

大型明渠工程机械化施工技术应用与实践

文 / 冉宗峰 甘肃水投集团水电工程局有限责任公司

摘要：本文系统探讨了大型明渠工程机械化施工技术的应用与实践。以河南省某总干渠工程为例，详细阐述了机械化施工技术体系构成，分析了精准测量与轨道铺设、高效削坡、混凝土衬砌及设备协同移机等关键技术实施细节。通过对比分析表明，机械化施工较传统方式降低劳动力需求 41.5%，节约总成本 35.2%，同时显著提升工程质量，为推进水利工程机械化施工提供了参考。

关键词：大型明渠；机械化施工；削坡技术；混凝土衬砌；经济效益

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.011

引言

河南省某总干渠工程是国家“十四五”重点水利工程项目，全长 78.5 公里，设计流量 52m³/s，灌溉面积达 26.8 万亩。该工程地处丘陵山区，地形复杂，坡度变化大，沿线穿越多处山体和村庄，施工难度高。传统人工施工方式面临工期长、质量波动大、安全风险高等问题，且当地劳动力成本逐年攀升，招工困难。2022 年 6 月工程启动后，项目部决定采用机械化施工技术，引进国产自动削坡机、混凝土衬砌机等设备，实施标准化、规模化作业。

一、机械化施工技术体系构成

(一) 核心设备系统集成

大型明渠工程机械化施工的核心在于设备系统的科学集成与配置。自动削坡机作为主要设备，采用 DMW-3.2 型履带式结构，装机功率 220kW，最大削坡深度可达 1.2m，单次作业宽度 3.2m，能适应 30°~45° 范围内的坡度调整。混凝土衬砌机采用国产 JKL-120 型，工作宽度可调范围为 2.5m~4.0m，振捣频率为 3000~4500 次/分钟，能实现 0.9m³/min 的混凝土布料速度。配套的 YSP-1.8 型抹光机采用液压传动，抹面宽度可达 1.8m，

能确保表面平整度达到设计要求^[1]。

辅助设备系统主要包括轨道系统、混凝土搅拌运输设备和检测设备。轨道系统采用 Q345 钢材制作，单轨重量为 38kg/m，轨距标准化设计为 2.6m，每节长度 6m，可快速拼装。混凝土搅拌站采用 HZS90 型，小时产能 90m³，配备 8 台 8m³ 混凝土运输车，确保施工连续性。检测设备包括全站仪、激光扫描仪、厚度检测仪和混凝土强度检测仪等，实现全过程数字化监测。

设备选型原则遵循“适应性、高效性、可靠性、经济性”四大要素。根据明渠设计参数、地形条件和施工要求，采用标准化配置方案：小型明渠（宽度 <3m）采用单机作业模式；中型明渠（3m~5m）采用“1+1+1”模式（削坡机+衬砌机+抹光机）；大型明渠（>5m）采用“2+2+2”模式，实现双侧同步施工。通过模块化设计，设备可在不同工况间快速转换，提高适应性^[2]。

(二) 工艺流程

如图 1 所示，明渠工程机械化施工工艺流程形成了一套完整的技术链路，确保各环节无缝衔接。首先进行精确测量放样，采用 RTK-GPS 技术确定轨道铺设线路，误差控制在 ±5mm 内。轨道铺设采用分段预制、现场拼

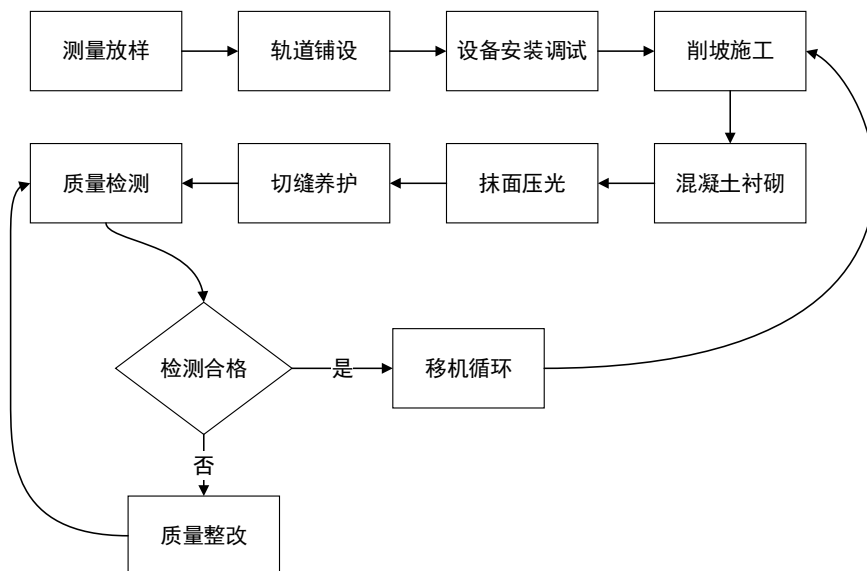


图 1 大型明渠工程机械化施工工艺流程图

装方式，每 100m 设置一个基准点，确保纵向坡度和横向水平度符合设计要求。设备安装调试阶段，对削坡厚度、混凝土布料量、振捣密度等关键参数进行校准，并进行空载试运行。

削坡施工是明渠成型的关键环节，自动削坡机按照预设程序进行坡面切削，形成符合设计要求的断面。随后进入衬砌阶段，混凝土衬砌机沿轨道行进，完成混凝土的布料、振捣和初步整平工作。抹光机紧随其后进行表面处理，确保平整度达标。质量检测环节采用“实时检测+阶段验收”模式，对关键指标如平整度、厚度、强度等进行全面检查。最后进行设备移机，将整套系统沿渠道方向推进，开始下一循环施工^[3]。

二、机械化施工关键技术实施

（一）精准测量与轨道铺设技术

明渠机械化施工的首要环节是精准测量与轨道铺设，这直接关系到后续施工的精度和效率。本工程采用 RTK-GNSS 技术结合全站仪进行测量放样，建立了以明渠中心线为基准的三维控制网，控制点间距为 50m，高程精度控制在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内。测量数据通过计算机处理后，形成渠道三维设计模型，为轨道铺设提供精确依据。

轨道系统采用组合式设计，主体由 Q345 钢材制造的 T 型轨组成，每段长 6m，通过专用连接器快速拼装。轨道两侧设置可调节支撑架，能适应地形变化进行微调，确保轨道纵向坡度误差不超过 1%，横向水平度偏差控制在 5mm 以内。为增强轨道稳定性，每隔 20m 设置一处固定锚固点，防止施工过程中的位移。在软土地段，采用预先铺设混凝土基础的方式增强承载力，确保重型设备运行时轨道不发生变形^[4]。

针对明渠施工中常见的弯道段和变坡段，开发了可调节曲率半径的弯道轨道模块，曲率半径可在 20~100m 范围内调整，满足不同转弯半径需求。变坡段则通过轨道高程精确调整，实现最大 15° 的坡度过渡。轨道铺设完成后，利用激光测距仪进行全面检测，确保其几何尺寸符合设计要求，为后续设备运行奠定基础。

（二）高效削坡施工技术

削坡施工是明渠成型的关键工序，本工程采用 DMW-3.2 型自动削坡机进行机械化作业。该设备削坡容量达 3.2m³，在标准工况下作业效率可达 1.2m³/h，是传统人工削坡效率的 6~8 倍。削坡机配备了基于激光扫描的坡面轮廓检测系统，实时监测削坡深度和坡度，形成闭环控制，确保削坡精度。

技术实施中，根据土质条件优化削坡参数。在硬土层采用“多次薄层切削法”，每次切削厚度控制在 5~8cm，减小设备负荷，提高削坡平整度；松软土层则采用“一次成型法”，削坡厚度可达 12cm。坡面平整度控制在 $\pm 0.5\text{cm/m}$ 范围内，满足设计要求。为解决削

坡过程中的震动问题，设备安装了阻尼减振系统，有效降低机械振动对坡面的影响。

削坡轨迹规划采用计算机辅助设计，根据渠道断面形状，生成最优削坡路径，减少无效行程。自动化控制系统通过 PLC 实现，操作人员只需设定初始参数，系统便能依据预设程序自动完成削坡。在坡面处理技术上，创新采用“削压结合法”，即削坡后立即进行轻度压实，增强坡面稳定性，为后续衬砌创造良好条件。

（三）混凝土衬砌工艺创新

明渠混凝土衬砌环节采用 JKL-120 型混凝土衬砌机，实现了从布料到压光的机械化作业。该工艺流程精细化分解为布料、振捣、抹面压光、切缝和养护五个步骤，每个环节都有针对性的技术创新。布料系统采用分区供料技术，通过计算机控制的分配器，确保混凝土均匀分布，布料厚度误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 范围内^[5]。

混凝土配比经过专门优化，采用 C25 防水混凝土，水灰比为 0.45，添加了聚丙烯纤维和高效减水剂，提高了混凝土的和易性和抗裂性。振捣采用高频振捣技术，振捣频率为 3800~4200 次/分钟，有效消除气泡，提高密实度。衬砌完成后的混凝土表面平整度达到 3mm/m，厚度控制在 120~140mm 范围内，28 天抗压强度在 24.2~27.6MPa 之间，各项指标均优于设计要求。

为解决传统衬砌中常见的收缩裂缝问题，开发了自动控制切缝技术。切缝机在混凝土初凝后（通常为浇筑后 4~6 小时），按照设计间距（一般为 3~4m）进行切缝，深度为衬砌厚度的 1/3，有效控制了随机裂缝的产生。养护采用自动喷淋系统和覆盖保湿膜相结合的方式，确保混凝土在 48 小时内保持适宜湿度，促进水化反应充分进行。

（四）设备协同与移机高效技术

大型明渠工程机械化施工的高效实施，依赖于多设备协同工作与移机技术的创新。本工程构建了“主设备+辅助设备”的协同作业模式，形成削坡→清理→衬砌→抹面→切缝的流水作业链。设备间通过无线通信系统保持实时数据交换，相互配合，减少等待时间。

移机技术是维持施工连续性的关键。传统移机方式耗时长、精度难保证，本工程开发了同步液压提升系统，能同时提升整套轨道及设备，移动速度达 4m/min，较传统方式提高了 50% 以上。移机定位采用激光导向技术，确保轨道重新安装后的位置精度，偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 范围内。

通过设备协同与高效移机技术，本工程实现了单日施工面积 2,000m² 的高产能。施工进度计划采用“日周期管理法”，每天完成一个固定长度段的施工（通常为 40~50m），从而实现施工资源的均衡使用和进度的精确控制。同时，建立了设备故障快速响应机制，配备专业维修团队和关键备件，将设备故障处理时间控制在 30 分

钟内，确保施工连续性，有效避免了因设备问题导致的工期延误。

三、经济效益与质量控制分析

(一) 劳动力与成本对比

机械化施工技术的应用显著改变了大型明渠工程的经济效益结构。通过对胡坪灌区总干渠工程分析，机械化施工在劳动力配置和成本构成上优势明显。如表 1 所示，削坡施工环节，机械化作业仅需 16 人，较传

统方式减少 36%。衬砌环节机械化施工需 18 人，减少 40%。整体而言，机械化施工平均用工量约为传统方式的 60%。

施工成本方面，明渠削坡单价由 7.20 元 /m² 降至 4.80 元 /m²，降幅 33.3%；混凝土衬砌单价由 32.50 元 /m² 降至 23.40 元 /m²，降幅 28.0%。机械化施工总成本较传统方式节约 35.2%。同时，机械化施工使工期缩短 32%，降低了管理费用和临时设施费用。

表 1 机械化施工与传统施工劳动力与成本对比

施工环节	指标类型	机械化施工	传统人工施工	变化幅度
削坡施工	用工人数 (人)	16	25	-36.0%
单价 (元 /m ²)	4.80	7.20	-33.3%	
日均产量 (m ²)	1850	680	+172.1%	
混凝土衬砌	用工人数 (人)	18	30	-40.0%
单价 (元 /m ²)	23.40	32.50	-28.0%	
日均产量 (m ²)	2000	720	+177.8%	
综合分析	总用工量 (人 /km)	48	82	-41.5%
综合成本 (万元 /km)	42.6	65.7	-35.2%	
工期 (天 /km)	6.5	9.6	-32.3%	

(二) 质量检测与成果

机械化施工在质量控制方面展现出明显优势，关键在于实现了施工过程标准化和数字化监测。如表 2 所示，通过对完工段落的抽样检测，明渠坡面平整度平均偏差为 2.1mm/m，优于设计要求；混凝土衬砌厚度平均 133mm，符合设计要求，且标准差仅为 4.2mm；混凝土强

度检测显示，28 天抗压强度平均值达 26.8MPa，变异系数仅为 5.3%。

质量验收方面，机械化施工的平整度、厚度和强度合格率分别达 98.7%、99.2% 和 100%，显著高于传统施工。特别是衬砌缝隙处理质量大幅提升，接缝处渗漏率从 4.2% 降至 0.8%。

表 2 机械化施工与传统施工质量检测对比

检测项目	检测内容	设计要求	机械化施工	传统施工	对比优势
坡面质量	平整度 (mm/m)	≤ 3.0	2.1±0.4	3.5±0.9	+40.0%
混凝土衬砌	平均厚度 (mm)	120 ~ 140	133±4.2	128±8.6	均匀性提高 51.2%
28 天抗压强度 (MPa)	≥ 25.0	26.8±1.4	25.3±2.2	+5.9%	
接缝质量	渗漏率 (%)	≤ 1.0	0.8	4.2	+81.0%
合格率	整体质量验收合格率 (%)	≥ 95	99.3	94.2	+5.4%

结语

大型明渠工程机械化施工技术的应用与实践，已在胡坪灌区总干渠工程中取得显著成效。机械化施工不仅提高了施工效率，降低了劳动力成本，更实现了质量的全面提升和标准化。数据表明，机械化施工使总成本降低 35.2%，劳动力需求减少 41.5%，而质量指标全面优于传统施工。然而，国产设备仍需在智能化控制、模块化设计和复杂地形适应性等方面加强创新。未来应加速推进核心技术研发，建立健全标准体系，加强人才培养，为我国水利基础设施建设提供强有力的技术支撑。

参考文献

[1] 王青松. 关于我国山岭隧道钻爆法施工技术发展的一些思考 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43(S1): 37-45.
 [2] 查小庆. 大型河渠现浇混凝土衬砌机械化施工

技术研究 [J]. 珠江水运, 2022, (14): 17-19.
 [3] 牛尚峰, 郑贵亮, 章再兴. 渠底改造机械一体化施工机械优化及施工技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2018, (23): 231-234.
 [4] 张学春. 隧道机械化设备应用及施工工艺改进 [J]. 中国高新科技, 2020, (10): 109-110.
 [5] 魏福来. 长输管道机械化施工装备研究与应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(23): 43-44.
 作者简介: 冉宗峰, 男, 1974.02, 甘肃·白银, 族, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 水利水电工程管理。
 基金项目: 课题名称: 景电二期体质增效项目明渠施工技术的研究与应用。项目负责人: 冉宗峰。项目名称: 甘肃省水利厅关于下达 2025 年水利科学试验研究及技术推广计划, 项目编号: 25GSLK100。