

大型水利水电工程施工组织设计与进度管理

赵子顺

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要：大型水利水电工程作为国家重大基础设施，具有规模宏大、周期漫长、技术集成度高、环境约束强及社会影响广泛等显著特征。其建设过程的复杂性与不确定性对施工组织设计与进度管理提出了极高要求。本文系统阐述了大型水利水电工程施工组织设计的核心内涵、基本原则与关键构成要素，深入剖析了施工总布置、施工总进度、主要施工方案及资源配置等核心内容的设计逻辑。在此基础上，重点探讨了进度管理的理论基础、计划编制方法及其在资源约束条件下的优化路径。进一步地，文章前瞻性地分析了以建筑信息模型（BIM）、物联网（IoT）、大数据和人工智能（AI）为代表的数字化、智能化技术对传统进度管理模式的深刻变革，论述了4D/5D模拟、实时数据驱动、智能预警与动态优化等新型管理范式。研究表明，构建一个融合系统工程思维、精细化管理理念与前沿信息技术于一体的现代化施工管理体系，是应对大型水利水电工程复杂挑战、保障项目高质量履约的根本路径。

关键词：水利水电工程；施工组织设计；进度管理；关键路径法；BIM技术

引言

水利水电工程在调控水资源、防灾减灾、提供能源及支撑经济发展上意义重大。全球重视可持续发展与能源转型，大型、超大型水利水电项目不断推进。这类工程涉及高坝大库等，建设周期长、投资巨大。其施工工具独特复杂性：自然条件严苛不可控，选址多在特殊区域，自然因素制约施工；工序逻辑高度耦合，各环节相互依存，延误易引发连锁反应；资源投入强度大且集中，高峰期需求庞大，考验供应链与组织能力；外部协调关系复杂，需兼顾多重目标。传统经验主导型施工管理模式已难以应对挑战，科学系统的施工组织设计是项目成功先决条件，进度管理是确保高效执行的核心，二者构成项目管理的关键。因此，深入研究其机理、优化方法与技术，对提升工程建设水平意义重大。

1 施工组织设计的理论框架与核心要素

施工组织设计是指导工程施工全过程的技术经济文件，是连接工程设计与现场实施的桥梁。对于大型水利水电工程，其施工组织总设计需立足于全生命周期视角，构建一个覆盖空间、时间、资源与技术的多维协同体系。

1.1 基本原则与目标导向

成功的施工组织设计应遵循以下核心原则：（1）系统性原则：将工程视为一个有机整体，统筹考虑各子系统（如挡水、泄洪、引水、发电、通航等）之间的接口与协同，避免局部最优导致全局次优。（2）前瞻性原则：充分预判施工过程中可能出现的风险与变化（如地质突变、极端天气、政策调整），在方案中预留弹性空间和应急预案。（3）经济性原则：在确保安全、质量和工期的

前提下，通过方案比选、工艺创新和资源优化，追求全生命周期成本的最小化^[1]。（4）可持续性原则：将绿色施工、生态保护、节能减排等理念融入设计全过程，最大限度减少工程建设对环境的负面影响。其最终目标是形成一个技术上先进可行、组织上高效有序、经济上合理可控、安全上万无一失的施工实施方案。

1.2 核心构成要素解析

大型水利水电工程的施工组织总设计主要由以下几部分构成：

1.2.1 施工总布置

作为施工组织设计的空间载体，施工总布置是对整个施工区域进行的功能性规划。其核心任务是实现“人、机、料、法、环”的高效空间协同。设计时需重点考虑：（1）功能分区：依据施工流程，科学划分主体工程施工区、骨料开采与加工系统、混凝土生产系统、施工辅助企业（钢筋、木材、机修等）、物资仓储区、办公生活营地及弃渣场等功能区块。（2）交通组织：构建层次分明、容量充足、安全可靠的场内外交通网络，包括主干道、支线、桥梁、码头及垂直运输设施（如缆机、塔吊），确保物流畅通无阻。（3）三通一平（通水、通电、通路、场地平整）：这是施工的前提条件，其规划必须与主体工程进度紧密衔接，做到“永临结合”，避免重复建设。（4）防洪与排水：针对山区河流洪水暴涨暴落的特点，必须制定周密的度汛方案，确保施工场地和重要设施在汛期

1.2.2 施工总进度

这是施工组织设计的时间轴线，是后续一切管理活

动的基准。其编制质量直接决定了项目能否按期投产。一个好的施工总进度应清晰界定所有关键里程碑(如截流、下闸蓄水、首台机组发电、工程竣工)和控制性节点,并详细分解各阶段的工作内容、逻辑关系与持续时间。

1.2.3 主要施工方案与专项技术措施

针对工程中的关键技术难点和高风险作业,必须制定专项施工方案。例如,大江大河的截流方案、高陡边坡的开挖与支护方案、大体积混凝土的温控防裂方案、大型地下洞室群的分层分块开挖方案、巨型水轮发电机组的安装与调试方案等。这些方案不仅是技术文件,更是进度、资源和安全计划的基础^[2]。

1.2.4 资源配置与保障体系

基于施工总进度,精确计算并规划劳动力、主要施工机械设备(如挖掘机、自卸车、缆机、拌和楼)、大宗材料(水泥、粉煤灰、钢材、砂石骨料)以及资金的投入计划。同时,需建立健全的质量保证体系、安全生产管理体系、环境保护体系和应急管理体系,为施工活动提供全方位保障。

2 进度管理的理论基础与优化路径

进度管理是确保项目在既定时间内完成所有预定目标的过程,其核心在于计划、执行、监控与纠偏的闭环管理。

2.1 进度计划的编制方法论

进度计划的编制始于工作分解结构(WBS)。WBS将复杂的工程项目逐层分解为更小、更易于管理和控制的工作包,是定义活动、估算资源和持续时间的基础。在WBS基础上,需明确各项活动之间的逻辑关系(紧前、紧后关系),并采用科学的方法估算其持续时间。对于大型水利水电工程,由于历史数据丰富,常采用类比估算法和参数估算法(基于定额)。对于不确定性高的活动,则可引入三点估算法(PERT),通过乐观、最可能、悲观三种时间估算来计算期望值和方差,以评估风险。关键路径法(CPM)是编制进度计划的核心工具。通过构建网络图并进行正向与反向推算,可以识别出决定项目总工期的关键路径。管理者可以将有限的管理精力聚焦于关键路径上的活动,任何对其的延误都将直接导致项目整体延期。非关键路径上的活动则存在总时差(Total Float)和自由时差(Free Float),为资源调配和应对突发情况提供了缓冲空间。

2.2 资源约束下的进度优化

理想的网络计划假设资源无限,但现实世界中资源总是稀缺的。因此,必须进行资源约束进度计划(Resource-Constrained Scheduling, RCS)。(1)资源均衡:在不变更项目总工期的前提下,利用非关键工作的时差,调整其

开始时间,使资源需求曲线尽可能平滑,避免出现资源需求的“高峰”和“低谷”,从而降低管理成本和资源闲置。(2)资源平滑:在资源供应上限固定的情况下,通过调整非关键工作,尽可能满足资源限制,但这可能会导致项目总工期的延长。(3)工期-成本权衡分析:当项目有严格的工期要求时,可以通过对关键路径上的活动进行“赶工”(Crashing)来缩短工期。赶工通常意味着增加资源投入(如加班、增加设备),从而导致直接成本上升^[3]。进度优化的目标是在工期压缩带来的效益与增加的成本之间找到最优平衡点。

3 数字化与智能化驱动的进度管理范式转型

信息技术的迅猛发展正在重塑大型水利水电工程的进度管理模式,推动其从静态、被动、粗放向动态、主动、精细转变。

3.1 BIM与4D/5D进度可视化

建筑信息模型(BIM)技术为进度管理提供了革命性的可视化平台。(1)4D进度模拟:将三维BIM模型与施工进度计划(时间维度)进行关联,形成4D模型。管理者可以在虚拟环境中直观地模拟和审查整个施工过程,提前发现潜在的工序冲突、空间干涉、大型设备作业盲区等问题,实现“虚拟建造”,极大提升了进度计划的可建造性和合理性。(2)5D成本集成:在4D模型基础上,进一步关联工程量清单和成本数据库,形成5D模型。这使得管理者能够实时追踪“形象进度”与“投资完成”的对应关系,实现进度与成本的联动分析,为动态成本控制 and 变更管理提供精准数据支持。

3.2 物联网(IoT)

物联网技术通过在施工现场部署各类智能感知终端,实现了对施工要素的实时、自动、全面感知。(1)人员与设备管理:通过GPS/北斗定位、UWB室内定位等技术,可实时监控关键岗位人员和大型施工机械的位置、状态及工作效率,为优化调度和安全管理提供依据。(2)材料与构件追踪:利用RFID、二维码等技术,可对钢筋、预埋件、大型机电设备等关键物资进行全流程追踪,确保其按时、按质、按量到达指定作业面,消除因材料延误导致的进度停滞。(3)自动化进度采集:通过无人机定期倾斜摄影,结合计算机视觉和AI图像识别算法,可以自动提取土石方开挖量、混凝土浇筑面积、结构完成度等关键进度指标,取代传统的人工填报,显著提高了进度数据的客观性、准确性和时效性。

3.3 大数据分析 with 人工智能(AI)

海量、多源的施工过程数据为深度挖掘和智能决策奠定了基础。(1)进度偏差智能预警:基于历史进度数

据、实时采集数据以及外部环境数据（如天气预报），利用机器学习算法（如LSTM、随机森林）构建进度预测模型。该模型不仅能实时诊断当前进度状态，更能预测未来趋势，对潜在的延误风险进行早期预警。（2）根因分析与智能纠偏：当进度出现偏差时，AI系统可以快速关联分析相关数据（如设备故障记录、供应链延迟信息、劳动力出勤率、天气影响指数等），精准定位延误的根本原因，并基于知识库自动生成多种可行的纠偏方案（如调整工序、增加资源、优化工艺），辅助管理者进行科学决策^[4]。（3）动态滚动计划优化：现代进度管理系统支持“滚动式”计划更新。基于最新的现场反馈和预测结果，系统可以自动或半自动地对后续若干周期的详细进度计划进行重新优化，确保项目始终在正确的轨道上前进，形成一个“计划-执行-检查-行动”（PDCA）的高效闭环。

4 面临的挑战与发展趋势

尽管技术日新月异，大型水利水电工程的施工组织与进度管理仍面临诸多深层次挑战。气候变化带来的极端天气事件频发，严重压缩了有效施工窗口期；全球化供应链的脆弱性增加了关键设备和材料的交付风险；多参与方、多层次的复杂组织架构也对高效协同提出了更高要求。面向未来，该领域的发展将呈现以下趋势：（1）数字孪生：构建一个与物理工程完全同步、实时交互的虚拟映射体。数字孪生将成为项目管理的“中央驾驶舱”，实现对工程状态的全要素感知、全时空追溯、全链条仿真和全周期优化，为超复杂工程的管理提供前所未有的洞察力。（2）自主化与自适应管理：随着AI算法的成熟，未来的管理系统将具备更强的自主决策能力。在预设规则和授权范围内，系统能够根据实时数据自动调整施工顺序、优化设备路径、触发应急预案，实现从“人控”到“智控”的跨越。（3）韧性工程管理：未来的施工组织设计将更加注重“韧性”（Resilience），即系统在遭受扰动后

吸收、适应并迅速恢复的能力。这要求在进度计划中嵌入更多的冗余设计、替代方案和快速响应机制，以应对日益不确定的外部环境。

5 结语

大型水利水电工程的建设是人类智慧与自然力量的宏大对话。其成功不仅依赖于先进的工程技术，更取决于卓越的施工组织与进度管理能力。本文系统论证了施工组织设计作为项目顶层设计的核心地位，其通过施工总布置、总进度、技术方案与资源配置四大支柱，为工程实施构建了清晰的蓝图。同时，本文深入剖析了进度管理从传统的CPM/PERT方法，到如今深度融合BIM、IoT、大数据与AI的智能化范式的演进历程。研究表明，未来的竞争不再是单一技术或资源的竞争，而是系统集成能力与数据智能水平的竞争。唯有将系统工程的思维、精细化管理的理念与最前沿的数字化工具深度融合，构建一个集前瞻性规划、动态化监控、智能化预警与协同化决策于一体的现代化施工管理体系，才能有效驾驭大型水利水电工程的极端复杂性，确保这一国之重器能够安全、优质、高效、如期地建成，为人类社会的可持续发展注入源源不断的动力。

参考文献

- [1]赵玮璠.水利水电工程施工组织设计编制探讨[J].工程与建设,2024,38(01):165-167.
- [2]卢凤民.浅论水利水电工程的精细化施工组织方案编制管理[C]//《建筑科技与管理》组委会.2021年7月建筑科技与管理学术交流会议论文集.河南省人民胜利渠管理局,2021:108-111.
- [3]刘敏.水利水电工程施工进度计划风险分析和管理[J].治淮,2024,(07):73-74.
- [4]焦鹏.水利水电工程甲方的质量及进度管理措施[J].大众标准化,2024,(16):34-36.