

氢能基础设施建设项目管理关键路径分析

徐焱滨

华电郑州机械设计研究院有限公司

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14641

[摘要] 在“双碳”目标战略背景下，氢能作为新型清洁能源，其基础设施建设日益受到重视。然而，氢能项目普遍面临工艺流程复杂、建设周期长、系统集成度高等问题，对项目管理尤其是关键路径分析提出了更高要求。本文从氢能基础设施建设的典型特征出发，系统梳理关键路径法（CPM）理论与方法，在此基础上，采用工作分解结构（WBS）、网络图技术，识别项目中的关键路径，进一步探讨资源约束下的关键路径优化策略，为提升氢能项目的工期控制能力与整体管理效能提供理论与实践支撑。

[关键词] 氢能基础设施；项目管理；关键路径；WBS；资源约束优化

1. 引言

氢能作为零碳能源系统的关键支撑环节，其大规模应用依赖于完善的基础设施体系，包括制氢、储氢、输氢和加氢等环节。在项目推进过程中，由于涉及多工种协作、多技术集成、多区域协调，管理难度显著上升，项目计划的逻辑性和时效性成为成败的关键因素。关键路径分析法（CPM）作为控制工期与优化进度的核心工具，在氢能项目中具有重要适配性。尽管传统 CPM 理论成熟，但在应对氢能工程中突出的不确定性、资源紧张与工序并行等方面仍存在局限，亟需结合行业特点进行技术性改良与优化。本文旨在聚焦氢能基础设施项目，从管理机制入手，构建与之相适应的关键路径识别与优化模型，推动项目进度管控的科学化、工程化。

2. 氢能基础设施建设项目特点分析

2.1 项目类型与构成

氢能基础设施项目主要包括可再生能源制氢装置（如 PEM 电解水系统）、高压储氢装置（350bar 与 700bar 两类储氢罐）、输氢管网及加氢站系统。以典型加氢站项目为例，其设备构成涵盖电解制氢系统（额定产氢能力 50 Nm³/h）、储氢模块（约 800kg 级高压储氢罐）、压缩机组（35MPa~70MPa）、加注装置等多个子系统，此外还涉及配电、消防、通讯、数据采集等辅助系统，形成复杂的系统集成型工程。建设项目往往呈现出高自动化、高压力工况与多学科协作特点，对工程组织与流程控制提出更高要求。

2.2 项目复杂性与不确定性

氢能项目的复杂性源自其跨学科的系统集成特征。一方面，制氢装置涉及电力电子与电化学反应过程，储氢环节则涵盖高压容器设计与金属氢脆控制，输氢与加注过程又牵涉

流体力学与自动控制系统。另一方面，氢能基础设施对外部依赖程度高，如用电、土地、气源与道路接入等，常受政策调整、地方规划与审批效率等不确定因素影响，施工计划极易受到扰动。加之，氢气本身易燃易爆，对施工工艺、安全技术规范提出严苛要求，项目在施工阶段需严格控制交叉作业风险及施工窗口期。

2.3 项目生命周期与阶段划分

氢能基础设施建设项目生命周期通常划分为前期规划、设计开发、设备采购、现场施工、调试验收五大阶段。前期规划阶段需完成场址可行性研究、环评、水保及能评审批；设计开发阶段需完成详细工程设计与施工图出图；采购阶段涵盖国产与进口设备技术谈判及运输安排；施工阶段依据工艺流程逐步推进主体安装、电气仪表敷设与系统联调；调试阶段需完成气密试验、无载氢测试、计量校准等环节。每一阶段均具备工序间强逻辑依赖性，路径识别与控制难度较大，尤需依赖关键路径技术。

3. 关键路径分析（CPM）理论与方法

3.1 关键路径分析基本原理

关键路径法（CPM）是一种用于确定项目中任务最早开始时间与最迟开始时间的网络进度管理技术，核心在于识别那些对总工期影响最大的活动序列。CPM 通过构建有向网络图，标注每项活动的持续时间、前置关系、最早/最迟开始与完成时间等参数，计算各活动的总时差（Total Float）。路径总时差为零的即为关键路径。以一个包含 35 个施工活动的典型加氢站项目为例，通过 CPM 分析识别出 17 项为关键任务，总工期控制在 210 天，任何关键任务延迟都将导致项目延期。

3.2 CPM 在项目管理中的作用

关键路径法 (CPM) 作为一种面向工期控制的计划工具, 在氢能基础设施项目管理中具有显著的应用价值。通过对项目各项活动间逻辑关系的明确界定, CPM 能帮助项目团队全面梳理工程流程, 清晰识别决定总工期的关键活动链条。在实际工程推进过程中, 借助关键路径信息, 项目管理者可将有限的施工资源, 如高等级电气技工、特殊设备或特种车辆, 优先投入至关键节点任务中, 避免非关键工序占用关键资源造成延误。例如, 某氢能加注站项目在设备安装阶段, 项目组通过 CPM 识别出“电解槽吊装—整流柜接线—PLC 控制回路调试”为关键路径, 遂将计划内的 3 组电气班组集中投入该路径, 工期控制在原定的 24 日之内。此外, CPM 还具备良好的动态适应能力, 在现场进度与计划不一致时, 能快速重新计算并修正关键路径, 有效规避由于任务浮动而导致的整体延期, 特别适用于应对氢能项目中高并发、快节奏施工特点。

3.3 传统 CPM 的局限性及其改进

尽管 CPM 在理论与工程实践中应用广泛, 但在氢能基础设施项目中, 传统 CPM 也暴露出一定的适用性局限。其一, 该方法默认资源无限供给, 未能有效反映实际施工过程中因人力、材料或设备受限所导致的工序延迟问题; 其二, CPM 以固定工期为基础建立网络图, 对施工中断、气候变化、设备交付延误等不确定性因素响应能力较弱, 导致路径判断滞后或误判。例如在某制氢厂项目中, 由于海外进口阀组交付延期 8 天, 导致原定关键路径偏离, 项目需临时调整作业序列。为弥补此类不足, 可引入资源受限项目调度问题 (RCPSP) 模型, 结合关键资源日可用量与任务优先级, 动态重构路径; 也可借助蒙特卡洛仿真法对活动时长进行概率分布模拟, 评估路径变动风险, 提升计划鲁棒性。此外, 当前 BIM 技术的集成也为关键路径追踪提供可视化支持, 将时间序列嵌入三维模型中, 可在施工现场实时调整作业流, 使关键路径管理具备更高的精度与可操作性。

4. 氢能基础设施建设项目关键路径分析

4.1 项目 WBS (工作分解结构) 分解

在开展氢能基础设施建设项目的关键路径分析前, 必须首先建立科学严谨的 WBS (工作分解结构), 作为进度计划和资源配置的基础。WBS 将整个项目目标进行层级化细分, 确

保各项活动具有明确的边界、可管理性和可计量性。在典型的 PEM 电解水制氢与加氢站项目中, WBS 可分为一级结构: 土建工程、设备安装、电气工程、自动化控制、调试运行五个主项, 每项再细化为若干子项。例如, 设备安装项可进一步分为制氢模块就位、储氢罐组装、高压压缩机吊装等子任务。WBS 分解应充分结合图纸、技术协议和施工组织设计内容, 确保其技术逻辑和工序顺序相符, 并与资源、时间等要素形成可量化关系。

进一步地, WBS 的结构层次需满足“100%规则”, 即上级任务必须完全由其下属于任务组成, 且不重复、不遗漏。在本研究中, 以一个装机容量为 5MW 的电解水制氢站为例, 其总任务量可划分为约 40 个三级 WBS 节点, 每个节点作为后续网络图中活动的输入单元, 便于计划编排与进度控制。WBS 构建完成后, 需与 BIM 模型绑定, 通过构件编码与任务编号的匹配, 实现构件级的进度控制。

4.2 活动定义与工期估算

在 WBS 构建完成后, 下一步是将每个工作包细化为可执行的活动, 并明确其起止边界与逻辑关系。活动定义必须具有施工可行性与测量可验证性, 避免出现虚拟活动或过度笼统任务。例如, “加氢机系统安装”可细化为“设备搬运就位”“连接高压管线”“电气接线与测试”等单元活动, 并注明其前后逻辑依赖。在氢能基础设施项目中, 活动间常存在高度的技术耦合性, 如储氢罐调压管道敷设必须在基础灌浆强度达标 ($\geq 20\text{MPa}$) 后 48 小时方可进行, 这种工程逻辑必须在活动定义中完整体现。

在工期估算方面, 推荐采用三点估算法, 即对每项活动分别估算最乐观时间 (O)、最可能时间 (M) 和最悲观时间 (P), 利用公式 $T = (O + 4M + P) / 6$ 得到期望工期, 进一步反映活动持续时间的波动性。例如, 在“压缩机接线调试”任务中, $O=3$ 天, $M=5$ 天, $P=9$ 天, 则 $T=5.2$ 天, 如表 1, 关键活动的期望工期普遍高于最可能工期, 反映出在氢能项目中施工不确定性较强, 必须通过合理缓冲和资源优化保障关键路径稳定可控。对于关键活动, 建议结合历史数据与专家评审结果交叉验证, 并考虑施工环境、工人效率、工序复杂性等因素。此外, 通过建立施工工效数据库, 如制氢机安装平均需耗用 4 工日/人、PLC 布线每日效率约为 120 米, 可大幅提高估算的准确性, 降低关键路径预测误差。

表 1 关键活动三点估算示意图

活动名称	最乐观工期（O）	最可能工期（M）	最悲观工期（P）	期望工期 $T = (O + 4M + P) / 6$
压缩机调试	3	5	9	5.2
储氢罐气密性测试	2	4	6	4
PLC 程序测试与联调	5	6	10	6.5

4.3 项目网络图绘制与关键路径识别

项目网络图是关键路径分析的核心工具，需依据活动间的前置逻辑关系构建有向图，清晰表示各活动之间的依赖路径。在氢能基础设施项目中，推荐采用 AOA（箭线表示活动）方式，节点代表事件，箭线代表活动。每一条路径由一系列活动构成，完成路径绘图后，计算每一活动的最早开始时间（ES）、最晚开始时间（LS）、最早完成时间（EF）与最晚完成时间（LF），进而求得总时差（Float）。其中总时差为零的路径即为关键路径。以一个 80 天工期、共 34 项活动的加氢站建设项目为例，关键路径识别结果为：地基施工→电解装置就位→管路安装→电气接线→联调→试运行，占总工期约 68 天。

在关键路径识别过程中，应使用专业软件工具如 Primavera P6 或 Project 进行自动化计算，以减少人工误差并支持后续的动态更新。在复杂项目中，常出现多条并行路径接近关键路径，需引入“近关键路径”识别机制（Near Critical Path），以防非关键活动浮动时间极短，造成管理上的忽视，最终引发整体进度延误。此外，对于活动持续时间的波动，可通过 PDM（前导图法）表示搭接关系，部分活动可在前项任务未完工时提前介入，有效压缩关键路径工期。

4.4 资源约束下的关键路径优化

传统 CPM 在分析关键路径时默认资源充足，然而在实际氢能项目中，常常受到专业工种匮乏、设备滞后到场、材料运输受限等多种资源因素影响，导致任务无法按计划进行。因此需引入资源受限项目调度模型（RCPSP）对关键路径进行再优化，目标是在资源有限条件下保持项目总工期最短。以某加氢站项目为例，其关键路径活动涉及高压系统调试、电气配线、储氢罐气密测试等任务，初步估算需电气技工 12 人日、仪表技工 10 人日，但由于人力供给受限，仅能提供 80% 资源，此时通过资源平衡算法重新排列活动次序，并在非关键任务中调配部分资源，最终仅延误 1.6 天工期，避免了

关键节点重大滞后。

关键路径优化还包括资源的跨期调节与工作面平衡。在具体实施中，可借助贪婪算法、遗传算法等智能调度手段，结合施工日历、设备台账与人力排班数据进行模拟排程，从而实现资源负荷的均衡化。在本研究中，通过构建资源强度曲线与活动资源需求矩阵，形成动态可调的资源配置模型，可在关键资源不足的情况下，优先保证关键路径任务正常推进，避免非计划工期增长。同时，结合滚动计划机制与现场施工反馈，实现关键路径每日动态修正，提升整个项目的韧性和应变能力。

结语

氢能基础设施项目作为高度集成、高风险的系统工程，其管理对进度控制提出了更高技术要求。关键路径法在氢能项目中可有效识别核心任务链，优化资源配置，提升工程执行力。但传统 CPM 方法在资源约束、多路径并行条件下存在一定适用性限制，亟需通过 WBS 精细化分解、网络图可视化构建、RCPSP 建模等手段予以拓展与改良。未来应结合 BIM 与 AI 调度系统，推动关键路径动态预测与自适应调整，实现氢能项目全过程精益化管理。

[参考文献]

[1] 凌文, 刘玮, 李育磊, 等. 中国氢能基础设施产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21 (03): 76-83.

[2] 任厚霖. 氢能产业链发展技术路线研究[J]. 化工管理, 2021, (34): 92-94.

[3] 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.

[4] 熊川. RF 公司氢燃料电池系统项目进度管理优化研究[D]. 吉林大学, 2024.

[5] 孙志磊. 项目进度管理方法研究[J]. 经济师, 2024, (05): 272-273.