

关键链理论在输变电工程项目进度中的应用研究

诸乐恺^{1*} 蒋义锋² 牛文政³ 刘志强⁴ 何冲⁴

1 美国堪萨斯州立大学; 2 合肥工业大学机械工程学院; 3 济南大学泉城学院 (烟台科技学院); 4 山东航空学院

DOI: 10.12238/ems.v6i8.8752

[摘要] 本文基于关键链技术和多项目理论, 从输变电行业的角度, 以资源有限的多个输变电项目的多项目进度为应用场景, 探讨如何应用关键链缓冲机制, 实现输变电工程进度动态监测。进一步深化关键链缓冲机制应用研究, 提出综合资源紧张调整法、密度调整法和输变电不确定性影响因素的缓冲大小设定方法, 引入动态思维, 为输变电工程项目提供支持。

[关键词] 关键链技术; 缓冲机制; 动态进度; 资源调度

Research on the Application of Critical Chain Theory in the Schedule of Transmission and Transformation Engineering Projects

Yuekai Zhu^{1*}; Yifeng Jiang²; Wenzheng Niu³; Zhiqiang Liu⁴; Chong He⁴

Kansas State University^{1*}; School of Mechanical Engineering, HeFei University of Technology²;

Yantai Institute of Science and Technology³; Shandong University of Aeronautics⁴

[Abstract] Based on the key chain technology and multi-project theory, from the perspective of transmission and substation industry, we discuss the application of key chain buffer mechanism to realize the dynamic monitoring of transmission and substation project progress by taking the multi-project progress of resource-constrained transmission and substation projects as the application scenario. Further deepening the application research of the key chain buffer mechanism, we propose a buffer size setting method that integrates the resource tension adjustment method, density adjustment method and transmission uncertainty influencing factor, and introduce the dynamic idea, which provides a scientific and practical method for the transmission and substation engineering projects.

[Keywords] critical chain technology; buffer mechanism; dynamic schedule; resource scheduling

1. 引言

目前, 中国电网企业着力践行国家“双碳”和“新基建”大政方针, 着力推进新型电力体系建设。输变电工程进展存在一定困难。当多个输变电项目同时进行时, 会出现资源供应有限、工期复杂的情况。由于缺乏高效、实用的方法, 项目的整体进度将会受到影响。目前仍然缺乏能够有效处理高度复杂项目之间的不确定性的方法。

关键链技术是艾利·高德拉特 (Eliyahu M. Goldratt) 博士在 1997 年提出的一种方法, 它将项目进度视为一个整体, 将关键路径转化为关键链, 结合实际活动逻辑和资源约束,

通过设置关键链缓冲区聚合进度风险, 从而避免流程中或过程中出现单点故障而阻碍项目进度。流程和改进了项目进度的可控性, 对输变电项目的进度有很大的启发。当多个项目并行运行时, 可以额外确定资源冲突活动之间的重叠关系, 将各个项目之间的关系视为同链上的项目, 形成多项目瓶颈链, 将项目串联起来形成参数完整的多项目网络。

本研究以输变电工程项目为应用场景, 基于关键链技术理论, 研究关键链缓冲机制、缓冲设置和缓冲大小计算的应用, 并探讨如何实现动态进度监控。提高输变电工程进度控制水平。

2. 输变电工程缓冲区尺寸设定

为了使缓冲区大小更加适合输变电项目中多项目应用场景的需求,提出一种新的缓冲区大小估算方法。新方法的核心思想是利用四点梯形模糊数法 TrFN 计算活动的安全施工期。结合资源紧张度调整方法(APRT 法)、密度调整方法(APD 法),引入结合大型输变电工程项目工序特点赋值的不确定性影响因子,来进行缓冲区估算。

2.1 安全时间估算

安全时间是指项目中为过程预留的浮动时间,用于吸收不确定因素对活动持续时间的影响。一般情况下,其数据为90%完工保证率的活动工期与50%完工保证率的活动工期的差值。

此次研究采用四点梯形模糊数方法 TrFN 测算活动安全工期时间,在模糊数理论中,采用置信指标的概念(Agreement Index, AI),AI(A, B)表示事件A与事件B的吻合程度。活动时间a为最乐观时间,活动时间d为最悲观时间,区间[b, c]被认为是活动最可能的持续时间,模糊数的隶属函数取值区间为[0, 1]。

$$\mu = \begin{cases} (t-a)/(b-a) & t \in [a, b] \\ 1 & t \in [b, c] \\ (d-t)/(d-c) & t \in [c, d] \\ 0 & t \notin [a, d] \end{cases}$$

为保障项目活动能按时完工,将置信指标 AI 数值设为90%,不仅具有较高的完工保证率,也有较好的参考价值。AI(A, B)=0.9, AI(A, B)图形化表达为图2-1中阴影部分面积。

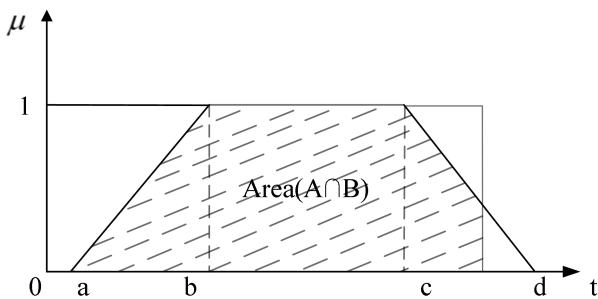


图 2-1 四点梯形模糊数方法图示

可推算出:

$$AI(A, B) = \frac{(c-b+d-a)/2 - (d-t_i)^2 / [2(d-c)]}{(c-b+d-a)/2} = 0.9 \quad (2-1)$$

$$S = d - \sqrt{0.1(c-b+d-a)(d-c)} \quad (2-2)$$

活动j的安全时间 Δt_j 是活动j高符合度(90%)下的持续时间 S_j 与正常持续时间 d_j 的差值,即 $\Delta t_j = S_j - d_j$,如图3-3所示。常规情况下,可将活动正常持续时间 d_j 视作

$d_j = 1/2(b+c)$,即剔除安全因素的活动平均时间,有利于开展项目进度计划。

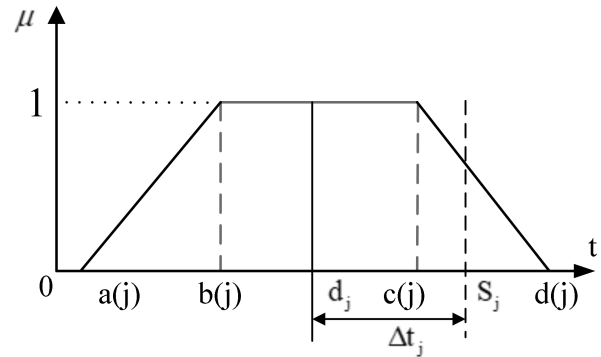


图 2-2 活动 j 的安全时间图示

2.2 缓冲区计算

此处创新融合资源紧张度调整方法(APRT 法)、密度调整方法(APD 法),形成新的缓冲计算方法。同时引入输变电工程项目不确定性影响因子 λ ,分别通过资源紧张度调节因子K、网络复杂度调节因子K'、输变电工程项目不确定性影响因子 λ 分别发挥其对链路资源紧张程度、计划网络复杂度和输变电相关工序不稳定因素的调节修正作用。

$$FB = [(K + K')/2] \sqrt{\sum_{m \in M} \lambda (\Delta t_m)^2} \quad (2-3)$$

$$PB = [(K + K')/2 + \lambda] \sqrt{\sum_{n \in N} (\Delta t_n)^2} \quad (2-4)$$

①FB——汇入缓冲;

②PB——项目缓冲;

③K——资源紧张度调节因子;

④K'——网络复杂度调节因子;

⑤ λ ——不确定性影响因子;

⑥ Δt ——活动安全时间

⑦M为非瓶颈链上的单项目活动链路上的活动集合, m为其中的活动; N为非多项目瓶颈链上的活动集合, n为其中的活动。

(1)资源紧张度调节因子K,该调节因子用于辨识项目活动的资源紧张程度。

$$K = 1 + \text{Max} \left[\frac{\sum_{j=1}^n r(j, q) \times d_j}{\text{Rav}(q) \times T} \right] \quad (2-5)$$

① $r(j, q)$ ——项目活动j所需q类资源量;

② $\text{Rav}(q)$ ——q类资源总量;

③ d_j ——活动j的持续时间;

④T——代表关键链或非关键链的链路时间长度。

(2)网络复杂度调节因子K',该调节因子用于辨识项

目活动的网络复杂程度。

$$K'=1+N_q/N_T \tag{2-6}$$

- ①N_q——汇入链路中紧前关系的数量；
- ②N_T——代表汇入链路总活动数量。

（3）输变电工程项目不确定性影响因子λ，以《南方电网公司基建项目指导工期表（2021 版）》对架空输电工程、变电安装工程的指导工期与工期调整系数为基准，考虑不同电压等级工程项目间的差异性,综合计算得出相应因子数值。不确定性影响因子λ按典型工序进行细分。

表 2-1 常规架空输电线路工程工序影响因子参数

工序	不确定性影响因子数值（λ）
土方开挖、基础浇制（含接地敷设）	0.8
铁塔组立	0.7
架线施工	0.6
验收、质监、消缺	0.1

表 3-2 常规变电安装工程工序影响因子参数

工序	不确定性影响因子数值（λ）
土建施工（至交付安装）	0.7
电气安装	0.6
调试及交接试验	0.5
验收、质监、消缺	0.1

3. 进度动态监控

3.1 缓冲区动态监控

实现有效监控的一项重要任务是设置进度风险触发点。缓冲区监控不仅关注缓冲区消耗情况，链路活动所需的缓冲区量是否能够满足需求也至关重要。可以设计动态监测参数来确定风险预警信号的范围。随着监测时点的推进，可以动态划定风险预警线，构建实时进度监测工作机制。

参考传统的基于工期的缓冲监控方法、基于关键链的缓

表 3-1 缓冲监控的决策表

对应情况	相应行动
$\theta < L_{1/3}$	进度受控，不采取行动，持续监控缓冲消耗情况
$L_{1/3} < \theta < L_{2/3}$	进度存在风险，进一步研究进度情况，密切监控缓冲消耗情况
$\theta > L_{2/3}$	进度失控，立即预警，研究应对措施，尽快制定进度控制方案并实施

4. 结论

本研究提出的输变电项目进度动态方法可以有效解决输电行业多个并行项目带来的进度控制难、预警措施薄弱、动态性低等实际问题。创新性地引入了输变电工程进度不确定性。影响因子λ形成了突出行业特点的新缓冲计算方法。将动态思维融入缓冲监控方法中，提出了一种以关键链缓冲为核心的动态进度方法。从实例应用结果来看，能够有效监测和有效预警工程进度滞后，展示了动态缓冲机制在输变电

冲监控方法，以缓冲需求量的情况作为动态进度的核心要点。计算动态缓冲量监控参数θ，该参数为链路剩余缓冲量与链路剩余活动所需缓冲量之间的比值，计算方式见式 3-8，图示见图 3-7。

$$\theta = \frac{TB - BC_t}{BD_t} \tag{3-1}$$

TB——链路缓冲总量

BC_t——t 监控时点的缓冲消耗量

BD_t——t 监控时点的链路剩余活动所需缓冲量

将各个监控时点的链路剩余活动所需缓冲量的 1/3、2/3 处作为风险临界点，风险警戒线由各时刻的风险临界值相连形成，如图 4-8 所示。风险临界点数值 L_{1/3}与 L_{2/3} 计算方式见式 3-2。

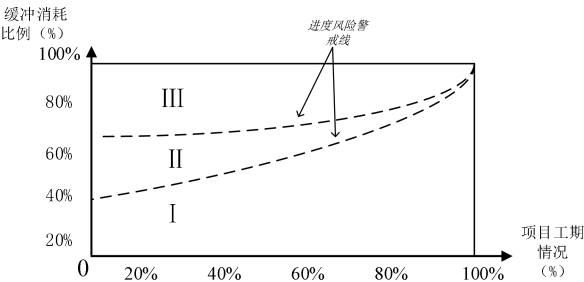


图 3-1 监控动态缓冲的进度风险警戒线

$$L_{1/3} = BD_t \times 1/3 \tag{3-10}$$

$$L_{2/3} = BD_t \times 2/3 \tag{3-11}$$

L_{1/3}——缓冲量 1/3 风险临界值

L_{2/3}——缓冲量 2/3 风险临界值

BD_t——t 监控时点的链路剩余活动所需缓冲量

进度风险警戒判断分为三种情况,对应不同的决策情况，同表 3-1。动态缓冲量监控参数θ 根据监控时点的缓冲消耗情况设定，风险警戒值则随着缓冲消耗的客观情况发生变动，充分体现该缓冲机制动态性，展现出良好的动态进度思路。

工程领域的实用性。

【参考文献】

[1]吴贤国, 秦文威, 张立茂, 等. 基于 BIM 的项目进度管理与控制研究[J]. 建筑经济, 2018, 39（10）: 59-63. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.201810059.

[2]张建勇. 水利水电工程项目的动态管理研究[J]. 工程技术研究, 2016,（05）: 182+188. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2016.05.122.