



# 水利水电测绘科技论文集

2007

合编

- 全国水利水电测绘信息网
- 长江设计院长江空间信息技术工程有限公司（武汉）
- 葛洲坝股份有限公司测绘工程院
- 湖北省水利水电勘测设计院

长江出版社



# 水利水电测绘科技论文集

2007

合编

- 全国水利水电测绘信息网
  - 长江设计院长江空间信息技术工程有限公司(武汉)
  - 葛洲坝股份有限公司测绘工程院
  - 湖北省水利水电勘测设计院
- 长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

水利水电测绘科技论文集.2007/杨爱明主编. —武汉:  
长江出版社, 2007.10  
ISBN 978-7-80708-245-3

I. 水… II. 杨… III. ①水利工程测量—学术论文—文集②水力发电工程—工程测量—学术会议—文集 IV. TV221-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 156356 号

水利水电测绘科技论文集.2007

杨爱明 主编

责任编辑: 贾茜

出版发行: 长江出版社

地 址: 武汉市汉口解放大道 1863 号

邮 编: 430010

E-mail: cjpub@vip.sina.com

电 话: (027)82927763(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销: 各地新华书店

印 刷: 通山县九宫印务有限公司

规 格: 880mm×1230mm

1/16

24 印张

930 千字

版 次: 2007 年 10 月第 1 版

2007 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-80708-245-3/TV · 68

定 价: 65.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

## 《水利水电测绘科技论文集2007》编纂委员会

主任委员 杨爱明

副主任委员 (按姓氏笔画顺序排列)

王海城 张正禄 张显书 耿汉文 高建军

蒋广文 韩明锋

委员 (按姓氏笔画顺序排列)

万先斌 王庆玉 王宗文 王俊红 王跃三

尹富强 田 淳 权录年 许映林 吕健春

乔裕民 吴光富 肖成良 陈明清 杨秋和

林胜海 张培存 范延峰 岳建平 胡兆球

胡宪洲 胡智银 徐 杰 高 峰 曹师翼

龚楚安 强伯年 曾保清 程崇木 裴喜安

主 编 杨爱明

副 主 编 裴灼炎 姚楚光 吴光富 程崇木

编 辑 姜本海 徐菊华 马本润 李国义

英文校译 王汉东 朱思蓉 郑 敏 卢 娟

## 前 言

举办学术研讨会,开展科技信息交流是信息网工作的主旋律,水利水电测绘信息网按地区分成六片开展信息交流活动,学术气氛十分活跃,每年都有3~4个片举办各种类型的学术与科技信息交流会,每隔四年召开一次全网代表大会,并举办全国性的学术研讨会。水利水电测绘信息网于2007年11月在湖北省宜昌市举行第八届全国代表大会暨学术研讨会,大会共征集190余篇科技论文,经评审推荐,遴选出129篇内容先进、新颖,有参考实用价值的论文,编辑成《水利水电测绘科技论文集(2007)》出版。

进入21世纪,新科技革命迅猛发展,卫星导航定位、遥感、地理信息系统等高新技术在水利水电测绘生产、科研、教学中发挥着越来越显著的作用。卫星导航定位技术已被广泛应用于各类工程控制网。特别是随着大地水准面精化的深入开展,GPS工程控制网从二维发展到三维,彻底改变了传统工程控制网的缺陷。高精度实时RTK技术已用于施工放样、断面测量和数字化测图。航空航天遥感技术的进步提供了快速获取信息的手段,水利水电测绘工作者已开始从Google Earth影像中提取信息,地理信息的现势性不断增强。地理信息系统技术向实用化的方向发展,正为实现数字江河、水利信息化提供技术支撑。数字化测图系统与地理信息系统接口,实现了野外采集数据与GIS数据间的交换,使野外数字测图系统成为GIS系统前端数据获取的一个子系统,为水电工程的勘察、设计、施工和竣工存档,提供高质量、多形式的空间基础信息支持。大坝安全监测、滑坡变形监测将现代大地测量仪器和空间技术、无线通信技术相结合,实现了连续、动态、实时、自动化监测,可以自动照准、自动观测、自动记录、自动数据处理、自动生成各种图形和报表。水利水电测绘科技工作者在生产、科研、教学中应用GPS、RS、GIS等新技术、新方法、新理论所取得的生产经验和科研成果,在《水利水电测绘科技论文集(2007)》中有较系统的反映,内容丰富并具有新颖性、科学性、实用性。

广大水利水电测绘工作者十分关注和支持《水利水电测绘科技论文集(2007)》的出版工作,测绘生产、科研、教学中第一线的科技工作者,知名学者、教授、博士、硕士研究生纷纷撰写论文,积极投稿;长江空间信息技术工程有限公司负责编辑工作,投入了大量的人力和物力。对此,我们表示衷心感谢!

编者

2007.7

## 目 录

## 空间定位技术

|                                           |     |     |             |
|-------------------------------------------|-----|-----|-------------|
| GPS 工程控制网优化设计与应用 .....                    | 邸国辉 | 郭际明 | 周国成(1)      |
| GPS RTK 作业精度的影响因素分析 .....                 | 黄张裕 | 徐于月 | 陈苏娟(4)      |
| GPS 空中三角测量应用于缅甸恩梅开江工程 .....               | 浦绍超 |     | 李静清(8)      |
| 网络 RTK 技术的工作原理 .....                      | 周 森 | 宋克忠 | 张学力(11)     |
| GPS 水准测量多项式曲面拟合模型的优化及应用方法 .....           | 郭积辉 | 田 野 | 刘文敬 王百涛(13) |
| GPS RTK 后处理系统的探讨与应用 .....                 |     |     | 周航宇(17)     |
| 采用 Pinnacle 随机软件进行 GPS 施工控制网数据处理的方法 ..... | 刘东庆 |     | 翟明成(20)     |
| RTK 技术在数字测图中的应用研究 .....                   | 韩伟清 |     | 邓迪祥(23)     |
| 浅析静态 GPS 控制测量在天津开发区引水工程中的应用 .....         | 宋克忠 | 程学强 | 王江涛(25)     |
| GPS 在云南鲁基厂水电站高等级控制网测量中的应用 .....           | 张 永 | 郭万里 | 卢彦升(26)     |
| 澜沧江水电规划平面控制网设计与实现 .....                   |     |     | 苟胜国(29)     |
| GPS 在南水北调截污导流工程测量中的应用 .....               |     |     | 李 莉(31)     |
| GPS 定位资料分析与检核 .....                       | 苑庆中 |     | 李 莉(34)     |
| GPS 高程在山区应用的可行性探讨 .....                   |     |     | 崔文刚(36)     |
| GPS 控制网拟合高程在太湖测量中的应用 .....                | 杨红锋 | 吴尔林 | 陈永勤 徐加东(39) |
| 带状平原丘陵地区 GPS 高程拟合探讨 .....                 | 李传中 |     | 陈四新(42)     |
| 南宁市内河三维 GPS 控制网设计 .....                   | 谢家业 | 黄流波 | 叶达忠(45)     |
| 带状“开放式”GPS 控制网的精度分析与探讨 .....              | 周冬红 |     | 乔 娜(48)     |
| 北海市铁山港二期供水水源工程首级 GPS 控制网 .....            | 颜景顺 | 叶达忠 | 周 然(50)     |
| 省域 C 级 GPS 控制网的建立 .....                   | 张绪朋 | 乔 婷 | 和耐秋(52)     |
| GPS 技术在长隧洞施工控制网测量中的应用 .....               |     |     | 张宗林(55)     |
| 利用 GPS RTK 技术修测 1:10000 地形图 .....         | 张学利 | 胡雅娴 | 王江涛(58)     |
| GPS 在佛子岭水库库容测量中的应用与库容计算 .....             | 陈尚林 | 李钦荣 | 汪鹤卫(60)     |
| RTK 测量的精度和可靠性分析 .....                     | 邸国辉 | 刘幼华 | 陈汉文(63)     |

## GIS 应用

|                            |     |                 |
|----------------------------|-----|-----------------|
| 基于 GIS 的基础数据库管理系统 .....    | 叶芳毅 | 朱思蓉(67)         |
| 渭河中下游河道基础地理数据库建设 .....     | 吴学明 | 曹天一 高庆方(69)     |
| 南水北调中线工程征地测量数据处理系统开发 ..... | 王海城 | 杨成宏(72)         |
| 建设“数字淮安水利”的必要性及其支持技术 ..... | 尚庆明 | 徐树元 包荣萍 罗时龙(77) |
| 网络 GIS 关键技术问题和发展趋势 .....   | 师胜林 | 耿汉文 吴尔林(80)     |

|                                              |     |             |
|----------------------------------------------|-----|-------------|
| 浅谈 ArcView 在测绘项目管理中的应用 .....                 | 李晓晨 | 何明刚(83)     |
| 浅谈利用 MapGIS 矢量化地形图转换为 DXF 文件的体会 .....        | 蒋国飞 | (86)        |
| 基于 FMEObject 的 CAD 数据向 GIS 数据转换方法研究与实现 ..... | 姜志哲 | 王保恩(89)     |
| 河道测绘信息数据库管理系统的设计 .....                       | 姜贤瑞 | 彭全胜 赵成海(92) |
| 基于 ArcSDE 技术实现空间数据库的连接 .....                 | 林永钢 | 燕樟林(94)     |
| 黄河基础地理信息系列标准编制 .....                         | 曹天一 | 吴学明 高庆方(98) |
| SCS G2004 在大比例尺数字化成图中的应用 .....               | 殷海霞 | (101)       |
| 校区地下管线的三维可视化 .....                           | 邹玉兰 | (103)       |
| 数字黄壁庄水库应用研究 .....                            | 武明海 | (108)       |
| 星图系统 GIS 数据获取与集成 .....                       | 宋克忠 | 程学强(113)    |
| ArcGIS 三维可视技术在山区水库库盘选址中的应用 .....             | 马震  | 王玉丽(115)    |
| 本体论与 GIS 互操作 .....                           | 陈余才 | 王红 张永光(119) |

## RS 与数字测量

|                                        |     |                      |
|----------------------------------------|-----|----------------------|
| 平行摄影测量测定精度分析 .....                     | 陈元申 | 薛倩(123)              |
| 全数字化测图中航片扫描分辨率对测量精度的影响分析 .....         | 陈元申 | 薛倩 张永光 葛凤仪(125)      |
| Matlab 环境下 Mask 匀光技术的研究与实现 .....       | 薄伟伟 | 高庆方 丁俊杰(128)         |
| GoogleEarth 影像在测量中的应用 .....            | 周国成 | (130)                |
| 激光雷达在数字化测图中的应用探讨 .....                 | 何坦  | (133)                |
| 三维激光扫描技术在绍兴柯岩景区“云骨”项目中的应用 .....        | 燕樟林 | 竺建平 张忠鑫(138)         |
| 三维激光扫描技术在温泉水电站大比例尺地形图测量中的应用 .....      | 许映林 | (140)                |
| 基于 DXF 文件的地形图在不同坐标系和投影条件下的转换方法研究 ..... | 吴敬文 | 盛青 王进(143)           |
| 在 CASS 数字测图中的作业体会 .....                | 施国武 | (145)                |
| 大比例尺地图制图与建库一体化方案研究 .....               | 陈余才 | 曹天一 张永光(148)         |
| 数字化地形测绘在水电工程中的应用 .....                 | 路创军 | (151)                |
| 两种地貌分形维数计算方法研究 .....                   | 胡洁  | 高庆方 赖瑞勋 孔娟(153)      |
| 浅谈高分辨率遥感卫星图像处理技术及其在水利工程中的应用 .....      | 熊莉  | 黄涛(155)              |
| 戈壁滩地区数字测图数据采集措施探讨 .....                | 张成增 | 张立银(157)             |
| 利用 Cass5.0 海洋成图软件进行陆地测量数字化成图 .....     | 石满菊 | 段宝德(159)             |
| 数字化测图技术应用与探讨 .....                     | 张学利 | 胡雅娴 周森(161)          |
| 天生桥一级水电站库区地形测量技术特点 .....               | 浦绍超 | 刘文东 李静清 王媛(163)      |
| 利用 1:5000 比例尺地形图更新土地调查的实施 .....        | 黄智  | 陈永勤 耿汉文(166)         |
| 主动遥感测图技术浅议 .....                       | 刘文国 | 乔朝飞 周永明 王成华 任立群(168) |
| 基于水库泥沙淤积测量方法的应用和分析 .....               | 白国荣 | (170)                |
| 西龙池抽水蓄能电站数字化测图技术及其应用 .....             | 陈剑华 | 王松波(173)             |
| 地学信息图谱及其应用 .....                       | 陈余才 | 王红 张永光(175)          |
| 堤防除险加固测量工程中水下测量方法初探 .....              | 吴定邦 | (178)                |
| 提高大比例尺数字地形图精度的实践 .....                 | 郭德普 | 丁俊福 王淑君(181)         |

## 精密工程测量与安全监测

|                                |     |          |
|--------------------------------|-----|----------|
| 滑坡变形监测点的布设原则 .....             | 李劲  | 陆付民(183) |
| 风洞试验中心流道检测 .....               | 潘国荣 | 谷川(186)  |
| 改进的 BP 算法及其在变形监测数据处理中的应用 ..... | 潘国荣 | 谷川(189)  |

|                                     |     |          |
|-------------------------------------|-----|----------|
| 清江隔河岩水利枢纽通航渡槽的安全监测与施工监控 .....       | 张文胜 | 李红霞(192) |
| 西龙池抽水蓄能电站下水库工程变形监测网优化设计 .....       | 刘东庆 | 张高明(196) |
| GPS 静态定位在大坝变形监测中的应用 .....           | 温继康 | 苑庆中(199) |
| A、B 级 GPS 测量技术在大型水利枢纽变形监测中的应用 ..... |     | 李玉平(202) |
| 五强溪电站一等平面监测网观测成果及精度分析 .....         | 沈绍罗 | 刘艾华(204) |
| 基于有限元确定性模型下的大坝变形分析 .....            | 伊晓东 | 张传刚(209) |
| 水布垭枢纽大坝挤压边墙施工期变形监测 .....            |     | 李红霞(212) |
| 构造断面法在滑坡变形监测数据处理中的应用 .....          | 任 远 | 王保恩(215) |
| 黄河拉西瓦水电站平面变形控制网及精密水准网施测 .....       | 雷建朝 | 高建军      |
| 新疆塔西河石门子水库大坝变形监测初步分析研究 .....        |     | 许映林(222) |
| 变形监测数据的小波神经网络预测方法 .....             | 潘国荣 | 谷 川(225) |
| 临淮岗洪水控制工程变形监测 .....                 | 杨仰诚 | 朱世同(227) |
| 利用误差椭球分析全自动变形监测系统的点位变形 .....        | 陶庭叶 | 高 飞      |
|                                     |     | 吴兆福(231) |

## 施 工 测 量

|                                        |     |          |
|----------------------------------------|-----|----------|
| 大中型水电工程关键测绘技术研究 .....                  |     | 吴光富(235) |
| 桥梁施工中曲面放样的解析方法 .....                   | 伊晓东 | 张 平(238) |
| 高精度三维施工控制网技术在抽水蓄能电站工程的应用研究与实践 .....    |     |          |
|                                        | 刘东庆 | 范延峰      |
|                                        | 翟明成 | 张高明      |
|                                        |     | 杨海军(241) |
| 基于近地层温度场模型的大气折光改正模型研究 .....            | 段 鹏 | 岳建平      |
| 基于小波变换的分布式光纤温度传感监测信号处理分析 .....         | 黎 昵 | 岳建平      |
| 大田河落生、大地水电站工程 GPS 施工控制网的建立 .....       |     | 吴恒友(253) |
| 某水电站施工测量平面控制网数据处理方法 .....              | 张立银 | 张成增(256) |
| 瀑布沟大坝工程施工控制网的布设与实施 .....               |     | 雷 勇(259) |
| 西龙池抽水蓄能电站隧洞贯通控制测量 .....                | 陈剑华 | 王松波(262) |
| 下坂地水利枢纽工程施工平面控制网的设计与实施 .....           | 李军安 | 张学锋(265) |
| 论西龙池抽水蓄能电站超长斜井的测量控制 .....              |     | 皮高华(268) |
| 坝区开挖高边坡边长交会方法的应用 .....                 |     | 马如坤(271) |
| 全站仪自由设站极坐标法在隧洞工程测量中的应用 .....           | 邱章云 | 吴 限(274) |
| 单程双转点水准测量程序在工程测量中的应用 .....             | 潘圣卿 | 贾玉华(278) |
| 双测站法悬高点高程测量及精度分析 .....                 | 王铁生 | 贾 存      |
| 塔吉克斯坦国杜尚别-胡站德 500kV 送电线路测量方法的探讨 .....  |     | 党 堆(285) |
| 南水北调配套工程纵横断面桩号的计算方法 .....              |     | 张燕萍(287) |
| 对 TPS1000 系列全站仪二次开发编程实现高拱坝施工测量放样 ..... | 刘艾华 | 沈绍罗(289) |
| 辽宁省大伙房水库输水工程有关工程坐标计算与使用的若干问题的介绍 .....  |     |          |
|                                        | 田 野 | 刘乃军      |
|                                        | 段宝珩 | 王 飞      |
|                                        | 刘文敬 | 董永刚      |
|                                        | 贾晓堂 | 徐汉超(291) |
| 用 Cass6.0 绘制架空送电线路平断面图 .....           |     | 凌以奎(292) |
| 关于等弧长椭圆曲线点的放样与方法探讨 .....               | 王瑞臣 | 朱 燕      |
| 山东省南水北调工程中的土地勘测定界测量 .....              | 张绪朋 | 赵曰瑕      |
| 地铁隧道掘进中盾构姿态定位模型的研究 .....               | 潘国荣 | 徐 然(298) |
| 110kV 及以下输电线路勘测中测绘的新方法及应注意的问题 .....    |     | 谢国靖(302) |
| 水电工程测量坐标系统的确定 .....                    |     | 饶兴贵(304) |

## 工程监理

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| 三峡特大型厂房引水压力钢管安装测量监理 ..... | 李明春(308)     |
| 水下开挖施工监控系统 .....          | 段宝德 石满菊(311) |

## 软件开发与应用

|                                         |              |
|-----------------------------------------|--------------|
| Excel VBA 编程在 GPS 测量数据处理中的应用 .....      | 何明岗 李晓晨(315) |
| Excel 及 VBA 在测量计算中的应用 .....             | 焦利俊(318)     |
| Excel VBA 与边角控制网平差 .....                | 李 瑞(321)     |
| Casio Fx-4800 计算器在水电站尾水洞扩散段测量中的应用 ..... | 特木热(324)     |
| Casio fx-4850P 计算器高程控制网计算程序 .....       | 余志贵 马 威(327) |
| 基于 Map Objects 应用等高线计算库区土地淹没面积 .....    | 叶芳毅(330)     |
| 数据自动化采集在土工试验中的应用 .....                  | 焦瑞娟(333)     |
| 编程实现曲线任意里程中边桩三维坐标正反算 .....              | 邱章云(334)     |
| 水利水电测绘资料查询系统设计 .....                    | 秦 涛(337)     |

## 测绘仪器

|                                       |                  |
|---------------------------------------|------------------|
| GeoBASIC 开发徕卡 TCA2003 测量机器人程序实践 ..... | 张高明 刘晓波 刘东庆(341) |
| 激光跟踪仪 LTD600 在地铁隧道管模检测中的应用 .....      | 潘国荣 韩美艳 张德海(344) |
| 标尺遮挡对数字水准仪测量结果的影响试验 .....             | 岳建平 秦茂芬 黎 昵(350) |
| 三维激光扫描技术在水电工程中的应用 .....               | 王小刚 杨 洪 周 杰(352) |

## 测绘管理

|                            |                  |
|----------------------------|------------------|
| 测绘在城市规划中的应用 .....          | 潘国荣 谷 川(355)     |
| 对《水利水电工程测量规范》的一些修改建议 ..... | 高志强 唐昌文 毛久常(358) |
| 测量工作如何更好地为经济建设服务 .....     | 杨仰诚 朱德华(360)     |
| 淮河流域的基础测绘工作 .....          | 杨仰诚 黄亚林(363)     |
| 试论测绘队伍的人才结构与人才培养 .....     | 杨仰诚 袁克飞(366)     |
| 浅谈测绘项目承包管理 .....           | 齐 忠(368)         |
| 工程测绘全过程的质量管理 .....         | 严 春(370)         |
| 测绘档案数字化初探 .....            | 宋晓岚(372)         |

# 空间定位技术



...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...

...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...

(1) ...  
(2) ...  
(3) ...  
(4) ...  
(5) ...  
(6) ...  
(7) ...  
(8) ...  
(9) ...  
(10) ...

(11) ...  
(12) ...  
(13) ...  
(14) ...  
(15) ...  
(16) ...  
(17) ...  
(18) ...  
(19) ...  
(20) ...

...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...

(21) ...  
(22) ...  
(23) ...  
(24) ...  
(25) ...  
(26) ...  
(27) ...  
(28) ...  
(29) ...  
(30) ...

# GPS 工程控制网优化设计与应用

邸国辉<sup>1</sup> 郭际明<sup>2</sup> 周国成<sup>1</sup>

(1. 湖北省水利水电勘测设计院; 2. 武汉大学测绘学院)

**摘要:** 本文提出了一种估算 GPS 基线向量方差、协方差的方法, 并设计了模拟法 GPS 工程控制网优化设计软件模块, 据此进行了南水北调中线引江济汉工程 GPS 网和某长隧道 GPS 网的方案设计, 根据设计的布网方案进行了实际外业观测, 对实测数据的平差结果的精度、可靠性和横向贯通误差与预先的设计方案的对应值进行了分析比较, 验证了该算法的可行性。

**关键词:** GPS 网 方差估计 优化设计

## The Optimization Design and Application of GPS Engineering Control Network

Di Guohui<sup>1</sup> Guo Jimin<sup>2</sup> Zhou Guocheng<sup>1</sup>

(1. Hubei Province Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower; 2. School of Survey, Wuhan University)

**Abstract:** This paper provides a method to evaluate the variance and covariance of GPS baseline vector, and designs a software model of GPS engineering control network optimization design through simulation method. It has been used to design the GPS network of diverting water from Chang jiang river to Hanjing river project in diverting water from the south to the north project and some long tunnel GPS network designing projects, and the field survey has been done based on the design. The comparison between the adjustment precision, reliability, the transverse sequential error or surveying data and the corresponding values of beforehand design validates the feasibility of the algorithm above.

**Key words:** GPS Network Variance Evaluation Optimization Design

GPS 工程控制网是为了满足工程建设需要而布设的测量控制网, 其建立过程为: ①布网方案设计; ②外业观测; ③内业数据处理与撰写总结报告。目前, 对于经典的地面测量控制网, 已有软件可供利用 (如 CosaWIN), 但对于 GPS 控制网, 大部分数据处理软件尚无优化设计功能。对于 GPS 控制网的优化设计, 估算设计的 GPS 基线向量的方差阵是其难点, 其方法大体分为三种: ①三个方向按标称精度平均分配; ②利用标称精度, 通过方差传播率计算; ③通过 GPS 历书估计基线向量方差。本文主要研究第二种估算 GPS 网基线向量方差阵的方法, 并通过引江济汉工程 GPS 网和某长隧道 GPS 网的实测数据, 验证了该算法的可行性。

## 1 GPS 基线向量方差—协方差阵估计

### 1.1 二维基线向量的方差—协方差阵估计

二维基线向量是平面向量, 根据标称精度计算 GPS 的边长方差  $m_s^2$  和方位角方差  $m_a^2$ , 其计算公式为:

$$m_s^2 = a^2 + (b \cdot s)^2 \quad (1)$$

$$m_a^2 = c^2 + \left(\frac{d}{s}\right)^2 \quad (2)$$

式中,  $a, b$  分别是 GPS 接收机边长测量固定误差和比例误差因子;  $c, d$  分别是 GPS 接收机方向测量固定误差和比例误差因子;  $s$  是基线长度。

因有:

$$\Delta x = s \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

$$\Delta y = s \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  是基线的坐标方位角。

对 (3)、(4) 两式进行线性化得:

$$\begin{bmatrix} d\Delta x \\ d\Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -s \cdot \sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ds \\ d\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据协方差传播律, 可得基线向量的方差—协方差阵:

$$D_{\Delta y} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha \cdot m_s^2 + \frac{s^2}{\rho^2} \sin^2 \alpha \cdot m_a^2 & \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \left(m_s^2 - \frac{s^2}{\rho^2} m_a^2\right) \\ \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \left(m_s^2 - \frac{s^2}{\rho^2} m_a^2\right) & \sin^2 \alpha \cdot m_s^2 + \frac{s^2}{\rho^2} \cos^2 \alpha \cdot m_a^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 1.2 三维基线向量方差—协方差阵估计

对 (5) 式扩展, 加入高程, 则有

$$\begin{bmatrix} d\Delta x \\ d\Delta y \\ d\Delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -s \cdot \sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & s \cdot \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ds \\ d\alpha \\ d\Delta h \end{bmatrix} \quad (7)$$

则  $\Delta x, \Delta y, \Delta h$  的方差—协方差阵为:

$$D_{\Delta y h} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha \cdot m_s^2 + \frac{s^2}{\rho^2} \sin^2 \alpha \cdot m_a^2 & \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \left(m_s^2 - \frac{s^2}{\rho^2} m_a^2\right) & 0 \\ \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \left(m_s^2 - \frac{s^2}{\rho^2} m_a^2\right) & \sin^2 \alpha \cdot m_s^2 + \frac{s^2}{\rho^2} \cos^2 \alpha \cdot m_a^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_h \end{bmatrix} \quad (8)$$

又根据站心坐标系转换成空间直角坐标系的公式:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta h \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $B, L$  分别为大地纬度和经度, 可由空间直角坐标系  $X, Y, Z$  转换得到;  $R$  为旋转矩阵。

则由协方差传播律得三维基线向量的方差—协方差阵计算公式:

$$D_{\Delta XYZ} = R \cdot D_{\Delta xyh} \cdot R^T \quad (11)$$

$$\text{令 } D_{\Delta XYZ} = \begin{bmatrix} \text{cov} \Delta X \Delta X & \text{cov} \Delta X \Delta Y & \text{cov} \Delta X \Delta Z \\ \text{cov} \Delta Y \Delta X & \text{cov} \Delta Y \Delta Y & \text{cov} \Delta Y \Delta Z \\ \text{cov} \Delta Z \Delta X & \text{cov} \Delta Z \Delta Y & \text{cov} \Delta Z \Delta Z \end{bmatrix}, \text{ 则其中:}$$

$$\begin{aligned} \text{cov} \Delta X \Delta Y &= \sin B \cos L (\sin B \cos L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta x + \sin L \cdot \\ &\text{cov} \Delta x \Delta y) + \sin L (\sin B \cos L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta y + \sin L \cdot \text{cov} \Delta y \Delta y) + \\ &\cos^2 B \cos^2 L \cdot \text{cov} \Delta h \Delta h \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{cov} \Delta Y \Delta Y &= \sin B \sin L (\sin B \sin L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta x - \cos L \cdot \\ &\text{cov} \Delta x \Delta y) + \cos L (-\sin B \sin L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta y + \cos L \cdot \text{cov} \Delta y \Delta y) + \\ &\cos^2 B \sin^2 L \cdot \text{cov} \Delta h \Delta h \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{cov} \Delta Z \Delta Z = \cos^2 B \cdot \text{cov} \Delta x \Delta x + \sin^2 B \cdot \text{cov} \Delta h \Delta h \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{cov} \Delta X \Delta Y &= \text{cov} \Delta Y \Delta X = \sin B \sin L (\sin B \cos L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta x + \\ &\sin L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta y) - \cos L (\sin B \cos L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta y + \sin L \cdot \\ &\text{cov} \Delta y \Delta y) + \cos^2 B \cos L \sin L \cdot \text{cov} \Delta h \Delta h \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{cov} \Delta X \Delta Z &= \text{cov} \Delta Z \Delta X = -\cos B (\sin B \cos L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta x + \\ &\sin L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta y) + \cos B \sin B \cos L \cdot \text{cov} \Delta h \Delta h \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{cov} \Delta Y \Delta Z &= \text{cov} \Delta Z \Delta Y = \cos B (-\sin B \sin L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta x + \\ &\cos L \cdot \text{cov} \Delta x \Delta y) + \cos B \sin B \sin L \cdot \text{cov} \Delta h \Delta h \end{aligned} \quad (17)$$

## 2 GPS 点位精度估计

GPS 基线向量的误差方程形式如下:

$$V_{ij} = B_{ij} \delta X_{ij} - L_{ij} \quad (18)$$

式中,

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\delta X_{ij} = [dX_i, dY_i, dZ_i, dX_j, dY_j, dZ_j]^T$$

由间接平差随机模型  $P_{ij} = \sigma_0^2 D_{\Delta XYZ}^{-1}$  可以定出各基线向量的权阵  $P_{ij}$ , 则法方程系数阵为  $N = B^T P B$ , 根据最小二乘原理, 其逆阵的对角线元素即为各坐标分量的协因数, 即:

$$Q = N^{-1}, q_{ij} = \text{diag}(Q_{ii}) \quad (19)$$

因此, 控制网中各设计点的精度估计值为:

$$\sigma_{x_i} = \sigma_0 \sqrt{Q_{x_i}}, \sigma_{y_i} = \sigma_0 \sqrt{Q_{y_i}}, \sigma_{z_i} = \sigma_0 \sqrt{Q_{z_i}} \quad (20)$$

$\sigma_0$  为验前单位权中误差。

## 3 可靠性分析

$$\text{观测值 } l_i \text{ 的多余观测分量 } r_i = (Q_{vv} P)_{ii} \quad (21)$$

$$r = n - u = \sum_{i=1}^n r_i \quad (22)$$

式中,  $r$  为整个网的多余观测数;  $r_i$  可以反映 GPS 控制网发现观测值中粗差的能力, 称为内部可靠性;  $n$  为总观测值个数;  $u$  为未知数个数。

外部可靠性反映的是控制网中未被发现的粗差对平差结果的影响程度, 计算公式为:

$$\delta_{0i} = \frac{1 - r_i}{r_i} \omega_0 \quad (23)$$

式中,  $\omega_0$  为非中心参数, 一般取 2.79 (显著水平 0.05, 检验功效 0.80)。

## 4 隧道横向贯通误差计算

洞外 GPS 平面控制网影响值 (即 GPS 网测量误差所引起隧道横向贯通误差, 简称“影响值”) 的计算可参照下述地面边角网的严密计算公式进行:

$$\begin{aligned} d(\Delta y_p) &= -a_{ja} \Delta X_{jp} dx_j - (1 + b_{ja} \Delta X_{jp}) dy_j + a_{ja} \Delta X_{jp} dx_a + \\ &b_{ja} \Delta x_{jp} dy_a - a_{cb} \Delta X_{cp} dx_b - b_{cb} \Delta X_{cp} dy_b + a_{cb} \Delta X_{cp} dy_c + (1 + b_{cb} \\ &\Delta X_{cp}) dy_c \end{aligned} \quad (24)$$

式 (24) 为贯通点横坐标差的权函数式 (纵向贯通误差影响值计算式与之相似), 含义是: 在给定的隧道独立坐标系下, 洞外 GPS 平面控制网影响值与进出口点 ( $J, C$ ) 和相应定向点 ( $A, B$ ) 的位置、精度以及贯通点  $P$  的位置有关, 式中  $\Delta y_p$  为分别由进出口推算贯通点  $P$  的  $y$  坐标的差值,  $a, b$  为相应边的方向系数,  $\Delta x$  为相应点的坐标差, 按协方差传播律计算出该差值的中误差即为“影响值”, 用  $M_{\text{外}}$  表示。该法称为坐标差权函数法。

## 5 引江济汉工程 GPS C 级网方案设计

### 5.1 GPS C 级网方案设计

南水北调中线引江济汉工程 GPS C 级网总长度近 70km, 是典型的带状控制网。在 B 级网的四个点 ( $G1, G2, G3, G4$ ) 上进行联测, 同步安排 6 台双频 GPS 接收机观测, 以 30min 作为观测时段长度, 每点均观测两个以上的时段, 共进行 3.5d 的外业观测。利用 GPS 工程控制网优化设计软件, 对整网进行了多个方案设计, 最后选定推荐方案。推荐方案的总测站数为 56 (4 个 B 级点, 52 个 C 级点), 独立基线数为 138 条, 首先生成三维基线向量及其方差—协方差, 然后进行精度、可靠性估计, 计算时取 GPS 基线固定误差为  $\pm 5\text{mm}$ , 比例误差为  $\pm 1\text{ppm}$ , 方位中误差为  $\pm 1''$ , 其结果见表 1、表 2。

表 1 GPS 三维设计网点精度

| 设计网 | $M_x(\text{cm})$ | $M_y(\text{cm})$ | $M_z(\text{cm})$ | $M_p(\text{cm})$ |
|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 最好点 | 0.33             | 0.63             | 0.44             | 0.84             |
| 最弱点 | 0.78             | 1.06             | 0.66             | 1.47             |
| 平均值 | 0.55             | 0.84             | 0.54             | 1.14             |

表2 GPS 三维设计网可靠性指标

| 设计网 | X 内可<br>靠性 | Y 内可<br>靠性 | Z 内可<br>靠性 | X 外可<br>靠性 | Y 外可<br>靠性 | Z 外可<br>靠性 |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 最小值 | 0.11       | 0.37       | 0.11       | 0.17       | 0.67       | 0.20       |
| 最大值 | 0.94       | 0.81       | 0.93       | 22.98      | 4.74       | 22.08      |
| 平均值 | 0.62       | 0.62       | 0.62       | 2.61       | 1.80       | 2.94       |

## 5.2 实测网精度与可靠性指标

按照方案设计要求,2006年1月8—11日进行了C级网的观测。数据处理过程中,C级网基线解算采用Pinnacle软件,网平差采用CosaGPS软件进行,得到的精度与可靠性指标见表3、表4。

表3 GPS 三维实测网点位精度

| 实测网 | $M_x$ (cm) | $M_y$ (cm) | $M_z$ (cm) | $M_p$ (cm) |
|-----|------------|------------|------------|------------|
| 最好点 | 0.19       | 0.36       | 0.23       | 0.47       |
| 最弱点 | 0.51       | 0.91       | 0.58       | 1.19       |
| 平均值 | 0.37       | 0.63       | 0.42       | 0.84       |

表4 GPS 三维实测网可靠性指标

| 设计网 | X 内可<br>靠性 | Y 内可<br>靠性 | Z 内可<br>靠性 | X 外可<br>靠性 | Y 外可<br>靠性 | Z 外可<br>靠性 |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 最小值 | 0.10       | 0.05       | 0.11       | 0.06       | 0.04       | 0.06       |
| 最大值 | 0.98       | 0.99       | 0.98       | 24.03      | 54.09      | 22.34      |
| 平均值 | 0.62       | 0.62       | 0.62       | 2.69       | 2.99       | 2.70       |

## 6 某长隧道 GPS 网方案设计

## 6.1 隧道 GPS 网方案设计

某隧道长达9km,贯通点在中部,GPS网见图1。

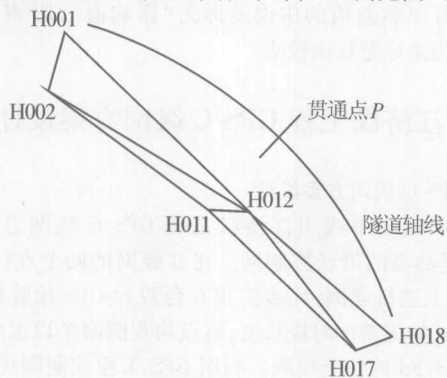


图1 隧道 GPS 网

为了提高相邻点的相对精度,推荐方案要求进行3条边长的精密测距( $\pm 1\text{mm}$ ),同步安排4台双频GPS接收机观测,以120min作为观测时段长度,每点均观测两个以上的时段。推荐方案的总测站数为6点,独立基线数为9条,进行精度、可靠性和贯通点横向、纵向中误差的估计,考虑到测区的收星情况,计算时取GPS基线固定误差为 $\pm 10\text{mm}$ ,比例误差为 $\pm 1\text{ppm}$ ,方位中误差为 $\pm 1''$ ,以H011为起点,H011-H012为固定方向,其结果见表5、表6。

表5 隧道 GPS 网设计网点位精度

| 网点   | $M_x$ (cm) | $M_y$ (cm) | $M_p$ (cm) |
|------|------------|------------|------------|
| H011 |            |            |            |
| H001 | 2.16       | 1.66       | 2.73       |

续表

| 网点   | $M_x$ (cm) | $M_y$ (cm) | $M_p$ (cm) |
|------|------------|------------|------------|
| H002 | 2.20       | 1.50       | 2.66       |
| H012 | 0.00       | 0.02       | 0.02       |
| H017 | 1.63       | 1.80       | 2.43       |
| H018 | 1.72       | 1.76       | 2.47       |

表6 隧道 GPS 网设计二维基线向量可靠性

| 起点   | 终点   | 内部可靠性 |      |
|------|------|-------|------|
|      |      | $DX$  | $DY$ |
| H001 | H002 | 0.74  | 0.07 |
| H001 | H012 | 0.58  | 0.64 |
| H001 | H011 | 0.45  | 0.57 |
| H002 | H012 | 0.50  | 0.61 |
| H011 | H012 | 0.55  | 0.80 |
| H011 | H017 | 0.45  | 0.62 |
| H012 | H017 | 0.56  | 0.56 |
| H012 | H018 | 0.44  | 0.59 |
| H017 | H018 | 0.50  | 0.72 |

由表6可知,平均内部可靠性( $DX$ 、 $DY$ )分别为0.53、0.58,内部可靠性均值为0.55,表明网的可靠性较高。

入口测站、入口照准点分别为H001、H002,出口测站、出口照准点分别为H017、H018。贯通点横向中误差的估计值为2.7cm。

## 6.2 实测网计算结果

按照推荐方案进行测量后,将GPS独立基线9条和精密测边3条作为观测量,进行二维联合平差,得到精度、可靠性和贯通点横向、纵向中误差,见表7、表8。

表7 隧道 GPS 网实测网点位精度

| 网点   | $M_x$ (cm) | $M_y$ (cm) | $M_p$ (cm) |
|------|------------|------------|------------|
| H011 |            |            |            |
| H002 | 1.80       | 1.31       | 2.23       |
| H001 | 1.77       | 1.43       | 2.27       |
| H017 | 1.37       | 1.50       | 2.03       |
| H012 | 0.00       | 0.03       | 0.03       |
| H018 | 1.46       | 1.46       | 2.07       |

表8 隧道 GPS 网实测二维基线向量可靠性

| 起点   | 终点   | 内部可靠性 |      |
|------|------|-------|------|
|      |      | $DX$  | $DY$ |
| H002 | H001 | 0.69  | 0.24 |
| H011 | H001 | 0.58  | 0.55 |
| H011 | H017 | 0.58  | 0.63 |
| H012 | H001 | 0.65  | 0.64 |
| H012 | H002 | 0.60  | 0.56 |
| H012 | H011 | 0.19  | 0.64 |
| H012 | H017 | 0.63  | 0.60 |
| H012 | H018 | 0.59  | 0.70 |
| H017 | H018 | 0.26  | 0.60 |

由表8可知平均内部可靠性( $DX$ 、 $DY$ )分别为0.53、0.58,内部可靠性均值为0.55,表明网的可靠性较高。

贯通点横向中误差的估计值为2.9cm。

(下转第10页)

# GPS RTK 作业精度的影响因素分析

黄张裕 徐于月 陈苏娟

(河海大学测绘科学与工程系)

**摘要:**RTK 技术的关键在于数据处理和数据传输技术,影响作业精度的因素主要在于整周模糊度求解(初始化)、差分数据传输以及坐标转换等。在实际作业中,还有其他一些因素也会影响 RTK 的作业精度,必须分析 RTK 作业精度的影响因素和减弱措施,提高测量精度,更好地为施工测量服务。

**关键词:**测量 RTK 精度 工程应用

## The Analysis of the Work Precision Influence Factor of GPS RTK

Huang Zhangyu Xu Yuyue Chen Sujuan

(School of Survey Science and Engineering, Hehai University)

**Abstract:** The keys of RTK technique are data processing and data transmission technique. The main factors of affecting the work precision are whole period illegibility initialization, differential data transmission and coordinate conversion and so on. In the practical work, there are some other factors which can also affect the work precision of RTK. We must analyze the factors of affecting the RTK's work precision and find the weakening measure, and improve the survey precision thus can provide more excellent service for construction survey.

**Key words:** Survey RTK Precision Project Application

实时动态 RTK 测量系统是 GPS 测量技术与数据传输技术相结合而构成的组合系统,是以载波相位观测量为基础的实时差分 GPS(RTDGPS)测量技术。常规的 GPS 测量方法,如静态、快速静态、准动态和动态相对定位等,如果不与数据传输系统相结合,其定位结果就需要通过观测数据的测后处理而获得,不仅无法实时给出观测站的定位结果,而且也无法对基准站和流动站观测数据的质量进行实时检核,因而难以避免在数据后处理中发现不合格的测量成果,需要返工重测。

实时动态测量通过实时计算的定位结果,可监测基准站与流动站观测成果的质量和解算结果的收敛情况,从而可实时判定解算结果是否成功,以减少冗余观测、缩短观测时间。RTK 测量系统的成功开发,为 GPS 测量工作的可靠性和高效率提供了保障。

RTK 技术是建立在流动站与基准站误差强相关这一假设的基础上的。当流动站离基准站较近(不超过 15km)时,上述假设一般均能较好地成立,此时利用一个或数个历元的观测资料即可获得厘米级精度的定位结果。为消除卫星钟和接收机钟的钟差,削弱卫星星历误差、电离层延迟误差和对流层延迟误差的影响,在 RTK 中通常都采用双差观测值。然而随着流动站和基准站间间距的增加,误差相关性将变得越来越差。轨道偏差、电离层延迟的残余误差和对流层延迟的残余误差项都将迅速增加,从而导致难以正确确定整周模糊度,无法获得固定解。

## 1 实时动态测量技术

GPS RTK 测量系统主要由 GPS 接收机、数据传输系统、软件系统三部分组成。

### 1.1 GPS 接收机

RTK 测量系统中至少包含两台 GPS 接收机,其中一台安置在基准站上,另一台或若干台分别安置在不同的流动站上。基准站应尽可能设在测区内地势较高,且观测条件良好的已知点上。在作业中,基准站的接收机应连续跟踪全部可见 GPS 卫星,并将观测数据通过数据传输系统实时发送给流动站。

### 1.2 数据传输系统

基准站与流动站之间的联系是靠数据传输系统(数据链)来实现的。数据传输设备是完成实时动态测量的关键设备之一,由调制解调器和无线电台组成。在基准站上,利用调制解调器将有关数据进行编码和调制,然后由无线电发射台发射出去。在流动站上利用无线电接收台将其接收,并由解调器将数据解调还原,送入流动站上的 GPS 接收机中进行数据处理。

### 1.3 软件系统

软件系统的功能和质量,对于保障实时动态测量的可行性、测量结果的可靠性及精度具有决定性意义。以载波相位为观测量的实时动态测量,其主要问题仍在于载波相

位初始整周模糊度的精密确定,流动观测中对卫星的连续跟踪,以及失锁后的重新初始化问题。快速解算和动态解算整周模糊度技术的发展,为实时动态测量的实施奠定了基础。实时动态测量软件系统应具备的基本功能有:①快速解算或动态快速解算整周模糊度;②实时解算流动站在 WGS-84 坐标系中的三维坐标;③求解坐标系之间的转换参数;④根据已知转换参数,进行坐标系统的转换;⑤解算结果的质量分析与评价;⑥作业模式(静态、准动态、动态等)的选择与转换;⑦测量结果的显示与绘图。

## 2 影响 RTK 作业精度的因素分析

RTK 技术的关键在于数据处理和数据传输技术,主要有三个方面:一是求解起始的整周模糊度(初始化);二是基准站与流动站间的数据传输;三是合适的坐标转换参数。在实际作业中,还有一些其他因素也会影响 RTK 的作业精度,需要作具体分析。

### 2.1 整周模糊度确定

RTK 确定整周模糊度,目前应用最多的是 OTF 算法。OTF 算法已经能在几秒时间内实现整周模糊度的快速准确求解,较好地解决了 GPS 信号失锁后的快速重新初始化。

要确定整周模糊度,必须有适合的 PDOP 值。实际作业时会有这样的情况:基准站和流动站能同时跟踪 4 颗以上卫星,无线电接收良好,但初始化时间较长。原因是有的卫星高度角低,且极不稳定,容易失锁,这样就造成了卫星数目虽多,但 PDOP 值很大,且信噪比低。PDOP 值越小,解算模糊度的速度越快、越可靠,一般 RTK 测量中 PDOP 值应不大于 6。另外,基准站与流动站的距离越近,求得的固定解越稳定,精度也越高。

### 2.2 数据链通信传输

RTK 采用超短波进行差分数据传送,这个波段主要是超高频 UHF 波和甚高频 VHF 波,UHF 波长为 0.1~1m,VHF 波长为 1~10m。UHF 的波长短,因此 UHF 的天线长度比 VHF 天线更短,发射机天线更便于安装,小巧的天线便于野外作业,所以当前的 RTK 通信主要采用 UHF 波。

UHF 波传播的方式主要是空间波,即直射波、折射波、散射波以及它们的合成波。其穿透性强,直线传播性强,但易受障碍物、地形和地球曲率的影响。如果采用 9600 波特率来传送数据,每发送一组数据(假设有 8 颗卫星时)要占用 0.7s 左右的时间(发送时间的长短随卫星的多少而变化),因此基准站一般每秒传送一组 RTK 改正数据。理想的传送距离应为  $D = 4.24 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ ,式中  $h_1$  和  $h_2$  分别为基准站和流动站电台的天线高(单位为 m), $D$  为数据链覆盖范围的半径(单位为 km),这是无障碍物遮挡和无电磁波干扰的理想条件下的覆盖范围。

RTK 作业时,数据传输的传播条件比较复杂,这是由在运动中进行无线通讯这一方式本身决定的。要在这样的传播条件下保持可以接收的传输质量,必须采用各种措施来抵消引起 UHF 波衰减的不利影响。为了增强通信能力,主要可采取下列解决办法:①把 RTK 的基准站布设在 RTK 有

效测区中央最高的控制点上;②提高基准站和流动站天线的架设高度;③使用高增益天线及高灵敏度接收机;④缩短各点到基准站的距离,使其能满足“电磁波通视”;⑤在地形、地物遮挡时,另增设中继站等。

总之,最佳通信系统是最佳发射机、最佳接收机和最佳通信路径的有机组合,研究 RTK 数据链的性能必须三者综合考虑,才能将 RTK 数据传输性能设置到最佳状态。

### 2.3 坐标转换参数求定

WGS-84 坐标系到地方坐标系的转换参数问题是 RTK 流动站实现实时提供坐标成果的一个重要环节,坐标转换参数的确定误差是 RTK 作业的主要误差源之一。选择合适的坐标转换模型,求得高精度的转换参数至关重要。

求解转换参数,常用七参数法,而坐标转换的精度取决于已知参考点和待测点的几何关系。七参数法的优点在于能够保持 GPS 测量的计算精度,只要地方坐标足够精密,公共点的分布合理,不管区域的大小都能适用。

分析转换模型可以看出,3 个旋转参数、3 个平移参数和尺度参数之间存在着很强的相关性,这会导致各参数之间不易分离,作用相互转换。一般应根据测区大小决定是采用三参数(只考虑坐标平移)还是七参数模型。七参数模型需要不少于 3 个已知公共点,三参数模型只需要 1 个已知公共点,当条件不够时,可以采用三参数求解。由于地球动力学的原因,受 ITRF 制约的 WGS-84 坐标系是不断变化的,工作时期不同,同一测区的转换参数也要根据最新的坐标成果求解。

通过以上分析,求坐标转换参数时必须顾及:①已知公共点最好选在测区四周及中心,均匀分布,能有效地控制测区内的测量精度;②坐标转换参数的精度与选用的已知公共点的坐标精度密切相关,所以已知点的 WGS-84 坐标和地方坐标都需要有较高的精度;③为检校转换参数的精度和正确性,还应选用几个已知点不参与计算,用于检核。

### 2.4 基准站精度和作业环境

由 RTK 的工作原理可知,如果基准站的坐标精度较低,流动站得到的三维坐标都会带有系统偏差。因此,基准站坐标具有较高的精度非常重要。第一次设置基准站,应联测一个已知点进行检核,联测的已知点尽量采用已建成的国家高等级 GPS 点、三角点或在一个控制网内经过统一平差的 GPS 点。如果没有已知点可联测,基准站必须先进行单点定位,测定 WGS-84 坐标一般取 10min 以上的观测数据。

选择基准站时,应考虑影响 GPS 测量的环境因素,避免多路径效应影响,基准站的选择要合适:①周围没有明显的障碍物;②要远离大功率无线电发射台、变电站、飞机场、高压线等无线电干扰源,以避免对 GPS 信号的干扰影响;③远离大面积水域和有平整表面的高大建筑物,防止 GPS 信号的多路径效应影响;④附近充电比较方便,以确保基准站连续用电的特殊需要。

### 2.5 人为因素

测量员作业的熟练程度也会影响 RTK 的作业精度。在作业时,如果屏幕显示不是固定解就记录数据,会使流动

站的精度很低,甚至出现错误;如果接收机天线未保持垂直,测设的成果就不可取,人为地降低了流动站坐标精度;如果电瓶电量不足,也会降低流动站测设的坐标的精度和可靠性。

为提高 RTK 测设精度,测量员应根据卫星星历预报,选择几何图形强度因子较小、卫星数量较多且分布较好的时段进行测设;适当延长在每个流动站上的观测时间,以确保测出的数据是固定解,并且将流动站天线尽可能保持垂直。

## 2.6 太阳黑子活动

电离层是由太阳放射的高能辐射(主要是紫外线)使地球上空的空气电离而形成的,因此电离层受太阳、昼夜和四季等变化影响很大,尤其是太阳黑子活动周期的影响,太阳黑子活动以 11 年为一个周期。

电离层活动直接取决于太阳黑子的数量,太阳黑子活动高峰期,GPS 测量的电离层误差在太阳黑子爆发时,其影响可达 50ppm,所以在太阳黑子活动高峰期最好不要进行 RTK 测量。例如,2000 年 6 月 6 日的太阳黑子猛烈爆炸,导致太阳风暴以 833m/s 的速度冲击地球磁场,使电子含量显著增大,且持续了一个星期,在这段时间内的 RTK 测量精度明显降低。

大量的试验和研究表明,在卫星信号无遮挡地区,视野中卫星数量足够多,RTK 整周模糊度解算速度快;在城市高楼林立、树木密集的高遮挡地区,视野中卫星数量不够多,会导致 RTK 整周模糊度解算速度慢,甚至无法获得固定解。在楼房密集区卫星遮挡严重,流动站只能接收到 4 颗或 4 颗以下的卫星,此时没有固定解,可以将流动站移到周围空旷的地方得到固定解,然后再慢慢移动到观测点上,一般情况能获得固定解。在大面积玻璃建筑物附近测量时,定位误差相对较大,主要是多路径效应影响明显,可以通过在天线下配置抑径板减弱多路径影响,或加入改正模型消除多路径误差提高观测精度。

## 3 RTK 测量工程应用

常规的 GPS 测量方法,如静态、快速静态、动态测量都需要事后进行解算才能得到测量结果和相应的精度,而 RTK 是能够在野外实时得到厘米级定位精度的测量方法,它采用了载波相位动态实时差分方法。RTK 的出现为各种控制测量、地形测图、工程放样带来了新变革,极大地提高了外业作业效率。RTK 定位技术可广泛用于以下几个方面。

### 3.1 中等精度控制测量

传统的大地测量、工程控制测量采用三角网、导线网方法来施测,不仅费工费时,要求点间通视,而且精度分布不均匀,在外业测量中也不知精度如何。采用常规的 GPS 静态测量、快速静态、伪动态方法,虽然无需测站之间通视,但在外业测设过程中同样也不能实时知道定位精度。测设完成后,再进行内业处理,如果此时发现精度不合要求,就必须返测。

而采用 RTK 进行控制测量,能够实时知道定位结果和定位精度,如果点位精度满足要求,用户就可以停止观测,这样可以大大提高作业效率。如果将 RTK 用于公路控制测量、电子线路控制测量、水利工程控制测量、大地测量,则不仅可以大大减少劳动强度、节省费用,而且极大地提高工作效率,确定 1 个控制点在几分钟甚至于几秒钟内就可完成。

### 3.2 数字地形测绘

地形测图时,一般首先要在测区建立图根控制点,然后在图根控制点上架设全站仪或经纬仪配合小平板测图,现在发展到外业用全站仪和电子手簿配合地物编码,利用大比例尺测图软件来进行测图,甚至于发展到全数采电子平板测图,等等,都要求测站点与被测的周围地物地貌等碎部点之间通视,而且一般至少要求 3~4 人操作,拼图时一旦精度不合要求还得返测。

而采用 RTK 进行测图时,仅需 1 人背着仪器在要测的碎部点上工作 3s 左右,并同时输入特征编码,通过电子手簿或便携电脑记录,在点位精度合乎要求的情况下,把一个区域内的地形地物点位测完后,在野外或回到室内由专业测图软件就可以输出所要求的地形图。采用 RTK 技术测定点位不要求点间通视,仅需 1 人操作,便可完成测图工作,大大提高了测图的工作效率。配合电子手簿可以测设各种地形图,如普通地形图、铁路带状地形图、公路管线地形图等,配合测深仪可用于测设水库地形图、航海专用图等。

### 3.3 工程施工放样

工程放样要求通过一定方法用相应仪器把事先设计好的点位在实地标定出来。常规的放样方法很多,如经纬仪交会放样、全站仪边角放样等,用这些方法放样一个设计点位时,往往需要来回移动目标,而且要 2~3 人操作,同时在放样过程中还要求点间通视情况良好。这些方法在生产应用上效率不是很高,有时放样中遇到困难的情况还要借助于其他方法。

采用 RTK 放样时,仅需把设计好的点位坐标输入到电子手簿中,通过动态显示寻找放样点,既迅速又方便。由于 RTK 是通过坐标来直接放样的,因此精度很高也很均匀,另外只需 1 个人操作,大大提高了作业的效率。

## 4 小结

本文讨论了 GPS RTK 测量技术以及 RTK 作业精度的影响因素和减弱措施以及工程应用等问题。

(1) 基于 RTK 测量技术,全面分析了影响 RTK 作业精度的各种因素,并讨论用相应的方法来消除或减弱这些因素的影响,有效提高测量精度。

(2) RTK 采用了载波相位动态实时差分方法,能够在野外实时得到厘米级定位精度的测量方法,RTK 在控制测量、数字地形测图、工程放样中的应用,极大地提高了外业作业效率。

(下转第 19 页)

# GPS 空中三角测量应用于缅甸恩梅开江工程

浦绍超 李静清

(中国水电顾问集团公司昆明勘测设计研究院)

**摘要:** 数字摄影测量发展趋势是利用 GPS 辅助空中三角测量进行航空摄影,特别是在测区植被茂密、人烟稀少的地方具有较大优势,本文介绍应用这一原理进行国外大型水电项目规划测绘地形图的一些基本方法。

**关键词:** GPS 辅助空中三角测量 数字地形图 载波相位差分 摄影测量工作站

## GPS Aerotriangulation Application in Burma Enmeikai River Project

Pu Shaochao Li Jingqing

(Kunming Institute of Survey and Design, CHECC)

**Abstract:** The development trend of digital photogrammetry is aerial photography using GPS help to aerotriangulation. In surveying area with vegetation flourishing and human habitation sparsity this technique has advantages. This paper introduces some primary methods of applying the principle above to survey and map topographic graphic in huge water conservancy planning project in overseas.

**Key words:** GPS Assistant Aerotriangulation Digital Topographic Map Carrier Phase Differential Photogrammetry Station

## 1 工程概况

伊洛瓦底江(AYEYARWADDY)发源于中国青藏高原的察隅地区,流经云南省的河段称独龙江,在贡山县马库乡西面流入缅甸境内河段称恩梅开江(MeHka River),在密支那城(Myitkyina)以北 50km 处与迈立开江(MaliHka River)汇合后始称伊洛瓦底江,纵贯缅甸南北注入安达曼海。缅甸境内全长 2150km 左右,沿江有葡萄、密支那、曼德勒、实皆、仰光等城镇,集中了缅甸的大部分人口,为缅甸文化的发祥地。伊洛瓦底江干流特别是密支那下游河段河道平缓、开阔,土地广袤、肥沃,不具备水电开发条件,水力资源主要集中在密支那市上游河段。

恩梅开江从中缅边境算起全长约 600km,集中落差约 1000m;河道平均比降约 0.17%,中缅边境处集水面积约 4265km<sup>2</sup>,其多年平均流量约 270m<sup>3</sup>/s;汇口处集水面积约 24054km<sup>2</sup>,其多年平均流量约 1560m<sup>3</sup>/s。经初步估算,恩梅开江干流河段可开发的水电资源装机容量约 12000MW。

由于该地区无 1:10000 比例尺地形图,1:50000 比例尺地形图也尚未完成,根据水力发电规划工作的需要必须测绘 1:10000 比例尺地形图,为完成该项工作,需采用航空摄影测量的方式。

## 2 GPS 辅助航空航摄测量

### 2.1 基本原理

GPS 辅助空中三角测量是利用安装于飞机上与航摄仪相连的和设在地面上一个或多个基准站点至少两台 GPS 信

号接收机同步而连续地观测 GPS 卫星信号,同时获取航空航摄瞬间航摄仪快门开启脉冲,通过 GPS 载波相位测量差分定位技术离线数据后处理获取航摄仪曝光时刻摄站的三维坐标,然后将其视为附加观测值引入摄影测量区域网平差中,经采用统一的数学模型和算法以整体确定物方点位置和像片方位元素。顾及运动载体的机动加速度和周跳后,基于载波相位观测量的动态 GPS 定位数学模型,其状态方程为: $X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + B_k b + \Gamma_{k-1} W_{k-1}$ 。观测方程为: $Y_k = H_k X_k + D_k d + V_k$ 。

### 2.2 航空摄影仪器设备

采用美国赛斯纳公司(Cessna)的奖状(Citation) II 喷气飞机。徕卡 RC30( $f=152.845\text{mm}$ )航空摄影仪,其分辨率平均为线对 114/mm,镜头径向畸变最大为 0.005mm,底片压平精度为 0.005mm,滤波器为 525 nm,美国柯达黑色胶卷(2402)以及包括 CCNS4 飞行导航管理系统,IMU(Inertial Measurement Unit)高精度姿态测量系统,将它与航摄仪紧密固连,能直接测定航摄仪的姿态参数,WinMP 航摄任务规划设计软件,IMU 和 DGPS 数据后处理软件等设备。

航空摄影飞机上安装阿斯泰克 Z-12 GPS 双频接收机,GPS 接收机天线置于机舱外顶,卫星截止高度角设置为 5°,数据采样间隔小于或等于 1s。IMU 与 GPS 天线位置关系为  $x = -0.050\text{m}$ 、 $y = -0.080\text{m}$ 、 $z = -0.930\text{m}$ ,IMU 与 Camera 位置关系为  $x = +0.000\text{m}$ 、 $y = +0.290\text{m}$ 、 $z = +0.380\text{m}$ ,数据记录容量 85M。

参考基准站位于密支那一座旅馆屋顶上,距空军基地约 11km,其坐标由缅甸国家首级控制网测定,采用阿斯泰克 Z-12 GPS 双频接收机,卫星截止高度角设置为 3°,采样间隔为 1s,数据记录容量 20M,其航摄资料技术参数如表 1 所示。