

文章编号:1003-207(2016)03-0125-08

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2016.03.015

大型建筑工程项目资源配置模型及策略研究

——基于系统动力学的建模和仿真

仲 勇¹, 陈智高¹, 周 钟²

(1. 华东理工大学商学院, 上海 200237; 2. 上海应用技术学院经济与管理学院, 上海 201418)

摘 要:大型建筑工程项目多类型资源的有效配置,是现阶段项目管理理论与工程管理实践面临的关键问题,特别是在考虑工艺顺序和间歇时间的工作可操作性特点,以及多资源之间反馈影响的情况下。通过整合挣值法和系统动力学理论,在分析资源可用性和工作可操作性之间因果关系的基础上,本文构建了大型建筑工程项目多资源配置的系统动力学模型。以上海市重大工程投资统计数据作为模型参数依据,模型的仿真结果表明:建筑工程项目不同类型资源其配置重要性与系统影响性存在显著差异,在制定资源配置策略时应同时考虑项目运作方式的特征与多资源之间的匹配,资源不匹配则容易导致资源配置系统失去稳态或策略失效。这为进一步研究项目管理中多资源配置提供了理论参考和实践支持。

关键词:资源配置;项目管理;系统动力学

中图分类号:N949 **文献标识码:**A

1 引言

对工程项目中不同类型的资源进行有效配置一直是施工项目管理的难点之一^[1],因为项目经理不得不面对质量、工期、成本三者之间的平衡。大型建筑工程项目工程结构复杂、资金投入大、建设周期长,即使很小比例的损耗,绝对数也是相当大的,因此,有效的资源配置显得尤为重要。探索大型建筑工程项目资源配置的研究有助于我国工程建设单位更全面的认识和管理项目资源,促进项目资源的利用效益。

项目管理中有关资源问题的研究大致分为四条主线:最早的是资源负载(Resource Loading),通过CPM、PERT等技术分析项目活动的资源需求以及整个项目资源负载的可行性;第二条主线是资源约束条件下的项目调度问题(RCPSP),从单一应用数学规划、启发式算法,到目前结合遗传算法与禁忌搜

索、模糊聚类与差分进化等混合算法,研究资源有限条件下的项目活动安排,使目标函数达到最优^[2-6];第三条主线是工期成本权衡问题(Time-cost Trade-off Problem),注重成本增加、减少对工期的影响,或工期固定如何有效降低施工成本,此类问题主要运用马尔可夫模型^[7]、遗传算法^[8]、系统动力学^[9]、多目标进化算法^[10]等方法;第四条主线即资源的分配或平衡问题(Resource Allocation or Leveling),致力于研究如何有效地分配平衡资源,提高资源的利用效率和效果,如多项目人力资源分配^[11]、不确定情况下资源分配^[12]、资源配置行为分析^[13]、科研项目资源分配^[14]等。

当前国内外相关研究存在如下两个方面的问题:一是忽略了对项目自身特性的分析,因为项目类型、结构和运作模式等属性不同,研究结果会有很大差别^[15]。区别于其他类别的项目,建筑工程项目施工过程中,产品或中间产品是固定的,生产者流动的。当施工模式采用平行施工时,工期大大缩短,但劳动力、物料两种资源消耗量集中,现金流非常大。采用流水施工,则施工操作、现场管理秩序井然,资源得到充分利用,但工期较长。二是忽略了资源的类型、特性以及相互间的关系。资源定义和分类的不统一妨碍了资源理论的进一步发展和交流^[16]。

收稿日期:2014-07-31; 修订日期:2014-12-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71372079)

通讯作者简介:仲勇(1976-),男(汉族),江苏东台人,华东理工大学商学院博士研究生,高级工程师,研究方向:项目管理,E-mail:LIB305@126.com.

以建筑安装工程费为例,包括直接费、间接费、利润和税金,其中直接费中的直接工程费由人工费、材料费、施工机械使用费构成。基于这个视角,项目资源可以分为资金、物料、劳动力,其中资金和物料是可耗尽的,劳动力属于可再生的资源,现金流的多少决定着物料的采购和劳动力的使用。目前现有文献大多是将三者定义为一组向量放入模型中去优化处理,这样的约束条件过于理想,与工程实际并不吻合,难以在实践中加以应用。

建筑工程项目本质上是动态的,并且包括多个反馈过程,而这些反馈所产生的自校正、自增强影响着项目的整体运作^[17]。本文运用系统动力学方法,在分析大型建筑工程项目特性的基础上,围绕资金、物料、劳动力三种资源构建配置模型,并将挣值法(Earned Value)的主要参数融入模型,全面、客观地评估资源配置效果。本文的结构安排如下:第二部分根据大型建筑工程施工特性分析各状态变量、辅助变量的因果关系;第三部分构建系统动力学模型建立方程;第四部分进行模型仿真和策略分析;最后得出研究结论和今后的研究方向。

2 大型建筑工程项目动态反馈机制

2.1 模型的基本假定

大型建筑工程项目的资源配置尚无成熟的系统动力学模型,为规范研究,对模型作如下假定:

假定一:从建筑工程费构成的角度,将项目资源分为资金、物料、劳动力三类,由于机械设备的使用相对于三者来说比例较小,在此忽略讨论。

假定二:在整个项目的施工过程中,不考虑天气、场地等不确定因素的影响,模型仿真正常施工运作下的状况,劳动生产率保持不变。

假定三:基于项目运作的视角,而非承包商或业主方等项目利益相关者的视角。以资金为例,是指该项目实际施工过程中所需要的资金。

2.2 因果关系分析

无论采用何种施工模式,决定整个项目施工进度的是资源的可用性和工作的可操作性,两者相互依赖相互制约。资源有效配置的目的是使整个项目在按时完工和不超支的前提下,尽可能的合理安排资源,确保施工过程的连续性,减少资源的闲置和浪费^[18]。资源的可用性是由现金流、库存物料、当前劳动力三个变量体现出来的,现金流的状况决定了库存物料和当前劳动力的多少(俗称直接材料和直接人工),它们分别决定了基于物料的施工进度和基

于劳动力的施工进度,两者相互牵制,统称为基于资源的施工进度^[18]。

工作的可操作性是由项目施工过程中的工艺顺序和间歇时间所决定的,这两个因素是建筑工程项目的重要特征之一^[19]。工艺顺序是指上一道工序未完成不能进入下一道工序,如土方开挖后方可进行基础工程,间歇时间则包括工艺、技术间歇和组织间歇,如混凝土的龄期、质量验收等。项目在工作面允许和资源充足的情况下,即使采用平行施工,工期也会受到二者的制约,因此工作的可操作性决定了可以达到的最快施工进度——基于工序的施工进度^[18]。

通过基于资源的施工进度和基于工序的施工进度可计算出工程施工过程中的实际施工进度和实际完成工作量,而两者又分别对库存物料和当前劳动力形成了反馈机制。库存物料消耗的多少取决于实际施工进度的快慢,而实际完成工作量和当前劳动力是负反馈的关系。根据实际完成工作量和累计使用资金可以计算出采用挣值法衡量的 SPI 进度绩效和 CPI 成本绩效,用以评估项目资源配置的整体效果。这样一个动态的因果关系,增加了大型建筑工程项目资源配置的难度,既要维持施工的连续性,确保工期不被延误,又必须使资源能得到充分利用,降低工程总造价,其总体因果关系如图 1 所示。

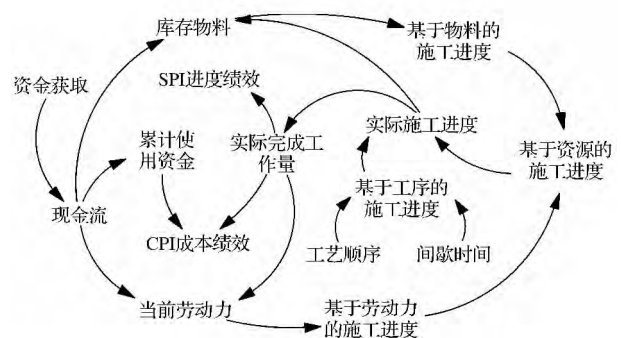


图 1 大型建筑工程资源配置总体因果关系

3 大型建筑工程项目资源配置的模型构建

3.1 系统动力学建模

依据以上因果关系分析,从系统的角度,大型建筑工程项目资源配置包含了物料、资金、劳动力、挣值指标四个子系统。物料子系统反映了施工主材的计划、获取和使用整个周转过程,劳动力子系统说明

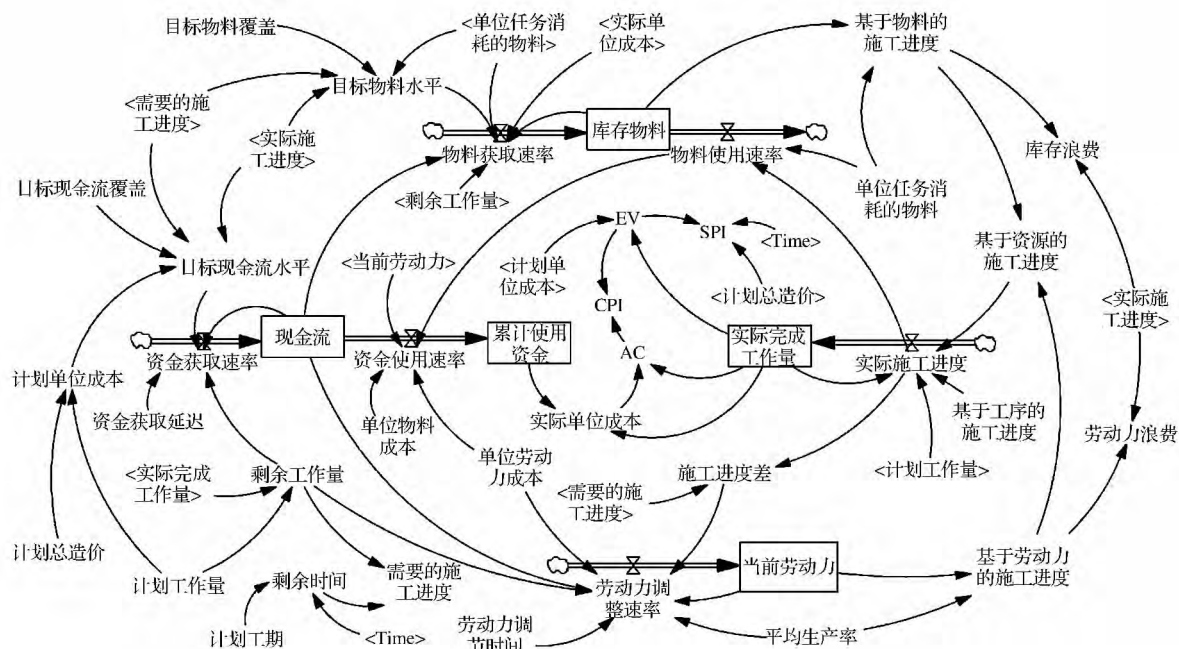


图 2 大型建筑工程资源配置模型

了当前劳动力如何根据工作量和需要的施工进度进行调整。资金的获取、使用以及现金流对上述两个变量的控制构成了现金流子系统,最终整个配置效果通过挣值子系统来体现。

这四个子系统之间在本质上通过资金的流动相互影响、相互制约。基于系统动力学,以现金流(万元)、库存物料(吨)、当前劳动力(人/天)、累计使用资金(万元)、实际完成工作量(平方米)作为状态变量,设置目标物料覆盖、基于物料的施工进度、物料使用速率等若干相关的辅助变量和速率变量,可以构成描述大型建筑工程项目资源配置的复杂的动态反馈系统模型,如图 2 所示。

3.2 方程式设计

建筑工程项目施工过程中,项目经理首先决定的资源政策是目标现金流覆盖和目标物料覆盖,目标物料覆盖是指库存物料可以维持周转的天数。由于建筑工艺的进步和新型材料的应用,施工模式大大改进,实际施工运作中,已不需要在现场搭设钢筋棚进行钢筋翻样,并且泵送砼也解决了现场搅拌的库存问题,所以考虑采购延时和库存调节时间与实际情况并不吻合^[18]。本文将目标物料覆盖作为常数,以天为单位,目标物料覆盖与施工进度决定目标物料水平。由于目标物料覆盖仅仅是一项资源配置策略,能否有效实现取决于现金流支撑,一旦现金流无法保证,物料获取速率则为0。

目标物料水平,单位:吨

$$= \text{IF THEN ELSE}(\text{需要的施工进度} > \text{实际施工进度}, \text{单位任务消耗的物料} * \text{需要的施工进度} * \text{目标物料覆盖}, \text{单位任务消耗的物料} * \text{实际施工进度} * \text{目标物料覆盖}) \quad (1)$$

物料获取速率,单位:吨/天

$$= \text{IF THEN ELSE}(\text{剩余工作量} > 0, \text{IF THEN ELSE}((\text{库存物料} < \text{目标物料水平}): \text{AND}: (\text{现金流} > (\text{目标物料水平} - \text{库存物料}) * (\text{实际单位成本} / \text{单位任务消耗的物料})), (\text{目标物料水平} - \text{库存物料}), 0), 0) \quad (2)$$

物料使用速率,单位:吨/天

$$= \text{单位任务消耗的物料} * \text{实际施工进度} \quad (3)$$

作为项目资源之一的资金的使用,主要是物料的消耗和劳动力的工资所决定的,后两者决定了基于资源的施工进度。资源安排过于充足,会造成资金的时间价值和机会成本的损失、劳动力的闲置(工作面不允许)以及物料损耗的加大,最终导致实际成本超出预算。如果资源不能持续平衡供应,则会出现资源瓶颈,最终导致工期延误。由此可见,当基于资源的施工进度一旦大于基于工序的施工进度,就会发生资源的冗余和浪费。关于施工进度的主要方程如下:

基于物料的施工进度,单位:平方米/天

$$= \text{库存物料} / \text{单位任务消耗的物料} \quad (4)$$

基于劳动力的施工进度,单位:平方米/天

$$= \text{当前劳动力} * \text{平均生产率} \quad (5)$$

基于资源的施工进度,单位:平方米/天

= MIN(基于劳动力的施工进度, 基于物料的
施工进度) (6)

实际施工进度,单位:平方米/天

= IF THEN ELSE(实际完成工作量≤计划
工作量, MIN(基于工序的施工进度, 基于资源的施
工进度), 0) (7)

现有的一些文献在对劳动力进行分析时,往往考
虑加班因素^[20],其实目前我国大型的建筑工程项目
绝大多数采用施工总承包模式,分项、分部工程如钢
筋工程、模板工程等基本是专业分包和劳务分包,一
旦工作量确定,并不考虑加班的工时及费用。所以本
文根据实际情况,基于剩余工作量、施工进度差等辅
助变量来确定劳动力的调整速度,主要方程如下:

劳动力调整速率,单位:人/天

= IF THEN ELSE(剩余工作量>=0, IF
THEN ELSE(施工进度差>0, IF THEN ELSE
(现金流>(当前劳动力*单位劳动力成本), 施工进
度差/平均生产率/劳动力调节时间, 0), 施工进度
差/平均生产率/劳动力调节时间), 0) (8)

资金是项目有效实施的前提,同时具有时间价
值^[20]。过于充足的资金覆盖会带来利息等机会成
本损失,但如果现金流不足,则会造成库存短缺或拖
欠工人工资,导致项目面临资源瓶颈,无法继续施
工。所以目标现金流水平必须权衡两者之间的关
系,在保证计划工期的基础上,尽量减小物料和资金
的闲置和浪费,其方程如下:

目标现金流水平,单位:万元

= IF THEN ELSE(实际施工进度>需要的施
工进度, 目标现金流覆盖*计划单位成本*实际施
工进度, 目标现金流覆盖*计划单位成本*需要的

施工进度) (9)

资金获取速率,单位:万元/天

= 目标现金流水平/资金获取延迟 (10)

资金使用速率,单位:万元

= 当前劳动力*单位劳动力成本+物料使用速
率*单位物料成本 (11)

挣值法可以有效的对项目进度、成本进行监控,
从整体上反映和评价项目进展情况^[21], SPI(Sched-
ule Performance Index)指标用来评价进度绩效,
CPI(Cost Performance Index)指标用来评价项目
的成本绩效,本文将实际完成工作量和累计使用资金
作为状态变量,由此确定实际单位成本和实际成本
AC,进而基于挣值 EV 计算出 SPI 和 CPI,用以整
体评估拟定的资源政策在正常施工条件下的效果,
其主要方程如下:

EV 挣值,单位:万元

= 实际完成工作量*计划单位成本 (12)

SPI 进度绩效

= EV/(计划总造价*(TIME/计划工期)) (13)

CPI 成本绩效

= EV/实际成本 (14)

3.3 参数设置

本文依据《建设工程(上海地区)建材与造价资
讯》、《上海市建筑和装饰工程预算定额 2000》以及
上海 2013 建筑市场价格信息等设定模型的参数,如
表 1 所示。

不同类别的建筑工程项目的标的物不尽相同,
为便于仿真实验,根据上海市 2011 年所完成重大工
程投资统计数据,设定待仿真项目的规模和计划等
参数:计划工作量(即总建筑面积)为 8 万平方米左

表 1 模型参数设置

模型参数		赋值	单位	变量赋值依据
类别	变量			
资源配置 政策	目标现金流覆盖	30	天	根据实践经验初步估计
	目标物料覆盖	2	天	根据实践经验初步估计
成本	计划单位成本	0.4768	万元/平方米	依据《上海市建筑和装饰工程预算定额 2000》计算
	单位劳动力成本	0.018	万元/人·日	上海市建筑建材业门户网站建筑人工成本信息
	单位物料成本	0.54	万元/吨	上海市 2013 建筑市场价格信息
管理	单位任务消耗物料	0.5869	吨/平方米	根据 2013 年《建设工程(上海地区)建材与造价资讯》每 m ² 消耗的钢材、黄沙、石子等主材的重量计算
	平均生产率	0.14	平方米/人	根据 2013 年《建设工程(上海地区)建材与造价资讯》建筑、装饰、安装合计的人工计算
	资金获取延时	3	天	根据银行结算方式估计
	劳动力调整时间	30	天	根据劳动法估计
	最小单位工时	1	天	

右,计划总造价5亿元,施工组织设计估算其基于工序的施工进度(即可以达到的最快施工进度)为200平方米/天,计划工期约2年。

针对大型建筑工程项目施工准备期的资源配置策略问题,应用 Vensim 软件对模型进行仿真,评估各种策略的效果,设置各状态变量初始值为0,仿真周期和步长分别为720天和1天。

4 模型的检验与仿真分析

4.1 模型的有效性检验

模型的量纲一致性通过 Vensim 软件的检验,下面检验模型行为。仿真实验结果显示,在两年的工期内,工程项目得到了很好的实施,按计划完成了总工作量8万平方米,成本与进度绩效指标理想,见图3、图4。基于资源的施工进度、实际施工进度以及需要的施工进度三个辅助变量在160天以后逐步趋于一致,系统达到稳定状态,以116平方米/天左右的施工速度完成整个项目。检验结果表明本文所建模型稳健且与研究对象吻合。

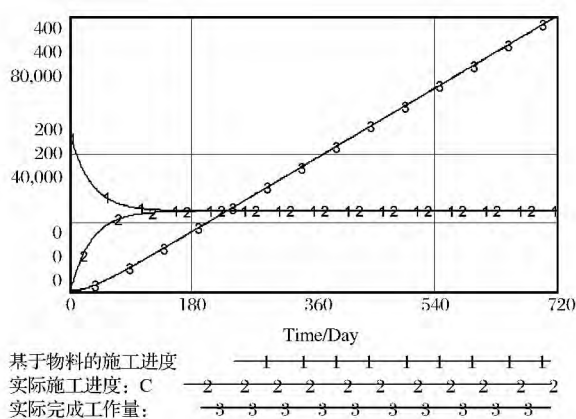


图3 施工进度的仿真结果

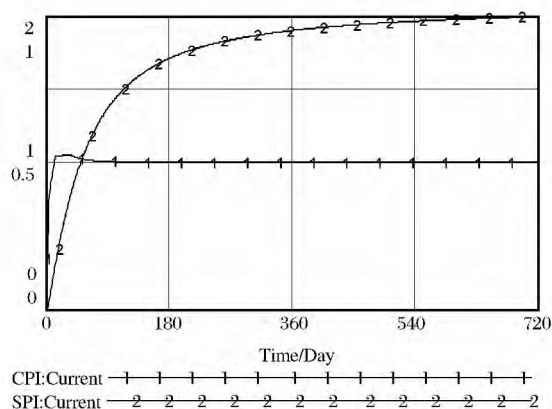


图4 进度、成本指标的仿真结果

4.2 资源配置策略仿真分析

工程实践操作中,三种主要资源之一的劳动力可以根据具体的施工进度进行调整(如图2),本文的资源配置策略仅考虑目标现金流覆盖和目标物料覆盖两个参数。基于两种参数是否匹配来划分,通常有五种配置策略。参数匹配:①资源等于进度需要②资源高于进度需要③资源低于进度需要;参数不匹配:④现金流高、物料低⑤现金流低、物料高。上节的模型检验是第①种策略,下面基于模型对其余四种可能的资源配置策略作仿真实验,分析系统整体的动态行为。

(1)策略②:资源配置高于进度需要。目标现金流覆盖和目标物料覆盖两个变量同时提高20%的仿真结果见图5,发现由于资金和物料过于充足,虽然工期顺利完成,但基于物料的施工进度高于实际施工进度39%,说明库存物料一直处于积压状态。由于物料是通过资金来购买的,库存的积压间接反映了企业资金时间价值的损失。同步提高基于劳动力的施工进度发现可以将工期提前,图6的仿真结果是实际施工进度以141平方米/天左右的进度施工,整个工期600天,提前120天完成,进度绩效指标SPI大于1,成本绩效指标CPI小于1。说明策略②尽管工期得以提前,但平行施工带来的措施费、周转材料等相关因素使得CPI指标超出了计划成本,整体运作并不经济。

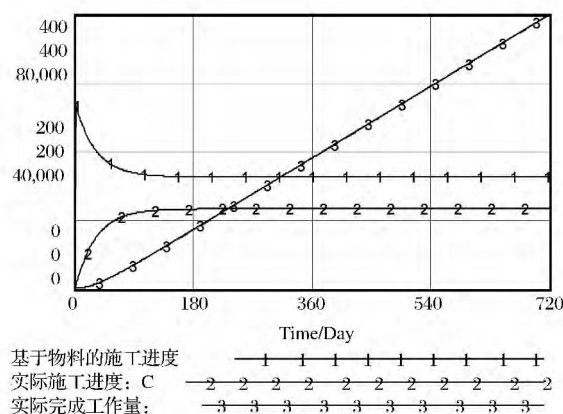


图5 同时提高20%的仿真结果

(2)策略③:资源配置低于进度需要。同时将目标现金流覆盖和目标物料覆盖两个参数降低20%的仿真结果发现,实际施工进度由基于材料的施工进度决定,开始的物料不足导致51天以后必须赶工(51天后基于劳动力的施工进度大于实际施工进度),见图7。物料的施工进度逐步加大,但706天

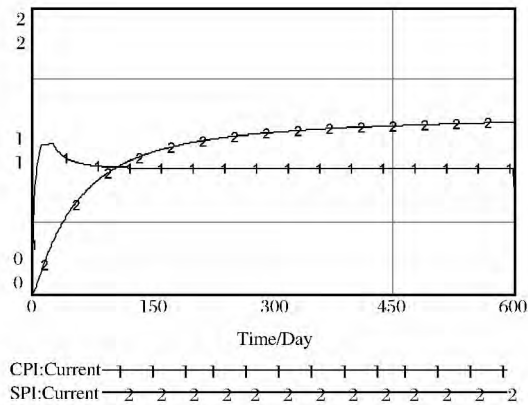


图6 提前120天的成本、进度指标

以后由于基于工序的施工进度的限制,使得实际施工进度无法继续增加,为200平方米/天,曲线成为一条直线。说明了建筑工程项目的一个重要特性,即由于工艺顺序、间歇时间等原因,当两者都大于基于工序的施工进度时,实际施工进度并不随之增加,而是以基于工序的施工进度施工。尽管工作量还是能在计划工期内完成,但这种策略下,基于物料的施工进度无法和基于劳动力的施工进度保持一致,造成劳动力的大量闲置,成本加大, SPI、CPI 指标如图8所示。当二个变量持续降低至35%发现,即使赶工,720天内也无法完成整个计划工作量,并且成本进一步加大, SPI 和 CPI 指标如图9所示。

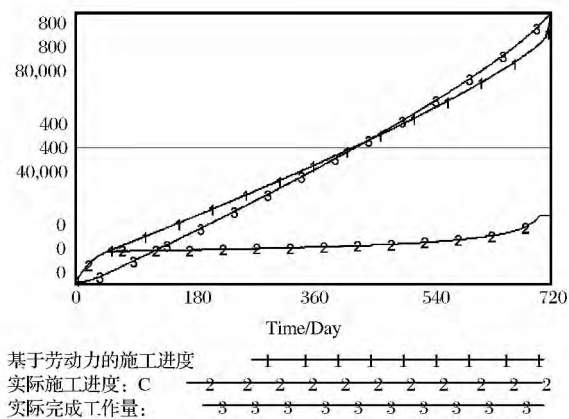


图7 策略③的施工进度仿真结果

(3)策略④: 现金流覆盖高, 物料覆盖低。将目标现金流覆盖提高20%、目标物料覆盖降低20%为例, 发现 SPI、CPI 以及实际完成工作量的仿真结果类同于策略③, 如同图7、8, 物料的不足限制了实际施工进度, 唯一的区别是现金流变大。参数的不匹配导致项目的现金流和施工所需的直接材料、直接人工不匹配, 即资金的增长部分没有在项目的物料

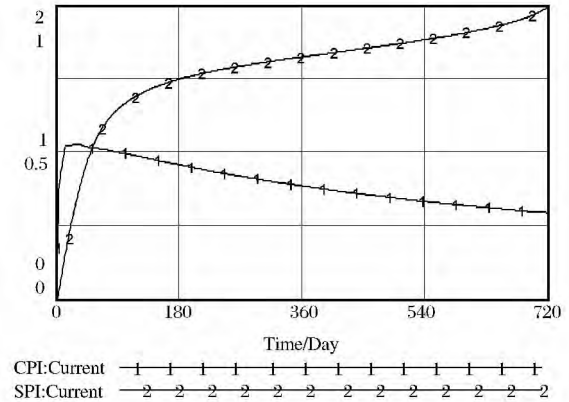


图8 策略③的进度、成本指标

和劳动力上得到反映, 对工程运作未产生任何实际影响, 其后果是增长的现金流成为闲置资金, 间接造成企业资金的时间价值损失。

(4)策略⑤: 现金流覆盖低, 物料覆盖高。将目标物料覆盖提高20%、目标现金流覆盖降低20%为例, 仿真结果显示如图10, 发现由于资金和物料不匹配, 尽管物料供应计划提高, 但资金供应跟不上, 无法实现目标物料覆盖提高20%的目标, 实际施工进度为0, 系统进入不稳定状态。实际经验可知, 现金流短缺不仅无法保证材料的正常供应, 还会造成工资拖欠, 施工项目面临停工的直接后果。

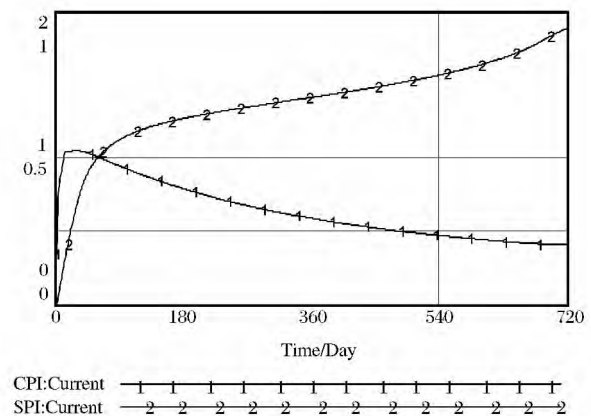


图9 同时降低35%的进度、成本指标

5 结语

仿真结果反映了大型建筑工程项目的高阶次、多反馈、非线性的动态特征。资源安排过于充足, 会造成资金的时间价值和机会成本的损失、劳动力的闲置(工作面不允许)以及物料损耗的加大, 最终导致实际成本超出预算。如果资源不能持续平衡供应, 则会出现资源瓶颈, 最终导致工期延误。本文运

- uncertainty and its application to Jinping-II Hydroelectric Project[J]. *International Journal of Project Management*, 2012, 30(8): 950—966.
- [9] 宁晓倩,王其藩. 运用系统动力学模型进行项目时间/成本估算[J]. *科技导报*, 2004, 22(0409): 54—57.
- [10] Tavana M, Abtahi A R, Khalili-Damghani K. A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time—cost—quality trade-off project scheduling problems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(4): 1830—1846.
- [11] Ballesteros-Pérez P, González-Cruz M C, Fernández-Diego M. Human resource allocation management in multiple projects using sociometric techniques[J]. *International Journal of Project Management*, 2012, 30(8): 901—913.
- [12] Laslo Z, Goldberg A. Resource allocation under uncertainty in a multi-project matrix environment: Is organizational conflict inevitable[J]. *International Journal of Project Management*, 2008, 26(8): 773—788.
- [13] 郭春东,黄璐,朱东华,等. 国家重大工程项目资源配置行为分析[J]. *科研管理*, 2012, 33(4): 147—154.
- [14] 何光喜,赵延东,杨起全. 我国科研资源分配不均等程度初探——对科研人员经费集中情况的分析[J]. *中国软科学*, 2014, (6): 58—66.
- [15] Tsai D, Chiu H. Two heuristics for scheduling multiple projects with resource constraints[J]. *Construction Management and Economics*, 1996, 14(4): 325—340.
- [16] 罗辉道,项保华. 资源概念与分类研究[J]. *科研管理*, 2005, 26(4): 99—105.
- [17] 李存斌,陆龚曙. 工程项目风险元传递的系统动力学模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(12): 2731—2739.
- [18] Park M. Model-based dynamic resource management for construction projects[J]. *Automation in Construction*, 2005, 14(5): 585—598.
- [19] Pena-Mora F, Park M. Dynamic planning for fast-tracking building construction projects[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2001, 127(6): 445—456.
- [20] 王森浩,乐云,方建. 施工现场库存管理系统动力学仿真分析——以上海世博会某场馆为例[J]. *华东经济管理*, 2012, 26(7): 124—127.
- [21] Acebes F, Pajares J, Galán J M, et al. A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics[J]. *International Journal of Project Management*, 2014, 32(3): 423—434.

Resource Allocation Model and Strategy Research of Large-scale Construction Project: System Dynamics Modeling and Simulation

ZHONG Yong¹, CHEN Zhi-gao¹, ZHOU Zhong²

(1. School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237;

2. School of Economics and Management, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418)

Abstract: The efficient allocation of different types of resources in large-scale construction projects is a key issue that the project management theory and practice facing nowadays. Especially both the work operability, which including the process sequences and time interval, and the feedback impact of these resources are considered. Combining the earned value method and the system dynamics theory, this paper establishes a system dynamics model of multiple resource allocation of large-scale construction projects. The modeling is based on the causal analysis between the resource availability and the work operability. Major investment construction projects statistical data in Shanghai are used to set the model parameters. The simulation results indicate that there is significant difference on the allocation importance and systematically affect of different resources in construction projects. Both the project operation model and multiple resource matching should be considered when resource allocation strategies are developed. Mismatch of resources always result in unsteady of the resource allocation system or strategy failure. This research will provide theoretical reference and practice support to the further research on multiple resource allocation of project management.

Key words: resource allocation; project management; system dynamics