

精密水准测量数据处理自动化系统的研究与实现

刘晓云^{1,2}, 张世娟², 程传录²

(1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 国家测绘局大地
测量数据处理中心, 陕西 西安 710054)

The Research and Realization to Exact Leveling Data Processing Auto-system

LIU Xiaoyun, ZHANG Shijuan, CHENG Chuanlu

摘要: 精密水准测量数据处理涉及标尺长度误差改正、固体潮改正、海潮负荷改正、正常水准面不平行改正、重力异常改正、环闭合差计算, 以及整网平差与精度估计、成果表制作等, 本文介绍了精密水准测量数据处理的相关模型, 融合 Visual FoxPro、Visual Basic、Excel VBA、C、MapBasic 等多种计算机语言开发了精密水准测量数据处理自动化系统, 实现了精密水准测量数据处理的高度自动化, 并用实例数据进行验证, 结果正确、可靠, 数据处理自动化程度高。

关键词: 精密水准; 数据处理; 自动化; 系统

一、引言

精密水准测量数据处理过程繁琐、复杂, 严重制约了数据处理效率。笔者从事精密水准测量数据处理工作多年, 积累了丰富的作业经验与技巧, 为了使繁琐的工作条理化、简单化, 开发了精密水准测量数据处理自动化系统, 该系统投入生产后根据作业需求与数据的复杂性, 不断修改升级, 功能日趋完善, 已在国家一二等水准网数据处理中使用, 极大提高了工作效率并保证了作业质量, 为便于同行相互交流与学习, 现将其进行较为详细的介绍, 与同行共勉。

二、数学模型

1. 各种误差改正模型

精密水准测量误差改正包括标尺长度误差改正、正常水准面不平行改正, 重力异常改正、固体潮改正、海潮负荷改正等, 这些改正模型在《精密水准测量的理论和实践》与《国家一二等水准测量规范》上有详细介绍, 在此不做赘述。

2. 网平差模型

水准网最小二乘平差时, 已知点的高程是作为常数值参加平差的, 只有未知点的高程才是误差方程和法方程中的未知数。在平差程序中, 若只将未知点作为待定参数, 则点号与未知点的编号之间缺乏简单明确的对应关系, 给数据存储和编程带来一定的不便。相反, 假如不区分已知点和未知点, 将每个点的高程都设成未知数, 这样未知点编号和点号就是一一对应的了, 这种规律性有利于编程, 所以平差程序中采用这种做法。但这样做已知点就失去了控制作用, 而且法方程系数矩阵是奇异矩阵, 所以需要对方程系数矩阵进行处理, 才能使法方程有解且与最小二乘解相同。

设 X_1 和 X_2 分别是未知点和已知点的高程值, 均为方程的未知数, 误差方程可写为

$$V = AX_1 + BX_2 - L \quad \text{权 } P$$

其中, A 、 B 是系数矩阵, L 是观测向量, V 是残差向量。假设平差前已知 X_2 的值为 \tilde{X}_2 , 将 \tilde{X}_2 视为虚拟的观测值参加平差, 需增加方程

$$V_x = X_2 - \tilde{X}_2 \quad \text{权: } I \times k$$

式中： I 是单位阵， k 是取定的大正数。设 X_1 的近似值为 X_1^0 ，则误差方程为

$$V = A\delta X_1 + B\delta X_2 + l$$

$$V_x = \delta X_2 + 0$$

$$\text{其中 } l = AX_1^0 + B\tilde{X}_2 - L$$

组成法方程式为

$$\begin{bmatrix} A^T PA & A^T PB \\ B^T PA & B^T PB + kI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X_1 \\ \delta X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A^T Pl \\ B^T Pl \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

因为 k 是已知点高程的权，当 k 趋于无穷大时， δX_2 就会趋近于 0。上式表明，在已知点和未知点都设未知数的情况下，只需把已知点未知数所对应的法方程系数阵的对角线元素加上一个较大的正数，然后再解算法方程，其结果与已知点固定的最小二乘平差是相当的。

3. 路线中间点中误差传递模型

假设已经进行了所有路线的结点平差，平差时利用测站数定权，计算的水准网单位权中误差为 σ ，当前路线首结点编号为 i ，路线编号为 j ，路线总测站数为 $lxczs$ ，当前计算观测段距当前路线起点的测站数累和为 $czslh$ ，则当前观测段的止点中误差 m 依据下式计算：

$$po = \frac{czslh}{lxczs}$$

$$M = po \times Q_{LL(j,j)} + po^2 \times Q_{VV(j,j)} + Q_{XX(i,i)} + 2 \times po^2 \times Q_{VL(j,j)} + 2 \times po \times Q_{XL(i,j)}$$

$$m = \sqrt{M} \times \sigma$$

经过实践，按照此公式在结点平差后推算出的路线中间点中误差，与将路线全部按测段拆开进行平差，得到的点中误差一样。

三、自动化系统的研究与实现

该系统根据水准测量数据处理各子模块特点采用 Visual FoxPro、Visual Basic、C、Excel VBA、MapBasic 等多种开发语言集合而成，具备提取外业观测数据、概算（标尺长度误差改正、固体潮改正、海潮负荷改正、正常水准面不平行改正、重力异常改正以及自动生成水准网闭合环和附和路线）、平差、成果表编制、绘图、检查等多种功能，软件操作简便，基本实现了水准测量数据处理的自动化，在水准测量数据处理作业中发挥了巨大作用，大大提高了工作效率并保证了成果质量。

1. 开发语言简介

(1) Visual FoxPro

Visual FoxPro 作为数据库管理软件，其专有的 SQL 查询语言非常实用，所以自动化系统将外业观测记录数据中提取出的信息整理成 Visual FoxPro 中的自由表，一条路线对应一个表，在数据处理和程序编写中充分发挥 SQL 查询语言功能，例如要统计每条路线的距离、测站数、高差、开测时间、结束时间，可将所有路线连成一个大文件，然后利用下面的命令获得需求信息：

`select lxx as 路线号,sum(d) as 距离,sum(czs) as 测站数,sum(gc) as 高差,min(wrq) as 开测时间,max(frq) as 结束时间 from 大文件 group by lxx order by lxx into table 路线统计信息`

由于 Visual FoxPro 的字符串大小、数组大小有限制，不善于开发长字符串操作和大型矩阵运算程序，同时制作的水准成果报表不够美观，不能方便的保存、查询，所以还要用到其他开发工具，Visual FoxPro 调用其他软件开发的 EXE 可执行程序采用如下命令即可：

```
run/n d:\平差.exe
```

(2) Visual Basic

Visual Basic 作为一种可视化、面向对象的 Windows 开发语言，具有易用、通用和开发效率高的特点，可方便调用 EXCEL VBA、MapBasic 等的命令行，完成软件中的成果表制作功能与绘图功能。

(3) C

开发大型矩阵运算程序，C 语言效率比 Visual Basic 效率高，故采用它完成软件中的平差模块。

(4) Excel VBA

水准成果表具有错行特点，所以采用 Visual FoxPro 直接生成的报表下面封口难尽人意，而且只能保存模板，不能将报表保存，并进行查询。采用 Microsoft Excel 制作的报表不仅克服了这些缺陷，而且可以进行人性化调整，例如长路线可以另起页，长点名自动调整行高进行折行显示等，同时还可以建立目录与路线之间的超级链接，便于查询。Excel VBA 作为 Microsoft Excel 的二次开发语言，语法简单，且自动录制宏功能可帮助开发者生成源代码，并易于被 Visual Basic 调用，所以用它开发水准报表生成程序；同时，外业上交的部分资料常常为 Excel 表，使用 Excel VBA 从中提取需求信息也非常方便、快捷。

(5) MapBasic

MapInfo 作为 GIS 软件，其对象不仅有图形信息还可以保留属性信息，所以我们基于该平台绘制水准路线、点、闭合环图。作为 MapInfo 的二次开发语言，MapBasic 跟 Visual Basic 语法相似，学起来很容易，也易于被 Visual Basic 调用，所以水准图的自动绘制采用该语言。

2. 软件主要模块

(1) 文件整理模块

1) 零散文件整理； 2) 文件重命名。

(2) 信息提取模块

1) 观测数据信息； 2) 结点信息； 3) 起算数据； 4) 布格值；
5) 路线起止信息； 6) 路线统计信息。

(3) 路线整理模块

1) 拆线； 2) 合线； 3) 倒线； 4) 合并过渡点； 5) 路线小文件连接；
6) 路线大文件拆分； 7) 画图。

(4) 概算模块

1) 标尺长度误差改正； 2) 概略高程推算； 3) 正常水准面不平行与重力异常改正；
4) 固体潮改正； 5) 海潮负荷改正； 6) 环闭合差文件生成。

(5) 平差模块

(6) 出成果模块

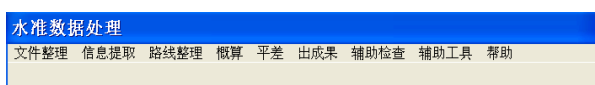


图 1 精密水准测量数据处理自动化系统主界面

四、算例

某水准网如图 2 所示，在利用精密水准测量数据处理自动化系统提取外业观测数据后，

共整理出路线 14 条，分析可用起算点 4 个，现给出经过概算、平差作业后制作的路线信息统计表、闭合环信息统计表、水准网平差成果表部分内容以及单位权中误差。

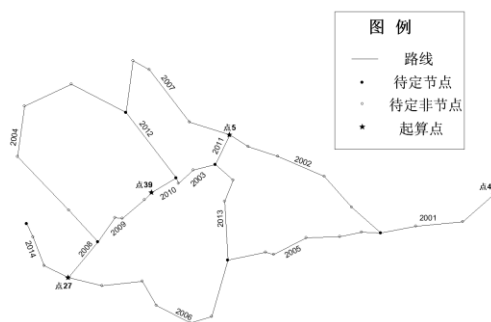


图 2 水准观测路线网图

表 1 路线信息统计表

路线号	起点名	止点名	正常水准面 不平行改正 (mm)	重力异常 改正 (mm)	往测固体 潮改正 (mm)	返测固体 潮改正 (mm)	往测海潮 改正 (mm)	返测海潮 改正 (mm)	路线高差 (m)	路线测 站数	路线距离 (km)
2001	点 1	点 4	-0.08	-0.27	-0.05	0.04	0.84	0.20	28.14930	278	12.1
2002	点 5	点 1	0.11	-0.25	0.45	-0.47	1.40	-0.29	8.95758	238	16.6
...
2015	点 27	点 45	-0.64	-1.76	-0.01	0.21	0.20	0.70	583.18006	410	9.7

表 2 水准网附和路线/闭合环信息统计表(注：路线号前加负号，表明该路线参与组环时需要反向)

环号	起点名	止点名	环闭合差(mm)	限差(mm)	环长(km)	附和路线/闭合环的组成路线
1	点 27	点 39	-7.865	13.624	11.6	附：2008, 2009
2	点 39	点 5	5.210	12.837	10.3	附：2010, 2003, 2011
...
7	点 14	点 14	1.180	25.393	40.3	环：2007, -2011, -2003, -2012

二等水准成果表

(1985 国家高程基准)

路线名称：1号路线 施测单位：测绘局 路线编号：2001
 起止点：点1~点4 施测年代：2011

序号	水准点名	自起点距离 (km)	高差中数 (m)	ϵ (mm)	λ (mm)	μ (mm)	平差改正 (mm)	高程 (m)
1	点1	0.0						17.214
2	点2	3.3	15.8156	0.0	-0.2	0.1	-0.8	33.028
3	点3	7.9	15.4881	0.0	-0.1	0.2	-1.5	48.515
4	点4	12.1	-3.1544	-0.1	0.0	-0.1	-1.6	45.359

图 3 水准网平差成果表

从平差过程文件中可获知：测站定权方式下单位权(每测站)中误差 0.31mm，距离定权方式下单位权(每公里)中误差 1.46mm。

由以上信息分析可得，该水准网无超限附和路线/闭合环，单位权中误差满足二等水准测量精度要求，成果可靠。

五、结束语

本文介绍了笔者开发的精密水准测量数据处理自动化系统，该系统自动化程度高，极大提高了数据处理效率并保证了成果质量。系统开发开发语言多样，均简单、易学，各自特点明显。本文旨在使读者了解高等级水准测量数据处理的整个流程及平差核心算法，以及如何发挥各种计算机语言的特点，灵活使用，开发出简单实用的数据处理程序。文中提到的 Visual FoxPro、EXCEL VBA 在数据整理和报表制作中非常有效，熟练使用这些软件，会使我们的工作事半功倍。

参考文献:

- [1] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 122-123.
- [2] 宋力杰. 测量平差程序设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009:154-159.
- [3] 梁振英,董鸿闻,姬恒炼. 精密水准测量的理论和实践[M]. 北京: 测绘出版社, 2004:1-3.
- [4] 杨运伟, 黄文斌, 熊建强. Visual FoxPro 应用基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 118-121.
- [5] 徐卓揆. 控制测量课程设计教学中的软件应用方法[J]. 测绘通报, 2012 (1): 105-106.
- [6] 韩小良, 周宁. Excel VBA 使用技巧大全[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 509-511.

第一作者简介:

刘晓云(1983.03-),女,汉族,陕西宝鸡人,在读硕士,工程师,主要从事大地测量数据处理与技术研究工作。

第二作者简介:

张世娟(1963.04-),女,汉族,陕西西安人,大专,工程师,主要从事大地测量数据处理与技术研究工作。

程传录(1965-),男,汉族,陕西商南人,教授级高级工程师,主要从事大地测量数据处理的技术研究工作。

文章联系人:

刘晓云, 13259415399, 029-87604128
国家测绘局大地测量数据处理中心
西安市友谊东路 334 号
710054