

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230003

大型明渠调水工程输水建筑物水头损失测算

卢明龙¹, 崔 巍², 陈文学², 穆祥鹏², 熊麒麟²

(1. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100038;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:近年来南水北调中线总干渠部分输水建筑物出现水位偏高和流态异常现象, 存在输水能力下降风险, 亟需评估水头损失状况, 但存在建筑物内部无监测站点、工程运行尚未达到设计规模、监测数据缺乏校验等问题。采集了总干渠 2022 年大流量输水期间的水位、流量监测数据, 开展第三方水力学原型观测, 复核与校正了监测数据。提出一种使用综合水头损失系数的水头损失推算方法, 对总干渠 158 座输水建筑物中具备分析条件的 143 座, 推算了加大流量下的水头损失。结果表明, 总干渠输水建筑物分配水头总体有剩余, 分布存在明显差异。全线总计剩余水头 3.05 m, 其中穿黄以南段、穿黄至漳河段和漳河以北段各自剩余 0.48、1.06、1.51 m, 分别占分配水头的 4%、13%、12%。全线有 40 座输水建筑物的水头损失超过分配值, 其中倒虹吸 31 座、渡槽 4 座、暗渠 4 座、隧洞 1 座。

关键词:水力学; 南水北调中线总干渠; 输水建筑物; 水头损失; 原型观测

中图分类号: TV133

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0108-03

1 概况

南水北调中线总干渠是世界上规模最大的调水工程, 2014 年 12 月正式通水, 已成为沿线多个城市特别是北京、天津的主要水源。总干渠为典型的长距离、低水头、大流量输水工程, 长 1 432 km, 渠首设计输水规模 420 m³/s(加大流量), 全线分配水头仅 87.08 m。总干渠含 158 座输水建筑物(不计惠南庄泵站), 包括渡槽 27 座, 倒虹吸 102 座, 暗渠 17 座, 隧洞 12 座, 分配水头约占总干渠的 50%^[1]。近年来大流量输水时, 部分输水建筑物出现水位偏高和流态异常现象^[2-3], 表明存在输水能力下降风险。总干渠通水以来, 尚未开展全面的输水建筑物水头损失测算。有关输水建筑物水头损失的研究主要通过水工模型试验或原型观测, 优化结构体型^[4-5]、率定糙率或水头损失系数^[6-8], 需在结构内部设置足量测点, 在设计运行工况下测量与分析。总干渠各输水建筑物仅在进出口设有水位测点, 结构内部的沿程和局部水头损失无法量取。且仅 64 座输水建筑物配备自动化水位监测设备, 其余均为人工读数的水尺, 测

量结果缺少校验。总干渠按输送加大流量设计^[9], 但通水至今尚未达到设计规模, 加大流量下的水头损失只能推算。各输水建筑物水头分配紧张, 平均每座不到 0.3 m, 对推算精度要求较高。因此, 本文采集了总干渠 2022 年大流量输水期间 158 座建筑物的监测数据, 使用水力学原型观测仪器, 对 30 座输水建筑物的监测数据进行复核。经误差分析, 对部分监测数据进行校正, 提出一种采用综合水头损失系数的输水建筑物水头损失推算方法, 对 143 座经历了敞流输水的建筑物推算加大流量下的水头损失。研究结果可为总干渠评估输水能力和制定应对措施提供支撑, 亦可供同类大型明渠调水工程参考。

2 数据采集与复核校正

2022 年 4~8 月, 总干渠实施大流量输水, 部分时段流量达到甚至超过设计流量。现场使用工程安装的水位计和流量计, 每天 10:00、16:00 采集输水建筑物进出口的水位、流量, 记录闸门的节制状态。统计表明, 158 座输水建筑物中的 143

收稿日期: 2023-01-02, 修回日期: 2023-01-29

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200905); 国家自然科学基金项目(U20A20316)

作者简介: 卢明龙(1985-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为输水调度技术与管理, E-mail: 75423654@qq.com

通讯作者: 崔巍(1979-), 男, 博士、教授级高级工程师, 研究方向为长距离输水工程水力控制, E-mail: joylife@126.com

座具备 15 d 以上敞流输水(输水建筑物的闸门全开)的监测数据,可用于水头损失分析。

2022 年 6~8 月,利用雷达水位计、走航式 ADCP 流量计、电子水准仪、电子测距仪等仪器,对 30 个输水建筑物(包括倒虹吸 20 个,渡槽 7 个,涵洞 2 个和暗渠 1 个)共计 60 个断面的水位、流量进行了水力学原型观测。

工程自测结果和复核测量结果对比见图 1。由图 1 可知,二者结果总体吻合良好,工程自测水位存在随机误差,偏差在 ± 0.10 m 以内;工程自测的流量存在系统误差,整体偏小,偏差在 7.2% 以内。基于复核测量数据,拟合出图 1(b)中的流量校正公式,对工程自测流量作了校正。

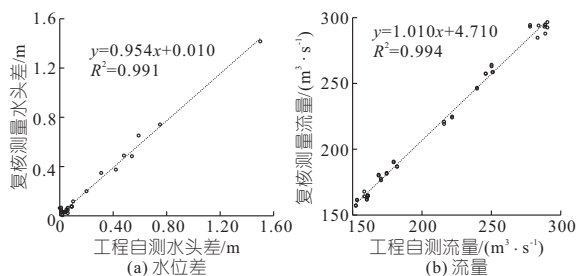


图 1 输水建筑物工程自测与复核测量结果比较

Fig. 1 Comparison of measurement results of water conveyance buildings

3 输水建筑物水头损失推算方法

基于大流量输水期间的水位、流量监测数据,推算输水建筑物加大流量下的总水头损失。各输水建筑物由进出口渐变段、进出口闸室段、主体段等结构组成,总水头损失 h_w 为各结构沿程水头损失 h_f 与局部水头损失 h_j 之和,计算公式为:

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (1)$$

沿程水头损失 h_f 计算公式为:

$$h_f = Q^2 n^2 l / (A^2 R^{4/3}) \quad (2)$$

式中, Q 为流量; n 为糙率系数; l 为流程长度; A 为过水断面面积; R 为过水断面水力半径。

局部水头损失 h_j 计算公式的形式随结构不同而异。闸室段 h_j 计算公式为:

$$h_j = \zeta_g v_g^2 / (2g) \quad (3)$$

式中, ζ_g 为闸室段局部水头损失系数; v_g 为闸室断面平均流速。

倒虹吸段 h_j 计算公式为:

$$h_j = (\zeta_a + \zeta_b + \zeta_c + \zeta_d) v_s^2 / (2g) \quad (4)$$

式中, ζ_a 、 ζ_b 、 ζ_c 、 ζ_d 分别为进口、水平进口弯段、水平出口弯段和出口的局部水头损失系数; v_s 为管身断面平均流速。

渐变段 h_j 计算公式为:

$$h_j = \zeta_t |v_a^2 - v_b^2| / (2g) \quad (5)$$

式中, ζ_t 为渐变段局部水头损失系数; v_a 、 v_b 分别为渐变段进出口断面平均流速。

使用式(2)~(5)时,糙率系数和各局部水头损失系数均需率定。对总干渠而言,仅依靠进出口的水位测点,无法满足要求。鉴于输水建筑物通常工作在阻力平方区,沿程和局部水头损失与流速平方成正比^[10],可将 h_w 表述为综合水头损失系数 ζ 与某特征断面流速水头的乘积,即:

$$h_w = \zeta v^2 / (2g) \quad (6)$$

理论上, ζ 包含了式(2)中 R 的影响,其值随流量变化。但当总干渠运行在高水位大流量区间时, R 变化不大,可近似认为 ζ 是定值。

按照式(6)率定 ζ ,需获知 $v^2 / (2g)$ 、 h_w 。为便于使用监测水位确定 v ,各输水建筑物的特征断面均选在主体段。对于渡槽、暗渠和涵洞,特征断面的宽为底宽,特征断面的高为进出口水深的平均值。对于倒虹吸,特征断面的尺寸取倒虹吸管的尺寸。获知 h_w 需要量取位置水头和流速水头。对输水建筑物进出口断面列能量方程:

$$z_i + \alpha_i \frac{v_i^2}{2g} = z_{i+1} + \alpha_{i+1} \frac{v_{i+1}^2}{2g} + \sum (h_f + h_j) \quad (7)$$

式中, z 为水位; α 为动能修正系数; v 为断面平均流速。

总干渠大流量输水时, v 一般在 1.0~1.3 m/s。以渠首刁河渡槽和渠末北拒马河南支倒虹吸为例进行测算,设计流量下进出口流速水头差分别为 0.002、0.001 m,不到建筑物总水头损失的 1%,可忽略不计。结合式(1)、(7)得:

$$z_i - z_{i+1} \approx \zeta v^2 / (2g) \quad (8)$$

依据式(8),以水位流量监测数据为样本,绘制输水建筑物“进出口水位差—特征断面流速水头”(即 $z_i - z_{i+1} - v^2 / (2g)$)关系图,确定线性拟合曲线,曲线的斜率即为 ζ 。以白河倒虹吸和漕河渡槽为例,其 $z_i - z_{i+1} - v^2 / (2g)$ 关系见图 2,对应 ζ 分别为 4.05、5.97。

将率定的 ζ 代入式(6),在加大流量条件下计算特征断面流速,推算输水建筑物的水头损失。对于渡槽、暗渠和涵洞,特征断面的水深随流量变化,同时影响式(6)两端,需采用试算法。

4 输水建筑物水头损失推算结果

按总干渠上游至下游顺序,143 座输水建筑物的分配水头和剩余水头(分配水头与水头损失

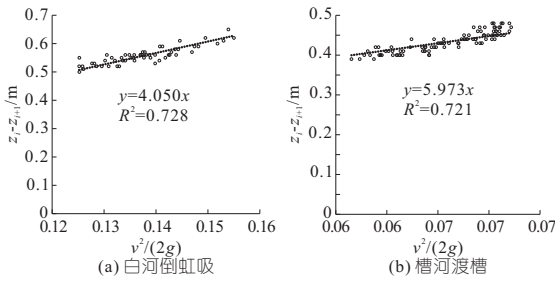


图 2 白河倒虹吸和漕河渡槽 $z_i - z_{i+1} - v^2 / (2g)$ 关系

Fig. 2 $z_i - z_{i+1} - v^2 / (2g)$ curves from Baihe invert siphon and Caohe aqueduct

的差)分布见图 3, 剩余水头为正值表示分配水头有富余, 为负值表示水头损失超标。由图 3 可知, 分配水头有富余的输水建筑物有 103 座, 水头损失超标的有 40 座, 占比分别为 72%、28%。水头损失超标的建筑物中, 倒虹吸 31 座, 占总数的 30%, 最大超标值 0.17 m; 渡槽 4 座, 占总数的 15%, 最大超标值 0.32 m; 暗渠 4 座, 占总数的 24%, 最大超标值 0.11 m; 隧洞 1 座, 占总数的 8%, 超标值 0.07 m。各类型输水建筑物相比较, 水头损失超标比例最大的是倒虹吸。

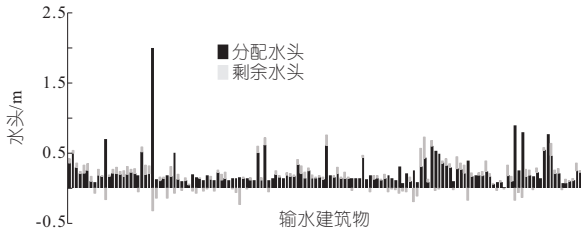


图 3 总干渠 143 座输水建筑物分配水头和剩余水头

Fig. 3 Allocated and surplus head of 143 bulidings of the main canal

按照渠段统计, 总干渠输水建筑物水头损失和剩余水头见表 1。穿黄以南段、穿黄至漳河段和漳河以北段的输水建筑物分配水头均有剩余, 分别为 0.48、1.06、1.51 m, 全线共计剩余水头 3.05 m。从各渠段剩余水头占分配水头比例看, 穿黄以南段的比例明显偏低, 为 4%, 其他两个渠段分别为 13%、12%, 全线为 9%。

由表 1 可知, 总干渠输水建筑物分配水头总体有富余, 但分布存在明显差异。具体到各单体输水建筑物, 约占总数 28% 的水头损失超标, 类型以倒虹吸为主。水头损失超标的原因主要与工

表 1 总干渠输水建筑物水头损失和剩余水头统计

Tab. 1 Statistics of allocated and surplus head of the main canal

水头	穿黄以南段	穿黄至漳河段	漳河以北段	全线
分配值/m	12.14	8.29	12.99	33.42
损失值/m	11.66	7.23	11.48	30.37
剩余值/m	0.48	1.06	1.51	3.05
剩余值占比/%	4.00	13.00	12.00	9.00

程自然老化、生物污损、建筑物内部淤积、进出口不良流态等相关。总干渠已持续运行 8 年, 衬砌表面水泥砂浆脱落, 接缝增大, 衬砌板破裂、错台等现象, 在历年水下探测中均有发现。2016 年以来, 还出现淡水壳菜附着和着生藻类异常增殖问题。藻类的附着会增加建筑物输水阻力^[11], 其衰老脱落后易堵塞进口格栅等设施, 增加局部水头损失。2020 年北京段调查表明, 倒虹吸管段普遍存在泥沙、藻类、落叶、贝类及其他杂物, 虽淤积深度较浅, 但范围较大^[12]。2020 年 4 月大流量输水以来, 部分倒虹吸和渡槽进出口出现水流往复运动、大幅波动、拍打闸门等不良流态, 产生了额外的水头损失^[3]。

5 结论

a. 水力学原型观测表明, 总干渠输水建筑物自身监测的水位存在随机误差, 偏差在 ±0.10 m 以内; 自身监测的流量存在系统误差, 总体偏小, 偏差在 7.2% 以内。

b. 总干渠全线 143 座输水建筑物中, 有 40 座水头损失超标, 其中倒虹吸 31 座, 最大超标值 0.17 m; 渡槽 4 座, 最大超标值 0.32 m; 暗渠 4 座, 最大超标值 0.11 m; 隧洞 1 座, 超标值 0.07 m。

c. 总干渠全线输水建筑物剩余水头总计 3.05 m, 占其分配水头的 9%, 分布不均衡。其中穿黄以南段剩余 0.48 m, 占分配水头的 4%; 穿黄至漳河段剩余 1.06 m, 占分配水头的 13%; 漳河以北段剩余 1.51 m, 占分配水头的 12%。

d. 基于 2022 年监测数据开展研究, 鉴于输水流量尚未达到设计规模, 推算结果存在一定偏差。随着日后总干渠输水规模继续增加, 使用本方法推算的结果将更加准确。

参考文献:

[1] 肖万格, 吴泽宇. 南水北调中线一期工程总干渠总体布置原则及特点[J]. 水利水电快报, 2006, 27(18):14-17.

[2] 李立群, 陈晓楠, 蒋莉, 等. 尾墩体型优化对消减南水北调典型渡槽水位波动的效果研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(1):146-151.

[3] 孟向阳. 基于 LES 方法的大型倒虹吸水头异常波动机理研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.

[4] 黄国兵, 聂艳华, 段文刚. 南水北调中线工程主要水力学问题研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10):34-42.

[5] 戴梅, 陈新桥. 南水北调中线工程槐河(二)渡槽水力特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1):194-196, 199.

在一定范围内,有利于协调各个水电站之间的利益矛盾,更具有实用性。考虑回水顶托影响,可使模型更加精确,并更符合实际。

c. 本文未考虑水电竞价上网的电力市场模式下多主体水电站竞价上网的效益分摊情况,今后应结合竞价策略等深入探讨研究。

参考文献:

[1] 马宇航,黄媛,刘俊勇,等. 考虑日内来水不确定和电网断面约束的梯级水电日前调度[J]. 电力建设, 2020,41(9):39-49.

[2] 刘激. 梯级水电站施工导流风险效益分摊及补偿机制研究[D]. 武汉:武汉大学,2014.

[3] 吴杨,刘俊勇,税月,等. 计及水流补偿风险的梯级水电发电权投标决策模型[J]. 电力自动化设备, 2018,38(2):91-99.

[4] 钟平安,张梦然,蔡杰,等. 基于决策树的梯级水电站泄流补偿调度风险分析[J]. 电力系统自动化, 2012,36(20):63-67,121.

[5] BARRETT M E. Comparison of BMP performance using the international BMP database[J]. Journal of irrigation & drainage engineering, 2008,134(5) : 556-561.

[6] 张蓓,朱燕梅,马光文,等. 考虑新能源的梯级水电中长期调度策略研究[J]. 水电能源科学,2020,38(11):67-71.

Optimal Operation of Cascade Hydropower Projects Considering Risk of Flow Compensation and Backwater Jacking Effect

XUE Yu¹, GE Xiao-lin²

(1. State Grid Shanghai Fengxian Power Supply Company, Shanghai 200090, China; 2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The risk of water flow compensation caused by the additional discharge of leading hydropower station has increased the difficulty of multi entity cascade hydropower optimal operation, and the backwater jacking effect of downstream hydropower stations has further increased the complexity of the model. Therefore, non-linear modeling is carried out for the flow compensation process of leading hydropower station, and the risk of flow compensation in the compensation period and the recharge period is quantified. At the same time, the impact of backwater jacking effect of downstream hydropower stations on the tail water level of leading hydropower station is considered, and then a scheduling model with the goal of maximizing the joint operation revenue of cascade hydropower stations is constructed. The analysis of the example shows that the method can more reasonably distribute the benefits between the upstream and downstream hydropower stations in the cascade basin, coordinate the conflicts of interests among the multi entity cascade hydropower stations, and improve the activity of the hydropower stations at all levels in participating in the market scheduling.

Key words: compensation risk; backwater jacking; cascade hydropower; multi agent; linearization

(上接第 110 页)

[6] 董丹丹,李成,毕京龙,等. 南水北调天津干线有压输水箱涵实际糙率研究[J]. 水利水电工程设计,2022, 41(3):14-17.

[7] 李立群,陈晓楠,陈文学. 南水北调中线典型输水建筑物表面降糙防护探析[J]. 中国农村水利水电, 2022(10):143-147,153.

[8] 崔巍,陈文学,穆祥鹏,等. 南水北调中线输水规律分析及调度数据深度挖掘[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2019.

[9] 张志明,陈烈奔,张颖君. 南水北调中线工程总干渠水面线研究[J]. 人民长江,2006,37(2):1-3,76.

[10] 李炜,徐孝平. 水力学[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,2002.

[11] 李代茂. 淡水壳菜对输水建筑物输水能力的影响研究[J]. 给水排水,2009,45(增刊1):94-96.

[12] 付军,程曦,王亚琦,等. 南水北调中线工程渠道及建筑物淤积情况研究[J]. 人民长江,2021,52(增刊1): 347-350.

Calculation of Head Loss of Large Open Channel Water Diversion Project

LU Ming-long¹, CUI Wei², CHEN Wen-xue², MU Xiang-peng², XIONG Qi-lin²

(1. China South-to-North Water Diversion Middle Route Cooperation Limited, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In recent years, part of water conveyance buildings of the main canal of the middle route of the South-to-North Water Diversion project have high water level and abnormal flow pattern, which lead to the risk of reduced water conveyance capacity. Therefore, it is urgent to assess the head loss. However, there are no monitoring stations inside the buildings, the project operation has not reached the designed scale, and the monitoring data lacks verification. The monitoring data of water level and discharge of the main canal during the large water delivery period in 2022 were collected, and the third-party hydraulic prototype measurement was carried out, and the monitoring data was reviewed and corrected. A calculation method of head loss was put forward using comprehensive head loss coefficient. The head loss of 143 out of 158 water transport structures in the main canal was calculated under enlarged flow. The results show that there is surplus in the distribution of head in the main canal. The total surplus head of the whole line is 3.05 m, among which the surplus in the section south to the Yellow River, the section between the Yellow River and the Zhang River, the section north to the Zhang River are 0.48 m, 1.06 m and 1.51 m respectively, accounting for 4%, 13% and 12% of the allocated head, respectively. The head loss of 40 water conveyance buildings exceeded the assigned value, among which were 31 inverted siphon, 4 aqueduct, 4 culvert and 1 tunnel.

Key words: hydraulics; middle route of South-to-North Water Diversion project; water conveyance building; head loss; prototype measurement