

青岛海湾大桥首级控制网 高精度 GPS 数据处理

曾旭平¹, 刘元良², 杨晓滨¹

(1. 中交公路规划设计院 北京市 100010; 2. 青岛海湾大桥工程项目建设办公室 青岛市 266108)

摘 要: 青岛海湾大桥首级施工平面控制网采用 GPS 接收机、DI2002 等仪器观测, GPS 数据采用先进的 GPS 科研软件 GAMIT 计算, 并在高精度工程控制网中将常规测距数据与 GPS 数据联合平差计算, 处理手段上有所创新, 控制网各项精度指标超过规定的要求。

关键词: GPS 平面控制网; GPS 数据处理; 联合平差

1 青岛海湾大桥控制网布设概况

青岛海湾大桥(北桥位)位于我国黄海中部, 胶东半岛南部的胶州湾, 地处我国著名的对外贸易良港青岛市, 是青岛市道路网络布局中胶州湾东西岸跨海通道的重要组成部分, 也是山东省“五纵四横一环”公路网主框架的重要组成部分。

大桥首级控制网是整个工程的空间及平面控制基准, 是大桥设计、施工和营运期间监测的基准, 是开工建设的必备前提条件, 其成果的精度和准确性

将关系到大桥建设的成败, 也是大桥初步设计阶段的一项重要工作。

大桥首级平面控制网作为跨海大桥的专用控制网, 按优于公路一级 GPS 网建立, 共计布设 15 点, 青岛、红岛、黄岛三岸各布设 5 点。点位地质条件良好, 便于保存, 既能满足 GPS 观测的需要, 又能满足常规测量、施工放样和未来变形监测的需要, 每个点至少与网中其他两点通视。控制网布设如图 1 所示。主要采用 GPS 接收机、DI2002 测距仪观测。

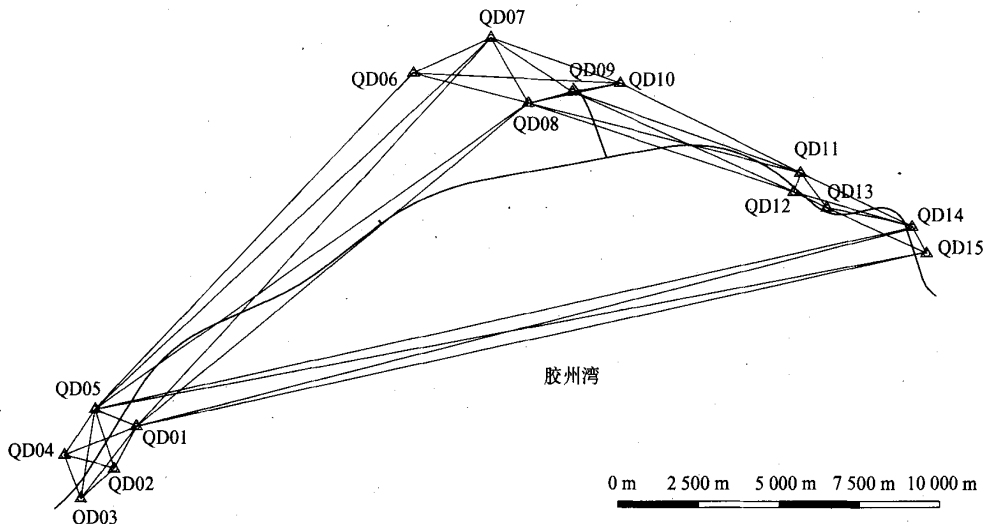


图 1 青岛海湾大桥(北桥位)首级平面控制网示意

2 首级平面控制网观测

GPS 共观测 18 点,其中大桥首级控制网点 15 点,联测全球 GPS 永久跟踪站(IGS)3 点,另外为了路桥的顺利连接,又连测了 3 个已知青岛 80 坐标系已知点。

为了保证首级网精度,观测按优于公路一级 GPS 网(超过 10 km 长的基线观测要求同国家 B 级网)的精度要求施测。GPS 控制网同步图形的连接采用边连接和图形连接的方式进行作业。控制网重复设站率不小于 2,网中每点至少有 3 条独立基线与之相连。每时段观测 2 h。为了提高长边的基线解算精度和可靠性,对涉及长边的观测时段延长了观测时间,每时段观测 12 h,共计 3 时段(其中 1 时段为夜间观测),整个控制网共计观测了 10 个时段。

另外,为了提高首级控制网的精度,采用 DI2002 测距仪加测 11 条边。

3 基线处理

3.1 基线解算软件

基线处理软件采用美国麻省理工学院(MIT)和 Scripps 研究所(SIO)共同研制的 GAMIT (UNIX Ver 10.1 版本)软件。该软件采用双差观测值解算,可以确定地面站的三维坐标和对空中飞行物定轨。作为国际同行所公认的高精度 GPS 数据处理软件,GAMIT 软件近年来在国家高精度空间基准框架网建立及维持中国地壳运动观测网络、省级大地水准面精化,以及精密工程测量等重大工程项目中得到了较为广泛的应用。在利用精密星历的情况下,基线解的相对精度能够达到 10^{-9} 左右,是世界上最优秀的 GPS 后处理软件之一。我国 A、B 级 GPS 网的基线解算是采用该软件进行的。

与常用的厂商随机软件相比,该软件在高精度 GPS 基线处理方面具有明显的优势,通过软件可以顾及如下改正:

- (1)卫星钟差的模型改正;
- (2)接收机钟差的模型改正;
- (3)电离层折射影响;
- (4)对流层折射的模型及折射量偏差参数的求解;
- (5)卫星和接收机天线相位中心改正;
- (6)测站位置的潮汐改正;
- (7)卫星轨道改进中使用的力模型,求解卫星轨道初值和光压参数;
- (8)截止高度角;
- (9)历元间隔;

(10)卫星轨道误差。

3.2 GPS 卫星星历的选择

卫星轨道的精度是影响 GPS 基线解算精度的重要因素之一,其对基线的影响可以较为精确地用下式给出:

$$\frac{|\Delta r|}{10|r|} < \frac{|\Delta b|}{|b|} < \frac{|\Delta r|}{4|r|} \quad (1)$$

式中: $|\Delta r|$ 为卫星轨道的误差; r 为卫星至测站的位置矢量; $|\Delta b|$ 为基线矢量的误差; b 为两站之间基线矢量。

设 $r=22\ 000\text{ km}$, $b=100\text{ km}$, 如 $|\Delta r|=20\text{ m}$, 则星历误差对基线解算在最不利的情况下,影响为 2.2 cm 。由此可见,提高卫星轨道的精度是保证 GPS 相对定位精度的关键之一。

GPS 基线解算,采用 IGS 最终精密星历,其轨道精度达到 5 cm 。在 GPS 基线边长为 100 km 的情况下,星历对基线解算在最不利的影响也不超过 0.1 mm 。因此,在本控制网的数据处理中,星历对基线解算的影响可以忽略。

3.3 坐标框架与历元

在 GPS 精密相对定位数据处理中,定位的基准是由卫星星历和基准站坐标共同给出的。基线解算时,要求地面基准站坐标的框架及历元与卫星星历的框架及历元保持一致性。本控制网基线处理采用的框架与历元为观测期间 IGS 精密星历所对应的框架和瞬时历元为 ITRF2000 Epoch 2005.1753。

3.4 高精度地面基准的引进

GPS 基线解算中,起算点(基准站)坐标的精度将影响基线的精度。起算点对基线解算的最大影响可以用下式表示:

$$\delta s = 0.60 \times 10^{-4} \times D \times \delta X_1 \quad (2)$$

式中: δs 为起算点坐标精度对基线的影响; D 为基线的长度; δX_1 为起算坐标的误差。

令起算坐标误差为 20 cm , 如果基线的长度为 100 km , 则起算坐标对其影响为 1.2 mm , 而 GPS 单点定位所得坐标的精度很差,大约在 20 m 左右,其最大影响量为 12 cm , 因此,单点定位结果不能作为起算点。由此可见,很有必要引进高精度的 GPS 基准点。

为了获得高精度的 GPS 坐标,引入全球永久跟踪站作为 GPS 控制网的基准,选取的跟踪站为:北京(BJFS)、上海(SHAO)、韩国釜山(SUWN)三个 GPS 跟踪站。

首先将控制网中部点 QD08 与国际 GPS 永久跟

踪站即 IGS 站联测,不仅可以为首级网基线解算提供基准,还可以将首级网与全球高等级 GPS 网联起来形成统一的系统,同时也能为下一步大桥形变监测提供基准服务。

3.5 相关数据文件的获取

GAMIT 基线处理需要准备 LUNTAB、SOLTAB、NUTABL、LEAP.SEC 以及 UT1、POLE 等文件,可以从 IGS 网站下载得到。

Lfile 文件根据跟踪站已知坐标和 GPS 商用软件 TGO 计算得到的坐标(本控制网中各点)转换形成。其中,跟踪站坐标为从 IGS 组织公布的精确后处理计算结果,将各跟踪站 0630、0640 及 0670 三个时段的不同坐标值取平均数后,作为其起始坐标。

Station.info 文件则根据各时段的点位观测时间、天线高以及仪器、天线类型、天线量取方式等信息编辑得到。

3.6 主要参数设定

Sittbl 表中,三个跟踪站的地心纬度 N 、经度 L ,松弛量设定为 0.05 m,矢径 R 松弛量设定为 0.10 m;其余点各松弛量均设定为 1.000 m。

Sestbl 表中,观测值选项(Choice of observable)计算 12 h 观测时段(联测跟踪站)设定为 LC_HELP;计算 2 h 观测时段设定为 L1_ONLY;试验选项(Choice of Experiment)设定为 BASELINE,其余主要选项采用软件推荐的缺省值。

卫星截止高度角为 15° ,历元间隔为 15 s;且不考虑卫星轨道误差,即固定 IGS 轨道。

3.7 基线解结果

每个观测时段的 GAMIT 基线解结果为对应的 O 文件(Ofile),本控制网基线解结果包括 O 文件 10 个(每时段对应一个)。GAMIT 基线解算为多基线方式,每时段处理得到的基线数为 $n \times (n-1)/2$ 条(n 为同步观测的测站数)。

3.8 同步图形检核

由于 GAMIT 软件采用网解的方式处理基线,其同步环闭合差在基线解算时已经进行了分配,即基线的同步环闭合差应恒为零,故同步环检核无实际意义,因此,对于 GAMIT 软件基线解的同步环检核,可以把时段基线精度指标 nrms 值作为同步环质量好坏的一个指标,一般要求 nrms 值小于 0.5,不能大于 1.0,小于 0.35 为优。本网共计算了 10 个同步图形,其中有 4 个 nrms 值小于 0.3,4 个 nrms 值介于 0.3~0.45,大于 0.45 的 2 个,最大值为 0.48,见表 1。

表 1 GAMIT 基线解算同步环精度统计

时段号	先验值	后验值
1	Prefit nrms: 22.6	Postfit nrms: 0.193
2	Prefit nrms: 40.1	Postfit nrms: 0.156
3	Prefit nrms: 29.8	Postfit nrms: 0.322
4	Prefit nrms: 34.3	Postfit nrms: 0.453
5	Prefit nrms: 39.4	Postfit nrms: 0.202
6	Prefit nrms: 31.4	Postfit nrms: 0.481
7	Prefit nrms: 15.6	Postfit nrms: 0.198
8	Prefit nrms: 28.3	Postfit nrms: 0.359
9	Prefit nrms: 35.3	Postfit nrms: 0.415
10	Prefit nrms: 28.7	Postfit nrms: 0.372

另外还对 GPS 基线的重复基线、异步环等进行了检核,均满足相应规范及设计要求,这说明 GPS 网的整体外业观测质量较高,可用于 GPS 网的平差。

4 三维约束平差

三维约束平差的主要目的:一是进行粗差分析,以发现观测量中的粗差并消除其影响;二是调整观测量的协方差分量因子,使其与实际精度相匹配;三是对整体网的内部精度进行检验和评估。

首先将北京(BJFS)、上海(SHAO)、釜山(SUWN)、QD08 组成的异步图形,以北京站为已知点进行平差,分别求出上海(SHAO)、釜山(SUWN)、QD08 等 3 点在 ITRF2000 下的坐标值。

通过比较发现:上海(SHAO)、釜山(SUWN)站的计算坐标与 IGS 提供的已知坐标值之差在 4 mm 之内,而上海(SHAO)站为全球 IGS 核心站,其坐标精度应在 5 cm 之内,从而证明控制网点 QD08 的 ITRF 坐标精度也在 5 cm 之内。然后将 QD08 作为已知点,对青岛海湾大桥(北桥位)首级控制网进行约束平差,求出整个控制网点在 ITRF2000 EPOCH2005.1753 下的坐标成果。

三维约束平差点位中误差均介于 ± 3.4 mm~ ± 4.6 mm 之间。由此可见,青岛海湾大桥(北桥位)首级控制网的整体精度较高,各点的地心坐标绝对精度均在 5 cm 之内。

5 二维约束平差

青岛海湾大桥(北桥位)首级控制网的 3 套平面成果平差软件均为 Power ADJ4.0 软件,不过在与

地面数据进行联合平差中,对原版本中的缺陷进行了改进,使该工程网平差能顺利进行。DI2002 测距边在参与平差前,进行了投影面改化、高斯改化,使之能与相应坐标系统相匹配。

青岛 80 坐标系与 1980 西安坐标系只存在坐标平移关系,其他系统定义均相同。将大桥控制网与青岛 80 坐标系的二等三角点凤山(CFSH)、水清沟(CSQJ)、烟台岭(CYTL)进行连测,共选取 57 条独立基线,在 1980 西安坐标系下进行平差,然后将西安坐标系下坐标成果进行数学关系转换,从而求出首级网的青岛 80 坐标系成果。

首级平面控制网的施工独立坐标系是大桥施工放样的主要坐标系,要严格保证坐标系的控制点间关系与实际空间尺度一致。平差时,取测区的中央子午线为 GPS 基线投影参考坐标轴,以 QD15、QD01 两点为起算点,并假定 QD15(10 000,10 000)为已知起算点,QD15~QD01 方位角为 $0^{\circ}00'00''$,同时选取所测的 11 条 DI2002 测距边纳入全网进行平差求得,边长投影到 1985 国家高程 12 m 及 50 m 的平面上。

6 精度统计

现将青岛海湾大桥(北桥位)首级控制网在在施工独立坐标系(50 m 投影面)下的精度统计情况分别列出,见表 2、表 3 和图 2。

表 2 边长相对中误差区间个数统计

1/15 万以下	1/15 万~ 1/30 万	1/30 万~ 1/90 万	1/90 万~ 1/200 万	<1/200 万
0	0	12 个	1 个	32 个

表 3 首级网点位坐标分量中误差统计 mm

项目	最大	最小	平均
x 方向	3.6	1.2	3.0
y 方向	2.3	0.0	1.9
点位中误差	4.2	1.2	3.2

平差结果表明,首级网的平均相对精度为 1/136 万。最弱边(QD11 至 QD12)最差基线相对误差为 1/31.6 万,其精度优于设计报告中要求的 1/15 万。

图 2 所示,最弱点为 QD03,其水平精度为 ± 4.2 mm,其精度优于设计报告中要求的 ± 8.0 mm。由此可知该首级平面控制网的点位精度达到了技术设计报告的要求。

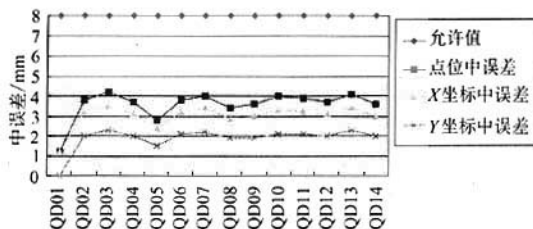


图 2 点位坐标中误差区间统计

7 结论

青岛海湾大桥(北桥位)首级控制网 GPS 平面控制测量,有效地将常规测量数据与 GPS 数据联合平差计算,并在平差软件中加入方差检验,合理定出不同观测值的权,克服了 GPS 数据与常规测量数据的互不兼容性。

数据处理手段上有创新。基线解算及三维平差中纳入 IGS 全球 GPS 跟踪站的数据,采用 IGS 最终精密星历,利用 GAMIT 软件解算基线,提高了成果的可靠性及各项精度指标。

参考文献:

- [1] 中交公路规划设计院. 青岛海湾大桥(北桥位)首级控制网技术设计报告[Z]. 2005.
- [2] 李毓麟. 高精度静态 GPS 定位技术研究论文集[C]. 北京:测绘出版社,1996.
- [3] 刘经南,刘大杰,等. 卫星网与地面网联合平差的理论与应用[J]. 武汉测绘科技大学学报,1987,(4).
- [4] 施闯. 大规模、高精度 GPS 网平差处理与分析理论及其应用[D]. 武汉测绘科技大学,1998.
- [5] 李德仁. 误差处理和可靠性理论[M]. 北京:测绘出版社,1988.
- [6] 施云江,曾旭平. GPS 网平差观测量选取的理论分析[J]. 地理信息空间,2004,2(1).
- [7] Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software. Scripps Institution of Oceanography University of California at San Diego. Release 10.0-December, 2000.