

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

王森浩, 乐云, 方建

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

[摘要] 不同于制造业库存管理, 建设项目的物料库存受施工现场的限制, 既要求不能一次订购超出现场库存能力的数量, 又要求建材供应不能出现间歇。为满足施工现场库存管理这一要求, 文章采用系统动力学仿真的方法, 从施工承包商的视角, 以钢材为例, 构建了施工现场钢材库存模型。通过模型对不同采购预警值进行了对比分析, 得出了合理的预警值。并对支付延迟可能产生的影响, 给出了相应的应对策略, 保证了施工的正常进行。最后, 将模型在中国2010年上海世博会某场馆工程建设中进行了检验。

[关键词] 施工; 库存; 系统动力学; 仿真; 世博会

[中图分类号] F280

[文献标志码] A

[文章编号] 1007—5097 (2012) 07—0124—04

Analysis of Dynamics Simulation of Inventory Management System in Construction Site ——Take a Pavilion in Shanghai Expo 2010 as an Example

WANG Sen-hao, LE Yun, FANG Jian

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Unlike the inventory management of manufacturing, the materials inventory of construction projects are limited by the construction site that the material's order cannot be out of the inventory capacity and neither the supply can be intermittent. To meet the requirement of inventory management in the construction site, this paper adopts the system dynamics simulation method, takes the steel as an example, constructs an steel inventory model in construction site from the perspective of the construction contractor. The paper also obtains the reasonable value according to the comparative analysis of different procurement of early warning value in the model and puts forward to the corresponding coping strategies to ensure the normal construction. Finally, the paper takes a pavilion in Shanghai Expo 2010 as an example to verify the feasibility of the model.

Key words: construction; inventory; system dynamics; simulation; Expo

一、引言

上海世博会已在2010年10月31日落下帷幕, 由上百个各国场馆所共同组成的大型群体项目在短时间内共同快速推进给世人留下了深刻印象。在世博园区内, 其中经上海市发改委立项的园区工程建设项目就多达110项, 规划总建筑面积约200多万平方米, 为了确保工程建设在2010年5月1日顺利开园, 工程总量大且进度目标严肃。在参与建设的各方通力配合下, 最终共同完成了这一目标, 造就了“上海速度”, 其工程管理的宝贵经验值得发掘与借鉴。

在世博会场馆建设过程中, 各场馆排列紧凑, 间距较小, 施工现场可供存放建筑材料的库存面积小。这就对施工现场库存管理提出了很高的要求, 既要求不能一次订购超出现场库存能力的数量, 又要求建材供应不能出现间歇, 即库存为零的状况。要满足这两个条件, 就需要提供精确的订货数量与供货时间, 还要对出现的各种原因引起“断供”情况提供相应的应急方案。此外, 虽在开工前可以确定大部分物料需求的品质、数

量、价格等关键信息, 但由于在限定的工期内物料供应需求量大, 且品种繁多, 对供应时间上又有着严格的要求, 往往与最终实施结果与计划相差甚远。会出现工程费用超支、工期延误等不利结果, 如何在施工过程中根据实际变化情况, 实施动态管理也成为管理者需要考虑的一大难题。

二、施工现场库存管理

(一) 施工现场与一般制造业库存管理的区别

施工现场库存管理是建设工程项目管理体系中的一项重要工作, 涉及到现场布置规划^[1]和库存管理两个方面, 贯穿于项目建设的全过程。其起源于制造业库存管理方法与理念, 如经济生产批量、物料需求计划(MRP)和准时生产制^[2](JIT)及精细生产等新的生产方式, 但又与一般制造业库存管理有着很大不同之处, 参照文献[3-4]归纳二者区别后详见表1。因此, 从一般制造业学习的理念与方法是无法全盘直接复制到建筑业的, 针对施工现场库存应加以区别研究。

[收稿日期] 2012—01—30

[基金项目] 国家自然科学基金项目(70972071); 上海市科技委员会——世博科技专项项目(08dz0580700)

[作者简介] 王森浩(1983—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生, 研究方向: 建设工程管理, 复杂项目管理;

乐云(1964—), 男, 湖北大悟人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 研究方向: 建设工程管理, 复杂项目管理;

方建(1971—), 男, 湖北黄石人, 工程师, 博士研究生, 研究方向: 建设工程管理, 复杂项目管理。

表1 一般制造业与施工现场库存管理区别

	一般制造企业	施工现场
库存物料	原材料、半成品、成品、形状规则易堆放	建筑材料、少量半成品，成品即建筑物，无成品库存，建材形状不规则（砂石），占用面积较大
仓库状态	物料存放仓库，仓库为长期使用，地理位置固定	物料有露天堆放、工棚堆放、仓库存放等多种方式，且需要对现场进行平面布置安排，面积常常受限，仓库多为临时性，项目结束，仓库拆除，
库存变动	库存物品种类变动不大，批量生产，数量随销售情况波动，难以预测	建筑产品具有大体量、单次性、不可逆性、不可复制性等特点，不同项目均需独立设计，材料需求个性化强，但大宗材料种类差别不大。单位时间内材料消耗量随施工强度波动较大，可预测
供应链	依据市场预测订购、生产，有产成品库存积压。产品的不同部件可以在不同地点生产，链上各企业供需关系长期且稳定	按客户需求订单式生产，不存在产成品库存积压，所有材料物资都集中在施工现场装配，链上各企业间供需关系为临时性

（二）运筹学中的库存管理问题

在现有的库存管理相关研究方法中，运筹学方法较为成熟，李忠富等采用了动态规划构建了建筑企业库存动态存储模型，从企业的视角对多项目库存进行规划^[3]。Michael J. Horman 等通过对物料库存系统调节来缓冲建设过程中出现的不确定性带来的风险，并与劳动力进行协调分析，提升了整体建设效率^[4]。

基于运筹学的方法一般都需要较强的假设条件与数学抽象，如统计模型中有关概率分布的假设，而实际的施工现场库存管理则包含了很多复杂的、不确定的因素（例如，组织、个人等等），同时库存协调是一种“牵一发动全身”的系统反馈问题，导致了模型的结构十分复杂，这使得运筹学的方法不能很好地解决这一类问题。

（三）系统动力学在库存管理上的应用

系统动力学（System Dynamics）由美国麻省理工学院的福瑞斯特教授于^[5]1956年创立，在20世纪50年代末成为一门独立完整的学科，是一门分析研究信息反馈系统的学科；是一门交叉、综合性的探索如何认识和解决社会、经济、生态和生物等一类复杂大系统问题的学科；是一门擅长于解决多重反馈、非线性、高阶、时变的复杂问题的学科。国内已有不少学者将系统动力学引入到建设项目管理领域。天津大学雷荣军、毕星指出“系统动力学方法与传统项目管理方法是相辅相成的关系，传统项目管理方法在项目计划等方面有着不可替代的作用，而系统动力学方法更侧重于项目的宏观管理，侧重于对难于准确量化的复杂因素的分析”^[6]。哈尔滨工程大学赵金楼、齐英同样采用了系统动力学研究了建设项目的人力与物质之间的资源平衡问题^[7]；同济大学王宇静、李永奎针对大型复杂建设项目管理中的计划问题进行了系统动力学建模研究^[8]。在这些研究之中，较少有直接针对建设项目现场库存管理问题。

而系统动力学在诞生之初就被应用在制造业库存管理上，其较好地仿真了经历了复杂销售和采购动态调整之后所引起的库存变化，得出了一系列研究成果。但在建筑业，项目在开始之初，就已经确定了建筑物的各项特征，不存在销售的预测失准问题。正是不同于制造业这一特点，决定了依照制造业建立的系统动力学库存管理模型都不适用于施工现场的库存进行仿真，需要建立具有针对建筑业的现场库存管理模型。

另一方面，由于建设速率的非线性，工程受供货、资金多

方面影响。建设工程项目在实际运行过程中还会出现各种突发情况，为及时调整，采用系统动力学建模的方式较为方便，只需调整相关参数或变量即可立即获得新结果，可以快速为制定决策提供新的依据。

三、施工现场库存管理因果关系分析

因果关系图是系统动力学描述系统常用的一种方法，不同于一般的有向图，它具有很强的实际意义。施工现场库存管理的因果关系如图1所示。由于场地库存上限的限制，建材库存的单次订购量被限制，配合建筑物施工进度，往往需要多次订购，当建筑物施工结束时，订购停止。本文欲通过对比建材库存与场地库存上限的差距量，来判断是否需要启动订购流程。当差距量达到订购要求时，激发订购流程，并根据订购量来确定资金需要量。启动支付资金后，建材库存获得补充，开始施工，如此形成一个负反馈回路。建筑物一般需要建设完成后才能交付业主，并非现货交易，大多数工程是根据工程完成进度阶段性支付。且承包商是从业主方获得支付后再支付给建材供应商，这一过程中必定会出现延迟，模型中也加以考虑。在图中两处延迟标记分别代表资金支付延迟和库存调节延迟。

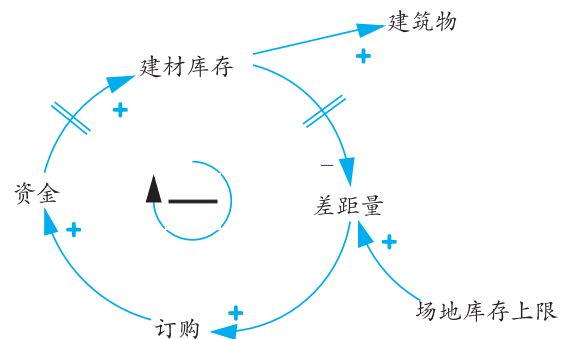


图1 施工现场钢材库存变动因果关系图

四、施工现场钢材库存模型

因果关系图只能描述反馈结构的基本方面，无法区别表示状态变量、辅助变量等概念。若要更详细地描述系统的特性，还需要借助流图来表示，图2即为施工现场钢材库存系统动力学流图。

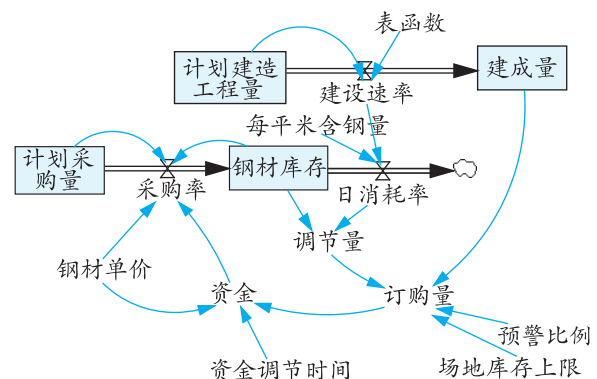


图2 施工现场钢材库存系统动力学流图

对流图中的各种变量赋值、建立方程后，即可实施系统仿真分析。本章节将对各变量的赋值及方程进行具体说明。

（一）建设速率

为衡量建筑物的建设速率，模型采用了平方米/天作为计量单位。建设工程前期多为施工准备及较难施工的基础工程阶段，此时建设速率较为平缓，当基础工程完成后，进入主体工程阶段时，建设速率则会大为提升，对物料的需求和消耗也进入高峰阶段。后期进入装饰装修阶段时，主体工程已经完工，建设速率又进入一个较为缓和的阶段。因此，遵循建设工程的基本

客观规律,建设速率是一条非线性曲线(如图3所示),借助于Vensim仿真软件中的表函数功能,可以描述这一过程。而建筑物的建成量则呈现“S”型增长,建设完成后,曲线尾部恒定在计划建造量所设定的初始值,而计划建造量曲线的尾部则归零。

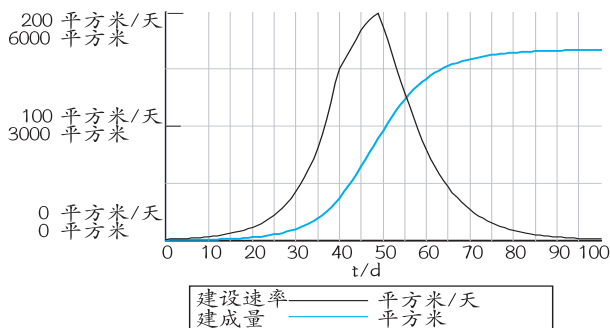


图3 建设速率、建成量随时间变化曲线图

(二) 钢材库存

建设工程量确定后,根据相关研究及实践经验对建设速率进行估算,建设速率的增减与工程对物料需求的增减呈现正比。从建设工程造价的角度分析,物料消耗占整个建设工程的70%,其中钢材和混凝土又占据物料消耗的40%左右,混凝土商品化后,不存在施工现场的库存问题。因此,模型选择了建设工程中最常使用的钢材为主要研究对象,钢材库存是整个模型中的核心,其变化水平,决定了整个系统的运作效率。其表达式为:

$$\text{钢材库存} = \text{INTEG}(\text{采购率} - \text{日消耗率}, 30) \quad (1)$$

(三) 调节量与订购量

建设工程施工进度受多方因素影响,包括天气、人工等,因此,对第二天的库存预估较为精确,可以通过精确核对来判断是否启动采购流程,但在日消耗量较大的情况下,库存调节有可能会滞后情况。调节量是由日消耗率和钢材库存共同决定的,如(2)式所示。

订购量主要由场地库存上限决定,由于施工需要,钢材必须堆放在施工现场,但大部分施工现场通过规划红线被严格限定,除去建筑物自身占地面积、塔吊、道路、办公场所后,留给场地库存面积并不是很多。并且,相关法律规范规定,建材不得存放在已完成工程内部。所以,从施工开始到施工结束,场地库存的上限基本是一个恒定的数值,而单次订购量要小于或等于该场地的库存上限。因此,整个工程所需全部钢材需多次采购完成,并且每次启动采购流程通过订购量的函数来判断。调节量与采购量的函数表达式分别如下:

$$\text{调节量} = \text{日消耗率} - \text{钢材库存} \quad (2)$$

$$\text{订购量} = \text{IF THEN ELSE}[\text{调节量} \geq \text{场地库存上限} \times \text{预警比例}; \text{AND: 建成量} \leq [\text{计划建造面积初始值} - (\text{场地库存上限} / \text{预警比例})], \text{场地库存上限}, 0] \quad (3)$$

(3)式表示当调节量 \geq 场地库存上限与预警比例之积时,并且同时满足(此处“AND:”的含义为同时满足其前后两者的条件)建成量 \leq 计划建造面积初始值 $-(\text{场地库存上限} / \text{预警比例})$ 时,单次订购量=场地库存上限,否则为0。此处并行限定“建成量 \leq 计划建造面积初始值 $-(\text{场地库存上限} / \text{预警比例})$ ”

作用是最后一次货物进场之后终止采购。

(四) 资金与资金调节时间

资金是项目实施的前提保障,项目资金有两个视角,从业主方来看,资金为支出,从承包商角度来看,资金为收入。模型中的资金为承包商视角,由其支付给钢材供应商。

从工程经济的角度来看,资金具有时间价值,因此,资金有两大属性值得关注:资金量的大小与资金的支付时间。资金量与每次建材的订购量息息相关,在模型中由于单次订购量不能超出场地库存上限,业主方一般采用按完成工程量按月据实支付,减少对己方资金占用。另外,工程开工前支付给承包商材料预付款供承包商资金周转。承包商使用这笔资金采购建材,业主在工程结束前支付给承包商的工程款中按比例扣回。

业主方资金的支付受各种因素影响,有时并不能按约定时限支付,是造成工程停工的一个重要原因。在模型中所设置的资金调节时间即为此考虑,当资金支付遇到延迟时,可以将其与正常约定支付情况做对比分析,为承包商制定钢材采购决策提供依据。

五、模型仿真与分析

根据上述设置,本节以2010年上海世博会园区某展览馆为例进行仿真验证,本场馆计划建造面积为5000m²,工期为100天,仿真步长设置为1天。建设速率如图3所示,峰值为200m³/天。根据参考文献[9]和工程实际情况取值分析,确定本模型中建筑物含钢量为0.05t/m²。为了批量采购获取总价和运费优惠,每次采购量固定为与场地库存上限为同一值,即30t。一般在工程开始施工前,业主都会支付工程材料预付款,因此,场地初始库存值为30t。

(一) 库存不足预警

钢材库存的控制目标是既不超出场地存放上限,也不至于无料可用。当钢材库存不足时,需要补充库存,由于补充库存有一定的延迟,如果待到钢材全部用完再下订单,则会出现施工停滞待料状态,轻则会造成施工人员窝工、机械闲置、工期延误等损失,重则造成施工单位的违约赔付。为避免此种状况的出现,模型中设置了预警比例这一常量。

当施工现场钢材库存量降至某一水平线,即设定预警比例与场地库存上限值的乘积之下时,启动采购流程,补足差额。预警比例的取值范围为0至100%,0代表不预警,库存直至用完后启动采购;100%代表与场地库存上限值相等,库存满仓时,依然启动采购。预警比例的取值应将钢材库存波动控制在合理范围之内,如图4中钢材库存所示,波谷代表了触碰到了预警值,启动采购,波峰代表库存经历采购后库存得到了补充。钢材库存变动控制在0至30之间,即达到了控制的预期目标。

而引起库存增减的两大因素分别为消耗和采购,二者的变动与库存变化息息相关。图4中日消耗率与施工进度正相关,钢材库存在日消耗率达到峰值的前后时间段内波动剧烈,代表了采购频繁。图4采购率的每次波峰代表一次采购值,随之,带来钢材库存出现一个新的波峰。最后一次采购率波峰低于之前,是由于剩余工程量所需钢材低于场地库存上限值,而不需要采购满仓。

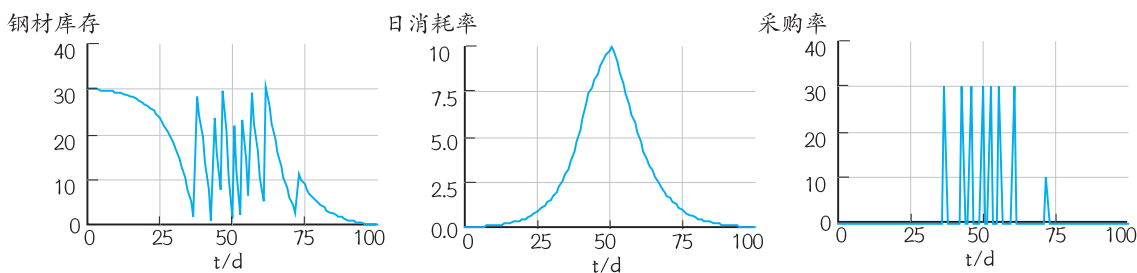


图4 钢材库存原因图

当预警比例取不同的值时,仿真结果如图5所显示,当预警比例取高值时,在库存还有较多剩余的状态下就启动了采购程序,结果造成多次波峰超出场地库存上限水平(30t);当预警比例取值过低时,则出现多次波谷低于0的状态,即停工待料状态。由于工程开始和结束不涉及到采购,因此,无论预警比例的高低,变化曲线在工程开始和结束是重叠在一起的。预警比例的高低直接影响着采购和施工工期,预警比例过低则会出现无料可用,预警比例过高则会出现库存还未使用完毕,新批次无法全部入库的窘境。过高或过低均不利于库存管理,确定合理的预警比例,对整个施工过程顺利进行起着至关重要的作用。在本模型中,当预警比例取3%时可以将库存严格限制在0~30t之间,达到管控目标。

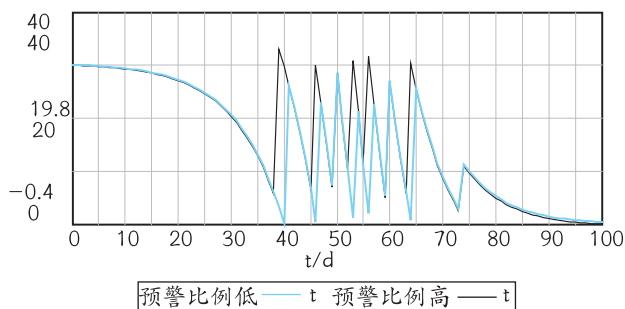


图5 预警比例高低差异对比

(二)支付延迟影响

在工程启动后,因各种原因会出现支付延迟,支付的延迟对初始计划有着较大的影响。本模型分别对正常支付和延迟支付两种情况进行比较分析。正常支付情况下的函数表达式如(4)式所示,延迟支付情况下的函数表达式如(5)式所示。

$$\text{资金} = \text{订购量} \times \text{钢材单价} \quad (4)$$

$$\text{资金} = \text{订购量} \times \text{钢材单价} - 10 \times \text{PULSE}(40, 10) \times \text{钢材单价} \quad (5)$$

(5)式所仿真的情况是:在工程进展到第40天时,业主方延迟支付了10t钢筋价款,共持续了10天。图6中细线是(4)式的仿真结果,粗线是(5)式的仿真结果。从图中可以看出,在第40天到50天内,代表(5)式的粗线波动剧烈,比正常支付情况下,多出几次波峰,但这几次的波峰均低于正常采购量。说明了承包商采用了“少量多次”采购的策略应对少支付的10t钢筋价款缺口,虽有一次库存量低于零,但通过与钢材供应商协调采用赊购的办法,并实时调整了后续采购步调,基本上保证了正常施工需求,避免了停工待料的情况。

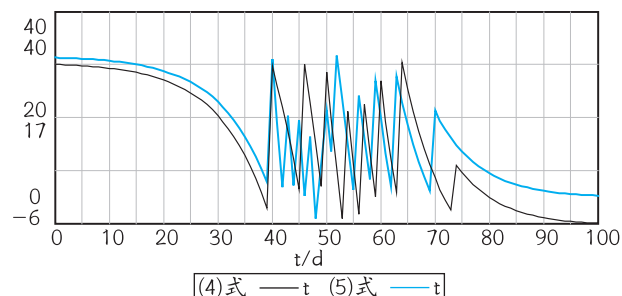


图6 支付延迟情况下钢材库存示意图

六、结 论

本文采用系统动力学仿真的方法,从施工承包商的视角出发,构建了施工现场钢材库存模型,并以2010年上海世博会园区某展览馆为例,对这一模型进行模拟仿真,并根据仿真结果制定施工材料采购计划,在满足施工现场存货能力受限的条件下,保证了施工材料供应的连续性,为施工顺利进行提供了保障,并通过最大限度的批量采购获得了经济效益。最后,根据模型仿真结果,提出通过主动修改施工材料采购计划解决对于贷款延迟支付这一影响正常施工的常见问题,相比于承包商长期以来的垫资或停工的解决方法,一定程度上降低了承包商的风险。

文中所构建的施工现场钢材库存模型,具有一定的普适应,随着我国城市化进程的加快,可以预见未来在建筑密度较高的城市进行施工时,施工场地多会受到局限,施工现场库存管理的好坏对施工是否能够顺利完成起着至关重要的作用。本研究的局限性在于所仿真的系统是单个项目,而施工企业往往是多项目并行,多项目的施工现场库存管理更为复杂,是本文下一步研究的方向。

[参考文献]

- [1] Ning X, Lam K, Lam M C. Dynamic construction site layout planning using max-min ant system [J]. Automation in Construction, 2010, 19(1): 55-65.
- [2] Pheng L S, Shang G. The Application of the Just-in-Time Philosophy in the Chinese Construction Industry [J]. Journal of Construction in Developing Countries, 2011, 16(1): 91-111.
- [3] 李忠富, 张世铮, 王博. 基于动态存储模型的建筑企业库存管理[J]. 工程管理学报, 2010, (2): 211-214.
- [4] 王挺, 谢京辰. 建筑供应链管理(CSCM)应用研究[J]. 建筑管理现代化, 2005, (2): 5-8.
- [5] Forrester J W, Technology M I O. Industrial dynamics [M]. MIT press Cambridge, MA, 1961.
- [6] 雷荣军, 毕星. 系统动力学在建设项目管理中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, (6): 72-75.
- [7] 赵金楼, 齐英. 基于系统动力学模型的建设项目的资源管理研究[J]. 科技管理研究, 2008, (7): 502-504.
- [8] 王宇静, 李永奎. 基于系统动力学的大型复杂建设项目计划模型[J]. 工业工程与管理, 2010, (3): 87-94.
- [9] 谭泽先. 钢筋混凝土结构含钢量的一般范围和合理控制方法[J]. 建筑结构, 2007, (7): 17-19.

[责任编辑: 余志虎]