

一种多目标资源受限项目调度问题的教学算法

王 凌, 郑环宇

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对多目标资源受限项目调度的特性, 基于结合活动列表和资源列表的编码设计了合理的交叉操作, 提出一种多目标教学算法. 为了在个体间有效交互信息, 在教师阶段非支配个体作为教师与学生执行交叉, 而在学生阶段学生间执行交叉, 同时在每个阶段通过前向-反向改进增强局部搜索能力, 并用 Pareto 档案集存储和更新非支配个体. 基于标准测试集的数值仿真及与现有最好算法的比较, 验证了所提出算法的有效性.

关键词: 资源受限项目调度; 多目标优化; 教学算法; 前向-反向改进

中图分类号: TP273

文献标志码: A

A teaching-learning-based optimization algorithm for multi-objective resource constrained project scheduling problem

WANG Ling, ZHENG Huan-yu

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: WANG Ling, E-mail: wangling@mail.tsinghua.edu.cn)

Abstract: According to the characteristics of the multi-objective resource constrained project scheduling problem, a reasonable crossover operator is designed based on the encoding scheme that combines activity list and resource list, and a multi-objective teaching-learning-based optimization algorithm is proposed. To exchange information among individuals effectively, the non-dominated individual as the teacher performs crossover with students at the teacher phase, while students perform crossover interactively at the student phase. At each phase, a forward-backward improvement is applied to enhance the local search capability and a Pareto archive is used to store and update the non-dominated individuals. Numerical simulation based on the benchmarking sets and comparisons with the state-of-the-art algorithms demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: resource-constrained project scheduling; multi-objective optimization; teaching-learning-based optimization; forward-backward improvement

0 引 言

资源受限项目调度问题(RCPSP)^[1]研究的是如何通过合理利用资源和安排活动来优化既定的调度目标, 如最小化项目的完成时间. RCPSP具有广泛的应用背景, 许多实际生产问题都可以建模成RCPSP, 例如半导体最终测试问题^[2]、系统综合设计问题^[3]、软件开发问题^[4]等. RCPSP的活动间存在“结束-开始”优先约束, 即对于每个活动, 其开始时间不能早于其前继活动的结束时间. 同时, 项目应满足资源约束, 即任意时刻执行中活动的总资源占用量不能超过资源总量. RCPSP已被证明是NP-hard问题^[5], 其高效求解算法的设计一直是相关领域的重要研究课题^[1,6-7].

随着对RCPSP研究的发展, 多目标调度问题越来越受到重视. 相关代表性研究包括: 基于禁忌搜索的最大完工时间和鲁棒性双目标优化^[8]; 考虑时间、成本、质量的多目标混合整数规划模型^[9]; 基于蚁群算法的时间-成本平衡^[10]. 近期, 文献[11]对多目标RCPSP进行了分类, 并给出了不同目标组合下的问题性质; 文献[12]提出了一种考虑项目最大完工时间和资源投资额度两个目标的基于Pareto档案集的分布估计算法, 其性能优于现有其他方法. 鉴于多目标问题的求解复杂性, 新颖且高效算法的研究很值得重视.

作为一种新颖的智能算法, 教学算法(TLBO)^[13]通过模拟教学过程构造教师与学生以及学生与学生

收稿日期: 2014-09-09; 修回日期: 2014-11-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174189); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130002110057).

作者简介: 王凌(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能优化调度理论与方法等研究; 郑环宇(1989-), 男, 硕士生, 从事智能优化调度的研究.

两个阶段的搜索来实现优化. 目前, TLBO 已应用于许多复杂优化问题, 譬如约束和无约束连续优化^[14]、热交换器多目标优化^[15]、多目标经济负荷分配^[16]等. 但是尚无在多目标 RCPSP (MORCPSP) 方面的研究. 基于此, 本文在 TLBO 框架内提出一种多目标教学算法 (MOTLBO), 通过有效的编码、解码、交叉操作、改进策略和多目标处理技术求解 MORCPSP, 并通过数值仿真和算法比较验证所提出算法的有效性.

1 问题描述

MORCPSP 的项目活动集合为 $N = \{0, 1, \dots, n\}$, 其中活动 0 和活动 n 为虚拟活动, 分别表示项目的开始和结束. 对于每一个活动 $j \in N$, s_j 表示其开始时间, d_j 表示其持续时间, P_j 表示其前继活动集合. 共有 K 种可更新资源, 活动 j 在执行时占用第 k 种资源 r_{jk} 单位. 约定活动均不可中断, 即一旦开始就一直执行到结束. 虚拟活动的持续时间和占用资源均为 0. 考虑文献 [12] 的双目标问题, 即项目最大完成时间 (MS) 和总资源投资 (RI), 记作 MORCPSP-MS-RI, 问题描述如下:

$$\min [MS, RI]. \tag{1}$$

$$\text{s.t. } MS = s_n; \tag{2}$$

$$RI = \sum_{k=1}^K c_k \max_{t \in [0, T]} r_k(t); \tag{3}$$

$$s_i + d_i \leq s_j, \forall j \in N, \forall i \in P_j; \tag{4}$$

$$\sum_{j \in A(t)} r_{jk} \leq a_k, \forall k \in [1, K], \forall t \in [0, T]. \tag{5}$$

其中: $r_k(t)$ 为 t 时刻资源 k 的占用量, a_k 为项目执行中最大资源占用量, c_k 为每单位资源的投资, $A(t)$ 为 t 时刻执行中的活动集合. 式 (2) 和 (3) 分别定义项目最大完成时间 MS 和总资源投资 RI, 式 (4) 表示活动优先约束, 式 (5) 表示项目资源约束.

设 s 为 MORCPSP-MS-RI 的一个可行调度解, χ 为所有可行解集合. 对于两个可行调度解 $s^1, s^2 \in \chi$, 当且仅当满足如下条件^[12]:

$$\begin{cases} MS(s^1) \leq MS(s^2), \\ RI(s^1) \leq RI(s^2), \end{cases} \tag{6}$$

且上述不等式至少有一个为严格小于时, 称 s^1 支配 s^2 , 记作 $s^2 \prec s^1$.

当且仅当不存在 $s' \in \chi$ 使得 $s^* \prec s'$ 时, 称 s^* 为 Pareto 最优解. 所有 Pareto 最优解的集合称为 Pareto 集合. 求解 MORCPSP-MS-RI 就是要获得问题的 Pareto 集合.

2 教学算法

作为一种群体进化算法, 教学算法^[13]主要包括

教师阶段和学生阶段. 在教师阶段, 种群中的最优个体选为教师 T , 其余个体作为学生向教师 T 学习来产生新的个体, 如果新个体优于原个体则将其替换. 在学生阶段, 每次随机选取两个学生, 通过相互学习来产生新个体, 若新个体优于较差个体则将其替换.

教学算法的流程如下.

Step 1: 初始化种群;

Step 2: 选择最优个体为教师;

Step 3: 学生向教师学习;

Step 4: 学生间互相学习;

Step 5: 判断终止条件是否满足, 如果是, 则输出优化结果, 否则转至 Step 2.

教学算法的控制参数较少, 并已在若干多目标优化问题上展现了优良性能^[15-16], 因此下节专门针对 MORCPSP-MS-RI 设计一种多目标 TLBO 算法.

3 求解 MORCPSP-MS-RI 的 MOTLBO

3.1 编码和解码

种群中每个个体对应问题的一个调度解. 每个个体的编码包括资源列表和活动列表, 其中活动列表 $\pi = (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_n)$ 表示活动优先顺序, 资源列表 $a = (a_1, a_2, \dots, a_K)$ 表示可更新资源的限制. 文献 [7] 的研究表明, 活动列表编码性能通常优于其他编码方式. 由于 MORCPSP-MS-RI 是 RCPSP 的扩展, 本文沿用活动列表对活动优先顺序编码.

为了将上述编码转化为可行的调度方案, 采用串行调度产生机制 (SSGS)^[17] 实现解码. 即, 在满足资源列表设定的资源限制下, 根据活动列表优先顺序依次将活动安排到最早可能的开始时间.

3.2 初始化阶段

初始种群包含 P 个个体, 各个体初始化过程如下.

对于资源列表, 随机产生第 k 种资源投资量 $a_k \in [a_{k, \min}, a_{k, \max}]$, $a_{k, \min} = \max_{j \in N} r_{jk}$ 由项目中占资源 k 最多的活动决定, $a_{k, \max}$ 通常人为设定.

对于活动列表, 采用基于最晚完成时间 (LFT) 后悔值的有偏随机采样^[18] 迭代产生. 具体过程如下:

设 S^l 为第 l 次循环后选择过的活动集合, $S^1 = \{0\}$. 定义可选活动集 $S_E^l = \{j \in N \setminus S^l, P_j \subseteq S^l\}$ 表示选择过 l 个活动后, 下一次循环的可选活动, 每次循环选取活动 $j \in S_E$ 的概率 η_j 为

$$\eta_j = \frac{\mu_j + 1}{\sum_{i \in S_E} (\mu_i + 1)}, \tag{7}$$

其中 $\mu_j = \max_{i \in S_E} LFT_i - LFT_j$. 执行上述循环直至所有活动均被选择.

3.3 教师阶段和学生阶段

在教师阶段,从 Pareto 档案集中随机选择一个个体作为教师,与种群中每个学生执行交叉产生新个体.在学生阶段,随机选择两个学生执行交叉产生新个体.鉴于 MORCPSP-MS-RI 编码特点,交叉算子设计如下.

对于活动列表,采用两点交叉^[18].首先在区间 $[1, n-1]$ 随机产生两个不同的整数 q_1 和 q_2 ($q_1 < q_2$),然后按如下方式产生新活动列表:

$$\pi_j^n = \pi_j^1, 0 \leq j \leq q_1; \quad (8)$$

$$\pi_j^n = \pi_l^2, l = \min\{l | \pi_l^2 \notin \{\pi_0^n, \dots, \pi_{q_1}^n\}\}, \\ q_1 + 1 \leq j \leq q_2; \quad (9)$$

$$\pi_j^n = \pi_l^1, l = \min\{l | \pi_l^1 \notin \{\pi_0^n, \dots, \pi_{q_2}^n\}\}, \\ q_2 + 1 \leq j \leq n. \quad (10)$$

其中 π^n 、 π^1 、 π^2 分别表示新个体的活动列表和用于交叉的两个个体的活动列表.

对于资源列表,按如下方式更新:

$$a_k^n = (1 - \theta)a_k^1 + \theta a_k^2, 0 \leq k \leq K. \quad (11)$$

其中: $\theta \in [0, 1]$ 表示学习速率,即较差个体向较优个体学习的速率; a_k^n 、 a_k^1 、 a_k^2 分别表示新个体资源列表和用于交叉的两个个体的资源列表中第 k 种资源量.

特别地,在教师阶段设定学生为第 1 个交叉个体,教师为第 2 个交叉个体;在学生阶段,若一个个体可支配另一个个体,则设定较差个体为第 1 个交叉个体,较优个体为第 2 个交叉个体,否则随机设定.对于新产生的个体,若不能被第 1 个交叉个体支配,则替换第 1 个交叉个体,否则不替换.

3.4 局部搜索策略

为了增强局部搜索能力,在教师阶段和学生阶段,每次产生新个体后均采用前向-反向改进策略(FBI)^[19]进一步改善个体的性能,以减小项目的最大完成时间,而不影响总资源投资.

具体而言, FBI 首先按完成时间将活动降序排列,然后采用反向 SSGS 生成调度,再按开始时间将活动升序排列,最后采用前向 SSGS 生成调度.

3.5 Pareto 档案更新

在多目标教学算法中,采用 Pareto 档案集存储非支配个体.在初始化阶段,由初始种群根据支配关系获得 Pareto 档案集;在教师阶段和学生阶段,随时用新个体更新 Pareto 档案集.记 I 为新个体, Pareto 档案集中的个体表示为 $A_j, j = 1, 2, \dots, |PA|$, $|PA|$ 为 Pareto 档案集大小,则更新过程如下.

Step 1: 判断 Pareto 档案集是否为空.如果是,则添加解 I 至档案集,结束更新,否则转至 Step 2.

Step 2: 判断是否存在 j , 使得 $I \prec A_j$ 或 $I = A_j$. 如果存在,则保持原档案集,结束更新;否则转至 Step 3.

Step 3: 对 $j = 1, 2, \dots, |PA|$, 判断 $A_j \prec I$ 是否成立.如果成立,则将 A_j 移出 Pareto 档案集,并将 I 加至 Pareto 档案集,结束更新.

3.6 算法流程和关键操作的复杂度分析

基于上述设计,在 TLBO 框架内设计求解 MORCPSP-MS-RI 的 MOTLBO 算法,其流程如图 1 所示,在此以最大调度数为终止条件.可见,算法通过教师阶段和学生阶段交替执行种群的进化,同时通过不断更新档案集获得最终的非支配解集.

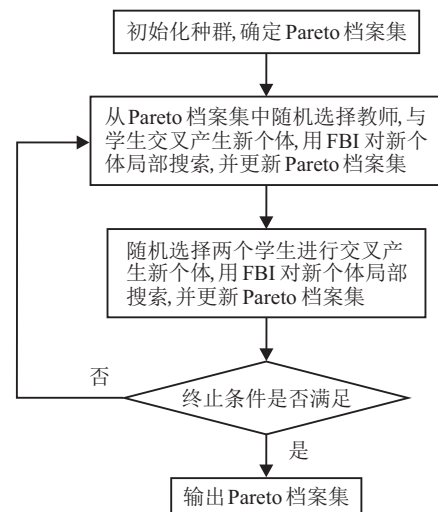


图 1 求解 MORCPSP-MS-RI 的 MOTLBO 流程

就计算复杂性而言,用 SSGS 解码的计算复杂度为 $O(n^2K)$. 其中: n 为项目规模, K 为可更新资源数.用交叉操作产生新个体计算复杂度为 $O(n)$,更新 Pareto 档案计算复杂度为 $O(|PA|)$.进一步考虑种群规模,产生新种群的复杂度为 $O((n + |PA|)P)$.实验发现, $|PA|$ 基本与 n 规模相当,因此种群更新过程的复杂度简化为 $O(nP)$.由综合解码和种群更新过程可见, MOTLBO 的计算复杂性不大,可实现 MORCPSP-MS-RI 的高效优化.

4 仿真测试和比较

4.1 实验设置

MOTLBO 采用 Visual Studio 2008 C++ 编程,计算机配置为 2.83 GHz 四核处理器, 4 GB 内存.与文献 [12] 相同,测试数据集采用 PSPLIB^[20] 中 J30 测试集(共 480 个项目,每个项目 30 个非虚拟活动)和 J120 测试集(共 600 个项目,每个项目 120 个非虚拟活动);设定第 k 种资源投资量上限 $a_{k,\max}$ 为 PSPLIB 中第 k 种资源限制,单位资源费用 $c_k = 1, k = 1, 2, \dots, K$;设定学习速率 $\theta = 0.95$,种群大小 $P = 100$,分别以

1 000、5 000、50 000 个调度解为终止条件来开展性能测试.

4.2 算法评价指标

与文献 [12] 相同, 采用所得非支配解集大小和收敛性指标对算法进行评价. 其中: 非支配解集大小反映了算法提供给项目经理方案的多样性, 解集越大算法可提供的方案越多; 非支配解集收敛性指标^[21], 也称 C 指标, 表示非支配解集中解的相互支配程度.

对于两个非支配解集 $P_1, P_2 \subseteq \chi$, P_1 相对 P_2 的 C 指标定义如下:

$$C(P_1, P_2) = |Q|/|P_2|, \quad (12)$$

其中 $Q = \{s^2 | s^2 \in P_2, \exists s^1 \in P_1 : s^2 \prec s^1 \text{ or } s^1 = s^2\}$.

显然, $C(P_1, P_2) \in [0, 1]$, 其值越大说明 P_2 中越多的解被 P_1 中的某个解支配或互不支配. 算法比较时需同时计算 $C(P_1, P_2)$ 和 $C(P_2, P_1)$, 若 $C(P_1, P_2) > C(P_2, P_1)$, 则 P_1 的质量优于 P_2 .

4.3 实验统计结果与比较

为了测试 MOTLBO 的性能, 将其与现有的求解 MORCPSP-MS-RI 最好的两种算法 NSGA2^[11] 和 PAEDA^[12] 进行比较. 表 1 和表 2 分别给出了 3 种算法求解 J30 和 J120 的平均非支配解集大小.

表 1 J30 测试集的平均非支配解集大小

算法	1000 个调度	5000 个调度	50000 个调度
PAEDA	11.73	14.52	17.31
NSGA2	15.83	16.90	14.91
MOTLBO	9.96	10.87	11.23

表 2 J120 测试集的平均近非支配解集大小

算法	1000 个调度	5000 个调度	50000 个调度
PAEDA	20.12	27.73	35.94
NSGA2	25.04	31.24	36.70
MOTLBO	20.14	24.00	25.93

由表 1 和表 2 可以看出, MOTLBO 给出的非支配解集略小于 PAEDA 和 NSGA2. 需要指出的是, 虽然 PAEDA 和 NSGA2 获得的非支配解较多, 但质量不一定高. 因此, 下面用 C 指标考察解的质量.

为了直观体现非支配解集的 C 指标, 用盒图给出对比结果. 将 PAEDA、MOTLBO、NSGA2 成对比较. J30 和 J120 的 C 指标分布情况分别如图 2 和图 3 所示. 每个子图中包含 3 个盒图, 分别表示终止条件为 1 000、5 000、50 000 个调度数时 C 指标的分布. 盒图上部和下部框线分别表示上四分位数和下四分位数, 盒子中间的线表示中位数, 两端须分别代表 5% 和 95% 分位数, 须之外的十字点是离群值.

由图 2 和图 3 可知, 在 3 种终止条件下, 无论小规模 J30 还是大规模 J120, MOTLBO 的收敛性均明显优于 PAEDA, 且两者均优于 NSGA2. 例如, 对于 J120 测

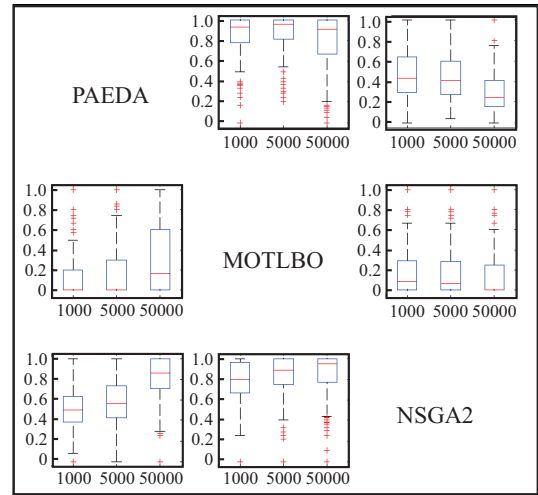


图 2 J30 测试集 C 指标盒

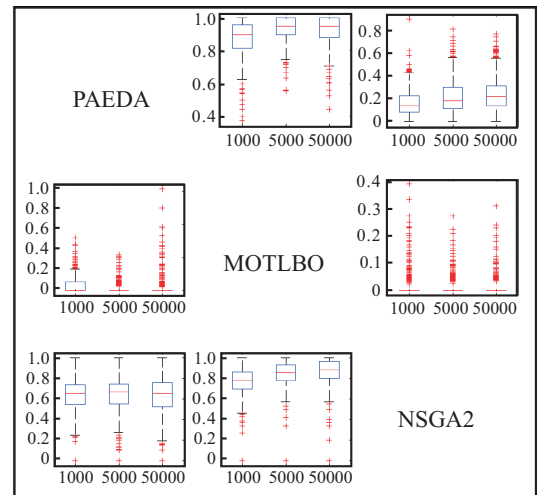


图 3 J120 测试集 C 指标盒

试集在最大调度数为 50 000 时, $C(\text{MOTLBO}, \text{PAEDA}) = 0.92$, 即第 1 行第 2 列子图的第 3 个盒图; $C(\text{PAEDA}, \text{MOTLBO}) = 0.02$, 即第 2 行第 1 列子图的第 3 个盒图. 这说明 PAEDA 92% 的解被 MOTLBO 的非支配解集中的解支配或互不支配, 而 MOTLBO 的非支配解集中仅有 2% 的解被 PAEDA 的非支配解集中的解支配或互不支配. 因此, 在相同计算量下, MOTLBO 所得非支配解集的质量明显优于 PAEDA 和 NSGA2 的结果. 简而言之, MOTLBO 是求解 MORCPSP-MS-RI 的一种更有效的算法.

5 结 论

本文在 TLBO 框架内提出了 MORCPSP-MS-RI 的一种多目标教学算法. 在特定的编码方式下, 通过设计交叉操作和改进策略以及 Pareto 档案集的更新, 取得了有效的求解性能, 结果优于现有的代表算法. 不仅丰富了多目标 RCPSP 的求解方法, 并且拓宽了 TLBO 算法的应用领域. 进一步的工作将研究多群体下的协同 TLBO 算法设计, 以及在其他类型的多目标调度问题上的应用.

参考文献(References)

- [1] 方晨, 王凌. 资源约束项目调度研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 641-650.
(Fang C, Wang L. Survey of study on resource- constrained project scheduling[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 641-650.)
- [2] Zheng X L, Wang L, Wang S Y. A novel fruit fly optimization algorithm for the semiconductor final testing scheduling problem[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 57(1): 95-103.
- [3] Wang L, Fang C, Suganthan P N, et al. Solving system-level synthesis problem by a multi-objective estimation of distribution algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(5): 2496-2513.
- [4] Chen W N, Zhang J. Ant colony optimization for software project scheduling and staffing with an event-based scheduler[J]. IEEE Trans on Software Engineering, 2013, 39(1): 1-17.
- [5] Blazewicz J, Lenstra J K, Kan A H G. Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity[J]. Discrete Applied Mathematics, 1983, 5(1): 11-24.
- [6] Hartmann S, Kolisch R. Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem[J]. European J of Operational Research, 2000, 127(2): 394-407.
- [7] Kolisch R, Hartmann S. Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update[J]. European J of Operational Research, 2006, 174(1): 23-37.
- [8] Al-Fawzan M A, Haouari M. A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling[J]. Int J of Production Economics, 2005, 96(2): 175-187.
- [9] Pollack-Johnson B, Liberatore M J. Incorporating quality considerations into project time/cost tradeoff analysis and decision making[J]. IEEE Trans on Engineering Management, 2006, 53(4): 534-542.
- [10] Mokhtari H, Baradaran Kazemzadeh R, Salmasnia A. Time-cost tradeoff analysis in project management: An ant system approach[J]. IEEE Trans on Engineering Management, 2011, 58(1): 36-43.
- [11] Ballestín F, Blanco R. Theoretical and practical fundamentals for multi-objective optimization in resource-constrained project scheduling problems[J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(1): 51-62.
- [12] Wang L, Fang C, Mu C D, et al. A Pareto-archived estimation-of-distribution algorithm for multiobjective resource-constrained project scheduling problem[J]. IEEE Trans on Engineering Management, 2013, 60(6): 617-626.
- [13] Rao R V, Savsani V J, Vakharia D P. Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(3): 303-315.
- [14] Rao R V, Savsani V J, Balic J. Teaching-learning-based optimization algorithm for unconstrained and constrained real-parameter optimization problems[J]. Engineering Optimization, 2012, 44(12): 1447-1462.
- [15] Rao R V, Patel V. Multi-objective optimization of heat exchangers using a modified teaching-learning-based optimization algorithm[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(3): 1147-1162.
- [16] Krishnanand K R, Panigrahi B K, Rout P K, et al. Application of multi-objective teaching-learning-based algorithm to an economic load dispatch problem with incommensurable objectives[M]. Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing. Berlin: Springer, 2011: 697-705.
- [17] Kolisch R. Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation[J]. European J of Operational Research, 1996, 90(2): 320-333.
- [18] Hartmann S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling[J]. Naval Research Logistics, 1998, 45(7): 733-750.
- [19] Li K Y, Willis R J. An iterative scheduling technique for resource-constrained project scheduling[J]. European J of Operational Research, 1992, 56(3): 370-379.
- [20] Kolisch R, Sprecher A. PSPLIB-a project scheduling problem library: OR software-ORSEP operations research software exchange program[J]. European J of Operational Research, 1996, 96(1): 205-216.
- [21] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.

(责任编辑: 齐 霖)