



GPS关键技术在长江口深水航道治理工程中的应用

汤宇, 付桂, 刘俊延

(交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003)

摘要: 介绍GPS关键技术在长江口深水航道治理工程中的应用, 包括GPS控制网的建立、高程异常网的建立、无潮水地形测量等。该技术已成功应用于水运工程施工各道工序中, 并已在国内推广使用。

关键词: GPS关键技术; 长江口深水航道治理工程; 应用; 推广

中图分类号: U 617

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2013)11-0038-05

Application and promotion of GPS key technology in the Yangtze estuary deepwater channel regulation project

TANG Yu, FU Gui, LIU Jun-yan

(Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, MOT, Shanghai 200003, China)

Abstract: This paper introduces the application of GPS key technology in the Yangtze estuary deepwater channel regulation project, including the establishment of GPS control network, height anomaly network construction, no tide topography measurement. This technology has been applied successfully to each procedure of port and waterway engineering construction, and has been widely used in China.

Key words: GPS key technologies; Yangtze estuary deepwater channel regulation project; application; promotion

1 采用GPS技术的必要性

水运工程中水上建筑物的施工测量, 包括建筑物的定位放线、作业船舶水上定位、工序验收测量及竣工验收测量等, 一直使用经纬仪、水准仪等测量仪器以及人工测读距离、角度的方法。一般需在陆域布设测量基线和平面、高程控制点。测点距岸较远时, 则一般需在水中设置专门的测量平台, 以传递高程和平面坐标。随着技术的进步, 激光测距仪、全站仪等新型测量仪器也逐步在水运工程中得到普及。少数工程也曾采用过无线电定位系统、微波定位系统。但总体上仍离不开岸台的支持, 且存在干扰大、精度差及成本较高等问题。

水深测量(地形及水下结构物的高程测量)仍沿用塔尺+水准仪、水砣打水等较原始的方法。航道工程和大面积水下地形测量中虽已普及了超声波测深仪自动测量方法, 但精度受水面高程变化(潮位及波浪)影响很大。

长江口深水航道治理工程远离陆岸平均达50 km, 无通视测量手段。若以测量平台传递三维坐标, 则需耗巨资建设大批临时建筑; 无法全天候作业; 且在长江口的风、浪、流条件下难以保证其稳定性及测量精度; 通讯及联系不便。采用无线电、微波等手段从精度、成本上考虑也难以实现。

GPS(全球卫星定位系统)能够向世界上任

收稿日期: 2013-08-25

作者简介: 汤宇(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事航道工程科研与管理工作。

何位置全天候、连续地提供精确的卫星三维位置、速度及时间信息,便于全天候、广域、实时、动态、准确地确定施测点的空间位置。是长江口深水航道治理整治建筑物工程施工测量必须的,也是唯一可行的选择。

2 长江口深水航道治理工程中GPS关键技术

2.1 建立工程GPS控制网

长江口深水航道治理工程空间跨度大,长江两岸虽有部分高级控制点,工程水域范围却是空白——既无测图控制网,又无施工控制网。要保证约800 km²范围内点位的高精度和稳定性,为施工测量提供坐标参考基准,建设工程GPS控制网十分必要。在如此广阔的水域建立一个工程局域控制网,是全国水运工程的首例。控制网的设计原则、设计和测设方法,布点间距的确定,如何克服地形、环境及交通条件带来的困难,及如何保证工程测量所要求的厘米级精度(从而全网的相对定位精度需达到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$)等均要求逐一解决。

为了保证精度,长江口深水航道治理工程GPS控制网按工程分期,也分为两步建立。首先于1997年初建立了一期工程局域控制网;二期工程开工前,于2001年3—6月又扩大建立了二期工程局域控制网。三期工程及航道维护期为满足工程需要,于2007年3—6月建立了覆盖范围更大的长江口航道GPS控制网。

1) 一期GPS控制网。

整治建筑物工程设计采用的平面坐标系为1954北京坐标系,高程为吴淞高程系, GPS定位采用的是WGS-84坐标系。为取得精确的北京坐标起算数据和WGS-84坐标系与1954北京坐标系之间的转换参数,一期控制网联测了4个高等级国家控制点;为获得网点正确的WGS-84坐标,各网点与余山GPS长期跟踪(IGS)站进行了联测;为确保高程转换参数的可靠性和精度,高程点联测了2个二等水准点。网中共布设6个点,最长边长50 km,最短边长6.2 km,平均边长30 km,控制网形如图1所示。

控制网的基线解算采用同济大学开发的

TGPPS软件,以余山IGS站为起点在WGS-84坐标系中作约束平差,求得各点WGS-84精确坐标;然后以一等点海楼村和陈家镇为已知坐标点进行GPS与地面控制网的联合平差,结果表明一期GPS控制网达到了C级要求,高程精度优于0.05 m。

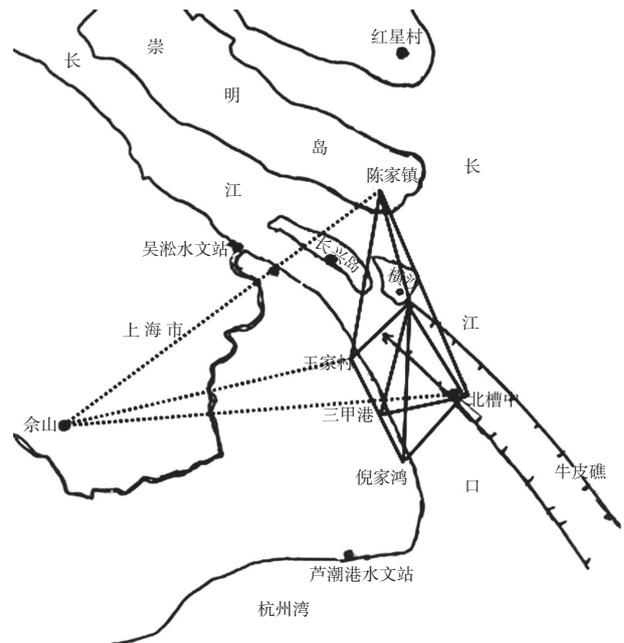


图1 一期工程GPS控制网^[1]

2) 二期GPS控制网。

二期GPS控制网是对一期控制网的扩充和延伸(图2)。二期控制网中共布设了12个点,并在长基线骨架网内布设了加密短边网,以加强网的整体强度。基线平均长度在50 km以上,最长达140 km。基线向量的解点采用了GAMIT软件,并由中国测绘研究院采用BERNESE软件进行了校核计算。对复测基线的较差和异步环闭合差的计算结果表明,基线相对中误差在 $2.3 \times 10^{-8} \sim 8.9 \times 10^{-8}$,短基线也在 $1.0 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-7}$,复测基线的较差全部小于 $2\sqrt{2} m_{\text{基}} [m_{\text{基}} = \pm (5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} D)]$ 。二期控制网的质量达到B级。

3) 三期工程及航道维护期GPS控制网。

三期工程及航道维护期GPS控制网又称长江口航道GPS控制网,是对二期控制网的扩充和延伸,网形呈“钻石”状,是镶嵌在长江口航道治理工程上的一颗璀璨的明珠,其网形见图3。长江

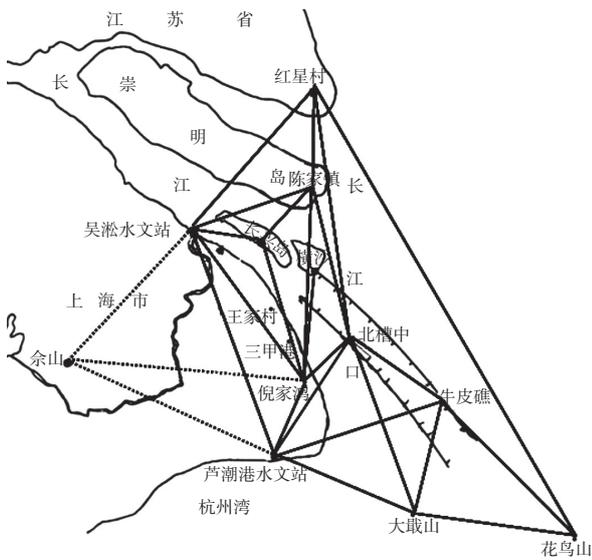


图2 二期工程GPS控制网^[1]

口航道GPS控制网结合长江口航道工程的实际需要及上海地区的现有条件，网型几何结构良好，控制网中共布设了21个点，基线平均长度在50 km以上，最长达180 km。观测时网点同步观测36 h，卫星几何强度因子良好，偏心观测点的归心测量精度优于3 mm，基线解算采用国际著名的GAMIT科学软件和IGS精密星历，保证了高精度的基线矢量解算结果。经国际著名的BERNESE软件独立计算结果的比对和检核，表明所给出的点位坐标可信、可靠，平面坐标的精度可优于2 cm，高程精度可优于3 cm，成果达到国标规定的B级控制网精度要求。

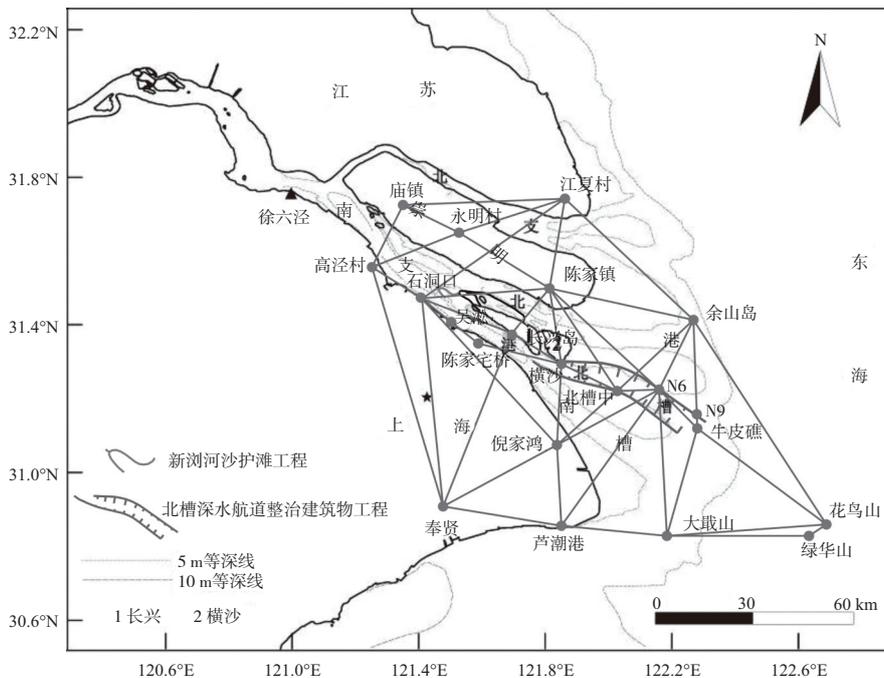


图3 三期工程及航道维护期GPS控制网

4) 控制网建设中的技术创新。

采用GPS技术，建立如此大范围的工程用基线控制网是我国水运工程的第一例。长江口深水航道治理工程通过理论分析，对控制网测设时段对基线精度的影响作了深入的分析研究，采取了合理的安排测时，保证数据采用率的措施；采用了简便实用的平差数学模型进行GPS网平差计算。该模型以GPS基线向量作为观测值，平差参数直接选用高斯平面坐标和大地高。在该模型中，如在法方程中消去大地高参数，就可变成平面平差模

型；如在法方程中消去高斯坐标参数，就可变成高程平差模型。

2.2 建立高程异常网

通常解算高程异常需要大量重力资料。长江口区域虽有大量重力资料，但是长江口航道范围内重力资料空缺。长江口深水航道治理工程要求利用GPS同时实现平面和高程三维测量，必须解决各测点的高程改正问题。为此，长江口深水航道治理工程创新地提出了充分利用RTK-GPS技术，开发GPS三维定位功能的方案，以实现平面定位测

量与测深同步实施, 加之空间跨度极大, 必须确定因地而异的高程异常值 (ξ), 以便能将 GPS 高程 (H) 转换为正常高 (h) ($h=H-\xi$)。

为此, 利用长江口区已有多个水位站及水准控制点构成了长江口高程异常网。对陆基水位站 (如芦潮港) 实施了与基岩点的水准联测, 以高精度确定陆域高程异常值; 整理、分析了各水位站长期验潮资料, 核定其多年平均水面值, 从而获得了网中高程异常值的分布, 并绘制了拟合残差分布图 (图4)。

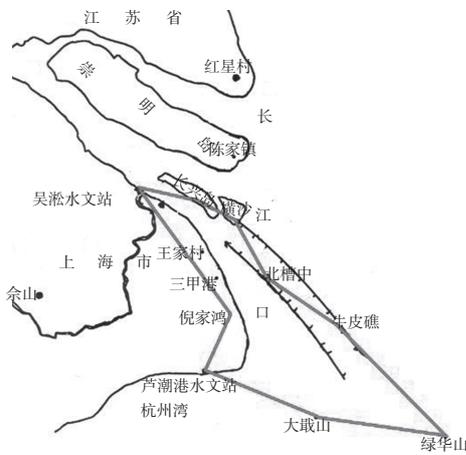


图4 长江口高程异常网 (HACN)

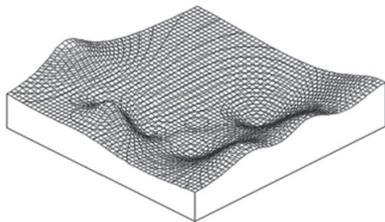


图5 二期工程高程残差立方图

从图5可见, 长江口区高程异常的分布呈不规则曲线变化, 因此, 采用了利用周边邻近各点的高程异常值加权平均的方法推算某点的高程异常值, 权重与各点至该点距离成反比。经试用, 高程异常的精度达10 cm以内。

但是仅靠GPS/水准拟合的似大地水准面, 不能准确定义出长江口航道区域范围内的似大地水准面, 为更好的提高测高精度, 在综合利用长江口航道区域及其周边地区较密集的重力点成果 (见重力展点图6, 共21 488点重力数据)、不低于30" × 30"分辨率数字高程模型; 360阶次的国内外先进的重力场模型 (EGM96、WDM94与IGG05B

) 及分布较均匀的、现势性较好的GPS/水准成果的基础上, 采用重力法 (Stokes、Molodensky原理) 及移去 (remove) ~恢复 (restore) 技术进行该地区分辨率为2.5' × 2.5' (相当于5 km × 3 km) 的高精度的似大地水准面精化, 精化结果表明其精度优于 ± 5 cm, 为长江口航道区域的施工应用提供了精准保障, 同时为无验潮水深测量提供了平面和高程基准。长江口航道区域范围内的似大地水准面优化填补了我国水运工程在河口区域尚无高精度似大地水准面的空白。

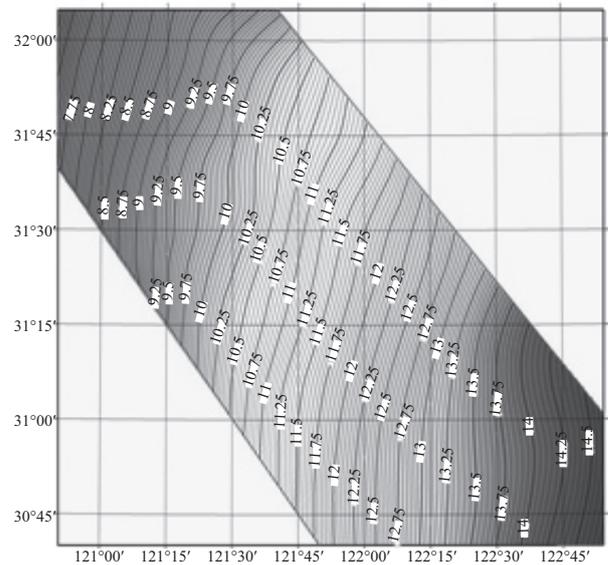


图6 似大地水准面精化等值线

在建立控制网的同时, 基于高精度的控制网点先后建立了横沙GPS基准站、石洞口GPS基准站、N9 GPS基准站, 并研制了实用性的GPS基准站监测软件, 创造性的利用微波数传技术实现了基准站远程数据监控、无人值守。

2.3 实现无验潮水下地形测量

直接由GPS三维定位结合测深仪测水深, 确定泥面 (或水下构筑物顶面) 高程, 是一个大胆的创新的想法, 可以消除潮位改正作业易产生的误差和大量繁复的作业量, 实现“完全数字随船一体化测量”。由于长江口深水航道治理工程建立了GPS控制网, 大范围工程区平面定位精度得到了保障; 建立了长江口区域的似大地水准面, 使得同步高程测量可采用GPS技术实现。从而, 整治建筑物工程的1954北京坐标和吴淞高程三维坐标均可利用GPS测定。在此基础上, 长江口深水航

道治理工程创造性地提出并实现了采用GPS与测深仪结合的无验潮水深测量方法，其工作原理如图7所示。由图7可知，欲测得水底面（或水下构筑物顶面）的吴淞高程 H ，只需据GPS测定的吴淞高程 h ，同轴联结GPS天线和测深仪换能器的联杆长度 ΔH_1 和测深仪读数 ΔH_2 即可简单计算出。无须测定水面高程。这样就彻底改变了以水面高程为基准的传统水深测量方法，抛弃了传统测深作业中大量且繁琐的潮位改正作业，从而也避免了验潮误差、测点与潮位站水面高差、逐点测深与验潮时刻的不完全同步带来的误差等一系列对测深精度的影响。

开发无验潮测深系统时，还通过软件处理解决了GPS数据与测深数据同步采集的技术难题，论证了在测深仪能确保收到回波信号的可作业海况条件下，浪流对测量精度的影响可控制在平面22.2 cm、高程5.1 cm，满足JTJ 203《水运工程测量规范》的要求。

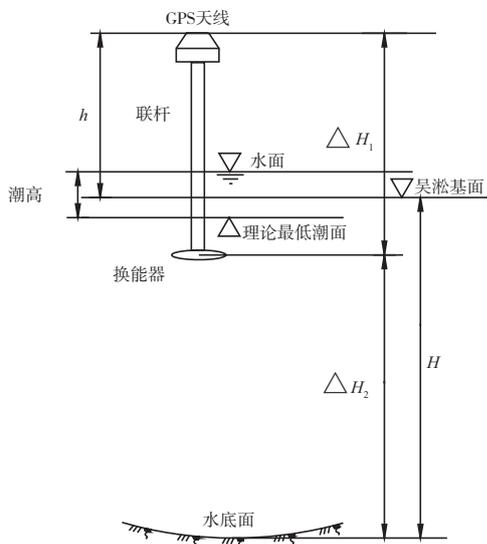


图7 无验潮测深原理

2.4 RTK放样

RTK-DGPS的三维定位迅捷性，改变了传统的放样方式方法，长江口区域的RTK-DGPS三维放样技术为后续工程大规模采用GPS技术放样提供了工程实例。

3 GPS技术的扩展应用

由于前述重大技术的突破，GPS技术在长江口深水航道治理工程中得到全面应用。

1) 每艘大型专用作业船上均配置了2台GPS接收仪，实现了无需临时测量设施、全天候（允许作业海况条件下不分昼夜）、工程区任一位置的高精度定位。

2) 针对软体排铺设、基床抛石整平、排水板打设及大型构件安装等各种水上作业，开发了相应的专用定位软件，集成了GPS技术、计算机数据处理和图像显示技术，在作业船控制室将设计船位、实际船位、三维定位误差、卫星工作状态及有关施工数据均直观地以图像和数据在屏幕上显示，大大提高了定位作业的精度和工效，实现了施工过程的实时、动态监控，开创了水运工程数字化、可视化、信息化施工管理的先例^[2]。

水上作业各主要工序及工程整体的验收测量、沉降位移监测等全部采用了GPS技术。

4) 航道水深测量、建筑物周边地形变化监测、工前水深测量和水下构筑物（如砂被、抛石基床等）的高程测量全部采用了无验潮测深方法。

4 结语

1) GPS关键技术长江口深水航道治理工程中取得重大突破和全面应用。该技术成功解决了长江口深水航道治理工程测量定位极端困难这一重大技术难题，全面且大幅度地提升了水运工程全行业测量定位技术水平。

2) 全面促进了长江口数字化测绘技术的发展，形成了以GPS技术为中心的测深、验潮、定位等集一身的新技术、新方法，从而实现数据采集数字化、数据处理数字化、测绘成果数字化，为可视化施工提供了数据基础。

3) GPS技术扩展应用于工程区任意位置的高精度定位、各类水上作业的实时化动态监控、各类水上作业的施工验收测量及水下无验潮测深。

参考文献：

[1] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口深水航道治理工程成套技术[R]. 上海: 交通运输部长江口航道管理局, 2007.
 [2] 史美祥, 袁世中. GPS技术在长江口深水航道治理工程的创新应用[J]. 水运工程, 2006(12): 63-81.

(本文编辑 郭雪珍)