

基于系统动力学的建设项目工期控制模型研究

常金贵

(西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 首先分析了建设项目工期的影响因素, 确定工期控制系统界限。基于理论研究与实践之间的差异, 做出模型的相关假设, 构建了包括施工过程子系统、控制目标子系统、资源管理子系统、工程表现子系统四个子系统模型的建设项目工期控制模型, 并对每个子系统模型进行了深入的分析。最后以西安北客站为例进行实证分析, 分别对项目工期、成本、累计返工程量进行仿真, 研究结果表明所建立的建设项目工期控制模型对项目运行模拟后拟合程度比较高, 能较好的反映项目实际进展状况。

关键词: 工期控制; 建设项目; 系统动力学

中图分类号: TU721.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)01-0147-08

Research on the schedule control model of construction project based on system dynamics

CHANG Jingui

(School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Firstly the influence factors of the construction project schedule is analyzed, and then the limit for a project control system is determined. Based on the difference between the theory and practice, the assumptions of the model is made, the construction project schedule control model, including the four subsystems of construction process, control target, resource management, project performance is constructed, and the model of each subsystem is analyzed. Finally the project schedule, cost, cumulative rework quantity of the xi'an north railway station as an example is simulated respectively. The result shows that the fitting degree of the established construction project schedule control model is higher, which can better reflect the actual project progress.

Key words: schedule control, construction project, system dynamics

工期控制在整个建设工程项目目标控制系统中处于协调和带动其他工作的主导地位, 在工程项目管理中具有举足轻重的作用。它是监控施工过程中各种不确定因素进而减少对施工工期不利影响的根本, 是促进施工成本的最小化和资源消耗的均衡化, 提高工程经济效益的重要手段, 是保证按时完成施工任务, 合理安排资源供应的重要措施。从项目管理体系本身的发展来看, 工期控制在项目管理的初级发展阶段很大程度上代表着项目管理本身, 工期控制的成功与否直接关系到整个项目的成败^[1]。而在实践中工期延误是项目管理常见的问题之一, Morris 和 Hough 在 1987 年对项目管理的现实进行调查表明: 大量项目存在工期延误的现象, 通常超出计划值的 40%~200%。工期延误导致工程项目进度、质量和投资目标失控, 造成项目建设各方发生纠纷, 对建设项目的经济效益和社会效益有着举足轻重的影响。

关于建设项目工期控制的研究已取得一些研

究成果, 王家远等通过收集深港两地 515 个公共建设项目的工期实际数据, 建立了评估工期延误风险的定量模型, 识别出了影响建设工期的前 15 位风险因素, 这些风险因素分别来自业主、承包商、分包商、政府部门及其他 5 个方面^[2]。张东海和王爱和在补充现有的评价指标的基础上对传统赢得值技术进行改进, 将之运用在项目进度绩效管理^[3]。徐志胜等针对特大桥梁工程施工过程中受各种风险的影响导致施工工序持续时间具有随机性的特点, 提出了采用逻辑关系确定、活动持续时间不确定的网络计划 PERT 法来进行施工进度风险评估^[4]。刘晓君和刘新科将 PERT 技术和模糊数学相结合, 建立了属于 7 个工期风险等级的隶属度函数, 最后依据每一个具体项目的工期变动范围与期望值的比值, 对项目的工期风险水平进行模糊等级评价^[5]。以项目工作分解、网络计划技术和赢得值法为主的传统项目工期管理方法是在工程项目建设开工前, 对项目的整个建设过程制定详细的进度计划或者通

过对工期进行优化来确定合理工期,虽然能够对项目工期进行有效的控制,但它们都存在着封闭性和静态性的缺点^[6]。王宇静认为传统项目管理方法存在缺乏对项目动态性的认识 and 无法处理项目复杂性问题两方面的缺陷^[7]。建设工程项目内部诸要素会动态地互相作用,项目与环境也不断互相影响。因此不但要在项目实施时不断地调整进度计划,更要求在项目工期管控中考虑到项目的动态性问题。系统动力学(SD—System Dynamics)是一种研究系统信息反馈的方法,能够有效解决复杂性、动态性系统问题,而建设项目管理本身就是一个典型的动态的、复杂的、非线性变化的系统。因此,本文将系统动力学的方法应用到工期控制的研究中,旨在建立一套能够对建设工程项目工期有效控制的方法,为项目管理人员提供管理决策方面的参考和建议。

1 建设项目工期控制系统界限

根据系统动力学的定义,系统的界限是指该系统研究的范围,它规定了形成特定动态行为所应包含的最小数量的单元。本文构建建设项目工期控制SD模型应该将项目工期的相关影响因素考虑在内,因此首先对工期的影响因素进行分析。

1.1 与人有关的影响因素

在工程项目的建设过程中,人是其实施的管理者,决策者和具体的操作者。人的素质水平的高低将直接或间接的影响工程项目三大目标的实现水平。在工程项目的建设过程中,各岗位人员的操作水平、技术水平、管理水平、职业道德、接受教育及培训水平的高低等都会对工程项目三大目标的实现产生一定的影响。在工程项目三大目标的管理过程中,人的影响因素具体分析如下:

①施工操作人员

在工程项目的一线施工过程中,施工操作人员的操作熟练程度,工作时间的长短,工作经验积累的多少,其工作的责任心以及工作时的情绪等都会对施工项目的工期产生影响。

②施工技术人员

在工程项目的一线施工过程中,技术员的技术水平,文化知识水平,以及学习能力,对技术难题的解决水平,其工作的责任心以及工作时的情绪等都会对工程项目完工的工期产生重要的影响。

③施工管理人员

在工程项目管理过程中,施工管理人员的管理

水平对整个项目三大目标的实现与否产生重要的影响。施工管理人员的价值观,协调能力,处理突发事件的水平,与下属及周围人员相处的好坏,以及他们之间在情感上的相悦性,其工作的责任心以及工作时的情绪等都会对工程项目整体管理的水平产生重要的影响。

1.2 与生产要素配置有关的影响因素

①材料的因素

在项目建设过程中,材料供应是否及时,选用的建筑材料是否合理,性价比是否最优,购买的半成品,成品材料是否经过质量检验,是否达到合格的标准,以及材料在保管过程中是否得当等问题都将对工程项目的质量,承载力及抗震能力以及项目的外观等产生直接或间接的影响,从而影响项目工期。

②机械设备的因素

在工程项目的建设过程中,机械设备的选用是否恰当以及其使用是否正确都会对建设项目产品的进度产生重要的影响。机械设备的质量、性能、操作的安全性等都会对工程项目实施过程中的进度产生较大的影响。

③施工工艺方法的因素

在工程项目施工过程中,施工方案的合理性、先进性以及技术措施的恰当运用,都会对工程项目的施工质量水平有较大的提高。大力推进采用新的工艺,新的方法,以及新的技术,通过不断提高工艺技术水平来保证建设项目的质量,提高安全性能的指标和缩短建设工期等。

1.3 社会因素

对于一个施工单位来说,其所承包的工程项目一般都是异地或就地施工,而且工程项目的参与者众多。所以,要想保证工程项目工期目标的最终实现,必须搞好各参与者之间的关系,对项目所在地的政府机构,监督管理机关,供应资金的银行以及项目建筑材料的供应商等都需要协调管理好,这样有利于项目工期的管理。

1.4 相关单位因素

①建设单位的因素

建设单位对于工程项目来说,可以说是其主人,其自身具有的建设经验、工作效率、应对突发事件所应采取的相应措施的能力以及对施工单位在项目建设过程中的支持度、配合度等都会影响工程项目工期目标的实现。

②监理单位的因素

监理单位是受建设单位的委托,为实现工程项目的目标而采取的一系列监管活动。监理单位对于自身所拥有的工程项目的监理经验、监理水平、指挥能力、协调能力、沟通能力、工作成效以及对国家标准和行业技术标准的理解掌握能力等都会对工程项目工期目标管理的成败起着重大影响。

③设计单位的因素

工程项目的每一个部件,每一个构造要求可以说都是由设计单位按照国家标准规范来设计完成的。设计单位本身所拥有的设计资质、设计人员的设计能力和经验、各专业人员之间相互配套协调能力以及对国家规定的规范标准的掌握和理解运用能力等都会对工程项目工期目标的实现起着重要的作用。

1.5 环境因素

环境因素主要包括工程项目所在地的地形、地质、水文、气象等客观的自然环境因素。

结合实际情况,考虑到运用系统动力学方法认识建设项目的内部结构与系统表现行为是研究的主要任务,在划定系统界限时,首先以实际工程情况为基础,其次根据各个变量对系统结构的相对作用不断修正,界限划分如图 1 所示,内部环境是项目自身的结构因素,外部环境是对系统起制约作用的因素,被忽略的因素属于难以量化且发生概率不大的因素系。

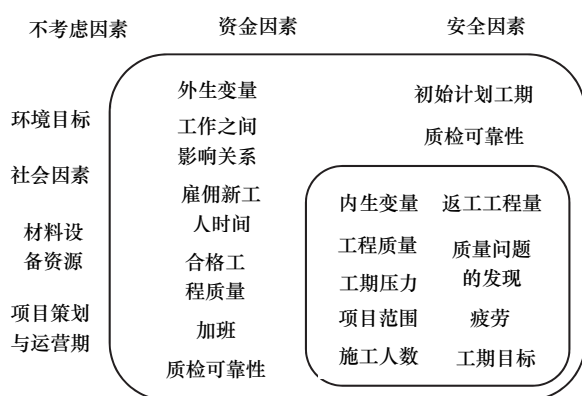


图 1 建设项目工期控制系统界限

Fig.1 Construction project schedule control system boundaries

2 建设项目工期控制模型构建

2.1 模型假设

建设项目的从立项到交付使用,期间过程非常复杂和漫长,任何建模方法都不可能建立一个与实际项目完全符合的模型。本文构建的是建设项目工期控制模型,所以只选择了与工期管理相

关的影响因素。为了更方便的研究模型的本质结构,做出相关假设如下:

假设 1: 本文研究的主要是建设项目从开工到施工再到完工,不包括前期设计阶段和后期的交付阶段。即假设这些阶段都能正常完成,不影响所研究的内容。

假设 2: 项目是以工作包为基本单元而组成的,工作包之间具有同质性,每个工作包在项目中以相同的方式流动。

假设 3: 在建立工期控制系统动力学模型时,主要考虑的是人力资源,假设施工过程中所需要的建筑材料及安装设备等能够及时到场,不影响施工进度。

假设 4: 工程上发现质量缺陷问题时一般有三种处理方案,分别是修补、返工、不处理,假设本模型出现的质量缺陷工程量一律按照返工处理。

假设 5: 假设在建设项目施工过程中外部环境相对稳定,如建筑企业的组织结构、施工技术 etc 外部因素在施工过程中不会有重大改变等。

2.2 建设项目工期控制子系统模型

根据对相关文献进行分析研究,结合建设项目施工的特点,利用系统的分解协调原理将工期控制系统划分为四个子系统分别进行研究。这四个子系统分别是施工过程子系统、控制目标子系统、资源管理子系统、工程表现子系统。各系统之间并不是相互独立的,而是相互关联和影响的。通过各子系统中相同的变量相互联系在一起,形成一个工期控制系统的总体模型。下面分别构建各个子系统模型。

2.2.1 施工过程子系统

利用系统动力学研究工程项目管理问题,通常根据工作分解结构的思想,将项目的工作分解成细小、同质的组成部分,项目管理者可以针对这些组成部分对项目实施进度管理。本文将这些细小、同质的组成部分定义为“工作包”,工作包作为项目结构的底层,代表着建设项目工程量的存量,是工程量的微观单位,施工过程子系统模型研究的就是工作包在系统中转移的物质流过程。

施工过程子系统是整个工期控制系统模型的基础,描述了建设项目从开工得到完工阶段的

系统运行方式和过程. 建设项目施工基本过程的系统动力学流图如图2所示.

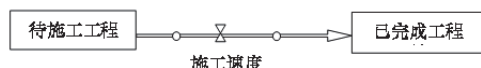


图2 施工基本过程流图

Fig.2 The basic construction process flow

工程量从“待施工程量”中, 以一定的“施工速度”流入“已完成工程量”中, 这个过程描述了工程量经历的两个基本的状态. 当然,

实际施工过程的反馈结构相当复杂, 例如, 项目实际存在着工程变更, 导致项目实际完成的工程量有所改变, 同时, 项目的质量也不能始终如一, 施工人员的疲劳或者偷工减料等行为会导致建设项目存在着质量偏差, 对于质量不合格的工程量需要进行返工, 这也造成了实际施工完成的工程量多于计划工程量. 所以针对返工行为等复杂反馈结构, 构建施工过程子系统流图如图3所示.

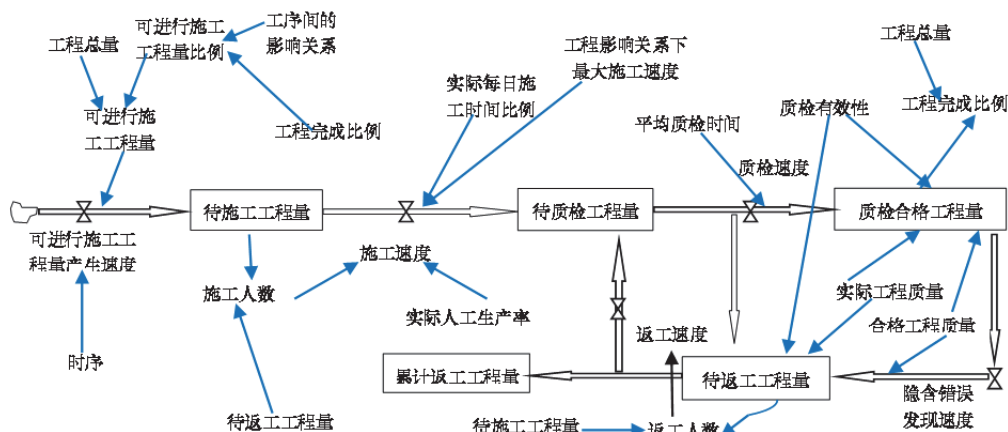


图3 施工过程子系统模型

Fig.3 The construction process subsystem model

2.2.2 控制目标子系统

建设项目工期管理的最终目标就控制项目工期, 使建设项目在计划的工期内竣工. 在施工过程中, 各种各样的质量问题导致的返工发生, 工程变更也会是项目所需完成的工程量增加, 以致实际进度滞后与计划进度. 如果这时投入赶工资源不足或资源覆盖不全面, 会使得“项目预计完工时间”不得向后推迟, 控制目标子系统正是用来描述这一过程的. 控制目标子系统模型结构如图4所示.

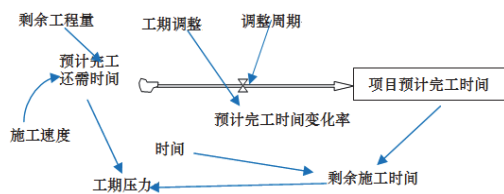


图4 控制目标子系统模型

Fig.4 The control target subsystem model

2.2.3 资源管理子系统

建设项目的实施, 就是将各种资源物化从而形成项目实体的过程. 完成一个项目需要从很多方面获取资源, 包括人力资源、材料资源、机械资源及技术资源, 这四种资源构成项目的可用资源. 其中, 建筑材料能够及时供应一定程度取决于供应商, 所以不再本模型的讨论范围内, 机械设备往往与项目

的人力资源按比例对应的, 而技术资源是难以量化的变量, 所以本系统针对人力资源的进行研究. 人力资源是影响建设项目动态行为的重要因素, 根据项目建设实际情况, 人力资源在施工过程中, 也是根据施工的需求而变化的, 在建设工程项目施工过程中, 当工程进度已经发生滞后或者出现滞后趋势时, 项目管理人员希望采取一定赶工措施来确保项目按期完工, 这时增加工人数量和增加工人的工作时间往往是最先考虑采取的措施. 因此, 资源子系统建立主要基于两个方面: 一是人员的流动性及其分配问题, 二是工作时间的变化. 综上所述, 本节将子系统分为调整人工模块和加班模块两部分分别进行建模.

(1) 调整人工模块

调整人工模块对工期的影响体现在两方面, 一是系统中的现有的人力资源总量, 二是人力资源的分配. 调整人工模块结构见图5.

人力资源总量严重影响着项目工期, 当工程刚开始时, 由于工作面的限制以及工作间影响关系的限制, 不会安排所有的人力资源一次性进场, 只会安排一定比例的工人进场施工, “初始人工分配率”表示项目刚开工时初始人工数占项目是施工平均人数的比例. 随着项目进展, 当进度落后时, 产生

的工期压力促使项目管理人员采取赶工措施, 由于现有成熟人工不足, “需要人工数”大于“现有总人工数”, 产生人工缺口, 这时项目管理人员按照一定的“调整人工意愿”采取引入新员工的措施, 调整人工意愿在为 0~1 范围内取值. 新雇佣的工人相比经验丰富的成熟工人来说, 人均生产率和施工质量要比成熟工人低一些, 这里既有对工程建设项目的熟悉程度不够以及对施工组织的认识了解

不足的原因, 也有生产技术上的原因和其工人的配合默契程度等原因. 所以, 新员工需要一定时间的培训和适应, 熟悉项目环境, 为成为成熟工人获取经验. 当然, 工人也不是一味地增加, 而是保持一种柔性状态, 部分工人会因为各种原因在项目进行中以一定的转出速度流出, 这其中既包括成熟工人转出也包括新工人转出.

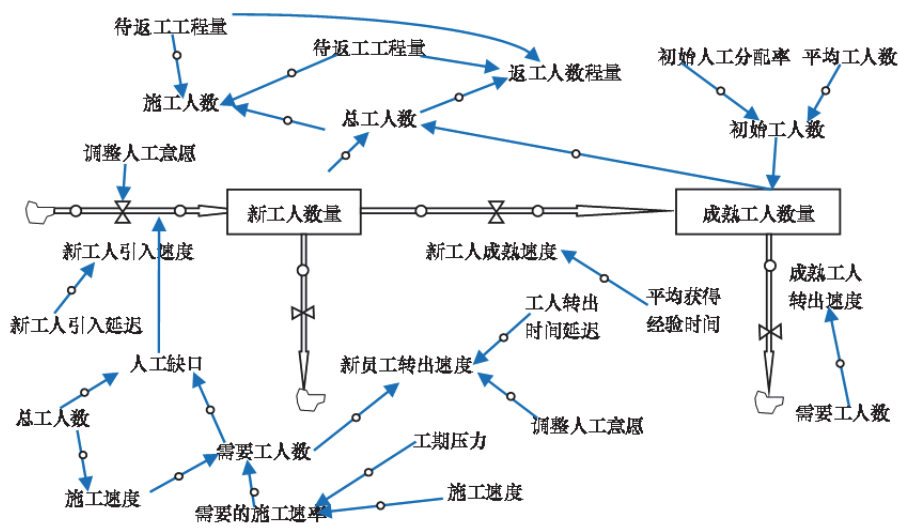


图5 调整人工模块模型
Fig.5 Adjustment of artificial model

(2)加班模块



图6 加班模块结构图
Fig.6 Overtime module structure diagram

建立加班模块, 根据工期压力计算出要求的施工速度, 结合施工人数, 将工期压力转化为加班, 以增大劳动生产率, 进而加快施工速度追赶工期. 其施工速度等于实际施工人数 \times 加班率 \times 劳动生产率. 一般地, 加班措施综合考虑到可能采取夜间施工以及工人的生理极限, 一天设定最多为 2 个班制, 即最大加班时间为 8 h. 又加班措施追赶进度的同时, 又会给项目带来一定的负作用, 加班会导致疲劳, 一方面影响工人的劳动生产率, 即同样的工作时间, 工人在加班时工作效率会有所降低, 另一方面, 加班会导致工程质量有所下滑, 产生额外的返工. 加班模块结构如图 6 所示.

2.2.4 工程表现子系统

建设项目的建设目的不仅仅是要求项目按时

完工, 还要满足工程的质量、成本与资源的使用效率要求. 在施工过程中, 工程质量、工程成本和生产率的变化与项目工期是密切相关的, 它们之间相互作用和影响, 本系统分别描述工程质量、工程成本和生产率在系统中的变化.

(1)工程质量模块

工程质量和工期关联密切, 一方面, 如果在项目实施过程中进行严格的质量控制, 确保实现项目预定的质量要求和功能, 可以大大减少实施过程中的返工工程量, 不但能够缩短工期, 而且可以避免不必要的返工费用, 有效的控制项目成本. 另一方面, 加快施工进度往往会打乱工程原有的施工计划安排, 使建设工程施工的各个环节之间出现脱节现象, 增加质量控制和施工协调的难度, 会对工程质量造成不利影响或留下工程质量隐患. 本文建立了工程质量模块如图 7, 研究工程质量在系统中的变化.

(2)工程成本模块

实际工程中, 工程成本压力会直接影响到项目工期. 当施工进度滞后时, 项目管理人员采取赶工措施, 如加班、高价雇用劳务、高价进料和增加租

用设备等,势必导致工程成本增加,而且在工程赶工过程中也容易使工程质量下滑,导致返工工程量增加,从而增加成本。工程成本模块模型结构如图8所示。

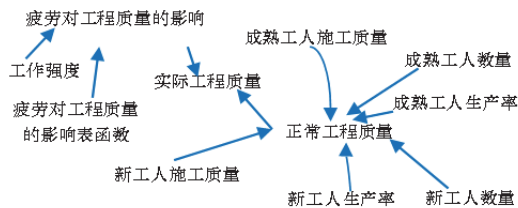


图7 工程质量模块结构图

Fig.7 The project quality module structure

从图8中可以看出,影响工程施工速度的因素众多,主要是施工人数、人均生产率和工作时间三类主要变量,这三类变量都受人的因素影响,且它们之间相互影响,所以导致生产率子系统非常复杂,如图9所示。

(3) 生产率模块

从图9中可以看出,影响工程施工速度的因素众多,主要是施工人数、人均生产率和工作时间三类主要变量,这三类变量都受人的因素影响,且它们之间相互影响,所以导致生产率子系统非常复杂。

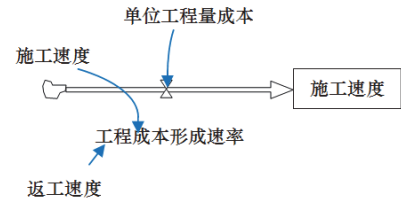


图8 工程成本模块结构图

Fig.8 The project cost module structure

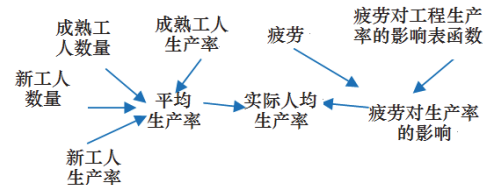


图9 生产率模块结构图

Fig.9 Productivity module structure

2.3 建设项目工期控制模型

前文将建设项目系统划分为4个子系统分别进行分析,在详细分析各子系统的基础上建立了各子系统的系统动力学模型,现在将四个子系统进行合并,通过它们之间的相互关系,把它们的系统动力学模型进行联接与融合,可以得到利用系统动力学的仿真软件 Vensim 建立的最终的建设项目工期控制的系统动力学总模型,如图10所示。

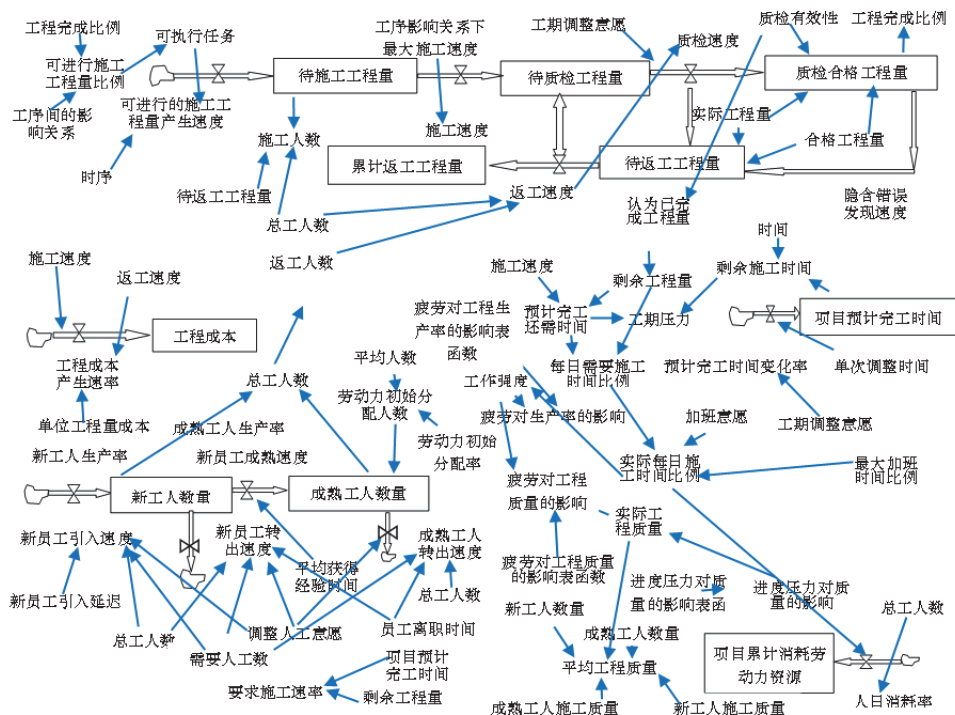


图10 建设项目工期控制的系统动力学总模型

Fig.10 The construction of the system dynamics model of the total project duration contro

3 实证研究

3.1 工程概况及案例相关说明

3.1.1 工程概况

西安火车北站为国家特大型铁路旅客站,位于西安城区北部即城市中轴未央路、城市三环路及绕城高速公路交通枢纽衔接处。距西安市市中心钟楼12 km;距咸阳市中心21 km;距西安咸阳国际机场

20 km. 总建筑面积约 33.8 万 m², 客运用房建筑面积 16.5 万 m². 北站站房东西向(含无柱雨棚)宽 434.5 m, 南北向长 550.4 m, 为地下二层, 地上二层结构. 其中地下一层为北站站房的国地铁出站通道, 地下二层为南北走向的地铁二号线站台层, ±0.000 层为国铁基本站台层, 地上二层为高架候车层, 站场设计规模为 18 台 34 线. 雨棚建筑面积为 9.4 万 m², 为单层钢结构, 位于主站房的两侧, 柱为钢管混凝土柱, 采用实腹钢梁. 吊顶为铝合金条型板. 顶面为直立锁边镀铝锌钢板屋面系统, 3 m 厚铝单板檐口封边.

3.1.2 研究对象选取

项目建设过程中, 关键线路上的工作被称为关键工作, 关键工作对项目工期的影响至关重要, 无论关键工作的实际进度提前或滞后, 都会对项目总工期产生影响. 项目施工过程中, “M 轴以北东侧雨棚屋面工程” 实际进行施工的工期为 69 d, 关键线路法 (CPM) 进度计划编制为 61 d, 工期发生延误 8 d. 由进度计划网络图可知, 该工程位于关键线路上, 一旦发生延误, 若不采取控制措施, 将导致整个建设项目的工期延误, 所以选择 “M 轴以北东侧雨棚屋面工程” 作为系统分析研究的对象. 已知该段工程共完成 2 602 726 m², 初始劳动力配置为 200 人, 工程成本分析见表 1.

表 1 工程成本分析表
Tab.1 Project cost analysis

项目	工程成本/万元	成本/万元·m ²
总成本	3 039.6	1 167.9
镀铝锌钢板屋面成本	2 832.4	1 088.24
特位强隔气膜	43.5	16.7
沥青玻璃棉毡保温隔热	64.6	24.8
3 厚镀锌铝板自防水	1 166.4	448.2
型钢檩条制作	314.1	120.7
钢天沟及压型钢板楼板	281.3	108.1
中空玻璃天窗	884.0	339.7
防水透气膜	78.4	30.1
直立锁边镀铝锌钢板屋面系统	101.0	38.8
铝合金装饰条成本	15.5	6.0
不锈钢天沟成本	90.8	34.9

3.2 模型初始运行分析

3.2.1 模型参数设置

系统动力学模拟的是同质的物质流流动的过程, 而建设项目本身的物质流种类相对复杂, 所以首先进行物质流的单位转换. 根据工作分解结构原理, 设定施工完成 1 m² 的屋面工程的工作量为 1 作

包, “M 轴以北东侧雨棚屋面工程” 的工程总量为 26 027 工作包, 初始计划的人均生产率为 2.13 工作包/日, 初始人工全部为熟练工人, 初始工人总量为 200 人, 单位工程量成本=0.116 7 万元/工作包, 根据向项目管理人员咨询实际情况, 设加班意愿为 0.5.

3.2.2 模拟结果分析

应用案例参数代入建立的工期控制系统动力学模型, 利用 Vensim PLE 软件进行仿真, 模拟工程项目的执行的情况.

(1) 工程项目工期模拟分析

如图 11 可以看出, 该项工程经过工期控制系统动力学模型的模拟, 在 67 d 时 “工程完成比例” 为 1, 项目完工时间为 67 d, 与实际工期 69 d 相比, 模拟结果属于可以接受范围.

(2) 工程建设项目成本模拟分析

对 “工程成本” 的模拟结果见图 12, 随着工程进展, 工程成本最终累计达到显 3 452.25 万元, 相比实际成本 3 039.6 万元, 模拟结果属于合理范围.

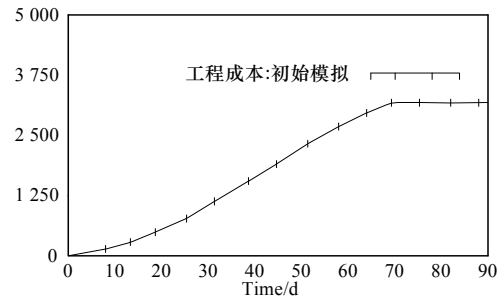


图 11 工程完成比例仿真图
Fig.11 Project completion rate simulation

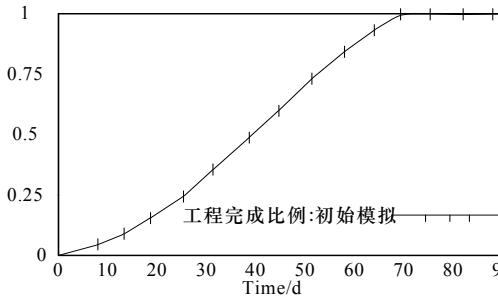


图 12 工程成本仿真图
Fig.12 Project cost simulation

(3) 累计返工工程量模拟分析

对 “累积返工工程量” 进行模拟, 结果如图 13 可以看出, 随着项目的进展, “累积返工工程量” 最终达到 15 726 工作包, 占工程总量的 10.13%. 返工已经成为影响项目进度的重要因素.

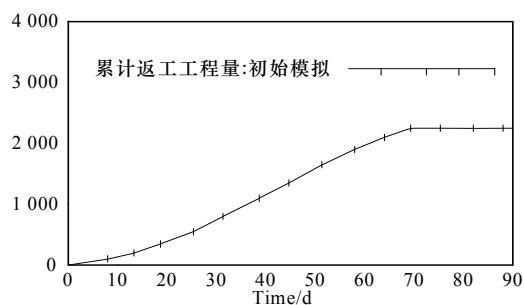


图13 工程累计返工仿真图

Fig.13 Project cumulative rework simulation

4 结论

通过以上的模拟仿真可知,建立的建设项目工期控制系统动力学模型能够客观实际地反映建设项目自身的演变趋势,但这是基于已完工的项目实际信息得出的模拟结果,对于项目管理人员,他们希望预先判断管理决策对项目产生的影响,更快、更全面的了解项目进展情况.系统动力学模型在这方面有明显的优势,它可以通过改变模型中的变量,模拟各种情境下的项目发展趋势,使项目管理人员提前了解决策对项目产生的影响,为项目管理人员节约大量的管理滞后时间,达到对项目工期动态管控的效果.尽管应用本文所建立的建设项目工期控制系统动力学模型对项目运行的模拟结果拟合程度比较高,但是与实际情况还是存在一定偏差.这是因为系统分析的影响项目运行的因素具有局限性,不可能将所有的影响因素划分到系统界限内,模型结构不可能十分完善,虽然通过了严密的逻辑分析和推理,但还是不能与现实完全吻合.

参考文献 References

- [1] KERZNER H. Project Management: A System Approach To Planning, Scheduling, and Controlling[M]. Beijing:

Publishing House of Electronics Industry, 2002.

- [2] 王家远, 申立银, 郝晓冬. 公共建设项目工期延误风险研究[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2006, 23(4): 303-308.
WANG Jiayuan, SHEN Liyin, HAO Xiaodong. Study on risks of time delay in the execution of public sector projects[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2006, 23(4): 303-308.
- [3] 张东海, 王爱和. 改进赢得值在项目进度绩效管理中的运用[J]. 工程管理学报, 2012, 26(2): 66-69.
ZHANG Donghai, WANG Aihe. Improved Earned Value in the Project Schedule Performance Management[J]. Journal of Engineering Management, 2012, 26(2): 66-69.
- [4] 徐志胜, 宋平, 贺志军, 等. PERT法评估特大桥梁工程施工进度风险[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(1): 83-87.
XU Zhisheng, SONG Ping, HE Zhijun, et al. Evaluation of Construction Progress Risk Using PERT Method in Huge Bridge Project[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(1): 83-87.
- [5] 刘晓君, 刘新科. 基于PERT与模糊数学的项目工期风险等级评价模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(4): 547-550.
LIU Xiaojun, LIU Xinke. Research on the risk evaluation model of project duration based on PERT and Fuzzy Theory[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2007, 39(4): 547-550.
- [6] LOVE P E D, HOLT G D, SHEN L Y, et al. Using system dynamics to better understand change and rework in construction project management systems[J]. International Journal of Project Management, 2002(20): 425-436.
- [7] 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.
WANG Yujing. A project management method based on system dynamics[J]. Statistics and Decision, 2010(12): 34-36.
- [8] 王宇静, 吴清. 复杂工程项目进度控制的系统动力学仿真方法研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
WANG Yujing, WU Qing. The Research on System Dynamics for Complex Construction Projects[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

(本文编辑 沈波)