

# 基于 BIM 的施工资源配置仿真模型自动生成及应用

林佳瑞, 张建平

(清华大学土木系, 北京 100084)

**摘要:** 针对目前工程施工资源配置面临的建模过程复杂、效率低等问题, 本研究提出一种基于 BIM (Building Information Modeling/Model) 模型数据标准 IFC (Industry Foundation Classes) 的资源配置离散事件仿真模型自动生成算法。本研究首先构建了基于 IFC 的进度资源信息模型, 通过分析 IFC 模型与离散事件仿真模型的异同, 实现前者向后者的自动转换。并将上述模型与模拟退火算法相结合, 开发了模型转换及资源配置离散事件仿真分析软件, 应用于实际工程, 验证模型自动构建方法的可行性及正确性。结果表明, 研究成果可提高仿真建模的速度与准确率, 为管理人员快速准确的进度与资源配置、管控提供了有力的工具。

**关键词:** BIM (Building Information Modeling/Model), IFC (Industry Foundation Classes), 离散事件仿真, 资源配置

## Simulation Model Generation and Application based on BIM for Resource Allocation

Lin Jiarui, Zhang Jianping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

**Abstract:** To eliminate effort needed in data modeling for resource allocation, a BIM-based approach to automatically generate discrete event simulation (DES) model for resource allocation was proposed. First, a model was established based on IFC to model schedule and resource information. Then, with comparison of IFC model and DES model, automatic conversion from the former to the latter was achieved. Finally, taking simulated annealing as the optimization module, a model generation and optimization application was developed for resource allocation, and was validated in a real project. Results illustrate that automatic generation of DES model can reduce mistakes and avoid rework in resource allocation modeling, thus facilitating decision making in schedule and resource trade off.

**Key Words:** BIM (Building Information Modeling / Model); IFC (Industry Foundation Classes); discrete event simulation; resource allocation

---

## 1. 绪论

我国建筑业发展长期存在着工期要求高、施工现场空间狭小、施工效率低、资源浪费严重等问题，提高工程施工资源使用效率，实现进度与资源的均衡、协调依然是工程施工管理者面临的一大挑战。近年来，我国提出了“一带一路”战略，将掀起新一波工程建设热潮，工程施工资源配置、优化需求显得愈加迫切。针对工程施工资源配置及高效使用等研究热点，国内外学者做了广泛而深入的研究。Liu 等<sup>[1]</sup>提出了一种新的基因交叉算子，以避免产生不满足条件的子代基因，用于工程施工的资源配置优化。针对多目标条件下的资源配置，Chaharsooghi 等<sup>[2]</sup>于 2008 年提出一种蚁群算法来获得相应的帕累托解。El-Rayes 等<sup>[3, 4]</sup>则提出了新的资源均衡指标及多目标遗传算法来实现资源利用率的最大化。Liang 等<sup>[5]</sup>采用变邻域搜索算法来求解工程施工资源配置的多目标优化问题，其测试案例表明该算法较混合遗传算法及蚁群算法更为精确、高效。

可见，国内外大量研究多集中于将智能算法应用于资源配置等问题，有关研究多关注于如何提高算法效率等方面。当前资源配置有关算法仍然存在着数据建模时间长，人工投入较大，难以有效推广应用等问题。建筑信息模型（Building Information Model, BIM）技术的不断发展与应用<sup>[6]</sup>，为工程建设进度、资源数据的整合与集成带来了新的契机，使得基于 BIM 模型的资源配置优化成为可能。

首先，本研究以 BIM 数据标准 Industry Foundation Classes (IFC) 为基础，建立了基于 IFC 的进度及资源信息模型；接着，通过对比分析 IFC 标准与离散事件仿真模型对资源配置信息描述机制的差异，提出前者向后者自动转换的方法，从而实现资源配置仿真模型的自动构建。最后，通过将该离散事件仿真模型与模拟退火算法相结合，并对某大型体育场馆工程项目钢结构吊装过程中资源-进度均衡问题进行仿真分析，验证上述模型构建方法的可行性及有效性。

## 2. 基于 IFC 的进度及资源信息模型

以清华大学 4D-BIM 模型组成<sup>[6]</sup>为基础，研究进一步完善了进度及资源信息模型构成，并基于 BIM 模型的最新数据标准 IFC4<sup>[7]</sup>构建了该模型的整体结构。该模型主要描述和定义了进度、资源信息及其相互关系，并指出了建筑构件产品信息在进度及资源信息模型中的地位及作用。需要注意的是，在资源配置优化过程中，成本或等效成本也往往被视为一个很重要的约束条件或优化目标<sup>[8]</sup>，因此在该模型中也对成本信息进行了相应的定义和描述。以下将按照进度信息、资源信息、产品信息以及三者的关系四个部分对其进行描述。

---

## 2.1 进度信息

工程施工管理过程中往往将项目工作按照树状结构，从根节点起向下逐级细分形成各任务节点，并设定各任务的起止时间及逻辑关系，形成工程进度计划。

IFC 标准中，将项目实施过程中的活动、事件及其相互关系等统一视为过程对象，用 *IfcProcess* 来表达，其子类 *IfcTask* 用以表达进度信息中的任务。进度信息的分解结构和任务之间的逻辑关系则分别通过 *IfcRelNests* 和 *IfcRelSequence* 来表达。而进度计划中的时间信息则专门由 *IfcTaskTime* 来描述，并通过属性 *TaskTime* 关联到 *IfcTask*。该部分中，*IfcTaskTime* 用以描述某工作任务涉及到的所有时间信息，包括计划开始时间、计划结束时间、实际开始时间、实际结束时间以及最早开始、最早结束、自由差等涉及有关网络计划计算的时间信息，而里程碑信息、任务优先级信息等则在 *IfcTask* 中进行描述。

## 2.2 资源及成本信息

工程施工资源指的是施工生产活动所需的的活动空间，人力资源、材料资源、设备/机械资源等。根据资源特征及其计量的差异，可将资源使用类型分为消耗型、占用型及其他类型等三大类，消耗型及占用型又可分别划分为完全消耗型、部分消耗型、完全占用型及部分占用型。其中消耗型资源是指在施工生产活动中被完全或部分消耗，不可再被其他施工生产活动所使用的资源，如：钢筋、混凝土、砂浆等；而占用型资源是指在施工生产活动中被完全或部分占用，在占用期间不可被其他施工生产活动所使用，只有占用资源的活动结束后该部分资源才可被其他施工生产活动占用的资源，该类资源包括：塔吊、汽车吊、混凝土泵车、场地等。

针对上述施工资源的组成及使用类型的划分，IFC 标准中将施工资源统一定义为 *IfcConstructionResource*，不同的人力、材料及机械资源由其子类分别表达。对任意一种 *IfcConstructionResource*，均可通过其 *ResourceConsumption* 属性定义其资源使用类型，并可通过 *Usage* 属性描述该资源相应的占用时间等信息。

同时，IFC 标准还通过 *BaseCosts* 及 *BaseQuantity* 属性定义了施工资源的工程量及单位成本信息，分别用 *IfcPhysicalQuantity* 及 *IfcCostValue* 进行描述，并各自对应为 *IfcCostItem* 的 *CostValues* 及 *CostQuantities* 属性，从而建立了施工资源的工程量、单价与工程成本之间的关系（如图 1 左下角所示）。该种定义方式建立了较为完备的资源及成本信息描述，可为施工过程仿真所需的资源信息提供详实的数据，支持后续施工资源的配置与优化。

## 2.3 产品及成本信息

产品信息主要用于描述组成建筑工程的各构件信息，包括构件定位、构件形体、构件材料、构件之间的空间关系与逻辑关系等；同时，设计阶段的工程量计算与清单计价

也主要依托工程构件信息进行。

IFC 标准将所有建筑构件统一界定为建筑产品，用 *IfcProduct* 来表达。同时，各建筑产品的工程量信息一般采用 *IfcElementQuantity* 表达，根据工程量类型（体积、面积还是重量等）的差异由不同的 *IfcPhysicalQuantity* 来描述，并通过 *IfcRelDefinesByProperties* 建立两者之间的相互关系。而建筑产品的成本信息则借助 *IfcCostItem* 来表达，并由 *IfcAssignsToControl* 建立建筑产品及其成本信息的关联关系。建筑产品成本计算的依据主要是工程量信息，因此，建筑产品的成本也通过 *BaseQuantities* 建立了与工程量信息（*IfcPhysicalQuantity*）的依赖关系（如图 1 右下角所示）。

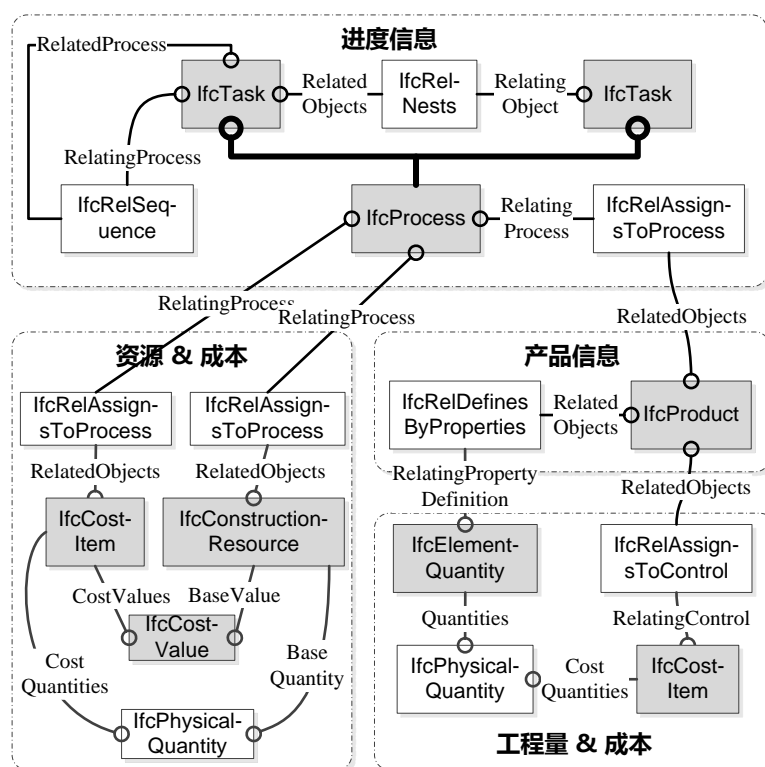


图 1 基于 IFC 的进度资源信息模型结构

Fig.1 IFC-based information model for schedule and resource

## 2.4 三者的相互关系

由基于 IFC 的信息模型（图 1）可知，进度信息、施工资源及成本信息、产品及成本信息分为比较独立的三个部分，各自之间通过关系实体<sup>[9]</sup>建立不同实体之间的关系：

- (1) 产品信息与进度信息的关系：主要通过 *IfcRelAssignsToProcess* 建立产品（*IfcProduct*）与项目实施过程对象（*IfcProcess*）的关联关系，并由其子类对象施工任务（*IfcTask*）的时间信息和关联关系描述来表达进度信息；
- (2) 资源成本信息与进度信息的关系：资源信息和成本信息分别通过 *IfcRelAssignsToProcess* 建立项目实施过程对象（*IfcProcess*）的关联关系，资

---

源及成本的时间信息也藉由相应的施工任务的时间信息来表达；

- (3) 产品信息中的量价信息与资源成本信息的不同：产品信息的量价信息（即工程量及成本信息）主要基于工程量计算与成本估计得出，在设计阶段形成，以建筑产品为核心进行描述；而资源成本信息主要描述某一项任务所需的施工资源及资源的成本信息，主要是在施工阶段形成，以建筑施工过程为核心进行描述。

### 3. 资源配置仿真模型的自动构建

#### 3.1 IFC 模型与资源配置离散事件仿真模型的差异

因功能及适用范围的不同，基于 IFC 的进度与资源信息模型与资源配置离散事件仿真模型在数据结构及描述方式方面存在着一定的差异。其中，IFC 模型面向工程施工进度及资源信息建模，其有关实体的划分和关联关系是对工程施工任务及资源的直接抽象，与工程施工过程具有明确的对应关系。也就是说，在 IFC 模型中，施工任务 (*IfcTask*) 是具有特定起止时间和持续时间、消耗或占用一定资源的实体 (*IfcConstructionResource*)，各施工任务的相互关系则基于相应的关系实体 (*IfcRelSequence*) 表达。而离散事件仿真模型是对现实物理世界的高度抽象，将系统状态的变化视为一系列事件的作用结果。通常情况下，离散事件仿真模型由一系列事件及连接事件的边组成；其中事件具有一定的行为，并可在某一特定时刻发生。因此，一般认为事件是瞬时完成的，事件之间的关系通过事件之间的边来表达。

因此，在 IFC 模型向离散事件仿真模型转换过程中，应将一系列施工任务转换为任务的开始事件及结束时间，并将施工资源的使用或占用视为离散事件系统的状态变化。以此为原则，可通过以下方式实现资源配置仿真模型的自动构建。

#### 3.2 IFC 模型工程进度计划信息的自动转化

IFC 模型工程进度计划信息的转换可分为施工任务信息转换及施工任务关联信息转换两大部分。具体转换可采用如下方式：

- (1) 施工任务信息转换：IFC 模型中的某项施工任务应转换为任务开始事件、任务结束事件以及由任务开始事件连向任务结束事件的边。其中，任务开始事件和任务结束事件的触发时间分别为施工任务的开始时间和结束时间，二者之间边的持续时间应则与任务的持续时间相等。如图 2 所示，任务 A 可转化为图 2 右上方虚框方框中的两个事件及二者之间的边。
- (2) 施工任务关联信息转换：工程计划中，施工任务的关联信息主要是各任务或工序的先后逻辑关系和时间间隔。施工任务的关联关系通常又被称为紧前紧后关系。根据类型的不同，紧前紧后关系又可分为开始-开始、

开始-结束、结束-开始、结束-结束四大类。施工任务之间的关联关系可基于离散事件仿真模型事件之间的边来表达。由于离散事件仿真模型事件之间的边必须从出发时间早的事件连向触发时间晚的事件，因此，在转换过程中，应考虑任务持续时间与紧前紧后关系时间设置的约束。根据任务起止时间 $s_A$ 、 $f_A$ 与 $s_B$ 、 $f_B$ 及其紧前紧后关系的不同，该事件之间边的持续时间应取不同的值，详见表 1。需注意的是，施工任务关联信息转换为的边（图 2 右侧虚线箭头）与施工任务起止事件间的边（图 2 右侧实线箭头）有所不同。前者仅仅表达任务起止事件间的先后关系，而后者则主要表达两个任务开始事件的触发关系，只有前一任务开始事件触发了，方可触发后一任务的开始事件。

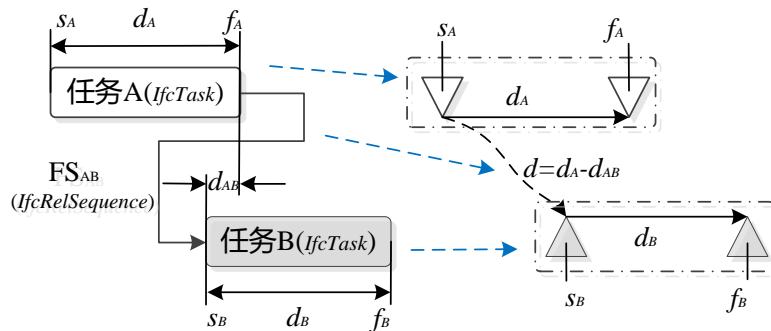


图 2 进度计划信息与离散事件信息的对应关系

Fig.2 Mapping relation between schedule and discrete event model

表 1 各紧前紧后关系对应持续时间的计算方法

Table 1 Calculation method of time of different task relationships

紧前紧后关系	持续时间
开始-开始 (Start-Start, SS)	$d = s_B - s_A$
开始-结束 (Start-Finish, SF)	$d = f_B - s_A$
结束-开始 (Finish-Start, FS)	$d = s_B - f_A$
结束-结束 (Finish-Finish, FF)	$d = f_B - f_A$

### 3.3 IFC 模型资源信息的自动转化

以基于 IFC 的进度及资源信息模型结构及其与离散事件仿真模型的差异为基础，综合考虑资源消耗型、占用型等类型的差异（在 IFC 模型中通过 ResourceConsumption 属性表达），研究将资源使用或占用视为离散事件系统的状态变化，提出图 3 所示的资源信息的转换方法。针对不同资源使用类型，可按照如下方式将资源信息转换到资源配置优化的离散事件仿真模型中：

- (1) 消耗型资源信息转换：对于施工任务使用的消耗型资源，应在该任务对应起始事件触发时从该类型资源库存中减去施工任务相应的资源消耗量，从而实现系统状态变化（图 3 上部）；
- (2) 占用型资源信息转换：对施工任务任务需要的占用型资源（或部分消耗型资源），则应在该任务对应起始事件触发时从该类型资源库存中减去该资源占用量，并在该任务对应结束事件触发时返还特定量该类型资源到其库存中，从而实现系统的资源状态变化（图 3 下部）；

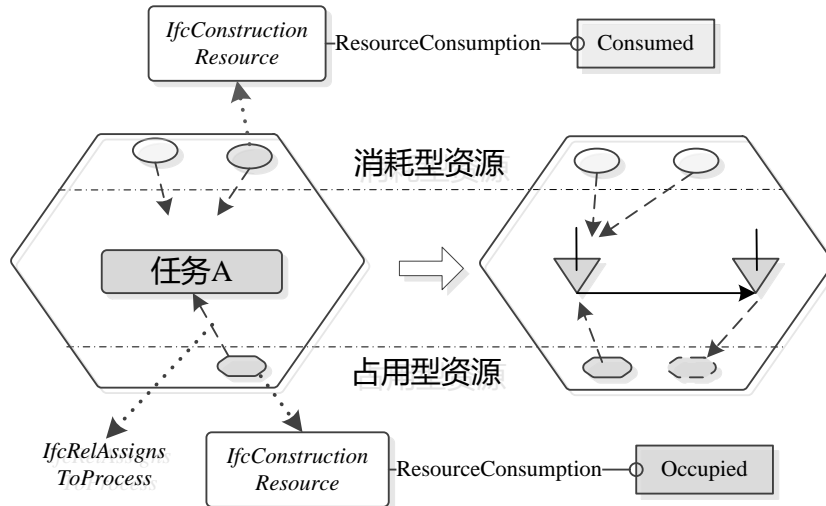


图 3 资源信息的自动转换

Fig.3 Conversion of resource information

### 3.4 占用型资源的竞争性分配机制

施工过程中，消耗型资源通常会采用分批采购现场贮存的方式来管理，并通过合理的采购计划保障该类资源的供给。而占用型资源则通常在不同时间点用于不同施工活动，该类资源某一时间点的不足往往会影响施工活动的正常进行，造成工程延误。因此资源配置及仿真优化过程中，通常将资源受限<sup>[10, 11]</sup>作为主要约束条件。鉴于占用型资源的竞争性使用特点，本研究面向离散事件仿真模型，提出如图 4 所示占用型资源的竞争性分配机制及相应的离散事件仿真模型构建方法：

- (1) 离散事件仿真模型构建方法：对需要使用占用型资源的任务，除按照 3.2 的策略将任务节点转换为事件及边外，应在其任务开始事件  $s$  前增加资源获取事件  $s'$ ，并将指向开始事件  $s$  的边指向  $s'$ ，再增加一条由  $s'$  指向  $s$  的边（持续时间为 0），以及一条由  $s'$  指向其本身的边（持续时间为一个微小的值）；
- (2) 竞争性分配机制：基于上述方法构建离散事件仿真模型后，仿真模型宜采用

如下机制对占用型资源的竞争性分配进行处理：

- 1) 任务 B 开始事件触发，从资源池获取部分占用型资源；
- 2) 任务 A 资源获取事件  $s'$  判断资源池是否为空，或资源池剩余资源是否满足任务需求：如不满足，则将  $s'$  指向  $s$  的边禁用，启用  $s'$  指向自身的边；
- 3) 事件  $s'$  不断在间隔一个微小的时间后检查资源池信息，直至另一任务 B 释放占用的资源；
- 4) 事件  $s'$  获取资源，激活其指向  $s$  的边，并禁用指向自身的边，从而触发任务开始事件  $s$ ，开始任务 A 的有关活动。

当有多个占用型资源时，应在事件  $s'$  中检查所有占用型资源是否满足条件，并在所有占用型资源满足条件时获取所有需要的占用型资源，并激活后续事件节点。对部分消耗型资源，可采用类似方式处理，只是在任务结束释放资源时，应从初始资源使用量减去其资源消耗量。

通过以上方式，可自动应对占用型资源的竞争性使用问题，并可直接实现向离散事件仿真模型的自动转换，减少人为建模的工作量及可能的错误，提高工作效率。

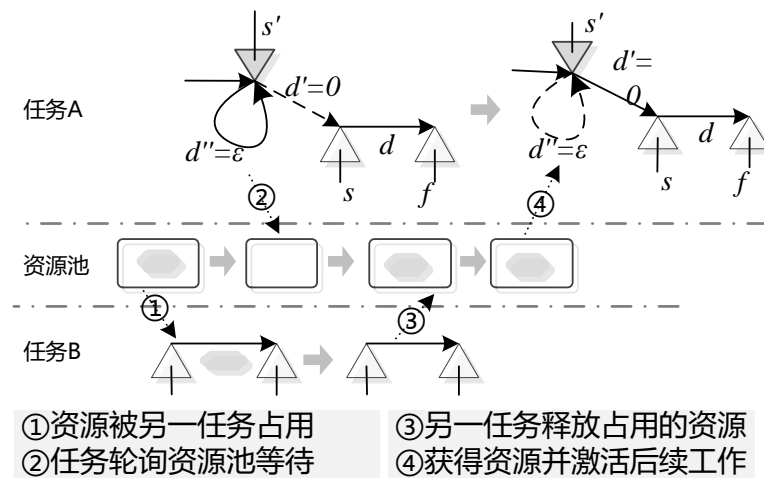


图 4 占用型资源的竞争性分配

Fig.4 Competitive allocation of occupied resources

## 4. 工程应用验证及分析

### 4.1 工程概况

研究选择了某大型体育场馆钢结构吊装施工作为应用案例来验证资源配置仿真模型自动生成方法的可行性，并基于生成的模型分析吊车与场地等关键资源对工程施工计划的影响。在清华大学 4D-BIM 平台基础上，研究开发了模型转换及离散事件仿真分析软件，并借助该平台的 IFC 数据接口集成工程施工计划及工程



资源需求数据，并建立二者的关联。

以桁架安装任务为例，其施工过程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况如表 2 所示。

表 2 各工序资源占用情况

Table 2 Resource usage of activities

工序	场地需求量	关键设备需求量
场地重整+构件运输	1 块	小型吊车 1 台
现场拼装	1 块	小型吊车 1 台
单元绑扎	1 块	小型吊车 1 台
单元脱胎+翻身	1 块	300T 吊车 1 台、800T 吊车 1 台
单元场内运输	/	800T 吊车 1 台
就位+调整+固定	/	800T 吊车 1 台
吊车返回	/	800T 吊车 1 台

#### 4.2 优化目标及算法选择

该应用案例场地资源最为关键，场地重整、单元拼装、单元绑扎、单元翻身等工序任务均需占用场地，当没有空闲场地时，其他任务只能等待当前占用场地的工序完成。因此，工程管理人员希望能够实现场地的最大化利用。故，研究将优化目标设定为充分利用场地缩短工期的前提下，尽可能减少吊车资源的使用量。通过分析，研究采用施工过程需要的各类吊车总数的加权值作为目标函数，权重系数依据各类吊车的单位成本等情况确定。同时，研究还引入罚函数以描述优化过程中的工期约束，以避免超过预期工期的解。罚函数（ $P$ ）具体形式如下：

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

其中， $AP$  为实际工期， $EP$  为预期工期

具体实现过程中，本研究选择了模拟退火算法与上述离散事件仿真模型相结合实现资源配置的仿真与求解。模拟退火依托温度变化，逐渐降低算法对差解的接受程度，实现算法初期的全局寻优与算法后期的快速收敛，并且当退火速度合适时，可找到全局最优解<sup>[12]</sup>。

#### 4.3 结果分析

基于以上算法及目标函数，实现了钢结构吊装施工过程的离散事件仿真模型

自动生成及其仿真分析优化，其仿真优化过程如图 5 所示。可见，随着仿真次数的增加，目标函数不断减小，且初期减小速度快，后期由于优化空间变小，目标函数值减小的速度逐渐减缓。（注：在绘制目标函数与仿真次数的曲线时并未将差解的惩罚值计入）

由初始数据与优化结果对比可以看出，优化结果中场地资源得到了充分的利用，即在吊车等资源充足的情况下，可通过各项任务交错进行实现场地资源的有效利用，避免场地占用冲突。此外，在算法实现过程中，研究引入了保证工序任务连续性的约束，在优化过程中可保证几项需连续完成的施工工序在优化后仍保持连续状态，避免工程实践中频繁中断、恢复某一施工工艺导致的效率降低（图 6）。

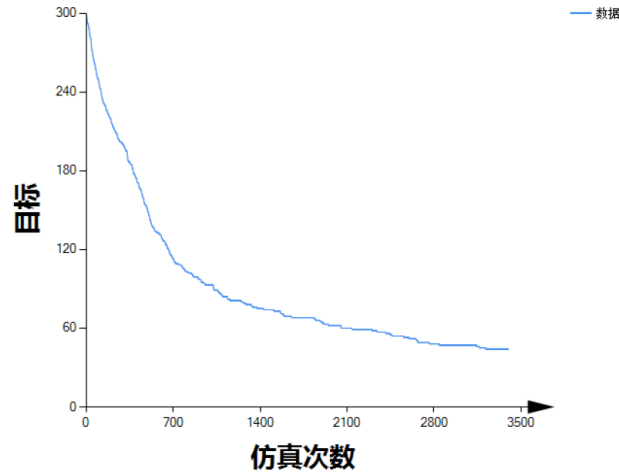


图 5 仿真优化迭代过程

Fig.5 Iteration process of simulation and optimization

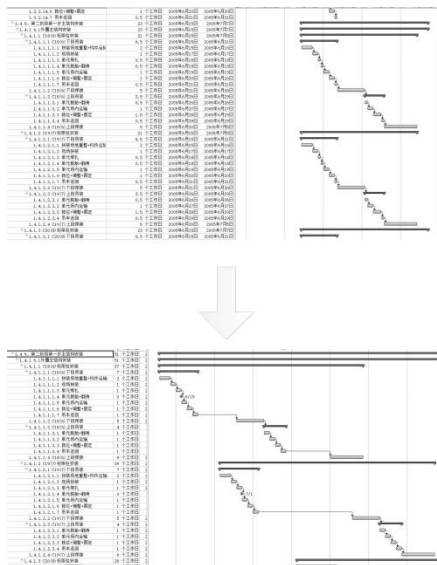


图 6 优化前后进度计划对比

---

Fig.6 Schedule comparison before and after optimization

## 5. 结论

本研究面向工程施工资源配置模型建模困难、效率较低的问题，以基于 IFC 的进度资源信息模型为基础，通过分析 IFC 模型与离散事件仿真模型的异同，实现了 IFC 模型向资源配置离散事件仿真模型的自动转换。最后，研究将模拟退火算法与前述离散事件仿真模型相结合，实现了资源配置过程的自动仿真与优化。实际工程测试与验证表明，研究提出的方法切实有效，可实现资源配置离散事件仿真模型的自动构建，并可结合不同的人工智能算法及目标函数选择策略解决施工资源与进度之间的冲突。本研究提出的转换方法可避免人工建立资源配置仿真模型耗时长、人为失误难以避免等问题，将极大提高资源配置仿真模型的构建速度与准确率，促进有关施工资源配置优化算法的普及应用，提高施工资源配置效率，服务工程施工管理决策。

## 参考文献：

- [1] Liu Y, Zhao S, Du X, et al. Optimization of resource allocation in construction using genetic algorithms[A]// 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics[C]. IEEE, 2005: 3428-3432.
- [2] Chaharsooghi S K, Kermani A H M. An effective ant colony optimization algorithm (ACO) for multi-objective resource allocation problem (MORAP)[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008,200(1):167-177.
- [3] El-Rayes K, Jun D. Optimizing Resource Leveling in Construction Projects[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2009,135(11):1172-1180.
- [4] Heon Jun D, El-Rayes K. Multiobjective Optimization of Resource Leveling and Allocation during Construction Scheduling[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011,137(12):1080-1088.
- [5] Liang Y, Chuang C. Variable neighborhood search for multi-objective resource allocation problems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013,29(3):73-78.
- [6] 林佳瑞, 张建平, 钟耀锋. 基于4D-BIM的施工进度-资源均衡模型自动构建与应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2014(06):44-49.
- [7] Liebich T. Unveiling IFC2x4-the next generation of openBIM[A]// 27th International Conference - Applications of IT in the AEC Industry & Accelerating BIM Research Workshop (CIB W78 2010)[C]. Cairo, Egypt , 2010:8.
- [8] Fan K, You W, Li Y. An effective modified binary particle swarm optimization (mBPSO) algorithm for multi-objective resource allocation problem (MORAP)[J]. Applied Mathematics and Computation, 2013,221(0):257-267.
- [9] 张洋. 基于BIM的建筑工程信息集成与管理研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [10] Abdelsalam H M, Rasmy M H, Mohamed H G. A Simulation-Based Time Reduction approach for

---

Resource Constrained Design Structure Matrix[J]. International Journal of Modeling and Optimization, 2014,4(1).

[11] Mendes J J M, Gonçalves J F, Resende M G C. A random key based genetic algorithm for the resource constrained project scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2009,36(1):92-109.

[12] 康立山. 非数值并行算法-模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

作者:

林佳瑞(1987-), 清华大学土木系博士生, 北京市海淀区清华大学土木系何善衡楼406, 100084, 电话: (010)62782706, E-mail: jiarui\_lin@foxmail.com

手机: 13810488248