

基于组合交换的分散式项目再调度优化方法^①

王 磊^{②*} ** 战德臣 * 聂兰顺^{③*}

(^{*} 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

(^{**} 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 苏州 215163)

摘要 为实现多资源主体分散式协同运作的复杂项目计划的调整,提出了一种基于组合交换求解具有分散式决策特征的项目再调度的方法。该方法通过引入资源交换来弥补单纯依靠资源再分配的局限性,以提高资源调整的匹配效率和减小变更对计划调整范围的影响;针对交换过程的多对多协商问题,提出了基于进化策略的附加成本优化获胜者判定算法,以减小变更对计划调整幅度的影响。实验表明该方法能够有效减少再调度过程的任务调整次数和降低再调度附加成本,从而提高解鲁棒性,同时能够保证项目计划的质量鲁棒性。

关键词 项目再调度,分散式决策,组合交换,解鲁棒性,质量鲁棒性

0 引言

复杂项目在执行阶段由于频繁受到多种不确定扰动因素影响,经常需要对基准计划进行调整以保证生产的顺利完成,这种调整称为项目再调度。项目再调度研究领域的一个重要概念是调度的鲁棒性。鲁棒性可分为单一标准和组合标准两种,其中单一标准又可进一步分为质量鲁棒性(quality robustness)和解鲁棒性(solution robustness)^[1]两类。质量鲁棒性一般以再调度结果为主要决策目标,比如项目工期或者交货期的变化最小,达到再调度结果的调整幅度尽量小的目标;解鲁棒性一般以再调度过程为主要决策目标,比如任务调整操作的次数最少,达到再调度过程的调整范围尽量小的目标。Salmasnia 等^[2]针对项目鲁棒调度问题进行研究,提出了求解时间、成本、质量三者权衡的鲁棒调度方法。Lambrechts 等^[3]对由于资源不可用造成任务工期不确定鲁棒调度进行了研究,分析了资源受限对任务执行时间以及工期的影响。随着分散式多项目调度问题被提出并逐渐引起关注,有研究者对基于分散式决策的项目再调度问题进行了探讨与研究。Lee^[4]针对分散式多项目调度项目在执行阶段

由于受到调度扰动需要进行再调度的问题,提出了基于多智能主体系统(multi-agent system,MAS)模型的分散式多项目资源控制问题求解方法,采用了组合拍卖机制分配资源时间槽。实验证明,基于拍卖的信息系统可以求解小规模(项目至多 9 个,每个项目至多包含 15 个任务)问题。

传统的项目再调度方法一般依靠资源再分配、任务时间调整等手段实现对基准计划的调整,跨组织、分散式的项目环境为新的计划调整手段提供了更大的可能性和应用空间。分散式项目再调度方法通过引入多个项目主体、资源主体的分散式自主决策方式,能更好地发挥各个决策主体在再调度过程中的自适应能力和多主体之间资源调整的互补效应,通过项目之间的资源交换与资源调整协调,能减小变更对于计划的影响面范围,提高再调度的资源调整效率。另一方面,频繁的计划变更与任务调整必然引起再调度附加成本的增加,导致调度解鲁棒性的降低,通过引入多项目主体、多资源主体之间的资源调整与资源再分配协调,也能减小再调度附加成本的增加,从而提高再调度过程解鲁棒性。在进行上述分析的基础上,本文针对多项目、多资源主体协同的跨组织项目计划调整问题,提出了一种基于组合交换的分散式项目再调度优化方法。实验证

① 国家自然科学基金(61273038,61033005),973 计划(2010CB328004),国家科技支撑计划(2013BAH17F03)和山东省科技攻关计划(2012GGX10309)资助项目。

② 男,1982 年生,博士,助理研究员;研究方向:项目调度,协调优化方法研究;E-mail:triplestone360@163.com

③ 通讯作者,E-mail:nls@hit.edu.cn

(收稿日期:2013-06-17)

明,该方法能够通过多主体分散决策与资源交换协调,能够有效减少任务调整次数,降低再调度附加成本,从而提高解鲁棒性和质量鲁棒性的控制效果。

1 分散式项目再调度问题

从单件生产(OKP)企业的多项目主体、多资源主体的项目再调度过程可以看出,对于发生扰动的项目计划进行修复与调整不单单涉及到一个独立的项目,而是由多个扰动项目和资源主体分散式协同完成的。每个项目监测自身的计划执行情况,当发生了一定的变更而不得不进行计划调整时对任务安排进行修改,该过程中一项重要的手段是资源调整。图1描述了多个扰动项目通过资源调整实现对计划变更的项目再调度过程。值得注意的是,在分散式再调度过程中项目主体、资源主体之间存在资源调整的相互协调,体现“调度+协调”思想^[5],通过项目内部关注自身计划变更优化、多项目/资源主体之间进行协调的方式获得更优的再调度效果。

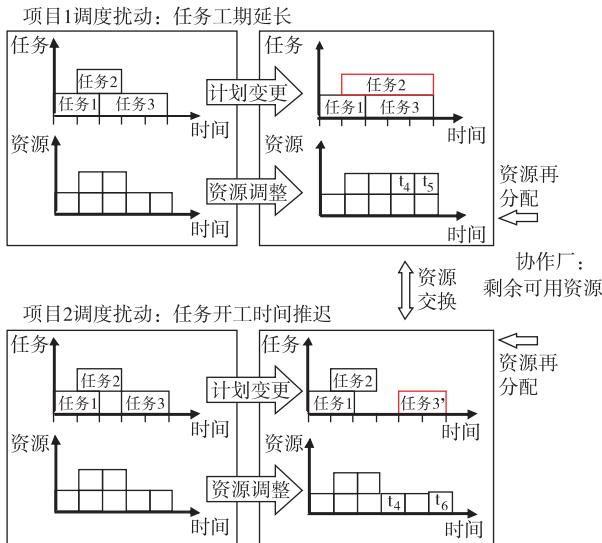


图1 基于资源调整协同的分散式项目再调度

不论采取何种计划修复与调整方式,再调度过程都将产生一定的附加成本,这包括了对于任务调整、资源调整所付出的代价,以及多决策主体之间进行协调所需付出的成本。附加成本的增加对再调度鲁棒性有较大影响,尤其在分散式项目再调度环境下这种影响更加明显。项目再调度需要对原生产计划进行修改,会对预先排定的任务和资源造成一定波动,对项目管理者而言,新调度同原调度间的差异越小越好,特别是在分散式项目中,生产波动会带来

更多的额外变更和附加成本。因此,降低扰动对生产稳定性的影响是再调度的一个主要目标。另外,项目再调度也要考虑到同原调度优化目标的一致性和保持性,即要尽可能保持原调度的优化目标。

设定项目原计划为 $S^0 = (s_1^0, s_2^0, \dots, s_n^0)$, 当由于资源不可用或可用量减少而导致资源约束不满足,原项目计划失效的情况下,经过调整和修补后的再调度结果为 $S^N = (s_1^N, s_2^N, \dots, s_n^N)$, 再调度的目标是最小化新调度同原调度之间的差异。分散式多项目环境具有一些新特征,多个决策主体根据各自不同的局部决策信息和决策内容进行分散式的决策。分散式的再调度结果之间往往存在冲突,需要进行消解,因而有必要对分散式多项目环境中的再调度问题模型以及求解方法进行研究。

针对多智能主体系统(MAS)模型中的项目经理决策和资源组织决策建立以下决策模型:

1.1 项目经理决策

项目经理决策的目标是将由于计划调整引起的项目成本幅度增大,数学模型如下:

$$\min \Delta C(S_i) = L_i(S_i, \theta, P(i)) + G_i(S_i, \theta, P(i)) + \Gamma_i \quad (1)$$

$$s.t. \quad s_{j_m} \geq f_{j_n}, \forall (j_n, j_m) \in A_i \quad (2)$$

$$\sum_{j_i \in I_i} r_{j_i h_i} \leq \rho_{h_i}, \forall t \in T, h_i \in \mathbf{R}_i \quad (3)$$

式(1)表示项目 i 的成本最小,其中 $\Delta C(S_i)$ 表示项目 i 由于计划调整而增加的成本, θ 表示资源成本, θ_{h_i} 表示资源 $h_i \in \mathbf{R}_i$ 在时段 t 的使用成本, $L_i(S_i, \theta)$ $= \sum_{j_i=j_1}^{j_{n_i}} \sum_{t=s_{j_i}}^{f_{j_i}} \sum_{h_i \in \mathbf{R}_i} r_{j_i h_i} \theta_{h_i}$ 表示项目 i 计划调整后的局部资源使用成本, $P(i)$ 表示项目 i 执行过程中发生扰动的概率, $G_i(S_i, \theta) = \sum_{j_i=j_1}^{j_{n_i}} \sum_{t=s_{j_i}}^{f_{j_i}} \sum_{k \in \bar{R}} r_{j_i k} \theta_{k t}$ 表示项目 i 计划调整后的共享资源使用成本, $\Gamma_i = \varepsilon_i \max \{0, f_{j_{n_i}} - \bar{d}_i\} - C_i(S_i)$ 表示项目 i 的拖期惩罚, ε_i 表示项目 i 的拖期惩罚因子, $C_i(S_i)$ 表示项目 i 原计划的项目成本;式(2)表示项目 i 的所有任务均满足时序关系约束,其中 j_n 和 j_m 表示项目 i 的两项任务且 j_n 为 j_m 的前序任务, s_{j_m} 表示任务 j_m 的开始时间, f_{j_n} 表示任务 j_n 的结束时间;式(3)表示项目 i 在任意时段执行任务的独占资源使用量总和不多于该项目的独占资源可用量, $r_{j_i h_i}$ 表示任务 j_i 对资源 h_i 的需求量, ρ_{h_i} 表示资源 h_i 的可用量。

1.2 资源组织决策

资源组织 Agent 一般以最大化资源利用率为决

策目标,数学模型如下:

$$\max \sum_{i=1}^n x_i [Revenue_i - K_i] \quad (4)$$

$$\text{s. t. } C_i + ready_{ij} \leq S_j \quad (5)$$

$$C_i \leq \bar{d}_i \quad (6)$$

式(4)表示资源主体以资源利用率最大为决策目标,其中 $Revenue_i$ 表示完成项目 i 能够获得的最大收益, K_i 为完成项目 i 所需付出的成本, x_i 表示决策因子;式(5)表示任务满足时序关系约束条件,其中 C_i 表示项目 i 的完成时间, S_j 表示项目 j 的开始时间, $ready_{ij}$ 表示项目 i 与 j 之间的准备时间;式(6)表示满足交货期约束, \bar{d}_i 表示项目 i 的时间底线。

多个项目之间进行“资源交换”的方式可以弥补资源再分配的成本增加,提出基于市场交易的多项目多资源主体项目再调度成本计算模型,即参与资源再分配、资源交换的所有项目主体、资源主体的交易值总和最大,从而提高资源再分配/交换效率、提高质量鲁棒性,研究资源交易成本对调度质量鲁棒性的影响,提出基于资源交易成本的质量鲁棒性计算方法。

基于迭代组合交换的再调度数学模型如下:

$$\lambda^* = \max \sum_{i \in I} v_i (\lambda_i \cdot P(t)) \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \lambda_{ij} + x_{ij}^0 \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in R \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \lambda_{ij} \leq 0, \forall j \in R \quad (9)$$

$$\lambda_{ij} \in \mathbf{Z} \quad (10)$$

其中,式(7)表示最大化参与交换 Agent 的交易值总量,能够反映资源交换的匹配程度,包括资源数量以及时间槽跨度,其中 $P(t)$ 表示在时段 t 或者间隔 $(t-1, t]$ 内由于任务变更引起的资源需求可能性, λ_i 表示计划调整成本, v_i 为调整因子;式(8)约束任何 Agent 卖出的物品都不多于初始时拥有的物品量, λ_{ij} 表示项目 i 对资源 j 的资源交易量, x_{ij}^0 表示初始交易情况;式(9)表示允许 Agent 自由支配并且交易物品,式(10)约束交易物品的取值范围。

2 基于组合交换的再调度方法

为了求解分散式多项目环境中的再调度问题,采用 Parkes 等^[6]介绍的迭代组合交换机制。每种资源在每个时间段的使用权可以看作组合交换过程中的交换品,并且这些交换品具有可替代性和互补性。项目经理和资源组织可以被视为买方和卖方,彼此交易物品代表资源使用权。

当项目在执行阶段发生时间扰动时,项目经理

可能需要从资源组织或者其他项目购买所需要的物品;或者当项目不再需要计划阶段分配的资源时需要将资源使用权卖给其他项目;资源组织会根据项目提出的资源请求卖出资源使用权。多个项目、资源组织之间对资源时间槽的交易过程可以被描述为多方多卖方参与的组合交换过程,并且交换的物品具有可替代性和互补性,因此我们采用迭代组合交换机制来处理其中的再调度过程^[6]。

2.1 基于组合交换的多项目资源调整协商机制

提出的基于组合交换的多项目资源调整协商机制通过活动图展现如图 2 所示。其中除了封装好的项目 Agent、资源 Agent 之外,还包括一个虚拟的交换 Agent,它作为协商桥梁连接着参与其中的多个项目主体和资源主体。

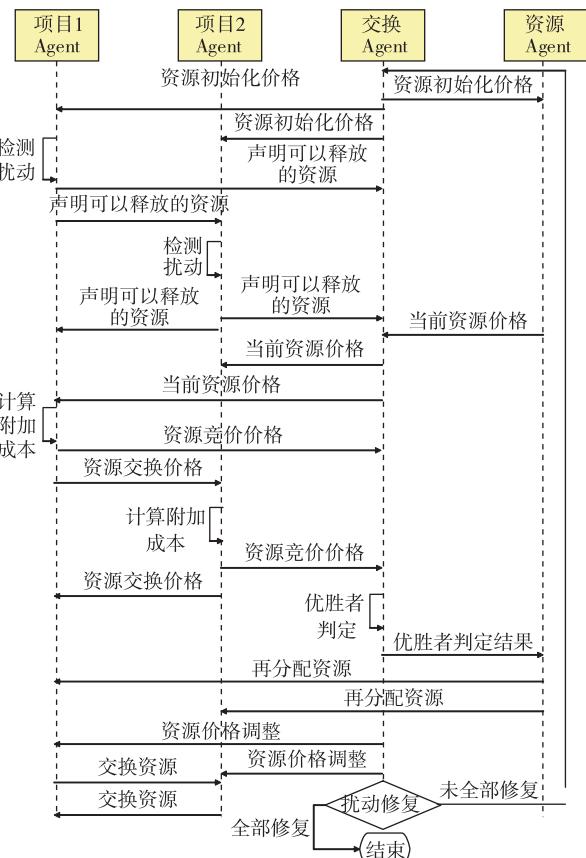


图 2 基于组合交换的多项目资源调整协商机制

作为协商机制的核心组成部分,迭代组合交换过程包括以下主要步骤:

(1) 检测扰动。项目执行阶段,任务 Agent 检测由增加/删除任务、任务工期延长/缩短等引起的时间扰动。这些时间扰动可能引起项目基准调度的不可行,需要进行再调度。

(2) 项目经理决策。任务 Agent 检测到任何时

间扰动时,项目经理需要对再调度进行决策。在满足任务时需依赖关系以及资源可用量约束下,项目经理一般以最小化可能的项目延迟为决策目标。

(3)资源再分配/交换需求。基于上述决策,项目经理可能提出资源再分配或者资源交换需求。这些需求通过竞价语言(bidding language)进行描述。

(4)资源组织决策。每个资源组织接收到资源再分配需求之后,确定该轮竞价的获胜者,对资源再分配方案进行决策。

(5)更新资源价格并回应资源再分配/交换需求。基于上述的获胜者决策结果,资源组织或者项目经理更新资源时间槽在下一轮交换中的价格,或者再分配/交换相应的资源时间槽给确定的项目。

如此迭代,直到迭代组合交换过程结束,资源将被再分配/交换给相应的项目,然后进入下一轮的时间扰动检测。

2.2 基于进化策略的优胜者判定算法

组合交换是一种拍卖机制的变种形式,其中优胜者判定是重要环节,具体而言,在上述的迭代组合拍卖过程中,判断每一轮参与拍卖的买方和卖方获胜情况,关系到资源的交换结果。进化计算方法由于其高兼容性和可行性,在项目调度领域得到了广泛应用^[7],本文用基于进化策略的思想设计优胜者判定方法。而其他的关键环节,比如物品定价、竞标者价格调整方法类似于组合交换中的解决方法。

2.2.1 编码规则

采用二进制编码形式对优胜者判定的候选解进行编码。假设存在 n 个竞投标者参与资源的交换拍卖,共有 m 项可能的交换品,则投标者 i ($i = \{1, \dots, n\}$) 对交换品 j ($j = \{1, \dots, m\}$) 的投标报价为 bid_i^j ,如果投标者 i 对交换品 j 报价 $bid_i^j > 0$,表示对该交换品存在竞标需求,记为 $b_i^j = 1$,否则 $bid_i^j = 0$,表示没有竞标需求,记为 $b_i^j = 0$,即

$$b_i^j = \begin{cases} 1, & bid_i^j > 0 \\ 0, & bid_i^j = 0 \end{cases} \quad (11)$$

基于以上对于投标者、交换品以及竞标需求等的描述,可以将资源组合交换的候选解变成如图 3 所示的二进制基因编码形式。

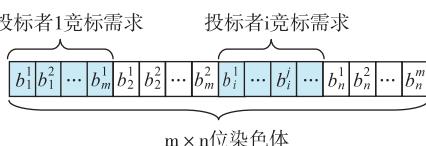


图 3 候选解的二进制基因编码形式

2.2.2 种群初始化

种群初始化包括以下两个步骤:(1)计算每个扰动项目再调度鲁棒性优化的资源交换需求;(2)根据再调度鲁棒优化的资源交换需求初始化候选解二进制编码。可采用以下算法进行编码初始化:

算法 1 二进制编码初始化算法

输入: N :发生调度扰动的项目集合; M :可以用于交换的资源集合
输出: D :初始化后的二进制编码

- 步骤 1. 根据项目决策模型计算各项目的资源交换需求,将所有项目编号为 $1, 2, \dots, n$, 项目 i 对资源 j 的需求记为 bid_i^j
- 步骤 2. 将资源集合 M 中的所有资源编号为 $1, 2, \dots, m$
- 步骤 3. 初始化外循环控制变量 $i \leftarrow 1$
- 步骤 4. 初始化内循环控制变量 $j \leftarrow 1$
- 步骤 5. 根据项目资源调整需求为染色体编码:


```
if  $bid_i^j > 0$ ,  $D[i \times j] \leftarrow 1$ 
      else  $D[i \times j] \leftarrow 0$ 
```
- 步骤 6. $j \leftarrow j + 1$
- 步骤 7. if $j < m$ then goto 步骤 5


```
else goto 步骤 7
```
- 步骤 8. $i \leftarrow i + 1$
- 步骤 9. if $i < n$ then goto 步骤 4


```
else goto 步骤 10
```
- 步骤 10. else 算法结束,输出 D

2.2.3 适应度评价与选择

适应度评价即基于各染色体对应的目标函数值对染色体的环境适应性进行评价,评价结果用于指导进一步的遗传操作。采用投标收益最大的目标函数作为进化选择的适应度评价指标,如下式所示:

$$f(D) = \max \sum_{i,j \in D} \lambda(bid_i^j, b_i^j) / \sum_{j \in M} \bar{p}^j \quad (12)$$

其中 $\lambda(bid_i^j, b_i^j)$ 表示资源交换过程中的交易值,计算方法参见式(7)~(10); $\sum_{j \in M} \bar{p}^j$ 表示所有交换资源的保留价格,作为评价交换交易实际值的一项比较指标。通过适应度评价可以从候选解组成的种群中选择资源交换交易值更高的方案,逐步趋近鲁棒性更高的结果。

2.2.4 交叉与变异操作

交叉与变异是进化算法中产生子代的主要手段,本算法中分别采用两点式交叉策略和基于分段的变异策略实现染色体的交叉与变异操作。

(1)交叉操作。采用两点式交叉策略。如图 4 所示,随机产生两个位置作为交叉点,将交叉点之间的基因进行交换,生成子代个体。

(2)变异操作。针对编码的特点,采用基于分段的变异策略。如图 5 所示,对于待变异的父代染

色体,首先根据“竞标者”将染色体分成 n 段,之后再段内进行随机交叉变异。

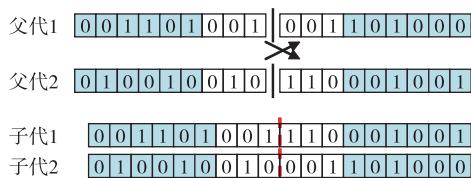


图 4 两点式交叉操作

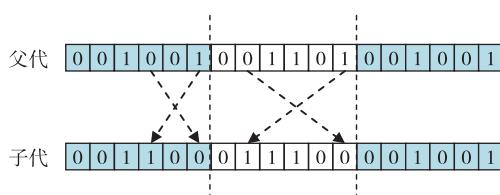


图 5 基于分段的变异操作

2.2.5 算法总体流程

基于进化策略求解资源组合交换优胜者判定问题的算法总体流程如下:

算法 2 基于进化策略的组合交换优胜者判定算法

```

输入: 当前所有项目的资源交换需求基础数据;进化算法相关参数
输出: 多项目资源交换方案
步骤 1  $t \leftarrow 0$ , 采用算法 1 初始化种群  $P(0)$ 
步骤 2 计算初始种群  $P(t)$  中每个个体的适应值
步骤 3 if  $t < \text{Max\_Gen}$  then goto 步骤 4
    else 算法结束,输出  $P(t)$  中适应度最大的染色体对应的变量值及目标函数值
步骤 4 根据式(12)的适应度函数采用锦标赛方法对  $P(t)$  进行选择,获得父代染色体
步骤 5 按照父概率应用两点式交叉策略生成  $P_c(t)$ 
    按变异概率  $P_c(n)$  应用变异策略生成  $P_m(t)$ 
步骤 6  $P(t) \leftarrow P_m(t)$ 
     $t \leftarrow t + 1$ 
    goto 步骤 3

```

3 仿真实验与结果分析

为了检验本文提出的基于组合交换的项目再调度协调方法对于发生调度扰动项目的计划修复能力以及鲁棒性性能,设计仿真实验并对结果进行分析。鲁棒性包括解鲁棒性和质量鲁棒性,其中,解鲁棒性体现决策过程应对不确定因素的抗干扰能力,鲁棒性高的决策过程能够减少决策的变更次数从而缩短决策时间;质量鲁棒性体现了决策结果对于执行扰动的抗干扰能力,鲁棒性高的决策结果能够提高计

划在实际生产中的可执行性。

为了突出考察的多项目主体、多资源主体间的资源调整协调,共享资源设定为多种。仿真实验中涉及的主要参数、取值范围以及描述如表 1 所示。计算过程均采用 MATLAB 7.0 编程实现,运行环境为 Pentium(R)4, CPU 主频为 3.00Ghz, 1.00GB 内存的 PC 上运行,操作系统为 Windows XP。

表 1 测试算例参数设置及描述

| 参数名称 | 取值范围 | 含义描述 |
|----------|-------------|------------------|
| 项目数 | 5 | 参与分散式协同再调度的项目总数 |
| 任务数 | 10,18 | 项目包含的实际任务数量 |
| 共享资源种类 | 2,3 | 共享资源种类 |
| 扰动强度 | 0.2,0.3,0.4 | 发生变更的任务数比例 |
| 允许延迟范围 | 5%,10% | 允许的项目计划工期与最佳工期差距 |
| 附加成本增加比例 | 3%,7% | 项目再调度产生的附加成本增加上限 |

3.1 解鲁棒性实验分析

解鲁棒性体现决策过程应对不确定因素的抗干扰能力,解鲁棒性高的决策过程能够减少决策的变更次数从而缩短决策时间。通过将 Deblaere 等^[8]提出的融合禁忌搜索策略的分支定界算法(Branch-and-Bound with tabu search, B&B)、Arauzo 等^[9]提出的基于拍卖的再调度方法以及本文提出的组合交换三种再调度方法对于相同测试实例的任务调整次数作为分析对象,比较不同方法对于再调度的解鲁棒性控制效果。几种再调度方法的任务调整次数仿真结果如表 2 所示。

从表 2 中的测试结果比较分析可以看出,在 24 组测试案例中,组合交换方法能够在其中 15 组通过相比于另外两种方法更少的任务调整次数实现满足允许延迟范围的计划修复过程,从而实现了更高的解鲁棒性。由此可以推出结论:组合交换方法由于引入多项目之间资源调整协调机制,因而能够减少任务调整次数,使得项目再调度获得更高的解鲁棒性。

3.2 质量鲁棒性实验分析

计划调整后的平均相对差距是一种常用的质量鲁棒性评价指标,比如交货期延迟能够反映调整后计划与原计划间的变化幅度,可采用公式平均项目

表2 几种再调度方法的任务调整次数仿真结果

| 任务数 | 共享 资源 种类 | 扰动 强度 | 延迟 范围 | 任务调整次数 | | |
|-----|----------------|----------|----------|--------------------------|------------------------|-----------|
| | | | | 分支定 界法 ^[8] | 拍卖 法 ^[9] | 组合交 换法 |
| 10 | 2 | 0.2 | 5% | 5 | 4 | 3 |
| | | | 10% | 4 | 3 | 4 |
| | | 0.3 | 5% | 4 | 4 | 3 |
| | | | 10% | 7 | 4 | 5 |
| | | 0.4 | 5% | 2 | 3 | 3 |
| | | | 10% | 5 | 4 | 5 |
| | 3 | 0.2 | 5% | 6 | 5 | 4 |
| | | | 10% | 5 | 5 | 4 |
| | | 0.3 | 5% | 4 | 3 | 4 |
| | | | 10% | 7 | 5 | 3 |
| | | 0.4 | 5% | 5 | 3 | 2 |
| | | | 10% | 2 | 3 | 3 |
| 18 | 2 | 0.2 | 5% | 5 | 5 | 5 |
| | | | 10% | 7 | 6 | 5 |
| | | 0.3 | 5% | 9 | 8 | 7 |
| | | | 10% | 10 | 8 | 7 |
| | | 0.4 | 5% | 7 | 7 | 6 |
| | | | 10% | 8 | 7 | 8 |
| | 3 | 0.2 | 5% | 8 | 7 | 6 |
| | | | 10% | 11 | 9 | 8 |
| | | 0.3 | 5% | 13 | 10 | 8 |
| | | | 10% | 14 | 9 | 8 |
| | | 0.4 | 5% | 16 | 12 | 13 |
| | | | 10% | 21 | 15 | 9 |

延迟 = ($\sum_{i=1}^z$ (调整后工期_i - 计划工期_i)) / z 计算平均项目延迟。如表3所示,通过组合交换、拍卖以及调度修复三种再调度方法的对比分析,在相同附加成本情况下不同方法获得的平均项目延迟。

从仿真结果可以看出,在24组测试算例中组合交换方法在其中11组获得了相比于其他两种再调度方法更短的平均项目延迟,并且可以看出,随着项目复杂度(任务数)增大、扰动强度增大,组合交换方法的优势有增强的趋势。经过分析可以推断,在同等附加成本增加上限约束下,由于组合交换方法引入了项目之间的资源调整协调机制,因此当变更数量增大时增加了成功实现资源交换的概率,从而可提高组合交换算法的成功率,降低平均项目延迟。项目的工期平均延迟从时间的角度衡量了项目计划的稳定性,而多个项目平均延迟反映了整体的质量鲁棒性。由此可见,相比于拍卖方法以及分支定界

表3 几种再调度方法的平均项目延迟仿真结果

| 任务数 | 共享 资源 种类 | 扰动 强度 | 附加 成本 上限 | 平均项目延迟(天) | | |
|-----|----------------|----------|----------------|--------------------------|------------------------|-----------|
| | | | | 分支定 界法 ^[8] | 拍卖 法 ^[9] | 组合交 换法 |
| 10 | 2 | 0.2 | 3% | 4.27 | 5.85 | 5.37 |
| | | | 7% | 5.28 | 4.15 | 4.27 |
| | | 0.3 | 3% | 6.17 | 6.28 | 5.83 |
| | | | 7% | 5.73 | 4.96 | 5.38 |
| | | 0.4 | 3% | 7.83 | 7.36 | 6.37 |
| | | | 7% | 6.95 | 6.27 | 5.37 |
| | 3 | 0.2 | 3% | 5.29 | 4.27 | 4.38 |
| | | | 7% | 4.73 | 4.19 | 3.29 |
| | | 0.3 | 3% | 5.28 | 6.38 | 5.39 |
| | | | 7% | 4.38 | 5.98 | 4.39 |
| | | 0.4 | 3% | 6.38 | 5.84 | 5.39 |
| | | | 7% | 6.10 | 5.39 | 5.28 |
| 18 | 2 | 0.2 | 3% | 6.40 | 4.29 | 4.35 |
| | | | 7% | 5.38 | 3.21 | 3.95 |
| | | 0.3 | 3% | 5.94 | 6.28 | 5.06 |
| | | | 7% | 4.28 | 5.39 | 4.39 |
| | | 0.4 | 3% | 9.38 | 7.04 | 6.70 |
| | | | 7% | 6.96 | 6.32 | 5.39 |
| | 3 | 0.2 | 3% | 6.19 | 6.93 | 6.38 |
| | | | 7% | 5.28 | 5.73 | 5.93 |
| | | 0.3 | 3% | 6.84 | 7.05 | 6.30 |
| | | | 7% | 6.04 | 6.53 | 5.69 |
| | | 0.4 | 3% | 8.37 | 9.85 | 9.94 |
| | | | 7% | 8.21 | 8.42 | 6.39 |

方法,通过分散式多对多资源调整协调的组合交换方法能够获得更高的质量鲁棒性再调度结果。

4 结 论

本文针对多项目、多资源主体协同的跨组织项目计划调整问题,提出了基于分散式计划调整、多决策主体资源组合交换的分散式项目再调度与资源调整协调优化方法,该方法通过引入多项目之间的资源组合交换弥补单纯依靠项目与资源主体之间资源再分配实现计划调整的局限性,提高了资源调整的供需匹配效率,减小了变更对计划调整范围的影响和再调度附加成本增加幅度,提高了再调度解鲁棒性;针对其中多对多并且角色变换的拍卖/交换协商问题,提出了基于进化策略的附加成本优化获胜者判定算法,从而减小了变更对计划调整幅度的影响,提高了项目计划的质量鲁棒性。实验表明所提出方

法通过多主体间分散式决策与资源交换协调能够有效减少任务调整次数,降低再调度附加成本,从而提高解鲁棒性,同时能够保证项目计划的质量鲁棒性。

参考文献

- [1] Herroelen W , Leus R . Project Scheduling under Uncertainty: Survey and Research Potentials. *European Journal of Operational Research*, 2005, 165(2) :289-306
- [2] Salmasnia A , Mokhtari H , Abadi I N K . A Robust Scheduling of Projects with Time, Cost, and Quality Considerations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 60(5-8) :631-642
- [3] Lambrechts O , Demeulemeester E , Herroelen W . Time Slack-based Techniques for Robust Project Scheduling Subject to Resource Uncertainty. *Annals of Operations Research*, 2011, 186(1) :443-464
- [4] Lee Y , Kumara S R T , Chatterjee K . Multiagent based Dynamic Resource Scheduling for Distributed Multiple Projects using a Market Mechanism. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2003, 14(5) :471-484
- [5] Wang L , Zhan D C , Nie L S , et al. Schema and Solutions for Decentralised Multiproject Scheduling Problem. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2013, 46(2) :142-154
- [6] Parkes D C , Cavallo R , Elprin N , et al. ICE: an Iterative Combinatorial Exchange. In: Proceedings of the 6th ACM Conference on Electronic Commerce, Vancouver, Canada, 2005 ,249-258
- [7] Sonda E , Philippe F . A hybrid rank-based evolutionary algorithm applied to multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(1) :31-41
- [8] Deblaere F , Demeulemeester E , Herroelen W . Reactive Scheduling in the Multi-Mode RCPSP. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(1) :63-74
- [9] Arauzo J A , Galan J M , Pajares J , et al. Multi-Agent Technology for Scheduling and Control Projects in Multi-Project Environments. An Auction based Approach. *Inteligencia Artificial*, 2009, 13(42) :12-20

Combinatorial exchange based decentralized project reactive scheduling method

Wang Lei , Zhan Dechen , Nie Lanshun

(* School of Computer Science and Technology , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001)

(** Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology , Chinese Academy of Sciences , Suzhou 215163)

Abstract

To realize the adjustment of the baseline schedule of a complex project with multiple resource's decentralized coordinative operation, a combinatorial exchange based method is proposed to solve the project reactive scheduling problem with the characteristic of decentralized decision making. The method introduces the resource exchange among multiple projects to increase the resource allocation efficiency and reduce the influence of disturbance on the schedule adjustment scope; focuses on the auction/exchange negotiation problem among multiple sellers and multiple buyers, and present an evolution strategy based winner determination algorithm for added cost optimization to reduce the influence of disturbance on the schedule adjustment range. The experimental results show that the method can decrease the number of activity adjustment and the added cost of project reactive scheduling process to raise the solution robustness, and also this method can keep the high quality robustness of project scheduling.

Key words: project reactive scheduling, decentralized decision making, combinatorial exchange, solution robustness, quality robustness