

水利科技与工程设计

顾 辉 著

气象出版社

水利科技与工程设计

顾 辉 著

气象出版社

内 容 提 要

本书是对大型水库及南水北调中线引水工程中的设计优化、应用及复杂地基病险水库加固等方面多项科研成果的集成,具有较高的实用和借鉴价值。

本书可供广大水利水电工程技术人员及高等院校、科研、施工、设计、管理单位有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水利科技与工程设计/顾辉著. —北京:气象出版社,2005

ISBN 7-5029-4016-2

I. 水… II. 顾… III. 水利工程-工程设计 IV. TV222

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 103774 号

水利科技与工程设计

Shuili Keji Yu Gongcheng Sheji

出 版 者:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编:100081

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@263.net

电 话:总编室 010-68407112 发行部 010-62175925

责任编辑:刘厚堂

终 审:章澄昌

封面设计:王 伟

责任技编:都 平

责任校对:时 人

印 刷 者:北京京科印刷有限公司

发 行 者:气象出版社

开 本:889mm×1194mm 1/16

印 张:15.25

字 数:470 千字

版 次:2005 年 11 月第 1 版

印 次:2005 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1—1000

定 价:58.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

前 言

水利水电工程建设是一项专业多、工序繁、规模大、涉及面广的社会化生产建设过程,也是涉及内外部关系的错综复杂的系统工程。搞好水利工程设计,对于把设计蓝图付诸实施,对工程建设过程进行科学的管理具有重要的经济意义和现实意义。

由于我国幅员辽阔,各地区自然条件差异甚大,水利水电工程枢纽建筑物千变万化。水利水电工程建设中由于受水文气象条件制约,施工季节性强;因地形地质条件复杂,工程又多地处偏远山区,交通运输不便,其工程困难极多。因此认真做好水利水电工程设计,对保证工程质量、缩短建设周期、降低工程造价和提高工程效益等都有十分重要的意义和作用。

随着建设体制改革的深入运行,一大批大中型或特大型水利水电工程已经建成或正在建设,并积累了许多宝贵的经验,在应用新技术新设备方面取得了可喜的成果。适时地迅速传递和推广这些先进经验和新技术,会进一步提高设计水平,保证工程质量。

本书的篇章,是多年来,循着我的工作和科研及科技论文编写而成的。主要介绍了南水北调中线跨流域大型调水工程设计优化,黄壁庄水库极复杂地基土石坝建混凝土防渗墙的关键技术研究,坝工设计、河道险工治理,水污染对水利工程的影响分析及对策等方面的经验。文中也涉及在工程设计中积累的正反两方面的经验和教训。

全书共分三部分:调水工程设计篇;病险土石坝除险加固设计篇;工程综合技术篇。

一年来,在大家的帮助下,终成此集。

由于水平有限,疏漏不妥之处请予批评指正。

著 者

2005 年 7 月

目 录

调水工程设计篇	(1)
1 南水北调中线京石段工程优化设计	(3)
2 优化设计技术在南水北调中线京石段工程中的应用	(8)
3 南水北调中线京石段工程地基土液化判别与对策	(16)
4 南水北调中线京石段大流量低流速引水隧洞优化设计	(22)
5 南水北调中线京石段大型输水明渠工程优化设计	(28)
6 南水北调中线京石段大型跨流域渠道倒虹吸工程优化设计	(35)
7 南水北调中线京石段大型跨河渡槽工程优化设计	(41)
8 南水北调中线京石段左岸排水工程优化设计	(49)
9 南水北调中线京石段渠渠交叉建筑物工程优化设计	(54)
10 南水北调中线京石段工程跨总干渠道桥工程优化设计	(57)
病险土石坝除险加固技术篇	(61)
11 黄壁庄水库抗风险能力分析	(63)
12 黄壁庄水库副坝病害分析	(66)
13 黄壁庄水库副坝加固对策研究	(79)
14 黄壁庄水库副坝防渗墙施工技术	(104)
15 黄壁庄水库副坝防渗墙施工过程中出现问题的分析及处理	(115)
16 黄壁庄水库副坝加固后安全性评价	(136)
工程综合技术篇	(161)
17 引冲式自溃坝设计及冲刷模拟计算	(163)
18 寒冷地区全断面碾压混凝土高坝试验研究	(168)
19 大黑汀水库岩基混凝土重力坝监测数据分析	(173)
20 海河流域防洪河道险工预测	(177)
21 海河流域防洪河道险工治理技术	(186)
22 水污染对水利工程的影响分析及对策研究	(214)

调水工程设计篇

1 南水北调中线京石段工程优化设计

1.1 引言

南水北调中线工程南起湖北省丹江口水库,北至北京市颐和园的团城湖,输水总干渠全长 1 275 km,其中河北省渠段由冀豫交界处的漳河北始至冀京边界处的北拒马河中支南止,渠长 464.90 km。河北省北段工程(京石段)自石家庄古运河枢纽至北拒马河中支南,途经石家庄和保定两市的 11 个市、县,渠长 227.375 km,其中渠道长 201.031 km,建筑物总长 26.344 km,各类建筑物 344 座。

1.2 水文气象

南水北调中线总干渠的河北北段沿太行山东麓与京广铁路之间的浅山丘陵或山前平原北行,沿途与子牙河和大清河系的 96 条大小河流及 31 片坡水区交叉,所经区域地理位置为东经 $114^{\circ}25'$ ~ $115^{\circ}47'$,北纬 $38^{\circ}06'$ ~ $39^{\circ}30'$,大体为南北向狭长地带,西侧为太行山迎风山区,东侧为山前平原或坡水区,所在地区属暖温带半湿润地区,受季风控制,四季分明,历年冬夏季较长,春秋季节较短。渠段沿线同期气温南北差异不大,多年平均气温为 $13.0 \sim 11.7^{\circ}\text{C}$ 之间,沿线多年平均降雨量变化规律不明显,变化范围为 468 ~ 552 mm,多年平均水面蒸发量为 1 512 ~ 1 928 mm。沿线冬春季盛行西北风,夏季多东南风,最大风速 $16 \sim 18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向为北风或西北风。西侧太行山浅山区为华北地区暴雨多发区,尤以保定段西侧的大清河浅山区是暴雨中心和暴雨高值区。由于华北地区降雨及径流年内分配不均匀和水库拦蓄作用,与总干渠交叉的绝大部分河道常年断流,汛期暴雨洪水集中,大小河流洪水相继穿越总干渠流向平原地区,部分渠段因特殊地形及河道发育特点,常发生河道主槽游荡和相邻河流洪水漫溢串流。

1.3 工程地质

干渠的河北北段位于太行山东麓与华北平原的接壤地带。输水总干渠所经范围内,地形总体上呈西高东低之势,南部处于平缓区,北部处于丘陵区,地形最高点地面高程 450.0 m,地形最低点地面高程 45.0 m,相对高差约 400 m。地表多被第四系地层覆盖,长 215.471 km,占渠段总长的 94.8%;基岩段长度 11.904 km,占渠段总长的 5.2%。基岩的地层岩性主要有太古界阜平群片麻岩;上元古界蓟县系雾迷山组、铁岭组、青白口系下马岭组、景儿峪组;古生界寒武系馒头组、毛庄组、徐庄组、张夏组;奥陶系冶里组、亮甲山组、马家沟组;石炭系本溪组等部分碳酸岩、碎屑岩、黏土岩。第四系松散地层中更新统中下段以泥砾为主,上更新统以黄土状壤土及碎石土为主,全新统主要为黏性土、碎石土及砂性土。丘陵区局部出露燕山期岩浆岩。

渠段地下水有孔隙水、裂隙水、岩溶裂隙水 3 种类型。孔隙水赋存于第四系松散岩层,大型河流的河床地下水一般埋深 2 ~ 10 m,一、二级阶地及部分倾斜平原渠段地下水埋深 10 m 以下。裂隙水、岩溶裂隙水赋存于砂岩、砾岩及可溶的白云岩、灰岩中,一般埋深较大。地下水位总体呈逐年下降的趋势。主要物理地质现象有冲沟、坍塌、岩溶等,但规模均较小,对工程无影响。

1.4 工程布置

南水北调中线工程总干渠* 为 I 等工程,渠道及其交叉建筑物的主要构筑物为 1 级建筑物,次要构筑物

* 文中总干渠及干渠均指总干渠的河北北段,即京石段。

为3级建筑物。渠道防洪标准为50 a一遇洪水设计,100 a一遇洪水校核;流域面积大于 20 km^2 的河道,其交叉建筑物的防洪标准按100 a一遇洪水设计,300 a一遇洪水校核;坡水区和流域面积小于 20 km^2 的河沟,建筑物的防洪标准按50 a一遇洪水设计,100 a一遇洪水校核。始末端设计流量分别为 $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。起止点设计水位分别为76.408 m和60.300 m。渠道纵坡大部分在 $1/25\,000 \sim 1/20\,000$ 之间。

渠道横断为梯形断面,按不同地形条件,分全挖、全填、半挖半填3种构筑方式,其长度分别为82 km, 14 km和102 km。全挖方渠段,在安全超高所相应的高程处设5 m宽的一级马道,以上每增高6 m增设一级马道,上口外设林带、左侧防洪堤和截洪排水沟。全填方渠段堤顶高程与堤宽的确定与全挖方渠段一级马道相同,在填方较高地段,两堤外坡自堤顶以下每6 m设置一条马道,堤脚处设置截洪排水沟和林带。半填半挖渠道同全填方渠段。

渠道设计水深6.0~3.8 m,边坡系数土渠段为2.0~3.0,石渠段为0.7~1.5,底宽24~7 m,综合糙率0.015。在强渗漏、全填方及煤矿区等特殊渠段渠道采用全断面混凝土衬砌,在混凝土衬砌板下铺设二布一膜复合土工膜加强防渗。渠道在有冻胀渠段采用聚苯乙烯泡沫保温板或置换砂砾料防冻胀。

干渠运行维护道路设于右侧的一级马道或堤顶,按四级公路设计,沥青混凝土路面净宽3.5 m,在穿越大型河流、铁路、隧洞等建筑物处,改为渠外绕行。

1.5 建筑物设计

渠段共布设各类建筑物344座。其中隧洞工程7座,大型河渠交叉建筑物23座,左岸排水建筑物105座,渠渠交叉建筑物29座,路渠交叉建筑物131座,控制工程37处,铁路交叉建筑物2座。

1.5.1 隧洞

7座隧洞总长9 597 m,其中洞身段长8 626 m。除西市隧洞为单洞室布置外,其余均为双洞室结构。洞身断面为无压马蹄形和无压圆拱直墙形。单洞底宽为6.6~7.8 m,洞高为6.77~8.62 m。洞身段Ⅱ、Ⅲ类围岩采用锚喷支护加局部减糙衬砌,Ⅳ、Ⅴ类围岩和破碎带采用钢筋混凝土全断面衬砌。

1.5.2 河渠交叉建筑物

渠段共有河渠交叉建筑物23座,按照交叉位置的地形条件及河、渠底高程与水位关系把交叉工程的穿越方式分为:梁(拱)式渡槽4座,涵洞式渡槽2座,渠道倒虹吸12座,暗渠2座,排洪涵洞2座,河倒虹吸1座。

4座梁(拱)式渡槽总长3 216 m,其中槽身段长1 980 m。漕河渡槽采用梁、拱两种结构,其余均为板梁式结构。桁架拱结构单跨跨度为60 m,板梁式为20~25 m。槽身采用矩形断面多槽布置。放水河渡槽为4槽,其余均为双槽。单槽底宽5.8~10 m,墙高4.7~5.0 m。渡槽下部结构采用扩基墩台或桩基墩台,桩径1.2~2.0 m。

2座涵洞式渡槽总长450 m,其中槽身段长202 m。上部槽身采用双槽矩形断面,尺寸分别为 $11.5 \text{ m} \times 4.7 \text{ m}$ 和 $6.5 \text{ m} \times 4.6 \text{ m}$ 。下部为行洪涵洞,采用多孔矩形箱涵结构,孔径、孔数和洞身长度分别为 $4.2 \text{ m} \times 4.2 \text{ m} \times 24 \text{ 孔} \times 28.9 \text{ m}$ 和 $4.4 \text{ m} \times 4.0 \text{ m} \times 18 \text{ 孔} \times 16.6 \text{ m}$ 。

12座渠道倒虹吸总长12 923 m,其中管身段长9 274 m。倒虹吸管身段采用多孔矩形箱涵结构,界河倒虹吸为2孔两联,其余为3孔一联布置。单孔宽为4.0~6.0 m,高为4.1~6.6 m。所有倒虹吸均采用深埋方案,管顶埋深在河道设计冲刷线以下0.5 m。对一般河道,管顶行洪口门采用导流堤形式与河道连接;对大型宽浅河道,为适应沿滩地段总干渠左堤横向水流比降大、流速高的特点,该处口门采用梨形裹头进行防护和连接,口门另一侧采用圆形裹头形式防护和连接。

2座暗渠总长785 m,采用3孔一联矩形箱涵结构,单孔宽6.6 m,高6.8 m。2座排洪涵洞总长202.1 m,采用6孔两联和9孔三联的箱涵结构,单孔尺寸为 $3.9 \text{ m} \times 3.9 \text{ m}$ 和 $3.8 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 。1座河倒虹吸为箱型倒虹吸,管身段为76 m,采用6孔两联的箱涵结构,单孔尺寸为 $4.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 。

1.5.3 左岸排水建筑物

设置左岸排水建筑物 105 座,其中排水渡槽 23 座,上部槽身为矩形断面,孔数为 1~6 孔,单孔宽 3.5~13 m,侧墙高 1.3~4.9 m,单跨长度为 10~26 m,槽身总长 30~100 m。槽身结构采用多侧墙矩形槽和多纵梁矩形槽两种型式,部分主梁采用预应力混凝土结构。下部结构采用重力墩,荷载较小者采用排架支承结构。

排水倒虹吸及排水涵洞 82 座,管身为钢筋混凝土单联箱形结构,孔数为 1~4 孔,最大断面尺寸 4.6 m×4.6 m。管身长 75~155 m,每节长度 10~20 m。

1.5.4 渠渠交叉建筑物

设置渠渠交叉建筑物 29 座,其中灌渠渡槽 16 座,槽身段为简支结构,跨数为 2~7 跨,跨度 10.5~20.6 m。上部结构采用矩形槽或 U 形槽两种型式。矩形槽断面为 3.3 m×2 m~1.15 m×0.79 m,U 形槽断面为 2.3 m×2 m~1.3 m×0.9 m。支承结构采用肋拱、排架柱或重力墩结构。排架柱高度为 3.5~19.6 m,重力墩高度为 7.28~8.88 m,边墩采用浆砌石重力墩。肋拱结构为单跨,跨度分别为 54 m,75.8 m,矢高为 11.25 m 和 15.12 m。基础采用钢筋混凝土扩大基础,结构尺寸为 5.64 m×2.6 m×0.5 m~3.2 m×2.0 m×0.5 m。

1.5.5 控制工程

设置控制工程 37 座,其中节制闸 12 座,一般布置在渡槽或隧洞的进口,或倒虹吸的出口。退水闸 7 座,结合大型河渠交叉建筑物布置。闸室长度为 11.5~17.5 m,孔数为 1~2 孔。单孔宽度为 3~7 m。分水闸闸室长度为 10~13 m,孔数为 1~2 孔。单孔宽度为 1.5~5.5 m;分水泵站流量大于 $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的选用双吸离心泵,小于 $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的选用潜水泵,每座泵站的装机台数为 5~8 台。

1.5.6 公路、铁路交叉建筑物

设置公路桥 128 座,公路桥上部梁体结构以装配式预应力混凝土 T 形梁、工型组合梁结构为主,单桥桥长在 50~150 m 之间,单孔跨径分别采用 20 m,25 m,30 m,35 m,40 m。行车道宽以净-7 m 和净-4.5 m 为主,少数为 2×净-11.5 m 和 2×净-9.75 m。桥面净宽为 4.5 m 的公路桥采用单柱式墩,桥面宽度较大的采用四柱式墩。柱体直径为 100~180 cm。基础型式采用阶梯状扩大基础和钻孔灌注桩基础。钻孔灌注桩基础多采用一柱一桩,桩基断面采用圆形,直径为 100~200 cm。

3 座铁路桥,桥长分别为 74.2 m,73.12 m,98.2 m,均为 3 孔。桥梁上部结构为预应力混凝土简支梁。下部墩柱为钢筋混凝土圆形桥墩,基础采用扩大基础,两端设置耳墙式桥台。

1.5.7 金属结构

干渠上涉及金属结构设备的各类建筑物共计 60 座。工作闸门均采用平面钢闸门,闸门高度大于 5 m 的检修闸门均采用叠梁钢闸门,闸门高度小于 5 m 的检修闸门均采用平面钢闸门或铸铁闸门。工作闸门启闭机均采用液压式启闭机,检修闸门启闭机均采用移动式电动葫芦或手、电两用螺杆式启闭机。金属结构设备共计门(栅)槽 228 孔,闸门 159 扇,拦污栅 11 扇,启闭机 142 台。闸门、埋件和启闭设备等重约 2 921 t,防腐面积约 51 200 m^2 。

1.5.8 检修排水与闸门防冻

为避免冬季运行时结冰对钢闸门形成危害,节制闸、退水闸、分水闸等工作闸门前均设置钢闸门防冰冻系统。防冰冻措施采用压力水射流法,即利用潜水泵产生由下而上的射流,使水面在一定范围内产生扰动,从而防止水面结冰。

1.5.9 供配电系统

工程负荷点多、线路长,要求供电可靠性高,供电系统采用 3 个 35 kV 中心开关站,由此引出 2 回 35 kV 线路向干渠的上下游两侧辐射,在干渠的负荷点设置降压变电站向负荷点供电。降压变电站 35 kV 采用典

型的“ π ”形双电源接线或“T”形接线,中心开关站供电末端的降压变电站母线上设有联络开关。正常运行时,联络开关处于“断开”位置,各中心开关站之间彼此独立供电;当 35 kV 输电线发生故障或某中心开关站失去系统电源时,可通过切除故障线路或故障点、闭合联络开关等一系列操作实现相邻两中心开关站之间的互为备用。35 kV 专网架空线路由中心开关站向总干渠上下游两侧辐射,沿右岸布置,位于干渠堤外 2 m 处。

1.6 管理设计

1.6.1 监控系统

监控系统包括闸门监控、图像监控和管理信息 3 个子系统。闸门监控采用分布式开放型多计算机分层树形网络拓扑结构,即设置调度中心层、分控中心层、现地闸站控制层和管理处监视层。其中调度中心层、分控中心层和现地闸站控制层 3 层参与调水控制,管理处监视层只起监视作用。

1.6.2 图像监控

建立图像监控系统监测渠段沿线各建筑物运行状态,通过监视屏幕直观了解现场情况。该系统采用分层分布开放式结构,设立图像监控中心和控制性建筑物图像监控站。

1.6.3 管理信息

将渠段各控制性建筑物闸站及管理站内的闸门监控系统、安全监控系统联接成局域网,实现资源共享、数据共享、功能互补、综合管理及优化调度,建立管理信息系统。

1.6.4 安全监测系统

为监视渠道与各主要建筑物的运行状况或安全运行程度,并进行预报,建立总干渠安全监测系统,按行政区域划分,组线分层与布式监测结构。监测渠道与建筑物水位、表面变形、渗流压力、土压力和钢筋应力等与土工建筑物安全密切相关的参量。

1.6.5 通信系统

为满足工程全线自动监控、安全监测、调度通信的要求,沿总干渠全线建立一个高速率、高质量、大容量、宽频带的数字及语音综合通信系统。通信系统与监控系统、调度管理系统的层次划分相结合,设有通信分中心、信息交换中心、通信用户终端。通信系统共设置 3 层,即省通信分中心、管理处信息交换中心、闸站(泵站)及管理站通信终端。

1.6.6 消防设计

本着贯彻“预防为主,防消结合”和“确保重点,兼顾一般”的原则,对引起火灾的主要部位及电气设备、电缆和闸门液压设备以及生产控制管理中心等作为消防重点对象。

消防范围包括建筑物中的闸门启闭机室、水泵站和变压器室(场)、柴油发电机房、高低压配电装置室、控制室、集控室、通信室等附属建筑物,以及管理分局和管理处、管理站等。对丙类电气设备场所采用防火墙作局部分隔,设置安全出口及防火门,配备手提式灭火器等灭火器材;启闭机室、配电装置室、控制室、集控室等重要场所、部位设置消防报警系统;结合正常通风需要设置消防排烟设施;厂区建筑物设置生产、生活、消防合一的供水系统,电缆全部采用不燃电缆和阻燃电缆,并采取防火隔板、防火涂料、防火墙、防火堵料等防火措施,并配置手提灭火器等灭火器材。

1.7 施工组织设计

在总干渠渠线的右侧分布有京广铁路、107 国道及京深高速公路等 3 条运输大动脉,并形成了以石家庄、保定为中心,辐射到所辖区、县等地方的公路交通网。公路情况,充分利用原有公路,个别路段在原有基础上加宽改造,使其达到Ⅲ级道路标准。

隧洞工程、公路交叉工程、铁路交叉工程、渠渠交叉工程、左岸排水工程分水口门及泵站工程,一般不需进行施工导流;河道倒虹吸、渠道倒虹吸、涵洞和渡槽等,均需要进行施工导流。导流建筑物级别为4级,导流建筑物洪水重视期按10~20 a选用。采用枯水期作为导流时段。施工导流方式采用分期围堰束窄河床导流或全断面围堰明渠导流两种方式。

渠的主要工程量:土方开挖8621万 m^3 ,土方回填3632万 m^3 ,石方开挖1176万 m^3 ,混凝土浇筑370万 m^3 ,砌石107万 m^3 以及大型混凝土预制构件安装和机电、金属结构安装等施工项目。土方开挖采用挖掘机配合自卸汽车将土运至弃土区或根据土方平衡规划将土方运至其他填筑区;土方回填采用振动碾和打夯机辅助压实。部分湿陷性黄土渠段采用强夯加密法进行处理。石方开挖采用潜孔钻、手风钻钻孔,梯段爆破方式开挖,周边进行预裂爆破。隧洞开挖采用钻爆方式,台阶法施工。混凝土浇筑采用集中拌和,3 m^3 混凝土罐车水平运输,混凝土泵入仓。混凝土预制构件最大件重90 t,采用160 t汽车起重机吊装就位。机电、金属结构安装场地开阔,安装方便。

针对不同的自然条件和施工特点,为统筹安排施工布置、土石方挖填平衡、施工进度,均衡施工强度、建筑材料供应和劳动力、施工机械设备配置等,各段采用集中与分散相结合的施工布置方式,以段内大型建筑物为中心,设置机械修配厂、综合加工厂、汽车保养站和施工仓库,兼顾其他建筑物施工需要。

1.8 结 语

南水北调中线工程条件优越,输水总干渠布置在黄淮海平原西部,地势西南高、东北低,全线以自流输水为主。沿线的大中城市包括北京市在内均位于输水总干渠东侧,都可就近自流供水,并可通过天津干渠向天津自流供水,运行成本低。建设南水北调中线工程,将会给京津冀华北平原地区提供优质水源,有效改善供水条件,提高生活质量,为国民经济发展注入新的活力。并通过水资源的优化配置,使城市和工业不再继续挤占农业用水,在平、丰水年可将原来挤占的农业供水还给农业,并可有效地控制地下水超采,改善日益恶化的生态环境。

河北省北段工程作为南水北调中线一期工程的组成部分之一,承担着南水北调中线一期工程所承担的基本供水任务,向北京市、天津市年输水10.52亿 m^3 和8.63亿 m^3 ;向河北省石家庄、保定、廊坊、沧州、衡水等城市供水;供水区控制范围4.5万 km^2 ,人口2972万,耕地276.69万 hm^2 。还担负着向北京市应急供水的特殊任务,确保北京市的城市供水安全。

2 优化设计技术

在南水北调中线京石段工程中的应用

2.1 引言

在南水北调中线河北省北段工程勘测设计中,严格遵循质量方针,重视科技进步,积极开发,应用新技术、新设备、新材料,先后完成了二维水流数学模型、宽浅式无压隧洞降低洞底高程的试验,倒虹吸工程动床模型试验,渡槽工程结构静力、动力模型试验等 69 项。同时,重视优化设计,利用最新的理论、最新的方法、最新的工艺、最新的材料、最新的工程经验,设计出最新的方案,以最小的工程投入,创造出最好的效益。

本段工程前期勘探、论证工作长达 40 年,已完成了各类建筑物的勘察设计、科学研究及编制设计文件等成果 1 000 多项,图纸 2 万多张,其中涉及到测绘、地质、水文、规划、建筑物工程等 20 多个专业,专用设计计算软件 100 多个。已将如此多的信息资料建立了档案信息数据库,面向南水北调工程设计建设,反映了南水北调工程几十年来前期勘察论证和工程设计的历史变化与庞杂数据的有机结合。

工程界长期以来的愿望就是要实现和发展工程设计优化技术,早在 40 年以前就提出了设计优化的基本概念和研究课题;计算机时代的到来,具备了实现的条件,引入了数学规划,为设计优化奠定了理论基础,形成了新型学科,得到了普遍应用,收到了显著效益;但目前的优化设计主要是采用非线性规划方法,对大型结构的优化,大量计算时间是用于优化过程中应力的重分析。现代的工程设计优化技术,在一系列有关的新学科、新技术成就的支持、渗透和推动下,增大了交叉性、综合性,扩大了研究范围,发展更加蓬勃。尤其是近几年南水北调工程的电子版文档的建立,为优化设计奠定了基础,使设计优化技术发展迅速,计算机辅助设计 CAD、自动优化设计、模糊优化设计、智能优化设计等先进技术,在南水北调工程设计中得到应用。

2.2 计算机辅助设计

1995 年以前,南水北调工程的设计主要是利用手工计算与绘图,有些设计也采用了三维模型来记录设计思想和设计方案。自 1996 年以来,计算机辅助设计与优化理论相结合,构成了优化设计新技术,用存储在计算机内的信息代替手工图纸和模型;存储在计算机内的信息,既有图形也有数据,其核心是几何模型的模拟。

随着 CAD 的发展,CAA 和 CAD 技术在工程设计中得到应用,向设计最优化和设计自动化推进。数字化地面模型技术进一步完善,平面设计图引入回旋线实体,实现了线性的精确设计,平面设计图自动生成,三维建模技术的发展、建筑物设计系统成熟的软件等,从而实现了由计算机完成分析、计算、设计优化、方案论证及绘图全过程的自动化设计。

对施工控制网进行信息化管理和机助模拟设计。制定既经济合理又满足精度要求的布网方案,根据设计和地形资料在图上选点布网,获取网点近似坐标,模拟观测方案,根据仪器精度确定观测值精度,进一步模拟观测值,计算网的各项质量指标如:精度、可靠性、灵敏度等。

2.2.1 计算力学

南水北调工程涉及到渠道交叉河流的洪水、交叉建筑物设计方案、渠道高边坡稳定、不良地质地段处理、大流量大跨度渡槽与桥梁的结构计算,隧洞、倒虹吸的断面型式,建筑物等计算问题。随着计算力学的发展,适应南水北调工程的计算软件编制成功,有限元、边界元、弹簧元、离散元等方法为优化设计提供了有力的工具。

2.2.1.1 误差估计和自适应技术

在线性静力问题计算方面,已有良好进展,有效的误差估计方法和多种自适应技术,如局部加密网络、局部提高形函数阶次和混合方式等,以及在非线性及瞬变问题中也有所发展。

2.2.1.2 流体力学

流体力学有效的计算方法为优化设计提供了基础条件,例如,水头的优化、最佳水力断面、交叉河道的数值模拟计算、糙率参数的合理选定、计算边界、初始条件、变网格处理技术等。

2.2.1.3 局部效应

土体、混凝土等材料的应变软化导致了结构的局部破坏,以自适应加密法分析这种局部的破坏,例如,灌注桩与土相互作用的研究,地基承载力特征值计算研究等。

2.2.1.4 多相行为及抗地震问题

包括土体液化在内的抗地震问题,采用了自适应和局部化技术,例如:渡槽在地震中的动力性能及受力特点,多点输入地震波,对简化模型的塑性分析,隔震支座的抗震性能等。

2.2.1.5 随机行为

随机性来自荷载和材料两个方面,从概率方法和实测资料进行理论性研究。

2.2.2 智能 CAD

常规 CAD 系统是基于几何模型的,在支持复杂的设计时常遇到一些困难,大量数据的输入也较麻烦,基于人工智能的 CAD 系统,功能得到增强,兼有专家系统 and 人机对话两方面的功能。

2.2.2.1 集成智能 CAD

南水北调工程设计的全过程是很复杂的,需要把许多 CAD 和智能 CAD 系统集成起来解决问题,为了各个子系统之间能很好地衔接,需进行全过程的通盘分析和全面规划,尽量减少各系统之间的数据传送,使计算和绘图实现自动化。并能够解决特殊问题和模拟方法的计算、分析、设计和绘图等任务。例如,对跨流域调水工程的水资源分析时,由于水资源系统的复杂性,很难用所有数学公式来完整地描述复杂的水资源系统,即使能用数学式子构成的模型表达水资源系统,但该模型也十分复杂和庞大,难以管理和实现。因此,根据优化模型成果建立模拟模型进行详细而具体的计算,列出有关成果数据和画出有关模型流程,通过线性规划模型确定总供水量,用连续动态规划模型优化年设计目标。优化模型的结果假定为目标函数近似最优值,作为进一步模拟计算的初始量或基础。

2.2.2.2 结构优化 CAD

采用一组控制点描述结构几何尺寸,并连结这些点,以便定义线、曲面和体的设计变量与控制点坐标相联系,在参数空间生成有限元网格,按照移动渐近的方法使优化问题中的目标和约束函数相接近。以单筋矩形截面钢筋混凝土梁的设计过程为例,按造价最省为目标,运用拉格朗日(Lagrange)乘数法, $f(b) - f(a) = f'(\xi)(b - a)$, $(a < \xi < b)$,对构件进行设计。

建立目标函数:

$$f(h_0, Ag) = b \cdot h \cdot C_c + Ag \cdot C_s + c \quad (2.1)$$

确定约束条件:

$$g_1(h_0, Ag) = KM \cdot 10^3 - RgAg \left(h_0 - \frac{RgAg}{2R_w b} \right) \leq 0 \quad (2.2)$$

$$g_2(h_0, Ag) = \frac{Ag}{bh_0} - 0.55 \frac{R_w}{Rg} \leq 0 \quad (2.3)$$

$$g_3(h_0, Ag) = \mu_{\min} - \frac{Ag}{bh_0} \leq 0 \quad (2.4)$$

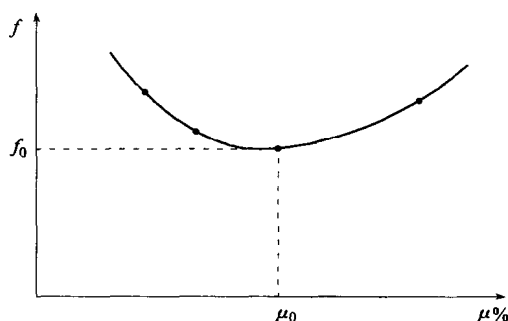


图 2.1 最经济配筋率图

辅助函数具有最小值的必要条件为:

$$\frac{\partial L}{\partial h_0} = \frac{\partial f}{\partial h_0} + \lambda \frac{\partial g_1}{\partial h_0} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Ag} = \frac{\partial f}{\partial Ag} + \lambda \frac{\partial g_1}{\partial Ag} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \frac{\partial f}{\partial \lambda} + g_1 = 0 \quad (2.7)$$

求出最经济配筋率 $\mu = \frac{Ag}{bh_0} = \mu_0$, 求得最经济配筋率作为钢筋混凝土矩型梁结构设计的依据, 使设计达到经济合理(如图 2.1 所示)。

2.2.2.3 交互式 CAD

用交互式 CAD 功能的办法研究在有限元中被离散的二维结构的形状优化设计问题, 按照几何模型比较简单地描述, 应用灵敏度分析的通用过程处理设计模型的参数模拟, 基于凸线性化的优化方法求解。实现交互式形状优化设计的前、后处理模式, 大大简化了设计者的工作。

用几何规划技术的有效优化法, 通过对偶凝聚将非线性的问题转化为等效的标准线性规划问题。例如在多跨板梁的交互式优化过程中, 能够显示板梁的纵剖面图、各种横截面和梁上的加载情况。工程设计优化过程定性的图形法提供一个迭代的设计优化过程的窗口, 揭示初始条件的最终灵敏度的存在; 对比不同设计过程; 不同方法的相似性; 相似过程中的实质差别。诸如桩基竖向承载力计算的荷载传递法、位移协调法与有限元法的比较。

2.3 自动优化设计技术

自动优化设计的开发研究始于 20 世纪 70 年代, 开始基于有限元的通用机助优化设计系统, 包括四部分: ①前处理——生成结构模型设计数据; ②分析——计算结构的挠度和应力; ③综合——将求解问题综合成非线性规划形式, 并求解之; ④后处理——用于检验分析和显示输出设计的结果。过去最优化的理论和技术的研究只局限于结构的截面优化, 而自动优化设计新技术使工程优化向前推进了一大步。在南水北调工程设计中, 系统聚集了数据库管理、数值技术、计算机绘图、有限元分析和非线性规划法等特性, 使工程技术人员易于输入、显示和设计计算。

随着空间结构计算机辅助设计系统的开发, 设计人员只需输入结构的初始设计数据和荷载, 系统将顺序地由软件执行、完成有限元分析、最优化方法、计算机辅助绘图以及输出优选的结构尺寸、工程量清单和图纸。对于复杂结构的有限元分析和前、后处理的自动绘图, 采用典型 CAD/CAE 系统来完成。将结构优化设计作为设计自动化的一种基本工具, 具有结构响应分析、设计灵敏度分析及最优化设计等功能。

2.3.1 测绘数字技术对设计的影响

随着空间技术和航空电子技术的发展, 将 GPS 与航摄机组合应用, 在获得地面影像的同时, 还可以获取

摄影站的坐标,直接用摄影站的坐标作为控制条件进行内业航测成图。这就好像把地球摆在实验室里进行观察一样方便。由空间技术和其他相关技术,如计算机、信息、通讯等技术发展起来的 3S 技术(GPS, RS, GIS)在测绘学中的不断引入和应用,使测绘学从理论到手段都发生了根本性的变化。

在南水北调工程设计中应用 GPS 技术,革新了传统的定位方式,不仅使定位有了自动化的手段,而且定位的精度大大提高,定位的范围大大扩大,定位的时间大大缩短,传统的摄影测量数据采集技术已被遥感卫星或数字摄影获得的影像所代替。地图视觉化及电子地图正受到 GIS 和地图学界的重视,并已研究出可喜的成果。地图视觉化是一种计算方法,它将符号转化成几何图形,便于工程技术人员观察其模拟和计算,利用视觉化(图像理解和图像综合)来解释输入到计算机中的图像数据和从复杂的多维数据中生成图像。

2.3.2 信息技术对设计的促进

随着计算机技术的高速发展,计算机网络和数据库技术已渗透到设计行业。信息技术是现代企业发展的基础。信息化建设基础平台由两部分组成:硬件基础平台和软件基础平台。硬件基础平台是指计算机网络系统;软件基础平台是指以数据库为核心的应用软件系统。

为南水北调项目构建的硬件平台,按照先进性、实用性、可维护性、经济性等原则进行规划和设计,利用成熟的信息系统技术,基于 GIS 的信息可视化方法和集成管理模式,构成统一和便利的信息交换平台,以信息基础设施为核心,实现了信息资源的整合和综合利用,有效信息共享,提高了工作效率。同时考虑技术的连接费用、传输线速度和实际流通速率、共享带宽、固有的协议效率、协议类型和利用率、全双工的流量、服务质量、可伸缩性、多厂商支持等。

信息技术和网络技术的高速发展,为南水北调项目设计提供了新的机遇和优秀的平台。软件信息基础平台是建立在网络硬件平台之上,以数据库为基础。建立局域网应用工作环境,使得资源共享、即时响应。实现信息共享,设计资料的审核、互提及流转,贯标质量文件的贯彻执行、协同设计,最终实现工程项目的网络化管理。

软件平台由网络操作系统、大型数据库、各个数据库应用系统组成。针对不同的需求,采用传统的 CLIENT/SERVER 模式与 3 层 WEB 体系结构模式相结合软件的开发模式。通过对管理过程和设计流程的分析,项目管理和工程文档管理是支撑整个工程设计业务过程的核心。项目管理和工程文档管理实现了计算机网络管理,它实施的软件开发是由浅入深,由易到难,统一规划数据库核心共享层内容,以工作流的管理为起点,开发结合实际工作、业务流程的功能模块,然后慢慢扩充功能模块,最后构成计算机集成应用系统。

以隧洞工程设计与建设为例,建立综合信息管理系统,在建设中可随时把现场测量、观测结果反馈到设计、施工中去,及时修正与确定设计和指导施工管理。①掌握周围围岩的动态;②了解支护的工作状态;③确保作为结构物的安全性;④掌握对周围结构物的影响;⑤指导施工,预报险情,以改善施工的经济性和安全性;⑥进行施工管理。设计流程见图 2.2。信息化设计的基本内容为:①洞室现场动态信息的管理,通过观察、量测、试验及测试等手段获得的信息建立“信息数据库”以及便于使用的量测、观察、试验、测试所需的仪器和技术。②预测和反馈,根据初期的量测数据,对围岩与工程结构的发展及终极状态进行预测。根据量测

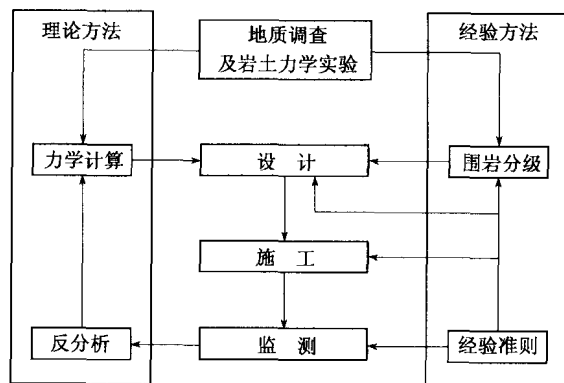


图 2.2 信息化设计流程

数据反馈结构的动态,应用直接反分析法、间接反分析法、有限元法和边界元法等评价围岩的稳定性并对初期设计、施工参数进行调整、修改。对位移的预测方法有:①以函数式近似的方法;②统计分析的方法;③基于对过去施工实践进行分析的方法。

2.4 多目标优化与创新思维方式

“创新型”课题活动的目标值是有意设置的“差距”,是为了要实现理想期望状态,因此无差距值可比;而“问题解决型”课题活动的目标值是针对现有存在的问题差距,为消灭它而设置的,是为了要达到应有的状态,因此有现状值可比。在活动的思维方式方面的比较见表 2.1。“创新型”课题活动,首先要转变观念,更新思维方式,建立创新的文化,尊重知识,尊重人才,增加对创新和高技术的投入,加强产、管、学、研的结合,建立技术创新体系和有效的运行机制。各阶段的不同点见表 2.2。

表 2.1 设计创新思维方式比较表(1)

序 号	项 目	创 新 型	问 题 解 决 型
1	寻找课题	从新的初始工作或打破现有业务现状方面寻找课题	以设计中存在的问题寻找差距
2	设置目标	有意设置新目的或目标值,与期望状态的差距	以现状值与要求值的差距为基础
3	对策方案	追求新的对策、思路、手段	在做法上追究存在差距产生的原因
4	解决方法	改变现有的工作做法创造出新的方法来实现	以现有的工作做法为前提来解决问题
5	对结果的追求	创造出新的工作业务或做法	改变一部分现有的工作做法

表 2.2 设计创新思维方式比较表(2)

序 号	项 目	创 新 型	问 题 解 决 型
1	选择课题	用头脑风暴法调查创新的课题、排列课题顺序、缩小课题范围、确定课题	根据存在的问题而自选课题
2	设定目标	选择主攻目标、把握课题现状水平、把握课题希望水平、确定将课题的现状水平提高多大幅度的目标值	依据选择课题的现状与要求值存在的差距,设定将问题减少到多大程度的目标值
3	掌握情况	列出实现课题目标的各种方案,评价各种方案并预测其效果,预测可能出现的故障并讨论防止的对策,必要时进行模拟试验,最后确定最佳方案	分析造成问题存在差距的原因并确定主要原因
4	制定对策	针对确定的最佳方案制定实现它的措施计划	针对确定的主要原因制定消除它的措施计划

2.5 模糊设计优化技术

模糊数学的发展,与最优化理论相结合,形成了模糊设计优化技术。模糊工程时代的到来,模糊工程理论的应用范围飞速地扩大,利用计算机处理人类用自然语言描述的知识和经验,能处理模糊信息,但存在一些问题,例如,只注重各个“结构”,而忽视“工程系统”;只追求力学答案的唯一性、最优化性,而未充分考虑不确定性因素和人的经验;只考虑结构的设计和施工,而忽略结构建成后的管理、维修和控制。模糊优化设计将弥补普通优化设计之不足。如细粒土岩性划分和定名,按照规范分为黏土类和粉土类,当黏性土中砂粒、粉粒含量较高时,仅按塑性图对其分类,如此定名存在不确切性,有时与实际情况出入较大,难以反映土本身的工程特性。采用模糊数学综合评判法,以土的土工试验成果为基础,选取塑性指数、黏粒含量、液限及粉粒含量等指标作为评价因素,用模糊数学综合评判的方法通过模糊变换进行评价,把结果相对照,使岩性划分更确切、合理。

2.5.1 不确定性因素分析

南水北调中线总干渠沿线河流水系发达,与大小近千条河流交叉,在河北省内就与 237 条河流交叉,其