

# 基于 4D-BIM 与过程模拟的施工进度-资源均衡

林佳瑞<sup>1</sup>, 张建平<sup>1</sup>, 钟耀锋<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学土木工程系, 北京, 100084)

**【摘要】**本文面向项目施工进度与资源管理的实际需求, 提出了基于 4D-BIM 与过程仿真解决进度-资源均衡问题的整体方案。通过研究进度计划与离散事件仿真模型的转化机制, 实现了进度-资源均衡模型的自动构建。同时, 论文对基于模拟退火算法求解进度-资源均衡模型的过程进行了分析和探索。将上述整体方案应用于工程实际数据, 取得了较好的结果。研究表明, 进度-资源均衡模型的自动构建可极大减少工作量, 基于模拟退火算法可迅速获得进度-资源均衡问题的优秀解, 本文的解决方案实现施工进度-资源均衡模型的自动构建、仿真与优化, 可减少大量重复工作, 为工程管理者方便快捷地制定工程进度计划与资源配置方案提供了切实可行的工具。

**【关键词】**4D-BIM 离散事件仿真; 模拟退火算法; 进度资源均衡

## 1、引言

我国目前存在大量建筑、桥梁、公路等工程建设, 以满足人们日益增加的居住、办公、与交通需求。然而, 工程工期紧、资源消耗大、施工场地空间狭小、大型机械费用高仍然是制约我国大多数工程施工进展的关键问题, 大型工程施工进度与资源的均衡与协调依然是工程施工管理者面临的一大挑战。围绕如何高效地配置和利用关键资源、保障工程进度, 国内外学者展开了大量的研究。Liang 等<sup>[1]</sup>针对大型工程资源配置, 设计了不同的基础解选择策略, 并通过比较认为变邻域搜索算法比混合遗传算法及蚁群算法更加有效。Hegazy 等<sup>[2]</sup>则将遗传算法与过程模拟相结合进行资源优化等工作。国内, 王宏等<sup>[3, 4]</sup>将解码规则和解码方向编入对应基因, 将自适应遗传算法用于资源受限的调度问题, 实验表明此种算法比其他遗传算法更有效。

综上所述, 近年来, 大量研究多将智能算法应用于资源配置及资源受限的进度编制问题, 然而, 此类研究多关注于如何提高算法效率等问题, 对动态构建进度资源的优化模型, 快速实现进度与资源的平衡和优化的研究还较少。

本文通过研究工程施工计划与离散事件仿真模型的异同, 建立了施工计划与离散事件仿真模型的转换方法, 将离散事件仿真模型与模拟退火算法相结合, 为进度资源均衡问题的模型构建、仿真与优化过程的自动化奠定了基础。同时, 论文对模拟退火算法求解进度资源均衡问题解空间选择与目标函数设计进行了细致的探讨与分析, 并将上述模型构建方法与优化算法应用于实际项目数据, 取得了良好的效果。

---

**【基金项目】**863 项目(2013AA041307)、国家自然科学基金(51278274)

**【作者简介】**林佳瑞, 1987 年生, 男, 博士生, 主要研究领域为绿色建筑, BIM, 4D 技术, 全生命周期管理及其应用。

## 2、整体解决方案

### 2.1 离散事件仿真

离散事件仿真将系统随时间的变化抽象成一系列的离散时间点上的事件，通过按照事件时间顺序处理事件，是一种事件驱动的仿真世界观。离散事件仿真将系统的变化看成一个个事件，系统任何的变化都只能通过相应的事件来体现，在两个相邻的事件之间，系统状态维持前一个事件发生后的状态不变<sup>[5]</sup>。离散事件仿真由状态、仿真钟、事件列表、随机数生成器、终止条件等部分组成。其中一个重要的组成部分就是仿真钟。仿真钟分成时间触发和事件触发两种类型。

### 2.2 模拟退火算法

模拟退火是一种通用概率的算法，可在大的空间内寻找问题的最优解，通常用来解决 NP-hard 问题。模拟退火作为一种人工智能的随机算法，能在较短的时间内找到一个较优的解，当退火速度足够慢时，算法能够找到全局最优解<sup>[6]</sup>。与贪心寻优算法相比，模拟退火算法可以一定的概率接受差解。初期温度较高时，算法以一个较大的概率接受差解，使得算法能在整个解空间范围内寻找最优解，随着温度的降低，算法会以一个越来越小的概率接受差解。

### 2.3 整体思路

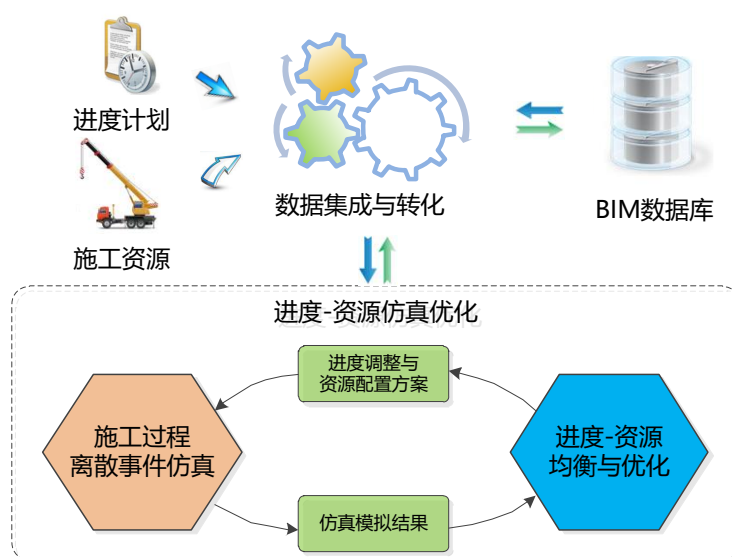


图 1 施工进度-资源均衡整体方案

目前，我国施工信息仍以表格、文档等形式存在，BIM 技术的出现为实现各专业、多参与方的数据互用带来了极大的方便。清华大学 4D-BIM 系统已实现了进度计划、施工资

源等工程施工数据的集成,形成了支持工程施工进度、资源、成本集成管理的施工 BIM 模型<sup>[7]</sup>。本研究在清华大学 4D-BIM 系统研究成果基础上,进一步扩展 BIM 数据的集成与转化机制,建立进度计划及资源信息与进度-资源仿真优化模型的转换机制,并在进度-资源仿真优化模型基础上进行工程施工进度与资源配置的均衡与优化。

从而,工程施工进度计划与施工资源配置方案可通过数据集成与转化接口集成到 BIM 数据库,并可自动转化为进度-资源仿真优化模型。基于进度-资源仿真优化模型,可通过施工过程的离散事件仿真输出工程施工过程中的资源消耗、工作持续时间等仿真模拟结果,这些模拟结果将作为基于模拟退火算法的进度-资源均衡优化算法的输入。算法通过对仿真模拟结果的分析处理,可输出对进度计划与资源配置的调整方案,作为下一步施工过程仿真的输入,如此往复循环,直至工程进度与资源配置的方案达到预期目标。最终,仿真优化结果可基于数据集成与转换机制自动更新工程施工进度计划与资源配置方案,将数据集成到施工 BIM 模型中 (图 1)。

### 3、离散事件仿真模型的自动生成

#### 3.1 进度计划与仿真模型的不同

因功能及适用范围的不同,工程施工进度计划与离散事件仿真模型存在一定的差异。工程进度计划主要由任务及任务之间的关系组成:其任务具有一定的持续时间;任务之间的关系规定了任务执行的前后顺序、时间间隔。而离散事件仿真模型主要由事件及事件之间的关系组成:其中事件具有一定的行为,该行为会在某一时刻发生,但一般认为事件的发生是瞬时完成的,不占用任何时间;事件之间的关系则用于表达事件发生的先后顺序与间隔时间。

#### 3.2 进度计划与离散事件仿真模型的转化方法

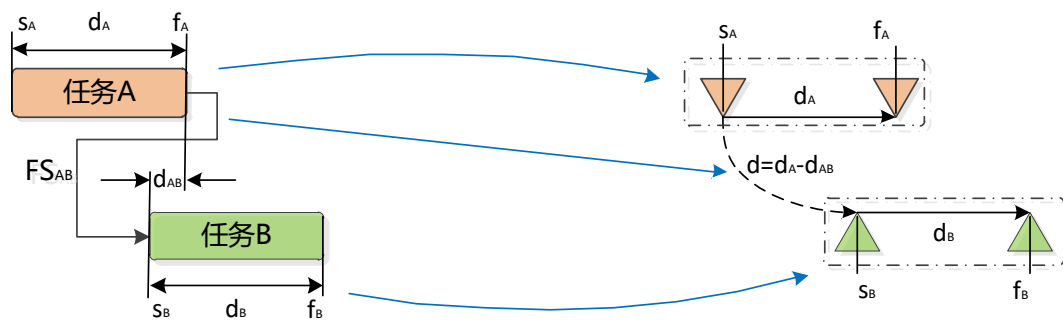


图 2 进度计划与仿真模型的转换方法

进度计划中的不同任务及任务之间的紧前紧后关系向离散事件仿真模型转化过程中应遵循以下原则:

- (1) 进度任务中的某项任务应转换为任务起始事件、任务结束事件与连接两个事件的边:其中边的持续时间应与任务的持续时间相等,任务起始事件和任务结束事件

的触发时间应分别等于该项任务的起止时间 (如图 2 中任务 A 应转化为图 2 右上方的方框中的两个事件及连接二者的边)。

- (2) 因为离散事件仿真模型中一般不允许从触发时间晚的事件连向触发时间早的事件的边，所以紧前紧后关系应转化为连接两项任务起始事件的边：其中边的持续时间  $d$  根据不同紧前紧后关系会取不同的值，详见表 1。需要注意的是，紧前紧后关系转换为的边与 (1) 中创建的边有所不同。(1) 中边表达的含义是当任务起始事件触发后经特定时间任务结束事件触发，而此处边的含义是前一个事件触发后经特定时间后续事件可以被触发。

表 1 不同紧前紧后关系对应离散事件中边的持续时间

紧前紧后关系	持续时间		紧前紧后关系	持续时间
开始-开始	$d=s_B-s_A$		结束-开始	$d=s_B-f_A$
开始-结束	$d=f_B-s_A$		结束-结束	$d=f_B-f_A$

4、基于模拟退火的进度-资源均衡与优化策略

4.1. 解空间的选择

模拟退火算法新解的产生和接受可分为以下步骤：首先在旧解的邻域内产生一个新解，并计算新解与旧解对应的目标函数差，其次根据 Metropolis 准则判断新解是否被接受，若被接受则用新解作为当前解，否则将新解舍去。在此基础上进行下一轮试验，直至满足终止条件。

本文通过调整任务的持续时间及任务之间的间隔时间来改变事件发生的时刻从而得到新的项目进度安排。由于工程施工中某些施工任务应该连续起来完成，不宜中断，因此，需要确定哪些任务之间的间隔是可以调整的，同时还需确定各项工序时间及其间隔可调整的范围。对于不同的任务可建立资源投入量与任务持续时间的关系，从而可确定任务持续时间的变动范围。对需要连续完成的施工任务其时间间隔宜限定为不能调整，而对其他情况，可以限定时间间隔的上下界（可基于该任务的自由差进行设置）。根据前述进度计划与离散事件仿真模型的转换关系，对任务持续时间和任务之间间隔的调整均可统一为对离散事件仿真模型中边的持续时间调整。

4.2. 邻域结构

模拟退火算法要在一个旧的解的邻域内产生一个新的解。邻域结构是指模拟退火算法产生新解的方式。我们在模拟退火中引入了两种产生新解的方式。如图 3 所示。

图中左侧为第一种新解的

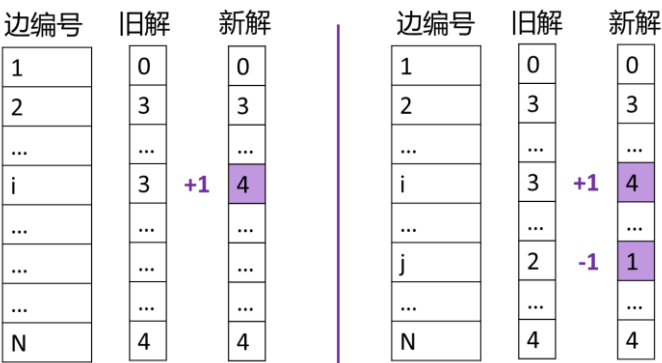


图 3 新解的产生

产生方式，把某条边的间隔时间加上 1；图中右侧为第二种新解的产生方式，即在某条边的间隔时间加 1 的同时让另一条边的间隔时间减 1，这是为了平衡不断增长的间隔时间使得总工期不断单调增长。

#### 4.3. 罚函数和目标函数设计

本文假定为保证或缩减工期，需投入更多的工程施工资源，但由于资金等其他条件限制只能投入一定量的工程施工资源，因此算法的优化目标是维持预期工期不变的或者缩小预期工期的情况下尽可能地控制资源投入。算法引入了罚函数来约束超过预期工期的解，是算法将其视为一个较差的解而将它舍弃。其中惩罚量（ $P$ ），与实际工期（ $AP$ ）和预期工期（ $EP$ ）的关系为

$$P = (AP - EP)^2$$

算法的目标函数可设为各种资源占用最大数量按照自身权重加权得到的平均值。权重系数依据各个资源的成本等情况确定。

$$U = \sum_{i=1}^n w_i m_i$$

其中  $w_i$  为第  $i$  种资源的权重值， $m_i$  为第  $i$  种资源的最大占用值， $n$  为资源数。

## 5、案例分析

### 5.1. 基本概况

研究选择了国家体育场（鸟巢）钢结构吊装施工计划作为对象进行了验证，主要分析吊车与场地等关键资源对工程施工计划的影响。研究建立的仿真分析模块依托清华大学 4D-BIM 平台，可直接集成采用 Microsoft Project 编制的施工计划，算法优化结果也可基于 4D-BIM 导出为 Microsoft Project 文件。验证过程中采用人工录入方式定义施工资源信息及其与施工计划各项任务的关联关系。以桁架安装任务为例，可分为拼装场地重整+构件运输、现场拼装、单元绑扎、单元脱胎+翻身、单元场内运输、就位+调整+固定、吊车返回等工序。

### 5.2. 资源占用情况及其性质差异

各个资源的使用情况如表 2 所示。

表 2 资源占用情况

工序	小型吊车	300T 吊车	800T 吊车	场地
拼装场地重整+ 构件运输	√			√

现场拼装	√			√
单元绑扎	√			√
单元脱胎+翻身		√	√	√
单元场内运输			√	
就位+调整+固定			√	
吊车返回			√	

工程施工过程中施工场地是有限的，如果没有空闲则需要使用场地的工序应等待占用场地的工序完成后才能执行。验证过程中对吊车的数量没有做限定，优化目标希望在减少工期的情况下得到所需的最少吊车数。

5.3. 结果分析讨论

通过对比初始数据与优化结果可以看出，场地得到了充分的利用（初始设定为场地不超过 9 块），通过保证一定数量的吊车，可并行开展各项工作，减少部分工序的等待时间，缩短工程工期（如表 2）。同时，对比优化前后的进度计划文件，可发现几项需要连续完成的任务在优化后仍保持连续执行状态，只是其相互之间的间隔和其部分任务的持续时间发生了变化，较好地避免了频繁中断和恢复某项工作导致的效率降低。

表 3 优化结果对比

	最大吊车数	最大场地数	工期
初始计划	12	2	405d
优化结果	35	9	100d

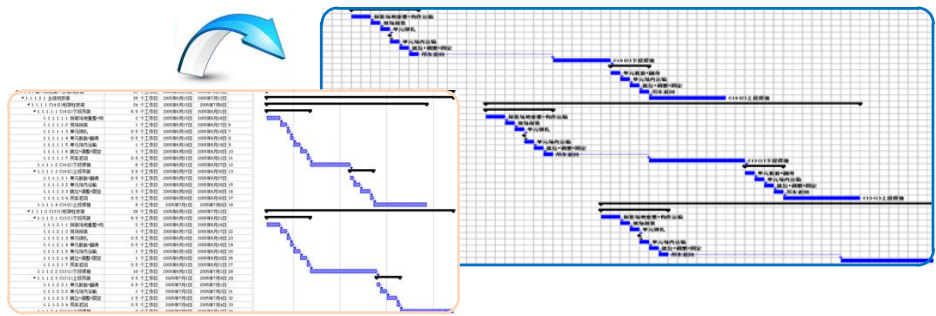


图 4 优化前后进度计划对比

6、结论

研究提出的进度计划与离散事件仿真模型转换机制为进度-资源平衡优化模型的自动构建、仿真与分析提供了有效的方法指导，可缓解进度-资源平衡优化模型构建过程复杂、人力投入大等问题。同时，论文对基于模拟退火方法配合离散事件模拟求解进度-资源平衡优化问题的过程进行了分析和探讨，针对工程施工计划特点提出了相应的解空间构造方法。

实际工程数据的测试与验证表明, 本文提出的方法切实有效, 可较好平衡进度与工程施工资源之间的冲突, 为工程施工管理人员带来了新的施工进度与资源管控工具。

#### 参考文献

- [1] Liang Y, Chuang C. Variable neighborhood search for multi-objective resource allocation problems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(3):73-78.
- [2] Hegazy T, Kassab M. Resource optimization using combined simulation and genetic algorithms[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2003, 129(6):698-705.
- [3] 王宏, 林丹, 李敏强. 一种求解资源受限项目调度问题的自适应遗传算法[J]. 系统工程, 2005(12): 99-102.
- [4] 王宏. 求解资源受限项目调度问题算法的研究[博士学位论文]. 天津大学, 2005.
- [5] 班克斯. 离散事件系统仿真[M]. 机械工业出版社, 2007.
- [6] 康立山. 非数值并行算法-模拟退火算法[M]. 科学出版社, 2000.
- [7] 张建平, 李丁, 林佳瑞, 等. BIM在工程施工中的应用[J]. 施工技术, 2012(16): 10-17.

## Schedule-Resource Trade-off Based On Construction Process

### Simulation and Simulated Annealing

Lin Jia-Rui<sup>1</sup>, Zhang Jian-Ping<sup>1</sup>, Zhong Yao-Feng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** According to the actual demand of management during construction, this paper researches on the schedule-resource trade-off based on 4D-BIM and construction process simulation. By transforming a construction schedule into a Discrete Event Simulation (DES) model, this method presented can automatically construct the schedule-resource trade-off model. Also, the paper explores and analyses the process of SA algorithm in order to tackle the schedule-resource trade-off. The whole solution is applied to solve a real problem and good results are obtained. The achievement indicates that the automatic construction of schedule-resource trade-off model can free people from intensive work. Excellent results can be obtained in a short time by SA algorithm. The solution presented in this paper constructs schedule-resource equilibrium model, simulates and optimizes construction process and reduces repetitive work, which provides managers with a practical tool to arrange the schedule and allocate resources.

**Key Words:** Discrete Event Simulation (DES); Simulated Annealing (SA) algorithm; Schedule-Resource Trade-off