

文章编号: 1000-5013(2010)06-0692-05

考虑施工暂停的建设工程承包商赶工模型

刘迅, 王卓甫

(河海大学 工程管理研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 结合传统的关键路线法网络压缩的数学模型, 研究不确定因素引起的工程施工暂停造成工期延迟的承包商赶工问题. 首先, 给出承包商赶工模型研究的基本假设及前提; 然后, 在此基础上构建存在施工暂停考虑项目无规定截至日期的承包商一般赶工模型. 通过对模型的分析与求解可以看出, 理性的承包商会选择增加初始时的赶工时限, 从而减少中断施工对项目的影响. 即施工暂停时, 承包商的赶工时间应大于基本方案所确定的压缩工期下限, 从而给出了最优的赶工策略, 提出对施工暂停事件的最佳应对策略.

关键词: 建设工程; 施工暂停; 赶工模型; 网络计划; 承包商

中图分类号: TU 72

文献标识码: A

建设工程在施工过程中存在大量的不确定性因素, 如原材料供应、气象、施工机械等, 使得由各种确定性模型和方法得到的优化性能指标降低甚至不再可行. 因此, 在处理工程施工进度问题时, 施工过程中存在的不确定性因素是必须要考虑的. 目前, 尽管项目进度理论在现代组织中发挥着重要作用, 但面临变化的项目环境时, 现有的技术和方法依然遇到了挑战. 其最主要的工具, 如关键路线法(CMP)和计划评审法(PERT)仍没能在前提假设方面得到改善并发挥其应有的作用^[1]. 在工程施工过程中, 分析不确定因素的原因在于消除其带来的影响或后果. 文[2]对影响工程项目工期的不确定性因素进行了分析, 在广泛调查的基础上寻求工程延误主要因素, 并提出建立能为工程项目服务的工期预警模型. 文[3]研究了不确定因素对项目费用的影响, 并应用 Bayesian 方法对项目的总费用进行预测. 文[4]针对标准环境中不确定性因素研究的不足, 运用概率风险判定方法研究了项目实施过程中突发事件的发生概率及对项目费用的影响程度. 文[5-8]研究了干扰事件对项目交付工期和费用动态影响, 运用系统动力学的理论与方法, 建立了相应的动态调控模型并给出相应的算法. 文[9]考虑了活动工序持续时间确定下, 工作过程中一些工序暂停随机时间段的平行机调度的总工期最短延误时间问题. 在实际的施工过程中, 建立贴近实际的模型和设计相应的合适有效的算法应该是这一问题研究的重点, 而缺少更多符合实际并满足施工承包单位要求的模型, 恰恰是目前对工程进度压缩问题研究的一个欠缺. 本文通过构建存在施工暂停、项目无规定截至日期的承包商赶工模型, 以及通过对模型的分析与求解, 提出对施工暂停事件的最佳应对策略.

1 基本假设与定义

为了研究方便, 在不影响结论准确性的基础上, 给出6点基本假设和定义.

(1) 项目实施网络计划中的部分资源是资源驱动的. 在一定限度内, 通过增加资源投入可以压缩作业活动的持续时间, 从而缩短工期. 一般地, 项目压缩成本是项目工期的分段线性凸函数^[10], 可利用二次函数 $\beta(\cdot)$ 近似地描述这一关系^[11-12]. 即假定在 t 时刻工期需压缩 x_t 周期, 所增加的直接压缩费用为 $\beta(x)$. 项目决策的初始阶段计划压缩的工期为 x_0 时, 所需要的直接压缩费用为 $\beta(x_0)$. $\beta(\cdot)$ 在整个工期周期内是连续可微的, 有

收稿日期: 2010-05-02

通信作者: 王卓甫(1957-), 男, 教授, 主要从事工程风险管理的研究. E-mail: zfwang@hhu.edu.cn.

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(06BJY085)

$$\frac{d\beta(x)}{dx} \geq 0, \quad \frac{d^2\beta(x)}{dx^2} \geq 0 \tag{1}$$

直接压缩费用函数是递增的凸函数. 也就是说, 工期压缩越大, 其需要的直接压缩费用越高, 且随着压缩工期的逐渐提高, 直接压缩费用增加的也越来越快.

(2) 直接费用和边际直接费用是在时刻 t 承包商计划压缩工期数的单调非递减函数. $\phi(\cdot)$ 表示任意 $t > 0$ 时刻的计划压缩费用函数, 对所有 $x \geq 0$ 都有 $\beta(x) \leq \phi(x)$. 这一假设反映承包商在项目施工过程中可以利用的自由度.

(3) 承包商在 $t = 0$ 时刻收到风险事件可能在施工过程中发生的信息. 如果这一风险事件发生将使所有的施工活动中断, 假定中断时限持续 τ 时间周期(图 1), 事件发生期间工程不进行施工, 直接费用保持不变. 但是, 需要对项目进行日常的管理, 单位工期的管理费用 C_1 为常数, 施工中断期间工程的管理费用为 $C_1\tau$.

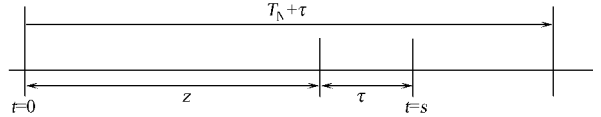


图 1 工程进度图
Fig. 1 Project progress

(4) 项目实施网络计划中, 承包商收到风险事件可能在此后的施工过程中, 其发生的时刻至中断施工的事件发生这一时间段 z 服从指数分布, 即 $z \sim \exp(\lambda)$. 此时, $1/\lambda$ 是 $t = 0$ 时刻至中断施工的事件发生的期望平均时间, 即密度函数 $f_z(t) = \lambda \exp(-2\lambda)$. 如果中断施工的事件发生, 则期望发生的时段为

$$\hat{z} = \lambda \int_0^{T_N - x_0} z \exp(-2\lambda) dz = \frac{1 - \exp(-2\lambda)[1 + \lambda(T_N - x_0)]}{\lambda}. \tag{2}$$

(5) 考虑在整个工程施工过程中仅发生一次暂停施工的事件, 且造成暂停施工的原因属于承包商施工承包风险, 发生的额外费用由承包商自己承担的情况.

(6) 质量保持在同一水平, 即工期的压缩不对质量产生影响.

2 考虑施工暂停工期压缩模型

假设一个工程施工项目中, 不对任何活动进行压缩时的正常直接费用总额为 C_N , 对应正常的工期为 T_N . 在实际中, 按正常活动周期所确定的项目工期, 往往不能满足工程进度的实际需要, 这就需要对网络中的某些活动的周期进行压缩, 这种压缩是以资源投入量的增加为代价的^[13]. 同时, 活动的压缩时间具有刚性, 即不管再投入多少资源, 压缩时间也不可能再被缩短^[14], 此时项目工期达到最短极限 T_c , 对应最大直接费用 C_c . 不考虑风险事件发生的情况下, 项目的总费用在压缩工期 x_0 处最小, 即

$$T_c(x_0) = C_N + \beta(x_0) + C_1(T_N - x_0), \quad 0 \leq x_0 \leq T_N - T_c. \tag{3}$$

对式(3)进行一阶求导, 很容易求出优化工期, 则有

$$\frac{d\beta(x_0)}{dx_0} = C_1, \tag{4}$$

式(4)表明, 当项目工期压缩所引起的边际直接费用的增加等于单位工期的间接成本时, 项目的总费用达到最小值. 考虑项目执行过程中可能存在使项目中断的事件发生, 项目的完工工期 M 为

$$M = \begin{cases} T_N - x_0, & z \geq T_N - x_0, \\ T_N + \tau - x_0 - x_z, & z < T_N - x_0. \end{cases} \tag{5}$$

因为风险事件在施工过程中发生的概率为 $1 - \exp(-\lambda(T_N - x_0))$, 则项目完工的期望总工期为

$$E(M) = (T_N - x_0)\exp(-\lambda(T_N - x_0)) + (T_N + \tau - x_0 - x_z)[1 - \exp(-\lambda(T_N - x_0))] = T_N + \tau - x_0 - x_z - (\tau - x_z)\exp(-\lambda(T_N - x_0)). \tag{6}$$

在 $t = 0$ 时刻, 承包商必须决定最初的压缩工期 x_0 , 以及计划将来风险事件发生时的可能赶工工期. 如果没有中断施工的事件发生, 则没有额外的赶工费用增加. 此时, 项目总费为 C_{NR} , 即

$$C_{NR} = C_N + \beta(x_0) + C_1(T_N - x_0). \tag{7}$$

但是, 如果有中断工程施工的事件发生, 承包商需针对风险事件在预期压缩 x_0 的基础上做出期望总费用最小时的压缩工期 x_z . 此时, 总费用为 C_R , 即

$$C_R = C_N + \beta(x_0) + C_1(T_N + \tau - x_0 - x_z) + \phi(x_0 + x_z) - \phi(x_0). \tag{8}$$

考虑施工中风险事件发生的概率服从密度函数 $f_z(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, 则项目的期望总费用为

$$E(T_C(x_0, x_z)) = C_N + \beta(x_0) + C_1(T_N - x_0) + C_1(\tau - x_z) \{1 - \exp(-\lambda(T_N - x_0))\} + \int_0^{T_N - x_0} [\phi(x_0 + x_z) - \phi(x_0)] \lambda \exp(-\lambda z) dz.$$

$s.t. \begin{cases} 0 \leq x_0 + x_z \leq T_N - T_C, \\ 0 \leq x_z \leq \min(\tau, T_N - x_0 - z). \end{cases} \tag{9}$

对式(9)自变量 x_z 进行求导, 则对自变量 x_z 的偏导函数为

$$\frac{\partial E[T_C]}{\partial x_z} = \left[\frac{\partial \phi(x_0 + x_z)}{\partial x_z} \right] [1 - \exp(-\lambda(T_N - x_0))]. \tag{10}$$

对于任意 $x_0 < T_N$ 都有 $[1 - \exp(-\lambda(T_N - x_0))] > 0$ 成立, 只有当 $\frac{\partial \phi(x_0 + x_z)}{\partial x_z} = C_1$ 上式等于 0 才成立

通过假设有 $\frac{\partial \phi(x)}{\partial x} \geq 0$ 以及 $\frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2} \geq 0$ 成立, 因此, 对于任意固定的 x_0 , 式(9) 是自变量 x_z 的非减函数.

对于 $z > 0$ 的任意时刻, $x_z^* = 0$ 时, 式(9) 有最小值, 因此, 任何一个理性的承包商在 $t = 0$ 之后的任何时刻都不做进一步压缩工期的计划.

假定 $\beta(x) = c_0 x^2$, 因为 $x_z^* = 0$, 期望总成本 $E[T_C(x_0)]$ 有

$$E[T_C(x_0)] = C_N + c_0 x_0^2 + C_1(T_N - x_0) + (C_1 \tau) \{1 - \exp(-\lambda(T_N - x_0))\}. \tag{11}$$

对自变量 x_0 求导, 并令其等于零, 有

$$2c_0 x_0 - (C_1 \tau \lambda) \exp(-\lambda(T_N - x_0)) = C_1. \tag{12}$$

对式(12) 进行求解, 得不到确定的数值, 可以利用泰勒级数展开式求得 x_0 的近似值 x_0^* . 即

$$x_0^* \approx \frac{1 + \lambda \tau C_1 \exp(-\lambda T_N)}{\frac{2c_0}{C_1} - \lambda^2 \tau \exp(-\lambda T_N)}. \tag{13}$$

如果风险事件的发生概率为零, 总费用函数式(11) 变为式(3), 则此时最优的工期压缩可通过式(4) 求出. 但是, 如果中断施工的事件发生的概率为 1, 则式(11) 变为

$$E[T_C(x_0)] = C_N + c_0 x_0^2 + C_1(T_N + \tau - x_0). \tag{14}$$

对该式进行求导, 可得出确定中断施工的事件发生时的最优压缩工期 $x_b^* = C_1/2c_0$, 等于不考虑中断事件发生时的最优赶工工期 x_0^* . 即 $x_0^* = x_b^* = C_1/2c_0$.

通过以上的分析可知, 在施工过程中, 若确定中断施工的事件一定发生或者一定不发生, 承包商往往仅压缩由式(4) 确定的 $x_0^* = x_b^*$ 压缩工期. $x_0^* = x_b^*$ 时的方案在此称为基本方案. 但是, 当不确定中断事件是否发生时, 承包商欲压缩的工期将大于基本方案所确定的压缩工期, 即试图在中断施工的事件发生前完成项目, 将风险事件的影响降到最低. 确切地说, 当不确定中断事件是否发生时, $x_0^* = x_b^*$ 定义了赶工工期的下限.

如果承包商有确定的信息知道中断施工的事件发生或者不发生, 那么不考虑项目截至日期的期望总成本由式(9) 表示, 并由式(4) 确定基本赶工工期方案. 但是, 如果承包商不确定在施工过程中是否发生中断施工的事件, 根据以上的推算, 承包商可以在基本工期压缩方案的基础上增大, 以使期望总费用的值达到最小. 承包商此时完成项目所增加的预期费用支出等于额外压缩工期的费用, 即

$$E[\Delta T_C] = E[T_C(x_0^*)] - E[T_C(x_0)] = \beta(x_0^*) - \beta(x_0) - C_1(x_0^* - x_0). \tag{15}$$

式(15) 中: x_0 可由式(3) 求出; 如果 $\beta(x) = c_0 x^2$, 则 x_0^* 可由式(10) 求出. 可以看出, $E[\Delta T_C]$ 对中断时间长度 τ 是最敏感的, 而对单位间接费用 C_1 和 c_0 敏感性则相对弱些. 随着 λ 的增大(减小), 中断施工事件发生的可能性也随之增加(减少), 从而使 x_0^* 与 x_0 之间的差减小, 进而使承包商完成项目所增加的预期费用支出 $E[\Delta T_C]$ 减小.

3 算例分析

某泄洪工程施工项目, 每周间接费用为 10 万元, 压缩 x 工期所需要的直接费用 $\beta(x) = c_0 x^2$, 压缩

费用系数 $c_0 = 1.75$ 万元, $\lambda = 0.02$, 正常模式完工工期 $T_N = 50$ 周, 期望中断时间 $E(\tau) = 5$ 周.

不考虑中断事件发生情况下, 压缩工期 $x_0 = C_1/2c_0 = 2.86$ 周, 也就是说, 承包商最优的完工工期为 $T_N - x_0 = 50 - 2.86 = 47.14$ 周. 但是, 考虑到风险事件的威胁, 承包商需考虑进一步压缩工期. 当 $\tau = 5$ 周时, 求得 $x_0 \approx 3$ 周, 期望总费用增加 30.46 万元; 当 $\tau = 10$ 周时, $x_0 \approx 7.1$ 周, 期望总费用增加 60.91 万元; 当 $\tau = 15$ 周时, $x_0 \approx 3.2$ 周, 期望总费用增加 91.37 万元.

期望总费用变化与中断时限占正常百分比的关系为线性关系, 如图 2 所示. 从式(9)可以看出斜率为 $C_1\{1 - \exp(-\lambda(T_N - x_0))\}$. 因此, 正常工期 T_N 固定的情况下, 对于承包商而言, 获得中断施工事件的持续时间是至关重要的.

最优的工期压缩也与中断施工事件发生的可能性大小密切相关的. 随着 λ 的变化, 中断施工事件发生可能性的大小随之变化. 假定 λ 在 0~ 0.2 之间变化(中断事件发生的概率在 之间), 最优压缩工期的变化如图 3 所示. 当 $\lambda = 0.02$ 时, 需压缩的最优工期达到最大值为 2.97 时间周期. 此时, 风险事

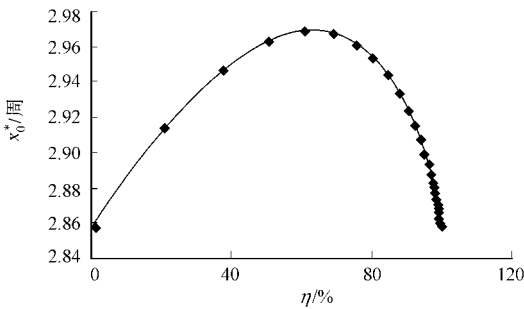
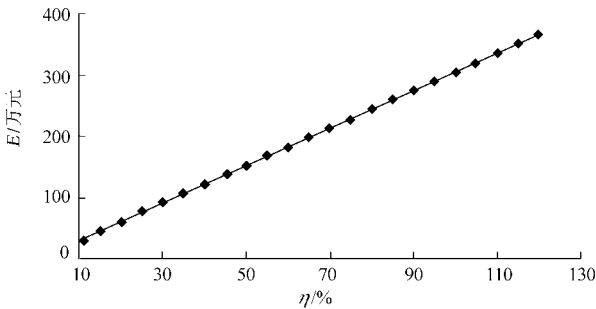


图 2 期望总费用变化与中断时限占正常工期百分比关系

Fig. 2 Expected total cost versus percentage of disruption period to normal construction period

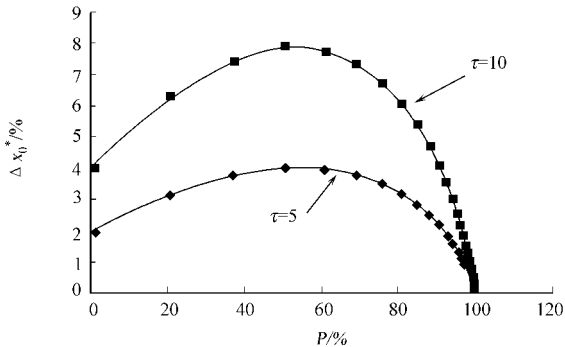
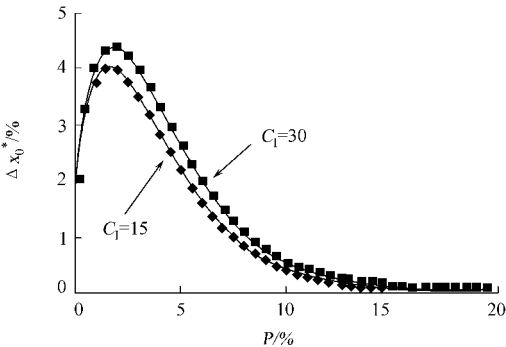
图 3 最优压缩工期与风险事件发生概率关系

Fig. 3 Project compression versus probability of disruptive event

件发生的概率(P)也达到最大 0.611. 由式(13)可以看出, 最优的压缩工期受 λ τ 及 C_1 的共同影响. 在 τ 值一定的情况下, 不同 C_1 值的 λ 在同一变动幅度(Δx_0^*)下的变化情况, 如图 4(a) 所示. 图 4 中: $z \leq T_N$. 由图 4(a) 可看出, C_1 值增加一倍时, 即每周 C_1 分别为 15, 30 万元时, 对最优压缩工期的影响(Δx_0^*)相差是很小的, 表明 x_0^* 对 C_1 的敏感性较小.

在每周间接费用 C_1 为 10 万元的情况下, x_0^* 对 τ 值的敏感程度如图 4(b) 所示. 由图 4(b) 可以看出, τ 为 10 周时的 x_0^* 变动曲线相差较大, 表明最优压缩工期对中断时限 τ 较为敏感.

由图 4 可以看出, 最优压缩工期对中断时限 τ 较为敏感. 因此对于施工单位来说, 在施工过程中将风险持续时间 τ 降为最低是极其重要的.



(a) 不同 C_1 值

(b) 不同 τ 值

图 4 工期压缩随风险事件发生概率变化图

Fig. 4 Compression as a function of the probability of the disruptive event

4 结束语

在施工暂停时,如何结合不确定因素对施工工序时间的影响以寻求承包商的最优赶工策略,还需要进一步研究.同时,由于没有考虑工程项目有规定截至日期,以及设立奖惩机制时的承包商赶工情况,因此,今后有必要进一步研究这一问题.

参考文献:

- [1] WALKER E D. Planning and controlling multiple, simultaneous, independent projects in a resource constrained environment[D]. Georgia: University of Georgia, 1998.
- [2] 张云波. 工程项目工期延误原因分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2003, 24(4): 369-373.
- [3] PALOMO J, RIOS I D, RUGGERI F. Dynamic models with expert input with applications to project cost forecasting [R]. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos, 2004.
- [4] JESUS P, DAVID R I, FABRIZIO R. Modeling external risks in project management[J]. Risk Analysis, 2007, 27(4): 961-978.
- [5] EDEN C T, WILLIAMS F, ACKERMAN, et al. The role of feedback dynamics in disruption and delay on the nature of disruption and delay (D & D) in major projects[J]. The Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(3): 291-300.
- [6] HOWICK S, EDDENC. The impact of disruption and delay when compressing large projects: Going for incentives [J]. The Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(1): 29-34.
- [7] WILLIAMS T. Seeking optimum project duration extensions[J]. The Journal of the Operational Research Society, 1999, 50(5): 460-467.
- [8] WILLIAMS T, EDEN C, ACKERMAN F, et al. The effects of design changes and delay on project costs[J]. The Journal of the Operational Research Society, 1995, 46(7): 809-818.
- [9] MANUEL L, PILAR L, PÉREZ A, et al. Minimizing weighted tardiness of jobs with stochastic interruptions in parallel machines[J]. European Journal of Operational, 2000, 127(2): 444-457.
- [10] 汪嘉旻, 孙永广, 吴宗鑫. 收益激励的优化与最优工期的选择[J]. 系统工程, 2000, 18(3): 5-10.
- [11] DECLRP R F, HEBERT J E, VERDINI W A, et al. Nonlinear time/cost tradeoff models in project management [J]. Comp Ind Eng, 1995, 28(2): 219-229.
- [12] LI Heng, CAO J N, LOVE P E D. Using machine learning and GA to solve time-cost tradeoff problems[J]. J Constr Eng Manage, 1999, 125(5): 347-353.
- [13] 柴国荣, 洪兆富, 元文国. 基于进度优化的大型项目激励机制模型[J]. 系统工程, 2008, 26(1): 102-105.
- [14] 张静文, 徐渝, 何正文. 多模式资源约束型折现流时间-费用权衡项目进度[J]. 系统工程, 2005, 23(5): 17-21.

Model of Contractor Rush-Work Considering Construction Suspension

LIU Xun, WANG Zhuo-fu

(Research Institute of Project Management, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Combined with the traditional model of critical path method network compression, the problem of contractor rush-work is studied, which is caused by construction suspension due to uncertainties. Firstly, the basic assumptions and premises of the model about the contractor rush-work are introduced. The general model of the contractor rush-work considering suspension for the projects without deadline is established. The analysis of the model shows: the rational contractors would increase the initial time, thus reduce the impact of the construction suspension. During suspension, the rush hours of the contractor should be greater than the lower limit of compression duration, then the optimal schedule of rush-work is suggested, and the optimal response strategy to construction suspension is obtained.

Keywords: construction project; construction suspension; rush-work model; network plan; contractor

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)