

建筑工程施工进度管理中的关键路径法应用研究

武有洋

宁夏师范大学 宁夏 固原 756000

摘要: 本文旨在系统探讨关键路径法 (Critical Path Method, CPM) 在建筑工程施工进度管理中的应用。首先, 剖析了关键路径法的基本原理、核心概念; 再次, 详细论述了CPM在项目全生命周期各阶段 (从计划编制、动态监控到优化调整) 的具体应用流程与方法, 并通过一个简化的工程实例进行说明; 最后, 客观分析了CPM在实际应用中存在的局限性, 并结合现代信息技术的发展趋势, 提出了融合BIM、大数据等先进技术的优化路径。研究表明, 尽管CPM存在对不确定性因素考虑不足等缺陷, 但通过科学的应用与技术创新, 它依然是提升建筑工程进度管理水平、保障项目成功实施不可或缺的有效工具。

关键词: 建筑工程; 施工进度管理; 关键路径法 (CPM); 网络计划技术; 项目管理

引言

随着我国城市化进程的不断加速和基础设施建设的持续投入, 建筑工程项目呈现出规模日益庞大、结构日趋复杂、技术集成度不断提高的特点。在此背景下, 传统的、依赖经验判断和粗放式管理的进度控制模式已难以应对现代工程项目的精细化管理需求。工期延误不仅会导致项目成本的急剧增加 (如人工窝工、设备租赁费超支、违约金等), 还可能引发合同纠纷, 损害企业的社会声誉, 甚至造成巨大的经济损失。因此, 如何科学、精准地规划和控制施工进度, 成为建筑企业亟待解决的核心问题。关键路径法 (CPM) 作为一种基于网络分析的定量管理技术, 能够清晰地揭示项目活动中各工序之间的逻辑关系, 准确识别出决定项目总工期的关键工作序列, 并为管理者提供优化资源配置、压缩工期、应对风险的决策依据。尽管CPM已有数十年历史, 但其理论内核在当代项目管理中依然具有强大的生命力。然而, 在实际工程应用中, 由于对CPM理解不深、数据采集困难或缺乏动态更新机制等原因, 其效能往往未能充分发挥。

1 关键路径法 (CPM) 的基本原理与核心概念

1.1 CPM的起源与发展

关键路径法诞生于1957年, 由美国杜邦公司与雷明顿-兰德公司共同开发, 最初被用于化工厂维护项目的工期优化。该方法一经推出, 便因其在缩短工期、降低成本方面的显著成效而迅速获得业界认可, 并很快从工业领域扩展至建筑、航天、国防等众多行业。在建筑工程领域, CPM的引入标志着进度管理从经验主义向科学化、系统化迈出了关键一步。它不再仅仅依赖项目经理的个人直觉, 而是通过构建数学化的网络模型, 为项目

时间管理提供了可量化、可验证的分析框架。

1.2 CPM的核心思想

关键路径法的核心思想在于将整个工程项目视为一个由相互关联的活动构成的有机整体。通过对这些活动进行分解、排序和时间估算, 并构建其逻辑网络图, 可以从中识别出一条从项目起点贯穿至终点、耗时最长的活动路径。这条路径即被称为“关键路径”, 其上的所有活动统称为“关键活动”。关键活动的最大特征在于它们没有机动时间, 或者说总时差为零, 这意味着任何一项关键活动的延迟都将直接、等量地导致整个项目总工期的延长^[1]。反之, 如果能有效缩短关键活动的持续时间, 则项目总工期也将相应缩短。这一思想为项目管理者指明了工作的重心所在——必须将有限的精力和资源优先投入到对关键路径的监控与保障上。

1.3 CPM的核心概念解析

要深入理解和应用CPM, 必须掌握其一系列核心概念。活动是构成项目的基本单元, 指需要消耗时间与资源并能产生明确成果的工作, 如“基础开挖”或“混凝土浇筑”。节点则代表活动开始或结束的瞬间状态, 本身不消耗资源。活动之间的先后顺序构成了逻辑关系, 其中最为常见的是完成-开始 (FS) 关系, 即紧前活动结束后, 紧后活动才能开始。持续时间是对完成一项活动所需时间的估算, 其准确性直接影响整个模型的可靠性。在此基础上, 通过正向推算可以得到每项活动的最早开始时间 (ES) 和最早完成时间 (EF), 而通过反向推算则能得到最迟开始时间 (LS) 和最迟完成时间 (LF)。总时差是LS与ES之差, 它代表了在不影响项目总工期的前提下, 一项活动可以推迟的时间余量。自由时差则进一步限定了不影响紧后活动最早开始时间的机动范

围。最终，所有总时差为零的活动串联起来，就形成了决定项目命运的关键路径。这些概念共同构成了CPM严密的逻辑体系，使其成为一种强大的进度分析工具。

2 CPM 在建筑工程施工进度管理中的具体应用

2.1 进度计划的编制阶段

CPM的应用始于项目初期的进度计划编制。这一过程并非一蹴而就，而是需要系统性的思考与协作。首先，项目团队需通过工作分解结构（WBS）将宏大的工程目标逐层细化，直至分解为一个具体、可执行的活动。这是后续所有分析的基础。接着，工程师们需要根据施工工艺流程、技术规范以及现场实际条件，仔细梳理各项活动之间的逻辑依赖关系，明确哪些工作必须先行，哪些可以并行。在此基础上，由项目经理牵头，联合有经验的技术人员，对每项活动的持续时间进行审慎估算^[2]。当这些基础数据准备就绪后，便可借助专业软件绘制出直观的网络图。最后，通过正向与反向的时间参数计算，精确识别出关键路径。至此，一份结构清晰、重点突出的进度蓝图便告完成，它不仅明确了项目的总工期，更重要的是，为管理者指明了需要重点关注和严格把控的核心工作序列。

2.2 进度计划的执行与动态监控阶段

计划的价值在于执行，而执行的关键在于动态监控。在项目进入实施阶段后，CPM的作用并未终结，反而进入了一个更为活跃的阶段。项目团队需要建立一套常态化的进度跟踪机制，定期收集现场的实际进展数据，包括已完成的工作量、正在进行活动的实际起止时间等。这些真实数据随后会被输入到CPM模型中，与基准计划进行对比分析，从而揭示出进度偏差的程度与方向。尤为重要的是，项目环境是动态变化的，原计划中的非关键活动可能因各种原因发生延误，当其延误时间超过自身总时差时，便会“晋升”为新的关键活动；同样，关键活动的提前完成也可能改变原有的关键路径。因此，管理者必须摒弃“一劳永逸”的观念，定期（例如在每次进度协调会后）对网络图进行重新计算和更新，确保关键路径始终反映项目的最新状态。这种动态更新机制，使得CPM能够持续为管理者提供精准的决策焦点，一旦发现关键活动出现风险苗头，便可立即启动预警和纠偏程序，将问题扼杀在萌芽状态。

2.3 工期优化与资源平衡阶段

在项目推进过程中，常常会遇到工期紧张或资源冲突的困境，此时CPM便展现出其强大的优化能力。当业主要求提前竣工或项目遭遇不可抗力导致工期滞后时，管理者可以利用CPM进行工期-成本优化分析。该方法聚

焦于关键路径上的活动，评估对这些活动采取赶工措施（如增加劳动力、延长作业时间、采用更先进设备等）所需追加的成本，并比较不同方案的成本效益，从而选择以最小代价换取最大工期压缩效果的最优策略^[3]。另一方面，当项目面临资源总量限制时，CPM可以通过利用非关键活动的总时差，对其开始时间进行灵活调整。例如，将某些非关键活动适当推迟，以避免资源需求高峰期，从而实现资源需求曲线的平滑化，避免因资源过度集中而导致的短缺或闲置，最终在满足工期目标的同时，实现资源的高效、均衡利用。

3 案例分析

为直观展示CPM的应用，我们以一个简化的住宅楼基础工程施工为例。

3.1 项目活动清单及逻辑关系如下：

表1 项目活动清单

| 活动代号 | 活动名称 | 紧前活动 | 持续时间（天） |
|------|---------|------|---------|
| A | 场地平整 | - | 3 |
| B | 测量放线 | A | 2 |
| C | 基坑开挖 | B | 5 |
| D | 垫层施工 | C | 2 |
| E | 基础钢筋绑扎 | D | 4 |
| F | 基础模板安装 | D | 3 |
| G | 基础混凝土浇筑 | E,F | 1 |
| H | 基础养护 | G | 7 |

3.2 应用CPM进行分析

3.2.1 绘制网络图

根据上表逻辑关系，可绘制出单代号网络图。

3.2.2 正向推算（计算ES,EF）

A:ES = 0,EF = 0+3 = 3
B:ES = 3,EF = 3+2 = 5
C:ES = 5,EF = 5+5 = 10
D:ES = 10,EF = 10+2 = 12
E:ES = 12,EF = 12+4 = 16
F:ES = 12,EF = 12+3 = 15
G:ES = max(16,15) = 16,EF = 16+1 = 17
H:ES = 17,EF = 17+7 = 24

项目总工期为24天。

3.2.3 反向推算（计算LF,LS）

H:LF = 24,LS = 24-7 = 17
G:LF = 17,LS = 17-1 = 16
E:LF = 16,LS = 16-4 = 12
F:LF = 16,LS = 16-3 = 13
D:LF = min(12,13) = 12,LS = 12-2 = 10

$$C:LF = 10, LS = 10 - 5 = 5$$

$$B:LF = 5, LS = 5 - 2 = 3$$

$$A:LF = 3, LS = 3 - 3 = 0$$

3.2.4 计算总时差 (TF = LS - ES)

$$A:0 - 0 = 0$$

$$B:3 - 3 = 0$$

$$C:5 - 5 = 0$$

$$D:10 - 10 = 0$$

$$E:12 - 12 = 0$$

$$F:13 - 12 = 1$$

$$G:16 - 16 = 0$$

$$H:17 - 17 = 0$$

3.3 结论

关键路径为A→B→C→D→E→G→H。活动F有1天的总时差,是非关键活动。这意味着,在不影响总工期24天的前提下,活动F最多可以延误1天。项目管理者应重点关注关键路径上的活动,确保其按计划推进。若因故需将总工期压缩至22天,则必须对关键路径上的活动进行赶工,例如,可以考虑缩短“基础养护”(H)的时间(如果技术允许)或增加“基坑开挖”(C)的机械台班。

4 CPM 应用的局限性及优化路径

4.1 局限性

尽管CPM功能强大,但在实际应用中也存在一些固有的局限性:(1)对不确定性处理能力弱:CPM假设活动持续时间是确定的单一值,而现实中工期受多种随机因素影响。对此,可以引入计划评审技术(PERT),采用三点估算法(乐观、悲观、最可能时间)来计算期望工期和方差,从而评估项目按期完成的概率。(2)依赖高质量的输入数据:CPM分析结果的准确性高度依赖于WBS的完整性、逻辑关系的正确性和持续时间估算的合理性。“垃圾进,垃圾出”(GIGO)原则在此体现得尤为明显^[4]。(3)忽视资源约束:传统CPM仅关注时间逻辑,未将资源限制纳入模型。在资源有限的现实场景下,即使逻辑上可行,也可能因资源冲突而无法执行。因此,必须将CPM与资源约束型项目调度(RCPSP)方法相结合。(4)静态性与动态性矛盾:CPM模型一旦建立,便趋于静态,而项目环境是动态变化的。频繁的手动更新网络图成本高昂且易出错。

4.2 面向未来的优化路径

为克服上述局限,CPM正与现代信息技术深度融合:(1)与BIM技术集成:建筑信息模型(BIM)提供了项目的三维几何信息和丰富的构件属性。将CPM进度

计划(4D)与BIM模型关联,可以实现进度的可视化模拟与冲突检测。管理者可以在虚拟环境中“预演”施工过程,提前发现空间冲突和逻辑错误,使进度计划更具可建造性。(2)与物联网(IoT)和大数据结合:通过在施工现场部署传感器、RFID标签、无人机等IoT设备,可以自动、实时地采集人、机、料、法、环等多维度数据。利用大数据分析技术,可以对进度偏差进行根因分析,并基于历史数据和机器学习算法,对未来进度风险进行智能预测,实现从“被动响应”到“主动预警”的转变。(3)云端协同平台:基于云的项目管理平台可以打破信息孤岛,让所有项目参与方在一个统一的数字环境中共享CPM进度模型和实时数据,极大地提升了沟通效率和决策速度。

5 结语

关键路径法作为项目进度管理的经典利器,在建筑工程领域历经时间考验,其通过揭示活动间的逻辑关系、精准定位关键路径、量化活动时差,为项目管理者提供了科学的决策框架。从进度计划的精细编制,到执行过程的动态监控,再到面对变化时的优化调整,CPM都发挥着不可替代的作用。然而,面对现代工程项目的复杂性和不确定性,单纯依赖传统的CPM已显不足。未来的方向在于将其与PERT、资源优化算法等方法论相结合,并深度融入BIM、IoT、大数据、云计算等新一代信息技术构建的数字化生态系统之中。通过这种融合创新,CPM将从一个静态的分析工具,进化为一个动态、智能、可视化的项目管理中枢,从而更有效地驾驭复杂工程的进度脉搏,为建筑工程的顺利、高效、成功交付提供坚实保障。建筑企业应积极拥抱这一变革,不断提升基于CPM的精细化、数字化进度管理能力,以构筑自身在新时代的核心竞争优势。

参考文献

- [1]汤伟俊.建筑工程进度管理中的关键路径法应用[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第四届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.浙江卫信工程管理有限公司天台分公司,2025:737-738.
- [2]王晖.工程进度管理中关键路径法的应用与优化[J].散装水泥,2025,(02):209-211.
- [3]刘婧.项目进度管理方法研究——关键路径法[J].营销界,2020,(16):152-154.
- [4]郭玉杰.基于关键路径法的工程项目进度控制策略探究[C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司.2024新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(五).唐山劳动技师学院,2024:125-126.