

基于多目标粒子群优化算法的 装备维修任务分配*

凌海风^{1,2}, 周献中¹, 江勋林², 萧毅鸿¹

(1. 南京大学 工程管理学院, 南京 210093; 2. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007)

摘要: 装备维修任务分配问题是典型的多约束/多目标/非线性规划问题, 利用传统方法无法求解, 因此提出了一种约束多目标粒子群算法, 并运用该算法对装备维修任务分配问题进行了优化求解。仿真结果表明, 约束多目标粒子群算法针对该问题, 在不同参数和约束条件下都有很强的收敛寻优能力, 能快速产生多个非支配解, 是一种高效的算法, 对实现装备维修任务分配的客观量化优化决策有重要作用。

关键词: 多目标优化问题; 粒子群算法; 装备维修任务分配

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2090-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.022

Study on equipment maintenance task assignment based on multi-objectives particle swarm optimization

LING Hai-feng^{1,2}, ZHOU Xian-zhong¹, JIANG Xun-lin², XIAO Yi-hong¹

(1. School of Management & Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Equipment maintenance tasks assignment problem is a typical multi-constraint/multi-objective nonlinear programming problem and it cannot be solved by conventional methods. This paper proposed a constraint multi-objective particle swarm optimization (CMOPSO) algorithm to solve the problem. Simulation results show that the CMOPSO algorithm is an effective one that has strong convergence optimization abilities for all different parameters and constraint conditions, and it can quickly produce a large number of optimal decision-making plans, so it is important to make optimized objective quantitative decision for equipment maintenance tasks assignment problem.

Key words: multi-objective optimization problem; particle swarm algorithm; equipment maintenance task assignment

0 引言

装备维修任务分配决策是装备维修保障的一项重要工作, 对保持和恢复装备战技术水平、提高装备的维修保障效益有重要作用。装备维修任务分配工作(主要指装备大修)由总部统一负责。在装备维修任务分配过程中, 装备类型、各类型装备需大修的数量以及各承修单位的实力都不一样, 如何在考虑经济性、时效性及装备维修质量的基础上, 权衡各方面因素, 科学安排修理任务, 使装备维修保障效益最大化, 必须建立优化模型, 科学定量决策。

国内外学者对多目标粒子群(MOPSO)算法的研究取得了不少成果, Margarita 等人^[1]对 MOPSO 进行了全面综述, 文献[2~4]也对 MOPSO 算法及其在各领域的应用进行了综述分析, 文献[5~7]对 MOPSO 算法进行了改进并对其进行了工程应用研究。理论和实际应用表明, MOPSO 算法对于那些用传统方法难以求解或求解效率极低的多约束/多目标/非线性规划问题有很好的求解效果, 因此该方法同样适用于复杂的装备维修任务分配问题。

1 问题模型

以全军工程装备大修计划分配为例, 设全军共有 m 个具有承担大修任务资质的修理机构, n 种需修理的装备类型, 则有如下设定:

a) 各装备类型需修理的装备数量可用矩阵 $REP = (r_1, r_2, \dots, r_m)$ 表示, 其中 $r_i (i \in [1, n])$ 表示第 i 种装备类型需修理的装备的数量。

b) 各修理机构的装备修理能力可用矩阵 $CAP = (a_{ij})_{m \times n}$ 表示, 其中 a_{ij} 表示第 i 个修理机构对第 j 种类型装备的修理能力, 即每年最多能完成该类型装备的修理数量。

c) 各修理机构根据人员保障训练需求, 对各类型装备修理任务的需求可用矩阵 $REQ = (b_{ij})_{m \times n}$ 表示, 其中 b_{ij} 表示第 i 个修理机构对第 j 种类型装备的修理需求, 即每年至少需要完成该类型装备的修理数量。

d) 各修理机构修理某类型装备的费用可用矩阵 $COST = (c_{ij})_{m \times n}$ 表示, 其中 c_{ij} 表示第 i 个修理机构对第 j 种类型装备的修理费用。

收稿日期: 2011-10-11; 修回日期: 2011-11-28 基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(90718036)

作者简介: 凌海风(1972-), 女, 浙江长兴人, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能信息处理与智能系统(ling_11178@sina.com); 周献中(1962-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为复杂系统建模与仿真、智能信息处理理论与技术; 江勋林(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能计算; 萧毅鸿(1983-), 男, 博士, 主要研究方向为智能信息处理与智能系统。

e)各修理机构修理某类型装备的时间可用矩阵 $TIME = (t_{ij})_{m \times n}$ 表示,其中 t_{ij} 表示第 i 个修理机构对第 j 种类型装备的修理时间。

f)各修理机构的装备修理质量综合评价向量用 $QAL = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ 表示,其中 $q_i (i \in [1, m])$ 表示第 i 个修理机构装备修理质量的综合评价得分。

同时,为了确保各修理机构均承担一定的修理任务,使之完成正常的装备维修保障训练,确定各修理机构年度装备修理数量至少为 $N_{\min}$ 台,修理费用至少为 $C_{\min}$ 万元。

1.1 目标函数

a)基于经济性的指标为

$$\min C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} c_{ij}$$

b)基于时效性的指标为

$$\min T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} t_{ij}$$

c)基于装备修理质量的指标为

$$\max Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_i / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

可转换为

$$\min (-Q) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} q_i / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

1.2 约束条件

a)装备修理任务分配全部完成为

$$r_j = \sum_{i=1}^m x_{ij}, j \in [1, n]$$

b)装备修理任务在年度内完成为

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} t_{ij} \leq T_{\max}, j \in [1, n]$$

即任何修理机构的年度修理时间不能超过 $T_{\max}$ (部队装备年度训练时间一般为 10 个月,因此 $T_{\max}$ 取 300 天)。

c)满足最少年度修理任务量为

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq N_{\min}, j \in [1, n], \forall i \in [1, m]$$

即任何修理机构的年度修理任务不能少于 $N_{\min}$ ($N_{\min}$ 一般可取 2~4) 台。

d)满足最少修理经费为

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} c_{ij} \geq C_{\min}, \forall j \in [1, n]$$

即任何修理机构的年度修理经费不能少于 $C_{\min}$ ($C_{\min}$ 一般可取 10) 万元。

e)满足修理机构修理需求为

$$x_{ij} \geq b_{ij}, \forall i \in [1, m], \forall j \in [1, n]$$

即对任何修理机构来说,分配的各类型装备的修理任务必须大于等于各修理机构对该类型装备的年度修理需求。

f)满足修理机构单装修理能力为

$$x_{ij} \leq a_{ij}, \forall i \in [1, m], \forall j \in [1, n]$$

即对任何修理机构来说,分配的各类型装备的修理任务必须小于各修理机构对该类型装备的年度修理能力。

2 约束多目标粒子群算法

2.1 多目标优化问题

定义 1 多目标优化。令 $S \subseteq \mathbb{R}^n$ 代表 n 维的搜索空间, $F \subseteq S$ 是可行空间(在无约束的情况下,可行空间等于搜索空

间)。令 $x = (x_1, x_2, \dots, x_D) \in S$ 为决策向量; $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \in O \subseteq \mathbb{R}^k$ 为包含 k 个目标函数评估的目标向量, O 为目标空间。

一般的 MOP 问题的基本数学模型可表示为

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} g_m(x) \leq 0, m = 1, 2, \dots, p \\ h_n(x) = 0, n = 1, \dots, q \\ x \in [X_{\min}, X_{\max}]^n \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: k 个子目标 $f_i(x) (i = 1, 2, \dots, k)$ 组成了目标向量空间 $f(x)$; $g_m(x)$ 和 $h_n(x)$ 分别表示不等式和等式约束, $x \in [X_{\min}, X_{\max}]^n$ 代表上下界限约束;多目标问题的解 x^* 在可行空间内,即 $x^* \in F$ 。

通常,相等约束可以转换为不等约束的形式:

$$|h_j(x)| - \delta \leq 0 \quad (2)$$

其中: δ 为允许偏差,一般为一个极小的正数。

2.2 约束多目标粒子群算法总体流程

CMOPSO 算法中一般包括一个进化群体 S 和外部档案 A 。多目标粒子群算法总体流程如下:

a)随机产生一个初始进化群体 S_0 (速度和位置)。

b)根据约束支配关系得到初始的外部档案 A_0 , 令进化代数 $t = 0$ 。

c)初始化每个粒子的局部最优 $pbest[i]$ 和全局最优 $gbest[i]$ 。

d)迭代循环直到最大进化代数 $g_{\max}$:

(a)自适应参数调整,主要包括惯性权重、学习因子等;

(b)针对群中的每个粒子,选取各粒子的全局向导,按式

(3)进行速度更新,按式(4)进行位置更新:

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + C_1 r_1 (x_{pbesti} - x_i(t)) + C_2 r_2 (x_{gbesti} - x_i(t)) \quad (3)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t) \quad (4)$$

(c)对到达边界的粒子进行处理,随机选择是重新初始化还是停在边界逆向飞行;

(d)按约束支配关系选取每个粒子的局部最优,对外部档案进行维护;

(e) $t = t + 1$, 转步骤 d);

e)算法结束。

为使 CMOPSO 算法适用于约束多目标优化问题,需增加约束处理机制。

2.3 约束处理机制

为了定量得到问题中每个解的约束违反程度,或者不可行度,根据式(1)表示的约束多目标问题,并由式(2)对等式约束进行转换后,个体的约束违反程度定义为

$$C(x) = \sum_{i=1}^p \max(g_i(x), 0) + \sum_{j=1}^q \max(|h_j(x)| - \delta, 0) \quad (5)$$

这里不可行度 $C(x)$ 可认为是解 x_i 到可行空间的距离, x_i 离可行空间越远,不可行度越大,反之越小;当 x_i 为可行解时,不可行度为零。

为了逐步增大满足约束要求的压力,使进化搜索由整个解空间逐步向着可行域中的 Pareto 最优解靠近。定义不可行度阈值 ε 为

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_0 \times (1 - 5t/4N) & t \leq 0.8N \\ 0 & t > 0.8N \end{cases} \quad (6)$$

其中: ε_0 是一个初始约束违反程度允许值, t 为当前进化代数,

N 为种群进化总代数。

在每一步进化中,对每一个候选解的不可行度与阈值进行比较。本文定义新的约束支配关系如下:

定义2 可接受解。对于每个候选解 x_i ,若解 x_i 的不可行度 $C(x_i) \leq \varepsilon$,则称 x_i 为可接受解。

定义3 约束支配。两个候选解 x_i 与 x_j ,称 x_i 约束支配 x_j ,若满足下列条件之一:

- 解 x_i 是可接受解,而解 x_j 不是可接受解。
- 解 x_i 与 x_j 都不是可接受解,但解 x_i 的不可行度小于解 x_j 。
- 解 x_i 与 x_j 都是可接受解且 x_i 支配 x_j 。

3 数值实验

设 $m=10$ (10 个具有大修任务资质的修理机构), $n=5$ (需修理的装备类型有五种)。各装备类型需修理的数量向量为 $REP = \{15, 20, 25, 20, 30\}$ 。各修理机构修理某类型装备的费用矩阵为 $COST = (c_{ij})_{m \times n}$,其中 c_{ij} 为 2~10 之间的随机数;各修理机构修理某类型装备的时间矩阵 $TIME = (t_{ij})_{m \times n}$,其中 t_{ij} 为 5~30 之间的随机数。各修理机构的装备修理质量综合评价向量 $QAL = (q_1, q_2, \dots, q_m)$,其中 q_i 为 0.8~1 之间的随机数。各修理机构年度装备修理数量至少为两台 ($N_{\min} = 2$),修理费用至少为 10 万元 ($C_{\min} = 10$)。

为简化起见,各修理机构的装备修理能力矩阵 $CAP = (20)_{10 \times 5}$,表示各机构对任一种装备类型的修理上限都是每年 20 台,而各修理机构对各类型装备的修理任务无特殊需求,即 $REQ = (0)_{10 \times 5}$ 。

基于 CMOPSO 算法,该问题的典型解集之一为 174 个非劣解(档案规模限制在 200),如图 1 所示(质量指标取正值绘制)。

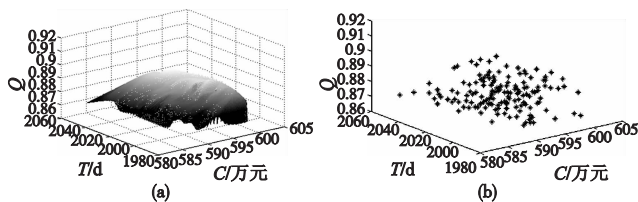


图1 Pareto解集示例

图1中, T 为时间轴,单位为天; C 是费用轴,单位为万元; Q 为质量轴。

为测试算法在不同情况下的实际运算效果,在保持基本参数不变的情况下,改变各修理机构的装备修理能力矩阵 CAP 及各修理机构的修理需求矩阵 REQ ,使 $CAP = (a_{ij})_{10 \times 5}$,其中 a_{ij} 为 2~6 之间随机产生的整数,表示第 i 个修理机构对第 j 种装备类型的修理上限; $REQ = (b_{ij})_{10 \times 5}$,其中 b_{ij} 为 0~2 随机产生的整数,表示第 i 个修理机构对第 j 种装备类型的修理下限。

基于本文提出的 CMOPSO 算法,改变 CAP 和 REQ 矩阵后,该问题的典型解集之一是可得 115 组非劣解(档案规模限制在 200),如图 2 所示。

对第 j 种类型的装备,各修理机构必须尽可能平均承担,即满足下式:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{ij} = r_j \\ \forall p, q \in [1, m], -1 \leq x_{pj} - x_{qj} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中: r_j 为第 j 种类型装备的年度修理量,而 x_{ij} 表示第 i 个修理

机构对第 j 种装备类型的修理数量。以第一种类型装备平均分配修理任务为例,经算法优化求解可得 66 组非劣解(档案规模限制在 200),如图 3 所示。

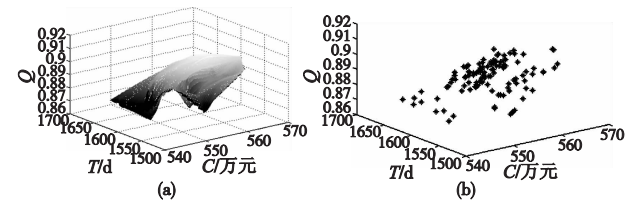


图2 修改条件后的Pareto解集

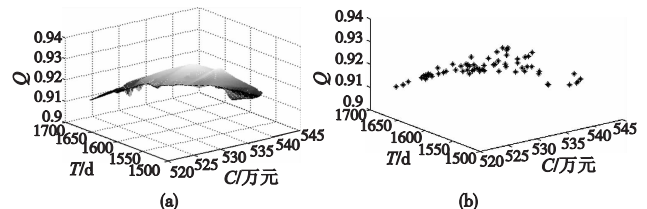


图3 平均分配修理任务后的Pareto解集

对复杂的装备维修任务分配决策问题,经多目标优化建模后用本文提出的 CMOPSO 算法进行仿真计算,在不同的条件下均可以快速获得多组 Pareto 非劣解。这些非劣解从优化的角度来看,由于多目标之间的不可公度性,任何一个非劣解都可作为候选的决策方案。若方案很少甚至唯一,则可直接根据优化结果给出决策方案;但若方案很多,则需要进一步结合决策者的偏好或其他方法,为决策者提供唯一满意的决策方案。

4 结束语

针对装备保障中非常典型的装备大修任务分配决策问题,本文建立了一个多目标多约束优化模型,并提出了一种 CMOPSO 算法。该算法通过定义个体的约束违反程度和不可行度阈值逐步增大满足约束要求的压力,可以快速获得多组 Pareto 非劣解。仿真实验结果表明,本算法对该类问题有很好的求解能力,能迅速求解得到可行解决方案集,对最终实现装备维修任务分配的客观量化优化决策有着重要作用。

参考文献:

- [1] MARGARITA R S, COELLO C A C. Multi-objective particle swarm optimizers: a survey of the state-of-the-art[J]. International Journal of Computational Intelligence Research, 2006, 2(2): 287-308.
- [2] 倪庆剑, 邢汉承, 张志政, 等. 粒子群优化算法研究进展[J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(3): 349-357.
- [3] 薛洪波, 徐淑娟. 粒子群算法在多目标优化中的应用综述[J]. 渤海大学学报: 自然科学版, 2009, 30(3): 265-269.
- [4] 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] 王雅琳, 王宁, 阳春华, 等. 求解任务分配问题的一种离散微粒群算法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(3): 571-576.
- [6] LEI De-ming. A Pareto archive particle swarm optimization for multi-objective job shop scheduling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(1-2): 157-165.
- [7] SHARAF A M, EL-GAMMAL A A A. Particle swarm optimization PSO: a new search tool in power system and electro technology[C]// Studies in Computational Intelligence. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 235-294.