

第五章 高程控制测量

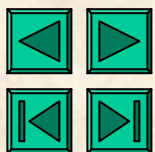
[本章提要]

- 5.1 国家高程基准
- 5.2 高程控制网的布设
- 5.3 精密水准仪与水准尺
- 5.4 精密水准测量的主要误差来源及其影响
- 5.5 精密水准测量的实施
- 5.6 正常水准面不平行性及其改正数计算
- 5.7 水准测量的概算
- 5.8 三角高程测量

[习题]

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

1 / 92



本章提要

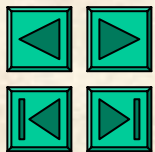
本章讲述高程控制网的布设，精密水准测量、三角高程测量。目的是解决高程控制点位置的测定问题。内容涉及国家高程基准、高程控制网的布设、精密水准仪与水准尺、精密水准测量的主要误差来源及其影响、精密水准测量的实施、正常水准面不平行性及其改正数计算、水准测量的概算、三角高程测量

【重点】精密水准仪与水准尺、精密水准测量的实施、三角高程测量

【难点】正常水准面不平行性及其改正数计算

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

2/92



返回本章首页

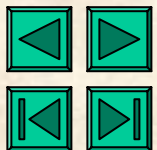
5.1 国家高程基准

5.1.1 高程基准面

5.1.2 水准原点

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

3/92



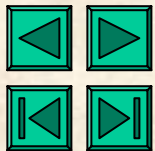
5.1.1 高程基准面

高程基准面就是地面点高程的统一起算面，由于大地水准面所形成的体形——大地体是与整个地球最为接近的体形，因此通常采用大地水准面作为高程基准面。

大地水准面是假想海洋处于完全静止的平衡状态时的海水面延伸到大陆地面以下所形成的闭合曲面。事实上，海洋受着潮汐、风力的影响，永远不会处于完全静止的平衡状态，总是存在着不断的升降运动，但是可以在海洋近岸的一点处竖立水位标尺，成年累月地观测海水面的水位升降，根据长期观测的结果可以求出该点处海洋水面的平均位置，人们假定大地水准面就是通过这点处实测的平均海水面。

长期观测海水面水位升降的工作称为验潮，进行这项工作的场所称为验潮站。

根据各地的验潮结果表明，不同地点平均海水面之间还存在着差异，因此，对于一个国家来说，只能根据一个验潮站所求得平均海水面作为全国高程的统一起算面——高程基准面。

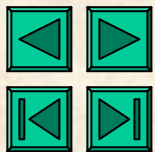


5.1.1 高程基准面

1957年确定青岛验潮站为我国基本验潮站，以该站1950年至1956年7年间的潮汐资料推求的平均海水面作为我国的高程基准面。以此高程基准面作为我国统一起算面的高程系统名谓“1956年黄海高程系统”。

“1956年黄海高程系统”的高程基准面的确立，对统一全国高程有其重要的历史意义，对国防和经济建设、科学研究等方面都起了重要的作用。但从潮汐变化周期来看，确立“1956年黄海高程系统”的平均海水面所采用的验潮资料时间较短，还不到潮汐变化的一个周期（一个周期一般为18.61年），同时又发现验潮资料中含有粗差，因此有必要重新确定新的国家高程基准。

新的国家高程基准面是根据青岛验潮站1952~1979年19年间的验潮资料计算确定，根据这个高程基准面作为全国高程的统一起算面，称为“1985国家高程基准”。

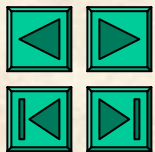


5.1.2 水准原点

为了长期、牢固地表示出高程基准面的位置，作为传递高程的起算点，必须建立稳固的水准原点，用精密水准测量方法将它与验潮站的水准标尺进行联测，以高程基准面为零推求水准原点的高程，以此高程作为全国各地推算高程的依据。

我国的水准原点网建于青岛附近。在“1985国家高程基准”系统中，我国水准原点的高程为72.260m。

“1985国家高程基准”已经国家批准，并从1988年1月1日开始启用，今后凡涉及高程基准时，一律由原来的“1956年黄海高程系统”改用“1985国家高程基准”。由于新布测的国家一等水准网点是以“1985国家高程基准”起算的，因此，今后凡进行各等级水准测量、三角高程测量以及各种工程测量，尽可能与新布测的国家一等水准网点联测，也即使用国家一等水准测量成果作为传算高程的起算值，如不便于联测时，可在“1956年黄海高程系统”的高程值上改正一固定数值，而得到以“1985国家高程基准”为准的高程值。



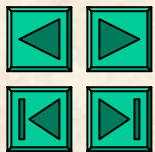
5.2 高程控制网的布设

5.2.1 国家高程控制测量

5.2.2 城市和工程建设高程控制测量

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

7/92

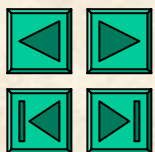


5.2.1 国家高程控制测量

国家高程控制测量主要是用水准测量方法进行国家水准网的布测。国家水准网是全国范围内施测各种比例尺地形图和各类工程建设的高程控制基础，并为地球科学研究提供精确的高程资料，如研究地壳垂直形变的规律，各海洋平均海水面的高程变化，以及其他有关地质和地貌的研究等。

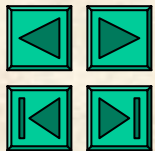
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

8/92



国家水准网的布设采用由高级到低级、从整体到局部逐级控制、逐级加密的原则。

国家水准网分4个等级布设，一、二等水准测量路线是国家的精密高程控制网。一等水准测量路线构成的一等水准网是国家高程控制网的骨干，同时也是研究地壳和地面垂直运动以及有关科学问题的主要依据，每隔15~20年沿相同的路线重复观测一次。构成一等水准网的环线周长根据不同地形的地区，一般在1 000~2000km之间。在一等水准环内布设的二等水准网是国家高程控制的全面基础，其环线周长根据不同地形的地区在500~750km之间。一、二等水准测量统称为精密水准测量。



5.2.1 国家高程控制测量

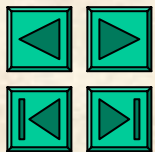
我国一等水准网由289条路线组成，其中284条路线构成100个闭合环，共计埋设各类标石近2万余座。全国一等水准网布设略图如图所示。



5.2.1 国家高程控制测量

二等水准网在一等水准网的基础上布设。我国已有1138条二等水准测量路线，总长为13.7万公里，构成793个二等环。

三、四等水准测量直接提供地形测图和各种工程建设所必须的高程控制点。三等水准测量路线一般可根据需要在高级水准网内加密，布设附和路线，并尽可能互相交叉，构成闭合环。单独的附和路线长度应不超过200km；环线周长应不超过300km。四等水准测量路线一般以附和路线布设于高级水准点之间，附和路线的长度应不超过80km。

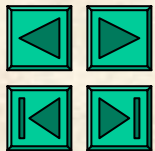


5.2.2 城市和工程建设高程控制测量

城市和工程建设高程控制网一般按水准测量方法来建立。为了统一水准测量规格，考虑到城市和工程建设的特点，城市测量和工程测量技术规范规定：水准测量依次分为二、三、四等3个等级。首级高程控制网，一般要求布设成闭合环形，加密时可布设成附和路线和结点图形。各等级水准测量的精度和国家水准测量相应等级的精度一致。

城市和工程建设水准测量是各种大比例尺测图、城市工程测量和城市地面沉降观测的高程控制基础，又是工程建设施工放样和监测工程建筑物垂直形变的依据。

水准测量的实施，其工作程序是：水准网的图上设计、水准点的选定、水准标石的埋设、水准测量观测、平差计算和成果表的编制。水准网的布设应力求做到经济合理，因此，首先要对测区情况进行调查研究，搜集和分析测区已有的水准测量资料，从而拟定出比较合理的布设方案。如果测区的面积较大，则应先在1: 25 000 ~ 1: 100 000比例尺的地形图上进行图上设计。

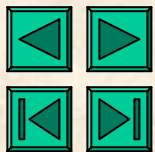


5.2.2 城市和工程建设高程控制测量

图上设计应遵循以下原则：

- (1) 水准路线应尽量沿坡度小的道路布设，以减弱前后视折光误差的影响。尽量避免跨越河流、湖泊、沼泽等障碍物。
- (2) 水准路线若与高压输电线或地下电缆平行，则应使水准路线在输电线或电缆50m以外布设，以避免电磁场对水准测量的影响。
- (3) 布设首级高程控制网时，应考虑到便于进一步加密。
- (4) 水准网应尽可能布设成环形网或结点网，个别情况下亦可布设成附和路线。水准点间的距离：一般地区为2~4km；城市建筑区和工业区为1~2km。
- (5) 应与国家水准点进行联测，以求得高程系统的统一。
- (6) 注意测区已有水准测量成果的利用。

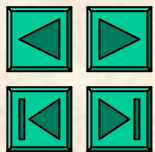
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



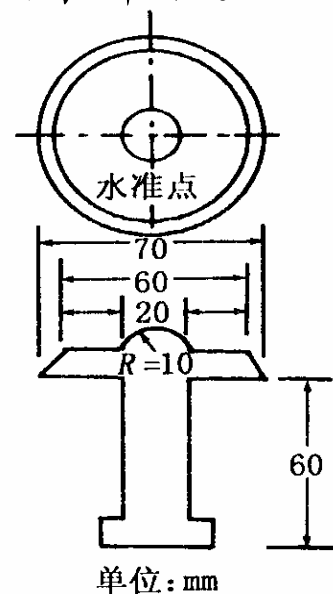
5.2.2 城市和工程建设高程控制测量

根据上述要求，首先应在图上初步拟定水准网的布设方案，再到实地选定水准路线和水准点位置。在实地选线和选点时，除了要考虑上述要求外，还应注意使水准路线避开土质松软地段，确定水准点位置时，应考虑到水准标石埋设后点位的稳固安全，并能长期保存，便于施测。为此，水准点应设置在地质上最为可靠的地点，避免设置在水滩、沼泽、沙土、滑坡和地下水位高的地区；埋设在铁路、公路近旁时，一般要求离铁路的距离应大于50m，离公路的距离应大于20m，应尽量避免埋设在交通繁忙的岔道口；墙上水准点应选在永久性的大型建筑物上。

水准点选定后，就可以进行水准标石的埋设工作。我们知道，水准点的高程就是指嵌设在水准标石上面的水准标志顶面相对于高程基准面的高度，如果水准标石埋设质量不好，容易产生垂直位移或倾斜，那么即使水准测量观测质量再好，其最后成果也是不可靠的，因此务必十分重视水准标石的埋设质量。



15 / 92

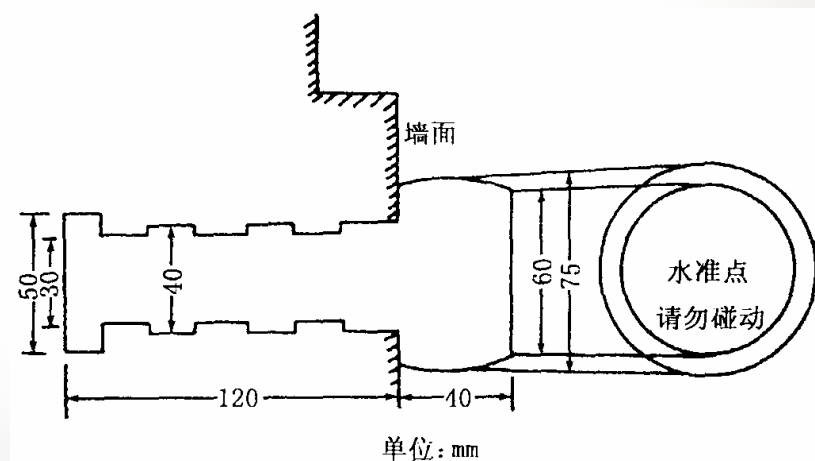
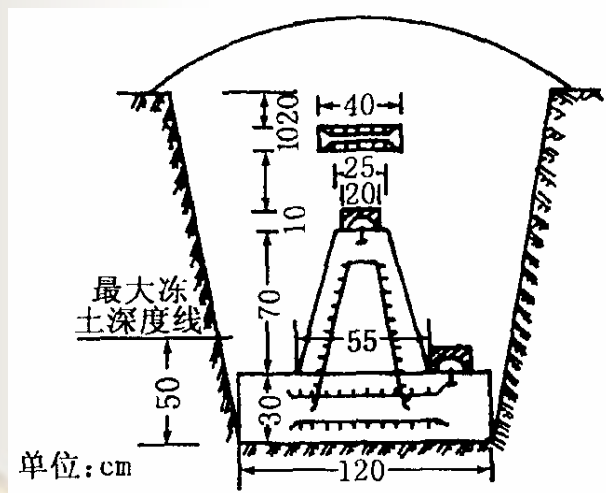


5.2.2 城市和工程建设高程控制测量

首级水准路线上的结点应埋设基本水准标石，基本水准标石及其埋设如左下图所示。

墙上水准标志如右下图所示，一般嵌设在地基已经稳固的永久性建筑物的基础部分，水准测量时，水准标尺安放在标志的突分。

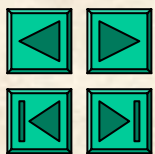
埋设水准标石时，一定要将底部及周围的泥土夯实，标石埋设后，应绘制点之记，并办理托管手续。



5.3 精密水准仪与水准尺

- 5.3.1 精密水准仪的构造特点
- 5.3.2 精密水准标尺的构造特点
- 5.3.3 Wild N3精密水准仪
- 5.3.4 Zeiss Ni 004精密水准仪
- 5.3.5 国产S1型精密水准仪

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.3.1 精密水准仪的构造特点

对于精密水准测量的精度而言，除一些外界因素的影响外，观测仪器——水准仪在结构上的精确性与可靠性是具有重要意义的。为此，对精密水准仪必须具备的一些条件提出下列要求。

1. 高质量的望远镜光学系统

为了在望远镜中能获得水准标尺上分划线的清晰影像，望远镜必须具有足够的放大倍率和较大的物镜孔径。一般精密水准仪的放大倍率应大于40倍，物镜的孔径应大于50mm。

2. 坚固稳定的仪器结构

仪器的结构必须使视准轴与水准轴之间的联系相对稳定，不受外界条件的变化而改变它们之间的关系。一般精密水准仪的主要构件均用特殊的合金钢制成，并在仪器上套有起隔热作用的防护罩。

3. 高精度的测微器装置

精密水准仪必须有光学测微器装置，借以精密测定小于水准标尺最小分划线间格值的尾数，从而提高在水准标尺上的读数精度。

一般精密水准仪的光学测微器可以读到0.1mm，估读到0.01mm



5.3.1 精密水准仪的构造特点

4.高灵敏的管水准器

一般精密水准仪的管水准器的格值为 $10''/2\text{mm}$ 。由于水准器的灵敏度愈高，观测时要使水准器气泡迅速置中也就愈困难，为此，在精密水准仪上必须有倾斜螺旋（又称微倾螺旋）的装置，借以可以使视准轴与水准轴同时产生微量变化，从而使水准气泡较为容易地精确置中以达到视准轴的精确整平。

5.高性能的补偿器装置

对于自动安平水准仪补偿元件的质量以及补偿器装置的精密度都可以影响补偿器性能的可靠性。如果补偿器不能给出正确的补偿量，或是补偿不足，或是补偿过量，都会影响精密水准测量观测成果的精度。

我国水准仪系列按精度分类有S05型，S1型，S3型等。S是“水”字的汉语拼音第一个字母，S后面的数字表示每公里往返平均高差的偶然中误差的毫米数。

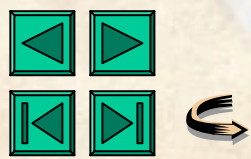
我国水准仪系列及基本技术参数列于下表。



我国水准仪系列及基本技术参数

技术参数项目		水准仪系列型号			
		S05	S1	S3	S10
每公里往返平均高差中误差		≤0.5mm	≤1mm		≤10mm
望远镜放大率		≥40倍	≥40倍	≤3mm	≥25倍
望远镜有效孔径		≥60mm	≥50mm	≥30倍	≥35mm
管状水准器格值		10″/2mm	10″/2mm	≥42mm	20″/2m
测微器有效量测范围		5mm	5mm	20″/mm	m
测微器最小分格值		0.1mm	0.1mm		
自动安平	补偿范围	±8′	±8′	±8′	±10′
水准仪	安平精度	±0.1″	±0.2″	±0.5″	±2″
补偿性能	安平时间不长于	2s	2s	2s	2s

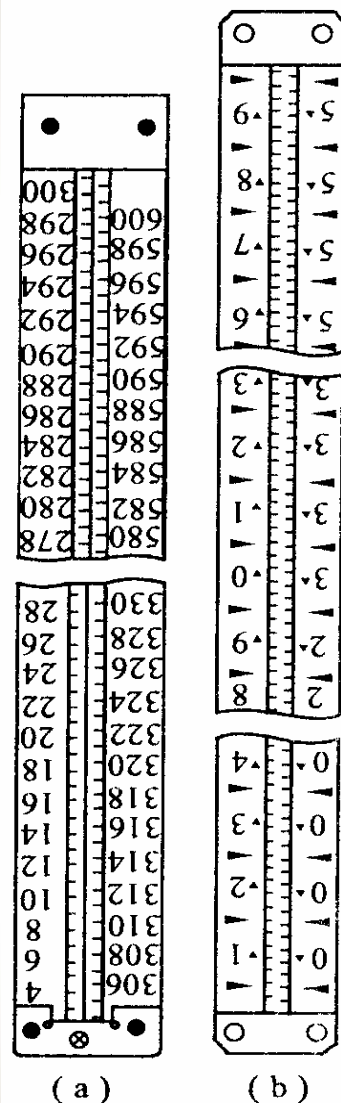
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.3.2 精密水准标尺的构造特点

水准标尺是测定高差的长度标准，如果水准标尺的长度有误差，则对精密水准测量的观测成果带来系统性质的误差影响，为此，对精密水准标尺提出如下要求：

(1) 当空气的温度和湿度发生变化时，水准标尺分划间的长度必须保持稳定，或仅有微小的变化。一般精密水准尺的分划是漆在因瓦合金带上，因瓦合金带则以一定的拉力引张在木质尺身的沟槽中，这样因瓦合金带的长度不会受木质尺身伸缩变形影响。水准标尺分划的数字是注记在因瓦合金带两旁的木质尺身上，如图 (a)、(b) 所示。



5.3.2 精密水准标尺的构造特点

(2) 水准标尺的分划必须十分正确与精密，分划的偶然误差和系统误差都应很小。水准标尺分划的偶然误差和系统误差的大小主要决定于分划刻度工艺的水平，当前精密水准标尺分划的偶然中误差一般在 $8 \sim 11 \mu m$ 。由于精密水准标尺分划的系统误差可以通过水准标尺的平均每米真长加以改正，所以分划的偶然误差代表水准标尺分划的综合精度。

(3) 水准标尺在构造上应保证全长笔直，并且尺身不易发生长度和弯扭等变形。一般精密水准标尺的木质尺身均应以经过特殊处理的优质木料制作。为了避免水准标尺在使用中尺身底部磨损而改变尺身的长度，在水准标尺的底面必须钉有坚固耐磨的金属底板。

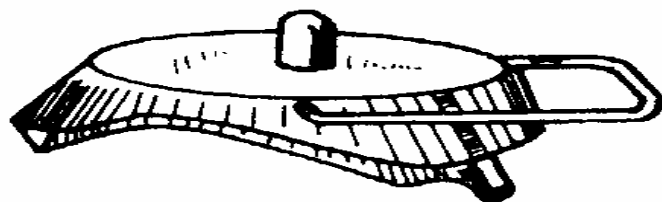


5.3.2 精密水准标尺的构造特点

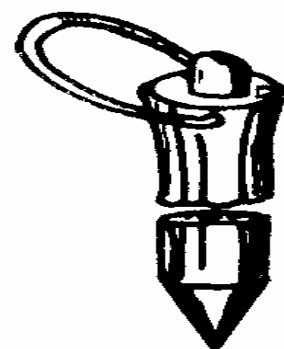
(4) 在精密水准标尺的尺身上应附有圆水准器装置，作业时扶尺者借以使水准标尺保持在垂直位置。在尺身上一般还应有扶尺环的

(5) 为了提高对水准标尺分划的照准精度，水准标尺分划的形式和颜色与水准标尺的颜色相协调，一般精密水准标尺都为黑色线条分划，与浅黄色的尺面相配合，如21页图所示，有利于观测时对水准标尺分划精确照准。装置，以便扶尺者使水准标尺稳定在垂直位置。

在精密水准测量作业时，水准标尺应竖立于特制的具有一定重量的尺垫或尺桩上。尺垫和尺桩的形状如下图所示。



尺垫

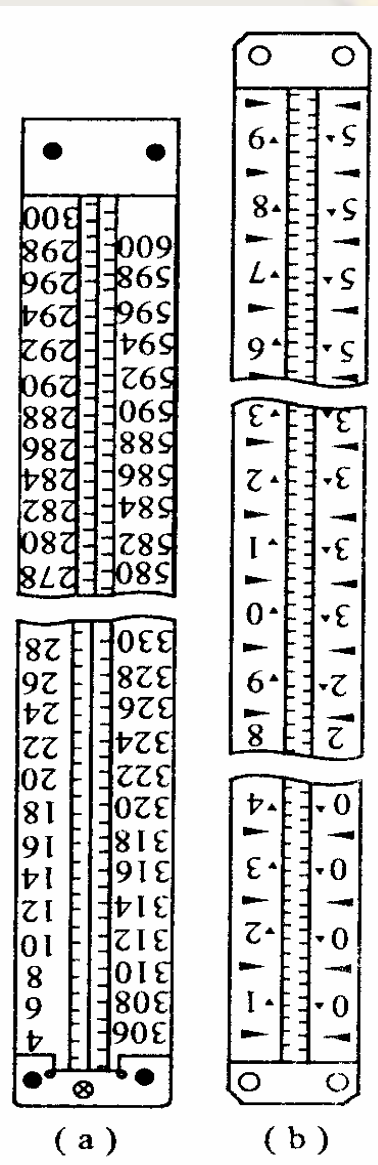


尺桩

5.3.2 精密水准标尺的构造特点

线条分划精密水准标尺的分格值有10mm和5mm两种。分格值为10mm的精密水准标尺如图(a)所示,它有两排分划,尺面右边一排分划注记从0~300cm,称为基本分划,左边一排分划注记从300~600cm称为辅助分划,同一高度的基本分划与辅助分划读数相差一个常数,称为基辅差,通常又称尺常数,水准测量作业时可以用以检查读数的正确性。分格值为5mm的精密水准标尺如图

(b)所示,它也有两排分划,但两排分划彼此错开5mm,所以实际上左边是单数分划,右边是双数分划,也就是单数分划和双数分划各占一排,而没有辅助分划。木质尺面右边注记的是米数,左边注记的是分米数,整个注记从0.1~5.9m,实际分格值为5mm,分划注记比实际数值大了一倍,所以用这种水准标尺所测得的高差值必须除以2才是实际的高差值。

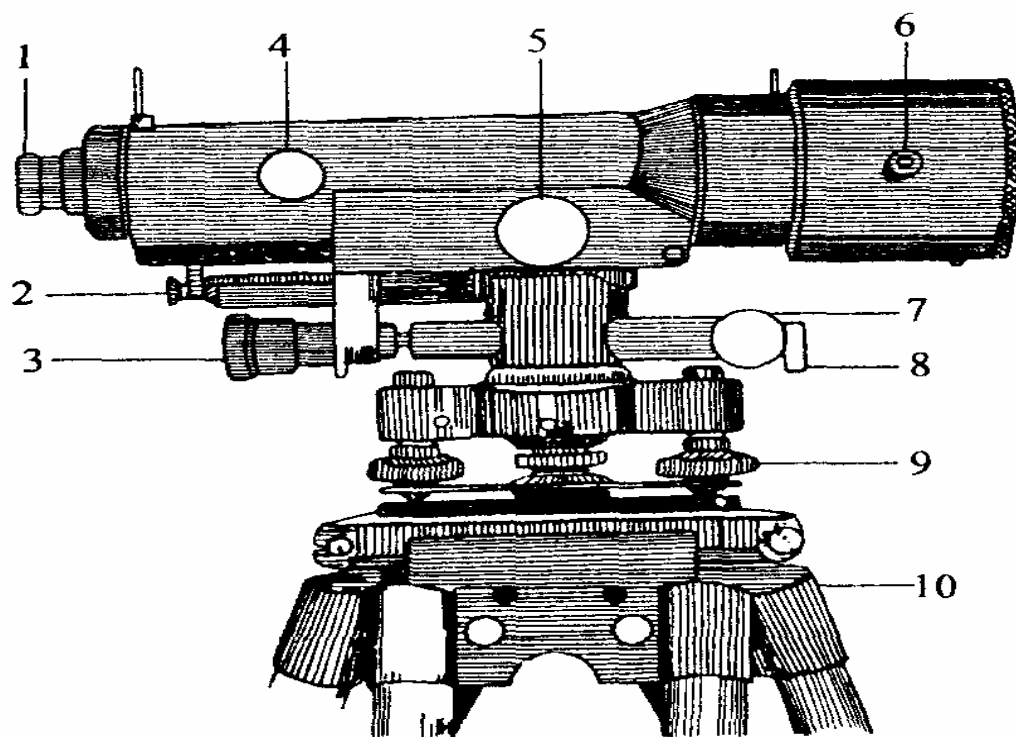


5.3.3 Wild N3精密水准仪

WildN3精密水准仪的外形如下图a所示。望远镜物镜的有效孔径为50mm，放大倍率为40倍，管状水准器格值为 $10''/2\text{mm}$ 。N3精密水准仪与分格值为10mm的精密因瓦水准标尺配套使用，标尺的基辅差为301.55cm。在望远镜目镜的左边上下有两个小目镜（在下图a中没有表示出来），它们是符合气泡观察目镜和测微器读数目镜，在3个不同的目镜中所见到的影像如下图b所示。

转动倾斜螺旋，使符合气泡观察目镜的水准气泡两端符合，则视线精确水平，此时可转动测微螺旋使望远镜目镜中看到的楔形丝夹准水准标尺上的148分划线，也就是使148分划线平分楔角，再在测微器目镜中读出测微器读数653(即6.53mm)，故水平视线在水准标尺上的全部读数为148.653cm。

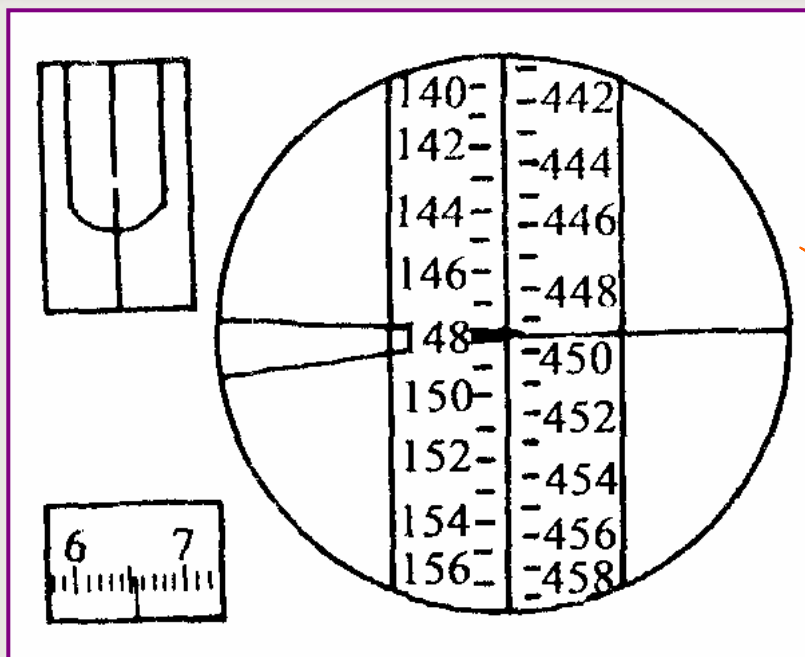
Wild N3精密水准仪



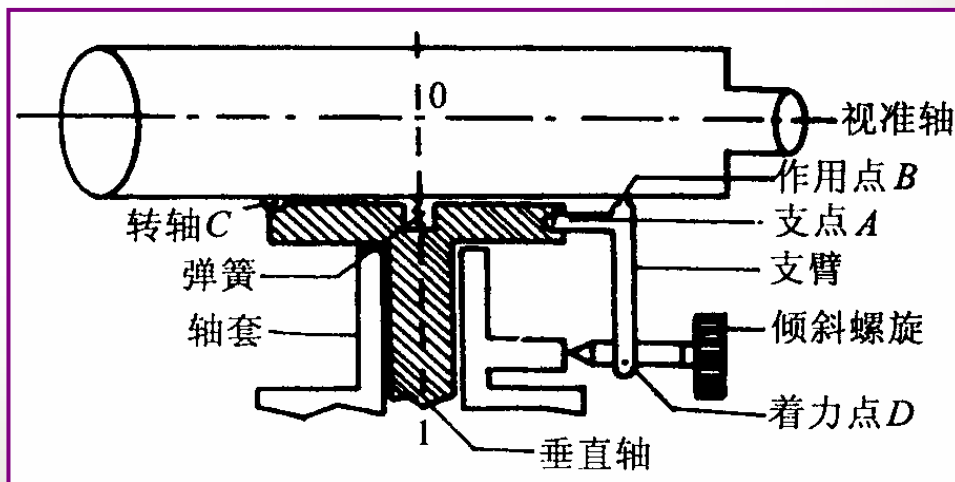
1—望远镜目镜；2—水准气泡反光镜；3—倾斜螺旋；
4—调焦螺旋；5—平行玻璃板测微螺旋；6—平行玻璃
板旋转轴；7—水平微动螺旋；8—水平制动螺旋；9—脚
螺旋；10—脚架

图a

Wild N3精密水准仪



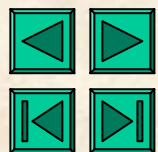
图b



图c

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

27/92



1. N3精密水准仪的倾斜螺旋装置

上图c所示是N3型精密水准仪倾斜螺旋装置及其作用示意图。它是一种杠杆结构，转动倾斜螺旋时，通过着力点可以带动支臂绕支点转动，使其对望远镜的作用点产生微量升降，从而使望远镜绕转轴作微量倾斜。由于望远镜与水准器是紧密相联的，于是倾斜螺旋的旋转就可以使水准轴和视准轴同时产生微量的变化，借以迅速而精确地将视准轴整平。在倾斜螺旋上一般附有分划盘，可借助于固定指标进行读数，由倾斜螺旋所转动的格数可以确定视线倾角的微小变化量，其转动范围约为7周。借助于这种装置，可以测定视准轴微倾的角度值，在进行跨越障碍物的精密水准测量时具有重要作用。



1. N3精密水准仪的倾料螺旋装置

必须指出，由上图c可见仪器转轴并不位于望远镜的中心，而是位于靠近物镜的一端。由圆水准器整平仪器时，垂直轴并不能精确在垂直位置，可能偏离垂直位置较大。此时使用倾斜螺旋精确整平视准轴时，将会引起视准轴高度的变化，倾斜螺旋转动量愈大，视准轴高度的变化也就愈大。如果前后视精确整平视准轴时，倾斜螺旋的转动量不等，就会在高差中带来这种误差的影响。

因此，在实际作业中规定：只有在符合水准气泡两端影像的分离量小于1cm时（这时仪器的垂直轴基本上在垂直位置），才允许使用倾斜螺旋来进行精确整平视准轴。但有些仪器转轴的装置，位于过望远镜中心的垂直几何轴线上。

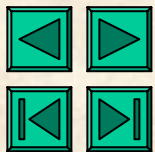


2. N3精密水准仪的测微器装置

下图是N3精密水准仪的光学测微器的测微工作原理示意图。由图可见，光学测微器由平行玻璃板、测微器分划尺、传动杆和测微螺旋等部件组成。平行玻璃板传动杆与测微分划尺相连。测微分划尺上有100个分格，它与10mm相对应，即每分格为0.1mm，可估读至0.01mm。每10格有较长分划线并注记数字，每两长分划线间的格值为1mm。当平行玻璃板与水平视线正交时，测微分划尺上初始读数为5mm。转动测微螺旋时，传动杆就带动平行玻璃板相对于物镜作前俯后仰，并同时带动测微分划尺作相应的移动。平行玻璃板相对于物镜作前俯后仰，水平视线就会向上或向下作平行移动。若逆转测微螺旋，使平行玻璃板前俯到测微分划尺移至10mm处，则水平视线向下平移5mm，反之，顺转测微螺旋使平行玻璃板后仰到测微分划尺移至0mm处，则水平视线向上平移5mm。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

30 / 92



N3 精密水准仪的测微器装置

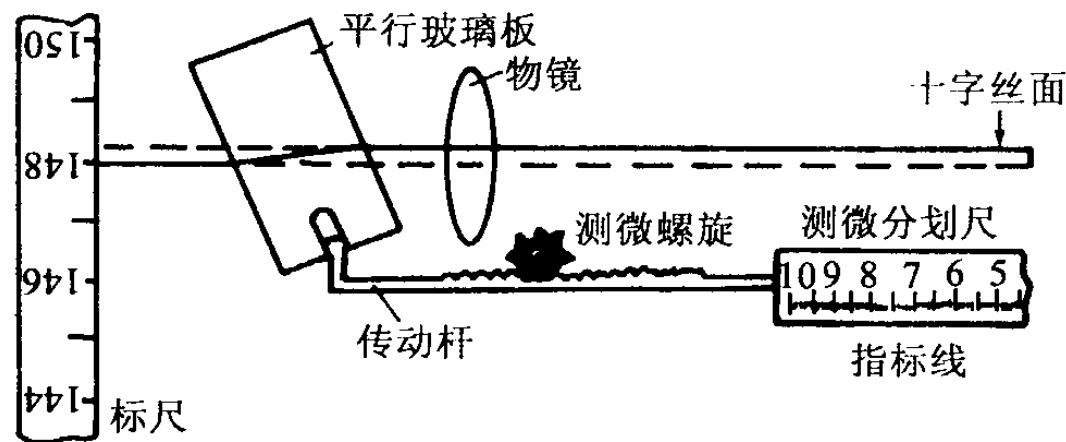
在下图中，当平行玻璃板与水平视线正交时，水准标尺上读数应为在两相邻分划148与149之间，此时测微分划上读数为5mm，而不是0。转动测微螺旋，平行玻璃板作前俯，使水平视线向下平移与就近的148分划重合，这时测微分划尺上的读数为6.50mm，而水平视线的平移量应为6.50~5mm，最后读数为

$$a = 148\text{cm} + 6.50\text{mm} - 5\text{mm}$$

即

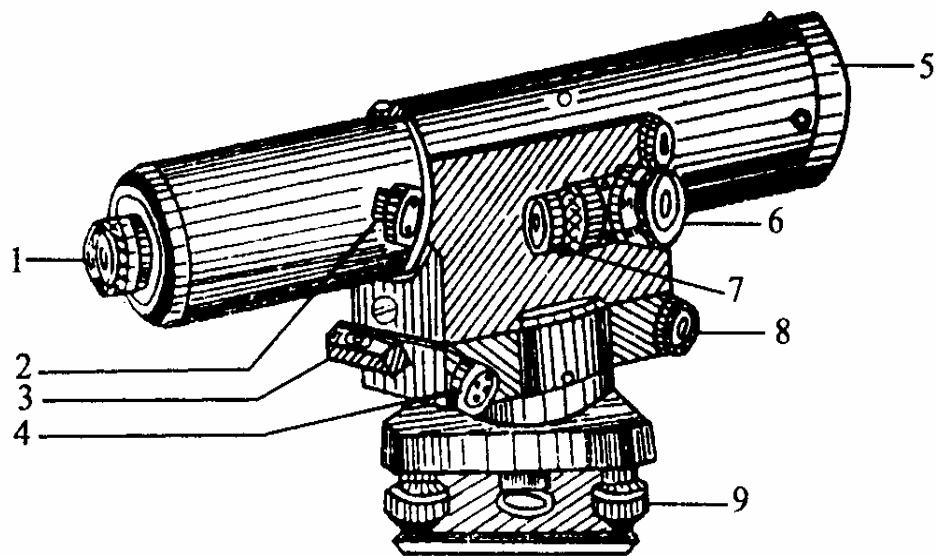
$$a = 148.650\text{cm} - 5\text{mm}$$

由上述可知，每次读数中应减去常数（初始读数）5mm，但因在水准测量中计算高差时能自动抵消这个常数，所以在水准测量作业时，读数、记录、计算过程中都可以不考虑这个常数。但在单向读数时就必须减去这个初始读数。



5.3.4 Zeiss Ni 004精密水准仪

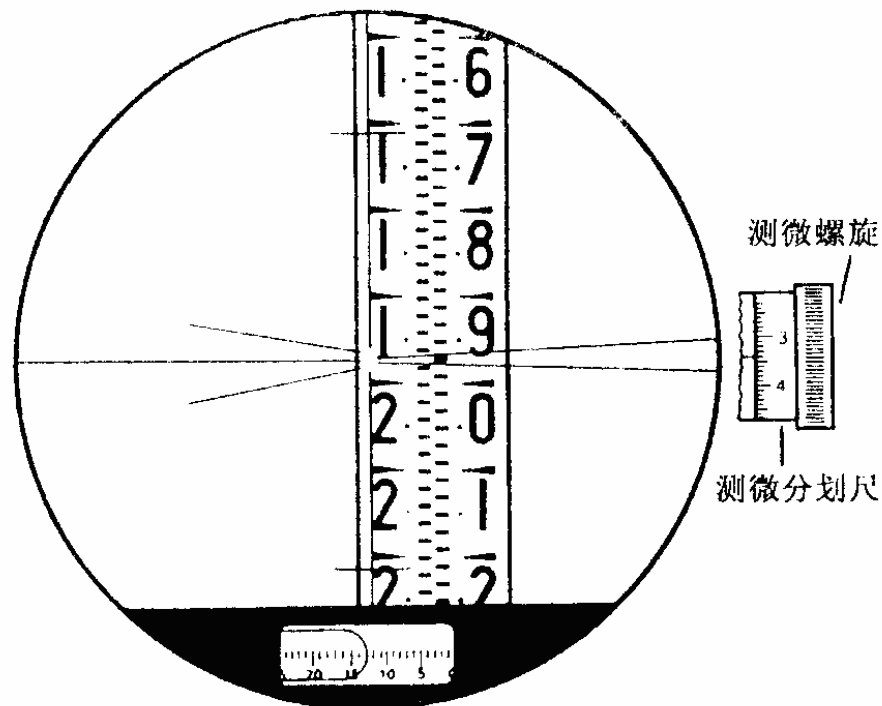
该仪器的主要特点是对热影响的感应较小，即当外界温度变化时，水准轴与视准轴之间的交角的变化很小，这是因为望远镜、管状水准器和平行玻璃板的倾斜设备等部件，都装在一个附有绝热层的金属套筒内，这样就保证了水准仪上这些部件的温度迅速达到平衡。



1—望远镜目镜；2—调焦螺旋；3—概略置平水准器；4—倾斜螺旋；5—望远镜物镜；6—测微螺旋；7—读数放大镜；8—水平微动螺旋；9—脚螺旋

仪器物镜的有效孔径为56mm，望远镜放大倍率为44倍，望远镜目镜视场内有左右两组楔形丝，如右图所示，右边一组楔形丝的交角较小，在视距较远时使用，左边一组楔形丝的交角较大，在视距较近时使用，管状水准器格值为 $10''/2\text{mm}$ 。转动测微螺旋可使水平视线在10mm范围内平移，测微器的分划鼓直接与测微螺旋相连（见右图），通过放大镜在测微鼓上进行读数，测微鼓上有100个分格，所以测微鼓最小格值为0.1mm。从望远镜目镜视场中所看到的影像如右图所示，视场下部是水准器的符合气泡影像。

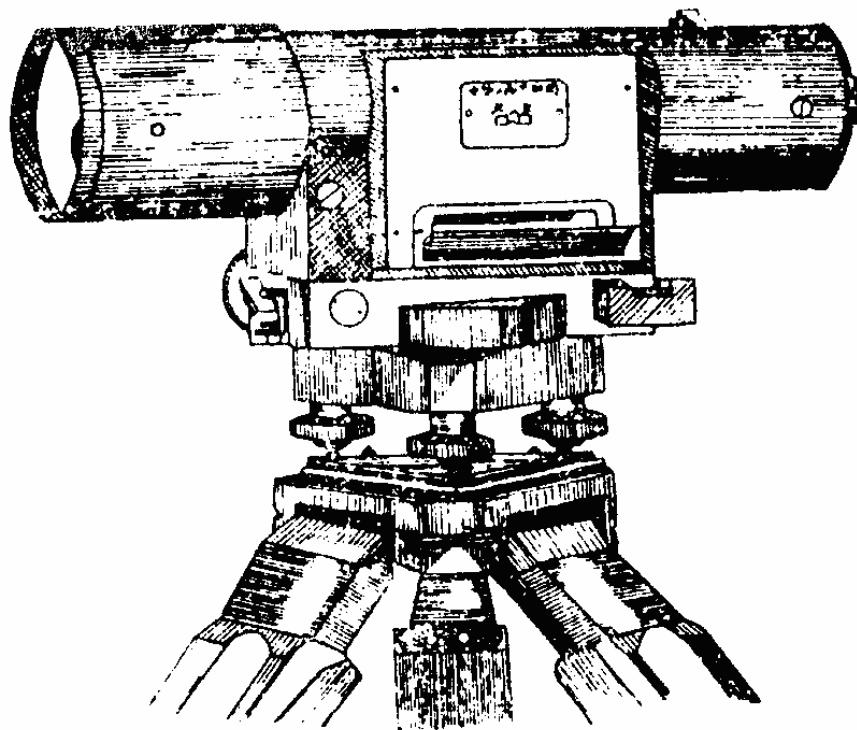
Ni 004精密水准仪与分格值为5mm的精密因瓦水准尺配套使用。在右图中，使用测微螺旋使楔形丝夹准水准标尺上197分划，在测微分划鼓上的读数为340，即3.40mm，水准标尺上的全部读数为197.340cm。



Zeiss Ni 004精密水准仪

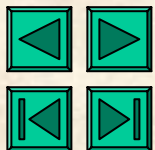
5.3.5 国产S1型精密水准仪

S1型精密水准仪由北京测绘仪器厂生产。仪器物镜的有效孔径为50mm，望远镜放大倍率为40倍，管状水准器格值为 $10''/2\text{mm}$ 。转动测微螺旋可使水平视线在10mm范围内作平移，测微器分划尺有100个分格，故测微器分划尺最小格值为0.1mm。



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

34 / 92

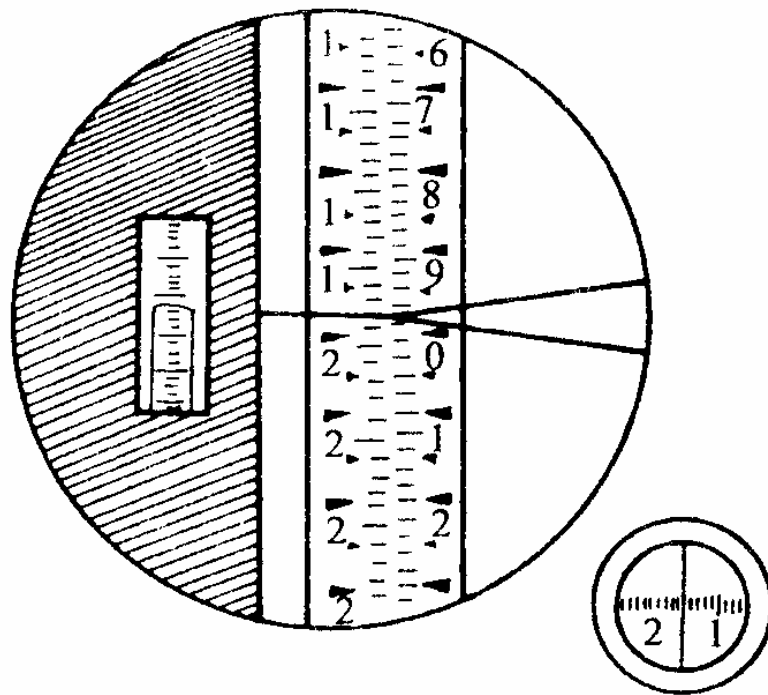


5.3.5 国产S1型精密水准仪

国产S1型精密水准仪望远镜目镜视场中所看到的影像如右图所示，视场左边是水准器的符合气泡影像，测微器读数显微镜在望远镜目镜的右下方。

该仪器与分格值为5mm的精密水准标尺配套使用。

在右图中，使用测微螺旋使楔形丝夹准198分划，在测微器读数显微镜中的读数为150，即1.50mm，水准标尺上的全部读数为198.150cm。



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

5.4 精密水准测量的主要误差来源及其影响

5.4.1 视准轴与水准轴不平行的误差

5.4.2 水准标尺长度误差的影响

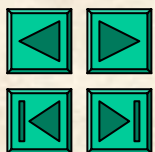
5.4.3 仪器和水准标尺（尺台或尺桩）垂直位移的影响

5.4.4 大气垂直折光的影响

5.4.5 电磁场对水准测量的影响

5.4.6 观测误差的影响

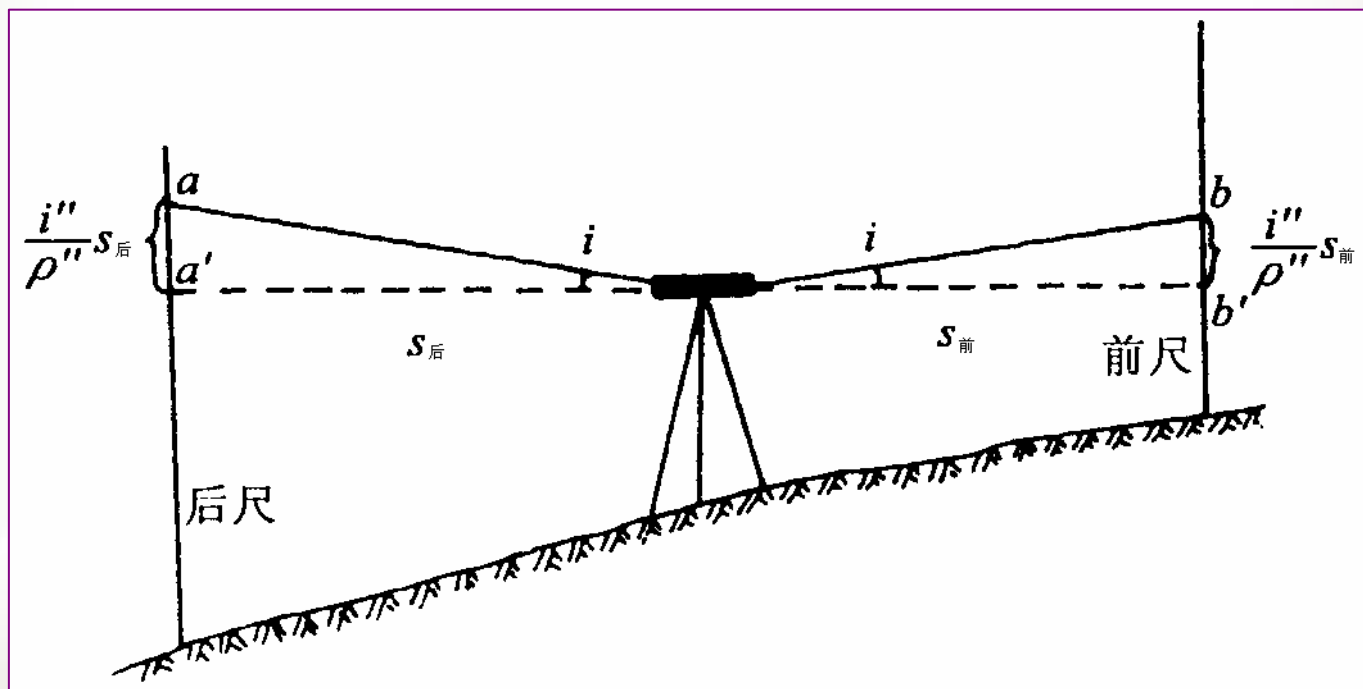
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.4.1 视准轴与水准轴不平行的误差

1. i 角的误差影响

虽然经过 i 角的检验校正，但要使两轴完全保持平行是困难的，因此，当水准气泡居中时，视准轴仍不能保持水平，使水准标尺上的读数产生误差，并且与视距成正比。



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

1. i 角的误差影响

上图中, $s_{\text{前}}$, $s_{\text{后}}$ 为前后视距, 由于存在 i 角, 并假设 i 角不变的情况下, 在前后水准标尺上的读数误差分别为 $i'' \cdot s_{\text{前}} \frac{1}{\rho''}$ 和 $i'' \cdot s_{\text{后}} \frac{1}{\rho''}$, 对高差的误差影响为

$$\delta_s = i''(s_{\text{后}} - s_{\text{前}}) \frac{1}{\rho''}$$

对于两个水准点之间一个测段的高差总和的误差影响为

$$\sum \delta_s = i''(\sum s_{\text{后}} - \sum s_{\text{前}}) \frac{1}{\rho''}$$



5.4.1 视准轴与水准轴不平行的误差

由此可见，在 i 角保持不变的情况下，一个测站上的前后视距相等或一个测段的前后视距总和相等，则在观测高差中由于 i 角的误差影响可以得到消除。但在实际作业中，要求前后视距完全相等是困难的。下面讨论前后视距不等差的容许值问题。

设 $i = 15''$ ，要求 δ_s 对高差的影响小到可以忽略不计的程度，如 $\delta_s = 0.1\text{mm}$ ，那么前后视距之差的容许值为

$$(s_{\text{后}} - s_{\text{前}}) \leq \frac{\delta_s}{i''} \rho'' \approx 1.4\text{m}$$

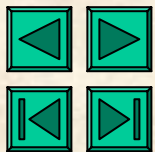
为了顾及观测时各种外界因素的影响，所以规定，二等水准测量前后视距差应 1m 。为了使各种误差不致累积起来，还规定由测段第一个测站开始至每一测站前后视距累积差，对于二等水准测量而言应 3m 。



5.4.1 视准轴与水准轴不平行的误差

2. φ 角误差的影响

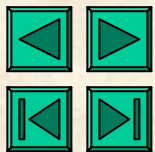
当仪器不存在 i 角，则在仪器的垂直轴严格垂直时，交叉误差 φ 并不影响在水准标尺上的读数，因为仪器在水平方向转动时，视准轴与水准轴在垂直面上的投影仍保持互相平行，因此对水准测量并无不利影响。但当仪器的垂直轴倾斜时，如与视准轴正交的方向倾斜一个角度，那么这时视准轴虽然仍在水平位置，但水准轴两端却产生倾斜，从而水准气泡偏离居中位置，仪器在水平方向转动时，水准气泡将移动，当重新调整水准气泡居中进行观测时，视准轴就会偏离水平位置而倾斜，显然它将影响在水准标尺上的读数。为了减少这种误差对水准测量成果的影响，应对水准仪上的圆水准器进行检验与校正和对交叉误差 φ 进行检验与校正。



3.温度变化对*i*角的影响

精密水准仪的水准管框架是同望远镜筒固连的，为了使水准轴与视准轴的联系比较稳固，这些部件是采用因瓦合金钢制造的，并把镜筒和框架整体装置在一个隔热性能良好的套筒中，以防止由于温度的变化，使仪器有关部件产生不同程度的膨胀或收缩，而引起角的变化。

但是当温度变化时，完全避免*i*角的变化是不可能的。例如仪器受热的部位不同，对角的影响也显著不同，当太阳射向物镜和目镜端影响最大，旁射水准管一侧时，影响较小，旁射与水准管相对的另一侧时，影响最小。因此，温度的变化对*i*角的影响是极其复杂的，实验结果表明，当仪器周围的温度均匀地每变化1°C时，*i*角将平均变化约为0.5"，有时甚至更大些，有时竟可达到1~2"。



3.温度变化对*i*角的影响

由于*i*角受温度变化的影响很复杂，因而对观测高差的影响是难以用改变观测程序的办法来完全消除，而且，这种误差影响在往返测不符值中也不能完全被发现，这就使高差中数受到系统性的误差影响，因此，减弱这种误差影响最有效的办法是减少仪器受辐射热的影响，如观测时要打伞，避免日光直接照射仪器，以减小*i*角的复杂变化，同时，在观测开始前应将仪器预先从箱中取出，使仪器充分地与环境空气温度一致。

如果我们认为在观测的较短时间段内，由于受温度的影响，*i*角与时间成比例地均匀变化，则可以采取改变观测程序的方法在一定程度上来消除或削弱这种误差对观测高差的影响。

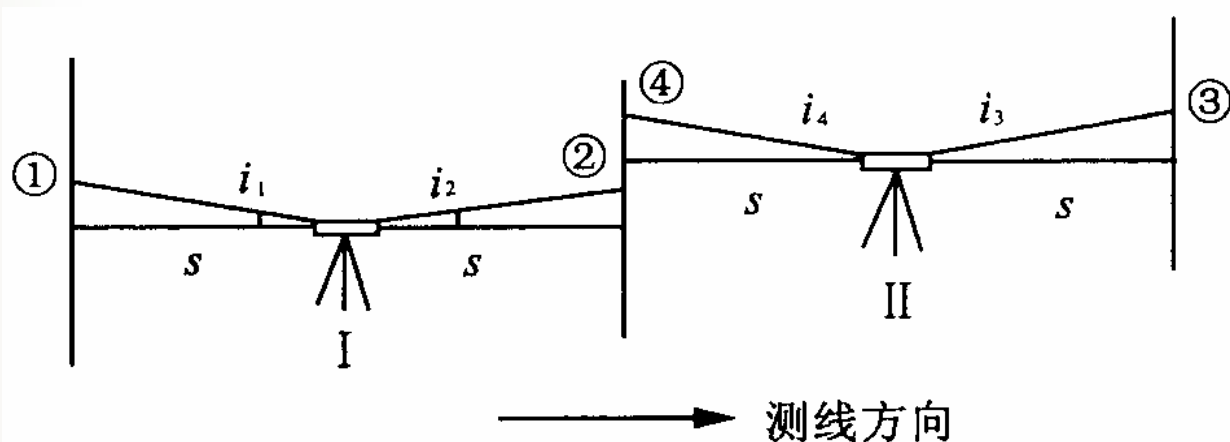
两相邻测站 I、II 对于基本分划如按下列①、②、③、④程序观测，即

在测站 I 上： ①后视 ②前视

在测站 II 上： ③前视 ④后视

3. 温度变化对*i*角的影响

则由下图可知，对测站 I、II 观测高差的影响分别为 $-s(i_2 - i_1)$ 和 $+s(i_4 - i_3)$, s 为视距, i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 为每次读数变化了的*i*角。



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

3.温度变化对*i*角的影响

由于我们认为在观测的较短时间段内，*i*角与时间成比例地均匀变化，所以，由此可见，在测站 I、II 的观测高差之和中就抵消了由于*i*角变化的误差影响，但是，由于*i*角的变化不完全按照与时间成比例地均匀变化，因此，严格地说，不一定完全相等，再说相邻奇偶测站的视距也不一定相等，所以按上述程序进行观测，只能说基本上消除由于*i*角变化的误差影响。

根据同样的道理，对于相邻测站 I、II 辅助分划的观测程序应为

在测站 I 上： ①前视 ②后视

在测站 II 上： ③后视 ④前视

综上所述，在相邻两个测站上，对于基本分划和辅助分划的观测程序可以归纳为奇数站的观测程序

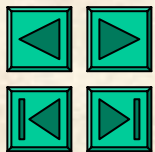
后（基）——前（基）——前（辅）——后（辅）

偶数站的观测程序

前（基）——后（基）——后（辅）——前（辅）

所以，将测段的测站数安排成偶数，对于削减由于角变化对观测高差的误差影响也是必要的。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.4.2 水准标尺长度误差的影响

1. 水准标尺每米长度误差的影响

在精密水准测量作业中必须使用经过检验的水准标尺。设 f 为水准标尺每米间隔平均真长误差，则对于一个测站的观测高差 h 应加的改正数为

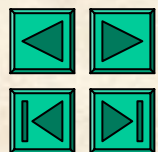
$$\delta_f = hf$$

对于一个测段来说，应加的改正数为

$$\sum \delta_f = f \sum h$$

式中 $\sum h$ 为一个测段各测站观测高差之和。

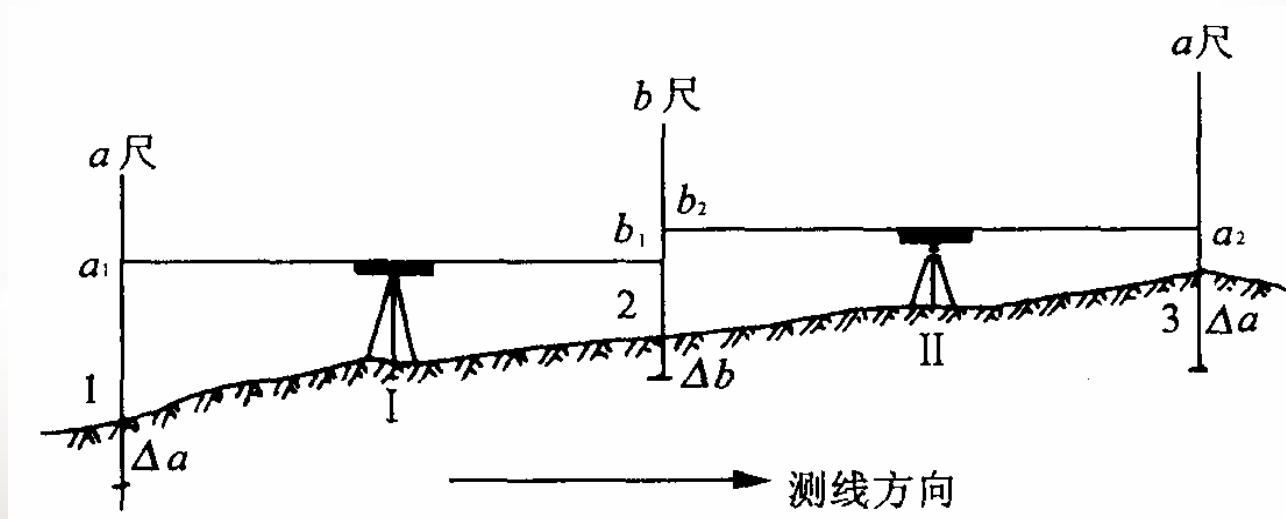
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



2. 两水准标尺零点差的影响

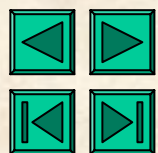
两水准标尺的零点误差相等，设 a ， b 水准标尺的零点误差分别为 Δa 和 Δb ，它们都会在水准标尺上产生误差。

如下图所示，在测站 I 上顾及两水准标尺的零点误差对前后视水准标尺上读数 b_1 ， a_1 的影响，则测站 I 的观测高差为 $h_{12} = (a_1 - \Delta a) - (b_1 - \Delta b) = (a_1 - b_1) - \Delta a + \Delta b$



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

46 / 92



2. 两水准标尺零点差的影响

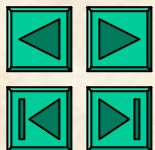
在测站 II 上，顾及两水准标尺零点误差对前后视水准标尺上读数 a_2, b_2 的影响，则测站 II 的观测高差为

$$h_{23} = (b_2 - \Delta b) - (a_2 - \Delta a) = (b_2 - a_2) - \Delta b + \Delta a$$

则 1、3 点的高差，即 I、II 测站所测高差之和为

$$h_{13} = h_{12} + h_{23} = (a_1 - b_1) + (b_2 - a_2)$$

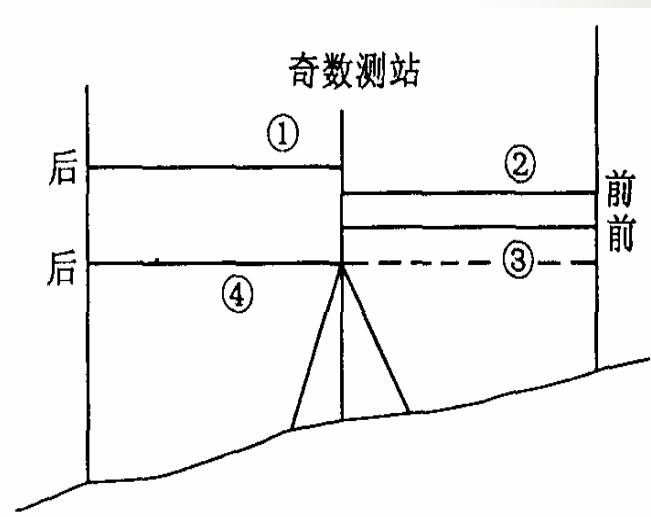
由此可见，尽管两水准标尺的零点误差 $\Delta a \neq \Delta b$ ，但在两相邻测站的观测高差之和中，抵消了这种误差的影响，故在实际水准测量作业中各测段的测站数目应安排成偶数，且在相邻测站上使两水准标尺轮流作为前视尺和后视尺。



5.4.3 仪器和水准标尺（尺台或尺桩）垂直位移的影响

仪器和水准标尺在垂直方向位移所产生的误差，是精密水准测量系统误差的重要来源。如图

按图中的观测程序，当仪器的脚架随时间而逐渐下沉时，在读完后视基本分划读数转向前视基本分划读数的时间内，由于仪器的下沉，视线将有所下降，而使前视基本分划读数偏小。同理，由于仪器的下沉，后视辅助分划读数偏小，如果前视基本分划和后视辅助分划的读数偏小的量相同，则采用“后前前后”的观测程序所测得的基辅高差的平均值中，可以较好地消除这项误差影响。



5.4.3 仪器和水准标尺（尺台或尺桩）垂直位移的影响

水准标尺（尺台或尺桩）的垂直位移，主要是发生在迁站的过程中，由原来的前视尺转为后视尺而产生下沉，于是总使后视读数偏大，使各测站的观测高差都偏大，成为系统性的误差影响。这种误差影响在往返测高差的平均值中可以得到有效的抵偿，所以水准测量一般都要求进行往返测。

在实际作业中，我们要尽量设法减少水准标尺的垂直位移，如立尺点要选在中等坚实的土壤上；水准标尺立于尺台后至少要半分钟后才进行观测，这样可以减少其垂直位移量，从而减少其误差影响。

有时仪器脚架和尺台（或尺桩）也会发生上升现象，就是当我们用力将脚架或尺台压入地下之后，在我们不再用力的情况下，土壤的反作用有时会使脚架或尺台逐渐上升，如果水准测量路线沿着土壤性质相同的路线敷设，而每次都有这种上升的现象发生，结果会产生系统性质的误差影响，根据研究，这种误差可以达到相当大的数值。



5.4.4 大气垂直折光的影响

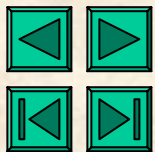
近地面大气层的密度分布一般随离开地面的高度而变化，因此，光线通过在不断按梯度变化的大气层时，会在垂直方向产生弯曲，并且弯向密度较大的一方，这种现象叫做大气垂直折光。

在地势较为平坦的地区进行水准测量时，前后视距相等，视线弯曲的程度也相同，因此，在观测高差中就可以消除这种误差影响。但是，由于越接近地面的大气层，密度的梯度越大，前后视线离地面的高度不同，视线所通过大气层的密度也不同，折光影响也就不同，所以前后视线在垂直面内的弯曲程度也不同。如水准测量通过一个较长的坡度时，由于前视视线离地面的高度总是大于（或小于）后视视线离地面的高度，当上坡时前视所受的折光影响比后视要大，视线弯曲凸向下方，这时，垂直折光对高差将产生系统性质误差影响。

为了减弱垂直折光对观测高差的影响，应使前后视距尽量相等，并使视线离地面有足够的高度，在坡度较大的水准路线上进行作业时适当缩短视距。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

50 / 92

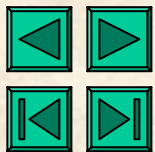


5.4.4 大气垂直折光的影响

垂直折光的影响，还与一天内的不同时间有关，在日出后半小时左右和日落前半小时左右这两段时间内，由于地表面的吸热和散热，使近地面的大气密度和折光差变化迅速而无规律，故不宜进行观测；在中午一段时间内，由于太阳强烈照射，使空气对流剧烈，致使目标成像不稳定，也不宜进行观测。为了减弱垂直折光对观测高差的影响，水准规范还规定每一测段的往测和返测应分别在上午或下午，这样在往返测观测高差的平均值中可以减弱垂直折光的影响。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

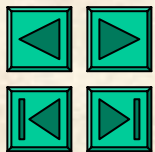
51 / 92



5.4.5 电磁场对水准测量的影响

根据研究发现输电线经过的地带所产生的电磁场，对光线，其中包括对水准测量视准线位置的正确性有系统性的影响，并与电流强度有关。输电线所形成的电磁场对平行于电磁场和正交于电磁场的视准线将有不同影响。

为了避免这种系统性的影响，在布设与输电线平行的水准路线时，必须使水准线路离输电线50m以外，如果水准线路与输电线相交，则其交角应为直角，并且应将水准仪严格地安置在输电线的下方，标尺点与输电线成对称布置，这样，照准后视和前视水准标尺的视准线直线性的变形可以互相抵消。

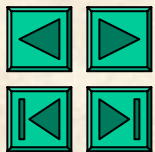


5.4.6 观测误差的影响

精密水准测量的观测误差，主要有水准器气泡居中的误差，照准水准标尺上分划的误差和读数误差，这些误差都是属于偶然性质的。由于精密水准仪有倾斜螺旋和符合水准器，并有光学测微器装置，可以提高读数精度，同时用楔形丝照准水准标尺上的分划线，这样可以减小照准误差，因此，这些误差影响都可以有效地控制在很小的范围内。实验结果分析表明，这些误差在每测站上由基辅分划所得观测高差的平均值中的影响还不到0.1mm。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

53/92



§ 5.5 精密水准测量的实施

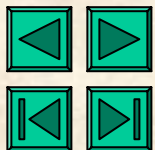
5.5.1 精密水准测量作业的一般规定

5.5.2 精密水准测量观测

精密水准测量一般指国家一、二等水准测量，在各项工程的不同建设阶段的高程控制测量中，极少进行一等水准测量，故在工程测量技术规范中，将水准测量分为二、三、四等三个等级，其精度指标与国家水准测量的相应等级一致。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

54 / 92



5.5.1 精密水准测量作业的一般规定

根据各种误差的性质及其影响规律，水准规范中对精密水准测量的实施作出了各种相应的规定：

(1) 观测前30分钟，应将仪器置于露天阴影处，使仪器与外界气温趋于一致；观测时应用测伞遮蔽阳光；迁站时应罩以仪器罩。

(2) 仪器距前、后视水准标尺的距离应尽量相等，其差应小于规定的限值：二等水准测量中规定，一测站前、后视距差应小于1.0m，前、后视距累积差应小于3m。这样，可以消除或削弱与距离有关的各种误差对观测高差的影响，如角误差和垂直折光等影响。

(3) 对气泡式水准仪，观测前应测出倾斜螺旋的置平零点，并作标记，随着气温变化，应随时调整置平零点的位置。对于自动安平水准仪的圆水准器，须严格置平。

(4) 同一测站上观测时，不得两次调焦；转动仪器的倾斜螺旋和测微螺旋，其最后旋转方向均应为旋进，以避免倾斜螺旋和测微器隙动差对观测成果的影响。

5.5.1 精密水准测量作业的一般规定

(5) 在两相邻测站上，应按奇、偶数测站的观测程序进行观测，对于往测奇数测站按“后前前后”、偶数测站按“前后后前”的观测程序在相邻测站上交替进行。返测时，奇数测站与偶数测站的观测程序与往测时相反，即奇数测站由前视开始，偶数测站由后视开始。这样的观测程序可以消除或减弱与时间成比例均匀变化的误差对观测高差的影响，如角的变化和仪器的垂直位移等影响。

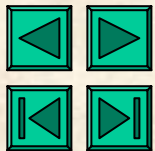
(6) 在连续各测站上安置水准仪时，应使其中两脚螺旋与水准路线方向平行，而第三脚螺旋轮换置于路线方向的左侧与右侧。

(7) 每一测段的往测与返测，其测站数均应为偶数，由往测转向返测时，两水准标尺应互换位置，并应重新整置仪器。在水准路线上每一测段仪器测站安排成偶数，可以削减两水准标尺零点不等差等误差对观测高差的影响。

(8) 每一测段的水准测量路线应进行往测和返测，这样，可以消除或减弱性质相同、正负号也相同的误差影响，如水准标尺垂直位移的误差影响。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

56 / 92



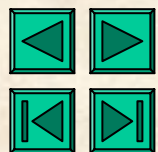
5.5.1 精密水准测量作业的一般规定

(9) 一个测段的水准测量路线的往测和返测应在不同的气象条件下进行，如分别在上午和下午观测。

(10) 使用补偿式自动安平水准仪观测的操作程序与水准器水准仪相同。观测前对圆水准器应严格检验与校正，观测时应严格使圆水准器气泡居中。

(11) 水准测量的观测工作间歇时，最好能结束在固定的水准点上，否则，应选择两个坚稳可靠、光滑突出、便于放置水准标尺的固定点，作为间歇点加以标记，间歇后，应对两个间歇点的高差进行检测，检测结果如符合限差要求（对于二等水准测量，规定检测间歇点高差之差应 $\leq 1.0\text{mm}$ ），就可以从间歇点起测。若仅能选定一个固定点作为间歇点，则在间歇后应仔细检视，确认没有发生任何位移，方可由间歇点起测。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.5.2 精密水准测量观测

1.测站观测程序

往测时，奇数测站照准水准标尺分划的顺序为

后视标尺的基本分划；

前视标尺的基本分划；

前视标尺的辅助分划；

后视标尺的辅助分划；

往测时，偶数测站照准水准标尺分划的顺序为

前视标尺的基本分划；

后视标尺的基本分划；

后视标尺的辅助分划；

前视标尺的辅助分划。

返测时，奇、偶数测站照准标尺的顺序分别与往测偶、奇数测站相同。

1

2

3

4

5

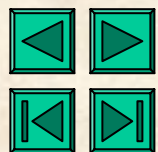
6

7

8

9

10



5.5.2 精密水准测量观测

以往测奇数测站为例，一测站的操作程序如下：

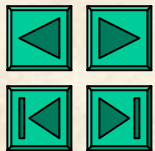
（一）置平仪器。气泡式水准仪望远镜绕垂直轴旋转时，水准气泡两端影像的分离，不得超过1cm，对于自动安平水准仪，要求圆气泡位于指标圆环中央。

（二）将望远镜照准后视水准标尺，使符合水准气泡两端影像近于符合（双摆位自动安平水准仪应置于第Ⅰ摆位）。随后用上、下丝分别照准标尺基本分划进行视距读数（如下表中的（1）和（2））。视距读取4位，第四位数由测微器直接读得。然后，使符合水准气泡两端影像精确符合，使用测微螺旋用楔形平分线精确照准标尺的基本分划，并读取标尺基本分划和测微分划的读数（3）。测微分划读数取至测微器最小分划。

（三）旋转望远镜照准前视标尺，并使符合水准气泡两端影像精确符合（双摆位自动安平水准仪仍在第Ⅰ摆位），用楔形平分线照准标尺基本分划，并读取标尺基本分划和测微分划的读数（4）。然后用上、下丝分别照准标尺基本分划进行视距读数（5）和（6）。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

59/92

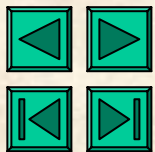


5.5.2 精密水准测量观测

(四) 用水平微动螺旋使望远镜照准前视标尺的辅助分划, 并使符合气泡两端影像精确符合 (双摆位自动安平水准仪置于第Ⅱ摆位), 用楔形平分线精确照准并进行标尺辅助分划与测微分划读数 (7)。

(五) 旋转望远镜, 照准后视标尺的辅助分划, 并使符合水准气泡两端影像精确符合 (双摆位自动安平水准仪仍在第Ⅱ摆位), 用楔形平分线精确照准并进行辅助分划与测微分划读数 (8)。下表中第 (1) 至 (8) 栏是读数的记录部分, (9) 至 (18) 栏是计算部分。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



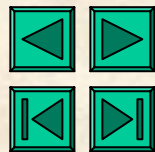
5.5.2 精密水准测量观测

测自_____至_____
时间 始 时 分 末 时 分
温度_____云量_____
天气_____土质_____

20 年 月 日
成 像
风向风速
太阳方向

测站 编号	后尺	下丝	前尺	下丝	方 尺 及 向 号	标尺读数		基+K 减 辅 (一减二)	备考
		上丝		上丝		基本分划 (一次)	辅助分划 (二次)		
	后距d		前距Σd						
	(1)		(5)		后	(3)	(8)	(14)	
	(2)		(6)		前	(4)	(7)	(13)	
	(9)		(10)		后-前	(15)	(16)	(17)	
	(11)		(12)		h			(18)	
					后				
					前				
					后-前				
					h				

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.5.2 精密水准测量观测

现以往测奇数测站的观测程序为例，来说明计算内容与计算步骤
视距部分的计算

$$(9) = (1) - (2)$$

$$(10) = (5) - (6)$$

$$(11) = (9) - (10)$$

$$(12) = (11) + \text{前站}(12)$$

高差部分的计算与检核

$$(14) = (3) + K - (8)$$

式中K为基辅差（对于N3水准标尺而言K=3.0155m）

$$(13) = (4) + K - (7)$$

$$(15) = (3) - (4)$$

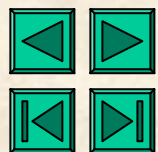
$$(16) = (8) - (7)$$

$$(17) = (14) - (13) = (15) - (16) \text{ 检核}$$

$$(18) = \frac{1}{2} [(15) + (16)]$$

以上即一测站全部操作与观测过程。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



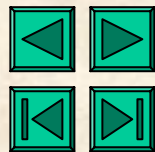
5.5.2 精密水准测量观测

一、二等精密水准测量外业计算尾数取位规定如下表：

项目等级	往（返）测距离总和km	测段距离中数km	各测站高差mm	往（返）测高差总和mm	测段高差中数mm	水准点高程mm
一	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	1
二	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	1

一、二等水准测量限差规定如下表：

项 目										
等 级	视线长度		前后 视距差 m	前后 视距 累积差 m	视线高度 (下丝读数) m	基辅分 划读数 之差 mm	基辅分 划所得 高差之差 mm	上下丝读数平均值 与中丝读数之差		检测间 歇点 高差之差 mm
	仪器 类型	视线 长度 m						0.5cm 分划标尺 mm	1cm 分 划标尺 mm	
一	S05	≤30	≤0.5	≤1.5	≥0.5	≤0.3	≤0.4	≤1.5	≤3.0	≤0.7
二	S1	≤50	≤1.0	≤3.0	≥0.3	≤0.4	≤0.6	≤1.5	≤3.0	≤1.0
	S05	≤50								



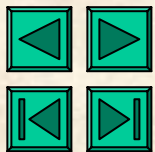
5.5.2 精密水准测量观测

测段路线往返测高差不符值、附和路线和环线闭合差以及检测已测测段高差之差的限值如下表：

项目等级	测段路线往返测高差不符值mm	附和路线闭合差mm	环线闭合差mm	检测已测测段高差之差mm
一等	$\pm 2\sqrt{K}$	$\pm 2\sqrt{L}$	$\pm 2\sqrt{F}$	$\pm 3\sqrt{R}$
二等	$\pm 4\sqrt{K}$	$\pm 4\sqrt{L}$	$\pm 4\sqrt{F}$	$\pm 6\sqrt{R}$

若测段路线往返测不符值超限，应先就可靠程度较小的往测或返测进行整测段重测；附和路线和环线闭合差超限，应就路线上可靠程度较小，往返测高差不符值较大或观测条件较差的某些测段进行重测，如重测后仍不符合限差，则需重测其他测段。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.5.2 精密水准测量观测

3. 水准测量的精度

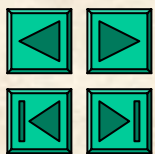
由个测段往返测的高差不符值计算每公里单程高差的偶然中误差（相当于单位权观测中误差）的公式为

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{\frac{1}{2} [\frac{\Delta\Delta}{R}]}{n}}$$

往返测高差平均值的每公里偶然中误差为

$$M_{\Delta} = \frac{1}{2} \mu = \pm \sqrt{\frac{1}{4n} [\frac{\Delta\Delta}{R}]}$$

式中， Δ 是各测段往返测的高差不符值，取 mm 为单位； R 是各测段的距离，取 km 为单位； n 是测段的数目。



3.水准测量的精度

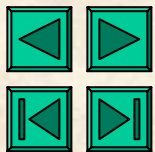
按水准规范规定，一、二等水准路线须以测段往返高差不符值计算每公里水准测量往返高差中数的偶然中误差。当水准路线构成水准网的水准环超过20个时，还需按水准环闭合差计算每公里水准测量高差中数的全中误差。

计算每公里水准测量高差中数的全中误差的公式为

$$M_W = \pm \sqrt{\frac{W^T Q^{-1} W}{N}}$$

式中， W 是水准环线经过正常水准面不平行改正后计算的水准环闭合差矩阵， W 的转置矩阵 $W^T = (w_1 w_2 \cdots w_N)$ ， w_i 为环的闭合差，以mm为单位； N 为水准环的数目，协因数矩阵 Q 中对角线元素为各环线的周长 $F_1, F_2, \cdots, F_N$ ，非对角线元素，如果图形不相邻，则一律为零，如果图形相邻，则为相邻边长度（公里数）的负值。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



3.水准测量的精度

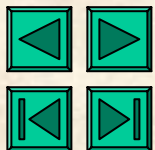
每公里水准测量往返高差中数偶然中误差和全中误差的限值列于下表中。

等级	一等mm	二等mm
M_w	≤ 0.45	≤ 1.0
M_Δ	≤ 1.0	≤ 2.0

偶然中误差 M_Δ ，全中误差 M_w 超限时，应分析原因，重测有关测段或路线。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

67/92

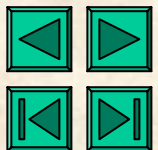


5.6 正常水准面不平行性及其改正数计算

5.6.1 水准面不平行性

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

68 / 92



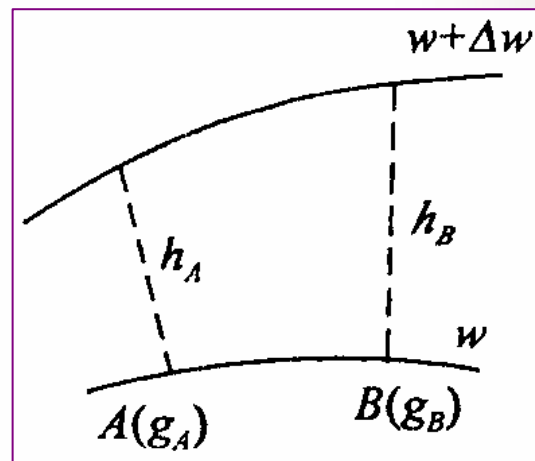
5.6.1 水准面不平行性

随着位置和重力加速度大小而变化的位能称为重力位能，即

$$W = gh$$

式中， g 为重力加速度； h 为单位质点所处的高度。

在同一水准面上各点的重力位能相等，因此，水准面称为重力等位面，或称重力位水准面。如果将单位质点从一个水准面提高到相距 Δh 的另一个水准面，其所做功就等于两水准面的位能差，即 $\Delta W = g\Delta h$ 。在右图中，设 Δh_A 、 Δh_B 分别表示两个非常接近的水准面在A、B两点的垂直距离， g_A 、 g_B 为A、B两点的重力加速度。由于水准面具有重力位能相等的性质，因此A、B两点所在水准面的位能差 ΔW 应有下列关系



$$\Delta W = g_A \Delta h_A = g_B \Delta h_B$$

5.6.1 水准面不平行性

在同一水准面上的不同点重力加速度 g 值是不同的， Δh_A 与 Δh_B 必定不相等，也就是说，水准面不是相互平行的，这是水准面的一个重要特性，称为水准面不平行性。

重力加速度值 g 是随纬度的不同而变化的，在纬度较低的赤道处有较小的值，而在两极处值较大，因此，水准面是相互不平行的、且为向两极收敛的、接近椭圆形的曲面。

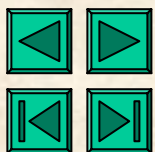
水准面的不平行性，对水准测量的影响

水准测量所测定的高程是由水准路线上各测站所得高差求和而得到的。在下图中，地面点的高程可以按水准路线各测站测得高差之和求得，即

$$H_{\text{测}}^B = \sum_{OAB} \Delta h$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

70 / 92

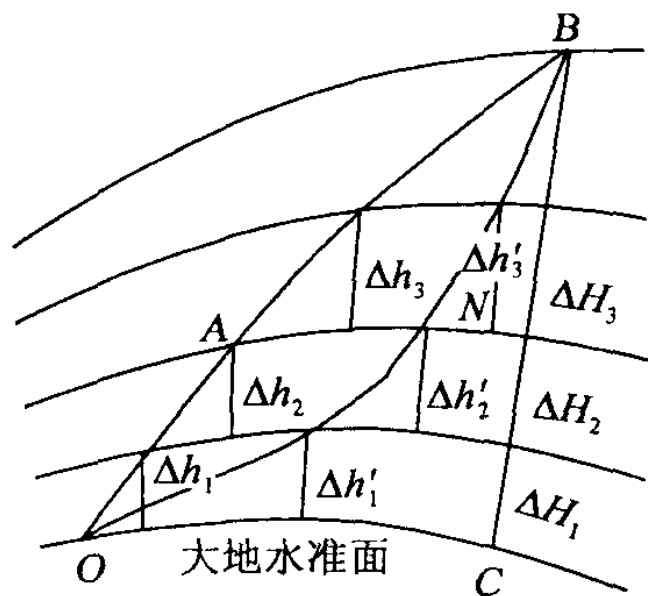


5.6.1 水准面不平行性

如果沿另一条水准路线 ONB 施测，则 B 点的高程应为水准路线 ONB 各测站测得高差 $\Delta h'_1, \Delta h'_2, \dots$ 之和，即

$$H_{\text{测}}'^B = \sum_{ONB} \Delta h'$$

由水准面的不平行性可知 $\sum_{OAB} \Delta h \neq \sum_{ONB} \Delta h'$ ，因此 $H_{\text{测}}'^B$ 也必定不等，也就是说，用水准测量测得两点间高差的结果随测量所循水准路线的不同而有差异。



如果将水准路线构成闭合环形 $OABNO$ ，既然 $H_{\text{测}}^B \neq H_{\text{测}}'^B$ ，可见，即使水准测量完全没有误差，这个水准环形路线的闭合差也不为零。在闭合环形水准路线中，由于水准面不平行所产生的闭合差称为理论闭合差。

5.6.1 水准面不平行性

由于水准面的不平行性，使得两固定点间的高差沿不同的测量路线所测得的结果不一致而产生多值性，为了使点的高程有惟一确定的数值，有必要合理地定义高程系，在大地测量中定义下面三种高程系统：正高，正常高及力高高程系。

正高高程系

正高高程系是以大地水准面为高程基准面，地面上任一点的正高高程（简称正高），即该点沿垂线方向至大地水准面的距离。

正常高高程系

将正高系统中不能精确测定的 g_m^B 用正常重力 γ_m^B 代替，便得到另一种系统的高程，称其为正常高，正常高可以精确求得，其数值也不随水准路线而异，是惟一确定的。因此，我国规定采用正常高高程系统作为我国高程的统一系统。

5.6.1 水准面不平行性

正常高与正高不同，它不是地面点到大地水准面的距离，而是地面点到一个与大地水准面极为接近的基准面的距离，这个基准面称为似大地水准面。

正高和正常高二者的差异

$$H_{\text{常}}^B - H_{\text{常}}^A = \int_{AB} dh + \varepsilon + \lambda$$

上式中 $H_{\text{常}}^B - H_{\text{常}}^A$ 是A、B点间的正常高高差； $\int_{AB} dh$ 是A、B点间实测高差； ε 称为正常位水准面不平行引起的高差改正， λ 称为由重力异常引起的高差改正，经过 ε 和 λ 改正后的高差称为正常高高差。

$$\varepsilon = -A\Delta\varphi' \cdot H_m = -0.0000015395 \sin 2\varphi_m \cdot \Delta\varphi' H_m$$

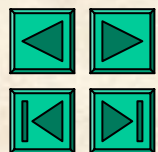
$$\lambda = \frac{(g - \gamma)_m}{\gamma_0^m} \Delta H$$

$$\gamma_0^m = 10^6 - \Delta\gamma = 10^6 (1 - \Delta\gamma \cdot 10^{-6}) (\text{mGal})$$

$$\Delta\gamma = 1.508344 \sin 2\varphi_m \times \Delta\varphi'$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

73/92



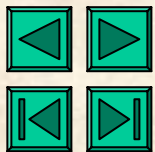
5.6.1 水准面不平行性

式中， φ_m 是A、B两点平均纬度， A 系数可按 φ_m 在水准测量规范中查取， $\Delta\varphi' = \varphi_B - \varphi_A$ 是A、B两点的纬度差，以分为单位； g 是实测重力值； γ 是正常重力值； $(g - \gamma)_m$ 是A、B线路上重力异常的平均值； ΔH 是A、B两点的实测高差； $\Delta\varphi' = \varphi_B - \varphi_A$ 是A、B点的纬度差； H_m 是A、B点的概略平均高程。

由于在海洋面上，似大地水准面与大地水准面重合，所以：

$$H_{\text{常}} = H_{\text{正}} + \varepsilon + \lambda$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5. 7 水准测量的概算

水准测量概算是水准测量平差前所必须进行的准备工作。在水准测量概算前必须对水准测量的外业观测资料进行严格的检查，在确认正确无误、各项限差都符合要求后，方可进行概算工作。

概算的主要内容有：

观测高差的各项改正数的计算

水准点概略高程表的编算



5. 7 水准测量的概算

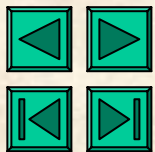
5. 7. 1 水准标尺每米长度误差的改正数计算

5. 7. 2 正常水准面不平行的改正数计算

5. 7. 3 水准路线闭合差计算

5. 7. 4 高差改正数的计算

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.7.1 水准标尺每米长度误差的改正数计算

水准标尺每米长度误差对高差的影响是系统性质的。根据规定，当一对水准标尺每米长度的平均误差 f 大于 $\pm 0.02\text{mm}$ 时，就要对观测高差进行改正，对于一个测段的改正 $\sum \delta_f$

$$\sum \delta_f = f \sum h$$

由于往返测观测高差的符号相反，所以往返测观测高差的改正数也将有不同的正负号。

设有一对水准标尺经检定得，一米间隔的平均真长为 999.96mm，则 $= (999.96 - 1000) = -0.04\text{mm}$ 。

测段往返测高差

$$h = \pm 20.345\text{m}$$

则该测段往返测高差的改正数为

$$\sum \delta_f = -0.04 \times (\pm 20.345) = \mp 0.81(\text{mm})$$

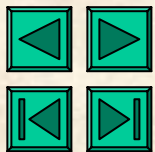


5.7.2 正常水准面不平行的改正数计算

按水准规范规定，各等级水准测量结果，均须计算正常水准面不平行的改正。正常水准面不平行改正数按下式计算，即

$$\varepsilon_i = -AH_i(\Delta\varphi)'$$

式中 ε_i 为水准测量路线中第 i 测段的正常水准面不平行改正数， A 为常系数，当水准测量路线的纬度差不大时，常系数 A 可按水准测量路线纬度的中数 φ_m 为引数在现成的系数表中查取， H_i 为第 i 测段始末点的近似高程，以 m 为单位； $\Delta\varphi' = \varphi_2 - \varphi_1$ 以分为单位， φ_1 和 φ_2 为第 i 测段始末点的纬度，其值可由水准点点之记或水准测量路线图中查取。



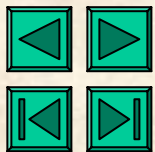
5.7.3 水准路线闭合差计算

水准测量路线闭合差 W 的计算公式为

$$W = (H_0 - H_n) + \sum h' + \sum \varepsilon$$

式中， H_0 和 H_n 为水准测量路线两端点的已知高程； $\sum h'$ 为水准测量路线中各测段观测高差加入尺长改正数 δ_f 后的往返测高差中数之和； $\sum \varepsilon$ 为水准测量路线中各测段的正常水准面不平行改正数之和。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.7.4 高差改正数的计算

水准测量路线中每个测段的高差改正数可按下式计算

$$v = -\frac{R}{\sum R} W$$

即按水准测量路线闭合差 W 按测段长度 R 成正比的
比例配赋予各测段的高差中，最后根据已知点高程及改
正后的高差计算水准点的概略高程。即

$$H = H_0 + \sum h' + \sum \varepsilon + \sum v$$

5.8 三角高程测量

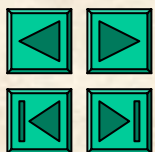
三角高程测量的基本思想是根据由测站向照准点所观测的垂直角（或天顶距）和它们之间的水平距离，计算测站点与照准点之间的高差。

5.8.1 三角高程测量的基本公式

5.8.2 垂直角的观测方法

5.8.3 三角高程测量的精度

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



5.8.1 三角高程测量的基本公式

由图可明显地看出，A、B 两地面点间的高差为

$$h_{1,2} = BF = MC + CE + EF - MN - NB$$

式中， EF 为仪器高 i_1 ； NB 为照准点的觇标高度 v_2 ；而 CE 和 MN 分别为地球曲率和折光影响。由

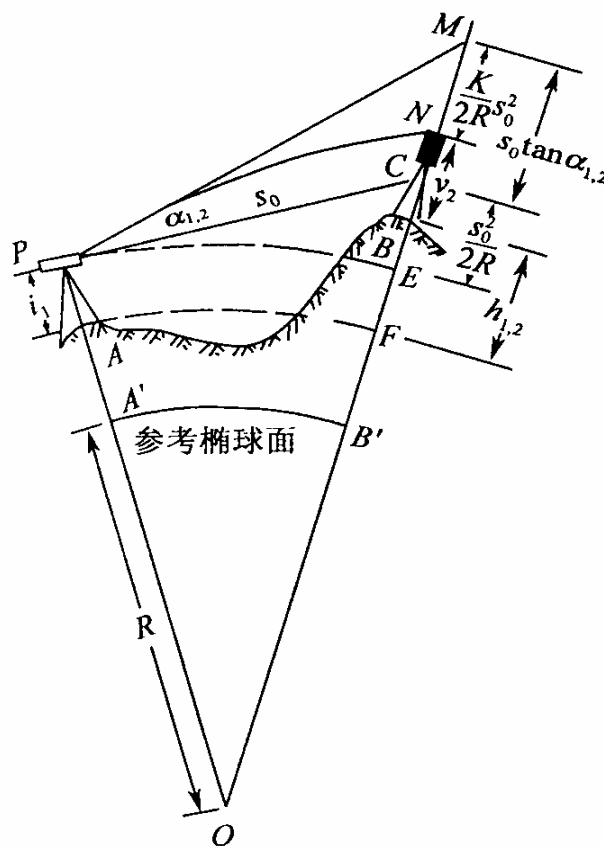
$$CE = \frac{1}{2R} s_0^2 \quad MN = \frac{1}{2R'} s_0^2$$

式中 R' 为光程曲线 $\widehat{PN}$ 在 N 点的曲率半径。设 $\frac{R}{R'} = K$,

则

$$MN = \frac{1}{2R'} \cdot \frac{R}{R} s_0^2 = \frac{K}{2R} s_0^2$$

K 称为大气垂直折光系数。



5.8.1 三角高程测量的基本公式

$$MC = s_0 \tan \alpha_{1,2}$$

两地面点 A 、 B 的高差为

$$h_{1,2} = s_0 \tan \alpha_{1,2} + \frac{1}{2R} s_0^2 + i_1 - \frac{K}{2R} s_0^2 - v_2$$

$$= s_0 \tan \alpha_{1,2} + \frac{1-K}{2R} s_0^2 + i_1 - v_2$$

令式中 $\frac{1-K}{2R} = C$, C 一般称为球气差系数, 则上式可写成

$$h_{1,2} = s_0 \tan \alpha_{1,2} + C s_0^2 + i_1 - v_2$$

该式就是单向观测计算高差的基本公式。

式中垂直角 α , 仪器高 i 和视标高 v , 均可由外业观测得到。
 s_0 为实测的水平距离, 一般要化为高斯平面上的长度 d 。



5.8.2 垂直角的观测方法

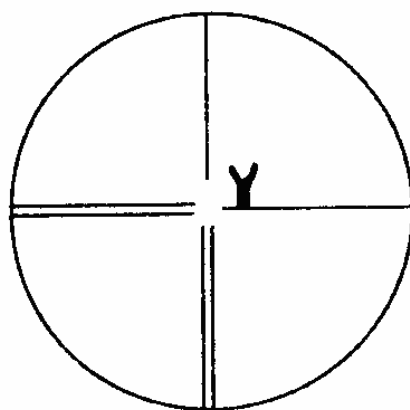
垂直角的观测方法有中丝法和三丝法两种。

1. 中丝法

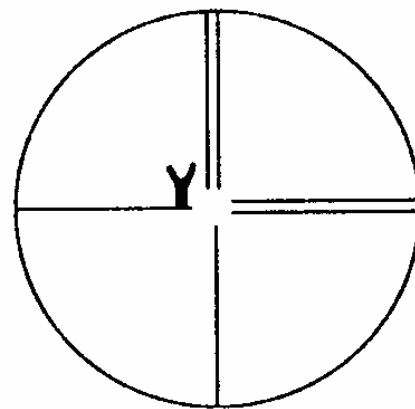
中丝法也称单丝法，就是以望远镜十字丝的水平中丝照准目标，构成一个测回的观测程序为：

在盘左位置，用水平中丝照准目标一次，如下图（a）所示，使指标水准器气泡精密符合，读取垂直度读数，得盘左读数。

在盘右位置，按盘左时的方法进行照准和读数，得盘右读数。照准目标如下图（b）所示。



(a)



(b)

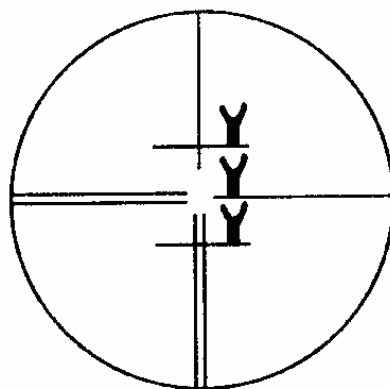
5.8.2 垂直角的观测方法

2. 三丝法

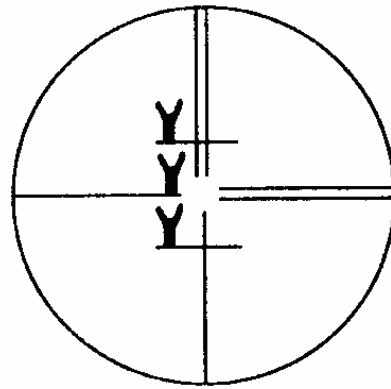
三丝法就是以上、中、下3条水平横丝依次照准目标。构成一个测回的观测程序为：

在盘左位置，按上、中、下3条水平横丝依次照准同一目标各一次，如图（a）所示，使指标水准器气泡精密符合，分别进行垂直度盘读数，得盘左读数。

在盘右位置，再按上、中、下3条水平横丝依次照准同一目标各一次，如图（b）所示，使指标水准器气泡精密符合，分别进行垂直度盘读数，得盘右读数。



(a)



(b)

在一个测站上观测时，一般将观测方向分成若干组，每组包括2~4个方向，分别进行观测，如通视条件不好，也可以分别对每个方向进行连续照准观测。

5.8.3 三角高程测量的精度

1. 观测高差中误差

三角高程测量平均精度的经验公式 $M_h = P \cdot s$

式中, M_h 为对向观测高差中数的中误差 s 为边长, 以 km 为单位; p 为每公里的高差中误差, 以 m/km 为单位。

2. 对向观测高差闭合差的限差

对向观测高差闭合差也称为往返测高差闭合差, 以 w 表示

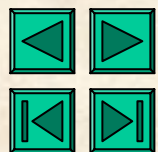
$$W = h_{1,2} + h_{2,1}$$

以 m_w 表示闭合差的中误差, 以 m_{h_0} 表示单向观测高差 h 的中误差, 则

$$m_w^2 = 2m_{h_0}^2$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

86/92



5.8.3 三角高程测量的精度

取两倍中误差作为限差，则往返测观测高差闭合差 $W_{\text{限}}$ 为

$$W_{\text{限}} = 2m_W = \pm 2\sqrt{2}m_{h_0}$$

若以 W_h 表示对向观测高差中误差，则单向观测高差中误差可以写为

$$m_{h_0} = \sqrt{2}M_h$$

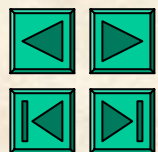
现在从最不利的观测条件来考虑，取 $p=0.025$ ，则

$$m_{h_0} = 0.025\sqrt{2}s$$

$$W_{\text{限}} = \pm 2\sqrt{2} \times 0.025\sqrt{2}s = \pm 0.1s$$

上式就是计算对向观测高差闭合差限差的公式

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



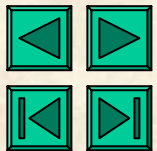
5.8.3 三角高程测量的精度

3. 环线闭合差的限差

环线闭合差限差 $W_{\text{限}}$ 为

$$W_{\text{限}} = 2m_w = \pm 0.05 \sqrt{\sum s_i^2}$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

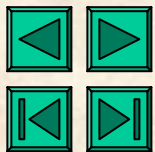


第五章 高程控制测量习题

1. 国家高程控制网的任务是什么?建网过程中应遵循哪些原则?
2. 国家高程控制网划分等级的依据是什么?为了体现其主要功能,各等网的布设方案和特点是什么?
3. 为什么说城市和工程建设高程水准网是国家高程控制网的组成部分?简要说明城市和工程建设高程控制网的基本规格。
4. 平面控制测量作业中,我们将确定控制点位的工作称为选点,而把高程控制测量时所进行的相应工序称为水准测量选线,这是为什么?测段的意义和作用是什么?
5. 何谓水准原点?何谓1985国家高程基准?

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

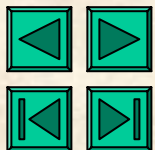
89/92



第五章 高程控制测量习题

6. 我国水准仪系列包括S05、S1、S3、S10等型号，试问S字母及下角码数字各代表什么含义？
7. 试述精密水准仪、水准尺与普通水准仪、水准尺的异同点。
8. 精密水准仪上的平行玻璃板有什么作用？为什么应用附有平行玻璃板的水准仪进行单向观测时要从读数中减去测微器常数差C？
9. 在进行三、四等水准测量时，为什么要求前后视距差不得大于所规定的限差？
10. 什么是水准仪的角误差和交叉误差？这两项误差各对观测成果有何影响？如何检验和校正？
11. 试述精密水准测量中的各种误差来源？

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



第五章 高程控制测量习题

12. 大地测量上使用哪几种高程系统？说明各种高程系统的意义及相互关系？如何求地面上一点在各高程系统中的高程值？

13. 何谓一对水准标尺零点差及基、辅分划读数差常数？在作业中采取何种措施才能消除其影响？为什么？

14. 水准测量作业时，一般要求采取下列措施：

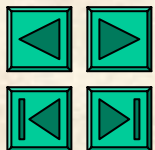
(1)前后视距相等；

(2)按“后—前—前—后”程序操作；

(3)同一测站的前、后视方向不得作两次调焦；

(4)旋转微倾斜螺旋及测微轮最后为“旋进”。

试述上列措施分别可以减弱哪些误差的影响？还有哪些主要误差不能由这些措施得到消除？



第五章 高程控制测量习题

15. 精密水准测量外业计算时，应求出哪些高差改正数？
16. 水准面的不平行性是由于什么原因引起的？这种现象对水准测量会产生什么影响？
17. 何谓电磁波测距三角高程？讨论研究这种方法有什么意义？试推导其高差计算公式。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

