

设计经验

# 南水北调中线一期工程天津干线输水方案设计特点

吴换营

(天津市水利勘测设计院, 天津 300204)

**摘要:** 针对南水北调中线一期工程天津干线的地形地势、洪水和输水过程等条件,在输水方案设计中,分别采取了相应措施。通过对多种不同输水方式的系统研究,因地制宜地提出了无压接有压自流输水方案;采用多功能自动调节堰井技术,简化了水力控制条件,降低了工程投资;针对可能出现的糙率进行水力设计,保证了流态稳定;统筹考虑相关工程的不利影响,设置溢流调节措施,保证了工程安全。实践证明,输水方案切实可行,科学合理。

**关键词:** 南水北调工程; 天津干线; 输水方案; 多功能自动调节堰井; 设计特点

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)04-0033-04

## Design Features of Water Delivery Scheme for Tianjin Section of South-to-North Water Diversion Middle Route First-phase Project

WU Huan-ying

(Tianjin Municipal Water-conservancy Survey and Design Institute, Tianjin 300204, China)

**Abstract:** According to the conditions of Tianjin section of South-to-North Water Diversion Middle Route First-phase Project, such as terrain, flood and water delivery, the corresponding measures were adopted in the design of the water delivery scheme. Through a systematic research on different water delivery modes, the gravity water delivery scheme with no-pressure section connected with pressure section was put forward according to the local conditions. The multifunctional automatic adjustment weir well technology could simplify the hydraulic control condition and reduce the investment of the project. In view of the possible roughness, the hydraulic design was carried out to ensure the stability of the flow regime. Considering the adverse effects of the related projects, the overflow control measures were set to ensure the safety of the project. The practice showed that this water delivery scheme was feasible, rational and scientific.

**Key words:** South-to-North Water Diversion Project; Tianjin section; water delivery scheme; multifunctional automatic adjustment weir well; design features

### 1 工程概况

南水北调中线一期工程天津干线起点位于河北省徐水县西黑山村,终点位于天津市外环河西,总体走向由西向东,全长为 155.3 km。设计流量为 50 m<sup>3</sup>/s,加大流量为 60 m<sup>3</sup>/s。

天津干线采用全箱涵无压接有压全自流输水方

案<sup>[1]</sup>,0+000~10+660 段采用无压输水方式,10+660~155+305 段采用有压输水方式,10+660 处设调节池。

该工程中的主要建筑物有:西黑山进口闸枢纽、东黑山陡坡、无压段输水箱涵、调节池、有压段输水箱涵、调节堰井、王庆坨水库连接井、分流井、外环河

出口闸等控制性建筑物及河渠、铁路和公路交叉建筑物。

天津干线通过西黑山进口闸从总干渠引水,总干渠采用闸前定水位运行方式;通过王庆坨连接井(流量规模为 $25\text{ m}^3/\text{s}$ )与天津市内配套工程王庆坨水库(在建)衔接;在分流井处,通过天津市内配套工程西河支线向西河泵站输水(流量规模为 $27\text{ m}^3/\text{s}$ ),在终点与天津市配套工程外环河泵站工程(流量规模为 $28\text{ m}^3/\text{s}$ )衔接。

## 2 天津干线的工程条件

### ① 社会经济情况

沿线经过河北省保定市、廊坊市的8个县(市、区)和天津市的3个区,沿线村庄星罗棋布,共穿越29个乡镇,169个自然村。区域内人均耕地为 $1.6\text{ 亩}$ ( $1\text{ hm}^2=15\text{ 亩}$ ),其中23个村耕地不足1亩,最小仅为 $0.17\text{ 亩}$ 。沿线经济建设发展迅速,耕地供求矛盾突出。

### ② 地形地势特点

天津干线起点地面高程为 $65.2\text{ m}$ ,终点地面高程为 $1.2\text{ m}$ ,高差为 $64\text{ m}$ 。总体地势西高东低,沿线高差变化较大,上段地势陡,中下段地势平缓。前 $20\text{ km}$ 地面高程由 $65.2\text{ m}$ 降至 $18.0\text{ m}$ ,高差变化为 $47\text{ m}$ ,平均坡降为 $1/425$ 。后 $135\text{ km}$ 地面高程由 $18.0\text{ m}$ 降至 $1.2\text{ m}$ ,高差变化仅为 $17\text{ m}$ ,平均坡降为 $1/7941$ 。

### ③ 地质特点

天津干线由西向东跨越太行山东麓的山前丘陵区东缘、山前冲洪积倾斜平原、河北冲积平原三个大的地貌单元,其中冲积平原由冲洪积平原和冲积海积平原组成。地震动峰值加速度分别为 $0.05g$ 、 $0.10g$ 和 $0.15g$ 。全区地震动反应谱特征周期为 $0.40\text{ s}$ 。

$59+150\sim 116+550$ 、 $136+450\sim 143+000$ 段箱涵底板坐落在湖沼相粘土、壤土层及淤泥质粘土上, $116+550\sim 136+450$ 、 $143+000\sim 155+530$ 段底板坐落在海相层粘土和壤土及淤泥质壤土层上,天津干线中下游段 $96.38\text{ km}$ 地段土体均属中~高压缩性土,承载力较低,存在地基土体变形量相对较大等问题。

在不同岩性结合处,由于土体物理力学性质有一定差异,亦存在不均匀沉降问题。

### ④ 水文及防洪特点

沿线与49条行洪排沥河渠、13条灌溉渠道交叉。最大的是大清河,白沟站以上集流面积为 $10154\text{ km}^2$ 。

天津干线穿越大清河分滞洪区。大清河水系的防洪形势相当严峻,现状防洪标准低,南支水系不足50年一遇,北支水系不足20年一遇。遇超标洪水时,需利用兰沟洼滞洪和向清北地区及大小王淀分洪,波及天津干线范围为 $28+800\sim 81+500$ ,总长为 $52.7\text{ km}$ 。

### ⑤ 输水过程特点

天津干线输水过程中年际间、年内各旬间都是不均匀的,中小流量的输水时段较长,水量较大。

具体来说,流量为 $30\sim 40\text{ m}^3/\text{s}$ 的供水时段占总时长的 $31.81\%$ ,输水水量占总水量的 $37.02\%$ ;流量为 $40\sim 50\text{ m}^3/\text{s}$ 的供水时段占 $18.58\%$ ,输水水量占总水量的 $26.26\%$ ;流量为 $50\sim 60\text{ m}^3/\text{s}$ 的供水时段占总旬数的 $16.01\%$ ,输水水量占总水量的 $28.57\%$ 。

## 3 输水方案的设计特点

### ① 因地制宜,合理确定输水方式

针对上述诸多条件,如何利用自然水头、采取何种输水方式安全可靠输送不同流量,是本工程方案选择的关键。

设计中进行了全管涵方案和管渠结合方案的综合比选。

在全管涵方案中,针对天津干线的地形地势特点、不同管涵的特点,结合水头的不同利用方式,提出了三种输水型式(以高压管涵为主的输水型式、全箱涵无压接有压输水型式、高压管涵与箱涵结合的输水型式,详见图1)、两种输水方式(自流输水、加压输水)。鉴于天津干线具有 $65\text{ m}$ 的自然水头,应优先考虑自流输水方式。从三种输水型式中筛选出 $2\text{DN}4\ 600\text{ PCCP}$ 管方案、3孔 $4.4\text{ m}\times 4.4\text{ m}$ 全箱涵方案和 $2\text{DN}4\ 000\text{ PCCP}$ 管与3孔 $4.4\text{ m}\times 4.4\text{ m}$ 箱涵结合三个方案进行综合技术经济分析。分析结果表明,对于以高压管涵为主的输水型式和高压管涵与箱涵结合的输水型式,虽然充分利用了水头,但运行调度复杂、投资较高,特别是前者,与沿线地质条件适应性较差,须采取地基处理措施。全箱涵方案投资最小,运行控制简单,便于与总干渠联合调度,因此,在自流输水方式中选择了全箱涵无压接有压方案。

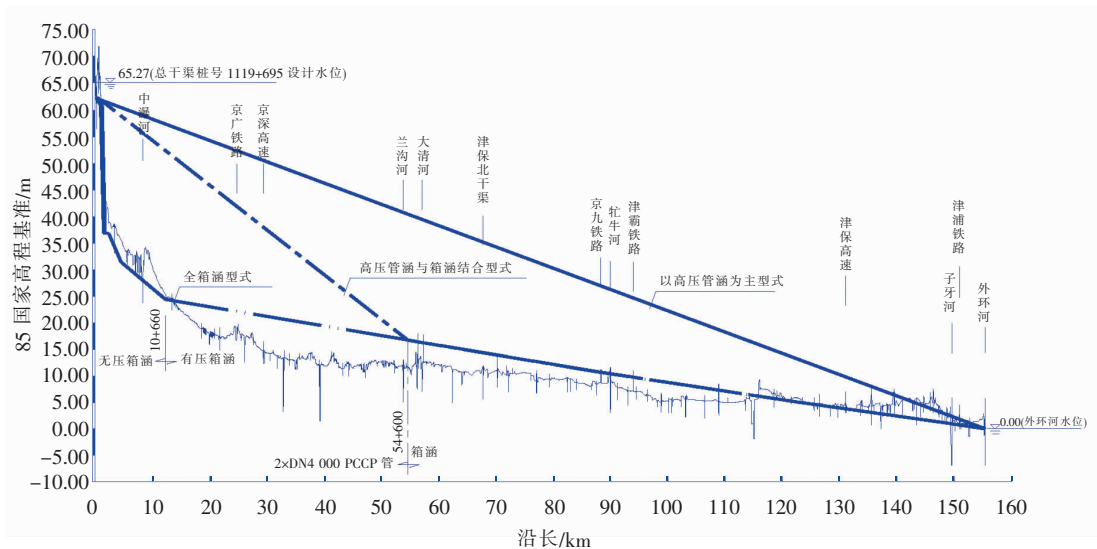


图 1 不同输水型式压坡线示意图

Fig. 1 Sketch map of pressure lines in different water delivery schemes

为减小管涵断面,降低投资,又进行了加压输水方式(即大流量加压、小流量自流输水)的比较。本着大部分水量自流和泵站利用率不宜过低的原则,确定了起始加压流量为  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ 、三种输水型式的加压方案。分析结果表明,加压输水方式存在自流与加压切换、在某些流量下存在先消能后加压的问题,而且与全自流方案相比,并无明显的技术经济优势。

由于明渠造价低,还拟订了管渠结合方案,即在大清河分洪区段和天津市内段采用管涵,其余段采用明渠。该方案有约 80 km 的明渠,一次性投资小,但存在永久占地大、对当地灌排系统产生一定影响的问题。更主要的是由于明渠在上游,为保证大流量时输水,不得不在下游管涵段设加压泵站,运行费用高、调度复杂。因此,管渠结合不适宜天津干线。

全箱涵无压接有压全自流方案具有运行费用低、控制简单、施工简单、管理方便、节约宝贵的土地

资源、更有利于保证水质水量等优点,经综合分析,推荐该方案为天津干线的输水方案。

## ② 采用多功能自动调节堰井技术

天津干线具有 64 m 地形高差,输水管径是在充分利用现有水头条件下,由最大流量决定的,如图 2 中 A 线所示,但输水过程中,输水流量是变化的,若在管道末端设置调节阀调节流量,会出现如下情况:当低于设计流量运行时,水头损失减少,下游管道压力增加,如图 2 中 B 线所示,停止输水时,输水管道承受全部水头,如图 2 中 C 线所示。相应带来如下问题:一是增加工程投资;二是要求调节阀调节控制程序严格,否则产生较大的水击压力,危及工程安全;三是对冰等杂物、异物的敏感性高,潜在风险大,运行管理复杂;四是用电负荷级别高;五是调节阀的关键部件需依赖国外,日后的维修、维护和更新受控于人,对工程运行和管理非常不利。

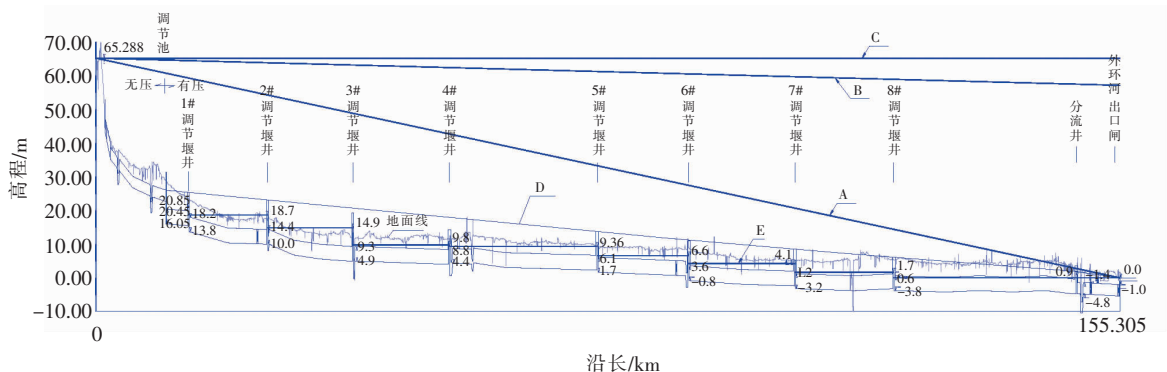


图 2 不同控制方式压坡线示意

Fig. 2 Sketch map of pressure lines in different control mode

基于上述问题,提出了多功能自动调节堰井技术<sup>[2]</sup>(见图3),与采用调节阀时的情况正好相反,设计流量时管道压力是最大的,如图2中D线所示,减小流量时,管道压力也减小,在最小运行流量时,还能保持管道所需的最小压力要求,如图2中E线所示。在天津干线工程中,因地制宜布设了八座调节堰井,通过分段消耗富余水头,降低了有压管涵小流量时的内水压力,大大简化了水力控制条件,节省投资8亿元。

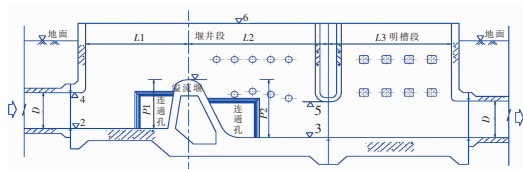


图3 多功能自动调节堰井纵剖面示意

Fig.3 Sketch map of longitudinal section of multifunctional automatic adjustment weir well

### ③ 注重水力条件,保证流态稳定

天津干线的水力边界条件复杂,因此水力计算包括恒定流计算和非恒定流计算。恒定流计算目的是确定输水断面尺寸、纵断面布置、各控制建筑物的水头损耗与水位衔接情况。非恒定流计算的目的是了解各种运行工况下沿线水位、流量变化情况,验证工程设计的合理性,并提出在满足安全运行条件下,允许的系统调节控制方法和程序,为工程运行调度提供依据。因混凝土工程的糙率具有一定的不确定性,水力计算中考虑了设计糙率及可能出现的小糙率情况,提出最高、最低压坡线,为建筑物设计、箱涵结构计算提供全面、科学的依据。

无压段设计中,应避免在不同流量及不同糙率下纵坡接近临界坡,以防发生不良流态,为保证水流形成设计流态,设计采用纵坡与设计流量相应的临界坡度相差2倍以上的措施。有压段设计中,为防止明满流过渡、有压箱涵进口形成贯穿性漩涡造成局部流态不稳以及大量掺气水流进入有压箱涵等不良水力现象的发生,采用调节堰井技术及按“一低一角”原则设置消涡梁的措施。

### ④ 统筹考虑,保证安全运用

天津干线线路长、流量大,首端与总干渠相接,末端又与2座泵站相接,为确保各种工况条件下输水系统的工程安全,应统筹考虑上下游工程对天津干线的不良影响。

对于进口闸调节流量时产生的水力波动,在向下游传播过程中经过较长的无压流的消耗衰减作用,结合有压流段阶梯设置的调节堰井的自动控制作用,避免了对下游近143 km、对压力波动敏感的有压流箱涵构成安全威胁。对于尾部的原因产生的水力波动(如:外环河和西河泵站事故停电),设计中考虑在线路中部和尾部较大行洪河道处设置溢流设施,以便就近且及时消除不利影响,即使在向上游传播的过程中也会被沿程设置的调节堰井和上游无压流所遮断和削减,不会直接影响进口闸的运行状态。该工程对易造成事故的水力波动,有较好的适应性,工程安全有保证。

## 4 结论

根据天津干线的具体条件,经多方案综合比选论证,采用了全箱涵无压接有压全自流方案;多功能自动调节堰井能有效适应输送不同流量的要求,使工程运行控制简单;采取双糙率设计,并注重水力学条件,使水流流态平稳;通过在关键部位设置溢流设施,使工程安全有保障。

目前,天津干线工程运行状况良好。

## 参考文献:

- [1] 天津市水利勘测设计院. 南水北调中线一期工程天津干线可行性研究报告[R]. 天津:天津市水利勘测设计院,2005.
- [2] 吴换营. 一种带有自动调节堰井的重力有压输水系统[P]. 中国专利:ZL200910093969.7,2011-07-20.



作者简介:吴换营(1969-),男,河北沧州人,硕士,教授级高级工程师,主要从事水利工程规划、设计和研究工作。

E-mail:why5886@126.com

收稿日期:2016-06-27