

第 1 篇 隧洞工程施工新技术应用

- 1 绪 论
- 2 隧洞工程施工支护设计新技术
- 3 经济适用型有轨出渣技术的应用

1 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

我国水资源蕴藏总量虽居世界首位但开发量不足 19%，属于水资源相对紧缺的国家之一，且时空分布和供需条件极不平衡。水工隧洞是目前解决这一问题的有效方式，水工隧洞主要包括引水隧洞、导流隧洞、泄洪隧洞等。截至 2010 年，我国已建与在建的大型水利水电（含抽水蓄能）地下工程 90 余座，水工隧洞 450 余条，隧洞总长度超过 500 km，包括有压、无压、竖井及斜井等形式的引水隧洞，其中已建成 4 km 以上的引水隧洞 22 座。锦屏水工隧洞（2007）^[1]装机 4 400 MW，四条引水隧洞平均长度 16.625 km，是目前规模最大的引水隧洞。南水北调工程穿越了黄河地下输水隧洞、一大批巨型水电站地下引水发电系统，其地下工程规模之大，施工难度之高，必将进一步推动我国地下工程施工的发展。目前我国已建或在建的长距离地下水工隧洞主要有南水北调中线穿黄隧洞（4.25 km）、渔子溪一级水电站引水隧洞（8.61 km）（1985 年）^[2]、天生桥一级水电站引水隧洞（9.77 km）（2000 年）^[3]，冯家山灌区引水隧洞（1.26 km）（2011 年）^[4]、引滦入津工程的输水隧洞（11.38 km）（1983 年）^[5]、福堂水电站引水隧洞（19.3 km）（2003 年）^[6]、辽宁大伙房输水一期工程（85.3 km）（2009 年）^[7]等。

地下工程施工具有一定的复杂性和多变性，引水隧洞的施工建设面临着各种各样的问题，这些问题直接影响到工程的施工进度、投资和安全运行，引水隧洞一旦失事，会给国民经济建设造成重大的损失，还有可能危及到人民的生命财产安全。隧洞施工过程中出现塌方、涌水等现象和由于运渣效率低而导致的工期延误目前也屡见不鲜，其主要原因也

是支护设计、支护结构达不到要求以及运渣技术选择不恰当，所以在保证工程质量的同时，如何改进施工方法提高施工效率就显得越来越重要。

龙开口电站水资源综合利用一期工程是云南省第一个水电站与水利工程相结合综合利用的省重点项目之一；该工程输水干渠取水口位于龙开口水电站大坝左岸，进口底板高程 1 287.5 m，线路沿着金沙江左岸山体布置，最后到达涛源镇政府所在片区，线路总长为 65.7 km，其中隧洞共计 15 条，其中最长隧洞 4 158.9 m，最短隧道 380 m，隧洞长度共计 15 613.065 m，占引水系统总长的 23.76%。输水隧洞净断面尺寸为 2.0 m×2.667 m~1.5 m×2.233 m（宽×高），城门洞型，开挖断面尺寸为 2.6 m×3.267 m~2.1 m×2.833 m（宽×高）。渠线总体属剥蚀、溶蚀中低山地貌，渠线地形普遍较陡，自然坡度 20°~40°，局部达 60°~70°，局部地形平缓开阔，自然坡度在 20°以下，地表多为第四系松散层覆盖。渠道沿线物理地质现象较发育，主要为冲沟、塌滑、泥石流。特别是 12#、15# 隧洞洞线途经挤压破碎围岩带和砂卵砾石层，地质薄弱等问题突出。开展对龙开口水电站水资源综合利用一期工程线性工程的规划、管理、施工组织、技术的优化及运用等几个方面进行探讨和研究有着重要的实际意义，总结出较科学合理的成果为以后类似工程施工积累经验和参考。

1.1.2 研究意义

目前，世界各国的水利工程专家学者对远距离跨流域调水工程等进行了大量研究，研究内容主要集中在地质超前预报、工程通风排烟技术、质量通病控制、成本控制、爆破技术等方面。相对于欧美国家，我国在引水隧洞的建设方面起步较晚，但近十年来，我国在隧洞选线、进出口选址的勘察、设计和施工等方面进行了广泛研究，并取得了丰硕成果。现如今，我国正处于经济迅猛发展的重要时期，伴随着基础设施的快速发展，近几年来我国地下工程建设也进入快速发展阶段，在地下洞室的选址、勘察、设计和建设施工方面也取得了丰硕成果，在长距离隧洞施工方面也积累了丰富的经验。但在小断面、长距离引水隧洞施工技术和建设管理方面的研究尚需进一步提升和完善。在超前预报、出渣技术、钻爆技术、测量导线控制及质量和进度控制等方面研究还不够深入，还

有待进一步研究。由于受到地形条件的限制，沿线一般要穿越不同地层岩性、断裂构造较为发育、岩体完整性不一、不同类型的地质单元，存在突涌水、薄弱断层破碎带等特殊区段工程地质问题。同时，长距离、小断面开挖因洞室空间相对狭小，出渣距离较长，使得洞室的通风、排水、出渣、支护等工序交叉干扰、相互影响，造成施工组织、进度和安全控制非常困难和复杂。近年来，我国许多隧洞施工出现的安全事故和安全问题，大多是由施工技术使用不当而引起的，因此，通过对隧洞工程的施工技术和工序管理进一步进行优化和改进，隧洞工程的施工安全、质量、进度、成本以及环境职业健康保证将会得到大大的改善和提高。

“龙开口水电站水资源综合利用一期工程”引水隧洞工程施工特点是小断面和长距离，小断面和长距离的隧洞施工作业面狭小，给钻爆开挖、通风、排水和支护都带来了较大的困难。隧洞施工的钻爆工艺、除尘、通风、排水等效果直接关系到施工的质量、进度、投资和安全，所以做好小断面、长距离引水隧洞工程切实可行的钻爆、通风、除尘、排水等关键技术方案非常重要。

鉴于此，本项目依托“龙开口水电站水资源综合利用一期工程”引水隧洞工程建设，结合项目研究过程中的技术管理工作对工程实践过程中遇到的各种关键的技术难题进行凝练和升华，对不良地质条件下隧洞的快速施工和经济实用型有轨出渣技术进行分析研究与实施，为该工程的施工提供及建设管理提供技术指导和支撑，对提升“龙开口水电站水资源综合利用一期工程”隧洞工程建设管理和施工技术水平具有重要的指导意义。同时本项目在超前锚杆和超前导管等传统工艺的基础上进行局部优化及改进，通过现场应用分析和总结出了较为成熟可行的施工技术，可解决小断面、比较长的引水隧洞在施工中存在的一些技术性难题，同时为类似工程提供工程参考与借鉴，提高提升企业类似工程的竞争力。

1.2 国内外研究现状

输水隧洞建设与道路、地铁、矿山隧道的建设有着相同的问题亟待解决。目前国内外学者对隧洞（道）的研究都集中在地质条件的不同所选择

的施工方式 (2015, 2016, 2017) [8-22]与管理方式 (2014, 2015, 2016) [23-34] 的选择运用上。施工技术的创新不但可以缩短工期, 还能节省大笔的资金。施工管理使得工程有序开展, 对于风险管理、组织管理严格把控, 确保工程保质保量的按时完成。

1.2.1 隧洞施工技术现状

1.2.1.1 开挖技术研究现状

隧洞开挖技术除广泛应用于水利工程中的引水、泄水、导流外, 在公路、铁路、地铁建设等领域的应用也较为普遍。而我国地域广阔, 山地、丘陵、河流等复杂地形分布较多, 各地区的地质情况也呈现多样化, 这些对隧洞开挖提出了很大的挑战。目前已建隧洞的开挖方法, 主要为钻孔爆破法开挖 (钻爆法), 也有少量工程使用了隧洞掘进机法开挖 (TBM)。其他破岩方法如高压水射流、激光、超声、热力破岩等物理破岩方法, 以及使岩体软化、溶解的化学破岩方法, 尚处在进一步的研究和试验中。

魏永华等 (2008 年) [35]通过对北盘江董箐水电站右岸导流隧洞进口段所确定的技术方案进行探讨, 总结和提高在复杂地质条件下特大断面隧洞开挖技术。他指出隧洞开挖施工中, 针对不同的工况, 作出合适的技术方案选择, 才能确保工程顺利进行, 达到安全、优质、高效。杨玉银等 (2013) [36]针对隧洞开挖超挖严重、开挖断面成形差的情况, 探讨了超挖对工程施工的影响, 给出了施工技术控制、爆破技术控制、施工管理控制等超挖控制方法, 并论证了单循环进尺与超挖量是平方关系, 控制单循环进尺可以有效减少超挖的结论。李兵 (2012) [37]结合锦屏二级水电站大型引水隧洞开挖工程, 介绍了采用激光测量技术的 FARO 三维激光扫描隧道测量系统、工作流程及简要说明、应用实例展示、优越性及应用前景。隧洞开挖技术在工程建设体系中十分重要, 为了应对各种新的问题, 还需要研究人员在此道路上继续探索, 创建新的开挖方法。董峰等 (2016) [38]研究水电站导流洞开挖施工中, 考虑施工技术的适用性, 满足工程建设的需求, 根据水电站导流洞的组成结构对开挖技术的

选择与研究做了深入的研究。李波等 (2016) [39] 针对某特大断面软岩隧道采用有限元数值模拟手段对 CD 法和三台阶七步开挖法的施工工法及其循环进尺参数进行优化研究, 并与现场实测数据对比验证, 验证了数值模拟的可靠。潘从贵等 (2016) [40] 以龙桥特大桥拱座基坑石方爆破开挖施工技术出发, 分析了基坑爆破的特点及难点, 得到了带缓冲层预裂爆破技术能较好地实现爆破轮廓的平整的结论。

1.2.1.2 支护技术研究现状

隧洞支护结构理论的发展至今已有百余年的历史, 它与岩土力学的发展有着密切的关系。土力学的发展促使着松散地层围岩稳定和围岩压力理论的发展, 而岩石力学的发展促使围岩压力和隧洞支护结构理论的进一步飞跃。随着新型支护结构的出现, 岩土力学、测试仪器及计算机技术和数值分析方法的发展, 隧洞支护结构理论正在逐渐形成一门完善的学科。

近年来国内外对隧洞支护技术做了大量的研究, 形成了较为完善的支理论, 在工程实际应用中也得到了广泛的认可。其中纪鹏 (2014) [41] 分析了隧洞工程以及隧洞支护结构理论, 其次对隧洞施工设计理论进行综合阐述, 提出了隧洞支护的三种结构, 为以后隧洞施工技术、施工设备方面更进一步的探讨而提供相关参考资料。李建华 (2016) [42] 阐述了地下输水隧洞工程施工采用钻爆法与掘进机法的优缺点, 对支理论进行了分析研究, 对输水隧洞施土施工工艺的选取依据以及支护方式的作用原理进行了进一步探讨。方创熙 (2008) [43] 系统总结了隧道支护技术的主要类型, 分别介绍了各种支护手段的概况、进展和适用条件, 并重点总结了普通喷混凝土、钢纤维喷混凝土、锚杆支护、大管棚支护、小导管支护、格栅与支撑以及地层冻结法等支护方法。最后, 介绍了比较成熟、经典的支护设计方法——Q 系统分类法。徐宇栋等 (2016) [44] 从地铁隧道队地层及建筑物的影响出发对隧道施工中超前支护方法的选型做了分析, 确定了超前支护方法为水平旋喷桩。运用数学推导、数值模拟和现场沉降监测数据对这一超前支护方法进行了研究。李万宁等 (2016) [45] 从土钉墙支护、水泥土墙、排桩、地下连续墙等方面介绍了基

坑支护的方法类型,分析了各种支护结构的安全等级与使用条件。贾宏俊等(2015)^[46]针对深部软岩地下工程围岩稳定性差且具有长期流变效应的问题,提出了刚柔结合的软弱大变形巷道围岩新型支护方法。罗德志等(2013)^[47]以文莱都东水坝导流洞支护为例,介绍高预紧力锚杆在软岩隧洞支护中的作用。潘一山等(2014)^[48]从现有理论不能有效解决煤矿巷道冲击地压的问题,建立了冲击地压下巷道围岩与支护响应的动力学模型,提出了冲击地压矿井巷道支护设计的两个思路,研发了一种新型防冲吸能巷道液压支架。

1.2.1.3 出渣技术研究现状

出渣的速度是控制单循环作业时间的关键,也是影响洞挖工程进度的主要因素,除了设法保证机械设备完好外,采取的另一项有效措施是:在洞中部设置运渣中转站。目前,国内外采用的出渣及材料运输系统主要有以下三种方式,即有轨方式(电力机车、内燃机车)、无轨方式(轮式车辆)和胶带方式,这三种方案有着各自的特点,其选择依据是根据开挖洞径、隧洞长度、隧洞坡度、隧洞布置、通风和投资费用、岩石的碎裂特性和隧洞里面水的数量进行综合比较。邵政权(2014)^[49]针对隧洞斜井无轨出渣技术进行了研究,其以东湖电站供水工程引水隧洞 8#支洞投影长度 1 084.12 m,坡度为 21.76%,支洞开挖断面为 5.5 m×5.5 m 为研究对象,对无轨运输方案作了简述,分析了无轨运输方案的难点及解决办法,也对出渣车辆调度、行驶速度等问题进行了详细的阐述。李文富等(2007)^[50]针对大伙房水库输水工程深埋长大隧洞 TBM 施工特点,研究确定了主洞连续皮带机加支洞固定皮带机的出渣方案,该出渣系统保证了 TBM 掘进机在工程施工中的高速掘进和高利用率,为南水北调西线隧洞施工等类似工程提供了成功的范例与宝贵的实践经验。唐志林等(2006)^[51]介绍了 TBM 施工出渣技术现状,分析了连续皮带机出渣方案的技术优势,针对主体隧洞 TBM 掘进和出渣过程进行了研究。王克忠等(2016)^[52]以沐水东调引水隧洞无轨运输方式为例,介绍了出渣过程中的通风形式与风管选取,对隧洞通风进行了 CFD 软件模拟。张高峰等(2016)^[53]

介绍了顶管施工技术, 具有施工出土量少、施工污染小作业面小、对环境影响小等优点。戴洪伟等 (2015) [54]对扬州瘦西湖隧道工程环流系统中的难题, 对盾构刀盘进行重新选型配置, 对冲刷系统和环流管路进行了改造, 形成了全断面黏土地层高效环流及出渣技术。王联军等 (2015) [55]结合巴基斯坦阿莱瓦水电站引水隧洞, 介绍了卷扬机分级接力出渣施工技术, 该技术采用多循环、多工序的有轨分级接力运输出渣。杨庆辉等 (2016) [56]对 TBM 施工中的出渣方式进行了分类比较, 认为传统的有轨运输+龙门吊提升会制约施工能力和效率, 提出了连续皮带机+垂直皮带机出渣的方式, 使掘进效率比上一种方式出渣提高了 75%以上。范水木等 (2012) [57]介绍了在两条平行输水隧洞施工中, 为减少洞内油烟和废气污染, 达到供水质量清洁、安全的目的, 采用电动轨道机车运输出渣的施工方式。

1.2.2 隧洞施工管理技术研究现状

隧洞施工管理主要集中于对于具体项目工程中所面临的施工安全[27, 58-59]、质量[29, 32, 60]、进度、成本方面的管理[61-64]。在进行施工作业的过程中采取的施工方法都只是为了保证这种施工的管理变化。要在真正意义上实现“动态施工”, 需要不断地对管理水平进行提高与完善。

洪坤等 (2015) [65]提出了改进的 PERT 方法, 克服了经典 PERT 中未考虑逻辑关系不确定和活动时间仅限于特定形式的不足。运用 Monte-Carlo 仿真法对改进的 PERT 网络进行求解, 实现对输水隧洞施工进度风险更加全面的分析。于文琳等 (2016) [33]考虑前人对隧洞施工过程中的风险管理的研究很少从施工工艺角度分析风险因素出发, 以穿黄隧洞施工为背景, 从施工工艺流程识别风险, 并将风险因素造成损失加入到 FMEA 分析方法中, 研究穿黄隧洞施工过程中的应对措施。王波等 (2017) [66]以山西大水网隧洞工程为例, 分析了隧洞工程安全方面存在的问题, 介绍了隧洞安全生产管理和现场控制措施。王天西等 (2015) [67]针对锦屏二级水电站隧洞所面临的特殊工程条件, 总结了在施工过程中对安全、质量、进度控制的成功经验。雷叶等 (2014) [68]介绍了全过程仿真技术,

利用 CPM 网络模型的基本框架调用 CYCLONE 实施层模型从而形成控制层和实施层组成的模型结构。陈红杰 (2013) [69]详细地介绍了 LSM 方法、甘特图法、CPM/PERT 这三种进度计划方法。通过对 LSM 方法与另外两种方法的对比,表明 LSM 方法更适用于线状工程。李荣自等 (2016) [70]针对线状工程的特殊性,对线状工程项目管理的质量、工期、成本三大目标进行两两对比分析,并结合 LSM 技术运用于线状工程项目管理中。刘军生等 (2015) [71]结合延长石油科研中心工程项目,运用 BIM 技术在施工管理全过程中的应用研究,基于 BIM 三维模型建立,从生产管理、技术管理、成本管理等多层面解决复杂工程现场施工问题。孙孟毅 (2015) [72]利用搜集整理的实际工程的进度数据,利用多元线性回归方法确定了施工活动的速率与影响因素之间的关系,进而构建了基于网络的施工速率回归模型,并通过对施工活动进出基本网络单元位置的探讨实现了基于 LSM 的中国铁路施工进度计划编制模型的构建。王代兵等 (2014) [73]探讨了 BIM 在施工管理中的应用,利用 BIM 进行 4D 施工进度的模拟与控制,并实现 5D 的动态成本控制,从而实现进度优化、节约成本、保证质量的目标,有效地处理了项目各方的沟通协调。李擎 (2013) [74]归纳了线性计划方法,对铁道部(现铁路总公司部分)集中维修活动的调研数据,利用线性计划理论对数据处理,构建了一个集中修进度计划编制模型 RCMSM,最后通过实际进度与模型数据对比验证了模型在进度计划编制上的优越性。王瑞丰等 (2014) [75]针对线状工程项目建设中测量控制网布设及其测量时间方式进行深入的分析,探究 GPRS 测量方式与导线测量方式,促进了线状工程项目的建设。杨坤等 (2014) [76]针对克服最小二乘法不具备抗粗差干扰能力的缺点,将稳健估计引入 GPS 水准的粗差剔除中,有效地避免了拟合结果失实现象,提高了结果的可靠性,结合工程项目实际数据进行拟合的结果,分析得出适合工程的最优拟合方法。陈红杰等 (2013) [77]研究了 CPM 方法和 LSM 方法在线状工程应用的优劣,得出 LSM 方法在工期变化时更容易对进度图进行修补的结论。