

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程系列教材

工程控制网数据处理 理论、方法与软件设计

郭际明 罗年学 周命端 赵红强 章迪 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校测绘工程系列教材

工程控制网数据处理 理论、方法与软件设计

郭际明 罗年学 周命端 赵红强 章 迪 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程控制网数据处理理论、方法与软件设计/郭际明,罗年学,周命端,赵红强,章迪编著. —武汉:武汉大学出版社,2012.4

高等学校测绘工程系列教材

ISBN 978-7-307-09731-5

I. 工… II. ①郭… ②罗… ③周… ④赵… ⑤章… III. 工程控制网—数据处理—高等学校—教材 IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 069534 号

责任编辑:胡 艳 责任校对:黄添生 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北金海印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:11.25 字数:275千字

版次:2012年4月第1版 2012年4月第1次印刷

ISBN 978-7-307-09731-5/TB·36 定价:24.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

随着计算机技术、数学理论在测量工程控制网数据处理中的广泛应用，工程控制网数据处理理论与方法不断变革，数据处理软件功能不断完善和增强。在工程测量中，控制网数据处理软件的广泛应用，不仅提高了测量计算工作效率和准确性，而且为大型工程设计、施工和安全运营提供了测量计算保障，在工程建设中发挥了重要作用。

本书讨论了测量工程控制网数据处理的理论和方法，基于 VC++ 语言，介绍了程序设计原理、编程思路，并结合软件设计思路，给出了部分程序代码与实例。控制网数据处理主要包括观测值预处理（方向改化、边长归算、高差改正、GPS 基线格式转换等）、控制网平差、输出成果报告等。本书重点介绍平面网（包括三角网、边角网、测边网和测角网）、高程网和 GPS 网的基于间接平差的数据处理理论、方法、软件与典型算例。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正，以便下次修订时加以改正。

编 者

2012 年 1 月

目 录

第 1 章 C++编程语言基础	1
1.1 VC++语言概述	1
1.2 控制网数据处理程序设计的 VC++基本知识	1
1.2.1 数组	1
1.2.2 指针	2
1.2.3 结构体类型	3
1.2.4 类及矩阵类	5
1.2.5 文件操作与文件流	6
1.3 小结	7
第 2 章 工程控制网数据处理的基本理论和方法	8
2.1 概述	8
2.2 观测值概算与投影	8
2.2.1 方向观测值概算与投影	8
2.2.2 边长观测值概算与投影	10
2.2.3 高差观测值概算	12
2.3 近似坐标推算	12
2.3.1 二维坐标相似变换	13
2.3.2 三维坐标相似变换	13
2.4 控制网平差	15
2.4.1 间接平差	15
2.4.2 附有条件的间接平差	16
2.4.3 平面控制网	17
2.4.4 高程控制网	19
2.4.5 三维控制网	20
2.5 粗差探测	22
2.5.1 数据探测法原理	23
2.5.2 平差公式与算法	23
2.5.3 粗差探测步骤	23
2.6 方差分量估计	24
2.6.1 估计公式	24
2.6.2 方差分量估计的计算步骤	24
2.7 高斯投影正反算	25

第3章 平面控制网平差软件	32
3.1 概述	32
3.2 平面控制网平差计算主程序实例	33
3.2.1 类设计及定义	33
3.2.2 类成员函数的实现	34
3.2.3 平面网平差报告	68
3.3 平面控制网算例	68
3.3.1 程序使用说明	68
3.3.2 平面网平差算例	80
第4章 水准网平差软件设计	117
4.1 概述	117
4.2 按间接平差法进行水准网平差的步骤	117
4.3 水准网平差计算主程序实例	118
4.3.1 类设计	118
4.3.2 类成员函数的实现	119
4.3.3 水准网观测数据准备	126
4.4 水准网算例	126
4.4.1 程序使用说明	127
4.4.2 水准网平差算例	132
第5章 GPS控制网平差软件设计	136
5.1 概述	136
5.2 GPS网无约束平差的数据处理理论	136
5.2.1 数学模型	136
5.2.2 平差准则与坐标成果	138
5.2.3 GPS网平差成果的质量检核	138
5.3 GPS网三维无约束平差主程序实例	141
5.3.1 类设计	141
5.3.2 类成员函数的实现	143
5.4 GPS网算例	144
5.4.1 程序使用说明	145
5.4.2 GPS网平差算例(城市四等网)	163
参考文献	173

第1章 C++编程语言基础

1.1 VC++语言概述

Visual C++是微软的 C++程序设计环境，它包括综合的微软基本类库（MFC Library），使得开发 Windows 应用程序变得简单而高效；它提供复杂的资源编辑器，可以编辑对话框、菜单、工具栏、图像和其他许多 Windows 应用程序的组成元素；它还有一个非常好的集成开发环境 Developer Studio，可以在编写 C++程序时，对程序的结构进行可视化的管理，此外，一个完全集成的 Debug 工具可以让程序员从各个方面来检查程序运行中的微小细节。这些只是 Visual C++众多特点中的一小部分。鉴于 Visual C++强大的编程功能，在测绘应用领域中，许多大型测量软件采用了 VC++语言进行系统开发，如武汉大学测绘学院研制的科傻（COSA）系列软件等。

1.2 控制网数据处理程序设计的 VC++基本知识

1.2.1 数组

1. 数组的概念

概括地说，数组是有序数据的集合。如果有 100 个互不关联的数据，可以分别把它们存放到 100 个变量中，但是如果这些数据是有内在联系的，是具有相同属性的，则可以把这批数据看做一个有机的整体，称为数组（array），可以用一个统一的名字代表这批数据，而用序号或下标来区分各个数据。数组中的数据称为数组元素。要寻找一个数组中的某一元素，必须给出两个要素，即数组名和序号。C++语言用方括号内的数字来表示数组中元素的序号，如方向观测值数组可以写为 `Direction[i]`，`i` 可取 0, 1, 2, ..., `n`，其中，`Direction` 为数组名，`[i]` 表示第 `i+1` 个方向观测值在数组中的序号。

数组是有类型属性的，测量控制网数据处理使用的数组类型一般有用表示点名的字符串数组、表示点的编号的整型数组、表示观测值等数据的双精度数组。同一数组中的每个元素都必须属于同一数据类型。一个数组在内存中占一片连续的存储单元。引入数组，就不需要在程序中定义大量的变量，大大减少了程序中变量的数量，使程序精练，而且数组含义清楚，使用方便，明确地反映了数据间的联系。

2. 一维数组的定义和引用

(1) 定义一维数组

定义一维数组的一般格式为：

类型标识符 数组名 [常量表达式]

说明：常量表达式的值表示元素的个数，即数组长度；常量表达式中不能包含变量。

例如：double Direction [100]，定义了一个可以存放 100 个方向观测值的双精度一维数组，数组元素的序号是 0, 1, 2, …, 99。

(2) 引用一维数组的元素

数组必须先定义，然后使用。只能逐个引用数组元素的值，而不能一次引用整个数组中的全部元素的值。

数组元素的表示形式为：

数组名 [序号]

说明：序号可以是整型常量或整型表达式。

例如：Direction [0]，表示第 1 个方向观测值；Direction [99]；表示第 100 个方向观测值。

3. 二维数组的定义和引用

(1) 定义二维数组

定义二维数组的一般形式为：

类型标识符 数组名 [常量表达式] [常量表达式]

在 C++ 语言中，二维数组中元素排列的顺序是按行存放，即在内存中先顺序存放第一行的元素，再存放第二行的元素。

C++ 允许使用多维数组。有了二维数组的基础，再掌握多维数组是不困难的。多维数组元素在内存中的排列顺序是第一维的下标变化最慢，最右边的下标变化最快。

例如：法方程的系数阵可以定义一个双精度二维数组，表示如下：

double N [100] [100]

(2) 引用二维数组元素

二维数组的元素的表示形式为：

数组名 [序号] [序号]

例如：N [9] [10]，表示法方程系数阵中第 10 行、第 11 列的元素。

1.2.2 指针

1. 指针的概念

一个变量的地址，称为该变量的指针。如果一个变量是专门用来存放另一变量地址（即指针）的，则称为指针变量。简言之，变量的指针就是变量的地址，用来存放变量地址的变量是指针变量。

控制网数据处理中常采用文件指针进行数据文件的读写，采用指针进行参数的传递等。

2. 定义指针变量

C++ 规定所有变量在使用前必须先定义，即指定其类型。在编译时，按变量类型分配存储空间。对指针变量，必须将它定义为指针类型。

定义指针变量的一般形式为：

基类型 * 指针变量名

例如：int * prn，表示指向卫星伪随机编号为整型数据的指针变量，这个 int 就是指针变量的类型。

在定义指针变量时要注意：不能用一个整数给一个指针变量赋初值；在定义指针变量

时，必须指定基类型，用来指定该指针变量可以指向的变量的类型。

3. 引用指针变量

有两个与指针变量有关的运算符：“&”取地址运算符和“*”指针运算符（或称间接访问运算符）。

例如：&a 为变量 a 的地址，*p 为指针变量 p 所指向的存储单元。

下面对“&”和“*”运算符再做些说明：

① “&”和“*”两个运算符的优先级别相同，但按自右至左方向结合。

② * &a 的含义是：先进行 &a 的运算，得 a 的地址，再进行 * 运算，即 &a 所指向的变量。

4. 指针作为函数参数

函数的参数不仅可以是整型、浮点型、字符型等类型的数据，还可以是指针类型的数据，它的作用是将一个变量的地址传送给被调用函数的形参。为了使在函数中改变了的变量值能被 main 函数所用，不能采取把要改变值的变量作为参数的办法，而应该用指针变量作为函数参数。在函数执行过程中，使指针变量所指向的变量值发生变化，函数调用结束后，这些变量值的变化依然保留下来，这样就实现了“通过调用函数使变量的值发生变化，在主调函数中使用这些改变了的值”的目的。

实参变量和形参变量之间的数据传递是单向的“值传递”方式。指针变量作函数参数也要遵循这一规则。调用函数时不会改变实参指针变量的值，但可以改变实参指针变量所指向变量的值。

5. 指向文件的指针

控制网相关的观测数据文件、坐标文件、平差结果文件，都可以使用指针进行读写。使用方法是：首先定义文件类型（FILE）的指针，再将该指针与相应的文件进行关联，然后即可进行读写操作。

```
例如：FILE * InputFile;
      FILE * ResultFile;
      InputFile=fopen(" Network. IN2", "rt");
      ResultFile=fopen(" Network. OU2", "wt");
      .....
```

1.2.3 结构体类型

1. 结构体的概念

C 和 C++ 允许用户自己指定一种将包含若干个类型不同（当然也可以相同）的数据项组织成一个组合项的数据类型，称为结构体。它相当于其他高级语言中的记录（record）。

申明一个结构体类型的一般形式为：

```
struct 结构体类型名
{成员表列}
```

结构体类型名用做结构体类型的标志。在声明一个结构体类型时，必须对各成员都进行类型声明，如类型名、成员名；每个成员也称为结构体中的一个域；成员表列又称为域表。

在 C++ 语言中，结构体的成员既可以包括数据（即数据成员），又可以包括函数（即

函数成员)，以适应面向对象的程序设计。

2. 定义结构体类型变量的方法

(1) 先申明结构体类型再定义变量名

例如：

```
struct CoorSystem
```

```
{
```

```
    char Point[8];
```

```
    double dX;
```

```
    double dY;
```

```
    double dZ;
```

```
};
```

```
CoorSystem WGS_84, BJ_54, XA_80;
```

(2) 在申明类型的同时定义变量

例如：

```
struct CoorSystem
```

```
{
```

```
    char Point[8];
```

```
    double dX;
```

```
    double dY;
```

```
    double dZ;
```

```
    } WGS_84, BJ_54, XA_80;
```

(3) 直接定义结构体类型变量

例如：

```
struct
```

```
{
```

```
    char Point[8];
```

```
    double dX;
```

```
    double dY;
```

```
    double dZ;
```

```
    } WGS_84, BJ_54, XA_80;
```

关于结构体类型，需要注意以下几点：

① 不要误认为凡是结构体类型都有相同的结构；

② 类型与变量是不同的概念，不要混淆；

③ 对结构体中的成员，可以单独使用，作用与地位相当于普通变量；

④ 成员也可以是一个结构体变量；

⑤ 结构体中的成员名可以与程序中的变量名相同，但二者没有关系。

3. 结构体变量的初始化

和其他类型变量一样，对结构体变量可以在定义时指定初始值；可以采用声明类型与定义变量分开的形式，在定义变量时进行初始化。

4. 结构体变量的引用

- ① 可以将一个结构体变量的值赋给另一个具有相同结构的结构体变量；
- ② 可以引用一个结构体变量中的一个成员的值；一般方式为：结构体变量名·成员名；
- ③ 如果成员本身也是一个结构体类型，则要用若干个成员运算符，一级一级地找到最低一级的成员；
- ④ 不能将一个结构体变量作为一个整体进行输入和输出；
- ⑤ 对结构体变量的成员可以像普通变量一样进行各种运算；
- ⑥ 可以引用结构体变量成员的地址，也可以引用结构体变量的地址。

5. 结构体数组

和定义结构体变量的方法相仿，定义结构体数组时，只需声明其为数组即可。与其他类型的数组一样，对结构体数组可以初始化。一般形式是，在所定义的数组名的后面加上“= {初值表列}”。

1.2.4 类及矩阵类

1. 类及与对象的关系

在 C++ 中，对象的类型称为类 (class)。类代表了某一批对象的共性和特征。类是对象的抽象，而对象是类的具体实例 (instance)；类是抽象的，不占用内存，而对象是具体的，占用存储空间。

2. 声明类类型

类是用户自己指定的类型。如果程序中要用到类，必须自己根据需要进行声明，或者使用别人已设计好的类。C++ 标准本身并不提供现成的类的名称、结构和内容。

在 C++ 中，声明一个类的方法跟声明一个结构体类型是相似的。类包括类头 (class head) 和类体 (class body)，类体是用一对花括号括起来的，类的声明以分号结束。

如果在类的定义中既不指定 private，也不指定 public，则系统就默认为是私有的。归纳以上对类类型的声明，可以得到其一般形式如下：

```
class 类名
{
private:
    私有的数据和成员函数
public:
    公用的数据和成员函数;
};
```

除了 private 和 public 之外，还有一种成员访问限定符 protected (受保护的)，用 protected 声明的成员称为受保护的成员，它不能被类访问，但可以被派生类的成员函数访问。

3. 矩阵类

矩阵运算常常应用在许多领域中，在测绘专业中更是常用。在面向对象程序设计方法之前，人们总是编写许多函数和过程来实现矩阵的各种运算，这给程序代码的复用带来了一定的困难，程序员经常把大量的精力放在重复调试上。而用面向对象的方法构造的矩阵类不但像数组一样能存储数据，而且还能操作数据，数据和方法被封装在一起，使程序员不用考虑数组的大小，因为这一切在矩阵类中都是自动处理的。矩阵类为控制测量计算提供了便利。

1.2.5 文件操作与文件流

1. 文件的概念

文件 (file) 是程序设计中一个重要的概念。所谓文件, 一般指存储在外部介质上数据的集合。一批数据是以文件的形式存放在外部介质 (如磁盘、光盘和 U 盘) 上的。外存文件包括磁盘文件、光盘文件和 U 盘文件。对用户来说, 常用到的文件有两大类, 一类是程序文件 (program file), 如 C++ 的源程序文件 (.cpp)、目标文件 (.obj)、可执行文件 (.exe) 等; 另一类是数据文件 (data file), 在程序运行时, 常常需要将一些数据 (运行的最终结果或中间数据) 输出到硬盘上存放起来, 以后需要时, 再从硬盘中输入到计算机内存, 这种硬盘文件就是数据文件, 程序中的输入和输出的对象就是数据文件。

根据文件中的数据的组织形式可分为 ASCII 文件和二进制文件。ASCII 文件又称为文本 (text) 文件或字符文件, 二进制文件又称为内部格式文件或字节文件。

2. 文件流类与文件流对象

文件流是以外存文件为输入输出对象的数据流。输出文件流是从内存流向外存文件的数据, 输入文件流是从外存文件流向内存的数据。每个文件流都有一个内存缓冲区与之对应。

在 C++ 的 I/O 类库中定义了几种文件类, 专门用于对文件的输入输出操作。标准输入输出流类 istream、ostream 和 iostream 用于键盘/屏幕的输入输出, 在此基础上定义了 3 个用于文件操作的文件类:

ifstream 类: 是从 istream 类派生的, 用来支持从文件的输入;

ofstream 类: 是从 ostream 类派生的, 用来支持向文件的输出;

fstream 类: 是从 iostream 类派生的。用来支持对文件的输入输出。

要以硬盘文件为对象进行输入输出, 必须定义一个文件流类的对象, 通过文件流对象将数据从内存输出到硬盘文件, 或者通过文件流对象从硬盘文件将数据输入到内存。文件流对象是用文件流类定义的, 而不是用 istream 和 ostream 类来定义的。可以用下面的方法建立一个输出文件流对象:

```
ofstream outfile;
```

3. 文件的打开与关闭

(1) 打开文件

打开文件是指在文件读写之前做必要的准备工作, 包括:

- ① 为文件流对象和指定的硬盘文件建立关联, 以便使文件流流向指定的硬盘文件;
- ② 指定文件的工作方式, 声明该文件是作为输入文件还是输出文件, 是 ASCII 文件还是二进制文件等。

调用文件流的成员函数 open。一般形式为:

文件流对象.open (硬盘文件名, 输入输出方式);

(2) 在定义文件流对象时指定参数

在声明文件流类时, 定义了带参数的构造函数, 其中包括了打开硬盘文件的功能。因此, 可以在定义文件流对象时指定参数, 调用文件流类的构造函数来实现打开文件的功能, 作用与 open 函数相同。

(3) 关闭硬盘文件

在对已打开的硬盘文件的读写操作完成后，应关闭该文件。关闭文件用成员函数 close。所谓关闭，实际上是解除该硬盘文件与文件流的关联，原来设置的工作方式也失效，这样，就不能再通过文件流对该文件进行输入和输出。此时，可以将文件流与其他硬盘文件建立关联，通过文件流对新的文件进行输入或输出。

4. 对 ASCII 文件的操作

如果文件的每个字节中均以 ASCII 代码形式存放数据，即一个字节一个字符，这个文件就是 ASCII 文件（或称为字符文件）。ASCII 文件的读写操作有以下两种方法：用流插入运算符 “<<” 和流提取运算符 “>>” 输入输出标准类型的数据；用文件流的 put、get、getline 等成员函数进行字符的输入输出。

5. 对二进制文件的操作

二进制文件不是以 ASCII 代码存放数据的，它将内存中数据存储形式不加转换地传送到硬盘文件，因此它又称为内存数据的映像文件。因为文件中的信息不是字符数据，而是字节中的二进制形式的信息，因此它又称为字节文件。对二进制文件的读写，主要用 ifstream 类的成员函数 read 和 write 来实现。与文件流有关的成员函数见表 1-1。

表 1-1 文件流有关的成员函数

成员函数	作用
gcount ()	返回最后一次输入所读入的字节数
Tellg ()	返回输入文件指针的当前位置
seekg (文件中的位置)	将输入文件中指针移到指定的位置
seekg (位移量, 参照位置)	以参照位置为基础移动若干字节
Tellp ()	返回输出文件指针当前的位置
seekp (文件中的位置)	将输出文件中指针移到指定的位置
seekp (位移量, 参照位置)	以参照位置为基础移动若干字节

一般情况下，读写是顺序进行的，即逐个字节进行读写。但是，对于二进制数据文件来说，可以利用上面的成员函数移动指针，随机地访问文件中任一位置上的数据，还可以修改文件中的内容。

1.3 小结

本章主要介绍了 C++ 编程语言在工程控制网数据处理软件设计中所用到或可能会用到的基本知识。从概念、定义及如何使用等方面入手，详细介绍了数组、指针、结构体类型、类及矩阵类、文件操作与文件流等编程知识的用法。在实际编程过程中，需要对编程语言基础知识的概念进行理解，这样有助于提高程序的质量，特别是提高“可复用性”与“可扩张性”，学会融会贯通。

C++ 编程经常会使用到“类”。C++ 中使用“类”进行工程控制网软件设计，其具有抽象性、封装性、继承性、多态性等突出特点而备受程序员青睐。

式中, ξ'' , η'' 为测站点上的垂线偏差在子午圈及卯酉圈上的分量, 它们可在测区的垂线偏差分量图中内插取得; A_m 为测站点至照准点的大地方位角; Z_1 为照准点的天顶距; α_1 为照准点的垂直角。

(2) 标高差改正

标高差改正又称为由照准点高度而引起的改正。当进行水平方向观测时, 如果照准点高出椭球面某一高度, 则照准面就不能通过照准点的法线与椭球面的交点, 由此引起的方向偏差的改正称为标高差改正 (图 2-2), 以 δ_h'' 表示, 其计算公式为

$$\delta_h'' = \frac{e^2}{2} H_2 \frac{\rho}{M_2} \cos^2 B_2 \sin 2A_1 \quad (2-2)$$

式中, B_2 为照准点大地纬度; A_1 为测站点至照准点的大地方位角; M_2 为与照准点纬度 B_2 相应的子午圈曲率半径; H_2 为照准点高出椭球面的高程, 它由三部分组成, 公式表示为

$$H_2 = H_{\text{常}} + \zeta + a \quad (2-3)$$

其中, $H_{\text{常}}$ 为照准点标石中心的正常高; ζ 为高程异常; a 为照准点的觇标高。

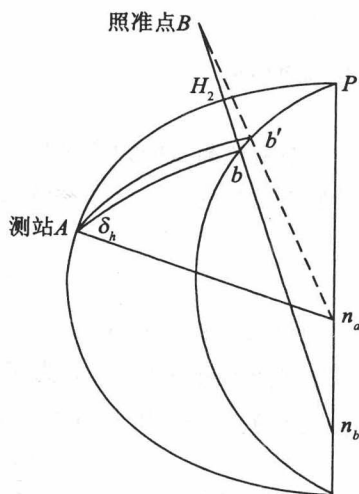


图 2-2 标高差改正

(3) 截面差改正

在椭球面上, 纬度不同的两点由于其法线不共面, 所以在对向观测时相对法截面不重合, 应当用两点间的达底线代替相对法截弧。将法截弧方向化为大地线方向应加的改正叫截面差改正 (图 2-3), 用 δ_g'' 表示, 其计算公式为

$$\delta_g'' = -\frac{e^2}{12\rho''} S^2 \left(\frac{\rho}{N_1} \right)^2 \cos^2 B_1 \sin 2A_1 \quad (2-4)$$

式中, B_1 为测站点纬度; S 为 AB 间大地线长度; N_1 为测站点纬度; B_1 为相对应的卯酉圈曲率半径; A_1 为测站点至照准点的大地方位角。

2. 方向观测值从椭球面改化到高斯平面

精密计算公式为

$$\delta_{ij} = \frac{x_i - x_j}{6R_m^2} \left(2y_i + y_j - \frac{y_m^3}{R_m^2} \right) + \frac{\eta^2 t}{R_m^3} (y_i - y_j) y_m^2 \quad (2-5)$$

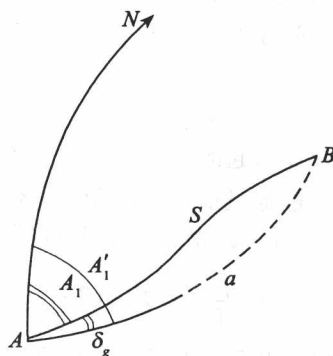


图 2-3 截面差改正

式 (2-5) 精确至 0.01", 适用于一等三角测量计算。

2.2.2 边长观测值概算与投影

1. 将地面电磁波测距长度归算至椭球面

(1) 气象改正

气象改正又称为大气折射改正。全站仪测量的距离是根据仪器中设置的某一参考大气气象条件下的折射率计算得到的, 如果实际的大气气象参数与仪器内部采用的气象参数不同, 则应进行气象改正。

气象改正的原理公式为

$$\Delta D = (n' - n)D \quad (2-6)$$

式中, D 为仪器显示的距离; n' 为仪器的参考折射率; n 为实际大气折射率。

大气折射率与气温、气压、波长有关, 可采用 Barrell-Sears 公式计算得到:

$$n = 1 + \frac{n_0 - 1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{p}{1013.25} - \frac{4.1 \times 10^{-8}}{1 + \alpha t} \cdot e \quad (2-7)$$

式中, $\alpha = \frac{1}{273.16} = 0.003661$; $n_0 - 1 = \left(287.604 + 3 \times \frac{1.6288}{\lambda^2} + 5 \times \frac{0.0136}{\lambda^4} \right) \times 10^{-6}$; p 为大气压 (mb); t 为气温 ($^{\circ}\text{C}$); λ 为载波波长 (μm); n_0 为标准大气条件下 ($t = 0^{\circ}\text{C}$, $p = 1013.25\text{mb}$, $e = 0\text{mb}$) 的折射率; e 为水汽压 (mb), 计算公式为

$$e = e' - 0.00062(t - t')(1 + 0.001146t')p$$

$$e' = 6.107 \times 10^a$$

$$a = \frac{7.5 \times t'}{237.3 + t'}$$

其中, t' 为湿气温 (采用干湿球温度计测得)。

例如, 对于 TPS1000 系列全站仪, $\lambda = 0.85\mu\text{m}$, 可求得 $n_0 = 1.0002945$, 进一步导出 n 的计算公式为

$$n - 1 = \left(\frac{0.29065 \times P}{1 + \alpha \times t} - \frac{4.126 \times 10^{-2} \times e}{1 + \alpha \times t} \right) 10^{-6} \quad (2-8)$$

参考气象条件为: $t = 12^{\circ}\text{C}$, $p = 1013.25\text{mb}$, 相对湿度 60% (湿温 8.3°C), 可求得 $n' = 1.0002818$, 进而得出使用的气象改正公式为

$$\Delta D = \left[281.8 - \left(\frac{0.29065 \times p}{1 + \alpha \times t} - \frac{4.126 \times 10^{-2} \times e}{1 + \alpha \times t} \right) \right] \times 10^{-6} \times D \quad (2-9)$$

$$D' = D + \Delta D$$

水汽压影响一般较小, 当精度要求允许时, 式 (2-9) 也经常略去第三部分, 简化为

$$\Delta D = \left(k_1 - \frac{k_2 \times 10^{-4} \times p}{1 + \alpha \times t} \right) \times 10^{-6} \times D$$

式中, $k_1 = 281.8$, 如果 p 以毫巴 (mb) 为单位, 则 $k_2 = 2906.5$; 如果 p 以毫米汞柱 (mm-Hg) 为单位, 则 $k_2 = 2906.5 \times 1013.25 / 760 = 3875.0$ 。

(2) 斜距 D_1 化算至平均高程面上的平距的改正

$$\begin{cases} \Delta D_2 = \sqrt{D_1^2 - \left(\Delta h \cdot \cos \frac{\gamma}{2} \right)^2} - \Delta h \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \\ \Delta h = D_1 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \gamma} + \frac{1 - k}{2R} \cdot (D_1 \cdot \cos \alpha) 2 \\ \gamma = \frac{D_1 \cdot \cos \alpha}{R} \end{cases} \quad (2-10)$$

$$D_2 = D_1 + \Delta D_2$$

式中, α 为垂直角。

(3) 平均高程面 D_2 化算至坐标系参考投影面上的改正

$$\Delta D_3 = - \frac{H_m - H_0}{R + H_m} \cdot D_2 \quad (2-11)$$

$$H_m = \frac{H_1 + H_2}{2}$$

$$D_3 = D_2 + \Delta D_3$$

式中, H_0 为坐标系参考投影面的高程。

如果已经利用水准测量得到了各点的高程, 则可以采用如下方法将经过气象改正后的地面电磁波测距长度归算至椭球面 (图 2-4):

$$S = 2R_A \arcsin \frac{D}{R_A} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{H_2 - H_1}{D} \right)^2}{\left(1 + \frac{H_1}{R_A} \right) \left(1 + \frac{H_2}{R_A} \right)}} \quad (2-12)$$

$$R_A = \frac{N}{1 + e'^2 \cos B_1^2 \cos^2 A_1}$$

2. 边长从椭球面改化到高斯平面

$$D = \left(1 + \frac{y_m^2}{2R^2} + \frac{\Delta y^2}{24R^2} + \frac{y_m^4}{24R^4} \right) S \quad (2-13)$$

$$R = \sqrt{MN}$$

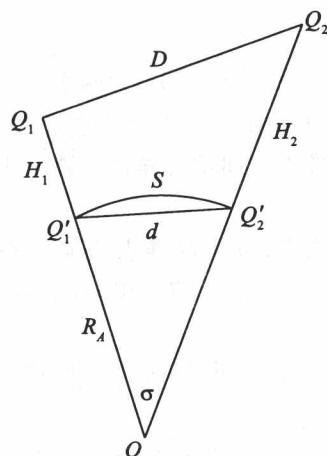


图 2-4 边长归算