

Research on Grid Workflow Scheduling Based on the Discrete Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm

LI Jinzhong, XIA Jiewu, WEI Simin, HUANG Chuanlian

School of Information Science and Media, Jinggangshan University, Ji'an, China

e-mail: lijinzhong@jgsu.edu.cn, leezhong2005@126.com

Abstract: Existing grid workflow scheduling algorithms commonly suffer by one or several of the following drawbacks: most only considerations of DAG grid workflow model, not enough considerations of multi-dimensional QoS parameters and the single objective optimal scheduling. The paper presents a grid workflow scheduling algorithm DMOPSO based on the discrete multi-objective particle swarm optimization. The proposed algorithm redefines the operation rules of particle's position and velocity, and the moving equation of particle for an effective use of crowding distance in multi-objective particle swarm optimization (MOPSO_CD) algorithm according to the characteristics of discrete variable. Compared with a grid workflow scheduling algorithm OMOPSO which is rounded to discrete for position and velocity of particles in the movement equation of particles based on the original MOPSO_CD algorithm, the experimental results show that the DMOPSO algorithm obtains more Pareto optimal solutions and better mean result of solutions.

Keywords: QoS; Grid Workflow; Scheduling; Discrete Multi-objective Particle Swarm Optimization

基于离散多目标粒子群算法的网格 workflow 调度研究

李金忠, 夏洁武, 魏斯民, 黄传连

井冈山大学信息科学与传媒学院, 吉安, 中国, 343009

e-mail: lijinzhong@jgsu.edu.cn, leezhong2005@126.com

【摘要】针对当前网格 workflow 调度算法中大多只考虑 DAG 结构的网格 workflow、涉及 QoS 参数较少及将多 QoS 参数聚合成一个单目标函数进行优化调度的现状, 提出了一种基于离散多目标粒子群的网格 workflow 调度算法 DMOPSO。该算法应用 MOPSO_CD 算法, 根据离散量的特点, 对粒子的位置和速度的相关运算规则及粒子的运动方程进行了重新定义。通过与基于对原 MOPSO_CD 算法中粒子的位置和速度采取直接取整法进行离散化后所设计的网格 workflow 调度算法 OMOPSO 比较, 实验结果表明了 DMOPSO 算法能获取更多的 Pareto 优化解和更优的平均结果。

【关键词】服务质量; 网格 workflow; 调度; 离散多目标粒子群

1 引言

网格 workflow 调度问题是网格 workflow 中的关键问题之一, 直接影响网格 workflow 执行成功与否和效率的高低。在网格服务组成的 workflow 中, 服务与资源间的映射关系组成网格服务的调度方案, 作为一个 NP 完全问题借助典型算法很难解决网格 workflow 调度。人们尝试用各种启发式方法进行求解, 如采用遗传算法 (GA)^[1], 禁忌搜索 (TS) 算法^[2], 模拟退火 (SA) 算法^[3]等以解决网格 workflow 调度问题。

现存的网格 workflow 调度算法中大部分存在一个或

多个以下缺陷: 只考虑 DAG 网格 workflow 模型, 缺乏如循环、选择等结构, 满足不了更复杂的网格 workflow 应用; 至多考虑响应时间和服务费用 2 维 QoS 参数, 对于可靠性、可利用性、声誉等 QoS 参数涉及较少; 将多维 QoS 参数的多目标通过某种聚合方法 (如加权法) 转化为一个单目标函数, 采用单目标优化算法进行优化, 所产生的最优调度方案是满足约束条件的单目标最优解, 不能从真正意义上解决多目标的优化问题。

MOPSO_CD^[4] 是一种新型多目标粒子群优化算法。该算法采用归档集储存产生的非支配解, 引入拥挤距离机制与变异操作, 保证了归档集中非支配解的多样性和收敛性, 并采用约束处理机制解决约束优化问题。对粒子群算法的研究目前主要集中在连续问题

资助信息: 江西省教育厅科技资助项目 (GJJ09589)

*通讯作者: 魏斯民 (1961-), 男, 江西南昌人, 教授。

的优化求解方面，在离散组合优化方面的研究还非常有限。MOPSO_CD算法适合于求解连续优化问题，为能同样解决离散问题，必须对原算法进行修改。

出于此动机，本文结合网格 workflow 调度问题的特点，首先将 MOPSO_CD 算法进行离散化以构造离散多目标粒子群算法，然后基于该算法，设计了一种带多 QoS 约束的，多目标优化的网格 workflow 调度算法 DMOPSO。该调度算法采用 AGWL 建模网格 workflow，考虑如循环、并行、选择等结构；在满足响应时间 T、服务费用 C、可靠性 R、可提供性 Av 和声誉 Re 各 QoS 参数约束条件下同时优化这 5 维 QoS 参数，最终产生一组 Pareto 优化解集，决策者可从中选取满足其个性化需求的一个精确解。DMOPSO 算法有效克服了现有调度算法中网格 workflow 结构表达不足、考虑 QoS 参数较少及单目标优化调度的缺陷。

2 网格 workflow 调度模型和思想

采用抽象网格 workflow 语言 AGWL^[5,6] 建模网格 workflow。AGWL 描述的网格 workflow 包含活动、控制流结构、数据流链、属性和约束。其活动可为原子活动和复合活动。控制流结构有：1) 基本控制流结构：顺序(sequence)、条件(if、switch)、循环(while、dowhile、for、forEach)、有向无环图(dag, directed acyclic graph); 2) 高级控制流结构：并行部分(parallel)，并行循环(parallelFor、parallelForEach)。假设一个抽象网格 workflow 由 m 个活动 {A₁, A₂, ..., A_m} 组成，每个活动对应于一个抽象网格服务，则 m 个活动对应于 m 个抽象服务 {AS₁, AS₂, ..., AS_m}，假设对 AS_i，存在 n_i 个候选网格服务 {GS_{i1}, GS_{i2}, ..., GS_{ini}}。网格 workflow 所支持的 QoS 参数取决于网格服务所支持的 QoS 参数。我们选择 5 个较通用 QoS 参数 (T、C、R、Av、Re) 构建一个 5 元组模型 (依据该模型可扩充评价更多维 QoS 参数) 即 QoS_{GS} = (T_{GS}, C_{GS}, R_{GS}, Av_{GS}, Re_{GS}) 衡量网格服务的 QoS。则活动 A 和网格 workflow GW 的 QoS 参数模型可分别对应设计为：QoS_A = (T_A, C_A, R_A, Av_A, Re_A) 和 QoS_{GW} = (T_{GW}, C_{GW}, R_{GW}, Av_{GW}, Re_{GW})。网格 workflow 的各维 QoS 参数的效益函数定义为：U_p(F) = Ω_p(A₁, A₂, ..., A_m)，其中 F 代表 T、C、R、Av、Re，Ω 表示加性、乘性、最大化等运算的复合，p 为某一调度方案。网格 workflow 调度过程就是控制 workflow 中各活动的执行顺序，并从各活动对应的候选网格服务中选择合适的服务进行执行的过程，使得能够满足 U_p(F) Δ GWF，希望 U_p(F) 追求以下的优化目标：最小化 T 和 C，最大化 R、Av 和 Re，其中 Δ 表示 ≤ 或 ≥ 运算符，GWF 表示对应的各维 QoS 参数约束常数。这些目标经归一量化转化后，可统一表示为：Min U_p(F)。本模型可推广到任意多个目标函数和约束条件。

3 基于离散多目标粒子群的网格 workflow 调度算法

网格 workflow 调度问题是一个离散问题，而 MOPSO_CD 算法的粒子状态更新机制是连续运算规则，适合求解连续优化问题。为使其能有效解决该问题，本文借鉴文献[7]中的思想，对粒子的位置和速度的相关运算规则及粒子的运动方程进行了重新定义以将其离散化，尔后应用离散化后的多目标粒子群算法设计了一种网格 workflow 调度算法 DMOPSO。

3.1 编码策略

采用非负整数定长编码方式。每个粒子代表一个调度方案，由 D 维 (D 表示网格 workflow 中所包含的原子活动的总数) 组成。第 d 维上的值表示第 d 个原子活动所选的候选网格服务的编号，整数 d=1, 2, ..., D。

3.2 粒子状态更新机制

1) 位置和速度：粒子位置 X 是一个 D 维向量，在 X 中，维表示调度顺序。第 i 个粒子的位置 X_i 可表示为 X_i = (X_{i1}, X_{i2}, ..., X_{ij}, ..., X_{iD})，其中 0 ≤ i < D, 0 ≤ X_{ij} < N_j，N_j 表示第 j 个活动所对应的候选网格服务的总个数。速度 V 的作用是改变粒子的位置，速度 V 是个 D 维向量，表示为：V_i = (V_{i1}, V_{i2}, ..., V_{ij}, ..., V_{iD})，0 ≤ i < D, 0 ≤ V_{ij} < N_j。

2) 减法算子 ⊖：粒子的不同位置相减运算，结果为粒子的速度，即 V = X₂ ⊖ X₁。速度的每一维数据由式(1)确定：V_i = { RandomInt(0, GS - 1), if (X_{1i} = X_{2i})
X_{2i}, else } ... (1)

GS 为第 i 个活动所对应的候选网格服务的最大编号。

3) 加法算子 ⊕：两个速度相加，得到新的速度，即 V = V₁ ⊕ V₂，由速度的每一维数据式(2)确定：

$$V_i = \begin{cases} V_{2i}, & \text{if } (V_{2i} = 0) \\ V_{1i}, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

4) 乘法算子 ⊗：粒子的速度与常量 c 相乘得到新的速度，即 V = c ⊗ V，速度的每一维数据由式(3)确定：

$$V_i = \begin{cases} V_i, & \text{if } (RandomDouble(0,1) \geq c) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

5) 移动算子 +：粒子在当前位置 X 以速度 V 移动到新位置，即 X = X + V，实现了粒子位置的移动，使粒子进入了一个新的位置，新位置的每一维的数据依次由式(4)确定：

$$X_i = \begin{cases} \Phi, & \text{if } ((V_i = 0) \parallel (V_i = X_i)) \\ swap(X_i, V_i), & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

6) 粒子的运动方程

由于离散量运算的特殊性，对粒子的运动方程作了修改，取消了原有的惯性项，定义为：

$$V(t+1,i)=C1 \otimes [P(t,i) \otimes X(t,i)] \oplus C2 \otimes [P(t,g) \otimes X(t,i)] \dots (5)$$

$$X(t+1,i)=X(t,i)+V(t+1,i) \dots (6)$$

3.3 DMOPSO 调度算法描述

算法 DMOPSO 的描述如下:

1)初始化各候选网格服务集 GSS 的各维 QoS 参数值, 目标函数和约束条件等。

2)通过活动约束属性, 对不满足活动的 QoS 局部约束的候选网格服务 GS 进行过滤, 缩小编码和搜索空间。

3)初始化: 种群规模 N、归档集大小 S、变异概率 Mut, 最大迭代次数 It、当前进化代数 G=0 等参数。

4)对每个粒子进行初始化:

①采用改进的种群初始化方法初始化各个粒子的位置 X: 对网格 workflow 中每个活动先利用贪婪法产生 5 个粒子, 分别是挑选候选网格服务中 T、C、R、Av、Re 最优而组成, 再以随机方式产生 N-5 个满足约束条件的粒子组成粒子群 P。

②随机初始化各粒子的速度 V, 整数 $V \in [0, GS)$ 。

③计算每个粒子对应的 5 个目标函数的适应值 $obj[i][j]$, 其中 $0 \leq j < 5$ 。

④初始化粒子个体极值 $Pbest[i]=P[i]$ 。

⑤根据各个粒子的 $Pbest[i]$ 找出初始种群的全局极值 Gbest。

5)将 P 中的非支配粒子存储在归档集 Ar 中。

6)计算 Ar 中每个非劣解的拥挤距离, 并按拥挤距离降序排列。

7)对每个粒子进行更新

①从 Ar 中拥挤距离较大的前 10% 的非劣解集中随机选择某一个体, 将其位置设置为 Gbest。

②依式(5)更新速度, 依式(6)更新位置。

③若 $G < It * Mut$, 则执行变异操作。

④评估每个粒子对应的多目标函数的适应值。

8)依约束条件进行支配检测, 在归档集中删除支配解, 插入新的非支配解。

9)依支配关系, 比较粒子 P[i]新位置和 $Pbest[i]$ 的优劣, 当 P[i]占优时, 则 $Pbest[i]=P[i]$ 。

10)G++, 若 $G < It$, 则转步骤 5), 否则, 输出 Ar 中的解, 算法结束。

4 实验结果及分析

实验环境为 p4 2.80GHZ 的 cpu, 内存 512MB。借鉴文献[1]中实验的思想方法进行仿真实验, 采用 vc++ 编程实现。给定一个名为“旅行计划”的网格 workflow 实例, 如图 1, 该 workflow 顺序由 4 个活动组成: 1 个原子活动, 3 个复合活动(1 个循环、2 个并行, 且一并行活动还包含选择子复合活动), 共包含 9 个原子活动。

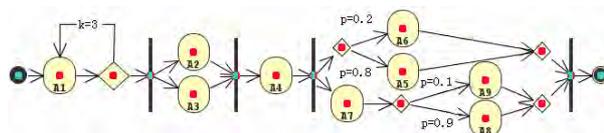


Figure 1. A grid workflow instance:travel planner

图 1. 一个网格工作流实例: 旅行计划

4.1 参数及函数的设定

$N=S=100$, 各候选网格服务的各维 QoS 参数值采用随机方式生成, 且服务费用 $C=$ 常数 $D/$ 响应时间 $T+$ 随机扰动 RND 。依图 1 所示的网格 workflow 结构和文[6]中服务质量估算算法可得网格 workflow 中各维 QoS 参数的全局目标函数(本文最小化各目标函数值)分别为:

$$obj[0]=3*t1+Max(t2,t3)+t4+$$

$$Max(0.8*t5+0.2*t6,t7+0.9*t8+0.1*t9);$$

$$obj[1]=3*c1+c2+c3+c4+0.8*c5+$$

$$0.2*c6+c7+0.9*c8+0.1*c9;$$

$$obj[2]=Max[2]-pow(r1,3)*r2*r3*r4*$$

$$(0.8*r5+0.2*r6)*r7*(0.9*r8+0.1*r9);$$

$$obj[3]=Max[3]-pow(Av1,3)*Av2*Av3*Av4*(0.8*Av5+$$

$$0.2*Av6)*Av7*(0.9*Av8+0.1*Av9);$$

$$obj[4]=Max[4]-(4*Re1+2*Re2+2*Re3+4*Re4+1.6*Re5$$

$$+0.4*Re6+Re7+0.9*Re8+0.1*Re9)/16;$$

各维 QoS 参数全局约束值分别定义为 $GW[i]=Max[i]-(Max[i]-Min[i])*k$ 和 $GW[j]=Min[j]+(Max[j]-Min[j])*k$, 其中 k 表示约束百分比, $GW[i]$ 可表示 T 和 C 的约束值, $GW[j]$ 可表示 R、Av 和 Re 的约束值, $0 \leq i < 2$, $2 \leq j < 5$ 。Max[d], Min[d] 分别顺序表示执行整个网格 workflow 所有方案中所需 T、C、R、Av 和 Re 的最大、最小值。且定义各维 QoS 参数约束 $constr[d]$ 分别为 $GW[i]-obj[i]$ 和 $Max[j]-obj[j]-GW[j]$, 进行归一量化后定义约束函数分别为 $constr[d]/(Max[d]-Min[d])$, 其中 $0 \leq d < 5$ 。

4.2 实验分析

4.2.1 可行性实验

表 1 是约束百分比 k、候选网格服务数 GS、最大迭代次数 It 各自不同时, 算法 DMOPSO 与基于对原 MOPSO_CD 算法中粒子的运动方程中位置和速度直接取整法进行离散化后所设计的网格 workflow 调度算法 OMOPSO 的 cpu 时间开销和最终归档集中解的个数 s 的比较。从表可知: 随着 k、GS、It 的增加, 所需时间趋于增加但有所波动。当 $k \in [0.2, 0.6]$ 时, DMOPSO 所需时间较短且整体上优于 OMOPSO。在 k 为 0.7 和 0.75 时, DMOPSO 所需时间迅速增长, 而 OMOPSO 所需时间变化不大, 但在 k=0.75 时 OMOPSO 找不到 Pareto 解, 而 DMOPSO 却能找到更多的 Pareto 解, 其主要原因是受改进的种群初始化方法的影响。

Table 1. Comparison of CPU mean executing time(ET) and the number of solutions(Ar) in the archive
表 1. 执行时间 ET 和最终归档集中解的个数 s 的比较

参数	DMOPSO(ET/s)		OMOPSO(ET/s)	
k=0.2,GS=32,It=100	2.2066	100	3.6438	100
k=0.3,GS=64, It =200	1.2128	100	3.4378	100
k=0.4,GS=100, It =500	1.25	100	2.844	100
k=0.5,GS=200, It =1000	1.7656	100	3.7812	100
k=0.6,GS=300, It =5000	9.6786	62	11.3998	100
k=0.7,GS=300, It =10000	2981.152	55	11.3906	19
k=0.75,GS=300,It=10000	387339.08	59	12.9156	0

4.2.2 有效性实验

根据表 1 所示的不同 k、GS、It 取值条件下，两算法求解该问题所产生的满足约束条件的 Pareto 优化解集中各维 QoS 参数的平均值见图 2 和图 3。理论上，k、It 的渐增，会使各 QoS 参数不断优化，而 GS 的渐增只是增加了可选网格服务，在一定程度上也可能会使各 QoS 参数不断优化。从两图可视：随着 k、GS、It 的增大，两算法产生的 T 均值总体趋向减小，而 C 均值有所波动，且 T 和 C 均值有些呈逆向变化，主要是受随机初始化 QoS 参数和种群、定义 T、C 为互冲突参数的影响。而对于参数 R、Av、Re 各均值趋于渐增，不断优化中，但期间也显少波动其主要原因是随机初始化 QoS 参数和种群所致。从两图中各维 QoS 参数均值来看，DMOPSO 总体上要优于 OMOPSO，说明 DMOPSO 解决带多 QoS 约束的多目标全局优化的网格工作流调度问题是有效的。

OMOPSO 算法是将离散空间映射到连续粒子运动空间，在计算上仍保留 MOPSO_CD 算法的速度—位置更新机制的连续运算规则，它对迭代产生的连续解的粒子位置采用近似取整策略的直接离散化方式以

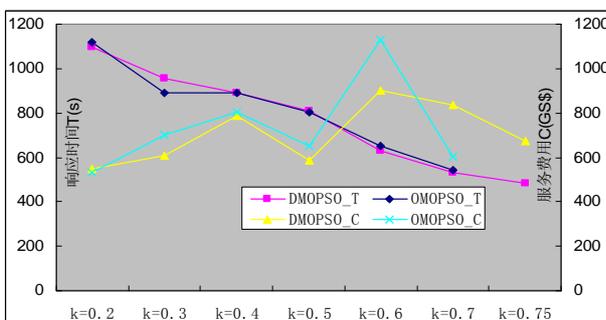


Figure 2. Average value of T & C in the Pareto set
图 2. Pareto 解集中 T&C 的平均值

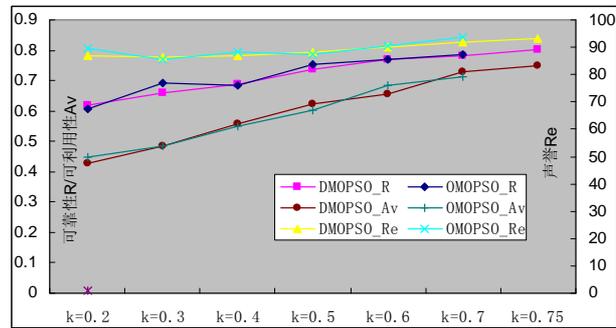


Figure 3. Average value of R & Av & Re in the Pareto set
图 3. Pareto 解集中 R & Av & Re 的平均值

评价解的质量，这种方法具有可以直接利用原来的连续变量优化方法的优点，但算法生成的连续解与目标函数评价价值之间存在多对一的映射，其目标函数不能完全反应解的质量。由于网格工作流调度问题离散空间的特殊性，连续空间中的向量计算不能很好地反映粒子对应离散状态的变化，未能充分利用 MOPSO_CD 算法的性能，导致 OMOPSO 算法获得的结果稍劣于 DMOPSO。

5 结语

本文基于MOPSO_CD算法，根据网格工作流调度问题和离散量的特点，对粒子的位置和速度的相关运算规则及粒子的运动方程进行了重新定义，提出了一种基于离散多目标粒子群的网格工作流调度算法 DMOPSO，该算法是1)基于AGWL语言，考虑了更丰富的网格工作流结构，能表达含循环、并行、选择等结构的更复杂的网格工作流应用。现有的调度算法主要是以DAG表示的网格工作流；2)考虑更多维QoS参数，同时优化5维QoS，且还可扩展更多的QoS参数；3)将多维QoS参数既作为目标函数又作为约束条件，通过同时优化多个目标函数产生一组满足约束条件的 Pareto 优化解集，这些解具有多样性且在不同的目标上各占优势，决策者可依实际需要和偏好选择最满意的 Pareto 优化解，未被选用的 Pareto 优化解可作为备用，在调度发生失效时启用，具有一定的灵活性。而现有的相关文献大部分只能得到一个满足约束条件的优化解，用户没有选择的余地，缺乏灵活性。

设计DMOPSO算法的关键是将粒子的位置、速度及其运算规则与网格工作流调度问题结合用恰当的方式表示出来，如何有效设置DMOPSO算法的参数和提高 Pareto 优化解的质量，探索更好的离散化处理策略以获取更优的调度方案仍有待于作进一步的研究。

References (参考文献)

- [1] WANG Yong, HU Chun-Ming, DU Zong-Xia. QoS-Awared grid workflow schedule, *Journal of Software*, 2006, 17(11). pp. 2341-2351 (Ch).
王勇, 胡春明, 杜宗霞. 服务质量感知的网格 workflow 调度[J]. *软件学报*, 2006, 17(11): 2341-2351.
- [2] S. Benedict, V. Vasudevan. Improving Scheduling of Scientific Workflows Using Tabu Search for Computational Grids [J], *Information Technology Journal*, 2008, 7 (1): 91-97.
- [3] Benedict S., Vasudevan V. Scheduling of Scientific Workflows Using Simulated Annealing Algorithm for Computational Grids [J], *International Journal of soft Computing*, 2007, 2 (5): 606-611.
- [4] Raquel C R, Naal P C. An Effective Use of Crowding Distance in Multiobjective Particle Swarm Optimization [C]. *Proceedings of Genetic And Evolutionary Computation Conf (GECCO'05)*. Washington DC, USA. 2005: 257-264.
- [5] T. Fahringer, J. Qin, S. Hainzer. Specification of Grid Workflow Applications with AGWL: An Abstract Grid Workflow Language [C]. *Proceedings of IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid 2005(CCGrid2005)*, Cardiff, UK. IEEE Computer Society Press.
- [6] LI Jin-zhong, LIANG Zheng-you. Quality of service estimation research based on the AGWL grid workflow model. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(1): 323-325 (Ch).
李金忠, 梁正友. 基于 AGWL 网格 workflow 模型的服务质量估算研究[J]. *计算机应用*, 2009, 29(1): 323-325.
- [7] ZHONG Yi-wen, YANG Jian-gang, NING Zheng-yuan. Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm for TSP Problem. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 6. pp: 89-94(Ch).
钟一文, 杨建刚, 宁正元. 求解 TSP 问题的离散粒子群优化算法[J]. *系统工程与理论*. 2006, 6: 89-94.