

施工设备维修对工程进度影响的 SD 模型及应用 ——以中亚某天然气管线建设工程为例

任天翔, 乐 云

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092, E-mail: traummannrtx2010@gmail.com)

摘 要: 在现代建设工程中, 施工设备维修对建设工程进度的影响日益增大, 另一方面, 工程实践中常见的赶工现象又可能导致设备超负荷运转, 增加了维修管理的难度。系统动力学及相关软件为理顺施工设备维修与工程进度之间的关系、估计施工设备需求量提供了有效的工具。通过建立施工设备维修—工程进度联动模型, 并使用该模型对某天然气管线建设工程进行模拟, 发现在考虑施工设备维修的情况下, 采用仿真方法, 可以对多种方案进行有效的评估。

关键词: 施工设备维修; 工程进度; 系统动力学; 仿真; 天然气管道

中图分类号: TU722 文献标识码: A 文章编号: 1674-8859 (2012) 04-061-06

System Dynamics Based on Simulation of the Relationship between Equipment Maintenance and Construction Progress: ——A Case of the Central Asian Natural Gas Pipeline Project

REN Tian-xiang, LE Yun

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

E-mail: traummannrtx2010@gmail.com)

Abstract: In modern construction projects, influence of equipment maintenance on the construction progress is increasingly significant. On the other hand, speeding construction often results in equipment overloaded. It increases difficulty of equipment maintenance management. To coordinate the relationship between the two and to determine the original number of equipments, system dynamics (SD) provides an effective tool. By establishment of the linkage model of equipment maintenance and construction progress, a gas pipeline construction project is simulated. It is discovered that when considering equipment maintenance, the SD method would provide an effective assessment to different plans.

Keywords: equipment maintenance; project progress; system dynamics; simulation; gas pipeline

中亚天然气管道工程始于土库曼斯坦, 途经乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦, 最后到达我国境内的霍尔果斯, 双线并行敷设, 单线长度 1818km, 是迄今为止中国唯一一条横跨多国的大口径天然气管道。其中针对哈萨克斯坦段工程具有工期紧、难度大、质量要求高的特点, 施工单位采用了新技术和新设备。一方面, 新的技术装备大大加快了工程进度, 另一方面也给施工设备维修管理和工期控

制带来了巨大挑战。新设备价格高、体积大、结构复杂、运输困难, 属于专门的特种装备, 一旦出现故障, 难以在短时间内通过采购方式得到及时补充, 只能依赖于现场维修。而维修时设备不得不临时退出工作, 会严重影响工程进度。此外, 工程施工过程中会不可避免地发生各种突发事件, 停工及由此带来的赶工现象十分普遍, 各种施工设备常常超负荷运转, 其故障率会大幅上升。因此, 准确理解施工设备维修对工程进度的影响, 理顺两者之间数量的关系, 并最终确定初始投入的施工设备数量

收稿日期: 2012-05-11.

以满足工程的工期要求,成为了管理者面临的严峻挑战。而系统动力学以及相关软件 Vensim 为解决这一问题提供了新的方法和有效的工具。

1 研究现状

系统动力学 (System Dynamics, SD) 以系统理论和复杂科学为理论基础,主要用于对存在多重反馈和延迟的非线性复杂问题进行系统性思考,是讨论复杂建设项目的有力工具^[1-3]。SD 在工程管理中的应用研究始于 20 世纪 70 年代,美国学者 Cooper 第一次建立起“忙中出错”回路和返工流模型,认为劳动力在高工作强度和高工作压力下的表现非常不稳定,会产生大量的返工,这些由返工产生的额外工作量是影响工程进度的主要因素^[4]。此后,这一模型不断丰富和发展,日趋成熟。Park^[5]建立的模型将返工流的产生归结为设计与施工搭接以及业主要求的变更;Love 和 Lyneis 等^[6]建立的因果关系模型认为工期压力产生的平行工作是返工产生的重要原因;王宇静等^[7]根据建筑工程实际建立了一个具有 93 个变量的模型,对劳动力数量和施工进度度的关系进行了详尽的分析。这些 SD 模型均以工程进度为重点研究对象,未将施工设备纳入模型体系中。

少数涉及施工设备的工程管理 SD 模型也很少考虑施工设备维修的问题:Nasirzadeh^[8,9]在工程风险 SD 模型中研究的,认为施工设备价格的提高会导致资金缺乏,影响工程质量,引起返工,而施工设备在施工过程中并不出现任何故障,也不需要相应的维修;Han 等^[10]讨论了设计错误对工程建设的影响,其模型实际上将设备故障归入到“其他生产力损失”中,没有对其单独展开详细讨论;同样,闫国栋^[11]建立的工期风险模型,也没有单独考虑设备故障问题,而是将其包含在“技术风险”因子内;Yaghootkar 等^[12]对多项目环境下进度和资源分配的关系建立了 SD 模型,其中施工设备与劳动力、资金一起作为“资源”因素对工期产生影响;Pena Mora 等^[13]以土方工程为例,模拟了载重卡车的投入数量对工程工期的影响,在此模型中,他没有考虑卡车出现故障的可能性。

综上所述,目前的工程进度 SD 模型,主要以返工流为基础,研究重点在于“人”的因素对工程进度的影响^[14]。而面对工程规模扩大和工期相对缩短的挑战,工程建设机械化、自动化水平程度越来越高,施工设备维修已经成为影响工期的重要因

素,对现有的工程进度 SD 模型进行进一步扩展是很有意义的。

2 施工设备维修与工程进度的因果关系

因果回路图 (Causal Loop Diagram, CLD) 是系统动力学分析系统结构的基础工具。系统动力学建模一般首先分别分析系统中各个要素之间的因果关系并将其集成为一个整体的因果回路,再以此为基础绘制存量流量图 (Stock and flow diagram)。确定图中各个变量数值并建立方程后,可利用此模型对不同参数下系统的行为模式,根据模拟结果为管理者提供建议^[15]。

仿照经典的劳动力返工流理论,对工程设备与工程进度的相互关系进行分析:如果实际工程进度落后于计划工程进度,管理方将采用赶工的方式加快施工进度,这就增加了施工设备的磨损速度。磨损达到一定程度后(这里存在一定的延迟时间),设备出现故障,退出工作。开工设备数量的减少,会制约工程的实际施工进度。这些因果关系形成了一个“故障回路”:即“实际工程进度→赶工速度→设备磨损程度→出现故障的设备数量→开工的设备数量→实际工程进度”。此因果回路中共有 3 个正因果链,2 个负因果链,故整个反馈环极性为正,属于增强型回路。这意味着如果没有一个负反馈环来平衡它,整个反馈环会由于设备故障而陷入恶性循环,停工数目越来越多,最终导致整个维修体系的崩溃。

但是另一方面,出现故障的设备数量增多同时也意味着可供修理的设备数量增多。如果停工设备数量的增长在工程技术部门的维修能力范围内,则维修速率也随之增长。开工的设备数量可以及时得到恢复(维修作业需要时间,因此也存在延迟),进而赶上计划施工进度。这些因果关系形成了“维修回路”:“实际工程进度→赶工速度→设备磨损程度→出现故障的设备数量→维修速率→开工的设备数量→实际工程进度”。此因果关系环中,有 5 个正因果链,1 个负因果链,故整个反馈环的极性为负,其系统动力学的行为特性应为“寻的”,最终在某一点上达到平衡。

将以上两因果回路整合后,整个模型类似于彼得·圣吉提出的成长上限基模^[16],如图 1 所示。系统内的正反馈导致某个存量不断增长,当增长到一定程度后会触发一个抑制增长的负反馈环路,导致增长减缓、停顿,甚至下滑。具体对本研究而言,

如果有足够强的维修能力,实际开工的施工设备数量和工程的实际施工速率最终会在一个相对固定的水平上波动。

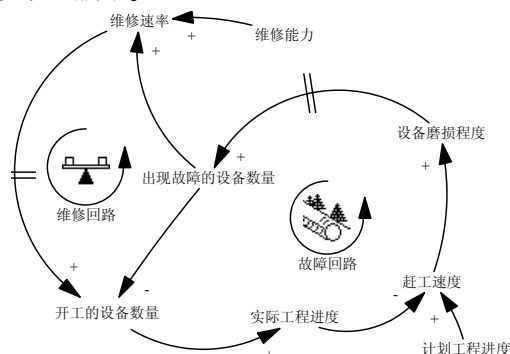


图1 施工设备维修与工程进度的因果回路图

根据施工设备维修与工程进度的因果回路图,建立SD存量流量模型,如图2所示。整个模型分为两个子系统:工程进度系统和施工设备维修系统。整个系统的行为不仅取决于两个子系统各自的结构,更取决于两者之间的相互作用。

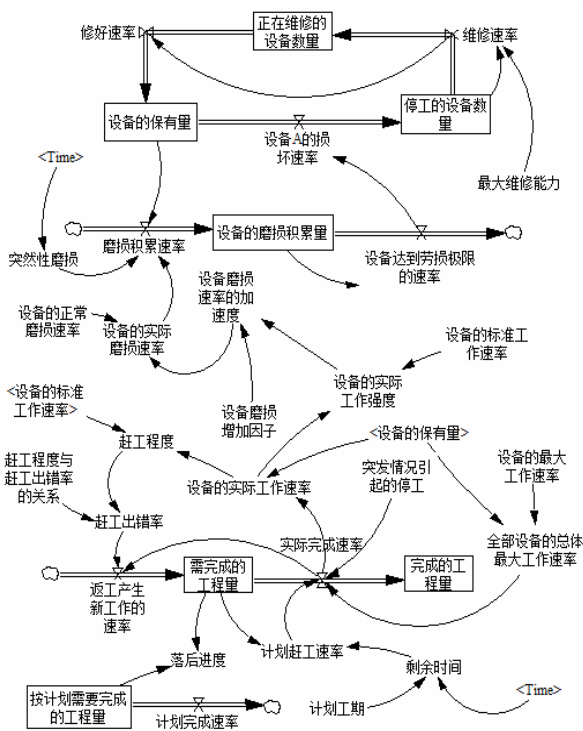


图2 施工设备维修与工程进度的存量流量图

3 施工设备维修与工程进度的联动模型

3.1 工程进度系统

由于返工会产生新的工程量,所以需要完成的工程量并不等于计划总工程量减去已完成的工程量,而应为返工产生新工作的速率与实际完成速率之差对最初计划的总工程量的积分。因此,衡量工

程完工的标准并不是已完成的工程量等于最初计划的总工程量,而是需要完成的工程量为零。管理人员会在每个模拟步长内根据计划工期来确定工程的剩余时间,并以此计划施工速度。但工程的实际完成速率还要受到当时可用设备的最大施工能力的限制,不一定能够满足管理人员对施工速度的要求。

工程的突然停工会对管理人员的工程进度计划产生巨大影响。在模型中,“突发情况引起的停工”这一辅助变量采用了脉冲输入函数(PULSE),让“实际完成速率”在一段时间内为零,以此模拟这一现象。此时,为保证工程能够按照计划工期完工,不可避免的产生了赶工的要求。

为了描述赶工对设备作业出错率的影响,需要对赶工程度进行衡量。由于设备的出错率存在最小值,当设备实际工作速率低于标准速率时,继续放慢工作速度并不能减少出错率,因此使用max函数以保证赶工程度的非负性。

$$\text{赶工程度} = \max\left(\frac{\text{设备的实际工作速率}}{\text{设备的标准工作速率}} - 1, 0\right) \quad (1)$$

显然,赶工引起的设备长时间运转和工人高强度工作会导致赶工时的作业失误率增高,但赶工出错率与赶工程度之间的具体关系常常不是线性的,而是随着加班时间的增长而呈指数性增长,对于具体工程可以根据实际情况使用表函数(Lookups)来描述这种非线性关系。

3.2 施工设备维修系统

在本模型中,采用磨损积累量来描述施工设备可能出现故障的概率,即如果某一个设备的磨损积累量达到0.5,则说明此设备有50%的概率发生故障。设备磨损是连续发生的,只有当磨损量达到100%后,设备才会发生故障,退出工作。尽管磨损是在所有施工设备上同时发生的,但实际上,所有施工设备并不是最终一起退出工作。由于设备发生故障是一个概率性事件,应以期望值估计发生故障的设备数:

$$E(\text{发生故障的设备数}) = \frac{\text{开工的设备数量}}{\text{单个设备的磨损积累量}} \quad (2)$$

因此,在计算中可以认为磨损是在全体设备上逐个积累的,设备是逐个退出工作的。为了同时描述磨损累计的连续性和退出工作的设备数量的离散性,需要针对“设备的磨损积累量”建立设备存量的协流,如图3所示。

而在每个模拟步长中,最终退出工作的设备数

量即为“设备的磨损积累量”的整数部分。

设备达到劳损
极限的速率 = $\text{INTEGER}(\text{设备的磨损积累量}) (3)$

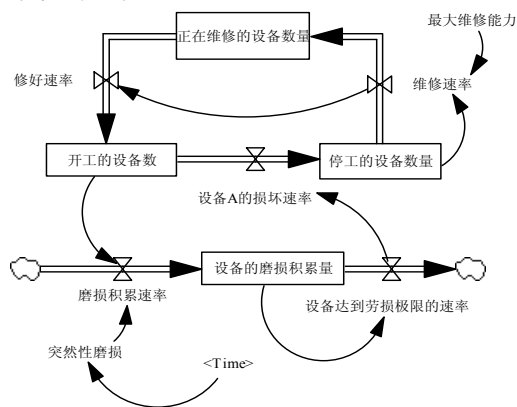


图 3 设备存量的协调

除了上面描述的日常性生产磨损外，在实际生产过程中，由于操作失误、保养不当、天气恶劣等原因，施工设备也可能发生突发性损坏。为模拟这一现象，在模型中引入“突然性磨损”这一辅助变量，通过脉冲输入使“磨损积累速率”在某个极短的时间段迅速升高。

3.3 施工设备维修系统与工程进度系统的联动

(1) 工程进度对施工设备维修存在影响。本模型中，“赶工程度”和“设备的实际工作强度”都用来描述设备超负荷运转的程度，前者针对工程工期，后者针对施工设备的磨损。施工设备有一个正常的磨损速率，例如，假设某施工设备在正常工作强度下每 20 周出现一次严重故障，并退出工作，则可认为此设备的正常磨损速率为 0.05/周。若“实际完成速率”过大，则会导致施工设备超负荷运转，设备磨损的速率会超过正常情况，大大增加了施工设备出现故障的可能性。

$$\text{设备实际工作速率} = \frac{\text{实际完成速率}}{\text{开工的设备数}} \quad (4)$$

$$\text{赶工程度} = \max\left(\frac{\text{设备的实际工作速率}}{\text{设备的标准工作速率}} - 1, 0\right) \quad (5)$$

$$\text{设备实际磨损速率} = \frac{\text{设备的正常磨损速率}}{\text{磨损速率}} + \frac{\text{设备磨损速率}}{\text{的加速度}} \quad (6)$$

$$\text{设备磨损速率的加速} = \left(\frac{\text{设备实际工程强度}}{\text{工程强度}} - 1\right) \times \text{设备磨损增加因子} \quad (7)$$

(2) 施工设备维修对工程进度的影响。开工的设备数目，决定了全部设备可以达到的总体最大工作速率，工程的“实际完成速率”不能超过这个极限，维修工作越及时，设备故障对工期的负面影响就越小。此外，突发情况引起停工时，工程的“实

际完成速率”不受施工设备数量和计划赶工程度的影响，而是固定为常数 0。

$$\text{实际完成速率} = \text{IF THEN ELSE}\left(\begin{array}{l} \text{突发情况} \\ \text{引起的停工} \end{array} = 1, 0, \text{MIN}\left(\frac{\text{全部设备的总体最大工作速率}}{\text{计划赶工速率}}\right)\right) \quad (8)$$

4 模型仿真与分析

根据上述设置，以中亚天然气管线位于哈萨克斯坦的某标段主体焊接工程为例进行模拟仿真。该段线路总长 650km，由于采取双线铺设，故整个工程量为 $650\text{km} \times 2 = 1300\text{km}$ 。标准管节长度为 11~12m，按平均值为 11.5m 进行计算，每千米管道有 87 根管节，86 道焊口。为了与实际的工程计划保持一致，模型将以周为时间步长、以焊接的钢管长度为工程量单位进行参数设置。

假设本管段的钢管焊接全部采用全自动焊方式，其中负责根焊的内焊机是影响一个机组作业的关键设备。由于每个机组只有一台内焊机，所以内焊机的作业速度实际上代表了一个机组的整体施工速度。一旦内焊机出现故障，维修需要 1 周的时间，维修期间整个机组都不得不停止工作，故以内焊机的维修为研究对象。

场景设置：在第 10 周和第 11 周，由于征地审批问题，停工两周，需要在后续施工中赶回工期；第 20 周由于出现沙尘暴，造成两台内焊机受损，需要维修，退出工作。

根据以往经验，在与本工程类似的管径和壁厚条件下，按照日工作时间为 8 小时的标准，全自动焊机组每周可以完成 350 道焊口，即 4km 管线。按照合同工期，本段工程应在 11 个月即 44 周内完成，考虑到突发事件对工期的影响，将计划施工时间定为 40 周。若不考虑设备故障，则需要机组数量为： $1300 / (40 \times 4) = 8.125$ ，故首先模拟采用 8 个机组时的情况。

(1) 模拟结果 1 (8 个机组)。在第 44 周时，仍有 400km 管线的工程量没有完成。通过 Vensim 软件中的 Causes Strip 控件进行分析，发现与传统返工流模型不同，影响工程进度的主要因素不是产生的返工作务量，而是实际完成速率。在第 10 周出现停工现象前，实际完成速率基本上保持着 30km/周的水平，在第 9 周降低到 24km，而在 10 周以后则围绕 20km/周波动，施工设备明显开工不足，参见图 4。

工程的实际完成速率受到开工设备数和设备实际工作强度的影响，故将三者放在一个图内（采

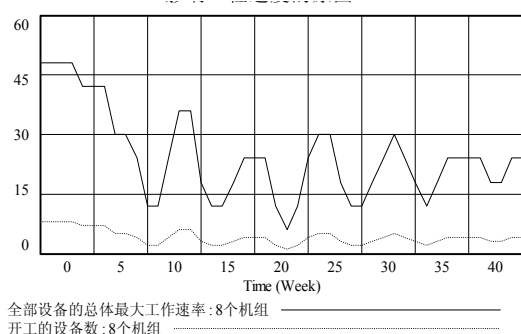


图4 影响工程进度的原因(8个机组)

用不同的比例尺),进行趋势分析,参见图5。第12周后,每个设备都处于最大负荷运转(实际工作强度为1.5,即每天工作12个小时),所以工程的实际完工速率完全由开工的设备数量决定,设备故障是影响施工速度的决定性因素。

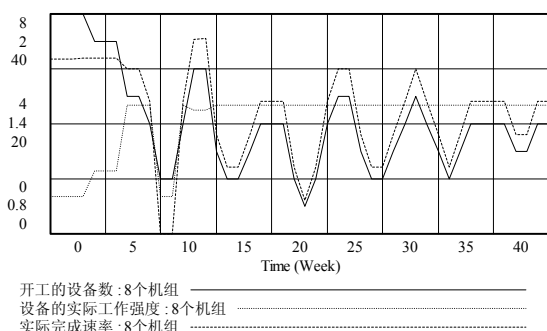


图5 影响工程的实际完成速率的因素(8个机组)

(2) 模拟结果2(8个机组、10个机组、12个机组的对比)。为了能够按时完工,需要提高机组数量。分别采用10个机组和12个机组进行模拟,结果显示,若采用10个机组,则第44周时,尚有156km管线没有完成;若采用12个机组,则在第41周就可以完成全部工程。工程进度加快不仅因为初始投入的机组数目增多,更重要的是出现故障的机组数大大减少。原因在于机组数量增多后,每个机组承担的工作任务指数性减少,实际工作强度大大降低。当机组数为12时,甚至可以保证每台设备的实际工作速率一直在标准工作速率以内。这就减轻了设备的磨损,降低了停工设备的数量,减少了维修任务。由于停工设备台数一直处于施工单位的最大维修能力范围之内,停工设备可以得到及时的维修,施工设备数量可以及时得到补充。例如,在第22周时,即便出现了设备突然损耗,设备数目下降到了9台,每台设备也没有出现超过标准工作速率运转的情况,开工设备数目在两周后就恢复

到11台的水平,参见图6。

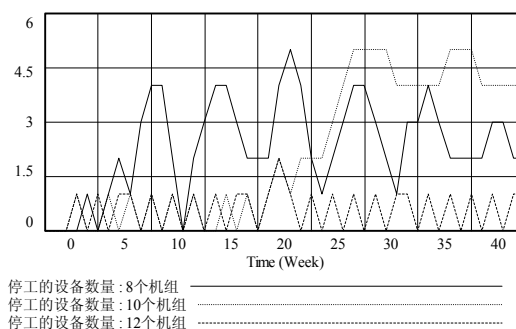


图6 比较三种情况下停工的设备数量

对比三种情况下停工的设备数量可以发现,采用10个机组施工时,从第12周到第21周,停工设备数量不超过一台,与第10周和第11周发生突然停工前的情况没有区别,这说明停工的影响基本上已经被消除。而第20周沙尘暴造成的设备损坏后,其影响直到第45周也没有消除。这说明,施工中期出现设备故障对工期的影响远大于工程早期的临时停工。面对工期压力,如果工程施工人员忽略设备运行的技术指标盲目赶工,不但无法按照原定日期完成工程任务,反而会由于设备故障的增多,进一步拖后工程进度。

为解决这一问题,施工方可以在工程开工时就适当增加施工设备的投入量。在维修能力不变的条件下,投入的施工设备的初始数量与工程工期之间并不是简单的线性关系,工程实际需要的设备数量要远高于根据工程量和设备工作定额计算出的结果。增加投入的施工设备数量,减少每台设备分配的工作任务,不但可以减少施工设备维修次数,而且能够保证赶工时期施工设备的正常运转,进而确保工程按时完成。在实际工程中,本段管道最终由12个机组共同实施焊接作业,在合同工期内按时完成了工程任务。

5 结语

本文以系统动力学为理论基础,建立了施工设备维修与工程进度的联动模型,并以中亚某天然气管线建设工程为例,对其进行了模拟仿真。仿真结果显示,施工设备维修以及初始投入的施工设备数量会对整个工程的实际工期产生决定性影响。与传统的计算方法相比,采用SD模型通过计算机模拟计算出的施工设备数目以及实际工期更加符合工程实际。

本文提出的施工设备维修与工程进度联动模型具有一定的普遍适应性。随着我国建设工程机械化、自动化水平的不断提高,可以预见,在未来的工程施工中,施工设备维修管理水平的高低对工程是否能够及时完成起着至关重要的作用。本研究的局限性在于模型中没有考虑工程材料的供应,而在实际工程中,施工设备、工程材料和工期三者之间存在着复杂的非线性关系,这也是本文下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 王其藩,宁晓倩,尤 炯.系统动力学方法在项目风险管理中的优势(英文)[J].复旦学报(自然科学版),2005(2):201-206.
- [2] Sterman J D. System dynamics modeling for project management. System Dynamics Group, Sloan School of Management[Z]. MIT, 1992.
- [3] 邹苏华,刘睿劼,张智慧.高速公路社会效益的系统动力学评价——以吉茶高速公路为例[J].工程管理学报,2011,25(5):512-516.
- [4] John D S. Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world[J]. Irwin McGraw-Hill, Boston, 2000, 851: 890.
- [5] Park M. Dynamic planning and control methodology for large-scale concurrent construction projects[J]. Apr, 2001, 3: 348-372.
- [6] Love P, Holt G D, Shen L Y, et al. Using systems dynamics to better understand change and rework in construction project management systems[J]. International Journal of Project Management, 2002, 20(6): 425-436.
- [7] 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.
- [8] Nasirzadeh F, Afshar A, Khanzadi M. Dynamic risk analysis in construction projects[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(8): 820-831.
- [9] Nasirzadeh F, AFSHAR A, KHAN ZADI M. System dynamics approach for construction risk analysis[J]. International Journal of Civil Engineering, 2008, 6(2): 120-131.
- [10] Han S, Love P, Pe N A-Mora F. A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011.
- [11] 闫国栋.基于系统动力学的建设工程风险管理研究[D].大连理工大学,2007.
- [12] Yaghootkar K, Gil N. The effects of schedule-driven project management in multi-project environments[J]. International Journal of Project Management, 2012, 30(1): 127-140.
- [13] Pena Mora F, Han S, Lee S, et al. Strategic-operational construction management: Hybrid system dynamics and discrete event approach[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2008, 134(9): 701-710.
- [14] 王宇静.一种基于系统动力学的项目管理方法[J].统计与决策,2010(12):34-36.
- [15] Khanzadi M, Nasirzadeh F, Alipour M. Integrating system dynamics and fuzzy logic modeling to determine concession period in BOT projects[J]. Automation in Construction, 2012, 22: 368-376.
- [16] Peter S. The fifth discipline[J]. The Art & Practice of Learning Organization. Doubleday Currence, New York, 1990.

作者简介:

任天翔(1985-),男,硕士研究生,研究方向:建设工程管理,复杂项目管理;

乐 云(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向:建设工程管理,复杂项目管理。