

基于资源整合的人工瀑布引水管道工程总体设计

——以温州市雅阳镇华东大峡谷项目为例

何海燕

[上海千年城市规划工程设计股份有限公司, 上海市 201900]

摘要: 在特色小城镇旅游产业迅猛发展的背景下,构建兼具生态效益与景观价值的生态型人工瀑布,已成为新型城镇化建设的重要探索方向。以实际工程为例,旨在解决新建人工瀑布的水源问题,同时满足生态要求与工程可行性。依据新建人工瀑布的区域位置,分析区域内可利用水资源状况,选取区域内3处现状水库作为新建人工瀑布的水源。从节约投资和工程可行性等层面考量,充分运用现有的水利设施,选定最优的引水工程线路。从工程背景出发,定量分析区域可利用水资源的引水流量、引水工程总体设计方案、关键节点设计等,对实际工程进行较详细介绍,为类似工程提供参考和借鉴。

关键词: 人工瀑布;引水流量;引水工程;总体设计

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0336-06

Overall Design of Water Diversion Pipeline Project for Artificial Waterfall Based on Resource Integration: A Case Study of East China Grand Canyon Project in Yayang Town, Wenzhou

HE Haiyan

[Shanghai Millennium Urban Planning and Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 201900, China]

Abstract: Against the backdrop of the rapid development of the tourism industry in characteristic small towns, the construction of ecological artificial waterfalls that combine ecological benefits and landscape value has become an important exploration direction in the construction of new urbanization. Taking a practical project as an example, the aims are to resolve the problems of water source for newly constructed artificial waterfalls, and at the same time to meet the ecological requirements and engineering feasibility. Based on the regional position of the newly built artificial waterfall, the available water resources within the region are analyzed and three existing reservoirs in the region are selected as water sources for the newly built artificial waterfall. Considering the saving investment and engineering feasibility, the existing water conservancy infrastructures are fully utilized, and the optimal water diversion routes are selected and determined. Starting from the engineering background, the water diversion flow rates of water resources able to utilize in the region, the overall design scheme of the water diversion project, and the key node design are quantitatively analyzed. The practical projects are introduced in detail, which provides the reference for the similar projects.

Keywords: artificial waterfall; water diversion flow rate; water diversion project; overall design

0 引言

随着居民生活水平的提升,旅游行业蓬勃兴起,小城镇旅游愈发受到大众的喜爱。自2016年住建部、发改委、财政部三部委联合发布《关于开展特色小镇培育工作的通知》后,培育发展特色小镇成为引领小城镇发展建设的新方向。

瀑布作为重要的旅游资源,具备较高的观赏和游览价值。人工瀑布是传统景观设计的重要组成部分,它以天然瀑布为模板,借助工程手段打造水体景观。依据跌落形式的差异,能形成丰富多样的瀑布形态。

目前,大多数人工瀑布的用水体系尚不完善,水资源利用率较低。许多人工瀑布独立于天然水系之外,依靠地下水或自来水系统维持运行,每年会消耗大量的水资源。而且,使用后的水大部分未经循环利用便直接排放,造成了水资源的浪费^[1]。

收稿日期: 2025-07-01

作者简介: 何海燕(1990—),女,硕士,工程师,从事市政设计工作。

温州市泰顺县雅阳镇积极响应国家宏观政策,充分利用自身区位条件、丰富的旅游资源、坚实的小城镇产业基础以及科学的政府决策等多方面因素,大力促进当地旅游业的发展。其目标是将雅阳镇打造成为一个集城镇服务、旅游服务等多种功能于一体,着力构建“三宜一体”(宜养、宜居、宜游)的康旅休闲型特色小镇。

在雅阳镇旅游产业的整体规划中,计划新建1处人工瀑布,作为特色小镇的又一标志性景观,为当地旅游事业增添新的光彩。

本文以温州市泰顺县雅阳镇人工瀑布建设项目作为研究对象,着重探讨该项目引水系统工程的设计与实施。项目创新性地整合区域水文资源,通过科学调度黄坑水库、宝林湖水库、沐峰水库等现有水利设施,构建可持续的生态补水系统。

1 工程概况

雅阳镇华东大峡谷新建的人工瀑布模拟自然景观,从大峡谷悬崖边的2级配水池倾泻而下,形成水体自然滚落的2级跌落型瀑布,属于自然式瀑布。该瀑布跌落设计总长100 m,设计最小流量为 $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

人工瀑布的水源来自区域内的现状水库,分别为宝林湖水库、黄坑水库和沐峰水库,充分利用了现状水库的水资源。人工瀑布的2级配水池池底标高分别为511、482.55 m。

依据现状黄坑水库的地理位置以及533 m标高的坝顶常水位,能够满足将水引至瀑布1级配水池的标高要求。

宝林湖水库至峡谷发电站有1条由矩形沟渠和隧道组合而成的现状引水通道,可将水引至峡谷现状发电站1。该现状引水通道位于宝林湖水库下游,起点为矩形沟渠,底标高为484 m。沐峰水库下游有1处现状集水池,集水池出水管中心标高为500 m,可将水引至峡谷发电站2。2处现状发电站均已停止使用。现状引水设施分布图见图1。

考虑到综合利用现有水利设施、节约成本,本次设计的引水管道工程将利用现状引水通道,把宝林湖水库和沐峰水库的来水引至瀑布2级配水池。宝林湖水库借助现状矩形沟渠和隧道组合的引水通道,将水引至瀑布2级配水池。沐峰水库的引水管道工程需要增设现状发电站1与现状发电站2之间的管道,并在现状沟渠位置和现状隧道内增加管道,以压力引水的方式将水引至瀑布2级配水池。



图1 现状引水设施分布图

本文重点分析了黄坑水库、宝林湖水库及沐峰水库的水资源调度方案,分为3条引水线路:黄坑水库引水工程、宝林湖水库引水工程、沐峰水库引水工程(见图2)。

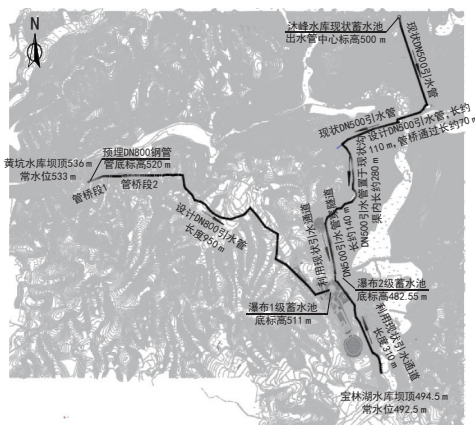


图2 设计引水通道工程图

2 引水流量计算

目前,黄坑水库、宝林湖水库、沐峰水库主要承担当地应急供水任务,同时还肩负着改善水生态和为旅游补水的重任。所以,在满足水库蒸发、渗漏损失、生态放水以及应急供水需求的前提下,可将多余的库容水量引入新建的人工瀑布,用于打造瀑布水景。

2.1 黄坑水库引水流量

黄坑水库坝顶标高536 m,常水位标高533 m,坝体预留的DN800引水管管底标高520 m,管中心标高520.4 m。引水至瀑布1级配水池出水管中心标高511.5 m。分别在常水位533 m、水位降至526 m、水

位降至521 m情况下计算引水流量。

引水流量采用《水力计算手册》^[2]和《水力学》^[3]中的压力管自由出流计算方式。

管道自由出流流量 Q 为:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}} A \sqrt{2gH_1} = \mu A \sqrt{2gH_1} \quad (1)$$

沿程水头损失 $h_{沿}$ 为:

$$h_{沿} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

局部水头损失 $h_{局}$ 为:

$$h_{局} = \sum \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中: μ 为管道流量系数; A 为管道的过水断面面

积, m^2 ; $H_1 = \frac{\alpha v^2}{2g} + H_0$, 其中 $\frac{\alpha v^2}{2g}$ 为行近流速水头, H_0 为现状集水池出水管中心标高与2级配水池出水口管中心标高之差,该工程行近流速水头忽略不计,即 $H_1 = H_0$; l 为管道长度, m ; d 为管径, m ; $\sum \zeta$ 为管道各局部水头损失系数之和, m ; λ 为沿程水头损失系数。该工程局部水头损失按沿程水头损失的10%计。

利用曼宁公式: $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ 计算谢才系数 C (其中 n 为管道粗糙系数; R 为水力半径),再根据 $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ 计算沿程水头损失系数 λ ,然后由局部水头损失为沿程水头损失的10%计算出局部水头损失系数 $\sum \zeta$ 。

黄坑水库引水管道过水量计算表见表1。

表1 黄坑水库引水管道过水量计算表

管径 d/m	管道长度 l/m	水力半径 R/m	标高差 H_0/m	过水断面 面积 A/m^2	管道粗糙 系数 n	谢才系数 $C/(m^{1/2} \cdot s^{-1})$	沿程水头 损失系数 λ	局部水头损失 系数之和 $\sum \zeta$	管道流量 系数 μ	流量 $Q/$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)
0.8	950	0.2	21.5	0.502 4	0.012	63.72	0.019	2.29	0.195	2.01
0.8	950	0.2	14.5	0.502 4	0.012	63.72	0.019	2.29	0.195	1.65
0.8	950	0.2	9.5	0.502 4	0.012	63.72	0.019	2.29	0.195	1.34

计算流速的公式为:

$$v = C \sqrt{RJ} \quad (4)$$

式中: v 为管道过水断面平均流速, m/s ; J 为水力坡度; C 为谢才系数, $m^{1/2}/s$ 。

当黄坑水库水位降至521 m时,水力坡度 J 为0.01,则可计算得到管道平均流速为2.85 m/s,总水头损失为 $h_{沿} + h_{局} = 10.3$ m。

考虑到实际引水时,水库不能一直保证常水位状态。当引水管设计水位为521 m,起终点高差为9.5 m,引水流量为1.34 m³/s时,总水头损失为10.3 m,大于9.5 m,高差不能满足压力流水头需要,因此,为保证水库水位低于522 m时的引水,引水管敷设时按一定坡度敷设。

据了解,黄坑水库常年来水充足,因此,理论平均引水量按1.65 m³/s计。

2.2 宝林湖水库引水流量

宝林湖水库利用现状沟渠引水通道,起点标高484 m,引水至瀑布2级蓄水池,底标高482.55 m,长约310 m,平均坡度定为4.6‰。现状引水通道为矩形沟渠与隧道组合方式(见图3)。

现状引水通道引水量按起点矩形沟渠断面过水量计算得出,为0.79 m³/s(见表2)。

宝林湖水库汇水面积大,库容小,为充分利用水



图3 宝林湖水库现状引水通道

库水量,增大引水量,本方案推荐采用1.0 m×1.2 m(宽×深)断面。沟渠位于峡谷边上,浆砌块石实施难度较大,施工慢,因此沿线沟渠全部替换为1.0 m×1.2 m(宽×深)断面的钢沟渠,钢沟渠粗糙系数取0.012,超高按0.2 m考虑,得出钢沟渠理论引水量为2.71 m³/s(见表2)。

排水沟渠的流量:

$$Q_1 = AV \quad (5)$$

排水沟渠的流速:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: Q_1 为排水沟渠的设计流量,m³/s; V 为流速,m/s; R 为水力半径,m; J 为水力坡降; n 为沟渠粗糙系数。

表 2 沟渠过水量计算表

断面尺寸/ (m×m)	宽度/m	高度/m	超高/m	过水断面 面积 A/m ²	湿周 X/m	水力半径 R/m	管道粗糙 系数 n	坡降 J	流速 V/ (m·s ⁻¹)	流量 Q/ (m ³ ·s ⁻¹)
1.0×0.7	1.0	0.5	0.2	0.5	2	0.25	0.017	0.004 6	1.58	0.79
1.0×1.2	1.0	1.0	0.2	1.0	3	0.33	0.012	0.004 6	2.71	2.71

2.3 沐峰水库引水流量

沐峰水库引水管起点始于沐峰水库下游现状集水池。集水池水面标高 502 m, DN500 现状出水管管中心标高 500 m, 引水至瀑布 2 级蓄水池, 池底标高 482.55 m, 出水管中心标高 483 m, 引水管沿线总长度约 960 m。

表 3 沐峰水库引水管道过水量计算表

管径 d/m	管道长度 l/m	水力半径 R/ m	标高差 H ₀ / m	过水断面面 积 A/m ²	管道粗糙系 数 n	谢才系数 C/ (m ^{1/2} ·s ⁻¹)	沿程水头损失 系数 λ	管道流量 系数 μ	流量/ (m ^{1/2} ·s ⁻¹)
0.5	960	0.125	17	0.196	0.012	58.92	0.022	0.14	0.58

3 管材选择

该工程引水管管径为 DN500 和 DN800, 需要穿越公路、峡谷等地质较复杂的区域, 对管材要求较高。因此, 选用钢管, 具有结构简单、施工方便、承压能力高、基础不均匀沉降适应性好, 能适应复杂恶劣的地质、使用寿命较长、保证输送水的水质质量、密封性好等优点^[4]。

黄坑水库设计工作压力为 0.5 MPa, 选用 Q235B 钢管, 壁厚 10 mm。管道采用焊接; 管道与管配件连接采用法兰连接, 管配件及阀门采用 PN10 级。

宝林湖水库引水通道利用现状矩形沟渠与隧道组合方式, 将现状浆砌块石沟渠替换为钢沟渠。采用 Q235B 钢板, 厚度为 10 mm。

沐峰水库设计工作压力为 3.0 MPa, 选用 Q235B 钢管, 壁厚 16 mm。管道采用焊接; 管道与管配件连接采用法兰连接, 管配件及阀门采用 PN40 级。

该工程所使用的钢管均需进行防腐处理, 以延长其使用寿命。依据当地习惯, 选用耐腐蚀、附着力强、耐磨性佳、施工便捷且安全经济合理的涂料。具体的防腐措施及处理要求如下:

(1) 钢管表面处理。表面处理应彻底清除管道外壁的浮锈、氧化铁皮、焊渣、油污等, 焊缝的突起高度不得大于防腐层设计厚度的 1/3。用人工除锈, 应达到 St3 级标准。内外壁表面处理应达到《涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定 第 1 部分》(GB/T 8923.1—2011): 未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后钢材表面的锈蚀等级和处理等级应达 Sa2.5 级; 配件采用人工除锈, 应达到 St3 级标准。

根据压力管自由出流公式(1)~(4), 计算得出沐峰水库现状 DN500 引水管理论引水量为 0.58 m³/s (见表 3)。

综上所述, 雅阳镇华东大峡谷新建人工瀑布理论引水量可达到 4.94 m³/s, 满足规划不小于 3.0 m³/s 的要求。

(2) 钢管内防腐。采用无毒高分子聚氨酯防腐漆, 2 道底漆、2 道面漆, 涂层干膜厚度不小于 150 μm, 总用量不少于 0.4 kg/m。

(3) 钢管外防腐。埋地段外防腐采用 4 油 1 布环氧煤沥青防腐层, 厚度不小于 400 μm。外露段外防腐采用环氧防腐涂层, 底漆 2 道, 面漆 2 道, 外防腐刷冷底子油 2 道, 再刷防腐面漆 2 道。

4 引水工程方案

4.1 黄坑水库引水工程

在引水管道跨越河流、山脉、铁路、高速公路等特殊情形时, 需依据具体状况, 因地制宜地选取适宜的敷设方式。该工程黄坑水库引水管道自坝体预留口引出(见图 4), 需跨越坝体与山体间的小峡谷。针对此情况, 该工程有 2 种方案可供选择: 一是沿坝体设置支架方案, 二是采用架设管桥的方式通过。



图 4 黄坑水库大坝图

该工程引水管管径为 DN800, 管径较大。若采用支架方案, 则引水管在坝体接出口位置需设置较多 90° 弯头, 使实施难度显著增大。由于坝体具有一定弧度, 部分支架的悬臂长度需达到 1 600 mm, 存在

结构安全风险。同时,支架方案需借助化学螺栓与大坝钢筋混凝土外壁连接,会对坝体外壁产生影响。鉴于沿坝体设置支架会对坝体结构造成影响,且水库管理单位不允许在坝体设置支架,因此该工程选用架设管桥方案,即图5中的管桥段1。

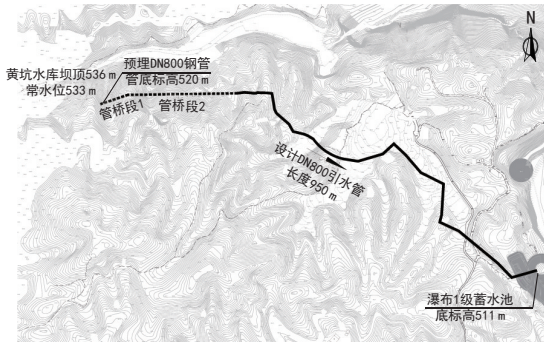


图5 黄坑水库设计引水通道工程图

根据《给排水工程结构设计手册》^[5],管道结构自重标准值 $G_{\text{管}}$ 和管内水重标准值 $G_{\text{水}}$ 计算式为:

$$G_{\text{管}} = 3.1416 \cdot \gamma_{\text{管}} \cdot D_0 \cdot t = 1.998 \text{ kN/m} \quad (7)$$

$$G_{\text{水}} = 0.785 \cdot \gamma_{\text{水}} \cdot D^2 = 5.024 \text{ kN/m} \quad (8)$$

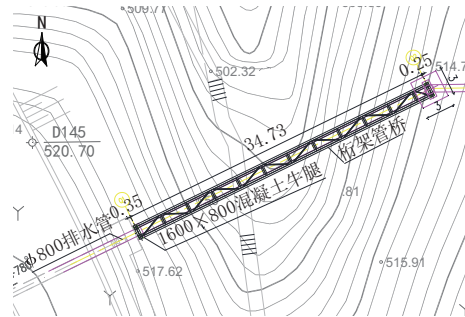
式中: $\gamma_{\text{管}}$ 为钢管重度,78.5 kN/m³; D_0 为钢管内径与壁厚之和, m; t 为钢管壁厚, m; $\gamma_{\text{水}}$ 为水重度, 10 kN/m³; D 为钢管内径, m。

经计算, DN800引水管满水自重约为7.022 kN/m; 管道附件和轻微震动荷载按管道满水自重的20%计, 取8.426 kN/m。

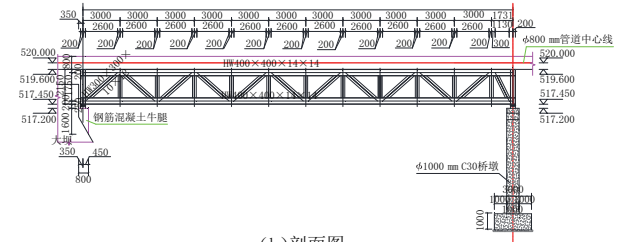
管桥段1的管桥采用钢结构桁架桥, 跨径为34.73 m, 桥宽1.6 m, 引水管道中心标高520 m。弦杆和腹杆采用工字钢, 弦杆梁高400 mm, 腹杆梁高300 mm, 上弦和下弦支承采用角钢, 均采用焊接连接方式。钢箱梁采用Q345qD钢材, 较厚板件厚度 $t=16$ mm, 满足强度设计要求。

管桥平面图、剖面图见图6。

图5所示管桥段2处于峡谷区域。基于现状地形状况, 地势高差显著, 当该段管道采用直埋敷设方



(a) 平面图



(b) 剖面图

图6 管桥平面图和剖面图(单位:mm)

式时, 需沿等高线绕行。鉴于DN800钢管管径较大, 绕行操作难度较高, 需设置较多弯头与借转, 这会对管道密封性产生影响, 施工难度较大, 施工质量难以保障, 且工程措施费用较高。因此, 建议采用管道架空敷设方式。经综合经济比较, 选用造价相对较低的管墩敷设方案, 敷设长度约为180 m。依据《简明管道支架计算及构造手册》, 针对连续敷设、承受均布荷载的水平直管, 管道支墩最大允许跨距 L_{max} 可按下式计算:

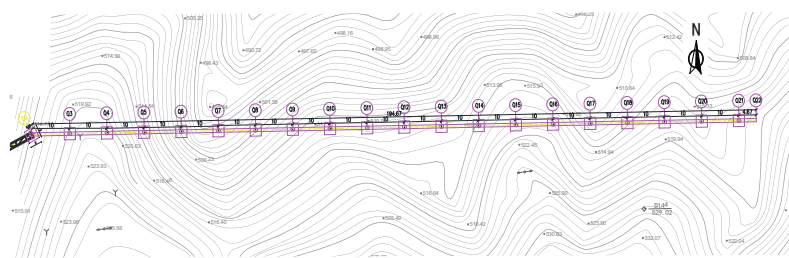
$$L_{\text{max}} = 2.24 \cdot \sqrt{\frac{W \cdot \Phi \cdot \sigma}{G}} \quad (9)$$

式中: G 为管道单位长度荷载, N/m; W 为管道截面抗弯截面系数, 取5 092 cm³; Φ 为横向焊缝系数, 取0.7 m; σ 为管道热态许用应力, 取112 N/mm²。

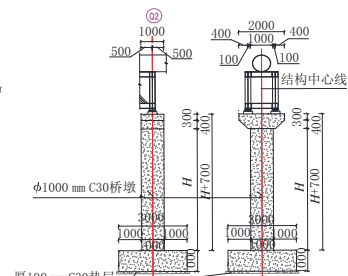
经计算, 管桥支墩的最大允许跨距为15.4 m。

因此, 综合实际地形状况, 本段管道采用架空敷设方式, 按照等跨布置原则, 以10 m为间距设置桥墩, 共需设置19个桥墩, 桥墩直径为2 000 mm。

管墩平面图、剖面图见图7。



(a) 平面图



(b) 剖面图

图7 管墩平面图和剖面图(单位:mm)

桥墩采用钢筋混凝土结构, 结构形式为盖梁连接立柱并连接扩大基础, 梁体沿管道纵向布置。在

管道跨越桥墩的位置, 采用钢结构管夹进行支撑。为缓冲管道因应力产生的变形, 分别在管墩敷设的

中间位置以及两头的埋地段设置伸缩节。同时,依据管道标高和排空需求,设置自动进气式排气阀和排空阀。

黄坑水库 DN800 引水通道于接入 1 级瀑布蓄水池之前设置智能流量计。用水量信号能够传输至监控中心,且可对引水管道阀门实施远程控制。

4.2 宝林湖水库引水工程

宝林湖水库引水工程利用现状沟渠与隧道组合的发电站引水通道。将起始段 1.0 m×0.7 m(宽×深)浆砌块石矩形沟渠替换为 1.0 m×1.2 m(宽×深)的钢沟渠,以增加引水流量。在引水通道起点位置安装测控一体化智能化水闸,用于控制水流和水量。

4.3 沐峰水库引水工程

新建人行桥平面图、剖面图见图 8。

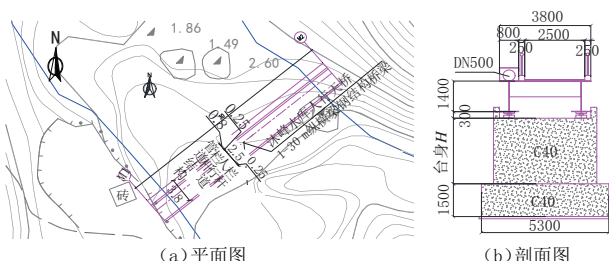


图8 新建人行桥平面图与剖面图(单位:mm)

于现状沟渠和隧道内铺设新建 DN500 引水管,以保障本次设计的沐峰水库瀑布引水管通过管道实现连通。引水管沿线的设计状况如下:

(1)过河段引水管随人行桥跨越河道,在人行桥预留管线通道。依据地质条件和河道状况,该工程选用纵横梁体系的钢结构桥梁,跨径布置为单跨 30 m,桥梁为等宽结构,桥宽 3.8 m。

(2)现状 DN500 引水管为露天敷设管道,本次对其实施埋地处理,长度约 420 m,并开展水压试验,以确保现状管道具备可用性。

(3)其余管段沿着现有发电站引水通道进行敷设。对于现有隧道部分,采用 DN500 引水管穿隧道的方式,且需对隧道内进行一定程度的清淤和疏通

处理;对于现有沟渠段,则将新建的 DN500 引水管安置于现有沟渠之中。管桥段管中心标高为 315 m,沐峰水库下游现有蓄水池标高为 500 m。经计算,沿程水头损失与沿程管段局部水头损失总计为 5 m,自由水头按 2 m 计,则总水头损失为 7 m。因此,为满足压力管水头差要求,引水管沿线管中心标高不得高于 493 m。同时,鉴于现有沟渠断面尺寸存在不一致的情况,需对沿线标高及断面进行梳理,以确保引水管的敷设工作顺利进行。

沐峰水库 DN500 引水管道在接入 2 级瀑布蓄水池之前设置智能流量计。用水量信号能够传输至监控中心,从而实现对引水管道阀门的远程控制。依据管道标高和排空要求,设置自动进气式排气阀和排空阀。

5 结 语

本文秉持“资源整合优先、经济可行主导”的核心理念,以充分利用现有水利设施和水资源、避免资源浪费、尽量降低工程投资和施工难度、提升工程建设经济性和可行性为原则,综合考量地形地势、引水水源位置等因素,选定了最佳的引水工程路线,并对各引水水源的可供水量进行核算,以满足区域新建瀑布的用水需求。同时,系统且细致地介绍了引水工程的总体设计和重要节点设计,可为瀑布用水和引水工程等类似项目提供经验借鉴。

参考文献:

- [1] 张琪,姚明甫.人工瀑布的设计探讨[J].农业科技与信息(现代园林),2020,37(9):103-111.
- [2] 李炜.水力计算手册[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2006.
- [3] 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室.水力学[M].5版.北京:高等教育出版社,2003.
- [4] 程万达.赣东地区供水工程长距离输水管道设计要点[J].中国市政工程,2018,47(3):47-49.
- [5] 上海市市政工程设计研究院.给水排水工程结构设计手册 第3册 城镇给水[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.