

6-2-2020

## Disruption Management Simulation for Multi-mode Resource-constrained Project Scheduling Problem

Shengming Liu

*Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China;*

Shuxing Feng

*Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Disruption Management Simulation for Multi-mode Resource-constrained Project Scheduling Problem

## Abstract

**Abstract:** As the disruption management simulation for multi-mode resource-constrained project scheduling problem received little concern, a pretty reasonable disruption management simulation process was designed. After analyzing the functional weakness of MS Project, *disruption management simulation for multi-mode resource-constrained project scheduling problem was implemented by optimized computation of CPLEX Studio IDE*. According to examples from Project Scheduling Problem Library, the cases of a single disruption in a single moment and multiple disruptions in multiple moments were simulated as well as analyzed. The results show that the resource conflicts play an important role on time limit of whole project and simulation process designed is effective to some extent. The designed simulation process can provide reference for the work of management personnel, such as planning, decision-making and so on, in a project of armament.

## Keywords

multi-mode resource-constrained project scheduling problem, disruption management, project scheduling problem library, Gantt chart

## Recommended Citation

*Liu Shengming, Feng Shuxing*. Disruption Management Simulation for Multi-mode Resource-constrained Project Scheduling Problem[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 662-668.

## 多模式资源受限项目调度中的干扰管理仿真

刘盛铭, 冯书兴

(中国人民解放军装备学院, 北京 101416)

**摘要:** 针对多模式资源受限项目调度中的干扰管理仿真研究较少这一现状, 分析了 MS Project 项目管理工具的功能弱项, 借助 CPLEX Studio IDE 的优化计算功能, 设计了较为合理的干扰管理仿真流程, 实现了多模式资源受限项目调度中的干扰管理仿真。分析了单一时刻单一干扰和多个时刻多个干扰的情况, 并基于项目调度问题库的实例进行仿真, 结果表明, 资源冲突对项目调度的工期偏移量影响作用较大, 设计的仿真流程具有一定的有效性, 可为武器装备项目的管理人员进行计划、决策等工作提供参考和借鉴。

**关键词:** 多模式资源受限项目调度; 干扰管理; 项目调度问题库; 甘特图

中图分类号: C93

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 03-0662-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201703026

### Disruption Management Simulation for Multi-mode Resource-constrained Project Scheduling Problem

Liu Shengming, Feng Shuxing

(Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China)

**Abstract:** As the disruption management simulation for multi-mode resource-constrained project scheduling problem received little concern, a pretty reasonable disruption management simulation process was designed. After analyzing the functional weakness of MS Project, *disruption management simulation for multi-mode resource-constrained project scheduling problem* was implemented by optimized computation of CPLEX Studio IDE. According to examples from Project Scheduling Problem Library, the cases of a single disruption in a single moment and multiple disruptions in multiple moments were simulated as well as analyzed. The results show that the resource conflicts play an important role on time limit of whole project and simulation process designed is effective to some extent. The designed simulation process can provide reference for the work of management personnel, such as planning, decision-making and so on, in a project of armament.

**Keywords:** multi-mode resource-constrained project scheduling problem; disruption management; project scheduling problem library; Gantt chart

## 引言

工程项目普遍存在于军队建设之中, 并对武器

装备研制与发展产生重要影响。作为工程项目的-一个重要内容, 项目调度无论是在理论研究还是具体应用中都具有较高价值, 它不仅推动着工程项目的开展, 而且是工程项目决策的重要参考, 特别是在资源受限的条件下, 有效的调度方案已是整个项目顺利完成的必要条件。然而客观世界存在诸多不确定因素, 任何一种项目调度方案都会面临各种随机



收稿日期: 2015-05-20

修回日期: 2015-09-06;

作者简介: 刘盛铭(1986-), 男, 湖南永州, 博士生, 研究方向是航天试验指挥; 冯书兴(1963-), 男, 河南南阳, 博士, 教授, 博导, 研究方向为航天力量建设与运用。

<http://www.china-simulation.com>

事件的影响与干扰。在这些干扰因素的作用下, 项目调度方案可能会变得不再可行, 因此, 对项目调度进行干扰管理就显得尤为重要。

干扰管理是为了及时处理系统所面临的各种干扰因素, 通过对调度方案进行优化调整, 使整个系统受到扰动最小, 并兼顾节省各种成本<sup>[1]</sup>。这一思想已被成功地应用于航空、物流、电力、项目管理等领域中, 受到了学者们的高度重视和广泛研究<sup>[2]</sup>。在项目管理领域中, 文献[3]对干扰因素作用下的资源受限项目调度问题(Resource-constrained Project Scheduling Problem, RCPSP)进行了研究, 使用整数线性规划对问题进行建模, 提出了一种分支界定算法用于求解, 并得出了干扰后的项目调度最优方案。文献[4]建立了多因素干扰下的 RCPSP 模型, 提出了一种结合设计结构矩阵的局部搜索算法进行求解, 引入了单一资源约束下的多模式资源受限项目调度问题(Multi-mode Resource-constrained Project Scheduling Problem, MMRCPSPP)实例进行分析。文献[5]以航班调度为背景, 提出了一种在干扰因素作用下的扩展 RSPSP 模型框架, 改进遗传算法并对这一模型框架的调度方案进行求解。以上研究深入分析了不同条件下的项目调度干扰管理问题, 侧重对问题模型的建立和求解算法的设计, 但对项目调度干扰管理过程的仿真, 则关注较少。

在现有的项目管理软件中, MS Project 是微软公司推出的有效项目管理工具, 具有制定计划、分配资源、管理成本、跟踪执行等功能, 能够实现项目调度过程的仿真。MS Project 通过分析项目中各个活动的资源分配, 使用“资源|调配资源”选项, 解决活动之间的资源冲突。该软件可供设置的资源类型涵盖了一般 RSPSP 中的可更新、不可更新资源两种, 因而可以对 RSPSP 进行仿真。但 MS Project 调配资源功能有限, 调配后的项目调度方案不一定是最优的<sup>[6]</sup>, 而且, 该软件无法解决 MMRCPSPP。针对 MS Project 功能弱项, 本文通过设计合理的仿真流程, 借助 IBM 公司 ILOG CPLEX Studio IDE 的优化计算功能, 实现 MMRCPSPP 干扰管理过程在 MS Project 中的仿真。

## 1 MMRCPSPP 干扰管理模型

为了应对突发情况, 项目工程人员会针对项目中的每个活动准备多套执行方案, 如果仅从活动出发去选择最优方案, 这就可能加大整个项目的资源消耗, 从而使项目资源无法满足后继活动的使用要求, 因此, 项目管理人员需要从项目全局的资源约束出发, 决定各个活动合适的执行方案, 调度项目中各个活动并达到成本的最优, 这就是 MMRCPSPP。作为项目管理中的典型问题, MMRCPSPP 在理论上属于 NP 问题, 计算较为困难, 其数学模型可表示如下<sup>[7]</sup>。

$$\min \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{imt} \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} x_{imt} = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} (t + d_{im}) \cdot x_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{t=es_k}^{ls_k} t \cdot x_{kmt}, (i, k) \in A \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{M_i} r_{iml}^p \cdot \sum_{s=\max\{t-d_m, es_i\}}^{\min\{t-1, ls_i\}} x_{ims} \leq a_l^p, l = 1, 2, \dots, L^p \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{M_i} r_{iml}^q \cdot \sum_{s=es_i}^{ls_i} x_{ims} \leq a_l^q, l = 1, 2, \dots, L^q \quad (5)$$

$$x_{imt} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n; m = 1, 2, \dots, M_i; t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$x_{imt}$  是决策变量, 当活动  $i$  在时刻  $t$  开始执行且执行模式为  $m$  时,  $x_{imt}=1$ , 它代表了项目调度方案;  $es_i(ls_i)$  是活动  $i$  的最早(最晚)开始时间, 根据  $i$  选择的执行模式而定;  $d_{im}$  是活动  $i$  在执行模式为  $m$  时的持续时间;  $r_{iml}^p$  是活动  $i$  对第  $l(l=1, 2, \dots, L^p)$  种可更新资源的消耗量;  $r_{iml}^q$  是活动  $i$  对第  $l(l=1, 2, \dots, L^q)$  种不可更新资源的消耗量;  $a_l^p$  是第  $l(l=1, 2, \dots, L^p)$  种可更新资源总量;  $a_l^q$  是第  $l(l=1, 2, \dots, L^q)$  种不可更新资源总量;  $A$  是项目网络结构图;  $T$  是整个项目完成时间的一个可行上界值; 式(1)是目标函数, 以最小化项目工期为目标; 式(2)限制活动  $i$  只能选择 1 种执行模式  $m$  和 1 个执行开始时刻  $t$ ; 式(3)根据项目网络结构图, 限制活动执行开始的时序关系; 式(4)表示在每一时刻  $t$ , 执行中的各个活动可更新资源消耗量之和不会超过其资源总量; 式(5)

表示在每一时刻  $t$ ，执行中的各个活动不可更新资源消耗量之和不会超过其资源总量；式(6)限制决策变量的取值。

当出现干扰情况时，项目调度的环境条件将发生变化，设此时的决策变量是  $x_{imt}^*$ 。由于干扰管理旨在原调度方案的基础上，生成整个项目工程扰动最小的新调度方案，因此可建立 MMRCPSP 干扰管理模型的目标函数，如下所示。

$$\min w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3 \quad (7)$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^n |t \cdot x_{imt}^* - t \cdot x_{imt}|, t = es_i, \dots, ls_i$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{M_i} r_{iml}^p \cdot \sum_{s=\max\{t-d_m, es_i\}}^{\min\{t-1, ls_i\}} x_{ims}^* - \sum_{m=1}^{M_i} r_{iml}^p \cdot \sum_{s=\max\{t-d_m, es_i\}}^{\min\{t-1, ls_i\}} x_{ims}$$

$$f_3 = \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{imt}^*$$

式(7)以函数  $f_1, f_2, f_3$  加权之和的最小化为目标， $w_1, w_2, w_3$  是权值。 $f_1$  是新调度方案与原调度方案项目活动开始时间的偏移量总和； $f_2$  是新调度方案与原调度方案项目活动执行模式资源消耗的偏移量总和； $f_3$  是新调度方案的工期。MMRCPSP 干扰管理模型依然要受到项目网络结构、资源消耗量等约束限制，约束条件包括(2)~(6)式，但对于干扰发生前已经执行了的活动  $1, 2, \dots, i^*$ ，增加约束条件：

$$x_{imt}^* = x_{ims}, i = 1, 2, \dots, i^* \quad (8)$$

式(8)限制干扰发生前已完成的的活动，在新调度方案与原调度方案中的决策变量值相同。需要说明

的是，当干扰发生后，项目活动的相关参数  $n, d_{im}, r_{iml}^p, r_{iml}^q$  等，项目网络结构图  $A$ ，项目资源的相关参数  $a_i^p, a_i^q$  等，可能不再与原调度方案的数值相同。

## 2 仿真流程

MS Project 具有强大的图表仿真功能，而 CPLEX Studio IDE 是一个运用优化技术的软件平台<sup>[8]</sup>，它基于 CPLEX 优化引擎，可计算出复杂 MMRCPSP 的结果，因此考虑结合二者优势对 MMRCPSP 干扰管理进行仿真。设计 MMRCPSP 干扰管理的仿真流程如图 1 所示。

以上仿真流程的核心是使用优化编程语言 (OPL)对 MMRCPSP 干扰管理进行建模，该问题数学模型 OPL 相关伪代码如图 2 所示。

除此之外，对仿真流程还有以下几点说明：

(1) 仿真项目网络结构的扰动需要修改项目活动的数据，仿真活动执行模式的扰动需要修改执行模式的数据，仿真资源总量的扰动可使用 OPL 提供的 stepFunction 函数。

(2) CPLEX Studio IDE 没有提供 MS Project 调用接口，但使用 OPL 脚本语言可输出 MS Project 项目调度的格式数据。比如，脚本语言输出 "...r1[6%], r2[0%], n1[0], n2[7]..." 形式的项目活动使用资源数据，可直接在 MS Project 甘特图中资源名称栏使用。

(3) CPLEX Studio IDE 用户界面如图 3 所示。

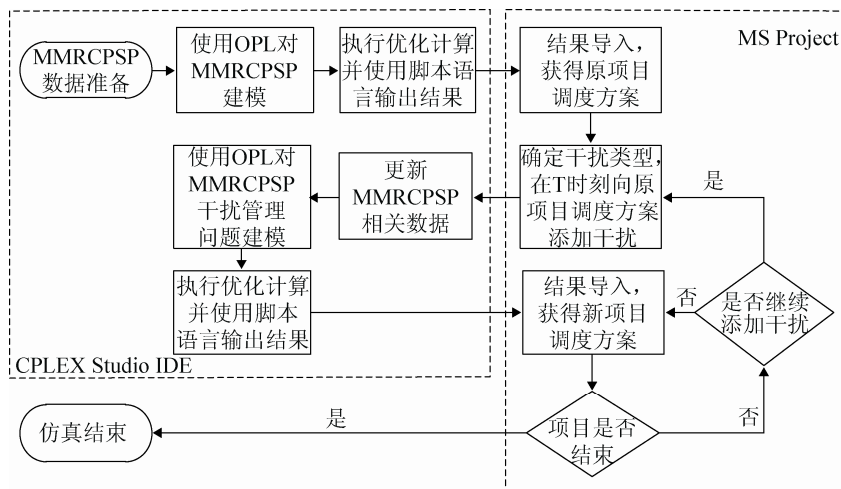


图 1 仿真流程

Fig. 1 Simulation process

```

.....
dvar interval task[1...n];
dvar interval mode[1...m];
cumulFunction r1_Usage=sum (m in Modes: m.nr1_need>0) pulse(mode[m], m.r1_need);
.....
dexpr int nr1_Usage=sum (m in Modes: m.nr1_need>0) m.nr1_need * presenceOf(mode[m]);
.....
minimize sum(t in Tasks, m in Modes)
w1*(startOf(task[t])-originalTask[t].starttime)^2
+w2*((Modes[m].r1Usage-originalModes[m].r1Usage)^2+...+(Modes[m].nr1Usage-
originalModes[m].nr1Usage)^2+...)
+w3*endOf(task[n])
subject to {
forall (t in Tasks) alternative(task[t], all(m in Modes: m.taskId==t.lid) mode[m]);
forall (t1 in Tasks, t2id in t1.succs) endBeforeStart(task[t1], task[t2id]);
cumulFunction r1_Usage<= stepfunction r1;
.....
cumulFunction nr1_Usage<=stepfunction nr1;
.....
(startOf(task[1])=originalTask[1].starttime;
Modes[1].r1Usage = originalModes[m].r1Usage;
.....

```

//将决策变量分解为两个interval类型变量, 分别对应项目活动和执行模式。interval是OPL用于求解调度问题的专有变量类型。  
// cumulFunction函数记录可更新资源的消耗量, sum函数完成累加, pulse函数取得interval类型变量mode[m]资源消耗量的数值。  
//使用紧致型决策变量用于记录不可更新资源的消耗量, presenceOf限制mode[m]不为空。  
//对目标函数进行建模。  
//定义约束条件。  
//限制决策变量项目活动与使用的执行模式要同时执行。  
//限制项目网络结构图中各个活动的先后关系。  
//限制可更新资源消耗量的范围。  
//限制不可更新资源消耗量的范围。  
//对于在干扰前已经执行了的活动, 限制其开始时间与原调度时间相同。  
//对于在干扰前已经执行了的活动, 限制其执行模式与原调度模式相同。

图 2 干扰管理模型的 OPL 伪代码

Fig. 2 Pseudocode of optimization modeling language for the interference management model



图 3 CPLEX Studio IDE 用户界面

Fig. 3 User interface of CPLEX Studio IDE

### 3 实例分析

首先仿真单一时刻单一干扰的情况。选择项目调度问题库 PSPLIB 多模式的 j1210\_1, 该项目网络结构如图 4(1)所示, 图中节点代表活动, 箭头代表时序关系, 项目活动的执行模式图 4 中(2)所示。从中可知, 活动 1 和 14 是项目网络结构中的虚节点, 活动 2~13 各有 3 种执行模式, 其可更新、不可更新资源消耗量如 r1, r2, nr1, nr2 所在列。j1210\_1 中这 4 种资源总量分别是 16, 12, 28, 43。

使用 OPL 对该问题进行建模并执行优化计算, 得到最优调度方案的甘特图如图 4(3)所示, 总工期是 20 天, 选择的项目活动执行模式如图 4(2)

中“\*”标记所示。总工期的优化计算结果与 PSPLIB 网站提供的 j1210\_1 最优数值结果<sup>[9]</sup>是一致的, 这在某种程度上反映了 CPLEX 处理 MMRCPS 的优越性。

为便于比较, 只引入 r1 资源的干扰, 在 MS Project 的 r1 资源信息中设置干扰如图 4(4)所示, r1 在第 10, 11 天不可用, 在第 12~16 天的总量是 12。设置完成后, r1 资源消耗与资源总量发生冲突, 冲突将在图 4(3)中用线段进行标记。从图 4(3)可知, r1 资源总量是 12 时, 对当时的项目调度没有影响, 这一结果也可从图 4(2) “\*” 标记的执行模式资源消耗量中推知。

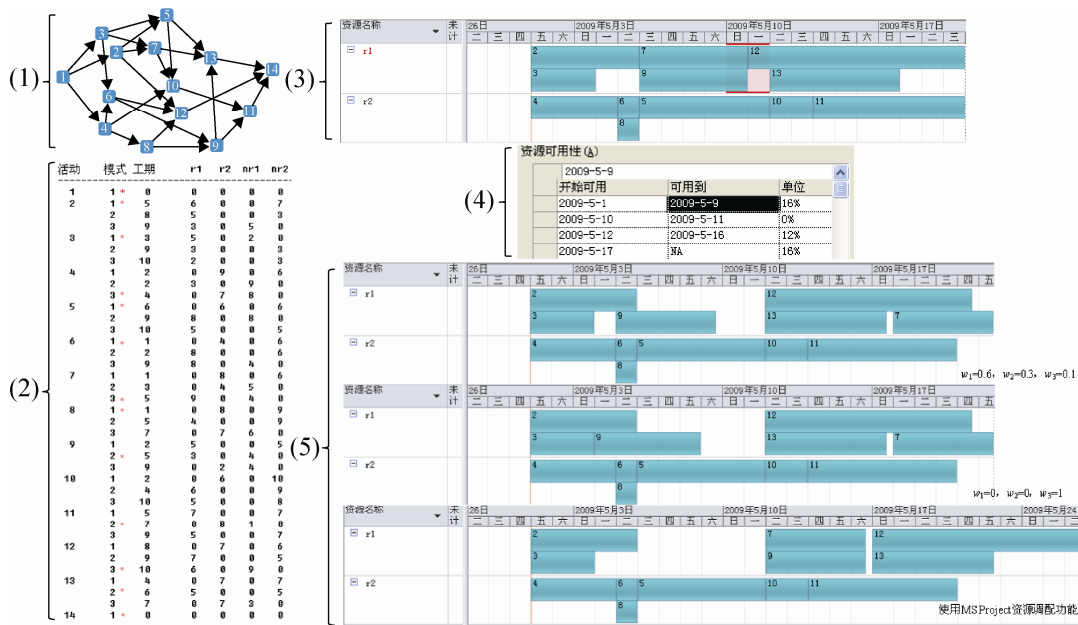


图 4 单一时刻单一干扰的情况  
Fig. 4 Situation for the single time and single interference

使用 OPL 对 j1210\_1 干扰管理问题进行建模计算。当  $w_1=0.6, w_2=0.3, w_3=0.1$  时,  $w_1=0, w_2=0, w_3=1$  时, 只基于 MS Project 的资源调配功能时, 分别记为情况 1, 情况 2, 情况 3, 仿真流程得到的项目调度方案甘特图如图 4 中(5)所示, 其总工期和各个活动的工期偏移量总和如表 1 所示。

表 1 3 种情况的比较  
Tab. 1 Comparison of three cases

调度条件	总工期/ 天	偏移量 总和/天
$w_1=0.6, w_2=0.3, w_3=0.1$	22	14
$w_1=0, w_2=0, w_3=1$	22	15
只基于 MS Project 资源调配功能	26	23

由图 4 中(5)和表 1 可知, 由于出现干扰, 项目总工期延长, 使用 CPLEX 优化计算得到的情况 1、情况 2 总工期天数小于使用 MS Project 资源调配功能的情况 3。情况 3 中, MS Project 为解决图 6 出现的资源冲突, 将冲突涉及的活动整体向后推移, 处理方式较为简单, 而经过 CPLEX 优化计算后, 情况 1 和情况 2 的项目活动排列相对紧凑, 且 r1 相关的项目活动调度与图 4(3)相比, 出现了变化。情况 2 的工期偏移量要大于情况 1 的工期偏移

量, 这是因为情况 2 设置  $w_1=0, w_2=0, w_3=1$ , 使得目标函数仍与原问题相同, 这是一种重调度的方式, 与干扰管理的出发点不相同, CPLEX 进行计算时会将活动的开始时间尽量往前排, 以便缩小整个项目工期。此外, CPLEX 优化计算结果表明, 为了使目标函数式(7)最小, 情况 1、情况 2 项目活动选择的执行模式与原调度方案相同。

其次仿真多个时刻多个干扰的情况。选择项目调度问题库 PSPLIB 多模式的 j3010\_1, 该项目网络结构如图 5(1)所示, 其执行模式、资源总量在文献[9]中可查, 设置干扰情况如表 2 所示。

原调度方案如图 6(1)所示, j3010\_1 项目最优工期是 26 天。设置  $w_1=0.6, w_2=0.3, w_3=0.1$ 。当干扰情况 1 出现后, 资源 r1、r2 发生冲突, 如图 6(1)线段所示; 经过仿真流程调整, 项目调度方案如图 6(2)所示, 工期偏移量是 15 天; 当干扰情况 2 出现后, 资源 r2 发生冲突, 如图 6(3)线段所示; 经过仿真流程调整, 项目调度方案如图 6(4)所示, 工期偏移量是 3 天; 当干扰情况 3 出现后, 经过仿真流程调整后的调度方案与图 6(4)的原方案相同, 工期偏移量是 0 天。

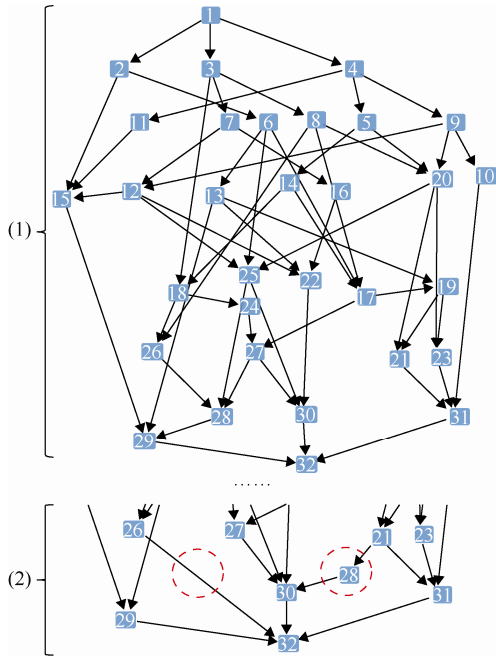


图 5 j13010\_1 项目网络结构图及变化  
Fig. 5 Project network structure and change of j13010\_1

表 2 干扰情况

Tab. 2 The interference cases

干扰	说明
情况 1	r1 在第 7、8、9 天总量降为 12, r2 在第 9、10 天总量降为 10。
情况 2	活动 16 缩减 5 天, 活动 19 延长 3 天, 活动 20 延长 3 天, 活动 22 缩减 2 天。
情况 3	更改活动 28 的时序关系, 如图 5(2)所示。

由以上结果可知, 项目资源、项目活动工期等因素的变化能够导致资源发生冲突, 资源冲突对项目调度干扰管理的工期偏移量影响作用较大。项目活动工期的长短变化、项目网络节点的时序关系变化, 若没有引起资源冲突, 则对干扰管理调度方案影响作用较小。仿真结果与实际情况较为接近, 说明了本文设计的项目调度干扰管理仿真流程是有效的, 能够为武器装备项目的管理人员进行计划、决策等工作提供参考和借鉴。

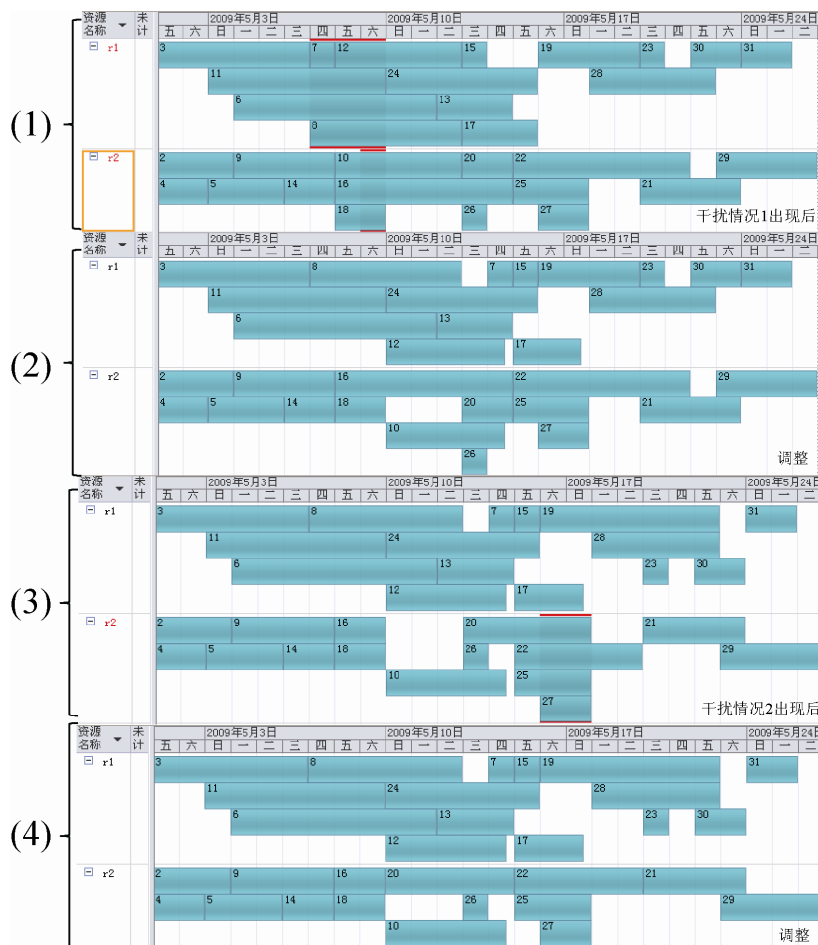


图 6 多个时刻多个干扰的情况  
Fig. 6 Situation for the multiple times and multiple interferences



## 4 结论

武器装备项目会受到干扰因素的影响,对 MMRCPSP 干扰管理问题的研究具有理论和应用价值。虽然 MS Project 能够实现项目调度过程的仿真,但它无法解决 MMRCPSP。通过设计合理的仿真流程,借助 CPLEX Studio IDE 优化计算功能,能够实现 MMRCPSP 干扰管理的仿真。实例分析的结果表明,本文设计的仿真流程具有一定的有效性。下一步将开展程序移植自主可控平台上的工作,并对干扰管理问题的求解算法进行深入研究。

### 参考文献:

- [1] Yu G, Qi X T. Disruption Management: Framework, Models and Applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2004: 1-10.
- [2] 胡祥培, 丁秋雷, 张漪, 等. 干扰管理研究评述 [J]. 管理科学, 2007, 20(2): 1-7. (Hu Xiangpei, Ding Qiulei, Zhang Yi, et al. Review of interference management research [J]. Management Science, 2007, 20(2): 1-7.)
- [3] Zhu Z, Bard J F, Yu G. Disruption Management for Resource-constrained Project Scheduling [J]. Journal of the Operational Research Society (S0160-5682), 2005, 56(4): 365-381.
- [4] 陈庭贵, 琚春华. 多干扰的资源约束项目调度问题 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2409-2417. (Chen Tinggui, Ju Chunhua. Resource-constrained project scheduling problem with multiple interferences [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2012, 18(11): 2409-2417.)
- [5] Jürgen Kuster, Dietmar Jannach, Gerhard Friedrich. Extending the RCPSP for modeling and solving disruption management problems [J]. Applied Intelligence (S0924-669X), 2009, 31(3): 234-253.
- [6] 柳春峰. 工程项目中技能型员工调度问题研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011: 92-95. (Liu Chunfeng. Research on the scheduling problem of skilled workers in engineering projects [D]. Hefei, China: Hefei Polytechnic University, 2011: 92-95.)
- [7] Erik L Demeulemeester, Willy S Herroelen. PROJECT SCHEDULING: A Research Handbook [M]. New York, USA: Kluwer Academic Publishers, 2002: 501-502.
- [8] IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio [EB/OL]. (2015-01-01) [2015-02-27]. <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimization-studio>.
- [9] Leibniz Supercomputing Centre. Project Scheduling Problem Lbrary-psplib [EB/OL]. (2014-05-21) [2015-04-03]. <http://www.om-db.wi.tum.de/psplib>
- [10] (上接第 653 页)
- [11] Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: Theory and applications [J]. Neurocomputing (S0022-3239), 2006, 70(1/3): 489-501.
- [12] 李彬, 李贻斌. 基于 ELM 学习算法的混沌时间序列预测 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2011, 44(8): 701-704. (LI Bin, LI Yibin. Chaotic Time Series Prediction Based on ELM Learning Algorithm [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 701-704.)
- [13] Cheng L, Wang Y, Li S. A self-adaptive particle swarm optimization based multiple source localization algorithm in binary sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks (S1550-1329), 2015, 2015: 1-9.
- [14] Yang Q, Tian J, Si W. An improved particle swarm optimization based on difference equation analysis [J]. Journal of Difference Equations & Applications (S1032-6198), 2016, 22(1): 1-18.