

3S Jishu Yu Shuzi Jiaotong

3S技术与数字交通

——第三届全国交通工程测量学术研讨会论文集

杨志强 王腾军 高成发 主编



西安地图出版社

3S 技术与数字交通

——第三届全国交通工程测量学术研讨会论文集

杨志强 王腾军 高成发 主编

西安地图出版社

图书在版编目(CIP)数据

3S技术与数字交通:第三届全国交通工程测量学术研讨会论文集/杨志强,王腾军,高成发主编.—西安:西安地图出版社,2007.10
ISBN 978-7-80748-179-9

I. 3… II. ①杨… ②王… ③高… III. ①遥感技术—应用—交通工程—工程测量—学术会议—文集②地理信息系统—应用—交通工程—工程测量—学术会议—文集③全球定位系统(GPS)—应用—交通工程—工程测量—学术会议—文集
IV. U412.2-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第155204号

【内 容 简 介】

在交通勘察设计、工程施工及营运管理过程中,测绘工作起着十分重要的先行和基础作用。目前随着3S技术(GPS、GIS、RS)所代表的现代空间信息技术在交通工程中的应用,交通工程测量的高新技术与科技含量越来越高。为促进我国交通工程建设与质量管理的全面提高,加强交通工程领域科技工作者的学术交流,推进新技术、新方法的深入广泛应用,中国测绘学会工程测量分会、全国交通工程测量学术研究会联合召开了这次以3S技术与数字交通为主题的全国学术研讨会。

本文集收编了这次会议交流的主要论文72篇,内容涉及GPS/GNSS在交通中的应用;智能交通(ITS)与3S集成应用;高速公路、高速铁路、长大隧道建设中的现代测量技术;地理信息系统在交通工程中的应用最新进展;精密交通工程测量技术;同时还报道了最新研制的高精度陀螺全站仪、无渣轨道检测车等交通工程测量软硬件。基本反映了当前交通工程测量领域的最新进展与发展方向。

本书内容丰富广泛、理论联系实际、具有较高的学术和实用价值。适合测绘、交通、规划、城建等领域的设计、教学、科研工作者以及高等院校师生阅读参考。

3S技术与数字交通
——第三届全国交通工程测量学术研讨会论文集
杨志强 王腾军 高成发 主编
西安地图出版社出版发行

(西安市友谊东路334号 邮政编码710054)

新华书店经销 陕西地质印刷厂印刷

880毫米×1230毫米 1/16开本 20印张 460千字

2007年10月第1版 2007年10月第1次印刷

印数001~500

ISBN 978-7-80748-179-9

定价:60.00元

目 录

高速公路路基沉降预测的神经网络方法研究.....	胡伍生 方磊 (1)
隧道 GPS 网数据处理软件 TGPPSW 7.0 的研究开发与应用.....	姚连璧 姚平 (5)
卫星轨道标准化及其算法实现.....	陈春花 高成发 (12)
轨道交通工程测量中的若干技术问题研究.....	花向红 许承权 蔡华 邹进贵 (16)
基于 ArcGIS 网络模型的最优路径算法分析与实现.....	刘建川 李永树 (21)
GAT-08 高精度陀螺全站仪研制及其在长江隧道贯通测量中的应用.....	杨志强 李光春 石震 (26)
荆州市公路影像信息系统的设计与实现.....	范千 王新洲 花向红 孙燕 (31)
短期交通流预测的神经网络方法探讨.....	胡伍生 (35)
一种新的滤波方法及其在地铁变形分析中的应用.....	余春平 李广云 卫建东 贺磊 (40)
基于 GPS/GIS 的交通视频监控数据库的设计.....	杨晓梅 沙月进 (46)
线路测量 RTK 基准站误差影响分析与对策.....	周立 蒋廷臣 王继刚 (51)
CTL2006A 型无磁轨道测量系统开发与应用研究.....	何英明 杨志强 龚云 杨建华 (57)
大跨径桥梁挠度测量新方法研究.....	余加勇 朱建军 邹峥嵘 张坤 (60)
高速公路再生工程中的测量问题.....	姚连璧 郭永锋 (64)
公路运输信息系统的设计与实现.....	杨久东 张云鹏 吴风华 (69)
武汉市交通监控管理信息系统的设计与实现.....	许承权 范千 花向红 陈志辉 (74)
GPS 用于滑坡监测中的对流层延迟影响分析.....	薛志宏 余春平 卫建东 (77)
高速公路某软基路段运营期沉降分析.....	胡晓晓 胡伍生 方磊 杨小青 (81)
GPS 在约旦 18 号海堤变形监测中的应用.....	冒爱泉 杨建 (84)
公路施工测量计算机辅助系统设计.....	闻道秋 (88)
基于 Google Earth 的控制点位置的初步确定探讨.....	王新志 王兴国 石 震 钦伟瑾 (93)
WGS-84 坐标系与地方局部坐标系的转换方法.....	陈新 薛志宏 (97)
基于 GIS 的边防管控信息系统研究与实现.....	王涛 郑丽 王新志 曹为刚 (101)
TMS 隧道测量技术在 Gotthard 隧道工程中的应用.....	贺磊 肖书安 (105)
盾构隧道断面测量数据处理方法研究.....	王维 高俊强 郭熙娟 闫玮 (111)
GPS 技术在公路滑坡监测中的应用.....	王练柱 龚云 王随练 刘雪峰 (115)
基于 PDA 和全站仪的圆桩定位方法与实现.....	仲树明 姚连璧 (118)
智能交通系统(ITS)中 GPS 导航应用与发展思考.....	杨子仪 黄凯 张琛 (123)
基于 PDA 和全站仪的既有铁路线一体化勘测系统开发与应用.....	范百兴 黄远宏 (129)
利用 AutoCAD 对 DEM 进行任意形状裁剪的应用研究.....	杜海燕 吴吉贤 李志磊 王婧 (134)
手持式 GPS 接收机测试数据分析.....	胡伍生 杨骏 (137)
基于相关系数的最优组合预测模型在变形预报中的应用.....	王永弟 许承权 (141)
利用卫星测高数据反演海底地形的探讨.....	陈伟 王山成 杨海彦 (145)
框幅式遥感影像空间后方交会 C++ 实现.....	张震 方子岩 张环 (148)
基于原点向量不变性的已知点数据兼容性判别.....	生仁军 高成发 喻国荣 (155)
编程计算器配合全站仪在公路测量中的应用.....	陈黎阳 (158)

缓和曲线横断面方向的测设	吴清海	(162)
三次抛物线缓和曲线的计算	张秀梅 余时民 闻道秋	(164)
神经网络对 GPS RTK 测量结果的精度分析	胡奎 黎曦 胡伍生	(169)
青林公路路基施工变形监测	谢宏全 赵林 邱礼泉	(174)
GPS/INS 组合导航系统原理与应用分析	余春平 贺磊 靳志光	(178)
CASIO4X00、PC-E500 计算器编程在工程测量中的应用	邓居勇	(183)
GPS RTK 技术在纵横断面测量中的应用	韦积海 符永好	(189)
江苏内河航道数字化测量船及其软件应用	陈建	(192)
差分 VLBI 技术及其在 GEO 卫星定轨中的应用	杨海彦 陈伟 毕龙珠	(198)
交通工程中断面土方测量精度估算	李玉宝	(201)
GPS 辅助空中三角测量在酒泉、敦煌测区的应用	李丑荣 李兴梅	(205)
机载激光扫描对地定位及其在道路工程中的应用探讨	张志伟	(210)
MMS 技术在北京市道路普查中的应用	张明 杜明义	(216)
测绘专业开设载运工具导航课程的经验	喻国荣 高成发	(220)
基于 AutoCAD 的道路桥梁管理信息系统的解决方案	陈奇	(223)
移动道路测量系统在路政设施调查中的应用	刘忠贞 杜明义	(228)
基于 VRML 的虚拟校园漫游系统设计与实现	曹为刚 王涛	(231)
GPS 精密单点定位精度测试与分析	高成发 陈安京 陈默 王小辉	(234)
TMS 隧道测量技术解决隧道渐变施工难题	张学强	(239)
GPS 高程拟合转换正常高的应用研究	朱超	(244)
缓和曲线平行线性质和测设的探讨	郑心惠	(249)
高压线走向和高程的测量方法	陈彦辉	(254)
房产面积测量精度估算的研究	李玉宝	(257)
利用双频载波相位探测与修复周跳	房新玉 俞国荣 闻道秋	(261)
远离大陆的洋山港区变形观测技术探讨	纪成林 李睿 陈俊	(266)
浅析 3S 集成技术及其在智能交通系统中的应用	靳海亮	(274)
基于 CORS 的道路测量	朱学明	(278)
依据设计数据计算区域面积的精度分析	许立苑 李玉宝	(281)
仙桃汉江公路大桥主施工测量	邓居勇	(285)
遥感影像二维纠正与三维纠正研究	项仲贞 方子岩	(290)
道路中线解算的自动化实现	曹峰	(297)
浅谈如何做好厂区管线竣工测量	曾爱兰	(300)
一种数字地图精度检测方法	方子岩 郑天赐	(303)
多路径影响下 RTK 测量的精度检测与分析	黎曦 胡奎 胡伍生	(306)
空间分析内容体系述评	徐江华 赵胜	(311)
矩形法计算房产面积测量精度分析	姚彬彬 李玉宝	(316)

高速公路路基沉降预测的神经网络方法研究

胡伍生 方磊

(东南大学交通学院 江苏省南京市 210096)

摘要:本文介绍了BP神经网络算法的一些改进措施,这些措施可以提高BP算法的学习收敛速度和网络性能的稳定性。神经网络法预测路堤工后沉降的难点之一是模型构造的确定。本文利用高速公路路基沉降量实测资料直接建模,提出了一种预测路基沉降的神经网络模型。该模型结构新颖、独特,工程应用效果良好。根据某高速公路工程实例分析,采用本文提出的神经网络模型,可较为准确地预测大约5个月之后的路基沉降量,预测值与实测值吻合较好。

关键词:改进的BP神经网络 软土地基 沉降量

基金项目:江苏省测绘科研基金项目资助(JSCHKY200608)。

1 概述

软土在我国分布十分广泛,随着高速公路建设的发展,作为大型线状工程的高速公路穿越软土地区是不可避免的。在软土地基上修建高速公路,软土地基的沉降是一个核心问题,它几乎涉及了岩土体环境、地基处理方法、施工方案、工期等一系列问题的各个方面。如果路基沉降控制不好,会给高速公路建设的质量带来严重的影响。软土地基的沉降控制主要涉及两大方面的问题,即施工期的稳定控制和路基工后沉降的控制。国内外已提出了许多种软土路基沉降分析方法,各地在公路建设过程中也结合当地具体实际地质条件和公路特点给出了不少经验方法。其中因人工神经网络具有较强的非线性映射能力和学习能力,国内已有学者在利用该方法对高速公路路基工后沉降预测,取得了不少有价值的研究成果^{[1][2][3]},但还有很多问题需要进行深入研究。我们对这一课题也进行了探讨,主要涉及到BP神经网络模型的改进、工程实例中样本如何采集,相关软件的开发及在工程实例中的应用。其结果表明改进后的BP神经网络模型效果良好,对工程应用具有实用性。

2 BP神经网络的改进措施

人工神经网络技术目前已渗透到各个领域,由于其极强的解决复杂问题的能力,引起了众多领域科技人员的兴趣,在工程应用领域,BP网络模型应用最为广泛^{[4][5]}。但在工程应用中BP神经网络算法有两个缺点:一是收敛速度很慢,尽管采取一些加快学习速度的措施,但收敛速度还是慢,尤其是在学习误差 ε_0 很小时;二是网络性能不很稳定,初始权值对结果有很大影响,网络有时收敛,有时不收敛。因此采用改进措施,以克服BP算法上述两个缺点是非常有意义的。

2.1 加入动量项的全局学习速率自适应

神经网络带有动量项的加权调节公式为^[6]:

$$\Delta w(t+1) = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w} + \alpha \cdot \Delta w(t) \quad (1)$$

式中: η 为学习速率; α 为动量系数,一般取0.9左右。采用该方法后,我们发现收敛速度加快非常明显。

2.2 BP算法误差分级迭代法

根据神经网络理论和高速公路工后沉降的特点,作者提出了一种BP网络计算的改进算法:误差分级迭代法^[6]。误差分级迭代法的思路是:将给定的收敛控制参数“学习误差” ε_0 先进行分级。设将 ε_0 分为 n 级,分级公式为^{[4][5]}:

$$\varepsilon_i = 2^{n-i} \cdot \varepsilon_0 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

再依次取 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ (注: $\varepsilon_n = \varepsilon_0$) 作为收敛控制参数让网络对学习集样本进行学习训练。当第 n 级误差 ε_0 迭代收敛后, 则网络的学习过程就宣告结束。

3 工程实例分析

江苏省某沿江岸边的高速公路路线穿越河相、湖相冲积平原, 全长 135km, 经过地区广泛分布着不同厚度的软土层, 平均厚度为 5~6m, 最大可达 17.7m 之多, 且在某些地段软土埋藏较深, 工程性质较差。该工程 2000 年 11 月 8 日开工, 2004 年 8 月 16 日建成通车。目前已开通三年, 断面交通流量较大, 2005 年 4 月全线平均断面日交通量为 24501 辆。东南大学交通学院承接了该高速公路的沉降观测工作, 从 2001 年 2 月开始至今, 收集了大量的观测数据。

3.1 路堤沉降神经网络预测法

软基上的高速公路, 对控制其工后沉降有严格的要求。因此, 科学、合理、实时地预测路堤的工后沉降量, 以便采取适当的处理对策, 具有重要的现实意义。我们的基本思路是: 利用前期观测结果和相关资料作为训练样本让神经网络进行学习, 再根据施工计划, 预计未来的工程进展情况, 让训练好的神经网络来预测未来的沉降量, 预测值对后期的施工决策具有重要的参考价值。现以观测断面 K76+000 堆载预压段的实测数据为例加以说明, 该断面首次观测日期是 2002 年 3 月 21 日, 前 26 次沉降观测 (约 18 个月) 的实测数据见表 1。

表 1 沉降观测数据

序号	时段天数	时段填土高	时段沉降量	序号	时段天数	时段填土高	时段沉降量
1	13	0.22	5	14	18	0.40	14
2	16	0.56	8	15	13	0.00	4
3	18	0.69	10	16	60	0.00	18
4	11	0.40	4	17	35	0.10	10
5	15	0.09	2	18	16	0.00	12
6	30	0.42	16	19	12	0.00	11
7	13	0.00	6	20	16	0.00	9
8	17	0.14	6	21	13	0.10	8
9	17	0.00	11	22	14	0.00	10
10	14	0.00	7	23	14	0.00	9
11	16	0.07	12	24	50	0.15	28
12	15	0.10	10	25	61	0.10	16
13	15	0.27	9	26	63	0.00	10

路堤沉降与很多因素有关, 要构造精确的沉降预测模型难度很大。为了讨论方便, 同时也是为了使用方法更实用, 不妨假设:

$$y = f(t, p) \quad (3)$$

式中: y 为时段沉降量; t 为时段时间间隔; p 为时段荷载情况。

经过分析研究和大量试算, 样本构造如下:

$$y_3 = f(t_1, p_1, y_1, t_2, p_2, y_2, t_3, p_3)$$

$$y_4 = f(t_2, p_2, y_2, t_3, p_3, y_3, t_4, p_4)$$

依此类推,由此确定 BP 神经网络模型为三层结构:①输入层元素取 8,分别为:时段天数 t_{i-2} 、时段荷载 p_{i-2} 、时段沉降量 y_{i-2} 、 t_{i-1} 、 p_{i-1} 、 y_{i-1} 、 t_i 、 p_i ;②隐含层节点数取 20,其选取方法主要还是以经验为依据,并结合实例数据进行试算;③输出层元素取 1,为时段沉降量 y_i ,累计沉降量可通过对所有时段沉降量相加而得到。

3.2 结果分析

取表 1 中前 10 个数据(大约 6 个月的观测数据)可以构成 8 个学习样本, BP 网络对此进行训练学习。之后,再对后面的数据进行预测,预测结果见表 2。

序号	实测沉降量	预测沉降量	差值	序号	实测沉降量	预测沉降量	差值
11	12.0	10.9	1.1	19	11.0	4.3	6.7
12	10.0	9.2	0.8	20	9.0	8.9	0.1
13	9.0	10.0	-1.0	21	8.0	10.4	-2.4
14	14.0	11.9	2.1	22	10.0	8.2	1.8
15	4.0	3.9	0.1	23	9.0	7.8	1.2
16	18.0	19.5	-1.5	24	28.0	19.4	8.6
17	10.0	17.4	-7.4	25	16.0	18.4	-2.4
18	12.0	7.6	4.4	26	10.0	18.3	-8.3

通过对表 2 的分析可知,利用本文建立的神经网络方法对路基沉降量作短期预报(大约 5 个月)是完全可行的,且十分有效。但对较长期的预报值误差较大,这一结果也合乎逻辑。因此,虽然神经网络方法能有效地进行沉降量预报,但现场观测工作仍需继续进行。取表 1 中前 20 个数据构成 18 个学习样本, BP 网络对此进行训练学习之后,再对后面的数据进行预测,预测结果见表 3。与表 2 比较,预测结果有明显改善。

序号 (N)	实测沉降量 y_1 (mm)	预测沉降量 y_2 (mm)	差值 Δy (mm)
21	8.0	6.9	1.1
22	10.0	9.9	0.1
23	9.0	6.6	2.4
24	28.0	22.5	5.5
25	16.0	14.5	1.5
26	10.0	10.4	-0.4

4 结论

(1) 对 BP 算法采用一些改进措施,从其工程应用效果来看,这些改进措施提高了 BP 算法的学习收敛速度,提高了网络性能的稳定性。

(2) 采用人工神经网络方法预测软土地区高速公路路基的工后沉降量是可行的。利用路基沉降量实测资料,用神经网络 BP 算法可以较为准确地预测其 4~5 个月之后的沉降量,预测值与实测值吻合较好。

因此,提出的改进神经网络 BP 算法方法是可行的,且具有一定的预报精度,可信度较高,并且随着学习样本的不断补充,网络的预测精度和泛化能力还将进一步提高。

(3)虽然神经网络法预测路基的工后沉降已有人进行过研究,但合适的训练样本构造有一定的难度。我们提出的“训练样本”构造方法新颖、独特,且效果良好,具有一定的工程实用价值。

参考文献:

- [1]刘勇健.用人工神经网络预测高速公路软土地基的最终沉降[J].公路交通科技,2000,17(6):15-18
- [2]叶观宝,司明强,赵建忠,徐超.高速公路沉降预测的新方法[J].同济大学学报,2003,31(5):540-543
- [3]宋茂天,王振宝,王志亮.神经网络技术在路堤沉降预测中应用探讨[J].探矿工程,2004,(4):4-7
- [4]袁曾任.人工神经网络及其应用[M].北京:清华大学出版社,1999,1-273
- [5]胡伍生.神经网络理论及其工程应用[Z].南京:东南大学校内教材,2003,69-80
- [6]胡伍生,沙月进.神经网络 BP 算法的误差分级迭代法[J].东南大学学报,2003,33(3):376-378

第一作者简介:

胡伍生(1965-)男,博士,教授,东南大学交通学院测绘工程系,南京,210096。

隧道 GPS 网数据处理软件 TGPPSW 7.0 的研究开发与应用

姚连璧^{1, 2} 姚平^{1, 2}

(1 同济大学 上海市 200092; 2 现代工程测量国家测绘局重点实验室 上海市 200092)

摘要: 本文主要介绍了同济大学研制的 GPS 网平差软件的升级版 TGPPSW 7.0 版在理论与技术方面的特色, 软件采用的主要数学模型, 以及软件的主体结构与操作流程。该软件已在许多城市及工程 GPS 网(尤其是隧道、大型桥梁等狭长型 GPS 网)数据处理中得以成功应用, 收到了良好的效果。

关键词: GPS 网平差 TGPPSW 软件 坐标系 贯通误差

1 概述

TGPPSW 是同济大学测量与国土信息工程系自主研发的 GPS 网平差软件, 其主要功能是对含有地面起算数据和观测数据的 GPS 基线网进行三维严密平差, 同时还具有 GPS 基线向量数据的自动采集, 同步环、异步环闭合差的计算, 不同坐标系之间及不同坐标类型之间的坐标转换, 由 GPS 大地高进行正常高的拟合计算, 网图及误差椭圆的绘制, 计算成果的打印输出等功能。这一软件提供给不少单位用于实际生产, 取得了很好的成果和效益。在吸收了各用户单位的意见, 以及结合自身的体会和研究成果, 对该软件包先后进行了多次改进, 分别形成了不同版本。本次对 6.0 版本进行了升级, 主要改进了 6.0 版本在与国家坐标系或 WGS-84 坐标系具有较大方位差异的工程独立坐标系中网平差时存在的诸多问题, 增加了贯通误差计算及网型设计功能, 加入了大量的鼠标操作功能, 使人机交互更为方便。经过升级后的 7.0 版本对于 GPS 网平差的适用范围更广, 而且更适合于建立公路、铁路、隧道、大型桥梁等狭长型 GPS 控制网。

2 软件的特色

众所周知利用 GPS 建立控制网具有高效、高精度的特点, 然而利用 GPS 直接获得的结果属于 WGS-84 坐标系, 它与实际使用的地面网坐标系在定位定向上往往存在着不小的差异, 从而使利用 GPS 建立控制网必须解决怎样把 WGS-84 成果纳入到实际应用的地面网坐标系的问题, 这个问题也是 GPS 能否保持住原有高精度的关键。本软件的开发者们对地面网坐标系进行了深入的分析, 从而使软件在实际应用中具有更广泛的适用性。

工程上采用的坐标系分为国家坐标系和地方独立坐标系两类。地方独立坐标系又分为两种类型, 一种是在国家坐标系的基础上建立的; 另一种是根据实际工程的需要建立的。实际工程坐标系根据投影变形的不同又可分为两种类型, 一种是先以某椭球为基准进行平差(称为 E1 椭球平差), 然后高斯投影再进行二维旋转和平移而成; 另一种是先将椭球进行三维旋转, 然后平差(称为 E2 椭球平差)并高斯投影, 最后进行二维平移而成。(E1, E2 椭球平差具体请参见文献[1])。图 1 为各种地面网坐标系分类。

图 1 所列坐标系中国家坐标系和以国家坐标系为基础建立的地方独立坐标系所采用的参考椭球与 WGS-84 坐标系参考椭球在定向上差异很小, 其旋转参数是微量, 从而可以直接采用经典三维空间转换模型进行两坐标系间的转换。而对于实际工程坐标系往往与 WGS-84 存在较大的方位差异, 从而不能直接采用经典三维空间转换模型需进行特殊处理, TGPPSW 7.0 的最大特色就是除了能在前两种坐标系中进行三维约束平差外, 还能够很好地处理在这类坐标系中进行 GPS 三维约束平差的问题, 用户可根据工程坐

标系的两种不同建立方式选择采用不同的平差方式。

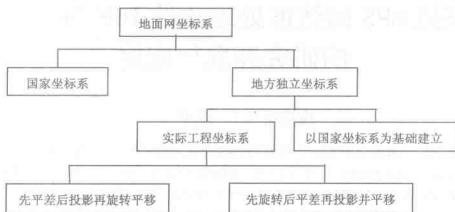


图1 地面网坐标系分类

特别是利用 E2 椭球平差的功能, 可以使建立诸如隧道、公路铁路、大型桥梁等狭长型 GPS 控制网更具有优势, 尤其当狭长控制网东西走向且达上百千米时有望利用该平差方法获得统一的坐标系。为便于施工测设, 如高等级公路工程中一般规定长度变形比例不得超过 $1/40000$, 而长度变形受两方面的影响: 一方面是从地面边长投影到椭球面的长度变形, 它与该边长的椭球面高程有关: 即 $\Delta S_1/S = H/R$, 一般来讲该项改正为负值, 此项变形可以通过改变投影面高程来减小, 具体可以通过建立区域性椭球使椭球面与投影面重合或接近来实现。另一方面是从椭球面投影到高斯面的改正, 它与距中央子午线的距离有关: $\Delta S_2/S = y_m^2/(2R^2)$, 该项改正为正值, 此项变形可以通过设置过测区的子午线为中央子午线来改善, 但当线路较长且为东西走向时此法也不能得到很好效果, 目前实践上对这种工程常常采用分带建立多个坐标系, 如在沈阳到山海关的高速公路工程中建立了多个 1 度带的高斯坐标系, 在各带边缘区域要给出相邻两带中的坐标, 然而在同一工程中采用多个坐标系给设计和施工建设带来许多不便。使用该软件可以首先建立 E2 椭球并设置中央子午线过线路两端的控制点, 这样就可以使线路控制点均匀分布在中央子午线两侧, 其 y 方向与中央子午线差距可控制在一两千米左右, 这对边长高斯投影的影响远小于 1 个 ppm 因而可忽略不计, 这样就可以建立统一的坐标系, 常规仪器所测的边长只需进行高程归化即可。在软件中实现时只要固定线路一端点以及到另一端点的大地方位角为 0° 进行约束平差即可。用此法建立的 GPS 控制网已经在多个隧道工程中得以成功应用。

TGPSSW 7.0 还具有贯通误差计算以及网型设计功能, 贯通误差的控制是隧道贯通的基础, 利用这两个功能可以事先进行隧道 GPS 网的设计并估算贯通误差, 为隧道 GPS 网的实测提供依据从而提高隧道的贯通精度。另外, 该软件还具有偏心观测改正功能以及利用 CAD 脚本语言可与 CAD 进行交互使得图形打印输出更具灵活性。

3 软件采用的主要数学模型

3.1 基线误差方程

软件采用的未知参数为点的三维空间坐标。考虑到两个空间直角坐标系之间的三维转换一般采用含有 7 个参数的布尔沙、莫洛金斯基和范式模型, 而对于基线来说可以采用坐标差转换模型, 其不涉及 3 个平移转换, 而可只采用 4 个转换参数。考虑了坐标转换的基线误差方程为:

$$\begin{bmatrix} V_{x_q} \\ V_{y_q} \\ V_{z_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ \Delta Z_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_l \\ \Delta Y_l \\ \Delta Z_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_q^0 \\ \Delta Y_q^0 \\ \Delta Z_q^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\Delta Z_q^0 & \Delta Y_q^0 \\ \Delta Z_q^0 & 0 & -\Delta X_q^0 \\ -\Delta Y_q^0 & \Delta X_q^0 & 0 \end{bmatrix} \delta u + R_{H1}^T \begin{bmatrix} \varepsilon_\eta \\ \varepsilon_\zeta \\ \varepsilon_\alpha \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta \tilde{X}_q - \Delta X_q^0 \\ \Delta \tilde{Y}_q - \Delta Y_q^0 \\ \Delta \tilde{Z}_q - \Delta Z_q^0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$R_{H1}^T = \begin{bmatrix} -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin L_0 & \cos B_0 \cos L_0 \\ -\sin B_0 \sin L_0 & \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 \\ \cos B_0 & 0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $(\delta X_j, \delta Y_j, \delta Z_j)$ 与 $(\delta X_i, \delta Y_i, \delta Z_i)$ 为地面网坐标系中的坐标改正数, $\delta\mu, \varepsilon_\eta, \varepsilon_\zeta, \varepsilon_\Delta$ 为两网的转换参数, 旋转参数 $\varepsilon_\eta, \varepsilon_\zeta, \varepsilon_\Delta$ 分别为绕地平平北方向旋转角, 绕地平平东方向旋转角和绕天顶方向旋转角。(地面观测值误差方程模型及约束条件模型具体参见文献[2]~[4])

以上基线模型严格意义上只适用点位在两个坐标系中均具有精确三维坐标的情况, 因为常规测量建立的地面网往往得不到准确的大地高, 通过高程异常加上水准高得到的大地高只有米级精度, 所以转换后的坐标精度也只有米级, 所以平时一般固定一个点的大地高, 其余已知点只固定大地经纬度。因此, 真正适用的基线误差方程为具有尺度和绕天顶方向旋转参数的简化模型(公式(1)中相应旋转参数中前两项取0)。本软件用的最多的就是这种简化模型。

对于实际工程坐标系而言往往为了工程的需要与 WGS-84 坐标系在绕某基准点天顶方向上存在较大的旋转(方位差异), 所以不能直接用简化的基线误差方程, 需在平差前减小两网的方位差异到某一微小量。本软件对于这种应用提供两种平差方式, 一种是利用 E1 椭球进行平差, 根据已知点在两坐标系中的平面坐标计算方位差异的近似值然后把已知坐标转到 E1 椭球进行平差, 平差后再把坐标转回到工程坐标系; 另一种是利用 E2 椭球进行平差, 即根据已知点计算两两坐标系的方位差异近似值, 然后把基线通过某一参考点的站心坐标系旋转到 E2 椭球然后进行平差。

E2 椭球平时基线旋转的数学模型为(具体参见文献[5]):

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{E2} = R_{H1}^T R_a R_{H1} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{84} \quad (3)$$

方差协方差阵旋转模型为:

$$(Q)_{E2} = R_{H1}^T R_a R_{H1} \cdot (Q)_{84} \cdot (R_{H1}^T R_a R_{H1})^T \quad (4)$$

式中: R_{H1}^T 与(2)式相同, 其中 B_0, L_0 为旋转参考点, 通常为坐标系的原点。

$$R_a = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 平差模型

软件采用带约束条件的间接平差模型。把边长、方位已知值也看作观测值给以适当的权与基线观测值一起组成误差方程:

$$V = A \delta \hat{X} - L \quad \text{权阵 } P \quad (6)$$

把已知的大地经纬度, 大地高看作是约束条件, 组成约束方程:

$$a \delta \hat{X} - W = 0 \quad (7)$$

利用误差方程(5)和约束方程(6)组成法方程:

$$\begin{bmatrix} A^T P A + a^T a & a^T \\ a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \hat{X} \\ K \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^T P L + a^T W \\ W \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

由此法方程就可解得在地面网坐标系中的包括空间直角坐标未知数 $(\delta X, \delta Y, \delta Z)$ 和转换参数在内的所有未知参数。

4 软件的结构与使用

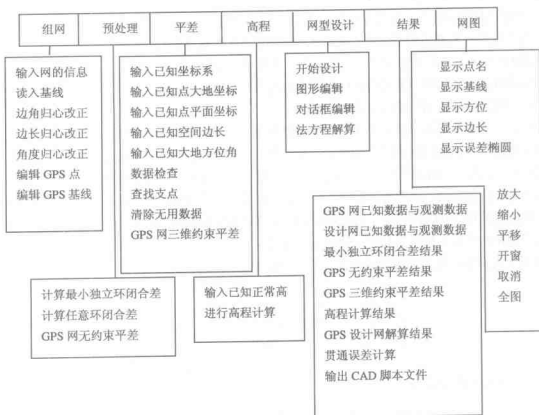


图 2 TGPPSW7.0 菜单结构

4.1 软件的主要功能模块

(1) GPS 基线向量采集及编辑模块。主要是读取 GPS 接收机随机软件解算所形成的基线文件，并可以编辑基线及 GPS 点，如进行了偏心观测还可以进行归心改正操作。该软件目前已经包含了市面上流行的接收机随机软件产生的基线文件的采集功能，包括 Leica、Trimble、Ashtech、Topcon、Javad 以及同济大学研制的 TJGPS 等。

(2) 数据预处理模块。主要是完成三维平差前的准备工作，对采集的基线数据进行检查剔除精度较差的基线并评定 GPS 网自身的相对精度，具体操作包括复测基线及环闭合差的自动和手动计算以及 GPS 三维无约束平差。

(3) 平差模块。此模块是本软件核心模块，它主要是完成把 GPS 结果从 WGS84 坐标系纳入到地面网坐标系的工作。所进行的工作有：地面网坐标系统的建立、地面观测值的输入、已知坐标的输入及数据的错误性检查，最后进行三维约束平差计算。

(4) 高程拟合模块。可以根据若干点上的水准高或大地水准面差距（或高程异常）拟合区域性大地水准面差距或高程异常，从而可以推算出其他 GPS 点的正高或正常高。高程拟合模块中提供了垂直平移、

直线模型、平面模型、曲线模型和曲面模型等高程拟合模型，用户可以根据高程已知点的个数及实际应用的需求选择合适的模型进行拟合。

(5) 网型设计模块。可以读取设计文件也可以进行鼠标操作建立设计网，然后进行模拟计算给出估算精度，从而可以指导 GPS 实际测量。

(6) 结果输出模块。此模块主要是功能是提供各种计算结果的查看及输出，贯通误差的计算以及 CAD 脚本的输出等。

(7) 图形显示模块。可以进行网图的放大、缩小、开窗及平移等操作以及误差椭圆的绘制功能。

软件的主要菜单结构如图 2 所示。

4.2 使用流程

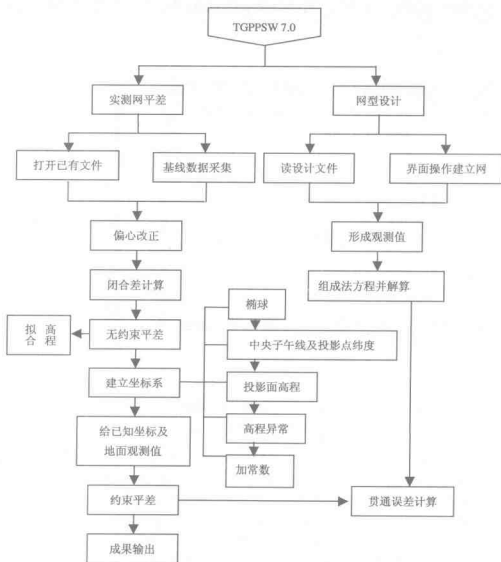


图 3 TGPPSW7.0 操作流程

TGPPSW 7.0 主要分为两块应用：实测 GPS 网平差与 GPS 网型设计。两种应用的操作流程如图 3 所示，当执行 GPS 实测网平差时网型设计菜单将不可用，而当执行网型设计功能时与实测网平差相对应的菜单将不可用，其中结果与网图菜单两种应用共用。可以看到网型设计的操作流程较简单，而实测网平差的步骤就比较烦琐。作者强烈推荐按照图 3 的操作流程完成平差计算，特别要注意的是已知坐标的输

入一定要在建立坐标系之后,换句话说当坐标系改变后之前输入的已知坐标将会改变。另外,在建立坐标系时如果是选择已有点的相应坐标来进行参数的设置的话就必需按照图 3 的顺序来设置坐标系,否则结果将出现偏差。

5 软件的应用

5.1 长梁山隧道 GPS 网处理

长梁山隧道是一条长约 13km 的直线隧道,基本为东西走向,位于山西省朔黄铁路线上,是我国较长的铁路隧道之一。在隧道进出口间布设有四个斜井以提高施工进度和质量。在定测的基础上,在实地标定好进出口及各斜井进洞控制点。在此基础上,布设隧道洞外 GPS 施工控制网。

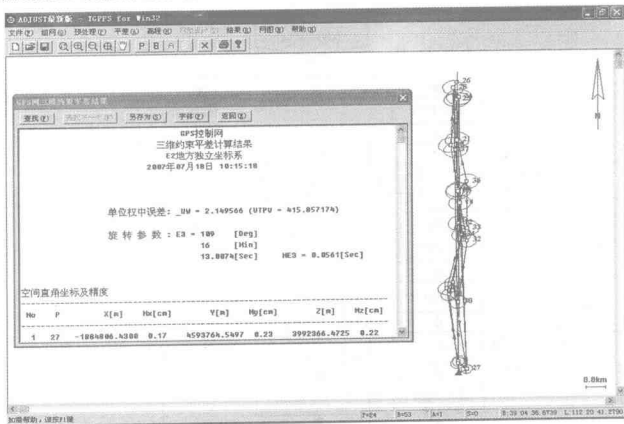


图 4 长梁山隧道平差结果

隧道以 1 号点为坐标原点,其 X 、 Y 坐标加常数分别为: 19756.890 和 1000.000, 1 号点大地高 1541.461m, 即固定 1 号点三维坐标; 1 号点至 26 号点为 X 轴, 即固定 1 至 26 号点大地方位角为 0 度, 并设置投影面大地高 1407.578m, 高程异常取值 37.378m, 然后进行约束平差。平差后各点精度均在 3mm 以内, 说明控制网保持了 GPS 原有的高精度; 各点 Y 方向与中央子午线差距均在 500m 以内, 因此高斯投影变形可忽略不计。这样就方便地建立了统一的长梁山隧道坐标系, 点位在此坐标系中的精度高且长度变形较小 (主要是距投影面的高程引起), 应用此成果使得施工方便了许多。

5.2 长江隧道设计网的应用

隧道控制网是隧道贯通的基础, 它要有很高的精度, 以确保投资巨大的隧道工程的正确贯通。因此在利用 GPS 技术进行隧道测量前必须进行网的设计, 并估算横向贯通误差。该软件已经在上海长江隧道的 GPS 控制网的设计中应用, 隧道 GPS 控制网一共 10 个点, 设计时基线观测精度以 $1\text{mm}+1\text{ppm}$ 给出, 固定隧道两端控制点进行精度估算, 结果点位精度均在 2mm 以内, 贯通误差在 5mm 以内。从实际上海市测绘院布设了上海崇明越江通道工程测量控制网, 外业数据采集采用 13 台 ASHTECH 双频接收机, 共观测了

72 小时以上, 点位精度优于 1mm, 高于设计的精度, 贯通误差更小, 因此可以看出横向贯通误差主要由洞内导线测量以及施工等方面的因素引起。

5.3 其他工程控制网的应用

除了上述的应用外, 该软件还在其他工程实践中得到成功的应用, 如 5.0 和 6.0 版本已成功应用于诸暨、宁波和泰宁等城市 GPS 控制网的改建、复测及吕梁山隧道、长梁山隧道、吴堡隧道等隧道 GPS 控制网的建立。实际应用结果表明, 软件可以广泛应用于诸如 GPS 网的扩建、加密、复测及新建等不同数据处理工作。

6 结束语

TGPPS 网平差软件自从研制开发完成并投入实际生产应用后, 随着应用与研究的不断深入也发现了很多问题并及时进行了改进与更新, 形成了完善的数学模型, 稳定的计算方法, 以适用于多种 GPS 网平差的数据处理要求。经过这次升级后形成的 TGPPSW7.0 版本适用于绝大多数的 GPS 网平差处理, 并且人机交互更为方便, 辅助功能更为齐全。当然也会存在一定的不足, 我们将会在实践中不断改进不足, 以形成更为稳定更为方便的 GPS 平差处理软件。

参考文献

- [1] 刘大杰, 施一民, 过静珺. 全球定位系统的原理与数据处理[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996
- [2] 姚连璧, 周小平. 线路与桥隧 GPS 测量[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1999
- [3] 刘大杰, 白征东. 一种 GPS 网三维平差的数学模型[J]. 测绘学报, 1997, 26(1): 37-41
- [4] 施一民. 工程 GPS 控制网平差转换的要点与模型[J]. 测绘通报, 2003, (4): 7-9, 9-16
- [5] 沈云中, 刘大杰. 自由定向坐标系中 GPS 网的平差计算[J]. 同济大学学报, 1996, (2): 158-161
- [6] 姚连璧, 刘大杰, 周全基. 隧道洞外控制网设计与数据处理软件及其应用[J]. 测绘通报, 1998, (6): 16-18
- [7] 姚连璧, 周全基, 宋滔, 李文全. GPS 与常规测量在隧道控制中应用的比较分析[J]. 工程勘察, 1996, (5): 45-48

第一作者简介:

姚连璧 博士, 教授, 主要研究方向为全球定位系统在道路、桥梁以及隧道工程中的应用。

通讯方式: 上海市四平路 1239 号土木大楼 B604 室, 邮编: 200092.

E-mail: lianbi@mail.tongji.edu.cn

卫星轨道标准化及其算法实现

陈春花 高成发

(东南大学交通学院 江苏省南京市 210096)

摘要:在GPS定位中需要不断地计算卫星的坐标,实时的卫星坐标是根据接收到的广播星历来计算的,而每次计算卫星坐标都需要占用大量内存,影响计算速度。根据GPS卫星轨道标准化的必要性及要求,本文简要介绍了轨道标准化的原理和算法,并通过实例分析了利用切比雪夫多项式进行GPS卫星轨道标准化的精度,拟合时间间隔及节点数选取等问题,得出了一些有益的结论。

关键词:GPS 切比雪夫多项式 卫星轨道标准化

利用GPS进行定位时,不管是采用差分模式还是非差精密单点定位,都是将空中卫星当作动态已知点,应用测量学中的距离后方交会,求解用户的三维坐标。因此,坐标解算是定位的关键,卫星轨道误差更是一个不容忽视的误差来源之一。如何快速准确地计算出所需GPS卫星的坐标是GPS定位中的一个极其重要的问题。

1 轨道标准化的必要性

GPS卫星星历有两种,广播星历和精密星历,因此直接利用卫星星历进行卫星位置计算的方法也就相应的有两种。第一种是利用GPS卫星广播星历中提供的开普勒轨道参数、轨道摄动参数等信息按照固定的公式进行卫星位置的计算;第二种是利用精密星历提供的等间隔时间点上的卫星坐标,利用数值分析中的插值技术计算所需时刻某卫星的坐标值。对于前述的两种方法,都存在很明显的缺点。应用第一种方法,计算量大,过程复杂。在星历文件与观测文件之间要不停地进行时间比对和卫星比对,而且用广播星历参数表达卫星位置时,每小时每颗卫星有一组独立的参数,用相邻两组星历计算同一时刻的卫星位置,将有不同的结果,这为邻接点及附近的整周跳变诊断和剔除、观测值残差的分析带来许多不利因素;应用第二种方法,尽管程序非常简洁,但是存储卫星位置信息要占大量的内存单元。因此有必要寻找一种占用内存空间尽可能少而计算速度快且能满足精度要求的轨道标准化方案。

2 利用广播星历计算卫星坐标的程序实现

由于广播星历精度不高,在卫星位置计算时只考虑了地球自转的影响,没有顾及章动、岁差等影响,但对于广播星历来说,精度影响不大。首先,按“二体运动”公式计算轨道参数;然后,根据导航电文给出的摄动参数进行改正,计算修正后的轨道参数;继而计算卫星在轨道坐标系中的坐标;最后,顾及地球自转的影响,将轨道坐标系转换为WGS-84坐标系。

根据具体计算过程,用VC++在MFC框架下,编制了直接利用广播星历计算卫星坐标的程序,可操作性较好,具有良好的人机交互界面。要计算卫星坐标,首先要解读GPS接收机所收到的导航电文和观测文件,然后从中获取各种已知参数。各种型号的接收机将GPS导航电文转换成的格式都是不一样的,本程序所能识别的格式是.txt格式,这种格式简单且有较好的可读性,本程序会从其可执行文件的根目录下读取预先存储在那里的.txt格式的数据文件,然后根据所读得的数据给计算卫星坐标所用到的所有参数赋值,进而计算出该观测时刻的GPS卫星坐标,形成坐标文件。这一程序是为后面轨道标准化算法实现做准备的。程序的解算过程思路过程如图1。