

水利水电施工进度问题研究综述

王卓甫, 李红仙, 杨建基

(河海大学国际工商学院, 江苏 南京 210098)

摘要:综述国内外水利水电施工进度优化和不确定性研究的现状;指出在考虑施工活动持续时间不确定的条件下,开展施工网络进度计划和优化研究,具有实际意义;在水利水电施工进度风险一定的条件下,尽可能推迟每一工作的开始时间,对节省工程投资或成本具有好的效果。

关键词:施工进度;网络计划;水利水电工程;综述

中图分类号:TV512

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)03-0014-04

水利水电工程项目施工过程中,进度、费用和数量是人们控制的三个主要目标,其中进度和费用两个目标密切相关。在 20 世纪 50 年代末,网络进度计划技术的出现,为水利水电工程施工进度管理提供了强有力的工具。稍后,网络进度计划优化技术又得到发展,使得在进度计划和管理的同时,对资源供应和费用的优化成为可能;计划评审技术(program evaluation and review technique, PERT)、模糊理论等的出现,以及计算机技术的飞速发展,使得考虑工程施工时间不确定性的研究也取得了长足发展。本文主要对考虑费用优化和活动时间不确定的水利水电施工进度问题的研究进行综述。

1 施工网络进度优化问题

水利水电施工网络进度计划基础典型的方法是 CPM(critical path method),在此基础上的网络进度计划优化技术通常包括^[1]:①有限资源的优化配置问题(resource constrained allocation);②无限资源均衡配置问题(unlimited resource leveling);③工期/费用优化,即时间/费用交换问题(time/cost trade off)。

1.1 有限资源的优化配置问题

有限资源的优化配置问题,即是在资源供应有限的条件下,寻求最短工期的问题。这类优化较早的办法是借助于数学规划模型,如线性规划模型、动态规划模型^[2,3]。然而,用数学规划方法解决有限资源的优化配置问题,其计算工作量较大。不少学者提出了有限资源优化配制的启发式方法,例如文献[4]和[5]。启发式方法有两类:序列(Serial)法和并行(Parallel)法。序列法首先将所有活动按优先次序排队,

然后根据给定序列制订计划。如因缺乏资源不能安排某一活动时,就必须等到其它活动完成后再安排,当所有活动被列入计划后,计算结束。有关优先排队的规则已很多,文献[6]曾对这些规则作过分析比较。启发式方法目前应用得较为广泛。文献[7]在分析启发方法的一些不足的基础上,提出了一种分枝定界算法。分枝定界算法本质上是一种隐枚举算法,只选取了那些工期短于当前“界”的方案,因此在多数情况下计算量要比前面介绍的方法要少一些。另外,由于优化前的计算工期是已知的,优化过程中能较早地得出当前“界”。因此,可以在可接受的误差范围内停止计算,得出近似解。

1.2 无限资源均衡配置问题

无限资源的均衡配置问题,即是在规定工期内,寻求资源均衡的优化问题。和解决有限资源的优化配置问题类似,数学规划方法和启发式方法常被用来解决无限资源均衡配置问题^[8]。启发式方法适用于解决多种类型的问题,同时,它公式简单,使用有效,因而应用较广,其缺点是不能保证最优。数学规划方法能保证最优,但仅适用小规模的网络。

上述两种方法的研究是单目标(一种资源)的均衡配置问题,这满足不了需要。文献[9]研究了多资源均衡问题,提出了一种“单步比较法”。该方法不仅能实现多资源的均衡配置,而且能得到较理想的优化结果,其缺点是调整次数较多,计算工作量较大。

文献[10]提出了资源均衡配置问题的遗传算法,用理论分析和示例说明遗传算法优于启发式算法。

遗传算法(genetic algorithm)是 20 世纪 70 年代

在美国逐步发展、完善的优化算法,它由 Holland 教授提出^[11],并在很多领域得到应用,如生物、计算机科学、工程和社会科学等。在我国,遗传算法的普及和应用才起步不久,人们对其还不太熟悉。遗传算法中,某问题的可能解被称为染色体(群)数,而每个染色体代表一个可能的逼近解。遗传算法的基本思想是适者生存,自然选择,它把自然界生物进化理论引入到人工环境,通过遗传操作找到适合环境的最佳目标。其解题步骤为:①随机初始化群体;②对群体中的个体进行评价;③按照概率准则选择较好的个体并对其进行交换、突变从而得到下一代群体;④重复②、③直至符合要求为止。

遗传算法是一种新的优化方法,它可以用更接近实际问题领域的表达式方式进行求解,因而更接近于实际,值得研究、推广和应用。

1.3 工期/费用优化问题

在工程施工过程中,在一定范围内增加资源,可缩短活动的持续时间,但这样会增加工程费用。于是,工期/费用优化,即时间/费用交换问题就被提出来了。数学规划方法,例如线性规划^[12]、非线性规划^[13]、动态规划^[14]常用来解决这类问题。线性规划仅能解决时间/费用关系是线性的情况,当时间/费用非线性时,只能取得近似解。当用其它方法求解非线性的时间/费用问题时,总存在一些局限性,如有时只能找到局部最优解。用数学规划方法解决费用优化问题的计算工作量很大,因此仅用于解决一些小工程的问题。

文献[15]提出了一种求解单一资源约束问题的回溯式算法,采用深度优先的搜索策略,系统地产生整个解空间。文献[16]设计了求解资源约束下时间/费用交换的启发式方法。该方法假定每个活动有几个实施方案,分别对应不同的持续时间、费用消耗和资源需求,而在整个项目结束时,最终的费用支出相同。文献[15]和[16]方法的缺陷同样也是计算工作量较大;能取得好的结果,但不能保证最满意。该方法对中小型工程可应用,但对大型工程项目难以适应。

用遗传算法来解决时间/费用交换问题^[17],其结果和启发式方法有相同的缺陷:计算工作量很大,不能保证得到最满意的解。为克服传统遗传算法的限制,一些学者对其进行了改进,在减少计算工作量、提高寻找满意解效率上作了一些探索,取得了较好的效果。

1.4 进度费用的联合优化

有限资源的优化问题、无限资源的优化问题和时间/费用交换问题(工期/费用优化问题)是从不同

的角度出发对工程项目施工进度的优化。在应用中,需要根据实际情况,采用不同的模型进行优化。当施工中发生资源供应限制时,可利用有限资源优化模型安排进度计划;在施工中希望资源供应均衡,以期取得较好的经济效益;当希望降低施工费用时,可采用工期/费用优化模型,以期达到节省费用、缩短工期之目的。能否将这些优化方法联合应用呢?这是值得探讨的问题。

文献[18]对进度/费用的联合管理做了一些探讨,指出:工程项目的费用(或成本)不仅是一笔总金额,而且存在着关于时间的分布。文献[18]的作者将费用作为一种特殊的资源加到网络的活动上,然后将三条不同的工期/累计费用曲线(包括:工期/计划费用、工期/消耗费用和工期/完成投资)进行比较,实现对工程项目的进度与费用的联合管理。

文献[19]提出了多准则施工进度优化模型,该模型集合了费用优化(时间/费用交换问题)、有限资源优化配制问题和无限资源均衡配置问题。作者将基于遗传算法的求解技术应用于求解该模型。在有限资源的约束下,这个模型能有效地提供令人满意的每一活动的施工历时、资源数量、最低工程直接费用和最小项目工期的组合。和传统的启发式和数学规划方法相比,采用遗传算法解决多准则施工进度问题有三方面优点:一是能够考虑到多目标,这是启发式和数学规划方法所不能考虑的;二是限制或多个目标要求被释放后,这种遗传算法仍适用分别解决单目标的优化问题;三是和启发式方法相比对解决不同类型的进度计划问题具有更多的灵活性。

2 考虑施工持续时间不确定的施工进度问题

网络进度的三种优化模型及其基于遗传算法的多准则施工进度优化模型,均是以 CPM 为基础的。CPM 的基本假定是网络进度计划中的每项活动的持续时间均是确定的。而实际工作中,由于政治、经济、气象、水文、施工方案、资源供应、施工环境等不确定因素的影响^[19-22],导致了施工工序活动持续时间的不确定,因而就出现了如何计算这种网络时间参数及工程施工工期能否按时实现的问题^[23]。当施工不能按计划实现时,即为施工工期风险已经形成。解决这类施工工序活动时间不确定网络进度问题的基本方法有:PERT 法、MC(Monte Carlo)法和模糊网络计划(fuzzy network program)。

2.1 PERT 法

经典 PERT 是一种以数理统计理论为基础,解决工程中常见的活动的逻辑关系确定,而活动的持续时间不确定的网络进度计划技术。经典 PERT 假

定活动的持续时间是随机的,且服从 β 分布.于是可用“三点法”来估计活动持续时间^[24].

假定活动的持续时间服从 β 分布主要是方便起见^[25,26], β 分布由最乐观时间和最保守时间可唯一确定.实际上也可假定服从三角分布、正态分布、Gamma分布等.只要不选择十分极端的随机变量,工程项目工期的随机分布不受其影响^[26].文献[27]的进一步研究表明,活动持续时间的随机分布只要不十分极端,当网络关键线路上的活动数超过20项时,工程施工工期基本上是服从正态分布的.

在PERT中,求得活动持续时间后,可用CPM求解各活动的时间参数、网络进度的期望工期、工程的完工概率或工程按时完工的风险(进度风险).PERT概念直观、使用方便、计算简单.但应注意到,PERT方法削弱了活动持续时间的概率特性.所得的期望工期偏短,方差偏大,计划实施的可靠度较低.

事实上,PERT要求:①活动的持续时间是相互独立的随机变量;②网络中只有一条路线占支配地位,其它路线成为关键路线的概率可以忽略不计.在实际工程中会碰到同时考虑几条关键路线的问题,或次关键路线和关键路线的持续时间相当接近,因而有关多条关键路线求解算法的研究也提了出来,文献[28,29]在这方面做了一些研究.

2.2 MC方法

MC方法是一种计算机模拟仿真方法,它的基本思想是构造各随机量的概率模型,然后对其进行抽样,即得到每一活动的随机持续时间,相当于施工一次,或仿真一次^[30].

文献[31]在仿真 N 次后,对总工期的仿真结果作统计分析,通过分析计数得出总工期的直方图,并将其近似地视为总工期的密度函数曲线.即

$$T_{\min} = \min\{T_k\}, \quad k \in (1, 2, \dots, N)$$

$$T_{\max} = \max\{T_k\}, \quad k \in (1, 2, \dots, N)$$

$$T_g = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{l}$$

则

$$T_1 = T_{\min} + T_g, \quad T_2 = T_1 + T_g, \dots,$$

$$T_m = T_{m-1} + T_g$$

其中 T_{\min} 为 N 次仿真中总工期最小值; T_{\max} 为 N 次仿真中总工期最大值; l 为分组的组数; T_g 为分组的组距.

将 N 次仿真结构按区间统计频数,便可得到总工期 T 的近似的分布密度函数 $f(T_j)$,对其按区间累加后便可得到总工期的近似累积分布函数 $F(T_j)$,最后,便可得到总工期的统计分布曲线及累积分布曲线.

文献[32]讨论了计划工期或完工时间也存在不确定的进度风险的计算问题,给出了如下计算步骤:①确定模拟仿真次数 N ;②产生伪随机数;③由抽样公式,计算各活动持续时间的随机值;④由各活动持续时间的随机值,用CPM法,计算工期的随机值;⑤将计划工期(或完工时间)的随机值和计算工期的随机值比较,并进行统计;⑥ N 次模拟仿真后,由统计数据,求施工进度风险.

和PERT法一样,MC模拟仿真方法假设每项活动是随机独立的.同PERT法相比,MC仿真方法可适合于活动的各种不同分布,而不一定要求是 β 分布,而且当仿真次数足够多时,其计算结果有较高的精度,MC仿真方法一定要借助于计算机,否则计算精度难以达到要求.当一个工程规模较大,或工程项目的结构分得较细,即活动数较多时,在一定的计算精度要求下,计算工作量较大.而且当精度要求提高1个数量级时,计算次数要求提高2个数量级.在计算机技术飞速发展,计算速度不断提高的今天,MC方法的应用还是有很好前景的.

2.3 模糊算法

对于一项活动,特别当影响因素较多时,很难给出它的施工持续时间,但对于有一定施工经验的人来说,他们能以较高的可信度给出某一工序施工即活动时间的可能的取值区间,对几个专家分别请他们给出活动(施工工序) (i, j) 持续时间可能的取值范围,则其结果可记为

$$[t_1^-, t_1^+]_y, [t_2^-, t_2^+]_y, \dots, [t_n^-, t_n^+]_y$$

因此,可得到施工工序,可能的持续时间的取值范围 T 为 $(\min t_i^-, \max t_j^+)$;施工工序 (i, j) 的持续时间 $t(i, j)$ 的取值域 T 的模糊集记为 $\mu_T(t(i, j))$.

文献[33]指出,根据 $L-R$ 模糊数的定义,施工工序时间参数模糊集 $\mu_T(t(i, j))$ 是 $L-R$ 的模糊数,当且仅满足:

$$\mu_T(t(i, j)) = \begin{cases} L\left(\frac{m(i, j) - t(i, j)}{\alpha(i, j)}\right), & t(i, j) \leq m(i, j), \\ \alpha(i, j) > 0 \\ R\left(\frac{t(i, j) - m(i, j)}{\beta(i, j)}\right), & t(i, j) \geq m(i, j), \\ \beta(i, j) > 0 \end{cases}$$

其中, L, R 为参数函数.

对任意两个 $L-R$ 模糊数可得到快速运算准则^[33].

文献[34]将施工工序持续时间用 $L-R$ 三角模糊数表示:

$$\mu_T(t(i,j)) = \begin{cases} \max\left\{0, 1 - \frac{t(i,j) - m(i,j)}{\beta(i,j)}\right\}, & \beta(i,j) \geq 0, \\ & m(i,j) \leq t(i,j) \\ \max\left\{0, 1 - \frac{m(i,j) - t(i,j)}{\alpha(i,j)}\right\}, & \alpha(i,j) \geq 0, \\ & m(i,j) \geq t(i,j) \end{cases}$$

在此基础上得到网络计划的模糊算法,例如,最早可能完工时间的计算公式:

$$\mu_T(tEF(i,j)) = \mu_T(tES(i,j)) \oplus \mu_T(t(i,j))$$

式中: $EF(i,j)$ 和 $ES(i,j)$ 分别为施工工序 (i,j) 的最早完成和最早开始时间. 上述算法工作量较大,特别要求有较多的具有施工经验的专家给每一施工工序的持续时间进行估计,实际工程中会有些困难.

文献[33~36]围绕着确定双代号模糊网络的时间参数和关键路线问题,进行了较多的研究,取得了一些成果. 文献[37]在双代号模糊网络的基础上,基于单代号模糊网络活动时间参数计算的办法,提出了确定网络时间参数和关键路线的计算方法,并可归纳出计算的过程.

3 研究展望

a. 前人对水利水电施工网络进度计划三方面优化(有限资源的优化配置模型、无限资源均衡配置模型、时间/费用优化模型)的研究分别已做了较多的工作,并取得了不少成果. 大多数研究成果主要集中在某一种优化的计算方法上. 但对水利水电施工网络进度计划三方面整合优化问题的研究很少,这有待于不断去开拓和发展.

b. 到目前为止的水利水电施工网络进度计划的优化问题的研究,总是基于 CPM 法,即假定施工网络进度计划中的活动时间是完全确定的. 但事实上,水利水电工程施工活动持续时间不变是相对的,而存在不确定性具有普遍性. 因此,考虑施工活动持续时间不确定条件下,对水利水电施工网络进度计划的优化问题进行研究,具有实际意义.

c. 在水利水电施工中,每一活动(或子项工程)施工所需的时间不同程度上存在着不确定性. 这种不确定性的存在,导致了水利水电施工网络计划工期的不确定性. 对于这种类型网络计划,从保证工程进度实现的角度出发,每一工作按最早开始时间开始施工是保险的;但从减少工程动态投资的角度看,每一项工作按最迟开始时间开始施工是有利的. 因此,探讨在水利水电施工进度风险一定下,尽可能推迟

每项工作的开始施工时间,对节省工程动态投资具有实际意义.

d. 在目前的研究中,特别在 PERT 中,总假定网络进度计划中的活动持续时间是服从 β 分布,然后用“三点法”或模糊三角树来估计活动持续时间的期望值. “三点法”这种估计在水利水电施工网络进度计划中似粗糙了一些,因为,在不同的月份,气象对可以施工的天数的影响是不一样的. 就水利水电工程而言,气象对施工的影响很大,而这种影响是客观的,不是主观决定的. 因此,将气象对施工持续时间的影响和其它因素的影响分别考虑是值得探讨的.

参考文献:

- [1] James M Antill, Ronald W Woodhead. Critical path methods in construction practice [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1982.
- [2] Davis E W. Project scheduling under resource constraints historical review and categorization of procedures [J]. AIIE Trans, 1973, 5(4): 297 ~ 312.
- [3] Doensch R H, Patterson J P. Scheduling project to maximize its present value [J]. A Zero-One Programming Approach, Management Science, 1977, 23: 882 ~ 889.
- [4] Morse L, Whitehouse G. A study of combining heuristics for scheduling projects with limited multiple resources [J]. Comp And Industrial Engrg, 1988, 15(4): 153 ~ 161.
- [5] Tsai D M, Chiu H N. Two heuristic for scheduling multiple projects with resource constraints [J]. Cons Mgmt And Economics, 1996, 14: 325 ~ 340.
- [6] Elsayed E A, Nasr N I. Heuristics for resource-constrained scheduling [J]. International Journal of Publication Research, 1986, 24(2): 124 ~ 132.
- [7] 刘明, 吴唤群. 资源有限——工期最短的分枝定界算法 [J]. 系统工程, 1999, 92(2): 72 ~ 75.
- [8] Harris R B. Precedence and arrow networking technique for construction [M]. New York: Wiley, 1978.
- [9] 高明生, 何建敏. 单步比较法——网络计划中的一种优化方法 [J]. 管理工程学报, 1999, 13(3): 57 ~ 58.
- [10] 戴建国. 活动网络资源均衡问题及其遗传算法 [J]. 系统工程理论与实践, 1996(2): 29 ~ 36.
- [11] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning [J]. Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1989.
- [12] Meyer W L, Shaffer L R. Extending CPM for multiform project time-cost curves [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1990, 91(1): 45 ~ 67.
- [13] Talbot F B. Resource-constrained project scheduling with time-resource tradeoffs: the non-preemptive case [J]. Mgmt Sci, 1982, 28(5): 1197 ~ 1210.
- [14] Panagiotakopoulos D. Cost-time model for large CPM project networks [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1977, 103(2): 201 ~ 211.

(下转第 59 页)

安装后坝袋渗水问题。

b. 止水海绵搭接安装. 止水海绵是铺垫在锚固槽底垫片上的一种止水材料, 一般安装是对接止水海绵法, 必须在接缝处剪直, 既浪费材料, 又费时, 且这种方法容易在接头处留有缝隙. 采取搭接法, 虽在接头处不平, 但因海绵压缩后成为一体, 从而达到接头处不渗水的目的。

5 工程实例

临沂市小埠东橡胶坝全长 1136 m, 是目前世界上最长的橡胶坝(1999 年列入大世界基尼斯之最), 应用以上锚固改进技术, 缩短工期 50 d, 节省工程造价达 120 万元, 使设计合理、安全、可靠. 经山东省科委组织有关专家鉴定, 在锚固技术方面达到国际先进水平. 工程实施后, 经 3 年实际运行和大洪水考验, 效果良好, 达到相应技术要求, 已发挥设计效益。

(上接第 17 页)

- [15] Patterson J H, Talbot F B, Slowinski R, Weglarz J. Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource constrained scheduling problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 49: 68 ~ 79.
- [16] Sung C S, Lim S K. A Project activity scheduling problem with net present value measure [J]. *International Journal of Production Economics*, 1994, 37: 177 ~ 187.
- [17] Chan W T, Chua D K H, Karman G. Construction resource scheduling with genetic algorithms [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1996, 122(2): 125 ~ 132.
- [18] 吴之明. 网络进度-费用的联合管理 [J]. *系统工程理论与实践*, 1995(6): 10 ~ 17.
- [19] Sou-Sen Leu, Chung-Huei Yang. GA-based multi-criteria optimal model for construction scheduling [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1999, 125(6): 420 ~ 426.
- [20] Mulholland B, Christian J. Risk assessment in construction schedules [J]. *Journal of Construction Engineering And Management*, 1999, 125(1): 8 ~ 15.
- [21] Shou Qing, Robert L K Tiong, Seng Kiong Ting, David Ashley. Political risks: analysis of key contract clauses in China's project [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1999, 125(3): 190 ~ 197.
- [22] Herbert Moskowitz, Derek Burn. Decision and risk analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 1987, 28: 247 ~ 260.
- [23] Thompson P, Perry J. Engineering construction risk: a guide to project risk analysis and risk management [M]. London: Thomas Telford, 1992.
- [24] 潘宝根. 计划协调技术 [A]. 李庆华. 中国网络计划大全 [C]. 北京: 地震出版社, 1993. 807 ~ 812.
- [25] Littlefield T K, Randolph P H. Reply—an answer to sasieni's question on PERT times [J]. *Mgmt Sci*, 1987, 33(10): 1357 ~ 1359.
- [26] MacCrimmon K R, Ryavec C A. An analytical study of the PERT assumption [J]. *Opns Res*, 1964(12): 6 ~ 7.
- [27] 李千生, 王卓甫, 白宏坤. 网络计划计算机仿真与风险分析 [J]. *河海大学学报*, 2001, 29(1): 65 ~ 69.
- [28] Bajis Dodin. Determining the k most critical paths in PERT net-works [J]. *Opns Res*, 1984, 32(4): 859 ~ 877.
- [29] Bajis Dodin. Bounding the project completion time distribution in PERT network [J]. *Opns Res*, 1985, 33(4): 862 ~ 881.
- [30] Al-bahar. Systematic risk management approach for construction project [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1990, 116(4): 533 ~ 546.
- [31] 徐哲, 冯允成. 网络计划的风险分析 [J]. *系统工程理论与实践*, 1998(4): 25 ~ 28.
- [32] 王卓甫, 陈登星. 水利水电施工进度计划的风险分析 [J]. *河海大学学报*, 1999, 27(4): 83 ~ 87.
- [33] Dider Dubois, Henri Prade. Operations on fuzzy numbers Internat [J]. *J Systems Sci*, 1987, 9(6): 613 ~ 626.
- [34] 周长春. 非确定时间参数网络规划的一种新算法 [J]. *系统工程理论与实践*, 1998(5): 89 ~ 91.
- [35] Nasution S H. Fuzzy critical path method [J]. *IEEE Transaction on SMC*, 1994, 24(1): 48 ~ 57.
- [36] Chang I S, Tsujimura Y. An efficient approach for large scale project planning based on fuzzy delphi method [J]. *FSS*, 1995, 76(3): 277 ~ 288.
- [37] 胡劲松, 达庆利. 单代号模糊网络的关键路线分析 [J]. *系统工程理论与实践*, 1998(8): 108 ~ 112.

(收稿日期: 2000-02-25 编辑: 熊水斌)