基于资源配置的施工阶段工程造价优化模型研究

常春光，尹　凯

（沈阳建筑大学 管理学院，辽宁 沈阳 110168）

摘　要：施工阶段工程项目涉及面广，人力、材料等资源的冲突与浪费问题突出，协调难度大，是导致工程造价居高不下的重要原因之一。应用规划理论建立了关于人力、材料资源配置的线性规划模型，以显性成本与隐性成本最小化为目标函数，考虑了人力、材料资源使用的各种约束，并通过实例应用进行对比分析，发现优化后的资源配置模式同传统配置模式相比，显著降低了工程造价，对施工阶段工程造价优化实践具有借鉴作用。

关键词：施工阶段；工程造价；线性规划；资源配置

DOI：10.6049/kjjbydc.2014GC0143

中图分类号：F224.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-7348(2014)11-0110-04

0　引言

在工程项目建设期间，作为产品形成期，施工阶段的现场资源配置引起的工程造价变动很大。然而，多数施工企业依然沿用传统的方法，施工人员配置形式单一，缺少变通性，现有的人力、材料资源没有得到合理配置与利用，造成大量资源浪费，导致工程造价提高。针对上述实际状况，如何科学地进行资源配置已成为施工阶段工程造价迫切需要解决的问题。

在资源配置方面，S. Thomas 等[1]提出应用 PDA 方法解决资源分配问题，即使在不连续的施工中仍然可以达到资源浪费的最小化；Anton Beloglazova[2]针对建筑节能与资源配置，建立了云计算模型，经验证该模型的应用显著降低了工程成本；李小丽[3]结合关键链方法进行了施工企业动态多项目管理资源配置计划的流程设计。

在造价测算方面，郝艳芬等[4]建立了造价影响因素和工程造价之间的映射关系，以工程特征因素作为神经网络的输入向量，将所需的工程造价作为神经网络的输出向量，通过将已有相似工程的造价信息输入训练网络函数，实现工程特征输入空间到工程造价输出空间的映射；秦育华等[5]将模糊数学与 BP 神经网络有机结合，构造了基于模糊神经网络的建筑工程造价估算模型，减少了计算量。

在造价控制方面，邓肖夫等[6]将工程施工项目物质资源的范围泛化，应用模糊综合评判原理，建立了工程施工项目资源配置合理性综合评价数学模型，为造价控制建立了基础；牛东晓等[7]结合 AHP 及模糊综合评价方法，建立了输变电工程造价控制要点管理综合评价体系，为进一步提高造价控制管理水平提供了借鉴。

上述研究对施工阶段资源配置方面提供了重要的理论依据，但如何围绕人工、材料等关键资源要素，实现施工的系统规划，尤其在配置量优化方面还有待进一步深入研究。本文立足于工程施工阶段，着眼于人力、材料资源优化配置，借助规划理论实现人力资源和物力资源的具体量化，以期解决资源配置制约工程造价最优化的瓶颈问题。

1　问题描述与变量说明

1.1　问题描述

在工期一定、确保工程质量的条件下，完成一定量的主体工程，对资源进行优化配置，实现工程造价最小化是一个典型造价优化问题。即针对钢筋工程、混凝土工程、模板工程，需要合理安排白天作业和晚上作业的普工、技工的平均每天作业人数，各种材料的平均每天使用量，以实现主体工程施工中人力、材料资源方面造价的最优化。

1.2　变量说明

i 表示分项工程序号，依次为钢筋工程、混凝土工

收稿日期：2014-03-31

作者简介：常春光(1973－)，男，辽宁辽阳人，沈阳建筑大学管理学院教授，研究方向为城市规划、工程管理；尹凯(1989－)，女，辽宁凌源人，沈阳建筑大学管理学院硕士研究生，研究方向为工程造价。

程、模板工程；m 表示分项工程的种类总数；j 表示工种序号，依次为白天作业技工、白天作业普工、夜间作业技工、夜间作业普工；n 表示工种的种类总数；k 表示材料的种类序号；K_i 表示分项工程 i 材料的种类总数；x_{ij} ：表示平均每天配置到分项工程 i 中工种 j 的人数；y_{ik} ：表示平均每天分项工程 i 中材料 k 的使用量；c_{ij} ：表示每天分项工程 i 中工种 j 的人工平均单价；p_{ik} 表示分项工程 i 中材料 k 的平均单价；λ 表示成本工时比较均衡系数；α 表示成本权重系数；β 表示人工工时权重系数；l_i 表示人工配置比率系数；h 表示白天作业平均每人总工时；h' 表示夜间作业平均每人总工时；T_i 表示各分项工程所需工期；w_i 表示各分项工程中技工平均每天保证出勤数量的下限；w'_i 表示各分项工程中技工平均每天保证出勤数量的上限；w 表示普工平均每天保证出勤数量的下限；w' 表示普工平均每天保证出勤数量的上限；t_i 表示各分项工程中技工总工时下限；t'_i 表示各分项工程中技工总工时上限；τ_i 表示各分项工程中普工总工时下限；τ'_i 表示各分项工程中普工总工时上限；g_i 表示每个技工平均每工时耗用相应分项工程材料量的下限；g'_i 表示每个技工平均每工时耗用相应分项工程材料量的上限；a_{ik} 表示保证质量合格条件下的各材料平均用量；b_{ik} 表示土建工程主材料库存下限。

2　施工阶段工程造价优化模型构建

在上述问题分析与变量说明的前提下，构建施工阶段工程造价优化模型如下：

$$\min z = \alpha\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} T_i c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{K_i} T_i p_{ik} y_{ik}\right) + \lambda\beta\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{2} T_i h x_{ij} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=3}^{n} T_i h' x_{ij}\right) \tag{1}$$

$$s.t.\ w_i \leqslant x_{i1} + x_{i3} \leqslant w'_i\ i = 1,2,\cdots,m \tag{2}$$

$$w \leqslant \sum_{i=1}^{m}(x_{i2} + x_{i4}) \leqslant w' \tag{3}$$

$$x_{i2} \geqslant l_i x_{i1}\ i = 1,2,\cdots,m \tag{4}$$

$$x_{i4} \geqslant l_i x_{i3}\ i = 1,2,\cdots,m \tag{5}$$

$$t_i \leqslant T_i(h x_{i1} + h' x_{i3}) \leqslant t'_i\ i = 1,2,\cdots,m \tag{6}$$

$$\tau_i \leqslant T_i(h x_{i2} + h' x_{i4}) \leqslant \tau'_i\ i = 1,2,\cdots,m \tag{7}$$

$$h x_{i1} > h' x_{i3}\ i = 1,2,\cdots,m \tag{8}$$

$$x_{23} \geqslant x_{13} \geqslant x_{33} \tag{9}$$

$$g_i(h x_{i1} + h' x_{i3}) \leqslant \sum_{k=1}^{K_i} y_{ik} \leqslant g'_i(h x_{i1} + h' x_{i3})\ i = 1,2,\cdots,m \tag{10}$$

$$y_{1k}/y_{1k+1} = a_{1k}/a_{1k+1}\ k = 1,2....K_1 \tag{11}$$

$$\sum_{k=1}^{n} a_{2k} \leqslant T_2 \sum_{k=1}^{n} y_{2k}/(T_3 y_{32}) \leqslant a_{32} \tag{12}$$

$$y_{ik} \leqslant b_{ik}\ i = 1,2,\cdots,m\ k = 1,2....K_i \tag{13}$$

在上述模型中，式(1)为目标函数，表示追求由总人工费、总材料费组成的显性成本最小化，同时兼顾工人出工的总工时这一隐性成本的最小化(有助于提高工人满意度)。式(2)到式(13)为约束条件，其中：式(2)表示各种技工每天保证出勤人数；式(3)表示普工每天保证出勤人数；式(4)、式(5)表示各分项工程中每天出勤技工人数与相应普工人数配置比；式(6)、式(7)表示各分项工程中技工、普工总工时约束；式(8)表示白天作业总工时大于夜间作业总工时(因为技工普工同步作业，所以这里仅对每天技工作业总工时进行比较)；式(9)表示各分项工程之间比较，混凝土夜间作业几率相对较大，其次是钢筋工程，最后是模板工程，在工期进度正常情况下，钢筋工程与模板工程很少夜间作业；式(10)表示每个技工平均每工时耗用材料量有限，则每天的总材料使用量有限；式(11)表示钢筋工程中各类钢筋之间配置比率，混凝土工程中各类商品砼之间配置比率；式(12)表示混凝土工程中商品砼与模板工程中的方木之间配置比率约束；式(13)表示材料库存约束。

3　实例应用与对比分析

3.1　实例应用

总工期为 5 天、建筑面积为 380m² 的框剪结构施工主体一标准层为 5 天，其中进度要求钢筋工程 2 天，混凝土工程 1 天，模板工程 2 天。工人作业时间以白天平均作业 10～11 小时，夜间作业 6～7 小时为基准。由于混凝土工程含有清理工作，所以相应普工平均多加 1 小时。各类主要材料用量预计为：钢筋工程中 1 级 6：0.23t；3 级 8：5.2t；3 级 10：6t；3 级 12：0.9t；3 级 14：4.1t；3 级 16：1.32t；3 级 18：0.23t；3 级 20：1.16t；3 级 22：0.55t，混凝土均为 C30 商品混凝土 130m³，模板工程用竹胶板 260m²，方木 1.47m³。其余参数根据实际调研得出，具体如下所示，不再赘述。其中 λ 数值是通过权衡两类目标函数的数量级大小加以确定的。

目标函数即式(1)的具体表现形式为：

$$\min z = 0.6[2(270x_{11} + 170x_{12} + 174x_{13} + 114x_{14}) + (220x_{21} + 187x_{22} + 384x_{23} + 133x_{24}) + 2(400x_{31} + 170x_{32} + 252x_{33} + 114x_{34}) + 2(3\ 500y_{11} + 3\ 650y_{12} + 3\ 620y_{13} + 3\ 500y_{14} + 3\ 550y_{15} + 3\ 600y_{16} + 3\ 610y_{17} + 3\ 540y_{18} + 3\ 590y_{19}) + 392y_{21} + 2(45y_{31} + 1\ 600y_{32})] + 100 \times 0.4[2(10x_{11} + 10x_{12} + 6x_{13} + 6x_{14}) + (10x_{21} + 11x_{22} + 6x_{23} + 7x_{24}) + 2(10x_{31} + 10x_{32} + 6x_{33} + 6x_{34})]$$

约束条件的具体表现形式如下：

式(2)各种技工每天保证出勤人数：

$5 \leqslant x_{11} + x_{13} \leqslant 12$；$3 \leqslant x_{21} + x_{23} \leqslant 7$；$8 \leqslant x_{31} + x_{33} \leqslant 18$

式(3)普工每天保证出勤人数：

$6 \leqslant x_{12} + x_{14} + x_{22} + x_{24} + x_{32} + x_{34} \leqslant 65$

式(4)、式(5)各分项工程中每天出勤技工人数与

相应普工人数配置比：

$x_{12} \geqslant 2x_{11}$，$x_{14} \geqslant 2x_{13}$；$x_{22} \geqslant 3.5x_{21}$，$x_{24} \geqslant 3.5x_{23}$；$x_{32} \geqslant 1.5x_{31}$，$x_{34} \geqslant 1.5x_{33}$

式(6)、式(7)各分项工程技工、普工总工时约束：

$140 \leqslant 2(10x_{11} + 6x_{13}) \leqslant 168$，$360 \leqslant 2(10x_{12} + 6x_{14}) \leqslant 380$

$30 \leqslant 10x_{21} + 6x_{23} \leqslant 36$，$130 \leqslant 11x_{12} + 7x_{14} \leqslant 156$

$240 \leqslant 2(10x_{21} + 6x_{23}) \leqslant 260$，$360 \leqslant 2(10x_{12} + 6x_{14}) \leqslant 360$

式(8)白天作业工时大于夜间作业工时：

$10x_{11} \geqslant 6x_{13}$；$10x_{21} \geqslant 6x_{23}$；$10x_{31} \geqslant 6x_{33}$

式(9)各分项工程之间夜间作业比较：

$x_{23} \geqslant x_{13} \geqslant x_{33}$

式(10)每天的总材料总使用量对应关系：

钢筋工程：$0.13(10x_{11} + 6x_{13}) \leqslant \sum_{k=1}^{9} y_{1k} \leqslant 0.14(10x_{11} + 6x_{13})$

混凝土工程：$4(10x_{21} + 6x_{23}) \leqslant y_{21} \leqslant 6(10x_{21} + 6x_{23})$

模板工程：$10x_{31} + 6x_{33} \leqslant y_{31} \leqslant 1.8(10x_{31} + 6x_{33})$

式(11)钢筋材料配置比率：

$y_{11}:y_{12}:y_{13}:y_{14}:y_{15}:y_{16}:y_{17}:y_{18}:y_{19} = 0.22:4.9:5.8:0.83:3.96:1.26:0.22:1.12:0.53$

式(12)商品砼与方木之间配置比：

$89 \leqslant y_{21}/2y_{32} \leqslant 92$

式(13)材料库存约束：

$y_{11} \leqslant 1.2$，$y_{12} \leqslant 3$，$y_{13} \leqslant 3.5$，$y_{14} \leqslant 2$，$y_{15} \leqslant 2$，$y_{16} \leqslant 1$，$y_{17} \leqslant 1$，$y_{18} \leqslant 1$，$y_{19} \leqslant 0.5$

$y_{21} \leqslant 200$，$y_{31} \leqslant 150$，$y_{32} \leqslant 5$

求解得到最优目标函数值及最优解如下：

$\min z = 142\ 859.9$，$x_{ij} = (7,18,0,0,3,12,0,0,12,18,0,0)^{T}$

$y_{1k} = (0.107,2.391,2.821,0.395,1.884,0.603,0.106,0.537,0.257)^{T}$

$y_{21} = 120$，$y_{31} = 120$，$y_{32} = 0.652$

3.2 对比分析

为验证本模型的应用效果，将优化后资源配置模型方案与传统资源配置方法方案进行对比，具体情况见表1、表2。纵观每个分项工程，优化后的作业工人数量以及材料用量有所变化。首先钢筋工程中技工、普工平均每天各减少1人，使人工费用总体降低1 420元，主材钢筋节约了部分用量，使得主材料费用降低4 370.34元，总成本降低了5 790.34元，该分项工程成本降低率为7.13%；混凝土工程中技工减少1人，普工减少2人，相应人工费用降低了594元，主材商品砼用量降低10m³，相应材料费用降低了3 920元，总成本降低了4 514元，该分项工程成本降低率为8.29%；模板工程中技工、普工平均每天各减少1人，相应人工费用降低了1 140元，主材方木与竹胶板用量均有减少，使得材料费用降低了1 095.2元，共降低2 235.2元，该分项工程成本降低率为7.25%。

上述分项工程人工费用累计降低3 154元，降低率为9.96%；材料费用累计降低10 525.54元，降低率为7.81%；共降低总成本13 679.54元，总成本降低率为8.22%。

由于实例以土建一层分项工程为基准，选用的都是主要用材，致使模板工程中摊销并不明显。但是纵观所有数据，优化后的配置方案仍然达到了人工、材料总成本降低的目标，并且效果显著。若在更大的工程中应用，该模型将为施工企业带来可观的经济效益，在施工造价中具有重要实际应用价值。

4 结语

本文从施工阶段工程造价最优化的终极目标出发，即在保证工程质量合格、工期稳定等条件下，使其造价最小化，改变了以往仅以成本最低为目的制定资源配置方案的做法，既考虑了显性的人工与材料成本，又考虑了隐性的工人出工总工时。将模型应用到实例中，通过对比分析，可得优化后的模型方案在以工程造价最小化为目标时优于传统资源配置方法得到的方

表1 传统资源配置方案与效果

	钢筋工程									混凝土工程				模板工程				汇总
x_{ij}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}						x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	—
	9	19	0	0						4	14	0	0	13	19	0	0	—
y_{ij}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{18}	y_{19}	y_{21}				y_{31}		y_{32}		—
	0.114	2.530	2.991	0.427	2.037	0.648	0.113	0.576	0.273	130				130		0.713		—
C_x	11 320.00									3 498				16 860.0				31 678.00
C_y	69 893.22									50 960				13 981.6				134 834.82
C	81 213.22									54 458				30 841.6				166 512.82

表 2　优化后资源配置方案与效果

	钢筋工程									混凝土工程				模板工程				汇总
x_{ij}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}						x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	—
	7	18	0	0						3	12	0	0	12	18	0	0	—
$\triangle x$	−1	−1	0	0						−1	−2	0	0	−1	−1	0	0	—
y_{ij}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{18}	y_{19}	y_{21}				y_{31}		y_{32}		—
	0.107	2.391	2.821	0.395	1.884	0.603	0.106	0.537	0.257	120				120		0.652		—
$\triangle y$	−0.01	−0.14	−0.17	−0.03	−0.15	−0.05	−0.01	−0.04	−0.02	−10				−10		−0.06		—
C_x	9 900									2 904				15 720				28 524
$\triangle C_x$	− 1420									−594				−1 140				−3 154
C_y	65 522.88									47 040				12 886.4				125 449.28
$\triangle C_y$	−4 370.34									−3 920				−1 095.2				−10 525.54
C	75 422.88									49 944				28 606.4				153 973.28
$\triangle C$	−5 790.34									−4 514				−2 235.2				−13 679.54

案。该模型适用于工程施工期间不同时段的资源调整，有利于解决资源配置一次性影响工程造价的短板问题，有利于解决施工过程中动态造价优化控制问题。文中为了简化问题，引入了成本权重系数和工时权重系数，对于该值的确定准确与否直接关系到本方法的应用效果，而对这两项数值更为精确的测算还有待于今后进一步深入研究。

参考文献：

[1] S THOMAS N G, DAISY X M ZHENG, JESSIE Z XIE. Allocation of construction resources through a pull-driven approach [J]. Construction Innovation: Information, Process, Management, 2013(1):77-97.

[2] ANTON BELOGLAZOVA, JEMAL ABAWAJYB, RAJKUMAR BUYYAA. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2012(5):755-768.

[3] 李小丽. 施工企业动态多项目管理资源配置研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2012:1-54.

[4] 郝艳芬，张军朝，陈俊杰，等. 基于 BP 神经网络的市政工程造价预估研究[J]. 太原理工大学学报，2012(6):732-735.

[5] 秦育华，易美超. 建筑工程造价的模糊神经网络确定[J]. 计算机仿真，2012(6):184-187.

[6] 邓肖夫，陈顺良，张敏. 工程施工项目资源配置合理性的模糊综合评价模型[J]. 中外建筑，2013(5):130-131.

[7] 牛东晓，王官庆，芦新. 输变电工程造价控制要点管理评价体系研究[J]. 华东电力，2012(4):536-539.

（责任编辑：陈晓峰）

Study on Optimization Model of Engineering Cost during Construction Phase by Resource Allocation

Chang Chunguang, Yin Kai

(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Engineering project in construction phase relates to broad domains, a wide range of resources conflict and waste issues, such as between the human resource and material resource, becoming more and more prominent, what's more, coordination among the resources is lacking of flexibility, these problems all leads to high construction cost. Appling programming theory to establish a linear programming model on the allocation of human and material resources, it regards the minimum of explicit and implicit costs as the objective function, and takes the various constraints of manpower and material resources into account. Through comparative analysis of examples in application, the resource allocation model to verify the optimized configuration, compared with the traditional model, significantly reduced the engineering cost, and it will provide reference to the optimal practice of engineering cost during construction phase.

Key Words: Construction Phase; Engineering Cost; Linear Programming; Resource Allocation