

水利水电测绘

SHUILI SHUIDIAN CEHUI
YU KANCHAXINJISHU
YINGYONG YANJIU

与

勘察新技术应用研究

王庆玉 王海城 丁海元 朱君 主编



黄河水利出版社

中国矿业大学



高新技术应用研究

中国矿业大学北京

中国矿业大学北京

水利水电测绘与勘察新技术应用研究

主 编 王庆玉 王海城 丁海元 朱 君

黄 河 水 利 出 版 社

内 容 提 要

本书介绍了水利水电测绘与勘察专业技术的应用与研究,内容涉及水利水电建设工程中以3S为代表的摄影测量与RS、GPS测量和数字制图、工程测量等测绘技术,以及工程地质勘察、岩土工程勘察与物探新技术,反映了21世纪初水利水电工程勘察新技术的前沿研究与应用的最新发展。

本书可供水利水电工程建设勘察、设计、施工和科研部门的专业技术人员及中高等学校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电测绘与勘察新技术应用研究/王庆玉等主编.

郑州:黄河水利出版社,2006.7

ISBN 7-80734-034-7

I.水... II.王... III.①水利工程测量—新技术应用—研究②水力发电工程—工程测量—新技术应用—研究
IV.TV221-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第070349号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传 真:0371-66022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:中水北方勘测设计研究有限责任公司

开本:889mm×1194mm 1/16

印张:17

字数:539千字

版次:2006年7月第1版

印数:1—1000

印次:2006年7月第1次印刷

书号:ISBN 7-80734-034-7/TV·443

定价:46.00元

序

水是重要的自然资源,水利是国民经济的重要基础设施,是实现经济、社会、环境可持续发展的物质基础。新中国成立以来,特别是改革开放 20 多年来,党和国家高度重视水利建设,兴建了大量的水利基础设施,发挥了十分显著的效益。在新的历史时期,兴修水利,造福民众,提出新的治水思路,即强化政府职能,加强水利资源的统一管理,促进可持续发展;加强水利基础设施建设,使水利与国民经济协调发展;积极推进水利产业化,实现水利良性运行。

在水资源开发和水利工程建设过程中,水利水电工程勘测作为一项重要的技术手段,承担着艰巨的任务,为各类工程提供多方面所需的基本资料,并保证建设计划的顺利实施和效益的充分发挥。

水利水电勘测是一门古老的专业技术,有着悠久的历史。从大禹治水“改堙堵为疏导”,都江堰工程“深淘滩低作堰”,到现代水利的“超长隧洞”、“数字建模”,勘测工作成果始终作为一项不可缺少的重要基础性技术资料,为工程建设提供有力的保障。随着人类社会的进步、经济的发展和科技水平的提高,勘测技术的理论、方法及其科学内涵也随之不断地发生变化。尤其是在当代,由于空间技术、勘探技术、计算机技术、通信技术和地理信息技术的发展,致使水利水电勘测的理论基础、工程技术体系、研究领域和科学目标正在适应新形势的需要,而发生深刻的变化。

随着生产力的发展,人类改造客观世界的力度越来越大,水利水电工程建设也毫不例外地越来越复杂,需要解决的勘探难题越来越多,要求达到的测绘精度也越来越高。在工程建设中遇到的工程地质问题主要包括软土地基问题、膨胀土问题、湿陷性黄土问题、饱和砂土震动液化问题、边坡稳定问题、渠道渗漏问题、施工中地下水涌问题、地下水侵蚀性问题等。工程测绘随着 3S 技术的飞速发展,在信息采集、数据处理和成果应用等方面也正步入数字化、网络化、智能化、实时化和可视化的新阶段。

正确的理论来源于实践又对实践发挥指导作用。《水利水电测绘与勘察新技术应用研究》付梓出版,令人鼓舞,这部著作是理论探索与实践创新的结晶,是“新思路、新方法、新工艺、新资料”在工程建设中成功运用和宝贵的经验,有助于进一步提高我国水利水电建设的技术水平。愿广大水利水电勘测工作者发奋图强,共同不断探索。

中国工程设计大师

王宏斌

2005 年 12 月

目 录

序	王宏斌
---------	-----

工程测量

水下地形与淤泥测量 Silas 技术	谢津平 王庆玉 曹宏彬 惠武权(3)
万家寨引黄工程特长输水隧洞横向贯通误差的制定	白玉春 崔阿李 董雪亮 金树生(7)
建立南水北调东线高程控制网的必要性和紧迫性	丁海元 曹卫斌 孙亚贤(11)
长隧洞竖向贯通精度设计	常 辉 李瑞雪(14)
WGS-84 与北京 54、国家 80 坐标转换设计	赵松杰 叶 朋 夏 菁(16)
全站仪在竖井高程联系测量中的特殊作用	滕传斌 朱明新 黄志环(23)
数字化测图技术在水利工程测量中的发展及精度分析	陈海兵(26)
数字化地形图工作中几个方面的探讨	张燕萍(30)
水利工程测量中的进度控制	康蛇龙(32)
隧洞控制测量距离导线边测对横向贯通误差的影响	滕传斌 朱明新 黄志环(35)
浅谈数字化测图工作	孙志勇 姚文良(39)
浅谈地形图精度检验的方法	张玉坡 任立生 王建喜(43)
简易测量距离的方法	康蛇龙(46)
河道纵、横断面测量的点滴体会	刘伯函(48)
WGS-84 与北京 54、国家 80 坐标转换精度检验探讨	叶 朋 赵松杰 夏 菁(50)
河道沿线建筑物桩号的计算	郭胜利(55)
河北省南水北调配套工程测量基础控制方案设计	温成连(58)
工程测量数据采集及处理软件集成系统开发综述	王海城(61)
南水北调东线第一期工程骨干网及首级施工控制测量投影分带的分析及布设方案	陈跃峡(65)
Excel 在曲线测设中的应用	夏海宁 孙志勇(68)

摄影测量与遥感

应用遥感技术修测海图陆域及岸线地形图	陈 雄 刘永强(73)
遥感图像的变化检测和分类识别	曹宏彬 张 帆(79)
两种 DEM 数据生产的分析与研究	庞清艳 王 冰 杜桂英(86)
非点源污染模型研究与应用	丁海元 张 帆 龚 薇 李瑞雪(89)
SPOT-5 遥感影像处理方法	陈 雄 刘永强(95)
IKONOS 卫星影像在地形图测绘中的应用	王朝晖 惠武权 陆日壮 李 文(98)
IKONOS 卫星影像在水利水电测绘中的应用	刘永强(102)

GPS 测量

浅析 RTK 技术在全天候条件下水下地形测量的精度分析与论证	亢文强 鲁志文(107)
--------------------------------------	--------------

南水北调中线河北省配套工程 C 级 GPS 网的建立	王海城(111)
南水北调中线工程(河北段)测绘工作综述	康蛇龙(116)
南水北调中线工程(天津段)C 级 GPS 施工控制网的布设与实施	亢文强(119)
基于 GPS 天线阵列技术的变形监测系统研制	邹进贵 王新洲 邱卫宁 邹双朝 王永弟 刘万科 杨荣华 黄超 廖群(123)
关于 GPS 测量级别划分的探讨	安志坤(128)
GPS 作业过程中的质量控制	孙悦民 黄勇 冯树芬 王学松(131)
GPS 所测大地高在变形监测中的应用	冯书强(135)
GPS 技术在刚果英布鲁水电枢纽工程施工控制网中的应用	鲁志文 常辉 李文(138)
GPS 高程拟合替代三、四等几何水准测量	鲁志文 亢文强 陈跃峡 杨鲁强(141)
GPS-RTK 技术在水库库容计算和淤积测量方面的应用	任立生 张玉坡 周景成(146)

GIS 与电子地图

在 AutoCAD 环境下绘制地形图符号	夏海宁(153)
虚拟现实技术在水利领域的应用	
——太湖地区三维场景漫游软件简介	马林(156)
如何提高 AutoCAD 绘制剖面图的效率	姚文良 杨雪莲(160)
基于土地信息服务的 WebLIS 体系研究	韦燕飞 卓柳利 叶朋(163)
基于 WebLIS 的地理信息共享	叶朋 莫小芸(168)
WebGIS——基于 Internet 的地理信息系统	孙亚贤 杨贵崇(172)
GIS 支持下的土壤侵蚀定量遥感监测模型及应用	张帆 王庆玉(175)
数字水利技术及其应用	辛守哲 惠武权(181)
北方港口挂图的制作	张育红(184)

形变监测

宜兴抽水蓄能电站下水库变形监测网的建立与实践	杨海军 翟明成(189)
平原区特长型大坝建立外部监测系统的方法	温成连(194)
黄河万家寨水利枢纽工程外部变形测量垂直位移分析	陆日壮 辛守哲 惠武权(198)
沉降观测技术在高层建筑施工中的应用	孙志勇 夏海宁(203)

岩土工程与地质勘察

镇墩位移监测浅析	董雪亮 崔阿李(209)
沿海地区软弱地基加固措施的试验与研究	姚文良 冯艳珠(212)
影响岩土工程勘察工作质量的因素	梁文丽 赵斌(216)
山西省万家寨引黄入晋工程隧洞主要工程地质问题及对策	任志善 裴晓东 屈志勇 陈洪蛟(218)
浅谈室内土工试验	冯艳珠 姚文良(222)
晋西北宁静向斜储水构造对引黄工程输水线路的影响	屈志勇 任志善 裴晓东(225)
金刚石液动冲击回转钻探技术	陈中和 姜冰川 任志善(230)
关于梅江 0 [#] 岛堆山工程检测手段的探讨	赵斌 梁文丽(233)
防渗墙的气举反循环成槽工艺应用	陈中和 任志善(234)

多头小直径深层搅拌桩在堤防工程中的应用	任志善 裴晓东 李天骄 李 文(238)
插板桩连续墙的气举反循环成槽和插板工艺	陈中和 任志善 陈洪蛟(241)
CFG 复合地基在应用中几个应重视的问题.....	赵 斌 梁文丽(245)

仪器设备研发

瞬态多道瑞利波勘探技术的原理方法及仪器设备.....	姚文良 孙志勇(249)
徕卡水准仪 i 角误差修正方法之研究	谢洪燕 何义斌(253)
一种新型全自动水质监测系统	葛 毅 陈 新 何义斌(258)
机载激光雷达技术及其在水利上的应用	陈 新 何义斌(261)

工 程 测 量

水下地形与淤泥测量 Silas 技术

谢津平 王庆玉 曹宏彬 惠武权
(中水北方勘测设计研究有限责任公司)

摘 要 水下地形与淤泥测量 Silas 技术,是采用 Silas 系统连续测定不同深度的淤泥密度,以密度划分淤泥类别;采用 GPSRTK 无验潮测深技术采集淤泥测点的空间信息,确定其相对高差。应用实践表明,它与传统淤泥测量方法相比,具有速度快、精度高、费用省、对水下淤泥扰动小等优点,可应用于水库、湖泊、海口、航道等水下地形与淤泥测量。

关键词 水下地形 淤泥测量 Silas 系统 无验潮测深

一、科技发展与测量需求

水是人类生存的物质基础,清泉细流、碧波万顷是人们理想中水的状态。由于自然和人类活动的影响,山洪暴发,滑坡泥石流,大面积的水土流失,使得大量的泥沙融入水体之中,从而给人们的生活带来一系列问题。泥沙淤积对河道、堤岸、水库的安全造成严重影响;泥沙夹杂有机物质淤积湖泊,造成湖泊水体富营养化,威胁饮水安全;大量的海陆相沉积物壅淤河口地带,影响航运和防洪。

根据工程建设需要,对于水下地形与淤泥测量提出了越来越高的要求。传统的测量方法主要有钻孔取样法、静力触探/测杆法、声纳探测法、放射线探测法等。2003 年在水利系统引进 Silas 系统并加以开发,经过研究和实践,提出了按密度划分淤泥、走航式的连续密度测量方法,形成了水下地形与淤泥测量 Silas 技术。技术的创新之处在于有效地整合了 Silas 走航式水底淤泥连续密度测量、GPSRTK 无验潮测深及淤泥密度测试等技术,开发了数据处理配套软件,形成了进行水下地形与淤泥测量的一整套系统方法。

二、淤泥分层理论基础

粒径小于 0.03mm 的泥沙与颗粒分散的泥沙相比,性质上有很多差异,通常把它称为淤泥。根据《港口工程地质勘察规范》里的表述,淤泥的准确名称应为淤泥性土,它是指在静水或缓慢的流水环境中沉积,天然含水率大于液限、天然孔隙比大于 1.0 的黏性土,可细分为淤泥质土、淤泥、流泥和浮泥(见表 1)。

表 1 淤泥的分类

土的名称	孔隙比 e	含水率 $w/\%$	土的名称	孔隙比 e	含水率 $w/\%$
浮泥	-	$w > 150$	淤泥	$1.5 < e \leq 2.4$	$55 < w \leq 85$
流泥	-	$85 < w \leq 150$	淤泥质土	$1.0 < e \leq 1.5$	$36 < w \leq 55$

不同淤泥层面的划分标准因不同地区泥质而异,按照一般情况,可以大致按密度变化范围划分出 4 个淤泥层面。细颗粒泥沙经絮凝沉落到水底后,要经过很长时间才能变得比较密实,在尚未密实之前具有很强的流动性,称为浮泥。浮泥的密度范围在 $1.0 \sim 1.2\text{g/cm}^3$ 之间。浮泥进一步固结,流动性减小,当密度达到 $1.2 \sim 1.5\text{g/cm}^3$ 时,便成为流泥。当孔隙水被排走,密度增加到 $1.5 \sim 1.8\text{g/cm}^3$ 时,界面波不再发生,在水流作用下不会直接悬扬,已经属于淤泥的范畴。密度达到 1.8g/cm^3 以上时,已成为淤泥质土。淤泥密度范围见表 2。

按密度划分淤泥,使对淤泥的量测从单纯的厚度到按密度的空间分布转化,从而可以按照淤泥的物理性质对淤泥的运动规律和污染状况进行定量的分析。这将对河流、水库的淤积研究,港口、航道适航

水深的确定及生态清淤的标准有着重要的意义。

表 2

淤泥密度范围

名称	密度范围/(g·cm ⁻³)	名称	密度范围/(g·cm ⁻³)
浮泥	1.0 ~ 1.2	淤泥	1.5 ~ 1.8
流泥	1.2 ~ 1.5	淤泥质土	1.8 以上

我国江河大多泥沙量大, 所建水库淤积严重, 由此带来了一系列问题: 库容损失影响水库效益的发挥; 淤积上延影响上游地区的生态环境; 水库变动回水区的冲淤对航运带来不利影响; 坝前泥沙淤积影响枢纽的安全运行; 水库下泄清水对下游河道河床的冲刷以及附着在泥沙上的污染物对水库水质的影响等。按密度划分淤泥, 可以定量地分析从悬移质到硬底的变化情况, 尤其可以实现对水库异重流、高含沙水流这样的浮泥层的定期或不定期监测。淤泥测量的成果对水库淤积形态、水库排沙及运行方式、变动回水区的冲淤、下游河道的冲淤变形、以及水库淤积数学模型等方面的研究都有着重要的贡献。

适航水深一直是港口、航道疏浚部门十分关注而又未彻底解决的问题。对于适航水深来说, 关心的焦点在于流动的密度相对较小的浮泥层。按密度划分淤泥, 可以细化浮泥的密度分层, 有助于分析特定目标层的流变特性, 从而确定适航深度, 减少疏浚量, 节约资金。

生态清淤是为减少污染, 促使生物实现良性循环而进行的清淤。生态清淤在工程上要求清淤的准确性和选择性, 即清除目标是富含污染物的易流动的浮泥和流泥层。按密度划分淤泥, 为生态清淤提供了一个清晰的选择标准。

三、水下地形与淤泥测量 Silas 技术原理

(一) 系统流程

水下地形与淤泥测量的一般流程:

(1) 布设和建立覆盖测量区域的基本控制网, 包括平面控制和高程控制, 通过 GPS 观测和水准测量得到高精度(毫米级)的平面坐标和高程, 用来作为进行水下地形与淤泥测量 GPSRTK 作业时的基准点及输入数据。

(2) 应用水下地形与淤泥测量 Silas 技术进行水下地形与淤泥测量点空间信息的同步外业采集。基准点设置 GPS 接收机, 基准点与测船流动站同时接收卫星信号, 基准站将接收到的卫星信号通过专用电台发送给测船流动站, 流动站将接收到的卫星信号及基准站发送来的信号传输至测船流动站接收机控制单元, 通过专用软件进行实时差分及平差处理, 实时得出测点的平面坐标和高程。获得的平面和高程坐标与 Silas 系统的高频水底深度数据/低频淤泥深度数据实时叠加而获得厘米级精度的水下地形与淤泥测量点空间信息。

(3) 外业采集结束后, 采用专用软件进行数据内业处理, 输出水下地形与淤泥测量的各种成果。

(二) 技术原理

水下地形与淤泥测量 Silas 技术的核心是采用 Silas 系统以密度划分淤泥, 采用 GPSRTK 无验潮测深技术采集淤泥测量点的空间信息。

Silas 系统是一个声学数据采集及处理系统, 它利用双频测深仪获取水底淤泥层的声学反射信息(反射信号强度、信号增益、时变增益等), 高精度地测定密度的梯度值。利用密度计的单点密度测量获得代表点(标定点)断面的绝对密度柱状图, 通过 Silas 专用软件自动推定剖面上各点的密度值, 根据标定点的数值结合声学反射信息来推断、划分剖面上其他点的密度。当确定的密度值被输入后, 此密度层面即可连续划分出来。

GPSRTK 可以精确地测定两点之间的相对高差, 小区域范围内通过该高差便可反算出流动站 GPS 天线相位中心的高程, 该高程同基准站具有相同的高程基准面。无验潮水下地形测量是利用高精度实时相位差分 GPS 测出天线相位中心的平面位置和大地高, 在此同一瞬间由 Silas 系统测出淤泥点的深度, 从而获得淤泥测量点的空间位置。

(三) 系统作业过程

(1) 以湖边(或岛屿上)平面和高程控制点为参考站, 利用 GPS 实时动态载波相位差分(RTK)无验潮技术进行测点的平面高程定位。载有 Silas 系统的作业船为流动站, 按照既定的成图精度比例尺, 沿着设计航线行进。

(2) 在行进中启动 GPS-RTK 系统和 Silas 系统, 连续获取测量点的平面位置和高程并记录航线上水下地层的柱面信息。由系统通过换能器向湖底发射高、低两个频率的声波, 再由换能器接收反射声波传入系统, 进行分析处理, 生成瀑布图。

(3) 根据瀑布图 and 实际走航情况, 每条航线选取几个代表点, 应用 Densitone 音叉振动密度计获取密度值, 作为该航线或该区域的标定点。

(4) 按照 Silas 的程序要求对密度计本身密度测定的准确度进行标定。

(5) 利用密度计获得代表点(标定点)断面的密度柱状图, 通过软件自动推定剖面上各点的密度值, 根据标定点的数值结合声学反射信息来推断、划分航线上剖面上其他点的密度。

(6) 结合平面和高程定位信息, 提取各目标淤泥层面的淤泥测量点的空间信息。

(四) 系统工作成果

根据控制网成果和采集的水下地形与淤泥测量点的空间信息, 经过滤波和筛选, 可以建立 DEM、淤泥声学图像信息库, 开发淤泥空间分布动态监测系统, 绘制不同比例尺的水下地形图、淤泥厚度分布图, 计算水域面积和库容、不同淤泥层面的覆盖面积和层间的淤积量。

(五) 系统的应用实例与前景展望

太湖是我国五大淡水湖之一, 水域面积 $2\,338\text{km}^2$, 最大水深在 3m 左右, 是一个典型的浅水湖泊。长期以来, 由于受入湖河流及周边工业污染造成水质明显下降, 再加之多年的行蓄洪及围垦、围湖养殖造成了湖底淤泥沉积物的不断增加, 对湖床、湖线产生了较大影响。太湖湖底水下地形和淤泥测量项目应用水下地形与淤泥测量 Silas 技术确立了淤泥测量的创新方法, 实现了以密度划分太湖淤泥, 走航式的连续密度测量方法。解决了淤泥测量空间信息采集的关键技术问题, 着重解决了船体姿态改正、浅水的多重回波、密度计的标定等技术难点, 获得了按密度值划分太湖浮泥、流泥、淤泥、淤泥质土的成果, 绘制了太湖各种密度值淤泥的水平、垂直分布图, 并计算出太湖浮泥、流泥、淤泥、淤泥质土的储量。

永定新河是天津市防洪的北部防线, 在海河流域防洪治理工程中占有极其重要的地位。由于受大气降水与人类频繁活动的影响, 上游径流匮乏, 河道长期受潮汐水流控制, 出现严重的海相泥沙沉积。2005 年 4~5 月, 技术人员采用水下地形与淤泥测量 Silas 技术, 实践了按密度划分淤泥、走航式的连续密度测量的创新方法, 获得了按密度值划分河口、近海淤泥的成果, 特别细分了浮泥、流泥层面, 绘制了河口和近海不同密度值淤泥的水平、垂直分布图并计算出对应密度值下淤泥的储量。永定新河河口床面淤泥厚度、容重测定的工作的顺利完成, 为进一步分析和研究永定新河河口水流、泥沙运动规律, 寻求兼顾防洪和河口综合开发的合理方案提供了宝贵的基础资料。

通过对湖泊、河口和近海等不同水域水底淤泥测量的应用实践, “水下地形与淤泥测量 Silas 技术”业已成为一项新的水利领域的产业技术, 可广泛应用于我国现有大中型水库、湖泊、海口、航道及其他水域的水下地形与淤泥测定。在水文测量中, 水下工程、江河湖泊污染治理、水土流失监测、水土保持规划、水库/河道清淤、河堤防护等项目中均可以加以运用, 获取准确的测量数据。

四、水下地形与淤泥测量 Silas 技术优于传统方法

国内外淤泥测量普遍采用的是钻孔取样、静力触探/测杆法、声纳探测、放射线探测等。钻孔取样法使用钻机单点采集柱状淤泥样本, 用环刀法测定柱状样中各分层淤泥的天然密度。钻孔取样对淤泥的扰动不能避免, 浮泥和流泥无法采集到, 对于面积大精度要求高的区域, 工作量大, 价格昂贵。

静力触探法一般采用专用测杆进行, 其原理是通过单点测定淤泥层对测杆的比贯入阻力来计算淤泥的承载力, 从而确定淤泥厚度。静力触探/测杆法无法测定淤泥的绝对密度, 也无法查明浮泥和流泥的分布。

多普勒双频超声波测量,以高频测量泥水界面,再通过低频测量淤泥底层距水面距离,从而得到淤泥厚度。这种方法较之其他方法高效快速,但淤泥的绝对密度值无法测定,只能测定水底和某一硬底层间的厚度。

放射线探测是根据核射线(如 γ 射线)的放射衰减比率来测定淤泥的密度。放射线探测法通过单点测量淤泥的密度,测定精度较高,但工作效率低,对人员和被测区域环境有潜在的放射性危害,安全性较差。

Silas 技术方法和这些方法比较,技术优势非常明显。第一, Silas 技术方法对淤泥的扰动小,尤其对浮泥和流泥层,可以查明其原始的密度和空间分布情况;第二, Silas 技术方法既可以在水平、垂直方向进行高效率的连续测量和重复测量,也可以根据需要通过音叉振动密度计进行单点测量;第三, Silas 技术方法水下地形和淤泥同步测量,测量效率很高;第四, Silas 技术方法测量密度范围 $1.0 \sim 1.8\text{g/cm}^3$, 涵盖了浮泥、流泥、淤泥和淤泥质土 4 个层次,测量深度可达 200m,能够穿透水底 40m 的泥层。尤其可以准确划分浮泥、流泥,测量密度精度达到了 10^{-4}g/cm^3 , 高程和厚度精度达到了厘米级。这些特点是其他方法所不具备的。淤泥测量能力的比较见表 3, 淤泥测量方法综合比较见表 4。

Silas 技术方法的测量效率和经济效益优势可举例说明:如果按精度比例尺为 $1:10\,000$, 目标区域为 100km^2 计算, 钻孔取样法需要 2 个月/台, 费用 1 028 万元;而 Silas 技术方法只需要 2d 即可完成, 费用仅为钻孔取样法的 $1/3$ 。

表 3 几种淤泥测量能力的比较

测量方法	钻孔取样	静力触探/测杆	声纳探测	放射线探测	Silas
能否测定淤泥密度	能	不能	不能	能	能
能否单点测量	能	能	不能	能	能
能否连续测量淤泥剖面	不能	不能	能	不能	能
能否查明流泥和浮泥空间分布	不能	不能	不能	能	能

表 4 几种淤泥测量方法综合比较

测量方法	钻孔取样	静力触探/测杆	声纳探测	放射线探测	Silas
测量费用	昂贵	高	便宜	中等	便宜
淤泥测量点的高程精度	较低	一般	较高	较高	很高
对淤泥的扰动程度	很大	较大	较小	较小	较小
测量效率	很低	低	较高	一般	较高
综合评分	C ⁺	D	C ⁺	B ⁻	A ⁺

参 考 文 献

- 1 冯增昭, 五英华, 刘焕杰, 等. 中国沉积学. 北京: 石油工业出版社, 1994
- 2 王昌杰. 河流动力学. 北京: 人民交通出版社, 2001
- 3 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004
- 4 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理. 武汉: 武汉大学出版社, 2005

万家寨引黄工程 特长输水隧洞横向贯通误差的制定

白玉春¹ 崔阿李¹ 董雪亮² 金树生³

(1.山西省太原市万家寨引黄工程管理局, 2.水利部山西水利水电勘测设计研究院,
3.忻州水利水电勘测设计院)

摘 要 现行《水利水电工程施工测量规范》仅有 8km 以内隧洞贯通测量的技术要求, 为了万家寨引黄工程的需要, 对特长隧洞贯通精度指标必须另行研究制定, 介绍 1992 年以来结合山西省万家寨引黄工程实践编制《特长输水隧洞横向贯通测量误差分配值》的理论和方法, 并经 2001 年一期工程 212.6km 隧洞优质贯通, 充分证明其理论正确、可行。

关键词 特长输水隧洞 贯通测量 横向中误差制定

一、山西省万家寨引黄工程概况

山西省万家寨引黄工程是一项大型跨流域调水工程, 线路总长为 453km, 隧洞总长为 256.6km, 总扬程为 636m, 总流量为 $48\text{m}^3/\text{s}$, 南干线 7#隧洞和北干线 1#隧洞长达 42.9km 和 44km。全线超过 10km 的长隧洞多达 7 条。从 1992 年隧洞开挖至 2001 年一期工程全线通水, 历时 10 年。在特长输水隧洞贯通测量实践中, 我们制定了《隧洞横向贯通测量中误差分配值》, 现将编制的理论和方法予以介绍。

二、确定特长隧洞贯通精度的原则

在特长隧洞施工测量中, 地面和地下控制网测量的精度要求主要取决于隧洞贯通精度的要求。现行规范仅对长度为 8km 以内的隧洞提出了贯通精度要求, 对万家寨引黄工程超过 10km 的长隧洞, 必须制定新的贯通精度要求。为此, 首先提出确定贯通精度应遵循的原则为:

(1) 两开挖洞口长度在 4km 以下的隧洞, 横向贯通中误差为 50mm, 4~8km 的隧洞横向贯通中误差为 75mm, 根据铁道系统 113 座 1~4km 和 15 座 4~8km 隧洞实际贯通的资料统计得来, 其中约 50% $<1/2$ 中误差, 约 70% $<$ 中误差, 只有极个别接近极限误差。因此 10km 以内隧洞横向贯通中误差基本上符合误差分布规律。10km 以上的隧洞横向贯通中误差的制定, 主要依据测量误差理论分析计算得到, 横向贯通精度要求随隧洞的开挖距离增长适当的放宽。

(2) 制定隧洞不同长度的横向贯通中误差, 以隧洞长度每增加 5km 为一区段, 20km 以内各区段中误差按 $1/2$ 递增计算。20km 以上隧洞横向中误差允许偏差可按隧洞的设计尺寸确定, 对于圆型隧洞可取设计直径(门洞型隧洞按设计宽度) $1/10 \sim 1/20$ 为横向贯通中误差的允许值。

(3) 决定特长隧洞横向贯通中误差, 还要考虑用于本工程的全断面隧洞掘进机(TBM)开挖线路与设计隧洞轴线偏离保持在 100mm 之内的要求, 按照这个要求推算, 隧洞横向贯通中误差最大不能超过 200mm。对 43km 的特长隧洞横向贯通中误差取 300mm, 使用先进的仪器和严密的措施是可以达到的。

三、特长隧洞横向贯通中误差的计算与确定

采用 GPS 技术建立隧洞施工控制网, 估算控制网测量误差对隧洞横向贯通误差的影响值, 没有成熟的计算方法, 也没有规范可循。按照导线测量误差对隧洞贯通误差进行估算, 隧洞地面贯通误差的影响

值的计算采用近似的方法。计算公式为:

$$m_{\beta}^2 = m_1^2 + m_2^2 = S_1^2 \frac{m_{\beta 1}^2}{\rho^2} + S_2^2 \frac{m_{\beta 2}^2}{\rho^2}$$

这种估算方法的可靠性在于 m_{β} 估计的准确性,采用平差后的 m_{β} 来估算横向贯通误差的影响值也是近似的方法,比较实用。

另一种方法是采用直伸附合导线中点(最弱点) K 的中误差来确定隧洞地面贯通误差的影响值。计算公式为:

$$M_K = \pm 0.5 \sqrt{m_s^2 n \left(\frac{m_{\beta} L}{\rho} \right)^2 \frac{(n+6)}{48}}$$

洞内贯通误差的影响值的计算采用单向导线最大长度以及对应的贯通距离来进行计算。对 43km 长的南干线 7[#]隧洞相向开挖,洞口至贯通面距离为 21.5km,设导线平均边长为 0.75km,则 $n = 29$,测角中误差 $m_{\beta} = 0.7''$,代入下式得:

$$M_B = \pm \sqrt{m_s^2 n + \left(\frac{n+1.5}{3} \right) \left(\frac{m_{\beta} L}{\rho} \right)^2} = \sqrt{2^2 \times 29 + \left(\frac{29+1.5}{3} \right) \left(\frac{0.7 \times 21500000}{206265} \right)^2} = \pm 233\text{mm}$$

研究采用了交叉双导线测量的方法可提高 $\sqrt{2}$ 倍精度,则 $M_B = 233/\sqrt{2} = 165\text{mm}$,再考虑地面控制测量误差和洞内洞外联系测量误差的综合影响后, $M = \pm \sqrt{3} M_B = \pm 286 \approx \pm 300\text{mm}$ 。从理论上分析,所提出的精度要求都能在工作实践中做到,为此,确定南干线 7[#]特长输水隧洞全部横向贯通中误差取 $\pm 300\text{mm}$ 。

当洞外施工控制网施测完成之后,根据洞外控制网的精度和隧洞贯通允许误差,计算洞内、外控制测量对隧洞贯通误差影响的允许值。洞外控制测量对横向贯通中误差的影响值应不超过横向贯通中误差允许值的 $1/\sqrt{3}$ 。当洞外控制采用 GPS 测量时,同样是采用两相邻洞口点的点位误差椭圆在贯通面上的投影来计算横向误差。现将各隧洞贯通中误差的限差计算值列于表 1。

表 1 万家寨引黄工程隧洞横向贯通中误差分配

相向开挖长度/km	<5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50
洞外测量/mm	± 30	± 40	± 60	± 75	± 90	± 115	± 145	± 175
洞内测量/mm	± 40	± 50	± 80	± 105	± 130	± 165	± 205	± 245
全部贯通测量/mm	± 50	± 75	± 100	± 130	± 160	± 200	± 250	± 300

注:相向开挖长度包括支洞的长度

四、特长隧洞横向贯通测量实施

(一) 建立高精度的地面 GPS 控制网

GPS 技术用于隧洞控制测量与常规方法相比较,具有布点少、工期短、精度高、费用低等优点。在 GPS 测量应用于我国石油工程勘测初期,率先将 GPS 技术应用到万家寨引黄工程施工控制中,以洞外 GPS 测量点对洞内导线点进行有效控制。GPS 控制网的精度在 $1/400\ 000 \sim 1/5\ 000\ 000$ 以上。南干 7[#]隧洞 42.9km,洞外控制点位中误差为 5.6mm。

(二) 洞内基本导线测角和测距的精度确定

根据隧洞开挖横向贯通中误差来推算隧洞内基本导线的测角中误差和基本导线等级,以南干线 5[#]隧洞为例推算,隧洞洞长 27km,洞内横向中误差为 165mm,如果取平均边长 $S = 750\text{m}$,支导线为洞长 27km 的一半,为 13.5km,共有 $n = 18$ 条边,根据支导线测角精度公式求得 5[#]洞测角精度如下式。

$$m_{\beta}^* = \pm \frac{m_{\text{左}} \rho''}{S_n \sqrt{\frac{n+1.5}{3}}} = \pm \frac{165 \times 206\,265}{750\,000 \times 18 \sqrt{\frac{18+1.5}{3}}} = \pm 1.0''$$

则 5#隧洞洞内主导线测角中误差定为 $\pm 1.0''$ ，按二等精度观测。

43km 长的 7#洞可将导线边长延长至 800m，求得 7#洞测角精度为： $m_{\beta} = \pm 0.8''$ 。采用交叉双导线网，其精度可提高 $\sqrt{2}$ 倍，导线精度为： $m_{\beta} = \pm \sqrt{2} \times 0.8 \approx \pm 1.0''$ ，此时洞内基本导线测角中误差仍按 $1.0''$ 观测，足以保证特长隧洞的贯通精度。

在测距精度与测角精度相匹配的原则下求得测距相对中误差为：当 $m_{\beta} = \pm 1.0''$ 时：

$$\frac{m_s}{S \times 10^3} = \frac{m_{\beta}}{\sqrt{2} \rho''} = \frac{1.0}{\sqrt{2} \times 206\,265} \approx \frac{1}{290\,000}$$

经论证，得到特长输水隧洞开挖贯通所需要的测角和测边精度。考虑到洞外控制网的精度较高，且有储备，因此将洞内横向贯通误差乘以 $\sqrt{2}$ 倍，作为贯通极限误差要求。表 2 为洞内基本导线精度要求。

表 2 隧洞洞内基本导线精度要求

相对开挖长度/km	导线边长/km	测角中误差/($''$)	测距中误差/mm
20 ~ 50	0.8 ~ 1.0	$\pm 0.7 - 1.0$	± 2
10 ~ 20	0.5 ~ 0.8	$\pm 1.0 - 1.8$	± 3

(三) 洞内基本导线所需主要测量仪器

为保证特长输水隧洞开挖贯通测量所要的测角和测边精度，必须具有相匹配的全站仪。万家寨引黄工程隧洞基本导线观测所使用的主要仪器如表 3 所示。

表 3 使用的主要仪器

仪器名称	型号	测角精度/($''$)	测距精度
全站仪	WILD TC2003	± 0.5	1mm + 1ppm
自动寻标全站仪	TCA1800	± 1.0	2mm + 2ppm

当使用 WILD TC2003 全站仪，测角中误差为 $\pm 0.5''$ ，已满足特长隧洞基本导线的测角精度需要，当使用 TCA1800 自动寻标全站仪测角中误差为 $\pm 1.0''$ ，测角精度仍能满足要求。TCA1800 自动寻标全站仪在隧洞测量中优越性大，该仪器由马达驱动，可以自动识别照准和跟踪目标，在 ATR 模式下，物镜发送红外线光束，通过反射镜返回并被仪器接收识别，马达驱动望远镜转向棱镜，并自动进行正倒镜组合测量。它基本上排除了人为照准误差因素，并且对目标的光照没有要求，在光线较暗的隧洞内自动寻标全站仪是较好的观测仪器。

五、隧洞横向贯通测量精度统计

通过隧洞实际贯通误差来看，横向贯通中误差全部达到设计要求，绝大多数贯通误差达到规定限差的 $1/2 \sim 1/3$ ，完全符合测量误差分布的规律。现将隧洞相向开挖至贯通面横向贯通误差值统计列于表 4。

表 4 各隧洞的贯通测量精度统计

工程名称	长度/km	贯通误差/mm	允许中误差/mm	工程名称	长度/km	贯通误差/mm	允许中误差/mm
总干线 8#隧洞	12.2	30	100	南干线 7#隧洞	42.9	85	-
总干线 11#隧洞	10.1	43	100	联接段 7#隧洞	13.4	36	-
南干线 5#隧洞	26.5	86	200	北干线 1#隧洞	44	-	-
南干线 6#隧洞	14.6	40	-	-	-	-	-

注：北干 1#隧洞正在施工。