

文章编号: 1001-0920(2007)10-1160-05

活动成本目标 MMRCPS 的活动-模式两步调度策略

刘振元, 王红卫

(华中科技大学 系统工程研究所, 武汉 430074)

摘要: 基于活动成本目标多模式资源受限工程调度的并行调度方案, 提出一种活动-模式两步调度策略, 给出了活动优先规则和模式优先规则. 该策略首先按活动优先规则进行可行活动的选择, 然后按模式优先规则选择活动的可行模式. 基于改造 PSPLIB 的算例测试得出, 活动-模式两步调度策略的结果比活动-模式联合调度策略好, 且在模式优先规则中考虑折衷的先序相关成本因素时取得的效果相对较好.

关键词: 多模式资源受限工程调度; 活动成本; 并行调度方案; 活动-模式调度; 优先规则

中图分类号: C934 文献标识码: A

Two-step activity-mode scheduling schema on MMRCPS with the objective of minimizing activities' cost

LIU Zhen-yuan, WANG Hong-wei

(Institute of Systems Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China.

Correspondent: LIU Zhen-yuan, E-mail: zylu.hustise@263.net)

Abstract: Based on parallel scheduling schema for multi-mode resource-constrained project scheduling problem (MMRCPS) with the objective of minimizing activities' cost, a two-step activity-mode scheduling schema is proposed. Some prior rules for selecting activity and mode are discussed respectively. In this schema, a feasible activity is selected firstly according to prior rule for activity, and a feasible mode is selected for the selected activity according to mode prior rule. Numerical study on updated PSPLIB shows that two-step activity-mode scheduling schema are superior to union activity-mode scheduling schema, and the effect is better when the eclectic relative cost is considered as the mode prior rule.

Key words: Multi-mode resource-constrained project scheduling; Activities' cost; Parallel scheduling schema; Activity-mode scheduling; Prior rule

1 引言

在工程建设中, 工程分包商、混凝土供应商等的资源能力会对工程进度构成约束, 因此在选择这些合作伙伴时, 承包商必须引入各合作伙伴的资源能力约束和工程工期底线约束, 达到工程活动成本的最小化. 其中工程活动成本包括静态的活动固定成本和动态的活动完工持有成本(包括完工活动的投资占用成本等)^[1]. 作者在前期工作中对活动成本目标下单模式的资源受限工程调度问题进行研究^[2], 而考虑活动多模式也很有理论和实践价值.

早在 20 世纪 70 年代, 人们就开始关注多活动执行模式的资源受限工程调度问题. 在工期目标、净现值最大化目标、时间-成本平衡等问题中, 均有考

虑活动多模式的研究实例^[3]. 此类问题的计算属于 NP-hard^[4]. 对于多模式情形下资源空缺而使活动中断的问题也有研究^[5]. 在考虑工期目标下多模式资源受限工程调度问题的研究中, 除了开发相应的精确算法之外^[6], 更多的是研究相应的启发式求解方法, 包括基于优先规则的单回合与多回合调度、模拟退火和遗传算法等智能启发式方法^[7,8]. 在测试算例库(PSPLIB)中, 也考虑了多模式工程调度的实例^[9].

现有的研究工作没有考虑活动成本目标下的多模式资源受限工程调度问题. 本文针对此类问题求解的并行调度方案^[10], 提出一种活动-模式两步调度策略, 设计活动优先规则和模式优先规则, 基于改

收稿日期: 2006-07-07; 修回日期: 2007-03-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70171015); 教育部高等学校优秀青年教师教学和科研奖励基金项目.

作者简介: 刘振元(1973—), 男, 武汉人, 副教授, 博士, 从事工程调度、建模与仿真的研究; 王红卫(1966—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、国民经济动员等研究.

造 PSPLIB 进行测试和对比分析.

2 问题描述

设定项目包含 J 项不可中断的活动 $\{1, 2, \dots, J\}$, 假定活动 1 是唯一最早开始的活动, 活动 J 是唯一最晚完成的活动, 它们分别表示整个工程的开始和结束. 工程中活动的执行需要 K 种可重用资源, 第 k 种资源的可得量为 Q_k , 单价为 C_k . 设活动 j 的完成时间为 FT_j , 单位时间单位活动价值的活动完工持有成本为 h , 工程工期底线为 H , 第 t 阶段产生的工程活动完工持有成本为 V_t . 活动 j 有 m_j 种执行模式 ($m_j = 1$), 活动 j 的模式 m 对应的执行周期为 d_{jm} , 对第 k 种可重用资源的需求量为 q_{jmk} .

引入变量 X_{jmt} , 表示活动 j 的执行选择模式 m , 在 t 时刻执行结束时, $X_{jmt} = 1$, 而在其他所有情况下, $X_{jmt} = 0$. 则活动成本目标多模式资源受限工程调度问题的数学模型可描述如下:

$$\min TV = \sum_{t=1}^{FT_J} V_t + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{m_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} v_{jm} X_{jmt}; \quad (1)$$

s. t.

$$m_i \leq LF_i - tX_{imt} \quad m_j \leq LF_j - [(t - d_{jm}) X_{jmt}], \quad \forall i \in P_j, j, \quad (2)$$

$$X_{jmt} = 1, j = 1, 2, \dots, J, \quad m=1 \leq t \leq LF_j \quad (3)$$

$$FT_J = \sum_{t=EF_J}^{LF_J} tX_{Jt} \leq H, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{m_j} \sum_{t=t}^{t+d_{jm}-1} (q_{jmk} X_{jmt}) \leq Q_k, \quad \forall k, t, \quad (5)$$

$$v_{jm} = \sum_{k=1}^K q_{jmk} d_{jm} c_k + v_{jm}, \quad \forall j, m, \quad (6)$$

$$V_t = V_{t-1} + h \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{m_j} v_{jm} X_{jmt}, \quad t = 1, 2, \dots, FT_J, \quad (7)$$

$$X_{jmt} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, m, t. \quad (8)$$

其中 EF_j 和 LF_j 分别为在假定各个活动均采用最小执行周期对应模式下, 通过 CPM 计算所得的最早可能完工时间和最迟可能完工时间.

上述模型中: 式(1) 为问题目标, 工程活动成本 TV 最小, 包括从工程开工至完工时间内, 活动完工持有成本的累积值和活动静态成本的累积值; 式(2) 为活动紧前关系约束, P_j 为活动 j 的紧前活动集; 式(3) 为活动执行约束; 式(4) 为工期底线约束; 式(5) 为资源能力约束; 式(6) 表示在各模式下活动的静态成本由两部分构成: 前一项为该模式对应的资源

成本, 后一项为活动在该模式下的非资源成本 v_{jm} ; 式(7) 为第 t 阶段发生的活动完工持有成本, 其中 $V_0 = 0$.

3 并行调度框架与活动 - 模式两步调度策略

在活动成本目标多模式资源受限工程调度问题的并行调度方案中, 每个调度阶段对应一个调度时间, 随着调度阶段 n 的递进, 对应的调度时间 t_n 逐步减小. 每个阶段对应一个不完全计划, 包括两部分: 正在执行的活动集 A_n 和已调度完成的活动集 C_n . A_n 是指已调度完毕但在 t_n 时正在执行的活动的集合; C_n 是指开始时间在当前调度时间之后的活动的集合.

3.1 基本定义

定义 1 可行活动 - 模式集

$$EA_n := \{ (j, m) \mid j \notin A_n, C_n, S_j \subseteq C_n, m \in \{1, \dots, m_j\}, q_{jmk} \leq R_k, \forall k \}. \quad (9)$$

活动 - 模式对 (j, m) 可行是指该活动不在不完全计划中, 而且该活动对应的紧后活动都已调度完成 (S_j 为活动 j 的紧后活动集), 且在模式 m 下所需资源量小于当前调度阶段资源剩余量 R_k .

定义 2 可行活动集

$$E_n := \{ j \mid \exists m \in \{1, \dots, m_j\}, \text{ s. t. } (j, m) \in EA_n, j \in \{1, \dots, J\} \}. \quad (10)$$

可行活动是指存在某种模式使得对应的活动 - 模式属于可行活动 - 模式集的活动.

定义 3 可行活动 j 的可行模式集

$$EM_j := \{ m \mid (j, m) \in EA_n, m \in \{1, \dots, m_j\} \}. \quad (11)$$

3.2 并行调度框架

融合活动 - 模式两步调度策略, 并行调度求解活动成本目标多模式资源受限工程调度问题的基本框架如下:

Initialization

$$n := 1, t_n := H, EA_n := \{ (J, 1) \}, E_n := \{ J \}$$

$$A_n := C_n := \emptyset, R_k := Q_k, k = 1, 2, \dots, K$$

Goto Step 2)

While $|A_n \cup C_n| < J$ Do

Begin

$$1) t_n := \max\{ST_j \mid j \in A_{n-1}\}$$

$$A_n := A_{n-1} \setminus \{j \mid ST_j = t_n, j \in A_{n-1}\}$$

$$C_n := C_{n-1} \cup \{j \mid ST_j = t_n, j \in A_{n-1}\}$$

Computing: R_k, EA_n, E_n

$$R_k := Q_k - \sum_{j \in A_n} q_{jmk}^*$$

$$EA_n := \{ (j, m) \mid j \in A_n, C_n, S_j \subseteq C_n, \\ m \in \{1, 2, \dots, m_j\}, q_{jmk} \leq R_k, \\ \forall k = 1, 2, \dots, K \}$$

$$E_n := \{ j \mid \exists m \in \{1, 2, \dots, m_j\}, \text{s.t. } (j, m) \in EA_n, j \in \{1, \dots, J\} \}$$

2) $j := \max\{j \mid \text{ActPr}(j) = \max_{i \in E_n} \{\text{ActPr}(i)\}, j \in E_n\}$

$$EM_j := \{ m \mid (j, m) \in EA_n, m \in \{1, 2, \dots, m_j\} \}$$

$$m_j^* := \min\{m_j \mid \text{ModePr}(m_j) = \max_{m \in EM_j} \{\text{ModePr}(m)\}, m_j \in EM_j\}$$

$$ST_j := t_n - d_{j m_j^*}$$

$$A_n := A_n \setminus \{j\}$$

Computing: R_k, EA_n, E_n

if E_n then Goto Step 2)

else $n := n + 1$

End

其中调度时间 t_n 的资源剩余量 R_k , 是从资源可得量中去除正在执行的活动及其对应模式下所需的资源总量计算的. 并行调度过程从工程的结束活动 J 开始, 此时当前调度时间为工期底线, A_n 和 C_n 均为空, EA_n 中只包括一个活动-模式对 $(J, 1)$. 这里假设工程结束活动 J 只有一种执行模式, 由此 E_n 只包括一个活动 J , m_j^* 为活动 j 选定的执行模式.

并行调度的每一阶段包括两步操作: 1) 依次定义对应调度时间 t_n, A_n 和 C_n , 更新各类资源的剩余量 R_k , 重新定义 EA_n 和 E_n ; 2) 按活动-模式两步调度策略进行活动-模式调度. 以上两步完成一次操作后, 如果 A_n 和 C_n 组成的调度计划仍不完全, 则重复以上两步, 直到生成完全调度计划.

在并行调度的执行过程中, 如果某个调度活动的开始时间小于 0, 则说明对应的并行调度框架及调度策略不能得到问题的可行解. 此时应停止操作, 并给出提示.

3.3 活动-模式两步调度策略

在并行调度框架中, $\text{ActPr}(\cdot)$ 为可行活动的优先权计算函数, 对应于活动优先规则; $\text{ModePr}(\cdot)$ 为可行模式的优先权计算函数, 对应于模式优先规则.

首先进行可行活动的优先权计算, 找到具有最大优先权的可行活动集合. 从该集合中选取具有最大编号的活动 j , 作为当前待调度活动, 然后定义活动 j 的 EM_j . 基于此, 运用模式优先规则进行可行活动的可行模式选择, 找到具有最大模式优先权的可行模式集合, 从中选择最小编号的模式 m_j^* , 作为

当前调度活动的执行模式. 此时可进行活动 j 的调度, 设定活动 j 的完成时间为当前调度阶段对应的时间 t_n , 然后将活动 j 并入 A_n .

重新定义 R_k, EA_n 和 E_n , 如果此时 E_n 为空, 则可进入下一阶段; 如果仍可找到可行活动, 则继续进行活动-模式的两步调度.

3.4 活动优先规则

基于可行活动集, 选择活动的基准是可行活动优先规则, 得到每个活动的优先权 $\text{ActPr}(\cdot)$. 从研究结果看, 当考虑活动相关成本(规则(5)~(7))和活动的最大最早完成时间(规则(3))时, 所得结果相对较好^[2]. 在多模式问题的求解中, 构造如下 4 种活动优先规则:

1) 最大可行平均活动成本: 考虑了可行活动 j 当前可行模式集下的平均活动成本, 称为活动的可行平均成本, 取最大者对应的可行活动进行调度.

$$\max_{j \in E_n} (\text{AvgAC}_j = \frac{1}{|EM_j|} \sum_{m \in EM_j} v_{jm}). \quad (12)$$

2) 最大平均紧前相关活动成本: 除了活动的可行平均成本外, 还包括其紧前活动的平均成本.

$$\max_{j \in E_n} (\text{AvgPAC}_j = \frac{1}{|EM_j|} \sum_{m \in EM_j} v_{jm} + \sum_{p \in P_j} \frac{1}{m_j} \sum_{m=1}^{m_j} v_{jm}). \quad (13)$$

3) 最大平均先序相关活动成本: 除了活动的可行平均成本外, 还包括其先序活动的平均成本.

$$\max_{j \in E_n} (\text{AvgTAC}_j = \frac{1}{|EM_j|} \sum_{m \in EM_j} v_{jm} + \sum_{p \in TP_j} \frac{1}{m_j} \sum_{m=1}^{m_j} v_{jm}). \quad (14)$$

其中设活动网络中的紧前关系为 $\text{Pre}(i, j)$, 即当活动 i 为活动 j 的紧前活动时, $\text{Pre}(i, j) = 1$; 否则, $\text{Pre}(i, j) = 0$. 活动 j 先序活动定义如下^[2]:

定义 4 对于活动网络 $N = (V, A)$ (其中 V 为节点集合, A 为弧线集合) 中的活动对, 如果 $\exists (i_0, i_1), \dots, (i_{s-1}, i_s) \in A, i_0, i_1, \dots, i_s \in V, i_0 = i, i_s = j$, 并且 $\text{Pre}(i_0, i_1) \times \dots \times \text{Pre}(i_{s-1}, i_s) = 1$, 则称活动 i 为活动 j 的先序活动. 活动 j 的所有先序活动构成的集合称为活动 j 的先序活动集, 记为 TP_j .

4) 最大最早完成时间: 选择具有最大的最早完成时间对应的活动进行调度, 即

$$\max_{j \in E_n} EF_j. \quad (15)$$

3.5 模式优先规则

设活动执行周期的可行下界为 $d_j = \min_{m \in EM_j} \{d_{jm}\}$, 其中 m 的选择为活动的可行模式集. 假

设活动成本的上界和下界表示为: $\bar{v}_j = \max_m \{v_{jm}\}$, $\underline{v}_j = \min_m \{v_{jm}\}$, 其中 m 包括活动的所有执行模式.

活动 - 模式两步调度策略下的模式优先规则同文献[10]中活动 - 模式联合调度策略下的模式优先规则. 从以下 3 个角度对活动先序相关成本因素 CF_{jm} 进行分析:

1) 悲观的活动先序相关成本

$$CF_{jm} = v_{jm} (1 + h(H - t_n)) + h \sum_{i \in TP_j} \bar{v}_i (d_{jm} - d_j); \quad (16)$$

2) 乐观的活动先序相关成本

$$CF_{jm} = v_{jm} (1 + h(H - t_n)) + h \sum_{i \in TP_j} v_i (d_{jm} - d_j); \quad (17)$$

3) 折衷的活动先序相关成本

$$CF_{jm} = v_{jm} (1 + h(H - t_n)) + h \sum_{i \in TP_j} \frac{\bar{v}_i + \underline{v}_i}{2} (d_{jm} - d_j). \quad (18)$$

通过 CF_{jm} 的计算, 可得到所选取可行活动的模式优先权 $ModePr(m)$.

4 算例分析

4.1 PSPLIB 改造

在 PSPLIB 关于多执行模式资源受限工程调度问题中, 每个算例给出的参数包括: 活动间的紧前紧后关系、各活动的执行模式、各执行模式下的活动执行周期、所需资源量和工程中资源的限量. 研究中不考虑不可重用资源的约束.

实验中选取 mm10 的所有 536 个算例进行改造, mm10 中的活动网络参数分别为: 网络复杂性 $NC = 1.8$, 资源因素 $RF = 0.5, 1.0$, 资源强度 $RS = 0.2, 0.5, 0.7, 1.0$. 问题中需设定活动的静态成本, 考虑到活动的多执行模式符合时间 - 费用曲线, 设定活动周期与活动静态成本的乘积为固定值.

针对每一活动, 首先设置第 1 种执行模式下的活动静态成本, 其中活动的资源成本中仍考虑可重用资源和不可重用资源. 假设每种资源的单位成本为一个单位, 活动的非资源成本根据随机生成一个 (0, 1) 之间的数乘以资源成本而得到. 基于以上设置可得到活动在其他模式下的静态成本.

4.2 算例测试及分析

联立不同的可行活动优先规则 (式 (12) ~ (15)) 和可行模式优先规则 (式 (16) ~ (18)), 将得到 12 种并行调度方法. 设定活动 - 模式两步调度方法的命名规则为 MT- a - b , 其中 a 的取值为 1 ~ 4, 分别对应 4 种可行活动优先规则 (式 (12) ~ (15)); b 的取值为 1 ~ 3, 分别对应 3 种可行模式优先规则

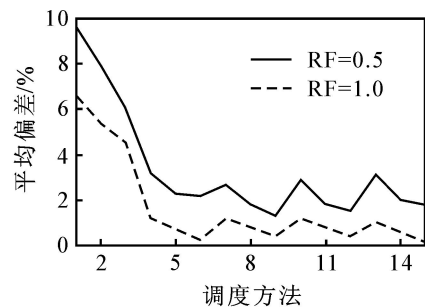
(式 (16) ~ (18)).

算法的实现以 Matlab6.5 编写, 运行的操作系统平台为 Windows 2000, 硬件平台为 IBM Server P4-2.8 GHz-1.5 G. 其中方法序号 1 ~ 15 分别对应活动 - 模式联合调度策略的 MU-1 ~ MU-3 和活动 - 模式两步调度策略的 MT-1-1, 测试 MT-1-2, ..., MT-4-3.

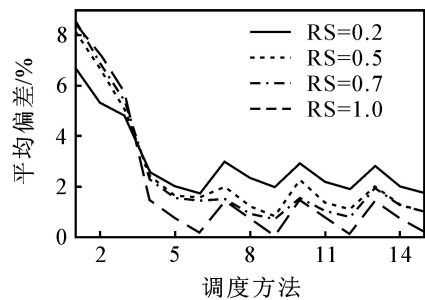
综合各种方法的计算结果, 536 个算例中有 495 个算例为公共有效算例 (各方法在公共有效算例下

表 1 测试结果对比

方 法	有效解数	最好次数	最差次数	平均偏差 / %
MU-1	507	78	373	8.75
MU-2	502	118	268	7.16
MU-3	499	178	196	5.68
MT-1-1	518	145	148	2.33
MT-1-2	508	224	93	1.59
MT-1-3	505	358	62	1.31
MT-2-1	513	159	133	2.09
MT-2-2	506	234	84	1.38
MT-2-3	504	373	59	0.91
MT-3-1	514	154	140	2.18
MT-3-2	505	226	87	1.40
MT-3-3	501	360	60	1.01
MT-4-1	518	156	139	2.19
MT-4-2	512	235	85	1.38
MT-4-3	508	375	56	1.04



(a) 资源因素影响下的计算效果



(b) 资源强度影响下的计算效果

图 1 基于改造 PSPLIB 的计算结果对比

都能得到可行解),每个算例下的最好解为各方法下的相对最好解,结果偏差的计算基于该最好解进行测试统计结果如表1和图1所示。

表1给出了各种算法的有效解数量。在模式选择中考虑折衷的先序相关成本因素时,得到的有效解较少,考虑乐观的先序相关成本因素时有效解较多,考虑悲观的先序相关成本因素时有效解最多。在每种模式选择规则下,活动-模式联合调度策略得到的有效解数量小于活动-模式两步调度策略。应用活动-模式两步调度策略,在活动优先规则中考虑平均可行活动成本或最大最早完成时间时,有效解的数量较多。

各种算法下的平均偏差对比表明,活动-模式两步调度策略的平均偏差小于联合调度策略。对于这两种调度策略,在模式选择中考虑折衷的先序相关成本因素时,得到的平均偏差较小,考虑乐观的先序相关成本因素时次之,考虑悲观的先序相关成本因素时最差。在活动-模式两步调度策略的各种方法中,采用相同模式选择规则的计算结果平均偏差比较接近,其中考虑以最大平均紧前相关活动成本作为活动优先规则时结果较好,考虑以最大平均可行活动成本作为活动优先规则时结果较差。

图1(a)给出了资源因素影响下的计算结果。可以看出,随着资源因素的增大,各种算法的计算效果会变得好一些。图1(b)给出了资源强度影响下的计算结果。可以明显地看出,在活动-模式两步调度策略下,随着资源强度的加大,结果的平均偏差越来越小。

5 结 语

本文在活动成本目标多模式资源受限工程调度问题求解的并行调度框架下,提出一种活动-模式两步调度策略,设计了相应的活动优先规则和模式优先规则。基于改造 PSPL IB 的多模式算例测试表明,虽然同类算法中在模式选择时考虑折衷的先序相关成本因素得到的有效解数量略少,但得到的平均偏差却是最小的,而且活动-模式两步调度策略下的计算结果优于活动-模式联合调度策略。

考虑合作伙伴的资源能力约束,可将活动成本目标资源受限工程调度用于工程供应链的合作伙伴选择。合作伙伴选择往往需要考虑更多的目标,这将是下一步研究的主题之一。

参考文献(References)

[1] Dodin B, Elimam A A. Integrated project scheduling

and material planning with variable activity duration and rewards[J]. IIE Trans, 2001, 33(11): 1005-1018.

[2] 刘振元,王红卫. 基于优先规则的活动成本目标资源受限工程调度[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9): 99-106.

(Liu Zhen-yuan, Wang Hong-wei. Priority-rule-based resource-constrained project scheduling with the objective of minimizing activities' cost [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2006, 26(9): 99-106.)

[3] Kolisch R, Padman R. An integrated survey of deterministic project scheduling[J]. Omega, 2001, 29(3): 249-272.

[4] Kolisch R, Drexel A. Local search for nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling[J]. IIE Trans, 1997, 29(11): 987-999.

[5] Buddhakulsomsiri J, Kim D S. Properties of multi-mode resource-constrained project scheduling problems with resource vacations and activity splitting[J]. European J of Operational Research, 2006, 175(1): 279-295.

[6] Sprecher A, Drexel A. Multi-mode resource-constrained project scheduling by a simple, general and powerful sequencing algorithm [J]. European J of Operational Research, 1998, 107(1): 431-450.

[7] Mori M, Tseng C. A genetic algorithm for multi-mode resource constrained project scheduling problem [J]. European J of Operational Research, 1997, 100(1): 134-141.

[8] 刘士新,王梦光,聂义勇. 多执行模式资源受限工程调度问题的优化算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(1): 55-60.

(Liu Shi-xin, Wang Meng-guang, Nie Yi-yong. Optimization algorithm for solving multi-mode resource constrained project scheduling problem[J]. J of Systems Engineering, 2001, 16(1): 55-60.)

[9] Kolisch R, Sprecher A. PSPL IB —A project scheduling problem library [J]. European J of Operational Research, 1997, 96(1): 205-216.

[10] 刘振元,王红卫. 活动成本目标 MMRCPSP 的并行调度方案[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(8): 1295-1298.

(Liu Zhen-yuan, Wang Hong-wei. Parallel scheduling schema on multi-mode resource-constrained project scheduling with the objective of minimizing activities' cost [J]. J of Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(8): 1295-1298.)