

基于 4D-BIM 的施工进度-资源均衡模型自动构建与应用

林佳瑞¹, 张建平¹, 钟耀锋¹

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

【摘要】针对工程项目施工进度与资源均衡的关键需求, 研究基于清华大学 4D-BIM 模型建立了基于 4D-BIM 模型解决进度-资源均衡问题的技术路线。研究通过 4D-BIM 模型进度及资源信息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讨论。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及智能仿真、求解极大地减少了建模工作量, 提高了工作效率, 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】建筑信息模型(BIM); 4D-BIM 模型; 进度-资源均衡; 离散事件仿真; 模拟退火算法

1、引言

我国目前仍处于大规模建设时期, 人们日益增长的居住、办公与交通需求推动着大量的建筑、桥梁、公路等工程建设。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^[1]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^[2]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^[3, 4]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。

近年来, 大量研究多集中于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 4D-BIM 模型与离散事件仿真模型的异同, 建立了 4D-BIM 模型与离散事件仿真模型的转换方法, 并将离散事件仿真模型与模拟退火算法相结合, 实现了进度-资源均衡问题的模型构建、仿真与优化过程的自动化。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“基于全生命周期绿色住宅产品化数字开发技术研究和应用”(2013AA041307)、国家自然科学基金“基于云计算的建筑全生命周期 BIM 集成与应用关键技术研究”(51278274)、清华大学-广联达 BIM 中心课题“基于 BIM 的绿色建筑全生命周期管理技术研究”

【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、研究基础

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一个事件，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^[5]。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^[6]。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 4D-BIM 模型结构

目前，我国施工信息仍以表格、文档等形式存在，建筑信息模型（Building Information Modelling, 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^[7]，即 4D-BIM 模型。该模型针对传统 4D 模型仅能关联产品模型（包含模型三维信息及基本属性）与时间信息而难以关联其他信息的不足，以工程施工 WBS（Work Breakdown Structure，工作分解结构）分解为核心，建立模型空间划分、工程进度（包括计划进度与实际进度）的关联机制，形成工程施工的过程模型。同时，在前述过程模型基础上，基于 WBS 分解，进一步关联工程施工的人材机等资源信息、工程算量及成本信息、工程施工质量及安全监测信息、场地信息以及其他信息，形成了信息丰富完善的 4D-BIM 模型。基于该模型，可为工程施工阶段的施工过程模拟、进度管理、资源管理、成本管理、质量安全管理、场地管理以及其他扩展应用提供完善的数据支撑。

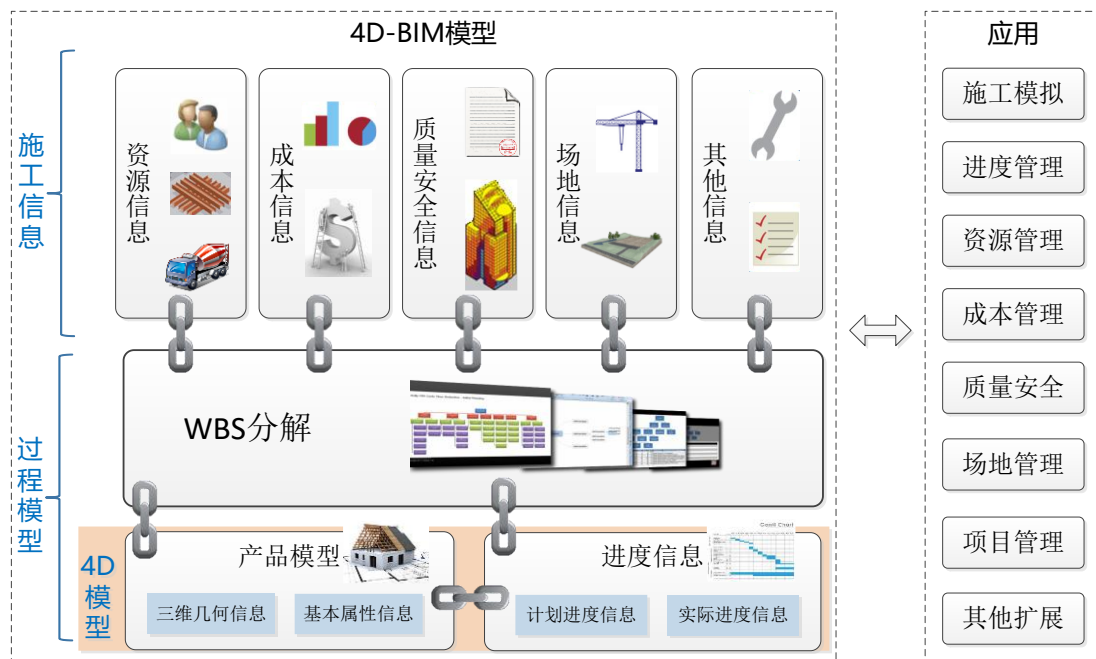


图 1 4D-BIM 模型结构

2.4 技术路线

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 2)。

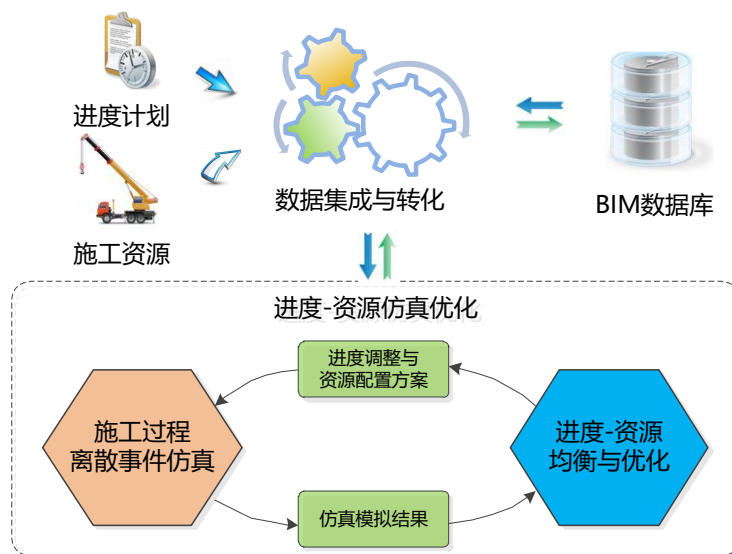


图 2 施工进度-资源均衡整体方案

3、施工进度-资源均衡模型的自动构建

3.1 4D-BIM 模型与进度-资源均衡模型的不同

因功能及适用范围的不同，4D-BIM 模型中进度计划与离散事件仿真模型存在一定的差异。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、可能使用一定的资源；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 4D-BIM 模型进度信息转换方法

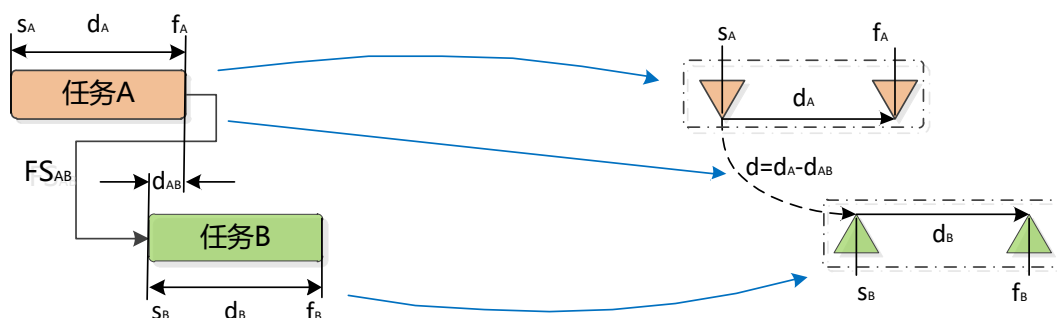


图 3 4D-BIM 模型进度信息转换

4D-BIM 模型进度信息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 3 中任务 A 应转化为图 3 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	$d=f_B-f_A$

3.3 4D-BIM 模型资源信息转换方法

工程施工过程中，可根据资源特点将资源分为可重用资源与不可重用资源两大类，前者包括塔吊、模板等机械设备或材料，后者包括混凝土、钢筋等材料。针对 4D-BIM 模型与进度-资源均衡模型的不同，综合考虑资源特点，研究提出如图 4 所示 4D-BIM 模型资源信息的转换方法。4D-BIM 模型中，某项任务需占用一定的不可重用资源与可重用资源，任务节点与其占用的资源已通过 WBS 分解建立了关联机制。针对不同资源类型，可按照如下原则将资源信息转换到进度-资源均衡的离散事件仿真模型中：

- (1) 对某项任务占用的不可重用资源，可等效转化为任务起始事件时从该资源库存中减去相应的资源消耗量；
- (2) 对某项任务占用的可重用资源，则等效转化为任务起始事件时从其资源库存中减去该资源使用量，并在任务结束事件触发时归还等量该资源到其资源库存中；

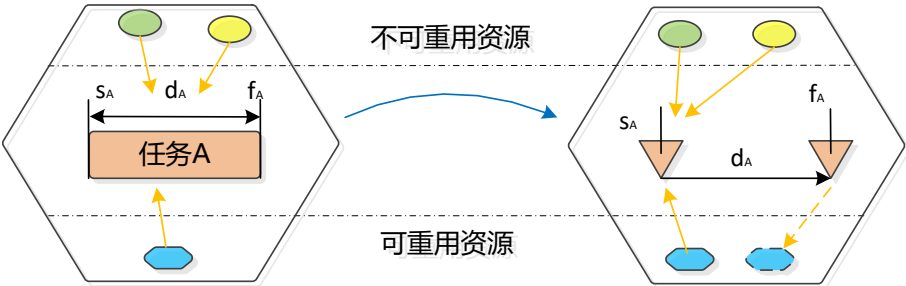


图 4 4D-BIM 模型资源信息转换

4、基于模拟退火的进度-资源均衡模型求解策略

4.1. 算法新解的构造方法

模拟退火算法新解的产生和接受可分为以下步骤：新解构造，新解与旧解目标函数差计算，判断是否接受新解，若接受新解则将新解视为当前解，否则舍去。在此基础上进行下一轮试验，直至满足终止条件。

施工进度-资源均衡问题中进度变量以及部分源等变量均需视为离散量，不可连续变化，同时，对工程施工还需考虑以下特点：

- (1) 工程施工过程中，某项任务的几道工序应连续完成，不宜中断；
- (2) 不同任务的持续时间与其需要的不同资源投入量之间存在着不同的关系；
- (3) 资源总量有限、部分资源可重复利用；

针对上述特点，本研究首先通过数据预处理，确定哪些任务间的时间间隔可调整，建立任务持续时间与资源投入量的函数关系，并明确了不同任务持续时间的浮动区间。研究采用的新解构造与验证方法如下：

- (1) 对任务持续时间及任务间隔时间的修改，均可视为对离散事件模型中边的修改。因此，新解的构造可通过如图 5 所示两种方法修改：一是将旧解的某条边增加 1，二是在旧解某边增加 1 的同时，将另一条边减少 1；
- (2) 根据对任务间的时间间隔、任务持续时间的浮动范围以及当前任务需求与资源存量的对比，确定新解是否可行；
- (3) 如可行则将新解视为当前解，否则重新构造新解。

边编号	旧解	新解	边编号	旧解	新解
1	0	0	1	0	0
2	3	3	2	3	3
...
i	3	4	i	3	4
...
...	j	2	1
...
N	4	4	N	4	4

图 5 新解的产生

4.2. 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、应用实例

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，可基于该平台的数据接口导入并集成过程施工计划与各项任务的资源数据，算法优化结果也可基于 4D-BIM 导出为 Microsoft Project 文件及资源配置计划。

5.2. 资源占用情况及其性质差异

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。各个工序的资源使用情概况如表 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

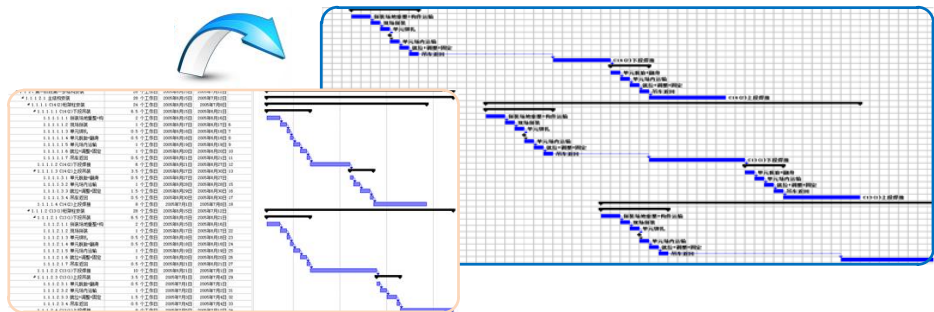


图 6 优化前后进度计划对比

6、结论

研究基于清华大学 4D-BIM 模型, 提出了 4D-BIM 模型与离散事件仿真模型的自动转换机制, 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提供了更加方便快捷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[D]. 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 Modelling and Application Based On 4D-BIM

Lin Jia-Rui¹, Zhang Jian-Ping¹, Zhong Yao-Feng¹

(1. *Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: According to the key requirements in schedule and resource management during construction, an approach for schedule-resource trade-off problem was established based on 4 Dimensional Building Information Model (4D-BIM) proposed by Tsinghua. With the transforming mechanics between 4D-BIM and Discrete Event Simulation model, schedule-resource trade-off model can be achieved automatically. In addition, the paper explores and analyses the process of SA algorithm in order to tackle the schedule-resource trade-off. The whole solution was applied to a real project and illustrated a good result. The result indicates that the automatic schedule-resource trade-off modelling can free people from intensive work, and reduces repetitive work, which provides managers with a practical tool for schedule arrangement and resource allocation.

Key Words: Building Information Modelling (BIM); 4 Dimensional Building Information Model (4D-BIM); Schedule-Resource Trade-off; Discrete Event Simulation (DES); Simulated Annealing (SA) algorithm