水库灌区盾构施工材料消耗定额的精细化制定与动态管控研究

花政卿
河南省水利第二工程局集团有限公司　河南　郑州　450016

摘　要：水库灌区盾构施工具有地质条件复杂、施工环境敏感、材料消耗种类繁多且波动性大等显著特征，传统定额制定方法难以满足精准管控需求。本文系统分析了水库灌区盾构施工材料消耗的主要类型与影响机理，提出基于施工参数分源解析的精细化定额制定方法，构建了融合数据驱动与动态调整的定额管控体系。研究从信息化平台建设、组织流程优化、数据积累机制三个维度构建了动态管控的实施路径，并探讨了精细化定额与动态管控的协同运作机制，形成"制定—执行—反馈—修正"的闭环管理体系，旨在为水库灌区盾构施工材料成本控制与资源优化配置提供理论支撑和方法指导。

关键词：水库灌区；盾构施工；材料消耗定额；精细化制定；动态管控

引言

水库灌区工程建设是我国水资源优化配置和农业灌溉保障的重要基础设施。随着盾构施工技术在大直径输水隧洞工程中的广泛应用，施工材料消耗管理面临新的挑战。盾构施工涉及管片、注浆材料、刀具、油脂、泡沫剂等数十种消耗性材料，其用量受地质条件、掘进参数、设备状态等多重因素影响，消耗波动幅度大、管控难度高。传统定额管理多依赖经验估算或静态标准，难以反映实际施工条件的动态变化，导致材料超耗与浪费现象普遍存在，直接影响工程成本与进度控制。近年来，关于盾构施工材料消耗的研究主要集中在消耗量预测模型构建和单种材料消耗规律分析方面，而对定额制定的精细化方法及其动态管控机制的整合研究尚显不足。尤其在水库灌区这一特定场景下，施工线路长、穿越地层多变、环境保护要求高，材料消耗的影响因素更为复杂，亟需建立适应性强、可动态调整的定额管理体系。

1 水库灌区盾构施工材料消耗特征与影响因素

1.1 施工环境与工艺特征对材料消耗的影响

水库灌区盾构施工通常沿灌溉渠系或输水线路布设，具有线路跨度大、穿越地层多样、地下水位高等特点。与城市地铁盾构相比，灌区盾构施工面临的显著差异在于：其一，施工场地多位于农田或水网密集区域，施工组织受农田灌溉周期和季节影响明显；其二，输水隧洞埋深变化较大，水压条件复杂，对盾构密封系统和注浆质量提出更高要求；其三，施工沿线地质勘察精度有限，地层突变风险增大，增加了施工材料消耗的不确定性。这些特征对材料消耗产生的直接影响表现为：管片拼装量受隧洞直径和埋深影响而呈现区段性差异；同步注浆和二次注浆材料消耗量因地层渗透性和水压差异波动显著；盾构刀具磨损速率受砂卵石地层占比控制，消耗规律呈现明显的非平稳性。此外，环境保护要求对废弃泥浆和渣土处理材料的消耗也构成刚性约束。

1.2 主要消耗材料的类型划分与消耗机理

水库灌区盾构施工消耗材料按功能属性划分为三类。一是结构性材料，主要指预制管片及连接件，消耗量与掘进里程直接相关，曲线段因选型调整产生额外消耗。二是工艺性材料，包括同步注浆浆液及土体改良剂，其消耗与掘进速度、出土量等参数高度耦合。三是耗损性材料，涵盖刀具、密封油脂等，消耗速率取决于地层摩擦磨损[1]。三类材料机理差异显著：结构性材料受设计控制，波动有限；工艺性材料受施工参数即时影响，具随机时变性；耗损性材料服从渐进累积规律，遇硬质岩层或孤石时出现跃增。明确这种差异性，是制定差异化定额标准的方法论基础。

1.3 定额制定的传统方法及其局限性

当前工程实践中，盾构施工材料消耗定额的制定普遍采用经验估算法、统计分析法或类比推演法。经验估算法依赖工程技术人员的个人经验，主观性强、可移植性差；统计分析法以历史工程的平均消耗水平为基准，但忽视了不同工程地质条件的本质差异；类比推演法参照同类工程的消耗指标进行折算，在施工条件相似时具有一定参考价值，但水库灌区工程往往具有独特的地质序列组合，类比误差不容忽视。上述传统方法面临的共同困境在于：将复杂系统简化为静态平均模型，缺乏对

消耗波动内在机制的解释能力；定额一经制定便贯穿施工全过程，无法随施工条件变化而动态调整；各材料品种孤立制定定额，忽略了材料消耗之间的内在联动关系。这些局限性在水库灌区长距离、变地层施工中尤为突出，迫切需要引入新的方法论予以突破。

2 消耗定额的精细化制定方法

2.1 分源解析的定额构成分析框架

精细化定额制定的逻辑起点在于将总消耗量分解为若干可解释、可计量的构成项。本文提出"分源解析"的分析框架，将材料消耗总量分解为设计基准消耗、地质增量消耗、工艺偏差消耗和管理损耗四个组分。设计基准消耗指在理想设计条件下按几何尺寸和配比计算的理论用量，是定额的基准值。地质增量消耗反映实际地层条件与设计假定之间的差异所导致的额外材料需求，可通过地质参数与消耗量的关联模型进行量化[2]。工艺偏差消耗涵盖掘进参数偏离最优区间、姿态纠偏、停机重启等工艺事件引发的增耗。管理损耗则包括材料运输、存储、拌制、泵送等环节产生的物理损耗和操作损耗。四组分分解方法的理论优势在于：各组分具有明确的物理含义和可控性，便于针对性制定管控策略；不同组分采用差异化的确定方法，提高了定额标准的科学性和可操作性。

2.2 基于施工参数分化的定额标准生成

在分源解析框架下，定额标准的生成需分类施策。对于结构性材料，定额基准值依据设计图纸和规范要求精确计算，地质增量和工艺偏差以修正系数的形式予以表达，该系数可根据掘进区段的地质预报信息进行分段设定。对于工艺性材料，定额生成的核心在于建立施工参数（掘进速度、刀盘扭矩、土仓压力、注浆量等）与材料消耗率之间的映射关系，通过施工参数的分段统计和聚类分析，识别不同工况模式下的典型消耗水平，据此生成差异化的定额子目。对于耗损性材料，定额制定需引入寿命周期概念。以盾构刀具为例，其消耗定额应综合考量刀具类型、布置方式、地层磨蚀性指数和预期掘进距离等因素，计算单位掘进长度的刀具消耗量，并结合换刀作业的辅助材料消耗形成综合定额。三类材料的定额子目最终汇总形成覆盖全部消耗品种的精细化定额库。

2.3 定额精度控制与误差分配机制

精细化定额的有效性取决于其精度水平。本文提出采用"误差分层控制"策略：对影响定额精度的各种因素按照影响程度进行排序和分类，主要影响因素通过专项测试和现场标定予以精确量化，次要因素以包干系数的形式予以涵盖。在定额编制过程中，需同步给出各定额子目的合理波动区间和置信水平，为后续动态管控提供判断基准。同时建立定额精度的校核机制，将定额消耗量与实测消耗量的偏差控制在预设阈值之内，当偏差超限时启动定额修正程序。精度控制和误差分配从制度层面保障了定额标准的可信度和适用性。

3 定额动态管控的体系构建

3.1 消耗数据实时采集与传输机制

动态管控的前提是获取及时、准确、完整的消耗数据。本文构建涵盖三个层次的盾构施工材料消耗数据采集体系：现场感知层通过在盾构机关键部位安装传感器和计量装置，自动采集掘进参数、注浆流量、泡沫注入率等工艺数据，并通过地磅称重、扫码登记等方式获取物料进场和使用数据。数据传输层依托工业以太网和无线通信网络，将分散在各施工断面的数据实时汇集至中心数据库。数据处理层对原始数据进行清洗、校验和标准化转换，剔除异常值和重复记录，形成可供分析的结构化数据集[3]。值得注意的是，数据采集体系的设计必须兼顾全面性和经济性，在关键控制点设置冗余校验，确保数据缺省时仍可通过关联推算予以补充。同时，材料消耗数据与施工进度、地质编录数据的时空对齐是实现关联分析的基础，需建立统一的数据编码和时间戳标准。

3.2 定额执行偏差识别与预警

偏差识别是动态管控的核心环节。本文提出基于"定额波动包络线"的偏差判别方法：针对每种消耗材料，以其精细化定额值为中心线，结合实际消耗的历史波动特征和精度要求，构建上包络线和下包络线，形成定额波动的正常区间。当实时消耗数据超出包络线范围时，系统自动触发偏差预警。偏差预警按严重程度划分为观察、关注、预警和干预四个等级。观察级表示消耗略有波动但仍处于可控范围，仅记录备案；关注级提示消耗趋势异常，需由现场工程师核查原因；预警级表明消耗显著偏离定额，要求立即采取纠偏措施；干预级则意味着消耗失控，需停工排查并调整施工方案或定额标准。预警等级的动态调整机制避免了固定阈值带来的误报和漏报问题，提高了管控系统的实用性和适应性。

3.3 动态调整策略与响应流程

定额动态调整遵循"异常触发—原因诊断—方案制定—调整实施—效果验证"的闭环流程。当偏差预警达到关注及以上等级时，启动原因诊断程序，从地质条件变化、设备状态劣化、施工参数漂移、操作水平差异、计量误差等维度排查偏差来源。诊断结果将偏差区分为"可控偏差"和"不可控偏差"两类：前者指因施工管理不善或

操作不当引起的消耗增加，通过管理纠偏即可恢复至定额水平，无需调整定额值；后者指因客观条件（如实际地质与勘察不符、设计变更等）导致的系统性偏差，确需对相应定额子目进行修订。定额调整采用"渐进修正"策略，每次调整幅度不超过原定额的一定比例，并设置调整后的观察期以验证新定额的合理性，避免频繁调整导致定额失去参考价值。所有调整记录均需纳入工程档案，作为后续定额编制的历史参照。

3.4 信息化平台支撑与组织保障

定额动态管控的有效运转需要信息化平台和组织体系的共同支撑。信息化平台应集成数据采集、定额管理、偏差预警、调整审批、绩效统计等功能模块，实现管控流程的线上化和可追溯。平台设计应充分考虑水库灌区施工线路长的特点，支持多工点、多盾构协同管理和移动端应用[4]。在组织层面，建议建立由项目经理牵头、工程技术部负责实施、物资设备部和合约成本部协同参与的定额管控小组。明确各岗位在数据填报、偏差分析、定额修订等环节的职责权限，将定额执行情况纳入绩效考核体系。组织保障解决了动态管控"谁来管、管什么、如何考核"的问题，为技术手段的有效落地提供了制度基础。

4 精细化定额与动态管控的协同机制

4.1 定额基准与动态反馈的耦合逻辑

精细化定额与动态管控并非彼此独立的两个环节，而是构成"以精细制定为起点、以动态管控为保障"的有机整体。定额的精细化程度决定了管控的基准质量——定额越精细，偏差识别的敏感性和针对性就越强；而动态管控的运行效果反过来检验定额制定的合理性，积累的消耗数据为定额修订提供实证依据。二者的耦合关系体现为数据闭环：精细定额为管控提供判断基准，管控过程中产生的大量实际消耗数据又成为定额优化的输入信息，形成持续改进的正向循环。通过引入偏差信号的反馈校正机制，使定额标准不断逼近施工实际，实现消耗管理从静态到动态的质变。

4.2 全过程闭环管理模式的构建

基于上述协同逻辑，本文提出水库灌区盾构施工材料消耗定额管理的全过程闭环模式，包括四个阶段。在"制定"阶段，依据工程勘察资料和施工方案编制精细化的初始定额库。"执行"阶段，将定额嵌入施工过程中的材料计划、采购、领用和核销各环节，作为成本控制的刚性约束。"监测"阶段，实时追踪消耗数据，运用预警机制识别偏差并诊断原因。"修正"阶段，根据偏差诊断结果实施定额调整或管理纠偏，并将修正后的定额重新投入执行环节。四阶段首尾衔接，循环迭代，伴随施工全过程动态演进。该模式的核心特征在于变"事后统计"为"事中控制"，变"静态标准"为"动态基准"，从而有效应对水库灌区盾构施工条件多变带来的材料消耗管控挑战。

5 结语

水库灌区盾构施工材料消耗定额的精细化与动态管控，是提升工程成本控制水平和资源利用效率的关键路径。本文在系统分析水库灌区盾构施工材料消耗特征的基础上，提出了分源解析的定额精细化制定方法，构建了涵盖数据采集、偏差预警和动态调整的管控体系，并阐明了精细定额与动态管控协同运作的闭环机制。研究成果为施工企业从粗放式定额管理向精细化、智能化管理转型提供了理论框架和方法工具。需要指出的是，本文侧重于方法论层面的理论建构，所提出的框架体系在实际应用中仍需结合具体工程条件进行适配和细化。随着大数据分析、人工智能等技术的发展，未来定额管理将进一步向智能化方向演进，实现消耗预测、定额生成和管控决策的自动化和最优化，为水利工程建设管理水平的持续提升提供更强有力的支撑。

参考文献

[1]吴凡.浅埋覆土输水隧洞盾构施工技术研究与应用[J].山西建筑,2024,50(17):176-178+182.

[2]吉皮五沙.大渡河流域水电开发的碳足迹评估与低碳发展策略研究[D].重庆交通大学,2026.

[3]张莉俊.水利工程经济管理的成本控制方法[J].水利水电科技进展,2026,46(4):115.

[4]杜昌言.大直径盾构穿越地上水库关键风险与施工措施研究[D].山东大学,2025.