

最大净收益目标下工程项目 工期、费用、质量的综合优化模型

李爱民 吴帅

(郑州大学管理工程系 郑州 450001)

【摘要】 工期、费用、质量是工程项目管理的三大控制目标,现有研究存在以下不足:工期、费用、质量权重的确定带有主观性或者试图割裂各目标之间的内在联系,且只从成本的角度静态优化,忽略了收益和资金时间价值的影响。以最大净收益为优化目标,在考虑资金时间价值、工程款支付方式、间接费用、业主奖罚金等因素的基础上建立的“工期费用质量综合优化”模型则克服了上述不足,笔者通过算例证明了模型的有效性。

【关键词】 最大净收益 工期费用质量综合优化 资金时间价值 质量的经济性

工期、费用、质量是工程项目管理的三大控制目标,它们之间存在对立统一的辩证关系。项目管理者在处理三者关系时,不能简单“加减”,而要通过目标的反复协调权衡,实现项目目标系统的整体优化。以往文献只对“工期最小”、“费用最低”、“工期费用综合优化”等“一维”、“二维”问题进行定量分析,少有学者涉及“工期费用质量综合优化”领域。

直到近年,该领域的问题才渐渐得到学者们的重视,并取得了一些研究成果。目前,解决该问题的思路主要有两种:其一,在“三维”领域利用多属性效应函数或多目标规划法建立模型;其二,利用“降低维度”的方法将“三维”问题转化为“二维”问题。采用“三维”建模法需要对工期、费用、质量之间的重要程度进行主观的权衡,会使决策结果因人而异,波动性较大,而“降低维度”法则割裂目标之间的内在联系。

然而,不论采用哪种思路,现有文献建立模型时大都只考虑活动的费用、质量与其持续时间呈连续变化的情况,而在实践中离散情况更为普遍。同时,它们大都只从成本的角度进行优化,成本最低并不意味着收益最大,即按照上述模型求得的结果未必可以使决策主体获得最大的收益。另外,这些模型大都只对数据做静态分析,忽略了资金的时间价值。为了克服上述不足,本文以承包商为研究主体,以最大净收益为优化目标,通过将工期、费用、质量三者有效地转化为净收益,建立考虑资金时间价值、间接费用以及业主的奖惩机制等以往被忽略因素的“工期费用质量综合优化”模型。

一、承包商最大净收益对工期、费用、质量的要求

一切经济实体在做出决策时,其追求的目标都是自身收益最大化。以往文献都是从成本的角度出发,几乎没有考虑收益的影响,但在实际项目中,作为决策者所追求的并不是支出最少,而是回报最大。工程项目建设是一个多组织参与的过程,参与各方所考虑的角度不同,其收益的衡量与计算的方法就不同。本文选择承包商为研究主体,其中所涉及的净收益是指承包商获得的收益与支出的费用之差。

工期、费用、质量都直接或间接地影响着承包商的净收益,例如,工期变动会影响资金的回笼、业主的奖罚金,但同时也需要支付因工期变动而增加或减少的成本;质量通过自身变动来改变质量收益和质量成本,从而影响项目的净收益;费用作为净收益的减数成为工期、质量影响项目净收益的媒介。在实践中,承包商根据净收益正负来调整自己对工期、费用、质量目标的追求,如果压缩工期获得的收益大于因此而必须支付的费用时,承包商就会缩短工期,反之不会;成本控制带来的收益大于成本控制的费用支出,则承包商进行成本控制,反之不会;提高质量带来的收益大于因此而支付的费用时,承包商就会提高质量水平,反之不会。

净收益是工期、费用、质量的有机统一,以最大净收益统领工期、费用、质量三大目标,可使工期、费用、质量具有一个客观的度量标准,更具操作性,既不割裂各目标之间的联系,也避免了过去多目标权重确定的主观性。

本文所论述的“工期费用质量综合优化”,是指承包商在合法的情况下追逐自身利益的最大化,由信息不对称等因素所诱发的恶性损害他人利益的行为不在本文的讨论范围之内。

二、工期费用质量综合优化模型的建立

1. 模型分析。 假定工程项目的有向无圈网络图 $G=(N, A)$ 采用双代号网络计划技术(AOA),其中 N 为节点(事件)集合, A 为弧(活动)集合, $|N|=n, |A|=m$ 。

网络图上仅有一个源节点和终节点,节点 i 的开始时间为 ES_i ,活动 (i, j) 的开始时间为 ES_{ij} , $P(i)$ 、 $S(i)$ 分别为节点 i 的前置节点集合和后置节点集合,执行时间为 t_{ij} ,直接费用为 c_{ij} ,工期为 T_N ,活动的执行不具有抢先模式,其优先关系约束为结束一开始型。

项目执行过程中承包商的收益与费用变动如下:

(1)合同价款(U)。由于资金时间价值作用,合同价款的支付对工程项目管理的影响特别是对净收益的影响已逐渐得到学者重视。近年来由于 FIDIC 合同已被普遍接受和应用,

过去按里程碑事件支付合同价款的模型已显示出局限性,本文采用 FIDIC 合同的支付方式——按月支付,并考虑了以往模型中被忽略的质量保修金,建立以下模型。

合同价款(U)按月支付,支付发生在月末,第 i 月支付款为 $P_i(i=1,2,\dots,i,\dots,12T_N)$,预付款为 $\lambda_1 U$,质量保修金 $\lambda_2 U$ 在项目完工后 T_1 时支付, λ_1, λ_2 分别为预付款和质量保修金占合同价款的比例,则合同款的净现值 U^P 为:

$$U^P = \lambda_1 U + \sum_{i=1}^{12T_N} \frac{P_i}{(1+\delta)^{i/12}} + \frac{\lambda_2 U}{(1+\delta)^{T_N+T_1}} \quad (1)$$

(2) 业主的奖罚金(BP)。奖惩机制已成为业主控制承包商实现工期目标的重要手段,也是承包商获得更多净收益不容忽视的因素。本文在何正文研究的基础上增加考虑奖罚金的支付方式与资金时间价值的作用,建立了如下模型:

项目在时段 $[D-\Delta D_1, D+\Delta D_2]$ 之间完成,则竣工时业主按照双方商定的合同价款 U 支付给承包商,即奖罚金为 0。 D 表示项目截止日期, $\Delta D_1 \geq 0$ 是承包商为获得奖励提前完成项目必须超过的最小时期数, $\Delta D_2 \geq 0$ 是承包商为避免惩罚延迟不能超过的最大时期数。

项目在时刻 $[D-\Delta D_1]$ 之前完成,则竣工业主向承包商额外支付 $\gamma(T_N) \cdot U$ 作为项目承包商提前完成项目的奖励。其中, $\gamma(T_N)$ 为合同双方事先商定的奖励比例。

项目在时刻 $[D+\Delta D_2]$ 之后完成,则竣工时业主从合同价款中扣除 $\delta(T_N) \cdot U$ 作为承包商未按时完工的惩罚。其中, $\delta(T_N)$ 为合同双方事先商定的惩罚比例。假定业主的奖罚金在竣工时一次性支付完毕,则承包商获得的奖罚金净现值(BPP)为:

$$BP^P = \begin{cases} \frac{\gamma(T_N) \cdot U}{(1+\delta)^{T_N}}, T_N \in [0, D-\Delta D_1] \\ 0, T_N \in [D-\Delta D_1, D+\Delta D_2] \\ \frac{-\delta(T_N) \cdot U}{(1+\delta)^{T_N}}, T_N \in [D+\Delta D_2, +\infty) \end{cases} \quad (2)$$

(3) 直接费用(C_d)。工程项目由各个活动组成,由于活动具有多种模式,使得“以费用来换取时间”成为可能性,活动的模式有连续和离散之分,在实践中,离散的情形更为普遍。假定活动 $(i, j) \in A$ 有 K_{ij} 种执行模式 $\{(t_{ij1}, c_{ij1}), (t_{ij2}, c_{ij2}) \dots (t_{ijk}, c_{ijk})\}$, 那么活动 (i, j) 的各执行模式间存在如下关系:若 $l < r$, 则 $i t_{ijl} < t_{ijr}$ 和 $c_{ijl} > c_{ijr}$; $i i t_{ijl} > t_{ijr}$ 和 $c_{ijl} < c_{ijr}$ 中仅有一个成立,即活动的执行时间越长,直接费用越低,反之活动的执行时间越短,直接费用越高。设 χ_{ijk} 为 0-1 变量,其满足:

$$\begin{cases} \chi_{ijk} = 1, \text{活动}(i, j) \text{选择第 } k \text{ 种模式执行} \\ \chi_{ijk} = 0, \text{活动}(i, j) \text{不以第 } k \text{ 种模式执行} \\ \sum_{k=1}^{K_{ij}} \chi_{ijk} = 1, \text{活动}(i, j) \text{选择唯一模式执行} \end{cases} \quad (3)$$

考虑时间价值作用下的工程项目的直接费用为:

$$C_d^P = \sum_{(i,j) \in A} \frac{\sum_{k=1}^{K_{ij}} c_{ijk} \chi_{ijk}}{(1+\delta_d)^{ES_{ij}}} \quad (4)$$

(4) 间接费用(C_1)。随着项目管理实践的不断发展,项目

执行中除直接费用外的其他费用也越来越多。如材料周转费、场地租赁费、融资费用等等,而这些费用大多属于项目的间接费用。据调查,近年来许多项目的间接费用在总费用中的比重已越来越大。以往文献简单地假定活动的间接费用随着工期呈线性变化,然而现实中活动的间接费用随工期呈离散变化,本文假定间接费用在第 i 月的月初支付为 η_i , 则考虑资金时间价值作用下的间接费用为:

$$C_1^P = \sum_{i=1}^{12T_N+1} \frac{\eta_i}{(1+\delta)^{(i-1)}} \quad (5)$$

(5) 增量质量的净收益(BR $_{Q_n}$)。在实践中,工程项目管理者并不是盲目追求高质量或者低质量,而是追求最经济的质量。质量经济性要求我们不仅要从事成本的角度考虑质量问题,而且要从收益的角度考虑质量问题。质量收益是指给承包商带来的与质量水平相关的收入,它包括质量好时给予的奖金以及由于提高质量给承包商带来的良好信誉、品牌等潜在收益。质量成本指因质量变动而改变的成本,它包括材料、人员变动的成本、返工成本、业主的质量罚金等。质量净收益是质量收益与质量成本之差,但质量收益与质量成本并不好确切衡量,因此,本文引入增量质量收益与增量质量成本的概念。

增量质量收益(BR $_Q$):指在工期等因素不变的情况下,项目提高到一定质量水平时承包商所增加的收益。

增量质量成本(BC $_Q$):指在工期等因素不变的情况下,项目提高到一定质量水平时承包商需要多支付的成本。

当增量质量效益大于增量质量成本时,承包商就会不停地改善质量,直到改善质量不再为承包商带来净收益,即满足 $BR_Q = BC_Q$ 时,承包商获得最大的质量净收益。此时的增量质量净收益为 BR $_{Q_n}$, 项目的质量水平为 Q_c :

$$BR_{Q_n} = \sum_{Q=Q_0}^{Q_c} (BR_Q - BC_Q^A) \quad (6)$$

BC $_Q^A$ 为项目的增量质量成本扣除因质量变动引起直接费用和间接费用变动的部分, Q_0 为给定的一个初始质量水平。但是,承包商追求利润最大化是建立在合法的且不恶性损害他人利益的基础上,假定满足用户从事生产、生活所需要的功能和使用要求,符合国家有关法规、技术标准和合同规定的质量为 Q_G , 承包商质量净收益最大时得出的质量为 Q_c , 那么,承包商实际施工中的质量标准应为 $Q = \text{Max}\{Q_G, Q_c\}$ 。

2. 模型的建立。本文针对承包商的工程项目管理进行动态分析,建立了考虑资金时间价值、业主支付、奖惩机制、间接费用等以往被忽略因素的“工期费用质量综合优化”模型:

$$\pi = \text{Max}\{U^P + BP^P - C_d^P - C_1^P + BR_{Q_n}\} \quad (7)$$

$$\text{S.t.} \begin{cases} \chi_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{活动}(i, j) \text{以模式 } k \text{ 执行;} \\ 0, \text{反之;} \end{cases} \\ \sum_{k=1}^{K_{ij}} \chi_{ijk} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\sum_{t=ET_{ij}}^{LT_{ij}} tY_{ij}^t + \sum_{T=ET_{ij}}^{LT_{ij}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} \chi_{ijk} \cdot t_{ijk} \leq \sum_{t=ET_{ij}}^{LT_{ij}} tY_{ij}^t; i \in P(j), 1 \in S(j) \quad (9)$$

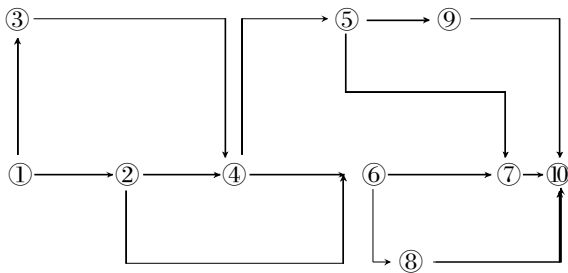
其中, $UP, BPP, C_d^p, C_i^p, BR_{Qn}$ 的计算公式如前文所述。公式(7)为目标函数, 表示承包商的净收益最大, 公式(9)表示活动的搭接关系, 即只有在所有紧前活动完成后, 该活动才可以开始。

该问题是 NP-Hard 问题, 其求解的方法分为优化算法和启发式算法两大类, 前者是适用于小型问题的精确算法, 后者是适用于大型问题的模糊算法。

三、工期费用质量综合优化模型算例

下图是一个 AOA 项目活动网络图。项目合同总价为(U) 1 655 万元, 预付款比例 $\lambda_1=0.1$, 合同价款每月月末支付比例 $\lambda=0.9 \times (\frac{1}{T_N})$, 不考虑质量保修金。间接费用在月初支付 75

万元, 项目期末不满一月时费率(η)为 25 千元/天, 平均日利率(θ_d)为 0.019%, 若承包商在 200 天内(不包含 200 天)完成项目, 业主奖励承包商 5 万元, 若在 210 天内尚未完成项目, 则罚款 5 万元。



AOA 项目活动网络图

现有两种质量水平 a、b, 表 1 为从水平 a 提高到水平 b 时各项活动的增量质量收益与增量质量成本以及活动的不同执行模式, 增量质量成本中直接费用、间接费用的比例依次为 0.42, 0.23。

表 1

活动代号 i-j	模式一 (天/千元)	模式二 (天/千元)	模式三 (天/千元)	增量质量成本(千元)	增量质量收益(千元)
1-2	(42, 840)	(36, 930)	(32, 960)	10	11
1-3	(35, 1 050)	(33, 1 102)	(28, 1 120)	12	9
2-4	(49, 1 176)	(45, 1 232)	(38, 1 330)	7	7
2-6	(35, 990)	(31, 1 092)	(30, 1 100)	6	8
3-4	(42, 840)	(40, 896)	(38, 912)	8	4.5
4-5	(42, 630)	(35, 715)	(21, 735)	6	5.5
4-6	(54, 810)	(48, 825)	(42, 840)	4	8.5
5-7	(14, 280)	(13, 301)	(10, 350)	5	3
5-9	(49, 980)	(41, 1 021)	(35, 1 155)	9	12
6-7	(42, 1 050)	(39, 1 110)	(35, 1 190)	11	13
6-8	(21, 525)	(20, 550)	(18, 576)	10	9
7-10	(56, 1 120)	(50, 1 162)	(42, 1 218)	5	6
8-10	(21, 315)	(17, 378)	(14, 420)	6	5
9-10	(14, 280)	(12, 295)	(9, 297)	3	2.5

按照上文提供方法建立模型, 增量质量成本(10.2 万元) 小于增量质量收益(10.4 万元), 所以承包商应该提升质量到水平 b, 此时, 增量质量净收益为 6.83 万元 $[10.4-10.2+(0.42+0.23) \times 10.2]$ 。

由于活动的网络图简单且执行模式较少, 在关键路径法的基础上结合枚举法即可求得项目的最优工期 196 天, 各活动的持续时间见表 2。合同价款前 6 个月每月支付 230 万元, 最后半月支付 109 万元时承包商获得最大净收益为 24.64 万元。综上, 承包商应将质量提高到水平 b, 获得 31.47 万元的净收益。

表 2

活动代号	1-2	1-3	2-4	2-6	3-4	4-5	4-6
工期	32	35	38	35	42	42	42
活动代号	5-7	5-9	6-7	6-8	7-10	8-10	9-10
工期	14	49	35	21	42	21	14

四、结语

本文是对工程项目“工期费用质量综合优化”方法的一种新的尝试, 通过工期、费用、质量向净收益的有效转化, 实现以净收益统筹工期、费用、质量三大目标, 既克服了三者权重确定的主观性, 又避免了割裂三者之间的内在联系。同时建立了更贴近现实的“工期费用质量综合优化”模型, 试图为承包商更好地进行工程项目管理提供一些参考和建议。

论文的不足之处是难以获得精确的输入数据, 这主要是因为项目优化所需的数据是预测性的数据, 而未来是充满不确定性的, 项目专家只能在借鉴历史资料的基础上, 尽可能多地考虑现在以及将来的影响因素, 给出输入数据的期望值。

主要参考文献

1. 王键, 刘尔烈, 骆刚. 工程项目管理中工期成本质量综合均衡优化. 系统工程学报, 2004; 19
2. 高兴夫, 胡程顺, 钟登华. 工程项目管理的工期—费用—质量综合优化研究. 系统工程理论与实践, 2007; 10
3. 苏菊宁, 蒋昌盛, 刘晨光, 陈菊红. 考虑支付进度的动态工期优化. 系统工程, 2009; 5
4. 柴国荣, 洪兆富, 何正文. 柔性资源约束下的大型项目奖惩结构优化. 系统管理学报, 2009; 18
5. 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. 系统工程, 2005; 5
6. 任宏, 晏永刚. 工程项目管理三大基本目标的新思维. 科技进步与对策, 2008; 10
7. 吴亚丽, 张立香. 基于文化遗传算法的资源受限项目调度. 系统工程, 2009; 4
8. Tareghian HR, Taheri SH. A solution procedure for the discrete time, cost and quality trade-off problem using electromagnetism scatter search. Applied Mathematics and Computation, 2007; 2