilde{a})), \\ (m(\tilde{b}) \neq m(\tilde{a})) \cap (w(\tilde{a}) + w(\tilde{b}) \neq 0); \\ \frac{w(\tilde{b}) - w(\tilde{a})}{\max\{w(\tilde{a}), w(\tilde{b})\}}, \\ (m(\tilde{b}) = m(\tilde{a})) \cap (w(\tilde{a}) + w(\tilde{b}) \neq 0). \end{cases} \quad (2)$$

基于上述 μ 值,区间数 \tilde{a} 和 \tilde{b} 的 μ 序关系如下:

$$\begin{cases} \tilde{a} \prec_{\mu} \tilde{b}, \mu(\tilde{a}, \tilde{b}) > 0; \\ \tilde{a} =_{\mu} \tilde{b}, \mu(\tilde{a}, \tilde{b}) = 0; \\ \tilde{a} \succ_{\mu} \tilde{b}, \mu(\tilde{a}, \tilde{b}) < 0. \end{cases} \quad (3)$$

1.2 P 准则

对于区间数 \tilde{a} 和 \tilde{b} , 这里考虑两者可能具有的 6 种相对位置关系,给出 $P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b})$ 的可能度定义^[12]如下:

$$P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) = \begin{cases} 0, & \underline{b} \leq \underline{\tilde{b}} \leq \underline{a} \leq \bar{a}; \\ \frac{(\bar{b} - \underline{a})^2}{2w(\tilde{a})w(\tilde{b})}, & \underline{b} \leq \underline{a} < \bar{b} \leq \bar{a}; \\ \frac{2\bar{b} - \underline{a} - \underline{\tilde{b}}}{2w(\tilde{b})}, & \underline{b} \leq \underline{a} \leq \bar{a} < \bar{b}; \\ \frac{\bar{b} + \underline{b} - 2\underline{a}}{2w(\tilde{a})}, & \underline{a} \leq \underline{b} \leq \bar{b} \leq \bar{a}; \\ 1 - \frac{(\bar{a} - \underline{b})^2}{2w(\tilde{a})w(\tilde{b})}, & \underline{a} < \underline{b} \leq \bar{a} \leq \bar{b}; \\ 1, & \underline{a} < \bar{a} < \underline{b} < \bar{b}. \end{cases} \quad (4)$$

区间数 \tilde{a} 和 \tilde{b} 的 P 可能度序关系如下:

$$\begin{cases} \tilde{a} \prec_p \tilde{b}, & P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) > 0.5; \\ \tilde{a} =_p \tilde{b}, & P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) = 0.5; \\ \tilde{a} \succ_p \tilde{b}, & P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) < 0.5. \end{cases} \quad (5)$$

1.3 μ 准则与 P 准则的对比分析

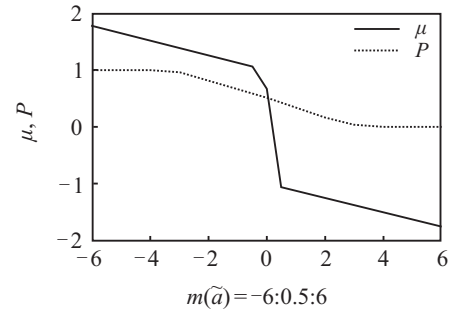
比较式(2)和(4)可知, μ 准则计算简单易用. 为了更进一步直观地比较两种区间数排序方法的特点, 这里给出在4种不同情况下 $\mu(\tilde{a}, \tilde{b})$ 和 $P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b})$ 的变化曲线, 如图1(a)~图1(d)所示.

在图1(a)中, $w(\tilde{a}) = 2, w(\tilde{b}) = 6, m(\tilde{b}) = 0$; 在图1(b)中, $m(\tilde{a}) = 0, m(\tilde{b}) = 0, w(\tilde{b}) = 6$; 在图1(c)中, $m(\tilde{a}) = 4, m(\tilde{b}) = 2, w(\tilde{b}) = 6$; 在图1(d)中, $m(\tilde{a}) = 0, m(\tilde{b}) = 2, w(\tilde{b}) = 6$. 从图1中可以得出如下结论:

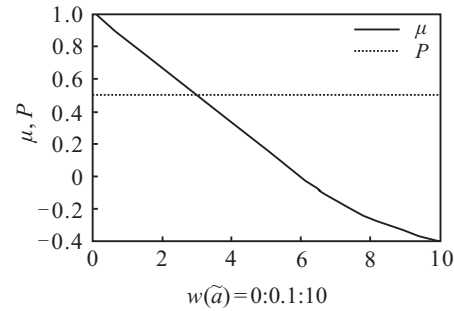
1) 由图1(a)可知, 在 $\bar{b} \leq \underline{a}$ 或者 $\bar{a} < \underline{b}$ 两区间不相交时, μ 准则对区间大小序关系具有更高的辨识度. 分析如下: 对于 P 准则, 有 $P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) \equiv 0$ 和 $P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) \equiv 1$, 即 P 值不会随 $m(\tilde{a})$ 的变化而发生变化, 无法进一步区分 $\tilde{b} \prec_p \tilde{a}$ 或者 $\tilde{a} \prec_p \tilde{b}$ 的程度, 此时, P 准则对区间数的序比较辨识度极低; 相比而言, μ 准则会随着 $m(\tilde{a})$ 的变化以 $-\frac{1}{w(\tilde{a}) + w(\tilde{b})}$ 的速度线性变化, 显然, μ 准则此时对区间数序关系的辨识度很高.

2) 对于区间存在交集的情况, 在图1(a)中, P 准则遵循非线性变化规律(该趋势亦可从图1(c)和图1(d)中看出), 相比而言, μ 准则在当 $m(\tilde{a}) = m(\tilde{b})$ 时, μ 值发生了跳变, 从 $\mu(\tilde{a}, \tilde{b}) > 0$ ($\tilde{a} \prec_p \tilde{b}$) 直接跳变为 $\mu(\tilde{a}, \tilde{b}) < 0$ ($\tilde{b} \prec_p \tilde{a}$), 而在 \tilde{a}, \tilde{b} 相交的其余点处, μ 值仍然按照 $-\frac{1}{w(\tilde{a}) + w(\tilde{b})}$ 的速率变化, 与不相交时相同, 不难理解, 当 $w(\tilde{a}) + w(\tilde{b})$ 取值较大时, μ 值变化将较小, 此时, μ 准则对区间大小序关系的辨识度相对低于 P 准则.

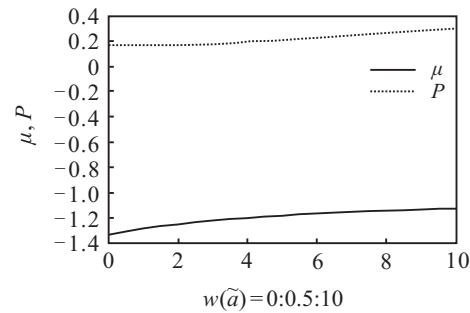
3) 进一步地, 对于 $m(\tilde{a}) = m(\tilde{b})$ 的情况, 从图1(b)可以看出: 无论 $w(\tilde{a})$ 和 $w(\tilde{b})$ 相对大小如何变化(在图1(b)中, $w(\tilde{a})$ 从0变化到大于 $w(\tilde{b})$), $P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) \equiv 0.5$, 即认为此时始终 $\tilde{a} = \tilde{b}$, 显然这种丝毫不考虑区间宽度即不确定性信息的结果是不符合区间相等的定义的, 对序关系的辨识度极低; 而对于 μ 准则, 在 $w(\tilde{a})$



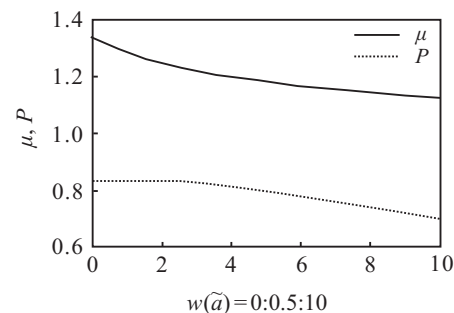
(a) $w(\tilde{a}), w(\tilde{b}), m(\tilde{b})$ 不变, $m(\tilde{a})$ 变化



(b) $m(\tilde{b}) = m(\tilde{a}), w(\tilde{b})$ 不变, $w(\tilde{a})$ 变化



(c) $m(\tilde{b}) < m(\tilde{a}), w(\tilde{b})$ 不变, $w(\tilde{a})$ 变化



(d) $m(\tilde{b}) > m(\tilde{a}), w(\tilde{b})$ 不变, $w(\tilde{a})$ 变化

图1 4种情况下 μ 值和 P 值变化

$< w(\tilde{b})$ 时, $\mu(\tilde{a}, \tilde{b})$ 随着 $w(\tilde{a})$ 的增加从大于0开始以速率 $-\frac{1}{w(\tilde{b})}$ 减小, 直至 $w(\tilde{a}) = w(\tilde{b}), \mu(\tilde{a}, \tilde{b}) = 0$, 此时有 $\tilde{a} = \tilde{b}$. 从该值变化可以看出, 当 $m(\tilde{a}) = m(\tilde{b}), w(\tilde{a}) < w(\tilde{b})$ 时, 即 \tilde{a} 的不确定性小于 \tilde{b} 的不确定性时, 认为 $\tilde{a} \prec_p \tilde{b}$; 而当 $w(\tilde{a}) > w(\tilde{b})$ 时, 即 \tilde{a} 的不确定性大于 \tilde{b} 的不确定性时, 认为 $\tilde{b} \prec_p \tilde{a}$, 这对于不确定决策是合理的.

4) 图1(c)和图1(d)分别给出了在 $w(\tilde{b})$ 保持不变时, 在 $m(\tilde{a}) > m(\tilde{b})$ 和 $m(\tilde{a}) < m(\tilde{b})$ 情况下, μ 值和 P 值随着 $w(\tilde{a})$ 变化而变化的曲线. 从图中可以看出,

无论哪种情况,在 $w(\tilde{a})$ 取值较小时,即 $w(\tilde{a}) < w(\tilde{b})$ 时, μ 值对区间序关系的辨识度优于 P 值,随着 $w(\tilde{a}) > w(\tilde{b})$, P 值对区间序关系的辨识度优于 μ 值。

综上所述, P 准则和 μ 准则对区间序关系的比较各有优劣,若能利用各自的长处,将两者进行融合,提出一种混合策略,则有望获得一种具有更高区间序关系比较辨识度的区间数比较方法,进而应用于区间多目标进化优化中,提高比较算子的性能,改善算法搜索到的 Pareto 前沿的逼近性、分布性和不确定性等。下面将给出基于 P 准则和 μ 准则的区间序关系比较的混合准则—— $\mu \oplus P$ 准则,进一步定义基于该准则的 Pareto 支配比较,然后提出基于该混合支配比较的区间多目标进化优化算法。

2 基于 $\mu \oplus P$ 的区间多目标进化算法

2.1 混合 $\mu \oplus P$ 准则

根据对 μ 准则和 P 准则的对比分析可得如下结论: 1) $\{P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) \equiv 0\} \cup \{P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) \equiv 1\}$ 时, $\mu(\tilde{a}, \tilde{b})$ 对区间序关系具有更高的辨识度; 2) $\{P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) = 0.5\} \cap \{m(\tilde{a}) = m(\tilde{b})\}$ 时, $\mu(\tilde{a}, \tilde{b})$ 对区间序关系具有更高的辨识度; 3) $\{P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) \in (0, 1)\} \cap \{w(\tilde{a}) < w(\tilde{b})\}$ 时, $\mu(\tilde{a}, \tilde{b})$ 对区间序关系具有更高的辨识度; 4) $\{P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b}) \in (0, 1)\} \cap \{w(\tilde{a}) > w(\tilde{b})\}$ 时, $P(\tilde{a} \prec_p \tilde{b})$ 对区间序关系具有更高的辨识度。

2.2 基于 $\mu \oplus P$ 准则的 Pareto 支配

考虑式(1)所示的区间多目标优化问题,给出基于 $\mu \oplus P$ 准则的区间目标 Pareto 支配的定义。对于式(1)的两个任意解 X_i, X_j , 且 $X_i \neq X_j$, 其区间多目标的 μ 指标可表示为 $\mu(\tilde{F}(X_i), \tilde{F}(X_j)) = \{\mu(\tilde{f}_k(X_i), \tilde{f}_k(X_j)) | k = 1, 2, \dots, m\}$, 简记为 $\mu^{ij} = \{\mu_k^{ij} | k = 1, 2, \dots, m\}$ 。同理, X_i, X_j 区间多目标的 P 指标可以表示为 $P(\tilde{F}(X_i) \prec \tilde{F}(X_j)) = \{P(\tilde{f}_k(X_i) \prec \tilde{f}_k(X_j)) | k = 1, 2, \dots, m\}$, 简记为 $P^{ij} = \{P_k^{ij} | k = 1, 2, \dots, m\}$ 。基于所提出的 $\mu \oplus P$ 准则,解 X_i, X_j 的区间目标有 l 个采用了 μ 指标,其余采用了 P 指标,则相应的区间多目标的 $\mu \oplus P$ 指标可表示为 $\mu^{Pij} = \{\mu_1^{ij}, \mu_2^{ij}, \dots, \mu_l^{ij}, P_{l+1}^{ij}, P_{l+2}^{ij}, \dots, P_m^{ij}\}$ 。

定义 1 $\mu \oplus P$ 准则的 Pareto 支配 $\prec_{\mu \oplus P}$ 对于式(1)所示问题的两个任意解 X_i, X_j , 且 $X_i \neq X_j$ 满足: 1) 若 $\forall k \in \{1, 2, \dots, l\}$, 有 $\mu_k^{ij} \geq 0, \forall q \in \{l+1, l+2, \dots, m\}$, 有 $P_q^{ij} \geq 0.5$, 且 $\exists k' \in \{1, 2, \dots, l\}$, 使得 $\mu_{k'}^{ij} > 0$ 或 $\exists q' \in \{l+1, l+2, \dots, m\}$, 使得 $P_{q'}^{ij} > 0.5$, 则称 $X_i \mu \oplus P$ Pareto 支配 X_j , 记为 $X_i \prec_{\mu \oplus P} X_j$; 2) 若 $\exists k \in \{1, 2, \dots, l\}$, 有 $\mu_k^{ij} \geq 0, \exists q \in \{l+1, l+2, \dots, m\}$, 有 $P_q^{ij} \geq 0.5$, 又 $\exists k' \in \{1, 2, \dots, l\}$ 使得 $\mu_{k'}^{ij} \leq 0$ 或 $\exists q' \in \{l+1, l+2, \dots, m\}$ 使得 $P_{q'}^{ij} \leq 0.5$, 则称 X_i 和 X_j 互不 $\mu \oplus P$ Pareto 支配, 记为 $X_i \parallel_{\mu \oplus P} X_j$ 。

$\mu \oplus P$ Pareto 支配比较的区间排序伪代码见图 2。

```

for each  $\alpha \in \text{Pop}$  // 种群 Pop 中的每个个体  $\alpha$ 
CNT_less=0, CNT_more=0, CNT_equal=0;
for each  $b \in \text{Pop}$  // 种群 Pop 中的每个个体  $b$ 
for  $i = 1:m$  //  $m$  为目标函数个数
if  $w(\tilde{f}_i(\alpha)) > w(\tilde{f}_i(b))$ 
计算  $P(\alpha \prec_p b)$ , 赋值给  $P\_value(i, \alpha, b)$ 
else 计算  $\mu(\alpha, b)$ , 赋值给  $\mu\_value(i, \alpha, b)$ 
end
if  $\mu\_value(i, \alpha, b) > 0 \parallel P\_value(i, \alpha, b) > 0.5$ 
CNT_less = CNT_less + 1
else if  $\mu\_value(i, \alpha, b) < 0 \parallel P\_value(i, \alpha, b) < 0.5$ 
CNT_more = CNT_more + 1
else CNT_equal = CNT_equal + 1
end
end
if CNT_more = 0 && CNT_equal  $\neq$  m
 $\alpha < b$  //  $\alpha \prec_{\mu \oplus P} b$ 
else if CNT_less = 0 && CNT_equal  $\neq$  m
 $b < \alpha$  //  $b \prec_{\mu \oplus P} \alpha$ 
else
 $b \parallel \alpha$  //  $\alpha \parallel_{\mu \oplus P} b$ 
end

```

图 2 区间支配比较排序算法伪代码

3 在区间多目标函数优化中的应用

3.1 实验背景

由于本文旨在研究混合区间比较策略在 NSGA-II 框架下解决区间多目标优化问题的性能,这里仅在 NSGA-II 框架下将所提出的策略与 4 种区间比较策略进行对比,以说明所提出算法的有效性。策略 1 和策略 2 分别是 μ 准则及概率支配 (PD)^[9], 可能度 P 占优支配关系^[12]; 策略 4 是传统的基于中点和宽度的比较策略,即将一个区间目标拆成两个目标,一个以区间中点为目标,另一个以区间宽度为目标,在本文中称之为 $m \oplus w$ 。此外,由 Limbourg 等提出的 IP-MOEA 算法^[7]在解决区间多目标优化问题中也具有代表性且应用广泛,因此本文也将该算法作为对比算法之一。

选择基准优化问题 DTLZ1、DTLZ2、DTLZ3 和 ZDT1^[14]进行验证,各优化问题决策变量的取值范围均为 $[0, 1]$,其中 DTLZ 系列函数决策变量的维数为 $n = 7$ 。实验中: DTLZ1、DTLZ2 和 DTLZ3 的目标函数个数分别取 2、3、4; ZDT1 的目标函数个数为 2,决策变量的维数为 $n = 30$ 。鉴于上述优化问题的目标函数均不含有区间参数,为了测试不同方法的性能,引入文献[7]所定义的扰动因子 δ_i ,使得目标函数值为区间 $\tilde{f}_i(X) = [f_i(X), \bar{f}_i(X)]$,表示如下:

$$\underline{f}_i(X) = 1 - \max\{f_i(X), f_i(X) + \delta_i\}, \quad (6)$$

$$\bar{f}_i(X) = 1 - \min\{f_i(X), f_i(X) + \delta_i\}. \quad (7)$$

记转化后的区间最小化多目标优化问题分别为 DTLZ1'、DTLZ2'、DTLZ3' 和 ZDT1'。

3.2 参数设置

进行 30 组实验,记录并比较其均值。5 种不同的 Pareto 支配比较策略及 IP-MOEA 算法均采用 NSGA-

II框架, 进化算子均采用规模为2的联赛选择、模拟二进制交叉以及多项式变异. 其中, 交叉和变异概率分别为0.9和0.01, 初始化种群规模 N 均设为100.

本文采用最好超体积BH、不确定度 I 和延展度 D 3种性能指标比较本文所提出的区间序关系与其他5种方法的性能. 其中, 区间超体积用于反映解的逼近度, 不确定度用于反映区间特性, 两者均由Limbourg等^[7]提出. 但由于区间超体积是一个区间且不利于比较, 将该区间的上限定义为最好超体积(BH), 该值越大, 解的逼近度越好. 这里将文献[15]计算的延展度扩展到目标函数为区间的情况, 即分别计算目标区间下限与上限的延展度之和, 该值越小, 延展度越好, 具体表示如下:

$$D(X) = \left(\sum_{j=1}^m \left[\left(\max_{i=1}^N \underline{f}_j(x_i) - \min_{i=1}^N \underline{f}_j(x_i) \right)^2 + \left(\max_{i=1}^N \bar{f}_j(x_i) - \min_{i=1}^N \bar{f}_j(x_i) \right)^2 \right] \right)^{1/2}. \quad (8)$$

3.3 实验结果与分析

本文方法与其余5种算法分别记为“ $\mu \oplus P$ ”、“ μ ”、“PD”、“ P ”、“ $m \oplus w$ ”和“IP-MOEA”.

对于两目标ZDT1'函数, 所提出的混合 $\mu \oplus P$ 和其余5种方法所得Pareto前沿如图3~图8所示.

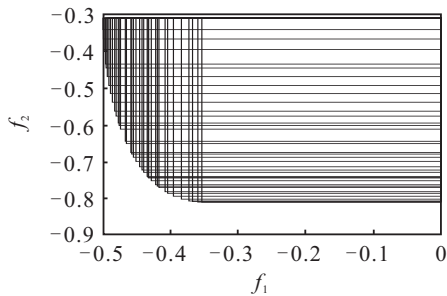


图3 $\mu \oplus P$ 方法所得 Pareto 前沿

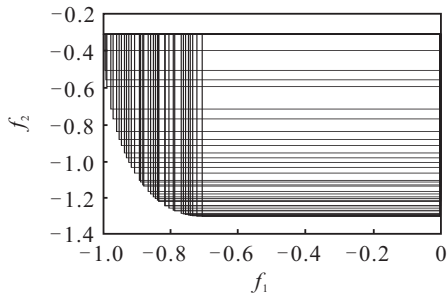


图4 μ 方法所得 Pareto 前沿

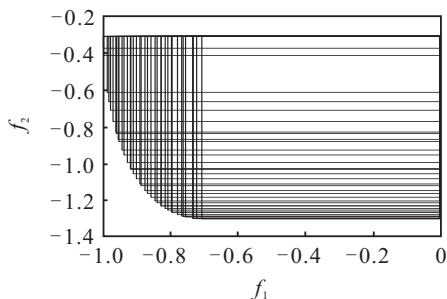


图5 P 方法所得 Pareto 前沿

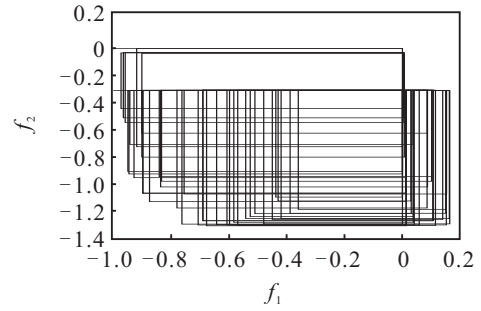


图6 PD方法所得 Pareto 前沿

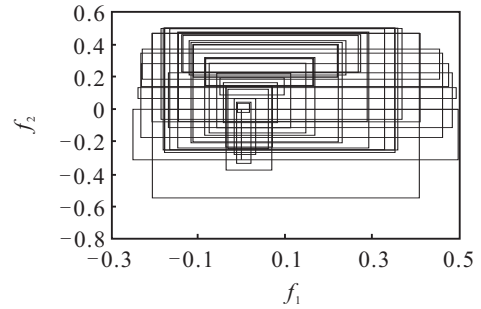


图7 $m \oplus w$ 方法所得 Pareto 前沿

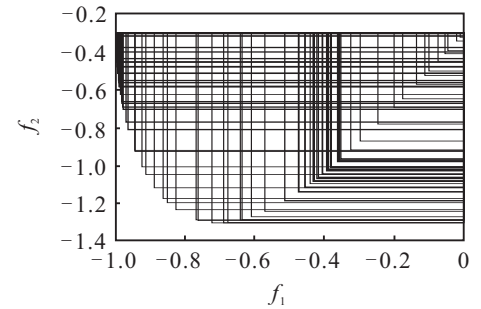


图8 IP-MOEA方法所得 Pareto 前沿

从图3~图8可以看出, 基于概率支配的PD准则和 $m \oplus w$ 准则所得的Pareto前沿显著劣于其余4种.

6种方法求解ZDT1'和DTLZ'所得Pareto前沿的BH、 I 和 D 结果如表1所示, 其中粗体表示该值所对应方法明显优于其他方法(采用 t 检验).

从表1可以看出: 1) 对于ZDT1'函数, $\mu \oplus P$ 准则的收敛性指标BH略劣于 μ 准则, 与 P 准则相当, 但显著优于其余算法; $\mu \oplus P$ 准则得到Pareto前沿的不确定度指标 I 显著优于其余5种方法; 对于延展性指标 D , $\mu \oplus P$ 指标除了仅次于 μ 准则之外, 均显著优于其余4种策略. 2) 对于DTLZ'函数, 本文策略所得Pareto前沿收敛性均最好, 除 $m \oplus w$ 准则之外, 在 I 测度方面本文策略较优于其余4种区间比较策略, 在反映延展性的 D 测度方面, 相较于其余5种策略, P 准则和IP-MOEA表现比较优越, $\mu \oplus P$ 准则在求解2维DTLZ1'和4维DTLZ2'均为最优.

综上所述, 本文提出的区间支配序比较方法具有较好的延展性, 所得结果具有更小的不确定性, 在收敛性上又明显优于在多目标中使用的IP-MOEA、概率支配和“ $m \oplus w$ ”策略. 下面进一步将该算法应用于煤矿井下射频识别阅读器布局, 以解决实际问题.

表 1 实验性能指标

函数	维数	性能指标	$\mu \oplus P$	μ	PD	P	$m \oplus w$	IP-MOEA
ZDT1'	2	BH	0.452 2	1.043 2	0.022 1	0.925	0.040 1	0.423 6
		I	0.595 3	1.175 1	1.179 6	1.156	0.633 3	1.114 9
		D	0.808 4	0.43	1.533 7	1.7	1.809 9	0.922 9
	2	BH	1.18e+13	1.17e+13	1.12e+13	8.56e+12	1.14e+13	4.36e+12
		I	0.447 9	0.482 5	0.475 8	0.418 6	0.385 8	0.363 7
		D	1.108 9	1.211 5	1.214 1	1.246	1.492 8	1.409 3
DTLZ1'	3	BH	4.29e+22	1.75e+22	1.71e+22	1.70e+19	5.04e+10	3.55e+22
		I	0.552 3	0.628 6	0.628	0.611 1	0.535 6	0.579 6
		D	1.837 8	1.990 3	1.901	1.818 5	2.436 2	1.022 9
	4	BH	6.63e+17	5.77e+17	5.27e+17	3.55e+17	5.08e+17	1.13e+17
		I	0.301 5	0.334	0.334 9	0.342 3	0.264	0.291 3
		D	8.31e+07	8.13e+07	8.07e+07	6.15e+07	8.27e+07	8.52e+07
	2	BH	36.11	35.681 7	35.201 2	35.681 7	5.375 2	8.869 4
		I	0.498 8	0.589 7	0.590 4	0.555 2	0.393 2	0.353 3
		D	1.413 3	1.406 2	1.348 1	1.331 9	1.973 5	1.000 2
DTLZ2'	3	BH	74.192 9	67.854 8	67.194 2	74.014 4	8.031 4	15.271 6
		I	0.594 8	0.644 2	0.623 8	0.629 8	0.542	0.61
		D	1.694 5	1.754 9	1.630 2	1.649 2	2.403 6	1.409 1
	4	BH	147.731 3	139.247 1	124.451 3	116.025 2	105.153 2	94.200 2
		I	0.327 4	0.403 5	0.359 4	0.41	0.256 4	0.448
		D	8.087 9	8.500 8	8.557 3	8.585 6	8.574 1	8.093 3
	2	BH	4.11e+14	3.67e+14	3.82e+14	1.12e+14	2.01e+03	5.07e+12
		I	0.435 5	0.457 3	0.478 7	0.463 1	0.388 4	0.395 2
		D	1.157 8	1.026 3	1.225 6	0.678 6	1.972 3	3.496 5
DTLZ3'	3	BH	8.18e+31	7.96e+31	7.26e+31	7.26e+31	6.66e+31	1.88e+31
		I	0.591	0.557 5	0.599 1	0.572 7	0.530 2	0.495 2
		D	1.637 9	1.643 2	1.608 6	1.416 4	1.667 6	1.549 5
	4	BH	1.74e+17	1.54e+17	1.43e+17	9.81e+16	7.73e+16	7.26e+15
		I	0.360 4	0.376 5	0.343 4	0.319	0.246 2	0.353 8
		D	6.60e+08	6.55e+08	6.63e+08	6.75e+08	6.70e+08	5.79e+08

4 算法在区间不确定 RFID 阅读器密集布局中的应用

煤矿井下巷道的射频识别 (RFID) 阅读器布局对于实时准确获取矿工的位置信息并在发生矿井灾害时快速实施救援至关重要. 对于煤矿井下 RFID 阅读器布局而言, 核心在于构建布局模型以及设计求解该模型的优化算法. 在目前已有研究中, 大多将该布局问题建模为多目标优化问题, 然后采用加权方法将其转化为单目标问题进行求解^[16-18]. 基于多目标的单目标模型的构建将会极大地影响求解的结果. 此外, 煤矿井下 RFID 阅读器布局还含有不确定性, 而已有研究尚未考虑. 因此, 解决井下巷道 RFID 阅读器的不确定布局问题十分必要.

4.1 区间不确定多目标布局模型构建

井下巷道阅读器的布局就是在该巷道空间中确定各阅读器的坐标位置. 设最多需放置 n 个阅读器, 巷道内共有 l 个标签, 第 i 个阅读器的坐标记为 (x_i, y_i) , 则该优化问题的决策变量为 $X = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$, 当 (x_i, y_i) 位于巷道内时为有效布局, 记 $E(x_i, y_i) = 1$, 否则 $E(x_i, y_i) = 0$.

本文考虑最小化读写器与标签间的距离 $f_1(X)$ 、

最大化容量 $f_2(X)$ 、最小化成本 $\tilde{f}_3(X)$ 、最小化干扰水平 $\tilde{f}_4(X)$ 和最小化几何精度因子 $f_5(X)$ 五个性能指标, 同时考虑成本和干扰水平的不确定性, 构建含有区间不确定性的井下 RFID 阅读器布局模型. 这里对最大化容量 $f_2(X)$ 进行取倒数处理, 从而将该多目标优化问题统一表述为最小化问题, 具体表示如下:

$$\begin{aligned} \min \tilde{F}(X) &= \{f_1(X), f_2(X), \tilde{f}_3(X), \tilde{f}_4(X), f_5(X)\}, \\ f_1(X) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sqrt{(x_i - tx_j)^2 + (y_i - ty_j)^2}, \\ f_2(X) &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \operatorname{sgn}[R - \sqrt{(x_i - tx_j)^2 + (y_i - ty_j)^2}]}, \\ \tilde{f}_3(X) &= \sum_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} [c_i, \bar{c}_i] \times E(x_i, y_i), \\ \tilde{f}_4(X) &= \sum_{j=1}^l \sum_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} [\operatorname{Td}(r_i, t_j) - \tilde{R}_{q_i}], \\ f_5(X) &= \sum_{j=1}^l \sqrt{\operatorname{Trace}(H_j^T H_j)^{-1}}. \end{aligned} \quad (9)$$

其中: (tx_j, ty_j) 为第 j 个标签的坐标; R 为阅读器有

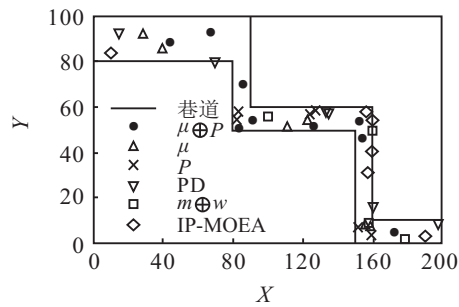
效阅读的半径; $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0; \end{cases}$ $[c_i, \bar{c}_i]$ 为第 i 个阅读器的价格变化范围, 在本文实验中设置为 $[1, 5]$; $\hat{R}q_i = [\underline{R}q_i, \overline{R}q_i]$ 为第 i 个阅读器的通信阈值范围; $Td(r_i, t_j)$ 为第 j 个标签 t_j 接收到的来自第 i 个阅读器 r_i 的信号强度, 且仅当 $Td(r_i, t_j) \geq \overline{R}q_i$ 时, 两者建立正常通信; $f_5(X)$ 为 RFID 阅读器定位的精度因子 GDOP; H 为观测矩阵, 且有

$$H_j = \begin{bmatrix} |tx_j - x_1| & |ty_j - y_1| & 1 \\ |tx_j - x_2| & |ty_j - y_2| & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ |tx_j - x_{n-1}| & |ty_j - y_{n-1}| & 1 \\ |tx_j - x_n| & |ty_j - y_n| & 1 \end{bmatrix}$$

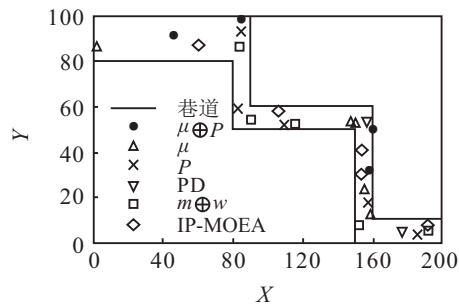
表 2 井下 RFID 阅读器布局性能指标

性能指标	$\mu \oplus P$	μ	PD	P	$m \oplus w$	IP-MOEA
BH	1.54e+14	1.53e+14	1.52e+14	1.47e+14	1.53e+14	1.41e+14
I	2.6882	3.6739	3.2878	3.7171	3.4969	3.1065
D	151.3502	143.6804	153.4207	152.2913	146.961	152.5021

在标签布局相同的情况下, 分别以最小化标签距离和最小化成本为基准, 从各方法中选择一组最优解, 其在巷道中的布局结果如图 9 所示。



(a) 最小化标签距离



(b) 最小化成本

图 9 两种最小化分布

由于成本是一个区间数, 本文首先选择区间中点最小的解, 当中点相同时选择区间宽度最小的, 与该方案对应的各方法的 5 个目标值如表 3 所示。

当以最小化标签距离为基准时, 由图 9(a) 可以看出, 本文方法的阅读器布局较为均匀, 相较于其余 5 种方法, 该方法在拐点处有较好的阅读器布局, 能够更全面地覆盖井下巷道区域。另外, 由表 3 可知, $\mu \oplus P$

由式 (9) 可以看出, 本文构建的煤矿井下 RFID 阅读器布局模型中有两个目标考虑了区间不确定性, 且目标个数较多, 当采用传统多目标进化优化方法求解时, 往往难以得到满意的布局方案。

4.2 RFID 阅读器不确定布局模型求解

将本文方法与前述 5 种方法分别应用于本文所构建的含区间不确定性的井下 RFID 阅读器布局模型, 并对结果进行比较, 各方法均运行 30 次, 仍采用 3.2 节所述性能指标, 具体结果见表 2。

由表 2 可以看出: $\mu \oplus P$ 准则在解决上述实际问题时仍具有最好的收敛性, 即所得解集更逼近最优解集; 对于解的不确定性, $\mu \oplus P$ 准则所得结果也是最小的, 而 $m \oplus w$ 准则的 I 测度也劣于本文方法。

表 3 两种方案对应的目标值

性能	方法	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
距离	$\mu \oplus P$	172.1842	0.0526	[9, 45]	[2.167, 2.662]	0.163
	μ	184.8154	0.0556	[6, 30]	[2.775, 3.132]	0.163
	P	197.5616	0.0588	[6, 30]	[1.308, 1.632]	0.163
	PD	230.9302	0.05	[7, 35]	[1.107, 1.498]	0.163
	$m \oplus w$	98.6827	0.1	[4, 20]	[0.782, 0.993]	0.163
	IP-MOEA	106.2535	0.1	[6, 30]	[2.764, 2.955]	0.163
成本	$\mu \oplus P$	122.9794	0.1	[4, 20]	[0.439, 0.679]	0.163
	μ	128.356	0.0909	[5, 25]	[0.694, 0.949]	0.163
	P	184.3642	0.0667	[5, 25]	[0.904, 1.220]	0.163
	PD	46.03681	0.25	[2, 10]	[0.323, 0.395]	0.6342
	$m \oplus w$	178.2181	0.0667	[5, 25]	[0.843, 1.145]	0.3272
	IP-MOEA	175.8919	0.0625	[5, 25]	[5.366, 5.661]	0.3342

准则取得了较小的标签距离和较大的标签覆盖容量, 但是牺牲了布局成本, 阅读器布局数量为 9 个; 干扰水平和定位精度与其余 4 种方法无显著差异。当以最小化成本为基准时, 由图 9(b) 可以看出, PD 准则取得了最小的成本, 阅读器布局数仅为两个, 虽然布置在巷道的拐点处, 但是所能覆盖的标签数量 ($1/0.25 = 4$, 仅能覆盖 4 个标签) 和定位精度显著劣于其余 5 种方法。由表 3 可以看出, 本文方法所得的阅读器布局个数为 4, 成本仅次于 PD 准则, 但对于其余 4 个目标同时具有较优的结果。综上所述, 所提出的算法可有效求解井下巷道 RFID 阅读器的布局优化问题, 为决策者提供了性能更优的布局方案。

5 结 论

对于含区间参数的多目标进化优化算法, 进化个体的优劣比较至关重要, 利用区间分析中的区间数排序比较策略是解决方法之一。首先, 本文对两种当前

常用区间数排序比较策略—— μ 准则和 P 准则进行了深入的对比分析,指出了各策略在不同区间覆盖情况下排序辨识度的差异;然后,结合两者的优点,提出了一种 $\mu \oplus P$ 区间数比较策略,并给出了 $\mu \oplus P$ 区间多目标 Pareto 支配概念,提出了一种基于 $\mu \oplus P$ Pareto 支配的区间多目标 NSGA-II 算法;最后,将所提出的算法分别应用于典型函数和煤矿井下射频识别阅读器布局问题中,并与其余 4 种基于区间数排序比较策略的 NSGA-II 算法和 IP-MOEA 算法进行了比较.结果表明,所提出的算法在解决区间参数多目标优化问题时具有更好的收敛性、分布性和更小的不确定性.

基于上述区间数排序策略,设计新的多目标进化优化的高效进化算子以进一步提高 $\mu \oplus P$ 区间多目标 NSGA-II 算法的性能将是下一步研究的课题.

参考文献(References)

- [1] 公茂果,焦李成,杨咚咚,等.进化多目标优化算法研究[J].软件学报,2009,20(2): 271-289.
(Gong M G, Jiao L C, Yang D D, et al. Research on evolutionary multi-objective optimization algorithms[J]. J of Software, 2009, 20(2): 271-289.)
- [2] Schaffer J D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms[C]. Proc of the 1st Intl Conf on Genetic Algorithms. Pittsburgh: Lawrence Erlbaum, 1985: 93-100.
- [3] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [4] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [5] Zhang Q, Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 712-731.
- [6] Gong D, Qin N, Sun X. Evolutionary algorithms for optimization problems with uncertainties and hybrid indices[J]. Information Sciences, 2011, 181(19): 4124-4138.
- [7] Limbourg P, Aponte D. An optimization algorithm for imprecise multi-objective problem functions[C]. The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Munich: IEEE, 2005: 459-466.
- [8] Gong D, Qin N, Sun X. Evolutionary algorithms for multi-objective optimization problems with interval parameters[C]. The 5th Int Conf on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications(BIC-TA). New York: IEEE, 2010: 411-420.
- [9] 张勇,巩敦卫,郝国生,等.含区间参数多目标系统的微粒群优化算法[J].自动化学报,2008,34(8): 921-928.
(Zhang Y, Gong D W, Hao G S, et al. Particle swarm optimization for multi-objective systems with interval parameters[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(8): 921-928.)
- [10] Sengupta A, Pal T K. On comparing interval numbers[J]. European J of Operational Research, 2000, 127(1): 28-43.
- [11] Chanas S, Kuchta D. Multiobjective programming in optimization of interval objective functions—A generalized approach[J]. European J of Operational Research, 1996, 94(3): 594-598.
- [12] 肖峻,张跃,付川.基于可能度的区间数排序方法比较[J].天津大学学报,2011,44(8): 705-711.
(Xiao J, Zhang Y, Fu C. Comparison between methods of interval number ranking based on possibility[J]. J of Tianjin University, 2011, 44(8): 705-711.)
- [13] Alolyan I. Algorithm for interval linear programming involving interval constraints[C]. IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting(IFSA/NAFIPS). Edmonton: IEEE, 2013: 1274-1278.
- [14] Deb K, Thiele L, Laumanns M, et al. Scalable test problems for evolutionary multiobjective optimization[M]. London: Springer, 2005: 105-145.
- [15] Zitzler E, Deb K, Thiele L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results[J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 173-195.
- [16] Choi J, Lee C. An MILP-based cross-layer optimization for a multi-reader arbitration in the UHF RFID system[J]. Sensors, 2011, 11(3): 2347-2368.
- [17] Gong Y J, Shen M, Zhang J, et al. Optimizing RFID network planning by using a particle swarm optimization algorithm with redundant reader elimination[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2012, 8(4): 900-912.
- [18] 闫广超,沈斌,王家海,等.井下巷道无线射频识别阅读器多目标约束优化选址方法[J].煤炭学报,2010,35(9): 1581-1586.
(Yan G C, Shen B, Wang J H, et al. Way to the multi-objective constrained optimization site of RFID reader in roadway of mine[J]. J of China Coal Society, 2010, 35(9): 1581-1586.)